# Metodika laboratorní testace vzorků pegmatitů zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků

| | |
|---|---|
| Program: | Epsilon |
| Číslo projektu TAČR: | TH79020002 |
| Výzva: | ERA-MIN 3 Call 2021 |
| Číslo projektu ERA-MIN 3: | JTC-2021_174 |
| Název projektu: | Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů |
| Název projektu anglicky: | Evolved magmatic and pegmatitic systems as sources of critical raw materials and industrial minerals |
| Identifikační číslo výsledku: | TH79020002-V1 |
| Typ výsledku: | Nmet |
| Název výsledku: | Certifikovaná metodika laboratorní testace vzorků pegmatitů hornin zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků |
| Název výsledku anglicky: | Certified method of laboratory testing of pegmatite samples focused on determination of contents and recoverability of silicate ores and rare elements |
| Důvěrnost a dostupnost: | veřejně přístupný |
| Hlavní řešitel: | Jan Cempírek |
| Datum ukončení: | 30.04.2025 |

Řešitelský tým: Jan Cempírek (Masarykova univerzita)
Milan Novák (Masarykova univerzita)
Radek Škoda (Masarykova univerzita)
Jaromír Tvrdý (G E T s.r.o.)
Petr Hanzlík (G E T s.r.o.)
Ondřej Krátký (G E T s.r.o.)
Ondřej Sysel (G E T s.r.o.)
Jitka Kovářová (G E T s.r.o.)
Pavel Jedlička (K M K GRANIT, a.s.)
Emília Křenková (K M K GRANIT, a.s.)
Pavel Tatýrek (K M K GRANIT, a.s.)

Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON je zaměřen zejména na zlepšení pozice českého a v globálním kontextu i evropského průmyslu pomocí podpory projektů spadajících do kategorie aplikovaného výzkumu (zahrnuje průmyslový výzkum, experimentální vývoj nebo jejich kombinaci), jejichž výsledky mají vysoký potenciál pro rychlé uplatnění v nových produktech, výrobních postupech a službách. Poskytovatelem finančních prostředků je Technologická agentura ČR.

# Obsah

1 Cíl metodiky ..... 6
2 Popis metodiky ..... 7
2.1 Horniny vyvinutých magmatických a pegmatitových systémů ..... 7
2.2 Užitkové složky ..... 9
2.3 Principy vzorkování a laboratorního hodnocení ..... 16
2.4 Metodika laboratorní testace horninových vzorků ..... 24
2.5 Ověření metodiky ..... 27
3 Novosti postupů a jejich zdůvodnění ..... 35
4 Uplatnění certifikované metodiky ..... 35
5 Ekonomické aspekty ..... 35
6 Seznam použité související literatury ..... 36
7 Seznam projektů a výsledků předcházejících metodice ..... 37
8 Přílohy metodiky ..... 38

## Seznam zkratek

| | |
|---|---|
| Be | beryllium |
| Ce | cer |
| CL | katodová luminiscence |
| CM1 | Certifikovaná metodika laboratorní testace vzorků pegmatitů zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků - výstup řešeného projektu |
| CM2 | Certifikovaná metodika hodnocení využitelnosti silikátových složek a vzácných prvků na ložiskách pegmatitového typu a příbuzných typů - výstup řešeného projektu |
| CRM | kritické suroviny Evropské unie (Critical Raw Materials) |
| CRMA | Akt o kritických surovinách |
| Cs | cesium |
| ČGS | Česká geologická služba |
| Dy | dysprosium |
| EDS | energeticky disperzní elektronová mikroskopie |
| EMPA | analýza elektronovou mikrosondou |
| ERA-MIN3 | projekt „Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů“ („Evolved magmatic and pegmatitic systems as sources of critical raw materials and industrial minerals“) |
| EU | Evropská unie |
| Fe | železo |
| GA ČR | Grantová agentura České republiky |
| Gd | gadolinium |
| GPS | globální polohový systém |
| Hf | hafnium |
| CHA | chemická analýza |
| ICP-OES | optická emisní spektroskopie s indukčně vázaným plazmatem |
| K | draslík (kalium) |
| Li | lithium |
| LIBS | spektroskopie laserem buzeného plazmatu (laser induced breakdown spectroscopy) |
| MLA | automatizovaná mineralogická analýza (mineral liberation analysis) |
| Mn | mangan |
| MŠMT | Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy |

| | |
|---|---|
| Na | sodík (natrium) |
| Nb | niob |
| Nd | neodym |
| NIR | spektrální oblast blízká infračervenému záření (Near InfraRed), |
| pXRF | přenosný rentgenfluorescenční analyzátor |
| PEGMAT | akronym projektu Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů |
| Pr | praseodym |
| Rb | rubidium |
| REE | prvky vzácných zemin |
| SE | sekundární elektrony |
| SEM | skenovací elektronová mikroskopie |
| Sc | skandium |
| SIMS | hmotnostní spektrometrie sekundárních iontů (Secondary Ion Mass Spektrometry) |
| Sm | samarium |
| Sn | cín |
| SOP | standardní operační postup |
| TA ČR | Technologická agentura České republiky |
| Ta | tantal |
| Tb | terbium |
| Th | thorium |
| Ti | titan |
| TIMA | integrovaný minerální analyzátor firmy TESCAN (TESCAN Integrated Mineral Analyzer) |
| U | uran |
| UQ | UNIQUANT (bezstandardová XRF fluorescence) |
| W | wolfram |
| WDS | vlnová disperzní elektronová mikroskopie |
| XRD | rentgenová difrakční analýza |
| XRF | rentgenová fluorescenční analýza |
| Y | yttrium |
| Zr | zirkonium |
| ZŽ | ztráta žíháním |
| Ž | obsah živcové substance |

# 1 Cíl metodiky

Předložená metodika je jedním z výsledků mezinárodního projektu „Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů“ („Evolved magmatic and pegmatitic systems as sources of critical raw materials and industrial minerals“).

Cíle mezinárodního výzkumného projektu sítě ERA-MIN3 podporované programem EU Horizont 2020 jsou:

- identifikovat hlavní výskyty pegmatitů a vzácnoprvkových granitů v karpatsko-balkánské oblasti a posoudit jejich geologické, strukturní a geochemické znaky;
- pochopit a charakterizovat geologické procesy a strukturní podmínky, které vedly ke vzniku pegmatitů a vzácnoprvkových granitů;
- posoudit vývoj ložisek a jejich surovin v čase, v závislosti na geologickém prostředí těchto magmatických těles a pochopit jejich regionální distribuci v oblasti;
- charakterizovat vnitřní procesy vzniku pegmatitů, modelovat pegmatitová tělesa a vymezit jejich vnitřní strukturu;
- určit potenciální průzkumné oblasti s ohledem na typ a obsah surovin;
- posoudit parametry využitelnosti rudních i nerudních surovin z komplexních pegmatitových těles.

Hlavními výstupy projektu TA ČR jsou dvě certifikované metodiky, které na sebe úzce navazují a v obecných kapitolách a rešeršních přílohách se překrývají:

- CM1 Certifikovaná metodika laboratorní testace vzorků pegmatitů zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků.
- CM2 Certifikovaná metodika hodnocení využitelnosti silikátových složek a vzácných prvků na ložiskách pegmatitového typu a příbuzných typů.

Obsahem předloženého dokumentu je certifikovaná metodika CM1.

# 2 Popis metodiky

## 2.1 Horniny vyvinutých magmatických a pegmatitových systémů[1]

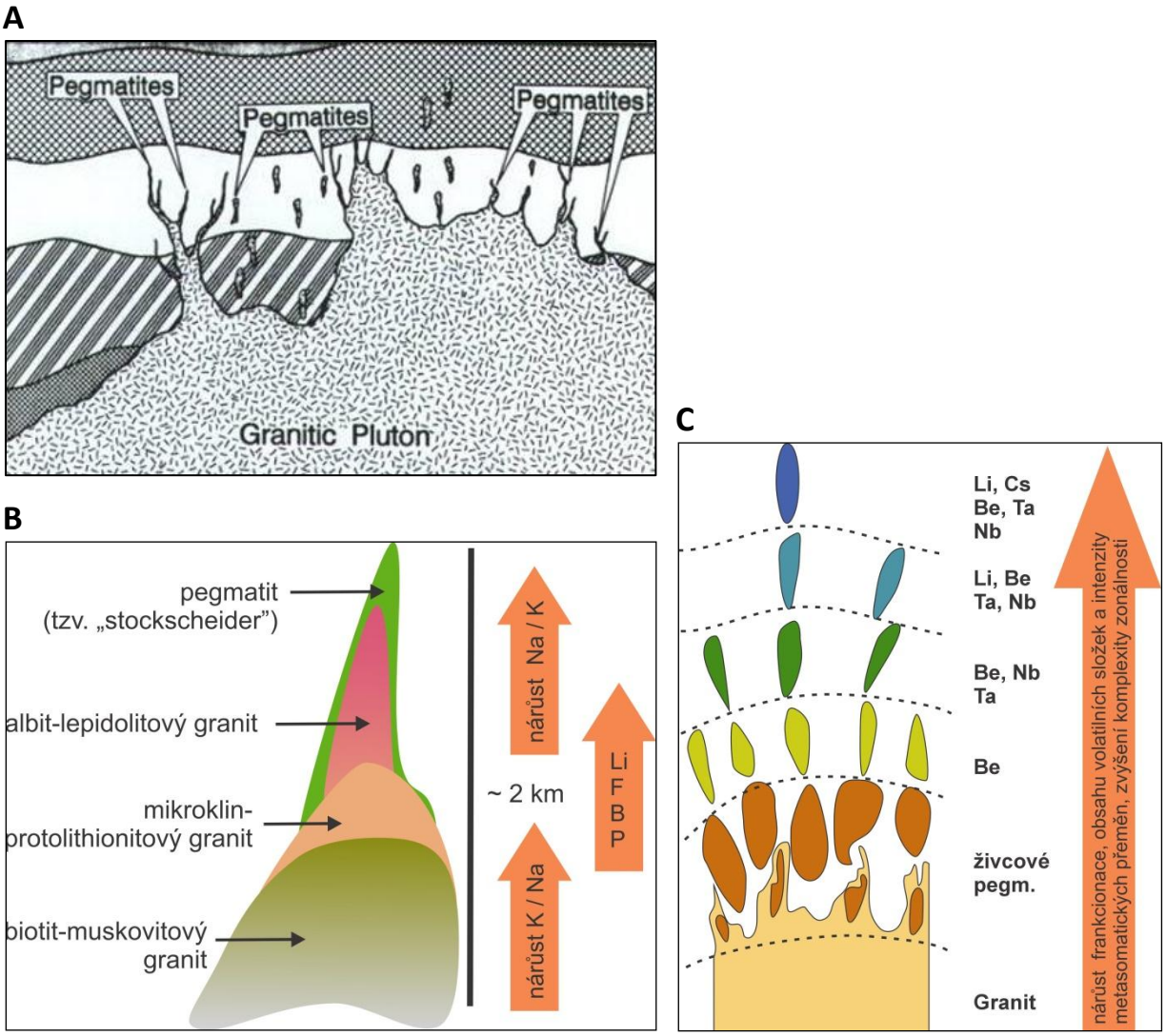
Předmětem hodnocení jsou vyvinuté magmatické horniny reprezentované pegmatity a alkalickoživcovými horninami (především granity a syenity), příp. i jejich metamorfovanými ekvivalenty. Rešeršní studie zaměřená na pegmatity jako hlavní studovanou horninu zpracovaná ve spolupráci s řešiteli projektových partnerů je uvedena v Příloze 2.

**Pegmatity** jsou texturně komplexní vyvřelé horniny, které jsou typické heterogenní zrnitostí – od okraje do středu tělesa se hornina může změnit od jemnozrnné (<1 mm) až po velkozrnnou s bloky živců, křemene a dalších minerálů, někdy v krystalech přesahujících 1 m. Pegmatity mají některé charakteristické textury, např. kosterní, radiální a grafické srůsty krystalů, přednostní orientaci krystalů kolmo od kontaktu do středu tělesa, nebo výraznou mineralogickou zonálnost, kdy jsou některé prvky koncentrovány v centrálních částech horninového tělesa. Většina ekonomicky využitelných pegmatitů je granitového složení. Pegmatity obvykle vznikají ve vazbě na tělesa granitoidních plutonů, i když tato vazba nemusí být vždy zřejmá. Nejčastěji se vyskytují v podobě žilných rojů vycházejících z plutonu do okolních hornin, nebo jako segregace a kupole v blízkosti nebo na kontaktu se zdrojovým plutonem. Pegmatity jsou zdrojem průmyslových nerostů (živce, křemen, spodumen, petalit) důležitých pro výrobu skla a keramiky; jsou rovněž zdrojem široké škály vzácných prvků (Li, Cs, Be, Nb, Ta, Sn atd.), které jsou zásadní pro moderní elektronický průmysl.

**Alkalickoživcové horniny** jsou magmatity granitového, popř. i syenitového složení, jejichž živcová složka obsahuje 90–100 % alkalických živců (tj. draselného živce a sodného plagioklasu s vysokým obsahem albitové komponenty v rozmezí $Ab_{100}$–$Ab_{95}An_5$) nebo foidů (typicky nefelínu). Jde zpravidla o intruzivní horniny klasifikované jako alkalicko-živcové granity nebo nefelinické syenity, které tvoří menší tělesa v rámci větších intruzivních komplexů; vzácněji se objevují jejich metamorfované ekvivalenty (ortoruly, metasyenity). Obsah hlavních komponent (živce, křemen, slídy) může kolísat, ale složením a zrnitostí jsou alkalickoživcové horniny oproti pegmatitům více homogenní. Hlavními využitelnými složkami jsou živce (nebo foidy) pro keramické účely, mohou však být zdrojem i řady dalších surovin.

Grafické znázornění zonálnosti látkového složení a tektonické pozice vyvinutých magmatických a pegmatitových systémů je uvedeno na následujícím obrázku.

[1] Viz též CM2 Certifikovaná metodika hodnocení využitelnosti silikátových složek a vzácných prvků na ložiskách pegmatitového typu a příbuzných typů.




Obrázek 1 *A. Schématický řez pozice pegmatitů vůči zdrojovému granitu. B. Schématická ilustrace změn složení granitového tělesa od nejspodnějšího dvojslídného granitu až po nejvyšší vzácnoprvkové granity a pegmatity. C. Vývoj složení žil pegmatitového pole v závislosti na vzdálenosti od zdrojového granitu (London 2008[2], upraveno).*

[2] London D. (2008): Pegmatites. Canadian Mineralogist Special Publication, 10, 368 s.

## 2.2 Užitkové složky[3]

Hlavními surovinami získávanými z pegmatitů jsou živec, křemen a slída. Jen malá část (méně než 10 %) těchto hornin obsahuje vzácné prvky a případně i drahé kameny v takové míře, aby je bylo možné dobývat. Silikátové složky obsahují množství minerálních příměsí s obsahem Fe, Ti, Mn aj., které často působí jako škodliviny negativně ovlivňující vzhled či vlastnosti konečného výrobku. Volba správné separační metody rozhoduje o použitelnosti a kvalitě vyrobeného silikátového produktu a o efektivitě získávání doprovodných kritických surovin. Totéž platí i pro užitkové složky obsažené ve vzácnoprvkových granitech a dalších horninách vyvinutých magmatických systémů. Níže uvádíme výčet a jejich základní charakteristiku[4]. Rešeršní souhrn podrobnějších informací je obsahem Přílohy 1.

### 2.2.1 Průmyslové nerosty

Z průmyslových nerostů vázaných na sledované horninové typy jsou kritickými surovinami živec, v omezené míře se vyskytující grafit a nepřímo i křemen jako surovina k výrobě kovového křemíku. Z ostatních nerostných surovin zde lze zmínit slídu, nefelinické horniny, keramické suroviny s obsahem minerálů lithia a přírodní abraziva.

**Živec a nefelín**

Granitické pegmatity jsou jedním z hlavních zdrojů živcových surovin pro výrobu keramiky (užitkové a sanitární keramiky, obkladů, glazur atd.), ale také důležitou surovinou ve sklářském průmyslu a stavebnictví. Základní užitkovou složkou živců jsou alkálie (Na, K spolu s Li a Rb), které během procesu vypalování působí jako tavivo umožňující slinování a dosažení požadovaných výsledných vlastností výrobku. Většina celosvětově těženého živce se používá jako plnivo do plastů, barev, tmelů, lepidel, brusiva, tlumiče plamene v sirkařském průmyslu, kosmetiky, izolace ze skelných vláken, svařovacích tyčí a zejména do keramiky a skla. Zušlechťování živcové suroviny (a podobně i křemene) zahrnuje celé spektrum činností od ručního třídění prováděného vyškolenými pracovníky, kteří se nacházejí vedle dopravníkového pásu, až po sofistikované úpravnické metody. Ty zahrnují optické třídění, selektivní flotaci, různé typy mokré a suché magnetické separace a elektrostatickou separaci. V keramických výrobcích, plnivech a sklu lze živcovou surovinu nahradit horninami bohatými nefelínem, např. nefelinickým syenitem, nefelinickým fonolitem nebo syenitovými pegmatity.

[3] Viz též CM2 Certifikovaná metodika hodnocení využitelnosti silikátových složek a vzácných prvků na ložiskách pegmatitového typu a příbuzných typů.

[4] Informace v této kapitole jsou z velké části převzaty z prací

Jirásek J., Sivek M., Láznička P. (2017): Ložiska nerostů. Online http://geologie.vsb.cz/ložiska/suroviny/index.html.

Dill H. G. (2015): Pegmatites and aplites: Their genetic and applied ore geology. Ore Geology Reviews 69: 417–561.

**Křemen**

Křemen je přírodní krystalický oxid křemičitý, který se díky svým fyzikálním a chemickým vlastnostem široce používá v elektronice, optických světelných zdrojích, fotovoltaice, letectví a dalších oborech. Je také surovinou k výrobě kovového křemíku. Požadavky na kvalitu křemene jsou velmi rozdílné a stejně jako u mnoha jiných surovin závisí na konečném použití. Křemenná surovina je používána při výrobě skla, keramiky, žáruvzdorných materiálů, chemikálií, plniv a přísad nebo v metalurgii jako písky pro tryskání, filtry a propanty. Kromě vysokého obsahu $SiO_2$ se sleduje bělost, tvrdost, inertnost, nízká koncentrace a forma přítomných škodlivých stopových prvků. Pro výrobu křemenného skla, optického skla a materiálu pro elektroniku se vyžaduje vysoce čistý a ultračistý křemen dosahující téměř 100 % $SiO_2$. To platí i pro polovodiče, ferosilicium a chromsilicium. Při výrobě vysoce čistého křemene v průmyslovém měřítku se používá kombinace různých postupů, mj. kalcinace (pálení), drcení, rozmělňování, magnetické separace, flotace, kyselého loužení, praní a sušení.

**Slída**

Slída v pegmatitech často dosahuje velké velikosti krystalů, takže ji lze často ručně oddělit jako vedlejší produkt. Průmyslový význam mají muskovit a hořečnatý člen biotitové skupiny, flogopit. Muskovit a flogopit jsou chemicky inertní, dielektrické, pružné, izolační a lehké, což je činí zajímavými pro širokou škálu aplikací. Nejkvalitnější co do velikosti, tloušťky a strukturních vad je tzv. bloková slída a listová slída. Horší jakost má mletá slída, která je vedlejším produktem při zpracování živcových a křemenných pegmatitů. Bloková slída se používá jako izolační materiál v elektrickém a elektronickém průmyslu, v optických filtrech, pyrometrech, regulátorech teploty, zpožďovačích v helium-neonových laserech apod. Listová slída se používá jako dielektrikum v kondenzátorech. Vločková slída má využití při výrobě speciálního papíru, mletá slída je vhodná jako plniva do cementů, omítek, barev, plastů a gumy.

**Lithné keramické suroviny**

Lithné pegmatity s obsahem lepidolitu, spodumenu, petalitu, amblygonitu a případně i dalších minerálů nacházejí významné uplatnění v keramickém průmyslu. Díky relativní dostupnosti je jejich použití ekonomicky výhodné v porovnání s čistými chemickými sloučeninami lithia. Přídavek lepidolitu nebo spodumenu do keramických směsí snižuje teplotu slinutí, zvyšuje elasticitu keramických materiálů při jejich tvarování a zároveň přispívá ke zlepšení pevnosti a tvrdosti finálních produktů. Díky obsahu lithných iontů se glazury stávají lesklejšími a odolnějšími vůči opotřebení, což je klíčové pro dekorativní a funkční keramiku. Lithium také snižuje tepelnou roztažnost, což zlepšuje odolnost keramiky vůči tepelným šokům. Tato vlastnost je klíčová při výrobě technické keramiky, která se používá v průmyslových aplikacích, jako jsou pecní vložky nebo laboratorní vybavení. Kombinace ekonomických a funkčních vlastností zvyšuje význam lithných surovin i v dalších odvětvích, mj. ve sklářství a elektrotechnice.

**Přírodní abraziva**

Abrazivní hmoty jsou využívány k čištění povrchů a jako řezací materiály. Velmi kvalitní abrazivní písky nesmí obsahovat nečistoty, jako jsou karbonáty, živce a organické částice. Některé minerály využívané jako přírodní abraziva (zirkon, granát, korund) se mohou vyskytovat také v pegmatitech, možnosti jejich ekonomického získávání jsou však velmi omezené.

### 2.2.2 Rudy kritických surovin a dalších vzácných prvků

Horniny vyvinutých magmatických systémů, k nimž jsou řazeny také pegmatity, obsahují ve vedlejším až stopovém množství celou řadu minerálů vzácných prvků. Ty v některých případech mohou být hlavním předmětem ekonomického zájmu, častěji však představují (často škodlivé) příměsi hlavních užitkových složek, zejména živce, křemene a slídy. Vyvinout metody vedoucí k efektivnímu získávání těchto doprovodných surovin je velkou výzvou současnosti. Z kritických surovin EU jde o beryllium, bismut, lithium, niob a tantal, prvky vzácných zemin spolu s yttriem, skandiem, titanem (resp. titanovým kovem), wolframem, zirkoniem a hafniem, k dalším zastoupeným elementům patří cín, rubidium a cesium[5].

**Beryllium**

V pegmatitech jsou obsaženy minerály vhodné jako ruda k výrobě kovového beryllia a také nerosty použitelné jako drahé kameny (beryl - akvamarín, smaragd, chryzoberyl - alexandrit). Kovové beryllium má uplatnění v leteckém a obranném průmyslu díky své pevnosti, nízké hmotnosti a rozměrové stálosti v širokém rozsahu teplot. Slitiny beryllia a mědi jsou vyhledávány díky své elektrické a tepelné vodivosti, vysoké pevnosti a tvrdosti, dobré odolnosti proti korozi, únavě a nemagnetickým vlastnostem. Oxid beryllia je dobrým tepelným vodičem, má vysokou pevnost a tvrdost a dobře funguje jako elektrický izolant. Beryllium se také používá v rentgenové technice. Světová produkce beryllia je poměrně nízká (kolem 300 tun ročně). Pegmatit byl hlavním zdrojem beryllia např. ve státech Nové Anglie na severovýchodě USA, kde se získával beryl jako vedlejší produkt při těžbě živce a slídy. Úprava berylové rudy zahrnuje mletí, flotaci, optické třídění a NIR třídění. Výsledný koncentrát má standardně cca 8 % BeO.

**Bismut**

Bismut byl pro svůj značný význam pro farmaceutický průmysl a jako náhrada olova v barvách zařazen mezi kritické suroviny Evropské unie. Spolu s molybdenem a někdy i arsenem je ve světě získáván jako vedlejší složka měděných a polymetalických rudních ložisek různých typů. V pegmatitech tvoří tyto kovy většinou ekonomicky bezvýznamné

[5] Viz též Tvrdý J., Kovářová J., Krátký O., Havránek J., Opekar L., Starý J. (2022): Metodika identifikace akumulací strategických komodit a podmínek využitelnosti strategických nerostných surovin. Projekt Horninové prostředí a nerostné suroviny SS02030023. Dílčí cíl 1.4. Program č. 6 Prostředí pro život. TA ČR.

příměsi, v některých případech je však spolu s dalšími komoditami separován bismut a molybden. Například v Pampské pegmatitové provincii v Argentině se během 80 let trvající těžby vytěžilo přes 1 Mt živce keramické kvality, 1 Mt křemene, 50 kt slídy, 25 kt berylu, 10 kt spodumenu, 45 t tantalových minerálů a pouze 10 t minerálů bismutu. Limitní obsahy ekonomické významnosti uvádí Dill (2015) v rozmezí 0,1–1 % Bi a 0,2–1 % Mo.

**Bor**

Turmalín se v mnoha pegmatitech objevuje jako poměrně hojný minerál a je také běžný v horninách v blízkosti kontaktů s pegmatitovými tělesy. Složení turmalínu odráží chemickou podstatu granitického systému, v němž se tvoří. Přestože bor v současné době není ekonomicky získáván z turmalínu nikde na světě, představují díky svému celosvětovému rozšíření pegmatitová ložiska bohatá na turmalín do budoucna potenciálně zajímavý zdroj tohoto prvku. Nejhojnější člen turmalínové skupiny skoryl obsahuje teoreticky 9 až 11,5 % $B_2O_3$.

**Lithium, cesium a rubidium**

Spodumen (ideální obsah 8,03 % $Li_2O$), lepidolit (7,7 % $Li_2O$), cinvaldit (zinnwaldit, 3,4 % $Li_2O$), petalit (4,5 % $Li_2O$) a amblygonit (7,4 % $Li_2O$) jsou hlavními složkami lithiových rud. Za ekonomicky únosné jsou považovány obsahy v rudě přesahující 0,5 % $Li_2O$. Lithium se používá do lehkých slitin, jako tavidlo v keramickém průmyslu a při výrobě hliníku, jako mazací přísada v chemických procesech, pro baterie, pájky, raketová paliva, katalyzátory při výrobě kaučuku, v jaderném průmyslu a v lékařství.

Cesium hraje důležitou roli v ropném průmyslu, v technologiích GPS, přenosu internetových dat, mobilních telefonech a naváděcích systémech letadel. Cesium je dominantně využíváno na výrobu mravenčanu (formiátu) cesného, jehož roztok se využívá k výplachu vrtů (především pod mořským dnem) - k jeho přednostem patří vysoká hustota, šetrnost k životnímu prostředí a stabilita při vysokých teplotách a tlaku. Cesiové hodiny jsou známé svou přesností a cesiové atomové hodiny se používají pro mezinárodní definici sekundy založené na rezonanci atomů cesia. Radioaktivní cesium se používá v medicíně, v průmyslových měřidlech, v důlních a geofyzikálních přístrojích. Hraje důležitou roli při sterilizaci potravin, odpadních vod a chirurgického vybavení. Cesium se používá také v metalurgii železa a neželezných kovů.

Sloučeniny obsahující rubidium mají využití v biomedicínském výzkumu, elektronice a pyrotechnice. Prvek se uplatňuje také ve fotočláncích (solární panely, pohybová čidla). Podobně jako cesium je také v některých atomových hodinách a je nezbytnou součástí globálních systémů určování polohy (GPS).

Lithium, cesium a rubidium se ve formě silikátových a fosfátových rud vyskytují také v pegmatitových ložiscích, která však v případě lithia nemají takový význam jako ložiska evaporitového typu. Zpracování silikátových Li-rud na koncentráty se provádí jemným mletím, flotací, ručním tříděním, optickým tříděním nebo NIR tříděním.

### Niob a tantal

Významným typem jsou pegmatitová a sedimentární ložiska. Za limitní kovnatosti považuje Dill (2015) >0,5 % oxidu Nb-Ta v ložiscích typu *„hard rock“* a >200 g/m$^3$ oxidu Nb-Ta v aluviálních a fluviálních systémech v okolí mateřských hornin. Prvky vzácných zemin a skandium zvyšují hodnotu Nb-Ta rudy, naopak obsahy P >0,1 % a příměsi Ti, Zr a Sn (celkové množství by mělo být pod 4 až 8 %) kvalitu rudy snižují. Niob se používá do nerezové/vysokojakostní oceli, karbidu Nb, vysokoteplotních slitin a v atomových reaktorech. Světové zásoby niobu jsou více než dostatečné pro pokrytí předpokládané poptávky. Ve srovnání s pegmatity jsou mnohem větší zdroje niobu v karbonatitech. Tantal se svým použitím mírně liší od niobu. Nachází využití v katalyzátorech, kondenzátorech elektrolytů, katodách, rotačních tryskách a v lékařské technice (implantáty a nástroje).

Zpracování coltanu (kolumbit-tantalit) je v pegmatitech ekonomicky zajímavé v případě převahy tantalu nad niobem (koncentrát >30 % $Ta_2O_5$). Radiace rudy by měla být nízká a proto není zájem o tantalem bohaté odrůdy mikrolitu, neboť jsou příliš často silně kontaminovány U a Th. Pyrochlorové Nb-Ta rudy se zpracovávají pomocí flotace a magnetické separace, rudy kolumbit-tantalitové se obohacují magnetickými, elektrostatickými a gravitačními metodami s cílem získat minerální koncentrát o obsahu 60 % oxidu Nb-Ta. Významným zdrojem Nb a Ta jsou také těžební a úpravárenské odpady.

### Prvky vzácných zemin

Prvky vzácných zemin (REE) mají uplatnění v široké škále finálních výrobků a v různých průmyslových odvětvích. Více než 80 % celkové potřeby REE tvoří Ce, La a Nd. REE se používají k legování lehkých a obecných kovů (Ce), k barvení skel a v jaderné technologii. Izotopy lanthanu se používají jako zdroj záření a izotopy Eu a Y se používají ve speciálních katodových trubicích. V budoucnosti se předpokládá další nárůst spotřeby především v oblasti magnetů, luminoforů a keramiky. Přestože alkalické magmatické systémy mohou hostit významná ložiska REE, pegmatity mají spíše omezený význam.

### Skandium

Iontový poloměr $Sc^{3+}$ se velmi podobá poloměru $Mg^{2+}$ a $Fe^{2+}$. Skandium proto vstupuje do krystalové mřížky horninotvorných silikátů železa a hořčíku, především pyroxenů a méně i amfibolů a slíd. V granitických pegmatitech a aplitech jsou příležitostně pozorována obohacení Sc, zejména pokud mají vztah k bazickým horninám. Hlavními nositeli skandia v pegmatitech jsou silikáty thortveitit a bazzit. Skandium nachází průmyslové využití v lehkých slitinách, jaderných technologiích, výrobě osvětlovacích zařízení a laserových krystalových tyčí. V současnosti není samostatně dobýváno a získává se jako vedlejší produkt při zpracování rud nebo z důlních odpadů.

### Titan

Titan je nezbytný pro fungování moderních průmyslových ekonomik. Je považován za kritický a strategický prvek díky jedinečným vlastnostem v kovovém stavu i ve formě oxidu. Hlavními rudními minerály obsahujícími titan jsou ilmenit a rutil, v menší míře i leukoxen (směs hydratovaných Ti-oxidů vzniklých alterací silikátů). V budoucnu by mohly mít hospodářský význam i další minerály, včetně anatasu, perovskitu a titanomagnetitu. Ilmenit se v současné době těží na ložiscích anortozitu uložených v horninách proterozoického stáří. Většina rutilu a téměř polovina vytěženého ilmenitu pochází z aluviálních, fluviálních a eolických ložisek (tzv. těžkých písků). V současnosti titan není ekonomicky získáván z pegmatitů, niobový rutil je však častou akcesorií alkalickoživcových granitů.

### Wolfram a cín

Wolfram (klark 1 ppm W) je v zemské kůře méně rozšířen než s ním se často vyskytující cín (35 ppm Sn). Wolfram se používá pro karbid wolframu ke zpevnění slitin, ferowolfram, nerezovou/vysokojakostní ocel a wolframová vlákna pro lampy a termionické aplikace. Sekundární W pochází z recyklace oceli legované W a práškového metalurgického materiálu, jako je karbid W, který se používá hlavně v těžkých nástrojích, např. ve vrtácích. Cín se používá k výrobě cínových plechů, různých slitin (bronz, mosaz, pájky), ve sklářském a keramickém průmyslu, v elektronických zařízeních (LCD displeje) a pigmentech. Produkce cínových a wolframových rud z pegmatitů nedosahuje takové výše jako z ložisek jiných genetických typů. Příkladem zdrojů v pegmatitech je DR Kongo. Pro získání koncentrátů se používá gravitační třídění a magnetická separace. Wolframit a scheelit se těží z rud s obsahem 0,2 až 0,4 % $WO_3$, u cínu je to v případě pevných hornin min. 0,3 %. Hodnotu wolframových koncentrátů zvyšují příměsi Au, Ag, Sc, Nb a Ta a naopak zhoršují obsahy Sn, As, P, S a dalších příměsí. Negativní vliv na hodnotu cínového koncentrátu mají zvýšené obsahy Fe, S, Pb, As, Cu atp.).

### Zirkonium a hafnium

Zirkoniová ruda je kromě Zr také zdrojem Hf. Vzhledem k vysokým žáruvzdorným vlastnostem se přibližně 70 % Zr používá ve formě zirkonu jako slévárenský písek a do žáruvzdorných vyzdívek. Asi 20 % Zr se spotřebuje při výrobě skla, glazur, porcelánových izolátorů a chemického porcelánu. Zbytek se používá na výrobu kovů a slitin v jaderném průmyslu a na výrobu speciálních druhů oceli a getrů (vysokovakuových výměv). Celková produkce hafnia je poměrně malá a závisí na těžbě a rafinaci zirkonia. Hafnium má hlavní využití v superslitinách, polovodičích, integrovaných obvodech a jaderné výrobě. Hlavní primární ložiska se nacházejí v alkalických magmatických horninách, které mají zvýšený obsah také niobu, tantalu a REE a mají blízkou vazbu na ložiska apatitů. Přesto je koncentrace zirkonia a hafnia v alkalických horninách poměrně malá, tudíž jen minimum těchto intruzí je vhodné pro těžbu.

### 2.2.3 Ostatní užitkové složky

Ve světě se v některých případech získávaly z pegmatitových hornin i další nerostné suroviny, příp. se zde vyskytují některé minerální složky, které by mohly být teoreticky využitelné.

**Drahé kameny**

Na tělesa pegmatitů je vázána značná část výskytů drahých kamenů. Jde hlavně o drahokamové odrůdy berylu (akvamarín, smaragd, heliodor, morganit), chryzoberylu (alexandrit), turmalínu (elbait a příbuzné minerální fáze), spodumenu (kunzit) atd. Drahé kameny nejsou předmětem řešeného projektu.

**Fluór**

Fluór a základní chemická sloučenina kyselina fluorovodíková se vyrábějí z fluoritu, který se lokálně vyskytuje v pegmatitech, v současnosti se z nich však netěží. Přírodní hexafluorohlinitan sodný - minerál kryolit $Na_3AlF_6$ používaný při výrobě hliníku - byl dříve těžen z pegmatitu na lokalitě Ivittuut (Ivigtut) v Grónsku. Toto ložisko je již vyčerpáno.

**Fosfáty**

Pegmatity často obsahují pestrou škálu minerálů ze skupiny fosforečnanů, jejich ložiskové využití je však marginální. Jedním z největších a nejbohatších nalezišť na světě a hlavním zdrojem fosfátové horniny v Rusku je Chibinský masiv na poloostrově Kola, kde je surovina vázána na nefelinické syenity.

**Grafit**

V několika málo případech (ložiska na Srí Lance) mohou pegmatity obsahovat ekonomicky zajímavé obsahy grafitu. Vyskytuje se v nich tzv. krystalický grafit, zatímco tzv. amorfní grafit pochází převážně z metamorfovaných hornin. Grafitová surovina v pegmatitových ložiscích by měla obsahovat minimálně 22 – 35 % uhlíku. Po drcení a mletí ve vodní suspenzi se grafit koncentruje pomocí flotačních postupů.

**Uran a thorium**

Uran a thorium jsou významné radioaktivní prvky, které hrají důležitou roli v energetice, zbrojním průmyslu a vědeckém výzkumu. Thorium může najít mnohem širší uplatnění mimo jeho využití jako zdroje jaderné energie, a to pro některé slitiny, skla s vysokým indexem lomu a jako zdroj neutronů. Z pegmatitů se v současné době uran ani thorium netěží, i když jejich minerály jsou zde častými akcesoriemi. V malých množstvích mohou být teoreticky získávány jako vedlejší produkty těžby živce nebo slídy. Madagaskar je jedinou zemí, kde se z pegmatitů vytěžilo větší množství uranových minerálů. Z leukogranitů (tzv. alaskitů) se uran získává v Namibii (Rössing mine), kde tvoří akumulace s průměrnými obsahy cca 200-400 ppm $U_3O_8$.

## 2.3 Principy vzorkování a laboratorního hodnocení

**Vzorkování**

Správné vzorkování nerostných surovin je zásadní pro získání přesných a spolehlivých analytických dat. Je třeba dbát na reprezentativnost vzorků, správnou metodiku a dodržování standardů. Typy vzorků a způsoby vzorkování závisí na účelu analýzy, velikosti ložiska, typu nerostu a požadavcích na detailnost informací. Při vzorkování nerostných surovin je nutno dodržet požadavky na reprezentativnost, homogenitu a čistotu. Vzorkování by mělo být prováděno v souladu interními předpisy a případně i mezinárodními standardy.[6]

Pro účely této metodiky se rozlišují vzorky

- reprezentativní vzorky: celohorninové, odebírané z horninového tělesa a poskytující údaje o složení suroviny;
- selektivní vzorky: indikační vzorky poskytující údaje o složení vybraných partií nebo dílčích charakteristik horninového tělesa;
- preparáty: malé části vzorku pro analýzu minerálních fází, specifických prvků atp.

Ve všech případech jde o tzv. primární vzorky, tj. o vzorky odebírané přímo ze zájmové horniny. V případě reprezentativního vzorku je nutno jeho velikost přizpůsobit zrnitosti a homogenitě materiálu (Tabulka 1) a každý odběr musí být podrobně zdokumentován a popsán v plánu vzorkování a protokolu o vzorkování[7].

Tabulka 1. Orientační požadavek na množství reprezentativního vzorku

| Zrnitost materiálu | Homogenita materiálu | |
|---|---|---|
| | vysoká | nízká |
| Práškovité materiály (< 0,063 mm) | 0,5 - 1 kg | 1 - 2 kg |
| Jemné částice (0,063 - 1 mm) | 1 - 2 kg | 2 - 5 kg |
| Středně jemné materiály (1 - 10 mm) | 2 - 3 kg | 3 - 7 kg |
| Hrubé materiály (> 10 mm) | 3 - 5 kg | 5 - 10 kg |
| Kamenivo a rudy (velké částice) | 5 - 10 kg | 10 - 20 kg |

[6] Viz např.:

ČSN 01 5111 Vzorkování sypkých a zrnitých materiálů.

ČSN EN 14899 Charakterizace odpadů - Vzorkování odpadů - Zásady přípravy programu vzorkování a jeho použití.

Černý R., Jedlička P., Křenková E. (2024): Vzorkování silikátových hornin. In: Vzorkování IV-2 průmysl, 167-178. Vyd. Ing. Václav Helán-2 THETA Český Těšín. 277 s.

Ševčík J. G. K. a kol. (2010): Vzorkování I – obecné zásady. Vyd. Ing. Václav Helán-2 THETA Český Těšín. 130 s.

[7] Viz např. Metodický pokyn MŽP ZP14/2008 ke vzorkování odpadů ze dne 11. 4. 2008 (B. Beneš a kol.).

**Polní zkoušky**

- Základní hodnocení fyzikálních vlastností minerálů vychází ze zkušeností pracovníka. Slouží k první identifikaci vzorků přímo v terénu. Jednotlivé minerály jsou určovány podle jejich charakteristických vlastností: barvy, lesku, hustoty, charakteru štěpnosti případně lomu, soudržnosti, morfologického vývinu atp.

  Důležitým diagnostickým znakem je tvrdost, kterou lze zjednodušeně testovat pomocí sady speciálních jehel s definovanou tvrdostí.

  Magnetické vlastnosti minerálů (ferri-, ferro-, para-, a diamagnetismus) lze v některých případech úspěšně testovat v terénu pomocí permanentního magnetu. Tímto způsobem lze odlišit magnetit a pyrhotin od podobných opakních fází.

  Přítomnost karbonátů lze v terénu testovat pomocí zředěné kyseliny chlorovodíkové. Běžné karbonáty jako kalcit nebo dolomit reagují bouřlivým rozkladem za uvolnění bublin $CO_2$.

- UV luminiscence je rychlá metoda pro diagnostiku fází během terénního průzkumu, využívající fluorescenčních vlastností pod ultrafialovým světlem. Tato metoda je v některých případech efektivní při identifikaci minerálů vykazující luminiscenci, které by byly jinak obtížně rozpoznatelné. Běžně se využívá excitace vlnovou délkou 254 a 360 nm. Metoda je využitelná například pro scheelit, powellit, fluorit, yttrofluorit, spodumen, některé sekundární minerály uranu, kalcit atd., a je vhodná pro průzkum ložisek kovů, studium minerálních procesů nebo monitorování kontaminace přímo v terénu.

- Ramanův spektrometr se využívá k analýze vibračních módů materiálů. Laserové světlo interaguje se vzorkem, což vede k rozptylu světla, jehož změny frekvence poskytují informace o struktuře vzorku. Prostřednictvím přenosného Ramanova spektrometru lze provádět identifikaci minerálů přímo v terénu. Vlastní identifikace je založena na porovnání naměřeného spektra s databází známých spekter. Přenosný Ramanův spektrometr lze aplikovat v případě, kdy zájmové minerály nelze spolehlivě odlišit od běžných horninotvorných (například (polucit-křemen, spodumen-petalit-živce, beryl-apatit-křemen, amblygonit-živce atp.).

- Gamaspektrometrie je založena na detekci gama záření emitovaného radioaktivními izotopy k analýze geologických vzorků. Při terénních průzkumech se často používají scintilační detektory na bázi NaI:Tl nebo BGO. Gamaspektrometrie je ideální pro měření koncentrace radioaktivních prvků jako uran (U), thorium (Th) a draslík (K), což pomáhá při průzkumu ložisek uranu a dalších radioaktivních minerálů. Vzhledem k úzké vazbě U a Th s prvky vzácných zemin, lze touto metodou v některých případech detekovat i minerály REE. Moderní terénní přístroje jsou vybaveny datalogery a GPS systémy, které umožňují automatické zaznamenávání pozic měřených bodů v terénu, což zjednodušuje sběr dat a zajišťuje přesnost prostorové lokalizace během průzkumu.

- Přenosný rentgenfluorescenční analyzátor slouží pro rychlou a neinvazivní analýzu minerálů, hornin anebo vrtných jader přímo v terénu. Využívá rentgenové záření k excitaci atomů ve vzorcích, což umožňuje identifikaci chemického složení materiálů na základě vyzařovaných rentgenových čar. Obvykle umožňuje kvantifikaci prvků s větším atomovým číslem než 12, ovšem citlivost narůstá s rostoucím atomovým číslem. Výhodou XRF analyzátoru je jeho mobilita, rychlost měření a schopnost provádět analýzy bez nutnosti laboratorního vybavení, což umožňuje efektivně získávat údaje o složení minerálů a hornin přímo na místě a výrazně zrychluje rozhodovací procesy v terénu.
- Přenosný laserový analyzátor LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) umožňuje také stanovení lehkých prvků s atomovým číslem menším než 12. Využívá analýzu plazmatu excitované laserovým impulsem pomocí emisní spektroskopie (viz níže). Přístroj umožňuje analýzu materiálů přímo v terénu bez nutnosti jejich složité přípravy. Protože nevyužívá žádný RTG zdroj, lze při měření držet vzorky přímo v ruce.

**Celohorninová chemická analýza**

Celohorninová prvková analýza (též silikátová analýza) hornin má za cíl stanovit hlavní chemické složky hornin. Její provedení je standardní službou většiny laboratoří specializovaných na horninové vzorky. V závislosti na instrumentálním vybavení pracoviště jsou používány některé z těchto metod či jejich kombinaci:

- Rentgenová fluorescenční spektroskopie (XRF) je jednou z nejběžnějších metod pro analýzu silikátových hornin. Provádí se na pevných vzorcích ve formě lisovaných tablet nebo tavených perel. Analýzy lze provádět s použitím standardů nebo jako semikvantitativní bezstandardovou (např. s použitím programu UNIQUANT; PD-SOP-113).
- Optická emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-OES) detekuje optické emisní spektrum vzniklé při excitaci atomů v plazmatu, což umožňuje měření koncentrace prvků. Provádí se na kapalných vzorcích, pevné materiály je proto nutno předem podrobit mokrému rozkladu. Obdobnou metodou je hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS).
- Atomová absorpční spektroskopie (AAS) patří k tzv. mokrým chemickým metodám. Jde o analytickou techniku, která využívá schopnost atomů absorbovat světelné záření charakteristické vlnové délky. Vzorek je nutno nejdříve převést do roztoku, který je následně za vysoké teploty atomizován. Každý prvek musí být měřen samostatně, což může být nevýhoda při analýze vzorků obsahujících více různých prvků. Na druhou stranu lze stanovit velmi nízké obsahy měřeného elementu. V případě řešené problematiky je metoda vhodná zejména pro stanovení obsahu Li a Be.

**Technologické zkoušky**

Tato metodika definuje základní technologické zkoušky silikátových surovin obsažených v zájmových horninových typech. Může jít o celou horninu nebo o meziprodukt zbavený nečistot (nejčastěji nositelů barvicích oxidů) vhodnou separační metodou. Získané výsledky jsou hodnoceny s ohledem na využití v různých oblastech silikátového průmyslu[8].

Technologické zkoušky na ostatní užitkové složky nejsou pro svou komplexnost do metodiky zahrnuty.

Základní technologické zkoušky silikátových surovin zahrnují zejména určení následujících parametrů:

- Vzhled výpalku, tj. vizuální posouzení struktury s ohledem na stupeň slinutí (struktura sypká – slepená – spečená – tavivo), přítomnost nečistot a barevnost.
- Barevnost. Stanovení barevnosti umožňuje objektivizaci vjemu barev a numerické vyjádření kvality výpalku pomocí hodnot L*, a*, b* (ČSN 72 1089).
- Smrštění je úbytek objemu předmětu alespoň v jednom rozměru. Ke smršťování dochází vlivem snížení teploty, zvýšení tlaku nebo procesů vedoucích ke snížení objemu vody (ČSN 72 1073).
- Nasákavost, tj. schopnost materiálu přijímat pórovou vodu (ČSN 72 5010).

Uvedené zkoušky se provádějí na vzorcích po výpalu na 1 250 °C a lze je doplnit o testaci na vzorcích v surovém stavu (po vysušení).

**Analýza minerálních složek**

Účelem je identifikace důležitých minerálů v horninových vzorcích širokou škálou metod s cílem určit chemické složení a fyzikální vlastnosti, které budou významné z hlediska technologických operací souvisejících jejich s následnou separací. Tato problematika není součástí řešené metodiky, pro úplnost zde však uvádíme hlavní používané metody.

- Modální analýza pomocí optického polarizačního mikroskopu je efektivní metoda pro určení procentuálního zastoupení jednotlivých minerálů v horninových vzorcích. Obvykle je prováděna na leštěných nebo krytých výbrusech nebo nábrusech. S využitím motorizovaného posunu vzorku, analýzy obrazu a strojového učení lze tento proces výrazně zefektivnit a zpřesnit. Tato metoda je však nevhodná pro hrubozrnné vzorky, jako je například bloková jednotka pegmatitu.
- Prášková difrakce (XRD) je účinná technika pro fázovou identifikaci minerálů v rozpráškovaných horninách. Při této metodě rentgenové záření interaguje s krystalovými mřížkami minerálů, což generuje specifické difrakční vzory, které jsou charakteristické pro jednotlivé minerály a umožňují jejich identifikaci. Pro kvantitativní

[8] Např. Hanykýř V., Kutzendörfer J. (2000): Technologie keramiky. Vega Hradec Králové. 287 s.

určení zastoupení jednotlivých minerálů v hornině se používá Rietveldovo vypřesnění, které je metodou, jež optimalizuje model krystalové struktury na základě experimentálně získaných difrakčních dat. Tato metoda umožňuje nejen přesnou identifikaci minerálů, ale i výpočet jejich relativního zastoupení na základě analýzy intenzity difrakčních maxim. Pro reprezentativní výsledky je důležitá důkladná homogenizace vzorku.

- Elektronová mikrosonda a případně i elektronový mikroskop jsou hojně využívány pro bodovou chemickou analýzu minerálů a jsou založeny na základě měření energie charakteristických rentgenových paprsků vyzařovaných atomy při jejich excitaci elektronovým svazkem. Objem analyzovaného bodu je několik $\mu m^3$. Pro měření se využívají dva hlavní typy detektorů – EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) a WDS (Wavelength Dispersive X-ray Spectroscopy). EDS analýza umožňuje rychlou orientační analýzu chemického složení vzorku. WDS analýza, na rozdíl od EDS, poskytuje vyšší spektrální rozlišení a nižší detekční limity, je vhodná zejména pro detekci prvků s nízkou koncentrací nebo pro minerály obsahující kombinace prvků mající spektrální interference, jako jsou REE, Ta-Si-W, Ca-Sn-Sc, Ba-Ti-Ce, Bi-Pb-S-Mg-Mo, As-Mg apod. Obvykle lze kvantifikovat prvky s větším protonovým číslem než 8. Dále se využívá detekce zpětně rozptýlených elektronů (BSE) a sekundárních elektronů (SE) k vizualizaci povrchu vzorku. Detekce BSE obrazu umožňuje studium minerálů na základě jejich rozdílného protonového čísla, čímž lze vzájemně odlišit jednotlivé minerály nebo odhalit chemickou zonálnost minerálů. Obraz v SE vizualizuje detailní morfologii povrchu. Kombinace těchto metod poskytuje komplexní pohled na chemické složení, texturní vztahy a zonalitu minerálů. Kvantifikace chemického složení se provádí z leštěných výbrusů a nábrusů. Před analýzou je nezbytné vzorky pografitovat, což zajistí jejich dostatečnou elektrickou vodivost a zamezí problémům s nabíjením povrchu.

  Metoda je využitelná i pro plošné mapování, které poskytuje informace o prostorové distribuci prvků ve vzorcích a také o rozložení jednotlivých fází. K detekci signálu se používá EDS nebo WDS detektor nebo oba typy. Plošné mapování je možné provádět buď rastrováním elektronového svazku po vybrané ploše vzorku, nebo použitím motorizovaného posunu vzorku při statickém elektronovém svazku. Plošné mapování je časově náročnější než bodové analýzy a nabízí nižší analytickou přesnost. Grafickým výstupem ale získáme informace o vzájemných vztazích mezi hlavními a vedlejšími prvky v ploše, chemické zonálnosti a migraci jednotlivých prvků podél systémů trhlin.

- LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) je vysoce citlivá laboratorní metoda pro měření chemického složení pevných materiálů kombinující laserovou ablaci vzorku s excitací ablatovaného materiálu v indukčně spojeném Ar plazmatu a hmotnostní spektrometrií, což umožňuje analyzovat obsahy chemických prvků s vysokou přesností a rozlišením. LA-ICP-MS je schopna dosahovat detekčních limitů v řádu µg/g až ng/g, což z něj činí nástroj vhodný pro analýzu

stopových prvků. Tato technika je zvláště užitečná pro měření lehkých prvků, jako jsou Li, Be a B, které mohou být obtížně stanovitelné jinými metodami. Velikost analyzovaného bodu se pohybuje obvykle od 10 do 150 µm a je preferována analýza z leštěných vzorků, i když to není podmínkou.

Metodu lze využít pro zjištění a vizualizaci distribuce prvků v ploše vzorku. Plošné mapování pomocí LA-ICP-MS je vhodné pro zkoumání prostorové distribuce hlavních až vedlejších a zejména stopových prvků a lehkých prvků; prostorové rozlišení je však mírně horší ve srovnání s elektronovou mikrosondou. Plošné prvkové mapování se obvykle provádí na leštěných výbrusech a nábrusech.

- TIMA (Tescan Integrated Mineral Analyzer) je nástroj určený pro automatizovanou analýzu minerálních složek pomocí skenovací elektronové mikroskopie (EDS) vybavené obvykle více detektory. Po načtení husté sítě EDS spekter jsou generovány prvkové mapy a mapy minerálních složek. Systém dále umožňuje kvantifikovat obsahy jednotlivých minerálů nebo chemických prvků v ploše vzorku, umožní určit texturní vztahy mezi jednotlivými minerály, vyhodnotit jejich velikost, minerální asociaci apod.
- Mikro XRF mapování slouží ke studiu horninových vzorků pomocí rentgenové fluorescence. Umožňuje detailní analýzu prvkového složení povrchu a vizualizací distribuce prvků. Tato technika je neinvazivní a poskytuje relativně vysoké prostorové rozlišení (pod 20 µm), což je ideální pro zkoumání minerálního složení hornin a obsahu vybraných prvků v horninách na větších plochách (stovky $cm^2$), než umožní běžná elektronová mikroskopie. Metodou také lze detekovat koncentrace prvků v hodnotách desítek ppm (pro těžší prvky). Systémy rovněž umožňují identifikaci jednotlivých fází, tvorbu map distribuce jednotlivých minerálů atp.
- SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry) je laboratorní metoda pro analýzu prvků a jejich izotopických poměrů v geologických vzorcích. Tato technika umožňuje vysoké prostorové rozlišení a měření koncentrací až do úrovně µg/g pro lehké prvky a sub µg/g pro těžké prvky. Nevýhodou této techniky je silný matrix efekt, který ztěžuje interpretaci výsledků a klade vysoké nároky na kvalitní standardy, a také problematická orientace na vzorku a speciální příprava preparátu. Využití této metody je pro dané účely marginální.
- Katodová luminiscence (CL) je technika, pomocí které jsou vizualizovány jednotlivé minerály, růstové vzory, textury a generace minerálů, které nejsou viditelné běžným mikroskopem. Katodová luminiscence je vyvolána elektronovým paprskem, který excituje atomy ve vzorku a způsobí emisi fotonu ve viditelné oblasti elektromagnetického spektra. Katodová luminiscence se studenou nebo horkou katodou poskytuje barevný CL záznam a je studována z leštěných výbrusů. Při použití CL ve spojení s elektronovou mikrosondou nebo SEM je CL znamenávána pomocí fotonásobiče, což vede k panchromatickému signálu. Touto technikou lze studovat

i leštěné nábrusy. Ve spojení se SEM lze CL kombinovat i s jinými pokročilými hyperspektrálními metodami jako je TIMA.

- Spektrometrie laserem buzeného plazmatu (LIBS, Laser Induced Breakdown Spectroscopy) je poměrně nová metoda využívající laserový impuls k excitaci materiálu, což vede k jeho ionizaci a tvorbě plazmatu. Po vzniku plazmatu jsou pomocí emisní spektroskopie analyzovány prvky přítomné ve studovaném materiálu. Výhodou metody je vysoká rychlost analýz, současná detekce více různých prvků a zejména měření lehkých prvků (mj. i lithium, uhlík a bór). LIBS obvykle analyzuje pouze povrchové vrstvy materiálu (v závislosti na intenzitě laseru a dalších parametrech).

**Separační metody**

Separační metody jsou metody, spočívající v oddělení složek směsi na základě jejich odlišných vlastností. Těmito vlastnostmi mohou být hustota, barva, fyzikálně-chemické vlastnosti povrchu, magnetické nebo elektrické vlastnosti příslušného minerálu atd. Separačních metod je proto velké množství a jsou obecně využívány jak při laboratorních metodách výzkumu, tak i při průmyslovém zpracování hornin.

- Sítování. Mezi nejjednodušší separační metody patří sítování, při kterém rozdělujeme zrnitý vzorek na základě velikosti částic. Sítování je možno realizovat za sucha nebo za mokra a jeho cílem je nejčastěji stanovení zrnitostního složení sypkého materiálu.
- Ruční separace. Nejstarší separační metoda, která je však dodnes velmi často využívána při těžbě surovin především v rozvojových zemích. Bývá však využívána i v laboratorních podmínkách u vzorků s úzkou zrnitostní frakcí. Při ruční separaci vzorku se může pracovat také s lupou nebo pod mikroskopem. Principem separace jsou v tomto případě odlišné vzhledové vlastnosti jednotlivých zrn (barva, tvar, struktura, lesk atd.).
- Optická separace. Optické třídění je automatizovaná obdoba ruční separace. Elektrooptické detektory jsou dnes schopny zpracovávat data o optických vlastnostech minerálů po ozáření infračerveným, viditelným, nebo i ultrafialovým zářením a odlišit tak částice okem nerozlišitelné. Stejný princip, pouze s pomocí gama záření, se nazývá radiometrická separace.
- Magnetická separace patří obecně mezi průmyslově velmi často využívané způsoby separace. Využívá rozdílů v magnetických vlastnostech jednotlivých minerálů. Může probíhat za sucha nebo za mokra.
- Gravitační separace je jednou z nejdůležitějších prostředků separace pevných látek. Během gravitační separace jsou částice většinou oddělovány na základě diference v hustotě. Je aplikována za sucha i za mokra. Suchá gravitační (také pneumatická) separace má nižší provozní náklady a je šetrnější k životnímu prostředí. Mokrá gravitační separace bývá efektivnější. V laboratorním prostředí lze využít rozdělování

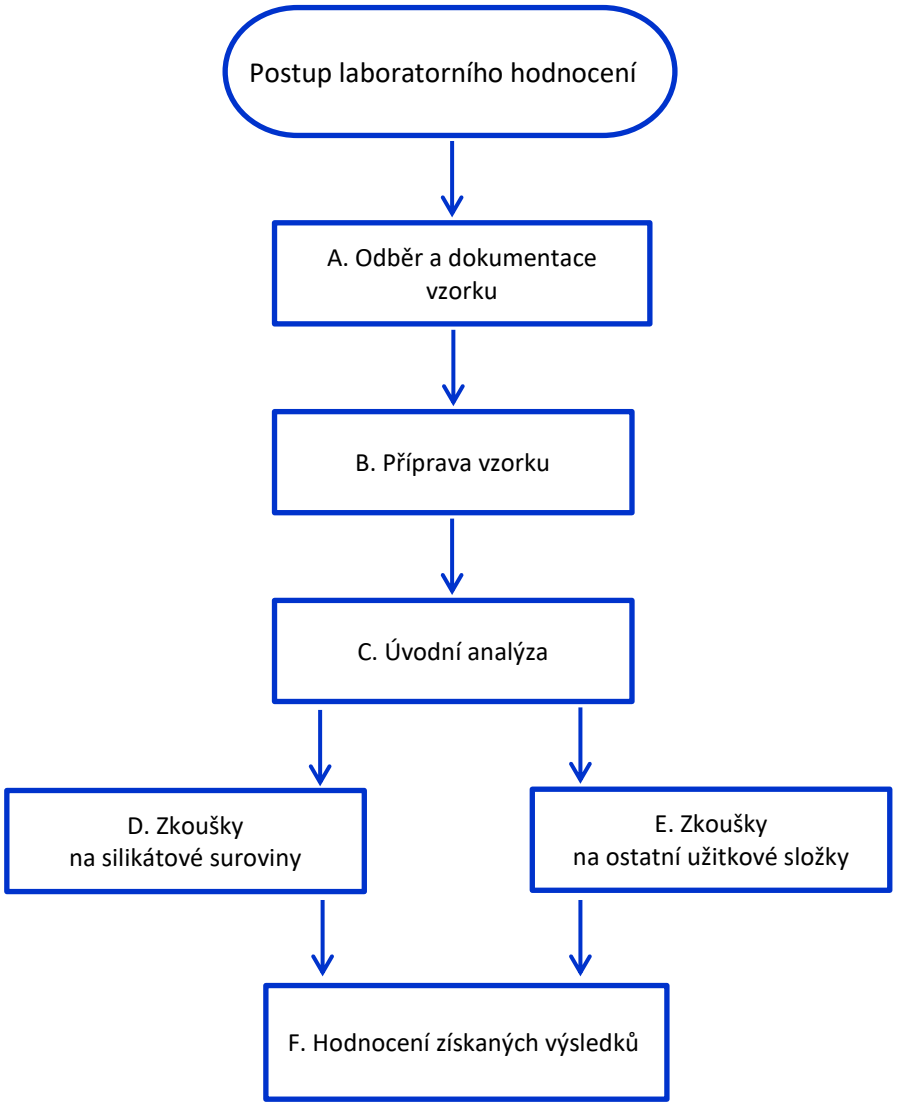
pomocí těžkých kapalin, těžkých suspenzí nebo tavenin. Jednoduchým řešením je šlichování.

- Flotace je proces oddělování minerálů od hlušiny využitím rozdílů v jejich hydrofobních vlastnostech. Rozdíly hydrofobicity mezi využitelnými minerály a odpadním hlušinou se zvyšují použitím povrchově aktivních látek a smáčedel. Flotace obecně patří k nejrozšířenějším průmyslově využívaným metodám separace.
- Elektrostatická separace spočívá v rozdílném chování látek v elektrostatickém poli. Zatímco vodivé materiály ztratí náboj na uzemněném povrchu, nevodiče si náboj zachovají, což umožňuje jejich oddělení. Metoda je vhodná např. pro oddělování muskovitových slíd od živcových pegmatitů.
- Pneumatická separace využívá rozdíly v aerodynamických vlastnostech částic. Surovina se vznáší v proudu vzduchu a rozdílné částice se oddělují na základě své velikosti a tvaru.
- Chemická separace je založena na rozdílné reaktivitě, resp. rozpustnosti minerálů při působení různých chemických činidel. Výhodou metody je rychlost a často i selektivita procesu. Nevýhodou je destruktivnost procesu a někdy i nežádoucí vedlejší reakce, které negativně ovlivňují nerozpuštěný zbytek.

Produkty separačních metod s nabohacenými zájmovými prvky se podrobí mineralogické a chemické analýze tak, aby bylo možno případně provést následné porovnání s požadavky na průmyslově využitelné koncentrace těchto složek.

## 2.4 Metodika laboratorní testace horninových vzorků

Tato kapitola uvádí přehlednou formou metodický postup laboratorní testace horninových vzorků pegmatitů a příbuzných horninových typů s předpokládaným obsahem užitkových složek. Postup hodnocení znázorněný v následujícím schématu je možné přizpůsobit přístupnosti přístrojového vybavení příslušného uživatele metodiky.



**A. Odběr a dokumentace vzorku**

A1 Označení vzorku. Ke každému vzorku označenému kódem zákazníka je přiděleno laboratorní číslo dle interních pravidel laboratoře.

A2 Stanovení hmotnosti odebraného/obdrženého vzorku.

A3 Popis vzorku z hlediska homogenity, kusovitosti, zrnitosti, vlhkosti apod.

A4 Fotografická dokumentace.

Zaznamenává se do dokumentu příslušného formátu. Krok A1 je povinný, kroky A2-A4 se provádějí podle interního předpisu laboratoře nebo podle potřeby řešeného projektu.

**B. Příprava vzorku**

B1 Podrcení na čelisťovém a válcovém drtiči (zrnitost cca 0 až 3 mm).

B2 Homogenizace a kvartace na množství potřebné pro další zkoušky.

B3 Úprava zrnitosti a kvartace vzorku na množství potřebné k analýze.

Zbytky z kvartace během jednotlivých fází přípravy se archivují podle interního předpisu laboratoře.

**C. Úvodní chemická analýza**

Účelem úvodní chemické analýzy je stanovení hlavních a případných vedlejších užitkových složek (CRM) přítomných v surovině. Podle jejích výsledků bude rozhodnuto o realizaci následných kroků D (Zkoušky silikátových složek) a/nebo E (Zkoušky ostatních užitkových složek).

C1 Semikvantitativní chemická analýza. Jedná se o komplexní stanovení všech hlavních i vedlejších prvků zastoupených v surovině. Vhodný pro tento účel je např. stolní XRF spektrometr, který umožňuje stanovit prvky těžší než fluór (včetně) a má vysokou citlivost pro přechodné kovy.

C2 Termogravimetrická analýza v rozsahu 25 až 1 000 °C. Jedná se o stanovení ztráty žíháním indikující přítomnost $CO_2$, $H_2O$, $OH^-$, organických látek atp.

C3 Doplňkové zkoušky, dle charakteru horniny.

**D. Zkoušky silikátových složek**

Základními nerostnými složkami pegmatitů a diferencovaných granitů jsou živec, křemen a slída. Ve speciálních případech k nim přistupuje také spodumen a petalit, které lze spolu s některými slídami využít buď do glazur, nebo jako tavivo v keramickém průmyslu, resp. jako zdroj pro výrobu sloučenin lithia.

D1 Silikátová analýza; jednotlivě všechny zájmové silikátové složky.

D2 Hodnocení výpalku (vzhled, barevnost, smrštění, nasákavost)[9]; variantně.

D3 Hodnocení vlivu na teploty slinutí a tavení; variantně pro surovinu s významným obsahem minerálů Li±Rb±Cs a/nebo nefelínu.

D4 Určení chemické čistoty křemenné suroviny; variantně pro tento typ materiálu.

D5 Jiné zkoušky dle úvahy technologa.

**E. Zkoušky ostatních užitkových složek**

Cílem zkoušek je zjištění formy a zastoupení jednotlivých minerálních složek (nositelů CRM) a možnosti jejich extrakce. K tomu se používá řada metod uvedených v kapitole 2.2. Lze předpokládat, že řada prací bude prováděna formou subdodávky.

E1 Zkoušky separovatelnosti (zejména magnetická a gravitační separace).

E2 Chemická analýza produktů separace (např. semikvantitativní chemická analýza pomocí stolního XRF spektrometru).

E3 Mineralogická analýza produktů separace - identifikace nositelů užitkových složek pomocí speciálních metod (optická mikroskopie, SEM-ED, EMPA, popř. XRD, TIMA, MLA).

**F. Hodnocení získaných výsledků**

Výsledky zkoušek podle subkapitol D a E budou vyhodnoceny se zaměřením na:

- zastoupené užitkové složky;
- obsah užitkových složek;
- způsob vazby užitkových složek na minerální fáze.

[9] Viz např.

ČSN 72 1073 Stanovení délkových změn keramických surovin sušením a pálením.

ČSN 72 1089 Stanovení absolutní bělosti keramických surovin.

ČSN 72 5010 Stanovení nasákavosti, zdánlivé pórovitosti, pórovitosti, objemové hmotnosti a zdánlivé hustoty vypálených keramických směsí a výrobků.

## 2.5 Ověření metodiky

Metodika byla ověřována na pracovištích Masarykovy univerzity a společnosti K M K GRANIT, část zkoušek byla provedena v externích laboratořích. Testace proběhla na selektivních vzorcích z vybraných lokalit studovaných v rámci projektu ERA-MIN 3 (Česká republika, Slovensko, Rumunsko, Bulharsko). Stejné lokality byly předmětem výzkumu ostatních členů konsorcia se zaměřením odpovídajícímu jejich projektům. Ověření proběhlo v jednotlivých metodických krocích A-F.

### A. Odběr a dokumentace vzorku

Vzorky pro ověření metodiky byly odebírány výběrově s ohledem na přítomnost potenciální užitkové složky a na horninový typ. Protože vzorky nereprezentují celé horninové těleso, plány vzorkování nebyly zpracovávány. Protokoly o vzorkování nahrazují pasporty lokalit uvedené v Příloze 3. Navštíveno bylo 34 lokalit v Bulharsku, Rumunsku, na Slovensku a v České republice. Na 21 z nich byly odebrány vzorky k testování metodiky. Na prvních pěti navštívených lokalitách bylo testováno použití přenosného rentgenfluorescenčního spektrometru (pXRF). Ukázalo se, že pro určení chemismu zrn vtroušených minerálů má tato metoda vzhledem k jejich malé velikosti jen omezené využití a na dalších lokalitách od ní bylo upuštěno.

Celkem bylo hodnoceno 34 vzorků, z toho je 22 pegmatitů, 6 alkalickoživcových magmatitů, 4 ortoruly a 2 srovnávací vzorky jiných hornin. Přehled vzorků uvádí Příloha 4, jejich fotografickou dokumentaci Příloha 5.

### B. Příprava vzorku

Všechny vzorky byly připraveny k laboratorním zkouškám v laboratoři společnosti K M K GRANIT. Vzorky byly nadrceny na čelisťovém drtiči a následně umlety na válcovém mlýně na zrnitost 0–2 mm. Z každého vzorku bylo vykvartováno cca 50 g k umletí na analytickou jemnost (pod 63 µm) jednopozicového planetového mlýnku s achátovými mlecími miskami. Zpracování vzorku se řídilo standardním operačním postupem laboratoře[10].

### C. Úvodní chemická analýza

Úvodní chemická analýza rentgen-fluorescenční metodou se prováděla na přístroji THERMO ARL Preform´X s využitím bezstandardové semikvantitativní analýzy UNIQUANT v souladu se zavedeným postupem laboratoře[11]. Obsahy Li (18 analýz) a Be (14 analýz) byly stanoveny

[10] PD-SOP-111 Příjem, příprava a zacházení se vzorky. Standardní operační postup. Laboratoř KMK GRANIT, Krásno.

[11] PD-SOP-113 Chemická analýza rentgenfluorescenčním spektrometrem a výpočet kovů z naměřených hodnot - $SiO_2$, $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$, $TiO_2$, CaO, MgO, $K_2O$, $Na_2O$, $P_2O_5$, Cs, Cu, Mn, Nb, Rb, Sn, Ta, W, Zn, živcovina, sumy alkálie ($K_2O$ + $Na_2O$), poměr alkálií ($K_2O/Na_2O$), Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mg, K, Na, P. Standardní operační postup. Laboratoř KMK GRANIT, Krásno.

PD-SOP-114 Stanovení ztráty žíháním. Standardní operační postup. Laboratoř KMK GRANIT, Krásno.

u externího dodavatele metodou AAS, u beryllia s použitím elektrotermické atomizace vzorku a u lithia plamenovou technikou. Souhrnná tabulka získaných výsledků analýz a příslušné laboratorní protokoly jsou obsahem Přílohy 6.

**D. Zkoušky silikátových složek**

Zkoušky silikátových složek byly zaměřeny na živcovou surovinu, která je základní komoditou průmyslového partnera projektu, společnosti K M K GRANIT. Upuštěno bylo od testace křemenné suroviny, neboť tuto problematiku řešil jiný projekt TA ČR[12]. Stejně tak nebyly kvantifikovány obsahy slídy, která je na příslušných modelových lokalitách relativně snadno získatelným vedlejším produktem (viz Kapitola 2.2.1), a turmalínu, jehož uplatnění jako suroviny boru je v současnosti ekonomicky málo reálné. Výsledky zkoušek silikátových složek jsou uvedeny v Příloze 7.

Silikátovou analýzu provedla za řízených podmínek Laboratoř KMK GRANIT.[13] Silikátová analýza byla provedena na vybraných 5 vzorcích z lokalit Brezoi-Vasilatu, Cataractele Lotrului, Valea Conțului (Rumunsko), Krásno-Vysoký Kámen a Lavičky (Česká republika). Na stejných vzorcích bylo provedeno hodnocení výpalku. Zjišťovanými parametry byly smrštění, nasákavost po výpalu a dále barva po výpalu, kterou charakterizují parametry L*, a*, b*.[14]

U 13 vzorků z 9 lokalit (Brezoi-Vasilatu, Dolní Rožínka, Lavičky, Lhenice, Přibyslavice, Řečice, Smolné Pece, Vernéřov, Vištérica) byla odzkoušena účinnost elektromagnetické separace na snížení barvicích oxidů a zvýšení kvality suroviny.

U 5 vzorků s předpokládaným zvýšeným obsahem tavicích složek byly provedeny zkoušky slínavosti s využitím pozorovací pece/žárového mikroskopu (Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně). Zkoušky byly provedeny na standardním živci FKS s příměsí 15 % studovaného vzorku (spodumenový pegmatit Valea Conțului, nefelinický syenit Ditrău-Ghiduţ, lepidolitový pegmatit Rožná a montebrasitový pegmatit Vernéřov).

**E. Zkoušky ostatních užitkových složek**

Na základě úvodních analýz (Příloha 5) bylo vybráno 6 vzorků k testaci ostatních složek tvořících potenciálně využitelnou příměs ve studovaných horninách. Sledováno bylo chemické složení vstupní suroviny, magnetického a gravitačního koncentrátu. Mineralogické složení koncentrátů bylo stanoveno ve společnosti TESCAN GROUP pomocí analyzátoru TIMA

[12] TITSMPO031 Výzkum perspektivních minerálních plniv a křemenných surovin v Českém masivu, jejich úpravy a využití pro moderní průmyslové aplikace. TA ČR 2021-2023 (Lhotský a kol. 2023).

[13] Aktuální Osvědčení o akreditaci č. 699/2024 Chemická analýza a stanovení ztráty žíháním silikátových surovin a keramických výrobků na bázi silikátů. Laboratoř KMK GRANIT, Krásno.

[14] PD-SOP-117 Kolorimetrické stanovení barevnosti a bělosti. Standardní operační postup. Laboratoř KMK GRANIT, Krásno.

vybaveného detektory pro energeticky disperzní spektroskopickou analýzu. Tytéž preparáty byly podrobeny chemické analýze. Výsledky zkoušek jsou obsahem Přílohy 8.

**F. Hodnocení získaných výsledků**

Metodika laboratorní testace byla ověřována na 34 selektivních horninových vzorcích (Tabulka 2). Vzorky svým složením pokrývají hlavní horninové typy karpatsko-balkánské oblasti a české části Českého masivu. Získané výsledky ukazují, jakým směrem by se měly ubírat případné další výzkumné a průzkumné práce vedoucí k ověření ekonomicky akumulací řešených nerostných surovin.

***Živcové a muskovitové pegmatity***

Živcové a muskovitové pegmatity jsou nejhojněji zastoupenými horninami. Studované vzorky z lokalit v Bulharsku, Rumunsku a České republiky lze v řadě případů hodnotit jako zdroj živcové suroviny a slídy. Charakterem výpalků se vybrané vzorky blíží standardnímu živcovému výrobku FK z ložiska Krásno-Vysoký Kámen. Obsah oxidu železitého jako hlavní škodliviny v živci lze výrazně snížit elektromagnetickou separací. V některých případech obsahují tyto horniny vysoký obsah turmalínu (skorylu), který lze gravitačně separovat a teoreticky využít jako surovinu boru. Dále lze uvažovat o získávání berylu a u těles s vyvinutým křemenným jádrem také křemenné suroviny (v rámci projektu neřešeno).

Lokality: Brezoi-Vasilatu, Cataractele Lotrului, Gilău-Cornu, Piatra Albă, Răzoare-Ciungi, Smolné Pece, Valea Conțului (1 vzorek), Vernéřov (1 vzorek), Vištérica.

***Lithné pegmatity***

Lithné pegmatity je souhrnný název pro horniny s významným obsahem lepidolitu a/nebo lithného turmalínu. V karpatsko-balkánské oblasti nebyly výzkumem zastiženy, soubor vzorků byl proto doplněn o materiál z českých a moravských lokalit. Tento horninový typ je významným zdrojem lithia, které je spolu s rubidiem a cesiem vázáno zejména na slídový minerál lepidolit. Lepidolitový pegmatit působí v silikátových směsích jako účinné tavivo, u vzorku z lokality Rožná bylo zkouškou v žárovém mikroskopu dokumentováno snížení žáruvzdornosti z původních 1 430 na 1 370 °C. Jako Li-rudu lze lepidolit získávat především pomocí magnetické separace. Naopak další identifikované užitkové složky, cínová ruda kasiterit a technicky využitelný granát, přecházejí do gravitačních koncentrátů. Na lokalitě Řečice jsou doprovázeny minerály arsenu, který je další strategickou nerostnou surovinou EU, dosud však byl spíš považovaný za škodlivinu. Lithné pegmatity mají místy zvýšený vysoký obsah turmalínu (Li-turmalín, skoryl), který je potenciální surovinou boru. Stejně tak mohou některá tělesa poskytnout kvalitní živec a křemen.

Lokality: Dobšiná, Dolní Rožínka, Lhenice, Rožná, Řečice.

***Spodumenové pegmatity***

Spodumenové pegmatity představují hlavní lithnou rudu typu „hard-rock“ ve světě. V zájmové oblasti jsou však vyvinuty pouze ojediněle. V odebraném vzorku byl stanoven obsah 1,3 % Li (Tabulka 2). Surovinu tohoto typu je možno využít k výrobě sloučenin lithia nebo ve sklářském a keramickém průmyslu do glazur a jako tavivo. Přídavkem studovaného vzorku ke standardnímu živci FKS v poměru 15 : 85 % byla snížena teplota slinutí z 1 215 na 1 180 °C (Příloha 7.5).

Lokalita: Valea Conțului (1 vzorek).

***Lithnofosfátové pegmatity***

Jde o celosvětově málo rozšířený surovinový typ. Studován byl vzorek horniny s dominantním montebrasitem, fosforečnanem o ideálním vzorci $LiAl(PO_4)(OH)$. Montebrasit lze získávat gravitační separací (laboratorně 86 % v těžké frakci). Spolu s lithiem bylo detekováno také rubidium, které je z velké části pravděpodobně vázáno ve struktuře K-živce. Možné využití jako energeticky úsporné suroviny bylo ověřeno žárovou zkouškou, kdy příměs 15 % v živcovém standardu snížila teplotu slinutí o 25 °C. Další užitkovou složkou je cín vázaný na gravitačně separovatelné kasiterit $SnO_2$ a sulfidy řady stannin $Cu_2FeSnS_4$ – kesterit $Cu_2ZnSnS_4$. Obsah Sn v surovém vzorku činí 1,25 % Sn.

Lokalita: Vernéřov (1 vzorek).

***Nefelinické syenity***

Nefelinické syenity jsou hrubozrnné hlubinné vyvřeliny, které se skládají převážně z nefelínu a alkalického živce a na rozdíl od granitů neobsahují křemen. Pro vysoký obsah alkálií působí jako tavivo ve sklářských a keramických směsích. Tato vlastnost byla ověřena i u studovaných vzorků, kdy 15% přídavek umletého přírodního materiálu s obsahem 17,3 % $Na_2O+K_2O$ do standardního živce snížil žáruvzdornost z původních 1 430 na 1 375 °C.

Lokalita: Ditrău-Ghiduţ.

***Alkalickoživcové granity***

Zatímco pegmatity často tvoří relativně málo mocné žíly v okolní hornině, alkalickoživcové granity se vyskytují v mnohem větších tělesech zpravidla umožňujících ekonomicky výhodnější dobývání. V rámci ověření metodiky byla laboratorní testace zaměřena na obsahy živcové suroviny a její upravitelnost pomocí magnetické separace vedoucí ke snížení obsahu barvicích oxidů. Odpadní magnetická frakce přitom může být zdrojem některých užitkových složek, zejména Sn, Nb-Ta, Ti, případně i slídy (Tabulka 2).

Lokality: Krásno-Vysoký Kámen, Lavičky, Přibyslavice.

***Ostatní horninové typy***

Během terénní rekognoskace jednotlivých lokalit byly k ověření metodiky odebrány vzorky také z dalších typů hornin. Leukokratní ortorula z Mălaia-Ciungetu byla vyhodnocena jako živcová surovina s příměsí slídy, v silikátové manganové rudě z ložiska Răzoare s obsahem 55 % MnO byly detekovány zvýšené obsahy prvků vzácných zemin a hydrotermální metasomatit z periférie syenitového masivu Ditrău (lokalita Jolotca) obsahuje cca 3 % $TiO_2$. Studium vzorků mineralizované migmatitické ortoruly z Costeşti-Jărosul ukazuje, že tato hornina by mohla být zdrojem REE, Zr-Hf a Nb.

Lokality: Costeşti Jărosul, Jolotca, Mălaia-Ciungetu, Răzoare.

Tabulka 2. Přehled vzorků použitých k ověření metodiky a jejich hodnocení.

| Modelová lokalita | Pasport lokality | Vzorek | Horninový typ | Provedené kroky | Hodnocení | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | užitková složka | obsah užitkových složek | hlavní nositel |
| Brezoi-Vasilatu | 10 | BrV | muskovitový pegmatit | A, B, C, D | živec | CHA živcovina 54 %, $Na_2O+K_2O$ 7,4 %, $Fe_2O_3$ surovina 0,68 % (CHA), 1,27 % (UQ), po magnetickém čištění 0,43 % výpalek suroviny na 1250 °C: smrštění 8,8 %, nasákavost 0,03 %, bělost 58 % | albit, K-živec |
| | | | | | slída | příměs v hlavní surovině (makropopis) | muskovit |
| Costeşti-Jărosul | 18 | CJ1, CJ2 | migmatitická ortorula | A, B, C, E | prvky vzácných zemin | surovina 0,11-0,18 % REE+Y, magnetická frakce 0,32 % REE+Y, těžká frakce 0,67 % REE+Y | monazit, polykras, bastnezit-parisit |
| | | | | | zirkonium, hafnium | surovina 1,8-2,3 % Zr, magnetická frakce 2,7-3,0 % Zr a 0,09-0,11 % Hf, 4,8 % zirkonu, těžká frakce 6,6 % Zr a 0,29 % Hf, 8,9 % zirkonu (TIMA) | zirkon |
| | | | | | niob | surovina 0,14-0,20 % Nb, magnetická frakce 0,22-0,24 % Nb, těžká frakce 0,73 % Nb | polykras, Nb-rutil |
| | | | | | cín | surovina 0,05-0,06 % Sn, těžká frakce 0,39 % Sn, 0,53 % kasiteritu | kasiterit |
| Cataractele Lotrului | 14 | CL | muskovitový pegmatit | A, B, C, D | živec | CHA živcovina 74 %, $Na_2O+K_2O$ 11,7 %, CHA $Fe_2O_3$ surovina 0,21 % výpalek suroviny na 1250 °C: smrštění 7,4 %, nasákavost 0,06 %, bělost 75 % | K-živec |
| | | | | | slída | příměs v hlavní surovině (makropopis) | muskovit, flogopit |
| Valea Conțului | 15 | Cn1 | spodumenový pegmatit | A, B, C, D | lithium | surovina 1,3 % Li | spodumen |
| | | Cn2 | živcový pegmatit | A, B, C, D | živec | CHA živcovina 79 %, $Na_2O+K_2O$ 9,8 %, $Fe_2O_3$ v surovině 0,35 % výpalek suroviny na 1250 °C: smrštění 4,8 %, nasákavost 0,07 %, bělost 85 % | albit, K-živec |
| Gilău-Cornu | 21 | Co-1 | živcový pegmatit | A, B, C | živec | živcovina 78 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 10,5 %, $Fe_2O_3$ surovina 0,42 % | albit, K-živec |
| | | Co-2 | živcový pegmatit | A, B, C | živec | živcovina 73 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 9,8 %, $Fe_2O_3$ surovina 1,1 % | albit, K-živec |
| Ditrău-Ghiduţ | 19 | Di2-1 | nefelinický syenit | A, B, C, D | nefelín | UQ $Na_2O+K_2O$ 17,3 %, $Fe_2O_3$ surovina 1,08 % | nefelín |
| | | Di2-2 | nefelinický syenit | A, B, C | nefelín | UQ $Na_2O+K_2O$ 18,1 %, $Fe_2O_3$ surovina 1,12 % | nefelín |
| Dobšiná | 23 | Dob | pegmatit | A, B, C | | živcovina 73 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 10,6 % | albit, K-živec |
| Dolní Rožínka | 26 | DORO | lithný pegmatit | A, B, C, D, E | živec | živcovina 58 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 7,1 %, $Fe_2O_3$ surovina 0,32 %, po magnetickém čištění 0,18 % | albit |
| | | | | | granát (abrazivo) | granát (spessartin) 87 % v těžké frakci, 20 % v magnetické frakci | granát |
| | | | | | cín | surovina 0,005 % Sn, těžká frakce 0,53 % Sn, 0,53 % kasiteritu | kasiterit |

| Modelová lokalita | Pasport lokality | Vzorek | Horninový typ | Provedené kroky | Hodnocení | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | užitková složka | obsah užitkových složek | hlavní nositel |
| | | | | | beryllium | surovina 117 g/t Be, beryl detekován v těžké i v magnetické frakci | beryl |
| | | | | | bor | skoryl 7 % v těžké i v magnetické frakci | turmalín (skoryl) |
| Krásno -Vysoký Kámen | 33 | FK | leukogranit | A, B, C, D | živec | UQ živcovina 79 %, $Na_2O+K_2O$ 11,3 %, $Fe_2O_3$ 0,12 %, CHA (FEW) živcovina 81 %, $Na_2O+K_2O$ 11,4 %, $Fe_2O_3$ 0,08 % výpalek suroviny na 1250 °C: smrštění 9,6 %, nasákavost 0,09 %, bělost 77 % | albit, K-živec |
| Jolotca | 20 | Jo1 | hydrotermalit | A, B, C | titan | 2,89 % $TiO_2$ | ilmenit, rutil |
| Lavičky | 28 | Lav1, Lav2 | alkalickoživcový granit | A, B, C, D | živec | živcovina 56-57 %, $Na_2O+K_2O$ 8,3-8,5 %, $Fe_2O_3$ surovina 0,3-0,4 %, po magnetickém čištění 0,2-0,3 % výpalek suroviny na 1250 °C: smrštění 9,7 %, nasákavost 0,03 %, bělost 75 % | K-živec, albit |
| Lhenice | 30 | LH | lithný pegmatit | A, B, C, D, E | živec | živcovina 48 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 7,8 %, $Fe_2O_3$ surovina 0,59 %, po magnetickém čištění 0,47 % | K-živec, albit |
| | | | | | lithium, rubidium, cesium | surovina 1,3 % Li, 0,93 % Rb, 0,24 % Cs, 78 % lepidolitu v magnetické frakci | lepidolit |
| | | | | | cín | 0,10 % Sn, v těžké frakci 8,23 % Sn, 49 % kasiteritu | kasiterit |
| | | | | | bor | 33 % turmalínu v těžké frakci | Li-turmalín, skoryl |
| Mălaia-Ciungetu | 11 | MC1, MC2 | ortorula | A, B, C | živec | živcovina 56-67 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 7,7-9,8 %, $Fe_2O_3$ v surovině 0,59 %, biotitická varieta 2,6 % (lze odseparovat) | K-živec, albit |
| Piatra Albă | 17 | PA | muskovitový pegmatit | A, B, C | živec | živcovina 67 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 8,4 %, $Fe_2O_3$ surovina 1,07 % | albit |
| | | | | | beryllium | surovina 49 g/t Be | beryl |
| | | | | | slída | příměs v hlavní surovině (odhad) | muskovit |
| Přibyslavice | 29 | Prb | granit až ortorula | A, B, C, D | živec | živcovina 55 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 7,5 %, $Fe_2O_3$ surovina 0,97 %, po magnetickém čištění 0,29 % | albit, K-živec |
| | | | | | cín | 0,02 % Sn | kasiterit |
| Răzoare-Ciungi | 22 | Raz2-1 | muskovitový pegmatit | A, B, C | živec | živcovina 69 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 10,9 %, $Fe_2O_3$ surovina 0,32 % | K-živec, albit |
| | | | | | slída | příměs v hlavní surovině | muskovit |
| | | Raz2-2 | turmalinický pegmatit | A, B, C | bor | příměs v hlavní surovině | turmalín (skoryl) |
| | | Raz3 | metamanganolit | A, B, C | Fe, Mn | 31,4 $Fe_2O_3$, 51,7 % MnO | Mn silikáty a karbonáty |
| Řečice | 27 | RE30 | lithný pegmatit | A, B, C, D, E | živec | živcovina 57 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 8,3 %, $Fe_2O_3$ surovina 1,2-1,4 %, po magnetickém čištění 0,53 % | K-živec, albit |
| | | | | | cín | surovina 0,60 % Sn, těžká frakce: 8,2 % Sn, 17 % kasiteritu | kasiterit |
| | | | | | arsen | surovina 0,49 % As, 5,1 % As a 23 % löllingitu v těžké frakci | löllingit |
| | | | | | bor | turmalín 44 % v těžké frakci, 30 % v magnetické frakci | skoryl, Li-turmalín |

| Modelová lokalita | Pasport lokality | Vzorek | Horninový typ | Provedené kroky | Hodnocení | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | užitková složka | obsah užitkových složek | hlavní nositel |
| Rožná | 25 | ROZ-1, ROZ-2 | lithný pegmatit | A, B, C, D, E | lithium, rubidium, cesium | v surovině 0,33-1,1 % $Li_2O$, 0,11-0,37 % $Rb_2O$, 0,01-0,03 % $Cs_2O$; lepidolit 30 % v magnetické frakci, Li-turmalín 62 % v těžké frakci | lepidolit, Li-turmalín |
| | | | | | cín | v surovině 0,04-0,10 % Sn, v těžké frakci 5,5 % Sn a 13 % kasiteritu | kasiterit |
| | | | | | bor | turmalín 66 % v těžké frakci, 10 % v magnetické frakci | Li-turmalín, skoryl |
| Smolné Pece | 32 | SMP-1 | turmalinický pegmatit | A, B, C | bor | příměs v hlavní surovině | skoryl |
| | | | | | živec | živcovina 77 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 11,6 %, $Fe_2O_3$ v surovině 2,4 % - lze snížit separací turmalínu | K-živec, albit |
| | | SMP-2 | živcový pegmatit | A, B, C, D | živec | živcovina 68 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 10,0 %, $Fe_2O_3$ surovina 0,49 %, po magnetickém čištění 0,23 % | K-živec, albit |
| Vernéřov | 34 | Ver, VerII | pegmatit, montebrasitový pegmatit | A, B, C, D, E | lithium, rubidium | 1,1 % $Li_2O$, 0,21 % $Rb_2O$, montebrasit 86 % v těžké frakci, 15 % v magnetické frakci | montebrasit |
| | | | | | cín | surovina 0,1 % - 1,25 % Sn, v těžké frakci 2,6 % Sn, 2,5 % kasiteritu, stannin/kesterit 3,3 % v těžké frakci, 1,5 % v magnetické frakci | kasiterit, stannin/kesterit |
| Vištérica | 2 | Vst-1, Vst-2, Vst-3 | živcový pegmatit | A, B, C, D | živec | živcovina 58-64 %, UQ $Na_2O+K_2O$ 8,2-12,6 %, $Fe_2O_3$ surovina 0,2-0,7 %, po magnetickém čištění 0,05-0,12 % | K-živec, albit |
| | | | | | slída | příměs v hlavní surovině | flogopit |

Poznámky k tabulce:

| | |
|---|---|
| CHA | akreditovaná chemická analýza |
| UQ | bezstandardová XRF analýza v režimu Uniquant |
| % | obsahy v hmotnostních procentech |
| živcovina | do obsahu živcové substance není započten teoretický vápenatý živec |

## 3 Novosti postupů a jejich zdůvodnění

Metodika stanovující postupy laboratorní testace horninových vzorků pegmatitových a příbuzných typů hornin zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků doposud neexistovala. Z tohoto hlediska se jedná o metodiku zcela novou.

V rámci České republiky předkládaná metodika navazuje na certifikovanou metodiku „Hodnocení využitelnosti silikátových složek a vzácných prvků na ložiskách pegmatitového typu a příbuzných typů“, která je dalším výstupem projektu PEGMAT.

## 4 Uplatnění certifikované metodiky

Granitické horniny, které prošly intenzivním magmaticko-hydrotermálním vývojem, jsou významným zdrojem průmyslově důležitých silikátových surovin (živce, křemen) a některých surovin vzácných prvků (především Li, Be, Nb, Ta, Sn, W), z nichž je většina v rámci zemí EU považována za kritické suroviny. Uvedená metodika popisuje laboratorní postup testování horninových vzorků s ohledem na jejich obsahy a získatelnost silikátových surovin a minerálů s obsahy vzácných prvků. Implementace do pracovních a rozhodovacích procesů konečných uživatelů přispěje ke kvalifikovanému hodnocení nerostných zdrojů spojených s řešeným typem magmatických hornin.

## 5 Ekonomické aspekty

Implementace metodiky neznamená žádné dodatečné finanční náklady. Metodika naopak přináší časovou, ekonomicky ovšem nevyjádřitelnou úsporu.

# 6 Seznam použité související literatury

Beneš B. a kol. (2008): Metodický pokyn MŽP ZP14/2008 ke vzorkování odpadů.

Černý R., Jedlička P., Křenková E. (2024): Vzorkování silikátových hornin. In: Vzorkování IV-2 průmysl, 167-178. Vyd. Ing. Václav Helán-2 THETA Český Těšín. 277 s.

ČSN 01 5111 Vzorkování sypkých a zrnitých materiálů.

ČSN 72 1073 Stanovení délkových změn keramických surovin sušením a pálením.

ČSN 72 1089 Stanovení absolutní bělosti keramických surovin.

ČSN 72 5010 Stanovení nasákavosti, zdánlivé pórovitosti, pórovitosti, objemové hmotnosti a zdánlivé hustoty vypálených keramických směsí a výrobků.

ČSN EN 14899 Charakterizace odpadů - Vzorkování odpadů - Zásady přípravy programu vzorkování a jeho použití.

Dill H. G. (2015): Pegmatites and aplites: Their genetic and applied ore geology. Ore Geology Reviews 69: 417–561.

Hanykýř V., Kutzendörfer J. (2000): Technologie keramiky. Vega Hradec Králové. 287 s.

Jirásek J., Sivek M., Láznička P. (2017): Ložiska nerostů. Online http://geologie.vsb.cz/ložiska/suroviny/index.html.

Lhotský P. a kol. (2023): Souhrnná výzkumná zpráva řešení projektu výzkumu perspektivních minerálních plniv a křemenných surovin v Českém masivu, jejich úpravy a využití pro moderní průmyslové aplikace. Projekt TITSMPO031. TA ČR.

London D. (2008): Pegmatites. Canadian Mineralogist Special Publication, 10, 368 s.

PD-SOP-111 Příjem, příprava a zacházení se vzorky. Standardní operační postup. Laboratoř KMK GRANIT, Krásno.

PD-SOP-113 Chemická analýza rentgenfluorescenčním spektrometrem a výpočet kovů z naměřených hodnot - SiO2, Al2O3, Fe2O3, TiO2, CaO, MgO, K2O, Na2O, P2O5, Cs, Cu, Mn, Nb, Rb, Sn, Ta, W, Zn, živcovina, sumy alkálie (K2O + Na2O), poměr alkálií (K2O/Na2O), Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mg, K, Na, P. Standardní operační postup. Laboratoř KMK GRANIT, Krásno.

PD-SOP-114 Stanovení ztráty žíháním. Standardní operační postup. Laboratoř KMK GRANIT, Krásno.

PD-SOP-117 Kolorimetrické stanovení barevnosti a bělosti. Standardní operační postup. Laboratoř KMK GRANIT, Krásno.

Ševčík J. G. K. a kol. (2010): Vzorkování I – obecné zásady. Vyd. Ing. Václav Helán-2 THETA Český Těšín. 130 s.

Tvrdý J., Kovářová J., Krátký O., Havránek J., Opekar L., Starý J. (2022): Metodika identifikace akumulací strategických komodit a podmínek využitelnosti strategických nerostných surovin. Projekt Horninové prostředí a nerostné suroviny SS02030023. Dílčí cíl 1.4. Program č. 6 Prostředí pro život. TA ČR.

# 7 Seznam projektů a výsledků předcházejících metodice

Přímou či nepřímou návaznost na řešený projekt mají níže uvedené projekty a výsledky výzkumu, experimentálního vývoje a inovací, které byly podpořeny z veřejných prostředků České republiky (výběr fulltextového vyhledávače TA ČR Starfos).

7AMB14AR006: Granitické pegmatity z Argentiny a České republiky; indikátory geologického vývoje a zdroje „high-tech“ prvků: prohloubení odborné spolupráce vědeckých skupin v Argentině (CONICEF, Mendoza) a ČR (Masarykova univerzita, Brno), mineralogické studium granitických pegmatitů a jejich minerálů. MŠMT 2014 – 2015.

FR-TI1/294: Výzkum nových výskytů živcových hornin v Českém masivu a jejich prùmyslové aplikace. MPO 2009-2012.

GA19-05198S: Greisenizace a albitizace - geologické procesy s potenciálem koncentrovat některé kritické suroviny pro moderní technologie. GA ČR 2019 – 2022.

GA205/04/0942: Komplexní mineralogická studie pegmatitu "Weisse Stein" u Lázní Kynžvartu aneb lokalita slavná přesto neznámá: komplexní mineralogicko-geologický výzkum jednoho z největších pegmatitových těles na území České republiky, zhodnocení materiálu institucionálních i soukromých sbírkových fondů. GA ČR 2004 – 2006.

GA205/96/0855: Přechod magmatické a hydrotermální fáze v komplexních pegmatitech a její vztah k chemickému složení okolních hornin: experimetální a terénní výzkum komplexních (Li) pegmatitů. GA ČR 1996 – 1998.

GF15-34621L: Postkolizní plutonická aktivita v jihozápadní části Českého masivu: analýza geotektonických příčin a zdroje tepla pozdně variských granitoidních plutonů. GA ČR 2015 – 2019.

ME 364: Distribuce prvků a minerálů vzácných zemin v topazových granitech Saxothuringika. MŠMT 2000 – 2002.

SS02030023: Horninové prostředí a nerostné suroviny. TA ČR 2020 – 2026.

TE02000029: Centrum kompetence efektivní a ekologické těžby nerostných surovin. TA ČR 2014 – 2019.

TITSMPO702: Analýza nových výskytů prvků vzácných zemin. TA ČR 2019 – 2021.

TITSMPO031: Výzkum perspektivních minerálních plniv a křemenných surovin v Českém masivu, jejich úpravy a využití pro moderní průmyslové aplikace. TA ČR 2021 – 2023.

# 8 Přílohy metodiky

Příloha 1: Rešeršní studie k nerostným surovinám

Příloha 2: Přehled pegmatitů v oblasti výzkumu (rešeršní studie)

Příloha 3: Pasporty studovaných lokalit

Příloha 4: Přehled testovaných vzorků a provedených analýz

Příloha 5: Fotografická dokumentace testovaných vzorků

Příloha 6: Úvodní chemické analýzy

Příloha 7: Zkoušky silikátových složek

Příloha 8: Zkoušky ostatních užitkových složek

Příloha 9: Laboratorní protokoly

# Příloha 1
# Rešeršní studie k nerostným surovinám

| | |
|---|---|
| Program: | Epsilon |
| Název projektu: | Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů |
| Název projektu anglicky: | Evolved magmatic and pegmatitic systems as sources of critical raw materials and industrial minerals |
| Číslo projektu TAČR: | TH79020002 |
| Číslo projektu ERA-MIN 3: | JTC-2021_174 |
| Řešitelské organizace: | Masarykova univerzita<br>G E T s.r.o.<br>K M K GRANIT, a.s. |
| Doba řešení: | 5/2022 - 4/2025 |
| Důvěrnost a dostupnost: | veřejně přístupný |


Řešitelský tým:

Jan Cempírek (Masarykova univerzita)

Milan Novák (Masarykova univerzita)

Radek Škoda (Masarykova univerzita)

Jaromír Tvrdý (G E T s.r.o.)

Petr Hanzlík (G E T s.r.o.)

Ondřej Krátký (G E T s.r.o.)

Ondřej Sysel (G E T s.r.o.)

Jitka Kovářová (G E T s.r.o.)

Pavel Jedlička (K M K GRANIT, a.s.)

Emília Křenková (K M K GRANIT, a.s.)

Pavel Tatýrek (K M K GRANIT, a.s.)

Autoři studie: Jaromír Tvrdý
Ondřej Krátký
Ondřej Sysel
Petr Hanzlík
Jan Cempírek

Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON je zaměřen zejména na zlepšení pozice českého a v globálním kontextu i evropského průmyslu pomocí podpory projektů spadajících do kategorie aplikovaného výzkumu (zahrnuje průmyslový výzkum, experimentální vývoj nebo jejich kombinaci), jejichž výsledky mají vysoký potenciál pro rychlé uplatnění v nových produktech, výrobních postupech a službách. Poskytovatelem finančních prostředků je Technologická agentura ČR.

# Obsah

1 Úvodní informace ..... 7
2 Lithium ..... 8
2.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 8
2.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 9
2.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 10
2.4 Ložiska v České republice ..... 11
2.5 Produkce a spotřeba ..... 11
2.6 Genetické typy ložisek ..... 14
2.7 Metody těžby a úpravy ..... 16
2.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 18
2.9 Reference ..... 18
3 Beryllium ..... 20
3.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 20
3.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 20
3.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 21
3.4 Výskyty v České republice ..... 22
3.5 Produkce a spotřeba ..... 22
3.6 Genetické typy ložisek ..... 24
3.7 Metody těžby a úpravy ..... 26
3.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 27
3.9 Reference ..... 28
4 Niob a tantal ..... 30
4.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 30
4.2 Průmyslová aplikace a trh ..... 30
4.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 33
4.4 Výskyty v České republice ..... 34
4.5 Produkce a spotřeba ..... 34
4.6 Genetické typy ložisek ..... 35
4.7 Metody těžby a úpravy ..... 37
4.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 40
4.9 Reference ..... 40
5 Cín ..... 42
5.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 42
5.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 43
5.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 43
5.4 Ložiska v České republice ..... 45
5.5 Produkce a spotřeba ..... 46
5.6 Genetické typy ložisek ..... 46
5.7 Metody těžby a úpravy ..... 49
5.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 50
5.9 Reference ..... 51
6 Wolfram ..... 54
6.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 54
6.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 56
6.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 56
6.4 Ložiska v České republice ..... 56
6.5 Produkce a spotřeba ..... 59
6.6 Genetické typy ložisek ..... 60
6.7 Metody těžby a úpravy ..... 62
6.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 63

6.9 Reference....64
7 Bismut....66
7.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře....66
7.2 Průmyslové aplikace a trh....67
7.3 Hlavní ložiska ve světě....68
7.4 Výskyty v České republice....70
7.5 Produkce a spotřeba....70
7.6 Genetické typy ložisek....71
7.7 Metody těžby a úpravy....74
7.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení....74
7.9 Reference....75
8 Prvky vzácných zemin....77
8.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře....77
8.2 Průmyslové aplikace a trh....78
8.3 Hlavní ložiska ve světě....79
8.4 Výskyty v České republice....80
8.5 Produkce a spotřeba....80
8.6 Genetické typy ložisek....81
8.7 Metody těžby a úpravy....85
8.8 Těžba a úprava ložisek iontově adsorpčních, reziduálních a lateritových ložisek....88
8.9 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení....89
8.10 Reference....90
9 Skandium....92
9.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře....92
9.2 Průmyslové aplikace a trh....93
9.3 Hlavní ložiska ve světě....94
9.4 Výskyty v České republice....96
9.5 Produkce a spotřeba....96
9.6 Genetické typy ložisek....97
9.7 Metody těžby a úpravy....99
9.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení....100
9.9 Reference....100
10 Rubidium a cesium....102
10.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře....102
10.2 Průmyslové aplikace a trh....102
10.3 Hlavní ložiska ve světě....103
10.4 Výskyty v České republice....103
10.5 Produkce a spotřeba....105
10.6 Genetické typy ložisek....105
10.7 Metody těžby a úpravy....106
10.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení....106
10.9 Reference....107
11 Titan....108
11.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře....108
11.2 Průmyslové aplikace a trh....109
11.3 Hlavní ložiska ve světě....112
11.4 Výskyty v České republice....113
11.5 Produkce a spotřeba....113
11.6 Genetické typy ložisek....114
11.7 Metody těžby a úpravy....116
11.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení....118
11.9 Reference....118

12 Zirkonium a hafnium ..... 120
12.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 120
12.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 122
12.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 123
12.4 Výskyty v České republice ..... 124
12.5 Produkce a spotřeba ..... 125
12.6 Genetické typy ložisek ..... 125
12.7 Metody těžby a úpravy ..... 127
12.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 129
12.9 Reference ..... 130
13 Uran a thorium ..... 132
13.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 132
13.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 134
13.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 134
13.4 Ložiska v České republice ..... 135
13.5 Produkce a spotřeba ..... 136
13.6 Genetické typy ložisek ..... 137
13.7 Metody těžby a úpravy ..... 140
13.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 141
13.9 Reference ..... 142
14 Živec ..... 143
14.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 143
14.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 146
14.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 146
14.4 Ložiska v České republice ..... 147
14.5 Produkce a spotřeba ..... 148
14.6 Metody těžby a úpravy ..... 150
14.7 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 153
14.8 Reference ..... 153
15 Křemen ..... 154
15.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 154
15.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 154
15.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 155
15.4 Ložiska v České republice ..... 156
15.5 Produkce a spotřeba ..... 157
15.6 Genetické typy ložisek ..... 158
15.7 Metody těžby a úpravy ..... 161
15.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 162
15.9 Reference ..... 162
16 Slída ..... 164
16.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 164
16.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 165
16.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 166
16.4 Výskyty v České republice ..... 167
16.5 Produkce a spotřeba ..... 167
16.6 Genetické typy ložisek ..... 168
16.7 Metody těžby a úpravy ..... 169
16.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 171
16.9 Reference ..... 171
17 Keramická aditiva (lepidolit, spodumen, amblygonit/montebrasit, nefelín) ..... 173
17.1 Průmyslové aplikace a trh ..... 176
17.2 Hlavní ložiska ve světě ..... 177

17.3 Ložiska v České republice ..... 179
17.4 Produkce a spotřeba ..... 179
17.5 Genetické typy ložisek ..... 180
17.6 Metody těžby a úpravy ..... 181
17.7 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 182
17.8 Reference ..... 182
18 Abraziva – granát, korund a zirkon ..... 183
18.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 183
18.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 186
18.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 189
18.4 Ložiska v České republice ..... 191
18.5 Produkce a spotřeba ..... 191
18.6 Genetické typy ložisek ..... 192
18.7 Metody těžby a úpravy ..... 194
18.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 196
18.9 Reference ..... 196
19 Bor a boráty ..... 197
19.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 197
19.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 199
19.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 201
19.4 Výskyty v České republice ..... 201
19.5 Produkce a spotřeba ..... 202
19.6 Genetické typy ložisek ..... 202
19.7 Metody těžby a úpravy ..... 203
19.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 204
19.9 Reference ..... 205
20 Fluorit a kryolit ..... 206
20.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 206
20.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 206
20.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 207
20.4 Ložiska fluoritu v České republice ..... 210
20.5 Produkce a spotřeba ..... 210
20.6 Genetické typy ložisek ..... 211
20.7 Metody těžby a úpravy ..... 213
20.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 215
20.9 Reference ..... 215
21 Fosfáty v magmatických horninách ..... 217
21.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře ..... 217
21.2 Průmyslové aplikace a trh ..... 217
21.3 Hlavní ložiska ve světě ..... 218
21.4 Výskyty v Českérepublice ..... 219
21.5 Produkce a spotřeba ..... 219
21.6 Genetické typy ložisek ..... 222
21.7 Metody těžby a úpravy ..... 222
21.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení ..... 223
21.9 Reference ..... 224

# 1 Úvodní informace

Rešeršní studie k nerostným surovinám byla zpracována v rámci projektu „Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů“ jako jeden z podkladů ke kompletaci dvou hlavních výstupů, kterými jsou certifikované metodiky, které na sebe úzce navazují a v obecných kapitolách se překrývají:

- CM1 Certifikovaná metodika laboratorní testace vzorků pegmatitů hornin zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků.
- CM2 Certifikovaná metodika hodnocení využitelnosti silikátových složek a vzácných prvků na ložiskách pegmatitového typu a příbuzných typů.

Z tohoto důvodu je rešeršní studie k nerostným surovinám zařazena jako příloha obou metodik. V souladu se záměrem projektu je zaměřena na nerostné suroviny, které se mohou ve studovaném horninovém prostředí vyskytovat v ekonomicky významných akumumacích:

- rudy kritických surovin a dalších vzácných prvků: lithium, beryllium, niob a tantal, cín (není CRM), wolfram, bismut, prvky vzácných zemin spolu s yttriem, skandium (vyčleněno mimo REE), rubidium a cesium, titan, zirkonium a hafnium, uran a thorium;
- průmyslové nerosty: živec (od r. 2023 je CRM), křemen (CRM jako křemíkový kov), slída (muskovit, lepidolit), abraziva (granát, korund, zirkon), omezeně pak bor/boráty, fluor (minerál kryolit), fosfor/fosfáty (těžená ložiska apatitu v alkalických syenitech).

Řešerše navazuje na podobné práce zpracované v rámcí projektů TA ČR, přičemž některé údaje jsou přímo převzaty, jiné doplněny a nově aktualizovány:

- TE02000029 Centrum kompetence efektivní a ekologické těžby nerostných surovin: Stanovení obecných limitních ukazatelů pro využitelnost ložisek a zdrojů nerostných surovin v ČR.
- SS02030023 Horninové prostředí a nerostné suroviny: Metodika identifikace akumulací strategických komodit a podmínek využitelnosti strategických nerostných surovin.

# 2 Lithium

## 2.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Lithium (z řeckého lithos – kámen) bylo poprvé identifikováno jako prvek v roce 1817 Johannem Arfvedsonem při studiu minerálu petalitu. Izolovat se jej poprvé podařilo v roce 1855.

Lithium je nejlehčí alkalický kov a nejlehčí prvek (kromě prvků za běžných podmínek plynných), je sříbřitě šedé, s kovovým leskem. Je velmi měkké, stejně jako ostatní alkalické kovy. Snadno reaguje s vodou (byť méně energicky než jiné alkalické kovy). V kontaktu s kyslíkem je hořlavé, je-li vystaveno vlhkému vzduchu, může se vznítit. V přírodě se lithium v elementární formě nevyskytuje. Základní charakteristiky lithia jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 1. *Základní charakteristika lithia jako prvku. Zdroj: BGS (https://www.bgs.ac.uk /mineralsuk/statistics/mineralProfiles.html).*

| Symbol | Li | |
|---|---|---|
| Atomic number | 3 | |
| Atomic weight | 6.94 | |
| Density in solid form @20°C | 534 | kg $m^{-3}$ |
| Melting Point | 180.54 | °C |
| Boiling Point | 1342 | °C |
| Crystal Structure | Body centred cubic | |
| Hardness | 0.6 | Mohs scale |
| Electrical resistivity | 9.5 | mΩ cm |
| Thermal conductivity | 85 | W $m^{-1}$ $K^{-1}$ |

Lithium je v horninách přítomno většinou ve stopovém množství. Jeho průměrné zastoupení (klark) v zemském plášti je cca 1,6 ppm, oceánská kůra obsahuje průměrně 4,3 ppm Li. Průměrné zastoupení lithia ve svrchní zemské kůře je odhadováno na 17 – 20 ppm, v horninách běžných na povrchu Země je tedy méně hojné než měď, ale hojnější než olovo, cín nebo stříbro. Ekonomicky nejvýznamnějšími minerály pegmatitových ložisek jsou alumosilikáty lithia spodumen a petalit a draselno-lithný alumosilikát lepidolit. Hlavním zdrojem lithia v ložiskách sedimentárního původu je jílový minerál hectorit.

Tabulka 2. *Hlavní minerály tvořící ekonomicky využitelná ložiska lithia. Zdroj: BGS. (https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk /statistics/mineralProfiles.html ).*

| Mineral name | Chemical formula | Lithium content (Li %) | Appearance (colour and lustre) |
|---|---|---|---|
| Spodumene | $LiAlSi_2O_6$ | 3.7 | White, colourless, grey, pink, lilac, yellow or green; vitreous |
| Lepidolite | $K_2\{Li,Al\}_{5-6}\{Si_{6-7}Al_{2-1}O_{20}\}(OH,F)_4$ | 1.39–3.6 | Colourless, grey/white, lilac, yellow or white; vitreous to pearly |
| Petalite | $LiAlSi_4O_{10}$ | 1.6–2.27 | Colourless, grey, yellow or white; vitreous to pearly |
| Eucryptite | $LiAlSiO_4$ | 2.1–5.53 | Brown, colourless or white; vitreous |
| Amblygonite | $LiAl[PO_4][F,OH]$ | 3.4–4.7 | White, yellow or grey; vitreous to pearly |
| Hectorite | $Na_{0.3}(Mg,Li)_3Si_4O_{10}(OH)_2$ | 0.54 | White, opaque; earthy |
| Jadarite | $LiNaSiB_3O_7(OH)$ | 7.3 | White; porcellanous |

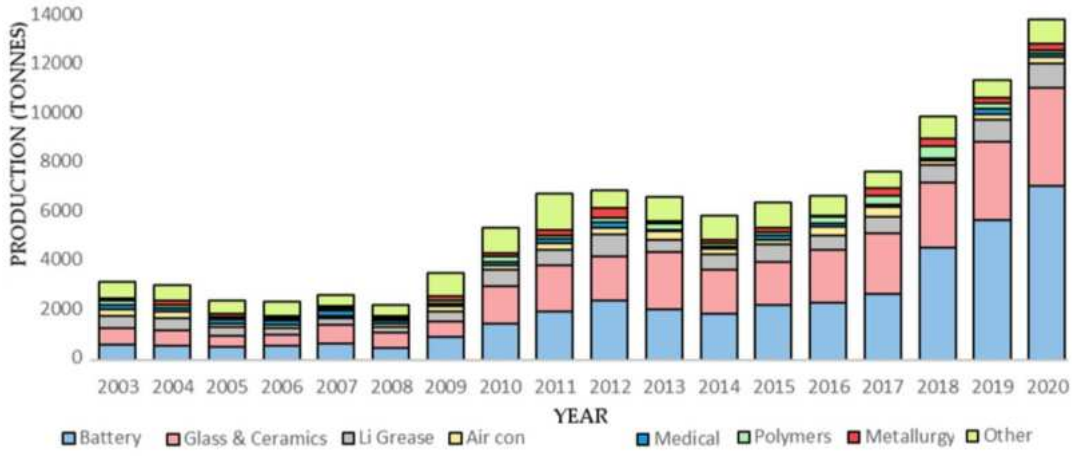
## 2.2 Průmyslové aplikace a trh

Lithium má mnohostranné využití v oblasti moderních ekologicky šetrných technologií, což vedlo k zařazení tohoto kovu do seznamů nerostných surovin kritických pro další rozvoj jednotlivých států (EU, USA, aj.). V současné době má největší (a stále rostoucí) význam využití lithia v bateriích pro spotřební elektroniku (mobilní telefony, notebooky aj.) a pro elektromobily a auta s hybridním pohonem. Lithium nachází využití také ve sklářském a keramickém průmyslu. Příměs oxidu lithného ve sklářském kmeni snižuje teplotu tání a viskozitu taveniny a zvyšuje pevnost výrobků a jejich odolnost vůči teplotním změnám. Přídavek lithia v některých keramických hmotách snižuje teplotní roztažnost výrobků. Lithium je také součástí glazur a smaltů. Ve formě stearátů a podobných sloučenin se lithium přidává se do širokého spektra průmyslových maziv. V metalurgii se lithium používá jako přísada do licích prášků. Lehké slitiny lithia s hliníkem mají využití v leteckém průmyslu a kosmonautice. Chlorid a bromid lithia, které velmi účině absorbují vodu, jsou využívány k vysoušení a chlazení vzduchu ve vzduchotechnických zařízeních. Menší část světové spotřeby lithia se užívá v procesu elektrolytické výroby hliníku. V medicíně nachází uplatnění v preparátech pro psychiatrii a také v zubní keramice. Lehčí izotop lithia $^{6}$Li lze použít k výrobě tritia pro jaderné zbraně.

Tabulka 3. *Spotřeba lithia v jednotlivých průmyslových odvětvích v roce 2020 (https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/ statistics/mineralProfiles.html)*

| | |
|---|---|
| Baterie | 35 % |
| Keramika a sklo | 32 % |
| Maziva | 9 % |
| Licí prášky | 5 % |
| Vzduchotechnika | 5 % |
| Výroba polymerů | 4 % |
| Výroba hliníku | 1 % |
| Ostatní | 9 % |

Z hlediska udržitelného rozvoje je nejvýznamnější použití lithia pro akumulátory, které umožňují využívat pro pohon automobilů obnovitelné zdroje energie namísto fosilních paliv. Lze předpokládat, že s dalším technologickým vývojem v této oblasti bude v blízké budoucnosti světová spotřeba lithia stoupat a poroste zájem o těžbu ložisek tohoto kovu.




Obrázek 1. *Průmyslové využití lithia v letech 2003-2020. Zdroj: Kavanagh et al., 2018.*

Na světovém trhu se lithium uplatňuje ve formě minerálních koncentrátů, sloučenin a upraveného kovu. Minerální koncentráty (nejčastěji koncentráty spodumenu, případně petalitu a lepidolitu) pochází převážně z pegmatitových ložisek a nachází uplatnění při výrobě skla a keramiky. Sloučeniny lithia (obvykle uhličitan lithný, chlorid lithný nebo hydroxid lithný) jsou získávány především ze solanek. Kovové lithium se získává elektrolýzou chloridu lithného.

Tabulka 4. *Vývoj ceny lithiumkarbonátu v USA. Zdroj: USGS-MCS.*

| Rok | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|---|---|---|---|---|---|
| Průměrná roční cena za 1 tunu (USD) | 12 100 | 8 600 | 12 600 | 68 100 | 46 000 |

## 2.3 Hlavní ložiska ve světě

Z hlediska současné produkce lithia mají největší význam solanky v bezodtokých pánvích v tektonicky aktivních aridních oblastech. Podzemní vody v těchto podmínkách mohou obsahovat rozpuštěné lithium v koncentracích v řádu prvních tisíců ppm. Světově nejvýznamnější oblast s výskytem kontinentálních evaporitů má celkový rozsah kolem 400,000 $km^2$ a zahrnuje severozápadní Argentinu, západní Bolívii a severní Chile. Z hlediska současné produkce lithia je nejvýznamnějším ložiskem Salar de Atacama v Chile, zaujímající plochu kolem 3 000 $km^2$. Další oblast s výskytem solanek se nachází na západě USA. Ložisko Clayton Valley (Silver Peak) ve státě Nevada je těženo od roku 1966. Jedná se o pánev o rozloze 83 $km^2$, na východě omezenou zlomem. Ložisko je prozkoumáno do hloubky cca 300 m. Je tvořeno nejméně šesti samostatnými zvodněmi, vyplněnými solankami. Zásoby se odhadují na 0,3 Mt lithia.

Druhý nejvýznamnější typ představují specifické typy pegmatitů a granitů, obohacené vzácnými prvky včetně lithia. Hlavní rudou Li je zde minerál spodumen. Podíl ostatních typů ložisek na světových zásobách a světové produkci je podstatně menší. V následujícím textu jsou podrobněji uvedeny všechny genetické typy. Z pegmatitových ložisek jsou nejvýznamnější Greenbushes v Austrálii, distriktu Araçuaí v Brazílii (kde se nachází množství samostatných pegmatitových těles), Quebec Lithium a Tanco v Kanadě, Jadar v Srbsku. Souhrně je popisuje tabulka níže.

Tabulka 5. *Genetické typy ložisek lithia. Zdroj: BGS. (https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/mineralProfiles.html).*

| | Deposit type | Brief description | Typical grade | Examples |
|---|---|---|---|---|
| **Minerals** | Pegmatites | Coarse-grained igneous rock formed during late-stage crystallisation of magmas | 1.5–4% $Li_2O$ | Greenbushes, Australia; North Carolina, USA; Bikita, Zimbabwe |
| | Hectorite | Lenses of smectite clay in association with volcanic centres | 0.4% $Li_2O$ | Kings Valley, Nevada, USA; Sonora, Mexico |
| | Jadarite | Altered sediments in an enclosed basin | 1.5% $Li_2O$ | Jadar, Serbia |
| **Brines** | Continental | Salt pans or salars in enclosed basins with lithium enrichment likely to be from hot springs | 0.04–0.15% Li | Clayton Valley, USA; Salar de Atacama, Chile; Salar de Hombre Muerto, Argentina |
| | Geothermal | Elevated levels of lithium contained in steam at geothermal power stations | 0.01–0.035% Li | Salton Sea area, California, USA |
| | Oilfield | Elevated levels of lithium contained in waters or brines produced in oilfields | 0.01–0.05% Li | Smackover oilfield, Arkansas, USA |

## 2.4 Ložiska v České republice

***Greiseny***

ČR má v současnosti největší evidované zdroje (v české terminologii se jedná o geologické zásoby) lithia v zemích EU. Klíčovou ložiskovou oblastí je revír Cínovec, kde v komplexních primárních Li-Sn-W rudách greisenového typu bilancováno téměř 1 128 kt geologických zásob Li. EMH udává ještě vyšší celkové zdroje (resources) 1 359 kt Li, z čehož je přes 104 kt zásob (reserves). Spolu s ložiskem Zinnwald na německé straně, které s greisenovými ložisky revíru Cínovec tvoří jeden ložiskový objekt, má území potenciál 1 261, resp. 1 492 kt lithia. To činí Cínovec nejen největším evropským ložiskem, ale i jedním z největších světových ložisek lithia v pevných horninách (mimo Li solanky).

***Pegmatity***

Z území České republiky jsou známy pegmatity s obsahem minerálů lithia. Jedná se však o výskyty, které nejsou vzhledem k malému rozsahu vhodné k průmyslovému využití. Výjimkou je nyní již vytěžené ložisko u Rožné (okres Žďár nad Sázavou), kde bylo v období let 1792 až 1944 (s mnoha přerušeními) jako zdroj lithiových rud dobýváno pegmatitové těleso. Těženou rudou byl lepidolit. Poslední etapa těžby probíhala za druhé světové války. Ložiskový průzkum prováděný v 50. letech 20. století prokázal vyčerpání ložiska. Podobně bez ekonomického významu je patrně také lokalita Vernéřov u Aše, odkud z pegmatitového žilníku s pneumatolytickou Sn-mineralizací uvádějí Stuchlíková a Frolíková (1988) sumární obsah 77 t Li-kovu.

***Solanky***

Výskyty silně mineralizovaných vod se zvýšeným obsahem lithia a dalších prvků jsou známy z limnických permokarbonských pánví ve středních Čechách. Tyto výskyty nebyly zkoumány cíleně jako možné zdroje Li a Br, ale pouze okrajově v souvislosti s ložiskovými průzkumy na uhlí a s hydrogeologickými průzkumy.

Nejlépe je prozkoumána oblast je v místech výskytu ložiska černého uhlí Slaný (B3160700). Vyšší koncentrace lithia a bromu se většinou nacházejí ve více mineralizovaných vodách spodní karbonské napjaté zvodně v hloubce kolem 1 000 m pod terénem. V těchto silně mineralizovaných vodách (solankách) typu Na-Cl bylo zjištěno až 87 g/l rozpuštěných látek. Nejvyšší zjištěný obsah lithia byl 49,97 mg/l, nejvyšší koncentrace bromu 466 mg/l.

Pro dobývací prostor ložiska Slaný byl zpracován odhad zdroje solanek s obsahem Li a Br. Je zde odhadováno celkem 453,6 mil. m³ podzemní vody, obsahující 123 kt bromu, 15 kt lithia a více než 18 Mt NaCl. Tento odhad však není evidován jako prognózní zdroj. Oblast výskytu silně mineralizovaných vod v permokarbonských kolektorech je mnohonásobně větší (zahrnuje i pokračování permokarbonských sedimentů pod českou křídovou pánví), ale útržkovité údaje zatím neumožňují tento zdroj kvantifikovat.

## 2.5 Produkce a spotřeba

Hlavními světovými producenty lithia jsou Austrálie, Chile, Čína a Argentina. Světové zásoby této suroviny se zdají dostatečné a rozložené po všech kontinentech. Z níže vedené grafiky je

patrné, že s českými cinvalditovými ložisky se ve světě dosud nepočítá. Naproti tomu surovinová ročenka České geologické služby (Starý et al. 2023) uvádí pro Českou republiku zásoby 1 138 kt Li.

Celosvětové zdroje lithia jsou vázány na tyto genetické typy ložisek (USGS 2017):

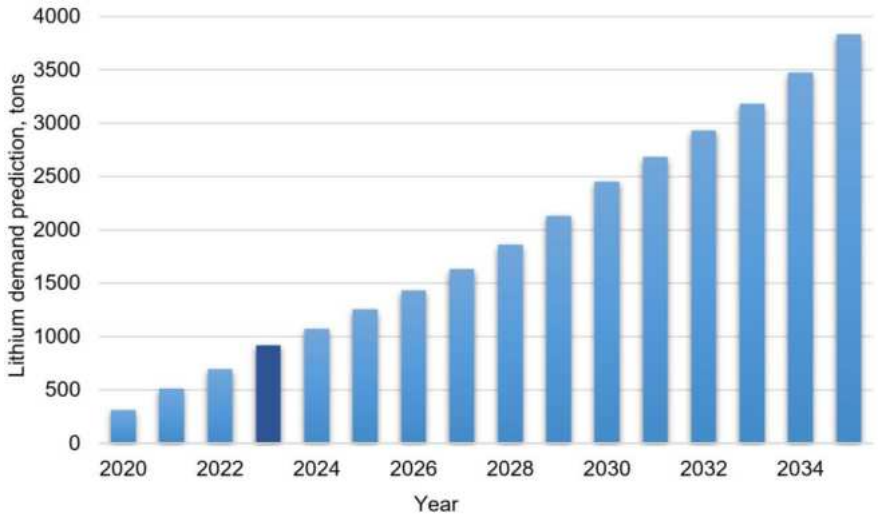
- solanky v uzavřených pánvích (closed-basin brines) .....58 %
- pegmatity a granity (pegmatites and related granites) .....26 %
- lithiem bohaté jíly (lithium-enriched clays) .....7 %
- ropné solanky (oilfield brines) .....3 %
- geotermální solanky (geothermal brines) .....3 %
- lithiem bohaté evapority (lithium-enriched evaporites) .....3 %

Obrázek 2. *Zásoby a zdroje lithia ve světě. Zdroj: https://dailybrief.oxan.com.*

Tabulka 6. *Světové zásoby a zdroje lithia v roce 2022 podle ročenky České geologické služby. Zdroj: Starý et al., 2023.*

| Země | t Li | % svět |
|---|---|---|
| Chile | 9 300 000 | 34,6 |
| Austrálie | 6 200 000 | 23,0 |
| Argentina | 2 700 000 | 10,0 |
| Čína | 2 000 000 | 7,4 |
| Česká republika* | 1 138 330 | 4,2 |
| Kanada | 930 000 | 3,5 |
| Zimbabwe | 310 000 | 1,2 |
| Brazílie | 250 000 | 0,9 |
| Portugal | 60 000 | 0,2 |
| **svět** | **26 914 000** | **100,0** |

Vzhledem k neutuchajícím snahám o rozvoj zelené energie a eletromobility a s tím spojená nutnost ukládání elektrické energie se předpokládá další růst spotřeby lithia.




Obrázek 3. *Předpokládaný vývoj světové spotřeby lithia (Lozhnikov et al. 2024).*

## 2.6 Genetické typy ložisek

### Pegmatity a vysoce diferencované granity

Pegmatity jsou poměrně běžné vyvřeliny, ale pouze asi 0,1 % pegmatitů obsahuje zvýšené koncentrace vzácných kovů. Pegmatitů, které mohou být zdroji lithia, je ještě méně. Za ekonomicky využitelný se u pegmatitů považuje obsah $LiO_2$ kolem 0,6 %, což odpovídá 0,28 % Li. K lithiu se obvykle druží další prvky, které mohou značně ovlivňovat celkovou rentabilitu těžby. Jedná se zejména o cín, beryllium, tantal a niob (Kesler et al. 2012).

Nejvýznamnější rudou lithia v pegmatiech je spodumen ($LiAl(SiO_3)_2$)). Amblygonit $LiAlPO_4(F,OH)$ a montebrasit $LiAlPO_4(OH)$ jsou poměrně rozšířené, ale jen zřídka tvoří ekonomicky využitelné akumulace. Méně obvyklé jsou petalit a eukryptit $LiAlSiO_4$. Perspektivním minerálem je lithná slída lepidolit $KLi_2AlSi_4O_{10}F_2$. Pegmatity jsou často zonální, s vnějšími zónami bohatými živcem, středními zónami s obsahem minerálů REE a křemenem bohatým jádrem. Extrémně velké krystaly lithiových minerálů jsou vázány na diferencované pegmatity. Pegmatity jsou nejhojnější v hluboce erodovaných, středně až silně metamorfovaných terénech. Intrudovaly obvykle v souvislosti s deformací a metamorfózou okolních hornin nebo následně. Často se objevují při okrajích rozsáhlých granitoidních intruzí, často v jejich nadloží. V území s výskytem lithných pegmatitů bývají přítomny také hluché pegmatity. Jsou-li pegmatity geneticky spjaty s intruzivními tělesy, lithné pegmatity se obvykle nachází nejdále od intruze.

Zdrojem lithiových rud mohou být také některé typy slídnatých granitů obohacené lithiem, tantalem, cínem a fluorem. Tato ložiska se charakterem mineralizace podobají některým lithným pegmatitům a v pracích o zdrojích lithia často nejsou od těchto pegmatitů rozlišovány.

Na pegmatitovém ložisku Greenbushes v Austrálii byly v roce 2021 (IGO ASX Release, 29 July, 2022) reportovány v hornině vyhledané zásoby o kovnatosti 1,5 % $Li_2O$.

Obrázek 4. *Ložisko Greenbushes v Austrálii. www. thewest.com.au.*

## Ostatní typy ložisek

### *Solanky*

Většina těchto ložisek je vázána na bezodtoké pánve v geologicky mladých terénech v aridních podmínkách. Díky převaze odpařování nad srážkami zde vznikají uloženiny evaporitů. Světově nejvýznamnější oblast příhodná pro vznik lithiem bohatých solanek leží v centrálních Andách na území Chile, Bolívie a Argentiny. Další rozsáhlá oblast s obdobnými podmínkami se nachází v Číně, méně významné jsou oblasti na západě USA a na severu Afriky. Evapority těchto kontinentálních pánví mají oproti mořským evaporitům značně variabilní chemické složení a lokální obohacení lithiem je zde pravděpodobnější. Názory na původ lithia v solankách se různí. Za pravděpodobné zdroje jsou považovány zvětrávání kyselých vulkanitů, geotermální aktivita nebo magmatická tělesa v podloží pánví. Složení solanek ovlivňují také interakce s horninovým prostředím. V následujícím textu uvádíme nejvýznamnější světové oblasti s výskytem solanek obohacených lithiem a charakteristiky vybraných ložisek.

Solanky z hlubších partií ropných ložisek mohou obsahovat lithium v řádu až stovek ppm. Poměrně dobře prozkoumány jsou např. ropné solanky, obsažené v sedimentech formace Smackover na jihu USA (Collins in Kesler et al. 2012). Mísy byla zjištěna koncentrace lithia až 692 mg/l. Tyto solanky vyplňují póry cca 200 m mocné polohy vápenců, která se nachází v hloubkách mezi 1 800 a 4 800 m pod povrchem. Předpokládá se, že jde o mořskou vodu, tektonicky uvězněnou v sedimentech a následně obohacenou lithiem a některými stopovými prvky (Garrett in Kesler et al. 2012). Ropné solanky mají jako zdroj lithia oproti solankám bezodtokých pánví dvě hlavní nevýhody – obvykle se nachází ve velkých hloubkách a často se vyskytují v klimatických oblastech, kde nelze odpařování efektivně využít sluneční energii.

Rovněž solanky využívané jako zdroj geotermální energie mohou obsahovat lithium a další cenné prvky. K získávání lithia se využívají např. v oblasti Salton Sea při mexicko-kalifornské hranici.

### *Lithiem bohaté jíly*

Asi 7 % dosud známých světových zdrojů lithia je vázáno na tento typ ložisek. Lithiem obohacené jíly jsou mezi jílovitými horninami Země poměrně vzácné. K obohacení jílů lithiem (a také hořčíkem a fluorem) došlo díky geotermálním procesům. Hlavním minerálem těchto ložisek je hectorit – silikát sodíku, hořčíku a lithia, jílový minerál ze skupiny smektitu, obsahující 0,5 % Li ($Na_{0,3}(Mg,Li)_3Si_4O_{10}(OH)_2$). Hectorit byl pojmenován podle ložiska v Kalifornii, které vzniklo hydrotermální alterací vulkanického popela, uloženého v jezerním prostředí. Jsou však známy také zvýšené obsahy lithia v jílových minerálech ze skupiny illitu a ve směsích illitu a smektitu.

Nejvýznamnější dosud objevené ložisko hectoritu King Valley se nachází v Nevadě v USA, ve vulkanickém komplexu kaldery McDermitt. Těžba ještě nebyla zahájena, ale ekonomická upravitelnost suroviny je prokázána.

Jíly s obsahem lithia byly a jsou těženy na jiných místech USA (Arizona, Kalifornie, Nevada), ale nikoli za účelem získávání lithia. Tyto jíly jsou pro své fyzikální vlastnosti používány jako přísady do vrtných výplachů, nátěrových hmot a kosmetiky.

Ložisko je tvořeno vrstvami hectoritu v sedimentárních horninách a tufech na západní straně kaldery. Hectoritové vrstvy o mocnosti 1 až 90 m byly zjištěny v oblasti o délce kolem 20 km a šířce několik km. Zásoby ložiska (proven and probable reserves) jsou odhadovány ve výši 27 Mt při průměrném obsahu 0,395 % Li (tj. 0,1 Mt lithia).

***Lithiem bohaté evapority***

Jediné známé ložisko tohoto typu je známo z neogenních (miocénních) sedimentů Srbska. Jezerní uloženiny pánve Jadar obsahují bitumenní břidlice, karbonáty, evapority a tufy. Tyto sedimenty byly překryty polohami s vysokým obsahem jadaritu (borosilikát lithia $LiNaB_3SiO_7(OH)$) o mocnosti několika metrů. Množství lithia, odhadované na ložisku Jadar, představuje asi 3 % světových zásob Li (Evans in Kesler et al. 2012).

## 2.7 Metody těžby a úpravy

***Úprava lithiových rud z pegmatitů a granitů***

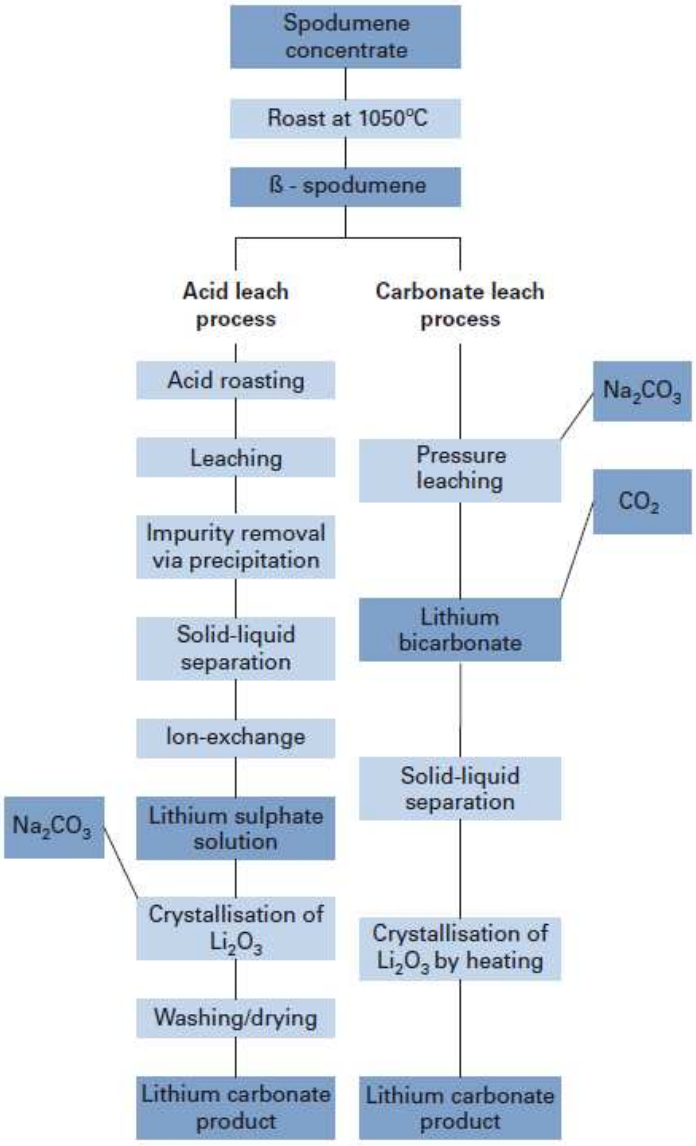
Hlavní užitkovou složkou v pegmatitech je zpravidla spodumen. Ložiska vázaná na pevné horniny jsou dobývána buď povrchovým (open pit), nebo hlubinným (underground) způsobem, obdobně jako ložiska jiných rud. U mělce uložených ložisek (obvykle do 100 m pod povrchem) bývá efektivnější povrchová těžba. Po odstranění skrývky se hornina s obsahem lithiové rudy těží v několika etážích, obvykle s využitím clonových odstřelů. Rubaninu odebírají nakladače nebo rypadla a automobily ji převáží k dalšímu zpracování. U hlouběji uložených ložisek bývá efektivnější hlubinné dobývání. Přístup k ložisku zajišťují důlní díla (štoly, svislé nebo úklonné jámy). Vlastní těžba probíhá s využitím trhacích prací. Dopravu rubaniny zajišťuje důlní železnice nebo pásové dopravníky. V některých případech je výhodné oba postupy kombinovat.

Prvním stadiem úpravy lithiových rud je fyzikální proces, zahrnující drcení a mletí rubaniny a separaci rudních minerálů od hlušiny s využitím rozdílných fyzikálních vlastností. Používá se zejména flotace, separace v těžkých kapalinách a magnetická separace. V kombinaci s fyzikálními procesy úpravy se někdy používá také chemických procesů (odstraňování nečistot pomocí kyselin).

Rudní koncentrát získaný fyzikálními metodami se dále chemicky zpracovává na sloučeniny lithia nebo na kovové lithium.

Spodumenový koncentrát, z něhož se vyrábí uhličitan lithný, obvykle obsahuje 6 – 7 % $Li_2O$, což odpovídá 75 – 87 % obsahu spodumenu. Koncentráty pro keramický průmysl obsahují obvykle cca 7,6 % $Li_2O$ a musí splňovat i další požadavky. Přírodní monoklinický α-spodumen se obtížně rozpouští. Vlastní chemické úpravě proto předchází vypálení koncentrátu v peci při teplotě 1050 °C po dobu cca 15 minut.

Za těchto teplot monoklinický α-spodumen konvertuje na tetragonální β-spodumen, z něhož lze lithium získat chemickým procesem, buď kyselým loužením (acid leaching) nebo karbonátovým procesem (carbonate leaching). Konečným produktem je v obou případech uhličitan lithný (viz schéma na obrázku).




Obrázek 5. *Obecné technologické schéma zpracování spodumenového koncentrátu na uhličitan lithný. Zdroj: BGS (https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/mineralProfiles .html).*

Při jiném způsobu se spodumenová ruda se smísí s jemně mletým vápencem a zahřeje se na 900 až 1 000°C. Dochází ke kalcinaci vápence a současně ke konverzi α-spodumenu na β-spodumen, který následně reaguje s vápnem za vzniku vápenatého silikátu a oxidu lithného. Vzniklý slínek se rozdrtí, rozemele a louhuje se horkou vodou. Vzniká hydroxid lithný, který se odděluje, promývá a suší. Hydroxid lithný může být finálním produktem nebo se z něj reakcí s HCl vyrábí chlorid lithný.

### *Úprava solanek*

Solanky obsahují poměrně málo lithia. Prvním krokem úpravy je proto vždy jejich koncentrace odpařováním z nádrží na povrchu terénu. Obsah lithia odpařováním narůstá až k hodnotě 6 000

ppm (nasycený roztok chloridu lithného). Takto koncentrovaný roztok, který kromě lithia může obsahovat zvýšené obsahy boru a hořčíku, je odváděn z nádrží do úpravny. Bor se odděluje pomocí kerosinu a následně se zpracovává na vedlejší produkty (boráty a kyselinu boritou). Hořčík je nutné odstranit přidáním uhličitanu sodného, což vede ke vzniku uhličitanu hořečnatého. Následuje vysrážení uhličitanu lithného. Ten se filtruje a promývá a nakonec suší. Výsledkem je uhličitan lithný. Proces úpravy solanek se liší dle složení a konkrétních podmínek daného ložiska. Nejpříznivější podmínky se vyskytují v oblasti solných jezer v Jižní Americe a náhorních plošin v Tibetu.

Lithium může být získáváno i jako vedlejší produkt ze solanek na ložiscích ropy (oilfield brines) nebo zdrojích geotermální energie (geothermal brines), Umístění a provedení vrtů se zcela podřizuje jejich primárnímu účelu (těžba ropy a zemního plynu, získávání geotermální energie).

## 2.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Pro hodnocení geologických celků z hlediska potenciálu k zajištění ekonomicky využitelných zásob a pro posuzování výpočtů zásob vyhrazených nerostů v České republice byly v rámci projektu TA ČR „Horninové prostředí a nerostné suroviny“ (SS02030023) navrženy následující limitní ukazatele (Tvrdý et al. 2022):

Velikost ložiska:

- minimální množství zásob ..... min. 2 000 t Li-kovu

Minimální obsah lithia na ložisku:

- bilanční zásoby ..... 0,20 hm. % Li-kovu
- nebilanční zásoby..... 0,10 hm. % Li-kovu

Konkrétní ložiskový objekt obsahuje zpravidla více užitkových složek a musí být posuzován komplexně s ohledem na ekonomiku využití všech obsažených komodit. Je tedy možné, že výsledné limity se budu lišit od ukazatelů zde navrhovaných.

## 2.9 Reference

Kavanagh, L., Keohane, J., Garcia Cabellos, G., Lloyd, A., Cleary, J. 2018. Global lithium sources - industrial use and future in the electric vehicle industry: a review. Resources 7(3), 57; https://doi.org/10.3390/resources7030057.

Kesler, S. E., Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Everson, M. P., Wallington ,T. J. 2012. Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. Ore Geology Reviews 48, 55-69.

Lozhnikov, O., Pavlychenko, A., Shustov, O., Dereviahina, N. 2024. Prospects for the lithium deposits development in Ukraine. E3S Web of Conferences 526, 01001 (2024).

sine (2017): Industrial Minerals – Lithium Prices; http://www.indmin.com /Lithium.html.

sine (2018a): European Metals Holding Limited – Annual Report 30 June 2018; https://www.investi.com.au/api/announcements/emh/3254b74c-ec0.pdf.

sine (2018b): Lithium Price Spotlight – Battery-grade Lithium Spot Prices. Metal Bulletin; https://www.metalbulletin.com/lithium-prices-update.html.

sine (2018c): Zinnwald Lithium Project; http://www.bacanoraminerals.com/projects/zinnwald-lithium/.

sine (2018d): Lithium Element Facts; http://www.chemicool.com/elements/lithium.html.

Starý, J., Sitenský, I., Mašek, D., Gabriel, Z., Němec, M., Hodková, T., Vaněček, M., Novák, J., Kavina, P. 2023. Surovinové zdroje České republiky. 484 s. MŽP, ČGS.

Stuchlíková, K., Frolíková, I. 1988. Inventarizace československých zdrojů vzácných prvků na ložiskách nerostných surovin. In: Sitenský I. (ed.): Možnosti intenzifikace využití vybraných přírodních zdrojů ČSSR. Zpráva o vědecko-výzkumné činnosti v letech 1986-1987, 38-55. Ústav geologických věd PřFUK, Praha (GF P061859).

Tvrdý, J., Kovářová, J., Krátký, O., Havránek, J., Opekar, L., Starý, J. 2022. Metodika identifikace akumulací strategických komodit a podmínek využitelnosti strategických nerostných surovin. Projekt Horninové prostředí a nerostné suroviny SS02030023. Dílčí cíl 1.4. Program č. 6 Prostředí pro život. TA ČR.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 3 Beryllium

## 3.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Beryllium (Be) je nejlehčí z řady kovů alkalických zemin. Je to tvrdý, šedý kov o vysoké teplotě tání (1 287 °C). Velmi dobře propouští rentgenové záření a ionizující záření gama. Beryllium a jeho soli jsou mimořádně toxické. Beryllium bylo poprvé objeveno francouzským chemikem Vauquelinem v roce 1798 v minerálu berylu. Kovové beryllium bylo poprvé izolováno v roce 1828.

Beryllium je litofilní prvek, který se vyskytuje v zemské kůře v koncentracích 1 až 3 ppm (Ryan 1999). Malá velikost $Be^{2+}$ (35 pm) způsobuje, že Be se chová nekompatibilně během magmatické frakcionace. Tato skutečnost a také nestabilita komplexů Be při vysokých teplotách zapříčiňuje, že Be se koncentruje ve vysoce vyvinutých granitech a pegmatitech. (Ure a Berrow 1982).

Beryllium je nejvíce zastoupeno v berylu $Al_2Be_3Si_6O_{18}$ (14 % BeO) a v bertranditu $Be_4Si_2O_7(OH)_2$ (42 % BeO). Nejedná se však o hlavní nositele Be v kůře. Tím jsou slídy, a to převážně muskovit, přestože samotné koncentrace Be v těchto minerálech jsou velmi nízké (Wedepohl 1978).

Minerály Be lze rozdělit geneticky do několika skupin:

- primární (magmatické, metamorfní),
- hydrotermální (vzniklé z hydrotermálních roztoků),
- sekundární (vzniklé pozdní hydrotermální alteraci primárních minerálů vzniklých při magmatických, metamorfních či hydrotermálních procesech).

***Beryl***

Beryl nejčastěji vzniká z kyselých granitických magmat bohatých těkavými prvky (pegmatity, albitity, greiseny, granity, aplity). Největší koncentrace berylu jsou typické pro žulové draselné až draselno-sodné pegmatity. Vzácněji se vyskytuje v ryolitech, skarnech, greisenech, metamorfovaných horninách (svorech) nebo na alpských žilách. Díky své mechanické a chemické odolnosti se beryl může koncentrovat i ve zvětralinách a náplavech.

***Bertrandit***

Je alteračním produktem berylu v některých pegmatitech nebo bývá sekundárním minerálem na Sn-W žilách. Může být přítomen i na žilách alpského typu. Za specifických podmínek bývá vázán na ryolity a jejich tufy, ve kterých se také nachází hlavní ložiska bertranditu (Spor Mountain, Utah, USA).

## 3.2 Průmyslové aplikace a trh

Beryllium je vyhledávaným kovem hojně používaným v metalurgii. V mnoha slitinách je nenahraditelné, např. slitina mědi s 2 % beryllia tvoří tzv. berylliový bronz, který se pevností a houževnatostí vyrovná nejkvalitnější nemagnetické oceli, jelikož přidání beryllia zvyšuje tvrdost mědi až pětkrát. Vyrábí se z něj také hodinová pera a struny, které ani při vyšších

teplotách neztrácejí pružnost. Nástroje s obsahem beryllia při úderu nejiskří, proto se používají např. v dolech a ponorkách.

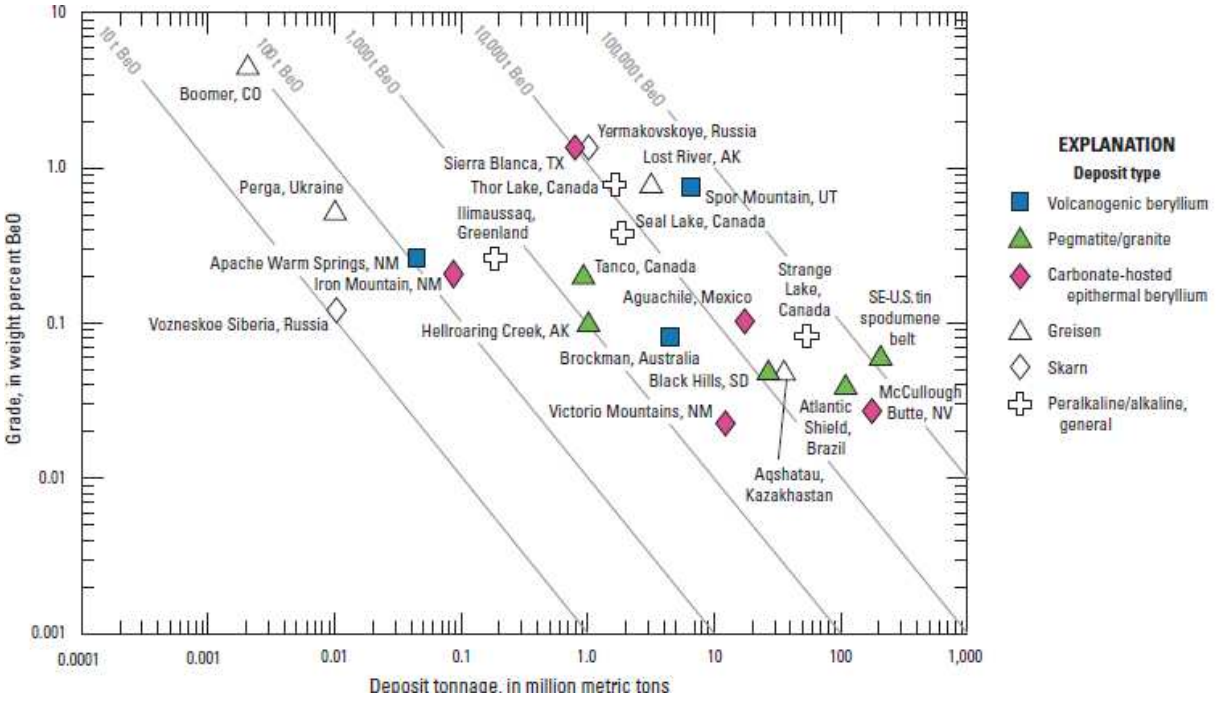
Beryllium je velmi jedinečné z hlediska tepelné vodivosti a tepelné kapacity – obě vlastnosti má, ve srovnání s jinými prvky a materiály, velmi vysoké. Díky tomu se používá tam, kde je nutný odvod tepla v kombinaci s nízkou hmotností (např. v leteckém a raketovém průmyslu). Beryllium je průhledné pro rentgenové záření, a proto se používá jako materiál pro okna v přístrojích využívající rentgenové záření, například ve zdravotnictví.

Beryllium se přidává také do manganových, hliníkových a titanových slitin pro výrobu namáhaných součástí letadel a raket. Ze slitiny niklu s berylliem se vyrábí injekční jehly a chirurgické nástroje.

Beryllium je také využíváno při stavbě jaderných reaktorů, jelikož je účinným neutronovým moderátorem a reflektorem. Oxid BeO se používá na lisování žáruvzdorných tyglíků, které odolávají teplotě do 2 500 ºC. Také se používá jako katalyzátor při výrobě některých organických látek (Jones et al., 2017).

## 3.3 Hlavní ložiska ve světě

Celosvětové zásoby beryllia se odhadují na více než 80 000 tun (Jaskula 2013). Přibližně 65 % z nich se nachází v ložiscích bertranditu v USA, zbytek v berylových ložiscích ve zbytku světa. Na obrázku níže jsou pro srovnání vyneseny obsahy beryllia a tonáže ložisek vulkanogenních, pegmatitových, karbonátových a greisenových. Světové zásoby beryllia nejsou dostatečně dobře prozkoumány, níže jsou tedy uvedena jen ložiska a lokality, pro které existují alespoň částečně věrohodné údaje.




Obrázek 6. *Kovnatosti a tonáže pro světová ložiska beryllia (Foley et al. 2017).*

Mezi významná pegmatitová ložiska, kde se beryl získává spolu s dalšími minerály, se řadí: Bernick Lake (Kanada), Black Hills (USA), Bikita (Zimbabwe), Malakialina (Madagaskar), Něrčinsk (Rusko), Daran-Pich (Afghánistán), Travancore (Indie).

Metasomatická ložiska tělesa jsou tvořená ponejvíce bertranditem, dále pak fenakitem, helvínem. Patří mezi ně Sil Lake (Kanada), Spor Mountain a Gold Hill (USA), poloostrov Seward (USA).

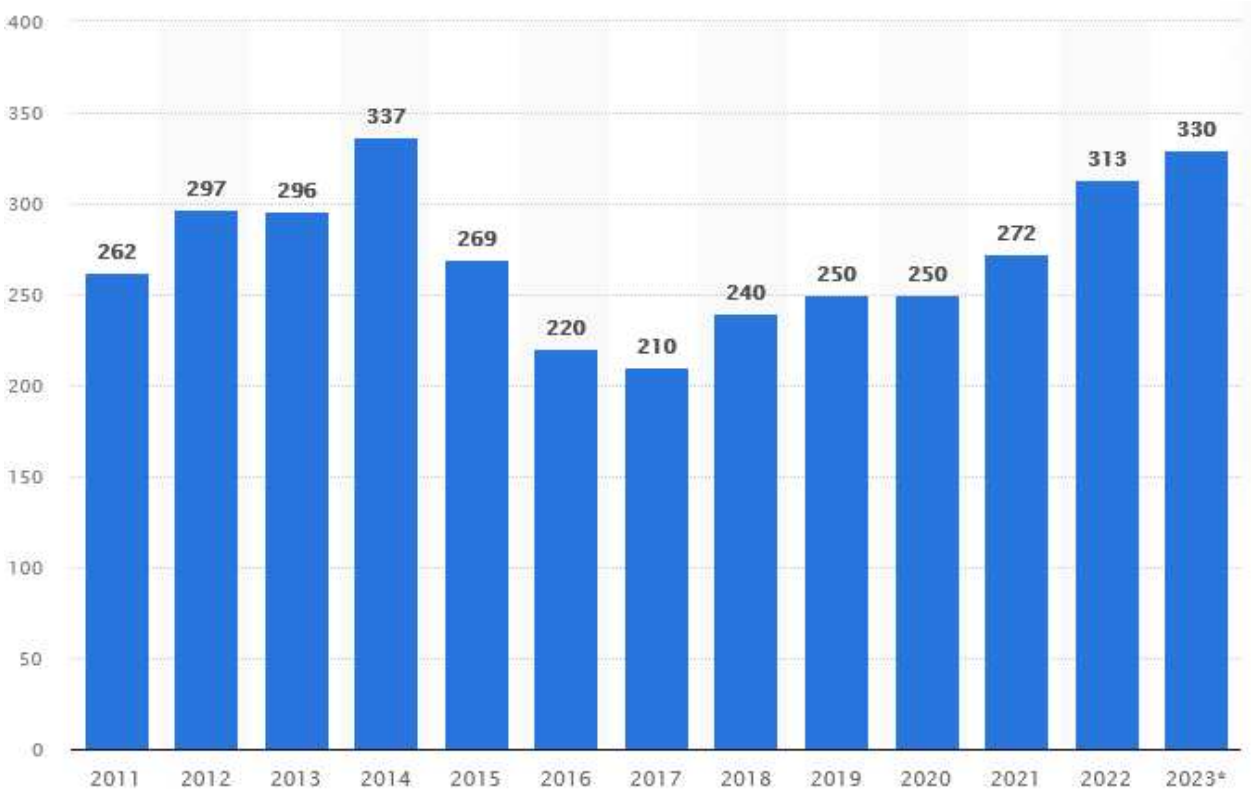
## 3.4 Výskyty v České republice

Dle České geologické služby se (k roku 2023) na území ČR nevyskytují žádná ložiska a zdroje beryllia. Beryl se nachází na více lokalitách, a to jak v pegmatitech (Nový rybník, Údražský obrázek), Otov, Meclov, Lázně Kynžvart, Maršíkov (Střelecký důl), Nová Ves u Českého Krumlova, Jeclov, Puklice, tak i v Sn-W křemenných žilách v Horním Slavkově-Krásně a v alpských žilách (Skály u Rýmařova).

Bertrandit je znám z pegmatitů v okolí Písku (Obrázek, Horní Novosedly) a na lokalitách Rudolfov, Maršíkov-Střelecký důl, Lázně Kynžvart, Rožná atd.

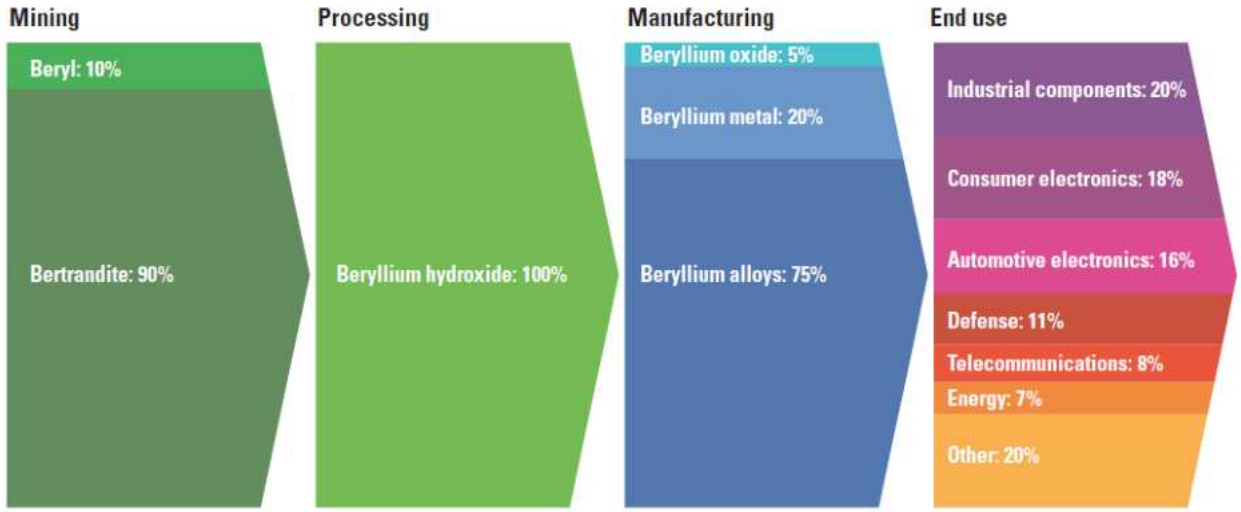
## 3.5 Produkce a spotřeba

Spojené státy jsou největším světovým producentem beryllia, jehož produkce se v roce 2023 odhaduje na 190 tun, zatímco Čína byla druhým největším producentem s produkcí 74 tun.




Obrázek 7. *Vývoj světové produkce beryllia v letech 2011-2023. Zdroj Statista.com*

Spojené státy, Kazachstán a Čína jsou jediné známé země, které zpracovávají berylliové rudy a koncentráty na berylliové výrobky.




Obrázek 8. *Zjednodušený diagram beryliového průmyslu. Procenta jsou vztažena k celkovému objemu beryllia v každé fázi. Nezohledňují ztráty mezi jednotlivými fázemi, změny zásob nebo recyklaci (Materion Corporation, 2016).*

Z obrázku je patrné, že hlavní vstupní surovinou je bertrandit (převážně z ložiska Spor Mountain, Utah, USA), přestože berylu se celosvětově vytěží víc. Je to dáno tím, že velká část berylu se nezpracovává na výrobu beryllia, ale používá se ve v surovém stavu (např. ve šperkařství).

Mezi země s aktivní průmyslovou těžbou berylu patří Čína, Madagaskar, Mozambik, Namibie, Uganda a Zambie. Z historického hlediska byly kdysi významnými producenty Be rudy Argentina, Indie a několik zemí subsaharské Afriky.

Tabulka 7. *Vývoj světové produkce berylu (údaje v tunách). Zdroj: World mineral production 2018–2022 (BGS).*

| Country | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|
| Madagascar (a) | * 16 | * 16 | * 16 | * 16 | * 16 |
| Mozambique | 416 | 45 | 80 | 330 | 1,285 |
| Namibia | ... | ... | ... | 15 000 | 360 |
| Uganda | 24 | 15 | 186 | 473 | * 500 |
| Zambia | 5 | 6 | * 6 | * 3 | * 4 |
| USA (b) | 4 130 | * 4 000 | * 4 130 | * 4 250 | * 4 500 |
| China | 1 725 | 1 750 | * 1 750 | * 1 750 | * 1 750 |

V současnosti jsou ekonomicky významné pegmatity bohaté na lithium, které obsahují i beryl (Bradley a McCauley 2013), a vulkanogenní ložiska bertranditu s velkou tonáží a vysokým obsahem beryllia (Foley et al. 2014).

## 3.6 Genetické typy ložisek

***Ložiska vázaná na magmatické horniny***

Vznik berylliových ložisek bývá nejčastěji spojen s magmatickými procesy (Barton a Young 2002; Černý 2002). Ložiska lze rozdělit na ta spojená s felsickými intruzemi bohatými na vzácné kovy a pegmatitovými tělesy a na ložiska, která vznikají při interakci těchto magmat s okolními horninami.

Vzácnými kovy obohacené plutony a související pegmatitová ložiska obsahující beryl; skarnová a greisenová ložiska obsahující bertrandit, beryl a fenakit; a vulkanogenní a karbonátová ložiska převážně bertrandit.

***Pegmatitová ložiska***

Mnoho plutonů obsahuje menší množství berylu, ovšem pouze pegmatity vzácných kovů obsahují beryl v množství dostatečném pro těžbu. Ačkoli jsou granitové pegmatity rozšířené a relativně běžné, pegmatity vzácných kovů tvoří jen asi 0,1 % z jejich celkového množství (Laznicka 2006). Mezi pegmatity vzácných kovů, které obsahují relativně hojně beryl, patří pegmatity vzácných prvků – lithné a berylové (LCT pegmatity) a miarolitické pegmatity typu topaz-beryl (NYF pegmatity; Černý et al. 2012). Nejvýznamnějšími zdroji průmyslového berylu jsou LCT pegmatity vzácných prvků. Miarolitické NYF pegmatity jsou především zdroji drahokamového berylu. Mnoho pegmatitových oblastí, které jsou nyní v hledáčku těžařů kvůli lithiu a niobu, původně přitahovalo pozornost pro jiné vzácné kovy, zejména beryllium, tantal, cín a průmyslové minerály, jako je živec, slída a vysoce čistý křemen (Glover et al. 2012; Kesler et al. 2012).

Většina granitických LCT pegmatitů je peraluminického složení, které je charakteristické pro granity typu S, které vznikají tavením metamorfovaných pelitických hornin (Černý et al. 2012). LCT pegmatity byly spojovány se subdukčními zónami kvůli vysokému výskytu granitových pegmatitů v orogenních pásech (Martin a De Vito 2005), ačkoli jiní je spojují s posttektonickou fází vývoje v pásech kontinentální kolize (Tkachev 2011). Nicméně geochemický charakter LCT pegmatitů závisí na jejich zdroji – slídou bohatých metamorfovaných hornin. Předpokládá se, že přítomnost rozmanitých volatilních prvků jako jsou bór, fluor a fosfor v metamorfovaných sedimentech má zásadní roli při vzniku LCT pegmatitů, protože mobilizují vzácné kovy, včetně Be, Cs, Nb, Rb, Sn a Ta (Linnen et al. 2012).

Pegmatity vzácných kovů se obvykle vyskytují v aureolách obklopující leukokratní plutony, nebo jako roje, které zasahují do okolních hornin sousedících s těmito intruzemi. Nejkvalitnější ložiska se nacházejí v zonálních pegmatitech, kde se beryl těží z obvykle vysoce frakcionovaných zón a z masivních výplní žil a puklin. Významné pegmatitové revíry pro těžbu berylu se nachází v Brazílii (v údolí Rio Doce a přilehlých oblastech ve státě Minas Gerais, ve městě Campina Grande ve státě Rio Grande do Norte, v Cristais-Berilandia ve státě Ceara a v Rio Jequitinhonha ve státě Minas Gerais), v Portugalsku (v pegmatitovém okrsku Covas do Barroso ve Viseu) a v Mozambiku (v Alto Ligonhain v provincii Zambezia); Kanadě (v dole Bernic Lake Mine - známém jako Tanco Mine - na břehu jezera Bernic Lake v provincii Manitoba; a v dole James Bay (Lithium One) Mine na břehu zálivu James Bay v provincii Quebec); Zimbabwe (v ložisku Bikita v provincii Masvingo); a v Číně (Kesler et al. 2012).

Většina pegmatitových ložisek obsahuje řádově tisíce tun rudy, i když největší z nich obsahují až 1 milion tun. Například ložisko Tanco v Kanadě – silně zonální LCT pegmatit, obsahuje cca 900 000 tun beryliové rudy (Černý 2005).

Za využitelné minerály pegmatitů jsou považovány bavenit, bertrandit, beryl, euklas a fenakit. Mezi nevyužitelné patří minerály ze skupiny gadolinitu a helvínu.

***Skarnová a greisenová ložiska beryllia a fluoru***

Skarnová a greisenová ložiska s obsahem beryllia se vyskytují ve spojení s velkými granitickými a syenitovými plutony nabohacenými vzácnými kovy. Tyto typy ložisek vznikají metasomatickými procesy v kontaktní zóně mezi intrudujícím plutonem a okolními horninami. Hlavní berylliové minerály jsou obvykle beryl, fenakit, bertrandit a minerály helvínové skupiny. Skarny vznikají vysokoteplotní alterací karbonátových hornin a greiseny vznikají metasomatickou přeměnou, většinou granitických, hornin.

Mezi ložiska fluor-beryliových skarnů a greisenů patří ložisko beryliových skarnů Lost River (Alexsandrov 2010), a ložiska na ruském Dálném východě, jako je ložisko Jermakovskoje v oblasti Kižinginského hřbetu v Burjatské republice. Tato ložiska se nacházejí v kontaktních aureolách karbonátových hornin intrudovaných leukokrátními granity bohatými na fluor (Reyf 2008). Beryl, minerály helvínové skupiny a fenakit se zde vyskytují společně s kalcitem, fluoritem, granátem, křemenem, topazem, turmalínem, zinnwalditem a sulfidickými minerály.

***Ložiska beryllia v karbonátových a vulkanických horninách***

Ložiska beryllia se tvoří v sekvencích karbonátových hornin, do kterých pronikají vulkanické horniny. Tyto typy ložisek beryllia se vyskytují například poblíž Sierra Blanca v Texasu a Aguachile v Mexiku. V Sierra Blanca se ložiska fluoritu bohatá na beryllium vyskytují v křídových vápencích pod intruzivním kontaktem s nadložním ryolitem. Ryolitové horniny v Sierra Blanca jsou silně peraluminické a mají anomální obsahy beryllia a fluoru (Rubin et al. 1987, 1988, 1990). Ryolity také obsahují zvýšené množství Li, Nb, Rb, prvků vzácných zemin (REE), Th, Y a Zn. Mineralizace berylu v Aguachile se vyskytuje jako výplň ve vápenci, který byl brekciován v průběhu intruze ryolitu. Bertrandit je hlavním beryliovým minerálem na takovýchto ložiscích.

Ložiska beryllia ve vulkanických horninách (Barton a Young 2002; Foley et al. 2012) vznikají nahrazením karbonátových úlomků v tufu (hornina složená ze zhutněného sopečného popela, skla a úlomků okolních hornin) a ryolitu, který je nabohacen vzácnými kovy, fluorem a dalšími litofilními prvky (Be, Ce, Li, Rb, REE, Sn, Th, Tl a U). Následné hydrotermální procesy jsou schopné loužit beryllium z vulkanického skla a vysrážet ho jako bertrandit, při kontaktu hydrotermálních roztoků s karbonáty v tufu/ryolitu. Je známo pouze malé množství ložisek berylia tohoto typu. Předpokládá se, že velikost a vulkanogenního ložiska beryllia souvisí s rozložením zón bohatých na karbonáty v hostitelském beryliovém tufu a na intenzitě postmagmatických remobilizačních procesů.

Vulkanogenní rudy beryllia se těží ve Spor Mountain v Utahu z podlouhlých čoček v tufech miocenního stáří složených ze skla, popela, úlomků karbonátů a dalších úlomků hornin Bertrandit se zde vyskytuje ve formě submikroskopických zrnek smíšených s jemnozrnným

fluoritem, opálem a kalcitem ve vrstevnatých konkrecích, které nahrazují karbonáty v tufu. Toho ložisek je největším producentem rudy obsahující beryllium na světě.

***Nemagmatická ložiska berylia***

Minerály beryllia se vyskytují také v různých nemagmatických hydrotermálních, metamorfních a sedimentárních prostředích; ve většině případů jsou však tyto výskyty neekonomické. Žilná ložiska vzniklá nahrazením hostitelské horniny nízkoteplotními hydrotermálními roztoky (solankami) s neznámými vazbami na magmatické systémy jsou jedním z klasických zástupců nemagmatických ložisek berylových minerálů. Klasickým příkladem jsou smaragdová ložiska Muzo a Chivor v kolumbijském departementu Boyacá, kde se těží výhradně drahokamový beryl (smaragd) a euklas.

Běžná jsou i ložiska v říčních sedimentech s obsahem berylu, která v minulosti poskytovala jak průmyslovou berylovou rudu, tak drahé kameny (Sinkankas 1981). Ložiska tohoto typu jsou známa ve státě Minas Gerais v Brazílii, na Madagaskaru a Srí Lance. Nemagmatická ložiska mohou být zdrojem průmyslového berylu; většinou se však těží jako pro drahokamové minerály, jako je akvamarín, chryzoberyl, smaragd, euklas, fenakit a tugtupit.

## 3.7 Metody těžby a úpravy

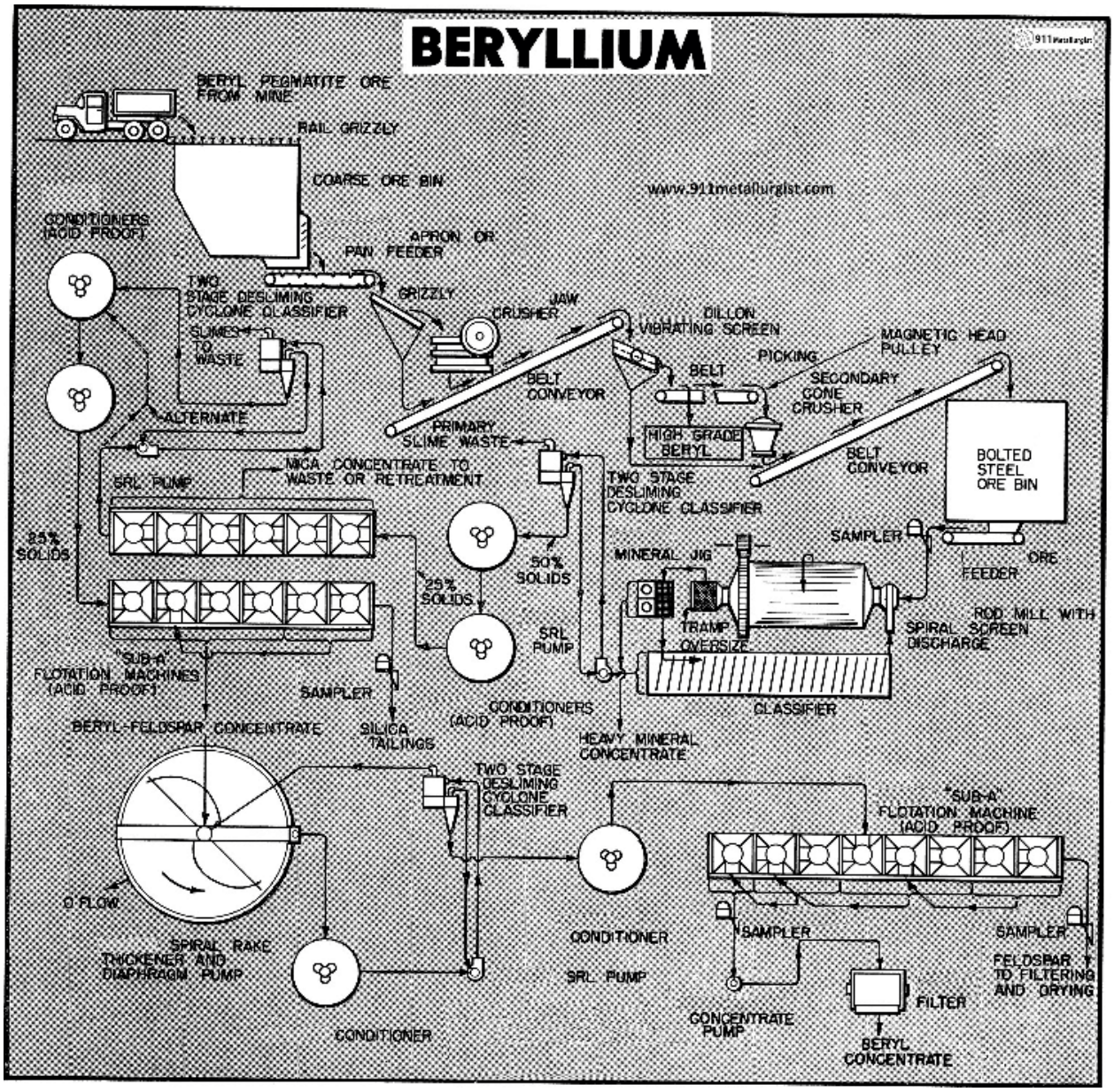
***Berylové rudy***

Beryl se běžně vyskytuje v pegmatitech spolu s minerály, jako jsou slída, živec a křemen. Proces extrakce zahrnuje následující kroky: mletí a třídění (v rámci které dojde i k separaci těžkých minerálů). Následuje flotace, aby se oddělily slídy a živce od berylu. Výsledný koncentrát má standartně cca 8 % BeO (zdroj metallurgist.com). Tento koncentrát je prodáván a je určen k dalšímu zpracování.

Čisté beryllium se získává pražením berylu s $Na_2SiF_6$ při teplotách 700 až 750 °C, následným vyloužením rozpustného fluoridu vodou a srážením $Be(OH)_2$. Beryllium se nejčastěji připravuje redukcí fluoridu berylnatého hořčíkem při teplotě okolo 1300 °C. Druhá nejčastější průmyslová výroba kovové beryllia probíhá elektrolýzou roztaveného chloridu berylnatého a sodného na rtuťové katodě v ochranné argonové atmosféře.

***Bertranditové rudy***

Bertranditová ruda se rozdrtí na prach a smíchá s vodou. Následně se louží s kyselinou sírovou při teplotách blízkých bodu varu. Síranové roztoky se následně pročišťují, až se z nich nakonec získá hydroxid berylnatý. Hydroxid je běžnou vstupní surovinou pro výrobu slitin beryllia s mědí, čistého kovového beryllia a keramiky (Kolanz 2001).




Obrázek 9. *Schéma úpravy berylové rudy z pegmatitových ložisek (metallurgist.com).*

## 3.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Ukazatel minimální kovnatosti suroviny pro hodnocení pegmatitových hornin z hlediska potenciálu k zajištění ekonomicky využitelných zásob lze odvodit z práce Geologické služby USA „Critical mineral resources of the United States - Economic and environmental geology and prospects for future supply“ (Foley et al. 2017).

- minimální obsah beryllia na ložisku .....0,04 hm. %

## 3.9 Reference

Alexsandro, S. M. 2010. Skarn-greisen deposits of the Lost River and Mount Ear ore field, Seward Peninsula, Alaska, United States: Geochemistry International 48, 12, 1220–1236.

Barton, M. D., Young, S. 2002. Non-pegmatitic deposits of beryllium - Mineralogy, geology, phase equilibria and origin, in Grew, E. S., ed., Beryllium - Mineralogy, petrology and geochemistry: Reviews in Mineralogy and Geochemistry 50, 591–691.

Bradley, D., McCauley, A. 2013. A preliminary deposit model for lithium-cesium-tantalum (LCT) pegmatites: U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1008, 7 p.

Černý, P. 2005. The Tanco rare-element pegmatite deposit, Manitoba—Regional context, internal anatomy, and global comparisions, in Linnen, R. I., Samson, I.M., eds., Rare element geochemistry and mineral deposits: St. Johns, Newfoundland and Labrador, Canada, Geological Association of Canada Short Course Notes 17, 127–158.

Černý, P., London, D., Novák, M. 2012. Granitic pegmatites as reflections of their sources. Elements 8, 4, 289–294.

Foley, N. K., Hofstra, A. H., Lindsey, D. A., Seal, R. R., Jaskula, B., Piatak, N. M. 2012. Occurrence model for volcanogenic beryllium deposits, chap. F of Mineral deposit models for resource assessment: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070 –F, 43 p.

Foley, N. K., Jaskula, B. W., Piatak, N. M., Schulte, R. F. 2017. Beryllium, chap. E of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. E1– E32.

Glover, A. S., Rogers, W. Z., Barton, J. E. 2012. Granitic pegmatites—Storehouses of industrial minerals. Elements 8, 4, 269–273.

Jaskula, B. W. 2013. Beryllium. U.S. Geological Survey Mineral Commodity Summaries 2013, 28–29.

Jirásek, J., Sivek, M., Láznička, P. 2017. Ložiska nerostů. Ostrava: Anagram.

Kolanz, M. E. 2001. Introduction to beryllium: uses, regulatory history, and disease. Appl Occup Environ Hyg. 16(5), 559-567.

Laznicka, P. 2006. Giant metallic deposits - Future sourcesof industrial metals: Berlin, Germany, Springer-Verlag, 732 p.

Linnen, R. L., Van Lichtervelde, M., Černý, P. 2012. Granitic pegmatites as sources of strategic metals. Elements 8, 4, 275–280.

Materion Corporation. 2016. Annual report 2015: Mayfield Heights, OH, Materion Corporation, 98 p.

Reyf, F. G. 2008. Alkaline granites and Be (phenakite–bertrandite) mineralization - An example of the Orot and Ermakovka (Yermakovskoye) deposits. Geochemistry International 46, 3, 213–232.

Rubin, J. N., Price, J. G., Henry, C. D., Koppenaal, D. W. 1987. Cryolite-bearing and rare metal-enriched rhyolite, Sierra Blanca Peaks, Hudspeth County, Texas. American Mineralogist 72, 11–12, 1122–1130.

Rubin, J. N., Price, J. G., Henry, C. D., Kyle, J. R. 1990. Geology of the beryllium-rare earth element deposits near Sierra Blanca, Texas: Society of Economic Geologists Field Trip Guidebook, 1990 Annual Meeting, Dallas, Tex., 10 p.

Rubin, J. N., Price, J. G., Henry, C. D., Pinkston, T. L., Tweedy, S. W., Koppenaal, D. W., Peterson, S. B., Harlan, H. M., Miller, W. T., Thompson, R.J., Grabowski, R. B., Laybourn, P. S., Schrock, G. E., Johnson, A., Staes, D. G., Gaines, R. V., Miller, F. H. 1988. Mineralogy of beryllium deposits near Sierra Blanca, Texas, in Torma, A. E., and Gundiler, I. H., eds., Precious and rare metal technologies, Proceedings; Symposium on Precious and Rare Metals, Albuquerque, N. Mex., April 6–8, 1988: Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 601– 614.

Ryan, J. 1999. Beryllium, School of Geosciences Faculty and Staff Publications. 859 p.

Sinkankas, J. 1981. Emerald and other beryls: Radnor, Penn., Chilton Book Co., 665 p.

Tkachev, A. V. 2011. Evolution of metallogeny of granitic pegmatites associated with orogens throughout geologic time, in Sial, A. N., Bettencourt, J. S., and De Campos, C. P., eds., Granite-related ore deposits: Geological Society of London Special Publications 350, 7–23.

Ure, A. M., Berrow, M. L. 1982. The chemical constituents of soils. In: Bowen (ed) Environmental Chemistry R Soc Chem. Burlington House London 2, 94-202.

Wedepohl, K. H. 1969–1978. Handbook of Geochemistry, II-1, Springer Verlag.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny v tabulkách evropských a světových ložisek.

# 4 Niob a tantal

## 4.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

V roce 1801 Charles Hatchett objevil niob/tantal v minerálu columbitu a pojmenoval ho proto columbium. Tantal byl objeven roku 1802 švédským chemikem Andersem G. Ekebergem, čistý prvek byl izolován až v roce 1820 Jönsem Berzeliem. Jméno získal podle bájného krále Tantala z řecké mytologie a je vyjádřením jeho význačné vlastnosti – chemické netečnosti. Později v roce 1844 bylo zjištěno Henrichem Rosem, že columbium/tantal se skládá ze dvou prvků a nový prvek byl pojmenován niob podle dcey krále Tantala – Niobé.

Niob (Nb) je měkký stříbřitě šedý kov, na vzduchu relativně stabilní kvůli tenkému povlaku oxidu niobu, který se tvoří na povrchu. Snadno oxiduje při vysokých teplotách (nad 200 °C), zejména při kontaktu s kyslíkem a halogeny. Niob je inertní vůči studeným kyselinám. Poměrně dobře se rozpouští za tepla v kyselině fluorovodíkové (HF), kyselých roztocích obsahujících fluoridové ionty a snadno se rozkládá alkalickým tavením. V chemických sloučeninách se vyskytuje v mocenství $Nb^{+2}$, $Nb^{+3}$ a $Nb^{+5}$.

Tantal (Ta) je šedý, kujný, velmi pevný kovový prvek, vysoce odolný proti kyselinám, je dobrým vodičem tepla a elektřiny. Při teplotách pod 150 °C je téměř chemicky inertní, nereaguje ani s lučavkou královskou. Má velmi vysokou teplotu tání (3 017 °C). Vyšší bod tání mají pouze wolfram a rhenium. Rozpouští se v kyselině fluorovodíkové (HF), kyselých roztocích obsahujících fluoridové ionty a kapalném oxidu sírovém ($SO_3$). Poměrně snadno se rozkládá alkalickým tavením. V chemických sloučeninách se vyskytuje v mocenství $Ta^{+3}$ a $Ta^{+5}$ (wikipedia.org; MSP-REFRAM 2017).

Výroba čistého niobu a tantalu je značně komplikovaná, protože se v přírodních rudách vyskytují společně a mají i velmi podobné chemické chování a vlastnosti. Obvykle se pro jejich separaci používá krystalizace fluorokoplexů nebo frakční destilace pětimocných chloridů. Po přečištění sloučenin se elementární kovový niob a tantal získávají elektrolyticky.

Niob a tantal jsou na Zemi poměrně vzácné, obsah v zemské kůře se odhadují na 15–25 ppm Nb a 2 ppm Ta. V průměrné kontinentální kůře je niob zastoupen 8 ppm a tantal 0,7 ppm (Rudnick a Gao 2004).

## 4.2 Průmyslová aplikace a trh

***Niob***

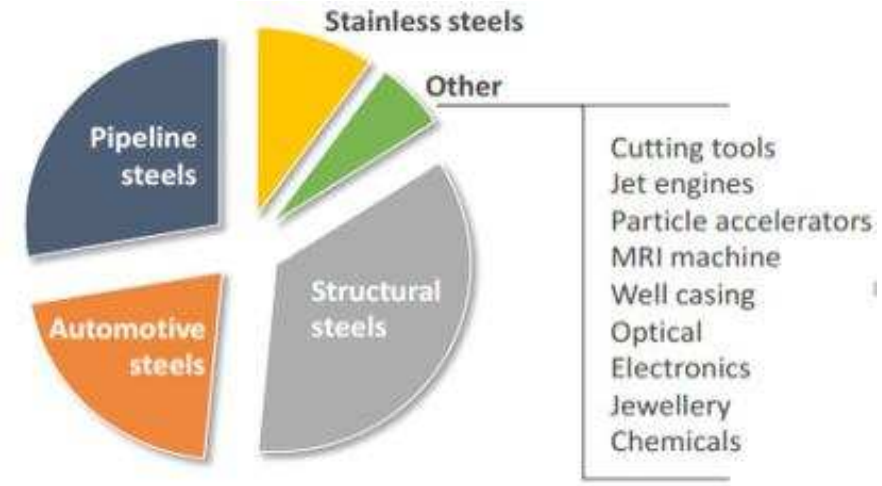
Hlavní použití niobu je ve vysoce pevných nízkolegovaných ocelích (HSLA) s přídavkem feroniobia. Tento trh představuje 90 % využití niobu a je zodpovědný za většinu zvýšení celkové spotřeby. Feroniobium a niklniobium se používají ve speciálních slitinách pro letecký a kosmický průmysl, zejména v komerčních leteckých motorech, stejně jako v plynových turbínách pro výrobu elektřiny a ve slitinách odolných proti korozi. Slitiny niobu s titanem a zirkoniem mají uplatnění v aeronautice, supravodičích a jaderné energetice (MSP-REFRAM 2017).

Tabulka 8. *Hlavní použití niobu. Zdroj: ROSKILL, 2009; MSP-REFRAM, 2017.*

| Form of Nb | Applications | Principal markets | Nb grade |
|---|---|---|---|
| HSLA FeNb | HSLA steels | Automobiles, gas linepipe, construction, heavy engineering | ~0.1% |
| | Stainsless and heat resistant steels | Automobiles, petrochemical and power plants | 0.04-0.08% |
| Vacuum grade FeNb and NiNb | Superalloys | Aircraft engines, electricity generation, petrochemicals | 3-5% |
| Nb metal and alloys | Superconductors | Particle accelerators, magnetic resonance imaging, various small tonnage uses | 45-89% |
| Nb chemicals | Functionnal ceramics and catalysts | Optical, electronics | 21-66% |

Protože je v čistém stavu fyziologicky inertní, používá se niob v klenotnictví a medicíně. Jeho namodralé barvy se využívá ve slitinách pro body-piercing.

Při ochlazení na velmi nízkou teplotu přechází niob do supravodivého stavu. Za atmosférického tlaku je kritická teplota elementárního kovu 9,25 K. Spolu s vanadem a techneciem patří niob mezi jediné tři prvky, které jsou supravodiči II. typu. Jeho slitiny se zirkoniem, cínem, titanem aj. patří také mezi supravodiče II. typu a používají se např. pro výrobu supravodivých magnetů, které jsou schopné vyrobit velmi silné magnetické pole (wikipedia.org).



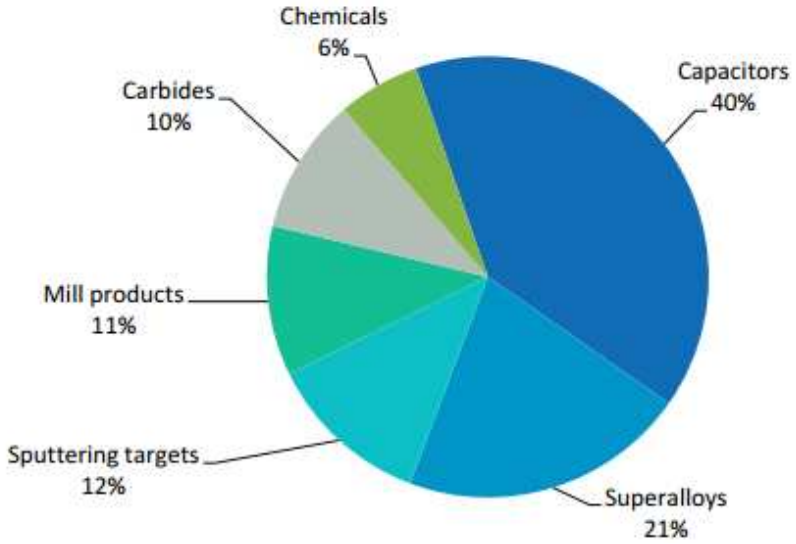

Obrázek 10. *Spektrum využití niobu. Zdroj: ROSKILL, 2009; MSP-REFRAM, 2017.*

### *Tantal*

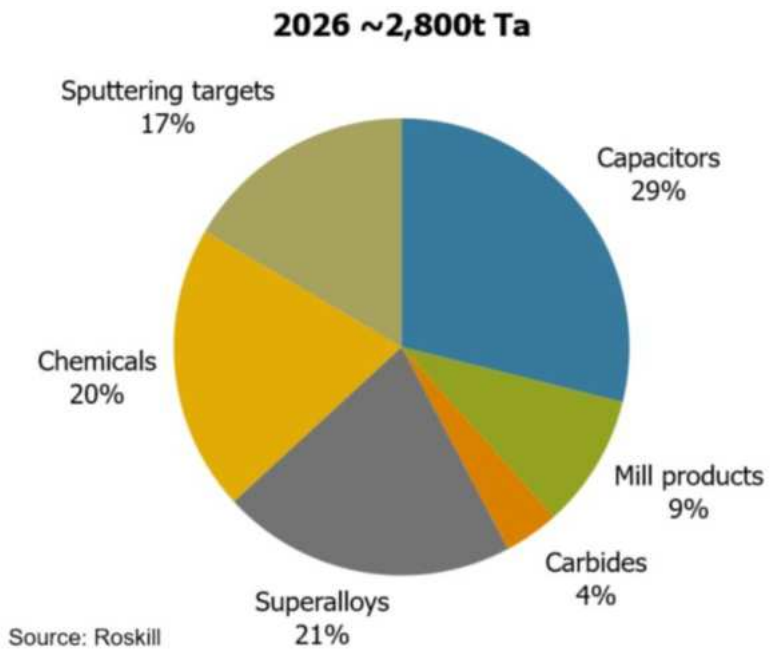
Tantal je využíván v různých odvětvích průmyslu pro své korozivzdorné vlastnosti a při výrobě elektronických součástek, hlavně kondenzátorů. Kondenzátory jsou hlavní výrobky na bázi tohoto kovu, ročně se jich vyrobí miliardy kusů. Dalším použitím v elektronice jsou rozprašovací elektrody (Ta-kov, $Ta_2O_5$, TaN) a povrchové akustické vlnové filtry, které mají použití v mobilních a bezdrátových telefonech, televizorech, systémech pro kontrolu tlaku v pneumatikách a systémech bezklíčového vstupu. Tantal se dále používá pro vysokoteplotní aplikace, např. letecké motory, ve formě super slitin na bázi niklu a kobaltu (MSP-REFRAM 2017).

Tantal se také využívá v mnoha slitinách, které díky němu získávají vysokou teplotu tání, jsou pevné a kujné. Nacházejí uplatnění při výrobě vysoce namáhaných součástek v leteckých turbomotorech, ponorkách, jaderných reaktorech a chemických reaktorech pro speciální aplikace. Protože je v lidském těle absolutně inertní, používá se často jako součást slitin pro výrobu chirurgických nástrojů a tělních implantátů. Karbid tantalu je jedním z nejtvrdších známých materiálů a používá se při výrobě speciálních brusných směsí a pro ochranu povrchů

vrtných zařízení. Oxid tantalu je složkou speciálních skel pro výrobu optických součástek (např. čočky filmových kamer), protože jeho přítomnost silně zvyšuje index lomu materiálu (wikipedia.org).



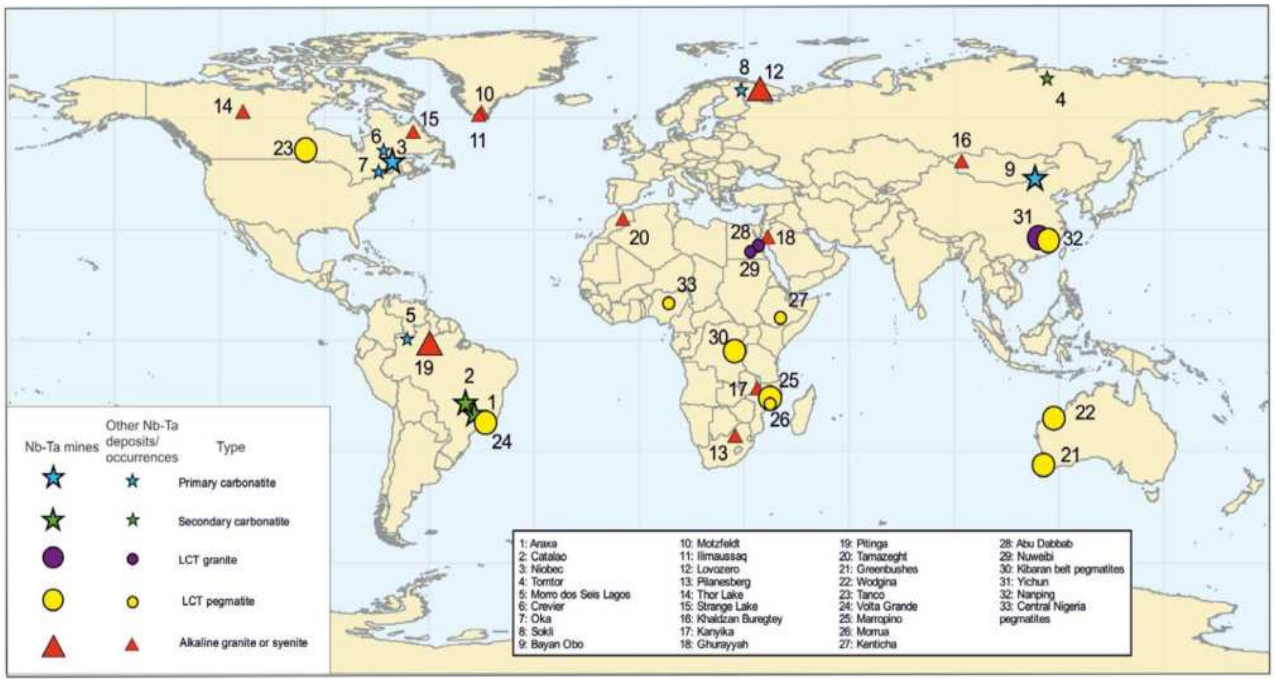

Obrázek 11. *Spektrum využití tantalu. Zdroj: ROSKILL, 2009; MSP-REFRAM, 2017.*




Obrázek 12. *Prognóza spotřeby tantalu v roce 2026. Zdroj: Stratton et al., 2018.*

## 4.3 Hlavní ložiska ve světě

Tantal a niob se obvykle vyskytují společně ve stejném typu ložisek a v minerálech podobných vlastností. Oba zde často tvoří tuhé roztoky, jak je tomu v případě kolumbit-tantalitu $(Fe,Mg,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$ (hlavní zdroj tantalu) i minerálech skupiny pyrochloru (hlavní zdroj niobu). Ložiska Nb-Ta rud jsou spojena se specifickými vyvřelými horninami: karbonatity a souvisejícími horninami, alkalické a peralkaliké granity a syenity a pegmatity. Zvětrávací procesy vedly ke vzniku druhotných ložisek, jako jsou laterity nabohacené pyrochlorem a eluvia.




Obrázek 13. *Výskyty Nb-Ta rud ve světě. Zdroj: Shaw et al., 2011.*

### *Niob*

Většina světové produkce niobu pochází z Brazílie, kde se hlavní ložiska vyskytují v alkalických ultramaficko-karbonatitových komplexech magmatické provincie Alto Paranaiba, které intrudovaly do neoproterozoických metasedimentárních hornin. Největší světové ložisko niobu Araxá těží společnost Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineraçao (CBMM). Druhým hlavním dolem na Nb-rudy je Catalão provozovaný společností Anglo American. Obě ložiska jsou vyvinuta v poměrně neobvyklých intruzích karbonatitů a phoscoritů (magmatická hornina složená z magnetitu, apatitu a olivínu) bez přidružených syenitů. V obou ložiscích je hlavní užitkovou složkou pyrochlor, vedlejší surovinou jsou fosfáty. Mimo Brazílii patří k největším dolům na niobové rudy Niobec v Kanadě těžený společností Iamgold Corporation (stav 2011). Ložisko leží v jižní části neoproterozoického karbonatitového komplexu Saint-Honoré.

### *Tantal*

Hlavní těžba tantalu probíhá ve střední Africe. Zde se vyskytují mineralizované pegmatity v pruhu sahajícím z Burundi přes Rwandu a Ugandu po Demokratickou republiku Kongo. Kolumbit-tantalit se zde těží převážně artisanálním způsobem z hluboce zvětralých pegmatitů

a ze sekundárních rozsypů odvozených od pegmatitů (Shaw et al., 2011). Dále se tantalové rudy těží v Austrálii, Číně a Rusku.

V Austrálii se tantal nachází na ložisích lithia, například na ložisku Bald Hill, v lithiovém projektu Kathleen Valley a s v dole Greenbushes společnosti Talison Lithium v západní Austrálii.

## 4.4 Výskyty v České republice

Ve státní bilanci výhradních ložisek nefigurují žádná ložiska niobu a tantalu. V evidenci ČGS jsou pouze prognózní zdroje, navíc většinou jako doprovodná surovina jiných rud (Starý et al. 2023).

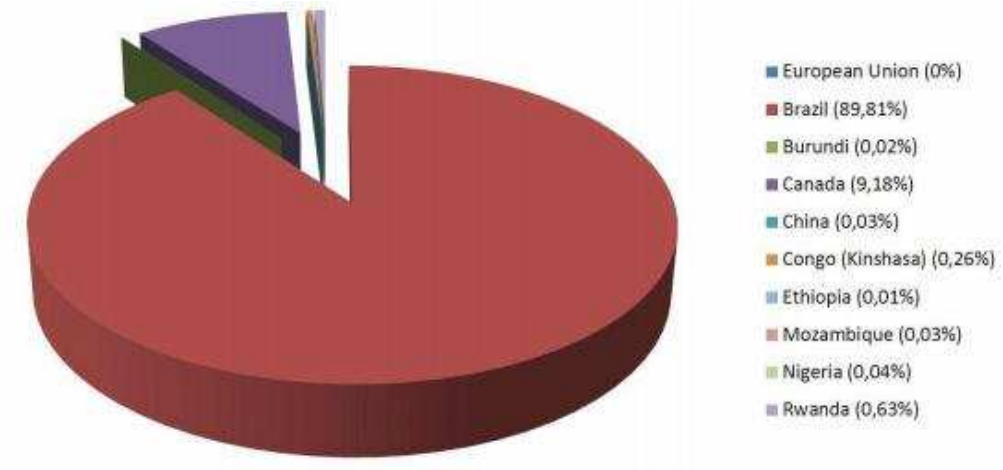
V České republice byly prognózní zdroje (neschválené) Nb vyhodnoceny na 124 288 t na uranových ložiskách v uranonosných pískovcích Strážského bloku české křídové pánve (spolu s REE, Zr a Hf) a dalších 4 200 t na lokalitě Hůrky v Čistecko-jesenickém masivu (spolu s Mo, Zr a Hf), kde byly vyčísleny také prognózy tantalu na 57 t. V oblasti Krásna a Cínovce byly vyčísleny (neschválené) prognózní zdroje 13 670 t Ta a 19 702 t Nb.

Získatelné obsahy tantalu a niobu jsou známy rovněž z wolframových a cínových koncentrátů pokusně získaných při průzkumu ložiska Sn-W rud Cínovec-jih (spolu s Li, Rb a Cs; Starý et al. 2023).

## 4.5 Produkce a spotřeba

***Niob***

Zhruba 90 % světové produkce niobu pochází ze 3 ložisek, z nichž dvě jsou v Brazílii (doly Araxá a Catalao) a jedno v Kanadě (důl Niobec). Převážná většina světových zásob Nb se také nachází v Brazílii a Kanadě. V Evropě v současné době neexistují žádné těžební provozy na niobové rudy. Významným zdrojem Nb a Ta jsou také těžební a úpravárenské odpady.

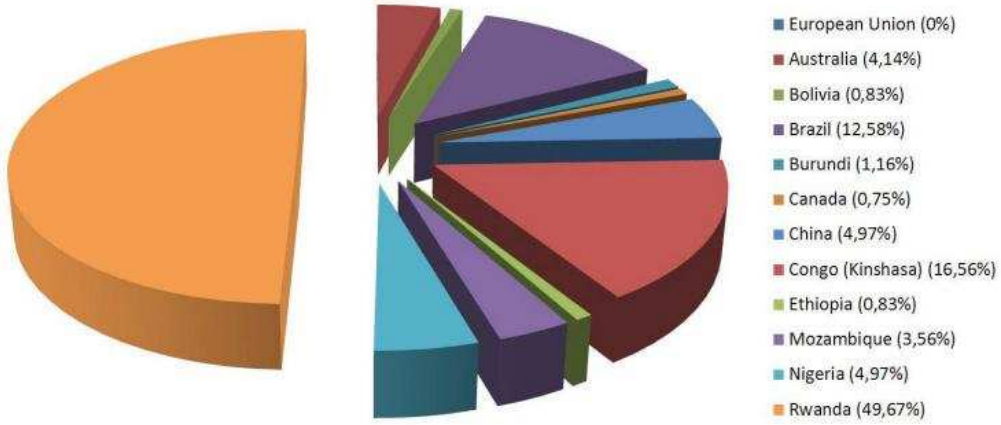



Obrázek 14. *Světoví producenti niobu. Zdroj: MSP-REFRAM, 2017.*

***Tantal***

I když jsou největší zásoby tantalu v Brazílii a Austrálii, vlivem faktorů poptávky, nedostatku kontroly nad výrobou a prodejem a zintenzivnění drobné artisanální těžby pochází největší množství suroviny z centrální Afriky. Téměř 50 % celosvětové produkce tantalového koncentrátu produkovala v roce 2013 Rwanda. Na Kongo připadalo 16,56 %, na Brazílii 12,58 %. V poslední době je však zaznamenán odklon od rizikových oblastí do Austrálie.

Spotřeba tantalu v EU se odhaduje zhruba na čtvrtinu až třetinu celosvětové produkce, tj. cca 250-330 t (MSP-REFRAM, 2017).




Obrázek 15. *Světoví producenti tantalu. Zdroj: MSP-REFRAM, 2017.*

Podíl Evropské unie na světové výrobě je minimální. Jediným zdrojem tantalu je ložisko kaolinu Echassières ve Francii, kde je vedlejším produktem smíšený koncentrát Sn-Ta-Nb (v roce 2011 55 tun s obsahem 10 % $Ta_2O_5$, tj. cca 4,5 tuny Ta).

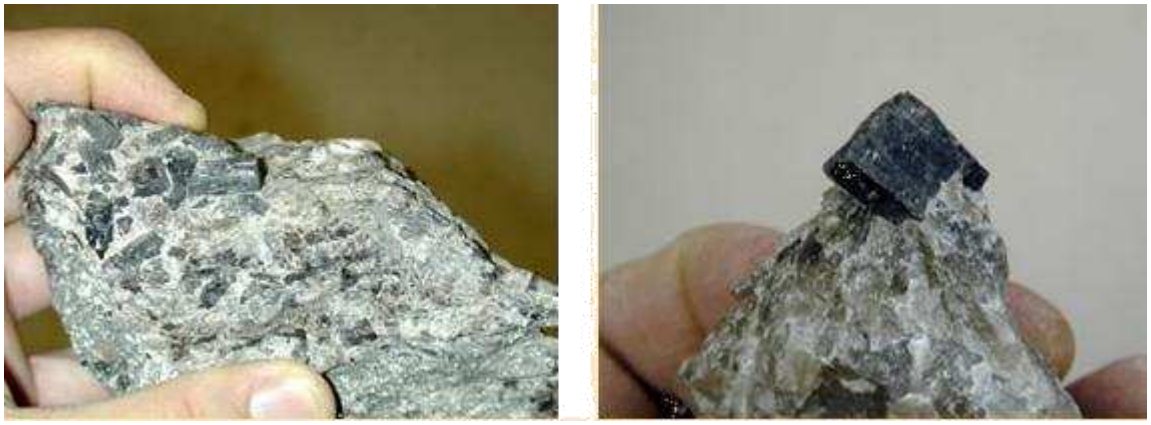
## 4.6 Genetické typy ložisek

Tantal a niob se obvykle vyskytují společně na ložisku v minerálech podobných vlastností. Oba zde často tvoří tuhé roztoky, jak je tomu v případě kolumbit-tantalitu $(Fe,Mg,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$ (hlavní zdroj tantalu) i minerálech skupiny pyrochloru (hlavní zdroj niobu). Ložiska Nb-Ta rud jsou spojena se specifickými vyvřelými horninami: karbonatity a souvisejícími horninami, alkalickými a peralkalickými granity a syenity a pegmatity. Zvětrávací procesy následně vedly ke vzniku sekundárních ložisek, jako jsou laterity nabohacené pyrochlorem a rozsypová ložiska.

### Pegmatity a vysoce diferencované granity

Granity a pegmatity skupiny LCT jsou typicky peraluminické a obohacené o lithium, rubidium, cesium, berylium, cín, tantal a niob (Ta>Nb). Vyvřeliny tohoto typu jsou celosvětově hlavními hostiteli tantalových ložisek. Většinou jde o velké intruze leukogranitů obklopené pegmatitovými roji. Nejvíce mineralizované pegmatity se zpravidla vyskytují v největší vzdálenosti od granitu. Nejdůležitější minerály tantalu jsou obecně kolumbit-tantalit, mikrolit, ixiolit, wodginit a také tapiolit, euxenit a fergusonit. Místy je důležitým rudním minerálem také tantalem bohatý kasiterit. Nositeli niobu a tantalu jsou v menší míře i rutil (variety ilmenorutil a strüverit se zvýšeným obsahem Nb a Ta) a minerály skupiny perovskitu nebo branneritu, ty

jsou však obtížně upravitelné. Mnoho pegmatitů podlehlo pozdějším alteračním procesům, zejména kaolinizaci (Krauß et al. 1982; Krauß 1983). Průměrné kovnatosti pro pegmatitová a granitová ložiska jsou uvedeny v tabulce níže.



Obrázek 16. *Vzorky tantalitu z pegmatitového ložiska Tanco v Kanadě. Zdroj www. djoyceminerals.com.*

Tabulka 9. *Parametry světových Nb-Ta ložisek.*

| **Ložiskový typ** | **Typické charakteristicky (Shaw et al., 2011)** | |
|---|---|---|
| | **velikost** | **kovnatost** |
| Karbonatity (primární ložiska) | 23,5 Mt (Niobec) | 0,59 % $Nb_2O_5$ (Niobec) |
| Karbonatity (zvětrávací ložiska) | < 1 000 Mt | až 3 % $Nb_2O_5$ |
| Alkalické granity a syenity | < 100 Mt | 0,1–1 % $Nb_2O_5$<br>< 0,1 % $Ta_2O_5$ |
| LCT-granity | < 100 Mt | < 0,05 % $Ta_2O_5$ |
| LCT-pegmatity | < 100 Mt | < 0,05 % $Ta_2O_5$ |

## Ostatní typy ložisek

### *Karbonatity a příbuzné horniny*

Karbonatity jsou vyvřelé horniny, které se skládají z více než 50 % primárních karbonátových minerálů. Jejich výskyty jsou téměř výhradně vázány na riftové zóny. Zdrojová magmata jsou odvozována přímo z pláště s velmi malým podílem korových hmot. Vyskytují se nejčastěji ve formě pravých a ložních žil a nevelkých pňů (s průměrem pod 1 km), zřídka i ve větších masívech nebo jako výlevná tělesa. Obvykle jsou doprovázeny alkalicko-silikátovými horninami, a to buď nefelinickými syenity a dalšími foidickými magmatity, nebo mafickými až ultramafickými alkalickými horninami. Řada karbonatitových těles je obklopena metasomatizovanými nebo fenitizovanými zónami, které vznikly působním fluid bohatých na sodík a/nebo draslík na okolní horniny.

Obsahy niobu v karbonatitových tělesech jsou sice zvýšené (obvykle 0,01–0,1 %, vzácně až 1 %), většinou ale nedosahují ložiskových parametrů. K nakoncentrování užitkových složek dochází vlivem magmatické diferenciace, postmagmatických hydrotermálních a metasomatických procesů a během přípovrchového zvětrávání (Shaw et al. 2011).

Karbonatity jsou typicky obohaceny o řadu prvků, mj. o REE, Ba, Sr, F, P, Nb, Zr, U a Th. Protože taveniny bohaté na oxid uhličitý se přednostně obohacují o niob, nemívají karbonatity vysoké obsahy tantalu (Möller 1989). Běžnými Nb-minerály v karbonatitech jsou členy skupiny perovskitu a pyrochloru, a také některé silikáty obohacené Nb, např. titanit (Mitchell 2005).

***Alkalické až peralkalické granity a syenity***

Alkalické vyvřelé horniny jsou klasifikovány na základě mineralogie jako horniny obsahující minerály bohaté na sodík nebo draslík (foidy, alkalické amfiboly nebo alkalické pyroxeny). V jejich rámci jsou jako peralkalické označovány horniny, v nichž obsah $Na_2O+K_2O$ převyšuje $Al_2O_3$. Alkalické horniny se nejčastěji vyskytují v zónách kontinentálního riftingu, mohou být ale také vyvinuty v postkolizních a postogrogenních zónách. Pro ložiska vázaná na alkalické magmatity jsou typické vysoké obsahy zirkonia, yttria, niobu a prvků vzácných zemin, jakož i nižší obsahy tantalu (Pollard 1989; Küster 2009).

Shaw et al. (2011) uvádějí jen málo využívaných Nb-Ta ložisek vázaných na alkalicko-granitové a syenitové komplexy. Většina z nich je ve fázi vyhledávání a průzkumu. Zájem se soustřeďuje zejména na středně proterozoickou magmatickou provincii Gardar v jihozápadním Grónsku a na její komplexy Ilímaussaq a Motzfeldt.

## 4.7 Metody těžby a úpravy

Postupy těžby a zpracování se liší v závislosti na charakteru ložisek:

- povrchová těžba (open pit) - primární rudy (karbonatity, strmě uložená tělesa - trhací práce, drcení), sekundární rudy (bagrování);
- hlubinná těžba – méně častá (především pegmatity);
- artisanální těžba malého rozsahu (ryžování, mělké šachtice v aluviích - střední Afrika).

Po těžbě se rudy zpracovávají na koncentráty se zvýšenými obsahy niobu a tantalu. Zpravidla v místě dolu nebo v jeho blízkosti probíhá drcení rudy a separace rudní složky od hlušiny pomocí kombinace fyzikálních a chemických metod. Ačkoliv niob a tantal jsou vzájemně geochemicky podobné, každý vyžaduje jinou zpracovatelskou cestu.

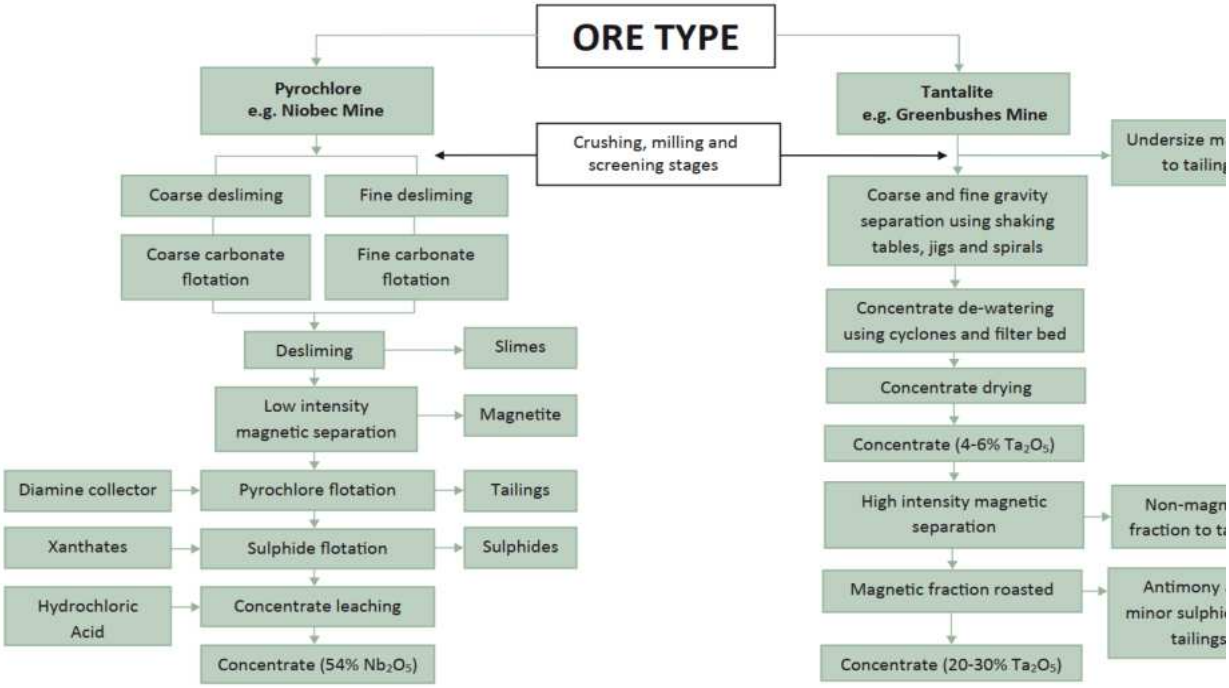
Niobová ruda je nejprve drcena v čelisťových, kuželových nebo nárazových drtičích a mleta v tyčových nebo kulových mlýnech pracujících v uzavřených okruzích s vibračními síty a spirálovými třídiči pro separaci užitkové složky. V závislosti na fyzikálních a chemických vlastnostech se používá gravitační separace, flotace, magnetická a elektrostatická separace nebo kyselé loužení. Koncentráty zpravidla obsahují cca 50 % oxidu niobu, resp. 30 % oxidu tantalu.

Koncentrát je dále zpracováván na čisté sloučeniny – komplexní fluoridy, chloridy nebo oxidy. Tyto jsou pak základními vstupy pro výrobu obou kovů. Kolumbitový koncentrát se zpracovává nejčastěji tavením s alkalickými sloučeninami, jako jsou NaOH, $Na_2CO_3$, nebo rozkladem pomocí HF. Při loužení ve vodě probíhá reakce za vzniku sraženiny niobu, přičemž příměsi

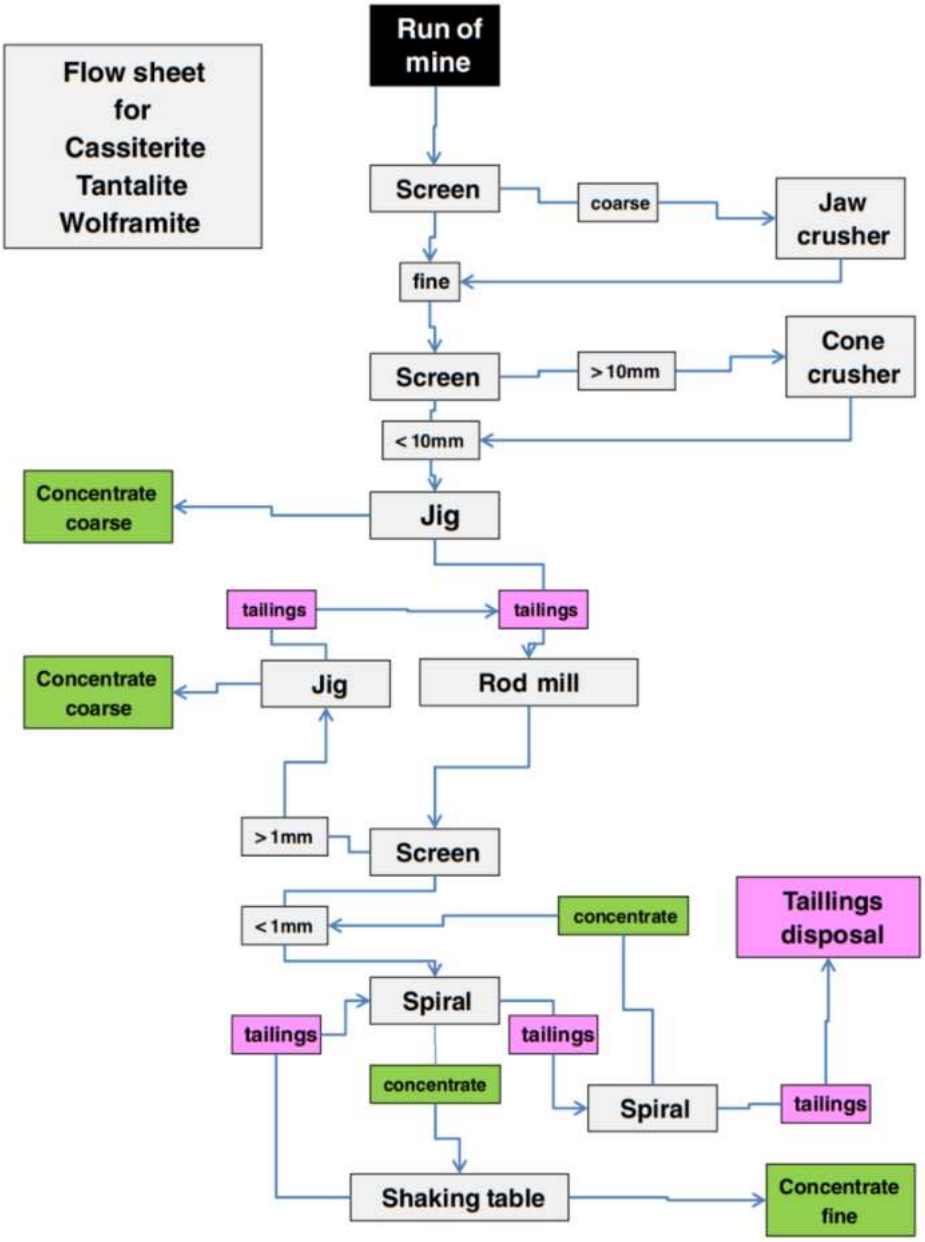
$SiO_2$, $SnO_2$, $Al_2O_3$, $FeWO_4$ přecházejí do roztoku. Výsledná sraženina se po filtraci suší při teplotě 100°C.

Kovový tantal a niob se získávají redukcí čistých oxidů, chloridů a komplexních fluoridů. Vysoká chemická stálost těchto sloučenin vyžaduje použití silných redukčních činidel. Proto se používají metody metalotermické nebo elektrolýza roztavených solí.

Extrakce Nb a Ta z rutilu (resp. z ilmenorutilu a strüveritu, variet rutilu se zvýšenými obsahy $Nb_2O_5$ a $Ta_2O_5$) se prozatím v praxi nevyužívá vzhledem k technologické náročnosti. Experimentálně byla možnost jejich získání pomocí pražení s NaOH, loužení pomocí $H_2SO_4$ a následnou selektivní separaci $Nb_2O_5$ z roztoku s obsahem Fe a Ti pomocí kyseliny šťavelové (Sun et al. (2021, 2022).




Obrázek 17. *Schéma úpravy Nb-Ta-rud na příkladu ložisek Niobec a Greenbushes. Zdroj: Shaw et al., 2011.*




Obrázek 18. *Schéma úpravy oxidických rud Sn, Ta a W z pegmatitů (podle Wotruby in Dill 2015).*

## 4.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Pro hodnocení geologických celků z hlediska potenciálu k zajištění ekonomicky využitelných zásob a pro posuzování výpočtů zásob vyhrazených nerostů v České republice byly v rámci projektu TA ČR „Horninové prostředí a nerostné suroviny“ (SS02030023) navrženy následující limitní ukazatele (Tvrdý et al. 2022):

Velikost ložiska:

- minimální množství zásob nutné pro zařazení do státní bilance..... 100 tun Nb-kovu
- minimální množství zásob nutné pro zařazení do státní bilance..... 10 tun Ta-kovu

Minimální obsah na ložisku:

- minimální obsah niobu jako vedlejší užitkové složky v rudě/surovině ..... 0,10 hm. % Nb
- minimální obsah tantalu jako vedlejší užitkové složky v rudě/surovině ..... 0,01 hm. % Ta

Konkrétní ložiskový objekt obsahuje zpravidla více užitkových složek a musí být posuzován komplexně s ohledem na ekonomiku využití všech obsažených komodit. Je tedy možné, že výsledné limity se budu lišit od ukazatelů zde navrhovaných.

## 4.9 Reference

Bourgeois, F., Andreiadis, E., Lambert, J. M. 2017. Tantalum and Niobium production. – REFRAM - Final Conference Brussels, 9-10 March 2017. http://prometia.eu.

Krauß, U. 1983. Untersuchungen über Angebote und Nachfrage Mineralischer Rohstoffe, XVII., Tantal. – Bundesanstalt für geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. 279 pp.

Krauß, U., Schmidt, H., Kippenberger, C. 1982. Untersuchungen über Angebote und Nachfrage Mineralischer Rohstoffe, XVI., Niob. Bundesanstalt für geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. 208 pp.

Küster, D. 2009. Granitoid-hosted Ta mineralization in the Arabian-Nubian Shield: Ore deposit types, tectono-metallogenetic setting and petrogenetic framework. Ore Geology Reviews 35, 68–86.

Möller, P. 1989. REE(Y), Nb, and Ta enrichment in Pegmatites and Carbonatite-Alkalic Rock Complexes. In: Möller et al.: Lanthanides, Tantalum and Niobium. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg.

Mitchell, R. H. 2005. Mineralogical and Experimental Constraints on the Origins of Niobium Mineralisation in Carbonatites. In: Linnen a Samson (eds.): Rare-Element Geochemistry and Mineral Deposits: Geological Association of Canada Short Course Notes. Cit. in Shaw et al. (2011).

MSP-REFRAM. 2017. Niobium and Tantalum. Short Description Factsheet. Multi-Stakeholder Platform for a Secure Supply of Refractory Metals in Europe. http://prometia.eu/msp-refram.

Pollard, P. J. 1989. Geochemistry of Granites Associated with Tantalum and Niobium Mineralisation. Cit. in Shaw et al., (2011).

ROSKILL 2009. The economics of niobium (11th ed.). – Roskill Information Services Ltd., London, 222 p.

Rudnick, R. L., Gao, S. 2004. Composition of the Continental Crust. In: Rudnick R L. (ed.) The Crust. Elsevier-Pergamon, Oxford.

Shaw, R., Goodenough, K., Gunn, G., Brown, T., Rayner, D. 2011. Commodity Profiles: Niobium–tantalum. British Geological Survey, www.MineralsUK.com. 28 pp.

Starý, J., Sitenský, I., Mašek, D., Gabriel, Z., Němec, M., Hodková, T., Vaněček, M., Novák, J., Kavina, P. 2023. Surovinové zdroje České republik. 484 s. MŽP, ČGS, Praha.

Stratton, P., Anderson, J., Baylis, R. 2018. The changing face of tantalum. T.I.C. Bulletin, 172 (January 2018), 16-22.

Sun, L., Yu, H., Meng, F., Qi, T., Wang, L., & Peng, Y. 2021. Recovery of niobium and titanium from ilmenorutile by NaOH roasting-$H_2SO_4$ leaching process. Journal of Materials Research and Technology, 15, 2575-2583.

Sun, L., Zhang, X., Wang, L., Yu, H., Meng, F., Qi, T., & Peng, Y. 2022. Separation and extraction of niobium from $H_2SO_4$ solution containing titanium and iron impurities. Separation and Purification Technology, 295, 121207.

Tvrdý, J., Kovářová, J., Krátký, O., Havránek, J., Opekar, L., Starý, J. 2022. Metodika identifikace akumulací strategických komodit a podmínek využitelnosti strategických nerostných surovin. Projekt Horninové prostředí a nerostné suroviny SS02030023. Dílčí cíl 1.4. Program č. 6 Prostředí pro život. TA ČR.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

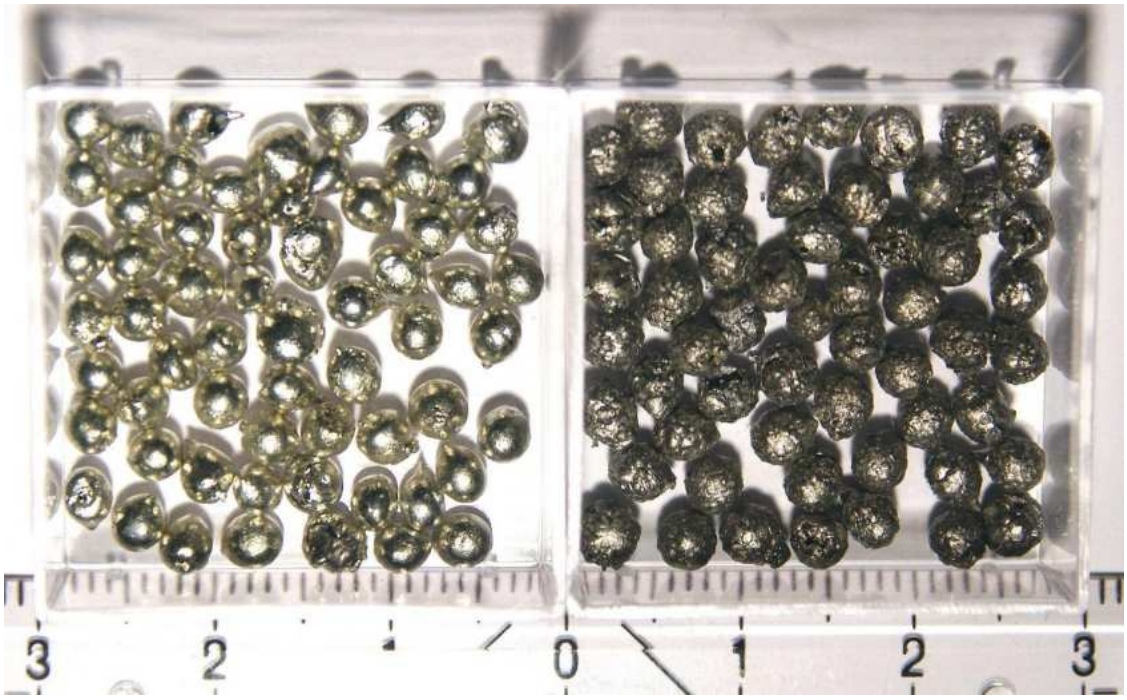
# 5 Cín

## 5.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Cín (chemická značka Sn, latinsky *stannum*) patří mezi kovy, které jsou známy lidstvu již od pravěku především jako součást slitiny zvané bronz. Má velmi nízký bod tání (232 °C) a je dobře kujný a odolný vůči korozi.

Většina cínu se používá jako ochranný povlak nebo jako slitina s jinými kovy, jako je olovo nebo zinek. Cín se používá v nátěrech ocelových nádob, v pájkách pro spojování kovových materiálů nebo elektrických/elektronických obvodů, v ložiskových slitinách, při výrobě skla, v široké škále chemických aplikací cínu a při výrobě uměleckých předmětů (bronz).

Cín je jedním z prvních známých a používaných kovů. Díky svému kalícímu účinku na měď se cín používal v bronzových nástrojích již 3 500 let př. n. l., ačkoli čistý kov se začal používat až kolem roku 600 př. n. l. Cín se těží asi ve 35 zemích světa. Cín je poměrně vzácný prvek, jehož množství v zemské kůře dosahuje cca 2 ppm, zatímco zinek má 94 ppm, měď 63 ppm a olovo 12 ppm. Většina cínu na světě se těží z ložisek naplavenin; nejméně polovina pochází z jihovýchodní Asie.




Obrázek 19. *Kovový cín ve formě malých kapek (wikipedia.org).*

V přírodě se cín vyskytuje v přibližně stovce minerálů. Nejvýznamnějším z hlediska těžby je kasiterit $SnO_2$. Menší význam má stannin $Cu_2S{\cdot}FeS{\cdot}SnS_2$, cylindrit $Pb_3Sn_4FeSb_2S_{14}$ a franckeit $Pb_5Sn_3Sb_2S_{14}$. Horninotvorné minerály, které mohou obsahovat významné množství cínu (tj. desítky až stovky ppm), jsou v pořadí podle rostoucího obsahu cínu muskovit, biotit, titanit a titanomagnetit (Wang et al. 2013).

## 5.2 Průmyslové aplikace a trh

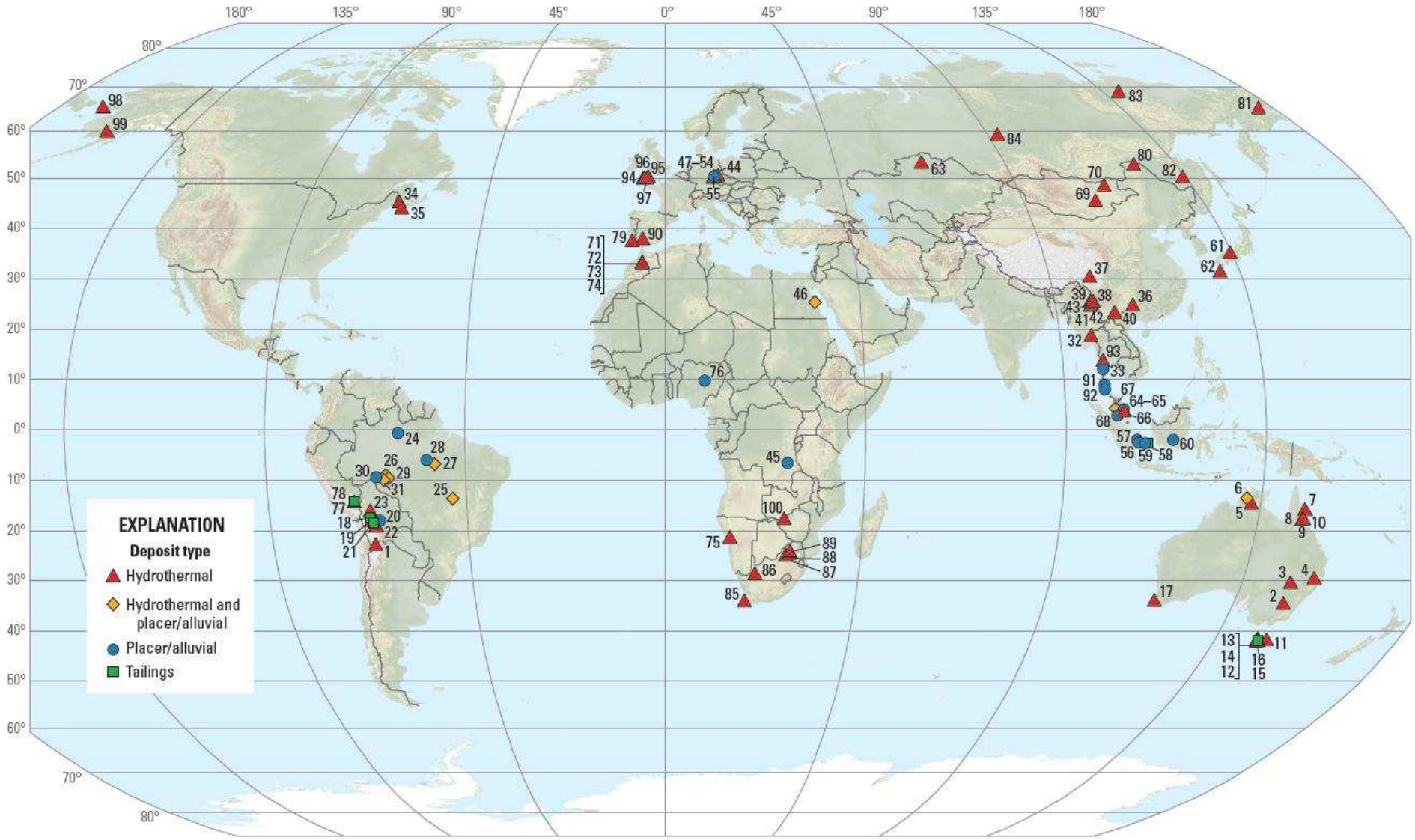
Využití cínu je velmi rozsáhlé. Cín slouží k přípravě celé řady slitin, k výrobě staniolu a k pokovování plechů, zejména při výrobě plechovek na konzervy. Největší podíl cínu (35 % světové spotřeby) se využívá k výrobě pájek. Ze sloučenin cínu má význam fluorid cínatý $SnF_2$ jako zdroj fluoru v zubních pastách. Chlorid číničitý $SnCl_4$ se používá jako katalyzátor Friedel-Crafsových heterogenních alkylací. Oxid číničitý $SnO_2$ slouží k výrobě bílých smaltů a glazur. Sulfid číničitý $SnS_2$ se používá jako žlutý pigment. Cínatan lithný $LiSn(OH)_3$ se používá jako silné redukční činidlo, chlorid cínatý $SnCl_2$ (E 512) se používá v potravinářství jako antioxidant a stabilizátor a jako redukční činidlo při přípravě aromatických aldehydů z nitrilů kyselin (Stephenova reakce). Hexachlorociničitan amonný $(NH_4)_2SnCl_6$ se používá jako mořidlo při barvení tkanin (zdroj prvky.com)

## 5.3 Hlavní ložiska ve světě

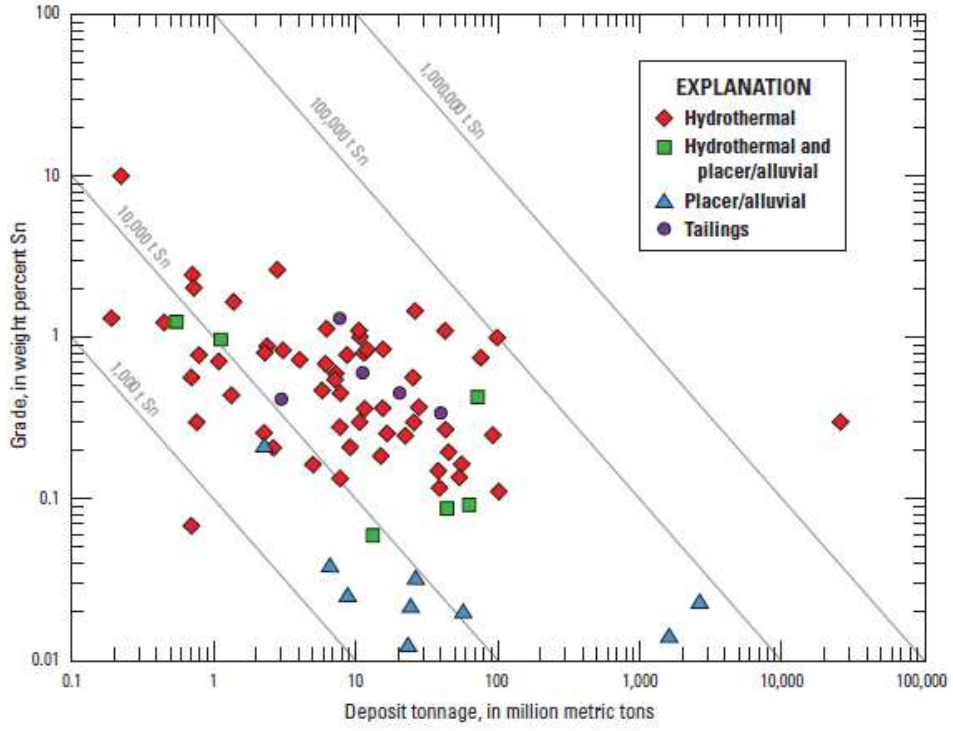
Významná ložiska cínu jsou omezena na poměrně malý počet oblastí. Více než polovina světových zásob cínových rud se těží ve velkém cínovém pásu jihovýchodní Asie. Významná ložiska se vyskytují také v Číně a Jižní Americe (viz obrázek níže).

Přibližně 80 % zjištěných světových zásob cínu se nachází v nezpevněných sekundárních nebo rozsypových ložiscích v říčních korytech a údolích nebo na mořském dně. Největší koncentrace ložisek na pevnině i v moři se nachází v rozsáhlém pásu cínu v jihovýchodní Asii, který se táhne od Číny na severu přes Thajsko, Barmu a Malajsii až po ostrovy Indonésie na jihu. Většina zbývajících zdrojů (asi 20 % zjištěných světových zásob cínu) se vyskytuje v primárních ložiscích – greisenech a křemenných žilách ve spojení s granitickými intruzemi. Dalšími zeměmi s významnými zásobami cínu jsou Austrálie, Bolívie a Brazílie.

Ačkoli většina cínu se získává těžbou cínových rud, kasiterit se vyskytuje také společně s rudami wolframu, tantalu a olova. Menší množství cínu se získává jako vedlejší produkt při těžbě těchto kovů.




Obrázek 20. *Hlavní světová ložiska cínu (Kamilli et al. 2017).*




Obrázek 21. *Kovnatoisti a zásoby hlavních světových ložisek cínu podle typu ložiska (Kyllia et al. 2017).*

## 5.4 Ložiska v České republice

Ložiskové zdroje cínu jsou až na výjimky soustředěny téměř výhradně v Krušnohoří, Slavkovském lese a jejich podhůří, kde byly využívány již od počátku středověku.

Nejvýznamnějším ložiskovým typem jsou greisenová ložiska Sn-W (Li). Vyskytují se jak ve východní (Cínovec, Krupka), tak v západní části Krušných hor (Rolava, Přebuz) i ve Slavkovském lese (Krásno, Horní Slavkov). Vznik ložisek je spjat s greisenizací a prokřemeněním elevací mladovariských lithno-topazových žul. Hlavním nositelem Sn zrudnění je kasiterit, vtroušený v greisenu, doprovázený wolframitem a cinvalditem. V krupeckém a cínoveckém revíru je významný podíl hydrotermálních křemenných žil s kasiteritem, wolframitem, případně minerály Bi a Mo. Na greisenových i žilných ložiskách byly těženy Sn-W rudy o obsazích cca 0,2–0,5 % Sn.

Zajímavý výskyt cínových rud představují polymetalické cínonosné skarny na lokalitě Zlatý Kopec u Božího Daru. Patrně polygenní rudy tvořené magnetitem s příměsí kasiteritu (s hulsitem a schoenfliesitem), sfaleritu a chalkopyritu obsahují asi 0,95 % Sn.

V podstatě jedinou ložiskovou akumulací primárních rud mimo krušnohorskou oblast jsou stratiformní kasiterit-sulfidické rudy u Nového Města pod Smrkem. Na tomto bývalém ložisku byl po 2. světové válce proveden pouze geologický průzkum, jímž byl ověřen průměrný obsah 0,23 % Sn v rudě.

Spíše z obecně metalogenetického a mineralogického hlediska zasluhuje pozornost výskyt Sn-mineralizace, tvořené staninem v hlubších patrech na staročeském pásmu v kutnohorském revíru, která má komplexní charakter a není ekonomicky významná.

Zpočátku se těžba soustředila na sekundární (rozsypová) ložiska, postupně přecházela na primární. Cínonosná rozsypová ložiska ve všech okrscích Sn-W rud krušnohorské oblasti a jejím podhůří jsou v podstatě vytěžena. Pouze ve Slavkovském lese a jeho podhůří zůstaly zachovány malé sekundární akumulace kasiteritu a wolframitu. Většina zásob primárních ložisek je rovněž vytěžena, zbylé nemají v současnosti ekonomický význam. Těžba Sn (Sn-W) rud v ČR skončila v roce 1991 uzavřením ložiska Krásno, na ložisku Cínovec-jih pak o rok dříve. Větší zbytkové zásoby chudých rud zůstaly jen na ložiskách v revírech Krásno-Horní Slavkov a Cínovec. V budoucnu by mohly představovat i možný zdroj stopových a vzácných prvků, především Li, Rb, Cs, popřípadě i Nb, Ta, Sc atd.

## 5.5 Produkce a spotřeba

Dle USGS je v roce 2023 největším producentem cínu Čína následovaná Barmou a Indonésií.

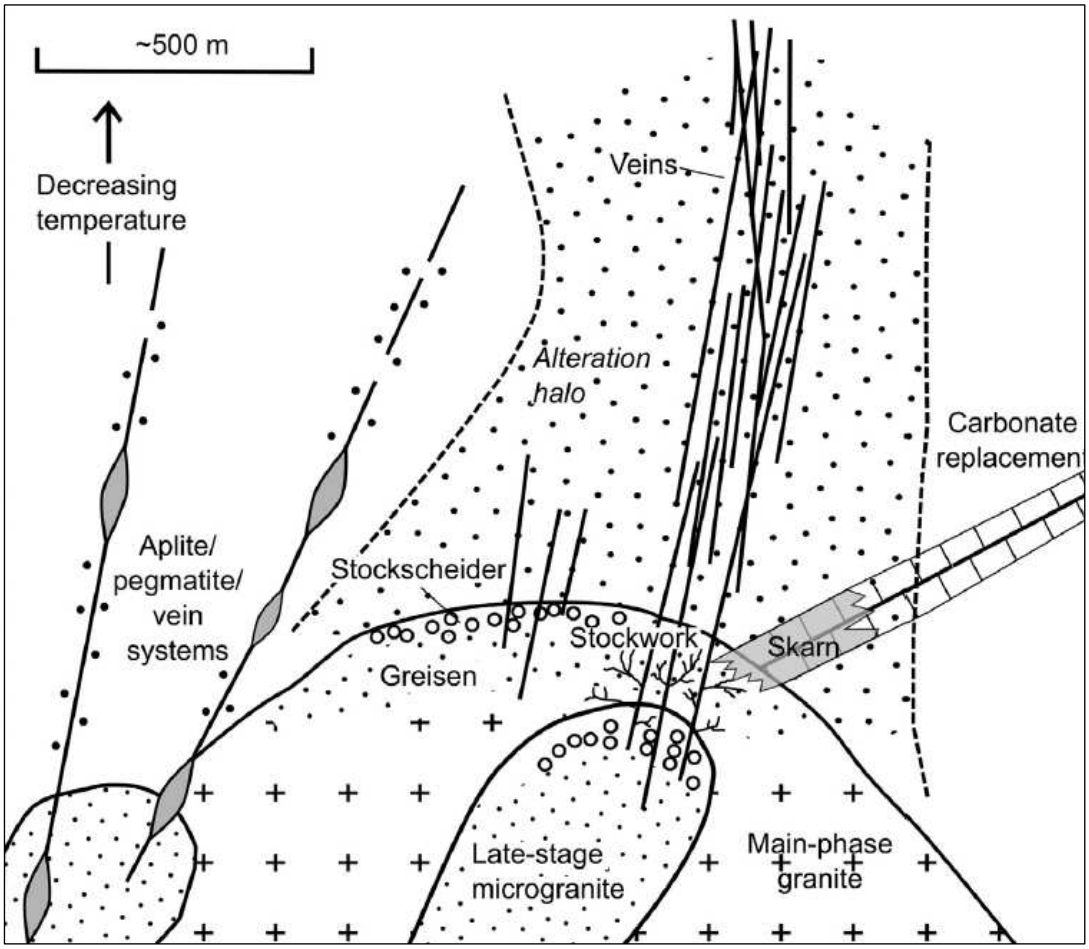
Tabulka 10. *Světová produkce a zásoby cínu dle USGS, 2024.*

| | Mine production | | Reserves[6] |
|---|---|---|---|
| | 2022 | 2023[e] | |
| United States | — | — | — |
| Australia | 9,000 | 9,100 | [7]620,000 |
| Bolivia | 17,600 | 18,000 | 400,000 |
| Brazil | [e]17,000 | 18,000 | 420,000 |
| Burma | [e]47,000 | 54,000 | 700,000 |
| China | [e]71,000 | 68,000 | 1,100,000 |
| Congo (Kinshasa) | [e]18,600 | 19,000 | 120,000 |
| Indonesia | [e]70,000 | 52,000 | NA |
| Laos | 2,510 | 2,300 | NA |
| Malaysia | [e]5,000 | 6,100 | NA |
| Nigeria | [e]7,000 | 8,100 | NA |
| Peru | 28,200 | 23,000 | 130,000 |
| Russia | [e]3,700 | 2,700 | 460,000 |
| Rwanda | [e]3,300 | 3,800 | NA |
| Vietnam | [e]5,900 | 5,300 | 11,000 |
| Other countries | 1,160 | 1,300 | 310,000 |
| World total (rounded) | 307,000 | 290,000 | 4,300,000 |

Zásoby cínu ve světě jsou značné, a proto cín také není na žádném seznamu kritických prvků, jelikož se těží téměř na každém kontinentu a nepředpokládá se u něj omezení dodávek.

## 5.6 Genetické typy ložisek

Všechna hydrotermální ložiska cínu se vyznačují těsnou vazbou na vysoce diferencované granitové intruze. Mineralizace se pak může vyskytovat v samotných intruzích ve formě křemenných žilníků nebo masivních poloh greisenů. Při kontaktu s Ca-bohatými horninami mohou vznikat mineralizované skarny. Rudní minerály se také mohou vyskytovat v křemenných žilách a aplitech/pegmatitech, které pronikly do okolních hornin.




Obrázek 22. *Klasický model primárních ložisek cínových rud souvisejících s magmatickými hydrotermálními systémy ve vztahu k cínové mineralizaci (Černý et al. 2005, Kamili et al. 2017).*

## Pegmatity a vysoce diferencované granity

Cínonosné pegmatity jsou nejčastěji křemen-mikroklinového typu s albitem, muskovitem a spodumenem, topazem a turmalínem. Kasiterit je nepravidelně rozptýlen v celém tělese pegmatitu a běžně v místech, kde probíhaly sekundární procesy“ (Taylor 1979, s. 46-47). Příkladem cínonosných pegmatitů jsou pegmatity Jābal as Silsilah v Saúdské Arábii (Kamilli a Criss 1996) a pegmatity Wodgina, Kamativi a Greenbushes v Austrálii, které jsou největšími známými příklady.

Na Ložisku Greenbushes v Austrálii byly v roce 1990 (Hatcher et al. 1990) reportovány obsahy cínu 0,15 % v hornině pro zásoby vyhledané prozkoumané. V současnosti se na tomto ložisku už udávají pouze obsahy lithia.

Nositeli cínu v pegmatitech mohou být i sulfidy (minerály řady stannin-kësterit) a také některé silikáty (malayait, nigerit). Na silikáty vázaný kov je však obtížně získatelný.

## Greiseny a křemenné žilníky

Tento typ ložiska se vyznačuje intenzivním rozvojem greisenizace s hojnou tvorbou muskovitových a topazových alteračních zón, které hostí kasiteritovou mineralizaci; kromě toho tyto alterační zóny hostí wolframit, bismutinit, molybdenit, arzenopyrit, tantalo-kolumbit a minerály uranu a mědi. Tento typ mineralizace je nejrozšířenějším typem ložiska cínu vázaného na žulu. Velká primární ložiska se vyskytují zřídka, ale častěji se vyskytují velmi bohatá ložiska vzniklá zvětráváním a erozí. Tyto typy ložisek (hlavně plaveniny) představují 60 až 70 % světové produkce cínu (Taylor 1979, s. 46). Příkladem těchto typů ložisek jsou ložiska Geevor a Wheal Jane v Cornwallu ve Spojeném království (Dines 1956; Garnett 1963; Hosking 1964; Rayment et al. 1971); ložisko Herberton v Queenslandu v Austrálii (Blake a Smith 1970); ložisko East Kemptville v Novém Skotsku v Kanadě (Richardson et al. 1982, 1990; Richardson 1988; Halter et al. 1996, 1998); a ložisko Chojlla v Bolívii (Lehmann 1990) a ložiska cínu v Krušných horách a Slavkovském lese.

## Ostatní typy ložisek

### *Sulfidicko-kasiteritová ložiska*

Tento typ ložiska se běžně vyskytuje nezávisle na výše uvedených typech ložisek pegmatitů a greisenových ložisek. Sulfidicko-kasiteritová ložiska se častěji označují jako cínové porfyry; mnohá z nich se těžila spíše kvůli stříbru než kvůli cínu, který obsahují. Jsou to ložiska s vysokou až střední teplotou a souvisejí s hypabysálními a přípovrchovými granitoidními intruzemi. Mezi běžně přítomné hydrotermální minerály patří kasiterit, turmalín, chlorit, pyrhotin, chalkopyrit, sfalerit, galenit a arzenopyrit. Nejvýznamnějšími příklady jsou ložiska Llallagua (Dietrich et al. 2000) a Chorolque v Bolívii (Sillitoe et al. 1975; Grant et al. 1980) a ložisko San Rafael v Peru (Kontak a Clark 2002); dalšími příklady mohou být ložisko Ardlethan v Novém Jižním Walesu v Austrálii (Clarke et al. 1985; Ren et al. 1995), ložisko Zeehan v Tasmánii v Austrálii (McAndrew 1965; Taylor 1979) a ložisko Akenobe v Japonsku (Shimizu a Kato 1991; Taylor 1979).

### *Skarny*

Skarnová ložiska jsou ložiska cínu, která se vyskytují v kontaktních zónách mezi intruzivními horninami a okolními hostitelskými horninami. Skarny vznikají metasomatickou výměnou minerálů v kontaktní zóně, kde se minerály cínu ukládají spolu s dalšími minerály, jako je kalcit, granát a pyroxen. Skarnová ložiska cínu jsou často spojena s polymetalickou mineralizací a mohou obsahovat další cenné kovy, jako je měď, olovo a zinek.

Příkladem těchto typů ložisek jsou ložiska Aberfoyle a Rossarden (Collins 1981) a Renison Bell (Sutphin et al. 1990) v Tasmánii v Austrálii; ložisko Cuomolong v Číně (Hou et al., 2007) a ložisko Lost River na Aljašce (Dobson 1982).

### *Hydrotermální ložiska*

Zdá se, že kasiterit vznikl převážně srážením z magmaticky vzniklých tekutin. Redistribuce kasiteritu chladnějšími hydrotermálními tekutinami vysrážela dřevní cín. Mexické ryolity s obsahem cínu mají mineralogické a chemické vlastnosti, které jsou podobné topazovým ryolitům v západní části Spojených států (Christiansen et al. 1986). Malá ložiska tohoto typu se

vyskytují v Mexiku (Ruiz 1988), v Rusku (Korostelev et al. 2009) a v Nevadě (Fries 1942) a Novém Mexiku (Rye et al. 1990) ve Spojených státech (Ruiz 1988).

***Rozsypová ložiska***

Důležitým zdrojem cínu jsou tradičně rozsypová ložiska, která v roce 2012 představovala přibližně 70 % světové produkce kasiteritových koncentrátů, a to především z Malajsie, Indonésie, Číny, Barmy (označované také jako Myanmar), Thajska, Nigérie a Konga/DRC (Taylor, 1979; Carlin, 2014). Protože kasiterit je těžký a chemicky neaktivní, koncentruje se ve zvětralinách, která se tvoří nad zdrojovými oblastmi hornin nebo v jejich blízkosti, kde zvětrávací a erozní procesy odstraňují lehčí horninové materiály. Kromě toho gravitace napomáhá pohybu těžkých minerálů, které se uvolňují zvětráváním, směrem dolů a vytvářejí eluviální ložiska (tj. ložiska, která zůstávají relativně blízko primárního ložiska, z něhož pocházejí). Nejbohatší naleziště se nacházejí v říčních sedimentech, kde proudící voda koncentruje těžké minerály. Ekonomické akumulace cínu mohou obsahovat také oceánské plážové písky.

## 5.7 Metody těžby a úpravy

Primární ložiska se těží povrchovým i hlubinným způsobem. Ruda je následné drcena a dále zpracovávána (obrázek níže).

Většina rozsypových ložisek cínu se těží povrchovým způsobem a (nebo) dragováním. Z natěženého materiálu je následně získáván kasiterit.

Výroba cínu se provádí redukcí kasiteritu uhlím. Kasiterit se nejprve oxidačně praží při teplotě okolo 650 °C, většina síry, arsenu a antimonu vytěká ve formě oxidů. Výpražky se potom promývají při teplotě okolo 120 °C ve zředěné kyselině sírové nebo chlorovodíkové, tím dojde k odstranění většiny přítomného železa, olova a mědi.

Druhou fází výroby je redukce výpražků uhlím nejčastěji v plamenné peci, redukce probíhá ve dvou stupních podle rovnic:

$SnO_2 + CO \rightarrow SnO + CO_2$

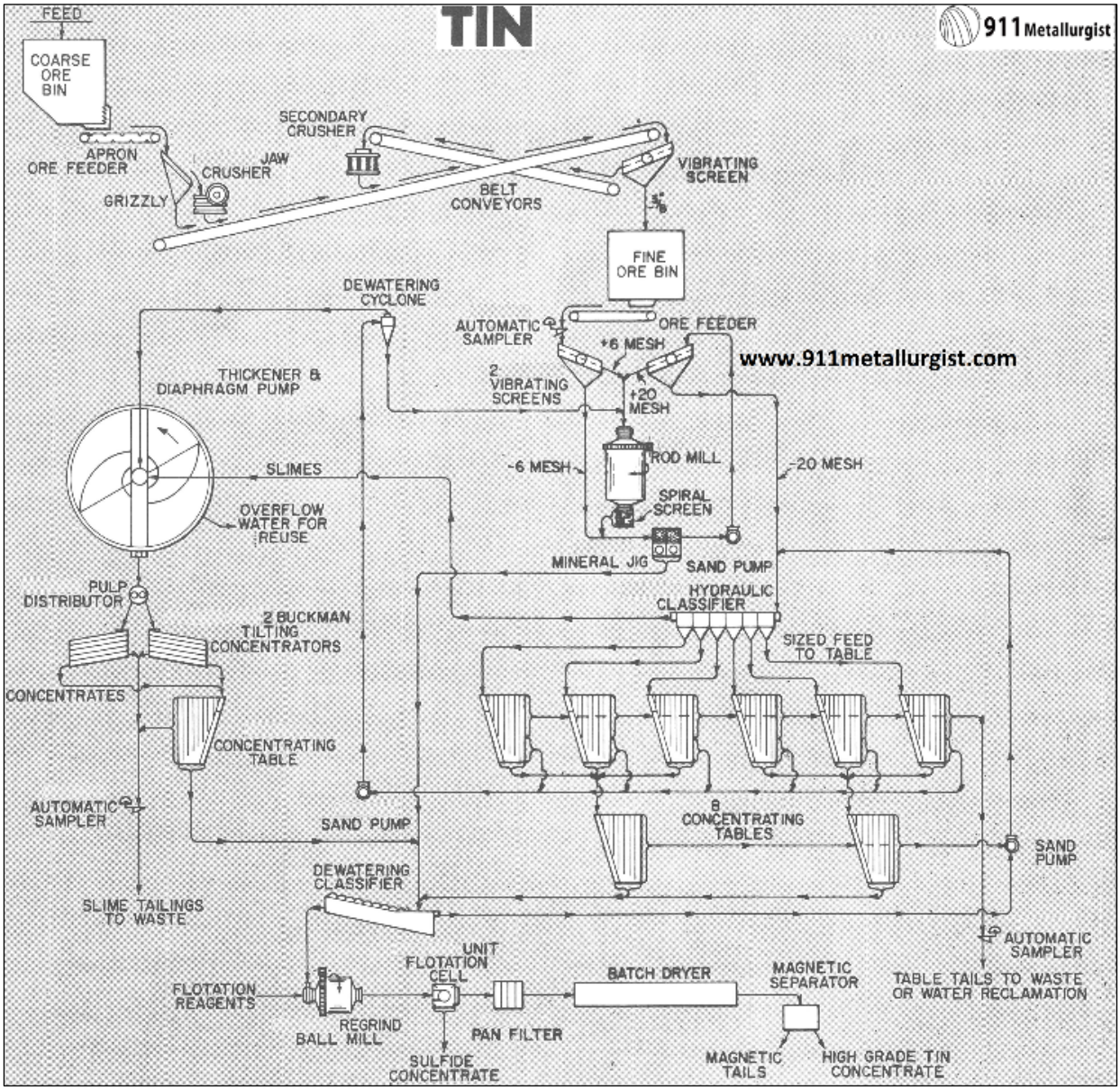
$SnO + CO \rightarrow Sn + CO_2$

Při redukci kasiteritu vzniká poměrně velké množství strusky s obsahem cínu ve formě křemičitanu. Proto se struska dále zpracovává tavením s oxidem vápenatým a koksem nebo se železným šrotem:

$SnSiO_3 + CaO + C \rightarrow Sn + CaSiO_3 + CO$

$SnSiO_3 + Fe \rightarrow Sn + FeSiO_3$

Surový cín se rafinuje na vysokou čistotu elektrolyticky, anodou je blok surového cínu, katodou je pocínovaný ocelový plech, elektrolyt tvoří 10% roztok $Na_2S$. Elektrolýza se provádí při teplotě 90 °C a poskytuje cín s čistotou až 99,99 % (prvky.com).




Obrázek 23. *Proces získávání kasiteritu z rudy (metallurgist.com).*

## 5.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Ukazatel minimální kovnatosti suroviny pro hodnocení pegmatitových hornin z hlediska potenciálu k zajištění ekonomicky využitelných zásob lze odvodit z práce Geologické služby USA „Critical mineral resources of the United States - Economic and environmental geology and prospects for future supply“ (Kamilli et al. 2017).

- minimální obsah Sn na ložisku .....0,05 hm. %

## 5.9 Reference

Blake, D. H., Smith, J. W. 1970. Mineralogical zoning in the Herberton tinfield, north Queensland, Australia: Economic Geology 65, 993–997.

Carlin, J. F., Jr. 2014. Tin, *in* Metals and minerals: U.S. Geological Survey Minerals Yearbook 2012, I, 77.1–77.9, accessed March 9, 2016.

Clarke, G. W., Paterson, R. G., Taylor, R. G. 1985. The nature and origin of brecciation and mineralization at the White Crystal ore deposit, Ardlethan tin mine, New South Wales: Australian Journal of Earth Sciences 32, 4, 343–348.

Christiansen, E. H., Sheridan, M. F., Burt, D. M. 1986. The geology and geochemistry of Cenozoic topaz rhyolites from the Western United States: Geological Society of America Special Paper 205, 82 p.

Collins, P. L. F. 1981. The geology and genesis of the Cleveland tin deposit, western Tasmania - Fluid inclusionand stable isotope studies: Economic Geology 76, 365–392.

Černý, P., Blevin, P. L., Cuney, M., London, D. 2005. Granite-related ore deposits. Economic Geology 100th Anniversary 337–370.

Černý, P. 1991. Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolutionof pegmatite deposits. Geoscience Canada 18 (2), 49–67.

Dietrich, A., Lehmann, B., Wallianos A. 2000. Bulk rock and melt inclusion geochemistry of Bolivian tin porphyry systems: Economic Geology 95, 313–326.

Dines, H. G. 1956. The metalliferous mining region of South-West England, v. 1 and 2, Memoirs of the GeologicalSurvey of Great Britain: London, United Kingdom, Her Majesty's Stationery Office, 795 p.

Dobson, D. C. 1982. Geology and alteration of the Lost River tin-tungsten-fluorine deposit, Alaska. Economic Geology 77, 1033–1052.

Fries, C., Jr. 1942. Tin deposits of northern Lander County, Nevada: U. S. Geological Survey Bulletin 931–L, 279–294.

Garnett, R. H. T. 1963. Local mineral zoning in Geevor tin mine, Cornwall, *in* Symposium—Problems of post-magmatic ore deposition symposium, v. 1: Prague, Czechoslovak Geological Survey, 91–96.

Grant, J. N., Halls, C., Sheppard, S. M. F., Avila, W. 1980. Evolution of the porphyry tin deposits of Bolivia, *in* Ishihara, S., and Takenouchi, S., eds., Granitic magmatism and related mineralization: Mining Geology Special Issue 8, 151–173.

Halter, W. E., Williams-Jones, A. E., Kontak, D. J. 1996. The role of greisenization in cassiterite precipitation at the East Kemptville tin deposit, Nova Scotia: Economic Geology 91, 368–385.

Halter, W. E., Williams-Jones, A. E., Kontak, D. J. 1998. Origin and evolution of the greisenizing fluid at the East Kemptville tin deposit, Nova Scotia, Canada: Economic Geology 93, 1026–1051.

Hatcher M. I., Clynick G. 1990. Greenbushes Tin-Tantalum-Lithium deposit: in Hughes F E (Ed.), 1990 Geology of the Mineral Deposits of Australia & Papua New Guinea The AusIMM, Melbourne Mono 14, 1, 599-603.

Hosking, K. F. G. 1964. Permo-Carboniferous and later primary mineralisation of Cornwall and South-West Devon, *in* Hosking, K. F. G., Shrimpton, G. J., eds., Present views of some aspects of the geology of Cornwall and Devon: Penzance, Cornwall, United Kingdom, Royal Geological Society of Cornwall, 201–245.

Hou Zengqian, Zaw Khin, Pan Guitang, Mo Xuanxue, Xu Qiang, Hu Yunzhong, Li Xingzhen 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in S.W. China—Tectonic setting,metallogenic epochs and deposit types: Ore Geology Reviews, 31, 48–87.

Kamilli, R. J., Kimball, B. E., Carlin, J. F., Jr. 2017. Tin, chap. S *of* Schulz, K. J., DeYoung, J. H., Jr., Seal, R. R., II, and Bradley, D. C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, S1– S53.

Kamilli, R. J., Criss, R. E. 1996. Genesis of the Silsilah tin deposit, Kingdom of Saudi Arabia: Economic Geology 91, 1414–1434.

Kontak, D. J., Clark, A. H. 2002. Genesis of the giant, bonanza San Rafael lode tin deposit, Peru - Origin and significance of pervasive alteration: Economic Geology 97, 1741–1777.

Korostelev, P. G., Gonevchuk, V. G., Semenyak, B. I., Gorelikova, N. V., Karabtsov, A. A., Kokorin, A. M., Kononov, V. V., Orekhov, A. A., Safronov, P. P., Sinyakov, E. Y. 2009. The Dzhalinda deposit in the Amur region, Russia - Genesis and position in the classification of tin deposits: Geology of Ore Deposits 51, 4, 305–316.

Lehmann, B. 1990. Metallogeny of tin, *in* Bhattacharji, S., Friedman, G. M., Neugebauer, H. J., Seilacher, A. eds. Lecture notes in Earth Sciences [no. 32]: Berlin, Germany, Springer-Verlag, 211 p.

McAndrew, J. 1965. Tin and lead ore deposits of Zeehan, *in* Madigan, R. T., ed., Geology of Australian ore deposits 1 (2nd ed.) *of* Commonwealth Mining and Metallurgical Congress, 8th, Australia and New Zealand: Melbourne, Victoria, Australia, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 492–494.

Rayment, B. D., Davis, G. R., Willson, J. D. 1971. Controls to mineralization at Wheal Jane, Cornwall: Institution of Mining and Metallurgy Transactions, 80, B224–B237.

Ren, S. K., Walshe, J. L., Paterson, R. G., Both, R. A., Andrew, A. 1995. Magmatic and hydrothermal history of the porphyry-style deposits of the Ardlethan tin field, New South Wales, Australia: Economic Geology, 90, 1620–1645.

Richardson, J. M. G. 1988. Field and textural relationships of alteration and greisen-hosted mineralization at the East Kemptville tin deposit, Davis Lake complex, southwest Nova Scotia, *in* Taylor, R. P., Strong, D. F., eds., Recent advances in the geology of granite-related mineral deposits:Canadian Institute of Mining and Metallurgy Special Volume 39, 265–279.

Richardson, J. M. G., Spooner, E. T. C., McAuslan, D. A. 1982. The East Kemptville tin deposit, Nova Scotia - An example of a large tonnage, low grade, greisen-hosted deposit in the endocontact zone of a granite batholith: Geological Survey of Canada, Current Research, pt. B, paper 82–1B, 27–32.

Richardson, J. M. G., Bell, K., Watkinson, D. H., Blenkinsop, J. 1990. Genesis and fluid evolution of the East Kemptville greisen-hosted tin mine, southwestern Nova Scotia, Canada, *in* Stein, H. J., Hannah, J. L., eds., Ore-bearing granite systems - Petrogenesis and mineralizing processes: Geological Society of America Special Paper 246, 181–204.

Ruiz, J. 1988. Petrology, distribution and origin of rhyolites associated with tin mineralization in the Sierra Madre Occidental, Mexico, *in* Taylor, R. P., Strong, D. F., eds. Recent advances in the geology of granite-related mineral deposits: Canadian Institute of Mining and Metallurgy Special Volume 39, 322–330.

Rye, R. O., Lufkin, J. L., Wasserman, M. D. 1990. Genesis of the rhyolite-hosted tin occurrences in the Black Range, New Mexico, as indicated by stable isotope studies, *in* Stein, H. J., Hannah, J. L., eds., Ore-bearing granite systems - Petrogenesis and mineralizing processes: Geological Society of America Special Paper 246, 233–250.

Shimizu, M., Kato, A. 1991. Roquesite-bearing tin ores from the Omodani, Akenobe, Fukuoku, and Ikuno polymetallic vein-type deposits in the Inner Zone of southwestern Japan: Canadian Mineralogist 29, 207–215.

Sillitoe, R. H. 1976. Tin mineralization above mantle hot spots: Nature, 248, 497–499.

Sutphin, D. M., Sabin, A. E., Reed, B. L. 1990. International Strategic Minerals Inventory summary report - Tin: U.S. Geological Survey Circular 930–J, 52 p.

Taylor, R. G. [with chaps. by Cuff, C.] 1979. Geology of tin deposits,: Amsterdam, Netherlands, Elsevier Scientific Publishing Co., Developments in Economic Geology Series 11, 543 p.

Wang R. C., Xie L., Chen J., Yu A., Wang L., Lu J., Zhu J. 2013. Tin-carrier minerals in metaluminous granites of the western Nanling Range (southern China). Constraints on processes of tin mineralization in oxidized granites: Journal of Asian Earth Sciences 74, September 25, 361–372.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 6 Wolfram

## 6.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Wolfram byl objeven roku 1781 švédským chemikem Carlem Wilhelmem Scheelem. Izolován byl až v roce 1783 Juanem Jose D'Elhuayarem a Faustem D'Elhuayarem. Již v roce 1555 užil rektor latinské školy Johannes Mathesius v Jáchymově v knize kázání Sarepta pro šedý, obtížně tavitelný kov název wolform a roku 1559 wolfrumb. Georgius Agricola zmiňuje latinskou obdobu názvu lupi spuma. Anglická varianta názvu pochází ze švédského tungsten = těžký kámen (wikipedia.org).

Wolfram je šedý až stříbřitě bílý, mimořádně obtížně tavitelný kov, jeho bod tavení je nejvyšší ze všech kovových prvků. Významná je i jeho vysoká hustota, pouze některé drahé kovy jako např. zlato, platina, iridium a osmium jsou těžší. Za supernízkých teplot pod 0,0012 K je supravodičem I typu (wikipedia.org).

Obrázek 24. *Wolframové tyčinky (99,98 % W) s desublimovanými krystaly, částečně oxidované s pestrými náběhovými barvami, a krychle 1 cm. Zdroj: Alchemist-hp (wikipedia.org).*

Tabulka 11. *Základní charakteristika wolframu jako prvku. Zdroj: MineralsUK.*

| Symbol | W (wolfram) | |
|---|---|---|
| Atomic number | 74 | |
| Atomic weight | 183.84 | |
| Density at 293 K | 19300 | kg/m$^3$ |
| Melting point | 3422 | °C |
| Boiling point | 5555 | °C |
| Crystal structure | Body centred cubic | |
| Hardness | 7.5 | Moh |
| Specific heat capacity at 293 K | 133.89 | J/kg |
| Electrical conductivity at 293 K | 18.2 | $10^6$S/m$^{-1}$ |

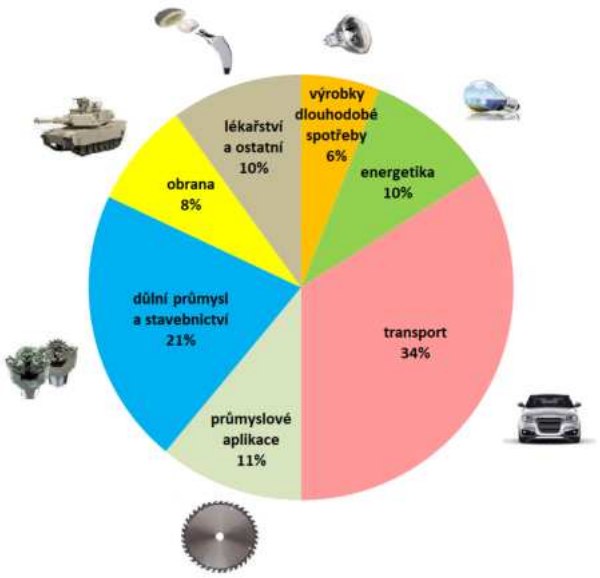
Kovový wolfram je chemicky velmi stálý – je zcela netečný k působení vody a atmosférických plynů a odolává působení většiny běžných minerálních kyselin. Wolfram tvoří celou řadu sloučenin, z nichž nejstálejší vykazují oxidační číslo VI+. Ve sloučeninách může mít dále oxidační číslo II+, III+, IV+, V+.

Průměrný obsah wolframu v zemské kůře je 1,25 až 1,50 ppm, tedy podobně jako cín nebo molybden.

V přírodě se wolfram nalézá v přibližně padesáti minerálech. Nejdůležitější wolframové rudy jsou wolframit (Fe,Mn)$WO_4$ (souhrnný název pro přechodnou řadu ferberit $FeWO_4$ - hübnerit $MnWO_4$), scheelit $CaWO_4$ a stolzit (raspit) $PbWO_4$, kterýt byl objeven v roce 1845 na Cínovci v Krušných horách. Nejčastějším minerálem wolframu je scheelit, který je přítomen zhruba na třech čtvrtinách známých ložisek wolframu. Významnou vlastností scheelitu je jeho fluorescence v krátkovlnném UV záření, využívaná zejména při průzkumu a těžbě scheelitových ložisek.

Tabulka 12. *Přehled hlavních minerálů, tvořících ekonomicky využitelná ložiska wolframu s uvedením chemického složení a obsahu $WO_3$. Zdroj: MineralsUK.*

| Name | Formula | Tungsten content ($WO_3$ %) | Specific gravity (g/cm³) | Appearance (colour and lustre) | Crystal structure |
|---|---|---|---|---|---|
| Ferberite | $FeWO_4$ | 76.3 | 7.5 | Black, sub-metallic to metallic | Monoclinic |
| Wolframite | (Fe,Mn)$WO_4$ | 76.5 | 7.1-7.5 | Dark grey to black, sub-metallic to metallic | Monoclinic |
| Hübnerite | $MnWO_4$ | 76.6 | 7.2-7.3 | Red-brown to black, sub-metallic to adamantine | Monoclinic |
| Scheelite | $CaWO_4$ | 80.6 | 5.4-6.1 | Pale yellow to orange, green to dark brown, pinkish-tan, dark blue to black, white or colourless, vitreous or resinous | Tetragonal |
| Stolzite | $PbWO_4$ | 50.9 | 8.28 | Reddish-brown to yellow-green, sub-adamantine to resinous | Tetragonal |




Obrázek 25. *Hlavní obory využití wolframu. Zdroj: https://wresources.com/projects/tungsten-overview/ (upraveno).*

## 6.2 Průmyslové aplikace a trh

Wolfram se nejčastěji používá k výrobě vláken žárovek, elektrod zapalovacích svíček, antikatod rentgenových lamp, termoelektrických článků, svařovacích elektrod a slinutých i litých karbidů. Pseudoslitina wolframu s chromem připravená matodami práškové metalurgie slouží k výrobě rychlořezných ocelí. Pro svou značnou hustotu a vhodné mechanické vlastnosti se wolfram spolu s uranem používá ke konstrukci průbojných protipancéřových projektilů a nachází i další rozsáhlé využití ve zbrojní výrobě. Těžké slitiny na bázi wolframu se používají ke konstrukci rotorů gyroskopů, rotačních regulátorů nebo vyvažovacích prvků listů vrtulníkových rotorů.

## 6.3 Hlavní ložiska ve světě

Hlavní ložiska se nacházejí v orogenních pásmech na Dálném Východě (jižní Čína, Severní a Jižní Korea, Japonsko, Thajsko, Myanmar), asijské části jižní Sibiře, Kazachstán, Uzbekistán, Kyrgyzstán (Altajsko-Sajanské pásmo) a Kavkaz. Dále ve zlomovém pásmu východního pobřeží Austrálie. Množství významných ložisek W se nachází rovněž v Západních Kordillerách (část tzv. circumpacifického oblouku): Kanada, USA, Bolívie a Peru. Důležitá ložiska leží rovněž ve variském pásmu od České republiky a Německa přes Francii a jz. Anglii do Španělska a Portugalska. W-ložiska v Brazílii (Rio Grande do Norte, Rondónia a Sao Paulo) a Africe (Rwanda, Uganda a Demokratická Republika Kongo) jsou asociována s riftovými strukturami.

## 6.4 Ložiska v České republice

V Bilanci zásob České republiky je uvedeno jediné ložisko s wolframem jako hlavní užitkovou složkou:

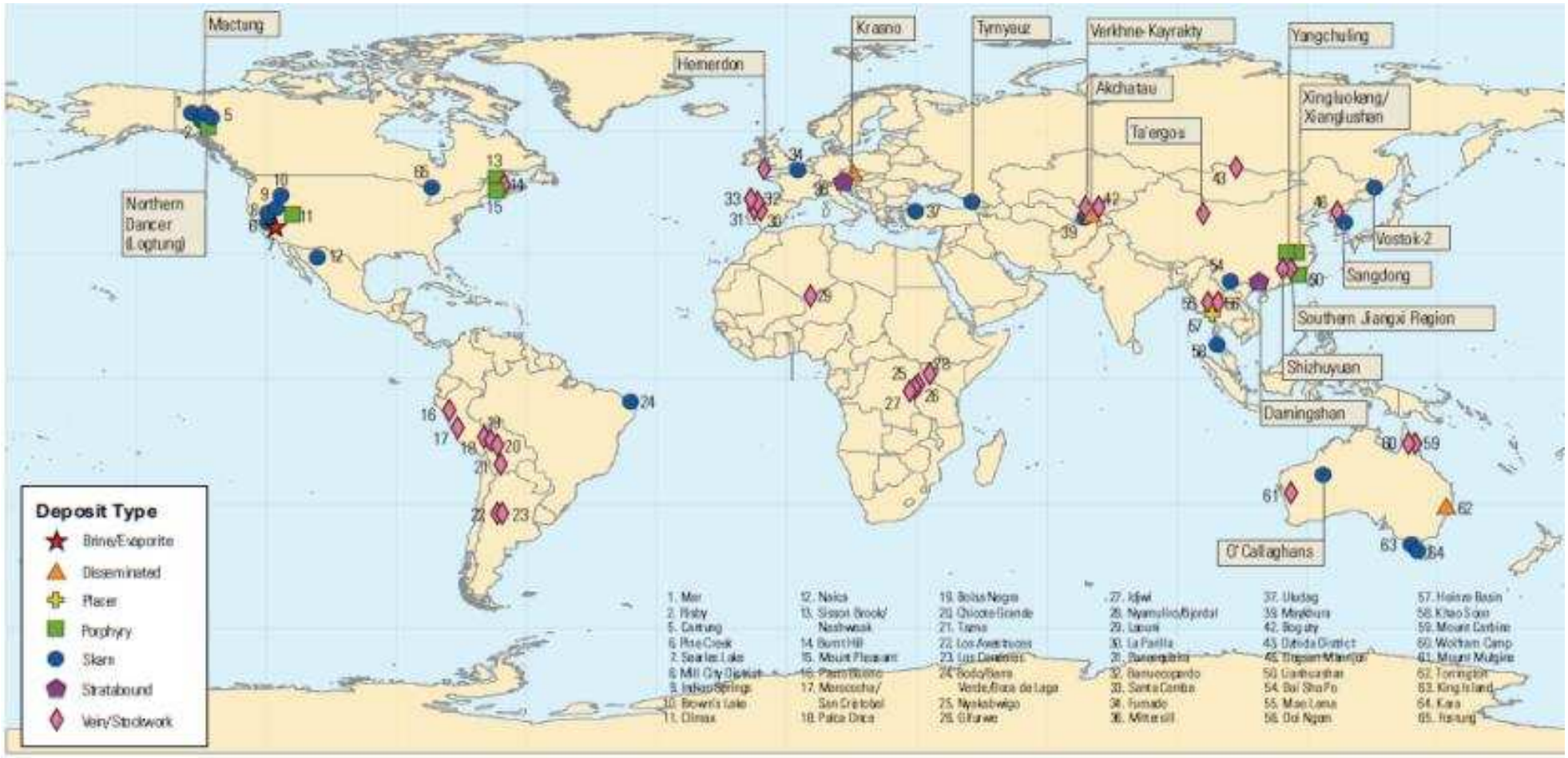
- Kašperské Hory (B-3234800)

Na dalších ložiscích je wolfram vedlejší užitkovou složkou k cínu a/nebo lithiu (Starý et al., 2021):

- Cínovec-jih (B-3123700), Cínovec-východ (B-3123701), Cínovec-severozápad (B-3123702),
- Krásno (B-3159900),
- Krásno-Horní Slavkov (B-3244000).

Obsahy wolframu na komplexních ložiscích jsou nízké a jejich využitelnost určují zejména obsahy cínu a lithia.

Kromě výše uvedených (a níže popsaných) ložisek jsou v Česku evidovány prognózní zdroje P a Q.




Obrázek 26. *Hlavní světová ložiska a ložiskové oblasti wolframových rud. Zdroj: European Mineral Statistics, podle Wernera et al., 1998.*

Tabulka 13. *Schválené prognózní zdroje wolframu v ČR.*

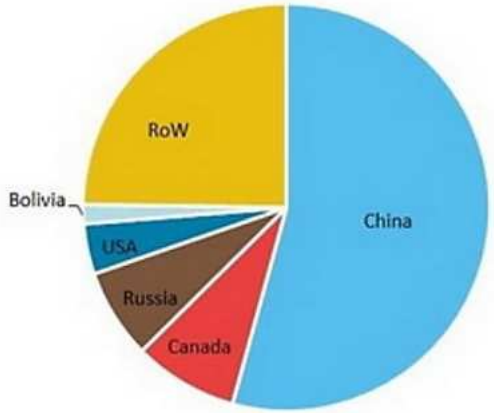
| ID | Název | Surovina |
|---|---|---|
| P-9060000 | Hůrky-střed | cín-wolframová ruda, stopové a vzácné prvky |
| P-9120900 | Kašperské Hory | cín-wolframová ruda, wolframová ruda, zlatonosná ruda |
| P-9072800 | Hůrky-sever | cín-wolframová ruda, měděná ruda, stop. a vzác. prvky, tavné h. |
| P-9327400 | Sepekov-Podboří | wolframová ruda, zlatonosná ruda |
| P-9345200 | Krásno-Horní Slavkov | cín-wolframová ruda, lithiová ruda, stop. a vzác. prvky |
| P-9324500 | Hartmanice-Hamižná | wolframová ruda, zlatonosná ruda |

Tabulka 14. *Ostatní prognózní zdroje wolframu v ČR.*

| ID | Název | Surovina |
|---|---|---|
| Q-9000100 | Boží Dar-Zlatý Kopec | cín-wolframová ruda |
| Q-9431100 | Dlažov-Miletice | wolframová ruda |
| Q-9225600 | Horní Krupka-Loupežný | cín-wolframová ruda |
| Q-9113800 | Horní Slavkov-Hánská elevace | cín-wolframová ruda, lithiová ruda |
| Q-9120800 | Kasejovice | wolframová ruda, zlatonosná ruda |
| Q-9048100 | Kovářská | wolframová ruda |
| Q-9114000 | Krupka-Komáří Vížka | cín-wolframová ruda |
| Q-9000200 | Krupka-okolí | cín-wolframová ruda |
| Q-9327200 | Malý Bor | wolframová ruda |
| Q-9355801 | Mokrsko-východ | wolframová ruda |
| Q-9353300 | Myslív-Nový Dvůr | wolframová ruda |
| Q-9346001 | Nekvasovy 1-Nástupovice-V | wolframová ruda |
| Q-9353400 | Nekvasovy-Nástupovice-západ | wolframová ruda, zlatonosná ruda |
| Q-9353500 | Nekvasovy-Za školou | wolframová ruda |
| Q-9345500 | Nezdín | wolframová ruda |
| Q-9002100 | Nové Město pod Smrkem-Ludvíkov | cín-wolframová ruda |
| Q-9348600 | Písecko | wolframová ruda, zlatonosná ruda |
| Q-9344200 | Potůčky-Bystrý potok | cín-wolframová ruda |
| Q-9356100 | Prostřední Lhota-Čelina | wolframová ruda, zlatonosná ruda |
| Q-9347100 | Řesanice 2-Nová Ves | wolframová ruda |
| Q-9327500 | Sepekov-Hodušín | wolframová ruda |
| Q-9327300 | Tehov | cín-wolframová ruda, wolframová ruda |
| Q-9328100 | Týnec-Hliněný Újezd-východ | wolframová ruda |
| Q-9225300 | Újezd u Kasejovic | polymetalické rudy, wolframová ruda |
| Q-9001400 | Vápenná-Žulová | wolframová ruda |
| Q-9071200 | Vernéřov u Aše | cín-wolframová ruda, lithiová ruda |

## 6.5 Produkce a spotřeba

Základní informace jsou podány v grafické a tabelární formě.




Obrázek 27. *Země s největšími zásobami wolframu. Zdroj: https://mcgroup.co.uk/researches /tungsten.*

Tabulka 15. *Světové a evropské zásoby wolfamu dle Starý et al., 2023. Údaje převzaty z MCS (Mineral Commodity Summary).*

| 2022 | | |
|---|---|---|
| **Země** | **mil. t** | **%** |
| Čína | 1 800 000 | 52,9 |
| Rusko | 400 000 | 11,8 |
| Vietnam | 100 000 | 2,9 |
| Španělsko | 56 000 | 1,6 |
| Rakousko | 10 000 | 0,3 |
| Portugalsko | 3 100 | 0,1 |
| ostatní země | 880 000 | 25,9 |
| **svět** | **3 400 000** | **100,0** |

| 2022 | | | |
|---|---|---|---|
| **Země** | **mil. t** | **% svět** | **% EU** |
| EU | 69 100 | 2,0 | 100,0 |
| Španělsko | 56 000 | 1,7 | 85,4 |
| Rakousko | 10 000 | 0,3 | 14,5 |
| Portugalsko | 3 100 | 0,1 | 4,5 |

*Zdroj: MCS 2023.*

Tabulka 16. *Údaje o světových cenách wolframového koncentrátu, ATP, kovového wolframu ve formě prášku a ferowolframu z německé ročenky DERA a ročenky Mineral Commodity Summary (MCS). Starý et al., 2023.*

| Komodita/rok | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|
| Wolframový koncentrát, Rotterdam, USD/mtu $WO_3$ (MCS) | 261 | 198 | 172 | 225 | 270 |
| Wolfram ve formě ATP, min. 88,5 % $WO_3$; USD/mtu (DERA) | 299,29 | 271,37 | 219,49 | 279,15 | 330,08 |
| Ferowolfram, 75 %, Evropa, USD/kg W (DERA) | 37,25 | 30,99 | 28,90 | 35,85 | 40,99 |
| Wolfram ve formě prášku 2–10 µm, min. 99,7 %, FOB, USD/kg (DERA) | 42,47 | 35,28 | 30,70 | 37,94 | 44,53 |

## 6.6 Genetické typy ložisek

Všechna primární ložiska wolframu jsou spojena s granitoidními intruzemi nebo se středně až vysoce metamorfovanými horninami. Přes 70 % ložisek wolframu vázaných na intruze vznikalo během mesozoika (251 až 85 Ma). Ložiska W obvykle leží uvnitř nebo v blízkosti orogenních pásem vázaných na kolizní/subdukční zóny.

Celosvětové zdroje wolframu jsou vázány na následující genetické typy ložisek:

- skarny (skarn)
- žilná ložiska (veins)
- brekcie (breccia)
- porfyrová ložiska (porphyry)
- greiseny (disseminated deposits)
- stratiformní (stratabound)
- pegmatity (pegmatites)
- hydrotermální ložiska (hydrothermal)
- rozsypy (placer)
- solanky (brines)

Většina současné produkce wolframu pochází ze žilných, skarnových, porfyrových a stratiformních rud.

Tabulka 17. *Přehled genetických typů ložisek wolframu a jejich základních charakteristik. Zdroj: MineralsUK).*

| Deposit type | Deposit size range (metric tonnes) | Typical grade ($WO_3$%) | Estimated tungsten metal content of known deposits (thousand tonnes) | % of total |
|---|---|---|---|---|
| Skarn | $<10^4 - 5x10^7$ | 0.3 -1.4 | 1764 | 41 |
| Vein/breccia/stockwork | $<10^5 - 10^8$ | Variable | 1475 | 35 |
| Porphyry | $<10^7 - 10^8$ | 0.1 – 0.4 | 679 | 16 |
| Disseminated | $<10^7 - 10^8$ | 0.1 - 0.5 | 217 | 5 |
| Stratabound | $<10^6 - 10^7$ | 0.2 -1.0 | 118 | 3 |
| **Total** | | | **4253** | **100** |

### Pegmatity a vysoce diferencované granity

Pegmatity mohou vznikat krystalizací pegmatitového magmatu obohaceného těkavými prvky, metasomaticky i metatekticky. Nejnápadnějším znakem pegmatitů je zrnitost, jsou velmi hrubě zrnité až velkozrnné. Vystupují jako pravé žíly nebo čočky. V mocnějších pegmatitových žílách lze obvykle rozlišit od okrajů do středu několik zón, lišících se velikostí zrna i minerálním složením. Wolframonosné pegmatity mají granitické složení a jsou nabohacené dalšími prvky jako je Li, Be, Nb, Ta, Sn a U. Wolfram není běžnou součástí pegmatitů a pegmatitová ložiska W jsou malá a vzácná. Jediným známým ekonomicky významným ložiskem tohoto typu je scheelitové ložisko Okbang v Jižní Koreji. Wolframit je také získáván jako by-produkt z pegmatitů společně s columbit-tantalitem, kasiteritem, berylem a spodumenem (např. důl Wodgina v Západní Austrálii). Většina W-nosných pegmatitů je prekambrického stáří. Ačkoliv

jsou tato ložiska poměrně nevýznamná, představují významný zdroj meteriálu pro některá rozsypová ložiska.

Greisenová ložiska Sn-W rud se vyskytují ve vrcholových partiích granitoidních intruzí a také v jejich exokontaktu. Mineralizace je provázena greisenizací okolních hornin. Rudní tělesa mají charakter žil nebo žilníků; na některých ložiskách jde o tělesa greisenových metasomatitů s vtroušeninovým zrudněním. Rudní mineralizace je tvořena hlavně kasiteritem, wolframitem, Li-slídami (cinvaldit), molybdenitem a scheelitem. Nerudní minerály jsou zastoupeny zejména křemenem, živci, topazem, fluoritem a apatitem. Greisenová ložiska Sn-rud se vyskytují v typické podobě v evropských variscidách. Typickým příkladem je krušnohorská oblast s ložisky Altenberg a Ehrenfriedersdorf v Německu, Cínovec a Krupka na Teplicku. Významné jsou také rudonosné greiseny v revíru Krásno-Horní Slavkov ve Slavkovském lese.

## Ostatní typy ložisek

### *Skarny*

Skarny jsou vápenatosilikátové horniny složené ze Ca-Fe-Mg-Al-silikátových minerálů, které byly vytvořeny metasomatickými procesy během metamorfózy Ca-bohatých hornin na/nebo v blízkosti kontaktu s granitovými intruzemi. Nejběžnějším W-minerálem je zde scheelit. Společně s W se mohou vyskytovat i další kovy, jako Cu, Mo, Sn, Zn a Bi. Rudní minerály tvoří ve skarnu vtroušeniny nebo drobné žilky.

### *Žilná a žilníková ložiska (vein/stockwork deposits)*

Žilná ložiska sestávají z jednoduchých nebo komplexních křemenných žil, mocných až několik metrů, které se vyskytují v blízkosti granitových intruzí. Jsou geneticky spjaté s frakturami souvisejícími s pronikáním a krystalizací granitových magmat. Minerální složení žil se pohybuje od jednoduchých žil tvořených pouze křemenem a wolframitem až ke komplexům jako např. Pasto Bueno v Peru a Panasqueira v Portugalsku, kde bylo identifikováno přes 50 minerálů, tvořících rudní žíly. Hlavním minerálem W na žilných ložiscích je běžně wolframit, nicméně některá ložiska obsahují i scheelit. Ekonomicky důležitými doprovodnými kovy bývá Sn, Cu, Mo, Bi a Au. Rovněž mohou být přítomné komplexní oxidy U, Th a REE, nebo fosfáty. Žilná ložiska mohou sestávat ze samostatných křemenných žil, zvrstvených křemenných systémů a rojů paraleleních až subparalelních křemnných systémů.

Ložiska tvořená zvrstvenými žilami a ložiska žilníková mají generelně nižší obsahy W, ale mohou být těžena v celém objemu (bez separace jednotlivých žil) a proto už obsahy 0,1 % WO3 jsou ekonomické.

### *Stratiformní ložiska*

Stratiformní ložiska W-rud se vyskytují zpravidla v regionálně metamorfovaných vulkanosedimentárních komplexech. Užitkovou složkou je scheelit, který bývá přítomen v podobě vtroušenin, žilek nebo pásků (tvořených např. křemenem, živcem a scheelitem) v různých typech metamorfitů (pararuly, amfibolity, erlany, mramory, kvarcity). Příkladem je např. rakouské ložisko Mittersill (Felbertal). Na území ČR se stratiformní scheelitová mineralizace (resp. zrudnění scheelit + zlato) vyskytuje v horninách pestré skupiny moldanubika (např. Kašperské Hory, drobné rudní akumulace na Horažďovicku a Humpolecku).

***Porfyrová ložiska***

Porfyrová ložiska se vyskytují v kořenových částech vulkanických komplexů (typu ostrovních oblouků), kde jsou spjaty s intermediárními až kyselými magmaty porfyrového typu (např. granodioritový porfyrit, granitový porfyr), silně postiženými hydrotermálně metasomatickými procesy (K-metasomatóza a sericitizace). Jde o hydrotermální ložiska žilníkovitě-impregnačního typu, která se vyznačují relativně nízkou kovnatostí a často obrovskými zásobami rud. Porfyrová ložiska se skládají z velkých převážně nepravidelných „stockwork-type“ žil, žilníků a zlomů, které se vyskytují uvnitř nebo v blízkosti velkých granitových intruzí. Wolframonosné porfyrové systémy se typicky skládají z mnohočetných fyzických intruzí v extenzních zónách uvnitř postkolizní tektonicky ztluštěné kůry.

***Brekcie***

Brekciové zóny s úlomky různých tvarů a velikostí běžně tvoří součást žilných/stockwork a porfyrových ložisek. Některá tělesa wolframonosných brekcií (zejména „trubky“ a komíny) se vyskytují zcela nezávisle na jiných ložiskových typech. „Trubková“ ložiska jsou subvertikální tělesa válcovitého, zvonovitého až cibulovitého tvaru. Vznikají buď magmatickým hydrotermálně hydraulickým rozpukáním a fluidizací, nebo freatomagmatickými explozemi. Mohou se nacházet uvnitř, nad nebo na okrajích vrcholu intruze, běžně na křížení puklinových systémů. Fragmenty jsou cementovány minerály rudonosných fluid. Rudní minerály často tvoří uzavřeniny a kapsy. Nejčastějším W minerálem bývá wolframit nebo ferberit, lokálně doprovázené scheelitem a minerály Mo, Sn, Bi, Cu, As, Zn, Pb a Sb. Brekciová ložiska bývají malá a i přes svůj historický význam (Austrálie) jsou v současné době považována za nedůležitá.

***Rozsypy a solanky***

Rozsypová ložiska obsahují sedimentární koncentrace scheelitu a wolframitu v aluviálních, eluviálních nebo marinních sedimentech. Vyskytují se typicky v blízkosti klasických ložisek wolframu, která představují zdroj těchto minerálů. Historická těžba rozsypových ložisek W probíhala např. v Bodmin Moor, v jihozápadní Anglii nebo Atolii v Kalifornii. Z průmyslově těžených ložisek lze jmenovat např. Heinze Basin, Barma (Myanmar) a revír Džida (Východní Sibiř). Většina rozsypových ložisek je však malých a vhodných pouze pro těžbu malého (artisanálního) rozsahu.

Wolframonosné solanky a evapority se vyskytují v recentních jezerních a nebo paleojezerních ložiscích v aridních oblastech. Např. Searles Lake v Kalifornii o ploše 90 $km^2$ obsahuje okolo 70 ppm $WO_3$ v solance a 118 ppm v kalech. To odpovídá celkem 61 000 t vysoce koncentrované solanky, přičemž celkové zásoby činí 170 000 t včetně evaporitů do hloubky 50 m. Zdrojem wolframu bylo vymývání z ložisek W z horní části povodí. Ložiska tohoto typu představují potenciálně perspektivní zdroj pro budoucnost.

## 6.7 Metody těžby a úpravy

Postupy těžby a zpracování se liší v závislosti na charakteru ložisek. Příklad úpravy uvádí obrázek.

Technologie výroby wolframu se skládá ze dvou základních kroků. Nejprve probíhá poměrně složitá příprava a rafinace kyseliny wolframové, po níž následuje redukce oxidu wolframového na práškový wolfram.

Práškový wolfram se slinováním ve vodíkové atmosféře při teplotě 3000 °C a kováním převádí na kompaktní kovový wolfram nebo se z něj střídavým působením kyseliny chlorovodíkové a hydroxidu sodného připravuje koloidní wolfram. Pro běžné technické využití se wolfram obvykle připravuje ve formě slitiny se železem jako ferowolfram.

***Wolframitové rudy***

Výroba kyseliny wolframové z wolframitových rud začíná flotací a magnetickou separací. Vzniklý rudný koncentrát se nejprve oxidačně praží, pražením se odstraní hlavní příměsi síry a arsenu. Následuje loužení kyselinou sírovou, při kterém se odstraňují další nečistoty, zejména fosfor. Dalším krokem je tavení rudného koncentrátu se sodou nebo hydroxidem sodným v plamenné peci při teplotě 800-900°C. Při alkalickém tavení vzniká rozpustný wolframan sodný:

$(Fe,Mn)WO_4 + Na_2CO_3 \rightarrow Na_2WO_4 + CO_2 + (Fe,Mn)O_2$

Wolframan sodný se vylouží vodou a podrobí se působení koncentrované kyseliny chlorovodíkové za vzniku žluté sraženiny kyseliny wolframové:

$Na_2WO_4 + 2HCl \rightarrow H_2WO_4 + 2NaCl$

***Scheelitové rudy***

Technologie výroby kyseliny wolframové ze sheelitu je podstatně jednodušší, není nutno používat alkalické tavení, na rudný koncentrát se působí koncentrovanou kyselinou chlorovodíkovou, produktem je přímo kyselina wolframová:

$CaWO_4 + 2HCl \rightarrow H_2WO_4 + CaCl_2$

## 6.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Pro hodnocení geologických celků z hlediska potenciálu k zajištění ekonomicky využitelných zásob a pro posuzování výpočtů zásob vyhrazených nerostů v České republice byly v rámci projektu TA ČR „Horninové prostředí a nerostné suroviny“ (SS02030023) navrženy následující limitní ukazatele (Tvrdý et al. 2022):

Velikost ložiska:

- minimální množství geologických zásob na ložisku ..... 2 000 tun W

Minimální obsah na ložisku:

Jakost nerostu je dána minimálním obsahem W-kovu, resp. $WO_3$ (poměr je cca 1 : 0,8). Tento ukazatel se stanovuje pro rudy s wolframem jako hlavní užitkovou složkou a pro komplexní rudy s obsahem wolframu.

a) samostatná ložiska s wolframem jako hlavní užitkovou složkou

- min. obsah pro povrchové dobývání.....bilanční 0,3 hm. %, nebilanční 0,1 hm. % W-kovu

- min. obsah pro hlubinné dobývání.....bilanční 0,5 hm. %, nebilanční 0,3 hm. % W-kovu

b) komplexní ložiska s obsahem wolframu

- min. obsah v rudě nutný pro zařazení zásob do státní bilance.....0,05 hm. % W-kovu

## 6.9 Reference

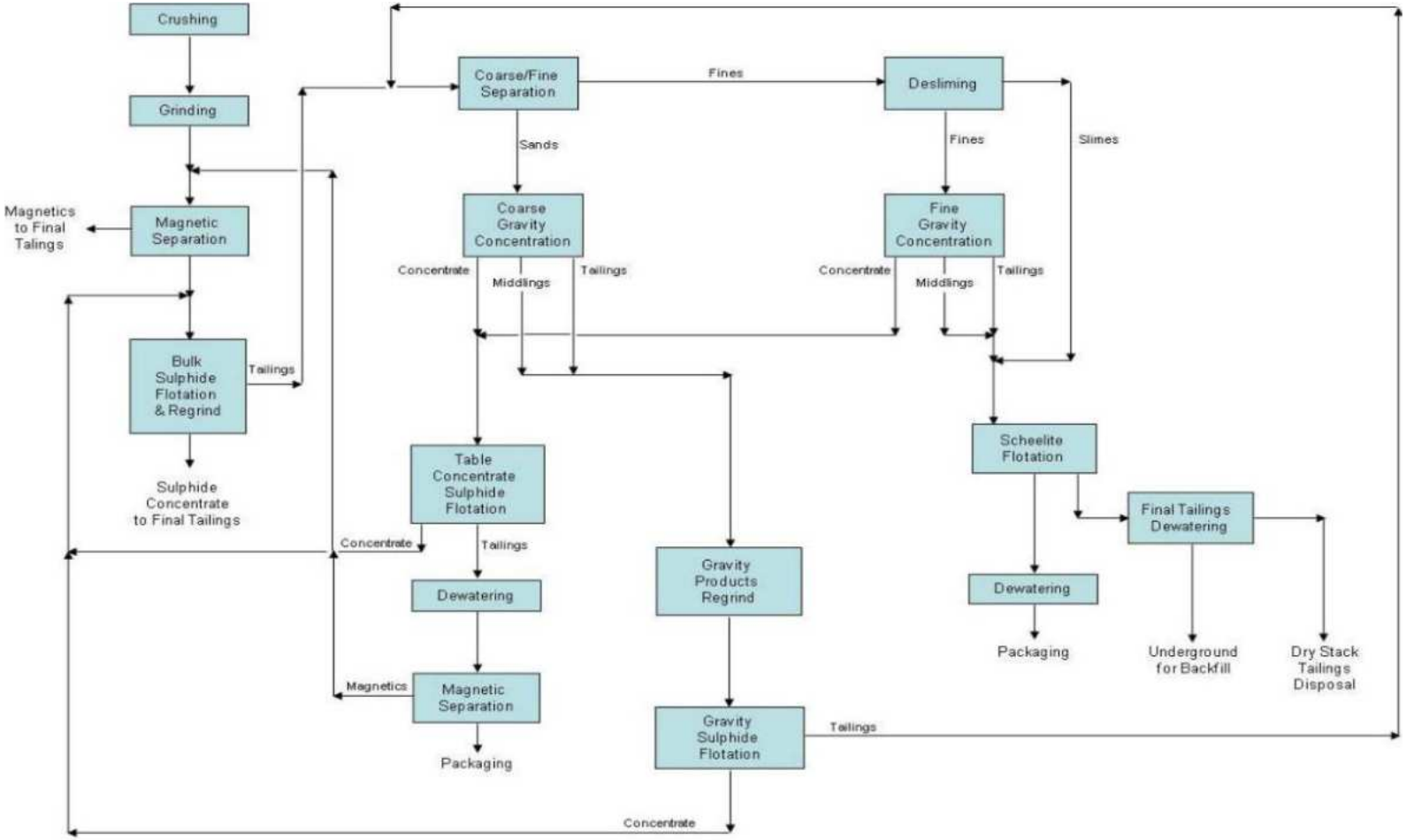
Narciso, H. et al. 2009. Amended Technical Report on the Mactung Property. Wardrop Engineering Inc., Vancouver.

Starý, J. 2020. Ložiskově-geologická studie revíru Kašperské Hory – ložisko Kašperské Hory a prognózní zdroj Kašperské Hory – rudy zlata a wolframu. 46 s. Česká geologická služba. Praha. CGS P000006/2020.

Starý, J., Sitenský, I., Mašek, D., Gabriel, Z., Němec, M., Hodková, T., Vaněček, M., Novák, J., Kavina, P. 2023. Surovinové zdroje České republiky. MŽP, ČGS. Praha.

Tvrdý, J., Kovářová, J., Krátký, O., Havránek, J., Opekar, L., Starý, J. 2022. Metodika identifikace akumulací strategických komodit a podmínek využitelnosti strategických nerostných surovin. Projekt Horninové prostředí a nerostné suroviny SS02030023. Dílčí cíl 1.4. Program č. 6 Prostředí pro život. TA ČR.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.




Obrázek 28. *Zjednodušené schéma úpravy rudy. Zdroj: Narciso et al., 2009.*

# 7 Bismut

## 7.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Bismut (Bi) je těžký křehký kov bílé barvy se slabým růžovým nádechem. Je známý již od středověku, o bismutu jako o kovu podobném cínu se zmiňuje Basilius Valentinus v 15. století. K výrobě barviv se získával již kolem roku 1460 v saském Schneebergu. Jako samostatný chemický prvek odlišný od olova ho v roce 1753 objevil francouzský chemik Claude F. Geoffroy (Deady et al. 2022).

Bismut je ušlechtilý prvek. Na vzduchu je stálý, v červeném žáru shoří namodralým plamenem na oxid bismutitý $Bi_2O_3$. S většinou kovů tvoří slitiny s nízkou teplotou tání. Elementární bismut má vysoký elektrický odpor a společně se rtutí nejnižší tepelnou vodivost ze známých kovových prvků. Na rozdíl od většiny ostatních těžkých kovů nejsou jeho sloučeniny toxické, vyskytuje se v nich v mocenství $Bi^{3+}$ a méně často $Bi^{5+}$ (https://cs.wikipedia.org/wiki/Bismut).

Obrázek 29. *Uměle vypěstované krystaly bismutu a krychle 99,99 % Bi o hraně 1 cm. Zdroj: Alchemist-hp (wikipedia.org).*

Hlavní minerály bismutu se vyskytují převážně v hydrotermálních a magmatických systémech. Patří sem ryzí bismut a jeho slitiny s Au a Ag, sulfidy, sulfosoli (např. bismutinit $Bi_2S_3$), selenidy a telluridy, oxidy a oxidické sloučeniny.

Tabulka 18. *Minerály bismutu. Zdroj: Deady et al., 2022.*

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Ryzi Bi a slitiny s Au a Ag** | | **Telluridy** | |
| Native bismuth | Bi | Tsumoite | BiTe |
| Maldonite | $Au_2Bi$ | Tellurobismuthite | $Bi_2Te_3$ |
| Matildite | $AgBiS_2$ | Pilsenite | $Bi_4Te_3$ |
| Pavonite | $AgBi_3S_5$ | Hedleyite | $Bi_7Te_3$ |
| Jonassonite | $Au(Bi,Pb)_5S_4$ | Tetradymite | $Bi_2Te_2S$ |
| **Sulfidy a sulfosoli** | | Joséite-A | $Bi_4TeS_2$ |
| Bismuthinite | $Bi_2S_3$ | Joséite-B | $Bi_4Te_2S$ |
| Ikunolite | $Bi_4S_3$ | **Oxidy a oxidické sloučeniny** | |
| Emplectite | $CuBiS_2$ | Bismite | $Bi_2O_3$ |
| Junoite | $Bi_8Pb_3Cu_2(S,Se)_{16}$ | Bismutite | $(BiO)_2CO_3$ |
| Wittite | $Pb_9Bi_{12}(S,Se)_{27}$ | Bismoclite | BiOCl |
| Andorite | $PbAgSb_3S_6$ | Russellite | $Bi_2WO_6$ |
| Akinite | $PbCuBiS_3$ | Montanite | $Bi_2TeO_6{\cdot}2H_2O$ |
| Wittichenite | $Cu_3BiS_3$ | Cannonite | $Bi_2(SO_4)O(OH)_2$ |
| Galenobismutite | $PbBi_2S_4$ | Preisingerite | $Bi_3(AsO_4)_2O(OH)$ |
| Cosalite | $Pb_2Bi_2S_5$ | Bismutoferrite | $Fe^{3+}{}_2Bi\,(SiO_4)_2(OH)$ |
| Lillianite | $Pb_3Bi_2S_6$ | | |

Obrázek 30. *Vzorek křemene s krystaly bismutinitu. Zdroj mindat.org.*

## 7.2 Průmyslové aplikace a trh

Pro svůj značný význam pro farmaceutický průmysl a jako náhrada olova v barvách byl bismut zařazen mezi kritické suroviny Evropské unie. Významné uplatnění nalézá bismut také jako legovací prvek v různých slitinách. Přídavek bismutu do slitin obvykle snižuje tvrdost materiálu

a zvyšuje jeho kujnost. Slitina železa s bismutem je známa jako kujná litina a lze ji na rozdíl od běžné litiny snadno tvářet kováním i válcováním. Slitina s manganem s názvem bismanol slouží pro výrobu velmi silných permanentních magnetů (https://cs.wikipedia.org/wiki/Bismut). Bi-Pb eutektické kompozice jsou účinnými těžkými kapalnými chladivy pro jaderné reaktory a několik nedávných prototypů reaktorů využívá moduly pro výrobu páry v přímém kontaktu s kapalným kovovým chladivem (Deady et al. 2022). V chemickém průmyslu je bismut součástí katalyzátorů na výrobu akrylátů a dalších látek. Při výrobě keramiky slouží bismut jako náhrada olova při přípravě glazur a barviv a při výrobě optických vláken s vysokým indexem lomu (https://cs.wikipedia.org/wiki/Bismut).

Bismut není považován za lidský karcinogen a je proto důležitou součástí kosmetických a lékařských přípravků.

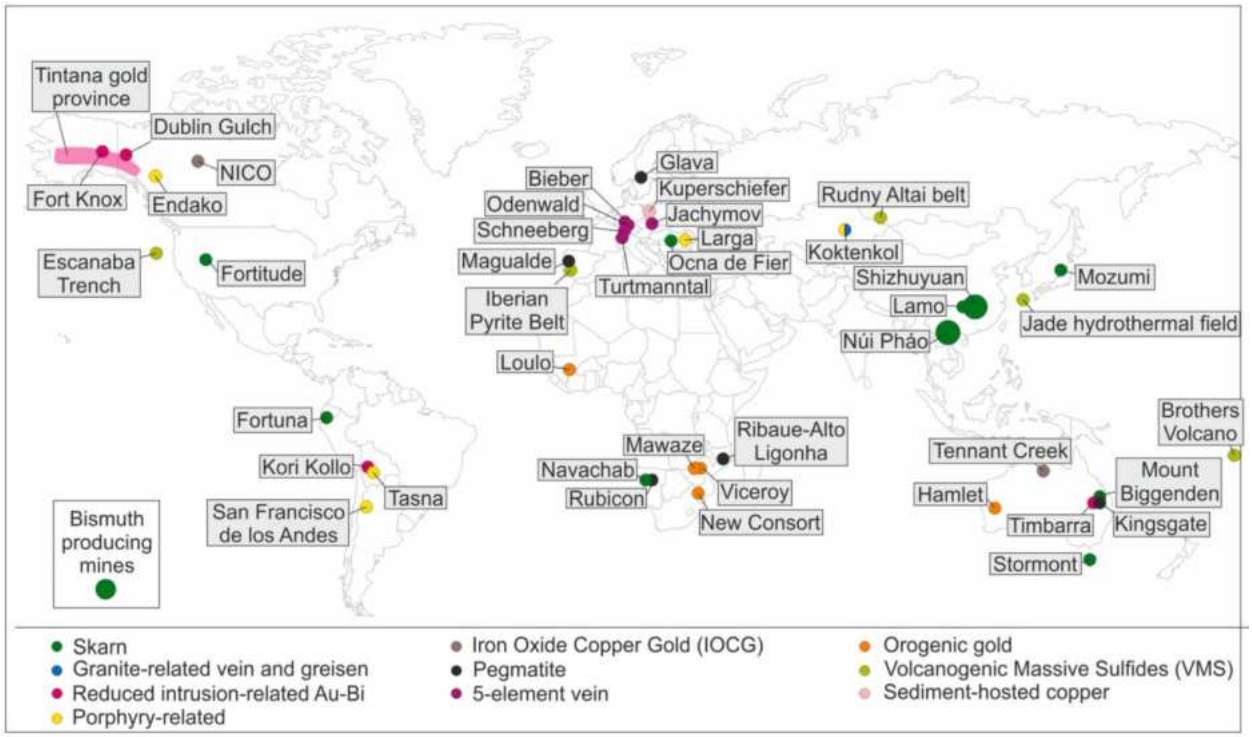
## 7.3 Hlavní ložiska ve světě

Bismut se získává hlavně jako vedlejší produkt těžby jiných kovů. Mezi hlavní ložiska, na kterých se těží rudy obsahující bismut, jsou Shizhuyuan v Číně a Núi Pháo v severním Vietnamu.

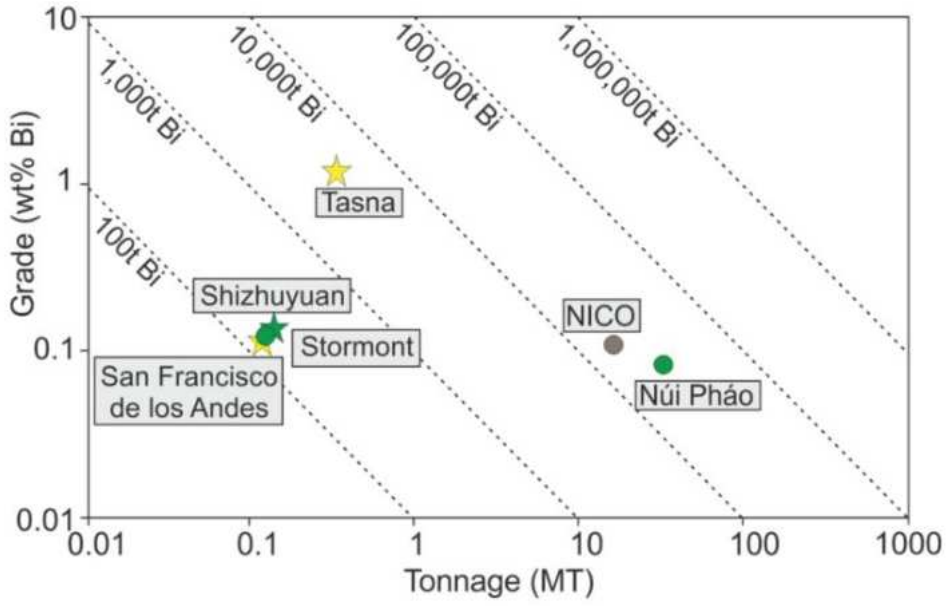
Tabulka 19. *Produkce bismutu v rafinériích. Zdroj: USGS.*

| | Refinery production[e] | |
|---|---|---|
| | 2022 | 2023 |
| United States | — | — |
| Bolivia | — | 40 |
| Bulgaria | 50 | 50 |
| China | 15,500 | 16,000 |
| Japan | 490 | 500 |
| Kazakhstan | 190 | 160 |
| Korea, Republic of | 810 | 850 |
| Laos | [8]1,940 | 2,000 |
| World total (rounded) | 19,000 | 20,000 |

Rozmístění hlavních ložisek bismutu po světě a kovnatost a velikost těch největších z nich graficky znázorňují obrázky níže.




Obrázek 31. *Hlavní světové výskyty bismutových rud. Zdroj: Deady et al., 2022.*




Obrázek 32. *Orientační množství zásob a kovnatost hlavních ložisek bismutu. Zdroj: Deady et al., 2022.*

## 7.4 Výskyty v České republice

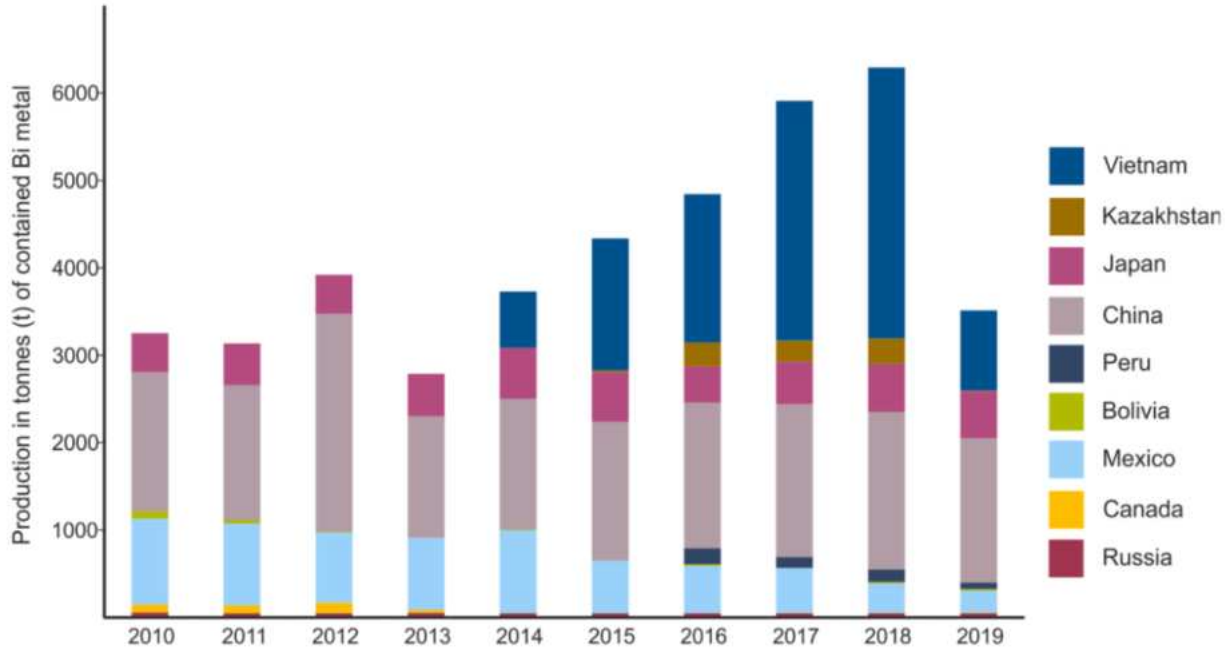
Ve Státní bilanci výhradních ložisek nefigurují žádná ložiska bismutu. Bismut je však častou příměsí rud jiných kovů. V České republice jde zejména o ložiska Sn-W±Li (Cínovec, Krupka), ložiska zlata (Mokrsko-Čelina-Psí hory), ložiska mědi (Tisová u Kraslic), polymetalických rud (Kutnohorský revír) a žilné výskyty pětiprvkové formace Co-Ni-Bi-Ag-As±U (Jáchymovský revír). Bez ložiskového potenciálu jsou patrně výskyty Bi-minerálů ve skarnech a pegmatitech.

## 7.5 Produkce a spotřeba

Evropská unie je stoprocentně závislá na dovozu rafinovaného bismutu o čistotě nejméně 99,8 % (EK 2017; 2020). Od roku 1997, kdy tam byla uzavřena poslední rafinerie, jsou zcela závislé na dovozu i Spojené státy (USGS 2022).

Celosvětové produkci v posledním desetiletí dominovala Čína, kde se Bi získává jako vedlejší produkt při zpracování hlavně rud Pb a W. Těžba na ložisku Núi Pháo ve Vietnamu, který vlastní společnost Masan Resources, vzrostla z 646 t v roce 2014 na 3 099 t v roce 2018 a v letech 2019 a 2020 klesla na <1000 t (Brown et al. 2020, 2021). V Číně probíhá také artesanální těžba bismutových rud, přičemž ruční separace bohaté Bi-mineralizace významně přispívá ke globální produkci koncentrátů (Blazy a Hermant 2013; EK, 2017). Pro artesanální těžbu Bi je k dispozici jen málo veřejných údajů a nejsou zahrnuty do grafů (Deady et al. 2022).

Předpokládá se, že světová poptávka po bismutu poroste o 4-5 % ročně, a to zejména díky rostoucímu použití ve farmaceutickém průmyslu (EK 2017). Zhruba třetinu poptávky představují metalurgické aplikace. Zbytek produkce se využívá při výrobě Bi-chemikálií. Další nárůst bude způsoben průmyslovou poptávkou v rozvíjejících se ekonomikách v souvislosti s používáním bismutu jako náhrady za olovo.




Obrázek 33. *Těžba bismutu v letech 2009 až 2019 podle Britské geologické služby. Zdroj: Brown et al., 2021, Deady et al., 2022.*

Vývoj cen bismutu v letech 2018-2022 udává Tabulka. Cena je obvykle uváděna pro kov 99,99 % Bi a v posledních letech značně kolísala.

Tabulka 20. *Ceny obchodovaných komodit. Zdroj: Starý et al., 2023.*

| Komodita/rok | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022[e] |
|---|---|---|---|---|---|
| Vizmut kov, USD/lb (MCS)* | 4,61 | 3,18 | 2,72 | 3,74 | 3,9 |
| Vizmut kov, rafinovaný ≥ 99.99 %, USD/kg (DERA)** | 9 381,20 | 6 358,40 | 5 341,1 | 7 100,99 | 6 833,51 |

*e – odhad*
** Cenové rozpětí zahrnuje nejnižší a nejvyšší cenové kotace v daném roce.*
*** Roční průměrná cena.*

## 7.6 Genetické typy ložisek

Bismut je obvykle vedlejším produktem při výrobě Pb, W, Cu nebo Au. Metody extrakce přitom závisí na vlastní mineralogii rudy. Často se však bismut z rud vůbec nezískává. Podle Jiráska et al. (2017) pochází z ložisek, kde je bismut považován za hlavní rudu, pouze asi 10 % produkce.

### Pegmatity a vysoce diferencované granity

Minerály bismutu jsou častou minoritní složkou ve vyvinutějších pegmatitech typu LCT (Li-Cs-Ta) a NYF (Nb-Y-F). Přestože obsahy jsou obvykle neekonomické, některé z nich byly v minulosti na bismut těženy. Bi se v pegmatitech vyskytuje buď ryzí či se sulfidy obecných kovů, nebo v niobotantalátových pegmatitech jako bismutotantalit ($BiTaO_4$).

V pegmatitu typu LCT El Quemado v Saltě (Argentina) vedla mineralizace v pozdní fázi ke vzniku asociace Bi-Te-minerálů zahrnujících ryzí bismut, bismutinit, emplektit a hodrušit ($Cu_8Bi_{12}S_{22}$). Tato asociace je omezena na relativně nízké teploty a tlaky v rozmezí 2-3 kbar. Pozdně hydrotermální až supergenní alterace vedly ke vzniku bismutitu a vzácného bismitu. Toto pegmatitové pásmo poskytlo ve 40. letech 20. století >5 t koncentrátů bismutových rud (Márquez-Zavalía et al. 2012).

V pegmatitovém komplexu typu LCT Pala v jižní Kalifornii se v křemenných jádrech vyskytují Bi-minerály, ryzí bismut, bismutinit, bismit, bismutit a beyerit $Ca(BiO)_2(CO_3)_2$, vzácné jsou klinobisvanit $BiVO_4$, eulytin $Bi_4(SiO_4)_3$ a namibit $Cu(BiO)_2(VO_4)(OH)$.

Supergenní Bi-mineralizace ve formě bismutitu byla identifikována ve zvětralých částech granitových pegmatitů v Mozambiku. Ryzí bismut a bismutinit byly získány z LCT-pegmatitů v oblasti Ribaue-Alto Ligonha (Mozambik).

Přestože jsou minerály bismutu v pegmatitech poměrně hojné, tak z nich bismut není v současné době ekonomicky získáván.

Bismut je globálně spojen s proximálními zónami žulových ložisek W a Sn, zejména v žulách bohatých borem a fluórem (turmalín). Vyskytuje se zde obvykle jako minoritní ryzí Bi a bismutinit v greisenových a žilných systémech.

Bismutovou mineralizaci hostí řada greisenů vázaných na variské granitoidy. Příkladem mohou být granity cornubského masivu (Bodmin Moor, Bosworgy, Hemerdon) ve Velké Británii, krušnohorského plutonu (Podlesí, Vykmanov, Boží Dar) a ložisko Panasqueira (Portugalsko). Na bismut jsou bohatá i některá žilná Sn-ložiska v Cornwallu v jihozápadní Anglii, například Wheal Jane, kde je greisenová fáze překryta pozdější sulfidickou mineralizací (Deady et al., 2022).

## Ostatní typy ložisek

### *Skarnová ložiska*

Skarny vznikají metasomatismem kontaktní zóny mezi vyvřelou intruzí a okolními karbonátovými horninami. Skarny se celosvětově těží pro obsah rud Au, Cu, W, Fe a polymetalů. Galenity ze skarnových rud mají obvykle zvýšený obsah Bi.

Minerály Bi, zejména bismutinit a ryzí bismut, jsou uváděny ve 23 % světových skarnových ložisek s převahou Au a v 9 % skarnových ložisek, kde je Au vedlejším produktem (Meinert, 2000; Theodore et al., 1991).

Ložisko Shizhuyuan v Číně zahrnuje proximální skarnové a greisenové W-Sn-Mo-Bi a distální Pb-Zn-Ag žíly v devonských vápencích v aureole granitové intruze. Ložisko obsahuje významné množství Bi ve formě bismutinitu a je jedním z mála, kde se bismut těží jako vedlejší produkt. Podle Zhonga et al. (2017) je na ložisku 0,2 Mt rudy s obsahem 0,19 % Bi. Vyskytují se zde tři typy mineralizace s bismutem – retrográdní skarny, masivní greiseny a žilníková ruda – které se často vzájemně překrývají (Lu et al., 2003).

Núi Pháo v severním Vietnamu je skarnové polymetalické ložisko W-F-Cu-Au-Bi světového významu. Jde o první velký důl zaměřený na produkci Bi, který byl otevřen po uzavření dolu Tasna v Bolívii v roce 1985. Průměrná hodnota obsahu Bi je 0,108 % na základě 0,2 % ekvivalentu WO3 a předpokládají se zde velké geologické zásoby. Těžba byla zahájena v roce 2014 a během dvou let překonala těžbu v Číně, i když v roce 2019 opět poklesla. Ložisko je tvořeno strmými greisenovými žilami a skarnovými horizonty na kontaktu granitoidů s ordovickými až silurskými sedimenty. Mineralizovaná zóna má délku cca 1500 a mocnost od 300 do 400 m. Hlavními rudami skarnů jsou scheelit, pyrhotin, ryzí bismut a chalkopyrit (Hau et al., 2020). Ložiska typu RIRGS

Menší skupina ložisek zlata s doprovodnou mineralizací zahrnující i bismut je představována systémy RIRGS (reduced intrusion-related systems), které se uplatňují distálně od konvergentních hranic desek a v oblastech známé W-Sn mineralizace (Deady et al., 2022). Zrudnění se obvykle vyskytuje v žilných systémech, i když byla popsána mineralizace brekciová, greisenová a rozptýlená (Thompson et al., 1999). V typech ložisek RIRGS se Bi spolu s Au-Ag-Te-S vyskytuje jako maldonit a jako teluridy (např. telurobismutit, tetradymit, hedleyit, joséit-B, joséit-A, pilsenit atp.). Příklady jsou Fort Knox (USA), Vasilkovskoe (Kazachstán), Timbarra (Austrálie), Kori Kollo (Bolívie) a Au-revír Tintina (USA a Kanada; Deady et al., 2022).

### *Porfyrová ložiska*

Bismut je ve větších obsazích přítomen i v některých ložiscích porfyrového typu. Významné obohacení se zdá být v ložisích Mo-W, např. Endako v Britské Kolumbii. V Endako je Bi ve

formě bismutinitu spojen s Mo-mineralizací v křemenných žilách a žilnících, není zde však získáván. Z epitermálně-porfyrických systémů je bismutová mineralizace uváděna například z ložiska Larga v Rumunsku (Cook a Ciobanu, 2004).

### *Ložiska Fe-oxidických rud mědi a zlata*

Paleoproterozoické ložisko NICO v Kanadě je ložisko Fe-oxidických rud mědi a zlata (IOCG) s převahou magnetitu a s Co-Au-Bi ± Cu-W mineralizací. Je uloženo v čočkách vázaných na vrstvy v metasedimentárních horninách. Pozdní Bi-mineralizace následuje po vysrážení kobaltem bohatých sulfarsenidů a je zastoupena ryzím bismutem, bismutinitem a emplektitem (Acosta-Góngora et al., 2015).

### *Žilná ložiska pětiprvkové formace*

Žilná ložiska tzv. pětiprvkové formace (Co-Ni-Bi-Ag-As±U) jsou významným zdrojem bismutu, který se zde často vyskytuje v ryzí formě. Klasickou oblastí jejich výskytu jsou Krušné hory, dalšími příklady jsou mj. v Německu doly Wittichen a Clara (Schwarzwald) a St. Andreasberg (pohoří Harz) a Turtmanntal ve Švýcarsku. Typická mineralizace zahrnuje ryzí Bi, As a Ag s následnými arsenidy Co-Ni- Fe.

### *Orogenní ložiska zlata*

Na některých orogenních ložiscích zlata se vyskytuje bismut v charakteristické asociaci Bi-Te(-Se). Na orogenním ložisku Au archaického stáří Hamlet (St. Ives, Západní Austrálie) koreluje lokální obohacení Bi s Au a odráží pohyb mineralizačních fluid zlatonosnou střižnou zónou (Hood et al. 2019). V dole Viceroy v zelenokamenovém pásmu (greenstone belt) Harare-Bindura-Shamva (Zimbabwe) se vyskytuje pestrá asociace Bi-sulfosolí (joséit-A, joséit-B, hedleyit, ikunolit, jonassonit) spolu s ryzím bismutem, maldonitem a bismutinitem. Tyto minerály jsou interpretovány jako produkty pozdní epitermální fáze, při které došlo k mobilizaci zlata obsaženého v již existujícím arzenopyritu a zlepšení kvality Au-rudy (Oberthür a Weiser, 2008). Z dalších významnějších orogenních Au-ložisek s obsahy Bi uvádí Deady et al. (2022) důl New Consort Gold Mine (JAR) a ložiska v těžebním revíru Loulo v Mali.

### *Ložiska typu VMS*

Masivní sulfidy mořského dna (seafloor massive sulphides, SMS), které se tvoří v recentních zaobloukových centrech rozpínání a v ponořených sopkách ostrovních oblouků, jsou ve srovnání s hydrotermálními systémy středooceánského hřbetu obohaceny o řadu kovů. Jejich fosilními analogy jsou tzv. vulkanogenní ložiska masivních sulfidů (VMS). Bi, In, Mo, Se a Te se v nejvyšších koncentracích vyskytují v masivních sulfidech, kterým dominuje chalkopyrit. Nejčastějšími Bi-minerály jsou bismutinit, tellurobismutit, tetradymit a ryzí bismut. Obsahy Bi v ložiscích VMS dosahují až 500 ppm. Množství Bi v ložiscích SMS činí pouze 0,2 % oproti množství v kontinentálních rudních ložiscích (Monecke et al. 2016).

### *Mědinosné sedimenty*

Zvýšené obsahy Bi jsou známy i z ložisek černých břidlic. Např. v polském revíru Lubin obsahuje vsázka do hutě 7 ppm Bi a je potenciálně využitelná (KGHM 2019). Emplektit a kuprobismutit ($Cu_1AgBi_{13}S_{24}$) se vyskytují s Pd-Hg-teluridy na žilách ve vrstevně vázané

(stratabound) Cu-Ag mineralizaci v měděném pásmu Kalahari v severozápadní Botswaně (Piestrzyński et al. 2015).

## 7.7 Metody těžby a úpravy

Vysoká specifická hmotnost, dobrá flotabilita a diamagnetismus nejběžnějších minerálů Bi umožňují použití metod jako flotaci a gravitační a magnetickou separaci (Krenev et al. 2015).

Získávání Bi z Bi bohatých rud W a W-Mo rud je možné pomocí kombinace gravitační, flotační a magnetické separace, ale obvykle má nízkou průměrnou výtěžnost, pod 70 % (Krenev et al. 2015). Při zpracování těchto rud se většina Bi rozdělí do sulfidického koncentrátu a zbytek se oddělí do W-Sn koncentrátu. Sulfidický koncentrát se zpracovává flotací a Bi se z W-Sn koncentrátu odstraňuje pomocí magnetické separace, kdy většina Bi přechází do nemagnetické frakce Sn a jen malé množství do magnetické frakce W. Při získávání Bi ze sulfidické frakce se používá řada depresorů Bi (včetně kyanidu) a ethylxantát jako kolektor. Pro získávání Bi z některých molybdenových flotačních zbytků byla vyvinuta bezkyanidová technologie (Krenev et al. 2015). V Núi Pháo se ruda rozděluje na frakci Cu+Au a na kolektivní sulfidickou frakci s obsahem W, Bi a F. Z kolektivní sulfidické frakce se Bi odděluje další flotací a loužením (Masan Resources 2014a).

Hydrometalurgické a pyrometalurgické metody jsou obvykle energeticky náročné a produkují značné množství oxidu uhličitého. Jsou proto vyvíjeny technologie na bázi loužení iontovými kapalinami (technologie DES), které mají potenciál snížit dopady na životní prostředí i náklady. V mnoha případech by tak bismut přestal být odpadním produktem, ale naopak užitkovou složkou zvyšující hodnotu rudy (Deady et al. 2022).

## 7.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Pro hodnocení geologických celků z hlediska potenciálu k zajištění ekonomicky využitelných zásob a pro posuzování výpočtů zásob vyhrazených nerostů v České republice byly v rámci projektu TA ČR „Horninové prostředí a nerostné suroviny“ (SS02030023) navrženy níže uvedené limitní ukazatele (Tvrdý et al. 2022). V České republice je bismut doprovodným prvkem rud jiných kovů a nevyskytuje se jako hlavní užitková složka. Byly proto stanoveny pouze limity pro zásoby vhodné k zařazení do státní bilance.

Velikost ložiska:

- minimální množství zásob nutné pro zařazení do státní bilance..... 100 tun Bi-kovu

Minimální obsah na ložisku:

- minimální obsah jako vedlejší užitkové složky v rudě/surovině ..... 0,02 hm. % Bi-kovu

## 7.9 Reference

Acosta-Góngora, P., Gleeson, S., Samson, I., Corriveau, L., Ootes, L., Taylor B. et al. 2015. Genesis of the Paleoproterozoic NICO iron oxide–cobalt–gold–bismuth deposit, Northwest Territories, Canada: Evidence from isotope geochemistry and fluid inclusions. Precambrian Research 268, 168–193.

Blazy, P., Hermant, V. 2013. Métallurgie extractive du bismuth. Éditions Techniques de l'Ingénieur, doc. M 2316, 152 s.

Brown, T. J., Idoine, N. E., Wrighton, C. E., Raycraft, E.R., Hobbs, S. F., Shaw, R. A., Everett, P., Kresse, C., Deady, E. A., Bide, T. 2020. World Mineral Production 2014-18. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham.

Brown, T. J., Idoine, N. E., Wrighton, C. E., Raycraft, E. R., Hobbs, S. F., Shaw, R. A., Everett, P., Deady, E. A., Kresse, C. 2021. World Mineral Production 2015-19. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham.

Cook, N., Ciobanu, C. 2004. Bismuth tellurides and sulphosalts from the Larga hydrothermal system, Metaliferi Mts, Romania: Paragenesis and genetic significance. Mineralogical Magazine 68, 301–321.

Deady, E., Moon, C., Moore, K., Goodenough, K. M., Shail, R. K. 2022. Bismuth: Economic geology and value chains. Ore Geology Reviews 143 (2022).

EK 2017. European Commission. Study on the review of the list of critical raw materials. Critical raw materials factsheets.

EK 2020. European Commission. Communication from the Commission to the European Parliment, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. COM/2020/474 final.

Hau, N. T., Nevolko, P., Dung, P., Svetlitskaya, T., Hoa, T. T., Shelepaev, R. et al. 2020. Age and genesis of the W-Bi-Cu-F (Au) Nui Phao deposit, Northeast Vietnam: Constrains from U-Pb and Ar-Ar geochronology, fluid inclusions study, S-O isotope systematic and scheelite geochemistry. Ore Geology Reviews 103578.

Jirásek, J., Sivek, M., Láznička, P. 2017. Ložiska nerostů. Ostrava: Anagram http://geologie.vsb.cz/ loziska/loziska/uvodem.html.

KGHM 2019. KGHM Polska Miedź S.A. Analyst Day Presentation. Lubin, 12-14 Feb 2019.

Krenev, V., Drobot, N., Fomichev, S. 2015. Processes for the recovery of bismuth from ores and concentrates. Theoretical Foundations of Chemical Engineering 49, 540–544.

Lu, H. Z., Liu, Y., Wang, C., Xu Y., Li H. 2003. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizhuyuan W-Sn-Bi-Mo-F skarn deposit, Hunan Province. China. Economic Geology 98, 955–974.

Márquez-Zavalía, M. F., Galliski, M. A., Černý, P., Chapman, R. 2012. An assemblage of bismuth-rich, tellurium-bearing minerals in the El Quemado granitic pegmatite, Nevados de Palermo, Salta. Argentina. Canadian Mineralogist 50, 1489–1498.

Meinert, L. 2000. Gold in skarns related to epizonal intrusions. Reviews in Economic Geology 13, 347–375.

Monecke, T., Petersen, S., Hannington, M. D., Grant, H., Samson, I. 2016. The minor element endowment of modern sea-floor massive sulfide deposits and comparison with deposits hosted in ancient volcanic successions. In: Verplanck P. L., Hitzman M. W. (Eds.): Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits: Society of Economic Geologists.

Oberthür, T., Weiser, T. 2008. Gold-bismuth-telluride-sulphide assemblages at the Viceroy Mine, Harare-Bindura-Shamva greenstone belt. Zimbabwe. Min Mag 72, 953–970.

Piestrzyński, A., Wendorff, M., Letsholo, M., Mackay, W. 2015. Platinum-group minerals in the Neoproterozoic stratabound copper-silver mineralisation, the Kalahari Copperbelt, northwestern Botswana. South African Journal of Geology 118, 275–284.

Starý, J., Sitenský, I., Mašek, D., Gabriel, Z., Němec, M., Hodková, T., Vaněček, M., Novák, J., Kavina, P. 2023. Surovinové zdroje České republiky – Nerostné suroviny 2023 (Statistické údaje do roku 2022). MŽP, ČGS, Praha. 484 s.

Tvrdý, J., Kovářová, J., Krátký, O., Havránek, J., Opekar, L., Starý, J. 2022. Metodika identifikace akumulací strategických komodit a podmínek využitelnosti strategických nerostných surovin. Projekt Horninové prostředí a nerostné suroviny SS02030023. Dílčí cíl 1.4. Program č. 6 Prostředí pro život. TA ČR.

Theodore, T. G., Orris, G. J., Hammerstrom, J. M., Bliss, J. D. 1991. Gold-bearing skarns. USGPO.

Zhong, J., Chen, Y. J., Pirajno, F. 2017. Geology, geochemistry and tectonic settings of the molybdenum deposits in South China: A review. Ore Geology Reviews 81, 829–855.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 8 Prvky vzácných zemin

Základní informace uvedené v následujícím textu jsou převzaty z dílčího výsledku typu O, Analýza výstupu CEEMIR, získaného v rámci řešení projektu TAČR Analýza nových výskytů prvků vzácných zemin TITSMPO702 (Tvrdý et al. 2021).

## 8.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Jako prvky (též kovy) vzácných zemin (Rare Earth Elements, REE) se označují skandium, yttrium a skupina lanthanoidů (lanthan, cer, praseodym, neodym, promethium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, lutecium). Skupina se dále podle protonových čísel a chemických vlastností dělí na lehké prvky vzácných zemin (Light Rare Earth Elements, LREE), k nimž řadíme lanthan, cer, praseodym, neodym, samarium a europium (plus skandium) a těžké prvky vzácných zemin (Heavy Rare Earth Elements, HREE), k nimž patří gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, lutecium (+ yttrium). Yttrium je k HREE řazeno na základě podobnosti chemických vlastností i přes nízké protonové číslo.

Tabulka 21. *Základní charakteristika prvků vzácných zemin (velvo) a přehled jejich hlavních minerálů. Zdroj: BGS (https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/mineralProfiles.html).*

| Element | Symbol | Atomic number | Atomic weight | Density ($gcm^{-3}$) | Melting Point (°C) | Vicker's hardness, (10 kg load, $kg/mm^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Scandium | Sc | 21 | 44.95 | 2.989 | 1541 | 85 |
| Yttrium | Y | 39 | 88.90 | 4.469 | 1522 | 38 |
| Lanthanum | La | 57 | 138.90 | 6.146 | 918 | 37 |
| Cerium | Ce | 58 | 140.11 | 8.160 | 798 | 24 |
| Praseodymium | Pr | 59 | 140.90 | 6.773 | 931 | 37 |
| Neodymium | Nd | 60 | 144.24 | 7.008 | 1021 | 35 |
| Promethium[1] | Pm | 61 | 145.00 | 7.264 | 1042 | - |
| Samarium | Sm | 62 | 150.36 | 7.520 | 1074 | 45 |
| Europium | Eu | 63 | 151.96 | 5.244 | 822 | 17 |
| Gadolinium | Gd | 64 | 157.25 | 7.901 | 1313 | 57 |
| Terbium | Tb | 65 | 158.92 | 8.230 | 1356 | 46 |
| Dysprosium | Dy | 66 | 162.50 | 8.551 | 1412 | 42 |
| Holmium | Ho | 67 | 164.93 | 8.795 | 1474 | 42 |
| Erbium | Er | 68 | 167.26 | 9.066 | 1529 | 44 |
| Thulium | Tm | 69 | 168.93 | 9.321 | 1545 | 48 |
| Ytterbium | Yb | 70 | 173.04 | 6.966 | 819 | 21 |
| Lutetium | Lu | 71 | 174.97 | 9.841 | 1663 | 77 |

| Mineral | Formula | Approximate REO % |
|---|---|---|
| Aeschynite-(Ce) | $(Ce,Ca,Fe,Th)(Ti,Nb)_2(O,OH)_6$. | 32 |
| Allanite-(Ce) | $(Ce,Ca,Y)_2(Al,Fe^{3+})_3(SiO_4)_3OH$. | 38 |
| Apatite | $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$ | 19 |
| Bastnäsite-(Ce) | $(Ce,La)(CO_3)F$ | 75 |
| Brannerite | $(U,Ca,Y,Ce)(Ti,Fe)_2O_6$ | 9 |
| Britholite-(Ce) | $(Ce,Ca)_5(SiO_4,PO_4)_3(OH,F)$ | 32 |
| Eudialyte | $Na_4(Ca,Ce)_2(Fe^{2+},Mn,Y)$ $ZrSi_8O_{22}(OH,Cl)_2$(?). | 9 |
| Euxenite-(Y) | $(Y,Ca,Ce,U,Th)(Nb,Ta,Ti)_2O_6$ | 24 |
| Fergusonite-(Ce) | $(Ce,La,Nd)NbO_4$ | 53 |
| Gadolinite-(Ce) | $(Ce,La,Nd,Y)_2Fe^{2+}Be_2Si_2O_{10}$. | 60 |
| Kainosite-(Y) | $Ca_2(Y,Ce)_2Si_4O_{12}CO_3.H_2O$. | 38 |
| Loparite | $(Ce,La,Na,Ca,Sr)(Ti,Nb)O_3$ | 30 |
| Monazite-(Ce) | $(Ce,La,Nd,Th)PO_4$ | 65 |
| Parisite-(Ce) | $Ca(Ce,La)_2(CO_3)_3F_2$. | 61 |
| Xenotime | $YPO_4$. | 61 |
| Yttrocerite | $(Ca,Ce,Y,La)F_3.nH_2O$. | 53 |
| Huanghoite-(Ce) | $BaCe(CO_3)_2F$. | 39 |
| Cebaite-(Ce) | $Ba_3Ce_2(CO_3)_5F_2$. | 32 |
| Florencite-(Ce) | $CeAl_3(PO_4)_2(OH)_6$. | 32 |
| Synchysite-(Ce) | $Ca(Ce,LA)(CO_3)_2F$. | 51 |
| Samarskite-(Y) | $(Y,Ce,U,Fe^{3+})_3(Nb,Ta,Ti)_5O_{16}$. | 24 |
| Knopite | $(CaTi,Ce_2)O_3$ | na |

Označení „prvky vzácných zemin“ vzniklo díky tomu, že byly původně izolovány z velmi vzácných minerálů. Jejich výskyt v zemské kůře je však poměrně hojný. Průměrný obsah REE v zemské kůře je 9,2 ppm, přičemž mezi jednotlivými prvky jsou značné rozdíly. Nejhojnější cer s průměrným obsahem 43 ppm je v zemské kůře častější než měď a další běžně používané prvky.

Nejvzácnějším členem skupiny (kromě promethia, které nemá žádný stabilní či dlouho žijící izotop) je thulium (průměrný korový obsah 0,28 ppm). Obecně platí, že LREE jsou v přírodě hojnější než HREE.

Všechny prvky vzácných zemin jsou poměrně měkké, stříbrolesklé kovy s výbornými magnetické vlastnosti. Reaktivita REE postupně klesá se stoupajícím atomovým číslem. Chemické vlastnosti solí lanthanoidů jsou značně podobné sloučeninám hliníku. Všechny tvoří například vysoce stabilní oxidy, které nereagují s vodou a jen velmi obtížně se redukují. Ze solí anorganických kyselin jsou důležité především fluoridy a fosforečnany, jejich nerozpustnost ve vodě se používá k separaci lanthanoidů od jiných kovových iontů. Další nerozpustnou sloučeninou je šťavelan, který je možno použít ke gravimetrickému stanovení těchto prvků po jejich vzájemné separaci.

## 8.2 Průmyslové aplikace a trh

Prvky vzácných zemin mají velice široké průmyslové vyžití. Více než 80 % celkové potřeby REE tvoří Ce, La a Nd. Obsah REE je ve většině výrobků extrémně nízký.

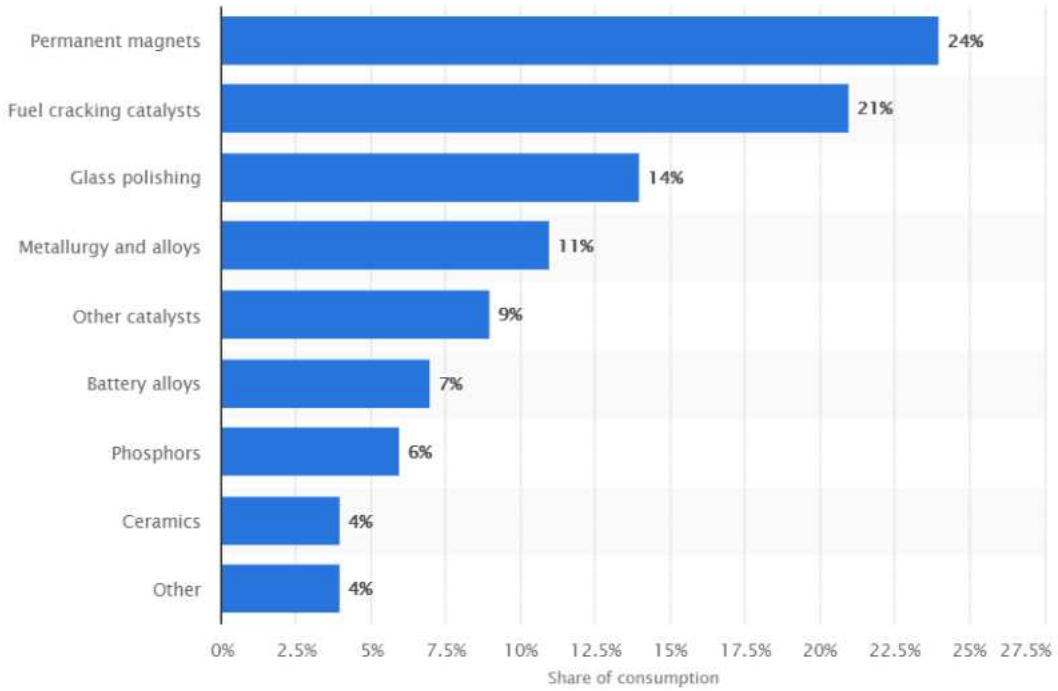
Hlavní směry využití REE v současné době představují:

- katalyzátory pro zpracování ropy,
- aditiva pro dieselové motory (Ce, La),
- magnety pro hybridní a elektrické automobilové motory, větrné elektrárny, pevné disky, elektronická zařízení, mikrofony a reproduktory (Nd),
- keramika,
- sklo,
- leštidla,
- palivové články a NiMH akumulátory (Ce, La, Nd),
- slitiny (Ce, La, Nd),
- elektronika - LCD a plasmové displeje, optická vlákna, lasery, zařízení pro zobrazovací metody v medicíně (Ce, Ga a Nd),
- úprava vody,
- přídavek do hnojiv a krmiv pro hospodářská zvířata.

V budoucnosti se předpokládá další nárůst spotřeby především v oblasti magnetů, luminoforů a keramiky.

Světová poptávka po prvcích vzácných zemin má dlouhodobě rostoucí tendenci. Vzhledem k velmi obtížné separaci jednotlivých kovů vzácných zemin se tyto prvky (s výjimkou nejběžnějších Ce, La a Nd) objevily na trhu teprve v roce 1940. V počátcích produkce REE se tyto prvky získávaly z malých ložisek vázaných především na granitové pegmatity. Ve druhé polovině 19. a první polovině 20. století byla hlavním zdrojem rozsypová ložiska, zejména na

jihovýchodě USA. V následujícím období vzrostl význam ložisek s REE vázanými v minerálu bastnäsitu, přičemž pokračovalo získávání REE jako vedlejšího produktu zpracování těžkých písků v různých částech světa. V letech 1965 až 1985 pocházela většina produkce z ložiska bastnäsitu Mountain Pass v Kalifornii, významná rozsypová ložiska se těžila zejména v Austrálii. Během 80. let 20. století se hlavním producentem REE postupně stala Čína s nejvýznamnějším ložiskem Bayan Obo a podíl USA a Austrálie na světovém trhu dramaticky poklesl. Na počátku 21. století již čínská produkce kryla cca 95 – 97 % světové spotřeby REE.




Obrázek 34. *Hlavní směry využití REE v průmyslu. Zdroj: Statista (https://www.statista.com/statistics/ 604190/distribution-of-rare-earth-element-consumption-worldwide-by-end-use/).*

Největším otřesem prošel světový trh v roce 2010. Dne 7. července 2010 čínské Ministerstvo obchodu oznámilo 70 % snížení kvót pro export této komodity. Cílem tohoto opatření bylo zajistit v prvé řadě potřeby domácího průmyslu. Výrazné omezení exportu dominantního světového producenta vyvolalo dramatický růst cen. Odpovědí na tuto situaci byla snaha o obnovu produkce na stávajících ložiskách a rychlý rozvoj nových těžebních a úpravnických kapacit v jiných částech světa. V současné době jsou zdroje REE již podstatně více diverzifikovány a podíl Číny na světové produkci poklesl na cca 70 %.

## 8.3 Hlavní ložiska ve světě

Největším známým zdrojem REE na světě je ložisko Fe-REE-Nb Bayan Obo ve Vnitřním Mongolsku v Číně. Je uloženo nekonformně na migmatitech o stáří 2,35 Ga a spolu s karbonskými vulkanity bylo deformováno během permské orogeneze. Největší jsou tzv. hlavní a východní rudní tělesa, z nichž každé tvoří ložiska o směrné délce přes 1 000 m a průměrném obsahu 5,41 %, resp. 5,18 % oxidů vzácných zemin REO (Yuan et al. 1992). Celkové zásoby jsou uváděny ve výši 48 Mt REO (průměrný obsah 6 %).

Ložisko Mountain Pass se nachází nedaleko východní hrany Mohavské pouště v Kalifornii. Ložisko představuje největší známé zásoby REE v USA. Vznik ložiska je spojen s deskovitou intruzí karbonatitu o stáří cca 1,4 Ga, která pronikla do rul metamorfovaných v granulitové facii. Těleso karbonatitu je doprovázeno ultradraselnými alkalickými plutony obdobného stáří, tvaru a orientace a hojnými karbonatitovými žílami. V roce 1987 bylo na ložisku vypočteno 29 Mt geologických zásob s průměrným obsahem 8,9 % REO při obsahu 5 % v okrajovém vzorku. Ruda obsahuje 10-15 % bastnäsitu, 65 % kalcitu nebo dolomitu a 20 – 25 % barytu. Jiné minerály jako jsou stroncianit a mastek se vyskytují ve větším množství jen lokálně (Castor a Hedrick 2006).

Ložisko loparitu na poloostrově Kola je těženo téměř přes 50 let z nefelinitického syenitu v peralkalickém masívu Lovozero. Svrchní část masívu tvoří eudialytický syenit. Spodní loparitová část masivu je přes 1000 m mocná a je složena ze střídajících se vrstev nefelinitu a nefelinového syenitu. Loparit vytváří 0,2 až 0,6 mm velká zrna a jen vzácně se vyskytuje ve formě větších krystalů (Smirnov et al., 1977, in Castor a Hedrick, 2006). Největší koncentrace loparitu jsou v místech největší diferenciace a v horninách bohatých na nefelin. Pásky rudy jsou mocné od několika centimetrů do několika metrů a obsahují 2-3 % loparitu, minerálu s obsahem 38,5 % oxidu titanu, 30-36 % REO a 10-12 % oxidu niobu a tantalu (Castor a Hedrick 2006).

Ložisko Mount Weld v jihozápadní Austrálii představuje laterizovanou svrchní část rozsáhlého karbonatitového tělesa o datovaném stáří 2,0 Ga. Ložisko má mimořádně vysoké obsahy REO (až 40 %), jejichž nositelem jsou převážně fosfátové minerály. Zvětralý karbonatit obsahuje 0,1-0,2 % REO, extrémní nabohacení lateritu je přisuzováno dlouhotrvajícímu působení podzemních vod (Pechar 2012).

Nejvýznamnější z lateritových ložisek v Brazílii, křídový karbonatitový komplex Araxá, má tvar kruhu s průměrem 4,5 km. Jde o supergenně obohacený laterit s průměrným obsahem 13,5 % REO vázaným hlavně ve fosfátech (Walters et al.,2011).

## 8.4 Výskyty v České republice

Prvky vzácných zemin nejsou v současné době v České republice těženy. Na území ČR se nenachází žádné evidované zdroje REE. Výskyty těchto prvků jsou známé z různých geologických prostředí, např. z alkalických vulkanitů Českého středohoří, z uranonosných pískovců strážského bloku české křídové pánve, z fenitizovaných granitoidů čistecko-jesenického masivu aj.

## 8.5 Produkce a spotřeba

Celková světová roční produkce prvků vzácných zemin je odhadována 350 kt REO v roce 2023 a 300 kt REO v roce 2021. Z toho kolem 68 % připadá na Čínu a 12 % na USA, 9 % na Barmu a 8 % na Austrálii. Dalšími významnějšími producenty jsou Austrálie, Barma, Thajsko, Madagaskar, Indie a Rusko (USGS 2024). Roční produkce 8-12 kt $Y_2O_3$ pochází z Číny a Barmy (Cordier 2022b).

Tabulka 22. *REE - světová produkce a zásoby dle USGS 2024.*

| | Mine production[e] | | Reserves[9] |
|---|---|---|---|
| | 2022 | 2023 | |
| United States | 42,000 | 43,000 | 1,800,000 |
| Australia | 18,000 | 18,000 | [10]5,700,000 |
| Brazil | 80 | 80 | 21,000,000 |
| Burma | 12,000 | 38,000 | NA |
| Canada | — | — | 830,000 |
| China | [11]210,000 | [11]240,000 | 44,000,000 |
| Greenland | — | — | 1,500,000 |
| India | 2,900 | 2,900 | 6,900,000 |
| Madagascar | 960 | 960 | NA |
| Malaysia | 80 | 80 | NA |
| Russia | 2,600 | 2,600 | 10,000,000 |
| South Africa | — | — | 790,000 |
| Tanzania | — | — | 890,000 |
| Thailand | 7,100 | 7,100 | 4,500 |
| Vietnam | 1,200 | 600 | 22,000,000 |
| World total (rounded) | 300,000 | 350,000 | 110,000,000 |

Celosvětové zásoby $Y_2O_3$ nebyly vyčísleny, nicméně mezi přední země s celkovými zásobami oxidu vzácných zemin patřily Austrálie, Brazílie, Čína, Rusko a Vietnam. Přestože těžba v Barmě byla významná, informace o zásobách v Barmě nebyly k dispozici. Celosvětové zásoby mohou být při současném tempu produkce dostatečné pro uspokojení krátkodobé poptávky; nedávná vysoká poptávka po iontově adsorpčních jílech vzácných zemin v Barmě a Číně, stejně jako změny ekonomických podmínek, environmentální problémy nebo omezení v oblasti povolování a obchodu by však mohly ovlivnit dostupnost a ceny mnoha prvků vzácných zemin, včetně yttria (USGS 2024).

Na celém světě jsou k dispozici rozsáhlé zdroje yttria v monazitu a xenotimu v náplavech, karbonatitech, uranových rudách a v iontově absorbčních jílech. Další zdroje ytria se vyskytují v horninách s obsahem apatitu a magnetitu, v ložiscích niobu a tantalu a také v sedimentárních ložiscích fosfátů (USGS 2024).

## 8.6 Genetické typy ložisek

Ložiska REE+Y lze dělit na primární a sekundární. Do skupiny primárních ložisek se řadí ložiska v karbonatitech a v alkalických vyvřelých horninách (Starý et al. 2021). Příkladem karbonatitových ložisek je mimořádně bohaté (téměř 20 mil. t rudy se 7 % REO) ložisko Mountain Pass v Kalifornii v USA, dále ložiska v Zambii, Malawi, Vietnamu a Číně. Z ložisek v alkalických vyvřelinách je na místě uvést velka ruská ložiska na Kolském poloostrově Lovozero a Chibiny, grónské ložisko Ilímaussaq, Norra Kärr ve Švédsku či kanadská ložiska Strange Lake na Labradoru a Nechalacho (Thor Lake) v Severozápadním Teritoriu. Do skupiny ložisek v alkalických hominách dále patří i světově nejdůležitější čínské ložisko rud Fe-REE-Nb Bayan Obo v provincii Vnitřní Mongolsko. Posledním typem jsou ložiska hydrotermální (žilná). Za příklad mohou sloužit Hoida Lake v Saskatchewanu v Kanadě, Nolans Bore v Severním teritoriu v Austrálii a také mimořádně bohaté ložisko Steenkampskraal v Západním Kapsku v JAR, které má sice poměrně malé zásoby rudy, ale vysokou kovnatost (Wall 2014).

Mezi sekundární ložiska REE patří různé typy rozsypů (mořské, aluviální, lateritové, paleorozsypy), např. velké ložisko Mount Weld v Západni Austrálii se zásobami 10 mil. t rudy s průměrným obsahem 10,8 % REO a dalšími 15 mil. t zdrojů s průměrnou kovnatosti 8,8 %

REO a ložiska iontově-adsorbčních jílů, která se nacházejí ve velkém množství v jižní Číně (provincie Jiangxi, Hunan, Fujian, Guangxi a Guangdong). Rovněž sem lze zařadit některá antropogenní ložiska, např. ložisko kryolitu Pitinga v provincii Amazon v Brazílii s xenotimem na odkališti po úpravě Sn rud (8,5 % REO), případné Y bohaté odkaliště po úpravě U rud v Kazachstánu (Wall, 2014). V okoli ostrůvku Minamitorishima v severozápadním Pacifiku, asi 2 000 km jv. od Japonska, byly v hlubokomořském bahně v hloubkách kolem 4 km v roce 2013 objeveny významné koncentrace REE (Starý et al. 2021). Jejich celkové obsahy přesahují 5 000 ppm (0,5 %). Celkové zdroje REY (rare-earth elements and yttrium = REY) oxidů byly odhadnuty ve výši 1,2 mil. t, především Y, Eu, Tb a Dy. Navíc s použitím hydrocyklonového separátoru byl získán koncentrát zrn biogenního fosforečnanu vápenatého ($Ca_3(PO_4)_2$) s obsahy REE až 2 % (Takaya et. al. 2018). Využití tohoto (a podobných zdrojů) je, vzhledem k poměrně jednoduché a efektivní úpravě suroviny i jejímu velkému množství, v blízké budoucnosti velmi pravděpodobné.

## Pegmatity a silně diferencované granity

Alkalické vyvřelé horniny vznikají z magmat bohatých na alkálie, která krystalizují na minerály bohaté na draslík a sodík (Pechar 2012). Tyto horniny jsou často charakterizovány extrémním obohacením o HFS prvky (high-field strength elements) jako jsou zirkonium, titan, yttrium, niob a REE (Castor a Hedrick 2006). Podobně jako u karbonatitů je mateřské magma alkalických vyvřelých komplexů generováno parciálním tavením pláště.

Ložiska peralkalických vyvřelých komplexů se dále dělí do dvou skupin:

1) ložiska peralkalických zvrstvených komplexů (Thor Lake, Ilímaussaq);

2) ložiska vázaná na peralkalické intruzivní žíly (Bokan Mountain).

Ložiska peralkalických vyvřelin se stejně jako karbonatity obvykle vyskytují v kontinentálních, tektonicky stabilních jednotkách a bývají často spojovány s intrakontinentálními rifty a zlomovými systémy (Berger et al. 2009, in Verplanck a van Gosen 2011). Společnost Tanbreez Mining Greenland AS uvádí pro ložisko Ilimaussaq koncentraci LREE 0,5 % a HREE 0,15 % v poměru HREE a LREE 1 : 3 (Goodenough et al. 2016).

## Ostatní ložiska

### *Ložiska v karbonatitech*

Karbonatity jsou vyvřelé horniny obsahující více než 50 % karbonátových minerálů (kalcit, dolomit a ankerit) a méně než 20 % $SiO_2$ (Le Maitre 2002, in Verplanck a van Gosen 2011). Jejich mateřskou taveninou jsou křemenem nenasycená alkalická magmata vznikající parciálním tavením pláště za nízkých teplot. Intruze karbonatitů jsou často doprovázeny alkalickými horninami (Pechar 2012).

Typické vlastnosti karbonatitů asociovaných se zásobami REE jsou:

1) významné obohacení HFSE prvky (high field strength elements), (REE, Y, Nb, Zr a U);

2) REE bohaté karbonatity jsou obohacené především o LREE;

3) ložiska REE mohou obsahovat různá množství rudních minerálů, obvykle to jsou REE-nosné karbonáty a fosfáty (bastnäsit, monazit a xenotim);

4) REE-minerály běžně vznikají krystalizací z magmat během magmatických procesů, ale ekonomická obohacení REE mohou vznikat také vysrážením minerálů z hydrotermálních roztoků nebo redistribucí REE v magmatických horninách/minerálech působením hydrotermálních fluid;

5) intruzivní karbonatity jsou běžně obklopeny zónami metasomaticky alterovaných hornin bohatých na sodík a draslík. Tyto desilicifikované zóny, zvané fenitické, vznikly reakcemi Na-K-bohatých fluid uvolněných z karbonatických intruzí.

Karbonatity se obvykle vyskytují v kontinentálních, tektonicky stabilních jednotkách zvaných jako štíty a kratony, a kde bývají často spojovány s intrakontinentálními rifty a zlomovými systémy (Berger et al., 2009, in Verplanck a van Gosen, 2011). Po celém světě je zdokumentováno více než 500 karbonatitových intruzí, jejichž největší koncentrace se nachází ve východní Kanadě, severní Skandinávii, u východoafrické riftové zóny, na poloostrově Kola v Rusku a v jižní Brazílii (Walters et al. 2011).

### *Lateritová ložiska prvků vzácných zemin*

Laterity vznikají dlouho trvajícím zvětráváním různých typů hornin v tropickém až subtropickém klimatu se střídáním deštivých a suchých období (Pechar 2012). Za těchto podmínek nastává laterizace, tj. vyluhování $SiO_2$, alkálií a alkalických zemin a obohacení Fe a Al oxidy. V případě lateritických ložisek REE může být mateřskou horninou např. karbonatit nebo syenit, které mohou být významnými zdroji s vysokým obsahem REE. Chemické zvětrávání karbonatitů způsobuje rozpouštění kalcitu, dolomitu a apatitu. Uvolněné REE z těchto minerálů pak mohou být vázány v nových supergenních minerálech, většinou ve fosfátech. V případě, že jsou laterity vyvinuty na karbonatitech, ložiska běžně obsahují vysoké množství REO (10-25 %; Walters et al. 2011).

### *Jíly s adsorbovanými ionty*

Relativně nově popsaným typem ložisek jsou reziduální ložiska REE-bohatých jílů, tzv. „ion-adsorption clays" (Chi et al. 2008 in Walters et al. 2011). Tato ložiska jsou spojena s REE-bohatými granity a vyskytují se téměř po celé jižní Číně, konkrétně v provinciích Jiangxi, Guangdong, Human and Fujian (Grauch et al. 2008, in Walters et al. 2011). Zvětralé REE bohaté zóny jsou 8-10 m mocné (Chi et al., 2008, in Walters et al., 2011). REE uvolněné během zvětrávání granitů a rozpadu primárních minerálů jsou v nich absorbovány jílovými minerály (Pechar 2012). Jde o poměrně malá ložiska se zásobami v rozmezí 3-12 kt a s průměrným obsahem 0,05-0,2 % REO (Castor a Hedrick 2006). Jsou však obzvláště bohatá na HREE a mají extrémně nízké obsahy radioaktivních prvků (Chi et al. 2008, in Walters et al. 2011).

### *Sedimentární a rozsypová ložiska vzácných zemin*

Rozsypová ložiska vznikají koncentrací rezistentních a těžkých minerálů, které byly transportovány a uloženy s pískem a štěrkem činností řek, příbřežních proudů, či vzduchem. Primárním zdrojem REE-nosných minerálů jsou většinou granitoidní nebo vysoce metamorfní horniny. Rozsypy jsou obohacené o minerály titanu, zirkonu a REE. Většina těchto ložisek je terciérního a kvartérního stáří, existují však i prekambrické paleorozsypy bohaté REE (Pechar, 2012).

Většina ekonomicky využitelných rozsypů jsou mořské plážové písky v blízkosti současných pobřežních linií. Těžké minerály jsou zde koncentrovány tidálními procesy, působením mořských proudů a vln. Tato ložiska jsou těžena hlavně pro obsahy titanových minerálů, zirkonu, xenotimu a monazitu.

Rozsáhlé zásoby těžkých minerálních plážových písků se táhnou např. téměř podél celého australského pobřeží, vyskytují se severně a jižně od města Perth v západní Austrálii. Významné zásoby fosilních plážových písků se také vyskytují v Murray Basin ve středním Novém jižním Welsu a Victorii (Hoatson et al. 2011, in Walters et al. 2011). Rutil-zirkon-ilmenitové rozsypové ložisko v Eneabba se nachází na západním pobřeží Austrálie severně od města Perth. Ložisko bylo otevřeno v 70. letech a produkovalo 2 500 tun monazitu ročně. Těžké minerály zahrnují až 6 % těženého písku a monazit tvoří od 0,5 až 7 % těžkých minerálů (Shepherd 1990, in Castor et al. 2006).

REE se z plážových písků získávají i v několika dalších zemích. Indie má na svém území rozsáhlé zásoby plážových písků obsahující monazit spolu s dalšími těžkými minerály. Hlavní z těchto akumulací se nacházejí na dnešním pobřeží a jejich zásoby jsou odhadovány na 2,7 Mt REO. V jihovýchodní Asii se získává monazit a xenotim z rozsypů těžených pro cín, zirkon a titan. Aluviální cínová ložiska s významným množstvím yttria se nacházejí v Malajsii (Walters et al. 2011).

### *Ostatní typy ložisek vzácných zemin*

Akumulace REE se neváží jen na výše zmíněné typy ložisek (Pechar 2012). V severní Austrálii na lokalitě Killi Hills byl popsán xenotim geneticky související s mineralizací uranu spjatou s fluidy uvolněných během diageneze pískovce (Walters et al. 2011).

Fosfority jsou dalším typem hornin nesoucích REE. Největší akumulace fosforitů se váží na mořské prostředí, kde vznikají sedimentací materiálu biogenního původu (Castor a Hedrick 2006).

Na oceánské prostředí se váže ještě jeden typ mineralizací REE. Jedná se o sedimenty hlubokomořského dna („metalliferous sediments“) - zeolitické jíly a pelagické červené jíly. V sedimentech východního Jižního Pacifiku byly zjištěny obsahy REE 1 000-22 300 ppm. Tyto sedimenty leží na povrchu dna a jejich mocnost se pohybuje v rozmezí 3-10 m. V centrálním Severním Pacifiku jsou REE-nosná bahna mnohem mocnější (až 30 m), avšak s menším obsahem REE (400-1 000 ppm). Přepokládá se, že mineralizace REE je v těchto sedimentech spojena s hydrotermální aktivitou v okolí středooceánského hřbetu (Walters et al. 2011).

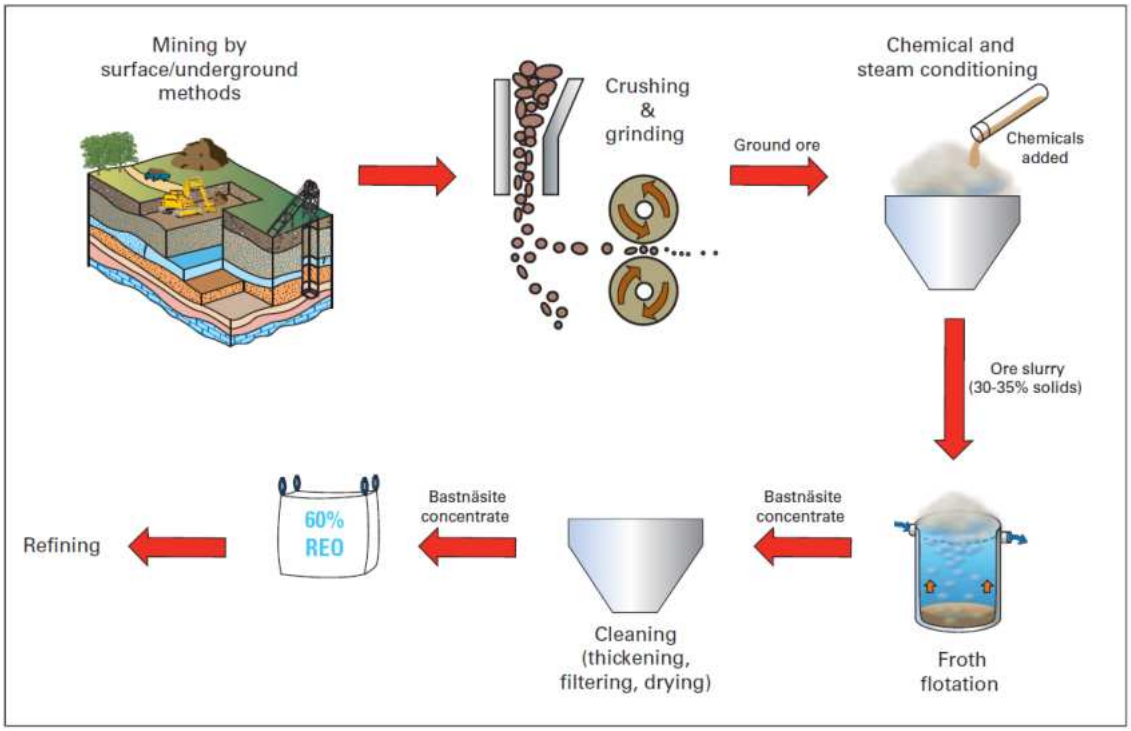
## 8.7 Metody těžby a úpravy

Postupy těžby a zpracování rud REE se liší v závislosti na charakteru ložisek. Po získání koncentrátů minerálů REE následují různé postupy rozkladu, rafinace a výroby konečných produktů, zpravidla solí REE. Za využitelné jsou dnes považovány minerályze skupiny fosforečnanů a karbonátu, získávání ze silikátů se stále řeší.

***Těžba a úprava ložisek vázaných na skalní horniny (typ „hard rock“)***

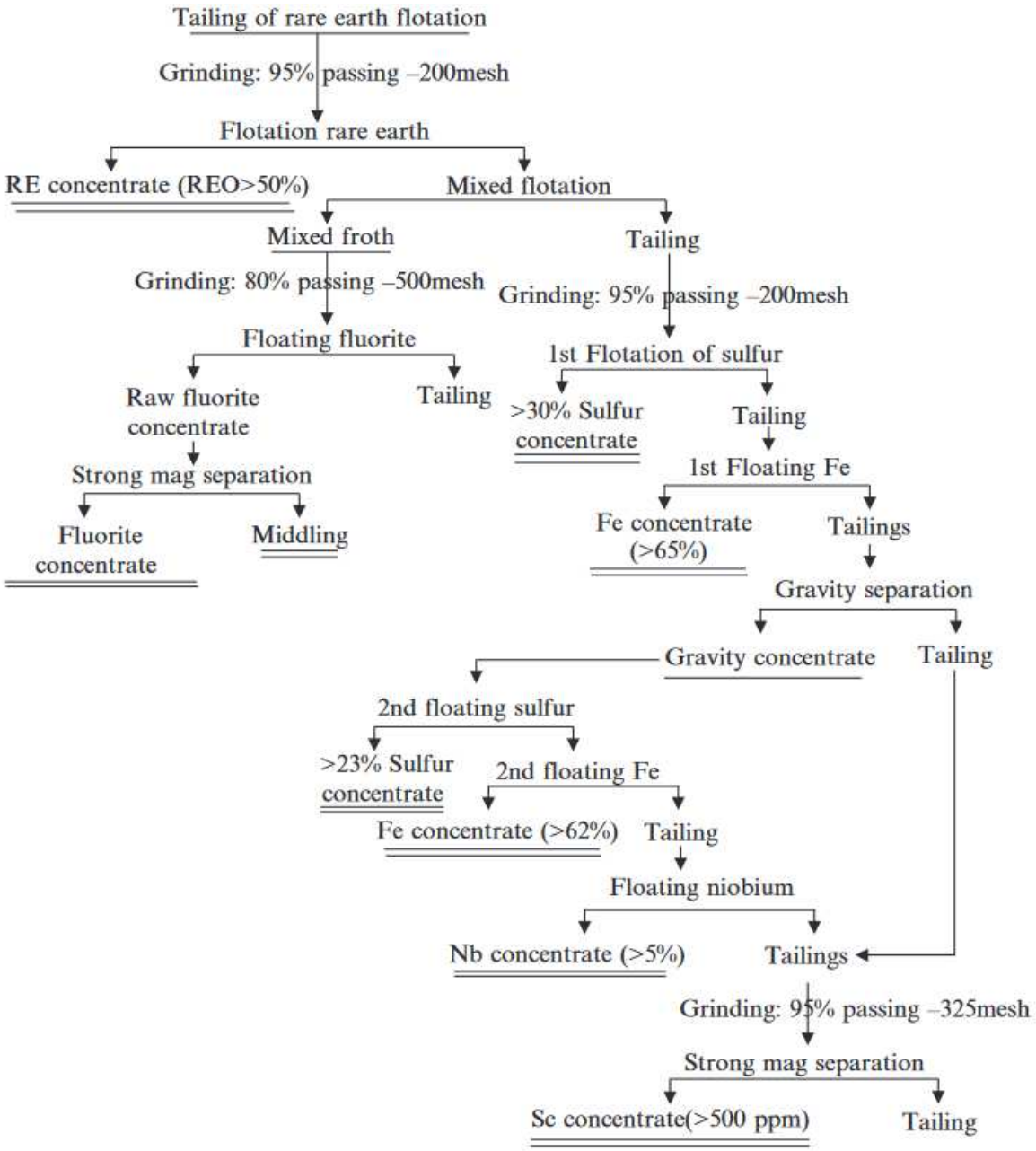
Masivní anebo strmě upadající tělesa chudších rud jsou dobývána povrchovým způsobem. Povrchové dobývání obvykle spočívá v odstranění skrývky, těžbě rudy (někdy ve spojení s trhacími pracemi) a její trasport nákladními vozidly nebo pásovými dopravníky na mezideponie. Povrchová těžba může dosáhnout hloubek několika set metrů (zřídka přes 100 m). Povrchová těžba probíhá také na zvětrávacích typech ložisek, rozsypech a náplavech. Oproti hlubinné těžbě jsou náklady na povrchovou těžbu mnohem nižší.

Metody podzemního dobývání se obvykle používají v případech, kdy se povrchová těžba stává příliš nákladnou. To se stává zejména v případě uložení ložiska ve větších hloubce a nevýhodném skrývkovém poměru. Hlubinná těžba obvykle vyžaduje rozsáhlé báňské práce spojené zejména s hloubením jámy a ražením chodeb, odvodňováním, větráním atd. Hlavní používanou metodou je komorování na pilíř, kdy těžba postupuje v horizontálním směru po etážích. Natěžená ruda je transportována kolovou, kolejovou či jinou dopravou do úpravny.




Obrázek 35. *Schéma získávání REE z bastnäsitových rud. Zdroj: BGS (https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/mineralProfiles.html).*

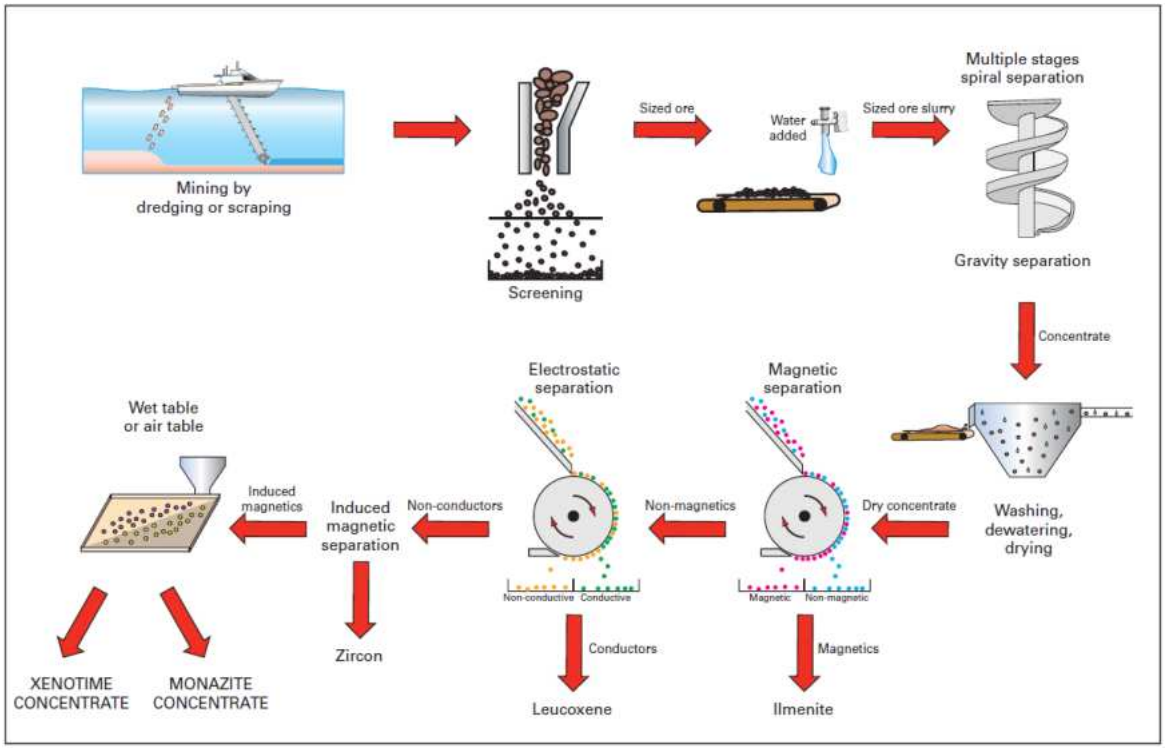
Mineralizace na ložisku Baiyan Obo (Čína) obsahuje komplex 170 různých potenciálně užitkových minerálů. Technologicky bylo zvládnuto získávání minerálních koncentrátů prvků vzácných zemin, železa, niobu, fluoritu, skandia a sulfidických koncentrátů (obrázek níže).



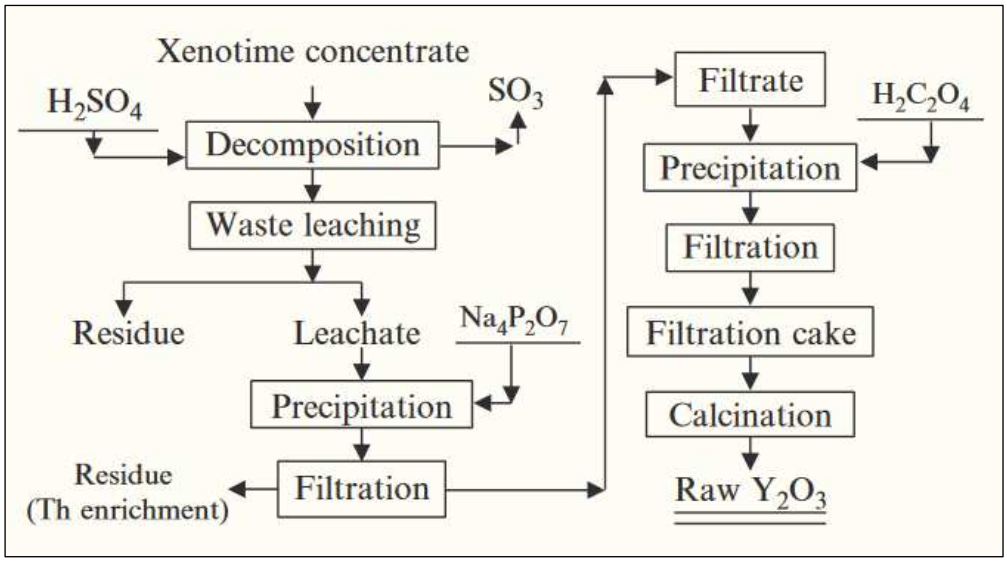

Obrázek 36. *Schéma flotačního získávání různých užitkových složek z odpadu po úpravě REE-rudy na ložisku Baiyan Obo. Zdroj: Qi, 2018.*

***Těžba a úprava rozsypových ložisek (typ „placer“)***

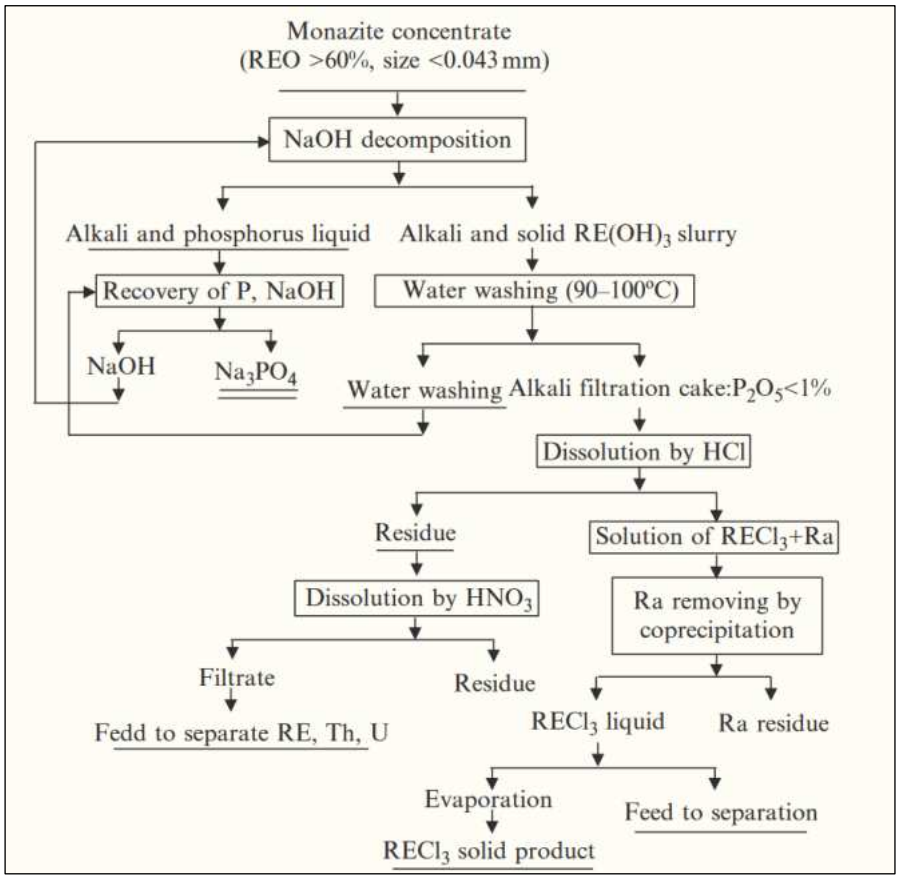
Relativně nejjednodušší dobývání je u sekundárních (sedimentárních) ložisek, která jsou v případě těžby z vody dobývána dragováním a při těžbě nad vodní hladinou pomocí nakladačů nebo rozplavováním proudem vody pomocí hydromonitorů. Koncentráty těžkých minerálů se vyráběji několikastupňovou gravitační separací a klasifikační technologií (Obrázek 37).




Obrázek 37. *Technologický postup získávání REE z ložisek monazit/xenotimových rud. Zdroj: BGS. (www.bgs.ac.uk/ mineralsuk/statistics/mineralProfiles.html).*




Obrázek 38. *Příklad rozkladu xenotimového koncentrátu kyselinou sírovou. Zdroj: Qi, 2018.*

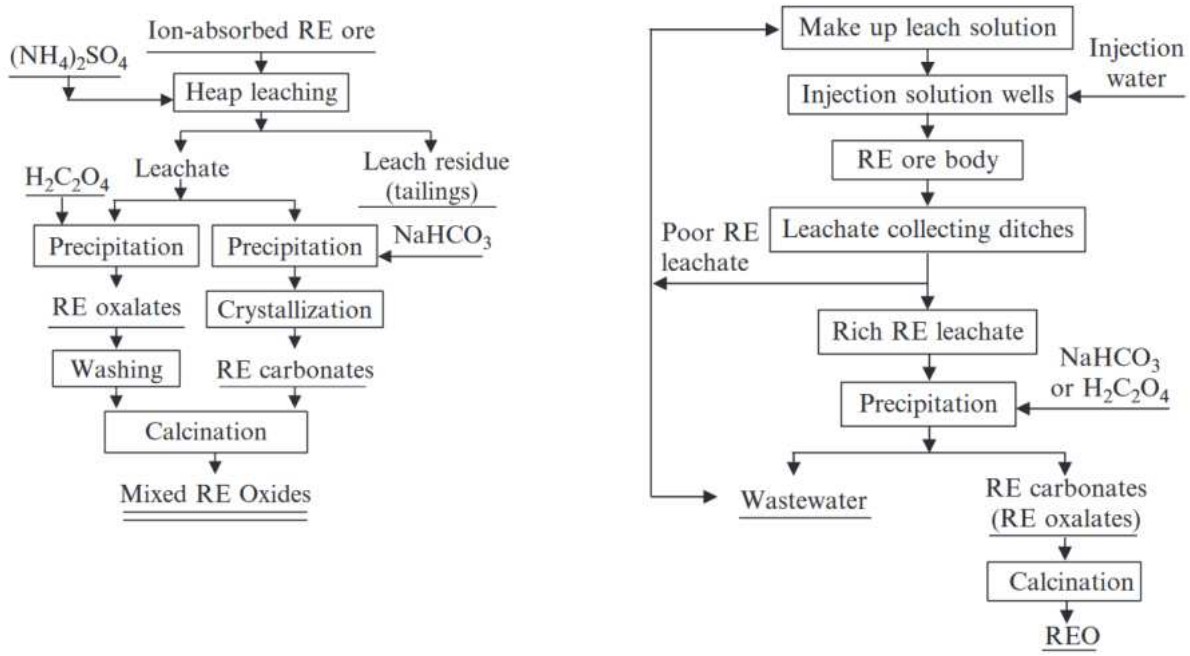



Obrázek 39. *Příklad rozkladu monazitového koncentrátu roztokem hydroxidu sodného. Zdroj: Qi, 2018.*

## 8.8 Těžba a úprava ložisek iontově adsorpčních, reziduálních a lateritových ložisek

Vývoj procesu loužení iontově vázaných rud vzácných zemin prošel třemi etapami. Zpočátku byl k loužení iontově absorbovaných rud vzácných zemin používán roztok chloridu sodného. Výhody spočívaly v tom, že činidlo je levnější a odpovídající zdroj, kyselina šťavelová byla použita k vysrážení prvků vzácných zemin a zároveň k oddělení nečistot (Al, Fe a Mn). Proces byl krátký a výtěžnost byla vyšší. Nevýhodou postupu bylo velké množství odpadní vody s vysokou koncentrací chloridu sodného (6-8 %), který se dostával do zbytků po loužení a způsoboval zasolování půdy a znečišťování životního prostředí. Při použití kyseliny šťavelové se také srážel sodík, což mělo za následek, že obsah vzácných zemin v kalcinovaném produktu byl nízký (pod 70 %), a současně nečistoty ve výluhu byly velmi vysoké a kapacita procesu byla nízká, takže rychlost loužení a výtěžnost prvků vzácných zemin byly velmi nízké při vysoké pracovní síle a špatných provozních podmínkách (Qi 2018).

Uvedený postup byl nahrazen technologií, při níž byl jako loužicí činidlo namísto chloridu sodného použit síran amonný. Tento proces byl prováděn v bazénu nebo pomocí haldového loužení; ve srovnání s prvním stadiem používajícím činidlo chlorid sodný je tento proces jednoduchý s nízkou koncentrací roztoku loužidla, 1-4 % $(NH_4)_2SO_4$.




Obrázek 40. *Schéma získávání REO pomocí haldového loužení (vlevo) a loužení in situ (vpravo). Zdroj: Qi, 2018.*

Znečištění životního prostředí odpadními vodami je nižší než při použití chloridu sodného a stupeň produktu získaného kalcinací oxalátů vzácných zemin je více než 92 %. Nevýhodou je, že je třeba vytěžit a přemístit obrovský objem rudy a skrývky, což je spojeno s velkými náklady na rekultivace. Většina čínských společností nahradila haldovým loužením původní extrakci v bazénech a haldové loužení spojuje s rekultivacemi lomů.

Následně se začalo používat loužení iontově absorbovaných rud vzácných zemin in situ. Roztok vyluhovacího činidla se vstřikuje do ložiskového tělesa, aby se selektivně vyluhovaly vzácné zeminy; výluh se shromažďuje pomocí příkopů a čerpá se do povrchového separačního zařízení. Výhody spočívají v eliminaci nákladů na skrývky a rekultivace a ve snížení požadavků na pracovní sílu.

V poslední době jsou vyvíjeny nové postupy s cílem zvýšení výtěžnosti loužení REE. Jako ekologičtější alternativa k současné metodě se uvažuje zejména biologické loužení, při kterém jsou REE rozpouštěny mikrobiální činností nebo vedlejšími produkty mikrobiálního metabolismu.

## 8.9 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Pro hodnocení geologických celků z hlediska potenciálu k zajištění ekonomicky využitelných zásob a pro posuzování výpočtů zásob vyhrazených nerostů v České republice byly v rámci projektu TA ČR „Horninové prostředí a nerostné suroviny“ (SS02030023) pro komplexní ložiska s obsahem prvků vzácných zemin jako doprovodné suroviny navrženy níže uvedené limitní ukazatele (Tvrdý et al. 2022).

Velikost ložiska v pevných horninách:

- minimální množství zásob nutné pro zařazení do státní bilance..... 100 tun REE-kovu

Minimální obsah na ložisku v pevných horninách:

- minimální obsah prvků vzácných zemin na ložisku nutný pro zařazení zásob do státní bilance..... 0,1 hm. % REE-kov

## 8.10 Reference

Barakos, G., Mischo, H., Gutzmer, J. 2016. An outlook on the rare earth elements mining industry - AusIMM Bulletin, 9 s.; https://www.ausimmbulletin.com/feature/an-outlook-on-the-rare-earth-elements-mining-industry/.

Castor, S. B., Hedrick, J. B. 2006. Rare Earth Elements. In Kogel, J. E. et al. eds., Industrial minerals & rocks, commodities, markets, and uses. Society for Mining. Metallurgy and Exploration, 769-792.

Cordier, D. J. 2022a. Rare Earths. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2021, January 2022; https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-rare-earths.pdf.

Cordier, D. J. 2022b. Yttrium. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2021, January 2022; https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-yttrium.pdf.

Goodenough, K. M. 2016. Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting, Ore Geology Reviews. British Geological Survey.

Chao, E. C. T., Back, J. M., Minkin, J. A., Tasumoto, M., Wang, J., Conrad, J. E., Mackee, E. H., Hou, Z. L., Meng, Q. R., Huang, S. G. 1997. The sedimentary carbonate-hosted giant Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit of Inner Mongolia, China: a cornerstone example of for giant polymetallic ore deposits of hydrothermal origin. USGS Bull. 2143, 1–65.

Kynický, J. 2010. REE mineralizace ložiska Bayan Obo ve vnitřním Mongolsku. Minerál 5, 422-435.

Kynický, J., Cihlářová, H., Smith, M., Cheng, X., Chakhmouradian, A., Reguir, K., Kempe, U., Vašinová Galiová, M. 2012. Gigantické ložisko Bayan Obo v Číně, část I.: Hlavní typy rud REE-Fe-Nb-Sc. Geoscience Research Reports for 2011, 226-231.

Pechar, T. 2012. Ložiska vzácných zemin ve světě a jejich indicie v České republice. Rare Earth Elements deposits in the World and their indications at Czech Republic. Bakalářská práce. PřFUK Praha, 34 s.

Qi D. 2018. Extraction of Rare Earths From RE Concentrates. Hydrometallurgy of Rare Earths, 1–185.

Roskill 2016. Rare earths: Global industry, markets and outlook (16th ed.). London, UK: Roskill.

Starý, J., Sitenský, I., Mašek, D., Gabriel, Z., Němec, M., Hodková, T., Vaněček, M., Novák, J., Kavina, P. 2021. Surovinové zdroje České republiky – Nerostné suroviny 2021 (Statistické údaje do roku 2020). – 484 s. MŽP, ČGS. Praha. ISSN 1801-6693. ISBN 978-80-7673-030-4.

Starý, J., Bohdálek, P., Godány, J., Mašek, D., Novák, J., Poňavič, M., Rýda, K., Večeřa, J., Lukeš, I., Zítko, V., Vaněček, M. 2019. Centrum kompetence efektivní a ekologické těžby nerostných surovin (CEEMIR) – WP 2 – Potenciální zdroje na území ČR – Zhodnocení aktuálního surovinového potenciálu ČR (kritické suroviny EU – CRM, lithium a kaolin). Výsledek Vsouhrn TE02000029. 177 s. Česká geologická služba. Praha. CGS P000081/2019.

Takaya,Y., Yasukawa, K., Kawasaki, T., Fujinaga, K., Ohta, J., Usui, Y., Nakamura, K., Kimura, J., Chang, Q., Hmada, M., Dodbiba, G., Nozaki, T., Iijima, K., Morisawa,T., Kuwahara, T., Ishida, Y., Ichimura, T., Kitazume, M., Fujita, T., Kato, Y. 2018. The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements. Scientific Reports 8, Article 5763.

Tuffin, D. 2015. Mount Weld Mineral Resource and Ore Reserve Update 2015. LYNAS Corporation. Kuantan.

Tvrdý, J., Brož, B., Brož, M., Hanzlík, P., Havránek, J., Krutský, J., Lhotský, P., Nekl, M., Opekar, L., Pechar, T., Meierlová, I. 2021. Výzkumná zpráva o prozkoumání možností výskytu koncentrací prvků vzácných zemin na území ČR. Výsledek $V_{souhrn}$ projektu Analýza nových výskytů prvků vzácných zemin, číslo projektu TITSMPO702. MS, MPO/TAČR Praha.

Tvrdý, J., Dolníček, Z., Ulmanová, J., Krátký, O., Nekl, M. 2021. REE minerály fenitů čisteckojesenického masivu (Česká republika). Bull. Mineral. Petrolog. 29(2): 297-320.

Tvrdý, J., Kovářová, J., Krátký, O., Havránek, J., Opekar, L., Starý, J. 2022. Metodika identifikace akumulací strategických komodit a podmínek využitelnosti strategických nerostných surovin. Projekt Horninové prostředí a nerostné suroviny SS02030023. Dílčí cíl 1.4. Program č. 6 Prostředí pro život. MS MŽP/TA ČR.

Verplanck, P. L., Van Gosen, B. S. 2011. Carbonatite and alkaline intrusion-related rare earth element deposits - a deposit model. U. S. Geological Survey Open-File Report 2011–1256, 6 s.

Wall, F. 2014. Rare earth elements. In: Gunn G., ed.: Critical Metals Handbook. British Geological Survey, John Wiley & Sons, 312-339. Chichester.

Walters, A., Lusty, P., Hill, A. 2011. Rare Earth Elements, British Geological Survey, 53 pp.

Williams-Jones, A. E., Vasyukova, O. V. 2018. The Economic Geology of Scandium, the Runt of the Rare Earth Element Litter. Economic Geology 113(4), 973–988.

Yuan, Z., Bai, G., Wu, C., Zhang, Z., Ye, X. 1992. Geological features and genesis of the Bayan Obo REE ore deposit, Inner Mongolia, China. Applied Geochemistry 7, 429-442.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 9 Skandium

## 9.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Chemický prvek skandium je tažný, bílý, neušlechtilý kov s charakteristickým žlutým nádechem. Vyskytuje se ve dvou alotropických modifikacích, hexagonální α-Sc přechází při teplotě 1 335°C na kubické β-Sc (www.prvky.com). Historicky byl spolu s yttriem a lanthanoidy zařazen mezi prvky vzácných zemin, protože má s lanthanoidy mnoho podobných vlastností. V zemské kůře není skandium nijak zvlášť vzácné - jeho obsahy se pohybují od 18 do 25 ppm (Qi 2018).

Obrázek 41. *Skandium o čistotě 99,998 % připravené sublimací. Pro porovnání krychle Sc o hraně 1 cm vyrobená tavením v argonové atmosféře. Zdroj: wikipedia (www.pse-mendelejew.de).*

Skandium se vyskytuje ve stopovém množství ve více než 800 minerálech, ale v přírodě se koncentruje jen zřídka. V nízkých obsazích se hojně vyskytuje v rudách hliníku, kobaltu, železa, molybdenu, niklu, fosfátů, tantalu, cínu, titanu, wolframu, uranu, zinku, zirkonia a prvků vzácných zemin (Qi 2018). Mezi známé minerály skandia patří např. bazzit $Be_3(Sc,Al)_2Si_6O$, kolbeckit $ScPO_4 \cdot 2H_2O$ a juonniit $CaMgSc(PO_4)_2(OH) \cdot 4H_2O$. Nejvyšší obsah skandia (32,13 % Sc) má nerost pretulit $ScPO_4$ (www.prvky.com; Tabulka 23).

Protože iontový poloměr $Sc^{3+}$ (75 pm) se velmi podobá poloměru $Mg^{2+}$ (72 pm) a $Fe^{2+}$ (78 pm), vstupuje skandium do krystalové mřížky horninotvorných silikátů železa a hořčíku. Klinopyroxeny s obsahem 200-400 ppm (výjimečně i přes 1 %) Sc jsou např. hlavním zdrojem skandia na ložisku Bayan Obo v Číně a na ložisku Žoltye Vody na Ukrajině. V menší míře obsahují skandium i amfiboly.

Tabulka 23. *Minerály obsahující skandium jako hlavní složku. Zdroj: Williams-Jones a Vasyukova, 2018.*

| | Name | Formula[1] | Wt % Sc | Type locality | Common host |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Thortveitite | $Sc_2Si_2O_7$ | 34.84 | Iveland, Norway | Granitic pegmatite |
| 2 | Pretulite | $ScPO_4$ | 32.13 | Fischbacher Alpen, Austria | Quartz veins |
| 3 | Kolbeckite | $ScPO_4 \cdot 2H_2O$ | 25.55 | Schmiedeberg, Germany | Phosphate deposits |
| 4 | Jervisite | $NaScSi_2O_6$ | 19.02 | Baveno, Italy | Granitic pegmatite |
| 5 | Eringaite | $Ca_3Sc_2(SiO_4)_3$ | 18.52 | Wiluy River, Russia | Rodingite |
| 6 | Bazzite | $Be_3Sc_2Si_6O_{18}$ | 15.68 | Lake Maggiore, Italy | Granitic pegmatite |
| 7 | Heftetjernite | $ScTaO_4$ | 15.51 | Tørdal, Norway | Granitic pegmatite |
| 8 | Juonniite | $CaMgSc(PO_4)(OH) \cdot 4(H_2O)$ | 15.32 | Kovdor, Russia | Carbonatite |
| 9 | Cascandite | $CaScSi_3O_8(OH)$ | 14.3 | Baveno, Italy | Granitic pegmatite |
| 10 | Scandiobabingtonite | $Ca_2(Fe^{2+},Mn)ScSi_5O_{14}(OH)$ | 7.28 | Novara, Italy | Granitic pegmatite |
| 11 | Kristiansenite | $Ca_2ScSn(Si_2O_7)(Si_2O_6OH)$ | 5.25 | Tørdal, Norway | Granitic pegmatite |
| 12 | Oftedalite | $(Sc,Ca)_2KBe_3Si_{12}O_{30}$ | 4.44 | Tørdal, Norway | Granitic pegmatite |

[1]In some cases the Sc site contains additional elements, e.g., Y in thortveitite

## 9.2 Průmyslové aplikace a trh

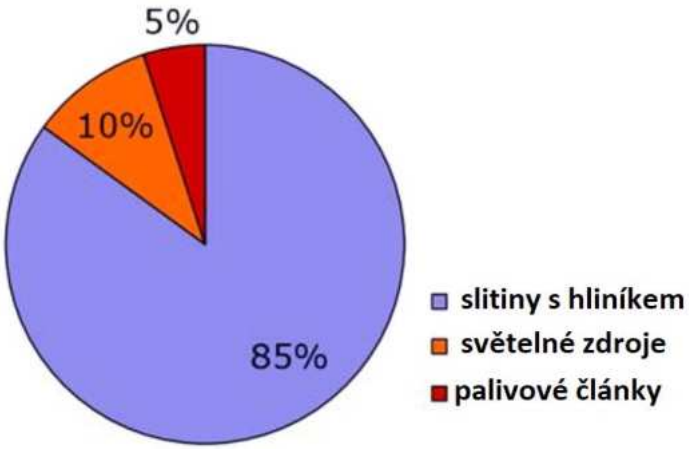
Praktické využití skandia je doposud velmi omezené (www.prvky.com). Skandium se používá jako mikrolegovací přísada (<2 % hmot.) do vysoce pevných a lehkých slitin pro úzce specializované (*vojenské, kosmické*) účely. Slitiny legované skandiem se vyznačují nízkou hustotou, dobrou svařitelností a definovanými pevnostními i únavovými vlastnostmi. Obvyklými typy slitin jsou Al-Li-Sc, Al-Mg-Sc nebo Al-Zr-Sc. Největší podíl skandia ve formě lehké slitiny byl použit při konstrukci sovětské stíhačky MIG-29. V civilním letectví byly slitiny legované skandiem využity při konstrukci letounu Airbus A-350 (www.prvky.com). Slitiny hliníku se skandiem se používají také v rámech jízdních kol a baseballových pálkách (Qi 2018).

Skandium se používá v pokročilých palivových článcích na bázi pevných oxidů (SOFC), kde funguje jako stabilizační činidlo pro zirkonium, přičemž snižuje provozní teploty, prodlužuje životnost a zvyšuje hustotu výkonu jednotky (Qi 2018).

Sloučeniny skandia se využívají také k výrobě speciálních skel a žáruvzdorných materiálů. Jodid skanditý $ScI_3$ se přidává do rtuťových výbojek pro úpravu barvy jejich světla. Síran skanditý $Sc_2(SO_4)_3$ se používá jako mořidlo na osivo kukuřice a hrachu (www.prvky.com).

Některé binární sloučeniny skandia vykazují zajímavé fyzikální vlastnosti. Např. karbid $Sc_{15}C_{19}$, který se vyznačuje mimořádnou tvrdostí (56 GPa), která ho řadí na třetí místo mezi nejtvrdší materiály, hned za diamant a kubický nitrid boru. Karbid skandia velmi snadno hydrolyzuje za vzniku vodíku a allylenu (propin), což jeho praktické využití značně komplikuje. Borid skandia $ScB_{12}$ vykazuje negativní hodnotu tepelné roztažnosti, při zahřívání se tedy jeho objem zmenšuje (www.prvky.com).

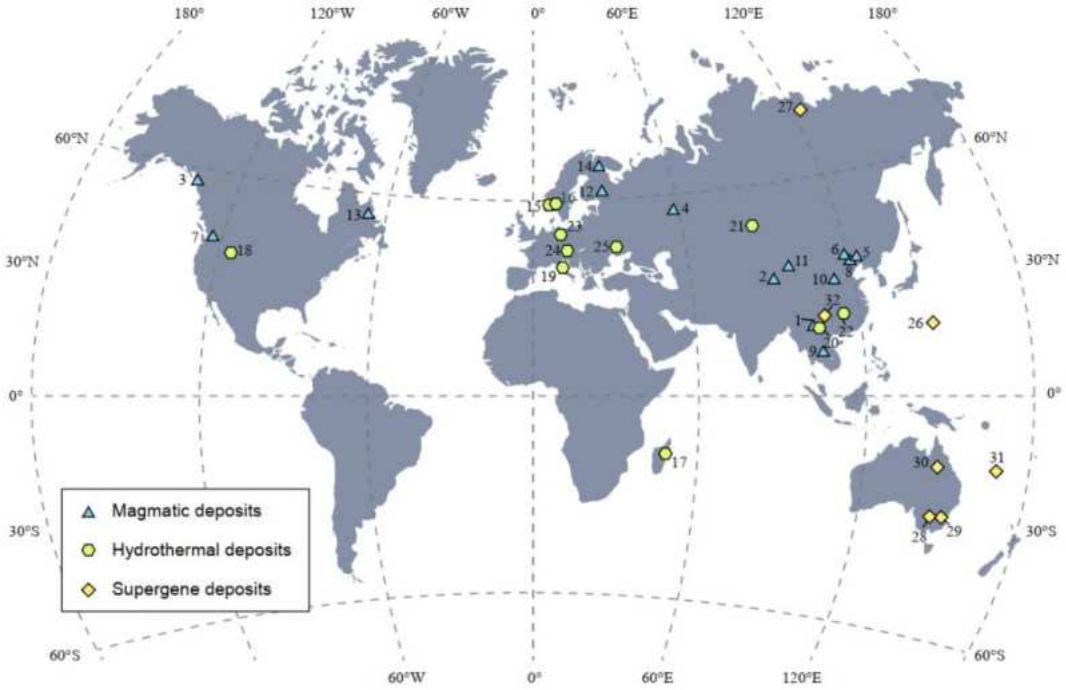
Radioaktivní izotop $^{46}Sc$ *(T1/2 = 83 dní)* se používá jako značkovací látka při sledování petrochemických a metalurgických procesů (www.prvky.com).




Obrázek 42. *Spektrum použití skandia. Zdroj: Starý, 2021.*

## 9.3 Hlavní ložiska ve světě

Zdroje skandia v Austrálii jsou v lateritových rudách niklu a kobaltu. Čínské zdroje jsou na ložiskách cínu, wolframu a železa v provinciích Ťiang-si, Kuang-si, Kuang-tung, Fu-ťien a Če-ťiang. Ložisko Fe-REE-Nb Baiyan Obo ve Vnitřním Mongolsku se stalo významným zdrojem poté, co bylo nedávno nalezeno řešení obohacování skandia do koncentrátu. Zdroje v Rusku a Kazachstánu se nacházejí v některých uranonosných ložiscích a na poloostrově Kola v apatitech. Na Ukrajině se skandium dříve získávalo jako vedlejší produkt při zpracování železné rudy v lokalitě Žoltye Vody. Na Madagaskaru a v Norsku se skandium obvykle nachází v pegmatitových ložiscích obsahujících thortveitit (Qi 2018).




Obrázek 43. *Situace hlavních ložisek skandia ve světě. Čísla objektů korespondují s tabelárním přehledem. Zdroj: Wang et al., 2020.*

Tabulka 24. *Hlavní ložiska skandia ve světě. Zdroj: Wang et al., 2020.*

| No. | | Location | Reserves/t | Grade/ ppm | Host rock/agent | Major Sc-bearing phases | Accessory Sc-bearing phases | References |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Magmatic deposits* | | | | | | | | |
| 1 | Mouding | Yunnan, China | 470 | 40–72 | Clinopyroxenite | Amphiboles, clinopyroxenes | Diopside, zircon | Zhu (2010), Guo et al., 2012 |
| 2 | Lajishan | Qinghai, China | – | > 50 | Clinopyroxenite | Clinopyroxenes | – | Wang et al., 2015 |
| 3 | Duke Island | Alaska, America | 2,673,060* | 54–110 | Clinopyroxenite | Amphiboles, clinopyroxenes | – | Li et al., 2013 |
| 4 | Ural Mountains | Russia | 1,914,607* | 75–135 | Clinopyroxenite | Amphiboles, clinopyroxenes | – | Krause et al., 2007 |
| 5 | Dongwanzi | China | 24,817* | 65–99 | Clinopyroxenite | Amphiboles, clinopyroxenes | – | Ma et al., 2014 |
| 6 | Gaositai | China | 7,595* | 88–108 | Clinopyroxenite | Amphiboles, clinopyroxenes | – | Li et al., 2012 |
| 7 | Chelan | America | 859,320* | 61–97 | Clinopyroxenite | Amphiboles, clinopyroxenes | – | Dessimoz et al., 2012 |
| 8 | Tiema | Hebei, China | > 100,000 | > 60 | Hornblendite | Amphiboles, clinopyroxenes | – | Zhang et al., 2018 |
| 9 | Wang Nam Khiao | Thailand | – | 93–115 | Hornblendite | Amphiboles | – | Fanka et al., 2016 |
| 10 | Zhongtiao | China | – | 71–78 | Hornblendite | Amphiboles | – | Yuan et al., 2017 |
| 11 | Sunjialing | Gansu, China | 162 | 69 | Hornblendite | Amphiboles | – | Xie et al., 2018 |
| 12 | Kiviniemi | Finland | 2,184 | 163 | Ferrodiorite | Amphibole, clinopyroxene, apatite | zircon | Halkoaho et al., 2020 |
| 13 | Misery Lake | Québec, Canada | – | > 150 | Ferrosyenite | Hedenbergitic clinopyroxene | – | Petrella et al., 2014; Williams-Jones and Vasyukova, 2018 |
| 14 | Kovdor | Kola Peninsula, Russia | 274 | – | Phoscorite-carbonatite | Baddeleyite, kampelite, pyrochlore, zirconolite, juonniite, ilmenite | Magnetite, forsterite, clinihumite, | Liferovich et al., 1998; Kalashnikov et al., 2016; Yakovenchuk et al., 2018 |
| 15 | Evje-Iveland | Norway | – | – | Pegmatite | Thortveitite | – | Ercit et al., 2005; Müller et al., 2015 |
| 16 | Tørdal | Norway | – | – | Pegmatite | Bazzite | Ixiolite, pyrochlore | Bergstøl and Juve, 1988 |
| 17 | Befanamo/ Berere | Madagaskar | – | – | Pegmatite | thortveitite | – | Ercit et al., 2005 |
| 18 | Crystal Mountain | Montana, USA | – | – | Pegmatite | Thortveitite | Ferroan diopside, edenite, aotinolite, allanite, titanite | Foord et al., 1993 |
| 19 | Baveno & Cuasso al Monte | Italy | – | – | Pegmatite | Bazzite, thortveitite | Cascandite, jervisite, scandiobabingtonite | Pezzotta et al., 2005 |
| 20 | Yingjiang | Yunnan, China | – | – | Pegmatite | Biotite | Sericite, kaolin | Zhou et al., 2014 |
| 21 | Kumir | Altai, Russia | 4 | 50–2,400 | Alaskite | Thortveitite, tourmaline | Micas, feldspars, Fe oxides | Gusev et al., 2009; Gusev, 2012 |
| *Hydrothermal deposits* | | | | | | | | |
| 22 | Nanling | Hunan, China | – | – | Quartz vein | Wolframnite, cassiterite | – | Chen, 1983; Zhang et al., 1987 |
| 23 | Erzgebirge | Germany | – | – | Quartz vein | Wolframnite, cassiterite | Zircon, scheelite | Kempe and Wolf, 2006 |
| 24 | Austroalpine Grobgneis | Austria | – | < 200 | Quartz vein | Pretulite | – | Bernhard, 2001 |
| 25 | Zhovti Vody | Ukraine | 777 | 105 | Amphibolite | Riebeckite | – | Mikhaylov, 2010; Tarkhanov et al., 1992 |
| *Supergene deposits* | | | | | | | | |
| 26 | Western North Pacific Ocean | 153°30′–154°00′E; 21°58′N | >2,000 | 56 | Deep-sea sediments | – | – | Yasukawa et al., 2018 |
| 27 | Tomtor | Russia | 39,000 | 390 | Regolith | Xenotime-(Y) | Monazite, goyazite, flurencite | Lapin et al., 2016; Williams-Jones and Vasyukova, 2018 |
| 28 | Nyngan | New South Wales, Australia | 3,972 | 235 | Regolith | Goethite | – | Williams-Jones and Vasyukova, 2018 |
| 29 | Syerston-Flemington | New South Wales, Australia | 1,350 | 434 | Regolith | Goethite | – | Chassé et al., 2017 |
| 30 | Lucknow and Kokomo | Queensland, Australia | 1,055 | 169 | Regolith | Goethite | – | Hoatson et al., 2011 |
| 31 | New Caledonian | New Caledonian | – | >100 | Regolith | Goethite | – | Teitler et al., 2019 |
| 32 | Shazi | Guizhou, China | 1,747 | 49 | Regolith | Kaolinite, sericite, limonite | Anatase, quartz | Sun et al., 2017; Nie et al., 2018a, b |
| *Secondary Sc resources* | | | | | | | | |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tailing | | | | | | | | |
| 33 | Bayan Obo | Inner Mongolia, China | 100 | 14,000 | REE mining | Aegirine | Columbite, Fe-rutile, parasite, tscheffkinite, hamartite, monazite, aeschynite, phlogopite, biotite | Zhao, 1987 |
| 34 | Panzhihua | Sichuan, China | – | 25,232 | V-Ti magnetite mining | Ti-augite | Ilmenite, magnetite | Huang et al., 2016 |
| 35 | Alcan, Alpart, Rerere | Jamaican | – | 154 | Bauxite mining | Crandallite, variscite, kolbeckite | Titanium oxides | Wagh and Pinnock, 1987 |
| 36 | Parnassos-Ghiona | Greece | – | 98 | Bauxite mining | Hematite, goethite | Zircon, titanium phase | Vind et al., 2018 |
| 37 | Guizhou Al plant | Guizhou, China | – | 70 | Bauxite mining | Rutile, ilmenite, anatase | – | Xiao et al., 1994 |
| Coal ash | | | | | | | | |
| 38 | Yakhlinsk | Siberia, Russia | – | 612 | Coal ash | – | – | Seredin et al., 2006 |
| 39 | Karazhira | Kazakhstan | – | 80 | Coal ash | Si-Al-Na-Ca-Zr-Sc-Ti-V-Fe-O complex | Zircon, xenotime | Arbuzov et al., 2014 |
| 40 | Bayanteeg | Mongolia | – | 78 | Coal ash | Si-Al-Na-Ca-Zr-Sc-Ti-V-Fe-O complex | Zircon, xenotime | Arbuzov et al., 2014 |
| 41 | Zapadno-Sibirskiy | Siberia, Russia | – | 150 | Coal ash | Si-Al-Na-Ca-Zr-Sc-Ti-V-Fe-O complex | Zircon, xenotime | Arbuzov et al., 2014 |

- Information not available, * Estimated Sc reserves with detailed methods in context.

## 9.4 Výskyty v České republice

V České republice není známo ložisko s ekonomicky významným výskytem skandia. Systematičtěji jsou sledovány obsahy tohoto elementu v rudách Sn, W a Li cínovecké skupiny ložisek. Dalším potenciálním zdrojem skandia v České republice mohou být bazické a ultrabazické magmatity. Obsahy Sc se v nich však dosud systematicky nesledovaly.

Odkaliště ve Stráži pod Ralskem, kde se desítky roků hromadil odpad výluhů ze suroviny z uranového ložiska s obsahem 0,030 % až 0,063 % vzácných zemin (lanthanu až gadolinia), ale i skandia, yttria, niobu, zirkonia a hafnia.

## 9.5 Produkce a spotřeba

Skandium se samostatné nikde netěží, získává se jako vedlejší produkt z úpravy rud Fe, Ti, Zr a REE (Čína), U (Kazachstán, Ukrajina, Rusko), apatit, bauxitu (Rusko) a Ni (Austrálie, Filipíny). Roční produkce není přesně známá, ale odhaduje se kolem 10-15 t a většina pochází z Číny. Údaje o produkci v letech 2020 a 2021 nejsou k dispozici (Gambogi 2019, Cordier 2022).

Hlavními zdroji skandia jsou Spojené státy, Austrálie, Čína, Kazachstán, Madagaskar, Norsko, Rusko a Ukrajina. Ve Spojených státech obsahují odvaly s hlušinou po těžbě fluoritu na ložisku Crystal Mountain poblíž Darby v Montaně thortveitit a související minerály obohacené skandiem. Menší zdroje skandia jsou obsaženy v rudách W, Mo, Ti na molybdenovém ložisku Climax v Coloradu. Další zdroje s nízkou kvalitou jsou obsaženy v rudách hliníku, kobaltu, železa, molybdenu, niklu, fosfátů, tantalu, cínu, titanu, zinku a zirkonia. Zbytky z některých historických provozů na výrobu wolframu ve Spojených státech rovněž obsahují významné množství skandia (Qi 2018).

Na světových trzích se skandium obchoduje zejména ve formě oxidu. Jeho cena se liší podle stupně dosažené čistoty. Oxid skanditý o čistotě 99,0 % se v roce 2012 obchodoval za 900 USD/kg, oxid o čistotě 99,9995 % se prodával za průměrnou cenu 5900 USD/kg. Kovové skandium se prodávalo za průměrnou cenu 206 USD/g (www.prvky.com). V období 2016-2017 se podle BGR (2018) cena za oxid skandia pohybovala v rozmezí 1100-1500 USD/kg (min. 99,5 %, Čína).

## 9.6 Genetické typy ložisek

Klasifikační schéma (obrázek níže) rozlišuje magmatická, hydrotermální a supergenní ložiska skandia. Limitní obsahy pro jednotlivá ložiska se přitom odlišují. Například některé bazické silikátové horniny s poměrně nízkými koncentracemi (klinopyroxenit: ~50-58 ppm Sc) a ferrodiorit (~40 ppm Sc) by již mohly být ekonomicky zajímavé, a proto lze magmatity s průměrným obsahem Sc >60 ppm považovat za potenciální ložiska skandia (Wang et al. 2020). Mezní hodnoty v lateritech se pohybují od 33 ppm Sc na ložisku Shazi v Číně, přes 70 ppm na ložisku Lucknow v Austrálii až po 300 ppm na ložisku Syerston-Flemington v Austrálii (Wang et al. 2020).

Obrázek 44. *Klasifikační schéma ložisek skandia. Zdroj: Wang et al., 2020.*

### Pegmatity a vysoce diferencované granity

V granitických pegmatitech a aplitech jsou příležitostně pozorována obohacení Sc, jako např. na ložiscích Evje-Iveland a Tørdal v Norsku, Befanamo na Madagaskaru, Crystal Mountain v USA, Baveno a Cuasso al Monte v Itálii a v revíru Hagendorf-Pleystein v Německu. Pegmatity bohaté na Sc se vzácněji vyskytují také v provincii Yunnan v jz. Číně (např. Yingjiang) a na poloostrově Kola v Rusku. Tyto pegmatity mají široký vztah k bazickým horninám, např. pegmatit bohatý na Sc v Evje-Ivelandu proniká páskovanými amfibolickými rulami, gabroamfibolity a metadiority. Hlavními nositeli skandia v pegmatitech jsou thortveitit $(Sc,Y)_2Si_2O_7$, bazzit $Be_3(Sc,Al)_2Si_6O_{18}$ a minerály skupiny ixiolitu $(Ta,Nb,Mn, Fe^{2+},Sc)O_2$, jejich distribuce je ale velmi nerovnoměrná. Příkladem může být např. Evje-Iveland, kde byly Sc-minerály pozorovány pouze v několika z více než 400 pegmatitových žil. Specifickým případem je lokalita Yingjiang v Číně, kde je nositelem skandia především biotit s obsahy 30-440 ppm Sc (Wang et al. 2020).

### Ostatní typy ložisek

#### *Magmatická ložiska*

Řada potenciálních ložisek skandia se nachází v klinopyroxenitech a hornblenditech bazických a ultrabazických intruzí, např. na Urale v Rusku (75-135 ppm Sc), v Duke Island v USA (54-110 ppm) a Dongwanzi (65-99 ppm), Gaositai (88-108 ppm) a Zhongtiao (71-78 ppm) v Číně (Wang et al. 2020). Tyto intruze se často skládají z dunitového jádra obklopeného postupně wehrlitem,

klinopyroxenitem ± hornblenditem, monzonitem a gabrem. Genetické vztahy mezi jednotlivými litologiemi jsou dosud nejasné, ačkoli gabro často vykazuje ostré kontakty vůči ostatním ultramafickým horninám. Dominantními minerály hostícími Sc jsou klinopyroxen a amfibol; obsahy Sc v nich jsou však v literatuře uváděny jen zřídka.

Na rozdíl od typických intruzí tohoto typu představuje ložisko Mouding v Číně zonální mafícko-ultramafickou intruzi bohatou na Sc, která se skládá z monzogabrového jádra a vnějších zón tvořených syenogabrem, gabrem a magnetit-olivínovými klinopyroxenity. Hranice mezi olivínovým klinopyroxenitem a syenogabrem jsou gradační, což naznačuje kontinuální krystalizaci (Wang et al. 2020).

Na skandium bohaté jsou také některé komplexy karbonatitů a alkalických hornin, jako je karbonatit-phoscoritový komplex Kovdor v Rusku a syenitová intruze Misery v Kanadě.

### *Hydrotermální ložiska*

Ačkoli chování Sc v hydrotermálním procesu není dosud zcela vyjasněno, zvýšené obsahy skandia jsou zpravidla spojovány s mineralizacemi W-Sn-(Nb-Ta), jako je tomu např. v Krušných horách (Kempe a Wolf, 2006) nebo v revíru Nanling v jižní Číně (Zhang et al., 1987; Zhao et al., 2017).

Oblast Nanling je nejvýznamnější W-Sn metalogenní provincií na světě a nachází se v ní řada žilných ložisek W-Sn světové úrovně, například ložiska Baishishan, Dangping, Xihuashan a Yaogangxian (Zhao et al. 2017). Žíly s obsahem W-Sn na těchto ložiscích jsou složeny především z křemene, slídy, kalcitu, fluoritu, wolframitu, arzenopyritu, kasiteritu, pyritu, chalkopyritu a stanninu. Skandium se nachází hlavně ve wolframitu a kasiteritu. Oproti ložisku Cínovec jsou však jeho obsahy relativně nízké, nejvyšší koncentrace zaznamenané ve wolframitu z Xihuashanu činí 463 ppm Sc (Hreus 2021).

V evropském variském orogenním pásmu je několik významných oblastí s výskytem greisenových těles (Hreus 2021). Patří mezi ně Cornwall (Anglie), Iberský masiv (Portugalsko, Španělsko), Massif Central (Francie) a Krušné Hory/Erzgebirge (Česká republika, Německo). Detailněji se distribuci a koncentracím Sc v minerálech věnovali Kempe a Wolf (2006), kteří popsali z greisenových ložisek převážně z německé části Krušných hor mineralizace s vysokými obsahy Sc. Neobvykle vysoké koncentrace Sc, převážně ve wolframitu a v kasiteritu, byly popsány z Altenbergu, Sadisdorfu a Cínovce/Zinnwaldu; nejvyšší obsahy Sc v Krušných horách/Erzgebirge byly zjištěny právě ve wolframitu (≤ 8 800 ppm) a kasiteritu (≤ 10 000 ppm) z ložiska Cínovec/Zinnwald.

### *Supergenní ložiska*

Supergenní ložiska skandia jsou převážně reziduální („regolitová“) a v mořských sedimentech. Množství reziduálních ložisek bylo v poslední době objeveno v Austrálii a řadě dalších zemí. Většina jich vznikla zvětráváním bazických a ultrabazických hornin, jako jsou např. bazalty (např. ložisko Shazi v Číně), peridotity (Nová Kaledonie, Argentina), gabra (Austrálie) a ofiolity. Skandium se tak liší od ostatních prvků vzácných zemin, které se obecně koncentrují v reziduích granitoidů (Wang et al. 2020). Zvětráváním bazik se mohou obsahy skandia zvýšit čtyř- až desetinásobně (Teitler et al. 2019).

Kromě maficko-ultramafických intruzí mohou být příznivým protolitem také skandiem bohaté karbonatity. Typickým příkladem je ložisko Tomtor v Rusku, které lze rámcově rozdělit na svrchní limonitovou a spodní limonit-frankolit-(křemennou) vrstvu. Hlavními nositeli skandia jsou monazit, goyazit, florencit a xenotim. Obsah Sc se pohybuje v rozmezí 65 až 489 ppm, ale může dosahovat až 1297 ppm (Lapin et al. 2016).

Příkladem ložiska, kde je skandium vykazováno jako jedna z hlavních užitkových složek, je Sunrise (Syerston) 370 km západně od Sydney (New South Wales, Austrálie). Jde o ložisko lateritických rud na ultramafickém intruzivním komplexu, které je vhodné k povrchové těžbě. Plošný rozsah je udáván 4x2 km a maximální mocnost 50 m. V roce 2018 zde byly vykázány následující zásoby:

- proven reserves 65,5 Mt rudy s obsahem 0,65 % Ni, 0,1 % Co a 48 g/t Sc,
- probable reserves 81,9 Mt rudy s obsahem 0,49 % Ni, 0,08 % Co a 57 g/t Sc,
- measured resources 68,8 Mt rudy s obsahem 0,63 % Ni, 0,1 % Co a 62 g/t Sc,
- indicated resources 93,9 Mt rudy s obsahem 0,47 % Ni, 0,08 % Co a 86 g/t Sc,
- inferred resources 20,6 Mt rudy s obsahem 0,23 % Ni, 0,09 % Co a 283 g/t Sc.

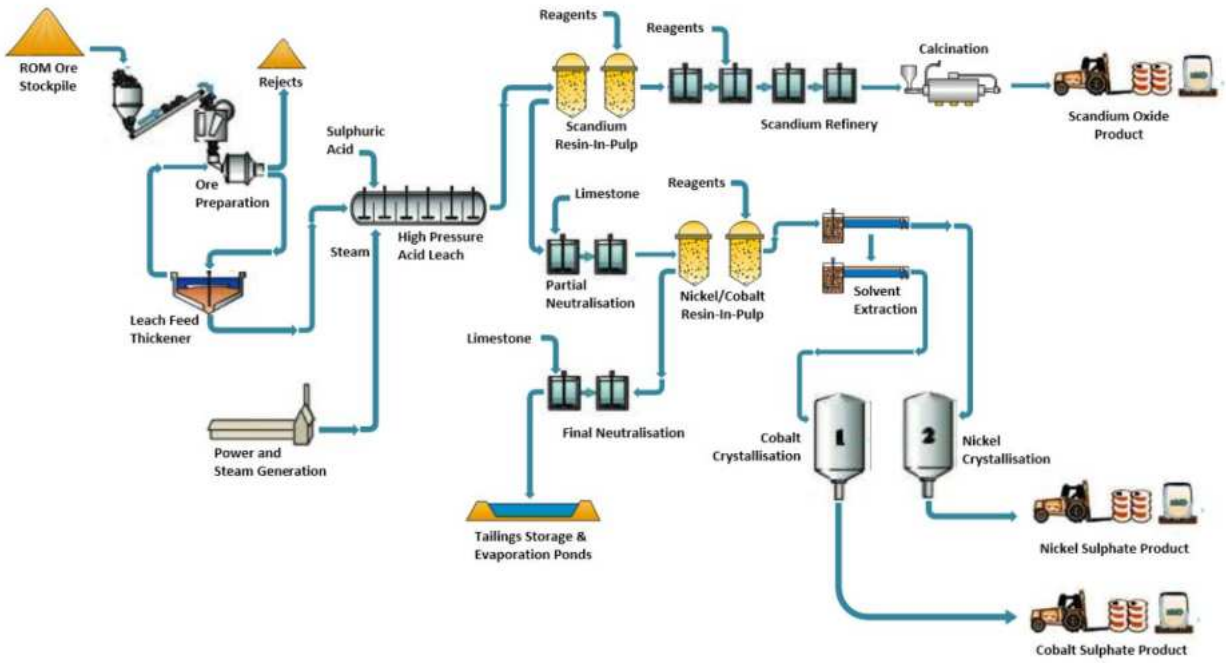
Významné obohacení Sc bylo nedávno objeveno v mořských sedimentech Tichého a Indického oceánu. Jedná se o zeolitické jíly a pelagické červené jíly hlubokomořského dna. V sedimentech východního Jižního Pacifiku byly zjištěny obsahy REE 1 000-22 300 ppm. Tyto sedimenty leží na povrchu dna a jejich mocnost se pohybuje v rozmezí 3-10 m. V centrálním Severním Pacifiku jsou REE-nosná bahna mnohem mocnější (až 30 m), avšak s menším obsahem REE (400-1 000 ppm). Přepokládá se, že mineralizace REE je v těchto sedimentech spojena s hydrotermální aktivitou v okolí středooceánského hřbetu (Walters et al. 2011).

## 9.7 Metody těžby a úpravy

Skandium je typickým doprovodným prvkem některých rud a samostatně v současnosti není dobýváno. Qi (2018) uvádí následující zdroje, z nichž je ve světě skandium získáváno:

- rudy prvků vzácných zemin;
- odpady po flotaci titanových rud;
- metalurgické odprachy a strusky;
- odpady po hutnění hliníku (red mud);
- úpravnické odpady s obsahem wolframitu;
- odpadní vody po hydrometalurgickém zpracování titanových rud;
- odpadní vody po hydrometalurgickém zpracování zirkoniových rud;
- roztoky po loužení uranových rud.

Schéma úpravy lateritových rud Ni, Co, Sc z dosud nevyužívaného ložiska Sunshine (Syerson), New South Wales (Austrálie) je na následujícím obrázku.




Obrázek 45. *Návrh úpravy a zpracování lateritových Ni-Co-Sc-rud ložiska Sunshine (Syerson) v Austrálii. Zdroj: CleanTEQ, 2016.*

## 9.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Pro hodnocení geologických celků z hlediska potenciálu k zajištění ekonomicky využitelných zásob a pro posuzování výpočtů zásob vyhrazených nerostů v České republice byly v rámci projektu TA ČR „Horninové prostředí a nerostné suroviny“ (SS02030023) navrženy níže uvedené limitní ukazatele (Tvrdý et al. 2022). V České republice je skandium doprovodným prvkem rud jiných kovů a nevyskytuje se jako hlavní užitková složka. Byly proto stanoveny pouze limity pro zásoby vhodné k zařazení do státní bilance.

Velikost ložiska:

- minimální množství zásob nutné pro zařazení do státní bilance..... 100 tun Sc-kovu

Minimální obsah na ložisku:

- minimální obsah skandia v komplexní rudě ..... 40 g/t

## 9.9 Reference

CleanTEQ 2016. Syerston Project pre-feasibility study. 4 s., https://www.sunriseem.com/wp-content/uploads/2016/12/9772_Clean-Teq-SYERSTON-PROJECT-PRE-FEASIBILITY-STUDY_31-1-17.pdf.

Cordier, D. J. 2022. Scandium. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2021, January 2022; https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-scandium.pdf.

Gambogi, J. 2019. Scandium. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2018, January 2019; http://minerals.usgs. gov/minerals/pubs/C0mm0dity/scandium/mcs-2019-scand.pdf.

Hreus, S. 2021. Post-magmatické změny rudní (Sn, W, Nb, Ta, Sc, REE) mineralizace na ložisku Cínovec-Zinnwald. Dizertační práce. Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Ústav geologických věd. Brno. 186 s.

Kempe, U., Wolf, D. 2006. Anomalously high Sc contents in ore minerals from Sn-W deposits: possible economic significance and genetic implications. – Ore Geol Rew, 28, 103-122.

Lapin, A. V., Tolstov, A. V., Kulikova, I. M. 2016. Distribution of REE, Y, Sc, and Th in the unique complex rare-metal ores of the Tomtor deposit. Geochem. Int. 54(12), 1061–1078.

Qi, D. 2018. Extraction of Rare Earths from RE concentrates. Hydrometallurgy of Rare Earths, 1–185.

Starý, J. 2021. Potenciální zdroje kritických nerostných surovin EU (CRM) v ČR. Powerpointová prezentace, online na https://slideplayer.cz/slide/17027511/98/images/10/.

Teitler, T., Cathelineau M., Ulrich M., Ambrosi J. P., Munoz M., Sevin B. 2019. Petrology and geochemistry of scandium in New Caledonian Ni-Co laterites. J. Geochem. Explor. 196, 131–155.

Tvrdý, J., Kovářová, J., Krátký, O., Havránek, J., Opekar, L., Starý, J. 2022. Metodika identifikace akumulací strategických komodit a podmínek využitelnosti strategických nerostných surovin. Projekt Horninové prostředí a nerostné suroviny SS02030023. Dílčí cíl 1.4. Program č. 6 Prostředí pro život. MS MŽP/TA ČR.

Walters, A., Lusty, P., Hill, A. 2011. Rare Earth Elements, British Geological Survey, 53 p.

Wang, Z., Yan Hei, Li M., Ray Liu, Z-R., Zhou, M-F. 2020. Scandium: ore deposits, the pivotal role of magmatic enrichment and future exploration. Ore Geology Reviews 128, 103906.

Williams-Jones, A. E., Vasyukova, O. V. 2018. The Economic Geology of Scandium, the Runt of the Rare Earth Element Litter. Economic Geology 113(4), 973–988.

Zhang, Z. R., Luo, X. C., Chen, R. M., Yu, X. Z., Yang, S. X., Ren, Y. C., Zeng, J. W., Sun, W. J. 1987. The ores of typical tungsten deposits in Nanling region: material composition and comprehensive utilization prospects. Geol. Prospect. 23(6), 38–40.

Zhao, W. W., Zhou, M. F., Li, Y. H. M., Zhao, Z., Gao, J. F. 2017. Genetic types, mineralization styles, and geodynamic settings of Mesozoic tungsten deposits in South China. Journal of Asian Earth Sciences 137, 109–140.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 10 Rubidium a cesium

## 10.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Rubidium a cesium byly objeveny v letech 1860-1861 německým chemikem Robertem W. Bunsenem a německým fyzikem Gustavem R. Kirchhoffem. Použili k tomu jimi vyvinutou metodu spektrální analýzy. Rubidium pojmenovali podle dvou červených (rubidus = tmavočervený) a cesium podle dvou modrých čar ve spektru (caesius = modrošedý). Rubidium i cesium jsou velmi reaktivní a v přírodě se vyskytují pouze ve sloučeninách v mocenství $Rb^+$ a $Cs^+$. Obsah rubidia v zemské kůře je poměrně vysoký, cca 100–300 mg/kg, což je zhruba stejně jako nikl, měď nebo zinek, a rubidium je 16. nejrozšířenějším prvkem periodické soustavy (www.prvky.com). Naopak cesium se vyskytuje pouze vzácně a předpokládá se, že zemská kůra obsahuje 1–7 mg Cs/kg, což je stejná úroveň jako brom, hafnium a uran (https://cs.wikipedia.org).

V minerálech provází Rb a Cs obvykle ostatní alkalické kovy; rubidium často z malé části zastupuje draslík v živcích. Nejvýznamnějším nositelem rubidia je lithná slída lepidolit $K(Li,Al)_3(Al,Si)_4O_{10}(F,OH)_2$ s obsahem kolem 1,5 % Rb a až 1 % Cs. V malých množstvích (asi okolo 0,015 %) se rubidium a cesium vyskytují i v karnalitu $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$. Hlavním rudním minerálem cesia je polucit $(Cs,Na)(Si_2Al)O_6 \cdot nH_2O$, který se vyskytuje hlavně v lithných pegmatitech v asociaci s lepidolitem a petalitem $LiAlSi_4O_{10}$ (https://cs.wikipedia.org).

Obrázek 46. *Kovové rubidium (vlevo). Dendritické cesium v kapsli s argonem (vpravo). Zdroj: Dnn87 (https://cs.wikipedia.org).*

## 10.2 Průmyslové aplikace a trh

Podle ročenky USGS se rubidium a jeho sloučeniny používají v biomedicínském výzkumu, elektronice, speciálním skle a pyrotechnice. Speciální skla jsou hlavním trhem pro rubidium; karbonát rubidia se používá ke snížení elektrické vodivosti, což zlepšuje stabilitu a trvanlivost v optických telekomunikačních sítích. Biomedicínské aplikace zahrnují soli rubidia používané v protišokových látkách a při léčbě epilepsie a poruch štítné žlázy; rubidium-82, radioaktivní izotop používaný jako stopovač krevního toku při pozitronovém emisním tomografickém zobrazování; a chlorid rubidný používaný jako antidepresivum. Atomy rubidia se používají v akademickém výzkumu, včetně vývoje výpočetních zařízení založených na kvantové mechanice, což je budoucí aplikace s potenciálem relativně vysoké spotřeby rubidia. Kvantový

výpočetní výzkum využívá ultrachladné atomy rubidia v různých aplikacích. Kvantové počítače, které mají schopnost provádět složitější výpočetní úlohy než tradiční počítače tím, že počítají ve dvou kvantových stavech současně, měly být ve fázi prototypu do 10 let. Rubidium je díky svým fotoemisivním vlastnostem užitečné pro generátory elektrických signálů v zařízeních pro snímání pohybu, zařízeních pro noční vidění, fotoelektrických článcích (solárních panelech) a fotonásobičích. Rubidium se používá jako atomový rezonanční frekvenční oscilátor pro synchronizaci telekomunikačních sítí a hraje důležitou roli v globálních systémech určování polohy. Živce bohaté na rubidium se díky své vysoké dielektrické konstantě používají v keramických aplikacích pro zapalovací svíčky a elektrické izolátory. Hydroxid rubidný se používá v ohňostrojích k oxidaci směsí jiných prvků a k vytváření fialových odstínů (Tuck 2022b).

## 10.3 Hlavní ložiska ve světě

Podle USGS se předpokládá, že v roce 2021 bylo veškeré Rb a Cs vytěženo v Číně. Důlní produkce ve všech ostatních zemích byla v posledních dvou desetiletích zastavena. Těžba v Namibii byla ukončena počátkem roku 2000, následně byl uzavřen důl Tanco v Kanadě, který byl později po závalu v roce 2015 prodán. Na ložisku Bikita v Zimbabwe byly v roce 2018 vyčerpány zásoby. V dole Sinclair v Austrálii byla těžba ukončena v roce 2019. V roce 2021 pokračovala realizace projektu Karibib v Namibii, kde bylo oznámeno 8,9 Mt geologických zásob (zdrojů) s obsahem 0,23 % Rb a 303 ppm Cs a 6,72 Mt vytěžitelných zásob (reserves) se 2,26 % Rb a 320 ppm Cs. Cesium, rubidium a draslík jsou doprovodnými složkami pegmatitové lithné rudy (Tuck 2022a; 2022b).

## 10.4 Výskyty v České republice

Ve Státní bilanci výhradních ložisek nefigurují žádná ložiska rubidia a cesia. V České republice oba tyto prvky doprovázejí lithium v cinvalditové mineralizaci na ložiscích v Krušných horách (Cínovec) a Slavkovském lese (Horní Slavkov).

### *Rudní revír Cínovec*

Největší akumulací je revír Cínovec, představovaný v současné době víceméně administrativně vymezenými primárními ložisky Cínovec-jih, Cínovec-východ, Cínovec-severozápad a sekundárním ložiskem Cínovec-odkaliště. Podle Starého et al. (2019) je revír co do velikosti zdroje lithia minimálně srovnatelný s dosud zdaleka největším evropským ložiskem Jadar (kolem 1 mil. t Li) v Srbsku. Obě se pak řadí mezi největší světová ložiska lithia a do první pětky ložisek v pevných horninách (mimo solanky).

Hlavní ložisko Cínovec-jih je spolu s navazujícím s ložiskem Cínovec-východ tvořeno chudými masivními rudami greisenového typu s průměrným obsahem 0,17-0,25 % Li, 0,05-0,19 % Sn a 0,01-0,04 % W. Rubidium a cesium jsou vázány na živec a na tmavou Li-slídu řady siderofylit $KFe^{2+}{}_2Al(Al_2Si_2O_{10})(OH)_2$ – polylithionit $KLi_2Al(Si_4O_{10})(F,OH)_2$ (tzv. cinvaldit). Cinvaldit je hlavním nositelem lithia a podle Tichého et al. (1965) obsahuje cca 4 % $Li_2O$ (≈1,8 % Li), 0,8 % $Rb_2O$ (≈0,7 % Rb) a 0,03 % $Cs_2O$ (≈0,028 % Cs), podle Davida a Daška (1991) je to 1,68 % Li, 1,1 % Rb a 0,04 % Cs. Obsah Li závisí na obsahu cinvalditu v rudě, obsah Rb je navíc ovlivněn zastoupením živce (koncový rubidný člen řady je rubiklín $RbAlSi_3O_8$). Poměr Li : Rb se tak

mění od cca 1 : 0,65 v greisenech přes 1 : 0,7–0,9 v greisenizovaných žulách až do 1 : 1,1 v albitizovaných žulách (Starý et al., 2019).

Ložisko Cínovec-severozápad zahrnuje území bývalých ložisek Cínovec-sever, Cínovec-starý závod a prognózního zdroje Li rud Cínovec-jih. Obsahuje 331,8 miliony tun komplexní Li-Sn-W rudy s průměrně 0,20 % (683,8 kt) Li, 0,04 % (145,4 kt) Sn a necelých 0,02 % (50,3 kt) W (Hanzlík et al. 2017).

Ložisko Cínovec-odkaliště je tvořeno odpadním materiálem po gravitační úpravě Sn-W-rud ložisek Cínovec-starý závod a Cínovec-jih. V deponovaném materiálu odkaliště je obsaženo podstatné množství cinvalditu, na který je vázána hlavní užitková složka lithium. Koncentrace Li v odkališti odpovídá ve většině partií původně těžené primární rudě (průměr 0,27 % Li). Na cinvaldit jsou vedle Li vázány i Rb a Cs. Odkaliště je vyhodnoceno pouze jako ložisko Li a spočteno zde bylo celkem 0,86 mil. t Li-rudy s průměrným obsahem 0,274 % (2 331 t) Li (Váňa et al. 2013). Mimo to byly rovněž odhadnuty prognózní zdroje Rb a Cs.

Zdroje Rb a Cs v revíru Cínovec odhaduje Starý et al. (2019) na cca 800 kt Rb a 30 kt Cs. Jejich případné využití zcela závisí na politickém rozhodnutí vlády, která by musela změnit výši úhrady z vydobytých nerostů pro tyto kovy na reálné hodnoty. Cena Rb i Cs je velmi podobná a pohybovala se u čistého kovu ve výši 11 (Cs) až 12 (Rb) tis. USD/1 kg, což je zhruba čtyřicetinásobek ceny čistého Li. V případě kusového kovu však cena výrazně nižší, nanejvýš několik set USD za 1 kg. Při předpokládané 4% sazbě úhrady to představuje poplatek mezi 160 až 460 tis. Kč za 1 t ekvivalentu kovu, což je v souladu s výší úhrady 10 692 Kč/t za Li (Starý et al. 2019).

***Rudní revír Krásno – Horní Slavkov***

Nejdůležitějším revírem ve Slavkovském lese a druhou nejvýznamnější domácí oblastí ložisek a zdrojů cinvalditových rud je Krásno – Horní Slavkov. Mineralizace Sn-W-Li je vázána na nejmladší lithnou albitickou žulou (typ Čistá-Krásno). Žula tvoří četné elevace s greisenizovanými zónami a aureolou křemenných žil s Sn, W, Li, As a Cu mineralizací. Revír je tvořen primárními ložisky Krásno, Krásno-Horní Slavkov, Krásno-Koník a sekundárním ložiskem Krásno-odkaliště.

V cinvalditovém koncentrátu z velkoobjemového vzorku greisenové suroviny z Krásno uvádějí Hoffman a Trdlička (1989) obsahy 1,014 % Li, 0,548 % Rb a 0,085 % Cs. Při předpokládané 60% výtěžnosti cinvalditu do koncentrátu odhadl Košatka (1992) celkové získatelné množství z ložisek Krásno, Krásno-Horní Slavkov a Horní Slavkov-odkaliště 19 706 t Li, 10 698 t Rb a 1 651 t Cs. Poslední odhad Starého et al. (2019) činí 18 700 t Rb a 2 530 t Cs ze všech potenciálně perspektivních ložisek a zdrojů.

Tabulka 25. *Výhradní ložiska lithia a potenciálně perspektivní zdroje rubidia a cesia v rámci výhradních ložisek Li-Sn-W rud (* odhadnuté zdroje kovů). Zdroj: Starý et al. 2019.*

| Ložisko | Číslo SurIS | Li kov | | Rb kov (*odhad) | | Cs kov (*odhad) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Zásoby t | Kovnatost % | Zdroje t | Kovnatost % | Zdroje t | Kovnatost % |
| Cínovec-jih | 3123700 | 407359 | 0,188 | *290970 | 0,134 | *11640 | 0,005 |
| Cínovec-odkaliště | 3268300 | 2331 | 0,274 | *1550 | 0,18 | *60 | 0,008 |
| Cínovec-severozáp. | 3123702 | 683753 | 0,200 | *488400 | 0,14 | *19530 | 0,006 |
| Cínovec-východ | 3123701 | 36694 | 0,230 | *24460 | 0,15 | *1050 | 0,007 |
| H.Slavkov-odkal. | 3268600 | 6153 | 0,126 | *4477 | 0,092 | *584 | 0,012 |
| Krásno-Koník | 3117500 | 2040 | 0,118 | *1491 | 0,086 | *190 | 0,011 |
| **Celkem ložiska** | | **1138330** | | ***811348** | | ***33054** | |

Tabulka 26. *Potenciálně perspektivní zdroje lithia, rubidia a cesia v rámci ložisek a zdrojů Li-Sn-W a Li rud (* odhadnuté zdroje kovů). Zdroj: Starý et al., 2019.*

| Zdroj | Číslo SurIS | Li kov | | Rb kov (*odhad) | | Cs kov (*odhad) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Zdroje t | Kovnatost % | Zdroje t | Kovnatost % | Zdroje t | Kovnatost % |
| Krásno | 3159900 | *15610 | *0,114 | *11455 | 0,084 | *1530 | 0,011 |
| Krásno-H.Slavkov | 3244000 | *17396 | *0,152 | *12246 | 0,107 | *1705 | 0,014 |
| **Celkem zdroje** | | ***33006** | | ***23701** | | ***3235** | |
| **Prognózní zdroj** | **Číslo SurIS** | **Li kov (odhad)** | | **Rb kov (odhad)** | | **Cs kov (odhad)** | |
| | | **Zdroje t** | **Kovnatost %** | **Zdroje t** | **Kovnatost %** | **Zdroje t** | **Kovnatost %** |
| Krásno-H.Slavkov | 9345200 | *2142 | 0,210 | *1500 | 0,107 | *200 | 0,0149 |
| **Celkem zdroje** | | ***35148** | | ***25201** | | ***3435** | |

## 10.5 Produkce a spotřeba

Podle ročenky USGS (Tuck 2024a; 2024b) nejsou pro rok 2023 k dispozici žádné oficiální údaje o produkci rubidia a cesia. Zásoby v pegmatitových ložiscích jsou proto odhadovány podle obsahů polucitu, hlavního nositele Li, Cs a Rb, a lepidolitu, nositele Li a Rb. Polucit obsahuje kolem 3,5 % oxidu rubidného a 5-32 % oxidu cesného, lepidolit až 1,5 % oxidu rubidného. Pro stanovení zásob v konkrétních zemích nejsou k dispozici žádné spolehlivé údaje; předpokládá se však, že Austrálie, Kanada, Čína a Namibie mají celkové zásoby v množství pod 200 kt.

Podle USGS se předpokládá, že v roce 2023 bylo veškeré Rb a Cs vytěženo v Číně. Důlní produkce ve všech ostatních zemích byla v posledních dvou desetiletích zastavena. Těžba v Namibii byla ukončena počátkem roku 2000, následně byl uzavřen důl Tanco v Kanadě, který byl později po závalu v roce 2015 prodán. Na ložisku Bikita v Zimbabwe byly v roce 2018 vyčerpány zásoby. V dole Sinclair v Austrálii byla těžba ukončena v roce 2019. V roce 2021 pokračovala realizace projektu Karibib v Namibii, kde bylo oznámeno 8,9 Mt geologických zásob (zdrojů) s obsahem 0,23 % Rb a 303 ppm Cs a 6,72 Mt vytěžitelných zásob (reserves) se 2,26 % Rb a 320 ppm Cs. Cesium, rubidium a draslík jsou doprovodnými složkami pegmatitové lithné rudy (Tuck 2022a; 2022b).

## 10.6 Genetické typy ložisek

Rubidium a cesium zpravidla doprovázejí lithium a vyskytují se proto na jeho ložiskách, často aniž by byly získávány.

Průmyslově významné typy ložisek rubidia a cesia (Starý et al. 2021; Tuck 2022a; 2022b) jsou následující.

***Pegmatity a silně diferencované granity***

- Li-pegmatity a granity (Rb, Cs): Greenbushes (Austrálie), Tanco, Bernic Lake (Kanada), Bikita (Zimbabwe);
- Li-greiseny a greisenizované granity (Rb, Cs): Česko, Sasko (Starý et al., 2019).

***Ostatní typy***

- magmatogenní fosfátová ložiska (Rb, Cs): poloostrov Kola (Rusko);
- Li-solanky (Rb, Cs): Salar de Atacama (Chile), Salar de Uyuni (Bolívie), pánev Quaidam (Čína), Silver Peak (USA);
- geotermální systémy v Německu, Indii a Číně (Rb);
- evapority – solná karnalitová ložiska (Rb): Kłodawa (Polsko), Stassfurt (Německo), Usť-Vajviskoe, Věrchněkamskoe (Rusko), Suria, Salena (Španělsko);

## 10.7 Metody těžby a úpravy

Rubidium a cesium se samostatně netěží a získávají se v některých případech jako vedlejší produkt rafinace jiných produktů, zejména lithia.

Nejdůležitějším zdrojem pro průmyslovou výrobu rubia je uhličitan rubidný $Rb_2CO_3$, který je hlavní součástí odpadních produktů po rafinaci lithia. Výroba rubidia se provádí elektrolýzou roztavené směsi 60 % chloridu vápenatého a 40 % chloridu rubidného při teplotě 750 °C. Vápník vzniklý elektrolýzou ve sběrné nádobě tuhne, protože jeho teplota tání je vyšší než rubidia a tím se od rubidia odděluje. Elektrolýza probíhá na železné katodě a grafitové anodě, na které vzniká plynný chlor. Tento způsob pro tento kov však není úplně nejlepší. V současné době se vyrábí okolo 5 tun rubidia ročně (https://cs.wikipedia.org/wiki/Rubidium; www.prvky.com):

$2RbCl \rightarrow 2Rb + Cl_2$

$2RbCl + Ca \rightarrow 2Rb + CaCl_2$

Jiný způsob je příprava chemickou cestou - zahříváním hydroxidu rubidného nebo oxidu rubidného s kovovým hořčíkem v proudu vodíku nebo s kovovým vápníkem ve vakuu. Jedno z nejlepších redukovadel je zirkonium (https://cs.wikipedia.org/wiki/Rubidium; www.prvky.com):

$2RbOH + Mg \rightarrow 2Rb + Mg(OH)_2$

$Rb_2O + Ca \rightarrow 2Rb + CaO$

## 10.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Pro hodnocení geologických celků z hlediska potenciálu k zajištění ekonomicky využitelných zásob a pro posuzování výpočtů zásob vyhrazených nerostů v České republice byly v rámci projektu TA ČR „Horninové prostředí a nerostné suroviny“ (SS02030023) navrženy níže uvedené limitní ukazatele (Tvrdý et al. 2022). V České republice jsou Rb a Cs doprovodnou složkou rud jiných kovů (Li, Sn, W) a nevyskytují se jako hlavní užitkové složky. Byly proto stanoveny pouze limity pro zásoby vhodné k zařazení do státní bilance.

Velikost ložiska:

- minimální zásoby rubidia na ložisku komplexních rud ..... 2 000 tun Rb-kovu

- minimální zásoby cesia na ložisku komplexních rud ..... 200 tun Cs-kovu

Minimální obsah na ložisku:

- minimální obsah rubidia na ložisku ..... 0,40 hm. % Rb-kovu
- minimální obsah cesia na ložisku ..... 0,04 hm. % Cs-kovu

## 10.9 Reference

Hanzlík, P., Tvrdý, J., Šmelhausová, A., Brož, B., Šešulka, V., Zach, J., Widenbar, L. 2017. Cínovec-severozápad. GET Praha, GEOMET Brno (GF FZ007320).

Hoffman, V., Trdlička, Z. 1989. Mineralogicko-chemické zhodnocení lithných surovin z ložisek Krušných hor a Slavkovského lesa, ZZ II pro lokality Cínovec-jih (dodatek), Krásno, Podlesí, Kladská. ÚNS Kutná Hora (GF P064518).

https://cs.wikipedia.org/wiki/Rubidium

Košatka, M. 1992. Vzácné prvky na ložisku Krásno – kandidátská disertační práce. Přírodovědecká fakulta University Karlovy, Praha (GF P134989).

sine 2018a. Cesium Element Facts; http://www.chemicool.com/elements /cesium.html.

sine 2018b. Rubidium Element Facts; http://www.chemicool.com/elements/rubidium.html.

Starý, J., Bohdálek, P., Godány, J., Mašek, D., Novák, J., Poňavič, M., Rýda, K., Večeřa, J., Lukeš, I., Zítko, V., Vaněček, M. 2019. Centrum kompetence efektivní a ekologické těžby nerostných surovin (CEEMIR) – WP 2 – Potenciální zdroje na území ČR – Zhodnocení aktuálního surovinového potenciálu ČR (kritické suroviny EU – CRM, lithium a kaolin). Výsledek Vsouhrn TE02000029. 177 s. Česká geologická služba. Praha. CGS P000081/2019.

Starý, J., Sitenský, I., Mašek, D., Gabriel, Z., Němec, M., Hodková, T., Vaněček, M., Novák, J., Kavina, P. 2021. Surovinové zdroje České republiky. 484 s. MŽP, ČGS, Praha.

Tuck, C. C. 2022a. Cesium. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2022; https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-cesium.pdf.

Tuck, C. C. 2022b. Rubidium. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2022; https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-rubidium.pdf.

Tvrdý, J., Kovářová, J., Krátký, O., Havránek, J., Opekar, L., Starý, J. 2022. Metodika identifikace akumulací strategických komodit a podmínek využitelnosti strategických nerostných surovin. Projekt Horninové prostředí a nerostné suroviny SS02030023. Dílčí cíl 1.4. Program č. 6 Prostředí pro život. MS MŽP/TA ČR.

Váňa, T., Paterová, B., Zach, J., Šešulka, V. 2013. Závěrečná zpráva Přepočet zásob odkaliště Cínovec – Li rudy. Stav ke dni 12. 4. 2013. - Timex Zdice s.r.o. / Geomet s.r.o.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 11 Titan

## 11.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

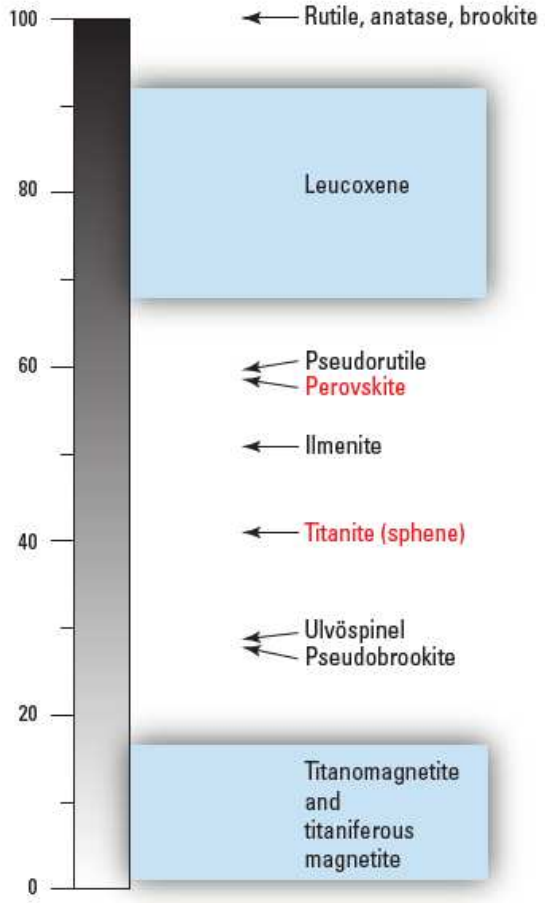
Titan je devátým (podle wikipedie sedmým) nejrozšířenějším prvkem v zemské kůře s průměrným obsahem $TiO_2$ 0,7% (Rudnick a Fountain 1995). Titan se vyskytuje téměř ve všech horninách a sedimentech, často v obsazích vyšších než 1 hmot. %, a proto je na rozdíl od mnoha jiných hospodářsky významných prvků považován za hlavní a nikoli za stopový prvek. Titan je přechodný prvek s atomovým číslem 22 a atomovou hmotností 47,867. Geochemie titanu je podobná chemickému křemíku a zirkoniu. Hlavním oxidačním stavem je $Ti^{4+}$, i když jsou známy i $Ti^{2+}$ a $Ti^{3+}$. Titan je litofilní prvek se silnou afinitou ke kyslíku a obvykle tvoří oxidy. V přírodě se nevyskytuje jako čistý kov a k získání kovu s nízkou hustotou a vysokou pevností je nutné jeho zpracování. Kovový titan má vynikající odolnost proti korozi a je stejně pevný jako ocel, ale o 45 % lehčí.

Titan je šedý až stříbřitě bílý, lehký a tvrdý kov. Je dobrým vodičem tepla i elektřiny. Vyznačuje se mimořádnou chemickou stálostí – je zcela netečný k působení vody a atmosférických plynů a odolává působení většiny běžných minerálních kyselin i roztoků alkalických hydroxidů. Zvolna se rozpouští v horké kyselině chlorovodíkové, naopak kyselina dusičná jeho povrch pasivuje. Pro jeho rozpouštění je nejúčinnější kyselina fluorovodíková nebo její směsi s jinými minerálními kyselinami.

Obrázek 47. *Tyčinka z krystalického titanu o vysoké čistotě 99,995 % vyrobená procesem van Arkel-de Boer společností URALREDMET v bývalém Sovětském svazu. Hmotnost ≈283 g, délka ≈14 cm, průměr ≈25 mm. Zdroj: wikipedie (pse-mendelejew.de).*

Titan je nezbytný pro fungování moderních průmyslových ekonomik. Většina vyrobeného titanu se rafinuje na oxid titaničitý, který má vysoký index lomu a je tak schopen dodávat trvanlivou bílou barvu barvám, papíru, plastům, gumě a nástěnným deskám. Díky vysokému poměru pevnosti k hmotnosti a odolnosti proti korozi se kovový titan a jeho slitiny používá v leteckém a kosmickém průmyslu, ale také pro povlaky svařovacích tyčí, biologické implantáty a spotřební zboží.

Hlavními rudními minerály obsahujícími titan jsou ilmenit a rutil, v menší míře i leukoxen (směs hydratovaných Ti-oxidů vzniklých alterací silikátů). V budoucnu by mohly mít hospodářský význam i další minerály, včetně anatasu, perovskitu a titanomagnetitu. Ilmenit se v současné době těží na dvou velkých ložiscích anortozitu uložených v horninách proterozoického stáří. Většina rutilu a téměř polovina vytěženého ilmenitu pochází z aluviálních, fluviálních a eolických ložisek tzv. těžkých písků. Titanové minerály se vyskytují v různých geologických prostředích, ale mnohá ze známých ložisek jsou v současnosti nebilanční kvůli komplikacím souvisejícím s mineralogií nebo kvůli přítomnosti stopových kontaminantů, které mohou ohrozit proces výroby pigmentu.




Obrázek 48. *Obsah $TiO_2$ (hmot. %) v hlavních titanonosných oxidech (černě) a silikátech (červeně). Zdroj: Woodruff et al., 2017.*

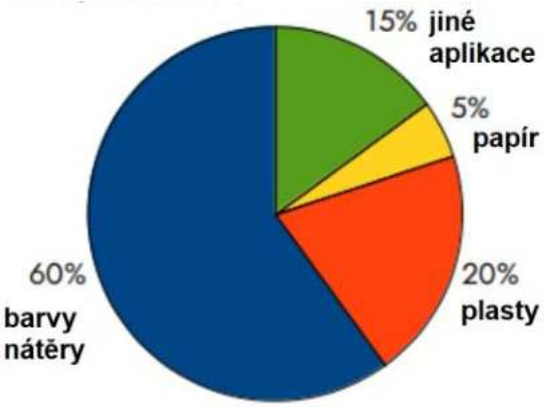
## 11.2 Průmyslové aplikace a trh

Titan je považován za kritický a strategický prvek díky jedinečným vlastnostem v kovovém stavu i jako oxidu. Neexistují žádné jeho zcela uspokojivé náhrady, zejména v případě kovového titanu (Towner et al., 1988). Obdobná kombinace odolnosti proti korozi, poměru hmotnosti a pevnosti a velmi vysokého bodu tání se u jiných kovů nevyskytuje. Výroba kovového titanu je však relativně finančně náročná a provozní nasazení titanových komponentů je účelné pouze v případech, kdy není možno použít levnější alternativu na bázi slitin hliníku a hořčíku – duralů. Od počátku průmyslové výroby kovového titanu spočívalo těžiště jeho využití v kosmických

technologiích a speciálních aplikacích leteckého průmyslu. Titan a jeho slitiny jsou základním materiálem při výrobě skeletů nebo povrchových ochranných štítů kosmických objektů (družice, vesmírné sondy a vesmírné stanice). V leteckém průmyslu nacházejí využití při výrobě zvláště namáhaných součástí letadel, tedy především při konstrukci vojenských stíhacích letounů i komerčních dopravních letounů (wikipedia.org).

Vysoká odolnost titanu je využívána při výrobě chirurgických nástrojů a módních doplňků (piercing). Titan, ve formě čistého titanu nebo titanové slitiny (Ti-6Al-4V) se používá jako implantát za kostní tkáně v ortopedii, neurochirurgii, stomatologii, nebo v obličejové a plastické chirurgii. V chemickém průmyslu je titan vhodný k výrobě nebo vystýlce chemických reaktorů, které pracují v extrémních podmínkách a vyžadují vysokou odolnost proti korozi. Titan je také používán v zařízeních, která dlouhodobě pracují ve styku s mořskou vodou. Mohou to být součásti lodí nebo ponorek (lodní šrouby), ale i komponenty průmyslových celků, sloužících k odsolování (desalinaci) mořské vody (wikipedia.org).

Náhrady pigmentu $TiO_2$, jako je oxid zinečnatý, litopon (směs síranu barnatého a sulfidu zinečnatého) a uhličitan vápenatý, mají obecně za následek horší výrobek a jsou méně bezpečné pro životní prostředí. Ačkoli olovo má podobné bělící vlastnosti, pigment na bázi oxidu titaničitého ho jako bělidlo kvůli zdravotním rizikům nahradil.




Obrázek 49. *Spektrum použití titanové běloby TiO2. Zdroj: www.explainthatstuff.com, 2022.*

Odvětví výroby titanových surovin je ovládáno relativně malým počtem společností na obou koncích dodavatelského řetězce; v důsledku toho mohou mít kroky několika vedoucích představitelů odvětví dopad na celé odvětví (Murphy a Frick 2006). Zdroje titanu se nacházejí v relativně malém počtu zemí, což znamená, že mnoho průmyslových států je závislých na dovozu titanu (Towner et al. 1988).

Zvyšující se poptávku po titanu v Číně bude doprovázet rostoucí poptávka ve Spojených státech, protože americká ekonomika se zotavuje z recese, která začala v roce 2008, a protože roste využití v leteckém, obranném a průmyslovém průmyslu. Například nová lehčí a úspornější letadla a vozidla budou vyžadovat podstatně více titanu ve svých konstrukcích, aby se snížila hmotnost a zvýšila odolnost. Dynamika celosvětového titanového průmyslu je tedy složitou vzájemnou závislostí nabídky a poptávky, průmyslových činností a environmentálních předpisů, které mohou být do značné míry ovlivněny objevením nových způsobů využití titanu a technologickým pokrokem v oblasti těžby a výroby kovového titanu a pigmentu $TiO_2$.

Tabulka 27. *Ceny obchodovaných komodit. Zdroj: Starý et al., 2023.*

| Komodita/rok | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022[e] |
|---|---|---|---|---|---|
| Rutil, volně ložený, min. 95 % $TiO_2$, FOB Austrálie, USD/t (IM v MCS)* | 1 025 | 1 150 | 1 175 | 1 450 | 1 500 |
| Ilmenit a leukoxen, volně ložený, FOB Austrálie, USD/t (IM v MCS)* | 407 | 478 | 459 | 595 | 580 |
| Ilmenit, dovoz do USA, USD/t (MCS) | 219 | 186 | 215 | 240 | 290 |
| Struska, 80%–95% $TiO_2$, proclený dovoz do USA, USD/t (MCS) | 664 | 738 | 792 | 757 | 750 |
| Koncentrát titanové rudy, volně ložený, 95 % $TiO_2$, USD/t (MB)** | 710–1 100 | 1 000–1 200 | 1 100–1 200 | N | N |
| Koncentrát titanové rudy, volně ložený, 54 % $TiO_2$, USD/t (MB)** | 160–200 | 164–220 | 190–230 | N | N |
| Leukoxen, min. 91 % $TiO_2$, max. 1 % $ZrO_2$, pytlovaný, FOB Západní Austrálie, USD/t (IM)*** | 700–802 | N | N | N | N |
| Rutil, koncentrát, min. 95 % $TiO_2$, volně ložený, CIF Čína, USD/t (IM)*** | 850–1 100 | 1 150–1 250 | 1 200–1 250 | N | N |
| Ferotitan, USD/kg (DERA)**** | 4,9 | 5,0 | 4,33 | 7,42 | 11,77 |
| Titan, oxid, pigment, volně ložený velký objem, CIF severní Evropa, EUR/t (DERA)***** | N | N | 2 908 | 3 271 | N |

*e – odhad*

** Průměr konečné roční ceny. Zveřejňování cen ilmenitu z Austrálie bylo přerušeno po konci roku 2017.*

*** Cenové rozpětí zahrnuje nejnižší a nejvyšší denní cenové kotace v daném roce.*

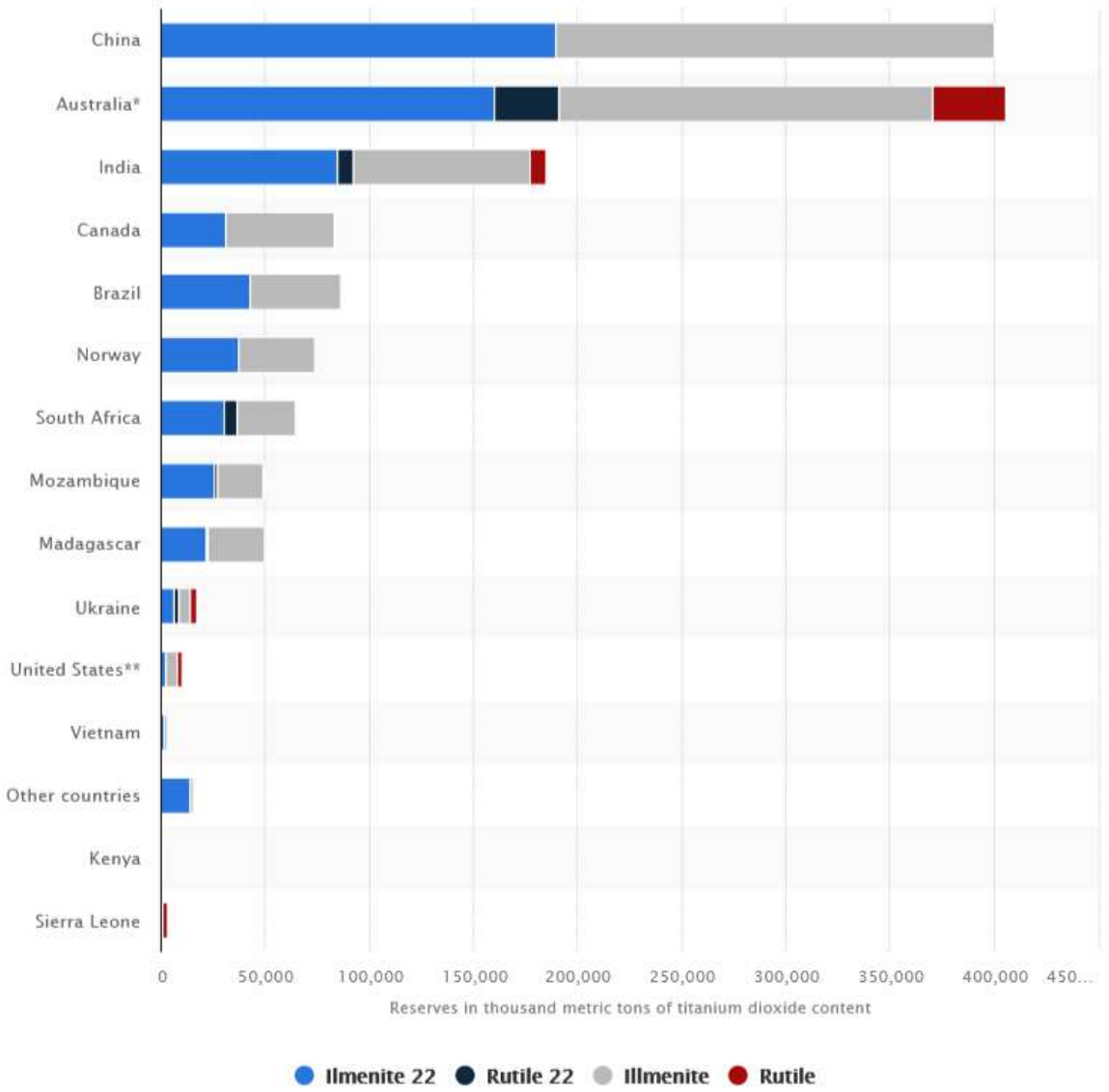
**** Cenové rozpětí zahrnuje nejnižší a nejvyšší měsíční cenové kotace v daném roce.*

***** Ceny ferotitanu 60% Ti za roky 2018 až 2021, FOB Evropa. Průměrná roční cena.*

****** Průměrná roční cena.*

## 11.3 Hlavní ložiska ve světě

Celosvětové produkci titanových minerálů v současnosti dominují Austrálie, Kanada, Norsko a Jihoafrická republika; další těžba probíhá v Brazílii, Indii, na Madagaskaru, v Mozambiku, v Siera Leone a na Srí Lance.




Tabulka 28. *Světové zásoby titanových minerálů 2023 (v kt $TiO_2$). Zdroj: www.statista.com.*

Největším evropským producentem titanových minerálů je Norsko. V Norsku je známo kolem 300 výskytů a ložisek Ti a Fe-Ti-rud. Nejvýznamnějšími ložisky jsou Tellnes (ilmenit, v provozu), Bjerkreim-Sokndal (kombinované ložisko titanomagnetitu bohatého na apatit, ilmenit a vanad v antortozitech) a Engebøfjellet (rutil v eklogitu).

## 11.4 Výskyty v České republice

Česká republika nedisponuje zdroji titanu a nejsou zde ani žádná evidovaná ložiska.

Na území České republiky ale jsou známy výskyty titanonosné mineralizace v pevných horninách i v sedimentech.

V magmatických horninách se zvýšené obsahy titanonosných minerálů nachází na lokalitách Špičák u Deštného a Pěčín v Orlických horách, levý břeh Labe u Týnce nad Labem a Vlčice v Jeseníkách (Hejtman 1977).

V alkalických matasomatitech Na ložisku komplexních U-Zr-Ti-rud Břevniště (Liberecký kraj) je titan doprovodnou složkou rud uranu a zirkonia (Novák et al. 2022). Také lokalita Hůrky může představovat zajímavý zdroj nejen Ti-minerálů.

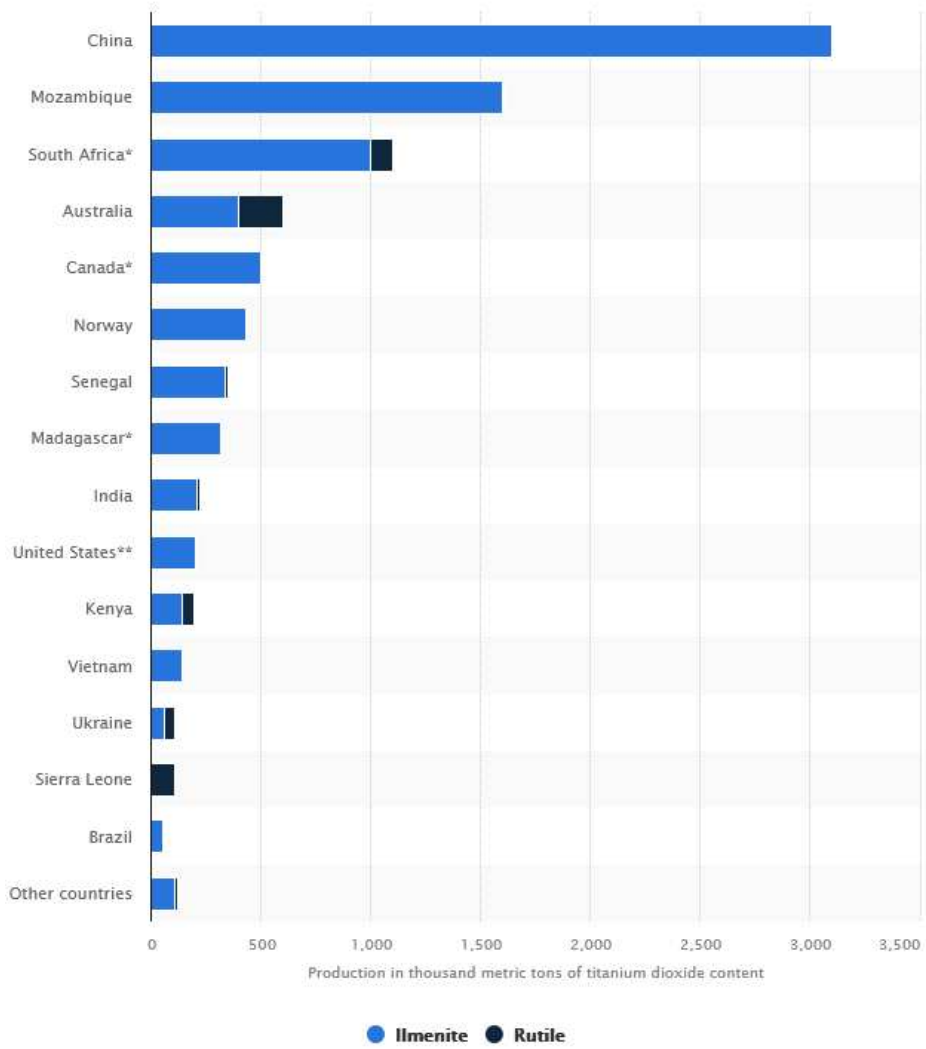
Reziduální jíly ve zvětralinových profilech a bazálních sedimentech podkrušnohorských pánví často obsahují akumulace převážně submikroskopického anatasu a sekundárního leukoxenu. Na lokalitě Želénky v teplické části mostecké pánve bylo v bezprostředním podloží uhelné sloje vyhodnoceno 210 kt jílů v poloze o průměrné mocnosti 4 m a s obsahy 6–7 % $TiO_2$ a 3–3,5 % $Fe_2O_3$ (Novák et al. 2022).

Akumulace těžkých minerálů v náplavech představuje další potenciálně zajímavý zdroj Ti-minerálů. Tím jsou například náplavey říčky Andělice jižně od Pocinovic, Kejžlice ssv. od Humpolce byly v náplavech Pstružného potoka, Sázavka jjz. od Golčova Jeníkova.

Ilmenit je v České republice hojnou složkou frakce těžkých minerálů na řadě ložisek štěrkopísků.

## 11.5 Produkce a spotřeba

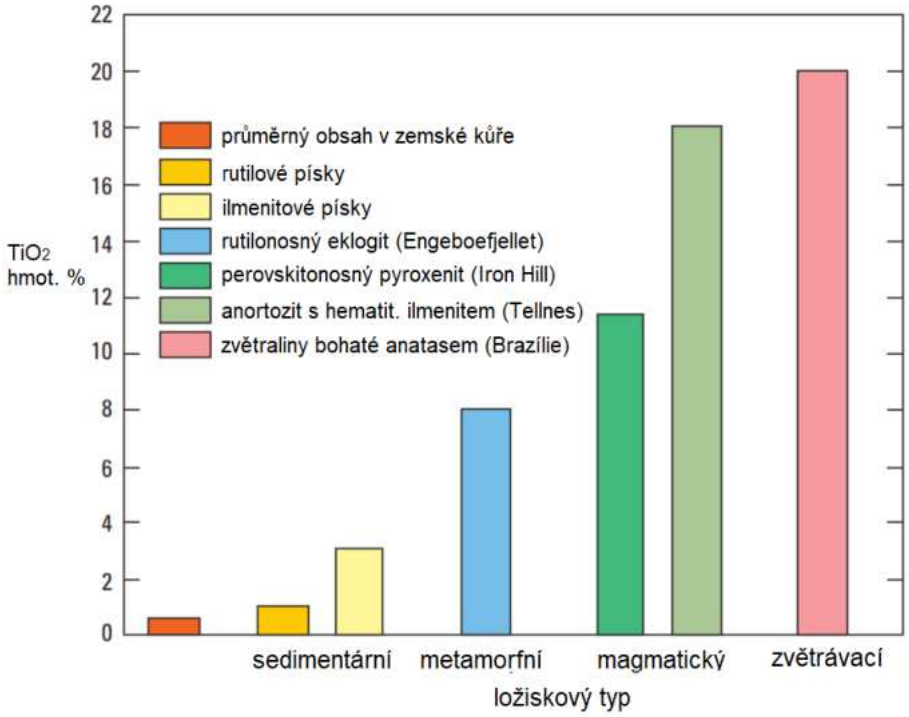
Světové zásoby titanových rud a jejich těžbu v roce 2023 graficky znázorňuje následující obrázek. Z tabulky uvedené níže vyplývá, že více než jedna třetina produkce sumárního $TiO_2$ (33 %, tj. 3 100 kt/r) připadá na Čínu, která je následována JAR (přes 1 100 kt/r, 12 %) a Mozambikem (necelých 1 600 kt/r, 11 %). Hlavním těženým minerálem je ilmenit. Těžba rutilu je mnohem nižší a dominuje v ní Austrálie (200 kt/r, tj. 32 %) a Sierra Leone (110 kt/r, tj. 19 %).




Obrázek 50. *Těžba titanových minerálů v roce 2023 (v kt $TiO_2$). Zdroj: www.statista.com.*

## 11.6 Genetické typy ložisek

Jak je z výše zmíněného patrné, titan není ekonomicky získáván z pegmatitů. Klasifikace ložisek se mohou značně překrývat. Například magmatické koncentrace křemičitanů a oxidů obsahujících železo a titan mohou být metamorfovány za vzniku rutilu, zvětrávat z matečných hornin a následně se zdržovat na místě ve zvětralinových zónách nebo být transportovány a tříděny větrem či vodou za vzniku ložisek těžkých minerálů. Společným znakem všech typů ložisek popsaných v tabulce je jejich konečný původ z hornin do určité míry obohacených titanem geologickými procesy.




Obrázek 51. *Průměrné kovnatosti jednotlivých ložiskových typů. Zdroj: Woodruff et al., 2017.*

Ekonomická hodnota a těžební potenciál ložiska titanu je do značné míry závislý spíše na jeho mineralogii než na celkovém obsahu titanu. K ekonomickému potenciálu ložiska přispívá také velikost zrn, morfologie, textura a typ a množství obsažených stopových prvků. V sedimentárních ložiscích se titanové minerály uvolnily z matečné horniny; proto lze těžit nízkoobsahová ložiska tohoto typu, pokud jsou titanové minerály dostatečně kvalitní, a to buď alterací ilmenitu, nebo přítomností rutilu.

Přítomnost či nepřítomnost samostatných krystalů ilmenitu je klíčovým faktorem, který určuje ekonomickou hodnotu většiny magmatických ložisek oxidů. V magmatických ložiscích ilmenitu, jako je ložisko v Tellnes (Norsko), musí být ruda vytěžena a rozdrcena a ilmenit musí být oddělen od odpadní horniny; proto musí být u těchto typů ložisek vysoká kvalita rudy (Korneliussen et al., 2000). Ložiska s netradičními titanovými rudními minerály, jako je například Iron Hill (Powderhorn, Colorado, USA) s perovskitem jako hlavní surovinou, jsou v současné době neekonomická. Podobně se v současné době nevyužívají pro titanit-anatasová ložiska Catalão, Salitre a Tapira v Brazílii (Woodruff et al. 2017).

Největším evropským producentem titanových minerálů je Norsko. V Norsku je známo kolem 300 výskytů a ložisek Ti a Fe-Ti-rud. Nejvýznamnějšími ložisky jsou Tellnes (ilmenit, v provozu), Bjerkreim-Sokndal (kombinované ložisko titanomagnetitu bohatého na apatit, ilmenit a vanad v antortozitech) a Engebøfjellet (rutil v eklogitu).

Tabulka 29. *Klasifikace vybraných ložisek titanových rud. Zdroj: Woodruff et al., 2017.*

| Skupina | Ložiskový typ | Hlavní minerály | Význam | Příklady |
|---|---|---|---|---|
| **Magmatická ložiska** | | | | |
| I-1 | anortozity | hematitizovaný ilmenit („hemo-ilmenit“) | 1 | Lac Tio, Quebec; Tellnes, Norsko |
| I-2 | anortozity-gabra | ilmenit, titanomagnetit | 2 | Sanford Lake district, N.Y., USA |
| I-3 | zvrstvené bazické intruze | ilmenit, titanomagnetit | 2 | Magpie, Quebec; Panzihuia, Čína |
| I-4 | troktolity/ultrabazika | ilmenit, titanomagnetit | 3 | Longnose, Minn. , USA |
| I-5 | albititicko-metasomatické | rutil | 3 | Kragerø, Norsko; Roseland, Va., USA (zčásti) |
| I-6 | alkalicko-metasomatické | perovskit, brookit, rutil | 3 | Iron Hill, Colo.; Magnet Cove, Ark., USA |
| I-7 | zvětralé alkalické horniny | anatas | 2 | Catalão, Salitre, Tapira, Brazílie |
| I-8 | zvětralé anortozity | ilmenit, rutil | 4 | Roseland, Va., USA (zčásti) |
| **Metamorfní ložiska** | | | | |
| M-1 | eklogity | rutil | 2 | Engebøfjellet, Norsko; Piampaludo, Itálie |
| M-2 | amfibolity | rutil | 3 | Daixian, Čína |
| M-3 | zelené břidlice | rutil | 5 | Dinning, Md., USA |
| M-4 | kontaktně metasomatizovaný anortozit | ilmenit, rutil | 4 | Roseland, Va., USA (zčásti) |
| M-5 | metasomatizovaný svor | rutil | 5 | Evergreen, Colo., USA |
| **Hydrotermální (magmatická a/nebo metamorfní)** | | | | |
| I/M | hydrotermální porfyrová | rutil | 3 | Bingham, Utah, USA; El Teniente, Chile |
| **Sedimentární** | | | | |
| S-1 | fluviální | rutil, ilmenit | 1 | Mogbwemo and Sherbo River, Sierra Leone |
| S-2 | plážové písky a/nebo příbřežní duny | ilmenit, alterovaný ilmenit, rutil, leukoxen | 1 | North Stradbroke Island, východní Austrálie; Richards Bay, JAR; Trail Ridge, Fla., USA (zčásti) |
| S-3 | zpevněné paleorozsypy (říční a/nebo plážové) | ilmenit, alterovaný ilmenit, rutil, leukoxen | 2 | Bothaville, JAR |
| S-4 | zvětralá sedimentární ložiska | alterovaný ilmenit, leukoxen | 1 | Trail Ridge, Fla., USA (zčásti) |

## 11.7 Metody těžby a úpravy

Postupy těžby a zpracování titanových rud se liší podle typu ložisek, zásadní rozdíl je mezi dobýváním magmatických, metamorfních a metasomatických ložisek vázaných na skalní horniny (typ „hard-rock“) a ložisek těžkých minerálů v sedimentech a reziduích.

### *Těžba primárních ložisek (typ „hard rock“)*

Masivní anebo strmě upadající tělesa magmatických, metamorfních a metasomatických rud jsou dobývána povrchovým způsobem. Povrchové dobývání obvykle spočívá v odstranění skrývky, těžbě rudy včetně trhacích prací a její trasport nákladními vozidly nebo pásovými dopravníky na mezideponie. Povrchová těžba může dosáhnout hloubek několika set metrů, zřídka však přes 100 m. Povrchová těžba probíhá také na zvětrávacích typech ložisek, rozsypech a náplavech.

### *Těžba sekundárních ložisek*

Relativně nejjednodušší je těžba sekundárních (sedimentárních a reziduálních) ložisek, která jsou v případě těžby z vody dobývána dragováním a při těžbě nad vodní hladinou pomocí nakladačů nebo rozplavováním proudem vody.

### *Metalurgické zpracování titanových rud*

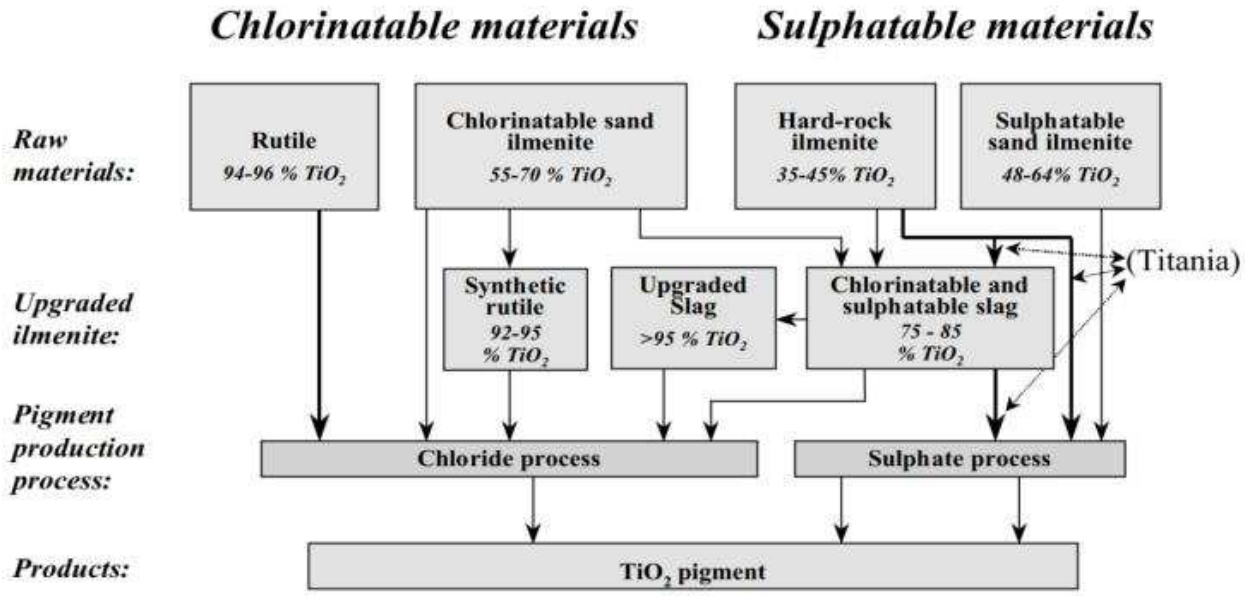
Ilmenit, rutil a leukoxen se hutní především na strusku bohatou na titan nebo syntetický rutil a poté se dále zpracovávají pro použití v pigmentech a jako kovový titan. Titanové strusky, které se získávají tavením ilmenitu, obsahují přibližně 75 až 86 % $TiO_2$; dalším zpracováním vysokotlakým kyselým loužením lze obsah zvýšit na přibližně 94,5 % $TiO_2$. Syntetický rutil se vyrábí odstraněním železa ze surového ilmenitu (Woodruff et al., 2017).

Titaničitý pigment $TiO_2$ i kovový titan se s rutilu a ilmenitu v současnosti vyrábí dvěma hlavními průmyslovými postupy (Mackey, 1994):

- Sulfátový proces je starší metodou, při níž se jemně mletý ilmenit nebo struska s vysokým obsahem TiO2 rozkládá koncentrovanou kyselinou sírovou.
- Chloridový proces (tzv. Krollův proces) je modernější. Při něm se nejprve pyrolýzou ilmenitu nebo rutilu s uhlíkem a chlorem získává chlorid titaničitý TiCl4. Po přečištění se jeho páry redukují hořčíkem v inertní argonové atmosféře při teplotě kolem 800 °C.

  $TiCl_4 + 2\ Mg \rightarrow Ti + 2\ MgCl_2$

Titan vzniklý Krollovým procesem je tuhá, pórovitá látka, která se po odstranění chloridu hořečnatého a nezreagovaného hořčíku dále čistí (wikipedia.org).




Obrázek 52. *Postup úpravy a zpracování titanových surovin. Zdroj: Dormann, 1993; Korneliussen et al., 2000.*

## 11.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Pro hodnocení geologických celků z hlediska potenciálu k zajištění ekonomicky využitelných zásob a pro posuzování výpočtů zásob vyhrazených nerostů v České republice byly v rámci projektu TA ČR „Horninové prostředí a nerostné suroviny“ (SS02030023) pro ložiska titanových rud v pevných horninách navrženy níže uvedené limitní ukazatele (Tvrdý et al. 2022).

Minimální velikost ložiska:

- minimální množství zásob na samostatném ložisku titanových rud uvažovaných jako hlavní užitková složka ..... 10 000 tun Ti-kovu

Minimální obsah na ložisku:

- minimální obsah na samostatném ložisku titanových rud uvažovaných jako hlavní užitková složka .....bilanční 5 hm. %, nebilanční 2,5 hm. % Ti-kovu
- minimální obsah na ložisku komplexních rud nutný pro zařazení do státní bilance zásob vyhrazených nerostů .....2,5 hm. % Ti-kovu

Uvedené ukazatele jsou indikační a mohou být pro konkrétní ložisko modifikovány, popř. doplněny o další parametry podle aktuální ekonomické rozvahy s ohledem na cenové relace, investiční náklady, náklady na těžbu a úpravu atp.

## 11.9 Reference

Hejtman, B. 1977. Petrografie. SNTL Nakladatelství technické literatury. Praha.

Korneliussen, A. 2019. Titanium and iron-titanium deposits in Norway. Focus Nr. 7, FEB 2019. NGU - Geological Survey of Norway. 2 s.

Korneliussen, A., McEnroe, S. A., Nilsson, L. P., Schiellerup, H., Gautneb, H., Meyer, G. B., Størseth L. R. 2000. An overview of titanium deposits in Norway. Norges Geologiske Underskøleske Bulletin 436, 27–38.

Mackey, T. S. 1994. Upgrading ilmenite into a high-grade synthetic rutile. Journal of Metals 46(4), 59-64.

Murphy, P., Frick, L. 2006. Titanium. In Kogel J. E., Trivedi N. C., Barker J. M., Krukowski S. T., eds., Industrial minerals and rocks (7th ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 987-1003.

Novák, J., Starý, J., Sitenský, I. 2022. Zdroje titanu na území ČR. Horninové prostředí a nerostné suroviny – Rock Environment Natural Resources (RENS) SS02030023 - dílčí cíl 1.1 Nerostné suroviny. MS Česká geologická služba.

Rudnick, R. L., Fountain, D. M. 1995. Nature and composition of the continental crust - a lower crustal perspective: Reviews of Geophysics, 33 (3), 267–309.

Starý, J., Sitenský, I., Mašek, D., Gabriel, Z., Němec, M., Hodková, T., Vaněček, M., Novák, J., Kavina, P. 2023. Surovinové zdroje České republiky. 484 s. MŽP, ČGS. Praha.

Tvrdý, J., Kovářová, J., Krátký, O., Havránek, J., Opekar, L., Starý, J. 2022. Metodika identifikace akumulací strategických komodit a podmínek využitelnosti strategických

nerostných surovin. Projekt Horninové prostředí a nerostné suroviny SS02030023. Dílčí cíl 1.4. Program č. 6 Prostředí pro život. MS MŽP/TA ČR.

Towner, R. R., Gray, J. M., Porter, L. M. 1988. International Strategic Minerals Inventory summary report – Titanium. U. S. Geological Survey Circular 930-G, 59 s.

Woodruff, L. G., Bedinger, G. M., Piatak, N. M. 2017. Titanium, chap. T of Schulz, K. J., DeYoung, J. H., Jr., Seal, R. R., II, and Bradley, D. C., eds., Critical mineral resources of the United States - Economic and environmental geology and prospects for future supply: U. S. Geological Survey Professional Paper 1802, T1–T23; https://doi.org/10.3133 /pp1802T.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny v tabulkách evropských a světových ložisek.

# 12 Zirkonium a hafnium

## 12.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Zirkonium je šedý až stříbřitě bílý, středně tvrdý a poměrně lehký kov, mimořádně chemicky stálý. Je zcela netečný k působení vody a odolává většině běžných minerálních kyselin i hydroxidů. Hustota je 6,506 g/cm$^3$. Jemně rozptýlený kov může na vzduchu samovolně vzplanout, v kusové podobě (slitky, plechy, dráty) je však stálý. V přírodě se vyskytuje pouze ve formě sloučenin.

Hafnium je šedý až stříbřitě bílý, kovový prvek, chemicky velmi podobný zirkoniu, které doprovází prakticky ve všech minerálech. Vyznačuje se mimořádnou chemickou stálostí – je zcela netečný k působení vody a odolává běžným minerálním kyselinám i roztokům alkalických hydroxidů. Hustota je 13,31 g/cm$^3$. Hafnium dokáže výborně absorbovat neutrony (až 600x víc než zirkonium).

Zirkonium a hafnium jsou litofilní prvky, které mají téměř stejný náboj, iontové poloměry a iontové potenciály. Jejich geochemické chování je proto velmi podobné. Oba prvky jsou nekompatibilní. Oba prvky jsou oproti plášti nabohaceny v zemské kůře. Průměrné obsahy jsou zde 100 ppm Zr a 3 ppm Hf (Taylor a McLennan 1995).

Hlavními minerály jsou zirkon ($ZrSiO_4$) a baddeleyit ($ZrO_2$). Jediný známý samostatný minerál hafnia je vzácný hafnon ($HfSiO_4$), většina hafnia se vyskytuje jako izomorfní příměs v minerálech zirkonia.

Zirkon ($ZrSiO_4$) je nejběžnějším minerálem zirkonia a hafnia, který se vyskytuje v přírodě. Vzniká převážně jako produkt primární krystalizace. Většina přírodního zirkonu má poměr Zr : Hf 33,6 : 1, který přibližně odpovídá poměru obsahů v zemské kůře (Taylor a McLennan 1995).

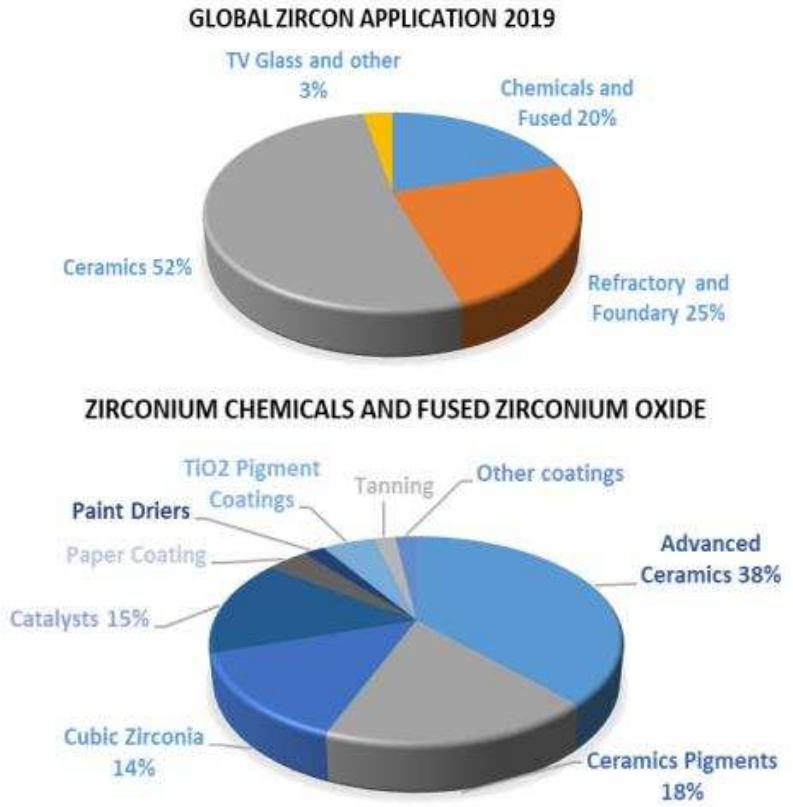
Baddeleyit ($ZrO_2$) je méně obvyklý minerál zirkonia, který se vyskytuje v alkalických horninách, mafických a ultramafických horninách a některých metamorfovaných karbonátových horninách. Baddeleyit je nejběžnější v pozdním stádiu, nejvíce chemicky frakcionovaných částí mafických magmat (Heaman a Le Cheminant 1993), a je to hlavní fáze nesoucí zirkonium v karbonatitových horninách z důvodu obecně nižší aktivity oxidu křemičitého při tavení karbonatitu. Stejně jako u zirkonu se i v baddeleyitu může poměr Zr : Hf značně lišit, a zejména v karbonátových systémech vykazuje baddeleyit frakcionaci zirkonia z hafnia (Scharer et al. 1997; Klemme a Meyer 2003). V mafických horninách jsou krystaly baddeleyitu obvykle světle až tmavě hnědé a tvoří drobné idiomorfní krystaly, které jsou obvykle rýhované (Heaman a Le Cheminant 1993). Krystaly jsou typicky velmi malé, často menší než 30 mikronů (Söderlund a Johansson 2002).

Hlavní světová ložiska Zr-Hf-rud jsou vázána na těžké minerální písky, které vznikají zvětráváním a erozí již existujících hornin a koncentrací zirkonu v sedimentárních systémech, zejména v pobřežním prostředí (tzv. plážové písky).

Obrázek 53. *Zirkonium a hafnium (Jones et al., 2017). A = kovové zirkonium. B = kovové hafnium (foto Heinrich Pniok, http://pse-mendelejew.de). C = krystaly primárního magmatického zirkonu, drát v levém dolním rohu má v průměru 0,1 mm. D = detritické krystaly zirkonu, zaoblené z důvodu transportu a přepracování, drát v horní části má v průměru 0,1 mm (foto James V. Jones). E = krystaly badelleyitu z karbonatitu Phalaborwa z Jihoafrické republiky (foto Rob Lavinsky, www.iRocks.com). F = tmavé proužky těžkých minerálů v plážovém písku z lokality Čennaí, Indie (měřítko mince 1 penny v pravém dolním rohu; foto Mark A. Wilson, College of Wooster, Ohio). G = mikrofotografie těžkého minerálního písku ze Srí Lanky, bohatého na spinely (rudá až hnědá zrna); šipka ukazuje na velké zrno zirkonu (šířka záběru 20 mm, foto Simm Sepp, www.sandatlas.org).*

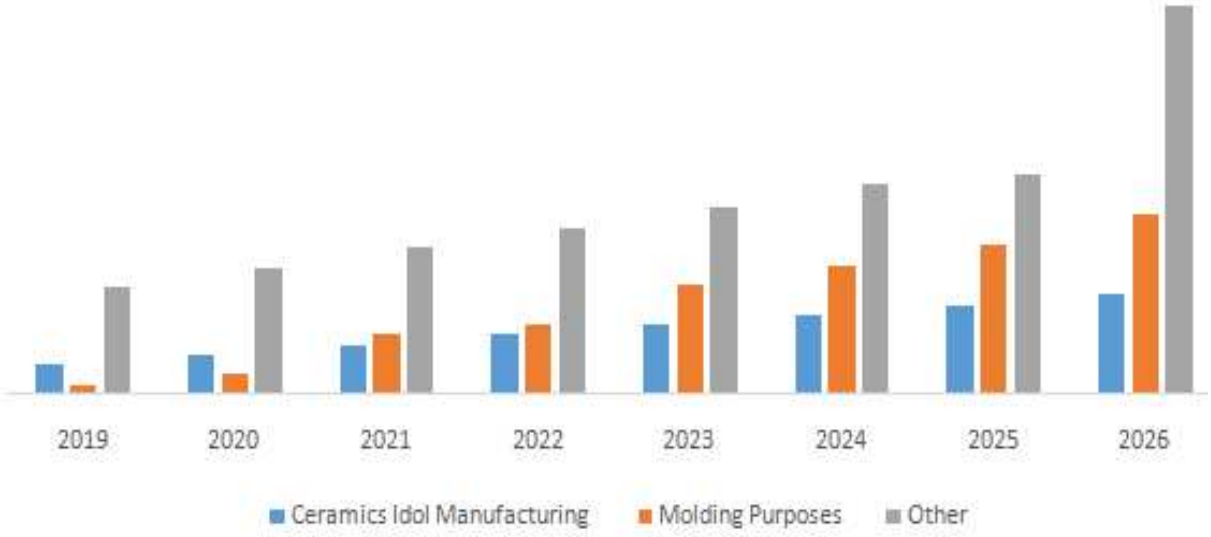
## 12.2 Průmyslové aplikace a trh

Přibližně 95 % veškerého spotřebovaného zirkonia je ve formě zirkonu, oxidu zirkoničitého nebo jiných sloučenin zirkonia (Nielson a Wilfling 2002). Minerál zirkon je vysoce žáruvzdorný, s bodem tání přes 2 550 °C. Používá se proto pro obklady na slévárenských formách a mletý v žáruvzdorných barvách pro povrchovou úpravu forem. Zirkonové cihly a bloky se používají ve slévárenství v pecích a nístějích, výrobky na bázi žáruvzdorných slitin Al-Si-Zr ve sklářství. Kolem 50 % produkce má použití v obkladech a dlažbách i sanitní a stolní keramice. Více méně okrajové využití zirkonu je ve šperkařství jako drahý kámen, syntetický kubický oxid zirkoničitý (zirkonia) je náhražkou diamantu. Baddeleyit se používá při výrobě Al-Zr-brusiv, v keramických barvách a žáruvzdorných materiálech.




Obrázek 54. *Hlavní oblasti využití zirkonia. Zdroj: http://www.zircomet.com.*

Pro použití v jaderných aplikacích musí být kovy odděleny kvůli jejich rozdílným vlastnostem absorpce neutronů. Kovové zirkonium bez hafnia má nízký účinný průřez, takže se používá jako konstrukční materiál v jaderných reaktorech a jako plášť jaderných palivových tyčí. Hafnium má relativně vysoký účinný průřez absorpce tepelných neutronů, a proto se používá v jaderných regulačních tyčích. Reaktorové zirkonium a hafnium se vyrábějí rozpouštěním oxychloridu zirkonia a chemickou separací hafnia z roztoku. Složky zirkonia a hafnia se zpracovávají odděleně za vzniku chloridů, které se pak redukují na kovy Krollovým procesem. Hafnium se také používá ve vysokoteplotní keramice, superslitinách na bázi niklu a tryskách pro řezání kovů plazmovým obloukem.




Obrázek 55. *Predikce využití zirkonu do roku 2026. Zdroj: https://www.maximizemarket research.com/market-report/global-zircon-sand-market/89123/.*

## 12.3 Hlavní ložiska ve světě

Veškeré údaje týkající se rud Zr-Hf jsou uváděny pro zirkonium (resp. minerál zirkon), jeho je hafnium minoritní příměsí. Světové zásoby $ZrO_2$ se odhadují na 44 milionů tun (Tabulka 30).

Tabulka 30. *Odhad světových zásob zirkoniových rud. Zdroj: USGS Mineral Commodity Summary, 2024.*

| | Zirconium mineral concentrates, mine production[e] (thousand metric tons, gross weight) | | Zirconium reserves[8] (thousand metric tons, $ZrO_2$ content)[1] |
|---|---|---|---|
| | 2022 | 2023 | |
| United States | [9]100 | [9]100 | 500 |
| Australia | 500 | 500 | [10]55,000 |
| China | 140 | 140 | 72 |
| Indonesia | 97 | 90 | NA |
| Kenya | 27 | 30 | 18 |
| Madagascar | 27 | 30 | 2,300 |
| Mozambique | 104 | 90 | 1,500 |
| Senegal | 57 | 50 | 2,600 |
| Sierra Leone | 34 | 30 | 290 |
| South Africa | 300 | 400 | 5,600 |
| Other countries | 57 | 140 | 5,700 |
| World total (rounded) | 1,440 | 1,600 | 74,000 |

Převážná část celosvětové produkce zirkonia je ve formě zirkonu z TM v sedimentárních ložiscích. Z následující tabulky vyplývá, že významná ložiska tohoto typu mají geologické zásoby v desítkách až tisících Mt a obsah těžkých minerálů přes 1 %. Podíl zirkonu v těžké frakci je variabilní a kolísá od desetin do prvních desítek procent.

Tabulka 31. *Parametry vybraných ložisek Zr-Hf-rud.*

| Název | Stát | Genetický typ | Zásoby, obsahy | Zdroj |
|---|---|---|---|---|
| Ložiska skupiny Kwale | Keňa | sedimentární | total resources:<br>surovina 254 Mt (1,9 % TM)<br>těžké minerály 4,7 Mt<br>(50 % ilmenit, 13 % rutil, 5,7 % zirkon) | 2021:<br>https://miningdataonline.com/property/1386/Kwale-Operation.aspx |
| Ložiska skupiny Kenmare | Mozambik | sedimentární | total reserves: 1 540 Mt<br>total resources: 6 368 Mt<br>cut-off 1,4 % TM, průměr cca 2 % TM | 2020:<br>www.kenmareresources.com |
| Toliara | Madagaskar | sedimentární | total reserves: 586 Mt<br>6,5 % TM<br>65 % ilmenit, 32 % zirkon, 3 % rutil | 2019:<br>https://www.miningreview.com/speciality-minerals/toliara-base-resources-madagascar/ |
| Tajiri T1-T4 | Tanzanie | sedimentární | resources: 147 Mt<br>3,1 % TM | 2018:<br>https://www.miningreview.com/east-africa/strandline-resources-jackpot-tajiri-tanzania/ |
| Mannar | Srí Lanka | sedimentární | resources: 10,33 Mt<br>11,71 % TM<br>5,57 % ilmenit, 1,34 % leukoxen,<br>0,18 % rutil, 0,26 % zirkon | 2015:<br>https://www.titaniumsands.com.au/company-projects/ |
| Grande Côte | Senegal | sedimentární | resources+reserves: 1 847 Mt<br>cut-off 1,0 % TM, průměr 1,4 % TM<br>TM = 72,0 % ilmenit, 10,7 % zirkon,<br>3,2 % leukoxen 2,5 % rutil | 2017:<br>https://mineraldeposits.com.au/grande-cote-mineral-sands/ |
| Tormin | JAR | sedimentární | resources: 1,13 Mt<br>8,27 % TM = 6,47 % granát,<br>1,13 % ilmenit, 0,47 % zirkon,<br>0,15 % rutil | 2020:<br>https://www.mineralcommodities.com/operations-projects/south-africa/tormin-mineral-sands-operation/ |
| Jacinth | Austrálie | sedimentární | resources: 124,3 Mt<br>5,2 % TM<br>30 % ilmenit, 47 % zirkon, 5 % rutil | 2011:<br>https://www.researchgate.net/publication/260418848_Heavy_Mineral_Sands_in_the_Eucla_Basin_Southern_Australia_Deposition_and_Province-Scale_Prospectivity |
| Coburn | Austrálie | sedimentární | resources: 1 606 Mt<br>cut-off 0,8 % TM, průměr 1,2 % TM<br>48 % ilmenit, 22 % zirkon, 7 % rutil,<br>5 % leukoxen, 5 % hlušina | 2018:<br>https://www.strandline.com.au/irm/content/mineral-resources1.aspx?RID=468 |
| Kovdor | Rusko | magmatický | resources measured+indicated:<br>Fe-ruda 267+219,7 Mt (27 % Fe)<br>apatit 14,7+2,9 Mt (6,8 % $P_2O_5$)<br>baddeleyit 0,4+0,105 Mt (0,17 % $ZrO_2$) | 2014:<br>Mikhailova et al. (2016) |

## 12.4 Výskyty v České republice

V České republice nejsou bilancována žádná ložiska zirkonia a hafnia. Prognózní zdroje zirkonia a hafnia byly odhadnuty v uranových rudách na ložiskách uranonosných pískovců Strážského bloku české křídové pánve (spolu s TR, Ta, Nb) na 71 800 t Zr a 2 520 t Hf. Dalších 122 370 t Zr a 2 446 t Hf se předpokládá ve fenitech na lokalitě Hůrky v Čistecko-jesenickém masivu (spolu s Mo, TR, Ta, Nb). Všechny zdroje jsou neschválené (Starý el al. 2023, Stuchlíková a Frolíková 1988).

Na území ČR není velká perspektiva vyhledání velkého rozsypového ložiska těžkých minerálů (TM). Případné průzkumné práce by se mohly opět soustředit na jednotku české křídy. TM lze očekávat zejména v místech s hlouběji zvětralým podložím (Dickinson 2008).

Dalším možným zdrojem TM, i když jen okrajového významu, jsou ložiska štěrkopísků. V případě rostoucí poptávky a ceny se ve světě nevylučuje ani využití primárních ložisek (Flohr a Ross 1990). Indicie obou těchto případů existují i v Českém masivu.

## 12.5 Produkce a spotřeba

Více než polovina světové produkce zirkoniových rud připadá na Austrálii. Dalšími významnými producentskými zeměmi jsou Jižní Afrika, Čína, Indonézie a Mozambik, těžba roste v Senegalu a Keni. Výroba zirkonia je soustředěna v rukou několika společností, z nichž největší jsou Iluka, Tronox a Rio Tinto/Richards Bay Mining (https://mcgroup.co.uk).

Celková produkce hafnia je poměrně malá a závisí na těžbě a rafinaci zirkonia. Na trhu s hafniem dominují společnosti Cezus (francouzská jaderná skupina Areva) a Wah Chang (ATI). Poptávka po hafniu je určována jeho hlavními navazujícími aplikacemi - superslitiny, polovodiče, integrované obvody a jaderná výroba. Předpokládá se, že celkový trh s hafniem poroste, ale je možné, že dojde k omezení nabídky (https://mcgroup.co.uk).

Tabulka 32. *Ceny zirkonia a hafnia na světových trzích (Starý et al. 2023).*

| Komodita/rok | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022[e] |
|---|---|---|---|---|---|
| Zirkon, Standard, volně loženy, min. 65,5 % $ZrO_2$, CIF Čína, USD/t (DERA) | 1 413,20 | 1 510,94 | 1 398,10 | 1 433,85 | 2 034,79 |
| Zirkon, USD/t, CIF Čína, (MCS) | 1 948 | 1 933 | 1 843 | 2 025 | 2 270 |
| Zirkonium surové, dovoz Čína do USA, USD/kg (MCS) | 35 | 33 | 21 | 31 | 29 |
| Hafnium surové, trh USA, USD/kg (MCS) | 838 | 775 | 750 | 950 | 1 900 |

*e – předběžné hodnoty*

## 12.6 Genetické typy ložisek

Zirkonium ani hafnium nejsou v současnosti ekonomicky získávány z pegmatitů nebo vysoce diferencovaných granitů.

### *Primární magmatická ložiska*

Hlavní primární ložiska se nacházejí v alkalických magmatických horninách, které také mají zvýšený obsah niobu, tantalu a REE a mají blízkou vazbu na ložiska apatitů. Přesto je koncentrace zirkonia a hafnia v alkalických horninách poměrně malá, tudíž jen minimum těchto intruzí je vhodné pro těžbu (Jones et al. 2017).

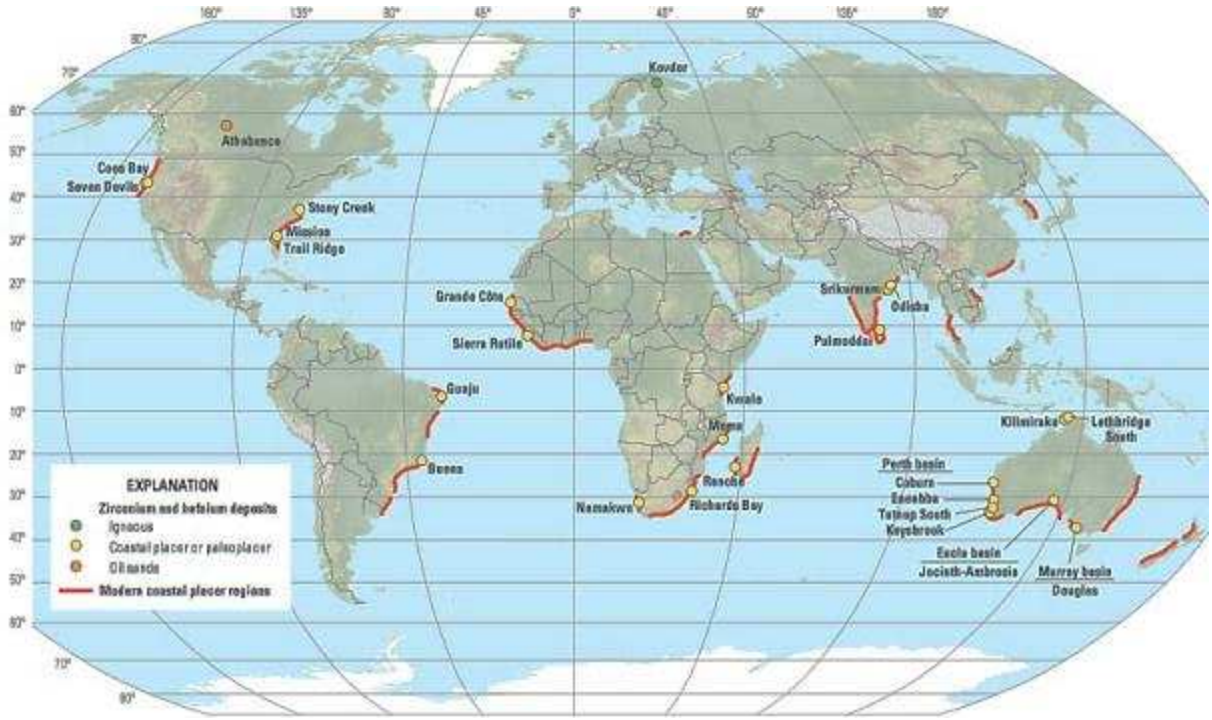
Na území Fennoskandie je známo celkem 19 ultrabazických alkalických masivů, z toho 16 v Rusku. Masivy intrudovaly během spodního paleozoika. Charakteristická je pro ně diferenciace magmatu za tvorby ultrabazických a alkalických hornin a karbonatitů. Většina z nich má koncentricky zonální stavbu se strmě upadajícími kontakty. Složeny jsou převážně pyroxenity a olivinity v centru, na okrajích vystupují horniny ijolit-urtitové řady, přítomny bývají dále melteigity a nefelinové syenity. V centru i v okrajových částech struktur se nacházejí žilná i sloupovitá tělesa karbonatitů. V endo- i exokontaktu se široce uplatnily metasomatické procesy, obzvlášť výrazné bývají aureoly fenitizovaných hornin.

### *Sekundární rozsypová ložiska*

Hlavním zdrojem zirkonia a hafnia jsou v současnosti tzv. těžké písky, které jsou sedimentárními procesy obohaceny těžkými minerály. Zirkon má vysokou hustotu a jako tvrdý a odolný minerál je stálý při zvětrávání primárních hornin a následném transportu (Morton a Hallsworth 1999).

Společně se zirkonem se obvykle ukládají další těžké minerály, které mají podobné mechanické vlastnosti. Výsledné ložisko tak může obsahovat ekonomické koncentrace zlata, cínu, železa a titanu (Slingerland a Smith 1986; Garnett a Bassett 2005). Zirkon se nejčastěji těží společně s titanovými rudami ilmenitem a rutilem.

Obrázek 56. *Titanonosné plážové písky, ostrov Mannar (Srí Lanka). Zdroj: www.titaniumsands.com.au.*




Obrázek 57. *Distribuce ložisek Zr-Hf a rozšíření těžkých plážových písků ve světě. Zdroj: Jones et al., 2017.*

***Ropné písky***

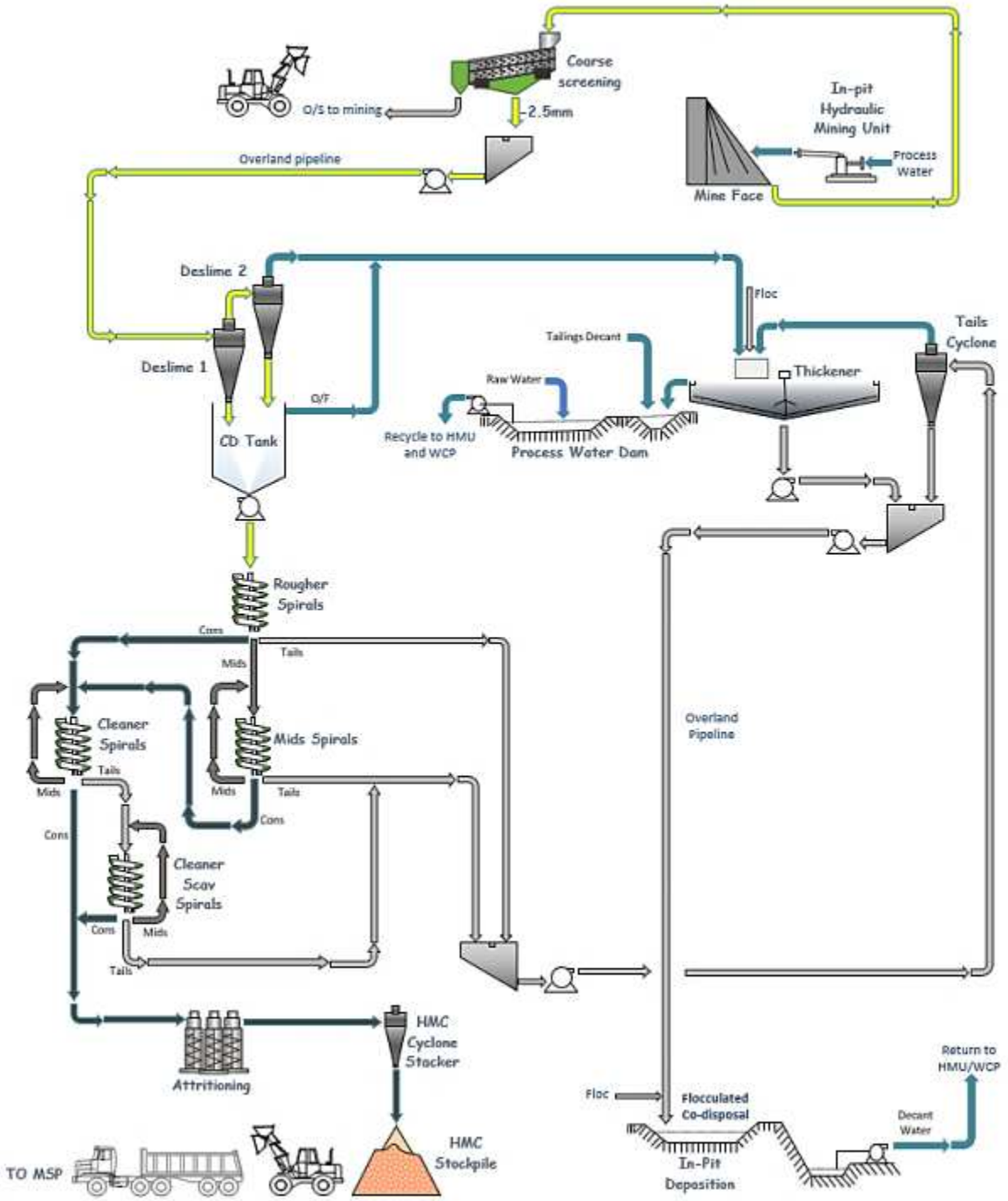
Dalším zdrojem zirkonu jsou odpady ze závodů na těžbu ropných písků. V rozsáhlé ložiskové oblasti Athabaska (Athabasca Oil Sands) v kanadské Albertě je ročně produkován odpad s obsahem cca 220 000 tun využitelného $TiO_2$ a 80 000 tun využitelného zirkonu. To představuje přibližně 6 % světové spotřeby $TiO_2$ a přibližně 9 % světové produkce zirkonu. Životnost zásob je uváděna na nejméně 50 let. Problémy dosud způsobovala obtížná upravitelnost způsobená povlaky bitumenu na zrnech písku, přítomnost sekundárního pyritu a karbonátů a vysoký podíl hlinitokřemičitanů s podobnými váhovými, elektrostatickými a magnetickými vlastnostmi. Tyto problémy lze do značné míry překonat pomocí nových technologických přístupů (Oxenford et al. 2001).

## 12.7 Metody těžby a úpravy

Způsob těžby a úpravy liší podle charakteru ložiska. Relativně nejjednodušší je u sekundárních (sedimentárních) ložisek, která jsou v případě těžby z vody dobývána dragováním a při těžbě nad vodní hladinou pomocí nakladačů nebo rozplavováním proudem vody pomocí hydromonitorů.

Obrázek 58. *Těžba písku s těžkými minerály pomocí hydromonitorů, důl Kwale (Keňa).*

Podle projektu Tajiri v Tanzanii spočívá výroba koncentrátu 95 % TM z několika stupňů gravitační separace a klasifikační technologie. Koncentrát obsahuje v průměru 56,7 % ilmenitu, 0,4 % leukoxenu a 6,4 % rutilu, 4,1 % zirkonu, 0,2 % monazitu, 15,6 % granátu, 11,1 % lehčí frakce a 5 % křemene. Koncentrát se dále zpracovává na separační lince. Kromě smíšeného zirkon-monazit-granátového koncentrátu (66 % $ZrO_2$+$HfO_2$) se vyrábí smíšený koncentrát leukoxen+rutil (HiTi, 92-93 % $TiO_2$) a ilmenitový koncentrát (48-54 % $TiO_2$).




Obrázek 59. *Schéma mokré úpravy TM-písků (projekt Tajiri, Tanzánie). Zdroj: Strandline Resources Ltd. Tajiri mineral sands project - engineering scoping study, 2020.*

Oxid zirkoničitý se vyrábí reakcí zirkonové rudy s hydroxidem sodným a následnou chlorací. Vzniklý oxychlorid zirkoničitý se kalcinuje a z výluhu se sráží $ZrO_2$ (zirkonia) ve formě prášku. Zirkonia má vysoký bod tání (2 700 °C) a nízkou tepelnou vodivost, je proto důležitou složkou keramiky, barev a glazur. Zirkonia podléhá při zahřívání fázové přeměně a pro další použití se musí stabilizovat přidáním oxidů, např. oxidu vápenatého (CaO), hořečnatého (MgO) a oxidu yttria ($Y_2O_3$). Yttriem stabilizovaná zirkonia ($ZrO_2$) se používá při výrobě kubické zirkonie, součástek optických vláken, žáruvzdorných povlaků, technické a konstrukční keramiky a kyslíkových senzorů ve spalovacích motorech. Protože má zvýšenou odolnost proti lomu a pevnost ve srovnání s podobnými výrobky z oxidu hlinitého, používá se yttriem-stabilizovaná zirkonia také v zubním lékařství, například při výrobě můstků, korunek a inlejí, a v kloubních náhradách.

Mezi další zirkoniové chemikálie patří:

- borid zirkoničitý používaný jako difúzní bariéra v polovodičích, jako nádoba pro roztavené kovy a jako hořlavý absorbér v jádrech jaderných reaktorů,
- uhličitany zirkonia používané v antiperspirantech a při výrobě tisku a papíru,
- hydrid zirkoničitý k výrobě světlic, rozbušek a náplní v pyrotechnice a jako pojivo nebo pájecí složka v brusných a leštících kotoučích,
- nitrid zirkonia používaný jako povlak odolný proti opotřebení na vrtácích a nástrojových bitech,
- fosforečnany zirkonia využívané při kationtové výměně, např. při dialýze, jako nosiče léků a při nakládání s jaderným odpadem,
- sírany zirkonia používané při činění kůží, jako katalyzátory a jako povlak práškových pigmentů na bázi oxidu titaničitého (Nielson a Wilfling, 2002).

Kovy zirkonium a hafnium se vyrábějí Krollovým procesem, který zahrnuje redukci oxychloridu zirkonia kovovým hořčíkem v inertní atmosféře. Výsledný kov obsahuje směs zirkonia a až 2 % hafnia a používá se pro nejaderné aplikace v korozivním prostředí a ve speciálních slitinách.

## 12.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

V České republice se zirkonium vyskytuje jako příměs v komplexních rudách. Nelze však vyloučit existenci ložiskových objektů, kde bude tvořit hlavní užitkovou složku. Hafnium je doprovodným prvkem zirkonia a v jiných než zirkoniových rudách se v přírodě významně neuplatňuje. Pro hodnocení geologických celků z hlediska potenciálu k zajištění ekonomicky využitelných zásob a pro posuzování výpočtů zásob vyhrazených nerostů byly v rámci projektu TA ČR „Horninové prostředí a nerostné suroviny“ (SS02030023) pro ložiska v pevných horninách navrženy níže uvedené limitní ukazatele (Tvrdý et al. 2022). Tyto ukazatele mohou být pro konkrétní ložisko modifikovány, popř. doplněny o další parametry podle zastoupení všech užitkových složek a aktuální ekonomické rozvahy.

Minimální velikost ložiska:

- minimální množství zásob na samostatném primárním ložisku zirkonium-hafniových rud jako hlavní užitkové složky ..... 10 000 tun Zr-kovu

- minimální množství zásob na komplexním ložisku s obsahem zirkonia a hafnia nutné pro zařazení do státní bilance ..... 1 000 tun Zr-kovu
- minimální množství zásob hafnia se nestanovuje.

Minimální obsah na ložisku:

a) Samostatná ložiska zirkonium-hafniových rud jako hlavní užitkové složky

- minimální kovnatost na samostatném primárním ložisku zirkonium-hafniových rud jako hlavní užitkové složky .....bilanční 0,25 hm. %, nebilanční 0,1 hm. % Zr-kovu
- minimální obsah v komplexních primárních rudách s obsahem zirkonia a hafnia nutný pro zařazení zásob do státní bilance .....0,1 hm. % Zr-kovu
- hafnium se hodnotí v případě poměru Zr : Hf menším než 60 : 1.

## 12.9 Reference

Dickinson, W. R. 2008. Impact of differential zircon fertility of granitoid basement rocks in North America on age populations of detrital zircons and implications for granite petrogenesis. Earth Planet. Sci. Lett. 275, 80-92.

Flohr, M.J.K., Ross, M. 1990. Alkaline igneous rocks of Magnet Cove, Arkansas: Mineralogy and geochemistry of syenites. Lithos 26, 67-98.

Garnett, R.H.T., Bassett, N.C. 2005. Placer deposits. - In Economic Geology - One hundredth anniversary volume: Littleton, Colo., Society of Economic Geologists, 813–843.

Heaman, L. M., Bowins, R., Crocket, J. 1990. The chemical composition of igneous zircon suites: implications for geochemical tracer studies. Geochim. Cosmochim. Acta 54, 1597–1607.

Heaman, L. M., Le Cheminant, A. N. 1993. Paragenesis and U-Pb Systematics of baddeleyite. Chemical Geology 110, 95-126.

Jones, J. V., Piatak, N. M., Bedinger, G. M. 2017. Zirconium and hafnium. Chap. V of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R. R., Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States. Economic and environmental geology and prospects for future supply. U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, V1–V26.

Klemme, S., Meyer, H. P. 2003. Trace element partitioning between baddeleyite and carbonatite melt at high pressures and high temperatures. Chemical Geology 199(3-4), 233–242.

Mikhailova, J. A., Kalashnikov, A. O., Sokharev, V. A. et al. 2016. 3D mineralogical mapping of the Kovdor phoscorite–carbonatite complex (Russia). Mineral Deposita 51, 131–149.

Morton, A. C., Hallsworth, C. R. 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. Sedimentary Geology 124 (1–4), 3–29.

Nielson, R. H., Wilfling, G. 2002.Zirconium and zirkonium compounds. In: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Wiley-VCH Verlag, Weinheim.

Schärer, U., Corfu, F., Demaiffe, D. 1997. U-Pb and Lu-Hf isotopes in baddeleyite and zircon megacrysts from the Mbuji-Mayi kimberlite: constraints on the subcontinental mantle. Chem. Geol. 143, 1–16.

Slingerland, R., Smith, N. D. 1986. Occurrence and formation of water-laid placers. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences 14, 113–147.

Söderlund, U., Johansson, L. 2002. A simple way to extract baddeleyite ($ZrO_2$). Geochemistry Geophysics Geosystems 3(2).

Stuchlíková K., Frolíková I. 1988. Inventarizace československých zdrojů vzácných prvků na ložiskách nerostných surovin. In: Sitenský I. (ed.): Možnosti intenzifikace využití vybraných přírodních zdrojů ČSSR. Zpráva o vědecko-výzkumné činnosti v letech 1986-1987, 38-55. Ústav geologických věd PřFUK, Praha (GF P061859).

Taylor, S. R., McLennan, S. M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. Reviews in Geophysics 33, 241-265.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 13 Uran a thorium

## 13.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Uran a thorium jsou významné radioaktivní prvky, které hrají důležitou roli v energetice, zbrojním průmyslu a vědeckém výzkumu. Oba patří mezi aktinoidy, což je skupina prvků známá svou nestabilitou a schopností podstupovat radioaktivní rozpad. Přestože jsou oba tyto prvky relativně vzácné, jejich výskyt v zemské kůře má důležité důsledky jak pro přírodní procesy, tak pro lidskou činnost, zejména v oblasti jaderné energetiky.

***Uran***

Uran (U) je radioaktivní, stříbrolesklý kov. Uran má v přírodní rozpadové řadě 3 izotopy: 235U (0,7 %), 238U (99,3 %) a 234U (0,0004 %; Burns a Finch 1999). Uran je relativně vzácný, ale přesto rozšířený v zemské kůře, kde se jeho koncentrace odhaduje na přibližně 2,8 ppm (částic na milion). Uran má vysokou hustotu (19 g/cm³), což jej činí jedním z nejtěžších přirozených prvků. Chemicky se uran snadno oxiduje a tvoří různé oxidační stavy, přičemž nejběžnější je oxidační stav +6 v uranylovém iontu ($UO_2^{2+}$), který se nachází v mnoha sloučeninách.

V přírodě se uran vyskytuje ve třech mocenstvích: $U^{IV}$, $U^{VI}$ a $U^{V}$ (bylo prokázáno pouze v jednom sekundárním minerálu). $U^{IV}$ je stabilní, vyskytuje se třeba v minerálu uraninitu nebo zastupuje zirkonium v zirkonu. V tomto mocenství taky tvoří ložiska. Naopak, $U^{VI}$ je v přírodě velmi mobilní, ve vodním prostředí je obvykle transportován v karbonátových komplexech, přičemž se v oxidačním prostředí dostává do roztoku, naopak v redukčním prostředí se sráží. Tato vlastnost je velice důležitá pro tvorbu ložisek (Burns a Fich 1999).

Obrázek 60. *Vzorky uranových rud (www.britannica.com/science/uranium; www.geology forinvestors.com).*

Uran (chemická značka U, atomové číslo 92) je těžký, stříbřitě šedý kov, který je mírně radioaktivní. Je to nejvyšší přirozeně se vyskytující prvek, co se týče atomového čísla. Uran je přítomen v přírodě ve třech izotopech: Uran-238 (99,3 %), Uran-235 (0,7 %) a velmi vzácný

Největší koncentrace uranu se nacházejí v rudných minerálech, jako je uraninit ($UO_2$), který je jedním z hlavních zdrojů těžby uranu. Dalšími důležitými minerály obsahujícími uran jsou například karnotit ($K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$) a autunit ($Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10\text{-}12H_2O$).

Uran-234. Izotop uran-235 je klíčový pro jadernou energetiku a jaderné zbraně, protože je štěpný – může podstoupit řetězovou reakci při štěpení jádra.

Uran se vyskytuje po celém světě, ale jeho nejvýznamnější ložiska se nacházejí v Kazachstánu, Kanadě, Austrálii a Namibii. Uran se těží buď v dolech, nebo pomocí metody „in-situ leach" (vyluhování uranu přímo v místě jeho výskytu bez potřeby těžby).

***Thorium***

Thorium (chemická značka Th, atomové číslo 90) je stříbřitě bílý, měkký kov, který je rovněž slabě radioaktivní. Thorium je stabilnější než uran, protože jeho hlavní izotop thorium-232 má poločas rozpadu 14 miliard let, což je delší než stáří Země. Stejně jako uran se thorium nachází ve více oxidačních stavech, ale nejběžnějším stavem je +4.

Thorium má potenciál být použito jako jaderné palivo, a to zejména díky své schopnosti přeměny na izotop uran-233, který je štěpný a může být využit v jaderných reaktorech. Výhodou thoria oproti uranu je to, že je v přírodě dostupnější a produkuje méně radioaktivních odpadů.

Thorium je v zemské kůře běžnější než uran, s koncentrací přibližně 10 ppm. Hlavním minerálem obsahujícím thorium je monazit, což je fosfát vzácných zemin obsahující thorium a další vzácné prvky. Thorium se nachází ve zvýšené koncentraci v píscích a pobřežních ložiscích, zejména v Indii, Brazílii, Austrálii a Jihoafrické republice. Dalšími významnými minerály jsou uranothorit $(U,Th)SiO_4$ (1–25 % $ThO_2$), thorit $ThSiO_4$, thorianit $(Th,U)O_2$ (1–25 % $ThO_2$) a zirkelit $(Ca,Th,Ce)Zr(Ti,Nb)_2O_7$ (6 % Th)

Obrázek 61. *Krystal monazitu (zdroj www. geigercheck.com).*

V současnosti se thorium znovu dostává do popředí zájmu jako alternativní jaderné palivo díky svým výhodám, jako je nižší produkce radioaktivních odpadů a větší dostupnost.

## 13.2 Průmyslové aplikace a trh

***Uran***

Hlavní využití uranu spočívá v jaderné energetice, kde je palivem v jaderných reaktorech. Uran-235 je po obohacení (zvýšení jeho koncentrace v přírodním uranu) používán jako štěpný materiál. Uran-238, který je neštěpný, však může být přeměněn na plutonium-239 v reaktorech a dále využit jako jaderné palivo. Uran má také vojenské využití. Ochuzený uran (238U) se používá v penetrátorech (průbojných zbraních) s kinetickou energií a v pancéřování, kde se využívá jeho vysoké hustoty.

***Thorium***

Ačkoli se thorium dnes používá jen v omezeném rozsahu, má obrovský potenciál v oblasti jaderné energetiky. V některých typech reaktorů může být thorium přeměněno na uran-233, který je štěpný. Takové reaktory by mohly poskytnout stabilní a dlouhodobý zdroj energie s menšími environmentálními dopady. Historicky se thorium používalo také v osvětlení – v plynových lampách, kde sloužilo ke zvyšování světelného výkonu, a rovněž jako legovací přísada do slitin hořčíku a wolframu, které mají speciální využití ve vysokoteplotních aplikacích. Ve slitině s magnesiem tvoří thorium vysoce pevný a tepelně odolný kov. Thorium je výhledově uvažováno jako rezervní palivo v atomových reaktorech. Kromě energetiky je thorium v různých formách využíváno v náročné keramické výrobě, pro katalytické vlastnosti a ve svářecích elektrodách.

## 13.3 Hlavní ložiska ve světě

***Uran***

V roce 2022 cca 57 % světové produkce bylo podle WNA získáváno z těchto 10 největších ložisek, která se nacházejí na území pěti států:

Tabulka 33. *Hlavní uranová ložiska ve světě a jejich roční těžba. Zdroj ČGS (Starý et al. 2023)*

| Ložisko | Země | Těžební společnost | Typ dolu | tuny U |
|---|---|---|---|---|
| Cigar Lake | Kanada | Cameco / Orano | hlubinný | 6 928 |
| Husab | Namibie | Swakop Uranium | povrchový | 3 358 |
| Inkai (sites 1-3) | Kazachstán | Kazatomprom / Cameco | ISL | 3 201 |
| Olympic Dam | Austrálie | BHP Billiton | hlubinný | 2 813 |
| Karatau (Buděnskoje 2) | Kazachstán | Uranium One / Kazatomprom | ISL | 2 560 |
| Rössing | Namibie | Rio Tinto | povrchový | 2 255 |
| Somair | Niger | Orano | povrchový | 2 020 |
| Central Mynkuduk | Kazachstán | Uranium One / Kazatomprom | ISL | 1 740 |
| Kharasan 1 | Kazachstán | Kazatomprom / Uranium One | ISL | 1 650 |
| South Inkai | Kazachstán | Uranium One / Kazatomprom | ISL | 1 600 |
| **TOP 10 celkem** | | | | **28 125** |

***Thorium***

Největší světové zásoby thoria se nacházejí v ložiscích placerového, karbonátového a žilného typu. Thorium se nachází v několika minerálech, z ekonomického hlediska jsou nejvýznamnější monazit, thorianit a thorit. Podle Světové jaderné asociace činily celosvětově zjištěné zdroje thoria odhadem 6,4 milionu tun thoria. Zdroje thoria se nacházejí po celém světě, především v Austrálii, Brazílii, Indii a Spojených státech. Největší zásoby má Indie (850 000 tun), následuje Brazílie (630 000 tun) a Austrálie a Spojené státy (po 600 000 tunách).

## 13.4 Ložiska v České republice

***Uran***

Česká republika patřila k nejvýznamnějším světovým producentům uranu. Historicky je s celkovou produkcí kolem 112 tis. t uranu v letech 1946 až 2019 ve formě tříděných rud (od počátku těžby do roku 1975) a chemického koncentrátu (od roku 1953) na 12. místě na světě. Hlavní období těžby uranových rud v ČR probíhalo od konce 40. let do počátku 90. let 20. století, kdy byla ukončena z důvodu vysoké ztrátovosti produkce na všech do té doby těžených žilných ložiskách (vyjma Rožné). V roce 1995 skončila ze stejného důvodu i těžba na ložisku Hamr a o rok později z převážně ekologických důvodů na ložisku Stráž, čímž byla ukončena těžba na ložiskách pískovcového typu. Od té doby bylo až do konce roku 2016 (v roce 2017 byla těžená ruda získávána v rámci opracování zbytkových struktur U rud při vyklízení dobývek před jejich opuštěním a provádění přípravných likvidačních prací) v ČR těženo pouze žilné ložisko Rožná. Uzavřením ložiska Rožná pravděpodobně těžba uranu v ČR nadlouho (ne-li definitivně) skončila.

V období vrcholného rozkvětu těžby (1955–1990) se roční produkce uranu pohybovala mezi 2 000 a 2 900 t (max. mírně přes 3 000 t v letech 1959 až 1960 a 1962 až 1964). Poté během tří let poklesla na zhruba 600 t a kolem této hodnoty se držela až do roku 1999. Od roku 2000 již výše těžby klesala pomalu, ale trvale až k 128 t v roce 2016, kdy byla těžba U rud ukončena. Od té doby je uran získáván ze sanace uzavřených dolů ve výši 30-40 t U/rok.

Ekonomicky významná a zejména v minulosti intenzívně využívaná ložiska byla soustředěna do pěti oblastí. V následujícím přehledu jsou oblasti s uvedením typu zrudnění a nejdůležitějších ložisek řazeny podle významu, daného množstvím vytěženého uranu. V závorce je doplněn procentní podíl oblasti na celkové těžbě.

- středočeská – žilné zrudnění: např. Příbram, Předbořice (téměř 40 % celkové těžby kovu)
- severočeská – zrudnění v křídových sedimentech: např. Stráž pod Ralskem, Hamr pod Ralskem, Břevniště pod Ralskem (kolem 24 %)
- moravská – zónové a žilné zrudnění: Rožná, Olší (kolem 21 %)
- západočeská – zónové a žilné zrudnění: např. Zadní Chodov, Vítkov 2, Horní Slavkov, Dyleň (necelých 10 %)
- krušnohorská – žilná ložiska a zrudnění v terciérních sedimentech: např. Jáchymov, Hájek (necelých 7 %)

Tabulka 34. *Ložiska uranu v ČR. Podle Starý et al. 2023.*

| Rok | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|
| Počet ložisek celkem | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| z toho těžených | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Zásoby celkem, t U | 134 948 | 134 862 | 134 833 | 134 825 | 134 803 |
| bilanční prozkoumané | 1 300 | 1 300 | 1 300 | 1 300 | 1 300 |
| bilanční vyhledané | 19 448 | 19 448 | 19 448 | 19 448 | 19 448 |
| nebilanční | 114 166 | 114 114 | 114 085 | 114 077 | 114 055 |
| vytěžitelné | 276 | 276 | 276 | 276 | 267 |
| Těžba, t U | 34 | 33 | 29 | 27 | 21 |
| Produkce koncentrátu, t U* | 29 | 33 | 28 | 26 | 22 |

Ostatní malá ložiska a výskyty rozptýlené po zbývajícím území Českého masivu např. v Železných horách, Rychlebských horách, Krkonoších a na ložisku Okrouhlá Radouň přispěly zbývajícími 2 % k celkově vytěženému množství cca 112 tisíc tun U po druhé světové válce.

Veškerá vytěžená surovina byla chemicky upravována a konečným produktem byl chemický koncentrát uranu prodávaný do zahraničí (v letech 2015-2017 do Kanady, Francie a Ruska). Téměř výhradním odběratelem uranového koncentrátu byla v posledních 25 letech energetická společnost ČEZ a. s. Spotřeba uranu v nakupovaných palivových článcích v jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín se v posledních letech pohybuje v rozsahu 650–700 tun ročně.

### *Thorium*

Česká republika nedisponuje zdroji thoria (Starý et al. 2023).

## 13.5 Produkce a spotřeba

### *Uran*

Přibližně dvě třetiny světové produkce uranu pochází z Kazachstánu, Kanady a Austrálie. Stále větší množství uranu, nyní více než 55 %, se získává loužením in situ. V roce 2022 produkoval největší podíl uranu z dolů Kazachstán (43 %), následovaný Kanadou (15 %) a Namibií (11 %).

Tabulka 35. *Světová těžba uranu v letech 2018-2022. Starý et al. 2023.*

| | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|
| Těžba uranu, t $U_3O_8$ (dle WBD) | 64 083 | 64 278 | 55 718 | 56 155 | N |
| Těžba uranu, t U (dle WNA*) | 54 154 | 54 742 | 47 731 | 47 808 | 49 355 |

### *Thorium*

Těžba a zásoby thoria jsou spojeny s těžbou monazitu v ložiscích těžkých minerálů a písku a samostatné obsahy a produkce nejsou kvantifikovány. Bez poptávky po vzácných zeminách by se monazit pro svůj obsah thoria za současných tržních podmínek pravděpodobně nevyužíval.

## 13.6 Genetické typy ložisek

Uran se v přírodě vyskytuje ve značném množství hornin, ložiskových typů a tektonických prostředí. Níže jsou vypsány hlavní typy (dle Starý et al. 2023):

1. Infiltrační v pískovcích: pánev ChuSarysu a Syrdarja (Kazachstán), Kyzylkum (Uzbekistán), Wyoming (USA), Tim Mersoi (Niger), Königstein (Německo), Hamr, Stráž (Česko).

2. Diskordantní – „unconformity“: Athabasca District (Kanada), Ranger (Austrálie).

3. Felzické intruze: Rössing, Husab (Namibie), Dalongshan (Čína).

4. Magmaticko-hydrotermální: Olympic Dam (Austrálie).

5. Fosilní říční rozsypy: Witwatersrand (Jižní Afrika), Elliot Lake (Kanada).

6. Vulkanická: Streltsovsk (Rusko), Fushou, Benxi (Čína), Dornod (Mongolsko), Kurišková-Jahodná (Slovensko).

7. Metasomatická: Ingulskoe, Smolinskoe (Ukrajina), Caetité/Lagoa Real (Brazílie).

8. Žilná: Beaverlodge (Kanada), Jaduguda, Turamdih (Indie), Chongyi, Lantian (Čína), Aue-Schlema (Německo), Příbram, Rožná (Česko).

### Pegmatity a diferencované granity

Minerály uranu, thoria a prvků vzácných zemin jsou běžnými akcesoriemi v pegmatitech. Malá množství uranových minerálů však mohou být získána (teoreticky) jako vedlejší produkty těžby živce nebo slídy. Madagaskar je jedinou zemí, kde se z pegmatitů vytěžilo větší množství uranových minerálů. V současnosti se uran z pegmatitů nezískává.

Uranová mineralizace je také spojena s různými intruzivními horninami včetně alaskitu, žuly a monzonitů. Mezi hlavní světová ložiska patří Rössing a Husab (Namibie), Kvanefjeld (Grónsko), oblast Bancroft (Kanada) a Palabora (Jihoafrická republika). V Jižní Austrálii se v letech 1954-62 těžilo na Radium Hill a v provincii Olary se vyskytují rozsáhlá tělesa mineralizace nízké kvality.

### Ostatní typy ložisek

#### *Metasomatity*

Metasomatitová ložiska se skládají z nerovnoměrně rozptýleného uranu v deformovaných horninách, které byly postiženy metasomatismem. Mezi hlavní příklady tohoto typu patří Elkonský revír (Rusko), revír Lagoa Real-Caetite (Brazílie), Novokonstantinovskoje a revíry u Želtyje Vody (Ukrajina), Valhalla a Skal (Austrálie), Michelin (Kanada) a Lianshanguan (Čína).

#### *Polymetalické železité brekcie*

Olympic Dam je největším světovým ložiskem uranu a tvoří většinu australských zásob uranu. Uran se však zde získává jako vedlejší produkt těžby mědi. Jak toto ložisko, tak ložisko Carrapateena se vyskytují v komplexu granitových brekcií bohatých na hematit v Gawlerově

kráteru, který je překrytý přibližně 300 metry plošně uložených sedimentárních hornin geologické provincie Stuart Shelf.

Ložisko obsahuje železo, měď, uran, zlato, stříbro, prvky vzácných zemin (především lanthan a cer) a fluor. Získává se pouze měď, uran, zlato a stříbro. Průměrné obsahy uranu se pohybují od 0,07 do 0,035 % U, přičemž mineralizace s vyššími obsahy je tvořena smolincem. Průměrné obsahy mědi činí 2,7 % u vyhledaných zásob, 2,0 % u prozkoumaných zásob a 1,1 % u prognózních zdrojů.

***Ložiska spojená s vulkanismem***

Ložiska uranu tohoto typu se vyskytují ve vulkanických kalderách a v jejich blízkosti, v kyselých až středně kyselých vulkanických horninách a jsou spojena se zlomy a střižnými zónami. Uran se vyskytuje v žilách nebo je rozptýlený a je běžně spojen s molybdenem a fluoritem. Významná ložiska tohoto typu se vyskytují v Číně (Xiangshan), Kazachstánu, Mongolsku (Dornod a Gurvanbulag), Ruské federaci (Strelcovská kaldera, hlavní výskyt), Peru a Mexiku. V Austrálii jsou menší – nejvýznamnější jsou Ben Lomond a Maureen v Queenslandu.

***Ložiska typu unconformity***

Ložiska typu unconformity tvoří přibližně třetinu uranových zdrojů západního světa a patří k nim některá z největších a nejbohatších ložisek. Hlavním minerálem je uraninit. Nejbohatší ložiska se vyskytují v Kanadě (Athabaská pánev, Saskatchewan a Thelonská pánev, Severozápadní teritoria) a v Austrálii (oblast Alligator Rivers v geosynklinále Pine Creek, Severní teritoria a oblast Rudall River, Západní Austrálie).

Veškerá kanadská produkce uranu v Saskatechewanu za posledních 40 let pochází z těchto ložisek - Key Lake, Cluff Lake, Rabbit Lake, McClean Lake, McArthur River a Cigar Lake - přičemž některé rudy obsahují kolem 20 % uranu. Ložiska v Athabaské pánvi se vyskytují pod, napříč a bezprostředně nad nekonformitou, přičemž ložiska s nejvyššími obsahy uranu se nacházejí na nekonformitě nebo těsně nad ní (např. Cigar Lake a McArthur River). V oblasti Alligator Rivers v Austrálii jsou známá ložiska (Ranger, Jabiluka, Koongarra a Nabarlek) uložena v podloží pod nekonformitou a podobně jako jejich kanadské protějšky Eagle Point, Millennium, Triple R a Kiggavik .

***Pískovce***

Pískovcová ložiska uranu se vyskytují ve středně až hrubě zrnitých pískovcích usazených v kontinentálním fluviálním nebo okrajovém mořském sedimentárním prostředí. Nepropustné jednotky břidlic/bahnitých hornin jsou proloženy sedimentárním souvrstvím a často se vyskytují bezprostředně nad a pod mineralizovanými pískovci. Uran se sráží za redukčních podmínek způsobených různými redukčními činidly v pískovci, hlavně organickým materiálem (detritické zbytky rostlin, amorfní humát, mořské řasy), sulfidy (pyrit, $H_2S$), uhlovodíky a proplástky bazického sopečného popela s hojnými železito-hořečnatými minerály (např. chlorit).

Ložiska v pískovcích tvoří přibližně 28 % světových zdrojů uranu a 40 % předpokládaných zdrojů a mají velký hospodářský význam hlavně v Kazachstánu, Uzbekistánu, USA a Nigeru. Rudní ložiska tohoto typu mají běžně nízkou až střední kvalitu (0,05-0,35 % U) a jednotlivá

rudní ložiska jsou malá až středně velká (v rozmezí maximálně 50 000 tU). Dílčí typy se těží metodami vyluhování in situ (ISL). Hlavními primárními minerály U jsou uraninit a coffinit.

USA mají velké zásoby v pískovcových ložiscích v oblasti Západních Kordiller a většina jejich produkce uranu pochází z těchto ložisek, v poslední době metodou in ISL. Povodí Powder River ve Wyomingu, Coloradská plošina a rovina na pobřeží Mexického zálivu v jižním Texasu jsou hlavními pískovcovými uranovými provinciemi. Další velká pískovcová ložiska se vyskytují v Nigeru, Gabonu (Francevillská pánev) a ve východní části Afriky ve formaci Karoo (Malawi, Tanzanie, Zambie, Jihoafrická republika).

***Ložiska v paleokonglomerátech***

Detritický uran se vyskytuje v některých archeo – raně paleoproterozoických křemenných konglomerátech, které překrývají krystalinické podloží. Ložiska uranu v konglomerátech se tvořila rozmezí 3070-2300 milionů let. Fluviální transport detritického uraninitu byl tehdy možný díky převládající anoxické atmosféře. Mohou být přítomny vzácné zeminy a thorium.

Tam, kde se uran získává jako vedlejší produkt při těžbě zlata, např. ve Witwatersrandu v Jihoafrické republice, může být obsah uranu pouhých 0,01 % U. V ložiscích s převahou uranu, jako je Elliot Lake v Kanadě, dosahují průměrné obsahy až 0,15 %U.

***Ložiska uhlí***

Uran se vyskytuje v hnědém uhlí a v bezprostředně přilehlých uhlíkem bohatých bahnitých a bahnitopísčitých horizontech. Obsah pyritu je vysoký. Příkladem jsou naleziště v Severní a Jižní Dakotě (USA), Mulga Rock (Západní Austrálie), Springbok Flats (Jihoafrická republika), Nizhneylyiskoye (Kazachstán) a Freital (Německo). Uran je adsorbován na uhelnou hmotu ačasto se nevytvořily žádné samostatné uranové minerály. Odhaduje se, že v těchto ložiscích se nachází více než 7 milionů tun uranu, ale většina z nich je v současné době neekonomická.

***Ložiska v karbonátech***

Ložiska jsou uložena ve vápencích nebo dolomitech, často v souvislosti s krasovými jevy a zlomy. Příkladem jsou rozsáhlá ložiska vázaná na vrstvy Tummalapalle (Indie), Mailuu-Suu (Kyrgyzstán) a Bentou-Sanbaqi (Čína).

***Fosforitová ložiska***

Sedimentární fosfority mořského původu obsahují nízké koncentrace uranu v jemnozrnném apatitu - 0,005-0,015 % U. Velmi rozsáhlá ložiska fosforitů se vyskytují v USA (Florida a Idaho), Maroku, Jordánsku a dalších zemích Blízkého východu. Při výrobě kyseliny fosforečné, se někdy uran získává jako vedlejší produkt, například na Floridě. Kontinentální ložiska fosfátů obsahují uran jen zřídka, výjimkou je Bakouma (Středoafrická republika).

Odhaduje se, že v těchto ložiscích je až 22 milionů tun uranu, ale většina z nich je v současné době neekonomická i jako vedlejší produkt při výrobě fosfátových hnojiv, pokud nebudou nasazeny nové postupy.

***Monazit jako ruda thoria***

Monazitové písky se ve velkém množství nachází v Indii, Číně, Brazílii, Spojených státech amerických a také v Austrálii. Dnes se thorium získává výhradně jako vedlejší produkt při těžbě prvků vzácných zemin nebo při těžbě minerálů obsahujících titan nebo zirkon z monazitového písku. Důvodem je nízká průmyslová poptávka po thoriu, jelikož se zatím nevyužívá ke komerční výrobě energie v jaderných reaktorech. Proto byl proveden jen malý průzkum thoria, což objasňuje, proč existuje nejistota ohledně jeho celkových světových zásob (Humphrey et al., 2018).

Základní prostředí, kde se nachází monazit (či jiné minerály thoria) jsou:

1. Rozsypy monazitu v recentních i pohřbených v příbřežně mořských usazeninách v Austrálii, Egyptě, Indii, JAR, Malajsii, Powderhorn (USA).

2. Ložiska monazitu v primárních rudách, nejčastěji v pegmatitech: (např. Nellur, Travancore – Indie, Jižní Dakota – USA, Brazílie, Čína), ale také v karbonatitech (např. Oka – Kanada) anebo v uranových rudách (např. Sunnyside Inglewood – Austrálie). Dále sem patří výskyty thorianitových (Madagaskar, Srí Lanka), thoritových (např. Bancroft – Kanada) a zirkelitových rud (např. Jacupiranga – Brazílie).

## 13.7 Metody těžby a úpravy

***Uran***

Technologický postup výroby uranu je obecně použitelný pro pískovcové a vápencové rudy obsahující uran ve formě v kyselině rozpustného karnotitu a roscoelitu. Rozpuštěný uran se extrahuje z vyčištěného a upraveného roztoku kyseliny metodou extrakce rozpouštědlem, poté se vyloučí z rozpouštědla a vysráží se obvyklým způsobem jako žlutý koláč. Vanad, pokud je přítomen, lze rovněž získat jako samostatný produkt tohoto úpravárenského procesu.

***Thorium***

Získávání thoria z monazitu zahrnuje několik kroků, v rámci obvykle hydrometalurgického procesu.:

1. Drcení a mletí: Monazitová ruda se nejprve rozdrtí a rozemele, aby se uvolnily minerály. Drcení odpadá v případě těžby nezpevněných písků a štěrků.

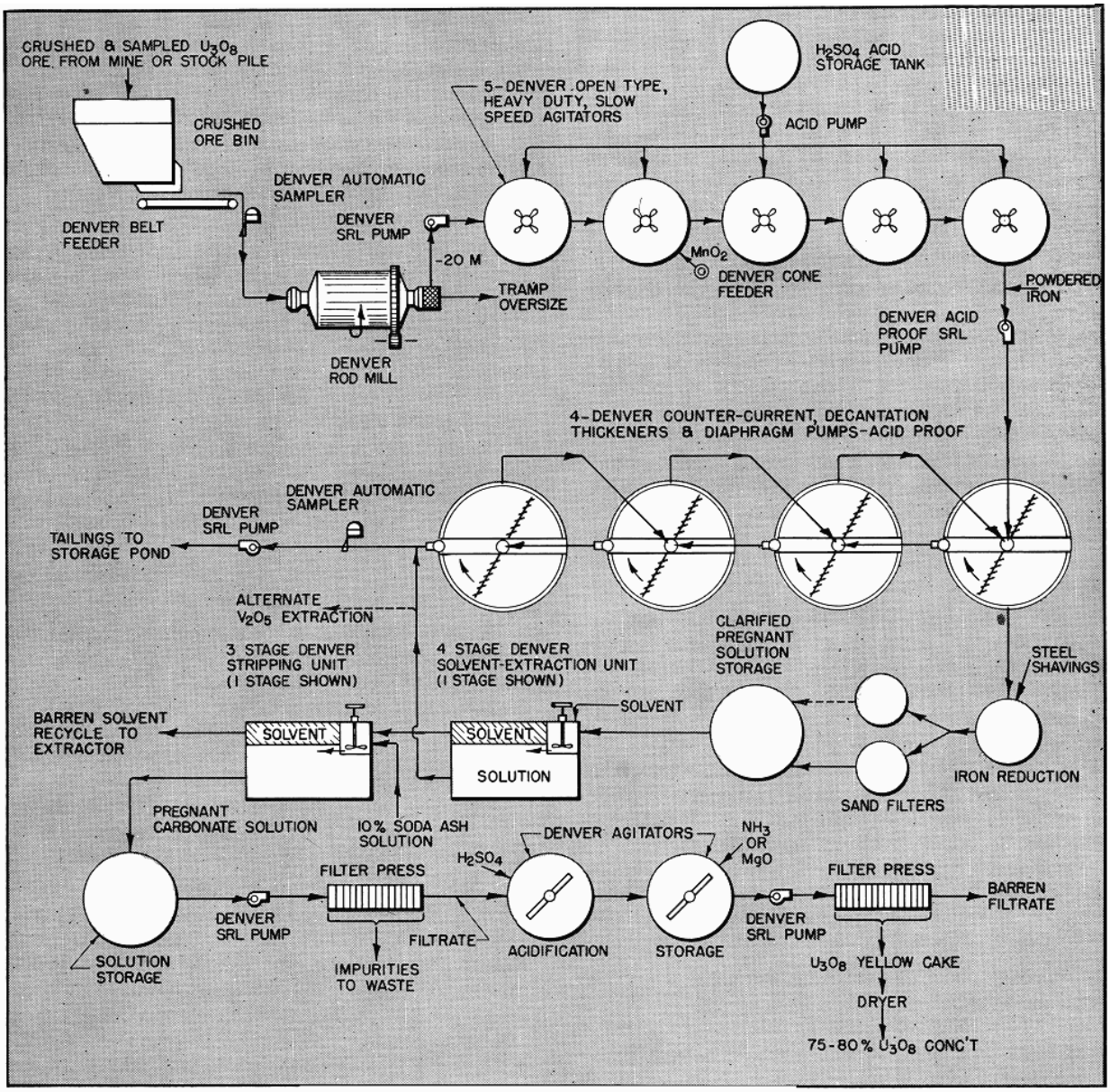
2. Loužení: Rozemletá ruda se poté ošetří koncentrovanou kyselinou sírovou při vysokých teplotách, aby se rozpustily prvky thoria a vzácných zemin.

3. Separace: Výsledný roztok se podrobí sérii kroků selektivního srážení a separace, aby se thorium izolovalo od ostatních prvků.

4. Čištění: Thorium se dále čistí pomocí extrakce rozpouštědlem. Lze například použít extrakci proti proudu, při níž organické rozpouštědlo selektivně extrahuje thorium z roztoku.

5. Srážení: Thorium se vysráží, často jako oxalát thoria, který se pak kalcinací přemění na oxid thoria ($ThO_2$).

Tímto procesem se nejen získává thorium, ale i prvky vzácných zemin.



Obrázek 62. *Schéma extrakce uranu z pískovců. Zdroj 911metallurgist.com.*

## 13.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

S využíváním uranu a thoria v řešeném typu hornin se nepočítá.

## 13.9 Reference

Burns, C. P., Finch, R. 1999. Uranium: Mineralogy, geochemistry and the environment. Rewiews in Mineralogy 38, Mineralogical Society of Amerika, 680 pp.

Hall, S., Coleman, M. 2013. Critical analysis of world uranium resources: U.S. Scientific Investigations Report 2012–5239, 56 pp.

Humphrey, U. E., Khandaker, M. U. 2018. Viability of thorium-based nuclear fuel cycle for the next generation nuclear reactor: issues and prospects. Renew. Sustain. Energy Rev. 97, 259–275.

René, M. 2017. Nature, Sources, Resources, and Production of Thorium. In Descriptive Inorganic Chemistry Researches of Metal Compounds. InTech.

Starý, J., Sitenský, I., Mašek, D., Gabriel, Z., Němec, M., Hodková, T., Vaněček, M., Novák, J., Kavina, P. 2023. Surovinové zdroje České republiky. 484 s. MŽP, ČGS.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 14 Živec

## 14.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Živce jsou skupina jednoklonných (ortoklas $KAlSi_3O_8$, sanidin) a trojklonných (mikroklin $KAlSi_3O_8$ a plagioklasy) draselných a sodno-vápenatých alumosilikátů. Spolu s křemenem to jsou nejrozšířenější horninotvorné minerály, které dohromady tvoří cca 60 % zemské kůry. Strukturu živců strukturu tvoří tetraedry $SiO_4$ a $AlO_4$. Jsou dokonale štěpné ve dvou rovinách, které jsou na sebe kolmé nebo téměř kolmé. Rozpadají se na fylosilikáty.

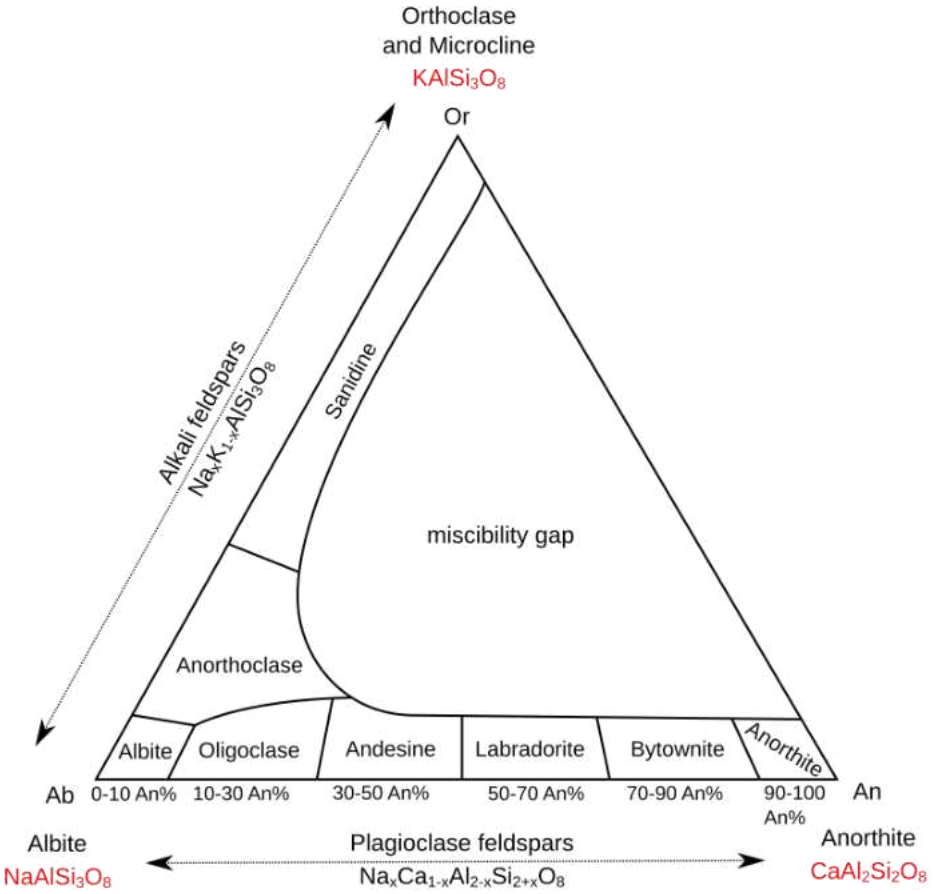
Živce se dělí podle chemického složení na:

- sodno-draselné živce čili alkalické živce,
- sodno-vápenaté živce čili plagioklasy,
- draselno-barnaté živce.

Obrázek 63. *Hlavní druhy živců. Zdroj ww.zmescience.com*

Na minerály uvedených řad se nahlíží jako na tuhé roztoky draselného živce (K-živce, $KAlSi_3O_8$), albitu (Na-živce, $NaAlSi_3O_8$) a anortitu (Ca-živce, $CaAl_2Si_2O_8$). Tuhé roztoky draselného živce a albitu jsou nazývány sodno-draselnými živci (čili alkalickými živci), roztoky mezi albitem a anortitem jsou nazývány sodno-vápenatými živci (čili plagioklasy). Podrobněji je mísitelnost znázorněna na obrázku 2. Draselný živec se s anortitem mísí jen omezeně, mezera mísitelnosti je v celém rozmezí teplot obvyklých v prostředí zemské kůry. Minerály z řady draselno-barnatých živců se v přírodě vyskytují poměrně vzácně.

Živce krystalizují z magmatu a jsou součástí jak intruzivních tak extruzivních hornin. Také jsou přítomny v mnoha metamorfovaných horninách. Vyskytují se jako kompaktní minerály či jako žíly. V případě, že se v době vzniku v tavenině nachází málo $SiO_2$, tak dochází ke vzniku foidů.




Obrázek 64. *Ternární fázový diagram živců při teplotě 900°C (wikipedia.org).*

### *Draselné živce*

Draselný živec vykazuje polymorfii, takže se vyskytuje ve třech krystalických modifikacích, a to jako monoklinický sanidin, triklinický ortoklas a rozdílně triklinický mikroklin. Sanidin je stabilní při nejvyšších teplotách a mikroklin při teplotách nejnižších.

Perthit je typickou texturou sodno-draselných živců. Textura je způsobena odmíšením – rozpadem původní hmoty na dvě fáze odlišného složení – při ochlazování. Perthitové textury v alkalickém živci mnoha žul jsou natolik hrubé, že jsou viditelné pouhým okem. Podle velikosti odmíšenin se rozlišuje makroperthit, mikroperthit a kryptoperthit.

Obrázek 65. *Perthitová textura v mikroklinu. Zdroj www.alexstrekeisen.it*

***Plagioklasy***

Chemické složení plagioklasů, resp. pevných roztoků řady albit-anortit, je základem pro jejich klasifikaci na:

- albity (0 – 10 % anortitu),
- oligoklasy (10 – 30 % anortitu),
- andesiny (30 – 50 % anortitu),
- labradority (50 – 70 % anortitu),
- bytownity (70 – 90 % anortitu),
- anortity (90 – 100 % anortitu).

Hra barev u některých živců se složením labradoritu je způsobena velmi jemnozrnným lamelárním odmíšením.

***Živcové suroviny***

Živcové suroviny jsou horniny, jejichž hlavní složkou je některý z minerálů ze skupiny živců nebo jejich směs v takové formě, množství a kvalitě, že můžou být průmyslově získávány.

Průmyslový význam mají živce draselné (K) - ortoklas, mikroklin - a kyselé (s převahou Na nad Ca) členy plagioklasové řady (albit $NaAlSi_3O_8$, oligoklas, andezin). Okrajový význam pak mají zásadité (s převahou Ca nad Na) členy plagioklasové řady (labradorit, bytownit, anortit $CaAl_2Si_2O_8$). Jako živcové suroviny se především uplatňují žilné horniny (pegmatity, aplity), vyvřeliny (leukokrátní granitoidy) i sedimenty (živconosné písky a štěrkopísky), méně i rezidua neúplně kaolinizovaných hornin a metamorfity. Hlavní škodlivinou v živcové surovině je podíl železa v jak v živcové mřížce, tak i v podobě příměsí. Živce se nejvíce využívají ve sklářství a keramickém průmyslu jako tavidlo a plastifikátor.

## 14.2 Průmyslové aplikace a trh

Pro svůj nízký bod tání se živce využívají jako tavivo do keramických směsí, sklářského kmene, glazur, smaltů a v posledních letech rovněž jako licí prášky v metalurgii. Téměř 90 % živců spotřebovává sklářský a keramický průmysl. Malé množství se používá i jako plnivo, především do barev a plastů. Ve sklářství se uplatňují i náhrady živců. Kromě živcových surovin jsou využívány jako jejich náhrady horniny, které mají obsah alkálií vázán na jiný minerál (většinou nefelín $(NaK)AlSiO_4$). Ve světě jsou tak využívány především nefelinické syenity, v menší míře pak nefelinické fonolity.

Tabulka 36. *Průměrně ceny různých živcových živcových výrobků. Zdroj Starý et al., 2023.*

| Komodita/rok | | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Živcová surovina, americký trh, průměrná cena (MCS) | USD/t | 97 | 107 | 108 | 110 | 110 |
| Nefelinický syenit, průměrná dovozní cena do USA, (MCS) | USD/t | 76 | 156 | 163 | 164 | 180 |
| Živec pro keramický a sklářský průmysl, průměrná vývozní cena z ČR do Polska (ČSÚ) | EUR/t | 37,96 | 38,24 | 27,99 | 26,77 | 36,62 |

## 14.3 Hlavní ložiska ve světě

Světové produkci živcové suroviny dominují Indie a Turecko. Česká republika je také významným světovým producentem živcové suroviny – produkuje jí víc, než například USA nebo Mexiko.

Tabulka 37. *Hlavní světoví producenti živce. Zdroj Starý et al., 2023.*

| 2022[e] | | |
|---|---|---|
| **Země** | **kt** | **%** |
| Indie | 6 600 | 23,6 |
| Turecko | 6 200 | 22,1 |
| Čína | 2 400 | 8,6 |
| Itálie | 2 200 | 7,1 |
| Írán | 2 000 | 8,6 |
| Thajsko | 1 300 | 4,6 |
| Jižní Korea | 1 000 | 3,6 |
| Saudská Arábie | 820 | 2,9 |
| Španělsko | 800 | 2,9 |
| Brazílie | 630 | 2,3 |
| Česká republika | 460 | 1,6 |
| USA | 420 | 1,5 |
| Mexiko | 320 | 1,1 |
| **svět** | **28 000** | **100,0** |

*e – předběžné údaje*

## 14.4 Ložiska v České republice

Tato kapitola je s úpravami převzata ze Surovinové ročenky ČGS (Starý et al. 2023). V České republice jsou ložiska živcových surovin primární, tvořená především leukokratními granitoidy a pegmatitovými tělesy, a sekundární, reprezentovaná živcovými štěrkopísky a písky.

Největší význam v České republice mají leukokrátní granitoidy (žuly a žulové aplity, křemenné diority), v současnosti tvořící již téměř 50 % všech domácích geologických zásob živcových surovin. Vzhledem k rozměrům granitoidních těles jsou ložiska často střední až větší velikosti a surovina je většinou poměrně kvalitní. Vyvinutá jsou např. v krušnohorském plutonu v západních Čechách, kde je lomem těženo stěžejní a největší domácí ložisko Krásno (albitická aplitická žula). Další významné lokality jsou například v mračnickém masivu (Mračnice: křemenný diorit–trondhjemit), třebíčském masivu (Velké Meziříčí-Lavičky: aplitická žula, Mikulovice a Výčapy: turmalinická žula). Zkoumány byly i v dalších masivech, např. brněnském (Moravský Krumlov), dyjském (Přímětice), chvaletickém, blanickém, babylonském, kladrubském (Benešovice), dílčích masivech středočeského plutonu aj. Surovina je tvořena většinou sodno-draselnými živci a používá se při výrobě sanitární keramiky, barevného skla, porcelánu, brusných kotoučů apod. Hrubě zrnité až porfyrické leukokrátní granitoidy by v budoucnu mohly představovat významný zdroj živcové suroviny. Ložiska i zdroje tvoří poměrně velká tělesa, ale často s nižší jakostí suroviny (zvýšené obsahy Fe). Známy jsou v masivech říčanském (Štíhlice), čistecko-jesenickém, borském, krkonošsko-jizerském plutonu (liberecká žula), lestkovském (Hanov) aj. Surovina je tvořena většinou sodno-draselnými živci a pro snížení obsahu Fe je většinou nutná úprava vysokointenzitní magnetickou separací.

Důležitým zdrojem živcových surovin jsou v současnosti ložiska fluviálních kvartérních živcových rozsypů, které tvoří cca 36 % geologických zásob. Vznikly uložením rozrušených žulových hornin s většinou vysokým obsahem porfyrických vyrostlic převážně draselných živců. Nejdůležitější jsou dvě oblasti: horní tok řeky Lužnice s ložisky Halámky, Krabonoš, Tušť, Dvory nad Lužnicí, Majdalena, mezi nimiž je rozhodující těžené ložisko Halámky, zbývající ložiska nejsou těžena. Z vody dobývané ložisko Halámky je jedním z nejvýznamnějších zdrojů kvalitních živců v ČR a nejdůležitějším představitelem sekundárního typu ložisek – živcových štěrkopísků. Velká část zásob těchto ložisek je vázána střety zájmů s ochranou přírody, zejména s CHKO Třeboňsko.

Oblast jižně od Brna s uloženinami řeky Jihlavy – tzv. syrovicko-ivaňská terasa s ložisky Bratčice, Žabčice-Smolín, Hrušovany, Ledce, atd. má mírně horší jakost živců – vyšší obsahy Fe. Naprostá většina zdejší suroviny je však v současnosti využívána pouze jako stavební štěrkopísek, pouze část je od roku 2000 ukládána na deponie k pozdějšímu využití jako živcová surovina. Podobná ložiska živcových akumulací řeky Jihlavy jsou v okolí Ivančic jihozápadně od Brna.

V minulosti byla jediným zdrojem suroviny, používané převážně pro keramiku, pegmatitová ložiska známá z několika oblastí. Ložiska jsou převážně menší, což je dáno omezeným rozsahem pegmatitových těles. Nejvýznamnější je oblast poběžovicko-domažlická s využívaným ložiskem Luženičky a dalšími, v současnosti netěženými ložisky a zdroji (např. Meclov, Mutěnín, Ohnišťovice, Otov, Bozdíš) jsou pegmatity střední až horší kvality s příměsí tmavých minerálů, které mají vyrovnaný poměr sodných a draselných živců. Jsou zde však i ložiska kvalitních sodných a sodno-vápenatých živců na glazury a čiré sklo (Ždánov). V ostatních oblastech

převládají v pegmatitech draselné živce. V tepelské oblasti v západních Čechách jsou poměrně hojné výskyty relativně kvalitních živců s nízkými obsahy škodlivin (Beroun, Křepkovice, Zhořec). Nově je poměrně málo prozkoumaná a snad nadějná oblast Písecka. Některé menší výskyty a ložiska jsou známy z okolí Humpolce, Tábora, Rozvadova (Česká Ves), ze západní Moravy (Smrček) aj. Vzhledem k nepravidelnosti ložiskových těles, malým a do značné míry vytěženým zásobám, ale i střetům zájmů, nejsou živce z pegmatitů již v současnosti příliš perspektivním zdrojem. Velká část nejkvalitnější suroviny pegmatitových ložisek (hlavně v poběžovicko-domažlické a písecké oblasti) je značně vyčerpaná těžbou, především snadněji dostupné přípovrchové partie. Platí to i pro oblast borského granulitového masivu s malým ložiskem Bory-Olší, navazující na klasické vytěžené ložisko Dolní Bory.

Dalším potenciálně perspektivním zdrojem živcové suroviny mohou být kaolinizované živcové horniny s nerozloženými nebo nedokonale rozloženými živci. Jedná se především o arkózy na Plzeňsku a Podbořansku, ruly a granitoidy na Znojemsku.

Jako náhrady živců jsou v ČR využívány terciérní vulkanity – nefelinické fonolity – Českého středohoří (ložisko Želenice). Vzhledem k vysokým obsahům barvicích oxidů jsou použitelné ve sklářském a keramickém průmyslu pouze jako tavivo do barevných hmot. Vysoký obsah alkálií (10–10,5 % $Na_2O$ a 3,5–5 % $K_2O$) umožňuje snížení tavicích teplot a zkrácení doby pálení.

## 14.5 Produkce a spotřeba

Údaje o světové produkci živců a podílu zemí z různých pramenů vykazují neobvykle vysoké rozdíly. Nejvíce se liší odhady čínské produkce živců. Nejnižší celkové údaje uvádí ročenka Mineral Commodity Summary (MCS), která např. mezi předními světovými producenty živců neuvádí vůbec Německo. Vyšší celosvětovou těžbu udává ročenka World Mineral Production (WMP), kterou vydává British Geological Survey. Zřejmě nejpřesnější údaje udává rakouská ročenka Welt Bergbau Daten (WBD).

Tabulka 38. *Světová těžba živců (Starý et al., 2023).*

| Rok | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022[e] |
|---|---|---|---|---|---|
| Světová těžba živců (dle MCS), kt | 25 600 | 23 000 | 24 400 | 27 600 | 28 000 |
| Světová těžba živců (dle WBD), kt | 35 049 | 31 000 | 29 892 | 35 838 | N |
| Světová těžba živců (dle WMP), kt | 31 952 | 30 327 | 30 155 | 34 356 | N |

*e – předběžné hodnoty*

Zjištěné i dosud neobjevené zdroje živce jsou více než dostatečné k uspokojení očekávané světové poptávky. Kvantitativní údaje o zdrojích živce, které se nacházejí v živcových pískách, žulách a pegmatitech, nejsou obecně zpracovány. Dostatek geologických důkazů naznačuje, že zásoby jsou velké, i když ne vždy jednoduše dostupné.

Hlavním průmyslovým zdrojem živců jsou žulové pegmatity. Největší význam mají tělesa, v nichž je mohutně vyvinuta bloková zóna s K-živcem. Metasomatická jednotka pegmatitů, v níž se výrazně uplatnila albitizace, může být zdrojem živce pro potřeby sklářského průmyslu. Velká pegmatitová ložiska živců jsou na území USA (ve státech New Hampshire, Severní Karolína, Jižní Dakota, Maine, Arizona, Virginie), Kanady (provincie Ontario a Quebec), Ruska (Karelie,

Kolský poloostrov) a Ukrajiny. U nás jsou pegmatitová ložiska K-živců v poběžovicko-domažlické oblasti (Meclov, Otov) a na Velkomeziříčsku (Dolní Bory; Votava 2012).

Jako „feldspatity“ se označují nepegmatitové živcové suroviny. Jde o granitoidní a alkalická intruziva, příp. o aplity. Těženy jsou např. leukokratní žuly (v Rusku v okolí Jekaterinburgu), alaskity (ložisko Spruce Pine v Severní Karolíně, kde je alaskit tvořen ze 45 % oligoklasem, 20 % mikroklinem, 25 % křemenem, 10 % muskovitem), albitizované žuly a albitity (Kazachstán), kaolinizované žuly (ložisko Sobótka v Polsku), nefelinické syenity (v Kanadě, Norsku a v Rusku na poloostrově Kola) a aplity (Turecko). V ČR jsou „feldspatity“ přítomny na ložisku Krásno ve Slavkovském lese, kde je živcovou surovinou albitický aplitický granit. U obce Lavičky (sev. od Velkého Meziříčí) bylo těženo čočkovité těleso leukokratní žuly aplitického charakteru (o rozměrech 100 x 800 m) v horninách pestré skupiny moldanubika (Votava 2012).

Obrázek 66. *Živcový lom Krásno (www.kmkgranit.cz).*

## 14.6 Metody těžby a úpravy

Živce se většinou těží v otevřených lomech, kde se rovnou i drtí a třídí na sítech a mísí v předepsaném poměru. Modernější postupy těžení živců využívají informace z geologických průzkumů ložisek. Tyto informace umožňují řídit těžbu a následnou úpravu s cílem dosáhnout co největší homogenity produktu. Další součástí drtící a třídící linky bývají zařízení na odstranění nečistot a na odstranění magnetických příměsí z drcené suroviny. Získaná živcová drť se dále mele např. v kontinuálních sušících mlýnech a mletý produkt je pak tlakovým vzduchem vynášen do třídiče, odkud se nadsítné frakce vracejí zpět do třídiče. Namleté živce se pak třídí na elektrostatických třídičích. Při tomto způsobu snižování obsahu barvících oxidů je nutné, aby namletý živec byl suchý. Magnetické nečistoty se také odstraňují odmagnetováním mletého živce. Při tomto procesu není nutné, aby byl živec zcela suchý. Pro zajištění dobré granulometrie živců vytěžené živce někdy homogenizují. Garantován musí být především obsah čistého živce a obsah alkalických a barvících oxidů. V keramickém průmyslu se stále více uplatňuje mikromletí živců.

Způsob úpravy živcové suroviny je dán ložiskovým typem. Příspěvek společnosti Shandong Xinhai Mining Technology & Equipment Inc. (Xinhai 2022) uvádí úpravnické postupy pro živcové pegmatity, leukogranity, granity a štěrkopísky.

### *Živcové pegmatity*

Obecně platí, že kvalita ložiska pegmatitového živce je vysoká a minerální složení je poměrně jednoduché. Relativně jednoduché jsou proto i způsoby úpravy. Zahrnuje především ruční třídění, drcení, mletí a magnetickou separaci.

- ruční třídění - oddělení velkých hlušinových minerálů podle objemu nebo barvy;
- drcení - hrubé drcení a v případě potřeby další drcení;
- mletí - kontinuální mletí se provádí kulovým nebo tyčovým mlýnem skvarcitovou vystýlkou;
- magnetická separace – vysokointenzitní magnetická separace k odstranění nečistot s intenzitou magnetického pole 1200 kA/m nebo vyšší.

### *Leukogranity*

Leukogranity mají obvykle rovnoměrnou mineralizaci a vyrovnanou kvalitu, přičemž draselný živec a albit tvoří přibližně 50-60 %. Dalšími zastoupenými minerály jsou křemen, slída a minerály obsahující železo. Pro získání velmi čistých živcových produktů je vhodný flotační proces, který následuje po základní úravě suroviny.

- drcení – surovina se primárním drcením (čelisťový drtič) a středním drcením (kuželový drtič) rozmělní na přibližně 20 mm;
- mletí a třídění - rozdrcené produkty se smíchají a rozemelou za mokra v uzavřeném okruhu složeném z tyčového mlýna a vibračního síta; poté se jemné jílové nečistoty odstraní cyklonem a spirálovým třídičem a koncentrát se podrobí flotační úpravě;
- flotace sestává variantně z několika stupňů, v první fázi se separuje slída flotací s kationtovým sběračem (hlavně aminovým sběračem) v kyselém prostředí (slídu lze dále za mokra třídit na prodejný produkt), ve druhé fázi se odstraňují minerály obsahující železo

aniontovými flotačními činidly (hlavně sulfonovaným olejem) v kyselém prostředí, ve třetím stupni se živec oddělí od křemene pomocí aniontového flotačního činidla v prostředí kyseliny fluorovodíkové.

Obrázek 67. *Mlýnice firmy Shandong Xinhai Mining Technology & Equipment Inc. (Xinhai 2022).*

Obrázek 68. *Magnetický separátor firmy Shandong Xinhai Mining Technology & Equipment Inc. (Xinhai 2022).*

### *Živcem bohaté žuly*

Granity (žuly) jsou nejběžnějším typem hlubinných vyvřelin. Oproti pegmatitům jsou jemněji zrnité, obsah křemene se obvykle pohybuje kolem 25-30 %, slíd a minerálů železa kolem 10 %. Hlavní složkou žul je alkalický živec reprezentovaný v různém poměru draselným živcem a albitem. Způsob úpravy je zhruba stejný jako u leukogranitů a zhrnuje drcení, mletí, třídění, flotační odstraňování nečistot (oxidů železa a slídy) a flotačního zahušťování (oddělení křemene od živce).

Obrázek 69. *Flotační jednotka firmy Shandong Xinhai Mining Technology & Equipment Inc. (Xinhai 2022).*

### *Živcové štěrkopísky*

Hlavními složkami živcových štěrkopísků jsou křemen a živec, jejichž zrojem jsou především žuly a živcem bohaté metamorfity. Kvalita těchto ložisek nebývá tak dobrá jako kvalita pegmatitových ložisek živce. Vzhledem k tomu, že se při těžbě vynechává drcení a mletí, jsou náklady na úpravu relativně nízké. Úprava zahrnuje především praní, drcení, třídění a případně i flotaci (oddělení křemene a živce). Někdy je k odstranění železa nutná magnetická separace.

Na sekundárních ložiscích v rozsypech jako např. na ložisku Halámky se těží živcový písek sacími bagry ze dna jezera. Požadovaná frakce se získává mokrým tříděním vytěžené suroviny na sítech.

## 14.7 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Podle normy ČSN 72 1370 Živce a živcové suroviny (1988) se živce označují klasifikačním znakem jakosti sestávajícím z:

a) písmene Ž a dvojčíslí udávajího nejmenší obsah živcové substance v procentech (Ž = ŽK + ŽNa + ŽCa, ŽK = 5,905·$K_2O$, ŽNa = 8,458·$Na_2O$, ŽCa = 4,961·CaO).

b) z chemických značek obsažených zásaditých prvků, u smíšených prvků se na prvním místě uvádí převládající prvek (živce draselné K, draselnosodné KNa, sodnodraselné NaK, sodné Na, sodnovápenaté NaCa a vápenatosodné CaNa),

c) z dvojmístného nebo trojmístného čísla (za mezerou) udávajícího nejvyšší obsah oxidu železitého v setinách procenta.

Podle obsahu živcoviny se živce dělí na chudé s obsahem nad 40 %, středně bohaté s obsahem nad 55 %, bohaté s obsahem nad 65 % a velmi bohaté s obsahem nad 75-85 % (Starý 2024). Ve smyslu by za bilanční surovinu měla být zásadně považována surovina lepší než Ž55 s max. 0,6 % $Fe_2O_3$; v případě, že obsahuje více $Fe_2O_3$, je nutno prokázat laboratorní či modelovou zkouškou možnost jeho snížení (Křelina a Kovářík 1993).

Podle sumy alkálií $Na_2O+K_2O$ jsou definovány třídy živce vyráběného ve společnosti K M K GRANIT. Bilanční třídy mají $Na_2O+K_2O > 7,0$ a $Fe_2O_3 \leq 0,60$ %. Protože $Fe_2O_3$ lze snížit elektromagnetickou separací, je rozhodujícím ktritériem při hodnocení suroviny obsah alkálií.

## 14.8 Reference

Křelina, B., Kovářík, J. 1993. Podmínky využitelnosti. Živcové suroviny. Gekon Praha.

Starý, J., Sitenský, I., Mašek, D., Gabriel, Z., Němec, M., Hodková, T., Vaněček, M., Novák, J., Kavina, P. 2023. Surovinové zdroje České republiky. MŽP, ČGS. Praha.

Starý, J. 2024. Kritické suroviny EU (CRM) - Ložiska a zdroje na území ČR. Živcové suroviny. Výzkumná zpráva Vsouhrn k Mapě ČR s rozmístěním ložisek a potenciálně perspektivních zdrojů živcových surovin a náhrad živců se stavem k 1. 1. 2024. Projekt Horninové prostředí a nerostné suroviny SS02030023. Dílčí cíl 1.4. Program č. 6 Prostředí pro život. MS MŽP/TA ČR.

Votava, P. 2012. Slinovací aktivita živců a jejich alternativ, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně.

Xinhai 2022. Four Types of Feldspar Ores Beneficiation Process. Shandong Xinhai Mining Technology & Equipment Inc. Online accessed at https://www.linkedin.com/pulse/beneficiation-process-4-types-feldspar-ore-%E7%83%9F%E5%8F%B0%E9%91%AB%E6%B5%B7%E7%9F%BF%E5%B1%B1%E6%9C%BA%E6%A2%B0%E6%9C%89%E9%99%90%E5%85%AC%E5%8F%B8/.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 15 Křemen

## 15.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Křemík, anglicky silicon, jméno odvozené z latinského „silex“ nebo „silicis“ významově pazourek. Objevil jej v roce 1824 švédský chemik Jöns Jacob Berzelius, kterému se jako prvnímu podařilo syntetizovat téměř čistý amorfní křemík, když nechal zreagovat $K_2SiF_6$ + K (Pacák 2012). V krystalické podobě jej připravil H. E. S.-C. Deville v roce 1854. Křemík má tři stabilní izotopy $^{28}Si$ (92,2 %), $^{29}Si$ (4,7 %), $^{30}Si$ (3,1 %). Čistý „kovový“ křemík v přírodě nenajdeme. Křemen ($SiO_2$) je nejběžnější formou oxidu křemičitého a tvoří cca 12,6 % objemu zemské kůry (Gotze 2009). Křemen díky svým stabilním fyzikálním a chemickým vlastnostem široce využíván jak v tradičních základních průmyslových odvětvích (stavebnictví), tak v oborech špičkových technologií (Haus 2005; Martello et al. 2011).

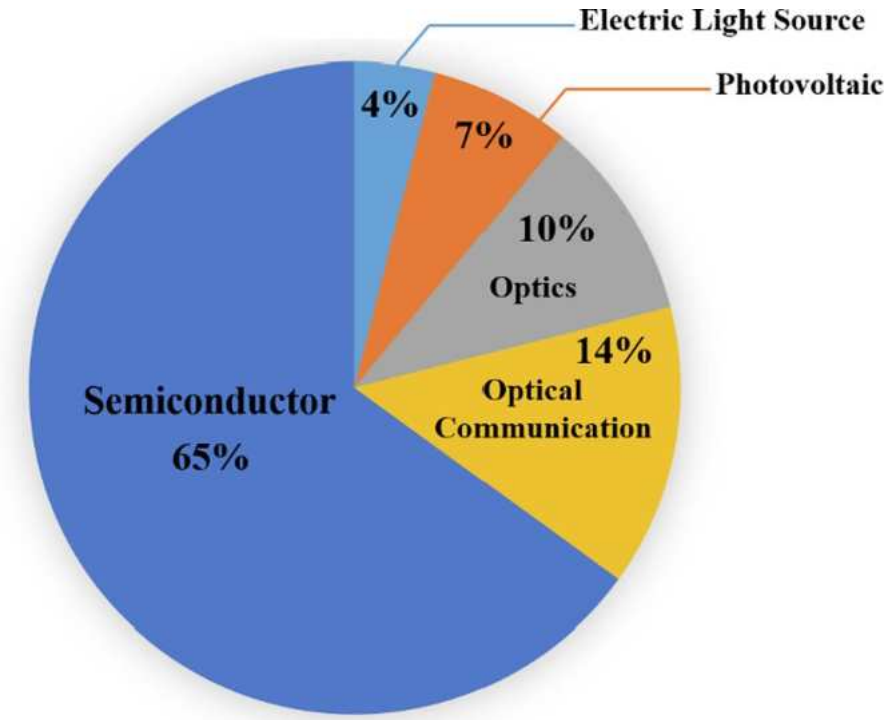
Minerály a horniny bohaté na $SiO_2$ hrají důležitou roli v geologických procesech a jsou hojně využívané v průmyslu. Křemen je hojně zastoupen zemské. Minerály a horniny $SiO_2$ vznikly primárním a sekundárním magmatickým, hydrotermálním nebo sedimentárním procesem, procesy nebo během diageneze a metamorfózy (Heaney et al. 1994). Výsledky těchto procesů jsou pegmatitové nebo hydrotermální křemeny, křemenné písky a pískovce, křemence nebo kvarcity. Diageneze organických křemičitých skeletů, např. diatomitů, radiolarie, křemičité houby, může vést ke vzniku křemičitých hornin, jako jsou diatomity nebo radiolarity (Füchtbauer 1988). Je známo nejméně 15 modifikací (Tabulka 1), tj. minerálních fází se vzorcem $SiO_2$, ale s odlišnou krystalovou strukturou.

Tabulka 39. *Modifikace $SiO_2$ (Strunz a Tennyson 1982, Goetz et al. 2012, Pacák 2014).*

| | | |
|---|---|---|
| **Křemen – tridymit – cristobalit** (nízkotlaké, za atm. podmínek) | nižší křemen (alfa) | trigonální |
| | vyšší křemen (beta) | hexagonální |
| | tridymit | monoklinický |
| | vyšší tridymit | hexagonální |
| | cristobalit | tetragonální |
| | vyšší cristobalit | kubický |
| | melanoflogit | kubický |
| | vláknitý $SiO_2$ (synt.) | rombický |
| | moganit | monoklinický |
| **Keatit – coesit – stišovit** (vysokotlaké) | keatit (synt.) | tetragonální |
| | coesit | monoklinický |
| | stišovit | tetragonální |
| | seifertit | rombický |
| **Lechatelierit – opál** (amorfní fáze) | lechatelierit | přírodní křemenné sklo |
| | opál | pevný $SiO_2$ s vodou - gel |

## 15.2 Průmyslové aplikace a trh

Minerály a horniny složené z $SiO_2$ byly díky svému hojnému výskytu používány k různým účelům již od dávné historie lidstva (např. jako nástroje, zbraně, šperky atd.) a jako tradiční stavební materiály (např. pískovce). Vzhledem k rostoucímu požadavku na kvalitu křemičitých surovin se pro některé vysoce pokročilé aplikace dnes stále častěji používá syntetický křemen (Blankenburg et al. 1994).




Obrázek 70. *Průmyslové využití $SiO_2$ o čistotě 99.50%- 99.95% (Securities 2016).*

Křemen se díky svým vynikajícím optickým vlastnostem a specifickým fyzikálním a chemickým vlastnostem široce používá v polovodičích, optice, optické komunikaci a dalších oborech (Bye a Ceccaroli 2014; Delannoy 2012). Jak je patrné z obrázku 1, největší podíl využití křemene je v polovodičovém průmyslu, což naznačuje, že vysoce čistý křemen se stal klíčovou složkou surovin polovodičového průmyslu již v nedávné minulosti a tento poměr stále narůstá.

Nároky na kvalitu surovin se s vývojem technologií, které je využívají, neustále zvyšují. Poptávka po velmi čistém křemeni je celosvětově na vzestupu, zejména díky celkovému rozšiřování trhu špičkových technologii a jejich pronikání do ostatních odvětví průmyslu. Obecně se za velmi čistý označuje křemen s obsahem znečišťujících látek pod 40 - 50 ppm (Götze 2012).

Různé $SiO_2$ materiály se využívají nejen v elektrotechnice. Například jako pomocná filtrační látka se používá diatomit, který má trubicovitou mikrostrukturu a velký specifický povrch (Mota dos Santos a Cordeiro 2021; Yılmaz a Ediz 2008).

## 15.3 Hlavní ložiska ve světě

Výrobní proces vysoce čistého křemene vyžaduje suroviny z rudních ložisek s vysokou kvalitou, kterými jsou obvykle pegmatitový křemen a hydrotermální žilný křemen (Platias et al. 2013; Zhang a Chen 2010). V současné době je celosvětové rozšíření ložisek křemenných surovin vysoké čistoty velmi vzácné (Larsen et al. 2000). Kromě Číny bylo objeveno 14 ložisek, většinou ve Spojených státech, Austrálii, Mauretánii, Norsku, Kanadě a Rusku, Brazílii (Muller et al. 2012; Santos et al. 2015; Wang 2021). Podle výzkumu Wang (2021) se největší světové zásoby křemenných surovin vysoké čistoty nacházejí ve Spojených státech a Austrálii, které mají

více než 20 milionů tun. Například důl Spruce Pine ve Spojených státech má více než 10 milionů tun, ložiska křemenných hor Baiquanhe v Austrálii mají 14 milionů tun.

## 15.4 Ložiska v České republice

Křemenné suroviny jsou v ČR (Starý et al. 2023) děleny na křemenné suroviny a křemenné suroviny pro speciální skla. Ložiska křemenných surovin se vážou zejména na výskyty „amorfního“ terciérního křemence, křídového „krystalického“ křemence a ordovického křemence, méně na ložiska žilného křemene a silicitů (buližníků) svrchního proterozoika. V současnosti se již v ČR tyto suroviny, až na jedinou výjimku, prakticky netěží, a jsou většinou nahrazovány křemennými písky (zcela v keramickém a sklářském průmyslu), kterých je na trhu dostatečné množství, a navíc jsou méně variabilní a levnější.

Akumulace žilného křemene se vyskytují prakticky po celém území ČR. Výskyty lze rozdělit do několika genetických skupin:

- Dosud málo významná ložiska a výskyty velmi čistého křemene v pegmatitech (Dolní Bory).
- Křemenné žíly typu valů (prokřemenělá dislokační pásma) na Tachovsku (Tachov-Světecká hora), v severních (Rumburk) a jižních (Římov-Velešín) Čechách a v Jeseníkách (Bílý Potok-Vrbno, Žárová).
- Žíly křemene vázané na granitoidní plutony (žulovský: Velká Kraš, karlovarský: Černava-Tatrovice, lužický: Rumburk).
- Ložiska „amorfního“ křemence (zrna křemene jsou tmelena velmi jemným křemenným tmelem) vznikla silicifikací terciérních a svrchnokřídových uloženin na Mostecku (Lužice u Mostu-Dobrčice, Stránce, Skršín) a Chomutovsku (Chomutov-Horní Ves). Na Podbořansku (Skytaly, Vroutek) a Žluticku se vyskytují již jen ve formě reliktních balvanů. Křemenec byl klasickou surovinou pro výrobu dinasu a nejčistší surovina je použitelná i pro výrobu kovového křemíku. Na Podbořansku se křemence používaly i v keramické výrobě. Obdobné jsou „krystalické“ křemence (izometrická zrna křemene) na Teplicku (Jeníkov-Lahošť, Střelná) a Mostecku (Bečov) použitelné především pro hutní zpracování (hlavně ferosilicium), zčásti i pro výrobu dinasu a kovového křemíku.
- Největší význam z paleozoických křemenců měly ordovické křemence Barrandienu (Kublov, Mníšek pod Brdy, Drahoňův Újezd-Bechlov, Sklená Huť, Železná). Jsou hodnoceny zpravidla jako jakostně horší pro výrobu ferosilicia, méně dinasu. Další větší akumulace křemenců až kvarcitů jsou v devonských horninách silezika (Vikýřovice). Tyto křemence mají nízkou kvalitu a jsou vhodné po úpravě pro výrobu dinasu nižší jakosti.
- Předpoklady pro průmyslové využití, pro své zásoby a kvalitu, by snad v budoucnu mohly mít ložiska svrchněproterozoických silicitů (buližníků) a to zejména na Rokycansku (Litohlavy, Kyšice-Pohodnice) a Přešticku (Kaliště, Kbelnice). Surovina by podle zkoušek mohla být vhodná pro výrobu křemíkatých slitin a snad i částečně dinasu.
- Valounový křemen ze štěrkopísků jako surovina pro výrobu křemíku a speciálních druhů skel se vyskytuje v sedimentech Labe, Dyje a na Chebsku. V současnosti je takto využívána frakce 16–50 mm na ložisku Vrábče-Boršov v Budějovické pánvi, která je tvořena prakticky jen valouny křemene (ručně se z ní vybírají jiné horniny, limonitizované

valouny a ostatní nečistoty). Frakce je exportován do Německa (kolem 20 kt ročně) jako křemenná surovina pro výrobu ferosilicia.

- Jako křemenná surovina pro speciální skla je po úpravě vhodný pouze mléčně bílý žilný křemen. Na Příbramsku (Krašovice) je vázaný na středočeský pluton (zónu metamorfovaných ostrovů) a na Prostějovsku (Dětkovice) na hydrotermální žíly, které prodělaly spolu s okolními horninami (fylity) metamorfózu.

Tabulka 40. *Počet ložisek v ČR, zásoby a těžba (Starý et al., 2023).*

| Rok | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|
| Počet ložisek celkem | 16 | 16 | 17 | 15 | 15 |
| z toho těžených | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Zásoby celkem, kt | 25 182 | 25 166 | 26 679 | 26 668 | 26 526 |
| bilanční prozkoumané | 763 | 763 | 763 | 763 | 924 |
| bilanční vyhledané | 20 230 | 20 214 | 21 727 | 21 716 | 21 416 |
| nebilanční | 4 189 | 4 189 | 4 189 | 4 189 | 4 189 |
| vytěžitelné | 377 | 445 | 428 | 417 | 188 |
| Těžba, kt | 17 | 16 | 17 | 11 | 20 |

Využitelnost řemenné suroviny byla nově studována v rámci výzkumného projektu TA ČR „Výzkum perspektivních minerálních plniv a křemenných surovin v Českém masivu, jejich úpravy a využití pro moderní průmyslové aplikace“. Bylo prokázáno, že selektivně těžené a klasicky upravené křemeny z lokalit Bory-Hatě, Světecký vrch u Tachova, Dětkovice aj. již samy o sobě mají jen po nadrcení a suché magnetické separaci železitých a jiných nečistot vysokou kvaltu (obsah $SiO_2$ nad 99 hmot. %, obsah $Fe_2O_3$ pod 0,1 hmot. %, u nejlepší suroviny z lokality Bory-Hatě obsah až 99,9 hmot. % $SiO_2$ a bělost R457 nm až 95 %. Taková surovina je již vhodná pro závěrečné chemické dočištění na cca 99,97 hmot. % $SiO_2$. Se zvyšováním čistoty upraveného křemene stoupá samozřejmě i bělost produktu. To může být velmi významné při aplikacích křemene jako bílého granulátu či plnidla (Lhotský et al. 2023).

## 15.5 Produkce a spotřeba

Spojené státy, Čína, Norsko, Kanada, Rusko a Brazílie jsou hlavními zeměmi, které produkují křemen s čistotou vyšší než 99,9 %.

Mezi klíčové hráče na trhu patří americká společnost Unimin (součástí belgické korporace Sibelco), která má dominantní postavení na světovém trhu s velmi čistým křemenem. Jedná se o jednu z největších společností v Severní Americe zabývajících se nerudními surovinami.

Hlavním evropským producentem je norská společnost Norsk Minerals. Její divize Norwegian Crystallites provádí povrchovou i podzemní těžbu a je producentem velmi čistého křemene od roku 1996. V roce 2011 vnikla korporace „The QUARTZ corp“ spojením Norsk Minerals a americké Imerys, zabývající se těžbou alaskitů (Götze 2012).

Tabulka 41. *Ceny obchodovaných komodit křemíku (USc/lb), americký trh, podle Mineral Commodity Summary (MCS) a ferosilicia podle Metal Bulletinu (MB) a podle Mineral Commodity Summary (MCS) v letech 2018-2022 (Starý et al., 2023).*

| Komodita/rok | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|
| Kovový křemík, metalurgická jakost | 117 | 134 | 106 | 97 | 140 |

| Komodita/rok | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|
| Ferosilicium, 50% Si, průměr cen, USc/lb, dle MCS | 94 | 104 | 102 | 103 | 110 |
| Ferosilicium, 75% Si, průměr cen, USc/lb, dle MCS | 87 | 108 | 89 | 87 | 140 |

## 15.6 Genetické typy ložisek

Přírodní křemité materiály reprezentují skupinu průmyslových hornin a minerálů, které se průmyslově využívají, a to jako jednotlivé krystaly nebo polykrystalické materiály, popřípadě jako kompaktní horniny bohaté $SiO_2$. Četné použití zahrnuje dokonalé krystaly piezoelektrického nebo optického křemene (často se používají syntetické krystaly), velmi čistý křemenný písek a štěrky ve slévárenském a sklářském průmyslu a také pro výrobu polovodičového křemíku a jeho slitin. Křemence se používají pro žáruvzdorné materiály. Využitelnost křemenných surovin pro specifické využití je limitována vlastnostmi materiálu, a to hlavně čistotou (obsahem nežádoucím prvků), která je základním parametrem kvality (Götze 2012).

Tabulka 42. *Vztahy mezi původem a specifickými vlastnostmi různých druhů surovin na bázi $SiO_2$ a jejich hlavním použitím v průmyslu (Götze 2012, Pacák 2014).*

| typ křemene | vlastnosti | upřednostňované použití |
|---|---|---|
| **magmatický/postmagmatický** | | |
| křemen z alaskitů ("IOTA křemen") | chemická čistota | velmi čisté $SiO_2$ materiály, optika,výbojky, polovodiče a fotovoltaika |
| pegmatitový a hydrotermální křemen | chemická čistota a perfektní krystalová struktura | optický a piezoelektrický křemen, syntetický křemen, polovodičový křemík,fotovoltaika, slitiny křemíku, sklo |
| **metamorfní** | | |
| kvarcity | obsah SiO2 až 98 %, kusový | refraktorní materiály, křemík a ferosilicium |
| metamorfogenní křemenné mobilizáty | chemická čistota | syntetický křemen |
| **sedimentární** | | |
| křemenné písky | chemická čistota, granulometrické vlastnosti | sklářský a slévárenský průmysl, cristobalit, křemenný prach, křemenné sklo, karbid křemíku (SiC) |
| křemenné štěrky | chemická čistota, velikost zrn | křemík a slitiny křemíku, stavebnictví |
| sedimentární kvarcity | chemická čistota, kryptokrystalický křemen | refraktorní materiály (dinas) |

## Pegmatity a vysoce diferencované granity

Hornin, které jsou převážně nebo téměř výhradně tvořeny $SiO_2$ magmatického nebo metamorfního původu, je poměrně málo. Jedná se především o pegmatity, hydrotermální žíly, kvarcity a typ leukogranitů označovaný jako alaskit (Götze 2012).

Hlavním zdrojem pegmatitů bohatých křemenem jsou reziduální magmata původně granitoidního složení, nebohacená volatilními složkami. Velké části pegmatitů se mohou skládat z velmi čistého křemene, zpravidla v paragenezi s živcem, slídou, popřípadě některými vzácnými minerály. Křemenné žíly zpravidla představují mineralizaci z hydrotermálních fluid pronikajících zejména podél horizontálních zlomových systémů.

Obrázek 71. *Spruce mine v USA. Zdroj www.ourstate.com.*

## Ostatní typy ložisek

### *Křemen v metamorfních horninách*

Metamorfní procesy mohou mobilizovat a vysrážet velmi čistý křemen, například ve formě žil a čoček sekrečního křemene. Tyto metamorfogenní hydrotermální křemeny ztrácí většinu nečistot během mobilizace hydrotermálních roztoků a krystalizačních procesů. Významnou akumulací křemene jsou kvarcity, kompaktní metamorfované horniny s nejméně 90 % křemene, vzniklé z křemenem bohatých pískovců kompakcí a metamorfózou. Pro průmyslové účely se za

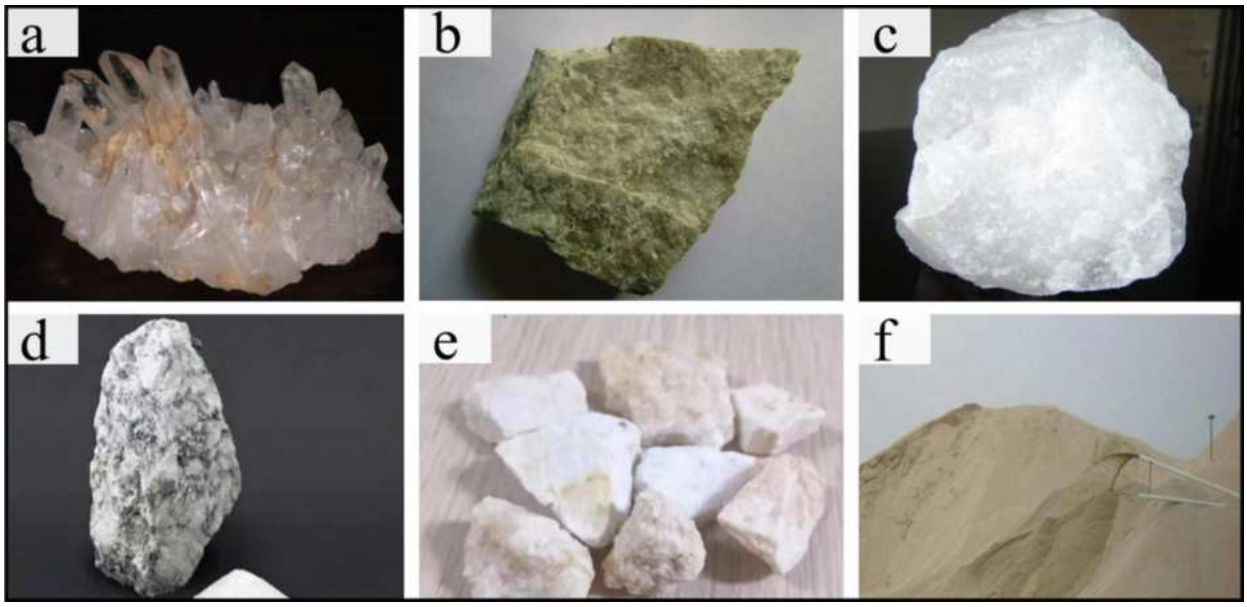
kvarcity označují všechny odolné horniny s obsahem $SiO_2$ > 96 %, bez ohledu na genezi (Götze 2012).

***Křemen v sedimentárních horninách***

Mezi sedimentárními horninami s převahou $SiO_2$ je potřeba rozlišovat mezi křemitými a siliciklastickými horninami. Křemité horniny jsou horniny s obsahem nad 50 % novotvořených (autigenních) minerálů $SiO_2$, jako jsou opál A a opál CT (Lynne a Campbell 2004), chalcedon, kvarcin nebo mikrokrystalický křemen (Früchtbauer in Götze 2012). Oproti tomu skupina siliciklastických hornin zahrnuje horniny s detritickým křemenem pocházejícím z již dříve existujících hornin, akumulovaným během zvětrávání, transportu, sedimentace a diageneze (Früchtbauer in Götze 2012).

***Křemité horniny***

Křemité horniny, které se skládají téměř výhradně z opálů CT nebo z mikrokrystalického křemene a chalcedone (buližníky). Vznik buližníků je možné vyložit diagenetickými mechanismy, kterými mohou být (a) postupné srážení a rekrystalizace z křemitých bahen (rozsivky, radiolarie, houby, vulkanické sklo) v posloupnosti opál A -> opál CT -> mikrokrystalický křemen nebo (b) přímé vysrážení mikrokrystalického křemene (nahrazení karbonátu). Podle křemitých prekurzorů vzniká radiolarit, diatomit nebo spongilit. Prekambrické buližníky jsou často pojmenovány kvůli svému původu jako stromatolity; často se vyskytují společně s oxidy železa na ložiscích páskovaných železných rud (Knauth 1994). Termín pazourek je označení pro konkrece rohovců v karbonátových horninách především křídového nebo jurského stáří (Früchtbauer in Götze 2012).




Obrázek 72. *Fotografie typických křemenných surovin; a: křišťál; b: kvarcit; c: žilný křemen; d: žulový křemen; e: křemenný prachovec; f: křemenný písek (Wang et al., 2019).*

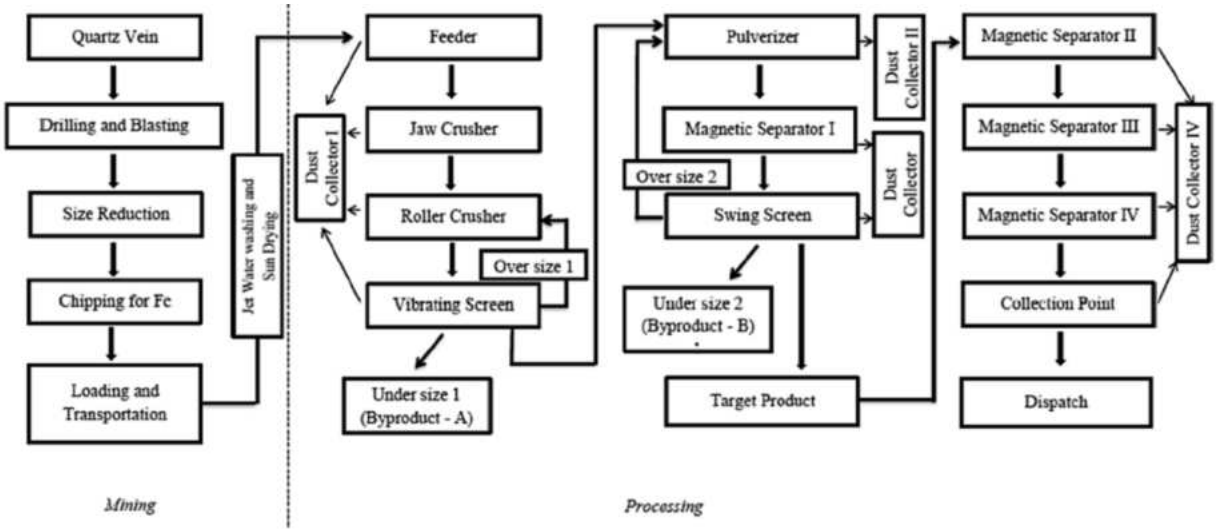
***Siliciklastické horniny***

Siliciklastické horniny představují akumulace fyzicky a chemicky odolného křemene, živců a úlomků hornin. Základní minerální složení a texturní charakteristiky závisí na vlastnostech primárních zdrojových hornin, zvětrávacích podmínkách, transportu, depozici a diagenezi během vzniku horniny (Kachlík a Chlupáč 2011). Tudíž, mineralogické a chemické vlastnosti a posouzení vhodnosti siliciklastických hornin pro použití jako suroviny je velmi složitý problém. Pískovce mívají v průměru obsah křemene kolem 65 hmot. %, ale v některých zralých píscích je to i více jak 99 hm. % (Götze 1997). Kompakce, alterace a vznik novotvořených minerálů během diageneze významně mění vlastnosti siliciklastických hornin. Diageneze a metamorfní procesy mohou vést ke stlačení písků nebo pískovců a jejich přeměně na kvarcit.

## 15.7 Metody těžby a úpravy

Křemenná surovina se dobývá jak povrchovým, tak hlubinným způsobem. Přeměna surového křemene na rafinované výrobky z křemene vysoké čistoty a vysoké hodnoty vyžaduje pokročilou úpravárenskou technologii. Drcením se surový křemen upravuje na požadovanou velikost a oddělují se nežádoucí složky rudy. Další mechanické, fyzikální, chemické a tepelné kroky jsou nutné k oddělení nebo rozpuštění nečistot, aby se splnily konečné požadavky na kvalitu. Goetze (2012) hlavní fáze procesu shrnul takto: prvotní drcení → optické třídění → rozmělnění → třídění podle velikosti částic produktu → chemické loužení → tepelná úprava.

Vytěžené kusy křemene je třeba promýt, aby se odstranily povrchové nečistoty, a rozdrtit, aby vznikla zrna o velikosti v řádu centimetrů. Následné mletí musí zohledňovat oba předešlé úpravárenské kroky, aby se snížilo opotřebení související s mletím, kontaminace křemene na minimum a selektivně uvolnit nežádoucí minerální příměsi. Elektrodynamické drcení je zdokonalená technologie k uvolňování nečistot v krystalech křemene vysoké čistoty. Minimalizuje množství jemných částic a míru kontaminace. Na obrázku níže je schematicky popsán celý proces úpravy křemenné rudy.




Obrázek 73. *Laboratorní metody a techniky čištění křemene (Pathirage et al. 2019; Tuncuk a Akcil 2014; Yang 2018).*

## 15.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Mezi křemenné suroviny patří různé typy hornin s vysokým obsahem $SiO_2$ - zpravidla minimálně 96 %, ale i přes 99 % pro vysoce kvalitní skla a výrobu křemíku (Starý et al. 2023).

Pro indikativní ložiskové hodnocení lze vycházet z požadavků na chemické složení křemenné suroviny využitelné k výrobě ferosilicia (ČSN 72 1230 Křemence a silicity):

- $SiO_2$ ..... min. 97,5 hm. %,
- $Al_2O_3$ .....max. 0,7 hm. %,
- $Fe_2O_3$ .....max. 0,8 hm. %.

## 15.9 Reference

Blankenburg, H.-J., Schulz, H., Gotze, J. 1994. Quarzrohstoffe. Deutscher Verlag f'ür Grundstoffindustrie, Leipzig, 245 pp.

Bye, G., Ceccaroli, B. 2014. Solar grade silicon: Technology status and industrial trends. Sol. Energy Mater. Sol. Cells 130, 634–646.

Delannoy, Y. 2012. Purification of silicon for photovoltaic applications. J. Cryst. Growth 360, 61–67.

Götze, J. 2009. Chemistry, textures and physical properties of quartz-Geological interpretation and technical application. Mineral. Mag. 73, 645–671.

Götze, J., Möckel R. 2012. Quartz: Deposits, mineralogy and analytics. Springer.

Heaney, P. J., Prewitt, C. T., Gibbs, G. V. (eds.). 1994. Silica: Physical behavior, geochemistry and materials applications. Kev. Mineral. 29.

Haus, R. 2005. High demands on high purity. Ind. Miner. 10, 62–67.

Kachlík, V., Chlupáč, I. 2011. Základy geologie. Historická geologie. 3. vyd. Karolinum, Praha, 342 s.

Knauth, L. P. 1994. Petrogenesis of chert. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 29(1), 233-258.

Larsen, R. B., Polve, M., Juve, G. 2000. Granite pegmatite quartz from Evje-Iveland: trace element chemistry and implications for the formation of high-purity quartz. Norges Geologiske Undersokelse 436, 57–66.

Lhotský, P. (ed.). 2023. Laboratorní práce, chemické rozbory a technologický výzkum upravitelnosti a zušlechtění jednotlivých surovinových typů. Projekt Výzkum perspektivních minerálních plniv a křemenných surovin v Českém masivu, jejich úpravy a využití pro moderní průmyslové aplikace TITSMPO031. MS GET/ČGS/TA ČR.

Martello, E. D., Bernardis, S., Larsen, R. B., Tranell, G., Sabatino, M. D., Arnberg, L. 2011. Electrical fragmentation as a novel refining route for hydrothermal quartz for SoG-Si production. Miner Eng 224, 209–216.

Mota dos Santos, A. A., Cordeiro, G. C. 2021. Investigation of particle characteristics and enhancing the pozzolanic activity of diatomite by grinding. Mater. Chem. Phys. 270, 124799.

Muller, A., Wanvik, J. E., Ihlen, P. M. 2012. Petrological and chemical charac-terisation of high-purity quartz deposits with examples from Norway. Quartz: Deposits, Mineral. Analytics, 71-118.

Pathirage, S. S., Hemalal, P. V. A., Rohitha, L. P. S., Ratnayake, N. P. 2019. Production of industry-specific quartz raw material using Sri Lankan vein quartz. Environmental Earth Sciences 78 (3), 58.

Platias, S., Vatalis, K., Charalabidis, G. 2013. Innovative processing techniques for the production of a critical raw material the high purity quartz. Procedia Econ. Finance 5, 597–604.

Santos, M. F. M., Fujiwara, E., Schenkel, E. A., Enzweiler, J., Suzuki, C. K. 2015. Processing of quartz lumps rejected by silicon industry to obtain a raw material for silica glass. Int. J. Miner. Process. 135, 65–70.

Securities, C. 2016. China Silicon Industry Yearbook.

Starý, J., Sitenský, I., Mašek, D., Gabriel, Z., Němec, M., Hodková, T., Vaněček, M., Novák, J., Kavina, P. 2023. Surovinové zdroje České republiky. 484 s. MŽP, ČGS. Praha.

Strunz, H., Tennyson, C. 1982. Mineralogische Tabellen. Eine Klassifizierung der Mineralien auf kristallchemischer Grundlage. Mit einer Einführung in die Kristallchemie. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Leipzig, 621 s.

Tuncuk, A., Akcil, A. 2014. Removal of iron from quartz ore using different acids: a laboratory-scale reactor study. Miner. Process. Extr. Metall. Rev. 35 (4), 217–228.

Wang, J. 2021. Global high purity quartz deposits: Resources distribution and exploitation status. Acta Petrologica et Mineralogica 40 (01), 131–141.

Yang, C. 2018. Advanced purification of industrial quartz using calcination pretreatment combined with ultrasound-assisted leaching. Acta Geodynamica et Geomaterialia 15, 187–195.

Yılmaz, B., Ediz, N. 2008. The use of raw and calcined diatomite in cement production. Cem. Concr. Compos. 30 (3), 202–211.

Zhang, Y., Chen, P. R. 2010. Characteristics of granitic pegmatite with high-purity quartz in Spruce Pine region, USA and Altay Region of Xinjiang, China. Geol. J. China Univ. 16 (4), 426–435.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 16 Slída

## 16.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Slída je název pro skupinu 37 fylosilikátových minerálů, které mají vrstevnatou nebo deskovitou strukturu (Hedrick 1999). Všechny slídy tvoří ploché hexagonální monoklinické krystaly, které vykazují dokonalou bazální štěpnost. To umožňuje jejich oddělování na opticky ploché vrstvy. Slídy se od sebe odlišují různým chemickým složením a fyzikálními vlastnostmi. Komerčně významné minerály slídy jsou (podle Dawson 1949, Watts et al. 2002):

- Muskovit – draselná slída (bezbarvá až světle zelená).
- Flogopit – hořečnatá slída (světle žlutá až tmavě hnědá).
- Vermikulit – hydratovaný biotit nebo hořečnato-železitá slída (bronzově žlutá).
- Lepidolit – draselnou-lithná slída (světle lila až tmavě fialová).

Komerčně nejdůležitějšími slídami jsou muskovit, flogopit a vermikulit. Lepidolit se těží v Portugalsku pro svůj obsah lithia. Muskovit se vyskytuje v různých geologických prostředích. Je primárním minerálem v kyselých vyvřelých horninách, jako je žula a pegmatit, a je nejběžnější slídou v aplitu. Muskovit se také vyskytuje v řadě regionálně metamorfovaných hornin. Slídové vločky jsou přítomny v mnoha klastických sedimentárních horninách. Značné množství komerční slídy se získává jako vedlejší produkt při těžbě živce. Za určitých okolností muskovit přežívá kaolinizaci žuly a může se uvolňovat při zpracování vzniklého kaolinu (Harben a Bates 1990).

Obrázek 74. *Slída v surovém/přírodním stavu (vlevo) a výrobky ze slídových destiček (vpravo). Zdroj www.ashevillemica.com.*

Primární muskovitová slída, která vzniká v pegmatitech a alaskitech, má charakteristické fyzikální vlastnosti – je pružná a snadno se odlupuje. Sekundární muskovitové slídy, které se nacházejí v břidlicích a rulách, tyto vlastnosti v takové míře nevykazují a bývají křehké (Tanner 1994). Muskovitová slída se používá v deskové i mleté formě, přičemž mletá slída má zdaleka největší podíl na trhu. Historicky se slída získávala z pegmatitů, které obsahují velké desky vhodné pro použití v tepelných oknech (krbová kamna) a elektrických izolátorech. Dnes se většinou používá slída mletá nebo vločková, která nachází uplatnění jako plnivo do barev, plastů

a spárovacích hmot, kde se využívá jejího charakteristického vločkového tvaru, pružnosti, elektrické a tepelné odolnosti a inertnosti.

Slída se těží z pegmatitů nebo z volně konsolidovaného jílovitého materiálu, který vzniká zvětráváním pegmatitů a alaskitů. Slídy se dělí na blokové slídy, filmy a štěpky. Velké kusy slídy lze snadno rozdělit na tenké filmy nebo štěpiny o tloušťkách od 0,0031 do 0,10 mm. K ořezání hrubých slídových listů je zapotřebí značného množství ruční práce, což vede k velkému množství odpadu. Kusy slídy, které mají vady, jako množství inkluzí, trhlin nebo záhybů, se nazývají slídový šrot a brousí se buď mokrou, nebo suchou metodou, aby se z nich vytvořily komerční výrobky, nebo se používají k výrobě rekonstituované slídy. Hlavním producentem vysoce kvalitní slídy je Indie.

## 16.2 Průmyslové aplikace a trh

Slída se používá hlavně při výrobě elektrických součástek, které se z ní děrují. Využití slídy a její aplikace jsou popsány v práci Wattse et al. (2002). Listová slída je ceněna pro svou nízkou vodivost, vysokou dielektrickou pevnost, vysokou dielektrickou konstantu a nízké energetické ztráty. Listová slída se používá jako kondenzátor v kondenzátorech, jako izolační materiál a jako nevodivý prvek v elektrických přístrojích. Další použití plechové slídy závisí na její pružnosti, průhlednosti, mechanické pevnosti, chemické inertnosti nebo spolehlivém chování v kritických podmínkách. Příkladem jsou membrány pro zařízení na dýchání kyslíku a měrné sklo ve vysokotlakých parních kotlích.

Výrobek *mikanit* vzniká vrstvením kousků slídových štěpků na sebe a jejich spojováním anorganickými nebo organickými pojivy. Desky se pak lisují dohromady při vysoké teplotě. Mikanit byl původně vyvinut v polovině devadesátých let 19. století jako levnější náhražka listové slídy. Mikanit se vyrábí z kousků listové slídy, které jsou příliš malé na to, aby se z nich daly vyrazit elektrické součástky.

Rekonstituovaná slída je slídový papír vyrobený vytvořením z velmi tenkých rozvrstvených vloček slídového odpadu. Rohož je obvykle impregnována organickým pojivem, ale je k dispozici i bez pojiva. Slídová rohož se suší při zvýšené teplotě. Hotový slídový papír se používá při výrobě těsnění, izolačních desek a dalších aplikací vyžadujících tepelnou, elektrickou nebo chemickou odolnost. Slída používaná v rekonstituované slídě se získává z odřezků z výroby slídových listů nebo z bloků slídy.

Slída vázaná ve skle se skládá z jemných částic slídy stmelených boritým nebo borosilikátovým sklem s nízkým bodem tání. Slídu vázanou sklem lze standardními technikami tvarovat do složitých trojrozměrných tvarů.

Mletá slída je zdaleka nejrozšířenějším druhem použití slídy, a to jak z hlediska množství, tak z hlediska použití. Vyrábí se mletím a tříděním slídového odpadu nebo koncentrátu slídy získaného z 5 zdrojů: 1) odřezky z listové slídy; 2) slídové bloky typu A (klasifikace viz oddíl specifikace); 3) jako vedlejší produkt těžby spodumenu, živce a kaolinu; 4) zvětralé pegmatity a alaskit; a 5) metamorfované břidlice, jako jsou ty, které jsou předmětem této zprávy. Mletí se provádí buď mokrým, nebo suchým procesem, přičemž redukce na mikronovou velikost se obvykle provádí tryskovým mletím. Mletá slída se používá jako funkční plnivo a výztužný materiál v nátěrových hmotách, plastech, gumách, tmelu, sádrových spárovacích hmotách

a sádrokartonových deskách, kapalinách do ropných vrtů, kosmetice a v mnoha dalších aplikacích.

Slída v blocích a deskách se používá především pro elektrické a elektronické aplikace, kde je vynikajícím materiálem díky kombinaci vysoké dielektrické pevnosti, rovnoměrné dielektrické konstanty, nízkých ztrát výkonu, vysokého elektrického odporu, nízkého teplotního koeficientu, odolnosti vůči vysokým teplotám, chemické odolnosti, průhlednosti a snadné výrobě. V 19. století se slída používala především k výrobě oken do kamen, stínidel pro lampy s otevřeným plamenem a k výrobě pozorovacích skel do pecí. Od devadesátých let 19. století začaly být důležité elektroizolační vlastnosti slídy a velké množství slídových desek se začalo používat k výrobě komutátorových segmentů pro elektromotory a generátory, v elektrických žehličkách, toustovačích, pojistkových svíčkách, rádiových trubicích, leteckých zapalovacích svíčkách, kondenzátorech, telefonních zařízeních, radarových součástkách a řadě dalších elektrických a elektronických zařízení. V současné době se slída používá především (Tanner 1994):

Kondenzátorová slída. Slída má průměrnou dielektrickou konstantu 7, což z ní činí jeden z nejspolehlivějších typů izolátorů pro všechny typy elektronických aplikací.

Tranzistorová slída: Slída se používá pro montážní podložky tranzistorů. Vynikající mechanické a elektrické vlastnosti přírodní slídy spolu s její vysokou odolností proti povrchovému úniku, nízkou absorpcí vlhkosti a schopností odvádět teplo činí ze slídy ideální materiál pro tuto aplikaci.

Mezivrstvá izolace: Slída o tloušťce 0,10 mm se používá jako izolace pracovních cívek v malých transformátorech třídy H. Slída je v této aplikaci účinnější než jiné materiály a pomáhá snižovat rozměry a hmotnost transformátorů.

Odporové a potenciometrické karty: Slída je díky svým vlastnostem, jako je vysoká tepelná odolnost, nízká objemová hmotnost a vysoká mechanická pevnost, vhodným materiálem pro vinutí nevodivých odporových karet. V potenciometrech nabízí materiál pro vysoké teploty, který lze navinout a později ohnout do kruhu.

Slídová pouzdra a trubky: Přírodní slídu lze vyrobit do tvaru trubek válcováním na trnu. Trubičky o délce 12,7 až 15,2 cm se používají k izolaci elektrických součástek, které vyžadují kulatou, zcela anorganickou trubičku.

Slída pro řízené střely: Přírodní slída se používá ve vybraných součástech naváděcích systémů řízených střel.

Další použití: K dalším použitím přírodní slídy patří součásti pro helium-neonové lasery, speciální optické filtry, obložení skel pro vysokotlaké parní ohřívače, membrány pro zařízení na dýchání kyslíku, podložky pro navigační kompasy, pyrometry a tepelné regulátory, čočky pro CT a další specializované součásti.

## 16.3 Hlavní ložiska ve světě

Slída se vyskytuje po celém světě, včetně Afriky, Indie, Austrálie, Brazílie, Spojených států a Kanady. Největším producentem slídy je Indie, následují Spojené státy, Brazílie a Afrika. Indie je zemí s největšími zásobami listové slídy na světě, které tvoří přibližně 60 % všech světových zásob.

V Indii se slída těží především ve státech Džhárkhand a Bihár. Tyto dva státy jsou hlavními zdroji slídy v Indii, protože mají největší ložiska slídou bohatých hornin. Ložiska vznikla metamorfózou sedimentárních hornin (především břidlic), které obsahují primární slídu.

Ve Spojených státech se slída těží v Apalačském pohoří na východě USA, především v Severní Karolíně, Georgii a Virginii. V těchto státech se slída nachází především v pegmatitech.

V Brazílii se slída těží ve státech Minas Gerais a Bahia. V těchto státech se slída nachází v břidlicích a rulách, které vznikly metamorfismem sedimentárních hornin. Známá ložiska jsou pegmatity Governador Valadares a Galiléia.

V Africe se slída těží v Mozambiku, Tanzanii a na Madagaskaru. Tyto země mají největší světové zásoby slídy, která se nachází v metamorfovaných a vyvřelých horninách.

V Austrálii se slída těží především v západní Austrálii. Slída se vyskytuje v různých horninách, včetně břidlic, svorů a pegmatitů.

## 16.4 Výskyty v České republice

Česká republika nedisponuje v současné době (2023) schválenými ložisky slídy. Historie těžby a potenciálně zajímavé lokality jsou popsány v knize Ložiska nerudních surovin ČSR (Kužvart et al. 1983).

Muskovit tvoří minerální součást většiny pegmatitů Českého masivu. Byl těžen v období obou světových válek v Kříženci u Mariánských Lázní a okolí, na babě u Domažlic a v Maršíkově v Hrubém Jeseníku. Průměrná roční produkce domažlického ložiska dosahovala v letech 1940-1946 zhruba 20-30 t muskovitu, u ostatních nalezišť nejsou údaje k dispozici. Muskovit byl těžen povrchově i hornicky zejména za druhé světové války v okolí Kříženec (sv. od Plané u Mariánských Lázní), dále na Trdlině u Hostíčkova, v Richterově lese u Vys. Jamného, v údolí Podhájského potoka východně od Křepkovic, v Klášterním lese u Nezdic.

Nepravidelná pegmatitová tělesa o mocnosti 1 až 8 m (max. 20 m) jsou uložena v pruzích směru Z-V téměř konformně v sérii rul a nepřesahující délku 100 m. Muskovit tvoří jemně lístkové vějířovité agregáty a sloupcové krystaly o průměru až 30 cm, lehce rozpadavé a zprohýbané lupeny. Jeho akumulace dosahovaly až 2% váhy pegmatitu. Méně významné jsou menší žilky směrem SV-JZ s hojnými odmrsky a neostré šmouhy v masívcích drobnozrnné žuly. Geneticky jsou tyto pegmatity vázány na variskou žulovou intruzi hanovské jizvy. Ložisko blokového pegmatitu Na babě (kóta 461 západně od Domažlic) tvoří žíly směru SV-JZ se sklonem k SZ mocnou 10 až 20 m a dlouhou asi 100 m v pararulách. Tlusté tabule muskovitu o ploše několik $dm^2$ mívají vrostlý biotit a tvoří 1 až 10 % horniny. Stáří slídy bylo stanoveno radiometricky na 370 milionů let. Slída byla těžena již v polovině 19. století a údajně exportována do Anglie. Dále se těžil muskovit u Maršíkova (ssz. od Sobotína v Hrubém Jeseníku), a to v pegmatitu s berylem na Scheibengrabenu během druhé světové války.

Po roce 1950 byly ověřovány některé lokality z hlediska možnosti obnovení těžby muskovitu jako elektroizolačního materiálu, a to zejména na ložisku Kříženec, průzkum však byl negativní.

## 16.5 Produkce a spotřeba

Zdroje vločkové slídy jsou přítomny v ložiscích jílu, žuly, pegmatitu a břidlice, a jsou považovány za více než dostatečné pro pokrytí očekávané světové poptávky v dohledné

budoucnosti. Světové zdroje slídy nebyly formálně vyhodnoceny, protože se tento materiál vyskytuje jen sporadicky. Velká ložiska slídy jsou známa v zemích, jako je Brazílie, Indie a Madagaskar. Tabulová slída se těží převážně v Indii, a to kvůli vysokým nákladům na ruční práci potřebnou k těžbě a zpracování slídy z pegmatitů.

Tabulka 43. *Produkce vločkové a listové slídy v letech 2022 a 2023. Zdroj USGS.*

| | Scrap and flake | | | Sheet | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mine production[e] | | Reserves[8] | Mine production[e] | | Reserves[8] |
| | 2022 | 2023 | | 2022 | 2023 | |
| United States | 42,000 | 38,000 | Large | NA | NA | Very small |
| Canada | 15,000 | 15,000 | Large | NA | NA | NA |
| China | 80,000 | 85,000 | 1,100,000 | NA | NA | 75,000 |
| Finland | [9]58,200 | 60,000 | Large | NA | NA | NA |
| France | 15,000 | 10,000 | Large | NA | NA | NA |
| India | 14,000 | 14,000 | Large | 1,000 | 1,000 | 110,000 |
| Korea, Republic of | [9]10,200 | 12,000 | 11,000,000 | — | — | NA |
| Madagascar | 35,000 | 50,000 | Large | — | — | NA |
| Turkey | [9]6,070 | 4,000 | 620,000 | — | — | NA |
| Other countries | 42,500 | 39,000 | Large | 200 | 200 | Moderate |
| World total (rounded) | 318,000 | 330,000 | Large | NA | NA | NA |

## 16.6 Genetické typy ložisek

Ekonomické koncentrace slídy jsou rozšířeny v mnoha částech světa (Martin et al. 2014; Nawaratne 2009; Yang et al. 2011). Jejich chemické složení, charakter mineralizace, hostitelské horniny a geneze se na různých lokalitách značně liší (Belkin et al. 1988; Ivanov a Grozdanov 2001; Rizzo et al. 2001; Yavus et al. 2002). Ekonomická ložiska slídy jsou běžně spojena s metamorfovanými horninami a pegmatity (Babu 1969; Brock 1974; Fernando et al. 2011; Wise a Brown 2010). Slída se může se vyskytovat v kapsách, roztroušeně, v žilách nebo vtroušená v hornině.

Ekonomické koncentrace slídy ve spojení s hydrotermálními ložisky jsou však méně časté. Z minerálů slídové skupiny se v hydrotermálně alterovaných horninách běžně vyskytují biotit a flogopit (Bol et al. 1989; Grapes 1993; Tracy 1991; Mansker et al. 1979; Shabani et al. 2003; Shaw a Penczak 1996; Solie a Su 1987).

### *Pegmatity a vysoce diferencované granity*

Muskovit je nejdůležitějším druhem slídy přítomným v granitových pegmatitech a často je po křemeni a živcích nejhojnějším minerálem. Muskovit krystalizuje v mnoha různých typech pegmatitů a v mnoha fázích vývoje pegmatitu.

V pegmatitech se krystaly muskovitu často vyskytují jako velké, dobře rostlé pláty. Pegmatity, což jsou hrubozrnné vyvřelé horniny, jsou obzvláště známé tím, že poskytují vysoce kvalitní krystaly muskovitu.

### *Ostatní typy ložisek*

Muskovit je běžným minerálem v některých typech metamorfovaných hornin a to břidlic, rul a svorů. Vzniká přeměnou již existujících hornin, jako jsou břidlice nebo sedimentární horniny bohaté na jílové minerály.

Muskovit se může vyskytovat také v ložiscích hydrotermálních žil. Ty vznikají průtokem hydrotermálních fluid puklinami v horninách a při ochlazování dochází ke krystalizaci novotvořených minerálů. Muskovit v hydrotermálních žilách může být spojen s jinými minerály, jako je křemen a živec.

V některých případech se muskovit vyskytuje v sedimentárních horninách, zejména v oblastech, kde sedimenty bohaté na jílové minerály prošly diagenezí a zhutněním.

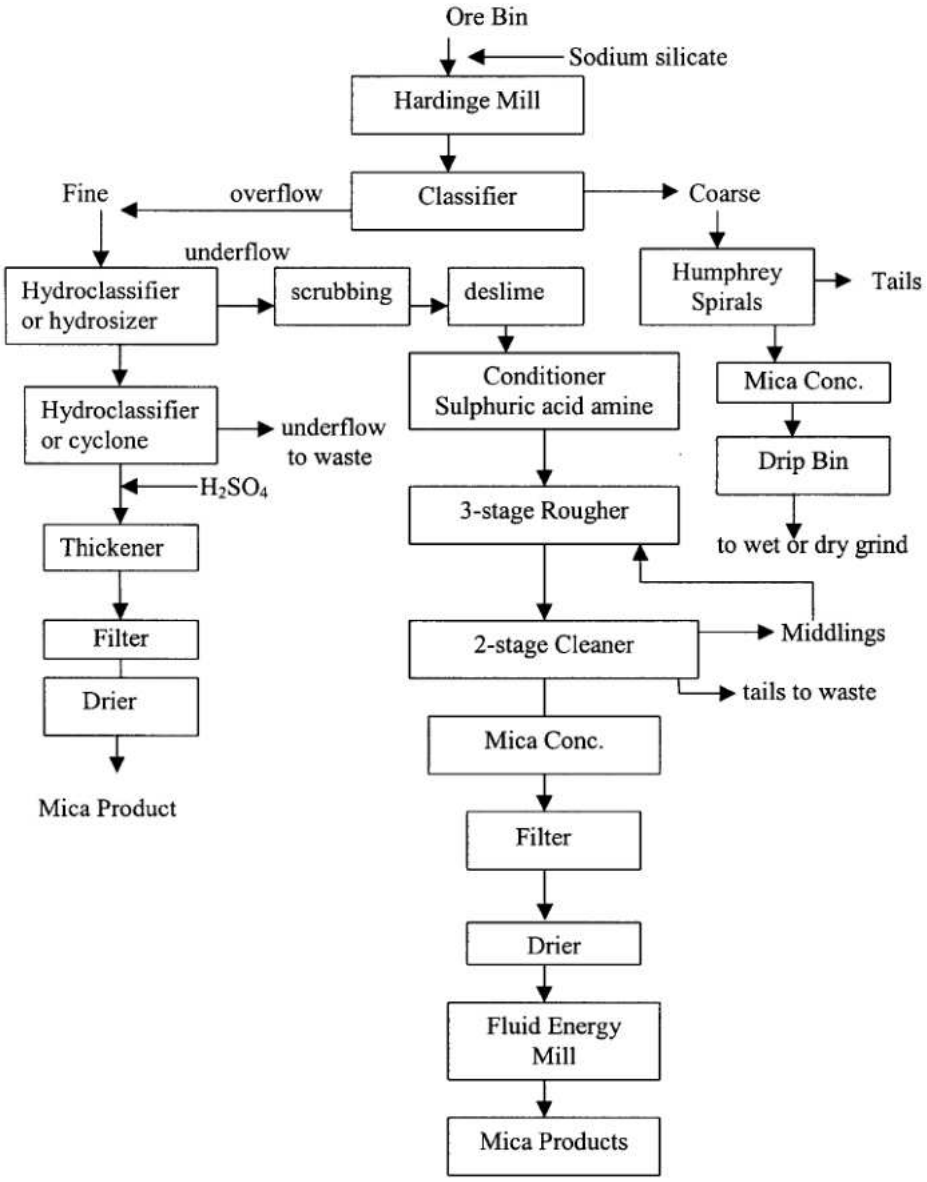
Obrázek 75. *Krystaly muskovitu v pegmatitu. Zdroj www.geologyscience.com.*

## 16.7 Metody těžby a úpravy

Většina listové slídy se těží v Indii, kde jsou poměrně nízké náklady na pracovní sílu a lze provozovat jinak nákladný způsob těžby. Desková slída se získává v šachtách hloubených podél pegmatitového tělesa nebo v povrchových dobývkách, ideálně v lehce navětralém pegamtitu. V obou případech se jedná o ekonomicky velmi riskantní způsob těžby vzhledem k nákladům spojeným s lokalizací žíly a nepředvídatelnosti kvality a množství slídy, která takto může být získána. Po nálezu slídové kapsy se postupuje velmi opatrně, aby se krystaly co nejméně poškodily. Kolem kapsy se opatrně umístí malé nálože výbušnin o síle 40 % až 60 % a při vrtání se dbá na to, aby nedošlo k proražení slídy. Nálož je dostatečná k tomu, aby se slída uvolnila z hostitelské horniny. Po odstřelu se slída ručně vybírá a ukládá do krabic nebo pytlů, které se převezou do úpravny, kde se třídí, štěpí a řeže na různé velikosti určené k prodeji.

Vločková slída se získává ze zvětralých i nezvětralých pegmatitů, alaskitů a svorů. Vločková slída se také získává jako vedlejší produkt těžby kaolinu. Ruda se standartně těží pomocí běžných rypadel nebo bagrů a následného nakládání pomocí čelních nakladačů. Úpravárenské procesy zahrnují drcení, po němž následuje suchá nebo mokrá obohacovací technika k získání slídy. Ložiska vhodná pro výrobu vločkového muskovitu by měla vykazovat tyto vlastnosti:

- vysoký podíl muskovitu v hornině,
- snadno se upravuje drcením a mletím,
- nepřítomnost inkluzí v muskovitu,
- nízký obsah železa (udávaný jako $Fe_2O_3$) v muskovitu,
- větší velikost částic (přednostně ≥ 1 mm, tj. 18 mesh),
- nepřítomnost kontaminace biotitem,
- velikost ložiska dostatečná pro produkci na cca 10 až 20 let.




Obrázek 76. *Diagram procesu kyselé úpravy slídy (Watts et al. 2002).*

## 16.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Slída je v pegmatitech a příbuzných horninách často zastoupena jako významný horninotvorný minerál. Pro průmyslové aplikace jsou hlavními sledovanými ukazateli velkost krystalů, vzhled, zvlnění a přítomnost vzduchových uzavřenin. Podle Kužvarta (1983, 1984) je velikost slídových lupenů obvykle přímo úměrná tloušťce pegmatitu. Zásoby slídy na ložisku lze vypočítat pouze z údajů získaných při podzemních důlních pracích. Obsah slídy by neměl být nižší než 3 % objemu pegmatitu.

## 16.9 Reference

Babu, V.R.R.M. 1969. Study of minerals from the pegmatites of the Nellore mica-belt, Andhra Pradesh, India Part III-Biotite. Mineral. Mag. 37 (287), 391–393.

Belkin, H. E., Cavarretta, G., Vivo, B. D., Tecce, F. 1988. Hydrothermal phlogopite and anhydrite from the SH2 well, Sabatini Yolcanic district, Latium, Italy: Fluid inclusions and mineral chemistry. Am. Mineral. 73, 775–797.

Bol, L.C.G.M., Bos, A., Sauter, P.C.C., Jansen, J.B.H. 1989. Barium-titanium-rich phlogopites in marbles from Rogaland, southwest Norway. Amer. Mineral. 74, 439–447.

Brock, K. J. 1974. Zoned lithium-aluminum mica crystals from the Pala pegmatite District. Amer. Mineral. 59, 1242–1248.

Dawson, E. H. 1949. “Mica”, Industrial Minerals and Rocks, 2nd Edition; AIME, New York, 551-566.

Fernando, G.W.A.R., Pitawala, A., Amaraweera, T.H.N.G. 2011. Emplacement and evolution history of pegmatites and hydrothermal deposits, Matale District, Sri Lanka. Int. J. Geosci. 2, 348–362.

Grapes, R. H. 1993. Barian mica and distribution of barium in metacherts and quartzofeldspathic schists, Southern Alps, New Zealand. Mineral. Mag. 57, 265–272.

Harben, P. W., Bates, R. L. 1990. Industrial minerals: geology and world deposits; Industrial Minerals Division, Metal Bulletin Plc., London 312 p.

Ivanov, M. I., Grozdanov L. A. 2001. Biotite in the granitic pegmatites in the deposit of Smilovene. Koprivshtitsa Region, Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des SciencesGeogazeta 54, 4–59.

Kužvart M. et al. 1983. Ložiska nerudních surovin ČSR. UK, Praha.

Kužvart, M. 1984. Industrial minerals and rocks. Developments in Economic Geology, 18. 454 s.

Mansker, W. L., Ewing, R. C., Keil, K. 1979. Barian-titanian biotites in nephelinites from Oahu, Hawaii. Amer. Mineral. 64 (1–2), 156–159.

Martin, R. F., Randrianandraisana, A., Boulvais, P. 2014. Ampandrandava and similar phlogopite deposits in southern Madagascar: Derivation from a silicocarbonatitic melt of crustal origin. J. Afr. Earth Sci. 94, 111–118.

Nawaratne, S. W. 2009. Feldspar and vein quartz mineralization in Sri Lanka: a possible post metamorphic mid-Paleozoic pegmatitic-pneumatolitic activity. J. Geol. Soc. Sri Lanka 13, 83–96.

Rizzo, G., Piluso, E., Morten, L. 2001. Phlogopite from the Serre ultramafic rocks, Central Calabria, southern Italy. Eur. J. Mineral. 13, 1139–1151.

Shabani, A.A.T., Lalonde, A.E., Whalen, J.B. 2003. Composition of biotite from granitic rocks of the Canadian Appalachian Orogen: A potential tectonomagmatic indicator? Can. Mineral. 41, 1381–1396.

Shaw, C.S.J., Penczak, R.S. 1996. Barium and titanium-rich biotite and phlogopite fromthe western and eastern gabbro, Coldwell alkaline complex, northwestern Ontario. Can. Mineral. 34 (5), 967–975.

Solie, D.N., Su, C.S. 1987. An occurrence of Ba-rich micas from the Alaska Range. Amer. Mineral. 72, 995–999.

Tracy, R. J. 1991. Ba-richmicas fromthe Franklinmarble, Lime Crest and Sterling Hill, New Jersey. Amer. Mineral. 76, 1683–1693.

Watts, Griffis and McOuat Ltd., Ontario Geological Survey. 2002. Industrial mineral assessment and sampling of mica in central and eastern Ontario; Open File Report 6086. 124p.

Wise, M. A., Brown, C. D. 2010. Mineral chemistry, petrology and geochemistry of the Sebago granite-pegmatite system, southern Maine, USA. J. Geosci. 55 (1), 3–26.

Yang, K., Huntington, J. F., Gemmell, J. B., Scott, K. M. 2011. Variations in composition and abundance ofwhitemica in the hydrothermal alteration system at Hellyer, Tasmania, as revealed by infrared reflectance spectroscopy. J. Geochem. Explor. 108 (2), 143–156.

Yavus, F., Gultekin, A. H., Orgun, Y., Celk, N., Karakaya, M. C., Saamaz, A. 2002. Mineral chemistry of barium- and titanium-bearing biotites in calc-alkaline volcanic rocks from the Mezitler area (Balıkesir-Dursunbey), western Turkey. Geochem. J. 36, 563–580.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 17 Keramická aditiva (lepidolit, spodumen, amblygonit/montebrasit, nefelín)

Keramické suroviny jsou nezbytné pro výrobu keramiky, skla a jiných průmyslových materiálů. Tyto suroviny dodávají produktům mechanickou pevnost, odolnost a požadované chemické a jiné technologické vlastnosti.

### *Lepidolit $K(Li,Al)_3(Al,Si)_4O_{10}(F,OH)_2$*

Lepidolit je minerál ze skupiny slíd, chemicky patřící mezi hlinitokřemičitany s obsahem lithia, hliníku a draslíku. Jeho chemický vzorec se obvykle uvádí jako $K(Li,Al)_3(Si,Al)_4O_{10}(F,OH)_2$. Charakteristickým rysem lepidolitu je jeho perleťový až sklovitý lesk a odstíny růžové, fialové, šedé nebo bílé barvy, které závisí na obsahu lithia a dalších prvků. Jeho tvrdost se pohybuje mezi 2,5–4 na Mohsově stupnici a má dokonalou štěpnost. Krystaluje v monoklinické soustavě a často se vyskytuje ve formě jemně šupinkovitých agregátů nebo masivních bloků.

Lepidolit se tvoří především v pegmatitových ložiscích, kde je běžně asociován s dalšími minerály obsahujícími lithium, jako jsou spodumen, montebrasit nebo petalit. Tyto pegmatity jsou zdrojem lithia, které je dnes klíčové pro výrobu baterií, ale má také dlouhou historii využití v keramickém průmyslu.

Obrázek 77. *Vzorek lepidolitu z Brazílie. Zdroj wikipedia.org*

### *Spodumen $LiAlSi_2O_6$*

Spodumen je významný minerál ze skupiny pyroxenů, chemicky se jedná o lithný hlinitokřemičitan s obecným vzorcem $LiAlSi_2O_6$. Jeho krystalová struktura patří do monoklinické soustavy a typicky vytváří hranolovité nebo sloupcovité krystaly. Spodumen se vyznačuje tvrdostí 6,5–7 na Mohsově stupnici, což z něj činí poměrně tvrdý a odolný minerál.

Barva spodumenu může být různorodá, od bezbarvé přes žlutou a zelenou (hiddenit) až po fialovou (kunzit), což je ovlivněno stopovými prvky, jako je mangan či železo.

Spodumen vzniká v pegmatitových ložiscích bohatých na lithium a je často asociován s minerály, jako jsou lepidolit, elbait nebo petalit. Nejvýznamnější naleziště spodumenu se nacházejí v Brazílii, Austrálii, Číně, Kanadě a na Madagaskaru. Díky vysokému obsahu lithia (až 8 % $Li_2O$) je spodumen jedním z hlavních světových zdrojů tohoto strategického prvku.

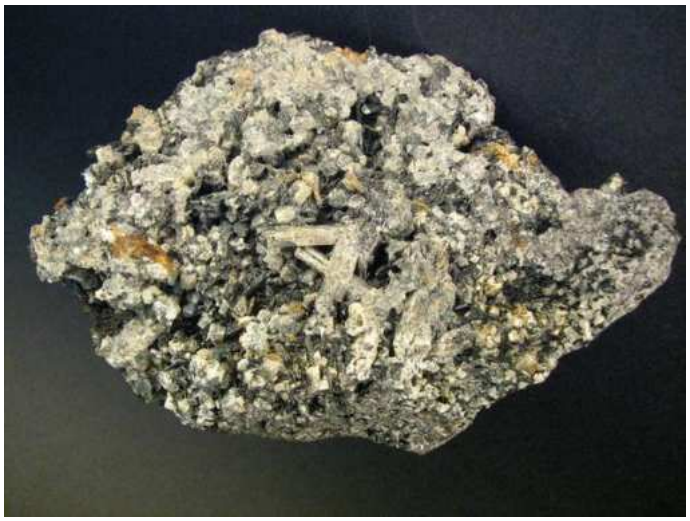
Obrázek 78. *Krystal spodumenu. Zdroj www.weinrichmineralsinc.com.*

Spodumen se v přírodním stavu vyskytuje jako α-spodumen. Strukturně se jedná o monoklinický „pyroxen“, který obsahuje 7,9 % $Li_2O$ a má hustotu 3,2 g/cm³. Při vysokých teplotách, v rozmezí 900 °C–1000 °C, tato nízkoteplotní forma prochází nevratnou polymorfní přeměnou, při které dochází k nárůstu objemu a přeměně na β-spodumen, který patří do tetragonální krystalové soustavy. V této formě minerál vykazuje hustotu 2,4 g/cm³ a je charakteristický velmi nízkou dilatometrickou roztažností, která odpovídá hodnotám nižším než $1{,}0 \cdot 10^{-6}$ °C.

### *Nefelín $Na_3K(Al_4Si_4O_{16})$*

Nefelín je významný minerál patřící do skupiny tektosilikátů, chemicky se jedná o sodno-draselný hlinitokřemičitan s obecným vzorcem $Na_3K(Al_4Si_4O_{16})$. Krystaluje v hexagonální soustavě a vyskytuje se ve formě masivních agregátů, zrn nebo méně často jako prizmatické krystaly. Nefelín je relativně měkký minerál s tvrdostí 5,5–6 na Mohsově stupnici, má matný až skelný lesk a obvykle šedou, bílou, nebo žlutohnědou barvu.

Geologicky je nefelín charakteristický pro alkalické vyvřelé horniny, jako jsou syenity anefelinity, kde se často vyskytuje společně s minerály, jako je sodalit, leucit nebo apatit. Nejvýznamnější naleziště nefelínu se nacházejí v Kanadě (Ontario), Rusku (Kola), Norsku a na Ukrajině.



Obrázek 79. *Sloupcovité šedobílé krystaly nefelínu s černým augitem. Zdroj geologie.vsb.cz*

***Amblygonit/montebrasit (Li,Na)Al(PO)$_4$(F,OH)***

Amblygonit je fosfátový minerál obsahující lithium, sodík, hliník a fosfor. Jeho chemický vzorec se obvykle udává jako (Li,Na)Al($PO_4$)(F,OH). Amblygonit krystaluje v trojklonné soustavě, i když v přírodě se vyskytuje převážně ve formě masivních zrn nebo agregátů. Minerál má perleťový až skelný lesk, tvrdost 5,5–6 na Mohsově stupnici a jeho barva se pohybuje od bílé, nažloutlé a šedé až po světle zelenou nebo růžovou.

Montebrasit je podobný minerál, obsahuje však více hydroxidových iontů než iontů fluoridových; v přírodě existuje kontinuální řada mezi montebrasitem a amblygonitem.

Amblygonit se nejčastěji vyskytuje v pegmatitových ložiscích bohatých na lithium, kde se nachází společně s minerály, jako jsou spodumen, lepidolit a petalit. Významná ložiska byla objevena v Brazílii, USA, Austrálii a Namibii. Obsah lithia v amblygonitu může dosahovat až 10 %, což z něj činí důležitý zdroj tohoto prvku.

Obrázek 80. *Velké bílé zrno amblygonitu v křemeni. Zdroj sberatelmineralu.cz.*

## 17.1 Průmyslové aplikace a trh

Společným rysem popisovaných minerálů je (s výjimkou nefelínu), že obsahují lithium, což je prvek klíčový pro snižování teploty tavení a zlepšení mechanických vlastností produktů.

### *Využití lepidolitu v keramickém průmyslu*

Lepidolit nachází významné uplatnění v keramickém průmyslu díky obsahu lithia, které snižuje bod tavení keramických směsí, což umožňuje výrobu keramiky při nižších teplotách. Tento efekt je obzvláště cenný při výrobě jemné keramiky, jako je porcelán, nebo při výrobě glazur.

Přídavek lepidolitu do keramických směsí také zvyšuje elasticitu keramických materiálů při jejich tvarování a zároveň přispívá ke zlepšení pevnosti a tvrdosti finálních produktů. Díky lithným iontům obsaženým v lepidolitu se glazury stávají lesklejšími a odolnějšími vůči opotřebení, což je klíčové pro dekorativní a funkční keramiku. Také má vliv na redukci tepelné roztažnosti keramiky, což zlepšuje její odolnost vůči tepelným šokům. Tato vlastnost je klíčová při výrobě technické keramiky, která se používá v průmyslových aplikacích, jako jsou pecní vložky nebo laboratorní vybavení. Díky relativní dostupnosti lepidolitu jako lithného minerálu, je jeho využití ekonomicky výhodné v porovnání s čistými chemickými sloučeninami lithia. Tato kombinace ekonomických a funkčních vlastností činí lepidolit důležitým minerálem nejen pro keramiku, ale také pro další odvětví, jako jsou sklářství nebo elektrotechnika. V kontextu rostoucí poptávky po lithiu je pravděpodobné, že role lepidolitu v keramickém průmyslu zůstane i nadále významná, a to jak z hlediska inovací v materiálovém inženýrství, tak z hlediska udržitelnosti zdrojů lithia.

### *Využití spodumenu v keramickém průmyslu*

Spodumen je jen mírně rozpustný (na rozdíl od uhličitanu lithného). Protože spodumen je přirozenou kombinací oxidu křemičitého, oxidu hlinitého a oxidu lithného, taví se lépe než chemicky ekvivalentní směs uhličitanu lithného, kaolinu a oxidu křemičitého. Vzhledem k tomu, že téměř všechny surové glazury obsahují kaolin a oxid křemičitý, je obvykle poměrně snadné upravit složení receptury pomocí glazur tak, aby byl uhličitan lithný nahrazen spodumenem (za předpokladu, že podíl uhličitanu lithného není příliš vysoký). Spodumen může být také použit jako náhrada části podílu živce v receptuře, aniž by příliš narušil celkovou chemii (kromě nahrazení $Li_2O$ za KNaO). Spodumen přispívá k tvorbě velmi lesklých a odolných glazur. Tyto glazury jsou vysoce ceněny pro dekorativní i funkční keramiku, protože poskytují trvanlivý povrch s vynikající odolností vůči chemickému a mechanickému opotřebení. Kromě toho spodumen zlepšuje přilnavost glazury k povrchu keramického výrobku, což umožňuje vytvářet složité a precizní dekorativní vzory. Spodumen se také využívá při výrobě elektrokeramiky, například keramických kondenzátorů nebo piezoelektrických materiálů. Tyto produkty těží z vlastností lithia, jako je nízká hmotnost a vysoká iontová mobilita, které jsou zásadní pro jejich funkčnost.

### *Využití nefelínu v keramickém průmyslu*

Nefelín nachází široké uplatnění v keramickém průmyslu, především díky jeho obsahu alkalických prvků (sodíku a draslíku) a nízkému obsahu křemíku. Často se proto používá jako alternativa k živcům v keramických směsích. Jednou z klíčových vlastností nefelínu je jeho schopnost snižovat viskozitu taveniny při vyšších teplotách, což podporuje tvorbu homogenních

a kvalitních keramických výrobků. Tato vlastnost je využívána při výrobě dlaždic, porcelánu a sanitární keramiky. Kromě toho přispívá přítomnost nefelínu ke zlepšení mechanických vlastností keramických výrobků, jako je pevnost a odolnost vůči opotřebení.

Nefelín se rovněž využívá při výrobě keramických glazur, kde působí jako tavivo. Jeho alkalické složky přispívají k vytváření hladkých, lesklých a odolných povrchů glazur, což je zásadní jak pro dekorativní, tak pro funkční keramiku. Nízký obsah křemíku v nefelínu umožňuje jeho kombinaci s dalšími tavivy, aniž by došlo k tvorbě nežádoucích fází v glazuře.

Speciální využití nefelínu lze nalézt i v technické keramice. Díky jeho chemické stabilitě a dobré tavitelnosti je vhodný pro výrobu žáruvzdorných materiálů, které nacházejí uplatnění v průmyslových pecích nebo tepelně namáhaných konstrukcích.

Nefelín představuje ekonomicky výhodnou surovinu pro keramický průmysl, zejména v regionech, kde jsou omezené zásoby živců. Jeho těžba je obvykle méně nákladná a má menší ekologický dopad ve srovnání s jinými surovinami. Navíc, díky jeho nízkému obsahu křemíku, nefelín omezuje tvorbu prachových částic oxidu křemičitého během zpracování, což zlepšuje pracovní podmínky v průmyslu.

***Využití amblygonitu v keramickém průmyslu***

Amblygonit se v keramickém průmyslu využívá zejména jako zdroj lithia, které má zásadní vliv na vlastnosti keramických směsí. Přidání amblygonitu snižuje bod tavení keramických materiálů, což umožňuje efektivnější a energeticky úspornější proces vypalování. To je důležité zejména při výrobě jemné keramiky, jako je porcelán, nebo technické keramiky používané ve speciálních průmyslových aplikacích.

Díky lithiu zlepšuje amblygonit elasticitu keramických směsí, což usnadňuje tvarování složitých výrobků. Po vypálení přispívá k vyšší pevnosti, tvrdosti a odolnosti keramických produktů vůči chemickému a mechanickému opotřebení. Tyto vlastnosti jsou zvláště ceněny v sanitární keramice, podlahových dlaždicích a kuchyňských výrobcích.

Přidání amblygonitu má významnou roli při výrobě glazur, kde zlepšuje tavitelnost a vytváří hladké, lesklé a odolné povrchy. Glazury obohacené amblygonitem jsou rovněž odolnější vůči chemickému působení, což z nich činí ideální volbu pro funkční keramiku, jako jsou laboratorní nádoby nebo průmyslové filtrační systémy.

V technické keramice amblygonit zlepšuje odolnost výrobků vůči tepelným šokům, což je klíčová vlastnost u žáruvzdorných materiálů a součástí pecí. Tato vlastnost je výsledkem nízké tepelné roztažnosti lithných sloučenin obsažených v minerálu.

## 17.2 Hlavní ložiska ve světě

***Lepidolit***

Mezi nejvýznamnější ložiska lepidolitu patří Greenbushes v Austrálii, jedno z největších světových ložisek lithia, kde se lepidolit těží spolu se spodumenem. Další významné oblasti zahrnují Minas Gerais v Brazílii, Kola Poloostrov v Rusku, Namibii a Zimbabwe. Evropská ložiska, jako jsou ta v Portugalsku.

Čína je hlavním světovým producentem lithia a významným těžařem lepidolitu a to hlavně v provinciích Jiangxi a Hunan.

Ložisko Bikita v Zimbabwe je jedním z největších zdrojů lithia v Africe a obsahuje také významná množství lepidolitu.

Portugalská ložiska v severních regionech, například Barroso, jsou významným zdrojem lithia v Evropě a obsahují také lepidolit.

***Spodumen***

Austrálie je největším producentem spodumenu na světě, s hlavními doly v Západní Austrálii, jako je Greenbushes, jeden z největších a nejkvalitnějších ložisek lithia na světě. Těžba v Austrálii představuje více než polovinu světové produkce lithia.

Čína má několik menších ložisek spodumenu a je zároveň největším zpracovatelem lithia na světě. Většina spodumenu těženého v Austrálii se exportuje do Číny, kde je přeměněn na lithium hydroxid a uhličitan lithný pro výrobu baterií.

Africké země, jako je Zimbabwe, Nigérie a Demokratická republika Kongo, mají rostoucí význam jako zdroje spodumenu. Důl Bikita v Zimbabwe je jedním z nejstarších aktivních dolů na spodumen.

Kanada těží spodumen z dolů, jako je Whabouchi v Quebecu, zatímco Brazílie má významná ložiska v Minas Gerais. Obě země rozvíjejí těžbu a zpracování, aby vyhověly rostoucí poptávce.

***Amblygonit***

Brazílie je jedním z nejvýznamnějších producentů amblygonitu. Hlavní ložiska se nacházejí v pegmatitových polích států Minas Gerais a Paraíba. Tyto oblasti jsou známé svou bohatostí na lithium a další vzácné prvky, což činí Brazílii důležitým hráčem na trhu s lithnými surovinami.

Kanada má významné pegmatitové ložisko v oblasti Tanco Mine v provincii Manitoba. Toto ložisko je jedním z největších a nejznámějších zdrojů lithných minerálů na světě a obsahuje také amblygonit.

V USA se amblygonit nachází především v pegmatitových polích ve státech jako Kalifornie a Maine. Ložiska v Kalifornii, například v oblasti Pala District, jsou známá výskytem lithných minerálů a drahokamových kvalit amblygonitu.

Portugalsko, zejména oblast severního Portugalska, obsahuje pegmatitová ložiska bohatá na lithium, včetně amblygonitu. Tato ložiska jsou významná pro evropskou produkci lithia.

Zimbabwe je důležitým africkým producentem lithných minerálů, přičemž amblygonit se nachází v pegmatitových ložiscích v oblasti Bikita, známé těžbou lithia.

Austrálie, která je největším světovým producentem spodumenu, má také menší výskyty amblygonitu. Tyto minerály se vyskytují v pegmatitech v západní Austrálii, například v oblasti Greenbushes.

***Nefelín***

Největší světová ložiska nefelínu se nacházejí na poloostrově Kola, zejména v oblasti Apatitových dolů (Khibiny masiv). Tyto ložiska jsou významná nejen svou velikostí, ale také vysokou kvalitou nefelínových syenitů. Ruské doly produkují velké množství nefelínu, který je využíván pro domácí průmyslovou potřebu i export.

Ložiska v provincii Ontario (Kanada), jako je oblast Blue Mountain, jsou známá svou čistotou a stabilním chemickým složením nefelínu. Kanadská produkce je zaměřena na export, přičemž hlavními odběrateli jsou USA a země Evropy.

Nefelínové syenity z Norska, například z regionu Lillesand, jsou těženy pro lokální keramický a sklářský průmysl.

Italská ložiska, jako například v regionu Latium, produkují nefelín pro specializované aplikace, zejména ve výrobě glazur a keramiky.

Další menší ložiska se nacházejí například v Grónsku, Turecku, Indii a některých afrických zemích, avšak jejich produkce má spíše lokální význam.

## 17.3 Ložiska v České republice

Lepidolit, spodumen a amblygonit/montebrasit se nacházejí v některých pegmatitech, zejména na Vysočině. V současnosti nejsou těžena.

Lepidolit je typickým minerálem speciálních Li-pegmatitů (Rožná, Jeclov, Dobrá Voda, Tři Studně), kde může vytvářet velká hnízda. Byl poprvé popsán v 18. století právě z moravské lokality Rožná.

Výskyt spodumenu v ČR je vázán na některé granitické Na-Li pegmatity, jako jsou např. Otov, Dobrá Voda.

Amblygonit se v ČR nevyskytuje v ložiskových akumulacích. Byl však popsán na lokalitách Nová Ves u Křemže, Vernéřov u Aše, Dobrá Voda u Velkého Meziříčí a Krasonice u Želetavy (wikipedia.org).

V ČR existují v současnosti tři ložiska nefelinické horniny bilancovaná jako náhrada živců – Železnice, Tašov-Rovný a Valkeřice-Zaječí vrch. Ložiska se nachází v terciérních vulkanitech (nefelinických fonolitech) Českého středohoří. Vzhledem k vysokým obsahům barvicích oxidů je surovina použitelná ve sklářském a keramickém průmyslu pouze jako tavivo do barevných hmot. Vysoký obsah alkálií (10–10,5 % $Na_2O$ a 3,5–5 % $K_2O$) umožňuje snížení tavicích teplot a zkrácení doby pálení (Starý et al., 2023). Výskyt nefelinických syenitů je znám z čisteckojesenického masivu v okrese Rakovník (lokalita Hůrky). Hornina zde obsahuje 9,71-13,45 % alkálií a kolem 4 % $Fe_2O_3$. Obsah oxidu železitého lze vhodnou úpravou snížit až na 0,3-0,5 % (Váňa 1997).

## 17.4 Produkce a spotřeba

Je nesnadné zjistit produkci a spotřebu jednotlivých minerálů pro keramické účely, jelikož lepidolit a spodumen se těží kvůli extrakci lithia a těžba pro keramické účely se samostatně nevyčísluje.

Současná hodnota trhu s lepidolitem (HPDA) v roce 2022 činí 10,99 miliardy USD a očekává se, že během předpovídaného období poroste s mírným složeným ročním tempem růstu (CAGR) 30,4 %, což povede k tržní hodnotě 151,44 miliardy USD do roku 2032 (zdroj: www.futuremarketinsights.com). Globální trh s lepidolitem se očekává, že bude vykazovat významnou míru růstu, což je přičítáno vysoké poptávce po minerálech na celém světě. Severní Amerika a západní Evropa mají významný podíl na příjmech z globálního trhu s lepidolitem, což je dáno bohatými zdroji lepidolitu a vysokým příjmem na obyvatele v těchto regionech během předpovídaného období.

Odhaduje se, že globální produkce spodumenu v roce 2023 dosáhla přibližně 900 000 tun LCE (ekvivalentu uhličitanu lithného), přičemž další růst bude poháněn investicemi do nových dolů a technologií zpracování. Trh spodumenu bude i nadále ovlivněn vývojem v oblasti elektromobilů, výzkumem alternativních zdrojů lithia (např. těžba z roztoků solných pánví) a geopolitickými faktory.

Spotřeba amblygonitu v keramickém průmyslu je velmi nízká ve srovnání s jinými lithnými minerály, především kvůli jeho omezené dostupnosti a vyšší ceně. Spodumen a jiné lithné minerály, jako je petalit, jsou preferovány díky větší dostupnosti, nižším nákladům a podobným vlastnostem. Jeho využití se soustředí na specifické aplikace, které těží z přítomnosti lithia, fosforu a fluoridu, zejména v glazurách, smaltech a technické keramice. Význam amblygonitu v keramice by mohl vzrůst v případě pokročilých technologií nebo vývoje nových keramických materiálů, které by více využívaly jeho jedinečné chemické vlastnosti.

Globální produkce a spotřeba nefelínu v keramickém průmyslu roste, zejména v důsledku jeho využití jako levnější a efektivní alternativy k tradičním živcům. Největší těžba probíhá v Rusku a Kanadě, zatímco klíčové trhy zahrnují Evropu, Asii a Severní Ameriku. Díky svým chemickým a fyzikálním vlastnostem zůstává nefelín klíčovou surovinou pro moderní keramický průmysl. Zvýšená poptávka v Asii a Africe: Růst urbanizace a stavebního průmyslu v těchto regionech zvyšuje poptávku po keramických dlaždicích a sanitární keramice, což podporuje využití nefelínu. Keramický průmysl se stále více zaměřuje na materiály, které umožňují snížení teploty výpalu, což činí nefelín atraktivní surovinou.

## 17.5 Genetické typy ložisek

Pegmatity, vysoce hrubozrnné magmatické horniny, jsou nejvýznamnější ložiskový typ pro výskyt minerálů bohatých na lithium, včetně lepidolitu a spodumenu. Tyto minerály vznikají v závěrečných stádiích magmatické diferenciace, kdy se v tavenině hromadí těkavé látky a prvky jako lithium, cesium a tantal. Pegmatity s lepidolitem a spodumenem mají často zonální strukturu, která odráží procesy krystalizace a chemické diferenciace.

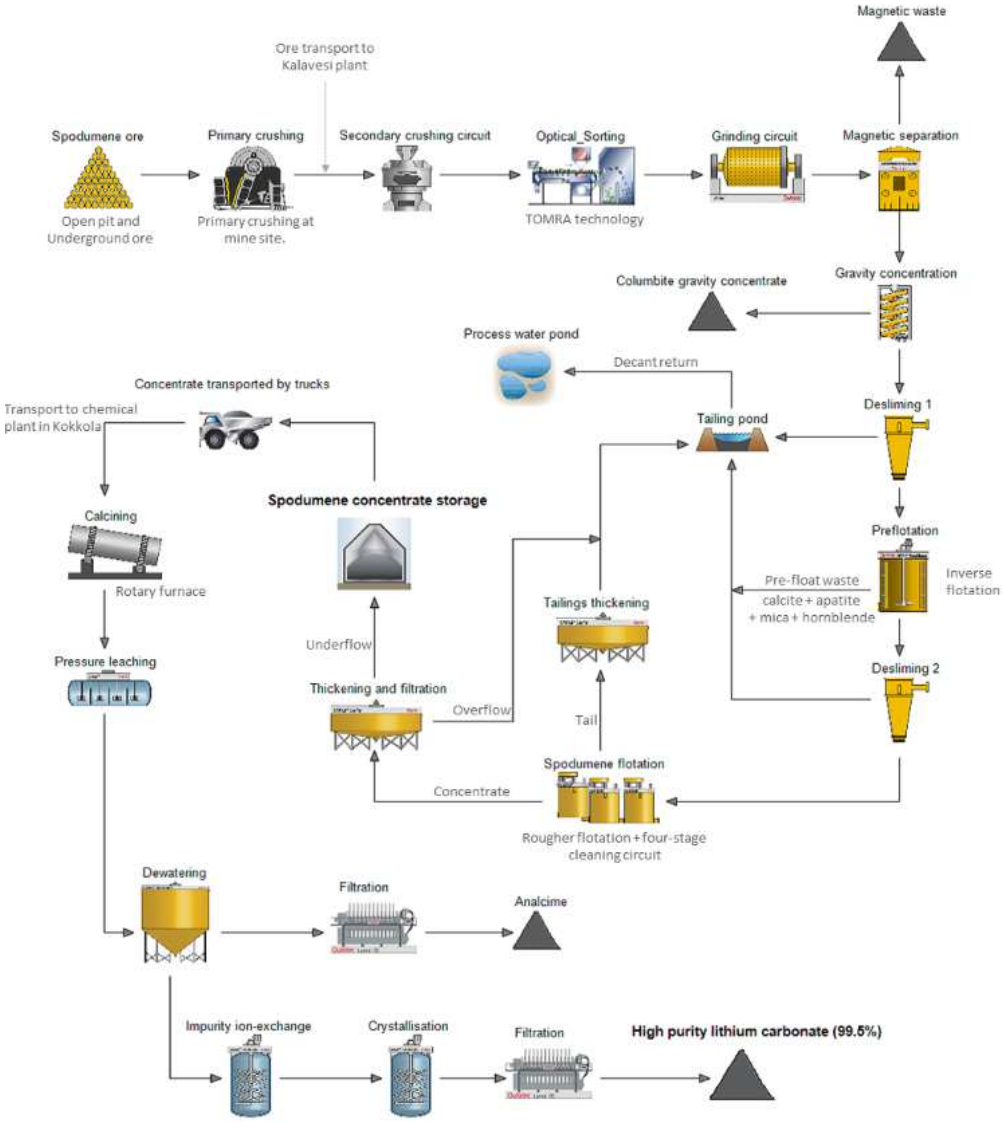
Lepidolit je často doprovázen křemenem, draselným živcem, muskovitem a albitem. Pegmatity s lepidolitem bývají také bohaté na vzácné prvky, jako je rubidium, cesium nebo tantal. Tyto pegmatity jsou vysoce obohacené o těkavé složky, což podporuje krystalizaci lithných slíd.

Spodumen v pegmatitech je často spojen s dalšími lithnými minerály, jako jsou lepidolit, petalit nebo amblygonit, a také s křemenem, albitem a draselným živcem. V některých případech se vyskytuje i spolu s berylem nebo tantalem. Jádro (středová zóna) pegmatitů, kde se spodumen obvykle nachází, obsahují vysoké koncentrace lithia a jsou ekonomicky nejvýznamnější částí pegmatitu.

Nefelín je primárně těžen z nefelinických syenitů a dalších alkalických magmatických hornin. Tyto horniny slouží nejen jako zdroj nefelínu, ale také jako významná průmyslová surovina pro výrobu skla, keramiky a dalších produktů. Hlavní světová ložiska nefelínu se nacházejí v Rusku, Kanadě, Norsku a Itálii, přičemž Rusko a Kanada jsou dominantními hráči v těžbě a produkci nefelínu.

## 17.6 Metody těžby a úpravy

Těžba výše zmíněných minerálů obvykle probíhá povrchovým dobýváním, protože ložiska pegmatitů se často nacházejí blízko povrchu. Proces zahrnuje vrtání, odstřelování a drcení horniny. Po vytěžení suroviny následuje zpracování, které zahrnuje flotaci, gravitační separaci




Obrázek 81. *Zjednodušený technologický postup úpravy spodumenu a výroby uhličitanu lithného (SWECO 2016; Keliber 2018, Flowsheet designed in HSC Chemistry 9 by Outotec 2018a).*

Oddělení lithných minerálů lze efektivně dosáhnout využitím jejich fyzikálních, elektrických a magnetických vlastností. Fyzikální separace se provádějí pomocí mokrého a suchého třídění, gravitačních stolů, magnetické, elektromagnetické, elektrostatické, magnetohydrostatické separace a separace těžkými médii. Gravitační separace je proveditelná pouze v případě, že je spodumen hrubě zrnitý. Flotace se používá k získání vysoce kvalitního koncentrátu např. spodumenu (75–85 % spodumenu), vhodného pro např. pro další extrakci lithia.

## 17.7 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Pro hodnocení lithných keramických a sklářských surovin lze uvažovat stejné ukazatele jako pro Li-rudy (Kapitola 2.8). Indikačním obsahem pro bilanční zásoby je 0,2 hm. % Li v hornině.

Nefelinické syenity s vysokým obsahem oxidu hlinitého (>23 %), nízkým obsahem oxidu křemičitého (<60 %), nízkým obsahem železa (<2 % $Fe_2O_3$) a vysokým obsahem alkálií ($Na_2O$ + $K_2O$ >15 %) lze použít při výrobě skla a keramiky, což představuje většinu jejich komerčního využití (McLemore et al. 2016).

## 17.8 Reference

McLemore, V.T., Timmons, S., and Wilks, M., eds. 2016. Energy and Mineral resources of New Mexico: New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources, Memoir 50 and New Mexico Geological Society Special Publication 13.

Outotec, 2018a. HSC Chemistry 9. Version 9.5.1. Finland. Outotec.

Outotec, 2018b. Spodumene Sorting - Tomra Bench-Scale Test Report (Private Report).

Starý, J., Sitenský, I., Mašek, D., Gabriel, Z., Němec, M., Hodková, T., Vaněček, M., Novák, J., Kavina, P. 2023). Surovinové zdroje České republiky. 484 s. MŽP, ČGS.

Ure, A. M., Berrow, M. L. 1982. The chemical constituents of soils. In: Bowen HJM (ed) Environmental Chemistry R Soc Chem. Burlington House, London 2, 94-202.

Váňa, J. 1997. Nefelinický syenit v ČR. Silikátový zpravodaj 2/97, str. 9.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 18 Abraziva – granát, korund a zirkon

## 18.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Abrazivní hmoty jsou využívány k čištění povrchů, možnosti využití jako řezacího materiálu a jejich celkové dobré dostupnosti. Velmi kvalitní abrazivní písky nesmí obsahovat nečistoty, jako jsou karbonáty, živce a organické částice. Nečistoty z velké míry snižují schopnost řezat, vytvářejí nestejnorodý povrch při otryskávání a zvyšují prašnost (Martinec et al. 2001). Většina zákazníků dává přednost pískům s ostrohrannými zrny. Abrazivní třídy a velikosti se indexují podle použití. Hrubší třídy jsou primárně pro velké povrchy a odstraňování povrchových vrstev. Jemnější frakce jsou potom určeny k leštění a čištění měkčích slitin jako je hliník nebo mosaz.

***Zirkon***

Zirkon je minerál patřící do skupiny nesosilikátů má tetragonální krystalovou strukturu a je zdrojem kovového zirkonia. Chemicky jde o křemičitan zirkonia se vzorcem $ZrSiO_4$. Empirický vzorec, který ukazuje určitý rozsah substituce prvků vzácných zemin a hydratace, je často $(Zr_{1-y}, REE_y)(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x-y}$. Zirkon krystalizuje ze silikátových tavenin a má poměrně vysoké koncentrace nekompatibilních prvků. Například hafnium je téměř vždy přítomno v zirkonu v množství od 1 do 4 %. Krystalová struktura zirkonu je tetragonální. Přirozená barva zirkonu kolísá mezi bezbarvou, žlutozlatou, červenou, hnědou, modrou a zelenou. Zirkon je běžnou akcesorickou až stopovou minerální složkou všech druhů vyvřelých hornin, zejména však granitů a felsických vyvřelých hornin. Díky své tvrdosti, trvanlivosti a chemické inertnosti se koncentruje v sedimentech a je běžnou složkou většiny písků. Minerál tvoří ekonomické koncentrace v ložiscích těžkých minerálních písků, v některých pegmatitech a v některých vzácných alkalických vulkanických horninách, například v trachytu Toongi v Dubbo v Novém Jižním Walesu v Austrálii v asociaci s minerály eudialytem a armstrongitem.

Obrázek 82. *Krystal zirkonu drahokamové kvality z Pákistánu. Zdroj wikipedia.org*

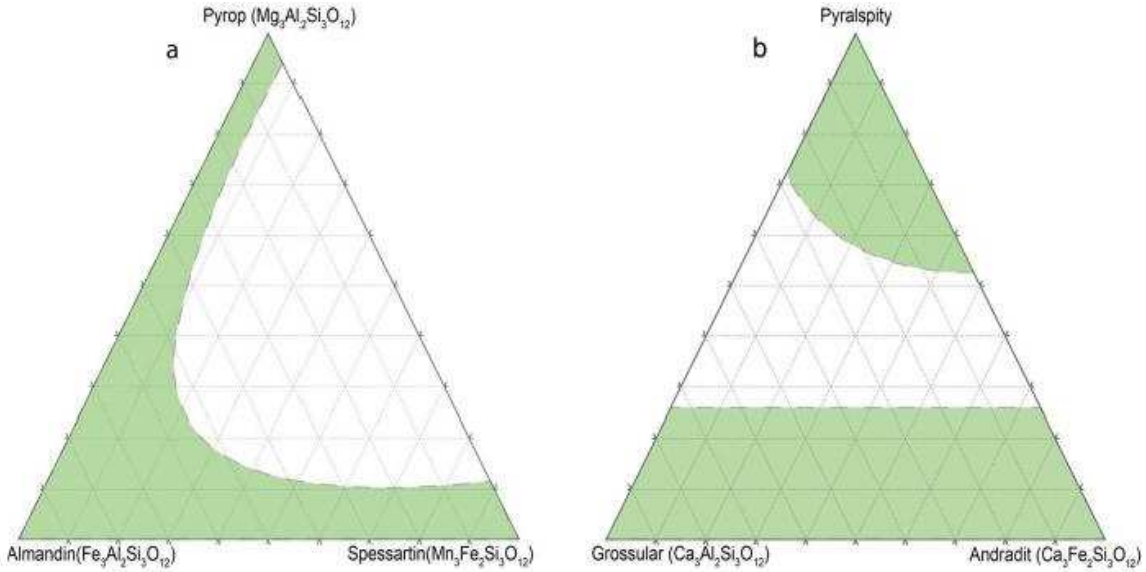
Zirkon je všestranný a vysoce ceněný minerál, který nachází široké uplatnění jako abrazivo i v dalších oblastech průmyslu. Jeho tvrdost a chemická odolnost z něj činí ideální materiál pro broušení, leštění i výrobu vysoce kvalitních keramických a žáruvzdorných produktů. Hlavními světovými producenty zirkonu jsou Austrálie, Jižní Afrika a USA, zatímco spotřeba zirkonu roste zejména v oblasti keramiky a moderních technologií.

### *Granát*

Granáty jsou skupina nesosilikátových minerálů s obecným chemickým vzorcem $X_3Y_2(SiO_4)_3$, kde X a Y jsou různé kovy, jako je železo, hořčík, vápník a mangan. Tyto minerály se vyskytují v mnoha barvách včetně červené, oranžové, žluté, zelené a hnědé, což je způsobeno chemickými variacemi v jejich struktuře. Granáty se nacházejí převážně v metamorfních horninách, jako jsou ruly a svory, a také v některých magmatických horninách, jako jsou pegmatity.

Skupina granátu v současnosti zahrnuje celkem 32 minerálů. Existují ale další minerály s podobnými vlastnostmi, které pro zařazení vyžadují ještě detailnější studium (Grew et al. 2013). Granáty jsou tradičně na základě mísitelnosti rozdělovány do dvou skupin – na hlinité pyralspity a vápenaté ugrandity (Griffen et al. 1992).

Pyralspity jsou pevným roztokem v systému: pyrop ($Mg_3Fe_2Si_3O_{12}$), almandin ($Fe_3Al_2Si_3O_{12}$) a spessartin ($Mn_3Al_2Si_3O_{12}$). Ugrandity pak tvoří izomorfní řadu mezi koncovými členy: grossular ($Ca_3AlSi_3O_{12}$) a andradit ($Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$). Chemismus odpovídající složením jednotlivým koncovým členům je ve struktuře granátu velmi vzácný (Deer et. al 2013, Novak a Gibbs 1971).




Obrázek 83. *(a) Rozsah mísitelnosti mezi pyralspity (koncové členy – pyrop, spessartin, almandin. (b) Ternární diagram s koncovými členy ugranditové skupiny (grossular a andradit), které mezi sebou vykazují rozsáhlou izomorfní mísitelnost, a skupinou pyralspitů; patrná je velmi omezená mísitelnost mezi pyralspitovou a ugranditovou skupinou (Hönig 2008 podle Deer et al. 1997).*

Granát je ceněn pro svou tvrdost (6,5–7,5 na Mohsově stupnici) a odolnost, což z něj činí ideální materiál pro abrazivní aplikace. Používá se při abrazivním tryskání, kde jeho ostré hrany efektivně odstraňují nečistoty. Další významné použití je v řezání vodním paprskem, kde granátové abrazivo umožňuje přesné a čisté řezy tvrdých materiálů, jako je kov, sklo akámen. Granátová abraziva jsou také využívána v brusném papíru a dalších brusných nástrojích, kde jejich odolnost zajišťuje dlouhou životnost a efektivitu.

Obrázek 84. *Červené krystaly granátu v granátickém eklogitu z Norska. Zdroj wikipedia.org*

***Korund***

Korund ($Al_2O_3$) je krystalický oxid hliníku, který krystalizuje v trigonální soustavě. Tento minerál je známý svou extrémní tvrdostí, dosahující hodnoty 9 na Mohsově stupnici, což z něj činí druhý nejtvrdší přírodní minerál po diamantu. Korund je chemicky velmi stabilní, odolný vůči vysokým teplotám a má hustotu přibližně 4,0 g/cm³. V přírodě se vyskytuje v různých barvách, přičemž čistý korund je bezbarvý, zatímco přítomnost stopových prvků, jako je železo, chrom nebo titan, způsobuje zbarvení minerálu do odstínů červené, modré, žluté nebo zelené, cožje velmi ceněno ve šperkařství.

Obrázek 85. *Barevné variety krystalů korundu. Zdroj geology.com.*

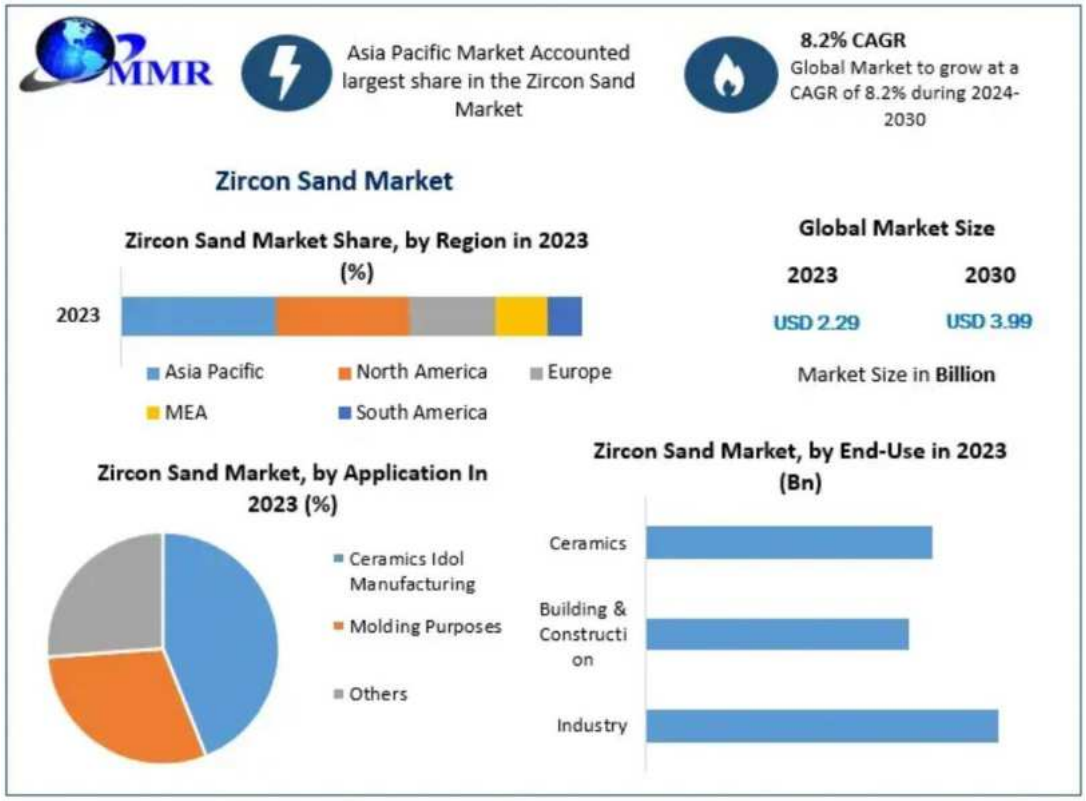
## 18.2 Průmyslové aplikace a trh

Technologie abrazivního vodního paprsku má obrovský význam ve většině průmyslových oborů: ve strojírenství, leteckém a automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, při těžbě nerostů, v potravinářství, medicíně apod. K unikátním vlastnostem zmíněné technologie patří mimo jiné absence tepelně ovlivněné zóny v místě interakce s materiálem (tzv. studený řez; max. 70 °C) a možnost řezání jakéhokoli doposud známého materiálu, včetně těch nejtvrdších a nejodolnějších (Martinec et al. 2023).

### *Zirkon*

Zirkon je strategicky významná surovina pro průmysl, a proto jeho produkce a spotřeba mají globální význam. Jeho využití pokrývá širokou škálu průmyslových aplikací, z nichž nejvýznamnější jsou výroba keramiky, slévárenství, a také zpracování drahokamů a abrazivních materiálů.

Díky své tvrdosti (7,5 na Mohsově stupnici) je zirkon efektivní při jemném broušení kovů, zejména při aplikacích, kde je vyžadována přesnost a minimální poškození povrchu. Zirkonové abrazivo se často používá při opracování tvrdých a křehkých materiálů, jako je keramika a sklo, kde je vyžadováno přesné a jemné leštění. Zirkon se používá ve formě jemného prášku jako přísada do lešticích past určených k finální úpravě povrchů, zejména v optice a elektronice. Zirkon je také ceněn pro svou odolnost vůči chemickému působení, což z něj činí ideální abrazivo pro aplikace, kde jsou abrazivní materiály vystaveny agresivnímu prostředí.

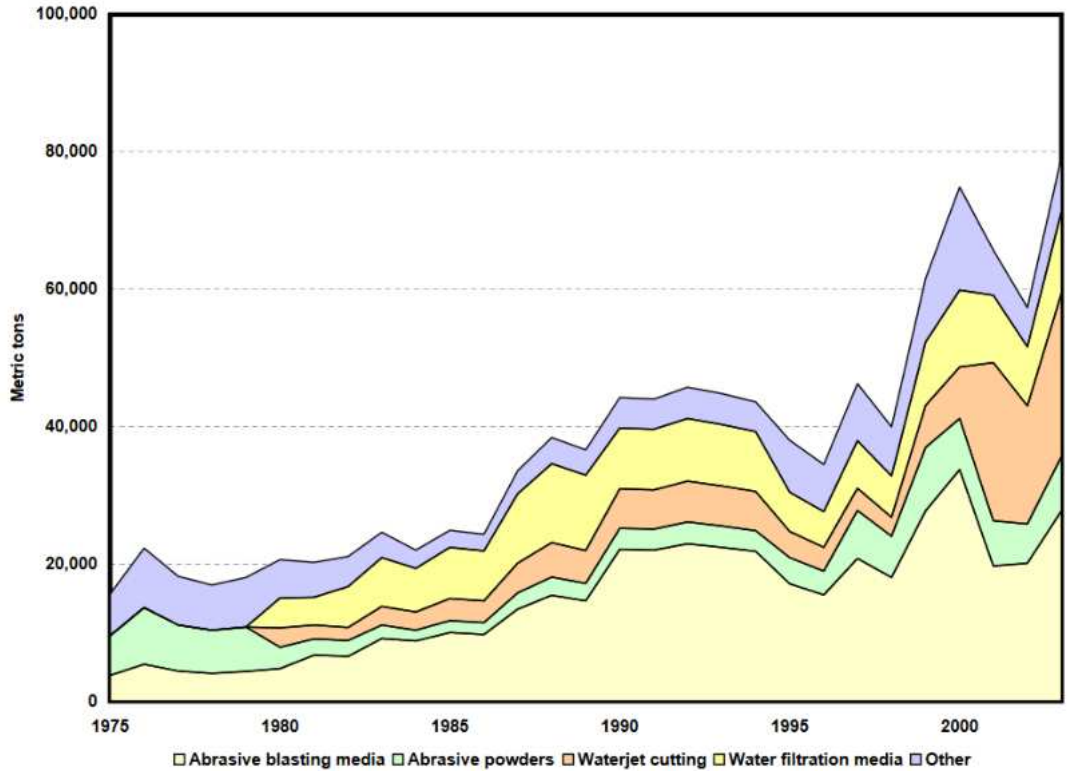



Obrázek 86. *Trh se zirkonem v roce 2023 podle www.maximizemarketresearch.com.*

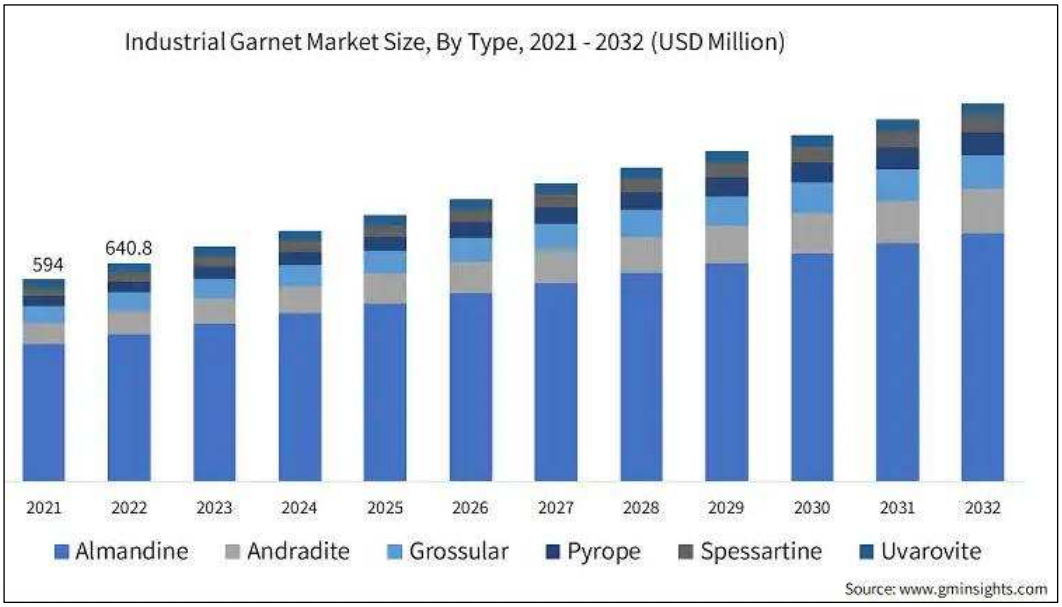
***Granát***

Granátová abraziva jsou preferována pro svou schopnost řezat tvrdé materiály s minimální produkcí prachu a přesnou kontrolou při řezných operacích. Trh s granátovými abrazivy roste díky jejich ekologickým výhodám a efektivitě. Granát je také používán v systémech vodní filtrace, kde jeho vysoká měrná hmotnost a ostré hrany pomáhají při účinném odstraňování usazenin a nečistot z vody. V hutním průmyslu se granát používá při řezání vodním paprskem a abrazivním tryskání.

Granátové abrazivo je abrazivní tryskací látka složená ze směsi almandinu, andraditu, grosuláru, pyropu a spessartinu. Granátové abrazivo, vysoce výkonné tryskací médium, se často používá při čištění hliníkových a sklolaminátových konstrukcí. Uplatnění nachází také při tryskání vodním paprskem a lze jej využít v oblastech, kde je významným faktorem znečištění, například v blízkosti vodních toků. V leteckém a kosmickém průmyslu se tyto metody používají pro složité díly, jako jsou letecké motory a trupy letadel, přičemž granátová abraziva zvyšují účinnost abrazivního tryskání. Kromě toho nachází řezání vodním paprskem uplatnění v průmyslu výroby lékařských a ve stavebnictví pro přípravu povrchů ve stavebních projektech. Pokud jde o tryskání, patří granátové abrazivo mezi nejbezpečnější, nejuniverzálnější a nejúčinnější látky. Ve srovnání se všemi přírodními a syntetickými abrazivy běžně používanými na místě má díky své vysoké specifické hmotnosti mimořádně vysokou účinnost tryskání.




Obrázek 87. *Světová spotřeba technického granátu podle způsobu využití. Podle USGS.*



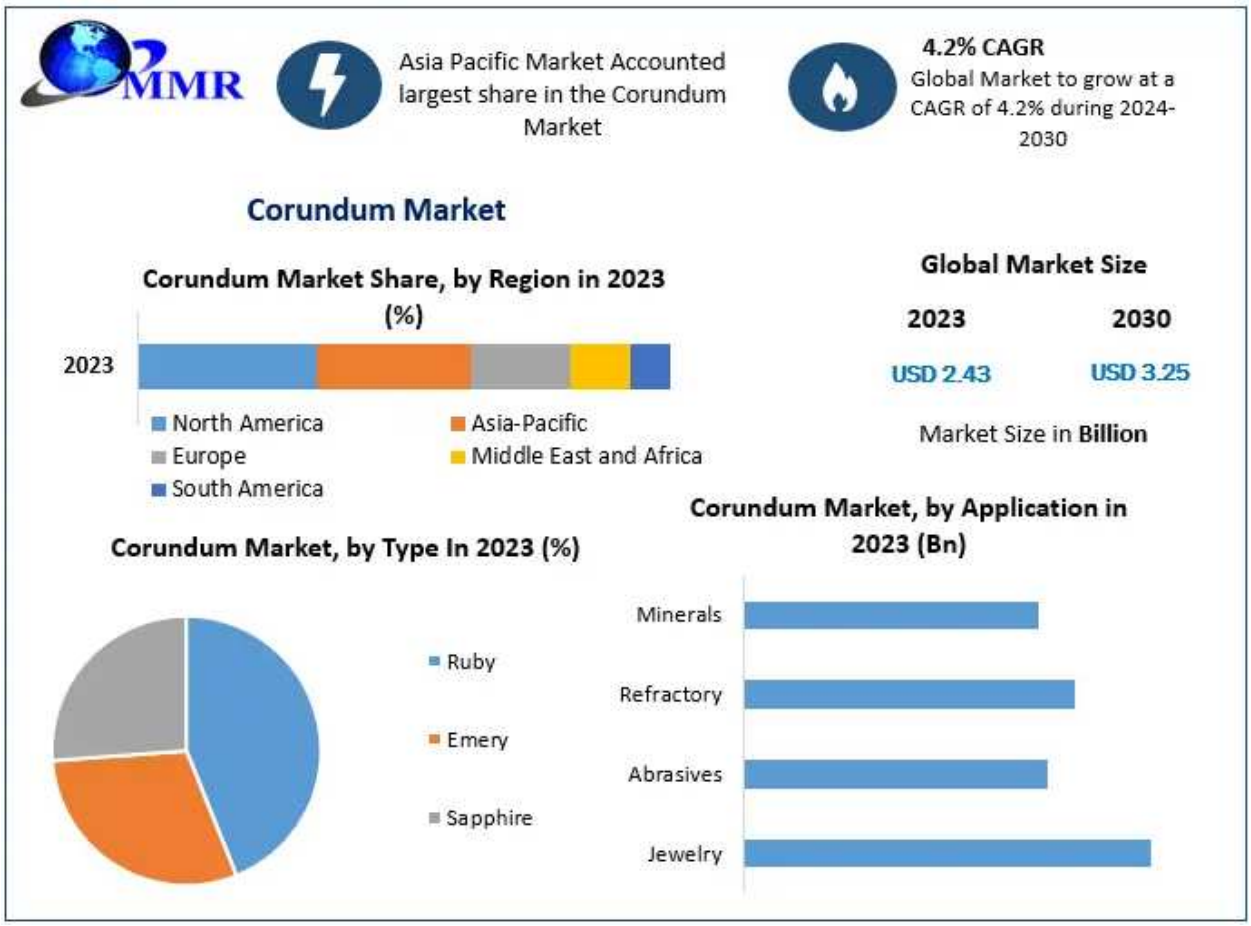

Obrázek 88. *Zastoupení různých typů granátu na trhu s výhledem do roku 2032. Zdroj www.gminsights.com.*

***Korund***

Korund se díky své tvrdosti a chemické odolnosti hojně využívá jako abrazivo. Je ideální pro široké spektrum aplikací, od hrubého broušení po jemné leštění, a to jak přírodní, tak syntetický korund. Ve formě drceného korundu se používá v brusných papírech, kotoučích, řezných nástrojích a tryskacích materiálech.

Korundová abraziva mají vysokou tvrdost, což umožňuje efektivní odstraňování materiálu i z tvrdých povrchů, jako jsou ocel, sklo nebo keramika. Díky své odolnosti vůči opotřebení a chemické stabilitě jsou korundová abraziva ideální pro průmyslové aplikace, kde je vyžadována dlouhá životnost nástrojů. Korund se používá v různých formách a velikostech zrn, které jsou přizpůsobeny konkrétním požadavkům. Hrubá zrna se používají pro intenzivní odstraňování materiálu při broušení a řezání, zatímco jemná zrna se uplatňují při leštění a povrchových úpravách. Další aplikací je použití korundového prášku v tryskacích procesech, kde slouží k odstranění koroze, barvy a jiných povrchových nečistot.

V mikroelektronice a přesném strojírenství je syntetický korund klíčovým materiálem pro jemné leštění optických čoček, polovodičů a dalších komponent, kde je vyžadována vysoká přesnost a kvalita povrchu.




Obrázek 89. *Ttrh s korundem v roce 2023 podle www.maximizemarketresearch.com.*

## 18.3 Hlavní ložiska ve světě

***Zirkon***

Austrálie má rozsáhlá ložiska těžkých minerálních písků v regionech, jako je Západní Austrálie (Eneabba, Jacinth-Ambrosia) a Queensland. Zirkon se zde těží jako vedlejší produkt při těžbě ilmenitu a rutilu (zdroje titanu). V pobřežních oblastech Jižní Afriky (Richards Bay) se těží těžké minerální písky obsahující významná množství zirkonu. Tato oblast má rovněž ložiska ilmenitu a rutilu. Pobřežní oblasti Indie, zejména stát Kerala, obsahují velká naleziště těžkých minerálních písků s významnými zásobami zirkonu. V USA Florida a Georgia mají rozsáhlá ložiska těžkých minerálních písků, z nichž se zirkon těží spolu s dalšími minerály.

Obrázek 90. *Zirkon (tmavě hnědé krystaly) jako základní surovina zirkonového písku, naleziště Wilberforce, Ontario, Kanada. (giessereilexiko.com).*

### *Granát*

Významná ložiska granátu se nacházejí v Austrálii, Číně, České republice, Indii, Pákistánu a Jihoafrické republice, kde se těží pro zahraniční i domácí trhy. V posledních letech byla těžena ložiska také v Rusku a Turecku, převážně pro vnitřní trhy, ale údaje o produkci nebyly zveřejněny. Další zdroje granátu se nacházejí v Kanadě, Chile, Španělsku, Thajsku a na Ukrajině; malé těžební operace byly zaznamenány ve většině z těchto zemí, avšak dostupné informace nebyly dostatečné pro spolehlivé odhady jejich individuální produkce (USGS, 2023).

### *Korund*

Ačkoli přírodní korund byl historicky důležitým zdrojem abrazivních materiálů, moderní průmysl spoléhá především na syntetický korund. Ten je vyráběn fúzí bauxitu nebo jiných oxidů hliníku ve vysokoteplotních pecích, přičemž výsledný produkt má vyšší tvrdost a čistotu než přírodní minerál. Tento proces je energeticky náročný, ale umožňuje masovou produkci kvalitního abraziva.

Korund se ale stále těží i v přírodě. Významná ložiska korundu se nacházejí v Indii, Austrálii, USA, Číně a na Srí Lance. Indie je jedním z největších producentů korundu, s významnými ložisky v oblasti Tamil Nadu. Austrálie má také bohatá ložiska, zejména v oblasti New South Wales. V USA jsou významná ložiska v Montaně a Idahu. Čína a Srí Lanka mají rovněž významné zásoby korundu, které jsou využívány pro různé průmyslové aplikace.

Obrázek 91. *Detail korundového abraziva (www.giessereilexikon.com).*

## 18.4 Ložiska v České republice

Výskyty zirkonu v České republice jsou poměrně malé a rozptýlené. Jsou spojeny hlavně s aluvinálními sedimenty a magmatickými horninami, kde se zirkon vyskytuje jako akcesorický minerál a jeho množství nedosahuje ložiskových parametrů.

V republice je v současnosti evidováno 7 ložisek pyroponosné horniny, jedná se však o granát používaný ve šperkařství. U Měděnce v Krušných horách existují dvě ložiska abraziv (granátu) a to Kovářská-Dolina 1 a Kovářská-odkaliště Měděnec.

Česká republika nedisponuje ložisky korundu. Drahokamový korund se nachází v sedimentech na Jizerské louce u Kořenova. Nejznámější výskyty korundu v pegmatitech jsou na lokalitách Orlík u Humpolce a zejména Pokojovice.

## 18.5 Produkce a spotřeba

***Zirkon***

Zirkon se těží především v oblastech bohatých na těžké minerály. Hlavními producenty zirkonu jsou země s velkými nalezišti těžkých minerálních písků, ze kterých se zirkon extrahuje.

Trh se zirkonem je ovlivňován poptávkou z různých průmyslových odvětví, zejména keramiky a slévárenství. Očekává se, že poptávka po zirkonu bude i nadále růst díky rostoucímu využití ve specializovaných technologiích, jako je výroba palivových článků pro jaderné reaktory a moderní elektronika.

Zároveň však může trh čelit výzvám v podobě udržitelnosti těžby a geopolitických rizik, protože některé z významných nalezišť zirkonu se nacházejí v politicky nestabilních oblastech. To může ovlivnit ceny a dostupnost tohoto strategického minerálu.

Největším spotřebitelem zirkonu je průmysl keramiky, který využívá zirkon pro výrobu glazur a žáruvzdorných materiálů. Další významnou oblastí spotřeby je slévárenství a výroba abraziv, kde se zirkon využívá pro leštění a broušení. Zirkon nachází stále větší využití také v technologiích vyžadujících vysokou odolnost vůči opotřebení a chemickému působení, jako jsou palivové články a elektronika.

***Granát***

Celosvětová produkce průmyslového granátu činila v roce 2023 celkem 970 tisíc tun, což představuje téměř stejnou těžbu, jako v roce 2022. Mezi hlavní světové producenty patřily Austrálie (390 000 tun), Čína (310 000 tun), Jihoafrická republika (180 000 tun), Indie (15 000 tun) a Spojené státy (68 000 tun). Ostatní země dohromady vyprodukovaly zbývajících 7 000 tun. Rusko a Turecko v posledních letech těžily granát, a malé těžební operace probíhaly také v Kanadě, Chile, České republice, Pákistánu, Španělsku, Thajsku a na Ukrajině, avšak dostupné informace nebyly dostatečné k přesnému odhadu produkce. Produkce ve většině těchto zemí byla určena pro domácí spotřebu.

Tabulka 44. *Světová těžba a zásoby granátu ve světě dle USGS.*

| | Mine production | | Reserves[7] |
|---|---|---|---|
| | 2022 | 2023[e] | |
| United States | 76,400 | 68,000 | 5,000,000 |
| Australia | 388,000 | 390,000 | Moderate to large |
| China | 310,000 | 310,000 | 37,000,000 |
| Czechia | [e]500 | 500 | NA |
| India | 15,000 | 15,000 | 8,600,000 |
| Pakistan | 1,870 | 1,900 | NA |
| South Africa | 179,000 | 180,000 | 320,000 |
| World total (rounded) | 971,000 | 970,000 | Moderate to large |

***Korund***

Indie je jedním z největších producentů korundu na světě, s roční produkcí přesahující 200 kt Čína, Austrálie a USA jsou dalšími významnými producenty. Spotřeba korundu roste zejména v průmyslových odvětvích, kde je využíván jako abrazivum. V posledních letech se zvyšuje poptávka po ekologických abrazivech, což přispívá k růstu trhu s korundovými abrazivy. Korund je také využíván v šperkařství, kde je ceněn pro svou krásu a odolnost (wikipedia.org).

## 18.6 Genetické typy ložisek

Zirkon, granát ani korund se v současnosti nezískává z pegmatitů, i když všechny tři minerály se akcesoricky v pegmatitech vyskytují. Často mají spíše drahokamovou kvalitu a neužívají se tak v průmyslových aplikacích.

Primárně se všechny tři minerály vyskytují převážně v metamorfovaných a některých magmatických horninách. Sekundárně se hojně vyskytují v aluviálních (náplavových ložiscích) kde se akumulují díky své mechanické odolnosti. Díky snadnosti těžby tak v současnosti sekundárná ložiska představují jejich hlavní zdroj.

***Zirkon***

Hlavním zdrojem zirkonu jsou v současnosti tzv. těžké písky, které jsou sedimentárními procesy obohaceny těžkými minerály (Tabulka 45). Zirkon má vysokou hustotu a jako tvrdý a odolný

minerál je stálý při zvětrávání primárních hornin a následném transportu (Morton a Hallsworth 1999).

Tabulka 45. *Hlavní typy ložisek zirkonu a příklady ze světa a ČR (http://geologie.vsb.cz).*

| typ | tvar | užitkové minerály | obsah kovu | příklady svět | příklady ČR |
|---|---|---|---|---|---|
| rozsypy | vrstvy v příbřežní mořské zóně, méně aluviální a fosilní rýžoviska | zirkon, baddeleyit | 2-6 % těžkých minerálů v písku, až 50 % zirkonu | Trail Ridge (Florida, USA), Richards Bay (JAR), delta Nilu (Egypt) | pískovce severní části české křídové pánve |
| reziduální | pokryv nefelinických syenitů s eudyalitem a albititů | baddeleyit, eudialyt, méně zirkon | | Brazílie, Afrika, Indie, Austrálie | --- |
| magmatogenní | stratifikované masívy alkalických plutonitů | baddeleyit, eudialyt, zirkon | do 9 % $ZrO_2$ | masív Lovozero (Kola, Rusko), komplex Ilimaussaq (Grónsko) | --- |

Zirkon se může příležitostně vyskytovat jako stopový minerál v ultrabazických vyvřelých horninách bohatých na hořčík, jako jsou kimberlity, karbonatity a lamprofyry, což je dáno unikátní genezí těchto hornin.

### *Granát*

Granátová ložiska mohou být primární (vyskytující se v původních horninách) nebo sekundární (přemístěná erozí a sedimentací). Primární ložiska jsou často spojena s metamorfními horninami (Tabulka 46), jako jsou ruly a svory, kde granáty vznikají při vysokých teplotách a tlacích. Sekundární ložiska se nacházejí v náplavech, kde byly granáty přemístěny vodními toky a usazeny v říčních sedimentech. Tyto ložiska jsou často bohatší a snadněji těžitelná.

Tabulka 46. *Hlavní typy ložisek granátu a příklady ze světa a ČR (http://geologie.vsb.cz).*

| typ | tvar | užitkový nerost | obsah suroviny | příklady svět | příklady ČR |
|---|---|---|---|---|---|
| regionálně metamorfované | vrstvy, polohy a čočky granátických svorů a rul | almandin | 5-60 % | North Creek (New York, USA), Ukrajina, Austrálie | Ktiš, Měděnec |
| rozsypy (rýžoviště) | vrstvy v náplavech potoků a řek | almandin, pyrop | | Chavara (Kerala, Indie) | Podsedice, Vestřev, Svojanov |
| skarny | masivní tělesa a čočky pyroxen-amfibol-magnetitových skarnů | andradit, grosulár | | Arizona (USA), Ural (Rusko), Quebec (Kanada) | Vlastějovice |

Další typy ložisek nezmíněné v tabulce představují například kimberlity, kde jsou granáty velmi hojné primární minerály. V Mexiku se také těží granáty z hydrotermálních žil.

### *Korund*

Typ ložiska a geologické prostředí ovlivňují vlastnosti průmyslového korundu, jako je velikost zrn, čistota a tvrdost. Metamorfní a magmatická ložiska jsou nejběžnějšími přírodními zdroji (Tabulka 47).

Korundová ložiska mohou být primární (v původních horninách) nebo sekundární (přemístěná erozí a sedimentací). Primární ložiska jsou často spojena s metamorfními horninami, jako jsou ruly a svory, kde korundy vznikají při vysokých teplotách a tlacích. Sekundární ložiska v náplavech jsou většinou bohatší a snadněji těžitelná.

Tabulka 47. *Hhlavní typy ložisek korundu a příklady ze světa a ČR. http://geologie.vsb.cz*

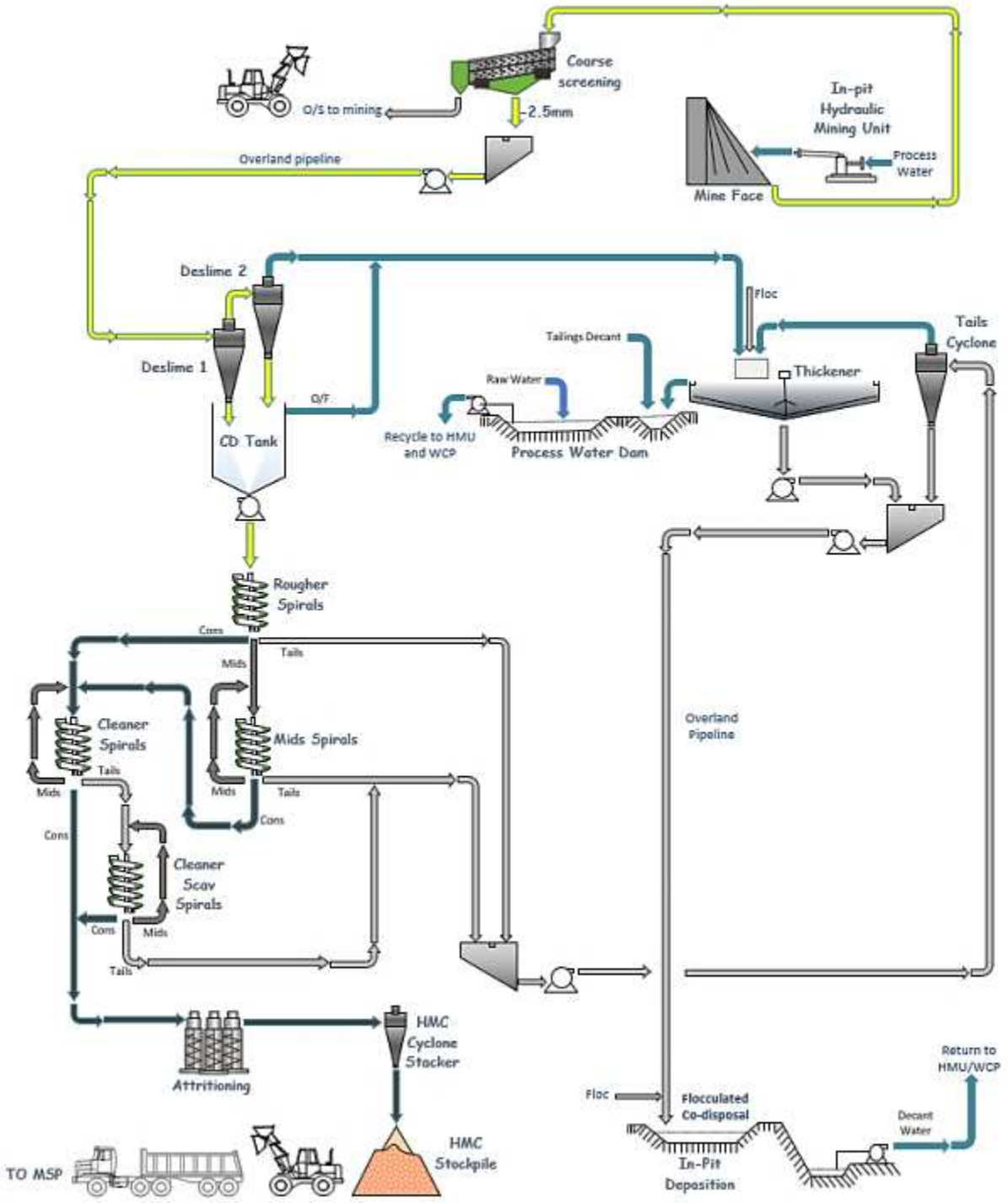
| typ | tvar | užitkový nerost | obsah suroviny | příklady svět | příklady ČR |
|---|---|---|---|---|---|
| pegmatity s korundem | žíly spjaté s nefelinickými syenity, vtroušeniny na okrajích masivů syenitů | korund | | Hastings (Ontario, Kanada) | Pokojovice u Třebíče |
| korundové plagioklasity | v ultrabazických horninách, asi hydrotermálně metasomatické | korund | | Borzovské lož. (Ural, Rusko) | --- |
| pneumatolyticko-hydrotermální metasomatity | čočky sekundárních křemenců ve vulkanitech | korund | až 95 % korundu | Mořské oko (Vihorlat, Slovensko) | --- |
| metamorfogenní | čočky vzniklé metamorfózou Al-bohatých hornin | smirek | min. 10 % korundu | ostrov Naxos (Řecko) | Sepekov |

## 18.7 Metody těžby a úpravy

Těžba na primárních ložiscích (převážně metamorfních nebo skarnových) probíhá buď povrchově, nebo v podzemí. Po těžbě následuje úprava, která zahrnuje drcení, třídění a čištění získaného materiálu. Minerály jsou často následně samostatně drceny a tříděny podle velikosti zrn vhodné pro různé průmyslové aplikace.

Relativně nejjednodušší je těžba a úprava u sekundárních (sedimentárních) ložisek, která jsou v případě těžby z vody dobývána dragováním a při těžbě nad vodní hladinou pomocí nakladačů nebo rozplavováním proudem vody pomocí hydromonitorů.

Podle projektu Tajiri v Tanzanii spočívá výroba koncentrátu 95 % TM (těžkých minerálů) z několika stupňů gravitační separace a klasifikační technologie. Koncentrát obsahuje v průměru 56,7 % ilmenitu, 0,4 % leukoxenu a 6,4 % rutilu, 4,1 % zirkonu, 0,2 % monazitu, 15,6 % granátu, 11,1 % lehčí frakce a 5 % křemene. Koncentrát se dále zpracovává na separační lince. Kromě smíšeného zirkon-monazit-granátového koncentrátu (66 % $ZrO_2$+$HfO_2$) se vyrábí smíšený koncentrát leukoxen+rutil (HiTi, 92-93 % $TiO_2$) a ilmenitový koncentrát (48-54 % $TiO_2$).




Obrázek 92. *Schéma mokré úpravy těžkých minerálů z písků (projekt Tajiri, Tanzánie). Zdroj: Strandline Resources Ltd. Tajiri mineral sands project - engineering scoping study, 2020.*

## 18.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Vzhledem k ceně a objemovému zastoupení příslušných minerálů (granát, korund, zirkon) nedávají úvahy o ekonomickém využití abraziv z hodnocených hornin smysl. Na druhou stranu nelze vyloučit jejich separaci jako doprovodné složky při úpravě na jiný typ suroviny:

- předpokládaný minimální obsah technických minerálů vhodných jako abraziva jako doprovodné suroviny .....2 %.

## 18.9 Reference

Martinec, P., Hlaváček, P., Sitek, L., Foldyna, J., Klomínský, J., Veselovský, F., Fediuk, F. 2023. Topaz quartzolite (greisen) in North Bohemia – potential source of the natural abrasive. ZGC 56, 2, 119–127.

Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J. 2013. An introduction to the Rock Forming Minerals (3rd edition). The Mineralogical Society, 498 p.

Griffen, D. T., Hatch, D. M., Phillips, W. R., Kulaksiz, S. 1992. Crystal chemistry and symmetry of a birefringent tetragonal pyralspite grandite garnet. American Mineralogist 77, 399-406.

Hönig, S. 2008. Granátické granity a pegmatity brněnského masivu – nový typ UST staveb v A-typových granitech? Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta, Masarykova Univerzita, Brno, 73 p.

Morton, A. C., Hallsworth, C. R. 1999. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. - Sedimentary Geology 124 (1–4), 3–29.

Novak, G. A., Gibbs, G. V. 1971. The crystal chemistry of the silicate garnets. American Mineralogist 56, 791-825.

Sun, W., Li, H. 2023. Research progress on zircon from pegmatites and insights into rare-metal mineralization - a review. Earth Science Frontiers, 30(5). 171-184.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 19 Bor a boráty

## 19.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Bor (chemická značka B, atomové číslo 5) je prvek, který patří mezi polokovy a najdeme jej v páté skupině periodické tabulky. Bor se v přírodě nevyskytuje volně, ale pouze ve sloučeninách, především boritanech a borosilikátech. Typickými nerosty obsahujícími bor jsou minerály ze skupiny turmalínu, borax ($Na_2[B_4O_5(OH)_4]\cdot 8H_2O$) a kernit. Elementární bor je pevná látka, která se vyskytuje ve dvou hlavních alotropických formách – amorfní a krystalické. Amorfní bor má práškovitou strukturu, zatímco krystalický bor je tvrdý, křehký a má kovový lesk.

Bor se slučuje s kyslíkem a dalšími prvky za vzniku kyseliny borité nebo anorganických solí zvaných boritany. Sloučeniny boru, především boritany, jsou obchodně důležité, a proto se ceny a prodej výrobků z boru odvíjejí od obsahu oxidu boritého ($B_2O_3$), který se liší podle rudy a sloučeniny a podle nepřítomnosti nebo přítomnosti vápníku a sodíku. Čtyři minerály – colemanit, kernit, borax a ulexit – představují 90 % boritanových minerálů používaných v průmyslu na celém světě. Více než tři čtvrtiny světové spotřeby se využívá ve výrobě keramiky, detergentů, hnojiv a skel.

Obrázek 93. *Kovový bor (wikipedia.cz)*

### *Turmalín*

Turmalín je nejběžnější borosilikát v zemské kůře. Je většinou přítomen akcesoricky v magmatických, metamorfovaných a méně často i sedimentárních horninách (Henry et al. 2011). Jsou však známé i horniny, kde je turmalín jeden z hlavních horninotvorných minerálů (Slack 1996). Turmalín tvoří nejčastěji sloupečky paralelní s krystalografickou osou c. Barevně stejně jako chemicky je velmi variabilní od červené, přes růžovou, zelenou, modrou, hnědou, černou až po bezbarvou (Ford a Dana 1932, Anthony et al. 1995). Charakteristickou vlastností turmalínu je jeho podélná nebo i příčná barevností zonálnost (Rustemayer 2003; Buerlen et al. 2011).

Obrázek 94. *Krystaly skorylu, který je nejběžnějším turmalínem. Zdroj mindat.org.*

Turmalín je známý širokým rozsahem substitucí a tím pádem i rozmanitým chemickým složením. Navíc je velmi stabilní, což z něho činí cenný indikátor změn v chemickém složení jeho horninového prostředí (Dutrow a Henry 2000). Obecný vzorec turmalínu je $XY_3Z_6(T_6O_{18})(BO_3)_3V_3W$ (Hawthorne a Henry 1999). Největší variabilita v chemickém složení je na pozicích X, Y, Z, W menší na pozici V, na pozici T dominuje Si, na pozici B je zastoupen výhradně B (Henry et al. 2011).

### *Boritanové minerály*

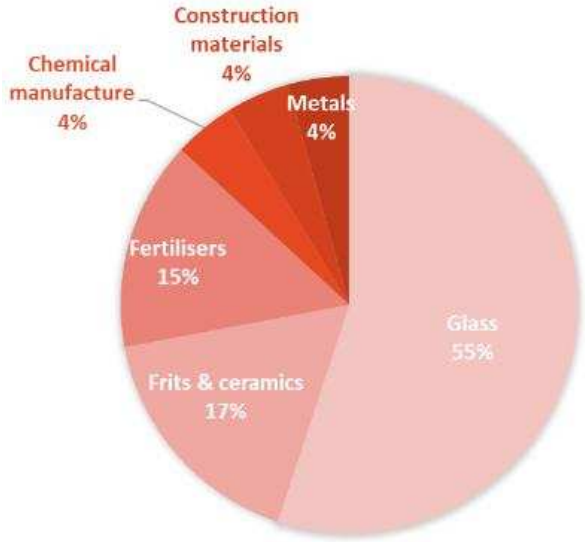
Boritanové minerály obsahují boritanovou aniontovou skupinu. Boritanové skupiny $BO_3$ mohou být polymerizovány podobně jako jednotky $SiO_4$ silikátových minerálů. Vznikají tak anionty $B_2O_5$, $B_3O_6$, $B_2O_4$ i složitější struktury, které obsahují hydroxidové nebo halogenové anionty, existuje i aniont $[B(O,OH)_4]$ (www.wikipedia.org).

Mnoho minerálů, jako je borax, colemanit a ulexit, jsou měkké, snadno rozpustné a vyskytují se v prostředí evaporitů. Některé, jako boracit, jsou však tvrdé a odolné vůči zvětrávání, podobají se spíše silikátům. Mají bělicí, pufrovací, dispergační a vitrifikační vlastnosti. Mezi hlavní minerály (z více než dvou stovek) patří bezvodé boráty boracit $Mg_3ClB_7O_{13}$ a sinhalit $MgAlBO_4$ a hydratované boritany borax $Na_2B_4O_5(OH)_4 \cdot 8H_2O$, kernit $Na_2B_4O_6(OH)_2 \cdot 3H_2O$, ulexit $NaCaB_5O_6(OH)_6 \cdot 5H_2O$ a colemanit $CaB_3O_4(OH)_3 \cdot H_2O$.

Obrázek 95. *Bílé krystaly colemanitu z Turecka. Zdroj sberatelmineralu.cz.*

## 19.2 Průmyslové aplikace a trh

Boritany jsou klíčovým vstupním materiálem při výrobě izolačních skleněných vláken, textilních skleněných vláken, borosilikátového skla, keramiky a hnojiv. Tyto aplikace představují více než tři čtvrtiny spotřeby boritanů. Boritany se rovněž používají v metalurgii a chemickém průmyslu. Další aplikace a použití zahrnují stavební materiály, brusiva, katalyzátory, nátěrové hmoty, detergenty a řídící tyče jaderných reaktorů. Vzhledem k povaze konečného použití není funkční recyklace boru/boritanů možná, protože produkty jsou spotřebovávány spolu s použitím (např. hnojiva, chemikálie a detergenty), nebo protože dochází pouze k nefunkční recyklaci. Například vytřídění borokřemičitého skla od nádoby bez boru a plochého skla není možné.




Obrázek 96. *Použití boritanů v Evropské unii v roce 2020 (SCRREEN, 2020)*

Keramický průmysl se v roce 2019 podílel na světové spotřebě boru odhadem 15 % (Eti Mine Works, 2020). Boritany hrály důležitou roli v keramických glazurách a smaltech, zvyšovaly chemickou a tepelnou odolnost a odolnost proti opotřebení. Borax a colemanit se v keramice používaly především jako tavidla, přičemž borax se používal při výpalech za vyšších teplot

a colemanit při výpalech za nižších teplot. Boritany se rovněž používaly v technické keramice, tedy ve výrobcích s využitím v letectví, balistice, elektronice a lékařství, které v posledním desetiletí zaznamenaly silný růst. Množství $B_2O_3$ použité v glazurách se pohybovalo mezi 8 % a 24 % a množství použité ve smaltech mezi 17 % a 32 %.

Karbid boru, třetí nejtvrdší známý materiál po kubickém nitridu boru a diamantu, je klíčovou složkou lehkých keramických neprůstřelných vest. Keramický průmysl používá karbid boru také jako brusný prášek k leštění a řezání keramiky (Precision Ceramics USA, nedatováno).

Použití boritanů v detergentech a mýdlech představuje odhadem 3 % světové spotřeby (Eti Mine Works, 2020, s. 60). Boritany se přidávají do pracích prostředků, mýdel a dalších čisticích prostředků, protože se používají jako alkalické pufry, stabilizátory enzymů, bělící činidla na bázi okyslíku a změkčovadla vody (U.S. Borax 2019a). Jako oxidační bělicí činidla se používá perboritan sodný a tetrahydrát perboritanu. Peroxid vodíku, velmi účinné bělicí činidlo, vzniká při hydrolýze perboritanu sodného při styku s vodou. Protože peroxid vodíku nelze účinně zabudovat do detergentů, perboritan sodný funguje jako jeho nosič. K hydrolýze perboritanu sodného je však zapotřebí horká voda, což vyžaduje více energie k zahájení reakce než jiné sloučeniny, a objevily se obavy z nadměrného obsahu boru ve vodních tocích v důsledku perboritanu sodného v pracích prostředcích. Jako náhrada byl peruhličitan sodný používán především v Evropě, protože produkuje peroxid vodíku při nižších teplotách a nezvyšuje obsah boru ve vodních tocích. Tato náhrada snížila spotřebu boru pro použití v detergentech.

Hlavním trhem pro boritany byl v roce 2019 sklářský průmysl, která představoval přibližně 48 % celosvětové spotřeby boritanů (Eti Mine Works, 2020, s. 59). Bor se používá jako přísada do skla ke snížení tepelné roztažnosti; ke zlepšení pevnosti, chemické odolnosti a trvanlivosti; k zajištění odolnosti proti vibracím, vysokým teplotám a tepelným šokům. Bor je také tavidlem snižujícím viskozitu skla při jeho tvorbě. V závislosti na aplikaci a kvalitě potřebného skla lze používat borax, kyselina boritá, colemanit, boritany sodné a (nebo) ulexit.

Konečným použitím skelných vláken jsou korozivzdorné, žáruvzdorné a vysokopevnostní tkaniny, tepelná izolace, výztuž a pohlcování zvuku. Začlenění boritanů do skleněných vláken výrazně zlepšuje kvalitu tím, že zvyšuje absorpci infračerveného záření (U.S. Borax, Inc., 2019b). Přibližně 90 % vyrobených textilních skelných vláken v roce 2019 bylo použito k výrobě elektronického skla (e-skla), které se původně používalo pro elektroniku, ale v poslední době i ke zpevnění termosetových a termoplastických polymerních kompozitních struktur.

Borosilikátové sklo je sklo s obsahem oxidu boritého mezi 5 a 30 %. Bor v borosilikátu propůjčuje sklu mnoho cenných vlastností, jako je zvýšená mechanická pevnost, nižší koeficient tepelné roztažnosti a větší odolnost proti chemickému působení a tepelným šokům.

V jaderné energetice se sloučeniny boru používají ke kontrole neutronů vznikajících při jaderném štěpení. Zejména izotop $^{10}B$ má vysokou schopnost pohlcovat volné neutrony. Řídicí tyče složené z karbidu boru se spouštějí do jaderného reaktoru, aby zachycováním neutronů řídily štěpnou reakci. Kyselina boritá se také používá v chladicí vodě obklopující jaderné reaktory k pohlcování unikajících neutronů (Ceradyne, Inc., 2011).

Nitrid boru se používá v mnoha kosmetických přípravcích díky svému nízkému koeficientu tření a nedostatku toxicity. Kyselina boritá má uplatnění v kosmetice, léčivech a toaletních potřebách.

Boritany se přidávají do brzdových kapalin, do paliv, maziv, kapalin pro obrábění kovů a chemických látek pro úpravu vody. Oxid boritý má uplatnění jako inhibitor koroze.

Ferroboron (FeB) je slitina železa s obsahem boru mezi 17,5 % a 24 % a byl nejlevnější borovou přísadou do oceli a dalších slitin železa. Ocelářský průmysl spotřeboval v průměru více než 50 % ročně vyrobeného ferroboronu (Eti Holding Inc., 2003, s. 8). Borová ocel, produkt vyrobený přidáním ferroboronu, byla pevnější a lehčí než průměrná vysokopevnostní ocel, což ji učinilo užitečnou při výrobě bezpečných a úsporných automobilů (Ray et al., 1966). Ferroboron se používal při výrobě neodymových magnetů – permanentních magnetů vzácných zemin, které se často používají v pohonech, ložiscích a spojkách, počítačových pohonech a servomotorech.

Boritany se přidávaly do různých materiálů, jako jsou celulózové izolace, textilie a dřevo, aby se jim dodaly nehořlavé vlastnosti. Kyselina boritá se přidávala do zpomalovačů hoření dřeva, aby se zabránilo přenosu hořlavin a snížilo se efektivní spalné teplo, což vedlo ke snížení šíření plamene. Boritan zinečnatý se používá v plastech jako multifunkční zpomalovač hoření.

## 19.3 Hlavní ložiska ve světě

Bor v současné době není ekonomicky získáván z turmalínu nikde na světě, přestože jsou pegmatity relativně běžnou horninou, která se nachází na všech kontinentech.

Ložiska boritanů jsou spojena s vulkanickou činností a suchým klimatem, přičemž největší ekonomická ložiska se nacházejí v Mohavské poušti ve Spojených státech, v alpinském pásu podél jižního okraje Eurasie a v Andách v Jižní Americe. Ložiska v USA tvoří především borax, kernit a boritany obsažené v solankách a v menší míře i ulexit a colemanit. Asi 70 % všech ložisek v Turecku tvoří colemanit, který se používá především při výrobě žáruvzdorného skla. Při současné úrovni spotřeby jsou světové zdroje v dohledné budoucnosti dostatečné.

Největším producentem boru je Turecko. Ročně se ho zde vyrobí přibližně 18 milionů tun díky vysoce kvalitním ložiskům. Kromě toho jsou zde dobře zavedené těžební a extrakční závody. Na ložiscích boru se těží také další minerály, jako jsou apatit, dolomit, a sylvín (chlorid draselný). Turecká společnost Borax & Chemical Company zásobuje přibližně 40 % světového trhu s kyselinou boritou. Byla založena Kemalem Atatürkem jako státní společnost v roce 1924, aby pomáhala dodávat chemikálie pro domácí použití.

Čína je dalším velkým producentem boru. Těží ho jednak na export, a hlavně pro domácí spotřebu. Patří sem výroba skleněného nádobí, porcelánových šálků nebo talířů pro potravinářský průmysl. Čína také vyrábí až dvě třetiny světové produkce kyseliny borité.

Hlavním výrobcem boru v Indii je společnost Indian Rare Earths Ltd., která byla založena v roce 1966 ve spolupráci s japonskou společností Nippon Steel & Sumikin Engineering Co. Má výrobní kapacitu pro minerály boru až 4 800 tun ročně (MTPA). Její provozovna se nachází v Kudremukh poblíž pohoří Western Ghats v Karnatace.

Role USA v těžbě boru roste. Největší světový producent čištěných solí boritanu sodného neboli „boraxu“ se nachází především v Kalifornii. K dalším producentům patří Kanada a Austrálie.

## 19.4 Výskyty v České republice

Česká republika nedisponuje zdroji boru. Koncem 20. století proběhlo několik průzkumných úkolů zaměřených na vyhledání boronosných surovin. O základním výzkumu datolitových

a turmalínových surovinách v Čechách podávají přehled závěrečné zprávy Bóronosné suroviny Českého masívu (Cílek a Rambousek 1986) a Boronosné suroviny (Woller et al. 1989). V průmyslových koncentracích byly ověřeny akumulace turmalínu na lokalitách Říčany-Říčanský les, Tehov a Pernštejn (Hranáč et al. 1994, Páša a Černý 1997).

## 19.5 Produkce a spotřeba

Velikost globálního trhu s borem byla v roce 2021 oceněna na 1,98 miliardy USD a předpokládá se, že do roku 2029 dosáhne 2,78 miliardy USD, přičemž během prognózovaného období poroste tempem 4,3 % (www.borates.today). Velikost trhu s hnojivy s obsahem boru činila v roce 2022 2,97 miliardy USD a předpokládá se, že do roku 2032 dosáhne přibližně 6,3 miliardy USD, přičemž během prognózovaného období 2023 až 2032 poroste tempem 7,81 % (www.borates.today). Očekává se, že pokračující investice do nových borových rafinerií a pokračující růst poptávky budou podporovat růst světové produkce v příštích několika letech.

Tabulka 48. *Produkce výrobků obsahujících bor v letech 2022 a 2023. Zdroj USGS, 2024.*

| | Production—All forms[e] | | Reserves[3] |
|---|---|---|---|
| | 2022 | 2023 | |
| United States | W | W | 48,000 |
| Argentina, crude ore | 130 | 130 | NA |
| Bolivia, ulexite | 170 | 170 | NA |
| Chile, ulexite | 360 | 360 | 35,000 |
| China, boric oxide equivalent | 200 | 200 | 20,000 |
| Germany, compounds | 60 | 60 | NA |
| Peru, crude borates | 200 | 200 | 4,000 |
| Russia, datolite ore | 80 | 80 | 40,000 |
| Turkey, refined borates | 2,200 | 2,200 | 950,000 |
| World total[4] | XX | XX | XX |

## 19.6 Genetické typy ložisek

### *Pegmatity a vysoce diferencované granity*

Turmalín se v mnoha pegmatitech objevuje jako poměrně hojný minerál a je také běžný v horninách v blízkosti kontaktů s pegmatitovými tělesy. Složení turmalínu odráží chemickou podstatu granitického systému, v němž se tvoří. Přestože bor v současné době není ekonomicky získáván z turmalínu nikde na světě, představují pegmatitová ložiska bohatá na turmalín do budoucna potenciálně zajímavý zdroj boru díky celosvětovému rozšíření pegmatitů bohatých na turmalín.

### *Ostatní ložiska*

Ačkoli se v přírodě vyskytuje více než 200 minerálů boru, pouze čtyři z nich představují 90 % boritanů používaných v průmyslu na celém světě: boritany sodné borax a kernit, boritan vápenatý colemanit a boritan sodno-vápenatý ulexit. Ložiska boritanů jsou spojena s vulkanickou činností a suchým klimatem a největší ložiska boritanů se nacházejí v Mohavské poušti ve Spojených státech, v alpském pásu podél jižního okraje Eurasie a v andském pásu v Jižní Americe. V důsledku toho bylo nejvíce boritanů vytěženo v Kalifornii a Turecku a v menší míře v Argentině, Bolívii, Chile, Číně a Peru. Sloučeniny a minerály boru se získávaly povrchovou, hlubinnou těžbou a ze solanek.

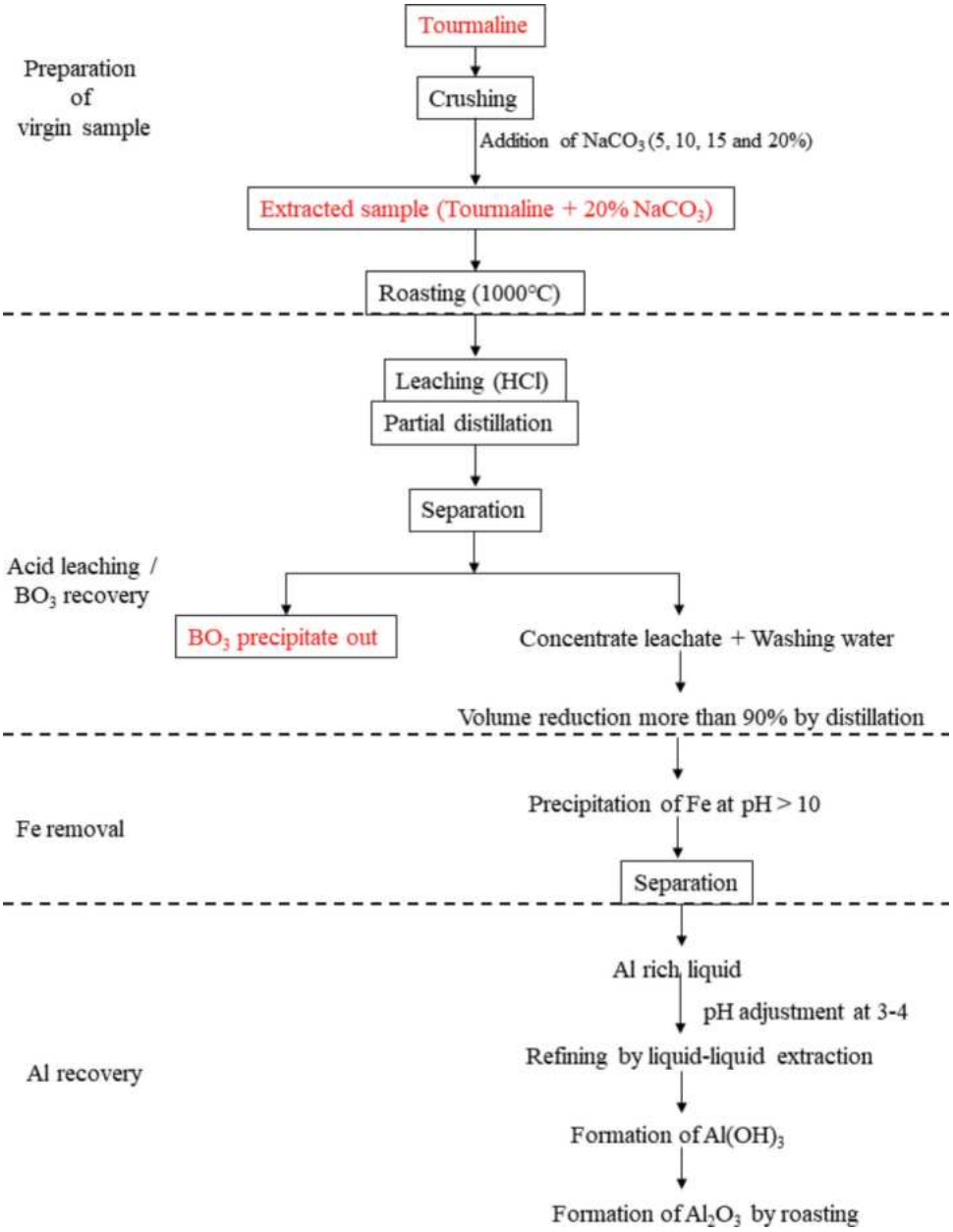
Bor je mobilizován v horninách zemské kůry vulkanismem nebo magmatismem. Následně roztoky jeho sloučenin vtékají do uzavřených pánví a koncentrují se v nich odparem a vytvářejí sloučeniny s Mg, Ca, Na, K, Li a klastickým materiálem sedimentární sekvence. V některých oblastech (např. Itálie) vyvěrá v horkých pramenech kyselina boritá (sassolin) $H_3BO_3$. Sedimentárně chemogenní akumulace sloučenin boru mohou podlehnout metamorfnímu přepracování. Nebo mohou vzniknout intruzemi magmatu do karbonátových hornin.

Obrázek 97. *Krystaly černého turmalínu v pegmatitu v USA. Zdroj www.geologybase.com.*

## 19.7 Metody těžby a úpravy

V průmyslovém měřítku se bor získává z minerálů, borax $Na_2B_4O_7$ a colemanitu $Ca_2B_6O_{11}$. Colemanit se nejprve převede na borax varem s roztokem uhličitanu sodného v potřebném poměru.

Experimentální extrakci boru z turmalínu popsali ve své práci Sneha a kol (2023). Za účelem extrakce boru ze vzorku turmalínu bylo přidáno 20 % síly uhličitanu sodného, aby se vytvořila sloučenina boru, která usnadní uvolnění prvku ze složité struktury turmalínu. Dále byl vzorek zahřát na 1 000 °C. Bylo zjištěno, že sodík z prášku $NaCO_3$ se spojí s borem a vytvoří boritan sodný. Oxid boru však lze extrahovat působením kyseliny chlorovodíkové na boritan sodný. Extrakce boru touto metodou je nákladově efektivní a může uspokojit potřebu prvků boru v různých průmyslových odvětvích.




Obrázek 98. *Schéma experimentální extrakce boru z turmalínu (Sneha et al. 2023).*

## 19.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Získávání boru z pegmatitů a příbuzných hornin není v současnosti aktuální a limitní ukazatele proto nelze stanovit.

Podmínky využitelnosti pro hodnocení zásob borité suroviny v rámci úkolu Turmalínové horniny (Hranáč et al. 1994) obsahovaly následující ukazatele:

- minimální množství zásob na ložisku ..... 5 tisíc tun
- minimální obsah $B_2O_5$ na ložisku ..... bilanční 4 %, nebilanční 3 %
- minimální obsah $B_2O_5$ v okrajovém vzorku ..... 1 %

## 19.9 Reference

Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W., Nichols, M. C. 1995. Handbook of Mineralogy. II. Silica, Silicates. Mineral Data Publishing, Tucson, Arizona.

Beurlen, H., de Moura, O. J. M., Soares, D. R., da Silva, M. R. R., Rhede, D. 2011. Geochemical and geological controls on the genesis of gem-quality "Paraíba Tourmaline" in granitic pegmatites from northeastern Brazil. Canadian Mineralogist 49, 277-300.

Cílek, V., Rambousek, P. 1986. Bóronosné suroviny Českého masívu. Část I - turmalín a turmalínovce. MS Ústřední ústav geologický, Praha. Archiv ČGS GF P052791.

Dutrow, B. L., Henry D. J. 2000. Complexy zoned fibrous tourmaline, Cruzeiro mine, Minas Gerais, Brazil: A record of evolving magmatic and hydrotermal fluids. Canadian Mineralogist 38, 131-143.

Ford, W. E., Dana, E. S. 1932. A Textbook of Mineralogy (4th ed.). J. Wiley & Sons, New York.

Hawthorne, F. C., Henry, D. J. 1999. Classification of the minerals of the tourmaline group. Eur. J. Mineral. 11, 201-215.

Henry, D. J., Novák, M., Hawthorne, F. C., Ertl, A., Dutrow, B., Uher, P., Pezzotta, F. 2011. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals. Amer. Mineralogist 96, 895–913.

Hranáč, P., Páša, J., Potužák, V., Tomášek, J. 1994. Turmalínové horniny. MS GMS Praha. Archiv ČGS GF P111266.

Páša, J., Černý, M. 1997. Turmalín pro sklářský průmysl. Silikátový zpravodaj 2/97,17-18.

Rustemeyer, P. 2003. Faszination Turmalin: Formen, Farben, Strukturen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Germany.

Slack, J. F. 1996. Tourmaline associations with hydrothermal ore deposits. In Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry (E.S. Grew & L.M. Anovitz, eds.). Rev. Mineral. 33, 559-644.

Sneha, D., Kavita, P., Dilip. P. 2023. Extraction of Boron from Tourmaline Ore: mechanism of Thermal Analysis of the Schorl, Pyrometallurgy – New Perspective.

Woller, F., Páša, J., Černý, M., Fürych, V., Švestka, J., Lienert, H., Navrátil, Z., Černý, L., Holub, M., Morkus, M. 1989. Boronosné suroviny, surovina: turmalín, etapa průzkumu: výzkumná, stav ke dni: 30. 6. 1989. MS Geoindustria. Archiv ČGS GF P075049.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 20 Fluorit a kryolit

## 20.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Fluor (chemická značka F, latinsky fluorum) je nekovový prvek, značně toxický, zelenožlutý plyn, chemicky mimořádně reaktivní. Vyznačuje se vysokou elektronegativitou. Je nejlehčím prvkem z řady halogenů. Elementární fluor poprvé připravil francouzský chemik Ferdinand Frederick Henri Moissan v roce 1886 elektrolýzou roztoku hydrofluoridu draselného $KHF_2$ v kapalném fluorovodíku při teplotě -50 °C. Za izolaci elementárního fluoru byl H. Moissan v roce 1906 oceněn Nobelovou cenou za chemii.

Fluor se v zemské kůře vyskytuje jako 13. nejrozšířenější prvek (na dvanáctém místě je mangan 1060 ppm a na čtrnáctém místě baryum 390 ppm). V zemské kůře je fluor přítomen v koncentraci 544 ppm (mg/kg). Voda oceánů obsahuje pouze přibližně 1 mg F/l, tento nízký obsah je způsoben tím, že většina fluoridů je ve vodě nerozpustná.

Fluor se na Zemi vyskytuje pouze ve sloučeninách. Nejvýznamnější minerály fluoru jsou fluorit $CaF_2$ (se 48,9 % F) a fluorapatit $Ca_5(PO_4)_3F$ (se 3,8% F). Dalším významným minerálem fluoru je kryolit $Na_3[AlF_6]$. Název pochází z řeckého κρύος (krýos) = led a λίθος (líthos) = kámen a odráží vzhled minerálu (wikipedia.org). Kryolit se těžil na jediném místě na světě, v Ivituutu v Grónsku mezi lety 1865-1987. Používá se hlavně při výrobě hliníku jako tavidlo, kdy snižuje bod tání $Al_2O_3$ z 200-2500 na 900-1000 °C (wikipedia.org). Používá se ale pouze uměle vytvořený kryolit, jelikož přírodní je vzácný.

Fluor se vyrábí elektrolýzou roztoku $KHF_2$ v HF. Kvůli extrémní reaktivitě a problémům s jeho skladováním se fluor spotřebovává ihned na místě výroby. Ze sloučenin fluoru se nejvíce využívá kyselina fluorovodíková jako základní průmyslová chemikálie, kryolit, který se používá na snížení teploty tání bauxitu při výrobě hliníku, a fluorid uranový, který slouží k rozdělení izotopů uranu pro použití v jaderných elektrárnách. Fluor se dále využívá na výrobu teflonu a syntetických organických polymerů. Fluor patří také k biogenním prvkům; vyskytuje se v kostech a zubech

## 20.2 Průmyslové aplikace a trh

Z hlediska užití a kvalitativních požadavků rozeznáváme tři základní druhy fluoritu:

a) metalurgický (min. 85 % $CaF_2$, max. 15 % $SiO_2$),

b) chemický pro výrobu kyseliny fluorovodíkové (min. 97 % $CaF_2$, do 1,5 % $SiO_2$, 0,1–0,3 % S),

c) keramický ve výrobě skla, emailů apod. (80–96 % $CaF_2$, do 3 % $SiO_2$).

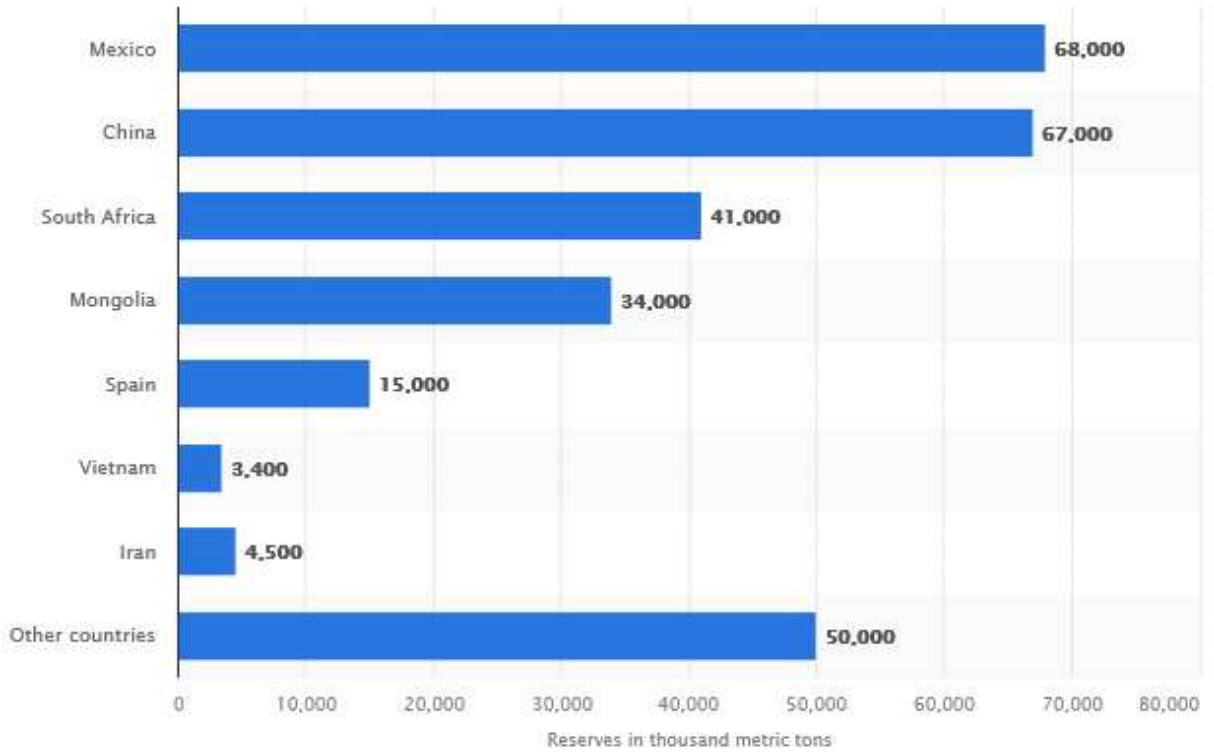
Více než polovinu vytěženého fluoritu spotřebuje chemický průmysl pro výrobu F, HF, NaF a kryolitu. Velkou spotřebu má i metalurgie hliníku a oceli (cca 1/3 produkce) jako tavidla snižující teplotu tavení. Jeho další použití je např. při výrobě cementu, ve sklářství (sklo s příměsí 10–30 % $CaF_2$ je neprůhledné, bílé a opaleskující), při výrobě smaltů a emailů. Zvláštní postavení mají polyfluorpolyhalogenalkany s obsahem bromu, které se používají k výrobě speciálních hasicích prostředků a anestetik.

Značný význam mají sloučeniny odvozené od alifatických uhlovodíků náhradou vodíku za fluor - freony. Fluorované polymery slouží k výrobě hydrofobizačních prostředků pro stavebnictví

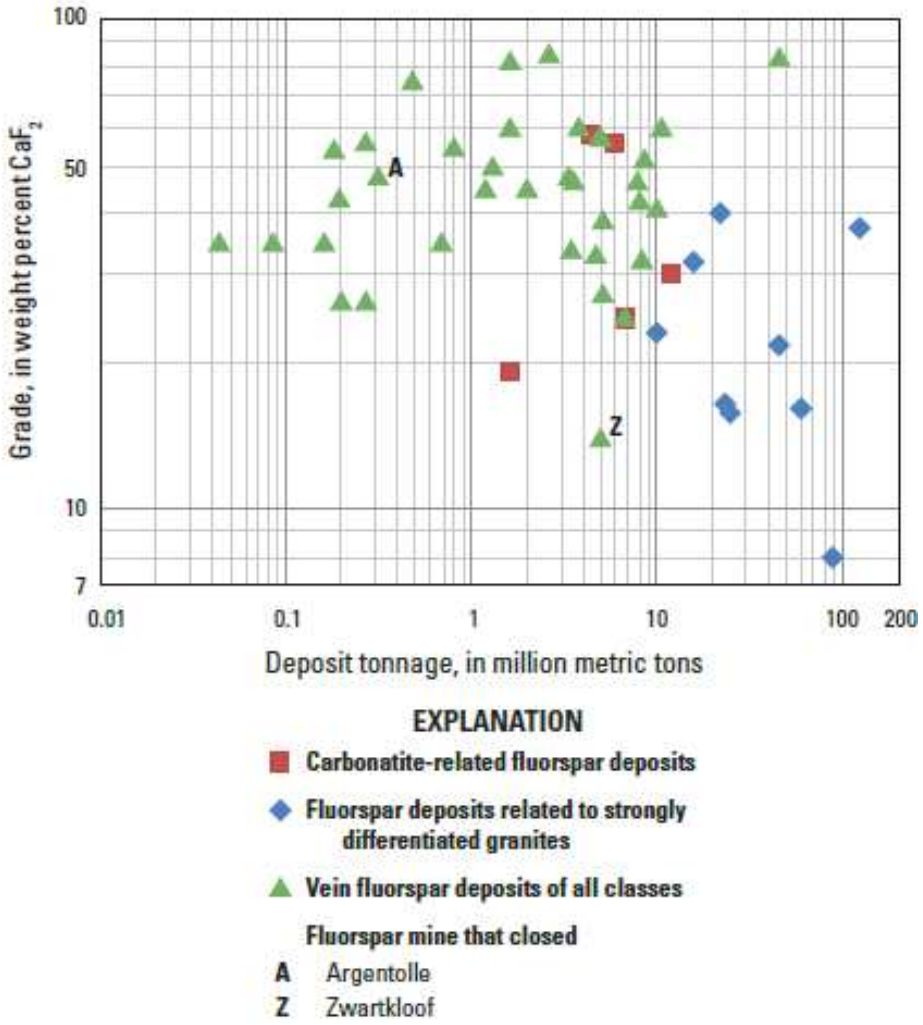
a textilní průmysl. Fluorid sodný NaF a fluorid cínatý $SnF_2$ se přidávají jako desinfekce do zubních past a slouží k ochraně dřeva před hnilobou. Fluorid zirkoničitý $ZrF_4$, niobičný $NbF_5$ a železitý $FeF_3$ se používají jako katalyzátory rozkladu hydridů hořčíku, které slouží jako zdroje vodíku. Fluorid sírový $SF_6$ se využívá k přípravě inertní atmosféry při odlévání hořčíkových slitin, ve směsi s dusíkem nebo argonem slouží k odstraňování vodíku a nežádoucích prvků, které způsobují poréznost hliníku a mědi. Hexafluorid síry se také používá jako zvukově izolační plyn do dvojitých skel oken. Hydrofluorid amonný $NH_4HF_2$ se používá jako dezinfekční činidlo v lihovarnictví a k leptání skla. Fluorid boritý $BF_3$ se používá jako katalyzátor iontových polymerací alkenů, fluoridy stříbrnatý $AgF_2$, kobaltitý $CoF_3$, niklitý $NiF_3$, chloritý $ClF_3$, bromitý $BrF_3$, fosforečný $PF_5$ a siřičitý $SF_4$ jsou důležitá fluoračních činidla. Fluorid dusitý $NF_3$ a methylfluorid $CH_3F$ se používají jako selektivní leptací činidla při výrobě polovodičů. Krátkodobý pozitronový radionuklid 18F (T1/2 = 110 min.) se požívá v emisní tomografii.

## 20.3 Hlavní ložiska ve světě

Významným zdrojem fluoritu jsou hlavně žilná ložiska v Číně v provincii Če-ťiang podél jihovýchodního pobřeží (Chen et al. 1996). V Mexiku jsou významná hlavně ložisko Las Cuevas, které je největším ložiskem fluoritu na světě (Gonzáles-Partida et al. 2019) a ložisko Coahuila.




Obrázek 99. *Globální zásoby fluoritu v kt dle statista.com.*




Obrázek 100. *Rozdělení fluoritových ložisek podle jakosti a tonáže (Hayes et al., 2017). Ložiska fluoritu jsou rozdělena na ta související se silně diferencovanými granity, související s karbonatity a pro žíly ze všech tříd ložisek fluoritu. Na grafu jsou vyznačeny dva fluoritové doly, které zkrachovaly buď kvůli nedostatečnému obsahu (Zwartkloof; Z), nebo nedostatečné tonáži (Argentolle; A).*

Obrázek 101. *Světová ložiska fluoritu podle jejich typů (Hayes et al. 2017).*

## 20.4 Ložiska fluoritu v České republice

Česká republika disponuje pouze menšími ložisky a zdroji fluoritu. Kvalita suroviny se pohybuje na jednotlivých ložiscích v průměru mezi 45 a 57 % obsahu fluoritu ($CaF_2$) jako užitkové složky. Veškerá ložiska fluoritu v ČR jsou hydrotermálního původu, žilného, žilníkového a ojediněle i impregnačního nebo metasomatického typu. Většinou jsou situována v okrajových oblastech Českého masivu, kde jsou vázána na hlubinné zlomové linie krušnohorského (JZ–SV) a labsko-lužického směru (SZ–JV). Nejvýznamnější ložiska i zdroje v Krušných horách jsou Kovářská. Moldava a Krásný Les. V lužické oblasti české křídové pánve pak Jílové u Děčína-Sněžník. Jedna lokalita se nachází i v Železných horách – Běstvina. Menší zdroje a výskyty jsou i na jiných místech Českého masivu, např. v Krkonoších (Harrachov), Ještědském pohoří (Křižany), Slavkovském lese (Novina). Jedinou výjimkou mezi primárními hydrotermálními ložisky je sekundární antropogenní ložisko Proboštov-odkaliště Přítkov, tvořené flotačními písky po úpravě fluoritových rud a koncentrátů v Sobědruhách.

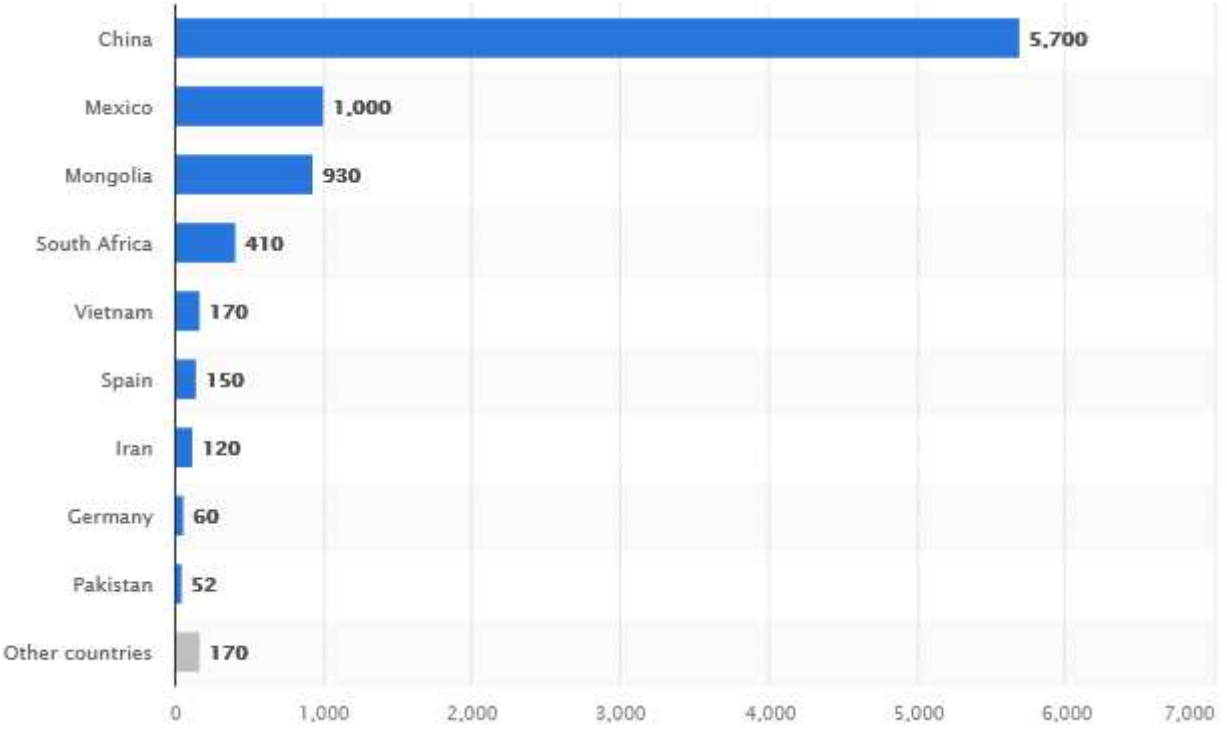
Akumulace fluoritu se nejčastěji vyskytují spolu s podstatným podílem barytu (např. evidovaná ložiska Běstvina, Kovářská a vytěžená ložiska a zdroje Krásná Lípa, Hradiště u Kadaně, Harrachov, Křižany u Liberce. Menší část fluoritových akumulací baryt neobsahuje prakticky vůbec (např. evidované ložisko Jílové u Děčína a vytěžená ložiska a zdroje Blahuňov u Chomutova, Kožlí u Ledče aj.) nebo v podřadném množství (např. evidované ložisko Moldava, vytěžené ložisko Vrchoslav).

Tabulka 49. *Počet ložisek, zásoby a těžba v uplynulých pěti letech (Starý et al., 2023).*

| Rok | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|
| Počet ložisek celkem [a)] | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| z toho těžených | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Zásoby celkem, kt | 2 210 | 2 210 | 2 210 | 2 726 | 2 726 |
| bilanční prozkoumané | 0 | 0 | 0 | 678 | 678 |
| bilanční vyhledané | 32 | 32 | 32 | 459 | 459 |
| nebilanční | 2 178 | 2 178 | 2 178 | 1 589 | 1 589 |
| Těžba, kt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

## 20.5 Produkce a spotřeba

Více než polovinu vytěženého fluoritu spotřebuje chemický průmysl pro výrobu F, HF, NaF a kryolitu. Velkou spotřebu má i metalurgie hliníku a oceli (cca 1/3 produkce) jako tavidla snižující teplotu tavení. Jeho další použití je např. při výrobě cementu, ve sklářství (sklo s příměsí 10–30 % $CaF_2$ je neprůhledné, bílé a opaleskující), při výrobě smaltů a emailů. Zvláštní postavení mají polyfluorpolyhalogenalkany s obsahem bromu, které se používají k výrobě speciálních hasicích prostředků a anestetik. Největším producentem fluoritu je Čína (68,7 %) následovaná Mexikem (11,7 %).




Obrázek 102. *Hlavní producenti fluoritu v roce 2023 (dle statista.com).*

Tabulka 50. *Ceny obchodovaných fluoritových komodit (USD/t) podle IM (Starý et al., 2023).*

| Komodita/rok | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|---|---|---|---|---|
| Průměrná cena dovoz do USA, CIF – filtrovaný (MCS), USD/t | 276 | 304 | 309 | 322 | 360 |
| Průměrná cena dovoz do USA, CIF – metalurgický (MCS), USD/t | 258 | 292 | 149 | 151 | 140 |
| Roční průměrná cena dovozu do ČR (ČSÚ) z Německa, obě kvality celkem, Kč/t | 6 181 | 6 521 | 9 916 | 10 438 | 9 667 |
| Roční průměrná cena dovozu do ČR (ČSÚ) z Německa, obě kvality celkem, EUR/t | 254 | 386 | 397 | 377 | 429 |

## 20.6 Genetické typy ložisek

Dle základního rozdělení, které používá například Starý et al. (2023), lze fluoritová ložiska dělit do tří základních skupin:

- Žilná hydrotermální různého původu: La Cuevas (Mexiko), Vergenieg, Buffalo (Jihoafrická republika), oblast Illinois-Kentucky (USA), Shizhuynan, Shuangijangkou (Čína)

- Metasomatická: Amba Dongar (Indie), Kerio Valley (Keňa), Rio Verde, Potosi (Mexiko)
- Sedimentární fosfáty: Baja California (Mexiko), Bone Valley (USA), Oulad Abdoun (Maroko)

Další dělení (viz níže) je závislé na typu horninového prostředí, ve kterém se fluoritová ložiska zformovala.

## Pegmatity a silně diferenciované granity

Ložiska fluoritu mohou být vázaná na širokou škálu diferencovaných granitů. Obecně platí, že čím větší je diferenciace, tím častější je výskyt přidružených ložisek fluoritu (Hayes et al. 2017). Ložiska zahrnují na fluorit bohaté cínovcové a wolframové skarny, na fluorit bohaté žíly s cínem a (nebo) wolframem, některé s antimonem, a na fluorit bohatá greisenová ložiska a v menším počtu vtroušená ložiska fluoritu. Greiseny jsou horniny složené převážně z muskovitu (nebo bílé slídy bohaté na lithium) a křemene s menším výskytem jednoho nebo více z následujících nerostů: bertrandit, beryl, kasiterit, kolumbit-tantalit, fluorit, fenakit, topaz, turmalín a wolframit. Přikladem takového ložiska je Vergenoeg v Jihoafrické republice, jehož zdrojové granitové horniny jsou součásti komplexu Bushveld.

V současnosti se fluorit z pegmatitů netěží, a přestože je fluorit často přítomen na greisenových ložiscích, tak ani z těch se nezískává.

## Ostatní ložiska

### *Ložiska vázaná na karbonatity*

V karbonatitových ložiscích je běžné, že karbonát (obvykle kalcit), který tvoří karbonatit, je částečně nahrazen nebo prostoupen žilným fluoritem Okolní horniny v kontaktu s karbonatitem mohou být fenitizovány a rovněž mineralizovány fluoritem. Ložiska fluoritu v karbonatitech mohou obsahovat také REE minerály. Na ložisku Fission (Richardson) v Ontariu v Kanadě a na ložisku Speewah v Kimberley v Západní Austrálii v Austrálii, kde fluorit tvoří masivní žíly, se nacházejí minerály jako bastnäsit, parisit (romboedrický $Ca(Ce,Nd,La)_2(CO_3)_2$) nebo pyrochlor (kubický $(Na,Ca)_2Nb_2O_6(OH,F)$). Dva příklady dobře prozkoumaných ložisek fluoritu asociovaných s karbonatity jsou ložisko Okorusu nacházející se v oblasti Otjozondjupa v Namibii (Kogut et al. 1997) a ložisko Amba Dongar nacházející se ve státě Gudžarát v Indii (Gwalani et al. 1993; Palmer a Williams-Jones 1996; Doroshkevich et al. 2009).

### *Ložiska fluoritu vázaná na alkalické intruze*

Ložiska fluoritu související s alkalickou intruzí jsou ložiska fluoritu, která jsou v těsném prostorovém spojení s granity, které obsahují egirín a (nebo) riebekit, nebo jsou ve spojení se syenity (Lykhin et al. 2010). Pro tato ložiska je běžné, že obsahují buď bertrandit, nebo fenakit a na některých místech i minerály lithia, například svělou slídu bohatou na lithium (Lykhin et al. 2010; Obolenskiy et al. 2010). Některé obsahují také ekonomické koncentrace niobu, REE, tantalu a zirkonia (Kovalenko a Jarmoljuk 1995). Fenakit je kosočtverečný $Be_2SiO_4$ a bertrandit je orthorombický $Be_4Si_2O_7(OH)_2$, takže tato ložiska jsou běžně také

ložisky beryllia. Další ložiska související s alkalickou intruzí se nacházejí v kanadském Newfoundlandu, kde velké fluoritové žíly protínají peralkalickou žulu (Van Alstine 1944).

***Fluoritová ložiska typu Mississippi Valley***

Ložiska olova a zinku (-fluoritu-barytu) typu Mississippi Valley (MVT) patří k nejlépe poznaným hydrotermálním rudním ložiskům. Tato ložiska vznikla v karbonátových zvodnělých horninách, kde docházelo k mezivrstevnímu míšení dvou solanek: (a) solanka bohatá na kovy a (nebo) fluor, která unikala směrem vzhůru z omezené spodní zvodnělé vrstvy, a (b) druhá solanka, pravděpodobně bohatší na sulfidy (Wenz et al. 2012), která migrovala laterálně (Plumlee et al. 1994, 1995; Bouch et al. 2006; Ingebritsen a Appold 2012; Wenz et al. 2012). Obě solanky měly pravděpodobně původ v hlubokých bazických podzemních vodách. Významná ložiska jsou/byla například v jihovýchodním Missouri, v revíru Tri-State (Missouri-Kansas-Oklahoma) a v revíru Pine Point v Severozápadních teritoriích v Kanadě (Palmer a Hayes 1989).

***Epitermální ložiska fluoritu***

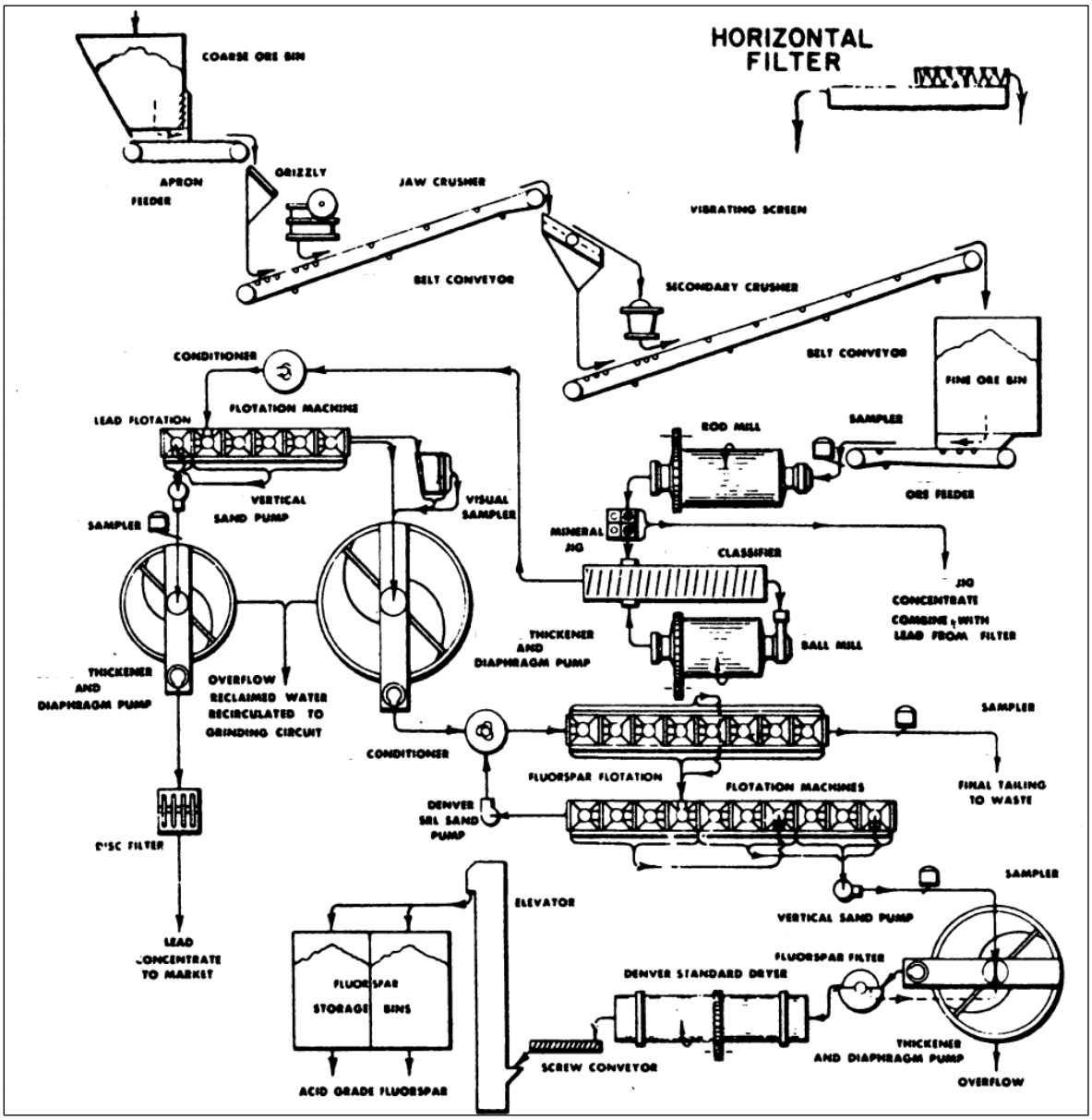
Mnoho ložisek fluoritu se po celém světě vyskytuje ve spojení se subalkalickými vulkanickými horninami. Subalkalické vulkanické horniny na rozdíl od alkalických a peralkalických vulkanických hornin nemají přebytek draslíku a sodíku potřebným pro vznik živců.

Ložiska fluoritu spojená se subalkalickými vulkanickými horninami jsou nejhojnější v Číně í a mnohá se nacházejí v provincii Če-ťiang podél jihovýchodního pobřeží kraje. Chen et al. (1996) popisují geologii ložisek fluoritu v provincii Zhejiang. Většina ložisek je popsána jako jednoduché velké žíly, které nemají těsnou prostorovou vazbu a zjevnou genetickou souvislost s plutonickými nebo mělce intruzivními vyvřelými horninami. Některé žíly v revíru Yangjia-Wuyi jsou souvislé v délce více než 15 km a jejich mocnost dosahuje 2,3 až 5,8 m.

## 20.7 Metody těžby a úpravy

Chemický fluorit, který je velmi žádaný v chemickém a hliníkárenském průmyslu, musí obsahovat nejméně 97,5 % $CaF_2$ s nejvýše 1,5 % $SiO_2$ a 0,5 % $Fe_2O_3$ (metallurgist.com). Často je obsah oxidu křemičitého omezen na 1,2 %, přičemž sankce začínají na 1,0 % $SiO_2$. Tato omezení na jakost a nečistoty vyžadují mimořádně přísnou kontrolu mlýnu a flotace, kde je zásadní selektivita a vysoká výtěžnost.

Ruda je prvně podrcena a následně dále zpracovávána. Více než 95 % veškerého fluoritu se zpracovává flotací, častokrát vícenásobnou. To je nezbytné pro vysokou selektivitu a dokonalé oddělení hlušiny od koncentrátu. Fluoritové rudy mohou být poměrně složité, zejména pokud jsou spojeny se sulfidy olova a zinku, barytem, kalcitem, oxidem železa a křemičitými nečistotami. Z tohoto důvodu by měl být prvním krokem při stanovení technologického postupu laboratorní flotační test.




Obrázek 103. *Postup úpravy fluoritové rudy. Zdroj: metallurgist.com.*

Průmyslová výroba fluoru se provádí elektrolýzou taveniny hydrofluoridu draselného $KHF_2$ nebo dihydrofluoridu draselného $KH_2F_3$. Elektrolýza probíhá při teplotě 250-300 °C v elektrolyzérech vyrobených ze slitin niklu. Surový fluor se rafinuje vymrazováním nebo absorpcí. Laboratorní příprava fluoru je možná termickým rozkladem některých fluoridů:

$2CoF_3 \rightarrow F_2 + 2CoF_2IF_7 \rightarrow F_2 + IF_5$

Přímé využití nachází fluor jako okysličovadlo v raketových motorech a jako fluorační činidlo ve velké řadě organických reakcí.

## 20.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Získávání fluorové suroviny z pegmatitů a příbuzných hornin není v současnosti aktuální a limitní ukazatele proto nelze stanovit.

## 20.9 Reference

Doroshkevich, A. G., Viladkar, S. G., Ripp, G. S., Burtseva, M. V. 2009. Hydrothermal REE mineralization in the Amba Dongar carbonatite complex, Gujarat, India. Canadian Mineralogist 47, 5, p. 1105–1116.

González-Partida, E.; Camprubí, A.; Carrillo-Chávez, A.; Díaz-Carreño, E. H.; González-Ruiz, L. E.; Farfán-Panamá, J. L.; Cienfuegos-Alvarado, E.; Morales-Puente, P.; Vázquez-Ramírez, J. T. 2019. Giant fluorite mineralization in Central Mexico by means of exceptionally low salinity fluids: an unusual style among MVT deposits. Minerals 9, 35.

Gwalani, L. G., Rogers, K. A., Demény, A., Groves, D. I., Ramsay, R., Beard, A., Downes, P. J., Eves, A. 2010. The Yungul carbonatite dykes associated with the epithermal fluorite deposit at Speewah, Kimberley, Australia - Carbon and oxygen isotope constraints on their origin: Mineralogy and Petrology 98, 1–4, 123–141.

Hayes, T. S., Miller, M. M., Orris, G. J., Piatak, N. M. 2017. Fluorine, chap. G of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr.,Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States - Economic and environmentalgeology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, G1– G80.

Chen Xianpei, Gao Jiyuan, Cao Junchen, 1996. Barite and fluorite deposits of China, *in* Editorial Committee of the Mineral Deposits of China, eds. [Responsible ed. Liu Nailong], Mineral deposits of China 5: Beijing, China, Geological Publishing House, 52–117.

Ingebritsen, S. E., Appold, M. S. 2012. The physical hydrogeology of ore deposits: Economic Geology 107, 559–584.

Kogut, A. I., Hagni, R. D., Schneider, G. I. C. 1997. The Okorusu, Namibia, carbonatite-related fluorite deposits, and a comparison with the Illinois-Kentucky fluorite district/Hicks Dome, *in* Sangster, D.F., ed. Carbonate-hosted lead-zinc deposits [Society of Economic Geologists] 75th anniversary volume: Littleton, Colo., Society of Economic Geologists Special Publication 4, 290–297.

Kovalenko, V. I., Kuz'min, M. I., Antipin, V. S., Petrov, L. L. 1971. Topaz-bearing quartz keratophyre (ongonite), a new variety of subvolcanic igneous vein rock. Doklady Akad. Nauk SSSR, Earth Science Sections 199, 1–6, 132–134.

Lykhin, D. A., Kovalenko, V. I., Yarmolyuk, V. V., Kotov, A. B., Kovach, V. P. 2010. The Yermakovsky deposit, western Transbaikal region, Russia - Isotopic and geochemical parameters and sources of beryllium-bearing granitoids and other rocks: Geology of Ore Deposits 52, 4, 289–301.

Obolenskiy, A. A., Rodionov, S. M. et al. 2010. Mineral deposit models for northeast Asia, chap. 3 *of* Nokleberg, W.J., ed., Metallogenesis and tectonics of northeast Asia: U.S. Geological Survey Professional Paper 1765, 3-1–3-75.

Palmer, J. R., Hayes, T. S. 1989. Late Cambrian lithofacies and their control on the Mississippi Valley-type mineralizing system in the Ozark Region (extended abs.), *in* Schindler, K.S., ed., U.S. Geological Survey research on mineral resources, 1989, Fifth Annual V.E. McKelvey Forum on Mineral and Energy Resources. U.S. GeologicalSurvey Circular 1035, 51–54.

Palmer, D. A. S., Williams-Jones, A. E. 1996. Genesis of the carbonatite-hosted fluorite deposit at Amba Dongar, India - Evidence from fluid inclusions, stable isotopes, and whole rock-mineral geochemistry. Economic Geology 91, 934–950.

Plumlee, G. S., Goldhaber, M. B., Rowan, E. L. 1995. The potential role of magmatic gases in the genesis of Illinois-Kentucky fluorspar deposits; implications from chemical reaction path modeling. Economic Geology, 90, 999–1011.

Plumlee, G. S., Leach, D. L., Hofstra, A. H., Landis, G. P., Rowan, E. L., Viets, J. G. 1994. Chemical reaction path modeling of ore deposition in Mississippi Valley-type Pb-Zn deposits of the Ozark Region, U.S. Midcontinent: Economic Geology 89, 1361–1383.

Starý J., Sitenský I., Mašek D., Gabriel Z., Němec M., Hodková T., Vaněček M., Novák J., Kavina P. (2023): Surovinové zdroje České republiky – Nerostné suroviny 2021 (Statistické údaje do roku 2022). – 484 s. MŽP, ČGS.

Van Alstine, R. E. 1944. The fluorspar deposits of St. Lawrence, Newfoundland. Economic Geology 39, 109–132.

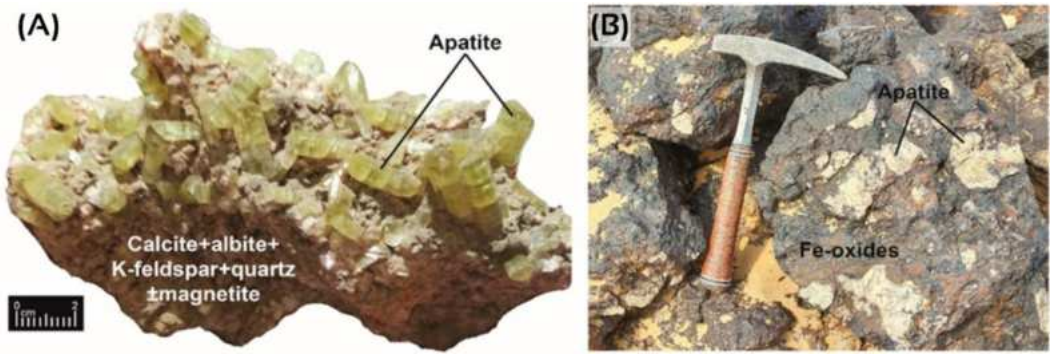
Wenz, Z. J., Appold, M. S., Shelton, K. L., Tesfaye, S. 2012. Geochemistry of Mississippi Valley-type mineralizing fluids of the Ozark Plateau - A regional synthesis: American Journal of Science 312, 1, 22–80.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

# 21 Fosfáty v magmatických horninách

## 21.1 Charakteristika, výskyt v zemské kůře

Fosfor (chemická značka P, latinsky *phosphorus*) je nekovový prvek, který má důležitou roli ve stavbě živých organismů. Poměrně hojně se vyskytuje v anorganických sloučeninách (skupina apatitu/fosfáty) v zemské kůře. Dále se vyskytuje v podobě fosforitů – usazených hornin biogenního původu. Fosfor poprvé izoloval H. Brandt (1669) rozkladem, zahuštěním a vysokoteplotní destilací moči jako voskovitou látku, jejíž páry na vzduchu ve tmě světélkují. Tato vlastnost dala prvku jeho název (phos = světlo, phoros = nesoucí). Fosfor je v zemské kůře 11. nejrozšířenějším prvkem. Pro rostliny i živočichy důležitým biogenním prvkem. Koloběh fosforu v přírodě je ovlivněn tím, že neexistují žádné jeho těkavé sloučeniny, které by cirkulovaly prostřednictvím atmosféry. Přírodní zdroje fosforu jsou převážně v minerálu apatitu $Ca_5(F,OH,Cl)(PO_4)_3$ (cca 40 % $P_2O_5$) a mohou být členěny na sedimentární a magmatogenní. Pro výrobu průmyslových hnojiv mají největší význam sedimentární ložiska.




Obrázek 104. *Fotografie marockých apatitových rud (Radouan et al., 2021).*

## 21.2 Průmyslové aplikace a trh

V celosvětovém měřítku je fosfátová ruda získávána převážně ze sedimentárních hornin (~90 %; Pufahl a Groat 2017) a používá se pro výrobu průmyslových hnojiv (~85 %; Spears et al. 2022). Ne ze všech sedimentárních hornin bohatých na fosfáty však lze i po úpravě získat kvalitní fosfátový koncentrát (tj. fosfátový koncentrát s vysokým obsahem $P_2O_5$).

Fosfátová ruda pro výrobu lithium-železo-fosfátové (LFP; $LiFePO_4$) baterie vyžaduje čistou kyselinu fosforečnou s nízkou koncentrací stopových prvků (BM Review 2022; Banerjee 2023). Výroba čisté kyseliny fosforečné s nízkými koncentracemi stopových prvků proto vyžaduje dodávky vysoce kvalitního fosfátového koncentrátu s vysokým obsahem $P_2O_5$ a nízkými koncentracemi stopových prvků.

Z magmatických rud lze po obohacení obecně získat fosfátový koncentrát s vyšším obsahem $P_2O_5$ než ze sedimentárních, ačkoli průměrný obsah $P_2O_5$ v magmatické rudě je nižší než v sedimentární fosfátové rudě. Například celkový průměrný obsah $P_2O_5$ ve magmatické fosfátové rudě je 8,1 % hmot. a v sedimentární fosfátové rudě 21,3 % hmot. (tabulka níže).

Průměrné obsahy $P_2O_5$ v obchodovatelných fosfátových koncentrátech (tj. fosfátových rudách po úpravě) vyrobených z magmatických rud jsou však výrazně vyšší než obsahy

vyrobené ze sedimentárních rud. Například celosvětový průměrný obsah $P_2O_5$ v obchodovatelných fosfátových koncentrátech vyrobených z magmatických a sedimentárních fosfátových rud je 36,9 a 29,6 % hmot.

Tabulka 51. *Porovnání obsahů $P_2O_5$ v sedimentárních a magmatických fosforových rudách před a po zpracování (Banerjee et al. 2024).*

| | Average $P_2O_5$ (wt.%) | | References |
|---|---|---|---|
| *Igneous ore* | Ore-grade | Concentrate (after beneficiation) | |
| Russia | 10.1 | 38.7 | Steiner et al., 2015 |
| Finland | 4.0 | 36.0 | Geissler et al., 2018; O'Brien et al., 2015 |
| S. Africa | 7.0 | 37.3 | Steiner et al., 2015 |
| Brazil | 11.1 | 35.4 | Steiner et al., 2015 |
| *Global average* | *8.1* | *36.9* | |
| *Sedimentary ore* | | | |
| Morocco | 26.4 | 31.5 | Steiner et al., 2015 |
| US | 11.8 | 29.2 | Steiner et al., 2015 |
| Jordan | 25.5 | 29.7 | Steiner et al., 2015 |
| China | 21.6 | 28.1 | Steiner et al., 2015 |
| *Global average* | *21.3* | *29.6* | |
| *Bégin-Lamarche area, Canada* | 3.0-20.0 ($P_2O_5$ range) | 40.9* | |

* Prepared and analyzed by SGS-Canada.

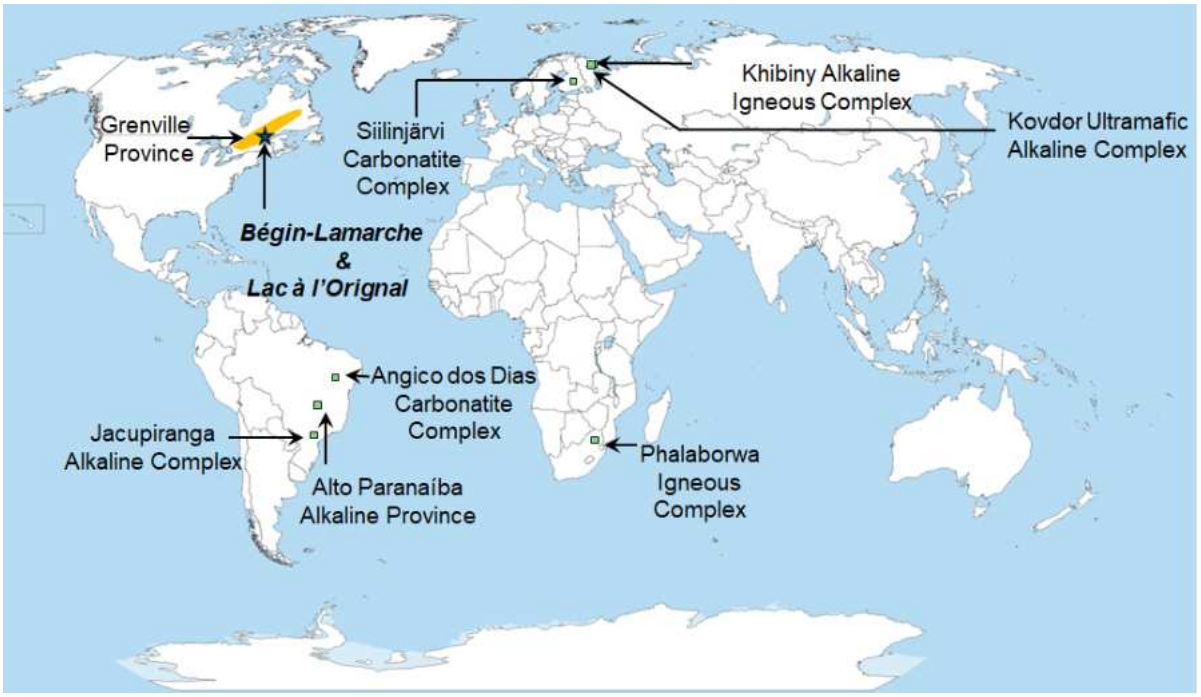
## 21.3 Hlavní ložiska ve světě

Fosfátová ruda (z magmatických hornin) s vysokým obsahem $P_2O_5$ - 6,8-17,2 hm.% pochází z Ruska. Hostitelskou horninou rudy s nejvyššími obsahy $P_2O_5$ je apatit-nefelinický syenit z alkalického magmatického komplexu Chibiny v Rusku. PhosAgro (ložiska Kukisvumchorr, Yukspor, Apatitovy Cirque, Rasvumchorr Plateau, Koashva a Njorkpahk) a Acron (ložisko Oleniy Ruchey) jsou dvě hlavní společnosti provozující doly v Chibinském alkalickém komplexu. Společnost Eurochem těží rudu z Kovdorského ultramafického alkalického komplexu (Kovdorský foskorit-karbonatitový komplex) v Rusku. Hostitelskou horninou fosfátové rudy kovdorského ultramafického alkalického komplexu je foskorit-karbonatit. Průměrný obsah $P_2O_5$ ve fosfátové rudě ultramafického alkalického komplexu Kovdor (6,8 % hmot.) je nižší než ve fosfátové rudě z alkalického magmatického komplexu Chibiny (10,7-17,2 % hmot.).

Ve Finsku je v provozu pouze jedno ložisko magmatických fosfátů, vyvinuté v karbonatitovém komplexu Siilinjärvi, které provozuje společnost Yara. Hostitelskou horninou ložiska je glimmerit-karbonatit a průměrná hodnota $P_2O_5$ v rudě je 4,0 % hmot.

Ložisko Phalaborwa v magmatickém komplexu Phalaborwa (Palabora) je hlavním magmatickým ložsek fosfátů v Jihoafrické republice. Hlavními hostitelskými horninami rudy jsou pyroxenity, karbonatity a foskority a ruda obsahuje průměrně 7,0 % hmot. $P_2O_5$ (Banerjee et al. 2024).

Sedm ložisek magmatických fosfátových rud je v Brazílii. Hlavními hostitelskými horninami fosfátových rud na těchto sedmi ložiscích jsou karbonatity a průměrný obsah $P_2O_5$ v rudě se pohybuje mezi 5,1 a 12,2 % hmot (Banerjee et al. 2024).




Obrázek 105. *Hlavní magmatické komplexy s ložisky apatitových rud (Banerjee et al., 2024).*

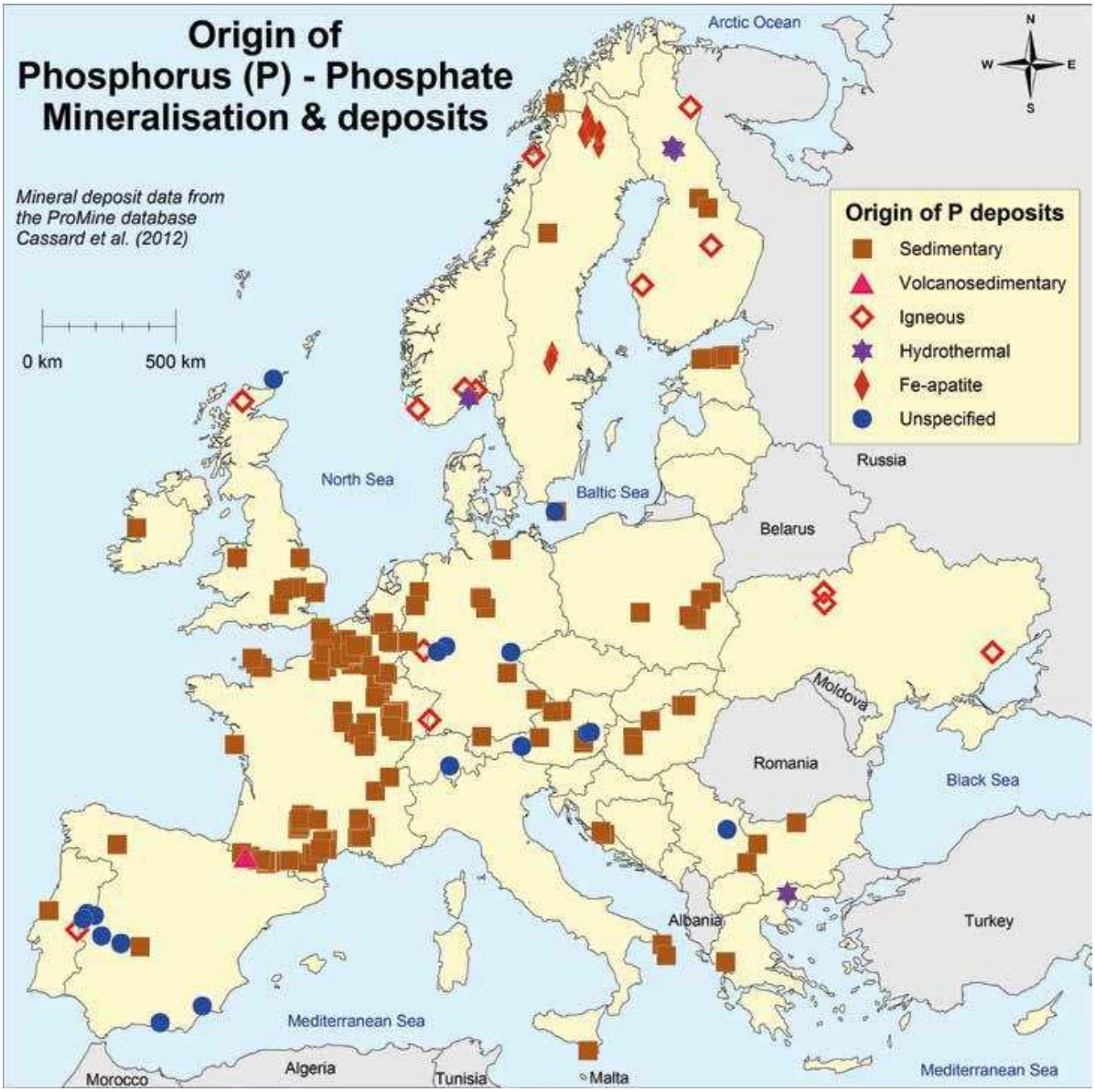
## 21.4 Výskyty v Českérepublice

Česká republika nedisponuje zdroji ani ložisky fosfátů.

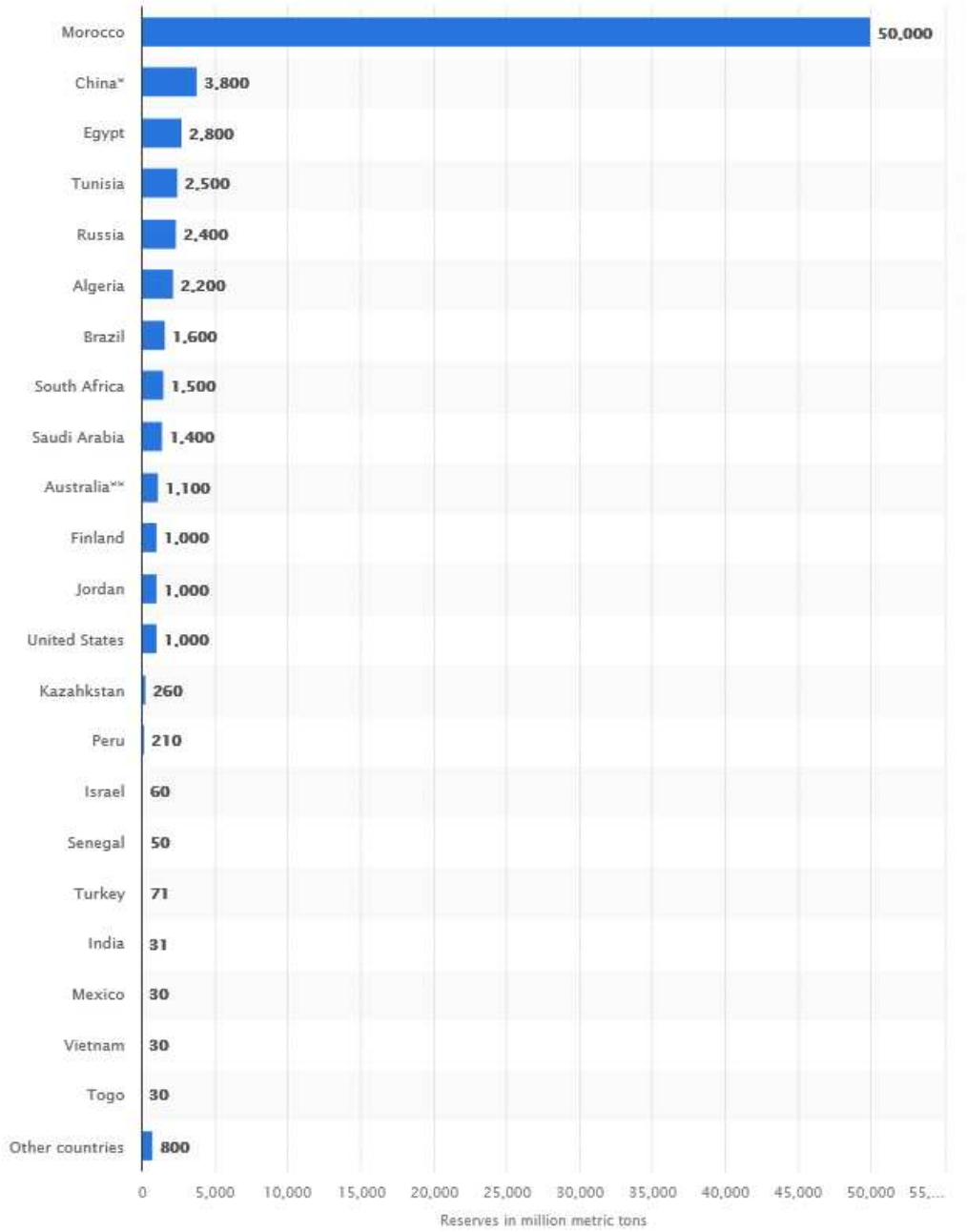
## 21.5 Produkce a spotřeba

Většina fosforu (80 %) se těží ze sedimentárních ložisek fosfátů v severní Africe, Číně, na Blízkém východě, v Jižní Africe, USA a Rusku. Další potenciálně hospodářsky zajímavá ložiska fosforitu se vyskytují v kontinentálním šelfu Atlantiku, Tichého a Indického oceánu (Cook a Shergold 1986; Valsangkar 2001).

Pouze malá část celosvětových zásob fosfátových rud (~10 %; Pufahl a Groat, 2017) pochází z magmatických hornin, a to z Ruska, Jihoafrické republiky, Brazílie a Finska. Tato magmatická ložiska fosfátů pocházejí většinou z alkalického magmatického komplexu Khibiny/Chibiny (Notholt, 1979) a foskorit-karbonatitového komplexu Kovdor (Ivanyuk et al. 2016) z poloostrova Kola v Rusku, karbonatitového komplexu Siilinjärvi ve Finsku (Decrée et al. 2020), Phalaborwa (Palabora) magmatického komplexu v Jihoafrické republice (Gómez-Arias et al. 2022) a Alto Paranaíba Alkaline Province v Brazílii (Silva et al. 2023).




Obrázek 106. *Ložiska fosforových rud v Evropě (ProMine database, Cassard et al. 2012).*




Obrázek 107. *Zásoby fosforu v  t. Většina zásob se nachází v sedimentárních horninách. Zdroj statista.com.*

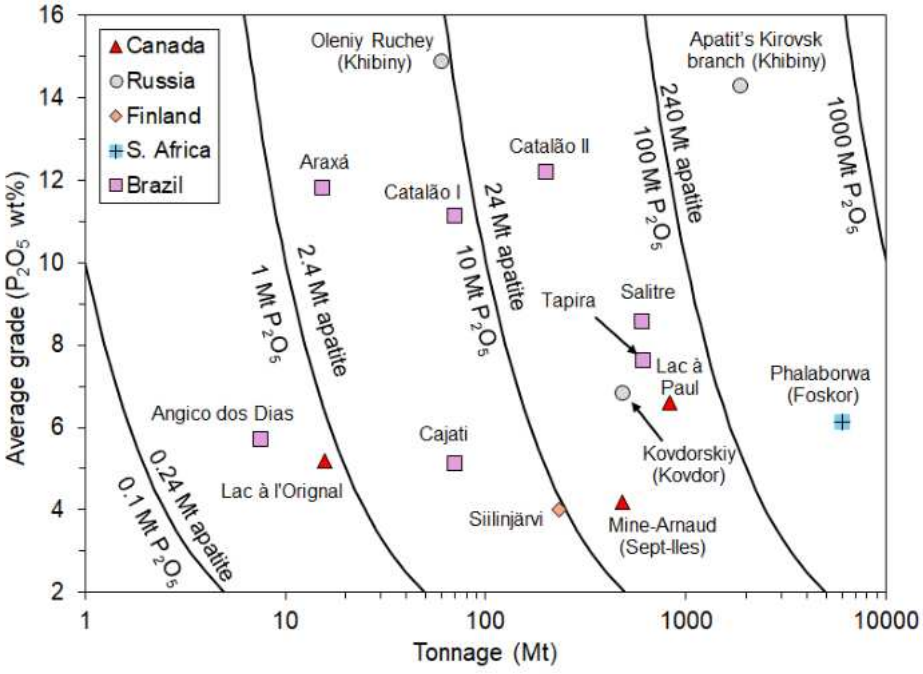
## 21.6 Genetické typy ložisek

1. Sedimentární ložiska v mořských sedimentech – fosforitech (asi 80 % světové produkce): Phosphoria Formation (USA), oblast Mount Isa (Austrálie), Al Jalamid (Saúdská Arábie), Oulad Abdoun (Maroko), Wengfu (Čína).

2. Magmatogenní ložiska apatitů v alkalických magmatických horninách (téměř celá zbývající produkce): Chibiny (Rusko), Palabora Complex (Jižní Afrika), Fanshan Complex (Čína), Siilinjärvi (Finsko).

Magmatická ložiska apatitu jsou většinou spojena s alkalickými komplexy a karbonatity a s anortozitovými a monzonitovými komplexy (zde spolu se železem a titanem; Notholt et al. 1979; Ihlen et al. 2014; Goodenough et al. 2016).

Magmatická apatitová ložiska mají obecně nižší obsahy než jejich sedimentární protějšky, ale obsah nežádoucích kontaminantů je obvykle nižší (Ihlen et al. 2014; Ahokas 2015). Kromě toho obsahují značné koncentrace REE (ať už jsou sedimentárního, nebo magmatického původu). Klíčovým potenciálem pro produkci REE z apatitových ložisek je jejich snadná těžba ve srovnání s většinou konvenčních perspektivních ložisek REE (Pereira a Bilal 2012; Emsbo et al. 2015). Vedle REE mohou fosfátové horniny obsahovat až 3-4 % F. Fosfátové rudy proto představují další možný zdroj fluoru (Gorecki 1994).

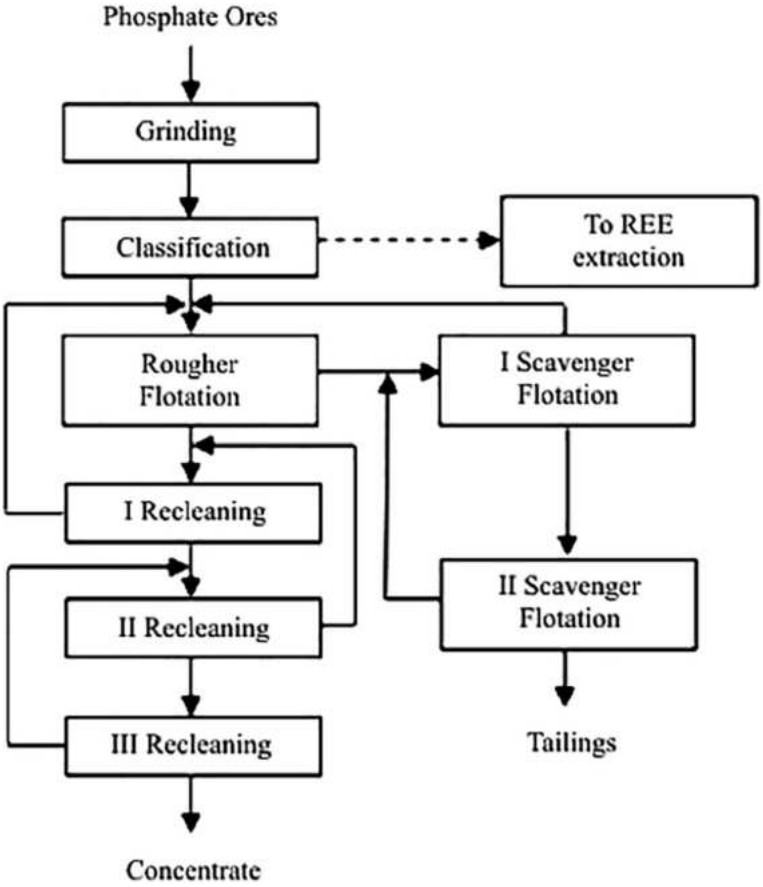



Obrázek 108. *Průměrný obsah fosforu v závislosti na tonáži hlavních magmatických ložisek fosfátů v alkalických, karbonátových a anorthozitových (Kanada) intruzí (Banerjee et al. 2024).*

## 21.7 Metody těžby a úpravy

Zpracování apatitové rudy zahrnuje několik kroků, které jsou nutné pro výrobu kyseliny fosforečné a hnojiv.

- Drcení a mletí: Ruda se nejprve rozdrtí a rozemele, aby se apatit uvolnil z okolní horniny.
- Flotace: To je základní metoda používaná ke koncentraci apatitu. Rozemletá ruda se smísí s vodou a chemikáliemi, čímž vznikne suspenze. Do směsi se přidají vzduchové bubliny, které se naváží na apatitové částice a vynesou je na povrch, kde mohou být odčerpány.
- Loužení: Koncentrovaný apatit se poté louží kyselinou dusičnou, aby se získala kyselina fosforečná. Tento krok je klíčový pro výrobu hnojiv a dalších fosfátových produktů.
- Rafinace: Kyselina fosforečná se čistí, aby se odstranily nečistoty, a je tak vhodná pro různé průmyslové aplikace.




Obrázek 109. *Blokové schéma obohacování fosfátových rud (Elbendari et al., 2019).*

## 21.8 Limitní ukazatele pro ložiskové hodnocení

Získávání fosforových rud z pegmatitů a příbuzných hornin není v současnosti aktuální a limitní ukazatele proto nelze stanovit.

## 21.9 Reference

Ahokas, K. 2015. Finland's phosphorus resources are more important than ever. Geofoorumi 2, 10–12.

Banerjee, S. 2023. Characterization of First Phosphate's Lac à l'Orignal phosphate deposit, Lac-Saint-Jean Anorthosite (LSJA) Complex, Quebec, Canada: Implications for supplying lithium ferro (Iron) phosphate (LFP) batteries. Technical report for First Phosphate Corp.

Banerjee, A., Pufahl, P. K., Dare, S. 2024. Igneous Rock Phospate: ore grades, concentrates and mining operations around the world, Research note.

BM Review. 2022. Identifying the pinch points in the LFP supply chain. Battery Materials Review 5(2), 1-4.

Cassard, D., Bertrand, G., Maldan, F. 2012. ProMine pan-European Mineral Deposit database: a new dataset for assessing primary mineral resources in Europe. Workshop on: Mineral Resources Potential Maps: a Tool for Discovering Future Deposits. 12–14th March 2012, Nancy, France. Proceedings 9–13.

Cook, P. J., Shergold, J. H. (Eds) 1986. Phosphate deposits of the world. Volume 1: Proterozoic and Cambrian phosphorites. Cambridge University Press.

Decrée, S., Savolainen, M., Mercadier, J., Debaille, V., Höhn, S., Frimmel, H., Baele, J. M. 2020. Geochemical and spectroscopic investigation of apatite in the Siilinjärvi carbonatite complex: Keys to understanding apatite forming processes and assessing potential for rare earth elements. Applied Geochemistry 123, 104778.

El Bamiki, R., Raji, O., Ouabid, M., Elghali, A., Khadiri Yazami, O., Bodinier, J. L. 2021. Phosphate Rocks: A Review of Sedimentary and Igneous Occurrences in Morocco. Minerals 11, 1137.

Emsbo, P., McLaughlin, P. I., Breit, G. N. 2015. Rare earth elements in sedimentary phosphate deposits: Solution to the global REE crisis? Gondwana Res 27, 776–785.

Goodenough, K. M., Schilling, J., Jonsson, E. 2016. Europe's rare earth element resource potential: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting. Ore Geol Rev 72, 838–856.

Gómez-Arias, A., Yesares, L., Díaz, J., Caraballo, M. A., Maleke, M., Sáez, R., van Heerden, E., Vermeulen, D., Nieto, J. M., Castillo, J. 2022. Mine waste from carbonatite deposits as potential rare earth resource: Insight into the Phalaborwa (Palabora) Complex. Journal of Geochemical Exploration 232, 106884.

Gorecki, H. J. 1994. Utilization of fluorine from phosphate fertilizer plants. In: Hodge C. A, Popovici N. N. (eds) Pollution control in fertilizer production, CRC press, 299–336.

Ihlen, P. M., Schiellerup, H., Gautneb, H., Skår, Ø. 2014. Characterization of apatite resources in Norway and their REE potential – a review. Ore Geol Rev 58, 126–147.

Jarvis I., Burnett W. C., Nathan Y. 1994. Phosphorite geochemistry: state of the art and environmental concerns. Eclogae Geol Helv 87, 643–700.

Ivanyuk, G. Y., Kalashnikov, A. O., Pakhomovsky, Y. A., Mikhailova, J. A., Yakovenchuk, V. N., Konopleva, N. G., Sokharev, V. A., Bazai, A. V., Goryainov, P. M. 2016. Economic minerals of the Kovdor baddeleyite-apatite-magnetite deposit, Russia: Mineralogy, spatial distribution and ore processing optimization. Ore Geology Reviews 77, 279-311.

Notholt, A. J. G., Highley, D. E., Slansky, M. 1979. Raw materials research and development IV. Dossier on Phosphate, Commission of the European Communities, Brussels.

Pereira, F., Bilal, E. 2012. Phosphoric acid extraction and rare earth recovery from apatites of the Brazilian phosphatic ores. Rom J Miner Dep 85, 49–52.

Pufahl, P. K., Groat, L. A. 2017. Sedimentary and igneous phosphate deposits: formation and exploration: an invited paper. Economic Geology 112, 483-516.

Silva, G. F., Cunha, I. A., Costa, I. S. L. (Orgs). 2023. An overview of critical minerals potential of Brazil. Serviço Geológico do Brasil, Brasília.

Valsangkar, A. B. 2001. Mineral resources. Volume 2 In: Gupta R.S. and Desa E. (eds) The Indian Ocean : A Perspective. AA Balkema Publishers, 585–644.

Ostatní použité zdroje jsou uvedeny u tabulek a obrázků.

Metodika laboratorní testace vzorků pegmatitů zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků

# Příloha 2
# Přehled pegmatitů v oblasti výzkumu (rešeršní studie)

| | |
|---|---|
| Program: | Epsilon |
| Název projektu: | Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů |
| Název projektu anglicky: | Evolved magmatic and pegmatitic systems as sources of critical raw materials and industrial minerals |
| Číslo projektu TAČR: | TH79020002 |
| Číslo projektu ERA-MIN 3: | JTC-2021_174 |
| Řešitelské organizace: | Masarykova univerzita<br>G E T s.r.o.<br>K M K GRANIT, a.s. |
| Doba řešení: | 5/2022 - 4/2025 |
| Důvěrnost a dostupnost: | veřejně přístupný |


| | |
|---|---|
| Řešitelský tým: | Jan Cempírek (Masarykova univerzita)<br>Milan Novák (Masarykova univerzita)<br>Radek Škoda (Masarykova univerzita)<br>Jaromír Tvrdý (G E T s.r.o.)<br>Petr Hanzlík (G E T s.r.o.)<br>Ondřej Krátký (G E T s.r.o.)<br>Ondřej Sysel (G E T s.r.o.)<br>Jitka Kovářová (G E T s.r.o.)<br>Pavel Jedlička (K M K GRANIT, a.s.)<br>Emília Křenková (K M K GRANIT, a.s.)<br>Pavel Tatýrek (K M K GRANIT, a.s.) |

Autoři studie: Milan Novák
Jan Cempírek
Petr Gadas
Radek Škoda
Gavril Săbău
Rossitsa D. Vassileva
Anna Lazarova
Kalin Naydenov
Sylvina Georgieva
Valentin Grozdev
Jaromír Tvrdý

Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON je zaměřen zejména na zlepšení pozice českého a v globálním kontextu i evropského průmyslu pomocí podpory projektů spadajících do kategorie aplikovaného výzkumu (zahrnuje průmyslový výzkum, experimentální vývoj nebo jejich kombinaci), jejichž výsledky mají vysoký potenciál pro rychlé uplatnění v nových produktech, výrobních postupech a službách. Poskytovatelem finančních prostředků je Technologická agentura ČR.

# Obsah

1 Úvodní informace ..... 4
2 Granitické pegmatity Českého masivu; mineralogická, geochemická a regionální klasifikace a geologický význam ..... 5
2.1 Úvod ..... 5
2.2 Používané termíny ..... 5
2.3 Klasifikace granitických pegmatitů podle jejich geologického prostředí ..... 9
2.4 Přehled výzkumů granitických pegmatitů v Českém masivu ..... 12
2.5 Klasifikace granitických pegmatitů Českého masivu ..... 14
2.6 Kontaminované pegmatity ..... 39
2.7 Petrogenetická klasifikace pegmatitů ..... 46
2.8 Regionální rozšíření jednotlivých typů granitických pegmatitů v Českém masivu ..... 47
2.9 Radiometrické datování pegmatitů ..... 57
2.10 Vztah granitických pegmatitů a mateřských (fertilních) granitů ..... 61
2.11 Vztah granitických pegmatitů a regionální metamorfózy ..... 63
2.12 Souhrn a závěr ..... 64
2.13 Literatura ..... 69
3 Přehled pegmatitových hornin a mineralizace vzácných kovů v Západních Karpatech (Slovensko) ..... 93
3.1 Úvod ..... 93
3.2 Geologická poloha pegmatitových hornin v Západních Karpatech ..... 93
3.3 Tvar těles granitových pegmatitů ..... 95
3.4 Minerální složení ..... 98
3.5 Stanovení stáří pegmatitů a žul typu Ss ..... 107
3.6 Poznámky k původu pegmatitů LCT ..... 108
3.7 Poznámky k původu granitů s obsahem vzácných kovů ..... 109
3.8 Shrnutí ..... 110
3.9 Přehled hlavních lokalit ..... 111
3.10 Literatura ..... 112
4 Výskyty a charakteristika pegmatitů v Rumunsku ..... 120
4.1 Geologická pozice ..... 120
4.2 Příkrovová jednotka Lupşa ..... 121
4.3 Masiv Preluca ..... 124
4.4 Pohoří Rodna ..... 125
4.5 Doména Getic ..... 129
4.6 Pegmatity oblasti Conţu ..... 136
4.7 Závěry ..... 142
4.8 References ..... 144
5 Přehled pegmatitů v Bulharsku ..... 149
5.1 Úvod ..... 149
5.2 Klasifikace typů pegmatitů v bulharské literatuře ..... 149
5.3 Distribuce pegmatitů ..... 152
5.4 Vybrané reference ..... 172

# 1 Úvodní informace

Rešeršní studie zaměřená na pegmatity jako hlavní studovanou horninu byla zpracována v rámci projektu „Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů“ jako jeden z podkladů ke kompletaci dvou hlavních výstupů, kterými jsou certifikované metodiky, které na sebe úzce navazují a v obecných kapitolách se překrývají:

- CM1 Certifikovaná metodika laboratorní testace vzorků pegmatitů zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků.
- CM2 Certifikovaná metodika hodnocení využitelnosti silikátových složek a vzácných prvků na ložiskách pegmatitového typu a příbuzných typů.

Rešerše tvořící přílohu CM1 i CM2 shrnuje základní informace o předmětu výzkumu jako jeden z podkladů jak pro zpracování obou metodik, tak i pro plnění výzkumných cílů ostatních projektových partnerů. Cíle projektu PEGMAT jsou definovány následovně:

(i) identifikovat hlavní výskyty pegmatitů a vzácnoprvkových granitů v karpatsko-balkánské oblasti a posoudit jejich geologické, strukturní a geochemické znaky;

(ii) pochopit a charakterizovat geologické procesy a strukturní podmínky, které vedly ke vzniku pegmatitů a vzácnoprvkových granitů;

(iii) posoudit vývoj ložisek a jejich surovin v čase, v závislosti na geologickém prostředí těchto magmatických těles a pochopit jejich regionální distribuci v oblasti;

(iv) charakterizovat vnitřní procesy vzniku pegmatitů, modelovat pegmatitová tělesa a vymezit jejich vnitřní strukturu;

(v) určit potenciální průzkumné oblasti s ohledem na typ a obsah surovin;

(vi) posoudit parametry využitelnosti rudních i nerudních surovin z komplexních pegmatitových těles.

# 2 Granitické pegmatity Českého masivu, jejich mineralogická, geochemická a regionální klasifikace a geologický význam

***Milan Novák, Jan Cempírek, Petr Gadas, Radek Škoda***
*Přírodovědeck á fakulta Masarykovy univerzity, Brno*
*Česká republika*

## 2.1 Úvod

Granitické pegmatity a především jejich nejvíce frakcionované typy (pegmatity obsahující minerály Be, Li, Cs, Sn, Nb, Ta, Zr, Hf, REE, Y, F, P, B) reprezentují nejvyšší stupeň diferenciace granitických hornin. Proto mohou poskytnout důležité informace o trendech vývoje jednotlivých magmatických komplexů, popř. o jejich protolitech. Vztah k okolním magmatickým a metamorfovaným horninám (převážně diskordantní) stejně jako minerální asociace pegmatitů podávají důležitou informaci o relativním stáří pegmatitů a o jejich vztahu k tektonickým a metamorfním procesům určité oblasti.

Granitické pegmatity jsou na území České republiky poměrně rozšířené horniny a byla jim věnována značná pozornost především ze strany mineralogů (např. práce V. Boušky, F. Čecha, P. Černého, D. Němce, M. Nováka, P. Povondry, J. Sekaniny, J. Staňka a řady dalších). Až na výjimky (např. Z. Vejnar, M. Kužvart, D. Němec, P. Černý, J. Duda a K. Breiter) se ale granitickými pegmatity nezabývali petrologové a geologové. Vzhledem k výraznému zaměření na studium minerálů pegmatitů jsou naše znalosti o jejich geologické pozici, vztahu pegmatitů k mateřským granitickým horninám a ke geologickému vývoji oblasti, v nichž se vyskytují, poměrně malé.

Tento přehled je zaměřen na velmi široké spektrum pegmatitových hornin od silně texturně diferencovaných a geochemicky frakcionovaných pegmatitů magmatogenního původu (např. komplexní pegmatity s Li-minerály) až po primitivní pegmatity s jednoduchou vnitřní stavbou a minerálním složením jak magmatogenního tak metamorfogenního původu (např. hrubě zrnité leukosomy migmatitů s cordieritem nebo primitivní pegmatity s turmalínem). Protože jsou primitivní pegmatity v některých jednotkách Českého masivu značně rozšířené, jsou v této práci detailněji diskutovány a členěny. Tomu je přizpůsobena i klasifikace pegmatitů a pegmatitových oblastí.

## 2.2 Používané termíny

V textu práce jsou často používány termíny týkající se granitických pegmatitů, které nejsou běžné v geologických, ale ani v řadě mineralogických prací. Také je nutné vymezit pojem granitický pegmatit používaný v této práci.

*Granitický pegmatit* – existuje několik definicí od různých autorů, které více či méně zvýrazňují texturní, mineralogické a/nebo geochemické rysy pegmatitů. Jako granitické pegmatity označujeme magmatické horniny (všechny nebo téměř všechny minerály pegmatitů vznikly utuhnutím ze silikátové taveniny), jejichž celkové složení (celého tělesa) je blízké granitu, a které tvoří spíše malá (maximálně zhruba 100 m mocná, většinou pouze několik m), převážně žilná tělesa (mohou mít také čočkovitý i zcela nepravidelný tvar). Novější, ale velmi podobnou definici pegmatitu podává např. London (2008). Typickým

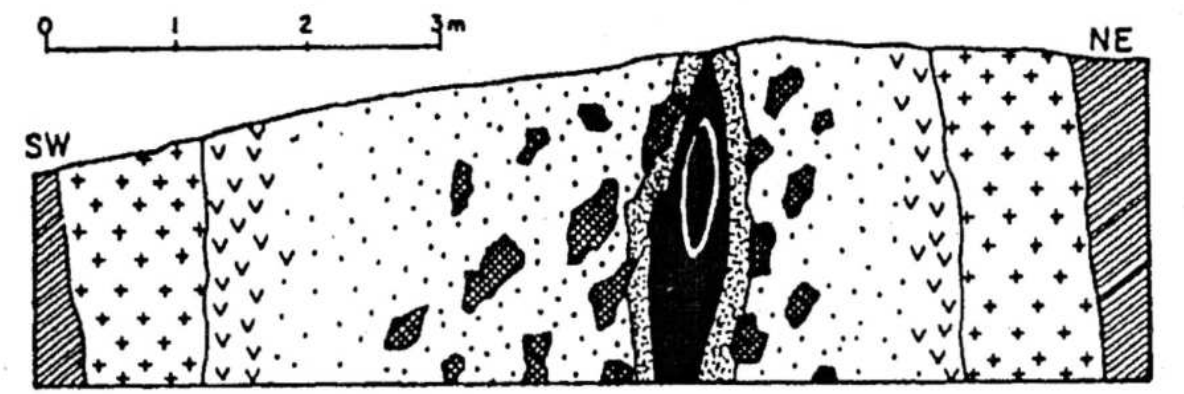
znakem je zonální stavba pegmatitových těles, především těch více frakcionovaných (jen vzácně jsou tyto pegmatity téměř homogenní), a dále je charakteristická přítomnost pegmatitových textur (např. grafické srůsty křemene a K-živce případně křemene a jiných minerálů, velké krystaly minerálů o objemu až několik $m^3$; viz. termín Texturní diferenciace). Protože granitické pegmatity představují nejvíce frakciované členy vývoje magmatických komplexů, uplatňují se v jejich složení ve větší míře tzv. inkompatibilní (litofilní) prvky a obsahují řadu vzácných v jiných horninách téměř neznámých minerálů (viz. termín Geochemická frakcionace).

Podle původu taveniny můžeme pegmatity rozdělit do dvou hlavních skupin: (i) pegmatitová tavenina je produktem diferenciace a frakcionace granitické taveniny (magmatogenní pegmatit), (ii) pegmatitová tavenina je produktem natavení (metamorfogenní pegmatit) jiné horniny (hlavně metapelitů) a k procesům diferenciace a frakcionace zde nedošlo vůbec nebo jen v malé míře. Svým vznikem i složením jsou magmatogenní pegmatity příbuzné pegmatoidním granitům, od nichž jsou často odvozeny, u nás např. Čertovy kameny u Jeseníku nebo Přibyslavice u Čáslavi, a dále vysokoteplotním žilným ložiskům Sn, popř. W a Mo a greisenům (např. amblygonitový žilník s kasiteritem z Vernéřova u Aše). Některé metamorfogenní pegmatity jsou blízké metatektům v migmatitech (např. cordieritem bohaté hrubozrnné partie metatektu v Horních Borech) nebo i vysokoteplotní alpské paragenezi (např. primitivní „pegmatitové“ žíly s hojným křemenem, s andalusitem, turmalínem, chloritem, muskovitem a karbonáty z Horních Borů). Granitické pegmatity popisované v této práci proto zahrnují výrazně širší spektrum pegmatitů, než je běžně uváděno v klasifikacích granitických pegmatitů (např. Černý 1991a, Černý a Ercit 2005, Černý et al. 2012).

*Texturní diferenciace* – typickým znakem většiny granitických pegmatitů (hlavně magmatogenních ale vzácně i metamorfogenních) je zonální stavba (obr. 2.1). Ta je produktem texturní diferenciace, kdy během krystalizace vznikají postupně jednotlivé jednotky (zóny) s odlišnou texturou, velikostí zrna i mineralogickým (chemickým) složením. Tyto jednotky mohou tvořit jasně definovatelné a souvislé zóny (hlavně granitická jednotka nebo křemenné jádro) nebo jen nepravidelné partie i značných rozměrů (např. albitová nebo lepidolitová jednotka). V textu je proto více užíván termín jednotka, který nám označuje určitý typ horniny bez informace o jeho tvaru a velikosti v rámci pegmatitového tělesa. Je obecnější než termín zóna, která nám už jasně definuje způsob vystupování v pegmatitovém tělese. Příkladem je zonálnost běžně vyvinutá od okraje do středu na pegmatitových žilách: granitická zóna (velikost zrna ~ 0,1-2 cm, křemen + K-živec + kyselý plagioklas + biotit ± muskovit), grafická zóna (velikost zrna ~ 0,5-5 cm, křemen + K-živec), bloková zóna (velikost zrna až několik m, K-živec), křemenné jádro. Ve více diferencovaných pegmatitech se objevují také albitová jednotka jako jasně definovaná zóna nebo jen partie, ale někdy i značných rozměrů, lepidolitová jednotka, popř. blokový spodumen nebo blokový petalit většinou situované mezi blokovým K-živcem (zóna blokového K-živce) a křemenným jádrem.

*Texturně-paragenetická jednotka* – jednotlivé zóny v pegmatitech bývají složeny z texturně i mineralogicky odlišných hornin někdy monominerálních. Protože ale v řadě pegmatitů nejsou tyto texturně a mineralogicky odlišné horniny uspořádány v zónách, ale ve více či méně nepravidelných partiích různé velikosti, je pro označení typu horniny používán termín texturně-paragenetická jednotka (unit) bez ohledu na to, jak velké partie tvoří. Mezi typické

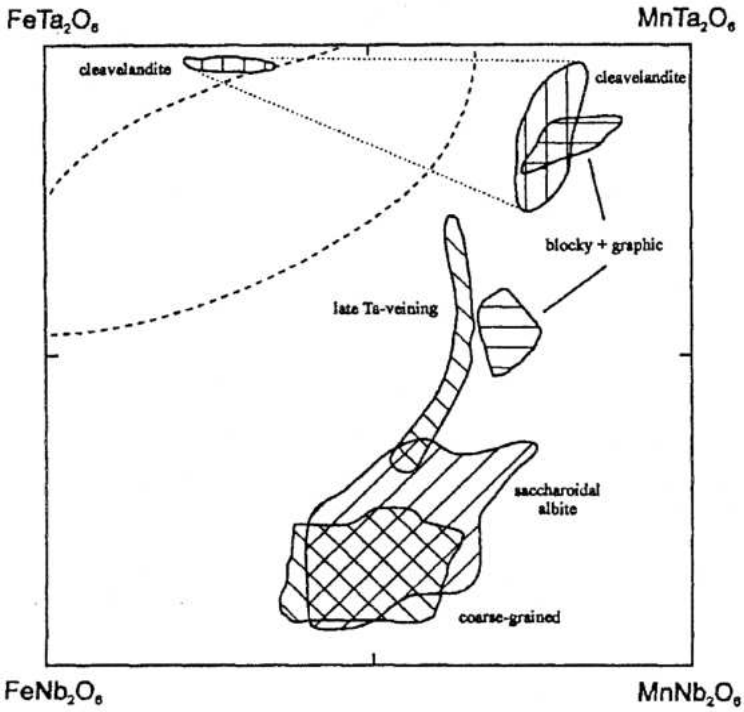
texturně-paragenetické jednotky pegmatitů patří např. granitická jednotka, grafická jednotka, blokový K-živec, blokový křemen, albitová jednotka, aj.




Obr. 2.1. Idealizovaný řez zonálním lepidolitovým pegmatitem v Dobré Vodě (Novák a Černý 1998). Křížky – granitická jednotka, vvv – grafická jednotka, řídké tečky – muskovit-albitová subjednotka, husté tečky – vnější lepidolit-albitová subjednotka, černá vnější – vnitřní lepidolit-albitová subjednotka, černá vnitřní - lepidolitové jádro, mřížkované partie – blokový K-živec.

*Geochemická frakcionace* – během frakční krystalizace v taveninách dochází ke koncentraci některých prvků (bývají označovány jako inkompatibilní) v závěrečných fázích krystalizace. Tento vývoj lze velmi dobře dokumentovat poměry vybraných prvků, např. K/Rb, K/Cs, Fe/Mn, Mg/Fe, Al/Ga, Zr/Hf, Nb/Ta a řada dalších, které se s nárůstem frakcionace snižují, (často se používají také jiné poměry Ta/(Ta+Nb), Mn/(Mn+Fe) aj.), a dále také zvýšenou koncentrací některých prvků, např. Li, Be, Sn, Ta, Rb a Cs. Stupeň frakcionace se odráží jak ve vzniku nových fází, např. Be-minerálů (beryl, fenakit aj.), Li-minerálů (trifylín, lepidolit, petalit, spodumen, elbait, amblygonit), Cs-minerálů (polucit), tak ve změně chemického složení u jednotlivých skupin minerálů s nárůstem stupně frakcionace, např. slídy: biotit → muskovit → trilithionit → polylithionit, granáty: almandin → spessartin, columbit-tantalit: ferrocolumbit → manganocolumbit → manganotantalit (obr. 2.2), turmalíny: dravit → skoryl (foitit) → elbait → rossmanit/darrellhenryit. Právě v granitických pegmatitech (magmatogenních) byly popsány nejvyšší stupně frakcionace (např. Černý et al. 1985, Schmakin et al. 1999) a také výrazný nárůst frakcionace v měřítku několika m (v rámci pegmatitového tělesa) nebo jen několika mm (v rámci jednoho zrna). V metamorfogenních pegmatitech je stupeň frakcionace velmi nízký. Geochemická frakcionace a texturní diferenciace spolu většinou úzce souvisí, i když vysoký stupeň texturní diferenciace nemusí být nutně spojen s vysokým stupněm frakcionace a naopak.

*Anatexe* – proces, při němž dochází za vysoké teploty (většinou nad 700 °C) k natavení (anatexi) hornin a vzniklá tavenina buď utuhne na místě vzniku, nebo je přemístěna na jiné místo, kde dojde k jejímu utuhnutí. Tímto způsobem vznikají migmatity (utuhnutí na místě, velikost polohy v mm až cm) i anatektické (metamorfogenní) pegmatity (žádná nebo krátká migrace taveniny, vznik žilného tělesa někdy se zonální stavbou, velikost v cm až m). Typickým znakem těchto anatektických pegmatitů je jednoduchá stavba a většinou i jednoduché mineralogické složení podobné nataveným partiím – metatektům migmatitů (cordierit, turmalín, biotit, granát, apatit, dumortierit).




Obr. 2.2. Vývoj složení columbit-tantalitu v beryl-colmbitovém pegmatitu z lokality Maršíkov-Scheibengraben (Novák et al. 2003a). V obrázku označeny jednotlivé texturně parageneticképé jednotky: coarse-grained – hrubě zrnitá jednotka, blocky-graphic – bloková až grafická jednotka, cleavelandite – cleavelanditová jednotka, saccharoidal – jednotka cukrovitého albitu.

*Kontaminace* – proces, při němž dochází k přínosu látek z okolních hornin do pegmatitu. Charakteristickým rysem je přítomnost takových chemických látek, resp. minerálů, které tyto látky obsahují a které nemohou být produktem běžné frakcionace granitické taveniny. Typickým příkladem jsou např. pegmatity pronikající serpentinity, které jsou obohaceny Mg (obsahují např. hojný cordierit, dravit nebo biotit bohatý Mg), nebo pegmatity pronikající Fe-skarny, které jsou obohaceny Fe (obsahují Fe-bohaté amfiboly a pyroxeny nebo epidot). Vlastní proces kontaminace je ale jen velmi málo prozkoumaný. Nevíme přesně, jakými mechanismy a ve kterých fázích vývoje pegmatitu dochází ke kontaminaci (Novák 2007, 2013, Novák et al. 2013a, 2017a, Martin a De Vito 2014). Protože se ukazuje, že hlavní část krystalizace více frakcionovaných granitických pegmatitů probíhá v uzavřeném nebo téměř uzavřeném systému (Novák 2000), zdá se, že ke kontaminaci dochází především během pohybu pegmatitové taveniny od zdroje na místo krystalizace a/nebo okamžitě po vmístění taveniny do hostitelské horniny. Jakmile vznikne okrajová pegmatitová zóna, proces kontaminace se zastaví zhruba až do konce primární krystalizace z taveniny, potom se systém znovu otevře přínosu látek z okolí.

*Desilikace* – proces, při němž dochází k odnosu křemíku z horniny. Projevuje se nízkým obsahem křemene, případně jeho úplnou absencí. V granitických pegmatitech, především v těch, které pronikají serpentinity nebo také dolomitické mramory, jde o běžný proces (Dosbaba a Novák 2012). Vlastní proces desilikace vyžaduje detailní studium, protože není jasné, jakým mechanismem a ve kterých stádiích vývoje pegmatitu k desilikaci dochází.

## 2.3 Klasifikace granitických pegmatitů podle jejich geologického prostředí

V současné době jsou nejvíce používané principy klasifikace granitických pegmatitů prezentované Černým (1991a), které byly aktualizované v pozdějších publikacích (Černý a Ercit 2005, Černý et al. 2012). Navazuje na klasifikaci publikovanou Ginzburgem et al. (1979), která vychází z řady dalších klasifikací ruských autorů. Tato klasifikace byla postupně doplněna o nové údaje (např. Novák a Povondra 1995 – vyčlenění elbaitového subtypu, Wise 1999 – detailní klasifikace pegmatitů se vzácnými zeminami, Ercit 2004 – zjednodušená klasifikace pegmatitů se vzácnými zeminami). Genetické členění granitických pegmatitů podle jejich chemického složení mateřských granitoidů na NYF a LCT skupinu (Černý 1991a, Černý a Ercit 2005, Černý et al. 2012) bude dále diskutováno.

Granitické pegmatity jsou řazeny podle geologického prostředí, v němž vznikají jejich hostitelské horniny (PT podmínky vzniku okolních metamorfovaných popř. magmatických hornin), do pěti základních tříd - abysální, muskovitové, muskovitové-vzácných prvků, vzácných prvků a miarolitické (obr. 2.3; Novák 2005). Aby bylo možné diskutovat některé specifické skupiny pegmatitů (vesměs poměrně primitivní, ale často velmi rozšířené), byly již dříve (Novák 2005) vyčleněny skupiny pegmatitů, které nejsou ve výše uvedených klasifikacích zařazeny (tab. 2.1 a 2.2).

Tabulka 2.1. Klasifikace granitických pegmatitů (Černý 1991a). Autorem modifikováno zařazením nové skupiny a subtypů označených v textu kurzívou.

| Třída/class | Subtyp/subtype | Typické minerály/typical minerals |
|---|---|---|
| Abysální | *dumortieritový* | dumortierit, turmalín (olenit, skoryl), muskovit |
| *Skupina subabysální* | *cordieritový* | cordierit, turmalín (dravit, skoryl), biotit |
| | *turmalínový* | turmalín (dravit, skoryl), apatit, cordierit |
| | *andalusitový* | andalusit, apatit, turmalín |
| Muskovitová | | |
| Muskovitová-vzácných prvků | | |
| Vzácných prvků | viz Tabulka 2.2 | |
| Miarolitická | | |

### 2.3.1 Pegmatity abysální třídy

Tato třída zahrnuje pegmatity vzniklé při metamorfních pochodech, tj. při natavení (anatexi) především metapelitických hornin, lze je tedy označit také jako metamorfogenní. Tyto pegmatity vznikají především v horninách vyšší amfibolitové až granulitové facie (P ~ 9-4 kbar, T ~ 800-700 °C; obr. 2.3). Abysální pegmatity tvoří zpravidla jen malá tělesa často konformní s metamorfní stavbou okolních hornin a zpravidla neobsahují dutiny. Texturně jsou jednoduché, pegmatitová tělesa jsou jen vzácně zonální. Také mineralogické složení je většinou poměrně jednoduché. Vedle K-živce, plagioklasu (oligoklas-andezin), křemene a slíd (biotit, muskovit) patří mezi typické akcesorické popř. minoritní minerály např. allanit, monazit, zirkon, uraninit, thorit, ilmenit, dumortierit, turmalín (skoryl, dravit, olenit), korund, $Al_2SiO_5$ modifikace (sillimanit, kyanit), apatit, rutil a granát (almandin) a jen velmi vzácně další akcesorické minerály.

### 2.3.2 Skupina „subabysálních“ pegmatitů

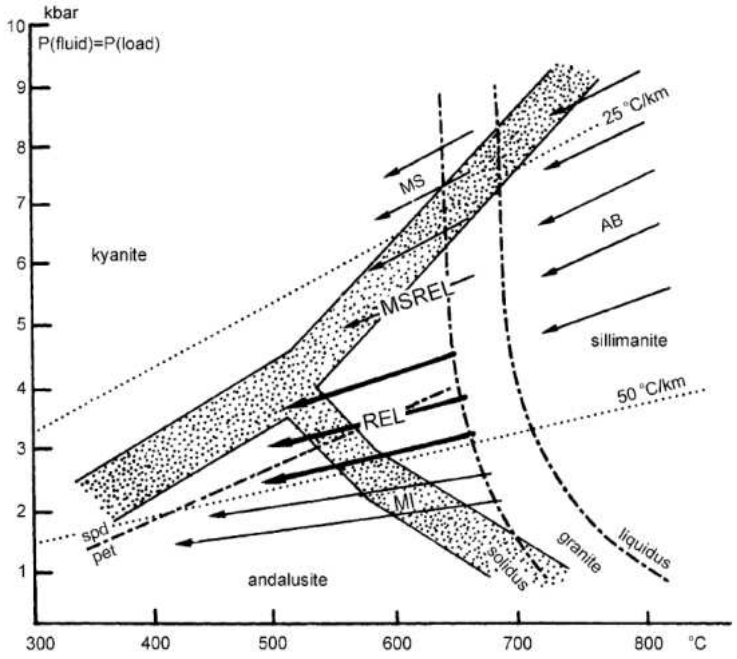
Novák (2005) vyčlenil v Českém masivu další skupinu (podtřídu) pegmatitů, tzv „subabysální“, tedy „méně hluboký“ člen abysálních pegmatitů. Vznikly natavením hornin, a utuhnutím v menší hloubce za nižších tlaků než abysální pegmatity. Jsou jim podobné stavbou, velikostí a zčásti i minerálními asociacemi, a odlišují se přítomností nízkotlakých minerálů (andalusit, cordierit-sekaninait, popř. sillimanit), metamorfním stupněm okolních hornin, který odpovídá vyšší amfibolitové facii (P ~ 5-2 kbar, T ~ 750-650 °C; typ Abukuma; obr. 3). Tyto pegmatity jsou v Českém masivu, hlavně v moldanubiku, velmi rozšířené. Typickým příkladem společného výskytu abysálních a subabysálních pegmatitů, který do jisté míry ukazuje na oprávnění vyčlenění této nové skupiny, je lokalita Vémyslice u Moravského Krumlova. Zde byly zjištěny jak starší abysální dumortieritové pegmatity s metamorfním přetiskem (sillimanit), tak mladší výrazně postektonické subabysální turmalínové pegmatity s primárním andalusitem (Cempírek a Novák 2004a, 2006, Cempírek et al. 2006, Gadas et al. 2012, Novák et al. 2015a). Hlavními problémy jsou u této „subabysální“ skupiny nesnadné odlišení abysálních a „subabysálních“ pegmatitů, a také to, že nelze vyloučit, že část pegmatitů, resp. jejich tavenin, nemá anatektický původ, ale tavenina byla odvozena od granitoidních hornin.

### 2.3.3 Pegmatity muskovitové třídy

Tyto pegmatity jsou někdy označovány jako keramické, protože bývají zdrojem živců, popř. muskovitu. Vyskytují se především v horninách amfibolitové facie (hlavně ruly a svory často s kyanitem) vzniklých za relativně vyšších tlaků metamorfózy (P ~ 8-5 kbar, T ~ 650-580 °C; typ Barrow; obr. 2.3). Mohou tvořit velká tělesa se zonální stavbou konformně i diskordantně uložená v okolních horninách, jen výjimečně obsahují dutiny. Vztah k mateřským granitoidům je většinou nejasný. Texturně i mineralogicky jsou poněkud komplikovanější než abysální pegmatity a mohou dosahovat obrovských rozměrů (mocnost v desítkách m). Typické minerály zahrnují vedle křemene a živců především muskovit, který bývá velmi hojný, dále akcesorické minerály např. granát, turmalín, biotit a apatit.

### 2.3.4 Pegmatity třídy muskovitové-vzácných prvků

V klasifikacích bývá často vyčleněna přechodná třída mezi muskovitovými pegmatity a pegmatity vzácných prvků. Spojuje typické znaky obou tříd, hojný muskovit a výskyt v horninách vzniklých za vyšších tlaků (hlavně ruly a svory často s kyanitem) na jedné (P ~ 7-3 kbar, T ~ 650-540 °C; obr. 2.3), a přítomnost minerálů vzácných prvků na druhé straně. Podobně jako u muskovitických pegmatitů je jejich vztah k mateřským granitickým horninám většinou nejasný. Typickými minerály jsou vedle křemene, K-živce, albitu a hojného muskovitu např. beryl, spodumen, amblygonit-montebrasit, trifylín, apatit, zirkon, kasiterit, columbit-tantalit, REE-minerály a řada dalších.




Obr. 2.3. PT diagram zobrazující horninové prostředí pegmatitových populací (Černý 1991a). AB – abysální třída, MS – muskovitová třída, RE-MS – třída muskovitová-vzácných prvků, RE- třída vzácných prvků, MI – miarolitická třída.

### 2.3.5 Pegmatity třídy vzácných prvků

Tato třída je velmi mnohotvárná a zahrnuje většinu známých, resp. detailněji studovaných granitických pegmatitů. Pegmatity vystupují především v metamorfovaných horninách amfibolitové facie až facie zelených břidlic, které vznikají v prostředí nižších tlaků než muskovitové pegmatity (P ~ 4-2 kbar, T ~ 650-450 °C; typ Abukuma; obr. 2.3), vzácně pronikají granity. Tvoří drobná i obrovská tělesa (mocnost kolem 100 m, délka až 2 km) většinou s komplikovanou vnitřní stavbou. Tělesa pronikají okolními horninami většinou diskordantně, vzácně jsou konkordantní nebo jsou uložena přímo v mateřských granitoidech, často je ale vztah k mateřským granitoidům nejasný. Mohou obsahovat dutiny, někdy poměrně časté. Mineralogicky jsou velmi pestré, typickými minerály jsou vedle křemene, K-živce a albitu např. beryl, spodumen, lepidolit, petalit, elbait, trifylín, triplit, amblygonit-montebrasit, apatit, zirkon, REE-minerály (allanit, aeschynit, euxenit, fergusonit, samarskit), topaz, cordierit, andalusit, polucit, kasiterit, columbit-tantalit a dále obsahují širokou škálu akcesorických minerálů včetně sekundárních produktů hydrotermálních alterací a zvětrávání (např. primárních Fe, Mn, Mg, Ca, Li-fosfátů, cordieritu, aj.).

### 2.3.6 Pegmatity miarolitické třídy

Pro miarolitické pegmatity, jak vyplývá z názvu, je typická přítomnost primárních dutin (sekundární dutiny vzniklé např. rozpouštěním berylu nebo jiných minerálů se neuvažují). Vznikají v relativně mělkých hloubkách (P ~ 2-1 kbar). Texturně jsou většinou poněkud jednodušší než pegmatity třídy vzácných prvků. Pegmatitová tělesa jsou často uložena přímo v mateřských granitoidech nebo v jejich těsné blízkosti. Mineralogicky jsou také většinou jednodušší než pegmatity vzácných prvků, typické minerály jsou vedle K-živce, albitu a křemene např. muskovit, Li-slídy, beryl, topaz, granát, turmalín, fluorit, zeolity a chlority. Přítomnost primárních dutin není jediným kritériem pro zařazení pegmatitu do třídy

miarolitických pegmatitů, protože dutiny jsou přítomny v zásadě v pegmatitech všech tříd, i když v podstatně menším množství. Rozhodujícími faktory pro zařazení do této třídy jsou (i) přítomnost hojných primárních dutin, (ii) úzký prostorový a geochemický vztah k mateřské hornině (většinou jsou uloženy přímo v granitu, netvoří ostře oddělené žíly a mají postupný kontakt), (iii) relativně nízký tlak při jejich vzniku. Protože je odhad tlaku často komplikovaný, není možné spolehlivě odlišit miarolitické pegmatity a pegmatity vzácných prvků s hojnými dutinami.

Tabulka 2.2. Klasifikace granitických pegmatitů třídy vzácných prvků (Černý 1991a, pegmatity vzácných zemin členěny podle Wise 1999). Autorem dále modifikováno zařazením nového typu a subtypů označených v textu kurzívou.

| Typ | Subtyp | Typické minerály |
|---|---|---|
| *primitivní* | *turmalínový*<br>*andalusitový*<br>*fosfátový* | turmalín (skoryl, foitit), apatit, ilmenit, granát<br>andalusit, turmalín, ilmenit, muskovit<br>triplit, zwieselit, trifylín, turmalín, ixiolit |
| vzácných zemin | allanitový<br>euxenitový<br><br>gadolinitový | allanit, fluorit, monazit, magnetit<br>euxenit, aeschynit, allanit, monazit, zirkon, xenotim, ilmenit, (beryl)<br>gadolinit, fergusonit, allanit, xenotim, samarskit, euxenit, aeschynit, zirkon, (beryl) |
| berylový | beryl-columbitový<br>beryl-columbit-fosfátový | beryl, columbit, niobový rutil<br>beryl, columbit-tantalit, trifylín, triplit, zwieselit |
| komplexní Li | spodumenový*<br><br>petalitový<br><br><br>lepidolitový<br><br><br>elbaitový<br><br><br>amblygonitový | spodumen, beryl, tantalit, amblygonit, montebrasit, kassiterit, trilithionit, polucit<br>petalit, beryl, trilithionit, elbait, polucit, amblygonit, montebrasit, manganocolumbit, manganotantalit, kassiterit<br>trilithionit, polylithionit, elbait, beryl, amblygonit, spodumen, petalit, mikrolit, topaz, polucit, kassiterit, manganocolumbit, manganotantalit, stibiotantalit<br>elbait, liddicoatit, beryl, polylithionit, hambergit, kassiterit, danburit, rhodizit, manganocolumbit, spodumen, petalit<br>amblygonit, montebrazit, beryl, trifylín, tantalit, kassiterit |
| albit-spodumenový* | | spodumen, kasiterit, beryl, tantalit, apatit, columbit |
| albitový* | | tantalit, beryl, kasiterit |

* není znám z území České republiky

## 2.4 Přehled výzkumů granitických pegmatitů v Českém masivu

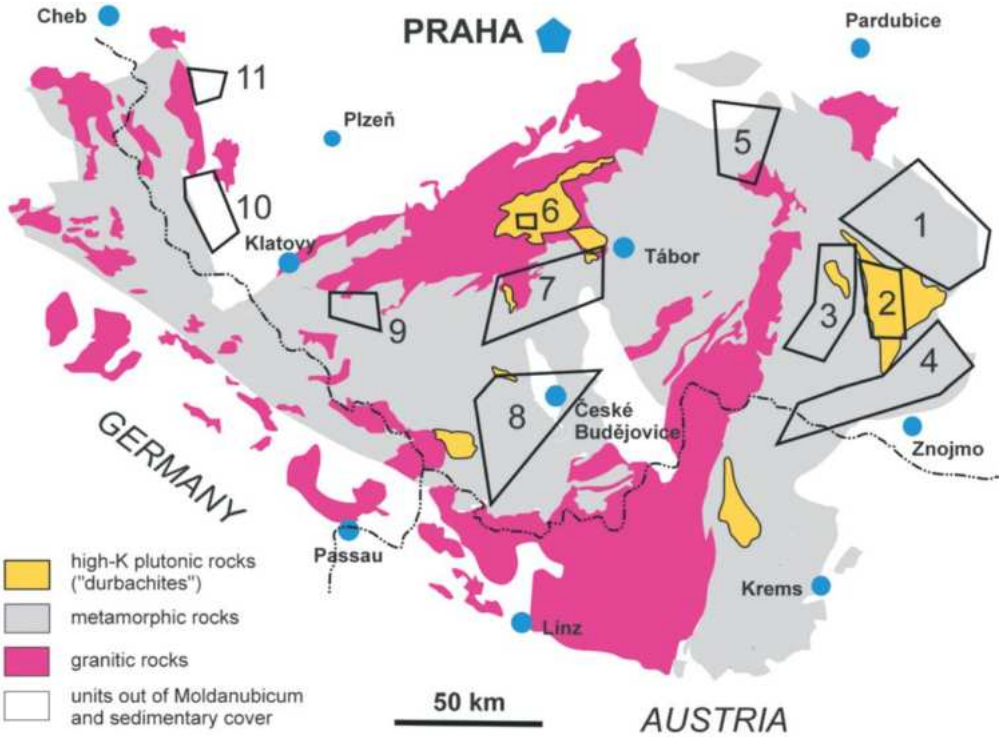
O minerálech pegmatitů v Českém masivu, resp. na území České republiky bylo publikováno poměrně velké množství prací (srovnej Čech et al. 1981, Čech 1985, Novák et al. 1992, Staněk in Bernard 2000 a zde citované práce). První publikace pocházejí už z konce 18. a počátku 19. století (např. Klaproth 1792, Hruschka 1824), a řada článků byla publikována i v prestižních zahraničních časopisech (např. Čech 1961, Čech et al. 1978, Černý 1963, 1968, Černý et al. 1964, 1971, 1979, 1980, 1984, 1992a,b, 1995a,b, 1997, Černý a Povondra 1966, 1972, Černý a Němec 1995, Bouška a Johan 1972, Němec 1983, 1989a,b, Franz a Morteani

1984, Ercit et al. 1993, Liang et al. 1995, Teertstra et al. 1995, Novák 1999, Novák a Povondra 1995, Novák et al. 1985, 1991, 1998b, 1999a,b, 2003a, 2004a,b, Novák a Černý 1998, Novák a Šrein 1998, Novák a Taylor 2000, Selway et al. 1998, 1999, Selway 1999, Frýda a Breiter 1995, Breiter et al. 1997, 2005, Breiter a Kronz 2004, Cempírek et al. 2006). Souhrnné práce o granitických pegmatitech Českého masivu zahrnují zejména tyto publikace: Sekanina (1928), Vejnar (1965, 1968), Němec (1976), Čech et al. (1981), Čech (1985), Novák et al. (1992) a Staněk (2000). Z pegmatitů Českého masívu bylo dokonce popsáno 9 nových minerálů: lepidolit (Klaproth 1792, Černý et al. 1995b), cyrilovit (Novotný a Staněk 1953, Novák et al. 2000), sekaninait (Staněk a Miškovský 1975, Černý et al. 1997), stibiobetafit (Černý et al. 1979), rossmanit (Selway et al. 1998, 1999), oxy-skoryl (Bačík et al. 2013), darrellhenryit (Novák et al. 2013a), lucchesiit (Bosi et al. 2017), celleriit (Bosi et al. 2022).

Úroveň zpracování jednotlivých oblastí i lokalit se značně liší. Zvýšená pozornost byla věnována hlavně moldanubické oblasti (moldanubikum), kde se vzácnoprvkové pegmatity objevují v 11 hlavních polích (Obr. 2.4); studovány byly především západní Morava, Písecko, Sušicko, Kutnohorsko a širší okolí Českého Krumlova. V tepelsko-barrandienské oblasti (bohemikum) pak pegmatity v Českém lese a méně v okolí Teplé. V sasko-durynské oblasti (saxothruringikum) byla detailnější pozornost věnována jen exotickým pegmatitům z Podlesí a Vernéřova a v západosudetské oblasti (lugikum) pegmatitům krkonošského plutonu a hlavně žulovského batolitu. V moravskoslezské oblasti byly detailně zkoumány pegmatity silesika především okolí Šumperka a Maršíkova (Černý et al. 1992, 1995, Novák et al. 2003a,b, Chládek et al. 2020, 2021), dalším jednotkám brunovistuliku a hlavně moraviku byla věnována mnohem menší pozornost. Souhrnně a detailně byly zpracovány a publikovány jen některé lokality (moldanubikum: např. Dolní Bory – Staněk 1954, 1991, 1997, Duda 1986, Němec 1981, Vlastějovice – Vavřín 1962, Žáček et al. 2003, Ackerman 2004, Rudolfov – Bouška a Čech 1960, Welser 1995, Ctidružice – Čech 1962a, Dobrá Voda – Staněk 1965, Novák a Staněk 1999, Věžná – Černý 1965, Černý a Novák 1992, Novák et al. 2003c, Toman a Novák 2018, 2020, Laštovičky – Staněk 1973, Lhenice – Skřápková 2020, Přibyslavice – Povondra et al. 1987, Breiter et al. 2003, Radonín – Němec 1982, Rudolec – Němec 1983a, Kracovice – Němec 1990a, Novák et al. 1999c, Rožná – Němec 1998, Novák et al. 1998c, Bližná – Novák et al. 1997a, 1999b, Černý 2004, Starkoč – Cempírek 2003, Cempírek et al. 2003, Vémyslice – Cempírek a Novák 2004a, Kuklík – Losert 1956, Cempírek a Novák 2004b, Cempírek et al. 2006; bohemikum: Kříženec – Grenar 1958; saxothuringikum: Podlesí – Breiter et al. 1997, Breiter 1998, 2001; silesikum: Maršíkov–Schinderhübel – Dostál 1964, 1966, Šumperk – Procházka 1966, Vidly – Aichler et al. 1986, Branná – Novák et al. 2003b).

Geologické pozici granitických pegmatitů byla věnována jen malá pozornost (např. Kratochvíl et al. 1951, Vejnar 1965, 1968, Grym 1975, Čech et al. 1981, Čech 1985, Duda 1986, Novák et al. 1992, Novák a Rejl 1993, Breiter 1998, 2001). Regionální klasifikace granitických pegmatitů byla publikována více autory, např. Grym (1975), Čech et al. (1981), Čech (1985) a Novák et al. (1992). Předložená klasifikace vychází především ze členění publikovaného Novákem et al. (1992) a Novákem (2005), dále z regionálně-geologických členění Českého masivu, a je také založena na nových geochemických a mineralogických a radiometrických datech (Glodny et al. 1998, Novák et al. 1998a, Ertl et al. 2004, Melleton et

al. 2012, Ackerman et al. 2017). Vyčleněné oblasti jsou regionálně geologické, a ne geograficky regionální, jako je tomu v klasické práci Mineralogie Československa (Čech et al. in Bernard 1981), i když nejasnosti v regionálně-geologickém členění Českého masivu (např. Mísař et al. 1983, Mísař a Dudek 1993, Dallmayer et al. 1995, Franke 2000, Franke a Żelazniewicz 2000) určitým způsobem komplikují regionální členění pegmatitů. Geologicky-regionální klasifikace granitických pegmatitů není nijak spojena s metalogenetickým členěním Českého masivu (např. Bernard et al. 1981, Bernard a Pouba 1986), jak to učinil Čech (1985), protože genetický vztah granitických pegmatitů a většiny hydrotermálního zrudnění je zřejmě nepravděpodobný a ani pro něj neexistují žádné důkazy.




Obr. 2.4. Schématická geologická mapa moldanubické oblasti s hlavními pegmatitvými poli. (modifikováno z Novák a Cempírek, 2010; individuální pegmatitová pole: 1 – Strážek, 2 – Třebíč, 3 – Jihlava, 4 – Vratěnín-Radkovice, 5 – Vlastějovice, 6 – Vepice, 7 – Písek, 8 – jihočeská, 9 – Sušice, 10 – Domažlice-Poběžovice, 11 – Kříženec).

## 2.5 Klasifikace granitických pegmatitů Českého masivu

Tato klasifikace je založena na klasifikacích Černého (1991b) a Černého a Ercita (2005) diskutovaných v úvodu (tab. 2.1 a 2.2). Klasifikace je rozšířená o některé specifické typy, resp. skupiny a subtypy pegmatitů vyskytující se především v moldanubiku (Novák et al. 1992, Novák 2005). Jde zejména o vyčlenění skupiny „subabysálních“ pegmatitů a její členění, a o členění primitivních pegmatitů třídy vzácných prvků, které nejsou v dnes používaných klasifikacích vůbec zařazeny. V této práci jsou zde vyčleněny hlavně proto, aby bylo možné tyto velmi rozšířené pegmatity diskutovat. Dále jsou pegmatity členěny do dvou hlavních skupin podle vzniku, na metamorfogenní a magmatogenní, i když u primitivních pegmatitů není odlišení jednoznačné. Je nutné si uvědomit, že granitické pegmatity jsou

velmi mnohotvárné po stránce mineralogické i texturní a každý pegmatit je do jisté míry unikátní. Proto bývá zařazení některých pegmatitů do určité třídy, typu a/nebo subtypu ne zcela jednoznačné a může se v budoucnosti po dalším detailním studiu změnit.

### 2.5.1 Abysální pegmatity

Pegmatity této třídy jsou u nás poměrně vzácné. Definici velmi dobře odpovídají pouze dumortieritové pegmatity a možná některé turmalínové pegmatity, které jsou uváděny ve skupině subabysálních pegmatitů popisovaných v následující podkapitole.

#### Dumortieritové pegmatity

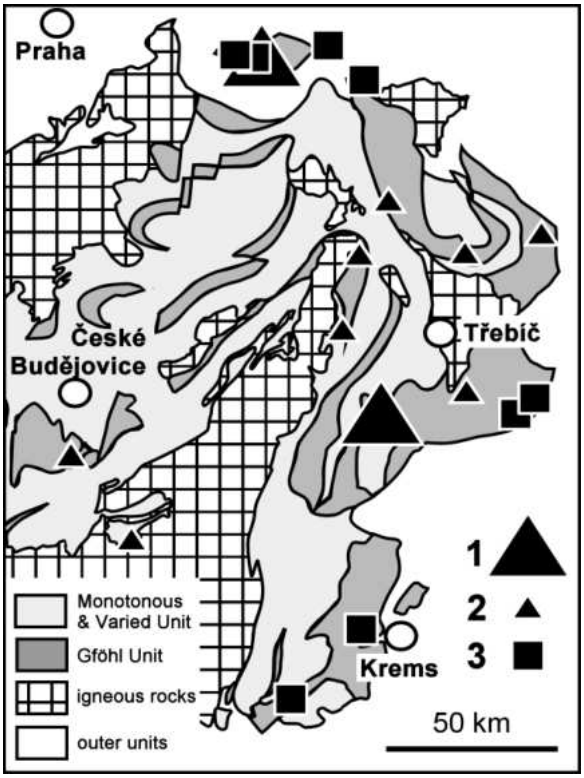
Tyto pegmatity nejlépe odpovídají definici abysálních pegmatitů tak, jak ji podává Černý (1991a). Pegmatity tvoří homogenní žilky o mocnosti kolem 2 cm a délce až několik m, nebo jednoduše zonální tělesa až 50 cm mocná uložená v masivních více či méně migmatizovaných biotitických rulách. Zonálnost se projevuje hrubnutím zrna od okraje k centru, kde se místy objevuje drobné křemenné jádro, a změnou minerální asociace. Kontakt s okolní horninou může být pozvolný i ostrý.

Typickými minerály jsou vedle křemene, oligoklasu, K-živce a muskovitu dumortierit a Al-bohatý turmalín (skoryl, olenit, dravit), oba ve více diferencovaných pegmatitech často ve více generacích. Dále se zde vyskytuje granát (almandin-spessartin), biotit, kyanit, sillimanit, staurolit, chryzoberyl, apatit, grafit, arzenopyrit a monazit. Typickým znakem pegmatitů je vysoká aktivita B, ale velmi nízká aktivita P a F.

Dumortieritové pegmatity studovali Fiala (1954), Losert (1956), Cempírek (2003), Cempírek et al. (2003, 2006) a Cempírek a Novák (2003, 2004a,b). Typické příklady primitivních typů jsou Běstvina, Spačice a Starkoč u Čáslavi, a Vémyslice u Moravského Krumlova, více diferencované typy jsou známy z okolí Kutné Hory – Miskovice a Kuklík. Všechny uvedené lokality leží v gföhlské jednotce při východním okraji moldanubika, především v kutnohorském krystaliniku (obr. 2.5). Vysoký obsah Al v pegmatitu může být produktem natavení Al-bohatých metapelitů ve specifických PT podmínkách; ke kontaminaci z okolní horniny během krystalizace pegmatitu už nedochází nebo jen ve velmi malé míře.

Unikátní borosilikátovou asociaci pak poskytla žilka aplit-pegmatitu s grandidieritem, werdingitem, boralsilitem a Sb-bohatým dumortieritem z kamenolomu Horní Bory (Cempírek et al. 2010). Představuje nejstarší vysokoteplotní asociaci s bórem v oblasti, a může indikovat vznik pegmatitových tavenin parciálním tavením granulitů.

Svéráznou lokalitou abysálních pegmatitů jsou pegmatoidní partie složené z hrubě zrnitého K-živce, křemene, plagioklasu, diopsidu, flogopitu a akcesorických minerálů (apatit, grafit, zirkon), které se vyskytují na lokalitě heřmanovských koulí u Heřmanova poblíž Velké Bíteše. Jsou uložené v hrubě lupenité flogopitické hornině a pegmatit velmi pravděpodobně vznikl natavením těchto flogopitem bohatých hornin. Zajímavá je přítomnost izometrických krystalů zirkonu, až 2 mm velkých.




Obr. 2.5. Výskyty dumortieritu ve střední a východní části moldanubické oblasti (podle Cempírek et al. 2010). 1 – hlavní výskyty v B-bohatých granulitech a migmatitech, 2 – vzácné výskyty v granulitech, migmatitech a rulách, 3 – výskyty v abysálních pegmatitech.

### 2.5.2 „Subabysální“ pegmatity

Do této skupiny (tab. 2.1) je zahrnována většina geochemicky primitivních pegmatitů, které vznikly anatexí hlavně metapelitických hornin, které ale krystalovaly v menších hloubkách, a tedy i při nižších tlacích, než jsou předpokládány u třídy abysálních pegmatitů.

#### Cordieritové pegmatity

Jsou poměrně rozšířeným typem subabysálních pegmatitů především v oblasti moldanubika. Většinou tvoří nepravidelná tělesa, čočky a žíly několik cm až dm mocné téměř výhradně uložené v migmatitizovaných biotit-sillimanitických rulách. Kontakt s okolní horninou bývá většinou pozvolný. Tělesa mají nedokonale vyvinutou zonálnost, která se projevuje hrubnutím zrna (bloky K-živce až 10 cm velké), vzácně jsou přítomny grafické srůsty křemene a K-živce, křemene a turmalínu a někdy i křemene a cordieritu. Zjednodušeně řečeno, cordieritové pegmatity představují mohutnější, hrubozrnnější a texturně komplikovanější polohy metatektu migmatitů, často s pegmatitovými texturami. Pohyb taveniny od místa natavení je minimální.

Vedle K-živce, křemene a plagioklasu je typickým minerálem cordierit-sekaninait, často silně pinitizovaný, dále relativně vzácný turmalín (skoryl, dravit), biotit, apatit, pyrit, pyrhotin, muskovit, dumortierit, popř. granát a andalusit. Typickou lokalitou studovanou více autory jsou Horní Bory u Velkého Meziříčí (např. Povondra et al. 1992, Kotková et al. 2003a), dále Vanov u Telče a další výskyty jsou v moldanubiku západních Čech v oblasti západně od křemenného valu (Vejnar 1968).

### Andalusitové pegmatity

Metamorfogenní pegmatity s andalusitem se vyskytují nepříliš hojně v některých oblastech moldanubika. Tvoří drobné žíly a kromě křemene, K-živce a kyselého plagioklasu obsahují muskovit a někdy také biotit a turmalín (skoryl, dravit). Z akcesorických minerálů jsou přítomny vedle andalusitu, většinou zatlačovaného muskovitem nebo i margaritem, pouze apatit. Pro tyto andalusitové pegmatity je typická relativně nízká aktivita B, a hlavně F a P. Primitivní pegmatitové žíly s andalusitem žíly se vyskytují např. v oblasti Třebíče (např. Kojetice) a také v okolí Kaplice v jižních Čechách (Vrána 2000). Nelze vyloučit, že část z nich může být magmatogenního původu.

### Turmalínové pegmatity

Tento typ je mezi subabysálními pegmatity pravděpodobně nejčastější. Problémem zůstává odhad hloubky vzniku (abysální versus subaysální) a hlavně odlišení turmalínových pegmatitů anatektického původu tedy metamorfogenních a pegmatitů, které mají magmatický zdroj a které jsou řazeny do třídy pegmatitů vzácných prvků. Oba typy jsou totiž většinou mineralogicky i texturně poměrně primitivní. Vedle křemene, živců a obou slíd obsahují někdy jen turmalín (dravit, skoryl) a v akcesorickém množství apatit, popř. granát, cordierit, andalusit, pyrit, rutil a ilmenit. Tělesa jsou jednoduše zonální, popř. roste od okraje ke středu pouze zrnitost, vzácně mohou obsahovat i drobné dutiny. Mocnost těles turmalínových pegmatitů kolísá od několika cm do zhruba 1 m. Někdy jsou viditelně usměrněné (metamorfované?). Typická je vysoká aktivita B, někdy i zvýšená aktivita P (hojný apatit), ale nízká aktivita F.

Tento subtyp pegmatitů se vyskytuje především v oblasti moldanubika. Turmalínové pegmatity se někdy vyskytují v oblastech se záhnědovými pegmatity (např. Věžná), s dumortieritovými pegmatity (např. Vémyslice). V saxothuringiku se vyskytují turmalínové pegmatity zřetelně deformované v okolí Unčína a Chlumce (Fiala 1951) nebo okolí Horního Slavkova. Na Kutnohorsku a zřejmě i v saxothuringiku se objevují silně deformované (metamorfované?) pegmatity s turmalínem ne zcela jasného původu.

## 2.5.3 Muskovitové pegmatity

Pegmatity této třídy jsou v rámci České republiky pravděpodobně vzácné. Hlavními důvody může být relativně malé rozšíření hornin vyššího stupně metamorfózy typu Barrow v Českém masivu (např. Cháb a Suk 1977, Petrakakis 1997, O´Brien 2000), určitou roli může hrát i výrazné překrytí této metamorfózy mladšími relativně nízkotlakými metamorfními procesy v některých geologických jednotkách.

Jedinými pegmatity, které dobře odpovídají třídě muskovitových pegmatitů, jsou poměrně primitivní pegmatity s hojným muskovitem a turmalínem v sileziku v oblasti Hrubého Jeseníku. Tvoří žíly, někdy značných rozměrů (až 20 m mocné), s jednoduchou zonální stavbou. Vyskytují se hojně v oblasti kry Orlíku, jejíž horniny (ruly, svory, metagranity) byly postiženy metamorfózou typu Barrow a pegmatity jsou považovány za prevariské (Cháb et al. 1984). Kromě muskovitu a místy velmi hojného turmalínu (dravit, skoryl) a někdy také granátu (almandin, spessartin), obsahují akcesorický apatit, biotit, jen velmi vzácně beryl (Vidly – Aichler et al. 1986), popř. tantalový rutil, ferrotapiolit a uranmikrolit (Bělá pod

Pradědem – Čech 1963). Dosud nebyly detailněji studovány s výjimkou lokality berylu z vrtu u Videl pod Pradědem. Pegmatity nesou jasné znaky metamorfního postižení, např. lemy metamorfního Ca-granátu kolem spessartin-almandinu (Aichler et al. 1986). Typická je pro ně vysoká aktivita B a velmi nízká aktivita P a F.

K muskovitovým pegmatitům možná patří relativně jednoduché pegmatity ve svrateckém a kutnohorském krystaliniku. Jsou nevýrazně zonální a bývají často uloženy konkordantně ve svorech s kyanitem. Z akcesorických minerálů se uvádějí pouze granát, apatit, vzácně turmalín, beryl a arsenopyrit (Přikryl et al. 2014). Spolehlivé informace o jednotlivých lokalitách těchto pegmatitů jsou ale prozatím nedostatečné.

### 2.5.4 Pegmatity muskovitové-vzácných prvků

Této třídě nejlépe vyhovují pegmatity z oblasti tepelského krystalinika, které jsou uloženy v rulách a svorech (často s kyanitem). V tomto případě známe potenciální mateřský granit - hanovská ortorula (Kratochvíl et al. 1951). Tato oblast je reprezentované především lokalitou Kříženec u Mariánských Lázní (Grenar 1958). Typickým znakem těchto pegmatitů je vysoký obsah muskovitu, který byl u Křížence těžen, a relativně jednoduché minerální složení zahrnující vedle křemene, živců a muskovitu pouze biotit, apatit a granát jako běžné akcesorie, vzácně byly nalezeny také zirkon, pyrit a turmalín. Dále je typické zřetelné usměrnění (metamorfóza) na všech žilách doprovázené vznikem metamorfního muskovitu (Glodny et al. 1998). Další lokality jsou např. Hostíčkov, Zhořec, Křepkovice, Beroun a Nezdice. V širším okolí Teplé leží také pegmatit z Boněnova u Michalových Hor, který se liší od ostatních pegmatitů téměř úplnou nepřítomností primárního muskovitu; zjištěny zde byly granát, biotit, magnetit, hematit, ilmenit, zirkon, apatit a především beryl a primární fosfáty (graftonit, wagnerit – Čech 1985), které ukazují na vyšší stupeň frakcionace. Tento pegmatit se svojí minerální asociací podobá pegmatitům s berylem a primárními fosfáty z okolí Otova. Typickým znakem pegmatitů tepelské oblasti je nízká aktivita B a F, ale mírně zvýšená aktivita P. Pegmatity této oblasti studovali Kratochvíl et al. (1951) a Grenar (1958). Detailnější moderní mineralogické studie ale chybí.

V tepelsko-barrandienské oblasti leží další pegmatity, které jsou řazeny do této třídy - berylové pegmatity někdy s primárními Fe,Mn,Li-fosfáty v okolí Poběžovic a Domažlic, Český les. Patří k nejlépe prozkoumaným pegmatitům v České republice, především po stránce geologické (Vejnar 1965, 1968). Zdejší pegmatity dosahují značných velikostí a mocné žíly jsou zonální a často komplikovaných tvarů (Vejnar 1965, 1968). Většinou jsou uloženy v metagabrech, méně často v rulách a svorech (někdy s kyanitem), typickým znakem je metamorfní postižení projevující se především usměrněním slíd na kontaktu s okolní horninou, vznikem metamorfního muskovitu a také mylonitizací. Část velkých těles obsahuje mohutné zóny blokového K-živce a křemene, v některých pegmatitech je velmi hojný muskovit, dále beryl, primární Li,Fe,Mn-fosfáty a granát (almandin-spessartin) jen místy jako hojné akcesorie. Velmi vzácně byly nalezeny spodumen, montebrasit a také apatit a turmalín. Další akcesorické minerály zahrnují gahnit, columbit-tantalit, kasiterit, sfalerit, bismutin a především už zmíněné primární fosfáty (trifylín, wolfeit, graftonit, sarkopsid, arrojadit-dickinsonit) a velmi širokou škálu sekundárních fosfátů (např. vivianit, lazulit-scorzalit, laueit, alluaudit, hagendorfit, ludlamit, goyazit, lipscombit, rockbridgeit, heterozit, strunzit aj. (Čech 1985, Masau et al. 2000). Pro výše uvedené pegmatity je typická vysoká aktivita P, ale

velmi nízká aktivita B a F dokumentovaná téměř úplnou absencí turmalínu, vzácným fluorapatitem a nízkými obsahy F v muskovitu (Vejnar 1965). Relativně vysoký stupeň frakcionace je také dokumentován přítomností Li-minerálů – trifylínu, spodumenu a montebrasitu (Otov-Větrný vrch).

Nejznámější lokalitami v této oblasti jsou Otov (Větrný vrch, Červený vrch, Pláně, Vyhlídka aj. zde především Li,Fe,Mn-fosfáty, beryl, spodumen, columbit-tantalit) a Meclov (beryl), kde byly živce těženy na několika místech. Bohatou lokalitou byl pravděpodobně i Sv. Vavřinec u Domažlic (Li,Fe,Mn-fosfáty). Muskovit se hojně se vyskytoval v pegmatitu Na babě u Domažlic.

### 2.5.5 Pegmatity vzácných prvků

Do této třídy patří značná část granitických pegmatitů v Českém masivu popisovaných v této práci. Protože jim byla věnována největší pozornost a existuje řada prací zabývajících se především jejich mineralogií ale i stavbou, bude jejich popis v této práci poněkud stručnější. Tato třída je členěna do několika typů a subtypů (tab. 2.2). V oblasti moldanubika ale byly zjištěny poměrně hojné relativně primitivní pegmatity, které nejsou v běžně užívané klasifikaci (Černý 1991a, Černý a Ercit 2005, Wise et al. 2018) zahrnuty a byly nově vyčleněny pouze pro účely této práce. Jejich příbuznost s více frakcionovanými pegmatity třídy vzácných prvků popisovaných níže je dána úzkými prostorovými vztahy, podobným chemickým složením (resp. geochemií) a minerálními asociacemi (hojný turmalín) včetně akcesorických minerálů (např. niobový rutil, columbit, primární fosfáty).

#### Primitivní pegmatity

Typ primitivních pegmatitů není v rámci pegmatitů vzácných prvků v běžných klasifikacích uváděn, i když část z nich už byla v Českém masivu vyčleněna Novákem et al. (1992) – andalusitový a fosfátový subtyp. V této práci byl typ primitivních pegmatitů definován hlavně proto, že jsou především v oblasti moldanubika poměrně rozšířené pegmatity, které neodpovídají žádnému typu a subtypu užívaných klasifikací (Černý 1991a). V minulosti byly významným zdrojem keramických surovin a jsou natolik hojné, že je nutné je zde zmínit a blíže diskutovat; některé z nich často ukazují úzký prostorový a asi i genetický vztah k více frakcionovaným pegmatitům třídy vzácných prvků popisovaných níže.

##### *Turmalínové pegmatity*

Tento subtyp je mezi primitivními pegmatity třídy vzácných prvků nejhojnější, ale problémem je rozlišení některých subabysálních turmalínových pegmatitů anatektického původu a turmalínových pegmatitů, které mají magmatický zdroj a které jsou řazeny do třídy pegmatitů vzácných prvků. Oba typy pegmatitů jsou většinou mineralogicky i texturně poměrně primitivní. Vedle křemene, živců a obou slíd obsahují někdy jen turmalín (skoryl, foitit, dravit) a v akcesorickém množství apatit, popř. granát (almandin-spessartin), cordierit-sekaninait, andalusit, rutil popř. niobový rutil, ilmenit, löllingit, pyrit, arzenopyrit a vzácně i columbit. Poměrně často se v nich objevuje také růženín, který v subabysálních turmalínových pegmatitech chybí. Turmalínové pegmatity třídy vzácných prvků by měly mít vyšší stupeň geochemické frakcionace ve srovnání se subabysálními turmalínovými pegmatity, který se projevuje vyšším poměrem Fe/(Fe+Mg) v turmalínu a biotitu,

Mn/(Mn+Fe) v granátu a přítomností některých akcesorických minerálů (např. Nb,Ta-oxidy, kasiterit).

Tělesa turmalínových pegmatitů jsou jednoduše zonální, popř. mohou vzácně obsahovat drobné dutiny, jejich mocnost kolísá od několika dm do několika m. Typickým znakem je také to, že se vyskytují v oblastech, kde jsou přítomny více frakciované berylové popř. komplexní pegmatity, dále existují přechody do andalusitových nebo fosfátových pegmatitů. Typická je pro ně vysoká aktivita B, někdy i zvýšená aktivita P (hojný apatit), a jen vzácně také F.

Turmalínové pegmatity jsou hojné zejména v moldanubiku a mezi typické příklady můžeme uvést např. Myšenec u Písku a řadu podobných žil v této oblasti, dále některé relativně primitivní pegmatity z oblasti Borů, Chlumek u Měřína, Lavičky u Velkého Meziříčí, pegmatit ve Strážku s krystaly granátu v dutinách, Březnice u Bechyně se sekundárním berylem po cordieritu (Vrána 1979). Klasickým příkladem jsou také Smolné Pece u Nejdku v saxothuringiku, kde je mohutná zonální žíla uložená v granitech.

Těmto pegmatitům byla ve srovnání s turmalínovými pegmatity patřícími do subabysální skupiny věnována poněkud větší pozornost. Pegmatit z Myšence popsali Novák et al. (1997b), Chlumek u Měřína zpracoval Čech (1957b), borské pegmatity byly jako celek studovány více autory (např. Duda 1986, Staněk 1954, 1991, 1997).

### *Andalusitové pegmatity*

Pegmatity s andalusitem, které jsou zřejmě odvozené od granitoidních plutonů (např. okolí centrálního moldanubického plutonu, Písecko) a které jsou často doprovázeny turmalínovými pegmatity, lze považovat za primitivní pegmatity třídy vzácných prvků. Kromě křemene, K-živce a kyselého plagioklasu obsahují biotit, muskovit a často turmalín (skoryl, dravit). Z akcesorických minerálů jsou přítomny vedle andalusitu, většinou zatlačovaného muskovitem někdy v asociaci s akcesorickým korundem, pouze pinitizovaný cordierit-sekaninait, ilmenit, apatit, granát, rutil a někdy i vzácnější akcesorie (wolframit, monazit, xenotim, zirkon, Novák et al. 2008). Diaspor, pyrofylit a kaolinit mohou místy doprovázet nebo zatlačovat andalusit. Pro všechny andalusitové pegmatity je typická vysoká aktivita B, ale nízká aktivita F a většinou i P.

Typické andalusitové pegmatity, v nichž se andalusit může vyskytovat i ve značném množství, se vyskytují výhradně v moldanubické oblasti. Jsou známy v okolí Dolních Borů (především některé primitivnější žíly např. žíla č. 3; Novák a Šrein 1989, Novák et al. 2008, Výravský et al. 2017), dále Čejov u Humpolce (více lokalit v okolí obce, Sztacho 1978), širší okolí Písku (např. Paseky, Jetětice a Kloub u Protivína) a Mysliboř u Telče. Část pegmatitů může být vázána také na centrální moldanubický batolit, např. Kostelní Myslová, Hostětice a další lokality v okolí Telče.

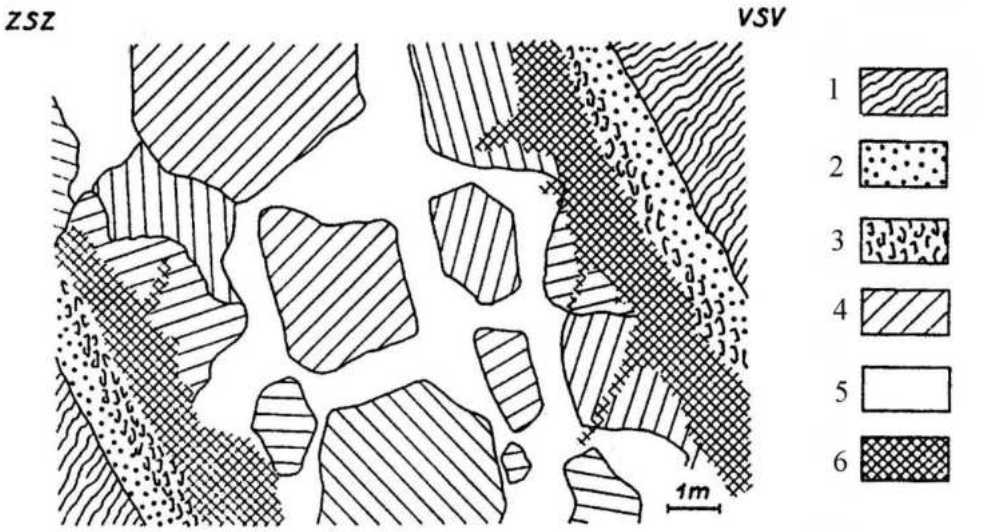
### *Fosfátové pegmatity*

Pegmatity patřící k tomuto subtypu se opět vyskytují výhradně v moldanubiku. Tvoří zonální žíly někdy značných mocností (až 30 m) složené z grafické zóny, zóny blokového K-živce a křemenného jádra, ve více diferencovaných žilách se objevuje i albitová jednotka (obr. 2.6 – Staněk 1981). Typickými znaky těchto pegmatitů jsou přítomnost primárních Fe,Mn-fosfátů

(triplit, zwieselit, trifylín, sarkopsid, graftonit, wagnerit), hojný turmalín (skoryl), místy andalusit, cordierit-sekaninait, apatit a granát (almandin). Akcesorické minerály zahrnují ilmenit, W,Nb,Fe-oxidy, a vzácně také kasiterit, topaz a řadu sekundárních fosfátů (Čech et al. 1964, Staněk 1971, 1991, Škoda et al. 2007). Pro fosfátové pegmatity je charakteristická vysoká aktivita B a P, ale variabilní a spíše nízká aktivita F.

Typickými lokalitami jsou Cyrilov (Staněk 1955, 1971), Horní Bory, žíla Oldřich v Dolních Borech (Staněk 1967, 1991) a Rousměrov (topaz a kasiterit; Staněk 1968) v oblasti Borů, Havírky u Písku, dále Podmoky u Sušice a pravděpodobně i jedna z žil v Rudolfově u Českých Budějovic (Welser 1995). Žíla Oldřich se od ostatních žil poněkud liší velikostí a pestřejší mineralogií.

Svojí minerální asociací se fosfátové pegmatity blíží pegmatitům beryl-columbit-fosfátového subtypu a jsou tam někdy řazeny (London et al. 1990). Od něj se ale liší úplnou absencí berylu a primárního columbitu a také velmi nízkým stupněm frakcionace; ilmenit výrazně převažuje nad Nb,Ta-oxidy (niobový rutil, columbit) vzniklými rozpadem wolframoixiolitu; Ti,Nb,Ta-oxidy vykazují velmi nízké poměry Mn/(Mn+Fe) a Ta/(Ta+Nb) (Novák a Šrein 1989). Poněkud vyšší stupeň frakcionace tohoto subtypu je také dokumentován přítomností vzácných Li-minerálů – trifylínu a cookeitu v Dolních Borech (Novák et al. 2015b) nebo kasiteritu a topazu v Rousměrově.




Obr. 2.6. Idealizovaný řez zonálním pegmatitem v Dolních Borech (Čech et al. 1981). 1 – okolní hornina, 2 – granitická jednotka, 3 – grafická jednotka, 4 –blokový K-živec, 5 – blokový křemen, 6 – albit.

## Pegmatity vzácných zemin

Tomuto typu pegmatitů byla dosud věnována v ČR poměrně malá pozornost, i když se vyskytují poměrně často a na více místech. Většinou ale tvoří málo mocná tělesa a poněkud unikají pozornosti (Krejčí 1923, Nováček 1932, Bouška et al. 1960, Bouška 1960, 1968, Čech 1957a,b, Čech et al. 1999, Staněk 1973b, Novák a Čech 1995). Podle stupně

frakcionace je můžeme rozdělit do tří subtypů (tab. 2.2). Protože jsou u nás vyvinuty téměř výhradně metaluminické pegmatity, a zcela chybí alkalické pegmatity ve smyslu Wise (1999), použiji pro tento případ mírně modifikovanou zjednodušenou klasifikaci pegmatitů se vzácnými zeminami (srovnej Wise 1999, Ercit 2004; tab. 2.2).

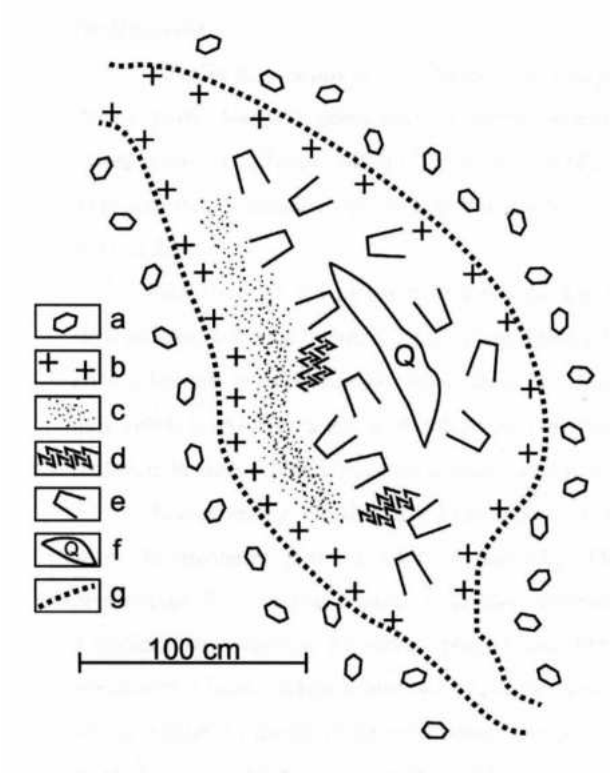
***Allanitové pegmatity***

Tento subtyp reprezentuje relativně primitivní pegmatity (LREE > Y,HREE), se kterými se můžeme setkat v řadě granitoidních plutonů, jejichž horniny odpovídají nejvíce *I*-typu (středočeský batolit, železnohorský batolit, žulovský batolit, třebíčský pluton, vzácně brněnský batolit). Žíly pegmatitů jsou většinou max. jen několik dm mocné, vzácně dosahují mocnosti až 2 m a pronikají granitoidy mateřského plutonu. Vedle živců a křemene obsahují hojný biotit, dále allanit a někdy také amfibol, titanit, magnetit, ilmenit, granát, epidot, monazit, zirkon a také turmalín. Naopak často zcela chybí primární muskovit. Jen výjimečně obsahují dutiny s krystaly křemene, živců, epidotu, chloritu a zeolitů (Žulovsko, Liberecko). Žíly jsou někdy ostře oddělené, jindy mají přechodný kontakt (Třebíčsko, Škoda et al. 2006, Zachař et al. 2020). Na některých žilách je přítomen také molybdenit a další sulfidy (středočeský batolit, Žulovsko – Morávek 1954, Bouška et al. 1960, Láznička 1967, Losos et al. 1995, 1998), jejich vztah k REE-minerálům ale není jasný a zdá se, že sulfidy reprezentují hydrotermální fázi vývoje pegmatitů (Sejkora et al. 2020). Typická je nízká aktivita F, P a většinou i B.

***Euxenitové pegmatity***

Pro tento více frakcionovaný subtyp (Y,REE ≈ LREE) je typická vedle allanitu přítomnost REE,Ti,Nb,Ta-oxidů, mezi které se řadí minerály skupiny euxenitu a aeschynitu, popř. fergusonit. Více frakciované žíly mají větší velikost a hlavně zonální stavbu. Vedle křemene a živců (K-živec je často vyvinutý jako zelený amazonit) jsou typickými minerály biotit, primární muskovit chybí, může se objevovat také beryl, fenakit, helvín-danalit, dále titanit, zirkon, ilmenit, pseudorutil, niobový rutil, a místy i turmalín nebo amfibol (Škoda 2003, Škoda et a. 2006, Škoda a Novák 2007, Novák a Filip 2010, Novák et al. 2011, Zachař et al. 2020).

Tento subtyp pegmatitů se vyskytuje především v oblasti třebíčského masivu v okolí Vladislavi, Kožichovic, Pozďátek, Klučova a Třebíče, a také v okolí Bochovic a Chlumku. Tvoří zonální žíly a jejich mocnost dosahuje až 2 m (obr. 2.7). Typickými minerály jsou minerály skupiny aeschynitu, euxenitu a pyrochlóru, titanit, ilmenit, pseudorutil, zirkon, vzácně beryl a ojediněle také niobový rutil, fluorit, fenakit, helvín-danalit, kasiterit, herzenbergit, stokesit, bavenit-bohseit a tinzenit (Škoda 2003, Škoda et al. 2004, Novák et al. 2023a). Na některých žilách je přítomen turmalín (skoryl, dravit bohatý Ca, Ti a chudý Al; Novák et al. 2003c, 2011), který naznačuje jen mírnou peraluminickou afinitu pegmatitů. Tyto pegmatity ukazují na nízkou až velmi nízkou aktivitu P, místy zvýšenou aktivitu F a především B (místy hojný turmalín).




Obr. 2.7. Idealizovaný řez zonálním euxenitovým pegmatitem z Vladislavi (Škoda 2003). a – durbachit, b – granitická jednotka, c – aplitická jednotka, d – grafická jednotka, e – blokový K-živec, f – křemenné jádro, g – neostrý kontakt.

***Gadolinitové pegmatity***

Nejvíce frakcionovaný subtyp (Y,REE > LREE) je charakteristický přítomností gadolinitu a REE,Ti,Nb,Ta-oxidů, kam patří především fergusonit, minerály skupiny samarskitu popř. minerály skupiny euxenitu a pyrochloru. Pegmatitové žíly mají větší mocnost a zonální stavbu. Vedle křemene a živců jsou typickými minerály biotit, vzácně primární muskovit, dále titanit, zirkon, ilmenit, granát (spessartin-almandin), niobový rutil, ferrocolumbit a amfibol (Škoda 2003).

S pegmatity gadolinitového subtypu se můžeme setkat na více místech, i když gadolinit byl dosud určen pouze ze Žulové (ústní sdělení F. Čermák 1982). Vyvinuty jsou zejména v durbachitovém masivu Čertova břemene a na Žulovsku, kde ale výrazně převládají allanitové pegmatity a o zdejších gadolinitových pegmatitech toho víme jen málo. Na Žulovsku byly popsány také další minerály ukazující zvýšený stupeň frakcionace např. fergusonit (Nováček 1932, Bouška 1968) a kasiterit.

Gadolinitové pegmatity byly nově zjištěny v masivu Čertova břemene v okolí Kovářova u Milevska (Vepice; Škoda et al. 2004, Sejkora et al. 2020). Přítomnost hojných dutin indikuje, že lze tyto pegmatity řadit k miarolitické třídě (srovnej Černý 1991a, 2000, Wise 1999, Ercit 2004, Černý a Ercit 2005).

## Berylové pegmatity

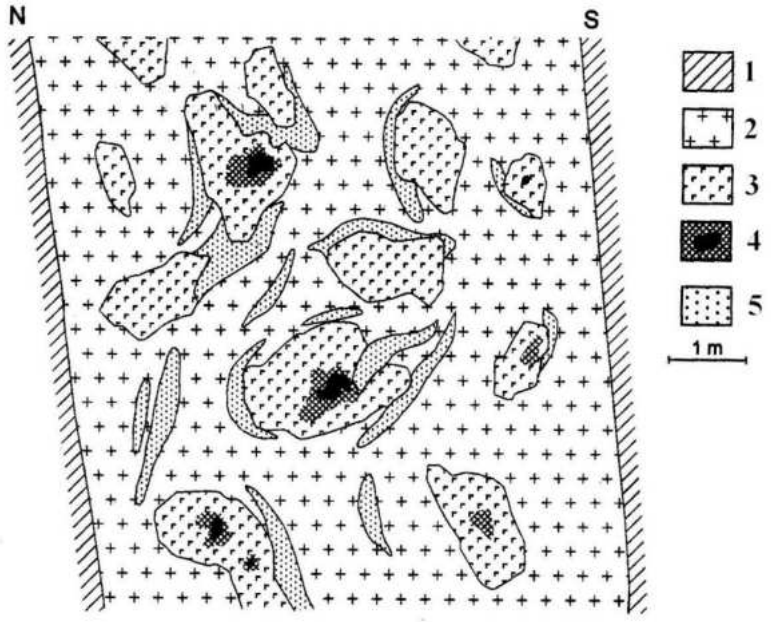
Tento typ pegmatitů se vyznačuje přítomností berylu. Dělí se na dva základní subtypy - beryl-columbitový a beryl-columbit-fosfátový (tab. 2.2). Beryl, typomorfní minerál pro berylové pegmatity, se vyskytuje také v některých více frakcionovaných pegmatitech vzácných zemin (Kožichovice), beryl je běžný v komplexních pegmatitech s Li-minerály a také v některých miarolitických pegmatitech. Proto samotná přítomnost berylu v určitém pegmatitu ještě nutně neznamená, že patří k berylovým pegmatitům a je nutné zohlednit další informace, např. přítomnost Li-minerálů nebo REE-minerálů, primárních dutin nebo geologickou pozici. V rámci Českého masivu je známo poměrně velké množství berylových pegmatitů, ale jen malá část z nich byla studována detailněji. Navíc je beryl poměrně nenápadný minerál, je proto pravděpodobné, že berylové pegmatity jsou ve skutečnosti poněkud hojnější.

### *Beryl-columbitové pegmatity*

Podle minerálních asociací můžeme vyčlenit dva základní typy – berylové pegmatity bez turmalínu a pegmatity s hojným turmalínem. První je běžný hlavně v sileziku, druhý je typický především pro moldanubikum, ale i zde existují výjimky.

Berylové pegmatity bez turmalínu se v sileziku vyskytují jako poměrně jednoduché muskovitické pegmatity s hojným granátem (almandin-spessartin) a akcesorickými minerály - columbitem, zirkonem, gahnitem a apatitem (Branná, Loučná – Novák et al. 2003b), nebo jako poměrně silně frakciované žíly s granátem (spessartin-almandin) a s řadou dalších akcesorických minerálů, k nimž patří např. ferrotapiolit, minerály skupiny mikrolitu, fersmit, rynersonit (Černý et al. 1992a, Novák et al. 2003a, Chládek et al. 2020, 2021), topaz, ryzí bismut, triplit, turmalín a chryzoberyl (okolí Maršíkova, Šumperk; obr. 2.8). Typickým znakem je přítomnost sekundárních minerálů Be, hojný je především bavenit-bohseit (Novák et al. 2023a), méně bertrandit a vzácný milarit a euklas (Pokorný a Staněk 1951). Pro berylové pegmatity je typická nízká aktivita B, P a F s výjimkou lokality Scheibengraben, kde je zvýšená aktivita B, P a hlavně F (topaz, muskovit bohatý F; Novák et al. 2003a).

Pegmatity v Hrubém Jeseníku nesou jasné stopy metamorfního postižení, jehož projevem je výrazné usměrnění muskovitu především v okrajových zónách prakticky na všech známých žilách. Část zdejších pegmatitů byla snad metamorfována na střižných zónách za vzniku fibrolitického sillimanitu s výraznou lineací a chryzoberylu (Franz a Morteani 1984, Černý et al. 1992b, 1995a).

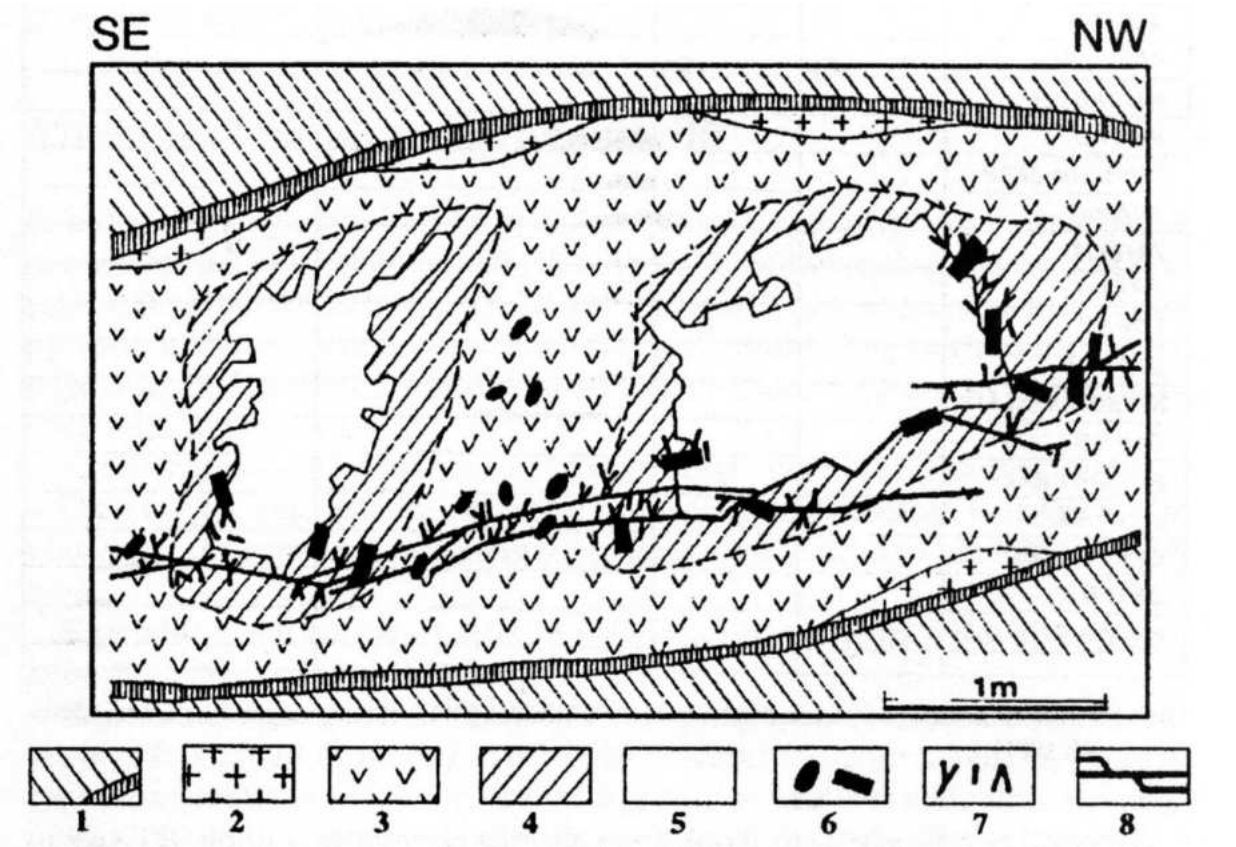



Obr. 2.8. Idealizovaný řez zonálním beryl-columbitovým pegmatitem z lokality Maršíkov-Scheibengraben (Novák et al. 2003a). 1 – okolní hornina, 2 – hrubě zrnitá jednotka, 3 – grafická jednotka, 4 – bloková jednotka s cleavelanditem (černý), 5 – jednotka cukrovitého albitu.

Berylové pegmatity s turmalínem vystupují téměř výhradně v oblasti moldanubika a objevují se v dvou specificky odlišných podtypech. První jsou relativně primitivní pegmatity obsahující vedle křemene, živců a někdy hojného muskovitu pouze beryl, turmalín a jen výjimečně další akcesorické minerály, např. granát, zirkon, apatit a columbit. Složení granátu, v němž často výrazně převažuje spessartin, ale ukazuje, že stupeň frakcionace některých pegmatitů je relativně vysoký. K těmto pegmatitům lze zařadit pegmatit Drahonín I u Tišnova (Černý 1956a,b), dále Polnička a Brzkov u Žďáru nad Sázavou, Žďár nad Sázavou, Kamenný Újezd u Českého Krumlova, Rudolfov u Českých Budějovic (Bouška a Čech 1960, Welser 1995), Kácov v Posázaví, Třebešice u Čáslavi, Plaňany u Kolína, Stříbrná Skalice a Chrášťany u Kdyně (Čech 1985). Poněkud specifickou lokalitou je Budislav u Litomyšle, kde se pegmatit vyskytuje v granitu železnohorského batolitu a jako běžná akcesorie se objevují vedle turmalínu, spessartinu a biotitu také muskovit, allanit a sulfidy (Nováček 1931). Tyto pegmatity tvoří až na výjimky drobné žíly o mocnosti kolem 1 m a většinou nebyly nově detailněji studovány. Výrazněji se odlišuje také berylový pegmatit s turmalínem a ferrocolumbitem z Kostelního Vydří u Telče, kde byl vedle berylu zjištěn primární Ca,Be-fosfát hurlbutit (Novák 1995, Cempírek et al. 1999).

Dalším podtypem jsou berylové pegmatity s turmalínem chudé muskovitem obsahující akcesoricky cordierit, niobový rutil, tantalový rutil, monazit, xenotim, zirkon, apatit, ilmenit, rutil a řadu dalších akcesorických minerálů. Jsou známé hlavně z Písecka (Písek - Obrázek I, Nový rybník, Údraž) a z Věžné u Nedvědice (obr. 2.9) a jsou také mnohem detailněji zpracované (Černý et al 1984, Čech 1985, Černý a Novák 1992, Novák et al. 2003c, Škoda et

al. 2011). Někdy tvoří mohutná a komplikovaně zonální tělesa o mocnosti až 30 m. Typickým znakem je také přítomnost sekundárních minerálů Be, které jsou v primitivních berylových pegmatitech vzácné. Na Písecku je hojný bertrandit a vzácný fenakit a milarit, ve Věžné byly zjištěny bertrandit, bavenit, epidydimit, eudidymit a milarit. Pro berylové pegmatity s turmalínem je charakteristická vysoká aktivita B, ale většinou velmi nízká aktivita P a F. Zcela specifický je pegmatit s primárním milaritem z lokality Velká skála u Písku (Novák et al. 2017b).




Obr. 2.9. Idealizovaný řez zonálním beryl-columbitovým pegmatitem z Věžné, upraveno podle Černý a Povondra (1967). 1 – serpentinit s lemem antofylitu, tremolitu, aktinolitu a flogopitu, 2 – granitická okrajová jednotka, 3 – grafická jednotka, 4 – přechodná bloková jednotka, 5 - křemenné jádro, 6 – grafické srůsty cordierit+křemen nebo turmalín+křemen, 7 – niobový rutil a beryl, 8 - trhliny.

***Beryl-columbit-fosfátové pegmatity***

Jediným pegmatitem v České republice, který zřejmě dobře odpovídá této definici, je Kynžvart u Mariánských Lázní. Tato lokalita je dnes velmi zašlá, ale nepochybně se jednalo o mohutné silně diferencované těleso uložené v granitu (Černý a Veselovský 2000). Vedle hojné světlé slídy (muskovit?) v několika generacích, berylu (místy zatlačovaný euklasem) a relativně méně častého turmalínu jsou typickými minerály primární fosfáty, především triplit, triploidit, apatit a amblygonit-montebrasit zatlačovaný lacroixitem a brazilianitem. Charakteristická je přítomnost fluoritu, hematitu, sekundárních fosfátů (např. fluellit) a akcesorických minerálů (manganocolumbit, mikrolit, zirkon, euxenit?) a hlavně silné hydrotermální alterace většiny minerálů. Pro pegmatit z Kynžvartu je typická vysoká aktivita P a F a také B (Černý a Veselovský 2000). Tím se odlišuje od většiny pegmatitů v Českém masivu. Přítomnost Li-minerálů ukazuje na poměrně vysoký stupeň frakcionace a nelze ani vyloučit přítomnost Li-slíd (zinnwaldit).

Beryl-columbit-fosfátovému subtypu by mohly dobře odpovídat některé pegmatity v oblasti Poběžovice-Domažlice (např. Otov-Větrný vrch), ale jsou vzhledem k jejich geologické pozici (jsou uloženy v rulách a svorech často s kyanitem) řazeny do třídy muskovitové-vzácných prvků. Dále by sem mohly být řazeny některé více frakciované fosfátové pegmatity bez berylu, např. žíla Oldřich z Dolních Borů a Cyrilov. Kromě absence berylu vykazují ale viditelně nižší stupeň frakcionace Mn/(Mn+Fe) a Ta/(Ta+Nb).

## Komplexní (Li) pegmatity

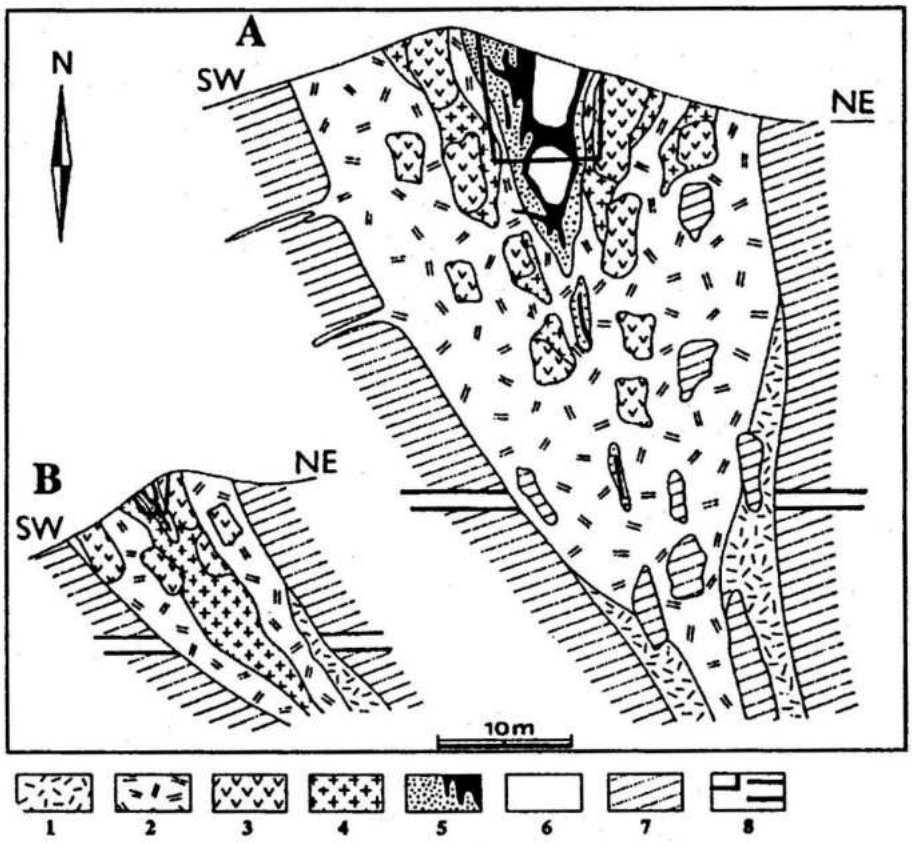
Jsou typické především pro moldanubikum, kde výrazně převládají nad berylovými pegmatity, i když nenápadnost berylu ve srovnání s lepidolitem a elbaity a možná přítomnost berylu v relativně primitivních pegmatitech mohou tento poměr zkreslovat. Komplexní pegmatity zcela chybí v sileziku, kde i obsahy Li v muskovitu jsou anomálně nízké (nepubl. data autora), ale setkáváme se s nimi v saxothuringiku, i když v poněkud odlišném vývoji.

Komplexní pegmatity se dělí do několika subtypů (tab. 2.2) a v moldanubiku byly nalezeny lepidolitový, elbaitový a petalitový subtyp. Přítomnost více Li-minerálů na jedné lokalitě v různém objemovém poměru vede k tomu, že některé pegmatity nelze zcela jednoznačně přiřadit k jednomu subtypu a existují pegmatity přechodného charakteru.

***Lepidolitové pegmatity***

Jsou nejhojnějším subtypem a dnes je u nás známo kolem 50 samostatných žil. Jejich stavba i velikost jsou velmi variabilní, mocnost kolísá od 1 do 35 m (Rožná). Téměř všechny žíly jsou zonální, zjednodušeně od okraje jsou přítomny granitická zóna, grafická zóna, hrubě až drobně zrnitá jednotka s albitem (existuje několik texturních a parageneticky typů), někdy blokový K-živec a křemenné jádro (obr. 2.10). Lepidolitová jednotka je přítomna na okraji křemenného jádra, popř. ve středu žíly. Lepidolitové pegmatity jsou mineralogicky velmi variabilní, typickým minerálem je vedle lepidolitu Li-turmalín (elbait, rossmanit), ale obsahují i další Li-minerály. Vzácné jsou pegmatity, kde je lepidolit jediným nebo téměř jediným a výrazně převažujícím minerálem Li (Sedlatice u Želetavy – Houzar 1996), téměř vždy je přítomen elbait, někdy také amblygonit-montebrasit a vzácně i petalit (Jeclov, Chvalovice, Puklice IV, Panská Lhota) vždy více či méně intenzivně zatlačený agregátem

křemene a spodumenu (např. v Dobré Vodě a Sušici I nebyly nalezeny ani relikty petalitu). V lepidolitových pegmatitech se především ve stráženckém moldanubiku objevují dutiny s krystaly křemene, albitu, elbaitů, lepidolitu a/nebo cookeitu (Dobrá Voda, Laštovičky, Dolní Bory, Přibyslavice u Čáslavi).




Obr. 2.10. Idealizovaný řez zonálním lepidolitovým pegmatitem z Rožné (Novák 1992). A – Hradisko, B – Borovina. 1 – hrubě zrnitá jednotka s biotitem, 2 - hrubě zrnitá jednotka se skorylem, 3 – grafická jednotka, 4 – granitická jednotka, 5 – albit-lepidolitová jednotka (černě – lepidolitová podjednotka), 6 – křemenné jádro, 7 – okolní hornina a enklávy, 8 – hranice těžby.

V lepidolitových pegmatitech je téměř vždy hojný muskovit a lepidolit odpovídá nejčastěji trilithionitu (hrubě lupenité růžové a fialové agregáty), ve více frakcionovaných pegmatitech (Rožná, Dobrá Voda) je běžný i polylithionit (jemnozrnné bílé, šedé i fialové agregáty ve středu žil – Černý et al. 1995b). Nárůst stupně frakcionace se odráží také ve vývoji složení turmalínů od černého skorylu až foititu přes tmavě modrý až zelený Fe-elbait často v asociaci s muskovitem po růžový elbait nebo vzácný rossmanit nebo darrellhenryit ve středu žil (Selway et al. 1998, 1999, Selway 1999, Novák 2000, Novák et al. 2013a), který je téměř vždy v asociaci s lepidolitem. Amblygonit-montebrasit je často zatlačovaný směsí sekundárních fosfátů – lacroxitu, brazilianitu, apatitu a minerálů skupiny crandallitu (goyazit, gorceixit), popř. mladšími generacemi montebrasitu. Jen v některých žilách byl zjištěn polucit (např. Puklice I, Jeclov). Typické akcesorické minerály zahrnují beryl, granát

(almandin-spessartin), apatit, kasiterit, columbit-tantalit, zirkon a topaz, dále řadu vzácných minerálů mikrolit, stibiotantalit, ferrotapiolit, löllingit, monazit, xenotim, triplit, trifylín. Při mladších hydrotermálních alteracích vznikly také zinnwaldit, analcim, cookeit, foitit, fluorit, hydroxyl-herderit, adulár aj. Pro lepidolitové pegmatity je typická vysoká aktivita F a podle množství turmalínu a amblygonit-montebrasitu popř. jiných fosfátů také zvýšená aktivita B a někdy i P. Nejvíce frakciované žíly (např- Rožná, Dobrá Voda, Jeclov I) se vyznačují vysokou aktivitou všech volatilních prvků - F, B i P.

Lepidolitové pegmatity se často vyskytují v lokálních rojích. Nejhojnější jsou v oblasti Jihlava-Luka nad Jihlavou (více samostatných žil v katastru obcí Jeclov, Puklice, Studénky, Příseka – Němec 1993), dále v okolí Borů (Dobrá Voda, Dolní Bory, Laštovičky), širší okolí Rožné (Hradisko, Borovina, Drahonín II). Vzácně jde o izolované žíly (např. Tři Studně u Žďáru nad Sázavou, Přibyslavice u Čáslavi), i když charakter terénu bez výchozů nevylučuje přítomnost dalších pegmatitů v oblasti. Některé žíly obsahují vedle lepidolitu poměrně velké množství elbaitu a blíží se elbaitovému subtypu (Strážek) nebo amblygonitu a blíží se amblygonitovému subtypu (Tři Studně).

***Petalitové pegmatity***

Pegmatit z Nové Vsi u Českého Krumlova je jediným příkladem v ČR, kdy množství lepidolitu a petalitu vedle poměrně hojného elbaitu a amblygonit-montebrasitu odpovídá přechodu mezi lepidolitovým a petalitovým subtypem, a v této práci je řazen k petalitovému (Staněk 1992, Grym 1994). Jeho vnitřní stavba, mineralogie i chemické složení minerálů (slídy, turmalíny) se velmi podobá lepidolitovým pegmatitům, a svojí stavbou i mineralogií se mu nejvíce blíží lokalita Jeclov I u Jihlavy. Vysoký stupeň frakcionace je dokladován i nejhojnějším výskytem polucitu u nás. Od lepidolitových pegmatitů se liší poněkud nižší aktivitou F, proto vznikl hojný petalit na úkor lepidolitu. Pegmatitu z Nové Vsi jsou podobné lepidolitové pegmatity v okolí, např. Chvalovice a Lhenice u Netolic, a to také dokazuje jeho genetickou příbuznost s lepidolitovými pegmatity.

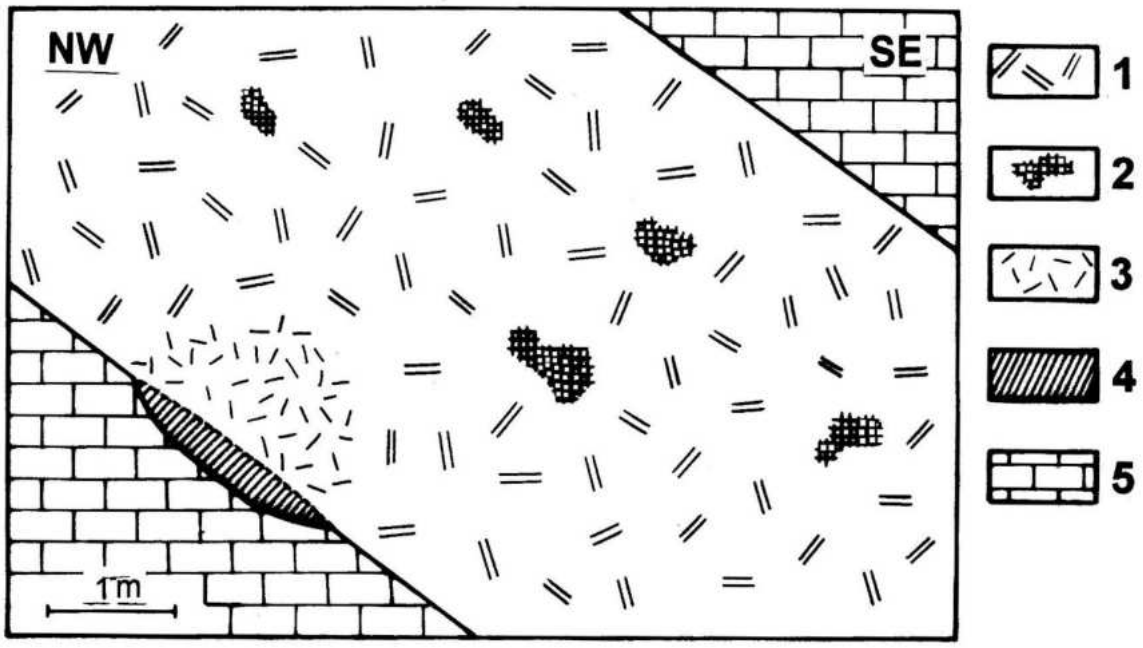
***Elbaitové pegmatity***

Pegmatity elbaitového subtypu jsou poměrně rozšířené a byly poprvé popsány právě z oblasti moldanubika (Novák a Povondra 1995). Jsou méně časté než lepidolitové pegmatity a až na výjimky obsahují celkově menší množství Li.

Elbaitové pegmatity tvoří relativně malá tělesa, jejich mocnost nepřesahuje 5 m a také jejich stavba je odlišná od lepidolitových pegmatitů. Některé žíly jsou nevýrazně zonální, roste pouze velikost zrna od okraje do středu (obr. 2.11). Li-minerály bývají soustředěny do více center v rámci jedné žíly, poměrně časté jsou dutiny s krystaly K-živce, křemene a elbaitu především v oblasti strážeckého moldanubika. Dalším typickým znakem řady žil jsou velmi časté grafické srůsty křemene a K-živce, dále křemene a turmalínu a křemene a granátu. Albitová jednotka tvořená většinou lupenitým světle modrozeleým cleavelanditem je méně častá než v lepidolitových pegmatitech, ale vždy indikuje přítomnost zajímavých minerálů.

Typickým znakem elbaitových pegmatitů je převaha K-živce nad albitem a téměř úplná nepřítomnost primárního muskovitu. Pokud je přítomen lepidolit, jeho složení odpovídá polylithionitu. Červené, červenohnědé, žlutohnědé až špinavě šedozelené elbaity jsou často

bohaté Mn, vzácně byl zjištěn i liddicoatit (Řečice, Bližná I, Staněk a Povondra 1987, Novák 2000). V těchto pegmatitech dosud nebyl nalezen petalit a amblygonit je velmi vzácný (Dolní Rožínka; Pauliš a Mazuch 2003). Typické akcesorické minerály jsou velmi podobné lepidolitovým pegmatitům – granát (spessartin), beryl, kasiterit, columbit-tantalit a zirkon. Dále jsou typické B-minerály - hambergit, danburit, datolit, manganaxinit, boromuskovit a řada dalších vzácných akcesorických minerálů, např. niobový rutil, danalit, monazit, thortveitit a pyrochlor. Při mladších hydrotermálních alteracích vznikly např. zinnwaldit, masutomilit, laumontit, muskovit, analcim, fluorit a titanit (Němec 1988, Novák a Povondra 1995, Novák et al. 1999b, Černý 2004, Novák et al. 2012). Pro elbaitové pegmatity je typická vysoká aktivita B a většinou nízká aktivita F a hlavně P.




Obr. 2.11. Idealizovaný řez elbaitovým pegmatitem Bližná I (Novák et al. 1997a). 1 – pegmatitová jednotka A se skorylem, 2 – pegmatitová jednotka A s Li-turmalíny, 3 – pegmatitová jednotka B s Li-turmalíny, 4 – exokontakt s turmalíny, 5 – mramor.

Dnes je známo zhruba 25 žil, např. Řečice u Nového Města na Moravě, Pikárec u Strážku, Dolní Rožínka, Vlastějovice nad Sázavou, Komárovice a Jeclov II u Jihlavy, Biskupice u Hrotovic, Bližná I a II a Černá I a II v Pošumaví, Ptáčkovna a Kamenné doly u Písku, aj.). Elbaitové pegmatity se vyskytují v určitých rojích (např. Bližná I, II a Černá I a II v Pošumaví) ale i zcela izolovaně (Vlastějovice). Někdy se objevují v oblastech, kde jsou hojnější lepidolitové pegmatity (okolí Jihlavy – elbaitové pegmatity Jeclov II a Komárovice, okolí Sušice - Sušice I a II – lepidolitové a Sušice III elbaitový s poněkud anomálními akcesorickými minerály - helvin, scheelit, polucit). Poněkud odlišná lokalita jsou Ctidružice u Moravských Budějovic (Čech 1962a). V zonálním pegmatitu s hojnými grafickými srůsty K-živce a křemene je velmi vzácný primární muskovit, jak lepidolit, tak i elbait jsou bohaté

Mn, dále jsou přítomny beryl, granát (spessartin), manganocolumbit, kasiterit a např. také hambergit a stokesit. Je blízký elbaitovým pegmatitům, ale zároveň má některé znaky podobné pegmatitu v Kracovicích popisovaného v kapitole Exotické pegmatity.

Vztah lepidolitových a elbaitových pegmatitů není zcela jasný. Některé pegmatity, např. Strážek, lze na základě jejich minerálních asociací označit jako přechodné, takže přinejmenším část elbaitových pegmatitů je geneticky blízce příbuzná lepidolitovým pegmatitům. Společné výskyty lepidolitových a elbaitových pegmatitů ve většině regionů a srovnatelné akcesorické minerály také ukazují na jejich genetickou příbuznost.

### 2.5.6 Miarolitické pegmatity

Pegmatity s hojnými primárními dutinami představují další třídu granitických pegmatitů. Rozhodujícími faktory pro zařazení do této třídy jsou hlavně přítomnost hojných primárních dutin, úzký prostorový a geochemický vztah k mateřské granitické hornině a vznik v relativně malých hloubkách zemské kůry.

Miarolitické pegmatity tvoří čočkovitá až kapkovitá a popř. i žilná tělesa, většinou jen několik dm mocná s jednoduchou zonální stavbou a minerálním složením, výjimečně dosahují tělesa velikosti několik m. Směrem od okraje se objevuje drobně až hrubě zrnitá granitická jednotka s biotitem (nebo amfibolem), grafická jednotka přecházející do blokového K-živce, a ve středu těles bývá vyvinuta dutina vyplněná krystaly K-živce, křemene a albitu. Přestože jsou v některých granitoidních masivech Českého masivu pegmatity odvozené od okolních granitoidů poměrně časté (např. středočeský batolit, žulovský batolit, pluton Čertova břemene, centrální moldanubický batolit), miarolitické pegmatity s vyvinutými dutinami jsou poměrně vzácné. Většina těles pegmatitů pronikajících granitické plutony má totiž výrazně žilný charakter, často mají ostrý kontakt a hlavně neobsahují dutiny.

Protože je většina miarolitických pegmatitů chemicky a mineralogicky poměrně jednoduchých, je využití publikovaných klasifikací (např. Černý 1991a, Wise 1999, Černý a Ercit 2005, Wise et al. 2018) nevhodné. Podle typu mateřského granitu můžeme miarolitické pegmatity poněkud zjednodušeně rozdělit do dvou hlavních skupin.

#### *Pegmatity vázané na granity I-typu*

V těchto granitech (liberecký pluton, žulovský batolit a durbachitové masivy hlavně masiv Čertova břemene) miarolitické pegmatity většinou neobsahují primární muskovit nebo jen v malém množství. V libereckém plutonu patří mezi klasické lokality Ruprechtice, Fojtka, Raspenava, Smržovka aj. a vedle již uvedených minerálů jsou poměrně časté zeolity (analcim, chabazit, stilbit), turmalín a vzácně i allanit, U-slídy a topaz (Jablonec nad Nisou - Fišera a Rychlý 1983). Podobná mineralizace je známa také ze Žulovska, kde jsou ale dutinové pegmatity mnohem vzácnější, mineralizace je jednodušší a navíc je přítomen chlorit (Losos et al. 1995).

Nově byly zjištěny miarolitické pegmatity v plutonu Čertova břemene v okolí Kovářova u Milevska a velmi dobře byly odkryty zejména v lomu poblíž Vepic (Škoda et al. 2004, Sejkora et al. 2020). Pegmatity tvořily čočky a kapkovité útvary o velikosti až několik $m^3$ uložené v porfyrickém durbachitu. Kontakt byl pozvolný, směrem od durbachitu byly

zjištěny: přechodná zóna světlého, hrubě zrnitého granitoidu s amfibolem, drobně zrnitá granitická zóna s biotitem, hrubě zrnitý pegmatit s albitem, blokový K-živec (místy amazonit) a křemen s dutinou vyplněnou velkými krystaly záhnědy. Primitivnější pegmatity kromě živců, křemene, biotitu a vzácného titanitu další minerály většinou neobsahují. Více frakciované miarolitické pegmatity, které lze na základě jejich mineralogického složení zařadit ke gadolinitového subtypu, byly zjištěny z lomu ve Vepicích. Tyto pegmatity obsahují řadu akcesorických minerálů a převážně v hrubě zrnité jednotce byly zjištěny minerály skupiny samarskitu (samarskit-Y, kalciosamarskit, ishikawait), minerály skupiny pyrochloru (yttrobetafit, yttropyrochlor, uranpyrochlor), fersmit, scheelit, ferrocolumbit, ilmenit, titanit, zirkon, rutil a řada sulfidů – pyrit, pyrhotin, galenit, molybdenit, pentlandit, sfalerit, argentopentlandit, parkerit (Škoda et al. 2004, Sejkora et al. 2020). V dutinách pak byly vedle velkých krystalů záhnědy, K-živce a albitu zjištěny titanit, jílové minerály a vzácně milarit, bertrandit a pyrit.

***Pegmatity vázané na S-typové granity***

Sem patří především centrální moldanubický batolit, říčanský pluton a pravděpodobně některé masivy v saxothuringiku. Miarolitické pegmatity z centrálního moldanubického batolitu, např. Řásná a Lhotka u Telče, obsahují vedle křemene a živců hojný muskovit, apatit a vzácně i andalusit a turmalín. Pegmatity z Březí u Říčan jsou zřejmě nejvíce frakcionované a obsahují v dutinách i barevné variety turmalínu a kasiterit (Kutina 1944, Láznička 1967), tyto nálezy ale nebyly nově potvrzeny (Velebil 1998). Drobné žíly pegmatitů z lokality Vítkov u Sokolova, karlovarský pluton jsou uloženy v hlavně granitech, popř. pronikají ruly v jejich plášti. Obsahují hojný černý a zelený turmalín, dále fluorit, muskovit, apatit a topaz, místy vyvinuté v dokonalých krystalech do dutin.

### 2.5.7 Exotické pegmatity

V Českém masivu byly zjištěny také pegmatity, které lze ve většině případů označit jako granitické a které jsou určitým způsobem neobvyklé až unikátní. Výrazně nezapadají do současných klasifikací (Černý a Ercit 2005, Wise et al. 2018) svým minerálním a celkovým chemickým složením, mají zvláštní vnitřní stavbou, popř. typ jejich frakcionace je neobvyklý. I když jsou některé pegmatity poměrně primitivní, vesměs se jedná o natolik významné a zajímavé lokality (některé pouze v rámci Českého masivu jiné i celosvětově), že je vhodné je zmínit v této kapitole. Navíc si právě tyto pegmatity nejvíce zaslouží detailní studium.

#### Primitivní pegmatity

K abysálním popř. subabysálním pegmatitům nejspíše patří řada relativně primitivních pegmatitů obsahujících pouze živce, křemen, slídy a vzácně i další akcesorické minerály. Vzhledem k jejich relativně primitivní stavbě a minerálnímu složení jim ale byla většinou věnována jen malá pozornost.

***Záhnědové pegmatity - moldanubikum***

Specifický a lokálně velmi rozšířený typ pegmatitů moldanubika, kterému je věnována značná pozornost ze strany sběratelů, ale jen malá pozornost ze strany odborníků. Jejich

typickým znakem je přítomnost hojných dutin s krystaly záhněd, albitu, K-živce, muskovitu a případně dalších minerálů, turmalínu, apatitu nebo i granátu, často ve velmi atraktivních ukázkách. Na druhé straně mají velmi úzký vztah k okolním horninám (migmatizované ruly), který se projevuje často konformním uložením pegmatitových žil, někdy přechodnými kontakty a také primitivním minerálním složením i chemickým složením jednotlivých minerálů (např. turmalín; Novák et al. 2004b). Právě absence možných mateřských granitů v místech jejich výskytu, úzké texturní vztahy k okolním metamorfovaným horninám a přítomnost andalusitu a cordieritu ukazují, že jde o pegmatity vzniklé nejspíše natavením okolních hornin za nižších tlaků (hojný andalusit), tedy typický znak metamorfogenních pegmatitů. Tím se výrazně liší od typických miarolitických pegmatitů, kde je vztah pegmatitů ke granitickým horninám velmi úzký.

Na základě dostupných informací lze vyčlenit dva poněkud odlišné subtypy. Jednoznačně nejhojnější jsou záhnědové pegmatity s turmalínem, často i apatitem, silně pinitizovaným cordieritem a andalusitem. Tvoří nepravidelné žíly, čočky a nepravidelná tělesa, konkordantně ale i diskordantně uložené v okolních horninách (více či méně migmatizované biotit-sillimanitické ruly a granulitové ruly místy s granátem). Kontakt s okolní horninou je spíše neostrý, jen diskordantní odžilky mají většinou ostrý kontakt. Velikost pegmatitových těles kolísá od několika cm do několika m. Stavba žil kolísá od velmi jednoduchých žil, kdy krystaly záhněd, živců, slíd, turmalínu a často apatitu narůstají na úzkou zónu složenou z křemene, živců a případně biotitu nebo muskovitu, až po často dokonale symetricky zonální tělesa. V nich jsou od okraje vyvinuty: okrajová jemnozrnná granitická zóna s biotitem, grafická zóna (někdy s biotitem), zóna blokového K-živce a někdy křemenné jádro. Vedle toho se objevují albitem bohaté partie a dutiny vyplněné krystaly záhněd, K-živce, turmalínu a muskovitu často značných rozměrů. Vztah dutin k jednotlivým texturně-parageneticým jednotkámch pegmatitů a jejich pozice v rámci tělesa nejsou zcela jasné. Dutiny mohou být přítomny na okraji křemenného jádra, přímo navazovat na grafickou jednotku, anebo se objevují v málo mocných odžilcích větších pegmatitových těles.

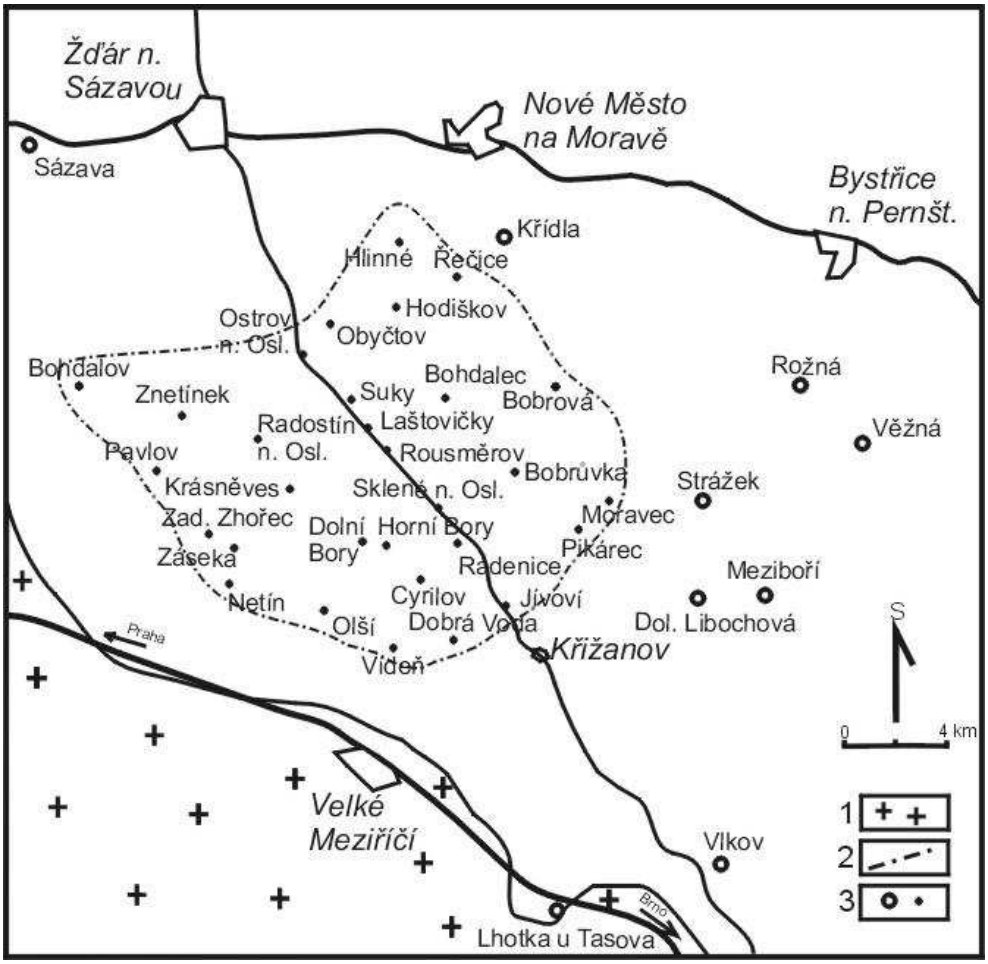
Vedle již uvedených hlavních i vedlejších minerálů se někdy v masivním pegmatitu v akcesorickém množství objevují dumortierit, ilmenit a rutil. V dutinách jsou vedle velkých krystalů záhnědy, K-živce, albitu a muskovitu přítomny turmalín (skoryl a dravit, vzácně foitit), apatit, brookit, anatas, pyrhotin, pyrit a výjimečně také kasiterit a granát (almandin-spessartin). Záhněda, albit, muskovit a turmalín se často objevují v několika generacích. Typickým znakem pegmatitů je vysoká aktivita B, místy mírně zvýšená aktivita P a zřetelně nízká aktivita F.

Nejznámější oblast dutinových záhnědových pegmatitů leží ve strážeckém moldanubiku, gföhlská jednotka (obr. 2.12) zhruba mezi Velkým Meziříčím, Žďárem nad Sázavou a Novým Městem na Moravě s lokalitami Bobrůvka, Bobrová, Cyrilov, Krásněves, Pikárec, Řečice, Sklené, Znetínek aj. Další, méně známé a menší oblasti leží v okolí Rožné a Věžné u Bystřice nad Pernštejnem, dále jsou to Dlouhá Brtnice u Jihlavy, Lhotka u Tasova, Mysliboř u Telče, Sedletín u Chotěboře a na řadě míst v jižních a východních Čechách (Černá v Pošumaví, Bor a Dražíč u Tábora aj.).

Drobné dutinové pegmatity s granátem v okolí obce Kámen u Pelhřimova představují další velmi neobvyklý typ. Jsou uloženy v relativně málo metamorfovaných horninách. Typickým

minerálem je granát (spessartin-almandin), který tvoří v dutinách dokonale vyvinuté krystaly až 1 cm velké. Bývá doprovázen albitem, muskovitem, záhnědovým křemenem a epidotem. Detailnější údaje o zdejších pegmatitech zatím chybí.

Záhnědové pegmatity byly detailně studovány jen výjimečně a to pouze subtyp s turmalínem (např. Hájek a Staňková 1970, Staněk 1986, Němec 1992, Gadas et al. 2012). Jednotlivé minerály z dutinových pegmatitů studovali např. turmalín – Sekanina (1928), Povondra (1981), Novák et al. (2004b), Gadas et al. (2012), ilmenit - Novák a Jilemnická (1986), dumortierit - Cempírek (2003).




Obr. 2.12. Schematická geologická mapa rozšíření záhnědových pegmatitů ve strážeckém moldanubiku. 1 – třebíčský pluton, 2 – oblast záhnědových pegmatitů, 3 – jednotlivé lokality.

### Markvartice u Třebíče - moldanubikum

V leukokrátních rulách byly zjištěny mikroklinem bohaté mineralogicky i texturně variabilní partie s relativně hojným kalcitem a andraditem a méně častými diopsid-hedenbergitem,

epidotem, amfibolem, magnetitem a titanitem (Houzar a Šrein 1990). Horniny mají místy mají pegmatitový charakter (např. grafické textury) a vedle mikroklinu a křemene vyskytuje andradit-grossular v krystalech až několik cm velkých, dále epidot, titanit a zirkon.

**Vlastějovice nad Sázavou - moldanubikum**

Vedle hojných amfibol-allanit-fluoritových pegmatitů (Žáček et al. 2003, Ackerman 2004, Ackerman et al. 2007, Novák et al. 2013b), elbaitového pegmatitu s bavenitem, danburitem, datolitem a vzácným fluoritem (Novák a Hyršl 1992, Novák et al. 2013b) a turmalínových pegmatitů třídy vzácných prvků s albitem, muskovitem a skorylem (Vavřín 1962) byl z této lokality popsán drobný pegmatit složený z křemene, K-živce, albitu a muskovitu (Staněk a Schnorrer 1993). Vedle akcesorického apatitu zde ale byly zjištěny také turmalín-buergerit a fenakit. Především přítomnost buergeritu z něj činí velmi neobvyklý pegmatit, který podobně jako buergerit vyžadují další studium.

**Hraničná u Javorníka – lugikum**

Zdejší pegmatity tvoří až 3 m mocné čočky a žíly pronikající mramory a magnetitové zrudnění poblíž Hraničné v Rychlebských horách (Litochleb 1972). Typickými minerály jsou světle zelený amazonit se zvýšeným obsahem Pb a Ba, z akcesorických minerálů se objevují allanit, turmalín, a také galenit, sfalerit a magnetit hlavně při kontaktu. Zajímavý je nízký obsah slíd (biotit, muskovit) a viditelné usměrnění (metamorfóza?) pegmatitu (Litochleb 1972). V této oblasti nejsou kromě tonalitů přítomny jiné potenciální mateřské granitické horniny, jejich vztah k pegmatitům je ale nejasný, mohou dokonce být i metamorfogenního původu. Přítomnost allanitu a amazonitu může naznačovat příbuznost k pegmatitům vzácných zemin.

**Ruda nad Moravou u Šumperka – lugikum**

Pegmatit z vrchu Žďár u Rudy nad Moravou je jedním z nejneobvyklejších pegmatitů v Českém masivu (Novák a Gadas 2010). Tvoří zonální žílu o mocnosti kolem 2 m uloženou v serpentinitu, dnes už zcela vytěženou. Na kontaktu byla vyvinuta poměrně mocná zóna složená z jemnozrnného plagioklasu, klinozoisitu, křemene a grossularu, a z krystalů diopsidu a amfibolu až 5 cm velkých. Vnitřní stavba pegmatitu se podobá klasickým pegmatitům, od okraje granitická zóna, grafická zóna, hrubozrnný plagioklasový pegmatit, partie blokového K-živce a plagioklasu a křemenné jádro. Neobvyklé je minerální složení, vedle křemene a poměrně vzácného K-živce (místy jako sytě zelený amazonit), je hojný plagioklas (oligoklas až bytownit), běžný grossular (grafické srůsty s křemenem i izolované krystaly; Novák et al. 1985, Gadas et al. 2013), diopsid často zatlačovaný aktinolitem, allanit a epidot. Typickou akcesorií je zirkon v několika odlišných morfologických, paragenetických a chemických typech, vzácný je titanit, biotit a ilmenit.

Minerálním složením zdejší pegmatit odpovídá spíše tonalitům než granitům. Mineralogické a chemické složení i vzhled kontaktní zóny mezi pegmatitem a serpentinitem.se podobá žilám rodingitu, které byly zjištěny na více místech serpentinitového tělesa u Rudy nad Moravou. Vnitřní stavba je ale obdobná jako v klasických pegmatitech, i když hojné grafické srůsty bazického plagioklasu a křemene a grossularu a křemene z grafické zóny jsou v pegmatitech unikátní. Neobvyklé jsou také vysoké obsahy Sr v plagioklasech (až 0,25 % SrO) a v pegmatitu (až 2500 ppm Sr).

### Velká Kraš u Vidnavy - lugikum

Mohutná pegmatitová žíla (mocnost desítky m) z Velké Kraše u Vidnavy v žulovském batolitu s objemově výrazně převládajícím křemenným jádrem v současném odkryvu představuje neobvyklý typ pegmatitů v rámci Českého masivu. Tento pegmatit má neostrý kontakt s okolním granitem, následuje bloková zóna K-živce s krystaly monazitu a mohutné křemenné jádro, které zřejmě obsahovalo dutiny s krystaly křišťálu a záhnědy. Další minerály zahrnují vzácný primární muskovit, hydrotermální albit, epidot a hematit. Tento pegmatit se liší velikostí, minerální asociací i vnitřní stavbou s mohutným křemenným jádrem od ostatních pegmatitů žulovského batolitu.

### Stavení u Moravského Krumlova – brunovistulikum

Pegmatity brněnského masivu jsou poměrně hojné, ale většinou velmi primitivní. Za zmínku stojí zonální pegmatity Krumlovského lesa z lokality Stavení u Moravského Krumlova (Staněk 1983) a řada dalších lokalit v této oblasti (Hlína). Zonální žíly, až 1 m mocné, jsou uloženy v granitech a typickým akcesorickým minerálem je granát (almandin-spessartin) a magnetit. Okolní leukokrátní granity až pegmatity obsahují akcesorický granát se zvýšeným obsahem Y a také několik vzácných akcesorických minerálů s velmi neobvyklým chemickým složením (zirkon a titanit - oba se zvýšeným obsahem Nb, dále yttropyrochlor, cheralit - Leichmann et al 1999, Hönig et al. 2010, 2014).

## Frakcionované pegmatity

V této části jsou uvedeny pegmatity, které vykazují relativně vysoký stupeň frakcionace (odpovídají pegmatitům vzácných zemin, beryl-columbitovému subtypu až komplexnímu typu třídy vzácných prvků) ale jsou výrazným způsobem odlišné od ostatních frakcionovaných pegmatitů popsaných v předešlých kapitolách.

### Drahonín u Tišnova - moldanubikum

Dvě zonální pegmatitové žíly z uranového dolu v Drahoníně (Drahonín III a IV) z oblasti drahonínského durbachitu (Sojka 1969, Škoda 2003 Škoda a Novák 2004) mají výrazně peraluminický charakter, ale jejich akcesorické minerály i stupeň frakcionace jsou velmi dobře srovnatelné s pegmatity gadolinitového subtypu např. z Vepic u Milevska (Škoda et al. 2004). První žíla obsahuje hojný turmalín a sekaninait, minerály skupiny samarskitu (samarskit-Y, kalciosamarskit, ishikawait), minerály skupiny pyrochloru (yttropyrochlor, yttrobetafit, uranpyrochlor), scheelit a uraninit (Škoda a Novák 2004). Dále zde byly nalezeny ferrocolumbit, ixiolit, zirkon a monazit. Další podobná žíla obsahuje hojný turmalín, spessartin se zvýšeným obsahem Y, beryl zatlačovaný bavenitem, bertranditem a analcimem, akcesorický manganocolumbit, kasiterit, mikrolit, yttropyrochlor a yttrobetafit.

### Hamry nad Sázavou u Žďáru nad Sázavou – moldanubkum

Mírně usměrněné dvojslídné granity s akcesorickým turmalínem pozvolna přecházejí do hrubozrnných pegmatoidních partií. Vedle velkých lupenů biotitu při okraji pegmatoidních partií jsou hojné velké lupeny muskovitu, sloupcovité krystaly skorylu, vzácně zrna topazu, sloupcovité krystaly berylu, apatit, löllingit často zatlačený

arseniosideritem, a granát. Postupné přechody a velmi podobné asociace naznačují, že pegmatit představuje více frakciované partie mateřského granitu (Novák 1981). Podobný typ pegmatitů je v Českém masivu poměrně výjimečný.

**Přibyslavice u Čáslavi – moldanubikum**

Specifikum této lokality nevyplývá z mineralogického složení, i když je nepochybně velmi zajímavé a bohaté, ale z kombinace vysoce frakcionovaných granitických hornin různého stáří, stupně metamorfního postižení, stupně frakcionace a poněkud rozdílné geochemické specializace, které nemá v Českém masivu obdoby. Těleso turmalín-muskovitové ortoruly místy s akcesorickým granátem (almandin) je pronikáno mladšími tělesy leukokrátního muskovitického granitu, který obsahuje řadu zajímavých akcesorických minerálů, např. velká zrna granátu (almandin, Breiter et al. 2005), dále turmalín (skoryl), apatit, sillimanit, staurolit, dumortierit, kasiterit, nigerit, gahnit a Mn-siderit. Běžné jsou také hrubozrnné (pegmatoidní) partie uložené v ortorulách i granitu, vždy s hojným turmalínem (skoryl, oxy-skoryl; Bačík et al. 2013), granátem (almandin) a nodulemi primárních fosfátů (trifylín, graftonit, sarkopsid, fluorapatit), doprovázené řadou akcesorických minerálů (grafit, löllingit, gahnit, staurolit, Mn-siderit, sfalerit) a bohatým společenstvím sekundárních fosfátů (Povondra et al. 1987, 1998, Breiter et al. 2003, 2005). V lomu č. 4 byla zjištěna diskordantní pegmatitová žíla lepidolitového subtypu s ložními odžilky bez granátu, ale obsahující vzácný lepidolit, elbaity a amblygonit a typické akcesorie - apatit, kasiterit a ferrocolumbit. V suti na Tisé skále byly nedávno nalezeny úlomky dalšího lepidolitového pegmatitu. (Starý et al. 2004). Zdá se, že ortorula je prevariského stáří (analogie s hlubockou ortorulou – U-Pb zirkon 506 Ma - Vrána a Kröner 1995), jen mírně deformovaný granit a aplit-pegmatity a nedeformovaný lepidolitový pegmatit jsou zřejmě variské.

**Zárubice u Třebíče – moldanubikum**

Dalším neobvyklým typem v rámci Českého masivu je pegmatit ze Zárubic (Houzar a Novák 1985). Zonální, ale nepravidelné těleso proniká Ca-bohaté horniny (erlan) a typickým znakem je velmi hojný topaz vedle turmalínu (skoryl), apatitu a vzácného triplitu, berylu a amblygonitu. Tento pegmatit je odlišný od jiných pegmatitů této oblasti extrémně vysokým obsahem topazu a zároveň nepřítomností Li-slíd. Složení turmalínu (skoryl, Fe-elbait) a živců (vysoký obsah P) jsou ale srovnatelné s jinými moldanubickými pegmatity třídy vzácných prvků.

**Kracovice u Třebíče – moldanubikum**

Tento pegmatit se svojí minerální asociací výrazně odlišuje od ostatních komplexních pegmatitů (Houzar 1987, Němec 1990a, Novák et al. 1998b, 1999c, 2012). Vedle křemene, K-živce místy amazonitového a albitu zde byly nalezeny hojný zinnwaldit a masutomilit, chemický vývoj turmalínů (skoryl až elbait; Čopjaková et al. 2013, 2015) i slíd (biotit, zinnwaldit, Mn-bohatý lepidolit) je zcela odlišný od ostatních lepidolitových pegmatitů (Novák et al. 1999c, 2012, Novák 2000). Dále je velmi hojný topaz, granát (spessartin) obsahuje zvýšená množství Y, hambergit je bohatý F (Novák et al. 1998b) a vyskytují se zde také oxidy REE, Nb – fergusonit, samarskit-Y a yttropyrochlor. Je možné, že jsou Kracovice geneticky příbuzné pegmatitům vzácných zemin třebíčského plutonu, protože výskyt pegmatitu leží jen několik stovek m od z. okraje třebíčského masivu ve směrném pokračování euxenitových pegmatitů mezi Vladislaví a Třebíčí. Vzhledem ke kombinaci vysoké aktivity

F, B, Li, Be a REE a neobvyklému složení řady minerálů se jedná o velmi unikátní pegmatit i ve světovém měřítku.

**Příbram - bohemikum**

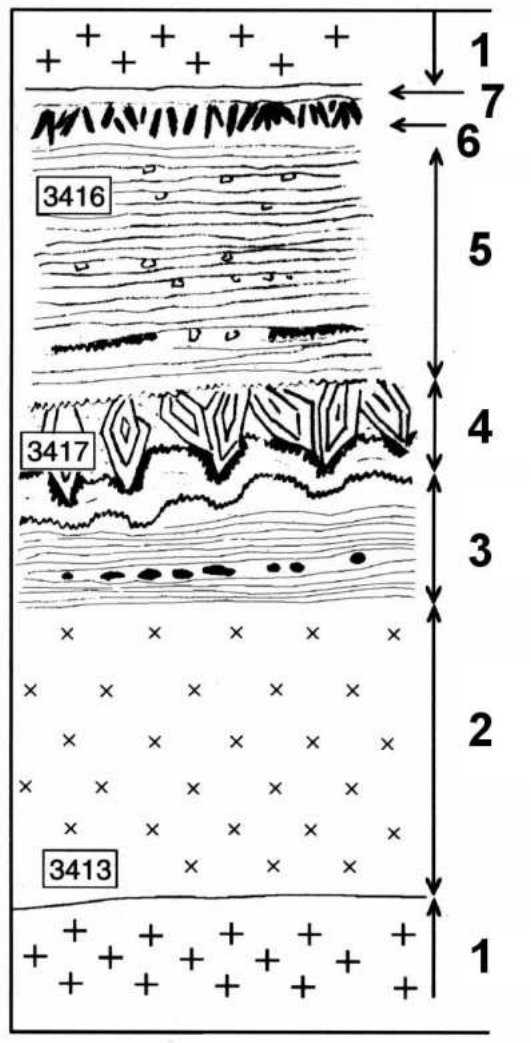
Nově byl zjištěn granitický pegmatit, který proniká proterozoickými horninami na žilném uzlu Skalka, Příbram. Vedle poměrně častého topazu, který je silně alterovaný a vyskytuje s v asociaci s modrozeleným cleavelanditem, obsahuje Li-slídu odpovídající zinnwalditu až Mn,Fe-bohatému lepidolitu, muskovit, dále hojné pseudomorfózy po sekaninaitu, složené z muskovitu a Fe,Mn-chloritu, skoryl a almandin-spessartin. Dále byl zjištěn vzácný fluorit a akcesoricky sfalerit, niobový rutil a rutil. S výjimkou Březí u Říčan se jedná se o další výrazněji frakcionovaný pegmatit vázaný zřejmě na středočeský batolit.

**Podlesí u Horní Blatné – saxothuringikum**

Zdejší pegmatit je neobvyklý chemickým složením i vnitřní stavbou. Je součástí velmi komplikovaného a silně frakciovaného magmatického komplexu, složeného z granitového pně pronikaného v horních partiích žilnými granity a jejich součástí jsou i žíly pegmatitů několik dm mocné (Breiter et al. 1997, Breiter 1998, 2001, 2002; obr. 2.13). Tento granitový komplex zřejmě intrudoval do velmi mělkých partií zemské kůry. Stavba pegmatitů je komplikovaná, krystaly drobně blokového K-živce, kolem 3 cm velké, jsou uložené v jemnozrnné hmotě složené z křemene, albitu a zinnwalditu. Hojný je také topaz a přítomna je řada akcesorických minerálů, např. apatit, kasiterit, uranmikrolit a fluorit. Ještě bohatší asociace akcesorických minerálů je v okolním žilném granitu (např. columbit, wolframit, amblygonit, eosforit, childrenit, trifylín, zwieselit, pyrit, bismutinit aj.).

**Vernéřov u Aše – saxothuringikum**

Klasickým příkladem horniny příbuzné pegmatitům je Vernéřov popsaný Čechem (1962b, 1985) a nově Breiterem et al. (2009). Jde o křemen-amblygonit-mikroklinový žilník, kde hlavní žíla dosahuje mocnosti 50-70 cm a délky kolem 1 km. Žilník je uložen diskordantně ve fylitech, kontakt s okolní horninou je ostrý, výjimečně se zde vyskytuje turmalín. Hlavní žíla má jen velmi nedokonale vyvinutou zonálnost, v některých partiích se při kontaktu objevují hrubozrnné srůsty mikroklinu a křemene, které poněkud připomínají grafický pegmatit. Vedle už uvedených minerálů jsou ve vedlejším množství přítomny místy také albit a muskovit. Neobvyklé jsou i akcesorické minerály, mezi nimiž jsou výrazně zastoupeny sulfidy (stannin, kesterit, sfalerit, chalkopyrit a molybdenit) vedle hojného kasiteritu, hojný je také apatit ve více generacích. Typické je také uplatnění mladší hydrotermální fáze, na kterou je vázána část sulfidů a při níž také došlo k alteraci některých primárních minerálů (hlavně amblygonitu) za vzniku řady sekundárních fosfátů (např. trifylín, augelit, crandallit, lazulit, apatit, gatumbait), karbonátů, fluoritu a diasporu. Žilník ve Vernéřově pravděpodobně reprezentuje přechod mezi pegmatity vzácných prvků (amblygonitový subtyp) a vysokoteplotními hydrotermálními žilami s Sn, Cu, Zn - mineralizací.




Obr. 2.13. Idealizovaný řez žilnými granit-pegmatity z Podlesí u Horní Blatné (Breiter 2002). 1 – albit-protolithionitový granit, 2 – albit-zinnwalditový granit, 3 – drobně-zrnitá laminovaná hornina s apatitem, 4 – K-živcem bohatá pegmatoidní poloha, 5 - drobně-zrnitá laminovaná hornina (albit + zinnwaldit), 6 – poloha s K-živcem, 7 - drobně-zrnitý granit.

## 2.6 Kontaminované pegmatity

Pegmatity popisované v předešlých kapitolách nejsou kontaminované z okolních hornin nebo jen velmi slabě, a patří do tzv. čisté linie (Fersman 1960). V Českém masivu se ale poměrně často vyskytují pegmatity, které nesou výrazné stopy kontaminace z okolních hornin. To se projevuje vznikem minerálů (např. pyroxeny, amfiboly, skapolit, fluorit), které nejsou v běžných granitických pegmatitech přítomny vůbec nebo jen zcela ojediněle. Dále často dochází ke vzájemné reakci mezi pegmatitem a okolní horninou, např. k odnosu alkálií hlavně draslíku z pegmatitu a přínosu látek z okolí. Kontaminace se projevuje především výrazným obohacením Ca, Fe a/nebo Mg, ale zřejmě také F, REE a popř. i jiných prvků. Mineralogické (a chemické) složení těchto pegmatitových těles je natolik odlišné od běžných pegmatitů a jejich rozšíření hlavně v oblasti moldanubika tak velké, že jsou zařazeny do samostatné kapitoly.

### 2.6.1 Primitivní pegmatity

Primitivní pegmatitové taveniny, metamorfogenního ale zřejmě i magmatogenního původu (jejich rozlišení bývá v jednotlivých případech komplikované) často pronikají horninami velmi odlišného chemického složení a výrazně kontaminovány. Podle převládajících nebo typických minerálů jsou primitivní pegmatity řazeny do několika samostatných subtypů.

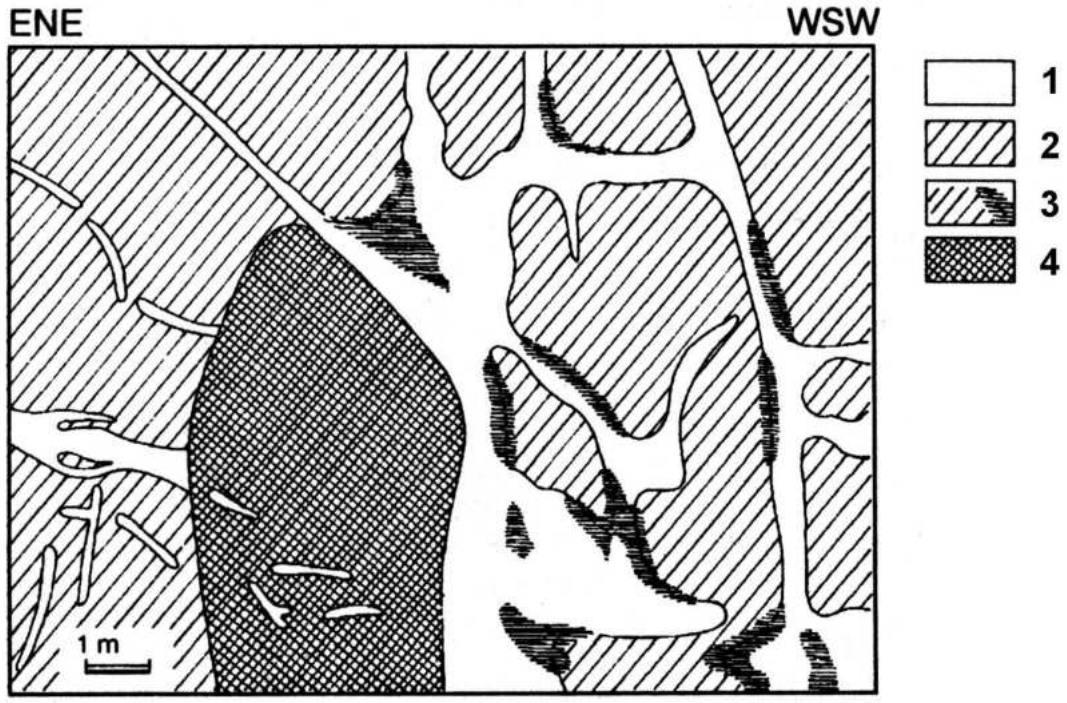
#### Amfibol-allanit-fluoritové pegmatity

Specifický typ primitivních pegmatitů vázaných výhradně na tělesa Fe-skarnů. Pegmatity tvoří žíly až žilníky (obr. 2.14), mocnost jednotlivých žil se pohybuje od několika cm do 3 m. Méně mocné žíly jsou většinou homogenní, u některých mocnějších žil se objevuje nevýrazná zonálnost projevující se zvětšováním zrna a změnou minerální asociace. Kontakt s okolní horninou může být místy ostrý, většinou jsou ale na kontaktu vyvinuty různě mocné kontaktní zóny s hojným amfibolem, biotitem, fluoritem, allanitem a popř. hedenbergitem, vesuvianem, grossularem a andraditem.

Amfibol-allanit-fluoritové pegmatity jsou silně kontaminované; vedle křemene, oligoklasu a méně častého K-živce se v těchto pegmatitech místy hojně vyskytují amfibol (hastingsit až ferropargasit), tmavě fialový, růžový až bezbarvý fluorit, hedenbergit a allanit. Lokálně hojné nebo naopak jen v akcesorickém množství jsou přítomny také andradit, apatit, ferroaxinit, uvit, dravit, epidot, klinozoisit, ferroaktinolit, skapolit, titanit, zirkon a kalcit. Výjimečně byl zjištěn také světle modrozelený albit (cleavelandit - Domanínek), který naznačuje zvýšený stupeň frakcionace na této lokalitě. Typické jsou hydrotermální alterace, při nichž vzniká např. prehnit, skapolit, minerály epidotové skupiny, apofylit, a fluorkarbonáty Ca a REE (např. bastnaesit, parisit, kalcioankylit). Běžným znakem většiny těchto pegmatitů je často vysoká aktivita F, jen místy zvýšená aktivita B a variabilní ale spíše nízká aktivita P.

Amfibol-allanit-fluoritové pegmatity jsou známy téměř ze všech těles Fe-skarnů moldanubika, kutnohorského a svrateckého krystalinika, zatím nebyly zjištěny např. v Fe-skarnech v okolí Mladé Vožice nebo v Fe-skarnech saxothuringika v Krušných horách. Množství pegmatitů i množství amfibolu, allanitu a fluoritu na jednotlivých žilách se ale výrazně liší, typické lokality jsou např. Vlastějovice nad Sázavou (hojný fluorit i allanit), Malešov u Kutné Hory, Rešice u Moravského Krumlova, Líšná u Nového Města na Moravě (hojný fluorit, vzácný allanit), Domanínek u Bystřice nad Pernštejnem (hojný allanit, vzácný fluorit), a řada dalších. Pegmatity a jejich minerály byly studovány řadou autorů např. Slavík (1951), Vavřín (1962), Němec (1963), Čech a Povondra (1972), Černý a Povondra (1972), Staněk (1977), Mrázek a Vrána (1984), Rezek a Krist 1985, Novák a Hyršl (1992), Goliáš (2002), Filip (2002), Filip et al. (2002), Žáček et al. (2003), Ackerman (2004), Ackerman et al. 2007, Novák et al. 2013b). Především hojný výskyt fluoritu a allanitu na některých lokalitách je velmi zajímavý. Žáček et al. (2003) studovali pegmatity ve Vlastějovicích a domnívají se, že pegmatitová tavenina vznikla natavením metapelitů, které se vyskytují v okolí skarnových těles. Primitivní tavenina pronikala křehké Fe-skarny během nebo těsně po vrcholu metamorfózy. Ve skarnu byla obohacena o Ca, Fe, F a REE, přičemž zdrojem Ca a Fe byly různé Ca,Fe-minerály Fe-skarnu, F byl zřejmě uvolněn z nejstarší generace F-bohatého grossularu, který byl zatlačen F-chudým granátem při regionální metamorfóze (Žáček 1997). REE možná pochází z allanitu, který je běžně přítomen ve skarnu. Přestože

byly tyto pegmatity i jejich minerály studovány poměrně často, jejich vznik byl dosud řešen pouze v práci Novák et al. (2013b), ale vyžaduje další detailnější studium.




Obr. 2.14. Pegmatity pronikající Fe-skarn ve Vlastějovicích (Novák a Hyršl 1992). 1 – pegmatit, 2 – Fe-skarn, 3 – reakční lem, 4 – magnetit.

## Diopsidové pegmatity

Kalcitické i dolomitické mramory, ale někdy i amfibolity a erlany (pyroxenické ruly) jsou pronikány žilami jednoduchých pegmatitů, které někdy obsahují velmi hojný diopsid. Jejich vnitřní stavba je většinou poměrně jednoduchá, od okraje ke středu dochází jen ke zhrubnutí zrna, zonální stavby jsou vzácné. Kontakt s okolním mramorem bývá někdy ostrý. Jindy je zde vyvinutý kontaktní lem složený hlavně z wollastonitu a pyroxenu, jen vzácně se vyskytuje grossular (Houzar 1985).

Velmi jednoduché je většinou i minerální složení, vedle dominujícího K-živce, podřadného křemene, plagioklasu (vzácně převládá nad K-živcem) a hojného až akcesorického diopsidu se můžeme setkat s titanitem a aktinolitem, vzácný je biotit a allanit, místy je poměrně hojný apatit, téměř vždy chybí primární muskovit. Typické jsou hydrotermální alterace diopsidu, který bývá zatlačován aktinolitem a nontronitem. Dále byly zjištěny kalcit, klinozoisit, chlorit, sekundární muskovit, grossular, apofylit, prehnit, skapolit a jen vzácně také fluorit, dravit, allanit a ferroaxinit. Pegmatity někdy přecházejí do žil složených téměř výhradně z hydrotermálních produktů – skapolitu a aktinolitu. Pro tento typ pegmatitů je typická nízká aktivita B a F, místy je zvýšená aktivita P a $CO_2$.

S diopsidovými pegmatity se můžeme setkat na řadě lokalit v různých geologických jednotkách. Mezi nejznámější lokality v moldanubiku patří okolí Moravských Budějovic (Lukov), Třebíče (Nová Ves, Sokolí, Číchov), Písku, Strakonic, Sušice a Volyně. Diopsidový pegmatit je znám v Supíkovicích u Jeseníku (silesikum), kde ale nelze vyloučit původ taveniny z žulovského masivu, který je nepochybný u podobných pegmatitů ze Starého Podhradí u Žulové a jiných míst na Žulovsku ležících v kontaktním plášti žulovského plutonu. Diopsidovým pegmatitům a jejich minerálům byla věnována zatím jen malá pozornost (Houzar 1985, Novák et al. 1990).

Pegmatit s akcesorickým korundem z lokality Pokojovice u Třebíče představuje poněkud specifický typ, který se podobá diopsidovým pegmatitům především přítomností diopsidu a titanitu v okrajových zónách a apofýzách. Pegmatit tvoří komplikované těleso diskordantně pronikající K-bohaté amfibolity s tenkými polohami mramorů. Vedle převládajícího K-živce, vedlejšího křemene a oligoklasu obsahuje akcesorický korund v krystalech až 10 cm dlouhých, který byl místy poměrně hojný. Dále se zde vyskytují biotit, muskovit, skoryl a vzácně také apatit, zirkon a scheelit. Nově tento pegmatit studovali Trnka a Houzar (1993). Považují jej za primitivní pegmatit podobný pegmatitům pronikajícím mramory, pro přítomnost korundu vyžadují vysokou aktivitu Al a nízkou aktivitu Mg a Fe, případně mohlo také dojít k odnosu alkálií.

## Skapolitové pegmatity

Specifickým typem kontaminovaných pegmatitů jsou pegmatity se skapolitem jako jedním z vedlejších, popř. hlavních minerálů. Jsou příbuzné diopsidovým pegmatitům, protože vedle křemene, K-živce a plagioklasu obsahují podobné vedlejší a akcesorické minerály – diopsid, titanit, aktinolit, kalcit, allanit a apatit. Dále pronikají hlavně mramory, mají jednoduchou stavbu a vykazují podobné a místy velmi intenzivní hydrotermální alterace. Pegmatity poměrně často přecházejí do žil složených téměř výhradně z hydrotermálních produktů – hlavně skapolitu, méně aktinolitu, prehnitu, popř. zeolitů. Pro tento typ pegmatitů je typická nízká aktivita B a F, místy zvýšená aktivita P a ve větší míře než v diopsidových pegmatitech se uplatňuje $CO_2$.

Nejlépe odkrytou je zonální žíla ve Studnicích u Nového Města na Moravě. Od okraje žíly téměř 1 m mocné je vyvinuta středně až hrubě zrnitá zóna složená z živců, křemene, aktinolitu a titanitu ve středu s křemenným jádrem obsahujícím nedokonale vyvinuté sloupcovité krystaly skapolitu (mejonit, nepubl. data MN) až kolem 50 cm dlouhé, Žíla pegmatitu přechází postupně do skapolitové žíly bez živců s vedlejším množstvím aktinolitu, kalcitu, apatitu a titanitu. Další podobné výskyty leží hlavně v okolí Moravských Budějovic (např. Lukov a Třebíč). Skapolitovým pegmatitům ale byla dosud věnována jen velmi malá pozornost. Až na výjimky neznáme chemické složení skapolitu a živců, popř. dalších akcesorických minerálů (Novák et al. 1990).

## Oligoklasové pegmatity

Tyto pegmatity patří mezi příklady, kdy odnos draslíku z pegmatitové taveniny doplněný kontaminací pegmatitové taveniny z okolních hornin vede ke vzniku neobvyklého složení pegmatitu. Typickými znaky těchto pegmatitů jsou vedle hojného až dominujícího oligoklasu, nízký obsah křemene a K-živce, přičemž oba často zcela chybí.

Oligoklasové pegmatity (někdy označované jako oligoklasity) tvoří většinou drobná tělesa (žíly, čočky a žilníky; obr. 2.15) o mocnosti několik cm až max. 1 m. Někdy mají vyvinutou jednoduchou zonálnost, jindy jsou homogenní. Na kontaktu s okolním serpentinitem je vždy vyvinuta reakční zóna, jejíž mocnost bývá někdy srovnatelná s mocností pegmatitu. Je složena především z flogopitu, antofylitu, aktinolitu, chloritu, vermikulitu a/nebo mastku, někdy je přítomen také modrý dravit.

Typomorfním minerálem je křídově bílý až světle šedý oligoklas (vzácně až andezín) a dalšími typickými minerály jsou turmalín (dravit, skoryl), flogopit, aktinolit, diopsid, vzácně apatit, zirkon, grafit, niobový rutil a korund. Při hydrotermálních alteracích vznikaly hlavně prehnit, skapolit, chlority, vermikulit, karbonáty (kalcit, dolomit, aragonit), minerály skupiny serpentinu, zeolity (thomsonit, harmotom, phillipsit, chabazit; Novák et al. 2023b) a hydrotalkit. Při hydrotermálních pochodech byl často rozpuštěn a odnesen křemen a zůstaly po něm vyloužené prostory někdy vyplněné sekundárními jílovými minerály nebo opálem.

Oligoklasové pegmatity pronikají téměř výhradně serpentinity (ve všech autorovi známých případech bezgranátické serpentinity) zejména v moldanubiku, popř. ve svrateckém krystaliniku, v jiných geologických jednotkách známé nejsou. Méně často pronikají dolomitické mramory. Typické lokality leží v okolí Drahonína u Tišnova, patří sem jednoduché žíly v okolí Věžné u Nedvědice, dále Věchnov u Bystřice nad Pernštejnem, Tři Studně u Nového Města na Moravě, Hrubšice u Oslavan, Mohelno, Smrček u Nedvědice, Mirošov u Strážku, Všechlapy u Bechyně a Stupná u Křemže. Oligoklasit s modrým dravitem uložený v dolomitickém mramoru se vyskytuje v Prosetíně u Olešnice (moravikum). Detailně byly studovány v řadě prací např. Černý (1958, 1960, 1963, 1965), některé minerály např. Rosický a Kokta (1931), Černý et al. (1964, 2000), Černý a Povondra (1966, 1967), Sekanina (1965), Povondra a Novák (1986), Gadas et al. (2014), Novák et al. (2017a), Bosi et al. (2017), Čopjaková et al. (2020) Krmíček et al. (2021).

### 2.6.2 Frakcionované pegmatity

**S**tupeň kontaminace frakcionovaných berylových a komplexních pegmatitů je v porovnání s primitivními pegmatity většinou nízký, a to i v případě, že pronikají horninami velmi kontrastního chemického složení. Nízký stupeň kontaminace většinou nemá žádný nebo jen velmi malý vliv na mineralogické složení pegmatitu, takže není důvod vyčleňovat samostatné subtypy, jako je tomu u primitivních pegmatitů. V této kapitole uvádím vybrané příklady prokazatelné kontaminace u více frakcionovaných pegmatitů.

#### *Pegmatity pronikající serpentinity*

V současné době je známo několik žil berylových (Věžná) a komplexních pegmatitů (petalitový pegmatit z Nové Vsi u Českého Krumlova, lepidolitový pegmatit z Radkovic a elbaitový pegmatit z Biskupic u Hrotovic), které pronikají serpentinity a které nesou více či méně výrazné stopy kontaminace okolní horninou. V této práci jsou blíže diskutovány jen nejtypičtější a detailněji zpracovávané lokality.

Berylové pegmatity z Věžné u Nedvědice byly studovány v řadě prací (např. Černý et al. 1984, Černý a Novák 1992, Teertstra et al. 1995, Novák et al. 2003c, 2017a, 2023, Dosbaba a Novák 2012, Toman a Novák 2018, 2020, Gadas et al. 2020) a jsou vzácným příkladem

výrazné kontaminace více frakciovaných pegmatitů v Českém masivu. Zonální, asi 2 m mocná pegmatitová žíla **Věžná I** ležící na pravém břehu Nedvědičky představuje typický beryl-columbitový pegmatit s ojedinělou a objemově bezvýznamnou čočkou Li,Cs-minerálů (pollucit, lepidolit, elbait, Cs-beryl, Cs-lepidolit) a dalších akcesorických minerálů (např. triplit, apatit, bismut, hübnerit, brabantit, analcim, harmotom). Kontaminace se projevuje téměř ve všech texturně-parageneticky jednotkách vysokým poměrem Mg/Fe v biotitu, cordieritu a turmalínu, zvýšené obsahy Mg byly zjištěny také v berylu a v odmíšeninách ferrocolumbitu v niobovém rutilu (Černý a Povondra 1966, 1967, Povondra 1981, Černý et al. 1984, 2000). Nejvíce frakciovaná partie s Li,Cs-minerály už nenese žádné stopy kontaminace, všechny studované minerály (turmalíny, zeolity, slídy) neobsahují žádný Mg, pouze pozdní sokolovait pronikající po trhlinách pollucitem a žilky chabasitu-(Ca) obsahují až 3 hm. % MgO. Žíla oligoklasitu **Věžná II** ležící v lůmku na levém břehu Nedvědičky je kontaminována výrazněji. Z tmavých minerálů je poměrně hojný tremolit, K-živec zcela chybí, křemen, turmalín, beryl a tantalový rutil jsou vzácné.

Oba pegmatity podlehly hydrotermální alteraci, která se projevuje na žíle Věžná I zatlačováním řady minerálů, hlavně cordieritu a berylu, a především rozpouštěním křemene v grafické zóně. Oligoklasit Věžná II je alterovaný výrazněji, plagioklas je masivně zatlačen prehnitem a zeolity, na puklinách a v dutinách po vylouženém křemeni se objevují kerolit, hydrotalkit, kalcit, aragonit a zeolity (harmotom, thomsonit, chabasit; Novák et al. 2023b). Obě žíly mají velmi dobře vyvinuté kontaktní lemy složené z antofylitu, aktinolitu, flogopitu, chloritu, vermikulitu a mastku mocné až několik dm.

V komplexních pegmatitech pronikajících serpentinity je stupeň kontaminace mnohem nižší a je dokonce obtížné ji spolehlivě prokázat. Např. turmalíny z **Nové Vsi u Č. Krumlova a Radkovic** vykazují zvýšené obsahy Mg jen v okrajové zóně a tyto obsahy se neliší od turmalínů z jiných srovnatelných pegmatitů pronikajících např. ruly nebo amfibolity (Selway et al. 1999, Selway 1999, Novák 2000). Především v Radkovicích došlo téměř k úplnému vyloužení křemene ve všech texturních jednotkách, které jsou vyplněny jílovými minerály, v Nové Vsi k rozpouštění křemene vůbec nedošlo. Kontakty obou žil nebyly studovány.

***Pegmatity pronikající mramory***

Mramory (dolomitické i kalcitické) proniká několik komplexních pegmatitů moldanubika (zonální lepidolitové pegmatity z Krasonic u Telče a Sušice I, zonální elbaitové pegmatity z Dolní Rožínky, Sušice III a Vratěnína u Jemnice, a nedokonale zonální elbaitový pegmatit Bližná I u Černé v Pošumaví). V současné době není znám žádný berylový pegmatit pronikající mramory.

Detailně byl studován pegmatit **Bližná I** pronikající dolomit-kalcitické mramory (Novák et al. 1997a, 1999b, 2012, Novák 2000, Černý 2004). Je nedokonale zonální, od okraje se mění pouze zrnitost, typické pegmatitové jednotky jako grafické srůsty křemene a K-živce nebo blokové K-živce jsou poměrně vzácné, v pegmatitu zcela chybí slídy. Detailní studium turmalínů ukázalo, že jsou obohacené Mg a Ca (uvit, dravit, liddicoatit), a to výrazněji než v jiných elbaitových pegmatitech (Novák 2000). Během krystalizace pegmatitu dochází postupně ke snižování obsahu Mg, takže nejmladší primární turmalíny elbait a liddicoatit Mg vůbec neobsahují. Neobvyklý je vláknitý modrý dravit narůstající popř. zatlačující elbait, který je hydrotermálního původu a ukazuje na nový přínos Mg z okolí (Novák 1998). Složení

živců na zvýšenou aktivitu Ca neukazuje s výjimkou pozdně magmatického andezínu v asociaci s liddicoatitem a elbaitem, ale relativně běžné jsou jiné akcesorické Ca-minerály, např. diopsid titanit, manganaxinit a kalcit (Černý 2004).

Zatímco v pegmatitu z Bližné I je kontaminace pegmatitu Mg a Ca prokázána, u ostatních pegmatitů pronikajících mramory je stupeň kontaminace mnohem nižší a projevuje se pouze mírně zvýšenými obsahy Ca, popř. Mg v turmalínu (Novák 1998, 2000). Živce většinou nebyly detailněji studovány. Pegmatity pronikající mramory mají vyvinuté jen nesouvislé kontaktní lemy mocné většinou jen několik mm, výjimečně nad 1 cm. V Krasonicích je na kontaktu s kalcitickým mramorem vyvinut reakční lem složený z wollastonitu, grossularu, pyroxenu, vesuvianu a klinozoisitu, elbaitové pegmatity Bližná I a Dolní Rožínka uložené v dolomit-kalcitických a dolomitických mramorech mají vyvinut velmi úzký lem tremolitu. Na jiných lokalitách nebyly kontaktní projevy studovány.

***Pegmatity pronikající Fe-skarny***

Elbaitový pegmatit z **Vlastějovic nad Sázavou** je jediným více frakcionovaným pegmatitem pronikajícím Fe-skarny. Asi 2 m mocná žíla s nedokonale vyvinutou zonálností je složena z převládajícího K-živce, křemene a turmalínu, pouze v podřadném až akcesorickém množství se vyskytují plagioklasy (oligoklas až albit), danburit a biotit. Vliv okolní horniny se projevuje vysokými obsahy Fe v biotitu a turmalínu, zvýšeným obsahem Ca v turmalínu (Povondra et al. 1985, Novák 2000, Novák et al. 2013b) a také přítomností akcesorického magnetitu, danburitu a datolitu. Oba poslední minerály se ale objevují i v elbaitových pegmatitech, kde se vliv kontaminace nepředpokládá. Vzácný fluorit může být také produktem kontaminace. Ve srovnání s amfibol-allanit-fluoritovými pegmatity ve Vlastějovicích má tento pegmatit jen nevýrazné kontaktní lemy (Čech 1985).

Srovnáme-li stupeň kontaminace primitivních a frakcionovaných pegmatitů, rozdíly jsou zcela zřejmé. Kontaminace se u primitivních pegmatitů projevuje vznikem nových fází, které jsou místy dokonce velmi hojné (pyroxeny, amfiboly, fluorit). U více frakcionovaných pegmatitů je vznik nových minerálů spíše výjimečný (diopsid, titanit). Tyto minerály se vyskytují pouze v akcesorickém množství, a kontaminaci lze zachytit podle vyššího množství relevantních prvků (Ca, Mg, Fe) v minerálech, které jsou v pegmatitu běžně přítomny (např. turmalín, biotit). Oba typy se také liší reakčními lemy, které jsou mocnější u primitivních pegmatitů.

Při diskusi reakčních lemů na styku pegmatitů a okolních hornin je nutné brát v úvahu také reakční lemy vznikající reakcí fluid uvolněných z vysoce frakciovaných pegmatitů bohatých B, Li, Cs aj. (Morgan a London 1987), tedy pohyb fluid z pegmatitu do okolních hornin. Projevuje se přítomností Ca,Mg-turmalínů (dravit, uvit), biotitu se zvýšeným obsahem Cs a F, a holmquistitu (Morgan a London 1987). Tento typ reakcí je ale v pegmatitech Českého masivu zcela výjimečný (např. enklávy rul s hojným turmalínem v Rožné; Novák a Selway 1997, nebo turmalínová poloha vyvinutá lokálně na styku pegmatitu s mramorem v Bližné I; Novák et al. 1997a, 1999b, 2017a, Krmíček et al. 2021).

## 2.7 Petrogenetická klasifikace pegmatitů

Zatímco členění pegmatitů do tříd - abysální, muskovitová, muskovitová-vzácných prvků, vzácných prvků a miarolitická, použité v předešlých kapitolách, je spíše deskriptivní, jsou pegmatity třídy vzácných prvků a miarolitické pegmatity v závislosti na chemické signatuře mateřské granitické horniny klasifikovány do tří genetických skupin (anglicky family; Černý 1991a, Černý a Ercit 2005, Černý et al. 2012):

**LCT** typické prvky - **Li**,Rb,**Cs**,Be,Sn,Zr,Hf,W,Ga,**Ta**>Nb,F,B,P

**NYF** typické prvky - **Nb**>Ta,Ti,Be,**Y**,Sc,REE,Zr,U,Th,**F**

**Mixed** – nese společné geochemické rysy jak LCT a tak NYF skupin, s více či méně výraznou převahou jedné z nich, a pegmatity patřící do této skupiny jsou vzácné a většinou nejsou spolehlivě zařaditelné (Černý 1991a, 2000, Novák et al. 2012).

Mineralogicky se obě skupiny liší. V LCT pegmatitech se vyskytují např. lepidolit, spodumen, petalit, amblygonit-montebrasit, pollucit, columbit-tantalit) a peraluminické minerály (andalusit, cordierit, turmalíny). Pro NYF pegmatity jsou typické hlavně REE-minerály (allanit, monazit, xenotim, minerály skupiny euxenitu, aeschynitu a samarskitu, fergusonit, gadolinit, aj.) a metaaluminické minerály (např. amfiboly). Beryl ale i řada dalších minerálů (např. biotit, muskovit, zinnwaldit, monazit, xenotim, zirkon, fluorit, topaz) se může vyskytovat v obou skupinách.

V České masivu lze většinu více frakcionovaných pegmatitů zařadit bez větších problémů do jednotlivých skupin, přičemž poněkud jednodušší situace je u NYF pegmatitů, protože u nich známe velmi často jejich mateřský granit. Patří sem pegmatity typu vzácných zemin (allanitový, euxenitový a gadolinitový subtyp), vyskytující se téměř výhradně v *I*-typových granitech a velmi pravděpodobně i některé miarolitické pegmatity vázané na *I*-typové granity (tab. 2.3). Pro LCT pegmatity je situace poněkud komplikovaná tím, že jejich mateřské granity často neznáme. Přesto můžeme na základě mineralogického složení i možného vztahu pegmatitů k *S*-typovým granitům do LCT rodiny zařadit pravděpodobně všechny berylové pegmatity (beryl-columbitový a beryl-columbit-fosfátový subtyp) a komplexní pegmatity (petalitový, lepidolitový a elbaitový subtyp) v oblastech moldanubika, saxothuringika a silezika (tab. 2.3).

Do tzv. Mixed skupiny by mohly patřit pouze dva pegmatity z moldanubika popsané v kapitole o exotických pegmatitech – Drahonín u Tišnova a Kracovice u Třebíče. Oba leží v rulách v těsné blízkosti *I*-typových durbachitových plutonů, s nimiž jsou velmi pravděpodobně geneticky svázané. Typickým znakem těchto pegmatitů je přítomnost REE-minerálů (Drahonín – samarskit-(Y), kalciosamarskit, ishikawait, yttropyrochlor, yttrobetafit, uranpyrochlor; Kracovice – fergusonit, samarskit-(Y), yttropyrochlor a Y-spessartin; Škoda a Novák 2004) na jedné straně a minerálů typických pro LCT pegmatity (Drahonín – sekaninait, turmalín; Kracovice – elbait, lepidolit) na straně druhé.

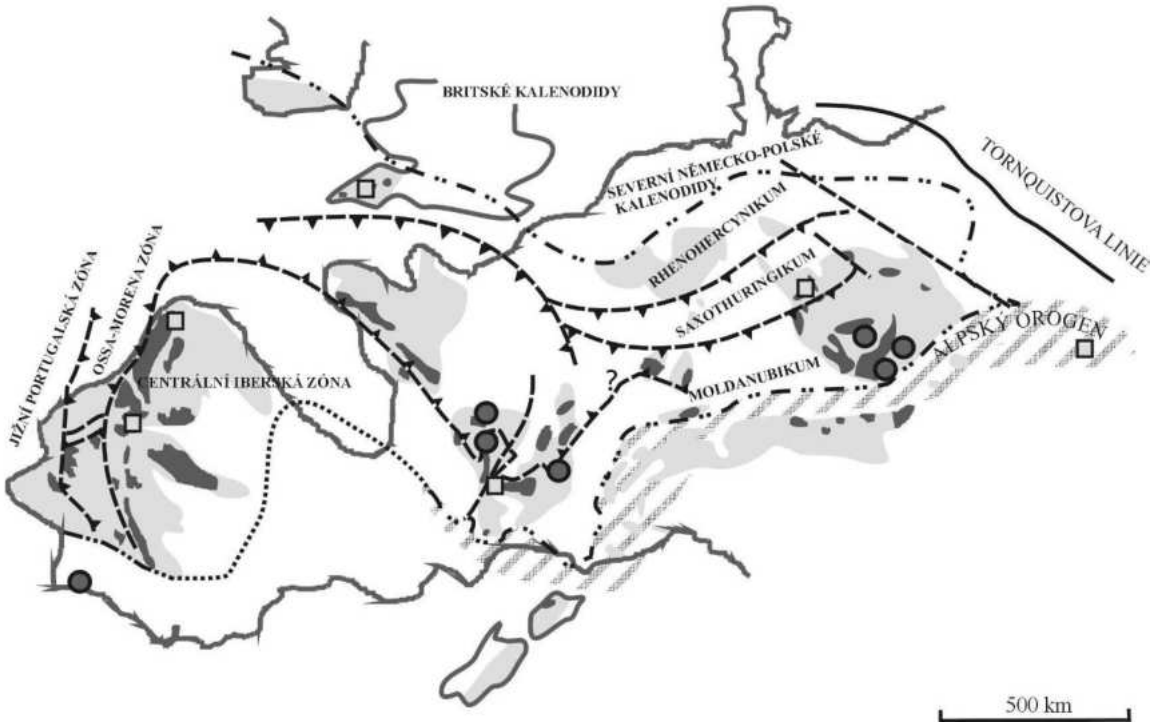
## 2.8 Regionální rozšíření jednotlivých typů granitických pegmatitů v Českém masivu

Český masiv je součástí hercynské orogenní zóny (obr. 2.16). Tato oblast je složena z několika mikrokontinentů, které spolu kolidovaly během paleozoika (Franke 2000). Byly v ní vyčleněny následující základní regionální jednotky, které se více či méně uplatňují na území České republiky: zóna moldanubická, zóna sasko-durynská a zóna rhenohercynská. V rámci těchto hlavních zón bylo v této práci používáno následující regionálně-geologické členění (srovnej např. Mísař et al. 1983, Dallmayer et al. 1995, Franke 2000, Franke a Żelażniewicz 2000, Chlupáč et al. 2002): oblast moldanubická (moldanubikum), oblast tepelsko-barrandienská nebo středočeská (bohemikum), oblast sasko-durynská (saxothuringikum), oblast západosudetská (lugikum) a oblast moravsko-slezská (silesikum, brunovistulikum a moravikum). Toto rozdělení bude využíváno pro regionální klasifikaci granitických pegmatitů, i když regionálně-geologické členění Českého masivu a jeho geologický vývoj jsou stále předmětem diskuse a i tento článek by k ní mohl přispět.

Tabulka 2.3. Přehled pegmatitů třídy vzácných prvků a miarolitické třídy Českého masivu (klasifikace upravena podle Černý 1991a a Wise 1999).

| Typ/ | Subtyp/ | Typické příklady |
|---|---|---|
| NYF skupina | | |
| vzácných zemin | allanitový | Chlumek, Babice, Ruprechtice, Žulová, Brno |
| | euxenitový | Třebíč, Kožichovice, Pozďátka, Vladislav, Klučov, Bochovice |
| | gadolinitový | Vepice |
| LCT skupina | | |
| berylový | beryl-columbitový | Písek, Údraž, Věžná, Drahonín I, Žďár nad Sázavou, Kovářová, Kostelní Vydří, Rudolfov, Třebešice, Plaňany, Chrášťany, Budislav, Maršíkov, Šumperk, Branná |
| | beryl-columbit-fosfátový | Kynžvart u Mariánských Lázní |
| komplexní (Li) | petalitový | Nová Ves u Českého Krumlova |
| | lepidolitový | Rožná, Dobrá Voda, Dolní Bory, Laštovišky, Drahonín II, Radkovice, Sedlatice, Krasonice, Jeclov I, Puklice, Panská Lhota, Chvalovice, Sušice I |
| | elbaitový | Řečice, Pikárec, Dolní Rožínka, Biskupice, Komárovice, Jeclov II, Vlastějovice, Bližná, Černá, Písek, Sušice III, |
| Mixed skupina | | |
| | | Drahonín III a IV, Kracovice |

Regionální klasifikace granitických pegmatitů v oblasti Českého masivu, resp. jeho části na území České republiky, byla publikována více autory, např. Grym (1975), Čech et al. (1981), Čech (1985) a Novák et al. (1992). Předložená klasifikace vychází především ze členění publikovaného Novákem et al. (1992) a Novákem (2005), dále z regionálního členění Českého masivu. V neposlední řadě je také založena na nových terénních, mineralogických, geochemických a radiometrických datech. Vyčleněné oblasti jsou regionálně geologické a ne spíše geograficky regionální jako je tomu v klasické práci Mineralogie Československa (Čech et al. in Bernard 1981).




Obr. 2.16. Schematická geologická mapa hercynské orogenní zóny. Světlé pole – metamorfované horniny, tmavé pole – variské granitické batolity, kroužky a čtverečky – turmalinické granity.

### 2.8.1 Moldanubická oblast (moldanubikum)

Moldanubikum zahrnující také kutnohorské a svratecké krystalinikum je na pegmatity jednoznačně nejbohatší jednotka v rámci Českého masivu a vyskytuje se zde celá škála různých tříd, typů a subtypů pegmatitů (tab. 2.3). Jsou zde známy abysální pegmatity, většinou bohaté Al, vyskytující se na sv. okraji moldanubika, a „subabysální“ pegmatity běžné hlavně v oblastech intenzivní migmatitizace. Hojné jsou různé typy relativně primitivních pegmatitů třídy vzácných prvků, včetně více frakcionovaných např. fosfátový subtyp (tab. 2.3). Pegmatity vzácných zemin třídy vzácných prvků jsou vázány výhradně na tělesa durbachitů a jejich blízké okolí, a mohou mít i miarolitický charakter. Poměrně rozšířené jsou i berylové pegmatity třídy vzácných prvků. Zvláště typické jsou komplexní (Li) pegmatity s převahou lepidolitového subtypu nad elbaitovým. LCT pegmatity výrazně převládají nad NYF, ale i ty jsou relativně hojné, velmi vzácný je tzv. Mixed typ (Kracovice, Drahonín), pokud oba pegmatity nepatří přímo k NYF pegmatitům. Přítomnost petalitu na některých lokalitách (Nová Ves u Českého Krumlova a Chvalovice – jižní Čechy, Jeclov I, Puklice IV a Panská Lhota - Jihlavsko) nebo pseudomorfóz po petalitu složených ze spodumenu a křemene (Dobrá Voda u Velkého Meziříčí, Sušice I) ukazují na relativně nízký tlak při intruzi pegmatitové taveniny nižší než 2,5-3 kbar pro komplexní pegmatity a pravděpodobně i pro ostatní pegmatity třídy vzácných prvků (hojný andalusit a cordierit-sekaninait). Dalším indikátorem nízkého tlakuje přítomnost téměř čistého sekaninaitu v pegmatitech (např. Dolní Bory, Drahonín III), který je stabilní P < ~2 kbar. Geochemicky

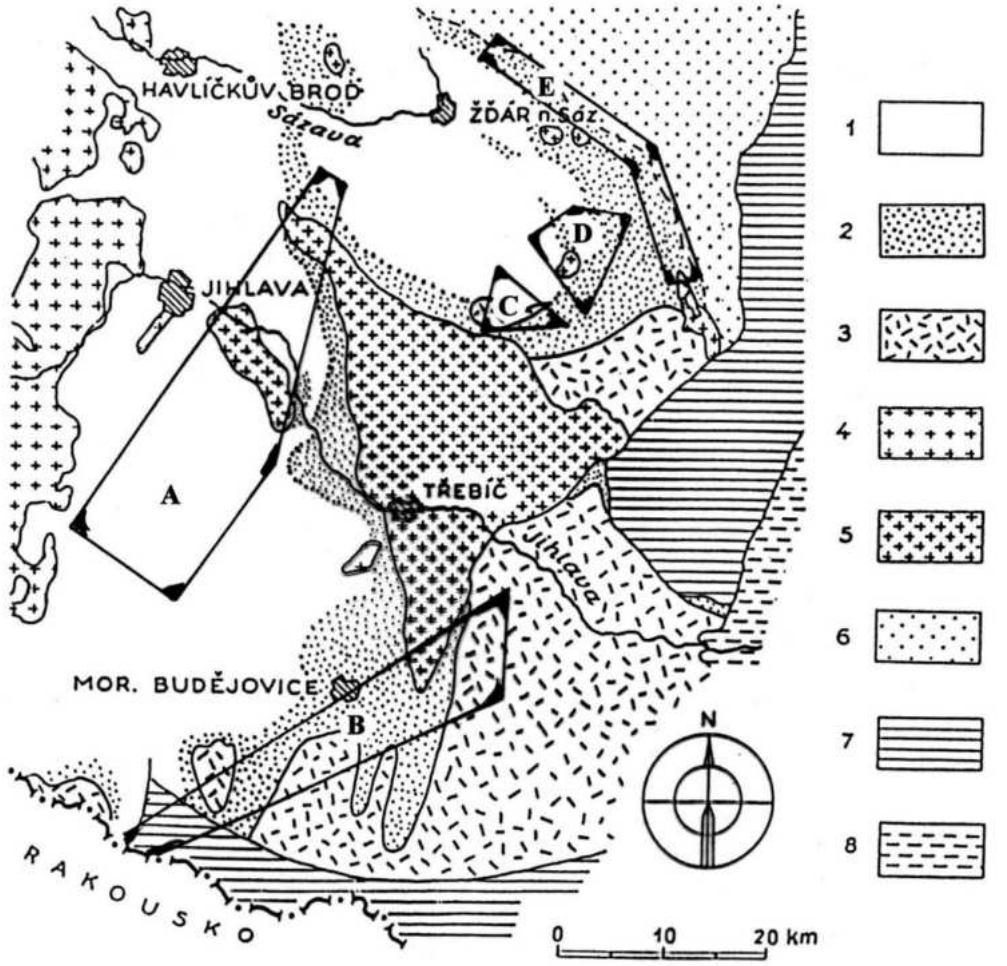
lze LCT pegmatity charakterizovat následovně: B > F > P, u více frakciovaných např. lepidolitových pegmatitů F > B > P, a Li > Be, u NYF pegmatitů B > F,P a Be >>> Li, ale celkově je aktivita těchto prvků výrazně nižší než v LCT pegmatitech. Jako typické minoritní prvky jsou v LCT pegmatitech přítomny As, Sn, Sb, Rb, Cs a W, naopak velmi vzácný je např. Bi.

V rámci moldanubika existují oblasti s viditelným nahromaděním pegmatitů (širší okolí Písku, strážecké moldanubikum, okolí Jihlavy, okolí Sušice, pestré jednotky v okolí jihočeských granulitových těles), jiné oblasti jsou naopak pegmatity relativně chudé (svorové zóny, monotónní jednotky). Specifickou oblastí je strážecké moldanubikum, kde jednotlivé často geochemicky výrazně odlišné typy a subtypy pegmatitů obsahují relativně často dutiny s velkými krystaly minerálů. Jednotlivé populace pegmatitů nerespektují hranice např. gföhlské a drosendorfské jednotky tak, jak jsou dnes obvykle vyčleněny (obr. 2.17), a komplexní pegmatity pronikají i mramory (např. Vratěnín u Jemnice, Bližná v Pošumaví), které jsou litologicky velmi podobné mramorům olešnické skupiny, řazeným k moraviku (srovnej Suess 1903, 1912, Cháb et al. 1992, Houzar a Novák 2001).

Moldanubikum výrazně přesahuje na území Rakouska a Německa. V Rakousku byly zjištěny velmi podobné pegmatity, ze třídy vzácných prvků – andalusitové, turmalínové, lepidolitové a elbaitové (např. lokality Königsalm, Maigen, Eibenstein; Niedermayr 1969, Hehenberger 1997, Ertl et al. 2004), a také záhnědové pegmatity.

Oblast moldanubika na území Německa tvořená především bavarikem, které je poněkud odlišné od hornin moldanubika na území ČR. Zdejší pegmatity jsou zčásti srovnatelné, např. pegmatity třídy vzácných prvků - turmalínové, andalusitové a berylové (Strunz et al. 1975, Grimm 1991, 1992). Zřetelně odlišné jsou ale světově proslulé beryl-columbit-fosfátové pegmatity z řady lokalit (např. Hagendorf, Zwiesel, Pleystein aj.; Strunz et al. 1975, Műcke et al. 1990), které nemají na území České republiky obdobu. Mají odlišnou vnitřní stavbu, vykazují vysokou aktivitu P (hojné primární fosfáty) ale nízkou aktivitu F a B a převahu Be nad Li, tím se liší od všech známých pegmatitů české i rakouské části moldanubika. Bavarikum tak představuje z pohledu granitických pegmatitů oblast výrazně odlišnou od ostatních částí moldanubika. Na druhé straně jsou tyto pegmatity mineralogicky nápadně podobné pegmatitům třídy muskovitové-vzácných prvků v okolí Otova a Meclova (běžný beryl, hojné primární fosfáty Fe,Mn,Mg,Ca a Li a jejich sekundární produkty a vzácný turmalín). Bavorské pegmatity jsou ale postektonické a jejich stáří je variské (Glodny et al. 1998). V oblasti bavarika také leží neobvyklé miarolitické (NYF?) pegmatity v granitech na lokalitě Tittling, Fürstensteinský pluton, kde se v dutinách vyskytují minerály Be (beryl, milarit, bavenit, bityit), zeolity (stilbit, laumontit, chabazit), dále samarskit, zirkon, apatit a titanit (Tennyson 1960). I tyto pegmatity ukazují převahu Be and Li a nízkou aktivitu pro moldanubikumtypických volatilních prvků B a F.

Určitá podobnost existuje mezi pegmatity moldanubika a krystalinika Góry Sowie v Polsku. Zdejší pegmatity obsahují běžně turmalín, granát, místy cordierit, typická je také přítomnost berylu (popř. chryzoberylu), primárních fosfátů (beusit, sarkopsid) a akcesorických Nb,Ta-oxidů (manganocolumbit, manganotantalit, stibiocolumbit, pyrochlor-mikrolit, holtit; Pieczka et al. 1997, 2015, Pieczka 2000). Lze je zařadit ke třídě vzácných prvků, berylový typ a možná i beryl-columbit-fosfátový subtyp (Pieczka 2000).




Obr. 2.17. Schematická geologická mapa rozmístění oblastí komplexních pegmatitů na západní Moravě, upraveno podle Novák a Houzar (1996). A – lepidolitové pegmatity oblasti Jihlava-Krasonice, B – elbaitové pegmatity oblasti Vratěnín-Radkovice, C - lepidolitové pegmatity oblasti Bory, D - elbaitové pegmatity oblasti Řečice-Pikárec, E - lepidolitové pegmatity oblasti Rožná. 1 – monotónní a pestrá jednotka, 2 – jednotka s dolomity a amfibolity, 3 – gföhlská jednotka a granulity, 4 – granity centrálního moldanubického batolitu, 5 – durchachity, 6 – svratecké a poličské krystalinikum, 7 – moravikum, 8 – karbonské a permské sedimenty.

### 2.8.2 Tepelsko-barrandienská oblast (bohemikum)

V této oblasti jsou pegmatity relativně méně časté a jsou soustředěny téměř výhradně při okrajích této jednotky, které jsou metamorfované v amfibolitové facii: na styku bohemika a moldanubika (Domažlice-Poběžovice), a na styku bohemika a saxothuringika (širší okolí Teplé; obr. 2.18). V oblasti bohemika leží také pegmatity odvozené od variských batolitů vystupujících na styku bohemika a přilehlých jednotek, např. pegmatity železnohorského batolitu (Budislav), pegmatity středočeského batolitu místy pronikající jen velmi slabě

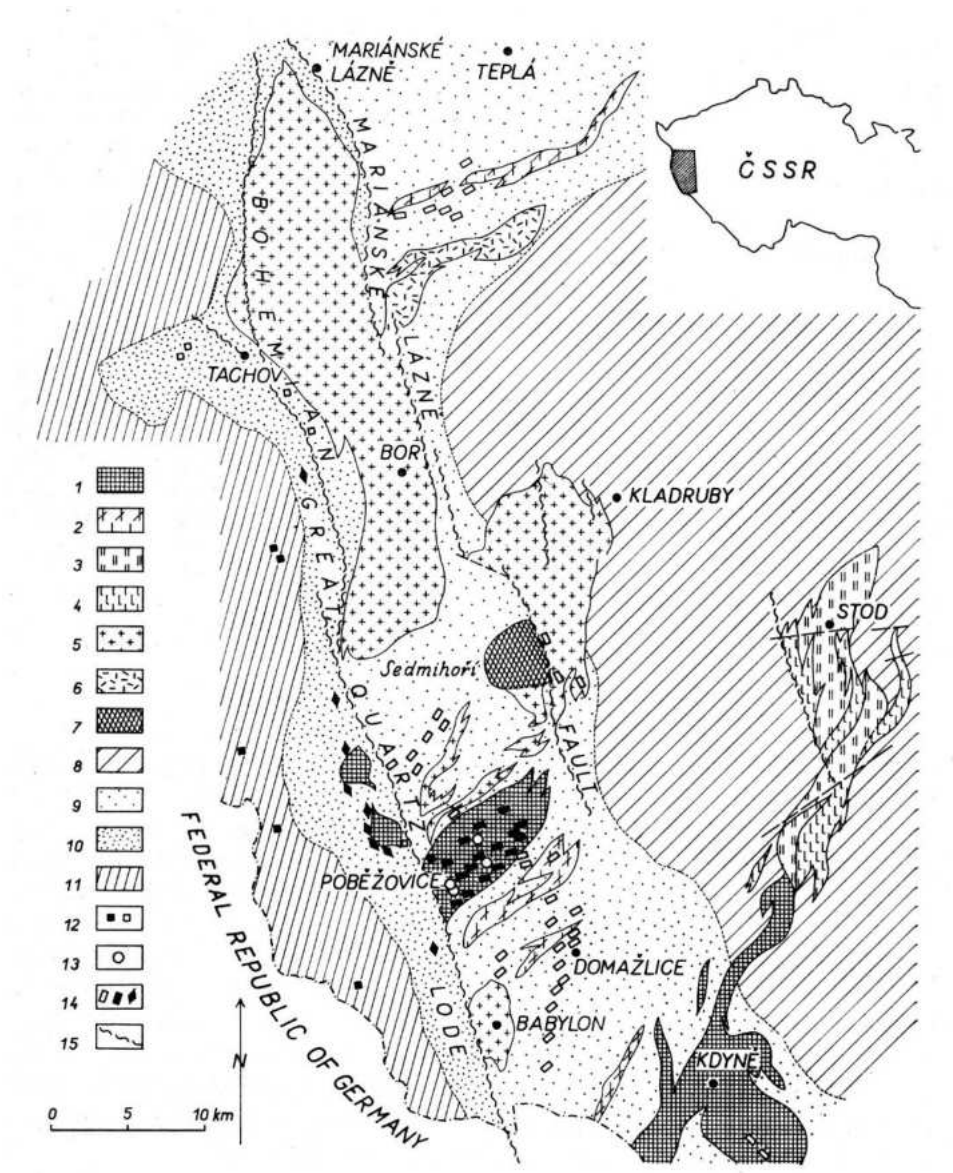
metamorfované sedimentární horniny v okolí Příbrami (Stočes 1918) včetně ojedinělého komplexního (Li)-pegmatitu v Příbrami (nepubl. data autora).

V západní a jihozápadní části bohemika jsou vyvinuty pegmatity řazené do přechodné třídy muskovitové-vzácných prvků (tepelská oblast, oblast Poběžovice-Domažlice). Přítomnost primárního spodumenu v Otově ukazuje na poněkud vyšší tlak při intruzi pegmatitů větší než 3,5-4 kbar ve srovnání s moldanubikem. Tyto LCT pegmatity lze geochemicky charakterizovat následovně: P >> F,B, a Be > Li, dále je typická přítomnost některých vedlejších až stopových prvků, např. Zn, Sn a Bi. Pegmatity vázané na *I*-typové granity středočeského a železnohorského batolitu mají NYF signaturu a geochemicky je lze charakterizovat následovně: B > F > P, Be > Li při nízké aktivitě volatilních prvků.

V Německu je za geologicky příbuznou jednotku považována zóna Erbendorf-Vobenstrauss (ZEV) (Glodny et al. (1998, Franke 2000). O granitických pegmatitech z této oblasti existuje poměrně malé množství informací (např. Strunz et al. 1975). Glodny et al. (1998) považují ale tyto metapegmatity za velmi příbuzné s metapegmatity v oblastech Poběžovice-Domažlice a Teplá. Radiometrické datovaní poskytlo velmi podobná stáří a podobný geologický vývoj. Nápadná mineralogická a geochemická podobnost beryl-columbit-fosfátových pegmatitů oblasti Poběžovice-Domažlice a bavarika prokazatelně značně odlišného stáří už byla diskutována dříve.

### 2.8.3 Sasko-durynská oblast (saxothuringikum)

Zdejší pegmatity jsou variabilní texturně i mineralogicky od primitivních po silně frakciované, ale většinou nebyly detailně studovány ve srovnání s oběma předešlými jednotkami. Do této oblasti patří některé pegmatity, např. stockscheidery při okrajích granitických intruzí (Krupka, Horní Slavkov), jednoduché deformované (metamorfované?) pegmatity s turmalínem a granátem (Unčín) a pegmatity z Podlesí u Horní Blatné. Nepočítáme-li exotické pegmatity z Podlesí extrémně bohaté Li, F a P, je zonální pegmatit z Kynžvartu u Mariánských Lázní asi nejvíce frakcionovaným pegmatitem této oblasti na území České republiky (Černý a Veselovský 2000). Pravděpodobně patří beryl-columbit-fosfátovému subtypu třídy vzácných prvků, i když i v tomto případě nelze na základě současných dat tento pegmatit spolehlivě zařadit. V oblasti jsou přítomny pouze LCT pegmatity a geochemicky ji lze většinou charakterizovat následovně: F > P > B, Li > Be, dále je typická přítomnost některých prvků, např. Sn, W, Mo, U a Bi.




Obr. 2.18. Schematická geologická mapa západní části bohemika s rozmístěním granitických pegmatitů (Vejnar 1968). 1 – gabra až gabrodiority, 2 – křemenné diority, 3 – amfibol-biotitické granodiority a křemenné diority, 4 – biotitické adamelity, 5 – křemenné diority a porfyrické granodiority, 6 – lestkovský granodiorit, 7 – biotitické granity, dvojslídné granity a albitické granity, 8 – západočeské proterozoikum, 9 – svory a plagioklasové pararuly, 10 – biotit-sillimanitické migmatity, 11 – cordierit-sillimanitické ruly, 12 – metamorfogenní pegmatity: a) cordierit-ortoklasové, b) mikroklinové, 13 – gabrové pegmatity, 14 – granitické pegmatity: a) muskovitové, b) biotit-muskovitové, c) turmalín-muskovitové, 15 – zlomy.

Na německé straně Krušných hor se v saxothuringiku setkáváme s texturně i geochemicky podobnými typy vysoce frakcionovaných exotických pegmatitů (např. Geyer, Ehrenfriesdorf; např. Seltmann et al. 1995). V saském granulitovém pohoří jsou známy z více lokalit v okolí města Penig komplexní pegmatity (lepidolitové, popř. elbaitové?) třídy vzácných prvků a abysální dumortieritové pegmatity z lokality Hartmannsdorf (Vollstädt & Weiss 1991), které jsou velmi podobné dumortieritovým pegmatitům moldanubika. Úroveň zpracování pegmatitů v této oblasti je ale nízká. Možný mateřský leukokratní granit (lokalita Zwickauer Mulde) vykazuje stáří U-Pb zirkonu 333 Ma (Kröner et al. 1998). Ve Smrčinách vystupují miarolitické (NYF?) pegmatity v okolí Epprechsteinu, smrčinský pluton, které obsahují v dutinách krystaly křemene, K-živce, topazu, apatitu, fluoritu, fenakitu, euklasu, herderitu, goyazitu, dále polylithionit, zinnwaldit, kasiterit, rutil, columbit, wolframit a tapiolit (Strunz a Tennyson 1980, Keck 1985). Podobné pegmatity nejsou na české straně známy.

### 2.8.4 Západosudetská oblast (lugikum)

V této oblasti jsou pegmatity méně časté ve srovnání s předešlými jednotkami na území České republiky a také zde chybí více frakciované pegmatity. Za zmínku stojí pouze miarolitické pegmatity v libereckém plutonu a v žulovském batolitu, dále pegmatity typu vzácných zemin třídy vzácných prvků v žulovském batolitu. V této oblasti jsou přítomny pouze NYF pegmatity, pokud lze u některých primitivních typů geochemickou afinitu vůbec odhadnout. Typická je nízká až velmi nízká aktivita všech volatilních prvků (F,B > P), přítomnost Be-minerálů je spíše výjimečná (gadolinit, fenakit) a zatím ne vždy dostatečně potvrzená, Li-minerály zcela chybí. Do oblasti lugika snad patří izolované výskyty ve staroměstském krystaliniku jako jsou pegmatity s amazonitem Ruda nad Moravou nebo Hraničná.

Na území Polska se vyskytují velmi podobné NYF pegmatity v polské části libereckého plutonu. Stupeň jejich frakcionace je zřetelně vyšší a byly zde zjištěny např. gadolinit, beryl, zirkon, fergusonit, fluorit, molybdenit, monazit, columbit a také zinnwaldit (Sachanbinski 1973, Siuda 2002), většinou minerály dosud neznámé v české části. Podobné výskyty leží také v okolí Zhořelce na území Německa, kde byly zjištěny např. bazzit, euxenit-(Y) a ferrocolumbit (Witzke a Giesler 1998). V granitech strzelinského masivu, který je zřejmě příbuzný žulovskému batolitu, byl zjištěn pegmatit s berylem (Sachanbinski 1973). V masivu Strzegom-Sobotka je z klasických miarolitických NYF pegmatitů uváděna řada minerálů, např. beryl, bavenit, fenakit, zinnwaldit, axinit, fluorit a řada zeolitů, kalcit, prehnit, epidot a řada sulfidů (Siuda 2001). NYF pegmatity v oblasti lugika si jsou geochemicky i mineralogicky podobné, více frakciované typy, které prakticky chybí na území České republiky, jsou známy z více míst v Polsku.

### 2.8.5 Moravskoslezská oblast (silesikum, brunovistulikum a moravikum)

#### Silesikum

V této oblasti se vyskytují dvě zcela odlišné populace pegmatitů. Prevariské pegmatity v oblasti Hrubého Jeseníku jsou většinou velmi primitivní, a kromě hojného turmalínu a místy také granátu obsahují jen velmi vzácně beryl a Nb,Ta-oxidy. Všechny pegmatity nesou znaky metamorfního postižení (deformace). Je velmi pravděpodobné, že patří k muskovitové třídě. Typická je pro ně vysoká aktivita B a velmi nízká aktivita P a F a Be >>> Li, přičemž beryl byl zatím zjištěn jen na jediné lokalitě (Vidly – Aichler et al. 1986).

Variské pegmatity v oblasti Hrubého Jeseníku jsou řazeny převážně k beryl-columbitovému subtypu třídy vzácných prvků (např. Maršíkov-Scheibengraben, Maršíkov-Schinderhübel I, II, Šumperk, Branná). Některé z nich podlehly intenzivní metamorfóze v sillimanitové zóně (Maršíkov-Schinderhübel III). Charakteristická je pro ně nízká aktivita B, P a F, jen místy je zvýšená koncentrace P, F a B (Maršíkov-Scheibengraben). Typické stopové prvky zahrnují především Zn, Bi a U, zatímco koncentrace Sn jsou mimořádně nízké (zcela zde chybí kasiterit). Celá oblast silesika (prevariské i variské pegmatity) je charakteristická přítomností LCT pegmatitů, NYF pegmatity asi chybí. Dále je typická naprostá nepřítomnost Li-minerálů, Be-minerály jsou naopak ve variských pegmatitech hojné.

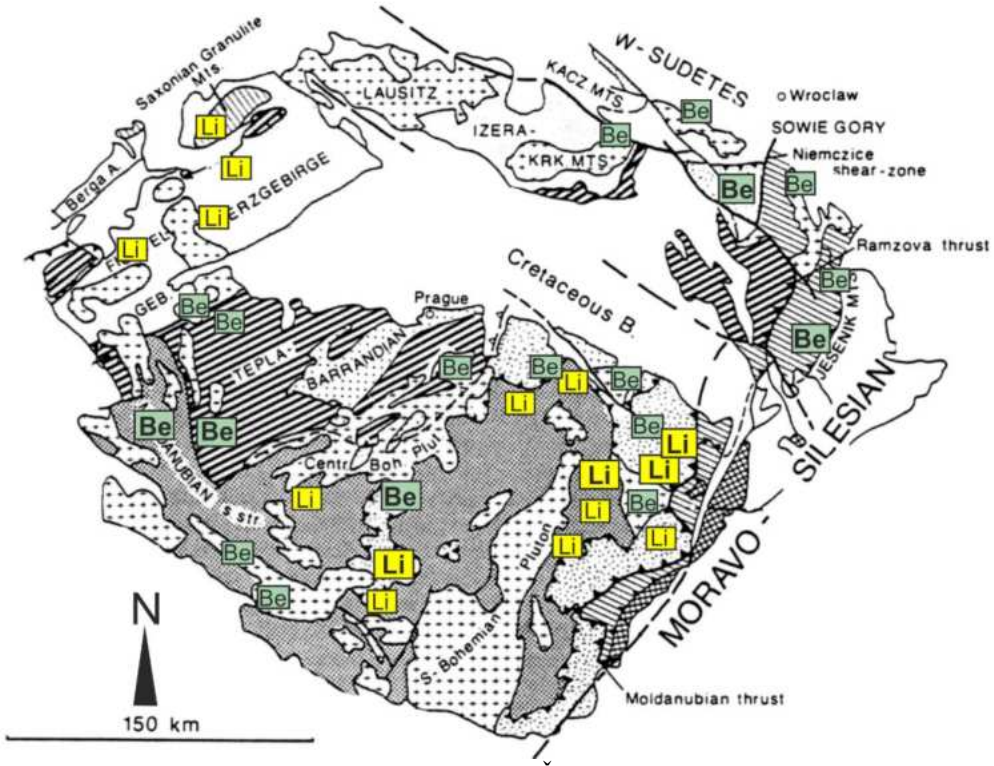
Na území Polska se setkáváme s pegmatity beryl-columbitového subtypu s granátem, které jsou uloženy v dvojslídných granitech východní části masivu Strzegom-Sobotka (Janeczek a Sachanbinski 1989) a jsou podobné variským beryl-columbitovým pegmatitům silesika. Horniny tohoto masivu se liší od biotitických granodioritů šumperského plutonu, který je pravděpodobným mateřským granitem velmi podobných beryl-columbitových pegmatitů v okolí Šumperka a Maršíkova. Masiv Strzegom-Sobótka je navíc řazen do oblasti lugika a ne do silesika.

#### Brunovistulikum

Do této jednotky patří pouze pegmatity v oblasti brněnského a dyjského batolitu (Hönig et al. 2010, 2014), popř. pegmatity z okolí Olomouce (Staněk 1983, 1987). Většinou jde o velmi primitivní pegmatity vázané na mateřské granitické horniny, a jen vzácně obsahující granát, magnetit, turmalín a cordierit (Krčmaň u Olomouce), v jiných pegmatitech se v okolí Brna vyskytuje akcesorický allanit. Vzácné a poněkud více frakcionované pegmatity (oblast Krumlovského lesa) obsahují např. Y-bohatý granát a vzácné akcesorické REE-minerály, které naznačují jejich afinitu k NYF pegmatitům. Typická je nízká koncentrace všech volatilních prvků (B, F, P) a nepřítomnost Li- a Be-minerálů.

#### Moravikum

Zdejší pegmatity jsou vzácné, velmi primitivní a kromě turmalínu (dravit, skoryl) téměř neobsahují jiné akcesorické minerály. Litologicky velmi podobné ale poněkud více metamorfované jednotky českokrumlovská a vratěnínská obsahují zcela jiné pegmatity (např. komplexní pegmatity - elbaitový subtyp Bližná, Vratěnín, Eibenstein) a jsou diskutovány v rámci moldanubika.




Obr. 2.19. Schematická geologická mapa Českého masivu (Dallmeyer et al. 1995) zobrazující rozmístění granitických pegmatitů s převládajícími Li-minerály nebo Be-minerály. Li – Li-minerály (lepidolit, elbait, petalit, amblygonit-montebrasit), Be-minerály (beryl, chryzoberyl), tučně – oblasti s hojnými pegmatity.

Srovnání geochemických charakteristik jednotlivých oblastí je uvedeno v tab. 2.4. Z ní je zřejmé, že se jednotlivé oblasti výrazně liší. Zde je ale nutno brát v úvahu, že do diskuse jsou omezeně zahrnuty pegmatity ležící na území sousedních států, protože úroveň jejich zpracování je až na výjimky (např. některé pegmatity bavarika) většinou nižší než v České republice, a autor navštívil osobně jen část pegmatitů na území okolních zemí.

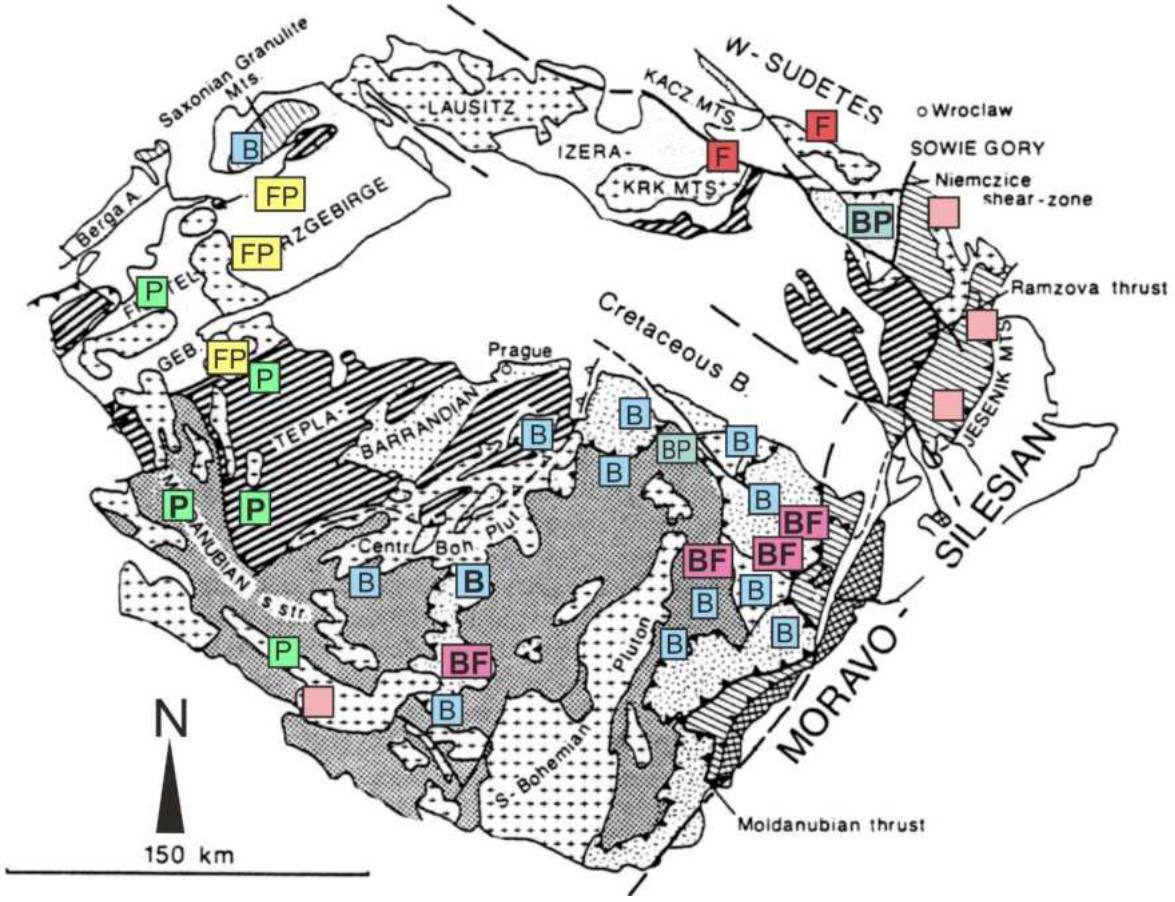
Poněkud příbuzné si jsou moldanubikum a saxothuringikum, ukazující převahu Li nad Be, ale odlišují se vyšší aktivitou B v podstatné části moldanubika a převážně vysokou aktivitou F v saxothuringiku (obr. 2.19, 2.20 a 2.21). V moldanubické zóně byly zjištěny pegmatity třídy abysální, skupiny subabysální a především pegmatity třídy vzácných prvků, jak LCT tak NYF afinity, a vzácně i miarolitické pegmatity. Podobné třídy pegmatitů najdeme i na území saxothuringika, uvažujeme-li i pegmatity ležící na území Německa včetně saského granulitového pohoří. NYF pegmatity v této oblasti asi chybí (obr. 2.21). Určitá příbuznost existuje i mezi bohemikem a silesikem; převaha Be-minerálů nad Li-minerály, ale pro bohemikum je typická vysoká aktivita P, zatímco v silesiku je typická vysoká aktivita B (pouze v prevariských pegmatitech), ve variských pegmatitech je typická nízká aktivita všech volatilních prvků ve srovnání s bohemikem (obr. 2.19, 2.20, tab. 2.4). Uvnitř většiny regionálních jednotek se setkáváme s podobnými typy pegmatitů. Největší rozdíly najdeme mezi granitickými pegmatity převážně české části moldanubika a bavarika na území Německa. Zde výrazně převládají Be-minerály nad Li-minerály a P nad B a hlavně F, typickými volatilními prvky pegmatitů moldanubika (obr. 2.19, 2.20, tab. 2.4).

Rozdíly mezi moldanubikem a saxotruringikem na jedné a bohemikem a silesikem na druhé straně v obsahu Li- a Be-minerálů (obr. 2.19) mohou být vedle odlišného složení protolitu také odrazem typu regionální metamorfózy metapelitů těchto oblastí. Nízkotlaká metamorfóza s cordieritem vede k vazbě Be do cordieritu, a proto jsou v těchto terénech Be-minerály v pegmatitech vzácnější. Naopak střednětlaká metamorfóza s granátem bez cordieritu umožňuje větší mobilitu Be a vznik berylu popř. jiných Be-minerálů v pegmatitech (London a Evensen 2002). Tyto závěry potvrzuje přítomnost pegmatitů s Be-minerály v okrajových částech moldanubika s.s. a v přilehlých jednotkách (kutnohorské a svratecké krystalinikum; obr. 2.19), metamorfovaných za poněkud vyšších tlaků. Na druhé straně tomu ale odporuje rozšíření pegmatitů s Be-minerály v bavariku, kde je cordierit v metamorfovaných horninách velmi rozšířený.

Pegmatity z oblasti západosudetské, téměř výhradně s NYF signaturou často patřící do miarolitické třídy, jsou na našem území poměrně primitivní, ale na území Polska i Německa silně frakcionované a obsahují např. gadolinit, zinnwaldit, beryl, fenakit, bazzit, topaz a YREE-oxidy (obr. 2.21). Pro poměrně primitivní pegmatity brunovistulika je typická NYF afinita.

Tabulka 2.4. Shrnutí informací o granitických pegmatitech v jednotlivých oblastech Českého masivu.

| Oblast/Region | Třída/Class<br>Skupina/Family | | Aktivita volatilních prvků/<br>Activity of volatile elements | Minerály Li nebo Be/<br>Minerals of Li or Be |
|---|---|---|---|---|
| Moldanubikum | - abysální<br>- „subabysální“<br>- vzácných prvků<br>- miarolitická | LCT | Vysoká až střední/high to moderate<br>B > F > P nebo F > B > P | Hojné/abundant<br>Li > Be |
| | | NYF | Nízká/low<br>B > F > P | Vzácné/rare<br>Be >> Li |
| - Bavarikum | - vzácných prvků | LCT | Vysoká až střední/high to moderate<br>P > B > F | Hojné/abundant<br>Be > Li |
| Bohemikum | - muskovitová-vzácných prvků<br>- vzácných prvků | LCT | Střední až nízká/moderate to low<br>P >> F,B | Běžné/common<br>Be > Li |
| | | NYF | Střední až nízká/moderate to low<br>F > B >> P | Vzácné/rare<br>Be >> Li |
| Saxothuringikum | - abysální<br>- vzácných prvků | LCT | Vysoká až střední/high to moderate<br>F > P > B | Běžné/common<br>Li >> Be |
| Lugikum | - vzácných prvků<br>- miarolitická | NYF | Střední/moderate<br>F > B > P<br>Nízká/low<br>B,F > P | Vzácné/rare<br>Be > Li |
| **Moravsko-slezská oblast** | | | | |
| - Silesikum | - muskovitová<br>- vzácných prvků | LCT | Střední až nízká/moderate to low<br>B >> F,P nebo/or F > B,P | Běžné/common<br>Be >> Li |
| - Brunovistulikum | - vzácných prvků | NYF | Velmi nízká/ very low | Chybí/absent |
| - Moravikum | | - | Velmi nízká/very low<br>B > F, P | Chybí/absent |




Obr. 2.20. Schematická geologická mapa Českého masivu (Dallmeyer et al. 1995) zobrazující rozmístění granitických pegmatitů charakterizovaných různou aktivitou volatilních prvků. F – fluor, B – bór, P – fosfor, FP – fluor a fosfor, BF – bór a fluor, BP – bór a fosfor, prázdné pole – nízká aktivita volatilních prvků, tučně – oblasti s hojnými pegmatity.

## 2.9 Radiometrické datování pegmatitů

Radiometrická data z granitických pegmatitů Českého masivu jsou poměrně vzácná. Přehled starších dat (vesměs K-Ar, Ar-Ar popř. Rb-Sr) uvádí Čech (1985), jejich využití pro geologické účely (vznik pegmatitů) je ale omezené.

### Moldanubická oblast

Černý et al. (1995b) publikovali Rb-Sr data pro lepidolit z lepidolitových pegmatitů - Rožná 323±4 Ma and Dobrá Voda 306±9 Ma. Tyto hodnoty se ale zdají být ve srovnání s radiometrickým datováním různých procesů v moldanubiku (např. Holub et al. 1997, Kröner 1988, 1998, 2000, Klötzli et al. 1999, Kotková et al. 2003b) příliš nízké a naznačují resetování izotopického systému ve slídách, které jsou velmi citlivé na postkrystalizační hydrotermální procesy (např., Baadsgaard & Černý 1993, Küster 1995).

Novák et al. (1998a) studovali radiometrické věky U-Pb monazitů z několika LCT pegmatitů třídy vzácných prvků moldanubika: fosfátový pegmatit Oldřich z Dolních Borů – 335,8±2 a 337,2±2 Ma, a beryl-columbitové pegmatity s turmalínem Obrázek I u Písku – 339,0±3 Ma a Věžná II – 335,4±3 Ma. Zjištěná data jsou si velmi blízká stejně jako nové Sm-Nd datování granátu z elbaitového pegmatitu v Eibesteinu, Rakousko - 339±4 Ma (Ertl et al. 2004). Podobná data získali datováním columbit-tantalitu z pegmatitů Melleton et al. (2012) a molybdenitu z Dolních Borů (Ackerman et al. 2017).

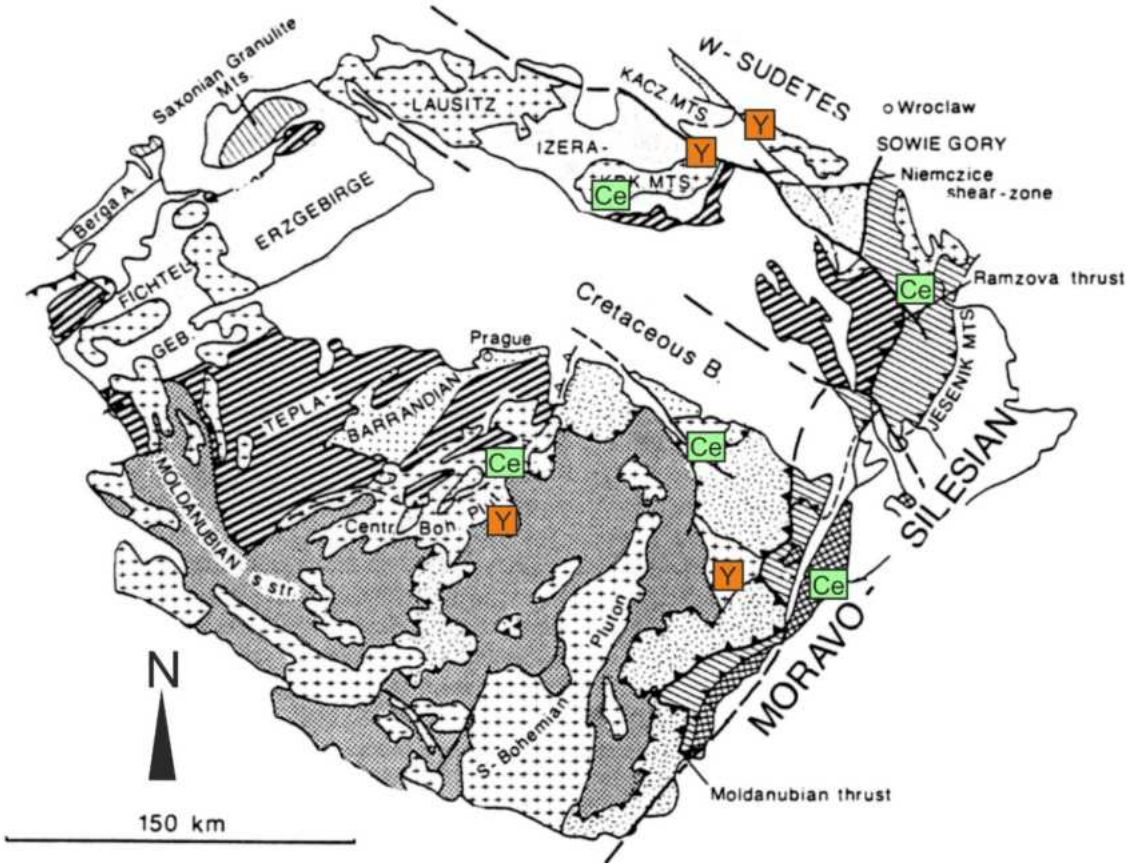
Nepřímo jsou datovány také NYF pegmatity třebíčského plutonu a plutonu Čertova břemene, protože zdejší pegmatity jsou přímo odvozeny od těchto granitů a krystalizace pegmatitů zřejmě velmi těsně následovala krystalizaci granitu. U masivu Čertova břemene jsou uváděny věky Pb-Pb zirkon 340±8 Ma (Holub et al. 1997), U-Pb zirkon 338±2 Ma (Klötzli & Parrish 1996, Klötzli et al. 1999) u třebíčského plutonu Pb-Pb zirkon 343±6 Ma (Holub et al. 1997) a U-Pb zirkon 339±2 Ma (Kotková et al. 2003b).

### Tepelsko-barrandienská oblast

Košler et al. (1994) uvádějí Rb-Sr data pro páry muskovit-plagioklas a biotit-plagioklas v jednoduchém pegmatitu (třída muskovitová-vzácných prvků) ve Stráži u Domažlic (Sv. Vavřinec) a získali dva odlišné věky 502-492 Ma a 373 Ma. Glodny et al. (1998) publikovali U-Pb a Rb-Sr data pro muskovitové metapegmatity v oblasti tepelského a domažlického krystalinika (třída muskovitová-vzácných prvků). Pro primární magmatickou krystalizaci odvodili z U-Pb dat pro zirkon, granát a columbit, a z Rb-Sr dat pro velké lupeny primárního muskovitu ordovické věky ~ 480 Ma, a z Rb-Sr dat pro nově tvořený (metamorfní) muskovit věk následné metamorfózy ~ 375 Ma. Pro relativně jednoduché pegmatity středočeského batolitu, často s NYF afinitou lze očekávat stáří srovnatelné s okolními, resp. mateřskými granity pohybující se zhruba od 351 do 336 Ma (přehled in Janoušek et al. 2000).

### Západosudetská oblast

V této oblasti byl datován monazit z NYF pegmatitu od Velké Kraše v žulovském plutonu (Novák nepubl. data). U-Pb stáří 303,4±1,7 Ma je podobné U-Pb věkům monazitu (309,1±0,8 Ma) a xenotimu (306,4±0,8 Ma) z dvojslídného granitu z masivu Strzegom-Sobótka ležícím severně od žulovského batolitu (Turniak a Bröcker 2002). Franke a Żelaźniewicz (2000) uvádějí Pb-Pb stáří zirkonu 314 Ma v libereckém plutonu. Podobné stáří mají nepochybně i zdejší miarolitické pegmatity. Celkově ukazují radiometrická data na relativně pozdně variské stáří granitických pegmatitů i magmatických procesů v lugiku.




Obr. 2.21. Schematická geologická mapa Českého masivu (Dallmeyer et al. 1995) zobrazující rozmístění granitických pegmatitů s minerály vzácných zemin. Ce – pegmatity s dominantním allanitem, Y – pegmatity s dominantními REE-oxidy (minerály skupiny aeschynitu, samarskitu a pyrochloru, fergusonit) a/nebo silikáty (gadolinit).

## Moravskoslezská oblast

### *Silesikum*

Zcela ojedinělé Sm-Nd stáří 334 Ma zjištěné v pegmatickém granitu Čertovy kameny u Jeseníku uvádějí (Hegner a Kröner 2000). Tento granit obsahuje hojné muskovitové pegmatity s granátem, andalusitem a vzácně chryzoberylem a columbitem, a naznačuje na variský věk beryl-columbitových pegmatitů silezika. Protože beryl-columbitové pegmatity silezika s různým stupněm metamorfního postižení mají téměř identické minerální asociace i složení jednotlivých minerálů, je metamorfní přetisk zahrnující vznik fibrolitického sillimanitu a chryzoberylu (Franz a Morteani 1984, Černý et al. 1992b) mladší a chryzoberylové metapegmatity nejsou starší než berylové pegmatity s nízkým stupněm deformace, jak předpokládají např. Čech et al. (1981). Prevariské muskovitické pegmatity s turmalínem nebyly přímo radiometricky datovány. Zřejmě jsou vázány na stejný magmatický cyklus jako ortoruly v desenské klenbě, které mají Sm-Nd stáří 502-517 Ma (Hegner a Kröner 2000).

***Brunovistulikum***

Granitoidy brněnského a dyjského batolitu jsou považovány za kadomské (Finger et al. 2000) a je proto velmi pravděpodobné, že i pegmatity budou mít stejné stáří. Radiometrické datování pegmatitů této oblasti je uváděno zcela výjimečně; Ar-Ar stáří muskovitu z pegmatitů brněnského batolitu je 565 Ma (in Klotzli et al. 1999).

Spíše ojedinělá radiometrická data z granitických pegmatitů v moravskoslezské oblasti (silesikum, brunovistulikum) a západosudetské oblasti nedovolují širší diskusi k jejich využití pro geologický vývoj těchto geologických oblastí. Je jen zřejmé, že pegmatity z moravsko-slezské oblasti jsou až na beryl-columbitové pegmatity (typ Maršíkov) prevariské (kadomské) a pegmatity lugika jsou variské a zřejmě mladší než v ostatních částech Českého masivu.

## Srovnání

Z oblasti moldanubika a především bohemika je dat více a umožňují poněkud detailnější diskusi. Vznik většiny granitických pegmatitů moldanubika (LCT – komplexní a berylové, NYF) je omezen na úzký interval zhruba 340-332 Ma. Pouze pegmatity svázané s mladšími granitickými intruzemi, např. centrální moldanubický batolit (beryl-columbitový pegmatit Kostelní Vydří u Telče - Cempírek et al. 1999; stockscheidery v okolí Homolky a Šejb - Novák et al. 1994, Uher 1998, Breiter a Scharbert 1995, 1998) jsou zřejmě mladší (různé typy datování 327-318 - granit Eisgarn, Rb-Sr horniny 319 Ma - granit Homolka a 316 Ma - granit Nakolice; Breiter a Scharbert 1995, 1998). Stáří abysálních a subabysálních pegmatitů ale není jasné. Část z nich je zřejmě prevariská popř. raně variská (např. dumortieritové pegmatity s kyanitem a sillimanitem), úzký vztah k metamorfóze a minimální tektonické postižení jiných pegmatitů (záhnědové, anadalusitové, turmalínové) ukazují na variské stáří.

V bohemiku se setkáváme se staršími pegmatity stáří ~ 480 Ma, pegmatity vázané na středočeský a železnohorský batolit jsou mladší. Ordovické stáří pegmatitů ukazuje na naprostou odlišnost pegmatitů moldanubika a bohemika. Velmi zajímavá je ale mineralogická a geochemická podobnost pegmatitů s berylem, columbitem a primárními fosfáty z oblasti Poběžovice-Domažlice a z Bavorska (např. Hagendorf, Zwiesel, Pleystein), jejichž radiometrické stáří Rb-Sr pro muskovit ~ 320 Ma (Glodny et al. 1998) a stáří příbuzných, pravděpodobně mateřských granitů (granit Leuchtenberg, Rb-Sr celková hornina 326±4 Ma - Siebel 1995; U-Pb zirkon 338±6 Ma - Köhler et al. 1993; granit Fürstenstein, U-Pb zirkon a titanit 324-321 Ma; Chen a Siebel 2004) je podstatně mladší a zhruba odpovídá jiným pegmatitům moldanubiku.

## 2.10 Vztah granitických pegmatitů a mateřských (fertilních) granitů

V současné době je vznik frakcionovaných granitických pegmatitů (třída pegmatitů vzácných prvků, popř. přechodná třída muskovitová-vzácných prvků) odvozených od granitických plutonů široce přijímaným názorem (např. Černý 1991a,b, London 1992, 1996, 2004a,b, Linnen 2004), i když se objevují i dnes názory na anatektický vznik dokonce komplexních (Li) pegmatitů (Černý 1998, Pieczka et al. 2019, Wise et al. 2018). Čím více je pegmatit frakciovaný, tím byla tavenina pohyblivější, dostala se dál od mateřského tělesa (modelování pohyblivosti taveniny ukazuje na vzdálenost 5-10 km – Baker 1998) a krystalovala za nižších teplot, a to jak taveniny (solidus až 450°C a likvidus kolem 600 °C pro 2 kbar u vysoce frakciované taveniny bohaté F, Li a/nebo B – London et al. 1989), tak teploty okolních hornin (rozdíl mezi teplotou taveniny a okolní horniny v okamžiku intruze 100-500 °C– např. Chakoumakos a Lumpkin 1990, Weber et al. 1999). U většiny pegmatitů včetně pegmatitů vzácných prvků není mateřské granitové těleso známo, a i z tohoto důvodu je odvození mateřských granitů pro většinu silně frakciovaných pegmatitů komplikované. Ve vztahu granit-pegmatit mohou poněkud zjednodušeně nastat následující možnosti.

a) Mateřský granit je spolehlivě definovatelný. V tomto případě je pegmatit uložen přímo v mateřském granitu a lze rozeznat postupný přechod texturní, mineralogický i chemický. Pegmatity tohoto typu vesměs tvoří čočky, kapkovitá tělesa, popř. žíly různých velikostí i nepravidelné partie. V Českém masivu sem patří především miarolitické pegmatity, např. Vepice, a další lokality v okolí Kovářova u Milevska uložené v durbachitovém masivu Čertova břemene; Ruprechtice a další lokality v libereckém plutonu; Březí u Říčan v říčanském plutonu a některé lokality v žulovském batolitu (např. Velká Kraš u Vidnavy). Stejně tak je jasný vztah některých pegmatitů vzácných prvků (NYF) v třebíčském plutonu, např. Pozďátka, Kožichovice a jiné lokality v okolí Vladislavi a Třebíče, pegmatitové polohy Krumlovského lesa v jižní části brněnského batolitu a v dyjském batolitu. K tomuto typu patří také více frakciované (LCT) pegmatity, např. pegmatitové partie s turmalínem, berylem a topazem z Hamrů nad Sázavou (Novák 1981), nebo žíly pegmatitů bohatých Li, F a P z Podlesí u Horní Blatné, karlovarský pluton (Breiter 1999, Breiter a Sokol 1997).

b) Jednoznačný mateřský granit je obtížně definovatelný, ale pegmatit je velmi pravděpodobně vázaný na určitý granitický pluton (batolit) s více intruzemi blízkého stáří. Sem patří pegmatitové žíly s ostrými kontakty pronikající granitickými horninami velkých batolitů (např. středočeský batolit, žulovský batolit, železnohorský batolit, centrální moldanubický batolit aj.,), popř. se vyskytují v jejich těsné blízkosti, kdy jiné velmi podobné pegmatity jsou přímo v granitech uloženy. Většina těchto pegmatitů je značně primitivních a k této skupině patří např. allanitové pegmatity nebo pegmatity s molybdenitem ve středočeském nebo žulovském batolitu. Jen vzácně se objevují více frakciované žíly s bohatší mineralizací, např. pegmatit s turmalínem, berylem a spessartinem z Budislavi u Litomyšle, železnohorský batolit (Nováček 1931), pegmatit s turmalínem, berylem, hurlbutitem a columbitem z Kostelního Vydří u Telče, centrální moldanubický batolit (Novák 1995, Cempírek et al. 1999). Známé ortorulové těleso v Přibyslavicích u Čáslavi s granity a pegmatity více typů a generací (Povondra et al. 1987, 1998, Breiter et al. 2003, Novák et al. 2015a) dokazuje, jak komplikované mohou být vztahy v systému granit-pegmatit.

c) Mateřský granit je velmi obtížně definovatelný, ale v blízkém okolí pegmatitu se vyskytují granitické horniny, které jsou geologicky, geochemicky i mineralogicky příbuzné určitým pegmatitům. Jsou srovnatelného stáří ověřeného geologicky a/nebo radiometrickým datováním, obsahují podobné volatilní prvky, např. B nebo stejné minoritní a akcesorické minerály, např. turmalín, andalusit, cordierit, granát, gahnit aj. Do této skupiny lze zařadit např. pegmatity v oblasti Borů u Velkého Meziříčí, které (i) vykazují určitou prostorovou zonálnost, nárůst stupně frakcionace zhruba směrem k S až SV, (ii) byly zde zjištěny granitické horniny, které mohou být přívodními kanály pegmatitové taveniny (Duda 1986), (iii) v blízkém okolí se ve směru snižování stupně frakcionace vyskytují leukokratní granity (např. Lavičky – Novák et al. 1997d, Jiang et al. 2003, Buriánek a Novák 2004, Buriánek et al. 2016), které mají podobné rysy – vysoká aktivita B, relativně hojný nodulární turmalín (byl zjištěn také v okrajových zónách pegmatitů v Dolních Borech a Dobré Vodě), apatit, primární andalusit a pseudomorfózy po cordieritu. Velmi podobné vztahy lze nalézt mezi turmalinickými granity a beryl-columbitovými a turmalínovými pegmatity také na Písecku. Turmalinické granity v asociaci s granitickými pegmatity se vyskytují v celé hercynské zóně (obr. 2.16).

Ještě lepším příkladem jsou berylové a příbuzné pegmatity v Hrubém Jeseníku (Šumperk, Maršíkov, Česká Ves, aj.), kde jsou primitivní pegmatity s biotitem, granátem a muskovitem uloženy uvnitř granitických těles (šumperský pluton, tělesa granitů sv. od Jeseníku – Čertovy kameny, Mikulovice, aj.; Novák 1988, Novák et al. 2003b, Chládek et al. 2020), více frakciované žíly s muskovitem a granátem bohatým Mn leží v blízkém okolí granitických těles a nejvíce frakciované žíly s berylem, columbitem, zirkonem, gahnitem ve větší vzdálenosti (Novák 1988). Jako akcesorické minerály byly v granitech zjištěny stejné minerály jako v pegmatitech např. granát, zirkon, gahnit a columbit (P. Uher – ústní sdělení). V této oblasti bylo pozorováno i zákonité rozmístění pegmatitů ve vztahu ke gravimetrickým anomáliím (Novák a Rejl 1993).

d) Mateřský granit pravděpodobně existuje, dokazuje to hlavně vysoký stupeň frakcionace pegmatitu, ale v okolí pegmatitu nebo skupiny pegmatitů nejsou granitické horniny, které by mohly odpovídat mateřským granitům, nebo zde magmatické horniny zcela chybí. To je velmi běžný případ a odpovídá mu značná část komplexních (Li) pegmatitů moldanubika, např. Rožná, Řečice, Strážek. S ohledem na značnou pohyblivost vysoce frakcionovaných pegmatitových tavenin mohl být jejich transport poměrně dlouhý (5-10 km – Baker 1998) a mateřský granit může být skrytý jako v případě jiných vysoce frakciovaných pegmatitů ve světě, např. Tanco (Černý 2004). U některých komplexních (Li) pegmatitů (např. Dobrá Voda a Dolní Bory, žíla č. 21, nebo lepidolitové pegmatity na Jihlavsku) jsou ale známy potenciální mateřské granitoidy (některé leukokrátní turmalinické granity v moldanubiku - Lavičky v oblasti Borů nebo Bílá skála u Puklic v oblasti Jihlavy).

e) Poslední skupinou jsou abysální a „subabysální“ pegmatity, které jsou anatektického (metamorfogenního) původu. Mateřský granit se u nich nepředpokládá a jsou diskutovány v následující kapitole.

## 2.11 Vztah granitických pegmatitů a regionální metamorfózy

Tento problém je diskutován ve více pracích, např. Ginzburg et al. (1979), Černý (1982, 1991b, 1998) a lze jej sledovat z více aspektů: a) zda a které pegmatity jsou produktem metamorfních procesů, b) jaký je vztah mezi typem granitických pegmatitů a stupněm metamorfózy okolních hornin a hlavně, jaký je časový vztah mezi intruzí granitických pegmatitů a vrcholem prográdní metamorfózy okolních hornin, c) metamorfní postižení pegmatitů. Ve všech případech ale existují poněkud odlišné názory a především jsou zatím jednotlivé aspekty tohoto problému studovány jen okrajově. Navíc jsou práce zaměřeny téměř výhradně na pegmatity třídy vzácných prvků.

a) Jako metamorfní (metamorfogenní) jsou v této práci označovány abysální a „subabysální" pegmatity. K této skupině patří v oblasti Českého masivu např. dumortieritové a cordieritové pegmatity, část turmalínových a andalusitových pegmatitů a pravděpodobně i záhnědové pegmatity s dutinami. Poněkud komplikovanější je situace u primitivních kontaminovaných pegmatitů v mramorech, skarnech nebo serpentinitech, protože některé z nich mohou být magmatogenního původu. Protože se vesměs jedná o poměrně primitivní pegmatity jak z pohledu stupně frakcionace a mineralogického složení, tak jejich vnitřní stavby je jejich odlišení někdy značně komplikované.

b) Tento problém je nastíněn v základní klasifikaci granitických pegmatitů do tříd (obr. 2.3, srovnej např. Ginzburg et al. 1979, Černý 1991a,b), kdy pegmatity jednotlivých tříd vznikají v jiných úrovních zemské kůry, tedy v metamorfovaných horninách s odlišným typem metamorfózy a teplotním gradientu. Tento diagram je ale velmi schematický a ukazuje na nejčastější typ metamorfované horniny v okolí určitých tříd pegmatitů. Mezi vrcholem prográdní metamorfózy určité oblasti a intruzí a následnou krystalizací pegmatitu ale může být značný časový odstup a také PT podmínky panující v hostujících horninách během intruze pegmatitové taveniny mohou být výrazně odlišné od vrcholu prográdní metamorfózy. Odhadovaný i počítaný rozdíl mezi teplotou intrudující pegmatitové taveniny (kolem 700 °C popř. méně u silně frakciovaných tavenin) a okolní horninou je od 100 do až 500 °C (např. Chakoumakos a Lumpkin 1990, Weber et al. 1999), a na vysoký stupeň podchlazení pegmatitových tavenin ukazují i experimentální práce (např. London et al. 1989, London 2004b). Vlastní krystalizace pegmatitové taveniny tedy probíhala často za tlaků a teplot nižších, než ve většině případů indikují okolní horniny v obr. 2.3. U pegmatitů s vysokým stupněm frakcionace se někdy setkáváme s relativně nižším stupněm metamorfózy okolních hornin, často s minimálními kontaktními projevy, a to i u mocných těles. Naopak primitivní a malé pegmatity pronikající do relativně horkých hornin, např. v plášti granitických plutonů, mají často mohutné kontaktní lemy (např. pegmatity v okolí Žulové). Pokud jsou kolem vysoce frakcionovaných pegmatitů vyvinuty kontaktní aureoly a typickými minerály jsou uvit, dravit, Cs,Li-biotit, holmquistit, karbonáty aj., je jejich vznik způsoben reakcí pozdních fluid uvolněných z pegmatitu v závěru primární krystalizace s okolní horninou a nejedná se o reakční lem kontaktně metamorfního původu (např. Morgan a London 1987, 1989, Novák a Selway 1997, Novák et al. 1999b)

c) Stupeň metamorfního postižení granitických pegmatitů byl studován jen výjimečně i celosvětově, i když je nepochybné, že řada pegmatitů podlehla regionální metamorfóze a lze je označit jako metapegmatity. V oblasti Českého masivu lze uvést několik poněkud

odlišných příkladů uvedených zhruba se vzrůstajícím stupněm metamorfózy: (i) málo metamorfované beryl-columbitové pegmatity silesika - usměrnění muskovitu na kontaktu (Novák 1988, Novák et al. 2003b, Chládek et al. 2020, 2021); (ii) prevariský berylový metapegmatit z Videl, skupina Orlíku, Hrubý Jeseník - výrazná metamorfní zonálnost granátu a pegmatit je viditelně usměrněný, další nově tvořené minerály prokázány nebyly, i když část muskovitu je možná metamorfní (Aichler et al. 1986); (iii) prevariské metapegmatity v oblasti bohemika (tepelské krystalinikum a oblast Poběžovice-Domažlice), kde je metamorfóza prokázaná také radiometrickým datováním, dále se projevuje výrazným usměrněním minerálů a nově tvořeným muskovitem (Vejnar 1965, 1968, Glodny et al. 1998); (iv) dumortieritový pegmatit ze Starkoče u Čáslavi, moldanubikum – zatlačování muskovitu kyanitem, přítomnost staurolitu (metamorfní?), usměrnění muskovitu při kontaktu, provrásnění žil (Cempírek 2003, Cempírek et al. 2003, Cempírek et al. 2006); (v) pegmatit s borosilikáty (grandidierit, werdingit, boralsilit, ominelit, skoryl) uložený v leukokratním granulitu (Cempírek et al. 2010); (vi) chryzoberylové pegmatity v Hrubém Jeseníku - výrazná lineace, usměrnění slíd při kontaktu a evidentní vznik metamorfních minerálů fibrolitického sillimanitu a chryzoberylu (Dostál 1966, Franz a Morteani 1984, Černý et al. 1992b).

Lze konstatovat, že granitické pegmatity jsou poměrně rezistentní k metamorfním pochodům, především primární minerály pegmatitů jsou poměrně stabilní a vznik nově tvořených minerálů (muskovit, chryzoberyl, sillimanit, kyanit) je většinou doprovázen strukturním (tektonickým) postižením (výrazná foliace a lineace). To je v kontrastu s nízkou rezistencí řady primárních minerálů vůči hydrotermálním alteracím vlastních residuálních fluid (např. zatlačení cordierit-sekaninaitu fylosilikáty a sekundárním berylem, popř. andalusitem, primárních Fe,Mn,Li-fosfátů sekundárními fosfáty, andalusitu a topazu muskovitem, amblygonitu mladšími generacemi amblygonit-montebrazitu, lacroixitem, brazilianitem, apatitem a minerály crandallitové skupiny, berylu bertranditem, bavenitem-bohseitem, milaritem aj.).

## 2.12 Souhrn a závěr

### Moldanubická oblast

Tato oblast je v rámci Českého masívu granitickými pegmatity nejbohatší a také nejdetailněji zpracovaná. Vyskytuje se zde řada různých tříd, typů a subtypů pegmatitů: (i) relativně vzácné abysální pegmatity bohaté Al, objevující se na v. okraji moldanubika; (ii) subabysální pegmatity, běžné především v oblastech intenzivní migmatitizace; (iii) lokálně velmi hojné pegmatity třídy vzácných prvků, od primitivních až po silně frakcionované pegmatity, jak s LCT tak NYF signaturou. V silně frakcionovaných komplexních LCT pegmatitech převažuje lepidolitový subtyp nad elbaitovým. NYF pegmatity vyskytující se v durbachitových horninách mohou mít i miarolitický charakter (tab. 2.3 a 2.4). Vztah pegmatitů a granitů je většinou nejasný s výjimkou NYF pegmatitů, vázaných téměř výhradně na tělesa durbachitů, a primitivních pegmatitů uvnitř peraluminických granitoidních plutonů. Geochemicky lze pegmatity třídy vzácných prvků charakterizovat následovně: LCT - B > F > P, nebo méně často F > B > P, a Li > Be, NYF - B > F,P a Be >>> Li, přičemž je u NYF pegmatitů výrazně nižší aktivita volatilních složek.

Přítomnost petalitu a absence primárního spodumenu v komplexních pegmatitech ukazuje na relativně nízký tlak (< 2,5-3 kbar) při intruzi pegmatitové taveniny komplexních pegmatitů, ale zřejmě také pro primitivní pegmatity třídy vzácných prvků obsahující andalusit a cordierit-sekaninait, a možná i pro část subabysálních pegmatitů. Abysální pegmatity mohly vzniknout za poměrně vysokých tlaků P > 5-6 kbar (kyanit a staurolit v pegmatitu ze Starkoče).

Vznik většiny granitických pegmatitů moldanubika (LCT – berylové a komplexní, NYF) je omezen na úzký časový interval zhruba 340-335 Ma. Pouze relativně primitivní pegmatity svázané s mladšími granitickými intruzemi (centrální moldanubický batolit) jsou mladší, pegmatity v eisgarnském granitu asi 327 Ma, stockscheidery v okolí Lásenice a Horní Stropnice asi 319-316 Ma. Stáří abysálních a subabysálních pegmatitů ale není jasné. Část z nich může být i prevariská popř. raně variská (např. dumortieritové pegmatity s kyanitem a sillimanitem), většina z nich je ale velmi pravděpodobně variská.

Moldanubikum představuje zcela samostatnou oblast v rámci Českého masívu. Pegmatity moldanubika se poněkud podobají některým abysálním pegmatitům s dumortieritem a komplexním pegmatitům třídy vzácných prvků ze saského granulitového pohoří v saxothuringiku. V bavariku se na území Německa vyskytují velká a komplikovaně diferencovaná tělesa pegmatitů beryl-columbit-fosfátového subtypu (např. Hagendorf, Zwiesel), která nemají obdobu v české části moldanubika, naopak jsou geochemicky a mineralogicky podobné pegmatitům oblasti Poběžovice-Domažlice, které mají ordovické stáří. V moldanubické oblasti tak existují dvě výrazně odlišné oblasti granitických pegmatitů – bavarikum a severnější část moldanubika ležící převážně na území České republiky a Rakouska.

## Tepelsko-barrandienská oblast

V této oblasti jsou pegmatity relativně méně časté a úroveň jejich zpracování je nižší než v moldanubiku. Můžeme je rozdělit do dvou skupin: (i) pegmatity třídy muskovitové-vzácných prvků vyskytující se v západní a jihozápadní části bohemika (okolí Teplé, oblast Poběžovice-Domažlice); (ii) většinou primitivní NYF pegmatity vázané na *I*-typové granity středočeského a železnohorského batolitu. S výjimkou NYF pegmatitů vázaných na granitická tělesa je vztah pegmatitů k mateřským granitům nejasný.

Geochemicky lze pegmatity třídy muskovitové-vzácných prvků charakterizovat: P >> F,B, a Be > Li; NYF pegmatity jsou většinou primitivní. Přítomnost primárního spodumenu v pegmatitu z Otova u Domažlic ukazuje na vyšší tlak při intruzi těchto pegmatitů (ve srovnání s moldanubikem), který byl vyšší než 3,5-4 kbar.

Primární (magmatická) krystalizace pegmatitů třídy muskovitové-vzácných prvků (tepelské krystalinikum, okolí Domažlic a Poběžovic) ~ 480 Ma, následná metamorfóza ~ 375 Ma a také geochemický charakter těchto pegmatitů je jasně odlišují od všech ostatních pegmatitů Českého masívu. Ukazují na výrazně odlišné stáří pegmatitů bohemika ve srovnání s ostatními jednotkami Českého masívu. Pegmatity tepelsko-barrandienské oblasti představuji nepochybně zcela samostatnou pegmatitovou oblast odlišnou od okolních regionálně-geologických jednotek – moldanubika, saxothuringika, lugika a moravskoslezské oblasti.

## Sasko-durynská oblast

Zdejší pegmatity se texturně i mineralogicky liší od obou předešlých oblastí. Až na výjimky mají úzký vztah k leukokratním, vysoce frakciovaným granitům a případně ke greisenům - stockscheidery při okrajích granitických intruzí nebo exotický komplexní pegmatit z Podlesí u Horní Blatné. Typicky vyvinuté zonální granitické pegmatity jako Kynžvart u Mariánských Lázní nebo Smolné Pece u Nejdku jsou relativně vzácné a dosud nebyly detailněji studovány. V této oblasti jsou přítomny pouze LCT pegmatity a geochemicky ji lze charakterizovat: F > P > B, Li > Be s velmi vysokou aktivitou volatilních prvků.

Oblast sasko-durynská je poněkud nejednotná, pegmatity z centrálních oblastí Krušných hor a saského granulitového pohoří mají podobnou geochemickou signaturu, jinak jsou ale texturně i mineralogicky značně odlišné (obr. 2.19, 2.20 a 2.21). Pegmatity z Krušných hor nejsou podobné jiným pegmatitům v Českém masívu. Pouze stockscheidery svázané s mladšími granitickými intruzemi (centrální moldanubický batolit) v širším okolí Jindřichova Hradce (např. Homolka a Šejby) jsou poněkud blízké texturně, méně mineralogicky, např. ukazují mnohem nižší aktivitu F. Především pegmatity ze saského granulitového pohoří jsou ale blízké pegmatitům moldanubika (abysální třída – pegmatity s dumortieritem, třída vzácných prvků – lepidolitové pegmatity) a možný mateřský nebo alespoň příbuzný leukokratní granit 333 Ma z této oblasti má i srovnatelné stáří. Úroveň zpracování pegmatitů této oblasti je pro podrobné srovnání nízká.

## Západosudetská oblast

V této oblasti, včetně přilehlého území Polska, jsou přítomny téměř výhradně NYF pegmatity vázané na *I*-typové granitová tělesa – liberecký pluton a žulovský batolit, a tyto pegmatity mají často miarolitický charakter. Typická je nízká aktivita všech volatilních prvků (F,B > P) a Be >> Li. Sporadická radiometrická data z těchto pegmatitů (309-303 Ma) ukazují na jejich pozdně variský věk. Za zmínku stojí pegmatity s amazonitem ze staroměstského krystalinika (např. Hraničná), které mohou náležet do bohemika., ale v této práci je řazeno k lugiku (Mísař a Dudek 1993, Novák et al. 1997c).

Podobné NYF pegmatity jsou běžné v přilehlých oblastech Polska, jinde v Českém masívu známy nejsou. Západosudetská oblast tak představuje další samostatnou pegmatitovou oblast v rámci Českého masívu, která se liší geochemicky, mineralogicky i stářím pegmatitových intruzí od ostatních jednotek.

## Moravskoslezská oblast

V rámci této oblasti jsou vyčleněny tři samostatné a v některých směrech odlišné geologické jednotky – silesikum, brunovistulikum a moravikum, kde granitické pegmatity téměř chybějí.

V silesiku se vyskytují dvě zcela odlišné populace pegmatitů: (i) prevariské primitivní pegmatity muskovitové třídy s hojným turmalínem, které ale byly jen výjimečně studovány, a (ii) variské beryl-columbitové pegmatity třídy vzácných prvků, naopak velmi detailně studované. U prvního typu není jasný vztah k mateřským granitům, u druhého typu se zdá velmi pravděpodobná příbuznost s šumperským plutonem a drobnými granitovými intruzemi v okolí Jeseníku. Obě populace mají odlišné geochemické signatury: (i) B >> P, F a Be >> Li, (ii) nízké akvitity B, F, P a Be >> Li. Ojedinělé radiometrické datování pegmatoidního

frakciovaných pegmatitů k těmto granitům není jasný, ale možná jsou na tyto granity/migmatity vázané některé subabysální pegmatity; *S*-typové a vysoce draselné *I*-typové granity (ca. 340-310 Ma) - centrální moldanubický batolit (primitivní LCT pegmatity), třebíčský pluton a pluton Čertova břemene (NYF pegmatity); postkolizní epizonální *I*-typové granodiority a tonality (ca. 320-290 Ma) - žulovský batolit (NYF pegmatity), *A*-typové leukogranity (ca. 300-250 Ma) – stockscheidery spojené s leukokratními vysoce frakciovanými granity saxothuringika i moldanubika.

U většiny pegmatitů a především u těch klasických a mineralogicky nejzajímavějších LCT pegmatitů např. berylové a komplexní pegmatity moldanubika a berylové pegmatity silezika, nebo pegmatity třídy muskovitové-vzácných prvků s berylem a primárními Fe,Mn,Li-fosfáty v bohemiku (oblast Poběžovice-Domažlice) ale většinou mateřské granity neznáme nebo tento vztah není dostatečně prokázaný (např. turmalinové granity a pegmatity na Písecku nebo v okolí Borů; beryl-columbitové pegmatity šumperský pluton v silesiku; srovnej např. Němec 1990b, Černý et al. 1992c, Novák a Rejl 1993, Gordějenko et al. 1996). Prostorový a možná i genetický vztah komplexních (Li) pegmatitů (např. Rožná, Dobrá Voda, Jeclov, Nová Ves u Českého Krumlova, Sušice) k durbachitovým tělesům (např. Bernard 1981, Gordějenko et al. 1996) je i přes velmi velmi blízké stáří málo pravděpodobný. Pouze zinnwaldit-masutomilit-elbaitový pegmatit z Kracovic u Třebíče, výrazně odlišný od ostatních komplexních pegmatitů moldanubika (Novák et al. 1999c) je zřejmě vázaný na třebíčský durbachitový pluton.

Přes poměrně vysoký stupeň vědeckého zpracování granitických pegmatitů Českého masívu na území ČR i mimo ně, a to v mezinárodním měřítku, stále existuje řada zajímavých témat, která si zaslouží naši pozornost. Zatím jen velmi málo jsou granitické pegmatity využité pro radiometrické datování a studium stabilních i radiogenních izotopů (Novák et al. 1998a, Jiang et al. 2003, Ertl et al. 2004, Ackerman 2004), v počátcích je studium fluidních inkluzí (Slowakiewicz a Lodzinski 2003, Ackerman 2004, Ackerman et al. 2007, Cempírek et al. 2010). Velká pozornost byla věnována krystalochemii některých minerálů z pegmatitů, ale i nadále je zde řada zajímavých témat, např. přítomnost minoritních nebo volatilních prvků v minerálech (např. P v topazu nebo granátu – Breiter a Kronz 2004, Breiter et al. 2005, B ve slídách – Černý et al. 1995b, Novák et al. 1999a). Jen velmi málo víme o vztahu pegmatitů k jejich mateřským granitům (Němec 1990b, Černý et al. 1992, Gordějenko et al. 1996) a jen minimálně jsou pegmatity diskutovány jak nejvíce frakcionovaný produkt granitických komplexů (Breiter 1998, 2001, Breiter et al. 2003). Pegmatity tedy představují zajímavý a z geologického hlediska poněkud podceňovaný objekt studia, který může přinést velmi zajímavé výsledky nejen v oblasti, popisné mineralogie, systematické mineralogie a krystalochemie, jak se může zdát z přehledu publikovaných prací o granitických pegmatitech, ale i pro řešení obecnějších geologických popř. regionálních problémů. Zároveň se pegmatity stávají stále více zajímavé, protože obsahuji řadu vzácných (a velmi často i kritických) prvků (především Li, Be, Ta, Nb, REE, Sc, Y, W, Sn, Rb, Cs) v ekonomicky využitelných koncentracích.

## 2.13 Literatura

Ackerman, L., 2004: Pegmatity ve Vlastějovicích. – *MS diplomová práce, Karlova Universita, Praha.* 142 stran.

Ackerman, L., Zachariáš, J. & Pudilová, M. 2007: P–T and fluid evolution of barren and lithium pegmatites from Vlastějovice, Bohemian Massif, Czech Republic. International Journal of Earth Sciences, 96: 623–638.

Ackerman, L., Haluzová, E., Creaser, R. A., Pašava, J., Veselovský, F., Breiter, K., ... & Drábek, M. 2017: Temporal evolution of mineralization events in the Bohemian Massif inferred from the Re–Os geochronology of molybdenite. *Mineralium Deposita*, *52*, 651-662.

Aichler, J., Fišera, M., Jilemnická, L., Zoubková, L., 1986: Metapegmatit s berylem z Videl, Hrubý Jeseník. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. nat*., 71: 22-33.

Baadsgaard, H., Černý, P., 1993: Geochronological studies in the Winnipeg River pegmatite populations, southeastern Manitoba. - *Program and Abstracts, GAC/MAC meeting, Edmonton,* A5.

Bačík, P., Cempírek, J., Uher, P., Novák, M., Ozdín, D., Filip, J., Škoda, R., Breiter, K., Klementová, M., Ďuďa, R., Groat, L. 2013: Oxy-schorl, $Na(Fe^{2+}{}_2Al)Al_6Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH)_3O$, a new mineral from Zlatá Idka, Slovak Republic and Přibyslavice, Czech Republic. American Mineralogist, 98, 485–492.

Baker, D.R., 1998: The escape of pegmatite dikes from granitic plutons: constraints from new models of viscosity and dike propagation. - *Can. Mineral*., 36: 255-263.

Bernard, J.H., (ed.) 1981: Mineralogie Československa. - *Academia Praha*. 645 stran.

Bernard, J.H., 2000: Minerály České republiky - stručný přehled. - *Academia Praha*. 186 stran.

Bernard, J.H., Pouba, Z., (ed.) 1986: Rudní ložiska a metalogeneze československé části Českého masívu. - *Ústřední ústav geologický, Praha*. 320 stran.

Bosi, F., Skogby, H., Ciriotti, M. E., Gadas, P., Novák, M., Cempírek, J., Všianský, D. & Filip, J. 2017: Lucchesiite, $CaFe^{2+}{}_3Al_6(Si_6O_{18})(BO_3)_3(OH)_3O$, a new mineral species of the tourmaline supergroup. *Mineralogical Magazine*, *81*(1), 1-14.

Bosi, F., Pezzotta, F., Altieri, A., Andreozzi, G. B., Ballirano, P., Tempesta, G., Cempírek, J., Škoda, R., Filip, J., Čopjaková, R., Novák, M., Kampf, A.R., Scribner, E.D., Groat, L.A. & James Evans, R. 2022: Celleriite,$\square(Mn^{2+}{}_2Al)Al_6(Si_6O_{18})(BO_3)_3(OH)_3(OH)$, a new mineral species of the tourmaline supergroup. *American Mineralogist*, *107*(1), 31-42.

Bouška, V., 1960: Příspěvek k poznání písekitu. - *Rozpr. Čs. Akad. věd*, 70: 1-35.

Bouška, V., 1968: Metamiktní přeměna fergusonitu ze Žulové. - *Čas. Mineral. Geol*., 13: 11-22.

Bouška, V., Čech, F., 1960: O nerostech z pegmatitu od Rudolfova u Českých Budějovic. - *Čas. Mineral. Geol*., 5: 381-384.

Bouška, V., Čech, F., Johan, Z., 1960: Study of some Czechoslovak metamict orthites. - *Acta Univ. Carol., Geol.*: 3-22.

Bouška, V., Johan, Z., 1972: New data on písekite. - *Lithos*, 5: 93-103.

Breiter, K., 1998: Phosphorus- and fluorine-rich granite system at Podlesí (Excursion stop. No. 3). - *Genetic significance of phosphorus in fractionated granites, Peršlák, Czech Republic, September 1998. Excursion guide (Breiter, K. ed.)*: 59-75.

Breiter, K., 2001: Phosphorus- and fluorine-rich granite system at Podlesí. - *International Workshop: Phosphorus- and fluorine-rich granites, Podlesí, Czech Republic, October 2001*: 52-78.

Breiter, K., 2002: From explosive breccia to unidirectional solidification textures: magmatic evolution of a phosphorus- and fluorine-rich granite system (Podlesí, Krušné hory Mts., Czech Republic). – *Bull. Czech Geol. Survey*, 77: 67-92.

Breiter, K., Beran, A., Buriánek, D., Cempírek, J., Dutrow, B., Henry, D., Novák, M., Raimboult, L., 2003. Přibyslavice near Čáslav, tourmaline-muscovite orthogneiss, muscovite grante, pegmatite. - *International symposium on light elements in rock forming minerals LERM 2003, Nové Město na Moravě, June 2003, Field trip guidebook (Novák, M. ed.):* 77-90.

Breiter, K., Frýda, J., Seltmann, R., Thomas, R., 1997: Mineralogical evidence for two magmatic stages in the evolution of an extremely fractionated P-rich rare-metal granite: the Podlesí stock, Krušné hory, Czech Republic. - *Journ. Petrol.*, 38: 1725-1739.

Breiter, K., Kronz, A., 2004: Phosphorus-rich topaz from fractionated granites (Podlesí, Czech Republic). - *Mineral. Petrol.*, 81: 235-247.

Breiter, K., Novák, M., Koller, F. & Cempírek, J. 2005b: Phosphorus – an omnipresent minor element in garnet of diverse textural types from leucocratic granitic rocks. Mineralogy and Petrology, 85: 205–221.

Breiter, K., Scharbert, S., 1995: The Homolka magmatic centre – an example of late variscan ore bearing magmatism in the Southbohemian Batholith (Southern Bohemia, Northern Austria). - *Jb. Geol. B.-A.*, 138: 9-25.

Breiter, K., Scharbert, S., 1998: Latest intrusions of the Eisgarn pluton (South Bohemia - Northern Waldviertel). - *Jb. Geol. B.-A.*, 141: 25-37.

Breiter, K., Škoda, R., & Veselovský, F. 2009: Neobvyklý P-, Li-a Sn-bohatý pegmatit z Vernéřova u Aše, Česká republika. *Bulletin Mineralogicko-Petrologickeho Oddeleni Narodniho Muzea v Praze*, *17*(1).

Breiter, K., Sokol, A., 1997: Chemistry of the Bohemian granitoids: geotectonic and metallogenic implications. - *Sbor. Geol. Věd., Lož. Geol, mineral.*, 31: 75-96.

Buriánek, D., Novák, M., 2004: Morphological and compositional evolution of tourmaline from nodular granite at Lavičky near Velké Meziříčí, Moldanubicum, Czech Republic. - *Journ. Czech Geol. Soc.*, 49: 81-90.

Buriánek, D., Dolníček, Z., & Novák, M. 2016: Textural and compositional evidence for a polyphase saturation of tourmaline in granitic rocks from the Třebíč pluton (Bohemian massif). *Journal of Geosciences*, *61*(4), 309-334.

Cempírek, J., 2003: Minerální asociace a chemické složení dumortieritu z granitických pegmatitů. - *MS diplomová práce, Masarykova universita Brno*. 81 stran.

Cempírek, J., Buriánek, D., Beran, A., Novák, M., 2003: Locality no. 9: Starkoč near Čáslav. Garnet-biotite gneiss to migmatite, abyssal barren pegmatite. Minerals of interest: garnet (OH), oxy-schorl, olenite (B,F,OH), dumortierite (B,OH). – *International symposium on light elements in rock forming minerals LERM 2003, Nové Město na Moravě, June 2003, Field trip guidebook (Novák, M. ed.):* 71-76.

Cempírek, J., Novák, M., 2003: Mineral assemblages and chemical composition of Al-rich tourmaline from abyssal pegmatites of the Bohemian Massif. – *International symposium on light elements in rock forming minerals LERM 2003, Nové Město na Moravě, June 2003, Book of Abstracts:* 12-13.

Cempírek, J., Novák, M., 2004a: Dumortierit a turmalín z abysálních pegmatitů od Vémyslic u Moravského Krumlova, gföhlská jednotka, moldanubikum. - *Acta Musei Moraviae, Sci. Geol*., 89: 45-54.

Cempírek, J., Novák, M., 2004b: Abyssal pegmatite with olenite and dumortierite from Kutná Hora, Czech Republic; an example of fractionation in Li-poor Al,B-rich granitic system. – *GAC/MAC Meeting, St. Catharines 2004, Abstracts Volume 29*, 225.

Cempírek, J., Novák, M., Ertl, A., Hughes, J.M., Rossman, G.R. & Dyar, M.D. 2006: Fe-bearing olenite with tetrahedrally coordinated Al from an abyssal pegmatite at Kutná Hora, Czech Republic: structure, crystal chemistry, optical spectra and Xanes spectra. – *The Canadian Mineralogist*, 44: 23–30.

Cempírek, J., Novák, M., Vávra, V., 1999: Hurlbutit z beryl-colubitového pegmatitu v Kostelním Vydří u Telče, západní Morava. - *Acta Mus. Moraviea, Sci. geol*., 84: 45-48.

Cempírek, J., Novák, M., Dolníček, Z., Kotková, J. & Škoda, R., 2010: Crystal chemistry and origin of grandidierite, ominelite, boralsilite and werdingite from the Bory Granulite Massif, Czech Republic. *American Mineralogist*, 95, 1533-1547.

Čech, F., 1957a: Priotit (blomstrandin) z Pozďátek u Třebíče. - *Čas. Mineral. Geol*., 2: 346-348.

Čech, F., 1957b: Příspěvek k poznání pegmatitů v třebíčsko-velkomeziříčském masívu. - *Čas. Morav. muz., vědy přír*., 40: 39-48.

Čech, F., 1961: Occurrence of stokesite in Czechoslovakia. - *Mineral. Mag*., 32: 673-675.

Čech, F., 1962a Mineralogické a genetické poměry pegmatitového ložiska od Ctidružic u Moravských Budějovic. – *MS, kand. disert. práce, Karlova universita Praha*.

Čech, F., 1962b: Fosforečnanová minerální asociace z Vernéřova. - *Čas. Mineral. Geol*., 7: 399-403.

Čech, F., 1963: Příspěvky k mineralogii Moravy a Slezska. - *Čas. Morav. muz., vědy přír* , 48: 31-42

Čech, F., 1985: Mineralogie žulových pegmatitů české části Českého masívu. - *MS doktorská disertační práce, PřF, Karlova universita Praha*. 333 stran.

Čech, F., Ewing, R.C., Lumpkin, G.R., Novák, M., 1999: Nb-Ta-Ti-REE oxides from NYF granitic pegmatites in the Třebíč durbachite massif, Czech Republic. - *The E.E. Foord Memorial Sympsium on NYF granitic pegmatites, Program and Abstracts, Can. Mineral.,* 37: 811-812.

Čech, F., Povondra, P., 1972: New data on metamict allanite from Domanínek, Czechoslovakia. - *Acta Univ. Carol., Geol*., 151-160.

Čech, F., Povondra, P., Staněk, J., 1964: Studium triplitu, zwieselitu a graftonitu ze západomoravských pegmatitů. - *Acta Univ. Carol., Geol*., 97-116.

Čech, F., Rieder, M., Novák, F., Novotný, J., 1978: Accessory nigerite in a granite from Central Bohemia, Czechoslovakia. - *Neues Jb. Mineral., Mh*., 337-346.

Čech, F., Staněk, J., Dávidová, Š., 1981: Minerály pegmatitů. - In: Bernard J.H. (ed.) Mineralogie Československa. - Academia Praha. 98-183.

Černý, Pavel, Veselovský, F., 2000: Pegmatit Bílý kámen u Kynžvartu. - *Minerál*., 8: 10-16.

Černý, P., 2004: Vliv kontaminace z okolních hornin na chemické složení turmalínů granitických pegmatitů v okolí Černé v Pošumaví. - *MS diplomová. práce, PřF Karlova universita Praha*, 78 stran.

Černý, P., 1956a: Bavenit a sdružené nerosty z Drahonína. - *Čas. Mineral. Geol*., 1: 197-203.

Černý, P., 1956b: Srůsty xenotimu a zirkonu z Drahonína.- *Spisy přírodověd. Fak. Masaryk. Univ*., 376: 293-306.

Černý, P., 1958: Desilikované pegmatity od Drahonína.- *Práce Brněnské zákl. ČSAV*, 370: 161-202.

Černý, P., 1960: Milarit a wellsit z Věžné. - *Práce Brněnské Zákl. ČSAV*, 32: 1-16.

Černý, P., 1963: Epididymite and milarite – alteration products of beryl from Věžná, Czechoslovakia. - *Mineral. Mag*., 33: 450-457.

Černý, P., 1965: Mineralogie dvou pegmatitů ze serpentinitu ve Věžné. - *MS kandidátská disertační práce, Geol. ústav. ČSAV, Praha*.

Černý, P., 1968: Berylliumwandlungen in Pegmatitem - Verlauf und Produkte. - *Neues Jb. Miner. Abh.* 108: 166-180.

Černý, P., 1982: Petrogenesis of granitic pegmatites. - In: P. Černý ed. Short Course in Granitic Pegmatites in Science and industry. - *MAC Short Course Handbook*, 8, 405-461.

Černý, P., 1991a: Rare-element granitic pegmatites. I. Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. - *Geosci. Canada*, 18: 49-67.

Černý, P., 1991b: Rare-element granitic pegmatites. II. Regional to global environments and Petrogenesis. - *Geosci. Canada*, 18: 68-81.

Černý, P., 1998: Magmatic vs. metamorphic derivation of rare-element pegmatites. - *Krystalinikum*, 24: 9-36.

Černý, P., 2000: Constitution, petrology, affiliation and categories of miarolitic pegmatites. - *Mem. Soc. Italiana Scienze Nat. Mus. Civ. Storia Nat, Milano*, 30: 5-12.

Černý, P., 2004: The Tanco rare-element pegmatite deposit, Manitoba: Regional context, internal anatomy, and global comparison. - *In: R.L. Linnen, I.M. Samson (eds).: Rare-element geochemistry and ore deposits, GAC Short Course Notes*, 17: 184-231.

Černý, P., Čech, F., Povondra, P., 1964: Review of ilmenite-strüverite minerals. - *Neues Jb., Miner., Abh.*, 101: 142-172.

Černý P. a Ercit T.S. 2005: The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, **43**, 2005–2026.

Černý, P., Ercit, T.S., Wise, M.A., 1992a: The tantalite-tapiolite gap: natural assemblages vs. experimental data. - *Can. Mineral*., 30: 587-598.

Černý, P., Hawthorne, F.C., Jarosewich, E., 1980: Crystal chemistry of milarite. - *Can. Mineral*., 18: 41-57.

Černý, P., Hawthorne, F.C., Laflamme, J.H.G., Hinthorne, J.R., 1979: Stibiobetafite, a new member of the pyrochlore group from Věžná, Czechoslovakia. - *Can. Mineral*., 17: 583-588.

Černý, P., Chapman, R., Schreyer, W., Ottolini, L., Bottazzi, P., McCammon, C., 1997: Lithium in sekaninaite from the type locality, Dolní Bory, Czech Republic. - *Can. Mineral*., 35: 167-173.

Černý, P., London, D., Novák, M., 2012: Granitic Pegmatites as Reflections of Their Sources. – *Elements*, 8, 289–294.

Černý, P., Meintzer, R.E., Anderson, A.J., 1985: Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites: selected examples of data and mechanisms. - *Can. Mineral*., 23: 381-421.

Černý, P., Němec, D., 1995: Pristine vs. contaminated trends in Nb, Ta-oxide minerals of the Jihlava Pegmatite district. - *Mineral. Petrol*., 55: 117-130.

Černý, P., Novák, M., 1992: Locality No.2: Věžná near Nedvědice, a pegmatite dike of the beryl-columbite subtype penetrating serpentinite. – *International symposium on granitic pegmatites Lepidolite 200, Nové Město na Moravě, August-September 1992, Field trip guidebook (Novák, M., Černý, P. eds.):* 27-32.

Černý, P., Novák, M., Fryer, B.J., Staněk, J., 1992c: Fertile granites - parents to rare-pegmatites in the Czechoslovak Moldanubicum. - *International symposium on granitic pegmatites* Lepidolite 200, *Nové Město na Moravě, August-September 1992, Abstracts of Papers*: 19-20.

Černý, P., Novák, M., Chapman, R., 1992b: Effects of sillimanite-grade metamorphism and shearing on Nb,Ta-oxide minerals in granitic pegmatites: Maršíkov, northern Moravia, Czechoslovakia. - *Can. Mineral*., 30: 699-718.

Černý, P., Novák, M., Chapman, R., 1995a: The Al(Nb,Ta)$Ti_{-2}$ substitution in titanite: the emergence of a new species? - *Mineral. Petrol*., 52: 61-73

Černý, P., Novák, M., Chapman, R., 2000: Subsolidus behavior of niobian rutile from Věžná, Czech Republic: a model for exsolution in phases with $Fe^{2+}$ >> $Fe^{3+}$. - *Journ. Czech. Geol. Soc.*, 45: 21-35.

Černý, P., Povondra, P., 1966: Beryllian cordierite from Věžná : (Na,K) + Be = Al. - *Neues Jb. Mineral., Mh*., 36-44.

Černý, P., Povondra, P., 1967: Cordierite in West-Moravian desilicated pegmatites. - *Acta Univ. Carol., Geol*., 203-221.

Černý, P., Povondra, P., 1972: An Al,F-rich metamict titanite from Czechoslovakia. - *Neues Jb. Miner. Mh*., 400-406.

Černý, P., Povondra, P., Staněk, J., 1971: Two cookeites from Czechoslovakia - a boron-rich variety and a IIb polytype. - *Lithos*, 4: 7-15.

Černý, P., Smith, J.V., Mason, R.A., Delaney, J.S., 1984: Geochemistry and petrology of feldspar crystallization in the Věžná pegmatite. - *Can. Mineral*., 22: 631-651.

Černý, P., Staněk, J., Novák, M., Baastgaard, H., Rieder, M., Ottolini, L., Kavalová, M., Chapman, R., 1995b: Chemical and structural evolution of micas at the Rožná and Dobrá Voda pegmatites, Czech Republic. - *Mineral. Petrol*., 55: 177-202.

Černý, P., Veselovský, F. 2000: Pegmatit Bílý kámen (Weisser Stein) u Kynžvartu. Minerál: 8(1): 10-16.

Čopjaková R, Škoda R, Vašinová-Galiová M, Novák M (2013) Distributions of Y + REE and Sc in tourmaline and their implications for the melt evolution; examples from NYF pegmatites of the Třebíč Pluton, Moldanubian Zone, Czech Republic. J Geosci 58: 113–131

Čopjaková R, Škoda R, Vašinová-Galiová M, Novák M, Cempírek J (2015) Scandium- and REE-rich tourmaline replaced by Sc-rich REE-bearing epidote-group mineral from the mixed (NYF + LCT) Kracovice pegmatite (Moldanubian Zone, Czech Republic). Amer Miner 100: 1434–1451

Dallmeyer, R.D., Franke, W., Weber, K., 1995: Pre-Permian geology of central and eastern Europe. - *Springer-Verlag, Berlin:* 1-593.

Dosbaba, M., Novák, M., 2012: Quartz replacement by "kerolite" in graphic quartz-feldspar intergrowths from the Věžná I pegmatite, Czech Republic; A complex desilicification process related to episyenitization. – The Canadian Mineralogist 50, 1609–1622.

Dostál, J., 1964: Pegmatity z okolí Maršíkova. - *MS diplomová práce, Karlova Universita, Praha.*

Dostál, J., 1966: Mineralogische und Petrographische Verhältnisse von Chrysoberyll-Sillimanit Pegmatit von Maršíkov. - *Acta Univ. Carol., Geol*., 271-287.

Duda, J. 1986: Pegmatites in the Bory granulite massif. - *Sbor. geol. Věd, Ložisk. geol. mineral*., 27: 157-202.

Ercit, T.S 2004: REE-enriched granitic pegmatites. - *In: R.L. Linnen, I.M. Samson (eds.): Rare-element geochemistry and ore deposits, GAC Short Course Notes*, 17: 257-296.

Ercit, T.S., Černý, P., Hawthorne, F.C., 1993: Cesstibtantite - a geologic introduction to the inverse pyrochlores. - *Mineral. Petrol*., 48: 235-255.

Ertl, A., Schuster, R., Prowatke, S., Brandstätter, F., Ludwig, T., Berndhardt, H-J., Koller, F., Hughes, J.M., 2004: Mn-rich tourmaline and fluorapatite in a variscan pegmatite from Eibenstein an der Thaya, Bohemian massif, Lower Austria. - *Eur. J. Mineral*., 16: 551-560.

Fersman, A.J., 1960: Izbrannyje trudy VI, pegmatity. - *Izdat. AN SSSR, Moskva*: 742 stran.

Fiala, F., 1951: Rulovité pegmatity od Unčína a Chlumce a jejich nerosty. - *Čas. Nár. Muz., odd. Přír*., 68-69: 1949-1950.

Fiala, F., 1954: Dumortierit od Miskovic. - *Sbor. Nár. Muzea*, 10: 3-38.

Filip, J., 2002: Minerální asociace a chemismus axinitu z vybraných hornin Českého masivu. - MS diplomová práce, Masarykova universita, Brno. 69 stran.

Filip, J., Houzar, S., Sulovský P., 2002: Allanit a produkty jeho přeměny ve skarnu a pegmatitu z Rešic. - *Acta Mus. Morav., Sci. geol*.., 87: 87-101.

Finger, F., Hanžl P., Pin C., von Quadt A., Steyrer H.P., 2000: The Brunovistulian: Avalonian Precambrian sequence at the eastern end of the Central European Variscides? - In: Franke W., Haak V., Oncken O., & Tanner D. (eds). Orogenic Processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt. *Geological Society, London, Special Publications*, 179: 103-112.

Finger, F., Roberts, M.P., Haunschmid, B., Schermair, A., Steyrer, H.P. (1997): Variscan granitoids of central Europe: their typology, potential sources and tectonotherm relations. - *Mineral. Petrol*., 61: 67-96.

Fišera, V., Rychlý, R., 1983: Nález topazu v pegmatite u Jablonce nad Nisou. - *Čas. Mineral. Geol*., 28: 215.

Franke, W., 2000: The mid-European segment of the variscides: tectonostratigraphic units, terrane boundaries and plate tectonic evolution. - In: Franke W., Haak V., Oncken O., & Tanner D. (eds). Orogenic Processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt. *Geological Society, London, Special Publications*, 179: 35-61.

Franke, W., Żelažniewicz, A., 2000: The eastern termination of the Variscides: terrane correlation and kinematic evolution. - In: Franke W., Haak V., Oncken O., & Tanner D. (eds). Orogenic Processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt. *Geological Society, London, Special Publications*, 179: 63-86.

Franz, G., Morteani, G., 1984: The formation of chrysoberyl in metamorphosed pegmatites. - *Journ. Petrol.*, 25: 27-52.

Frýda, J., Breiter, K., 1995. Alkali feldspars as a main phosphorus reservoirs in rare-metal granites: three examples from the Bohemian Massif (Czech Republic). - *Terra Nova*, 7: 315-320.

Gadas, P., Novák, M., Staněk, J., Filip, J., Vašinová Galiová, M., 2012: Compositional evolution of zoned tourmaline crystals from pockets in common pegmatites, the Moldanubian Zone, Czech Republic. Canadian Mineralogist 50, 895–912.

Gadas, P., Novák, M., Talla, D., Vašinová Galiová, M. 2013: Compositional evolution of grossular garnet from leucotonalitic pegmatite at Ruda nad Moravou, Czech Republic; a complex EMPA, LA-ICP-MS, IR and CL study. Mineralogy and Petrology, 107, 2, 311-326.

Gadas, P., Novák, M., Cempírek, J., Filip, J,. Vašinová Galiová, M., Groat, L.A. a Všianský, D. 2014: Mineral assemblages, comositional variation, and crystal structure of feruvitic tourmaline from a contaminated anatectic pegmatite at Mirošov near Strážek, Moldanubian Zone, Czech Republic Canadian Mineralogist, 52, č. 2, s. 285-301.

Gadas P., Novák M., Galiová M.V., Szuszkiewicz A., Pieczka A., Haifler J. a Cempírek J. 2020: Secondary beryl in cordierite/sekaninaite pseudomorphs from granitic pegmatites – a monitor of elevated content of beryllium in the precursor. *The Canadian Mineralogist*, **58**(6), 785–802.

Ginzburg, A.I., Timofejev, I.N., Feldman, L.G., 1979: Osnovy geologii granitnych pegmatitov. - *Nedra,* 296 stran.

Glodny, J., Grauert, B., Fiala, J., Vejnar, Z., Krohe, A., 1998: Metapegmatites in the western Bohemian massif: ages of crystallisation and metamorphic overprint, as constrained by U-Pb zircon, monazite, garnet, columbite and Rb-Sr muscovite data. - *Geol. Rundsch.*, 87: 124-134.

Goliáš, V., 2002: Thorium Occurrences in the Czech Republic and their Mineralogy. - *In: Uranium deposits - from their genesis to the environmental aspects, Prague. Proceedings (Kříbek, B., Zeman, J. eds.)*: 54-56.

Gordějenko, V.V., Ilina, A.N., Timochina, L.A., Badanina, E.V., Staněk, J., 1996: Geochemical model of evolution of pegmatite-ore system western Moravia. - *Zap. Vses. Mineral. Obsch.*, 125: 38-48.

Grenar, A., 1958: Mineralogicko-petrografické studie pegmatitu v Kříženci a jeho nejbližšího okolí. - *Geol. Práce*, 13: 74-96.

Grimm, M.C., 1991: Beitrage zur Kenntnis der Pegmatite im Bayerischen Wald, 2: Die Verbandsverhalnisse des Turmalinpegmatits Maisried bei Bobrach/Bayerischer Wald. - *Aufschluss*, 42: 179-192.

Grimm, M.C., 1992: Beitrage zur Kenntnis der Pegmatite im Bayerischen Wald, 3: Pegmatit- und Granitgange im Bereich Bobrach-Bodenmais/Bayerischer Wald. - *Aufschluss*, 43: 271-286.

Grym, V., 1975: Geochemická klasifikace žulových pegmatitů Českého masívu. - *Geoindustria, vybrané práce, techologie a geologie rudních ložisek*, 7: 235-240.

Grym, V., 1994: Lithný pegmatit z Nové Vsi u Čes. Krumlova. - *Minerál*, 2: 245-250.

Hájek, J., Staňková, J., 1970: Drobná tektonika a pterografie pegmatitů z Bobrůvky u Velkého Meziříčí. - *Vlast. Sbor. Vysočiny*, 6: 33-43.

Hönig, S., Leichmann, J., Novák, M. 2010: Unidirectional solidification textures and garnet layering in Y-enriched garnet-bearing aplite–pegmatites in the Cadomian Brno Batholith, Czech Republic. Journal of Geosciences, 55: 113–129

Hönig, S., Čopjaková, R., Škoda, R., Novák, M., Dolejš, D., Leichmann, J. a Vašinová Galiová, M. 2014: Garnet as a major carrier of the Y and REE in the granitic rocks: An example from the layered anorogenic granite in the Brno Batholith, Czech Republic. American Mineralogist, 99, 10, 1922-1941.

Hegner, E., Kröner, A., 2000: Review of Nd isotopic data and xenocrystic and detrital zircon ages from the pre-Variscan basement in the eastern Bohemian Massif: speculations on palinspatic reconstruction. - In: Franke W., Haak V., Oncken O., & Tanner D. (eds). Orogenic Processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt. *Geological Society, London, Special Publications*, 179: 113-129.

Hehenberger, R., 1997: Elbait, Olenit und Lepidolith von Maigen/Niederosterriech. - *Lapis*, 22: 241-44.

Holub, F.V., Cocherie, A., Rossi, P., 1997: Radiometric dating of granitic rocks from the Central Bohemian Plutonic Complex (Czech Republic): constraints on the chronology of thermal and tectonic events along the Moldanubian-Barrandian boundary. - *C.R. Acad. Paris, Earth & Planet. Sci*., 325: 19-26.

Houzar, S., 1985: Příspěvek k petrografii reakčních vápenatých skarnů u Sokolí na Třebíčsku. - *Přírod. Sbor. Západomorav. Muz*.,14: 9-21.

Houzar, S., 1987: Nový lithný pegmatite z Kracovic u Třebíče. - *Acta Sci. nat. Musei Moraviae occident. Třebíč*: 1-4.

Houzar, S., 1996: Nový lepidolitový pegmatit od Sedlatic u Želetavy, záp. Morava - *Acta Mus. Moraviae, Sci. Nat*., 80: 47-55.

Houzar, S., Novák, M., 1985: Nový lithný pegmatit ze Zárubic u Třebíče. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. nat.*, 70: 209-210.

**Houzar, S., Novák, M., 2001: Mramory na jihovýchodním okraji Českého masivu (přehled výzkumů). - *Vlastiv. Sbor. Vysočiny,* Jihlava, 3-33.**

**Houzar, S., Šrein, V., 1990: Calcite-andradite microclinite from Markvartice near Třebíč. - *Acta Mus. Moraviae. Sci. nat*. 75: 3-20.**

Hruschka, W., 1824: Vorkommen und Kristallisation einiger mähr. Fossilien. - *Mitt. der mähr. schles. Gessel*. No. 52.

Cháb, J., Fediuková, E., Fišera, M., Novotný, P., Opletal, M., 1992: Deformation and metamorphism in the silesicum (North Moravia, Czechoslovakia). - *Proceedings 1st International Conference on the Bohemian Massif, Czech Geol. Survey,* 44-48.

Cháb, J., Fišera, M., Fediuková, E., Novotný, P., Opletal, M., Skácelová, D., 1984: Problémy tektonického a metamorfního vývoje východní části Hrubého Jeseníku. - *Sbor. Geol. Věst., Ř.G.*, 39: 27-72.

Cháb, J., Suk M., 1977: Regionální metamorfóza na území Čech a Moravy. - *Knihovna ÚÚG*, svazek 50. 156 stran.

Chakoumakos, B.C., Lumpkin, G.R., 1990: Pressure-temperature constraints on the crystallization of the Harding pegmatite, Taos County, New Mexico. - *Can. Mineral.*, 28: 287-298.

Chen, F., Siebel, W., 2004: Zircon and titanite geochronology of the Fürstenstein granite massif, Bavarian Forest, NW Bohemian Massif: Pulses of the late Variscan magmatic activity. - *Eur. J. Mineral.*, 16: 777-788.

Chládek Š., Uher P. a Novák M. 2020: Compositional and textural variations of columbite-group minerals from beryl-columbite pegmatites, the Maršíkov District, Bohemian Massif, Czech Republic: magmatic *versus* hydrothermal evolution. *The Canadian Mineralogist*, **58**(6), 767–783.

Chládek Š., Uher P., Novák M., Bačík P. a Opletal T. 2021: Microlite-group minerals: tracers of complex post-magmatic evolution in beryl–columbite granitic pegmatites, Maršíkov District, Bohemian Massif, Czech Republic. *Mineralogical Magazine*, **85**(5), 725–743.

Chlupáč, I., Brzobohatý, R., Kovanda, J., Stráník, Z., 2002: Geologická minulost České republiky. - *Academia Praha*, 436 stran.

Janeczek, J., Sachanbinski, M., 1989: Pegmatyty berylowe w granicie Dwulyszczykowym wschodniej czesci masywu Strzegom-Sobótka. - *Archiwum Mineralogiczne*, T., 44: 57-76.

Janoušek, V., Bowes, D.R., Rogers, G., Farrow, C.M., Jelínek, E., 2000: Modelling diverse processes in the petrogenesis of a composite batholith: the Central Bohemian Pluton, Central European Hercynides. - *Journ. Petrol.*, 41: 511-543.

Jiang, S-Y., Yang, J.H., Novák, M., Selway, J.B., 2003: Chemical and boron isotopic compositions of turmaline from the Lavičky leucogranite, Czech Republic. - *Geochem. Journ.,* 37: 545-556.

Keck, E., 1985: Über einige Mineralien von Rudolfstein im Fichtelgebirge. - *Aufschluss*, 36: 348-358.

Klaproth, M.H., 1792: Aus einem Schreiben von Hrn. Bergrath Karsten in Berlin. - *Bergmannisches Journal*, 80.

Klötzli, U.S., Frank, W., Scharbert, S., Thöni, M., 1999: Evolution of the SE Bohemian Massif based on geochronological data – a review. - *Jb. Geol. B.-A.*, 141: 377-394.

Klötzli, U.S., Parrish, R.R., 1996: Zircon Pb-Pb and U-Pb geochronology of the Rastenberg granodiorite, South Bohemian Massif, Austria. - *Mineral. Petrol*., 58: 197-214.

Köhler, H., Dodig, G., Hölzl, S., 1993: Zirkondatierungen am Leuchtenberger Granite (NE Bazern). - *Beihefte Europ. Journ. Mineral*., 5: 116.

Košler, J., Rogers, G., Bowes, D.R., Hopgood, A.M., 1994: Rb-Sr isotopic evidence for polymetamorphism in the Domažlice crystalline complex from a study of mica-feldspar pairs in a segregation pegmatite near Stráž, western Bohemia. - *Mitt. Öster. Min. Ges*., 139: 75-76.

Kotková, J., Novák, M., Povondra, P., 2003a: Locality No. 6: Horní Bory near Velké Meziříčí. Granulite, migmatite and granitic pegmatite. Minerals of interest: cordierite ($H_2O$,$CO_2$,Li), schorl, oxy-schorl (OH,F,O,B,Li). – *International symposium on light elements in rock forming minerals LERM 2003, Nové Město na Moravě, June 2003, Field trip guidebook (Novák, M. ed.):* 47-52.

Kotková, J., Schaltegger, U., Leichmann, J., 2003b: 338-335 Ma old intrusions in the E Bohemian massif - a relic of the orogen-wide durbachitic magmatism in European Variscides. - *Journ. Czech Geol. Soc*., 48: 80-81.

Kratochvíl, F., Vachtl, J., Zoubek, V., 1951: Geologické poměry kříženecko-nezdického pegmatitového pásma tepelské vysočiny. - *Sbor. Ústř. Ústav. Geol*., 18: 201-223.

Krejčí, A., 1923: Písekit, nový radioaktivní nerost nebo klamotvar. - *Čas Mineral. Geol*., 1: 1-5.

Krmíček, L., Novák, M., Trumbull, R. B., Cempírek, J., a Houzar, S. 2021: Boron isotopic variations in tourmaline from metacarbonates and associated calc-silicate rocks from the Bohemian Massif: Constraints on boron recycling in the Variscan orogen. *Geoscience Frontiers*, *12*(1), 219-230.

Kröner, A., Jaeckel, P., Reischmann, T., Kroner, U., 1998: Further evidence for an early Carboniferous (~340 Ma) age of high-grade metamorphism in the Saxonian granulite complex. - *Geol. Rundsch*., 86: 751-766.

Kröner, A., O'Brien, P.J., Nemchin, A.A., Pidgeon, R.T., 2000: Zircon ages for high pressure granulites from South Bohemia, Czech Republic, and their connection to Carboniferous high temperature processes. - *Contrib. Mineral. Petrol*., 138: 127-142

Kröner, A., Wendt, I., Liew, T.C., Compston, W., Todt, W., Fiala, J., Vaňková, A., Vaněk, J., 1988: U-Pb zircon and Sm-Nd model ages of high-grade Moldanubian metasediments, Bohemian Massif, Czechoslovakia. - *Contrib. Mineral. Petrol*., 99: 257-266.

Küster, D., 1995: Rb-Sr isotope systematics of muscovite from Pan-African granitic pegmatites of Western and Northeastern Africa. - *Mineral. Petrol*., 55: 71-84.

Kutina, J., 1944: Nové nálezy nerostů na Říčansku a Jílovsku. - *Vědy přírodní*, 23: 33-41.

Láznička, P. 1967: Mineralogie středočeského plutonu. – *Přednášky Národní muzeum v Praze,* 48 stran.

Leichmann, J., Novák, M., Sulovský, P,. 1999: Peraluminous Whole-Rock Chemistry versus Peralkaline Mineralogy of Highly Fractionated Garnet-Bearing Granites from the Brno Batholith. - *Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft,* 11: 144.

Liang, J-J., Hawthorne, F.C., Novák, M., Černý, P., Ottolini, L., 1995: Crystal-structure refinement of boromuscovite polymorphs using a coupled Rietveld-static-structure-energy minimization method. - *Can. Mineral*., 33: 859-865.

Linnen, R.F., 2004: Granite-related rare-element deposits and experimental constrints on Ta-Nb-W-Sn-Zr-Hf mineralization. - In: R.L. Linnen, I.M. Samson eds.: Rare-element geochemistry and ore deposits, GAC Short Course Notes, 17, 70-102.

Litochleb, J., 1972: Amazonitový pegmatite z Hraničné ve Slezsku. - *Čas. Slez. Muzea*, 21: 151-154.

London, D., 1992: The application of experimental petrology to the genesis and crystallizetion of granitic pegmatites. - *Can. Mineral*., 30: 499-540.

London, D., 1996: Granitic pegmatites. - *Trans. Royal Soc. Edinburgh Earth Sci*., 87: 305-319.

London, D., 2004a: Geochemistry of alkali and alkaline earth elements in ore-forming granites, pegmatites, and rhyolites. - In: R.L. Linnen, I.M. Samson eds.: Rare-element geochemistry and ore deposits, GAC Short Course Notes, 17, 25-69.

London, D., 2004b: Granitic pegmatites: an accesssment of current concepts and directions for the future. - *Lithos*, in press.

London, D., 2008: Pegmatites. – Mineralogical Association of Canada, 347 p., Québec.

London, D., Černý, P., Loomis, J.L., Pan, J.J., 1990:. Phosphorus in alkali feldspars of rare-element granitic pegmatites. - *Can. Mineral*., 28: 771-786.

London, D., Evensen, J.M., 2002: Beryllium in silicic magmas and the origin of beryl-bearing pegmatites. In: E.S. Grew ed. Beryllium – mineralogy, petrology and geochemistry. - *Rev. Mineral., Geochem*., 50: 445-486.

London, D., Morgan, G.B. VI, Hervig, R.L., 1989: Vapor-undersaturated experiments with Macusani glass + $H_2O$ at 200 MPa, and internal differentiation of granitic pegmatites. - *Contrib. Mineral. Petrol*., 102: 1-17.

Losert, J., 1956: Dumortierity z pegmatitů a migmatitů v širším okolí Kutné Hory.- *Rozpr. ČSAV*, 66: 1-44.

Losos, Z., Sulovský, P., Vávra, V., 1998: Sn-, Bi-, and Ag-minerals from pegmatites, aplites and quartz veins of Žulová granitic massif (Silesicum, Czech Republic). - *Krystalinikum*, 24: 53-72.

Losos, Z., Zimák, J., Krausová, D., Sulovský, P., 1995: Chamosit (”strigovit”) z Žulovského masivu (Česká republika) a jeho srovnání s chlority v Strzegom-Sobótka massif (Poland). - *Acta Mus. Moraviae, Sci. Nat.*, 80: 9-34.

Martin, R. F., & De Vito, C. 2014: The late-stage miniflood of Ca in granitic pegmatites: an open-system acid-reflux model involving plagioclase in the exocontact. *The Canadian Mineralogist*, *52*(2), 165-181.

Masau, M., Staněk, J., Černý, P., Chapman, R., 2000: Metasomatic wolfeite and Associated phosphates from the Otov I granitic pegmatite, western Bohemia. - *Journ. Czech Geol. Soc*., 45: 159-173.

Melleton, J., Gloaguen, E., Frei, D., Novák, M. & Breiter, K. (2012): How are the emplacement of rare-element pegmatites, regional metamorphism and magmatism interrelated in the Moldanubian domain of the Variscan Bohemian massif, Czech Republic. *The Canandian Mineralogist*, 50, 1751- 1773.

Mísař, Z., Dudek, A., 1993: Some critical events in the geological history of eastern margin of the Bohemian Massif. - *Journ. Czech Geol. Soc*., 38: 9-20.

Mísař, Z., Dudek, A., Havlena, V., Weiss, J., 1983: Geologie ČSSR I, Český masív. - SPN Praha,

Morávek, P., 1954: Pegmatity z Kamenného Přívozu u Jílového. - *Čas. Nár. Muzea, odd. Přír*.,73: 46-52.

Morgan, G.B. VI, London, D., 1987: Alteration of amphibolitic wallrocks around the Tanco rare-element pegmatite, Bernic Lake, Manitoba. - *Amer. Mineral*., 72: 1097-1121.

Morgan, G.B.VI, London, D., 1989: Experimental reactions of amphibolite with boron-bearing aqueous fluids at 200 MPa: implications for tourmaline stability and partial melting of mafic rocks. - *Contrib. Mineral. Petrol*., 102: 281-297.

Mrázek, Z., Vrána, S., 1984: Highly aluminian titanite from a plagioclase-fluorite pegmatite in skarn at Vlastějovice, Czechoslovakia. - *Neues Jb. Mineral., Mh*., 193-196.

Mücke, A., Keck, E., Haase, J., 1990: Die genetische Entwicklung des Pegmatits von Hagendorf-Süd/ Aufschluss, Oberpfalz. - *Aufschluss*, 41: 33-51.

Němec, D., 1963: Eruptivgesteine in westmährischen Skarnen und ihre genetische stellung. - *Neues Jb. Mineral., Abh*., 100: 203-224.

Němec, D., 1976: Versuch einer paragenetischen Analyse der Pegmatite Böhmens und Mährens. - *Chem. D. Erde*, 35: 126-157.

Němec, D., 1981: Ein Pegmatit mit Li-Mineralisierung von Dolní Bory, Westmähren (ČSSR). - *Chem. d. Erde*, 40: 146-177.

Němec, D., 1982: Ein Pegmatit mit Li-Mineralisierung bei Radonín in Westmähren (ČSSR). - *Chem. d. Erde*, 41: 243-253.

Němec, D., 1983a: Der Li-Pegmatit bei Rudolec in Mähren (ČSSR) und Fragen der pegmatites mit verstreuter Li-Mineralisation. - *Z. Geol. Wiss*., 11: 715-727.

Němec, D., 1983b: Zinnwaldit in Moldanubischen Lithium-Pegmatiten. - *Chem. Erde*, 42: 197-204.

Němec, D., 1988: Das Be-Borat Hambergit im Pegmatit Jeclov II (West-Morava/ČSSR) und seine Entstehung. - *Z. geol. Wiss*., 16: 245-251.

Němec, D., 1989a: Chemical composition of tourmaline in pegmatites of the Jihlava Massif (Western Moravia, ČSSR). - *Chem. d. Erde*, 49: 317-340.

Němec, D., 1989b: Lithium aluminosilicates in pegmatites affected by stress. - *Chem. Erde*, 49: 167-172.

Němec, D., 1990a: Neues zur Mineralogie eines Hambergit-führenden Pegmatitigangs von Kracovice (bei Třebíč, Westmorava, ČSFR).- *Z. geol. Wiss*., 18: 1105-1115.

Němec, D., 1990b: Fertile leucogranites and aplites of the Jihlava pegmatite field, western Moravia, Czechoslovakia. - *Acta Univ. Carol., Geol*., 25-34.

Němec, D., 1992: Pegmatity s drúzovými dutinami západomoravského krystalinika. - *Přír. Sbor. Západomor. Muzea*, 18: 13-23.

Němec, D., 1993: Lithné pegmatity jihlavského masívu, západní Morava. - *Vlast. Věst. Vysočiny*, 11: 75-99.

Němec, D., 1998: The Rožná pegmatite field, western Moravia (Czech Republic). - *Chem. d. Erde*. 58: 233-246.

Niedermayr, G., 1969: Der Pegmatit der Königsalm, Niederösterreich. - *Ann. Naturhistor. Mus. Wien*, 73: 49-54.

Nováček, R., 1931: Granáty československých pegmatitů. - *Věst. Král. Čes. Spol. Nauk, tř. II*, 38: 1-55.

Nováček, R., 1932: Fergusonit z Frýdberka. - *Příroda*, 25: 18-20.

Novák, M., 1981: Mineralogie pegmatitu od Hamrů nad Sázavou, západní Morava. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. nat*., 66: 7-16.

Novák, M., 1988: Granáty z pegmatitů Hrubého Jeseníku (severní Morava). - *Acta Mus. Moraviae, Sci. nat.*, 73:3-28.

Novák, M., 1992: Locality No. 1: Rožná near Bystřice nad Perštejnem, a large pegmatite dike of the lepidolite subtype, type locality of lepidolite. - *International symposium on mineralogy, petrology and geochemistry of granitic pegmatites Lepidolite 200, Nové Město na Moravě, August-September 1992, Field trip guidebook (Novák, M., Černý, P. eds.):* 21-26.

Novák, M., 1995: Ferrocolumbit z beryl-columbitového pegmatitu v Kostelním Vydří u Telče, západní Morava. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. nat*., 79: 3-8.

Novák, M., 1998: Fibrous blue dravite; an indicator of fluid composition during subsolidus replacement processes in Li-poor granitic pegmatites in the Moldanubicum, Czech Republic. - *Journ. Czech Geol. Soc*., 43: 24-30.

Novák, M., 1999: Cassiterite and tusionite as monitors of B and Sn behaviour in the elbaite pegmatite at Řečice near Nové Město na Moravě, western Moravia, Czech Republic. - *Neues Jb. Miner., Mh*., 481-493.

Novák, M., 2000: Compositional pathways of tourmaline evolution during primary (magmatic) crystallization in complex (Li) pegmatites of the Moldanubicum, Czech Republic. - *Mem. Soc. Italiana Scienze Nat. Mus. Civ. Storia Nat, Milano*, 30: 45-56.

Novák, M., 2001: Are granitic pegmatites a toy for descriptive mineralogists or a useful tool for geologists? - MinPet 2001 Symposium, *Mittl. Österr. Miner. Gessel.*, 146: 217-219.

Novák, M. 2007: Contamination in granitic pegmatites, examples from the Moldanubicum, Czech Republic. In Granitic Pegmatites: The state of the art - International Symposium. U. P. – Facul. Ciências, Memórias, **9**: 9 –12.

Novák M. 2013: Contamination processes in complex granitic pegmatites PEG 2013: The 6th International Symposium on Granitic Pegmatites, 100–103.

Novák, M., Burns, P.C, Morgan, G.B.VI, 1998b: Fluorine variation in hambergite from granitic pegmatites. - *Can. Mineral.*, 36: 441-446.

Novák M, Cempírek J (eds) 2010: Granitic pegmatites and mineralogical museums in Czech Republic. IMA 2010 Field Trip Guide CZ2. Acta Mineral Petrogr Field Guide Series 6, Szeged, pp 1–56.

Novák M., Cícha J., Čopjaková R., Škoda R. a Galiová M.V. (2017b) Milarite-group minerals from the NYF pegmatite Velká skála, Písek district, Czech Republic: sole carriers of Be from the magmatic to hydrothermal stage. *European Journal of Mineralogy*, **29**, 755–766.

Novák, M., Čech, F., 1996: Scandian columbite and niobian rutile from pegmatites penetrating the Třebíč durbachite massif, western Moravia, Czech Republic. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. nat.*, 80: 3-8.

Novák, M., Černý, P., 1998: Niobium-tantalum oxide minerals from complex pegmatites in the Moldanubicum, Czech Republic; Primary *versus* secondary compositional trends. - *Can. Mineral.*, 36: 659-672.

Novák, M., Černý, P., Cempírek, J., Šrein, V., Filip, J., 2004a: Ferrotapiolite as pseudomorph of stibiotantalite from the Laštovičky lepidolite pegmatite, Czech Republic; an example of hydrothermal alteration at constant Ta/(Ta+Nb). - *Can. Mineral.*, 42: 1117-1128.

Novák, M., Černý, P, Cooper, M, Hawthorne, F.C., Ottolini, L., Xu, Z., Liang, J-J., 1999a: Boron-bearing $2M_1$ polylithionite and $2M_1$ + 1M boromuscovite from an elbaite pegmatite at Řečice, western Moravia, Czech Republic. - *Eur. J. Miner.*, 11: 669-678.

Novák, M., Černý, P., Čech, F., Staněk, J., 1992: Granitic pegmatites in the territory of the Bohemian and Moravian Moldanubicum. – *International symposium on mineralogy, petrology and geochemistry of granitic pegmatites Lepidolite 200, Nové Město na Moravě, August-September 1992, Field trip guidebook (Novák, M., Černý, P. eds.):* 11-20.

Novák, M., Černý, P., Kimbrough, D.L., Taylor, M.C., Ercit, T.S., 1998a: U-Pb Ages of monazite from granitic pegmatites in the Moldanubian Zone and their geological implications. - *Acta Univ. Carol.*, Vol. conf. POCEEL Praha, 42: 309-310.

Novák, M., Černý, P., Povondra, P., Škoda, R., 2003c: Locality No. 4: Věžná near Nedvědice. Beryl pegmatite. Minerals of interest: cordierite (Li,Be,$H_2O$), beryl, dravite, oxy-dravite (Li,B,OH,O,F). – *International symposium on light elements in rock forming minerals LERM 2003, Nové Město na Moravě, June 2003, Field trip guidebook (Novák, M. ed.):* 31-37.

Novák, M., Černý, P., Selway, J.B., 1999c: The zinnwaldite-masutomilite-elbaite pegmatite at Kracovice from the Třebíč durbachite massif - a complex pegmatite related to the NYF family. - The Eugene E. Foord Memorial Symposium on NYF-type Pegmatites, Denver, Colorado, *Can. Mineral.,* 37: 815-816.

Novák, M., Černý, P., Uher, P., 2003a: Extreme variation and apparent reversal of Nb-Ta fractionation in columbite-group minerals from the Scheibengraben beryl-columbite pegmatite, Maršíkov, Czech Republic. - *Eur. J. Miner.*, 15: 565-574.

Novák, M., Dolníček, Z., Zachař, A., Gadas, P., Nepejchal, M., Sobek, K., Škoda, R., Vrtiška, L. (2023a) Mineral assemblages and compositional variations in bavenite-bohseite from granitic pegmatites of the Bohemian Massif, Czech Republic. Mineral. Mag (in print)

Novák M., Ertl A., Povondra P., Vašinová Galiová M., Rossman G.R., Pristacz H., Prem M., Giester G., Gadas P., Škoda R. (2013b): Darrellhenryite, $Na(LiAl_2)Al_6(BO_3)_3Si_6O_{18}(OH)_3O$, a new mineral from the tourmaline supergroup. American Mineralogist, 98, 1886-1892.

Novák, M., Houzar, S., 1996: The HT/LP metamorphism of dolomite marbles in the eastern part of the Moldanubicum; a manifestation of heat flow related to the Třebíč Durbachite Massif. - *Journ. Czech Geol. Soc.*, 41: 139-146.

Novák, M., Houzar, S., Pfeiferová, A., 1998c: Přehled mineralogie, petrografie a historie klasické lokality lepidolitového pegmatitu v Rožné u Bystřice nad Pernštejnem, západní Morava. *Acta Mus. Moraviae, Sci. geol.,* 83, 3-48.

Novák, M., Houzar, S., Šrein, V., 1997c: Gahnite-bearing marbles and their regional geological significance, E-NE of the Bohemian Massif. - *Journ. Czech Geol. Soc.*, 42: 33-40.

Novák, M., Hyršl, J. (1992): Locality No.3: Vlastějovice near Zruč nad Sázavou, pegmatites with fluorite penetrating skarn.- *International symposium on mineralogy, petrology and geochemistry of granitic pegmatites Lepidolite 200, Nové Město na Moravě, August-September 1992, Field trip guidebook (Novák, M., Černý, P. eds.):* 33-37.

Novák, M., Jilemnická, L., 1988: Ilmenite from pegmatites of western Moravia. - *Čas. Mineral. Geol.,* 33: 411-417.

Novák, M., Johan, Z., Škoda, R., Černý, P., Šrein, V. & Veselovský, F. 2008: Primary oxide minerals in the system $WO_3$–$Nb_2O_5$–$TiO_2$–$Fe_2O_3$–FeO and their breakdown products from the pegmatite No. 3 at Dolní Bory, Hatě, Czech Republic. European Journal of Mineralogy, 20: 489–499.

Novák M., Kadlec T. & Gadas P. (2013a): Geological position, mineral assemblages and contamination of granitic pegmatites in the Moldanubian Zone, Czech Republic; examples from the Vlastějovice region. *J. Geosci*. **58**, 21-47.

Novák, M., Klečka, M., Šrein, V., 1994: Compositional evolution of Nb,Ta-oxide minerals from alkali-feldspar muscovite granites Homolka and Šejby southern Bohemia, and its comparison with other rare-element granites. - *MinPet 94 Symposium, Mitteil. Österreich. Mineral. Gessel.*, 139: 353-354.

Novák, M., Korbel, P., Odehnal, F., 1991: Pseudomorphs of bertrandite and epididymite after beryl from Věžná, Western Moravia, Czechoslovakia. - *Neues Jb. Miner. Mh.*, 1991: 473-480.

Novák, M., Nepejchal, M., Škoda, R., Urbánek, B., 2003b: Beryl-columbitový pegmatit z Branné, Hrubý Jeseník. - *Acta Musei Moraviae, Sci. Geol*., 88: 113-122.

Novák, M., Povondra, P., 1995: Elbaite pegmatites in the Moldanubicum: a new subtype of the rare-element class. - *Mineral. Petrol*., 55: 159-176.

Novák, M., Povondra, P., Selway, J.B., 2004b: Schorl-*oxy-schorl* to dravite-*oxy-dravite* tourmaline from granitic pegmatites; examples from the Moldanubicum, Czech Republic. - *Eur. J. Miner*., 16: 323-333.

Nová,k M., Prokop, J., Losos, Z. a Macek, I. 2017a: Tourmaline, an indicator of external Mg-contamination of granitic pegmatites from host serpentinite; examples from the Moldanubian Zone, Czech Republic. *Mineralogy and Petrology*, **111**, 625–641.

Novák, M., Rejl, L., 1993: Vztah muskovitických pegmatitů ke geofyzikálním polím v oblasti Hrubého Jeseníku. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. Nat*., 77: 49-61.

Novák, M., Sejkora, J., Cooper, M.A., 2000: Cyrilovite from Cyrilov, western Moravia, Czech Republic; new data on the type material. - *Journ. Czech. Geol. Soc*., 45: 1010-1016.

Novák, M., Selway, J.B., 1997: Locality No. 1: Rožná near Bystřice nad Pernštejnem, Hradisko hill, a large lepidolite subtype pegmatite dike. - International Symposium on Tourmaline, Nové Město na Moravě, June 1997, Field Trip Guidebook (Novák M., Selway J.B. eds.): 23-38.

Novák, M., Selway, J.B., Černý, P., Hawthorne, F.C., 1999b: Tourmaline of the elbaite-dravite series from an elbaite-subtype pegmatite at Bližná, southern Bohemia, Czech Republic. - *Eur. J. Mineral*., 11: 557-568.

Novák, M., Selway, J.B., Korbel, P., Šarbach, M., 1997a: Locality No. 4: Bližná near Černá v Pošumaví, elbaite subtype pegmatite penetrating marble with exomorphic tourmaline. – *International Symposium on Tourmaline, Nové Město na Moravě, June 1997, Field Trip Guidebook (Novák M., Selway J.B. eds.):* 55-70.

Novák, M., Selway, J.B., Staněk, J., 1997b: Locality No. 10: Myšenec near Protivín, barren pegmatite with giant tourmaline aggregates. – *International Symposium on Tourmaline, Nové Město na Moravě, June 1997, Field Trip Guidebook (Novák M., Selway J.B. eds.):* 105-110.

Novák, M., Selway, J.B., Škoda, R., 2003c: Tourmaline from the NYF pegmatites; example from the Třebíč massif. – *International symposium on light elements in rock forming minerals LERM 2003, Nové Město na Moravě, June 2003, Book of Abstracts:* 55-56.

Novák, M., Selway, J.B., Uher, P., 1997d: Locality No. 6: Lavičky near Velké Meziříčí, quartz-tourmaline orbicules in leucocratic two-mica granite tourmaline in barren pegmatite and hydrothermal quartz-tourmaline veins. – *International Symposium on Tourmaline, Nové Město na Moravě, June 1997, Field Trip Guidebook (Novák M., Selway J.B. eds.)*: 77-84.

Novák, M., Staněk, J., 1999: Pegmatit od Dobré Vody. - *Acta Mus. Moraviea, Sci. geol*., 84: 3-44.

Novák M., Škoda R., Filip J., Macek I., & Vaculovič T. (2011). Compositional trends in tourmaline from intragranitic NYF pegmatites of the Třebíč pluton, Czech Republic: an electron microprobe, Mössbauer and LA–ICP–MS study. *The Canadian Mineralogist*, *49*(1), 359-380.

Novák, M., Škoda, R., Gadas, P., Krmíček, L., & Černý, P. (2012). Contrasting origins of the mixed (NYF+ LCT) signature in granitic pegmatites, with examples from the Moldanubian Zone, Czech Republic. *The Canadian Mineralogist*, *50*(4), 1077-1094.

Novák, M., Šrein, V., 1989: Chemical composition and paragenesis of wolframite from the Dolní Bory pegmatites, western Moravia, Czechoslovakia. - *Acta Univ. Carol. Geol., Čech Vol.*: 495-500.

Novák, M., Šrein, V., 1998: Niobian cesstibtantite from the Dobrá Voda lepidolite pegmatite, Western Moravia, Czech Republic. - *Neues Jb. Miner. Mh*., 1998: 354-360.

Novák, M., Šrein, V., Houzar, S., 1990: Chemical composition of titanite from various calc-silicate rocks and associated pegmatites in the eastern part of the Moldanubicum, western Moravia, Czechoslovakia. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. nat*., 75: 3-20.

Novák, M., Taylor, M.C., 2000: Foitite: Formation during late stages of evolution of complex pegmatites at Dobrá Voda, Czech Republic, and Pala, California, USA. - *Can. Mineral.,* 38: 1399-1408.

Novák, M., Toman, J., Škoda, R., Šikola, D., Mazuch, J. 2023b: Review of zeolite mineralizations from the high-grade metamorphosed Strážek Unit, Moldanubian Zone, Czech Republic. J. Geosci, (in print)

Novák, M., Zimák, J., Jilemnická, L., 1985: Nearly pure grossular from a pegmatite. - *Neues Jb. Miner. Mh*., 1985: 179-183.

Novotný, M., Staněk, J., 1953: Nový minerál, fosforečnan cyrilovit. - *Práce Moravskoslezs. akad. věd přír*., 25: 325-336.

O'Brien, P.J., 2000: The fundamental Variscan problem: high-temperature metamorphism at different depths and high-pressure metamorphism at different temperatures. - In: Franke W., Haak V., Oncken O., & Tanner D. (eds). Orogenic Processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt. *Geological Society, London, Special Publications,* 179: 369-386.

Pauliš, P., Mazuch, J., 2003: Amblygonit z lithného pegmatitu z Dolní Rožínky. – *Vlastiv. Sbor. Vysočiny*, 16: 59-61.

Petrakakis, K., 1997: Evolution of Moldanubian rocks in Austria: review and synthesis. - *J. Metamorphic Geol.*, 15: 203-222.

Pieczka, A., 2000: A rare mineral-bearing pegmatite from the Szklary serpentinite massif, the Fore-Sudetic Block, SW Poland. - *Geologica Sudetica*, 33: 23-31.

Pieczka, A., Marszalek, M., Golebiowska, B., 1997: Manganoniobite, stibioniobite and Hf-zircon from the Szklary pegmatite, Lower Silesia (Poland). - *Mineral. Polonica*, 28: 89-100.

Pieczka, A., Szuskiewicz, A., Szełeg, E. a Nejbert, K. 2019: Calcium minerals and late stage metasomatism in the Julianna pegmatitic system, the Góry Sowie Block, SW Poland. Contributions to the 9th international Symposium PEG 2019, 56–58.

Pokorný, J., Staněk, J., 1951: Berylový pegmatit ze Scheibengraben u Maršíkova. - *Práce Moravskoslez. Akad., Vědy přír.*, 7: 247-258.

Povondra, P., 1981: The crystal chemistry of tourmalines of the schorl-dravite series. - *Acta Univ. Carol., Geol.*: 223-264.

Povondra, P., Čech, F., Staněk, J., 1985: Crystal chemistry of elbaites from some pegmatites of the Czech Massif. - *Acta Univ. Carol., Geol.*, 1-24.

Povondra, P., Lang, M., Pivec, E., Ulrych, J., 1998: Tourmaline from the Přibyslavice peraluminous alkali-feldspar granite, Czech Republic. - *Journ. Czech geol. Soc.*, 43: 3-8.

Povondra, P., Novák, M., 1986: Tourmalines from metamorphosed carbonate rocks from western Moravia. - *Neues Jb. Miner. Mh.*, 1986 : 273-282.

Povondra, P., Pivec, E., Čech, F., Lang, M., Novák, F., Prachař, I., Ulrych, J., 1987: Přibyslavice peraluminous granite. - *Acta Univ. Carol., Geol.*, 183-283.

Povondra, P., Staňková, J., Staněk, J., 1992: $CO_2$-bearing cordierite of Moldanubian leptynite rock series from Horní Bory, Czech Republic. - *Acta Univ. Carol., Geol.*, 331-349.

Procházka, J., 1966: O nových pegmatitech a jejich minerálech z okolí Šumperka. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. Nat,* 51: 43-60.

Přikryl J, Novák M, Filip J, Gadas P, Vašinová-Galiová M (2014) Iron+Magnesium-bearing beryl from granitic pegmatites: An EMPA, LA-ICP-MS, Mössbauer spectroscopy, and powder XRD study. Canad Mineral 52: 271–284

Rezek, K., Krist, P., 1985: Předběžná zpráva o výskytu U-Th, Ti-Zr a Nb-Ta minerálů na Holém vrchu u Vlatějovic. - *Čas. Mineral. Geol.*, 30: 434.

Rosický, V., Kokta, J., 1931: O povaze plagioklasů z pegmatitů, provázejících hadce na západní Moravě. - *Sbor. Přír. spol. v Mor. Ostravě*, 6: 97-108.

Sachanbinski, M., 1973: Wystepowanie mineralow berylowych na Dolnym Slasku. - *Instytut Geologyczny – Biuletyn*, 264: 249-257.

Sejkora, J., Litochleb, J., Novák, M., Cicha, J. & Dolníček, Z. 2020: Nickel-(Bi, Ag) sulphide mineralization from NYF Vepice pegmatite, Milevsko pluton, southern Bohemia (Czech Republic)-a reflection of the parental granite chemistry. *Journal of Geosciences*, *65*(3), 187-199.

Sekanina, J., 1928: Nerosty moravských pegmatitů.- *Čas. Morav. zem. mus*., 26: 113-224.

Sekanina, J., 1965: Vermiculit am Kontakt zwischen Aplit und Dolomit bei Prosetín. (Nordteil der Schwartzawakuppel). - *Acta Univ. Carol., Geol*., 17-30.

Seltmann, R., Lehmann, B., Schneider, T., Hösel, G., Tägl, U., 1995: Tin-tungsten mineralization in the Ehrenfriesdorf District, Central Erzgebirge. Ore Mineralzations of the Krušné Hory Mts (Erzgebirge). - *Excursion Guide, SGA Meeting, Mineral Deposits: From Their Origin to their Environmental Impact, Czech Geological Survey, Prague*: 125-148.

Selway, J.B., 1999: Copositional evolution of tourmaline in granitic pegmatites. - *MS PhD thesis, University of Manitoba, Winnipeg*. 363 stran.

Selway, J.B., Novák, M., Černý, P., Hawthorne, F.C., 1999: Compositional evolution of tourmaline in lepidolite-subtype pegmatites. - *Eur. J. Miner*., 12: 569-584.

Selway, J.B., Novák, M., Hawthorne F.C., Černý P., Ottolini, L., Kyser, T.K., 1998: Rossmanite $\square LiAl_2Al_6(BO_3)_3Si_6O_{18}(OH)_4$, a new alkali-deficient tourmaline: Description and crystal structure. - *Amer. Mineral*., 83: 894-900.

Schmakin, B.M., Makagon, V.M., Zagorsky, V.Ju., Peretyazhko, I.S., 1999: On the extreme concentrations of some minor elements in granitic pegmatites. - The E.E. Foord Memorial Sympsium on NYF granitic pegmatites, Program and Abstracts, *Can. Mineral.,* 37: 843-844.

Siebel, W., 1995: Anticorrelated Rb-Sr and K-Ar age discordances: Leuchtenberg granite, NE Bavaria, Germany. - *Contrib. Mineral. Petrol*., 120: 197-211.

Simmons WB, Webber KL (2008) Pegmatite genesis: state of the art. Eur J Mineral 20: 421–438

Skřápková, L., 2020. Mineralogy of the lithium pegmatite Lhenice I. MS thesis Masaryk University, Faculty of Science. 142 p. Available at: https://is.muni.cz/th/jmap5/

Slavík, F., 1951: Skarn a jeho resorpce pegmatitem-aplitem u Dolní Líšné na Novoměstsku. - *Sbor. Ústř. Ústav. Geol*, 18: 573-579.

Slowakiewicz, M., Lodzinski, M., 2003: $H_2O$-$CO_2$-NaCl-$CH_4$ fluid inclusions in beryls from pegmatites of the Sudety Mts. - *Mineral. Polonica*, 34: 13-26.

Sojka, A., 1969: Mineralogické a texturně parageneticképoměry pegmatitů na ložisku Olší.- *MS diplomová práce, PřF MU, Brno*.

Staněk, J., 1954: Petrografie a mineralogie pegmatitových žil u Dolních Borů. - *Práce Brněn. Zákl. Cs. Akad. Věd*, 26: 1-43 .

Staněk, J., 1955: K paragenezi fosfátů z Cyrilova u Vel. Meziříčí. - *Čas. Morav muz*., 40: 69-80.

Staněk, J., 1965: Pegmatit z Dobré Vody u Velkého Meziříčí. - *Folia Scripta Fac. Sci. Nat. Univ. Purk. Brun*., 6:1-39.

Staněk, J., 1967: Trifylín, sarkopsid a alluaudit z pegmatitu od Dolních Borů na západní Moravě. - *Čas. Morav. muz., vědy přír*., 52: 35-42.

Staněk, J., 1968: Triplit, kasiterit a topaz z pegmatitu od Rousměrova na západní Moravě. - *Folia Fac. Sci. Nat. Univ. Purk. Brun*., 14: 71-81.

Staněk, J., 1971: Studium sekundárních fosfátů železa a manganu z pegmatitu od Cyrilova. - *Folia Fac. Sci. Nat. Univ. Purk. Brun*., 22: 25-48.

Staněk, J., 1973a: Mineral paragenesis of the new lithium-bearing pegmatite at Laštovičky, western Moravia, Czechoslovakia. - *Scripta Fac. Sci. Nat. Univ. Purk. Brun*., 3: 1-14.

Staněk, J., 1973b: Phenakite from Třebíč, Czechoslovakia. - *Čas. Morav. muz*., 58: 49-52.

Staněk, J., 1977: Pegmatites from skarn near Líšná, western Moravia. - *Acta Univ. Carol., geol.*, 145-149.

Staněk, J., 1983: Projevy rekrystalizace v pegmatitech u Moravského Krumlova v jižní části brněnského masívu. - *Scripta přír. Fak. UJEP*, 13: 185-194.

Staněk, J., 1986: Paragenezis mineralov miarolovych pegmatitov Zapadnoj Moravii, Čechoslovakija. - *Proceedings of the General Meeting of IMA, Varna 1982*, 403-410.

Staněk, J., 1987: Garnets from granioid and pegmatoid rocks of the Dyje massif. - *Scripta Fac. Sci. Nat. Univ. Purk. Brun*., 17: 21-28.

Staněk, J., 1991: Parageneze minerálů pegmatitových žil z Hatí u Dolních Borů na západní Moravě. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. nat*., 76, 19-49.

Staněk, J., 1992: Locality No. 7: Nová Ves near Český Krumlov, a pegmatite dike of the petalite subtype penetrating serpentinite. – *International symposium on mineralogy, petrology and geochemistry of granitic pegmatites Lepidolite 200, Nové Město na Moravě, August-September 1992, Field trip guidebook (Novák, M., Černý, P. eds.):* 57-62.

Staněk, J., 1997: Asociace minerálů významnějších pegmatitových žil v Hatích u Dolních Borů na západní Moravě. - *Acta Mus. Moraviae, Sci. nat*., 82, 3 – 19.

Staněk, J., 2000: Minerály pegmatitů. In: J.H. Bernard, Minerály České republiky – stručný přehled. 26-50. - Academia Praha.

Staněk, J., Miškovský, J., 1975 : Sekaninaite, a new mineral of the cordierite series, from Dolní Bory, Czechoslovakia. - *Scripta Fac. Sci. Nat. Univ. Purk. Brun*., 5 : 21-30.

Staněk, J., Povondra, P., 1987: Elbaites from Řečice, western Moravia. - *Acta Mus. Moraviae, Sci . nat*., 72: 35-42.

Staněk, J., Schnorrer, G., 1993: Phenakit und Buergerit aus dem Skarnsteinbruch Vlastějovice bei Zruč nad Sázavou in Böhmen. - *Aufschluss*, 44: 161-164.

Starý, J., Šanderová, J., Tomášek, M., 2004: Tisá skála – pozůstatky po dolování cínu. - *Sbor. konference Stříbrná Jihlava*, 96-103.

Stočes, B., 1918: O pegmatitu z rudního obvodu příbramského. - *Rozp. České akad. Věd*, 27: 1-8.

Strunz, H., Forster, A., Tennyson, Ch., 1975: Die Pegmatite in der nördlichen Oberpfalz. - *Aufschluss*, 26: 117-189.

Strunz, H., Tennyson, Ch., 1980: Die Kluft- und Drusenmineralien der Fichtelgebirgsgranite. - *Aufschluss*, 31: 419-451.

Suess, F.E., 1903: Bau und bild der Böhmischen Masse. - In: Bau und Bild Österreichs, Wien.

Suess, F.E., 1912: Die moravischen Fenster und ihre Beziehung zum Grundgebirge des Hohes Gesenkes. Denkschr. - *Öster. Akad. Wiss., math.-naturviss. Kleide*, 88: 541-629.

Suida, R., 2001: Mineraly z pegmatitów masywu strzegomskiego. – *Otoczak*, 27: 15-25.

Suida, R., 2002: Pegmatyty Karkonoszy. – *Otoczak*, 28: 2-12.

Sztacho, P., 1978: Nerosty okolí Humpolce. – *Přednášky Národní muzeum*, 23 stran.

Škoda, R., 2003: Minerály Y, REE, Ti, Nb a Ta z NYF pegmatitů českého masívu. - *MS diplomová práce, PřF MU, Brno*.

Škoda, R., Novák, M., 2004: Akcesorické Nb-Ta-Ti minerály z pegmatitu v uranovém dole Drahonín, strážecké moldanubikum. - *Acta Musei Moraviae, Sci. Geol*., 89: 55-66.

Škoda, R., Novák, M., Černý, P., Černý, P., 2005: Komplexní Nb-Ta-Ti oxidy z pegmatitu ve Vepicích u Milevska, masiv Čertova břemene, moldanubikum. - *Bull. Mineral-petrolog. Odd. Nár. Muz.*, v tisku..

Škoda, R. & Novák, M. 2007: Y,REE,Nb,Ta,Ti-oxide ($AB_2O_6$) minerals from REL-REE euxenite-subtype pegmatites of the Třebíč Pluton, Czech Republic; substitutions and fractionation trends. Lithos, 95: 43–99.

Škoda, R., Novák, M., Cicha, J. 2011: Uranium–niobium-rich alteration products after "písekite", an intimate mixture of Y,REE,Nb,Ta,Ti-oxide minerals from the Obrázek I pegmatite, Písek, Czech Republic. J. Geosci., 56, 317-325 .

Škoda, R., Novák, M. & Houzar, S. 2006: Granitické NYF pegmatity třebíčského plutonu. Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 91: 129–176.

Škoda, R., Staněk, J. & Čopjaková, R. (2007): Minerální asociace fosfátových nodulí granitického pegmatitu od Cyrilova u Velkého Meziříčí, Moldanubikum; část I-primární a exsoluční fáze. Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae, 92: 59–74.

Teertstra, D.K., Černý, P., Novák, M., 1995: Compositional and textural evolution of pollucite in rare-element pegmatites of the Moldanubicum. - *Mineral. Petrol*., 55: 37-52.

Tennyson, Ch., 1960: Berylliummineralien und ihre pegmatische Paragenese in der Graniten von Tittling/Bayerischer Wald. - *Neues Jb. Miner. Abh*., 94: 1253-1265.

Toman, J., Novák, M., 2018: Textural relations and chemical composition of minerals from pollucite + harmotome + chabazite nodule in the Věžná I pegmatite, Czech republic. – The Canadian Mineralogist, 56, 1–18.

Toman J. a Novák M. 2020: Beryl-columbitový pegmatit Věžná I. *Acta Musei Moraviae, Scientiae Geologicae*, 107, 3–42.

Trnka, M., Houzar, S., 1993: Corundum pegmatite from Pokojovice near Třebíč. - *Acta Mus. Moraviae, Sci.nat.*, 78: 3-12

Turniak, K., Bröcker, M., 2002: Age of the two-mica granite from the Strzegom-Sobótka massif: new data from U/Pb monazite and xenotime study. - *Mineralogical Society of Poland, Special Papers*, 20: 211-213.

Uher, P., 1998: Composition of Nb,Ta,Ti,Sn-bearing oxide minerals from the Homolka phosphorus-rich granite, Czech Republic. - *Acta Univ. Carol., Geol. Vol. Genetic significance of phosphorus in fractionated granites, Peršlák, September 1998*, 42: 169-172.

Vavřín, I., 1962: Pegmatity magdalenského skarnového ložiska u Vlastějovic nad Sázavou. - *Sbor. Nár. muzea*, 18: 89-105.

Vejnar, Z., 1965: Pegmatity poběžovicko-domažlické oblasti. - *Sbor. Geol. Věd, Ložisk. Geol.*, 4: 7-84.

Vejnar, Z., 1968: The genesis of pegmatites and its relationship to the metamorphic and magmatic development of the West-Bohemian crystalline complexes. - *Rozp. Československ. Akad věd*, 78: 1-70.

Velebil, D., 1998: Revize lokality Březí u Říčan a lokality Cheb u Seče v Železných horách, naleziště krystalů ortoklasu. - *Minerál.*, 6: 91-93.

Vollstädt, H., Weiss, S., 1991: Mineralfundstellen Sächsisches Erzgebirge. - Wiese Verlag, München, 127 p.

Vrána, S., 1979: A secondary magnesium-bearing beryl in pseudomorphs after pegmatititic cordierite. - *Čas. Mineral. Geol.*, 24: 65-69.

Vrána, S., 2000: Margarit a sekundární korund v andalusitovém pegmatitu u Benešova nad Černou: důsledky pro interpretaci vzniku korundu v andalusitových pegmatitech moldanubika. - *Bull. Mineral-petrolog. Odd. Nár. Muz.*, 8: 250-252.

Vrána, S., Kröner, A., 1995: Pb-Pb zircon ages for tourmaline alkali-feldspar orthogneiss from Hluboká nad Vltavou in southern Bohemia. - *Journ. Czech Geol. Soc.*, 40: 127-135.

Výravský, J., Novák, M., & Škoda, R. 2017: Formation of pretulite ($ScPO_4$) by recrystallization of Sc-rich precursors in Dolní Bory pegmatite: Evidence for different mobility of Sc, Y, REE and Zr in hydrothermal conditions. *Chemical Geology*, *449*, 30-40.

Webber, K.L., Simmons, W.B., Falster, A.U., Foord, E.E., 1999: Cooling rates and crystallization dynamics of shallow level pegmatite-aplite dikes, San Diego County, California. - *Amer. Mineral*., 84: 708-717.

Welser, P., 1995: Příspěvek k poznání mineralogie a petrografie pegmatitů z lomu nedaleko Rudolfova u Č. Budějovic. - *Sbor. Jihočes. Muz.v Č. Budějovicích, Přír. vědy*, 35: 21-34.

Wise, M.A., 1999: Characterization and classification of NYF-type pegmatites. - The Eugene E. Foord Memorial Symposium on NYF-type Pegmatites, Denver, Colorado, *Can. Mineral.,* 37: 802-803.

Wise, M. A., Müller, A., & Simmons, W. B. 2022: A proposed new mineralogical classification system for granitic pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, *60*(2), 229-248.

Witzke, T., Giesler, T., 1998: Erster Nachweis des seltenen Scandium-Silikates Bazzit $Be_3Sc_2(Si_6O_{18})$, aus dem Königshainer Granit/Lausitz. - *Aufschluss*, 49: 293-297.

Zahradníček, L. & Novák, M. (2012): Lithium-bearing micas from elbaite-subtype pegmatites in the Western Moravia, Czech Republic. *Acta Musei Moraviae 97*, 25-37.

Zachař A., Novák M. and Škoda R. (2020) Beryllium minerals as monitors of geochemical evolution from magmatic to hydrothermal stage; examples from NYF pegmatites of the Třebíč Pluton, Czech Republic. *Journal of Geosciences*, **65**(3), 153–172.

Žáček, V., 1997: Compositional evolution of garnet in the regionally metamorphosed skarn, Vlastějovice, evidence of the preservation of early stages pre-dating regional metamorphism. - *Bull. Czech Geol. Surv*., 72: 37-48.

Žáček, V., Novák, M., Raimboult, L., Zachariáš, J., Ackerman, L., 2003: Locality No. 8: Vlastějovice near Ledeč nad Sázavou. Fe-skarn, barren fluorite pegmatite. Minerals of interest: garnet (F,OH), hastingsite (F), titanite (F,OH), fluorite. – *International symposium on light elements in rock forming minerals LERM 2003, Nové Město na Moravě, June 2003, Field trip guidebook (Novák, M. ed.):* 61-70.

# 3 Přehled pegmatitových hornin a mineralizace vzácných kovů v Západních Karpatech (Slovensko)

***Tomáš Sobocký***
*Ústav věd o Zemi, Slovenská akademie věd, Bratislava*
*Slovensko*

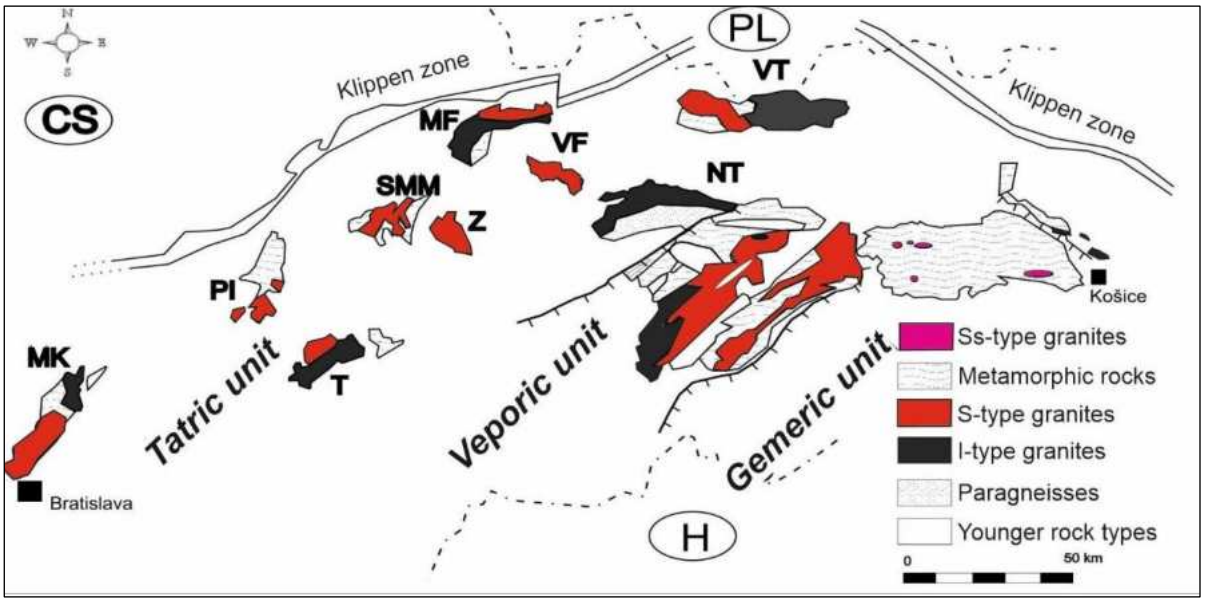
## 3.1 Úvod

Západní Karpaty reprezentují alpínské pohoří zahrnující fragmenty variského krystalinika. Většina pegmatitů je variského stáří a jejich vznik je spojován s procesy částečného tavení a/nebo magmatického štěpení matečných hornin (Černý & Ercit 2005; London 2008). Většina pegmatitů vzniká z fluid oddělených při pozdní krystalizaci magmatické taveniny. Tato zbytková fluida jsou většinou obohacena o těkavé sloučeniny a vzácné prvky, které se akumulují v hlubších částech těles a později jsou transportovány do jejich svrchních částí. Pegmatity jsou obvykle málo viskózní a frakcionované prvky jsou vázány na existující minerální fáze tvořící velké krystaly. Nekompatibilní prvky tvoří minerální fáze vzácných prvků, ale tvorba nových minerálů je omezená. Na druhé straně nejsvrchnější velké alpínské segmenty v západokarpatských strukturách - gemerská a silická jednotka – mají relativně nízký počet pegmatitů, které jsou však mineralogicky zajímavé vzhledem k obsahům fází bohatých na lithium, jako je např. elbait.

## 3.2 Geologická poloha pegmatitových hornin v Západních Karpatech

Žulové pegmatity Západních Karpat tvoří nejčastěji žíly a čočky ve variských granitických horninách devonského až spodnokarbonského stáří (~ cca 362 340 mil. let) v rámci tatrické a veporské alpské tektonické jednotky. Mateřské granitoidní horniny lze klasifikovat jako alkalickovápenaté metaluminické až peraluminické biotitické tonality až leukogranodiority, biotitické a dvojslídné granodiority až granity, muskovitické leukogranity, které inklinují k orogenním granitům typu S a méně až I (např. Cambel & Vilinovič 1987; Petrík & Broska 1994; Petrík & Kohút 1997; Petrík 2000; Petrík et al. 2001; Broska & Uher 2001; Kohút & Nabelek 2008). Pegmatitová tělesa se nejčastěji vyskytují ve felsických a leukokratních varietách dvojslídného granodioritu, monzogranitu, syenogranitu až alkalicko-živcového granitu v bratislavském masivu Malých Karpat, masivu Bojné v Považském Inovci, masivu Žiaru, masivu Rimavice v jv. části veporské jednotky, masivu Suchého a Malé Magury ve Strážovských vrších. Geochemicky lze tyto pegmatity často zařadit díky zvýšené koncentraci Li, Cs spolu s dalšími prvky jako Rb, Be, Sn, B, P a F do skupiny LCT (Černý & Ercit (2005).

Výskyt pegmatitu v biotitickém (leuko)tonalitu až granodioritu s vlastnostmi I-typu nebo přechodného I-/S-typu je omezený: modravský masiv Malých Karpat, hlohovecký masiv Považského Inovce, Vysoké Tatry, Velká a Malá Fatra, Prašívá hora v ďumbierském masivu Nízkých Tater. Vzácnokovové granity (pegmatity) v kupolích skrytého velkého gemerského žulového masivu jsou vázány na granity typu S nebo Ss (obr. 3.1).




Obr. 3.1. Přehledná geologická mapa včetně prostorového rozložení žulových typů Západních Karpat na Slovensku (převzato a upraveno; Uher 2019).

Západokarpatské granitické pegmatity vykazují prostorovou příbuznost s mateřskými variskými granitickými horninami. Pegmatity tvoří žilná až čočkovitá tělesa v granitoidech, případně v dioritech, méně ve stropních metamorfovaných horninách v amfibolitickém stupni metamorfózy. Pegmatitem nasunuté příkrovové horniny jsou vzdáleny pouze ~100-300 m od intruzivního kontaktu s granitickými horninami. Žulové pegmatity příkrovových hornin se vyskytují ve spodnopaleozoických metamorfovaných horninách tatrické a veporské jednotky, většinou v metapelitových až metapsamitových horninách (břidlice až pararuly), lokálně v metagranitech (ortoruly) a metabazických horninách (amfibolity až amfibolitické břidlice), ojediněle je přítomen v enklávách variských dioritových hornin. Některé výskyty žulového pegmatitu byly dokumentovány v metamorfovaných horninách (rulách) krystalinika v zemplínské jednotce (Faryad & Balogh 2002).

Někdejší geologická poloha variských granitických hornin a okolních paleozoických metamorfovaných hornin byla alpínsky komplikována, protože Západní Karpaty jsou součástí třetihorního alpsko-karpatsko-balkánského orogenního pásma. Komplexy předalpského krystalinika byly během alpínské orogeneze typicky naskládány (např. Grecula *et al.* 1997; Vozár *et al.* 2010). Výsledkem takto složitých alpínských struktur byl omezený výskyt variských reliktů v recentních pohořích, jako jsou Malé Karpaty, Považský Inovec, Tribeč, Strážovské vrchy, Žiar, Malá a Velká Fatra, Západní a Vysoké Tatry a tunel Branisko. Dále jsou v dubovském souvrství v modravském masivu (Malé Karpaty Mts., Modra - Harmónia, Dubová) známy vzácné tenké žíly a čočky žulových pegmatitů až aplitů (mocnost do ~30 cm), které intrudují devonské metamorfované vápence - mramory alterované na alkalicko-vápenaté rohovce nebo skarny (Cambel 1954; Broska *et al.* 2008). Podél jejich intruzivního kontaktu dochází ke kontaminaci pegmatitu s amfibolovým útvarem a okolními mramory až skarny.

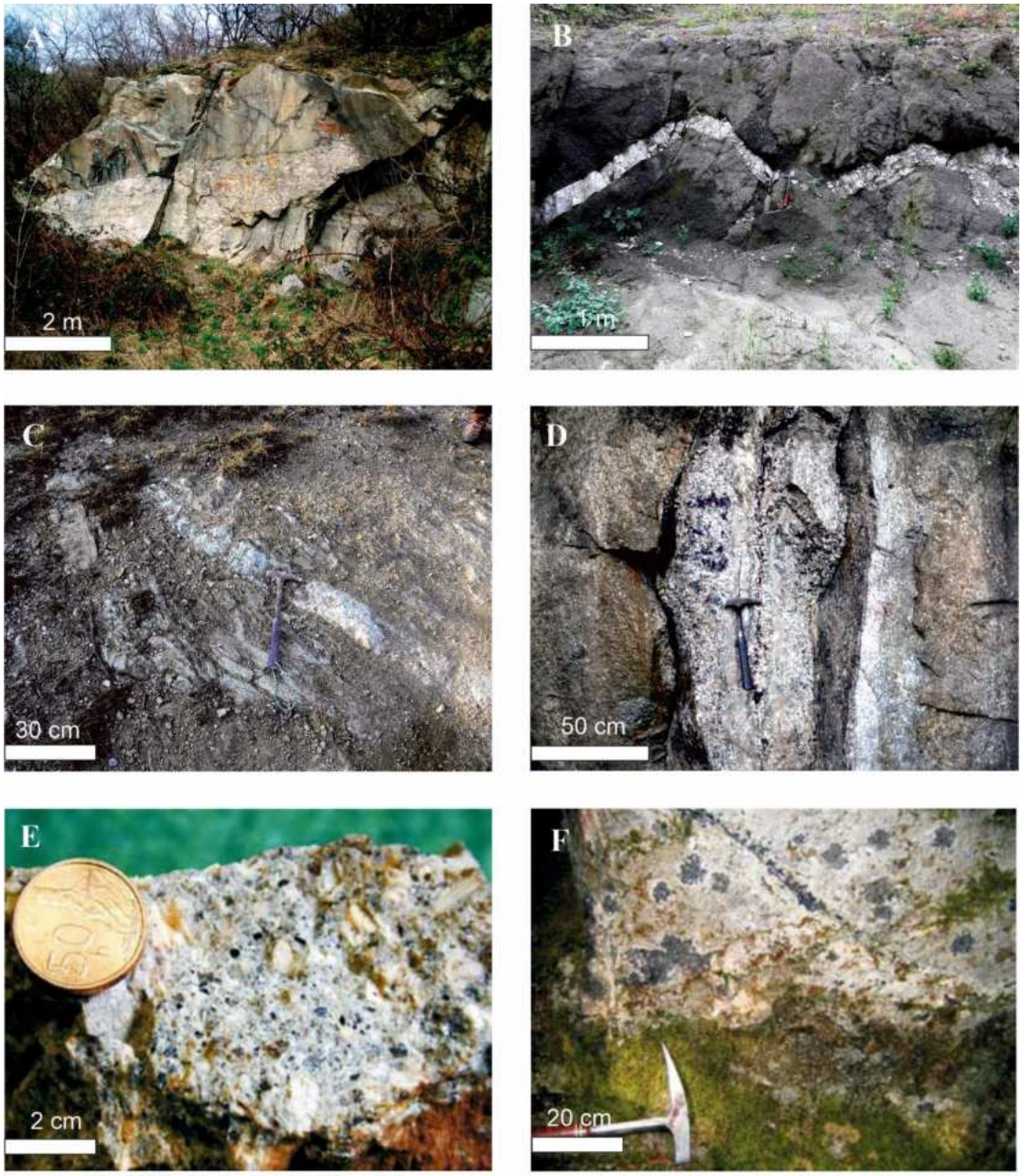
Gemerské granity intrudují do gelnické formace. Gemerská jednotka je nejvyšší tektonickou jednotkou svrchní kůry alpínského stáří v centrálních Západních Karpatech (Plašienka *et al.* 1997). Tato granitová tělesa jsou tvořena porfyrickými a jemnozrnnými granity, které ořezaly gelnické paleozoické vulkanosedimentární horniny postižené slabou kontaktní metamorfózou (Bajaník *et al.* 1984). Na základě vyvinuté mineralizace vzácných kovů Sn-Nb-Ta-W jsou definovány jako specializované granity typu S (Uher & Broska 1996; Broska & Uher 2001) (Grecula & Drnzík 1995; Malachovský *et al.* 2000; Uher *et al.* 2001).

## 3.3 Tvar těles granitových pegmatitů

Žulové pegmatity vyplňují pukliny žuly a nejčastěji tvoří subparalelní žíly a méně čočky v granitu (obr. 3.2A). Mocnost pegmatitů se pohybuje od několika cm (Nízké Tatry - Sopotnická dolina) do několika metrů (Malé Karpaty - Jezuitské lesy, Švábský vrch, Kamzík II, Rosslerův lom, Zuckermandel, Žiar - Nad Uhliskom, Strážovské vrchy, Považský Inovec - Moravany nad Váhom). Některé lokality v Malých Karpatech obsahují pegmatity intrudované do dioritických hornin v rámci duktilního tektonického režimu (obr. 3.2B) nebo intrudované do spodnopaleozoického metamorfního podloží, tj. pararul (obr. 3.2C). V pegmatitech je popisováno 7 různých zón:

- aplitová zóna (albit + K-živec + křemen + muskovit (biotit)
- hrubozrnný živec - křemen - muskovit (biotit)
- grafická (písmenková) zóna (K-živec + křemen)
- bloková zóna K-živce
- bloková křemenná zóna
- křemen - muskovitová zóna (vějířovitá muskovitová zóna)
- zóna jemnozrnného cukrovitého až hrubozrnného albitu (cleavelanditu).

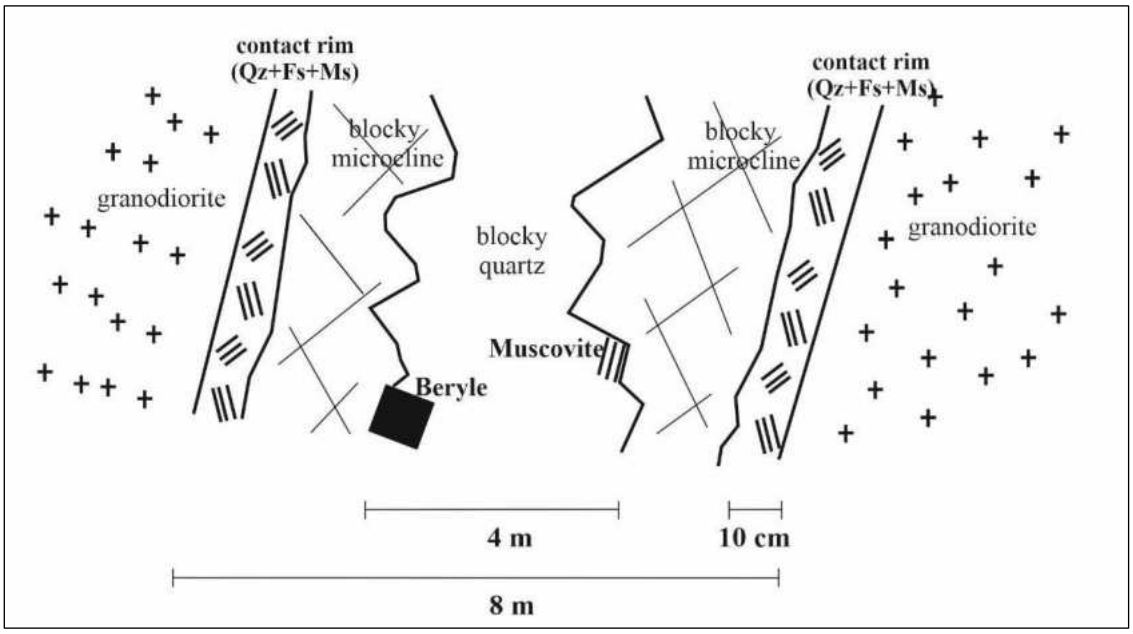
Výskyt všech výše uvedených zón v jednom pegmatitovém tělese je omezený. Zonalita subhorizontálních těles není vždy symetrická (obr. 3.2D), což se týká zejména drobných pegmatitových žil, u nichž byla vyvinuta pouze jedna zóna. V případě pegmatitů v Jezuitských lesích se jedná o zóny 2, 3, 4, 5 a 6. Směrem od okrajové zóny do centrální zóny se tvoří křemenné jádro se sporadickým muskovitem a berylem. Pegmatit z Považského Inovce je tvořen asymetricky zónami 4, 5, 2 a 7. Pegmatity Nízkých Tater ze Sopotnické doliny mají nejčastěji jednozónové složení tvořené křemenem, K-živcem, plagioklasem, biotitem a muskovitem. Pegmatit ze Žiarských vrchů - nad Uhliskom je tvořen zónou 3, 4 (s mikroklinem), 2 a 5.




Obr. 3.2. A - žíla žulového pegmatitu v granodioritu z lomu Bratislava-Rössler, bratislavský masiv Malých Karpat. B - žíla granitového pegmatitu intrudující do dioritu v duktilním režimu v Bratislavě, východní svah vrchu Machnáč, Malé Karpaty. C - subparalelně orientované žíly žulových pegmatitů intrudující pararuly podél klivážových zón ze Svatého Juru, Zuby, bratislavský masiv Malých Karpat. D – žla zonálního granitového pegmatitu s aplitem a hrubozrnnou živcovo-muskovitovou (± biotitovou) zónou (vlevo) v granodioritu z Bratislavy, Karlova Ves, Sihoť, Malé Karpaty. E - porfyrický granit („granitový porfyr“) s typickými živcovými fenokrysty a velkým křemenem z Betliaru, gemerská jednotka. F - středně zrnitý granit s nodulárním turmalínem z Betliaru, gemerská jednotka.

V případě pegmatitů ze Žiarských vrchů - nad Uhliskom se jedná o zónu 3, 4 (s mikroklinem) a 5. Pegmatitové zóny bývaly albitizovány a zatlačovány jemně krystalickým cukrovitým albitem, křemenem a muskovitem. Lokálně je přítomen i cleavelandit (Dávidová 1997).

Velikost krystalů minerálů obecně roste od okrajové aplitové zóny (max. 3 mm široké), přes hrubě krystalickou živcovo-křemen-muskovitovou až po biotitovou a grafickou zónu (obvykle 0,5-5 cm), až po blokovou zónu mikroklinu a křemene (~1-20 cm). Hlavním charakteristickým rysem je absence miarolitických dutin s krystalově omezenými minerály. Lokální výskyt žil a čoček v dutinách s čistým křemenem až záhnědou z čistého křemene, adularem a albitem je lokálně přítomen v granitoidech, ale především v metamorfovaných horninách tatrické a veporské jednotky. Tento jev lze geneticky spojovat s alpínskými (křídovými) orogenními procesy (Uher 2019). Ideální příklad zonálního pegmatitu ukazuje obr. 3.3.




Obr. 3.3. Schematický řez zonálním žulovým tělesem z Moravan nad Váhom-Striebornice v bojnickém masivu, Považský Inovec (upraveno podle Uher 2005, 2019).

Gemerské specializované žuly jsou výjimkou, protože frakcionace žuly vedla ke vzniku kupolí, nikoliv pegmatitů. Jsou známy následující vyvinuté žulové elevace: Hnilec - Peklisko, Surovec, Podsúlová, Betliar a Čučma. Nejvíce frakcionované granity u Betliaru byly geochemicky klasifikovány jako specializované granity typu S (Uher & Broska 1996, Broska & Uher 2001). Byly zde rozlišeny tři typy granitů: (1) hrubozrnný porfyrický biotitický granit, (2) středně zrnitý muskovitický granit a (3) jemnozrnný muskovitický granit, který bývá ve svrchních částech často greisenizován (Ončáková 1954). Typický je také výskyt žulových porfyrů s velkým obsahem křemene v jemnozrnné základní hmotě (Ončáková 1954; Kamenický & Kamenický 1955; Varček 1959). V poslední době jsou žulové porfyry nazývány porfyrickými granity, protože jejich textura vznikla v důsledku dvou procesů: (1) hlubinné krystalizace a (2) jemnozrnné rychlé krystalizace při vmístění během druhotného varu (Broska a Uher, 2020). Granitová tělesa v gemerské jednotce jsou permského stáří. Jsou tvořena různými petrografickými typy, které odrážejí zonální složení granitového tělesa -

hlouběji jsou porfyrické granity, svrchní část je stejnozrnná a jemnozrnná a nejsvrchnější část jsou hydrotermálně pozměněné kupole, lokálně greisenizované (obr. 3.2E-F). Kromě toho je v exokontaktních zónách (Čučma, Dlhá dolina) známa přítomnost hydrotermálních žil přímo vázaných na granitový magmatismus. Vtroušená Sn-W-(Nb-Ta) mineralizace je dominantně soustředěna v greisenizovaných kupách s výskytem hydrotermálních kasiterit-křemenných žil (Drnzík 1982; Grecula & Drnzík 1995). Alpinské souvrství v různých typech granitických hornin v gemerské jednotce tvoří albit, fengit a hrubozrnný granát (Faryad & Dianiška 1989, Breiter *et al.* 2015).

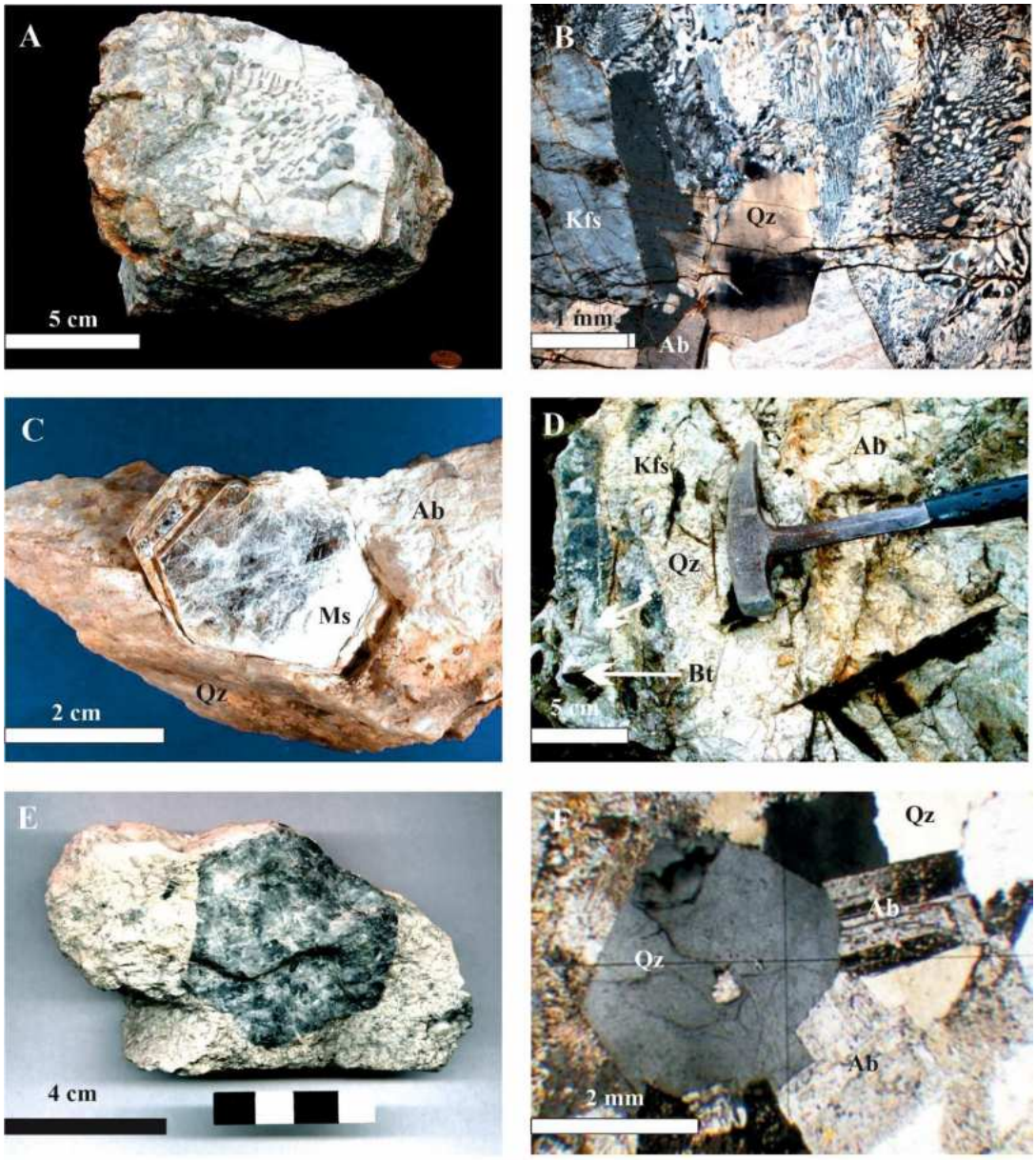
## 3.4 Minerální složení

### Horninotvorné minerály

Horninotvorné minerály západokarpatských žulových pegmatitů jsou tvořeny draselnými živci (ortoklasem až mikroklinem) a křemenem, které budují ~70-90 obj. %, menší množství tvoří muskovit a albit, který je zastoupen jen lokálně (do 10 obj. %). Přítomnost biotitu je omezená (méně než 5 obj. %).

**K-živec** tvoří často pevný roztok ortoklasu a mikroklinu. Je hojným minerálem v aplitové a hrubě krystalické živcové křemen-muskovitové ±biotitové zóně a tvoří hlavní objemovou část (~60 až 80 obj. %) grafické zóny zejména v monominerální blokové K-živcové zóně. Velmi typickým znakem granitových pegmatitů jsou grafické prorostlice křemene a K-živce (obr. 3.4A-B). Velikost krystalů monominerální blokové zóny se nejčastěji pohybuje mezi 3 až 15 cm, v některých případech až 50 cm. Živce jsou světle šedé až tmavě šedé s přechodem do bílé barvy. Přítomnost růžového K-živce je typická pro některé oblasti v bratislavském masivu Malých Karpat, hlohoveckém masivu Považského Inovce a masivu Prašivé Nízkých Tater. K-živce Západních Karpat jsou na základě optických měření a stupně strukturního uspořádání klasifikovány jako triklinický maximální mikroklin, méně intermediární mikroklin a intermediární ortoklas a vzácně monoklinický ortoklas (Dávidová 1970b, 1987b, 1982, 1994, 1997). Typický je výskyt pertitu, který je exsolucí K-živce (~98-76 obj. %) a albitu (~22-26 obj. %), zatímco draselná fáze pertitu má složení mikroklin-ortoklas (~89-99 obj. %), albit (~1-11 obj. %). Sodná část vykazuje albit (97-98 obj. %), anortit (1,0-1,8 obj. %) a mikroklin-ortoklas (0,5-0,8 obj. %; Dávidová 1997). Alkalické živce gemerských granitů jsou v hornině zastoupeny cca 14-25 obj. % a tvoří typické fenokrystaly (Kubiš & Broska 2005, 2010; Petrík *et al.* 2011).

**Albit** je spolu s K-živcem, křemenem a muskovitem běžnou součástí aplitové zóny, ale vyskytuje se i v hrubozrnné živcovo-křemen-muskovitové (±biotitové) zóně (obr. 3.4D). Nejvyšší koncentrace albitu jsou v jemně (obr. 3.4C) až hrubě krystalické zóně (cleavelandit), kde je albit dominantní až monominerální. Albit tvoří bílé hypidiomorfní až alotriomorfní krystaly o velikosti ~0,1-1 mm (aplitová zóna, sacharoidní albitová zóna). V živcově-křemenné muskovitové (± biotitové) a albitové (cleavelanditové) zóně tvoří albit hypidiomorfní až idiomorfní krystaly o velikosti do 3 cm. Nepravidelné agregáty jemnokrystalického sacharoidního albitu vytlačují starší zóny a mohou dosahovat mocnosti až ~30-50 cm (bratislavská oblast v jz. části Malých Karpat, Moravany nad Váhom v Považském Inovci).




Obr. 3.4. A - grafické prorostlice K-živce (bílé) a křemene (šedé) z Bratislavy-Železné Studničky bratislavského masivu, Malé Karpaty. B - granofyrická textura v kontaktu s hruběji krystalickou živcově-křemennou texturou v aplitu-pegmatitu pod optickým mikroskopem se zkříženými polaroidy. Vzorek z Dubové, Horné Trávniky; masiv Modré, Malé Kaipaty Mts. C - Pseudohexagonální deskovitý tvar krystalu muskovitu v bločkovité křemenné až sacharoidní albitové zóně z Bratislavy, Rösslerův lom Bratislavského masivu, Malé Karpaty. D - biotit (černé lamely vlevo) v hrubozrnné živcové křemen-muskovitové (±biotitové) a grafické až bločkové K-živcové zóně pegmatitu z Koliby v bratislavském masivu, Malé Karpaty. E - atypický krystal křemene hexagonálního tvaru v grafickém až blokovitém K-živci z lomu Rössler v bratislavském masivu, Malé Karpaty. F - typická asociace horninotvorných minerálů v ekvigranulární žule z Betliaru, gemerská jednotka (obrázky převzaty z Kubiš & Broska, 2010; Uher 2019). Zkratky: Qz-křemen, Ab-albit, Kfs-K-živec, Bt-biotit.

Vějířovité agregáty drobných lamelových albitů (cleavelandit) se v žulových pegmatitech WC vyskytují sporadicky a pouze v nejvyvinutějších tělesech, jako např. na lokalitě Moravany nad Váhom - Striebornica. Porfyrické žuly gemerské jednotky obsahují hypidiomorfní až alotriomorfní alkalické živce s perthitickou strukturou. Různé horninové typy gemerských granitů obsahují ~12-25 obj. % perthitických K-živců a ~14-46 obj. % plagioklasu (Kubiš & Broska 2005, 2010; Petrík *et.* 2011). Většinu živců tvoří téměř čisté koncové členy albitu. Náhodně orientované albíty bývají silně sericitizované (obr. 3.4F). Anortitová složka v albítu je velmi nízká, ale v granitových pegmatitech a gemerských granitech také ~1 až 3 mol. % (Uher nepublikovaná data; Kubiš & Broska, 2010).

**Křemen** je typickým hlavním minerálem pegmatitů v západokarpatských pegmatitech. Jeho výskyt je ve všech zónách, zatímco maximální velikost a rozšíření je v centrální části (křemenné jádro). Křemen tvoří masivní alotriomorfní agregáty a v křemenném jádru může dosahovat velikosti až 50 cm, lokálně až 3-4 m (Moravany nad Váhom). Barva křemene je nejčastěji bílá nebo šedá, lokálně bezbarvá. Růžový nebo kouřový křemen nebyl v žulových pegmatitech Západních Karpat doložen. Ojediněle křemen tvoří idiomorfní hexagonální solitérní krystaly o velikosti do 5 cm v asociaci s K-živcem z lomu Rossler (obr. 3.4E). Křemen v granitických horninách gemerské jednotky tvoří idiomorfní až hypidiomorfní krystaly o velikosti do 2 cm v porfyrických typech (obr. 3.2E, 3.5E) vykazující magmatickou resorpci a undulózní extinkci (Kubiš & Broska 2010). Množství křemene v gemerských granitech je cca 37-52 obj. % (Kubiš & Broska, 2005).

Nejčastější slídou v pegmatitech je **muskovit**, který se vyskytuje ve třech formách: (1) jemně krystalický hypidiomorfní až alotriomorfní muskovit (± 1 mm) přítomný v aplitové zóně, ale vzácnější v jemně krystalické sacharoidní albitové zóně (obr. 3.4C), (2) velké tabulkovité krystaly muskovitu (~1 až 10 cm), lokálně pseudohexagonální, tvořící součást hrubozrnné živcovo-křemen-muskovitové (± biotitové) zóny, která je někdy překryta blokovou křemennou zónou a (3) plumózní agregáty muskovitu a křemene (křemen-muskovitová zóna), které dosahují velikosti do 7 cm a otiskují starší pegmatitové zóny. Chemické složení muskovitu v Malých Karpatech studovali Uher & Chudík 2014; Uher nepublikovaná data a v Tatrách Gaw^da *et al.* (2013, 2016). Muskovit obsahuje 4,8-5,6 apfu Al, 1,5-1,9 apfu IV Al (na základě 22 atomů kyslíku), obsahy F jsou nižší (0,15-0,25 hm. %; 0,06-0,11 apfu; lom Bratislava-Rossler). Obsahy Li v muskovitech z Malých Karpat jsou velmi nízké. Naproti tomu v gemerských granitech typu Ss byla dokumentována přítomnost přechodu mezi zinnvalditem a polylithionitem vyskytujícím se ve vločkách v rámci mikrogranitu ve vyvinutém Li-suroveckém granitu (obr. 3.6F; trioktaedrické slídy: 3,5-6 hm. % $Li_2O$ a dioktaedrických micas: fengit 1,2-1,7 hm. % $Li_2O$; Petrík *et al.* 2011). Nejčastější slídou v betliarské žule je annit s poměrem Fe/(Fe+Mg)=0,79-0,81 (Kubiš & Broska 2010), ale v hnilecké žule je obj. % slíd až 22 % (biotit ± 1 obj. %; Kubiš & Broska 2005). V suroveckém Li-granitu je rovněž doložena přítomnost zinnvalditu (slídy s převahou Li) a fengitu v důsledku alpínského střihu (Petrík *et al.* 2011).

**Biotit** se vyskytuje pouze na několika málo lokalitách pegmatitů, běžně v tělesech, která intrudují bazičtější variety biotitických granodioritů až granitů. Pokud je přítomen, je omezen pouze na hrubě krystalickou živcovo-křemen-muskovitovou ±biotitovou zónu, kde tvoří idiomorfní drobné laminární černé krystaly o velikosti 1-5 cm (obr. 3.4D), ojediněle až 40 cm. biotit zarůstá muskovitem. Chemické složení biotitu v typomorfní lokalitě (Bratislava-

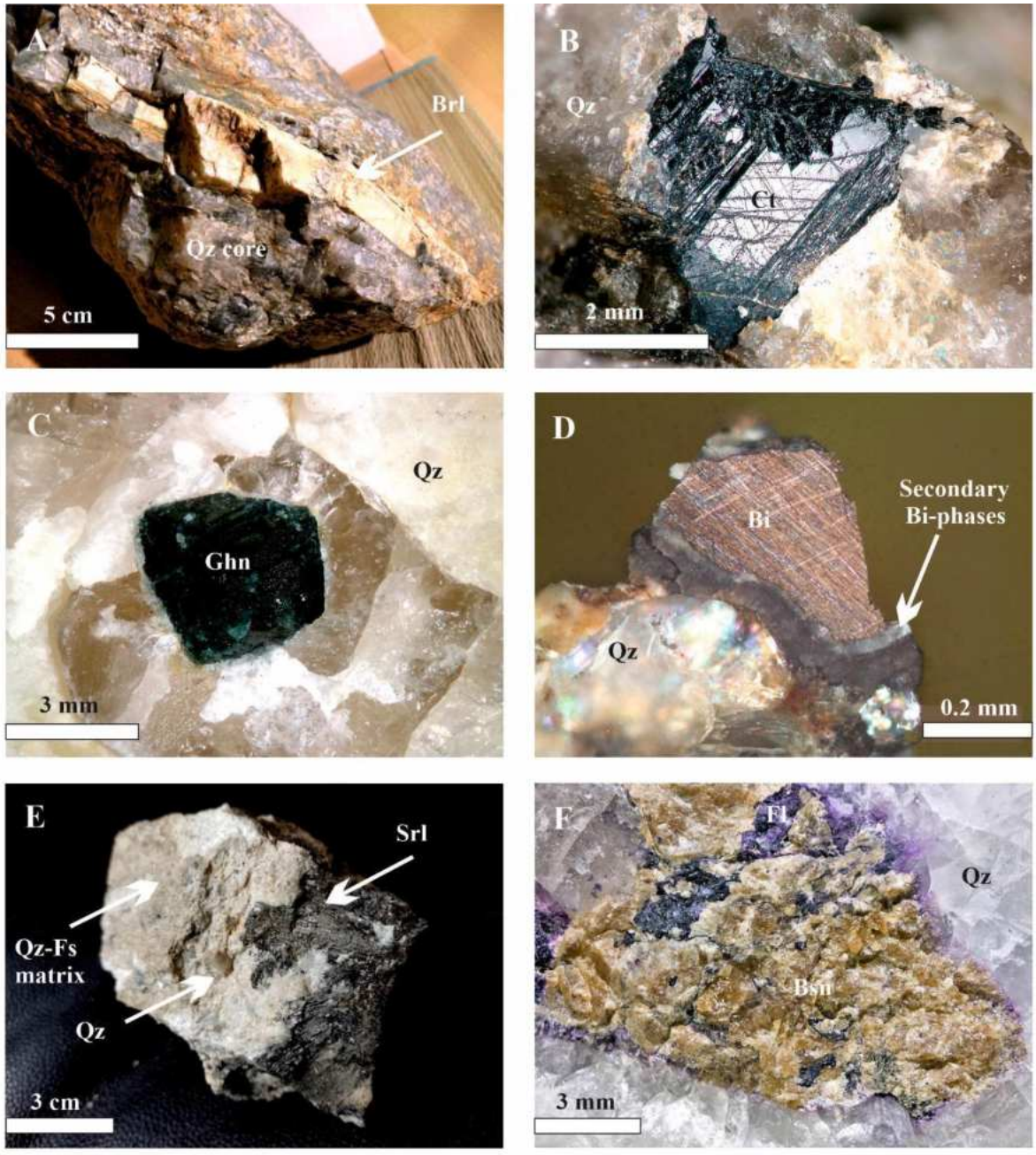
Rosslerův lom) je zastoupen koncový člen annit s poměrem Fe/(Fe+Mg) at. = 0,66-0,71, 3,2-3,5 apfu Al, 2,4 2,6 apfu IV Al (na bázi 22 atomů kyslíku), obsahy F jsou ~0,2 hm. %, ~0,1 apfu (Uher, nepublikované údaje). Biotit v pegmatitu z Barance (Západní Tatry) má poměrně nízký poměr Fe/(Fe+Mg) na úrovni 0,47-0,49, 3,1-3,2 apfu Al, 2,5-2,7 apfu IVAl (na základě 22 atomů kyslíku), a proto je klasifikován jako přechod flogopit - annit (Gawęda *et al.* 2016).

## Akcesorické minerály

V nejvyvinutějších pegmatitových tělesech se hojněji vyskytují akcesorické těžké minerály. Jen v malém množství jsou i v méně frakcionovaných, spojených s granity typu I (např. Nízké Tatry - Sopotnická dolina).

Nejhojnějším akcesorickým minerálem v žulových pegmatitech je **granát**, který tvoří idiomorfní krystaly v různých paragenetických zónách: (1) průhledné růžově zbarvené krystaly o velikosti do 0.1 až 1 mm je v jemně krystalické apliticko-cukrovité albitové zóně, (2) neprůhledný tmavočervený až červenohnědý krystal o velikosti 3 až 5 mm je v hrubozrnné živcové křemen-muskovitové (± biotitové) zóně, lokálně s velkými krystaly o velikosti 3-7 cm (Malé Karpaty - Svatý Jur - Neštich, Borinka - Medené Hámre, Bratislava - Karlova Ves v bratislavském masivu). V aplitové zóně je možné pozorovat laminovanou texturu drobného granátu s jemně krystalickým cukrovitým albitem (obr. 3.6A; Uher 2019). Chemické složení granátu vykazuje přechod koncových členů **almandinu** [$Fe_3Al_2(SiO_4)_3$] ke **spessartinu** [$Mn_3Al_2(SiO_4)_3$] s nízkým obsahem Ti, Mg a Ca a poměrem Mn/(Mn+$Fe^{2+}$ ) se pohybuje v širokém rozmezí (Dávidová 1968; Gbelský 1980; Uher 1991, 1992; Uher & Chudík 2014; Uher, nepublikovaná data). Almandin je častější v méně frakcionovaných, ale spessartin ve více frakcionovaných pegmatitech s přítomností berylu (Moravany nad Váhom v Považském Inovci, Brusno-Sopotnická dolina v Nízkých Tatrách, Štrbské Pleso-Solisko ve Vysokých Tatrách). Koncentrace Mn, resp. zvýšení poměru Mn/Fe nezávisí na stupni frakcionace, ale zřejmě na koexistenci s jinými minerály, jako je kolumbit-tantalit-fluorapatit, které mohou Mn ve své struktuře koncentrovat. Mírná zonalita je doprovázena poklesem Mn a nárůstem Fe od středu ke krystalovému jádru. Lokální alterací almandinu-spessartinu vzniká Fe-chlorit (chamosit).

**Zirkon** stejně jako granát je prostorově hojným minerálem v pegmatitech a také v gemerských žulách. Tvoří idiomorfní prismaticko-dipyramidální krystaly šedohnědé barvy o velikosti 0,1 až 1 mm převážně v hrubozrnné živcové křemen-muskovitové (±biotitové) a albitové zóně. Morfologie zirkonu z porfyrického granitu typu Ss vykazuje převahu morfologických podtypů S8, S9, S10, méně často S4, S3 a S6 (Pupin 1980). Zirkon je téměř bez zonality nebo s nepravidelnou a lokální oscilační zonalitou způsobenou různými obsahy Hf, REE a U. Zirkon ve fluidním režimu je ovlivněn silnou metamizací (obr. 3.6E) spojenou se zvýšenými obsahy Hf, které jsou nejvyšší v nejvíce frakcionovaných pegmatitech s berylem a Nb-Ta minerálními fázemi (~5-23 hm. % Hf) a lokálním obohacením P, Al, REE+Y (0,09 apfu), Ca, Fe- (Uher & Černý 1998; Chudík *et al.* 2008; Uher & Ondrejka 2009; Uher & Chudík 2014).




Obr. 3.5. A - prizmatický bílý až nažloutlý krystal berylu v křemenném jádru žulového pegmatitu. B - černý tabulkovitý krystal kolumbitu-tantalitu v křemeni. C - tmavě zelený průsvitný osmistěnný krystal gahnitu v bílé křemenné hmotě. D – ryzí bismut s okrajovými částmi tvořenými sekundárními Bi-fázemi v křemeni. E - nodulární turmalín (skoryl/dravit) s křemenem v jemnozrnné křemen-živcové základní hmotě. F - asociace bastnäsitového agregátu s fluoritem v bílé křemenné žíle (obrázky převzaty ze Števko et al. 2012; 2020; Uher 2019). Zkratky: Brl-beryl, Qz-křemen, Ghn-gahnit, Ct-kolumbit, Bi-bismut, Srl-skoryl, Fs- živec, Bsn-bastnäsit, Fl-fluorit.

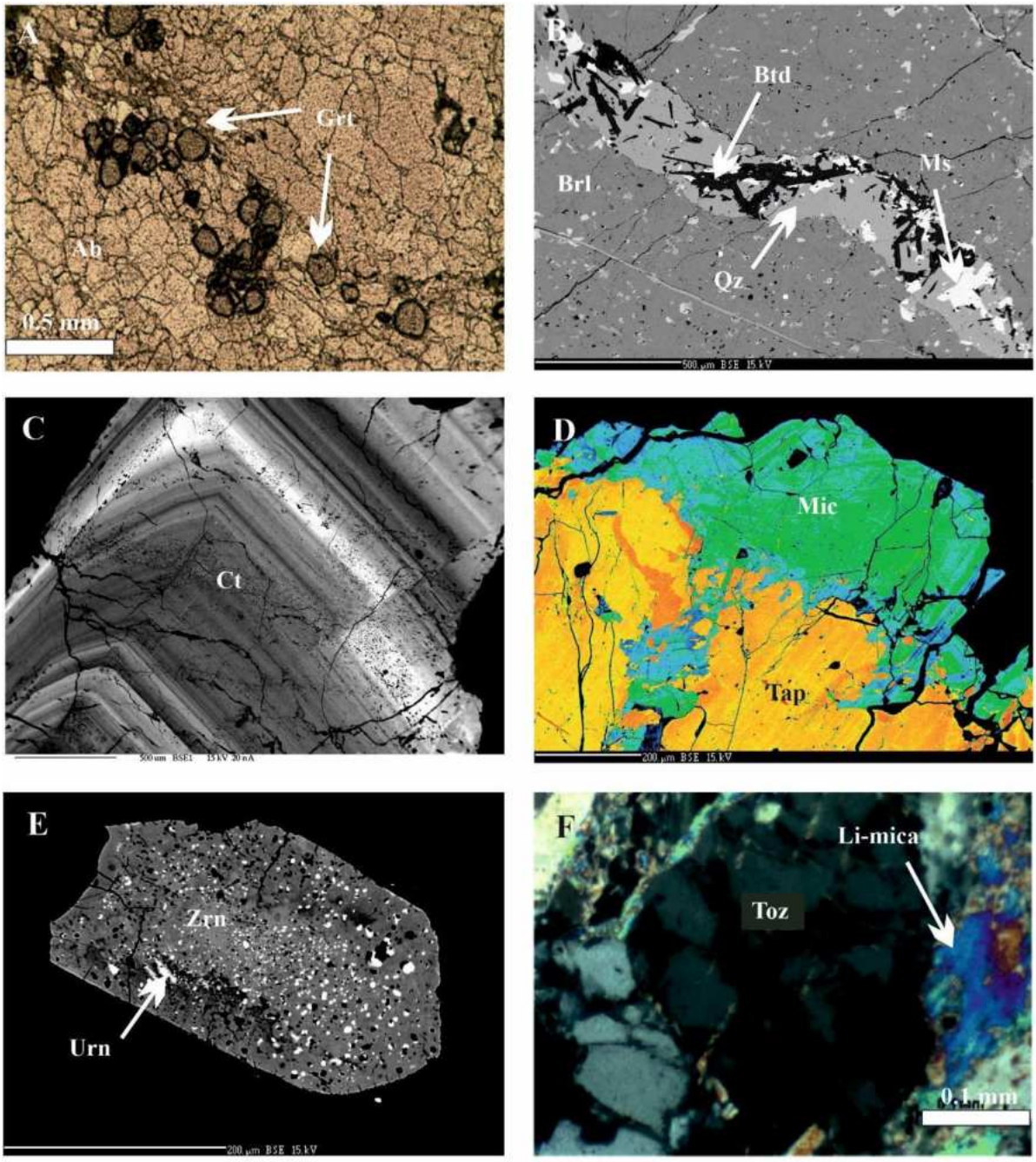
Nejvýznamnější Be-nosnou fází je **beryl** [$Be_3Al_2Si_6O_{18}$], který se vyskytuje především v bratislavském masivu - Jezuitských lesích. Je to charakteristický minerál vysoce frakcionované pegmatitové suity Západních Karpat. První výskyt byl doložen v pohoří Žiar (Fiala 1931). Později bylo objeveno mnoho lokalit v Považském Inovci i Nízkých a Vysokých Tatrách (Pitoňák & Janák 1983; Gargulák & Gaw^da 1989; Uher 1991, 1992; Uher & Broska 1995; Uher & Benko 1997; Uher *et al.* 2010, 2012; Uher & Chudík 2014; Bačík *et al.* 2019). Beryl je často lokalizován od hranice mezi hrubozrnnou živcově-křemennou muskovitovou (±biotitovou) a blokovou křemennou zónou. Tvoří hexagonální krystaly o velikosti do 2–10 cm, lokálně až 15–22 cm (obr. 3.5A; Bratislava - Dúbravka, Železná Studnička, Považský Inovec Mts - Moravany nad Váhom). Vzácný výskyt berylu byl dokumentován i v jemně krystalickém albitu (Bratislava - Devín, Jezuitské lesy; Uher *et al.* 2010; Uher & Chudík 2014). Primární magmatický beryl v granitovém pegmatitu Striebornica z Považského Inovce - Moravany nad Váhom obsahuje četné inkluze kasiteritu, ferotapiolitu, pyrochloru, gahnitu, magnetitu, fluorapatitu, barytu, pyritu, sfaleritu, galenitu, muskovitu, bertranditu nebo fenakitu (Uher & Ozdín 2011). Beryl je klasifikován jako málo alkalický vůči sodíku s převažující substitucí oktaedrů a lokálně tetraedrů (Uher *et al.* 2010; Bačík *et al.* 2019). Obsahy Li a Cs jsou obecně nízké (atypický rys LCT pegmatitové suity), ale v nejvíce frakcionovaných pegmatitových tělesech mohou dosahovat hodnot až 2 hm. % $Cs_2O$ (Bratislava - Děvín, Jezuitské lesy) a 5600 ppm Li (Moravany nad Váhom - Striebornica; Uher *et al.* 2010). Primární magmatický beryl bývá ovlivněn postmagmatickou hydrotermální alterací a typický je vznik sekundárních Be-fází **fenakitu** [$Be_2SiO_4$] a **bertranditu** [$Be_4Si_2O_7(OH)_2$] s doprovodným pozdním křemenem, K-živcem a muskovitem (obr. 3.6B; Uher *et al.* 2012; Uher & Chudík 2014). Beryl I vykazuje běžnou patrovitou vnitřní zonálnost, která svědčí o vzniku během pozdně magmatických až subsolidových a částečně rozpouštěcích-recipitačních procesů (Uher *et al.* 2012). Subsolidový beryl II s téměř homogenní texturou má nižší obsah Cs než beryl I. Primární beryl I může obsahovat inkluze kasiteritu, pyritu, sfaleritu, pyrochloru, galenitu, muskovitu a gahnitu s vysokým obsahem FeO (18 hm. %, 37 - 47 mol % hercynitu), což je pro pegmatitové prostředí neobvyklé. V některých případech byly pozorovány pouze prázdné dutiny po krystalech berylu (Bratislava - Děvín, Líščia stráň).

**Turmalín** [$NaFe_3Al_6(BO_3)_3Si_6O_{18}(OH)_4$ - skoryl] nepatří k charakteristickým minerálům západokarpatských žulových pegmatitů, ale lokálně se vyskytuje v pegmatitech Malé Fatry (lom Dubná skala u města Vrútky; Láznička 1965), Nízkých a Vysokých Tater. Černé krystaly skorylu byly doloženy z pegmatitu v Nízkých Tatrách o velikosti 0,5-4 cm (Bystrá-Srdiečko a Magurka - štola Adolf, 10 cm velký je v Západních Tatrách; Gaw^da *et al.* 2013). Turmalín se vyskytuje vzácně a obvykle v křemeni a živcích v rámci hrubozrnné živcovo-křemen-muskovitové (± biotitové) zóny. Turmalíny jsou typické pro specializované gemerské granity typu Ss, např. na lokalitě Betliar, kde tvoří 10+ cm typická nodulární "turmalínová slunce" s radiální strukturou v granitových porfyrech (Kubiš & Broska 2010; Balen & Broska 2010; (obr. 3.2F, 3.5E). Turmalíny zahrnují čtyři různé typy: (1) idiomorfní nepravidelný diseminovaný skoryl vykrystalizovaný z granitického magmatu, (2) intersticiální nodulární skoryl vzniklý v blízkosti solidu, (3) turmalín se skoryl-dravitovým složením vyskytující se v křemen-turmalínových žilách, které protínají středně a jemnozrnné ekvigranulární granity, a (4) pozdně magmatický až metamorfovaný s dravitovým složením.

Tento metamorfovaný turmalín je zastoupen ve formě tenkých žilek nebo nepravidelných krystalových shluků (Kubiš & Broska 2010).

**Monazit** s alotriomorfními až hypidiomorfními inkluzemi cheralitu až pevného roztoku Th-REE-Si-P s **thoritem** [$ThSiO_4$] o velikosti 100-250 μm v křemeni a K-živci byla dokumentována v Bratislavském masivu - Jezuitských lesích (Uher & Chudík 2014).

Druhou nejhojnější skupinu vzácných prvků tvoří oxidy Nb-Ta - minerály ze skupiny **kolumbitu**. Tyto minerály tvoří drobné drobné tabulkovité černé krystaly o velikosti 0,1 až 5 mm (obr. 3.5B), ojediněle až 2 cm, a vyskytují se v hrubozrnné křemen-muskovit-mikroklinové zóně (Bratislavský masiv-Patrónka) a jemně krystalické albitové zóně (Žiarské vrchy - nad Uhliskom) zatlačované mikrolitem (Uher *et al.* 1994; Uher 2019). Vnitřní oscilační zonalita odráží různé obsahy Nb-Ta během krystalizace, což ukazuje na pozdně magmatický až subsolidový rozpouštěcí-recipitační původ dalších generací minerálů (Putnis 2002, 2009, Chudík *et al.* 2011; obr. 3.6C). Je zde zastoupeno několik koncových členů: kolumbit-(Fe) [$Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$], tantalit-(Fe) [$Fe,Mn)(Ta,Nb)_2O_6$], kolumbit-(Mn) [$Mn,Fe)(Nb,Ta)_2O_6$] tantalit-(Mn) [$Mn,Fe)(Ta,Nb)_2O_6$]. Tvorba Nb-Ta oxidů také více generací vedla k různému původu: magmatickému, metasomatickému a hydrotermálnímu, např. krystalizace ferokolumbitu na ferrotantalit II ze sacharoidního albitu vzniklého pozdně magmatickou taveninou bohatou na Na (Chudík *et al.* 2011). Typickým doprovodným minerálem je heteromorfní **tapiolit-(Fe)** [$Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$], který tvoří 30 μm až 15 mm velké agregáty (Moravany nad Váhom - Striebornica**,** obr. 3.6D; Bratislava - Devín, Jezuitské lesy) a **ferrowodginit** [$FeSnTa_2O_8$] (do 0,7 mm, Jezuitské lesy a Limbach v bratislavském masivu). Paragenetická asociace Nb-Ta minerálů s několika generacemi kolumbitu-tantalitu, tapiolitu, wodginitu a Nb-Ta rutilu odráží složitý vývoj granitových pegmatitů od magmatického do subsolidového postmagmatického stadia na příkladu Moravan nad Váhom - Striebornice (Novák *et al.* 2000) a Limbachu - Slnečného údolí (Uher *et al.* 2007). Asociace Nb-Ta minerálů se zvýšeným obsahem Ti zahrnuje magmatický kolumbit-(Fe), kolumbit-(Mn) až tantalit-(Mn), ixiolit bohatý na Ti a také Nb-Ta rutil s exsolučními lamelami armakolitu bohatého na Nb-Ta až pseudobrookitu se vyskytuje v pegmatitech z Nízkých Tater. - Sopotnické doliny (Uher *et al.* 1998a) a kolumbit-tantalit v Ráztočném ze Žiaru (Uher 2008). Postmagmatickou až hydrotermální asociaci minerálů tvoří hojné minerály **pyrochlorové superskupiny.** Tato superskupina je zastoupena **mikrolitem** [$Na,Ca)_2Ta_2O_6$] (koncový člen Ta; obr. 3.6D) a **pyrochlorem** [$(Na,Ca)_{2(}Nb_2O_6$] (koncový člen Nb) s obohacením Th, U a Sb (zejména fluorkalciomikrolit, vzácně hydroxylem dominantní alkalický vakantní pyrochlor až mikrolit). Ojediněle byla zjištěna přítomnost **roméitu** [$(Ca,Fe,Mn,Na)_2(Sb,Ti)_2O_6(O,OH,F)$], **fersmitu** $(Ca,Ce,Na)(Nb,Ta,Ti)_2(O,OH,F)_6$ a **stibiotantalitu** [$SbTaO_4$] (pegmatity Malé Karpaty, Považský Inovec, Žiarské vrchy, Nízké Tatry; Határ 1979; Uher 1991, 1992, 2000, 2008; Uher *et al.* 1998, 2007; Novák *et al.* 2000; Chudík & Uher 2009; Chudík *et al.* 2011; Uher & Ozdín 2011; Uher & Chudík 2014). Původ fluorcalciomikrolitu v pegmatitu z Jezuitských lesů se zdá být posledním procesem, který formoval vývoj Nb-Ta fází a býval spojen s konečným postmagmatickým/hydrotermálním přetiskem ztuhlého pegmatitového tělesa. Typická je alterace starších Nb-Ta oxidických minerálů alkálií (bohatou na Ca, Na) a fluidy bohatými na F (např. Wise & Černý 1990; Uher *et al.* 1994, 1998; De Vito *et al.* 2006; Chudík & Uher 2009).




Obr. 3.6. A - akumulace granátu v cukrovitém albítu. B - žilka tvořená bertranditem, muskovitem a křemenem jako sekundární produkt alterace berylu, BSE. C - oscilační zonální kolumbit, BSE. D - primární tapiolit zatlačený sekundárním mikrolitem, BSE. E - metamorfovaný zirkon s inkluzemi uraninitu. F - topaz a Li-slídnatý specializovaný granit z gemerské jednotky. Obrázky převzaty z Kubiš & Broska (2018); Chudík & Uher (2009); Uher (2019). Zkratky: Grt-granát, Brl-beryl, Brd-bertrandit, Ms-muskovit, Qz-křemen, Toz-topaz, Ct-kolumbit, Cst-kasiterit, Tap-tapiolit, Ab-albit, Mic-mikrolit.

Zajímavou minerální fází ze skupiny spinelů je **gahnit** [$ZnAl_2O_4$] identifikovaný v Malých Karpatech, Považském Inovci a Vefké Fatře, kde tvoří idiomorfní tmavě zelené průhledné až průsvitné krystaly oktaedru o velikosti 0,1 až 3 mm (obr. 3.5C). Gahnit se zpravidla vyskytuje s granátem v jemnokrystalickém sacharoidním albítu/štěpánovci nebo ve formě inkluzí v berylu. Gahnit je bohatý na Fe a může obsahovat molekulu hercynitu (Gbelský & Krištín 1985; Uher & Broska 1989; Uher 1991, 1992, 2004; Uher & Ozdín 2011; Uher & Chudík 2014). **Uraninit** [$UO_2$] tvoří alotriomorfní inkluze (< 20 ^m) v metamorfovaném zirkonu (obr. 3.6E), lokálně v granátu a kolumbitu-tantalitu (Malé Karpaty, Považský Inovec; Uher 1992; Uher & Černý 1998; Uher *et al.* 2007). Tvoří také obruby o velikosti 100 μm na zirkonu v asociaci s pyrochlorem (koncový člen betafitu) a 1 cm krystaly lutrovanými pyritem popsané z pegmatitu ve štole Augustín na dole Dúbrava z Nízkých Tater (Dávidová 1998). Přítomnost několika generací uraninitu je spojována s hydrotermálními procesy, zejména v U-Mo obohacené žíle v Majerské dolině u Čučmy v blízkosti sta metrů od permské žulové intruze (Ferenc *et al.* 2021).

Žulové pegmatity a žuly typu Ss v Západních Karpatech obsahují fosfáty zastoupené **fluorapatitem** [$CaPO_4F$] a minerály ze skupiny monazitů jako **monazit-(Ce)** [$CePO_4$], **cheralit** [$(Ca, Th)(PO_4)_2$] a **xenotim-(Y)** [$YPO_4$]. **Fluorapatit** tvoří idiomorfní krystaly, které se vyskytují v hrubozrnné muskovit-křemen-živcové zóně obvykle o velikosti do 15 mm (Gawęda *et al.* 2016). Mírná zonalita je způsobena lokálním obohacením REE (především Y a Ce). Fluorapatit může obsahovat až 9,5 hm. % MnO a až 1,4 hm. % FeO a 1,2 hm. % SrO (Bratislava - Devín, Jezuitské lesy; Uher & Chudík 2014). **Monazit-(Ce)** tvoří hypidiomorfní až alotriomorfní krystaly (0,1-0,3 mm) a je rozšířenou minerální fází ve všech typech felsických hornin. Monazit má lokálně zvýšené obsahy Th a U (< 9 hm. % $ThO_2$ a 4 hm. % $UO_2$; bratislavský masiv Malých Karpat; Uher *et al.* 2014). Podobné obsahy aktinoidů a vysoké obsahy cheralitu (28-46 mol %) v monazitu byly dokumentovány v betliaru gemerské jednotky (Kubiš & Broska 2010). **Cheralit** byl identifikován jako hypidiomorfní krystalové vyrostlice o velikosti 25 ^m se zirkonem v aplitu až pegmatitu s granoporfyrickou strukturou (Qtz+Kfs+Ab) v Dubové-Horních Trávníkách v modravském masivu Malých Karpat (Uher & Ondrejka 2009).

**Xenotim-(Y)** tvoří solitérní prizmaticko-dypiramidální krystaly (0,1-0,3) mm nebo inkluze a srůsty s izostrukturním zirkonem (Gbelský 1979; Uher 1992; Uher & Černý 1998). V gemerských granitech typu Ss byly odhaleny neobvyklé minerální asociace jako vzácné aluninofosfáty (arrojadit, lacroixit, viitaniemiit) goyazit, gorceixit (Petrík *et al.* 2011).

## Vzácné minerální fáze

Výskyt **molybdenitu** [$MoS_2$] byl stanoven ve formě agregátů v pegmatitech z údolí Malé Železné poblíž Magurky v Nízkých Tatrách. (Michalenko 1959, 1960) Kokavy nad Rimavicou ve Slovenském rudohoří (krystaly o velikosti do 1 cm; Láznička 1965) a na hřebeni Voloveckého štítu v Západních Tatrách (krystaly o velikosti 6 mm; Gawęda *et al.* 2013). Byl pozorován i krystalický grafit ve formě tabulkovitých krystalů (< 1 cm) v žulovém pegmatitu a aplitové žíle na hřebeni Malé Fatry (Pulec 1989). Čistý **bismut** s lemy dominantního **bismutinitu** [$Bi_2S_3$], bismutokolumbitu [$BiNbO_4$], bismutotantalitu [$BiTaO_4$], eulytinu $Bi(SiO_4)_3$], matilditu [$AgBiS_2$], Bi-sulfosolemi (cosalit, empektit, gladit, kobelit, lindströmit) a supergenní alterační produkty jako bismit $Bi_2O_3$, bismutit $Bi_2O_2(CO_3)$, vzácně

beyerit $CaBiO_2(CO_3)_2$, bismoclit BiOCl, klinobisvanit $BiVO_4$, namibit $Cu(BiO)_2(VO_4)(OH)$, waylandit $BiAl_3(PO_4)_2(OH)_6$, výjimečně bleasdaleit $(Ca,Fe^{3+})_2Cu^{2+}{}_5(Bi,Cu^{2+})(PO_4)_4(H_2O, OH,Cl)_{13}$, jakož i minerály bohaté na Bi z pyrochlorové nadskupiny byly identifikovány v pegmatitu Bratislava - Dúbravka, Švábský vrch (obr. 3.5D; Števko *et al.* 2012). Deriváty bismutinitu, minerály kobellit-tintinaitové série, giessenit-izoklakeitové série a také Pb-Sb sulfosalty (především jamesonit, boulangerit, robinsonit a jejich variety bohaté na Bi) byly podrobně studovány v hydrotermálních křemenných žilách zejména v Ss typu Sn-W-F obohaceného gemerského granitu z dolu Alžběta, Gemerská Poloma (Števko *et al.* 2021).

**Bastnäsit** $[Ce(CO)_3F]$ patří k hydrotermálním minerálům a tvoří oranžovohnědé agregáty do 2 x 1 cm se skelným až mastným leskem, které se vyskytují v hydrotermální křemenné žíle protínající hrubozrnný porfyrický granit typu Ss se vzácnými kovy v asociaci s fluoritem, sideritem a pyritem (obr. 3.5F; Števko *et al.* 2020). Identifikována byla řada dalších akcesorických minerálů jako **sfalerit, galenit, antimonit, chalkopyrit, pyrit, arzenopyrit, ilmenit, magnetit, kasiterit, anatas, brookit, pseudorutil, topas, goethit, silimanit, epidot, pumpellyit, thomsonit-Ca, kalcit, baryt** (Drnzíková & Mandáková 1982; Broska & Uher 1988; Uher 1992, nepublikované údaje; Chudík *et al.* 2008; Uher & Ozdin 2011; Petrík *et al.* 2011; Radvanec & Gonda 2019).

## 3.5 Stanovení stáří pegmatitů a žul typu Ss

Možnosti datování zirkonu v žulových pegmatitech jsou omezené kvůli silné metamiktizaci. Granitové pegmatity z Malých Karpat jsou geneticky spojeny se zdrojovými granity, které byly datovány metodou U-Th-Pb SHRIMP, jež odhalila stáří 355 ± 5 Ma (Kohút *et al.* 2009). Podobná stáří 352 ± 5 Ma, 357 ± 6 Ma s malou odchylkou byla určena U-Th-Pb monazit-(Ce) datováním, které potvrdilo vazbu na rodičovské granitové horniny bratislavského masivu (Uher *et al.* 2014). U-Th-Pb datování uraninitu z pegmatitů Malých Karpat, Považského Inovce a Nízkých Tater poskytlo hodnoty v rozmezí 330 ± 2 až 360 ± 2 Ma a některé nízkotlaké analýzy uraninitu byly vyneseny do intervalu 220-315 ± 2 Ma, což odhalilo mladší tektonotermální procesy spojené s hydrotermální alterací uraninitu (Uher, nepublikovaná data). Rb-Sr datování celých hornin ukazuje stáří 345 ± 9,5 Ma s inicial $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0,70625 ± 0,0002 v granitových pegmatitech Západních Tater (Gawęda 1995). Granát z granitového pegmatitu Rimavská Baňa u Hnúště byl datován izotopovou metodou Sm-Nd a měření ukázala 339,0 ± 7,7 Ma (Thoni *et al.* 2003). Pegmatit ze Západních Tater (Volovecký štít) byl datován metodou Re-Os na molybdenitu a výsledkem bylo 350 ± 1 Ma (Gawęda *et al.* 2013). Datování fluorapatitu z granitového pegmatitu z Barance metodou LA-ICP-MS U-Pb ukázalo stáří 328,6 ± 2,4 Ma (Gawęda *et al.* 2016). Izotopové Ar/Ar datování muskovitu prokázalo plošné stáří 337,1 ± 3,4 Ma pro Borinku, bratislavský masiv a 358,1 ± 4,5 pro pegmatit z dolu Dúbrava - Nízké Tatry (Uher & Scharbert, nepublikovaná data).

Určení gemerských žul bylo problematické, protože žuly v alpských strukturách byly považovány za alpské. První permské určení gemerských granitů ukázala monazitová U-Th-Pb metoda (Finger *et al.* 1996). Permské stáří bylo mnohokrát potvrzeno různými metodami. Stáří metalogenní hydrotermální mineralizace spojené s gemerskými granity podepřelo permské stáří Re-Os datováním molybdenitu (Kohút & Stein 2005). In situ U-Pb SHRIMP datování ukázalo stáří 277,2 ± 1,9 Ma (Radvanec *et al.* 2009). Permské stáří bylo dodatečně podpořeno datováním Bi-U-Mo mineralizace v Majerské dolině, Čučma (Ferenc *et al.* 2021).

Robustní izotopové určení stáří forma nejrozsáhlejších gemerských granitů ukázalo permské stáří (Villasenor *et al.* 2022).

## 3.6 Poznámky k původu pegmatitů LCT

Chemické složení pegmatitu Jezuitské lesy vykazuje nejvyšší stupeň magmatické frakcionace, což se projevuje velmi vysokou koncentrací litofilních prvků jako Rb, Cs, Be, Nb, Ta, Sn a je typické pro vzácné prvkové pegmatity (Černý & Ercit 1985, London 2008). Dále nižší hodnoty Ba, Sr, Zr a REE, negativní anomálie Eu, nízký poměr Rb/Cs, Zr/Hf a Nb/Ta, naopak zvýšené hodnoty 10000Ga/Al a Rb/Sr svědčí o značném stupni frakcionace taveniny, kterou pegmatit produkoval. Geochemicky lze tento pegmatit zařadit do LCT suity *in sensu* Černý & Ercit (2005). Na druhou stranu velmi nízké obsahy Li (23 ppm) jsou pro vzácně kovové granitové pegmatity s afinitou k LCT zvláštní, přestože koncentrace Li v hostitelských granodioritech bratislavského masivu jsou v Li poměrně vysoké (67-100 ppm; Cambel & Vilinovič 1987). Anomálie vyššího poměru Y/Ho (60) spolu s tetradovým efektem může být způsobena důsledkem vyšší aktivity F ve zbytkových magmatických hydrotermálních fluidech (Bau 1996; Irber 1999). Pegmatitová tavenina byla ve své počáteční fázi relativně bohatá na Ta oproti Nb a svědčí o tom krystalizace ferrotantalitu z primární magmatické hrubozrnné křemen-mikroklin-muskovitové jednotky (Chudík *et al.* 2011). Minerály oxidů Nb-Ta s dominantním složením Fe nad Mn naznačují trend kolumbit-tantalitové frakcionace typický pro prostředí chudé na F, typické pro beryl-kolumbitovou subtypovou řadu (Černý *et al.* 1986; Uher *et al.* 1994; Abella *et al.* 1995; Tindle & Breaks 1998). Přítomnost fluorapatitu a fluorkalciomikrolitu však naznačuje vyšší aktivitu F v závěrečné fázi magmatického vývoje za relativně vysoké teploty, protože primární magmatický muskovit má nízký obsah F (např. pegmatity Moravany nad Váhom a Ráztočno; Chudík & Uher 2009; Uher & Chudík 2014). Vývojový trend oxidů Nb-Ta naznačuje (1) magmatickou krystalizaci ferrotantalitu I, ferrotapiolitu I, ferrowodginitu I, následovanou (2) obráceným vývojovým trendem Ta/Nb vzniku druhé generace těchto minerálních fází, (3) fází obohacení Mn způsobenou třetí generací těchto fází a konečně (4) hydrotermálním přesahem (krystalizace fluorkalciomikrolitu; Chudík *et al.* 2011). Pegmatit Jezuitských lesů vznikl během magmatické frakcionace a krystalizace a pozdně magmatické až subsolidové albitizace spojené s vlivem fluid bohatých na F, které vedly k variskému utuhnutí pegmatitu. Albitizace (Na-metasomatóza) je charakterizována výskytem gahnitu, metamického zirkonu, fluorapatitu, monazitu-(Ce), xenotimu-(Y), rutilu, pyritu, U-Ti-Zn-fází a vznikem sekundárních pyrochlorů. (Valach 1954; Veselský & Gbelský 1978; Gbelský 1979; Gbelský & Krištín 1985; Števko *et al.* 2012). Téměř totožný trend byl dokumentován v pegmatitu Považského Inovce se 4 vývojovými stupni: magmatickým, živcově-hydrolytickým, Na-metasomatickým a hydrotermálně alteračním. Takováto sukcese naznačuje na základě podobné minerální parageneze (kolumbit-tantalit, tapiolit, fersmit, gahnit, Hf-zirkon), že tyto minerály vznikly během Na-metasomatózy a nikoliv magmatickou diferenciací (Uher & Broska 1988, Chudík *et al.* 2008). Podporuje to i přítomnost četných inkluzí v magmatickém (gahnit, magnetit, fluorapatit, ferrotapiolit) až hydrotermálním (kasiterit, betrandit či fenakit) stadiu v primárním magmatickém berylu (Uher & Ozdín 2011). Poslední stadium nízkoteplotní alterace pegmatitů je dobře dokumentováno částečným rozpadem berylu na fenakit + muskovit II + křemen II (bertrandit + K-živec II + muskovit II + hydrobiotit (?) a druhou generaci muskovitu. Komplexní geneze pegmatitů tvořících bratislavský masiv

a Považský Inovec ukazuje na magmatickou diferenciaci, frakcionaci prvků, pozdní magmatickou subsolidární albitizaci spojenou s Na-metasomatózou a závěrečnou fázi hydrotermální alterace (Chudík *et al.* 2008). Všechny tyto procesy mohou být spojeny s postvariským vyzdvižením granitu nebo s alpínskými tektonotermálními událostmi (Uher & Chudík 2014).

## 3.7 Poznámky k původu granitů s obsahem vzácných kovů

Gemerská jednotka je zastoupena vzácnokovovými granity a granitovými pegmatity typu Ss v několika oblastech (Hnilec, Betliar, Gemerská Poloma, Dobšiná, Surovec). Granit tvoří kupovitá a vrcholová tělesa, která se od jiných typických výskytů granitů liší horninovou variabilitou zonální struktury od hlubších (jemno-středně hrubozrnný a porfyrický granit) až po vyšší patra (albitit, greiseny a křemenné žíly). Tyto horniny jsou vysoce frakcionované a obohacené o vzácné kovy (REE, LILE, HFSE). Rozsáhlé hydrotermální žíly a exokontaktní zóny (Čučma, údolí Dlhé) jsou přímo spojeny s granitovým magmatismem s hojnou mineralizací vzácných kovů tvořenou turmalínem, karbonáty REE, pyrochlorem, vzácnými fosfáty, polykrasem-(Y) a U-Pb-Mo-Te-Bi fázemi (Jiang *et al.* 2008; Petrík *et al.* 2011; Števko & Sejkora 2021; Števko *et al.* 2020; Ferenc *et al.* 2021; Uher & Broska 1997; Broska & Kubiš 2021), jakož i supergenní alterace a reprecipitace U-fází (Ferenc *et al.* 2018). Gemerské žuly tvoří kompozitní žulová tělesa nad většími žulovými masivy (Šefara *et al.* 2017). Nejtypičtějším minerálem je turmalín, který řídí obsah B v magmatickém až hydrotermálním stadiu vyvinuté taveniny. Vyšší obsahy B a F způsobují depolymerizaci taveniny (snížení objemu a viskozity), takže je dobře vyvinuta frakcionace. Koncentrace B jsou nejvyšší v okrajových částech granitových pegmatitů a také v exokontantních zónách s okolními horninami a nejnižší jsou v hlubší části granitového tělesa. Granitové kupole mají vysokou koncentraci F. Existuje rozdíl v mechanismu srážení těchto dvou prvků. Turmalín z granitů je skoryl, vzácně foitit, zatímco turmalín s dravitovou molekulou se vyskytuje vexokontaktních zónách nebo puklinách jako produkt postmagmatické tekutiny (magmatické, metamorfní tekutiny smíšené s meteority), která cirkuluje mezi granitovým tělesem a hostitelskou horninou (metapelitem; Jiang *et al.* 2008). Významným jevem v hnileckém granitu je významné obohacení na Sn, Rb, B, F, Nb, Ta a W, jehož výsledkem je hojný kasiterit, fluorit a Nb-Ta fáze. Hlavním nositelem fluoru je F bohatá bílá slída a fluorit. Oblast režimu vysokého fluoru se nachází mezi jemnozrnnou žulovou kupolí a jemnozrnnými a hrubozrnnými žulami ve vysokotlakém prostředí. Vysoký tlak vodní páry může přesáhnout litostatický tlak a vede k rozpadu hostitelských hornin za vzniku zlomů a puklin, kterými těkavé sloučeniny unikají za vzniku mineralizace vzácných kovů ve vyvinutých částech granitu (Broska & Kubiš 2004). Na příkladu betliarského granitu byly pozorovány dvě magmatické fáze. Během první etapy vznikla vyvinutá granitová tavenina spolu s rezervoárem bohatým na těkavé látky. Tato žulová tavenina intruduje do svrchního patra v podobě ložních a pravých žil a krystalizuje v podobě středně zrnitých až jemnozrnných stejnozrnných granitů. Následný tok těkavých látek způsobil postmagmatickou alteraci tuhnoucích granitů a vedl ke vzniku greisenů s vyšším obsahem turmalínů a Nb-Ta-Th-W fází. Během druhé magmatické fáze se magma z hlubších úrovní kolektoru intrudovalo jako kaše s K-živcem, albitem, slídami a křemennými fenokrysty a vznikly porfyrické granity. Částečné rozpouštění a koroze fenokrystů byla podpořena poklesem tlaku při ukládání porfyrických granitů do středních úrovní kůry, kde zbytková tavenina v krátké době

vykrystalizovala a zůstala jako matrice s křemen-živec-albitovým složením turmalínu a dalších akcesorických minerálů (Kubiš & Broska 2010). Středně zrnitý Li-granit Surovec s vysokými obsahy P a hojným topazem je zastoupen také Li-slídami (zinnvaldit, lepidolit), amblygonitem a fosfáty vzácných kovů (arrojadit, lacroixit, viitaniemiit). Tyto minerály vznikly při velkém obohacení P ve zbytkové tavenině během krystalizace K-živce a křemene, kdy topaz, lacroixit a viitaniemiit se staly stabilnějšími než albit a apatit a navíc arrojadit krystalizoval na výjimku biotitu (vyšší Fe a Mn). Goyazit a gorceixit vznikaly na úkor apatitu a arrojaditu během zvýšeného fluidního režimu při teplotě ~ 300 °C (Petrík *et al.* 2011). Peraluminické granity bohaté na Li-F se vyskytují pouze na západní straně gemerské jednotky (Kubiš & Broska 2005).

Hydrotermální mineralizace je geneticky spjata s granitovým magmatismem, v němž jsou přítomna cirkulující magmatická fluida, které se mísí s meteorickými fluidy, přičemž chladnoucí podpovrchové magma dodává potřebné teplo. Nejvýznamnější lokality se nacházejí v oblastech Gemerské Polomy (důl Elisabeth, Majerská dolina, Krátká dolina, Hnilec) ve Spišsko-gemerském rudohoří. Žilná tělesa jako albitit, greisen pronikají žulovým tělesem a obsahují širokou škálu mineralizací vzácných kovů. Turmalíny skoryl-dravitové série vyplňují dutiny, pukliny jiných primárních hostitelských minerálů a jsou ovlivněny magmatickými, metamorfními a hydrotermálními fluidy (Jiang *et al.* 2008). Karbonáty REE - bastnäsit-(Ce), synchisit-(Ce), parisit-(Ce) – jsou produktem alteračního rozpadu primárního alanitu-(Ce) a monazitu-(Ce). Vznik hydrotermálních křemenných žil se sulfosolemi v Gemerské Polomi je spojen s postmagmatickou hydrotermální aktivitou přímo spojenou s intruzemi P-, F-, Li-bohatých specializovaných granitů gemerského typu S. Minerální asociace jsou tvořeny fluoritem, fosfáty, ojediněle s minerály Nb-Ta nebo bastnäsitem-(Ce), případně malým množstvím hydrotermálních karbonátů jako Mn-siderit a minoritní dolomit (Uher *et al.* 2009; Števko *et al.* 2015; Števko *et al.* 2020). Byly zjištěny nízké tepelné podmínky krystalizace Pb-Sb sulfosolí spolu se sfaleritem a galenitem (Hurai *et al.* 2007).

## 3.8 Shrnutí

Pegmatitové horniny jsou variského stáří a jsou součástí jádrového pohoří alpínských Západních Karpat tatrické a veporské jednotky. Vzhledem k obloukovitému charakteru mateřského variského magmatismu existují pouze omezená pegmatitová pole. Pegmatity tvoří diková a čočkovitá tělesa (obvykle < 5 m mocná), jejichž hostitelem jsou rodičovské variské granity, granodiority až leukotonality (~360-340 Ma). Obecně pegmatity vykazují texturní zonálnost zahrnující (z vnější strany) aplitovou, grafickou a hrubozrnnou křemen-živec-muskovitovou hranici až intermediární zóny k blokovým zónám K-živce a křemenného jádra, lokálně s pozdními albitovými produkty zatlačování (cukrovitý albit, cleavelandit; Uher *et al.* 2012, Uher & Chudík 2014).

Největší a nejvyvinutější granitové pegmatity z tatrické jednotky jsou v bratislavském masivu a v Žiaru s příbuzností typu S, které patří do třídy vzácných prvků typu LCT, třídy beryl-kolumbit-REE. Primární minerály vzácných kovů tvoří beryl, kolumbit-tantalit, tapiolit, wodginit, zirkon, monazit, pyrochlor a gahnit. Ostatní Be-fáze, jako bertrandit a fenakit, jsou produkty alterace berylu I. Zajímavým jevem je Bi-mineralizace zahrnující bismutokolumbit $BiNbO_4$, bismutotantalit $BiTaO_4$, eulytin $Bi_4(SiO_4)_3$, bismutinit $Bi_2S_3$, matildit $AgBiS_2$ a sulfosole Bi (cosalit, emplektit, gladit, kobellit, lindströmit) a také Bi obohacené minerály

pyrochlorové nadskupiny. Výskyt těchto minerálů je spojován se subsolidovými hydrotermálními fluidy během pozdní fáze magmatického vývoje granitových pegmatitů. Geochemicky jsou tyto granitové pegmatity obohaceny o Rb, Cs, Be, Nb, Ta, Sn a W a ochuzeny o Li, Sr, Ba, P, Zr a REE, což vedlo k absenci Li- a B-bohatých fází. Takto výrazně nízké obsahy Li (pouze 23 ppm) jsou pro pegmatitovou soupravu LCT netypické. V Považském Inovci bylo identifikováno 100-150 m dlouhé a 20 m mocné muskovitové pegmatitové těleso s minerální asociací vzácných kovů granát-gahnit-kolumbit-tantalit (Uher *et al.* 2010, Fridrichová *et al.* 2016). Granity z Nízkého a Vysokých Tater mají příbuznost s I. typem a na ně vázané pegmatitové hráze jsou méně časté a vykazují nižší frakcionaci, což dokumentuje Na- a Mg bohatý beryl z těchto pegmatitů s dominantní oktaedrickou substitucí (Fridrichová *et al.* 2016, Bačík *et al.* 2018).

Gemerská jednotka je charakterizována malými tělesy permských (~ 270-250 mil. let) granitů vzácných kovů (Li-Sn-W-Nb-Ta), které se vyvinuly v kupolích větších skrytých granitových intruzí, kde může být průmyslově zajímavá mineralizace REE. Lithiové fáze jsoureprezentovány Li-bohatými slídami (siderofylit-zinnwaldit), které byly podrobně studovány v suroveckém leukogranitu (Petrík *et al.* 2011). Jako akcesorické minerály nejvyvinutějších albit-topaz-Li-slídnatých leukogranitů (výskyt v Gemerské Polomi, Hnilecké žule) se vyskytují kasiterit, Nb-bohatý wolframit, kolumbit, Nb-Ta rutil a mikrolit-pyrochlor. Byly identifikovány různé Y-REE-U-Ti-Nb-Ta minerály včetně rutilu, polykrasu-(Y), uranpolykrasu a pyrochloru identifikované hydrotermální žíly a exokontaktní zóny granitu z Dlhé Doliny a Čučmy (Uher & Broska 1997, Broska & Kubiš 2021). Výjimečná pegmatitová žíla Li-skorylem až elbaitem a Nb-Ta oxidy byla nedávno objevena v gemerské jednotce u Dobšiné (Uher *et al.* 2019).

## 3.9 Přehled hlavních lokalit

***Bratislavský masiv Malých Karpat.*** Až několik metrů mocné hráze s mineralizací vzácných kovů zahrnují: beryl (krystaly o velikosti až 22 cm), oxidy Nb-Ta (kolumbit, tantalit, tapiolit, wodginit) a gahnit - indikátory vysoce vyvinutých granitových pegmatitů. Přítomny jsou také monazit-(Ce), cheralit a zirkon. Sekundární Be (bertrandit, fenakit) a Nb-Ta (minerály pyrochlorové nadskupiny) a také neobvyklé fáze čistého vizmutu indikují hydrotermální stadium. Granitové pegmatity jsou obohaceny o Be, Rb, Cs, Nb, Ta, ale málo o REE, Li, Sr, Ba, Ti.

***Považský Inovec-Moravany nad Váhom-Striebornica***. Největší pegmatitové těleso na Slovensku (rozpadavé žíly 100-150 m x 20 m) je tvořeno berylem, zirkonem, gahnitem a oxidy Nb-Ta. Nejhojnější oxidy Nb-Ta (kolumbit-tantalit) a zirkon mají neobvykle široký poměr Ta/(Ta+Nb) a poměr Zr/Hf svědčí o extrémní frakcionaci vysoce peraluminózních žulových pegmatitů. Muskovit obsahuje až 130 ppm Sn. Koncentrace B, Li, P, Be, Ti a REE jsou nízké.

***Nízké Tatry-masiv Prašivá-Sopotnická dolina.*** Drobné žíly málo frakcionovaného granitového pegmatitu, ale bohatého na Ti s neobvyklou minerální asociací tvořenou titanitem, fersmitem, minerály pyrochlorové nadskupiny (koncové členy U-Pb-Sb) a roméitem jako výsledek hydrotermální alterace primárního kolumbitu, Ti-ixiolitu a Nb-Ta rutilu. Hydrotermální postižení způsobila metamorfně-magmatická fluida související s přilehlými ložisky sulfidů Sb±Au, Pb-Zn-Sb.

***Permské specializované (Sn-W-Nb-Ta obohacené) granity gemerské jednotky***. Několik oblastí (Betliar, Hnilec, Surovec, Dobšiná, Gemerská Poloma) s hojnou mineralizací vzácných kovů vázanou na greiseny až albitity především ve svrchních částech žulového tělesa. Přítomnost Li-mika (zinnvaldit, lepidolit) a turmalínů (skoryl-dravit) ukazuje na vysoce frakcionované žulové těleso (vysoká koncentrace Li, P a B) s vícestupňovým původem. Sekundární hydrotermální stadium zahrnuje tvorbu karbonátů REE, ryzího bismutu, pyrochlorových minerálů nadskupiny, U-Th fází s příbuznou sulfidickou mineralizací.

## 3.10 Literatura

Alfonso Abella P., Melgarejo i Draper J. C. & Corbella i Cordomi M. 1995: Nb-Ta-minerals from the Cap de Creus pegmatite field, eastern Pyrenees: distribution and geochemical trends. *Mineralogy and Petrology*, *55*(1), 53-69.

Bačík P., Fridrichová J., Uher P., Rybár S., Bizovská V., Luptáková J., Vráblikova D., Pukančik L. & Vaculovič T. 2019: Octahedral substitution in beryl from weakly fractionated intragranitic pegmatite Predne Solisko, Tatry Mountains (Slovakia): the indicator of genetic conditions. – *Journal of Geosciences 64*, 59–72.

Bajaník S., Vazarova A., Ivanická J., & Snopko L. 1984: Kharakternye cherty paleozoya gemerikuma. *Geologické práce*, *80*, 129-151.

Balen D. & Broska I. 2011: Tourmaline nodules: products of devolatilization within the final evolutionary stage of granitic melt?. *Geological Society, London, Special Publications*, *350*(1), 53-68.

Bau M., Koschinsky A., Dulski P. & Hein J. R. 1996: Comparison of the partitioning behaviours of yttrium, rare earth elements, and titanium between hydrogenetic marine ferromanganese crusts and seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *60*(10), 1709-1725.

Breiter K., Broska I. & Uher P. 2015: Intensive low-temperature tectono-hydrothermal overprint of peraluminous rare-metal granite: a case study from the Dlhá dolina valley (Gemericum, Slovakia). *Geologica Carpathica*, *66*(1), 19.

Broska I. & Uher P. 1988: Accessory minerals of granitoid rocks of Bojna and Hlohovec blocks, the Považsky Inovec Mts. – *Geologický Zborník Geologica Carpath*ica, *39*, 505–520.

Broska I. & Uher P. 2001: Whole-rock chemistry and genetic typology of the WestCarpathian Variscan granites. – *Geologica Carpathica 52*, 79–90.

Broska I., Záhradník L. & Petrík I. 2008: Origin of syenitic dike by flowage differentiation (Modra massif, Male Karpaty Mts., Western Carpathians). – *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen Journal of Mineralogy and Geochemistry 185*, 79–90**.**

Cambel B. 1954: Geologicko-petrografické problémy severovýchodnej časti kryštalinika Malých Karpát. – *Geologické Prace Zošit*, *36*, 3–74.

Cambel B. & Vilinovič V. 1987: Geochémia a petrológia granitoidných hornín Malých Karpát. *Veda, vydavateľstvo SAV*, Bratislava, 1-248.

Černý P. & Ercit T. S. 1985: Some recent advances in the mineralogy and geochemistry of Nb and Ta in rare-element granitic pegmatites. *Bulletin de Minéralogie*, *108*(3), 499-532.

Černý P. & Ercit T. S. 2005: "The Classification of Granitic Pegmatites Revisited". *The Canadian Mineralogist*. *43*(6): 2005–2026.

Černý P., Goad B. E., Hawthorne F. C. & Chapman R. 1986: Fractionation trends of the Nband Ta-bearing oxide minerals in the Greer Lake pegmatitic granite and its pegmatite aureole, southeastern Manitoba. *American Mineralogist*, *71*(3-4), 501-517.

Dávidová Š. 1968: Granáty z pegmatitov Malých Karpát. – *Acta Geologica et Geographica Universitatis Comenianae Geologica 13*, 117–127.

Dávidová Š. 1970b: Draselne živce z pegmatitov Malých Karpát. – *Acta Geologica et Geographica Universitatis Comenianae Geologica*, *19*, 177–200.

Dávidová Š. 1978b: The grade of order of potassium feldspars of pegmatites in the Tatrides. – *Geologický Zborník Geologica Carpath*ica, *29*, 275–294.

Dávidová Š. 1982: Determination of potassium feldspars triclinity degree by means of infrared spectrosco - py. – *Acta Geologica et Geographica Universitatis Comenianae Geologica 38*, 65–82.

Dávidová Š. 1994: The genesis of feldspars from pegmatites of the Považsky Inovec Mts. – *Geologica Carpathica, 45*, 225–238.

Dávidová Š. 1997: O stupni diferenciácie pegmatitov tatrika. – *Mineralia Slovaca*, *29*, 136–148.

Dávidová Š. 1998: Granitový pegmatit ložiska Dúbrava v Nízkych Tatrách – mineralogická charakteristika a petrogenéza. – *Mineralia Slovaca*, *30*, 36–43.

De Vito C., Pezzotta F., Ferrini V. & Aurisicchio C. 2006: Nb–Ti–Ta oxides in the gemmineralized and "hybrid" Anjanabonoina granitic pegmatite, central Madagascar: a record of magmatic and postmagmatic events. *The Canadian Mineralogist*, *44*(1), 87-103.

Drnzík E. 1982: Factor controls of the tin mineralization in the Hnilec tin ore field (*Doctoral dissertation, Thesis*, Technical University Košice).

Drnzíková L. & Mandáková K. 1982: Mineralogy of tin and associated mineralizations in Hnilec ore field. *Unpublished report, Geofond*, 1-90.

Faryad S. W. & Balogh K. 2002: Variscan pegmatite and K–Ar and Ar/Ar dating from basement rocks of the Zemplin Unit, Western Carpathians. – *Acta Geologica. Hungarica*, *45*, 193–205.

Faryad S. W. & Dianiška I. 1989: Garnets from granitoids of the Spissko-gemerské rudohorie mts. *Geologický zborník*, *40*(6), 715-733.

Ferenc S., Biron A., Mikuš T., Spišiak J. & Budzak S. 2018: Initial replacement stage of primary uranium (UIV) minerals by supergene alteration: association of uranyl-oxide hydroxy-hydrates and "calciolepersonnite" from the Kratka Dolina Valley (Gemerska

Poloma, Gemeric Unit, Western Carpathians, Slovakia). *Journal of Geosciences*, *63*(3), 277- 291.

Ferenc Š., Števko M., Mikuš T., Milovská S., Kopáčik R. & Hoppanová E. 2021: Primary minerals and age of the hydrothermal quartz veins containing U-Mo-(Pb, Bi, Te) mineralization in the Majerská valley near Čučma (Gemeric Unit, Spišsko-gemerské rudohorie Mts., Slovak Republic). *Minerals*, *11*(6), 629.

Fiala F. 1931: Několik mineralogických nálezů ze Žiarskeho pohoří. – *Sborník. Prirodovedního Odboru Slovenské. Vlasti - vedecké Muzeum Bratislava,* (Bratislava), 1924– 1931, 24–27.

Finger F., Broska I., Schermaier A. & Schitter F. 1996: Monazite in Graniten und Gneisen: Verbreitung, Stabilitätsbereich, chemische Variabilität.

Garculák M. & Vanek J. 1989: Beryl – prvý nález v pegmatitoch Malých Karpát. – *Mineralia Slovaca*, *21* (5).

Gawęda A. 1995: Geochemistry and Rb/Sr izochron age of pegmatites from the Western Tatras Mts. (S-Poland). – *Geologica Carpathica*, *46*, 95–99.

Gawęda A., Muller A., Stein H. & Kądziołko-Gaweł Mikulski, S. 2013: Age and origin of the tourmaline rich hydraulic breccias in the Tatra Granite, Western Carpathians. – *Journal of Geosciences, 58*, 133–148.

Gawęda A., Szopa K., Chew D., Klotzli U., Muller A., Sikorska M. & Pyka P. 2016: Age and origin of fluorapatite-rich dyke from Baranec Mt. (Tatra Mts., Western Carpathians): a key to understanding of the post-orogenic processes and element mobility. – *Geologica Carpathica*., *67*, 417–432.

Gbelský J. 1979: Electron microprobe determination of Zr/Hf ratios in zircons from pegmatites of the Male Karpaty Mts. (West Carpathians). – *Geologcký Zborník Geologica Carpath*ica *30*, 463–474.

Gbelský J. 1980: Composition of the main morphological types of garnets from the pegmatites of the Male Karpaty Mts. (West Carpathians). – *Geologický Zborník Geologica Carpath*ica *31*, 185–199.

Gbelský J. & Krištin J. 1985: Gahnit v pegmatitoch Malých Karpát – príspevok k topografickej mineralógii Slovenska. In Veselský, J., Beňka, J., Gbelsky, J. (eds.) Akcesorické minerály – ich petrogenetický a metalogeneticky význam. 65–70. *Geologicky ústav D. Štúra*, Bratislava.

Grecula P., Abonyi A., Abonyiová M., Antaš J., Bartalský B., Bartalský J., Dianiška I., Drnzík E., Ďuďa R., Gargulák M., Gazdaéko Ľ., Hudáček J., Kobulský J., Lörincz L., Macko J., Návesňák D., Németh Z., Novotný L., Radvanec M., Rojkovič I., Rozložník L., Rozložník O., Varček C. & Zlocha J 1995: Mineral deposits of the Slovak Ore Mountains, Vol. 1. Bratislava: *Geocomplex (Mineralia Slovaca Monograph)*, 1-834.

Grecula P. & Drnzík E. 1995: Hydrothermal-greisenic and albititic mineralisation. In : Grecula P. et al. (Eds.): Mineral deposits of the Slovak Ore Mountains. Vol. 1. *Geokomplex Press*, *Košice*, 99-113.

Grecula P., Hovorka D. & Putiš M. (eds.) 1997: Geological evolution of the Western Carpathians. *Mineralia Slovaca Monograph*, Bratislava, 1-370.

Határ J. 1979. Akcesorické minerály niektorých hornín kryštalinika záp. časti ďumbierskeho pásma Nízkych Tatier. *Kandidátska dizertačná práca, manuscript Katedra mineralógie Prírodovedecká. fakulta UK, Bratislava*, *1*, 1-191.

Hurai V., Urban M., Konečný P., Thomas R., Lexa O., Schulmann K. & Chovan M. 2007: Cretaceous age of quartz-stibnite veins near Čučma (Spišsko-gemerské rudohorie Mts). *Mineralia Slovaca 38*, 131–140.

Chudík P. & Uher P. 2009: Minerály skupiny pyrochlóru z granitových pegmatitov Západných Karpát: variácie chemického zloženia a substitučne mechanizmy. – *Mineralia Slovaca*, *41*, 159–168.

Chudík P., Uher P., Gadas P., Škoda R. & Pršek J. 2011: Niobium-tantalum oxide minerals in the Jezuitske Lesy granitic pegmatite, Bratislava, Massif, Slovakia: Ta to Nb and Fe to Mn evolutionary trends in a narrow Be,Cs-rich and Li,B-poor dike. – *Mineralogica Petrologica, 102*, 15–27.

Chudík P., Uher P., Kohút M. & Bačík P. 2008: Accessory columbite to tantalite, tapiolite and zircon:products of extreme fractionation in highly peraluminous pegmatitic granite from the Považsky Inovec Mountains, Western Carpathians, Slovakia. – *Journal of Geosci*ences, *53*, 235–246.

Irber W. 1999:. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu∗, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *63*(3-4), 489-508.

Jiang S. Y., Radvanec M., Nakamura E., Palmer M., Kobayashi K., Zhao H. X. & Zhao K. D. 2008: Chemical and boron isotopic variations of tourmaline in the Hnilec granite-related hydrothermal system, Slovakia: Constraints on magmatic and metamorphic fluid evolution. *Lithos*, *106*(1-2), 1-11.

Kamenický J. & Kamenický L. 1955. Gemeric granites and ore mineralisation of Spiš–Gemer Ore Mountains. *Geologické Práce Zošit*, *47*, 1-73.

Kohút M. & Nabelek P. I. 2008: Geochemical and isotopic (Sr, Nd and O) constraints on sources for Variscan granites in the Western Carpathians – implications for crustal structure and tectonics. – *Journal of Geosciences, 53*, 307–322.

Kohút M. & Stein H. 2005: Re–Os molybdenite dating of granite-related Sn–W–Mo mineralisation at Hnilec, Gemeric Superunit, Slovakia. *Mineralogy and Petrology*, *85*, 117- 129.

Kohút M., Uher P., Putis M., Ondrejka M., Sergeev S., Larionov A. & Paderin,I. 2009: SHRIMP U-Th-Pb zircon dating of the granitoid massifs in the Malé Karpaty Mountains (Western Carpathians): evidence of Meso-Hercynian successive S-to I-type granitic magmatism. *Geologica Carpathica*, *60*(5), 345.

Kubiš M. & Broska I. 2005: The role of boron and fluorine in evolved granitic rock systems (on the example of the Hnilec area, Western Carpathians). *Geologica Carpathica-Bratislava 56*(3), 193-204.

Kubiš M. & Broska I. 2010: The granite system near Betliar village (Gemeric Superunit, Western Carpathians): evolution of a composite silicic reservoir. *Journal of Geosciences*, *55*(2), 131-148.

London D. 2008: Pegmatites. *The Canadian Mineralogist*, Special Publication 10. *Mineralogical Association of Canada*, Quebec, 1-347.

Malachovský P., Uher P. & Ďuďa R. 2000: Nb-W minerals in rare metal granites, Dlhá dolina Spišsko Gemerské Rudohorie Mts. *Natura Carpatica 41*, 7–14 (in Slovak).

Michalenko J. 1959: Predbežná sprava o výskyte molybdenitu v muskovitických pegmatitoch a aplitických žulách v Malej Železnej doline v Nízkych Tatrách. – *Geologické Prace Zpr*áva *16*, 101–104.

Michalenko J. 1960: Správa o výskyte molybdenitu v muskovitických pegmatitoch aaplitických žulách v Malej Železnej doline v Nizkych Tatrach. – *Časopis Mineralica Geol*ogica, *5*, 68–70.

Novák M., Uher P., Černý P. & Siman P. 2000: Compositional variations in ferrotapiolite+tantalite pairs from the beryl-columbite pegmatite at Moravany nad Vahom, Slovakia. – *Mineralogica Petrologica 69*, 295–306.

Ončáková P., & Šalát J. 1954. Petrografia a petrochémia gemeridných žúl. *Geologický ústav Dionýza Štúra v nakladateľstve SAV*.

Petrík I. 2000: Multiple sources of the West-Carpathian Variscan granitoids: a review of Rb/Sr and Sm/Nd data. – *Geologica Carpathica 51*, 145–158.

Petrík I. & Broska I. 1994: Petrology of two granite types from the Tribeč Mountains, Western Carpathians: an example of allanite (+ magnetite) versus monazite dichotomy. *Geological Journal*, *29*(1), 59-78.

Petrík I. & Kohút M. 1997: The evolution of granitoid magmatism during the Hercynian orogen in the Western Carpathians. In Grecula, P., Hovorka, D., Putiš, M. (eds.) Geological evolution of the Western Carpathians. 235–252. *Mineralia Slovaca Monograph*, Bratislava.

Petrík I., Kohút M., Broska I., Bezák V., Hraško Ľ., Janák M., Plašienka D., Uher P., Poller U., Todt W., Nabelek P. & Recio C. 2001: Granitic plutonism of the Western Carpathians. Guidebook to Eurogranites 2001. *Geological Institute of Slovak Academy of Sciences and Geological Survey of the Slovak Republic*, *Bratislava*, 1-116.

Petrík I., Kubiš M., Konečný P., Broska I. & Malachovský P. 2011: Rare phosphates from the Surovec Topaz–Li-Mica microgranite, Gemeric unit, Western Carpathians, Slovak Republic: Role of F/H2O of the melt. *The Canadian Mineralogist*, *49*(2), 521-540.

Pitoňák & P., Janák M. 1983: Beryl – nový minerál nízkotatranských pegmatitov. – *Mineralia Slovaca*, *15*, 231–232.

Plašienka D., Grecula P., Putiš M., Kováč M., & Hovorka D. 1997: "Evolution and structure of the Western Carpathians: an overview." *Geological evolution of the Western Carpathians* (1997): 1-24.

Pulec M. 1989: Výskyt kryštalického grafitu v pararulách, granitoidoch, pegmatitoch a aplitoch kryštalinika Západných Karpát. – *Mineralia Slovaca*, 21, 53–57.

Pupin J. P. 1980: Zircon and granite petrology. *Contributions to mineralogy and petrology*, *73*(3), 207-220.

Putnis A. 2002: Mineral replacement reactions: from macroscopic observations to microscopic mechanisms. *Mineralogical Magazine*, *66*(5), 689-708.

Putnis A. 2009: Mineral replacement reactions. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, *70*(1), 87-124.

Radvanec M. & Gonda S. 2019: Genetic model of Permian hydrothermal mineralization in Gemeric unit (W. Carpathians) from deep-seated zone of anatectic melting to volcanicexhalative SedEx mineralization on surface. *Mineralia Slovaca*, *52*, 109-156.

Radvanec M., Konečný P., Ondrejka M., Putiš M., Uher P. & Németh Z. 2009: Granity gemerika ako indikátor extenzie kôry nad neskorovarískou subdukčnou zónou a pri ranoalpínskej riftogenéze (Západné Karpaty): interpretácia podľa veku monazitu a zirkónu datovaného metódou CHIME a SHRIMP. *Mineralia Slovaca*, *41*, 381-394.

Šefara J., Bielik M., Vozár J., Katona M., Szalaiová V., Vozárová A.& Götze H. J. 2017: 3D density modelling of Gemeric granites of the Western Carpathians. *Geologica Carpathica*, *68*(3), 177.

Števko M. & Sejkora J. 2021: Bismuth, lead-bismuth and lead-antimony sulfosalts from the granite-hosted hydrothermal quartz veins at the Elisabeth mine, Gemerská Poloma, Spišskogemerské rudohorie Mts., Slovakia. *Journal of Geosciences*, *66*(3), 157-173.

Števko M., Sejkora J. & Dojčanský Ľ. 2021: New data on sulphosalts from hydrothermal siderite-type veins in the Spišsko-gemerské rudohorie Mts.(eastern Slovakia): 1. Nuffieldite and aikinite from Slovinky-Došťavná vein. *Bulletin Mineralogie-Petrologie*, *29*(1), 108-114.

Števko M., Sejkora J. & Dolníček Z. 2020: Hydrothermal bastnäsite-(Ce) from the Elisabeth adit near Gemerská Poloma (Slovak Republic). *Bulletin Mineralogie Petrologie*, *28*(1), 1-8.

Števko M., Uher P. & Ozdín D. 2012: Bizmut a jeho alteračné produkty: akcesorické minerály granitového pegmatitu berylového typu na lokalite Bratislava – Švábsky vrch (Male Karpaty, Slovensko). – *Bulletin Mineralogicko-Petrologického Oddelení Narodního Muzea. (Praha), 20*, 226–229.

Števko M., Uher P., Sejkora J., Malíková R., Škoda R. & Vaculovič T. 2015: Phosphate minerals from the hydrothermal quartz veins in specialized S-type granites, Gemerská Poloma (Western Carpathians, Slovakia). *Journal of Geosciences*, *60*, 237-249.

Thöni M., Petrík I., Janák M. & Ľupták B. 2003: Preservation of Variscan garnet in Alpine metamorphosed pegmatite from the Veporic Unit, Western Carpathians: Evidence from SmNd isotope data. – J*ournal of Czech Geological Society, 48*, 123–124.

Tindle A. G. & Breaks F. W. 1998: Oxide minerals of the Separation Rapids rare-element granitic pegmatite group, northwestern Ontario. *The Canadian Mineralogist*, *36*(2), 609-635.

Uher P. 1991: Be-Nb-Ta pegmatites – a new type of rare-element mineralization in the Western Carpathians. – *Geologica Carpathica*, *42*, 331–339.

Uher P. 1992: Vzácnoprvková Be-Nb-Ta mineralizácia v granitových pegmatitov Západných Karpát. – MS, *kandidátska dizertačná práca*, Geologicky ústav SAV Bratislava.

Uher P. 2000: Stibiotantalit v pegmatite Sb ložiska Dúbrava – produkt hydrotermálnej alterácie kolumbitutantalitu. – *Mineralia Slovaca, 32*, 109–114.

Uher P. 2004: Gahnit z granitových pegmatitov tatrika (Slovensko). – *Bulletin Mineralogicko-Petrologického Oddelení Narodního Muz*ea *(Praha), 12*, 202–205.

Uher P. 2008: Columbit-tantalit z pegmatitu pri Raztočne v pohorí Žiar (stredne Slovensko). – *Bulletin Mineralogicko-Petrologického Oddelení Narodního Muz*ea *(Praha)*, *16*, 109–112.

Uher P. 2019: Granitové pegmatity Západných Karpat: súčasný stav poznatkov. – *Acta Musei Moraviae, Scientiae Geologicae.*, *104*, 2, 139–167 (with English summary).

Uher P., Bačik P., Ozdin D. & Števko M. 2012: Beryl in granitic pegmatites of the Western Carpathians (Slovakia): compositional variations, mineral inclusions and breakdown products. – *Acta Mineralogica-Petrographica. Abstract Series, 7*, 144.

Uher P. & Benko P. 1997: Beryl-kolumbitový pegmatit na ložisku Dúbrava v Nízkych Tatrách. – *Natura Carpathica, Košice*, *38*, 181–184.

Uher P. & Broska I. 1989: Muskovitický pegmatit s obsahom minerálov vzácnych prvkov pri Moravanoch nad Váhom (Považsky Inovec). – *Mineralia Slovaca, 21*, 163–173.

Uher P. & Broska I. 1995: Pegmatites in two suites of Variscan orogenic rocks (Western Carpathians, Slovakia). – *Mineralogica Petrologica 55*, 27–36.

Uher P. & Broska I. 1996: Post-orogenic Permian granitic rocks in the Western CarpathianPannonian area: geochemistry, mineralogy and evolution. *Geologica Carpathica, 47*, 311- 322.

Uher P. & Černý P. 1998: Accessory zircon in Hercynian granitic pegmatites of the Western Carpathians, Slovakia. – *Geologica Carpathica*, *49*, 261–270.

Uher P., Černý P., Chapman R., Határ J. & Miko O. 1998a: Evolution of Nb,Ta-oxide minerals in the Prašiva granitic pegmatites, Slovakia. I. Primary Fe,Ti-rich assemblage. – *The Canadian Mineralogist*, *36*, 525–534.

Uher P., Černý P., Novák M. & Siman P. 1994: Niobium-tantalum minerals from granitic pegmatites in the Male Karpaty, Považsky Inovec and Žiar Mountains, Western Carpathians, Slovakia. – *Mineralia Slovaca, 26*, 157–164.

Uher P., Dávidová Š. & Vikar I. 2001: Schorl composition from the barren granitic pegmatites in the Western Carpathians: Two examples from the Nizke Tatry Mountains, Central Slovakia. – *Journal of Czech Geological Society 46*, 21–26.

Uher P. & Chudík P. 2014: Minerály a geochémia granitového pegmatitu Bratislava – Jezuitské lesy (Slovensko). – *Bulletin Mineralogicko-Petrologického Oddelení Narodního Muz*ea (Praha), *22*, 281–292.

Uher P., Chudik P., Bačik P., Vaculovič T. & Galiova M. 2010: Beryl composition and evolution trends: an example from granitic pegmatites of the beryl-columbite subtype, Western Carpathians, Slovakia. – *Journal of Geosciences, 55*, 69–80.

Uher P. & Ozdín D. 2011: Minerálne inklúzie v beryle, živcoch a kremeni z granitového pegmatitu Moravany nad Vahom – Striebornica (Považsky Inovec, zapadne Slovensko): chemické zloženie a genetické aspekty. – *Bulletin Mineralogicko-Petrologického Oddelení Narodního Muz*ea *(Praha)*, *19*, 130–137.

Uher P. & Ondrejka M. 2009: P-Al-Th-REE obohatený zirkón a fáza blízka cheralitu v apliticko-pegmatitickom granofýre na lokalite Dubová – Horne Trávniky pri Modre (Male Karpaty, jz. Sloven sko). – *Bulletin Mineralogicko-Petrologického Oddelení Narodního Muz*ea. *(Praha)*, 17/2, 81–86.

Uher P., Žitňan P. & Ozdín D. 2007: Pegmatitic Nb-Ta oxide minerals in alluvial placers from Limbach, Bratislava Massif, Western Carpathians, Slovakia: compositional variations and evolutionary trend. – *Journal of Geosciences 52*, 133–141.

Valach J. & Gorek A. 1954: Pegmatity severozápadnej časti Vysokých Tatier. – *Geologický Sborník Slov*aca

Varček C. 1959: Paragenetické pomery žily Mária v Rožňave. *Geologické Práce, Zošit 55,* 181, 213.

Veselský J. & Gbelský J. 1978: Výsledky štúdia akcesorických minerálov granitoidov a pegmatitov Malých Karpát. *Acta Geologica et Geographica Universitatis Comeniana, Geologica*, *33*, 91-112.

Villasenor G., Catlos E., Kohut M., Broska I., Etzel T., Kyle J. R. & Stockli D. 2022: Timing of rifting in the Central Western Carpathians post-Variscan orogeny and provenance of the Meliata Ocean. *Authorea Preprints*.

Vozár J., Ebner F., Vozárová A., Haas J., Kovacs S., Sudar M., Bielik M. & Pero CS. (eds.) 2010: Variscan and Alpine terranes of the Circum-Pannonian Region. *Geological Institute*, *Slovak Academy od Sciences*, *Bratislava*, 1-233.

Wise M. A. & Černý P. 1990: Beusite-triphylite intergrowths from the Yellowknife pegmatite field, Northwest Territories. *The Canadian Mineralogist*, *28*(1), 133-139.

# 4 Výskyty a charakteristika pegmatitů v Rumunsku

***Gavril Săbău***
*Institutul Geologic al României, Bucureşti*
*Rumunsko*

## 4.1 Geologická pozice

Výskyty pegmatitů v Rumunsku mají společné charakteristiky ve všech jednotkách, ve kterých se vyskytují. Nacházejí se ve středně metamorfovaných jednotkách krystalinika, konsolidovaných při teplotách na spodní hranici solidusové křivky granitových tavenin, s kyanitem a sillimanitem jako indexovými metamorfními minerály (Hann, 1987). Pravidelná prostorová asociace s granitoidními tělesy nebyla zjištěna, a pokud se v hostitelských horninách vyskytují granitoidní intruze, jsou bez vzájemné spojitosti. Mineralogické složení pegmatitů je jednoduché, s křemenem a živcem jako hlavními minerály, v časté asociaci s muskovitem a nepravidelným výskytem dalších silikátových a fosfátových minerálů, jako jsou biotit, turmalín, granát, hlinitokřemičité fáze a apatit. Tyto minerály se také často vyskytují v hostitelských metamorfovaných horninách, v případě turmalínu jsou lokální koncentrace spojeny s pegmatitovými tělesy. Minerály bohaté na vzácné prvky se v pegmatitových tělesech objevují v podřízeném množství, jde zejména o beryl, vzácný kolumbit-tantalit, výjimečně fosforečnany hliníku nebo Fe-Mn s obsahem lithia. Tyto výskyty se zpravidla objevují ve spojení s muskovitem bohatými pegmatitovými poli, někdy jsou vzácné minerály přítomny uvnitř vnitřně zónovaných velkých těles konkordantních vůči hostitelským horninám. Všechny pegmatity spadají do třídy s muskovitem (MS), s občasným přechodem do třídy s muskovitem a vzácnými prvky (MSREL) v klasifikaci Černého a Ercita (1995), která zcela odpovídá charakteristikou hostitelských hornin a mineralogickým složením pegmatitů.

Zjištěné společné rysy vedly Mărzu (1980, 1985) k vymezení karpatské pegmatitové provincie rozdělené na subprovincie (Gilău-Muntele Mare v Apusenském pohoří, Preluca a Rodna ve Východních Karpatech, Getická subprovincie v Jižních Karpatech). Getická podprovincie se dělí na dva úseky: Semenic-Muntele Mic a Sebeş-Cibin-Lotru. Ačkoli se pegmatitonosné jednotky ve všech těchto oblastech nápadně podobnají, stanovení U-Th-PbT stáří monazitu z bazických formací ukazuje na konsolidaci v různých obdobích: křídovou v případě hrásti Rodnei a inselbergu Preluca, intenzivní jurskou remobilizaci s intruzemi pegmatitů v oblasti Gilău-Muntele Mare (Reiser et al., 2018), variskou synmetamorfní tektonizaci následovanou permským tepelným postižením a permsko-jurskou diferenciální exhumací v getickém krystaliniku (Săbău & Negulescu, 2016). Představa jednotné metamorfní provincie v karpatském měřítku tedy není podpořena, ale subprovincie vymezené Mărzou mají unitární charakter a jsou schopny obstát při klasifikaci pegmatitonosných jednotek v Rumunsku. Výjimkou je subprovincie Gilău-Muntele Mare, která není jednotná, protože spojuje pegmatity metamorfního komplexu Someş (bihorská jednotka) s pegmatity jednotky Baia de Arieş, na které je nutno vzhledem ke zcela odlišné strukturní pozici pohlížet separátně.

Tektonická pozice pegmatitových výskytů v pohoří Apuseni je znázorněna na geologických mapách 1 : 50 000 Valea Ierii, Muntele Mare, Călăţele a Gilău (GIR). Stavba Apusenského

pohoří v oblasti Gilău-Muntele Mare (obr. 4.1) zahrnuje jednotky alpínského příkrovu nebo příkrovového podloží, které obsahují sled předalpínských základních jednotek:

## 4.2 Příkrovová jednotka Lupşa

**Série Muncel** se skládá z:

- sericiticko-chloritické břidlice, biotitické a chloritické břidlice, svory s chloritizovaným granátem
- grafitické břidlice
- břidlice s amfiboly a chloritem
- mramory, dolomitické mramory, karbonátové břidlice

**Komplex Biharia** zahrnuje:

- chloritické břidlice ± epidot a albit, sericiticko-chloritické břidlice (základ)
- metagranity
- grafitické břidlice
- albitické ruly (metatrondhjemity)
- amfibolity
- ortoamfibolity
- mramory a dolomitické mramory, karbonátové břidlice

**Příkrov Finiş-Garda** zahrnuje:

- granit Codru
- metamorfní komplex Codru:

  - pararuly a svory (základ)

  - ortoamfibolity

**Jednotka Bihor** sestává z:

- granit Muntele Mare
- metamorfity Arada
- metamorfity Someş

  - svorová série Balceşti - svory ± almandin, arkózové kvarcity

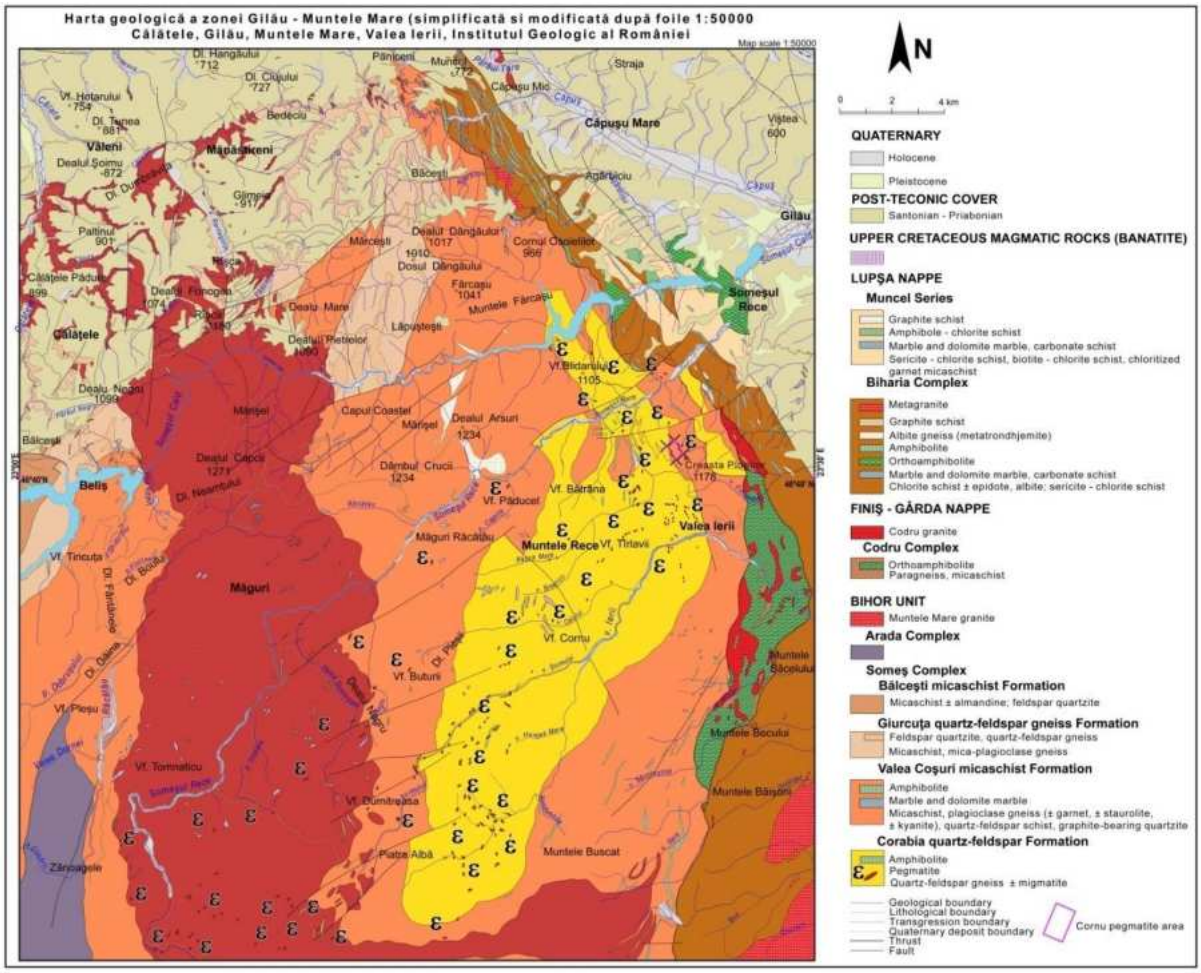
  - série ortorul Giurcuţa – svory, plagioklasové ruly (pozadí), arkózové kvarcity, ortoruly

  - série Valea Coşuri - svory, plagioklasové ruly (± granát, ± staurolit, ± kyanit), křemen-živcové svory, grafitické kvarcity

- ortorulová série Corabia

- ortoruly ± migmatity (základ)
- amfibolity
- pegmatity

Většina pegmatitových výskytů je soustředěna v sérii Corabia (obr. 4.1, tab. 4.1), méně pak v sérii Valea Coşuri a do ní intrudovaných granitech Muntele Mare.



Obr. 4.1 Zjednodušená geologická mapa oblasti Gilău-Muntele Mare.

Tabulka 4.1. Výskyty pegmatitů v pohoří Apuseni. Popis dle původních citací, zkratky minerálů podle Warra (2021).

| Výskyt | Strukturní jednotka | Morfologie | Velikost | Struktura/textura | Mineralogie | Genetický typ | Ekonomický význam |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Someșul Rece - Iara Zone | jednotka Bihor, série Someș (granity, migmatity, ruly, svory) | konkordantní a diskordantní čočky a žíly | max. 600 m/ 50-80 m | aplitická – velkozrnná; masivní, místy zonální, miarolitická | K-Fsp, Na-Fsp, Ab, Qtz, Ms, Bt, Tur, Grt (Alm-Sps), Ttn, Ap, Zrn, Brl, Mnz, Aln, Ky, Sil, Act, Ep; Mag, Jcb, Ilm, Mol, Py, Pyh, Ccp, Eng, Mrc | magmatický | pegmatit s/bez mineralizace |
| Cornu | jednotka Bihor, série Someș | | | | | | průzkumná licence |
| Muntele Rece | | žíly, deskovitá tělesa | | | K-Fsp, Pl, Qtz, Ms, Tur, Grt | metamorfní | |
| Plopiș Mts. | | | | | Qtz, Fsp, Ms, Grt, Tur, Rt, And, Chl, Kln | | |
| Gilău Mts. | | čočky | 250 m/ 5-50 m | | Qtz, K-Fsp, Pl, Bt, Grt, Tur, Brl, Crd, St, Sil, Amp | metamorfní | |
| Geamăna (Murariu et al. 1988) | série Baia de Arieș: svory s Ky-St, pararuly, amfibolity, granity Vința | čočky a žíly | stovky/ desítky metrů | pegmatitická; grafická | Qtz, Or, Pl (40 % Fsp), Ms (do 5 cm), Tur (1-2 %), Grt (AlmSps), Bt, Brl, Ap, Zrn, Ttn; pegmatiticko-pneumatolytická mineralizace: Mol; epitermální: Py, Ccp | magmatický | živcové pegmatity; muskovitové pegmatity |
| La Lăcuț (Cioara de sus), Sașa V. (bloky) (Mârza 1977) | série Baia de Aries: Ky-St svory, pararuly, amfibolity | čočky | 30-50 cm / desítky metrů | | oligoklas, K-Fsp, Qzt, Ms, Bt, Ap, Zrn, Ilm (1-2 cm/1-2 mm, up to 10 cm/5 mm); Ep, Zo, Cal, Clc, Py, Ccp; Fsp s Li=0.068-0.22%, Na=1-1.08%, K=2.22-3.02% | magmatický | živcové pegmatity (80 %, 10 cm) - Ilm (3- 5%) |
| Vința (potok Piciorușului) (Mârza 1973) | | žíly | | pegmatitická, mikropegmatitická; břidličnatá, masivní | Fsp, Qtz, Ms, Grt, Aln, Tur; pegmatiticko-pneumatolytická mineralizace: Mol; epitermální: Py, Ccp, melnikovit, Qtz, Cal | magmatický | Ms-Plg pegmatit, pegmatit s Pl-Ms-Grt; pegmatit s Plg-Tur; Fs-pegmatit s Mo (0.1 mm-3cm); Or-Qtz-pegmatit |

## 4.3 Masiv Preluca

Masiv Preluca představuje izolovaný metamorfní blok nacházející se v severozápadní Transylvánii. Metamorfovaný podklad přiřazují Rusu et al. (1983), Balintoni (1996) ke skupině Baia de Aries (jedna z jednotek, která je součástí podkladu Apusenského pohoří).

Podle Kossmata a v. Johna (1905), Rusu al. (1983) a Kalmára (1972) tvoří metamorfovaný podklad masivu Preluky čtyři jednotky: svrchní terigenní formace Valea Cavnicului, série Preluca Nouă (převážně granátické svory, amfibolity, pararuly, amfibolické ruly, pyroxenity, leptynity, grafitické kvarcity), karbonátovásérie Măgureni a spodní terigénní série Răzoare.

- Série Valea Cavnicului

  - granátické svory ± staurolit ± kyanit (základ), plagioklasové ruly, ortoruly, pegmatity

- Série Preluca Noua

  - granátické svory a svorové ruly ± staurolit ± kyanit-nosné (základ), místy amfibolity, plagioklasové ruly, mramory, vložky okatých rul, pegmatity

- Série Măgureni

  - monotónní sled karbonátových hornin (převážně dolomitických), pegmatitů a dalších hornin

- Série Răzoare

  - pararuly a svory s granátem ± staurolitem ± kyanitem, s tenkými vložkami mramorů a amfibolitů, granátické pegmatity

- Série Valea Zăpodiei

  V západní části masívu byla vyčleněna další jednotka, série Valea Zăpodiei tvořená granátonosnými a kyanitonosnými svory, pararulami, čočkami Fe-Mn silikát-karbonátových hornin uložených v černých kvarcitech, křemen-karbonátových břidlicích, amfibolických kvarcitech, mikroblastických magnetitických kvarcitech (Udubaşa et al. 1996). Východní hranice této formace je vyznačena soustavou karbonátových hornin măgurenské formace a četnými tělesy turmalinických pegmatitů (obr. 4.2). Kalmár (1972) řadí tento útvar do prelucké formace, kde by měl představovat rozšířený sled střední části, a tak by măgurenská formace představovala boky antiformy, v jejíž ose se nachází formace Razoare.

Pegmatity se v masivu Preluca (Tab. 4.2, obr. 4.2) vyskytují ve všech jeho jednotkách s výjimkou série Valea Zăpodiei. Jsou složeny z křemene, K-živce, plagioklasu (albit nebo oligoklas), muskovitu a akcesorických minerálů (turmalín, biotit, zirkon, apatit). Pouze pegmatity formace Răzoare obsahují granát jako akcesorický minerál.

Pegmatity jsou považovány za vzniklé z anatektických tavenin (Sîrbu et al. 2010) na základě následujících znaků:

- složení granátu (30 mol. % spessartinu),
- vysoký obsah HREE a mírně negativní Eu anomálie,

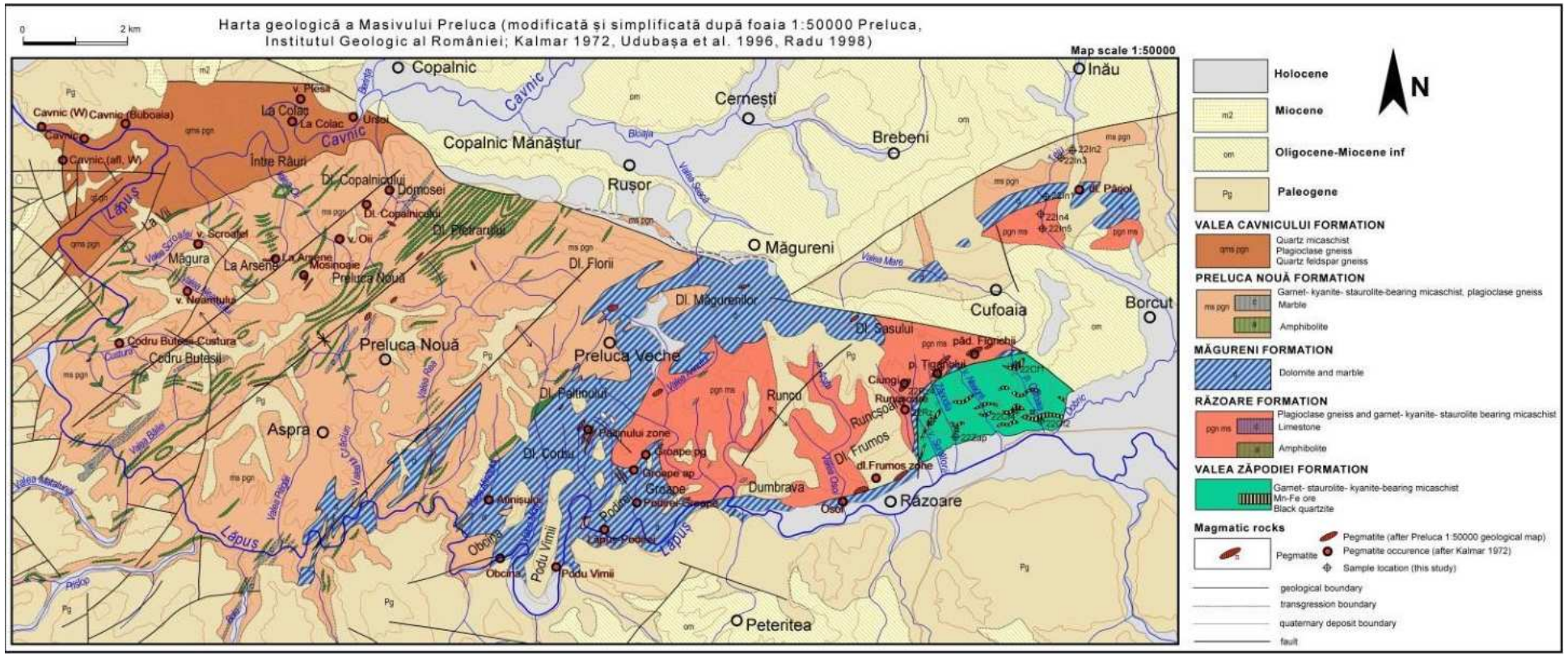
- poměry Y/Dy a Y/Gd ukazující na růst granátů z tavenin bohatých na těkavé látky,
- vysoké koncentrace P v granátu z pegmatitů formace Răzoare,
- metamorfní podmínky zaznamenané v hostitelských horninách, které odpovídají výskytu granitových tavenin (Balintoni 1996; Radu 1997).

Vzácné kovy jsou přítomny v akcesorických fázích. V odebraných vzorcích jsme identifikovali náhodná zrna zonálního zirkonu bohatého na Hf, allanit-(Ce) a ferokolumbit s proměnlivým obsahem Ta a kvantitativně podřízenou substitucí Mn.

## 4.4 Pohoří Rodna

První informativní údaje o pegmatitech v pohoří Rodna se objevily v práci v. Richthofena (1860). První podrobnou petrografickou studii o krystaliniku pohoří Rodnei a zdůvodnění příkrovové struktury představující polohu masivu v rámci krystalinicko-mezozoické zóny Východních Karpat provedl Krautner (1938). Autor rozlišil dvě hlavní tektonické jednotky: příkrovovou jednotku (příkrov Rodna) a jednotku, která má ve vztahu k příkrovu autochtonní postavení a ve vztahu ke stavbě Východních Karpat představuje paraautochton překrývající celou krystalinicko-mesozoickou zónu nad vnitřní jednotkou karpatského flyše. Autor se zmiňuje také o pegmatitech na svahu Faget, u pramenů Scărişoara, Curu Ascuns a Tarniţa Scărişoarei, které jsou popisovány jako produkty fluid cirkulujících během regionální metamorfózy. Následující výzkumy a podrobné mapy popřely příkrovovu stavbu masivu Rodna (např. Ghika-Budeşti 1955). Výskyty pegmatitů v pánvích Rebra, Cormaia, Valea Caselor zkoumal Pomărleanu (1965), který vyslovil hypotézu o korelaci mezi mramory a skrytým intruzivním tělesem, které by generovalo kontaktní jevy končící vznikem diopsidových výskytů mezi údolím Rebra a údolím Cormaia. Jihozápadní část masivu Rodna, považovaná Krautnerem (1938, 1968) za kořenovou zónu příkrovu Rodna, se vyznačuje maximální četností a složitějším chemickým složením pegmatitů (Murariu, 1979). Příkrovovou stavbu masivu potvrdili Dessila-Codarcea (1967), Pitulea (1967) a Krautner & Krautner (1970).

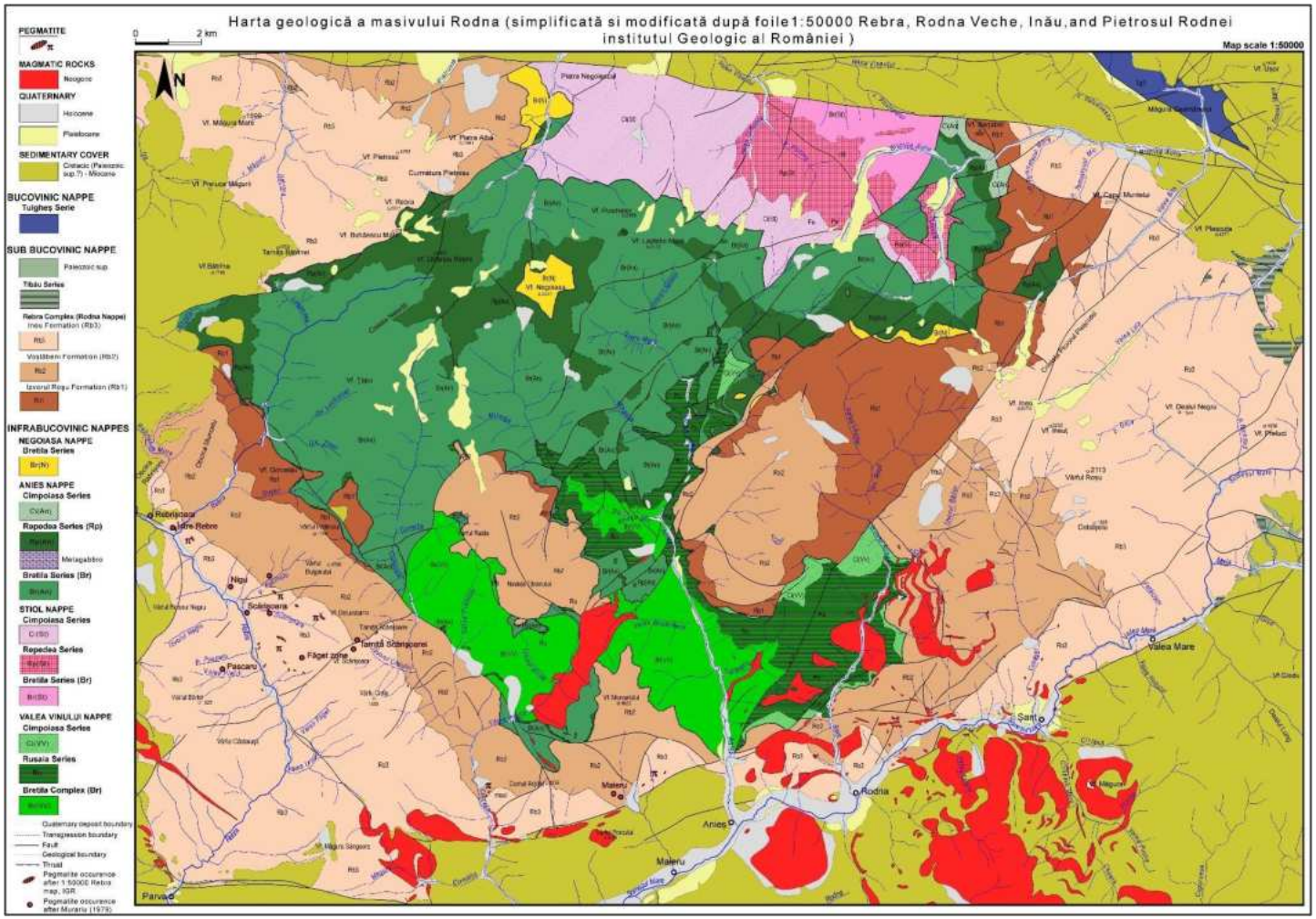
Výzkum pegmatitů masivu Rodna a metamorfovaných hostitelských hornin, který provedli Pomărleanu & Murariu (1973), ukazuje na rozdíly v chemismu těchto hornin. Murariu (1979) popisuje pegmatity z oblasti údolí Rebra (tab. 4.3, obr. 4.3) jako čočky shodné s břidličnatostí hostitelských hornin, zonální, patřící ke slídovým pegmatitům složeným z křemene, draselného živce, plagioklasu, muskovitu, biotitu, turmalínu, granátu a apatitu. Na základě předložených geochemických charakteristik a geotermometrických údajů autor uvažuje o vzniku pegmatitů během několika po sobě jdoucích etap, jako výsledku metasomatických přeměn některých magmatických těles tvořených křemenem, živcem a někdy i biotitem.




Obr. 4.2. Zjednodušená geologická mapa masivu Preluca.

Tabulka 4.2. Pegmatitové výskyty v masivu Preluca.

| Výskyt | Strukturní jednotka | Morfologie | Velikost | Struktura/ textura | Mineralogie | Genetický typ | Ekonomický význam |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Úsek Răzoare:** Osoi, zóna údolí Frumos, zóna Runcșoare, zóna Ciungi, Piciorul Țiganului, zóna Cufoii - Neagra v. (Padurea Florichii), Lapus Podirei, Podirei-Groape, Groape, zóna Paltinului Hill, Obcina, Podu Vimii, Afinișului v. | série Măgureni a Răzoare (Kalmar 1973) | konkordantní a diskordantní čočky a žíly v rulách | 10-50 m/ 10-15 m; délka do 350-500 m | aplitická, pegmatitická; masivní, zčásti zonální | Qtz, Or, Mcc, Ab-oligoklas, Ms, Bt, Tur (elbait), Grt, Ap (do 3 cm), Zrn, Mnz, Ttn | anatektická tavenina (např. Sîrbu et al. 2010); magmatický, neorogenní (Kalmar, 1972) | keramika, slídy |
| **Úsek Copalnic-Mănăștur:** zóna Codru Butesii-Costura, Neamțului v., Scroafei v., Moșinoaie, La Arsene, Valea Oii, dl. Copalnicului, Domoșei, Cavnic r. (Buboaia), zóna Cavnic r. (W), zóna V. Pleșii, La Colac, Vrch Ursoi | série Valea Cavnicului a Preluca Nouă (Kalmar 1973) | konkordantní a diskordantní čočky a žíly v rulách | 10-15m/ 500 m | pegmatitická; zonální | jádro: Qtz, K-Fsp, Ab; střed: velké krystaly; vnější zóna: Bt, Grt, Tur, An; - Ms, Ap, Qtz | anatektická tavenina (např. Sîrbu et al. 2010); magmatický, neorogenní (Kalmar, 1972) | keramika, slídy |



Obr. 4.3. Zjednodušená geologická mapa masivu Rodna.

Podle mapových listů 1 : 50 000 (Rebra, Rodna Veche, Inău a Pietrosul Rodnei) tvoří krystalinické podloží masivu Rebra (obr. 4.3):

- Sedimentární pokryv křídového (svrchně paleozoického?) až miocénního stáří
- Subbukovinský (rodenský) příkrov

  - svrchně paleozoický pokryv - arkózy, brekcie s krystalickými prvky

  - série Ţibău - šedé a bílé dolomity, bílé a šedé kvarcity, mramory, sericit-chloritové břidlice s ojedinělými vložkami kvarcitů, sericiticko-chloritických a sericiticko-grafitických fylitů (v sv. části masivu)

  - krystalinický komplex Rebra sestávající z formací Ineu (Rb3),Voşlabeni (Rb2) a Izvorul Roşu (Rb1)
- Vnitrobukovinské příkrovy zahrnující příkrovy Negoiasa, Anieş, Stiol a Valea Vinului
- Série Bretila
- Spodní vnitřní bukovinská jednotka - sericitové ± grafitické břidlice
- Neogénní vyvřelé horniny

Údaje z mapových listů (měřítko 1 : 50 000) Rebra, Rodna Veche, Pietrosul Rodnei, Inau a údaje Murariu (1978) ukazují, že výskyty pegmatitů se objevují v jednotkách Ineu a Voşlăbeni (?) v jihozápadní části masivu Rodna, soustředěné na hranici mezi nimi v údolí Rebra a údolí Caselor (Maieru; tab. 4.3, obr. 4.3).

Dosud nejistá je korelace příkrovu Rodna s Bukovinským příkrovem ve středovýchodní oblasti (krystalinikum-mesozoikum) Východních Karpat, protože jsou zde velké rozdíly jak v podloží, tak i v pokryvu. Podloží připisované komplexu Rebra ze sukcese centrálně-východokarpatských jednotek je konsolidováno ve variské orogenezi a má nízkotlaký metamorfní otisk svrchního karbonu až permu, zatímco komplex Rebra je postižen metamorfózou středního stupně ze střední křídy (Reiser et al., 2019).

## 4.5 Doména Getic

Jednotky basementu domény Getic se vyskytují v následujícím pořadí:

- Jednotka Semenic (SU)

  Představuje svrchní část metamorfní série Lotru (LMS; Săbău 1999). Semenská jednotka má homogenní petrografické složení, je celá tvořena formací Negovanu Mare (NMF). Litologicky je tato formace zastoupena především svory složenými z muskovitu, biotitu, křemene, granátu, kyanitu a staurolitu. Porfyroblasty granátu, kyanitu a staurolitu mohou být velmi hojné a dosahovat až centimetrových rozměrů.

  Geometrická tloušťka SU byla odhadnuta odlišně. Savu (1970) odhadl mocnost na cca 2000 m na základě metamorfní foliace (považované za stratifikaci) s konstantními poklesy směrem k SZ od semenického masivu a na základě vyřazení „metamorfovaných zón“ identifikovaných v NMF. Bercia (1975) odhadl maximální mocnost na 1500 m na základě stejných kritérií, k nimž přidal horizontální stavbu

litostratigrafické sukcese, zatímco Săbău (1999) tvrdí, že odhad SU na větší mocnost než 100-200 m nemůže obstát, NMF se vyskytuje jako ostrůvky s oblými hranicemi, mezi nimiž jsou erozní okna obnažující hlubší horniny.

Oblasti výchozů NMF se obvykle objevují na horských hřebenech, zpravidla bez návaznosti. Pod svory vystupují směrem k nižším členům přechodné litologie. Spodní hranice SU je velmi charakteristická, zvýraznitelná litologickými a strukturními kontrasty danými stupněm metamorfózy a rozložením indexových minerálů. Podložní jednotku Voineasa (VU) budují ortoruly, různé typy amfibolitů a pararuly. Ze strukturního hlediska dochází na úrovni spodní hranice SU k přechodu od planárního tektonického stylu k rotačnímu (Săbău, 1999). NMF se vyznačuje velmi výraznou břidličnatostí danou metamorfní foliací. Spodní část NMF je sevřena komplexem vrás s přibližně horizontálním obalem, který se vyvíjí v různých měřítcích.

Na hranici mezi SU a VU se nacházejí tabulkovitá nebo čočkovitá litologická tělesa různého rozsahu, která nepatří do VU a téměř vždy vyznačují rovinu mezi oběma jednotkami. Nejcharakterističtějšími horninami jsou zde kvarcity, eklogity, amfibolity, ultrabazické horniny, roje pegmatitů, horniny s oxidy železa, turmalinické horniny, okaté ruly, stratiformní granitoidy, ale zejména Mn-silikátové horniny (horizont Delineşti). Neobyčejná je petrografická složitost této hranice, a to jak se strukturami, tektonického mísení, metamorfní mobilizace a metasomatické substituce v různých měřítcích (Săbău, 1999). Litologie, které vymezují tuto hranici, patří do tří odlišných skupin, které představují buď horniny rozptýlené na úrovni nadloží (eklogity, amfibolity, ultrabazity), nebo litologie vzniklé během násunu metamorfními procesy (pegmatity, kvarcity, manganolity), nebo anatecké stratoidní granitoidy nacházející se na minimální odporové ploše příkrovu (Săbău, 1999).

- Jednotka Voineasa (VU)

  Horniny, které tvoří VU, se nacházejí mezi násunovou rovinou semenické jednotky (SU) a další diskontinuitou z metamorfní série Lotru (Săbău, 1999), vyznačující se vývojem pegmatitových těles a mramorových čoček spojených s vápenatosilikátovými horninami a tělesy skarnů a karbonátů.

  - Formace Saracinu (SF). Svrchní část VU mapovali Gheuca et al. (1993) v pohoří Lotru. Svrchní člen souvrství je zastoupen SF (Gheuca et al., 1993) a je tvořen růžovými rulami s převahou lamin se živcem a amfiboly nad slídovými, které Arion et al. (1988) popsal jako typ Frumoasa. Pod nimi se nacházejí amfibolity a amfibolické ruly Tărtărău, pro které jsou charakteristické namodralé amfiboly, biotit s velmi silnou absorpcí, epidot, alanit a pyrochlor, dále pak tenký pruh převážně muskovitických svorů s granátem a sillimanitem (typ Balu).

  - Komplex Steaja (SC) leží pod SF a je tvořen plagioklasovými rulami s biotitem, sillimanitem, někdy granátem (typ Goaţa), s kvantitativně podřízenými amfibolitovými vložkami. Pod rulami Goaţa se nacházejí kvarcity typu Piatra Albă, pod nimiž se vyskytují ruly typu Pravăţ, které tvoří nejcharakterističtější litologii SC. Pravăţské ruly jsou převážně živcové, s oligoklasem a biotitem; často obsahují muskovitové a sillimanitové nodule, někdy granátické. Na rozdíl od rul Goaţa jsou páskované a odlučné v centimetr mocných vrstvách. Pod pravăţskými rulami se nacházejí biotitické

svory typu Cataracte s výraznější břidličnatou texturou než u výše položených hornin, s obsahem poměrně hojných granátových porfyroblastů, nahloučenin sillimanitu, často staurolitu. Zastoupeny jsou dva charakteristické typy horninových vložek: amfibolity a amfibolické ruly s pegmatoidními segregacemi amfibolů a klinopyroxenu, a nodulární ruly typu Vidra (Ghika-Budeşti, 1932).

Horniny SC obsahují četná pegmatitová tělesa, z nichž největší se nachází v Cataracte. Pegmatity jsou obvykle plagioklasové, ale v případě velkých těles obsahují také K-živec. V těchto pegmatitech jsou častá obohacení minerály obsahujícími těkavé složky, jako je turmalín a beryl. Velké krystaly berylu jsou běžné na levém svahu řeky Lotru.

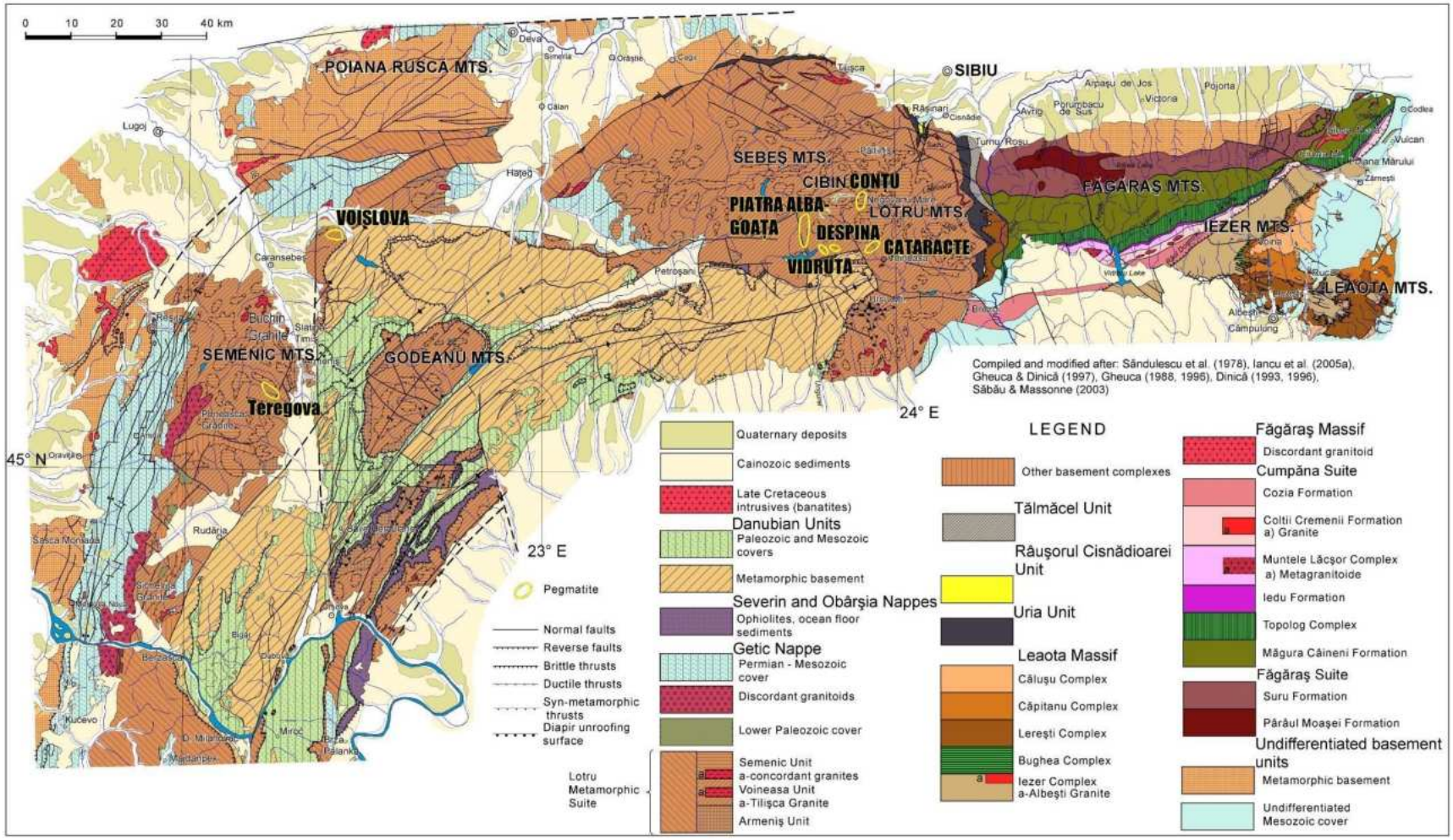
- Komplex Păltiniş (PC). Pod SC se objevují masivní ortoruly, které se střídají s biotitickými rulami (Gheuca et al. 1993, cf. Săbău, 1993). Ve srovnání s rulami Frumoasa neobsahují amfibol a vykazují orientovanější textury, dané výraznějším páskováním. Charakteristická je asociace mikroklinových rul s muskovitickými rulami, mikroblastické muskovitickéruly a přítomnost četných pegmatoidních a K-živcových segregací.

- Formace Poiana Sibiului (PSF) je nejnižší člen VU (Dinica, 1993) v okolí Poiana Sibiului. Je odkryta na východním okraji semenického masivu, podél východního okraje koridoru Timişului na jižní Poiana Ruscă, jakož i v západní a severní části zóny Godeanu; východním směrem již spodní hranice VÚ není nikde odkryta. Pod litologií PSF, která tvoří bázi VU, se nachází asociace mramorů a pegmatitů s častými reakčními skarny, pod nimiž leží nejhlubší člen LMS, jednotka Armeniş. Normální mocnost VU je na svazích Timiş několik desítek metrů a vykazuje pozoruhodný nárůst jak směrem na západ, tak zejména na východ. Absence spodní hranice v centrálních Jižních Karpatech však znemožňuje jakýkoliv odhad.

- Jednotka Armeniş (AU)

  Nejhlubší horizonty LMS jsou odkryty v masivech Semenic a Godeanu. Svrchní část této části souvrství, která tvoří AU, je tvořena hojnými čočkami mramorů spojených s poměrně velkými pegmatitovými tělesy (Săbău, 1994). Pod touto úrovní se nacházejí biotitické ruly s plagioklasem a sillimanitem.

  Výskyty pegmatitů v LMS vyznačují tektonický styk mezi SU a VU. Pegmatity s obsahem vzácných kovů jsou zřejmě spojeny s diferenciálními exhumačními strukturami, přičemž nejvýznamnější a nejcharakterističtější jsou pegmatity se spodumenem a berylem z lokalit Voislova, Conţu, Teregova, Haneş, Curmătura Vidruţei, Despina, Piatra Albă a pegmatity Cataracte (tab. 4.4, obr. 4.4).




Obr. 4.4. Zjednodušená geologická mapa Jižních Karpat se situací hlavních pegmatitových těles.

Tabulka 4.3. Pegmatitové výskyty v Jižních Karpatech. LMS = metamorfní série Lotru (Săbău & Massonne, 1999).

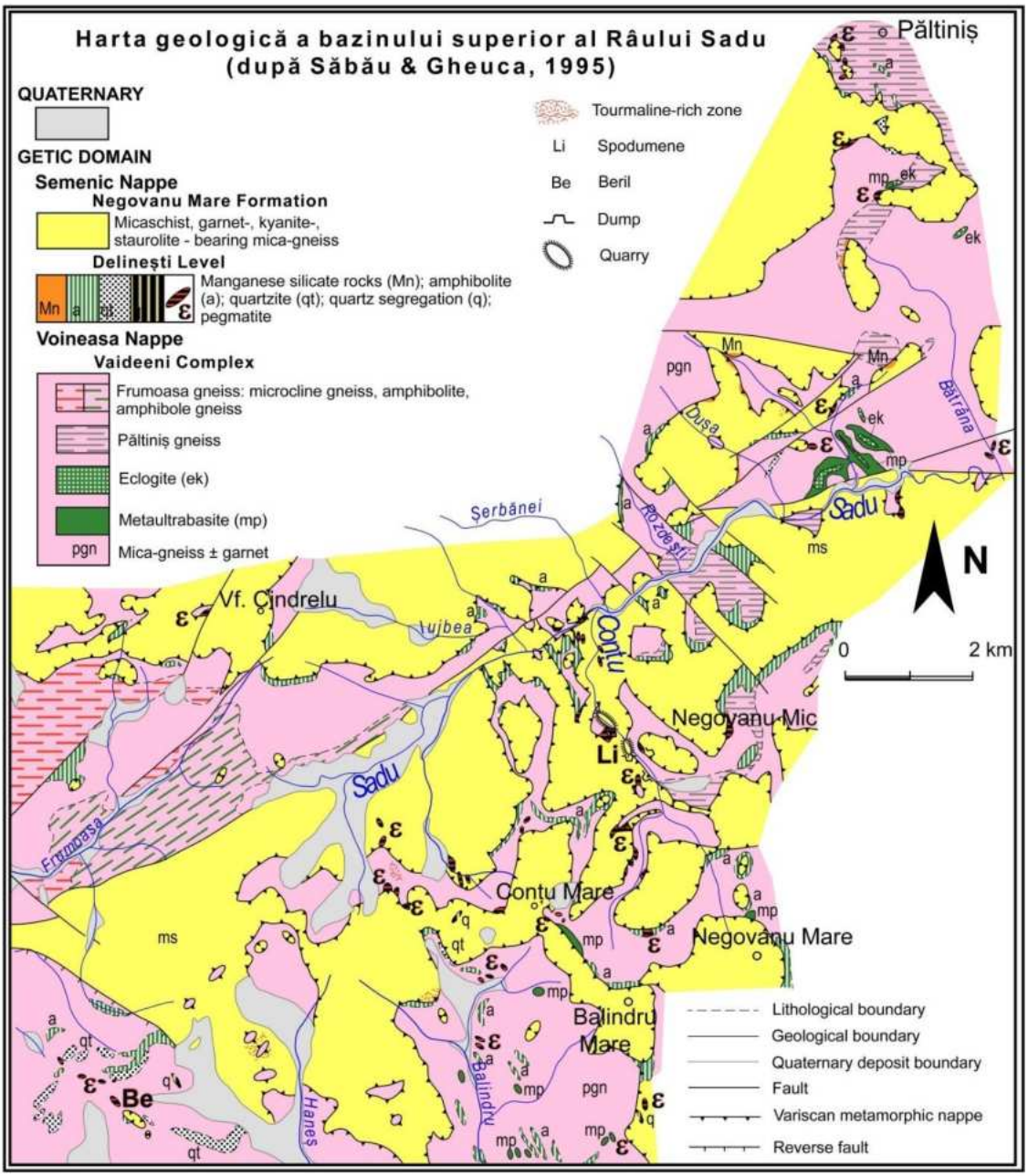
| Výskyt | Strukturní jednotka | Morfologie | Velikost | Struktura/textura | Mineralogie | Genetický typ | Ekonomický význam |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Úsek Semenic-Muntele Mic** | | | | | | | |
| Voislova | doména Getic, LMS, Voineasa prealpínská jednotka Unit (VU) | konkordantní nebo diskordantní žíly, čočkovitá hnízda, pně | | | Ab, Qtz, Ms, Ap, hnízda fosfátů Li, Fe, Mn a Ca, Ap | metamorfní | pegmatity s Li, Nb-Ta, Be |
| zóna Tîlva | doména Getic, LMS, VU | žíly, konkordantní čočkovitá tělesa | | | Ms, Brl, Fsp, Tur | metamorfní | pegmatity se slídou, berylem, živcem; z velké části vydobyto |
| zóna Măgura | | konkordantní nebo diskordantní žíly, čočkovitá tělesa | až 180 m / 20 m (těleso Cîrniș) | zonální nebo azonální | | metamorfní | pegmatity se slídou a K-živcem (Runcurelu, Scoarța v.) |
| zóna Slatina Timiș | | | | | | metamorfní | živcové a křemenné pegmatity |
| Armeniș | | SZ-JV konkordantní tělesa | 550 m / 40 m | | | metamorfní | živcové pegmatity, podána žádost o průzkumnou licenci |
| Ratconia Criva (Teregova) | | konkordantní čočkovitá tělesa, žíly | 220 m / 10 m | velkozrnná (pegmatitická) | K-živec, Ab-oligoklas, Qtz, Ms, Grt (Alm-Spess), Ap, Tur, Brl, Clb-Ttl, Hb, Py, Pyh, Mol; vzácný Spd, Mbs, Cst, Zr, Rt, Ttn, Ilm | metamorfní; magmatický (Dittler & Kirnbauer, 1931) | pegmatity s Be-Nb – Ta+Li; průzkumná licence na keramické pegmatity |
| **Úsek Sebeș-Cibin-Lotru** | | | | | | | |
| Pietroșita V. | doména Getic, LMS, VU | | | | Ab (46-47 %), mikroklin-perthit (18.4-20.5 %), Qtz (27 %), Hem (0.8 %), Py (0.1 %) | metamorfní segregace | keramické pegmatity (>70% živce) |
| Voinești̦a V. | | | | | Plg (55 %), mikroklin-perthit (20 %), Qtz (19%), Hem (1 %) | metamorfní segregace | keramické pegmatity (>70% živce) |

| Výskyt | Strukturní jednotka | Morfologie | Velikost | Struktura/textura | Mineralogie | Genetický typ | Ekonomický význam |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Țancu | | | | | Mcc (80 %), Plg (5-35 %), Qtz (10- 22 %), Ms (1-40 %), Bt, akcesorie: Ttn, Mag, Ap, Zr, Brl, Mnz, Grt, Tur, Ep, Chl | metamorfní segregace | |
| Haneș, Steaja | | | | | | metamorfní segregace | berylové pegmatity |
| Curmătura Vidruței (Latoriței M.) | | | | velkozrnná | Qtz, oligoklas, slída, K-Fsp, Brl (až 20 cm), Grt | metamorfní segregace | berylové pegmatity |
| Despina (Latoriței M., Mănăileasa V. ) | | | | | Qtz (17-35 %), K-Fsp (40-35 %), Plg (12-15 %), Ms (5-10 %), Bt (1 %), Grt (1-2 %), limonit (1 %), Tur (1-2 %), Brl (0.5 %). | metamorfní segregace | pegmatity se živem, slídou, berylem (2-3 %) |
| Băluțu (Piatra Albă- Goața, Lotrului M.) | doména Getic, LMS, VU Goața Fm. | tělesa různé mofrologie | 200-300 m / 5-15 m | velkozrnná (30-40 cm) krystaly berylu | K-živec (15-35 %), Qtz (10-30 %), Ms (1-5 cm; 5-25 %), Brl (30-40 cm; 2-3 %), kolumbit | metamorfní segregace | berylové pegmatity s Nb-Ta; průzkumná licence na keramické pegmatity |
| Balindru-Sadu (Conțu-Negovanu, Lotrului M.) | doména Getic, LMS, mezi SU a prealpinskou VU | deskovité žíly, nepravidelné čočky, konkordantní tělesa | 100-450 m / 1-5 m | zonální | Fsp, Ms, Qtz, Ab (cleavelandit) – oligoklas (30 %), Spd (10-50 %, 0.5-70 cm), Qtz (25 %), Ms (15 %), Bt (2 %), Mcc – perthit (5 %), Grt (Alm-Spess) (2 %, 1-3 cm), trifylín-ferisicklerit-heterosit, amblygonit-montebrasit, Ap, wolfeit, maricit, Mnz, uraninit, kolumbit-tantalit, Ttn, Tou (skoryl), kasiterit, grafit, Mag, REE-Smk, Fsm, Brl (0.5 – 6 cm) | metamorfní segregace | živcové a slídové pegmatity; pegmatity s Li a REE (6.76 % $Li_2O$; spodumenový koncentrát s 4.5 $Li_2O$, 0.7 % $Fe_2O_3$); průzkumná licence na keramické pegmatity |

| Výskyt | Strukturní jednotka | Morfologie | Velikost | Struktura/textura | Mineralogie | Genetický typ | Ekonomický význam |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cataracte | doména Getic, LMS, prealpinská VU | konkordantní těleso | 30-300 m / 4- 30 m | zčásti zonální: vnější grafická (Fsp, Qtz, Bt, Ms); přechodná granulární Plg, Qtz, Ms); jádro: masivní (Qtz, velká slída) | K-Fsp, Na-Fsp (60-70 % Fsp), Qtz (25-30 %), Ms, Bt (5-10 % slídy), Grt, Tou, Ap, Brl, Ccp, Pyh, Cal; radioaktivní microinkluze a REE v biotitu: Zr, Mnz, Xtm, Ttn, Aln aj. | magmatický, S-granit (Ducea et al., *v tisku*) | keramický pegmatit; slídový pegmatit; těženo |

## 4.6 Pegmatity oblasti Conţu

Spodumenové pegmatity v oblasti Conţu-Negovanu (obr. 4.5) byly objeveny v roce 1963 a vzbudily velký zájem díky své zvláštní a komplexní mineralizaci se vzácnými kovy. Spodumen nalezený v této oblasti představuje největší výskyt tohoto druhu v Rumunsku a je doprovázen dalšími Li-minerály (fosfáty trifylín-lithiofylitové řady) a minerály bohatými na Li (biotit, granát, muskovit, živec). Obohacení Rb, Cs, Ba, Sr popsal Androne (2005).




Obr. 4.5 Geologická mapa horního toku řeky Sadu (podle Săbău & Gheuca, 1995, in Săbău 1995).

Minerální druhy popsané v pegmatitech Conţu (Săbău, 2010), Călin et al. (2009) jsou uvedeny v tab. 4.4. Geochemii pegmatitů z Conţu zkoumal Androne (2005), který došel k těmto závěrům:

- obsah $Li_2O$ je ve srovnání s ostatními výskyty poměrně nízký (5,14-5,53 %);
- obsah stopových prvků je poměrně nízký (70-251 ppm Rb; 30-73 ppm Sr; 40-47 ppm Cs; 21-40 ppm Ba), což pravděpodobně odráží přítomnost živcových a muskovitových inkluzí ve spodumenu;
- - obsah REE je velmi nízký a rozložení REE/chondrit je velmi nepravidelné, což naznačuje přítomnost minerálních inkluzí bohatých na REE, jako jsou fosfáty Li, Mn, Fe.

Pegmatitová oblast v pohořích Lotru a Mănăileasa představuje několik výskytů s typickými rysy, které naznačují prostorovou blízkost a postupnou frakcionací směrem k periferii.

Pegmatit Cataracte je rozsáhlé těleso otevřené údolím Lotru na vrstevnici asi 200 m (obr. 4.6). Hlavní těleso je tvořeno křemen-živcovou varietou s protoklastickou strukturou se subhorizontální kliváží. Hrubě krystalické pegmatoidní bloky se vyskytují nerovnoměrně a obsahují biotitové a muskovitové agregáty se vtroušenými minerály na okrajích (obr. 4.8-4.11). Vyskytují se také zonální akumulace biotitu s muskovitem, někdy ve velkých deskách (obr. 4.12). Vzhled převážně protoklastické textury a křemen-živcové složení bez mafických minerálů vedly některé autory k označení „pegmatitový leukogranit“ (Ducea et al., 2021). Na základě přítomnosti akcesorického zirkonu bylo toto pegmatitové těleso datováno do permu. Obsah křemene a živce se slídou a velmi vzácná přítomnost turmalínu a granátu naznačují mírnou diferenciaci tohoto tělesa s centrální polohou v roji pegmatitů v údolí říčky Lotru.

Obr. 4.6 Pegmatitové útesy na svazích údolí Lotru.

Obr. 4.7 Čočkovité těleso hrubě krystalického slídnatého pegmatitu s otevřenou dobývkou.

Obr. 4.8 Pegmatit s protáhlými biotitovými destičkami a šupinami muskovitu.

Obr.4.9 Biotitové lišty v K-živci a křemeni.

Obr. 4.10 Megakrysty K-živce.

Obr. 4.11 Hypidiomorfní krystal muskovitu s hranolovitými stěnami omezený sousedními zrny.

Obr. 4.12 Orientovaný srůst biotitu s muskovitem.

Výchoz Curmătura Vidruţei (Ţancu I) je pozoruhodný přítomností vystupujícího křemenného jádra (obr. 4.13) lemovaného zónou s centimetrovými až decimetrovými krystaly K-živce, křemene a berylu, často ve skeletovitých, vzácněji i grafických agregátech (obr. 4.13-4.15). Hojný je i muskovit, turmalín a granát (obr. 4.17), místy v kostrovitém vývoji (obr. 4.18).

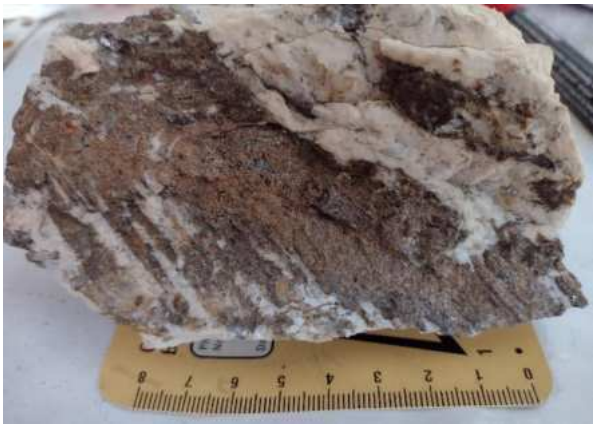
Obr. 4.13 Výchoz křemenného jádra pegmatitu Curmătura Vidruţei.

Obr. 4.14 Krystal berylu graficky srostlý s křemenem a K-živcem, se zirkonem na okrajích zrn.

Obr. 4.15 Vnitřní koncentrická struktura krystalu berylu srostlého s K-živcem a křemenem.

Obr. 4.16 Paralelní srůst berylových krystalů.

Obr. 4.17 Krystaly spessartinu v křemeni.



Obr. 4.18 Kostrovitý agregát granátu.

Pegmatity z Piatra Alba mají středně až jemně zrnitou strukturu s hojným albitem, muskovitem, někdy zonálním turmalínem, křemenem a podřízeným granátem. Turmalín obvykle tvoří agregáty uspořádané rovnoběžně s difúzní hranicí pegmatitu. Beryl se vyskytuje v krystalech různých velikostí, srůstá s albitem, muskovitem a/nebo křemenem.

Obr. 4.19 Jemnozrnný turmalín s albitem a muskovitem při okraji pegmatitu.

Obr. 4.20 Krystaly turmalínu s muskovitem, albitem a křemenem.

Obr. 4.21 Krystal berylu ve středně zrnitém pegmatitu s křemenem a živcem s náznaky lupenité stavby

Obr. 4.22 Krystal berylu s vicinálními plochami prizmatu, zčásti korodovaný a rozpadavý.

Pegmatit Conţu je pozoruhodný pestrým mineralogickým obsahem a hojnou přítomností Li-minerálů, mezi nimiž dominuje spodumen spolu s lithiofylitem-trifylínem, často přeměněným v heterosit-purpurit. Spodumen se může vyskytovat ve formě protáhlých decimetrových krystalů (obr. 4.23). Nejhojnějšími horninovými složkami jsou křemen, nazelenalý muskovit v malých paketech a spodumen. Beryl (obr. 4.25) a apatit jsou přítomny méně často. Řada minerálů se vyskytuje jako akcesorie; jejich vyčerpávající seznam uvádí Călin (2012).

Obr. 4.23 Dlouze lištovitý spodumen.

Obr. 4.24 Idiomorfní krystal spodumenu.

.

Obr. 4.25 Krystal berylu s křemenem a muskovitem.

Obr. 4.26 Krystaly trifylínu lemované zirkonem, s berylem, spodumenem a křemenem.

Obr. 4.27 Heterosit-purpurit v křemeni.

Obr. 4.28 Trifylín přeměněný na heterosit-purpurit v křemen slídnatém pegmatitu.

Zonální rozložení těchto pegmatitů je pravděpodobně spojeno s plošnou strukturou s gradační frakcionací. Území je předmětem strukturního výzkumu a ložiskového hodnocení za účasti zahraničních partnerů.

Na severním okraji pohoří Sebeş se objevuje mineralizovaná zóna se strukturně omezeným výskytem a zvláštními charakteristikami, kterou představují migmatizované horniny s akumulací inkompatibilních prvků. Jedná se o asociaci Zr-Nb(Ta)-Y-Sn-REE-U-Th, převážně oxidickou s podřízenou přítomností fosfátů a silikátů, což svědčí o vysokoteplotních metasomatických efektech s asociací diadochních elementů Nb–Ta, U–Th. Geneze je v současnosti sporná a mineralogické složení nedostatečně prozkoumané. Hostitelské horninové prostředí se vyskytuje ve velké ploše a dobře známa je i jeho pozice v litologické sukcesi centrálních Jižních Karpat. Nabízí tak zajímavé vědecké i ekonomické perspektivy.

## 4.7 Závěry

Výskyty pegmatitů v Rumunsku se bez výjimky nacházejí ve středně metamorfovaném krystaliniku. Patří k jednotkám se složitým vývojem. Stáří konsolidace je odlišné a v určitém kontrastu k podobným metamorfním asociacím, což ukazuje, že vznik pegmatitů je dán spíše příznivými fyzikálními podmínkami než stářím a povahou metamorfních událostí. Existující geochronologická data dokumentují, aniž by poskytovala vyčerpávající obraz, vznik pegmatitů počínaje permem v metamorfní sérii Lotru (Jižní Karpaty, getický příkrov), přes významnou mesozoickou remobilizaci v basementu Apusenského pohoří postihující starší metamorfní jednotky (paleozoikum, variscidy), jakož i křídová metamorfóza v masivech Preluca a Rodna.

Vymezení karpatské metamorfní provincie se vzhledem ke kontextovým rozdílům nezdá být opodstatněné, ale výskyt a strukturní poloha pegmatitových rojů v každé z jednotek s ucelenými charakteristikami poskytuje údaje o jejich vývoji a umožňuje odhadnout jejich potenciál.

Podobnosti mezi hostitelskými horninami, způsobem výskytu a charakteristikami pegmatitů v těchto jednotkách vedou k upřednostnění klasifikace navržené Černým & Ercitem (1995). Podle ní patří všechny inventarizované výskyty pegmatitů do třídy muskovitových pegmatitů (MS), vzácně přecházejících do třídy pegmatitů s muskovitem a vzácnými prvky (MSREL), podtřídy MSREL-LI, pegmatitů s berylem a obsahem minerálů lithia; jediný výskyt (Conţu) vykazuje znaky podtřídy albit-spodumenu patřící do třídy vzácných prvků (REL). Při analýze souvislostí těchto kategorií citovaní autoři uvádějí, že chybí spojitost mezi pegmatity s muskovitem a granitovými (mateřskými) intruzemi, pegmatity se vzácnými prvky jsou vmístěny vně (zřídka okrajově nebo uvnitř). Absence spojitosti s granitoidy vyplývá také z terénních pozorování. Mineralogické složení pegmatitových těles je obecně jednoduché: kromě křemene, živce a častých slíd jsou v proměnlivém zastoupení běžné turmalín (skoryl), granát a apatit.

V rámci hostitelských hornin existuje spojitost s různými litologickými jednotkami a také s extenzními zónami ukazujícími na exhumační procesy v Jižních Karpatech a severních Apusenách. V pegmatitovém poli Lotru–Mănăileasa bylo rovněž zjištěno podobné prostorové rozložení pegmatitových typů jaké uvádí Černý (1991b), avšak bez vztahů s granitoidními

horninami. Pegmatity v masivu Rodna jsou zřejmě rozloženy na kontaktu dvou formací, zatímco časté výskyty pegmatitů v masivu Preluca jsou relativně homogenně rozloženy ve třech ze čtyř útvarů krystalinika.

V getickém příkrovu Jižních Karpat se na okrajích pánví Caransebeş a Mehadia v pohoří Semenic a Mic-Ţarcu nacházejí roje pegmatitů, které nejsou dostatečně strukturně charakterizovány. V nich byly zjištěny přechody pegmatitům s REE a berylem (Voislova, Teregova) a lokálními výskyty niobotantalátů (Teregova). Jejich vztahy k dominantním muskovitickým pegmatitům velmi rozšířeným na východní straně pohoří Semenic, stejně jako k ložním intruzím variských granitoidů Buchina a Slatina Timiş příležitostně prostoupených pegmatitovými žilami, nejsou dostatečně objasněny a mohly by poskytnout jak teoretické informace, tak i praktické využití.

Pegmatitové pole v údolí řeky Lotru, rozkládající se v pohořích Lotrului a Mănăileasa (oblast Mănăileasa-Cataracte-Piatra Albă-Conţu), svým pravidelným plošným rozložením, rozmanitostí a počtem výskytů, jakož i koncentrací vzácných kovů, opravňuje k důkladnějšímu výzkumu a shromažďování podrobných údajů pro regionální genetické a prediktivní modelování. To je důvod, proč byla tato oblast vybrána v rámci spolupráce s mezinárodními partnery.

Na severním okraji pohoří Sebeş se objevuje mineralizovaná zóna se strukturně řízeným uložením a zvláštními charakteristikami, kterou představují migmatické horniny s koncentrací inkompatibilních prvků. Asociace Zr-Nb(Ta)-Y-Sn-REE-U-Th, převážně oxidická s podřízenou přítomností fosfátů a silikátů, svědčí o vysokoteplotních metasomatických vlivech. Geneze je v současnosti sporná a mineralogický obsah nedostatečně prozkoumán. Hostující horninová formace představuje široké rozšíření a definovanou pozici v litologické sukcesi v centrálních Jižních Karpatech a nabízí zajímavé vědecké i praktické perspektivy.

Hospodářský potenciál pegmatitů a příbuzných hornin tvoří podle jejich povahy a mineralogického obsahu především průmyslové nerosty. Po výrazném poklesu tržní poptávky po slídě jsou hlavním předmětem zájmu pegmatity s obsahem keramického živce. Využitelné akumulace, jež jsou předmětem těžby již několik desetiletí, jsou v ortorulách formace Corabia v pohoří Apuseni. Ložiska Crişeni-Muntele Rece a Valea Bedeciului jsou v současné době vyčerpána a na hranici rentability, ale přítomnost dalších pegmatitových těles stále skýtá perspektivu do budoucna. Příkladem může být ložisko Vărful a také četné a rozsáhlé výskyty v pánvi Valea Ierii.

## 4.8 References

Andersen O. (1931) Discussions of Certain Phases of the Genesis of Pegmatites, *Norsk Geol. Tidsskr. 12, 1-56*

Androne D. A.-M. (2005) The spodumene from Conţu-Negovanu pegmatites (Lotru-Cibin Mts.). Analele Ştiinţifice ale Universităţii „Al. I. Cuza" Iaşi Geologie, tomul LI

Arion M., Dragu G., Dragu M. D. (1988) Report, Prospec¡iuni S.A. Arch.

Balintoni I. (1996) Geotectonica terenurilor metamorfice din România. *Carpatica, 1996 - 178 pp*.

Bercia I. (1975) Metamorfitele din partea centrală și de sud a masivului Godeanu: Stud. tehn. econ. Inst. Geol. Geofiz., I 12, 159 pp.

Brana V. (1967) Zăcămintele nemetalifere ale Romaniei, *Editura Technică, București, 472 pp.*

Brongniart A. (1813) Essai d'une classification minéralogique des roches mélangées, *Journal des Mines 34, N°. 199, 5-48*

Buddington A. F. (1959) Granite Emplacement with Special Reference to North America, *Bulletin of The Geological Society of America 70, 671-747*

Călin N. (2012) Mineralogia pegmatitelor litifere din cadrul bazinului Conţu, Munţii Cindrel, România, *Teză de doctorat, 206 pp. http://www.unibuc.ro/facultati/geologie-geofizica/scoa-doct/rezumateTEZE/docs/2013/feb/05_09_21_52*

Călin N., Dumitraş D., Costea C., Marincea Ş. (2019) Li-Bearing and associated minerals in pegmatites from Conţu, Cindrel Mountains. *Romanian Journal of Mineralogy, 84, 7-9, abstract volume*.

Černý P. (1991a) Rare-element Granitic Pegmatites. Part I: Anatomy and Internal Evolution of Pegmatite Deposits, *Geoscience Canada 18/2, 49-67*

Černý P. (1991b) Rare-element Granitic Pegmatites. Part II: Regional to Global Environments and Petrogenesis, *Geoscience Canada 18/2, 68-81*

Černý P., Ercit T. S. (1995) The classification of granitic pegmatites revisited, *The Canadian Mineralogist 43/6, 2005-2026*

Černý P., London D., Novák M. (2012) Granitic Pegmatites as Reflections of Their Sources *Elements 8, 289–294*

Cohen J.A.M. (1950) The pegmatite problem, *ProQuest 10107206, ISBN 978-1-339-70608-5, 130 pp.*

Dessila-Codarcea M. (1967) Noi date asupra stratigrafiei terenurilor cristalofiliene din România. *Stud. Cerc. Geol. Geofiz. Geogr., seria Geol., 12, 1, București.*

Dinică I. (1993) Report, GIR Arch.

Dill, H.G. (2016) The CMS classification scheme (Chemical composition–Mineral assemblage– Structural geology)–linking geology to mineralogy of pegmatitic and

aplitic rocks. *Neues Jahrbuch für Mineralogie–Abhandlungen/Journal of Mineralogy and Geochemistry 193, 231-263*

Dimitrescu R. (1963) Asupra şisturilor cristaline din Nord-Vestul Transilvaniei. *Societatea de Ştiinte Naturale şi Geografie din Republica Socialistă România, Comunicări de Geologie, II, 147–154*.

Ducea, M.N., Tene, I., Balica, C., Balintoni, I., Hann, H.P. (in press). On the Late Permian Age (258.3 ± 2.5 Ma) and Tectonic Significance of the Cataracte Pegmatitic Leucogranite (Vâlcea County, Romania). Submitted to Revue Roumaine de Geologie, May 2021.

Gheuca et al. (1993) Report, GIR Archive.

Ghika-Budești Șt. (1932) Études géologiques et pétrographiques dans les Munții Lotrului (Carpates Méridionales, Roumanie): extr. An. Inst. Geol. Rom. XVI (1931), M. O. Imprimerie Nationale, 68 pp.

Ghika-Budești (1955) Structura Muntelui Curățelu în Masivul Rodnei. *D. S. Com. Geol. XXXIX, 151-274*

Ginsburg, A. I. (1984). The geological condition of the location and the formation of granitic pegmatites. *In Proceedings of the 27th International Geological Congress, Vol. 15, 245-260*

Hann H. P. (1987) Pegmatitele din Carpații Meridionali, *Editura Academiei RSR, 141 pp.*

Haüy R. J. (1822) Traité de minéralogie, Seconde édition, revue, corrigée, et considerablement augmentée par l'auteur, tome quatrième, *Paris, Bachelier - Libraire, Successeur de Mme VE Courcier, Quai des Augustins, 604 pp.*

Hîrtopanu P., Fairhurst R. J. 2014. Mineralogy of the Grădiștea de Munte rare element minerals occurrence, Sebeș Mts., South Carpathians. Part II: phosphates and silicates. *Romanian Journal of Mineral Deposits 87/1, 57-60*

Kalmár I. (1972) Stratigrafia terenurilor metamorfice și sedimentare din insulele cristaline Inău, Preluca și Țicău. Unpublished PhD. Thesis, Institute of OiI, Gas and Geology, Bucureşti, 409 pp.

Kalmár I., 1973. Pegmatitele din Munții Preluca. *D. S. Inst. Geol., LIX/1 (1972), 231-250.*

Kossmat F., von John C. (1905) Das Mangan-Eisenerzlager von Macskamezö in Ungarn. Z. prakt. Geologie XIII, 305-325

Kraütner H. (1968) Vederi noi asupra masivului cristalin al Rodnei. *Stud. Cerc. Geol. Geof. Geogr., seria Geol. 13, 2. Bucureşti.*

Kraütner H., Kraütner F. (1970) Formațiunile cristaline din versantul nordic al masivului Rodna. *D.S. Inst. Geol. LV/1, Bucureşti.*

Kraütner Th. (1938) Das kristalline Massiv von Rodna (Ostkarpaten). *An. Inst. Geol. Rom., XIX, Bucureşti, 161-292.*

London D. (2008) Pegmatites. *Canadian Mineralogist Special Publication 10, 368 pp.*

London D. (2014), A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites, *Lithos 184–187, 74-104*

Martin R. F., De Vito C. (2005) The patterns of enrichment in felsic pegmatites ultimately depend on tectonic setting, *The Canadian Mineralogist 43/6, 2027-2048.*

Mârza I. (1973) Pegmatitele cu molibdenit de la Vinţa (Munţii Apuseni). *Studii şi Cercetări de Geologie, Geologie, 18 - 2, 317-327.*

Mârza I. (1977) Prezenţa unor pegmatite cu ilmenit în regiunea Baia de Arieş (Munţii Apuseni). *Studia Universitatis Babeş – Bolyai, XXII – 1, 3-11.*

Mârza I. (1980) Considerations genetiques sur les pegmatites du cristallin de Gilău (Monts Apuseni) et la province pegmatitique carpatique, *Anuarul Institutului de Geologie şi Geofizică LVII, 423-431*

Mârza I. (1985) Geneza zăcămintelor de origine magmatică, vol. 2, Metalogenia ortomagmatică și pegmatitică, *Editura Dacia, Cluj, 331 pp.*

Mârza I., Sântimbreanu A., Moţiu A., Palfi S., Mîrza Lucreţia, Ciura C. (1973) Pegmatitele cu molibdenit de la Vinţa (Munţii Apuseni). *Studii şi Cercetări de Geologie, 18-2, 317-327.*

Murariu T. (1978) Studiul mineralogic, geochimic și structural al pegmatitelor din Munții Rodnei. *Inst. Geol. Geofiz, Studii tehnice şi economice, seria I Mineralogie-Petrografie, nr. 15, 276 p.*

Murariu, T. (1979) Studiul mineralogic, geochimic și structural al pegmatitelor din Munții Rodnei. Stud. Tehn. Econ. Ser. I, Min.-Petr. 15, București, 264 p.

Murariu T., Boboş I., Vaicau V. (1988) Aspecte geochimice ale pegmatitelor de la Geamăna (Munţii Apuseni). *Lucrările Seminarului Geologic "Grigore Cobălcescu", 217-225.*

Müller, A., Romer, R.L. and Pedersen, R.B. (2017) The Sveconorwegian pegmatite province – thousands of pegmatites without parental granites. *The Canadian Mineralogist, 55(2), 283-315.*

Müller, A., Simmons, W., Beurlen, H., Thomas, R., Ihlen, P.M., Wise, M., Roda-Robles, E., Neiva, A.M., Zagorsky, V. (2022) A proposed new mineralogical classification system for granitic pegmatites–Part I: History and the need for a new classification. *The Canadian Mineralogist, 60(2), 203-227.*

Pitulea G. (1967) Researches geologiques dans la zone cristalline des Carpates Orientales (Region de Pop Ivan - Tulgheș). *Rev. Roum. Geol. Geogr. seria Geol. 12, 1, București.*

Pomârleanu V. (1965) Diopsidul în șisturile cristaline din Munții Rodnei. *Stud. Cerc. Geol. Geof. Geogr. Seria Geol., 10, 1, București.*

Pomârleanu V., Murariu T. (1973) Contributions a l'etude des grenats de Roumanie. *Procedings of the X Congress CBGA, Sect. IV, Bratislava.*

Radu D. (1997) Evoluția tremobarică a rocilor metamorfice din masivele Preluca, Țicău și Codru, NV Transilvaniei, *Teză de doctorat.*

Reiser, M.K., Săbău, G., Negulescu, E., Schuster, R., Tropper, P., Fügenschuh, B. (2019) Post-Variscan metamorphism in the Apuseni and Rodna Mountains (Romania): evidence from Sm–Nd garnet and U– Th–Pb monazite dating. *Swiss Journal of Geosciences, 112(1), 101-120.*

Rusu A., Balintoni I. C., Bombiță G., Popescu G. (1983) Geological Map of Romania, 1:50.000. Sheet Preluca, GIR.

Savu H. (1970) Stratigrafia și izogradele de metamorfism din provincia metamorfică prebaicaliană din Munții Semenic. *An. Inst. Geol. XXXVIII, 1-15.*

Săbău (1994) Lithostratigraphic and metamorphic correlations: A possible way of exploring the early history of the Getic Crystalline. *Rom. J. Petrology 76, 119-128.*

Săbău (1995) Consecințe ale tectonicii de pânză metamorfică la partea superioară a Seriei de Lotru. *Rom. J. of Mineral Deposits 76, 55-62.*

Săbău (2010) Lanthanide-free fersmite in the lithian pegmatites at Conţu, Lotru Mts., and its relationship with other niobo-tantalates: *In Seghedi A., Roban D. R. (Eds.): Papers presented at the SGR National Conference dedicated to the 70th anniversary of Prof. Dr. Nicolae Anastasiu, 204 pp., 157-160.*

Săbău G., Gheuca I. (1996) The lithostratigraphic and tectonic structure of the Lotru Series. *An. Inst. Geol. Rom. 69/I, 190-193.*

Săbău G., Negulescu E. (2014) A monazite U-Th-Pb$_T$ metamorphic ages survey in the South Carpathian basement units: delving into tectonic stacking and differential exhumation. *Buletini i Shkencave Gjeologjike, Special Issue Vol. 1/2014, Proc. XX Congress of Carpathian Balkan Geological Association (CBGA 2014), 24-26 September 2014, Tirana, Albania, 219-222.*

Săbău G., Negulescu E. (2016) Metamorphic Ages in Basement Units of Romania – A Sectional Revision for Pre-Alpine Tectonic Interpretations, *AAPG European Regional Conference and Exhibition, Bucharest, Petroleum Systems of Alpine-Mediterranean Fold Belts and Basins, Abstract Book.*

Simmons W.B. (2005) A look at pegmatite classifications, *Crystallization Processes in Granitic Pegmatites – MSA International Meeting Abstracts-23rd-29th May, Elba.*

Sîrbu S., Buzgar N., Kasper H. U. (2010) Geochemistry of selected garnets in pegmatites from the Răzoare Formation (Preluca Mountains, Romania) *Analele Ştiinţifice ale Universităţii "Al.I. Cuza" geologie LVI/2, 109-120.*

Thomas R., Davidson P. (2015) Comment on “A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites” by David London (2014), *Lithos 212–215, 462–468.*

Udubașa G., Hârtopanu P., Ilinca G., Valdman S. (1996). The regionally metamorphosed Mn-Fe deposit at Răzoare, Preluca Mts., Romania. *Romanian Journal of Mineral Deposits, 77, 3–20.*

v. Richthofen F. (1860) Über den Bau der Rodnaer Alpen. *Verh. d. geol. R. A. Wien, 68-71.*

Warr L.N. (2021). IMA–CNMNC approved mineral symbols. *Mineralogical Magazine, 85(3), 291-320.*

Wise, M.A., Müller, A., Simmons, W.B. (2022) A proposed new mineralogical classification system for granitic pegmatites. *The Canadian Mineralogist, 60(2), 229-248*.

# 5 Přehled pegmatitů v Bulharsku

***Rossitsa D. Vassileva, Anna Lazarova, Kalin Naydenov, Sylvina Georgieva, Valentin Grozdev***
*Българска академия на науките, София*
*Bulharsko*

## 5.1 Úvod

Hojné granitové pegmatity různé morfologie, struktury a mineralogicko-geochemických vlastností na území Bulharska jsou výsledkem různých geologických procesů v řadě geologických prostředí (Ivanov, 1991). Řada autorů se zabývá různými aspekty studia pegmatitů: geologickou a tektonickou polohou, mineralogickými, geochemickými, strukturními a geochronologickými charakteristikami. Přesto jsou údaje o bulharských pegmatitech roztříštěné a jediný systematický přehled publikoval Ivanov v roce 1991. Na základě dostupných údajů probíhá nový výzkum s cílem zhodnotit ekonomickou hodnotu pegmatitů a potenciál jako zdroj kritických prvků. V tomto shrnutí je nastíněn současný stav znalostí o výskytu a vlastnostech pegmatitů na území Bulharska.

## 5.2 Klasifikace typů pegmatitů v bulharské literatuře

Obecný přehled s návrhem genetické klasifikace pegmatitů na bulharském území uvádí Ivanov (1991; tab. 5.1, 5.2). Podle genetických vlastností a procesů vzniku jsou pegmatity rozděleny do tří hlavních skupin: pegmatity vzácných zemin, pegmatity vzácných kovů a pegmatity miarolové(„komorové“).

**Vzácnozeminové pegmatity** jsou omezeny na metamorfované horniny amfibolitové a méně často granulitové facie. Zpravidla nejsou prostorově vázány na definitivní granitové intruze, ale často přiléhají k zónám intenzivní migmatitizace a tento vztah je poznamenán řadou přechodných variet mezi migmatity a pegmatity. Mnohé pegmatity této skupiny vykazují složení ovlivněné vloženými metamorfovanými horninami. Skládají se z oligoklasu, K-živce, křemene a typické série Ti-niobotantalátů vzácných zemin. Někdy se vyskytují kyanit, sillimanit a granát-almandin, charakteristické pro metamorfované horniny. Na základě hlavních horninotvorných minerálů lze tuto skupinu rozdělit na parageneticke typy s oligoklasem, mikroklin-oligoklasem, oligoklas-mikroklinem, mikroklinem a albit-oligoklas-mikroklinem.

**Pegmatity vzácných kovů** se vyskytují také v oblastech s aktivní orogenezí, ale hlavně po deformaci. Jsou prostorově a geneticky spjaty s granitovými intruzemi, často se zonálním rozložením kolem nich. Tato skupina pegmatitů se vyznačuje složitým a pestrým minerálním složením, které tvoří křemen, K-živec, albit, v některých případech spodumen a široká škála minerálů vzácných kovů s hojnými těkavými složkami. Lze rozlišit parageneticke typy s mikroklinem, mikroklin-albitem, albitem a albit-spodumenem.

**Miarolové pegmatity** jsou specifická skupina mělce uložených pegmatitů s výskytem omezeným na oblasti s relativně neporušeným tektonickým režimem (Černý, Ercit, 2005; Ivanov, 1991). Geneticky a prostorově jsou příbuzné s hypabysálními anorogenními granitovými intruzemi a jsou téměř celé součástí jejich objemu. Minerální složení je podobné

jako u pegmatitů vzácných kovů a obsahují dutiny vyplněné dobře vyvionutými krystaly různých minerálů. Přechody mezi miarolovými pegmatity, greiseny a křemennými žilami jsou vzhledem k jejich společnému výskytu běžné.

Pegmatity vzácných zemin a vzácných kovů (+ miarolové pegmatity) odpovídají ve vysoké míře petrogenetickým skupinám NYF a LCT podle Černého, Ercita (2005; Ivanov, 1991).

Široká škála podmínek vzniku granitových pegmatitů se shoduje s podmínkami vzniku granitů, které obecně odpovídají korovému původu. Jejich vznik se řídí zobecněným schématem (Ivanov, 1991) od postupné diferenciace granitového magmatu během jeho vývoje až k úplnému utuhnutí v zemské kůře. Migmatitické pegmatity jako produkt počáteční anatexe metamorfovaných hornin představují přechod mezi migmatity a pegmatity. Během diferenciace granitového magmatu vznikají postupně mikroklinové, oligoklas-mikroklinové a oligoklasové pegmatity vzácnozeminového typu. Ochlazením magmatu v dostatečné hloubce vznikají nejprve albit-oligoklas-mikroklinové pegmatity, které působí jako přechodný typ mezi pegmatity s REE (REEP) a pegmatity se vzácnými kovy (RMP). Pegmatity se vzácnými kovy souvisí s granitovými masami krystalizujícími v abysálních podmínkách. Posloupnost jejich vzniku probíhá od mikroklinového směrem k mikroklin-albitovému, albitovému a albit-spodumenovému podtypu. Krystalizace RMP v hloubkách blízkých vzniku REEP vede k některým mineralogicko-geochemickým podobnostem, které se často projevují vznikem přechodnými albit-oligoklas-mikroklinových REEP. Pokud jsou vázány na granity krystalizující v malých hloubkách v hypabysálních podmínkách, vykazují RMP rysy miarolových pegmatitů.

Tabulka 5.1. Hlavní charakteristiky pegmatitů vzácných zemin, pegmatitů vzácných kovů a pegmatitů miarolového typu na bulharském území (upraveno podle Ivanova, 1991, s doplňky).

| Hlavní charakteristiky | Pegmatitový typ | | |
|---|---|---|---|
| | vzácnozeminový (REEP) NYF | se vzácnými kovy (RMP) LCT | miarolové LCT |
| Tektonický režim | aktivní | různý – aktivní až relativné klidný | klidný |
| Okolní horniny | metamorfity amfibolitové facie | granity a metamorfity | hlavně granity, místy fylity, kvarcity atd. |
| Hloubka vzniku | >5 km | 3,5-5 km | ~ 3 km |
| Vztah ke granitům | bez zřejmé prostorové souvislosti s granity, často vázány na migmatitizované zóny | úzká časová a prostorová souvislost s granitovými intruzemi, zonálnívýskytykolem matečného plutonu | uzavřené v matečné intruzi |
| Hlavní horninotvorné minerály | plagioklas (8-35 %), mikroklín nebo ortoklas, křemen | mikroklín, albit, křemen, spodumen | mikroklín, albit, křemen |
| REE akcesorie | allanit, monazit, xenotim, zirkon, REE-niobotantaláty, uraninit, thorit | minerály Li, Cs, Be, Nb, Ta, Sn atd. | lepidolit, beryl, kasiterit, $WO_4$- a $MoO_4$-fáze |
| Počet minerálních druhů | 30-35 | přes 300 | ~ 75 |
| Množství křemene | 20-30 % | 30-50 % | 50-90% |
| Minerály s volatilními složkami | muscovit, biotit, turmalin | muscovit, turmalin, lepidolit, apatit, topaz, fluorit, amblygonit | slídy, topaz, fluorit, turmalin, apatit |

| Hlavní charakteristiky | Pegmatitový typ | | |
|---|---|---|---|
| | vzácnozeminový (REEP) NYF | se vzácnými kovy (RMP) LCT | miarolové LCT |
| Stavba | masivní, slabě zonální | slabě zonální až zonální | zonální |
| Přítomnost miarolových dutin | velmí vzácně, většinou chybí | vzácně | vždy |

Tabulka 5.2. Podtypy pegmatitů a jejich rozšíření v Bulharsku

| Typ | Charakteristika | Výskyt/Pegmatitová pole |
|---|---|---|
| **REE pegmatity (v hloubce)** | | |
| Migmatitické | ložní nebo pravé žíly, čočky většinou méně než 1 m, zřídka 5 až 10 m mocné a 0,5 až 1 m, někdy 20 až 30 m dlouhé; výrazné kontakty, které se v okatých rulách postupně spojují, porfyroblastická struktura | zóna Srednogorie, Sakar, Rodopy, Rila, Ograzden |
| Mikroklinové | izolované žilky, hrubě granitická a pegmatoidní stuktura, azonální | povodí řeky Vachy, Chepelare, mezi městy Peštera a Batak |
| Oligoklas-mikroklinové | příčné žíly a čočkovitá tělesa, tloušťka až 10-15 m a délka 200-300 m, ostré kontakty, v blízkosti žul, žádná genetická souvislost, většinou bez zonace, zřídka se zonální (Lenishte); porfyroblastická, pegmatoidní struktura | Rodopy: povodí řeky Vachy a mezi městy Peštera a Batak (obec Nová Mahala) |
| Mikroklin-oligoklasové | příčné, zřídka konformní žíly do tloušťky 1-5 m a délky 20-50 m; ostré kontakty v blízkosti žul, žádná zřejmá genetická souvislost; porfyroblastické bez zón až se složitou zonalitou | Dolen, oblast Zlatograd; Pastra, Rila |
| Oligoklasové | příčné a příležitostně konformní žíly a čočkovitá tělesa; tloušťka až 5-10 m a délka 50-100 m; ostré kontakty s hostitelskými metamorfity; v blízkosti žul, žádná genetická souvislost; většinou azonální, zřídka zonální; porfyroblastická struktura | Východní Rodopy (obce Kamilski Dol, Huhla, Popsko, Podrumche), Západní Rila (obce Popova Glava, Gorno Osenovo, Pastra, Pchelina); Ograzhden (obce Pokrovnik, Selishte, oblast Igralishte); Srednogorie (vesnice Tserovo a Muhovo u města Ihtiman) |
| Albit-oligoklas-mikroklinové | křížící se žíly až do několika set metrů dlouhé a mocnosti 0,5 až 15-20 m; prostorová a genetická příbuznost s žulami batolitového typu; nezonální až zonální; porfyroblastická struktura | podél endo- a exo kontaktů rilozápadního rodopského batolitu v oblasti Velingradu a Dolního Osenova; v metamorfitech v okolí Čepelar a Madan |
| **Pegmatity se vzácnými kovy (mírně hluboko uložené)** | | |
| Mikroklinové | vyvinuty v (parciálních) granitových intruzích; malé žilky 10-50 cm široké (Rila); šířka 5-10 m a délka 100-300 m (pluton Plana) | SZ Rila (Kalinský pluton); vnitřní části RWRB; Pirinský pluton (podél řeky Demianica); Dolno Drianovo a Barutin-Buynovo plutony, Sakarská a Středohorská zóna ( Gutsalský pluton), pluton Plana |

| Typ | Charakteristika | Výskyt/Pegmatitová pole |
|---|---|---|
| Mikroklin-albitové | prostorově a geneticky vázané na žuly; šířka od desítek cm do 15-20 m a délka do 100 m a někdy až 400 m | většinou rozšířený ve střední Sredné Goře, západních Rodopech, severozápadní Rile a méně často spojený s Ossogovem, Pirinem, Dolním Drianovem, BarutinemBuynovem, Sakarskými plutony. Li odrůdy nejsou přítomny |
| Albitové | úzce spojen s podtypem mikroklin-albitovým, časté přechody | střední Sredna Gora, poblíž města Strelcha; sz. Rila |
| Albit-spodumenové | v Bulharsku není tento typ zastoupen | |
| **Miarolové pegmatity (mělké)** | | |
| Mikroklinové | Těševský pluton - šířka 0,1-0,5 m a délka desítky metrů, ostré kontakty; Plana pluton - SZ, SV tendence, vzácně V-Z, různá morfologie (žíly, čočky) různé šířky od několika cm do 8 m, čočky jsou široké až 15 m; délka se pohybuje od 3-5 m do 40- 50 m | pluton Teshovo v pohoří Pirin (vesnice, Teshovo, Gaitaninovo, Laki) a se středněopirinským plutonem v okolí chaty Vihren); Plana (obce Popoviane-Kovachevtsi, Gorni a Dolni Okol); pegmatity příbuzné syenitu ve vitošském a rosenském plutonu |
| Mikroklin-albitové | protínající metamorfní foliaci hostitelských metamorfitů, ostré kontakty | Střední Rodopy u města Ardino v metamorfovaných horninách |

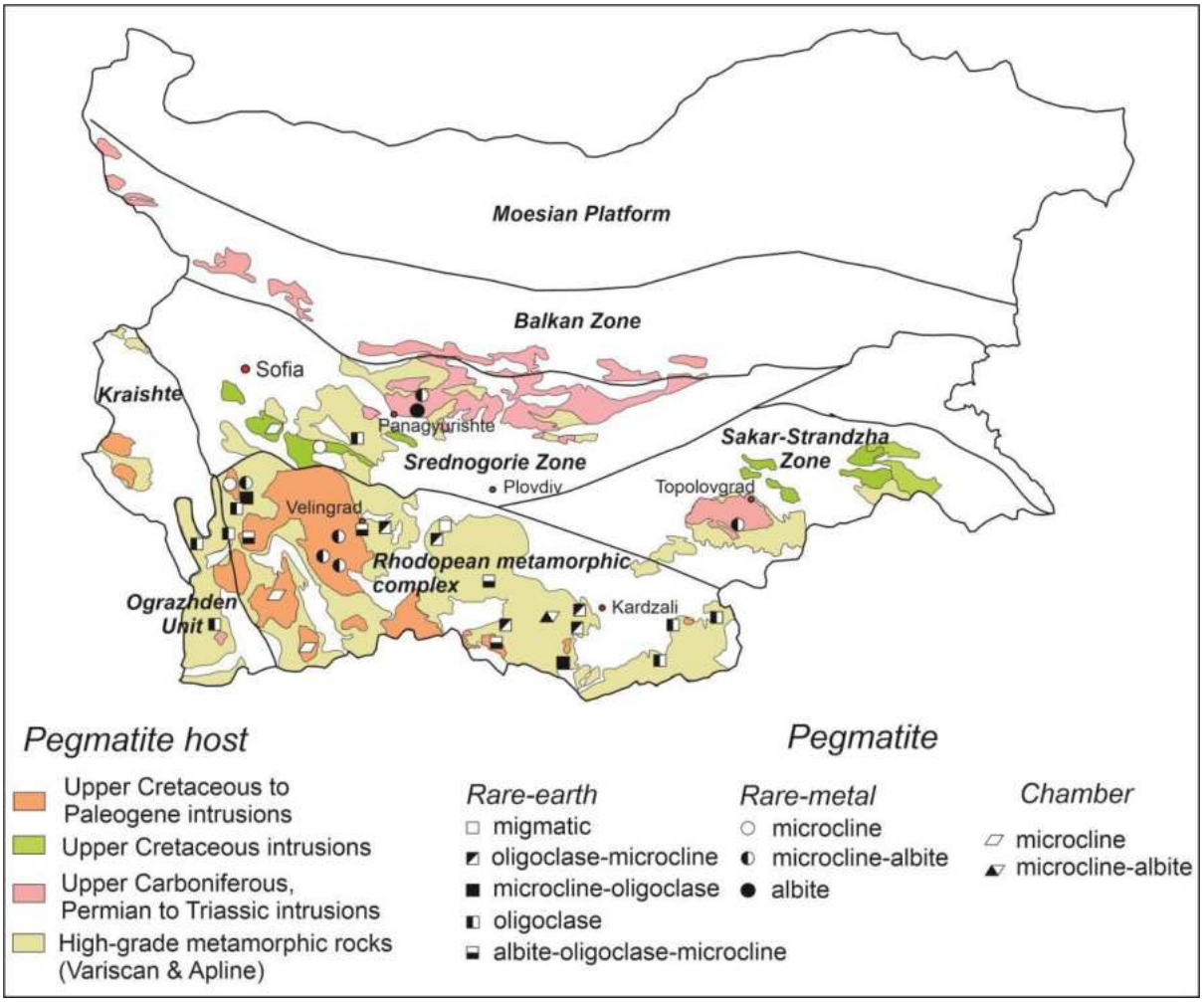
## 5.3 Distribuce pegmatitů

Pegmatity vyskytující se na území Bulharska jsou vázány na variské krystalinikum, pozdně křídový obloukovitý magmatismus, rodopský metamorfní komplex. Výskyty pegmatitů jsou soustředěny hlavně v v jižním Bulharsku, kde souvisí metamorfovanými nebo plutonickými horninami.

### 5.3.1 Pegmatity variského basementu

Významné části pegmatitů jsou soustředěny v několika krystalinických komplexech, které představují fragmenty jádra variského orogenu a budují základní jednotky alpského balkánského orogenu.

Krystalinikum zóny Sredna Gora tvoří silně metamorfované horniny, které hostí pozdně syn- až posttektonické intruze. Metamorfní komplex (v poslední době rozlišovaný jako vysokostupňový komplex Sredna Gora; např. Gerdjikov et al., 2013; Lazarova et al., 2016; Balkanska et al., 2021; Žák et al., 2021) zahrnuje jak migmatitizované, tak i nemigmatitizované jednotky (Kouzhoukharov et al., 1980; Dabovski, 1988; Zagorchev, 2008; Antonov et al., 2010; Lazarova et al., 2016). Převažují migmatitické pararuly, ale známy jsou i metamagmatity (felsické i mafické) ediakarského (Carrigan et al. 2006) a pozdně kambrického (Peytcheva, Von Quadt, 2004; Antonov et al., 2010; Lazarova et al., 2015) stáří protolitu, jakož i izolovaná tělesa metabazik a eklogitů (Cortesogno et al., 2005; Marchev et al., 2006; Gaggero et al., 2009). Předpokládají se smíšené protolity kontinentální a oceánské povahy (Zagorchev, 2008).




Obr. 5.1. Rozložení žulových pegmatitů mezi tektonickými jednotkami v Bulharsku (upraveno podle Ivanova 1991). Tektonické jednotky jsou podle Ivanova (2017).

Variský metamorfní vývoj je málo známý, ale dostupná data U-Pb a $^{40}Ar/^{39}Ar$ naznačují metamorfózu eklogitové facie před 398±5,2 Ma (Gaggero et al., 2009), vysokoteplotní metamorfózu a migmatitizaci v 336,5±5,4 Ma (Carrigan et al., 2006), následovanou retrográdní přeměnou na facii zelených břidlic až spodní amfibolitovou facii a současným vmístěním muskovitických granitů 333,9±0,2 Ma (Gerdjikov et al., 2010). Stáří postmetamorfního ochlazení ul se pohybuje mezi 317 a 305 Ma (Velichkova et al. 2004). Během migmatitizace vznikly hojné tenké aplitové a drobné pegmatitové žíly. Často jsou uloženy podél metamorfní foliace, ale některé jsou nekonformní. Nasycení synmetamorfních oligoklasových pegmatitů je pozorováno v oblasti mezi obcemi Tserovo a Muhovo v Ihtimanské Sredné Goře, kde tvoří 1-5 m mocné a několik desítek metrů dlouhé žíly podél metamorfní foliace nebo šikmo k ní (např. Ivanov, 1991).

Nejdůležitější etapa vzniku pegmatitů se shoduje s posledními fázemi variského orogenního vývoje během pozdního karbonu až raného permu, kdy došlo k intruzím pozdně syn- až posttektonických plutonů (312-285 mil. let; Carrigan et al., 2003, 2005; von Quadt et al., 2004; Velichkova et al., 2004).Na tyto plutony (včetně granitoidů Koprivshtitsa, Strelcha,

Smilovene, Hisarja-Pastrovo a Karavelovo) je často vázáno množství pegmatitů a aplitů. Pole mikroklin-albitových RM-pegmatitů je lokalizováno v oblasti Koprivshtitsa, Strelcha a Panagyurishte (Ivanov, 1991), kde jsou geneticky příbuzné s amfibolicko-biotitickými, biotitickými a dvojslídnými granity plutonů Koprivshtitsa (304,8 ± 0,8,Von Quadt et al., 2004; 312,0 ± 5,4, Carrigan et al., 2005) a Strelcha (285,5 ± 5,2, Carrigan et al., 2003; 289,5 ± 7,8, Carrigan et al., 2005). Hospodářsky významné jsou výskyty mikroklin-albitových RMP v oblasti Smilovene a albitových RMP u Strelchy a Koprivshtitsa. Puls magmatické aktivity pozdně permského až raně triasového stáří dokládá přítomnost drobných granitových intruzí ve variských vysoce metamorfovaných jednotkách a starších granitoidech (např. granit Klisura/Rozino; Antonov et al., 2010; Lazarova et al., 2021). Na toto těleso jsou vázány velmi tenké (0,2-0,3 m) aplitové žíly a řídké pegmatity (Kuykin et al., 1974).

Další fragment variského orogenu, který byl nedávno vyčleněn jako ograždensko-vertiskoský vysoce metamorfovaný komplex (Gerdjikov et al., 2013), zaujímá jihozápadní cíp Bulharska v pohoří Ograždeni, Belasica a Pirin. V komplexu převažují amfibolitové facie ortorul (Zidarov et al., 2003; Macheva et al., 2006, Klimov et al., 2009). Sdružují se s pararulami, svory a amfibolity, jakož i s budinami a velkými tělesy eklogitických metaofiolitů a serpentinitů (Zidarov et al., 2003; Macheva et al., 2006; Pristavova et al., 2007; Sarov et al., 2008; Zagorchev, 2008; Janak et al., 2011). Existují dvě hlavní skupiny dle stáří protolitu ortorul (viz Peytcheva et al., 2015) - pozdně ordovická (cca 450-455 mil. let) a raně silurská (440-435 mil. let), u některých metamorfovaných hornin byly však zjištěny i ediakarsko-spodnokambrické (562-522 mil. let) protolity. Vysokoteplotní stadium metamorfózy a s ním související migmatitizace je visejské (333,4 ± 4,7 Ma; Peytcheva et al., 2015). V migmatitizovaných doménách metamorfovaného úseku se častěji vyskytují mikroklinové a oligoklasové pegmatitové a aplitové žíly a tělesa. Roztroušené oligoklasové pegmatity jsou vázány na raně až středně triasové plutony Igralishte (243±1 Ma; Peytcheva et al., 2009a) a Skrut (249±1 Ma; Zidarov et al., 2007) - malé intruze vmístěné ve vysoce metamorfních jednotkách. Pegmatity jsou řídké, 0,5-1 m mocné a 10-20 m dlouhé (Ivanov, 1991).

Předmesozoický basement alpinské zóny Sakar-Strandža tvoří ruly a amfibolity s neoproterozoicko-kambrickým (Sahin et al., 2014; Natal'in et al., 2016) a ordovickým (Bonev et al., 2019) stářím protolitu a metasedimentární horniny s kambrickým (maximálním) stářím usazenin (Vladinova et al., 2018; Vladinova a Georgieva, 2020). Jsou pronikány četnými pozdně karbonskými až triasovými plutony tvořícími významnou část basementu (např. Bonev et al., 2019, 2022; Satacinska et al., 2021, 2022). Největšími jsou pozdně karbonsky Sakarský batolit (Kamenov et al., 2010; Peytcheva et al., 2016; Bonev et al.,2019a; Pristavova et al., 2019), Ustremský pluton a komplex Melnitsa (Bonev et al., 2019a). Do plutonů a jejich metamorfníhopláště pronikají četné pegmatitové a aplitové žíly.

### 5.3.2 Pegmatity související s pozdně křídovým obloukovým magmatismem

Severně orientovaná subdukce oceánské kůry Neo-Tethys/Vardar Tethys pod evropským kontinentálním okrajem během pozdní křídy vedla k vývoji kontinentálního magmatického oblouku protáhlého ve směru ZSZ-VJV (např. Boccaletti et al. 1974; Gallhofer et al. 2015), táhnoucího se mezi Apusenským a Banátským pohořím v Rumunsku až po Pontidy a Malý Kavkaz a označovaného jako apusensko-banátsko-timocko-srednogorský magmatický a metalogenní pás (Popov et al., 2002; vonQuadt et al., 2005; Georgiev et al., 2012; Gallhofer

et al., 2015 a odkazy v nich). V důsledku odvalování subdukční desky je podle stáří magmatických produktů zaznamenána výrazná migrace magmatických center napříč obloukem od 92 Ma na severu po cca 78-75 Ma na jihu (např. Handler et al., 2004; von Quadt et al., 2005). Bulharský úsek pásu zahrnuje několik vulkanických a vulkanoplutonických komplexů a souvisejících sedimentárních sekvencí, rozdělených do několika magmatických oblastí - západní, střední a východní Srednogorie a Rodopy (např. Dabovski et al., 2009).

Pozdně křídový magmatický oblouk je známý svým bohatstvím polymetalických a drahých kovů v porfyrových a příbuzných epitermálních systémech. Pegmatity nebo granitoidy však nehrají významnou roli v surovinové specializaci této provincie, protože, jak poznamenává Dill (2015), v takovém geodynamickém prostředí se nepředpokládá vznik velkých pegmatitových polí nebo alespoň ne těch s velkou perspektivou rudních ložisek. Pegmatitové a aplitové horniny se vyskytují ve většině pozdně křídových plutonů, které souvisejí s nejnovější fází jejich magmatického vývoje, ale jen několik plutonů soustřeďuje významnější pegmatitové akumulace: Vitošský pluton (např. Arnaudov, Petrusenko, 1992; Petrusenko, Karov, 1993; Karov, 2000), pluton Plana (např. Boyadjiev, Ivanov, 1975; Belev, 1985; Ivanov, 1991; Arnaudov et al., 2002); Gutsalský pluton (Belev, 1985; Ivanov, 1991); Rosenský pluton. Pro Vitošský a Planský pluton jsou typické turmalínonosné pegmatity a aplity (Vergilov & Kostova, 2000; Arnaudov et al., 2002).

### 5.3.3 Pegmatity v alochtonu rodopského metamorfního komplexu

Alpinsko-rodopský metamorfní komplex je oblastí intenzivního před-, syn- i postmetamorfního magmatismu a v souladu s tím je zřejmě nejvýznamnější provincií z hlediska objemu a prostorového výskytu pegmatitů (a odpovídajících pegmatoidních nebo aplitických granitů). Struktura orogenní stavby je však poměrně složitá. Mezi charakteristickými rysy pegmatitů (včetně jejich objemu a relativní hojnosti) a strukturní polohou hostitelských tektonických jednotek velkého měřítka existuje přímá souvislost, která vyžaduje podrobnější regionální tektonický úvod.

O struktuře rodopského komplexu se vedou staleté debaty a bylo navrženo mnoho protichůdných modelů. V posledním zhruba desetiletí převládá jeden z výkladů, který byl přijat i zde, popisující metamorfní podloží Rodop jako příkrovovou stavbu tvořenou čtyřmi skupinami litotektonických jednotek, které zahrnují čtyři alochtonní jednotky orogenního rozsahu. Tento model byl poprvé navržen Janakem et al. (2011) a rozšířen v dalších publikacích (např. Jahn-Awe et al., 2012; Froitzheim et al., 2014; Georgiev et al., 2016; Gorinova et al., 2019). Podle interpretace autorů došlo k naskládání příkrovů, respektive k juxtapozici různých terranů, které reprezentují čtyři alochtonní oblasti, v rámci prodloužené orogeneze od pozdní jury do eocénu. Alochtony jsou označovány jako Nejsvrchnější, Svrchní, Střední a Spodní. **Nejsvrchnější alochton** zahrnuje nízkoteplotní facie metamorfovaných hornin (modré a zelené břidlice až anchizónové metamorfity) jurského oblouku a/nebo příbuznosti se zadním obloukem, které byly obdukovány na sever na evropský okraj při kolizi oblouku s kontinentem v době rané křídy. **Svrchní alochton** zahrnuje jednotky s afinitou k evropské kontinentální kůře (včetně variského metamorfovaného podloží), které byly silně přepracovány v časné alpínské orogenezi během subdukce pod a kolize s pozdně jurským obloukem. **Střední alochton** zahrnuje *high-grade*

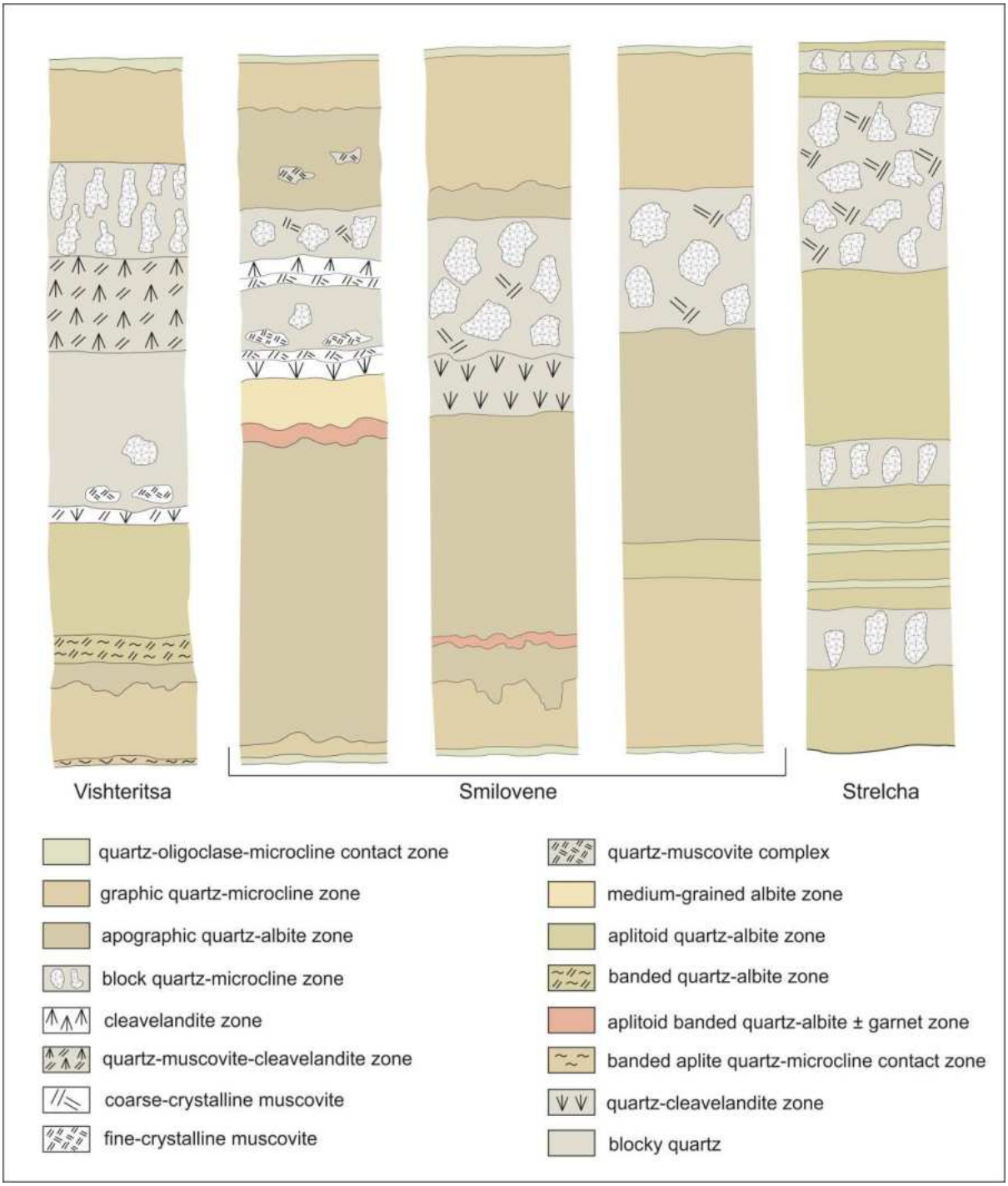
para- a ortometamorfity jurského oblouku a je hostitelem nejobjemnějšího pozdně alpského magmatismu v rodopském komplexu. Protolity jednotek středního alochtonu jsou podobné jednotkám svrchního alochtonu, ale oba mají zcela odlišnou strukturní pozici a tektonometamorfní vývoj. **Spodní alochton** zahrnuje ortoruly vysokého stupně přeměny se stářím protolitu odpovídajícím pozdně až postvariskému magmatismu v srbsko-makedonském masivu (Ograzhden-Vertiskos), ve Srednogorie a v Sakarsko-strandžské zóně. Metasedimentární jednotky alochtonu odkryté na jihu jsou buď hostitelskými, nebo sedimentárními pokryvnými sekvencemi variských plutonů. V Bulharsku jsou *high-grade* ruly obnaženy v jádrech několika extenzních dómů v Centrálních a Východních Rodopech.

Z hlediska výskytu pegmatitů je hlavní zájem o rodopský komplex zaměřen na litotektonické jednotky spodního a středního alochtonu. Nejvyšší alochton lze považovat za jalový, zatímco svrchní alochton, který je ekvivalentem variských metamorfních jednotek evropské desky, by mohl být zajímavým cílem pro studium variských pegmatitů přepracovaných během alpínské evoluce rodopského souvrství. Přesto je prostorový rozsah jednotek svrchního alochtonu v Rodopech omezený.

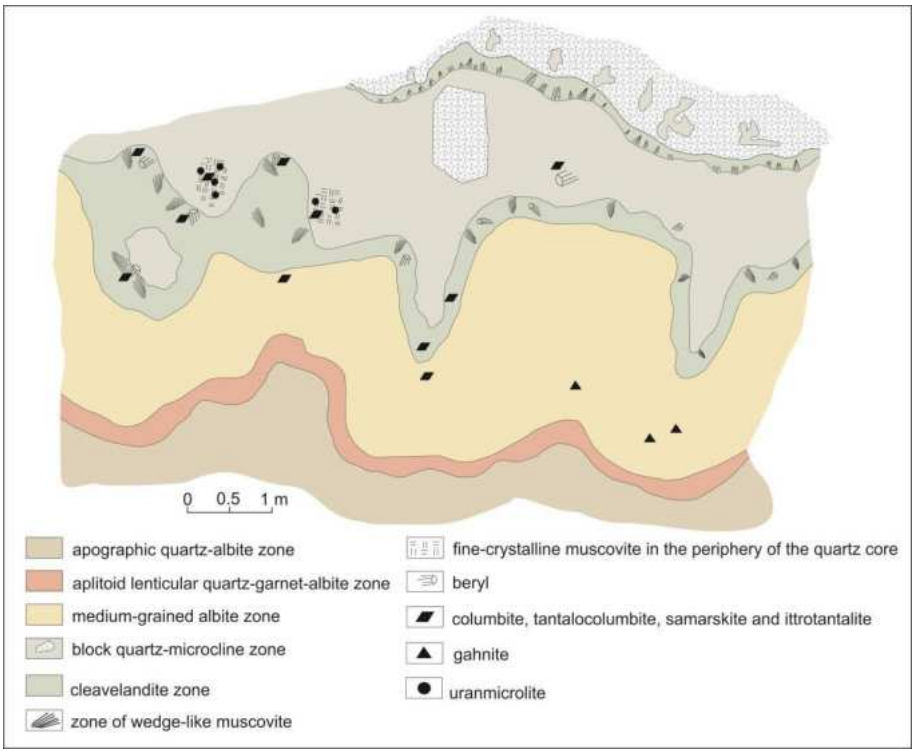
Spodní alochton je ve středních a východních Rodopech obnažen v několika extenzních kopulích, které se vyvinuly během orogenní pozdně alpínské exhumace a vytvořily v jádrech metamorfní jádrové komplexy s anatektickými a diatektickými migmatity. Anatektické tavení vytvořilo různě velká (metry až několik desítek metrů) nepravidelná tělesa s difúzními kontakty nebo žilná tělesa. Pegmatity související s migmatitizací jsou poměrně hojné, ale jejich mocnost jen zřídka přesahuje cca 30 cm. Vytvářejí žíly, které jsou s ohledem na nejpozdější synmetamorfní deformaci v hostitelských horninách syn- až pozdně synkinematické se snadno rozlišitelnou s deformací související foliační stavbou, a postkinematické nedeformované pegmatity. Jako příklad načasování a vztahů mezi migmatitizací a ukládáním a krystalizací pegmatitů lze uvést synmigmatitovou tvorbu taveniny ve spodním alochtonu podél řeky Chepelare (střední Rodopy), která je datována do doby cca 37 mil. let (Arkadaksky et al., 2000); střižné pegmatity ze stejné oblasti vykazují stejné stáří krystalizace 36,3 ± 0,4 mil. let (Bosse et al., 2009). U-Pb stáří skarnového granátu (andraditu) vzniklého na kontaktu pegmatit/mramor v oblasti Chepelare je 37,0 ± 1,1 Ma (Vassileva et al., nepublikované údaje).

Jednotky středního alochtonu představují nejdůležitější pegmatitové úseky rodopského komplexu, včetně pegmatitových polí, která byla nebo stále jsou využívána jako zdroj různých surovin (kovových i nekovových) nebo jsou spojena se známými rudními mineralizacemi klasifikovanými jako indikace a výskyty. Tento alochton se však vyznačuje dvěma ve svém metamorfním vývoji kontrastními jednotkami - migmatitizovanými a nemigmatitizovanými, s odlišnými poměry normální nebo převrácené metamorfní zonace (např. Georgiev et al., 2022). Bez ohledu na strukturní pozici jsou nemigmatitizované jednotky téměř oproštěny od velkých pegmatitů a pegmatitových polí (i když hostí různě velké eocénní granity), zatímco migmatizované jednotky mají jako jeden z hlavních charakteristických znaků objemné pegmatitové intruze. Podobně jako u pegmatitů spodního alochtonu se i zde rozlišují dva hlavní typy - rané pegmatity, často s konkordantní s regionálně metamorfní stavbou a s výraznou strukturní deformací, a pozdější pegmatity, které protínají jak metamorfní strukturu v hostitelských jednotkách, tak i dříve deformované žíly a tělesa. Jestliže tělesa první generace lze označit za obecně málo mocná (jak je vidět na

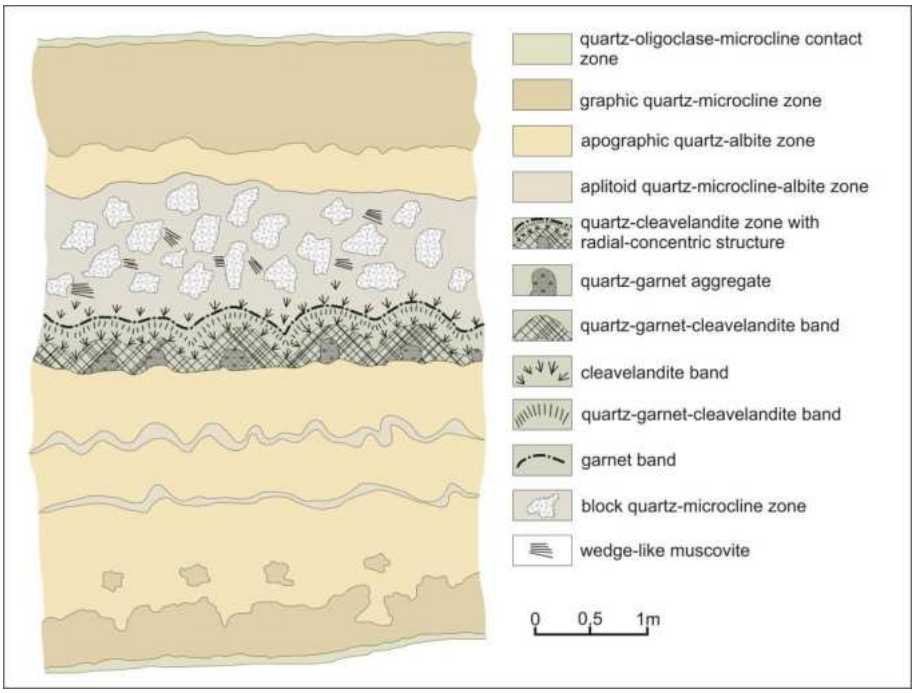
povrchu, i když v hloubce dosahují mocnosti až 3 m) a nesouvislá nebo boudinovaná, tělesa druhé fáze mají mocnosti často přesahující 2 m a lze je sledovat na větší vzdálenosti. Často tvoří rozsáhlá pegmatitová pole a nesou mnohem vyšší ekonomický potenciál ve srovnání s pegmatity starší fáze. Vedle pegmatitů hostí Střední alochton objemné granitoidní intruze a je všeobecně přijímáno, že vznik pegmatitů je částečně geneticky spojen s tímto granitoidním magmatismem (i když u části pegmatitových těles se uvažuje i o genetické souvislosti s migmatitizační událostí). Lze zde rozlišit tři skupiny stáří magmatické krystalizace: i) intruze na konci pozdní křídy (71-67 mil. let) - rozsáhlé části rilsko-rodopského batolitu (např. von Quadt & Peytcheva, 2005; Stavrev et al., 2020); ii) synkinematické granitoidy a pegmatitové žíly se stářím krystalizace mezi 50 a 55 Ma - např. plutony Dolno Drianovo, Pripek, Drangovo, části rilsko-rodopského batolitu, pegmatity různých úseků středního alochtonu atp. (Jahn-Awe et al., 2010, 2012; Marchev et al., 2013; Gorinova et al. 2019; Pleuger et al., 2019; Peytcheva et al., 2021), a iii) post-synkinematické nebo spíše pozdně synkinematické granitoidy a pegmatity vmístěné před 42 až 45 miliony let, jako jsou plutony Elatia-Barutin-Buinovo, Smilian, Yugovo, Pripek, jakož i pegmatitová tělesa a žíly (Soldatos et al., 2001; von Quadt&Peytcheva, 2005; Raeva et al., 2008; Jahn-Awe et al., 2012; Rohrmeier et al., 2013).




Obr. 5.2. Stavba některých asymetrických mikroklin-albitových pegmatitů z Vištěrice (západní Rodopy) a srednogorské zóny (upraveno podle Ivanova 1967, 1991).

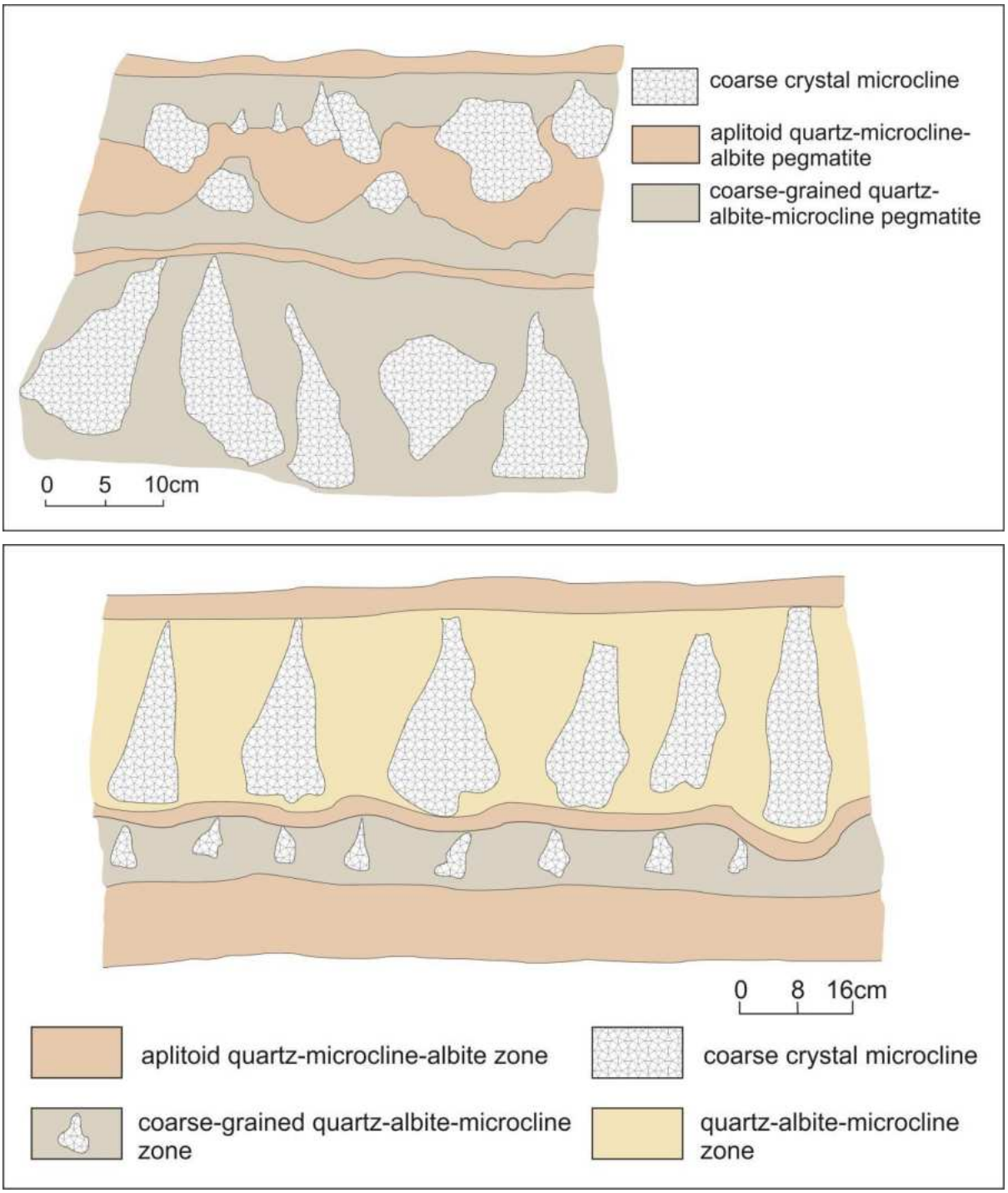



Obr. 5.3. Příčný řez mikroklin-albitickým pegmatitem z výskytu u Smilovene (upraveno podle Ivanova 1991).

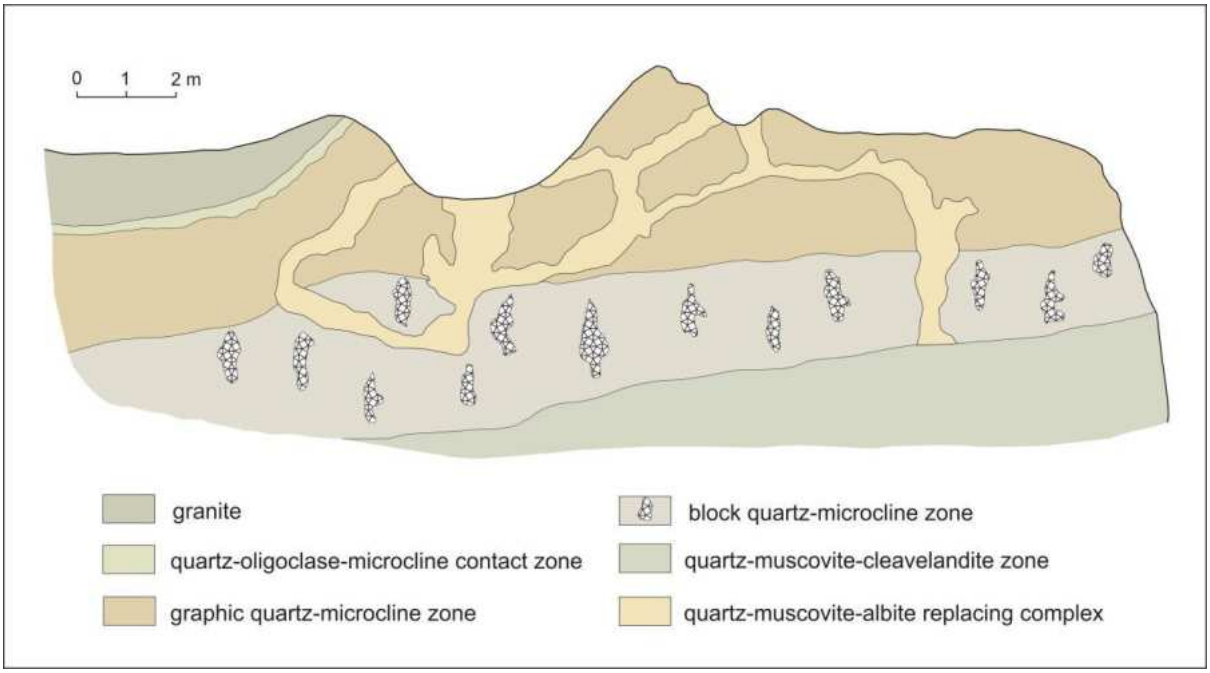



Obr. 5.4. Řez mikroklin-albitickým pegmatitem ze Smilovene (místo je 50 m výše nad řezem v předchozím obrázku, upraveno podle Ivanova 1991).

Obr. 5.5. Výchoz u Smilovene, pegmatitové žíly a vzorky (květen 2023).




Obr. 5.6. Řezy rytmicko-zonálními mikroklin-albitovýmipegmatity z oblasti Strelča (Strelcha, upraveno podle Ivanova 1991).




Obr. 5.7. Řez částí tělesa Vištерica v západních Rodopech (upraveno podle Ivanova 1967, 1991).

### *Vištерica (Vishteritsa)*

V západních Rodopech hostí mikroklinicko-albitické pegmatity hrubozrnné biotitické a dvojslídné granity RWRB, které tvoří velké pegmatitové pole. Jsou zde popsány dva typy těles (Ivanov, 1967), z nichž první se vyskytují jako 10-15 m mocné čočky v biotitickém granitu v blízkosti vrcholu Beslet a podél řeky Vištерica. Většina těchto těles byla v minulosti těžena na živec a slídu. Druhý typ pegmatitů představují ~1 m mocné V-SZ rytmicko-zónové žíly. Pegmatity z ložiska Vištерica jsou podobné některým pegmatitům mikroklin-albitového subtypu vzácných kovů v zóně Srednogorie (mezi Koprivšicí a Strelčou). Tato tělesa se vyznačují složitou zonální strukturou a některé z ukloněných žil vykazují asymetrickou zonálnost (Ivanov 1967). Akcesorická mineralizace je zastoupena magnetitem, ilmenitem, amfibolem, apatitem, zirkonem a cyrtolitem, monazitem, xenotimem, kolumbitem, granátem, gahnitem a berylem (Arnaudov a Petrusenko 1967). Magnetit a ilmenit se vyskytují především ve vnějších zónách pegmatitu, zatímco minerály vzácných zemin a vzácných kovů se vyskytují ve vnitřních zónách, v blízkosti křemenného jádra. U-Pb stáří kolumbitu v pegmatitu je ~50 Ma (Peytcheva et al., 2021).

### *Rakitovo, Babyak, Dolno Osenovo*

Západní endokontakt rilsko-západorodopského batolitu (RWRB), kde se nacházejí četné pegmatity, je budován porfyrickým granitem, zbřidličnatělým granitem a žulorulami. Pegmatity tvoří šikmo uložená tělesa s různou mocností a úklonem, z nichž část je nediferencovaná a část mírně až zcela diferencovaná (se zonální strukturou). Minerální složení pegmatitů z Velingradské oblasti a pegmatitů z obce Dolno Osenovo (Blagoevgradská oblast) tvoří K-živec (ortoklas), plagioklas (oligoklas a albit-oligoklas $An_{12-20}$), místy albit ($An_{7-10}$) v centrálních částech zonálních žil, křemen, malé množství slídy

(biotit a muskovit) a specifická mineralizace vzácných zemin (allanit, xenotim, monazit, euxenit a samarskit; Ivanov 1973). Podle Ivanova (1973) vykazují pegmatity z velingradské a dolnoosenovské oblasti úzkou prostorovou a genetickou příbuznost s granity, což není pro typ REP typické. Kromě toho mají řadu mineralogických znaků (např. složení plagioklasu, obsah Rb v K-živci, akcesorické minerály) společných s oligoklasovými a oligoklas-mikroklinovými pegmatity (slídnatý a keramický typ), které jsou široce rozšířeny v metamorfním komplexu a nemají žádný určitý vztah ke granitu. Na druhé straně jsou zřejmé některé podobnosti se mikroklin-albitovými RM-pegmatity z centrálních částí batolitu RWR.

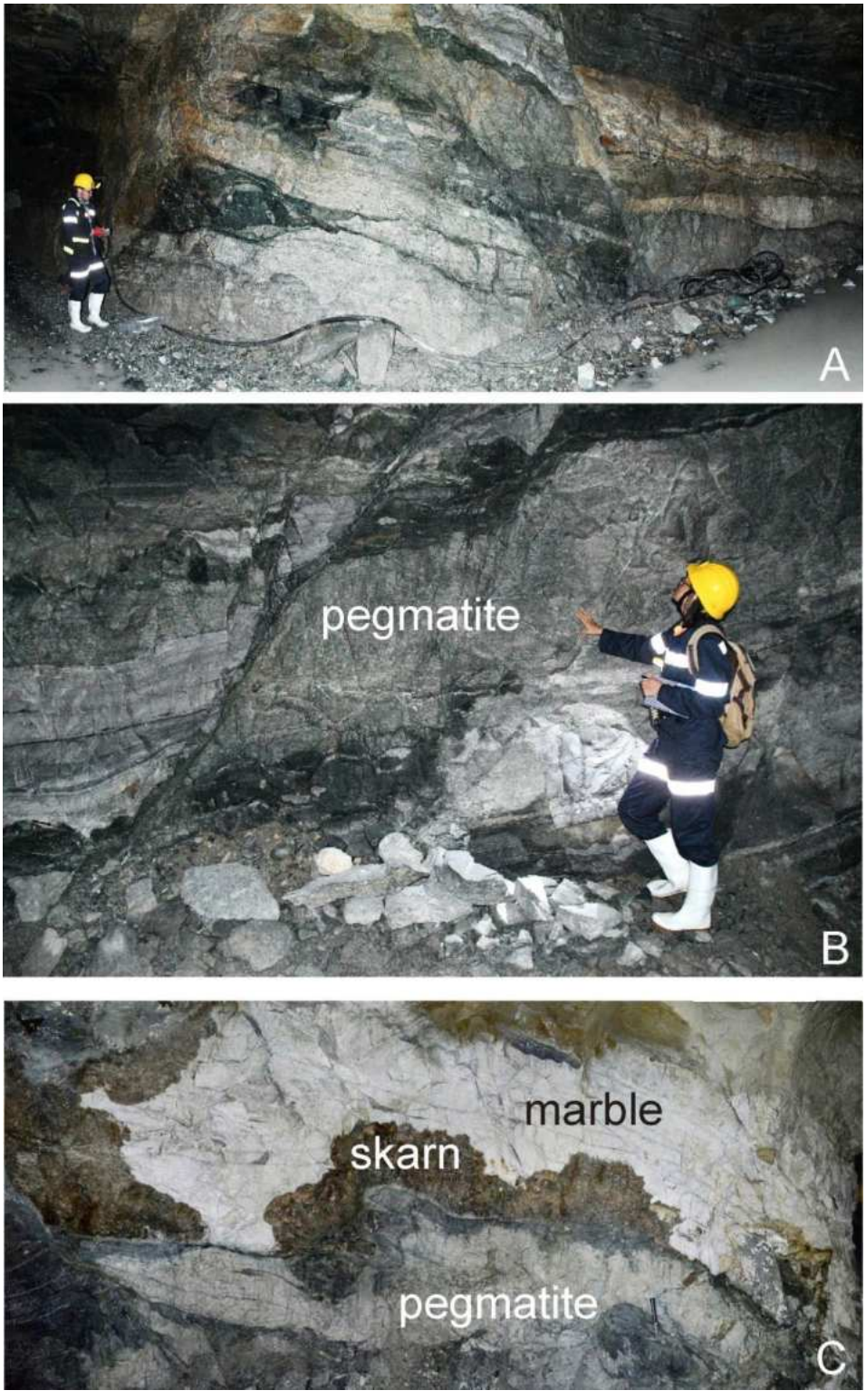
Obr. 5.8. Lom Vištérica v západních Rodopech (říjen 2022).

Obr. 5.9. Lom Suhata reka u Rakitova, západní Rodopy (říjen 2022).

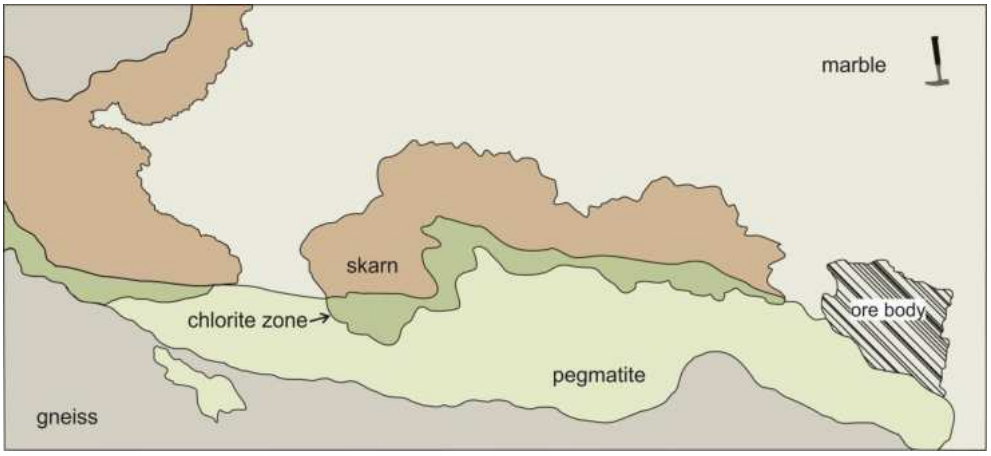
Obr. 5.10. Pegmatity na západním kontaktu rilsko-západorodopského batolitu nedaleko obce Babyak.

Obr. 5.11. Pegmatity u obce Nova Mahala nedaleko města Batak, Západní Rodopy (květen 2023).

Obr. 5.12. Epidotová alterace v pegmatitech průsmyku Pechinsko poblíž žilného polymetalického ložiska Strašimir, oblast Madan, duben 2023 (Georgieva et al. 2023, v tisku).




Obr. 5.13. Konformní pegmatitová tělesa na polymetalických ložiscích v oblasti Laki a Madan: A-B - ložisko Džurkovo (Djourkovo); C - ložisko Petrovica (Petrovitsa).




Obr. 5.14. Ložisko Petrovica (Petrovitsa): hydrotermální přeměna podél kontaktu pegmatit/mramor s tvorbou pyroxenových skarnů v mramoru a alterací s převahou chloritu v pegmatitu. Stáří U-Pb na titanitu z pegmatitového tělesa je ~ 50 Ma (Milenkov et al., 2022).

Obr. 5.15. Pegmatitová žíla- kontakt s okolní horninou a textura. Obec Dolen, Východní Rodopy (duben 2023).

Tabulka 5.3. Akcesorické minerály vzácných kovů v pegmatitech Bulharska (další nerosty jsou popsány v knize Minerals of Bulgaria, Kostov et al., 2022)

| Minerál | Popis | Pegmatitový subtyp a lokalita | Reference |
|---|---|---|---|
| Bismutinit | nepravidelná zrna 1-2 mm | Mc-Ab (Rila), desilicifikovaný (Rila), Ab-Ol-Mc (oblast Chepelare, Rodopy) | Arnaudov, 1975 Petrussenko et al., 1965 Petrussenko et al., 1971 |
| Galenobismutit | | desilicifikovaný (sz. Rila) | Arnaudov, 1975 |
| Chryzoberyl | 1) žlutozelené krystalové agregáty mezi plagioklasem a biotitem, 2) žlutý až zelený, zrnitý kolem krystalů berylu | desilicifikovaný berylový (Rila), Mc-Ol (Dolen, Rhodopes) | Arnaudov, Petrussenko, 1971 |
| Strüverit | černé bipyramidální krystaly (1-2 mm) a nepravidelná zrna v mikroklínu a berylu v asociaci s kolumbitem, cyrtolitem, monazitem, xenotimem a tschevkinitem | Ab-Ol-Mc (Chepelare, Rodopy) | Arnaudov, Petrussenko, 1972 |
| Anatase-Ta | alterační produkt, kůry a kryptokrystalické agregáty po euxenitu-Ta | Ab-Ol-Mc (Chepelare, Rodopy) | Arnaudov, Petrussenko, 1972 |
| Kolumbit | černé destičkovitá až sloupečkovité krystaly 0.5-1 mm v berylu (4-5 až 8-10 cm) v albitu (cleavelanditu), někdy i v granátu | miarolitový p. (Ardino), Mc-Ol (Dolen, Pastra), Ol (Tserovo), Ab-Ol-Mc (Sredna Gora, záp. Rodopy, Rila), Mc-Ab (Vishteitsa) | Breskovska, 1954, 1961 Ivanov 1991 (a ref. tam) Peytcheva et al., 2021 |
| Pyrochlor | žlutý druhotný metamiktní minerál, povlaky na kolumbitu | sz. Rila | Arnaudov, 1975, 1976 |
| Uranmikrolit | nepravidelná zrna (1-2 mm) a žilky po Ta-kolumbitu a samarskitu | Mc-Ab (Smilovene) | Ivanov 1967; |
| Euxenit | drobné (2-3 mm) prizmatické krystaly hnědočervené barvy a kovového lesku | Ab-Ol-Mc (Velingrad) | Ivanov 1973 |
| Samarskit | nepravidelné, sloupcovité nebo destičkovité krystaly (1-5 mm) černé až červenohnědé barvy a kovového lesku | Mc-Ol (Dolen)Ab-Ol-Mc (Velingrad, Dolno Osenovo), Mc (Gutsal pluton), Mc-Ab (Sredna gora; sz. Rila), desilicifikový p. (Rila) ajc. | Ivanov, Arnaudov, 1966; Ivanov 1991 (a reference tam) |
| Uraninit | drobné (0.1-0.5 mm) dobře omezené krystaly s kubickým nebo oktaedrickým habitem | Mc-Ol (Pastra, Dolen), Ab-Ol-Mc (Velingrad, Mihalkovo, Ljaškov), Mc (Gutsal), miarolový p. (Plana), Ol-Mc (údolí řeky Vachy), Ol (Igraliště), Mc-Ab (sz. Rila); Pb-zn ložiska středních Rodop | Arnaudov 1975 Ivanov, Arnaudov,1966; Ivanov 1991 |
| Bertrandit | produkt přeměny berylu, 0,05-1 mm velké bezbarvé krystaly s bavenitem a adularem | Mc-Ab (Smilovene) | Ivanov, Arnaudov, 1964; |

| Minerál | Popis | Pegmatitový subtyp a lokalita | Reference |
|---|---|---|---|
| Beryl | prizmatické jednoduché krystaly namodralé, žluté, zelené barvy, různé velikosti (mm až 50 cm), někdy hnízda ve značném množství | Mc-Ol (Dolen), Ab-OlMc (Chepino, Suhata reka, Chepelare), Mc- Ab(všude, Sredna Gora, Vištерica, sz. Rila), miarolový (Gaitaninovo, Galabovo) | Ivanov 1991 a Kostov et al 2022 a odkazy v nich uvedené |
| Bavenit | bílé paprsčité agregáty v přemeněném berylu | Mc-Ab (Smilovene) | Ivanov, Arnaudov, 1964 |
| Helvin | hnědé tetraedrické 1-3 mm až 1 cm velké krystaly v křemeni, albitu nebo pozdním K-živci | Mc-Ab (Smilovene a okolí Koprivštice) | Ivanov 1969 |
| Zirkon | krátce až dlouze prizmatický s různým zbarvením a morfologií; krystaly zřídka přesahují 0,5 mm | ve všech typech pegmatitů | Ivanov 1991 (variace barvy a habitu zirkonu z různých pegmatitových typů) Kostov at al., 2022 |
| Allanit | černé prizmatické krystaly 1-2 mm až 0,5-1 cm, vzácně dosahují 6-8 cm (podél Vachy) a 30 cm (Plana) | pegmatity vzácných zemin (Rodopy), vzácně v Mc, Mc-Ab (Plana, Gutsal plutony) | Kostov et al., 2022 Milenkov et al., 2022 Georgieva et al., 2022 |
| Moraesit | jehličkovité krystalky ( 1-2 mm) a paprsčité,vláknité agregáty po berylu | Mc-Ab (Smilovene) | Ivanov, Arnaudov 1964 |
| Xenotim | žlutozelený, oranžově žlutý až červený, často v agregátech se zirkonem nebo titanitem | pegmatity vzácných zemin (Rodopy); Sredna Gora, Ol (Igralishte) | Ivanov, Arnaudov 1966 Kostov et al., 2022 a odkazy v nich uvedené |
| Monazit | světle zelený, žlutozelený, drobné krystaly (0,1-1 mm), vzácně až 4-5 cm (Vishteritsa) | rare earth pegmatites (Rhodopes), Mc-Ab (Vishteritsa) | Kostov et al., 2022 and references therein |
| Rabdofán | bílé masy po cyrtolitu | Mc-Ab (Sredna Gora) | Ivanov 1968, 1991 |
| Churchit-(Y) | alterační produkt po cyrtolitu a monazitu | Mc-Ab (Sredna Gora) | Ivanov 1968, 1991 |
| Autunit | žluté až zelenavé šupinky, zvětráváním uraninitu | Ab (Sredna Gora), McOl (Dolen) | Ivanov, Arnaudov 1966 |
| Torbernit | trávově zelené lupínky, vzácně s autunitem | Mc-Ab (Vishteritsa) | Bojadziev 1959; Kostov et al., 2022 |
| Bismutit | šedozelené agregáty a povlaky pseudomorfující bismutinit | Mc-Ab (NW Rila) | Arnaudov 1975 |
| Grafit | vločkovité krystaly | migmatic and Mc-Ol (Vacha River valley) | Kostov et al., 1964 |
| Grayit | světle žluté a hnědavé drobnozrnné agregáty v dutinách v krystalech berylu | Mc-Ab (Smilovene) | Zidarov and Petrov 2011 |

## 5.4 Vybrané reference

Алексиев, Е. 1960. Геохимия на редките и разсеяни елементи във Витошкия плутон. – Тр. геол. България, сер. Геохим., пол. изкоп., 1, 3-64.

Алексиев, Е. 1969. Геохимия на редките земи в ларамийските плутони от Средногорието. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 18, 29-46.

Алексиев, Е., Л. Даиева. 1978. Геохимия на редкоземните елементи в Южнобългарските гранитоиди. – Год. СУ, ГГФ, 69, 1, 115-123.

Алексиев, Е., И. Иванов. 1962. Върху абсолютната геологическа възраст на пегматитите от находище Смиловене, Копривщенско. – Изв. Геол. инст. БАН, 11, 27-31.

Алексиев, Е., И. М. Иванов. 1970. Редкоземните елементи в средногорските гранитоиди и свързаните с тях пегматити в района на Копривщица и Стрелча. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 19, 5-15.

Алексиев, Е., В. Цветкова. 1962. Геохимични и минералогични изследвания върху монацита от гранитите на Рила планина. – Тр. геол. България, сер. Геохим., минерал. петрогр., 3, 5- 24.

Алексиев, Е., Н. Черноколев. 1967. Геохимия на редкоземните елементи в Росенския плутон. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 16, 7-16.

Алексиев, Е., И. Иванов, В. Арнаудов. 1965. Върху геохимията на пегматитите от находище Смиловене, Копривщенско. – Тр. геол. България, сер. Геохим., минерал. петрогр., 5, 47- 67.

Алексиев, Е., М. Стефанова, Р. Бояджиева. 1966б. Геохимични изследвания на редкоземните елементи в Свидненските калиевоалкални скали. – Тр. геол. България, сер. Геохим., минерал. петрогр., 6, 27-34.

Алексиев, Е., Т. Хисина, М. Павлова. 1969. Геохимия на редките земи в Планския плутон. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 18, 47-57.

Алексиев, Е., З. Чернева, Л. Даиева, Е. Станчева. 1987. Редкоземни елементи в ортити от гнайси и мигматични пегматити в Централните Родопи. – Геохим., минерал. петрол., 23, 3-17.

Антонова, Д. 1989. Минералогия и генетични особености на редкометалното орудяване в Росенското рудно поле. Дисертация кгмн. С.

Антонова, Д. 1993. Минераложка проблематика на бронерита и давидита – нови минерали за Росенското рудно поле. – В: Научна сесия “Развитие на българската минералогия”. Сборник резюмета. София, 23-24 декември 1993 г. С., 7.

Апостолов, Д., И. И. Иванов, Й. Йорданов. 1975. Съотношение на циркония и хафния в цирконите от някои пегматити от Южна България. – Геохим., минерал. петрол., 2, 3-7.

Арнаудов, В. 1975. Строеж и минерален състав на гранитните пегматити от Северозападна Рила. – Геохим., минерал. петрол., 2, 61-77.

Арнаудов, В. С. 1976. Десилицирани пегматити от Рила планина. – Год. СУ, ГГФ, 68, 1, 129-147.

Арнаудов, В. 2001. Берилият в берилоносни петматити от Рила планина, България. – Геохим., минерал. петрол., 38, 89-100.

Арнаудов, В. 2006. Самороден алуминий в десилициран пегматит със смарагд и хризоберил от Рила планина, ЮЗ България. – Геохим., минерал. петрол., 44, 33-40.

Арнаудов, В., Р. Арнаудова. 1981. Последовательность образования гранитоидов Пирина, Рилы и Родоп по данным структурным исследований калиевых полевых шпатов. – Geologica Balc., 11, 2, 33-42.

Арнаудов, В., Р. Арнаудова. 1996. Съвременни схващания за минералогията на адулара. – В: VI Конгрес БГД, Научна сесия: Новости в геологията на България. Сборник резюмета. С., 9- 10.

Арнаудов, В., Р. Арнаудова. 2000. Химизъм на флогопити от нечисти мрамори и десилицирани пегматити от кристалина на Южна България. – Геохим., минерал. петрол., 37, 77-85.

Арнаудов, В., Б. Караджова. 1970. Разпределение на редките алкалии в пегматитите от Северозападна Рила и някои пегматити от Влахина планина. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 19, 81-91.

Арнаудов, В., П. Лилов. 1978. Калий-аргонова възраст на пегматитови късове от младоалпийския конгломерат при с. Долни Пасарел, Софийско. – Сп. Бълг. геол. д-во, 39, 3, 342-344.

Арнаудов, В., П. Лилов. 1983. K/Ar датиране на гранитоидите от Пирин. – Геохим., минерал. петрол., 17, 3-10. 137

Арнаудов, В., М. Павлова. 1967. Относно съдържанието на олово в някои амазонити. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 16, 41-43.

Арнаудов, В., М. Павлова. 1969. Разпределение на оловото в пегматита от находище Вищерица, Западни Родопи. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 18, 58-66.

Арнаудов, В., М. Павлова. 1970. Върху съдържанието на олово в пегматитите от Северозападна Рила. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 19, 93-101.

Арнаудов, В., М. Павлова. 1971. Оловото във фелдшпатите от някои слюдоносни пегматити в Южна България. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 20, 21-29.

Арнаудов, В., М. Павлова. 1974. Възраст и генезис на пегматити от Южна България по данни от изотопния състав на оловото във фелдшпатите. – В: Минерогенезис. С., БАН, 315-332.

Арнаудов, В., М. Павлова. 1979. Геохимия на оловото в терциерните магматити при Лозен и Маджарово, Източни Родопи. – Геохим., минерал. петрол., 11, 3-12.

Арнаудов, В., С. Петрусенко. 1965. Малакон и торогумит от с. Свидня, Софийско. – Сп. Бълг. геол. д-во, 26, 2, 199-203.

Арнаудов, В., С. Петрусенко. 1967а. Пегматити с моасанит от Чепеларско. – Сп. Бълг. геол. д-во, 28, 2, 203-207.

Арнаудов, В., С. Петрусенко. 1967б. Първична акцесорна минерализация в пегматита от находище Вищерица, Западни Родопи. – Изв. Геол. инст., сер. Геохим., минерал. петрогр., 16, 145-159.

Арнаудов, В., С. Петрусенко. 1968. Розов цоизит и розов клиноцоизит от Рила планина. – Сп. Бълг. геол. д-во, 29, 3, 317-321.

Арнаудов, В., С. Петрусенко. 1971. Хризоберил от два различни типа пегматити от РилоРодопската област. –Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 20, 91-97.

Арнаудов, В., С. Петрусенко. 1972. Стрюверит, тантевксенит и танталов анатаз от пегматити край Чепеларе, Централни Родопи. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 21, 77-83.

Арнаудов, В., С. Петрусенко. 1993. Десилицираните пегматити в България. – В: Научна сесия "Развитие на българската минералогия". Сборник резюмета. София, 23-24 декември 1993 г. С., 7-8.

Арнаудов, В., С. Петрусенко. 1997. Турмалините от десилицирани пегматити в ултрабазити и от шисти с базичен състав – обособена група в редицата шерл-дравит. – Геохим., минерал. петрол., 32, 23-28.

Арнаудов, В., С. Петрусенко. 1999. Минерален състав на магнезиално-силикатни калцифири от Северозападна Рила планина. – В: Сб. резюмета от Юбилейна научна сесия в чест на акад. Иван Костов "Проблеми на минерогенезиса". 21-22 януари, 1999, София, 1.

Арнаудов, В., Н. Фъкев. 1978. Десилицирани пегматити от Яковишкия ултрабазичен масив. – Сп. Бълг. геол. д-во, 39, 3, 291-297.

Арнаудов, В., Б. Амов, М. Павлова. 1969. Върху абсолютната геоложка възраст на някои пегматити от Южна България. – Изв. Геол. инст., сер. Геохим., минерал. петрогр., 18, 19- 27.

Арнаудов, В., М. Павлова, Б. Амов, Ц. Балджиева. 1974. Възраст и генезис на гранитните пегматити от Южна България по данни от изотопния състав на оловото във фелдшпатите. – В: Минерогенезис. С., БАН, 315-332.

Арнаудов, В., Т. Танева, З. Игнатова. 1980. Геохроноложки изследвания по метода на следите на пегматити от Рила планина. – Геохим., минерал. петрол., 13, 19-26.

Арнаудов, В., С. Петрусенко, М. Павлова. 1982. Берилийсъдържащ маргарит и фуксит от десилицирани пегматити в Рила. – Геохим., минерал. и петрол., 20, 33-40.

Арнаудов, В., Б. Амов, Е. Н. Бартницкий, М. Павлова. 1989. Изотопная геохронология магматических и метаморфических пород в Балканидах и Родопском массиве. – В: XIV Конгресс КБГА. Тезисы докладов, 4. С., 1154-1157.

Арнаудов, В., С. Петрусенко, Ч. Каров. 2004. Еволюция на турмалинообразуването в палеозойските пегматити от Софийското и Ихтиманското Средногорие. – В: Минерогенезис-2004. Научна сесия в чест на 90-годишния юбилей на академик Иван Костов. Соф. унив. "Св. Климент Охридски", София, 22-23 януари 2004 г. Резюмета. С., БМД, 18-19.

Арнаудов, В., С. Петрусенко, Е. Станчева. 2012. Минерален и химичен състав на нечисти мрамори (магнезиално-силикатни калцифири) от Рила планина. – Сп. Бълг. геол. д-во, 73, 1-3, 5-25.

Арнаудов, В. Г. 1932. Жилните скали в северозападните и западните отдели на Витоша. – Тр. Бълг. природоизп. д-во, 15-16, 93-121.

Атанасов, В. 1964. Шеелит и ферберит от Росенските месторождения. – Сп. Бълг. геол. д-во, 25, 2, 196-202.

Бедринов, И. 2014. Комплексно-полиметално, алкално и редкоземно находище "Черешките" – Смолянско. – Минно дело и геология, 1-2, 43-47.

Бедринов, И. 2015. Собственоуранови, уран-полиметални (U-Pb-Zn±Cu, Mo, Au, Ag) и уран-торий редкоземни (U-Th-TR) минерализации и орудявания в Централните Родопи. – Геол. минер. ресурси, 22, 7-8, 24-29.

Божков, И., Е. Вълчанова, Я. Михаилов, В. Стоева, М. Райнова, Е. Плотников. 1984. Епидотапатит-ортитова минерализация в района на селата Рибник и Дрангово (Благоевградско). – В: Проблеми на геологията на Югозападна България. С., Техника, 100-113.

Божков, И., И. Иванов, М. Попов. 2008. Редкоземните орудявания в Югозападна България. – Геол. минер. ресурси, 15, 3, 27-30.

Бояджиев, С., И. М. Иванов. 1975. Върху пегматитите в Планския плутон. – Геохим., минерал. петрол., 3, 76-87.

Бояджиев, С., И. М. Иванов. 1983. Сравнително морфоструктурно и минераложко-геохимично изследване на пегматитите в средноалпийските интрузии от Централното Средногорие. – Геохим., минерал. петрол., 17, 55-66.

Бресковска, В. 1954. Колумбит от Централните Родопи. – Год. СУ, ГГФ, 49, 2, 91-92.

Бресковска, В. 1962. Изследвания върху колумбит от Родопите и Средна гора. – Год. СУ, ГГФ, 55, 2, 191-198.

Бресковска, В., С. Габровска. 1964. Характеристика на везувиана от Западна Рила. – Год. СУ, ГГФ, 57, 1, 206-216.

Бресковска, В., Г. Ескенази. 1961. Турмалин от някои български находища. – Год. СУ, БГГФ, 54, 2, 15-48.

Бресковска, В., Л. Кирязова. 1974а. Един случай на сраствания между ксенотим и монацит. – В: Минерогенезис. С., БАН, 229-236.

Бресковска, В., Л. Кирязова. 1974б. Ксенотим от Сърнена Средна гора. – Год. СУ, ГГФ, 66, 1, 163- 170.

Бресковска, В., Р. Маринова. 1975. Евксенит – нов минерал за България. – Сп. Бълг. геол. д-во, 36, 2, 187-190.

Вергилов, В. 1955. Минерален състав и геохимия на пегматитите при с. Калково, Самоковско. – Изв. Геол. инст. БАН, 3, 25-49.

Вергилов, В. 1959. Върху мигматичните пегматоидни жили в някои мрамори от Централните Родопи. – Изв. Геол. инст. БАН, 7, 81-100.

Витов, О. 1993б. Съвместен растеж на кварц и хематит в пегматити от Витоша. – В: Научна сесия "Развитие на българската минералогия", Сборник резюмета. София, 23-24 декември 1993 г. С., 15-16.

Грозданов, Л. 1974. Биотит от пегматити в кариерата на Липата, Витоша планина. – В: Минерогенезис. С., БАН, 253-261.

Грозданов, Л. 1978. Амфибол от пегматит от околността на с. Тополница, Станкедимитровско. – Сп. Бълг. геол. д-во, 39, 3, 269-277.

Грозданов, Л. 1988. Амфиболи от пегматоидни минерализации от Средногорската област. – Геохим., минерал. петрол., 25, 3-19.

Димитров, Д. К., К. П. Котев. 1967. Микроклинови пегматити в докамбрийските метаморфни скали на Маданското рудно поле. – Сп. Бълг. геол. д-во, 28, 2, 208-214.

Димитров, Стр. 1934-1935. Пегматити в България. – Природа и наука, 5, 5-6, 73-75.

Димитрова, Г. 1974. Хидромусковитови псевдоморфози по турмалин от местността Белите брези на Витоша. – В: 7 Нац. преглед ТНТМ, 247-248.

Иванов, И. М. 1963. Особености на редкометалната минерализация в пегматитите от Смиловене, Коприщенско. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 12, 223-236.

Иванов, И. М. 1967а. Вътрешен строеж и произход на асиметрично зоналните пегматитит от Средногорието и Вищерица. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 16, 171-187.

Иванов, И. М. 1967б. Уранмикролит (джалмаит) от находище Смиловене. – Сп. Бълг. геол. д-во, 28, 3, 353-356.

Иванов, И. М. 1968а. Върху произхода на мусковита в микроклин-албитовите пегматити от Средногорието и Вищерица. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 17, 49-61.

Иванов, И. М. 1968б. Вътрешен строеж, минералогия и геохимия на пегматитите от района на Копривщица и Стрелча, Средна гора. Дисертация кгмн. С., 274 с.

Иванов, И. М. 1969. Хелвин от пегматитите в района на Копривщица. – Сп. Бълг. геол. д-во, 30, 1, 67-70.

Иванов, И. М. 1970. Пространствени и генетични взаимоотношения на пегматитите с гранитите в района на Копривщица и Стрелча, Средна гора. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 19, 35-59.

Иванов, И. М. 1973. Редкометални пегматити в Рило-Родопския гранитоиден батолит. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 22, 41-52.

Иванов, И. М. 1974. О генетической классификации гранитных пегматитов. – В: Минерогенезис. С., БАН, 299-314.

Иванов, И. М. 1982. Пегматитовое месторождение Смиловене, Копривштенско. – В: Путеводитель экскурсия 2, 60-72.

Иванов, И. М. 1987. Об одном способом определения динамики распределения редких элементов в процессе становления гранитных пегматитов. – Геохим., минерал. петрол., 23, 18-31.

Иванов, И. 1989а. Минералите в нашите гранитни пегматити. – Природа, 36, 3, 18-23.

Иванов, И. М. 1989б. О геохимии и генезисе мигматических пегматитов из метаморфического комплекса Центральных Родоп. – В: XIV Конгресс КБГА. Тезисы докладов, 1. С., 102-105.

Иванов, И. 1989в. Пегматитови находища. – В: Неметални полезни изкопаеми в България. 2. Ендогенни промишлени минерали и скали. С., Техника, 80-103.

Иванов, И. М. 1990. Върху геохимията и генезиса на мигматичните пегматити от метаморфния комплекс в Централните Родопи. – Геохим., минерал. петрол., 26, 65-104.

Иванов, И. М. 1991. Гранитните пегматити в България. С., Изд. БАН, 205 с.

Иванов, И. М. 2014. Генетични типове находища на редкоземни елементи у нас и възможности за тяхното използване. – В: Сборник с доклади. Научен семинар “Редки и разсеяни елементи в България: геоложки, техноложки и екологични аспекти”. 27 ноември 2014 г., София, С., НТС МДГМ, 20-23.

Иванов, И. М., В. Арнаудов. 1963. Гаанит от Смиловене, Копривщенско. – Сп. Бълг. геол. д-во, 24, 3, 320-323.

Иванов, И. М., В. Арнаудов. 1966. Редкометалната минерализация в слюдоносните пегматити от находище Долен, Златоградско. – Изв. Геол. инст. БАН, 15, 145-157.

Иванов, И. М., В. С. Арнаудов. 1964. Върху хидротермалната минерализация в пегматитите от с. Смиловене, Копривщенско. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геох., минерал. петрогр., 13, 71- 80.

Иванов, И. М., И. Божков. 2003. Редкоземните орудявания в България. – В: IV Нац. симпозиум "Металогения на България". Сборник резюмирани доклади, 7-9 май 2003. С., Нац. музей "Земята и хората", 104-107.

Иванов, И. М., Р. Бояджиева. 1970. Разпределение на ниобия и тантала в пегматитите от Средногорието. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геох., минерал. петрогр., 19, 61-68.

Иванов, И. М., Б. Караджова. 1970. Разпределение на лития, рубидия и цезия в Средногорските пегматити от района на Копривщица и Стрелча. – Геол. инст. БАН, сер. Геох., минерал. петрогр., 19, 69-79.

Иванов, И. М., Л. Даива, Е. Станчева. 1984. Редкоземните елементи в гранитните пегматити от Южна България. – Геохим., минерал. петрол., 19, 3-14.

Йорданов, Н., С. Марева, И. Хавезов. 1962. Изследвания върху колумбит от Вищерица. – Изв. Хим. инст. БАН, 9, 123-133.

Каров, Ч., С. Петрусенко 1996. Пренит от две пегматитови находища в България. – Historia naturalis bulgarica, 7, 97-103.

Колчева, К. 1969. Габропегматити при с. Чернозем, Ямболско. – Год. СУ, ГГФ, 61, 1, 193-206.

СУ, ГГФ, 94, 1, 171-192.

Костов, И. 1940. Върху ортита от мигматичните пегматити около с. Михалково (Центр. Родопи). – Год. СУ, ФМФ, 36, 3, Ест. ист., 187-194.

Костов, И. 1954а. Андалузит от пегматити в Ардинско, Централните Родопи. – Год. СУ, БГГФ, 48, 2, 1-22.

Костов, И. 1965а. Алпийски тип минерализации в гнайсите на Централните Родопи. – Сп. Бълг. геол. д-во, 26, 3, 271-278.

Костов, И., С. Петрусенко. 1965. Андалузитови параморфози от пегматоидни лещи. – Тр. геол. България, сер. Геохим., минерал. петрогр., 5, 85-97.

Костов, Р. И. 2007в. Пегматитови и скарнови минерали от Западните Родопи. – В: Ръководство за учебни практики по минералогия и петрография (ред. Костов, Р. И.). Второ прер. и доп. изд., С., Изд. къща "Св. Иван Рилски", 92-94.

Костов, Р. 2012г. Пегматитови и метаморфни минерали от Западните Родопи. – В: Ръководство за учебни практики по минералогия и петрография (Б. Банушев, С. Приставова, Р. Костов, Р. Паздеров, Н. Цанкова, Е. Раева, С. Малинова). 2012. Трето прер. и доп. изд., С., Изд. къща "Св. Иван Рилски", 101-103.

Костов, Р. И., Р. Паздеров. 2007. Пегматитови минерали от Плана планина. – В: Ръководство за учебни практики по минералогия и петрография (ред. Костов, Р. И.). Второ прер. и доп. изд., С., Изд. къща "Св. Иван Рилски", 47-49.

Котев, К. 1964. Върху лепидолит от гранитовите пегматити в Маданско. – Сп. Бълг. геол. д-во, 25, 1, 79-81.

Котев, К. 1975. Върху гранитните пегматити от района мужду с. Елховец, Смилян, Триград (Централи Родопи). – Сп. Бълг. геол. д-во, 36, 1, 59-68.

Котев, К. 1980. Върху керамичните и слюдоносните пегматити от Източните Родопи. – Сп. Бълг. геол. д-во, 41, 2, 128-138.

Малеев, М., Г. Х. Димитрова, Е. Н. Ланджева. 1978б. Хидромусковитови псевдоморфози по турмалин от Витоша. – Год. СУ, ГГФ, 69, 1, 107-114.

Маринова, Р. 1981. Бастнезит – нов минерал за България. – Рудообр. проц. минер. нах., 14-15, 132-136.

Маринова, Р., Р. Димитров. Н. Гюров. 1968. Корунд от района на селата Мишевско и Комощица, Кърджалийско. – В: Юбилеен геологически сборник. С., БАН, 387-394.

Нейкова, Е. 2002. K-Na полевые шпаты из пегматитовой жилы Латинка 1, Болгария – определение Al/Si упорядоченности и параметров елементарной клетки по рентгеноструктурным даннам. – В: II Международный симпозиум “Минеральное разнообразие – исследование и сохранение”. 11-14 октября, 2002, София, Болгария, Тезисы. С., Нац. музей “Земля и люди”, 25.

Нейкова, Е., Д. Захариева, А. Секиранов. 2007. Оптически аномальные бериллы из жилы 211-32 (Бери) Ардинского пегматитового поля. – В: Третий Международный симпозиум “Минеральное разнообразие –исследование и сохранение”. 7-10 октября, 2005, София, Болгария, Доклады. С., Нац. музей “Земля и люди”, 155-166.

Николов, Н. 1933. Скъпоценни камъни. – Природа и наука, 3, 5-6, 72-74.

Николов, Н. 1934б. Турмалин. – Природа и наука, 5, 4, 60-62.

Николов, Н. 1935а. Пегматитът от Маркова трапеза, Самоковско. – Год. СУ, ФМФ, 31, 3, 139-147.

Пейчева, И., Р. Арнаудова, В. Арнаудов, А. Секиранов. 1992а. Калиеви фелдшпати от пегматити в района на гр. Ардино. – В: Научна сесия “Постижения и задачи на българската минералогия и петрология”. София, 24-25 септември 1992. С., СУБ, 23-24.

Пейчева, И. М., С. Соколов, А. Секиранов. 1993. Rb-Sr датирование пегматитов района г. Ардино, Центральные Родопы. – Докл. БАН, 46, 7, 63-65.

Пейчева, И., Р. Арнаудова, В. Арнаудов, А. Секиранов. 1994. Адулар от камерни пегматити при с. Латинка, Централни Родопи. – Сп. Бълг. геол. д-во, 55, 1, 25-35

Петров, П., М. Райнова, Т. Маринова, Е. Костова. 1982. Эвксенит гранитных пегматитов в консолидированных областях Альпийского складчатого пояса. – В: XIII Конгресс ММА’82, Варна. Тез. докладов, С., БАН, 162.

Петрусенко, С. 1969. Скаполит от северозападна Рила. – Изв. Геол инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 18, 153-160.

Петрусенко, С. 1981. Андалузит, корунд и турмалин от пегматитовото находище Маркова трапеза, Самоковско. – Геохим., минерал. петрол., 14, 73-82.

Петрусенко, С. И. 1990. Диопсид от скарните на Северозападна Рила. – Геохим., минерал. петрол., 26, 42-50.

Петрусенко, С. 2002а. Везувиан от калциеви скарни в Рила планина. – Historia naturalis Bulgarica, 14, 145-156.

Петрусенко, С. 2022. Таумасит и смарагд – редки минерали от находища от Рила планина. – Геол. минер. ресурси, 29, 2-3, 33-35.

Петрусенко, С., В. Арнаудов. 1978. Изумруды из десилицированных пегматитов Болгарии. – В: XI съезд Международной минералогической ассоциации, Тезисы докладов, 2, Новосибирск, 102-103.

Петрусенко, С., В. Арнаудов. 1980. Изумруды из десилицированных пегматитов Болгарии. – В: Самоцветы. Материалы XI съезда ММА. Л., Наука, 74-79.

Петрусенко, С., В. Арнаудов. 1996. Десилицирани пегматити с дравит и корунд от Ихтиманска Средна гора. –Геохим., минерал. петрол., 31, 65-77.

Петрусенко, С., В. Желев. 2017. "Урдини езера". – Геол. минер. ресурси, 24, 9-10, 38-44.

Петрусенко, С., В. Желев. 2021. Урдиният циркус – защитен природен обект за минерали в Рила планина. –Минно дело и геология, 1, 30-36.

Петрусенко, С. И., Ч. Каров. 2003. Минералите на Витоша. – Минно дело и геология, 75, 8, 23-27.

Петрусенко, С., К. Падера. 1970. Розов клиноцоизит от Централните Родопи. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 19, 133-139.

Петрусенко, С., В. Арнаудов, И. Костов. 1966. Смарагдов пегматит от Урдините езера, Рила планина. – Год. СУ, ГГФ, 59, 1, 247-268.

Петрусенко, С., В. Арнаудов, И. Костов. 1971. Сравнително изучаване на берилите от България. – Изв. Геол. инст. БАН, сер. Геохим., минерал. петрогр., 20, 45-68.

Петрусенко, С. И., М. Н. Таран, А. Н. Платонов, С. В. Гаворкян. 1992. Исследование минералов группы эпидота из месторождений Родопской области методами оптической и инфракрасной спектроскопии. – Сп. Бълг. геол. д-во, 53, 1, 1-9.

Петрусенко, С., М. Петрова, В. Енчев. 2005. Първа находка на александрит в България. – Минно дело и геология, 10, 35-37.

Пироева, И., С. Атанасова-Владимирова, В. Димов. 2007. Пилотно изследване на турмалин от пегматитовата жила Латинка, Централни Родопи, България. – В: Геонауки 2007. С., БГД, 48-49.

Ратиев, Л., Х. Пулиев. 1964а. Амазонит от околностите на с. Кестен, Смолянско. – Год. Гл. упр. геол., 14, 93-99.

Ратиев, Л., Х. Пулиев. 1964б. Химико-структуные особенности амазонита окрестностей с. Кестен (Смолянский округ, Болгарии). – Зап. Всес. минер. о-ва, 93, 6, 655-661.

Рашкова, Д. 1975. Кристалографски изследвания на алкални фелдшпати от пегматити в Бургаско. – В: VIII Нац. преглед ТНТМ. С., 209-218.

Рашкова, Д. 1982а. Сравнителни изследвания на магнезиево-железни слюди и калиеви фелдшпати от медномолибденови жили и пегматити в Бургаско. Дисертация кгмн. С., 164 с.

Рашкова, Д. 1982б. Сравнително изследване на магнезиево-железни слюди от медномолибденови рудни жили и пегматити в Бургаско. – Геохим., минерал. петрол., 16, 29- 46.

Рашкова, Д. 1982в. Стойките – жилы альпийского типа. – В: Путеводитель экскурзий. 3. Централные Родопы. С., 53-56.

Рашкова, Д., Г. Н. Киров. 1980. Алкални фелдшпати от пегматитите при с. Черноморец, Бургаско. – Геохим., минерал. петрол., 12, 48-56.

Сарафова, Н., И. М. Иванов. 1971. Характеристика на калиевите фелдшпати в пегматитите от Средногорието. –Сп. Бълг. геол. д-во, 32, 1, 113-120.

Секиранов, А., Е. Нейкова. 2002. Музейный каталог образцов пегматитовой жилы “Латинка 1” – основные категории и структурирование базы данных. – В: II Междун. симпозиум Минеральное разнообразие –исследование и сохранение”. 11-14 октября, 2002, София. Тезисы. С., Нац. музей “Земля и люди”, 4.

Стефанов, С. 1963. Смолянският фелдшпат – нова ценна суровина за финокерамичната промишленост. –Строит. мат. силик. пром., 4, 31-33.

Стойнова, М. 1965. Минералогия на пневматолитно-хидротермалните жили по р. Белишка, Смолянски окръг. – Год. ВМГИ, 10, 2, 79-86.

Стоянов, И. 1915. Фелдшпатите от няколко фелдшпатови находища в България. – Год. СУ, 10-11, 1-125.

Хисина, Т. 1966. Псевдоморфоза торогуммита по уранините из Планских пегматитов. – Труд геол. България, сер. Геохим., минерал. петрогр., 6, 243-246.

Цанкова, Н. С. 2004. Илменорутил от микроклин-олигоклазовите пегматити от района на с. Пастра в Рила. – В: Минерогенезис-2004. Научна сесия в чест на 90-годишния юбилей на академик Иван Костов. СУ “Св. Климент Охридски”, София, 22-23 януари 2004 г. Резюмета. С., БМД, 62-63.

Чернева, З., Р. Арнаудова, Ц. Илиев. 1992. Фелдшпатова термометрия на мигматични образувания от Централните Родопи. – В: Научна сесия “Постижения и задачи на българската минералогия и петрология”. София, 24-25 септември 1992. С., СУБ, 65-67.

Чернева, З., Р. Арнаудова, Ц. Илиев, К. Рекалов. 1997. Фелдшпатова термометрия на мигматични образувания от Централните Родопи. – Сп. Бълг. геол д-во, 58, 3, 139-156.

Чонтова, Ц. 1965. Гранитови петматити при н. Подрумче, Крумовградско. – Сп. Бълг. геол. д-во, 26, 2, 185-192.

Янакиева, Ж., Ч. Начев, П. Петров, Е. Нейкова. 2000. Месторождения короткопризматического турмалина в окрестностях с. Владая. – В: Международный симпозиум "Минеральное разнообразие – исследование и сохранение". 6-9 ноября, 2000, София, Болгария. Тезисы. С., Нац. музей "Земля и люди", 18.

Arnaudov V. 1975. Pegmatite types of various ages from the northwestern part of the Rhodope Massif – Geologica Balcanica, vol. 5 (4), 59-72.

Arnaudov V. 1974. Mineralogy and geochemistry of the pegmatites from NW Rila – PhD Thesis (in Bulgarian).

Arnaudov V. 1975. Structure and mineral composition of the granite pegmatites from NW Rila – Geochem., mineral., petrol., 2, 61-77 (in Bulgarian).

Arnaudov V, S. Petrussenko. 1967. Primary accessory mineralization in the pegmatite of Vishteritsa, Western Rhodopes. Bulletin of the Geological Institute – series Geochemistry, mineralogy and petrology, vol XVI, 145-159 (in Bulgarian with English and Russian abstracts)

Arnaudov V, S. Petrussenko. 1992. Non-granite facial and phase pegmatites in Vithosha, West Bulgaria. – In: Lepidolite 200, Interact. Symp. Mineral., petrol. Geochem. Gran. Pegm., Praga, Czechosl., 10-11

Arkadakskiy, S., Böhm, C., Heaman, L., Cherneva, Z., Stancheva, E. 2000. New U-Pb results from the Central Rhodope Mts., Bulgaria. In: Geodynamics and ore deposits evolution of the AlpineBalkan-Carpathian-Dinaride Province, ABCD-GEODE 2000 Workshop, Borovets, Bulgaria, Abstracts, page 5.

Alexandrov, P., G. Giuliani, J. Zimmermann. 2001. Mineralogy, age, and fluid geochemistry of the Rila emerald deposit, Bulgaria. – Econ. Geology, 96, 6, 1469-1476.

Amov, B. G., Ts. T. Baldjieva, V. S. Arnaudov, M. D. Pavlova. 1973. Isotopic composition of lead in potassium feldspars and the geological age of pegmatites in Southern Bulgaria. – Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci., 26, 2, 1513-1516.

Antonova, D. V., L. V. Andreeva. 1988. Synchisite and parisite: new minerals for Bulgaria. – Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci., 41, 2, 83-86.

Antonova, D., L. Andreeva. 1989. Certain metasomatic La-Ce-F carbonates (composition and features). – In: XIV Congress CBGA, Extended Abstracts, Sofia, 1, 51-54.

Arnaudov, V. 1975. Pegmatite types of various ages from the Northeastern part of the Rhodope massif. – Geologica Balc., 5, 4, 59-72.

Arnaudov, V. S., R. T. Arnaudova. 1996. Adularia in pegmatites, alpine veins and hydrothermal oremineralizations from Bulgaria. – Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci., 49, 9-10, 95.

Arnaudov, V., M. Pavlova, L. Punev. 1979. Tungstenian wulfenite in a quartz-pegmatoid vein in the area of Tran (Western Bulgaria). – Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci., 32, 3, 345-347.

Arnaudov, V., B. Amov, T. Baldjieva, M. Pavlova. 1990b. Tertiary migmatic pegmatites in the Central Rhodope crystalline complex. Uranium-lead zircon dating. – Geologica Balc., 20, 6, 25-32.

Arnaudov, V., S. Petrussenko, Ch. Karov. 2002. Buergerite in pegmatites from the Plana Cretaceous pluton, Western Bulgaria. – Geochem., Mineral. Petrol., 39, 75-80.

Arnaudov, V., S. Petrussenko, C. Karov. 2003. Schorl, foitite and dravite in pegmatites from the metamorphic mantle of the Plana pluton, SW Bulgaria. – Geochem., Mineral. Petrol., 40, 97- 107.

Arnaudov, V., S. Petrussenko, E. Stancheva. 2004. Manganoan sekaninaite in the Tertiary pegmatites from the metamorphic complex in the Central Rhodope. – Geochem., Mineral. Petrol., 41, 45-52.

Atanassova-Vladimirova, S., A. Sekiranov. 2009. “New Hope” pegmatite vein from Arda region, the Central Rhodopes, Bulgaria. – In: IV Intern. Symposium “Mineral Diversity – Research and Preservation”. 12th-15th October, 2007, Sofia, Bulgaria. Working Papers. Earth and Man National Museum, Sofia, 201-206.

Bosse, V., Boulvais, P., Gautier, P. Tiepolo, M., Ruffet, G., Devidal, J.L., Cherneva, Z., Gerdjikov, I.,Paquette, J.L. 2009. Fluid-induced disturbance of the monazite Th–Pb chronometer: in-situ dating and element mapping in pegmatites from the Rhodope (Greece, Bulgaria). Chemical Geology, 261, 286–302.

Boyadjiev, S., I. Ivanov. 1975. On the pegmatites in the Plana pluton. - Geochem. Mineral. Petrol.,3, 78-87 (in Bulgarian).

Froitzheim N., Jahn-Awe S., Frei D., Wainwright A.N., Maas R., Georgiev N., Nagel T.J., Pleuger J. 2014. Age and composition of meta-ophiolite from the Rhodope Middle Allochthon (Satovcha, Bulgaria): a test for the maximum-allochthony hypothesis of the Hellenides. Tectonics. doi:10.1002/2014TC003526.

Georgiev N., Froitzheim N., Cherneva Z., Frei D., Grozdev V., Jahn-Awe S., Nagel T.J. (2016) Structure and U–Pb zircon geochronology of an Alpine nappe stack telescoped by extensional detachment faulting (Kulidzhik area, Eastern Rhodopes, Bulgaria). International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch) DOI 10.1007/s00531-016-1293-4.

Georgiev, N., Naydenov, K., Pleuger, J., Froitzheim, N. 2022. The Middle Allochthon and possible solutions for its modes of appearance within the Rhodope Metamorphic Complex. GeologicaBalcanica, XXII International Congress of the CBGA, Plovdiv,

Bulgaria, 7–11 September 2022, Abstracts, Special session SS3GeologicaRhodopica – updated, p 295.

Gorinova, T., Georgiev, N., Cherneva, Z. Naydenov, K., Grozdev, V., Lazarova, A. 2019. Kinematics and time of emplacement of the Upper Allochthon of the Rhodope Metamorphic Complex: evidence from the Rila Mountains, Bulgaria. International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch), 108, 7, 2129-2152, https://doi.org/10.1007/s00531-019-01754-2

Georgieva, S., R. Vassileva, G. Milenkov, Y. Georgieva, G. Lutov, E. Stefanova. 2020a. Clinozoisite from the Petrovitsa Pb-Zn deposit, Madan region, Central Rhodopes. – Rev. Bulg. Geol. Soc., 81, 3, 37-39.

Georgieva, S., R. Vassileva, G. Milenkov, E. Stefanova. 2021a. Epidote-group minerals in altered pegmatites from Madan ore region, Central Rhodopes, Bulgaria: occurrence and chemistry. – In: 9th Intern. Conference "Mineralogy and Museums". 24-26 August 2021, Sofia, Bulgaria. Extended Abstracts (Eds. Kostov, R. I., R. Atanassova). Earth and Man National Museum, Sofia, 39-40.

Georgieva, S., R. Vassileva, G. Milenkov, E. Stefanova, I. Peytcheva. 2021b. Epidote metasomatic zone in pegmatites from the vicinity of Strashimir Pb-Zn vein deposit, Central Rhodopes: mineralogy, geochemistry and in-situ U/Pb age determination. – Rev. Bulg. Geol. Soc., 82, 3, 22-24.

Giuliani, G., C. France-Lanord, P. Coget, D. Schwarz, A. Cheilletz, Y. Branquet, D. Giard, A. MartinIzard, P. Alexandrov, D. H. Piat. 1998. Oxygen isotope systematics of emerald: relevance for its origin and geological significance. – Mineralium Deposita, 33, 5, 513-519.

Dencheva, S. 2019. Twinned adularia from Latinka, Eastern Rhodopes, Bulgaria. – Rev. Bulg. Geol. Soc., 80, 3, 25-26.

Dimov, V., Z. Vergilov, B. Kostova, I. Vergilov. 2004. Real structure study of Vitosha tourmaline by computer simulated HRTEM images. – Ann. Univ. Sofia, FGG, 96, 1, 121-130.

Handler, R., Neubauer, F., Velichkova, S.H., Ivanov, Z., 2004.40Ar/39Ar age constraints on the timing of magmatism in thePanagyurishte region, Bulgaria. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen 84 (1/2), 119–132.

Haralampiev, A., E. Dinolova. 1993. Tsilaisite – new tourmaline variety in Bulgaria. – Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci., 45, 1, 25-27.

Jahn-Awe, S., Froitzheim, N., Nagel, T.J., Frei, D., Georgiev, N., Pleuger, J. 2010. Structural and geochronological evidence for Paleogene thrusting in the western Rhodopes, SW Bulgaria: Elements for a new tectonic model of the Rhodope Metamorphic Province. Tectonics 29, 3, TC3008, doi:10.1029/2009TC002558.

Jahn-Awe, S., Pleuger, J., Frei, D., Georgiev, N., Froitzheim, N., Nagel, T.J. 2012. Time constraints for low-angle shear zones in the CentralRhodopes (Bulgaria) and their

significance for the exhumationof high-pressure rocks. International Journal of Earth Sciences, 101, 1971-2004, https://doi.org/10.1007/s00531-012-0764-5.

Janák M., Froitzheim N., Georgiev N., Nagel T.J., Sarov S. (2011) P-T evolution of kyanite eclogite from the Pirin Mountains (SW Bulgaria): implications for the Rhodope UHP Metamorphic Complex. J Metamorph Geol 29:317-332.

Ivanov I. 1967. Inner structure and origin of assymetrical zonal pegmatites from the Srednogorie and Vishteritsa. Bulletin of the Geological Institute – series Geochemistry, mineralogy and petrology, vol XVI, 171-187 (in Bulgarian with English and Russian abstracts)

Ivanov I. 1973. Rare-earth pegmatites in the Rilo-Rhodope granitoid batholite. Bulletin of the Geological Institute – series Geochemistry, mineralogy and petrology, vol XXII, 41-52 (in Bulgarian with English and Russian abstracts)

Ichev, M. M. 1986. A new emerald deposit in Bulgaria. – Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci., 39, 12, 81-83.

Ivanov, I. M. 1995. Granitic pegmatites in Bulgaria – a potential complex source for metal and mineral resources. –Geology and Mineral Resources, 4, 16-20.

Ivanov, I. M., L. A. Grozdanov. 2001. Biotite in the granitic pegmatites in the deposits of Smilovene, Koprivshtitsa Region. – Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci., 54, 4, 59.

Karov, C. 2000. Mineral composition of pegmatite types in Vitosha pluton. First International Symposium, Mineral diversity – research and preservation. Earth and Man National Museum, Sofia, 1, 15.

Kaiser-Rohrmeier, M., R. Handler, A. von Quadt, C. Heinrich. 2004. Hydrothermal Pb-Zn ore formation in the central Rhodopian dome, south Bulgaria: review and new time constraints from Ar-Ar geochronology. – Swiss Bull. Mineral. Petrol., 84, 1, 37-58.

Kaiser-Rohrmeier, M., A. von Quadt, T. Driesner, C. A. Heinrich, R. Handler, M. Ovtcharova, I. Peytcheva. 2013. Postorogenic extension and hydrothermal ore formation: high-precision geochronology of the Central Rhodopian metamorphic core complex (Bulgaria-Greece). – Economic Geology, 108, 4, 691-718.

Karov, Ch. 2000. Mineral composition of pegmatite types in Vitosha pluton. – In: Intern. Symposium “Mineral Diversity – Research and Preservation”. 6th-9th October, 2000, Sofia, Bulgaria. Abstracts. Earth and Man National Museum, Sofia, 15.

Kostov-Kytin, V., Ch. Karov, I. Dimitrov, R. Nikolova. 2020. New investigations on the columbite from Vishteritsa locality, western Rhodopes. – Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci., 73, 5, 657-665.

Marchev, P., Georgiev, S., Raicheva, R., Peytcheva, I., von Quadt, A., Ovtcharova, M., Bonev, N. 2013. Adakitic magmatism in post-collisional setting: an example from the Early-Middle Eocene Magmatic Belt in South Bulgaria and North Greece. Lithos 180–181, 159–180.

Milenkov, G., R. D. Vassileva, I. Peytcheva, V. Grozdev. 2020. U/Pb dating and trace element compositions in pegmatite hosted titanite from the Petrovitsa Pb-Zn deposit, Madan district, South Bulgaria. – Rev. Bulg. Geol. Soc., 81, 3, 90-92.

Milenkov, G., R. D. Vassileva, S. Georgieva. 2022. Critical elements in allanite and titanite from pegmatites in the Petrovitsa Pb-Zn deposit, Central Rhodopes, Bulgaria. – In: Proc. 16th SGA Biennial Meeting, 28-31 March 2022, Vol. 1 (Ed. Christie, A. B.), 255-258.

Ovtcharova, M., A. von Quadt, Z. Cherneva, S. Sarov, C. Heinrich, I. Peycheva. 2004. U-Pb dating of zircon and monazite from granitoids and migmatites in the core and eastern periphery of Central Rhodopian Dome, Bulgaria. – Geochim. Cosmochim. Acta, 68, 11, A644.

Petrussenko, S. 1982. Pegmatites in the Plana pluton. – In: Guide Book 1. Eastern Srednogorie Zone. IMA 13thGeneral Meeting, Varna, 1982, 61-63.

Petrussenko, S. 1991. Kamenie szlachetne i ozdobne Bulgarii. – Mineral. Polon., 22, 1, 81-87.

Petrussenko, S., Ch. Karov. 1993. Tennantite from the pegmatites of Vitosha. – Comp. Rend. Acad. Bulg. Sci., 46, 1, 79-80.

Petrussenko, S., Ch. Karov. 2021a. The mineral diversity of the Urdini Lakes and the glacial valley of the Urdina River (Rila Mountain) – an overview. – Geologica Balc., 50, 3, 15-22.

Petrussenko, S., Ch. Karov. 2021b. Urdina's River glacial valley – a protected area for minerals in the Rila Mountain, Bulgaria. – In: 9th Intern. Conference “Mineralogy and Museums”. 24-26 August 2021, Sofia, Bulgaria. Extended Abstracts (Eds. Kostov, R. I., R. Atanassova). Earth and Man National Museum, Sofia, 109-110.

Petrussenko, S., I. Dimitrov, K. Glushkov, L. Metodiev. 2009. A wonderful world of minerals (minerals, mineral deposits and localities from the area of the town of Chepelare, the Central Rhodopes, Bulgaria). – In: IV Intern. 287 Symposium “Mineral Diversity – Research and Preservation”. 12th-15th October, 2007, Sofia, Bulgaria. Working Papers. Earth and Man National Museum, Sofia, 229-233.

Peytcheva, I., M. Stavrev, A. Hikov, S. Chavdarova, T. Vladinova. 2020a. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating of granites in the area of Vishteritsa pegmatites: implication for timing of fertile magmatism in the Western Rhodopes, Bulgaria. – Rev. Bulg. Geol. Soc., 81, 3, 93-95.

Peytcheva, I., A. von Quadt, V. Kostov-Kytin, M. Stavrev, M. Guillong. 2020b. First LA-ICP-MS U-Pb dating and trace element composition of columbite from Vishteritsa rare-metal pegmatites, Western Rhodopes, Bulgaria. –Rev. Bulg. Geol. Soc., 81, 3, 96-98.

Peytcheva, I., A. von Quadt, V. Kostov-Kytin, M. Kadiyski, M. Stavrev. 2021. U-Pb dating and composition of columbite from Vishteritsa: Implication for timing of granite magmatism and rare-element granitic pegmatites in the Western Rhodopes, Bulgaria. – Geologica Carpathica, 72, 3, 195-212.

Piroeva, I., S. Atanasova-Vladimirova, V. Dimov. 2007. Investigation of tourmaline from Latinka pegmatite vein. – Central Laboratory of Mineralogy and Crystallography, Bulgarian Academy of Sciences, Ann. Report 13, 45-46.

Pristavova, S., T. Stanimirova, I. Klimov, M. Ichev. 2019a. Piemontite occurrence from the area of Petrovo village, South Pirin, Bulgaria. – Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci., 72, 5, 627-633.

Petrussenko S., Ch. Karov.1993. Tennantite from the pegmatites of Vitosha. – C. R. Acad. Bulg. Sci., 46 (1): 79-80.

Peytcheva, I., von Quadt, A., Kostov-Kytin, V., Kadiyski, M., Stavrev, M. 2021. U–Pb dating and composition of columbite from Vishteritsa: Implication for timing of granite magmatism and rare-element granitic pegmatites in the Western Rhodopes, Bulgaria. GeologicaCarpathica, 72, 3, 195–212.

Pleuger, J., Cherneva, Z., Klug, L., Hoffmann, E., Schmidtke, M., Froitzheim, N., Georgiev, N., Naydenov, K., Stegmann, K., Pohl, A., Germer, M., Borchert, A., Menneken, M. 2019. EGU, 14th Emile Argand Conference on Alpine Geological Studies, September 2019, SionSwitzerland, Abstract volume, p71.

Raeva, E., Peytcheva, I., Ovtcharova, M., and Cherneva, Z., 2008, U-Pb zircon dating of granites and orthogneisses from the Madan unit in the Arda river valley, Central Rhodopes, Bulgaria: Bulgarian Geological Society, Geosciences, Sofia, Bulgaria, Dec. 2008, Proceedings, p. 37–38.

Rohrmeier, M.K., von Quadt, A., Dreisner, T., Heinrich C.A., Handler, R., Ovtcharova, M., Ivanov, Z., Petrov, P., Sarov, S., Peytcheva, I. 2013. Post-Orogenic Extension and Hydrothermal Ore

Formation: High-Precision Geochronology of the Central Rhodopian Metamorphic Core Complex (Bulgaria-Greece). Economic Geology, 108, 691-718.

Soldatos T., Koroneos A., Christofides G., Del-Moro, A. 2001. Rb-Sr geochronology and origin ofthe ElatiaPlutonite (Helenic Rhodope Massif,N. Greece) constrained by new Sr isotopic data.NeuesJahrbuch für Mineralogie (Abh.), 176, 2,179-209.

Stavrev, M., Peytcheva, I., Hikov, A., Vassileva, R.D., von Quadt, A., Guillong, M., Grozdev,V., Plotkina, Y. 2020*. Late Cretaceous Magmatism in Part of the Western Rhodopes (Bulgaria): U-Pb dating on zircon and grossular-andradite garnets. ComptesRendus de l'AcademieBulgare des Sciences, 73, 4, 521-530.

Vassileva, R. D., V. Grozdev, G. Milenkov. 2020 Trace elements in pegmatite-hosted titanite from the Petrovitsa Pb-Zn deposit, South Bulgaria. – In: Goldschmidt 2020. Abstracts.

Vassileva, R. D., G. Milenkov, S. Georgieva, E. Stefanova. 2021a. Chlorite alteration in pegmatite from the Madan Pb-Zn deposits: mineral association, chemical composition and temperature of formation. – Rev. Bulg. Geol. Soc., 82, 3, 70-72.

Vassileva, R., G. Milenkov, S. Georgieva. 2021b. Pegmatites from the Pb-Zn deposits in Central Rhodopes, South Bulgaria. – In: XIII Nat. Petrographic Conference “Petrology

and Geodynamics of Geological Processes" Irkutsk, September 6-13, 2021, 3, Geography Institute, Russian Academy of Sciences, 287-290.

Vassileva, R. D., S. Georgieva, G. Milenkov. 2022. Hydrothermal products on the pegmatite/marble contact: a case study from Pb-Zn Madan deposits, South Bulgaria. – In: Proc.16th SGA Biennial Meeting. 28-31 March 2022, Vol. 1 (Ed. Christie, A. B.), Rotorua, 404-407.

Vergilov, Z., B. Kostova. 2000. Composition, anatomy and growth mechanism of tourmalines from Vitosha pegmatites. – Ann. Univ. Sofia, FGG, 92, 1, 105-119.

Vergilov, Z., V. Dimov, I. Vergilov. 2000. Pilot real structure modeling of Vitosha tourmaline. – Ann. Univ. Sofia, FGG, 92, 1, 95-104.

Vesselinov, I. 1992. Flux recrystallization of natural beryl into gem-quality emerald. – Geologica Balc., 22, 2, 70.

Von Quadt, A., Moritz, R., Peytcheva, I., Heinrich, C., 2005. Geochronologyand geodynamics of Late Cretaceous magmatism and Cu–Au mineralizationin the Panagyurishte region of the Apuseni–Banat–Timok–Srednogoriebelt(Bulgaria). Ore Geology Reviews 27, 95–126.

Von Quadt, A., Peytcheva, I. 2005. The southern extension of the Srednogorie type Upper Cretaceous magmatism in Rila-Western Rhodopes: constraints from isotope-geochronological and geochemical data. Proceedings of the Jubilee International Conference "80 years Bulgarian Geological Society", 113-116.

Zidarov, N., Petrov O. (2011). Grayite from Srednagora pegmatites - first find in Bulgaria. Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences 64, 1719-1726.

Metodika laboratorní testace vzorků pegmatitů zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků

# Příloha 3
# Pasporty studovaných lokalit

| | |
|---|---|
| Program: | Epsilon |
| Název projektu: | Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů |
| Název projektu anglicky: | Evolved magmatic and pegmatitic systems as sources of critical raw materials and industrial minerals |
| Číslo projektu TAČR: | TH79020002 |
| Číslo projektu ERA-MIN 3: | JTC-2021_174 |
| Řešitelské organizace: | Masarykova univerzita |
| | G E T s.r.o. |
| | K M K GRANIT, a.s. |
| Doba řešení: | 5/2022 - 4/2025 |
| Důvěrnost a dostupnost: | veřejně přístupný |


| | |
|---|---|
| Řešitelský tým: | Jan Cempírek (Masarykova univerzita) |
| | Milan Novák (Masarykova univerzita) |
| | Radek Škoda (Masarykova univerzita) |
| | Jaromír Tvrdý (G E T s.r.o.) |
| | Petr Hanzlík (G E T s.r.o.) |
| | Ondřej Krátký (G E T s.r.o.) |
| | Ondřej Sysel (G E T s.r.o.) |
| | Jitka Kovářová (G E T s.r.o.) |
| | Pavel Jedlička (K M K GRANIT, a.s.) |
| | Emília Křenková (K M K GRANIT, a.s.) |
| | Pavel Tatýrek (K M K GRANIT, a.s.) |

Přílohu zpracovali: Jaromír Tvrdý
Pavel Jedlička
Milan Novák
Jan Cempírek

Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON je zaměřen zejména na zlepšení pozice českého a v globálním kontextu i evropského průmyslu pomocí podpory projektů spadajících do kategorie aplikovaného výzkumu (zahrnuje průmyslový výzkum, experimentální vývoj nebo jejich kombinaci), jejichž výsledky mají vysoký potenciál pro rychlé uplatnění v nových produktech, výrobních postupech a službách. Poskytovatelem finančních prostředků je Technologická agentura ČR.

# 1 Úvodní informace

Pasporty testovaných lokalit byly zpracovány v rámci projektu „Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů“ jako jeden z podkladů ke kompletaci dvou hlavních výstupů, kterými jsou certifikované metodiky, které na sebe úzce navazují a v obecných kapitolách se překrývají:

- CM1 Certifikovaná metodika laboratorní testace vzorků pegmatitů zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků.
- CM2 Certifikovaná metodika hodnocení využitelnosti silikátových složek a vzácných prvků na ložiskách pegmatitového typu a příbuzných typů.

Účelem pasportů zařazených jako příloha obou metodik je charakterizace navštívených objektů projektového území doplněných o lokality v Českém masivu tak, aby odebrané vzorky představovaly pokud možno reprezentativní soubor vhodný jak pro testování vyvíjených metodik, tak i pro výzkumné cíle ostatních projektových partnerů. Tyto cíle jsou definovány následovně:

(i) identifikovat hlavní výskyty pegmatitů a vzácnoprvkových granitů v karpatsko-balkánské oblasti a posoudit jejich geologické, strukturní a geochemické znaky;

(ii) pochopit a charakterizovat geologické procesy a strukturní podmínky, které vedly ke vzniku pegmatitů a vzácnoprvkových granitů;

(iii) posoudit vývoj ložisek a jejich surovin v čase, v závislosti na geologickém prostředí těchto magmatických těles a pochopit jejich regionální distribuci v oblasti;

(iv) charakterizovat vnitřní procesy vzniku pegmatitů, modelovat pegmatitová tělesa a vymezit jejich vnitřní strukturu;

(v) určit potenciální průzkumné oblasti s ohledem na typ a obsah surovin;

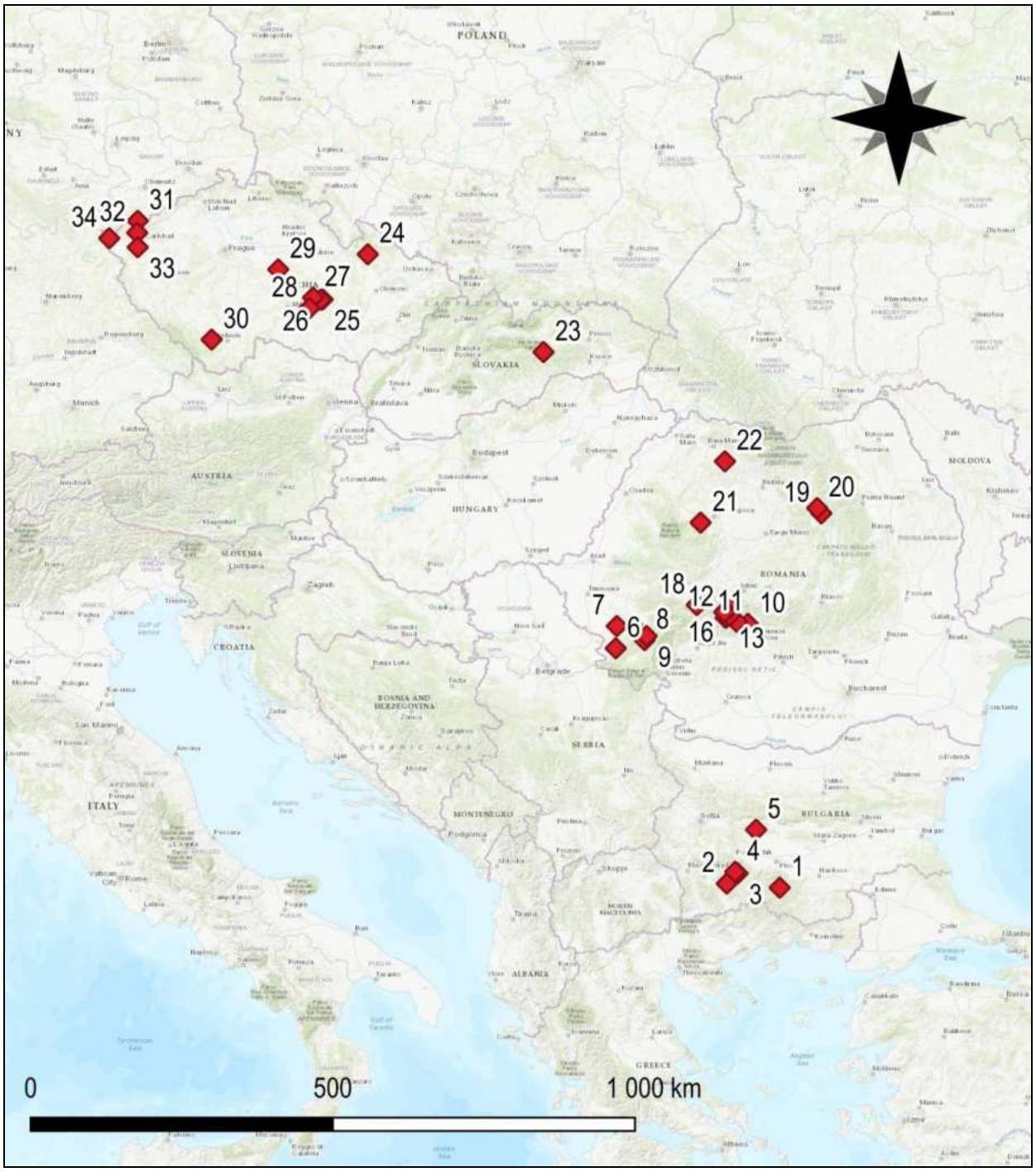
(vi) posoudit parametry využitelnosti rudních i nerudních surovin z komplexních pegmatitových těles.

Protože jde o výskyty, které jsou současně předmětem výzkumu zahraničních projektových partnerů, jsou pasporty zpracovány v anglickém jazyce.

## 2 Přehled studovaných lokalit

| Poř. číslo | Kód | Název | Horninový typ |
|---|---|---|---|
| 1 | Dzu | Džurkovo | pegmatit |
| 2 | Vst | Vištерica | pegmatit |
| 3 | Rak | Rakitovo | pegmatit |
| 4 | Vel | Velingrad | pegmatit |
| 5 | Smi | Smilovene | pegmatit |
| 6 | Ocm | Oravița-Ciclova Montana | skarn |
| 7 | Ocf | Ocna de Fier | skarn |
| 8 | Ter | Teregova | pegmatit |
| 9 | Arm | Armeniș-Sat Bâtrân | pegmatit |
| 10 | BrV | Brezoi-Vasilatu | pegmatit |
| 11 | MC | Mălaia-Ciungetu | ortorula/feldspatit |
| 12 | Vid | Vidruța | pegmatit |
| 13 | MM | Mănaileasa Mare | pegmatit |
| 14 | CL | Cataractele Lotrului | pegmatit |
| 15 | Cn1, Cn2 | Valea Conțului No 1-2 | pegmatit |
| 16 | Cri | Cristești | svor |
| 17 | PA | Piatra Albă | pegmatit |
| 18 | CJ1, CJ2 | Costeşti-Jărosul No 1-2 | migmatitická ortorula |
| 19 | Di | Ditrău- Ghiduţ | nefelinický syenit |
| 20 | Jo | Jolotca | hydrotermalit |
| 21 | Co | Gilău-Cornu | pegmatit |
| 22 | Raz | Răzoare-Ciungi | pegmatit |
| 23 | Dob | Dobšiná | pegmatit |
| 24 | D6e | Maršíkov | pegmatit |
| 25 | ROZ | Rožná | pegmatit |
| 26 | DORO | Dolní Rožínka | pegmatit |
| 27 | RE | Řečice | pegmatit |
| 28 | Lav | Lavičky | alkalicko-živcový granit |
| 29 | Prb | Přibyslavice | alkalicko-živcový granit |
| 30 | LH | Lhenice | pegmatit |
| 31 | Pot | Potůčky | alkalicko-živcový granit |
| 32 | SMP | Smolné Pece | pegmatit |
| 33 | FK | Krásno-Vysoký Kámen | alkalicko-živcový granit |
| 34 | Ver | Vernéřov | pegmatit |

# 3 Přehledná mapa studovaných lokalit



# Pasporty lokalit

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 01 | BG | Dzu | DŽURKOVO |

**Territorial administrative units**
Province (code): Plovdiv (BG421)
Municipality: Laki

**Coordinates**
41.762222N, 24.807500E
https://maps.app.goo.gl/q1ECrffNA9n6DTPdA

**Rock type**
pegmatite

**Expected main raw material**
Feldspar
Quartz
REE (allanite)

**Situation**

**Topography**
Pegmatite bodies in the underground of the Laki Pb-Zn mine in Central Rhodopes, southern Bulgaria. The mine is situated at about 1070 m asl. in the valley of Džurkovska reka at the street No. 861 between the villages of Džurkovo (Djurkovo) and Zdravec (Zdravets).

**Other inferred useful components**
Sc (thortveitite)
Th, U
Nb, Ta

**Geology**
The Džurkovo (Djurkovo) base-metal vein deposit in Laki ore field is hosted by a heterogeneous gneiss/amphibolite/marble rock sequence of the high-grade metamorphic complex of the Central Rhodopes. Slightly deformed and hydrothermally altered thin pegmatite dykes occur predominantly concordant to the foliation of the host metamorphics.

**Textural/paragenetic units**
Abyssal class – LREE subclass. Clear textural zonation within the bodies is absent except for the preferential crystallization of garnet in the innermost parts. Along the pegmatite contacts, late hydrothermal epidote and chlorite are developed, usually in thin veinlets penetrating inwards the volume of the pegmatites.

**Mineralogy**
The pegmatite bodies consist mostly of K-feldspar, albite, quartz and minor garnet present.
The predominant K-feldspar forms massive cm-sized aggregates. Late albite partly dissolved earlier K-feldspar.
The main accessories include ishikawaite, zircon, apatite, monazite-(Ce), allanite-(Ce) and titanite.
The postmagmatic hydrothermal overprint resulted in the formation of epidote, sericite, chlorite, carbonate, quartz, hematite, and leucoxene. The accessory oxide, silicate, and phosphate minerals bearing rare earth elements, actinides (ACT), Nb, Ta, and Ti have undergone partial replacement by secondary mineral phases (thortveitite, fergusonite, fersmite, uraninite, thorianite, REE-epidote, xenotime) observed as irregular grains or veinlets along fractures and dissolved zones, either inside or near the primary minerals.

**Earlier exploration work. References.**
Georgieva S. et al. (2024) Incompatible elements (REE, Th, U, Nb, Ta, Ti) mineral association in altered pegmatite from the Djurkovo Pb-Zn deposit, Central Rhodopes: occurrence and geochemical properties. Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences 77, 1474-1484.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| No samples were taken to verify the developed methodologies. | 19. 6. 2023 |

**Photodocumentation**

Pegmatite outcrops in the underground (archive photos)

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 02 | BG | Vst | VIŠTERICA |

**Territorial administrative units**
Province (code): Pazardzhik (BG423)
Municipality: Bansko

**Coordinates**
41.8197222N, 23.8155556E
https://maps.app.goo.gl/zio1UTqu7tfe25Vo6

**Topography**
Pegmatite field located about 40 km south-west of the Velingrad town, in the upper reaches of the Višterica river. Close to Malak Beslet summit, the pegmatites were exploited for K-feldspar and muscovite until 1961.

**Geology**
Pegmatite field in western Rhodopes hosted by coarse-grained biotite and two-mica granites. Two types of bodies are decribed: (1) 10-15 m thick lenses in the biotite granite near the Beslet peak and along the Vishteritsa river; (2) up to 1 m thick zonal veins.

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – beryl columbite subtype. The bodies are characterized by complex zonal structure and some of the inclined veins show asymmetrical zonality.

- Quartz-oligoclase-microcline contact zone
- Graphic quartz-microcline zone
- Blocky quartz-microcline zone
- Quartz-muscovite-cleavelandite zone
- Irregular quartz-muscovite-albite replacements

Magnetite and ilmenite are found mainly in the external zones, while the rare-earth and rare-metal minerals occur in the inner zones close to the quartz core.

**Mineralogy**
Quartz, microcline-albite, muscovite Accessories: magnetite, ilmenite, amphibole, apatite, zircon, monazite, xenotime, columbite, garnet, gahnite, beryl

**Earlier exploration work. References.**
Ivanov I. (1967) Inner structure and origin of assymetrical zonal pegmatites from the Srednogorie and Vishteritsa. Bulletin of the Geological Institute – series Geochemistry, mineralogy and petrology, XVI, 171-187 (in Bulgarian).
Arnaudov V., Petrussenko S. (1967) Primary accessory mineralization in the pegmatite of Vishteritsa, Western Rhodopes. Bulletin of the Geological Institute – series Geochemistry, mineralogy and petrology, XVI, 145-159 (in Bulgarian).
Peytcheva, I., Von Quadt, A., Kostov-Kytin, V., Kadiyski, M., Stavrev, M. (2021) U–Pb dating and composition of columbite from Vishteritsa: Implication for timing of granite magmatism and rare-element granitic pegmatites in the Western Rhodopes, Bulgaria. Geologica Carpathica, 7, 195-212.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Samples VST-1, VST-2, VST-3. | 14. 6. 2023 |

**Rock type**
pegmatite

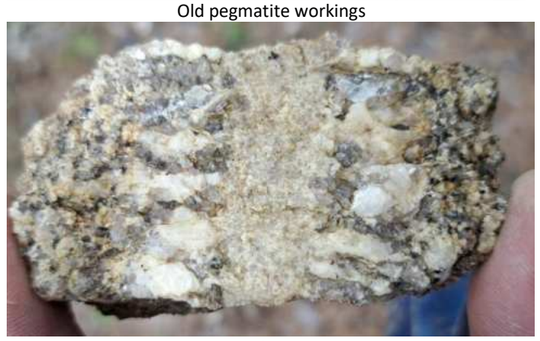
**Expected main raw material**
Feldspar
Mica

**Other inferred useful components**
Nb-Ta
REE
Beryllium
Sn

**Situation**

**Photodocumentation**

Old pegmatite workings


Pegmatite sample

Detail of pegmatite body

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality | Rock type |
|---|---|---|---|---|
| **03** | **BG** | **Rak** | **RAKITOVO** | **pegmatite** |

**Territorial administrative units**
Province (code): Pazardzhik (BG423)
Municipality: Rakitovo

**Coordinates**
41.961796N, 24.019090E
https://goo.gl/maps/rCQ8ryU4qQzUPGkv8

**Expected main raw material**
Feldspar
Mica
Quartz

**Other inferred useful components**
REE

**Situation**

**Topography**
Occasionally mined quarries for ceramic raw material in pegmatoid granite sills about 4-5 km southwest of Rakitovo in the direction of Lepenica. Large pegmatite body/bodies in the Suhata Reka quarry were documented.

**Geology**
The pegmatite forms a large body/bodies, more than 40 m wide and at least 100 m long in metagranitoids, migmatitised gneisses (biotite and two-mica), amphibolites and marbles of the Chepino lithotectonic unit. Medium-grained biotite granite contains abundant granitic pegmatites of variable size and shape. Contact with host rock sharp.

**Textural/paragenetic units**
Feldspar pegmatite.
The pegmatite lacks typical zonal distribution of minerals in the large scale; characteristic pegmatite textures similar to graphic (feldspar/quartz) intergrowths, albite-dominated areas and transitions to coarse-grained texture occur rather irregularly within the pegmatite volume. Observed units are:

- Coarse-grained granitic unit (Fls+Qz+Bt)
- Graphic unit (Kfs+Qz)
- Blocky Kfs
- Blocky Qz

**Mineralogy**
K-feldspar 40%, plagioclase 30%, quartz 25%, mica (muscovite, biotite) ≤ 5%
Garnet (almandine-spessartine) - common including line rock, often weathered
Magnetite - black grains, up to 5 mm, with biotite in less evolved unit
Pyrite - on tectonic fractures, strongly weathered
Zircon, monazite, xenotime, scarce apatite
(REE+Y)-bearing phosphates (xenotime, cheralite) and silicatels (e.g. REE-epidote)

**Earlier exploration work. References.**
Vassileva R. D. et al. (2023) Garnet (REE+Y)-bearing mineral association in pegmatite from the Chepino lithotectonic Unit, Western Rhodopes. Review of the Bulgarian Geological Society, 84, 63–66.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| No samples were taken to verify the developed methodologies. Collected mineralogical samples resulted in the publication Vassileva et al. (2023). | 9. 9. 2022 |

**Photodocumentation**

Explotation of pegmatoid granites in the Suhata Reka quarry

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 04 | BG | Vel | VELINGRAD |

**Territorial administrative units**
Province (code): Pazardzhik (BG423)
Municipality: Velingrad

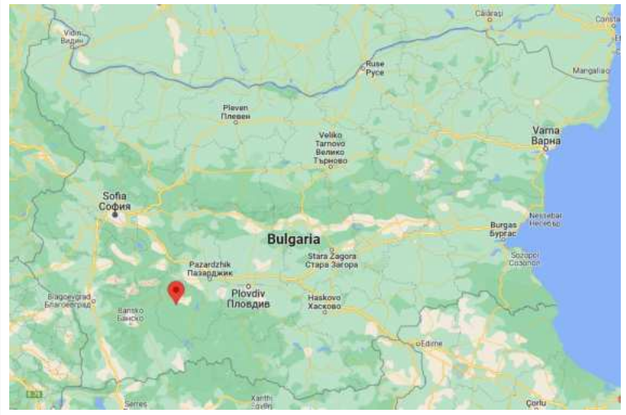
**Coordinates**
41.983943N, 23.974405E
https://goo.gl/maps/QVNhzDWZi5R49QV58

**Rock type**
pegmatite

**Expected main raw material**
Feldspar

**Other inferred useful components**
REE
garnet (abrasive) in skarn

**Situation**




**Topography**
Pegmatites penetrating marbles in highly degraded outcrops by the road, about 5 km S from the town of Velingrad in the direction to Lepenica.

**Geology**
Calcite marbles penetrated by pegmatites and late andesite dike. Marbles contain synmetamorphic porphyroblasts of garnet with diopside and titanite rims, often are layered and foliated, locally with lineation marked by a fibrous (asbestos-like) mineral.
Pegmatite dikes are up to 1.5 thick, subhomogeneous, strongly foliated (lineated quartz), concordant with lineation of host marble. They are often strongly altered, locally with veinlets of epidote. Perhaps further altered minerals (secondary malachite).
Ca-skarn in reaction zones on the contact with pegmatite about 1-2 dm thick. Evidently lower degree of foliation comparing marble and pegmatite.
Andesite in 1.5 m thick dikes cutting other rocks, no reaction rim observed.

**Textural/paragenetic units**
Feldspar pegmatite.

**Mineralogy**
Pegmatite minerals: feldspar, allanite, monazite, apatite, thorite, thorianite, fergusonite
Skarn minerals: garnet (aggregates of equidimensional grains up to 5 cm), diopside (greenish masses), vesuvianite (brown radial aggregates), wollastonite (white radial masses), epidote, apophyllite, etc…

**Earlier exploration work. References.**
Grozdev V., Vassileva R.D., Peytcheva I., Machev P., von Quadt A. (2022) Link between magmatic and hydrothermal processes: a case study on Ca-garnets from SW Bulgaria. XXII International Congress of the CBGA, Plovdiv, Bulgaria, 329.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| No samples were taken to verify the developed methodologies. | 9. 9. 2022<br>13. 6. 2023 |

**Photodocumentation**

Road cut in marbles penetrated by pegmatites

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 05 | BG | Smi | SMILOVENE |

**Territorial administrative units**
Province (code): Sofia (BG412)
Municipality: Koprivštica (Koprivshtitsa)

**Coordinates**
42.5694444N, 24.3650000E
https://maps.app.goo.gl/uAoY7M9ZUNepwjos5

**Rock type**
pegmatite

**Expected main raw material**
Feldspar
Mica

**Situation**

**Topography**
Pegmatite field about 15 km south of Koprivštica (Koprivshtitsa) towards Strelča (Strelcha), in the upper reaches of the Luda Yana River. Two active open pits and several abandoned workings.

**Other inferred useful components**
Beryllium
Nb, Ta
REE

**Geology**
Series of pegmatite bodies of vein and lens-like shapes and different elements of bedding in granodiorite of Srednogorie batholite.

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – beryl columbite subtype.
Pegmatites a complex zonal, often asymmetric-zonal structure.

- Quartz-oligoclase-microcline contact zone
- Graphic quartz-microcline zone
- Apographic quartz-albite zone
- Aplitoid quartz-garnet-microcline-albite zone
- Medium grained albite zone
- Quartz-cleavelandite zone
- Zone of wedge-like muscovite
- Block quartz-microcline zone/quartz core

**Mineralogy**
Quartz, microcline-albite, muscovite
Biotite – up to 15 cm, in external zones of pegmatite bodies
Garnet, Beryl
Accessories: zircon, columbite-tantalite, samarskite, gahnite, uranmicrolite

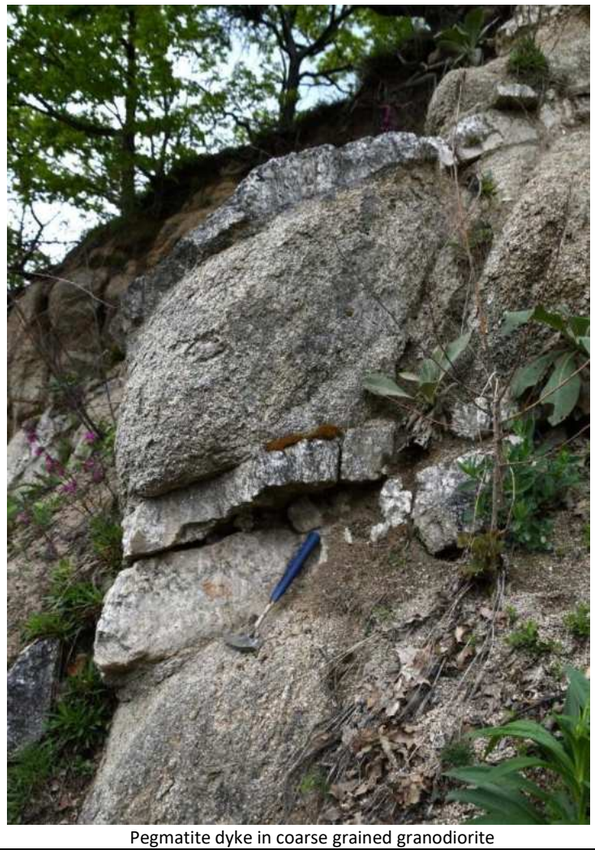
**Earlier exploration work. References. Reserves/resources**
Ivanov I. (1967) Inner structure and origin of asymmetrical zonal pegmatites from the Srednogorie and Vishteritsa. Bulletin of the Geolog. Inst., Geochemistry, mineralogy and petrology 16, 171-187.
Ivanov M. I., Grozdanov L. A. (2001) Biotite in the granitic pegmatites in the deposit of Smilovene, Koprivshtitsa Region. Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences, 54(4), 4-59.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| No samples were taken to verify the developed methodologies. | 15. 6. 2023 |

**Photodocumentation**

Abandoned pegmatite quarry

Muscovite in coarse grained pegmatite


Pegmatite dyke in coarse grained granodiorite

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality | Rock type |
|---|---|---|---|---|
| 06 | RO | Ocm | ORAVIȚA-CICLOVA MONTANA | skarn |

**Territorial administrative units**
County (code): Caraș-Severin (RO422)
Commune: Oravița

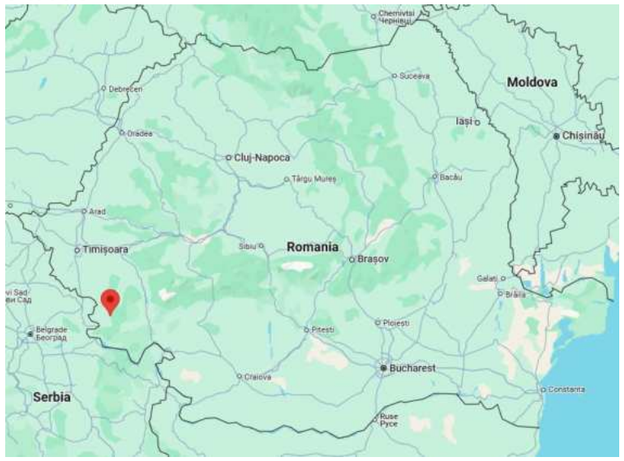
**Coordinates**
45.0317833N, 21.7340167E
https://maps.app.goo.gl/zG9cPg6D1GrBo7G9A

**Expected main raw material**
–

**Topography**
Dumps of abandoned Trei Crai mine at Ciclova Montana at the road to Oravița.

**Other inferred useful components**
–

**Situation**




**Geology**
Porphyry Mo and Cu-Mo, and skarn-type Cu-(W,Mo,Co,Au) orebodies, related to Upper Cretaceous-Palaeozoic plutons and apophyses of monzodiorite-diorite and granodiorite composition.
The geological environment has a genetic link to pegmatites and their B, F-enrichment.

**Textural/paragenetic units**
The pegmatite occurrences were not observed.

**Mineralogy**
The occurrence of pegmatites was not observed. Found vesuvianite mineralization in pegmatoid/coarse-grained diorite reflects regional fluid flow and F-enrichment.

**Earlier exploration work. References**
Marincea S., Dumitraş D.G., Ghineț C., Bilal E. (2015) The occurrence of high-temperature skarns from Oravita (Banat, Romania): a mineralogical overview. Can. Min. 53(3), 511-532.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| No samples were taken to verify the developed methodologies. | 4. 10. 2024 |

**Photodocumentation**

Dumps of abandoned Trei Crai mine at the road to Oravița

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| **07** | **RO** | **Ocf** | **OCNA DE FIER** |

**Rock type**
**skarn**

**Territorial administrative units**
County (code): Caraș-Severin (RO422)
Commune: Ocna de Fier

**Coordinates**
45.3267667N, 21.7540167E
https://maps.app.goo.gl/i3iE9HwvHWQUH91w5

**Expected main raw material**
–

**Situation**

**Topography**
Periodically active quarry in the upper part of the ridge between the villages of Ocna de Fier and Dognecea.

**Other inferred useful components**
–

**Geology**
The Ocna de Fier-Dognecea Cu-Fe-orefield contains more than 30 irregularly shaped orebodies situated within a narrow, 10 km long, NNE-SSW striking zone between the villages of Ocna de Fier and Dognecea. The orebodies lie within the contact aureole of the Ocna de Fier-Dognecea granodiorite intrusion and are located along the boundary between Mesozoic limestone and Precambrian schists of the Bocșița-Drimoxa Formation. The geological environment is linked to pegmatite formation and enrichment in B, F in fluid phase.

**Photodocumentation**

Borate skarn with black ludwigite

Acicular ludwigite in dolomitic marble

Quarry Ocna de Fier

**Textural/paragenetic units**
The occurrence of pegmatites was not observed.

**Mineralogy**
The occurrence of pegmatites was not observed. The observed borate mineralization in skarn zones shows localized fluid flow and their boron enrichment.

**Earlier exploration work. References.**
Ciobanu C. L., Cook N. J. (2004) Skarn textures and a case study: the Ocna de Fier-Dognecea orefield, Banat, Romania. -Ore Geology Reviews, 24 (3), 315-370.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| No samples were taken to verify the developed methodologies. | 3. 10. 2024 |

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| **08** | **RO** | **Ter** | **TEREGOVA** |

**Territorial administrative units**
County (code): Caraș-Severin (RO422)
Commune: Teregova

**Coordinates**
45.1402500N, 22.2753333E
https://maps.app.goo.gl/Wf4WCL76SPNTtciz6

**Rock type**
**pegmatite**

**Expected main raw material**
Feldspar

**Other inferred useful components**
Beryl
Nb-Ta
Li

**Situation**

**Topography**
Remnants of heaps from underground pegmatite mining below the mouth of the adit.

**Geology**
Pegmatites at Teregova form bodies up to 220 m long and 10 m wide, hosted by gneisses of Sebeș Series. Pegmatite bodies of the Armeniș unit occur in the metamorphic Lotru series at the tectonic contact between the Semenic and Lotru units. Below the level of the Armenis unit with marbles and pegmatites are biotitic gneisses with plagioclase and sillimanite.

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – beryl columbite subtype.
The pegmatite has following textural-paragenetic units:

- border zone with biotite and tourmaline
- intermediate coarse-grained granitic to blocky zone (assemblage beryl + quartz + K-feldspar)
- fine-grained microcline-albite unit (assemblage beryl + plagioclase + muscovite + columbite-tantalite).

**Mineralogy**

- K-feldspar, albite-oligoclase, quartz
- Muscovite, garnet (almandine-spessartine), apatite, tourmaline
- Beryl, columbite-tantalite, amphibole, pyrite, pyrrhotite, molybdenite
- Rare spodumene, montebrasite, cassiterite, zircon, rutile, titanite, ilmenite

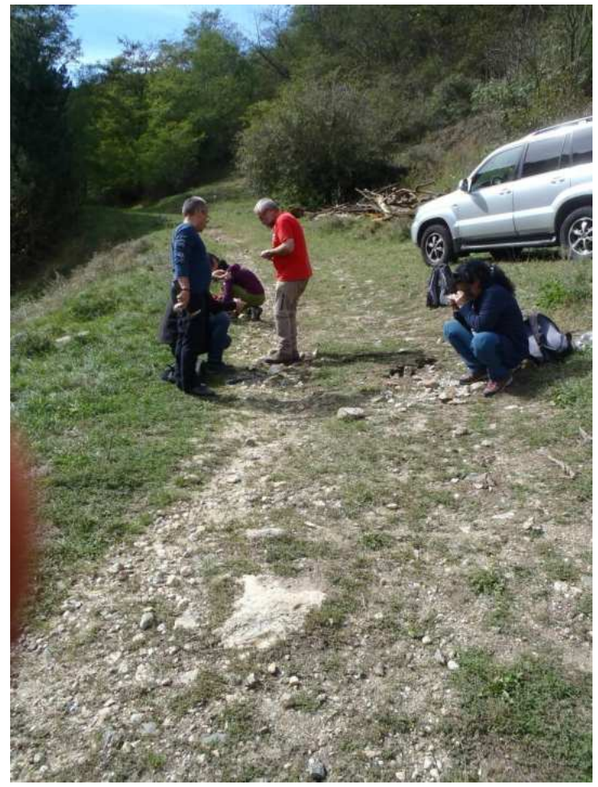
**Earlier exploration work. References.**
Hann H. P. (1987) Petrographic investigations of pegmatites located between Teregova and Marga (Eastern Banat, South Carpathians), Anuarul Instit. Geologie şi Geofizică 67, 5-80.
Maieru O., Superceanu C., Apostoloiu N. (1968) Neue Spodumen- und Beryll Pegmatite im mittleren südkarpatischen Schiefergebirge (Rumänien), Geologie 17/4, 388-397.
Superceanu C. (1957) Minerale rare în pegmatitele granitice din Banat (I). Revista Minelor 3, 140-154.An exploration licence for ceramic pegmatites has been placed on the deposit.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| No samples were taken to verify the developed methodologies. | 2. 10. 2024 |

**Photodocumentation**

Mouth of the mining adit

Remnants of heaps below the adit


Remnants of heaps below the adit

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| **09** | **RO** | **Arm** | **ARMENIȘ-SAT BÂTRÂN** |

**Territorial administrative units**
County (code): Caraș-Severin (RO422)
Commune: Armeniș

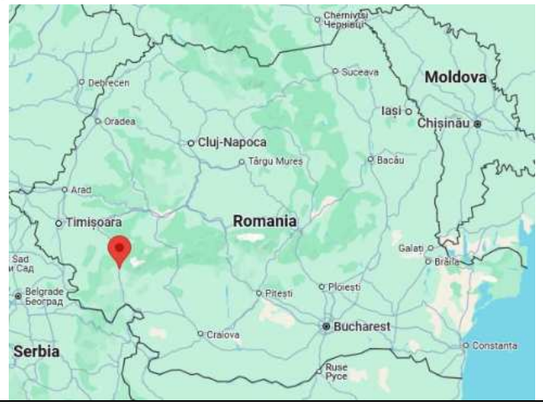
**Coordinates**
45.1947833N, 22.3117333E
https://maps.app.goo.gl/gwdoPLmRka2QjwF86

**Rock type**
**pegmatite**

**Expected main raw material**
Feldspar

**Other inferred useful components**
Mica

**Situation**




**Topography**
Pegmatite field in eastern surrounding of Armeniș: localities Armeniș "At the bridge" (roadcut with pegmatite body in marble, calc-silicate rocks with diopside and tremolite), Armeniș-Sat Bâtrân (abandoned quarry, pegmatite penetrating marble, calc-silicate rock with diopside, amphibole, scapolite), Armeniș (abandoned open pit for feldspar pegmatite, municipal waste landfill).
Coordinates:

- Armeniș "At the bridge": N 45° 14.015' E 22° 18.101'
- Armeniș-Sat Bâtrân: N 45° 14.086' E 22° 18.182'
- Armeniș: N 45° 11.687' E 22° 18.704'

**Photodocumentation**

Armeniș - „At the bridge"

Armeniș-Sat Bâtrân - abandoned quarry

**Geology**
In surroundings of Armeniș, pegmatites are represented by concordant bodies striking to NW-SE up to 550 m long and 40 m wide, hosted by gneisses and marbles of the Lotru Metamorphic Suite.

**Textural/paragenetic units**
Feldspar pegmatite.
Granite type pegmatites, often with graphic texture and muscovite.
Textural zoning is not clear, coarse-grained feldspar seems to be affected by a post-magmatic tectonic event.

**Mineralogy**
Feldspar (albite-oligoclase, microcline) 65%
Quartz 25-30%
Muscovite 5%
Minor and accessory biotite, garnet, chlorite, limonite.

Armeniș - pegmatite open pit

Muscovite pegmatite

**Earlier exploration work. References.**
Popescu G.C.et al. (2003) Feldspar in Romania: geology and mining. – Proceedings of Int. Symposium Industrial Minerals and Building Stones, Istanbul, Turkey. 835-840.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| No samples were taken to verify the developed methodologies. | 2. 10. 2024 |

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 10 | RO | BrV | BREZOI-VASILATU |

**Territorial administrative units**
County (code): Vâlcea (RO415)
Commune: Brezoi

**Coordinates**
45.355380N, 24.211197E
https://goo.gl/maps/aZYreoxiHoYmFH9H7

**Rock type**
pegmatite

**Expected main raw material**
Feldspar
Mica (muscovite)

**Topography**
An abandoned quarry in pegmatite about 3 km WNW of the village Brezoi.

**Other inferred useful components**
–

**Situation**

**Geology**
Several pegmatite dikes from 10 cm to 20 m thick, concordant and discordant with host gneisses, contact with host rock is sharp.

**Textural/paragenetic units**
Muscovite class.
Dominant coarse-grained granitic unit with biotite and muscovite.
Blocky K-feldspar up to 20 cm in size.

**Mineralogy**
Muscovite - more common in more evolved units, locally foliated.
Garnet – pink, common including line rock.

**Earlier exploration work. References.**
Murariu T. (2001) Geochimia pegmatitelor din România. Ed. Acad. Române.
Popescu G.C. et al. (2003) Feldspar in Romania: geology and mining. – Proceedings of Int. Symposium Industrial Minerals and Building Stones, Istanbul, Turkey. 835-840.
Resources approx. 0.5 Mt, reserves approx. 0.3 Mt (Popescu et al. 2003).

**New measurements and analyses (separate annexes)**
Field pXRD (ppm):

| Ti | Mn | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Ba | La | Pb |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 424 | 72 | 183 | 95 | 6 | 0 | 5 | 691 | 0 | 57 |
| 1306 | 176 | 27 | 107 | 12 | 7 | 6 | 76 | 0 | 38 |
| 2052 | 320 | 53 | 76 | 16 | 15 | 14 | 96 | 71 | 81 |
| 338 | 578 | 25 | 79 | 8 | 15 | 4 | 67 | 0 | 28 |
| 2464 | 330 | 50 | 90 | 10 | 6 | 15 | 110 | 0 | 49 |
| 0 | 68 | 205 | 112 | 0 | 0 | 0 | 826 | 0 | 59 |

Sample BrV.

**Date**
12. 9.2022

**Photodocumentation**

Dump under the feldspar mine

Dump under the feldspar mine

Pegmatite rock

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 11 | RO | MC | MALAIA-CIUNGETU |

**Territorial administrative units**
County (code): Vâlcea (RO415)
Commune: Malaia
Village: Ciungetu

**Coordinates**
45.382182 N, 24.004173 E
https://goo.gl/maps/UJN5BKb3UPUY425n9

**Rock type**
orthogneiss/feldspathite

**Expected main raw material**
Feldspar

**Topography**
Outcrops of feldspathite and orthogneiss along the road, about 0.5 km from the main intersection.

**Other inferred useful components**
Zr
Ti
REE

**Situation**

**Geology**
Medium- to fine-grained, evidently foliated/banded reddish biotite metagranitoid (syenite/granite) in gneisses. Fine-grained pink to grey biotite-poor granitoid as veins/layers up to 10-20 cm thick. Late veins up to 5 mm thick on brittle tectonic fractures:
a) fine-grained dark blue,
b) white radial aggregates on fractures.

**Textural/paragenetic units**
--

**Mineralogy**
--

**Earlier exploration work. References.**
–

**New measurements and analyses (separate annexes)**
Field pXRD (ppm):

| Ti | Cr | Fe | Rb | Sr | Y | Zr | Ba | Pb |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1114 | 49 | 7584 | 132 | 40 | 16 | 35 | 88 | 15 |
| 0 | 49 | 2519 | 187 | 43 | 8 | 36 | 51 | 19 |
| 1797 | 68 | 4331 | 195 | 42 | 34 | 40 | 84 | 20 |
| 2045 | 118 | 10790 | 137 | 189 | 9 | 95 | 761 | 15 |
| 1718 | 116 | 8226 | 145 | 196 | 8 | 73 | 850 | 14 |
| 2268 | 83 | 10942 | 103 | 187 | 10 | 99 | 757 | 10 |
| 1649 | 50 | 8392 | 90 | 196 | 9 | 87 | 478 | 11 |
| 1448 | 132 | 8201 | 84 | 198 | 16 | 126 | 603 | 10 |

Samples MC1 and MC2.

**Date**
12. 9. 2022

**Photodocumentation**

Feldspatite outcrop in the creek

Detail of the feldspatite outcrop

Biotite orthogneiss

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 12 | RO | Vid | VIDRUȚA |

**Rock type**
pegmatite

**Territorial administrative units**
County (code): Vâlcea (RO415)
Commune: Voineasa

**Coordinates**
45.435270N, 23.794260E
https://goo.gl/maps/dCaVinp4A1xx53rD6

**Expected main raw material**
Beryl
Quartz

**Other inferred useful components**
–

**Situation**

**Topography**
A pegmatite swarm containing beryl, which extends in apparent structural concordance at the highest topographic elevations of the Lotru and Mănăileasa Mountains bordering the Lotru River. Abandoned exploration work on beryl pegmatite and quartz core outcrop.

**Geology**
A beryl pegmatite occurrence located in a sillimanite-grade Permian gneiss dome emplaced subsequently to Variscan stacking of reworked and juvenile metamorphic units of the Lotru Metamorphic Suite. Zoned pegmatite dike, about 10 m thick, with SSE-NNW direction.

**Textural/paragenetic units**
- Coarse-grained unit with Ms
- Graphic unit (Kfs+Qz)
- Blocky K-feldspar
- Large quartz core (2 m?)
- Albite unit

**Mineralogy**
The pegmatite body is coarse grained, containing blocky aggregates of quartz, beryl and microcline, grading into a quartz core. Additional phases of the assemblage are spessartine garnet, albite, muscovite, tourmaline, and zircon. Abundant beryl tends to form large-sized crystals, displaying frequently particular habits, such as striated parallel intergrowths or skeletal textures with the accompanying phases.
Garnet - common, in distinct units, crystals up to 5 cm in size, often altered
Beryl – greenish crystals up to several dm in size, quite fresh
Zircon – brown altered grains 3 mm, often close to garnet
Schorl – rare black grains

**Earlier exploration work. References.**
Pintea I., Săbău G. (2023) Preliminary petrography and microthermometry of the fluid and melt inclusions from the Vidruța beryl mineralization, Lotru Metamorphic Suite (South Carpathians, Romania). Goldschmidt 2023 Abstract

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| No samples were taken to verify the developed methodologies. | 13. 9. 2022 |

**Photodocumentation**

Outcrop of pegmatite quartz core

Sampling in an old exploration pit

Outcrop of pegmatite quartz core

Garnet in pegmatite

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 13 | RO | MM | MĂNĂILEASA MARE |

**Territorial administrative units**
County (code): Vâlcea (RO415)
Commune: Voineasa

**Coordinates**
45.445350 N, 23.81870 E
https://goo.gl/maps/BZCaaLKq64gZvt6k9)

**Rock type**
pegmatite

**Expected main raw material**
Beryl

**Other inferred useful components**
Feldspar
Zr
REE

**Situation**

**Topography**
Abandoned exploration for beryl pegmatite, rare fragments. Upper parts of the hill.

**Geology**
Host mica schist with tourmaline and quartz-tourmaline layers/veins. Zoned pegmatite concordant contact.

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – beryl-columbite-phosphate subtype.
Textural/paragenetic units not observed.

**Mineralogy**
Schorl, garnet, columbite?

**Earlier exploration work. References.**
–

**New measurements and analyses (separate annexes)**
No samples were taken to verify the developed methodologies.

**Date**
13. 9. 2022

**Photodocumentation**

Access road to the site

Overall view

Heap of exploration adit

Heap of exploration adit

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality | Rock type |
|---|---|---|---|---|
| 14 | RO | CL | CATARACTELE LOTRULUI | pegmatite |

**Territorial administrative units**
County (code): Vâlcea (RO415)
Commune: Voineasa

**Coordinates**
45.466156 N, 23.871462 E
https://goo.gl/maps/ET3LmixBvPdJBCbj7)

**Expected main raw material**
Feldspar
Mica (muscovite)

**Topography**
Abandoned mines and outcrops of pegmatoid granites and pegmatites in the deep Lotru valley.

**Other inferred useful components**
–

**Situation**

**Geology**
A biggest pegmatite zone in Romania, 3.5 km in length and 1 km in width. Numerous granite-pegmatite dikes up to ~100 m thick and very long (1 km?). Bodies are concordant and discordant with host gneisses to mica schists of the Lotru Series, contact with host rock is typically sharp.

**Textural/paragenetic units**
Muscovite class.
Medium- to coarse biotite granite - contains randomly distributed pegmatites variable in size and shape
Coarse-grained granitic unit - with abundant biotite and muscovite, biotite laths up to 1 m long are dominant.
Graphic pegmatite (K-feldspar+quartz)
Blocky K-feldspar up to 20 cm in size
Blocky quartz very rare.
The main mineralogical composition is 60-70 % feldspars, 25-30 % quartz, 5-10 % micas (Popescu et al. 2003).

**Photodocumentation**

Mouth of the underground mine

An old hopper under a cliff of pegmatoid granite.

**Mineralogy**
Biotite - laths up to 1 m long. Muscovite - more common in more evolved units, locally foliated aggregates. Both biotite and muscovite are often closely associated or form intergrowth.
Popescu et al. (2003): tourmaline, garnet, apatite, beryl, fersmite, uraninite, zeolites, sulfides atc.

**Earlier exploration work. References.**
Popescu G.C. et al. (2003) Feldspar in Romania: geology and mining. – Proceedings of Int. Symposium Industrial Minerals and Building Stones, Istanbul, Turkey. 835-840.
Resources approx. 45 Mt, reserves approx. 30 Mt (Popescu et al. 2003).

Muscovite pegmatite

Biotite (left), muscovite (right).

**New measurements and analyses**
Field pXRD (ppm):

| Ti | Cr | Rb | Sr | Sn | Ba | Pr | Nd | Pb |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1589 | 77 | 186 | 37 | 43 | 5316 | 0 | 0 | 11 |
| 0 | 90 | 148 | 416 | 0 | 12608 | 155 | 518 | 81 |
| 0 | 104 | 183 | 447 | 24 | 16278 | 252 | 661 | 101 |

Sample CL.

**Date**
13. 9. 2022

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality | Rock type |
|---|---|---|---|---|
| 15 | RO | Cn1, Cn2 | VALEA CONȚULUI No1+2 | pegmatite |

**Territorial administrative units**
County (code): Sibiu (RO126)
Commune: Tălmaciu

**Coordinates**
Dump of Adit 1: 45.560930N, 23.872222E
https://goo.gl/maps/CZAvFHPj8HVzbLTx5)
Dump of Adit 2: 45.557332N, 23.876971E
https://goo.gl/maps/Ts86TmJiVGkKvT2D8

**Expected main raw material**
Spodumene
Feldspar

**Situation**

**Topography**
The Conțu pegmatite field is located on the slopes of the similarly-named brook: a tributary to the Sadu Valley and extends southwards to the Balindrul Mic saddle in the main range of the Lotru Mts. Dumps of 2 exploration adits for spodumene pegmatites.

**Other inferred useful components**
Mica (muscovite)
Beryl

**Geology**
Seven tabular to lens-shaped pegmatite bodies up ·to· 200-300 x 2-12 ·m hosted in kyanite-staurolite-bearing mica schists ·and mica· gneisses ·formation, with manganiferous intercalations, belonging to the Lotru Precambrian·Group and rare quartz-tourmaline veins.

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – albite-spodumene subtype.

- Coarse-grained Ms-rich unit
- Blocky Kfs
- Blocky Qz (but Qz core is likely not present).
- Albite unit – fine-grained + cleavelandite (?)
- Spodumene-rich unit

Spatial relations of units - complex, almost all close to contact.

**Mineralogy**
The Contu pegmatites are mainly feldspathic (albite 30-43%, K-feldspar 0-5%, ± oligoclase) containing large prismatic spodumene·crystals (15-20%), quartz 25-30%, muscovite 3-10%, other minerals occurring subordinatedly.
Spodumene (prismatic crystals up to 30 cm long, white, grey, greenish, locally altered or weathered), garnet (pink crystals, rather fresh), beryl (white, close to spodumene), phosphates (apatite, triphyline-lithiophilite, amblygonite-montebrasite, purpurite, alluaudite (?), hureaulite, tavorite), columbite, cassiterite, sphalerite, topaz.

**Earlier exploration work. References.**
Săbău G. (1989) Mineral assemblages within the lithian pegmatites at Conțu, Lotru Mts. (Central South Carpathians) and their genetical bearing. D. S. Inst. Geol. Geofiz. 74/1 (1987), 251-262.

**New measurements and analyses (separate annexes)**

Field pXRD (ppm):

| Ni | Rb | Nb | Sn | Pb | Bi | Ni | Rb | Nb | Sn | Pb | Bi |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9 | 79 | 3 | 80 | 0 | 0 | 12 | 51 | 4 | 25 | 34 | 0 |
| 0 | 47 | 3 | 42 | 29 | 19 | 13 | 668 | 46 | 100 | 37 | 0 |
| 0 | 521 | 3 | 76 | 0 | 34 | 15 | 2784 | 188 | 397 | 58 | 0 |

Samples Cn1, Cn2.

**Date**
15. 9. 2022

**Photodocumentation**

Dump on the site No1

Dump on the site No2

Spodumene from the site No1

Spodumene from the site No2

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 16 | RO | Cri | CRISTEȘTI |

**Rock type**
mica schist

**Situation**

**Territorial administrative units**
County (code): Vâlcea (RO415)
Commune: Voineasa

**Coordinates**
45.526466 N, 23.788260 E
https://goo.gl/maps/UfEZGTnDK4BzpTde9

**Expected main raw material**
Kyanite

**Topography**
Rocky outcrops in the top area of the hill Cristești.

**Other inferred useful components**
Mica
Staurolite
Garnet

**Geology**
Mica schists (staurolite, garnet, kyanite) with layers of feldspar + quartz.

**Textural/paragenetic units**
-

**Photodocumentation**

Mica schist outcrops

Top of the Cristești Hill

**Mineralogy**
Staurolite - in distinct assemblages including mica schist, feldspar+quartz layers, massive quartz, some fresh or altered to micaceous minerals.

Mica schist outcrops

Staurolite in mica schist

**Earlier exploration work. References.**
–

**New measurements and analyses (separate annexes)**
No samples were taken to verify the developed methodologies.

**Date**
14. 9. 2022

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 17 | RO | PA | PIATRA ALBĂ |

**Territorial administrative units**
County (code): Vâlcea (RO415)
Commune: Voineasa

**Coordinates**
45.509691N, 23.769285E
https://goo.gl/maps/2VmNBPByTWemPZD19

**Rock type**
pegmatite

**Expected main raw material**
Beryl

**Other inferred useful components**
Nb+Ta
Feldspar

**Situation**

**Topography**
Abandoned exploration work on beryl pegmatite, remains of small mine dump, about 800 m to the east from the peak Piatra Albă (2178 m). On the site called Căldarea Gropii at the northern slopes of the Steaja valley.

**Geology**
Outcrops and openings in trenches along the main ridge, pegmatite lenses down to the sources of Steaja valley. Contact with host mica schist is concordant and sharp, common Qz veins with tourmaline.

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – beryl columbite-phosphate subtype.

- Coarse-grained unit
- Blocky K-feldspar
- Blocky quartz
- Albite unit

**Mineralogy**
Muscovite – very common, biotite absent
Black tourmaline - conic crystals up 7 cm in coarse-grained unit
Beryl - conic crystals up to 5 cm in coarse-grained unit
- prismatic crystals in albite unit and Qz core
Garnet – 2 cm crystals
Zircon - crystals up to 2 mm
Phosphate/garnet – nodule 10 cm
Columbite – tabular crystals up to 5 mm with beryl in albite
Muscovite and tourmaline grow directly from the contact, beryl is close to the contact ~10 cm.
Newly identified are bertrandite, hurlbutite and gahnite.

**Earlier exploration work. References.**
No data.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Sample PA. | 14. 9. 2022 |

**Photodocumentation**

View to the locality from the Cristești Hill (left of the saddle)

Inspection of the site

Sampling

Beryl

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 18 | RO | CJ1 CJ2 | COȘTEȘTI-JĂROSUL No1-2 |

**Territorial administrative units**
County (code): Hunedoara (RO423)
Commune: Orăștioara de Sus
Village: Grădiștea de Munte

**Coordinates**
No1 - outcrops near stream
45.603058 N, 23.253667 E
https://goo.gl/maps/AJ8JMBZX1pbPY8fUA
No2 - dumps of the Adit #16
45.604861 N, 23.252793 E
https://goo.gl/maps/1JBh2Ds6uMVmFs95A

**Rock type**
migmatitic orthogneiss

**Expected main raw material**
Zr-Nb-Ta-U-Y ores

**Situation**

**Topography**
Rock outcrops in the small stream and forest road at dumps of exploration adits.

**Other inferred useful components**
U, Th, REE, Sn, Be (?)

**Geology**
Red foliated granitoids gneisses up to 10 m thick, layered, strongly tectonized. Zr-Nb-Ta-Y+REE-U-Th-(Sn) mineralization hosted in microcline gneiss containing quartz, albite, biotite, albite and magnetite. REE minerals appear disseminated, set along the metamorphic foliation, mainly in the biotite-rich layers. Associated rocks are gneisses and mica schists with garnet.

**Textural/paragenetic units**
–

**Mineralogy**
Magnetite up to 1 cm in size. Beryl in yellowish prisms up to 7 cm. Accessories: abundant zircon, thorite, fergusonite, monazite, thalénite, xenotime-(Y), hingganite-(Y), columbite, cassiterite, Nb-Ta-U-Th hydrous silicate.

**Earlier exploration work. References.**
Săbău G.et al. (2023) Rare elements accumulation in migmatitic gneisses: the case of the Grădiștea de Munte occurrence, Central South Carpathians. Goldschmidt Conference Abstract.

**New measurements and analyses (separate annexes)**
Field pXRD (ppm):

| Ti | Cr | Ni | Cu | Zn | Rb | Y | Zr | Nb | Sn | Ba | La | Ce | Ta | Pb | Th | U |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1309 | 138 | 96 | 0 | 73 | 1695 | 329 | 2012 | 719 | 122 | 413 | 0 | 173 | 63 | 195 | 315 | 134 |
| 1155 | 137 | 64 | 0 | 80 | 1587 | 260 | 1124 | 659 | 229 | 371 | 104 | 249 | 44 | 218 | 289 | 130 |
| 1536 | 320 | 169 | 87 | 140 | 1823 | 536 | 3256 | 1176 | 223 | 603 | 161 | 382 | 87 | 261 | 439 | 236 |
| 2598 | 53 | 161 | 156 | 212 | 1904 | 1002 | 9941 | 956 | 437 | 442 | 0 | 212 | 82 | 143 | 418 | 180 |
| 3182 | 65 | 172 | 173 | 310 | 1507 | 958 | 10300 | 873 | 311 | 459 | 104 | 252 | 69 | 111 | 398 | 196 |
| 1531 | 88 | 130 | 95 | 194 | 1237 | 958 | 7347 | 888 | 402 | 437 | 104 | 296 | 48 | 104 | 543 | 179 |

Samples CJ1 and CJ2.

**Date**
16. 9. 2022

**Photodocumentation**

Dump of the Adit #16

Garnet in mica schist

Measurement of gamma-activity

Brown-red mineralized migmatitic orthogneiss

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 19 | RO | Di | DITRĂU-GHIDUŢ |

**Territorial administrative units**
County (code): Harghita (RO124)
Commune: Lăzarea
Village: Ghiduț

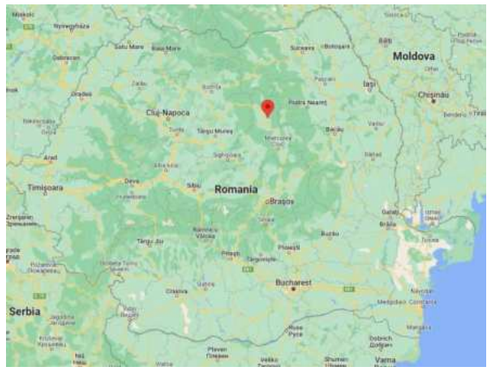
**Coordinates**
46.7972222N, 25.5875000E
https://maps.app.goo.gl/u2wbCWLsf6GVyxjo7

**Rock type**
nepheline syenite

**Expected main raw material**
Nepheline
Feldspar

**Other inferred useful components**
Zircon

**Situation**




**Topography**
Small quarries and outcrops in the valley of the Ghiduţ (Güdüc) creek (46°47'34.92"N, 25°34'24.04"E).
Valea Mare small quarry in pegmatites with abundant sodalite and cancrinite besides nepheline and perthitic K-feldspar (46°49'59.84"N, 25°35'17.60"E).
Rock boulders at the Piricske (Újhavas) ridge (46°48'46.66"N, 25°38'26.44"E).

**Geology**
Mesozoic alkaline igneous complex of 14 x 19 km poorly exposed with a wedge-shaped area of the western part completely obscured by Pliocene and Pleistocene sediments and Tertiary andesitic volcanic rocks (Streckeisen & Hunziker 1974). Nepheline syenites are the most abundant rocks in the central and eastern part of the Massif.

**Textural/paragenetic units**
Nepheline syenite and its pegmatoid facies: abundant nepheline, sometimes large-sized, minor sodalite, large magnetite and zircon-bearing syenite.
Pegmatites cross-cutting host rocks.

**Mineralogy**
Nepheline, K-feldspar, albite, aegirine, biotite
Accessory blue sodalite, yellow cancrinite, titanite, pyrite, zircon

**Earlier exploration work. References.**
Jakab G. (1998) Geologia masivului alcalin de la Ditrău. Miercurea Ciuc: Ed. Pallas-Akademia. 297 p.
Streckeisen A., Hunziker J. C. (1974) On the origin of the nephelinsyenit Massif of Ditró (Transylvania, Romania). Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, 54, 59-77.
Morogan,V., Upton B. G. J., Fitton J. G. (2000) The petrology of the Ditrau alkaline complex, Eastern Carpathians. Mineralogy and Petrology, 69, 227-265.
Honour V. C., Goodenough K. M., Shaw R. A., Gabudianu I., Hirtopanu, P. (2018) REE mineralisation within the Ditrău Alkaline Complex, Romania: Interplay of magmatic and hydrothermal processes. *Lithos*, *314*, 360-381.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Samples Di2-1, Di2-2. | 8. 6. 2023 |

**Photodocumentation**

Small abandoned quarry in the Valea Mare valley

Boulder outcrop of nepheline syenite

Sampling works at the Piricske (Újhavas) ridge

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| **20** | **RO** | **Jo** | **JOLOTCA** |

**Territorial administrative units**
County (code): Harghita (RO124)
Commune: Ditrău
Village: Jolotca

**Coordinates**
46.8648167N, 25.5093833E
https://maps.app.goo.gl/bpDbk3GqaJZBuUui6

**Rock type**
**hydrothermalite**

**Expected main raw material**
Molybdenum
REE+Y, Ti, Nb
Th

**Situation**

**Topography**
Dumps of exploration Adit No 25 west from the village Jolotca.

**Other inferred useful components**
Cu (Zn, Ag)

**Geology**
Discordant ore veins of the Jolotca field are hosted in the mafic-ultramafic rock-types dominating the earliest intrusions of the Ditrău alkaline massif. The massif is a Mesozoic alkaline igneous complex of 14 x 19 km, poorly exposed with a wedge-shaped area of the western part completely obscured by Pliocene and Pleistocene sediments and Tertiary andesitic volcanic rocks (Streckeisen & Hunziker 1974).

**Textural/paragenetic units**
The monazite-bearing veins represent polystage vein fillings associated to cooling and devolatilization of the intrusion soon after emplacement. The earliest stages have a pneumatolytic character and are responsible for the precipitation of the Ti-Nb-Y-REE mineralization. Ti-Fe-Nb-(Y) oxides are the first to precipitate, followed by an episode leading to the precipitation of pyrite and LREE-rich phases, some of them silicates. The reaction between the fluids and formerly deposited oxides forms reaction assemblages, with an intermediate Ti-Fe-LREE-rich or Y-LREE composition, comprising phases like chevkinite or aeschynite. The final hydrothermal stages are responsible for a subordinate, but rich sulphide, sulfosalt and native elements assemblage.

**Mineralogy**
Ilmenite, rutile, euxenite, monazite, allanite, bastnäsite, chevkinite, aeschynite group minerals. Dominant pyrite, minor molybdenite, chalcopyrite.

**Earlier exploration work. References. Reserves/resources**

Jakab G. (1998) Geologia masivului alcalin de la Ditrău. Miercurea Ciuc: Ed. Pallas-Akademia. 297 p.

Săbău G. (2009) Ti-Nb-REE assemblages in the monazite veins at Jolotca, Ditrău alkaline massif. In: Anastasiu N., Duliu O. (eds.) Mineralogy & Geodiversity. Editura Universităţii Bucureşti, 143-153

Honour V. C., Goodenough K. M., Shaw R. A., Gabudianu I., Hirtopanu P. (2018) REE mineralisation within the Ditrău Alkaline Complex, Romania: Interplay of magmatic and hydrothermal processes. Lithos, *314*, 360-381.


| **New measurements and analyses (separate annexes)** | **Date** |
|---|---|
| Sample Jo1. | 14. 9. 2022 |

**Photodocumentation**

Jolotca locality – dump at the adit #25

Dump at the adit #25

Dump at the adit #20 (46°52'13.97"N, 25°30'48.42"E)

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| **21** | **RO** | **Co** | **GILĂU-CORNU** |

**Territorial administrative units**
County (code): Cluj (RO113)
Commune: Gilău

**Coordinates**
46.6777706N, 23.3249572E
https://maps.app.goo.gl/6iWwY8uWnUc7eZwx9

**Rock type**
**pegmatite**

**Expected main raw material**
Feldspar
Mica (muscovite)

**Topography**
Temporary open pit at the slope of Mt. Cornu in the NE part of Bihor Mts. (Muntele Mare).

**Other inferred useful components**
Be, Nb (?), REE (?)

**Situation**

**Geology**
Syntactic pegmatite bodies of a lens-vein like shapes, partly metamorphosed (tectonised) chiefly near the contact and in fine-grained units.

**Textural/paragenetic units**
Feldspar pegmatite.
Border granitic unit locally foliated
Graphic unit (Kfs+Qz)
Blocky K-feldspar
Massive quartz
Albite unit

**Mineralogy**
Black tourmaline, garnet, very rare beryl.
The main mineralogical composition is 60-70 % feldspars, 25-30 % quartz, 5-10 % micas (Popescu et al. 2003).

**Earlier exploration work. References.**
Resources approx. 40 Mt, reserves approx. 15 Mt (Popescu et al. 2003)
Popescu G., Marinescu M., Predeteanu D. (2003) Feldspar in Romania: geology and mining. In: Proceedings of International Symposium Industrial minerals and building stones. Istanbul.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Samples Co-1, Co-2. | 7. 6. 2023 |

**Photodocumentation**

Pegmatite open pit

Pegmatite body

Muscovite-tourmaline intergrowths

Muscovite pegmatite

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| **22** | **RO** | **Raz2** | **RĂZOARE-CIUNGI** |

**Rock type**
**pegmatite**

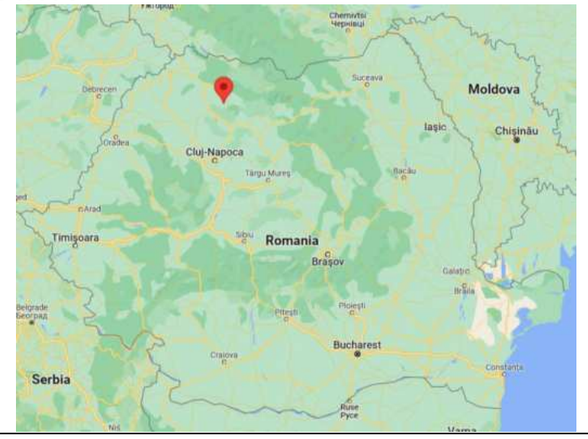
**Territorial administrative units**
County (code): Maramureș (RO114)
Commune: Târgu Lăpuș
Village: Răzoare

**Coordinates**
47.4623889N, 23.7812500E
https://goo.gl/maps/8Q4ERP3X12ZHdgdf6

**Expected main raw material**
Feldspar
Mica (muscovite)

**Other inferred useful components**
Garnet (abrasive)

**Situation**




**Topography**
An abandoned mine along the Sunătorii brook ca. 500 m south from the main ridge of the Preluca Inselberg.

**Geology**
Postkinematic pegmatite dikes from 10 cm to 20 m thick, concordant and discordant with host gneisses, contact with host rock is sharp, sometimes with a skarn-type reactive rim. In the vicinity of the Răzoare manganese deposit exploited in 1988-2006.

**Textural/paragenetic units**
Feldspar type pegmatite.
Dominant coarse-grained granitic unit with Bt and Ms.
Blocky Kfs up to 20 cm in size.

**Mineralogy**
K-feldspar, plagioclase, quartz
Muscovite - more common in more evolved units, locally foliated, up to 40x40 cm large plates
Garnet – pink, common including line rock.
Common tourmaline and apatite, rare beryl.

**Earlier exploration work. References.**
Kalmár J. (1973) Pegmatitele din Munții Preluca. D. S. Inst. Geol., LIX/1 (1972), 231-250.
Kalmár J., G. Lelkes-Felvári (1991) The metamorphic Mn-ore deposit of Razoare (Romania) and its geological setting. Mineralia Slovaca, 23, 413-419.
Murariu T., Dumitrescu M. (1976) Contribuții la geochimia și geotermometria pegmatitelor de la Copalnic (Masivul Preluca – Lăpuș). D. S. Inst. Geol., LXII/1 (1974-1975) 1, Min.-petr.-geoch., 379-398.

| **New measurements and analyses (separate annexes)** | **Date** |
|---|---|
| Samples Raz2-1, Raz2-2 (pegmatite), Raz3 (manganese ore). | 6. 6. 2023 |

**Photodocumentation**

An erosion cutting the Ciungi mine heap

Black tourmaline in pegmatite

Muscovite and apatite in pegmatite

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality | Rock type |
|---|---|---|---|---|
| **23** | **SK** | **Dob** | **DOBŠINÁ** | **pegmatite** |

**Territorial administrative units**
Region (code): Košický kraj (SK042)
District (code): Rožňava (808)
Municipality (code): Dobšiná (525634)

**Coordinates**
48.83321N, 20.38104E
https://goo.gl/maps/WCdVFMXHPnYHthRaA

**Expected main raw material**
Feldspar

**Situation**

**Topography**
Boulders and excavation outcrops near a forest road in the “Malá Vlčia dolina” valley, ca. 500 m N from the northern border of Dobšiná.

**Other inferred useful components**
Sn, Nb-Ta (Li)

**Geology**
The pegmatite forms 2–3 m thick dike in host gneisses and amphibolites of the Klátov Group. The pegmatite shows affinity to the LCT-family with distinct enrichment in B, Li, Sn, Nb, and Ta.

**Photodocumentation**

Excavation of the pegmatite

Sample with K-feldspar and albite

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – elbaite subtype (?).
The pegmatite consists of K-feldspar-quartz graphic to blocky feldspar zone, coarse-grained K-feldspar-albite-quartz-muscovite unit and quartz core.
The pegmatite is cut by thin siderite veins.

**Mineralogy**
Hand samples contain quartz, feldspar, muscovite, black tourmaline, rare garnet.
Uher et al. (2018) reported albite, orthoclase, muscovite, garnet (almandine), cassiterite, columbite-(Mn), tourmaline (dravite, schorl, elbaite, fluor-elbaite, fluor-schorl), NbTa oxides (fersmite, hydrokenopyrochlore, hydroxycalciomicrolite, hydroxycalciopyrochlore), fluorapatite, and accessory huttonite, magnetite, monazite-(Ce), sphalerite, thorite, xenotime-(Y), zircon.

**Earlier exploration work. References.**
Uher P., Bačík P., Števko M., Chládek Š., Fridrichová J. (2018) Elbaite-bearing, Nb-Ta-rich granitic pegmatite from Dobšiná, Gemeric Unit, Eastern Slovakia: the first documented occurrence in the Western Carpathians. Joint 5th Central-European Mineralogical Conference and 7th Mineral Sciences in the Carpathians Conference, Book of Abstracts, 109.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Sample “Dob”. | 6. 7. 2022 |

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality | Rock type |
|---|---|---|---|---|
| 24 | CZ | D6e | MARŠÍKOV | pegmatite |

**Territorial administrative units**
Region (code): Olomoucký kraj (CZ071)
District (code): Šumperk (CZ0715)
Municipality (code): Velké Losiny (541265)

**Coordinates**
50.0290278N, 17.0871842E
https://maps.app.goo.gl/hdHW21PEumWUePDP8

**Expected main raw material**
Be
Feldspar
Quartz

**Situation**

**Topography**
The beryl-columbite pegmatite D6e is located SE from Maršíkov Village, on the south slope of the spot height 565 m, near the crossroads of the Sobotín - Maršíkov road.

**Other inferred useful components**
Nb-Ta
Garnet

**Geology**
The D6e pegmatite has a lenticular shape and is deposited conformably with the foliation of the surrounding amphibole gneisses belonging to the Sobotín amphibolite massif. The length of the pegmatite body is about 12-15 m, its maximum thickness is 2.2 m, the direction is NNE-SSW, the dip is 65° to ESE.

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – beryl columbite subtype.
A minor aplitic unit (quartz + K-feldspar + albite + biotite) is developed on the margin of the body. A muscovite coarse-grained unit (quartz + K-feldspar + albite + muscovite ± biotite ± beryl) forms the bulk of the pegmatite volume, followed by a poorly developed graphic unit (K-feldspar + quartz), a block feldspar unit (K-feldspar + quartz + muscovite + beryl) and a quartz core. The coarse-grained and block unit are locally intensely albitised.

**Mineralogy**
Main rock-forming minerals: quartz, albite, K-feldspar, muscovite, biotite
Other minerals present: beryl (crystals up to 15 × 10 × 10 cm in size), columbite group minerals [columbite-(Mn), columbite-(Fe)]. microlite and fersmite (in columbite fissures), garnet (almandine-spessartine) bavenite-bohseite, bertrandite, milarite (white to light greenish aggregates up to 5 cm), zircon, fluorapatite, uraninite.

**Earlier exploration work. References.**
Dolníček Z. et al. (2020) Bohseit z beryl-columbitového pegmatitu D6e v Maršíkově (silezikum, Česká republika). Bulletin Mineralogie Petrologie: 28(1): 219-223.
Chládek Š. et al. (2024) Evolution of beryllium minerals in granitic pegmatite Maršíkov D6e, Czech Republic: Complex breakdown of primary beryl by internal and external hydrothermal-metamorphic fluids. Geochemistry, https://doi.org/10.1016/j.chemer.2024.126092

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| No samples were taken to verify the developed methodologies. | 10.7.2023, 20.5.2024 |

**Photodocumentation**

Maršíkov – D6e pegmatite

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 25 | CZ | ROZ | ROŽNÁ |

**Rock type**
pegmatite

**Territorial administrative units**
Region (code): Vysočina (CZ063)
District (code): Žďár nad Sázavou (CZ0635)
Municipality (code): Rožná (596655)

**Coordinates**
49.4804078N, 16.2416903E
https://maps.app.goo.gl/vbMw91mqJptjNaDc6

**Expected main raw material**
Lithium (lepidolite)
Feldspar

**Situation**

**Topography**
An old quarry with the outcrop of a pegmatite vein and numerous old heaps, a shaft and adit on the wooded hill Hradisko near Rožná. The total area is about 2 ha.

**Other inferred useful components**
Sn
Nb-Ta
Quartz

**Geology**
Lithium pegmatite vein in Proterozoic metapelites and metavolcanics. The regional metamorphosis reaches the amphibolite facies, with biotitic and amphibolic gneisses being the dominant rocks. The pegmatite vein is about 1 km long and up to 35 m wide. It is oriented SSW-SSE, parallel to the foliation of the surrounding rocks, with a dip 60° to the WNW. The contact of the vein with the surrounding rocks is sharp. In addition to the Hradisko Hill, pegmatites are also exposed on the Borovina Hill, and it also comes to the surface behind the road from Rožná to Zlatkov.

**Photodocumentation**

Rožná pegmatite – Hradisko quarry

Rožná pegmatite – short adit in the Hradisko quarry

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – lepidolite subtype.
The pegmatite composed by several textural-paragenetic units. The central parts of the vein consist of quartz with an albite-lepidolite subunit, in which most of the rarer minerals occur: lepidolite, elbaite, albite, cassiterite, topaz, apatite, amblygonite-montebrasite and others. Later hydrothermal and weathering processes gave rise to hydromicas, bertrandite, cookeite and clay minerals.

**Mineralogy**
Lepidolite - fine-grained blocks mostly purple in colour up to 1 m in size.
Feldspar - variable ratios of K-feldspar and albite
Amblygonite-montebrasite
Cassiterite – locally common in the albite unit
Columbite-tantalite – black crystals in the blocky and albite units
Rare topaz and beryl

**Earlier exploration work. References. Reserves/resources**
Novák M. et al. (1998) Přehled mineralogie, petrografie a historie klasické lokality lepidolitového pegmatitu v Rožné u Bystřice nad Pernštejnem, západní Morava. Acta Musei Moraviae, Sci. geol., 83, 3-48.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Samples ROZ-1, ROZ-2. | 10. 2. 2024 |

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| **26** | **CZ** | **DORO** | **DOLNÍ ROŽÍNKA** |

**Territorial administrative units**
Region (code): Vysočina (CZ063)
District (code): Žďár nad Sázavou (CZ0635)
Municipality (code): Dolní Rožínka (595535)

**Coordinates**
49.475880N, 16.202075E
https://maps.app.goo.gl/GvsTpiJG1AGkkFja9

**Rock type**
**pegmatite**

**Expected main raw material**
Feldspar

**Situation**

**Topography**
Field outcrop on the western edge of the Dolní Rožínka village, near the historical marble quarry.

**Other inferred useful components**
Nb-Ta
Sn
Be
(Lithium - amblygonite)
(Rb, Cs)
Quartz

**Geology**
A pegmatite vein about 3 m thick penetrates the dolomitic marble and amphibole gneiss of the Moldanubian unit.

**Photodocumentation**

View of the locality
Pegmatite sample

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – lepidolite subtype.
Towards the margin the vein is composed of a fine-grained granitic zone with biotite grading into a graphic unit (Kfs+Qtz, Ab+Qtz) with black tourmaline and a coarse-grained unit with albite with blocky K-feldspars in places. Rarely quartz core has been identified. Lithium micas were found quite exceptionally as light purplish small flakes in albite and colourless flakes up to 1 cm in size growing on K-feldspar and albite.

**Mineralogy**
Elbaite – main host of Li, forms crystals up to ca. 5 cm in pegmatite core (albite unit)
Lepidolite – rare medium-grained veins silverish in colour.
Beryl – several generations (in coarse-grained and albite units), crystals up to ca. 3x 1 cm
Cassiterite, columbite-tantalite and microlite – microscopic grains in the albite unit, rarely several mm large grains

**Earlier exploration work. References.**
Pauliš P., Mazuch J. (2003) Amblygonit z lithného pegmatitu z Dolní Rožínky. - Vlastiv. Sbor. Vysočiny, 16: 59-61.
Novotný, F., Cempírek, J. (2021) Mineralogie elbaitového pegmatitu z Dolní Rožínky. – Acta Mus. Morav., Sci. Geol., 106, 1, 3–33.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Sample DORO. | 14. 11. 2023 |

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 27 | CZ | RE | ŘEČICE |

**Territorial administrative units**
Region (code): Vysočina (CZ063)
District (code): Žďár nad Sázavou (CZ0635)
Municipality (code): Řečice (596680)

**Coordinates**
49.502974N, 16.062676E
https://maps.app.goo.gl/ALyhwipBAh6doZ3z7

**Rock type**
pegmatite

**Expected main raw material**
Feldspar
Gems (tourmaline)

**Situation**

**Topography**
Field outcrop at the border of a small forest, ca. 1 km SSW from the village.

**Other inferred useful components**
Sn
Nb-Ta
(Be)

**Geology**
The Řečice pegmatite is located in migmatitised gneisses of the Strážek Moldanubian Unit. It belongs to a typical elbaite-subtype, complex-type pegmatite with LCT geochemical signature. The pegmatite vein is ca. 20 m long and 1.5 m thick.

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – elbaite subtype.
The pegmatite body is characterized by simple internal structure: heterogeneous fine-grained contact unit, medium-grained unit, and dominant coarse-grained unit, the latter with common pockets. Notably, graphic textures and blocky unit are absent. Tourmaline-rich contact subunit consists of black tourmaline, plagioclase, quartz and annite, which is typically replaced by bosiite/dutrowite.

**Mineralogy**
Tourmaline-absent contact subunit is composed of plagioclase, quartz, rare primary schorl and garnet. The medium-grained unit is characterized by prevalence of albite and quartz over schorl-dravite and garnet. Coarse-grained unit consists of K-feldspar, quartz, albite and tourmaline, showing increase in grain size (10 cm max.) towards the pockets. The largest pockets are present in the centre of the dike with zoned tourmaline crystals (black schorl → dark red elbaite I) up to 15 cm long, K-feldspar, smoky quartz (up to 20 cm), minor albite, polylithionite, cassiterite, elbaite II (1 cm), tusionite replaced by cassiterite, late boromuscovite and bertrandite.

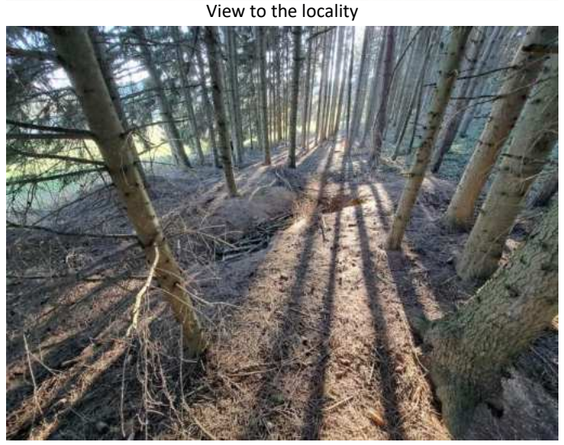
**Earlier exploration work. References.**
Flégr T. et al. (2016) New occurrence of bosiite in the Řečice pegmatite, Czech Republic. In New Minerals and Mineralogy in the 21th Century, International Scientific Symposium Jáchymov 2016.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Sample RE30. | 10. 11. 2023 |

**Photodocumentation**

View to the locality

View to the locality


Collectors' digs in the woods

Pegmatite fragments

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality | Rock type |
|---|---|---|---|---|
| **28** | **CZ** | **Lav** | **LAVIČKY** | **alkali feldspar granite** |

**Territorial administrative units**
Region (code): Vysočina (CZ063)
District (code): Žďár nad Sázavou (CZ0635)
Municipality (code): Lavičky (596019)

**Coordinates**
49.3736000N, 15.9921833E
https://maps.app.goo.gl/V52iiTHfvfsbqdVb6

**Expected main raw material**
Feldspar

**Topography**
The abandoned quarry is located about 3 km north of Velké Meziříčí. The access road leads from the village of Lavičky after turning right above the church along the road past the farmhouse. The distance from the village is about 1.3 km, the quarry is overgrown and hidden in the woods.

**Other inferred useful components**
(Zr, REE?)

**Situation**

**Geology**
A small granite body lies on the eastern edge of the Třebíč massif and intruded into the durbachites and migmatitised biotite-sillimanite gneisses of the Strážek unit. The body is composed of medium-grained leucogranite and also contains pegmatite veins and lenses with simple zonation and thickness up to 0.3 m. Younger hydrothermal quartz-tourmaline veins of several centimetres in thickness can also be found in the granite.

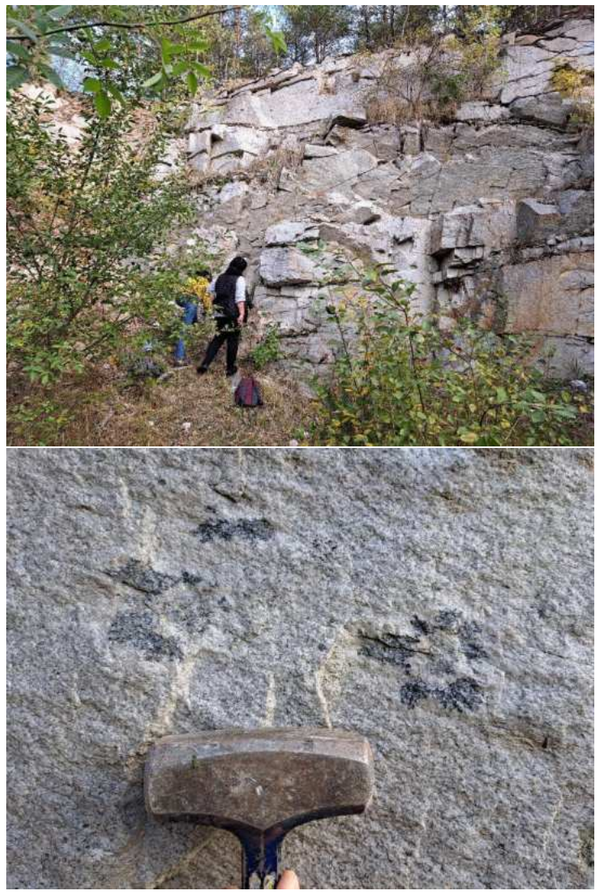
**Textural/paragenetic units**
Biotite to biotite-muscovite leucogranite is generally medium grained. A very striking phenomenon are quartz-tourmaline nodules up to 7 cm in size, in which all the tourmaline of the rock is concentrated. Each nodule is surrounded by a pale zone up to 3 cm thick, which is enriched in K-feldspar and completely lacks biotite.

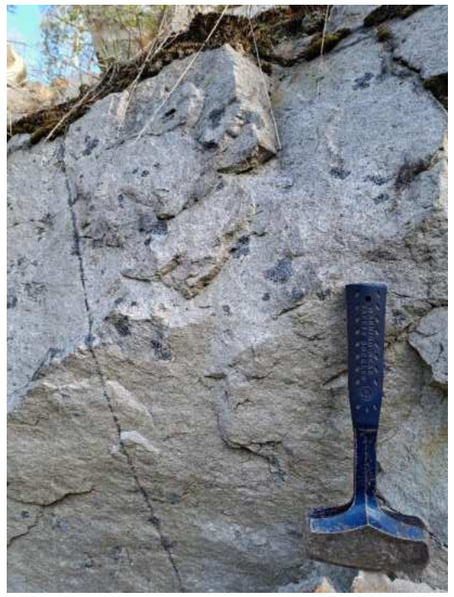
**Mineralogy**
The rock modal composition is K-feldspar (± 40%), quartz (± 33%), plagioclase (± 25%) and biotite (± 4%). Tourmaline forms clusters in nodules or veins. Andalusite, cordierite, apatite, ilmenite, zircon, monazite and xenotime are recorded as accessories.

**Earlier exploration work. References. Reserves/resources**
Jiang S.Y., Buriánek D., Novák M. (2003) Locality No.7: Lavičky near Velké Meziříčí (Novák M., ed.): LERM2003 – field trip guidebook, Brno.
Novák M., Selway J.B., Uher P. (1997) Locality No. 6: Lavičky near Velké Meziříčí, quartz-tourmaline orbicules in leucocratic two-mica granite tourmaline in barren pegmatite and hydrothermal quartz-tourmaline veins. – International Symposium on Tourmaline, Nové Město na Moravě, June 1997, Field Trip Guidebook (Novák M., Selway J.B. eds.), 77-84.
Štelcl J. et al. (2006) Mineralogicko-petrografický exkurzní průvodce po území Moravy a Slezska. –Maaryk University, Brno.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Samples Lav1, Lav2. | 21.10.2023 |

**Photodocumentation**





Lavičky leucogranite quarry and detailed photographs of the tourmaline-bearing parts of the outcrop

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| **29** | **CZ** | **Prb** | **PŘIBYSLAVICE** |

**Rock type**
**alkali-feldspar granite**

**Territorial administrative units**
Region (code): Středočeský kraj (CZ020)
District (code): Kutná Hora (CZ0205)
Municipality (code): Vlkaneč (534579)

**Coordinates**
49.8460972N, 15.4095619E
https://maps.app.goo.gl/K1WUsEjx1EKdX4Xo8

**Expected main raw material**
Feldspar
Tin (cassiterite)

**Situation**

**Topography**
Abandoned quarries NE from the village Přibyslavice.

**Other inferred useful components**
Feldspar
Lithium
Nb-Ta

**Geology**
The quarries are located within a body of leucocratic muscovite-tourmaline alkali-feldspar granite (“orthogneiss”, "Přibyslavice granite"). The orthogneiss is penetrated by vein bodies of muscovite aplite, muscovite-biotite-tourmaline pegmatite and two distinct lithium pegmatites - lepidolite pegmatite, ~2 m thick, enclosed in biotite gneiss close to orthogneiss and amblygonite pegmatite, ~0.5 m thick, cutting muscovite granite in quarry No. 4. Fragments of thin quartz veins with accessory cassiterite enclosed in granite occur on old small dumps. Triphylite veinlets cut muscovite-biotite granite.

**Textural/paragenetic units**
The accessory minerals of interest are located mainly in vein assemblages (Qtz vein with cassiterite, pegmatites with Sn, Nb-Ta, Li).

**Mineralogy**
Cassiterite – accessory in granite and in pegmatites
Garnet (spessartine-almandine) - contains frequent quartz inclusions, indicating its formation by metasomatism.
Triphylite – in granite
Lepidolite, montebrasite, elbaite – in Li-bearing pegmatites

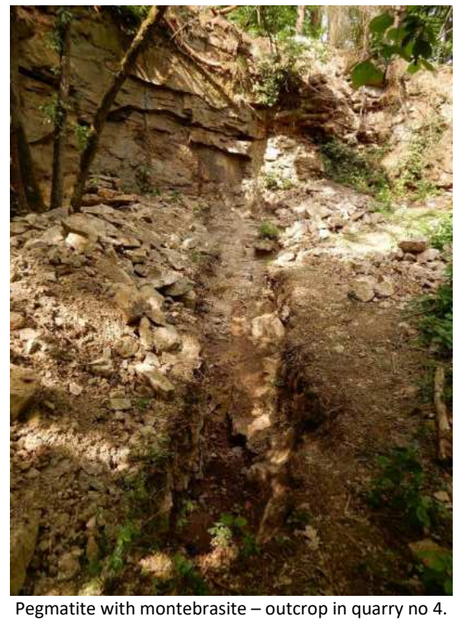
**Earlier exploration work. References.**
Povondra P. et al. (1987) Přibyslavice peraluminous granite. Acta Universitatis Carolinae, Geologica 1987: 183-283.
Procházka Z. et al. (1985) Revize šlichových anomálií, oblast II - Přibyslavice. MS Archive CGS GF P047303.
Páša J. et al. (1989) Boronosne suroviny. Surovina: turmalin. MS Archive CGS GF P075049.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Sample “Prb”. | 16.10. 2023 |

**Photodocumentation**

Oxy-schorl in a pegmatoid facies of the granite at Tisá skála.

Garnet in granite above the quarry no.4


Pegmatite with montebrasite – outcrop in quarry no 4.

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| **30** | **CZ** | **LH** | **LHENICE** |

**Territorial administrative units**
Region (code): Jihočeský kraj (CZ031)
District (code): Prachatice (CZ0315)
Municipality (code): Lhenice (550361)

**Coordinates**
48.987736N, 14.161787E
https://maps.app.goo.gl/fWpDPJMsBU1kEFJK9

**Rock type**
**pegmatite**

**Expected main raw material**
Lithium (lepidolite, montebrasite)
Feldspar

**Situation**

**Topography**
Fields in eastern surroundings of Lhenice.

**Other inferred useful components**
Nb-Ta
Sn
Quartz

**Geology**
A pegmatite dyke forming a flat-laying tabular body, approximately 20 m long and 4 m thick in its most fractionated part; hosted in high-grade metamorphic rocks (gneisses, granulites and serpentinites). A part of the Lhenice-Nová Ves pegmatite group.

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – lepidolite subtype.
Idealized zoning from border to the core:

- Medium-grained graphic zone
- Coarse-grained granitic zone
- Blocky zone
- Quartz core
- Metasomatic (Qtz-Ms-Ab, and Ab-Lpd) zones

**Mineralogy**
All pegmatites of the Lhenice-Nová Ves pegmatite group are characterized by high Li and P contents and similar mineral composition (elbaite, schorl, biotite, K-feldspar, lepidolite).

- Main: quartz, K-feldspar, plagioclase, mica (zinnwaldite, muscovite, lepidolite)
- Minor: garnet (spessartine), tourmaline (schorl, elabite,, darrelhenryite), montebrasite, apatite
- Accessories: cassiterite, columbite-tantalite, zircon, monazite, pollucite
- Secondary: chlorite, cookeite

**Earlier exploration work. References.**
Skřápková L. (2020) Mineralogy of the lithium pegmatite Lhenice I. MS thesis Masaryk University, Faculty of Science. 142 p.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Sample LH. | 18. 10. 2021 |

**Photodocumentation**

View of the locality

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality | Rock type |
|---|---|---|---|---|
| 31 | CZ | Pot | POTŮČKY | alkali-feldspar granite |

**Territorial administrative units**
Region (code): Karlovarský kraj (CZ041)
District (code): Karlovy Vary (CZ0412)
Municipality (code): Potůčky (555479)

**Coordinates**
50.4319378N, 12.7766036E
https://goo.gl/maps/w8gup7ncnttH5Bes6

**Expected main raw material**
Feldspar

**Situation**

**Topography**
A small abandoned quarry in the mountain forest on the northern slope of the hill "Písková skála" (962 m), south of the settlement Podlesí, about 1.1 km from the German border. In the middle of the 20th century, the quarry produced small quantities of stone products (paving stones, pillars, stair treads, etc.).

**Other inferred useful components**
Li
Ti-Nb-Ta
Sn-W

**Geology**
The Potůčky-Podlesí stock belongs to the Horní Blatná granite body, of which it is the most strongly fractionated partial intrusion of the western part of the Variscan Krušné hory/Ergebirge batholite. The surroundings of the body are composed of Ordovician chlorite-sericite phyllite with interbedded quartzites and metabasites and older biotitic granites.

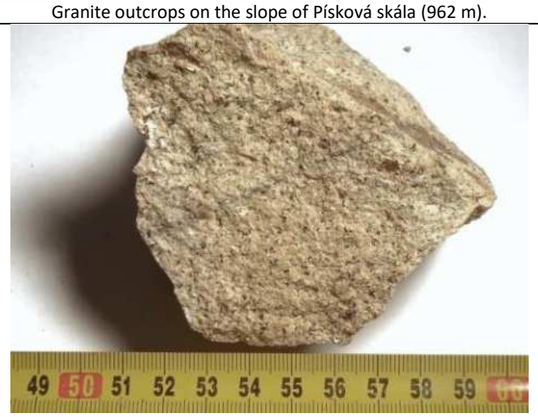
**Photodocumentation**

Granite outcrops on the slope of Písková skála (962 m).

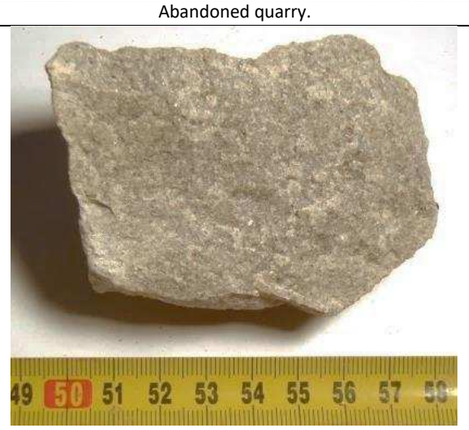
Abandoned quarry.

**Textural/paragenetic units**
The dominant rock type of the stock is alkaline-feldspar granite ('albite-protolithionite-topaz granite', 'stock granite', 'main granite'). The main granite is cut by a series of flat veins of albite-zinnwaldite-topaz granite ('vein granite'). In the quarry, an about 7 m thick body of vein granite is exposed.

**Mineralogy**
Albite, K-feldspar, quartz, protolithionite, topaz.
Accessories: All granite types contain disseminated Nb-Ta-Ti-W-Sn minerals that crystallized in the following succession: rutile + cassiterite (in biotite granite), rutile + cassiterite → ferrocolumbite (in protolithionite granite) and ferrocolumbite → ixiolite → ferberite (in zinnwaldite granite) – Breiter et al. (2007).




Alkali-feldspar granite (“main granite”)




Alkali-feldspar granite (“vein granite”)

**Earlier exploration work. References.**
The site has been the subject of research work and there are many publications on it. The main author is Karel Breiter. Indicated feldspar resources are estimated at the deposit. The definition of the mining lease is in progress.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| No samples were taken to verify the developed methodologies. | 10. 5. 2022 |

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| 32 | CZ | SMP | SMOLNÉ PECE |

**Rock type**
pegmatite

**Territorial administrative units**
Region (code): Karlovarský kraj (CZ041)
District (code): Karlovy Vary (CZ0412)
Municipality (code): Smolné Pece (538027)

**Coordinates**
50.2886797N, 12.7662919E
https://goo.gl/maps/WCdVFMXHPnYHthRaA

**Expected main raw material**
Feldspar

**Situation**

**Topography**
A small pegmatite pit in the forest about 200 m from the residential area. In the vicinity of small heaps with pegmatite material.

**Other inferred useful components**
Quartz
(Nb-Ta?)

**Geology**
The largest known body of pegmatite in the Nejdek granite pluton. The lenticular pegmatite is hosted in biotite granite of the older intrusive complex of the Krušné hory/Erzgebirge batholith.

**Photodocumentation**

Pegmatite pit

Dups digged by mineral collectors

Pegmatite pit

Tourmaline

**Textural/paragenetic units**
Feldspar type pegmatite.
The pegmatite is composed of an aplitic contact zone, a zone of K-feldspar and of blocky quartz in the central part. Albite unit with abundant coarse-grained muscovite a locally grains of cordierite forms veins cutting other pegmatite units.

**Mineralogy**
Quartz, feldspar
Muscovite
Tourmaline occurs in several distinct textural and paragenetic types also in aggregates up to over 1 kg. It is often strongly altered.
Cordierite/sekaninaite, strongly pinitised in albite masses.
Ilmenite associated with cordierite.

**Earlier exploration work. References.**
Databáze významných geologických lokalit: 1962 [online]. Praha: Česká geologická služba, 1998 [cit. 2024-12-16]. Dostupné z: https://lokality.geology.cz/1962.

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Samples SMP-1 and SMP-2. | 10. 5. 2022, 5.6. 2022 |

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality | Rock type |
|---|---|---|---|---|
| **33** | **CZ** | **FK** | **KRÁSNO-VYSOKÝ KÁMEN** | **alkali-feldspar granite** |

**Territorial administrative units**
Region (code): Karlovarský kraj (CZ041)
District (code): Sokolov (CZ0413)
Municipality (code): Krásno (538337)

**Coordinates**
50.1141822N, 12.7764536E
https://goo.gl/maps/ZQVoxmDM6AU2Ta9F9

**Expected main raw material**
Feldspar

**Situation**

**Topography**
Open pit (quarry) on the NE slope of the Šibeník Hill (819 m), NW from the Town of Krásno.

**Other inferred useful components**
Ti-Nb-Ta
Li, Be
Sn-W

**Geology**
The body of the alkali-feldspar leucogranite is approximately 400 x 600 m in size and up to 190 m thick. It has a generally unconformable contact with the surrounding biotite granite of the Čistá type. Both belong to the younger intrusive complex of the Variscan Karlovy Vary granite pluton. To the south, the granites dip beneath the migmatitic gneisses of the Saxothuringian.

**Textural/paragenetic units**
Alkaline-feldspar leucogranite - 40 to 65% of the feldspar component.
Leucosyenite (feldspatite) - zones with feldspar content over 80%.
Alkaline-feldspar aplite - subhorizontal plate-like bodies.
Quartz-feldspar metasomatite - irregular zones with 'sugary' texture and mottling, often macroscopically indistinguishable from aplite.
Pegmatite - subhorizontal veins and rims of aplite in cm/dm thickness, negligible abundance in the raw material.
Greisen - mica-quartz nearby pure mica metasomatites, isolated dykes or lenticular bodies.

**Mineralogy**
Albite, K-feldspar, quartz, Li-muscovite.
Accessories: fluorite, apatite, Nb-rutile, beryl (in pegmatites).
Secondary minerals: autunite, hematite, jasper etc.

**Earlier exploration work. References.**
In regard to the feldspar raw material, the deposit is explored in detail.
For the purpose of producing commercial products, the mined material is classified into several grades based on the iron oxide content and total alkali content:

| | Economic grade | | | Subeconomic grade | |
|---|---|---|---|---|---|
| wt% | FEW | FKW | FKS | FKL | FKN |
| $Fe_2O_3$ | ≤ 0,14 | ≤ 0,27 | ≤ 0,60 | ≤ 1,1 | ≤ 0,55 |
| $Na_2O+K_2O$ | ≥ 10 | ≥ 9,5 | ≥ 7,0 | ≥ 5,0 | < 5,0 |

**New measurements and analyses (separate annexes)**
Sample FK.

**Date**
10. 5. 2022

**Photodocumentation**

Panoramic view of the feldspar quarry.

Alkali-feldspar leucogranite from Vysoký Kámen

Pegmatite rim of aplite vein (bottom) in the leucogranite (top).

## LOCALITY RECORD

| ID | Country | Locality code | Locality |
|---|---|---|---|
| **34** | **CZ** | **Ver** | **VERNÉŘOV** |

**Rock type**
**pegmatite**

**Territorial administrative units**
Region (code): Karlovarský kraj (CZ041)
District (code): Karlovy Vary (CZ0411)
Municipality (code): Aš (554499)

**Coordinates**
50.2225994N, 12.2424639E
https://maps.app.goo.gl/K1WUsEjx1EKdX4Xo8

**Expected main raw material**
Lithium (montebrasite)
Tin (cassiterite, stannite)

**Situation**

**Topography**
A heap nearby an exploration shaft from the 1950s. Currently a natural monument. In the forest ca 1 km west of Vernéřov, 500 m west of the former mill building, on the southern slope of a sharply incised right tributary of the Bílý Halštrov stream.

**Other inferred useful components**
Feldspar
Cu, Bi, Mo

**Geology**
A minor deposit of lithium and tin ores consisting of quartz-montebrasite-microcline veinlets veins with sulphides and cassiterite ores hosted in weakly migmatitized paragneiss of the Smrčiny crystalline unit. A special feature of the pegmatite in this deposit is its enrichment by later hydrothermal processes with a contribution period of tin, copper, iron, zinc and molybdenum. The main vein has a thickness of 50 to 70 cm and a total length of approximately 1 km.

**Textural/paragenetic units**
Rare element class – amblygonite subtype.
Textural/paragenetic units not observed.

**Mineralogy**
K-feldspar and montebrasite - – dominant minerals in the vein assemblage (motebrasite was originally reported as amblygonite, redefined by Breiter et al. 2009)
Cassiterite
Stannite-Kësterite
Chalcopyrite, sphalerite, molybdenite
Tourmaline (in exocontact)

**Earlier exploration work. References.**
Between 1954 and 1958, geological exploration was carried out to verify ore reserves, but work was stopped due to the small extent of the ore.
Breiter K., Škoda R., Veselovský F. (2009) Neobvyklý P-, Li-a Sn-bohatý pegmatit z Vernéřova u Aše, Česká republika. Bulletin Mineralogicko-Petrologickeho Oddeleni Narodniho Muzea v Praze, 17(1).

| New measurements and analyses (separate annexes) | Date |
|---|---|
| Samples Ver and VerII | 17. 8. 2023 |

**Photodocumentation**

A heap of the exploration shaft

A heap of the exploration shaft

Fragments of quartz-montebrasite-microcline pegmatite in the heap material

Pegmatite veinlets in paragneis

# Příloha 4
# Přehled testovaných vzorků a provedených analýz

| | |
|---|---|
| Program: | Epsilon |
| Název projektu: | Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů |
| Název projektu anglicky: | Evolved magmatic and pegmatitic systems as sources of critical raw materials and industrial minerals |
| Číslo projektu TAČR: | TH79020002 |
| Číslo projektu ERA-MIN 3: | JTC-2021_174 |
| Řešitelské organizace: | Masarykova univerzita<br>G E T s.r.o.<br>K M K GRANIT, a.s. |
| Doba řešení: | 5/2022 - 4/2025 |
| Důvěrnost a dostupnost: | veřejně přístupný |


| | |
|---|---|
| Řešitelský tým: | Jan Cempírek (Masarykova univerzita)<br>Milan Novák (Masarykova univerzita)<br>Radek Škoda (Masarykova univerzita)<br>Jaromír Tvrdý (G E T s.r.o.)<br>Petr Hanzlík (G E T s.r.o.)<br>Ondřej Krátký (G E T s.r.o.)<br>Ondřej Sysel (G E T s.r.o.)<br>Jitka Kovářová (G E T s.r.o.)<br>Pavel Jedlička (K M K GRANIT, a.s.)<br>Emília Křenková (K M K GRANIT, a.s.)<br>Pavel Tatýrek (K M K GRANIT, a.s.) |

Přílohu zpracovali: Emília Křenková
Pavel Jedlička
Jan Cempírek
Jaromír Tvrdý

Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON je zaměřen zejména na zlepšení pozice českého a v globálním kontextu i evropského průmyslu pomocí podpory projektů spadajících do kategorie aplikovaného výzkumu (zahrnuje průmyslový výzkum, experimentální vývoj nebo jejich kombinaci), jejichž výsledky mají vysoký potenciál pro rychlé uplatnění v nových produktech, výrobních postupech a službách. Poskytovatelem finančních prostředků je Technologická agentura ČR.

| A. Odběr a dokumentace vzorku | | | | | B. | C. Úvodní analýza | | | D. Zkoušky silikátových složek | | | | | E. Zkoušky ostatních užitkových složek | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Označení | Lab. č. | Hmotnost kg | Popis vzorku | Foto | Příprava vzorku | Zkoušky KMK | | Zkoušky externí | CHA | Hodnocení výpalku | Teplota slinutí a tavení | Hodnocení křemenné suroviny | Jiné (elmag čištění) | UQ koncentrátu | | Mineralogie koncentrátu | |
| | | | | | | UQ | ZŽ | Li, Be | | | | | | magnetický | gravitační | magnetický | gravitační |
| **BrV** | **3578/2024** | 8,6 | muskovitický pegmatit, hrubozrnný, v úlomcích 5-10 cm, úlomky s variabilním obsahem slídy (cca 1-2 %) a křemene | x | x | x | x | x | x | x | | | x | | | | |
| **CJ1** | **3596/2024** | 6,3 | migmatitizovaná ortorula, drobně až středně zrnitá, červenohnědě a tmavě zelenošedě šmouhovaná, v úlomcích cca 10 cm | x | x | x | x | x | | | | | | | | | |
| **CJ2** | **3597/2024** | 7,4 | migmatitizovaná ortorula, drobně až středně zrnitá, červenohnědě a tmavě zelenošedě šmouhovaná, v úlomcích cca 10 cm | x | x | x | x | x | | | | | | x | | x | x |
| **CL** | **3577/2024** | 9,8 | muskovitický pegmatit, bělavý, velkozrnný, živcovo-křemenný, se světlou slídou (až cca 5 % horniny), v úlomcích cca 10-15 cm | x | x | x | x | x | x | x | | | | | | | |
| **Cn1** | **3595/2024** | 8,5 | spodumenový pegmatit, bělavý až šedý, velkozrnný, s převahou živce, křemene a hrubě lištovitého spodumenu, v úlomcích 5-15 cm | x | x | x | x | x | | | x | | | | | | |
| **Cn2** | **3576/2024** | 6,8 | pegmatit šedý, hrubo- až velkozrnný, křemen-živcový, s obsahem zrn tmavých minerálů, v úlomcích 8-15 cm | x | x | x | x | x | x | x | x | | | | | | |
| **Co-1** | **3601/2024** | 10,2 | živcový pegmatit, narezle bělošedý, středně až hrubě zrnitý, s patrným metamorfním usměrněním, křemen-živcový, se shluky drobně šupinkaté slídy, v úlomcích cca 5-10 cm | x | x | x | | | | | | | | | | | |
| **Co-2** | **3602/2024** | 8,3 | živcový pegmatit, hrubozrnný, s turmalínem a granátem (variabilní obsah), v úlomcích 5-15 cm | x | x | x | x | | | | | | | | | | |
| **Di2-1** | **3603/2024** | 8,7 | nefelinický syenit, šedý, drobně až středně zrnitý, s obsahem doprovodných minerálů, v úlomcích 5-15 cm | x | x | x | x | | | | x | | | | | | |
| **Di2-2** | **3604/2024** | 9,4 | nefelinický syenit, bělošedý, hrubě zrnitý, s bělavým živcem a šedým nefelínem, v úlomcích 10-15 cm | x | x | x | x | | | | | | | | | | |
| **Dob** | **3606/2024** | 5,2 | pegmatit velkozrnný, světle okrově šedobílý, s velkými zrny živce, křemene a šupinami světlé slídy, v úlomcích 5-15 cm | x | x | x | x | x | | | | | | | | | |
| **DORO** | **2875/2023** | 6,1 | lithný pegmatit, hrubozrnný, šedý s okrovou pigmentací, s obsahem lithné slídy a patrnou příměsí turmalínu a berylu, bez makroskopického granátu, v úlomcích 5-15 cm | x | x | x | x | x | | | | | | x | x | | x | x |
| **FK** | **3591/2024** | 8,8 | leukogranit bílý, slabě slídnatý, drobně až středně zrnitý, v úlomcích 5-8 cm | x | x | x | x | x | x | x | | | | | | | |

| A. Odběr a dokumentace vzorku | | | | | B. | C. Úvodní analýza | | | D. Zkoušky silikátových složek | | | | | E. Zkoušky ostatních užitkových složek | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Označení | Lab. č. | Hmotnost kg | Popis vzorku | Foto | Příprava vzorku | Zkoušky KMK | | Zkoušky externí Li, Be | CHA | Hodnocení výpalku | Teplota slinutí a tavení | Hodnocení křemenné suroviny | Jiné (elmag čištění) | UQ koncentrátu | | Mineralogie koncentrátu | |
| | | | | | | UQ | ZŽ | | | | | | | magnetický | gravitační | magnetický | gravitační |
| **Jo1** | **3605/2024** | 5,3 | amfibolický pegmatit, bílo-černě skvrnitý, hrubozrnný, s patrným tmavohnědým titanitem, v úlomcích 10-15 cm | x | x | x | x | | | | | | | | | | |
| **Lav1** | **3608/2024** | 7,5 | granit šedý, drobně až středně zrnitý, slídnatý, v úlomcích 10-15 cm | x | x | x | x | x | | | | | x | | | | |
| **Lav2** | **3579/2024** | 8,6 | granit šedý, drobně až středně zrnitý, slídnatý, s nevýraznými světlejšími šmouhami a difúzními okrouhlými shluky drobnozrnného černého turmalínu, v úlomcích 5-10 cm | x | x | x | x | x | x | x | | | x | | | | |
| **LH** | **2877/2023** | 6,2 | lithný pegmatit, středně zrnitý, bělošedý, okrově pigmentovaný, slídnatý, se slabou příměsí lithného turmalínu, v úlomcích 10-15 cm | x | x | x | x | x | | | | | x | x | | x | x |
| **MC1** | **3592/2024** | 8,6 | živcová ortorula ("feldspatit"), drobnozrnná, bělavá, nepravidelně okrově pigmentovaná, s drobnými shluky biotitu, v úlomcích cca 10 cm | x | x | x | x | x | | | | | | | | | |
| **MC2** | **3593/2024** | 9,4 | živcová ortorula, drobně až středně zrnitá, bělavě a tmavošedě skvrnitá s patrným usměrněním, v úlomcích cca 10 cm | x | x | x | x | x | | | | | | | | | |
| **PA** | **3594/2024** | 5,8 | pegmatit hrubozrnný, slabě slídnatý, s příměsí svorové horniny, navětralý (okrové zbarvení), v úlomcích 5-10 cm | x | x | x | x | x | | | | | | | | | |
| **Prb** | **2868/2023** | 10,6 | granit až ortorula, drobně až středně zrnitý, šedý, místy okrově zbarvený, silně slídnatý, v úlomcích 10-15 cm | x | x | x | x | x | | | | | x | | | | |
| **Raz2-1** | **3598/2024** | 7,4 | pegmatit hrubozrnný, živcový, s hojnými agregáty světlé slídy (cca 15-20 %), v úlomcích 10-15 cm ("světlý vzorek") | x | x | x | x | | | | | | | | | | |
| **Raz2-2** | **3599/2024** | 6,6 | pegmatit hrubozrnný, s hojným turmalínem, v úlomcích 10-15 cm ("tmavý vzorek") | x | x | x | x | | | | | | | | | | |
| **Raz3** | **3600/2024** | 5,6 | manganová ruda, šedá, drobnozrnná, s převahou silikátů Mn, v úlomcích 5-15 cm | x | x | x | | | | | | | | | | | |
| **RE30** | **2876/2023** | 7,3 | pegmatit hrubozrnný, navětralý (okrové zbarvení), s hojnými tmavými minerály (kasiterit, turmalín), v úlomcích kolem 10 cm | x | x | x | x | x | | | | | x | x | | x | x |
| **ROZ-1** | **3609/2024** | 6,4 | lithný pegmatit, středně zrnitý, bělošedý, okrově pigmentovaný, slídnatý, v úlomcích kolem 10 cm | x | x | x | x | x | | | x | | | | | | |
| **ROZ-2** | **3610/2024** | 5,8 | pegmatit hrubozrnný, šedý, slídnatý, s obsahem tmavých minerálů, v úlomcích 10-15 cm | x | x | x | x | x | | | | | | x | | x | x |
| **SMP-1** | **3590/2024** | 5,5 | pegmatit hrubozrnný, křemen-živcový, s vysokým podílem černého turmalínu (cca 10 %), v úlomcích 5-15 cm | x | x | x | x | | | | | | | | | | |

| A. Odběr a dokumentace vzorku | | | | | B. | C. Úvodní analýza | | | D. Zkoušky silikátových složek | | | | | E. Zkoušky ostatních užitkových složek | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Označení | Lab. č. | Hmotnost kg | Popis vzorku | Foto | Příprava vzorku | Zkoušky KMK | | Zkoušky externí | CHA | Hodnocení výpalku | Teplota slinutí a tavení | Hodnocení křemenné suroviny | Jiné (elmag čištění) | UQ koncentrátu | | Mineralogie koncentrátu | |
| | | | | | | UQ | ZŽ | Li, Be | | | | | | magnetický | gravitační | magnetický | gravitační |
| **SMP-2** | **3589/2024** | 6,2 | aplitický pegmatit, drobně až středně zrnitý, slídnatý bělošedý, okrově zbarvený (navětrání), z okrajové partie pegmatitového tělesa, v úlomcích cca 10 cm | x | x | x | x | | | | | | x | | | | |
| **Ver** | **2869/2023** | 5,4 | montebrasitový pegmatit, hrubozrnný, světle šedý, nehomogenní, v úlomcích cca 10 cm | x | x | x | x | x | | | x | | x | x | | x | x |
| **VerII** | **3607/2024** | 5,6 | pegmatit hrubozrnný, bělošedý, okrově pigmentovaný, slídnatý, v úlomcích cca 10 cm | x | x | x | x | x | | | | | x | | | | |
| **VST-1** | **2870/2023** | 8,4 | biotitický pegmatit, středně až hrubě zrnitý, světle šedý (okrajová partie), v úlomcích 5-15 cm | x | x | x | x | x | | | | | x | | | | |
| **VST-2** | **2871/2023** | 7,5 | živcový pegmatit, hrubozrnný, slídnatý, v úlomcích cca 10 cm | x | x | x | x | x | | | | | x | | | | |
| **VST-3** | **2872/2023** | 7,8 | živcový pegmatit s granátem, zčásti albitický, středně zrnitý, v úlomcích cca 10 cm | x | x | x | x | x | | | | | x | | | | |

Metodika laboratorní testace vzorků pegmatitů zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků

# Příloha 5
# Fotografická dokumentace testovaných vzorků

| | |
|---|---|
| Program: | Epsilon |
| Název projektu: | Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů |
| Název projektu anglicky: | Evolved magmatic and pegmatitic systems as sources of critical raw materials and industrial minerals |
| Číslo projektu TAČR: | TH79020002 |
| Číslo projektu ERA-MIN 3: | JTC-2021_174 |
| Řešitelské organizace: | Masarykova univerzita<br>G E T s.r.o.<br>K M K GRANIT, a.s. |
| Doba řešení: | 5/2022 - 4/2025 |
| Důvěrnost a dostupnost: | veřejně přístupný |


| | |
|---|---|
| Řešitelský tým: | Jan Cempírek (Masarykova univerzita)<br>Milan Novák (Masarykova univerzita)<br>Radek Škoda (Masarykova univerzita)<br>Jaromír Tvrdý (G E T s.r.o.)<br>Petr Hanzlík (G E T s.r.o.)<br>Ondřej Krátký (G E T s.r.o.)<br>Ondřej Sysel (G E T s.r.o.)<br>Jitka Kovářová (G E T s.r.o.)<br>Pavel Jedlička (K M K GRANIT, a.s.)<br>Emília Křenková (K M K GRANIT, a.s.)<br>Pavel Tatýrek (K M K GRANIT, a.s.) |

Přílohu zpracovali: Pavel Jedlička
Emília Křenková
Milan Novák
Jan Cempírek
Jaromír Tvrdý

Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON je zaměřen zejména na zlepšení pozice českého a v globálním kontextu i evropského průmyslu pomocí podpory projektů spadajících do kategorie aplikovaného výzkumu (zahrnuje průmyslový výzkum, experimentální vývoj nebo jejich kombinaci), jejichž výsledky mají vysoký potenciál pro rychlé uplatnění v nových produktech, výrobních postupech a službách. Poskytovatelem finančních prostředků je Technologická agentura ČR.

**BrV**

**CJ1**

**CJ2**

**CL**

**Cn1**

**Cn2**

**Co-1**

**Co-2**

**Di2-1**

**Di2-2**

**Dob**

**DORO**

**FK**

**Jo1**

**Lav1**

**Lav2T**

**LH**

**MC1**

**MC2**

**PA**

**Prb**

**Raz2-1**

**Raz2-2**

**Raz3**

**RE30**

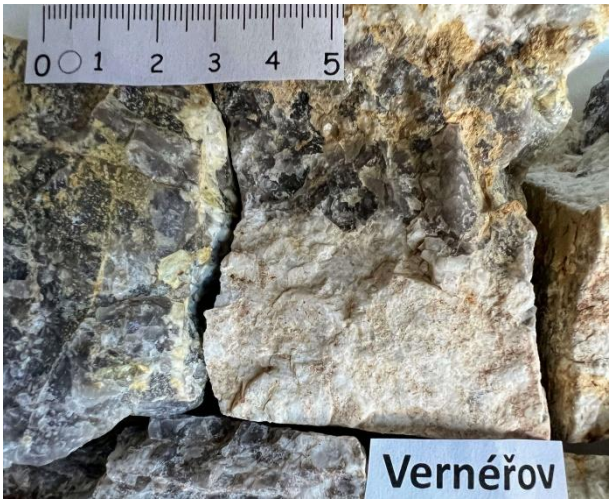
**ROZ-1**

**ROZ-2**

**SMP-1**

**SMP-2**

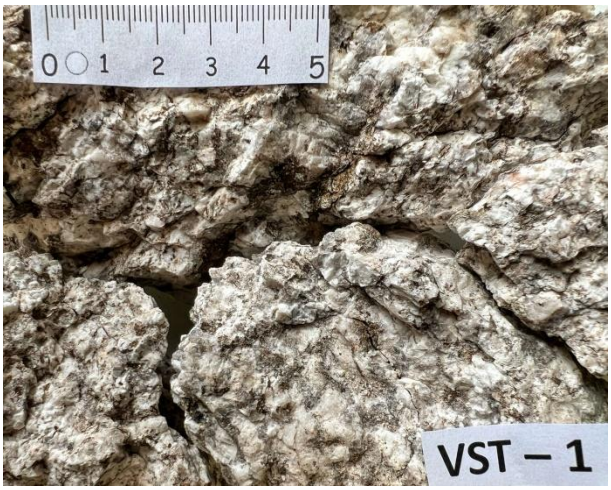
**Ver**



**VerII**

**VST-3**

**VST-1**




**VST-2**

Metodika laboratorní testace vzorků pegmatitů zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků

# Příloha 6
# Úvodní chemické analýzy

| | |
|---|---|
| Program: | Epsilon |
| Název projektu: | Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů |
| Název projektu anglicky: | Evolved magmatic and pegmatitic systems as sources of critical raw materials and industrial minerals |
| Číslo projektu TAČR: | TH79020002 |
| Číslo projektu ERA-MIN 3: | JTC-2021_174 |
| Řešitelské organizace: | Masarykova univerzita<br>G E T s.r.o.<br>K M K GRANIT, a.s. |
| Doba řešení: | 5/2022 - 4/2025 |
| Důvěrnost a dostupnost: | veřejně přístupný |


Řešitelský tým:

Jan Cempírek (Masarykova univerzita)

Milan Novák (Masarykova univerzita)

Radek Škoda (Masarykova univerzita)

Jaromír Tvrdý (G E T s.r.o.)

Petr Hanzlík (G E T s.r.o.)

Ondřej Krátký (G E T s.r.o.)

Ondřej Sysel (G E T s.r.o.)

Jitka Kovářová (G E T s.r.o.)

Pavel Jedlička (K M K GRANIT, a.s.)

Emília Křenková (K M K GRANIT, a.s.)

Pavel Tatýrek (K M K GRANIT, a.s.)

Přílohu zpracovali: Pavel Jedlička
Emília Křenková
Pavel Tatýrek

Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON je zaměřen zejména na zlepšení pozice českého a v globálním kontextu i evropského průmyslu pomocí podpory projektů spadajících do kategorie aplikovaného výzkumu (zahrnuje průmyslový výzkum, experimentální vývoj nebo jejich kombinaci), jejichž výsledky mají vysoký potenciál pro rychlé uplatnění v nových produktech, výrobních postupech a službách. Poskytovatelem finančních prostředků je Technologická agentura ČR.

| Vzorek | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | $TiO_2$ | CaO | $P_2O_5$ | MgO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $Rb_2O$ | MnO | LOI | Li* | Be* | Sc | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | As | Sr | Y | Zr | Nb | Sn | Cs | Ba | La | Ce | Nd | Gd | Dy | Yb | Hf | Ta | W | Pb | Th |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g | µg/g |
| BrV | 72,77 | 15,38 | 1,27 | 0,10 | 2,04 | 0,07 | 0,34 | 3,59 | 3,45 | 0,014 | 0,09 | 0,73 | <10 | 3,19 | | 14 | | | | | 45 | 21 | | 712 | 40 | 104 | | | | 332 | | | | | | | | | | 72 | |
| CJ1 | 70,20 | 9,67 | 6,69 | 0,41 | 0,18 | 0,02 | 0,16 | 3,80 | 4,12 | 0,212 | 0,04 | 0,57 | <50,1 | 9,30 | | | | 76 | | | 142 | 48 | | 54 | 118 | 22500 | 1980 | 586 | | | 125 | 329 | 118 | 56 | 132 | 210 | 768 | 121 | | 295 | 438 |
| CJ2 | 59,26 | 15,21 | 8,39 | 0,31 | 0,57 | 0,42 | 1,08 | 4,34 | 5,79 | 0,159 | 0,04 | 1,31 | <50,1 | 10,3 | | | | 87 | | 29 | 254 | 52 | | 72 | 1060 | 17500 | 1420 | 522 | | | 83 | 260 | 79 | 52 | 72 | 179 | 625 | 46 | | 194 | 351 |
| CL | 73,69 | 12,55 | 0,10 | 0,01 | 0,14 | 0,06 | 0,06 | 2,10 | 10,14 | 0,021 | 0,00 | 0,40 | <10 | 1,04 | | | | | | | | | | 389 | | | | | | 626 | | | | | | | | | | 118 | |
| Cn1 | 76,64 | 15,42 | 0,78 | 0,01 | 0,20 | 0,33 | 0,06 | 3,39 | 2,37 | 0,057 | 0,15 | 0,73 | 13000 | 21,0 | | | | | | | 68 | 27 | | 43 | | 46 | 27 | 68 | | | 36 | | | | | | | | | 94 | |
| Cn2 | 69,51 | 18,05 | 0,47 | 0,02 | 0,28 | 0,12 | 0,09 | 7,94 | 2,10 | 0,092 | 0,01 | 1,33 | 64,0 | 18,2 | | | | | 11 | | 14 | 25 | | 76 | | 47 | 82 | 82 | | | | | | | | | | 26 | | 78 | |
| Co-1 | 72,54 | 15,40 | 0,42 | 0,01 | 0,40 | 0,32 | 0,17 | 6,09 | 4,38 | 0,024 | 0,24 | n.a. | n.a. | n.a. | | | | | 8 | | 18 | 8 | | 28 | | | | | | | | | | | | | | | 81 | |
| Co-2 | 71,87 | 15,52 | 1,10 | 0,02 | 0,37 | 0,33 | 0,22 | 5,96 | 3,84 | 0,023 | 0,08 | 0,65 | n.a. | n.a. | | | | | | | 92 | 14 | | 17 | | 34 | | | | | | | | | | | | | | 64 | |
| Di2-1 | 55,52 | 22,40 | 1,08 | 0,23 | 1,06 | 0,07 | 0,24 | 11,48 | 5,83 | 0,019 | 0,13 | 1,28 | n.a. | n.a. | | | | 9 | | | 49 | 33 | | 659 | 24 | 228 | 147 | | | 448 | 183 | 195 | 29 | | | | | | | | |
| Di2-2 | 56,92 | 21,84 | 1,12 | 0,03 | 0,19 | 0,02 | 0,09 | 11,53 | 6,54 | 0,025 | 0,06 | 1,38 | n.a. | n.a. | | | | | | | 27 | 31 | | 50 | | 460 | 195 | | | | 28 | 63 | 41 | | | | | | | | |
| Dob | 74,33 | 14,07 | 0,22 | 0,00 | 0,06 | 0,03 | 0,04 | 4,15 | 6,42 | 0,125 | 0,02 | 0,49 | n.a. | n.a. | | | | | 9 | | 55 | 35 | | | | | 25 | | | | 21 | | | | | | | | | | |
| DORO | 79,39 | 12,10 | 0,32 | 0,00 | 0,29 | 0,07 | 0,08 | 6,31 | 0,77 | 0,018 | 0,23 | 0,38 | 70,2 | 117 | | | | | 15 | | 20 | 33 | | | | 37 | 88 | 49 | | | | | | | | | | | | | |
| FK | 71,45 | 15,84 | 0,12 | 0,02 | 0,27 | 0,39 | 0,06 | 4,77 | 6,57 | 0,165 | 0,01 | 0,34 | 73,0 | 4,90 | | | | | | | 11 | 43 | | | | | 42 | | | | | | | | | | | | | |
| Jo1 | 44,47 | 15,45 | 11,85 | 2,89 | 7,63 | 0,64 | 6,11 | 5,07 | 3,24 | 0,010 | 0,23 | 1,80 | n.a. | n.a. | | 273 | 51 | 148 | 79 | 35 | 133 | 16 | | 168 | 29 | 368 | 137 | | | 127 | | 113 | 47 | | | 33 | | | | | |
| Lav1 | 75,73 | 13,27 | 0,31 | 0,09 | 1,54 | 0,11 | 0,17 | 2,86 | 5,39 | 0,024 | 0,00 | 0,42 | 17,7 | n.a. | | | | | 25 | | 10 | 15 | | 181 | | 46 | | | | 461 | | | | | | | | | 22 | | |
| Lav2T | 75,59 | 13,19 | 0,41 | 0,10 | 1,30 | 0,12 | 0,18 | 2,55 | 5,98 | 0,026 | 0,00 | 0,45 | 11,5 | 6,06 | | | | | 48 | | | 12 | | 190 | | 48 | | | | 446 | | | | | | | | | | | |
| LH | 67,58 | 17,00 | 0,59 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,85 | 6,91 | 0,930 | 0,26 | 2,00 | 12800 | 7,17 | | | | | 21 | | 69 | 84 | 190 | 27 | | | 117 | 1050 | 2440 | | | | | | | | | 58 | 51 | | |
| MC1 | 77,14 | 11,23 | 0,59 | 0,05 | 0,49 | 0,03 | 0,08 | 3,51 | 6,28 | 0,028 | 0,02 | 0,55 | <50,1 | 0,774 | | | | | | | | 11 | | 46 | 29 | 63 | | | | | | | | | | | | | | | |
| MC2 | 73,54 | 12,27 | 2,60 | 0,42 | 2,02 | 0,06 | 0,58 | 3,91 | 3,81 | 0,020 | 0,05 | 0,64 | <50,1 | 0,562 | | 36 | | 14 | | | 31 | 11 | | 242 | | 182 | | | | 417 | 27 | | | | | | | | | | |
| PA | 75,72 | 13,27 | 1,07 | 0,02 | 0,39 | 0,27 | 0,09 | 6,85 | 1,55 | 0,017 | 0,15 | 0,74 | <50,1 | 49,5 | | | | | 13 | 10 | 78 | 18 | | 31 | | 77 | | | | | | | | | | | | | | 45 | |
| Prb | 74,97 | 13,41 | 0,97 | 0,01 | 0,58 | 0,91 | 0,04 | 4,02 | 3,52 | 0,112 | 0,19 | 1,01 | 210 | 0,0942 | | | | | 32 | | 87 | 37 | | 414 | | | 60 | 196 | | | | | | | | | | 25 | | |
| Raz2-1 | 72,55 | 14,15 | 0,32 | 0,02 | 0,13 | 0,11 | 0,07 | 1,77 | 9,15 | 0,020 | 0,00 | 1,57 | n.a. | n.a. | | | | | | | 13 | | | 197 | | | | | | 919 | | | | | | | | | | 216 | |
| Raz2-2 | 62,34 | 21,58 | 7,48 | 0,50 | 1,26 | 0,72 | 1,56 | 1,54 | 2,06 | 0,005 | 0,09 | 0,72 | n.a. | n.a. | 7 | 51 | 37 | 73 | 42 | | 160 | 39 | | 80 | 48 | 292 | | | | | 29 | | | | | | | | | |
| Raz3 | 8,20 | 1,29 | 31,35 | 0,02 | 4,54 | 1,34 | 0,82 | 0,45 | 0,10 | 0,062 | 51,72 | n.a. | n.a. | n.a. | | | | 307 | | | | | 110 | 238 | 37 | | | | | | | | 207 | | | | | | | |
| RE30 | 76,42 | 11,53 | 1,43 | 0,04 | 0,31 | 0,03 | 0,04 | 2,66 | 5,68 | 0,062 | 0,10 | 0,21 | 50,8 | 1,81 | | | | | 21 | | 66 | 23 | 4890 | 65 | 95 | 29 | 186 | 5990 | | | 39 | | | | | | | 26 | 30 | 58 | |
| ROZ-1 | 70,62 | 16,26 | 0,99 | 0,04 | 0,22 | 0,14 | 0,05 | 4,11 | 3,28 | 0,368 | 0,69 | 1,46 | 3320 | n.a. | | | | | 38 | | 154 | 38 | | 42 | | 43 | 200 | 975 | 288 | | | | | | | | | | 53 | | |
| ROZ-2 | 78,36 | 12,33 | 0,43 | 0,02 | 0,12 | 0,11 | 0,05 | 5,49 | 1,32 | 0,112 | 0,24 | 0,83 | 1110 | n.a. | | | | | 24 | | 50 | 19 | | | | 79 | 134 | 443 | 112 | | 28 | | | | | | | | 35 | | |
| SMP1 | 68,26 | 15,14 | 2,39 | 0,09 | 0,28 | 0,17 | 0,16 | 3,47 | 8,09 | 0,081 | 0,03 | 1,90 | n.a. | n.a. | 11 | | | | | | 53 | 36 | | 45 | | 26 | 73 | | | | | | | | | | | | | | |
| SMP2 | 74,91 | 12,10 | 0,49 | 0,09 | 0,24 | 0,08 | 0,10 | 3,56 | 6,47 | 0,044 | 0,01 | 1,90 | n.a. | n.a. | | | | | | | 22 | 18 | | 32 | | 30 | | | | | | | | | | | | | | |
| Ver | 69,96 | 12,99 | 0,17 | 0,08 | 0,90 | 7,22 | 0,08 | 0,63 | 5,26 | 0,188 | 0,00 | 1,56 | 21,3 | n.a. | | | | | 65 | 407 | 511 | 12 | | 289 | | | | 986 | | 271 | 29 | | | | | | | 46 | | |
| VerII | 62,06 | 15,25 | 0,25 | 0,12 | 1,62 | 9,83 | 0,07 | 0,64 | 5,26 | 0,207 | 0,01 | 2,03 | 11100 | 2,90 | | | | | 31 | 456 | 330 | 12 | | 736 | | | 67 | 12500 | | 569 | | | | | | | | | 76 | |
| VST-1 | 76,20 | 13,05 | 0,70 | 0,05 | 1,09 | 0,05 | 0,08 | 3,68 | 4,53 | 0,022 | 0,03 | 0,47 | <50,1 | 1,19 | | | | | 17 | | 10 | 17 | | 129 | 81 | 96 | | | | | | | | | | | | | 90 | |
| VST-2 | 73,00 | 13,50 | 0,20 | 0,02 | 0,16 | 0,02 | 0,05 | 1,66 | 10,91 | 0,047 | 0,02 | 0,33 | 107 | 0,272 | | | | | 15 | | 11 | 12 | | 116 | | | | | | 192 | | | | | | | | | 221 | |
| VST-3 | 74,69 | 13,51 | 0,65 | 0,03 | 0,94 | 0,02 | 0,07 | 3,46 | 5,94 | 0,025 | 0,12 | 0,49 | <50,1 | 0,976 | | | | | 16 | | 14 | 16 | | 138 | 107 | 49 | | | | 229 | | | | | | | | | 24 | 109 | |

Poznámky:

| | |
|---|---|
| * | doplňkové externí analýzy |
| n.a. | neanalyzováno |
| prázdné pole | <10 ppm prvku |

Metodika laboratorní testace vzorků pegmatitů zaměřené na určení obsahů a získatelnosti silikátových surovin a vzácných prvků

# Příloha 7
# Zkoušky silikátových složek

| | |
|---|---|
| Program: | Epsilon |
| Název projektu: | Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů |
| Název projektu anglicky: | Evolved magmatic and pegmatitic systems as sources of critical raw materials and industrial minerals |
| Číslo projektu TAČR: | TH79020002 |
| Číslo projektu ERA-MIN 3: | JTC-2021_174 |
| Řešitelské organizace: | Masarykova univerzita<br>G E T s.r.o.<br>K M K GRANIT, a.s. |
| Doba řešení: | 5/2022 - 4/2025 |
| Důvěrnost a dostupnost: | veřejně přístupný |


Řešitelský tým:

Jan Cempírek (Masarykova univerzita)

Milan Novák (Masarykova univerzita)

Radek Škoda (Masarykova univerzita)

Jaromír Tvrdý (G E T s.r.o.)

Petr Hanzlík (G E T s.r.o.)

Ondřej Krátký (G E T s.r.o.)

Ondřej Sysel (G E T s.r.o.)

Jitka Kovářová (G E T s.r.o.)

Pavel Jedlička (K M K GRANIT, a.s.)

Emília Křenková (K M K GRANIT, a.s.)

Pavel Tatýrek (K M K GRANIT, a.s.)

Přílohu zpracovali: Pavel Jedlička
Emília Křenková
Pavel Tatýrek
Jaromír Tvrdý

Obsah přílohy:
7/1 Souhrnná tabulka
7/2 Výsledky elektromagnetického čištění
7/3 Hodnocení výpalků
7/4 Analýza na žárovém mikroskopu (Vysoké učení technické v Brně)

Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON je zaměřen zejména na zlepšení pozice českého a v globálním kontextu i evropského průmyslu pomocí podpory projektů spadajících do kategorie aplikovaného výzkumu (zahrnuje průmyslový výzkum, experimentální vývoj nebo jejich kombinaci), jejichž výsledky mají vysoký potenciál pro rychlé uplatnění v nových produktech, výrobních postupech a službách. Poskytovatelem finančních prostředků je Technologická agentura ČR.

# Souhrnná tabulka

| Vzorek | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | $TiO_2$ | CaO | $P_2O_5$ | MgO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $Rb_2O$ | Σalk. | K2O/Na2O | LOI | Li* | Be* | Smrštění výpalku | Nasákavost výpalku | Bělost | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | hm.% | µg/g | µg/g | % | % | B+L*/D65 | B-a*/D65 | B-b*/D65 |
| BrV | 71,46 | 16,53 | 0,68 | 0,07 | 2,73 | 0,07 | 0,36 | 4,04 | 3,32 | 0,01 | 7,36 | 0,82 | 0,73 | <10 | 3,19 | 8,79 | 0,03 | 57,52 | 4,65 | 13,21 |
| CL | 72,58 | 14,80 | 0,21 | 0,01 | 0,15 | 0,10 | 0,02 | 2,05 | 9,66 | 0,02 | 11,71 | 4,71 | 0,40 | <10 | 1,04 | 7,39 | 0,06 | 75,10 | 1,00 | 1,13 |
| Cn2 | 68,02 | 19,91 | 0,35 | 0,03 | 0,30 | 0,13 | 0,08 | 8,01 | 1,78 | 0,07 | 9,79 | 0,22 | 1,33 | 64 | 18,20 | 4,81 | 0,07 | 85,35 | -0,26 | 7,09 |
| FK | 70,17 | 16,07 | 0,08 | 0,02 | 0,25 | 0,44 | 0,02 | 5,20 | 6,22 | 0,19 | 11,42 | 1,20 | 0,34 | 73 | 4,90 | 9,57 | 0,09 | 77,21 | 0,15 | 2,92 |
| Lav2T | 75,01 | 13,81 | 0,34 | 0,10 | 1,33 | 0,13 | 0,20 | 2,67 | 5,94 | 0,02 | 8,61 | 2,22 | 0,45 | 12 | 6,06 | 9,71 | 0,03 | 74,95 | 1,18 | 10,06 |

* externí analýza

# Výsledky elektromagnetického čištění

| Vzorek | Bilance | Separace | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | $TiO_2$ | CaO | $P_2O_5$ | MgO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $Rb_2O$ | $Cs_2O$ | $Li_2O$* | BeO* | SrO | $Nb_2O_5$ | $Ta_2O_5$ | $SnO_2$ | $WO_3$ | ΣREE | MnO | $ZrO_2$ | F | LOI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | % | % | % | % |
| **BrV** | n.a. | V | 72,77 | 15,38 | 1,27 | 0,10 | 2,04 | 0,07 | 0,34 | 3,59 | 3,45 | 0,014 | | <20 | 8,85 | 842 | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 51 | 0,086 | 0,014 | n.a. | 0,73 |
| | n.a. | M | 58,24 | 22,22 | 4,55 | 0,28 | 4,50 | 0,08 | 0,88 | 1,96 | 4,91 | 0,024 | | <100 | 3,75 | 2140 | 39 | n.a. | n.a. | n.a. | 199 | 0,401 | 0,013 | n.a. | 1,60 |
| | n.a. | N | 75,99 | 13,65 | 0,43 | 0,06 | 1,37 | 0,06 | 0,22 | 3,97 | 3,17 | 0,012 | | <100 | 3,58 | 522 | n.a. | n.a. | n.a. | n.a. | 27 | 0,012 | 0,010 | n.a. | 0,95 |
| **DORO** | 100 | V | 79,39 | 12,10 | 0,32 | 0,00 | 0,29 | 0,07 | 0,08 | 6,31 | 0,77 | 0,018 | | 151 | 325 | n.a. | 126 | n.a. | 62 | n.a. | | 0,233 | 0,005 | n.a. | 0,38 |
| | 5,6 | M | 68,34 | 13,46 | 5,49 | 0,03 | 0,44 | 0,19 | 0,34 | 5,00 | 0,67 | 0,013 | | 353 | 547 | n.a. | 700 | 118 | 677 | 218 | 221 | 5,100 | 0,038 | n.a. | 0,57 |
| | 94,4 | N | 79,47 | 12,21 | 0,18 | 0,00 | 0,30 | 0,06 | 0,08 | 6,61 | 0,69 | 0,015 | | <100 | 488 | n.a. | 101 | n.a. | 52 | n.a. | | 0,110 | 0,005 | n.a. | 0,23 |
| **Lav1** | 100 | V | 75,73 | 13,27 | 0,31 | 0,09 | 1,54 | 0,11 | 0,17 | 2,86 | 5,39 | 0,024 | | 38,1 | n.a. | 214 | | | | 28 | | 0,003 | 0,006 | n.a. | 0,42 |
| | 4,3 | M | 65,14 | 14,64 | 4,97 | 1,22 | 2,35 | 0,16 | 2,10 | 2,62 | 5,04 | 0,030 | | 209 | n.a. | 247 | 129 | | | 458 | | 0,042 | 0,013 | 0,195 | 1,19 |
| | 95,7 | N | 76,06 | 12,93 | 0,21 | 0,06 | 1,54 | 0,11 | 0,13 | 2,78 | 5,65 | 0,025 | | 35,1 | n.a. | 228 | | | | | | 0,001 | 0,006 | n.a. | 0,41 |
| **Lav2** | 100 | V | 75,59 | 13,19 | 0,41 | 0,10 | 1,30 | 0,12 | 0,18 | 2,55 | 5,98 | 0,026 | | 24,8 | 16,8 | 225 | | | | | | 0,004 | 0,007 | n.a. | 0,45 |
| | 5,6 | M | 65,27 | 15,42 | 4,81 | 1,07 | 1,73 | 0,13 | 1,84 | 2,38 | 5,63 | 0,036 | | 89,8 | n.a. | 233 | 125 | | | 600 | 84 | 0,032 | 0,021 | n.a. | 1,32 |
| | 94,4 | N | 76,43 | 12,71 | 0,25 | 0,06 | 1,22 | 0,11 | 0,12 | 2,39 | 6,15 | 0,025 | | <20 | n.a. | 220 | | | | | | 0,001 | 0,005 | n.a. | 0,45 |
| **LH** | 100 | V | 67,58 | 17,00 | 0,59 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,85 | 6,91 | 0,930 | 2580 | 27555 | 19,9 | 32 | 167 | 71 | 1330 | 65 | | 0,263 | | 3,26 | 2,00 |
| | 3,3 | M | 55,64 | 22,60 | 1,24 | 0,02 | 0,06 | 0,06 | 0,16 | 0,29 | 9,94 | 1,480 | 3900 | 38318 | 51,3 | 55 | 305 | 144 | 701 | 153 | | 0,486 | 0,009 | 3,52 | 3,94 |
| | 96,7 | N | 69,59 | 16,00 | 0,47 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,07 | 0,69 | 6,73 | 0,931 | 2720 | 25402 | 41,9 | | 177 | 98 | 1380 | 73 | | 0,254 | | 2,97 | 1,78 |
| **Prb** | 100 | V | 74,97 | 13,41 | 0,97 | 0,01 | 0,58 | 0,91 | 0,04 | 4,02 | 3,52 | 0,112 | | 452 | 0,26 | 489 | 86 | | 249 | 32 | | 0,194 | | 0,16 | 1,01 |
| | 18,1 | M | 53,82 | 24,28 | 4,11 | 0,07 | 1,31 | 1,63 | 0,07 | 1,64 | 7,38 | 0,335 | | 1748 | 5,80 | 739 | 480 | | 402 | 40 | | 0,751 | | 0,60 | 3,74 |
| | 81,9 | N | 78,94 | 11,93 | 0,29 | 0,00 | 0,32 | 0,46 | 0,03 | 4,74 | 2,65 | 0,065 | | 147 | 14,87 | 319 | 23 | | | | | 0,040 | | n.a. | 0,48 |
| **RE30** | 100 | V | 76,42 | 11,53 | 1,43 | 0,04 | 0,31 | 0,03 | 0,04 | 2,66 | 5,68 | 0,062 | | 109 | 5,02 | 77 | 266 | 31 | 761 | 37 | 166 | 0,104 | 0,004 | n.a. | 0,21 |
| | 9,9 | M | 64,78 | 13,23 | 9,00 | 0,27 | 0,50 | 0,08 | 0,12 | 2,25 | 2,55 | 0,033 | | 715 | 14,18 | 64 | 1260 | 67 | 10400 | 82 | 991 | 0,664 | 0,279 | n.a. | 1,58 |
| | 90,1 | N | 77,12 | 11,77 | 0,53 | 0,01 | 0,30 | 0,02 | 0,04 | 2,68 | 6,42 | 0,070 | | 441 | 20,96 | 86 | 136 | | 5040 | | 119 | 0,023 | 0,003 | n.a. | 0,18 |
| **SMP2** | n.a. | V | 74,91 | 12,10 | 0,49 | 0,09 | 0,24 | 0,08 | 0,10 | 3,56 | 6,47 | 0,044 | | n.a. | n.a. | 38 | | | | | | 0,008 | 0,004 | n.a. | 1,9 |

| Vzorek | Bilance | Separace | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | $TiO_2$ | CaO | $P_2O_5$ | MgO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $Rb_2O$ | $Cs_2O$ | $Li_2O$* | BeO* | SrO | $Nb_2O_5$ | $Ta_2O_5$ | $SnO_2$ | $WO_3$ | ΣREE | MnO | $ZrO_2$ | F | LOI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | % | | % | % | % | % | % | % | % | % | % | % | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | % | % | % | % |
| | n.a. | M | 60,97 | 18,73 | 4,65 | 0,49 | 0,36 | 0,22 | 1,01 | 4,63 | 5,91 | 0,054 | | n.a. | n.a. | 39 | 161 | | 62 | | 127 | 0,084 | 0,025 | n.a. | 2,80 |
| | n.a. | N | 72,43 | 13,56 | 0,23 | 0,04 | 0,24 | 0,16 | 0,15 | 5,52 | 6,50 | 0,043 | | n.a. | n.a. | 38 | | | | | 31 | 0,006 | 0,003 | n.a. | 1,20 |
| **Ver** | 100 | V | 69,96 | 12,99 | 0,17 | 0,08 | 0,90 | 7,22 | 0,08 | 0,63 | 5,26 | 0,188 | | 45,9 | n.a. | 342 | | | 1250 | 58 | 34 | 0,004 | | 0,61 | 1,56 |
| | 4,5 | M | 61,53 | 15,78 | 1,34 | 0,13 | 1,77 | 7,59 | 0,18 | 0,76 | 5,65 | 0,217 | | 96,7 | n.a. | 374 | 32 | | 6300 | 917 | | 0,020 | 0,020 | 0,64 | 1,90 |
| | 95,5 | N | 68,97 | 13,47 | 0,11 | 0,09 | 0,79 | 8,36 | 0,07 | 0,48 | 5,02 | 0,176 | | <20 | n.a. | 275 | | | 542 | | | 0,003 | 0,003 | 0,67 | 1,61 |
| **VerII** | 100,0 | V | 62,06 | 15,25 | 0,25 | 0,12 | 1,62 | 9,83 | 0,07 | 0,64 | 5,26 | 0,207 | | 23895 | 8,05 | 870 | 95 | | 15900 | | | 0,008 | <0,001 | 0,74 | 2,03 |
| | 4,2 | M | 44,64 | 19,47 | 3,46 | 0,26 | 4,94 | 7,37 | 0,35 | 0,29 | 5,68 | 0,322 | | 14854 | 75,2 | 1380 | 143 | <10 | 37500 | 91 | | 0,106 | <0,001 | 1,06 | 4,69 |
| | 95,8 | N | 62,10 | 14,82 | 0,13 | 0,11 | 1,54 | 9,83 | 0,05 | 0,67 | 5,03 | 0,201 | | 19568 | 25,5 | 855 | 121 | <10 | 20200 | <10 | | 0,006 | <0,001 | 0,88 | 2,41 |
| **VST-1** | 100 | V | 76,20 | 13,05 | 0,70 | 0,05 | 1,09 | 0,05 | 0,08 | 3,68 | 4,53 | 0,022 | | <100 | 3,30 | 153 | | | | | 103 | 0,264 | 0,013 | n.a. | 0,47 |
| | 11,8 | M | 65,90 | 15,36 | 6,90 | 0,56 | 0,95 | 0,10 | 0,50 | 3,02 | 4,43 | 0,026 | | <100 | 14,2 | 122 | 192 | | | | 1016 | 0,160 | 0,11 | n.a. | 1,83 |
| | 88,2 | N | 78,16 | 12,34 | 0,12 | 0,01 | 1,08 | 0,00 | 0,05 | 3,72 | 4,07 | 0,018 | | <100 | 9,19 | 139 | | | | | 36 | 0,008 | 0,005 | n.a. | 0,37 |
| **VST-2** | 100 | V | 73,00 | 13,50 | 0,20 | 0,02 | 0,16 | 0,02 | 0,05 | 1,66 | 10,91 | 0,047 | | 230 | 0,76 | 137 | | | | | | 0,023 | | n.a. | 0,33 |
| | 4,3 | M | 65,54 | 16,58 | 4,32 | 0,36 | 0,24 | 0,05 | 0,34 | 1,53 | 8,77 | 0,046 | | 53,8 | 6,05 | 97 | 62 | | | 70 | 539 | 0,557 | 0,017 | n.a. | 1,54 |
| | 95,7 | N | 75,33 | 12,60 | 0,05 | 0,01 | 0,17 | 0,01 | 0,04 | 1,69 | 9,81 | 0,041 | | <100 | 1,86 | 121 | | | | | | 0,003 | | n.a. | 0,22 |
| **VST-3** | 100 | V | 74,69 | 13,51 | 0,65 | 0,03 | 0,94 | 0,02 | 0,07 | 3,46 | 5,94 | 0,025 | | <100 | 2,71 | 163 | | | | | 136 | 0,117 | 0,007 | n.a. | 0,49 |
| | 5,6 | M | 58,82 | 16,26 | 11,46 | 0,57 | 0,80 | 0,10 | 0,57 | 2,46 | 4,29 | 0,027 | | <100 | 14,32 | 90 | 130 | | | | 3108 | 2,290 | 0,081 | n.a. | 1,86 |
| | 94,4 | N | 76,81 | 12,90 | 0,08 | 0,01 | 0,94 | 0,01 | 0,04 | 3,55 | 5,22 | 0,022 | | <100 | 8,96 | 152 | | | | | 26 | 0,008 | 0,003 | n.a. | 0,36 |

Poznámky:

| | |
|---|---|
| * | externí analýza |
| n.a. | neanalyzováno |
| prázdné pole | <10 ppm prvku |

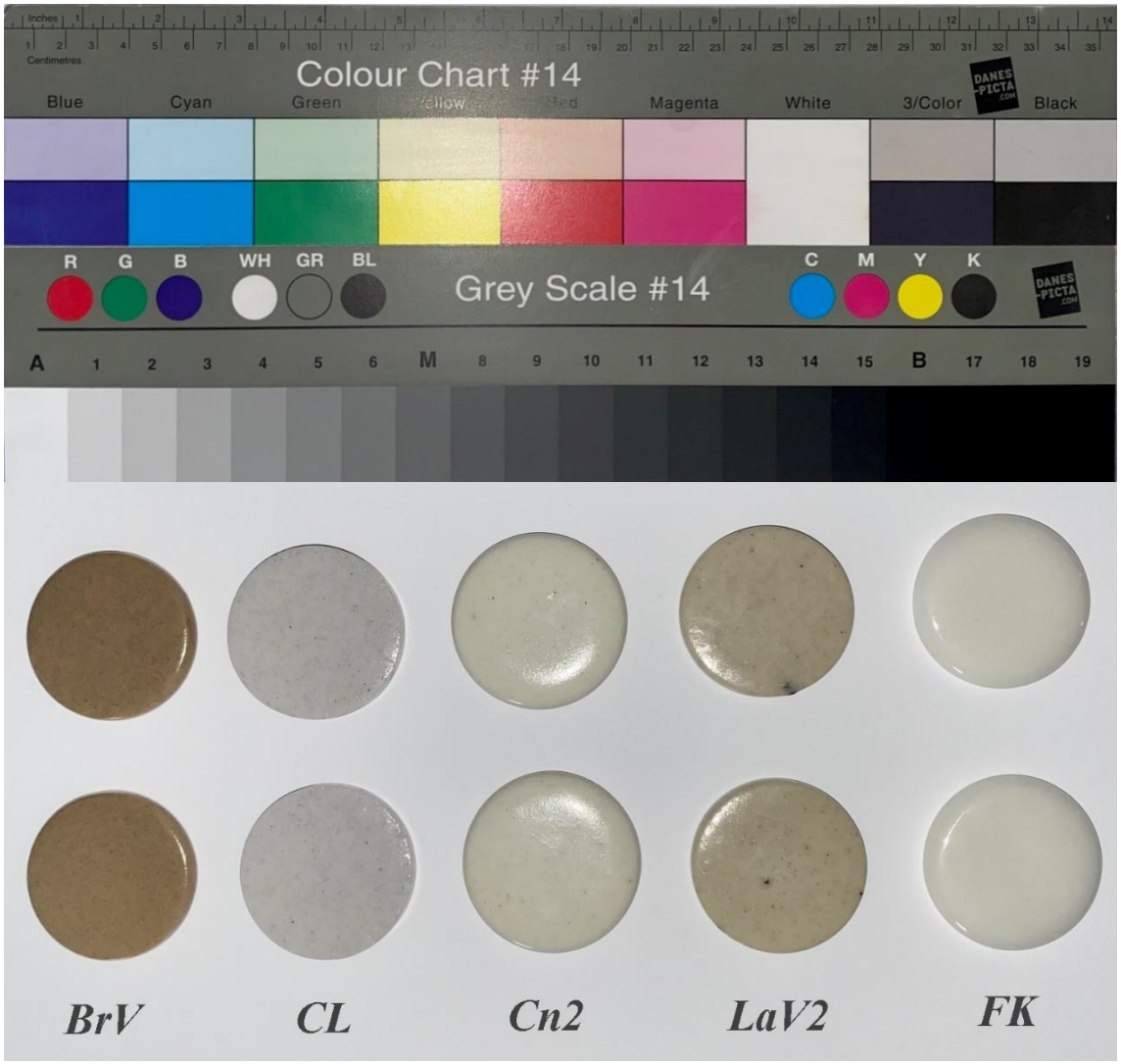
## Zkoušky silikátových složek

**Příloha 7/3**

# Hodnocení výpalků

Podmínky výpalu:
teplota 1250 °C, rychlost nárůstu teploty 3 °C/min, 1 hodina výdrž na max. teplotě.

**Foto výpalku**



## Vzhled výpalku

| | |
|---|---|
| **Cn2** | barva světle béžová |
| | povrch slinutý hladký, lesklý |
| | bez vytavenin |

| | |
|---|---|
| **Lav2** | barva světle okrová<br>jemně šedě a tmavohnědě kropenatý |
| | povrch slinutý hladký, lesklý |
| | ojedinělá vytavenina |

| | |
|---|---|
| **CL** | barva šedá<br>jemně šedě a tmavohnědě kropenatá |
| | povrch špatně slinutý hrubý, lesklý |
| | bez vytavenin |

| | |
|---|---|
| **BrV** | barva světle šedohnědá |
| | povrch slinutý hladký, lesklý |
| | bez vytavenin |

| | |
|---|---|
| **FK** | barva světle béžová |
| | povrch slinutý hladký, lesklý |
| | bez vytavenin |

## Smrštění výpalku

| **Cn2** | **lv** | **lp** | **s /%/** |
|---|---|---|---|
| | 45,73 | 43,46 | 4,96 |
| | 45,72 | 43,59 | 4,66 |
| **průměr** | **45,73** | **43,53** | **4,81** |

| **Lav2** | **lv** | **lp** | **s /%/** |
|---|---|---|---|
| | 45,73 | 41,30 | 9,69 |
| | 45,70 | 41,25 | 9,74 |
| **průměr** | **45,72** | **41,28** | **9,71** |

| **CL** | **lv** | **lp** | **s /%/** |
|---|---|---|---|
| | 45,80 | 42,67 | 6,83 |
| | 45,71 | 42,08 | 7,94 |
| **průměr** | **45,76** | **42,38** | **7,39** |

| **BrV** | **lv** | **lp** | **s /%/** |
|---|---|---|---|
| | 45,70 | 41,58 | 9,02 |
| | 45,72 | 41,80 | 8,57 |
| **průměr** | **45,71** | **41,69** | **8,79** |

| **FK** | **lv** | **lp** | **s /%/** |
|---|---|---|---|
| | 45,72 | 41,37 | 9,51 |
| | 45,69 | 41,29 | 9,63 |
| **průměr** | 45,705 | 41,33 | **9,57** |

## Nasákavost výpalku

| Cn2 | G dry | G sat | MA /%/ |
|---|---|---|---|
| | 19,6885 | 19,7026 | 0,072 |
| | 19,7259 | 19,7382 | 0,062 |
| **průměr** | **19,71** | **19,72** | **0,07** |

| Lav2 | G dry | G sat | MA /%/ |
|---|---|---|---|
| | 19,7795 | 19,7862 | 0,034 |
| | 19,8535 | 19,8592 | 0,029 |
| **průměr** | **19,82** | **19,82** | **0,03** |

| CL | G dry | G sat | MA /%/ |
|---|---|---|---|
| | 19,7951 | 19,8058 | 0,054 |
| | 19,9143 | 19,9270 | 0,064 |
| **průměr** | **19,85** | **19,87** | **0,06** |

| BrV | G dry | G sat | MA /%/ |
|---|---|---|---|
| | 19,7413 | 19,7481 | 0,034 |
| | 19,7592 | 19,7661 | 0,035 |
| **průměr** | **19,75** | **19,76** | **0,03** |

| FK | G dry | G sat | MA /%/ |
|---|---|---|---|
| | 19,8446 | 19,8630 | 0,093 |
| | 19,7424 | 19,7601 | 0,090 |
| **průměr** | **19,79** | **19,81** | **0,09** |

## Bělost výpalku

| Cn2 | B-L*/D65 | B-a*/D65 | B-b*/D65 |
|---|---|---|---|
| | 85,48 | -0,28 | 7,09 |
| | 85,22 | -0,23 | 7,08 |
| **průměr** | **85,35** | **-0,26** | **7,09** |

| Lav2 | B-L*/D65 | B-a*/D65 | B-b*/D65 |
|---|---|---|---|
| | 74,70 | 1,19 | 10,09 |
| | 75,19 | 1,17 | 10,02 |
| **průměr** | **74,95** | **1,18** | **10,06** |

| CL | B-L*/D65 | B-a*/D65 | B-b*/D65 |
|---|---|---|---|
| | 75,32 | 0,99 | 1,07 |
| | 74,87 | 1,01 | 1,19 |
| **průměr** | **75,10** | **1,00** | **1,13** |

| BrV | B-L*/D65 | B-a*/D65 | B-b*/D65 |
|---|---|---|---|
| | 57,46 | 4,71 | 13,29 |
| | 57,57 | 4,59 | 13,12 |
| **průměr** | **57,52** | **4,65** | **13,21** |

| FK | B-L*/D65 | B-a*/D65 | B-b*/D65 |
|---|---|---|---|
| | 77,23 | 0,15 | 2,96 |
| | 77,19 | 0,15 | 2,88 |
| **průměr** | **77,21** | **0,15** | **2,92** |

# Závěrečná zpráva k zakázce

# DČ SR122457109
# protokol 24 /09 / 3201

# Analýza vzorků živců na žárovém mikroskopu

**Objednavatel:** **KMK GRANIT, a.s.**
Mírová 545,
357 31 Krásno

**Odpovědný řešitel:** **doc. Ing. Karel Dvořák, Ph.D.**

**Pracoviště:** **Ústav technologie stavebních hmot a dílců**
**Fakulta stavební**
**Vysoké učení technické v Brně**
Veveří 331/95
602 00 Brno
IČ: 00216305 / DIČ: CZ00216305

**Zpracováno dne:** 10.09.2024

doc. Ing. Karel Dvořák, Ph.D.
odpovědný řešitel

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
vedoucí ústavu THD

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební

## 1. Předmět

Předmětem zprávy je analýza slínavosti šesti vzorků živcových surovin s využitím pozorovací pece/žárového mikroskopu.
Pro tento účel byly objednatelem předány vzorky šesti živcových surovin v uzavřených sáčcích.
Zpráva byla zpracována na základě objednávky č. 153/040/24 z 4.7.2024.
Dodány byly vzorky označené:

1) FKS 0-5
2) FKS+Ch-1
3) FKS+Ch-2
4) FKS+Di2-1
5) FKS+R0z-1
6) FKS+Ver

## 2. Metodika práce a použité zkušební postupy

Na vzorcích byly nejprve upraveny následujícím postupem:

1) Výroba granulátu s přídavkem 10 % roztoku Lovosy (CMC, 3% roztok)
2) Suché lisování vzorků ve válcové formě tlakem 35 MPa
3) Úprava válcových vzorků na jednotnou velikost: průměr 13 mm, výška 25 mm

Analýza slínavosti provedena v peci Clasic. Rychlost nárustu teploty 10 °C/ min

Vyhodnoceny byly:

1) Sintrace – teplota, při které je vzorek maximálně zhutněn
2) Počátek deformace – teplota, při které dochází k prvnímu vychýlení vzorku ze svislé polohy
3) Žárovzdormost – teplota, kdy dojde k deformaci vzorku (válečku) o 90 °

## 3. Výsledky zkoušek

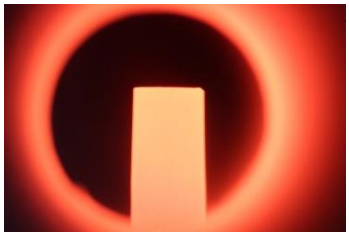
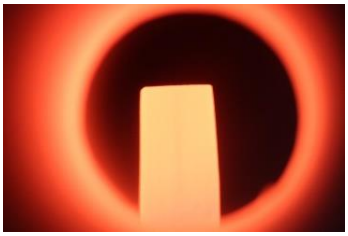
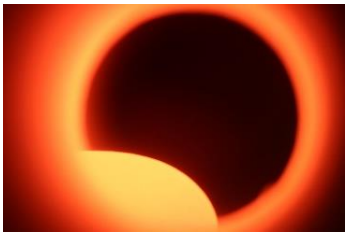
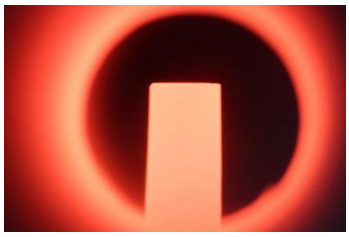
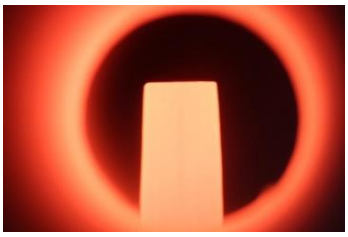
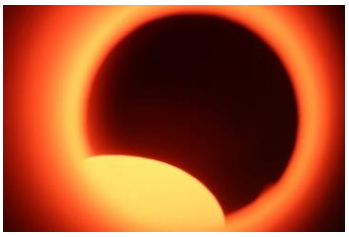
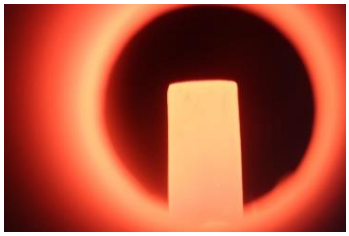
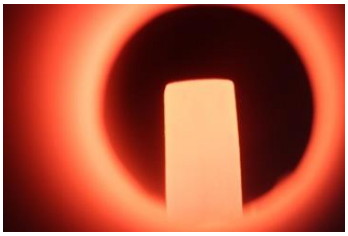
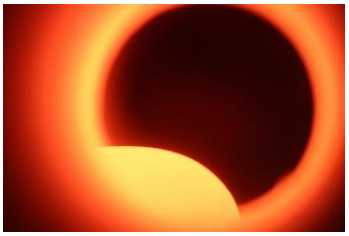
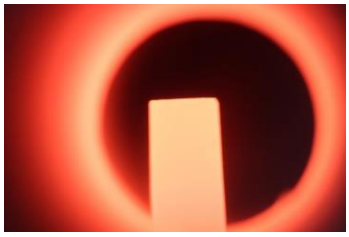
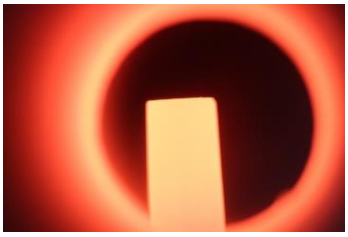
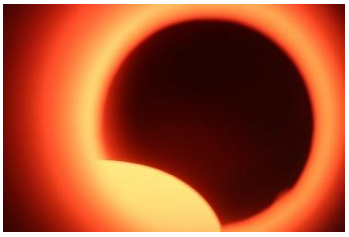
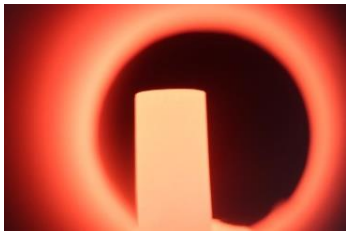
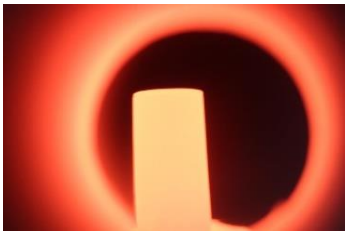
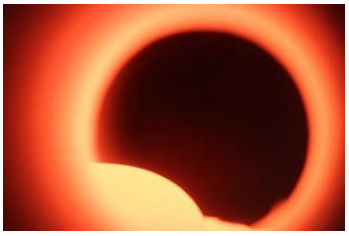
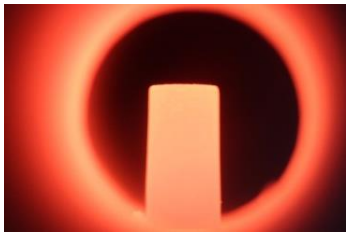
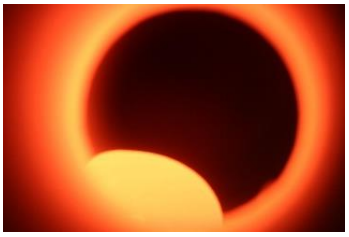
Výsledky vyhodnocení sintrace, počátku deformace a žáruvzdornosti, jsou uvedeny v tabulce č.1:

Tab. 1: Stanovení sintrace, počátku deformace a žáruvzdornosti
(vyšší teplota – červeně. Nižší teplota – modře)

| č. | Vzorek | Sintrace [°C] | Počátek deformace [°C] | Žárovzdornost [°C] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | FKS 0-5 | 1215 | 1285 | 1430 |
| 2 | FKS+Ch-1 | 1180 | 1265 | 1420 |
| 3 | FKS+Ch-2 | 1225 | 1255 | 1405 |
| 4 | FKS+Di2-1 | 1210 | 1230 | 1375 |
| 5 | FKS+R0z-1 | 1210 | 1235 | 1370 |
| 6 | FKS+Ver | 1190 | 1260 | 1420 |

*(vyšší teplota – červeně. Nižší teplota – modře)

Na obrázku č. 1 jsou uvedeny obrazové záznamy z pozorovací pece, které korespondují s vyhodnocenými teplotami v tabulce č. 1.

| č. | Vzorek | Sintrace | Počátek deformace | Žárovzdornost |
|---|---|---|---|---|
| 1 | FKS 0-5 |  |  |  |
| 2 | FKS+Ch-1 |  |  |  |
| 3 | FKS+Ch-2 |  |  |  |
| 4 | FKS+Di2-1 |  |  |  |
| 5 | FKS+R0z-1 |  |  |  |
| 6 | FKS+Ver |  | |  |

Obr. 1: Záznamy z pozorovací pece

## 4. Závěr

Brzký počátek deformace a významné nižší žárovzdornost vykazovali vzorky FKS+Di2-1 a FKS+R0z-1.

V Brně dně 10.9.2024

doc. Ing. Karel Dvořák, Ph.D.
doc. Ing. Radomír Sokolář, Ph.D.

# Příloha 8
# Zkoušky ostatních užitkových složek

| | |
|---|---|
| Program: | Epsilon |
| Název projektu: | Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů |
| Název projektu anglicky: | Evolved magmatic and pegmatitic systems as sources of critical raw materials and industrial minerals |
| Číslo projektu TAČR: | TH79020002 |
| Číslo projektu ERA-MIN 3: | JTC-2021_174 |
| Řešitelské organizace: | Masarykova univerzita<br>G E T s.r.o.<br>K M K GRANIT, a.s. |
| Doba řešení: | 5/2022 - 4/2025 |
| Důvěrnost a dostupnost: | veřejně přístupný |


| | |
|---|---|
| Řešitelský tým: | Jan Cempírek (Masarykova univerzita) |
| | Milan Novák (Masarykova univerzita) |
| | Radek Škoda (Masarykova univerzita) |
| | Jaromír Tvrdý (G E T s.r.o.) |
| | Petr Hanzlík (G E T s.r.o.) |
| | Ondřej Krátký (G E T s.r.o.) |
| | Ondřej Sysel (G E T s.r.o.) |
| | Jitka Kovářová (G E T s.r.o.) |
| | Pavel Jedlička (K M K GRANIT, a.s.) |
| | Emília Křenková (K M K GRANIT, a.s.) |
| | Pavel Tatýrek (K M K GRANIT, a.s.) |

Přílohu zpracovali: Pavel Jedlička
Emília Křenková
Pavel Tatýrek
Jan Cempírek
Radek Škoda
Jakub Výravský (TESCAN GROUP, a.s.)

Obsah přílohy: 8/1 Metodika
8/2 Tabulka chemických analýz
8/3 Mineralogické analýzy

Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON je zaměřen zejména na zlepšení pozice českého a v globálním kontextu i evropského průmyslu pomocí podpory projektů spadajících do kategorie aplikovaného výzkumu (zahrnuje průmyslový výzkum, experimentální vývoj nebo jejich kombinaci), jejichž výsledky mají vysoký potenciál pro rychlé uplatnění v nových produktech, výrobních postupech a službách. Poskytovatelem finančních prostředků je Technologická agentura ČR.

# Zkoušky ostatních užitkových složek

**Příloha 8/1**

## Metodika

Jakub Výravský (TESCAN GROUP, a.s.)

Radek Škoda (Masarykova univerzita)

Emília Křenková (K M K GRANIT, a.s.)

### Příprava vzorků

Pro výzkum ostatních složek tvořících potenciálně využitelnou příměs ve studovaných horninách bylo vybráno 6 vzorků. Sledováno bylo chemické složení vstupní suroviny, magnetického a gravitačního koncentrátu. Magnetická frakce byla získána na elektromagnetickém separátoru ERIEZ (Laboratoř K M K GRANIT). Těžké koncentráty byly připraveny v Ústavu geologických věd PřF Masarykovy univerzity. Vzorky byly podrceny na čelisťovém drtiči na <2 mm, následně vibračně sítovány mokrou cestou, frakce ze sít 0,250 a 0,125 mm šlichovány na rýžovací misce do ne zcela tmavého šlichu, vysušeny a rozdruženy pomocí těžké kapaliny (tetrabromoethan, hustota 2.97 g/cm$^3$).

Pro mineralogickou analýzu byly vzorky zality do disků z epoxidové pryskyřice. Aby se zabránilo sedimentaci částic s vysokou hustotou během fixace vzorku v discích a tím nadhodnocení jejich zastoupení ve výsledných datech, byl použit dvoufázový postup přípravy vzorku. Materiál vzorku byl smíchán s epoxidovou pryskyřicí a byly připraveny dva disky, každý o průměru 25 mm. Po úplném vysušení byly disky nařezány kolmo (ve směru sedimentace částic) na tenké destičky, které byly následně zafixovány do 6 disků o průměru 25 mm, vyleštěny a pokoveny uhlíkem pro automatizovanou mineralogickou analýzu.

### Chemická analýza

Chemická analýza byla provedena v laboratoři společnosti K M K GRANIT. Analyzována byla magnetická frakce (pokud to množství materiálu dovolilo) a epoxidové preparáty magnetické (označení „m“) a těžké frakce („TF“). Zvolena byla rentgenfluorescenční metoda pomocí přístroje THERMO ARL Preform´X s využitím bezstandardové semikvantitativní analýzy UNIQUANT v souladu se zavedeným postupem laboratoře. Analyzovány byly všechny epoxidové disky (označeny „A“–„D“; Příloha 8.3), v souhrnné tabulce (Příloha 8.2) jsou vždy uvedeny průměry za každý vzorek.

### Mineralogická analýza

Disky se vzorkem byly analyzovány pomocí Tescan Integrated Mineral Analyzer (TIMA) vybaveného detektory pro energeticky disperzní spektroskopickou (EDS) analýzu. Metoda TIMA je založena na FEG (Field Emission Gun) skenovacím elektronovém mikroskopu s detektorem BSE (zpětně rozptýlené elektrony) a až 4 SDD EDS detektory pro simultánní sběr dat. Byly použity

následující analytické podmínky: Pracovní vzdálenost 15 mm, urychlovací napětí 25 kV, proud paprsku 10 nA, šířka pole 1500 µm. Průměr stopy paprsku byl <100 nm. Data byla získána pomocí režimu high resolution mapping (Hrstka et al. 2018) s velikostí pixelu 4 µm. Doba načítání BSE byla 10 µs/pixel pro EDS bylo shromážděno 1000 fotonů z každého pixelu, Data byla zpracována v TIMA SW ver. 2.11. Data byla segmentována metodou „standard segmentation" používající multispektrální watershed s uživatelsky nastavitelným prahem (Juránek et al. 2022). Hodnota separation of phases určující práh watershed segmentace byla nastavena na hodnotu 17. Segmentace slouží k nalezení chemicky koherentních oblastí (ideálně odpovídající jednotlivým minerálním zrnům) a poté jsou v rámci těchto segmentů sečtena spektra ze všech pixelů pro zredukování šumu a výsledné kumulativní spektrum klasifikováno na základě uživatelsky definovatelného klasifikačního schématu. V klasifikačním schématu se nacházejí definice jednotlivých minerálních fází obsahující klasifikační pravidla zahrnující normalizované intensity jednotlivých spektrálních čar vybraných prvků a/nebo poměry normalizovaných intensit vybraných spektrálních čar a/nebo střední hodnotu BSE jasu ze všech pixelů v daném segmentu. Pro výpočty celkového složení vzorku a distribuce jednotlivých prvků mezi minerály byly v klasifikačním schématu jednotlivým minerálům přiřazeny reprezentativní složení a hustoty, které většinou odpovídají ideálním vzorcům koncových členů dostupných ve veřejných minerálových databázích (webmineral.com, mindat.org). Výsledky mineralogické analýzy jsou uvedeny v Příloze 8.4.

## Literatura

Juránek R., Výravský J., Kolář M., Motl D., Zemčík P- (2022): Graph-based deep learning segmentation of EDS spectral images for automated mineral phase analysis. Computers & Geosciences 165, 105109.

Hrstka T., Gottlieb P., Skála R., Breiter K., Motl D. (2018): Automated mineralogy and petrology - applications of TESCAN Integrated Mineral Analyzer (TIMA). Journal of Geosciences 63(1), 47-63.

# Zkoušky ostatních užitkových složek

**Příloha 8/2**

## Tabulka chemických analýz

| Vzorek | Matrice | hm.% | | | | | | | | | | | µg/g | | | | | | | | | | |

**Příloha 8/3**

# Mineralogické analýzy

**Primary phases / Mass % of phase [%]**

**Mass % of phase [%]**

| Primary phases / Fraction | Rozna2 Heavy fraction | Rozna2 Magnetic fraction | Dolni Rozinka Heavy fraction | Dolni Rozinka Magnetic fraction | Vernerov Heavy fraction | Vernerov Magnetic fraction | Lhenice Heavy fraction | Lhenice Magnetic fraction | Costeşti Jărosul Heavy fraction | Costeşti Jărosul Magnetic fraction | Řečice Heavy fraction | Řečice Magnetic fraction |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Albite | 2,93 | 33,00 | 0,48 | 38,06 | 0,02 | 3,87 | 0,09 | 1,06 | 1,51 | 35,81 | 0,23 | 12,74 |
| Quartz | 3,75 | 17,97 | 0,54 | 27,21 | 0,12 | 29,69 | 0,45 | 5,79 | 0,27 | 1,89 | 1,93 | 31,84 |
| Lepidolite | 6,03 | 30,02 | 0,01 | 0,35 | 0,00 | 0,28 | 1,24 | 78,38 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,15 |
| Spessartine | 0,02 | 0,03 | 86,87 | 19,91 | 0,03 | 0,00 | 0,52 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 4,45 | 1,22 |
| Elbaite | 61,93 | 9,68 | 1,10 | 0,76 | 0,03 | 0,09 | 31,37 | 0,73 | 0,02 | 0,00 | 1,77 | 1,25 |
| Montebrasite | 0,03 | 0,01 | 0,16 | 0,01 | 86,49 | 15,09 | 0,64 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,07 | 0,01 |
| Schorl | 3,56 | 0,52 | 7,02 | 6,34 | 0,00 | 0,04 | 1,32 | 0,09 | 0,01 | 0,01 | 42,26 | 29,83 |
| Cassiterite | 13,29 | 0,04 | 0,53 | 0,02 | 2,50 | 0,17 | 49,47 | 0,11 | 0,53 | 0,11 | 17,06 | 0,64 |
| Hematite/Magnetite | 0,19 | 0,04 | 0,04 | 0,02 | 0,04 | 0,14 | 0,76 | 0,29 | 69,28 | 10,53 | 0,47 | 0,35 |
| Orthoclase | 0,08 | 0,84 | 0,03 | 2,58 | 0,04 | 28,23 | 0,05 | 0,18 | 1,68 | 31,21 | 0,12 | 12,32 |
| Muscovite | 1,07 | 6,27 | 0,01 | 0,41 | 0,12 | 10,95 | 3,17 | 8,08 | 0,00 | 0,05 | 0,02 | 0,15 |
| Lollingite | | 0,00 | 0,01 | 0,00 | | 0,00 | 1,65 | 0,06 | 0,00 | | 23,42 | 3,98 |
| Chlorite - Clinochlore | 0,00 | 0,01 | 0,19 | 0,42 | 0,00 | 0,06 | 0,37 | 0,22 | 10,76 | 11,87 | 0,04 | 0,09 |
| Zircon | 0,97 | 0,04 | 0,26 | 0,12 | 0,01 | 0,03 | 2,72 | 0,01 | 8,87 | 4,79 | 0,22 | 0,03 |
| Apatite | 4,87 | 0,44 | 1,44 | 0,28 | 2,52 | 2,80 | 0,02 | 0,03 | 0,20 | 0,05 | 0,13 | 0,02 |
| Scorodite | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | 0,11 | 0,02 | | | 3,49 | 1,51 |
| Kaolinite | 0,21 | 0,25 | 0,28 | 1,26 | 0,11 | 1,12 | 0,10 | 1,11 | 0,00 | 0,01 | 0,05 | 0,46 |
| Kesterite | 0,00 | | 0,02 | 0,00 | 3,26 | 1,48 | 0,03 | | | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Biotite | 0,05 | 0,15 | 0,08 | 0,38 | 0,01 | 0,42 | 0,23 | 2,22 | 0,20 | 0,33 | 0,03 | 0,06 |
| Polycrase | 0,00 | | 0,00 | | | 0,00 | | | 3,03 | 1,04 | 0,00 | 0,00 |
| Sphalerite | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,46 | 1,01 | 0,02 | | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,00 |
| Columbite-(Mn) | 0,10 | 0,03 | 0,33 | 0,09 | | 0,00 | 2,72 | 0,04 | | | 0,14 | 0,04 |
| Wallkilldellite | | | 0,00 | 0,00 | | | 0,06 | 0,00 | | | 1,39 | 1,37 |
| Orthoclase(2) | 0,02 | 0,13 | 0,00 | 0,24 | 0,00 | 1,08 | 0,02 | 0,24 | 0,09 | 0,38 | 0,01 | 0,50 |
| Pyrite | 0,01 | | 0,00 | | 0,03 | 0,03 | 0,00 | | 1,71 | 0,22 | 0,07 | 0,09 |
| Crandallite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,94 | 1,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Osumilite | 0,07 | 0,18 | 0,13 | 0,30 | 0,00 | 0,10 | 0,01 | 0,59 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,12 |
| Monazite | | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | | 0,26 | 0,06 | 0,85 | 0,17 |
| illite Krasno | 0,16 | 0,06 | 0,01 | 0,17 | 0,01 | 0,14 | 0,54 | 0,15 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 |
| Xenotime-chernovite | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | | 0,00 | 0,00 | 0,45 | 0,34 |
| Calcite | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,71 | 0,00 | 0,00 |
| Beryl | 0,30 | 0,10 | 0,04 | 0,18 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,05 |
| brazilianite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,60 | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Goethite | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,18 | 0,29 | 0,03 | 0,02 | 0,06 | 0,06 |
| Kaersutite | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,57 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Schorl(2) | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,41 | 0,00 | | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Almandine | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,22 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,04 | 0,02 |
| Corundum | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,10 | 0,09 | 0,29 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| Liddicoatite | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,03 | 0,05 | 0,32 | 0,00 | 0,01 | | 0,00 | 0,04 | 0,03 |
| Ilmenite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | | 0,31 | 0,13 | 0,00 | 0,00 |
| ferosaponite-goethite | 0,04 | 0,02 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,04 | 0,12 | 0,07 | 0,05 | 0,01 | 0,02 |
| Huttonite-thorite | 0,00 | | 0,00 | | | 0,00 | 0,00 | | 0,29 | 0,09 | 0,00 | 0,00 |
| Quartz(2) | 0,02 | 0,03 | 0,01 | 0,04 | 0,01 | 0,13 | 0,02 | 0,04 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,04 |
| Columbite | 0,04 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,22 | 0,04 |
| Nb-Ta rutile | 0,00 | | | | 0,00 | 0,00 | | | 0,20 | 0,12 | | 0,00 |
| Nepheline | | 0,00 | | 0,00 | | 0,28 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Spodumene | 0,07 | 0,05 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 |
| Morinite | | 0,00 | | 0,00 | 0,05 | 0,22 | | | 0,00 | 0,00 | | 0,00 |
| Chlorite - Chamosite | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,10 | 0,06 | 0,02 | 0,03 |

| Primary phases / Fraction | Rozna2 Heavy fraction | Rozna2 Magnetic fraction | Dolni Rozinka Heavy fraction | Dolni Rozinka Magnetic fraction | Vernerov Heavy fraction | Vernerov Magnetic fraction | Lhenice Heavy fraction | Lhenice Magnetic fraction | Costeşti Jărosul Heavy fraction | Costeşti Jărosul Magnetic fraction | Řečice Heavy fraction | Řečice Magnetic fraction |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Lacroixite | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,21 | 0,02 | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | |
| New Nb As phase | | | | 0,00 | | | | 0,00 | 0,00 | | 0,14 | 0,09 |
| Y-Nb oxide | | | | | | | 0,02 | | 0,00 | 0,00 | 0,16 | 0,04 |
| Rutile | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,12 | 0,09 | 0,00 | 0,00 |
| Plagioclase | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,08 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,11 |
| Al2SiO5 polymorphs | 0,00 | 0,00 | | 0,01 | 0,01 | 0,07 | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Fersmite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,15 | 0,02 |
| Hedenbergite | | | | | | 0,00 | 0,17 | | 0,00 | | | |
| SiFeAl phase | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,01 | 0,00 |
| Cancrinite | | 0,00 | | 0,00 | | 0,15 | | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 |
| Leucoxene | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,05 | 0,00 | 0,00 |
| Chalcopyrite | | | | | 0,03 | 0,03 | | | 0,08 | 0,01 | 0,00 | |
| CaFe amphibole NaMg | 0,02 | 0,03 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| Varlamoffite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,01 |
| Cherealite | 0,00 | | 0,03 | 0,01 | 0,00 | | 0,01 | | 0,03 | 0,01 | 0,04 | 0,00 |
| Fe-Mn oxide | 0,00 | | 0,02 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Diopside | 0,00 | | | | | | 0,11 | | | | | |
| Amphibole_II | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Augelite | | | 0,00 | | 0,05 | 0,06 | 0,00 | | | | | |
| columbite-tantalite-micro | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,01 |
| Zoisite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,08 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Tantalite | | | | | | | 0,09 | 0,00 | | | 0,00 | |
| Bastnesite-parisite | | | | | | 0,00 | | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,00 |
| SnNbFe oxide | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,01 |
| Topaz | 0,03 | 0,01 | | 0,00 | | 0,00 | 0,04 | | | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Romanechite-kryptomela | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | | 0,00 | | | | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Microlite | | | | | | | 0,06 | 0,00 | | | 0,00 | |
| Grossular | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Enstatite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Bariopharmacosiderite | | 0,00 | | 0,00 | | | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,03 | 0,02 |
| Arsenopyrite | | | | | 0,01 | | | | | | 0,02 | 0,01 |
| Pyrrhotite | 0,00 | | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| Actinolite | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,04 | | | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Xenotime-(Y) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,02 | | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| ferrohornblende | 0,00 | | 0,01 | 0,00 | | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Sodalite | | 0,00 | | | | 0,03 | | | | | | 0,00 |
| Phenakite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Hf-rich zircon | | | | | | | 0,03 | | | | | |
| titanomagnetite | | | | | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| Uraninite | 0,00 | | | | | | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,02 | |
| Galena | | | | | 0,00 | 0,00 | | | 0,02 | 0,00 | | |
| Sillenite | | | | | 0,00 | 0,00 | | | | | 0,02 | 0,00 |
| Bismuthinite | | | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | | | | | 0,00 | 0,00 |
| Scheelite | | | | | | | | | | | 0,02 | |
| Augite | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ilmenite II | | | | | | 0,00 | 0,00 | | 0,01 | 0,01 | | |
| Gananite | | | 0,00 | | 0,01 | 0,00 | | | | | | |
| staurolite | | | | | | | 0,01 | | | | | |
| Titanite | | 0,00 | | | | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 |
| Fluorite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Svanbergite | | | | 0,00 | 0,01 | 0,00 | | | | | | |

| Primary phases / Fraction | Rozna2 Heavy fraction | Rozna2 Magnetic fraction | Dolni Rozinka Heavy fraction | Dolni Rozinka Magnetic fraction | Vernerov Heavy fraction | Vernerov Magnetic fraction | Lhenice Heavy fraction | Lhenice Magnetic fraction | Costeşti Jărosul Heavy fraction | Costeşti Jărosul Magnetic fraction | Řečice Heavy fraction | Řečice Magnetic fraction |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Baryte | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Mn-phosphate | 0,01 | 0,00 | | | | | | | | | | |
| Bismuth | | | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | 0,00 | 0,00 |
| Molybdenite | | | | | 0,00 | 0,01 | | | | | | 0,00 |
| Jagowerite | | | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | | | | | | |
| Dolomite | 0,00 | | | 0,00 | | | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ag2S | | | | | 0,00 | 0,00 | | | | | | |
| Cuprite | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ankerite-siderite | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Tusionite | | | | | | | | | | | 0,00 | 0,00 |
| Pyrope | | | 0,00 | | 0,00 | | | | | | | |
| Cryptomelane | | 0,00 | | | | | | | | | | |
| Robertsite | 0,00 | | | | | | | | | | | |
| Hinnganite-Y | | | 0,00 | 0,00 | | | | | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ta rich rutile | | | | | | | | | 0,00 | 0,00 | | |
| Ferro alumino thcermakit | | 0,00 | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | | 0,00 | |
| Emplectite | | | | | 0,00 | 0,00 | | | | | | |
| Wolframite | 0,00 | | 0,00 | 0,00 | | | | | | | | |
| Chalcocite | | | | | 0,00 | | | | | | | 0,00 |
| **Total** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** |

**Grouped minerals / Mass % of phase [%]**

**Mass % of phase [%]**

| Grouped minerals / Fraction | Rozna2 Heavy fraction | Rozna2 Magnetic fraction | Dolni Rozinka Heavy fraction | Dolni Rozinka Magnetic fraction | Vernerov Heavy fraction | Vernerov Magnetic fraction | Lhenice Heavy fraction | Lhenice Magnetic fraction | Costeşti Jărosul Heavy fraction | Costeşti Jărosul Magnetic fraction | Řečice Heavy fraction | Řečice Magnetic fraction |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Albite | 2,93 | 33,00 | 0,48 | 38,06 | 0,02 | 3,87 | 0,09 | 1,06 | 1,51 | 35,81 | 0,23 | 12,74 |
| Quartz | 3,78 | 17,99 | 0,54 | 27,25 | 0,12 | 29,82 | 0,47 | 5,83 | 0,28 | 1,92 | 1,95 | 31,88 |
| Lepidolite | 6,03 | 30,02 | 0,01 | 0,35 | 0,00 | 0,28 | 1,24 | 78,38 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,15 |
| Spessartine | 0,02 | 0,03 | 86,93 | 20,03 | 0,03 | 0,01 | 0,74 | 0,06 | 0,03 | 0,02 | 4,49 | 1,24 |
| Li-turmaline | 61,93 | 9,68 | 1,15 | 0,78 | 0,08 | 0,40 | 31,37 | 0,74 | 0,02 | 0,00 | 1,80 | 1,28 |
| Montebrasite | 0,03 | 0,01 | 0,16 | 0,01 | 86,49 | 15,09 | 0,64 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,07 | 0,01 |
| Schorl | 3,56 | 0,52 | 7,17 | 6,75 | 0,00 | 0,04 | 1,37 | 0,09 | 0,01 | 0,02 | 42,27 | 29,84 |
| Cassiterite | 13,29 | 0,04 | 0,53 | 0,02 | 2,50 | 0,17 | 49,47 | 0,11 | 0,53 | 0,11 | 17,06 | 0,64 |
| Fe(Mn) oxides | 0,28 | 0,08 | 0,07 | 0,04 | 0,07 | 0,25 | 0,99 | 0,71 | 69,39 | 10,61 | 0,55 | 0,43 |
| Orthoclase | 0,09 | 0,97 | 0,03 | 2,82 | 0,05 | 29,31 | 0,06 | 0,41 | 1,77 | 31,59 | 0,13 | 12,82 |
| Muscovite | 1,23 | 6,33 | 0,02 | 0,58 | 0,13 | 11,09 | 3,71 | 8,24 | 0,00 | 0,05 | 0,02 | 0,16 |
| Lollingite | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,65 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 23,42 | 3,98 |
| Chlorite | 0,00 | 0,01 | 0,20 | 0,43 | 0,00 | 0,06 | 0,37 | 0,23 | 10,86 | 11,93 | 0,06 | 0,11 |
| Zircon | 0,97 | 0,04 | 0,26 | 0,12 | 0,01 | 0,03 | 2,75 | 0,01 | 8,87 | 4,79 | 0,22 | 0,03 |
| Apatite | 4,87 | 0,44 | 1,44 | 0,28 | 2,52 | 2,80 | 0,02 | 0,03 | 0,20 | 0,05 | 0,13 | 0,02 |
| Biotite | 0,11 | 0,33 | 0,21 | 0,68 | 0,01 | 0,52 | 0,24 | 2,81 | 0,20 | 0,34 | 0,06 | 0,18 |
| Scorodite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 3,49 | 1,51 |
| Kaolinite | 0,21 | 0,25 | 0,28 | 1,26 | 0,11 | 1,12 | 0,10 | 1,11 | 0,00 | 0,01 | 0,05 | 0,46 |
| Kesterite | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 3,26 | 1,48 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Polycrase | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 3,03 | 1,04 | 0,16 | 0,04 |
| Columbite-tantalite-microlite | 0,13 | 0,04 | 0,34 | 0,10 | 0,00 | 0,00 | 2,97 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,51 | 0,12 |
| Sphalerite | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2,46 | 1,01 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,00 |
| Wallkilldellite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,39 | 1,37 |
| Other silicates | 0,08 | 0,04 | 0,03 | 0,15 | 0,04 | 0,70 | 1,04 | 0,03 | 0,06 | 0,06 | 0,04 | 0,02 |
| Pyrite | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 1,71 | 0,22 | 0,07 | 0,09 |
| Crandallite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,94 | 1,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Monazite | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,26 | 0,06 | 0,85 | 0,17 |
| Other phosphates | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,72 | 0,39 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Xenotime-(Y) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,46 | 0,35 |
| Calcite | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,71 | 0,00 | 0,00 |
| Beryl | 0,30 | 0,10 | 0,04 | 0,18 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,05 |
| Rutile | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,41 | 0,27 | 0,00 | 0,00 |
| Corundum | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,10 | 0,09 | 0,29 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 |
| U-Th phases | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,32 | 0,10 | 0,06 | 0,00 |
| Ilmenite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 0,31 | 0,14 | 0,00 | 0,00 |
| Plagioclase | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,14 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,12 |
| Spodumene | 0,07 | 0,05 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,10 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 |
| Lacroixite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,21 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| New Nb As phase | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 0,09 |
| Other sulphides | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,12 | 0,02 | 0,00 | 0,00 |
| Varlamoffite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,01 |
| Bastnesite-parisite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,00 |
| SnNbFe oxide | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,01 |
| Bi minerals | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| Bariopharmacosiderite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,02 |
| Arsenopyrite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| Phenakite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Scheelite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 |
| Fluorite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Baryte | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Tusionite | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Hinnganite-Y | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| **Total** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** | **100,00** |

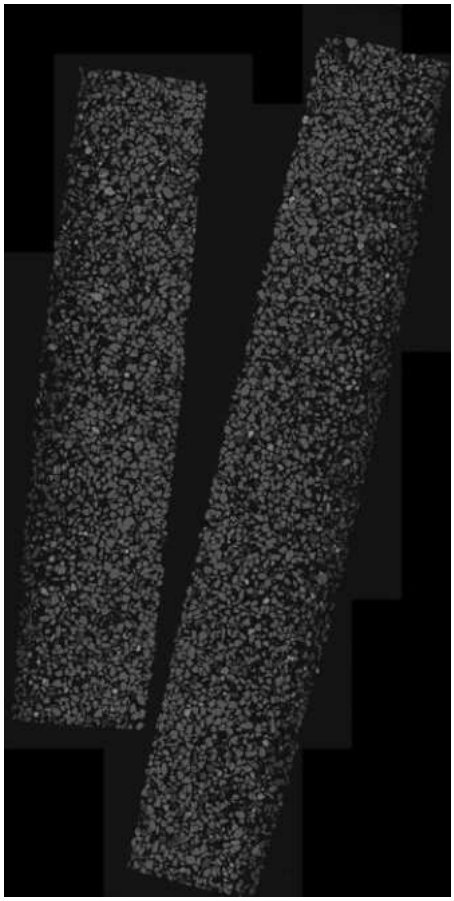
**Bulk composition calculated**

**Mass of element**

| Fraction / Elements | Rozna2 Heavy fraction | Rozna2 Magnetic fraction | Dolni Rozinka Heavy fraction | Dolni Rozinka Magnetic fraction | Vernerov Heavy fraction | Vernerov Magnetic fraction | Lhenice Heavy fraction | Lhenice Magnetic fraction | Costeşti Jărosul Heavy fraction | Costeşti Jărosul Magnetic fraction | Řečice Heavy fraction | Řečice Magnetic fraction |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| O | 47,57 | 48,71 | 35,12 | 46,53 | 47,73 | 47,73 | 34,47 | 45,95 | 32,39 | 44,56 | 31,59 | 46,56 |
| Si | 17,03 | 31,10 | 16,97 | 30,80 | 0,17 | 26,94 | 8,33 | 28,61 | 4,14 | 24,21 | 9,52 | 27,63 |
| Al | 13,52 | 9,05 | 10,93 | 8,30 | 16,45 | 9,07 | 7,52 | 7,89 | 1,35 | 8,03 | 8,01 | 8,18 |
| Fe | 0,85 | 0,19 | 14,35 | 4,40 | 0,24 | 0,31 | 1,89 | 0,72 | 50,81 | 9,00 | 15,45 | 7,54 |
| Sn | 10,39 | 0,03 | 0,41 | 0,01 | 3,04 | 0,63 | 38,88 | 0,09 | 0,43 | 0,10 | 12,50 | 0,49 |
| Mn | 0,04 | 0,02 | 20,17 | 4,61 | 0,01 | 0,00 | 0,32 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,99 | 0,28 |
| K | 0,74 | 3,78 | 0,02 | 0,52 | 0,02 | 5,25 | 0,50 | 8,96 | 0,27 | 4,46 | 0,02 | 1,74 |
| P | 0,90 | 0,08 | 0,30 | 0,06 | 19,06 | 3,90 | 0,15 | 0,01 | 0,08 | 0,02 | 0,24 | 0,10 |
| As | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 1,25 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 17,10 | 3,46 |
| Na | 1,88 | 2,99 | 0,25 | 3,30 | 0,07 | 0,41 | 0,85 | 0,11 | 0,13 | 2,96 | 1,08 | 1,77 |
| Li | 1,38 | 1,25 | 0,03 | 0,03 | 4,10 | 0,73 | 0,67 | 2,81 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,03 |
| F | 0,49 | 1,54 | 0,06 | 0,04 | 2,94 | 0,76 | 0,12 | 3,93 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Zr | 0,43 | 0,02 | 0,12 | 0,05 | 0,00 | 0,01 | 1,23 | 0,00 | 3,98 | 2,14 | 0,09 | 0,01 |
| Ca | 1,95 | 0,43 | 0,58 | 0,40 | 1,11 | 1,34 | 0,13 | 0,03 | 0,14 | 0,59 | 0,20 | 0,24 |
| B | 2,31 | 0,36 | 0,30 | 0,27 | 0,00 | 0,02 | 1,16 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 1,49 | 1,08 |
| Mg | 0,01 | 0,03 | 0,04 | 0,14 | 0,00 | 0,08 | 0,18 | 0,36 | 1,69 | 1,87 | 0,01 | 0,03 |
| S | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 1,73 | 0,77 | 0,02 | 0,00 | 0,96 | 0,14 | 0,04 | 0,05 |
| Zn | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,91 | 0,80 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,00 | 0,00 |
| H | 0,31 | 0,16 | 0,05 | 0,07 | 0,47 | 0,18 | 0,19 | 0,28 | 0,15 | 0,16 | 0,28 | 0,21 |
| Nb | 0,04 | 0,01 | 0,11 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,92 | 0,01 | 0,49 | 0,18 | 0,25 | 0,07 |
| Ta | 0,04 | 0,01 | 0,09 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,89 | 0,01 | 0,45 | 0,16 | 0,13 | 0,04 |
| Cu | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,89 | 0,41 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,02 | 0,02 |
| Ti | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,09 | 0,00 | 0,75 | 0,33 | 0,01 | 0,00 |
| Hf | 0,05 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,43 | 0,23 | 0,01 | 0,00 |
| Y | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,36 | 0,13 | 0,16 | 0,11 |
| Th | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,42 | 0,13 | 0,05 | 0,01 |
| Ce | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,21 | 0,08 | 0,24 | 0,05 |
| U | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,19 | 0,07 | 0,03 | 0,01 |
| La | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,04 | 0,01 | 0,12 | 0,02 |
| Nd | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,10 | 0,02 |
| C | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,00 | 0,00 |
| Dy | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,03 |
| Yb | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,03 |
| Er | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,02 |
| Bi | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 |
| Be | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Gd | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| Ba | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Pb | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Sm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| W | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| Mo | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Cr | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Cl | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Sr | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ag | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Ho | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Lu | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

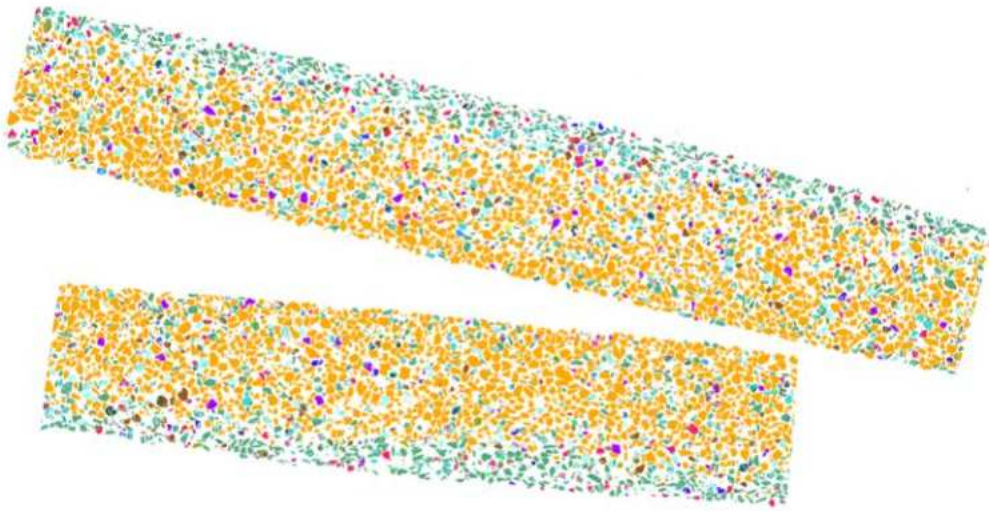
| Fraction / Elements | Rozna2 Heavy fraction | Rozna2 Magnetic fraction | Dolni Rozinka Heavy fraction | Dolni Rozinka Magnetic fraction | Vernerov Heavy fraction | Vernerov Magnetic fraction | Lhenice Heavy fraction | Lhenice Magnetic fraction | Costeşti Jărosul Heavy fraction | Costeşti Jărosul Magnetic fraction | Řečice Heavy fraction | Řečice Magnetic fraction |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Tb | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Pr | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| **Total** | **99,97** | **99,76** | **99,97** | **99,62** | **99,98** | **99,35** | **99,98** | **99,87** | **99,98** | **99,70** | **99,98** | **99,84** |

# Fázové mapy a BSE snímky 1/45



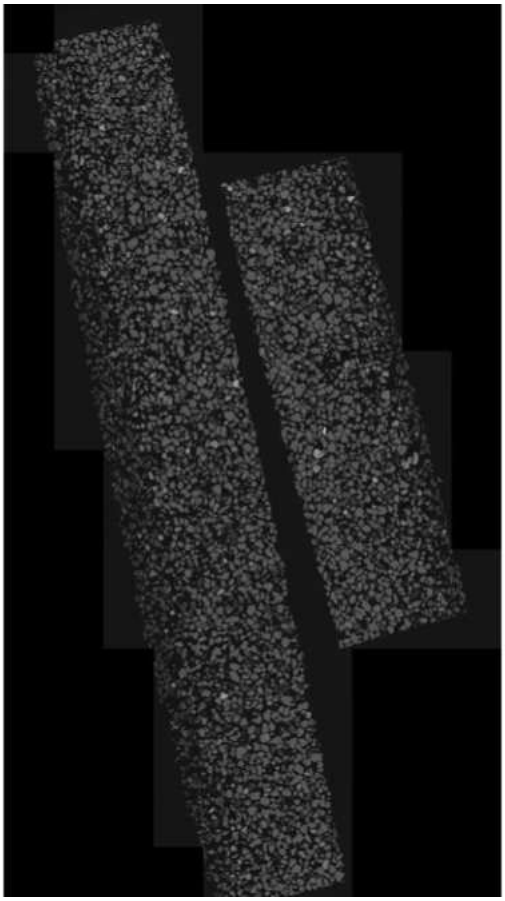
Jméno: CJ Heavy fraction CJ2-TF-A - Liberation analysis #6_Panorama_BSE

Jméno: CJ Heavy fraction CJ2-TF-A - Liberation analysis #6_Panorama_Phases - legend



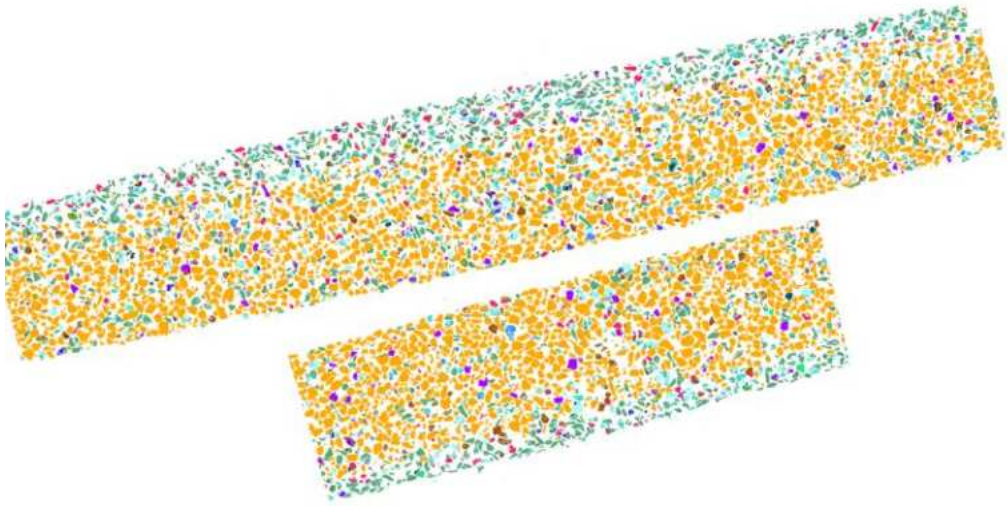
Jméno: CJ Heavy fraction CJ2-TF-A - Liberation analysis #6_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 2/45



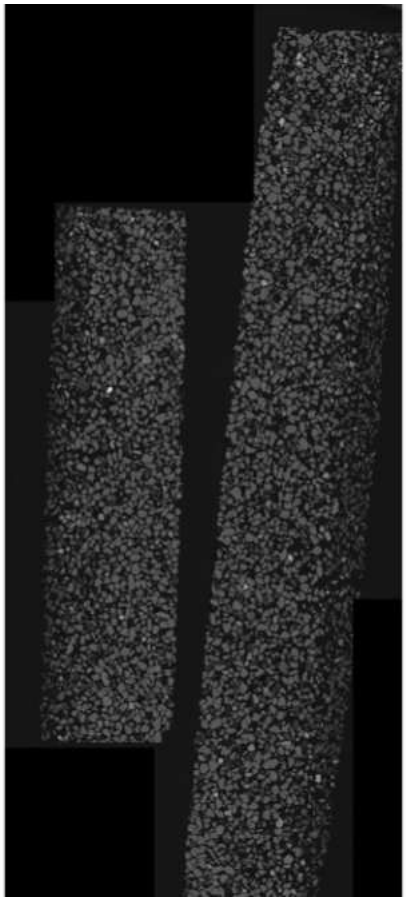
Jméno: CJ Heavy fraction CJ2-TF-B - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: CJ Heavy fraction CJ2-TF-B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



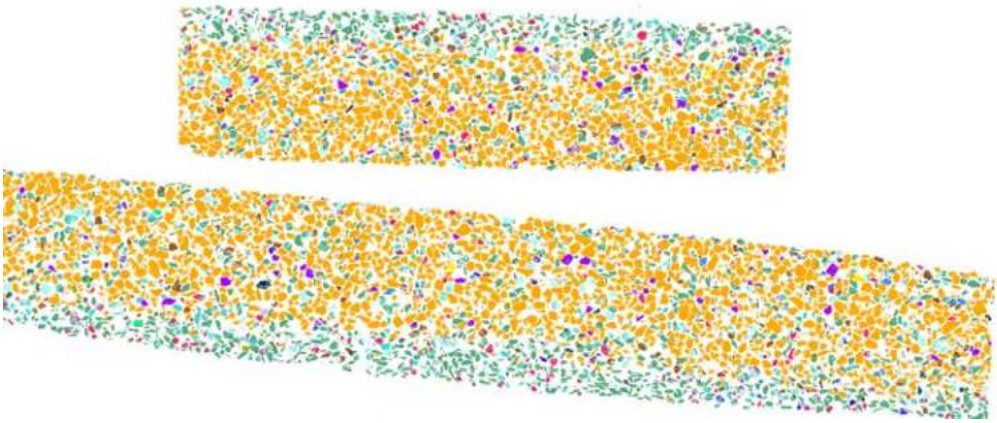
Jméno: CJ Heavy fraction CJ2-TF-B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 3/45



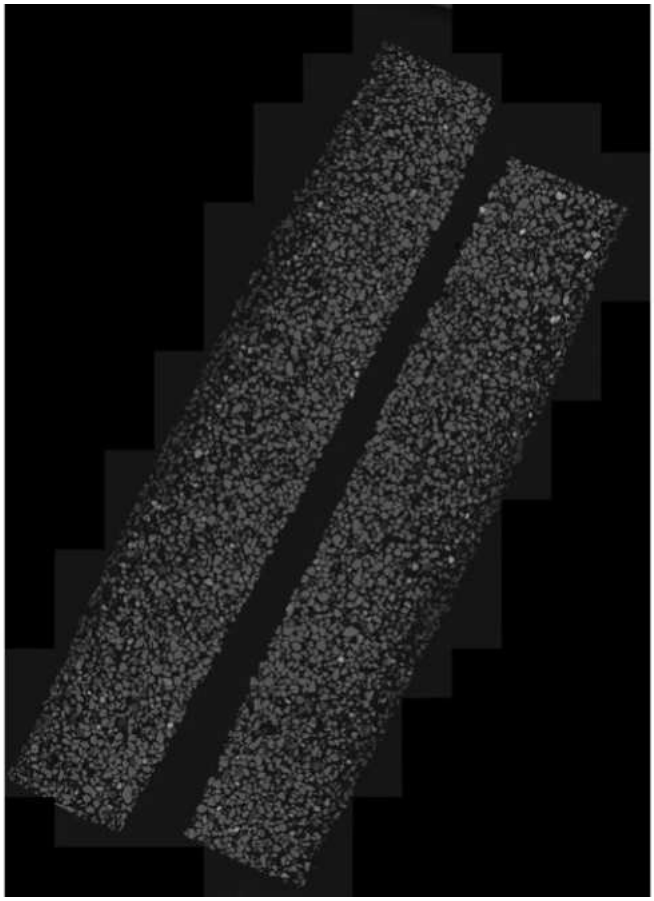
Jméno: CJ Heavy fraction CJ2-TF-C - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: CJ Heavy fraction CJ2-TF-C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



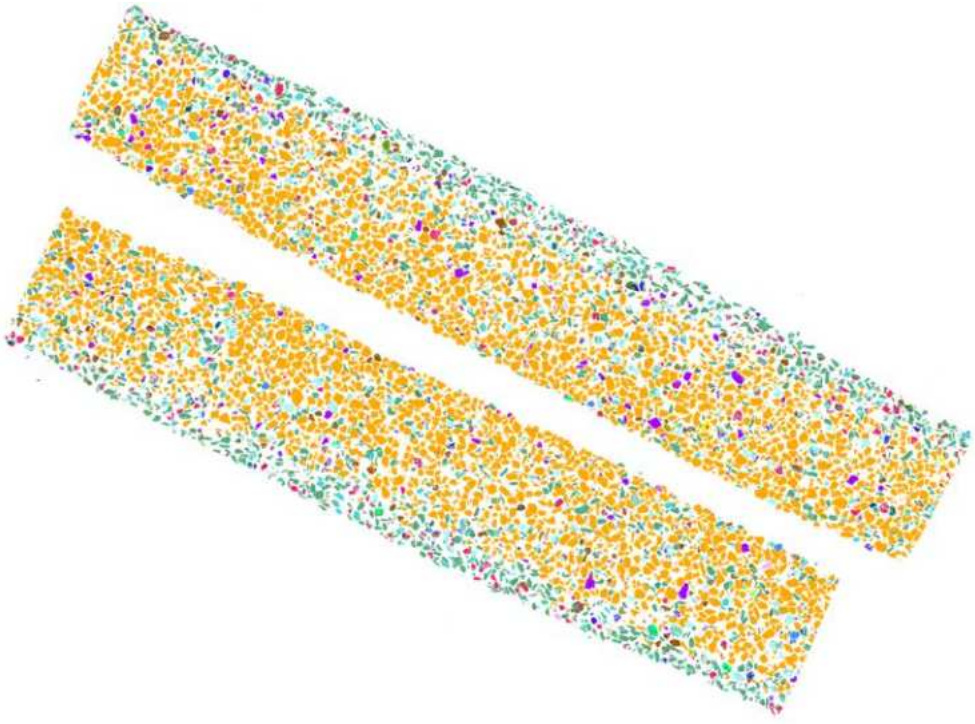
Jméno: CJ Heavy fraction CJ2-TF-C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 4/45



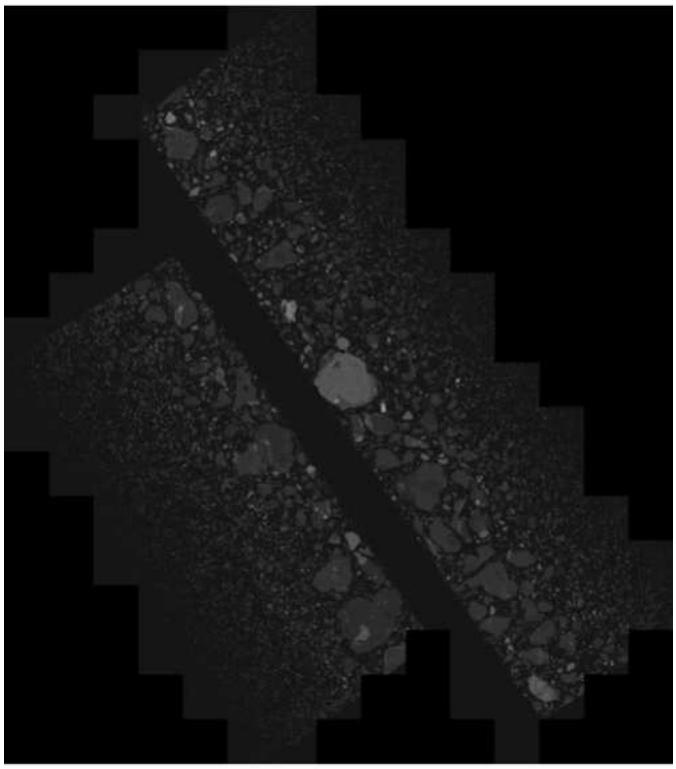
Jméno: CJ Heavy fraction CJ2-TF-D - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: CJ Heavy fraction CJ2-TF-D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



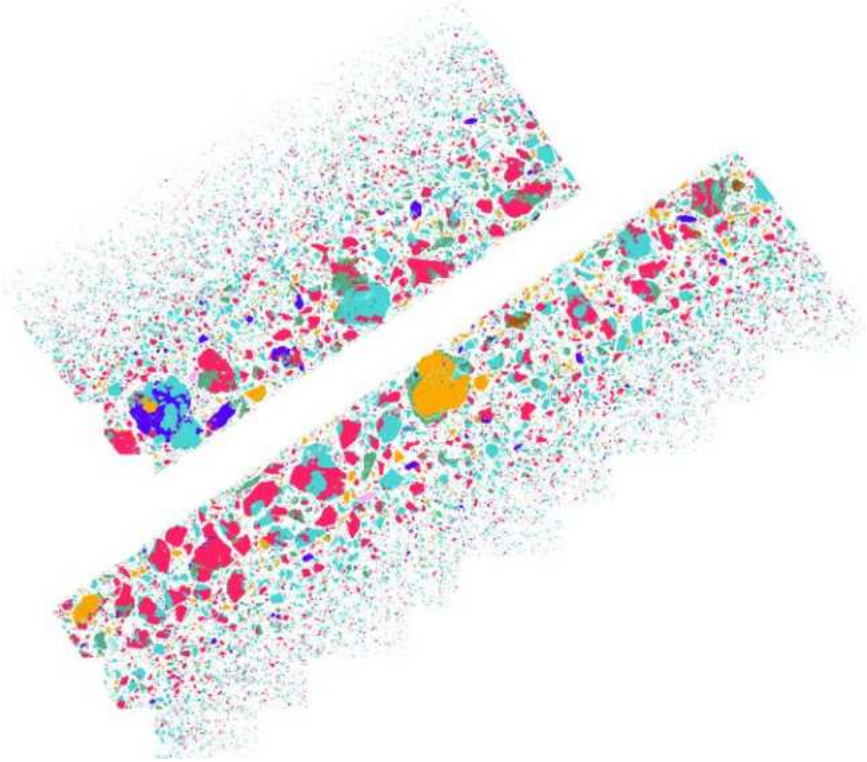
Jméno: CJ Heavy fraction CJ2-TF-D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 5/45



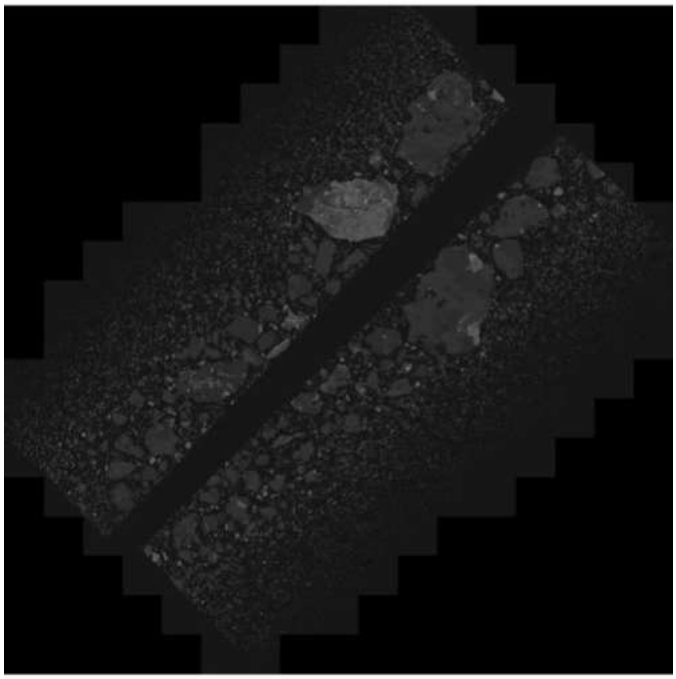
Jméno: CJ Magnetic fraction CJ2m-A - Liberation analysis #4_Panorama_BSE

Jméno: CJ Magnetic fraction CJ2m-A - Liberation analysis #4_Panorama_Phases - legend



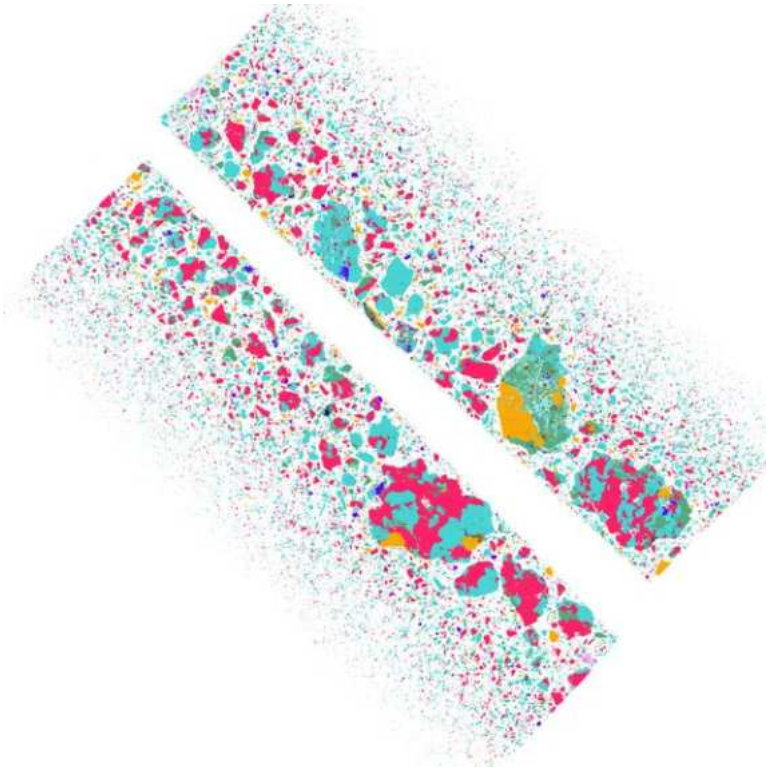
Jméno: CJ Magnetic fraction CJ2m-A - Liberation analysis #4_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 6/45



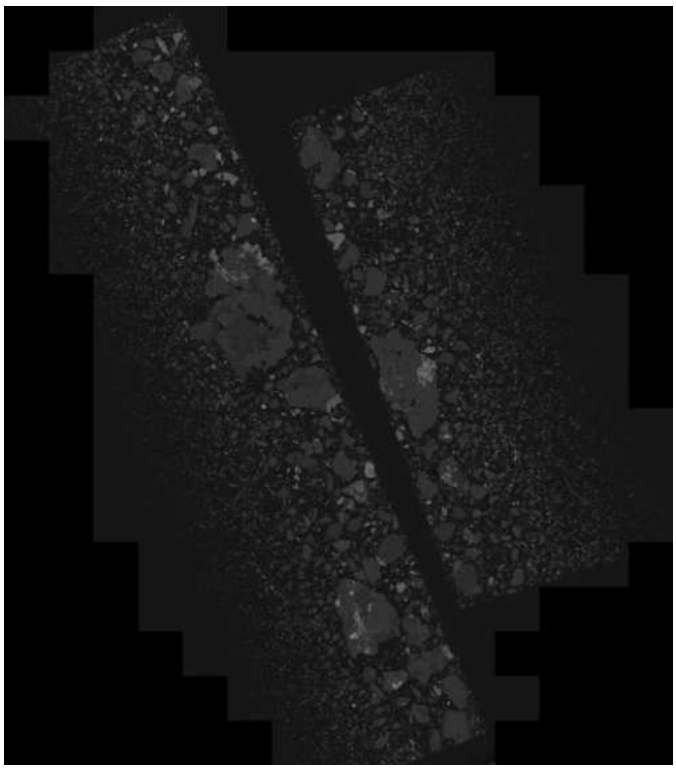
Jméno: CJ Magnetic fraction CJ2m-B - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: CJ Magnetic fraction CJ2m-B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



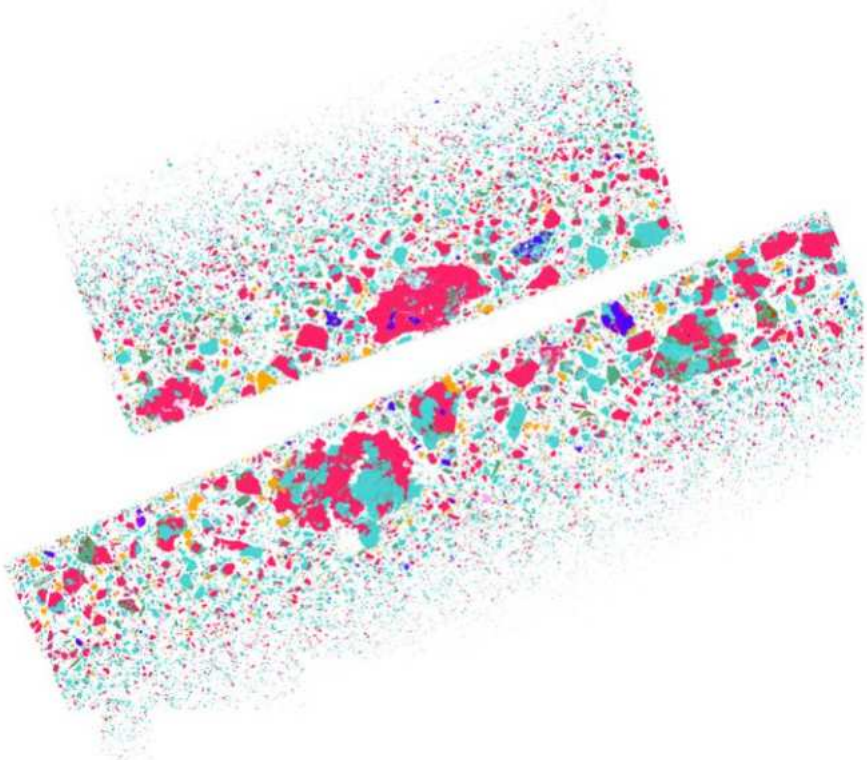
Jméno: CJ Magnetic fraction CJ2m-B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 7/45



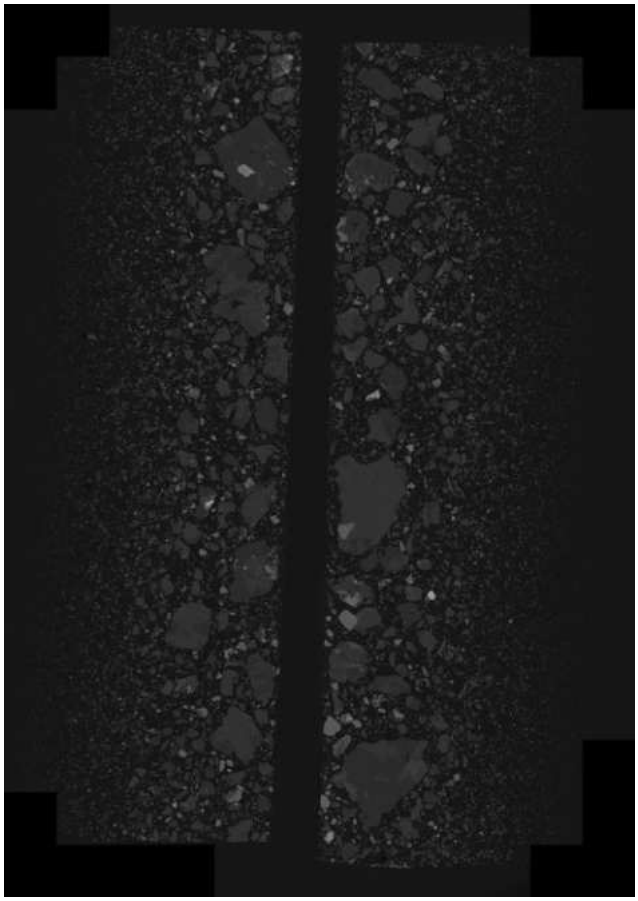
Jméno: CJ Magnetic fraction CJ2m-C - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: CJ Magnetic fraction CJ2m-C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



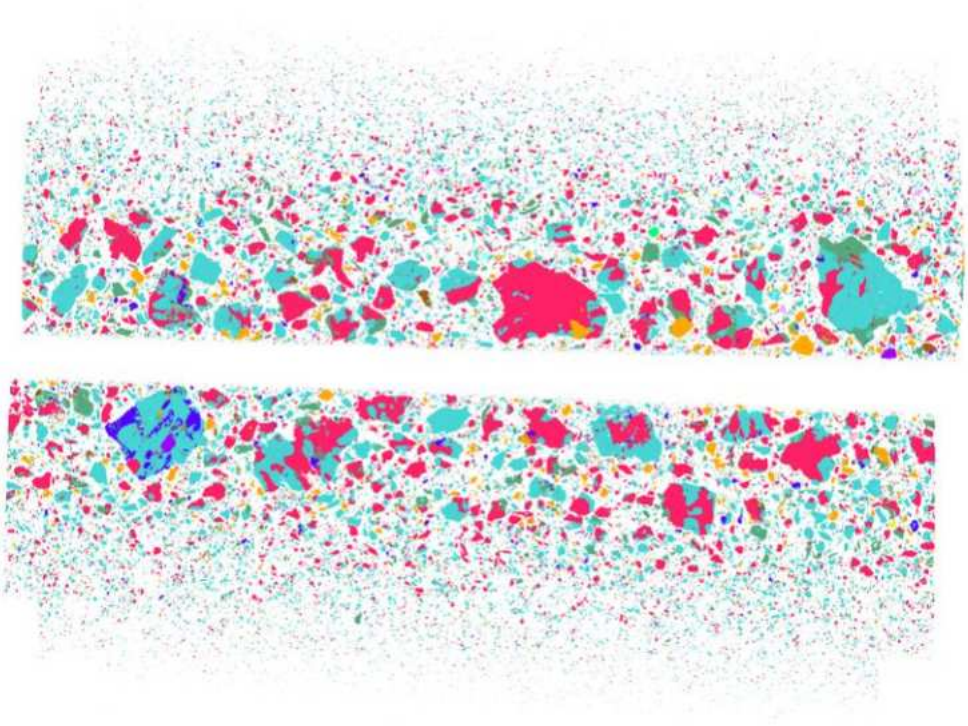
Jméno: CJ Magnetic fraction CJ2m-C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 8/45



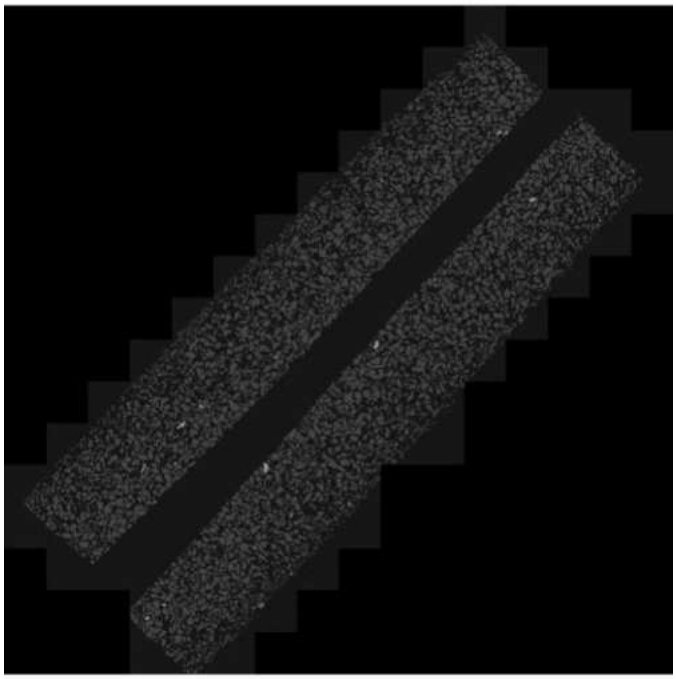
Jméno: CJ Magnetic fraction CJ2m-D - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: CJ Magnetic fraction CJ2m-D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



Jméno: CJ Magnetic fraction CJ2m-D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 9/45

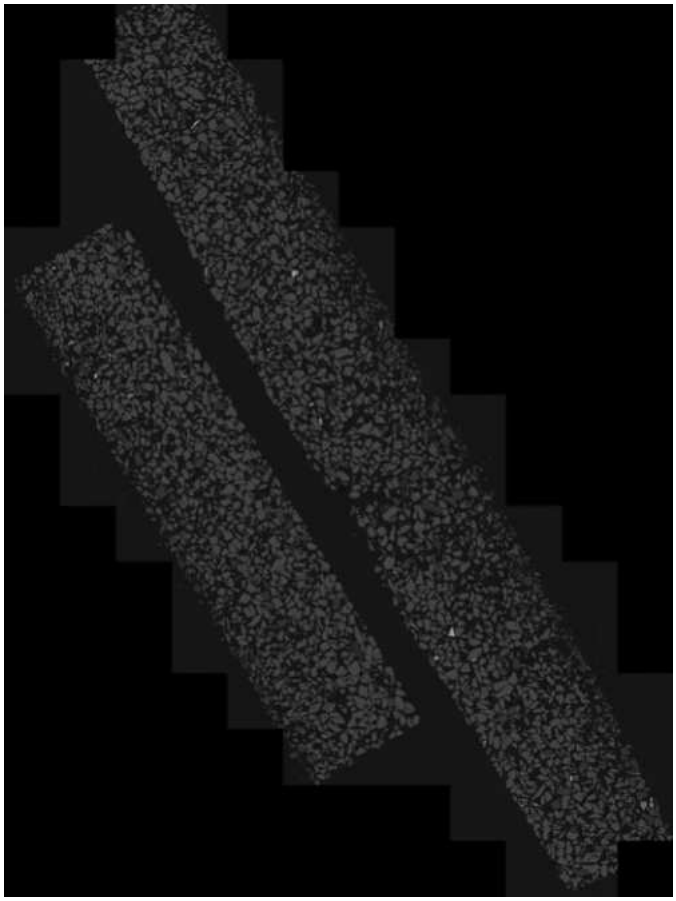


Jméno: Dolni Rozinka Heavy fraction DORO-TF-A - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Dolni Rozinka Heavy fraction DORO-TF-A - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend

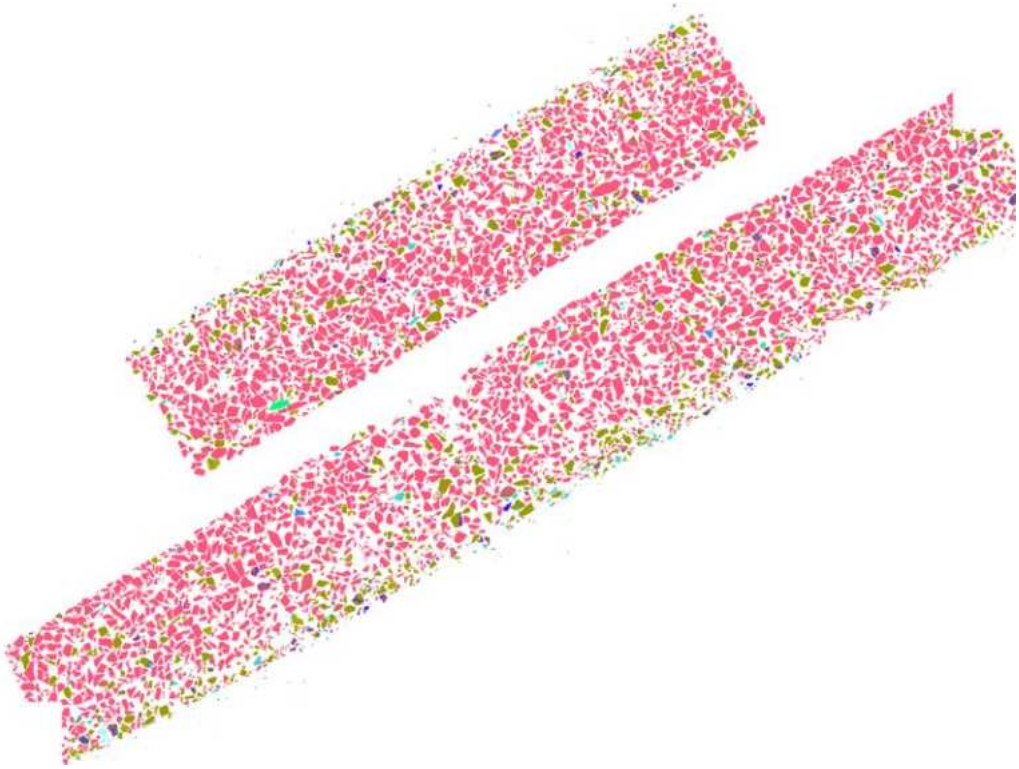
Jméno: Dolni Rozinka Heavy fraction DORO-TF-A - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 10/45



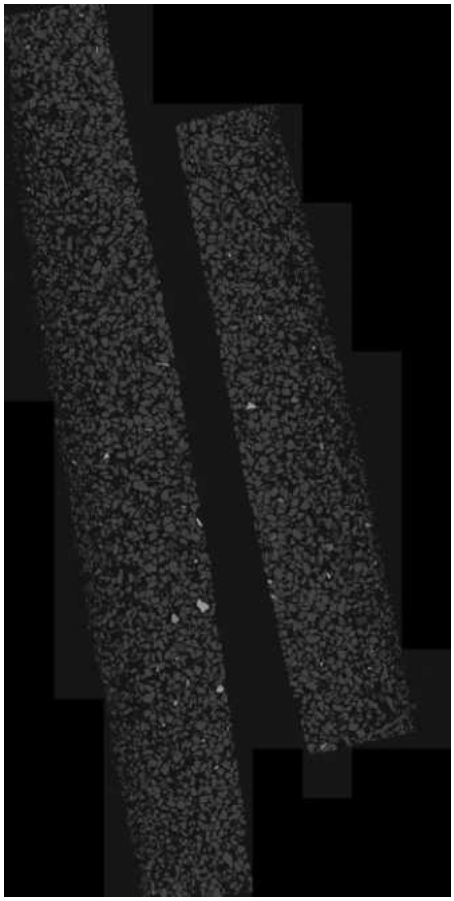
Jméno: Dolni Rozinka Heavy fraction DORO-TF-B - Liberation analysis #3_Panorama_BSE

Jméno: Dolni Rozinka Heavy fraction DORO-TF-B - Liberation analysis #3_Panorama_Phases - legend



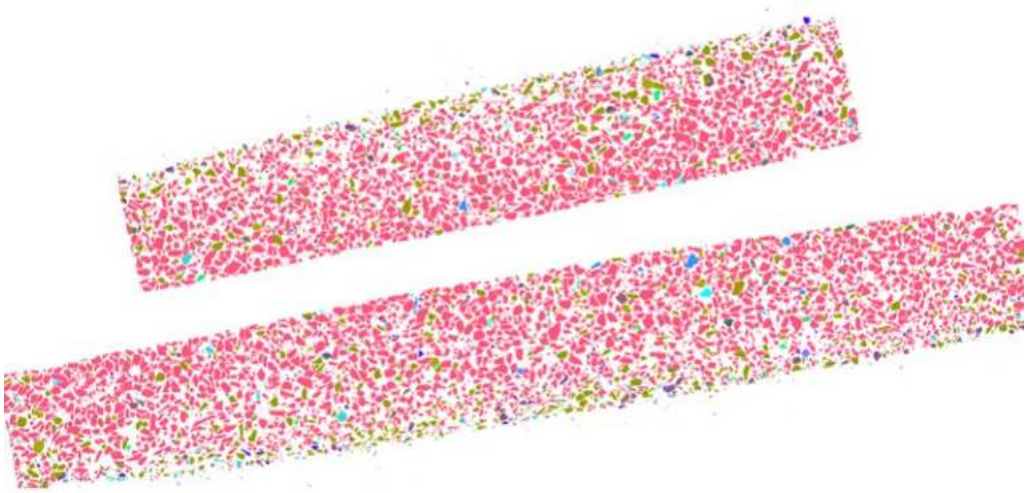
Jméno: Dolni Rozinka Heavy fraction DORO-TF-B - Liberation analysis #3_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 11/45



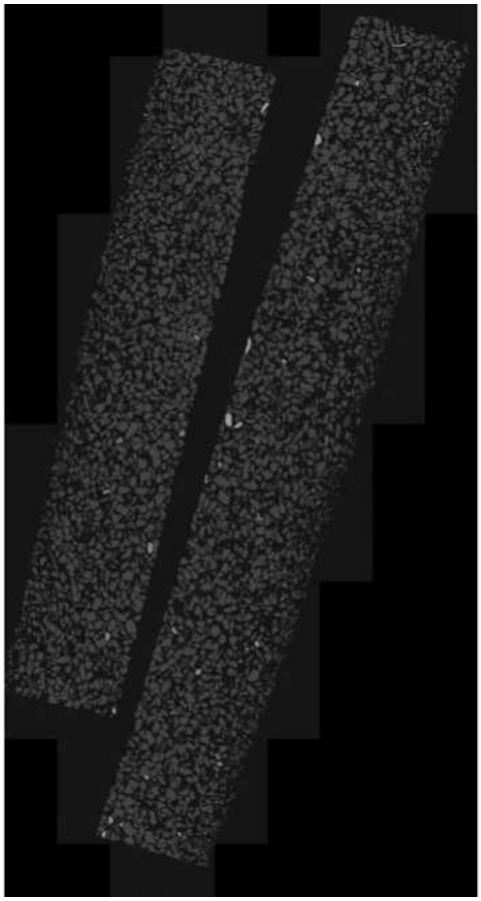
Jméno: Dolni Rozinka Heavy fraction DORO-TF-C - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Dolni Rozinka Heavy fraction DORO-TF-C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



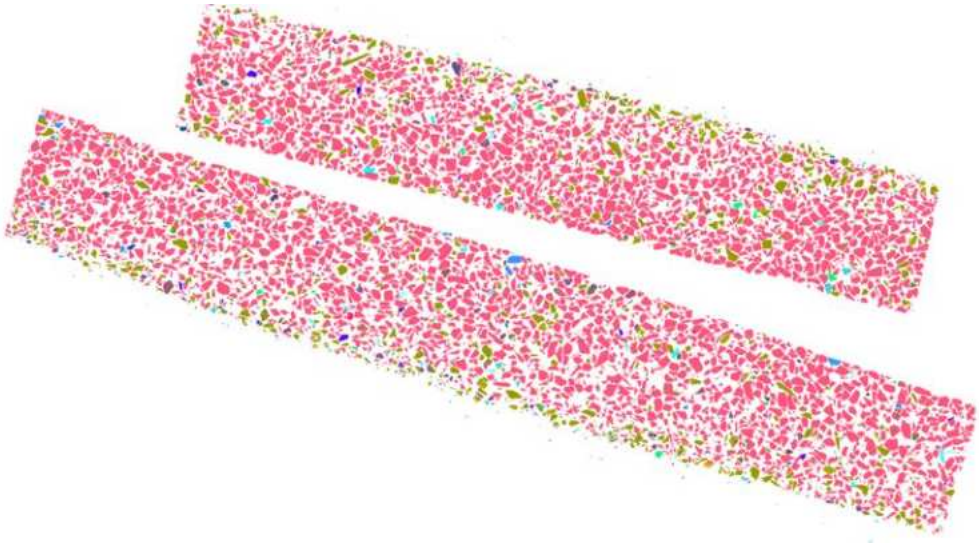
Jméno: Dolni Rozinka Heavy fraction DORO-TF-C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 12/45



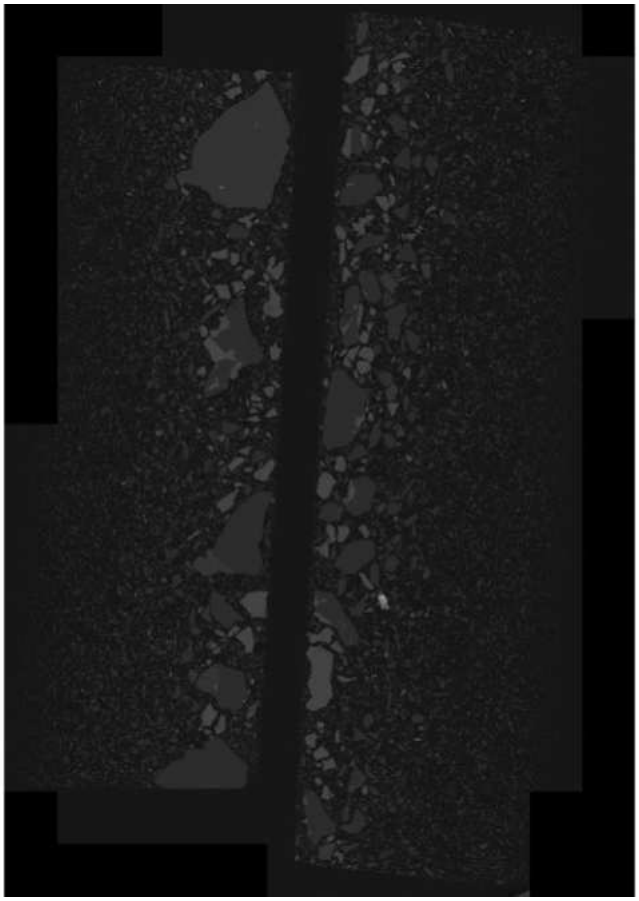
Jméno: Dolni Rozinka Heavy fraction DORO-TF-D - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Dolni Rozinka Heavy fraction DORO-TF-D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



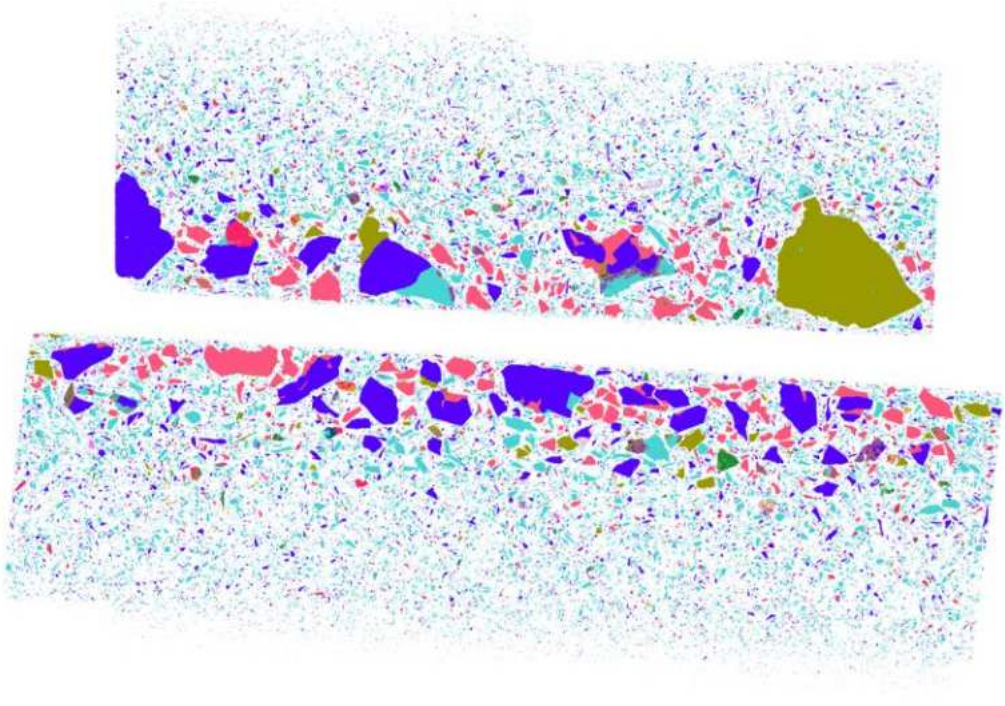
Jméno: Dolni Rozinka Heavy fraction DORO-TF-D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 13/45



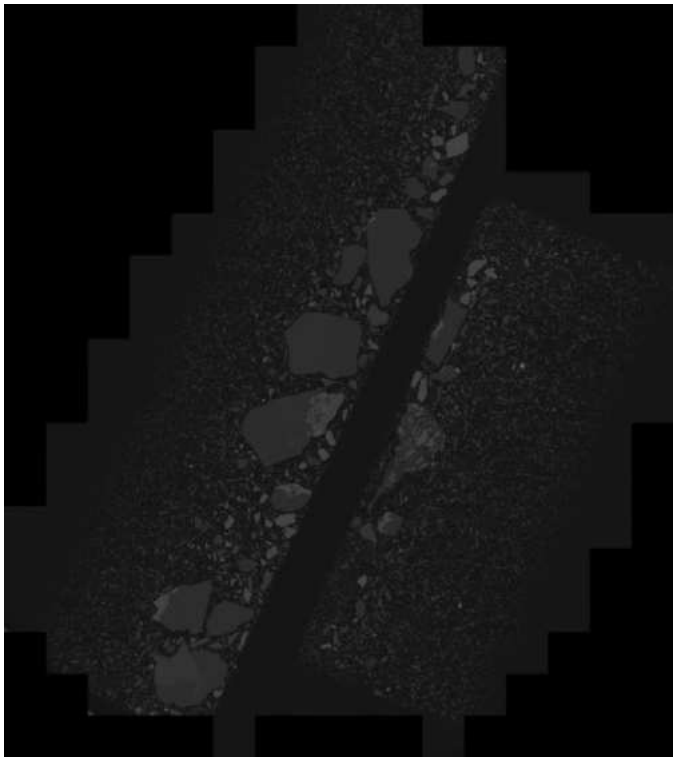
Jméno: Dolni Rozinka Magnetic fraction DOROm.A - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Dolni Rozinka Magnetic fraction DOROm.A - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



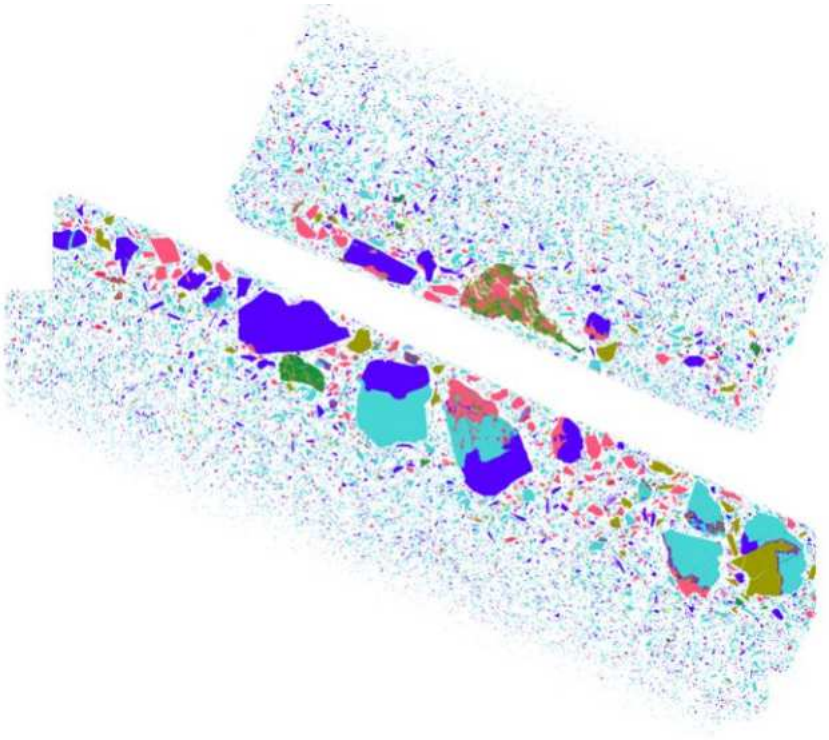
Jméno: Dolni Rozinka Magnetic fraction DOROm.A - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 14/45



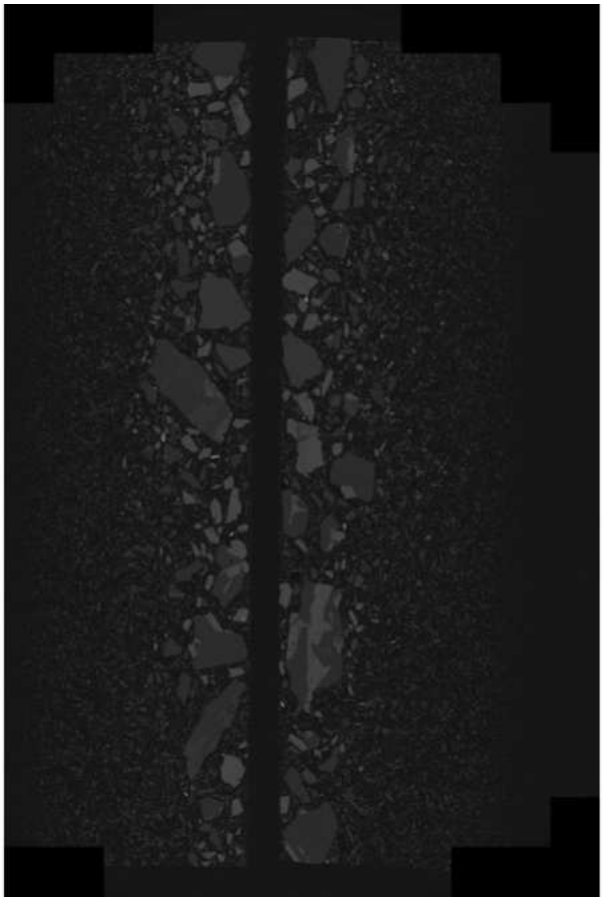
Jméno: Dolni Rozinka Magnetic fraction DOROm.B - Liberation analysis #3_Panorama_BSE

Jméno: Dolni Rozinka Magnetic fraction DOROm.B - Liberation analysis #3_Panorama_Phases - legend



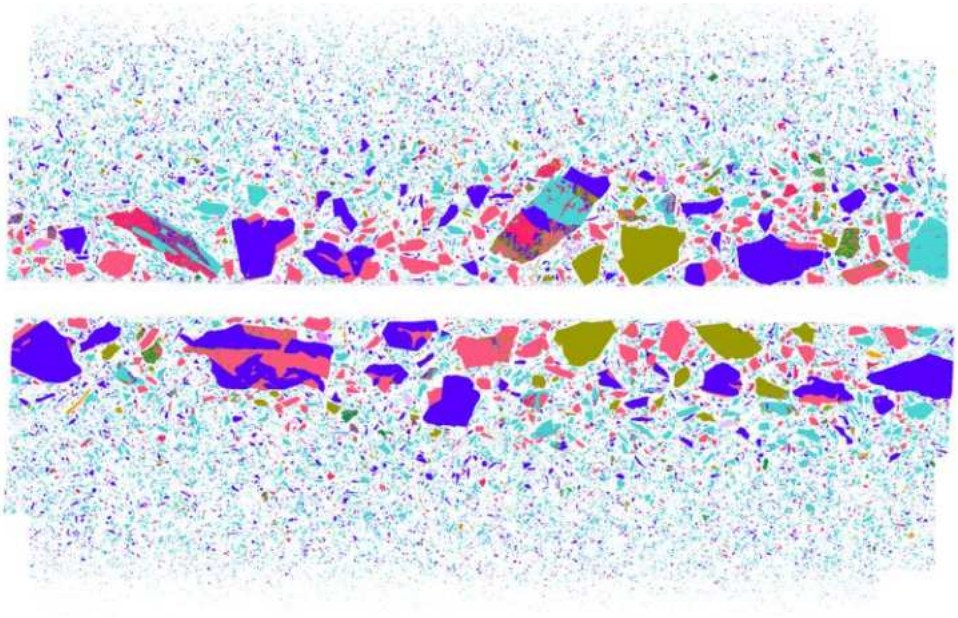
Jméno: Dolni Rozinka Magnetic fraction DOROm.B - Liberation analysis #3_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 15/45



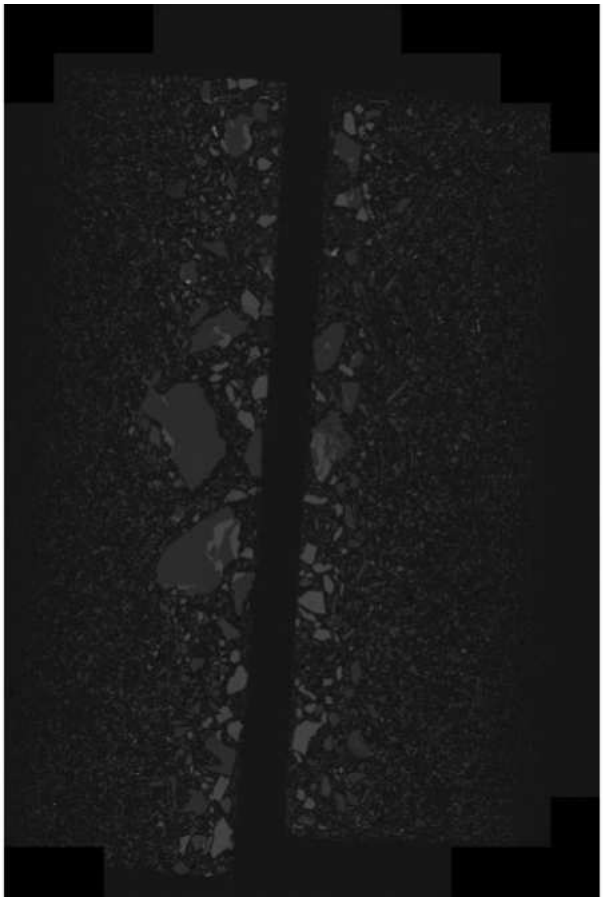
Jméno: Dolni Rozinka Magnetic fraction DOROm.C - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Dolni Rozinka Magnetic fraction DOROm.C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



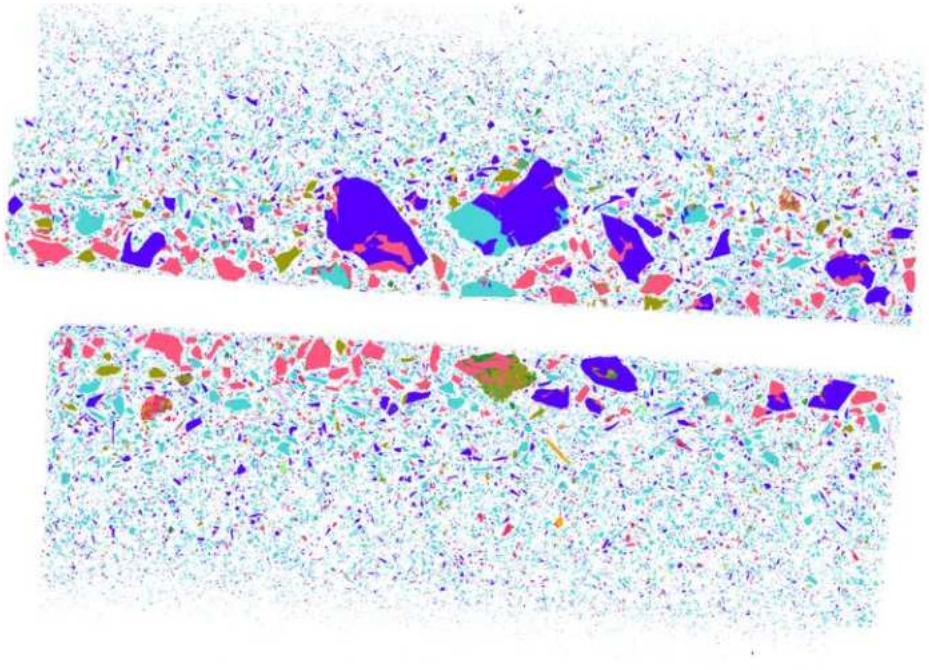
Jméno: Dolni Rozinka Magnetic fraction DOROm.C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 16/45



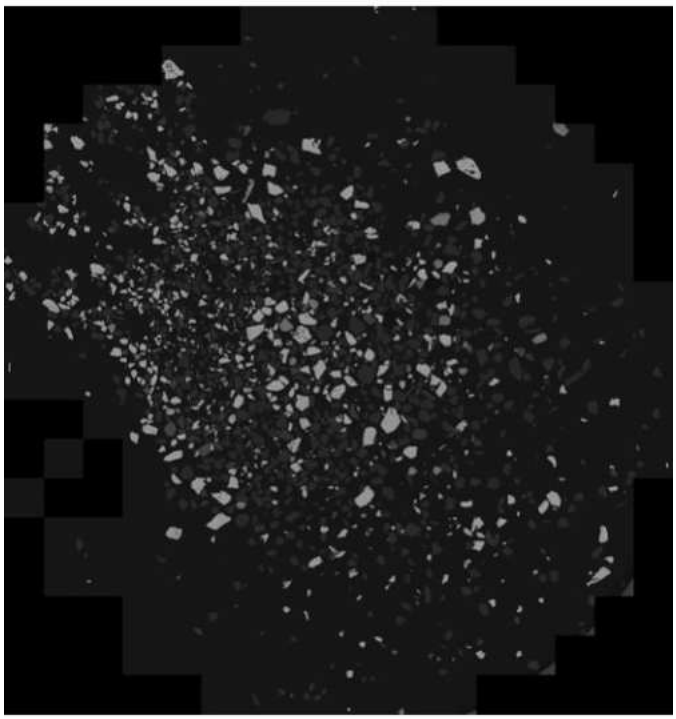
Jméno: Dolni Rozinka Magnetic fraction DOROm.D - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Dolni Rozinka Magnetic fraction DOROm.D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



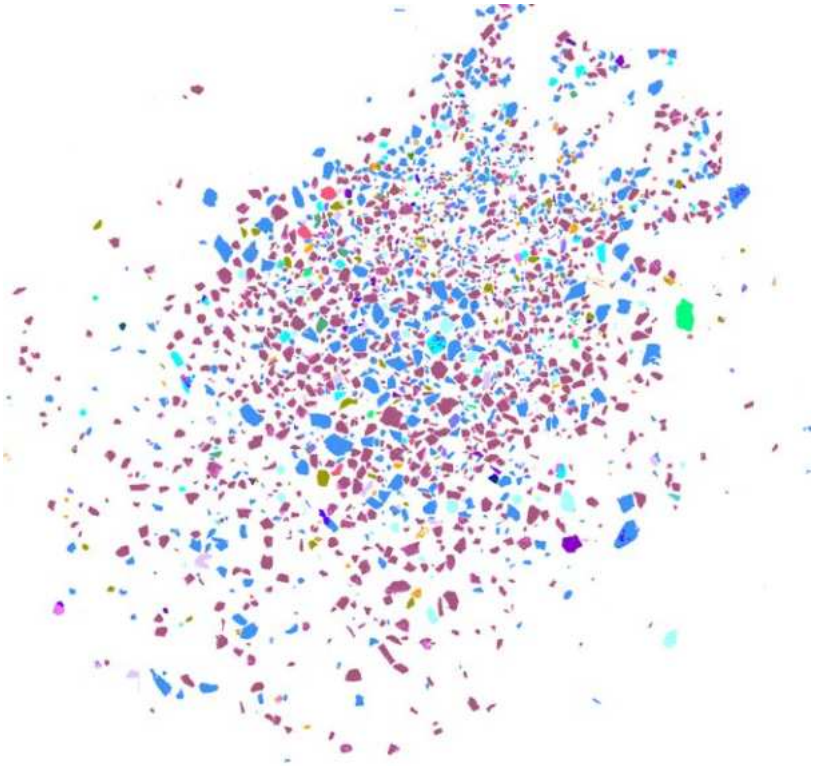
Jméno: Dolni Rozinka Magnetic fraction DOROm.D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 17/45



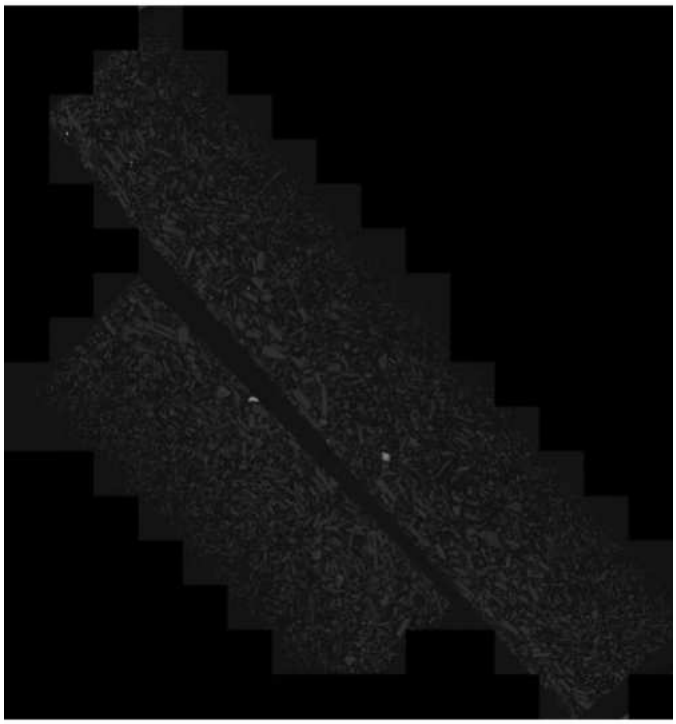
Jméno: Lhenice Heavy fraction LH-TF - LA peg concentrates #1_Panorama_BSE

Jméno: Lhenice Heavy fraction LH-TF - LA peg concentrates #1_Panorama_Phases - legend



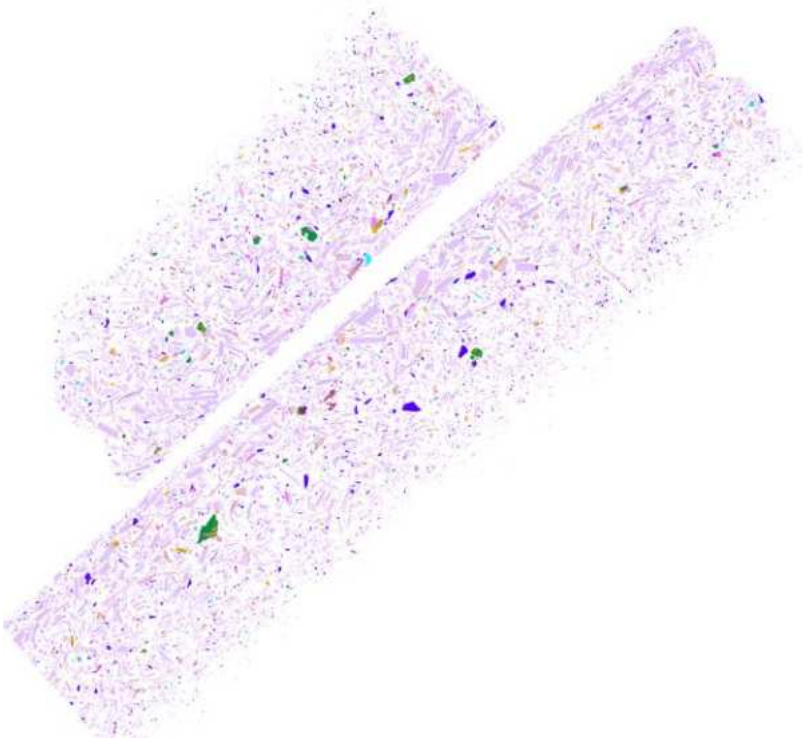
Jméno: Lhenice Heavy fraction LH-TF - LA peg concentrates #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 18/45



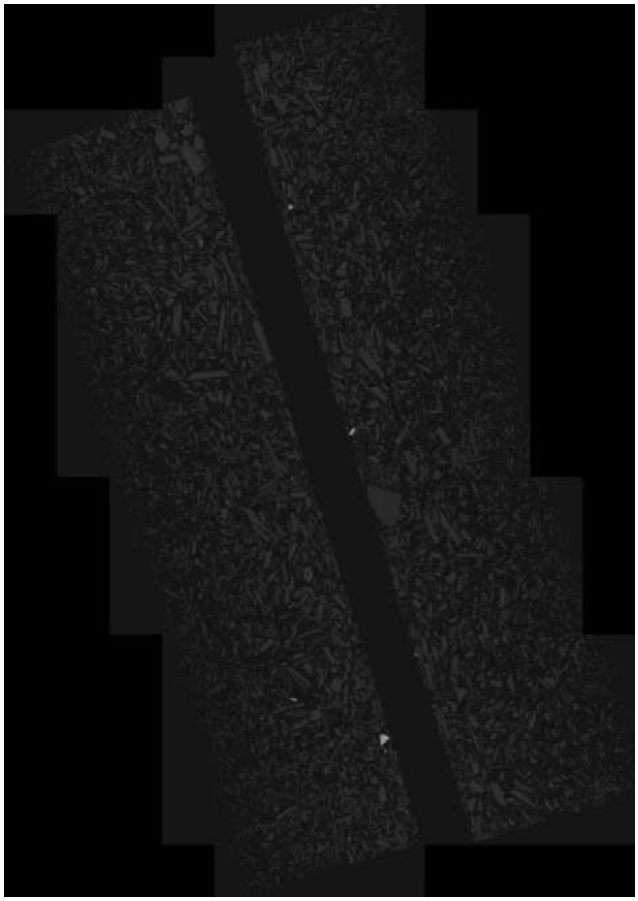
Jméno: Lhenice magnetic fraction LHm.A - Liberation analysis #2_Panorama_BSE

Jméno: Lhenice magnetic fraction LHm.A - Liberation analysis #2_Panorama_Phases - legend



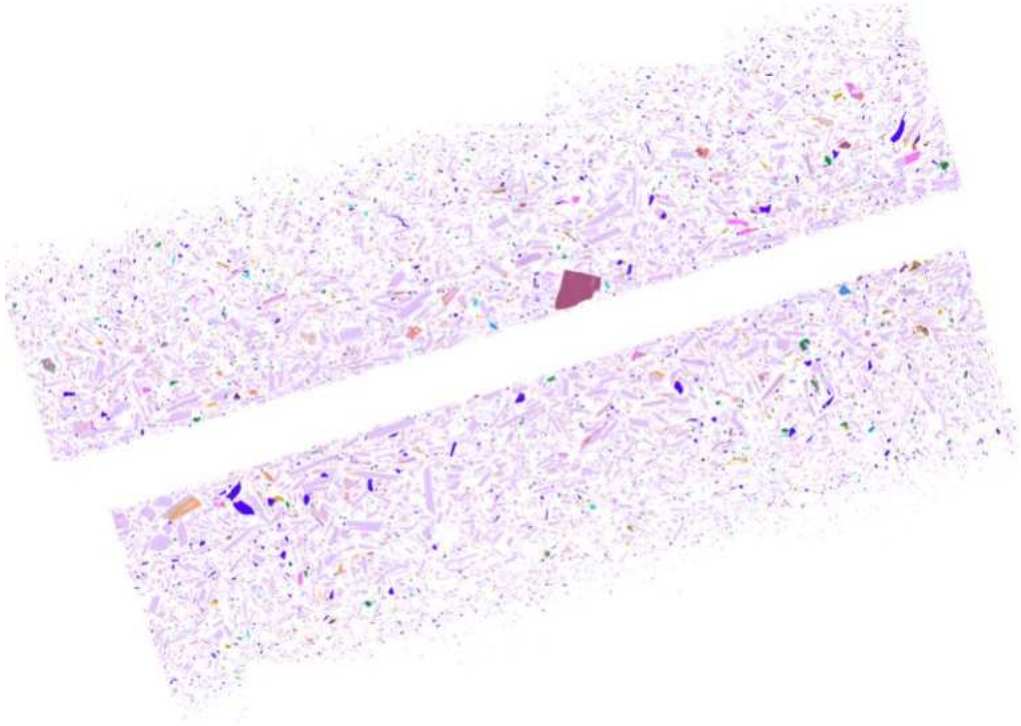
Jméno: Lhenice magnetic fraction LHm.A - Liberation analysis #2_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 19/45



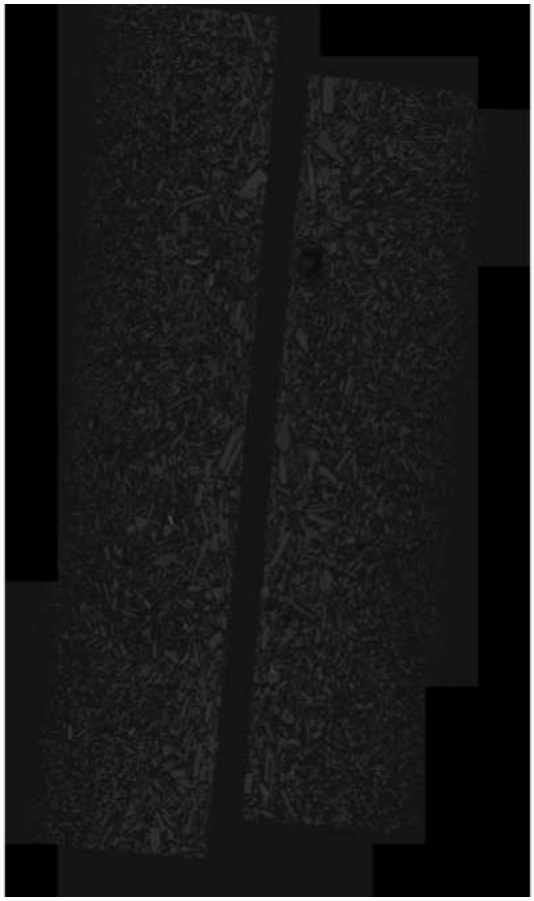
Jméno: Lhenice magnetic fraction LHm.B - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Lhenice magnetic fraction LHm.B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



Jméno: Lhenice magnetic fraction LHm.B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 20/45

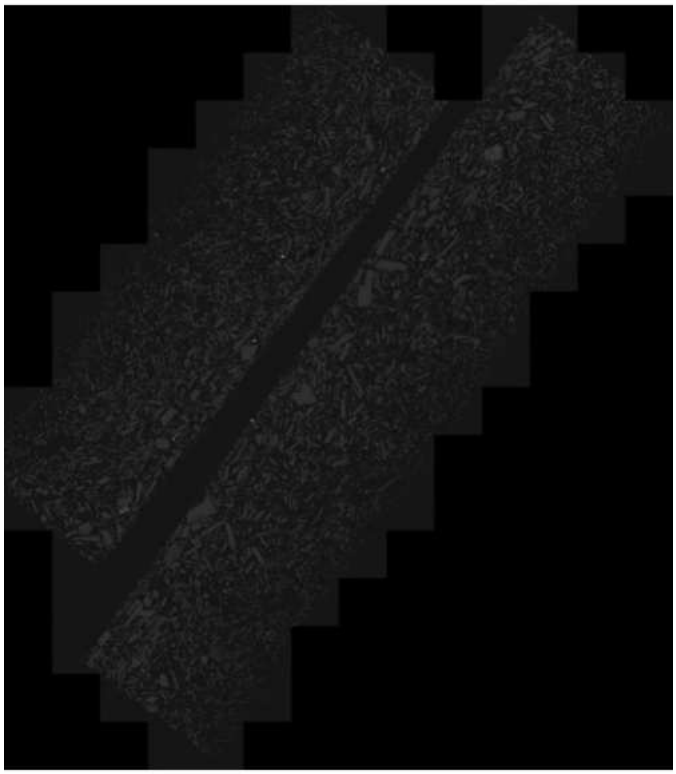


Jméno: Lhenice magnetic fraction LHm.C - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Lhenice magnetic fraction LHm.C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend

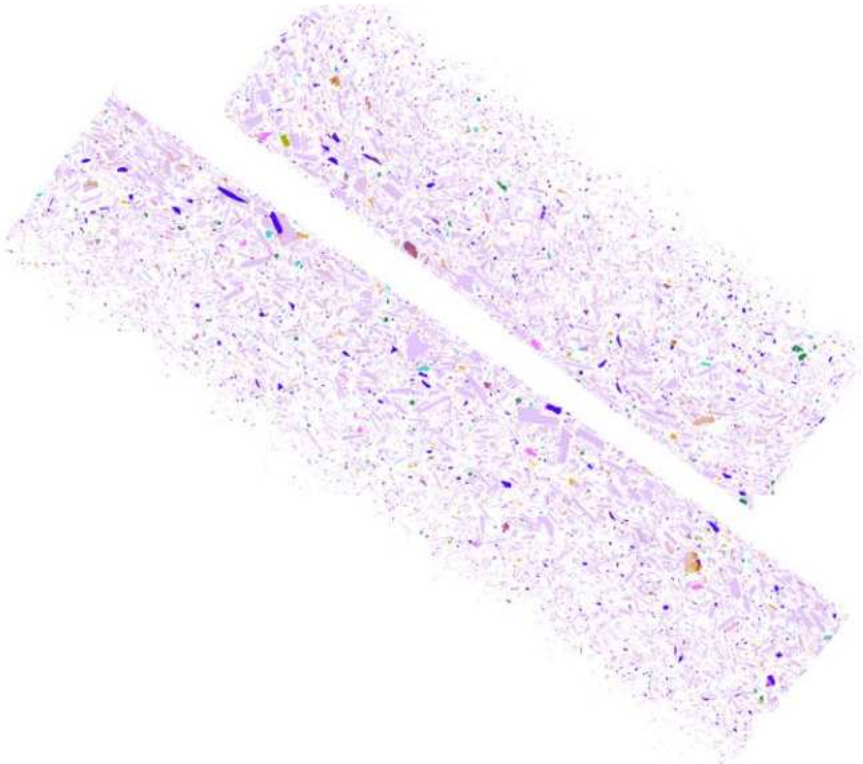
Jméno: Lhenice magnetic fraction LHm.C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 21/45



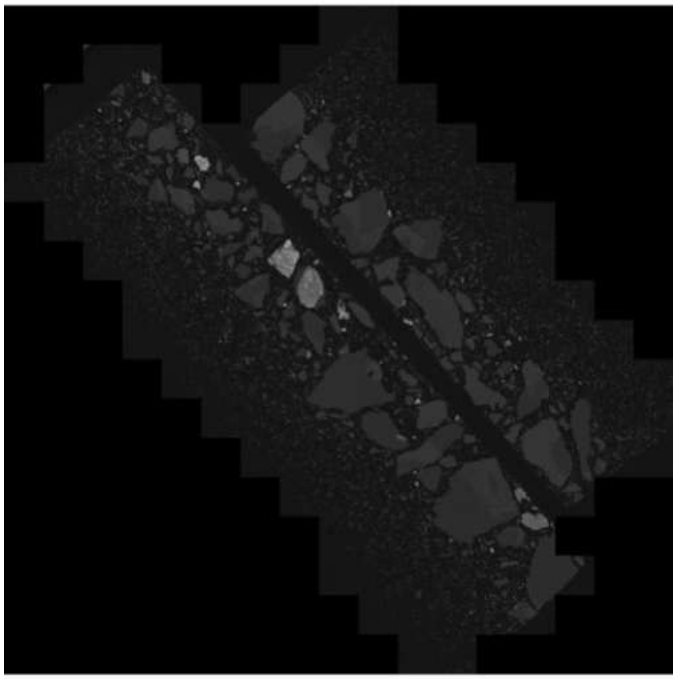
Jméno: Lhenice magnetic fraction LHm.D - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Lhenice magnetic fraction LHm.D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



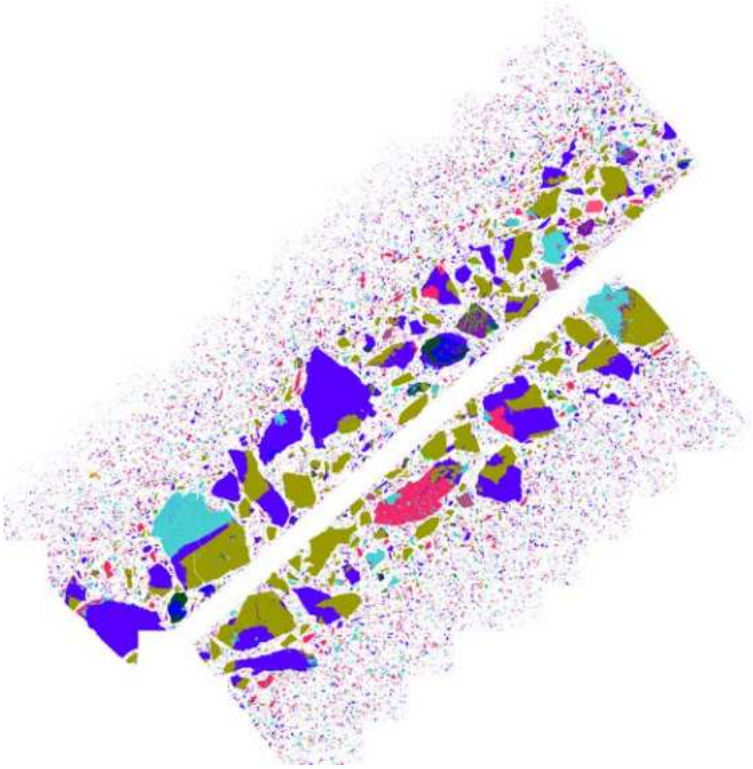
Jméno: Lhenice magnetic fraction LHm.D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 22/45



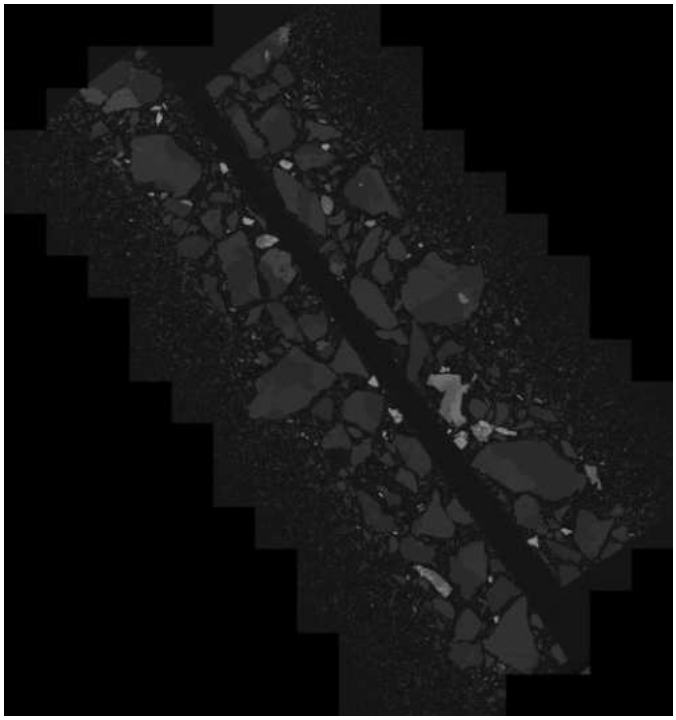
Jméno: RE30 Magnetic fraction RE30m.A - Liberation analysis #4_Panorama_BSE

Jméno: RE30 Magnetic fraction RE30m.A - Liberation analysis #4_Panorama_Phases - legend



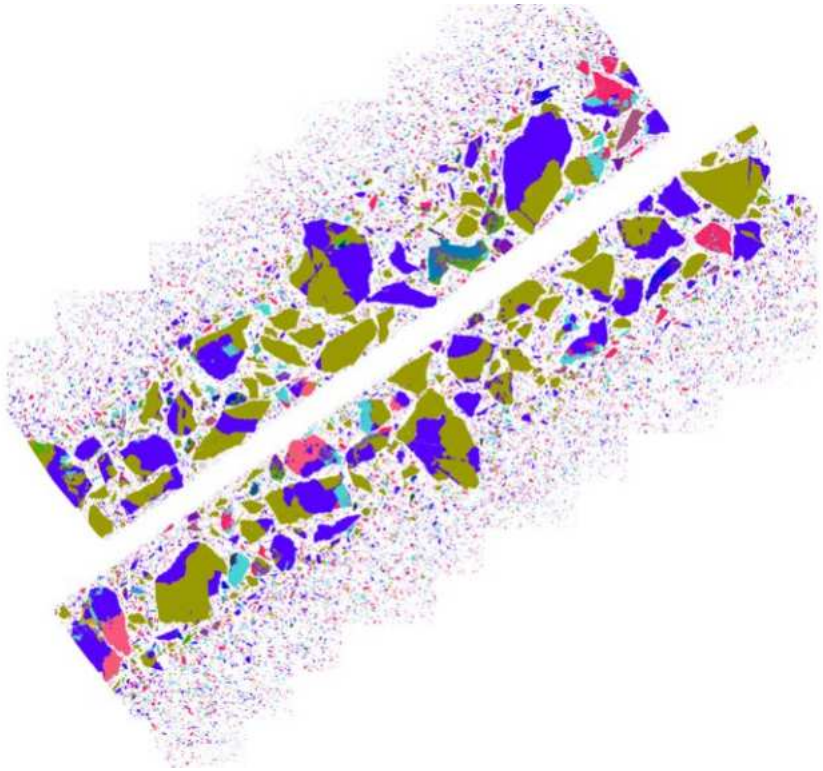
Jméno: RE30 Magnetic fraction RE30m.A - Liberation analysis #4_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 23/45



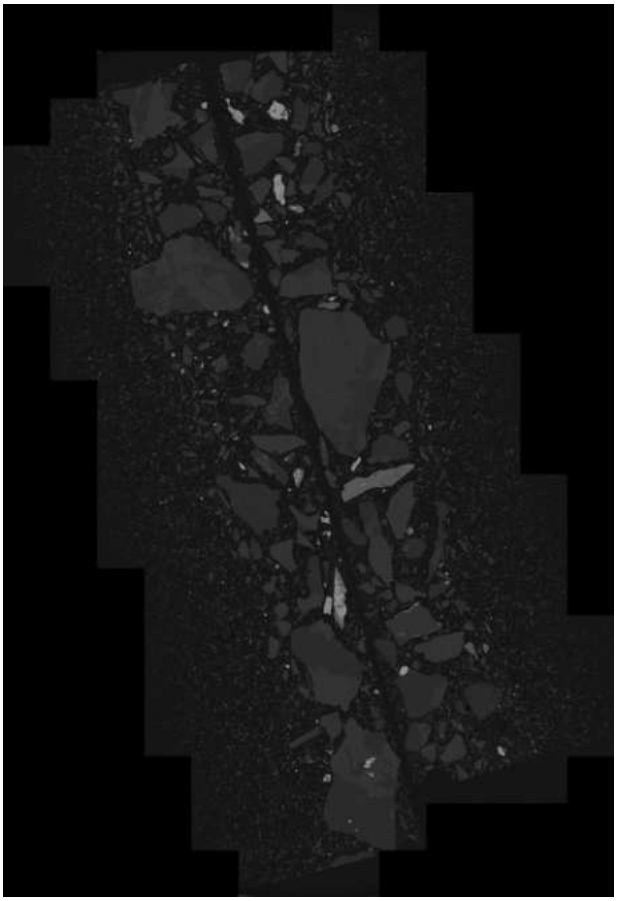
Jméno: RE30 Magnetic fraction RE30m.B - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: RE30 Magnetic fraction RE30m.B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



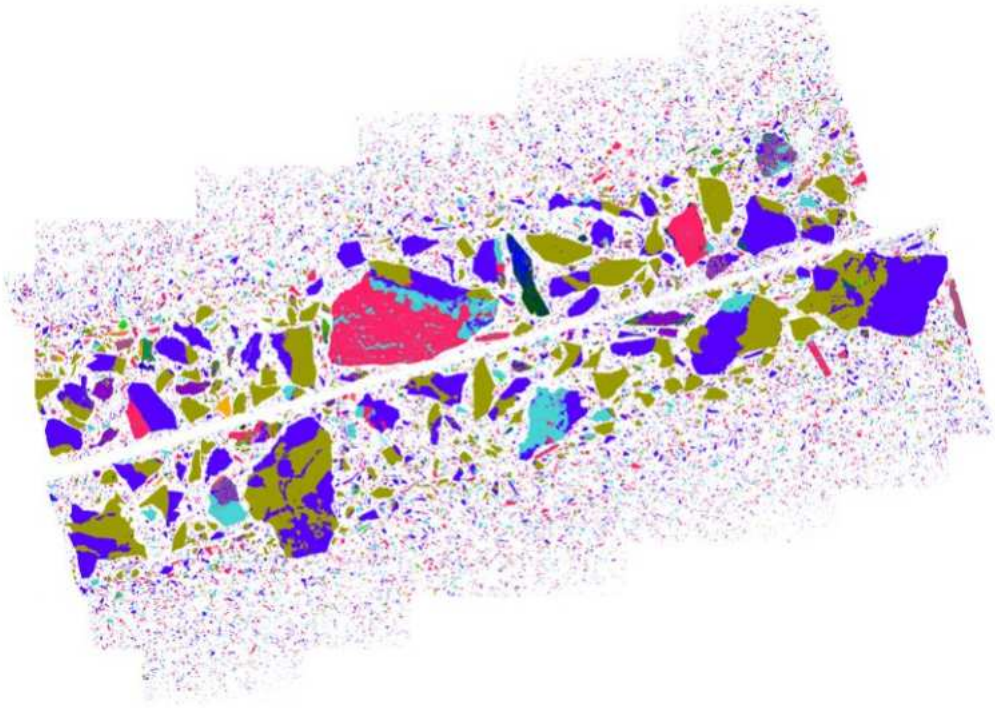
Jméno: RE30 Magnetic fraction RE30m.B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 24/45



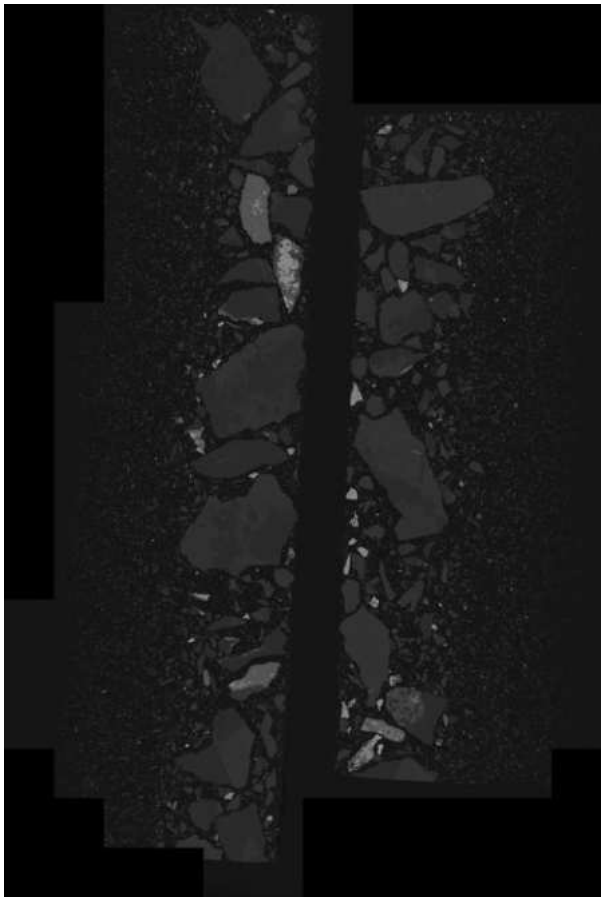
Jméno: RE30 Magnetic fraction RE30m.C - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: RE30 Magnetic fraction RE30m.C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



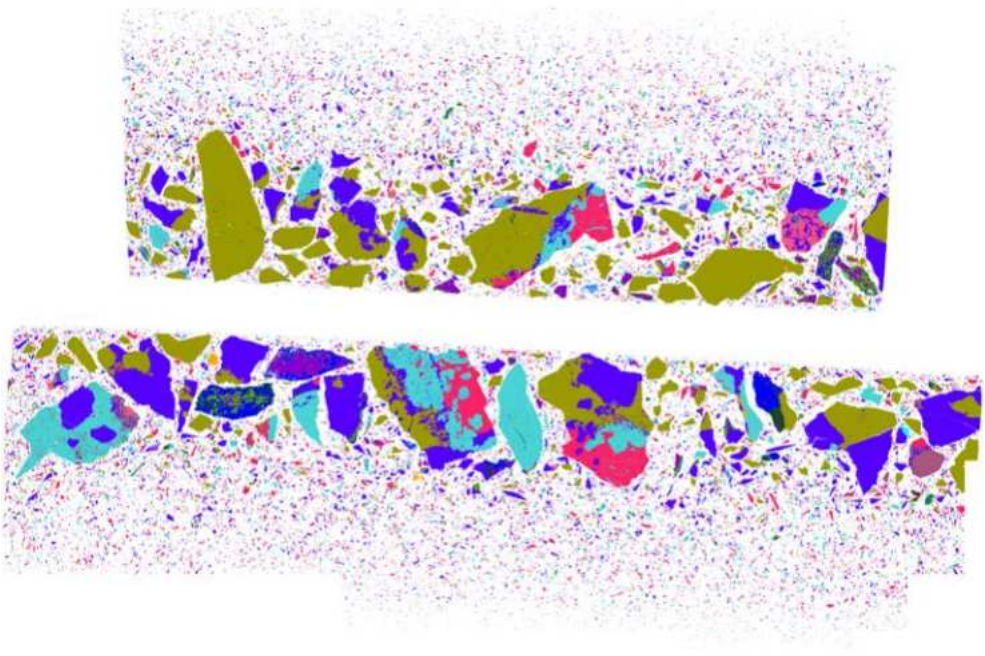
Jméno: RE30 Magnetic fraction RE30m.C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 25/45



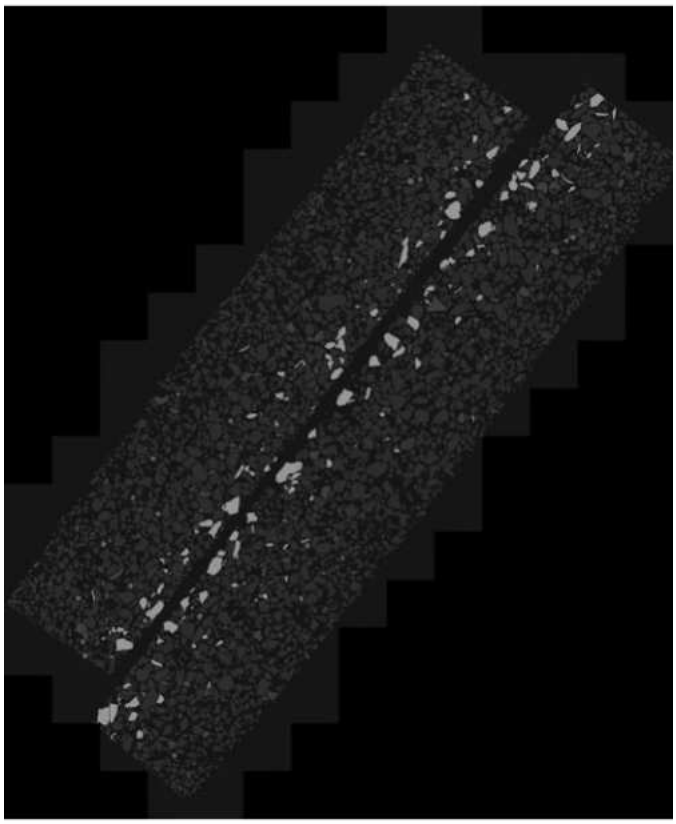
Jméno: RE30 Magnetic fraction RE30m.D - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: RE30 Magnetic fraction RE30m.D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



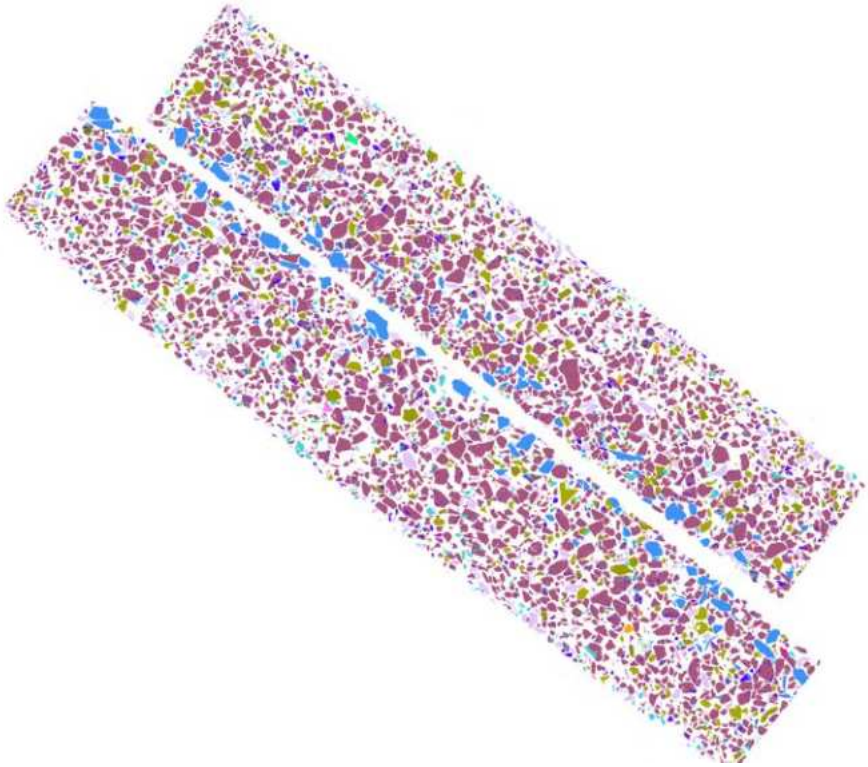
Jméno: RE30 Magnetic fraction RE30m.D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 26/45



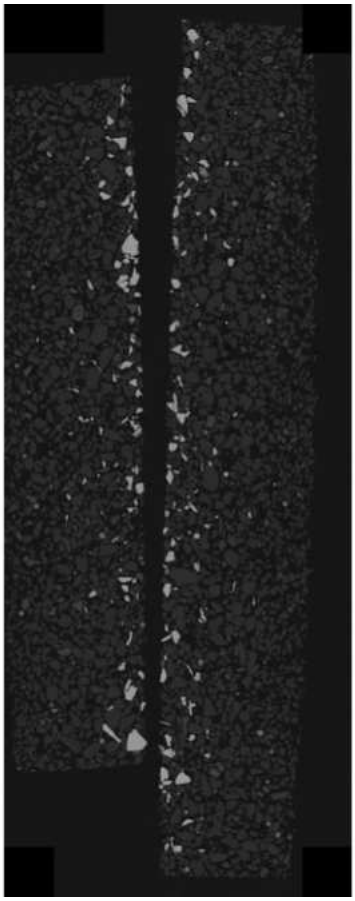
Jméno: Rozna2 Heavy fraction ROZ2-TF.A - Liberation analysis #3_Panorama_BSE

Jméno: Rozna2 Heavy fraction ROZ2-TF.A - Liberation analysis #3_Panorama_Phases - legend



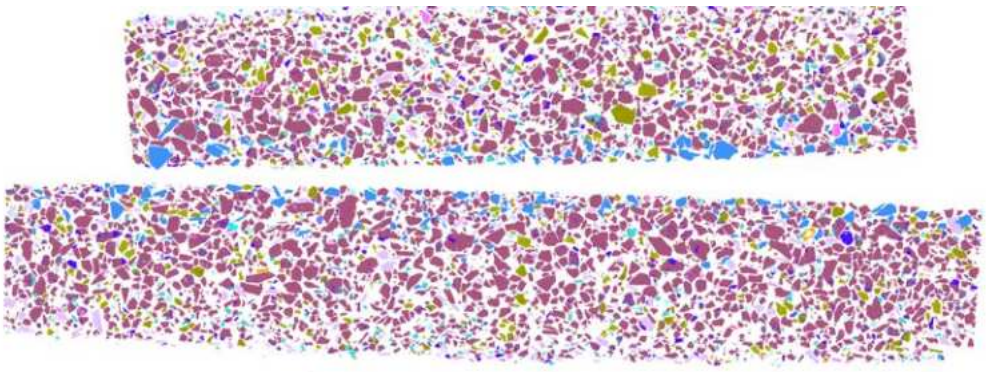
Jméno: Rozna2 Heavy fraction ROZ2-TF.A - Liberation analysis #3_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 27/45



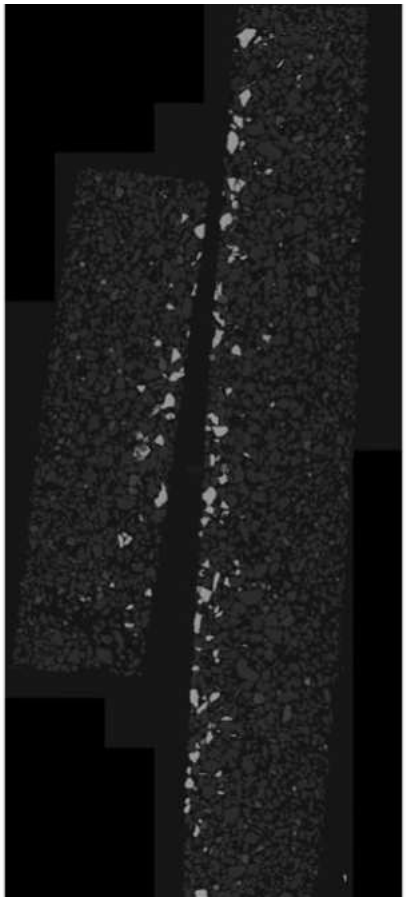
Jméno: Rozna2 Heavy fraction ROZ2-TF.B - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Rozna2 Heavy fraction ROZ2-TF.B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



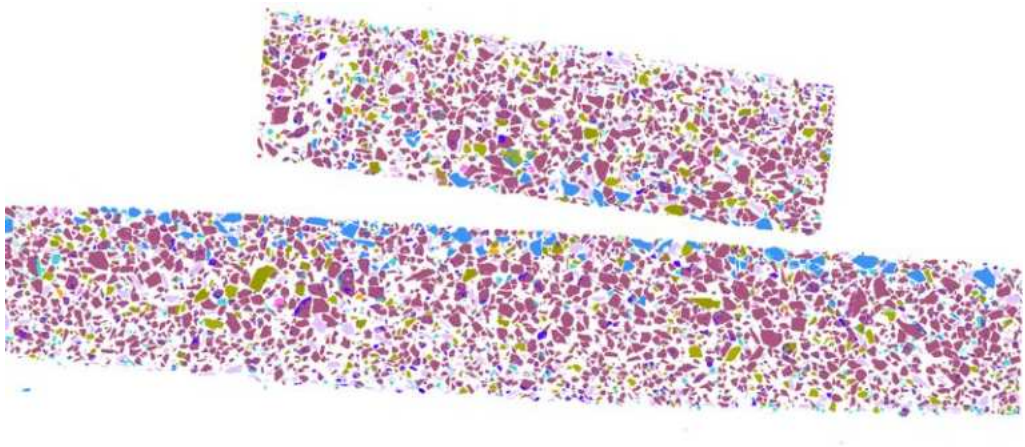
Jméno: Rozna2 Heavy fraction ROZ2-TF.B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 28/45



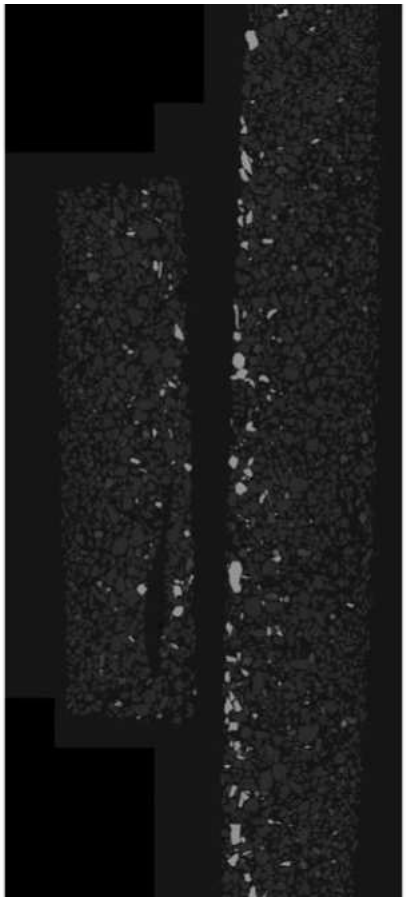
Jméno: Rozna2 Heavy fraction ROZ2-TF.C - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Rozna2 Heavy fraction ROZ2-TF.C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



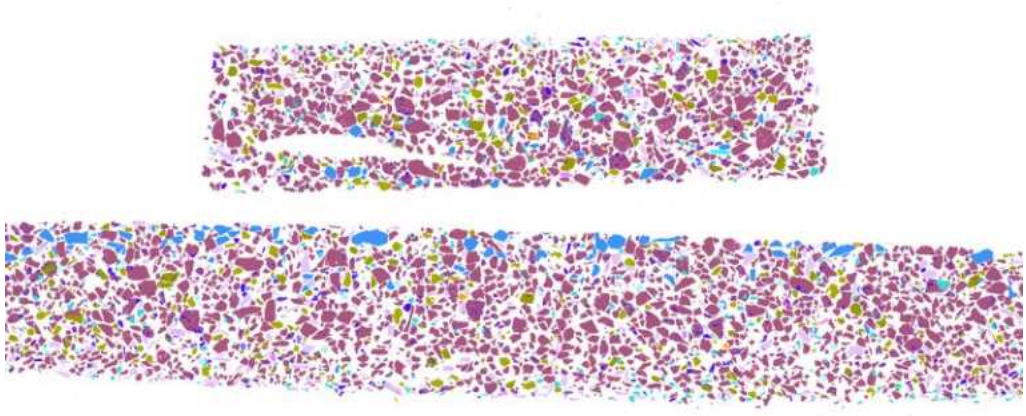
Jméno: Rozna2 Heavy fraction ROZ2-TF.C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 29/45



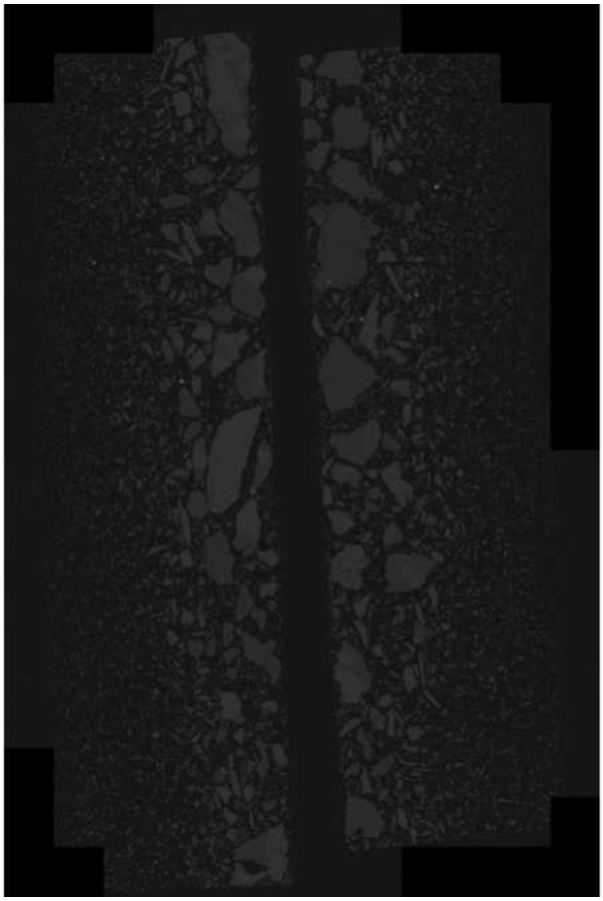
Jméno: Rozna2 Heavy fraction ROZ2-TF.D - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Rozna2 Heavy fraction ROZ2-TF.D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



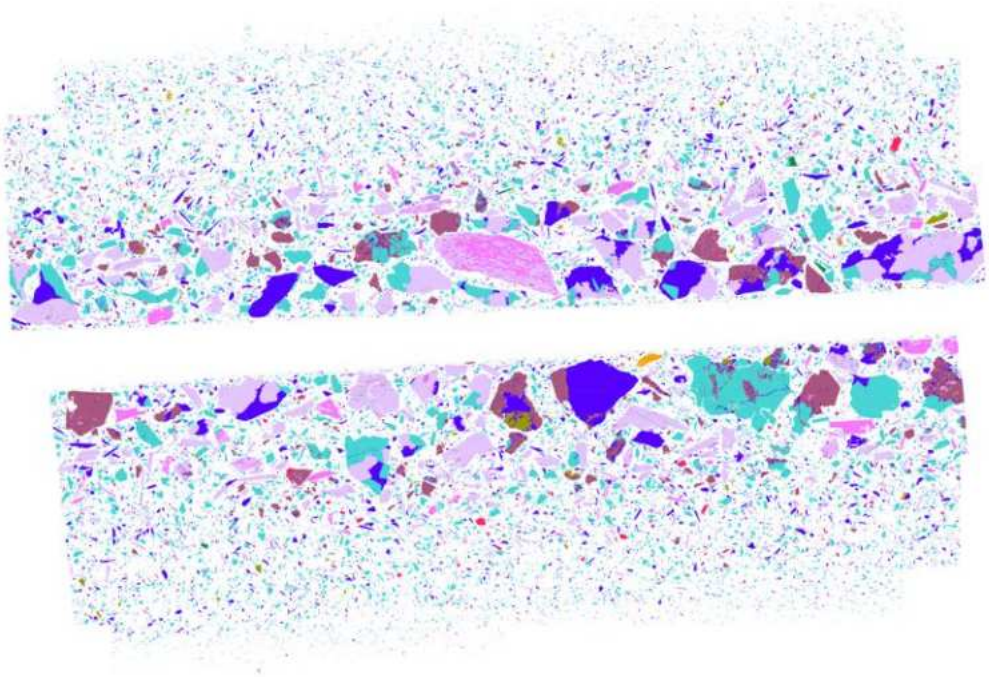
Jméno: Rozna2 Heavy fraction ROZ2-TF.D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 30/45



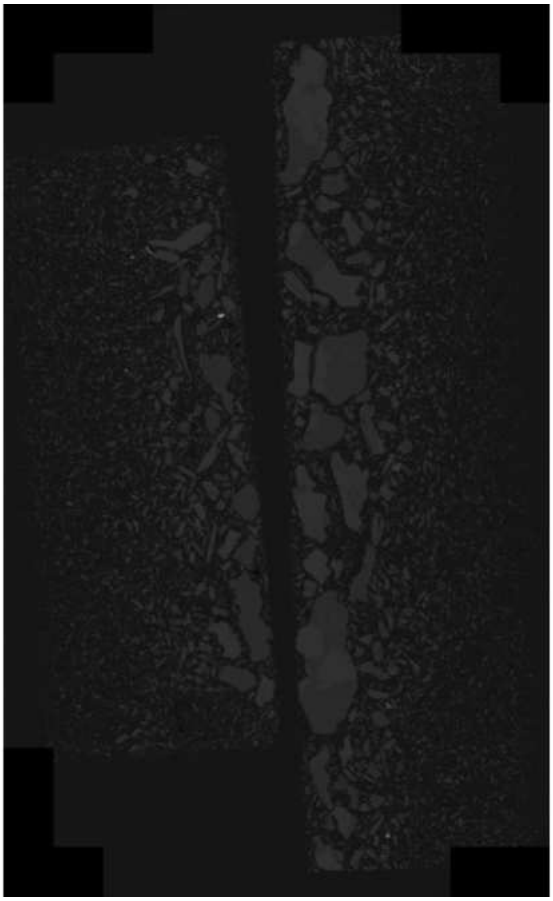
Jméno: Rozna2 Magnetic fraction ROZ2m.B - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Rozna2 Magnetic fraction ROZ2m.B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



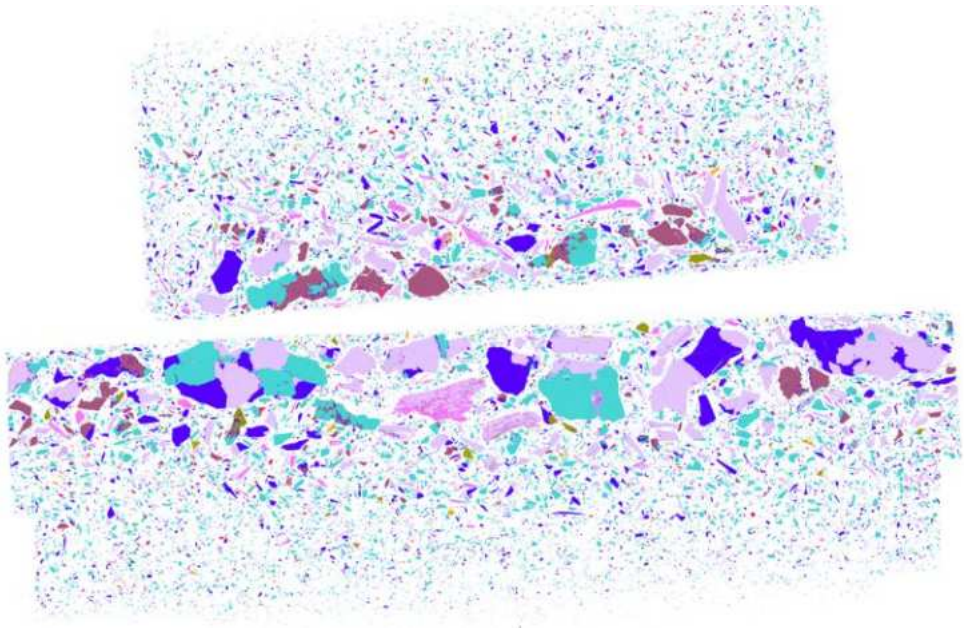
Jméno: Rozna2 Magnetic fraction ROZ2m.B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 31/45



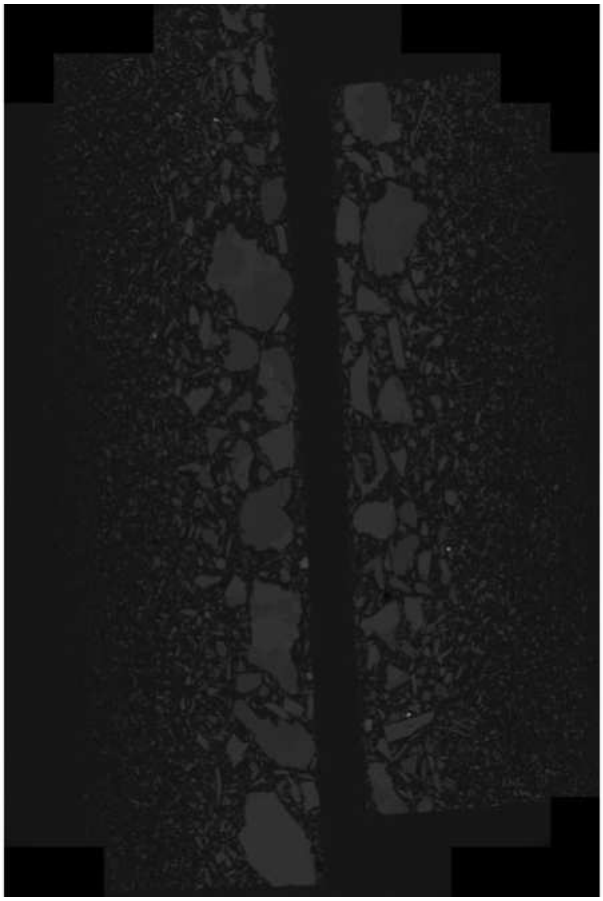
Jméno: Rozna2 Magnetic fraction ROZ2m.C - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Rozna2 Magnetic fraction ROZ2m.C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



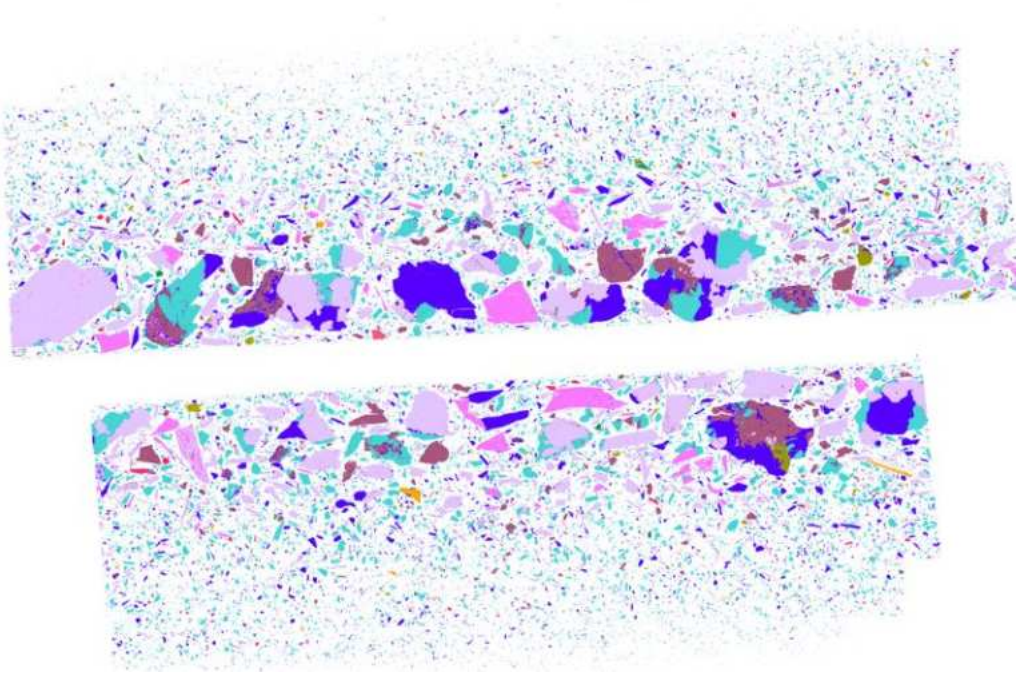
Jméno: Rozna2 Magnetic fraction ROZ2m.C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 32/45



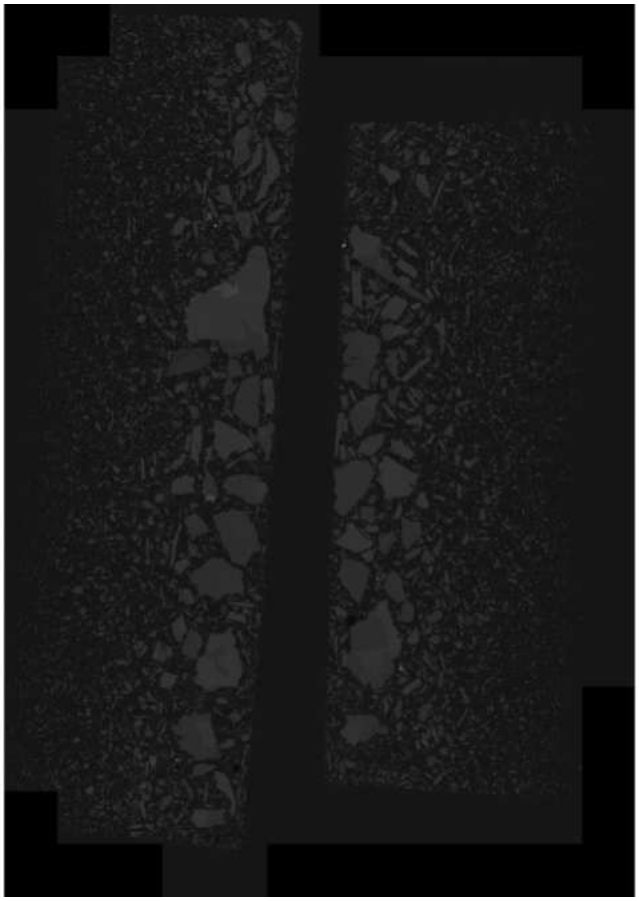
Jméno: Rozna2 Magnetic fraction ROZ2m.D - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Rozna2 Magnetic fraction ROZ2m.D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



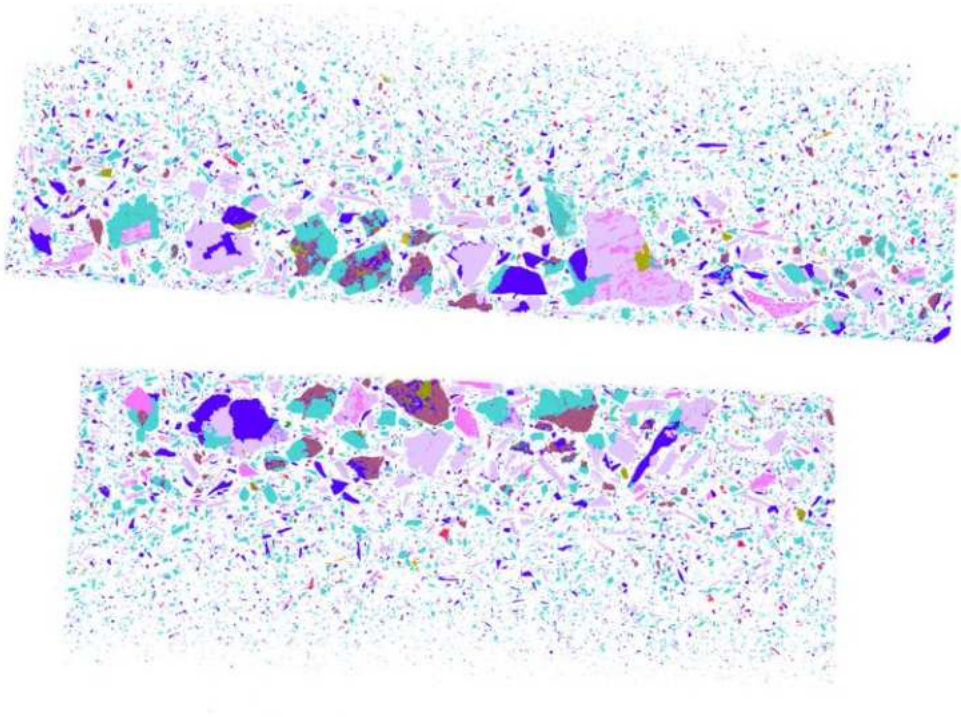
Jméno: Rozna2 Magnetic fraction ROZ2m.D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 33/45



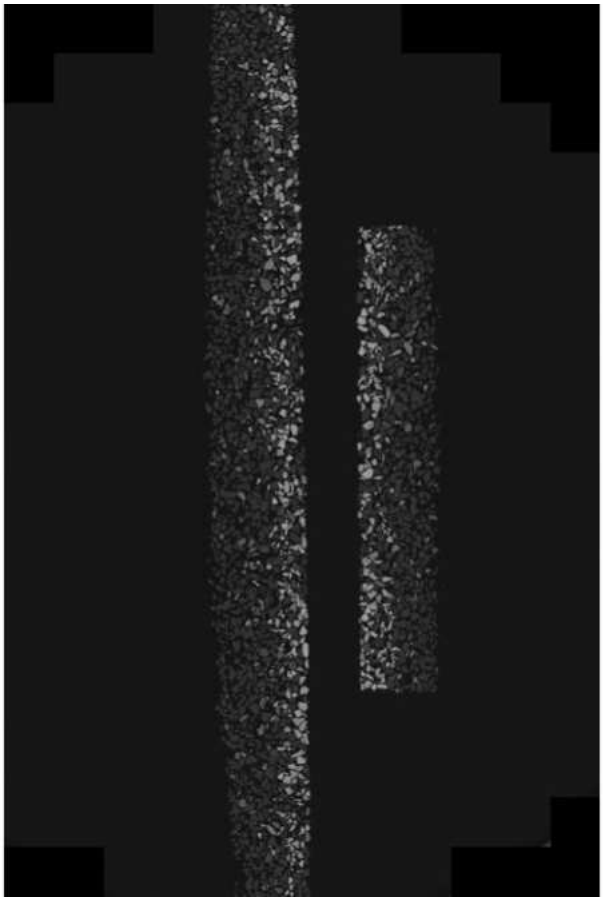
Jméno: Rozna2 Magnetic fraction ROZm.A - Liberation analysis #3_Panorama_BSE

Jméno: Rozna2 Magnetic fraction ROZm.A - Liberation analysis #3_Panorama_Phases - legend



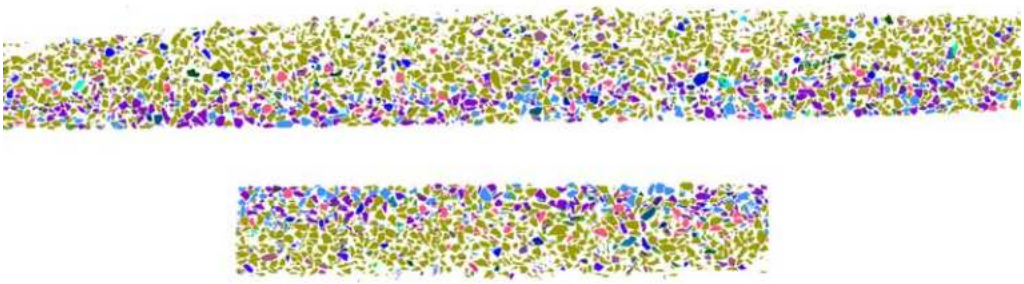
Jméno: Rozna2 Magnetic fraction ROZm.A - Liberation analysis #3_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 34/45



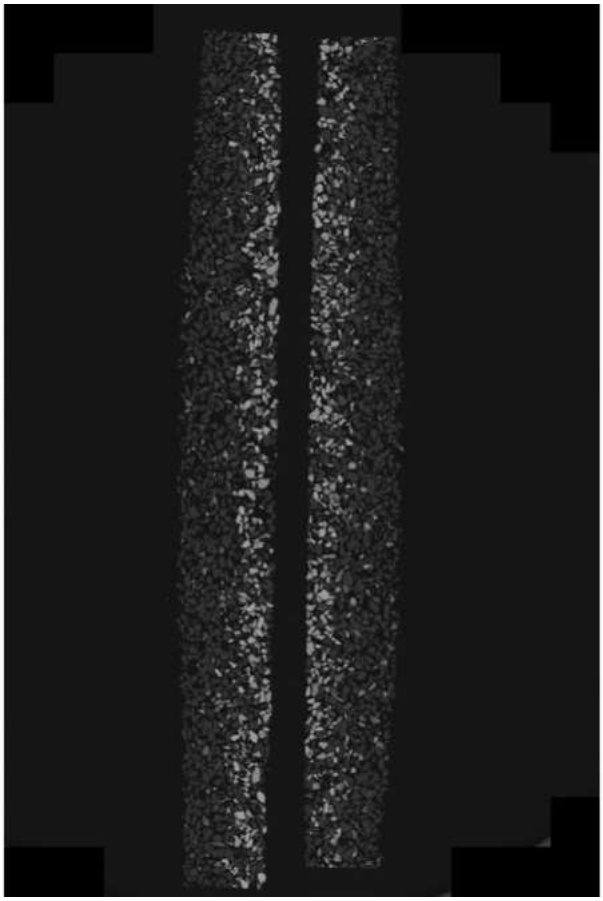
Jméno: Řečice Heavy fraction RE30-TF-A - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Řečice Heavy fraction RE30-TF-A - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



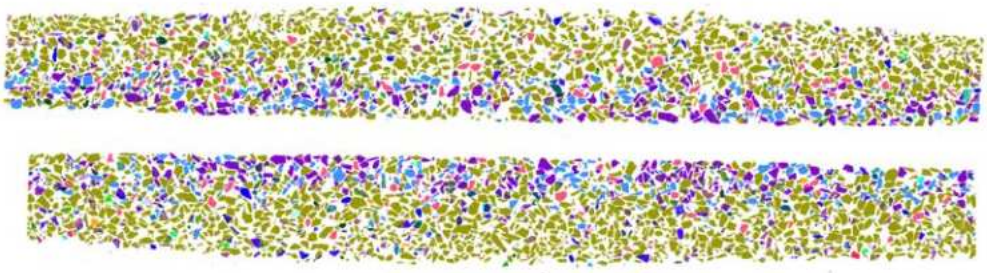
Jméno: Řečice Heavy fraction RE30-TF-A - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 35/45



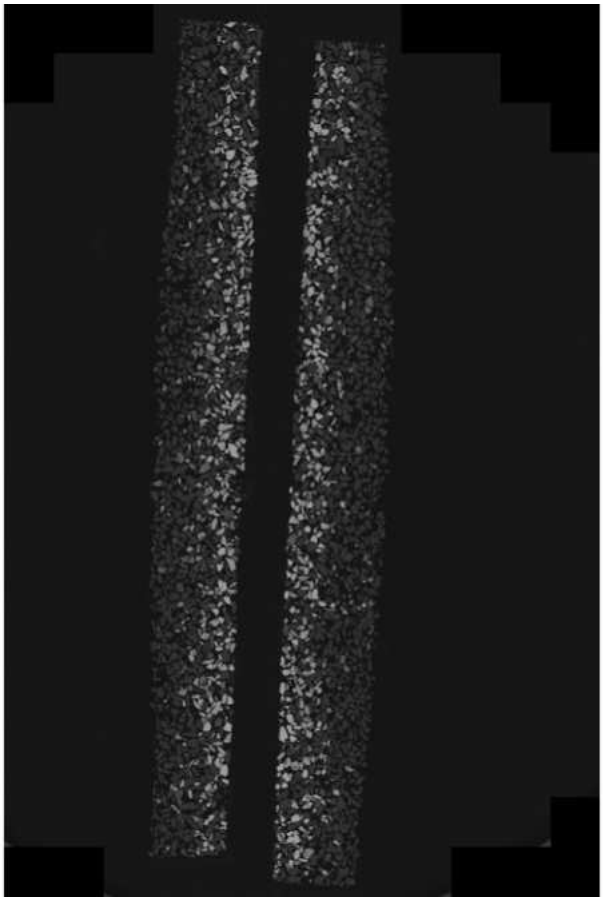
Jméno: Řečice Heavy fraction RE30-TF-B - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Řečice Heavy fraction RE30-TF-B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



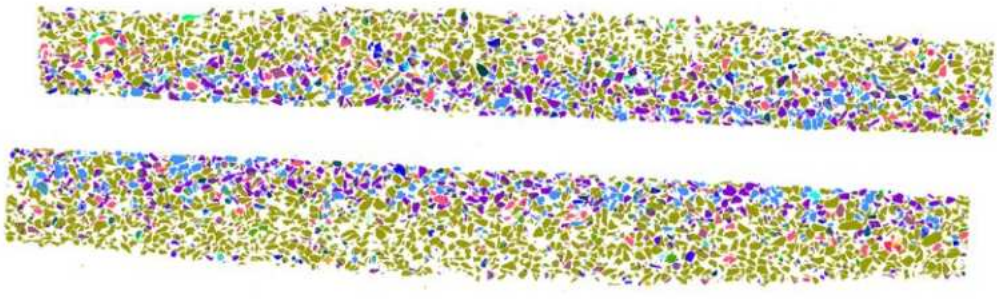
Jméno: Řečice Heavy fraction RE30-TF-B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 36/45



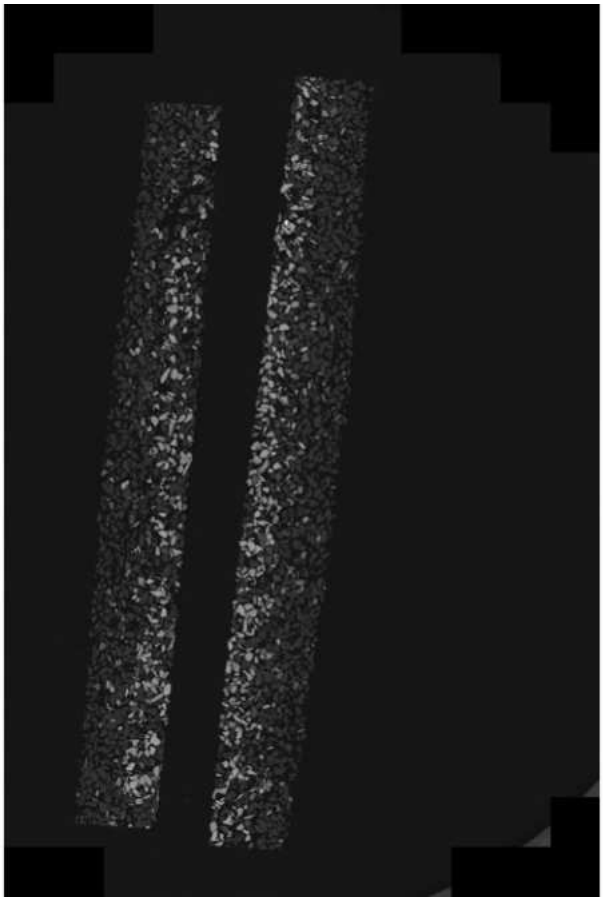
Jméno: Řečice Heavy fraction RE30-TF-C - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Řečice Heavy fraction RE30-TF-C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



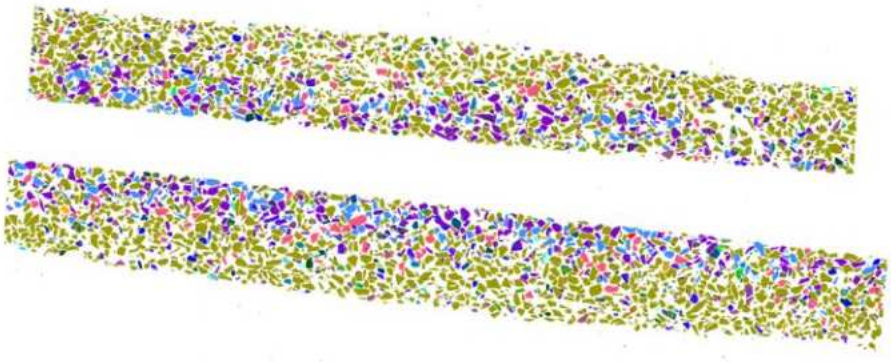
Jméno: Řečice Heavy fraction RE30-TF-C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 37/45



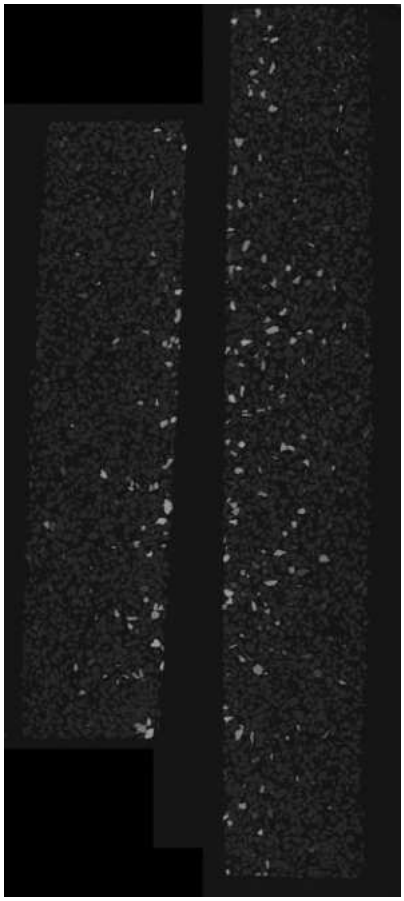
Jméno: Řečice Heavy fraction RE30-TF-D - LA peg concentrates #1_Panorama_BSE

Jméno: Řečice Heavy fraction RE30-TF-D - LA peg concentrates #1_Panorama_Phases - legend



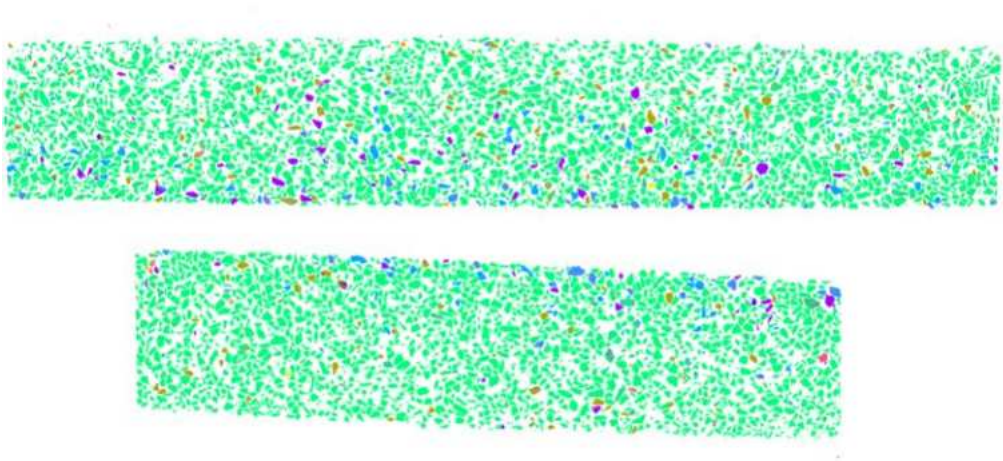
Jméno: Řečice Heavy fraction RE30-TF-D - LA peg concentrates #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 38/45



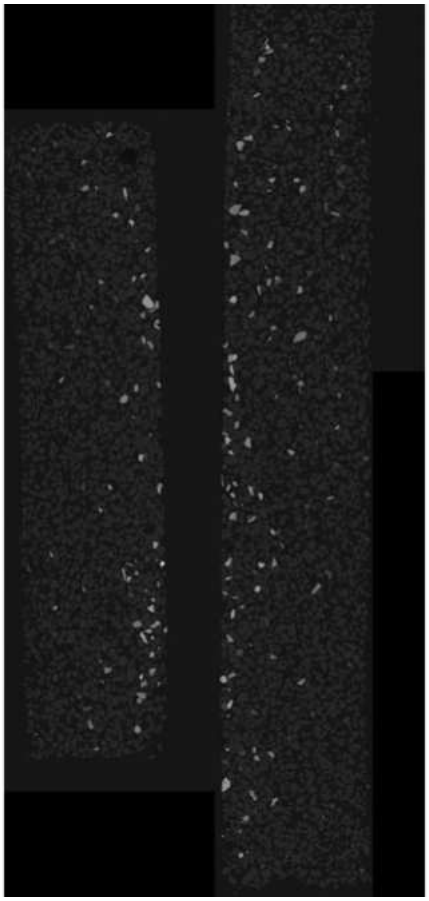
Jméno: Vernerov Heavy fraction VER-TF.B - Liberation analysis #3_Panorama_BSE

Jméno: Vernerov Heavy fraction VER-TF.B - Liberation analysis #3_Panorama_Phases - legend



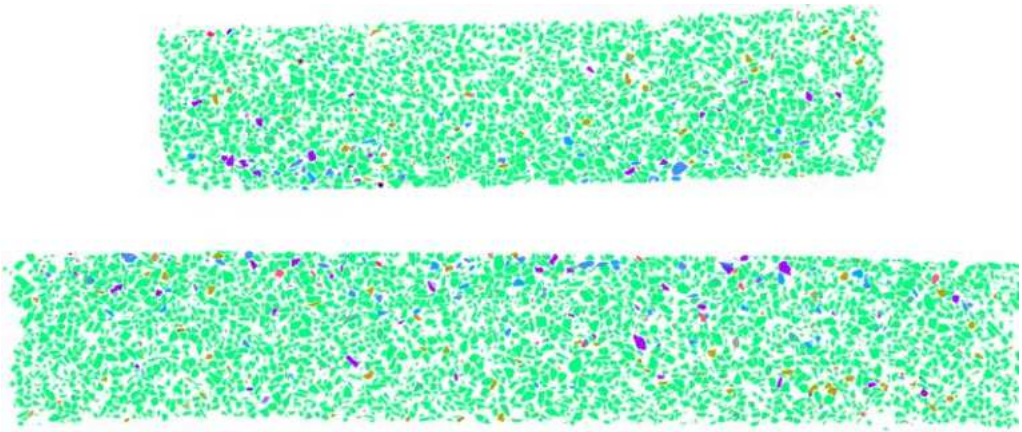
Jméno: Vernerov Heavy fraction VER-TF.B - Liberation analysis #3_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 39/45



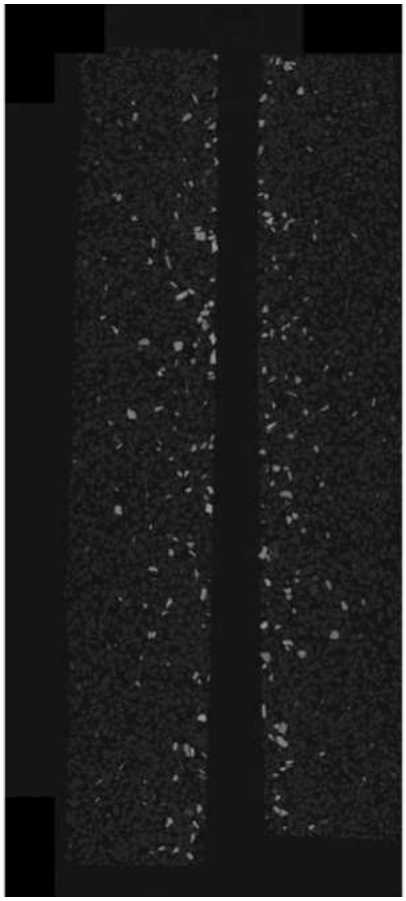
Jméno: Vernerov Heavy fraction VER-TF-A - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Vernerov Heavy fraction VER-TF-A - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



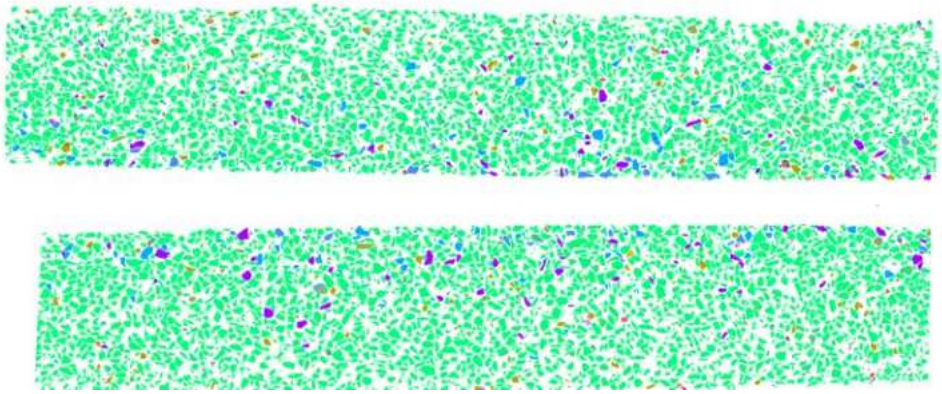
Jméno: Vernerov Heavy fraction VER-TF-A - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 40/45



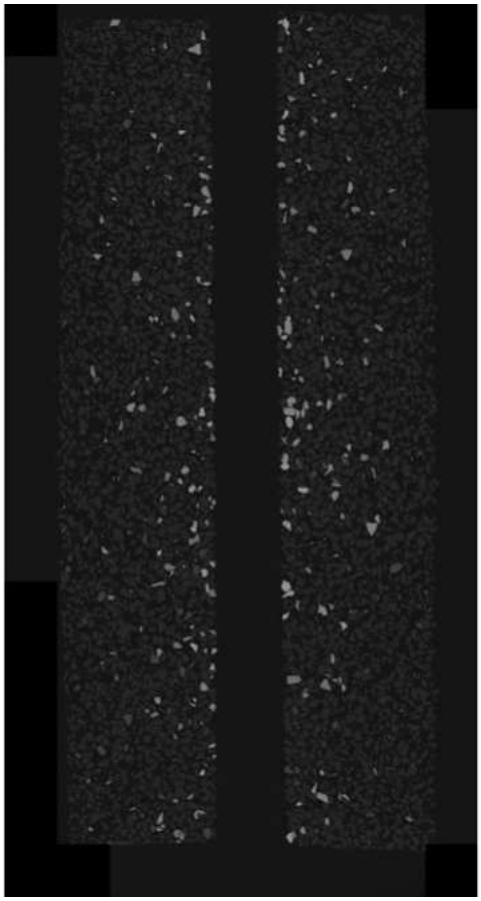
Jméno: Vernerov Heavy fraction VER-TF-C - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Vernerov Heavy fraction VER-TF-C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



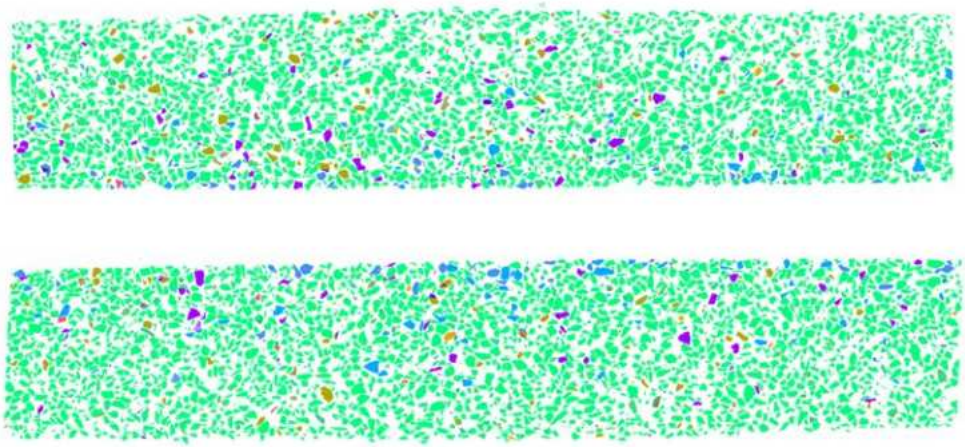
Jméno: Vernerov Heavy fraction VER-TF-C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 41/45



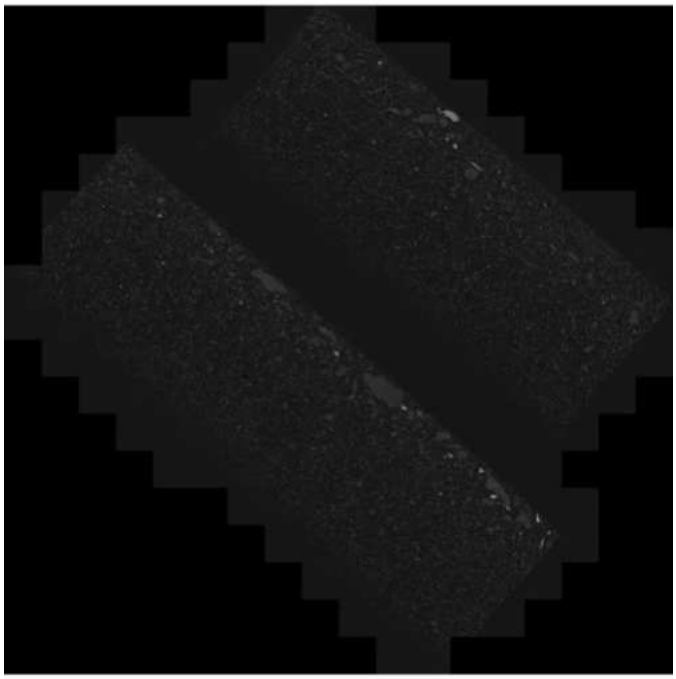
Jméno: Vernerov Heavy fraction VER-TF-D - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Vernerov Heavy fraction VER-TF-D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



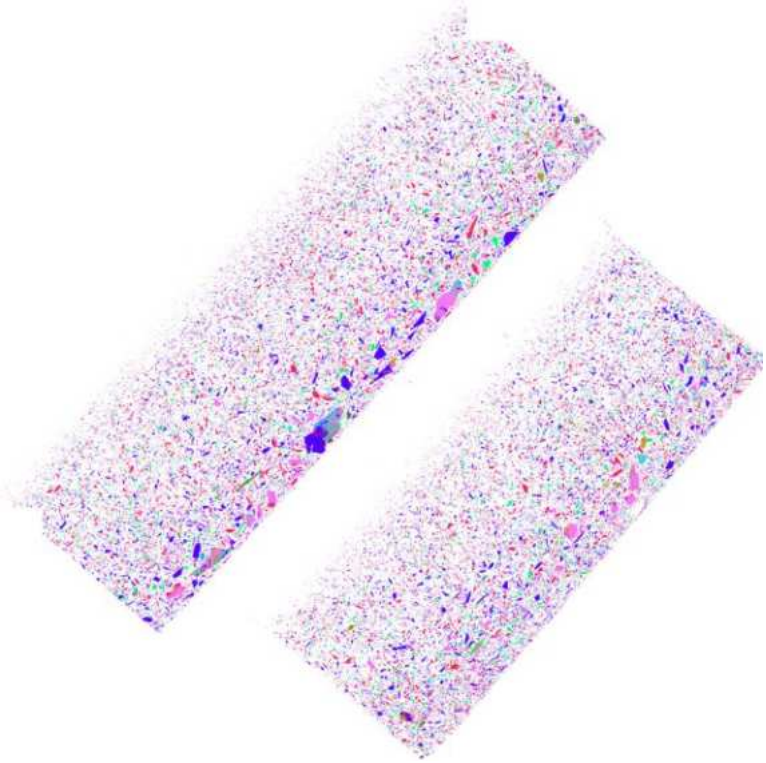
Jméno: Vernerov Heavy fraction VER-TF-D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 42/45



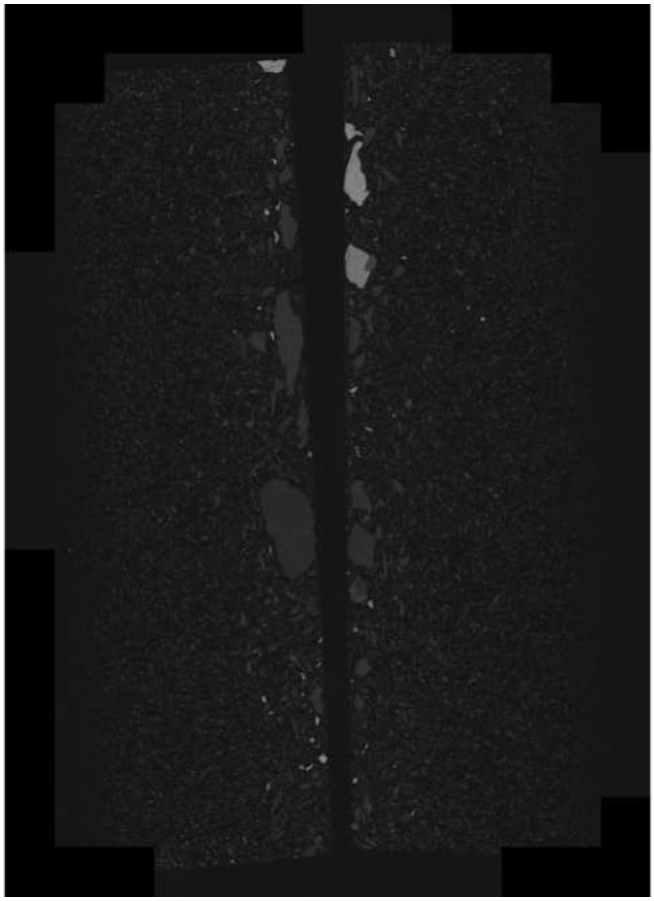
Jméno: Vernerov Magnetic fraction VERm.A - Liberation analysis #3_Panorama_BSE

Jméno: Vernerov Magnetic fraction VERm.A - Liberation analysis #3_Panorama_Phases - legend



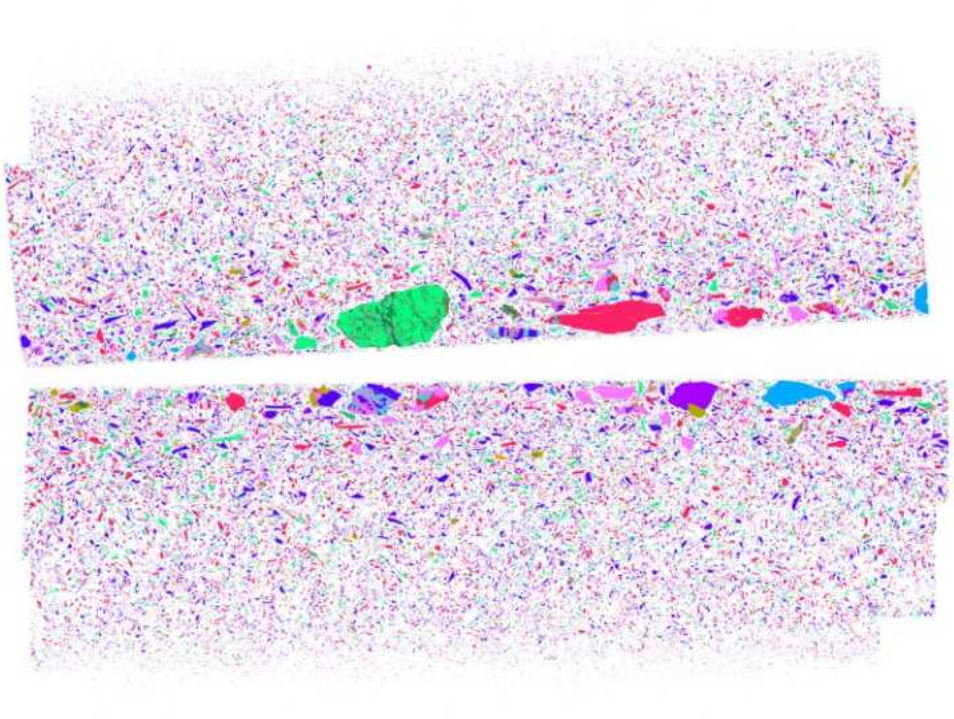
Jméno: Vernerov Magnetic fraction VERm.A - Liberation analysis #3_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 43/45



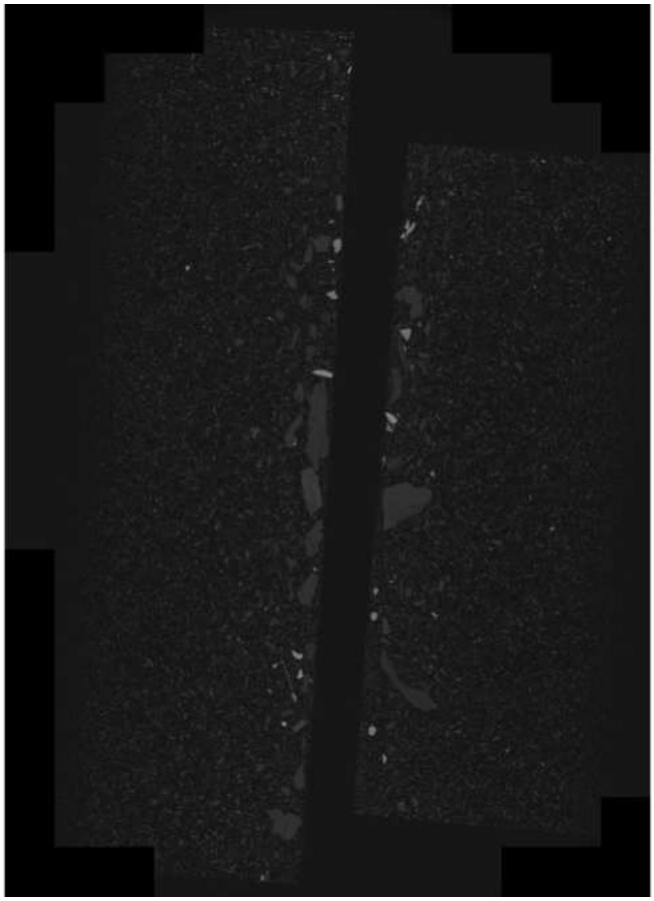
Jméno: Vernerov Magnetic fraction VERm.B - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Vernerov Magnetic fraction VERm.B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



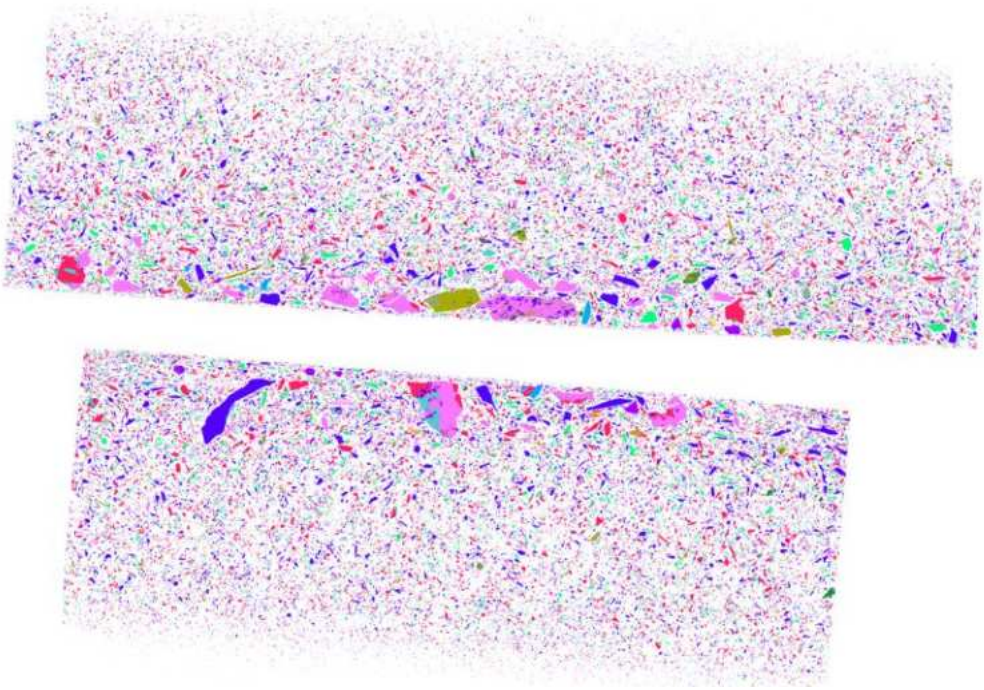
Jméno: Vernerov Magnetic fraction VERm.B - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 44/45



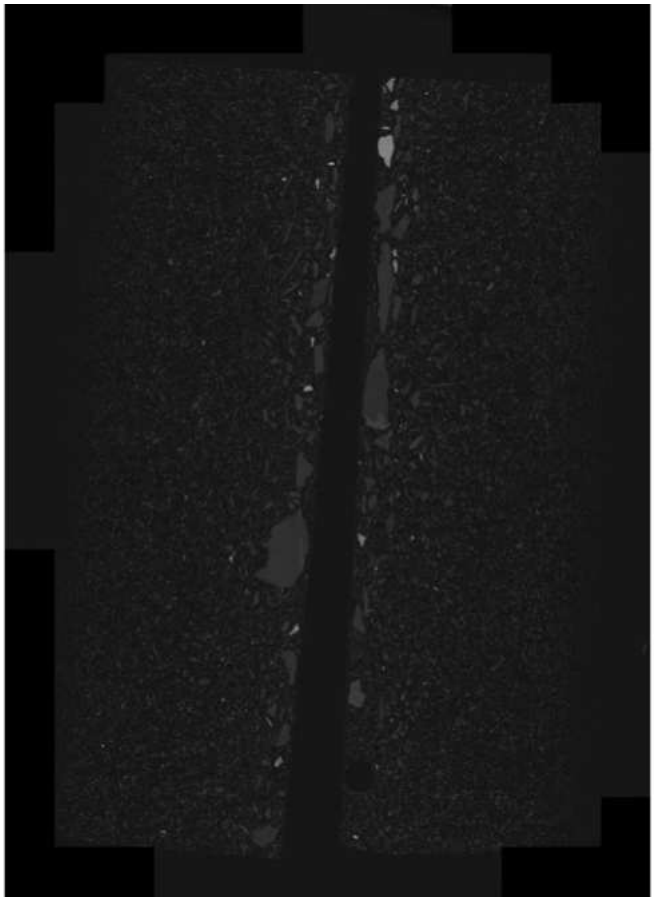
Jméno: Vernerov Magnetic fraction VERm.C - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Vernerov Magnetic fraction VERm.C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



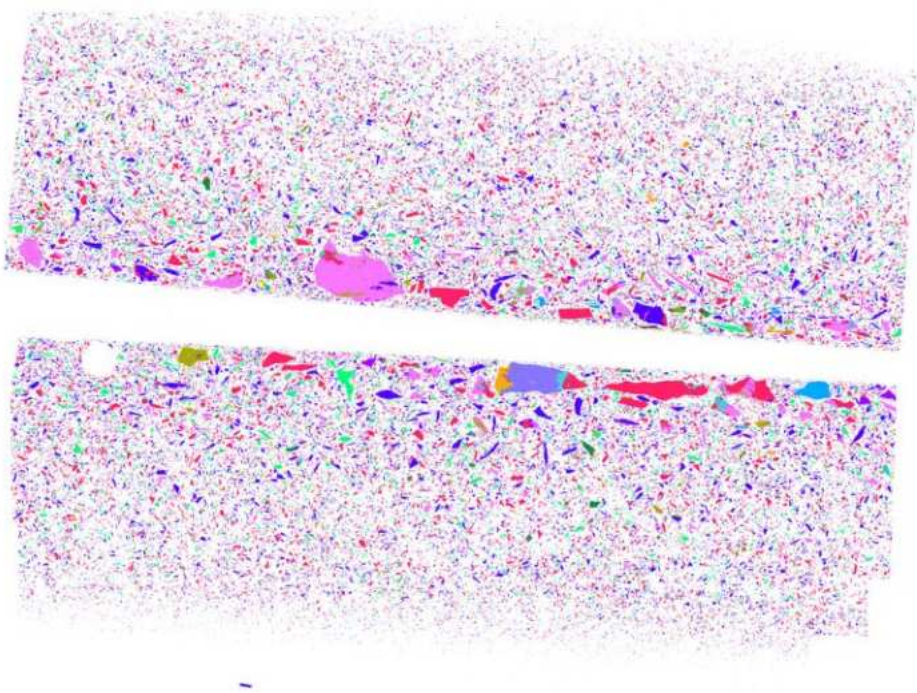
Jméno: Vernerov Magnetic fraction VERm.C - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Fázové mapy a BSE snímky 45/45



Jméno: Vernerov Magnetic fraction VERm.D - Liberation analysis #1_Panorama_BSE

Jméno: Vernerov Magnetic fraction VERm.D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases - legend



Jméno: Vernerov Magnetic fraction VERm.D - Liberation analysis #1_Panorama_Phases

# Příloha 9
# Laboratorní protokoly

| | |
|---|---|
| Program: | Epsilon |
| Název projektu: | Vyvinuté magmatické a pegmatitové systémy jako zdroje kritických surovin a průmyslových minerálů |
| Název projektu anglicky: | Evolved magmatic and pegmatitic systems as sources of critical raw materials and industrial minerals |
| Číslo projektu TAČR: | TH79020002 |
| Číslo projektu ERA-MIN 3: | JTC-2021_174 |
| Řešitelské organizace: | Masarykova univerzita<br>G E T s.r.o.<br>K M K GRANIT, a.s. |
| Doba řešení: | 5/2022 - 4/2025 |
| Důvěrnost a dostupnost: | veřejně přístupný |


| | |
|---|---|
| Řešitelský tým: | Jan Cempírek (Masarykova univerzita) |
| | Milan Novák (Masarykova univerzita) |
| | Radek Škoda (Masarykova univerzita) |
| | Jaromír Tvrdý (G E T s.r.o.) |
| | Petr Hanzlík (G E T s.r.o.) |
| | Ondřej Krátký (G E T s.r.o.) |
| | Ondřej Sysel (G E T s.r.o.) |
| | Jitka Kovářová (G E T s.r.o.) |
| | Pavel Jedlička (K M K GRANIT, a.s.) |
| | Emília Křenková (K M K GRANIT, a.s.) |
| | Pavel Tatýrek (K M K GRANIT, a.s.) |

Přílohu zpracovali: Pavel Jedlička
Emília Křenková

Obsah přílohy:
9/1 XRF analýzy UNIQUANT (Laboratoř KMK GRANIT)
9/2 Silikátové XRF analýzy (Laboratoř KMK GRANIT)
9/3 Stanovení obsahů beryllia a lithia (SUAS Lab s.r.o.)
9/4 Osvědčení o akreditaci (Laboratoř KMK GRANIT)

Program na podporu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje EPSILON je zaměřen zejména na zlepšení pozice českého a v globálním kontextu i evropského průmyslu pomocí podpory projektů spadajících do kategorie aplikovaného výzkumu (zahrnuje průmyslový výzkum, experimentální vývoj nebo jejich kombinaci), jejichž výsledky mají vysoký potenciál pro rychlé uplatnění v nových produktech, výrobních postupech a službách. Poskytovatelem finančních prostředků je Technologická agentura ČR.

# Laboratorní protokoly

**Příloha 9/1**

# XRF analýzy UNIQUANT

Označení vzorků v protokolech:

a) původní hornina: BrV, CJ1, CJ2, CL, Cn1, Cn2, Co-1, Co-2, Di2-1, Di2-2, Dob, DORO, FK, Jo1, Lav1, Lav2T, LH, MC1, MC2, PA, Prb, Raz2-1, Raz2-2, Raz3, RE30, ROZ-1, ROZ-2, SMP1, SMP2, Ver, VerII, VST-1, VST-2, VST-3

b) magnetická frakce: BrV mag., DORO mag., Lav1 mag., Lav2 mag., LH mag., Prb mag., RE30 mag., SMP2 mag., Ver mag., VerII mag., VST-1 mag., VST-2 mag., VST-3 mag.

c) nemagnetická frakce: BrV nemag., DORO nemag., Lav1 nemag., Lav2 nemag., LH nemag., Prb nemag., RE30 nemag., SMP2 nemag., Ver nemag., VerII nemag., VST-1 nemag., VST-2 nemag., VST-3 nemag.

d) epoxidový preparát magnetické frakce: CJ2 m (A až D), DORO m (A až D), LH m (A až D), RE30 m (A až C), ROZ2 m (A až D), VERII m (A až D)

e) epoxidový preparát těžké frakce: CJ2-TF (A až D), DORO-TF (A až D), LH-TF, RE30-TF (A, B, BC, D), ROZ2-TF (A až D), VERII-TF (A až D)

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:29:03
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**BrV**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 16.2.2023 | 11:19:15 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 72.77 | 0.22 | Si | 34.02 | 0.10 |
| Al2O3 | 15.38 | 0.18 | Al | 8.14 | 0.10 |
| Na2O | 3.59 | 0.09 | Na | 2.67 | 0.07 |
| K2O | 3.45 | 0.09 | K | 2.87 | 0.08 |
| CaO | 2.04 | 0.07 | Ca | 1.46 | 0.05 |
| Fe2O3 | 1.27 | 0.06 | Fe | 0.887 | 0.04 |
| MgO | 0.337 | 0.017 | Mg | 0.203 | 0.010 |
| TiO2 | 0.1000 | 0.0050 | Ti | 0.0599 | 0.0030 |
| MnO | 0.0864 | 0.0043 | Mn | 0.0669 | 0.0033 |
| SrO | 0.0842 | 0.0042 | Sr | 0.0712 | 0.0036 |
| P2O5 | 0.0728 | 0.0036 | Px | 0.0318 | 0.0016 |
| BaO | 0.0371 | 0.0053 | Ba | 0.0332 | 0.0047 |
| Rb2O | 0.0143 | 0.0007 | Rb | 0.0131 | 0.0007 |
| ZrO2 | 0.0140 | 0.0012 | Zr | 0.0104 | 0.0009 |
| PbO | 0.0077 | 0.0015 | Pb | 0.0072 | 0.0014 |
| ZnO | 0.0056 | 0.0004 | Zn | 0.0045 | 0.0003 |
| Y2O3 | 0.0051 | 0.0007 | Y | 0.0040 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0028 | 0.0004 | Ga | 0.0021 | 0.0003 |
| V2O5 | 0.0025 | 0.0007 | V | 0.0014 | 0.0004 |

Rest = 0.73 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 93.8 %
Total Weight% Oxygen = 48.73

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 10:40:58
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**BrV mag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.2.2023 | 8:59:40 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 58.24 | 0.25 | Si | 27.23 | 0.12 |
| Al2O3 | 22.22 | 0.21 | Al | 11.76 | 0.11 |
| K2O | 4.91 | 0.11 | K | 4.07 | 0.09 |
| Fe2O3 | 4.55 | 0.10 | Fe | 3.18 | 0.07 |
| CaO | 4.50 | 0.10 | Ca | 3.22 | 0.07 |
| Na2O | 1.96 | 0.07 | Na | 1.45 | 0.05 |
| MgO | 0.882 | 0.044 | Mg | 0.532 | 0.026 |
| MnO | 0.401 | 0.020 | Mn | 0.311 | 0.016 |
| TiO2 | 0.279 | 0.014 | Ti | 0.168 | 0.0084 |
| SrO | 0.214 | 0.011 | Sr | 0.181 | 0.0090 |
| P2O5 | 0.0801 | 0.0040 | Px | 0.0349 | 0.0017 |
| BaO | 0.0575 | 0.0061 | Ba | 0.0515 | 0.0055 |
| Rb2O | 0.0242 | 0.0012 | Rb | 0.0221 | 0.0011 |
| ZnO | 0.0161 | 0.0008 | Zn | 0.0129 | 0.0006 |
| Y2O3 | 0.0160 | 0.0009 | Y | 0.0126 | 0.0007 |
| ZrO2 | 0.0134 | 0.0020 | Zr | 0.0099 | 0.0015 |
| PbO | 0.0127 | 0.0017 | Pb | 0.0118 | 0.0016 |
| Ga2O3 | 0.0062 | 0.0004 | Ga | 0.0046 | 0.0003 |
| V2O5 | 0.0047 | 0.0009 | V | 0.0026 | 0.0005 |
| Co3O4 | 0.0041 | 0.0005 | Co | 0.0030 | 0.0004 |
| Nb2O5 | 0.0039 | 0.0009 | Nb | 0.0027 | 0.0006 |
| La2O3 | 0.0039 | 0.0010 | La | 0.0033 | 0.0009 |
| CuO | 0.0023 | 0.0005 | Cu | 0.0018 | 0.0004 |

Rest = 1.60 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 97.2 %
Total Weight% Oxygen = 46.12

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 10:42:58
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**BrV nemag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.2.2023 | 8:48:32 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 75.99 | 0.21 | Si | 35.52 | 0.10 |
| Al2O3 | 13.65 | 0.17 | Al | 7.22 | 0.09 |
| Na2O | 3.97 | 0.10 | Na | 2.94 | 0.07 |
| K2O | 3.17 | 0.09 | K | 2.63 | 0.07 |
| CaO | 1.37 | 0.06 | Ca | 0.982 | 0.04 |
| Fe2O3 | 0.430 | 0.021 | Fe | 0.301 | 0.015 |
| MgO | 0.216 | 0.011 | Mg | 0.130 | 0.0065 |
| P2O5 | 0.0600 | 0.0030 | Px | 0.0262 | 0.0013 |
| TiO2 | 0.0573 | 0.0029 | Ti | 0.0344 | 0.0017 |
| SrO | 0.0522 | 0.0026 | Sr | 0.0441 | 0.0022 |
| BaO | 0.0321 | 0.0051 | Ba | 0.0287 | 0.0045 |
| MnO | 0.0122 | 0.0006 | Mn | 0.0094 | 0.0005 |
| Rb2O | 0.0118 | 0.0006 | Rb | 0.0108 | 0.0005 |
| ZrO2 | 0.0103 | 0.0010 | Zr | 0.0077 | 0.0007 |
| PbO | 0.0061 | 0.0015 | Pb | 0.0057 | 0.0014 |
| Y2O3 | 0.0027 | 0.0007 | Y | 0.0021 | 0.0005 |
| ZnO | 0.0025 | 0.0004 | Zn | 0.0020 | 0.0003 |
| Cr2O3 | 0.0018 | 0.0005 | Cr | 0.0012 | 0.0003 |
| Ga2O3 | 0.0015 | 0.0003 | Ga | 0.0011 | 0.0003 |
| CuO | 0.0011 | 0.0004 | Cu | 0.00088 | 0.0003 |

Rest = 0.95 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 94.2 %
Total Weight% Oxygen = 49.14

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:31:54
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**CJ-1**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 4.10.2022 | 15:55:13 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 415.48 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7273.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 70.20 | 0.23 | Si | 32.82 | 0.11 |
| Al2O3 | 9.67 | 0.15 | Al | 5.12 | 0.08 |
| Fe2O3 | 6.69 | 0.12 | Fe | 4.68 | 0.09 |
| K2O | 4.12 | 0.10 | K | 3.42 | 0.08 |
| Na2O | 3.80 | 0.10 | Na | 2.82 | 0.07 |
| ZrO2 | 3.05 | 0.09 | Zr | 2.25 | 0.06 |
| TiO2 | 0.413 | 0.021 | Ti | 0.248 | 0.012 |
| Nb2O5 | 0.283 | 0.014 | Nb | 0.198 | 0.0099 |
| Rb2O | 0.212 | 0.011 | Rb | 0.194 | 0.0097 |
| CaO | 0.175 | 0.0087 | Ca | 0.125 | 0.0062 |
| MgO | 0.160 | 0.0080 | Mg | 0.0962 | 0.0048 |
| Y2O3 | 0.150 | 0.0075 | Y | 0.118 | 0.0059 |
| HfO2 | 0.0906 | 0.0045 | Hf | 0.0768 | 0.0038 |
| SnO2 | 0.0743 | 0.0037 | Sn | 0.0586 | 0.0029 |
| ThO2 | 0.0498 | 0.0031 | Th | 0.0438 | 0.0027 |
| CeO2 | 0.0405 | 0.0032 | Ce | 0.0329 | 0.0026 |
| MnO | 0.0400 | 0.0020 | Mn | 0.0310 | 0.0016 |
| U3O8 | 0.0351 | 0.0018 | U | 0.0298 | 0.0015 |
| PbO | 0.0318 | 0.0020 | Pb | 0.0295 | 0.0019 |
| Yb2O3 | 0.0239 | 0.0014 | Yb | 0.0210 | 0.0013 |
| P2O5 | 0.0232 | 0.0016 | Px | 0.0101 | 0.0007 |
| ZnO | 0.0177 | 0.0009 | Zn | 0.0142 | 0.0007 |
| Dy2O3 | 0.0151 | 0.0023 | Dy | 0.0132 | 0.0020 |
| Ta2O5 | 0.0148 | 0.0017 | Ta | 0.0121 | 0.0014 |
| La2O3 | 0.0147 | 0.0013 | La | 0.0125 | 0.0011 |
| Nd2O3 | 0.0138 | 0.0016 | Nd | 0.0118 | 0.0014 |
| Co3O4 | 0.0104 | 0.0007 | Co | 0.0076 | 0.0005 |
| Ga2O3 | 0.0065 | 0.0006 | Ga | 0.0048 | 0.0004 |
| Gd2O3 | 0.0064 | 0.0014 | Gd | 0.0056 | 0.0012 |
| SrO | 0.0064 | 0.0007 | Sr | 0.0054 | 0.0006 |

Rest = 0.57 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 105.8 %
Total Weight% Oxygen = 46.92

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

12.3.2025 7:59:29
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**CJ2**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.7.2024 | 15:25:40 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 471.44 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8253.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 59.26 | 0.25 | Si | 27.70 | 0.11 |
| Al2O3 | 15.21 | 0.18 | Al | 8.05 | 0.10 |
| Fe2O3 | 8.39 | 0.14 | Fe | 5.87 | 0.10 |
| K2O | 5.79 | 0.12 | K | 4.80 | 0.10 |
| Na2O | 4.34 | 0.10 | Na | 3.22 | 0.08 |
| ZrO2 | 2.36 | 0.08 | Zr | 1.75 | 0.06 |
| MgO | 1.08 | 0.05 | Mg | 0.649 | 0.03 |
| CaO | 0.573 | 0.029 | Ca | 0.410 | 0.020 |
| P2O5 | 0.424 | 0.021 | Px | 0.185 | 0.0092 |
| TiO2 | 0.314 | 0.016 | Ti | 0.188 | 0.0094 |
| Nb2O5 | 0.202 | 0.010 | Nb | 0.142 | 0.0071 |
| Rb2O | 0.159 | 0.0079 | Rb | 0.145 | 0.0073 |
| Y2O3 | 0.134 | 0.0067 | Y | 0.106 | 0.0053 |
| HfO2 | 0.0737 | 0.0037 | Hf | 0.0625 | 0.0031 |
| SnO2 | 0.0663 | 0.0033 | Sn | 0.0522 | 0.0026 |
| S | 0.0442 | 0.0022 | S | 0.0442 | 0.0022 |
| MnO | 0.0431 | 0.0022 | Mn | 0.0334 | 0.0017 |
| ThO2 | 0.0400 | 0.0024 | Th | 0.0351 | 0.0021 |
| CeO2 | 0.0319 | 0.0028 | Ce | 0.0260 | 0.0023 |
| ZnO | 0.0316 | 0.0016 | Zn | 0.0254 | 0.0013 |
| U3O8 | 0.0257 | 0.0013 | U | 0.0218 | 0.0011 |
| PbO | 0.0209 | 0.0018 | Pb | 0.0194 | 0.0017 |
| Yb2O3 | 0.0204 | 0.0013 | Yb | 0.0179 | 0.0012 |
| Co3O4 | 0.0119 | 0.0007 | Co | 0.0087 | 0.0005 |
| La2O3 | 0.0097 | 0.0011 | La | 0.0083 | 0.0010 |
| Nd2O3 | 0.0092 | 0.0014 | Nd | 0.0079 | 0.0012 |
| SrO | 0.0085 | 0.0006 | Sr | 0.0072 | 0.0005 |
| Dy2O3 | 0.0083 | 0.0022 | Dy | 0.0072 | 0.0019 |
| Ga2O3 | 0.0070 | 0.0005 | Ga | 0.0052 | 0.0004 |
| Gd2O3 | 0.0060 | 0.0013 | Gd | 0.0052 | 0.0012 |
| Ta2O5 | 0.0056 | 0.0016 | Ta | 0.0046 | 0.0013 |
| CuO | 0.0036 | 0.0006 | Cu | 0.0029 | 0.0005 |

Rest = 1.31 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 100.7 %
Total Weight% Oxygen = 45.08

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

18.7.2024 6:45:32
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**CJ2 mag. -**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.7.2024 | 16:36:48 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 471.44 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8253.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 55.44 | 0.25 | Si | 25.92 | 0.12 |
| Al2O3 | 14.47 | 0.18 | Al | 7.66 | 0.09 |
| Fe2O3 | 11.45 | 0.16 | Fe | 8.01 | 0.11 |
| K2O | 5.43 | 0.11 | K | 4.51 | 0.09 |
| Na2O | 3.98 | 0.10 | Na | 2.95 | 0.07 |
| ZrO2 | 3.69 | 0.09 | Zr | 2.73 | 0.07 |
| MgO | 1.55 | 0.06 | Mg | 0.936 | 0.04 |
| CaO | 0.510 | 0.025 | Ca | 0.365 | 0.018 |
| TiO2 | 0.494 | 0.025 | Ti | 0.296 | 0.015 |
| Nb2O5 | 0.318 | 0.016 | Nb | 0.222 | 0.011 |
| Y2O3 | 0.200 | 0.0100 | Y | 0.157 | 0.0079 |
| Rb2O | 0.144 | 0.0072 | Rb | 0.131 | 0.0066 |
| HfO2 | 0.124 | 0.0062 | Hf | 0.105 | 0.0052 |
| SnO2 | 0.1000 | 0.0050 | Sn | 0.0787 | 0.0039 |
| MnO | 0.0631 | 0.0032 | Mn | 0.0488 | 0.0024 |
| ThO2 | 0.0580 | 0.0030 | Th | 0.0510 | 0.0026 |
| S | 0.0512 | 0.0026 | S | 0.0512 | 0.0026 |
| CeO2 | 0.0456 | 0.0030 | Ce | 0.0371 | 0.0025 |
| P2O5 | 0.0417 | 0.0021 | Px | 0.0182 | 0.0009 |
| U3O8 | 0.0384 | 0.0019 | U | 0.0325 | 0.0016 |
| ZnO | 0.0354 | 0.0018 | Zn | 0.0284 | 0.0014 |
| Yb2O3 | 0.0324 | 0.0016 | Yb | 0.0285 | 0.0014 |
| BaO | 0.0241 | 0.0060 | Ba | 0.0216 | 0.0054 |
| PbO | 0.0208 | 0.0019 | Pb | 0.0194 | 0.0018 |
| Dy2O3 | 0.0184 | 0.0025 | Dy | 0.0160 | 0.0022 |
| Nd2O3 | 0.0173 | 0.0015 | Nd | 0.0149 | 0.0013 |
| Co3O4 | 0.0153 | 0.0008 | Co | 0.0112 | 0.0006 |
| Ta2O5 | 0.0129 | 0.0018 | Ta | 0.0105 | 0.0015 |
| La2O3 | 0.0120 | 0.0012 | La | 0.0102 | 0.0011 |
| Gd2O3 | 0.0101 | 0.0015 | Gd | 0.0087 | 0.0013 |
| SrO | 0.0077 | 0.0007 | Sr | 0.0065 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0055 | 0.0006 | Ga | 0.0041 | 0.0004 |

Rest = 1.59 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 102.7 %
Total Weight% Oxygen = 43.92

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:38:17
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**CJ2m.A**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 11.2.2025 | 12:56:29 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 51.51 | 0.25 | Si | 24.08 | 0.12 |
| Fe2O3 | 13.90 | 0.17 | Fe | 9.72 | 0.12 |
| Al2O3 | 13.70 | 0.17 | Al | 7.25 | 0.09 |
| K2O | 4.65 | 0.11 | K | 3.86 | 0.09 |
| Na2O | 4.54 | 0.10 | Na | 3.37 | 0.08 |
| ZrO2 | 4.14 | 0.10 | Zr | 3.07 | 0.07 |
| Cl | 2.60 | 0.08 | Cl | 2.60 | 0.08 |
| MgO | 1.85 | 0.07 | Mg | 1.11 | 0.04 |
| CaO | 1.09 | 0.05 | Ca | 0.782 | 0.04 |
| TiO2 | 0.449 | 0.022 | Ti | 0.269 | 0.013 |
| Nb2O5 | 0.388 | 0.019 | Nb | 0.271 | 0.014 |
| Y2O3 | 0.272 | 0.014 | Y | 0.214 | 0.011 |
| Rb2O | 0.198 | 0.0099 | Rb | 0.181 | 0.0090 |
| SnO2 | 0.110 | 0.015 | Sn | 0.0868 | 0.012 |
| HfO2 | 0.106 | 0.013 | Hf | 0.0900 | 0.011 |
| SO3 | 0.0989 | 0.0049 | Sx | 0.0396 | 0.0020 |
| MnO | 0.0981 | 0.0049 | Mn | 0.0760 | 0.0038 |
| P2O5 | 0.0800 | 0.0069 | Px | 0.0349 | 0.0030 |
| ZnO | 0.0531 | 0.0047 | Zn | 0.0427 | 0.0038 |
| U3O8 | 0.0530 | 0.011 | U | 0.0449 | 0.0094 |
| CeO2 | 0.0525 | 0.0095 | Ce | 0.0428 | 0.0077 |
| Yb2O3 | 0.0318 | 0.0078 | Yb | 0.0279 | 0.0069 |
| La2O3 | 0.0208 | 0.0039 | La | 0.0177 | 0.0034 |
| Nd2O3 | 0.0177 | 0.0050 | Nd | 0.0152 | 0.0043 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 48.0 %
Total Weight% Oxygen = 42.71

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:31:33
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**CJ2m.B**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 12.2.2025 | 9:29:06 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 51.70 | 0.25 | Si | 24.17 | 0.12 |
| Al2O3 | 15.14 | 0.18 | Al | 8.01 | 0.09 |
| Fe2O3 | 12.22 | 0.16 | Fe | 8.55 | 0.11 |
| Na2O | 4.96 | 0.11 | Na | 3.68 | 0.08 |
| K2O | 4.55 | 0.10 | K | 3.78 | 0.09 |
| ZrO2 | 4.29 | 0.10 | Zr | 3.18 | 0.08 |
| Cl | 2.16 | 0.07 | Cl | 2.16 | 0.07 |
| MgO | 2.02 | 0.07 | Mg | 1.22 | 0.04 |
| CaO | 0.912 | 0.045 | Ca | 0.652 | 0.032 |
| TiO2 | 0.493 | 0.025 | Ti | 0.296 | 0.015 |
| Nb2O5 | 0.365 | 0.018 | Nb | 0.255 | 0.013 |
| Y2O3 | 0.264 | 0.013 | Y | 0.208 | 0.010 |
| Rb2O | 0.190 | 0.0095 | Rb | 0.174 | 0.0087 |
| SnO2 | 0.141 | 0.011 | Sn | 0.111 | 0.0086 |
| HfO2 | 0.112 | 0.010 | Hf | 0.0952 | 0.0087 |
| MnO | 0.0925 | 0.0046 | Mn | 0.0716 | 0.0036 |
| S | 0.0903 | 0.0045 | S | 0.0903 | 0.0045 |
| ZnO | 0.0545 | 0.0035 | Zn | 0.0438 | 0.0028 |
| ThO2 | 0.0481 | 0.016 | Th | 0.0423 | 0.014 |
| U3O8 | 0.0430 | 0.0083 | U | 0.0365 | 0.0070 |
| CeO2 | 0.0419 | 0.0080 | Ce | 0.0341 | 0.0065 |
| Yb2O3 | 0.0374 | 0.0061 | Yb | 0.0328 | 0.0054 |
| P2O5 | 0.0236 | 0.0064 | Px | 0.0103 | 0.0028 |
| Nd2O3 | 0.0232 | 0.0043 | Nd | 0.0199 | 0.0037 |
| La2O3 | 0.0170 | 0.0034 | La | 0.0145 | 0.0029 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 55.5 %
Total Weight% Oxygen = 43.07

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:35:58
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**CJ2m.C**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 11.2.2025 | 13:19:17 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 52.57 | 0.25 | Si | 24.58 | 0.12 |
| Al2O3 | 14.81 | 0.18 | Al | 7.84 | 0.09 |
| Fe2O3 | 12.06 | 0.16 | Fe | 8.44 | 0.11 |
| K2O | 5.26 | 0.11 | K | 4.37 | 0.09 |
| Na2O | 4.22 | 0.10 | Na | 3.13 | 0.07 |
| ZrO2 | 4.14 | 0.10 | Zr | 3.06 | 0.07 |
| Cl | 2.36 | 0.08 | Cl | 2.36 | 0.08 |
| MgO | 1.69 | 0.06 | Mg | 1.02 | 0.04 |
| CaO | 1.07 | 0.05 | Ca | 0.762 | 0.04 |
| TiO2 | 0.418 | 0.021 | Ti | 0.251 | 0.013 |
| Nb2O5 | 0.343 | 0.017 | Nb | 0.240 | 0.012 |
| Y2O3 | 0.253 | 0.013 | Y | 0.199 | 0.0099 |
| Rb2O | 0.204 | 0.010 | Rb | 0.187 | 0.0093 |
| HfO2 | 0.117 | 0.012 | Hf | 0.0993 | 0.0099 |
| MnO | 0.0911 | 0.0046 | Mn | 0.0706 | 0.0035 |
| SnO2 | 0.0890 | 0.014 | Sn | 0.0701 | 0.011 |
| S | 0.0773 | 0.0039 | S | 0.0773 | 0.0039 |
| CeO2 | 0.0505 | 0.0088 | Ce | 0.0411 | 0.0072 |
| P2O5 | 0.0480 | 0.0067 | Px | 0.0209 | 0.0029 |
| ZnO | 0.0459 | 0.0039 | Zn | 0.0368 | 0.0031 |
| Yb2O3 | 0.0424 | 0.0065 | Yb | 0.0372 | 0.0057 |
| La2O3 | 0.0239 | 0.0037 | La | 0.0203 | 0.0032 |
| Gd2O3 | 0.0144 | 0.0046 | Gd | 0.0125 | 0.0040 |
| Nd2O3 | 0.0140 | 0.0046 | Nd | 0.0120 | 0.0039 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 51.2 %
Total Weight% Oxygen = 43.08

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:45:21
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**CJ2m.D**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 11.2.2025 | 11:00:24 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 52.95 | 0.25 | Si | 24.75 | 0.12 |
| Al2O3 | 14.52 | 0.18 | Al | 7.69 | 0.09 |
| Fe2O3 | 12.16 | 0.16 | Fe | 8.50 | 0.11 |
| Na2O | 5.18 | 0.11 | Na | 3.84 | 0.08 |
| K2O | 4.75 | 0.11 | K | 3.95 | 0.09 |
| ZrO2 | 3.87 | 0.10 | Zr | 2.86 | 0.07 |
| Cl | 2.10 | 0.07 | Cl | 2.10 | 0.07 |
| MgO | 1.72 | 0.06 | Mg | 1.04 | 0.04 |
| CaO | 0.932 | 0.046 | Ca | 0.666 | 0.033 |
| TiO2 | 0.367 | 0.018 | Ti | 0.220 | 0.011 |
| Nb2O5 | 0.330 | 0.016 | Nb | 0.230 | 0.011 |
| Y2O3 | 0.242 | 0.012 | Y | 0.190 | 0.0095 |
| Rb2O | 0.196 | 0.0098 | Rb | 0.179 | 0.0089 |
| HfO2 | 0.0978 | 0.010 | Hf | 0.0829 | 0.0087 |
| SnO2 | 0.0970 | 0.012 | Sn | 0.0764 | 0.0091 |
| MnO | 0.0891 | 0.0045 | Mn | 0.0690 | 0.0034 |
| ZnO | 0.0734 | 0.0037 | Zn | 0.0590 | 0.0029 |
| S | 0.0665 | 0.0033 | S | 0.0665 | 0.0033 |
| ThO2 | 0.0616 | 0.016 | Th | 0.0541 | 0.014 |
| P2O5 | 0.0457 | 0.0064 | Px | 0.0199 | 0.0028 |
| U3O8 | 0.0448 | 0.0082 | U | 0.0380 | 0.0070 |
| Yb2O3 | 0.0378 | 0.0059 | Yb | 0.0332 | 0.0052 |
| CeO2 | 0.0359 | 0.0079 | Ce | 0.0293 | 0.0064 |
| La2O3 | 0.0169 | 0.0034 | La | 0.0144 | 0.0029 |
| Nd2O3 | 0.0169 | 0.0042 | Nd | 0.0145 | 0.0036 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 54.9 %
Total Weight% Oxygen = 43.22

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:33:47
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**CJ2-TF.A**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

Method : UQ-i
Kappa List : AnySample
Shapes & ImpFc : Teflon
Calculated as : Oxides
Case Number : 0 = All known

Measured on : 11.2.2025 13:40:35
X-ray Path: : Vacuum
Film Type : PP 6mu
Collimator Mask : ø 29 mm
Viewed Diameter = 20.00 mm
Viewed Area = 314.16 mm2
Viewed Mass = 5500.00 mg
Sample Height = 4.00 mm

Reporting Level > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err.

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| Fe2O3 | 60.50 | 0.24 | Fe | 42.31 | 0.17 |
| SiO2 | 14.38 | 0.18 | Si | 6.72 | 0.08 |
| ZrO2 | 8.92 | 0.14 | Zr | 6.60 | 0.11 |
| Al2O3 | 4.86 | 0.11 | Al | 2.57 | 0.06 |
| Cl | 2.97 | 0.08 | Cl | 2.97 | 0.08 |
| MgO | 2.68 | 0.08 | Mg | 1.62 | 0.05 |
| Nb2O5 | 1.02 | 0.05 | Nb | 0.713 | 0.04 |
| TiO2 | 0.859 | 0.043 | Ti | 0.515 | 0.026 |
| Y2O3 | 0.701 | 0.035 | Y | 0.552 | 0.027 |
| SnO2 | 0.590 | 0.029 | Sn | 0.465 | 0.023 |
| K2O | 0.458 | 0.023 | K | 0.380 | 0.019 |
| S | 0.395 | 0.020 | S | 0.395 | 0.020 |
| HfO2 | 0.360 | 0.031 | Hf | 0.305 | 0.026 |
| P2O5 | 0.243 | 0.012 | Px | 0.106 | 0.0053 |
| CaO | 0.237 | 0.012 | Ca | 0.169 | 0.0084 |
| Br | 0.148 | 0.0095 | Br | 0.148 | 0.0095 |
| Yb2O3 | 0.144 | 0.020 | Yb | 0.127 | 0.018 |
| MnO | 0.130 | 0.0065 | Mn | 0.100 | 0.0050 |
| ZnO | 0.122 | 0.011 | Zn | 0.0983 | 0.0092 |
| CeO2 | 0.106 | 0.011 | Ce | 0.0860 | 0.0088 |
| U3O8 | 0.0890 | 0.027 | U | 0.0754 | 0.023 |
| Nd2O3 | 0.0392 | 0.0058 | Nd | 0.0336 | 0.0050 |
| La2O3 | 0.0296 | 0.0043 | La | 0.0253 | 0.0037 |
| V2O5 | 0.0248 | 0.0035 | V | 0.0139 | 0.0020 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 47.0 %
Total Weight% Oxygen = 32.90

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy lom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:29:18
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**CJ2-TF.B**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

Method : UQ-i
Kappa List : AnySample
Shapes & ImpFc : Teflon
Calculated as : Oxides
Case Number : 0 = All known

Measured on : 12.2.2025 10:42:40
X-ray Path: : Vacuum
Film Type : PP 6mu
Collimator Mask : ø 29 mm
Viewed Diameter = 20.00 mm
Viewed Area = 314.16 mm2
Viewed Mass = 5500.00 mg
Sample Height = 4.00 mm

Reporting Level > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err.

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| Fe2O3 | 60.07 | 0.25 | Fe | 42.01 | 0.17 |
| SiO2 | 14.22 | 0.17 | Si | 6.65 | 0.08 |
| ZrO2 | 9.26 | 0.14 | Zr | 6.86 | 0.11 |
| Al2O3 | 4.56 | 0.10 | Al | 2.42 | 0.06 |
| Cl | 3.41 | 0.09 | Cl | 3.41 | 0.09 |
| MgO | 2.66 | 0.08 | Mg | 1.61 | 0.05 |
| Nb2O5 | 1.11 | 0.05 | Nb | 0.773 | 0.04 |
| TiO2 | 0.927 | 0.046 | Ti | 0.556 | 0.028 |
| Y2O3 | 0.759 | 0.038 | Y | 0.597 | 0.030 |
| SnO2 | 0.674 | 0.034 | Sn | 0.531 | 0.026 |
| K2O | 0.470 | 0.023 | K | 0.390 | 0.019 |
| S | 0.371 | 0.018 | S | 0.371 | 0.018 |
| HfO2 | 0.341 | 0.038 | Hf | 0.289 | 0.032 |
| CaO | 0.198 | 0.0099 | Ca | 0.142 | 0.0071 |
| ZnO | 0.178 | 0.013 | Zn | 0.143 | 0.010 |
| Br | 0.168 | 0.011 | Br | 0.168 | 0.011 |
| MnO | 0.137 | 0.0068 | Mn | 0.106 | 0.0053 |
| Yb2O3 | 0.117 | 0.022 | Yb | 0.103 | 0.019 |
| U3O8 | 0.110 | 0.033 | U | 0.0936 | 0.028 |
| CeO2 | 0.0896 | 0.012 | Ce | 0.0730 | 0.0099 |
| P | 0.0800 | 0.0048 | P | 0.0800 | 0.0048 |
| La2O3 | 0.0369 | 0.0045 | La | 0.0315 | 0.0039 |
| Nd2O3 | 0.0239 | 0.0065 | Nd | 0.0205 | 0.0056 |
| V2O5 | 0.0205 | 0.0042 | V | 0.0115 | 0.0024 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 42.4 %
Total Weight% Oxygen = 32.57

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:14:44
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**CJ2-TF.C**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 12.2.2025 | 12:04:50 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| Fe2O3 | 59.15 | 0.25 | Fe | 41.37 | 0.17 |
| SiO2 | 15.29 | 0.18 | Si | 7.15 | 0.08 |
| ZrO2 | 8.80 | 0.14 | Zr | 6.52 | 0.10 |
| Al2O3 | 4.96 | 0.11 | Al | 2.63 | 0.06 |
| Cl | 3.14 | 0.09 | Cl | 3.14 | 0.09 |
| MgO | 2.81 | 0.08 | Mg | 1.70 | 0.05 |
| Nb2O5 | 1.05 | 0.05 | Nb | 0.732 | 0.04 |
| TiO2 | 0.907 | 0.045 | Ti | 0.543 | 0.027 |
| Y2O3 | 0.707 | 0.035 | Y | 0.556 | 0.028 |
| SnO2 | 0.642 | 0.032 | Sn | 0.506 | 0.025 |
| K2O | 0.461 | 0.023 | K | 0.382 | 0.019 |
| S | 0.458 | 0.023 | S | 0.458 | 0.023 |
| HfO2 | 0.324 | 0.034 | Hf | 0.275 | 0.029 |
| CaO | 0.243 | 0.012 | Ca | 0.174 | 0.0087 |
| P2O5 | 0.194 | 0.0096 | Px | 0.0845 | 0.0042 |
| ZnO | 0.175 | 0.012 | Zn | 0.140 | 0.0094 |
| Yb2O3 | 0.150 | 0.020 | Yb | 0.131 | 0.018 |
| Br | 0.146 | 0.010 | Br | 0.146 | 0.010 |
| MnO | 0.139 | 0.0069 | Mn | 0.108 | 0.0054 |
| U3O8 | 0.115 | 0.028 | U | 0.0972 | 0.024 |
| CeO2 | 0.0615 | 0.011 | Ce | 0.0501 | 0.0093 |
| CuO | 0.0385 | 0.011 | Cu | 0.0308 | 0.0090 |
| La2O3 | 0.0289 | 0.0046 | La | 0.0247 | 0.0039 |
| V2O5 | 0.0188 | 0.0042 | V | 0.0106 | 0.0023 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 44.8 %
Total Weight% Oxygen = 33.06

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy lom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:40:39
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**CJ2-TF.D**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

Method : UQ-i
Kappa List : AnySample
Shapes & ImpFc : Teflon
Calculated as : Oxides
Case Number : 0 = All known

Measured on : 11.2.2025 11:54:19
X-ray Path: : Vacuum
Film Type : PP 6mu
Collimator Mask : ø 29 mm
Viewed Diameter = 20.00 mm
Viewed Area = 314.16 mm2
Viewed Mass = 5500.00 mg
Sample Height = 4.00 mm

Reporting Level > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err.

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| Fe2O3 | 60.45 | 0.24 | Fe | 42.28 | 0.17 |
| SiO2 | 15.08 | 0.18 | Si | 7.05 | 0.08 |
| ZrO2 | 8.73 | 0.14 | Zr | 6.46 | 0.10 |
| Al2O3 | 4.78 | 0.11 | Al | 2.53 | 0.06 |
| Cl | 2.76 | 0.08 | Cl | 2.76 | 0.08 |
| MgO | 2.53 | 0.08 | Mg | 1.53 | 0.05 |
| Nb2O5 | 1.02 | 0.05 | Nb | 0.716 | 0.04 |
| TiO2 | 0.868 | 0.043 | Ti | 0.520 | 0.026 |
| Y2O3 | 0.690 | 0.034 | Y | 0.543 | 0.027 |
| SnO2 | 0.637 | 0.032 | Sn | 0.502 | 0.025 |
| S | 0.440 | 0.022 | S | 0.440 | 0.022 |
| K2O | 0.429 | 0.021 | K | 0.356 | 0.018 |
| HfO2 | 0.330 | 0.031 | Hf | 0.280 | 0.026 |
| CaO | 0.192 | 0.0096 | Ca | 0.137 | 0.0068 |
| Br | 0.145 | 0.0089 | Br | 0.145 | 0.0089 |
| ThO2 | 0.144 | 0.042 | Th | 0.127 | 0.036 |
| ZnO | 0.143 | 0.011 | Zn | 0.115 | 0.0085 |
| P2O5 | 0.133 | 0.0070 | Px | 0.0582 | 0.0031 |
| MnO | 0.121 | 0.0060 | Mn | 0.0934 | 0.0047 |
| Yb2O3 | 0.116 | 0.018 | Yb | 0.102 | 0.016 |
| U3O8 | 0.108 | 0.025 | U | 0.0916 | 0.021 |
| CeO2 | 0.0786 | 0.010 | Ce | 0.0640 | 0.0085 |
| Nd2O3 | 0.0264 | 0.0056 | Nd | 0.0227 | 0.0048 |
| V2O5 | 0.0213 | 0.0037 | V | 0.0119 | 0.0021 |
| La2O3 | 0.0196 | 0.0040 | La | 0.0167 | 0.0034 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 49.2 %
Total Weight% Oxygen = 33.05

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:41:43
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**CL**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : 4.10.2022 15:02:22 | | |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : Vacuum | | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : None | | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : ø 29 mm | | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 415.48 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7273.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 73.69 | 0.22 | Si | 34.45 | 0.10 |
| Al2O3 | 12.55 | 0.17 | Al | 6.64 | 0.09 |
| K2O | 10.14 | 0.15 | K | 8.42 | 0.13 |
| Na2O | 2.10 | 0.07 | Na | 1.56 | 0.05 |
| BaO | 0.699 | 0.035 | Ba | 0.626 | 0.031 |
| CaO | 0.143 | 0.0071 | Ca | 0.102 | 0.0051 |
| Fe2O3 | 0.102 | 0.0051 | Fe | 0.0714 | 0.0036 |
| MgO | 0.0570 | 0.0028 | Mg | 0.0343 | 0.0017 |
| SrO | 0.0461 | 0.0023 | Sr | 0.0389 | 0.0019 |
| P | 0.0282 | 0.0014 | P | 0.0282 | 0.0014 |
| Rb2O | 0.0207 | 0.0010 | Rb | 0.0189 | 0.0009 |
| PbO | 0.0127 | 0.0018 | Pb | 0.0118 | 0.0016 |
| TiO2 | 0.0103 | 0.0008 | Ti | 0.0061 | 0.0005 |
| MnO | 0.0037 | 0.0006 | Mn | 0.0029 | 0.0004 |

Rest = 0.40 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 98.4 %
Total Weight% Oxygen = 47.59

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:44:31
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Cn1**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 4.10.2022 | 15:33:26 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 415.48 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7273.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 76.64 | 0.21 | Si | 35.83 | 0.10 |
| Al2O3 | 15.42 | 0.18 | Al | 8.16 | 0.10 |
| Na2O | 3.39 | 0.09 | Na | 2.51 | 0.07 |
| K2O | 2.37 | 0.08 | K | 1.97 | 0.06 |
| Fe2O3 | 0.782 | 0.039 | Fe | 0.547 | 0.027 |
| CaO | 0.198 | 0.0099 | Ca | 0.142 | 0.0071 |
| MnO | 0.153 | 0.0076 | Mn | 0.119 | 0.0059 |
| P | 0.142 | 0.0071 | P | 0.142 | 0.0071 |
| MgO | 0.0578 | 0.0029 | Mg | 0.0348 | 0.0017 |
| Rb2O | 0.0567 | 0.0028 | Rb | 0.0518 | 0.0026 |
| PbO | 0.0101 | 0.0018 | Pb | 0.0094 | 0.0017 |
| TiO2 | 0.0092 | 0.0007 | Ti | 0.0055 | 0.0004 |
| SnO2 | 0.0086 | 0.0021 | Sn | 0.0068 | 0.0017 |
| ZnO | 0.0085 | 0.0004 | Zn | 0.0068 | 0.0004 |
| ZrO2 | 0.0062 | 0.0009 | Zr | 0.0046 | 0.0007 |
| SrO | 0.0050 | 0.0006 | Sr | 0.0043 | 0.0005 |
| La2O3 | 0.0042 | 0.0009 | La | 0.0036 | 0.0008 |
| Nb2O5 | 0.0039 | 0.0009 | Nb | 0.0027 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0036 | 0.0004 | Ga | 0.0027 | 0.0003 |

Rest = 0.73 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 94.1 %
Total Weight% Oxygen = 49.72

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:45:34
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Cn2**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 4.10.2022 | 15:44:19 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 415.48 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7273.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 69.51 | 0.23 | Si | 32.50 | 0.11 |
| Al2O3 | 18.04 | 0.19 | Al | 9.55 | 0.10 |
| Na2O | 7.94 | 0.14 | Na | 5.89 | 0.10 |
| K2O | 2.10 | 0.07 | K | 1.74 | 0.06 |
| Fe2O3 | 0.470 | 0.023 | Fe | 0.329 | 0.016 |
| CaO | 0.279 | 0.014 | Ca | 0.200 | 0.0100 |
| MgO | 0.0934 | 0.0047 | Mg | 0.0563 | 0.0028 |
| Rb2O | 0.0923 | 0.0046 | Rb | 0.0844 | 0.0042 |
| P | 0.0543 | 0.0027 | P | 0.0543 | 0.0027 |
| TiO2 | 0.0167 | 0.0008 | Ti | 0.0100 | 0.0005 |
| S | 0.0123 | 0.0007 | S | 0.0123 | 0.0007 |
| Nb2O5 | 0.0118 | 0.0009 | Nb | 0.0082 | 0.0006 |
| SnO2 | 0.0104 | 0.0020 | Sn | 0.0082 | 0.0016 |
| SrO | 0.0090 | 0.0006 | Sr | 0.0076 | 0.0005 |
| PbO | 0.0084 | 0.0017 | Pb | 0.0078 | 0.0016 |
| ZrO2 | 0.0064 | 0.0009 | Zr | 0.0047 | 0.0006 |
| MnO | 0.0050 | 0.0005 | Mn | 0.0039 | 0.0004 |
| Ga2O3 | 0.0034 | 0.0004 | Ga | 0.0025 | 0.0003 |
| Ta2O5 | 0.0031 | 0.0010 | Ta | 0.0026 | 0.0009 |
| ZnO | 0.0018 | 0.0004 | Zn | 0.0014 | 0.0004 |
| NiO | 0.0014 | 0.0004 | Ni | 0.0011 | 0.0003 |

Rest = 1.33 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 93.8 %
Total Weight% Oxygen = 48.20

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:56:50
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Co - 1**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.6.2023 | 12:38:43 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 72.54 | 0.22 | Si | 33.91 | 0.10 |
| Al2O3 | 15.40 | 0.18 | Al | 8.15 | 0.10 |
| Na2O | 6.09 | 0.12 | Na | 4.52 | 0.09 |
| K2O | 4.38 | 0.10 | K | 3.64 | 0.08 |
| Fe2O3 | 0.420 | 0.021 | Fe | 0.294 | 0.015 |
| CaO | 0.399 | 0.020 | Ca | 0.285 | 0.014 |
| P2O5 | 0.316 | 0.016 | Px | 0.138 | 0.0069 |
| MnO | 0.239 | 0.012 | Mn | 0.185 | 0.0092 |
| MgO | 0.170 | 0.0085 | Mg | 0.102 | 0.0051 |
| Rb2O | 0.0241 | 0.0012 | Rb | 0.0221 | 0.0011 |
| TiO2 | 0.0100 | 0.0006 | Ti | 0.0060 | 0.0003 |
| PbO | 0.0087 | 0.0010 | Pb | 0.0081 | 0.0009 |
| SrO | 0.0033 | 0.0005 | Sr | 0.0028 | 0.0004 |
| ZnO | 0.0023 | 0.0004 | Zn | 0.0018 | 0.0003 |
| Ga2O3 | 0.0011 | 0.0004 | Ga | 0.00084 | 0.0003 |
| NiO | 0.0010 | 0.0004 | Ni | 0.00080 | 0.0003 |

D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 92.0 %
Total Weight% Oxygen = 48.74

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:58:50
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Co - 2**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.6.2023 | 12:50:51 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 471.44 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8253.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 71.87 | 0.22 | Si | 33.60 | 0.11 |
| Al2O3 | 15.52 | 0.18 | Al | 8.21 | 0.10 |
| Na2O | 5.96 | 0.12 | Na | 4.42 | 0.09 |
| K2O | 3.84 | 0.10 | K | 3.19 | 0.08 |
| Fe2O3 | 1.10 | 0.05 | Fe | 0.768 | 0.04 |
| CaO | 0.372 | 0.019 | Ca | 0.266 | 0.013 |
| P2O5 | 0.325 | 0.016 | Px | 0.142 | 0.0071 |
| MgO | 0.220 | 0.011 | Mg | 0.133 | 0.0066 |
| MnO | 0.0790 | 0.0039 | Mn | 0.0612 | 0.0031 |
| Rb2O | 0.0231 | 0.0012 | Rb | 0.0211 | 0.0011 |
| TiO2 | 0.0202 | 0.0010 | Ti | 0.0121 | 0.0006 |
| ZnO | 0.0114 | 0.0006 | Zn | 0.0092 | 0.0005 |
| PbO | 0.0068 | 0.0010 | Pb | 0.0064 | 0.0009 |
| ZrO2 | 0.0046 | 0.0006 | Zr | 0.0034 | 0.0005 |
| S | 0.0026 | 0.0005 | S | 0.0026 | 0.0005 |
| SrO | 0.0020 | 0.0005 | Sr | 0.0017 | 0.0004 |
| Ga2O3 | 0.0019 | 0.0004 | Ga | 0.0014 | 0.0003 |

Rest = 0.65 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 96.6 %
Total Weight% Oxygen = 48.50

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 14:00:41
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Di2 - 1**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.6.2023 13:16:38 | |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 471.44 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8253.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 55.52 | 0.25 | Si | 25.96 | 0.12 |
| Al2O3 | 22.40 | 0.21 | Al | 11.85 | 0.11 |
| Na2O | 11.48 | 0.16 | Na | 8.52 | 0.12 |
| K2O | 5.83 | 0.12 | K | 4.84 | 0.10 |
| Fe2O3 | 1.08 | 0.05 | Fe | 0.754 | 0.04 |
| CaO | 1.06 | 0.05 | Ca | 0.761 | 0.04 |
| ZrO2 | 0.308 | 0.015 | Zr | 0.228 | 0.011 |
| MgO | 0.241 | 0.012 | Mg | 0.145 | 0.0073 |
| TiO2 | 0.225 | 0.011 | Ti | 0.135 | 0.0067 |
| Cl | 0.127 | 0.0063 | Cl | 0.127 | 0.0063 |
| MnO | 0.126 | 0.0063 | Mn | 0.0976 | 0.0049 |
| SrO | 0.0779 | 0.0039 | Sr | 0.0659 | 0.0033 |
| P2O5 | 0.0738 | 0.0037 | Px | 0.0322 | 0.0016 |
| BaO | 0.0500 | 0.0053 | Ba | 0.0448 | 0.0047 |
| CeO2 | 0.0240 | 0.0024 | Ce | 0.0195 | 0.0019 |
| La2O3 | 0.0215 | 0.0012 | La | 0.0183 | 0.0010 |
| Nb2O5 | 0.0211 | 0.0011 | Nb | 0.0147 | 0.0007 |
| Rb2O | 0.0190 | 0.0009 | Rb | 0.0174 | 0.0009 |
| S | 0.0114 | 0.0006 | S | 0.0114 | 0.0006 |
| ZnO | 0.0061 | 0.0004 | Zn | 0.0049 | 0.0003 |
| Ga2O3 | 0.0044 | 0.0004 | Ga | 0.0033 | 0.0003 |
| Nd2O3 | 0.0034 | 0.0011 | Nd | 0.0029 | 0.0010 |
| Y2O3 | 0.0030 | 0.0008 | Y | 0.0024 | 0.0007 |
| Au | 0.0022 | 0.0007 | Au | 0.0022 | 0.0007 |
| Co3O4 | 0.0012 | 0.0004 | Co | 0.00086 | 0.0003 |

Rest = 1.28 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 96.3 %
Total Weight% Oxygen = 45.06

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 14:02:13
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Di2 - 2**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.6.2023 | 13:27:46 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 471.44 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8253.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 56.92 | 0.25 | Si | 26.61 | 0.12 |
| Al2O3 | 21.84 | 0.21 | Al | 11.56 | 0.11 |
| Na2O | 11.53 | 0.16 | Na | 8.55 | 0.12 |
| K2O | 6.54 | 0.12 | K | 5.43 | 0.10 |
| Fe2O3 | 1.12 | 0.05 | Fe | 0.786 | 0.04 |
| CaO | 0.194 | 0.0097 | Ca | 0.139 | 0.0069 |
| MgO | 0.0911 | 0.0046 | Mg | 0.0549 | 0.0027 |
| Cl | 0.0826 | 0.0041 | Cl | 0.0826 | 0.0041 |
| ZrO2 | 0.0622 | 0.0031 | Zr | 0.0460 | 0.0023 |
| MnO | 0.0595 | 0.0030 | Mn | 0.0461 | 0.0023 |
| SO3 | 0.0368 | 0.0018 | Sx | 0.0147 | 0.0007 |
| TiO2 | 0.0347 | 0.0017 | Ti | 0.0208 | 0.0010 |
| Nb2O5 | 0.0279 | 0.0014 | Nb | 0.0195 | 0.0010 |
| Rb2O | 0.0250 | 0.0013 | Rb | 0.0229 | 0.0011 |
| P2O5 | 0.0201 | 0.0017 | Px | 0.0088 | 0.0007 |
| CeO2 | 0.0077 | 0.0020 | Ce | 0.0063 | 0.0016 |
| SrO | 0.0059 | 0.0005 | Sr | 0.0050 | 0.0004 |
| Nd2O3 | 0.0048 | 0.0011 | Nd | 0.0041 | 0.0009 |
| MoO3 | 0.0044 | 0.0014 | Mo | 0.0029 | 0.0009 |
| Ga2O3 | 0.0042 | 0.0004 | Ga | 0.0031 | 0.0003 |
| ZnO | 0.0033 | 0.0004 | Zn | 0.0027 | 0.0003 |
| La2O3 | 0.0032 | 0.0009 | La | 0.0028 | 0.0007 |

Rest = 1.38 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 96.8 %
Total Weight% Oxygen = 45.20

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 9:53:31
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Dob**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 18.11.2024 | 15:52:23 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 471.44 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8253.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 74.33 | 0.22 | Si | 34.75 | 0.10 |
| Al2O3 | 14.07 | 0.17 | Al | 7.45 | 0.09 |
| K2O | 6.42 | 0.12 | K | 5.33 | 0.10 |
| Na2O | 4.15 | 0.10 | Na | 3.08 | 0.07 |
| Fe2O3 | 0.220 | 0.011 | Fe | 0.154 | 0.0077 |
| Rb2O | 0.125 | 0.0063 | Rb | 0.115 | 0.0057 |
| CaO | 0.0644 | 0.0032 | Ca | 0.0460 | 0.0023 |
| MgO | 0.0408 | 0.0020 | Mg | 0.0246 | 0.0012 |
| P2O5 | 0.0326 | 0.0016 | Px | 0.0142 | 0.0007 |
| MnO | 0.0218 | 0.0011 | Mn | 0.0169 | 0.0008 |
| Cl | 0.0145 | 0.0030 | Cl | 0.0145 | 0.0030 |
| ZnO | 0.0068 | 0.0004 | Zn | 0.0055 | 0.0003 |
| Ga2O3 | 0.0047 | 0.0003 | Ga | 0.0035 | 0.0003 |
| Nb2O5 | 0.0036 | 0.0007 | Nb | 0.0025 | 0.0005 |
| TiO2 | 0.0025 | 0.0005 | Ti | 0.0015 | 0.0003 |
| La2O3 | 0.0025 | 0.0008 | La | 0.0021 | 0.0007 |
| NiO | 0.0011 | 0.0004 | Ni | 0.00088 | 0.0003 |

Rest = 0.49 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 100.2 %
Total Weight% Oxygen = 48.51

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:21:42
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**DORO**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 18.7.2024 | 13:59:43 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 79.39 | 0.20 | Si | 37.12 | 0.09 |
| Al2O3 | 12.10 | 0.16 | Al | 6.40 | 0.09 |
| Na2O | 6.31 | 0.12 | Na | 4.68 | 0.09 |
| K2O | 0.769 | 0.038 | K | 0.638 | 0.032 |
| Fe2O3 | 0.324 | 0.016 | Fe | 0.226 | 0.011 |
| CaO | 0.293 | 0.015 | Ca | 0.209 | 0.010 |
| MnO | 0.233 | 0.012 | Mn | 0.181 | 0.0090 |
| MgO | 0.0751 | 0.0038 | Mg | 0.0453 | 0.0023 |
| P2O5 | 0.0676 | 0.0034 | Px | 0.0295 | 0.0015 |
| Rb2O | 0.0176 | 0.0009 | Rb | 0.0161 | 0.0008 |
| Nb2O5 | 0.0126 | 0.0007 | Nb | 0.0088 | 0.0005 |
| SnO2 | 0.0062 | 0.0016 | Sn | 0.0049 | 0.0012 |
| ZrO2 | 0.0050 | 0.0007 | Zr | 0.0037 | 0.0005 |
| Ga2O3 | 0.0045 | 0.0003 | Ga | 0.0033 | 0.0003 |
| TiO2 | 0.0040 | 0.0005 | Ti | 0.0024 | 0.0003 |
| ZnO | 0.0024 | 0.0004 | Zn | 0.0020 | 0.0003 |
| NiO | 0.0018 | 0.0004 | Ni | 0.0015 | 0.0003 |
| GeO2 | 0.0012 | 0.0004 | Ge | 0.00084 | 0.0003 |

Rest = 0.38 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 101.0 %
Total Weight% Oxygen = 50.05

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 11:56:45
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**DORO mag**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 18.7.2024 | 15:08:26 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 471.44 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8253.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 68.34 | 0.23 | Si | 31.95 | 0.11 |
| Al2O3 | 13.46 | 0.17 | Al | 7.12 | 0.09 |
| Fe2O3 | 5.49 | 0.11 | Fe | 3.84 | 0.08 |
| MnO | 5.10 | 0.11 | Mn | 3.95 | 0.09 |
| Na2O | 5.00 | 0.11 | Na | 3.71 | 0.08 |
| K2O | 0.669 | 0.033 | K | 0.556 | 0.028 |
| CaO | 0.440 | 0.022 | Ca | 0.314 | 0.016 |
| MgO | 0.342 | 0.017 | Mg | 0.206 | 0.010 |
| P2O5 | 0.192 | 0.0096 | Px | 0.0837 | 0.0042 |
| Nb2O5 | 0.0700 | 0.0035 | Nb | 0.0490 | 0.0024 |
| SnO2 | 0.0677 | 0.0034 | Sn | 0.0533 | 0.0027 |
| ZrO2 | 0.0384 | 0.0019 | Zr | 0.0285 | 0.0014 |
| TiO2 | 0.0334 | 0.0017 | Ti | 0.0200 | 0.0010 |
| ZnO | 0.0310 | 0.0016 | Zn | 0.0249 | 0.0012 |
| NiO | 0.0288 | 0.0014 | Ni | 0.0226 | 0.0011 |
| WO3 | 0.0218 | 0.0015 | W | 0.0173 | 0.0012 |
| As2O3 | 0.0158 | 0.0022 | As | 0.0119 | 0.0016 |
| Y2O3 | 0.0147 | 0.0007 | Y | 0.0116 | 0.0006 |
| Sc2O3 | 0.0146 | 0.0007 | Sc | 0.0096 | 0.0005 |
| Rb2O | 0.0133 | 0.0007 | Rb | 0.0122 | 0.0006 |
| Ta2O5 | 0.0118 | 0.0012 | Ta | 0.0096 | 0.0010 |
| Gd2O3 | 0.0074 | 0.0011 | Gd | 0.0064 | 0.0010 |
| Bi2O3 | 0.0073 | 0.0007 | Bi | 0.0066 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0061 | 0.0004 | Ga | 0.0046 | 0.0003 |
| Co3O4 | 0.0057 | 0.0005 | Co | 0.0042 | 0.0004 |
| GeO2 | 0.0022 | 0.0005 | Ge | 0.0015 | 0.0003 |
| Cr2O3 | 0.0016 | 0.0006 | Cr | 0.0011 | 0.0004 |

Rest = 0.57 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 101.2 %
Total Weight% Oxygen = 47.40

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 11:58:04
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**DORO nemag**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 18.7.2024 | 15:25:36 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 79.47 | 0.20 | Si | 37.15 | 0.09 |
| Al2O3 | 12.21 | 0.16 | Al | 6.46 | 0.09 |
| Na2O | 6.61 | 0.12 | Na | 4.91 | 0.09 |
| K2O | 0.694 | 0.035 | K | 0.576 | 0.029 |
| CaO | 0.302 | 0.015 | Ca | 0.216 | 0.011 |
| Fe2O3 | 0.182 | 0.0091 | Fe | 0.127 | 0.0064 |
| MnO | 0.110 | 0.0055 | Mn | 0.0852 | 0.0043 |
| MgO | 0.0753 | 0.0038 | Mg | 0.0454 | 0.0023 |
| P2O5 | 0.0645 | 0.0032 | Px | 0.0281 | 0.0014 |
| Rb2O | 0.0148 | 0.0007 | Rb | 0.0135 | 0.0007 |
| Nb2O5 | 0.0101 | 0.0007 | Nb | 0.0071 | 0.0005 |
| SnO2 | 0.0052 | 0.0016 | Sn | 0.0041 | 0.0013 |
| ZrO2 | 0.0047 | 0.0007 | Zr | 0.0035 | 0.0005 |
| Ga2O3 | 0.0040 | 0.0003 | Ga | 0.0030 | 0.0002 |
| TiO2 | 0.0018 | 0.0005 | Ti | 0.0011 | 0.0003 |
| ZnO | 0.0016 | 0.0004 | Zn | 0.0013 | 0.0003 |
| NiO | 0.0015 | 0.0004 | Ni | 0.0012 | 0.0003 |

Rest = 0.23 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 101.2 %
Total Weight% Oxygen = 50.13

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy lom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:52:59
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**DOROm.A**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 11.2.2025 | 10:02:50 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 70.22 | 0.23 | Si | 32.83 | 0.11 |
| Al2O3 | 13.27 | 0.17 | Al | 7.02 | 0.09 |
| Na2O | 4.47 | 0.10 | Na | 3.31 | 0.08 |
| Fe2O3 | 3.82 | 0.10 | Fe | 2.67 | 0.07 |
| MnO | 3.24 | 0.09 | Mn | 2.51 | 0.07 |
| Cl | 2.58 | 0.08 | Cl | 2.58 | 0.08 |
| K2O | 0.865 | 0.043 | K | 0.718 | 0.036 |
| CaO | 0.462 | 0.023 | Ca | 0.330 | 0.016 |
| MgO | 0.445 | 0.022 | Mg | 0.269 | 0.013 |
| P2O5 | 0.234 | 0.012 | Px | 0.102 | 0.0051 |
| Nb2O5 | 0.0745 | 0.0058 | Nb | 0.0521 | 0.0041 |
| ZrO2 | 0.0492 | 0.0055 | Zr | 0.0364 | 0.0041 |
| NiO | 0.0465 | 0.0027 | Ni | 0.0365 | 0.0021 |
| ZnO | 0.0422 | 0.0031 | Zn | 0.0339 | 0.0025 |
| S | 0.0394 | 0.0020 | S | 0.0394 | 0.0020 |
| SnO2 | 0.0391 | 0.0085 | Sn | 0.0308 | 0.0067 |
| WO3 | 0.0362 | 0.0082 | W | 0.0287 | 0.0065 |
| TiO2 | 0.0342 | 0.0020 | Ti | 0.0205 | 0.0012 |
| Rb2O | 0.0285 | 0.0038 | Rb | 0.0261 | 0.0035 |
| Sc2O3 | 0.0109 | 0.0014 | Sc | 0.0071 | 0.0009 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 47.1 %
Total Weight% Oxygen = 47.35

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy lom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:50:08
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**DOROm.B**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 11.2.2025 | 10:39:53 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 70.66 | 0.23 | Si | 33.03 | 0.11 |
| Al2O3 | 13.20 | 0.17 | Al | 6.99 | 0.09 |
| Na2O | 5.45 | 0.11 | Na | 4.05 | 0.08 |
| Fe2O3 | 2.80 | 0.08 | Fe | 1.96 | 0.06 |
| Cl | 2.76 | 0.08 | Cl | 2.76 | 0.08 |
| MnO | 2.52 | 0.08 | Mn | 1.95 | 0.06 |
| K2O | 0.821 | 0.041 | K | 0.681 | 0.034 |
| MgO | 0.567 | 0.028 | Mg | 0.342 | 0.017 |
| CaO | 0.541 | 0.027 | Ca | 0.387 | 0.019 |
| P2O5 | 0.280 | 0.014 | Px | 0.122 | 0.0061 |
| SO3 | 0.112 | 0.0056 | Sx | 0.0450 | 0.0022 |
| Nb2O5 | 0.0537 | 0.0061 | Nb | 0.0376 | 0.0043 |
| WO3 | 0.0461 | 0.0078 | W | 0.0365 | 0.0062 |
| NiO | 0.0424 | 0.0027 | Ni | 0.0333 | 0.0021 |
| ZrO2 | 0.0405 | 0.0058 | Zr | 0.0300 | 0.0043 |
| SnO2 | 0.0266 | 0.0085 | Sn | 0.0209 | 0.0067 |
| ZnO | 0.0265 | 0.0030 | Zn | 0.0213 | 0.0024 |
| TiO2 | 0.0237 | 0.0019 | Ti | 0.0142 | 0.0011 |
| Rb2O | 0.0229 | 0.0039 | Rb | 0.0209 | 0.0036 |
| Sc2O3 | 0.0051 | 0.0014 | Sc | 0.0033 | 0.0009 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 45.9 %
Total Weight% Oxygen = 47.47

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 10:35:53
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**DOROm.C**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.2.2025 | 11:44:04 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 68.91 | 0.23 | Si | 32.21 | 0.11 |
| Al2O3 | 13.44 | 0.17 | Al | 7.11 | 0.09 |
| Na2O | 5.25 | 0.11 | Na | 3.89 | 0.08 |
| Fe2O3 | 3.84 | 0.10 | Fe | 2.68 | 0.07 |
| MnO | 3.65 | 0.09 | Mn | 2.82 | 0.07 |
| Cl | 2.31 | 0.08 | Cl | 2.31 | 0.08 |
| K2O | 0.971 | 0.048 | K | 0.806 | 0.040 |
| CaO | 0.496 | 0.025 | Ca | 0.355 | 0.018 |
| MgO | 0.460 | 0.023 | Mg | 0.277 | 0.014 |
| P2O5 | 0.308 | 0.015 | Px | 0.135 | 0.0067 |
| Nb2O5 | 0.0612 | 0.0051 | Nb | 0.0428 | 0.0036 |
| ZrO2 | 0.0493 | 0.0048 | Zr | 0.0365 | 0.0036 |
| S | 0.0487 | 0.0024 | S | 0.0487 | 0.0024 |
| NiO | 0.0438 | 0.0024 | Ni | 0.0344 | 0.0019 |
| Rb2O | 0.0347 | 0.0033 | Rb | 0.0317 | 0.0030 |
| SnO2 | 0.0334 | 0.0079 | Sn | 0.0263 | 0.0062 |
| WO3 | 0.0330 | 0.0073 | W | 0.0262 | 0.0058 |
| TiO2 | 0.0330 | 0.0018 | Ti | 0.0198 | 0.0011 |
| ZnO | 0.0324 | 0.0028 | Zn | 0.0261 | 0.0022 |
| Sc2O3 | 0.0121 | 0.0013 | Sc | 0.0079 | 0.0009 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 51.6 %
Total Weight% Oxygen = 47.09

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 10:38:41
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**DOROm.D**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.2.2025 | 11:23:41 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 70.51 | 0.23 | Si | 32.96 | 0.11 |
| Al2O3 | 12.42 | 0.16 | Al | 6.57 | 0.09 |
| Na2O | 5.50 | 0.11 | Na | 4.08 | 0.08 |
| Fe2O3 | 3.10 | 0.09 | Fe | 2.17 | 0.06 |
| MnO | 3.07 | 0.09 | Mn | 2.38 | 0.07 |
| Cl | 2.59 | 0.08 | Cl | 2.59 | 0.08 |
| K2O | 0.934 | 0.046 | K | 0.775 | 0.039 |
| CaO | 0.565 | 0.028 | Ca | 0.404 | 0.020 |
| MgO | 0.523 | 0.026 | Mg | 0.315 | 0.016 |
| P2O5 | 0.350 | 0.017 | Px | 0.153 | 0.0076 |
| SO3 | 0.106 | 0.0053 | Sx | 0.0424 | 0.0021 |
| Nb2O5 | 0.0608 | 0.0056 | Nb | 0.0425 | 0.0039 |
| SnO2 | 0.0462 | 0.0079 | Sn | 0.0364 | 0.0062 |
| NiO | 0.0413 | 0.0027 | Ni | 0.0324 | 0.0021 |
| ZrO2 | 0.0402 | 0.0053 | Zr | 0.0298 | 0.0039 |
| WO3 | 0.0365 | 0.0079 | W | 0.0289 | 0.0063 |
| ZnO | 0.0353 | 0.0030 | Zn | 0.0284 | 0.0024 |
| Rb2O | 0.0307 | 0.0037 | Rb | 0.0281 | 0.0034 |
| TiO2 | 0.0248 | 0.0018 | Ti | 0.0149 | 0.0011 |
| Sc2O3 | 0.0112 | 0.0014 | Sc | 0.0073 | 0.0009 |
| La2O3 | 0.0104 | 0.0033 | La | 0.0089 | 0.0028 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 46.3 %
Total Weight% Oxygen = 47.30

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:54:56
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**DORO-TF A**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 27.1.2025 | 10:25:32 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 34.13 | 0.24 | Si | 15.95 | 0.11 |
| MnO | 22.82 | 0.21 | Mn | 17.67 | 0.16 |
| Al2O3 | 17.97 | 0.19 | Al | 9.51 | 0.10 |
| Fe2O3 | 16.44 | 0.19 | Fe | 11.50 | 0.13 |
| Cl | 3.30 | 0.09 | Cl | 3.30 | 0.09 |
| P2O5 | 1.23 | 0.06 | Px | 0.536 | 0.02 |
| CaO | 1.00 | 0.05 | Ca | 0.717 | 0.04 |
| Na2O | 0.719 | 0.12 | Na | 0.533 | 0.09 |
| SnO2 | 0.665 | 0.033 | Sn | 0.524 | 0.026 |
| MgO | 0.657 | 0.033 | Mg | 0.396 | 0.020 |
| ZrO2 | 0.186 | 0.014 | Zr | 0.138 | 0.010 |
| Nb2O5 | 0.159 | 0.015 | Nb | 0.111 | 0.010 |
| SO3 | 0.140 | 0.0070 | Sx | 0.0560 | 0.0028 |
| ZnO | 0.0914 | 0.010 | Zn | 0.0735 | 0.0083 |
| TiO2 | 0.0892 | 0.0045 | Ti | 0.0535 | 0.0027 |
| K2O | 0.0875 | 0.0044 | K | 0.0727 | 0.0036 |
| NiO | 0.0862 | 0.0079 | Ni | 0.0677 | 0.0062 |
| Y2O3 | 0.0852 | 0.013 | Y | 0.0671 | 0.0100 |
| Br | 0.0777 | 0.0086 | Br | 0.0777 | 0.0086 |
| Sc2O3 | 0.0614 | 0.0031 | Sc | 0.0400 | 0.0020 |
| La2O3 | 0.0124 | 0.0041 | La | 0.0106 | 0.0035 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 38.9 %
Total Weight% Oxygen = 38.59

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy lom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 12:02:30
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**DORO-TF B**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 27.1.2025 | 8:28:09 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 33.67 | 0.24 | Si | 15.74 | 0.11 |
| MnO | 22.53 | 0.21 | Mn | 17.45 | 0.16 |
| Al2O3 | 17.61 | 0.19 | Al | 9.32 | 0.10 |
| Fe2O3 | 16.54 | 0.19 | Fe | 11.57 | 0.13 |
| Cl | 3.86 | 0.10 | Cl | 3.86 | 0.10 |
| P2O5 | 1.39 | 0.06 | Px | 0.605 | 0.03 |
| CaO | 1.08 | 0.05 | Ca | 0.774 | 0.04 |
| Na2O | 0.911 | 0.13 | Na | 0.676 | 0.10 |
| SnO2 | 0.720 | 0.036 | Sn | 0.567 | 0.028 |
| MgO | 0.682 | 0.034 | Mg | 0.411 | 0.020 |
| ZrO2 | 0.180 | 0.018 | Zr | 0.133 | 0.013 |
| Nb2O5 | 0.148 | 0.019 | Nb | 0.104 | 0.013 |
| ZnO | 0.124 | 0.011 | Zn | 0.0996 | 0.0086 |
| TiO2 | 0.0965 | 0.0048 | Ti | 0.0579 | 0.0029 |
| Y2O3 | 0.0882 | 0.016 | Y | 0.0694 | 0.013 |
| Br | 0.0817 | 0.011 | Br | 0.0817 | 0.011 |
| K2O | 0.0752 | 0.0038 | K | 0.0624 | 0.0031 |
| NiO | 0.0659 | 0.0092 | Ni | 0.0518 | 0.0072 |
| Sc2O3 | 0.0655 | 0.0033 | Sc | 0.0427 | 0.0021 |
| S | 0.0578 | 0.0029 | S | 0.0578 | 0.0029 |
| La2O3 | 0.0191 | 0.0047 | La | 0.0163 | 0.0040 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 34.6 %
Total Weight% Oxygen = 38.25

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:57:32
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**DORO-TF C**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 27.1.2025 | 9:36:01 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 34.05 | 0.24 | Si | 15.92 | 0.11 |
| MnO | 22.67 | 0.21 | Mn | 17.56 | 0.16 |
| Al2O3 | 17.54 | 0.19 | Al | 9.28 | 0.10 |
| Fe2O3 | 16.35 | 0.18 | Fe | 11.43 | 0.13 |
| Cl | 3.39 | 0.09 | Cl | 3.39 | 0.09 |
| P2O5 | 1.45 | 0.06 | Px | 0.632 | 0.03 |
| CaO | 1.10 | 0.05 | Ca | 0.787 | 0.04 |
| Na2O | 1.05 | 0.12 | Na | 0.780 | 0.09 |
| SnO2 | 0.679 | 0.034 | Sn | 0.534 | 0.027 |
| MgO | 0.673 | 0.034 | Mg | 0.406 | 0.020 |
| ZrO2 | 0.222 | 0.015 | Zr | 0.164 | 0.011 |
| Nb2O5 | 0.189 | 0.016 | Nb | 0.132 | 0.011 |
| ZnO | 0.119 | 0.0098 | Zn | 0.0958 | 0.0079 |
| TiO2 | 0.0966 | 0.0048 | Ti | 0.0579 | 0.0029 |
| K2O | 0.0805 | 0.0040 | K | 0.0668 | 0.0033 |
| Y2O3 | 0.0792 | 0.014 | Y | 0.0624 | 0.011 |
| Br | 0.0791 | 0.0091 | Br | 0.0791 | 0.0091 |
| S | 0.0609 | 0.0030 | S | 0.0609 | 0.0030 |
| Sc2O3 | 0.0608 | 0.0030 | Sc | 0.0396 | 0.0020 |
| NiO | 0.0387 | 0.0084 | Ni | 0.0304 | 0.0066 |
| La2O3 | 0.0155 | 0.0042 | La | 0.0132 | 0.0036 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 37.8 %
Total Weight% Oxygen = 38.47

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 11:59:08
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**DORO-TF D**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : 27.1.2025 | 9:16:04 | |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : Vacuum | | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : PP 6mu | | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : ø 29 mm | | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 33.35 | 0.24 | Si | 15.59 | 0.11 |
| MnO | 23.01 | 0.21 | Mn | 17.82 | 0.16 |
| Al2O3 | 17.90 | 0.19 | Al | 9.47 | 0.10 |
| Fe2O3 | 16.32 | 0.18 | Fe | 11.41 | 0.13 |
| Cl | 3.71 | 0.09 | Cl | 3.71 | 0.09 |
| P2O5 | 1.24 | 0.06 | Px | 0.542 | 0.02 |
| Na2O | 1.15 | 0.13 | Na | 0.856 | 0.10 |
| CaO | 0.945 | 0.047 | Ca | 0.676 | 0.034 |
| MgO | 0.659 | 0.033 | Mg | 0.398 | 0.020 |
| SnO2 | 0.646 | 0.032 | Sn | 0.509 | 0.025 |
| ZrO2 | 0.201 | 0.017 | Zr | 0.149 | 0.012 |
| Nb2O5 | 0.163 | 0.017 | Nb | 0.114 | 0.012 |
| ZnO | 0.111 | 0.010 | Zn | 0.0895 | 0.0082 |
| TiO2 | 0.0917 | 0.0046 | Ti | 0.0550 | 0.0027 |
| K2O | 0.0853 | 0.0043 | K | 0.0708 | 0.0035 |
| NiO | 0.0809 | 0.0088 | Ni | 0.0636 | 0.0069 |
| Y2O3 | 0.0763 | 0.015 | Y | 0.0601 | 0.012 |
| Br | 0.0757 | 0.010 | Br | 0.0757 | 0.010 |
| Sc2O3 | 0.0671 | 0.0033 | Sc | 0.0437 | 0.0022 |
| S | 0.0601 | 0.0030 | S | 0.0601 | 0.0030 |
| Yb2O3 | 0.0573 | 0.018 | Yb | 0.0504 | 0.015 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 35.9 %
Total Weight% Oxygen = 38.18

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

13.3.2025 8:50:56
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**FK**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 12.3.2025 | 13:53:19 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 71.45 | 0.23 | Si | 33.40 | 0.11 |
| Al2O3 | 15.84 | 0.18 | Al | 8.38 | 0.10 |
| K2O | 6.57 | 0.12 | K | 5.45 | 0.10 |
| Na2O | 4.77 | 0.11 | Na | 3.54 | 0.08 |
| P2O5 | 0.392 | 0.020 | Px | 0.171 | 0.0085 |
| CaO | 0.266 | 0.013 | Ca | 0.190 | 0.0095 |
| Rb2O | 0.165 | 0.0082 | Rb | 0.151 | 0.0075 |
| Fe2O3 | 0.115 | 0.0057 | Fe | 0.0803 | 0.0040 |
| MgO | 0.0558 | 0.0028 | Mg | 0.0337 | 0.0017 |
| TiO2 | 0.0199 | 0.0010 | Ti | 0.0120 | 0.0006 |
| MnO | 0.0115 | 0.0006 | Mn | 0.0089 | 0.0004 |
| Nb2O5 | 0.0060 | 0.0007 | Nb | 0.0042 | 0.0005 |
| Ga2O3 | 0.0057 | 0.0004 | Ga | 0.0043 | 0.0003 |
| ZnO | 0.0014 | 0.0004 | Zn | 0.0011 | 0.0003 |

Rest = 0.34 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 90.3 %
Total Weight% Oxygen = 48.23

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 14:03:44
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Jo1**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.6.2023 | 13:39:52 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 44.47 | 0.25 | Si | 20.79 | 0.12 |
| Al2O3 | 15.45 | 0.18 | Al | 8.18 | 0.10 |
| Fe2O3 | 11.85 | 0.16 | Fe | 8.28 | 0.11 |
| CaO | 7.63 | 0.13 | Ca | 5.45 | 0.09 |
| MgO | 6.11 | 0.12 | Mg | 3.68 | 0.07 |
| Na2O | 5.07 | 0.11 | Na | 3.76 | 0.08 |
| K2O | 3.24 | 0.09 | K | 2.69 | 0.07 |
| TiO2 | 2.89 | 0.08 | Ti | 1.73 | 0.05 |
| P2O5 | 0.636 | 0.032 | Px | 0.277 | 0.014 |
| MnO | 0.228 | 0.011 | Mn | 0.176 | 0.0088 |
| SrO | 0.199 | 0.0099 | Sr | 0.168 | 0.0084 |
| BaO | 0.142 | 0.0071 | Ba | 0.127 | 0.0064 |
| S | 0.0518 | 0.0026 | S | 0.0518 | 0.0026 |
| ZrO2 | 0.0497 | 0.0025 | Zr | 0.0368 | 0.0018 |
| V2O5 | 0.0488 | 0.0024 | V | 0.0273 | 0.0014 |
| Cl | 0.0392 | 0.0023 | Cl | 0.0392 | 0.0023 |
| Co3O4 | 0.0201 | 0.0010 | Co | 0.0148 | 0.0007 |
| Nb2O5 | 0.0197 | 0.0010 | Nb | 0.0137 | 0.0007 |
| ZnO | 0.0166 | 0.0008 | Zn | 0.0133 | 0.0007 |
| CeO2 | 0.0139 | 0.0029 | Ce | 0.0113 | 0.0023 |
| NiO | 0.0100 | 0.0007 | Ni | 0.0079 | 0.0005 |
| Rb2O | 0.0096 | 0.0005 | Rb | 0.0088 | 0.0005 |
| Cr2O3 | 0.0074 | 0.0008 | Cr | 0.0051 | 0.0005 |
| Nd2O3 | 0.0054 | 0.0015 | Nd | 0.0047 | 0.0013 |
| CuO | 0.0044 | 0.0006 | Cu | 0.0035 | 0.0005 |
| Yb2O3 | 0.0037 | 0.0013 | Yb | 0.0033 | 0.0011 |
| Y2O3 | 0.0036 | 0.0008 | Y | 0.0029 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0021 | 0.0005 | Ga | 0.0016 | 0.0004 |

Rest = 1.80 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 97.8 %
Total Weight% Oxygen = 42.64

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 9:56:58
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Lav1**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 9.1.2024 | 11:42:09 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 75.73 | 0.21 | Si | 35.40 | 0.10 |
| Al2O3 | 13.27 | 0.17 | Al | 7.02 | 0.09 |
| K2O | 5.39 | 0.11 | K | 4.47 | 0.09 |
| Na2O | 2.86 | 0.08 | Na | 2.12 | 0.06 |
| CaO | 1.54 | 0.06 | Ca | 1.10 | 0.04 |
| Fe2O3 | 0.306 | 0.015 | Fe | 0.214 | 0.011 |
| MgO | 0.173 | 0.0086 | Mg | 0.104 | 0.0052 |
| P2O5 | 0.113 | 0.0056 | Px | 0.0491 | 0.0025 |
| TiO2 | 0.0902 | 0.0045 | Ti | 0.0540 | 0.0027 |
| BaO | 0.0514 | 0.0049 | Ba | 0.0461 | 0.0044 |
| Rb2O | 0.0236 | 0.0012 | Rb | 0.0216 | 0.0011 |
| SrO | 0.0214 | 0.0011 | Sr | 0.0181 | 0.0009 |
| ZrO2 | 0.0062 | 0.0008 | Zr | 0.0046 | 0.0006 |
| NiO | 0.0032 | 0.0004 | Ni | 0.0025 | 0.0003 |
| WO3 | 0.0028 | 0.0009 | W | 0.0022 | 0.0007 |
| MnO | 0.0027 | 0.0004 | Mn | 0.0021 | 0.0003 |
| Ga2O3 | 0.0020 | 0.0003 | Ga | 0.0015 | 0.0002 |
| ZnO | 0.0012 | 0.0004 | Zn | 0.00097 | 0.0003 |

Rest = 0.42 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 93.5 %
Total Weight% Oxygen = 48.94

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 12:08:10
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Lav1 mag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 12.1.2024 | 14:02:29 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 65.14 | 0.24 | Si | 30.45 | 0.11 |
| Al2O3 | 14.64 | 0.18 | Al | 7.75 | 0.09 |
| K2O | 5.04 | 0.11 | K | 4.19 | 0.09 |
| Fe2O3 | 4.97 | 0.11 | Fe | 3.48 | 0.08 |
| Na2O | 2.62 | 0.08 | Na | 1.94 | 0.06 |
| CaO | 2.35 | 0.08 | Ca | 1.68 | 0.05 |
| MgO | 2.10 | 0.07 | Mg | 1.27 | 0.04 |
| TiO2 | 1.22 | 0.06 | Ti | 0.733 | 0.03 |
| F | 0.195 | 0.045 | F | 0.195 | 0.045 |
| P2O5 | 0.164 | 0.0082 | Px | 0.0716 | 0.0036 |
| NiO | 0.0711 | 0.0036 | Ni | 0.0559 | 0.0028 |
| WO3 | 0.0458 | 0.0023 | W | 0.0364 | 0.0018 |
| MnO | 0.0424 | 0.0021 | Mn | 0.0328 | 0.0016 |
| Rb2O | 0.0302 | 0.0015 | Rb | 0.0276 | 0.0014 |
| Cl | 0.0274 | 0.0031 | Cl | 0.0274 | 0.0031 |
| SrO | 0.0247 | 0.0012 | Sr | 0.0209 | 0.0010 |
| ZnO | 0.0153 | 0.0008 | Zn | 0.0123 | 0.0006 |
| U3O8 | 0.0151 | 0.0011 | U | 0.0128 | 0.0010 |
| ZrO2 | 0.0130 | 0.0012 | Zr | 0.0096 | 0.0009 |
| Nb2O5 | 0.0129 | 0.0011 | Nb | 0.0090 | 0.0008 |
| Cr2O3 | 0.0113 | 0.0007 | Cr | 0.0077 | 0.0005 |
| V2O5 | 0.0101 | 0.0009 | V | 0.0057 | 0.0005 |
| PbO | 0.0095 | 0.0018 | Pb | 0.0088 | 0.0017 |
| ThO2 | 0.0090 | 0.0021 | Th | 0.0079 | 0.0019 |
| Co3O4 | 0.0060 | 0.0005 | Co | 0.0044 | 0.0004 |
| SO3 | 0.0044 | 0.0015 | Sx | 0.0018 | 0.0006 |
| CuO | 0.0038 | 0.0005 | Cu | 0.0030 | 0.0004 |
| Sc2O3 | 0.0031 | 0.0005 | Sc | 0.0021 | 0.0003 |
| Ga2O3 | 0.0022 | 0.0004 | Ga | 0.0016 | 0.0003 |

Rest = 1.19 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 93.2 %
Total Weight% Oxygen = 46.76

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 12:07:17
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Lav1 nemag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 12.1.2024 | 12:02:47 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 76.06 | 0.21 | Si | 35.56 | 0.10 |
| Al2O3 | 12.93 | 0.17 | Al | 6.84 | 0.09 |
| K2O | 5.65 | 0.12 | K | 4.69 | 0.10 |
| Na2O | 2.78 | 0.08 | Na | 2.06 | 0.06 |
| CaO | 1.54 | 0.06 | Ca | 1.10 | 0.04 |
| Fe2O3 | 0.206 | 0.010 | Fe | 0.144 | 0.0072 |
| MgO | 0.128 | 0.0064 | Mg | 0.0775 | 0.0039 |
| P2O5 | 0.110 | 0.0055 | Px | 0.0481 | 0.0024 |
| TiO2 | 0.0586 | 0.0029 | Ti | 0.0351 | 0.0018 |
| BaO | 0.0492 | 0.0053 | Ba | 0.0440 | 0.0048 |
| Rb2O | 0.0250 | 0.0013 | Rb | 0.0229 | 0.0011 |
| SrO | 0.0228 | 0.0011 | Sr | 0.0193 | 0.0010 |
| Cl | 0.0182 | 0.0031 | Cl | 0.0182 | 0.0031 |
| ZrO2 | 0.0057 | 0.0009 | Zr | 0.0042 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0015 | 0.0003 | Ga | 0.0011 | 0.0002 |
| MnO | 0.0014 | 0.0004 | Mn | 0.0011 | 0.0003 |
| ZnO | 0.0013 | 0.0004 | Zn | 0.0011 | 0.0003 |

Rest = 0.41 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 96.3 %
Total Weight% Oxygen = 48.92

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 12:17:46
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Lav2**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 9.1.2024 | 11:59:21 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 75.59 | 0.21 | Si | 35.34 | 0.10 |
| Al2O3 | 13.19 | 0.17 | Al | 6.98 | 0.09 |
| K2O | 5.98 | 0.12 | K | 4.97 | 0.10 |
| Na2O | 2.55 | 0.08 | Na | 1.89 | 0.06 |
| CaO | 1.30 | 0.06 | Ca | 0.928 | 0.04 |
| Fe2O3 | 0.411 | 0.020 | Fe | 0.287 | 0.014 |
| MgO | 0.179 | 0.0090 | Mg | 0.108 | 0.0054 |
| P2O5 | 0.123 | 0.0061 | Px | 0.0536 | 0.0027 |
| TiO2 | 0.1000 | 0.0050 | Ti | 0.0599 | 0.0030 |
| BaO | 0.0498 | 0.0050 | Ba | 0.0446 | 0.0045 |
| Rb2O | 0.0260 | 0.0013 | Rb | 0.0238 | 0.0012 |
| SrO | 0.0225 | 0.0011 | Sr | 0.0190 | 0.0009 |
| ZrO2 | 0.0066 | 0.0008 | Zr | 0.0048 | 0.0006 |
| NiO | 0.0061 | 0.0004 | Ni | 0.0048 | 0.0003 |
| MnO | 0.0035 | 0.0004 | Mn | 0.0027 | 0.0003 |
| Ga2O3 | 0.0016 | 0.0003 | Ga | 0.0012 | 0.0002 |

Rest = 0.45 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 94.0 %
Total Weight% Oxygen = 48.83

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

6.11.2024 9:11:04
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**La2 T MAG -**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 12.1.2024 | 14:19:40 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 65.27 | 0.24 | Si | 30.51 | 0.11 |
| Al2O3 | 15.42 | 0.18 | Al | 8.16 | 0.10 |
| K2O | 5.63 | 0.12 | K | 4.68 | 0.10 |
| Fe2O3 | 4.81 | 0.11 | Fe | 3.37 | 0.07 |
| Na2O | 2.38 | 0.08 | Na | 1.76 | 0.06 |
| MgO | 1.84 | 0.07 | Mg | 1.11 | 0.04 |
| CaO | 1.73 | 0.07 | Ca | 1.24 | 0.05 |
| TiO2 | 1.07 | 0.05 | Ti | 0.641 | 0.03 |
| P2O5 | 0.128 | 0.0064 | Px | 0.0557 | 0.0028 |
| NiO | 0.0760 | 0.0038 | Ni | 0.0597 | 0.0030 |
| WO3 | 0.0600 | 0.0030 | W | 0.0476 | 0.0024 |
| BaO | 0.0466 | 0.0054 | Ba | 0.0418 | 0.0048 |
| Cl | 0.0376 | 0.0025 | Cl | 0.0376 | 0.0025 |
| Rb2O | 0.0359 | 0.0018 | Rb | 0.0328 | 0.0016 |
| MnO | 0.0316 | 0.0016 | Mn | 0.0245 | 0.0012 |
| SrO | 0.0233 | 0.0012 | Sr | 0.0197 | 0.0010 |
| ZrO2 | 0.0213 | 0.0011 | Zr | 0.0157 | 0.0008 |
| Nb2O5 | 0.0125 | 0.0008 | Nb | 0.0087 | 0.0006 |
| V2O5 | 0.0121 | 0.0009 | V | 0.0068 | 0.0005 |
| Cr2O3 | 0.0107 | 0.0007 | Cr | 0.0073 | 0.0005 |
| ZnO | 0.0102 | 0.0005 | Zn | 0.0082 | 0.0004 |
| Co3O4 | 0.0067 | 0.0005 | Co | 0.0049 | 0.0004 |
| Sc2O3 | 0.0064 | 0.0005 | Sc | 0.0042 | 0.0003 |
| SO3 | 0.0062 | 0.0012 | Sx | 0.0025 | 0.0005 |
| Y2O3 | 0.0055 | 0.0010 | Y | 0.0044 | 0.0008 |
| Ga2O3 | 0.0030 | 0.0004 | Ga | 0.0022 | 0.0003 |
| La2O3 | 0.0029 | 0.0010 | La | 0.0024 | 0.0008 |
| CuO | 0.0019 | 0.0005 | Cu | 0.0015 | 0.0004 |

Rest = 1.32 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 92.7 %
Total Weight% Oxygen = 46.83

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 12:19:04
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Lav2 nemag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 12.1.2024 12:19:59 | |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 76.43 | 0.21 | Si | 35.73 | 0.10 |
| Al2O3 | 12.71 | 0.17 | Al | 6.72 | 0.09 |
| K2O | 6.15 | 0.12 | K | 5.10 | 0.10 |
| Na2O | 2.39 | 0.08 | Na | 1.78 | 0.06 |
| CaO | 1.22 | 0.05 | Ca | 0.873 | 0.04 |
| Fe2O3 | 0.245 | 0.012 | Fe | 0.172 | 0.0086 |
| MgO | 0.119 | 0.0059 | Mg | 0.0717 | 0.0036 |
| P2O5 | 0.107 | 0.0053 | Px | 0.0466 | 0.0023 |
| TiO2 | 0.0589 | 0.0029 | Ti | 0.0353 | 0.0018 |
| BaO | 0.0488 | 0.0052 | Ba | 0.0437 | 0.0047 |
| Rb2O | 0.0247 | 0.0012 | Rb | 0.0226 | 0.0011 |
| SrO | 0.0220 | 0.0011 | Sr | 0.0186 | 0.0009 |
| Cl | 0.0126 | 0.0031 | Cl | 0.0126 | 0.0031 |
| ZrO2 | 0.0053 | 0.0008 | Zr | 0.0039 | 0.0006 |
| MnO | 0.0014 | 0.0004 | Mn | 0.0011 | 0.0003 |
| ZnO | 0.0013 | 0.0004 | Zn | 0.0011 | 0.0003 |
| Ga2O3 | 0.0013 | 0.0003 | Ga | 0.00094 | 0.0002 |

Rest = 0.45 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 92.1 %
Total Weight% Oxygen = 48.91

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 10:01:04
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Lav2T**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 9.1.2024 11:59:21 | |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 75.59 | 0.21 | Si | 35.34 | 0.10 |
| Al2O3 | 13.19 | 0.17 | Al | 6.98 | 0.09 |
| K2O | 5.98 | 0.12 | K | 4.97 | 0.10 |
| Na2O | 2.55 | 0.08 | Na | 1.89 | 0.06 |
| CaO | 1.30 | 0.06 | Ca | 0.928 | 0.04 |
| Fe2O3 | 0.411 | 0.020 | Fe | 0.287 | 0.014 |
| MgO | 0.179 | 0.0090 | Mg | 0.108 | 0.0054 |
| P2O5 | 0.123 | 0.0061 | Px | 0.0536 | 0.0027 |
| TiO2 | 0.1000 | 0.0050 | Ti | 0.0599 | 0.0030 |
| BaO | 0.0498 | 0.0050 | Ba | 0.0446 | 0.0045 |
| Rb2O | 0.0260 | 0.0013 | Rb | 0.0238 | 0.0012 |
| SrO | 0.0225 | 0.0011 | Sr | 0.0190 | 0.0009 |
| ZrO2 | 0.0066 | 0.0008 | Zr | 0.0048 | 0.0006 |
| NiO | 0.0061 | 0.0004 | Ni | 0.0048 | 0.0003 |
| MnO | 0.0035 | 0.0004 | Mn | 0.0027 | 0.0003 |
| Ga2O3 | 0.0016 | 0.0003 | Ga | 0.0012 | 0.0002 |

Rest = 0.45 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 94.0 %
Total Weight% Oxygen = 48.83

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

12.3.2025 7:56:16
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**LH**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 18.7.2024 | 13:25:19 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 67.58 | 0.23 | Si | 31.60 | 0.11 |
| Al2O3 | 17.00 | 0.19 | Al | 9.00 | 0.10 |
| K2O | 6.91 | 0.13 | K | 5.74 | 0.11 |
| F | 3.26 | 0.09 | F | 3.26 | 0.09 |
| Rb2O | 0.930 | 0.046 | Rb | 0.850 | 0.042 |
| Na2O | 0.845 | 0.042 | Na | 0.627 | 0.031 |
| Fe2O3 | 0.587 | 0.029 | Fe | 0.410 | 0.020 |
| MnO | 0.263 | 0.013 | Mn | 0.203 | 0.010 |
| Cs2O | 0.258 | 0.013 | Cs | 0.244 | 0.012 |
| SnO2 | 0.133 | 0.0066 | Sn | 0.105 | 0.0052 |
| MgO | 0.0679 | 0.0034 | Mg | 0.0410 | 0.0020 |
| P2O5 | 0.0373 | 0.0019 | Px | 0.0163 | 0.0008 |
| CaO | 0.0352 | 0.0018 | Ca | 0.0252 | 0.0013 |
| As2O3 | 0.0251 | 0.0023 | As | 0.0190 | 0.0017 |
| Nb2O5 | 0.0167 | 0.0008 | Nb | 0.0117 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0113 | 0.0006 | Ga | 0.0084 | 0.0004 |
| ZnO | 0.0086 | 0.0004 | Zn | 0.0069 | 0.0003 |
| Ta2O5 | 0.0071 | 0.0010 | Ta | 0.0058 | 0.0008 |
| WO3 | 0.0065 | 0.0011 | W | 0.0051 | 0.0009 |
| MoO3 | 0.0050 | 0.0016 | Mo | 0.0034 | 0.0011 |
| TiO2 | 0.0048 | 0.0006 | Ti | 0.0029 | 0.0004 |
| SrO | 0.0032 | 0.0006 | Sr | 0.0027 | 0.0005 |
| NiO | 0.0027 | 0.0005 | Ni | 0.0021 | 0.0004 |
| GeO2 | 0.0020 | 0.0004 | Ge | 0.0014 | 0.0003 |

Rest = 2.00 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 101.0 %
Total Weight% Oxygen = 45.82

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy lom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 12:05:17
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**LH mag**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 22.11.2023 | 14:15:52 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 433.74 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7593.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 55.64 | 0.25 | Si | 26.01 | 0.12 |
| Al2O3 | 22.60 | 0.21 | Al | 11.96 | 0.11 |
| K2O | 9.94 | 0.15 | K | 8.25 | 0.12 |
| F | 3.52 | 0.09 | F | 3.52 | 0.09 |
| Rb2O | 1.48 | 0.06 | Rb | 1.35 | 0.06 |
| Fe2O3 | 1.24 | 0.06 | Fe | 0.869 | 0.04 |
| MnO | 0.486 | 0.024 | Mn | 0.376 | 0.019 |
| Cs2O | 0.390 | 0.019 | Cs | 0.368 | 0.018 |
| Na2O | 0.288 | 0.014 | Na | 0.214 | 0.011 |
| MgO | 0.157 | 0.0079 | Mg | 0.0948 | 0.0047 |
| SnO2 | 0.0701 | 0.0035 | Sn | 0.0552 | 0.0028 |
| P2O5 | 0.0591 | 0.0030 | Px | 0.0258 | 0.0013 |
| CaO | 0.0565 | 0.0028 | Ca | 0.0404 | 0.0020 |
| Nb2O5 | 0.0305 | 0.0015 | Nb | 0.0213 | 0.0011 |
| TiO2 | 0.0212 | 0.0011 | Ti | 0.0127 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0165 | 0.0008 | Ga | 0.0123 | 0.0006 |
| ZnO | 0.0160 | 0.0008 | Zn | 0.0128 | 0.0006 |
| WO3 | 0.0153 | 0.0012 | W | 0.0121 | 0.0009 |
| Ta2O5 | 0.0144 | 0.0011 | Ta | 0.0118 | 0.0009 |
| ZrO2 | 0.0092 | 0.0009 | Zr | 0.0068 | 0.0007 |
| SrO | 0.0055 | 0.0007 | Sr | 0.0047 | 0.0006 |
| NiO | 0.0030 | 0.0005 | Ni | 0.0024 | 0.0004 |
| GeO2 | 0.0029 | 0.0005 | Ge | 0.0020 | 0.0003 |
| CuO | 0.0015 | 0.0004 | Cu | 0.0012 | 0.0003 |

Rest = 3.94 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 97.9 %
Total Weight% Oxygen = 42.82

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 12:03:16
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**LH nemag**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 18.7.2024 | 15:47:15 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 69.59 | 0.23 | Si | 32.53 | 0.11 |
| Al2O3 | 16.00 | 0.18 | Al | 8.46 | 0.10 |
| K2O | 6.73 | 0.13 | K | 5.58 | 0.10 |
| F | 2.97 | 0.08 | F | 2.97 | 0.08 |
| Rb2O | 0.931 | 0.046 | Rb | 0.852 | 0.042 |
| Na2O | 0.691 | 0.034 | Na | 0.513 | 0.026 |
| Fe2O3 | 0.471 | 0.024 | Fe | 0.330 | 0.016 |
| Cs2O | 0.272 | 0.014 | Cs | 0.257 | 0.013 |
| MnO | 0.254 | 0.013 | Mn | 0.196 | 0.0098 |
| SnO2 | 0.138 | 0.0069 | Sn | 0.109 | 0.0054 |
| MgO | 0.0672 | 0.0034 | Mg | 0.0405 | 0.0020 |
| P2O5 | 0.0329 | 0.0016 | Px | 0.0144 | 0.0007 |
| CaO | 0.0241 | 0.0012 | Ca | 0.0172 | 0.0009 |
| Nb2O5 | 0.0177 | 0.0009 | Nb | 0.0124 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0111 | 0.0006 | Ga | 0.0083 | 0.0004 |
| Ta2O5 | 0.0098 | 0.0010 | Ta | 0.0080 | 0.0008 |
| ZnO | 0.0081 | 0.0004 | Zn | 0.0065 | 0.0003 |
| WO3 | 0.0073 | 0.0010 | W | 0.0058 | 0.0008 |
| TiO2 | 0.0043 | 0.0006 | Ti | 0.0026 | 0.0003 |
| GeO2 | 0.0020 | 0.0005 | Ge | 0.0014 | 0.0003 |
| NiO | 0.0018 | 0.0005 | Ni | 0.0014 | 0.0004 |

Rest = 1.78 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 98.7 %
Total Weight% Oxygen = 46.30

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 12:42:23
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**LHm A**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 13.1.2025 | 7:48:17 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 53.43 | 0.25 | Si | 24.98 | 0.12 |
| Al2O3 | 21.13 | 0.20 | Al | 11.18 | 0.11 |
| K2O | 11.58 | 0.16 | K | 9.61 | 0.13 |
| Cl | 4.59 | 0.10 | Cl | 4.59 | 0.10 |
| Fe2O3 | 3.99 | 0.10 | Fe | 2.79 | 0.07 |
| Rb2O | 2.67 | 0.08 | Rb | 2.44 | 0.07 |
| MnO | 0.728 | 0.036 | Mn | 0.564 | 0.028 |
| Na2O | 0.517 | 0.10 | Na | 0.384 | 0.08 |
| MgO | 0.404 | 0.022 | Mg | 0.244 | 0.014 |
| Cs2O | 0.393 | 0.043 | Cs | 0.371 | 0.040 |
| CaO | 0.113 | 0.0058 | Ca | 0.0810 | 0.0041 |
| P | 0.0981 | 0.0071 | P | 0.0981 | 0.0071 |
| SnO2 | 0.0814 | 0.020 | Sn | 0.0641 | 0.016 |
| ZrO2 | 0.0723 | 0.016 | Zr | 0.0535 | 0.012 |
| Nb2O5 | 0.0626 | 0.017 | Nb | 0.0437 | 0.012 |
| TiO2 | 0.0429 | 0.0040 | Ti | 0.0257 | 0.0024 |
| S | 0.0332 | 0.0032 | S | 0.0332 | 0.0032 |
| NiO | 0.0322 | 0.0055 | Ni | 0.0253 | 0.0043 |
| ZnO | 0.0310 | 0.0065 | Zn | 0.0249 | 0.0052 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 25.7 %
Total Weight% Oxygen = 42.39

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 12:45:13
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**LHm B**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : 17.1.2025 10:26:22 | | |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : Vacuum | | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : PP 6mu | | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : ø 29 mm | | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 52.86 | 0.25 | Si | 24.71 | 0.12 |
| Al2O3 | 20.95 | 0.20 | Al | 11.09 | 0.11 |
| K2O | 11.38 | 0.16 | K | 9.44 | 0.13 |
| Cl | 4.47 | 0.10 | Cl | 4.47 | 0.10 |
| Fe2O3 | 4.02 | 0.10 | Fe | 2.81 | 0.07 |
| Rb2O | 3.21 | 0.09 | Rb | 2.94 | 0.08 |
| Na2O | 0.749 | 0.10 | Na | 0.556 | 0.07 |
| MnO | 0.736 | 0.037 | Mn | 0.570 | 0.028 |
| Cs2O | 0.588 | 0.044 | Cs | 0.554 | 0.041 |
| MgO | 0.367 | 0.021 | Mg | 0.221 | 0.012 |
| SnO2 | 0.216 | 0.020 | Sn | 0.170 | 0.016 |
| CaO | 0.133 | 0.0066 | Ca | 0.0948 | 0.0047 |
| P | 0.0802 | 0.0064 | P | 0.0802 | 0.0064 |
| S | 0.0762 | 0.0038 | S | 0.0762 | 0.0038 |
| Nb2O5 | 0.0506 | 0.015 | Nb | 0.0354 | 0.010 |
| TiO2 | 0.0399 | 0.0036 | Ti | 0.0239 | 0.0022 |
| ZnO | 0.0298 | 0.0066 | Zn | 0.0240 | 0.0053 |
| NiO | 0.0297 | 0.0054 | Ni | 0.0234 | 0.0043 |
| Ga2O3 | 0.0215 | 0.0058 | Ga | 0.0160 | 0.0043 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 31.2 %
Total Weight% Oxygen = 42.10

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 12:43:29
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**LHm C - (1)**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.1.2025 | 10:53:02 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 53.09 | 0.25 | Si | 24.82 | 0.12 |
| Al2O3 | 20.89 | 0.20 | Al | 11.06 | 0.11 |
| K2O | 11.43 | 0.16 | K | 9.49 | 0.13 |
| Cl | 4.51 | 0.10 | Cl | 4.51 | 0.10 |
| Fe2O3 | 3.84 | 0.10 | Fe | 2.68 | 0.07 |
| Rb2O | 3.11 | 0.09 | Rb | 2.85 | 0.08 |
| Na2O | 0.854 | 0.10 | Na | 0.633 | 0.07 |
| MnO | 0.692 | 0.034 | Mn | 0.536 | 0.027 |
| Cs2O | 0.532 | 0.043 | Cs | 0.502 | 0.040 |
| MgO | 0.405 | 0.021 | Mg | 0.244 | 0.013 |
| P2O5 | 0.161 | 0.012 | Px | 0.0702 | 0.0050 |
| SnO2 | 0.150 | 0.020 | Sn | 0.118 | 0.016 |
| CaO | 0.137 | 0.0068 | Ca | 0.0977 | 0.0049 |
| S | 0.0632 | 0.0036 | S | 0.0632 | 0.0036 |
| TiO2 | 0.0451 | 0.0037 | Ti | 0.0270 | 0.0022 |
| ZnO | 0.0352 | 0.0064 | Zn | 0.0283 | 0.0051 |
| Ga2O3 | 0.0300 | 0.0056 | Ga | 0.0223 | 0.0042 |
| NiO | 0.0227 | 0.0058 | Ni | 0.0178 | 0.0046 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 31.0 %
Total Weight% Oxygen = 42.23

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 12:15:08
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**LHm D**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : 17.1.2025 11:37:40 | | |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : Vacuum | | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : PP 6mu | | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : ø 29 mm | | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 53.68 | 0.25 | Si | 25.10 | 0.12 |
| Al2O3 | 20.93 | 0.20 | Al | 11.07 | 0.11 |
| K2O | 11.38 | 0.16 | K | 9.45 | 0.13 |
| Cl | 4.71 | 0.11 | Cl | 4.71 | 0.11 |
| Fe2O3 | 3.92 | 0.10 | Fe | 2.74 | 0.07 |
| Rb2O | 2.74 | 0.08 | Rb | 2.51 | 0.07 |
| MnO | 0.700 | 0.035 | Mn | 0.542 | 0.027 |
| Na2O | 0.496 | 0.10 | Na | 0.368 | 0.07 |
| Cs2O | 0.383 | 0.045 | Cs | 0.361 | 0.043 |
| MgO | 0.359 | 0.021 | Mg | 0.216 | 0.013 |
| P2O5 | 0.201 | 0.013 | Px | 0.0878 | 0.0055 |
| CaO | 0.163 | 0.0081 | Ca | 0.117 | 0.0058 |
| SO3 | 0.160 | 0.0080 | Sx | 0.0640 | 0.0032 |
| SnO2 | 0.0970 | 0.022 | Sn | 0.0764 | 0.018 |
| TiO2 | 0.0378 | 0.0038 | Ti | 0.0226 | 0.0023 |
| ZnO | 0.0334 | 0.0071 | Zn | 0.0268 | 0.0057 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 29.6 %
Total Weight% Oxygen = 42.53

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 11:03:22
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**LH-TF**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.2.2025 | 10:27:10 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 37.05 | 0.24 | Si | 17.32 | 0.11 |
| Al2O3 | 34.53 | 0.24 | Al | 18.27 | 0.13 |
| SnO2 | 10.45 | 0.15 | Sn | 8.23 | 0.12 |
| Cl | 4.84 | 0.11 | Cl | 4.84 | 0.11 |
| Fe2O3 | 3.77 | 0.10 | Fe | 2.64 | 0.07 |
| Na2O | 1.77 | 0.12 | Na | 1.31 | 0.09 |
| K2O | 1.28 | 0.06 | K | 1.06 | 0.05 |
| MnO | 0.883 | 0.044 | Mn | 0.684 | 0.034 |
| P2O5 | 0.854 | 0.043 | Px | 0.373 | 0.019 |
| Ta2O5 | 0.809 | 0.040 | Ta | 0.663 | 0.033 |
| MgO | 0.689 | 0.034 | Mg | 0.416 | 0.021 |
| ZrO2 | 0.519 | 0.026 | Zr | 0.384 | 0.019 |
| CaO | 0.501 | 0.025 | Ca | 0.358 | 0.018 |
| BaO | 0.417 | 0.10 | Ba | 0.374 | 0.09 |
| Cs2O | 0.407 | 0.07 | Cs | 0.384 | 0.07 |
| Nb2O5 | 0.405 | 0.024 | Nb | 0.283 | 0.016 |
| As2O3 | 0.352 | 0.06 | As | 0.267 | 0.049 |
| TiO2 | 0.133 | 0.0067 | Ti | 0.0799 | 0.0040 |
| HfO2 | 0.123 | 0.027 | Hf | 0.105 | 0.023 |
| NiO | 0.0681 | 0.0071 | Ni | 0.0535 | 0.0056 |
| Cr2O3 | 0.0498 | 0.0053 | Cr | 0.0341 | 0.0036 |
| ZnO | 0.0480 | 0.0090 | Zn | 0.0386 | 0.0072 |
| Br | 0.0331 | 0.010 | Br | 0.0331 | 0.010 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 28.9 %
Total Weight% Oxygen = 41.78

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:37:59
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**MC1**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : 4.10.2022 14:39:22 | | |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : Vacuum | | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : None | | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : ø 29 mm | | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 415.48 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7273.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 77.14 | 0.21 | Si | 36.06 | 0.10 |
| Al2O3 | 11.23 | 0.16 | Al | 5.94 | 0.08 |
| K2O | 6.28 | 0.12 | K | 5.21 | 0.10 |
| Na2O | 3.51 | 0.09 | Na | 2.60 | 0.07 |
| Fe2O3 | 0.589 | 0.029 | Fe | 0.412 | 0.021 |
| CaO | 0.486 | 0.024 | Ca | 0.348 | 0.017 |
| MgO | 0.0847 | 0.0042 | Mg | 0.0511 | 0.0026 |
| TiO2 | 0.0509 | 0.0025 | Ti | 0.0305 | 0.0015 |
| Rb2O | 0.0276 | 0.0014 | Rb | 0.0252 | 0.0013 |
| MnO | 0.0193 | 0.0010 | Mn | 0.0150 | 0.0007 |
| P | 0.0140 | 0.0007 | P | 0.0140 | 0.0007 |
| ZrO2 | 0.0085 | 0.0008 | Zr | 0.0063 | 0.0006 |
| SrO | 0.0055 | 0.0006 | Sr | 0.0046 | 0.0005 |
| Y2O3 | 0.0037 | 0.0010 | Y | 0.0029 | 0.0008 |
| Ga2O3 | 0.0014 | 0.0004 | Ga | 0.0011 | 0.0003 |

Rest = 0.55 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 99.2 %
Total Weight% Oxygen = 48.72

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:40:07
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**MC2**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 4.10.2022 | 14:50:15 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 415.48 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7273.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 73.54 | 0.22 | Si | 34.38 | 0.10 |
| Al2O3 | 12.27 | 0.16 | Al | 6.49 | 0.09 |
| Na2O | 3.91 | 0.10 | Na | 2.90 | 0.07 |
| K2O | 3.81 | 0.10 | K | 3.16 | 0.08 |
| Fe2O3 | 2.60 | 0.08 | Fe | 1.82 | 0.06 |
| CaO | 2.02 | 0.07 | Ca | 1.45 | 0.05 |
| MgO | 0.583 | 0.029 | Mg | 0.352 | 0.018 |
| TiO2 | 0.422 | 0.021 | Ti | 0.253 | 0.013 |
| BaO | 0.0465 | 0.0061 | Ba | 0.0417 | 0.0055 |
| MnO | 0.0452 | 0.0023 | Mn | 0.0350 | 0.0017 |
| SrO | 0.0286 | 0.0014 | Sr | 0.0242 | 0.0012 |
| P | 0.0273 | 0.0014 | P | 0.0273 | 0.0014 |
| ZrO2 | 0.0246 | 0.0012 | Zr | 0.0182 | 0.0009 |
| Rb2O | 0.0195 | 0.0010 | Rb | 0.0179 | 0.0009 |
| V2O5 | 0.0064 | 0.0009 | V | 0.0036 | 0.0005 |
| ZnO | 0.0039 | 0.0004 | Zn | 0.0031 | 0.0004 |
| La2O3 | 0.0032 | 0.0010 | La | 0.0027 | 0.0009 |
| Co3O4 | 0.0019 | 0.0005 | Co | 0.0014 | 0.0004 |
| Ga2O3 | 0.0014 | 0.0004 | Ga | 0.0011 | 0.0003 |

Rest = 0.64 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 97.9 %
Total Weight% Oxygen = 48.38

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:43:28
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**PA**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 4.10.2022 | 15:22:33 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 415.48 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7273.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 75.72 | 0.21 | Si | 35.40 | 0.10 |
| Al2O3 | 13.27 | 0.17 | Al | 7.02 | 0.09 |
| Na2O | 6.85 | 0.13 | Na | 5.08 | 0.09 |
| K2O | 1.55 | 0.06 | K | 1.29 | 0.05 |
| Fe2O3 | 1.07 | 0.05 | Fe | 0.745 | 0.04 |
| CaO | 0.387 | 0.019 | Ca | 0.277 | 0.014 |
| MnO | 0.150 | 0.0075 | Mn | 0.116 | 0.0058 |
| P | 0.120 | 0.0060 | P | 0.120 | 0.0060 |
| MgO | 0.0875 | 0.0044 | Mg | 0.0528 | 0.0026 |
| TiO2 | 0.0203 | 0.0010 | Ti | 0.0122 | 0.0006 |
| Rb2O | 0.0168 | 0.0008 | Rb | 0.0154 | 0.0008 |
| ZrO2 | 0.0104 | 0.0008 | Zr | 0.0077 | 0.0006 |
| ZnO | 0.0097 | 0.0005 | Zn | 0.0078 | 0.0004 |
| PbO | 0.0048 | 0.0016 | Pb | 0.0045 | 0.0015 |
| SrO | 0.0036 | 0.0006 | Sr | 0.0031 | 0.0005 |
| Au | 0.0026 | 0.0007 | Au | 0.0026 | 0.0007 |
| Ga2O3 | 0.0024 | 0.0004 | Ga | 0.0018 | 0.0003 |
| NiO | 0.0017 | 0.0004 | Ni | 0.0013 | 0.0003 |
| CuO | 0.0013 | 0.0004 | Cu | 0.0010 | 0.0003 |

Rest = 0.74 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 97.5 %
Total Weight% Oxygen = 49.11

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 10:07:18
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Prb**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 19.10.2023 | 10:22:51 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 433.74 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7593.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 74.97 | 0.22 | Si | 35.05 | 0.10 |
| Al2O3 | 13.41 | 0.17 | Al | 7.10 | 0.09 |
| Na2O | 4.02 | 0.10 | Na | 2.98 | 0.07 |
| K2O | 3.52 | 0.09 | K | 2.92 | 0.08 |
| Fe2O3 | 0.968 | 0.048 | Fe | 0.677 | 0.034 |
| P2O5 | 0.905 | 0.045 | Px | 0.395 | 0.020 |
| CaO | 0.579 | 0.029 | Ca | 0.414 | 0.021 |
| MnO | 0.194 | 0.0097 | Mn | 0.151 | 0.0075 |
| F | 0.156 | 0.040 | F | 0.156 | 0.040 |
| Rb2O | 0.112 | 0.0056 | Rb | 0.102 | 0.0051 |
| SrO | 0.0489 | 0.0025 | Sr | 0.0414 | 0.0021 |
| MgO | 0.0375 | 0.0019 | Mg | 0.0226 | 0.0011 |
| SnO2 | 0.0249 | 0.0017 | Sn | 0.0196 | 0.0014 |
| TiO2 | 0.0148 | 0.0007 | Ti | 0.0089 | 0.0004 |
| ZnO | 0.0108 | 0.0005 | Zn | 0.0087 | 0.0004 |
| Nb2O5 | 0.0086 | 0.0008 | Nb | 0.0060 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0049 | 0.0004 | Ga | 0.0037 | 0.0003 |
| NiO | 0.0040 | 0.0004 | Ni | 0.0032 | 0.0003 |
| WO3 | 0.0032 | 0.0010 | W | 0.0025 | 0.0008 |

Rest = 1.01 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 99.6 %
Total Weight% Oxygen = 48.93

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

26.3.2025 9:46:19
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Prb mag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 22.11.2023 | 12:06:00 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 53.83 | 0.25 | Si | 25.16 | 0.12 |
| Al2O3 | 24.28 | 0.21 | Al | 12.85 | 0.11 |
| K2O | 7.38 | 0.13 | K | 6.13 | 0.11 |
| Fe2O3 | 4.11 | 0.10 | Fe | 2.87 | 0.07 |
| Na2O | 1.64 | 0.06 | Na | 1.22 | 0.05 |
| P2O5 | 1.63 | 0.06 | Px | 0.710 | 0.03 |
| CaO | 1.31 | 0.06 | Ca | 0.936 | 0.04 |
| MnO | 0.751 | 0.037 | Mn | 0.582 | 0.029 |
| F | 0.604 | 0.05 | F | 0.604 | 0.05 |
| Rb2O | 0.335 | 0.017 | Rb | 0.307 | 0.015 |
| SrO | 0.0739 | 0.0037 | Sr | 0.0625 | 0.0031 |
| MgO | 0.0668 | 0.0033 | Mg | 0.0403 | 0.0020 |
| TiO2 | 0.0666 | 0.0033 | Ti | 0.0399 | 0.0020 |
| Nb2O5 | 0.0480 | 0.0024 | Nb | 0.0335 | 0.0017 |
| ZnO | 0.0431 | 0.0022 | Zn | 0.0346 | 0.0017 |
| SnO2 | 0.0402 | 0.0020 | Sn | 0.0317 | 0.0016 |
| Cl | 0.0237 | 0.0029 | Cl | 0.0237 | 0.0029 |
| Ga2O3 | 0.0174 | 0.0009 | Ga | 0.0129 | 0.0006 |
| S | 0.0053 | 0.0007 | S | 0.0053 | 0.0007 |
| NiO | 0.0049 | 0.0005 | Ni | 0.0038 | 0.0004 |
| Co3O4 | 0.0042 | 0.0005 | Co | 0.0030 | 0.0004 |
| WO3 | 0.0040 | 0.0014 | W | 0.0032 | 0.0011 |
| Sc2O3 | 0.0024 | 0.0004 | Sc | 0.0015 | 0.0003 |

Rest = 3.74 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 96.8 %
Total Weight% Oxygen = 44.60

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

26.3.2025 9:48:33
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**PRB nemag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 21.11.2023 | 13:12:17 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 78.94 | 0.20 | Si | 36.91 | 0.10 |
| Al2O3 | 11.93 | 0.16 | Al | 6.31 | 0.09 |
| Na2O | 4.74 | 0.11 | Na | 3.51 | 0.08 |
| K2O | 2.65 | 0.08 | K | 2.20 | 0.07 |
| P2O5 | 0.463 | 0.023 | Px | 0.202 | 0.010 |
| CaO | 0.324 | 0.016 | Ca | 0.231 | 0.012 |
| Fe2O3 | 0.293 | 0.015 | Fe | 0.205 | 0.010 |
| Rb2O | 0.0645 | 0.0032 | Rb | 0.0590 | 0.0029 |
| MnO | 0.0402 | 0.0020 | Mn | 0.0311 | 0.0016 |
| MgO | 0.0320 | 0.0016 | Mg | 0.0193 | 0.0010 |
| SrO | 0.0319 | 0.0016 | Sr | 0.0270 | 0.0013 |
| TiO2 | 0.0049 | 0.0005 | Ti | 0.0029 | 0.0003 |
| Ga2O3 | 0.0031 | 0.0003 | Ga | 0.0023 | 0.0002 |
| ZnO | 0.0029 | 0.0003 | Zn | 0.0023 | 0.0003 |
| Nb2O5 | 0.0023 | 0.0007 | Nb | 0.0016 | 0.0005 |

Rest = 0.48 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 94.9 %
Total Weight% Oxygen = 49.80

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:51:09
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Raz2 - 1**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.6.2023 | 12:02:03 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 72.55 | 0.22 | Si | 33.92 | 0.10 |
| Al2O3 | 14.15 | 0.17 | Al | 7.49 | 0.09 |
| K2O | 9.15 | 0.14 | K | 7.59 | 0.12 |
| Na2O | 1.77 | 0.07 | Na | 1.32 | 0.05 |
| Fe2O3 | 0.320 | 0.016 | Fe | 0.224 | 0.011 |
| CaO | 0.126 | 0.0063 | Ca | 0.0902 | 0.0045 |
| P2O5 | 0.105 | 0.0052 | Px | 0.0457 | 0.0023 |
| BaO | 0.103 | 0.0052 | Ba | 0.0919 | 0.0047 |
| MgO | 0.0651 | 0.0033 | Mg | 0.0393 | 0.0020 |
| PbO | 0.0233 | 0.0015 | Pb | 0.0216 | 0.0014 |
| SrO | 0.0233 | 0.0012 | Sr | 0.0197 | 0.0010 |
| Rb2O | 0.0197 | 0.0010 | Rb | 0.0180 | 0.0009 |
| TiO2 | 0.0172 | 0.0009 | Ti | 0.0103 | 0.0005 |
| MnO | 0.0032 | 0.0005 | Mn | 0.0025 | 0.0004 |
| ZnO | 0.0017 | 0.0004 | Zn | 0.0013 | 0.0003 |

Rest = 1.57 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 94.7 %
Total Weight% Oxygen = 47.55

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:53:07
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Raz2 - 2**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.6.2023 13:05:33 | |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 62.34 | 0.24 | Si | 29.14 | 0.11 |
| Al2O3 | 21.58 | 0.21 | Al | 11.42 | 0.11 |
| Fe2O3 | 7.48 | 0.13 | Fe | 5.23 | 0.09 |
| K2O | 2.06 | 0.07 | K | 1.71 | 0.06 |
| MgO | 1.56 | 0.06 | Mg | 0.939 | 0.04 |
| Na2O | 1.54 | 0.06 | Na | 1.14 | 0.05 |
| CaO | 1.26 | 0.06 | Ca | 0.902 | 0.04 |
| P2O5 | 0.724 | 0.036 | Px | 0.316 | 0.016 |
| TiO2 | 0.503 | 0.025 | Ti | 0.302 | 0.015 |
| MnO | 0.0927 | 0.0046 | Mn | 0.0718 | 0.0036 |
| ZrO2 | 0.0394 | 0.0020 | Zr | 0.0292 | 0.0015 |
| ZnO | 0.0199 | 0.0010 | Zn | 0.0160 | 0.0008 |
| Cl | 0.0147 | 0.0025 | Cl | 0.0147 | 0.0025 |
| SO3 | 0.0113 | 0.0012 | Sx | 0.0045 | 0.0005 |
| Co3O4 | 0.0100 | 0.0006 | Co | 0.0073 | 0.0004 |
| SrO | 0.0094 | 0.0006 | Sr | 0.0080 | 0.0005 |
| V2O5 | 0.0090 | 0.0009 | V | 0.0051 | 0.0005 |
| Y2O3 | 0.0062 | 0.0008 | Y | 0.0048 | 0.0006 |
| Cr2O3 | 0.0054 | 0.0007 | Cr | 0.0037 | 0.0004 |
| Rb2O | 0.0053 | 0.0005 | Rb | 0.0049 | 0.0005 |
| NiO | 0.0053 | 0.0006 | Ni | 0.0042 | 0.0004 |
| Ga2O3 | 0.0052 | 0.0005 | Ga | 0.0039 | 0.0003 |
| La2O3 | 0.0034 | 0.0010 | La | 0.0029 | 0.0008 |
| Sc2O3 | 0.0011 | 0.0004 | Sc | 0.00072 | 0.0003 |

Rest = 0.72 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 94.0 %
Total Weight% Oxygen = 48.00

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:54:26
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Raz3**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.6.2023 | 12:26:31 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| MnO | 51.72 | 0.25 | Mn | 40.06 | 0.19 |
| Fe2O3 | 31.35 | 0.23 | Fe | 21.92 | 0.16 |
| SiO2 | 8.20 | 0.14 | Si | 3.83 | 0.06 |
| CaO | 4.54 | 0.10 | Ca | 3.25 | 0.07 |
| P2O5 | 1.34 | 0.06 | Px | 0.584 | 0.03 |
| Al2O3 | 1.29 | 0.06 | Al | 0.681 | 0.03 |
| MgO | 0.816 | 0.041 | Mg | 0.492 | 0.025 |
| Na2O | 0.453 | 0.023 | Na | 0.336 | 0.017 |
| K2O | 0.0981 | 0.0049 | K | 0.0814 | 0.0041 |
| Co3O4 | 0.0418 | 0.0021 | Co | 0.0307 | 0.0015 |
| Cl | 0.0311 | 0.0018 | Cl | 0.0311 | 0.0018 |
| S | 0.0299 | 0.0015 | S | 0.0299 | 0.0015 |
| SrO | 0.0282 | 0.0014 | Sr | 0.0238 | 0.0012 |
| Gd2O3 | 0.0238 | 0.0057 | Gd | 0.0207 | 0.0050 |
| TiO2 | 0.0201 | 0.0010 | Ti | 0.0120 | 0.0006 |
| As2O3 | 0.0145 | 0.0039 | As | 0.0110 | 0.0030 |
| Y2O3 | 0.0047 | 0.0009 | Y | 0.0037 | 0.0007 |

D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 96.3 %
Total Weight% Oxygen = 28.60

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

12.3.2025 7:55:01
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**RE 30**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 18.7.2024 | 14:16:52 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 471.44 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8253.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 76.42 | 0.21 | Si | 35.73 | 0.10 |
| Al2O3 | 11.53 | 0.16 | Al | 6.10 | 0.08 |
| K2O | 5.68 | 0.12 | K | 4.71 | 0.10 |
| Na2O | 2.66 | 0.08 | Na | 1.97 | 0.06 |
| Fe2O3 | 1.43 | 0.06 | Fe | 0.998 | 0.04 |
| SnO2 | 0.761 | 0.038 | Sn | 0.599 | 0.030 |
| As2O3 | 0.646 | 0.032 | As | 0.489 | 0.024 |
| CaO | 0.311 | 0.015 | Ca | 0.222 | 0.011 |
| MnO | 0.104 | 0.0052 | Mn | 0.0807 | 0.0040 |
| Rb2O | 0.0618 | 0.0031 | Rb | 0.0565 | 0.0028 |
| MgO | 0.0427 | 0.0030 | Mg | 0.0257 | 0.0018 |
| TiO2 | 0.0371 | 0.0019 | Ti | 0.0222 | 0.0011 |
| Nb2O5 | 0.0266 | 0.0013 | Nb | 0.0186 | 0.0009 |
| P2O5 | 0.0256 | 0.0013 | Px | 0.0112 | 0.0006 |
| Y2O3 | 0.0120 | 0.0013 | Y | 0.0095 | 0.0011 |
| ZnO | 0.0082 | 0.0004 | Zn | 0.0066 | 0.0003 |
| SrO | 0.0077 | 0.0005 | Sr | 0.0065 | 0.0005 |
| PbO | 0.0063 | 0.0019 | Pb | 0.0058 | 0.0017 |
| La2O3 | 0.0046 | 0.0009 | La | 0.0039 | 0.0008 |
| ZrO2 | 0.0039 | 0.0008 | Zr | 0.0029 | 0.0006 |
| S | 0.0039 | 0.0007 | S | 0.0039 | 0.0007 |
| WO3 | 0.0037 | 0.0010 | W | 0.0030 | 0.0008 |
| Ta2O5 | 0.0031 | 0.0010 | Ta | 0.0026 | 0.0008 |
| Ga2O3 | 0.0031 | 0.0004 | Ga | 0.0023 | 0.0003 |
| NiO | 0.0027 | 0.0004 | Ni | 0.0021 | 0.0004 |

Rest = 0.21 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 98.2 %
Total Weight% Oxygen = 48.70

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 12:00:15
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**RE 30 mag**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111
Method : UQ-i
Kappa List : Silikat
Shapes & ImpFc : Teflon
Calculated as : Oxides
Case Number : 0 = All known

Measured on : 18.7.2024 14:34:06
X-ray Path: : Vacuum
Film Type : None
Collimator Mask : ø 29 mm
Viewed Diameter = 25.00 mm
Viewed Area = 490.63 mm2
Viewed Mass = 8593.75 mg
Sample Height = 4.00 mm

Reporting Level > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err.

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 64.78 | 0.24 | Si | 30.28 | 0.11 |
| Al2O3 | 13.23 | 0.17 | Al | 7.00 | 0.09 |
| Fe2O3 | 9.00 | 0.14 | Fe | 6.29 | 0.10 |
| As2O3 | 3.15 | 0.09 | As | 2.38 | 0.07 |
| K2O | 2.55 | 0.08 | K | 2.12 | 0.07 |
| Na2O | 2.25 | 0.07 | Na | 1.67 | 0.05 |
| SnO2 | 1.04 | 0.05 | Sn | 0.817 | 0.04 |
| MnO | 0.664 | 0.033 | Mn | 0.515 | 0.026 |
| CaO | 0.502 | 0.025 | Ca | 0.359 | 0.018 |
| ZrO2 | 0.279 | 0.014 | Zr | 0.206 | 0.010 |
| TiO2 | 0.267 | 0.013 | Ti | 0.160 | 0.0080 |
| Nb2O5 | 0.126 | 0.0063 | Nb | 0.0878 | 0.0044 |
| MgO | 0.124 | 0.0091 | Mg | 0.0749 | 0.0055 |
| P2O5 | 0.0811 | 0.0040 | Px | 0.0354 | 0.0018 |
| Y2O3 | 0.0621 | 0.0031 | Y | 0.0489 | 0.0024 |
| ZnO | 0.0583 | 0.0029 | Zn | 0.0468 | 0.0023 |
| BaO | 0.0379 | 0.0060 | Ba | 0.0339 | 0.0054 |
| CeO2 | 0.0354 | 0.0060 | Ce | 0.0288 | 0.0049 |
| Rb2O | 0.0329 | 0.0016 | Rb | 0.0301 | 0.0015 |
| S | 0.0209 | 0.0010 | S | 0.0209 | 0.0010 |
| NiO | 0.0158 | 0.0008 | Ni | 0.0125 | 0.0006 |
| ThO2 | 0.0152 | 0.0018 | Th | 0.0134 | 0.0016 |
| U3O8 | 0.0134 | 0.0010 | U | 0.0114 | 0.0008 |
| PbO | 0.0133 | 0.0018 | Pb | 0.0123 | 0.0017 |
| La2O3 | 0.0116 | 0.0011 | La | 0.0099 | 0.0009 |
| Yb2O3 | 0.0099 | 0.0012 | Yb | 0.0087 | 0.0011 |
| Co3O4 | 0.0096 | 0.0006 | Co | 0.0070 | 0.0005 |
| HfO2 | 0.0084 | 0.0014 | Hf | 0.0071 | 0.0012 |
| WO3 | 0.0082 | 0.0018 | W | 0.0065 | 0.0014 |
| Bi2O3 | 0.0074 | 0.0010 | Bi | 0.0066 | 0.0009 |
| Ta2O5 | 0.0067 | 0.0016 | Ta | 0.0055 | 0.0013 |
| SrO | 0.0064 | 0.0006 | Sr | 0.0054 | 0.0005 |
| Ga2O3 | 0.0059 | 0.0005 | Ga | 0.0044 | 0.0003 |
| Nd2O3 | 0.0059 | 0.0016 | Nd | 0.0051 | 0.0014 |
| Sc2O3 | 0.0041 | 0.0005 | Sc | 0.0026 | 0.0003 |

Rest = 1.58 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 99.6 %
Total Weight% Oxygen = 46.09

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 12:01:21
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**RE 30 nemag**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 18.7.2024 | 16:04:26 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 471.44 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8253.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 77.12 | 0.21 | Si | 36.05 | 0.10 |
| Al2O3 | 11.77 | 0.16 | Al | 6.23 | 0.09 |
| K2O | 6.42 | 0.12 | K | 5.33 | 0.10 |
| Na2O | 2.68 | 0.08 | Na | 1.99 | 0.06 |
| Fe2O3 | 0.525 | 0.026 | Fe | 0.367 | 0.018 |
| SnO2 | 0.504 | 0.025 | Sn | 0.397 | 0.020 |
| As2O3 | 0.307 | 0.015 | As | 0.232 | 0.012 |
| CaO | 0.298 | 0.015 | Ca | 0.213 | 0.011 |
| Rb2O | 0.0698 | 0.0035 | Rb | 0.0638 | 0.0032 |
| MgO | 0.0404 | 0.0023 | Mg | 0.0244 | 0.0014 |
| MnO | 0.0230 | 0.0012 | Mn | 0.0178 | 0.0009 |
| P2O5 | 0.0153 | 0.0013 | Px | 0.0067 | 0.0005 |
| Nb2O5 | 0.0136 | 0.0009 | Nb | 0.0095 | 0.0006 |
| TiO2 | 0.0115 | 0.0007 | Ti | 0.0069 | 0.0004 |
| Y2O3 | 0.0089 | 0.0014 | Y | 0.0070 | 0.0011 |
| SrO | 0.0086 | 0.0005 | Sr | 0.0073 | 0.0004 |
| ZrO2 | 0.0034 | 0.0008 | Zr | 0.0025 | 0.0006 |
| La2O3 | 0.0030 | 0.0009 | La | 0.0026 | 0.0008 |
| ZnO | 0.0026 | 0.0004 | Zn | 0.0021 | 0.0003 |
| Bi2O3 | 0.0022 | 0.0007 | Bi | 0.0020 | 0.0007 |
| Ga2O3 | 0.0022 | 0.0003 | Ga | 0.0016 | 0.0003 |

Rest = 0.18 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 98.1 %
Total Weight% Oxygen = 48.86

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 12:13:15
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**RE30m A**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.1.2025 | 12:03:10 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 67.30 | 0.23 | Si | 31.46 | 0.11 |
| Al2O3 | 13.72 | 0.17 | Al | 7.26 | 0.09 |
| Fe2O3 | 6.42 | 0.12 | Fe | 4.49 | 0.09 |
| K2O | 3.20 | 0.09 | K | 2.66 | 0.07 |
| Cl | 2.52 | 0.08 | Cl | 2.52 | 0.08 |
| Na2O | 2.38 | 0.08 | Na | 1.77 | 0.06 |
| As2O3 | 1.69 | 0.06 | As | 1.28 | 0.05 |
| CaO | 0.623 | 0.031 | Ca | 0.445 | 0.022 |
| MnO | 0.509 | 0.025 | Mn | 0.394 | 0.020 |
| SnO2 | 0.477 | 0.024 | Sn | 0.376 | 0.019 |
| MgO | 0.356 | 0.018 | Mg | 0.215 | 0.011 |
| TiO2 | 0.206 | 0.010 | Ti | 0.123 | 0.0062 |
| SO3 | 0.184 | 0.0092 | Sx | 0.0737 | 0.0037 |
| P2O5 | 0.0880 | 0.0071 | Px | 0.0384 | 0.0031 |
| Nb2O5 | 0.0817 | 0.0070 | Nb | 0.0571 | 0.0049 |
| Rb2O | 0.0591 | 0.0047 | Rb | 0.0540 | 0.0043 |
| ZnO | 0.0526 | 0.0034 | Zn | 0.0423 | 0.0028 |
| Y2O3 | 0.0398 | 0.0063 | Y | 0.0313 | 0.0050 |
| WO3 | 0.0294 | 0.0087 | W | 0.0233 | 0.0069 |
| NiO | 0.0292 | 0.0030 | Ni | 0.0230 | 0.0024 |
| ZrO2 | 0.0241 | 0.0065 | Zr | 0.0178 | 0.0048 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 48.1 %
Total Weight% Oxygen = 46.64

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy lom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 12:11:07
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**RE30m B**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.1.2025 | 13:18:47 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 65.77 | 0.24 | Si | 30.75 | 0.11 |
| Al2O3 | 14.11 | 0.17 | Al | 7.47 | 0.09 |
| Fe2O3 | 7.82 | 0.13 | Fe | 5.47 | 0.09 |
| K2O | 2.68 | 0.08 | K | 2.22 | 0.07 |
| Cl | 2.19 | 0.07 | Cl | 2.19 | 0.07 |
| Na2O | 2.16 | 0.07 | Na | 1.60 | 0.05 |
| As2O3 | 1.74 | 0.07 | As | 1.32 | 0.05 |
| MnO | 0.809 | 0.040 | Mn | 0.627 | 0.031 |
| SnO2 | 0.651 | 0.032 | Sn | 0.513 | 0.026 |
| CaO | 0.590 | 0.029 | Ca | 0.421 | 0.021 |
| MgO | 0.356 | 0.018 | Mg | 0.214 | 0.011 |
| TiO2 | 0.262 | 0.013 | Ti | 0.157 | 0.0078 |
| P2O5 | 0.247 | 0.012 | Px | 0.108 | 0.0054 |
| Y2O3 | 0.153 | 0.0077 | Y | 0.121 | 0.0060 |
| S | 0.127 | 0.0064 | S | 0.127 | 0.0064 |
| Nb2O5 | 0.0820 | 0.0067 | Nb | 0.0573 | 0.0047 |
| ZnO | 0.0666 | 0.0033 | Zn | 0.0535 | 0.0027 |
| Rb2O | 0.0487 | 0.0043 | Rb | 0.0445 | 0.0039 |
| ZrO2 | 0.0379 | 0.0060 | Zr | 0.0281 | 0.0045 |
| WO3 | 0.0320 | 0.0084 | W | 0.0254 | 0.0066 |
| NiO | 0.0230 | 0.0029 | Ni | 0.0180 | 0.0023 |
| La2O3 | 0.0203 | 0.0032 | La | 0.0173 | 0.0027 |
| Yb2O3 | 0.0175 | 0.0057 | Yb | 0.0154 | 0.0050 |
| Sc2O3 | 0.0053 | 0.0012 | Sc | 0.0035 | 0.0008 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 53.2 %
Total Weight% Oxygen = 46.43

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 12:09:04
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**RE30m C**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 21.1.2025 | 9:49:42 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 67.64 | 0.23 | Si | 31.62 | 0.11 |
| Al2O3 | 13.57 | 0.17 | Al | 7.18 | 0.09 |
| Fe2O3 | 6.56 | 0.12 | Fe | 4.59 | 0.09 |
| K2O | 3.60 | 0.09 | K | 2.99 | 0.08 |
| Cl | 2.23 | 0.07 | Cl | 2.23 | 0.07 |
| Na2O | 2.12 | 0.07 | Na | 1.57 | 0.05 |
| As2O3 | 1.64 | 0.06 | As | 1.25 | 0.05 |
| CaO | 0.580 | 0.029 | Ca | 0.415 | 0.021 |
| SnO2 | 0.563 | 0.028 | Sn | 0.443 | 0.022 |
| MnO | 0.495 | 0.025 | Mn | 0.383 | 0.019 |
| MgO | 0.312 | 0.016 | Mg | 0.188 | 0.0094 |
| TiO2 | 0.204 | 0.010 | Ti | 0.123 | 0.0061 |
| P2O5 | 0.105 | 0.0071 | Px | 0.0457 | 0.0031 |
| Nb2O5 | 0.0689 | 0.0064 | Nb | 0.0482 | 0.0045 |
| S | 0.0660 | 0.0033 | S | 0.0660 | 0.0033 |
| Rb2O | 0.0608 | 0.0043 | Rb | 0.0556 | 0.0039 |
| ZnO | 0.0521 | 0.0031 | Zn | 0.0418 | 0.0025 |
| Y2O3 | 0.0454 | 0.0058 | Y | 0.0357 | 0.0046 |
| NiO | 0.0275 | 0.0027 | Ni | 0.0216 | 0.0021 |
| ZrO2 | 0.0241 | 0.0059 | Zr | 0.0178 | 0.0043 |
| La2O3 | 0.0166 | 0.0033 | La | 0.0142 | 0.0028 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 51.7 %
Total Weight% Oxygen = 46.66

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy lom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 10:55:13
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**RE30-TF.A**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.2.2025 | 11:37:17 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 30.05 | 0.23 | Si | 14.05 | 0.11 |
| Fe2O3 | 20.41 | 0.20 | Fe | 14.27 | 0.14 |
| Al2O3 | 19.14 | 0.20 | Al | 10.13 | 0.10 |
| SnO2 | 10.65 | 0.15 | Sn | 8.39 | 0.12 |
| As2O3 | 7.49 | 0.13 | As | 5.68 | 0.10 |
| Cl | 4.79 | 0.11 | Cl | 4.79 | 0.11 |
| MnO | 2.30 | 0.07 | Mn | 1.78 | 0.06 |
| Na2O | 1.45 | 0.15 | Na | 1.07 | 0.11 |
| MgO | 0.895 | 0.044 | Mg | 0.540 | 0.027 |
| CaO | 0.811 | 0.040 | Ca | 0.580 | 0.029 |
| TiO2 | 0.580 | 0.029 | Ti | 0.348 | 0.017 |
| P2O5 | 0.327 | 0.016 | Px | 0.143 | 0.0071 |
| Nb2O5 | 0.244 | 0.031 | Nb | 0.171 | 0.022 |
| Y2O3 | 0.211 | 0.024 | Y | 0.166 | 0.019 |
| ZnO | 0.189 | 0.012 | Zn | 0.152 | 0.0098 |
| S | 0.185 | 0.0092 | S | 0.185 | 0.0092 |
| K2O | 0.106 | 0.0053 | K | 0.0880 | 0.0044 |
| CeO2 | 0.100 | 0.025 | Ce | 0.0816 | 0.021 |
| Br | 0.0658 | 0.016 | Br | 0.0658 | 0.016 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 30.1 %
Total Weight% Oxygen = 37.32

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy lom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 10:48:08
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**RE30-TF.B**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.2.2025 | 10:25:35 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 26.85 | 0.22 | Si | 12.55 | 0.10 |
| Fe2O3 | 21.99 | 0.21 | Fe | 15.38 | 0.14 |
| Al2O3 | 19.90 | 0.20 | Al | 10.53 | 0.11 |
| SnO2 | 10.95 | 0.16 | Sn | 8.63 | 0.12 |
| As2O3 | 8.44 | 0.14 | As | 6.40 | 0.10 |
| Cl | 4.18 | 0.10 | Cl | 4.18 | 0.10 |
| MnO | 2.49 | 0.08 | Mn | 1.93 | 0.06 |
| Na2O | 1.60 | 0.13 | Na | 1.19 | 0.10 |
| CaO | 0.839 | 0.041 | Ca | 0.600 | 0.030 |
| MgO | 0.813 | 0.040 | Mg | 0.491 | 0.024 |
| TiO2 | 0.607 | 0.030 | Ti | 0.364 | 0.018 |
| Nb2O5 | 0.337 | 0.027 | Nb | 0.236 | 0.019 |
| Y2O3 | 0.205 | 0.020 | Y | 0.162 | 0.016 |
| P | 0.200 | 0.0099 | P | 0.200 | 0.0099 |
| ZnO | 0.189 | 0.011 | Zn | 0.152 | 0.0085 |
| S | 0.106 | 0.0052 | S | 0.106 | 0.0052 |
| K2O | 0.0975 | 0.0048 | K | 0.0809 | 0.0040 |
| Br | 0.0834 | 0.013 | Br | 0.0834 | 0.013 |
| ZrO2 | 0.0785 | 0.023 | Zr | 0.0581 | 0.017 |
| NiO | 0.0412 | 0.0089 | Ni | 0.0323 | 0.0070 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 34.7 %
Total Weight% Oxygen = 36.66

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 10:45:54
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**RE30-TF.BC**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : 17.2.2025 10:45:16 | | |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : Vacuum | | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : PP 6mu | | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : ø 29 mm | | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 29.23 | 0.23 | Si | 13.67 | 0.11 |
| Fe2O3 | 21.04 | 0.20 | Fe | 14.72 | 0.14 |
| Al2O3 | 19.14 | 0.20 | Al | 10.13 | 0.10 |
| SnO2 | 9.94 | 0.15 | Sn | 7.83 | 0.12 |
| As2O3 | 8.61 | 0.14 | As | 6.52 | 0.11 |
| Cl | 4.12 | 0.10 | Cl | 4.12 | 0.10 |
| MnO | 2.22 | 0.07 | Mn | 1.72 | 0.06 |
| Na2O | 1.87 | 0.12 | Na | 1.39 | 0.09 |
| MgO | 0.940 | 0.047 | Mg | 0.567 | 0.028 |
| CaO | 0.878 | 0.043 | Ca | 0.628 | 0.031 |
| TiO2 | 0.607 | 0.030 | Ti | 0.364 | 0.018 |
| P2O5 | 0.271 | 0.013 | Px | 0.118 | 0.0059 |
| Nb2O5 | 0.244 | 0.027 | Nb | 0.171 | 0.019 |
| Y2O3 | 0.165 | 0.020 | Y | 0.130 | 0.016 |
| ZnO | 0.163 | 0.011 | Zn | 0.131 | 0.0084 |
| Ta2O5 | 0.150 | 0.025 | Ta | 0.123 | 0.021 |
| S | 0.132 | 0.0065 | S | 0.132 | 0.0065 |
| ZrO2 | 0.109 | 0.023 | Zr | 0.0809 | 0.017 |
| K2O | 0.104 | 0.0052 | K | 0.0866 | 0.0043 |
| Br | 0.0728 | 0.013 | Br | 0.0728 | 0.013 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 35.1 %
Total Weight% Oxygen = 37.32

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 10:26:26
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**RE30-TF.C**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.2.2025 | 12:49:46 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 29.29 | 0.23 | Si | 13.69 | 0.11 |
| Fe2O3 | 21.00 | 0.20 | Fe | 14.69 | 0.14 |
| Al2O3 | 19.13 | 0.20 | Al | 10.13 | 0.10 |
| SnO2 | 10.12 | 0.15 | Sn | 7.97 | 0.12 |
| As2O3 | 8.61 | 0.14 | As | 6.52 | 0.11 |
| Cl | 4.13 | 0.10 | Cl | 4.13 | 0.10 |
| MnO | 2.19 | 0.07 | Mn | 1.69 | 0.06 |
| Na2O | 1.74 | 0.13 | Na | 1.29 | 0.10 |
| CaO | 0.893 | 0.044 | Ca | 0.639 | 0.032 |
| MgO | 0.874 | 0.043 | Mg | 0.527 | 0.026 |
| TiO2 | 0.580 | 0.029 | Ti | 0.348 | 0.017 |
| P2O5 | 0.281 | 0.014 | Px | 0.122 | 0.0061 |
| Nb2O5 | 0.236 | 0.027 | Nb | 0.165 | 0.019 |
| ZnO | 0.171 | 0.010 | Zn | 0.138 | 0.0084 |
| Y2O3 | 0.160 | 0.020 | Y | 0.126 | 0.016 |
| Ta2O5 | 0.145 | 0.025 | Ta | 0.119 | 0.020 |
| S | 0.129 | 0.0064 | S | 0.129 | 0.0064 |
| K2O | 0.117 | 0.0058 | K | 0.0970 | 0.0048 |
| ZrO2 | 0.115 | 0.023 | Zr | 0.0851 | 0.017 |
| Br | 0.0691 | 0.013 | Br | 0.0691 | 0.013 |
| Sc2O3 | 0.0086 | 0.0026 | Sc | 0.0056 | 0.0017 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 34.1 %
Total Weight% Oxygen = 37.31

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 10:57:36
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**RE30-TF.D**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.2.2025 | 10:47:13 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 28.79 | 0.23 | Si | 13.46 | 0.11 |
| Fe2O3 | 20.69 | 0.20 | Fe | 14.47 | 0.14 |
| Al2O3 | 19.29 | 0.20 | Al | 10.21 | 0.10 |
| SnO2 | 10.56 | 0.15 | Sn | 8.32 | 0.12 |
| As2O3 | 8.04 | 0.14 | As | 6.09 | 0.10 |
| Cl | 4.61 | 0.10 | Cl | 4.61 | 0.10 |
| MnO | 2.44 | 0.08 | Mn | 1.89 | 0.06 |
| Na2O | 1.76 | 0.14 | Na | 1.31 | 0.10 |
| MgO | 0.837 | 0.041 | Mg | 0.505 | 0.025 |
| CaO | 0.785 | 0.039 | Ca | 0.562 | 0.028 |
| TiO2 | 0.591 | 0.029 | Ti | 0.354 | 0.018 |
| Nb2O5 | 0.355 | 0.029 | Nb | 0.248 | 0.021 |
| Y2O3 | 0.234 | 0.022 | Y | 0.184 | 0.017 |
| S | 0.180 | 0.0089 | S | 0.180 | 0.0089 |
| P | 0.165 | 0.0082 | P | 0.165 | 0.0082 |
| ZnO | 0.163 | 0.012 | Zn | 0.131 | 0.0097 |
| ZrO2 | 0.121 | 0.025 | Zr | 0.0895 | 0.019 |
| CeO2 | 0.116 | 0.024 | Ce | 0.0947 | 0.020 |
| K2O | 0.106 | 0.0053 | K | 0.0883 | 0.0044 |
| Br | 0.0710 | 0.015 | Br | 0.0710 | 0.015 |
| NiO | 0.0577 | 0.0097 | Ni | 0.0453 | 0.0076 |
| Nd2O3 | 0.0384 | 0.010 | Nd | 0.0329 | 0.0089 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 31.6 %
Total Weight% Oxygen = 36.90

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:16:52
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**ROZ-1**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.6.2024 | 18:45:30 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 70.62 | 0.23 | Si | 33.01 | 0.11 |
| Al2O3 | 16.26 | 0.18 | Al | 8.60 | 0.10 |
| Na2O | 4.11 | 0.10 | Na | 3.05 | 0.07 |
| K2O | 3.28 | 0.09 | K | 2.72 | 0.07 |
| F | 1.54 | 0.07 | F | 1.54 | 0.07 |
| Fe2O3 | 0.987 | 0.049 | Fe | 0.690 | 0.034 |
| MnO | 0.694 | 0.035 | Mn | 0.537 | 0.027 |
| Rb2O | 0.368 | 0.018 | Rb | 0.336 | 0.017 |
| CaO | 0.222 | 0.011 | Ca | 0.159 | 0.0079 |
| P2O5 | 0.143 | 0.0072 | Px | 0.0625 | 0.0031 |
| SnO2 | 0.124 | 0.0062 | Sn | 0.0975 | 0.0049 |
| MgO | 0.0497 | 0.0025 | Mg | 0.0300 | 0.0015 |
| TiO2 | 0.0440 | 0.0022 | Ti | 0.0264 | 0.0013 |
| Cs2O | 0.0305 | 0.0040 | Cs | 0.0288 | 0.0038 |
| Nb2O5 | 0.0286 | 0.0014 | Nb | 0.0200 | 0.0010 |
| ZnO | 0.0192 | 0.0010 | Zn | 0.0154 | 0.0008 |
| WO3 | 0.0067 | 0.0011 | W | 0.0053 | 0.0008 |
| ZrO2 | 0.0058 | 0.0008 | Zr | 0.0043 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0052 | 0.0004 | Ga | 0.0038 | 0.0003 |
| SrO | 0.0050 | 0.0006 | Sr | 0.0042 | 0.0005 |
| NiO | 0.0048 | 0.0005 | Ni | 0.0038 | 0.0004 |

Rest = 1.46 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 95.6 %
Total Weight% Oxygen = 47.59

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 10:13:05
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**ROZ-2**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 18.7.2024 | 13:42:31 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 471.44 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8253.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 78.36 | 0.21 | Si | 36.63 | 0.10 |
| Al2O3 | 12.33 | 0.16 | Al | 6.52 | 0.09 |
| Na2O | 5.49 | 0.11 | Na | 4.07 | 0.08 |
| K2O | 1.32 | 0.06 | K | 1.09 | 0.05 |
| F | 0.474 | 0.041 | F | 0.474 | 0.041 |
| Fe2O3 | 0.427 | 0.021 | Fe | 0.299 | 0.015 |
| MnO | 0.240 | 0.012 | Mn | 0.186 | 0.0093 |
| CaO | 0.121 | 0.0060 | Ca | 0.0864 | 0.0043 |
| P2O5 | 0.113 | 0.0056 | Px | 0.0492 | 0.0025 |
| Rb2O | 0.112 | 0.0056 | Rb | 0.103 | 0.0051 |
| SnO2 | 0.0562 | 0.0028 | Sn | 0.0443 | 0.0022 |
| MgO | 0.0470 | 0.0024 | Mg | 0.0284 | 0.0014 |
| Nb2O5 | 0.0192 | 0.0010 | Nb | 0.0134 | 0.0007 |
| TiO2 | 0.0184 | 0.0009 | Ti | 0.0111 | 0.0006 |
| Cs2O | 0.0118 | 0.0035 | Cs | 0.0112 | 0.0033 |
| ZrO2 | 0.0106 | 0.0007 | Zr | 0.0079 | 0.0005 |
| ZnO | 0.0062 | 0.0004 | Zn | 0.0050 | 0.0003 |
| WO3 | 0.0044 | 0.0009 | W | 0.0035 | 0.0007 |
| La2O3 | 0.0033 | 0.0008 | La | 0.0028 | 0.0007 |
| NiO | 0.0030 | 0.0004 | Ni | 0.0024 | 0.0003 |
| Ga2O3 | 0.0025 | 0.0003 | Ga | 0.0019 | 0.0002 |

Rest = 0.83 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 98.2 %
Total Weight% Oxygen = 49.51

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

19.7.2024 7:25:33
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**ROZ 2-mag -**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 18.7.2024 | 14:51:17 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 67.15 | 0.23 | Si | 31.39 | 0.11 |
| Al2O3 | 18.09 | 0.19 | Al | 9.57 | 0.10 |
| Na2O | 4.67 | 0.11 | Na | 3.46 | 0.08 |
| K2O | 3.43 | 0.09 | K | 2.85 | 0.08 |
| Fe2O3 | 1.56 | 0.06 | Fe | 1.09 | 0.04 |
| F | 1.16 | 0.06 | F | 1.16 | 0.06 |
| MnO | 0.891 | 0.044 | Mn | 0.690 | 0.034 |
| CaO | 0.383 | 0.019 | Ca | 0.274 | 0.014 |
| Rb2O | 0.375 | 0.019 | Rb | 0.343 | 0.017 |
| P2O5 | 0.280 | 0.014 | Px | 0.122 | 0.0061 |
| SnO2 | 0.105 | 0.0052 | Sn | 0.0823 | 0.0041 |
| MgO | 0.0795 | 0.0040 | Mg | 0.0479 | 0.0024 |
| Nb2O5 | 0.0505 | 0.0025 | Nb | 0.0353 | 0.0018 |
| TiO2 | 0.0489 | 0.0024 | Ti | 0.0293 | 0.0015 |
| Cs2O | 0.0413 | 0.0040 | Cs | 0.0390 | 0.0038 |
| ZrO2 | 0.0303 | 0.0015 | Zr | 0.0224 | 0.0011 |
| ZnO | 0.0250 | 0.0012 | Zn | 0.0201 | 0.0010 |
| WO3 | 0.0232 | 0.0012 | W | 0.0184 | 0.0009 |
| NiO | 0.0216 | 0.0011 | Ni | 0.0170 | 0.0008 |
| Ga2O3 | 0.0052 | 0.0004 | Ga | 0.0039 | 0.0003 |
| La2O3 | 0.0027 | 0.0009 | La | 0.0023 | 0.0008 |
| SrO | 0.0017 | 0.0006 | Sr | 0.0015 | 0.0005 |

Rest = 1.58 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 99.0 %
Total Weight% Oxygen = 47.15

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 12:03:35
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**ROZ2m. A**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 23.1.2025 | 9:52:57 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 66.08 | 0.24 | Si | 30.89 | 0.11 |
| Al2O3 | 17.78 | 0.19 | Al | 9.41 | 0.10 |
| Na2O | 4.30 | 0.10 | Na | 3.19 | 0.08 |
| K2O | 3.85 | 0.10 | K | 3.20 | 0.08 |
| Cl | 3.13 | 0.09 | Cl | 3.13 | 0.09 |
| Fe2O3 | 1.56 | 0.06 | Fe | 1.09 | 0.04 |
| MnO | 0.973 | 0.048 | Mn | 0.754 | 0.037 |
| Rb2O | 0.588 | 0.029 | Rb | 0.538 | 0.027 |
| P2O5 | 0.556 | 0.028 | Px | 0.243 | 0.012 |
| CaO | 0.451 | 0.022 | Ca | 0.322 | 0.016 |
| MgO | 0.262 | 0.014 | Mg | 0.158 | 0.0087 |
| SnO2 | 0.0970 | 0.0099 | Sn | 0.0764 | 0.0078 |
| S | 0.0730 | 0.0036 | S | 0.0730 | 0.0036 |
| Cs2O | 0.0708 | 0.020 | Cs | 0.0668 | 0.019 |
| Nb2O5 | 0.0671 | 0.0066 | Nb | 0.0469 | 0.0046 |
| TiO2 | 0.0523 | 0.0026 | Ti | 0.0313 | 0.0016 |
| ZrO2 | 0.0329 | 0.0063 | Zr | 0.0244 | 0.0046 |
| NiO | 0.0308 | 0.0030 | Ni | 0.0242 | 0.0023 |
| ZnO | 0.0299 | 0.0037 | Zn | 0.0240 | 0.0030 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 40.9 %
Total Weight% Oxygen = 46.70

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 12:02:16
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**ROZ2m. C**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 23.1.2025 | 10:13:47 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 66.94 | 0.24 | Si | 31.30 | 0.11 |
| Al2O3 | 17.64 | 0.19 | Al | 9.34 | 0.10 |
| Na2O | 4.65 | 0.11 | Na | 3.45 | 0.08 |
| K2O | 3.66 | 0.09 | K | 3.04 | 0.08 |
| Cl | 2.72 | 0.08 | Cl | 2.72 | 0.08 |
| Fe2O3 | 1.42 | 0.06 | Fe | 0.991 | 0.04 |
| MnO | 0.977 | 0.049 | Mn | 0.757 | 0.038 |
| Rb2O | 0.530 | 0.026 | Rb | 0.484 | 0.024 |
| P2O5 | 0.417 | 0.021 | Px | 0.182 | 0.0091 |
| CaO | 0.351 | 0.018 | Ca | 0.251 | 0.013 |
| MgO | 0.280 | 0.014 | Mg | 0.169 | 0.0084 |
| SO3 | 0.0872 | 0.0049 | Sx | 0.0349 | 0.0020 |
| SnO2 | 0.0730 | 0.0095 | Sn | 0.0575 | 0.0075 |
| Nb2O5 | 0.0630 | 0.0067 | Nb | 0.0441 | 0.0047 |
| TiO2 | 0.0528 | 0.0026 | Ti | 0.0317 | 0.0016 |
| WO3 | 0.0408 | 0.0079 | W | 0.0323 | 0.0062 |
| ZnO | 0.0325 | 0.0031 | Zn | 0.0261 | 0.0025 |
| NiO | 0.0302 | 0.0028 | Ni | 0.0237 | 0.0022 |
| ZrO2 | 0.0280 | 0.0063 | Zr | 0.0207 | 0.0047 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 42.7 %
Total Weight% Oxygen = 47.05

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 12:00:24
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**ROZ2m. B**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 23.1.2025 | 9:29:53 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 66.20 | 0.24 | Si | 30.95 | 0.11 |
| Al2O3 | 18.40 | 0.19 | Al | 9.74 | 0.10 |
| Na2O | 4.40 | 0.10 | Na | 3.27 | 0.08 |
| K2O | 3.72 | 0.09 | K | 3.09 | 0.08 |
| Cl | 2.61 | 0.08 | Cl | 2.61 | 0.08 |
| Fe2O3 | 1.61 | 0.06 | Fe | 1.13 | 0.04 |
| MnO | 1.05 | 0.05 | Mn | 0.817 | 0.04 |
| Rb2O | 0.551 | 0.027 | Rb | 0.504 | 0.025 |
| P2O5 | 0.387 | 0.019 | Px | 0.169 | 0.0084 |
| CaO | 0.363 | 0.018 | Ca | 0.259 | 0.013 |
| MgO | 0.243 | 0.013 | Mg | 0.146 | 0.0077 |
| SO3 | 0.143 | 0.0071 | Sx | 0.0573 | 0.0029 |
| SnO2 | 0.0796 | 0.0085 | Sn | 0.0627 | 0.0067 |
| Nb2O5 | 0.0612 | 0.0057 | Nb | 0.0428 | 0.0040 |
| TiO2 | 0.0591 | 0.0030 | Ti | 0.0354 | 0.0018 |
| ZrO2 | 0.0421 | 0.0053 | Zr | 0.0312 | 0.0039 |
| ZnO | 0.0321 | 0.0030 | Zn | 0.0258 | 0.0024 |
| NiO | 0.0288 | 0.0025 | Ni | 0.0226 | 0.0020 |
| MoO3 | 0.0191 | 0.0057 | Mo | 0.0127 | 0.0038 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 46.1 %
Total Weight% Oxygen = 47.04

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 10:53:02
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**ROZ2m.D**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.2.2025 | 12:14:09 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 65.79 | 0.24 | Si | 30.76 | 0.11 |
| Al2O3 | 18.87 | 0.20 | Al | 9.98 | 0.10 |
| Na2O | 4.08 | 0.10 | Na | 3.03 | 0.07 |
| K2O | 4.04 | 0.10 | K | 3.35 | 0.08 |
| Cl | 2.52 | 0.08 | Cl | 2.52 | 0.08 |
| Fe2O3 | 1.66 | 0.06 | Fe | 1.16 | 0.04 |
| MnO | 1.10 | 0.05 | Mn | 0.850 | 0.04 |
| Rb2O | 0.607 | 0.030 | Rb | 0.555 | 0.028 |
| CaO | 0.372 | 0.019 | Ca | 0.266 | 0.013 |
| P2O5 | 0.363 | 0.018 | Px | 0.159 | 0.0079 |
| MgO | 0.252 | 0.013 | Mg | 0.152 | 0.0081 |
| SnO2 | 0.0792 | 0.0091 | Sn | 0.0624 | 0.0072 |
| Nb2O5 | 0.0628 | 0.0061 | Nb | 0.0439 | 0.0043 |
| TiO2 | 0.0565 | 0.0028 | Ti | 0.0339 | 0.0017 |
| S | 0.0412 | 0.0022 | S | 0.0412 | 0.0022 |
| ZrO2 | 0.0369 | 0.0057 | Zr | 0.0273 | 0.0042 |
| ZnO | 0.0320 | 0.0032 | Zn | 0.0257 | 0.0026 |
| NiO | 0.0317 | 0.0026 | Ni | 0.0249 | 0.0020 |
| La2O3 | 0.0144 | 0.0037 | La | 0.0123 | 0.0031 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 45.2 %
Total Weight% Oxygen = 46.95

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 11:58:04
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**ROZ2. TF A**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 24.1.2025 | 6:41:02 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 39.96 | 0.24 | Si | 18.68 | 0.11 |
| Al2O3 | 30.28 | 0.23 | Al | 16.02 | 0.12 |
| SnO2 | 6.78 | 0.13 | Sn | 5.34 | 0.10 |
| Fe2O3 | 5.40 | 0.11 | Fe | 3.78 | 0.08 |
| MnO | 3.54 | 0.09 | Mn | 2.74 | 0.07 |
| P2O5 | 3.52 | 0.09 | Px | 1.54 | 0.04 |
| Cl | 2.96 | 0.08 | Cl | 2.96 | 0.08 |
| CaO | 2.58 | 0.08 | Ca | 1.84 | 0.06 |
| Na2O | 2.40 | 0.09 | Na | 1.78 | 0.07 |
| K2O | 0.982 | 0.049 | K | 0.815 | 0.041 |
| ZrO2 | 0.459 | 0.023 | Zr | 0.340 | 0.017 |
| MgO | 0.295 | 0.017 | Mg | 0.178 | 0.010 |
| Rb2O | 0.181 | 0.0090 | Rb | 0.165 | 0.0083 |
| NiO | 0.141 | 0.0070 | Ni | 0.111 | 0.0055 |
| Cs2O | 0.135 | 0.037 | Cs | 0.127 | 0.035 |
| ZnO | 0.122 | 0.0061 | Zn | 0.0983 | 0.0049 |
| TiO2 | 0.119 | 0.0060 | Ti | 0.0715 | 0.0036 |
| Nb2O5 | 0.0868 | 0.011 | Nb | 0.0607 | 0.0077 |
| S | 0.0401 | 0.0024 | S | 0.0401 | 0.0024 |
| Br | 0.0247 | 0.0051 | Br | 0.0247 | 0.0051 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 41.7 %
Total Weight% Oxygen = 43.29

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 12:07:53
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**ROZ2.TF B**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 24.1.2025 | 7:50:57 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 39.38 | 0.24 | Si | 18.41 | 0.11 |
| Al2O3 | 30.03 | 0.23 | Al | 15.89 | 0.12 |
| SnO2 | 7.78 | 0.13 | Sn | 6.13 | 0.11 |
| Fe2O3 | 5.45 | 0.11 | Fe | 3.81 | 0.08 |
| MnO | 3.48 | 0.09 | Mn | 2.70 | 0.07 |
| P2O5 | 3.26 | 0.09 | Px | 1.42 | 0.04 |
| Cl | 2.97 | 0.08 | Cl | 2.97 | 0.08 |
| Na2O | 2.53 | 0.09 | Na | 1.88 | 0.07 |
| CaO | 2.40 | 0.08 | Ca | 1.72 | 0.05 |
| K2O | 0.905 | 0.045 | K | 0.751 | 0.037 |
| ZrO2 | 0.575 | 0.029 | Zr | 0.426 | 0.021 |
| MgO | 0.271 | 0.016 | Mg | 0.163 | 0.0096 |
| Rb2O | 0.170 | 0.0085 | Rb | 0.155 | 0.0078 |
| Cs2O | 0.145 | 0.038 | Cs | 0.137 | 0.035 |
| ZnO | 0.134 | 0.0067 | Zn | 0.108 | 0.0054 |
| TiO2 | 0.130 | 0.0065 | Ti | 0.0778 | 0.0039 |
| Nb2O5 | 0.108 | 0.011 | Nb | 0.0756 | 0.0077 |
| NiO | 0.0946 | 0.0047 | Ni | 0.0743 | 0.0037 |
| SO3 | 0.0842 | 0.0045 | Sx | 0.0337 | 0.0018 |
| WO3 | 0.0531 | 0.013 | W | 0.0421 | 0.010 |
| Br | 0.0300 | 0.0050 | Br | 0.0300 | 0.0050 |
| Ga2O3 | 0.0153 | 0.0049 | Ga | 0.0114 | 0.0037 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 42.8 %
Total Weight% Oxygen = 42.99

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 12:05:24
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**ROZ2-TZ_C**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 22.1.2025 | 6:54:17 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 40.06 | 0.24 | Si | 18.73 | 0.11 |
| Al2O3 | 29.52 | 0.23 | Al | 15.62 | 0.12 |
| SnO2 | 6.66 | 0.12 | Sn | 5.24 | 0.10 |
| Fe2O3 | 5.49 | 0.11 | Fe | 3.84 | 0.08 |
| P2O5 | 3.56 | 0.09 | Px | 1.55 | 0.04 |
| MnO | 3.54 | 0.09 | Mn | 2.74 | 0.07 |
| Cl | 3.41 | 0.09 | Cl | 3.41 | 0.09 |
| CaO | 2.58 | 0.08 | Ca | 1.84 | 0.06 |
| Na2O | 2.47 | 0.10 | Na | 1.83 | 0.08 |
| K2O | 1.06 | 0.05 | K | 0.878 | 0.04 |
| ZrO2 | 0.550 | 0.027 | Zr | 0.407 | 0.020 |
| MgO | 0.308 | 0.019 | Mg | 0.186 | 0.011 |
| Rb2O | 0.189 | 0.0094 | Rb | 0.173 | 0.0086 |
| ZnO | 0.139 | 0.0069 | Zn | 0.111 | 0.0056 |
| TiO2 | 0.124 | 0.0062 | Ti | 0.0743 | 0.0037 |
| Nb2O5 | 0.0992 | 0.013 | Nb | 0.0694 | 0.0088 |
| NiO | 0.0851 | 0.0052 | Ni | 0.0669 | 0.0041 |
| WO3 | 0.0539 | 0.015 | W | 0.0427 | 0.012 |
| S | 0.0527 | 0.0026 | S | 0.0527 | 0.0026 |
| Br | 0.0362 | 0.0058 | Br | 0.0362 | 0.0058 |
| Ar | 0.0268 | 0.0060 | Ar | 0.0268 | 0.0060 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 37.9 %
Total Weight% Oxygen = 43.07

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

4.3.2025 9:44:06
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**ROZ2.TF D**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111
Method : UQ-i
Kappa List : AnySample
Shapes & ImpFc : Teflon
Calculated as : Oxides
Case Number : 0 = All known

Measured on : 24.1.2025 7:30:49
X-ray Path: : Vacuum
Film Type : PP 6mu
Collimator Mask : ø 29 mm
Viewed Diameter = 20.00 mm
Viewed Area = 314.16 mm2
Viewed Mass = 5500.00 mg
Sample Height = 4.00 mm

Reporting Level > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err.

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 40.97 | 0.25 | Si | 19.15 | 0.11 |
| Al2O3 | 29.12 | 0.23 | Al | 15.41 | 0.12 |
| SnO2 | 6.78 | 0.13 | Sn | 5.34 | 0.10 |
| Fe2O3 | 5.44 | 0.11 | Fe | 3.81 | 0.08 |
| MnO | 3.45 | 0.09 | Mn | 2.67 | 0.07 |
| Cl | 3.39 | 0.09 | Cl | 3.39 | 0.09 |
| P2O5 | 3.25 | 0.09 | Px | 1.42 | 0.04 |
| Na2O | 2.72 | 0.10 | Na | 2.01 | 0.07 |
| CaO | 2.37 | 0.08 | Ca | 1.69 | 0.05 |
| K2O | 0.883 | 0.044 | K | 0.733 | 0.036 |
| ZrO2 | 0.553 | 0.028 | Zr | 0.410 | 0.020 |
| MgO | 0.327 | 0.018 | Mg | 0.197 | 0.011 |
| Rb2O | 0.170 | 0.0085 | Rb | 0.155 | 0.0077 |
| ZnO | 0.130 | 0.0065 | Zn | 0.104 | 0.0052 |
| TiO2 | 0.125 | 0.0062 | Ti | 0.0748 | 0.0037 |
| Nb2O5 | 0.108 | 0.013 | Nb | 0.0756 | 0.0090 |
| NiO | 0.0972 | 0.0051 | Ni | 0.0764 | 0.0040 |
| WO3 | 0.0542 | 0.016 | W | 0.0430 | 0.012 |
| S | 0.0504 | 0.0027 | S | 0.0504 | 0.0027 |
| Br | 0.0259 | 0.0059 | Br | 0.0259 | 0.0059 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 38.1 %
Total Weight% Oxygen = 43.16

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:33:56
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**SMP1**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 20.5.2022 | 12:44:36 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 68.26 | 0.23 | Si | 31.91 | 0.11 |
| Al2O3 | 15.14 | 0.18 | Al | 8.01 | 0.09 |
| K2O | 8.09 | 0.14 | K | 6.71 | 0.11 |
| Na2O | 3.47 | 0.09 | Na | 2.57 | 0.07 |
| Fe2O3 | 2.39 | 0.08 | Fe | 1.67 | 0.05 |
| CaO | 0.276 | 0.014 | Ca | 0.197 | 0.0098 |
| MgO | 0.155 | 0.0078 | Mg | 0.0937 | 0.0047 |
| TiO2 | 0.0924 | 0.0046 | Ti | 0.0554 | 0.0028 |
| Rb2O | 0.0809 | 0.0040 | Rb | 0.0740 | 0.0037 |
| P | 0.0757 | 0.0038 | P | 0.0757 | 0.0038 |
| MnO | 0.0259 | 0.0013 | Mn | 0.0200 | 0.0010 |
| Cl | 0.0186 | 0.0035 | Cl | 0.0186 | 0.0035 |
| Nb2O5 | 0.0104 | 0.0009 | Nb | 0.0073 | 0.0006 |
| ZnO | 0.0065 | 0.0005 | Zn | 0.0053 | 0.0004 |
| SrO | 0.0053 | 0.0006 | Sr | 0.0045 | 0.0005 |
| Ga2O3 | 0.0049 | 0.0004 | Ga | 0.0036 | 0.0003 |
| ZrO2 | 0.0035 | 0.0009 | Zr | 0.0026 | 0.0007 |
| Sc2O3 | 0.0016 | 0.0004 | Sc | 0.0011 | 0.0003 |

Rest = 1.90 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 80.8 %
Total Weight% Oxygen = 46.66

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:35:17
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**SMP2**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 16.5.2022 | 8:20:50 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 74.91 | 0.22 | Si | 35.02 | 0.10 |
| Al2O3 | 12.10 | 0.16 | Al | 6.41 | 0.09 |
| K2O | 6.47 | 0.12 | K | 5.37 | 0.10 |
| Na2O | 3.56 | 0.09 | Na | 2.64 | 0.07 |
| Fe2O3 | 0.489 | 0.024 | Fe | 0.342 | 0.017 |
| CaO | 0.240 | 0.012 | Ca | 0.171 | 0.0086 |
| MgO | 0.0956 | 0.0048 | Mg | 0.0577 | 0.0029 |
| TiO2 | 0.0867 | 0.0043 | Ti | 0.0520 | 0.0026 |
| P2O5 | 0.0760 | 0.0038 | Px | 0.0332 | 0.0017 |
| Rb2O | 0.0444 | 0.0022 | Rb | 0.0406 | 0.0020 |
| MnO | 0.0083 | 0.0006 | Mn | 0.0065 | 0.0005 |
| ZrO2 | 0.0041 | 0.0008 | Zr | 0.0030 | 0.0006 |
| SrO | 0.0038 | 0.0006 | Sr | 0.0032 | 0.0005 |
| ZnO | 0.0027 | 0.0004 | Zn | 0.0022 | 0.0003 |
| Ga2O3 | 0.0024 | 0.0004 | Ga | 0.0018 | 0.0003 |

Rest = 1.90 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 83.2 %
Total Weight% Oxygen = 47.95

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

26.3.2025 12:57:54
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**SMP2 mag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.5.2022 | 12:11:33 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 60.97 | 0.24 | Si | 28.51 | 0.11 |
| Al2O3 | 18.73 | 0.20 | Al | 9.91 | 0.10 |
| K2O | 5.91 | 0.12 | K | 4.90 | 0.10 |
| Fe2O3 | 4.65 | 0.11 | Fe | 3.25 | 0.07 |
| Na2O | 4.63 | 0.11 | Na | 3.43 | 0.08 |
| MgO | 1.01 | 0.05 | Mg | 0.607 | 0.03 |
| TiO2 | 0.485 | 0.024 | Ti | 0.291 | 0.014 |
| CaO | 0.360 | 0.018 | Ca | 0.257 | 0.013 |
| P2O5 | 0.224 | 0.011 | Px | 0.0976 | 0.0049 |
| MnO | 0.0843 | 0.0042 | Mn | 0.0653 | 0.0033 |
| Rb2O | 0.0538 | 0.0027 | Rb | 0.0492 | 0.0025 |
| ZrO2 | 0.0247 | 0.0012 | Zr | 0.0183 | 0.0009 |
| ZnO | 0.0167 | 0.0008 | Zn | 0.0134 | 0.0007 |
| Nb2O5 | 0.0161 | 0.0009 | Nb | 0.0113 | 0.0006 |
| Y2O3 | 0.0081 | 0.0013 | Y | 0.0064 | 0.0010 |
| Co3O4 | 0.0065 | 0.0005 | Co | 0.0047 | 0.0004 |
| SnO2 | 0.0062 | 0.0021 | Sn | 0.0049 | 0.0016 |
| Ga2O3 | 0.0059 | 0.0005 | Ga | 0.0044 | 0.0003 |
| La2O3 | 0.0046 | 0.0011 | La | 0.0039 | 0.0009 |
| PbO | 0.0044 | 0.0012 | Pb | 0.0041 | 0.0011 |
| SrO | 0.0039 | 0.0006 | Sr | 0.0033 | 0.0005 |
| U3O8 | 0.0032 | 0.0010 | U | 0.0027 | 0.0009 |
| Sc2O3 | 0.0012 | 0.0004 | Sc | 0.00080 | 0.0003 |

Rest = 2.80 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 82.3 %
Total Weight% Oxygen = 45.75

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

26.3.2025 10:00:13
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**SMP2 nemag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.5.2022 | 11:46:11 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 72.43 | 0.22 | Si | 33.86 | 0.10 |
| Al2O3 | 13.56 | 0.17 | Al | 7.17 | 0.09 |
| K2O | 6.50 | 0.12 | K | 5.40 | 0.10 |
| Na2O | 5.52 | 0.11 | Na | 4.10 | 0.08 |
| CaO | 0.238 | 0.012 | Ca | 0.170 | 0.0085 |
| Fe2O3 | 0.230 | 0.011 | Fe | 0.161 | 0.0080 |
| MgO | 0.149 | 0.0074 | Mg | 0.0897 | 0.0045 |
| P | 0.0694 | 0.0035 | P | 0.0694 | 0.0035 |
| Rb2O | 0.0426 | 0.0021 | Rb | 0.0390 | 0.0019 |
| TiO2 | 0.0350 | 0.0018 | Ti | 0.0210 | 0.0011 |
| MnO | 0.0061 | 0.0006 | Mn | 0.0047 | 0.0004 |
| SrO | 0.0038 | 0.0006 | Sr | 0.0032 | 0.0005 |
| La2O3 | 0.0031 | 0.0010 | La | 0.0027 | 0.0008 |
| ZrO2 | 0.0027 | 0.0008 | Zr | 0.0020 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0022 | 0.0004 | Ga | 0.0016 | 0.0003 |
| ZnO | 0.0016 | 0.0004 | Zn | 0.0013 | 0.0003 |

Rest = 1.20 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 82.5 %
Total Weight% Oxygen = 47.70

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 10:23:46
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Ver**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.7.2024 | 14:33:33 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 69.96 | 0.23 | Si | 32.71 | 0.11 |
| Al2O3 | 12.99 | 0.17 | Al | 6.87 | 0.09 |
| P2O5 | 7.22 | 0.13 | Px | 3.15 | 0.06 |
| K2O | 5.26 | 0.11 | K | 4.36 | 0.09 |
| CaO | 0.895 | 0.045 | Ca | 0.640 | 0.032 |
| Na2O | 0.633 | 0.032 | Na | 0.470 | 0.023 |
| F | 0.611 | 0.050 | F | 0.611 | 0.050 |
| Rb2O | 0.188 | 0.0094 | Rb | 0.172 | 0.0086 |
| Fe2O3 | 0.172 | 0.0086 | Fe | 0.120 | 0.0060 |
| SnO2 | 0.125 | 0.0063 | Sn | 0.0986 | 0.0049 |
| TiO2 | 0.0815 | 0.0041 | Ti | 0.0489 | 0.0024 |
| MgO | 0.0750 | 0.0037 | Mg | 0.0452 | 0.0023 |
| ZnO | 0.0637 | 0.0032 | Zn | 0.0511 | 0.0026 |
| CuO | 0.0510 | 0.0025 | Cu | 0.0407 | 0.0020 |
| S | 0.0410 | 0.0020 | S | 0.0410 | 0.0020 |
| SrO | 0.0342 | 0.0017 | Sr | 0.0289 | 0.0014 |
| BaO | 0.0302 | 0.0057 | Ba | 0.0271 | 0.0051 |
| NiO | 0.0082 | 0.0005 | Ni | 0.0065 | 0.0004 |
| WO3 | 0.0058 | 0.0010 | W | 0.0046 | 0.0008 |
| MnO | 0.0037 | 0.0005 | Mn | 0.0029 | 0.0004 |
| La2O3 | 0.0034 | 0.0009 | La | 0.0029 | 0.0007 |
| Ga2O3 | 0.0016 | 0.0003 | Ga | 0.0012 | 0.0002 |

Rest = 1.56 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 100.2 %
Total Weight% Oxygen = 48.94

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

26.3.2025 10:28:29
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Ver mag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.7.2024 | 15:08:42 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 61.53 | 0.24 | Si | 28.76 | 0.11 |
| Al2O3 | 15.78 | 0.18 | Al | 8.35 | 0.10 |
| P2O5 | 7.59 | 0.13 | Px | 3.31 | 0.06 |
| K2O | 5.65 | 0.12 | K | 4.69 | 0.10 |
| CaO | 1.77 | 0.07 | Ca | 1.27 | 0.05 |
| Fe2O3 | 1.34 | 0.06 | Fe | 0.937 | 0.04 |
| ZnO | 0.766 | 0.038 | Zn | 0.615 | 0.031 |
| Na2O | 0.764 | 0.038 | Na | 0.566 | 0.028 |
| F | 0.643 | 0.06 | F | 0.643 | 0.06 |
| SnO2 | 0.630 | 0.031 | Sn | 0.496 | 0.025 |
| CuO | 0.383 | 0.019 | Cu | 0.306 | 0.015 |
| S | 0.363 | 0.018 | S | 0.363 | 0.018 |
| Rb2O | 0.217 | 0.011 | Rb | 0.198 | 0.0099 |
| MgO | 0.180 | 0.0090 | Mg | 0.108 | 0.0054 |
| NiO | 0.137 | 0.0069 | Ni | 0.108 | 0.0054 |
| TiO2 | 0.130 | 0.0065 | Ti | 0.0777 | 0.0039 |
| WO3 | 0.0917 | 0.0046 | W | 0.0727 | 0.0036 |
| SrO | 0.0374 | 0.0019 | Sr | 0.0316 | 0.0016 |
| BaO | 0.0334 | 0.0062 | Ba | 0.0299 | 0.0056 |
| MnO | 0.0203 | 0.0010 | Mn | 0.0157 | 0.0008 |
| ZrO2 | 0.0200 | 0.0010 | Zr | 0.0148 | 0.0007 |
| CdO | 0.0087 | 0.0016 | Cd | 0.0076 | 0.0014 |
| MoO3 | 0.0072 | 0.0017 | Mo | 0.0048 | 0.0011 |
| Bi2O3 | 0.0042 | 0.0008 | Bi | 0.0037 | 0.0007 |
| Nb2O5 | 0.0032 | 0.0010 | Nb | 0.0022 | 0.0007 |
| Cr2O3 | 0.0023 | 0.0006 | Cr | 0.0016 | 0.0004 |
| Co3O4 | 0.0014 | 0.0005 | Co | 0.0010 | 0.0003 |

Rest = 1.90 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 100.0 %
Total Weight% Oxygen = 47.11

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

26.3.2025 10:26:23
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Ver nemag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 17.7.2024 | 14:50:31 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 68.97 | 0.23 | Si | 32.24 | 0.11 |
| Al2O3 | 13.47 | 0.17 | Al | 7.13 | 0.09 |
| P2O5 | 8.36 | 0.14 | Px | 3.65 | 0.06 |
| K2O | 5.02 | 0.11 | K | 4.17 | 0.09 |
| CaO | 0.788 | 0.039 | Ca | 0.563 | 0.028 |
| F | 0.666 | 0.05 | F | 0.666 | 0.05 |
| Na2O | 0.479 | 0.024 | Na | 0.355 | 0.018 |
| Rb2O | 0.176 | 0.0088 | Rb | 0.161 | 0.0081 |
| Fe2O3 | 0.113 | 0.0056 | Fe | 0.0787 | 0.0039 |
| TiO2 | 0.0886 | 0.0044 | Ti | 0.0531 | 0.0027 |
| MgO | 0.0690 | 0.0034 | Mg | 0.0416 | 0.0021 |
| SnO2 | 0.0542 | 0.0027 | Sn | 0.0427 | 0.0021 |
| BaO | 0.0357 | 0.0054 | Ba | 0.0319 | 0.0048 |
| SrO | 0.0275 | 0.0014 | Sr | 0.0233 | 0.0012 |
| S | 0.0226 | 0.0011 | S | 0.0226 | 0.0011 |
| CuO | 0.0210 | 0.0010 | Cu | 0.0168 | 0.0008 |
| ZnO | 0.0158 | 0.0008 | Zn | 0.0127 | 0.0006 |
| MoO3 | 0.0056 | 0.0014 | Mo | 0.0037 | 0.0009 |
| MnO | 0.0033 | 0.0004 | Mn | 0.0025 | 0.0003 |
| ZrO2 | 0.0030 | 0.0009 | Zr | 0.0022 | 0.0007 |
| NiO | 0.0013 | 0.0004 | Ni | 0.00099 | 0.0003 |

Rest = 1.61 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 99.6 %
Total Weight% Oxygen = 49.12

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 11:40:03
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VER-TF.A**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 13.2.2025 | 10:08:17 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| P2O5 | 50.17 | 0.25 | Px | 21.90 | 0.11 |
| Al2O3 | 34.16 | 0.24 | Al | 18.08 | 0.13 |
| Cl | 4.29 | 0.10 | Cl | 4.29 | 0.10 |
| SiO2 | 3.91 | 0.10 | Si | 1.83 | 0.05 |
| SnO2 | 2.38 | 0.08 | Sn | 1.87 | 0.06 |
| CaO | 1.69 | 0.06 | Ca | 1.21 | 0.05 |
| ZnO | 0.734 | 0.037 | Zn | 0.590 | 0.029 |
| Na2O | 0.549 | 0.09 | Na | 0.407 | 0.07 |
| S | 0.446 | 0.022 | S | 0.446 | 0.022 |
| Fe2O3 | 0.438 | 0.022 | Fe | 0.306 | 0.015 |
| TiO2 | 0.405 | 0.020 | Ti | 0.243 | 0.012 |
| MgO | 0.296 | 0.019 | Mg | 0.179 | 0.011 |
| CuO | 0.266 | 0.013 | Cu | 0.212 | 0.011 |
| SrO | 0.0812 | 0.0070 | Sr | 0.0686 | 0.0059 |
| K2O | 0.0748 | 0.0039 | K | 0.0621 | 0.0032 |
| NiO | 0.0604 | 0.0040 | Ni | 0.0475 | 0.0031 |
| MnO | 0.0253 | 0.0031 | Mn | 0.0196 | 0.0024 |
| Br | 0.0240 | 0.0051 | Br | 0.0240 | 0.0051 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 32.8 %
Total Weight% Oxygen = 48.22

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 11:37:58
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VER-TF.B**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

Method : UQ-i
Kappa List : AnySample
Shapes & ImpFc : Teflon
Calculated as : Oxides
Case Number : 0 = All known

Reporting Level > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err.

Measured on : 13.2.2025 10:51:08
X-ray Path: : Vacuum
Film Type : PP 6mu
Collimator Mask : ø 29 mm
Viewed Diameter = 20.00 mm
Viewed Area = 314.16 mm2
Viewed Mass = 5500.00 mg
Sample Height = 4.00 mm

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| P2O5 | 47.91 | 0.25 | Px | 20.91 | 0.11 |
| Al2O3 | 33.04 | 0.24 | Al | 17.49 | 0.12 |
| SiO2 | 5.11 | 0.11 | Si | 2.39 | 0.05 |
| Cl | 3.80 | 0.10 | Cl | 3.80 | 0.10 |
| SnO2 | 3.60 | 0.09 | Sn | 2.83 | 0.07 |
| CaO | 1.92 | 0.07 | Ca | 1.37 | 0.05 |
| ZnO | 1.01 | 0.05 | Zn | 0.808 | 0.04 |
| Na2O | 0.977 | 0.09 | Na | 0.725 | 0.07 |
| S | 0.580 | 0.029 | S | 0.580 | 0.029 |
| Fe2O3 | 0.541 | 0.027 | Fe | 0.379 | 0.019 |
| TiO2 | 0.419 | 0.021 | Ti | 0.251 | 0.013 |
| CuO | 0.399 | 0.020 | Cu | 0.319 | 0.016 |
| MgO | 0.315 | 0.018 | Mg | 0.190 | 0.011 |
| K2O | 0.103 | 0.0052 | K | 0.0858 | 0.0043 |
| SrO | 0.0910 | 0.0065 | Sr | 0.0770 | 0.0055 |
| NiO | 0.0604 | 0.0039 | Ni | 0.0475 | 0.0031 |
| WO3 | 0.0398 | 0.012 | W | 0.0316 | 0.0094 |
| CdO | 0.0321 | 0.010 | Cd | 0.0281 | 0.0090 |
| Ar | 0.0239 | 0.0067 | Ar | 0.0239 | 0.0067 |
| Br | 0.0238 | 0.0047 | Br | 0.0238 | 0.0047 |
| MnO | 0.0137 | 0.0028 | Mn | 0.0106 | 0.0022 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 35.9 %
Total Weight% Oxygen = 47.63

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 11:17:26
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VER-TF.C**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 13.2.2025 | 12:39:57 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| P2O5 | 48.50 | 0.25 | Px | 21.17 | 0.11 |
| Al2O3 | 33.43 | 0.24 | Al | 17.69 | 0.12 |
| SiO2 | 5.31 | 0.11 | Si | 2.48 | 0.05 |
| Cl | 3.55 | 0.09 | Cl | 3.55 | 0.09 |
| SnO2 | 2.89 | 0.08 | Sn | 2.27 | 0.07 |
| CaO | 1.58 | 0.06 | Ca | 1.13 | 0.04 |
| ZnO | 1.09 | 0.05 | Zn | 0.876 | 0.04 |
| Na2O | 1.04 | 0.09 | Na | 0.769 | 0.06 |
| S | 0.661 | 0.033 | S | 0.661 | 0.033 |
| Fe2O3 | 0.539 | 0.027 | Fe | 0.377 | 0.019 |
| TiO2 | 0.418 | 0.021 | Ti | 0.251 | 0.013 |
| CuO | 0.385 | 0.019 | Cu | 0.307 | 0.015 |
| MgO | 0.305 | 0.017 | Mg | 0.184 | 0.010 |
| K2O | 0.106 | 0.0053 | K | 0.0879 | 0.0044 |
| SrO | 0.0815 | 0.0060 | Sr | 0.0689 | 0.0050 |
| NiO | 0.0709 | 0.0035 | Ni | 0.0557 | 0.0028 |
| La2O3 | 0.0249 | 0.0049 | La | 0.0213 | 0.0042 |
| Br | 0.0205 | 0.0044 | Br | 0.0205 | 0.0044 |
| MnO | 0.0133 | 0.0026 | Mn | 0.0103 | 0.0020 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 37.3 %
Total Weight% Oxygen = 48.02

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 11:31:17
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VER-TF.D**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 13.2.2025 | 11:36:48 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| P2O5 | 46.94 | 0.25 | Px | 20.48 | 0.11 |
| Al2O3 | 32.47 | 0.23 | Al | 17.18 | 0.12 |
| SiO2 | 5.36 | 0.11 | Si | 2.51 | 0.05 |
| SnO2 | 4.42 | 0.10 | Sn | 3.48 | 0.08 |
| Cl | 3.55 | 0.09 | Cl | 3.55 | 0.09 |
| CaO | 1.99 | 0.07 | Ca | 1.42 | 0.05 |
| ZnO | 1.22 | 0.05 | Zn | 0.982 | 0.04 |
| Na2O | 1.08 | 0.09 | Na | 0.798 | 0.06 |
| S | 0.696 | 0.035 | S | 0.696 | 0.035 |
| Fe2O3 | 0.666 | 0.033 | Fe | 0.466 | 0.023 |
| CuO | 0.471 | 0.023 | Cu | 0.376 | 0.019 |
| TiO2 | 0.430 | 0.021 | Ti | 0.258 | 0.013 |
| MgO | 0.321 | 0.017 | Mg | 0.194 | 0.011 |
| K2O | 0.107 | 0.0053 | K | 0.0887 | 0.0044 |
| NiO | 0.0912 | 0.0045 | Ni | 0.0717 | 0.0036 |
| SrO | 0.0896 | 0.0063 | Sr | 0.0758 | 0.0054 |
| WO3 | 0.0518 | 0.011 | W | 0.0411 | 0.0091 |
| Br | 0.0267 | 0.0046 | Br | 0.0267 | 0.0046 |
| MnO | 0.0229 | 0.0029 | Mn | 0.0177 | 0.0023 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 37.4 %
Total Weight% Oxygen = 47.28

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

25.3.2025 10:22:04
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VER II**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 19.10.2023 | 10:33:59 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 433.74 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7593.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 62.06 | 0.24 | Si | 29.01 | 0.11 |
| Al2O3 | 15.25 | 0.18 | Al | 8.07 | 0.10 |
| P2O5 | 9.83 | 0.15 | Px | 4.29 | 0.06 |
| K2O | 5.26 | 0.11 | K | 4.36 | 0.09 |
| CaO | 1.62 | 0.06 | Ca | 1.16 | 0.05 |
| SnO2 | 1.59 | 0.06 | Sn | 1.25 | 0.05 |
| F | 0.738 | 0.05 | F | 0.738 | 0.05 |
| Na2O | 0.642 | 0.032 | Na | 0.476 | 0.024 |
| Fe2O3 | 0.251 | 0.013 | Fe | 0.175 | 0.0088 |
| Rb2O | 0.207 | 0.010 | Rb | 0.190 | 0.0095 |
| TiO2 | 0.122 | 0.0061 | Ti | 0.0734 | 0.0037 |
| SrO | 0.0870 | 0.0043 | Sr | 0.0736 | 0.0037 |
| MgO | 0.0713 | 0.0036 | Mg | 0.0430 | 0.0021 |
| BaO | 0.0635 | 0.0071 | Ba | 0.0569 | 0.0063 |
| CuO | 0.0571 | 0.0029 | Cu | 0.0456 | 0.0023 |
| S | 0.0420 | 0.0021 | S | 0.0420 | 0.0021 |
| ZnO | 0.0410 | 0.0021 | Zn | 0.0330 | 0.0016 |
| Nb2O5 | 0.0095 | 0.0013 | Nb | 0.0067 | 0.0009 |
| In2O3 | 0.0088 | 0.0020 | In | 0.0073 | 0.0016 |
| PbO | 0.0082 | 0.0020 | Pb | 0.0076 | 0.0018 |
| MnO | 0.0081 | 0.0006 | Mn | 0.0063 | 0.0005 |
| NiO | 0.0039 | 0.0005 | Ni | 0.0031 | 0.0004 |
| Ga2O3 | 0.0016 | 0.0004 | Ga | 0.0012 | 0.0003 |

Rest = 2.03 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 97.2 %
Total Weight% Oxygen = 47.84

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy lom Krasno
357 47 KRASNO

26.3.2025 10:35:04
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Verll mag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 22.11.2023 | 11:48:51 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 44.64 | 0.25 | Si | 20.87 | 0.12 |
| Al2O3 | 19.47 | 0.20 | Al | 10.30 | 0.10 |
| P2O5 | 7.37 | 0.13 | Px | 3.22 | 0.06 |
| K2O | 5.68 | 0.12 | K | 4.72 | 0.10 |
| CaO | 4.94 | 0.11 | Ca | 3.53 | 0.08 |
| SnO2 | 3.75 | 0.09 | Sn | 2.95 | 0.07 |
| Fe2O3 | 3.46 | 0.09 | Fe | 2.42 | 0.06 |
| CuO | 1.24 | 0.06 | Cu | 0.992 | 0.04 |
| ZnO | 1.22 | 0.05 | Zn | 0.977 | 0.04 |
| F | 1.06 | 0.06 | F | 1.06 | 0.06 |
| S | 0.785 | 0.039 | S | 0.785 | 0.039 |
| MgO | 0.345 | 0.017 | Mg | 0.208 | 0.010 |
| Rb2O | 0.322 | 0.016 | Rb | 0.294 | 0.015 |
| Na2O | 0.293 | 0.022 | Na | 0.218 | 0.016 |
| TiO2 | 0.262 | 0.013 | Ti | 0.157 | 0.0078 |
| SrO | 0.138 | 0.0069 | Sr | 0.117 | 0.0058 |
| MnO | 0.106 | 0.0053 | Mn | 0.0818 | 0.0041 |
| BaO | 0.0697 | 0.0088 | Ba | 0.0625 | 0.0079 |
| MoO3 | 0.0485 | 0.0028 | Mo | 0.0323 | 0.0018 |
| NiO | 0.0336 | 0.0017 | Ni | 0.0264 | 0.0013 |
| CdO | 0.0221 | 0.0025 | Cd | 0.0193 | 0.0022 |
| PbO | 0.0189 | 0.0024 | Pb | 0.0176 | 0.0022 |
| Nb2O5 | 0.0143 | 0.0020 | Nb | 0.0100 | 0.0014 |
| WO3 | 0.0091 | 0.0024 | W | 0.0072 | 0.0019 |
| Ga2O3 | 0.0054 | 0.0005 | Ga | 0.0040 | 0.0004 |
| V2O5 | 0.0037 | 0.0009 | V | 0.0021 | 0.0005 |
| Bi2O3 | 0.0036 | 0.0008 | Bi | 0.0032 | 0.0008 |
| Co3O4 | 0.0032 | 0.0006 | Co | 0.0023 | 0.0004 |

Rest = 4.69 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 98.1 %
Total Weight% Oxygen = 42.23

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

26.3.2025 10:38:32
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**Verll nemag.**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 21.11.2023 | 14:23:15 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 433.74 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7593.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 62.10 | 0.24 | Si | 29.03 | 0.11 |
| Al2O3 | 14.82 | 0.18 | Al | 7.84 | 0.09 |
| P2O5 | 9.83 | 0.15 | Px | 4.29 | 0.06 |
| K2O | 5.03 | 0.11 | K | 4.18 | 0.09 |
| SnO2 | 2.02 | 0.07 | Sn | 1.59 | 0.06 |
| CaO | 1.54 | 0.06 | Ca | 1.10 | 0.04 |
| F | 0.884 | 0.06 | F | 0.884 | 0.06 |
| Na2O | 0.666 | 0.033 | Na | 0.494 | 0.025 |
| Rb2O | 0.201 | 0.010 | Rb | 0.184 | 0.0092 |
| Fe2O3 | 0.125 | 0.0063 | Fe | 0.0876 | 0.0044 |
| TiO2 | 0.114 | 0.0057 | Ti | 0.0686 | 0.0034 |
| SrO | 0.0855 | 0.0043 | Sr | 0.0723 | 0.0036 |
| BaO | 0.0587 | 0.0075 | Ba | 0.0526 | 0.0067 |
| MgO | 0.0539 | 0.0027 | Mg | 0.0325 | 0.0016 |
| Nb2O5 | 0.0121 | 0.0014 | Nb | 0.0084 | 0.0010 |
| SO3 | 0.0120 | 0.0021 | Sx | 0.0048 | 0.0008 |
| PbO | 0.0094 | 0.0020 | Pb | 0.0087 | 0.0019 |
| ZnO | 0.0084 | 0.0005 | Zn | 0.0067 | 0.0004 |
| MnO | 0.0062 | 0.0006 | Mn | 0.0048 | 0.0004 |
| CuO | 0.0040 | 0.0005 | Cu | 0.0032 | 0.0004 |
| Ga2O3 | 0.0014 | 0.0004 | Ga | 0.0011 | 0.0003 |

Rest = 2.41 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 97.8 %
Total Weight% Oxygen = 47.64

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 11:42:41
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VERm.A**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 12.2.2025 | 12:33:01 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 56.88 | 0.25 | Si | 26.59 | 0.12 |
| Al2O3 | 13.84 | 0.17 | Al | 7.33 | 0.09 |
| P2O5 | 11.83 | 0.16 | Px | 5.16 | 0.07 |
| K2O | 7.20 | 0.13 | K | 5.98 | 0.11 |
| Cl | 3.29 | 0.09 | Cl | 3.29 | 0.09 |
| CaO | 2.35 | 0.08 | Ca | 1.68 | 0.05 |
| Fe2O3 | 1.41 | 0.06 | Fe | 0.988 | 0.04 |
| Na2O | 0.928 | 0.08 | Na | 0.689 | 0.06 |
| Rb2O | 0.444 | 0.022 | Rb | 0.406 | 0.020 |
| MgO | 0.366 | 0.018 | Mg | 0.221 | 0.011 |
| SnO2 | 0.352 | 0.018 | Sn | 0.277 | 0.014 |
| ZnO | 0.247 | 0.012 | Zn | 0.198 | 0.0099 |
| NiO | 0.203 | 0.010 | Ni | 0.159 | 0.0079 |
| TiO2 | 0.166 | 0.0083 | Ti | 0.0995 | 0.0050 |
| WO3 | 0.139 | 0.0098 | W | 0.110 | 0.0078 |
| S | 0.134 | 0.0067 | S | 0.134 | 0.0067 |
| CuO | 0.0858 | 0.0043 | Cu | 0.0686 | 0.0034 |
| SrO | 0.0763 | 0.0061 | Sr | 0.0645 | 0.0052 |
| MnO | 0.0269 | 0.0028 | Mn | 0.0208 | 0.0022 |
| La2O3 | 0.0175 | 0.0050 | La | 0.0149 | 0.0043 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 37.9 %
Total Weight% Oxygen = 46.51

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 11:05:07
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VERm.B**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 14.2.2025 | 9:23:50 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 55.64 | 0.25 | Si | 26.01 | 0.12 |
| Al2O3 | 14.30 | 0.18 | Al | 7.57 | 0.09 |
| P2O5 | 13.17 | 0.17 | Px | 5.75 | 0.07 |
| K2O | 7.05 | 0.13 | K | 5.85 | 0.11 |
| Cl | 2.44 | 0.08 | Cl | 2.44 | 0.08 |
| CaO | 2.38 | 0.08 | Ca | 1.70 | 0.05 |
| Fe2O3 | 1.30 | 0.06 | Fe | 0.913 | 0.04 |
| Na2O | 1.06 | 0.07 | Na | 0.789 | 0.05 |
| ZnO | 0.421 | 0.021 | Zn | 0.339 | 0.017 |
| Rb2O | 0.418 | 0.021 | Rb | 0.382 | 0.019 |
| SnO2 | 0.391 | 0.019 | Sn | 0.308 | 0.015 |
| S | 0.333 | 0.017 | S | 0.333 | 0.017 |
| MgO | 0.308 | 0.015 | Mg | 0.186 | 0.0093 |
| NiO | 0.199 | 0.0099 | Ni | 0.157 | 0.0078 |
| CuO | 0.179 | 0.0089 | Cu | 0.143 | 0.0071 |
| TiO2 | 0.149 | 0.0075 | Ti | 0.0895 | 0.0045 |
| WO3 | 0.115 | 0.0079 | W | 0.0915 | 0.0063 |
| SrO | 0.0748 | 0.0047 | Sr | 0.0632 | 0.0040 |
| ZrO2 | 0.0244 | 0.0066 | Zr | 0.0181 | 0.0049 |
| MnO | 0.0243 | 0.0022 | Mn | 0.0188 | 0.0017 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 45.5 %
Total Weight% Oxygen = 46.84

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

3.3.2025 6:23:42
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VER-m.C**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : 13.2.2025 13:00:39 | | |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : Vacuum | | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : PP 6mu | | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : ø 29 mm | | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 57.40 | 0.25 | Si | 26.84 | 0.12 |
| Al2O3 | 13.73 | 0.17 | Al | 7.27 | 0.09 |
| P2O5 | 11.75 | 0.16 | Px | 5.13 | 0.07 |
| K2O | 7.15 | 0.13 | K | 5.94 | 0.11 |
| Cl | 2.71 | 0.08 | Cl | 2.71 | 0.08 |
| CaO | 2.43 | 0.08 | Ca | 1.73 | 0.05 |
| Fe2O3 | 1.34 | 0.06 | Fe | 0.935 | 0.04 |
| Na2O | 1.06 | 0.07 | Na | 0.788 | 0.05 |
| Rb2O | 0.442 | 0.022 | Rb | 0.404 | 0.020 |
| SnO2 | 0.367 | 0.018 | Sn | 0.289 | 0.014 |
| ZnO | 0.356 | 0.018 | Zn | 0.286 | 0.014 |
| MgO | 0.351 | 0.017 | Mg | 0.211 | 0.011 |
| S | 0.199 | 0.0099 | S | 0.199 | 0.0099 |
| NiO | 0.195 | 0.0097 | Ni | 0.153 | 0.0076 |
| TiO2 | 0.149 | 0.0074 | Ti | 0.0891 | 0.0045 |
| WO3 | 0.127 | 0.0085 | W | 0.100 | 0.0067 |
| CuO | 0.121 | 0.0060 | Cu | 0.0964 | 0.0048 |
| SrO | 0.0716 | 0.0047 | Sr | 0.0605 | 0.0040 |
| ZrO2 | 0.0240 | 0.0067 | Zr | 0.0178 | 0.0049 |
| MnO | 0.0182 | 0.0023 | Mn | 0.0141 | 0.0018 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 43.4 %
Total Weight% Oxygen = 46.74

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

28.2.2025 11:10:43
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VER-m.D**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 13.2.2025 | 13:19:34 |
| Kappa List | : AnySample | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | PP 6mu | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 20.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 314.16 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 5500.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 57.39 | 0.25 | Si | 26.83 | 0.12 |
| Al2O3 | 14.23 | 0.17 | Al | 7.53 | 0.09 |
| P2O5 | 11.46 | 0.16 | Px | 5.00 | 0.07 |
| K2O | 7.37 | 0.13 | K | 6.12 | 0.11 |
| Cl | 2.55 | 0.08 | Cl | 2.55 | 0.08 |
| CaO | 2.17 | 0.07 | Ca | 1.55 | 0.05 |
| Fe2O3 | 1.34 | 0.06 | Fe | 0.940 | 0.04 |
| Na2O | 1.15 | 0.07 | Na | 0.852 | 0.05 |
| Rb2O | 0.408 | 0.020 | Rb | 0.373 | 0.019 |
| MgO | 0.361 | 0.018 | Mg | 0.218 | 0.011 |
| SnO2 | 0.356 | 0.018 | Sn | 0.280 | 0.014 |
| ZnO | 0.271 | 0.014 | Zn | 0.218 | 0.011 |
| NiO | 0.189 | 0.0095 | Ni | 0.149 | 0.0074 |
| S | 0.181 | 0.0091 | S | 0.181 | 0.0091 |
| TiO2 | 0.166 | 0.0083 | Ti | 0.0996 | 0.0050 |
| CuO | 0.133 | 0.0066 | Cu | 0.106 | 0.0053 |
| WO3 | 0.120 | 0.0082 | W | 0.0949 | 0.0065 |
| SrO | 0.0621 | 0.0050 | Sr | 0.0525 | 0.0042 |
| CeO2 | 0.0306 | 0.0093 | Ce | 0.0249 | 0.0075 |
| MnO | 0.0283 | 0.0023 | Mn | 0.0219 | 0.0018 |
| ZrO2 | 0.0212 | 0.0069 | Zr | 0.0157 | 0.0051 |
| La2O3 | 0.0137 | 0.0041 | La | 0.0117 | 0.0035 |

Sum Weight% before normalization to 100% = 44.4 %
Total Weight% Oxygen = 46.78

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:04:16
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VST-1**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 19.10.2023 | 11:00:16 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 433.74 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7593.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 76.20 | 0.21 | Si | 35.63 | 0.10 |
| Al2O3 | 13.05 | 0.17 | Al | 6.90 | 0.09 |
| K2O | 4.53 | 0.10 | K | 3.76 | 0.09 |
| Na2O | 3.68 | 0.09 | Na | 2.73 | 0.07 |
| CaO | 1.09 | 0.05 | Ca | 0.777 | 0.04 |
| Fe2O3 | 0.703 | 0.035 | Fe | 0.492 | 0.024 |
| MgO | 0.0779 | 0.0039 | Mg | 0.0470 | 0.0023 |
| TiO2 | 0.0497 | 0.0025 | Ti | 0.0298 | 0.0015 |
| P2O5 | 0.0489 | 0.0024 | Px | 0.0213 | 0.0011 |
| MnO | 0.0264 | 0.0013 | Mn | 0.0204 | 0.0010 |
| Rb2O | 0.0219 | 0.0011 | Rb | 0.0200 | 0.0010 |
| SrO | 0.0153 | 0.0008 | Sr | 0.0129 | 0.0006 |
| ZrO2 | 0.0129 | 0.0008 | Zr | 0.0096 | 0.0006 |
| Y2O3 | 0.0103 | 0.0008 | Y | 0.0081 | 0.0007 |
| PbO | 0.0097 | 0.0016 | Pb | 0.0090 | 0.0014 |
| Ga2O3 | 0.0022 | 0.0003 | Ga | 0.0017 | 0.0002 |
| NiO | 0.0022 | 0.0004 | Ni | 0.0017 | 0.0003 |
| ZnO | 0.0012 | 0.0004 | Zn | 0.00096 | 0.0003 |

Rest = 0.47 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 100.7 %
Total Weight% Oxygen = 49.06

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

21.3.2025 10:37:55
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VST-1/mag -**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 22.11.2023 | 12:36:23 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 471.44 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8253.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 65.90 | 0.24 | Si | 30.81 | 0.11 |
| Al2O3 | 15.36 | 0.18 | Al | 8.13 | 0.10 |
| Fe2O3 | 6.90 | 0.13 | Fe | 4.82 | 0.09 |
| K2O | 4.43 | 0.10 | K | 3.68 | 0.09 |
| Na2O | 3.02 | 0.09 | Na | 2.24 | 0.06 |
| CaO | 0.945 | 0.047 | Ca | 0.675 | 0.034 |
| TiO2 | 0.559 | 0.028 | Ti | 0.335 | 0.017 |
| MgO | 0.497 | 0.025 | Mg | 0.300 | 0.015 |
| MnO | 0.160 | 0.0080 | Mn | 0.124 | 0.0062 |
| ZrO2 | 0.107 | 0.0054 | Zr | 0.0793 | 0.0040 |
| P2O5 | 0.0969 | 0.0048 | Px | 0.0423 | 0.0021 |
| Y2O3 | 0.0924 | 0.0046 | Y | 0.0727 | 0.0036 |
| Rb2O | 0.0263 | 0.0013 | Rb | 0.0241 | 0.0012 |
| Nb2O5 | 0.0192 | 0.0010 | Nb | 0.0134 | 0.0007 |
| SrO | 0.0122 | 0.0006 | Sr | 0.0103 | 0.0005 |
| Yb2O3 | 0.0092 | 0.0011 | Yb | 0.0081 | 0.0010 |
| SO3 | 0.0079 | 0.0012 | Sx | 0.0032 | 0.0005 |
| Co3O4 | 0.0071 | 0.0005 | Co | 0.0052 | 0.0004 |
| V2O5 | 0.0069 | 0.0008 | V | 0.0039 | 0.0005 |
| ZnO | 0.0068 | 0.0005 | Zn | 0.0055 | 0.0004 |
| Ga2O3 | 0.0045 | 0.0004 | Ga | 0.0033 | 0.0003 |
| Sc2O3 | 0.0039 | 0.0004 | Sc | 0.0026 | 0.0003 |
| CuO | 0.0016 | 0.0004 | Cu | 0.0013 | 0.0004 |
| NiO | 0.0015 | 0.0005 | Ni | 0.0011 | 0.0004 |

Rest = 1.83 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 97.9 %
Total Weight% Oxygen = 46.78

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

21.3.2025 10:13:15
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VST-1/nemag -**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 21.11.2023 | 12:06:17 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 78.16 | 0.21 | Si | 36.54 | 0.10 |
| Al2O3 | 12.34 | 0.16 | Al | 6.53 | 0.09 |
| K2O | 4.07 | 0.10 | K | 3.38 | 0.08 |
| Na2O | 3.72 | 0.09 | Na | 2.76 | 0.07 |
| CaO | 1.08 | 0.05 | Ca | 0.774 | 0.04 |
| Fe2O3 | 0.121 | 0.0060 | Fe | 0.0843 | 0.0042 |
| MgO | 0.0488 | 0.0024 | Mg | 0.0294 | 0.0015 |
| Rb2O | 0.0177 | 0.0009 | Rb | 0.0162 | 0.0008 |
| SrO | 0.0139 | 0.0007 | Sr | 0.0118 | 0.0006 |
| TiO2 | 0.0123 | 0.0007 | Ti | 0.0074 | 0.0004 |
| PbO | 0.0104 | 0.0015 | Pb | 0.0096 | 0.0014 |
| MnO | 0.0079 | 0.0005 | Mn | 0.0061 | 0.0004 |
| ZrO2 | 0.0048 | 0.0008 | Zr | 0.0035 | 0.0006 |
| P2O5 | 0.0040 | 0.0012 | Px | 0.0017 | 0.0005 |
| Y2O3 | 0.0036 | 0.0008 | Y | 0.0028 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0025 | 0.0003 | Ga | 0.0018 | 0.0002 |
| NiO | 0.0015 | 0.0004 | Ni | 0.0011 | 0.0003 |
| ZnO | 0.0012 | 0.0004 | Zn | 0.00099 | 0.0003 |

Rest = 0.37 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 99.0 %
Total Weight% Oxygen = 49.46

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:05:32
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VST-2**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 19.10.2023 | 11:11:24 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 433.74 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7593.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 73.00 | 0.22 | Si | 34.13 | 0.10 |
| Al2O3 | 13.50 | 0.17 | Al | 7.15 | 0.09 |
| K2O | 10.91 | 0.16 | K | 9.06 | 0.13 |
| Na2O | 1.66 | 0.06 | Na | 1.23 | 0.05 |
| Fe2O3 | 0.199 | 0.0099 | Fe | 0.139 | 0.0069 |
| CaO | 0.160 | 0.0080 | Ca | 0.115 | 0.0057 |
| MgO | 0.0542 | 0.0027 | Mg | 0.0327 | 0.0016 |
| Rb2O | 0.0467 | 0.0023 | Rb | 0.0427 | 0.0021 |
| P2O5 | 0.0239 | 0.0013 | Px | 0.0104 | 0.0006 |
| PbO | 0.0238 | 0.0016 | Pb | 0.0221 | 0.0015 |
| MnO | 0.0226 | 0.0011 | Mn | 0.0175 | 0.0009 |
| BaO | 0.0215 | 0.0056 | Ba | 0.0192 | 0.0050 |
| TiO2 | 0.0155 | 0.0008 | Ti | 0.0093 | 0.0005 |
| SrO | 0.0137 | 0.0007 | Sr | 0.0116 | 0.0006 |
| NiO | 0.0018 | 0.0005 | Ni | 0.0015 | 0.0004 |
| Ga2O3 | 0.0016 | 0.0004 | Ga | 0.0012 | 0.0003 |
| ZnO | 0.0014 | 0.0004 | Zn | 0.0011 | 0.0003 |

Rest = 0.33 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 94.5 %
Total Weight% Oxygen = 47.68

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

21.3.2025 10:38:50
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VST-2/mag -**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 22.11.2023 | 12:53:32 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 471.44 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8253.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 65.54 | 0.24 | Si | 30.64 | 0.11 |
| Al2O3 | 16.58 | 0.19 | Al | 8.77 | 0.10 |
| K2O | 8.77 | 0.14 | K | 7.28 | 0.12 |
| Fe2O3 | 4.32 | 0.10 | Fe | 3.02 | 0.07 |
| Na2O | 1.53 | 0.06 | Na | 1.14 | 0.05 |
| MnO | 0.557 | 0.028 | Mn | 0.432 | 0.022 |
| TiO2 | 0.355 | 0.018 | Ti | 0.213 | 0.011 |
| MgO | 0.335 | 0.017 | Mg | 0.202 | 0.010 |
| CaO | 0.241 | 0.012 | Ca | 0.172 | 0.0086 |
| P2O5 | 0.0458 | 0.0023 | Px | 0.0200 | 0.0010 |
| Rb2O | 0.0456 | 0.0023 | Rb | 0.0417 | 0.0021 |
| Y2O3 | 0.0375 | 0.0019 | Y | 0.0295 | 0.0015 |
| ZrO2 | 0.0167 | 0.0008 | Zr | 0.0124 | 0.0006 |
| PbO | 0.0147 | 0.0016 | Pb | 0.0137 | 0.0015 |
| NiO | 0.0109 | 0.0006 | Ni | 0.0086 | 0.0004 |
| SrO | 0.0097 | 0.0005 | Sr | 0.0082 | 0.0004 |
| CeO2 | 0.0081 | 0.0023 | Ce | 0.0066 | 0.0019 |
| WO3 | 0.0070 | 0.0013 | W | 0.0056 | 0.0010 |
| ThO2 | 0.0063 | 0.0016 | Th | 0.0055 | 0.0014 |
| Nb2O5 | 0.0062 | 0.0008 | Nb | 0.0043 | 0.0006 |
| ZnO | 0.0055 | 0.0004 | Zn | 0.0044 | 0.0004 |
| La2O3 | 0.0050 | 0.0010 | La | 0.0043 | 0.0008 |
| Co3O4 | 0.0044 | 0.0005 | Co | 0.0032 | 0.0004 |
| Ga2O3 | 0.0039 | 0.0004 | Ga | 0.0029 | 0.0003 |
| Yb2O3 | 0.0033 | 0.0010 | Yb | 0.0029 | 0.0009 |
| Sc2O3 | 0.0024 | 0.0004 | Sc | 0.0015 | 0.0003 |

Rest = 1.54 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 99.0 %
Total Weight% Oxygen = 46.42

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

21.3.2025 10:15:26
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VST-2/nemag -**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 21.11.2023 | 12:23:27 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 75.33 | 0.22 | Si | 35.22 | 0.10 |
| Al2O3 | 12.60 | 0.17 | Al | 6.67 | 0.09 |
| K2O | 9.81 | 0.15 | K | 8.14 | 0.12 |
| Na2O | 1.69 | 0.06 | Na | 1.25 | 0.05 |
| CaO | 0.173 | 0.0087 | Ca | 0.124 | 0.0062 |
| Fe2O3 | 0.0519 | 0.0026 | Fe | 0.0363 | 0.0018 |
| MgO | 0.0414 | 0.0021 | Mg | 0.0250 | 0.0012 |
| Rb2O | 0.0410 | 0.0020 | Rb | 0.0375 | 0.0019 |
| PbO | 0.0184 | 0.0016 | Pb | 0.0171 | 0.0015 |
| SrO | 0.0121 | 0.0006 | Sr | 0.0102 | 0.0005 |
| TiO2 | 0.0059 | 0.0006 | Ti | 0.0035 | 0.0004 |
| P | 0.0035 | 0.0005 | P | 0.0035 | 0.0005 |
| MnO | 0.0026 | 0.0005 | Mn | 0.0020 | 0.0004 |
| Ga2O3 | 0.0019 | 0.0003 | Ga | 0.0014 | 0.0003 |
| ZnO | 0.0011 | 0.0004 | Zn | 0.00091 | 0.0003 |

Rest = 0.22 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 94.6 %
Total Weight% Oxygen = 48.24

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

11.3.2025 13:06:53
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VST-3**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 19.10.2023 | 11:22:31 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 23.50 | mm |
| | | Viewed Area | = | 433.74 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7593.44 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 74.69 | 0.22 | Si | 34.92 | 0.10 |
| Al2O3 | 13.51 | 0.17 | Al | 7.15 | 0.09 |
| K2O | 5.94 | 0.12 | K | 4.93 | 0.10 |
| Na2O | 3.46 | 0.09 | Na | 2.56 | 0.07 |
| CaO | 0.935 | 0.046 | Ca | 0.668 | 0.033 |
| Fe2O3 | 0.646 | 0.032 | Fe | 0.452 | 0.023 |
| MnO | 0.117 | 0.0058 | Mn | 0.0905 | 0.0045 |
| MgO | 0.0659 | 0.0033 | Mg | 0.0397 | 0.0020 |
| TiO2 | 0.0261 | 0.0013 | Ti | 0.0156 | 0.0008 |
| BaO | 0.0256 | 0.0055 | Ba | 0.0229 | 0.0049 |
| Rb2O | 0.0252 | 0.0013 | Rb | 0.0230 | 0.0012 |
| P2O5 | 0.0182 | 0.0013 | Px | 0.0080 | 0.0006 |
| SrO | 0.0163 | 0.0008 | Sr | 0.0138 | 0.0007 |
| Y2O3 | 0.0136 | 0.0009 | Y | 0.0107 | 0.0007 |
| PbO | 0.0117 | 0.0016 | Pb | 0.0109 | 0.0015 |
| ZrO2 | 0.0067 | 0.0009 | Zr | 0.0049 | 0.0006 |
| WO3 | 0.0030 | 0.0010 | W | 0.0024 | 0.0008 |
| Ga2O3 | 0.0021 | 0.0003 | Ga | 0.0016 | 0.0003 |
| NiO | 0.0021 | 0.0004 | Ni | 0.0016 | 0.0003 |
| ZnO | 0.0017 | 0.0004 | Zn | 0.0014 | 0.0003 |

Rest = 0.49 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 96.7 %
Total Weight% Oxygen = 48.58

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

21.3.2025 10:39:41
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VST-3/mag -**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 22.11.2023 | 13:10:41 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 25.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 490.63 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 8593.75 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 58.82 | 0.25 | Si | 27.50 | 0.12 |
| Al2O3 | 16.26 | 0.18 | Al | 8.61 | 0.10 |
| Fe2O3 | 11.46 | 0.16 | Fe | 8.01 | 0.11 |
| K2O | 4.29 | 0.10 | K | 3.56 | 0.08 |
| Na2O | 2.46 | 0.08 | Na | 1.82 | 0.06 |
| MnO | 2.29 | 0.07 | Mn | 1.77 | 0.06 |
| CaO | 0.796 | 0.040 | Ca | 0.569 | 0.028 |
| MgO | 0.573 | 0.029 | Mg | 0.346 | 0.017 |
| TiO2 | 0.568 | 0.028 | Ti | 0.341 | 0.017 |
| Y2O3 | 0.253 | 0.013 | Y | 0.200 | 0.0100 |
| P2O5 | 0.104 | 0.0052 | Px | 0.0454 | 0.0023 |
| ZrO2 | 0.0807 | 0.0040 | Zr | 0.0597 | 0.0030 |
| Yb2O3 | 0.0274 | 0.0016 | Yb | 0.0241 | 0.0014 |
| Rb2O | 0.0272 | 0.0014 | Rb | 0.0249 | 0.0012 |
| ThO2 | 0.0226 | 0.0017 | Th | 0.0198 | 0.0015 |
| Nb2O5 | 0.0130 | 0.0011 | Nb | 0.0091 | 0.0008 |
| PbO | 0.0119 | 0.0016 | Pb | 0.0111 | 0.0015 |
| Co3O4 | 0.0113 | 0.0007 | Co | 0.0083 | 0.0005 |
| Dy2O3 | 0.0103 | 0.0024 | Dy | 0.0090 | 0.0021 |
| ZnO | 0.0100 | 0.0006 | Zn | 0.0080 | 0.0005 |
| SrO | 0.0090 | 0.0006 | Sr | 0.0076 | 0.0005 |
| CeO2 | 0.0085 | 0.0024 | Ce | 0.0069 | 0.0020 |
| La2O3 | 0.0069 | 0.0011 | La | 0.0059 | 0.0009 |
| S | 0.0062 | 0.0004 | S | 0.0062 | 0.0004 |
| Sc2O3 | 0.0052 | 0.0005 | Sc | 0.0034 | 0.0003 |
| V2O5 | 0.0051 | 0.0010 | V | 0.0029 | 0.0005 |
| U3O8 | 0.0048 | 0.0010 | U | 0.0041 | 0.0008 |
| Nd2O3 | 0.0047 | 0.0013 | Nd | 0.0040 | 0.0011 |
| NiO | 0.0038 | 0.0007 | Ni | 0.0030 | 0.0006 |
| Ga2O3 | 0.0033 | 0.0004 | Ga | 0.0024 | 0.0003 |

Rest = 1.86 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 97.2 %
Total Weight% Oxygen = 45.15

Laboratory KMK GRANIT
Zivcovy Iom Krasno
357 47 KRASNO

21.3.2025 10:16:41
Calculated by UniQuant
Thermo Fisher Scientific

**VST-3/nemag -**

ARL PFX-108 Rh 60kV LiF200 LiF220 Ge111

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Method | : UQ-i | Measured on | : | 21.11.2023 | 12:40:37 |
| Kappa List | : Silikat | X-ray Path: | : | Vacuum | |
| Shapes & ImpFc | : Teflon | Film Type | : | None | |
| Calculated as | : Oxides | Collimator Mask | : | ø 29 mm | |
| Case Number | : 0 = All known | Viewed Diameter | = | 24.00 | mm |
| | | Viewed Area | = | 452.39 | mm2 |
| | | Viewed Mass | = | 7920.00 | mg |
| Reporting Level | > 10 ppm and wt% > 3 Est.Err. | Sample Height | = | 4.00 | mm |

| Compound | Wt% | Est.Error | Element | Wt% | Est.Error |
|---|---|---|---|---|---|
| SiO2 | 76.81 | 0.21 | Si | 35.91 | 0.10 |
| Al2O3 | 12.90 | 0.17 | Al | 6.83 | 0.09 |
| K2O | 5.22 | 0.11 | K | 4.33 | 0.09 |
| Na2O | 3.55 | 0.09 | Na | 2.63 | 0.07 |
| CaO | 0.940 | 0.047 | Ca | 0.672 | 0.033 |
| Fe2O3 | 0.0827 | 0.0041 | Fe | 0.0579 | 0.0029 |
| MgO | 0.0448 | 0.0022 | Mg | 0.0270 | 0.0014 |
| Rb2O | 0.0216 | 0.0011 | Rb | 0.0198 | 0.0010 |
| BaO | 0.0201 | 0.0051 | Ba | 0.0180 | 0.0046 |
| SrO | 0.0152 | 0.0008 | Sr | 0.0129 | 0.0006 |
| PbO | 0.0126 | 0.0015 | Pb | 0.0117 | 0.0014 |
| MnO | 0.0083 | 0.0005 | Mn | 0.0064 | 0.0004 |
| TiO2 | 0.0076 | 0.0006 | Ti | 0.0046 | 0.0004 |
| ZrO2 | 0.0029 | 0.0008 | Zr | 0.0022 | 0.0006 |
| P | 0.0026 | 0.0005 | P | 0.0026 | 0.0005 |
| Y2O3 | 0.0026 | 0.0008 | Y | 0.0020 | 0.0007 |
| Ga2O3 | 0.0023 | 0.0003 | Ga | 0.0017 | 0.0002 |
| ZnO | 0.0014 | 0.0004 | Zn | 0.0012 | 0.0003 |

Rest = 0.36 LOI D/S = 0.286 Cellulose (1)

Sum Weight% before normalization to 100% = 97.7 %
Total Weight% Oxygen = 49.10

# Laboratorní protokoly

**Příloha 9/2**

# Silikátové XRF analýzy

**KMK**GRANIT
akciová společnost

L 1626

# L a b o r a t o ř K M K G R A N I T

**Živcový lom Krásno, 35731 KRÁSNO , CZ** tel.: +420 777 493 303, e-mail: krenkova@kmkgranit.cz
Zkušební laboratoř č. 1626 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018

## PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 3576/2024



**Zákazník:** Laborator KMK GRANIT Adresa: Krásno, Živcový lom Krásno, PSC 35747
Kontakt: Ing. Krenkova E. E-mail: krenkova@kmkgranit.cz Telefon: +420777493303
Datum příjmu vzorku: 5.11.2024 Datum provedení zkoušek: 17.3.2025
Datum vystavení protokolu: 27.3.2025

| | |
|---|---|
| Laboratorní číslo: | 3576/24 |
| **Zkoušená položka:** | **Silikátová surovina** |
| Popis zákazníkem: | *Jiný materiál* |
| Označení zákazníkem: | *Cn2* |
| Datum odběru: | *05.11.2024* |
| Vzorek odebral: | Zákazník |

### Metody zkoušení:

| | |
|---|---|
| PD-SOP-113 | Bezstandardová analýza XRF-lisovaně /UQ/ |
| PD-SOP-113 | Chemická analýza XRF spektrometrem |
| PD-SOP-117 | Kolorimetricke stanoveni belosti |
| | Výpal vzorku na teplotu 1250 °C, 3,5 °C/min - výdrž 1 hod (pálicí křivka-prg.č.5) |
| PD-SOP-113 | $K_2O/Na_2O$ - Výpočet poměru z naměř. dat |
| PD-SOP-113 | SUM-Alk - Výpočet sumy alkálií $K_2O+Na_2O$ z naměř.dat |
| PD-SOP-114/A | ZŽ-A - Ztráta žíháním 1100°C |

### Výsledky zkoušek: 3576/24

| | Jedn. | Výsledek | Čís. SOP | Statut zk. |
|---|---|---|---|---|
| **$SiO_2$** | % | **68,02** | PD-SOP-113 | A |
| **$Al_2O_3$** | % | **19,91** | PD-SOP-113 | A |
| **$Fe_2O_3$** | % | **0,35** | PD-SOP-113 | A |
| **$TiO_2$** | % | **0,03** | PD-SOP-113 | A |
| **CaO** | % | **0,30** | PD-SOP-113 | A |
| **MgO** | % | **0,08** | PD-SOP-113 | A |
| **$K_2O$** | % | **1,78** | PD-SOP-113 | A |
| **$Na_2O$** | % | **8,01** | PD-SOP-113 | A |
| **$P_2O_5$** | % | **0,13** | PD-SOP-113 | A |
| **$Rb_2O$** | % | **0,07** | PD-SOP-113 | N |
| **SUM-Alk** | % | **9,79** | PD-SOP-113 | A |
| **$K_2O/Na_2O$** | | **0,22** | PD-SOP-113 | A |
| **ZŽ-A** | % | **1,33** | PD-SOP-114/A | A |
| **Li** | mg/kg | **64** | --- | SUB |
| **Be** | mg/kg | **18,2** | --- | SUB |
| **B-L*/D65** | | **85,35** | PD-SOP-117 | N |
| **B-a*/D65** | | **-0,26** | PD-SOP-117 | N |
| **B-b*/D65** | | **7,09** | PD-SOP-117 | N |
| **UQ LIS** | | **viz. Příloha** | PD-SOP-113 | N |
| **Smrštění pálení** | % | **4,81** | | N |
| **Nasákavost/hm./** | % | **0,07** | | N |

**Vysvětlivky:**

A = metoda v rozsahu akreditace

N = metoda mimo rozsah akreditace

SUB = metoda v rozsahu akreditace subdodavatele

FRA = uplatněn flexibilní rozsah akreditace

~ = naměřená hodnota je mimo pracovní rozsah metody v rozsahu akreditace

Protokol schválil:

Ing. Emília Křenková
Vedoucí laboratoře KMK GRANIT

**Poznámky:** Výsledky zkoušek se vztahují pouze ke zkoušenému vzorku, tak jak byl přijat. Laboratoř neodpovídá za údaje dodané zakazníkem (ozn. kurzívou).

Kromě SUB jsou zkoušky provedeny v laboratoří. Na požádání poskytne laboratoř údaje o nejistotě měření.

Protokol o zkoušce nesmí být bez písemného souhlasu Laboratoře KMK GRANIT reprodukován jinak než celý.

---

Konec protokolu o zkoušce

**KMK**GRANIT
akciová společnost

L 1626

# L a b o r a t o ř K M K G R A N I T

**Živcový lom Krásno, 35731 KRÁSNO , CZ** tel.: +420 777 493 303, e-mail: krenkova@kmkgranit.cz
Zkušební laboratoř č. 1626 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018

## PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 3577/2024



**Zákazník:** Laborator KMK GRANIT Adresa: Krásno, Živcový lom Krásno, PSC 35747
Kontakt: Ing. Krenkova E. E-mail: krenkova@kmkgranit.cz Telefon: +420777493303
Datum příjmu vzorku: 5.11.2024 Datum provedení zkoušek: 17.3.2025
Datum vystavení protokolu: 27.3.2025

| | |
|---|---|
| Laboratorní číslo: | 3577/24 |
| **Zkoušená položka:** | **Silikátová surovina** |
| Popis zákazníkem: | *Jiný materiál* |
| Označení zákazníkem: | *CL* |
| Datum odběru: | *05.11.2024* |
| Vzorek odebral: | Zákazník |

### Metody zkoušení:

| | |
|---|---|
| PD-SOP-113 | Bezstandardová analýza XRF-lisovaně /UQ/ |
| PD-SOP-113 | Chemická analýza XRF spektrometrem |
| PD-SOP-117 | Kolorimetricke stanoveni belosti |
| | Výpal vzorku na teplotu 1250 °C, 3,5 °C/min - výdrž 1 hod (pálicí křivka-prg.č.5) |
| PD-SOP-113 | $K_2O/Na_2O$ - Výpočet poměru z naměř. dat |
| PD-SOP-113 | SUM-Alk - Výpočet sumy alkálií $K_2O+Na_2O$ z naměř.dat |
| PD-SOP-114/A | ZŽ-A - Ztráta žíháním 1100°C |

### Výsledky zkoušek: 3577/24

| | Jedn. | Výsledek | Čís. SOP | Statut zk. |
|---|---|---|---|---|
| **$SiO_2$** | % | **72,58** | PD-SOP-113 | A |
| **$Al_2O_3$** | % | **14,80** | PD-SOP-113 | A |
| **$Fe_2O_3$** | % | **0,21** | PD-SOP-113 | A |
| **$TiO_2$** | % | **0,01** | PD-SOP-113 | A |
| **CaO** | % | **0,15** | PD-SOP-113 | A |
| **MgO** | % | **0,02** | PD-SOP-113 | A |
| **$K_2O$** | % | **9,66** | PD-SOP-113 | A |
| **$Na_2O$** | % | **2,05** | PD-SOP-113 | A |
| **$P_2O_5$** | % | **0,10** | PD-SOP-113 | A |
| **$Rb_2O$** | % | **0,02** | PD-SOP-113 | N |
| **SUM-Alk** | % | **11,71** | PD-SOP-113 | A |
| **$K_2O/Na_2O$** | | **4,71** | PD-SOP-113 | A |
| **ZŽ-A** | % | **0,40** | PD-SOP-114/A | A |
| **Li** | mg/kg | **<10** | --- | SUB |
| **Be** | mg/kg | **1,04** | --- | SUB |
| **B-L*/D65** | | **75,10** | PD-SOP-117 | N |
| **B-a*/D65** | | **1,00** | PD-SOP-117 | N |
| **B-b*/D65** | | **1,13** | PD-SOP-117 | N |
| **UQ LIS** | | **viz. Příloha** | PD-SOP-113 | N |
| **Smrštění pálení** | % | **7,39** | | N |
| **Nasákavost/hm./** | % | **0,06** | | N |

**Vysvětlivky:**

A = metoda v rozsahu akreditace

N = metoda mimo rozsah akreditace

SUB = metoda v rozsahu akreditace subdodavatele

FRA = uplatněn flexibilní rozsah akreditace

~ = naměřená hodnota je mimo pracovní rozsah metody v rozsahu akreditace

Protokol schválil:

Ing. Emília Křenková
Vedoucí laboratoře KMK GRANIT

**Poznámky:** Výsledky zkoušek se vztahují pouze ke zkoušenému vzorku, tak jak byl přijat. Laboratoř neodpovídá za údaje dodané zakazníkem (ozn. kurzívou).

Kromě SUB jsou zkoušky provedeny v laboratoří. Na požádání poskytne laboratoř údaje o nejistotě měření.

Protokol o zkoušce nesmí být bez písemného souhlasu Laboratoře KMK GRANIT reprodukován jinak než celý.

---

Konec protokolu o zkoušce

**KMK**GRANIT
akciová společnost

L 1626

# L a b o r a t o ř K M K G R A N I T

**Živcový lom Krásno, 35731 KRÁSNO , CZ** tel.: +420 777 493 303, e-mail: krenkova@kmkgranit.cz
Zkušební laboratoř č. 1626 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018

## PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 3578/2024



**Zákazník:** Laborator KMK GRANIT
Kontakt: Ing. Krenkova E.
Datum příjmu vzorku: 5.11.2024

Adresa: Krásno, Živcový lom Krásno, PSC 35747
E-mail: krenkova@kmkgranit.cz Telefon: +420777493303
Datum provedení zkoušek: 17.3.2025
Datum vystavení protokolu: 27.3.2025

| | |
|---|---|
| Laboratorní číslo: | 3578/24 |
| **Zkoušená položka:** | **Silikátová surovina** |
| Popis zákazníkem: | *Jiný materiál* |
| Označení zákazníkem: | *BrV* |
| Datum odběru: | *05.11.2024* |
| Vzorek odebral: | Zákazník |

### Metody zkoušení:

| | |
|---|---|
| PD-SOP-113 | Bezstandardová analýza XRF-lisovaně /UQ/ |
| PD-SOP-113 | Chemická analýza XRF spektrometrem |
| PD-SOP-117 | Kolorimetricke stanoveni belosti |
| | Výpal vzorku na teplotu 1250 °C, 3,5 °C/min - výdrž 1 hod (pálicí křivka-prg.č.5) |
| PD-SOP-113 | $K_2O/Na_2O$ - Výpočet poměru z naměř. dat |
| PD-SOP-113 | SUM-Alk - Výpočet sumy alkálií $K_2O+Na_2O$ z naměř.dat |
| PD-SOP-114/B | ZŽ-B - Ztráta žíháním 1000°C |

### Výsledky zkoušek: 3578/24

| | Jedn. | Výsledek | Čís. SOP | Statut zk. |
|---|---|---|---|---|
| **$SiO_2$** | % | **71,46** | PD-SOP-113 | A |
| **$Al_2O_3$** | % | **16,53** | PD-SOP-113 | A |
| **$Fe_2O_3$** | % | **0,68** | PD-SOP-113 | A |
| **$TiO_2$** | % | **0,07** | PD-SOP-113 | A |
| **CaO** | % | **2,73** | PD-SOP-113 | A |
| **MgO** | % | **0,36** | PD-SOP-113 | A |
| **$K_2O$** | % | **3,32** | PD-SOP-113 | A |
| **$Na_2O$** | % | **4,04** | PD-SOP-113 | A |
| **$P_2O_5$** | % | **0,07** | PD-SOP-113 | A |
| **$Rb_2O$** | % | **0,01** | PD-SOP-113 | N |
| **SUM-Alk** | % | **7,36** | PD-SOP-113 | A |
| **$K_2O/Na_2O$** | | **0,82** | PD-SOP-113 | A |
| **ZŽ-B** | % | **0,73** | PD-SOP-114/B | A |
| **Li** | mg/kg | **<10** | --- | SUB |
| **Be** | mg/kg | **3,19** | --- | SUB |
| **B-L*/D65** | | **57,52** | PD-SOP-117 | N |
| **B-a*/D65** | | **4,65** | PD-SOP-117 | N |
| **B-b*/D65** | | **13,21** | PD-SOP-117 | N |
| **UQ LIS** | | **viz. Příloha** | PD-SOP-113 | N |
| **Smrštění pálení** | % | **8,79** | | N |
| **Nasákavost/hm./** | % | **0,03** | | N |

**Vysvětlivky:**

A = metoda v rozsahu akreditace

N = metoda mimo rozsah akreditace

SUB = metoda v rozsahu akreditace subdodavatele

FRA = uplatněn flexibilní rozsah akreditace

~ = naměřená hodnota je mimo pracovní rozsah metody v rozsahu akreditace

Protokol schválil:

Ing. Emília Křenková
Vedoucí laboratoře KMK GRANIT

**Poznámky:** Výsledky zkoušek se vztahují pouze ke zkoušenému vzorku, tak jak byl přijat. Laboratoř neodpovídá za údaje dodané zakazníkem (ozn. kurzívou).

Kromě SUB jsou zkoušky provedeny v laboratoří. Na požádání poskytne laboratoř údaje o nejistotě měření.

Protokol o zkoušce nesmí být bez písemného souhlasu Laboratoře KMK GRANIT reprodukován jinak než celý.

---

Konec protokolu o zkoušce

**KMK**GRANIT
akciová společnost

L 1626

**L a b o r a t o ř K M K G R A N I T**
**Živcový lom Krásno, 35731 KRÁSNO , CZ** tel.: +420 777 493 303, e-mail: krenkova@kmkgranit.cz
Zkušební laboratoř č. 1626 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018

# PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 3579/2024



**Zákazník:** Laborator KMK GRANIT Adresa: Krásno, Živcový lom Krásno, PSC 35747
Kontakt: Ing. Krenkova E. E-mail: krenkova@kmkgranit.cz Telefon: +420777493303
Datum příjmu vzorku: 5.11.2024 Datum provedení zkoušek: 21.3.2025
Datum vystavení protokolu: 27.3.2025

| | |
|---|---|
| Laboratorní číslo: | 3579/24 |
| **Zkoušená položka:** | **Silikátová surovina** |
| Popis zákazníkem: | *Jiný materiál* |
| Označení zákazníkem: | *Lav2* |
| Datum odběru: | *05.11.2024* |
| Vzorek odebral: | Zákazník |

## Metody zkoušení:

| | |
|---|---|
| PD-SOP-113 | Bezstandardová analýza XRF-lisovaně /UQ/ |
| PD-SOP-113 | Chemická analýza XRF spektrometrem |
| PD-SOP-117 | Kolorimetricke stanoveni belosti |
| | Výpal vzorku na teplotu 1250 °C, 3,5 °C/min - výdrž 1 hod (pálicí křivka-prg.č.5) |
| PD-SOP-113 | $K_2O/Na_2O$ - Výpočet poměru z naměř. dat |
| PD-SOP-113 | SUM-Alk - Výpočet sumy alkálií $K_2O+Na_2O$ z naměř.dat |
| PD-SOP-114/B | ZŽ-B - Ztráta žíháním 1000°C |

## Výsledky zkoušek: 3579/24

| | Jedn. | Výsledek | Čís. SOP | Statut zk. |
|---|---|---|---|---|
| **$SiO_2$** | % | **75,01** | PD-SOP-113 | A |
| **$Al_2O_3$** | % | **13,81** | PD-SOP-113 | A |
| **$Fe_2O_3$** | % | **0,34** | PD-SOP-113 | A |
| **$TiO_2$** | % | **0,10** | PD-SOP-113 | A |
| **CaO** | % | **1,33** | PD-SOP-113 | A |
| **MgO** | % | **0,20** | PD-SOP-113 | A |
| **$K_2O$** | % | **5,94** | PD-SOP-113 | A |
| **$Na_2O$** | % | **2,67** | PD-SOP-113 | A |
| **$P_2O_5$** | % | **0,13** | PD-SOP-113 | A |
| **$Rb_2O$** | % | **0,02** | PD-SOP-113 | N |
| **SUM-Alk** | % | **8,61** | PD-SOP-113 | A |
| **$K_2O/Na_2O$** | | **2,22** | PD-SOP-113 | A |
| **ZŽ-B** | % | **0,45** | PD-SOP-114/B | A |
| **Li** | mg/kg | **11,5** | --- | SUB |
| **Be** | mg/kg | **6,06** | --- | SUB |
| **B-L*/D65** | | **74,95** | PD-SOP-117 | N |
| **B-a*/D65** | | **1,18** | PD-SOP-117 | N |
| **B-b*/D65** | | **10,06** | PD-SOP-117 | N |
| **UQ LIS** | | **viz. Příloha** | PD-SOP-113 | N |
| **Smrštění pálení** | % | **9,71** | | N |
| **Nasákavost/hm./** | % | **0,03** | | N |

**Vysvětlivky:**

A = metoda v rozsahu akreditace

N = metoda mimo rozsah akreditace

SUB = metoda v rozsahu akreditace subdodavatele

FRA = uplatněn flexibilní rozsah akreditace

~ = naměřená hodnota je mimo pracovní rozsah metody v rozsahu akreditace

Protokol schválil:

Ing. Emília Křenková
Vedoucí laboratoře KMK GRANIT

**Poznámky:** Výsledky zkoušek se vztahují pouze ke zkoušenému vzorku, tak jak byl přijat. Laboratoř neodpovídá za údaje dodané zakazníkem (ozn. kurzívou).

Kromě SUB jsou zkoušky provedeny v laboratoří. Na požádání poskytne laboratoř údaje o nejistotě měření.

Protokol o zkoušce nesmí být bez písemného souhlasu Laboratoře KMK GRANIT reprodukován jinak než celý.

---

Konec protokolu o zkoušce

**KMK**GRANIT
akciová společnost

L 1626

**L a b o r a t o ř K M K G R A N I T**
**Živcový lom Krásno, 35731 KRÁSNO , CZ** tel.: +420 777 493 303, e-mail: krenkova@kmkgranit.cz
Zkušební laboratoř č. 1626 akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018

# PROTOKOL O ZKOUŠCE č. 3591/2024



**Zákazník:** Laborator KMK GRANIT Adresa: Krásno, Živcový lom Krásno, PSC 35747
Kontakt: Ing. Krenkova E. E-mail: krenkova@kmkgranit.cz Telefon: +420777493303
Datum příjmu vzorku: 6.11.2024 Datum provedení zkoušek: 24.3.2025
Datum vystavení protokolu: 24.3.2025

| | |
|---|---|
| Laboratorní číslo: | 3591/24 |
| **Zkoušená položka:** | **Silikátová surovina** |
| Popis zákazníkem: | *Jiný materiál* |
| Označení zákazníkem: | *FK* |
| Datum odběru: | *06.11.2024* |
| Vzorek odebral: | Zákazník |

## Metody zkoušení:

| | |
|---|---|
| PD-SOP-113 | Bezstandardová analýza XRF-lisovaně /UQ/ |
| PD-SOP-113 | Chemická analýza XRF spektrometrem |
| PD-SOP-117 | Kolorimetricke stanoveni belosti |
| | Výpal vzorku na teplotu 1250 °C, 3,5 °C/min - výdrž 1 hod (pálicí křivka-prg.č.5) |
| PD-SOP-113 | $K_2O/Na_2O$ - Výpočet poměru z naměř. dat |
| PD-SOP-113 | SUM-Alk - Výpočet sumy alkálií $K_2O+Na_2O$ z naměř.dat |
| PD-SOP-114/B | ZŽ-B - Ztráta žíháním 1000°C |

## Výsledky zkoušek: 3591/24

| | Jedn. | Výsledek | Čís. SOP | Statut zk. |
|---|---|---|---|---|
| **$SiO_2$** | % | **70,17** | PD-SOP-113 | A |
| **$Al_2O_3$** | % | **16,07** | PD-SOP-113 | A |
| **$Fe_2O_3$** | % | **0,08** | PD-SOP-113 | A |
| **$TiO_2$** | % | **0,02** | PD-SOP-113 | A |
| **CaO** | % | **0,25** | PD-SOP-113 | A |
| **MgO** | % | **0,02** | PD-SOP-113 | A |
| **$K_2O$** | % | **6,22** | PD-SOP-113 | A |
| **$Na_2O$** | % | **5,20** | PD-SOP-113 | A |
| **$P_2O_5$** | % | **0,44** | PD-SOP-113 | A |
| **$Rb_2O$** | % | **0,19** | PD-SOP-113 | N |
| **SUM-Alk** | % | **11,42** | PD-SOP-113 | A |
| **$K_2O/Na_2O$** | | **1,20** | PD-SOP-113 | A |
| **ZŽ-B** | % | **0,34** | PD-SOP-114/B | A |
| **Li** | mg/kg | **73** | --- | SUB |
| **Be** | mg/kg | **4,9** | --- | SUB |
| **B-L*/D65** | | **77,21** | PD-SOP-117 | N |
| **B-a*/D65** | | **0,15** | PD-SOP-117 | N |
| **B-b*/D65** | | **2,92** | PD-SOP-117 | N |
| **UQ LIS** | | **viz. Příloha** | PD-SOP-113 | N |
| **Smrštění pálení** | % | **9,57** | | N |
| **Nasákavost/hm./** | % | **0,09** | | N |

**Vysvětlivky:**

A = metoda v rozsahu akreditace

N = metoda mimo rozsah akreditace

SUB = metoda v rozsahu akreditace subdodavatele

FRA = uplatněn flexibilní rozsah akreditace

~ = naměřená hodnota je mimo pracovní rozsah metody v rozsahu akreditace

Protokol schválil:

Ing. Emília Křenková
Vedoucí laboratoře KMK GRANIT

**Poznámky:** Výsledky zkoušek se vztahují pouze ke zkoušenému vzorku, tak jak byl přijat. Laboratoř neodpovídá za údaje dodané zakazníkem (ozn. kurzívou).

Kromě SUB jsou zkoušky provedeny v laboratoří. Na požádání poskytne laboratoř údaje o nejistotě měření.

Protokol o zkoušce nesmí být bez písemného souhlasu Laboratoře KMK GRANIT reprodukován jinak než celý.

---

Konec protokolu o zkoušce

## Laboratorní protokoly

### Příloha 9/3

# Stanovení obsahů beryllia a lithia

SUAS Lab s.r.o. - Speciální laboratoř, pracoviště Vřesová
Výpis z protokolů. Originály jsou uloženy v archivu Laboratoře KMK GRANIT.

Vzorek: BrV 3578/2024
Protokol o zkoušce číslo: 1779/2024
Datum vyhotovení: 14. 11. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **3,19** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 0,96 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<10,0** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,9** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: BrV Mag
Protokol o zkoušce číslo: 193/2023
Datum vyhotovení: 8. 3. 2023

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **1,35** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.19 / B | AKR | 0,68 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.19 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.19 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: BrV Nemag
Protokol o zkoušce číslo: 193/2023
Datum vyhotovení: 8. 3. 2023

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **1,29** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.19 / B | AKR | 0,65 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.19 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,9** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.19 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: CJ1 3596/2024
Protokol o zkoušce číslo: 1022/2023
Datum vyhotovení: 26. 9. 2023

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **9,30** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.23 / B | AKR | 4,65 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,9** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: CJ2 / 5B –Jarosul II
Protokol o zkoušce číslo: 1038/2022
Datum vyhotovení: 18. 10. 2022

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **10,3** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.21 / B | FRA | 3,1 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.19 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.19 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: CL 3577/2024
Protokol o zkoušce číslo: 1779/2024
Datum vyhotovení: 14. 11. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **1,04** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 0,31 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<10,0** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Cn1 3595/2024- Contu spodumen
Protokol o zkoušce číslo: 1022/2023
Datum vyhotovení: 26. 9. 2023

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **21,0** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.23 / B | AKR | 10,5 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **13000** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 3260 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,9** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Cn2 3576/2024
Protokol o zkoušce číslo: 193/2023
Datum vyhotovení: 8. 3. 2023

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **18,2** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 5,5 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **64,0** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 19,2 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: DORO 2875/23
Protokol o zkoušce číslo: 1378/2023/R2
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **117** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.23 / B | AKR | 59 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **70,2** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 17,6 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,9** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: DORO Mag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **197** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 59 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **164** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 41 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: DORO Nemag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **176** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 53 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: FK 3591/2024
Protokol o zkoušce číslo: 491/2025
Datum vyhotovení: 21. 3. 2025

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **4,90** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 1,47 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **73,0** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 21,9 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Lav1 3608/2024
Protokol o zkoušce číslo: 908/2024
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Lithium v sušině | **17,7** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 5,3 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Lav1 Mag.
Protokol o zkoušce číslo: 908/2024
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Lithium v sušině | **97,2** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 29,2 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,1** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Lav1 Nemag.
Protokol o zkoušce číslo: 908/2024
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Lithium v sušině | **16,3** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 4,9 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Lav2 3579/2024
Protokol o zkoušce číslo: 1779/2024
Datum vyhotovení: 14. 11. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **6,06** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 1,82 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **11,5** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 3,5 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Lav2 Mag.
Protokol o zkoušce číslo: 908/2024
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Lithium v sušině | **41,7** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 12,5 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,2** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Lav2 Nemag.
Protokol o zkoušce číslo: 908/2024
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Lithium v sušině | **<10,0** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: LH 2877/2023
Protokol o zkoušce číslo: 1378/2023/R2
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **7,17** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.23 / B | AKR | 3,59 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **12800** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 3210 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: LH Mag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **18,5** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 5,6 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **17800** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 4450 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,7** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: LH Nemag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **15,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 4,5 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **11800** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 2940 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,7** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: MC1 / 1B
Protokol o zkoušce číslo: 1038/2022
Datum vyhotovení: 18. 10. 2022

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **0,774** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.19 / B | AKR | 0,387 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.19 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.19 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: MC2 / 1C
Protokol o zkoušce číslo: 1038/2022
Datum vyhotovení: 18. 10. 2022

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **0,562** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.19 / B | AKR | 0,281 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.19 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.19 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: PA / 3 Piatra Alba
Protokol o zkoušce číslo: 1038/2022
Datum vyhotovení: 18. 10. 2022

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **49,5** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.21 / B | FRA | 14,9 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.19 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.19 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Prb Mag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **2,09** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 0,63 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **812** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 203 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Prb Nemag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **5,36** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 1,61 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **68,4** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 17,1 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Prb Přibyslavice 2868/2023
Protokol o zkoušce číslo: 1378/2023/R2
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **0,0942** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.23 / B | AKR | 0,0471 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **210** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 53 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: RE30 2876/23
Protokol o zkoušce číslo: 1378/2023/R2
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **1,81** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.23 / B | AKR | 0,91 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **50,8** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 15,2 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,9** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: RE30 Mag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **5,11** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 1,53 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **332** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 100 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: RE30 Nemag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **7,55** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 2,27 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **205** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 62 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,9** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: ROZ-1 3609/2024
Protokol o zkoušce číslo: 908/2024
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Lithium v sušině | **3320** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,4** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: ROZ-2 3610/2024
Protokol o zkoušce číslo: 908/2024
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Lithium v sušině | **1110** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Ver 2869/2023
Protokol o zkoušce číslo: 908/2024
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Lithium v sušině | **21,3** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 6,4 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Ver Mag
Protokol o zkoušce číslo: 908/2024
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Lithium v sušině | **44,9** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 13,5 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,3** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: Ver Nemag
Protokol o zkoušce číslo: 908/2024
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Lithium v sušině | **<10,0** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: VerII 3607/2024
Protokol o zkoušce číslo: 1378/2023/R2
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **2,90** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.23 / B | AKR | 1,45 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **11100** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 2780 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: VerII Mag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **27,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 8,1 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **6900** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 1730 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,5** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: VerII Nemag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **9,17** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 2,75 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **9090** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 2270 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: VST-1 2870/2023
Protokol o zkoušce číslo: 1378/2023/R2
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **1,19** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.23 / B | AKR | 0,60 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: VST-1 Mag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **5,11** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 1,53 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,3** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,5** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: VST-1 Nemag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **3,31** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 0,99 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: VST-2 2871/2023
Protokol o zkoušce číslo: 1378/2023/R2
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **0,272** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.23 / B | AKR | 0,136 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **107** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | 27 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,9** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: VST-2 Mag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **2,18** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 0,65 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **25,0** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 7,5 | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,7** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: VST-2 Nemag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **0,669** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 0,201 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,9** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: VST-3 2872/2023
Protokol o zkoušce číslo: 1378/2023/R2
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **0,976** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_1.23 / B | AKR | 0,488 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,9** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: VST-3 Mag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **5,16** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 1,55 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,3** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,4** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

Vzorek: VST-3 Nemag
Protokol o zkoušce číslo: 1429/2023/R1
Datum vyhotovení: 27. 6. 2024

| Stanovení | Hodnota | Jednotky | Metoda zkoušení / Postup | Status zkoušky | Rozšířená nejistota | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Speciální minerální analýza** | | | | | | |
| Berylium v sušině | **3,23** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_9.23 / B | AKR | 0,97 | mg/kg |
| Lithium v sušině | **<50,1** | mg/kg | 000.ZP.CL.CL.2_2_2.23 / B | AKR | - | mg/kg |
| **Ostatní parametry** | | | | | | |
| Sušina při 105°C | **99,8** | hm.zl. [%] | 000.ZP.CL.CL.2_3_9.23 | AKR | 2,2 | hm.zl. [%] |

**Signatář EA MLA**
**Český institut pro akreditaci, o.p.s.**
**Hájkova 2747/22, Žižkov, 130 00 Praha 3**

vydává

v souladu s § 16 zákona č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky, ve znění pozdějších předpisů

# OSVĚDČENÍ O AKREDITACI

č. **699/2024**

**K M K GRANIT, a.s.**
**se sídlem Mírová 545, 357 31 Krásno, IČO 46884556**

pro zkušební laboratoř č. **1626**
Laboratoř KMK GRANIT

Rozsah udělené akreditace:

Chemická analýza a stanovení ztráty žíháním silikátových surovin a keramických výrobků na bázi silikátů vymezené přílohou tohoto osvědčení.

Toto osvědčení je dokladem o udělení akreditace na základě posouzení splnění akreditačních požadavků podle

ČSN EN ISO/IEC 17025:2018

Subjekt posuzování shody je při své činnosti oprávněn odkazovat se na toto osvědčení v rozsahu udělené akreditace po dobu její platnosti, pokud nebude akreditace pozastavena, a je povinen plnit stanovené akreditační požadavky v souladu s příslušnými předpisy vztahujícími se k činnosti akreditovaného subjektu posuzování shody.

Toto osvědčení o akreditaci nahrazuje v plném rozsahu osvědčení č.: 587/2023 ze dne 8. 11. 2023, popřípadě správní akty na ně navazující.

Udělení akreditace je platné do **19. 12. 2029**

V Praze dne 19. 12. 2024

Český institut pro akreditaci, o.p.s.
NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN
–5–

Ing. Jan Velíšek
ředitel odboru zkušebních
a kalibračních laboratoří
Český institut pro akreditaci, o.p.s.

**Příloha je nedílnou součástí**
**osvědčení o akreditaci č.: 699/2024 ze dne: 19. 12. 2024**

**Akreditovaný subjekt podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2018:**

**K M K GRANIT, a.s.**
objekt číslo 1626, Laboratoř KMK GRANIT
Živcový lom Krásno, 357 31 Krásno

*Laboratoř uplatňuje flexibilní přístup k rozsahu akreditace.*
*Aktuální seznam činností prováděných v rámci flexibilního rozsahu má laboratoř k dispozici na webových stránkách laboratoře http://www.kmkgranit.cz/875/certifikace/ ve formě „Seznam činností v rámci flexibilního rozsahu akreditace".*
*Detailní informace k činnostem v rozsahu akreditace (stanovované analyty) jsou uvedeny v části „Upřesnění rozsahu akreditace".*

## Zkoušky:

| Pořadové číslo[1] | Přesný název zkušebního postupu / metody | Identifikace zkušebního postupu / metody[2] | Předmět zkoušky | Stupně volnosti[3] |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Stanovení prvků a oxidů rentgenfluorescenčním spektrometrem a výpočet prvků, živcoviny a poměru alkálií z naměřených hodnot | PD-SOP-113 (firemní návod ARL PERFORM'X; firemní návod ElvaX Pro; ČSN 72 1370; DIN 51001) | Silikátové suroviny a keramické výrobky na bázi silikátů | B |
| 2 | Stanovení ztráty žíháním gravimetricky (1100 °C) | PD-SOP-114/A (ČSN 72 0103) | Silikátové suroviny a keramické výrobky na bázi silikátů | - |
| 3 | Stanovení ztráty žíháním termogravimetricky (1000 °C) | PD-SOP-114/B (manuál LECO TGA801) | Silikátové suroviny | - |

[1] v případě, že laboratoř je schopna provádět zkoušky mimo své stálé prostory, jsou tyto zkoušky u pořadového čísla označeny hvězdičkou

[2] u datovaných dokumentů identifikujících zkušební postupy se používají pouze tyto konkrétní postupy, u nedatovaných dokumentů identifikujících zkušební postupy se používá nejnovější platné vydání uvedeného postupu (včetně všech změn)

[3] stupeň volnosti: A – Flexibilita týkající se materiálů/výrobků (předmět zkoušky), B – Flexibilita týkající se komponent/parametrů/vlastností, C – Flexibilita týkající se výkonnosti metody, D – Flexibilita týkající se metody.
Laboratoř může modifikovat zkušební postupy s uvedeným stupněm volnosti v dané oblasti akreditace při zachování principu měření. Není-li uveden žádný stupeň volnosti, nemůže laboratoř pro danou zkoušku uplatňovat flexibilní přístup k rozsahu akreditace.

## Upřesnění rozsahu akreditace:

| Pořadové číslo zkoušky | Detailní informace k činnostem v rozsahu akreditace (stanovované analyty) |
|---|---|
| 1 | Stanovení: $SiO_2$, $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$, $TiO_2$, CaO, MgO, $K_2O$, $Na_2O$, $P_2O_5$, Cs, Cu, Mn, Nb, Rb, Sn, Ta, W, Zn<br>Výpočet z naměřených hodnot: živcovina ($K_2O$+$Na_2O$), poměr alkálií ($K_2O$/$Na_2O$), Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mg, K, Na, P |

Český institut pro akreditaci, o.p.s.
NÁRODNÍ AKREDITAČNÍ ORGÁN