

# Magmatické a metamorfní procesy

—

## Hydratační a dehydratační metamorfní reakce II

David Buriánek

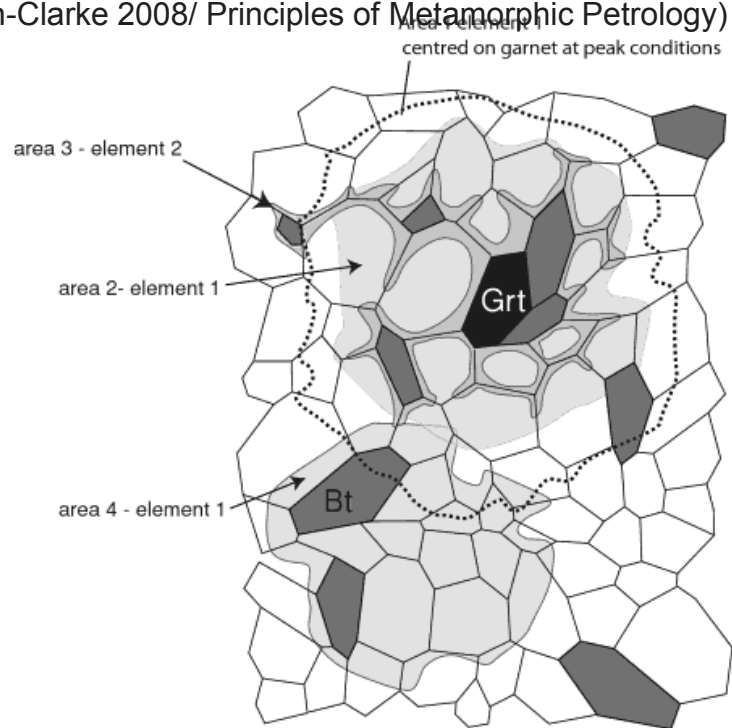
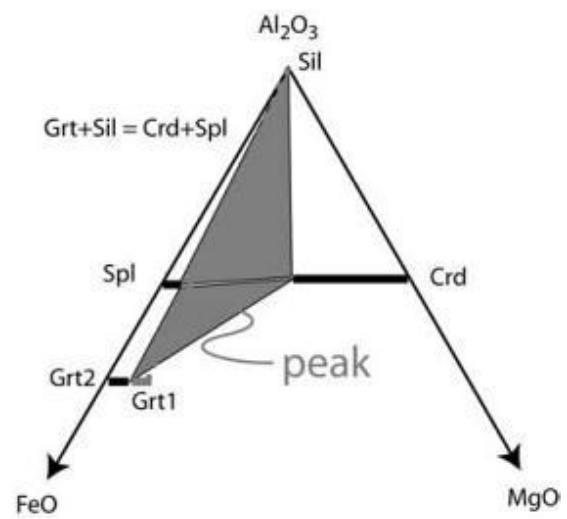
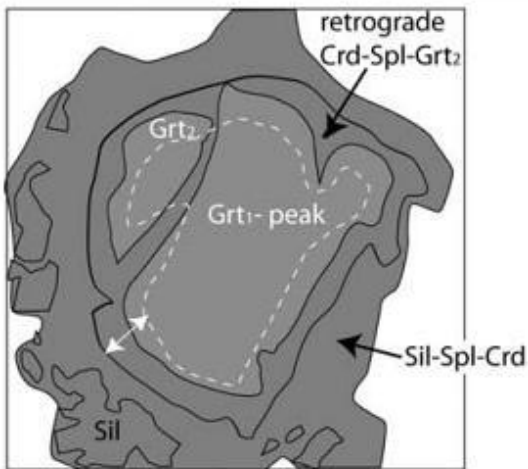
# Osnova

1. Chování fluidní fáze během retrográdních metamorfních reakcí
2. Význam ultramafických hornin při interpretaci geologických procesů
3. Fázové vztahy v ultramafických horninách
4. Hydratační reakce v ultramafických horninách
5. Retrográdní reakce v metakarbonátech
6. Metamorfóza nízkého stupně bazických hornin a vápenatosilikátových hornin (význam hydratačních reakcí)

# 1. Chování fluidní fáze během retrográdních metamorfních reakcí

- retrográdní vznikají během poklesu teplot a často produkují fluida
- většinou neproběhnou úplně
- často tvoří retrográdní minerály lemy kolem reliktnů prográdní asociace
- pokud není dostatek fluidní fáze nebo je pokles teplot příliš rychlý nemusí proběhnout vůbec
- velmi často dochází k reakcím ve velmi malém objemu horniny kolem 1 cm<sup>3</sup> (lokální rovnováhy)
- během retrográdních přeměn jsou rovnováhy mezi minerály závislé na difuzi
- difuze je ovlivněna strukturou horniny

Schematický náčrt výbrusu (upraveno podle Stuwe, 1997) složená ze čtyř rozdílných minerálů Grt+Bt+Fsp+Qtz s vyznačením oblasti v nichž došlo k rovnováze. Oblasti 1 až 3 ukazují že pro rozdílné prvky může být velikost této oblasti rozdílná. Oblast 1 znázorňuje prvek u kterého je poměr mezi difuzí po hranici zrn ku difuzi přes krystalovou mřížku je nízký a to za podmínek vrcholné metamorfózy i při nižších teplotách (2). Oblast 3 znázorňuje element jehož poměr difuze po intergranulárách vůči difuzi přes krystalovou mřížku je vyšší. Oblast 4 má podobnou velikost jako oblast 2 (Vernon-Clarke 2008/ Principles of Metamorphic Petrology)



Vznik retrográdního lemu Cdr+Spl+Grt který odděluje Silimanit od prográdního granátu (Vernon-Clarke 2008/ Principles of Metamorphic Petrology)

### Ultramafic rocks

Olivine	→ serpentine	H <sub>2</sub> O-rich fluids
	→ magnesite	CO <sub>2</sub> -rich fluids
Enstatite	→ anthophyllite	
Opx and/or olivine	→ talc ± serpentine	

### Metabasites

Ca-plagioclase	→ Na-plagioclase + Ep/Zo/Czo	Very common amphibolite facies → greenschist facies retrogression (H <sub>2</sub> O-rich fluids). Common in very low grade burial metamorphism and ocean-floor metamorphism In metabasites this usually requires significant K <sup>+</sup> introduction. CO <sub>2</sub> -rich fluids. Hydrothermal metamorphism CO <sub>2</sub> -rich fluids.
	→ zeolites	
	→ sericite/muscovite	
	→ calcite	
	→ scapolite	
Clinopyroxene	→ hornblende/actinolite	Usually associated with significant K <sup>+</sup> introduction
Hypersthene	→ hornblende/actinolite	
Hornblende	→ actinolite	
	→ chlorite	
	→ biotite	
Blue (Na-) amphibole (glaucophane/crossite)	→ green (Ca-) amphibole (actinolite)	
Garnet	→ chlorite	
Ilmenite or rutile	→ sphene	

### Granitoid rocks

K-feldspar	→ sericite/muscovite/pyrophyllite
	→ clay minerals (e.g. kaolinite)
Plagioclase	→ sericite (epidote group minerals)
Biotite	→ chlorite

### Calc-silicate rocks

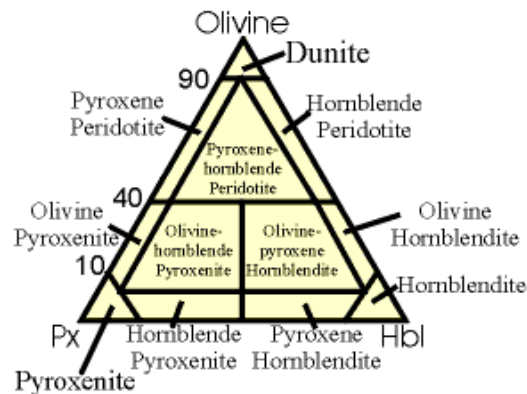
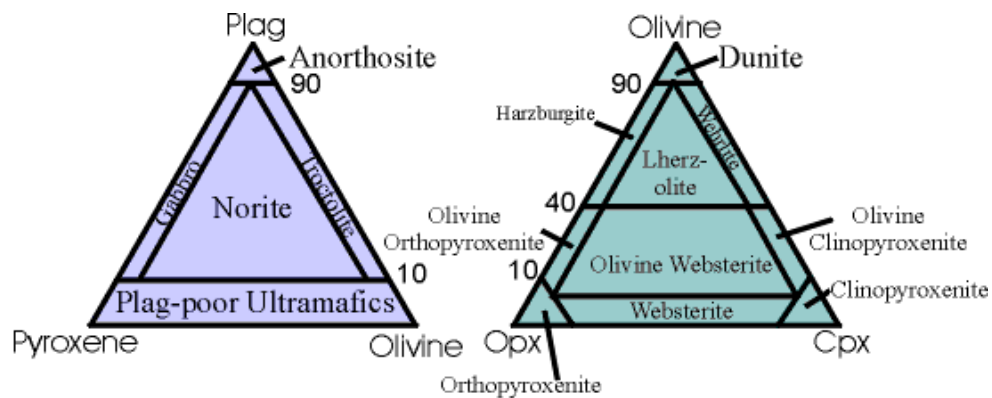
Forsterite	→ serpentine
Anorthite	→ epidote minerals (± sericite)
	→ carbonate minerals
Diopside	→ tremolite—actinolite
Tremolite	→ talc

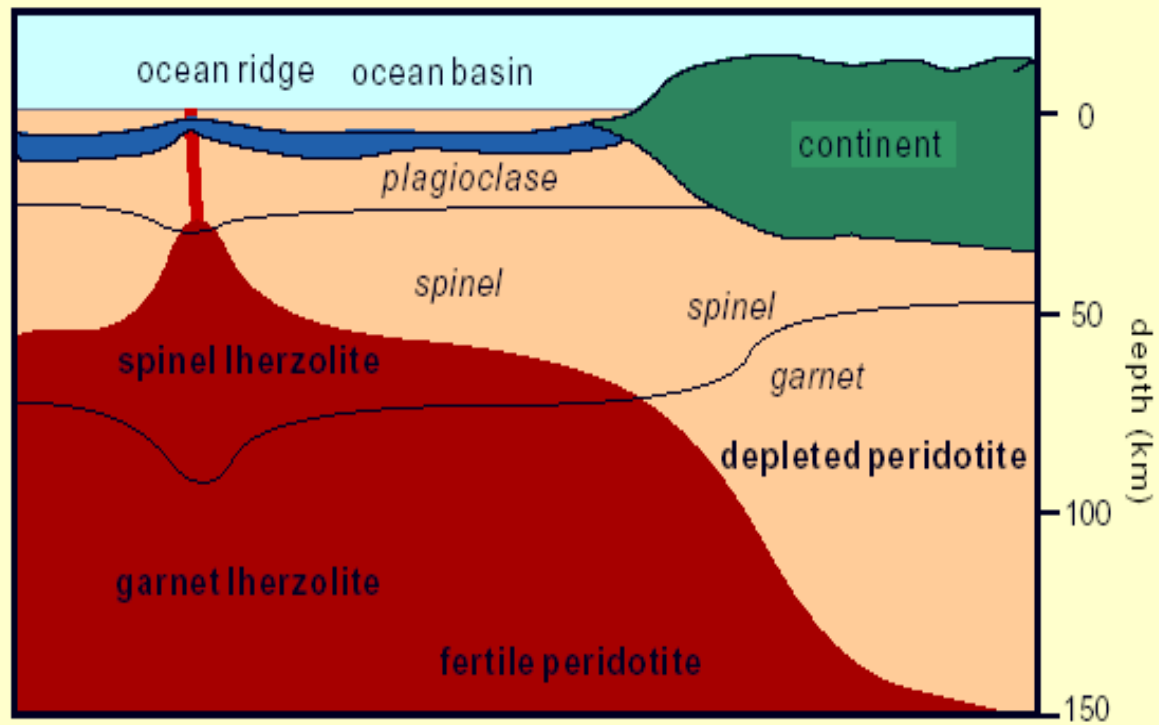
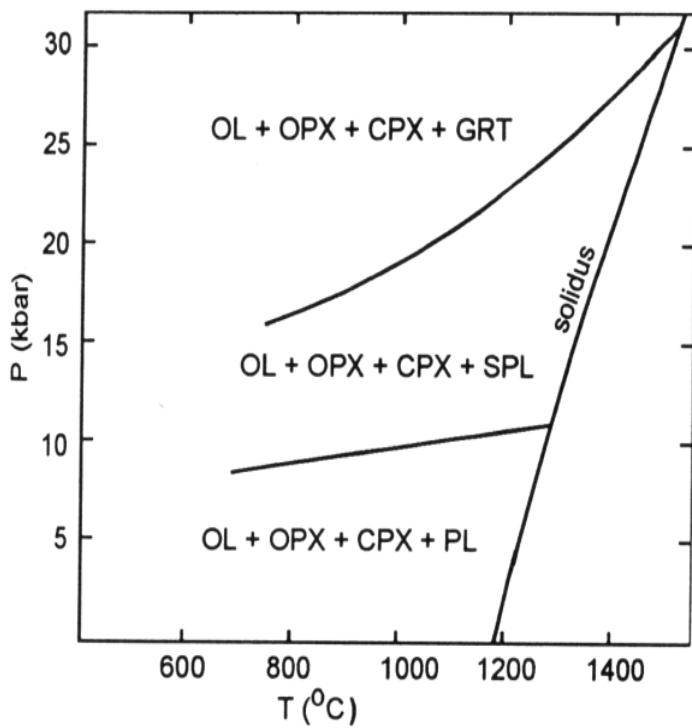
### Metapelites

Garnet	→ chlorite and/or biotite
Staurolite	→ sericite
	→ sericite + chlorite
Andalusite, kyanite, sillimanite	→ sericite/white mica
Cordierite	→ pinite (fine mix of sericite + chlorite)
Chloritoid	→ chlorite (± sericite)
Biotite	→ chlorite
Ilmenite	→ sphene

## 2. Význam ultramafických hornin při interpretaci geologických procesů

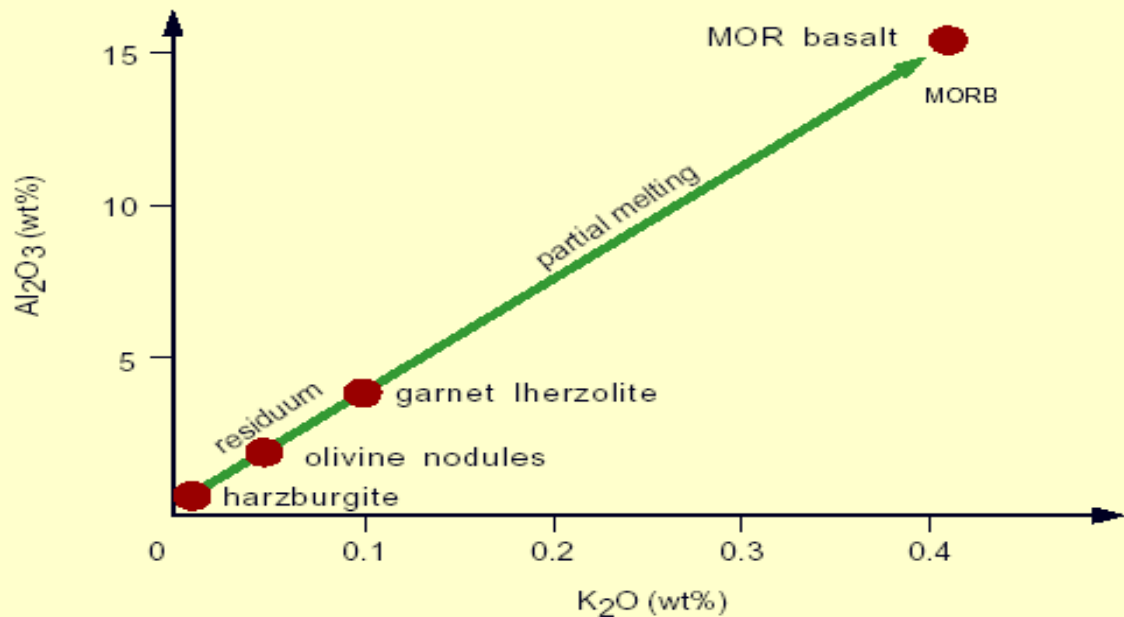
- hlavní horninový typ zemského pláště
- složeny hlavně z Mg-silikátů, světlé součástky < 10 %
- geochemicky – utrabazické horniny ( $\text{SiO}_2 < 45 \text{ hm } \%$ )
- primární minerály: olivín bohatý Mg (Fo 88-95), ortopyroxen (enstatit), klinopyroxen (Cr-diopsid), chromit (akcesorie), granát (pyrop 60-75 mol.%), spinel, plagioklas
- sekundární minerály: minerály skupiny serpentinu (chryzotil, antigorit, lizardit, aj.) - nahrazují olivín nebo ortopyroxen (bastit), amfiboly (tremolit), mastek, magnezit, Mg-chlority, Mg-biotit, ilmenit, magnetit

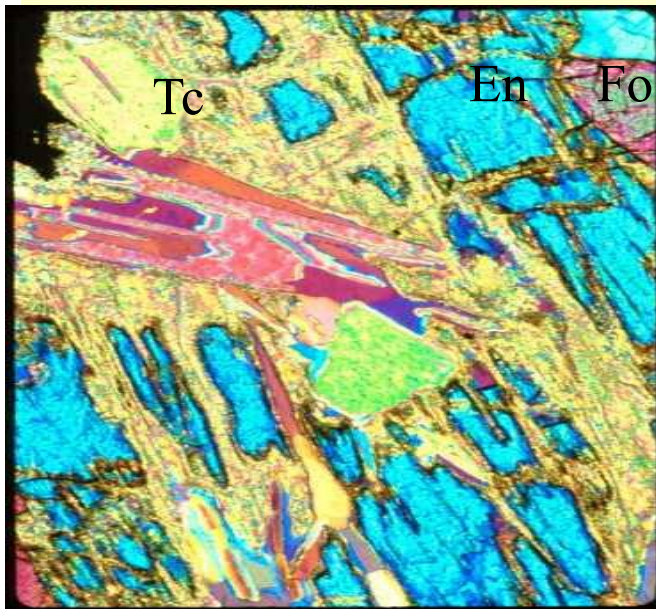
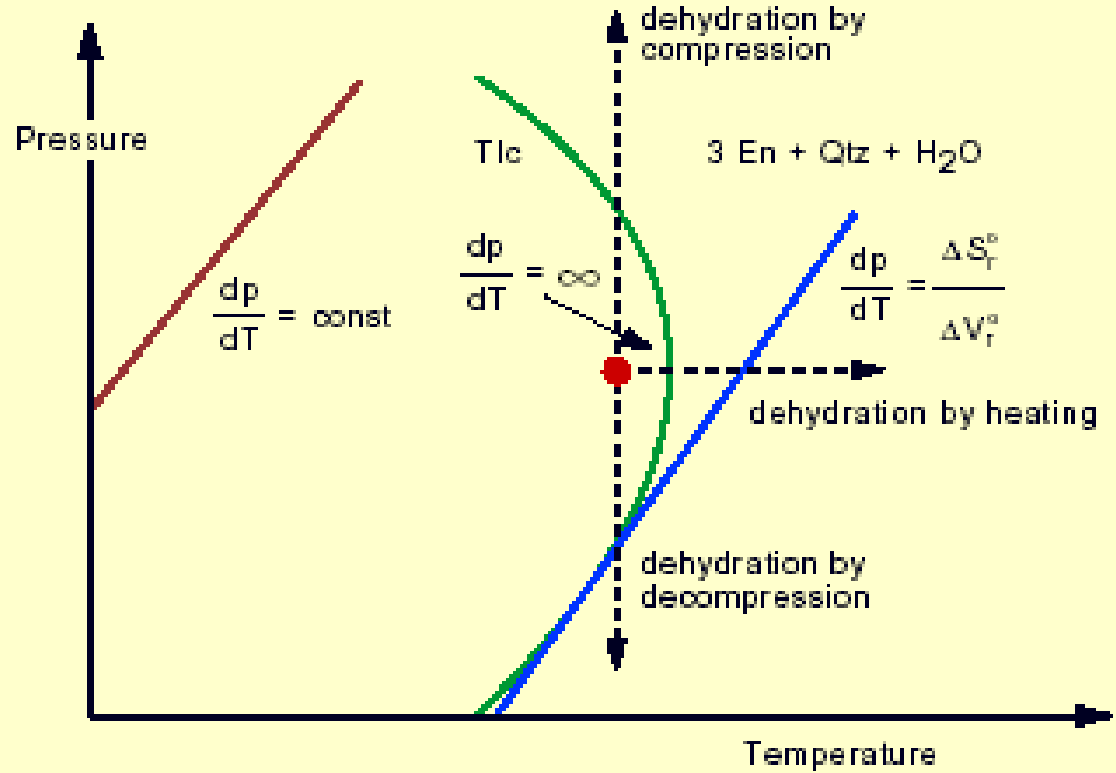
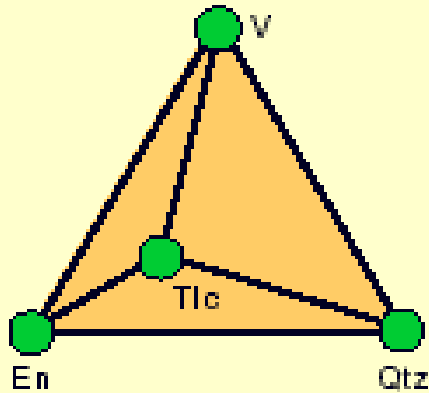
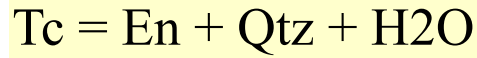




PT-diagram ukazující pole stability lherzolitů s různými asociacemi

- ultramafické horniny tvoří plášť
- v kontinentální kůře jsou vzácné
- v orogénech jsou často tělesa peridotitů uspořádána v nesouvislých pásích X00- 1000 km dlouhých, paralelních se strukturními prvky orogénu





### dehydratační reakce

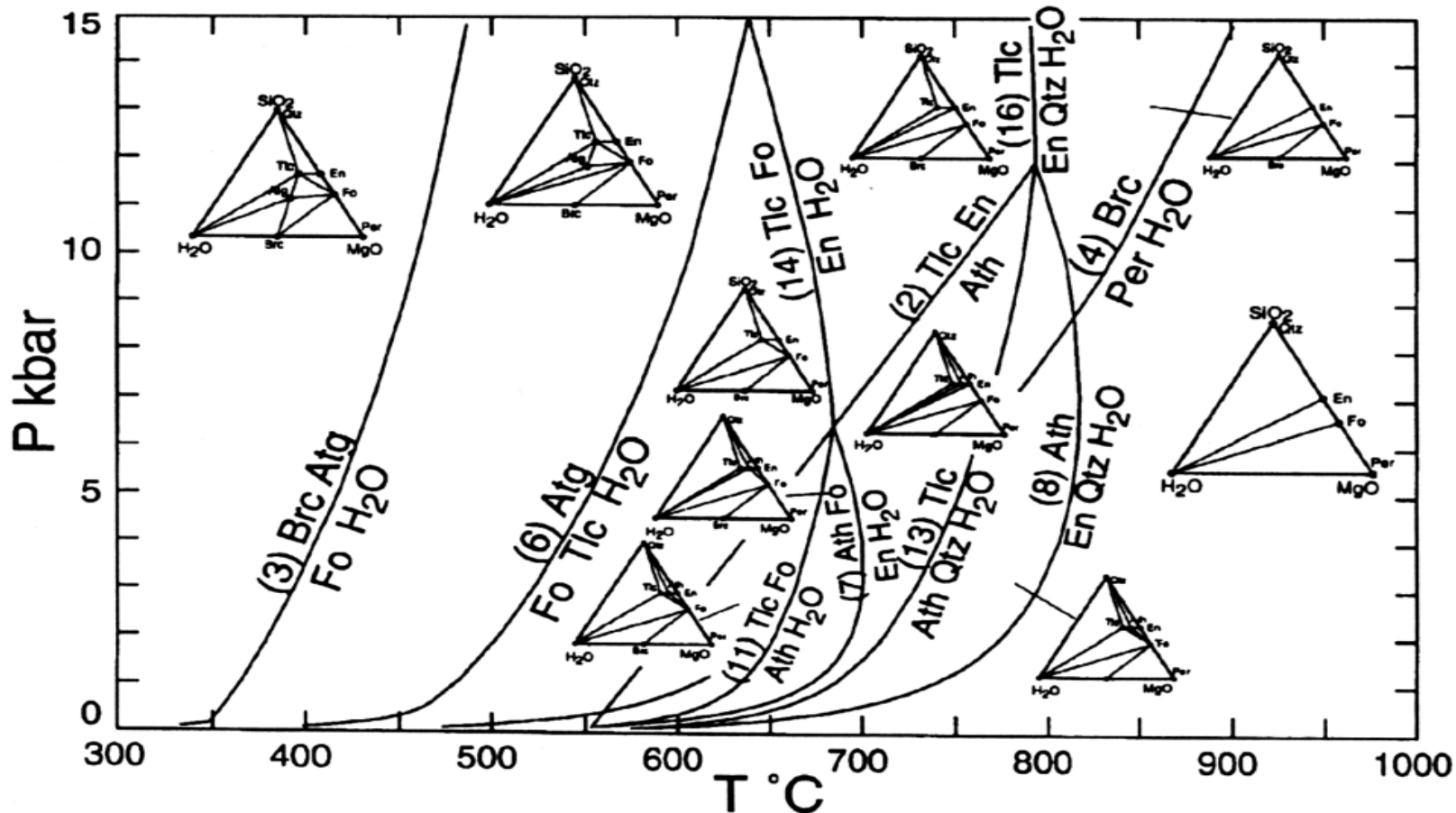
- $\text{Tc} + \text{Fo} = \text{Ath} + \text{H}_2\text{O}$  (MSH)
- $\text{Ath} + \text{Fo} = \text{En} + \text{H}_2\text{O}$  (MSH)
- $\text{Tc} = \text{En} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$  (MSH)
- $\text{Tr} = \text{En} + \text{Di} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O}$  (CMSH)
- $\text{Chl} = \text{Opx} + \text{Fo} + \text{Sp} + \text{H}_2\text{O}$  (CMASH)

### 3) Fázové vztahy v ultramafických horninách

- systémy: CMS, MSH, CMSH, FeO (FMSH, CFMSH),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$
- **důležité minerály:**
- Antigorit  $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
- Mastek  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Aktinolit  $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
- Tremolit  $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

- Diopsid  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
- Anthofyllit  $\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
- Enstatit  $\text{MgSiO}_3$
- Forsterit  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$

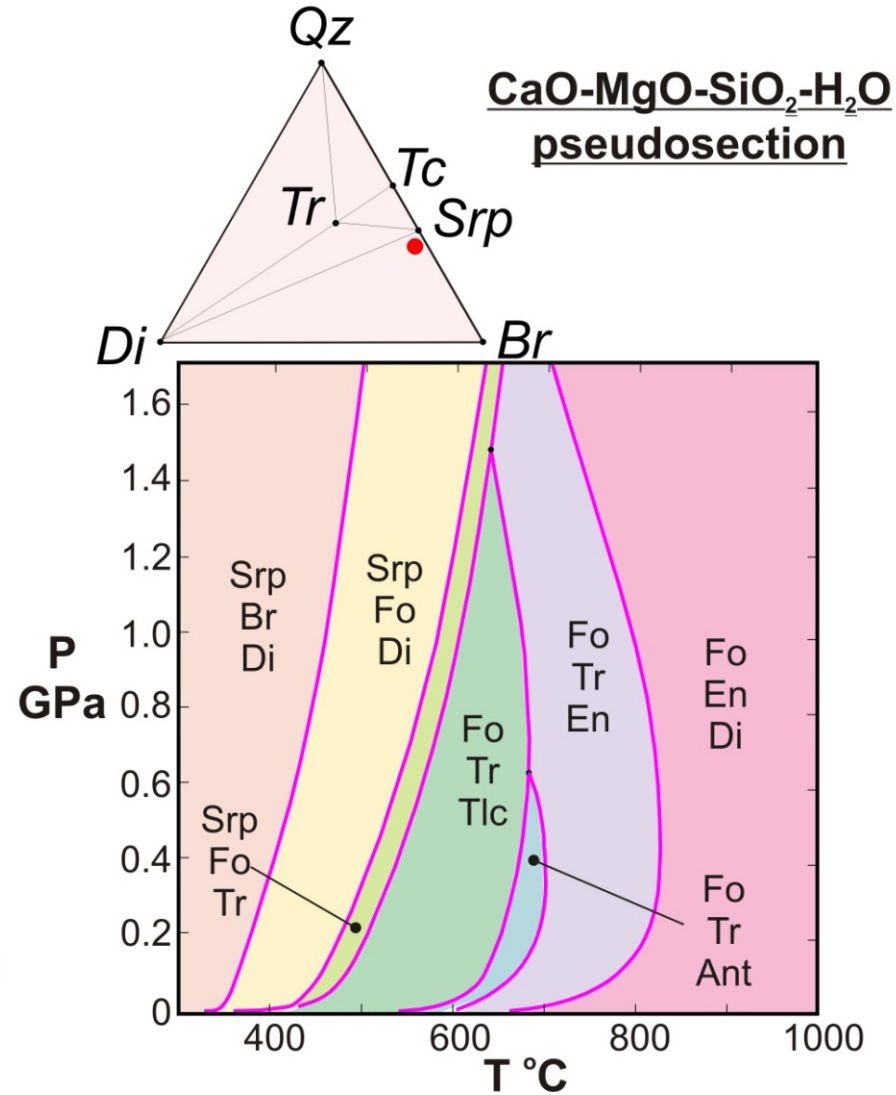
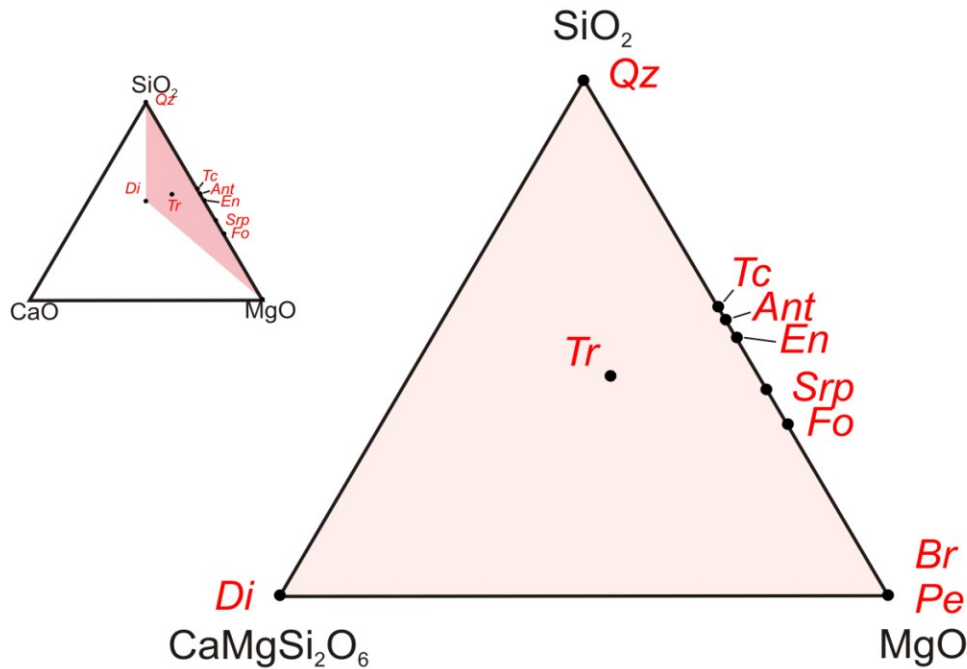
Zjednodušená MSH mřížka pro ultramafické horniny (sestaveno na základě termodynamických databází Bermana, Konopásek et al. 1998 převzato ze Speara 1993)

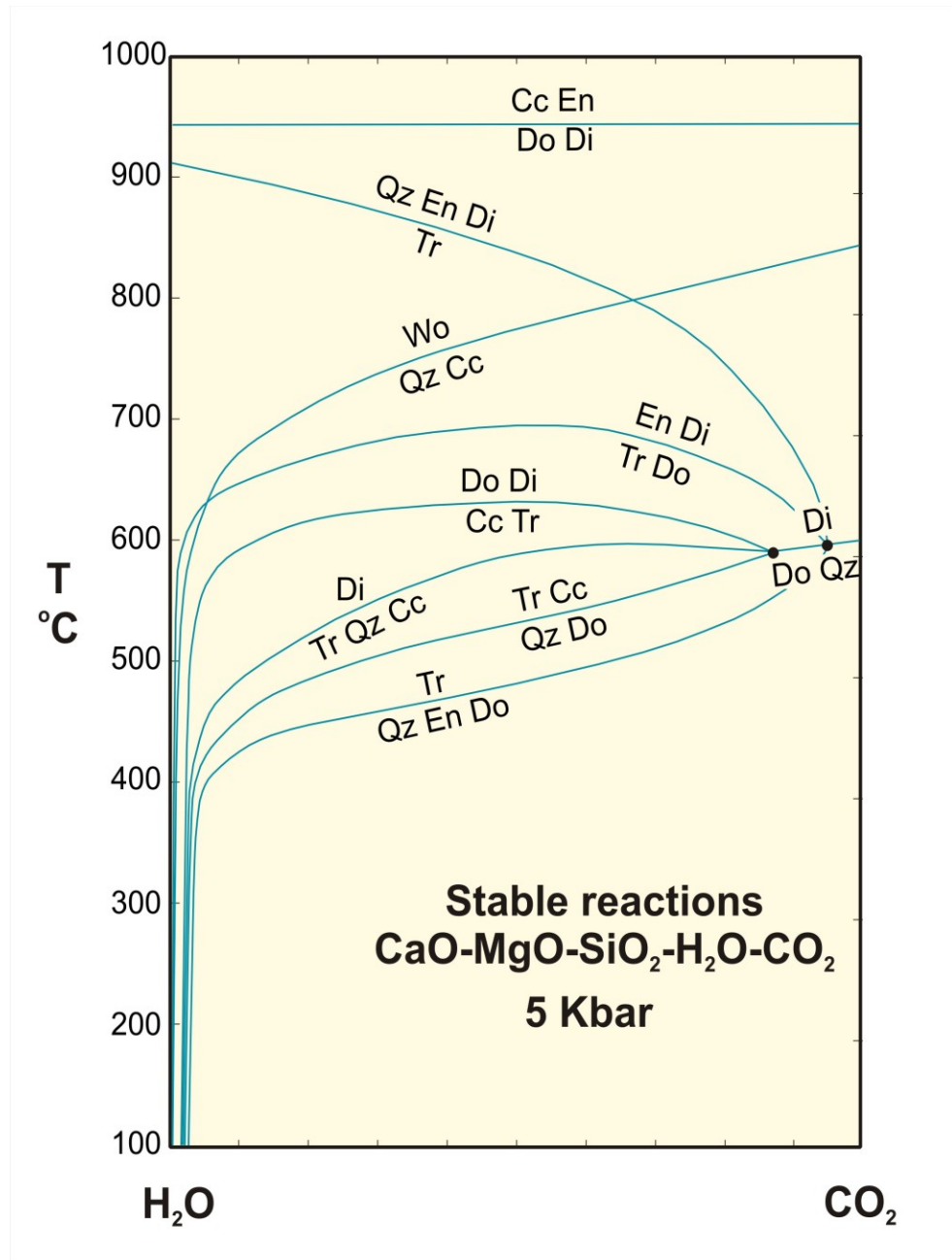
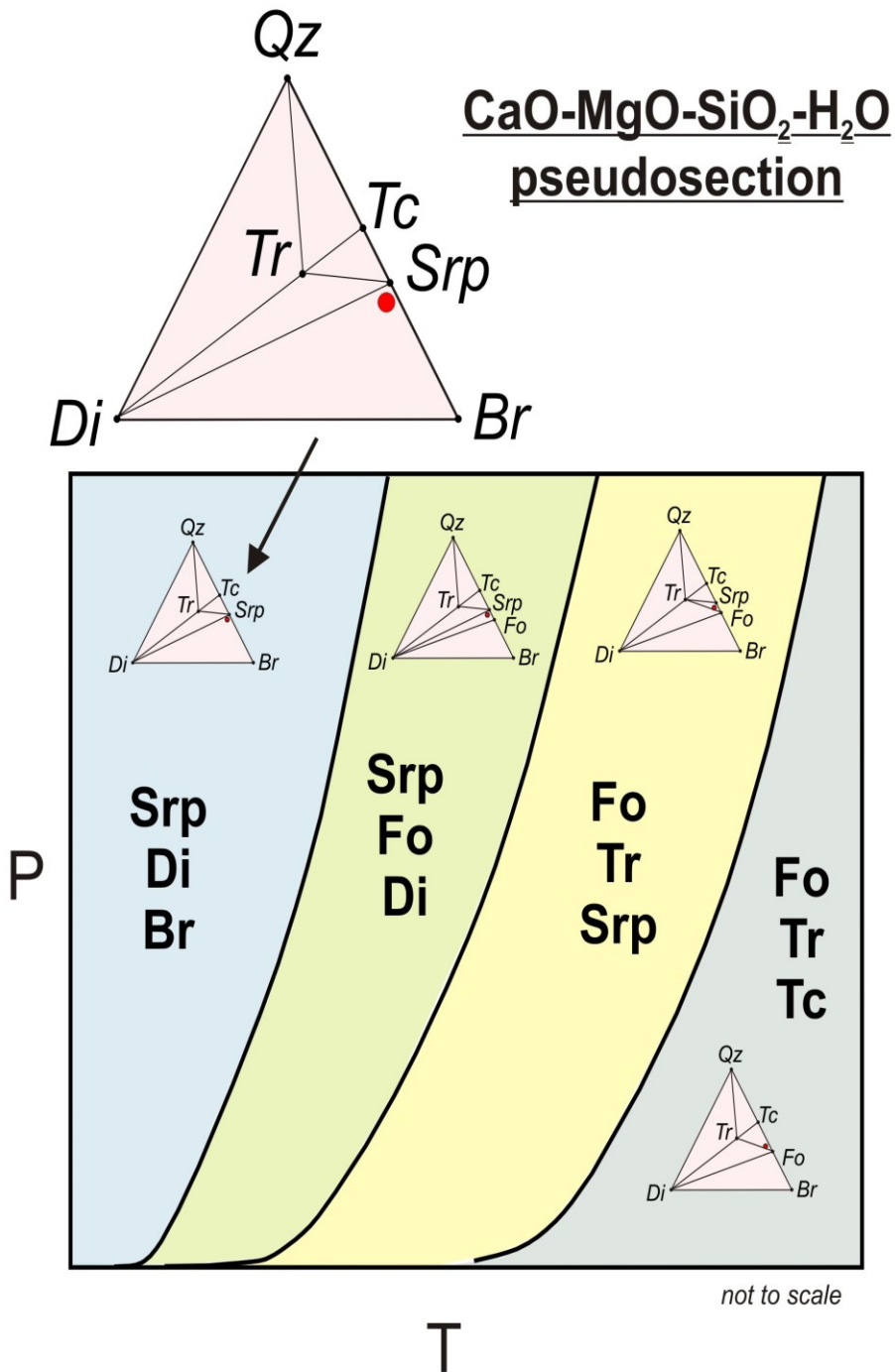




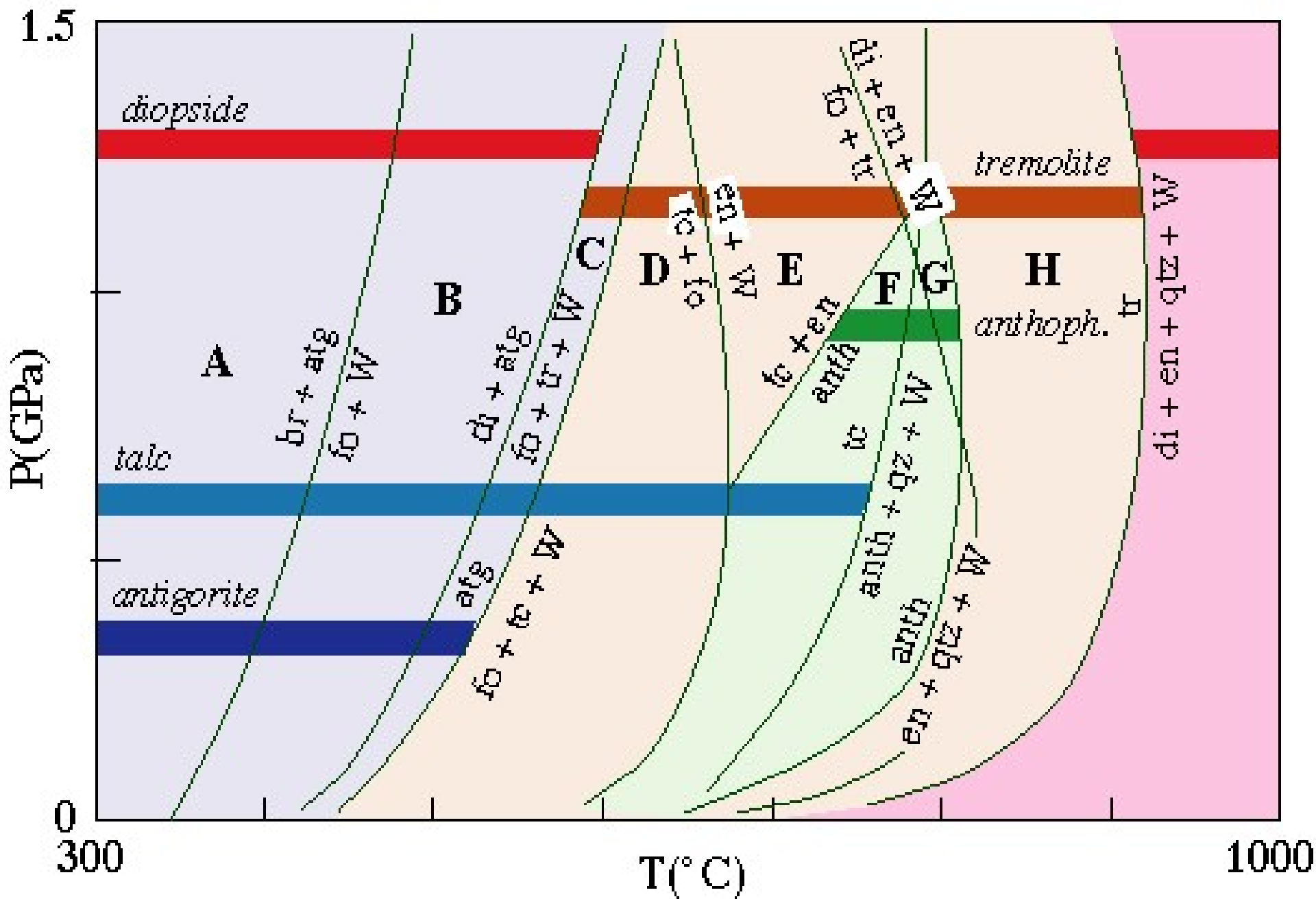
## Ultramafic Rocks (water saturated)

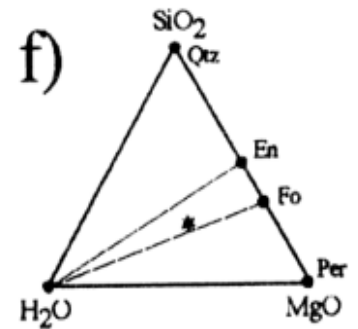
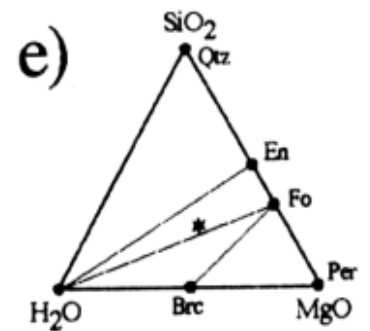
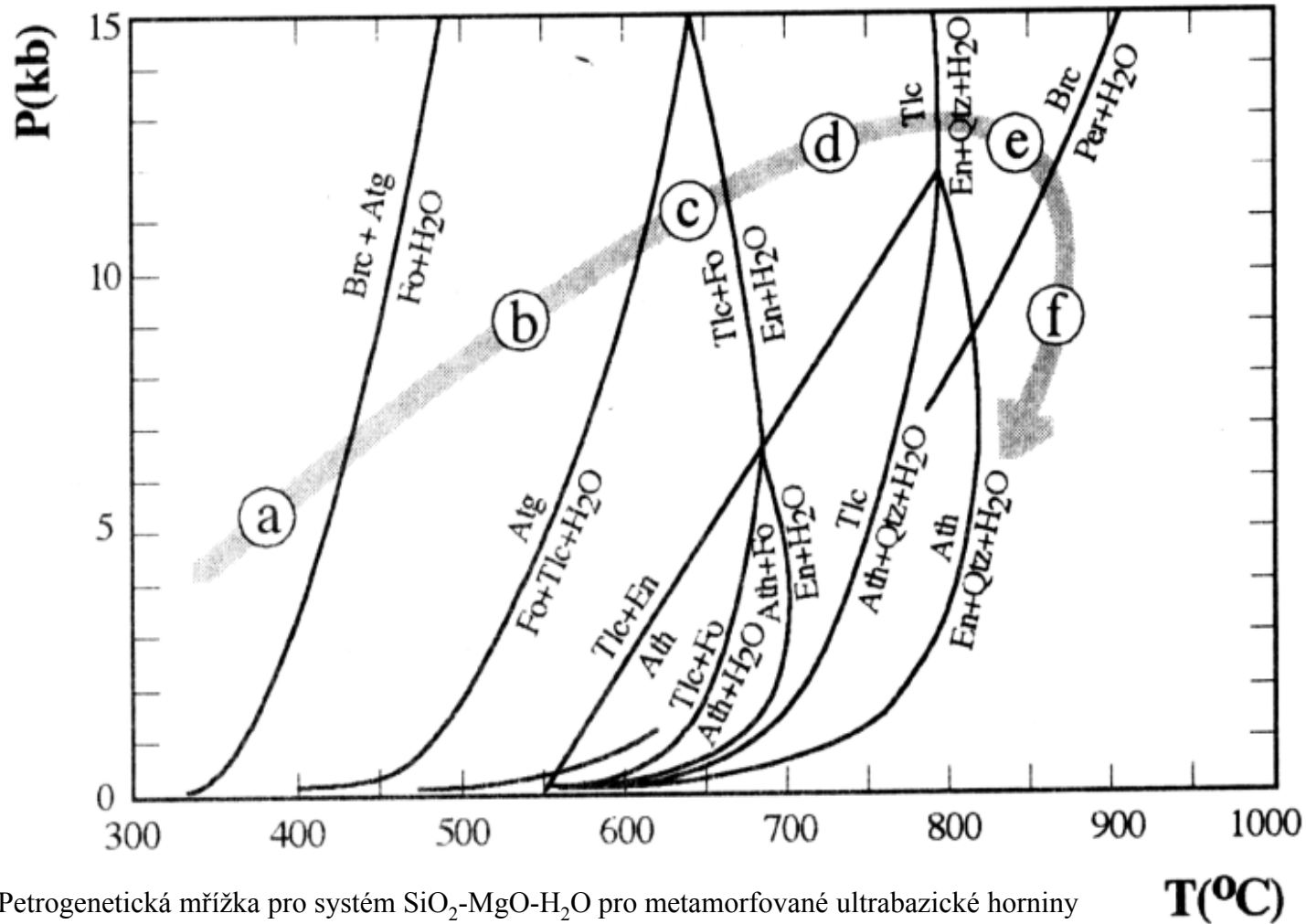
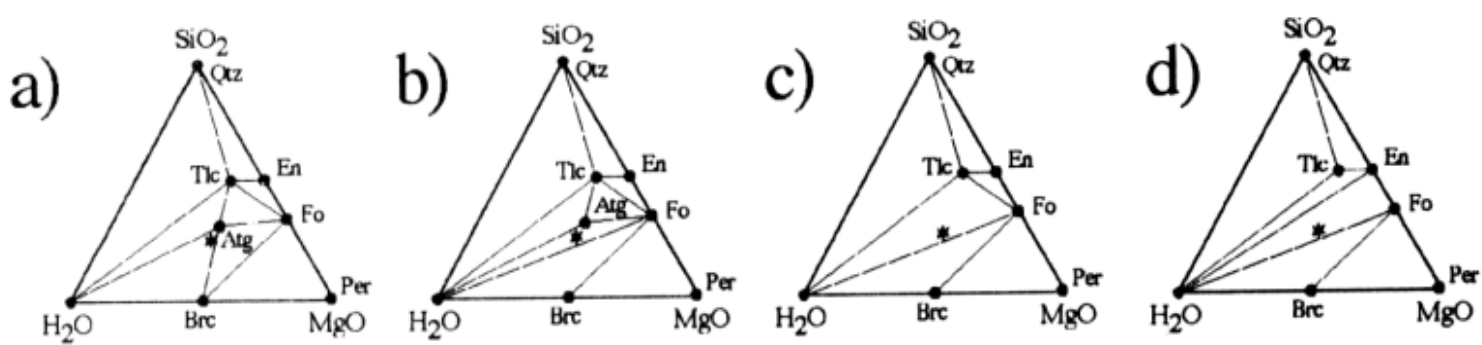
brucite	(Br)	$Mg(OH)_2$	low grade $\downarrow$ high grade
antigorite	(Srp)	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	
anthophyllite	(Ant)	$Mg_7Si_8O_{22}(OH)_2$	
talc	(Tc)	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	
tremolite	(Tr)	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$	
quartz	(Qz)	$SiO_2$	
diopside	(Di)	$CaMgSi_2O_6$	
enstatite	(En)	$MgSiO_3$	
forsterite	(Fo)	$Mg_2SiO_4$	
periclase	(Pe)	$MgO$	

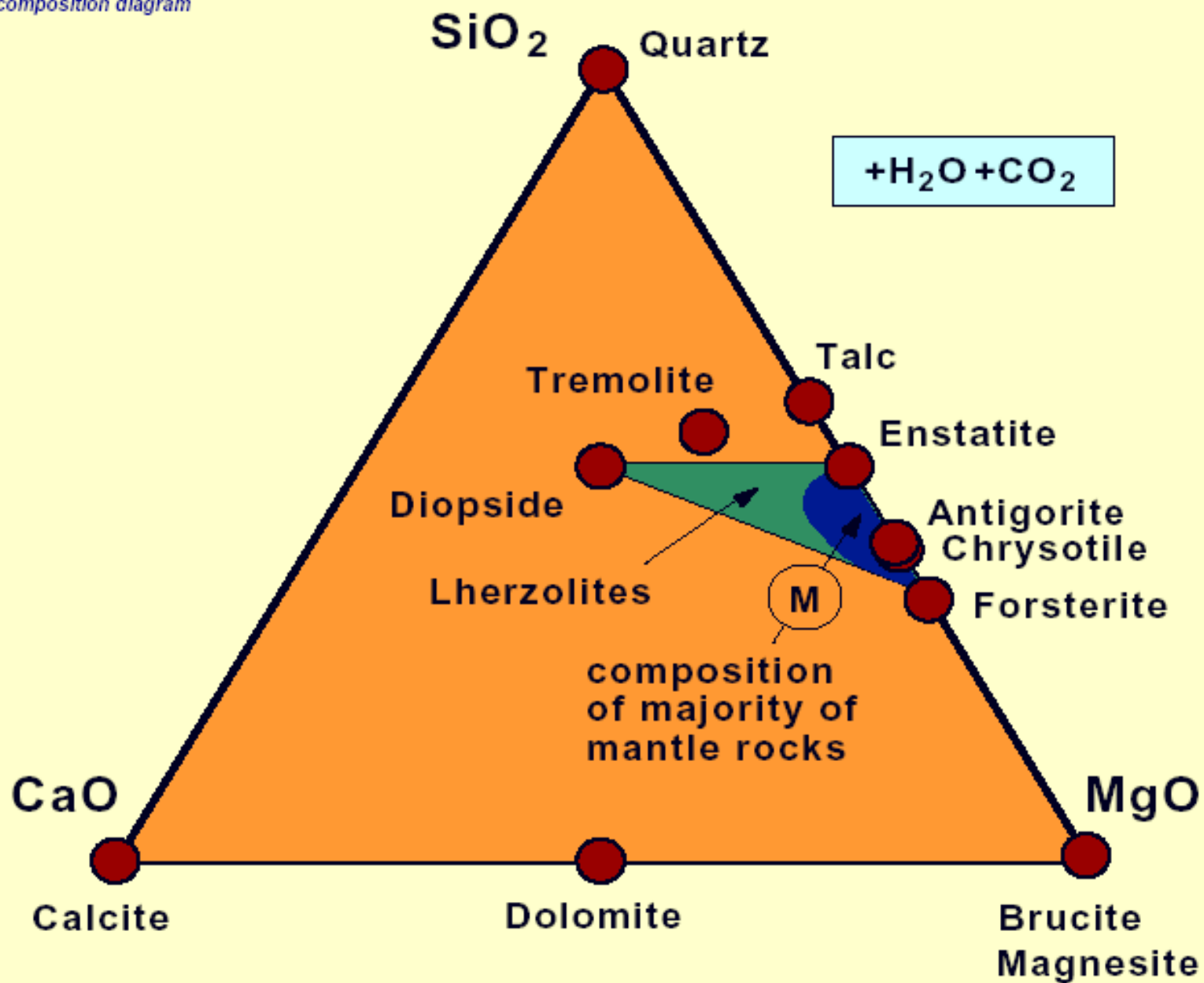


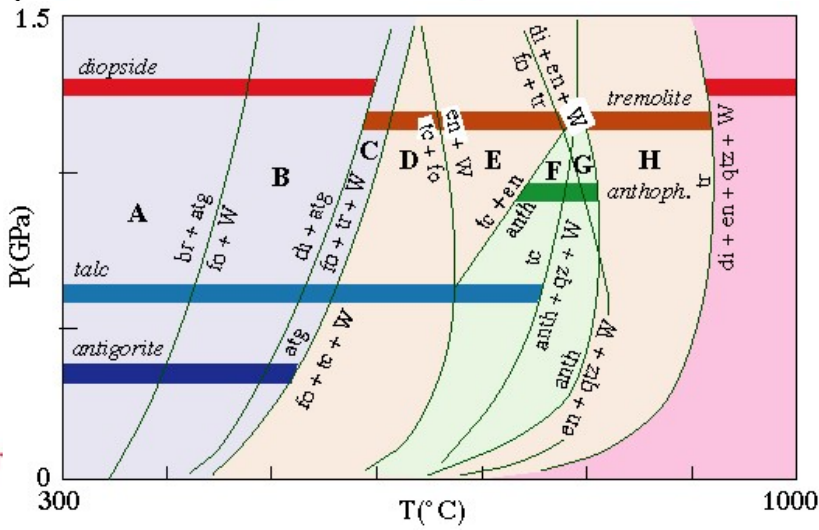
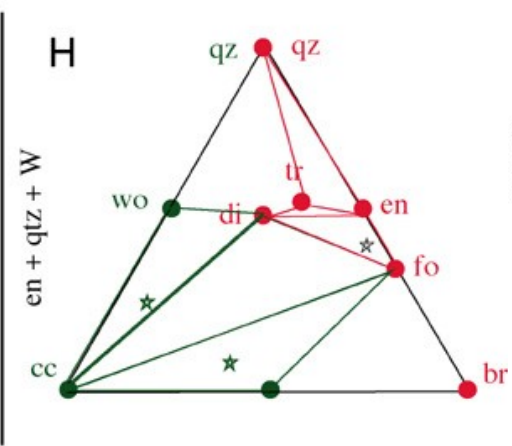
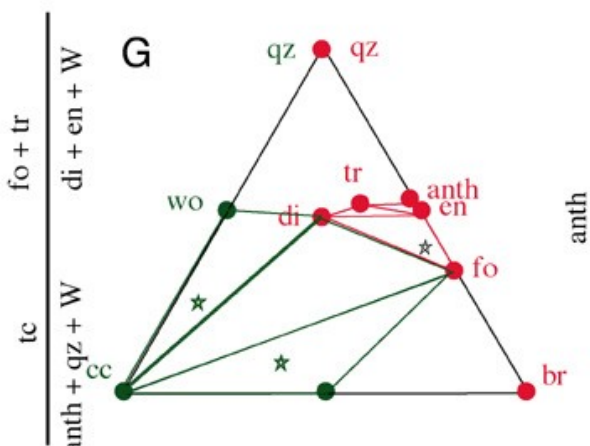
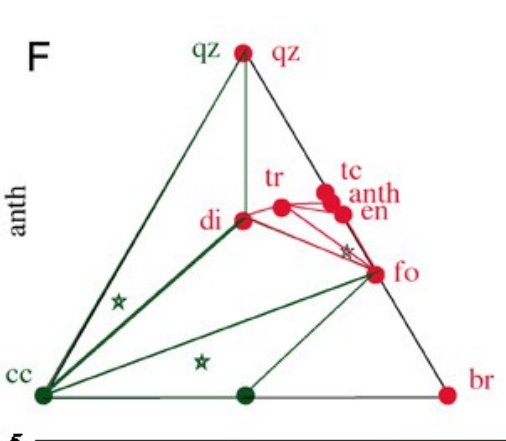
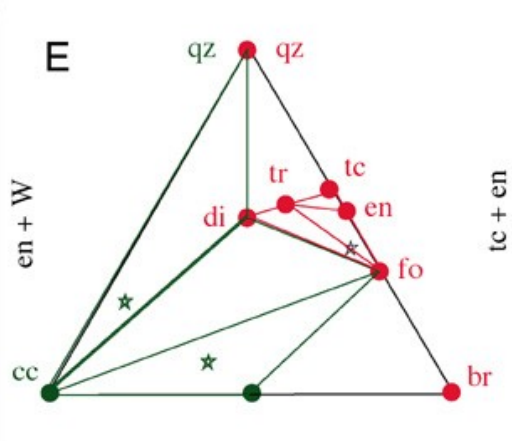
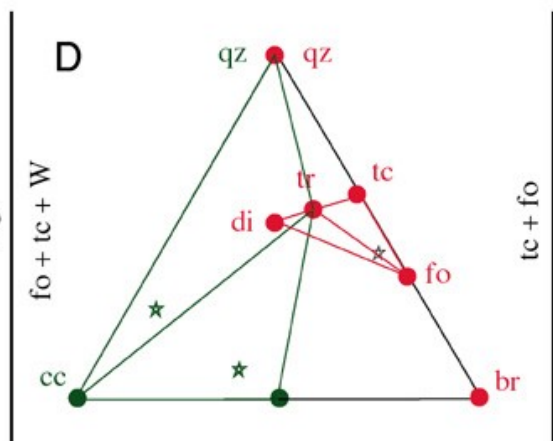
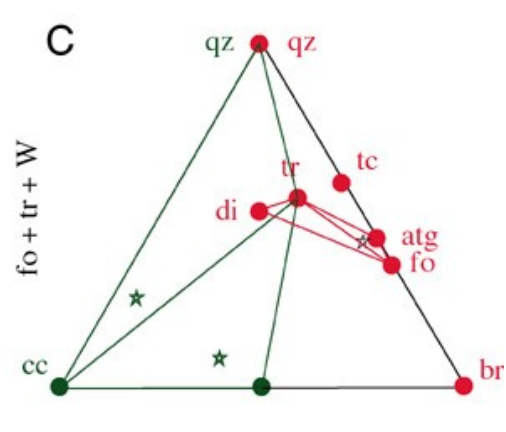
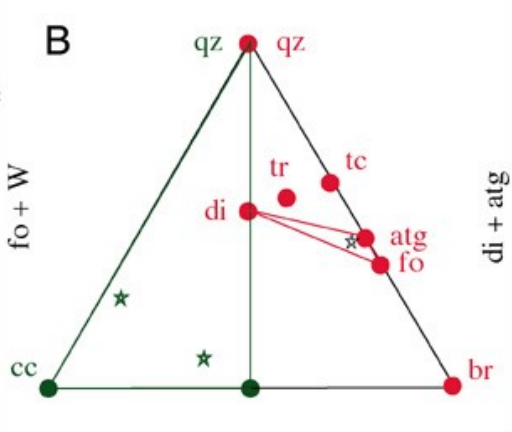
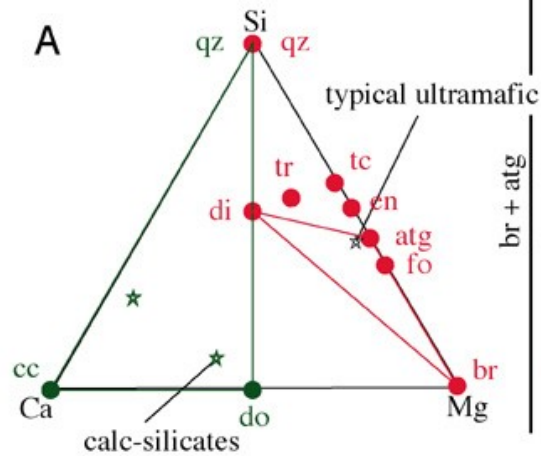


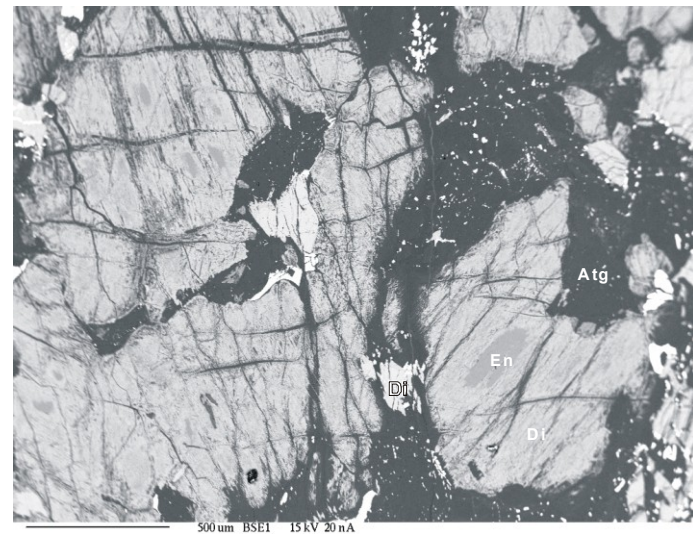
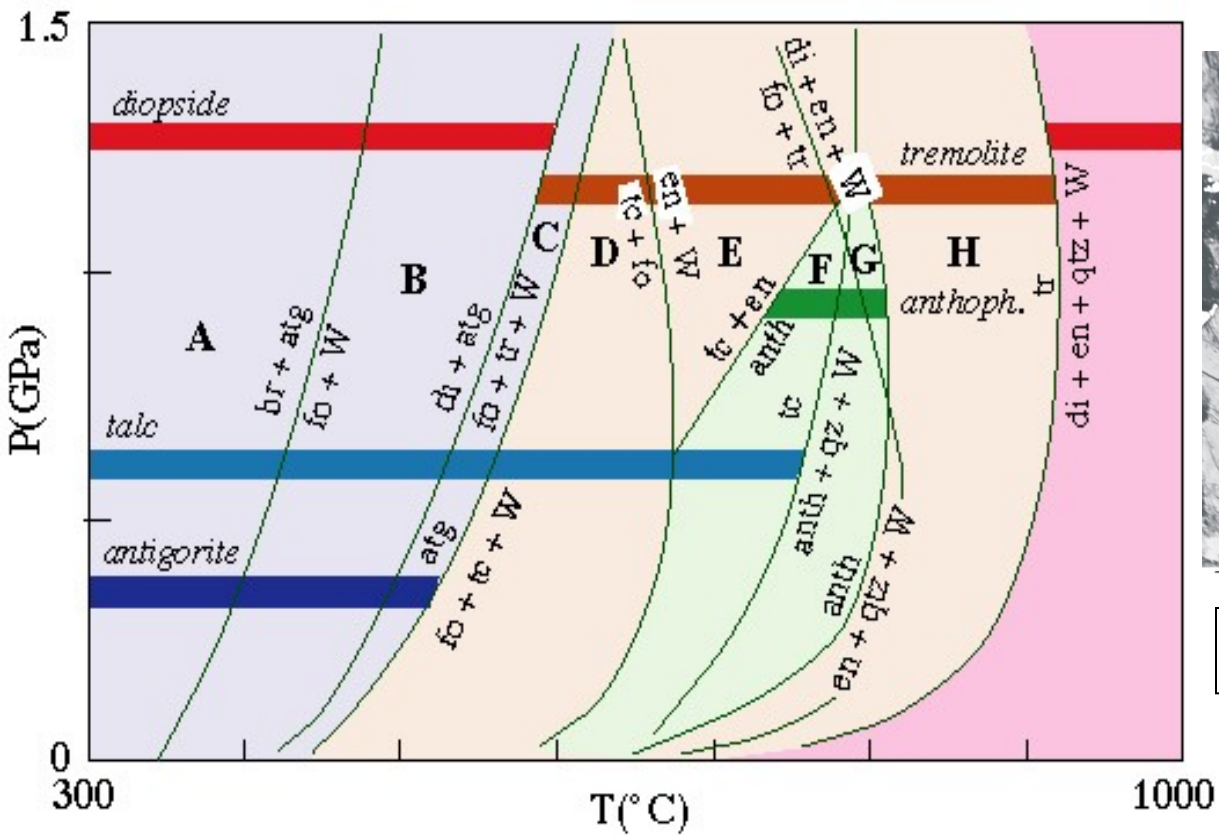
# Prográdní metamorfóza ultrabazických hornin v systému CSMH



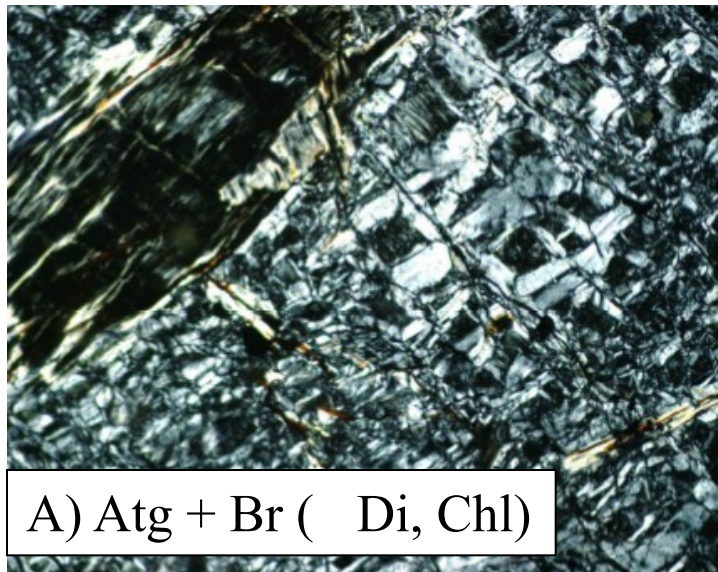




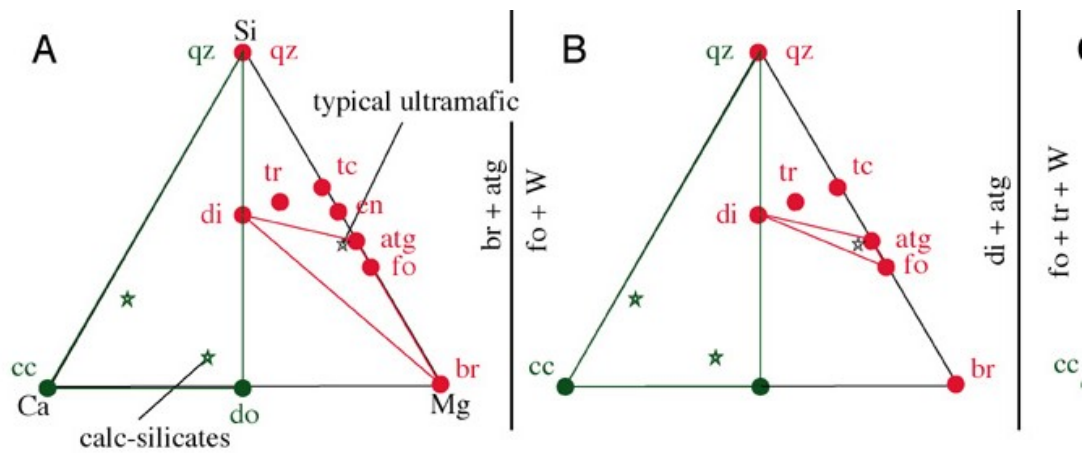


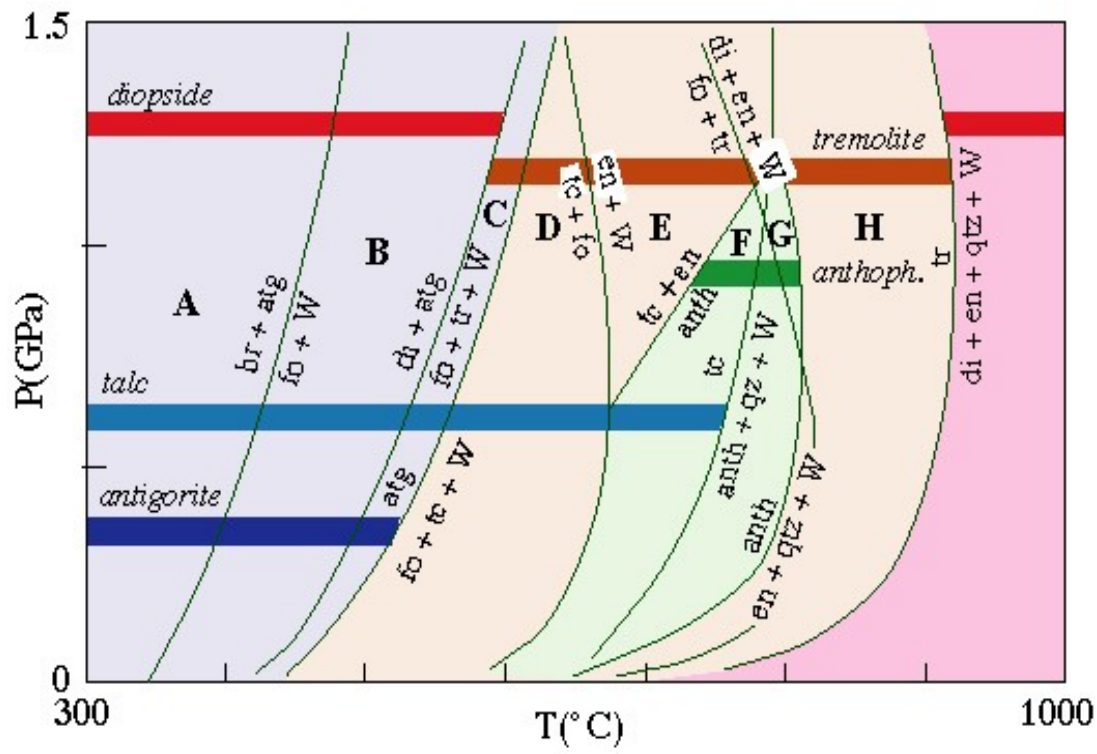
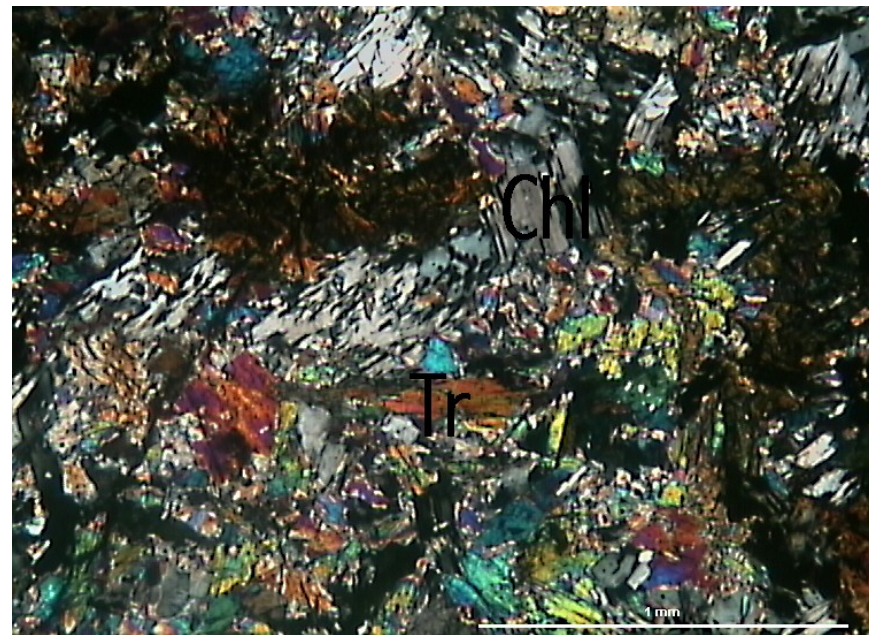
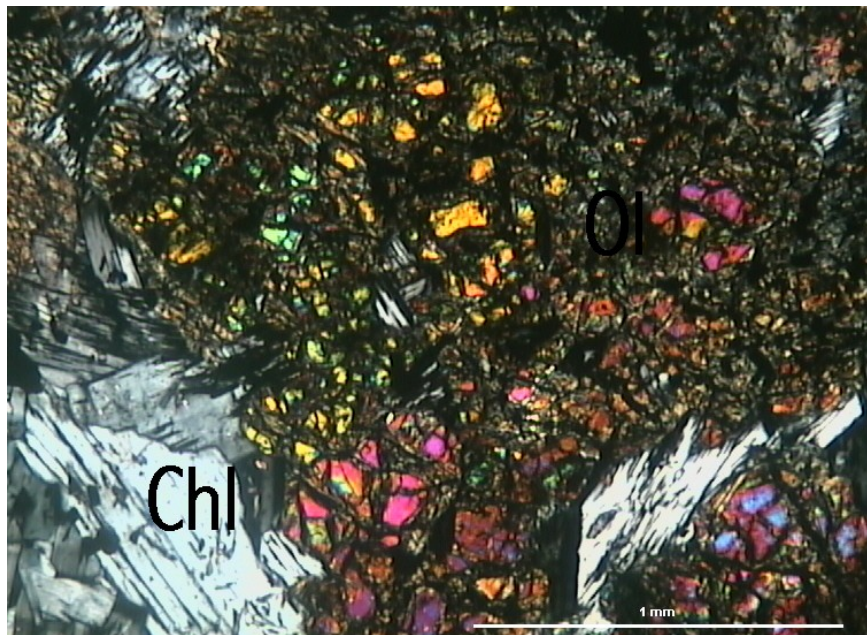


B) Atg + Di + Fo ( Chl)

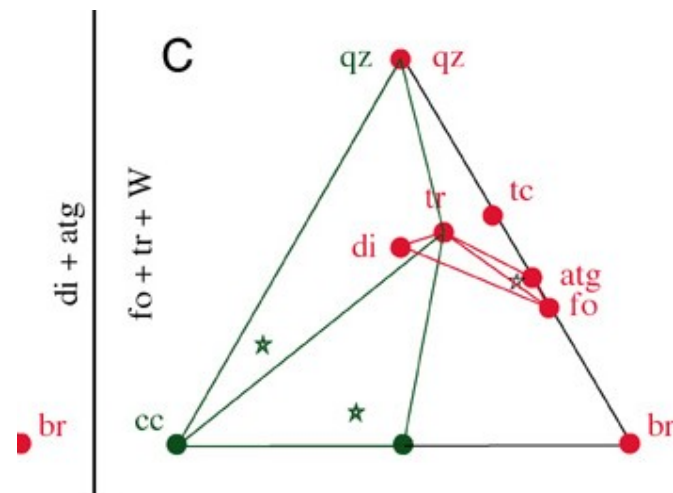


A) Atg + Br ( Di, Chl)

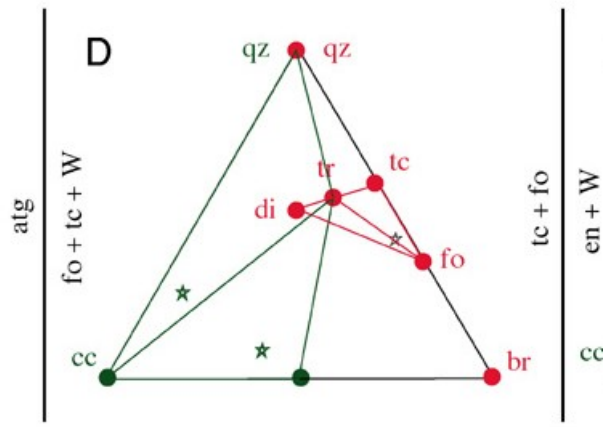
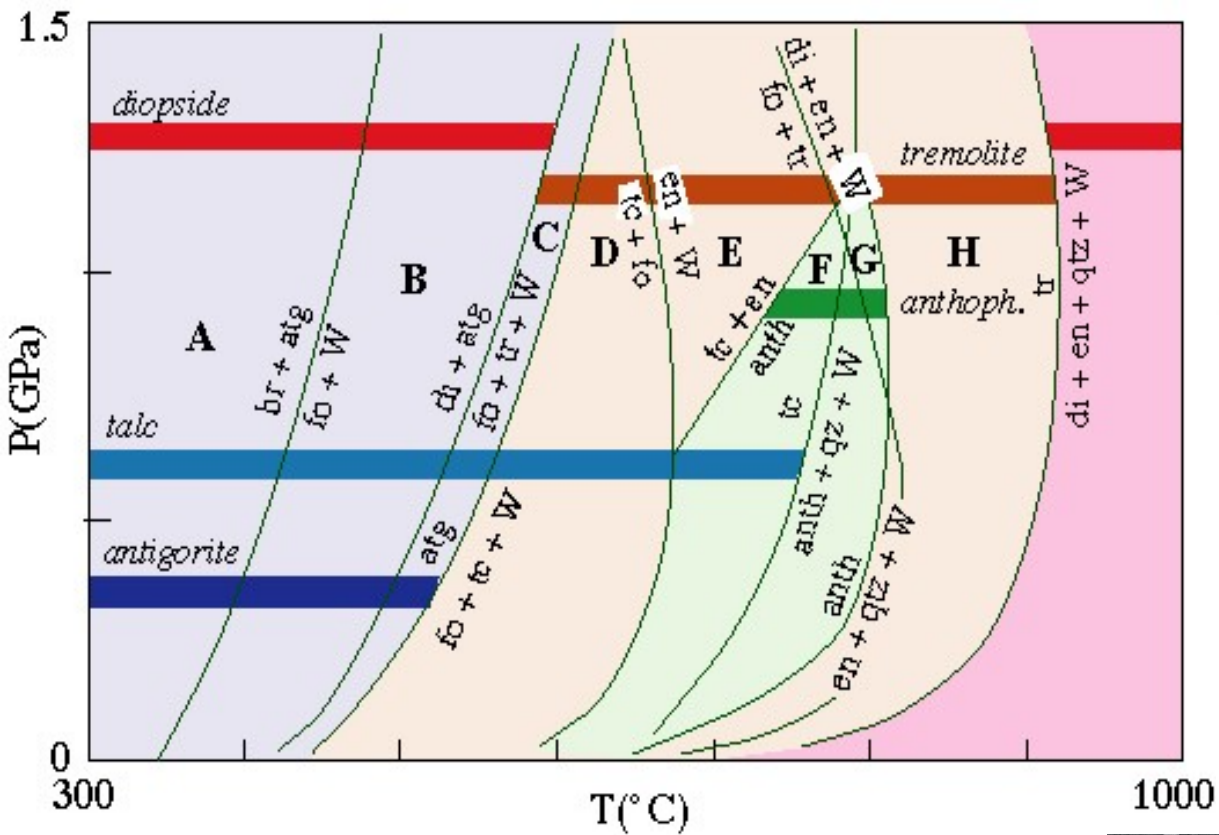




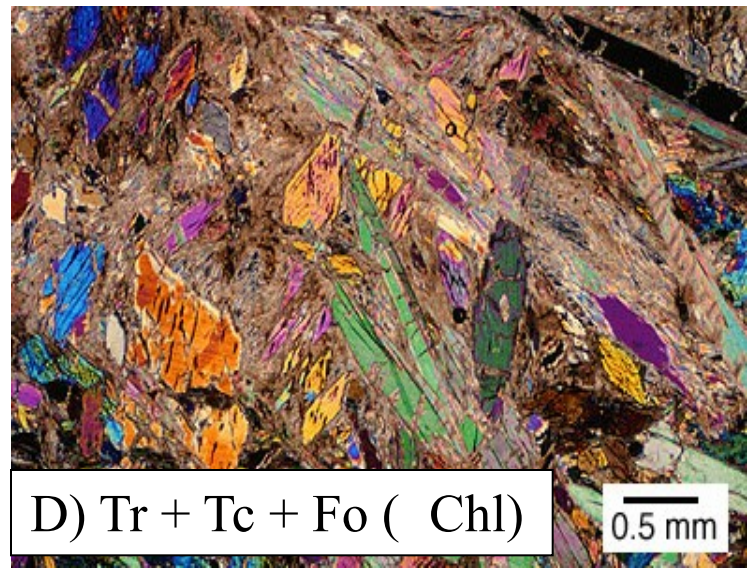
C) Tr + Atg + Fo + Chl



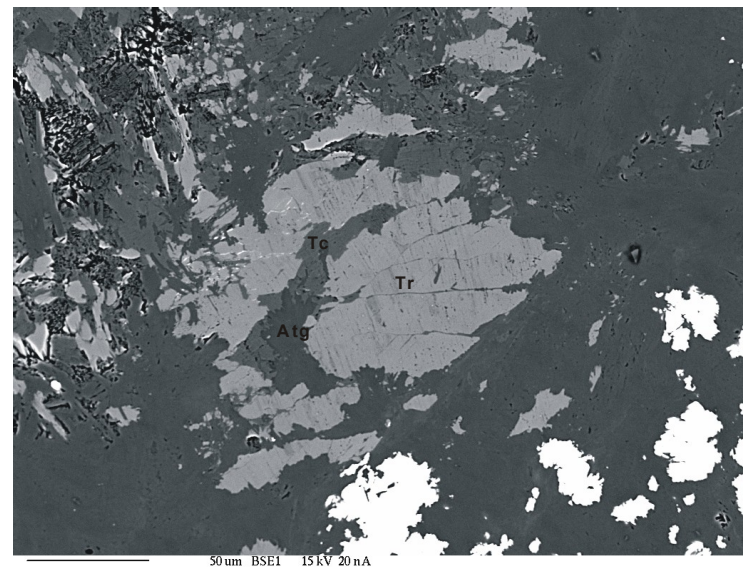




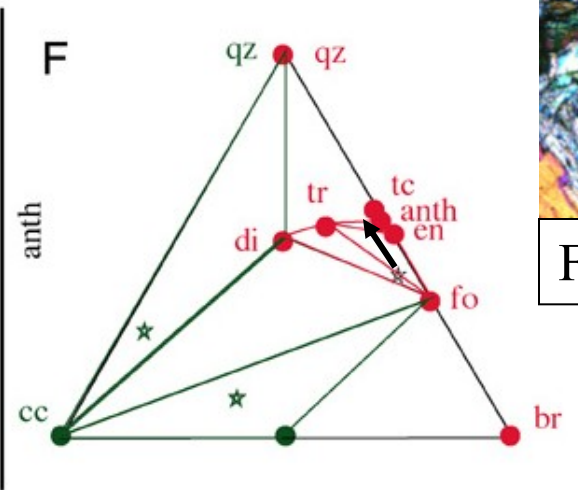
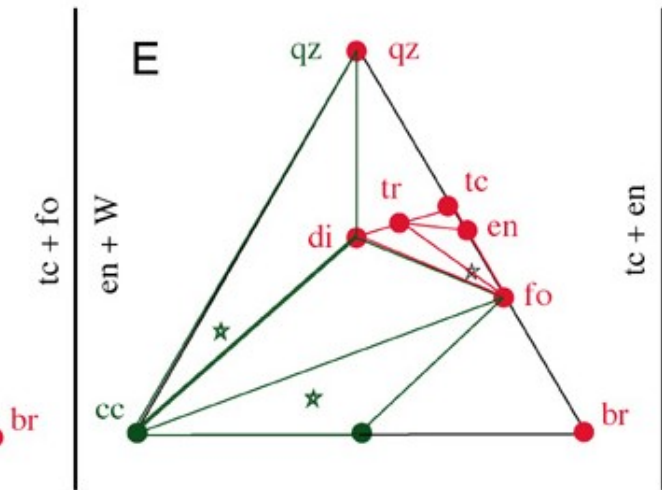
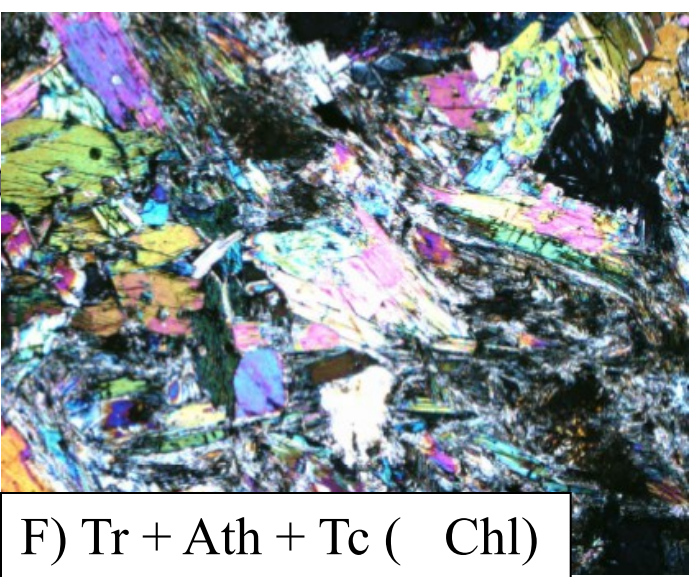
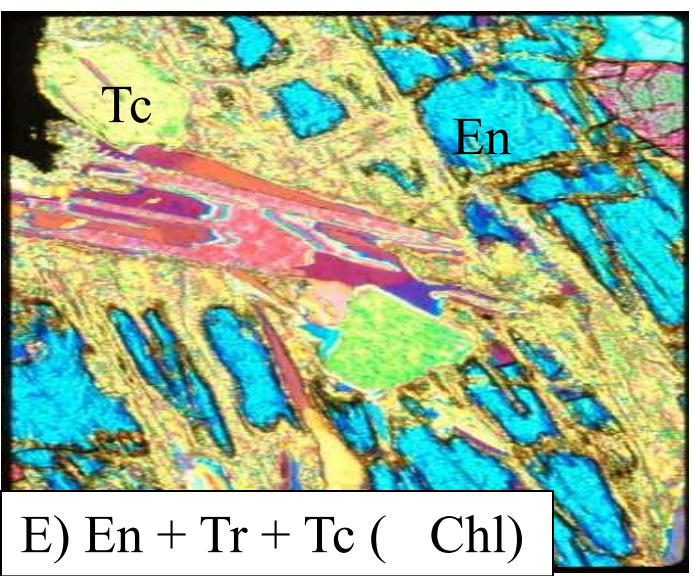
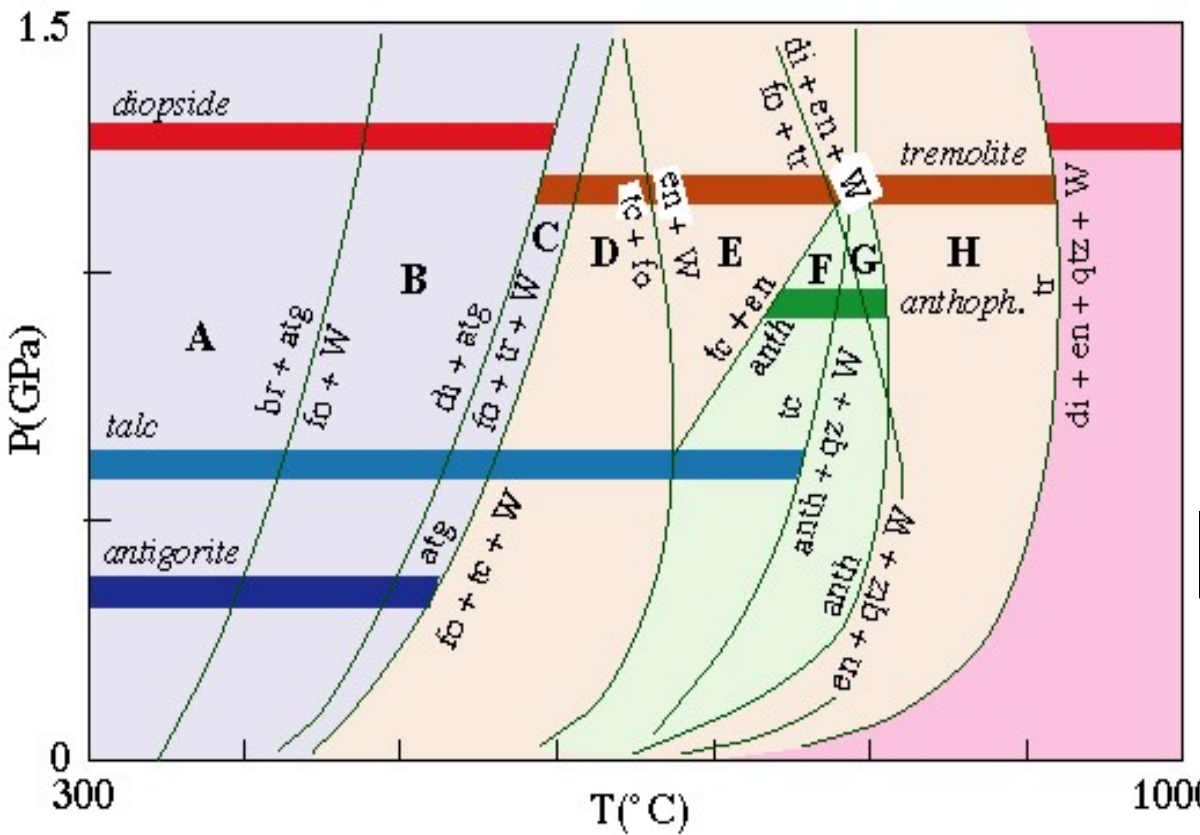
C) Tr + Atg + Fo ( Chl)

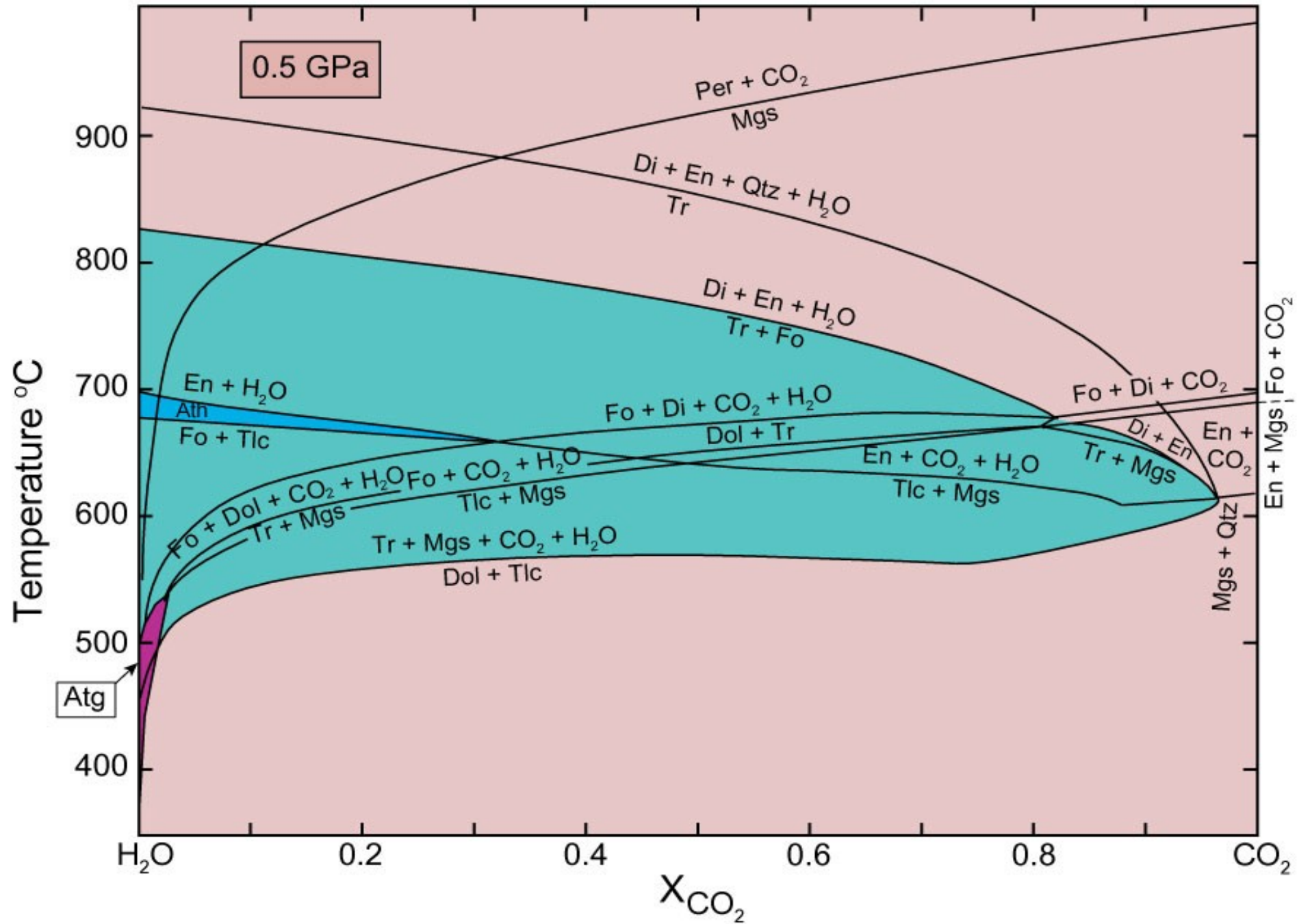


D) Tr + Tc + Fo ( Chl)



50 μm BSE1 15 kV 20 nA





system CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> Winter (2010) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

Facie	Kritická asociace	Al-fáze
nízkých stupňů	chryzotil + mastek + tremolit	chlorit
zelených a modrých břidlic	brucit + antigorit + diopsid forsterit + antigorit + diopsid	chlorit chlorit
amfibolitová	forsterit + antigorit + tremolit forsterit + mastek + tremolit forsterit + antofylit (nebo magnesio-cummingtonit)+ +tremolit forsterit + ortopyroxen + tremolit  forsterit + ortopyroxen + hornblend	chlorit chlorit chlorit/ chromit chlorit/ chromit spinel
pyroxenických rohovců (nízký P)	forsterit + ortopyroxen + klinopyroxen	plagioklas
granulitová (střední P)	forsterit + ortopyroxen + klinopyroxen + hornblend	spinel
eklogitová (vysoký P)	forsterit + ortopyroxen + klinopyroxen	granát

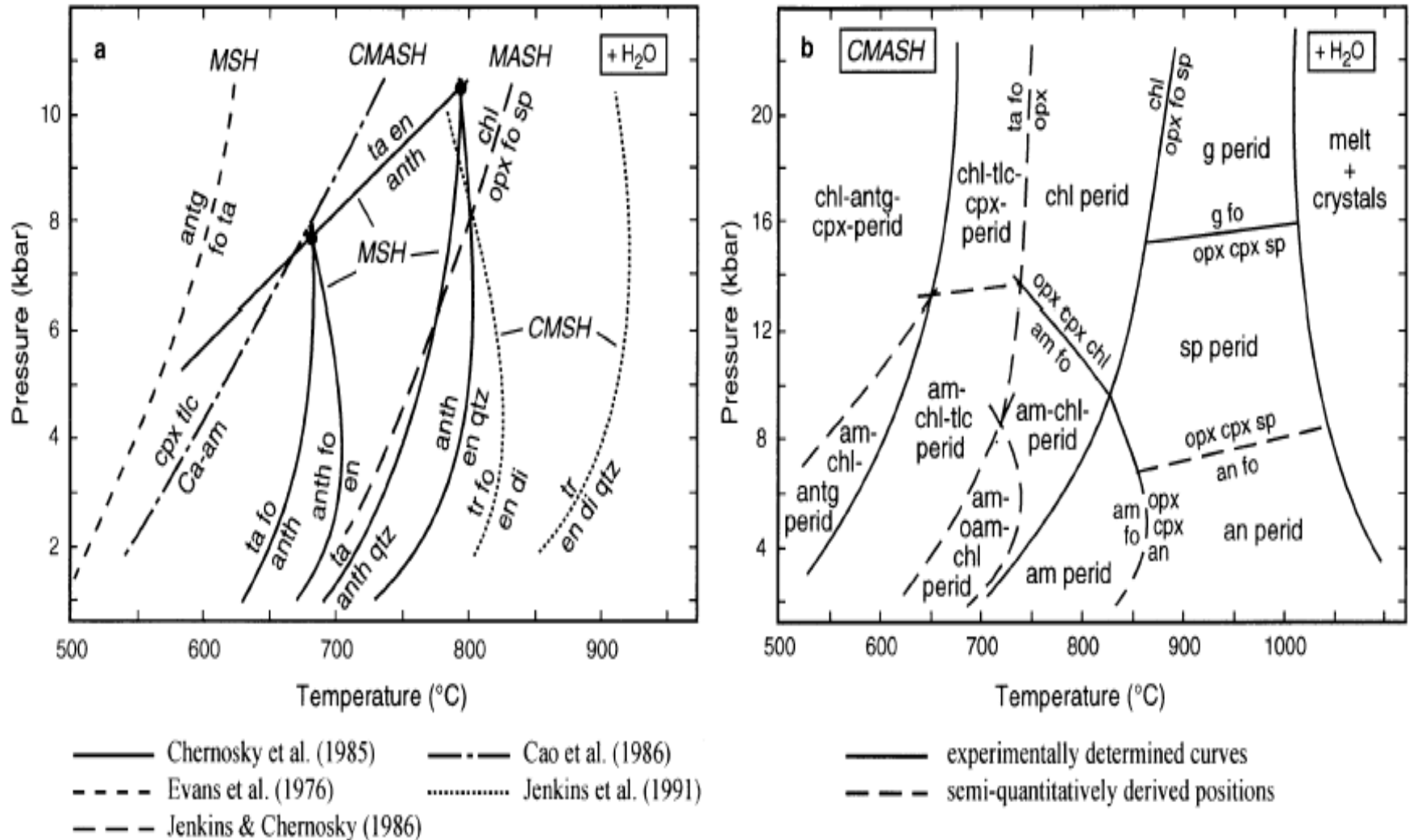
Granát (grt): pyropové složení, při Ca metasomatóze grossular

Spinel (sp): chromit-spinel

Plagioklas: anortit, albit

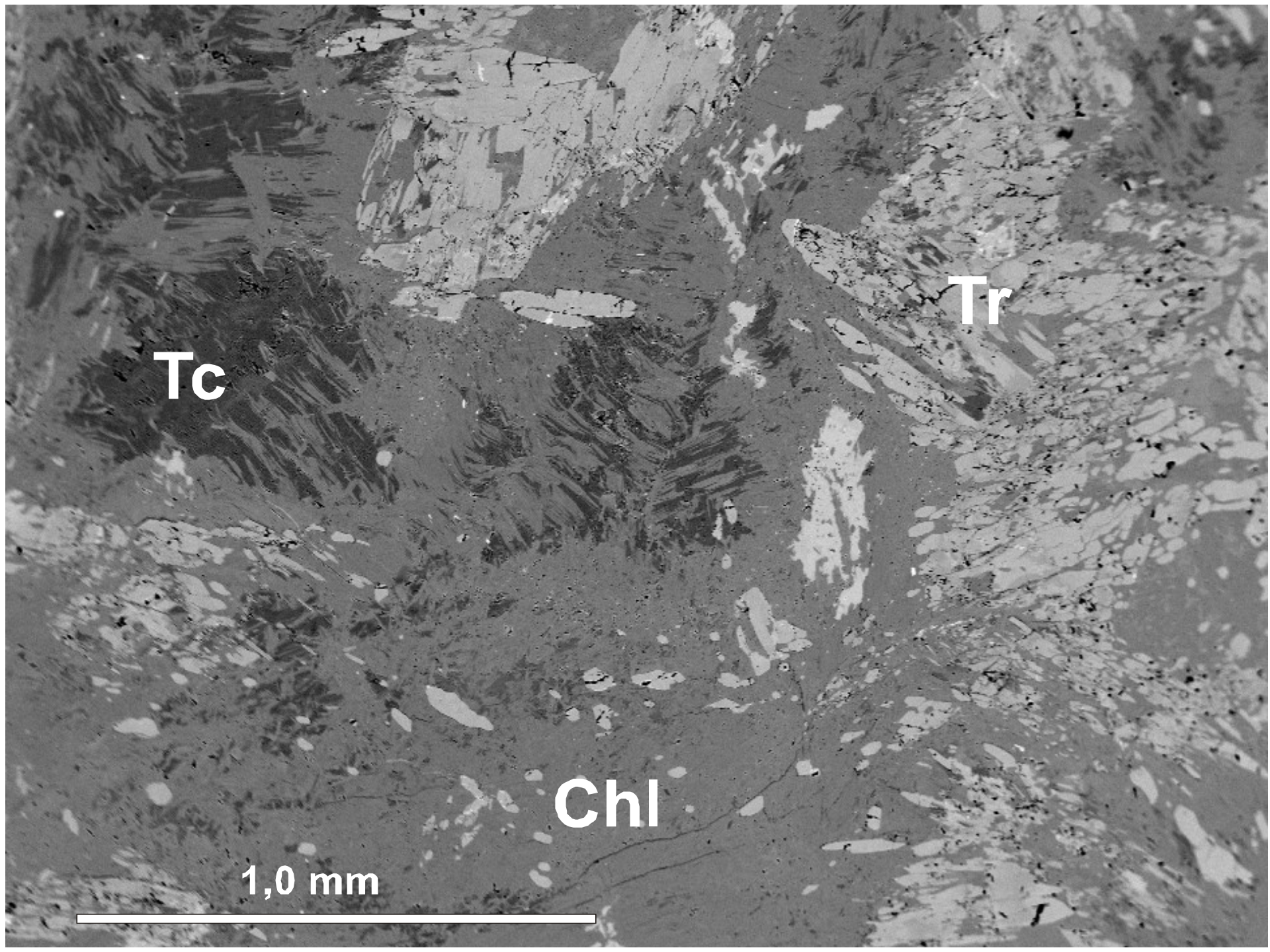
Chlorit (chl):  $(Mg_5Al)^{vi} (AlSi_3)^{iv}O_{10}(OH)_8$  > klinochlor – chamosit, substituce :  $FeMg_{-1}$

# Význam hliníku v systému ultrabazických hornin



**Fig. 2a** Compilation of experimental data in various model systems. **b** Petrogenetic grid for peridotites of Jenkins (1981). *antg* antigorite; *g* garnet; *perid* peridotite; *qtz* quartz. For other abbreviations see

Table 1; note that *ta* = Mg-talc and *tlc* = talc with Tschermak's component

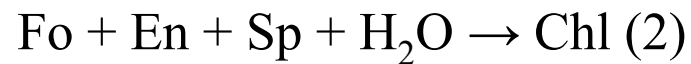
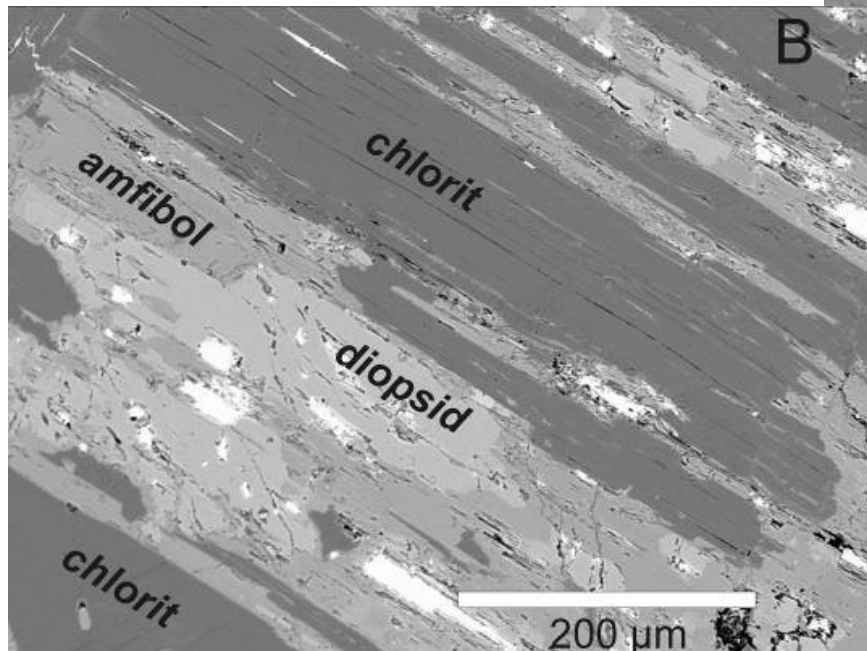
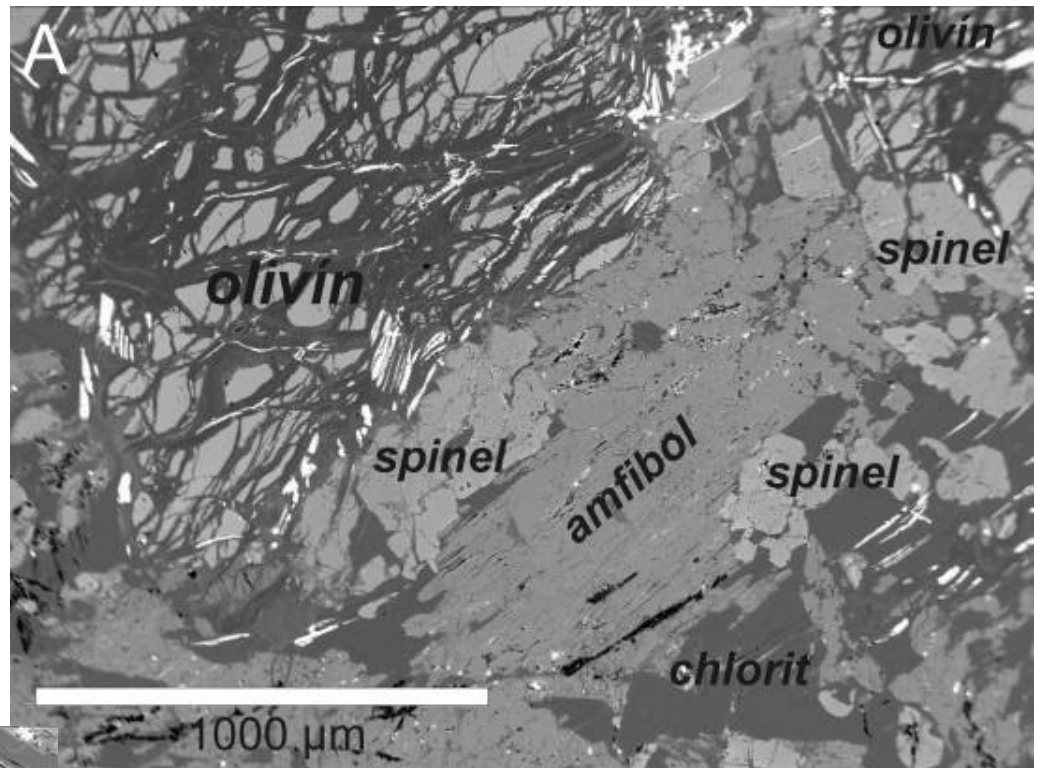
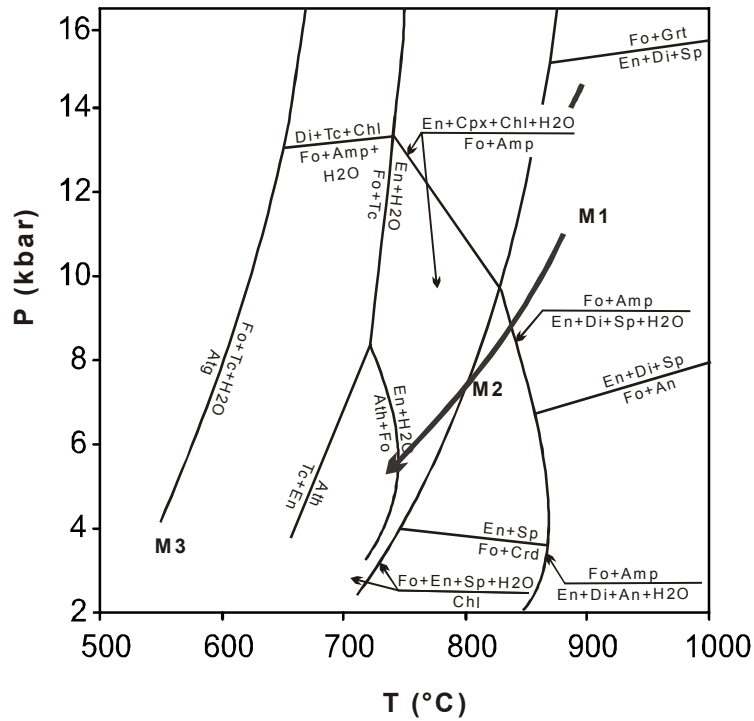


Tc

Tr

Chl

1,0 mm



CMASH			CMFASH		
Phases		Phase components	Phases		Phase components
Chlorite (chl)	clin ames	$Mg_4MgAl[Si_3Al]O_{10}(OH)_2$ $Mg_4Al_2[Si_2Al_2]O_{10}(OH)_2$	clin daph ames		$Mg_4MgAl[Si_3Al]O_{10}(OH)_8$ $Fe_4FeAl[Si_3Al]O_{10}(OH)_8$ $Mg_4Al_2[Si_2Al_2]O_{10}(OH)_8$
Ca-Amphibole (am)	tr ts	$Ca_2Mg_3Mg_2[Si_8]O_{22}(OH)_2$ $Ca_2Mg_3Al_2[Si_6Al_2]O_{22}(OH)_2$	tr ftr ts		$Ca_2Mg_3Mg_2[Si_8]O_{22}(OH)_2$ $Ca_2Fe_3Fe_2[Si_8]O_{22}(OH)_2$ $Ca_2Mg_3Al_2[Si_6Al_2]O_{22}(OH)_2$
Orthoamphibole (oam)	anth ged	$Mg_5Mg_2[Si_8]O_{22}(OH)_2$ $Mg_5Al_2[Si_6Al_2]O_{22}(OH)_2$	anth fath ged		$Mg_5Mg_2[Si_8]O_{22}(OH)_2$ $Fe_5Fe_2[Si_8]O_{22}(OH)_2$ $Mg_5Al_2[Si_6Al_2]O_{22}(OH)_2$
Talc (tlc)	ta tats	$Mg_2Mg[Si_4]O_{10}(OH)_2$ $Mg_2Al[Si_3Al]O_{10}(OH)_2$	ta fta tats		$Mg_2Mg[Si_4]O_{10}(OH)_2$ $Fe_2Fe[Si_4]O_{22}(OH)_2$ $Mg_2Al[Si_3Al]O_{22}(OH)_2$
Orthopyroxene (opx)	en mgts	$MgMg[Si_2]O_6$ $MgAl[SiAl]O_6$	en fs mgts		$MgMg[Si_2]O_6$ $FeFe[Si_2]O_6$ $MgAl[SiAl]O_6$
Clinopyroxene (cpx)	di cats	$CaMg[Si_2]O_6$ $CaAl[SiAl]O_6$	di hed cats cats		$CaMg[Si_2]O_6$ $CaFe[Si_2]O_6$ $CaAl[SiAl]O_6$ $CaAl[SiAl]O_6$
Forsterite (fo)	fo	$Mg_2SiO_4$	Olivine (ol)	fo fa	$Mg_2SiO_4$ $Fe_2SiO_4$
Spinel (sp)	sp	$MgAl_2O_4$	Spinel (spl)	sp	$MgAl_2O_4$
Anorthite (an)	an	$CaAl_2Si_2O_8$	herc	herc	$FeAl_2O_4$

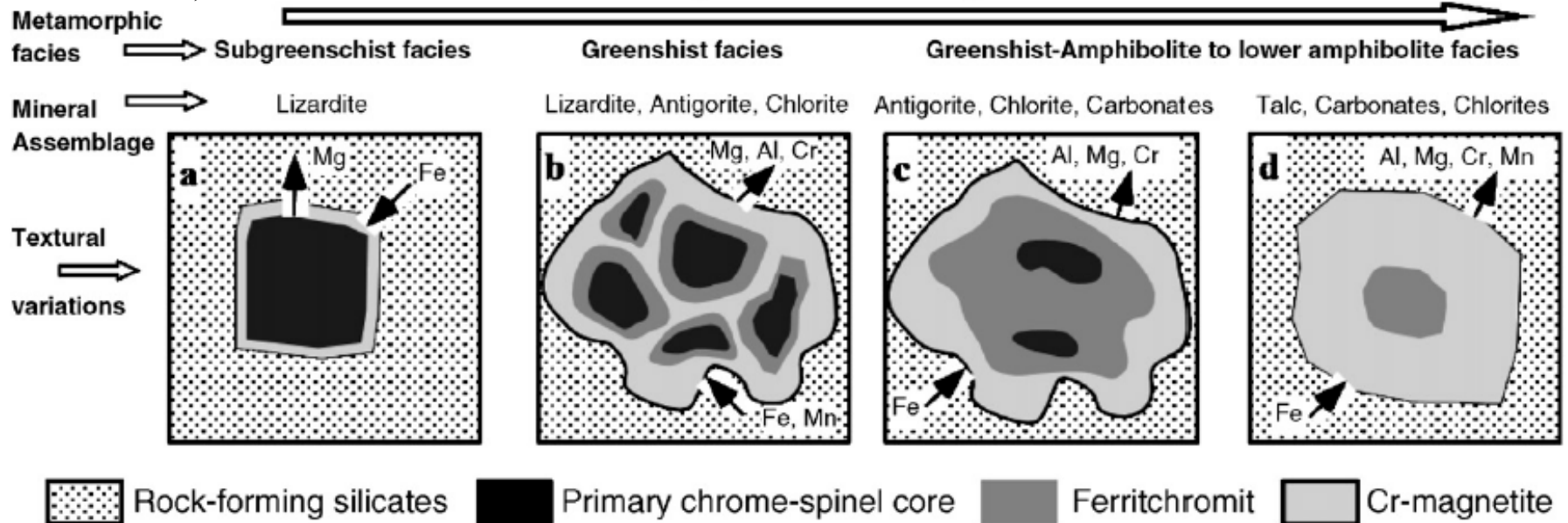


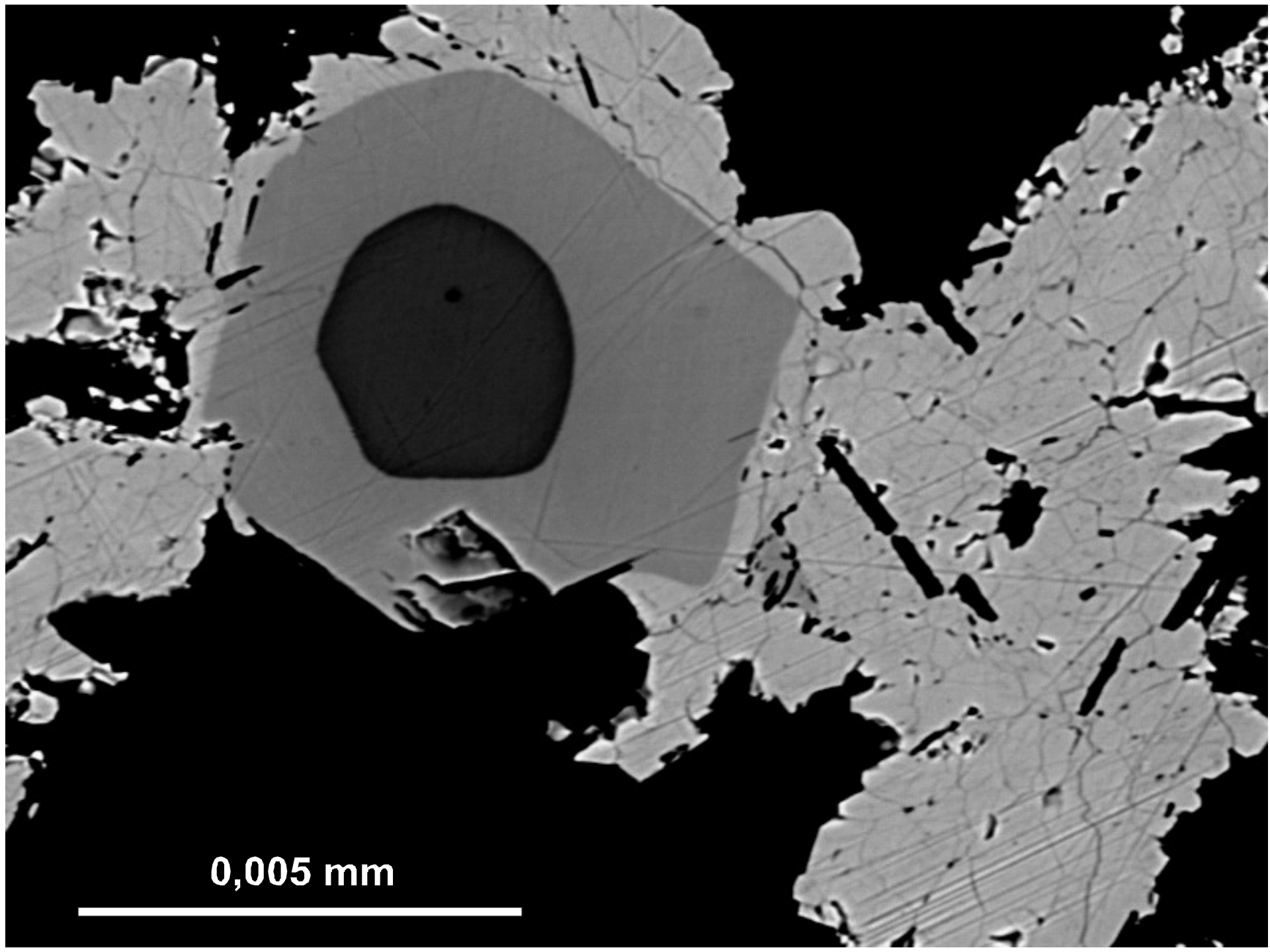
# Spinelidy jako indikátor stupně metamorfózy

- během progradní metamorfózy dochází k postupné změně chemického složení původního chromitu
- vzniká chrómem bohatý magnetit na úkor chromitu má několik fází (Farahat 2008)
- za podmínek velmi nízkého stupně metamorfózy je původní chromový spinel lemován v důsledku přínosu Fe a odnosu Mg chromovým magnetitem
- ve facii zelených břidlic dochází k reekvilibraci s okolními silikáty (Al, Mg, Cr)
- relikty původního chromového spinelu lemuje ferichromit, který jej odděluje od chromového magnetitu na okraji
- v amfibolitové facii často dochází k úplnému nahrazení původního chromového spinelu ferichromitem a ten je lemován chromovým magnetitem

(Farahat 2008)

Increasing Grade of Metamorphism

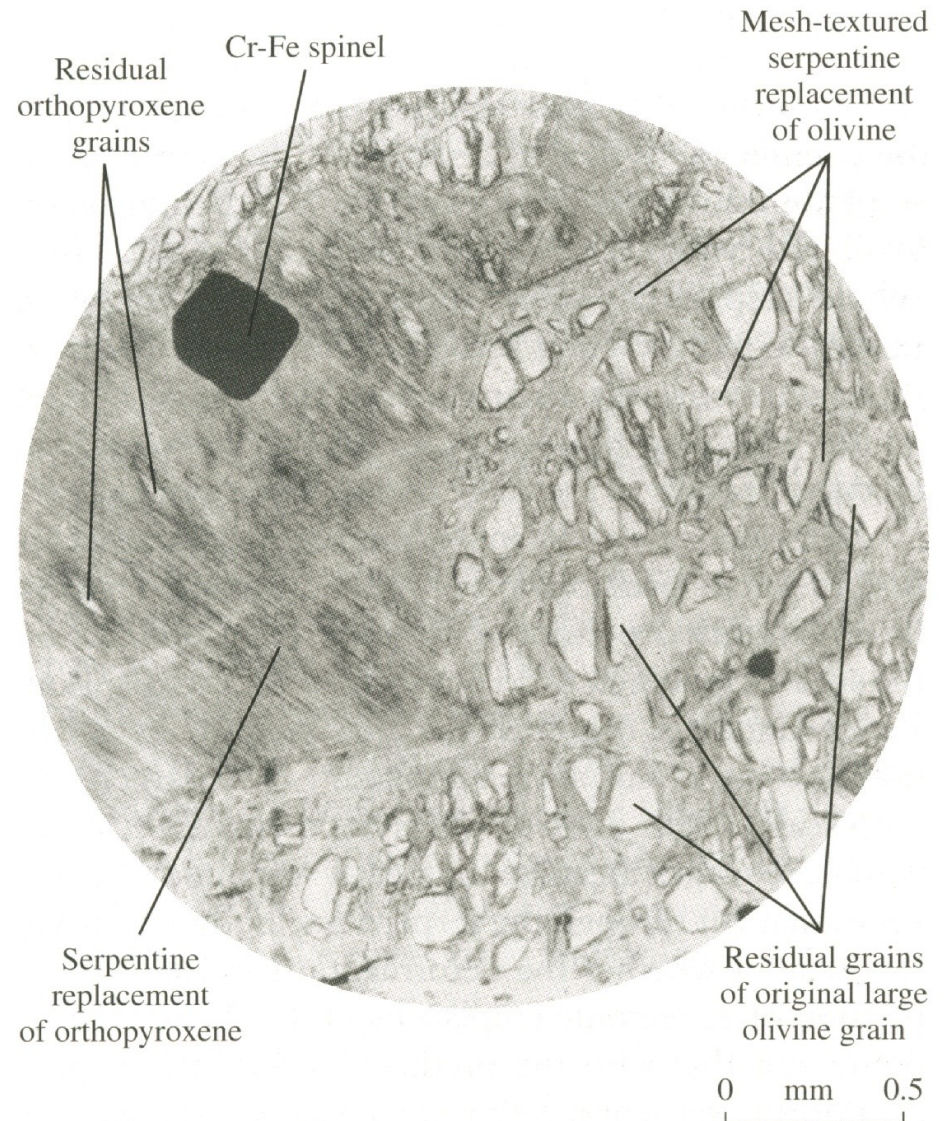




0,005 mm

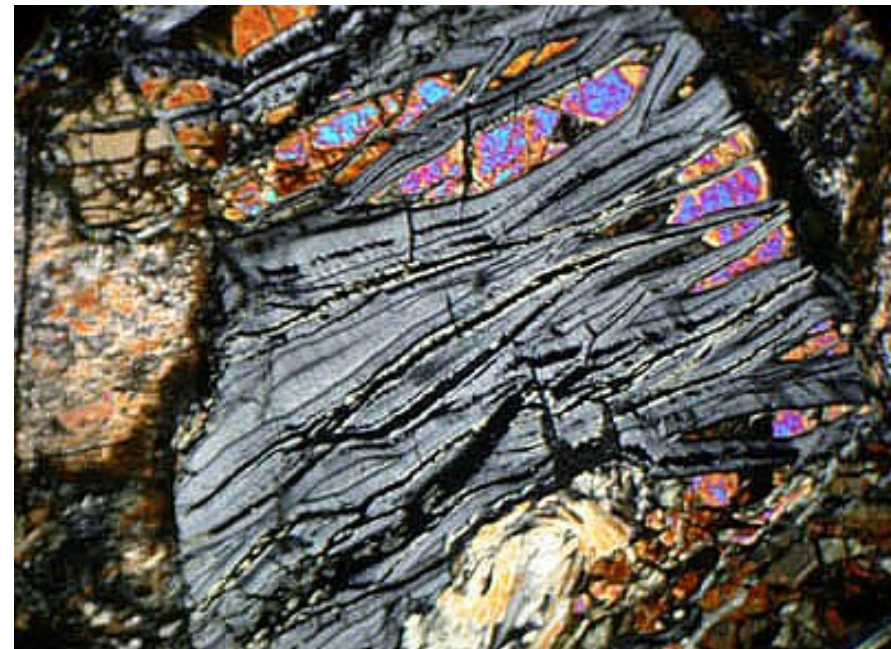
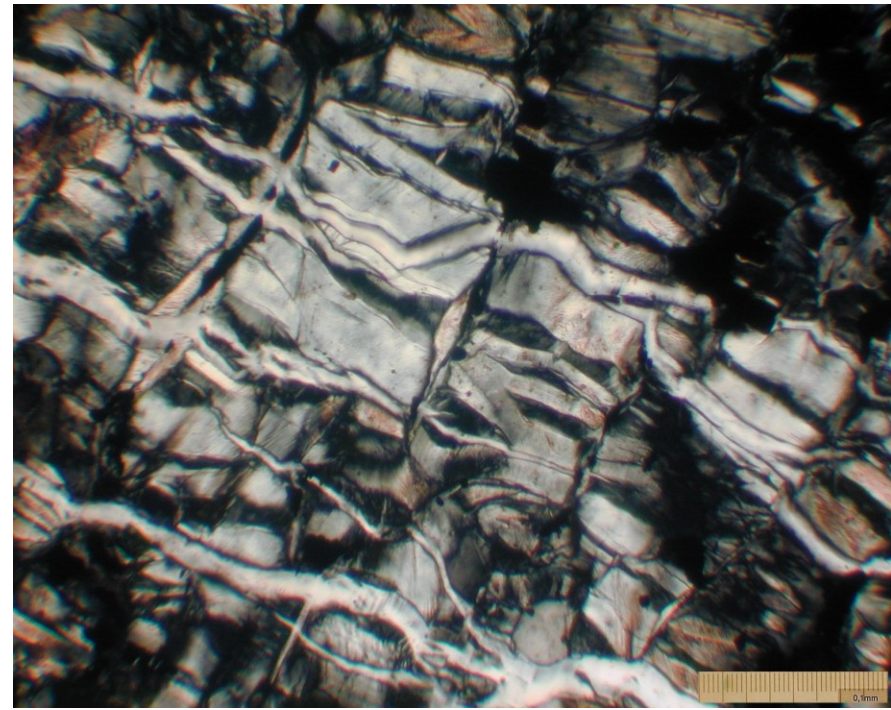
## 4) Hydratační reakce v ultramafických horninách

- v ultramafických horninách dochází k hydrataci bezvodých minerálů již za velmi nízkých teplot
- *nejčastěji jsou postiženy minerály:*
  - **Opx:**  $(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$
  - **Cpx:**  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
  - **Ol:**  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
- *nejčastější nízkoteplotní alterace:*
  - Olivín → serpentín
  - ortopyroxen → serpentín
  - Olivín + ortopyroxen → serpentín + Fe oxidy + mastek + brucit
  - Klinopyroxen → amfibol + hydratované Ca-Al silikáty + chlorit
  - Plagioklas → Ca-Al silikáty + jílové minerály + kalcit



# Serpentinizace

- Přeměna začíná podél puklin a štěpných trhlin (pyroxen, olivín)
- minerály serpentínové skupiny jsou stabilní v podmínkách facie zelených břidlic
- lizardit a chrisotil stabilní do 300 °C
- antigorit stabilní do cca 500-600°C
- serpentinizace » otevřený systém
- Mg – bohatá hornina tvořená bezvodými minerály se mění na směs hydratovaných silikátů
- minerály serpentínové skupiny obsahují 12 – 14 % H<sub>2</sub>O
- serpentinity vznikly interakcí s mořskou vodou nebo meteorickou vodou (<sup>18</sup>O)
- lokálně může serpentinizace probíhat za velmi nízké fugacity kyslíku (vzniká přírodní Fe nebo slitiny Fe-Ni-Co) » Fe obsažené v olivínech a pyroxenech reaguje s O v pronikající vodě a vzniká magnetit ale volný H redukuje část Fe případně Co a Ni až do kovové formy



- serpentinity mohou vznikat v důsledku těchto dvou rozdílných reakcí :



forsterite                      serpentine              brucite

88 cm<sup>3</sup>                      111 cm<sup>3</sup>              25 cm<sup>3</sup>

$\Delta V = 48 \text{ cm}^3$



forsterite                      serpentine

271 cm<sup>3</sup>                      221 cm<sup>3</sup>

865 g              90 g              554 g



brucite              removed in solution

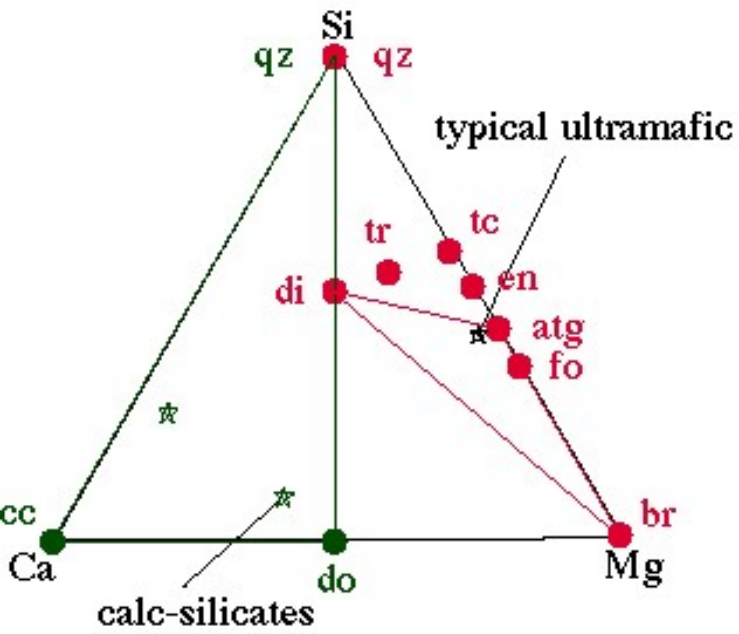
49 cm<sup>3</sup> 116 g    173 g              129 g

$\Delta V \sim 0$

- v tenké oceánské kůře může rozsáhlá serpentinizace na středooceánském hřbetě vyvolat výzdvih
- nebyly pozorovány projevy expanze
- nemůžeme to ale říci s jistotou, protože velká tělesa serpentinitů porušují četné zlomy
- zlomy mohou souviset s expanzí

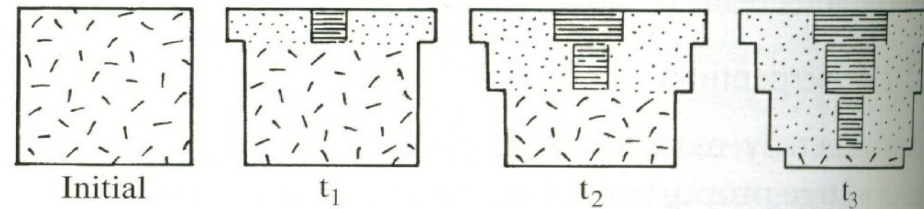
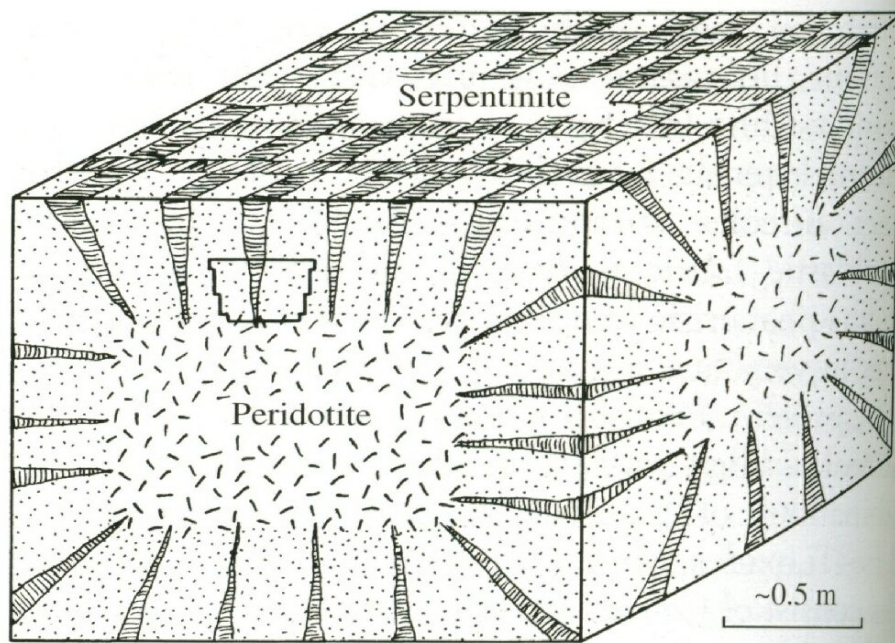
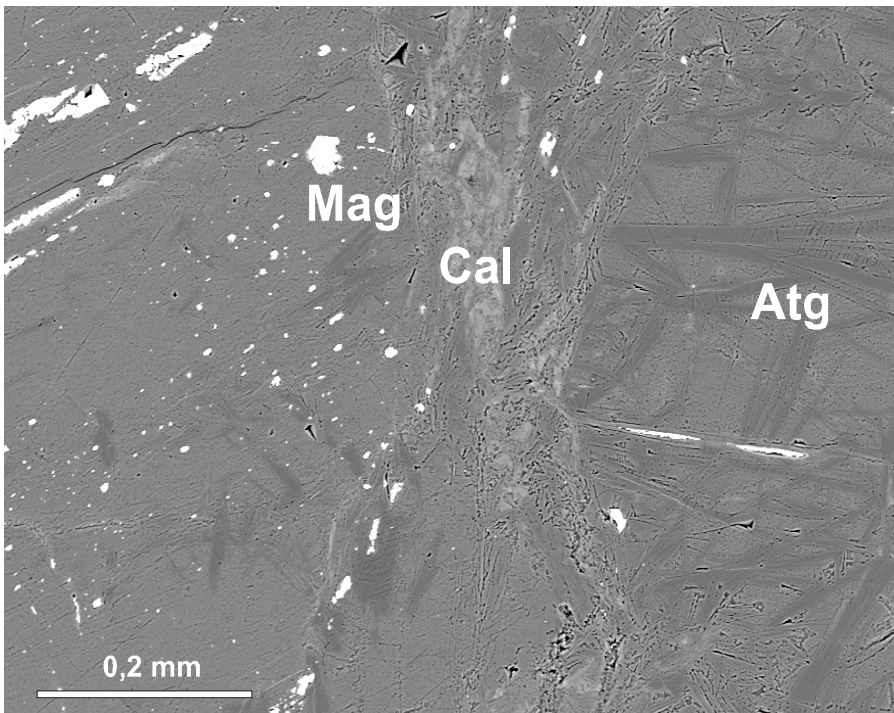
- všechno Mg a Si v oceánu může být produktem reakcí na středooceánských hřbetech
- avšak v různě intenzivně serpentinizovaných peridotitech je poměr SiO<sub>2</sub> / (MgO + CaO + MnO + NiO + FeO) zachován

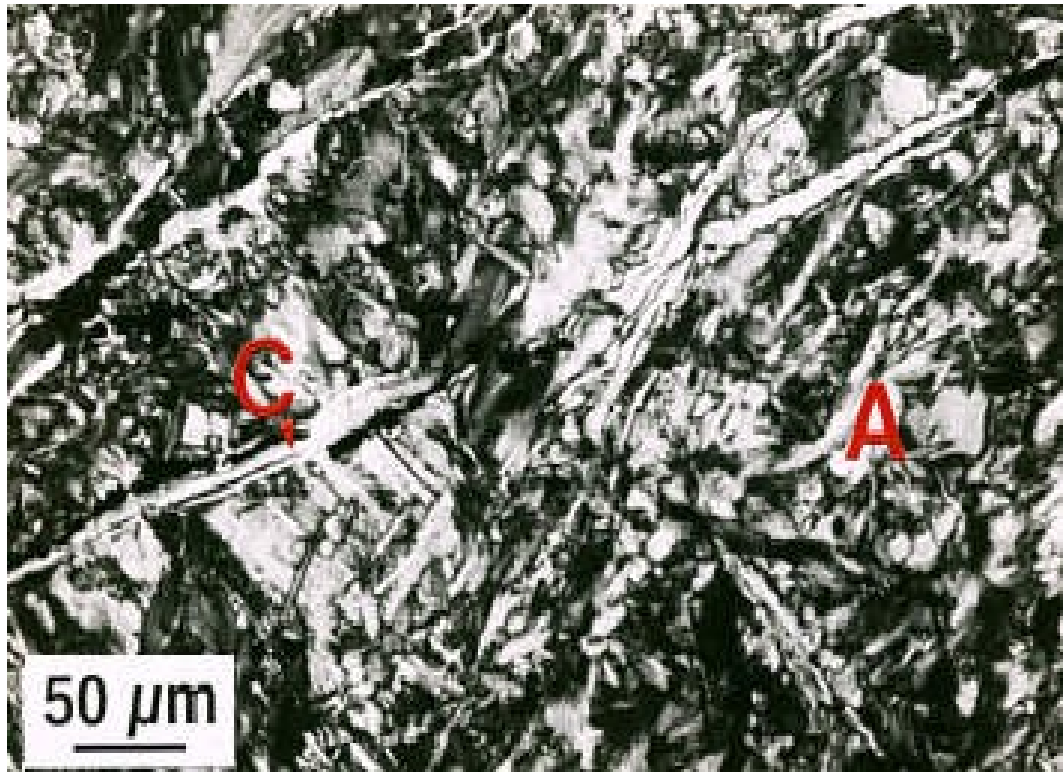
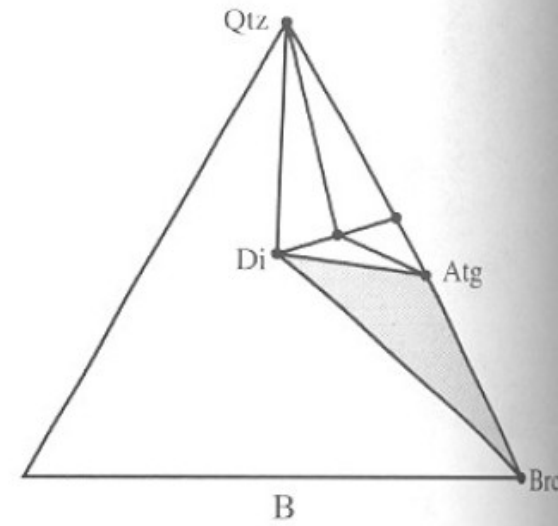
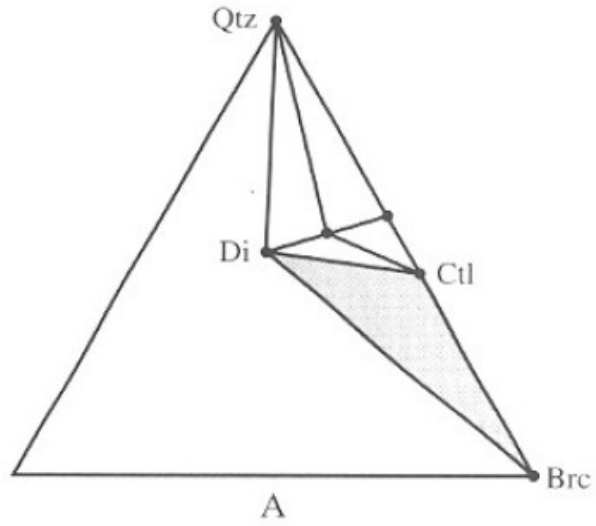
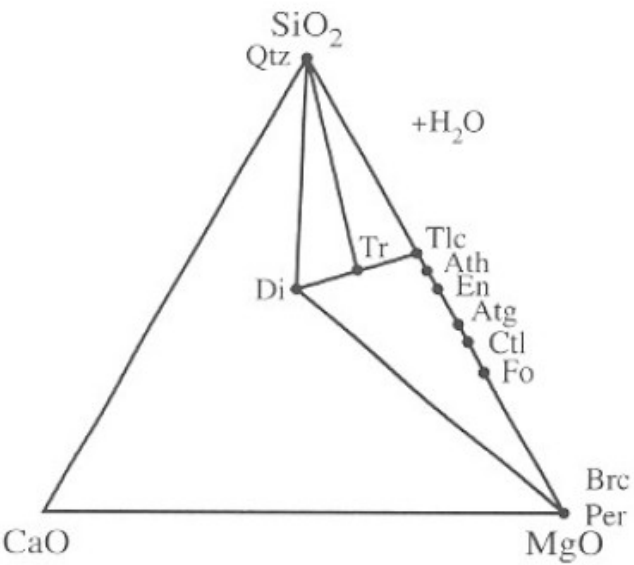
- Zdroje H<sub>2</sub>O:
  - a) pozdní granitické intruze bohaté vodou
  - b) okolní horniny (nemet.- nízko met.)
  - c) litologická rozhraní a zlomy



- qz: quartz
- tc: talc
- tr: tremolite
- en: enstatite
- di: diopside
- atg: antigorite
- fo: forsterite
- cc: calcite
- do: dolomite
- br: brucite

- Ca je obsaženo v primárních Cpx ale není ve většině novotvořených fází → v otevřeném systému přechází do roztoků a migruje (rodingitizace)





C (Ctl) = chrisotil, A (Atg) = antigorit

- sepentinity mají nižší hustotu oproti primárním dunitům a peridotitům (2,6-2,8 g/cm<sup>3</sup> vs. 3,3 g/cm<sup>3</sup>)

➤ **Lizardit**

< 200 °C, do ~ 20 kbar  
 facie zelených a modrých břidlic

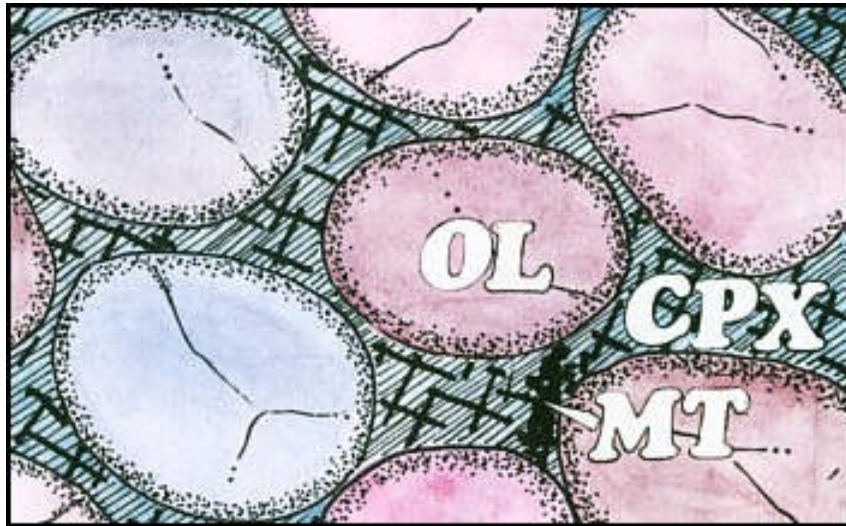
➤ **Chrisotil**

< 200 °C do ~300 °C, < 3-4 kbar

➤ **Antigorit**

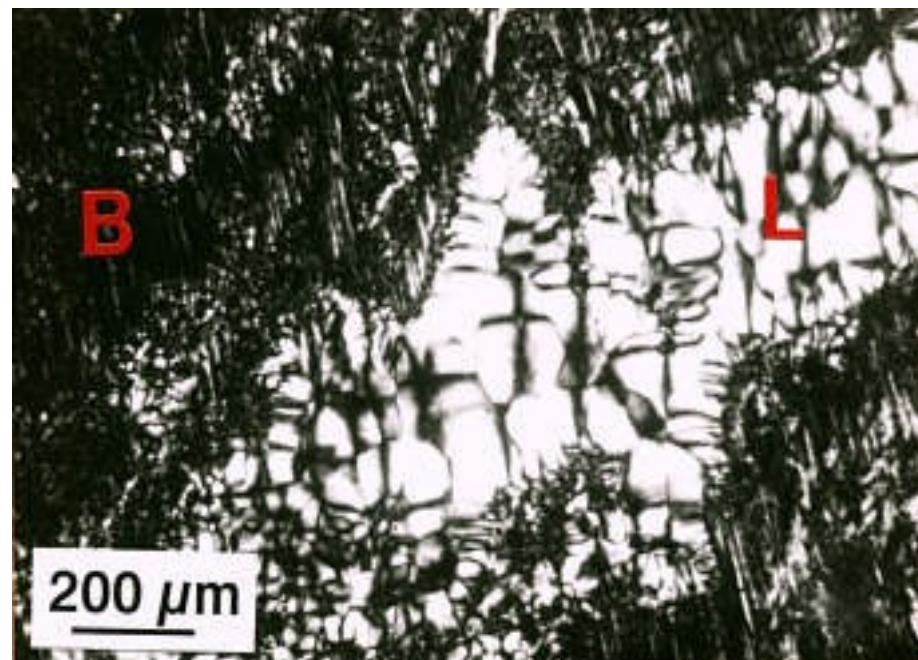
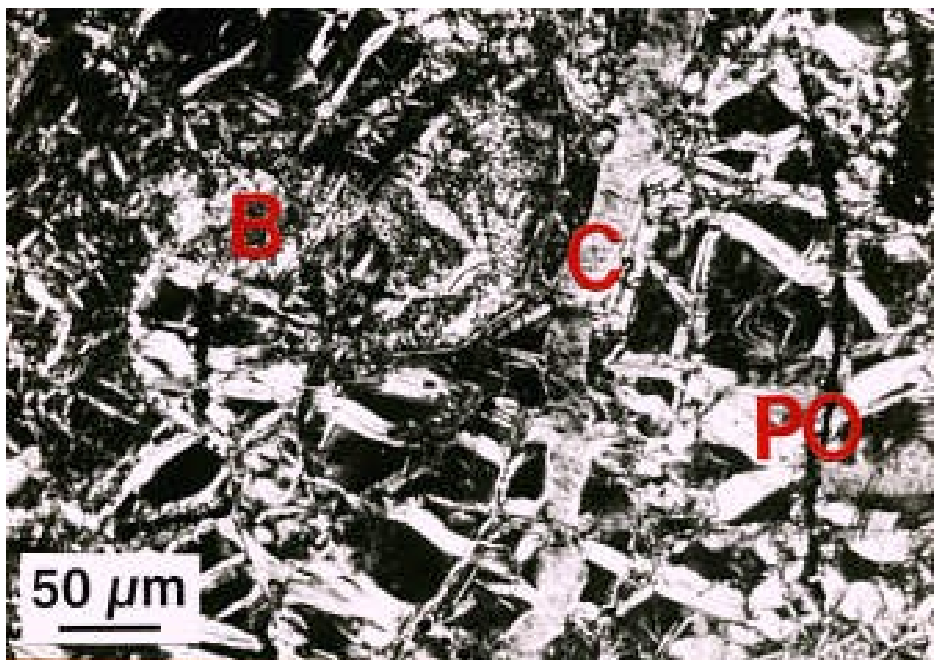
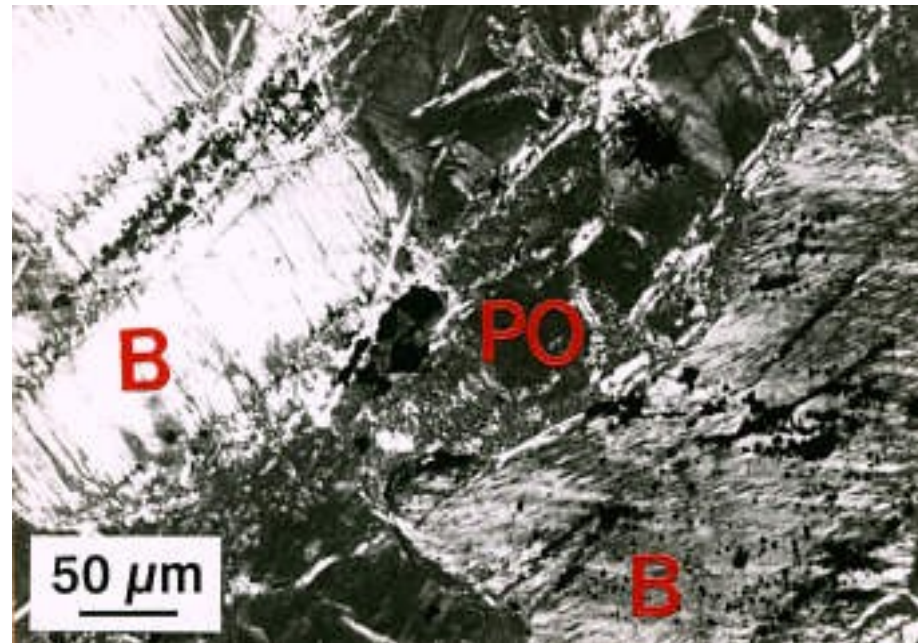
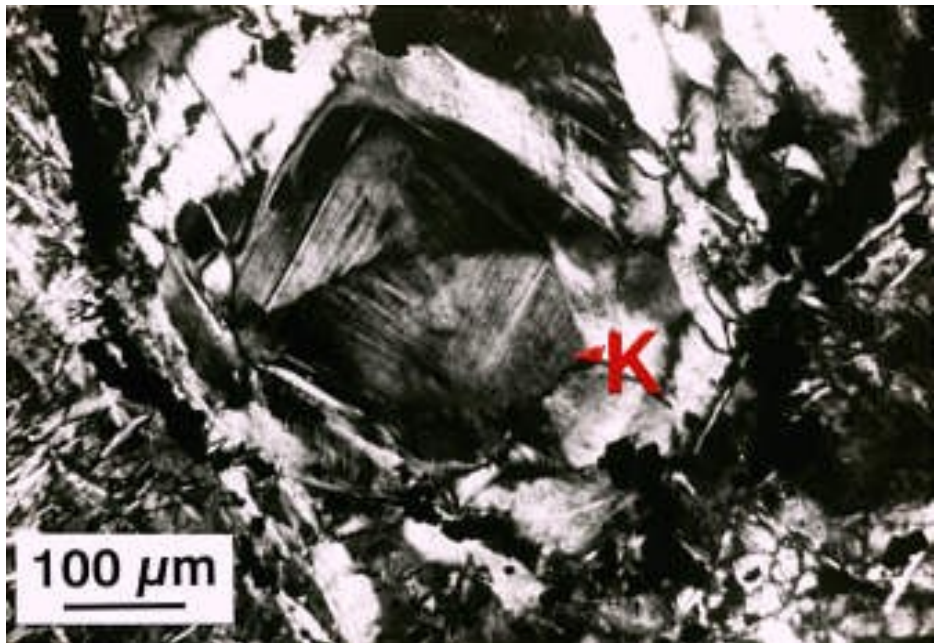
< 300-500 °C, do ~ 20 kbar

# Serpentinizace kumulátových ultrabazik



Ol = olivín, CPX = klinopyroxen, MT = magnetit, K = lizardit, A = antigorit , B = bastit (složený převážně s lizarditu), CHR = chrisotil (převzato)

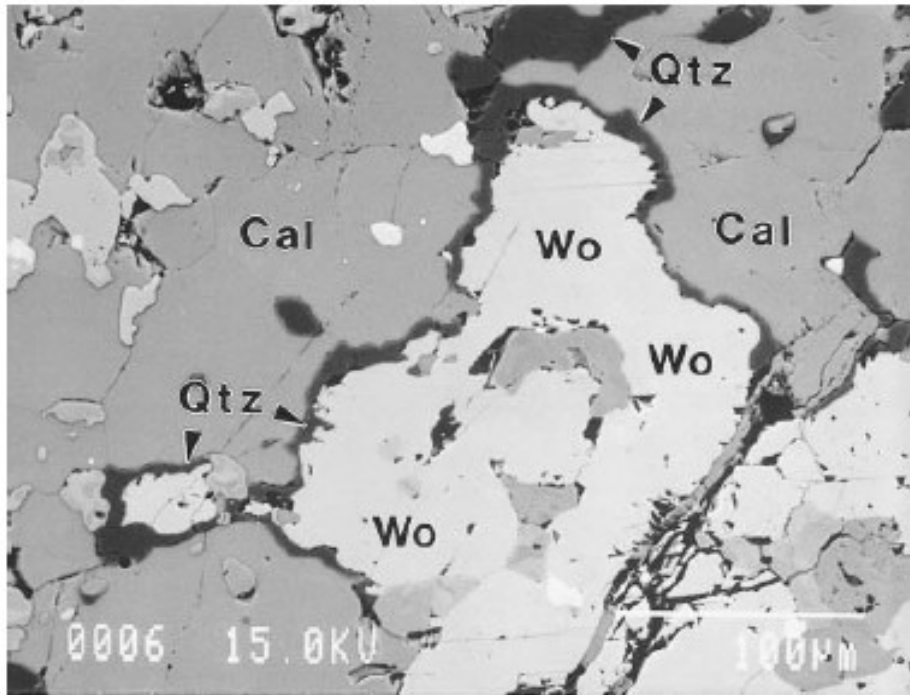
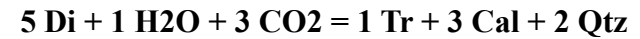
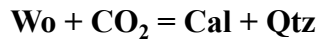




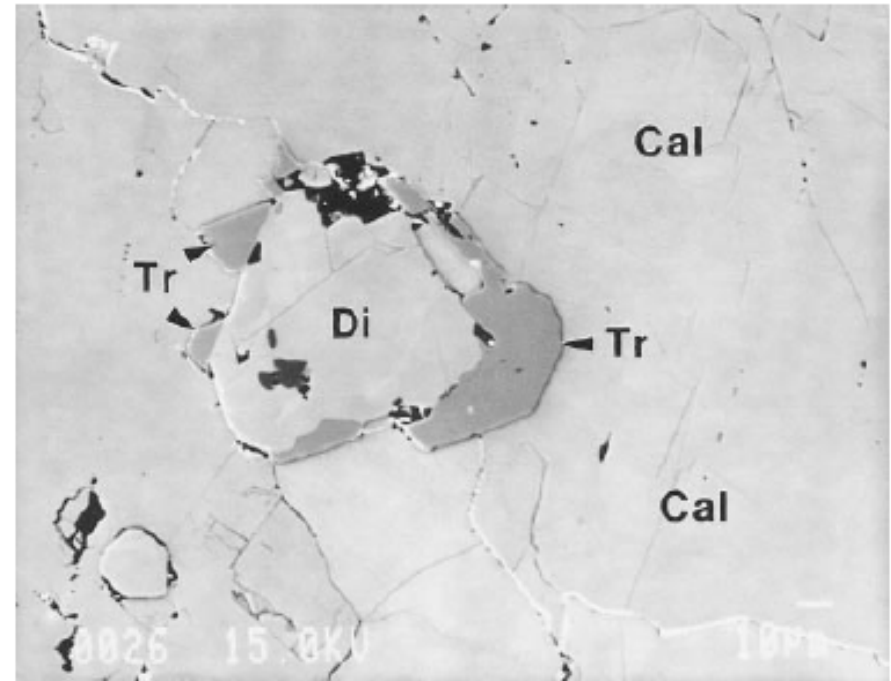
B = bastit (složený převážně s lizarditu), C = chrisotil, PO = pseudomorfóza po olivínu (lizardit), K = pseudomorfóza po olivínu lemovaná magnetitem (převzato)

## 5. Retrográdní přeměny metakarbonátů

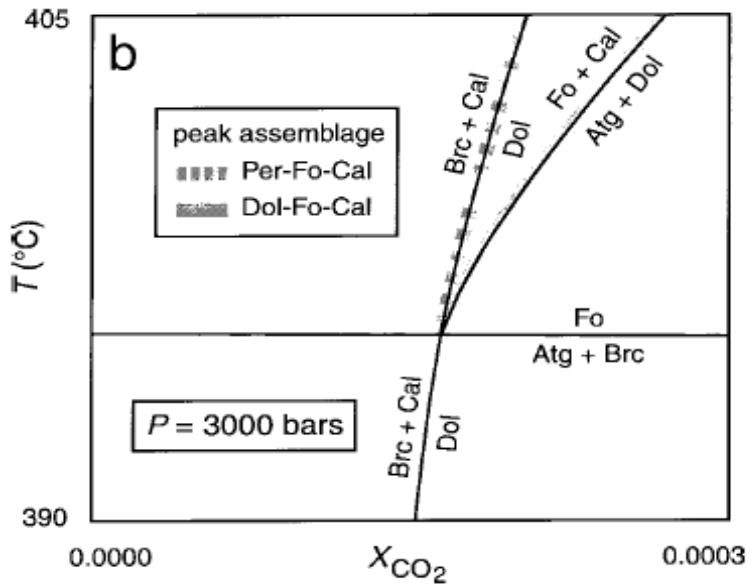
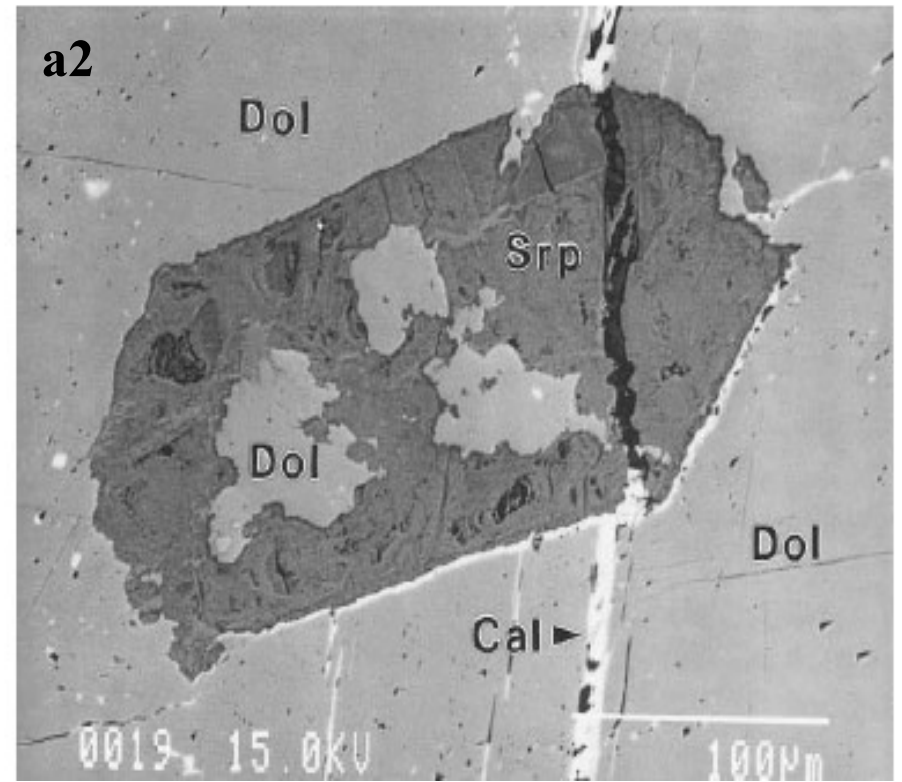
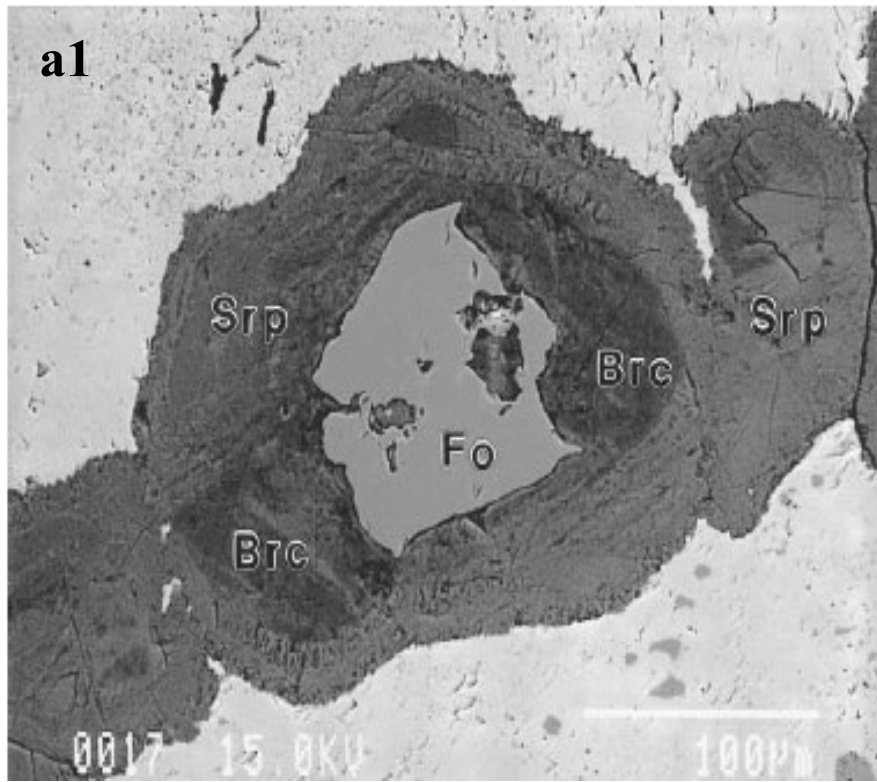
- většina retrográdních reakcí v systémech CMSH, CMASCH má na straně reaktantu  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- minerální asociace jsou odolnější proti retrográdním přeměnám než v metapelitech
- častěji zachovávají podmínky blízké vrcholným podmínkám metamorfózy
- zároveň se mnohdy setkáváme s nerovnovážnými asociacemi



**FIGURE 4.** Backscattered electron (BSE) image of continuous rim of quartz (Qtz) around wollastonite (Wo) in a matrix of calcite (Cal) illustrating incipient progress of retrograde Reaction 2 (in reverse) in siliceous limestone from the Ritter Range pendant, California. Sample 2O of Ferry et al. (1998). Long dimension of photo is 0.36 mm.



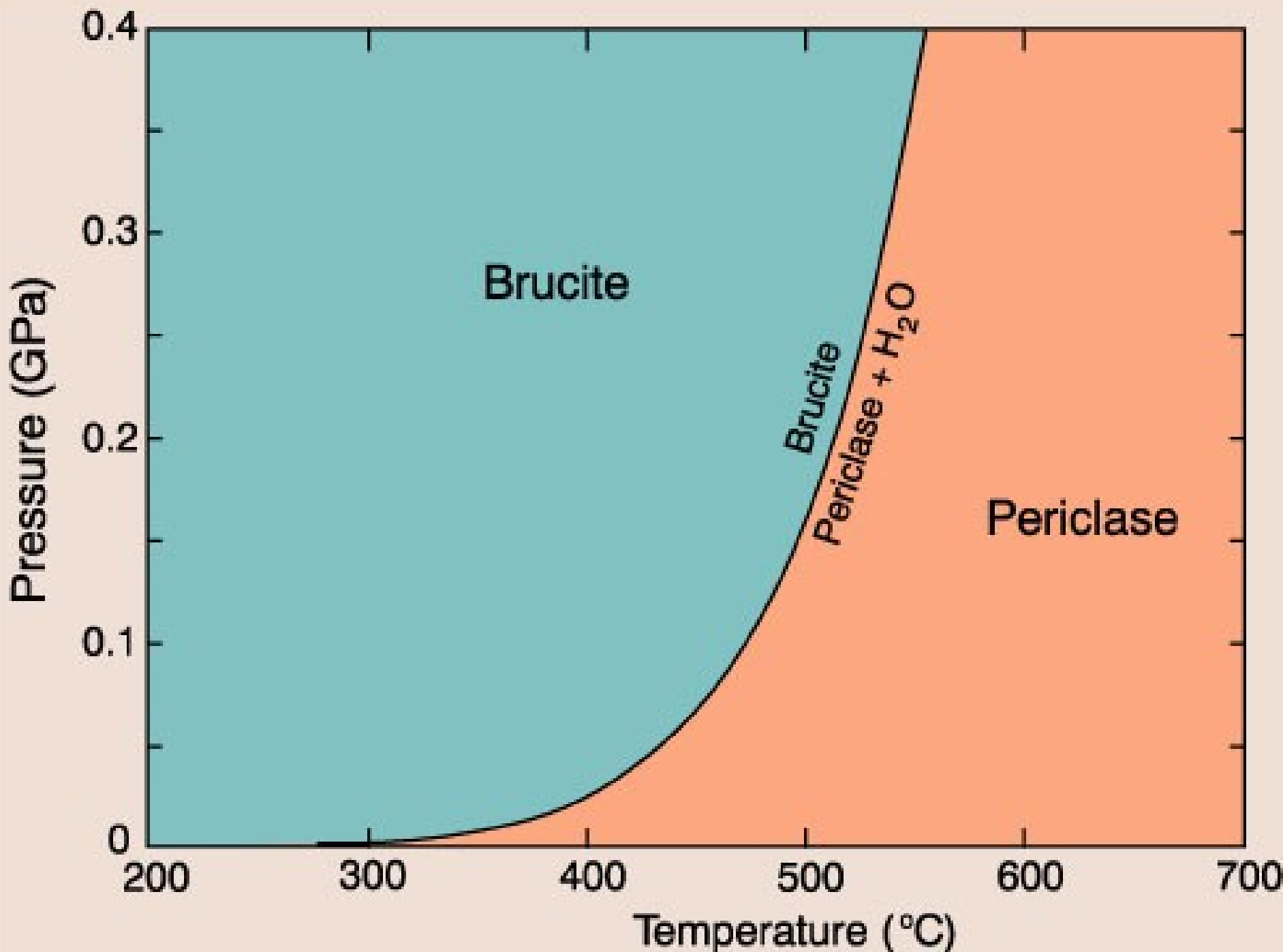
**FIGURE 5.** BSE image of subhedral tremolite (Tr) crystals developed at the margin of diopside (Di) in contact with calcite (Cal), illustrating incipient progress of retrograde reaction 3 in siliceous limestone from the Ritter Range pendant, California. Sample 4H of Ferry et al. (1998). Long dimension of photo is 0.22 mm.



**a1)**  $34 \text{ Fo} + 51 \text{ H}_2\text{O} = \text{Srp} + 20\text{Brc}$  (Ferry 2000)

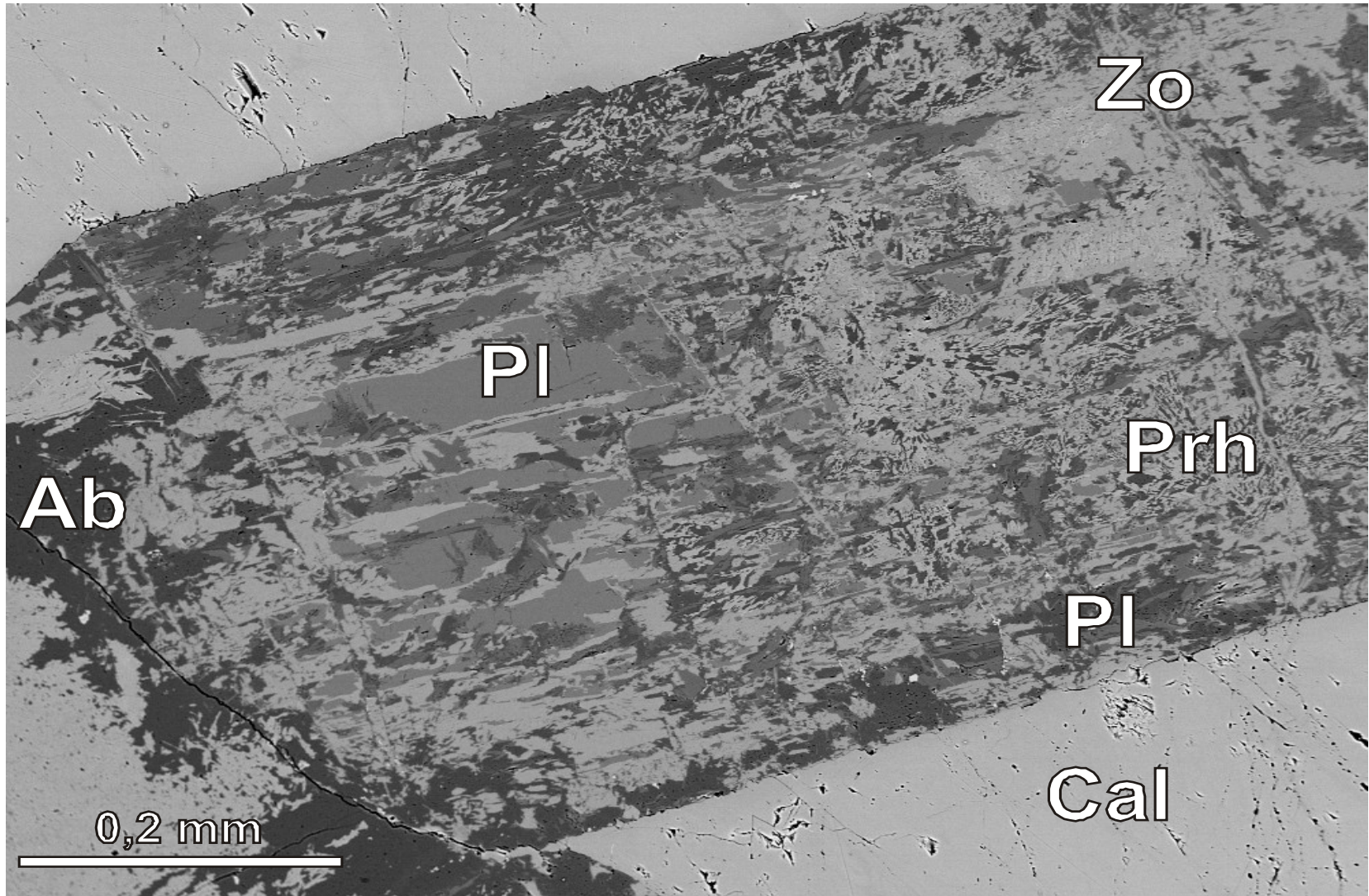
**a2)**  $34 \text{ Fo} + 20 \text{ Cal} + 20 \text{ CO}_2 + 31 \text{ H}_2\text{O} = \text{Srp (Atg)} + 20 \text{ Dol}$  (Ferry 2000)

- $T$ - $X_{\text{CO}_2}$  diagram ukazující vztahy mezi dolomitem (Dol), brucitem (Brc), antigoritem (Atg), forsteritem (Fo), a  $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  fluidy při 3000 bars
- čárkované a šedé čáry ukazují vývoj periklasového a dolomitového mramoru během chladnutí (Ferry 2000)

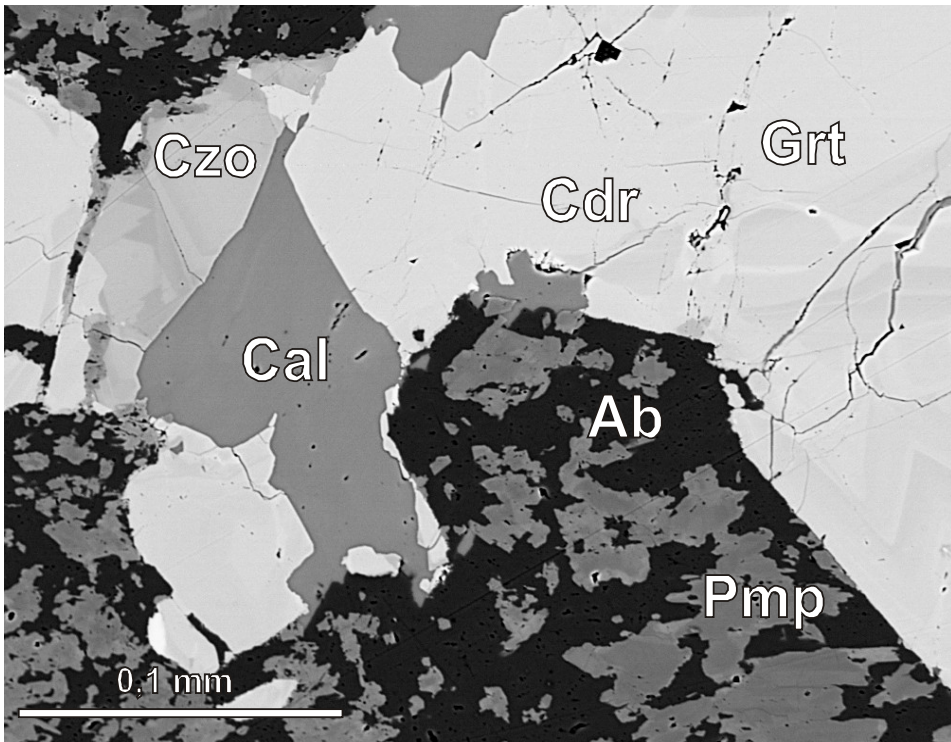
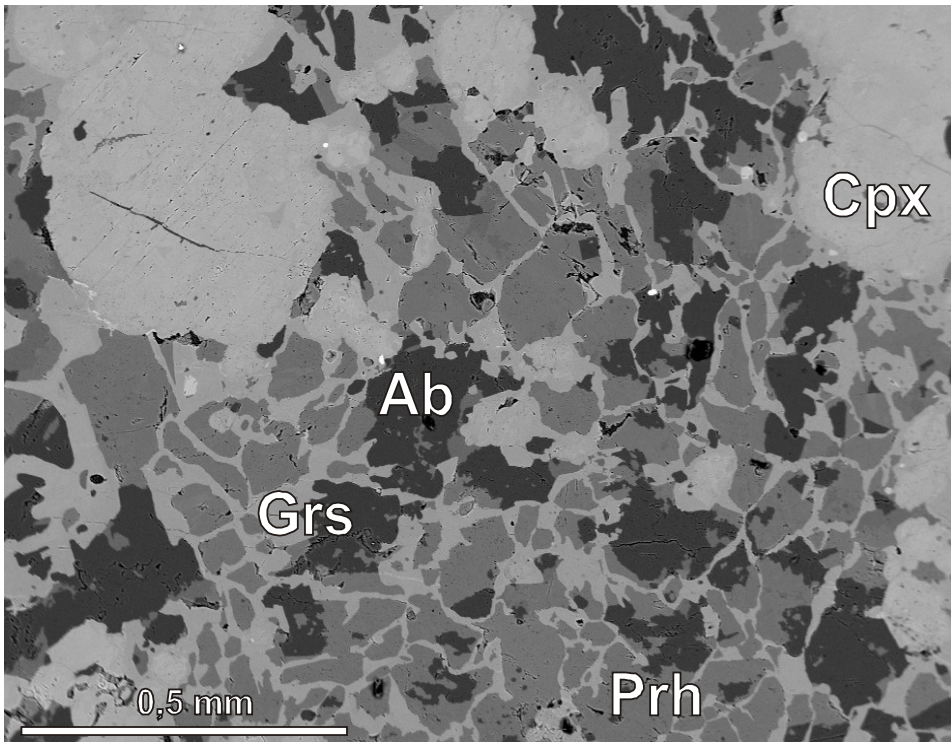
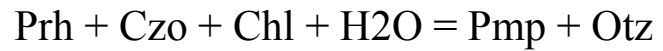
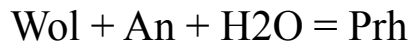
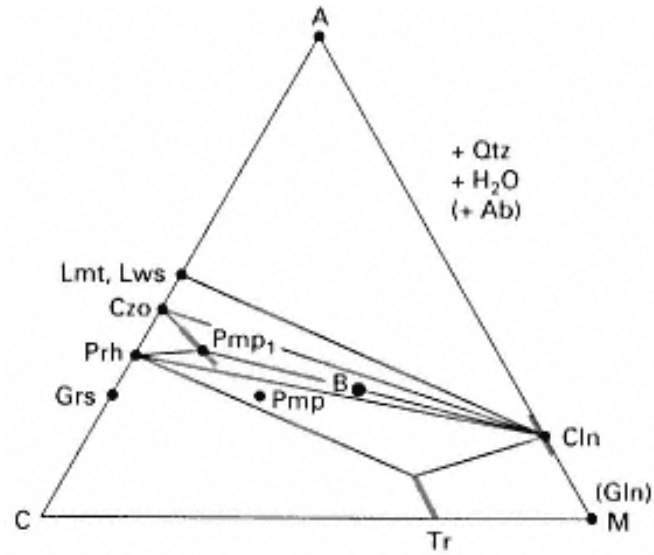


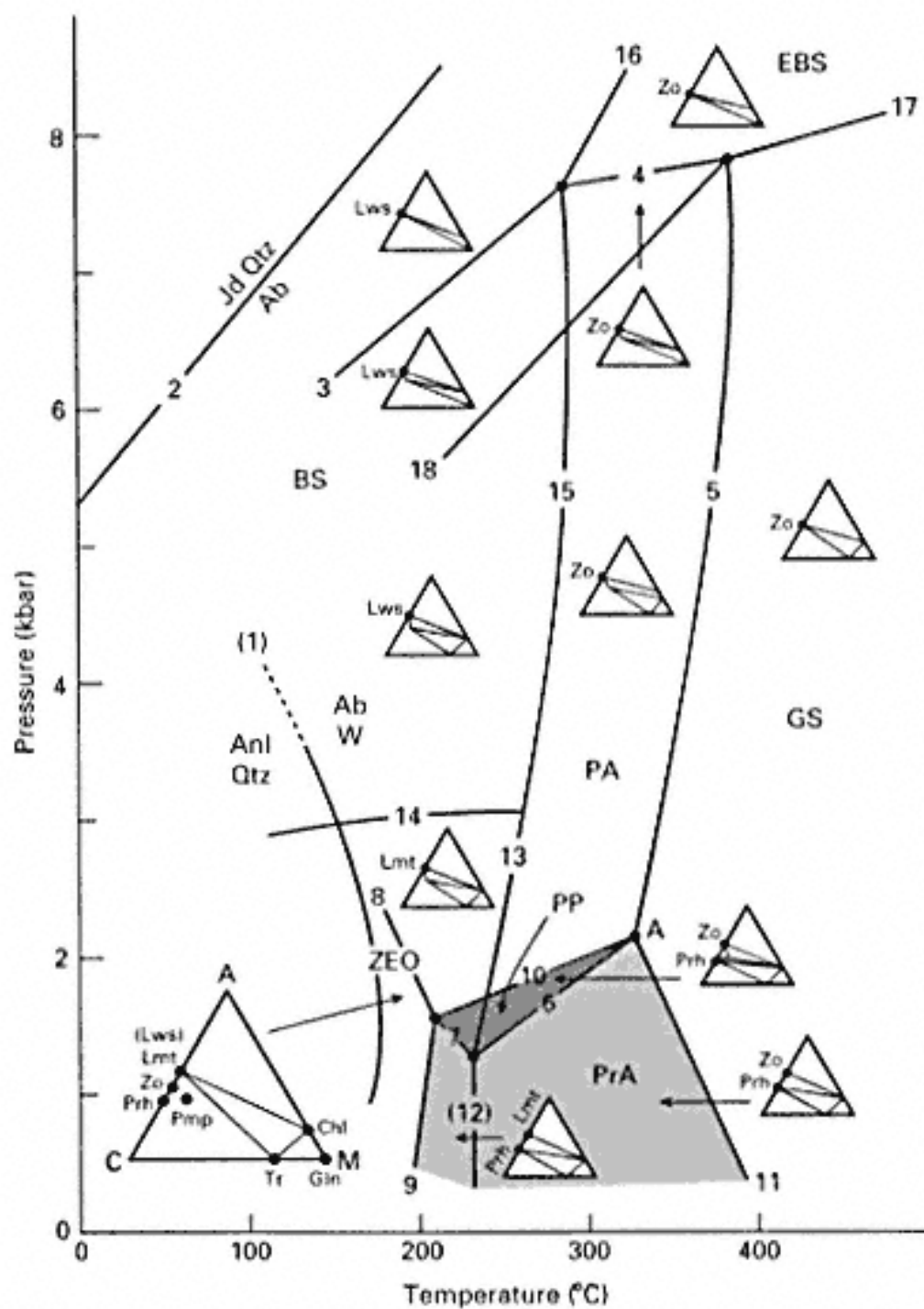
## 6. Metamorfóza nízkého stupně bazických hornin a vápenatosilikátových hornin (význam hydratačních reakcí)

- retrográdní změny v těchto horninách jsou důsledkem reakce mezi bezvodými minerály a fluid
- často jde o metasomatické přeměny s přínosem některých prvků jako je Si ( $An + 2H_4SiO_4 = Prh + 2H^+$ )



- v bazických horninách probíhají hydratační reakce hlavně v podmínkách zeolitové facie až facie zelených břidlic
- retrográdní reakce v kontaktních aureolách často souvisí s fluidy uvolňovanými během chladnutí magmatu
- rozpadem bazického plagioklasu mohou v závislosti na teplotě vznikat: zeolity, světlé slídy, albit, prehnit, pumpellyit, zoisit, kalcit
- kyselé plagioklasy se rozpadají převážně na albit, světlé slídy
- tmavé minerály (pyroxen, granát, amfibol) se mění na pumpellyit, chlorit, epidot, aktinolit



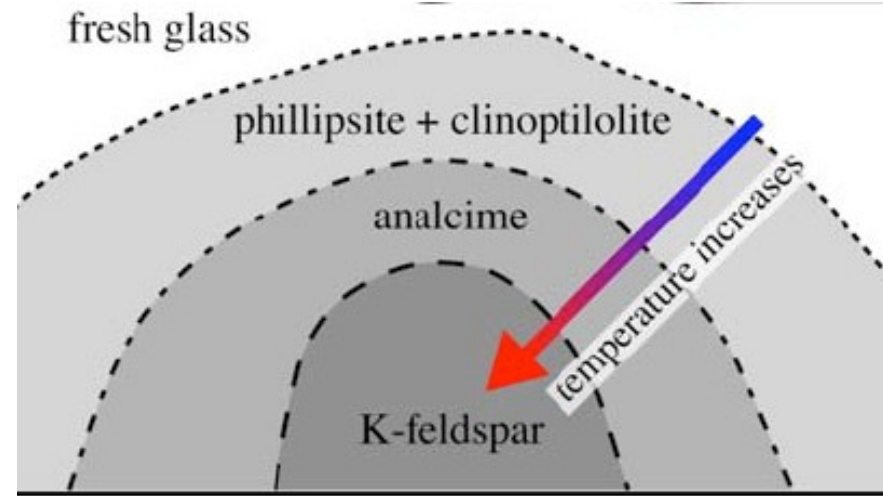


- Reakce v systému NCMASH (Liou et al., 1985a, 1987):
- $\text{Na}_2\text{O}$   $\text{CaO}$   $\text{MgO}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$   $\text{SiO}_2$   $\text{H}_2\text{O}$

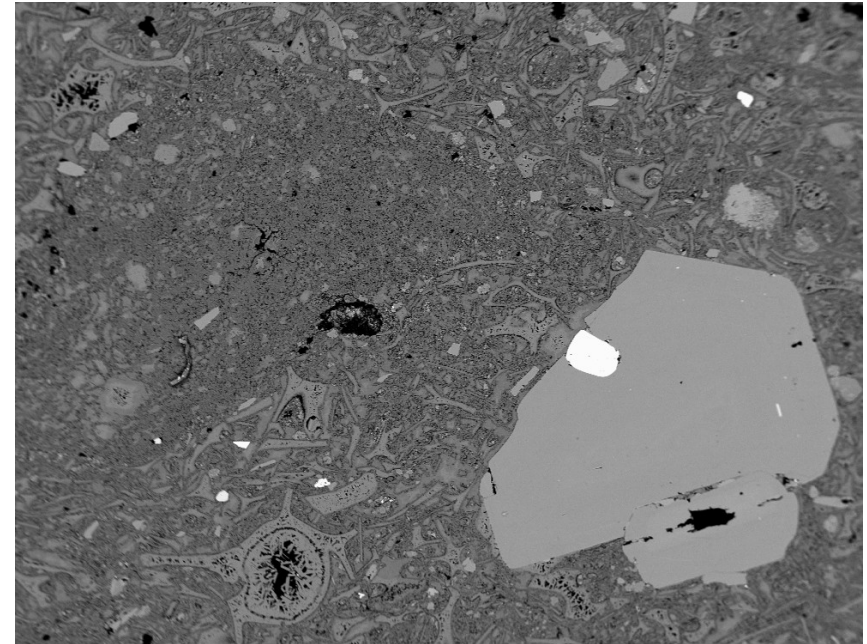
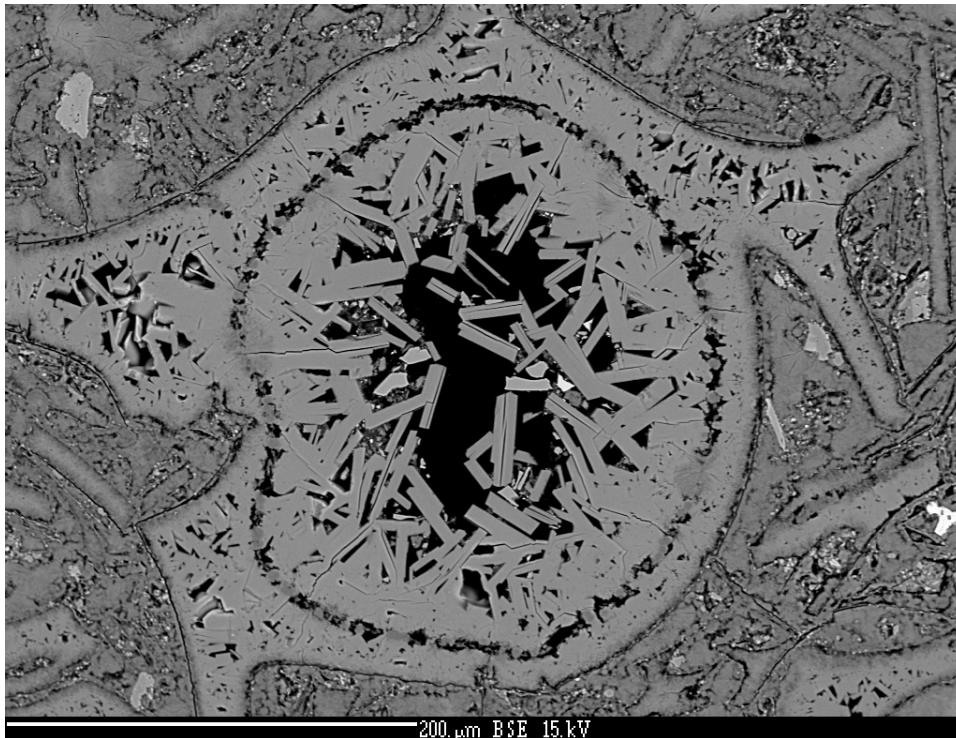
1.  $\text{Anl} + \text{Qtz} = \text{Ab}$
2.  $\text{Jd} + \text{Qtz} = \text{Ab}$
3.  $\text{Gln} + \text{Lws} = \text{Pmp} + \text{Chl} + \text{Ab} + \text{Qtz}$
4.  $\text{Gln} + \text{Czo} + \text{W} = \text{Pmp} + \text{Chl} + \text{Ab}$
5.  $\text{Pmp} + \text{Chl} + \text{Qtz} = \text{Czo} + \text{Tr} + \text{W}$
6.  $\text{Pmp} + \text{Qtz} = \text{Prh} + \text{Czo} + \text{Chl} + \text{W}$
7.  $\text{Pmp} + \text{Qtz} + \text{W} = \text{Prh} + \text{Chl} + \text{Lmt}$
8.  $\text{Pmp} + \text{Chl} + \text{Qtz} + \text{W} = \text{Tr} + \text{Lmt}$
9.  $\text{Tr} + \text{Lmt} = \text{Prh} + \text{Chl} + \text{Qtz} + \text{W}$
10.  $\text{Pmp} + \text{Tr} + \text{Qtz} = \text{Prh} + \text{Chl} + \text{W}$
11.  $\text{Tr} + \text{Czo} + \text{W} = \text{Prh} + \text{Chl} + \text{Qtz}$
12.  $\text{Prh} + \text{Lmt} = \text{Czo} + \text{Qtz} + \text{W}$
13.  $\text{Pmp} + \text{Lmt} = \text{Czo} + \text{Chl} + \text{Qtz} + \text{W}$
14.  $\text{Lws} + \text{Qtz} + \text{W} = \text{Lmt}$
15.  $\text{Pmp} + \text{Lws} = \text{Czo} + \text{Chl} + \text{Qtz} + \text{W}$
16.  $\text{Gln} + \text{Lws} = \text{Czo} + \text{Chl} + \text{Ab} + \text{Qtz} + \text{W}$
17.  $\text{Czo} + \text{Gln} + \text{Qtz} + \text{W} = \text{Tr} + \text{Chl} + \text{Ab}$
18.  $\text{Pmp} + \text{Gln} + \text{Qtz} + \text{W} = \text{Tr} + \text{Chl} + \text{Ab}$

## A) zeolitová facie

- zeolity mohou vznikat:
  - v podmínkách diagenese
  - v důsledku interakce hydrotermálními roztoky
  - v podmínkách metamorfózy pohřbením
- horní hranice diagenese : 200°C
  - analcim + křemen = albit + H<sub>2</sub>O (NASH)
  - stilbit = laumontit + křemen + H<sub>2</sub>O (CASH)



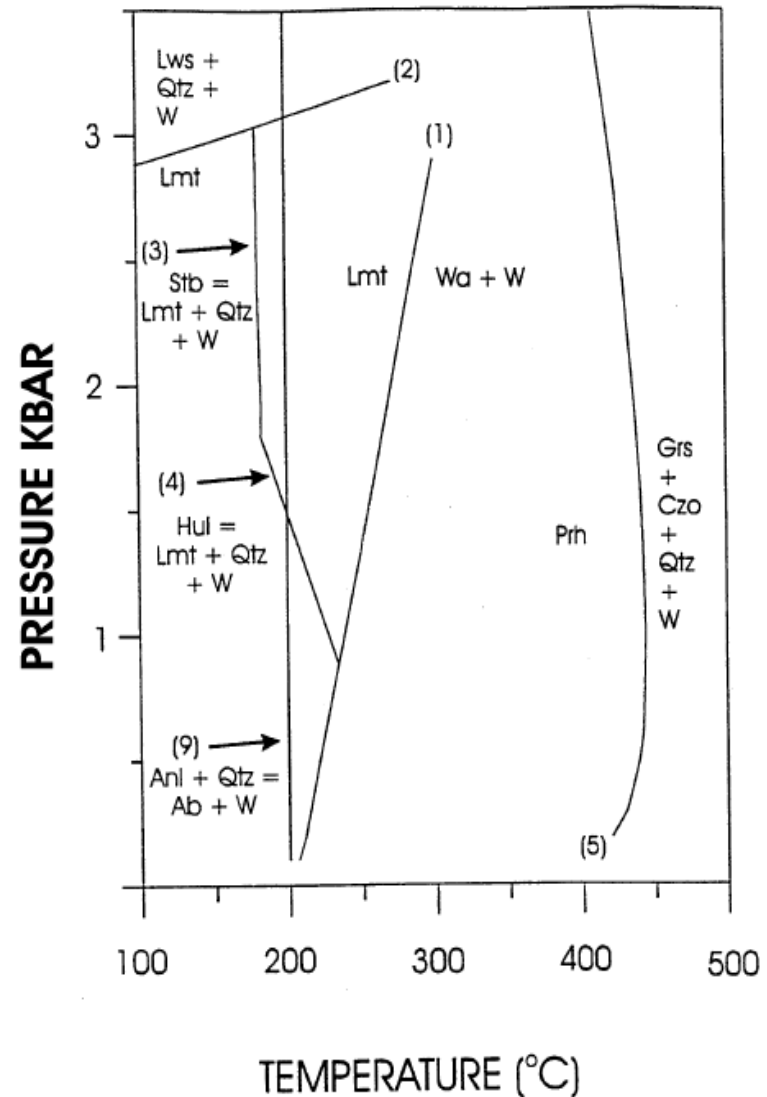
Příklad hydrotermální alterace vulkanického lávového proudu

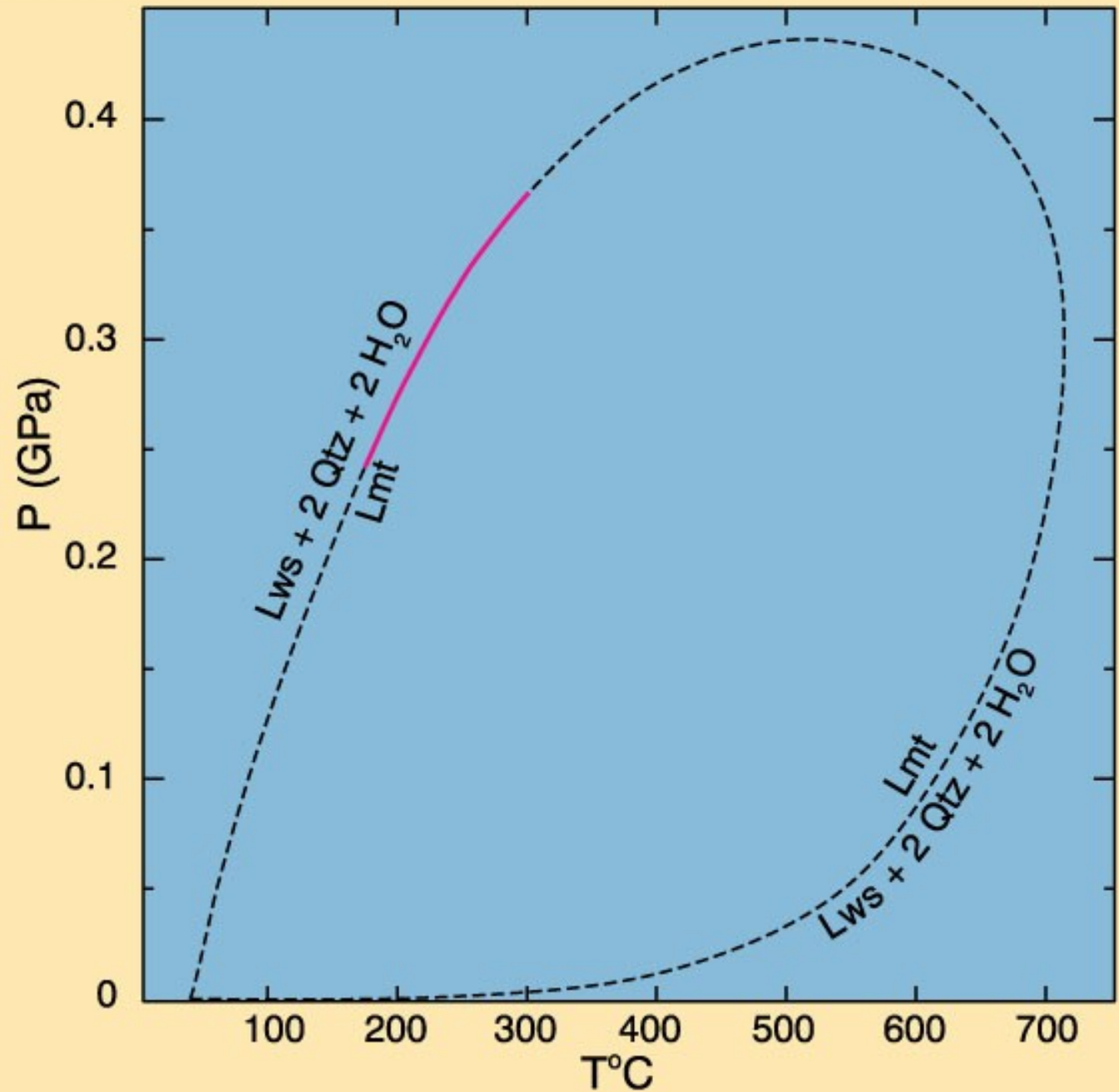


úloмок vulkanického skla přeměněný na zeolity



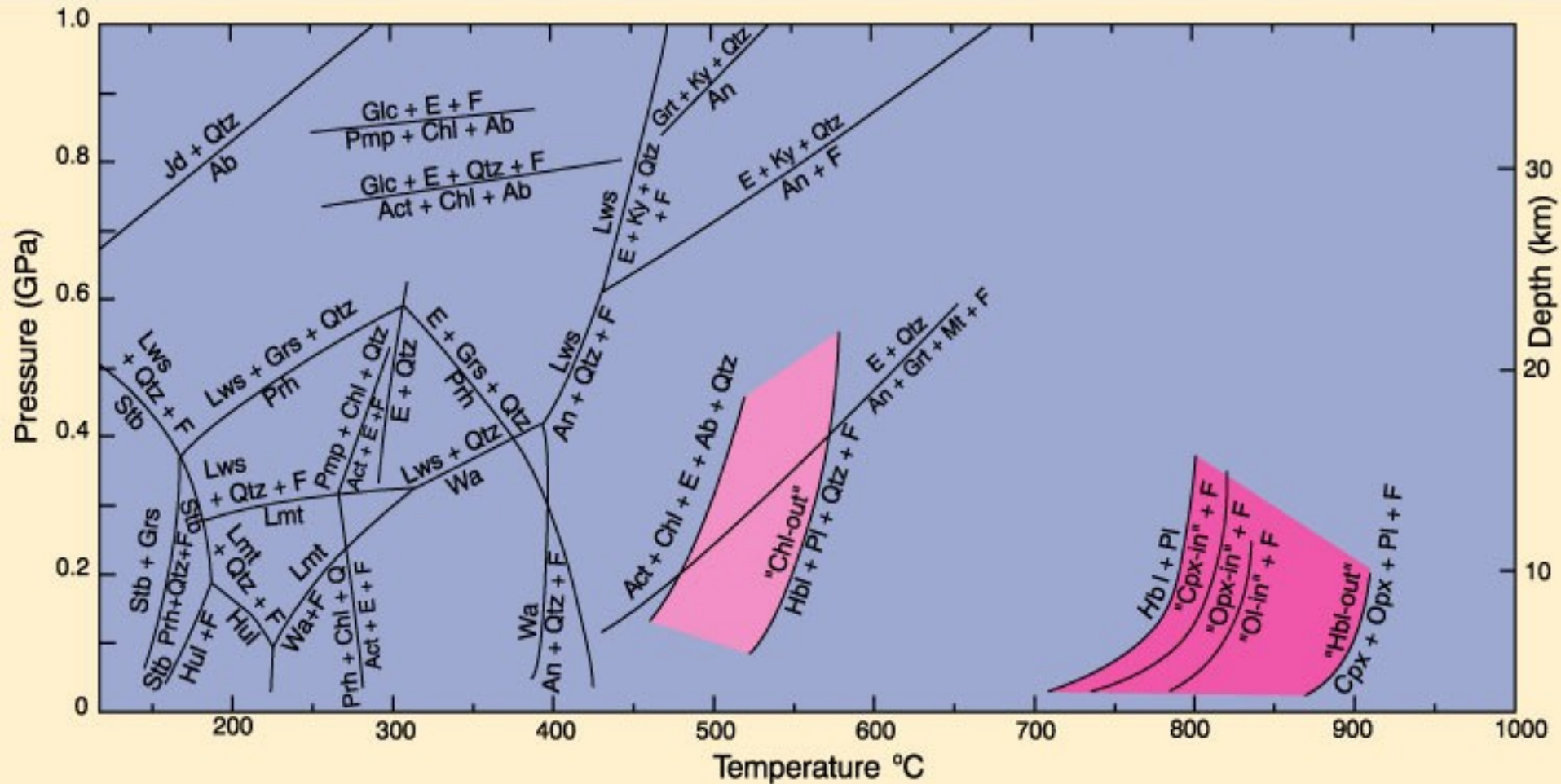
- zeolity jsou hydratované alumosilikáty obsahující alkálie (K, Na), alkalické zeminy (Ca, etc.) a vodu
- jejich struktura umožňuje opakovanou hydrataci a dehydrataci stejně jako iontové výměny
- nejdůležitější zeolity:
  - **Natrolit** – kosočtverečný ( $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )
  - **Chabazit** - trigonální ( $\text{CaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )
  - **Analcim** – krychlový ( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) feldspathoid
- zeolity jsou typickým produktem hydrotermální alterace vulkanického skla a plagioklasů
- v sedimentech často jejich vysoký výskyt značí přítomnost vulkanické komponenty
- zeolitizované horniny si často zachovávají strukturu protolitu
- v sedimentech se nejčastěji vyskytuje: laumontit, analcim, heulandit a klinoptilot
- ve vulkanitech je častější chabazite a phillipsit,
- zeolity vystupují společně s křemenem, albitem, adularem, kalcitem, fylosilikáty (chlorit, světlé slídy atd.), titanit, prehnit, pumpellyit



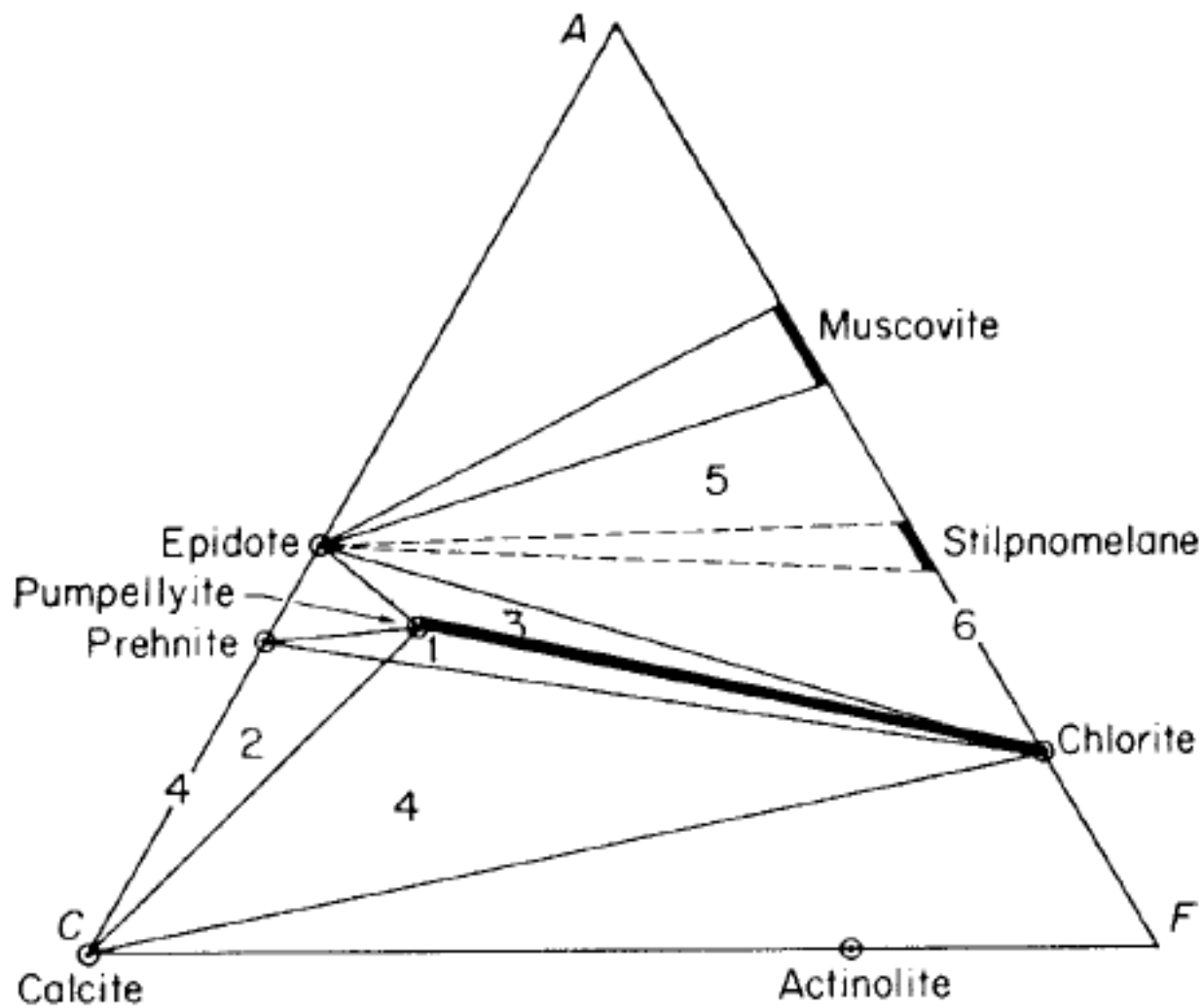


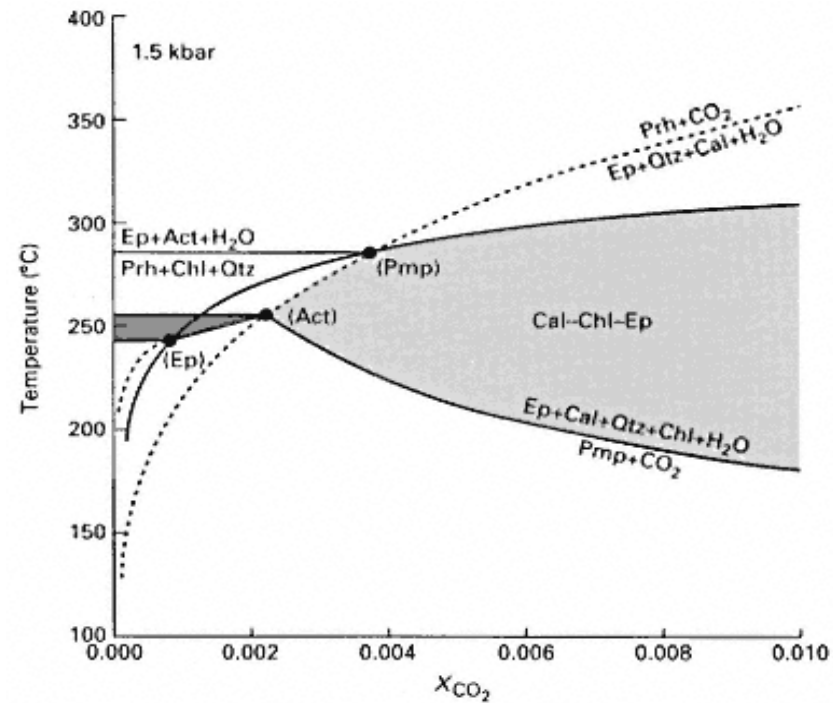
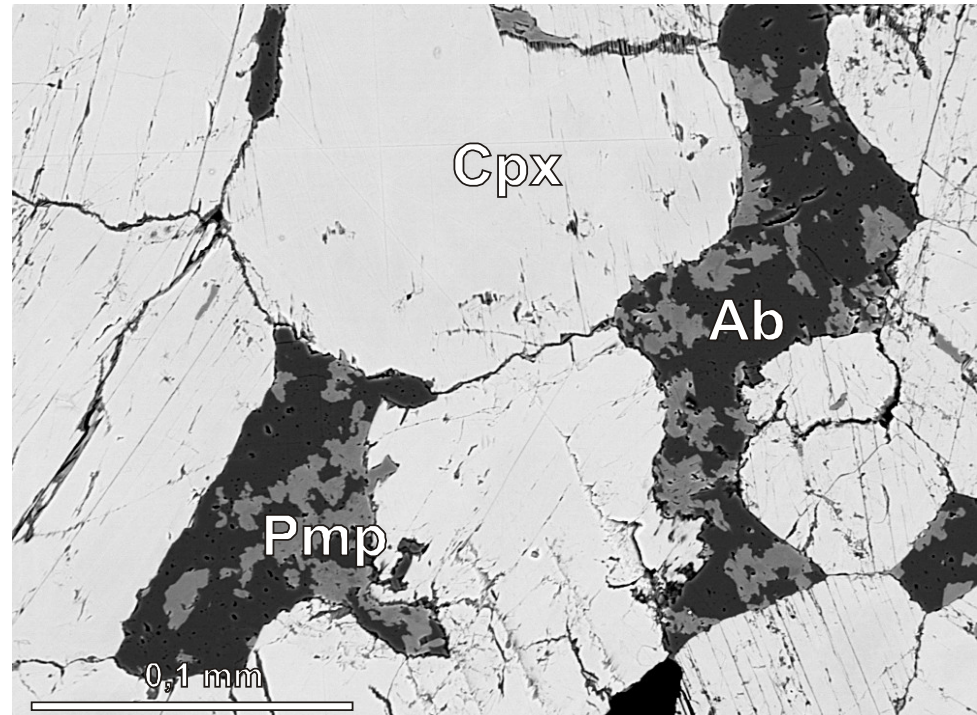
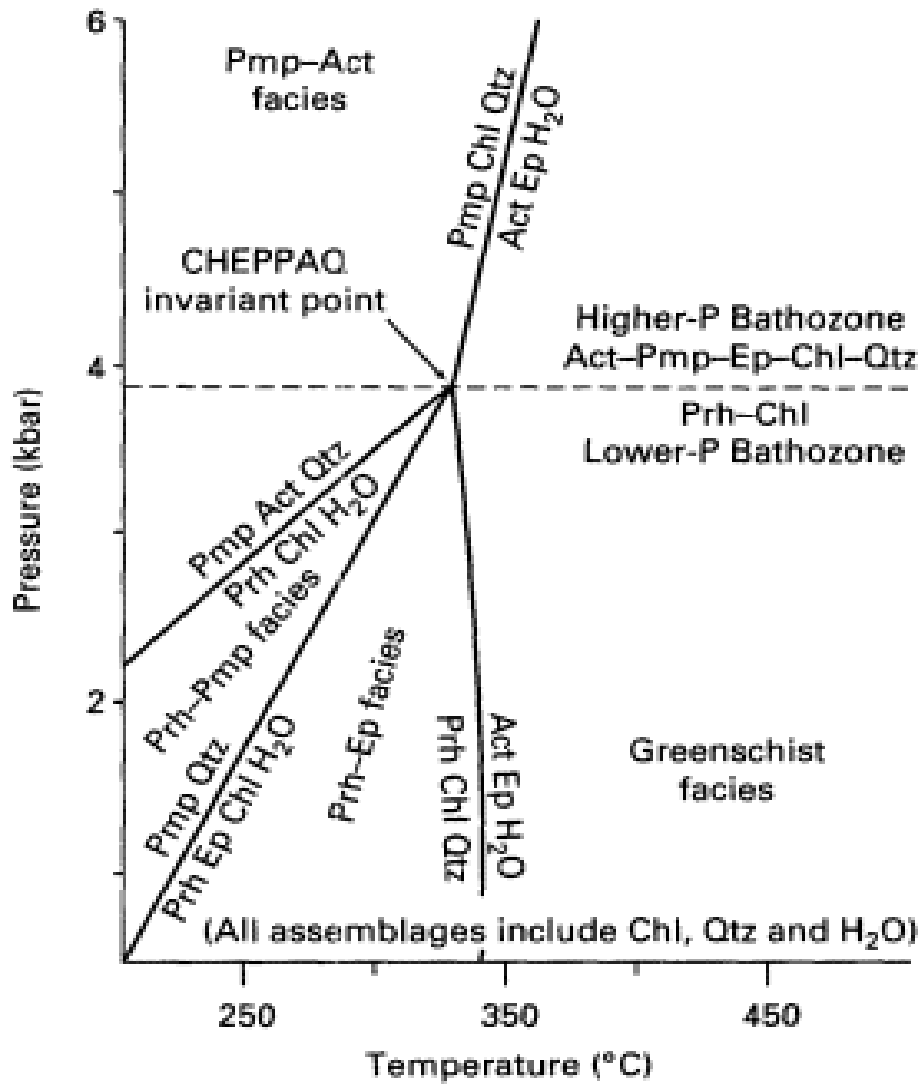
P-T reakční křivka pro dehydrataci laumontitu ukazující teoretickou smyčku kterou může reakce udělat za velmi vysokých tlaků. Většinou bývá horní část a část za nízkých teplot metastabilní. Avšak teoreticky může dojít k tomu že za nízkých teplot a vysokých tlaků dojde k retrográdní dehydrataci tohoto minerálu. Převzato: Winter (2001). An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology, Prentice Hall.

- důležité reakce:
  - CASH: laumontit = lawsonit + H<sub>2</sub>O ( 200-250 C, P > 3kbar)
  - CASHCO<sub>2</sub>: laumontit + kalcit = prehnit + křemen + H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub> (ca 3kbar/300-400 C )
- horní hranici zeolitové facie:
  - za nízkých tlaků: epidot + křemen + H<sub>2</sub>O = laumontit + prehnit
  - za vyšších tlaků: epidot + chlorit + křemen + H<sub>2</sub>O = laumontit + pumpellyit



## B) prehnit pumpellyitová facie

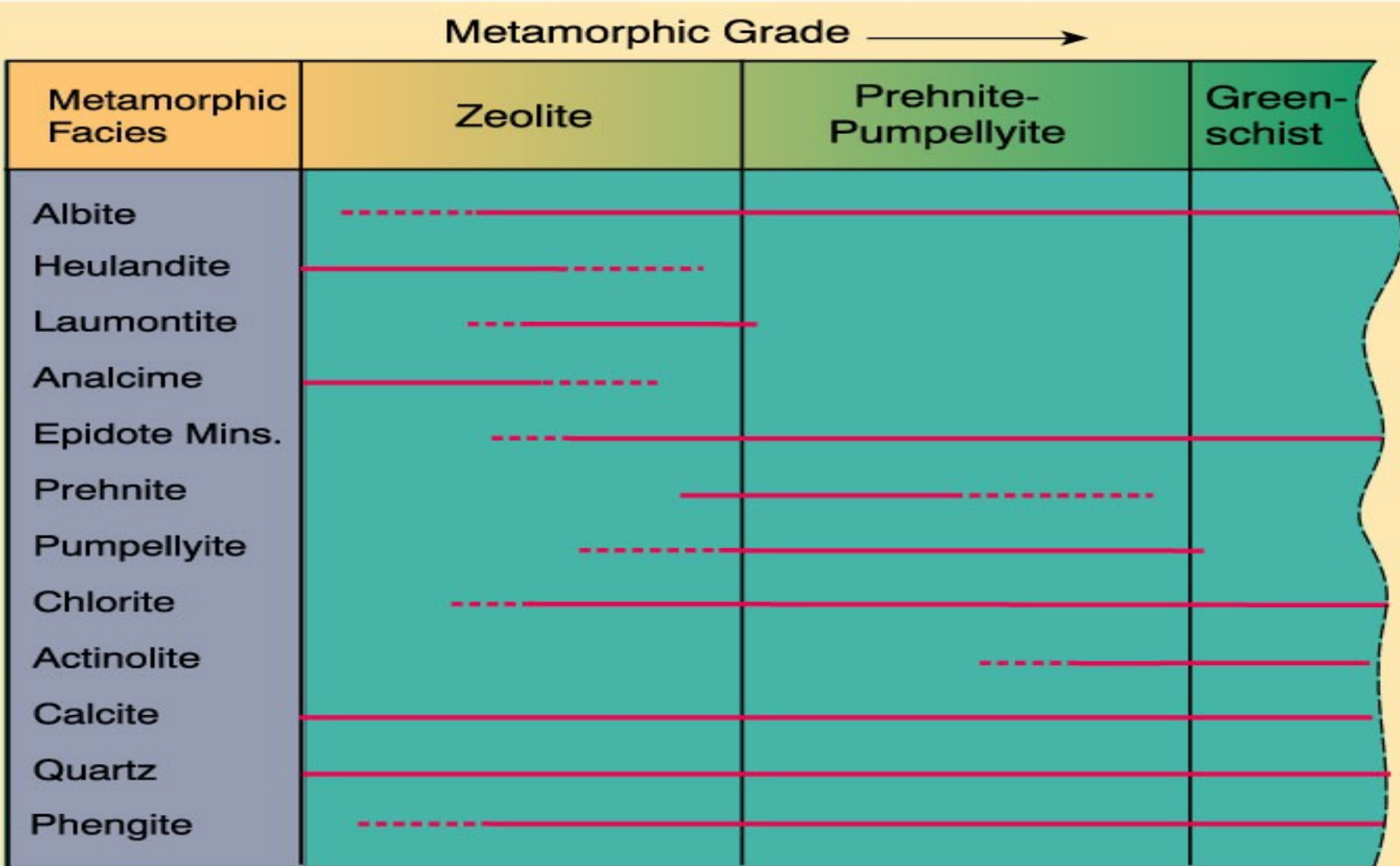


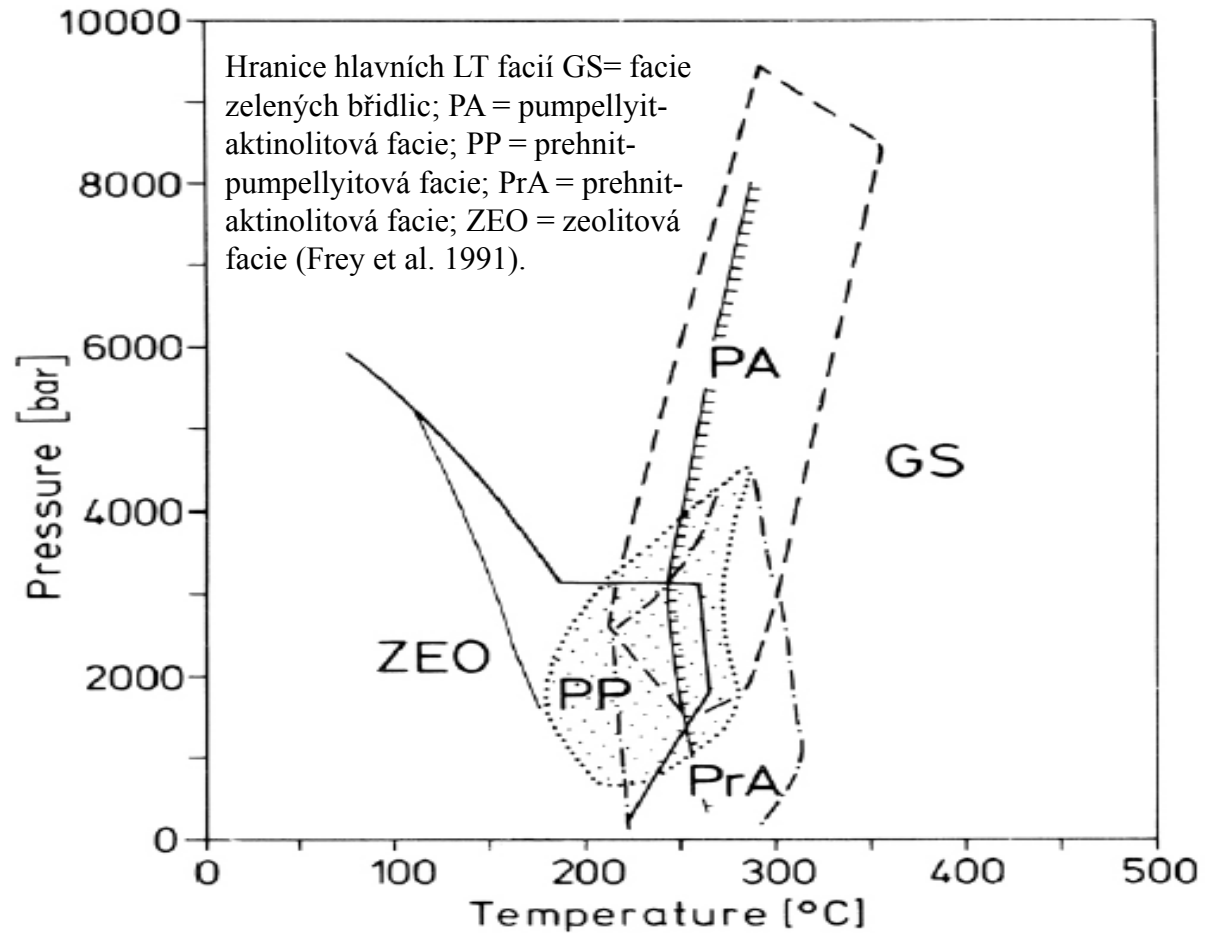


- $\text{Prh} + \text{Chl} + \text{Qtz} = \text{Act} + \text{Ep} + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{Pmp} + \text{Qtz} = \text{Prh} + \text{Czo} + \text{Chl} + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{Prh} + \text{Chl} + \text{H}_2\text{O} = \text{Pmp} + \text{Act} + \text{Qtz}$
- $10\text{Pmp} + 21\text{Qtz} + 14\text{H}_2\text{O} = 17\text{Prh} + 2\text{Chl} + 6\text{Lmt}$

### C) Facie zelených břidlic

- typické minerály: chlorit, aktinolit, epidot, albit, křemen, titanit, kalcit
- spodní hranice = vymizení pumpellyitu a objevení aktinolitu
- reakce v CFMASH systému: chlorit + klinozoisit + křemen = aktinolit + kyanit + H<sub>2</sub>O (> 5-6kbar)





Facie	Metabazity	Pelity (+ Qz)
<b>Zeolitová</b>	zeolity	jílové minerály (illit-paragonit, chlorit-smektit)
<b>Prehnit-pumpellyitová</b>	Prh – Pmp – Chl – Ab	jílové minerály (illit, paragonit-smektit, chlorit-smektit)
<b>Pumpellyit-actinolitová</b>	Pmp – Act – Chl – Ab	jílové minerály (illit, paragonit, chlorit-smektit)
<b>Zelených břidlic</b>	Act – Chl – Ab – Ep	Chl – Bt Ctd Gt (Mn – rich) + Ms

# 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