

Magmatické a metamorfní petrologie

Metasomatóza

Prof. RNDr. Milan Novák, CSc.

Osnova:

- 1. Úvod**
- 2. Definice**
- 3. Faktory důležité pro metasomatózu**
- 4. Mechanismus přenosu látek**
- 5. Příklady metasomatických procesů**

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. Právě **metasomatóza** je typickým procesem probíhajícím v otevřeném systému.**



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

1.Úvod

- **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

- **Definice:**

Metasomatóza je proces, který vede ke změně celkového chemického a většinou i mineralogického složení horniny (popř. minerálu) a který probíhá v pevném stavu a ve velmi širokém rozpětí tlaků a teplot od zemského pláště až po sedimentární horniny na zemském povrchu.

- **Co je změna chemického složení?**

Zahrnuje především prvky, které můžeme označit jako kationty, a to jak Na, Ca, Mg, Fe, Al, Si ale také H.

Za změnu nepovažujeme např. pokles obsahu H_2O nebo CO_2 (např. diagenese), i když viditelná změna prvků (látek), které označujeme jako anionty, a to např. OH, F, B nebo CO_2 naznačuje i změny ve složení kationtů. Už proto, že odnášená H_2O obsahuje určité množství rozpuštěných látek.

2. Definice

Co je změna mineralogického složení?

Nahrazení např. grosularu klinozoisitem nebo kalcitu dolomitem je jasným příkladem mineralogické změny. Metasomatóza ale může probíhat i bez změny mineralogického složení, např. změna poměru $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ v granátu nebo změna poměru Fe/Mg v pyroxenu. Tyto změny mohou být velmi nenápadné a těžko pozorovatelné.

Co je pevný stav?

Za pevný stav můžeme považovat běžné metamorfované a sedimentární (zpevněné) horniny, v jejich přirozeném prostředí v zemské kůře. Metasomatóza ale může probíhat i na hydrotermálních žilách a v magmatické tavenině, takže pevný stav není naprosto nutnou podmínkou a jeho definice je poněkud volnější.

2. Definice

Výše uvedené informace ukazují, že často neexistuje ostře definovatelná hranice mezi metasomatózou a některými geologickými procesy, např.

- kontaktní metamorfóza *versus* vznik skarnů
- diagenetické procesy *versus* metasomatické zatlačování karbonátů
- krystalizace albitu z taveniny *versus* metasomatické zatlačování K-živce albitem v pegmatitech

které sice nepovažujeme za metasomatózu, i když jednoznačně probíhají v otevřeném systému.

3. Faktory důležité pro metasomatózu

- **Vhodné PT podmínky**

Otevřenost systémů a tedy i míra metasomatických změn obecně roste s rostoucí teplotou.

- **Časový faktor**

Pohyb látek je obecně poměrně pomalý a proto čas hraje velmi důležitou roli, např. kontaktní metamorfóza vulkanických hornin na povrchu nebývá spojena s metasomatickými změnami, i když jiné podmínky mohou být vhodné.

- **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. tzv. fluida.

3. Faktory důležité pro metasomatózu

- **Prostor, v němž přenos probíhá**

Medium, které nese jednotlivé kationty nebo látky potřebuje volný prostor (póry mezi zrny, trhliny). Je-li hornina extrémně masivní, je metasomatóza ztížena, naopak porézní horniny jsou velmi příhodné a porozita zřejmě hraje velmi významnou roli.

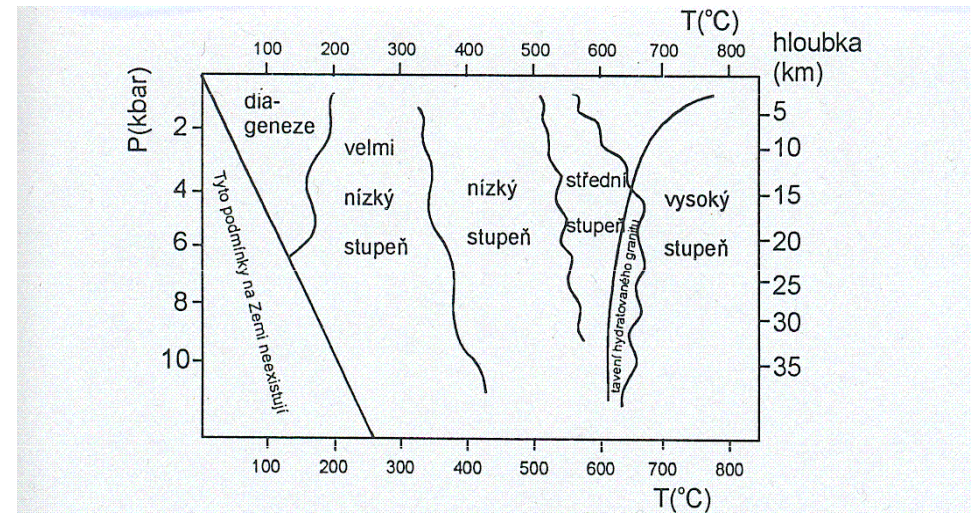
Pohyb může probíhat také difuzí kationtů uvnitř krystalů jednotlivých minerálů, v tomto případě není nutný volný prostor, kromě vhodné krystalové mřížky.

- **Rezervoár prvků nebo jiných látek**

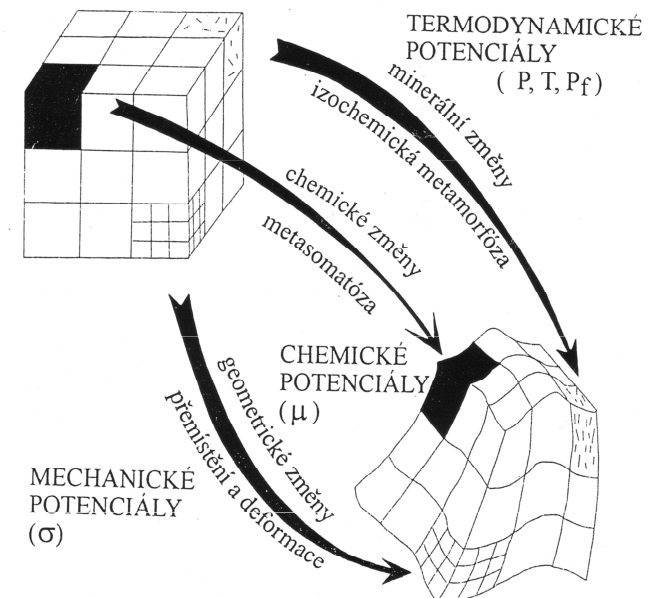
Jestliže dochází k nahrazování jednoho prvku jiným, popř. jeden komplex prvků jiným komplexem, musíme mít zdroj, nejčastěji to bývá např. magma. Na druhé straně musí existovat také rezervoár nebo prostor pro prvky odnášené.

3. Faktory důležité pro metasomatózu

- Hlavní faktory ovlivňující metasomatózu
- teplota a tlak
- čas
- chemické složení protolitu
- chemické složení a koncentrace infiltrujících fluid a např. X_{CO_2} , fO_2 , fS_2 , pH
- permeabilita horniny



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



Obr. 1-2. Obrázek schematicky ukazuje základní tři typy změn, které v hornině během metamorfózy mohou probíhat.

4. Mechanismus přenosu látek

- Infiltrace je hlavním mechanismem při metasomatóze. 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.**
- Difuze v horninách je řízena rozdíly v chemických potenciálech a fluida nesoucí prvky jsou stacionární. Difuzní metasomatóza je méně častá.**
- Difuze v minerálech, kdy dochází k pohybu atomů v rámci krystalové mřížky.**

4. Mechanismus přenosu látek

Difuze v krystalech

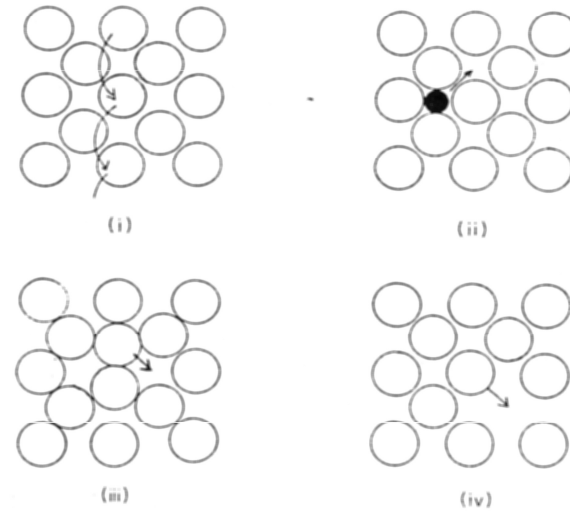
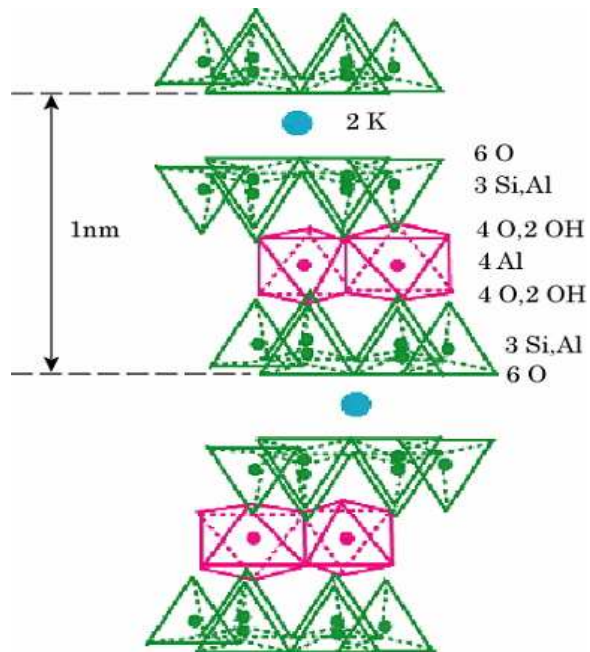
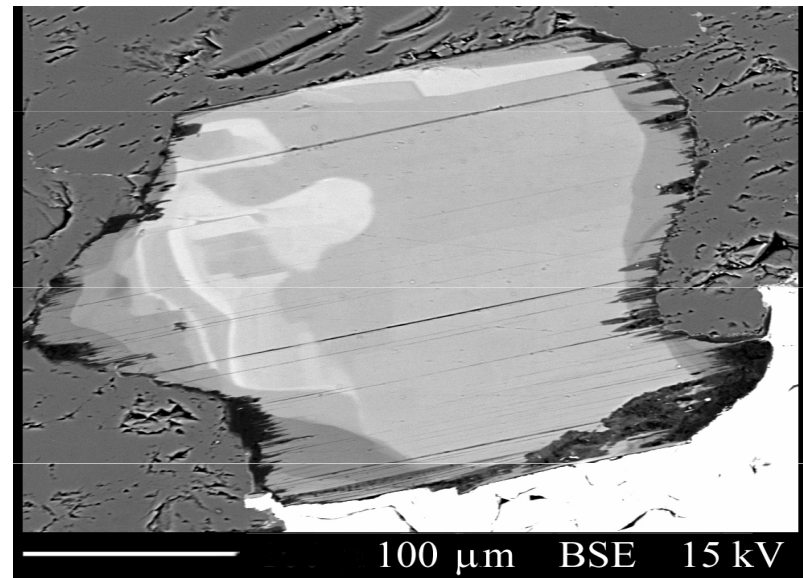


Fig. 5.48 Atomic mechanisms of diffusion: (i) exchange or ring mechanism; (ii) interstitial mechanism; (iii) interstitialcy mechanism; and (iv) vacancy mechanism.

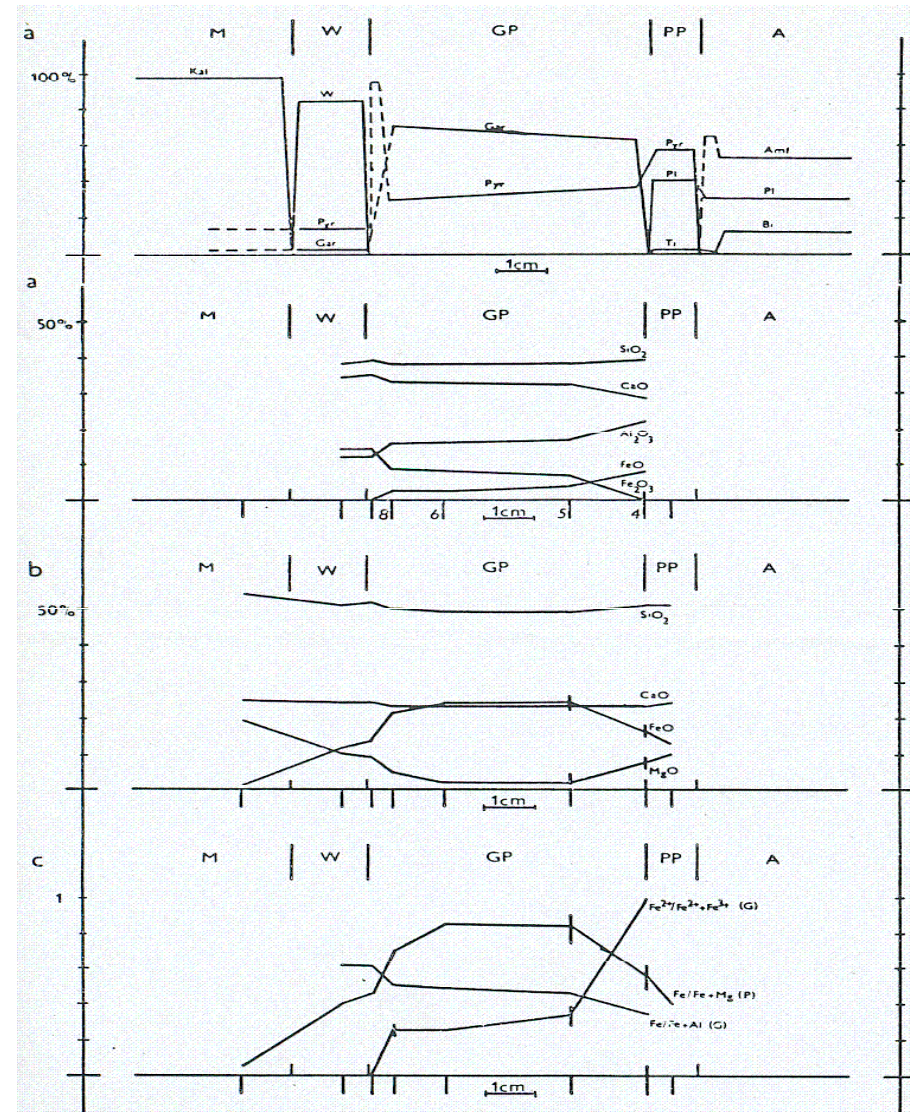


4. Mechanismus přenosu látek

Difuze mezi horninami s
kontrastním chemickým
složením

Kontakt mezi
amfibolitem a kalcitickým
mramorem

Mirošov



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

4. Mechanismus přenosu látek

- Difuze mezi horninami s kontrastním chemickým složením.
- Infiltrace podél oslabených ploch a jiných odlišných litologií

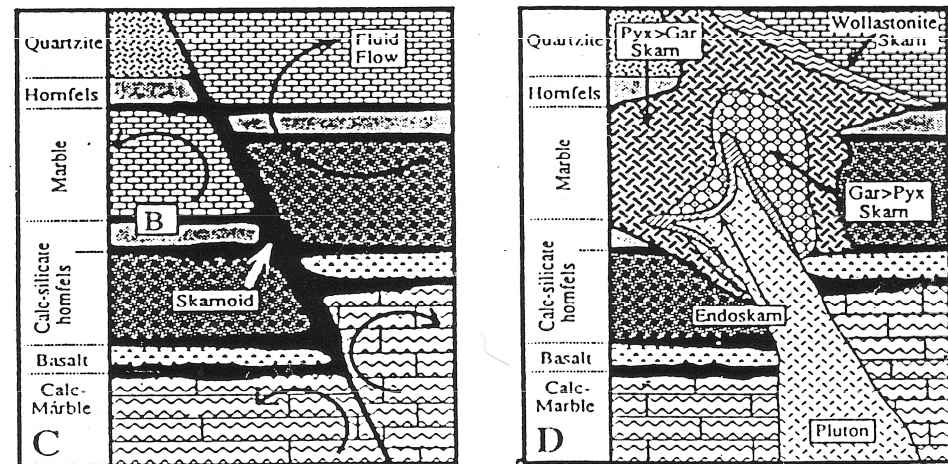
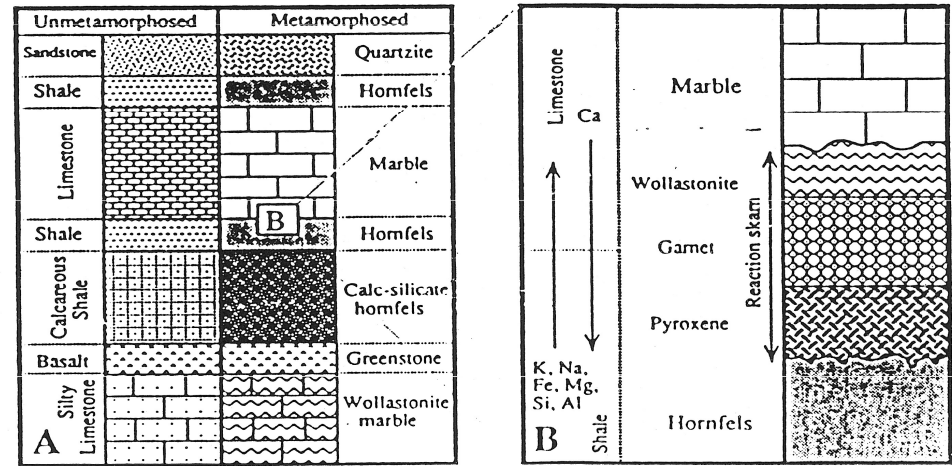


Figure 1 Types of skarn formation: (A) Isochemical metamorphism involves recrystallization and changes in mineral stability without significant mass transfer; (B) Reaction skarn results from metamorphism of interlayered lithologies, such as shale and limestone, with mass transfer between layers on a small scale (bimetasomatism); (C) Skarnoid results from metamorphism of impure lithologies with some mass transfer by small-scale fluid movement; (D) Fluid-controlled metasomatic skarn typically is coarse grained and does not closely reflect the composition or texture of the protolith.

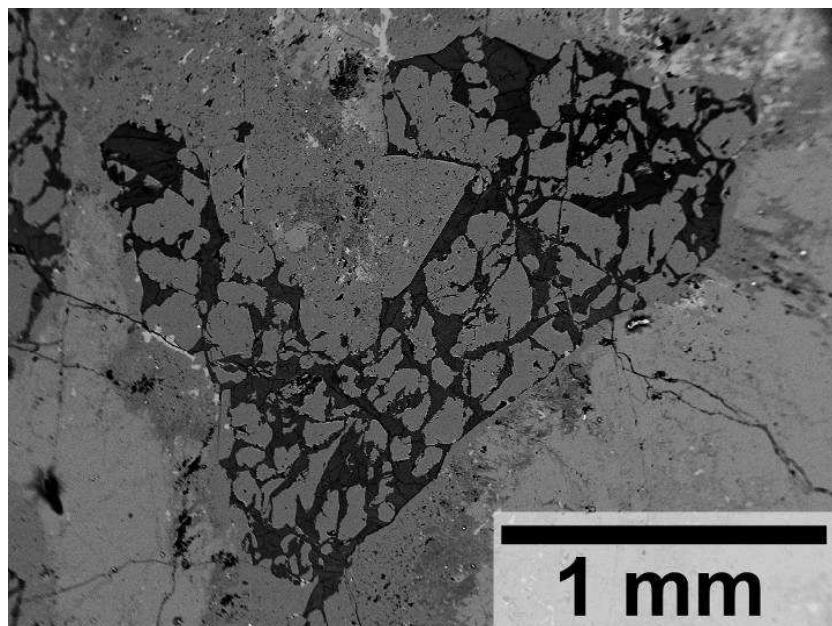
4. Mechanismus přenosu látek

Dissolution-reprecipitation process

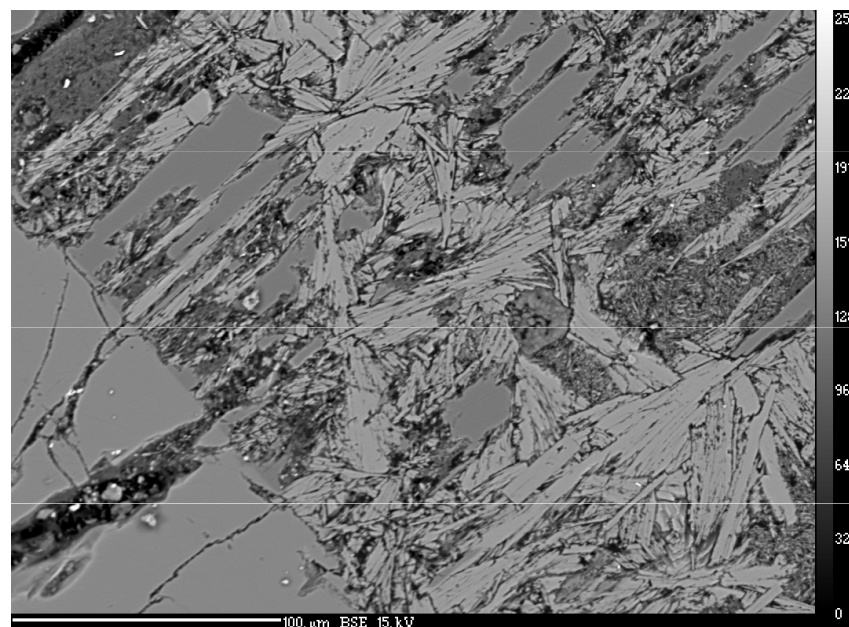
– nový přístup k mechanismu metasomatózy (Putnis 1992).

Dochází při něm k nahrazení jednoho minerálu jiným nebo dojde jen k více či méně výrazné změně chemického složení téhož minerálu. Tento proces probíhá v pevném stavu a je iniciován fluidy. Nejde o pouhou difuzi kationtu ve struktuře ale překrystalování minerálu.

**Křemen zatlačovaný
kerolitem, Věžná**



**Beryl I zatlačovaný berylem II,
bavenitem a bazzitem, Kožichovice**



5. Příklady metasomatických procesů

- Příklady nejznámějších i ekonomicky nejvýznamnějších metasomatických procesů v metamorfních podmínkách
- Metamorfní prostředí
- Skarny
- Fenity
- Greiseny

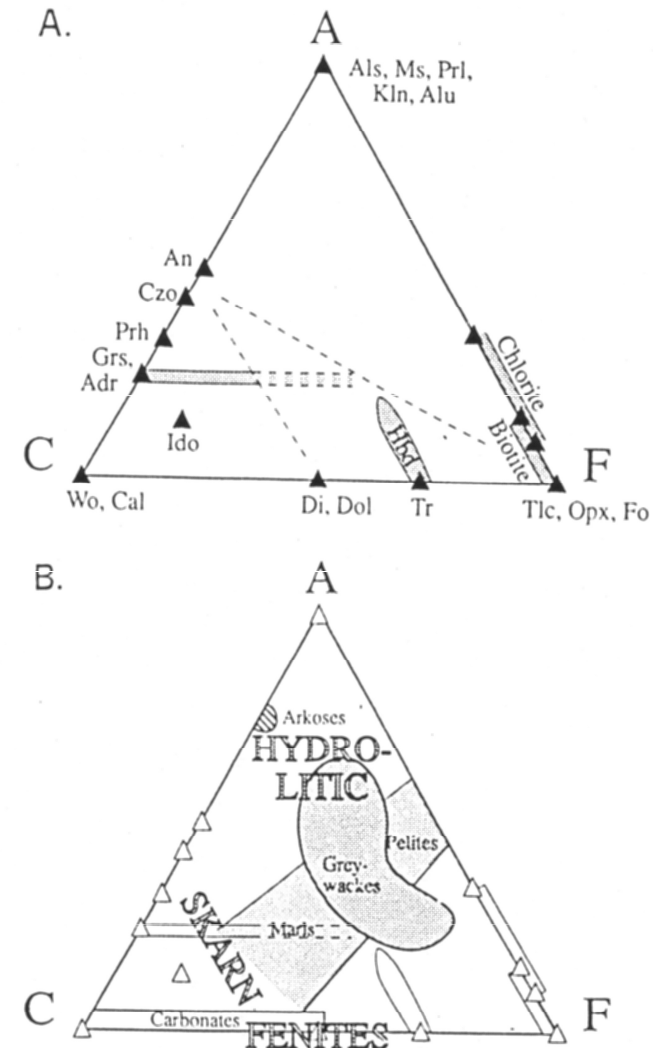


Figure 1. ACF projection of minerals and generalized rock compositions commonly involved in metasomatic aureoles. A. Mineral compositions. B. Generalized fresh rock compositions and schematic regions for metasomatic types.

5. Příklady metasomatických procesů

- Skarny**

Metasomatické silikátové většinou bezživcové horniny bohaté Ca vznikající jako výsledek reakcí fluid s karbonáty bohatými litologiemi. Jejich typickým znakem je často polyfázový vývoj.

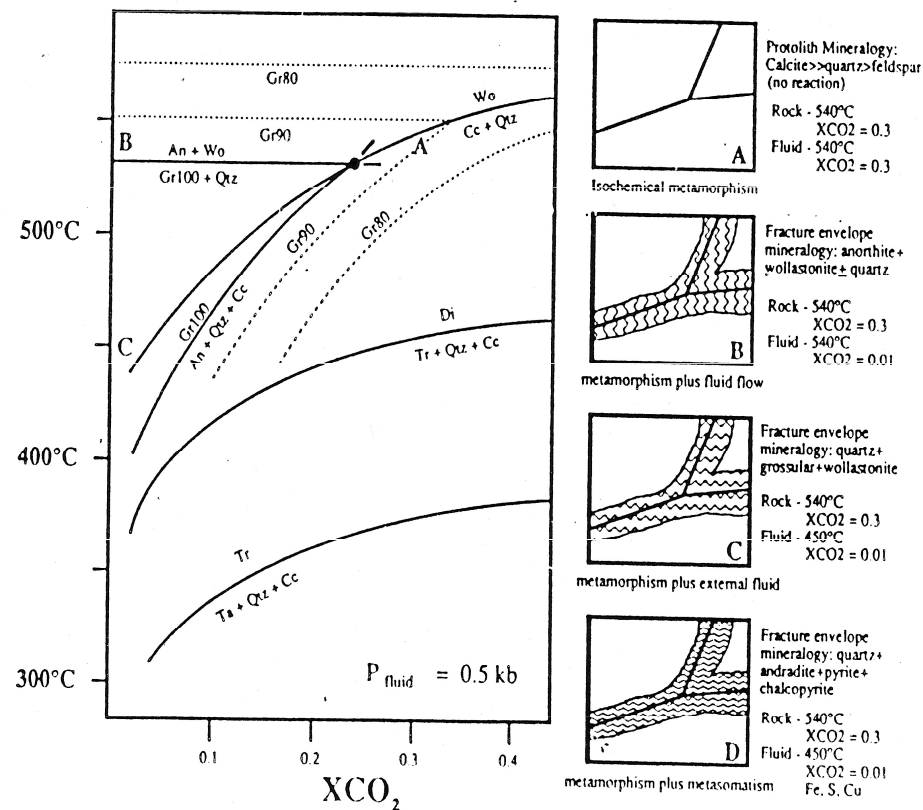


Figure 2 Illustration of metamorphic phase equilibria for selected reactions in the system Ca-Mg-Al-Si-H₂O-CO₂. Modified from Greenwood (1967) and Kerrick (1974). Examples of four fracture-controlled alteration events are illustrated: (A) Fluid in fracture is same temperature and composition as surrounding rocks at high XCO₂; (B) Fluid in fracture is same temperature as surrounding rocks but has flushed some CO₂ out of the system; (C) Fluid in fracture is cooler than surrounding rocks and has flushed some CO₂ out of the system; (D) Fluid in fracture is a concentrated metasomatic fluid with magmatic components including Fe, Cu and S. Cc = calcite; Ta = talc; other abbreviations as in Table 1.

5. Příklady metasomatických procesů

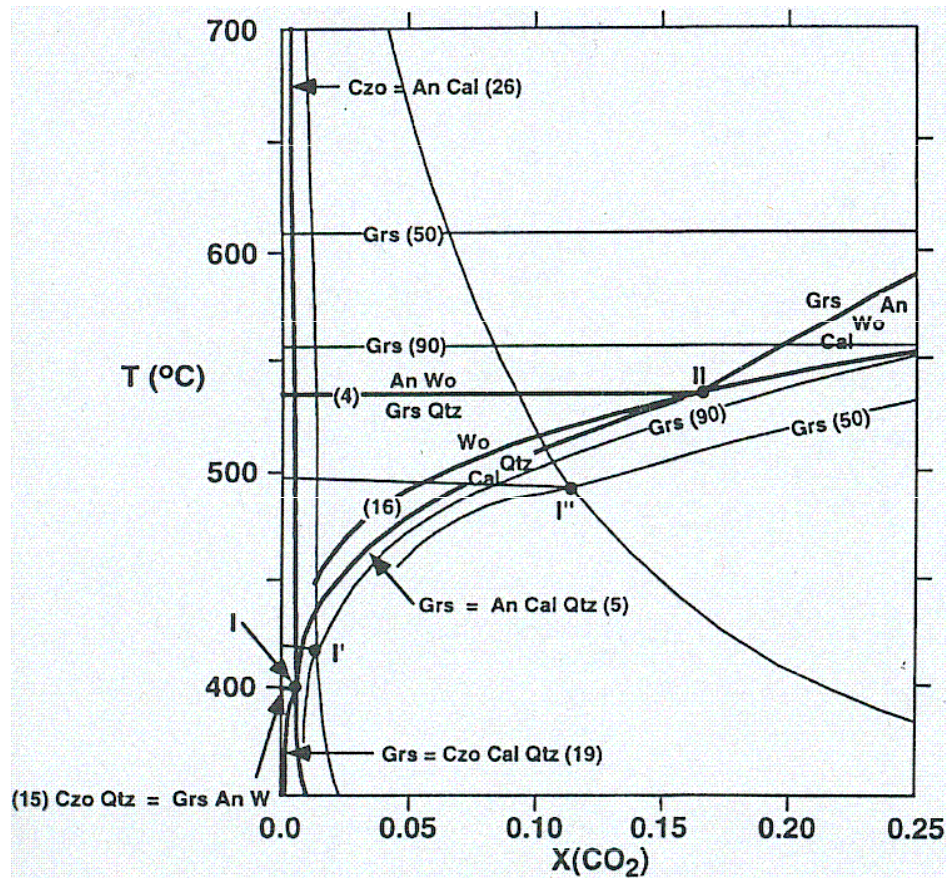
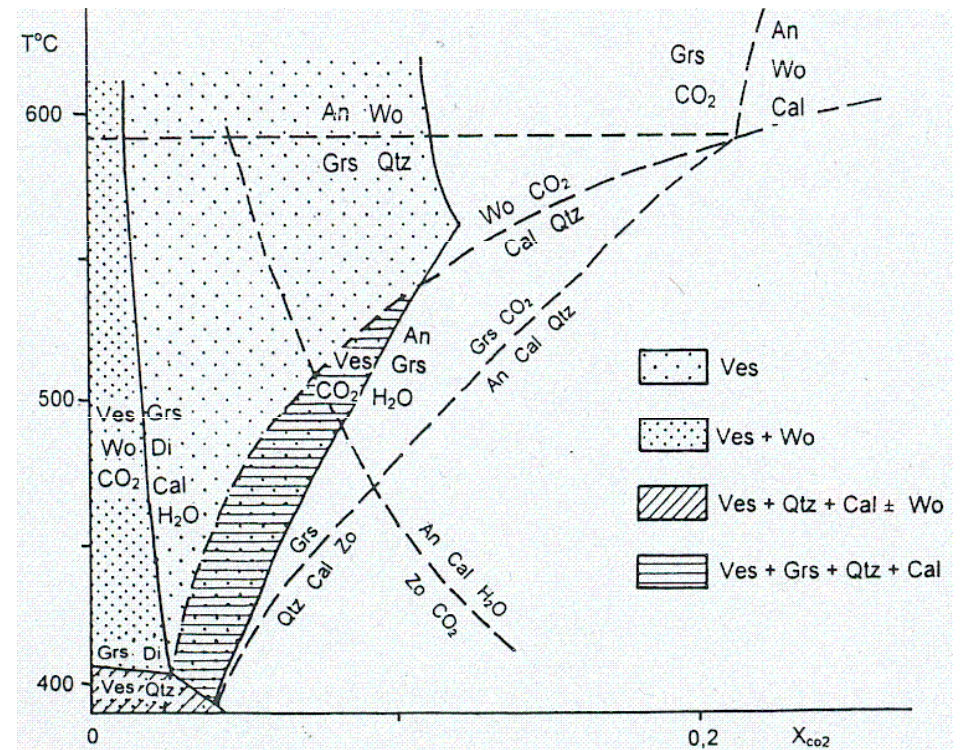


Figure 9. Water-rich [0.0 to 0.25 $X(\text{CO}_2)$] portion of an isobaric ($P_T = P_f = 100$ MPa) T - $X(\text{CO}_2)$ diagram illustrating the effects of solid solution (dilution of Grs with Adr, of Czo with Pi) on the phase equilibria of Figure 7. Shifts in location of equilibria calculated with methods described in the Thermodynamics section.



Obr. 1. Schematický $T - X_{\text{CO}_2}$ diagram vybraných reakcí v systému CMAS- H_2O - CO_2 při $P_{\text{fluid}} = P_{\text{celk.}} = 200$ MPa (upraveno podle Valleyho et al. 1985 a Labotky et al. 1988).
 Fig. 1. Schematic $T - X_{\text{CO}_2}$ diagram showing selected reactions in the system CMAS- H_2O - CO_2 at $P_{\text{fluid}} = P_{\text{total}} = 200$ MPa (modified from Valley et al. 1985 and Labotka et al. 1988).

5. Příklady metasomatických procesů

- **Magnezity a siderity**

Ložiska magnezitů a sideritů v Západních Karpatech vznikla pravděpodobně metasomatickým zatlačením původně kalcitických, popř. kalcit-dolomitických vápenců v podmínkách nízkého stupně metamorfózy. Zdrojem Mg mohou být např. ultrabazické horniny v jejich okolí.



Magnesit, Štýrsko

5. Příklady metasomatických procesů

Na-K-Ca-Mg metasomatóza

Tento typ metasomatických změn je vázaný na vulkanismus oceanického dna. Dochází při ní k více typům zatlačování:

- **látky**

Mg – Fe

Na – Ca, K

Ca – Mg, Na, H

K – Na, Ca

- **minerály**

Ca-plagioklas – Na-plagioklas (analcim, skapolit)

amfibol – chlorit, aktinolit, epidot

Ca-plagioklas – epidot

živce – zeolity

5. Příklady metasomatických procesů

- H^+ - metasomatóza

Iont H^+ nahrazuje jiné kationty, především Na, K a Ca a někdy se uplatňují i další prvky např. F. To vede k destrukci živců a jako hlavní procesy můžeme označit:

- sericitizace
- greisenizace

- Fenitizace

Tento proces je svázaný s alkalickým magmatismem a dochází při něm k intenzivnímu přínosu Na a K. Vznikají minerály s vysokým obsahem Na, popř. K a také s vysokým poměrem $Na+K/Al$ a Fe/Mg .

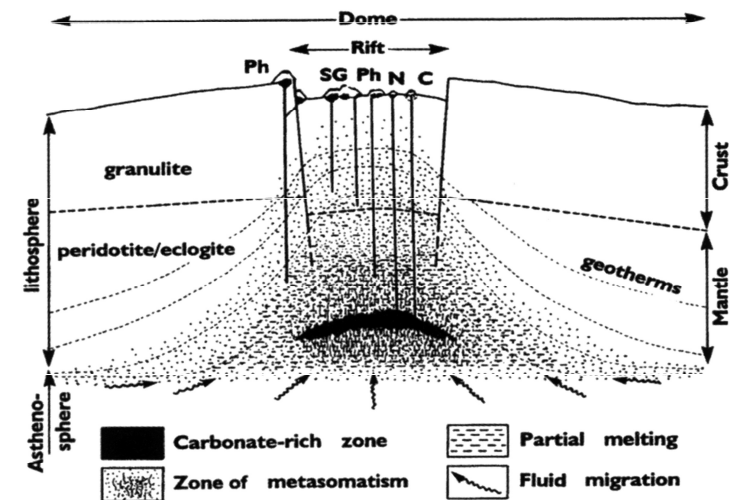


FIG. 2. Schematic cross-section of a zone of active rifting in a continental setting. The upward bulge in the asthenospheric mantle is due to a focusing of mantle degassing and thermal expansion. Here, as in Figure 1, the upward migration of fluid offers a very efficient mechanism of transfer of heat into the lower and middle crust. The degassing mantle emits both H_2O and CO_2 , the proportion of which is of primordial importance in determining the nature of elements transported upward into the crust, and the nature of the melting reaction. Where the metasomatizing agent is dominantly H_2O , granitic melts of A type will result. The metasomatic steps leading up to partial melting have involved the preferential mobilization of alkalis over Al, which is reflected in an alkaline character of the partial melt. Carbonatitic and nephelinitic melts will result in areas where CO_2 is the dominant metasomatizing agent. Here, the metasomatic step leading up to partial melting has caused a major enrichment in high field-strength elements and the rare-earth elements, and these patterns of enrichment are reflected in the magmas produced. Of course, all intermediate cases between these two end-member situations are likely to be encountered, which explains the juxtaposition of silica-oversaturated and silica-undersaturated suites along belts of anorogenic igneous activity. The anomalously high temperatures at the base of the crust promote granulite-facies assemblages, even though the environment is far from being anhydrous. Diagram courtesy of Alan Woolley (1987), and reproduced with permission of the publisher.

5. Příklady metasomatických procesů

- **Přínos B (Li, Cs aj.) v okolí komplexních pegmatitů**

V závěru magmatické krystalizace dochází k odměšení fluid bohatých B, ale také Li, Cs, F, Al aj. Fluida opouštějí pegmatit a reagují s okolní horninou (především s tmavými minerály) za vzniku holmquistitu, turmalínů, Cs,Rb,F-oboahacného biotitu, aj.

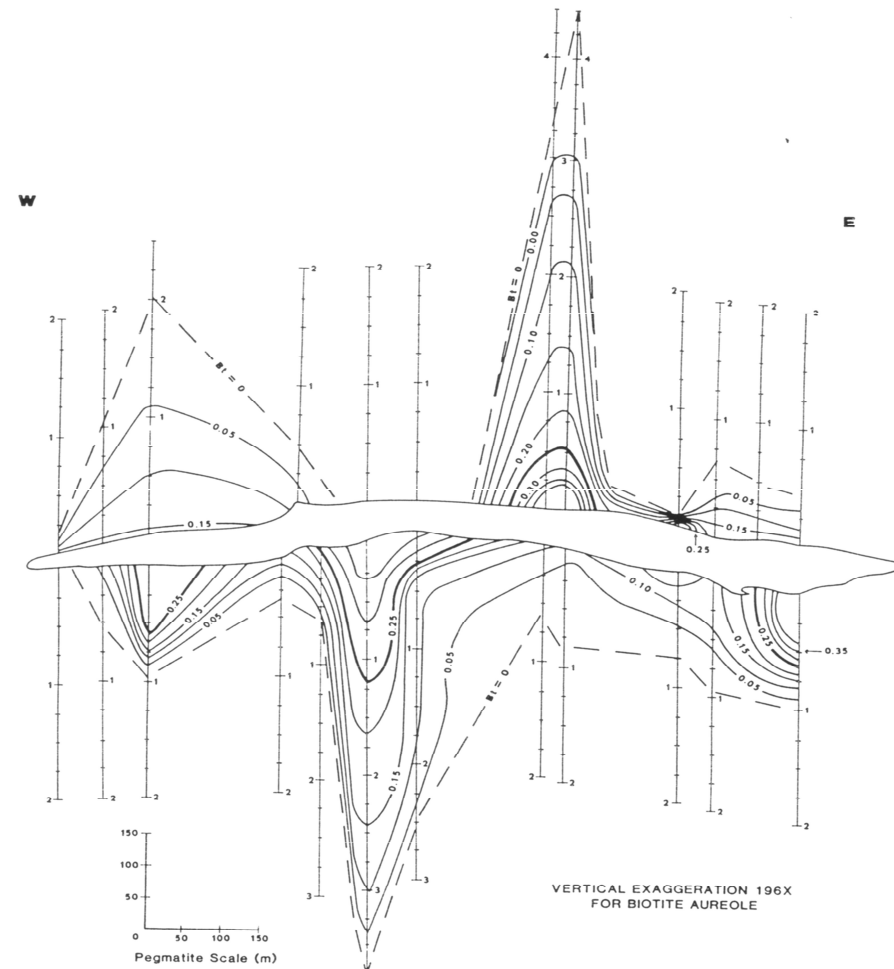
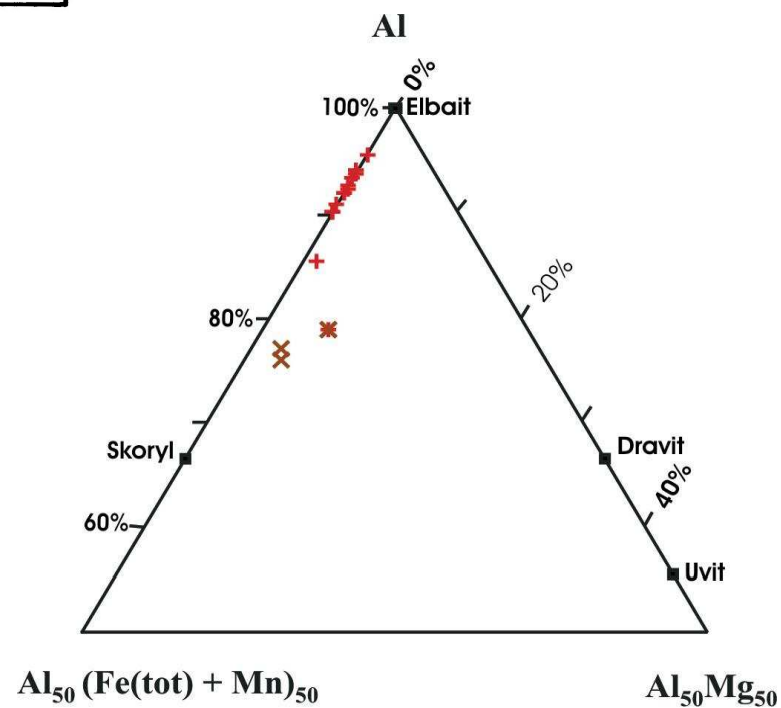
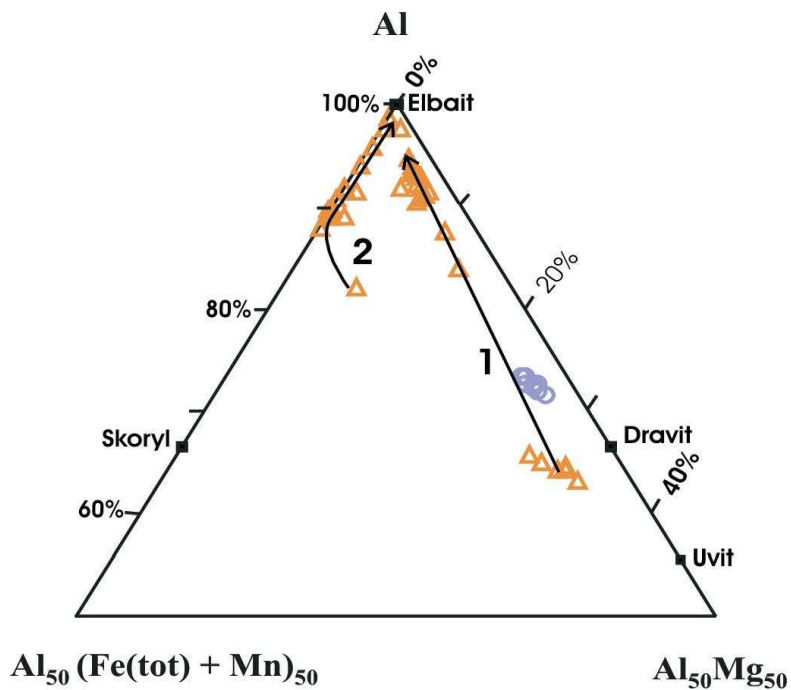
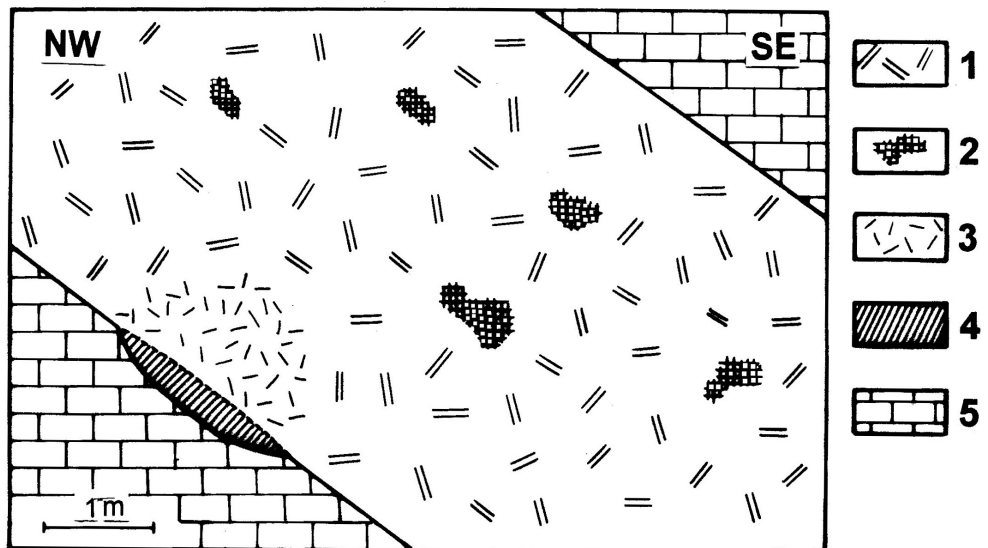


Fig. 6. Contour of the variation in cations of Rb per formula unit of exomorphic biotite from around the Tanco pegmatite.

Tanco – kontaktní aureola

5. Příklady metasomatických procesů

Bližná



5. Příklady metasomatických procesů

- **Magmatické prostředí**

V tomto případě probíhá metasomatóza přímo v magmatické hornině a to v různých stádiích vývoje horniny a v různých PT podmínkách. Zdrojem fluid je téměř výhradně samotná magmatická hornina, popř. jiná asociující magmatická hornina.

- **Stádium pozdního solidu až ranného subsolidu**

- **V tomto stádiu probíhá zřejmě většina metasomatických změn v magmatických horninách. Rozpoznání metasomatických změn je ale většinou velmi komplikované.**

- **- Alterace granitů postmagmatickými fluidy, např. alterace živců, při níž může dojít ke změně ve složení např. koncentrace Rb a Cs.**

- **- Raně postmagmatické alterace v komplexních pegmatitech, např. nahrazení primárních Fe, Mn fosfátů širokou škálou mladších minerálů, zatlačení cordieritu turmalínem.**

- **- Vznik metasomatických jednotek v pegmatitech, albit, lepidolit aj.**

5. Příklady metasomatických procesů

- Tavení granitů za UHP (ultravysoké tlaky 15 a více kbar)

Granity se za těchto tlaků a přítomnosti vody chovají poněkud jinak, než předešlé taveniny. Nedochozí k jejich tavení, ale postupně se rozpouštějí na fluidum, a to ne skokem, ale postupně. Za nepřítomnosti vody se ale uvolňuje postupně za nižších teplot ultrapotasické fluidum, leucitového složení, při kompletním rozpuštění se složení blíží granitu.

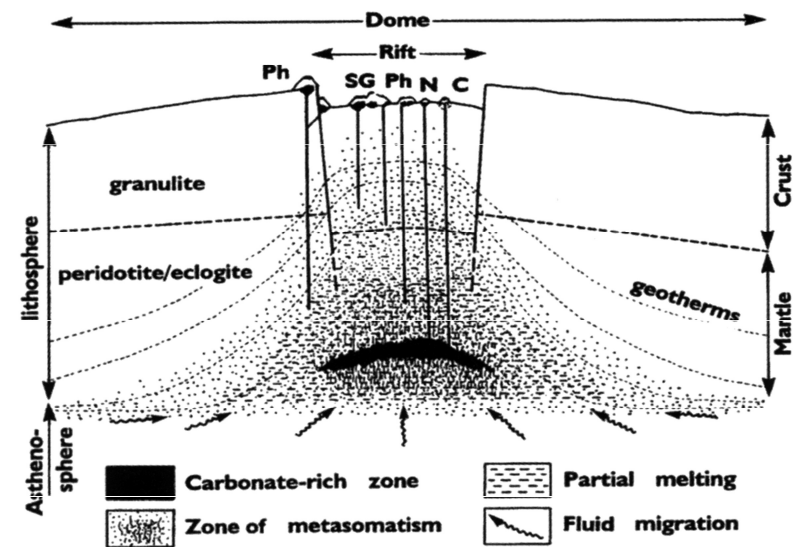


FIG. 2. Schematic cross-section of a zone of active rifting in a continental setting. The upward bulge in the asthenospheric mantle is due to a focusing of mantle degassing and thermal expansion. Here, as in Figure 1, the upward migration of fluid offers a very efficient mechanism of transfer of heat into the lower and middle crust. The degassing mantle emits both H₂O and CO₂, the proportion of which is of primordial importance in determining the nature of elements transported upward into the crust, and the nature of the melting reaction. Where the metasomatizing agent is dominantly H₂O, granitic melts of A type will result. The metasomatic steps leading up to partial melting have involved the preferential mobilization of alkalis over Al, which is reflected in the alkaline character of the partial melt. Carbonatitic and nephelinitic melts will result in areas where CO₂ is the dominant metasomatizing agent. Here, the metasomatic step leading up to partial melting has caused a major enrichment in high field-strength elements and the rare-earth elements, and these patterns of enrichment are reflected in the magmas produced. Of course, all intermediate cases between these two end-member situations are likely to be encountered, which explains the juxtaposition of silica-oversaturated and silica-undersaturated suites along belts of anorogenic igneous activity. The anomalously high temperatures at the base of the crust promote granulite-facies assemblages, even though the environment is far from being anhydrous. Diagram courtesy of Alan Woolley (1987), and reproduced with permission of the publisher.

5. Příklady metasomatických procesů

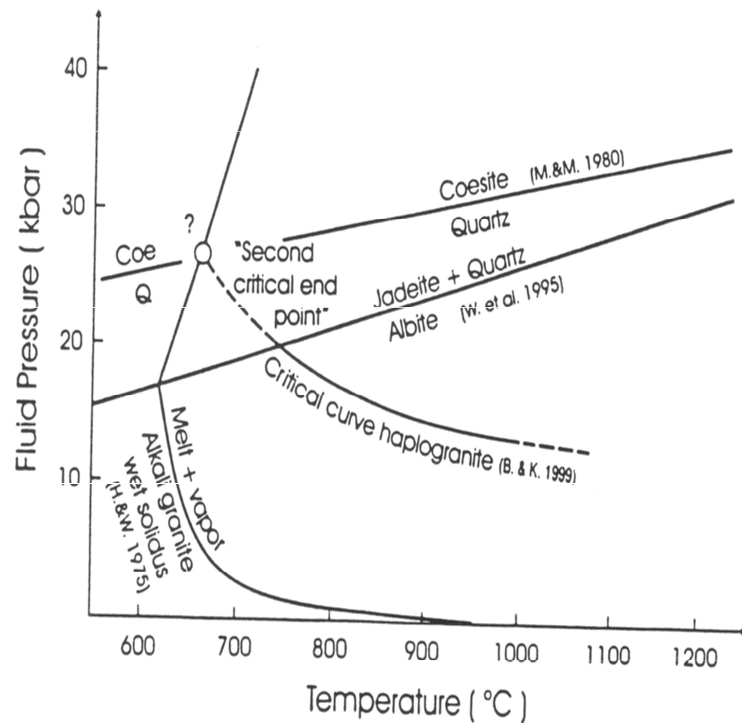


FIG. 3. Pressure-temperature plot showing the critical curve of a haplogranite as determined by Bureau and Keppler (1999), together with other relevant reaction curves. Upper pressure stability limits of albite are after Waterwiese et al. (1995) and of quartz after Mirwald and Massonne (1980); the "wet melting curve" of an alkali granite was taken from Huang and Wyllie (1975). Note that the latter curve is intersected by the extrapolated critical curve (dashed line). However, because of the larger number of components present in this system, the resulting point cannot be compared directly with the second critical end point shown in Figure 1 for albite-water. Nevertheless, supercritical behavior of a more complex nature takes place at higher pressures, and the "wet melting curve" of Huang and Wyllie (1975) should no longer be present there.

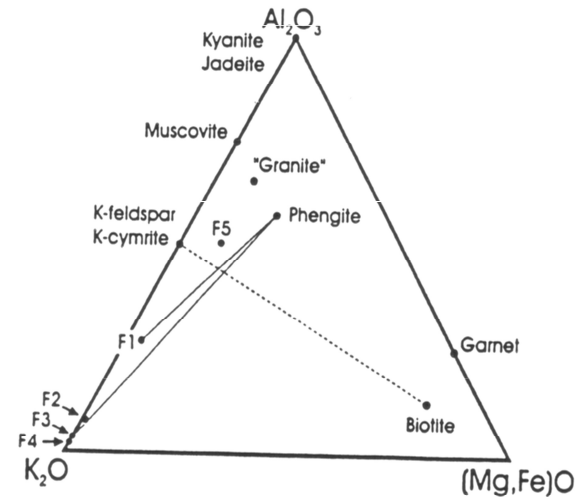


FIG. 4. Ternary plot of selected components of the Dora-Maira granite starting material (Tilton et al., 1991, here shown as "Granite") used by M. Burchard (pers. commun.) for his experiments. It shows the partial compositions of some relevant solid and fluid phases appearing in the presence of silica and water. Clinopyroxene was ignored. The phengite composition is taken from Burchard and Schreyer (1995a, GN1); biotite is an idealized phlogopite or annite. F1-F5 are the fluid compositions as analyzed from quench products of runs in the range from 40 to 45 kbar, 700 to 750°C, with 3 to 10 wt% water added to the capsule (Burchard, pers. commun.). The dotted line refers to the solid assemblage present in the starting material, whereas the solid lines represent resulting assemblages under run conditions. Note that this plot cannot strictly be taken as a compatibility triangle.