

Akcesorické minerály

Prof. RNDr. Milan Novák, CSc.

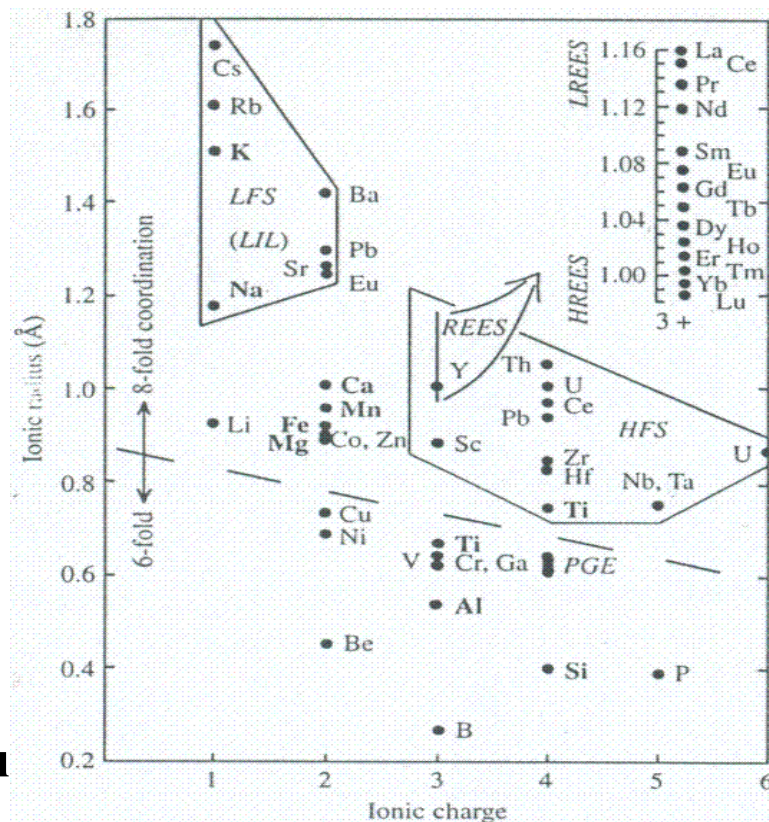
Beryl a Be-minerály

Osnova přednášky:

- 1. Úvod**
- 2. Skupina berylu**
- 3. Beryl**
- 4. Minerály Be**
- 5. Alterace Be-minerálů**

1. Úvod

- Berylium (Be) patří vzhledem ke svým amfoterním vlastnostem k důležitým stopovým prvkům.
- Rozměr kationtů –
 ${}^{\text{IV}}\text{Be} = 0,27 \text{ \AA}$
 ${}^{\text{VI}}\text{Be} = 0,45 \text{ \AA}$
a zároveň nízká valence vedou k tomu, že Be jen těžko vstupuje do tetraedrické pozice obsazované Si, Al nebo P a většinou vstupuje do další tetraedrické pozice T(2) v minerálech často spolu s Al, popř. Li nebo B.



1. Úvod

- **Malá schopnost Be vstupovat do stejných strukturních pozicí s jinými prvky vede k tomu, že je dnes známo asi 110 minerálů Be. To, že se může vyskytovat, jak v pozici klasického kationtu např.**

v bertranditu



tak v aniontové části alumosilikátů alkalických kovů (Na) např.

v epididymitu



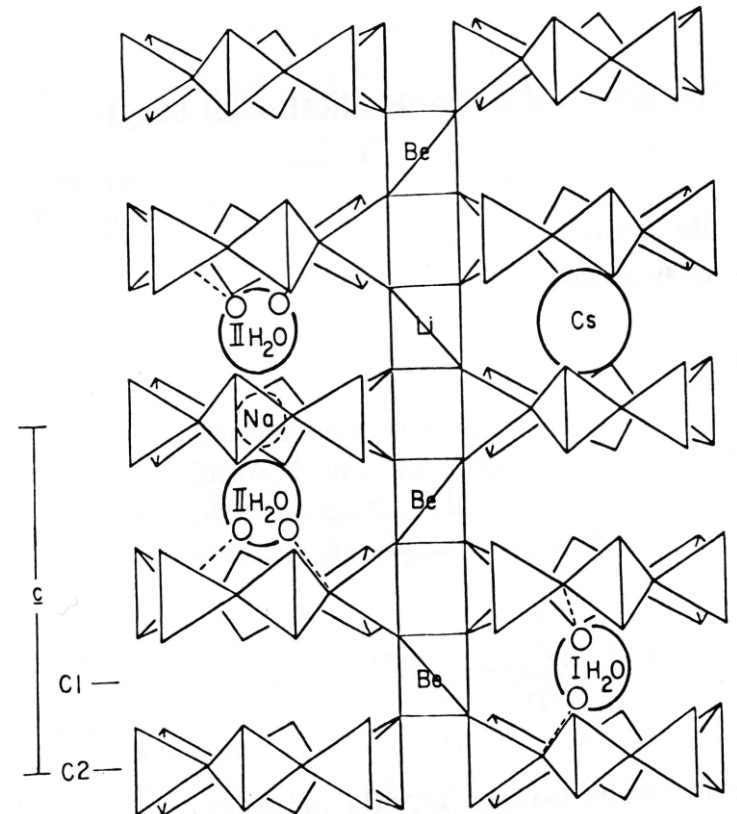
umožňuje využít minerálů Be k odhadu podmínek vzniku minerálních asociací.

Nejdůležitějším minerálem Be je beryl.



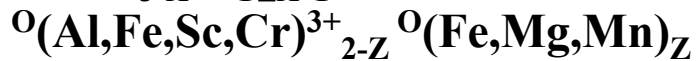
2. Skupina berylu

- **Obecný vzorec:**
 $CT(2)_3O_2T(1)_6O_{18}$
- **pozice C (kanál) = vakance, Na, Cs, H₂O (He, Ar)**
I H₂O
II H₂O
- **pozice T(2) (tetraedrická 2) = Be, Li, Al (vakance)**
- **pozice O (oktaedrická) = Al, Fe³⁺, Sc, Mg, Fe²⁺, Cr, V, Mn**
- **pozice T(1) (tetraedrická 1) = Si, Al**
- **Hexagonální**



2. Skupina berylu

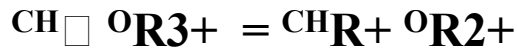
Reálnější ale komplikovanější vzorec:



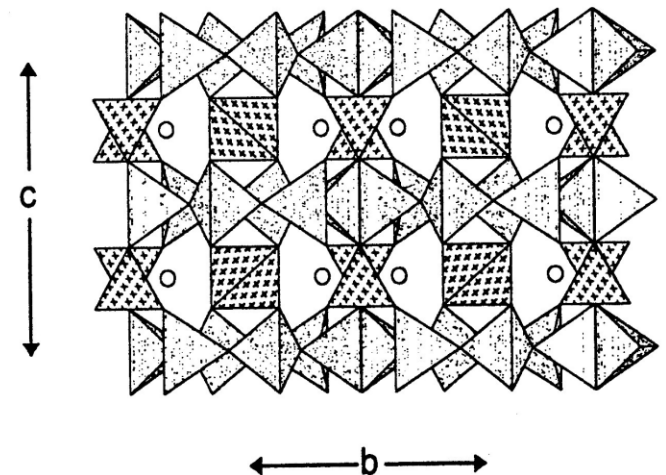
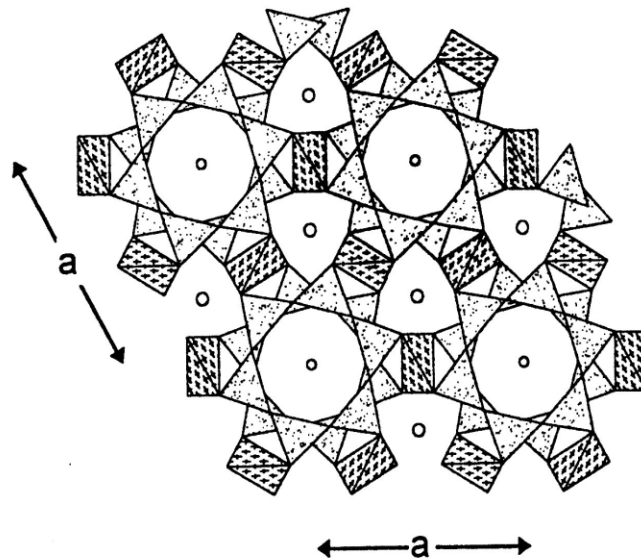
kde $2 \geq Y$, $X \geq Y$, $Z \ll 2$ a $2 \geq 2X-Y+Z$

Typické substitute

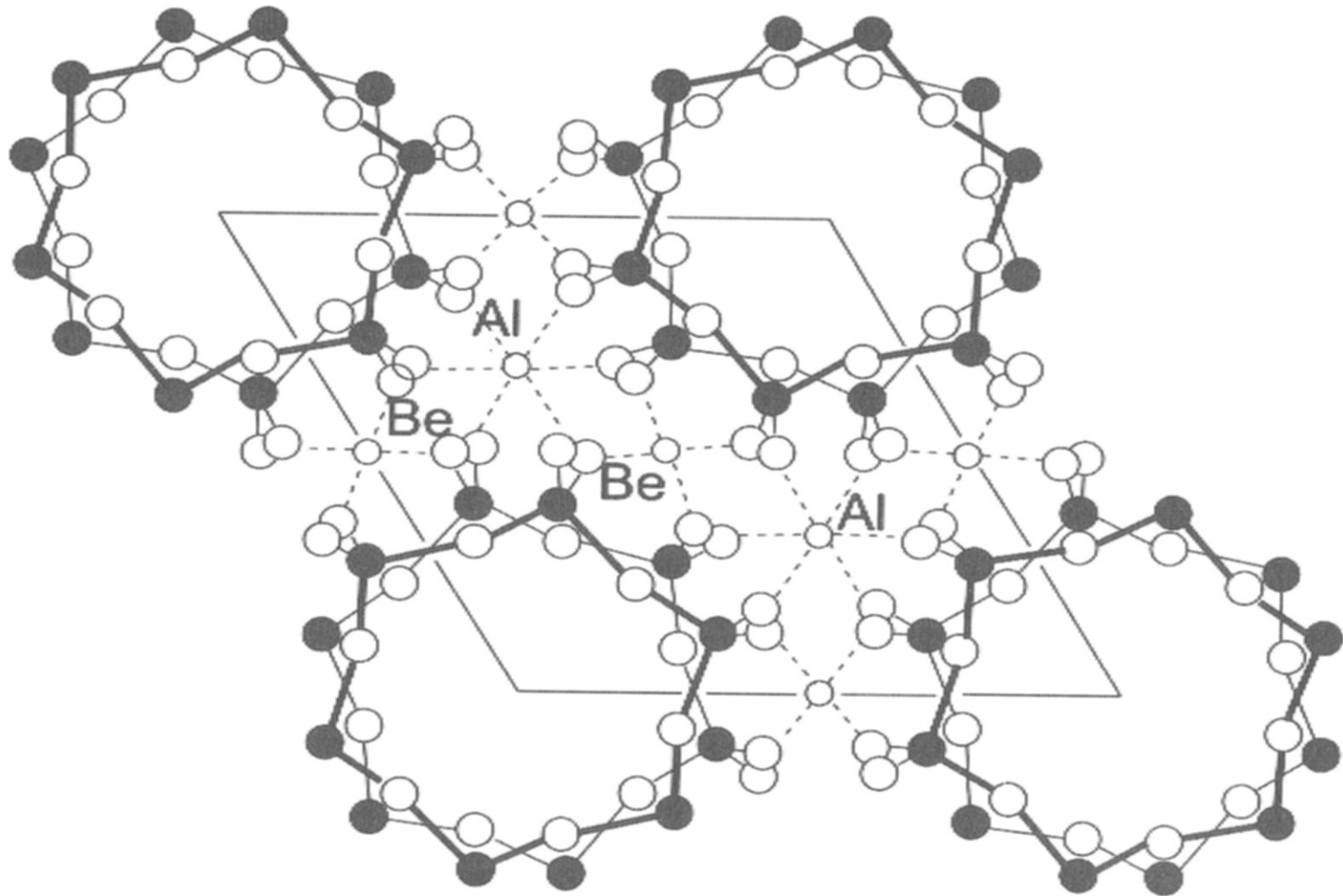
Al = Sc nebo Fe^{3+}



kde $\text{CH}R+ = \text{Na, Cs}$; ${}^OR3+ = \text{Al, Sc, Fe}^{3+}$; ${}^OR2+ = \text{Mg, Fe}^{2+}$



2. Skupina berylu



2. Skupina berylu

- **Tabulka 1. Přehled minerálů skupiny berylu**

- | Minerál | idealizovaný vzorec | typová lokalita | rok popisu |
|------------|---|-----------------|------------|
| Beryl | $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ | neznámá | starověk |
| Bazzit | $\text{Be}_3\text{Sc}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ | Baveno, Alpy | 1915 |
| Stoppaniit | $\text{Be}_3\text{Fe}^{3+}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ | Capranica, Řím | 1998 |
| Pezzottait | $\text{CsBe}_2\text{LiAl}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ | Madagascar | 2003 |
| Indialit | $\text{Al}_3\text{Mg}_2\text{Si}_5\text{AlO}_{18}$ | Bihar, Indie | 1954 |

Protože indialit neobsahuje Be, není už blíže popsán. Ale jeho vzorec nám ukazuje, že do strukturně příbuzných pozic vstupují i jiné kationty.

2. Skupina berylu

Další minerály skupiny berylu s výjimkou bazzitu jsou téměř neznámé. Dilem proto, že jsou velmi vzácné (indialit, stoppanit), ale hlavně proto, že většina z nich byla popsána relativně nedávno (stoppanit, pezzottait).

Bazzit $\text{Be}_3\text{Sc}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$

Ve srovnání s berylem jde o velmi vzácný minerál známý jen z několika málo desítek lokalit na celém světě. Bazzit má většinou jasně modrou barvu, poněkud nižší tvrdost a vyšší hustotu, ale jinak je velmi podobný berylu. Tmavě modré beryly jsou bez detailnějšího studia neodlišitelné. Bazzit se vyskytuje výhradně v pegmatitech vzácných zemin, kde často krystaluje v dutinách. Nejznámější lokalitou je Baveno v Itálii, vyskytuje se také v Königshainu u Görlitz, Německo poblíž našich hranic.

Stoppanit $\text{Be}_3\text{Fe}^{3+}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$

Dosud je znám pouze z jediné lokality v alkalických vulkanických horninách v oblasti Latium poblíž Říma, jde tedy o extrémně vzácný minerál. Jeho vznik vyžaduje vysoce oxidační prostředí a vysokou aktivitu Be a Fe vedle nízké aktivity Al.

Pezzottait $\text{CsBe}_2\text{LiAl}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$

Zcela nově popsaný minerál ze skupiny berylu nazvaný podle mineraloga Přírodovědného muzea v Miláně Federica Pezzotty, který tento minerál objevil. Vyskytuje se na několika lokalitách komplexních pegmatitů na Madagaskaru, kde tvoří růžové tabulkovité krystaly až několik cm velké v dutinách pegmatitů, kde bývá doprovázen albitem. Už se stal velmi atraktivním minerálem pro sběratele.

3. Beryl

Beryl $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$



Beryl, Otov



Beryl, Maršikov

3. Beryl



Písek



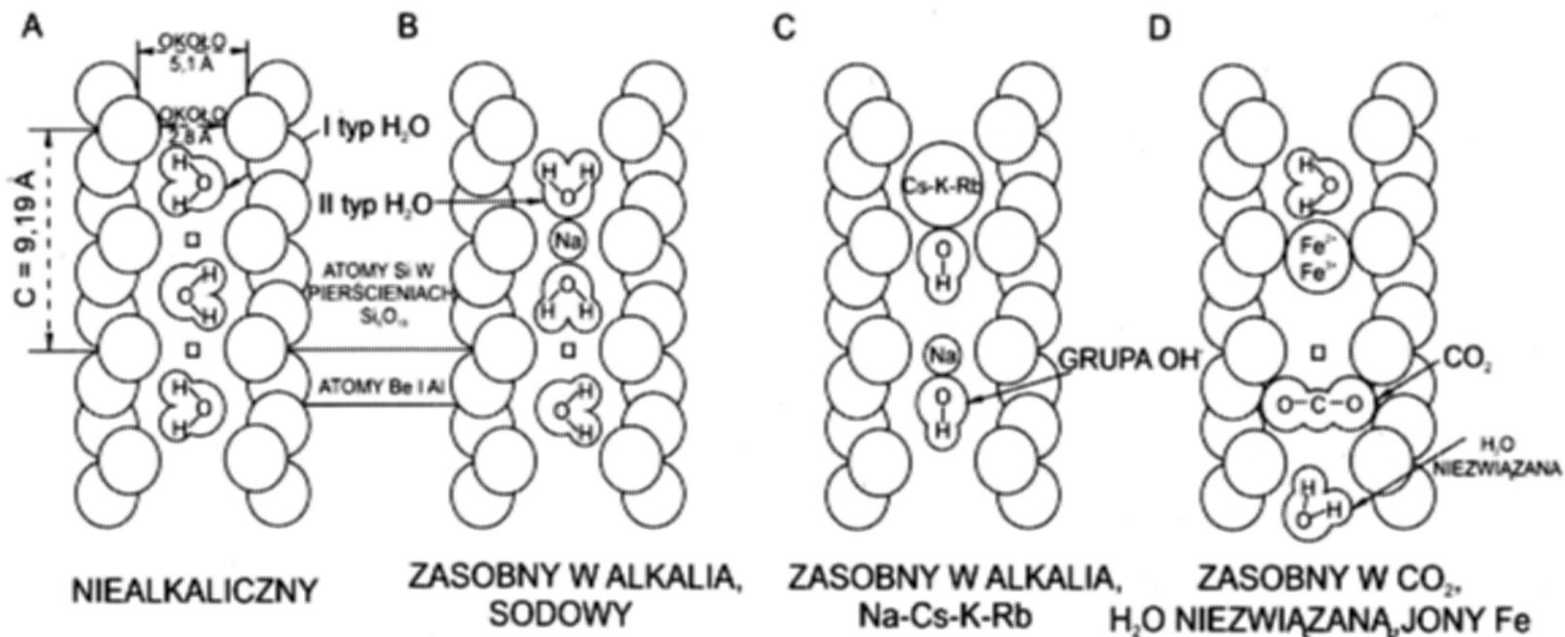
3. Beryl

Beryl $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$

Do pozice CH vstupují vedle vakance, Na, Cs, H_2O (He, Ar), CO_2 a Fe, a H_2O ve 2 (3?) odlišných pozicích.

I H_2O

II H_2O

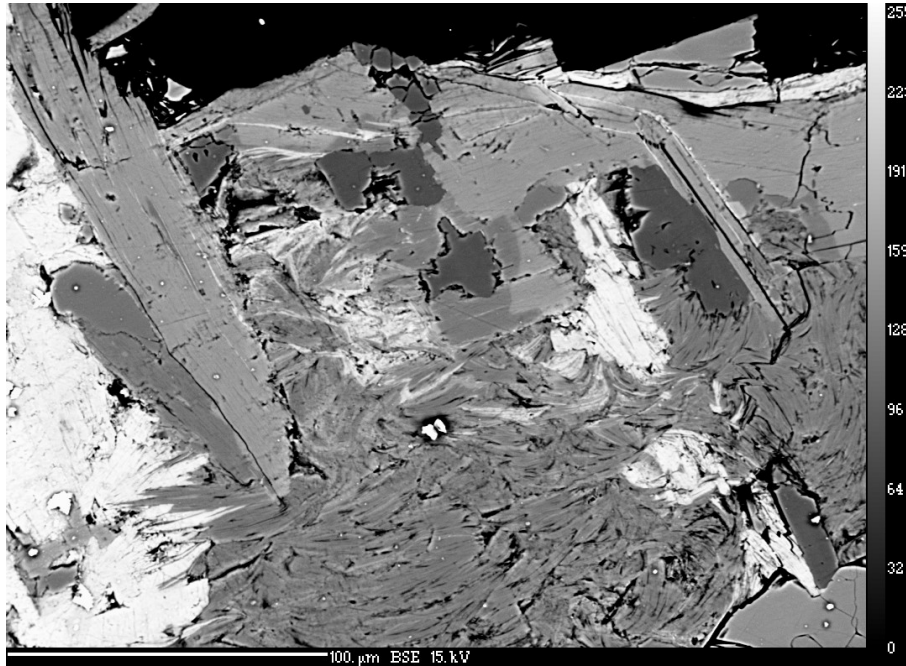


3. Beryl

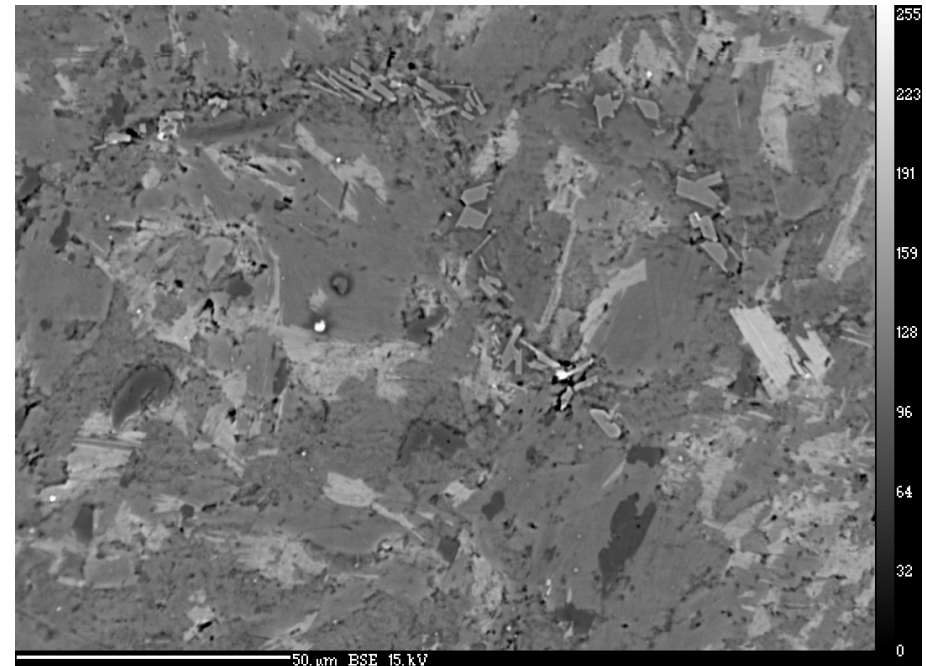
- **Vlastnosti:**
- většinou nazelenalý nebo nažloutlý, nedokonale štěpný, $t = 7$, $h = 2,65$, ve výbruse podobný křemeni ale často alterovaný
- **Variety:**
 - smaragd – smaragdově zelený (Cr,V)
 - akvamarín - modrozelený
 - heliodor – žlutý
 - morganit – růžový (Cs)
- Často velmi blízký teoretickému vzorci, někdy nízké obsahy Na, H₂O, Fe a Mg. Další prvky někdy vstupující prvky jsou Cs popř. Cr a V.
- Nejnovější výzkumy ukazují na zřetelnou mísitelnost mezi berylem a minerály skupiny cordieritu Al₃(Mg,Fe)₂AlSi₅O₁₈ – cordieritem a sekaninaitem (srovnej vzorec indialitu). Zvýšený obsah Be v cordieritech z pegmatitů je poměrně častý, až 1,94 váh.% BeO, naopak beryl může obsahovat vysoká množství ferických prvků, např. až okolo 7 % FeO_{tot}. A 4 % MgO. V cordieritu jsou známy dvě substituce pro vstup Be^{CH}Na^TBe^{CH}□ O^TAl₁ a BeSiAl₂.

3. Beryl

Příklad metamorfního berylu

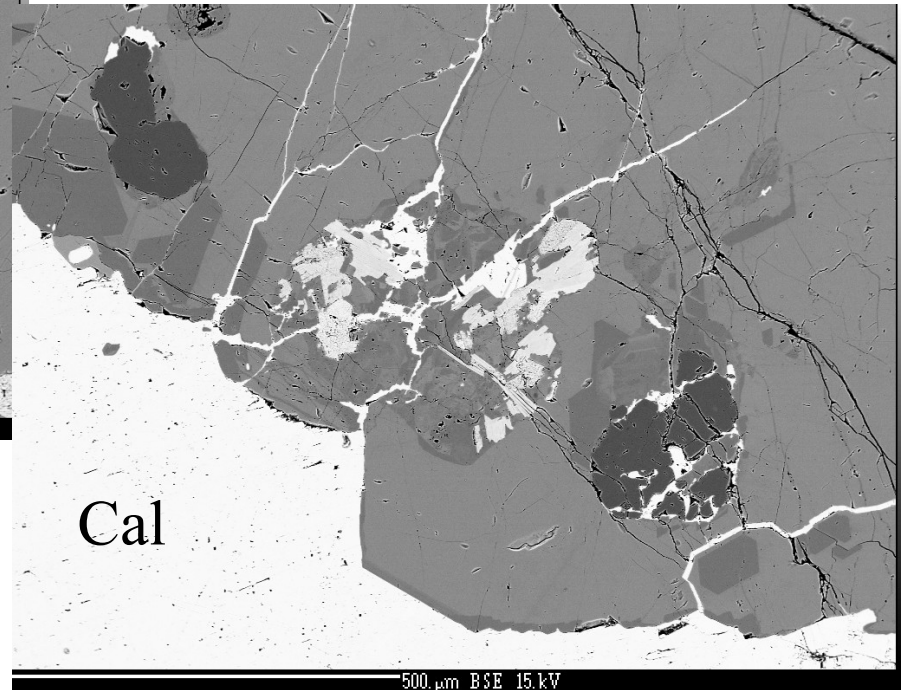
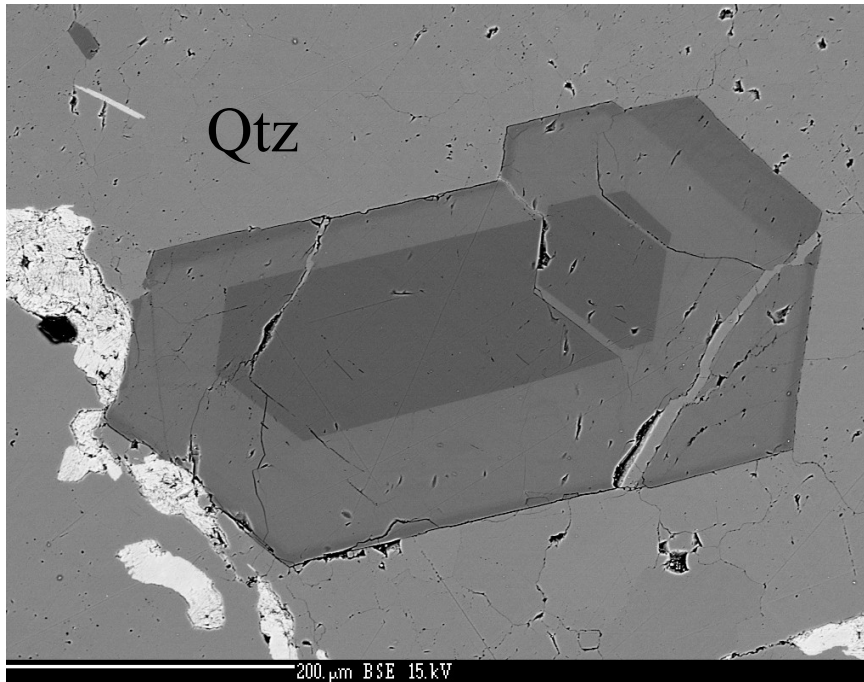


Beryl (tmavý) v jemnozrnném agregátu chloritu a muskovitu

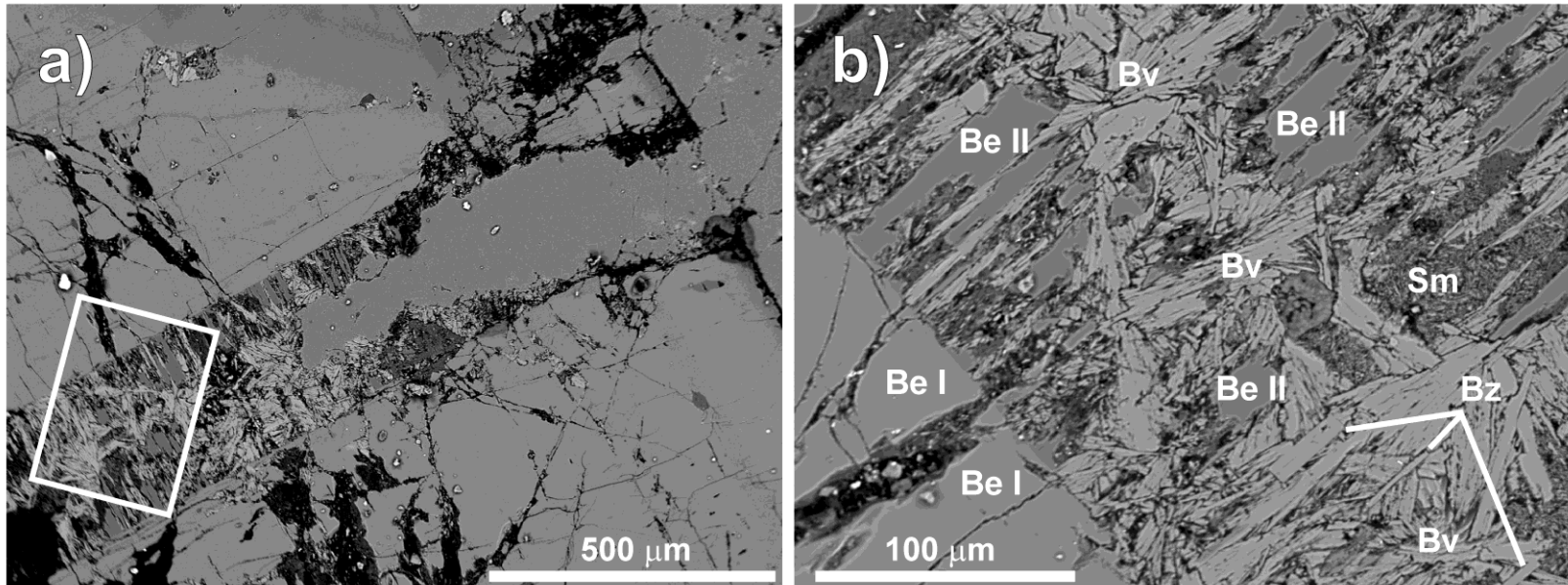


3. Beryl

Zonální beryl ze Skal u
Rýmařova

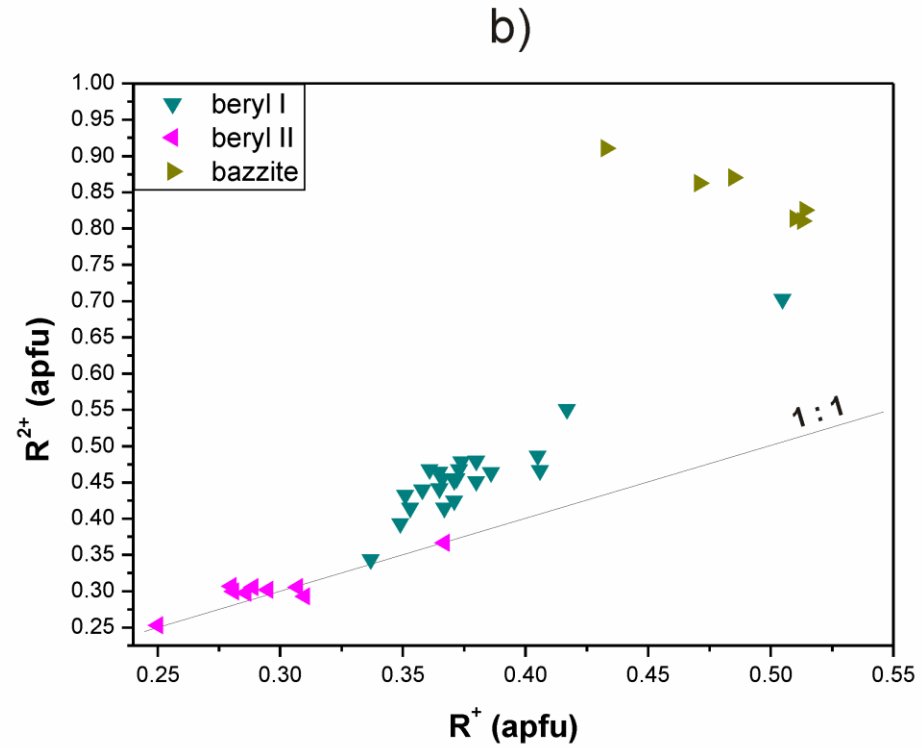
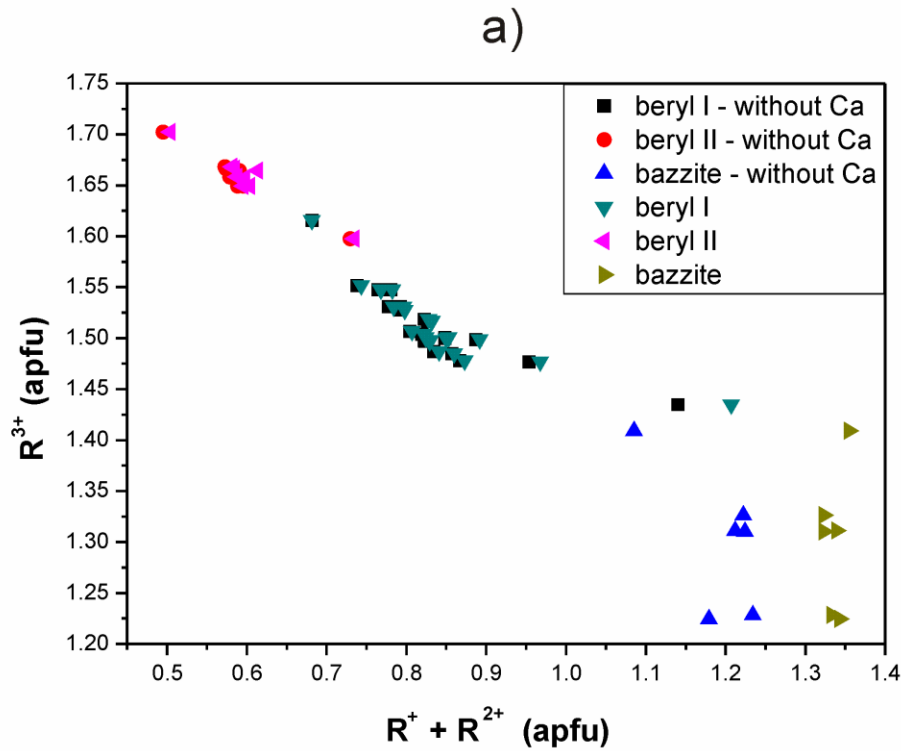


3. Beryl

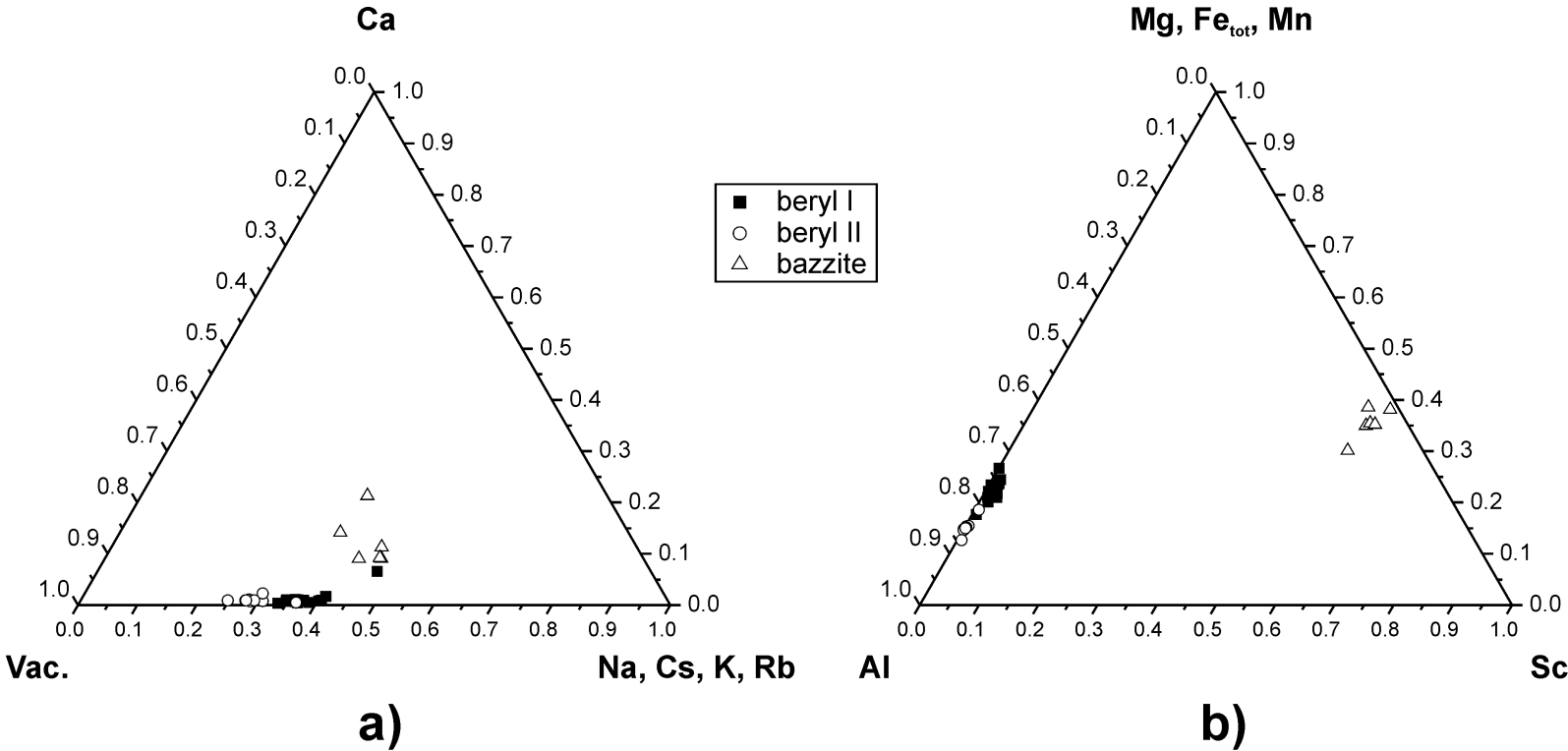


Beryl a produkty jeho rozpadu beryl II a bazzit z Kožichovic (Novák a Filip v tisku)

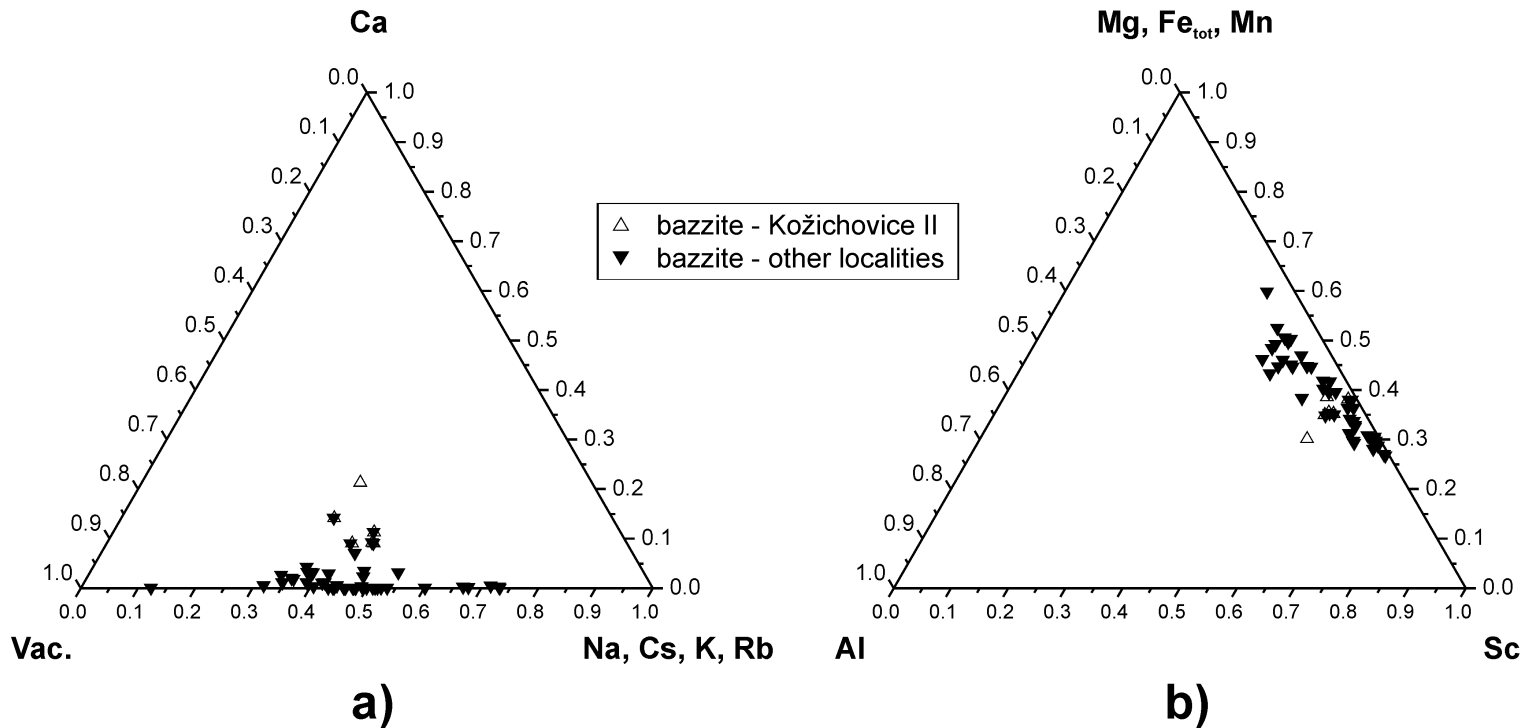
3. Beryl



3. Beryl



3. Beryl



Složení bazzitu

3. Beryl

- **Výskyty berylu**

Beryl je pravděpodobně nejhojnějším minerálem Be vůbec, i když hlavním zdrojem Be je dnes bertrandit.

- **Beryl se vyskytuje v různých geologických prostředích**

- **Beryl se vyskytuje v různých typech magmatických a metamorfovaných hornin, zjištěn byl také na hydrotermálních žilách, v greisenech ale i v sedimentech.**

- **1. granitické pegmatity - nejhojnější typ výskytu, několik set ppm Be je dostatečné ke krystalizaci berylu z taveniny. Složení berylu kolísá podle typu mateřského pegmatitu, v relativně primitivních pegmatitech se blíží teoretickému vzorci, v silně frakciovaných pegmatitech může obsahovat vysoké obsahy Cs popř. Li.**

- **2. greiseny a vysokoteplotní hydrotermální křemenné žíly**

- **3. metamorfované horniny – často obsahuje zvýšená množství např. Fe, Cr, Mg, Sc, aj.**

3. Beryl

Granitické pegmatity jsou jednoznačně nejčastější typ výskytu berylu v přírodě. Ke krystalizaci berylu z pegmatitové taveniny je dostatečný obsah pouze několika set ppm Be, proto je beryl v pegmatitech poměrně častý, často ale uniká pozornosti. Beryl je znám z více typů pegmatitů, které lze rozdělit do několika skupin. Jednotlivé pegmatity ale nelze vždy jednoznačně klasifikovat do některého z níže uvedených typů a někdy se zařazení pegmatitů u jednotlivých autorů liší.

- ***Pegmatity vzácných prvků*** jsou nejhojnější třídou pegmatitů a dělí se do několika typů a subtypů.
- **Berylový typ (zahrnuje beryl-columbitový a beryl-columbit-fosfátový subtyp)**
Zde je beryl typomorfní minerálem, ale přítomnost berylu na lokalitě ještě nutně neznamena, že jde o berylový pegmatit ve smyslu této klasifikace. Platí to hlavně tehdy, odráží-li přítomnost berylu nejvyšší stupeň frakcionace v pegmatitovém tělese, tedy chybí zde nebo jsou extrémně vzácné např. minerály Li a nebo minerály REE. Beryl tvoří sloupcovité více či méně dokonale omezené krystaly někdy dosahují délky až 8 m. Jejich barva je většinou světle žlutá až světle zelená s různými odstíny, beryl může být i světle šedý nebo mírně namodralý. V těchto pegmatitech je většinou přítomen pouze jediný paragenetický typ berylu. Někdy se objevuje v dutinách jako dokonale vyvinuté krystaly. Spolu s berylem se vyskytují muskovit, granát, turmalín, columbit, zirkon, gahnit, kasiterit, niobový rutil a primární fosfáty (např. trifylin). V tomto typu pegmatitů se vyskytuje podstatná část berylu a známé lokality leží hlavně v Brazílii (Minas Gerais), Mosambiku, USA, Kanadě, na Madagaskaru. Typickými lokalitami u nás jsou např. oblast Písek a Údraž, Maršíkov a další lokality v Hrubém Jeseníku, Věžná u Nedvědice, Meclov u Poběžovic, Kynžvart u Mariánských Lázní.
- **Vzácnost-zeminový typ (zahrnuje euxenitový a gadolinitový subtyp)**
V těchto pegmatitech se vyskytují především minerály vzácných zemin - REE (např. Ce, La, Nd) a Y, jako jsou allanit, euxenit, aeschynit, samarskit, fergusonit, ale i Be-obsahující minerál gadolinit. Beryl je zde vzácný a typickými lokalitami jsou např. Iveland v Norsku, u nás Kožichovice u Třebíče.

3. Beryl

- **Komplexní (Li) typ** (zahrnuje spodumenový, petalitový, lepidolitový, amblygonitový a elbaitový subtyp)

V těchto pegmatitech se beryl vyskytuje často ve více paragenetických typech. V okrajových zónách pegmatitů je beryl podobný výskytům v méně frakcionovaných berylových pegmatitech barvou, chemickým složením i minerální asociací. Ve více frakcionovaných částech pegmatitových těles a v dutinách, kde je beryl často doprovázený minerály s Li (spodumen, lepidolit, elbait, petalit, amblygonit), je obohacený Li a Cs a má světle šedou, bílou nebo růžovou barvu. Typické lokality jsou např. Tanco, Manitoba, Kanada, Bikita, Zimbabwe, Alto Ligonho, Mosambik, u nás Nová Ves u Českého Krumlova, Rožná u Bystrice nad Pernštejnem, Puklice a Jeclov u Jihlavy.

- *Miarolitické pegmatity*

Tato třída pegmatitů je charakteristická přítomností hojných dutin, ale jinak jsou velmi podobné pegmatitům třídy vzácných prvků. Zde se beryl vyskytuje v dutinách často v dokonale vyvinutých průhledných krystalech jako akvamarín nebo heliodor, spíše výjimečně se objevuje také morganit. Typické lokality jsou např. Volyně na Ukrajině (heliodor), Mt. Antero, Colorado, USA, a Gilgit, Pakistan (akvamarín) nebo San Piero, Elba, Itálie (morganit), u nás tento typ pegmatitů zatím nebyl zjištěn.

- **Ryolity** jsou dalším typem hornin, kde se můžeme s berylem setkat, i když jen velmi vzácně a pouze v dutinách. Zde ale většinou vzniká až v hydrotermální fázi např. spolu s topazem, fluoritem, hematitem a spessartinem. V tomto typu hornin se vyskytuje rudý beryl - bixbit. Typické lokality např. Thomas Range nebo Wah Wah leží ve státě Utah, USA, u nás tento typ chybí.

3. Beryl

- **Vysokoteplotní hydrotermální křemenné žíly a greiseny obsahují bílý až bezbarvý beryl poměrně vzácně např. ve srovnání s pegmatity. Většinou tvoří nevelké krystaly nebo jejich agregáty zarostlé v křemeni doprovázené např. apatitem. Typické lokality jsou např. v Armorickém masívu ve Francii (Morbihan), Šerlovaja Gora, Sibiř u nás např. Krásno u Horního Slavkova.**
- **Středněteplotní hydrotermální žíly s dominantním kalcitem a/nebo křemenem jsou dalším genetickým typem. Vzhledem k odlišnému chemickému složení okolních hornin se výrazně liší složení i barva berylu, takže do této skupiny patří např. kalcitové žíly se smaragdy a minerály vzácných zemin z lokality Muso v Kolumbii nebo křemen-kalcitové žíly s modrým berylem z řady lokalit v Alpách a v Pyrenejích, které často pronikají horninami s hematitem. U nás jsou jedinou podobnou lokalitou Skály u Rýmařova.**
- **Metamorfované horniny zahrnují více různých hornin, kde se beryl vyskytuje – např. svory, metabazity a serpentinity. Tyto horniny jsou většinou v asociaci s magmatickými horninami (často pegmatity), které jsou zdrojem Be. V souhlase s chemickým složením hornin, obsahuje beryl často vysoké množství Fe, Mg, ale také Cr a V. Typickými lokalitami jsou především výskyty smaragdu jako jsou Habachtal, Alpy, Rakousko nebo Tokovaja na Urale. Někdy je doprovázen dalšími minerály Be, např. fenakitem nebo chryzoberylem. Tento typ výskytů berylu u nás dosud chybí.**
- **Sedimenty jsou vzhledem k nízké hustotě berylu a jejich časté hydrotermální alteraci méně běžným typem výskytu berylu. Přesto se zde vyskytují v náplavech především drahokamové typy berylu, např. v Nigérii nebo na Srí Lance. Tento typ výskytu berylu není v ČR znám.**

4. Minerály Be - a

- **Oxidy**
Chryzoberyl BeAl_2O_4 **rombický**
- **Fosfáty**
Beryllonit $\text{NaBe}(\text{PO}_4)$ **rombický**
Hurlbutit $\text{CaBe}_2(\text{PO}_4)_2$ **monoklinický**
Herderit $\text{CaBe PO}_4 (\text{F},\text{OH})$ **monoklinický**
- **Boráty**
Hambergit $\text{Be}_2 [\text{BO}_3] (\text{OH},\text{F})$ **rombický**
- **Silikáty**
Fenakit $\text{Be}_2 \text{SiO}_4$ **trigonální**
Euklas $\text{BeAl SiO}_4 (\text{OH})$ **rombický**
Bertrandit $\text{Be}_4[\text{Si}_2\text{O}_7] (\text{OH})_2$ **rombický**
Bavenit $\text{Ca}_4 [\text{Be}_2\text{Al}_2\text{Si}_9\text{O}_{27}] (\text{OH})$ **rombický**
Bityit $\text{CaLiAl}_2\text{AlBeSi}_2\text{O}_{10} (\text{OH})_2$ **monoklinický**

4. Minerály Be - b

- **Silikáty**

Milarit



hexagonální

A = K, Na, Y, REE, Ca

B = Ca, Y, Na, vakance

T(2) = Be, Al

T(1) = Si

Skupina gadolinitu



monoklinický

X = Y, Ce, Yb, Ca

Y = Fe³⁺, Y, vakance

O = OH

Skupina helvinu



kubický

A = Mn (helvin), Fe (danalit), Zn (genthelvin)

Na rozdíl od výše uvedených minerálů Be, tyto skupiny jsou chemicky velmi proměnlivé

4. Minerály Be - c

- **Silikáty z alkalických hornin**

Epididymit	Na₂[Be₂Si₆O₁₅] · H₂O	rombický
Čkalovit	Na₂BeSi₂O₆	rombický
Melifan	CaNaBeSi₂O₆F	tetragonální

Minerály Be uvedené v části a) mají většinou chemické složení blízké ideálnímu vzorci snad kromě variace OH-F v herderitu a hambergitu. Pouze bavenit a bityit mají poněkud modifikovaná složení, např. nahrazování části Al - Be. Minerály v části b) jsou chemicky silně variabilní, naopak minerály v části c) jsou opět velmi blízké ideálnímu složení.

Většina minerálů Be jsou hospodářsky bezvýznamné kromě využití jako drahý kámen (chryzoberyl, fenakit). Bertrandit a tzv. sferobertrandit jsou ale hlavním zdrojem Be z vulkanických tufů ve státě Utah.

4. Minerály Be

- **Vznik minerálů Be v různých geologických prostředích**
Minerály Be lze rozdělit geneticky do několika skupin:
 - **primární (magmatické, metamorfní)**
 - **hydrotermální (vzniklé z fluid)**
 - **sekundární (vzniklé pozdní hydrotermální alterací primárních minerálů vzniklých při magmatických, hydrotermálních popř. metamorfních procesech)**

Helvín



Bertrandit

Chryzoberyl



4. Minerály Be

- **Geologické prostředí se zvýšenými obsahy minerálů berylia**
- **1. Magmatické**
 - 1.1. granitické pegmatity a granity LCT (beryl, chryzoberyl, boráty, fosfáty) a NYF (beryl, fenakit, gadolinit, bazzit)**
 - 1.2. alkalické pegmatity (čkalovit, melifan, epididymit)**
 - 1.3. vulkanické horniny (beryl, stoppannit)**
 - 1.4. ryolitové tufy (bertrandit)**
- **2. Hydrotermální a metasomatické**
 - 2.1. greiseny (beryl, euklas)**
 - 2.2. skarny (helvin, danalit)**
- **3. Metamorfované**
 - 3.1. svory, ruly, metabazity (beryl, fenakit, chryzoberyl)**
 - 3.2. alpská parageneze (milarit, euklas)**
- **4. Pozdní produkty hydrotermální (sekundární) alterace primárních minerálů (bertrandit, bavenit, milarit).**

5. Alterace Be-minerálů

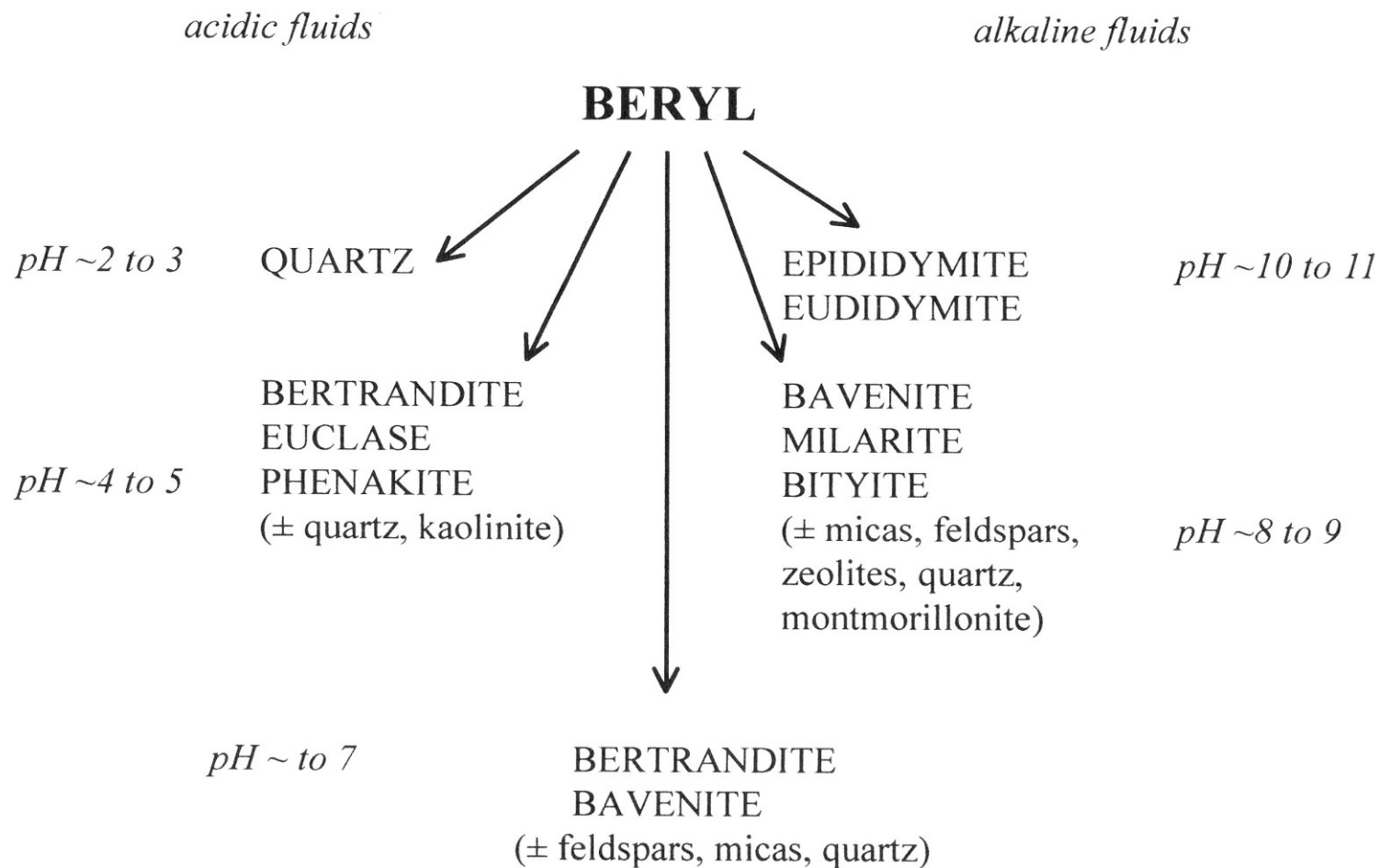


Figure 5. The most common silicate products of alteration of beryl in granitic pegmatites, generated by acidic (left side) and alkaline (right side) solutions. Modified after Černý (1970).

5. Alterace Be-minerálů

System BASH (beryl, chryzoberyl, fenakit, euklas, bertrandit)

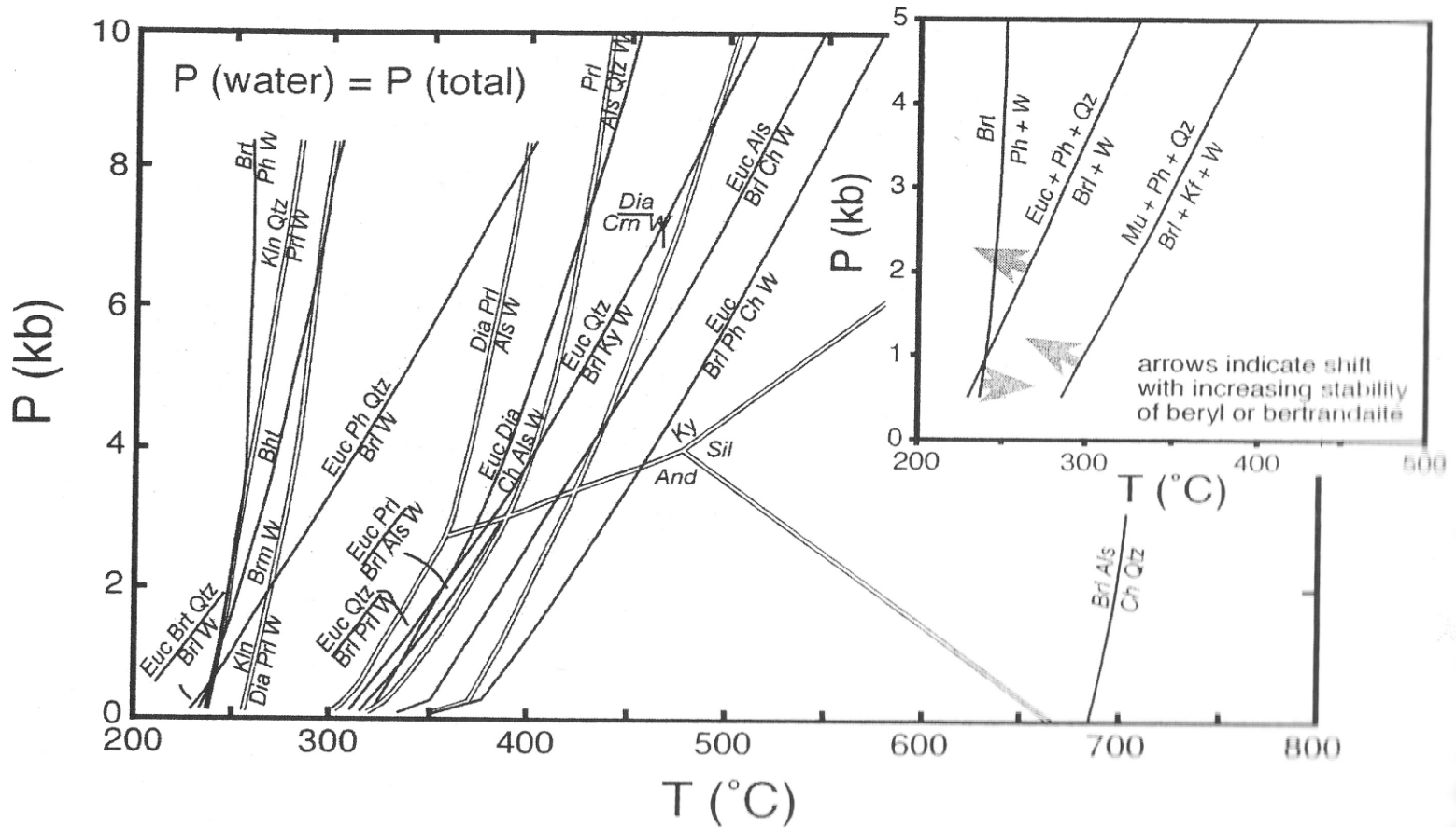
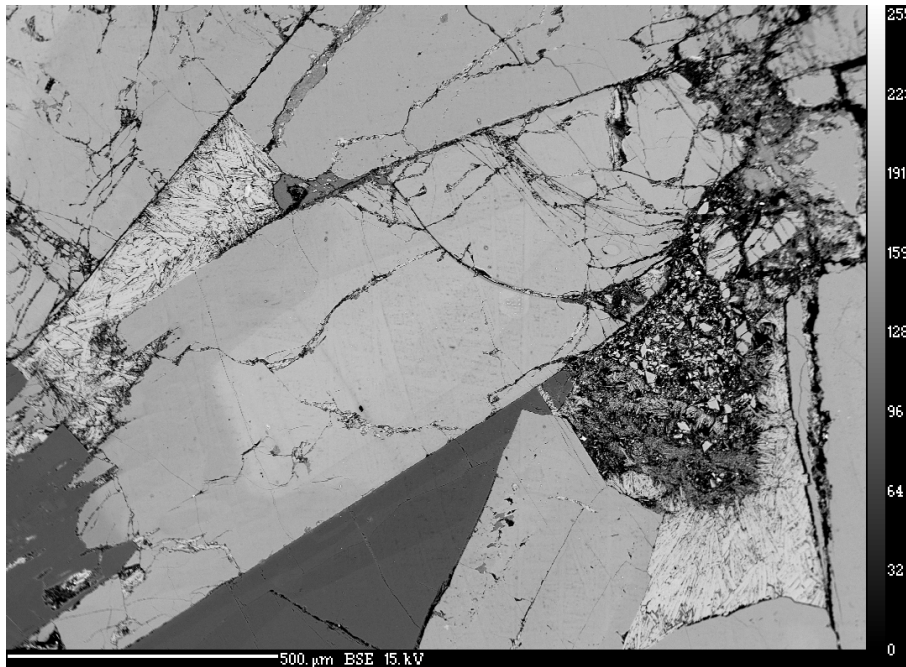


Figure 10. Pressure-temperature projection of phase relationships in the $\text{BeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (BASH) system. Redrawn from Barton (1986). Limiting reactions for bertrandite and beryl both can depend on solid solution effects, F for OH in bertrandite, and multiple components in beryl (inset).

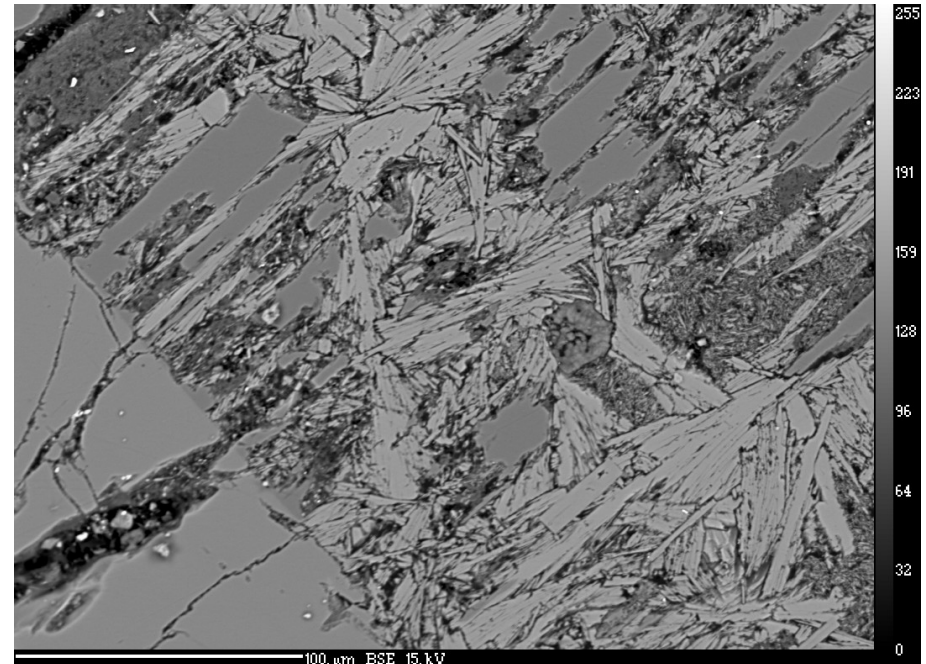
5. Alterace Be-minerálů

Kožichovice



**Zonální beryl,
bertrandit, bavenit**

Beryl, sekundární beryl, bavenit, bazzit



5. Alterace Be-minerálů

Pseudomorfózy herderitu po beryllonitu z Rožné, Boroviny

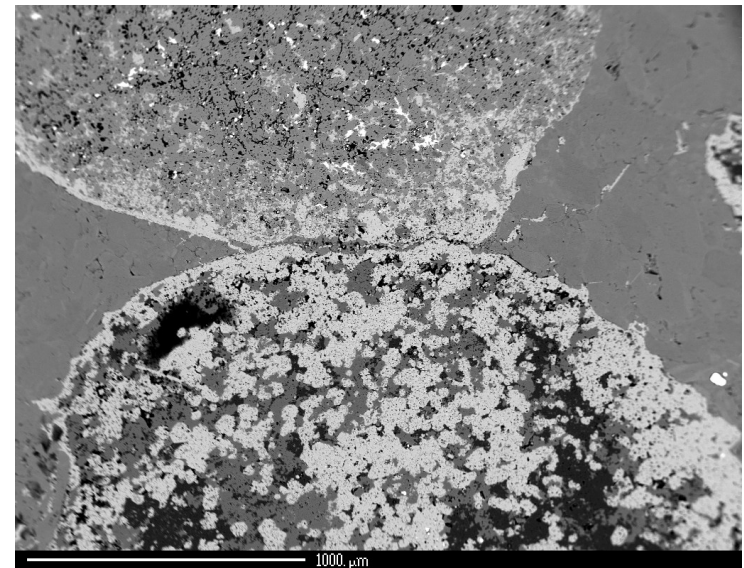
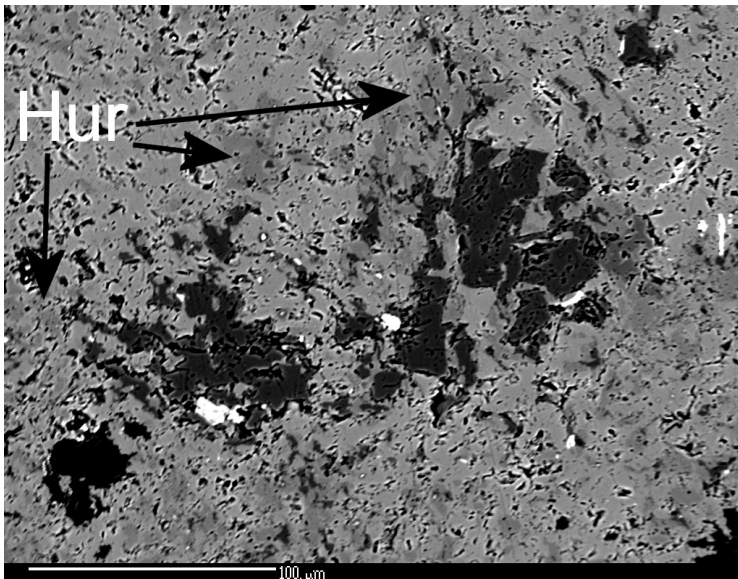


Figure 2. Assemblage I - relics of dark beryllonite are replaced by darker grey hurlbutite and lighter grey hydroxylherderite. Bright white spots are inclusions of unknown phosphates of Ba and Sr. Scale bar length is 0.1 mm.

5. Alterace Be-minerálů

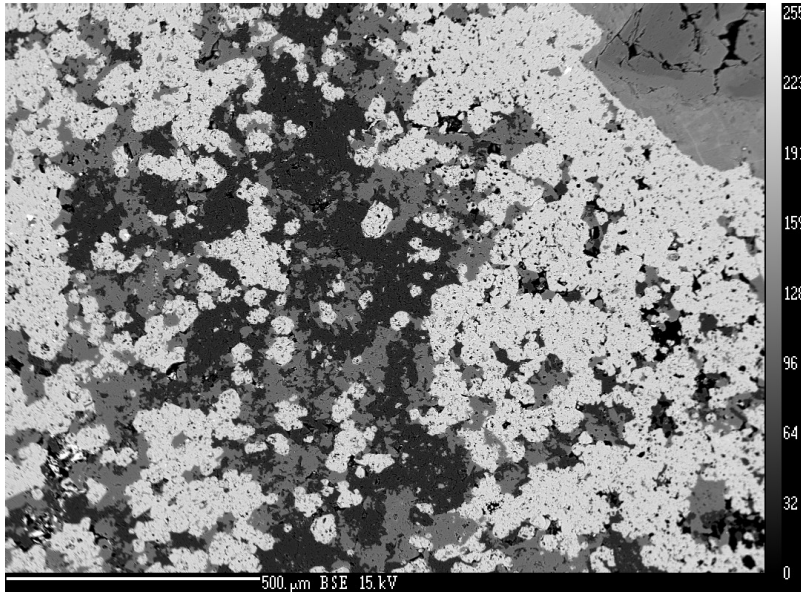
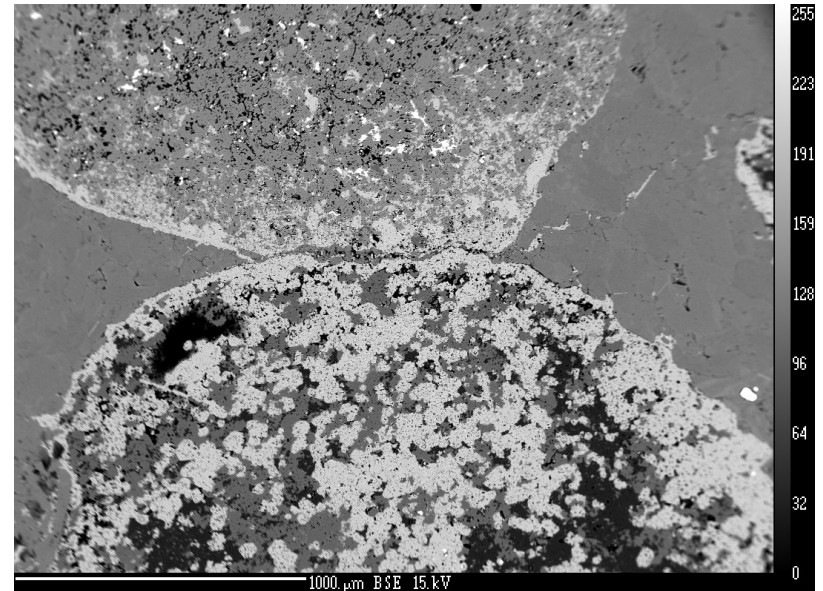


Figure 3. Assemblage II – aggregates of bertrandite (dark) + quartz (grey) + apatite (white) as a replacement product after hydroxylherderite (grey, very similar to quartz). Scale bar length is 0.5 mm.



Sekvence zatlačování:

beryllonit ⇒ hurlbutit ⇒ hydroxylherderit ⇒ bertrandit + fluorapatit

6. Závěr

- Minerály Be jsou vzhledem ke specifickým vlastnostem Be velmi vhodným indikátorem podmínek jejich vzniku ve velmi širokém rozsahu PTX-podmínek včetně pH, aktivity různých prvků (Na, Ca, P).