

Magmatické a metamorfní procesy

—

Kontaktní metamorfóza a metasomatóza II

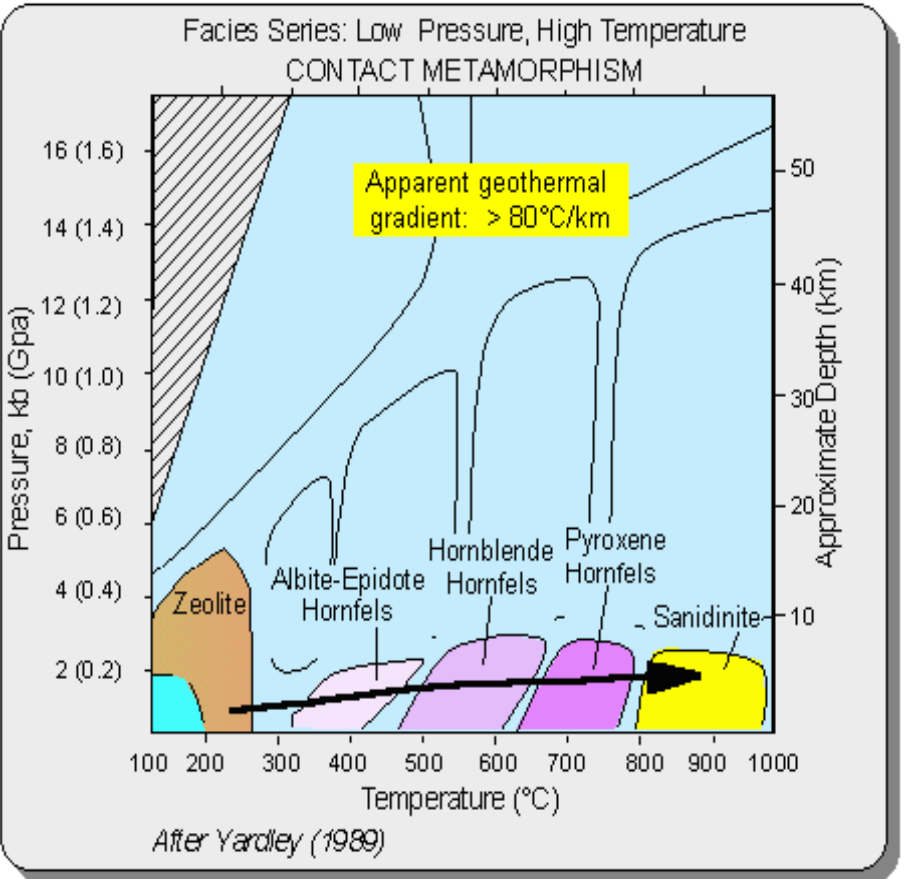
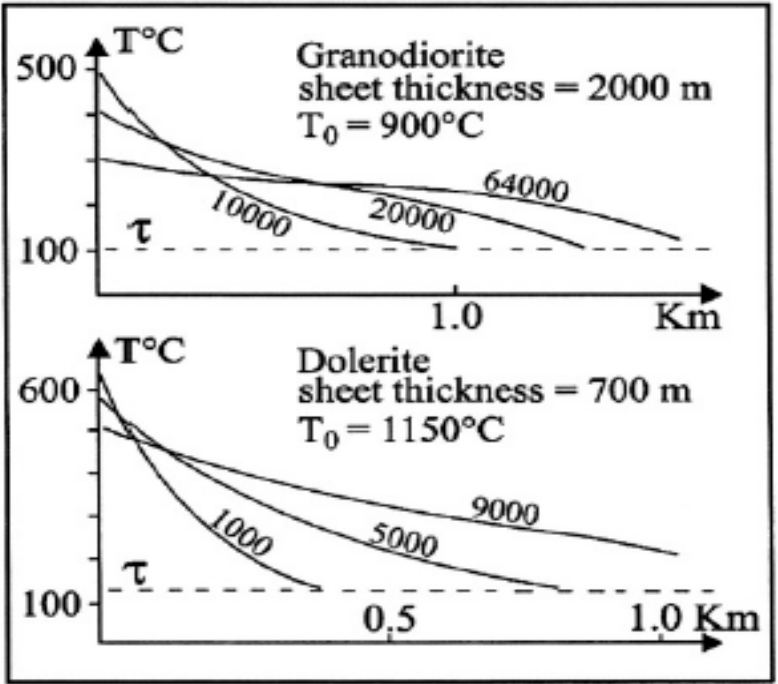
David Buriánek

Osnova

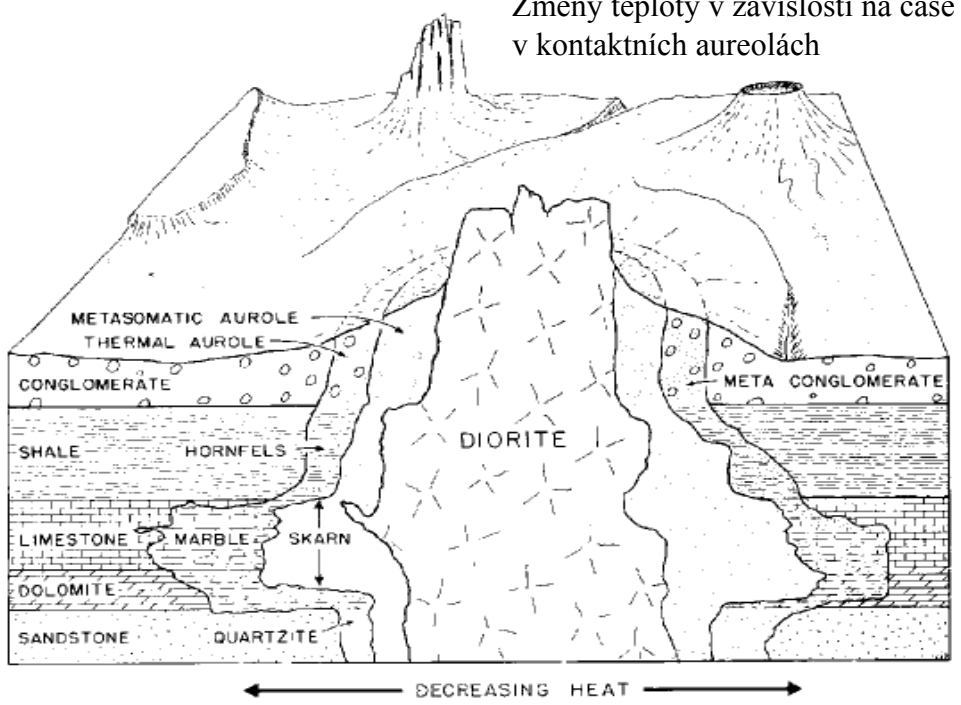
1. Charakteristika kontaktní metamorfózy
2. Metapelity
3. Al-chudé pelity během kontaktní metamorfózy
4. Vývoj chemického složení fluid během kontaktní metamorfózy
5. Metasomatóza
6. Interpretace látkové bilance metasomatických procesů

1) Charakteristika kontaktní metamorfózy

- tepelné působení těles vyvřelých hornin
- účinky rychle klesají se vzdáleností od kontaktu
- rozsah obvykle max. několik km
- rozsah aureoly závisí na tvaru tělesa, typu magmatu a petrografickém složení kontaktní aureoly, rozdílu teplot mezi magmatem a okolím (hloubka intruze)
- nízký P/T (andalusit-sillimanit- cordietit)



Změny teploty v závislosti na čase v kontaktních aureolách



2. Metapelity

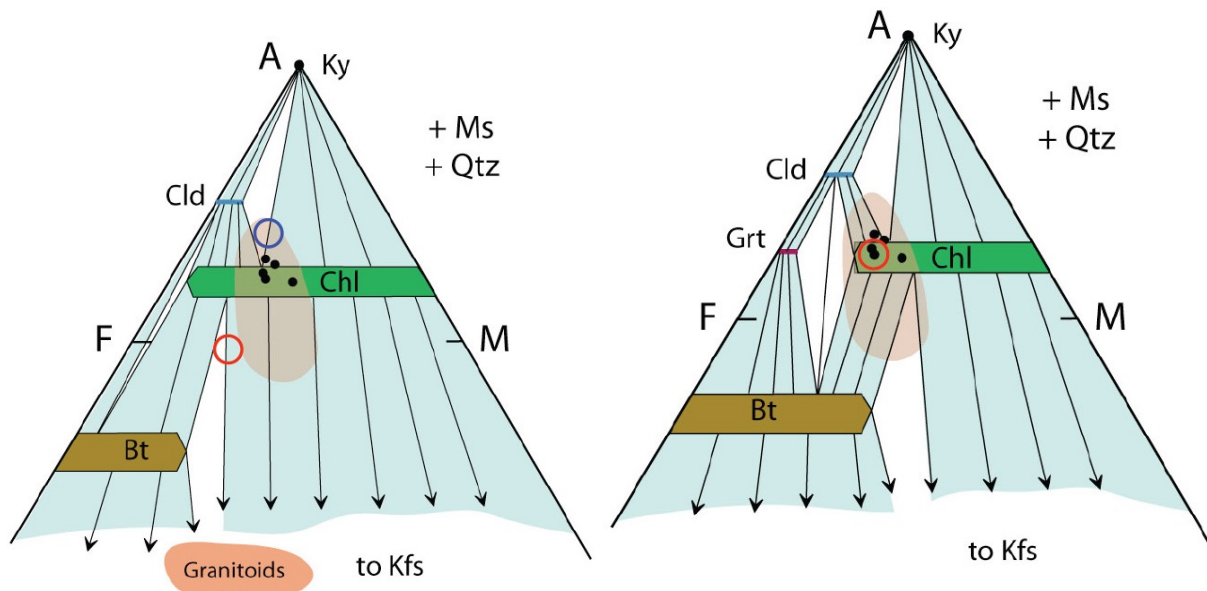
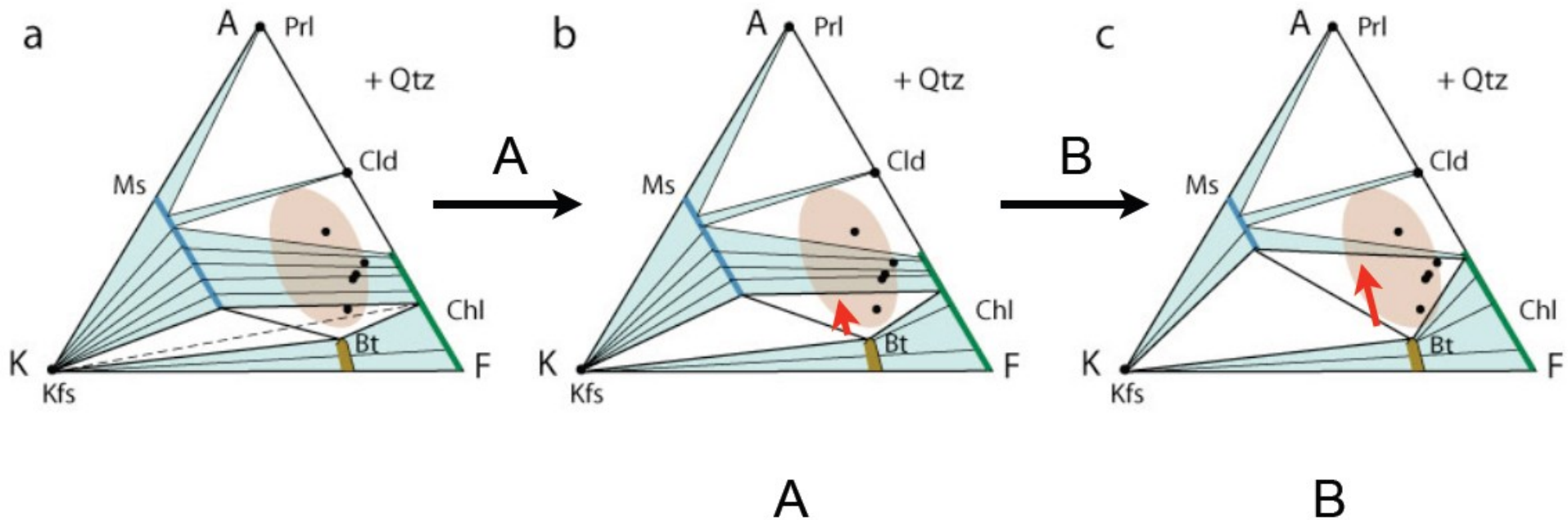
- důležité svou citlivostí na změny metamorfních podmínek
- během progradní metamorfózy vzniká řada minerálů (možno rozpoznat v terénu)
- stupně progradní metamorfózy (barrovienská) na konci 19. Stol. (Barrow 1893, 1912)
- regionální met. charakteristické výskytem tzv. indexových minerálů
- v pořadí chlorit, biotit, granát, staurolit, kyanit, sillimanit

Mineral zoning	Chlorite and biotite zones	Almandine zone	Staurolite and kyanite zone	Sillimanite zone
Chlorite	—	—		
Muscovite				—
Biotite	—			
Almandine		—		
Staurolite			—	
Kyanite			—	
Sillimanite				—
Sodic plagioclase	—			
Quartz	—			

	1	2	3	4	5
SiO₂	64.7	64.0	61.5	65.9	56.3
TiO₂	0.80	0.81	0.87	0.92	1.05
Al₂O₃	17.0	18.1	18.6	19.1	20.2
MgO	2.82	2.85	3.81	2.30	3.23
FeO	5.69	7.03	10.0	6.86	8.38
MnO	0.25	0.10			0.18
CaO	3.50	1.54	0.81	0.17	1.59
Na₂O	1.13	1.64	1.46	0.85	1.86
K₂O	3.96	3.86	3.02	3.88	4.15
P₂O₅	0.15	0.15			
Total	100.00	100.08	100.07	99.98	96.94

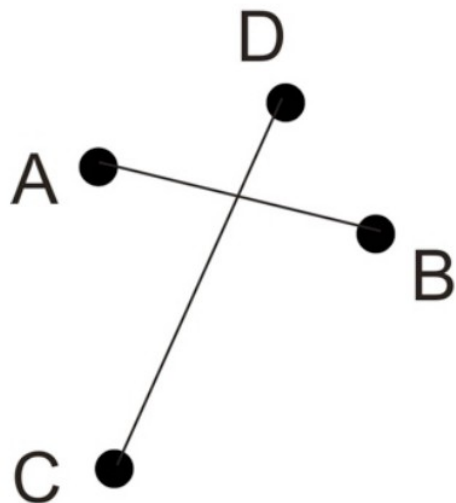
* Reported on a volatile-free basis (normalized to 100%) to aid comparison.

1. "North American Shale Composite". Gromet *et al.* (1984). 2. Average of ~100 published shale and slate analyses (Ague, 1991). 3. Ave. pelite-pelagic clay (Carmichael, 1989). 4. Ave. of low-grade pelitic rocks, Littleton Fm, N.H. (Shaw, 1956). 5. Ave. of

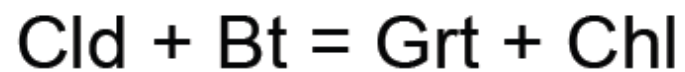
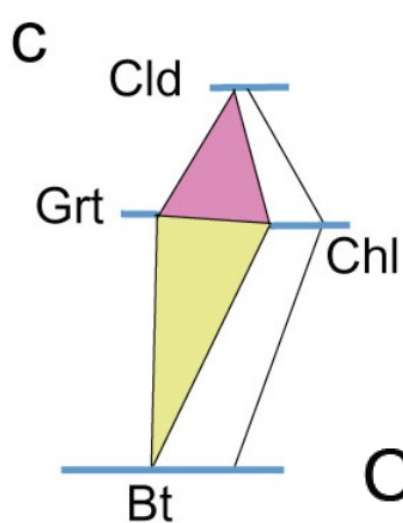
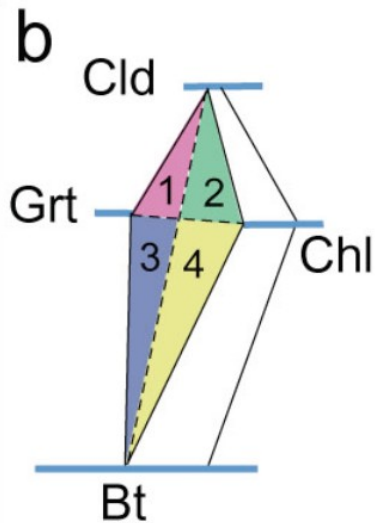
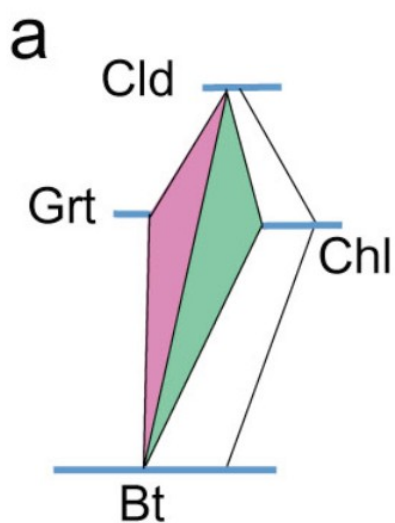
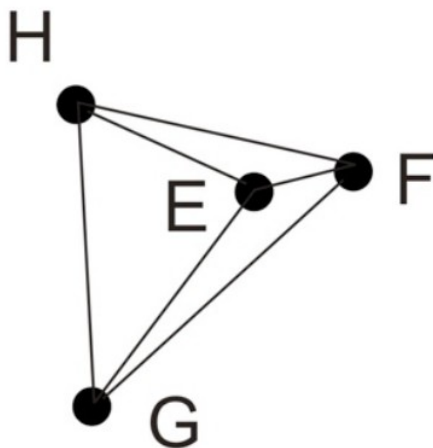


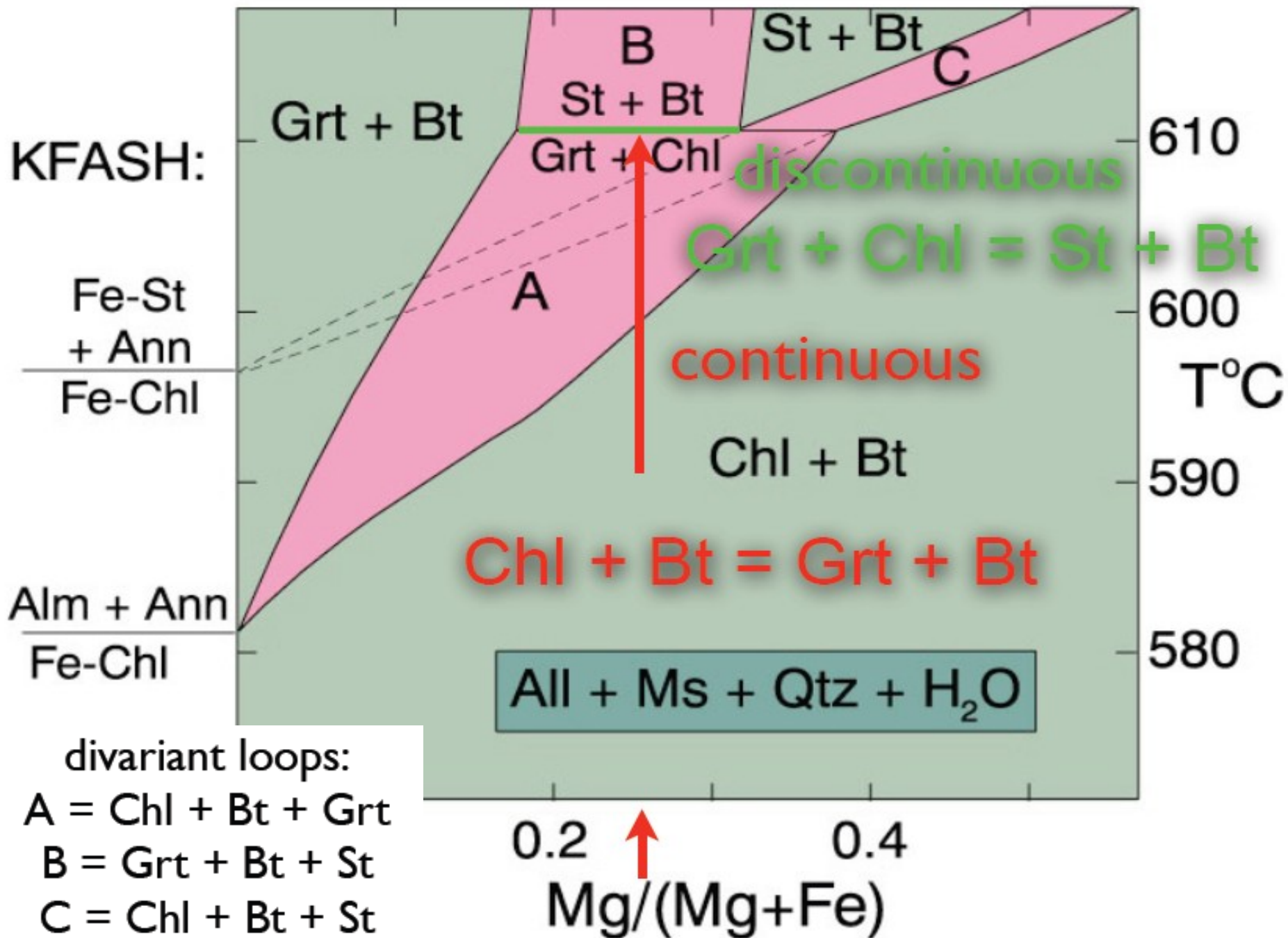
- Diagramy ilustrují metamorfózu metapelite v Bt zóně
- Kontinuální reakce zvětšuje pole Ms-Bt-Chl a Ms-Kfs-Bt

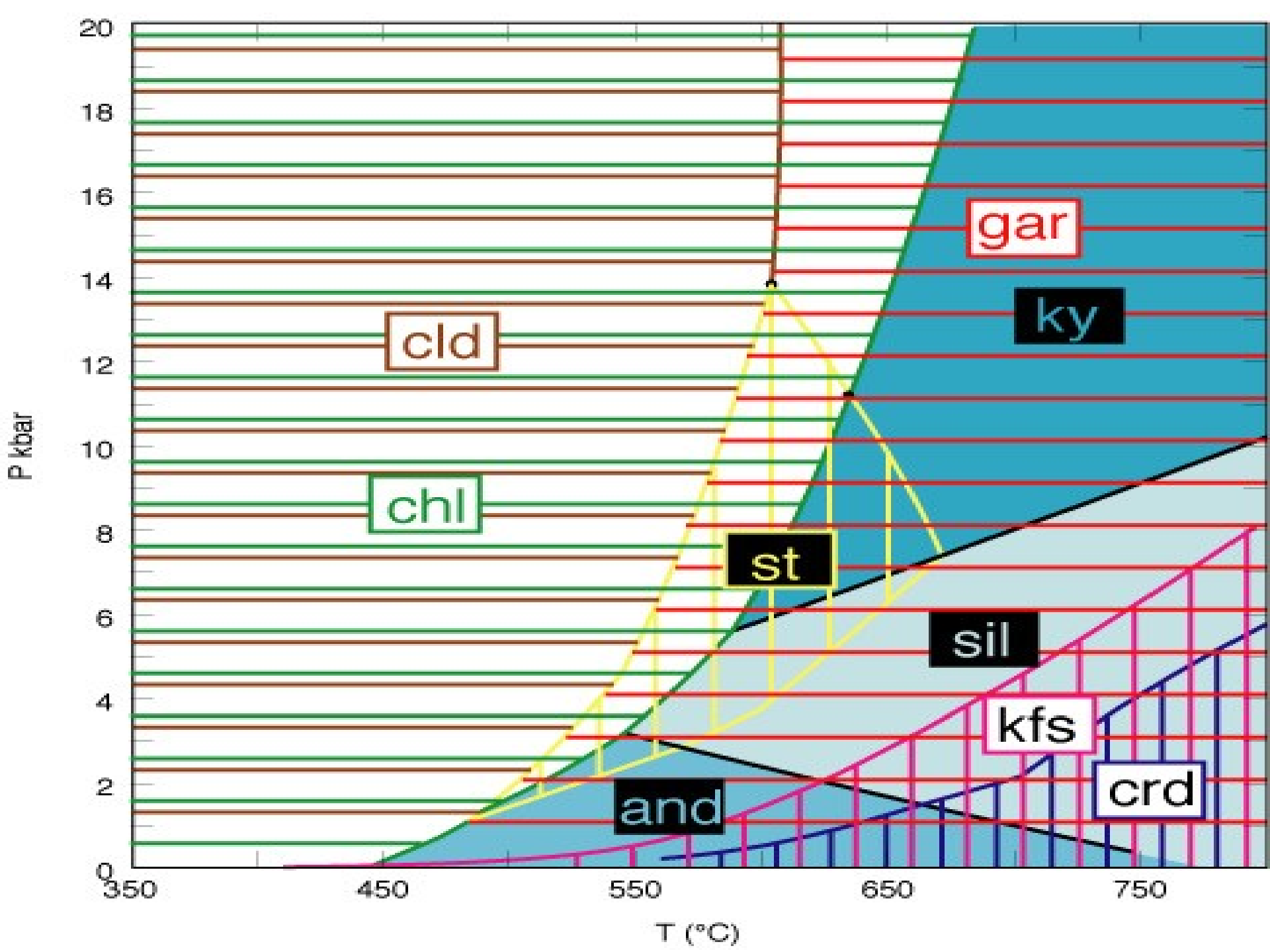
Tie Line Flip Reaction



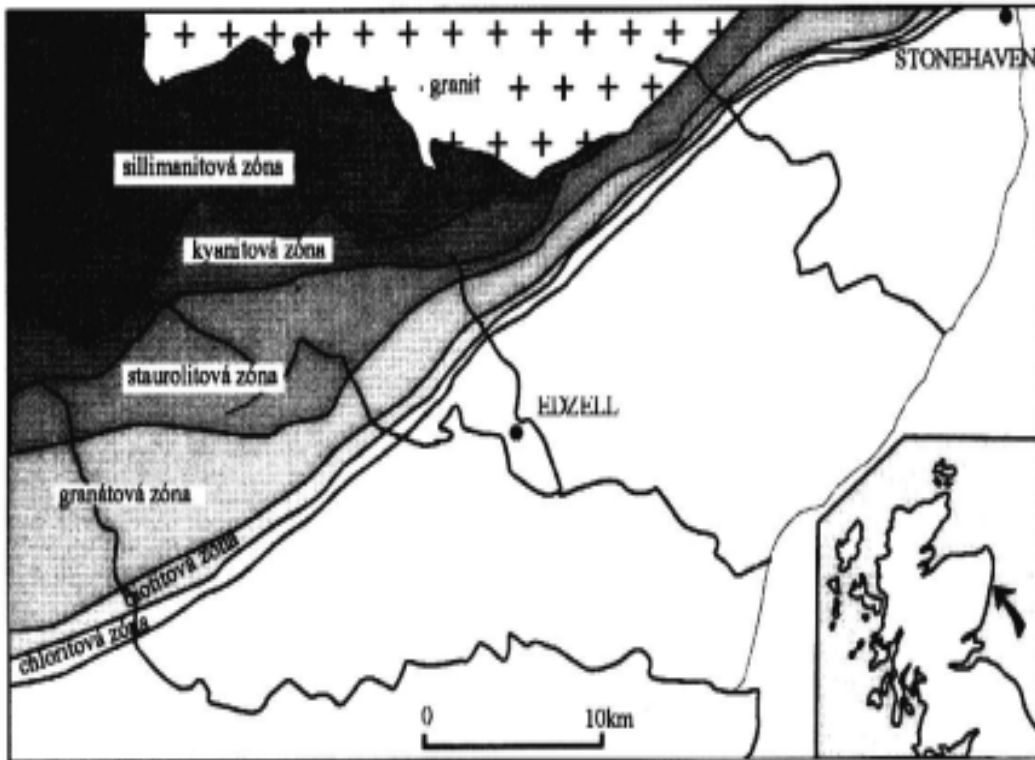
Terminal Reaction



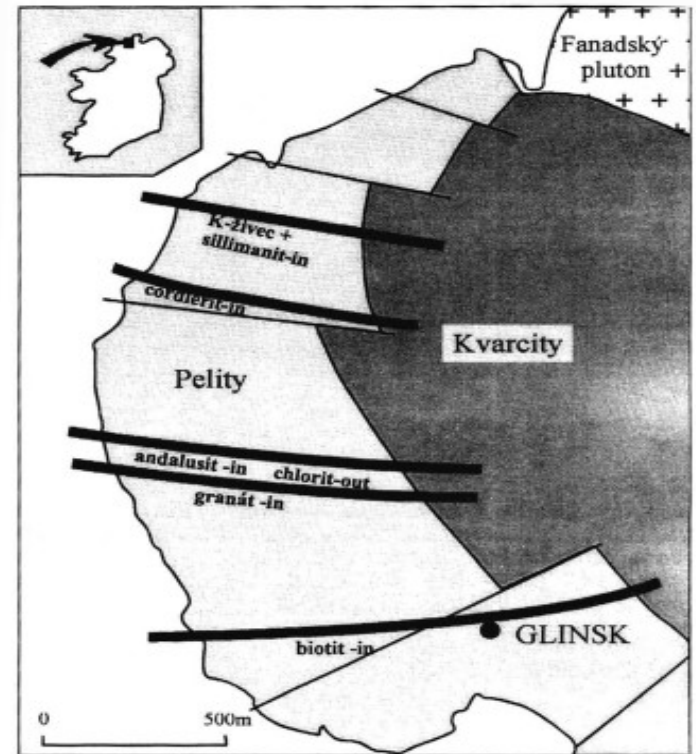




- v SV Skotsku byla definována metamorfóza typu Buchan
- staurolit (biotit) – cordierit – andalusit – sillimanit.
- kontaktní metamorfóza a je výsledkem nízkého poměru P/T



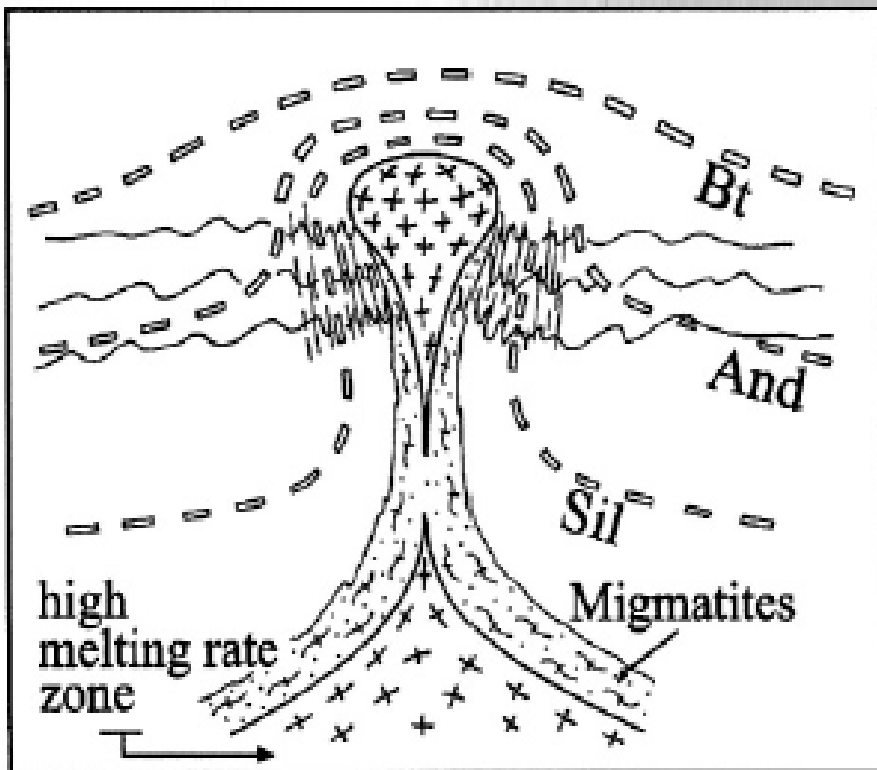
Metamorfnní zóny vymapované barrovienské met. v metapelitech ze Skotska (Konopásek et al. 1998 podle Tilley, 1925)



Metamorfnní zóny kontaktní metamorfózy (typ Buchan) vyvinuté v oblasti Fanadského plutonu (Konopásek et al. 1998 podle Yardley 1989)

Metamorfóza v metapelitech za nízkých tlaků

- v nízkotlakých metamorfních terénech (<5 kbar za teploty 700°C) je posloupnost stabilních minerálních asociací v metapelitech poněkud odlišná od barrovinské metamorfózy
- zdrojem tepla bývá většinou magmatická intruze (tlaky 1-4 kbar = hloubka 3 – 12 km)
- maximální teploty při kontaktní metamorfóze s granity nepřekročí teplotu 650°C
- kolem intruzivního tělesa vzniká kontaktní aureola
- ve vysokoteplotní kontaktní aureole kolem bazických a ultrabazických hornin z pláště mohou být teploty až 900-1000°C

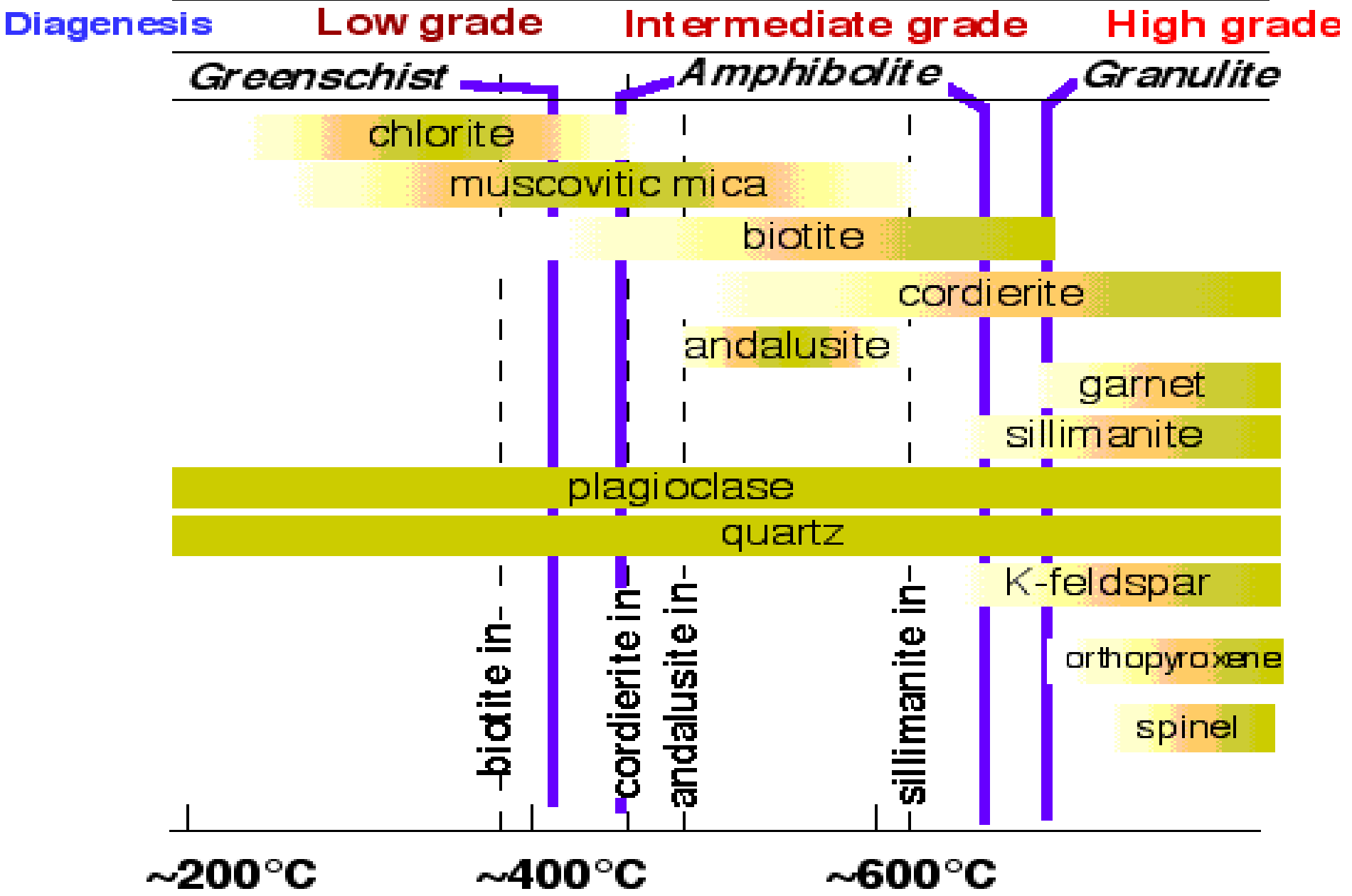


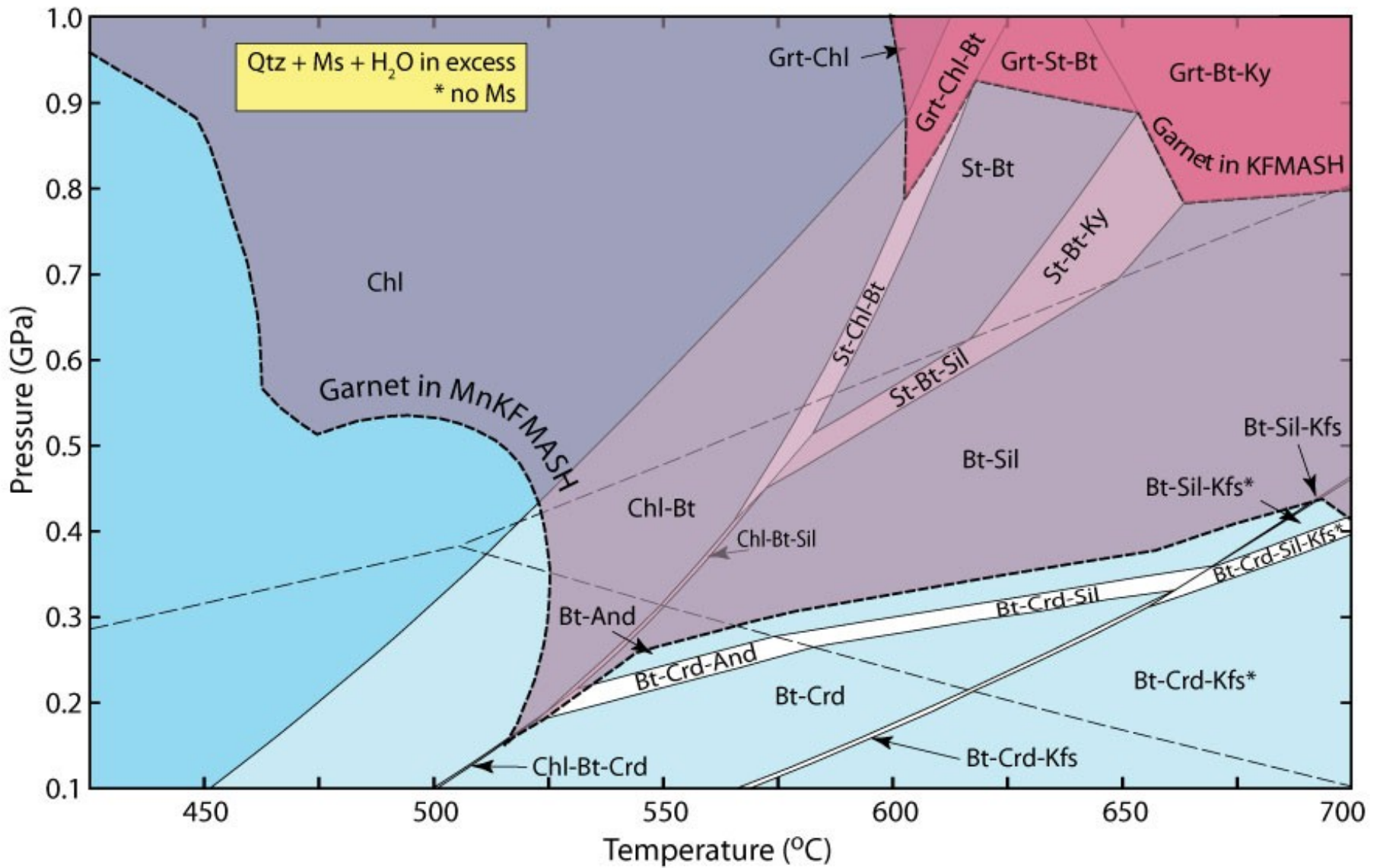
Schématický diagram dynamického vmístění granitového plutonu (hypotéza diapirického plutonu, Flood a Vernon, 1978).

Pluton vzniká v spodní kůře (prciálně natavené) a v důsledku nižší hustoty stoupá.

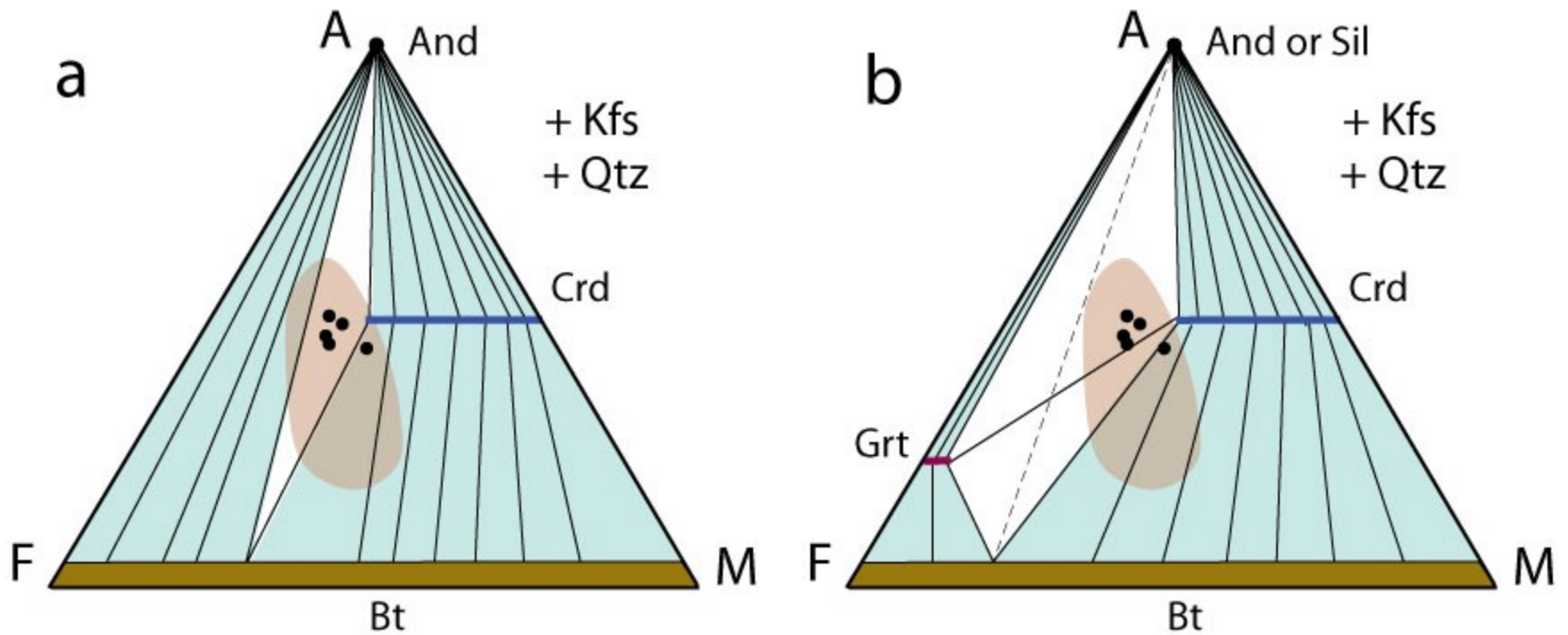
S intruzí je svázána deformace okolních hornin a parciální tavení hlavně v spodní části plutonu

Progressively metamorphosed pelite *Low PT series*





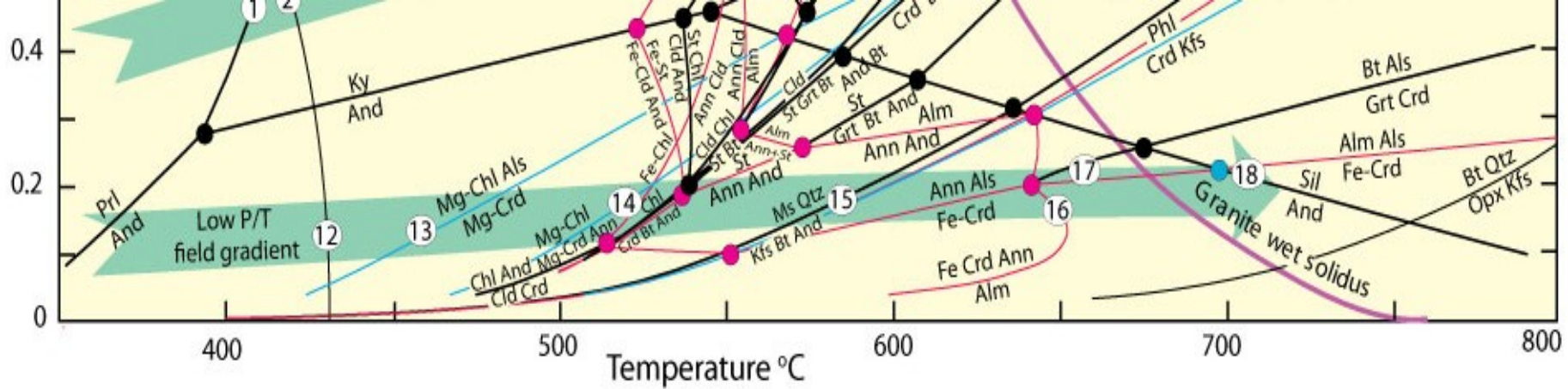
P-T pseudosekce *KFMASH* pro X_{bulk} : $\text{Al}_2\text{O}_3 = 45.80$, $\text{FeO} = 21.93$, $\text{MgO} = 19.59$, $\text{K}_2\text{O} = 9.01$ (in mol%) počítáno pomocí programu THERMOCALC, Tinkham et al. (2001). Winter (2010) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.



AFM diagram (promítaný přes Kfs) pro spodní facii pyroxenických rohovců.

a. Během metamorfózy se pole Crd-And-Bt posunuje směrem Mg koncovému členu. Andalusit je jen Al-bohatých pelitech

b. Granát s andalusitem je jen v Al-bohatých pelitech. Winter (2010) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.



AFM diagram pro granulitovou facii.

Cordierit vzniká reakcí 14 a přerušovaná čára Sil-Bt se mění na plnou Grt-Crd při reakci 17. Winter (2010) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

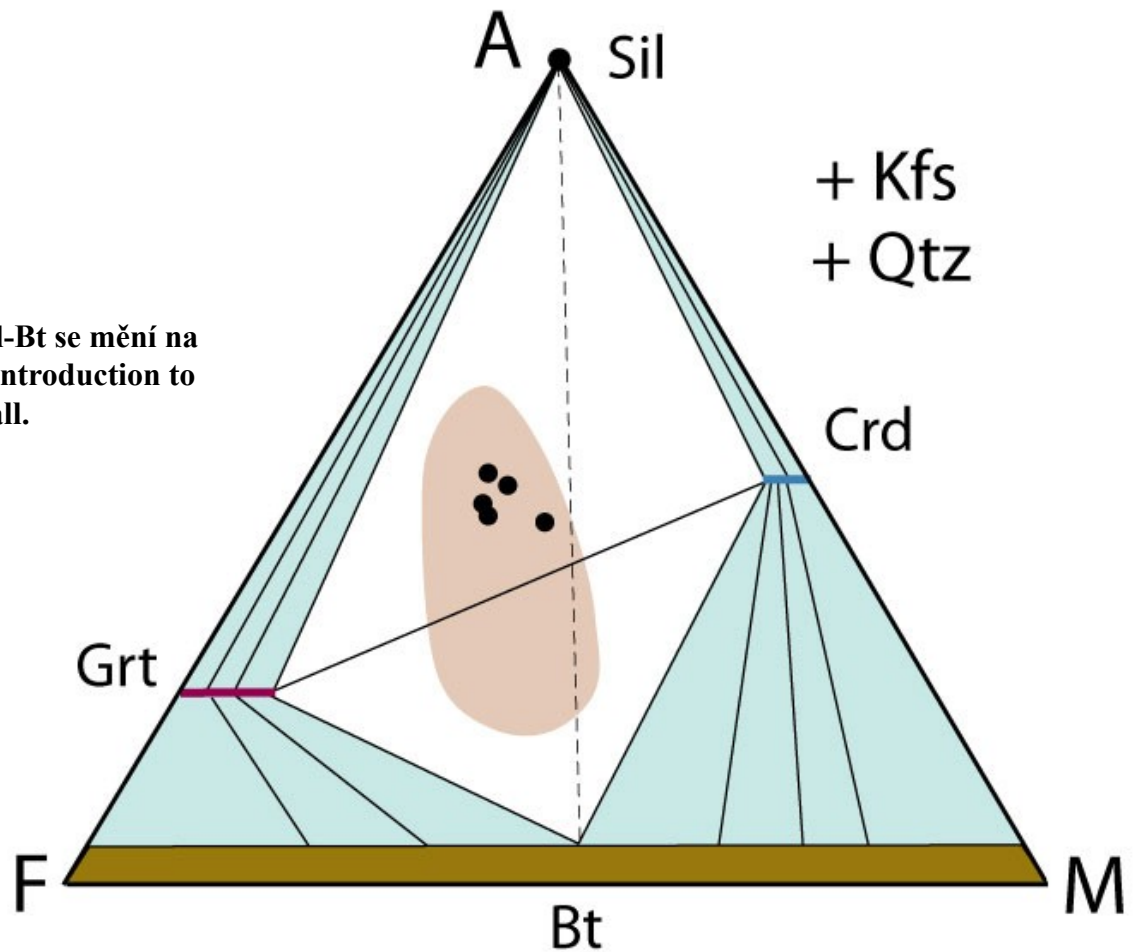
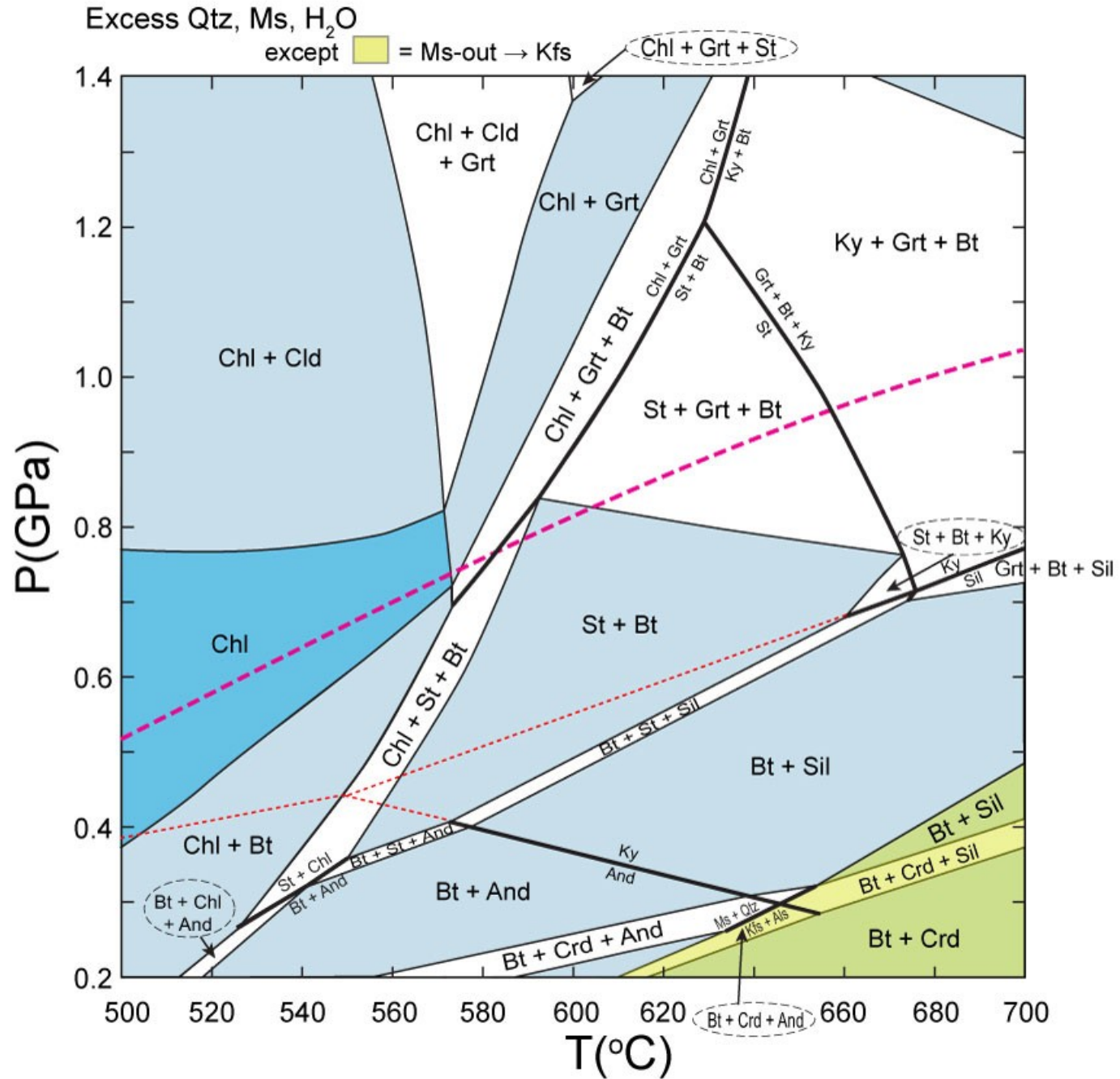
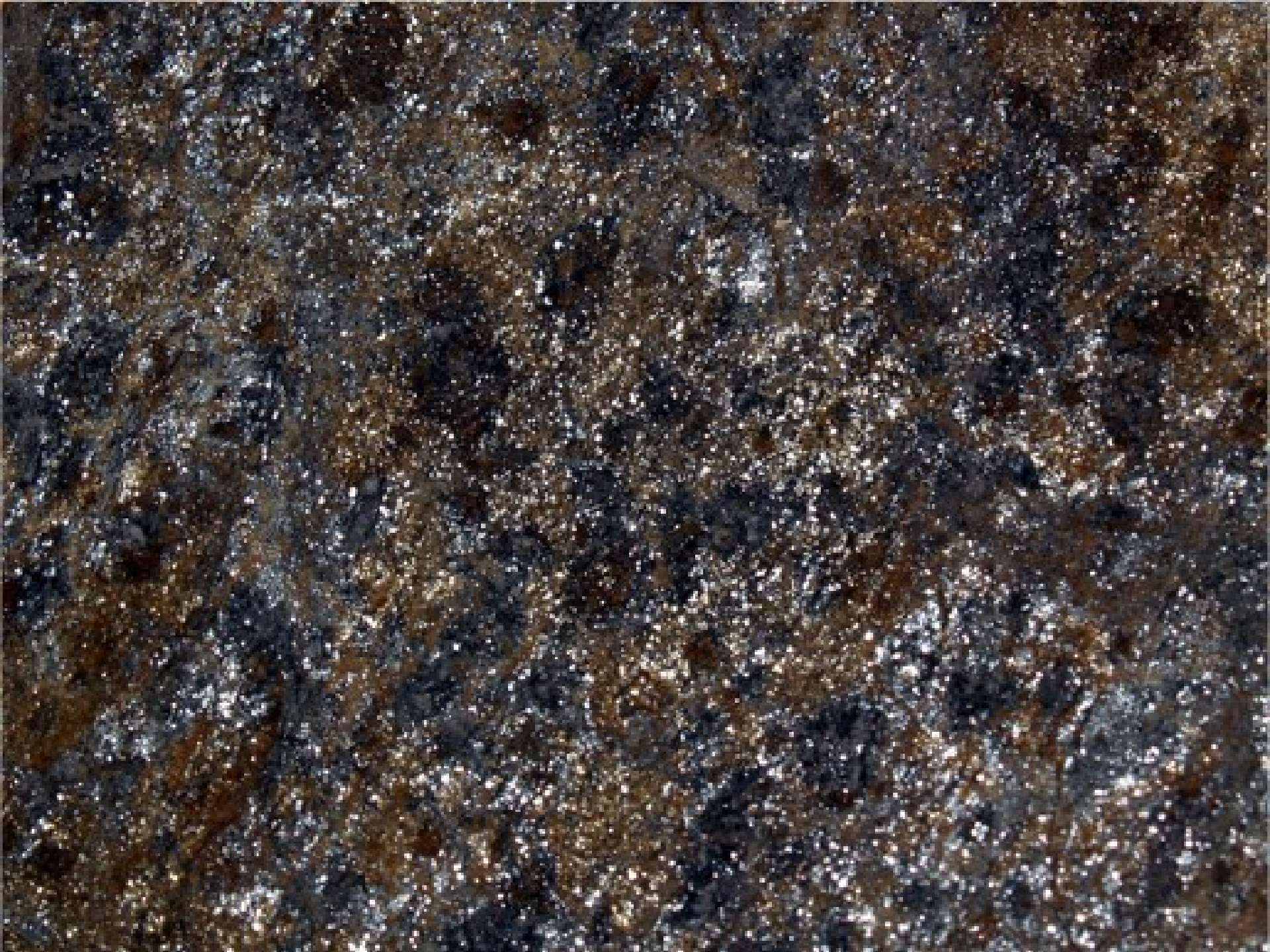


Figure 28.14. P-T pseudosection in *KFMASH* for mol% $\text{SiO}_2 = 76.14$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.25$, $\text{MgO} = 4.89$, $\text{FeO} = 7.33$, $\text{K}_2\text{O} = 3.39$. This composition has Qtz and Ms in excess and H_2O was set to saturated. Calculated using both THERMOCALC and PERPLEX and the November 2003 Holland-Powell internally-consistent thermodynamic database with quite similar results. Based on Powell et al. (1998). Extensions of Al_2SiO_5 polymorph reactions shown as dashed curves for clarity. Winter (2010) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

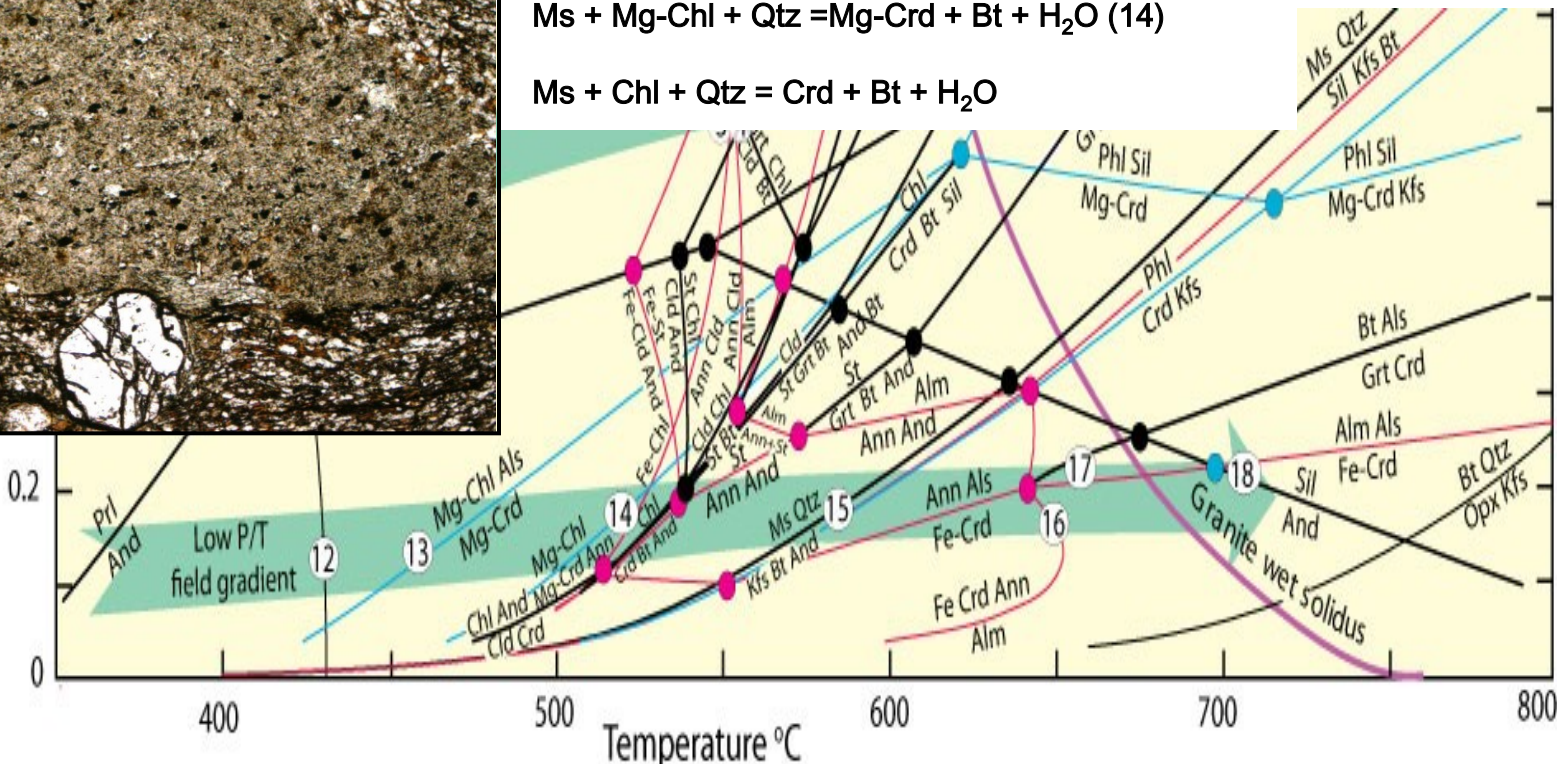
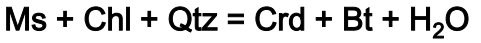
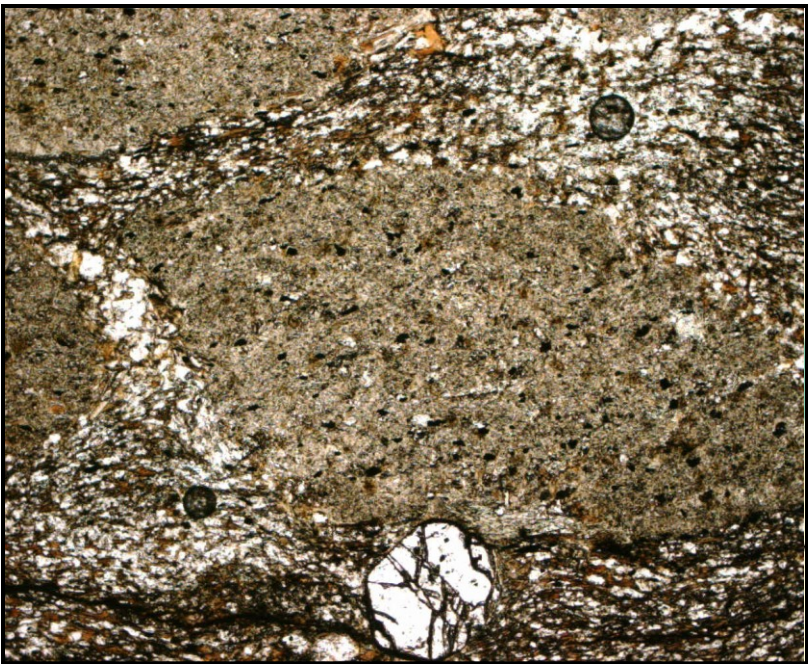




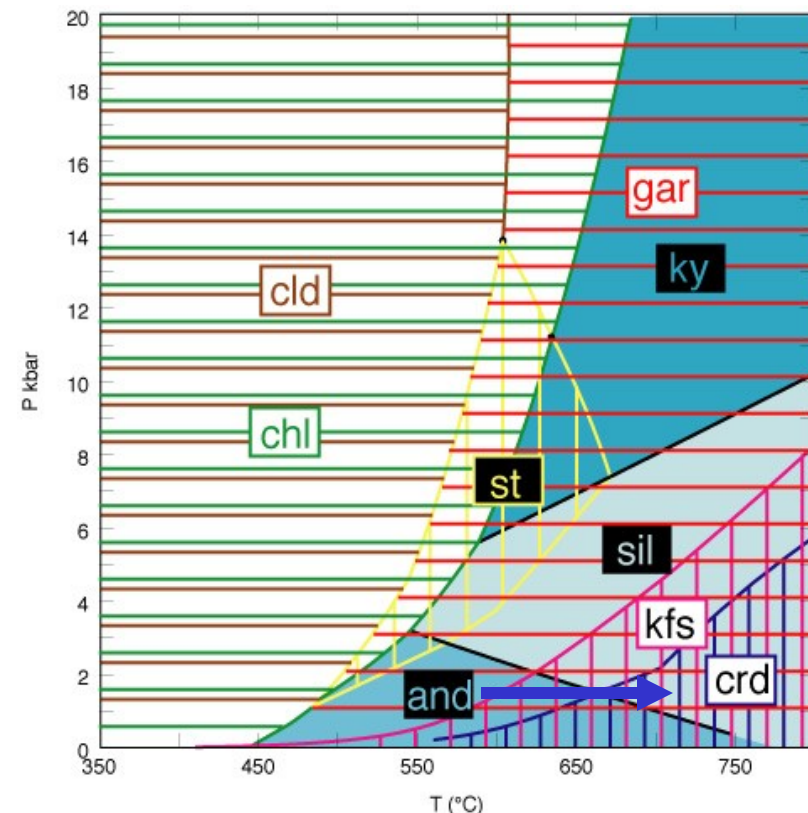
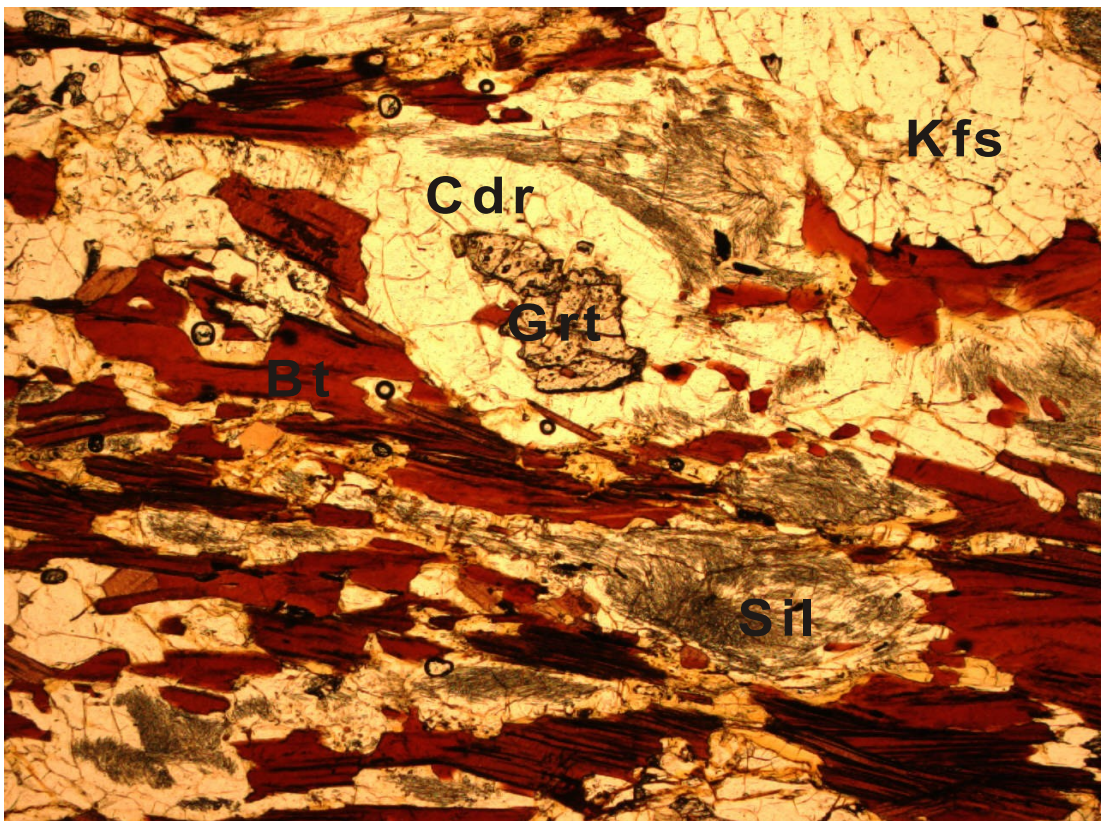


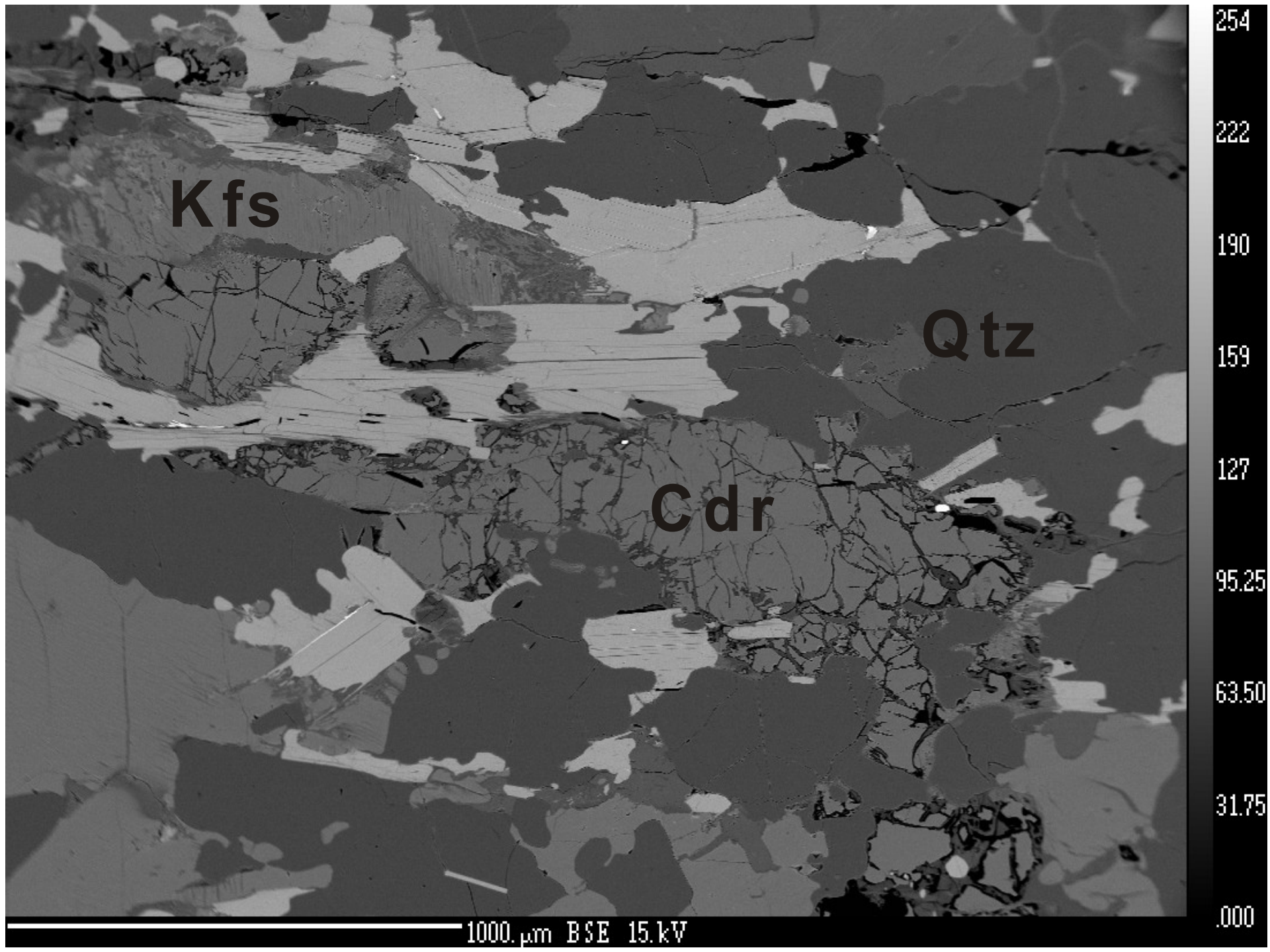


- substituce Fe – Mg má zásadní význam
- **cordierit** může obsahovat molekulární fluida jako H₂O a CO₂ ale reakce zahrnující **cordierit** mohou být počítány pro prostředí bez H₂O (n=0).
- **cordierit** v metapelitech má vyšší obsah než koexistující **granát** nebo **spinel**
- pole **cordieritu** se výrazně zvětšuje ve srovnání se systémem KFLASH
- kolem 530 C při 2 kbar se v metapelitech objevuje **cordierit**



- **granát + andalusit + křemen = cordierit**
- za vyšších teplot se objevuje **K-živec**, nebo tavenina (**K-živec + křemenem + H₂O**)
- **biotit + andalusit + křemen = cordierit+ granát**
- typické asociace asociace:
- **cordierit + granát + K-živec + biotit**
- **cordierit + granát + K-živec + andalusit (Sil)**





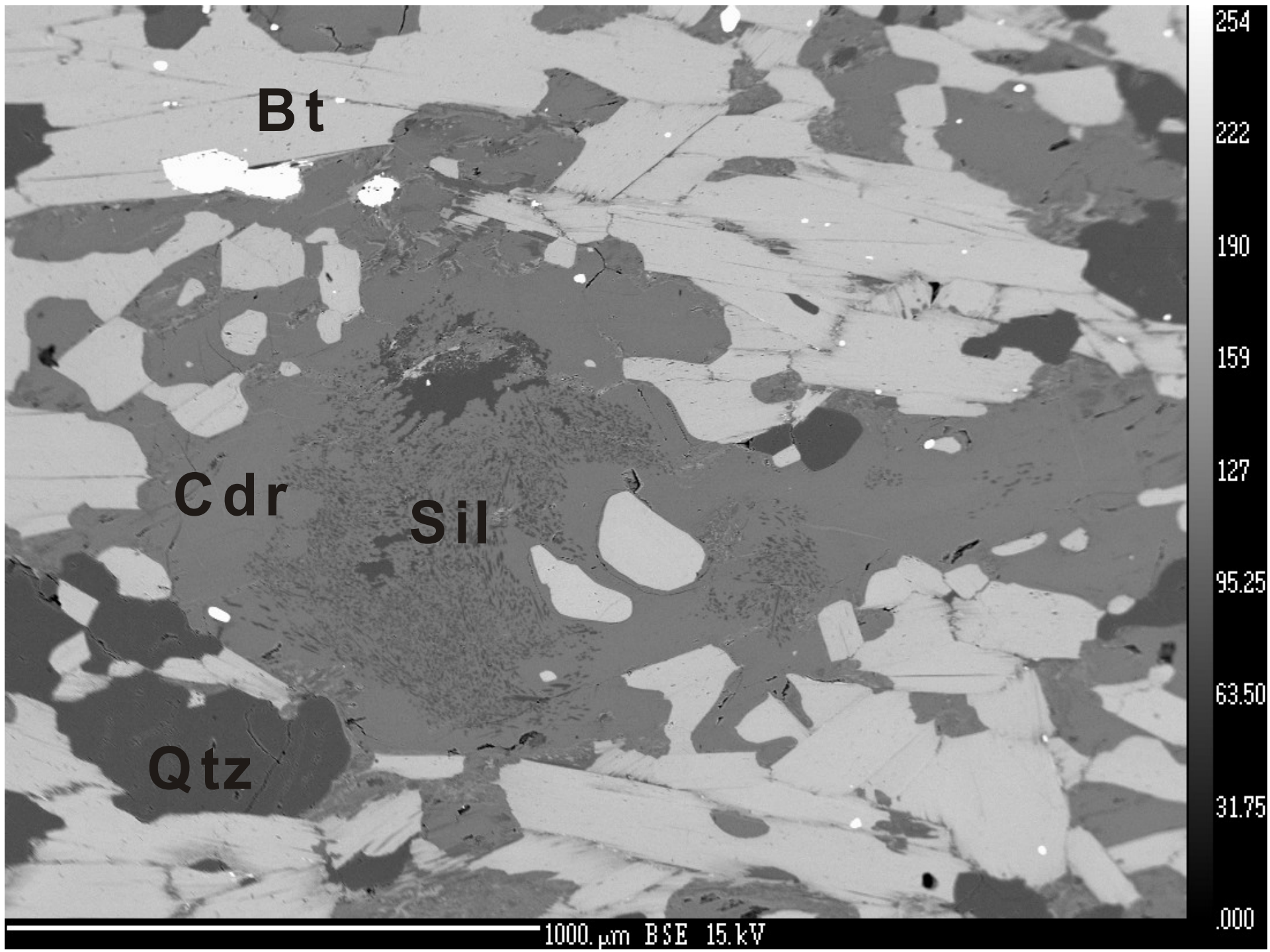
Kfs

Qtz

Cdr

1000. μm BSE 15.kV

254
222
190
159
127
95.25
63.50
31.75
.000



Bt

Cdr

Sil

Qtz

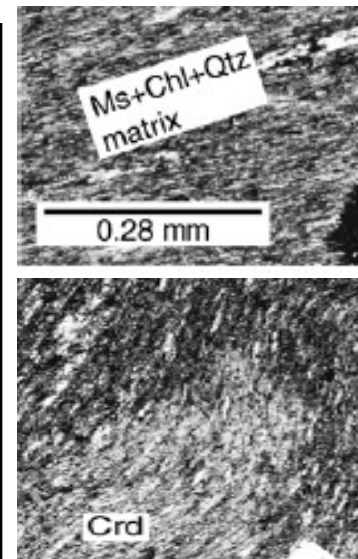
254
222
190
159
127
95.25
63.50
31.75
.000

1000. μm BSE 15 kV

3) Al-chudé pelity během kontaktní metamorfózy

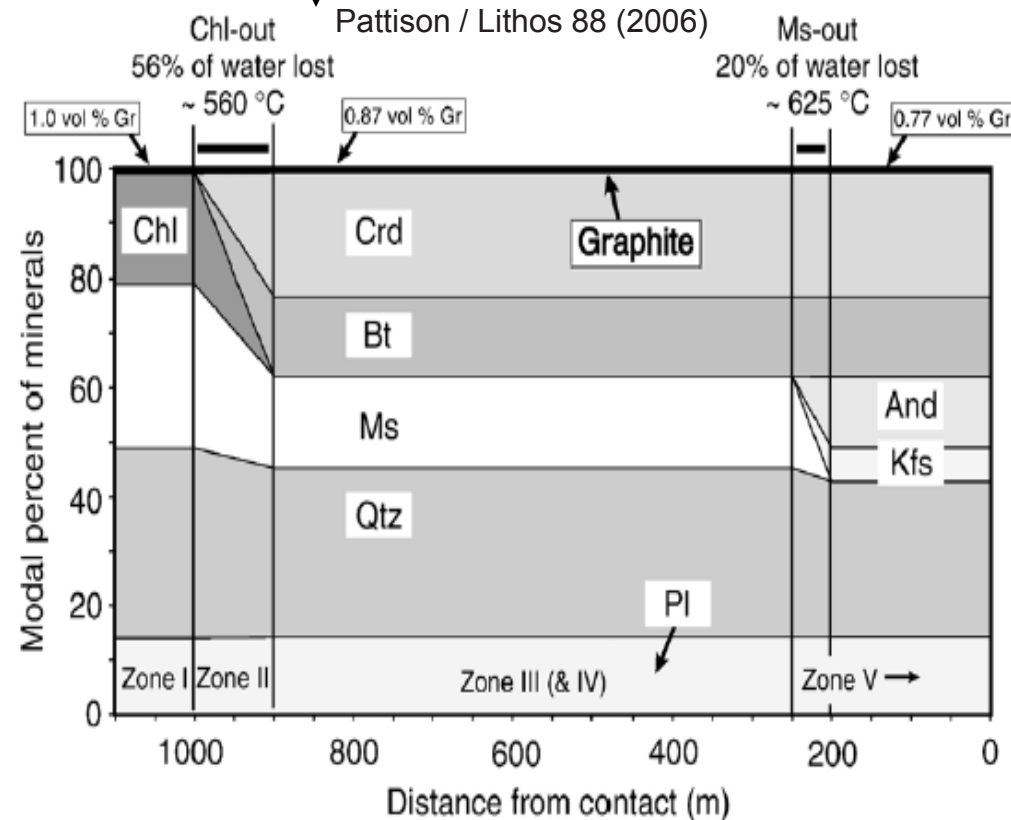
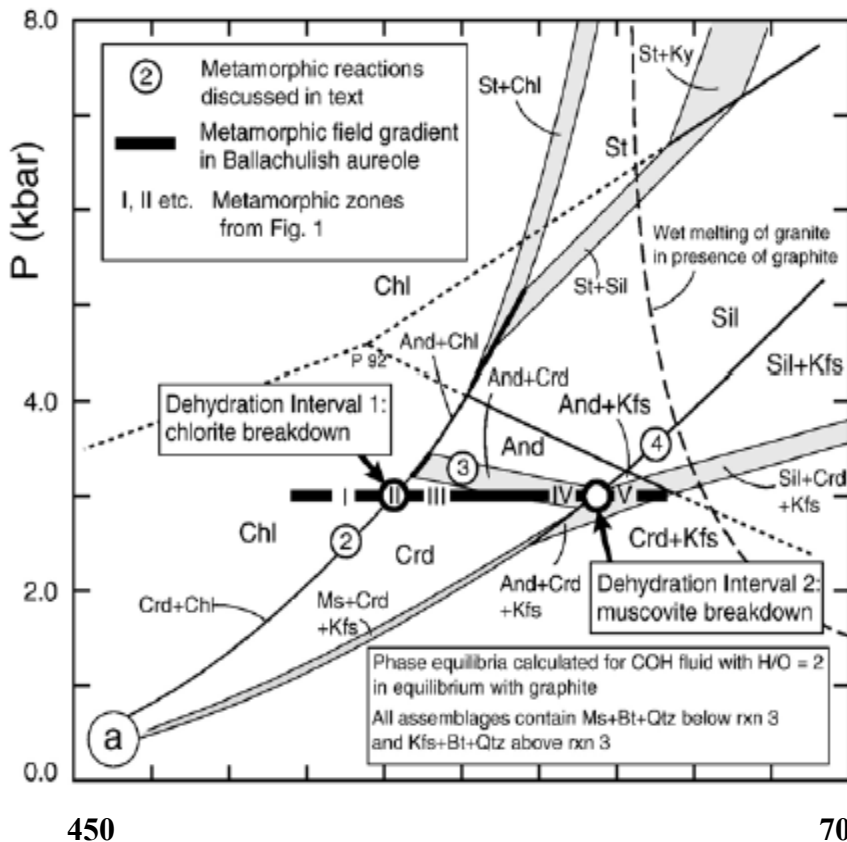
- Al-chudé pelity ve 350 °C a 3 kbar mají asociaci:

- I. chlorit + muskovit + křemen + plagioklas
 - II. $Ms + Chl + Qtz = Cdr + Bt + H_2O$ kontinuální reakce (2)
 - III. $Ms + Cdr = And + Bt + Qtz + H_2O$ (3)
 - IV. $Ms + Qtz = And + Kfs + H_2O$ (4)
 - V. andalusit = sillimanit
- konečná asociace je: $Sill + Cdr + Kfs + Bt + Ms + Qtz + Pl$

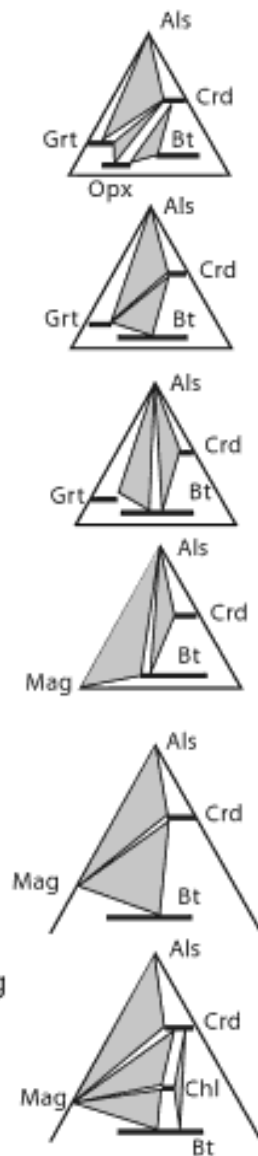
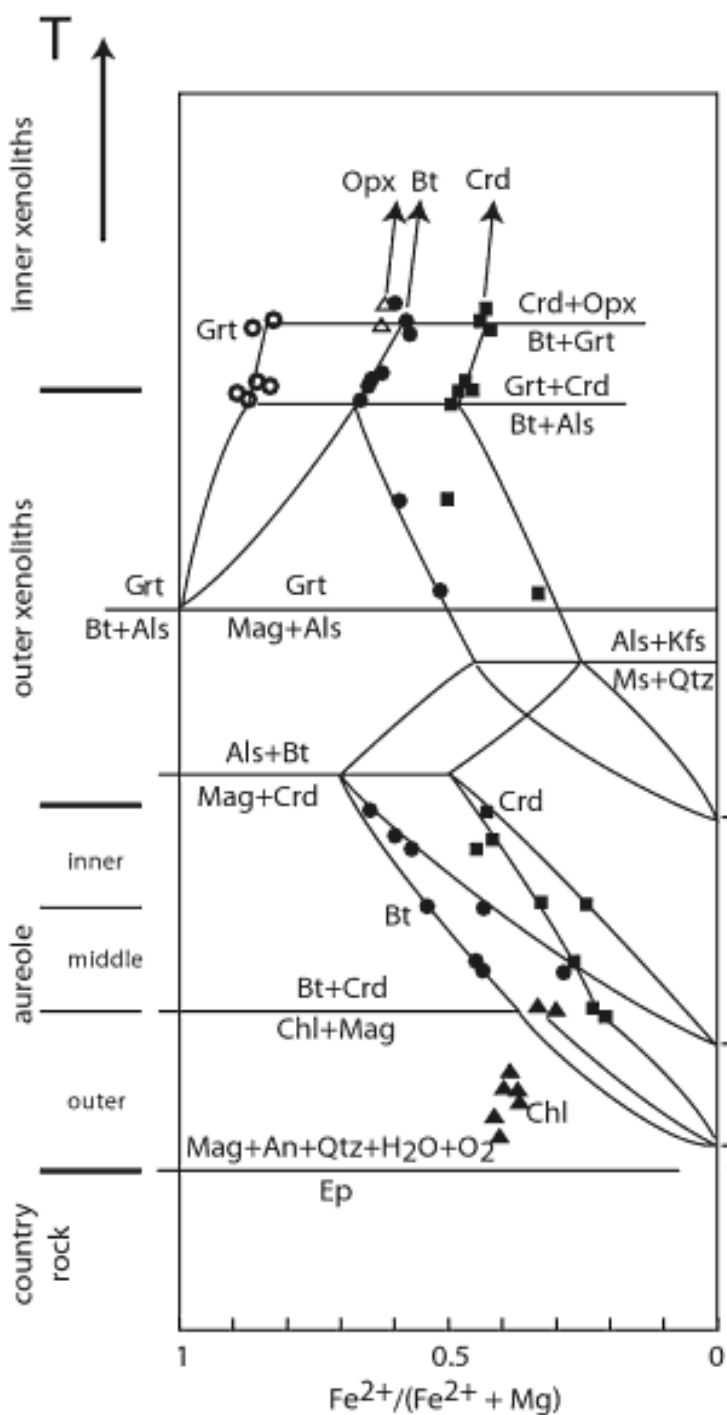


I. Ms + Chl + Qtz

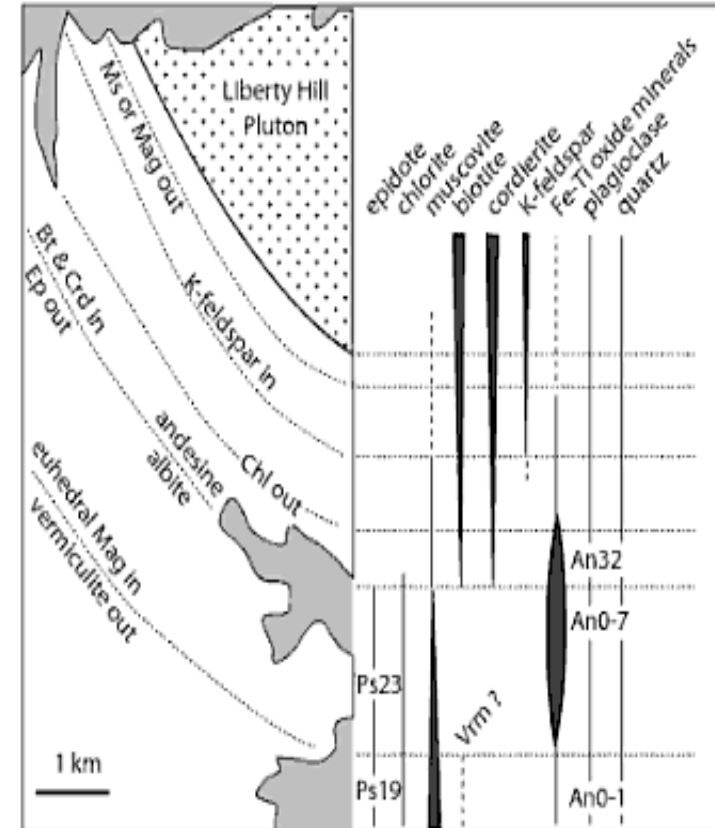
III. Ms + Ms + Cdr + Bt







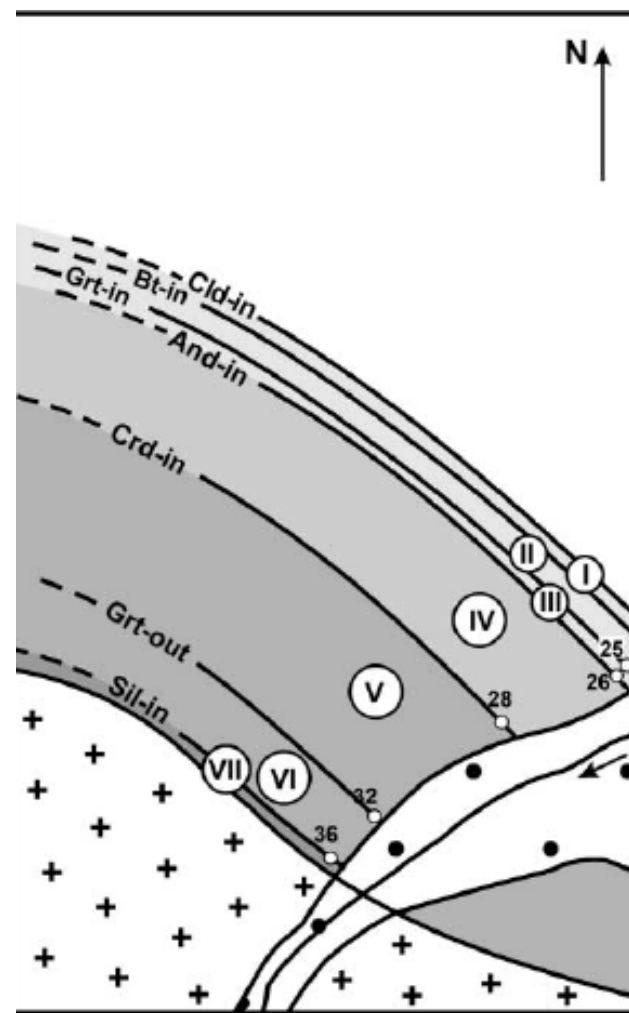
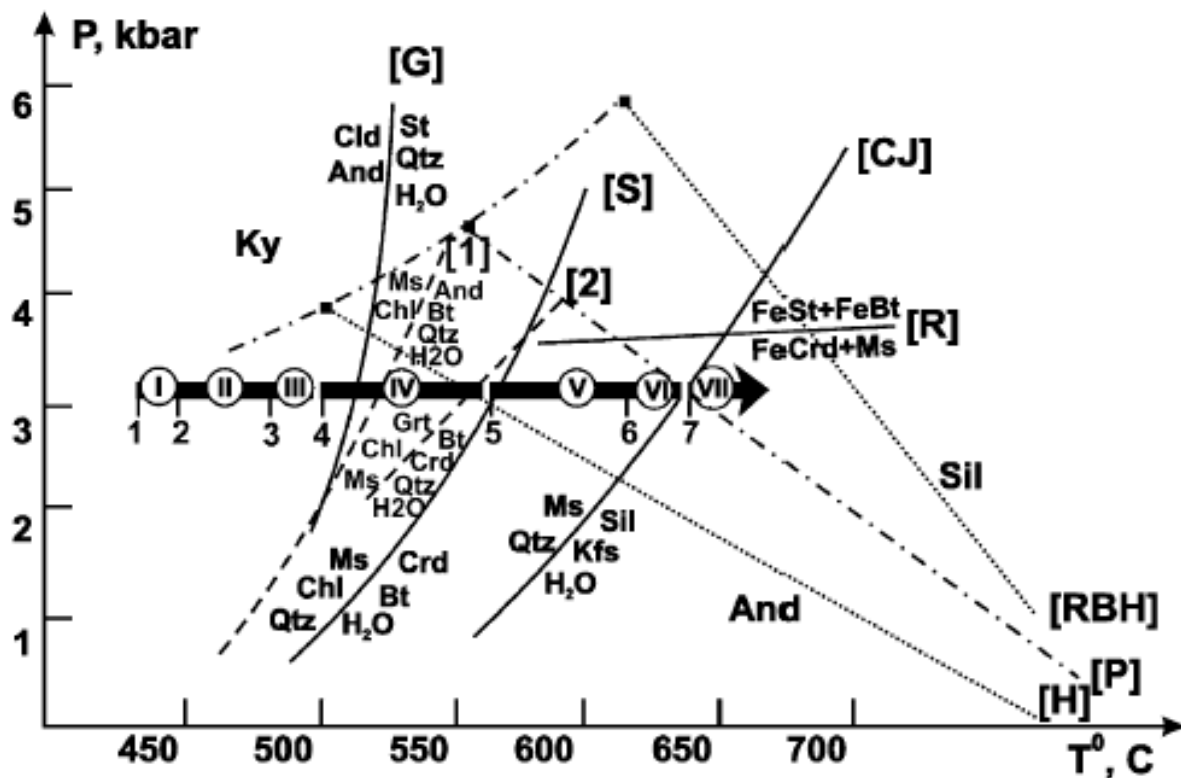
- Složení minerální asociace je výrazně závislé na chemickém složení metamorfované horniny



Vývoj minerálního složení metapelite v kontaktní aureole Vernon-Clarke 2008/ Principles of Metamorphic Petrology

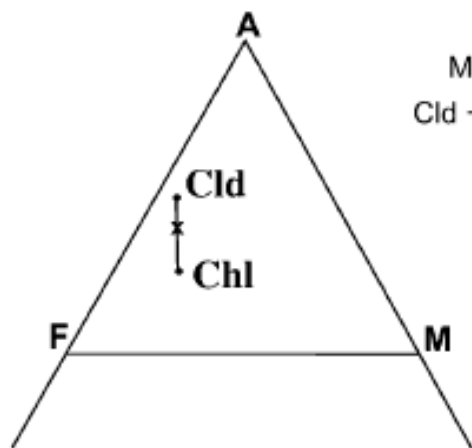
Příklad kontaktní metamorfózy

- Okolní hornina Chl + Ms + Pl + Qtz + Rt
- I. Cld + Ms + Chl + Pl + Qtz + Ilm + Rt
- II. Bt + Cld + Ms + Chl + Pl + Qtz + Ilm
- III. Grt + Bt + Cld + Ms + Chl + Pl + Qtz + Ilm
- IV. And + Bt + Grt + Ms + Chl + Pl + Qtz + Ilm
- V. Crd + And + Bt + Ms + Pl + Qtz + Ilm + Chl + Grt
- VI Crd + And + Bt + Ms + Pl + Qtz + Ilm
- VII Sill + Kfs + Cdr + Bt+Qtz + Ilm + Ms



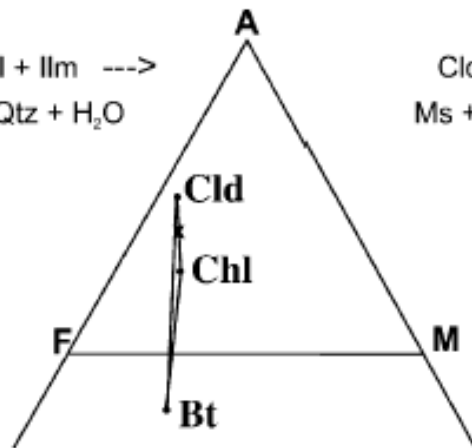
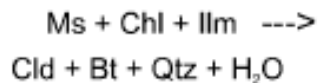
Schematický P–T diagram ukazující pozici metamorfních zón a izográd v kontaktní aureole Ayakhtinsk (Likhanov et al. 2001, syntetizovaná data více autorů (Pattison, 1992 Chatterjee a Johannes, 1974, Ganguly, 1969, Richardson, 1968 a Seifert, 1970). Isograda: I = Cld-in, II Bt-in, III Grt-in, IV And-in, V Crd-in, VI Grt–Chl-out a VII Sil–Kfs-in.

Chloritoid zone



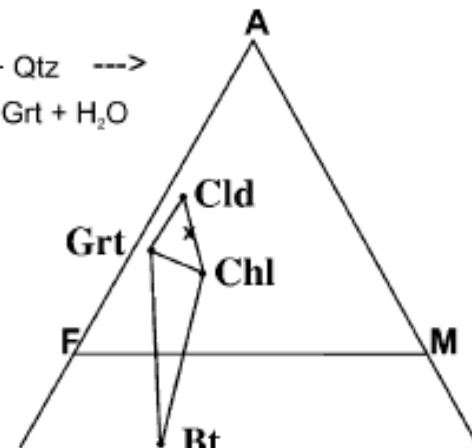
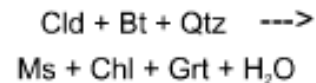
+Ms+Pl+Qtz+Ilm+H₂O

Biotite zone



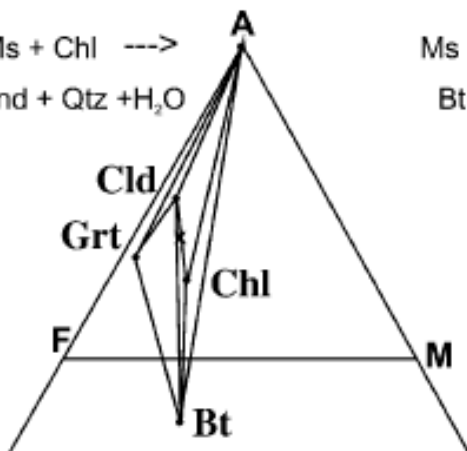
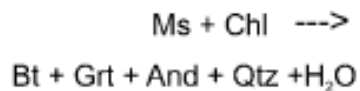
+Ms+Pl+Qtz+Ilm+H₂O

Garnet zone



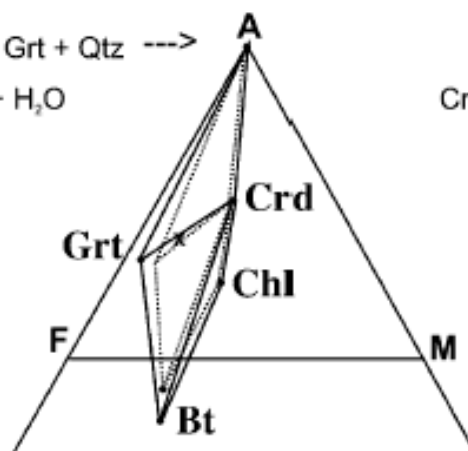
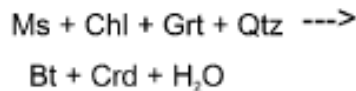
+Ms+Pl+Qtz+Ilm+H₂O

Andalusite zone



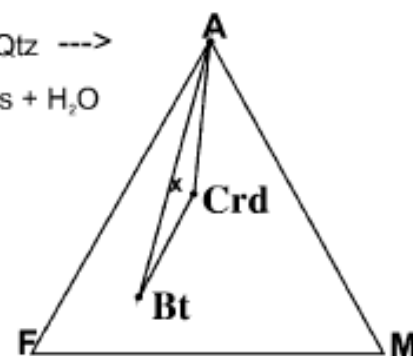
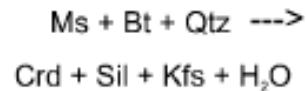
+Ms+Pl+Qtz+Ilm+H₂O

Cordierite zone

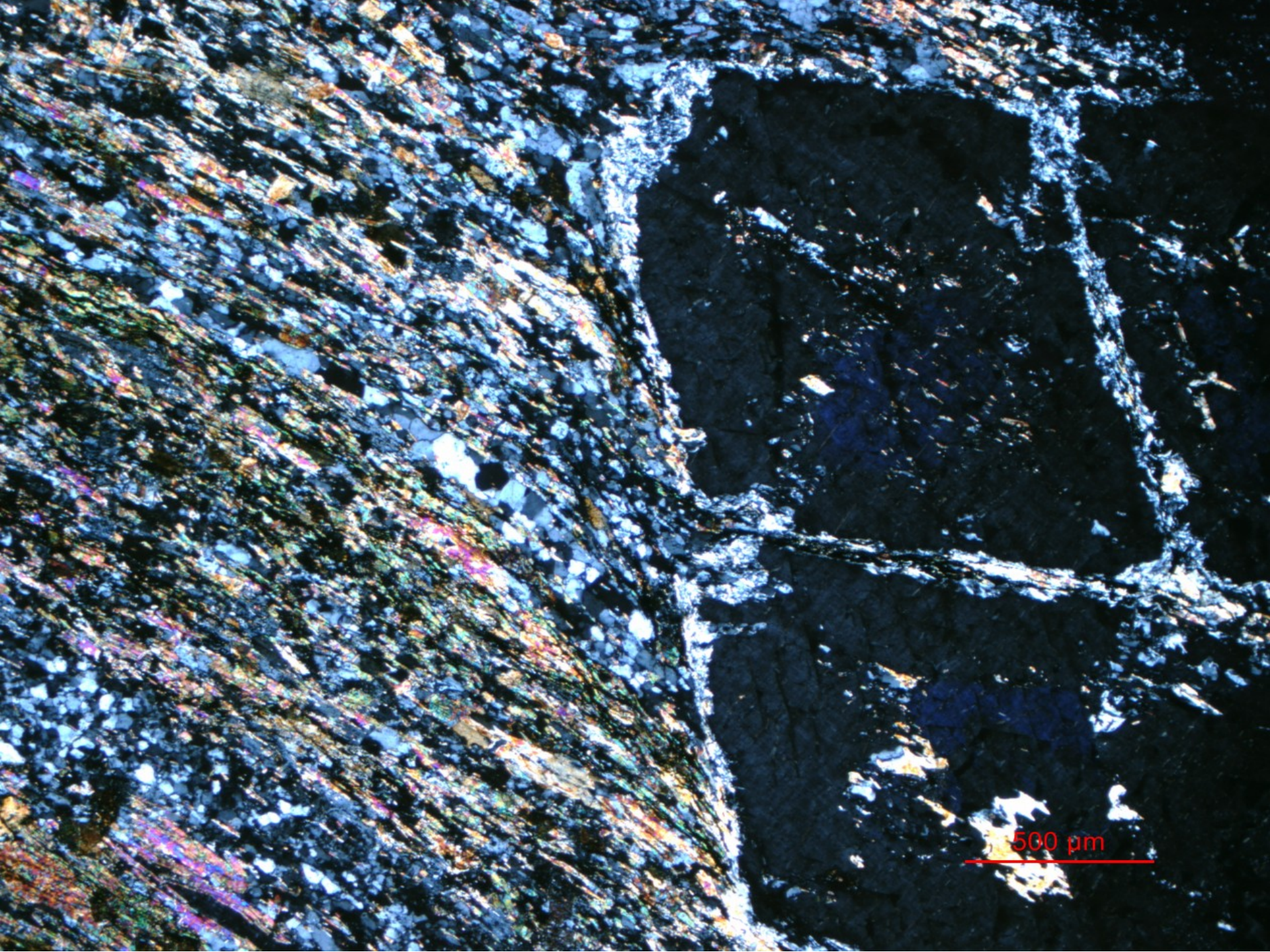


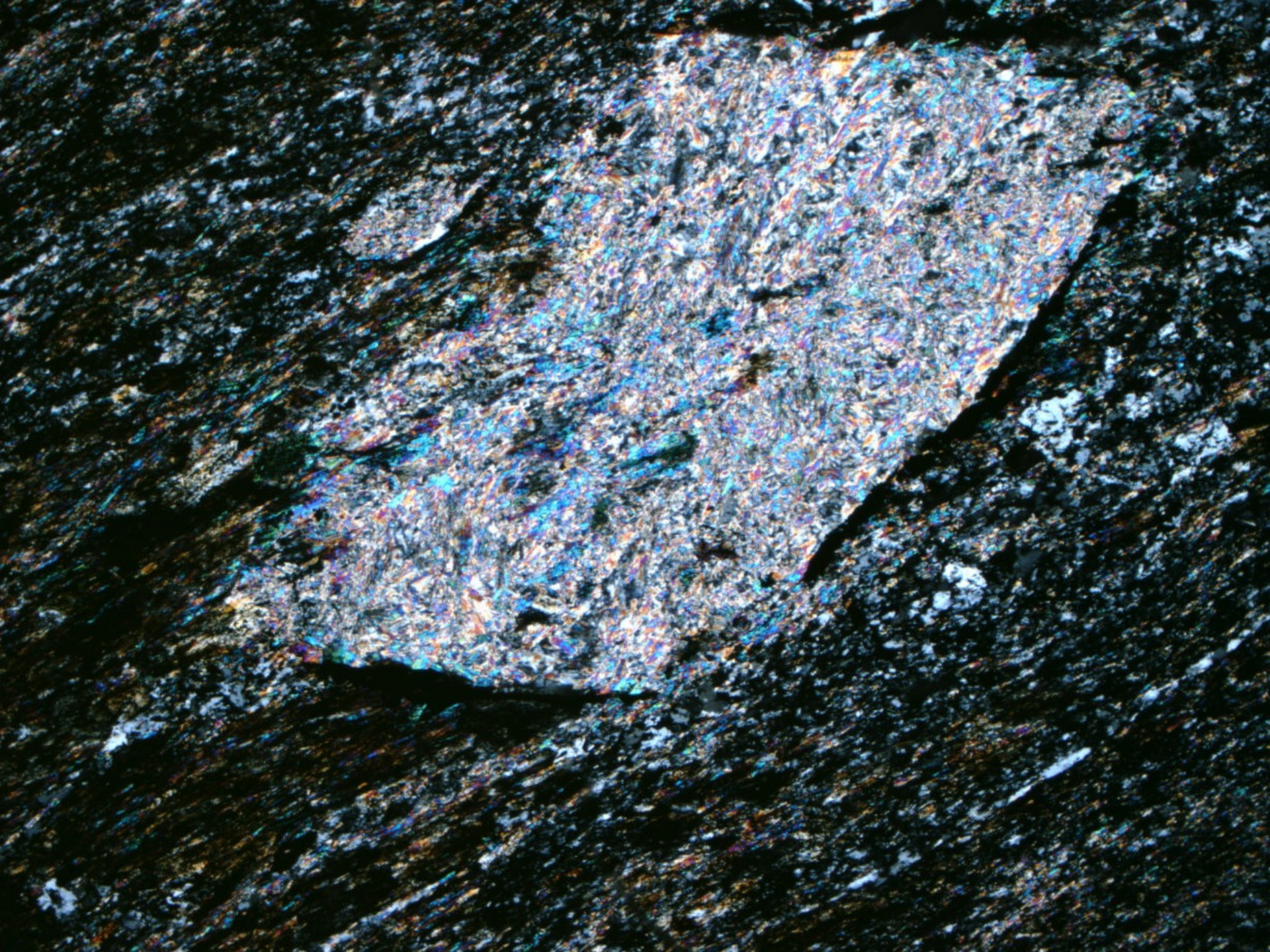
+Ms+Pl+Qtz+Ilm+H₂O

Sillimanite-K feldspar zone

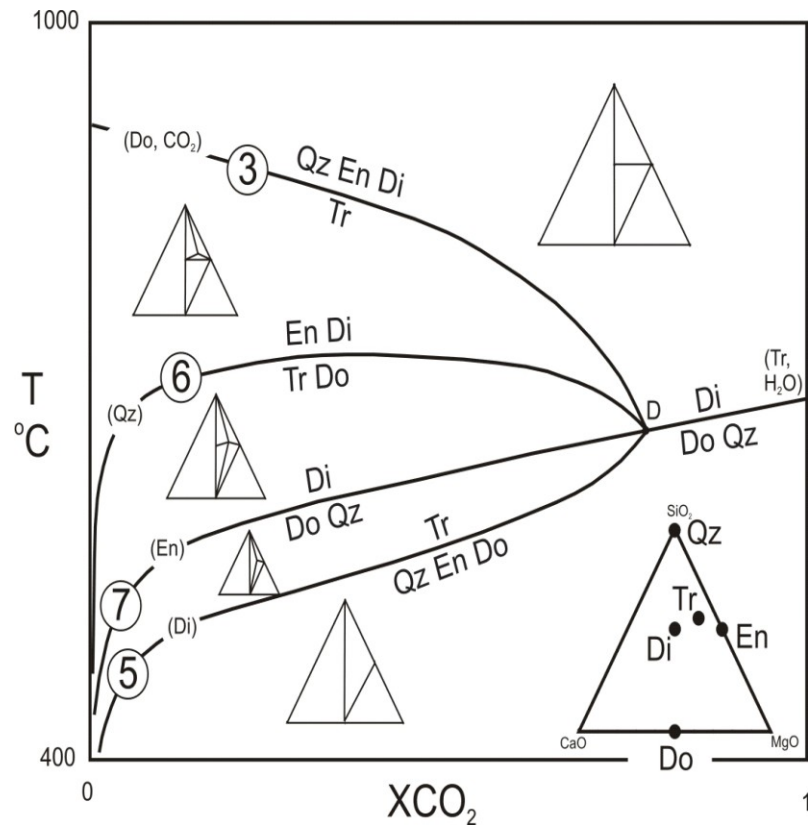
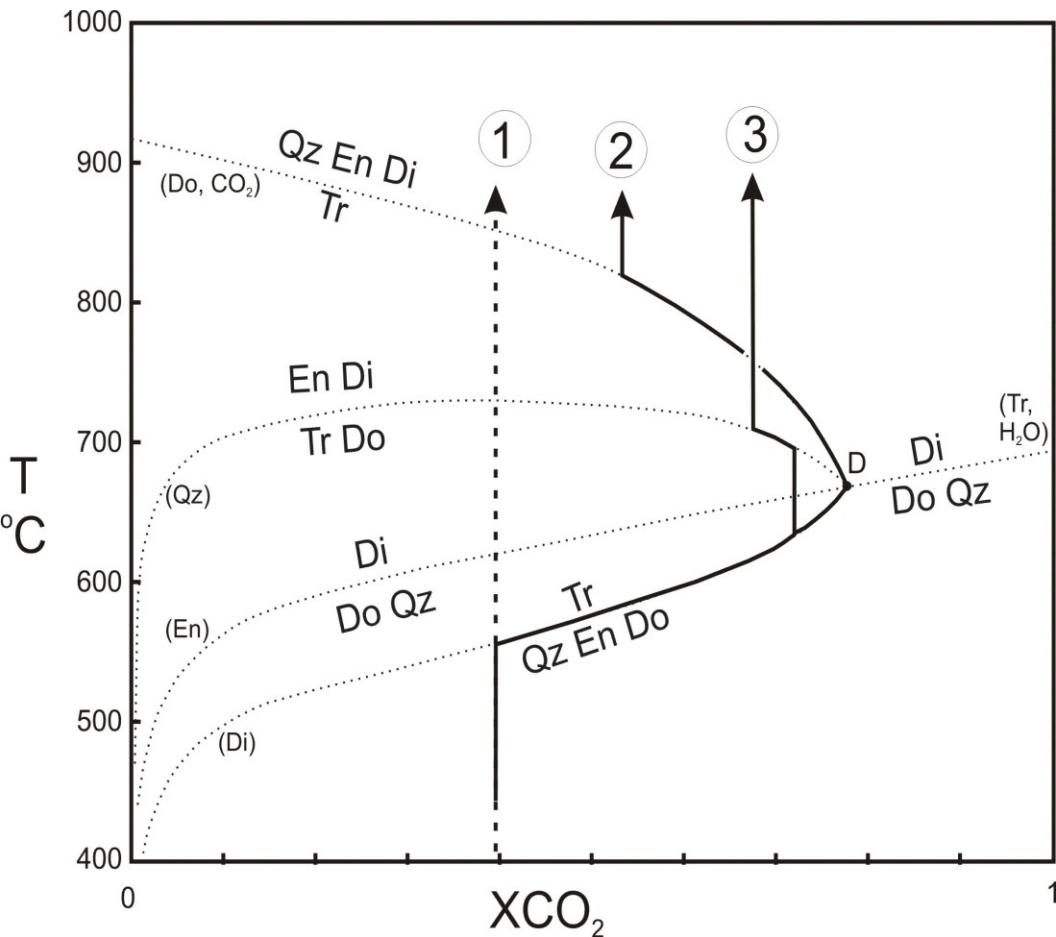


+Kfs+Pl+Ilm+H₂O





4) Vývoj chemického složení fluid během kontaktní metamorfózy



Převzato http://serc.carleton.edu/research_education/equilibria/TXdiagrams.html

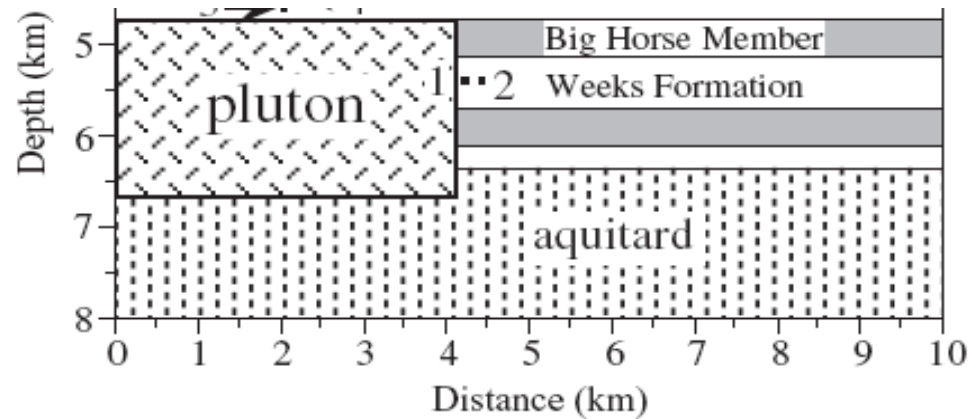
Tři případy průběhu reakcí v systému CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂. Rozdíl je dán rozdílným poměrem množství fluidní fáze a minerálů nebo odlišným množstvím některých minerálních fází.

V prvním případě je objem fluid výrazně větší než objem horniny (otevřený systém) fluidy horninou pronikají a udržují stabilní XCO₂

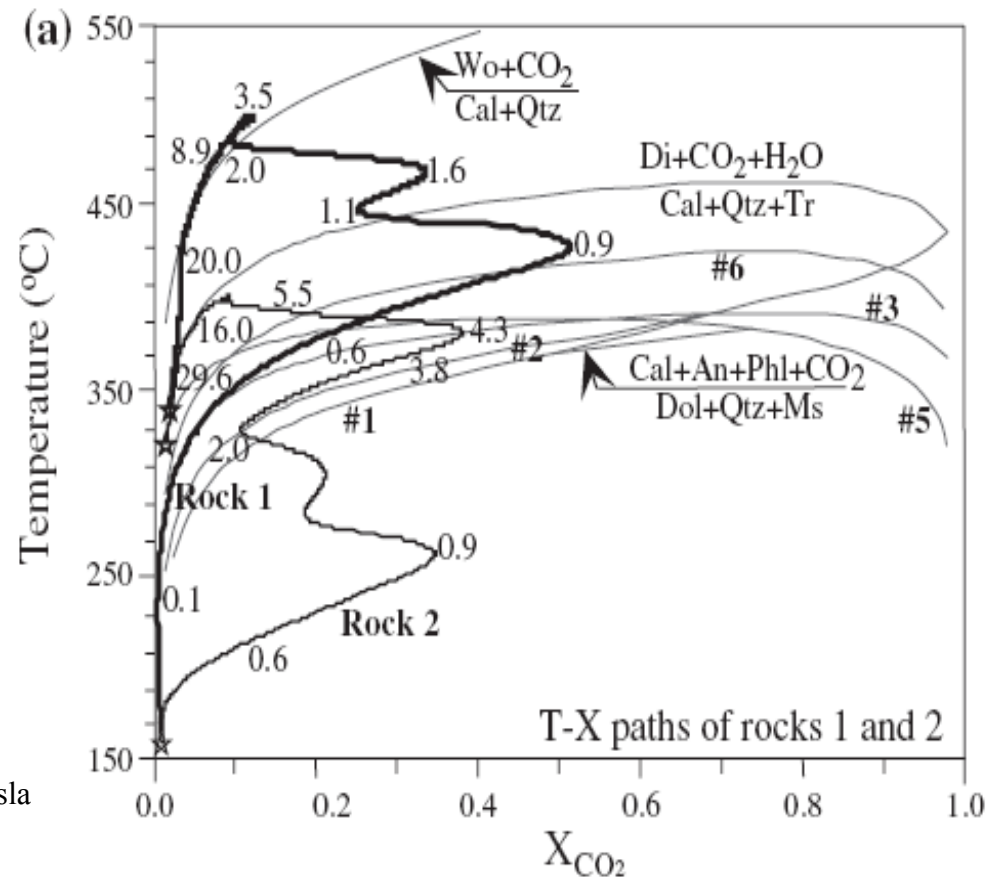
Druhý případ reprezentuje uzavřený systém v němž během vzniku Tr roste obsah CO₂, protože se tento plyn uvolňuje a naopak se konzumuje H₂O, teplota postupně stoupá až do bodu D. Při dalším vzrůstu teplot se tremolit začíná rozpadat a uvolňuje se H₂O dokud není spotřebován všechen Tr.

V třetím případě je všechen Qtz spotřebován před dosažením bodu D. K další reakci dochází až při rozpadu Tr v důsledku reakce s Dol.

- V okolí kontaktních aureol se často mísí magmatická a sed nebo met. fluida.
- V důsledku teplotního působení magmatu dochází k výraznému proudění fluid což ovlivňuje vývoj minerálních asociací v kont. aureole.
- metamorfní reakce nízkého a středního stupně jsou řízeny hlavně teplotou (se vzrůstem teploty roste tlak fluid a X_{CO_2} ve fluidech)
- naproti tomu při reakcích během vrcholu metamorfózy (wolastonitová reakce) jsou reakce výrazně ovlivněny infiltrací fluid s nízkým X_{CO_2}
- v pozdních fázích vývoje kontaktní aureoly je nízký obsah CO_2 ve fluidech způsoben intenzivním přínosem magmatických fluid

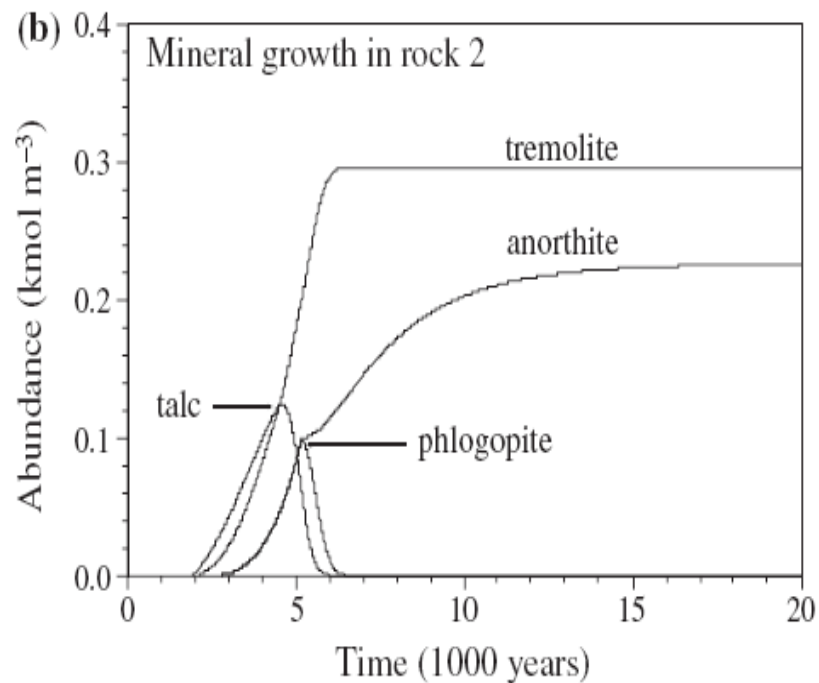
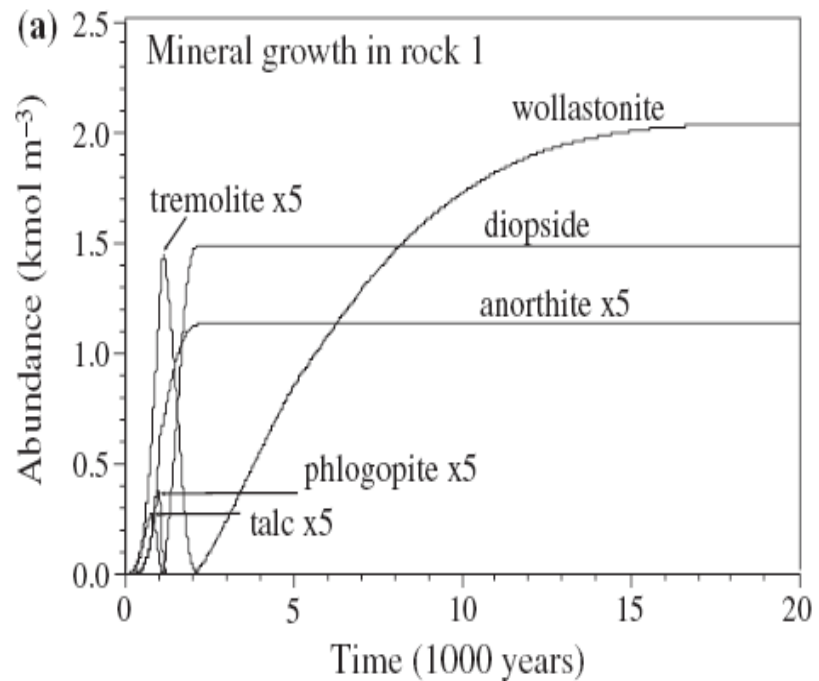
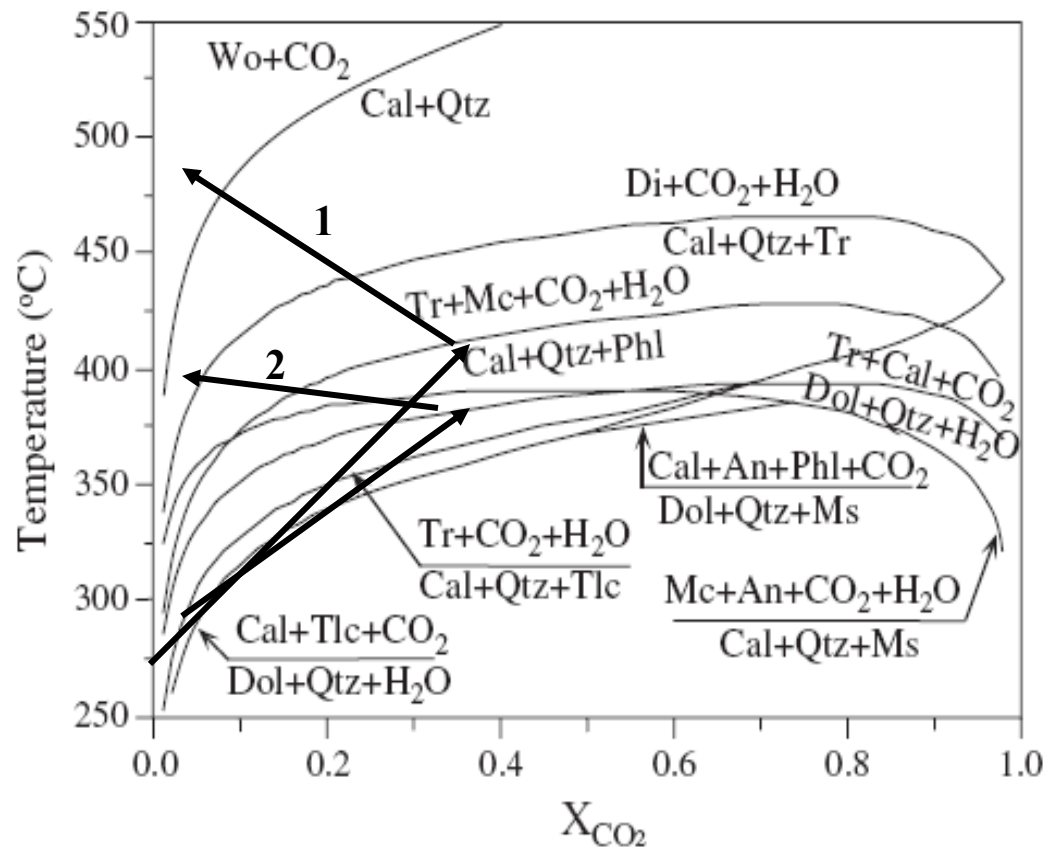


Polohy vápenatosilikátových hornin (mramorů) a kvarcitů



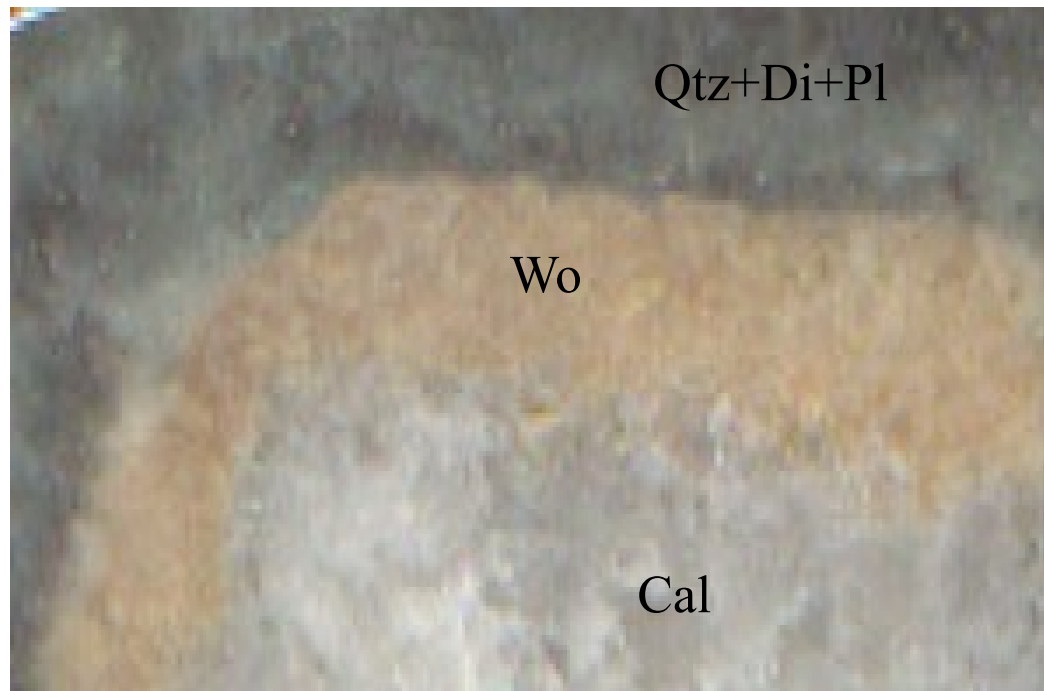
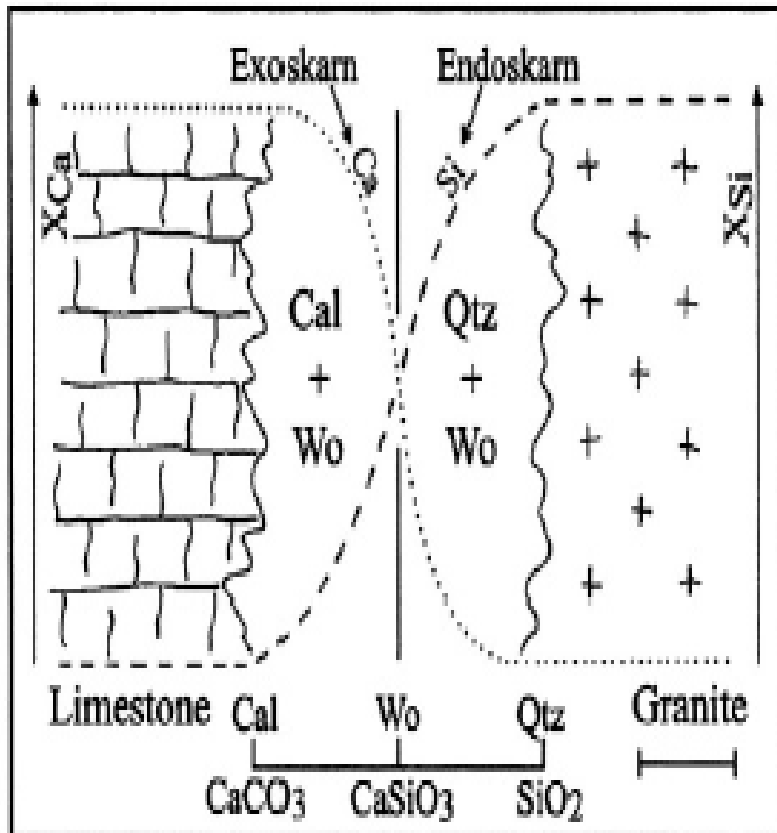
Předpokládaný vývoj T- X_{CO_2} v horninách v okolí granitového plutonu (Cui et al 2003), minerální reakce počítané pro 750 bar čísla udávají stáří v 1000 let po vmístění magmatu

Reaction #	
1	$3 \text{ Dol} + 4 \text{ Qtz} + 1 \text{ H}_2\text{O} = 3 \text{ Cal} + 1 \text{ Tlc} + 3 \text{ CO}_2$
2	$6 \text{ Cal} + 4 \text{ Qtz} + 5 \text{ Tlc} = 3 \text{ Tr} + 6 \text{ CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$
3	$5 \text{ Dol} + 8 \text{ Qtz} + 1 \text{ H}_2\text{O} = 3 \text{ Cal} + 1 \text{ Tr} + 7 \text{ CO}_2$
4	$3 \text{ Dol} + 2 \text{ Qtz} + 1 \text{ Ms} = 2 \text{ Cal} + 1 \text{ An} + 1 \text{ Phl} + 4 \text{ CO}_2$
5	$1 \text{ Cal} + 2 \text{ Qtz} + 1 \text{ Ms} = 1 \text{ Mc} + 1 \text{ An} + 1 \text{ CO}_2 + 1 \text{ H}_2\text{O}$
6	$6 \text{ Cal} + 24 \text{ Qtz} + 5 \text{ Phl} = 3 \text{ Tr} + 5 \text{ Mc} + 6 \text{ CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$
7	$3 \text{ Cal} + 2 \text{ Qtz} + 1 \text{ Tr} = 5 \text{ Di} + 3 \text{ CO}_2 + 1 \text{ H}_2\text{O}$
8	$1 \text{ Cal} + 1 \text{ Qtz} = 1 \text{ Wo} + 1 \text{ CO}_2$



5) Metasomatóza

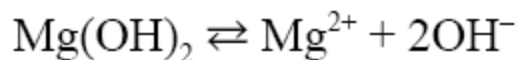
- gradienty v chemických potenciálech mají podobně jako termální gradienty tendenci k vyrovnávání
- hydrotermální fluida toto vyrovnávání usnadňují
- endoskarn: vnitřní část kontaktní zóny která vznikla přeměnou vyvřelé horniny která byla v kontaktu s kontaktním dvorem intruze
- exoskarn: vnější lem intruze kde v důsledku přínosu fluid dochází ke změnám metamorfované horniny



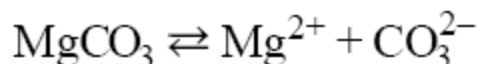
Metasomatická reakce mezi mramorem a granitem gradient v chemických potenciálech se vyrovnává přesunem Si do vápenců a Ca do granitů vzniká tak wollastonitový lem který odděluje endoskarn a exoskarn

Vlastnosti roztoků a stabilita minerálních fází na příkladu rozpustnosti Mg

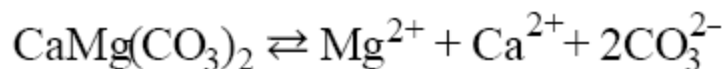
- Z fluid bohatých Mg se může za běžných podmínek srážet brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), magnesit (MgCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) a také hydratované karbonáty jako je hydromagnesit ($\text{MgCO}_3(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) stabilitu těchto fází můžeme popsat těmito reakcemi (White 1999):



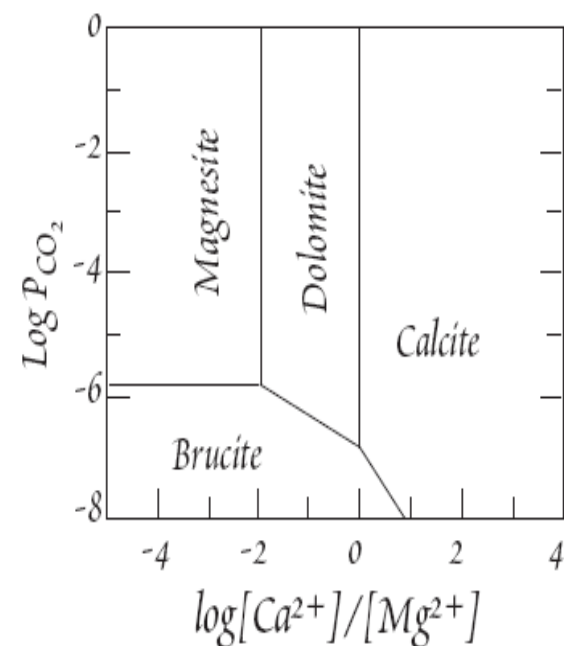
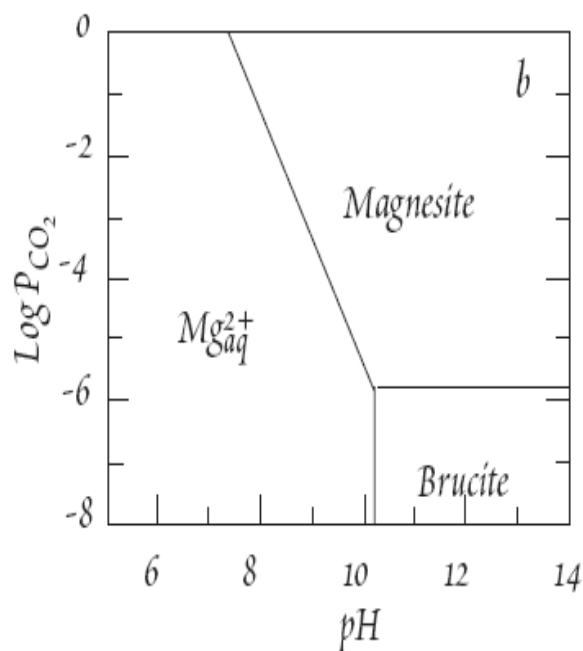
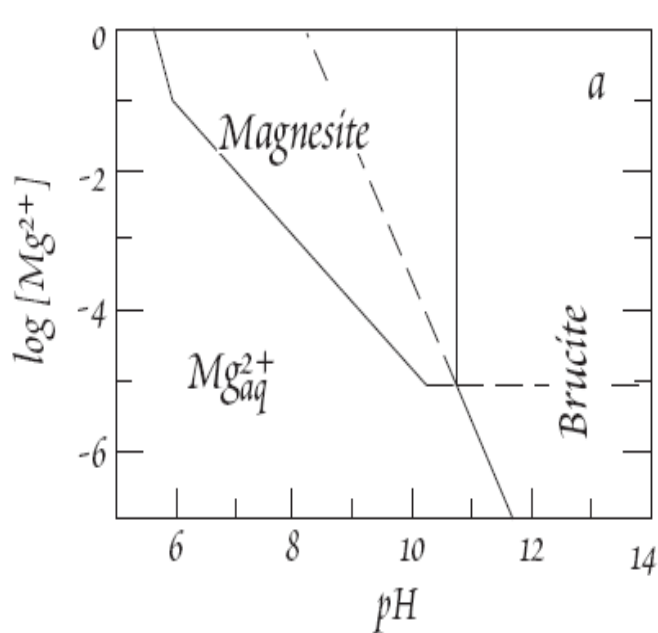
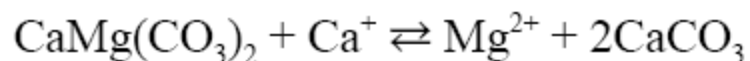
$$K_{\text{bru}} = 10^{-11.6}$$

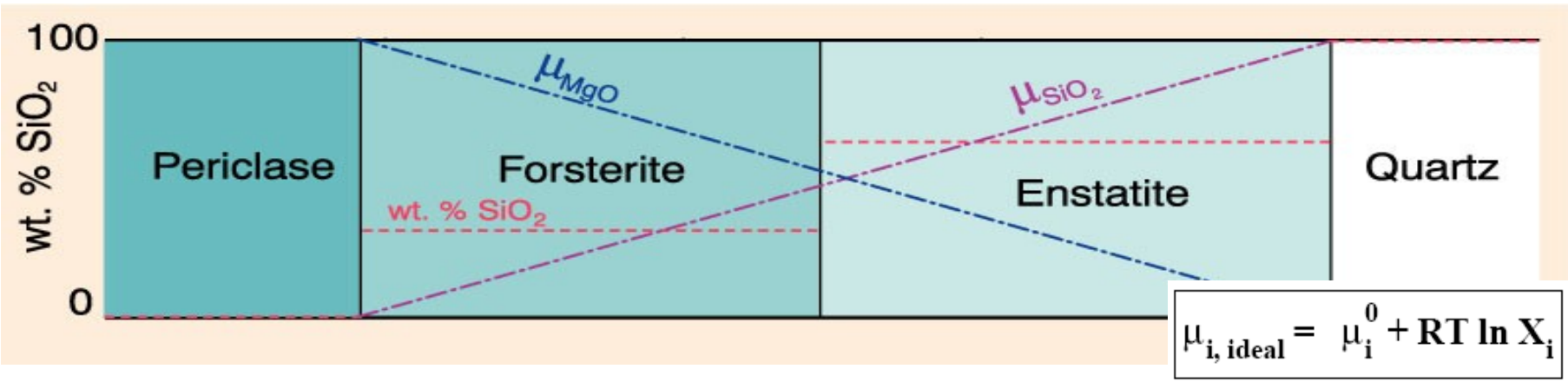


$$K_{\text{mag}} = 10^{-7.5}$$

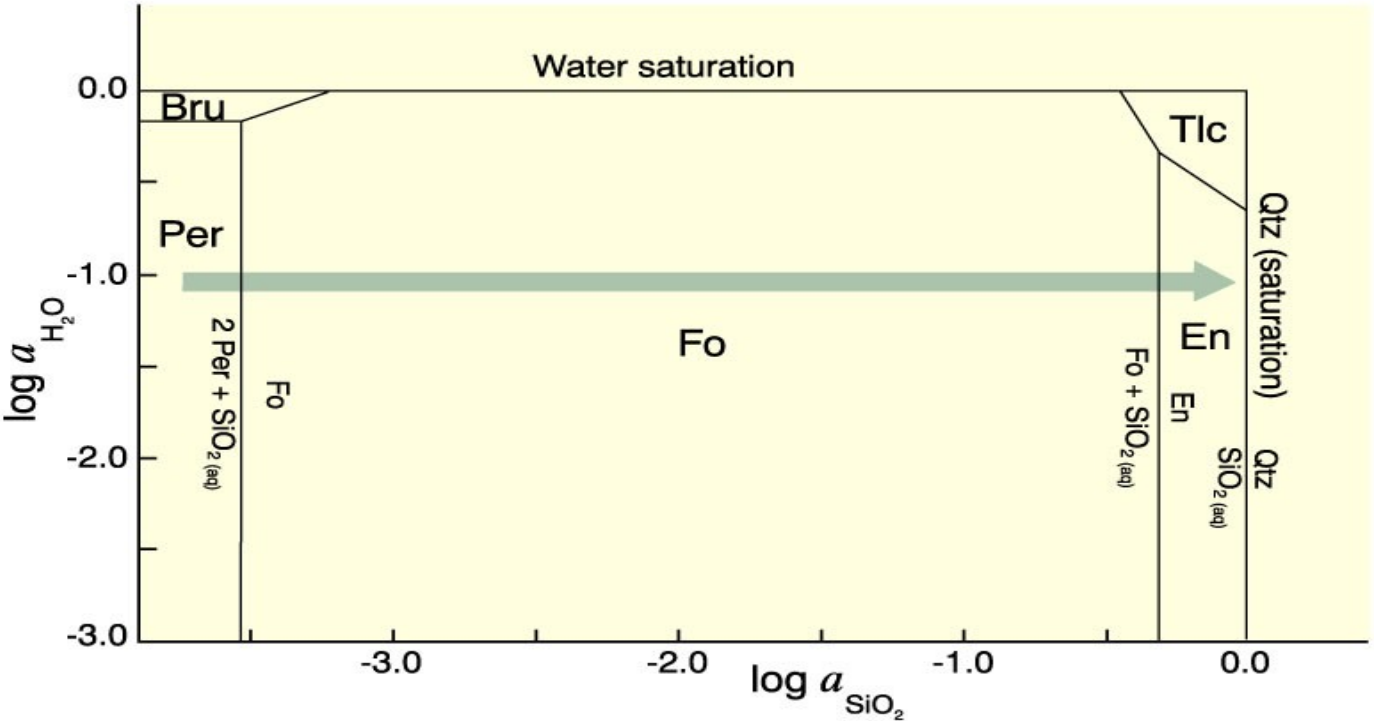
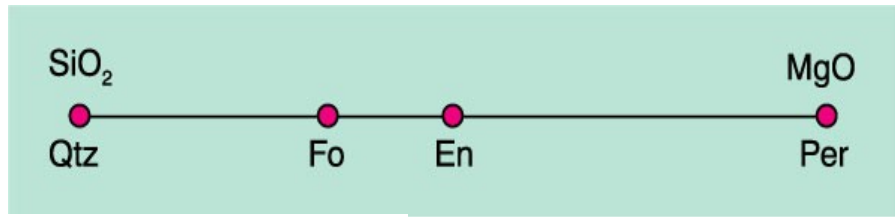


$$K_{\text{dol}} = 10^{-17}$$



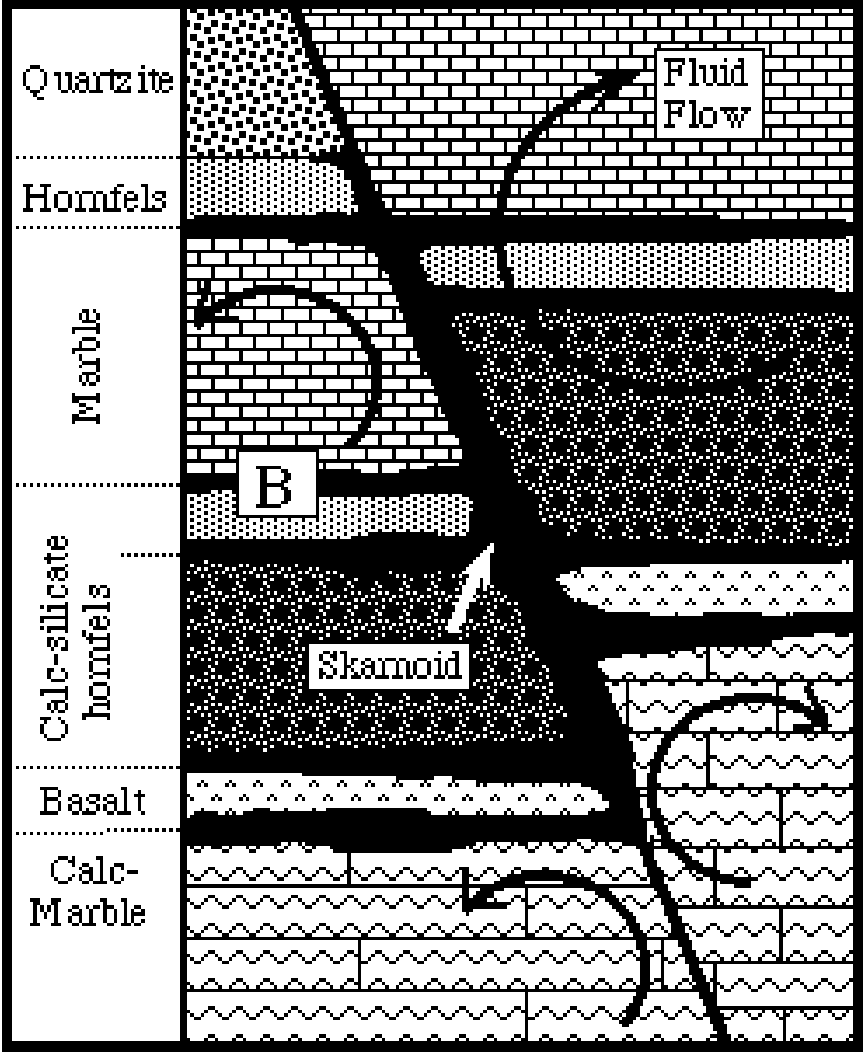
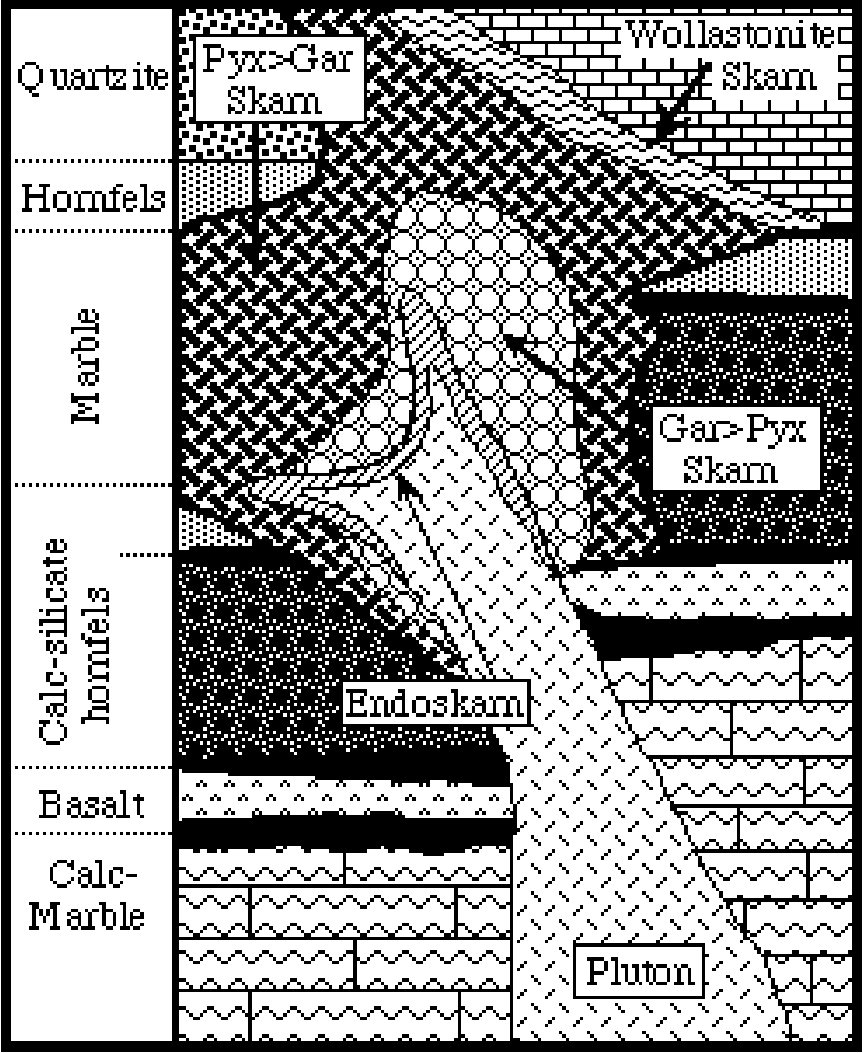


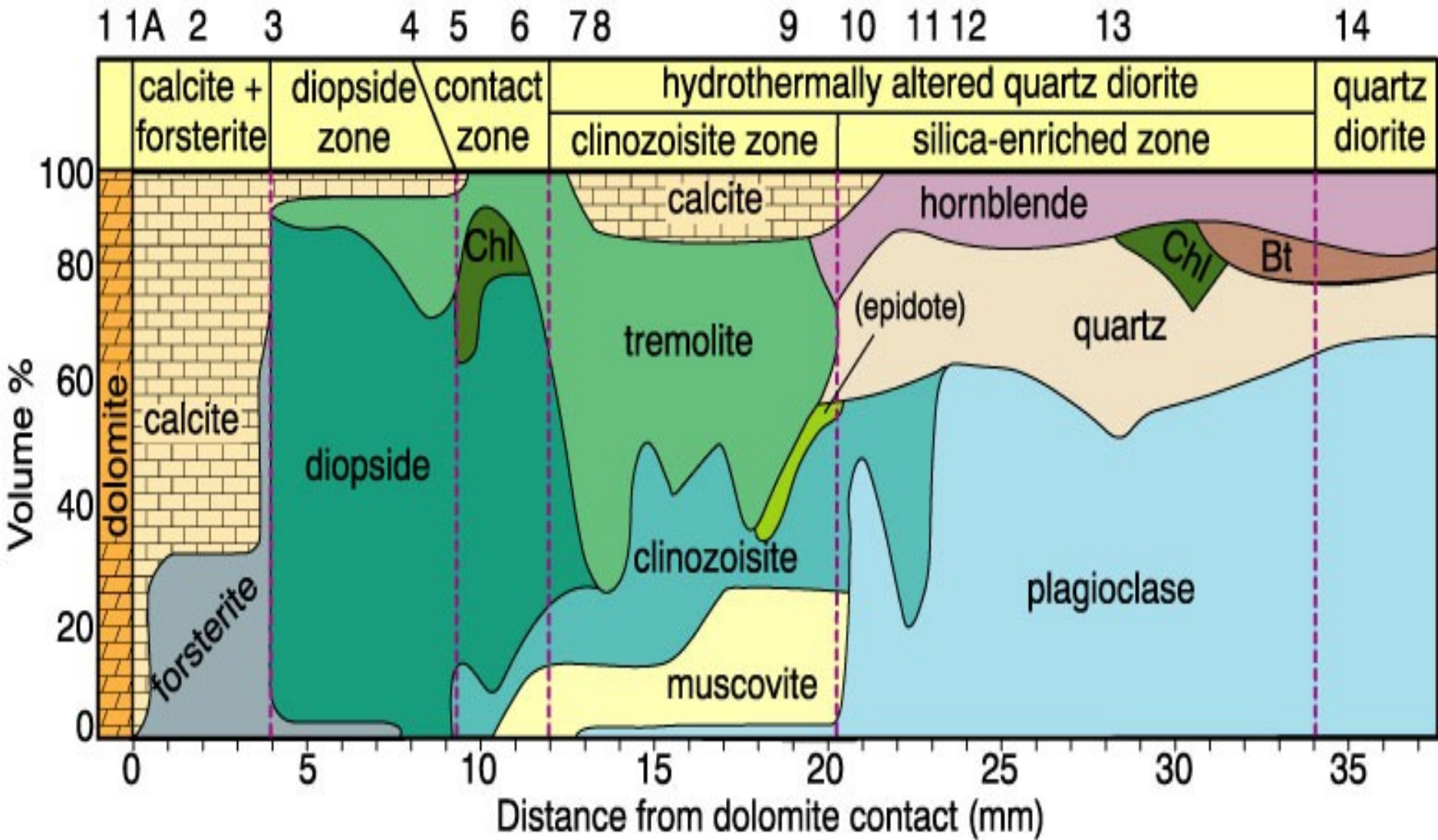
Hypotetický řez kontaktem mezi křemenem a periklasem (Thompson 1959) s zónami vzniklými v důsledku difuze. červená přerušovaná čára ukazuje obsah wt.% SiO_2 další dvě přerušované čáry ukazují změny v chemických potenciálech μ_{SiO_2} a μ_{MgO} . (Winter 2001, An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall).



$a_{SiO_2} - a_{H_2O}$ diagram pro fluida v systému $MgO-SiO_2-H_2O$ při teplotě $600^\circ C$ a tlaku $0.2 GPa$ (Winter 2001, An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall).

- skarny – silikátová hornina obsahující Ca-Fe-Mg vznikající v důsledku metasomatózy
- typické minerály: granáty (grosular-andradit-almandin), pyroxen (diopsid-hedenbergit), plagioklasy (podružně), wollastonit, epidot, vesuvian, kalcit, křemen, skapolit
- vznikají na kontaktu s plutonickými tělesy nebo jako důsledek reakce vhodných hornin s hydrotermálními fluidy

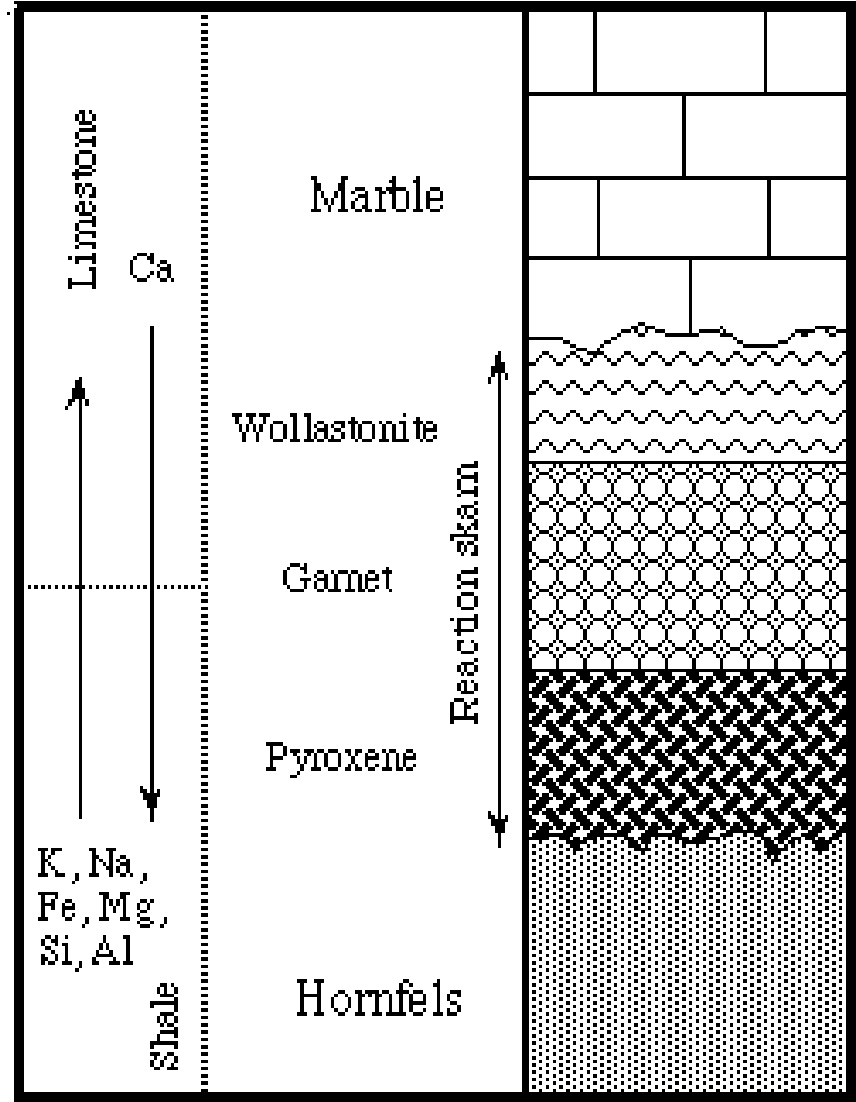


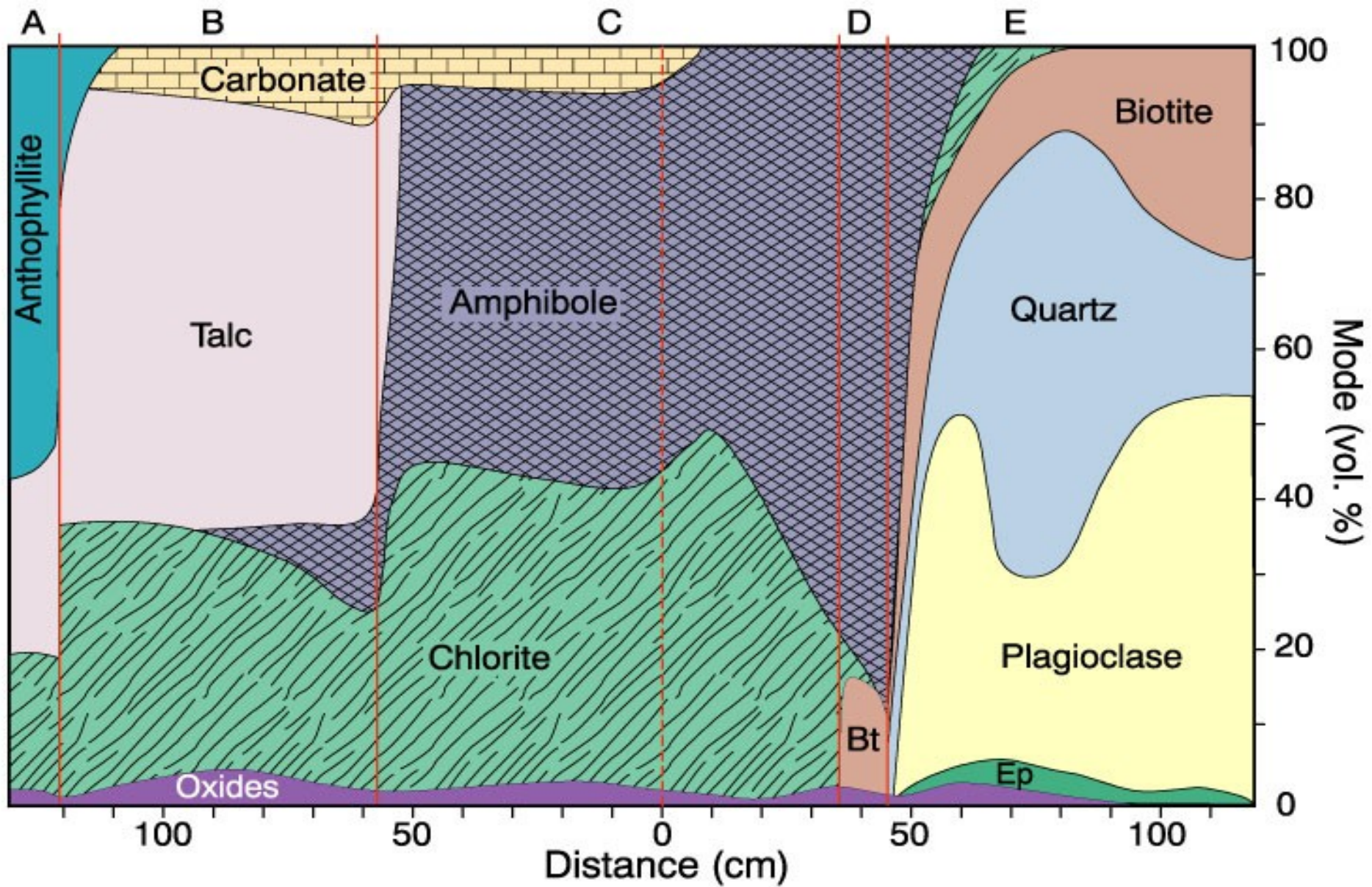


Minerální zóny vyvinuté na kontaktu mezi Qtz dioritem a dolomitickým mramorem. čísla ukazují místa odběru pro horninovou analýzu (Frisch a Helgeson 1984, Amer. J. Sci., 284, 121-185; Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall)

- vznikají také jako produkt reakce mezi dvěma chemicky kontrastními horninami během regionální metamorfózy (např. rohovcové konkrece v mramoru)

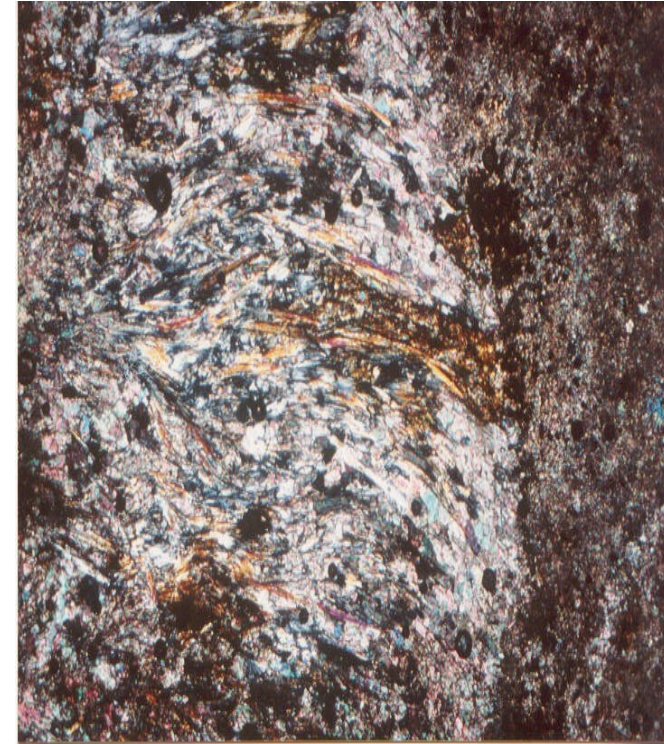
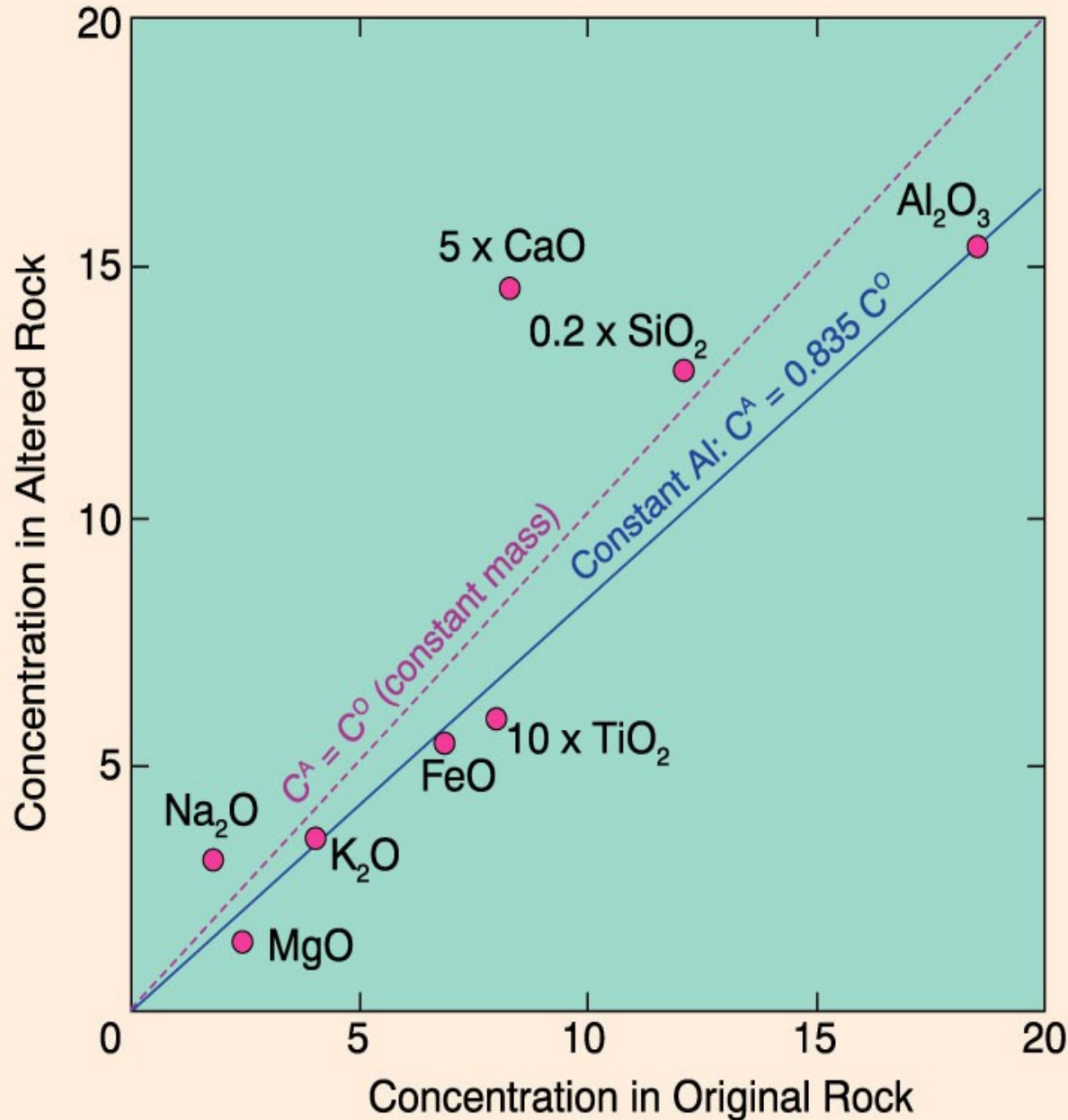
Unmetamorphosed		Metamorphosed	
Sandstone		Quartzite	
Shale		Hornfels	
Limestone		Marble	
Shale		Hornfels	
Calcareous Shale		Calc-silicate hornfels	
Basalt		Greenstone	
Silty Limestone		Wollastonite marble	





Kontakt ultramafické horniny s rulou (Grafton, Vermont). Bylo vyčleněno několik zón: A = Tlc + Ath, B = Tlc, C = Act + Chl, D = přechodná, E = okolní hornina. (Sanford 1982, Amer. J. Sci., 282, 543-616, upravil Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall).

5) Interpretace látkové bilance metasomatických procesů



Dol mramor s žilou Tr+Cal

Isoconový diagram (Grant 1986) *Econ. Geol.*, 81, 1976-1982. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

Literatura

- Dudek, A. - Fediuk F. - Palivcová M. (1962): Petrografické tabulky
- Hejtman, B. (1962): Petrografie metamorfovaných hornin
- Konopásek, J. – Štípská P. – Klápková H. – Schulmann K. (1998): Metamorfní petrologie
- Kornprobst, J. (2002): Metamorphic Rocks and Their Geodynamic Significance. A Petrological Handbook. Petrology and Structural Geology Series Vol. 12.
- Vernon, R.H. and Clarke, G.L. (2008): Principles of Metamorphic Petrology. Cambridge University Press, 446 pp.,
- Naprostá většina obrazového materiálu pochází z celé řady internetových stránek věnujících se metamorfní petrologii