

Minerogenetické procesy

Prof. RNDr. Milan Novák, CSc.

Minerogenetické procesy

Ke vzniku minerálů vedou velmi rozmanité procesy.

- **Minerály skládají různé typy magmatických, metamorfovaných i sedimentárních hornin, ložisek nerostných surovin a také některých technických hmot, a proto je mineralogie základem většiny geologických disciplín snad s výjimkou paleontologie a historické geologie.**
- **Petrologie – s výjimkou přírodních skel a některých organických látek jsou horniny složeny výhradně z minerálů. Mineralogické složení hornin závisí na celkovém chemickém složení a na PTX-stabilitě jednotlivých minerálů a minerální asociací.**
- **Geochemie – chování chemických prvků při geologických procesech je ovlivněno především charakterem vazby těchto prvků v minerálních fázích a jejich stabilitě v různých PTX-podmínkách.**
- **Strukturní geologie – mechanické chování hornin závisí na mechanickém chování jednotlivých minerálů za různých PTX-podmínek a na stavbě horniny.**

Minerogenetické procesy

- **Proč a za jakým účelem studujeme minerály?**
- **Zjednodušeně existují dva přístupy ve studiu minerálů:**
- **Minerál jako pevná fáze - využívají se metody studia fyziky pevné fáze (krystalografie, spektroskopie, různé metody chemické analýzy, jiné experimentální metody) a výsledkem studia je detailní charakteristika fyzikálních a chemických vlastností minerálů a jejich chování v různých PTX-podmínkách**
- **Minerál jako součást horniny – využívají se podobné metody, ale hlavním výsledkem studia je na základě znalostí o vlastnostech jednotlivých minerálů chování minerálu během geologických procesů a odvození PTX-podmínek vzniku (petrologie, geochemie).**
- **Oba přístupy je vhodné kombinovat.**

Minerogenetické procesy

A. Členění minerogenetických procesů

Pro členění procesů vzniku minerálů můžeme použít mnoho hledisek, níže jsou vedena jen některá z nich.

1. Vliv člověka

- **Přírodní (bez vlivu člověka na proces vzniku) – téměř všechny procesy, které studujeme v přírodě a které jsou v této přednášce.**
- **Umělé**
 - řízené člověkem (výroba umělých minerálů)
 - ovlivňované člověkem (minerály na hořících haldách, zvětrávání hornin na historických stavbách).

Minerogenetické procesy

2. Fyzikálně-chemický přístup

2.1. podle typu krystalizace minerálů

- z taveniny (magmatické horniny)
- z fluid (většinou vysokoteplotní metasomatické horniny např. skarny, greiseny, některé plášťové horniny)
- z roztoků (středněteplotní hydrotermální roztoky až roztoky pokojové teploty, hydrotermální zrudnění, alpské žíly, výplně trhlin, evapority)
- růst v pevném stavu (většina metamorfních procesů, metasomatické horniny), ale i v tomto případě probíhá růst prostřednictvím fluid

Jednotlivé typy není lehké vždy rozlišit a do určité míry se překrývají. Přejít mezi jednotlivými typy jsou většinou nedostatečně prozkoumané.

2.2. podle PTX podmínek vzniku

- tlak
- teplota
- složení (resp. aktivita) fluidní fáze (např. H_2O , CO_2 , F, Cl, fO_2 , H^+)

Minerogenetické procesy

2. Fyzikálně-chemický přístup

2.3. podle otevřenosti systému během jednotlivých fází krystalizace

- uzavřené
- otevřené
- Míra uzavřenosti systémů často výrazně kolísá v čase. Zcela uzavřené systémy v geologii téměř neexistují. Pro vlastní výzkum je také nezbytné umět si definovat systém, který studujeme tak, aby dál odpovídal studované hornině. Zde nutně dochází ke zjednodušení, které ale nesmí překročit určitou mez. Rozpoznání, zda byl náš systém choval jako otevřený nebo uzavřený a během kterých fází vývoje je jedne ze ztěžejních úkolů geologie.

Minerogenetické procesy

3. Geologický přístup

Existuje poměrně velké množství geologických hledisek, podle nichž lze klasifikovat minerogenetické procesy, ale některá si poněkud odporují a také jejich význam je velmi odlišný. Níže jsou uvedena jen jako příklad některá hlediska.

3.1. podle způsobu vzniku

- magmatické
- metamorfní
- sedimentární
- hydrotermální

Určitým způsobem navazují na fyzikálně-chemický přístup, ale jen částečně.

3.2. podle vztahu k deskové tektonice

- uvnitř bloků (např. rift)
- divergentní okraje (např. oceánické hřbety)
- konvergentní okraje (např. kolize kontinentů)
- transformované okraje

Minerogenetické procesy

Fyzikálně-chemický přístup je dnes považován za modernější než geologický, i když oba mají své výhody i nevýhody. Vývoj ale bude jednoznačně směřovat k fyzikálně-chemickému přístupu.

- **Proč studujeme minerogenetické procesy?**

Pochopení vzniku minerálů a hornin je hlavním úkolem, ne pouze popis hornin či jiných objektů. Pokud poznáme za jakých podmínek a z jakého media vznikl náš minerál nebo celá minerální asociace a za jakých podmínek, můžeme přispět k rekonstrukci geologického vývoje celé oblasti.

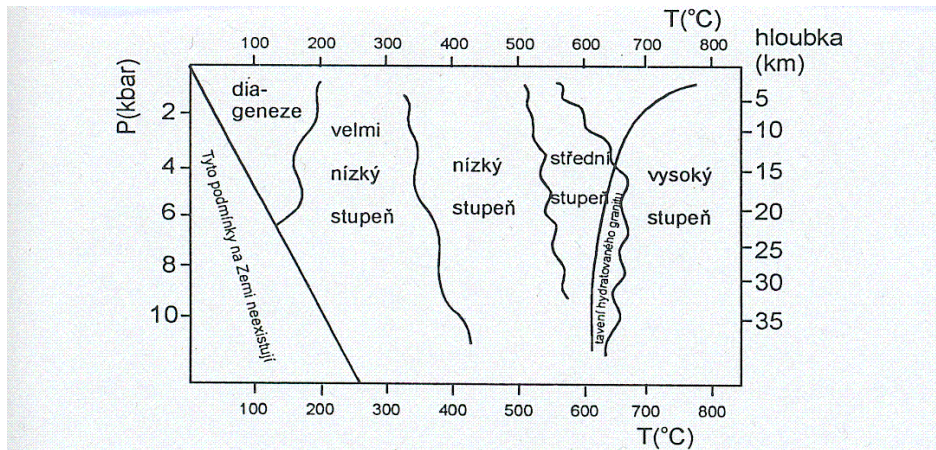
- **Co je objektem této přednášky?**

Procesy vzniku minerálů, které nejsou většinou podrobněji probírány v petrologii, popř. v ložiskové geologii.

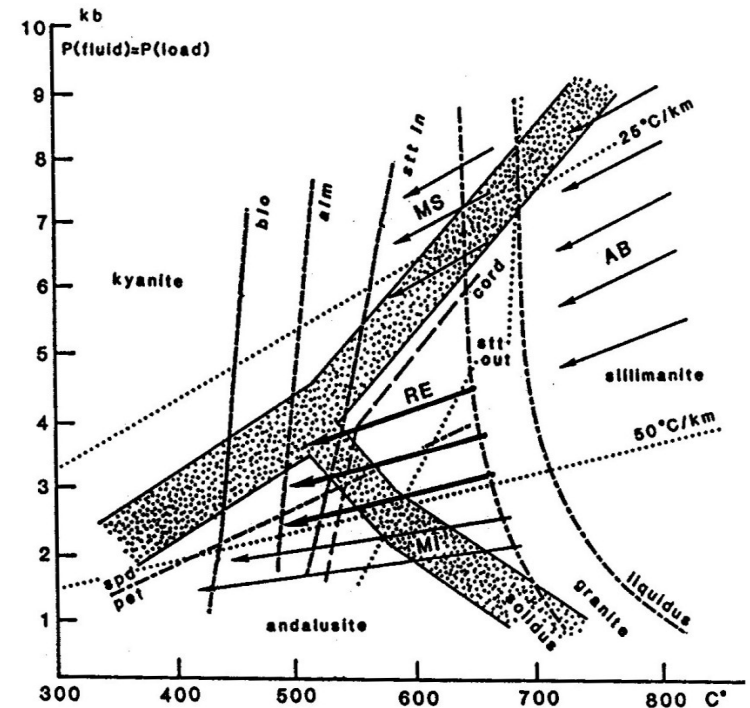
Minerogenetické procesy

B. Idealizovaný přístup ke studiu minerogenetických procesů

1. Pozice procesu v zemské kůře (plášti)



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.



Minerogenetické procesy – Příklad 1

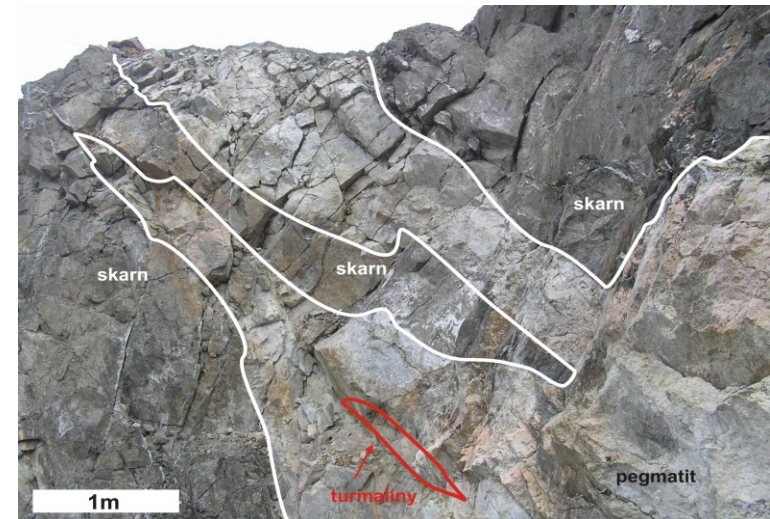
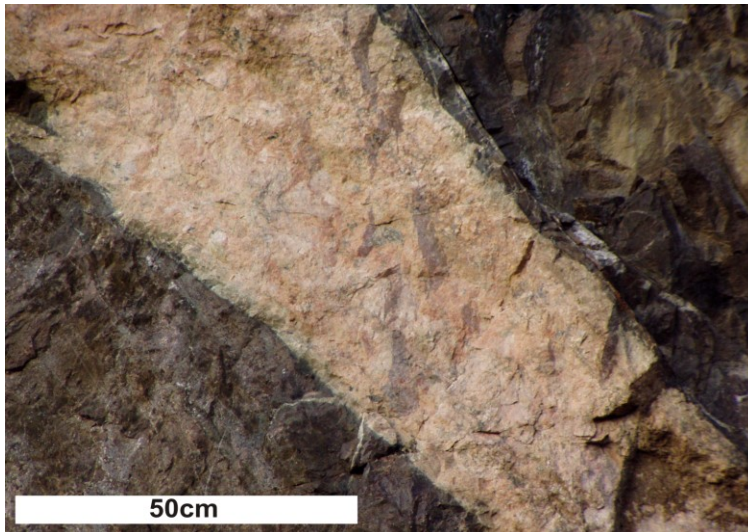
2. Geologické poměry

Vlastějovice

pegmatity pronikající Fe-skarny

studium stupně kontaminace

pegmatitové taveniny na
základě studia vhodných
minerálů



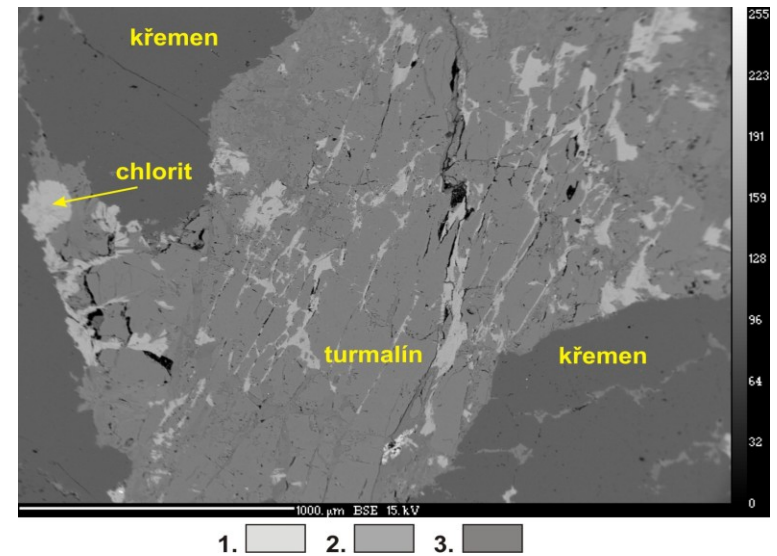
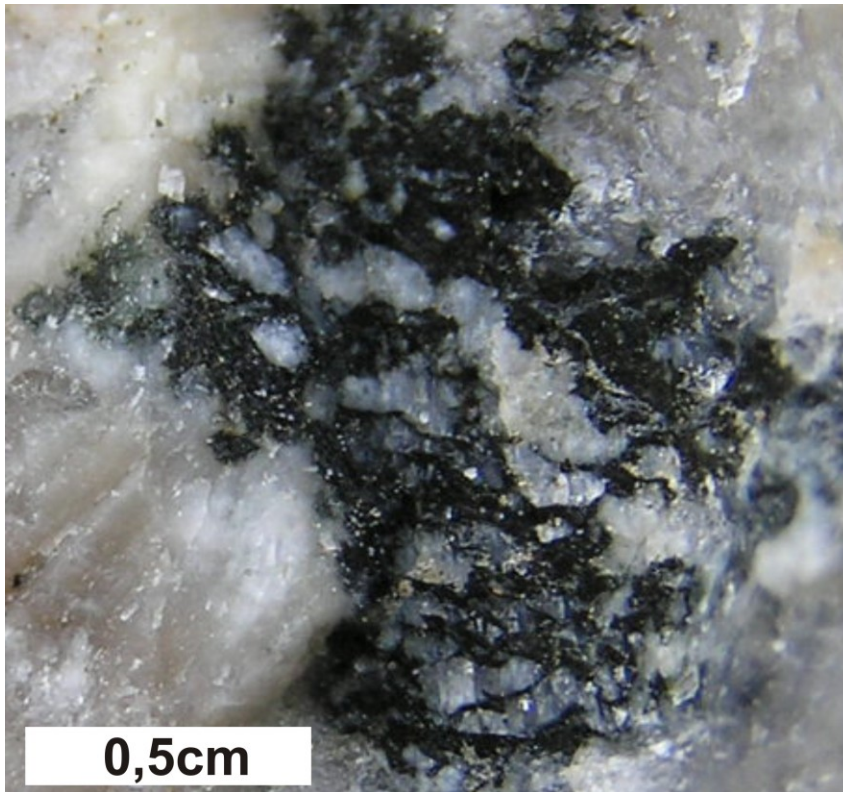
Minerogenetické procesy – Příklad 1

2. Geologické poměry



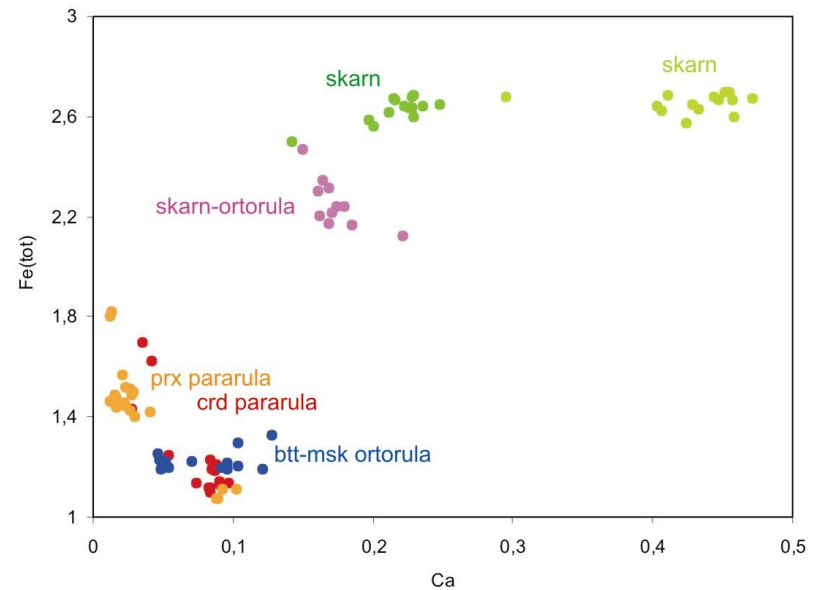
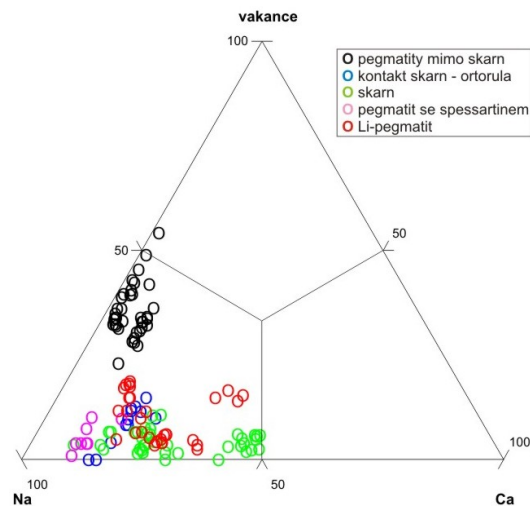
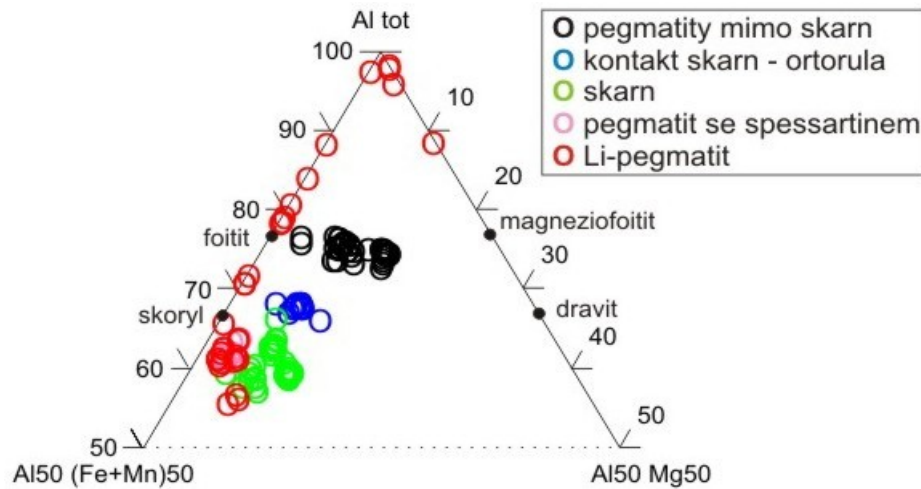
Minerogenetické procesy – Příklad 1

3. Texturní vztahy mezi minerály



Minerogenetické procesy – Příklad 1

4. Chemické složení minerálů - turmalín



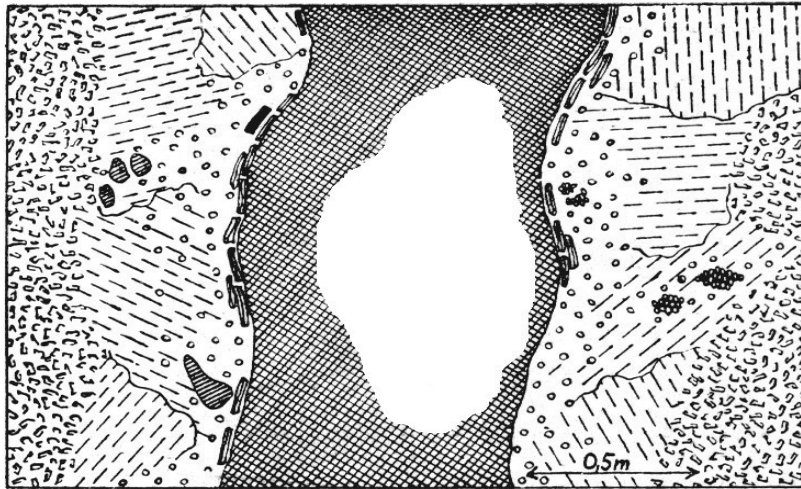
Minerogenetické procesy – Příklad 2

2. Geologické poměry

Dolní Bory

pegmatity s andalusitem a diasporem

Studium typu krystalizace ve vztahu k možnému mediu



VSV			ZJZ	
pís. pegmatit	K-živec	křemen	albit, zona	
muskovit	cordierit	biotit	turmalin	

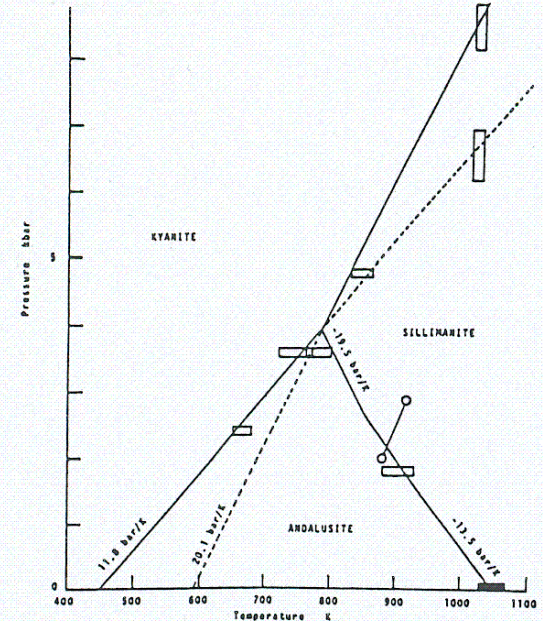
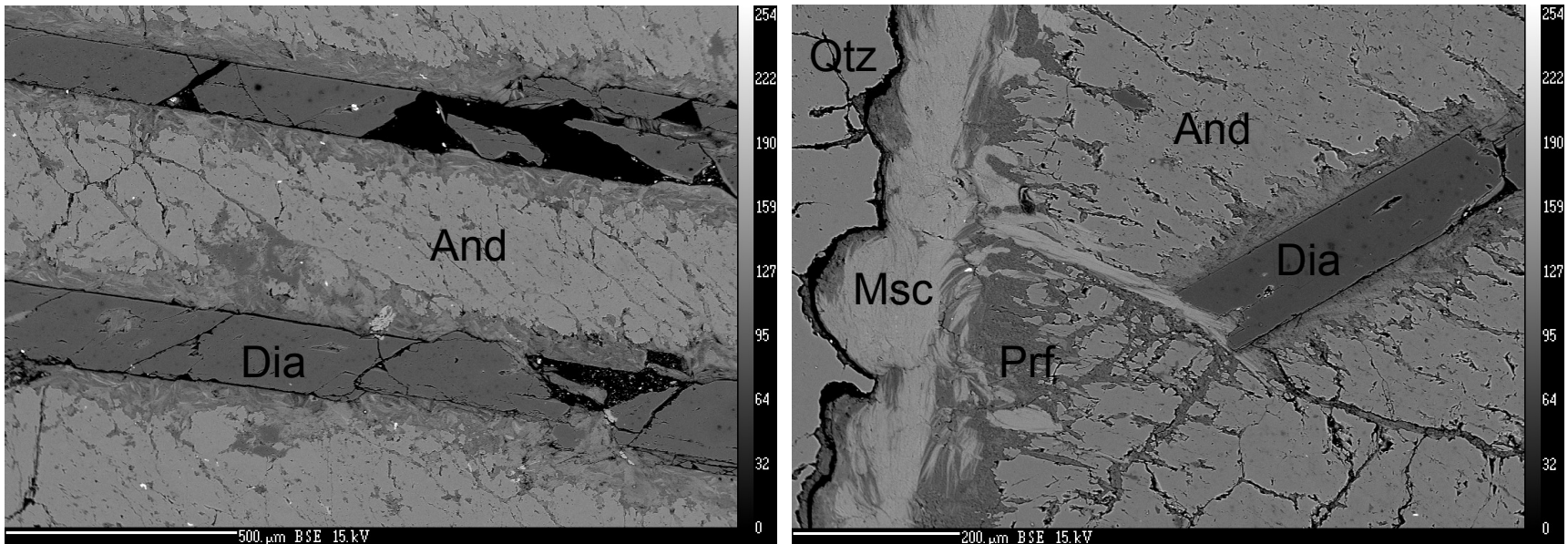


Figure 3.37. Phase equilibrium diagram showing experimental brackets for the Al_2SiO_5 equilibria (rectangles) and the univariant equilibria computed with the Clapeyron equation using entropies derived from the heat capacity measurements of Robie and Hemingway (1984). (From Robie and Hemingway, 1984, Fig. 5).

Minerogenetické procesy – Příklad 2

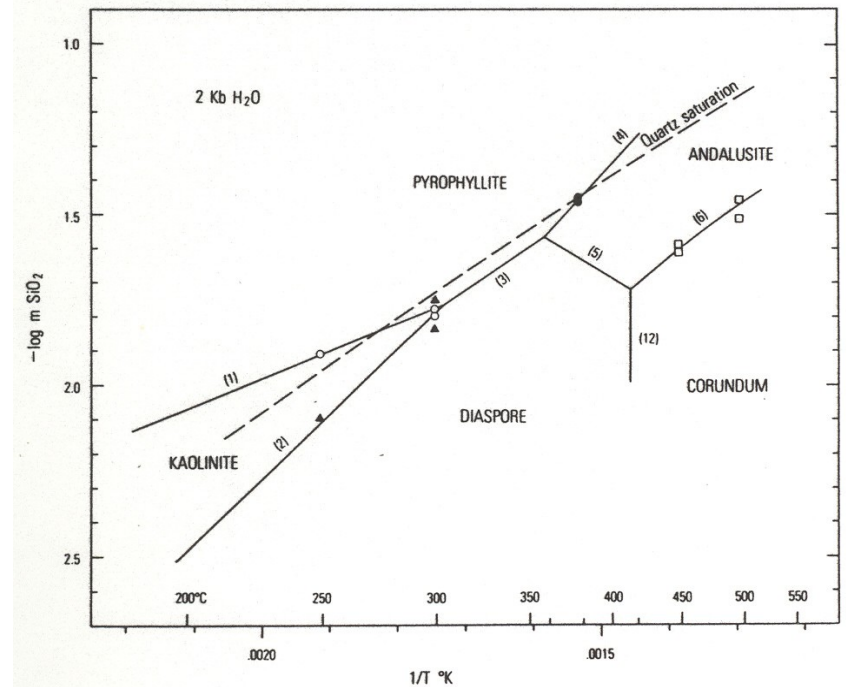
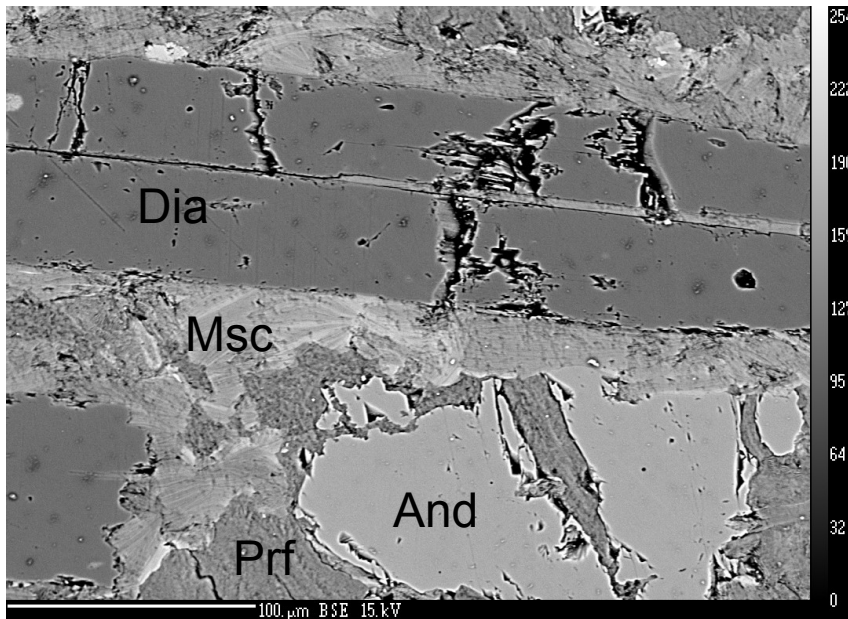
3. Texturní vztahy mezi minerály



4. Chemické složení minerálů je v tomto případě blízké teoretickým vzorcům

Minerogenetické procesy – Příklad 2

3. Texturní vztahy mezi minerály



4. Chemické složení minerálů je v tomto případě blízké teoretickým vzorcům

Minerogenetické procesy

C. Grafické znázornění minerogenetických procesů

Grafické znázorňování geologických systémů a procesů je velmi důležité a existuje velké množství různých diagramů.

- podle chemického složení

Chemické systémy - ACF, AKF, KFMASH aj.- více v petrologii

- podle PTX-podmínek

PTX-čas -diagramy

- podle minerálních asociací

Paragenetické diagramy

Grafické znázornění minerogenetických procesů

P-T digramy

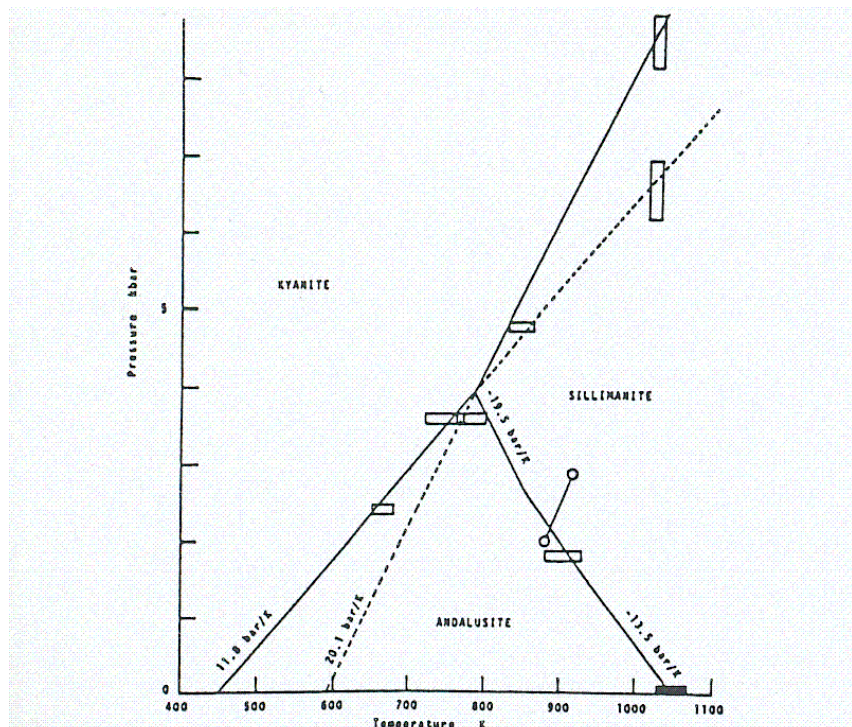
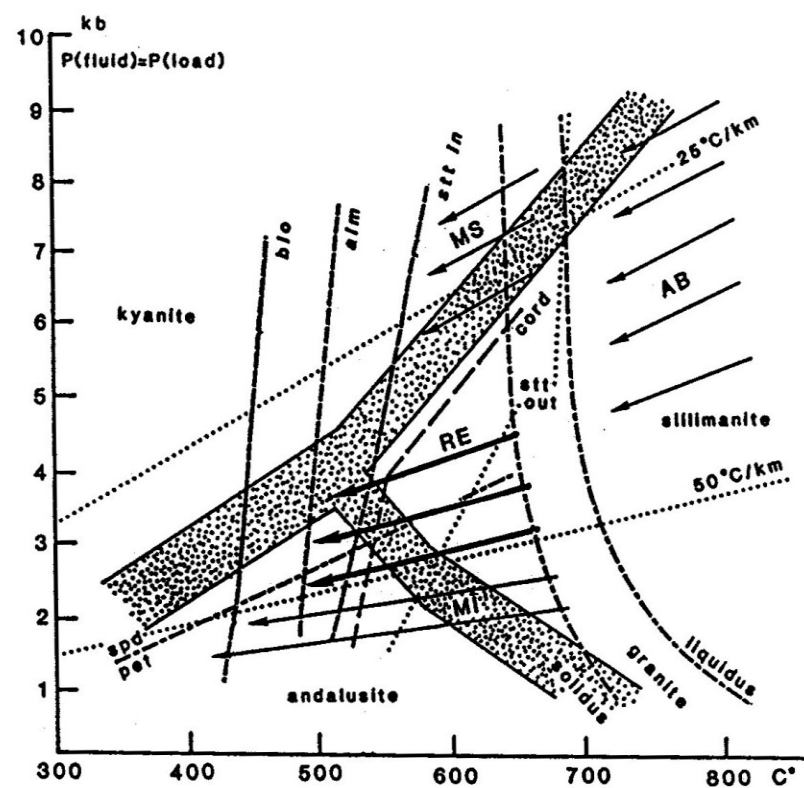


Figure 3.37. Phase equilibrium diagram showing experimental brackets for the Al_2SiO_5 equilibria (rectangles) and the univariant equilibria computed with the Clapeyron equation using entropies derived from the heat capacity measurements of Robie and Hemingway (1984). (From Robie and Hemingway, 1984, Fig. 5).



Grafické znázornění minerogenetických procesů

P-T-X diagramy

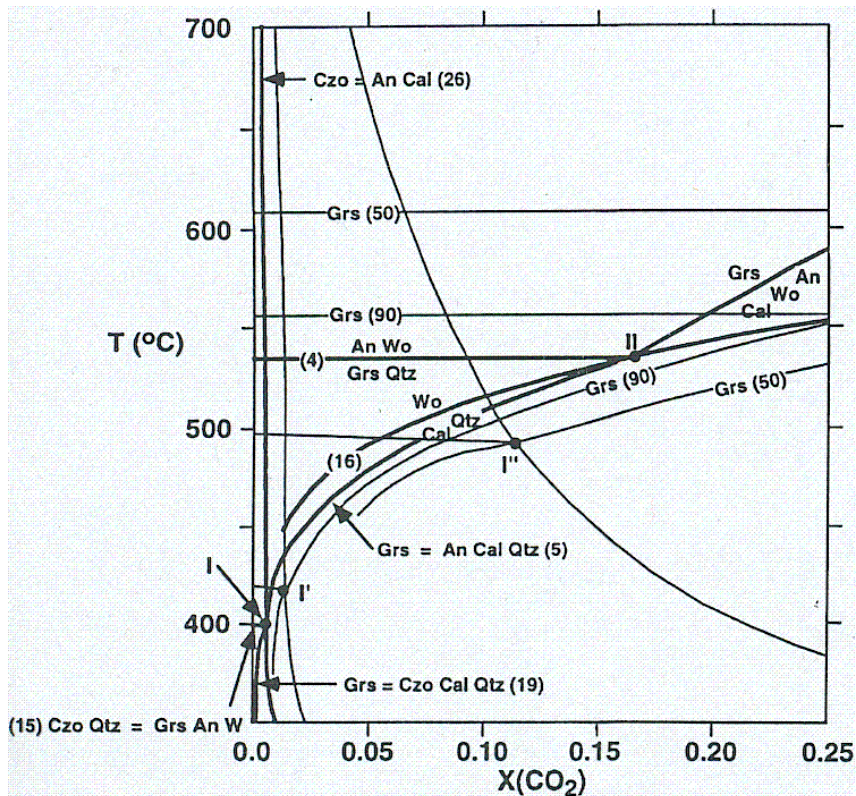
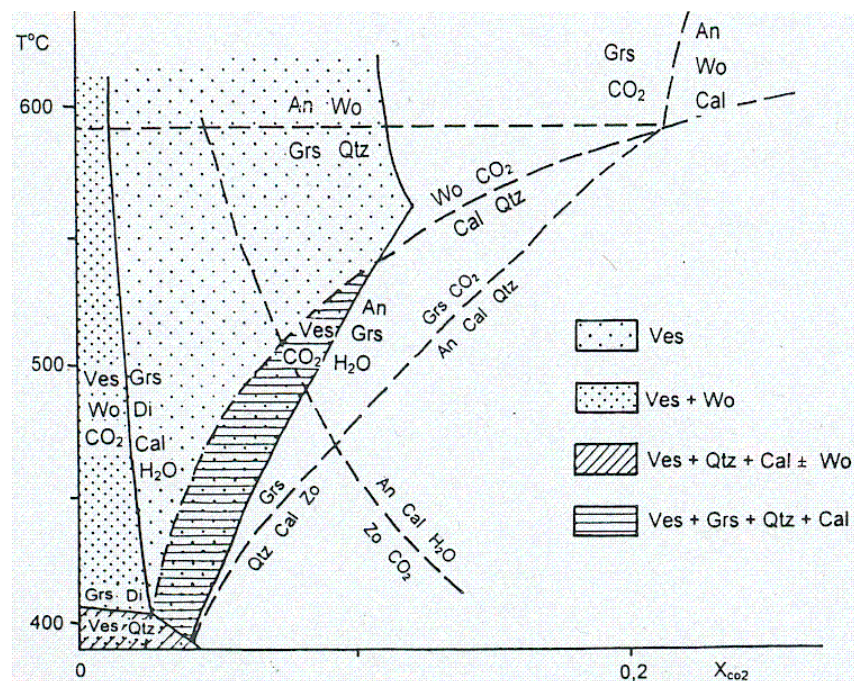


Figure 9. Water-rich [0.0 to 0.25 $X(\text{CO}_2)$] portion of an isobaric ($P_T = P_f = 100$ MPa) $T-X(\text{CO}_2)$ diagram illustrating the effects of solid solution (dilution of Grs with Adr, of Czo with Pi) on the phase equilibria of Figure 7. Shifts in location of equilibria calculated with methods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



Obr. 1. Schematický $T - X_{\text{CO}_2}$ diagram vybraných reakcí v systému CMAS- $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ při $P_{\text{fluid}} = P_{\text{celk.}} = 200$ MPa (upraveno podle Valleyho et al. 1985 a Labotka et al. 1988)

Fig. 1. Schematic $T - X_{\text{CO}_2}$ diagram showing selected reactions in the system CMAS- $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ at $P_{\text{fluid}} = P_{\text{total}} = 200$ MPa (modified from Valley et al. 1985 and Labotka et al. 1988).

Grafické znázornění minerogenetických procesů

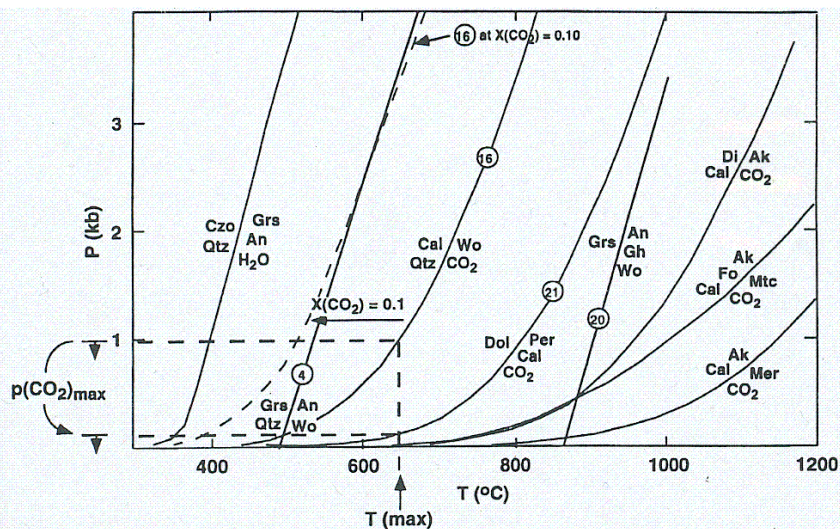


Figure 5. Pressure-temperature diagram with a variety of phase equilibria used for placing limits on the P - T conditions of skarn formation. Phase equilibria calculated using the GEOCALC program of Perkins *et al.* (1986). Decarbonation equilibria are at the condition $P_T = p(\text{CO}_2)$ (solid lines) except reaction 16 is computed both at $P_T = p(\text{CO}_2)$ and at $X(\text{CO}_2) = 0.1$ (dashed line). $T(\text{max})$ and $p(\text{CO}_2)_{\text{max}}$ discussed in text.

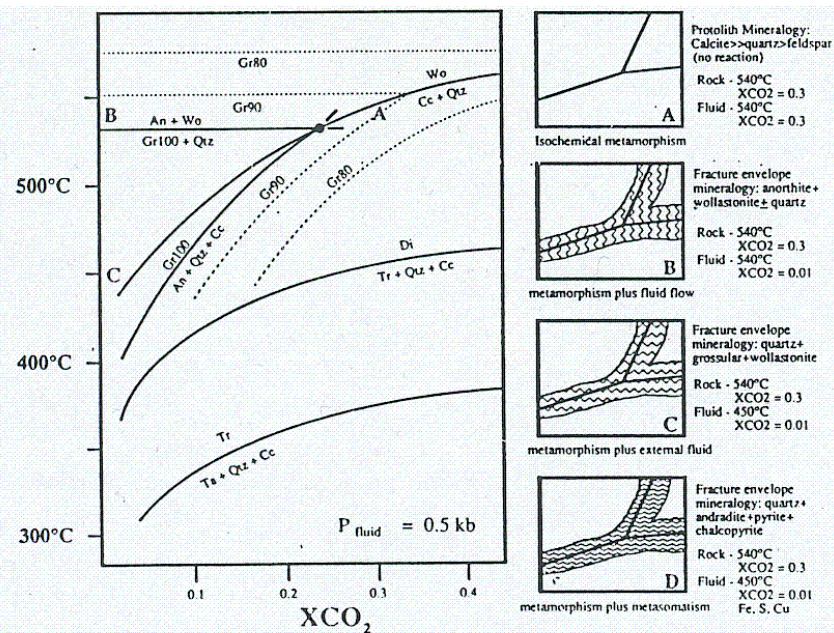
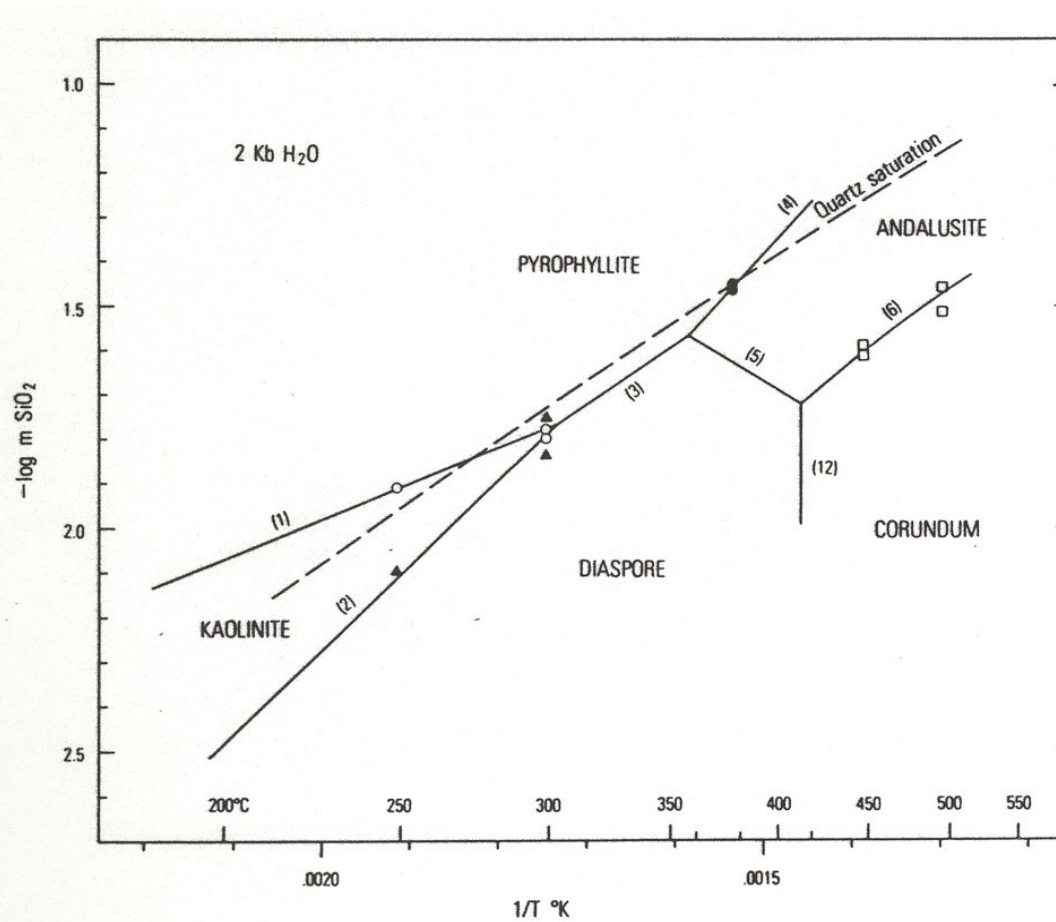


Figure 2. Illustration of metamorphic phase equilibria for selected reactions in the system $\text{Ca-Mg-Al-Si-H}_2\text{O-CO}_2$. Modified from Greenwood (1967) and Kerrick (1974). Examples of four fracture-controlled alteration events are illustrated: (A) Fluid in fracture is same temperature and composition as surrounding rocks at high X_{CO_2} ; (B) Fluid in fracture is same temperature as surrounding rocks but has flushed some CO_2 out of the system; (C) Fluid in fracture is cooler than surrounding rocks and has flushed some CO_2 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.

Grafické znázornění minerogenetických procesů

T-aktivita diagramy



Grafické znázornění minerogenetických procesů

T-čas diagramy

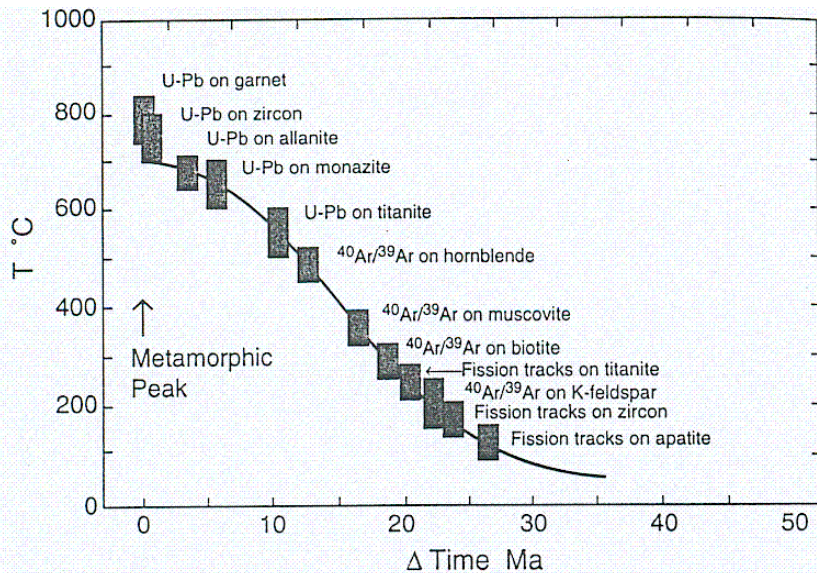


Figure 20-12. A hypothetical temperature-time plot showing the array of different thermochronometers that may be used to constrain the T-t history of an area.

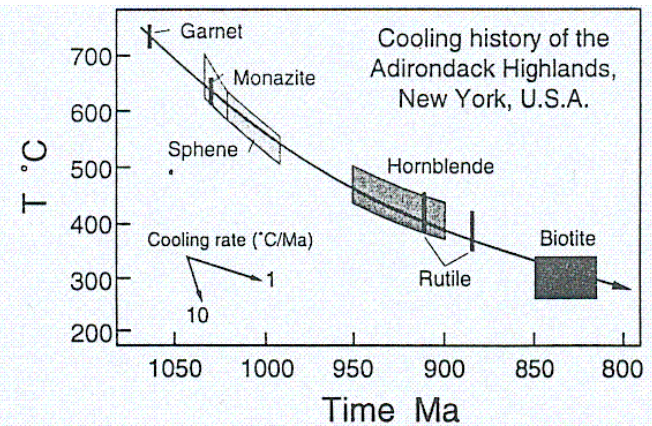
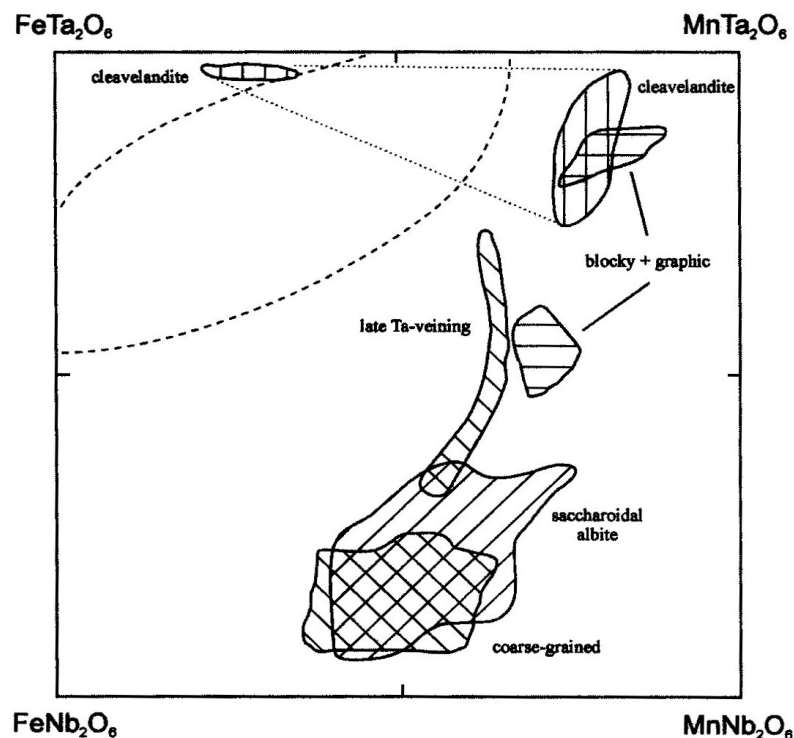
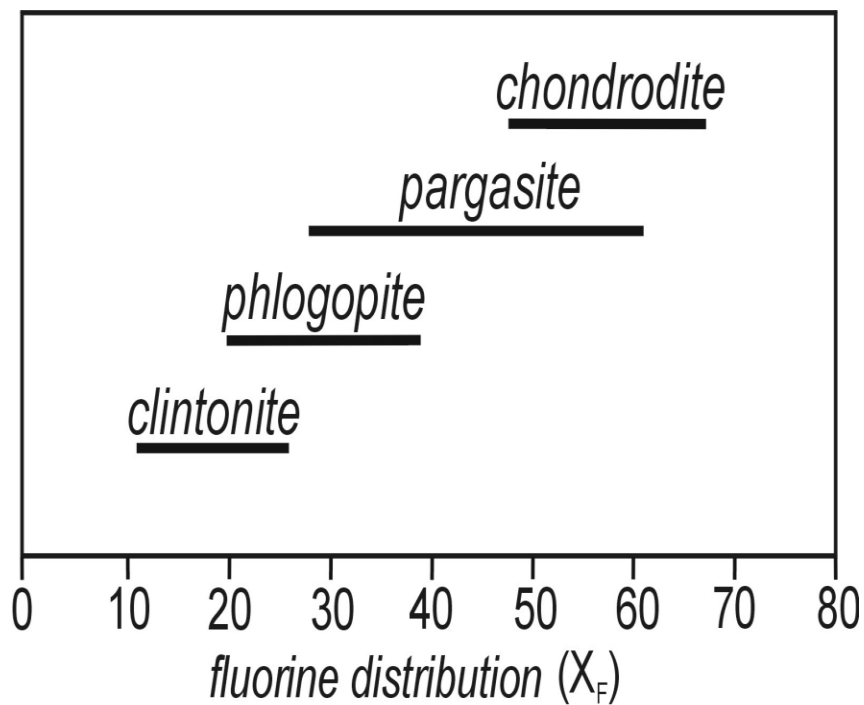


Figure 20-16. Temperature-time history for the Adirondack highlands, New York, U.S.A. Mezger et al. (1989).

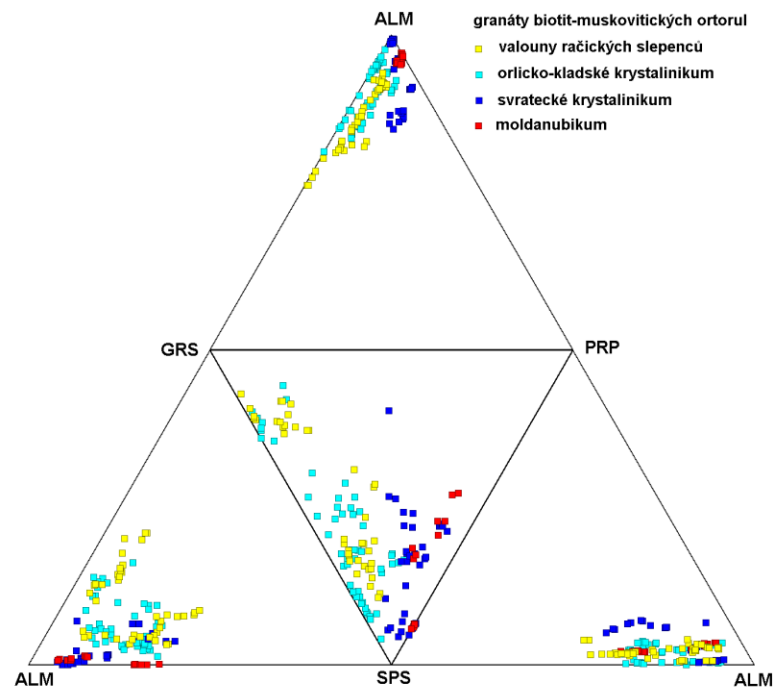
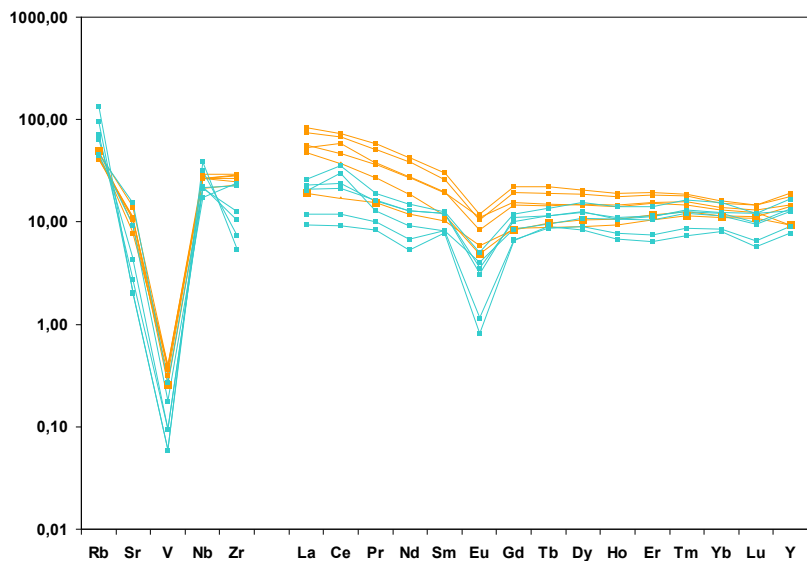
Grafické znázornění minerogenetických procesů

Diagramy složení minerálů



Grafické znázornění minerogenetických procesů

granáty



Grafické znázornění minerogenetických procesů

turmalín

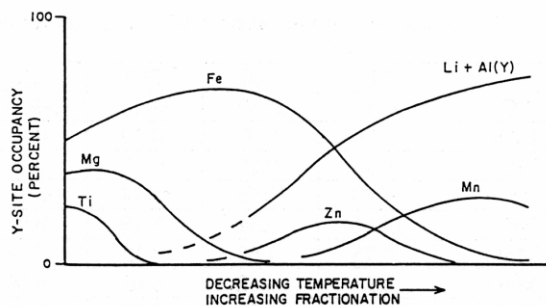


Fig. 6. Schematic illustration of ideal covariation of Y-site cations of tourmaline in response to decreasing temperature and increasing fractionation of melt (Jolliff *et al.* 1986).

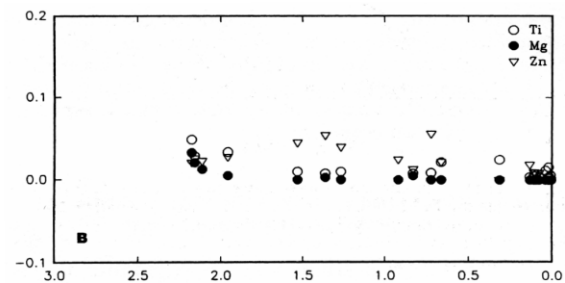
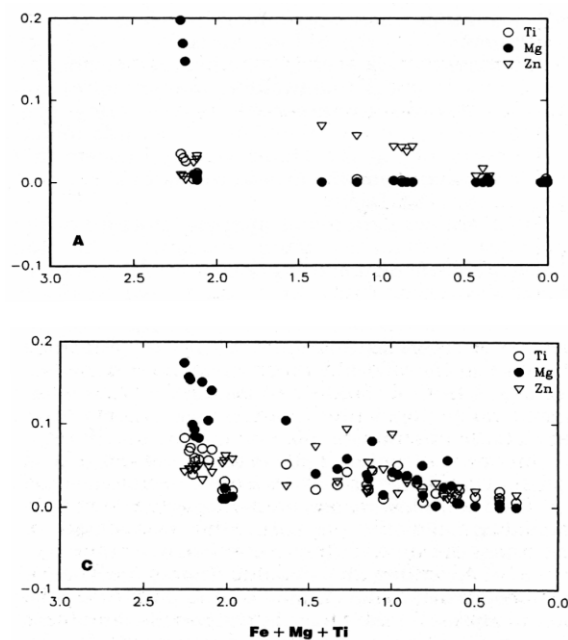


Fig. 2. Variation in concentrations of Ti, Mg and Zn per formula unit versus the FMT index. A - Lastovičky, B - Pikárec, C - Kračovice.

Magmatické

Magmatické (vyvřelé)

vznikají utuhnutím taveniny
magmatu za vysoké teploty

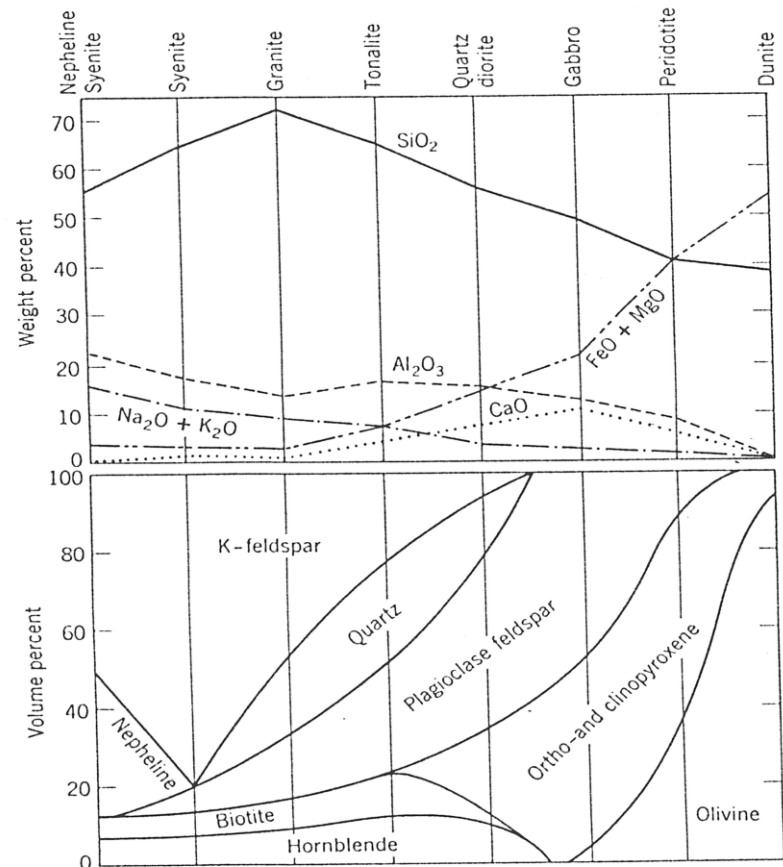
dělíme je na:

pomalou tuhnoucí v hloubce: žula,
diorit

rychle tuhnoucí při povrchu: čedič,
ryolit

Nebo podle chemického složení
(hlavně obsah SiO_2)

na kyselé – intermediální - bazické
- ultrabazické



Magmatické



**Granit s krystalem K-živce –
kyselá a tuhneící v hloubce**



**Čedič s olivínem – bazická a
tuhnoucí na povrchu**

Magmatické - pegmatity

Specifické magmatické horniny složením blízké granitu ale s velkými krystaly zonální stavbou a vzácnými minerály

Granitické pegmatity



Pegmatit v granitu - Strzegom



Beryl - Maršikov



Magmatické - pegmatity

Chemická charakteristika granitických pegmatitů

Hlavní Si, Al, K, Na, O

Vedlejší Li, Be, Fe, Mn, Ca,

Stopové Cs, Rb, Nb, Ta, Mg

Těkavé H₂O, B, F, P

Minerály

Hlavní: křemen, K-živce, albit

Andalusit

Vedlejší: muskovit, biotit, turmalín, granát, beryl, lepidolit, apatit, andalusit

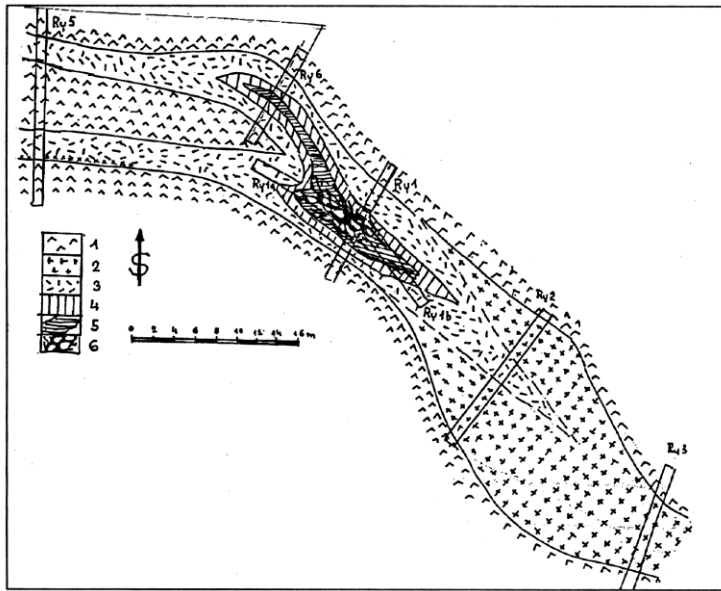
Stopové: columbit, kasiterit,

S těkavými prvky: turmalín, apatit, topaz, spodumen

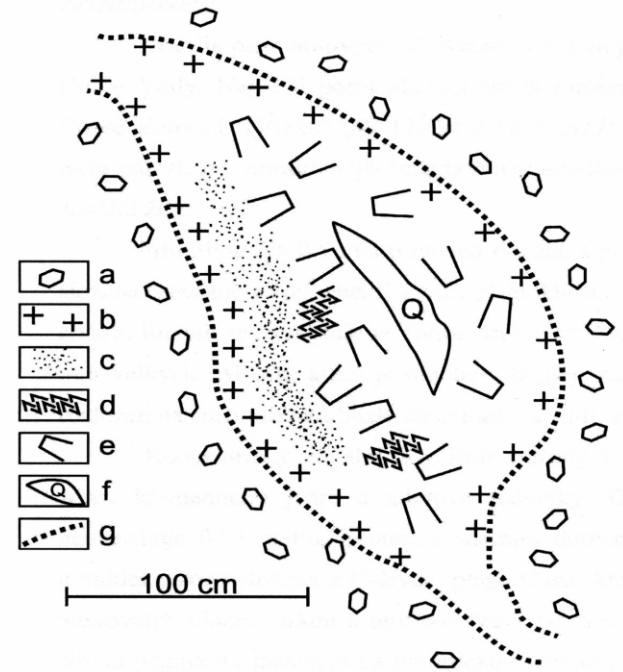
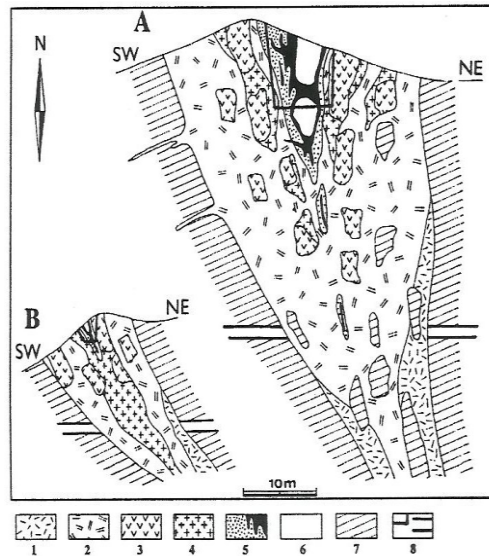


Elbait

Magmatické - pegmatity



Zonálnost pegmatitů



Metamorfní

Metamorfní (přeměněné)

vznikají krystalizací v pevném stavu za vyšších teplot a tlaků

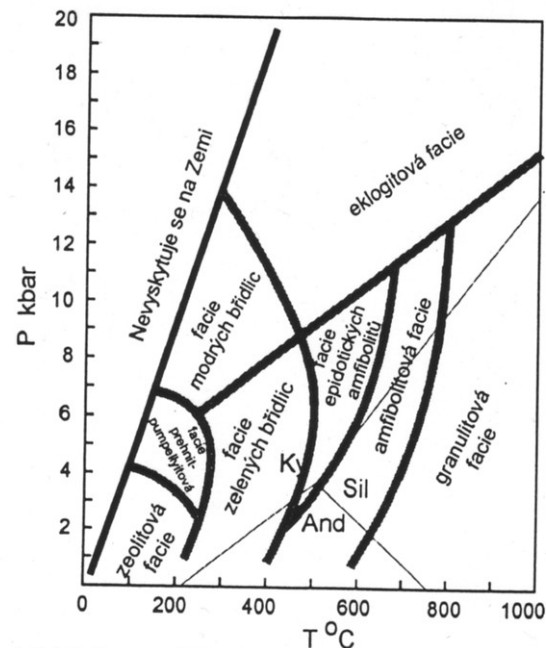
Dělíme je velmi nízký, nízký, střední a vysoký stupeň metamorfózy

- horniny: fylit, svor, rula, mramor, migmatit, serpentín

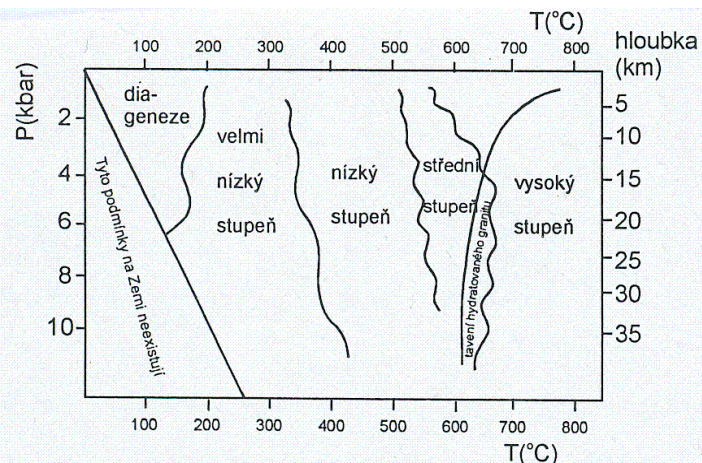
- plus metasomatické horniny: skarn, greisen



Almandin v rule

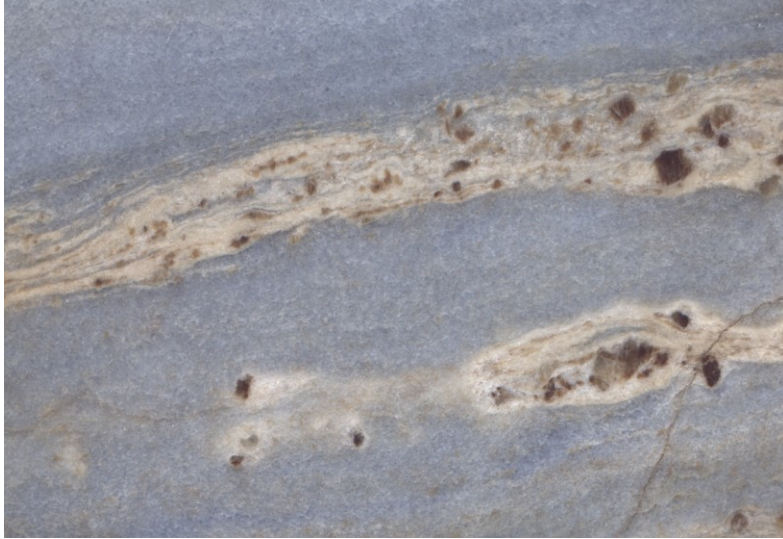


Obr. 5-5. P-T diagram s hlavními metamorfními facie a trojným bodem Al_2SiO_5 podle Holdawaye 1971. Převzato ze Speara (1993).



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.

Metamorfní



Mramor s wollastonitem a vesuvianem

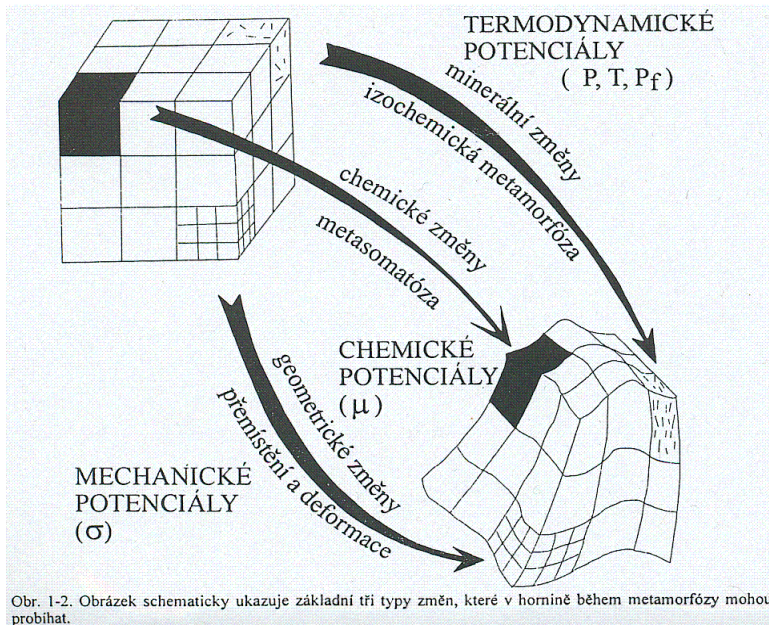


Mramory zavrásněné do rul, Černá v Pošumaví



Mramor s tremolitem

Metamorfni - metasomatické



Metasomatické horniny jsou svým vznikem podobné metamorfovaným horninám, ale při jejich vzniku dochází k výrazné změně chemického složení, tedy část prvků ke přinesena a část odnesena.

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



Hedenbergit



Grosular

Metamorfní - metasomatické

- Typické minerály skarnů:

Granáty - grosular, andradit

Pyroxeny – diopsid, hedenbergit

Amfiboly

Vesuvian

Wollastonit

Epidot

Dále řada rudních minerálů:

Scheelit, chalkopyrit, magnetit

Podle mineralogického složení
je dělíme na:

Ca-skarny

Mg-skarny

Fe-skarny

Mn-skarny

Wollastonit



Sedimentární

Sedimentární (usazené) horniny

vznikají poblíž zemského povrchu většinou na dně vodních nádrží za teplot blízkých povrchu, často zvětráváním jiných minerálů

- Usazením a zpevněním úlomků minerálů
- Usazování z roztoků
- Z organických zbytků
- horniny: pískovec, vápenec, droba, jílovec, písek, jíl, sůl kamenná

Zvětrávání proces, který předchází vznik sedimentárních hornin a kdy dochází k rozkladu primárních minerálů na sekundární.

Např. živec větrá na kaolinit
chalkopyrit větrá na malachit



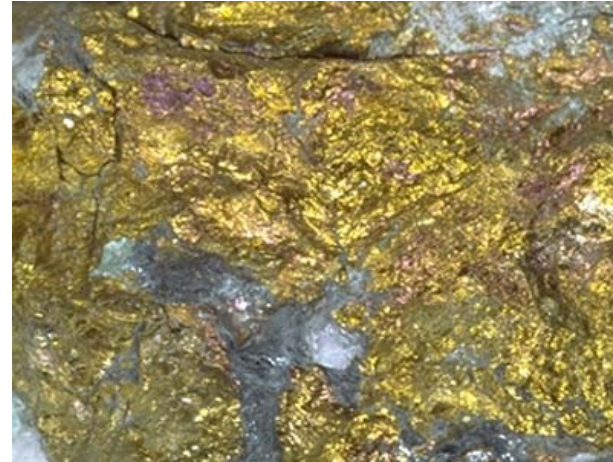
Limonit

Kalcit



Hydrotermální

- Hydrotermální mineralizace jsou velmi pestré a zahrnují:
- Rudní hydrotermální žíly, kde hlavní výplní žil jsou křemen, kalcit nebo dolomit a široká škála rudních minerálů jako pyrit, chalkopyrit, galenit, sfalerit, antimont, uraninit, hematit
- Alpské žíly, které jsou vyplněny běžnými horninotvornými minerály, např. epidot, albit, prehnit, křemen, K-živec (adulár), rutil, titanit, chlorit aj.



Chalkopyrit



Galenit

Shrnutí

1. Magmatické procesy

- vysoké teploty, někdy vysoký tlak,
- probíhají od pláště až po zemský povrch

2. Metamorfní procesy

- vysoké až nízké teploty, vysoké až nízké tlaky,
- probíhají od pláště až po zemský povrch, PT-pole magmatických a metamorfních procesů se překrývá, v tomto poli se liší mediem, z něhož krystalují: tavenina – pevná fáze

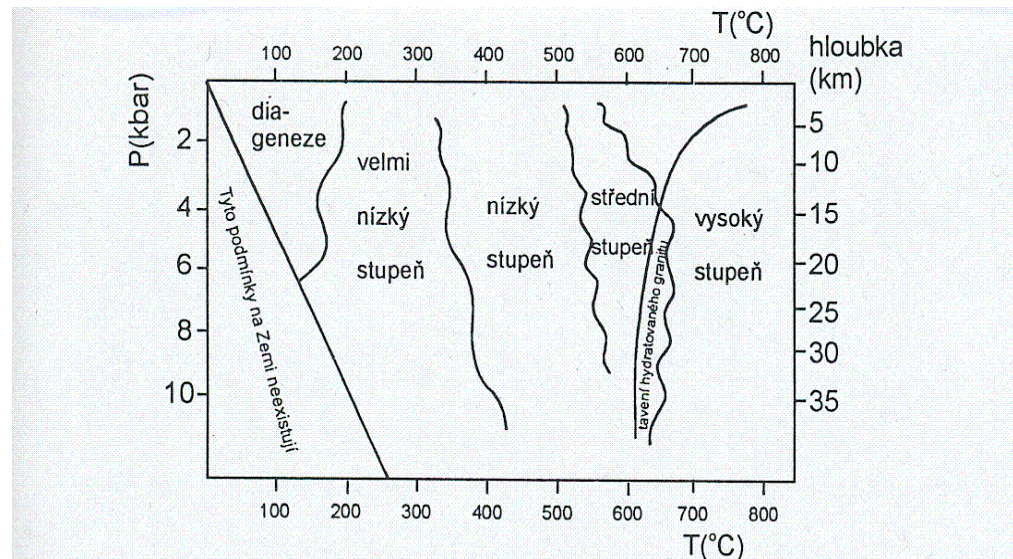
3. Hydrotermální procesy

- střední až nízké teploty, střední a hlavně nízké tlaky
- navazují na nebo se mírně překrývají s magmatickými, popř. i metamorfními procesy, liší se mediem, z něhož krystalují: tavenina – pevná fáze – hydrotermální roztok nebo fluidum

4. Sedimentární procesy

- nízké teploty a hlavně nízké tlaky
- navazují na nebo se mírně překrývají s metamorfními procesy

Neexistují jasně definované hranice mezi jednotlivými procesy, proto je nutné vedle geologického členění využívat i fyzikálně-chemické podle mateřského media, jsme-li schopni je definovat.



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.