

Magmatické a metamorfní procesy

1. Uzavřené *versus* otevřené systémy v geologických procesech

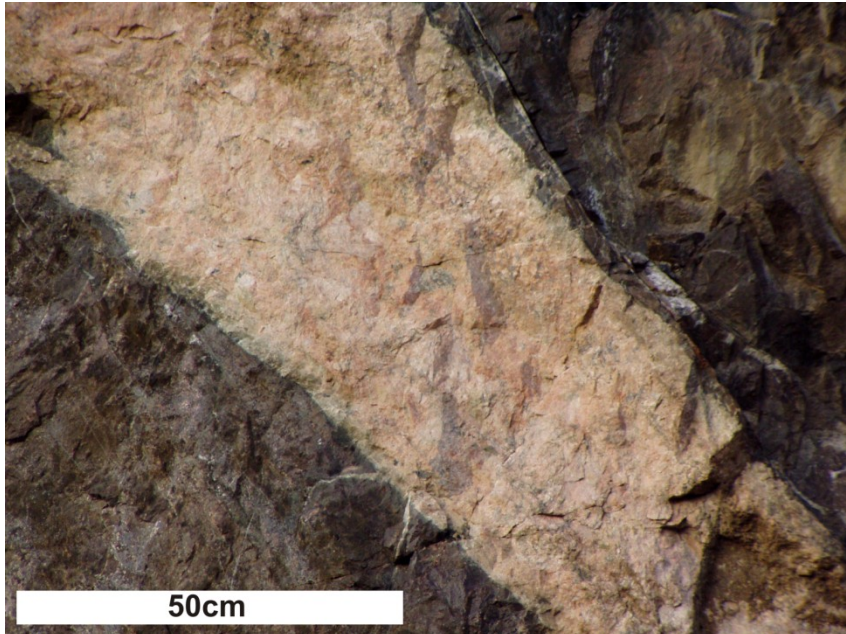
Prof. RNDr. Milan Novák, CSc.

Osnova:

- 1. Úvod
- 2. Definice
- 3. Proces definování systému
- 4. Faktory důležité pro otevřenost/uzavřenost
- 5. Mechanismus přenosu
- 6. Příklady

1. Úvod

- **Geologické procesy mohou probíhat v uzavřených nebo v otevřených systémech. Zda se systém chová jako uzavřený nebo otevřený je zásadní otázkou pro interpretaci řady geologických procesů a ne vždy je tomuto problému věnována dostatečná pozornost.**



**Vlastějovice, kontakt
Fe-skarn-pegmatit**

2. Definice systémů (Rieder a Povondra 1997)

- Izolovaný systém – je látkově izolován od okolí, a nemůže přijímat nebo uvolňovat energii a nemůže konat práci. Izolované systémy v geologických objektech zřejmě neexistují.**
- Uzavřený systém – je látkově izolován od okolí, ale může přijímat nebo uvolňovat energii a může konat práci anebo na něm může být vykonána práce jeho okolím.**
- Otevřený systém – může s okolím vyměňovat energii, ale i některé chemické specie (složky).**
- V geologické literatuře jsou požadavky na termodynamické definice obvykle respektovány poněkud méně striktně než v experimentálních pracích fyziků a chemiků a řada systémů označovaných v geologii jako uzavřené se ve skutečnosti uzavřenosti jen více či méně blíží.**

2. Definice

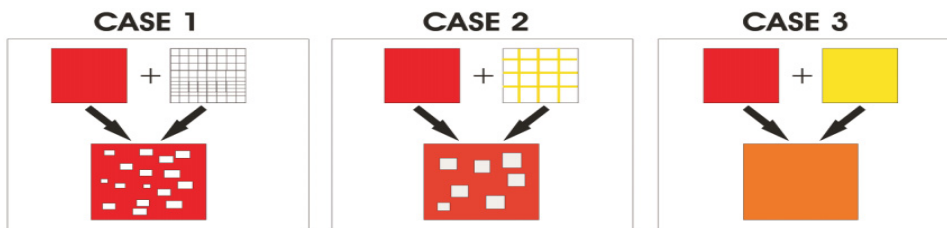
- **Jednou ze základních otázek, jimiž se geologové zajímají, je to, zda byl jimi zvolený systém (hornina, minerál, minerální asociace) uzavřený nebo otevřený a do jaké míry. Metasomatóza reprezentuje typický případ procesů, který probíhá v otevřeném systému a většinou v pevném stavu (jiná přednáška).**
- **1. Definice:**
- **Metasomatóza je proces, který vede ke změně celkového chemického a většinou i mineralogického složení horniny. Probíhá v pevném stavu a v širokém rozpětí tlaků a teplot od zemského pláště až po sedimentární horniny v blízkosti zemského povrchu.**
- **Zahrnuje především prvky, které můžeme označit jako kationy, a to jak Na, Ca, Mg, Fe, Al, Si ale také H. Za změnu zpravidla nepovažujeme např. pokles obsahu H₂O nebo CO₂ (např. diagenese), i když viditelná změna prvků (látek), které označujeme jako aniony, a to např. OH, F, B nebo CO₂ naznačuje i změny ve složení kationů. Už proto, že odnášená H₂O obsahuje určité množství rozpuštěných látek.**

3. Proces definování systému

- **Geologické objekty jsou většinou chemicky i texturně poměrně komplikované. Abychom mohli diskutovat otevřenost nebo uzavřenost systémů, musíme si nejdříve definovat systém, k němuž otevřenost nebo uzavřenost vztahujeme.**
- **Podobně jako u určení chemického systému hornin (např. KFMASH) a vzhledem ke komplikovanosti těchto systémů to není vždy právě jednoduché. Navíc je důležité, které složky systému sledujeme, systém totiž může být pro některé složky uzavřený a pro jiné otevřený, pak je jako celek otevřený. Z toho je zřejmé, že nás někdy zajímá uzavřenost nebo otevřenost systému jen pro určité složky.**
- **Definování systému je nelehký ale základní úkol.**

3. Proces definování systému

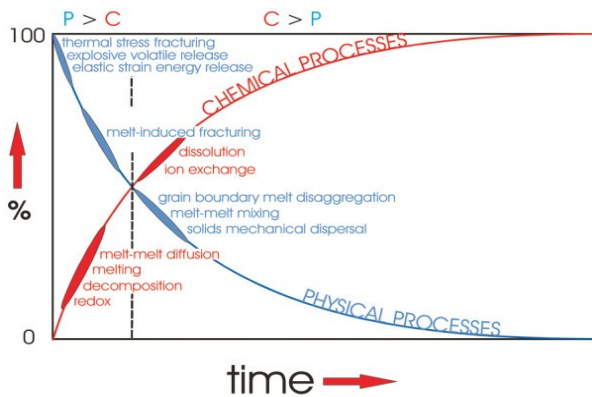
Asimilace v granitech



Clarke 2007

3. Proces definování systému

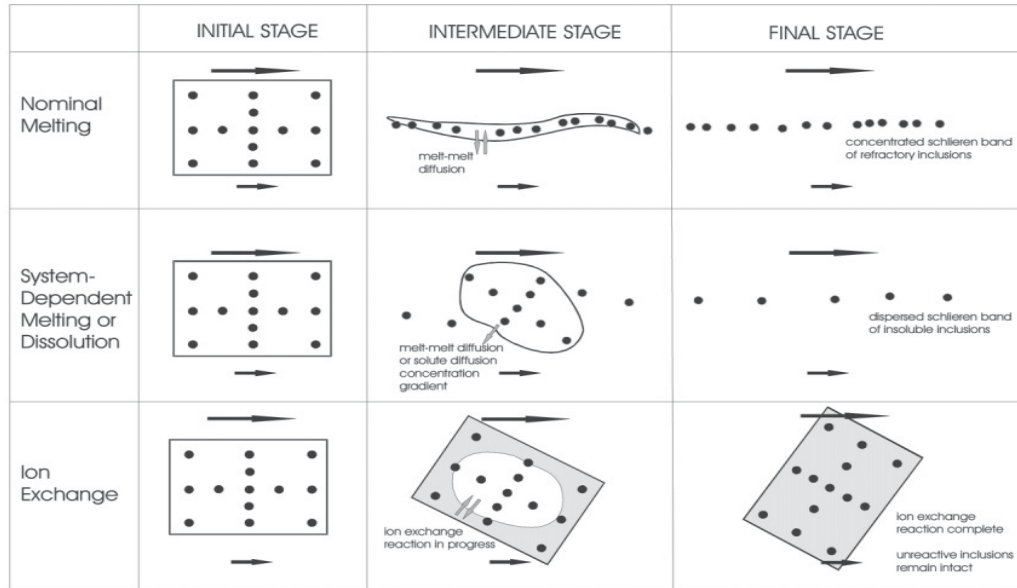
Asimilace v granitech



Vztah fyzikálních procesů a chemických procesů v granitech.

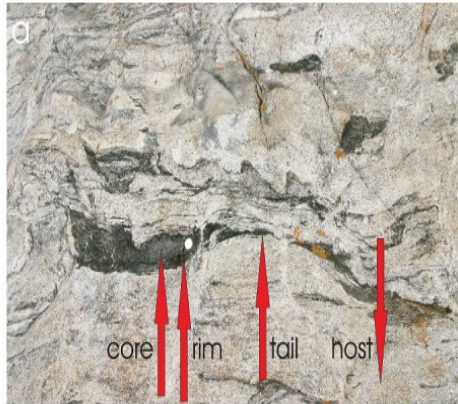
3. Proces definování systému

Asimilace v granitech

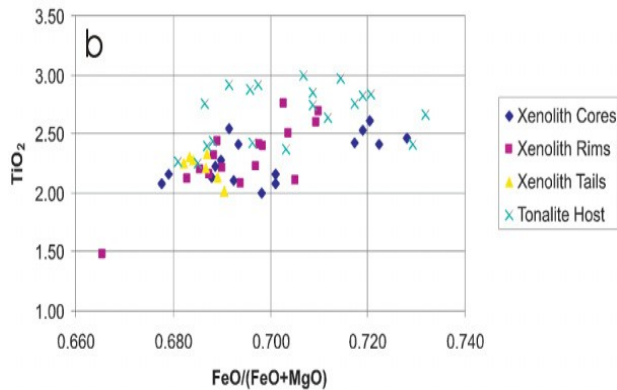


Různé typy asimilace v granitech

3. Proces definování systému



Složení biotitu z různých asociací v kontaminované hornině a granitu.



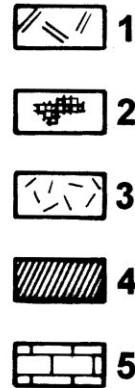
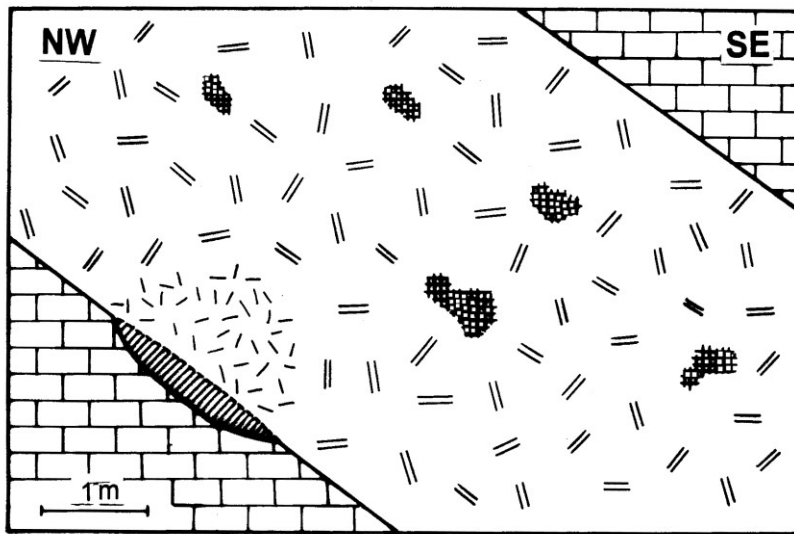
3. Proces definování systému

Granitické pegmatity

Obr. 1. Řez granitickými pegmatity Bližná a Nová Ves u Č. Krumlova, uložených v serpentinitech a mramorech

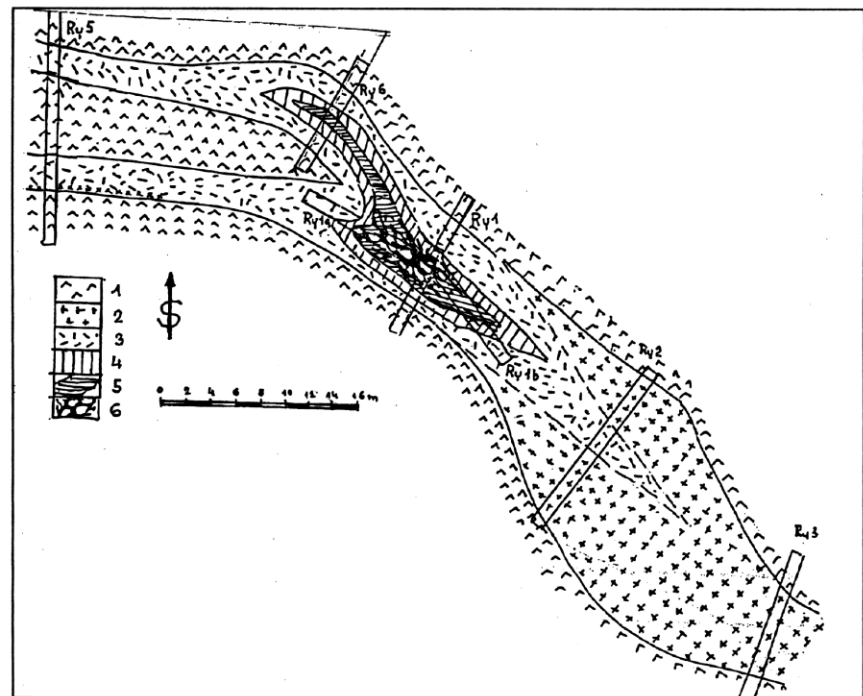
- **Definování jednotlivých systémů v granitických pegmatitech od objemově velkých až po malé-mikroskopické**
 - a) horninový komplex s pegmatitovým tělesem**
 - b) pegmatitové těleso**
 - c) jednotlivá zóna v rámci pegmatitového tělesa**
 - d) minerální asociace jako část pegmatitové zóny**
 - e) zrno minerálu**

3. Proces definování systému



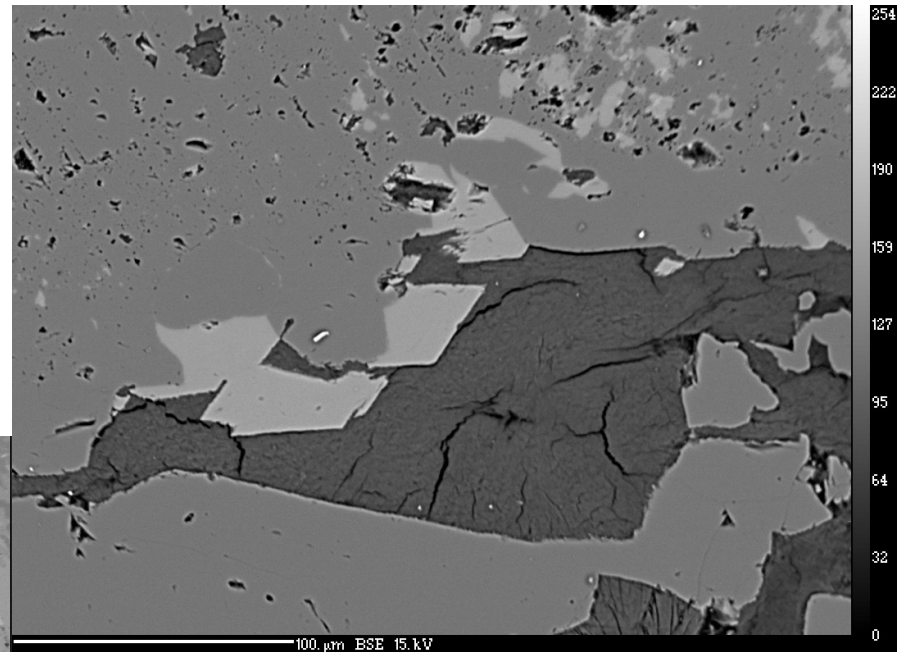
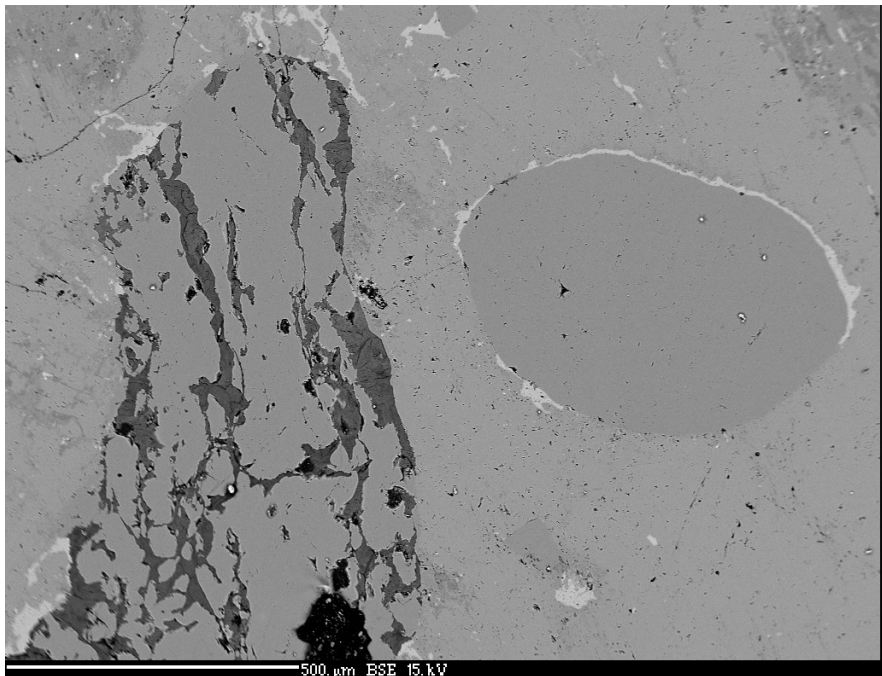
Bližná

Nová Ves



3. Proces definování systému

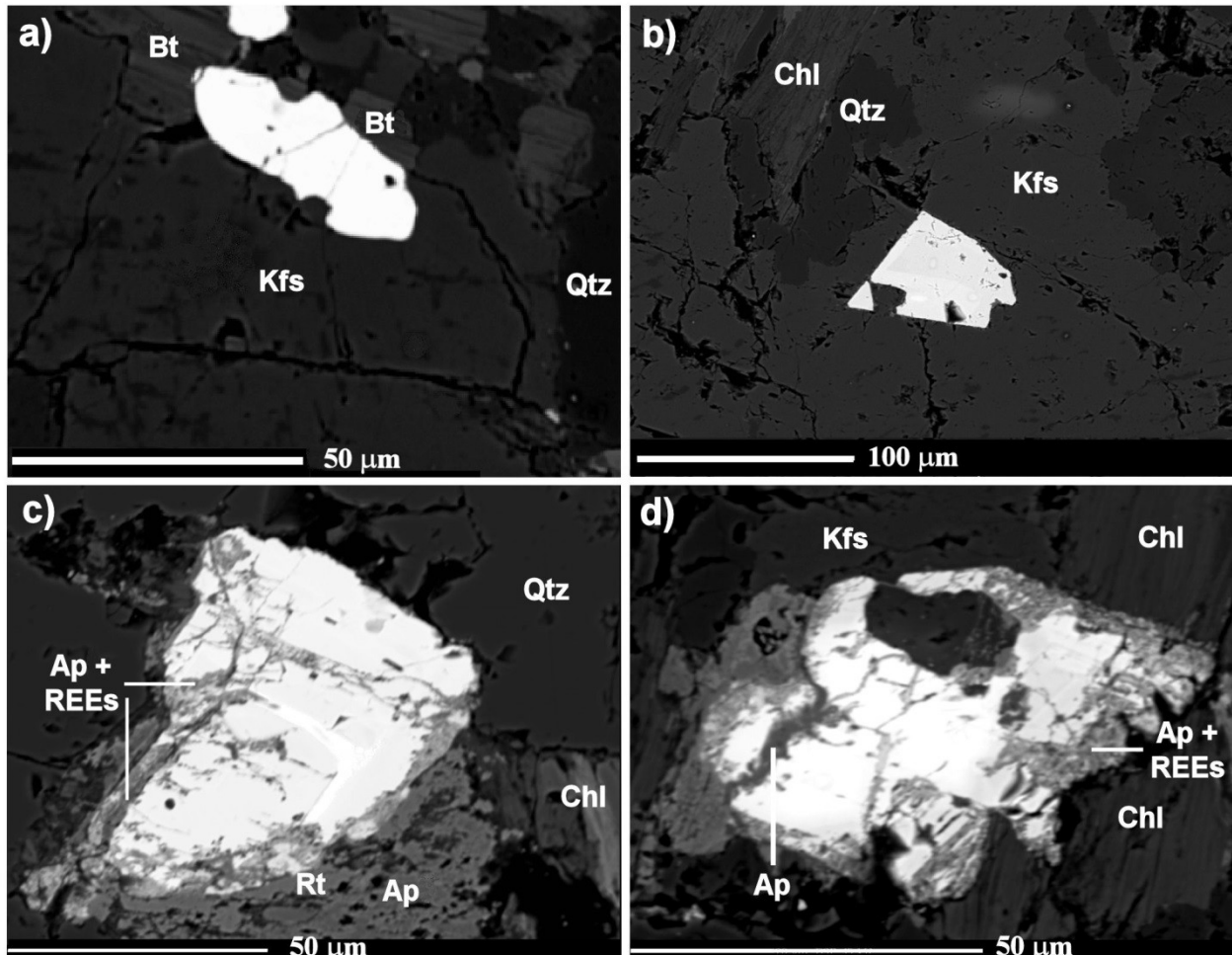
Zatlačování křemene kerolitem,
Věžná



Dosbaba a Novák 2009

3. Proces definování systému

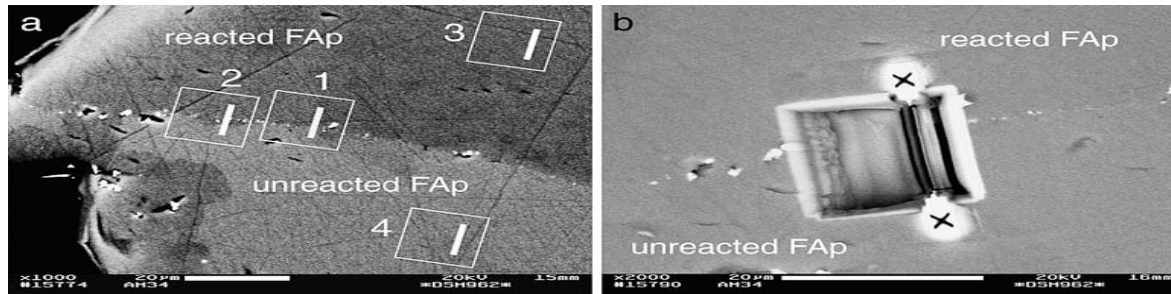
Monazit v granitu z valounu kulmských slepenců,
čerstvý monazit CHIME stáří 333 ± 8 Ma; alterovaný CHIME stáří 320 ± 6 Ma,



Čopjaková 2009

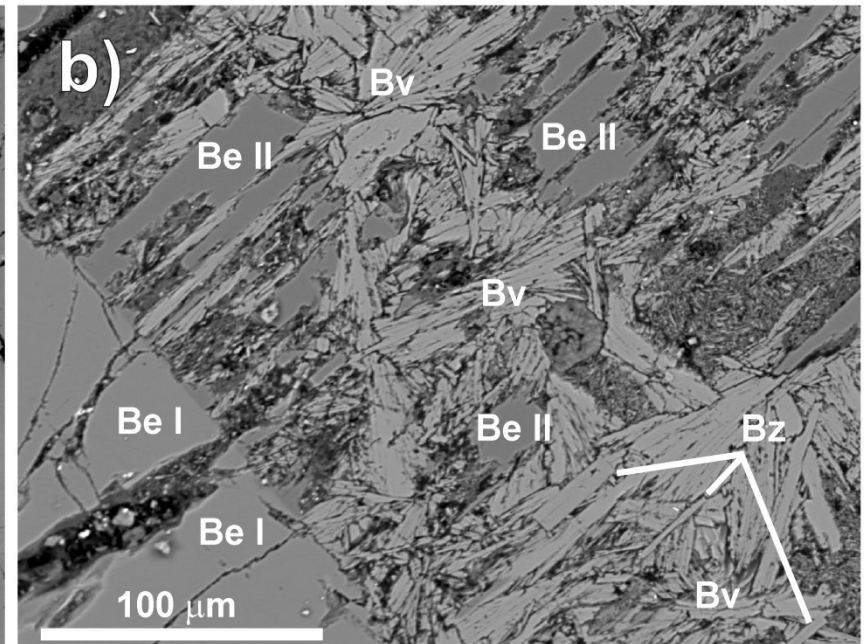
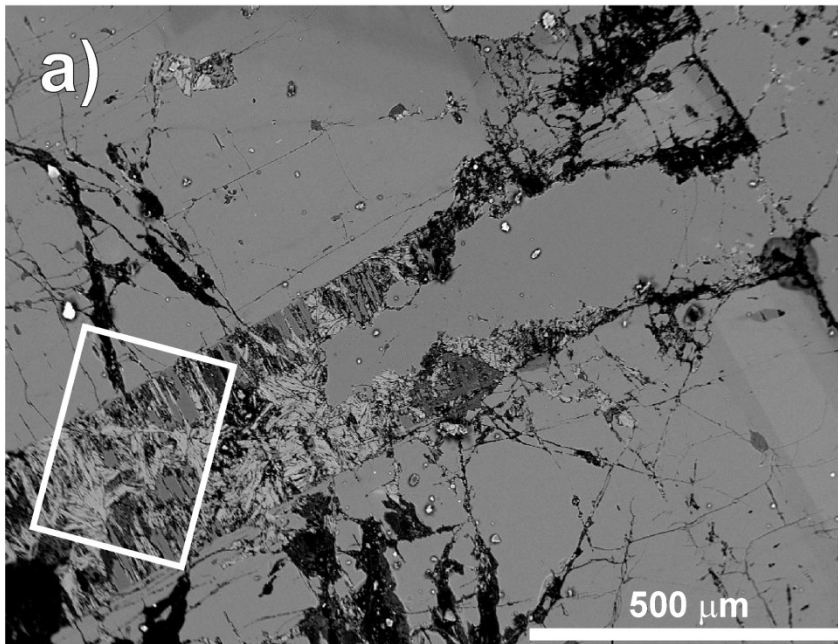
3. Proces definování systému

Apatit-rekrytalizace



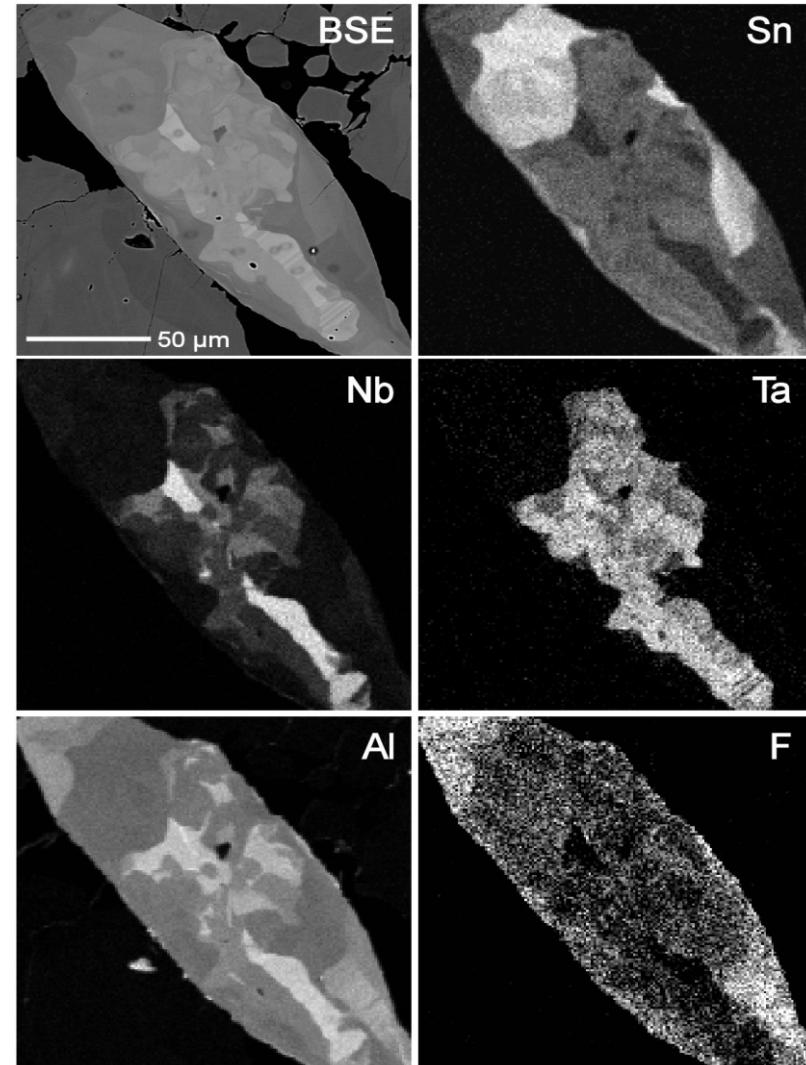
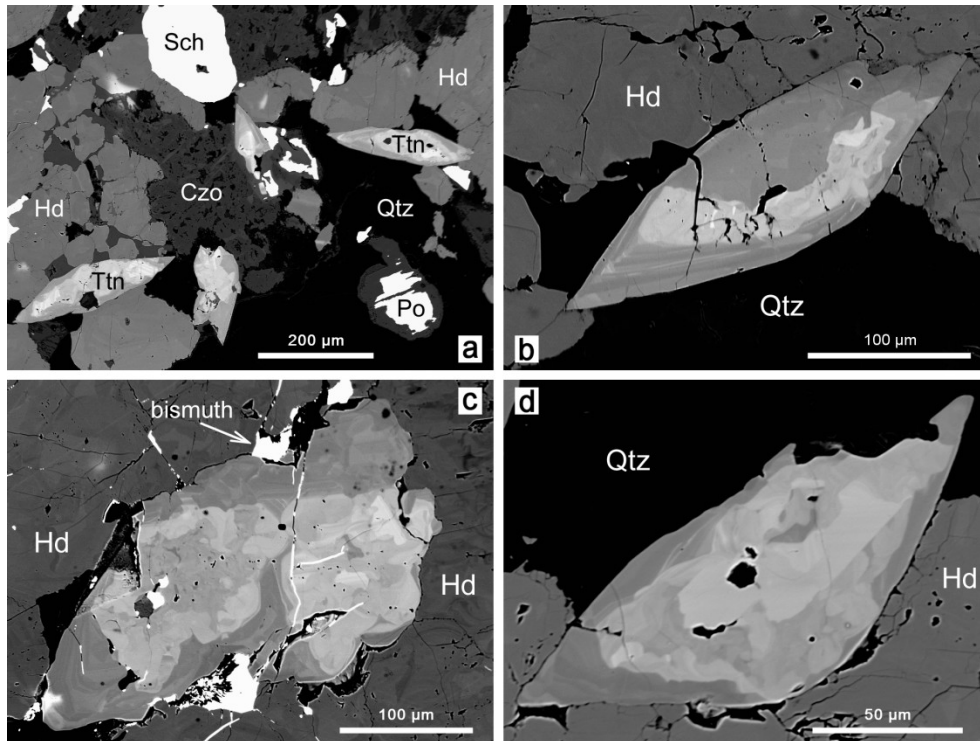
3. Proces definování systému

Alterace berylu na sekundární minerály



3. Proces definování systému

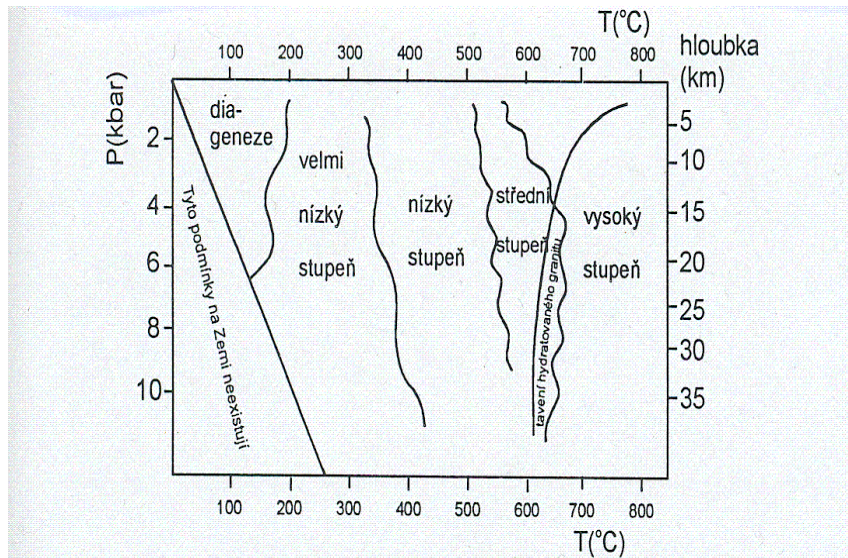
Cempírek et al. 2008



4. Faktory důležité pro otevřenost/uzavřenost systému

- PT podmínky

Otevřenost systémů obecně roste s rostoucí teplotou, příkladem jsou uzavírací teploty minerálů používaných pro radiometrické datování.



Obr. 1-1. Schematický PT (tlak, teplota) diagram s vyznačením polí pro stupně metamorfózy a diagenézy. V diagramu je také vyznačena křivka tavení hydratovaného granitu a pole podmínek, které na Zemi neexistují.

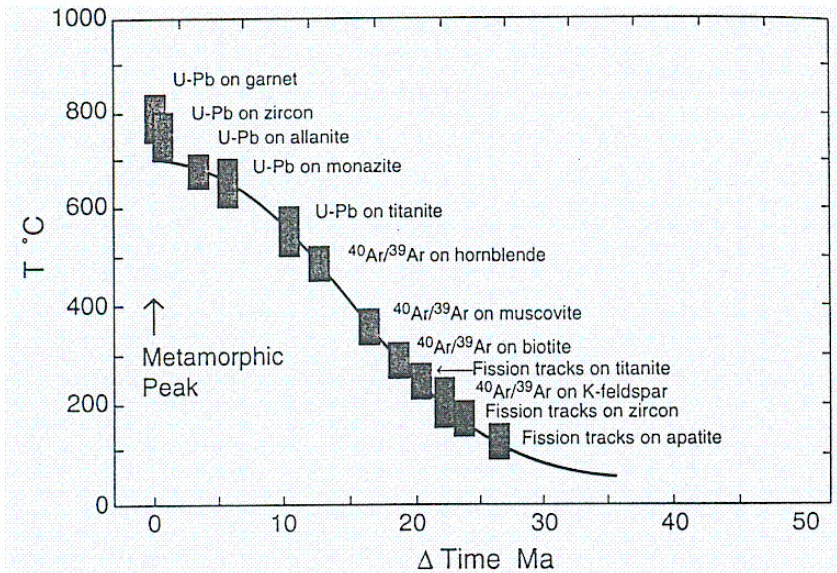


Figure 20-12. A hypothetical temperature-time plot showing the array of different thermochronometers that may be used to constrain the T-t history of an area.

4. Faktory důležité pro otevřenost/uzavřenost systému

- **Časový faktor**

Pohyb látek tedy otevřenost systémů se obecně zvyšuje s časem trvání vhodných podmínek. Velmi důležitá je také otevřenost v průběhu času, která může výrazně kolísat.

- **Medium, které umožní přenos**

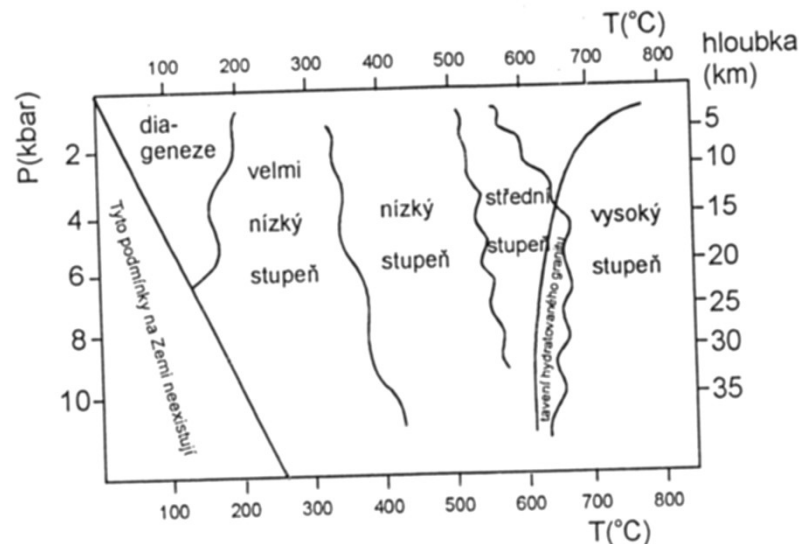
- Jednotlivé prvky nebo látky se většinou nemohou pohybovat jako samostatné atomy, jsou přenášeny v různých komplexech složených hlavně z O a tzv., těkavých látek (F, B, Cl, S, CO₂ aj.)

- Pohyb může probíhat také difúzí kationů uvnitř krystalů jednotlivých minerálů, v tomto případě není nutné žádné medium pro přenos (platí pouze pro mikroskopické systémy).

4. Faktory důležité pro otevřenost/uzavřenost systému

- Prostor, v němž přenos probíhá

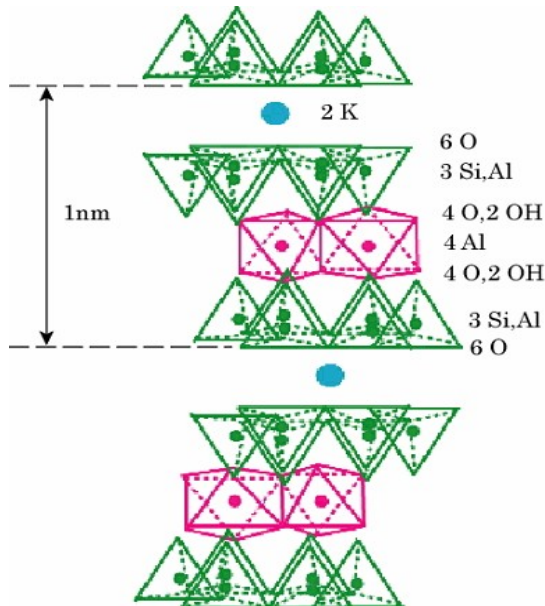
Medium, které nese jednotlivé kationy nebo látky, potřebuje volný prostor (póry mezi zrny, trhliny). Je-li hornina extrémně masivní, je výměna látek ztížena, naopak porézní horniny jsou velmi příhodné. Porosita popř. tektonické postižení hraje velmi významnou roli pro otevřenost určitého systému. Permeabilita je důležité pro systémy větších objemů, u mikroskopických systémů je důležitá difúze v minerálech a zde hraje větší úlohu krystalová struktura minerálů.



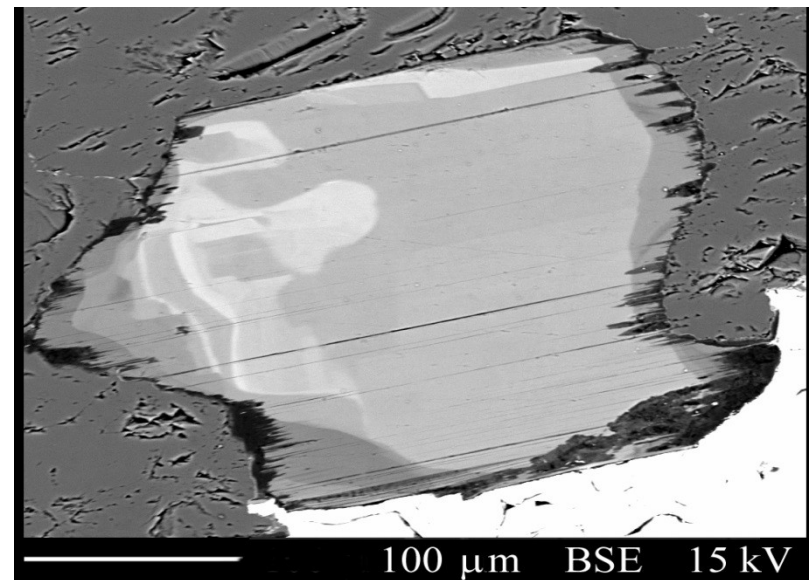
4. Faktory důležité pro otevřenost/uzavřenost systému

- Krystalová struktura minerálů

Krystalové struktury minerálů obsahují pozice, které mají různou sílu vazby na ně vázaných prvků. Proto mohou obsahovat prvky (látky), které jsou lehce vyměnitelné a tedy i vhodnější pro otevření systému. Nahrazení prvku v jedné pozici může ale vyžadovat změnu i v jiné pozici. Při nepřítomnosti vhodného prvku do této pozice se může výměna zablokovat, i když jsou další podmínky vhodné. To může hrát důležitou roli pro otevřenost systému a také to ukazuje, jak důležité je rozumět mineralogii námi studovaných systémů.



Slídy



5. Mechanismus přenosu látek v otevřených systémech

- **Infiltrace je hlavním mechanismem pro více objemové horninové systémy. Roztoky a fluida s rozpuštěnými látkami cirkulují těmi částmi hornin, kde je vyšší permeabilita (póry, trhliny a jiné oslabené zóny) a reagují s protolitem, a odnáší uvolněné prvky a látky.**
- **Difúze v horninách je řízena rozdíly v chemických potenciálech a fluida nesoucí prvky jsou stacionární. Difúze je méně častá a méně výkonná.**
- **Difúze v minerálech, kdy dochází k pohybu atomů v rámci krystalové mřížky. Tento proces je důležitý pro systémy mikroskopické velikosti, při dostatku času a vhodných PT-podmínek, např. v plášti, může být i tento mechanismus důležitý.**

5. Mechanismus přenosu látek v otevřených systémech

Difuze v krystalech

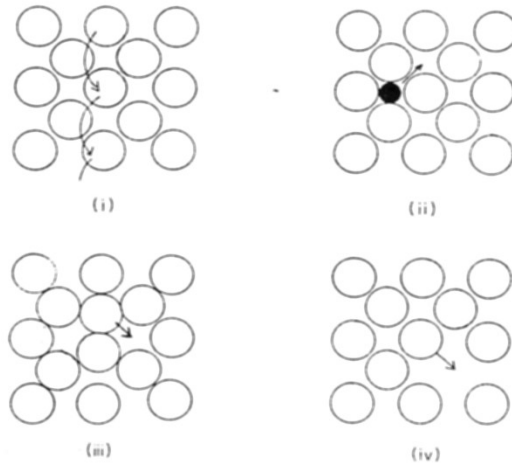
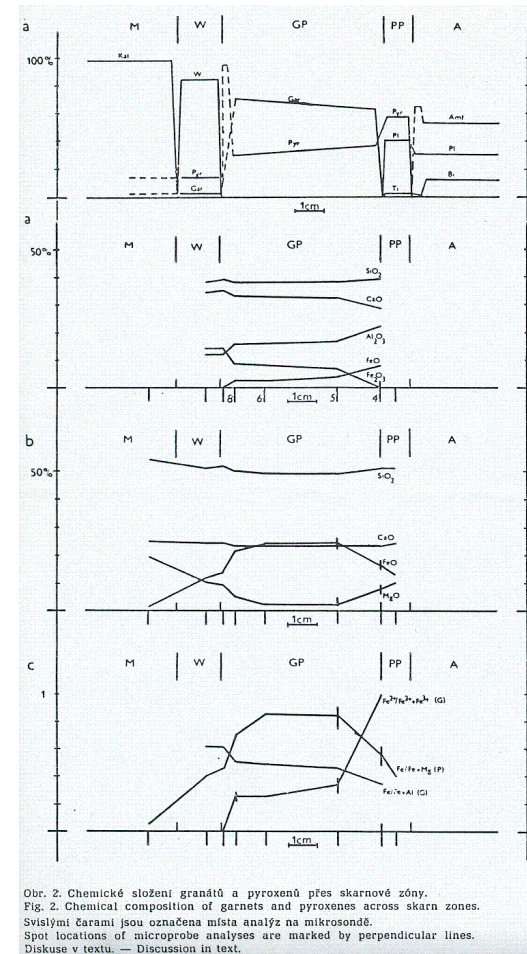


Fig. 5.48 Atomic mechanisms of diffusion: (i) exchange or ring mechanism; (ii) interstitial mechanism; (iii) interstitialcy mechanism; and (iv) vacancy mechanism.



Obr. 2. Chemické složení granátů a pyroxenů přes skarnové zóny.
Fig. 2. Chemical composition of garnets and pyroxenes across skarn zones.
Svislémi čarami jsou označena místa analýz na mikrosondě.
Spot locations of microprobe analyses are marked by perpendicular lines.
Diskuse v textu. — Discussion in text.

Difuzní skarn

6. Příklady pegmatitů

Pegmatitové žíly v serpentinitu a dolomitickém mramoru

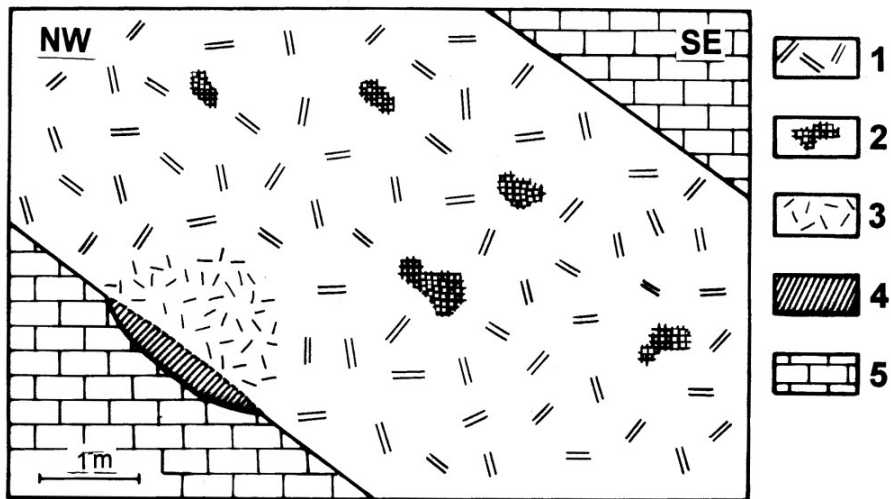
Chemická charakteristika granitických pegmatitů a vybraných okolních hornin

	hlavní	vedlejší	stopové	těkavé
Pegmatit	Si, Al, K, Na	Li, Be, Fe, Mn, Ca, Cs, Rb, Nb, Ta, Mg		H ₂ O, B, F, P
Serpentinit	Si, Mg,	Fe, Al Ca, Ti,	Cr, Ba, Ni	H ₂ O, CO ₂ , Cl
dolomit	Mg, Ca	Si, Al, Fe	CO ₂ , H ₂ O	

Minerály vhodné pro studium

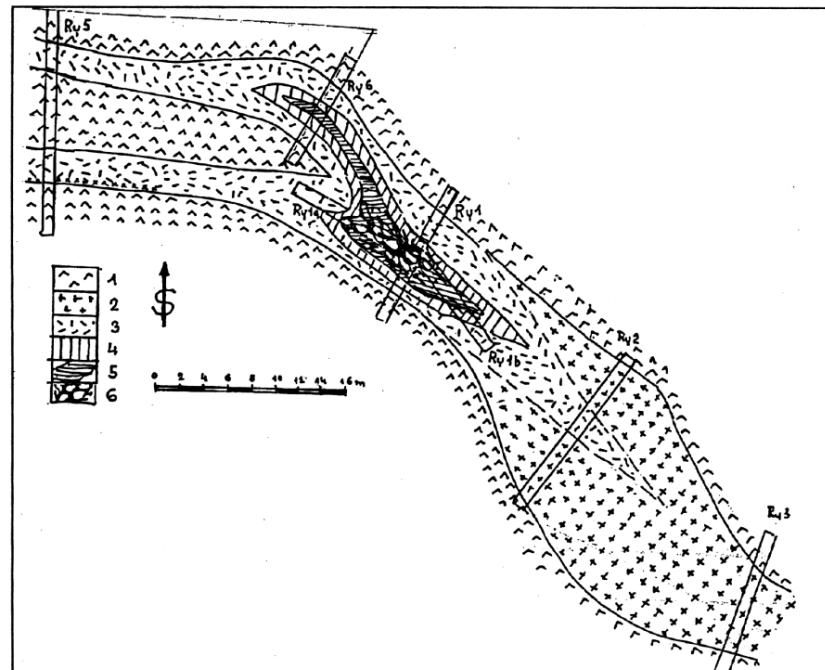
- obsahují v dostatečné koncentraci sledované prvky (Mg, Ca)
- přítomnost v jednotlivých zónách pegmatitu
- téměř neomezená mísitelnost i za nižších teplot
- refraktorní vlastnosti (chemická i mechanická stálost)

6. Příklady pegmatitů



Bližná

Nová Ves



6. Příklady pegmatitů

Stádia vývoje pegmatitů:

- a) **uvolnění pegmatitové taveniny (nízká viskozita, vysoký obsah rozpuštěných těkavých látek H_2O , B, F, P) z mateřského granitu a její intruze na místo krystalizace**
- b) **krystalizace minerálů z pegmatitové taveniny**
- c) **krystalizace minerálů z fluid uvolněných ze zbytkové pegmatitové taveniny**
- d) **tepelná a tlaková ekvibrace pegmatitového tělesa s okolními horninami**

6. Příklady pegmatitů

- a) Nejkomplikovanější a zatím jen velmi málo objasněné stádium vývoje. Vzhledem k tomu, že tavenina byla nenasycená na těkavé látky, mohl přenos látek probíhat pouze difúzí v tavenině, popř. mechanickým pohlcením okolních hornin, které pak byly asimilovány. Během tohoto stádia velmi pravděpodobně nevznikaly žádné minerály. Systém se choval jako otevřený.
- b) Tavenina byla rychle oddělena od okolních hornin úzkou okrajovou zónou pevné horniny. Výměna látek s okolím byla omezena vznikem této zóny, dále tím, že tavenina nebyla nasycena těkavými látkami a výměna látek s okolím mohla probíhat pouze difúzí v tavenině, a výměnu omezovala i rychlá krystalizace taveniny.

Během tohoto stádia vznikaly téměř všechny minerály, výjimečně téměř 100 %. Systém se choval jako uzavřený.

6. Příklady pegmatitů

- c) Uvolnění těkavých látek ze zbytkové taveniny umožnilo jejich pohyb do okolních hornin. Pokud byl tlak uvolněných fluid vyšší než v okolních horninách, pohybovala se fluida pouze tímto směrem a vznikla reakční zóna složená z nově tvořených minerálů v okolní hornině na kontaktu. Pokud byl tlak fluid srovnatelný nebo dokonce nižší (pravděpodobně vzácný případ), došlo k míšení fluid a vzniku minerálů, které obsahují prvky uvolněné jak z pegmatitové taveniny, tak z okolní horniny přímo uvnitř pegmatitového tělesa.

Během tohoto stádia vznikaly nové minerály, většinou méně než 5 % celkového objemu pegmatitů. Systém se choval jako otevřený.

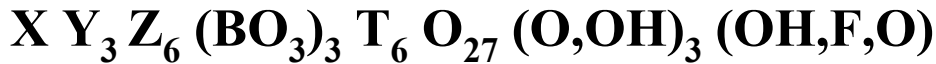
- d) Vyrovnání tlaků a teplot pegmatitového tělesa s okolními horninami vede k tomu, že pegmatit a okolní horniny jsou součástí jednoho systému.

Během tohoto stádia vznikaly nové minerály při pozdně hydrotermálních a zvětrávacích procesech. Systém se choval jako otevřený.

6. Příklady pegmatitů

Minerály vhodný pro studium otevřenosti systému v granitických pegmatitech

Turmalíny

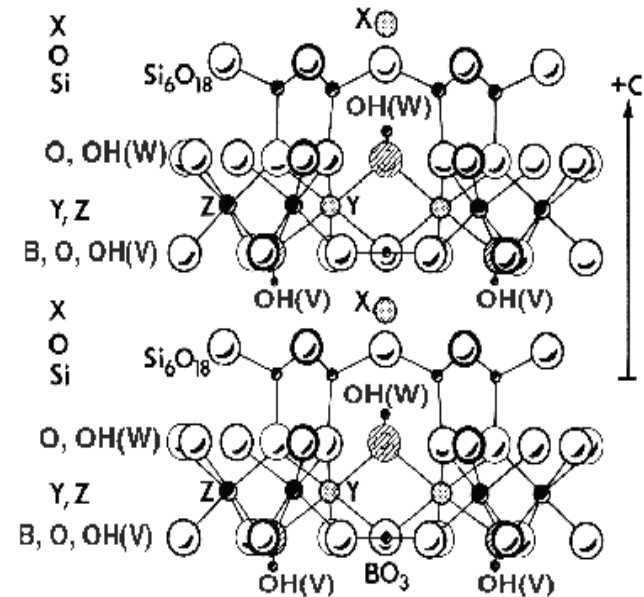


X = Na, Ca (K)

Y = Li, Mg, Fe²⁺, Al (Mn, Zn, Ti, Fe³⁺)

Z = Al (Mg, Fe³⁺)

T = Si (Al)



6. Příklady pegmatitů

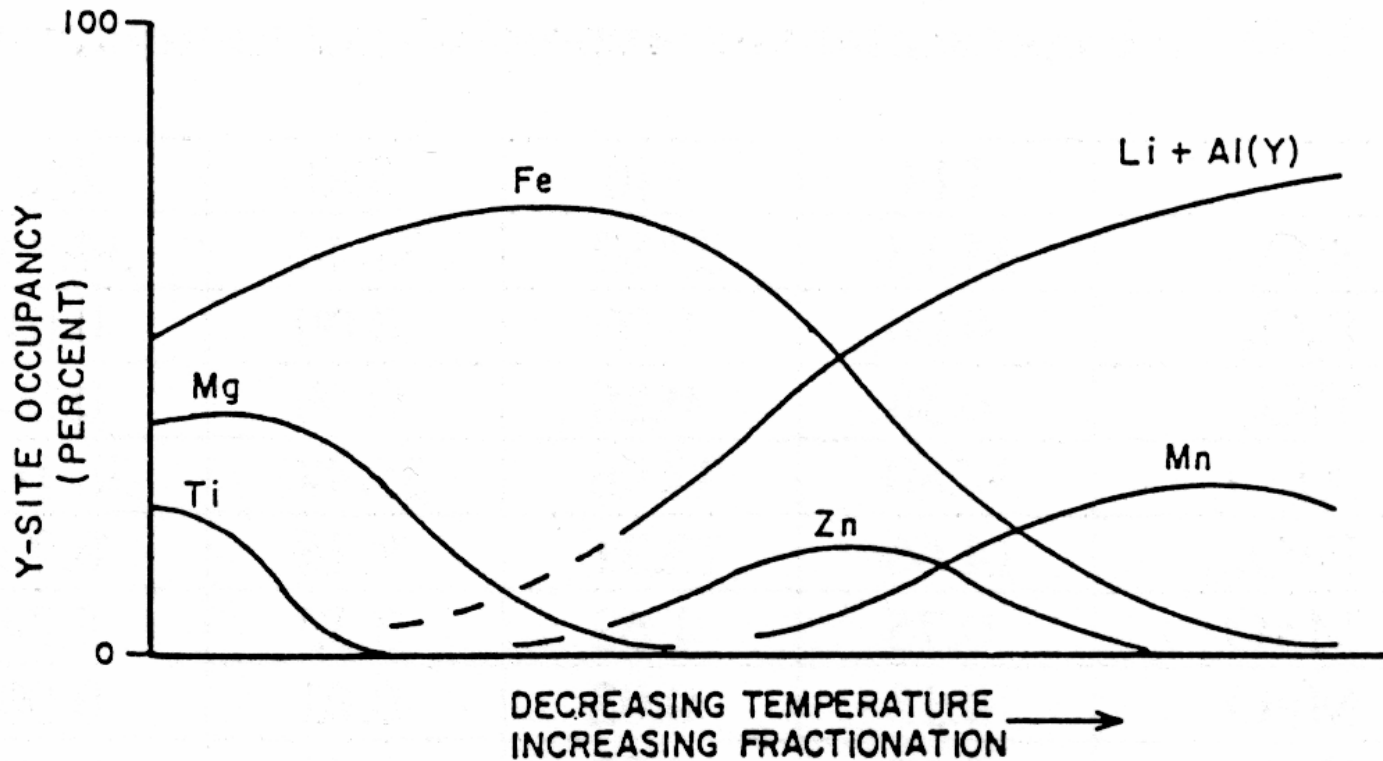


Fig. 6. Schematic illustration of ideal covariation of Y-site cations of tourmaline in response to decreasing temperature and increasing fractionation of melt (Jolliff *et al.* 1986).

6. Příklady pegmatitů

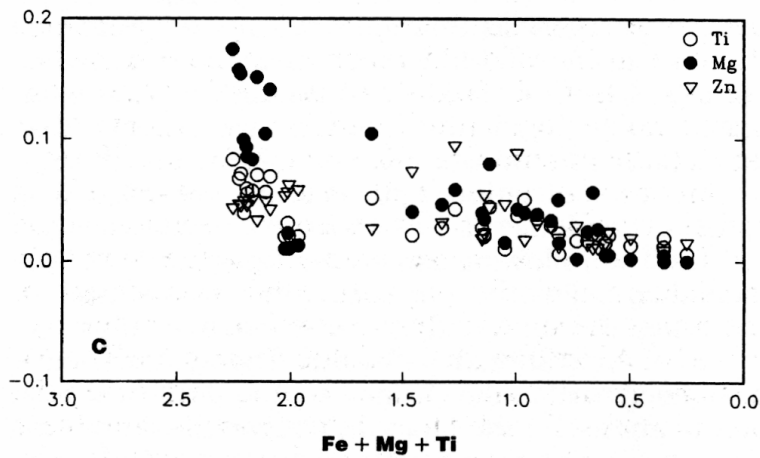
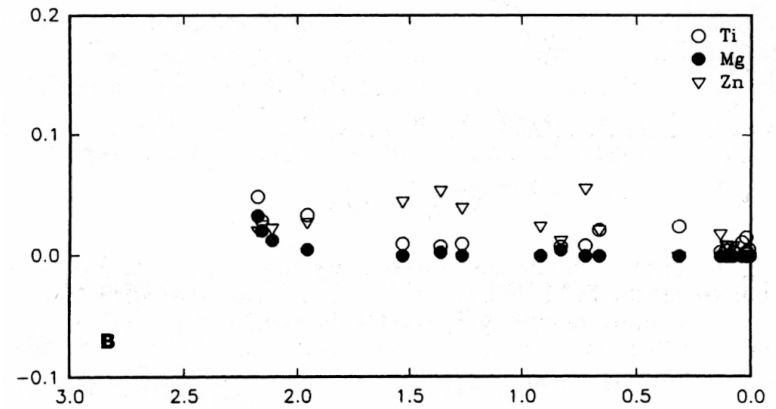
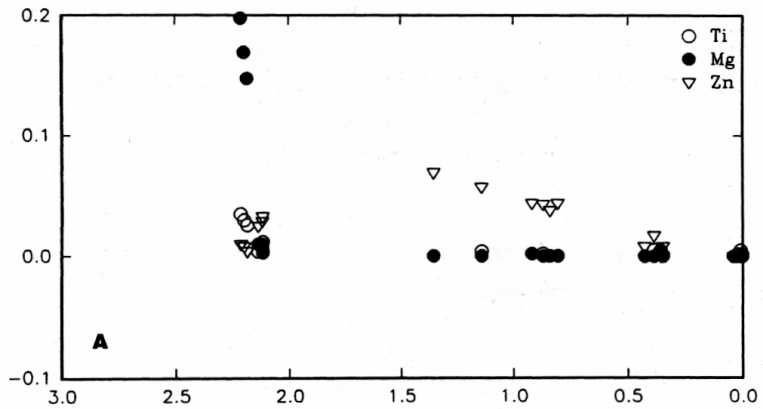
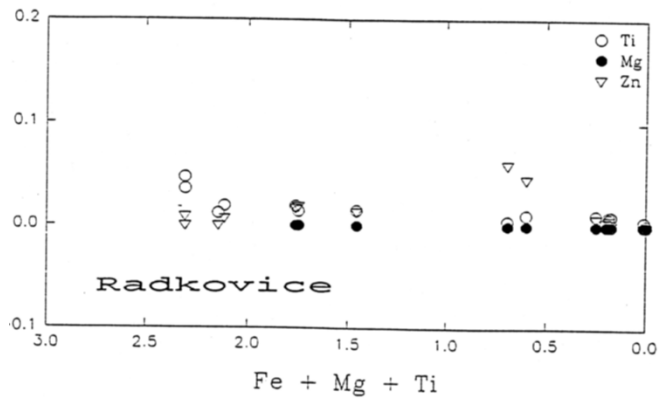
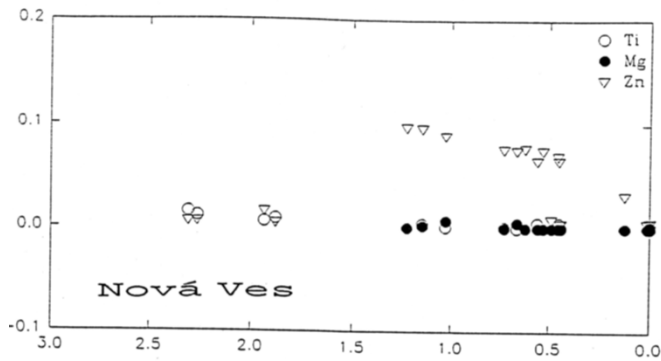
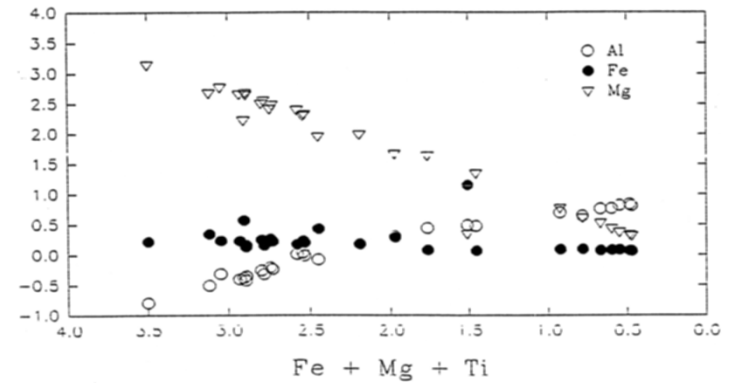
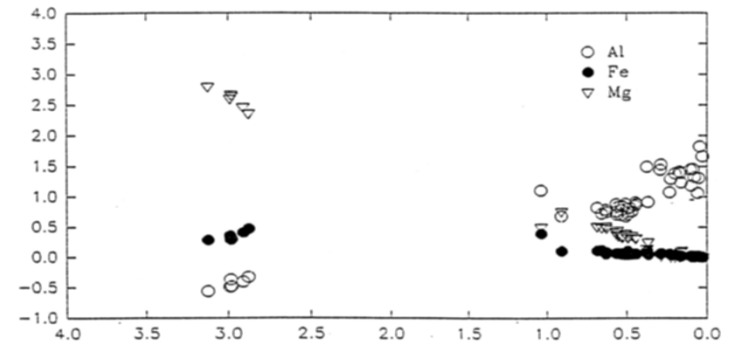
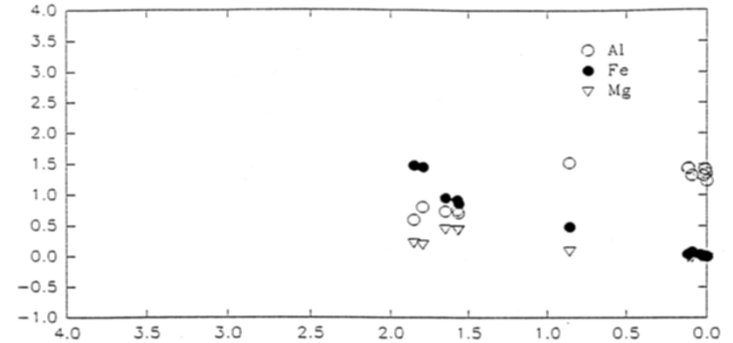


Fig. 2. Variation in concentrations of Ti, Mg and Zn per formula unit versus the FMT index. A - Lastovičky, B - Pikárec, C - Kračovice.

6. Příklady pegmatitů



Bližná



6. Příklady pegmatitů

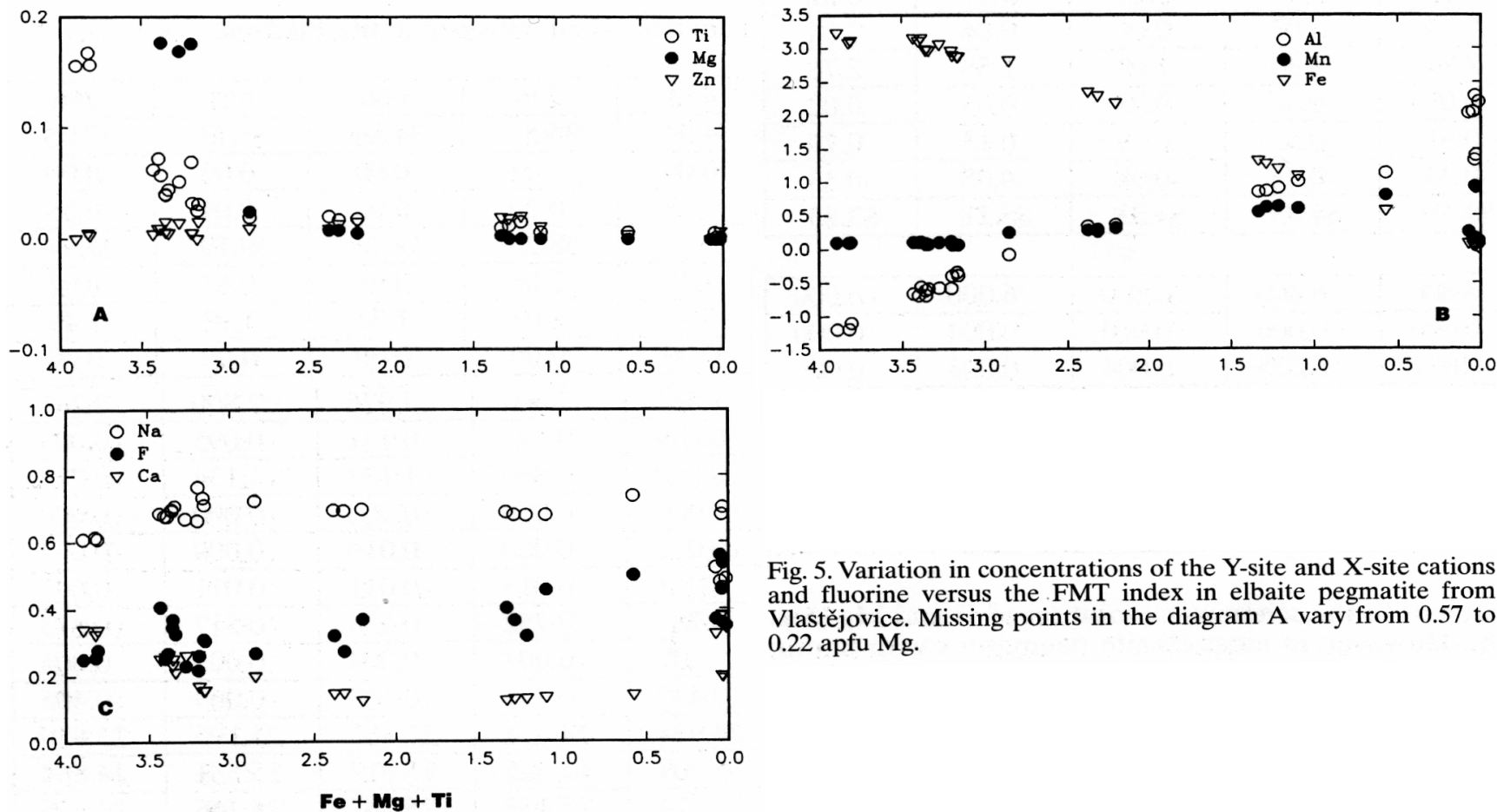


Fig. 5. Variation in concentrations of the Y-site and X-site cations and fluorine versus the FMT index in elbaite pegmatite from Vlastějovice. Missing points in the diagram A vary from 0.57 to 0.22 apfu Mg.

6. Příklady pegmatitů

Vlastějovice

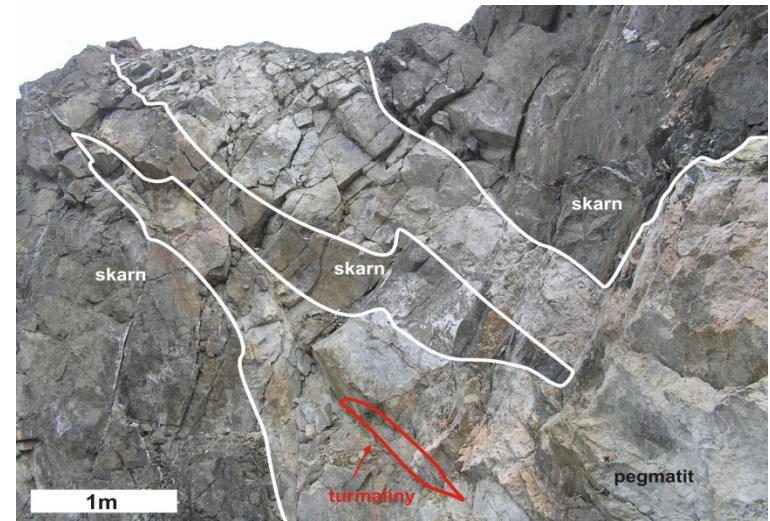
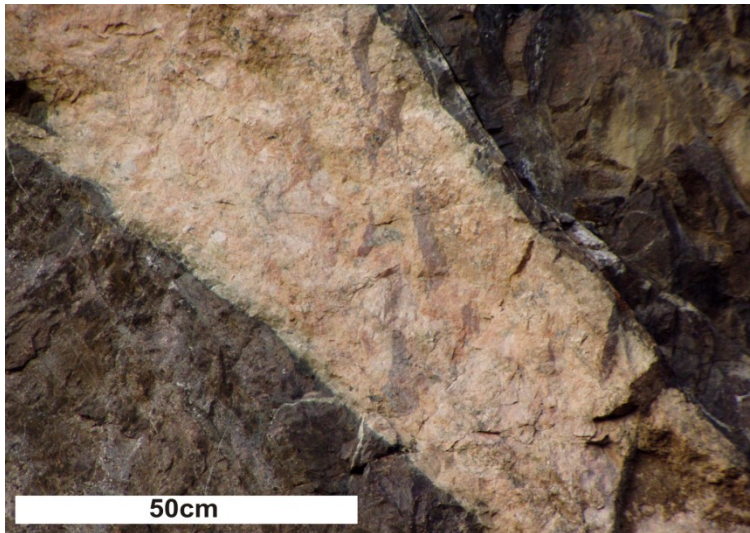
pegmatity pronikající Fe-skarny

studium stupně kontaminace

pegmatitové taveniny na

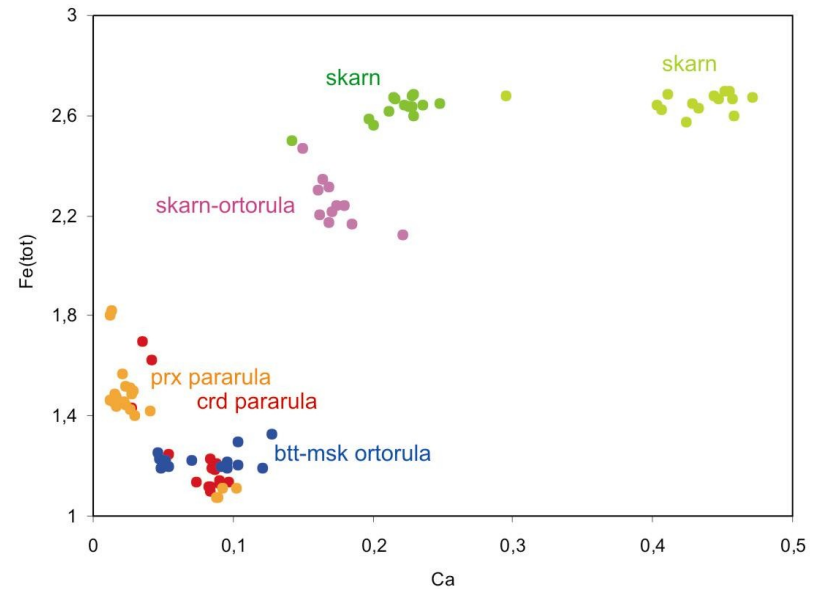
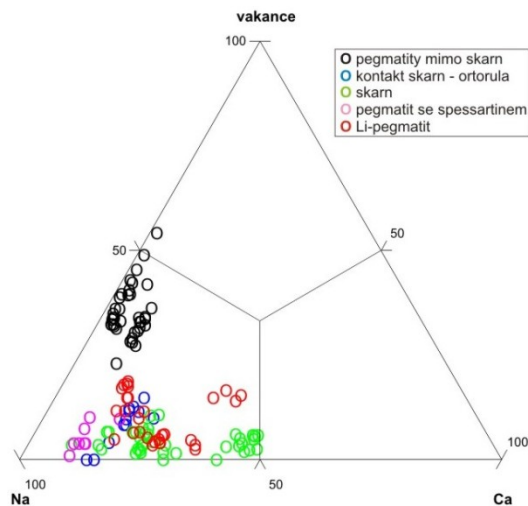
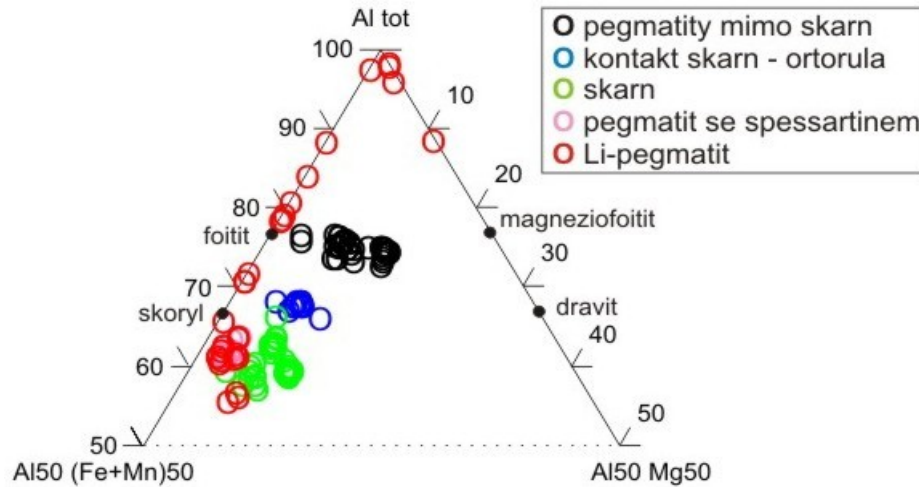
základě studia vhodných

minerálů



6. Příklady pegmatitů

Chemické složení minerálů - turmalín



6. Příklady pegmatitů

Izotopické složení B turmalín

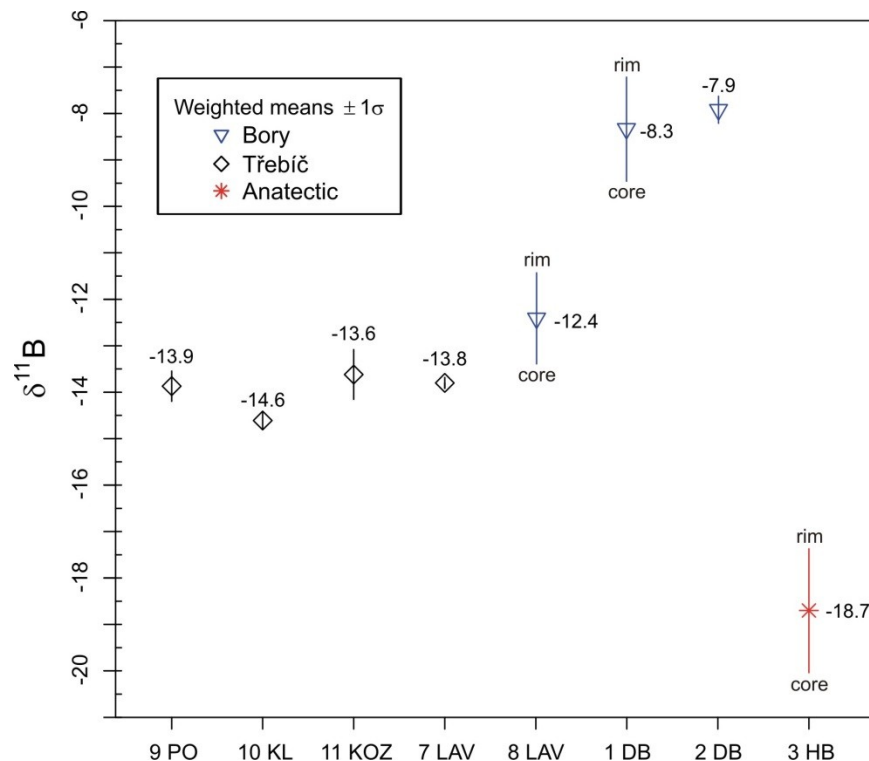
Pegmatity

Třebíč - Ms

Bory + Ms

Anatektické + Ms

Absence minerálů
kompatibilních s B
(muskovit) vede k tomu,
že se systém chová jako
uzavřený.



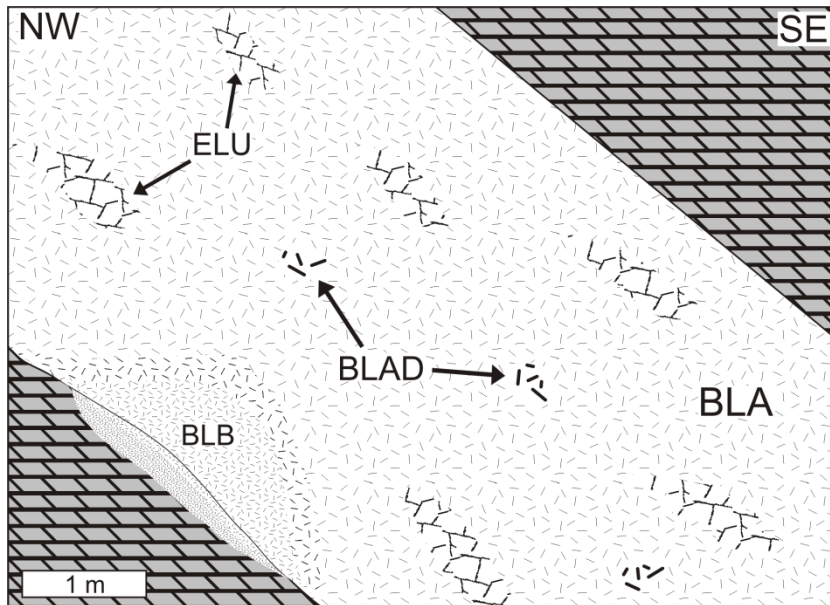
Míková et al. 2010

6. Příklady pegmatitů

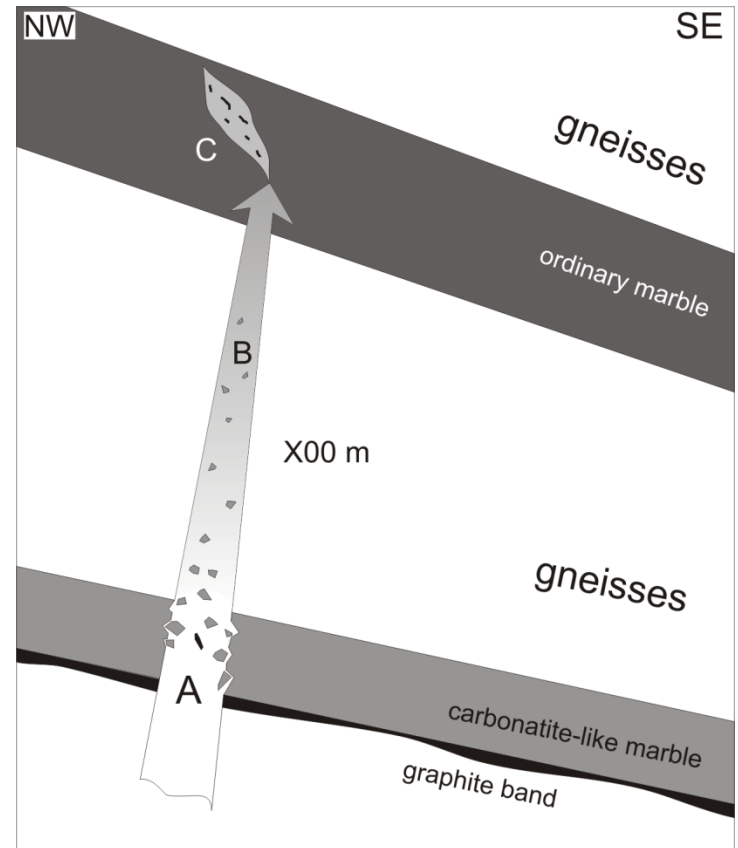
Otevřenost systému v čase

1. Kontaminace (Ca, Mg, REE)

Pegmatit Bližná 1

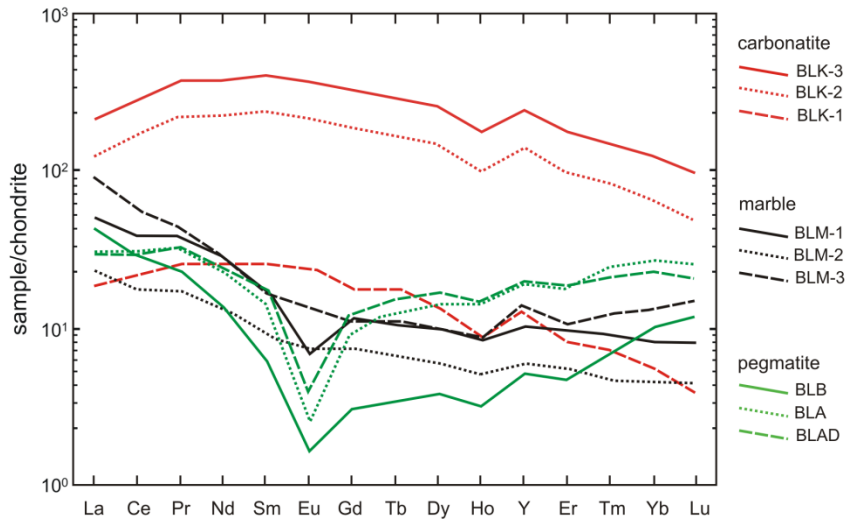


Vmístění pegmatitové taveniny

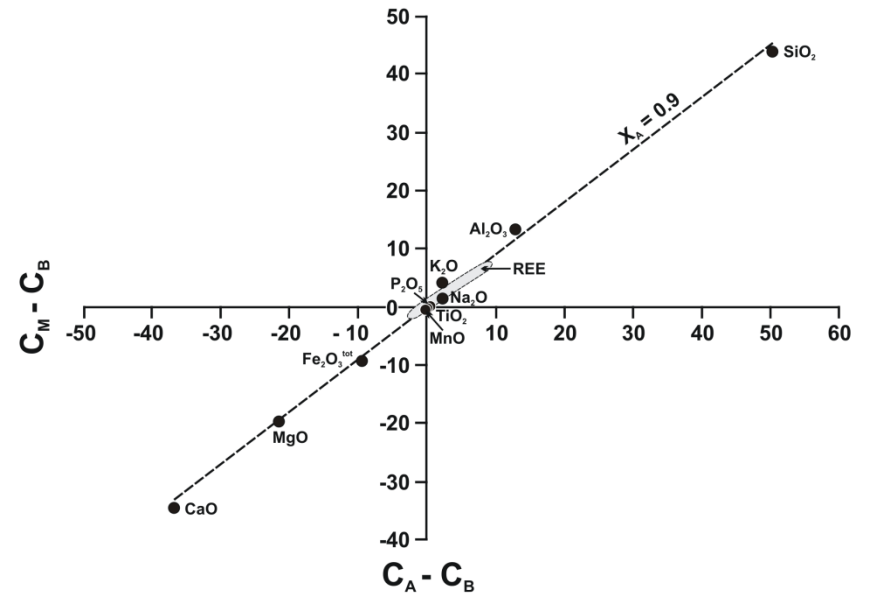


6. Příklady pegmatitů

Složení hornin Bližná I

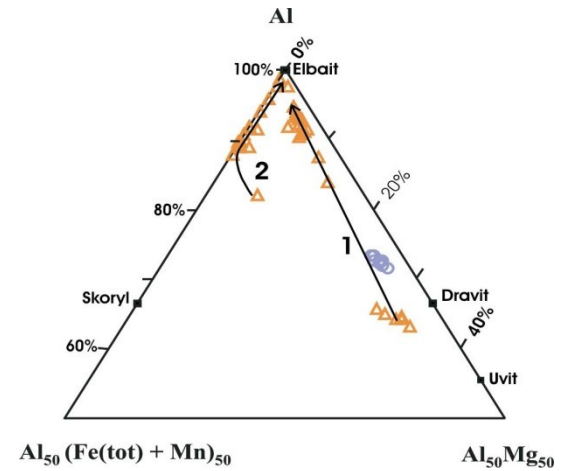
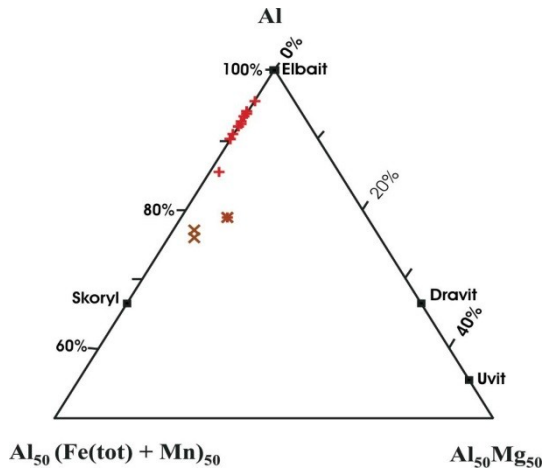
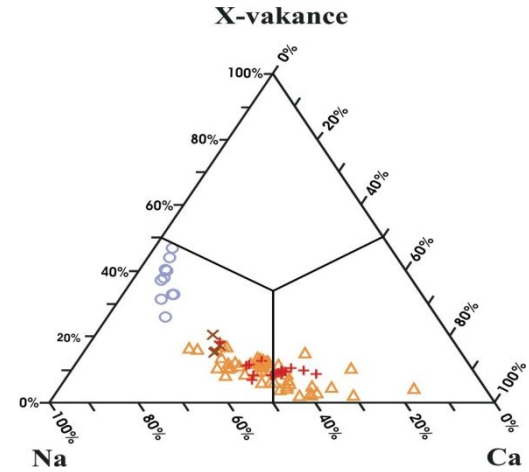


Výpočet asimilace



6. Příklady pegmatitů

2. kontaminace – Mg



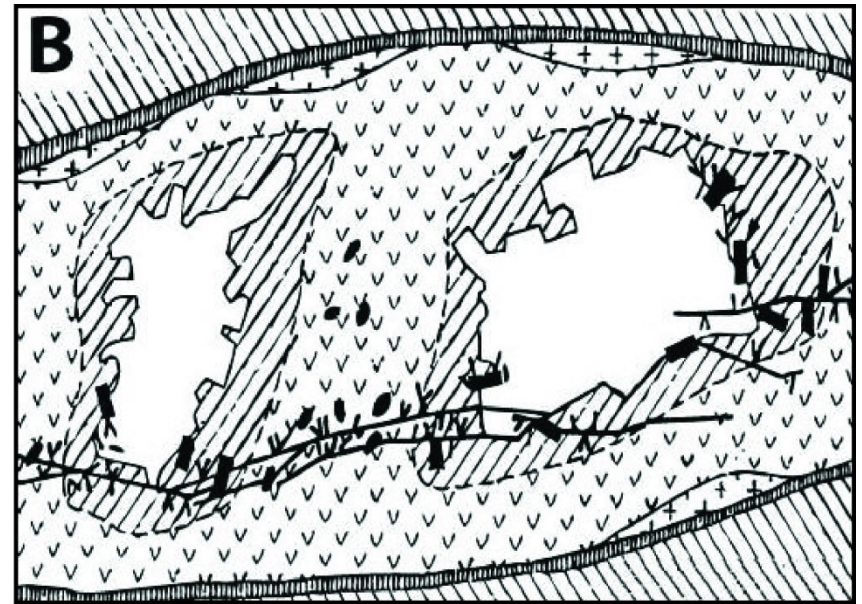
Složení turmalínu, Černý 2004

6. Příklady pegmatitů

Pegmatity uložené v serpentinitech



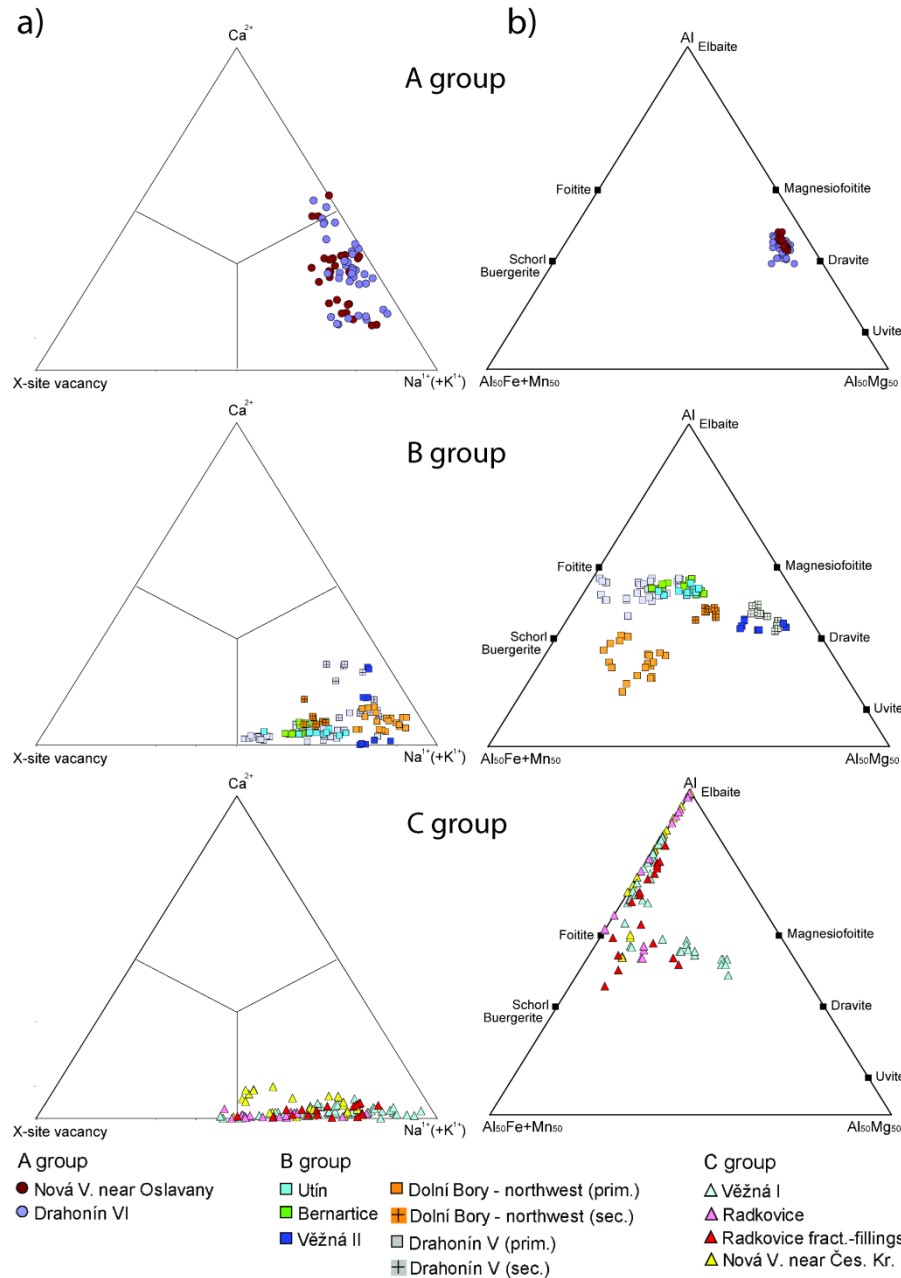
10 cm



1 m



6. Příklady pegmatitů



A
Silná kontaminace
Mg a Ca

B
Silná až střední
kontaminace Mg a
slabá kontaminace
Ca

C
Slabá kontaminace
Mg a velmi slabá
kontaminace Ca

Závěr

Otevřenost *versus* uzavřenost je důležitá např. pro studium skarnů nebo greisenů (typické otevřené systémy), metamorfních hornin (často uzavřené systémy), granitů a pegmatitů (systémy otevřené i uzavřené), radiometrické datování a izotopická studia (nutnost uzavřeného systému). Zásadním problémem jsou také změny v uzavřenosti resp. otevřenosti daného systému v průběhu času. I když prokázání otevřenosti velmi komplikované, je v řadě případů nezbytné, neboť bez objasnění otevřenosti/uzavřenosti systému mohou být interpretace pochybné.