

Magmatické a metamorfní procesy

—

Hydratační a dehydratační metamorfní reakce II

David Buriánek

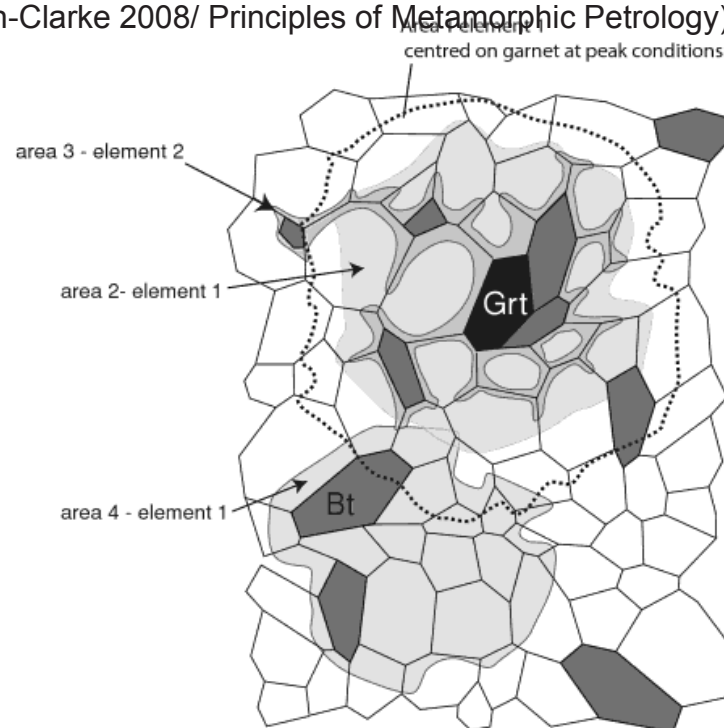
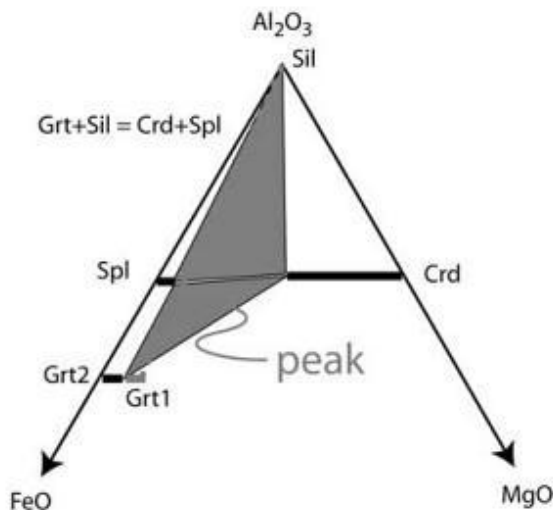
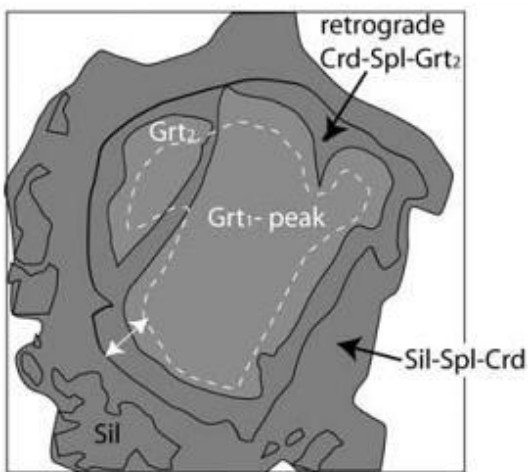
Osnova

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 cm³ (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 ₂ O-rich fluids
	→ magnesite	CO ₂ -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 ₂ O-rich fluids). Common in very low grade burial metamorphism and ocean-floor metamorphism In metabasites this usually requires significant K ⁺ introduction. CO ₂ -rich fluids. Hydrothermal metamorphism CO ₂ -rich fluids.
	→ zeolites	
	→ sericite/muscovite	
	→ calcite	
	→ scapolite	
Clinopyroxene	→ hornblende/actinolite	Usually associated with significant K ⁺ 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

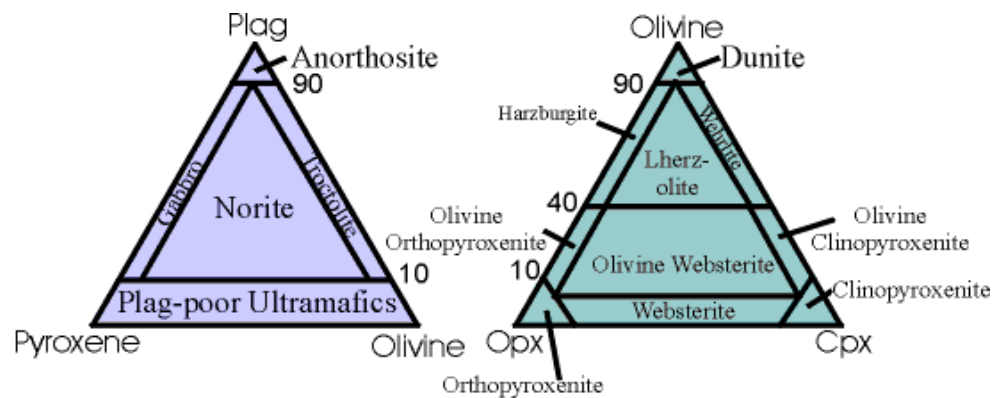
Forsterite	→ serpentine
Anorthite	→ epidote minerals (± sericite)
	→ carbonate minerals
Diopside	→ tremolite—actinolite
Tremolite	→ talc

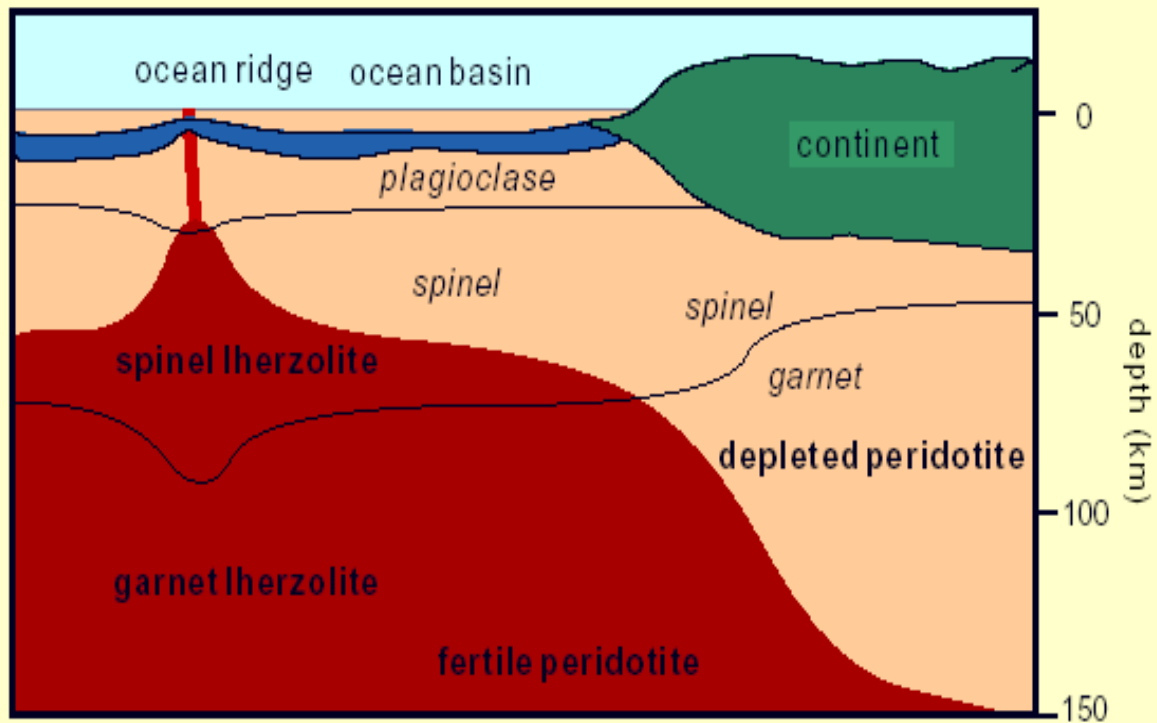
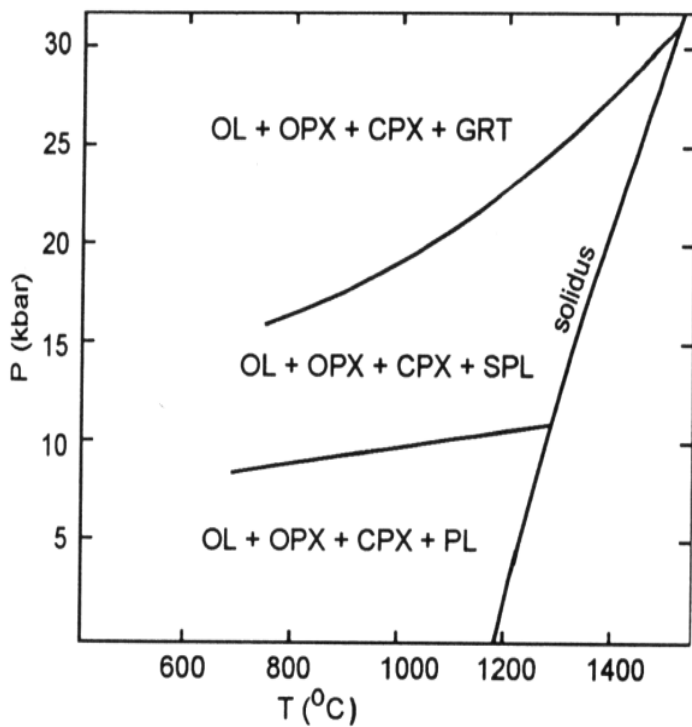
Metapelites

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

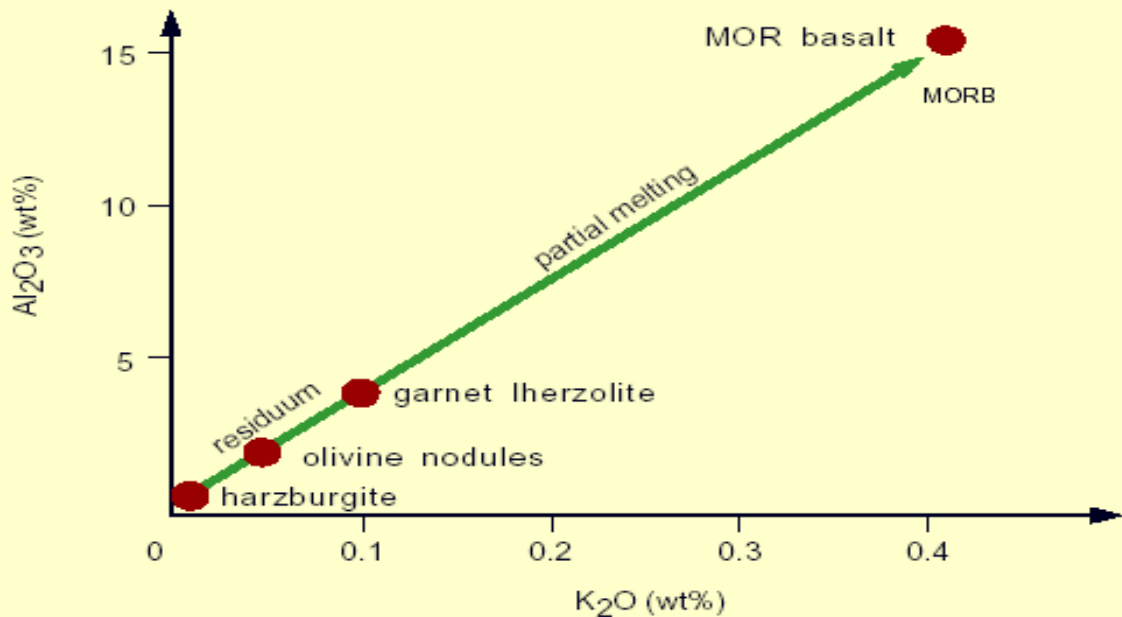
- hlavní horninový typ zemského pláště
- složeny hlavně z Mg-silikátů, světlé součástky < 10 %
- geochemicky – ultrabazické horniny ($\text{SiO}_2 < 45 \text{ hm } \%$)
- primární minerály: olivín bohatý Mg (Fo 88-95), ortopyroxen (enstatit), klinopyroxen (Cr-diopsid), chromit (akcesorie), granát (pyrop 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

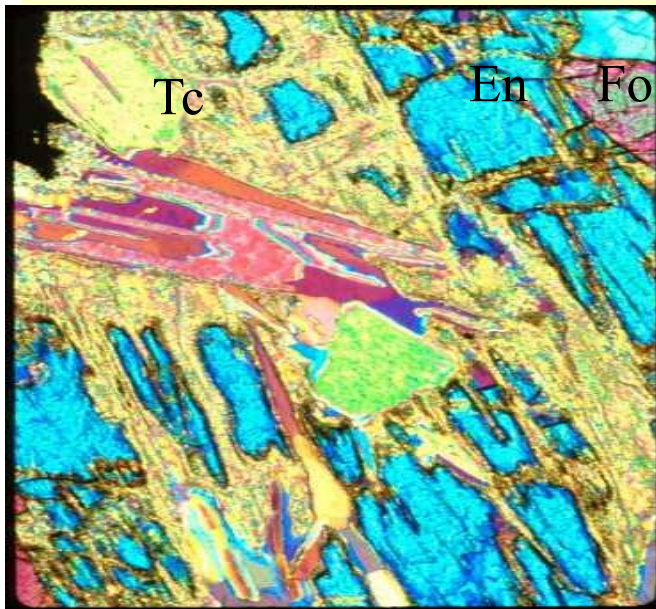
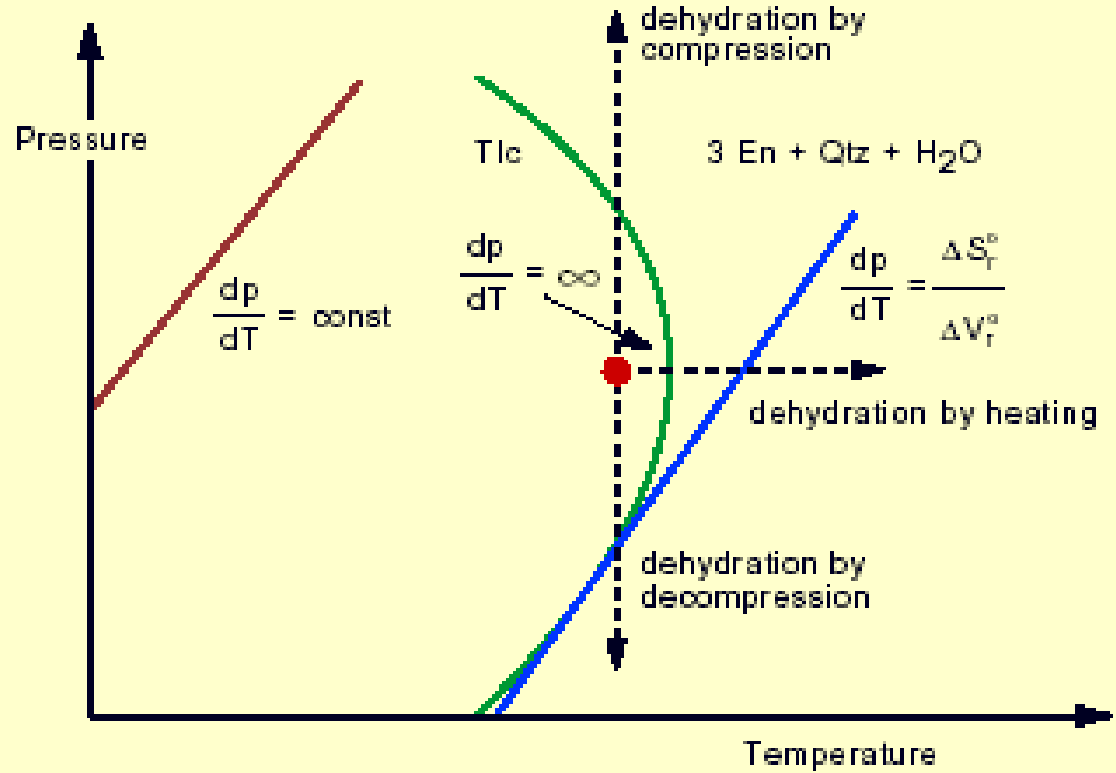
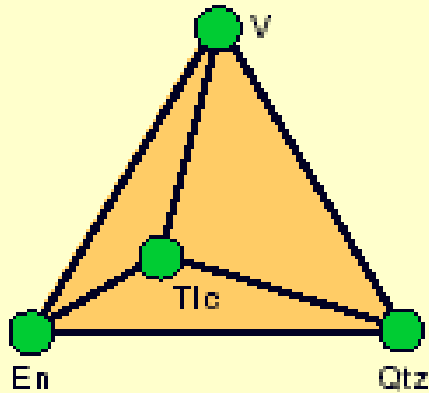
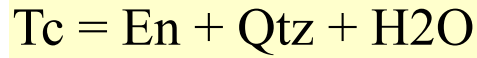




PT-diagram ukazující pole stability lherzolitů s různými asociacemi

- 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 strukturálními 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), Al_2O_3 , 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 $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

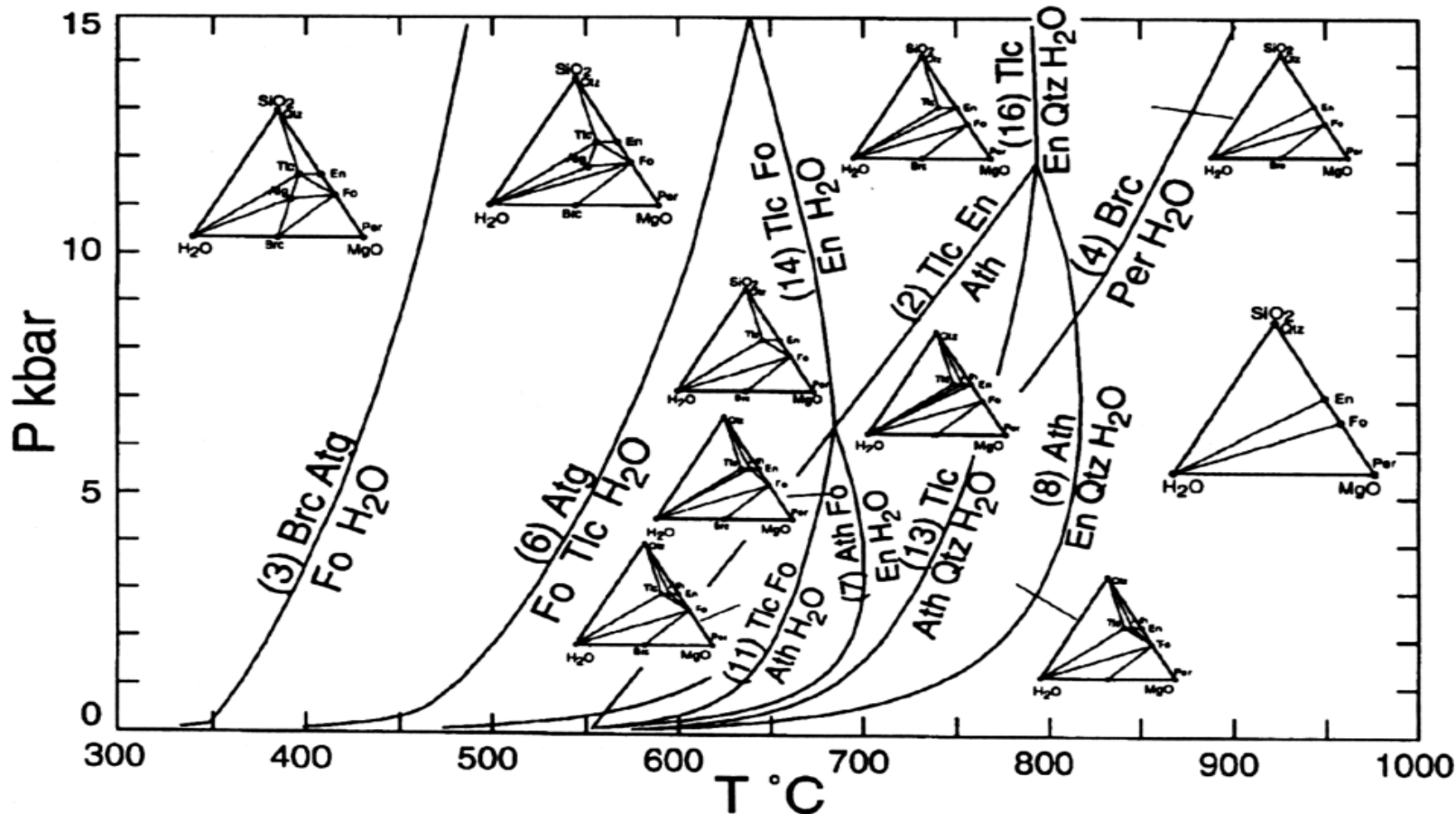
• Diopsid $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$

• Anthofyllit $\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

• Enstatit MgSiO_3

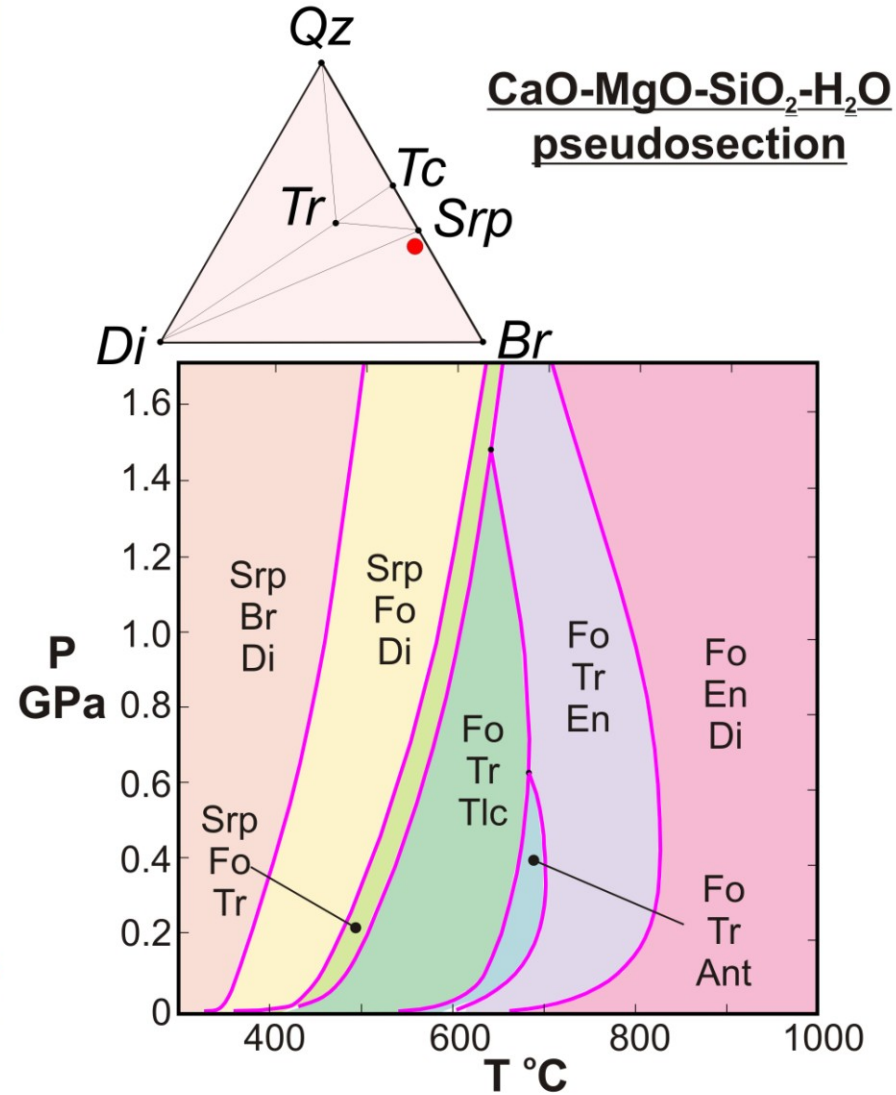
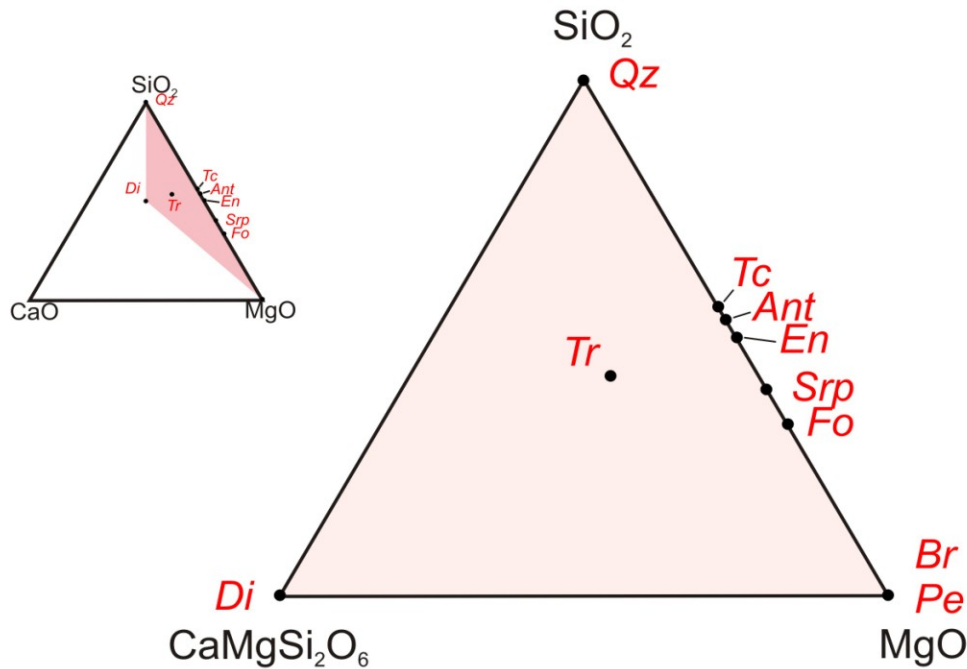
• Forsterit Mg_2SiO_4

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

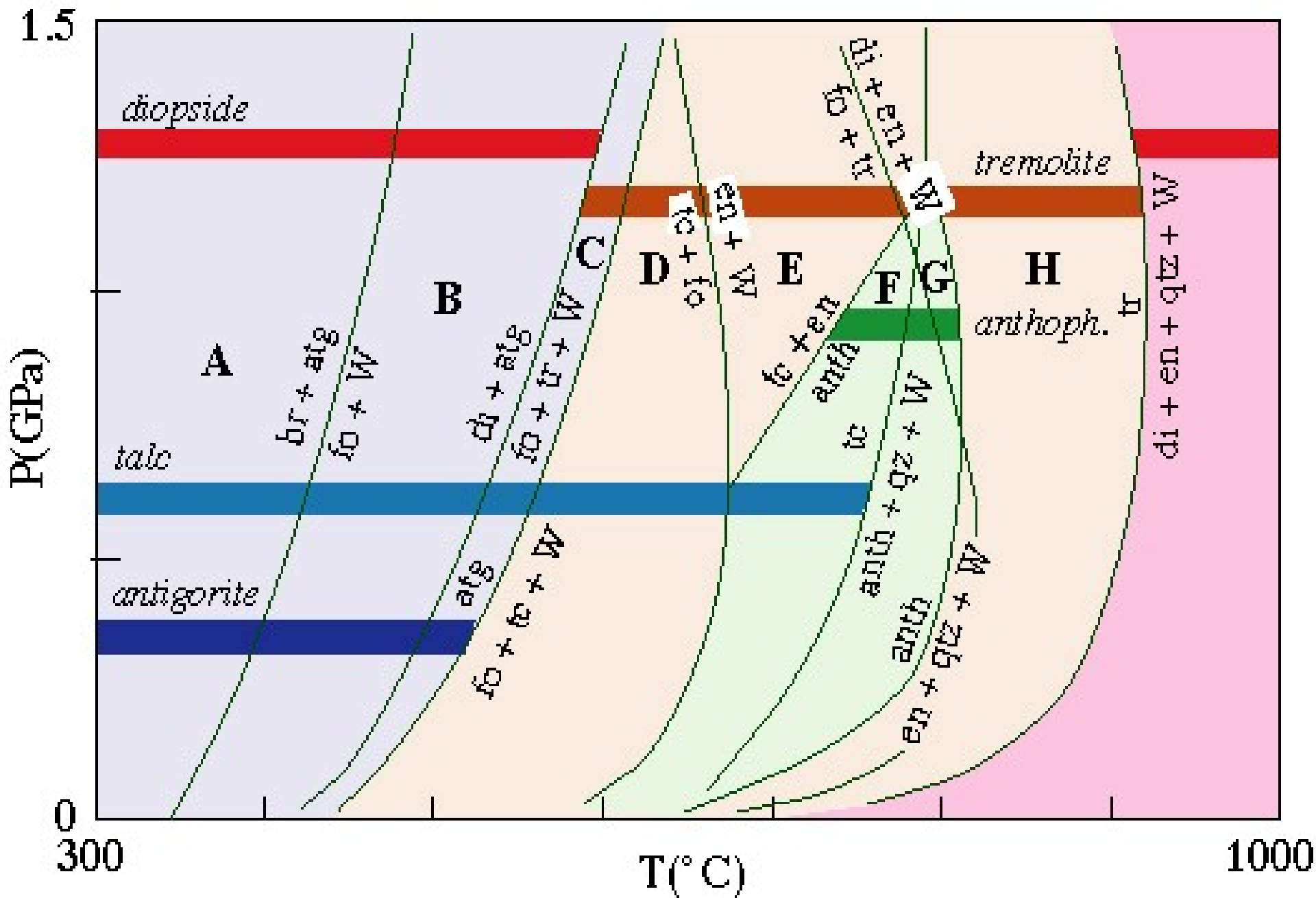


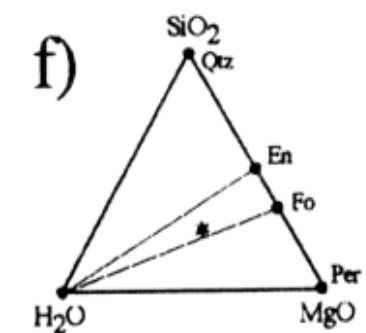
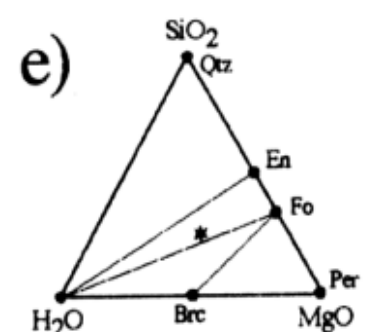
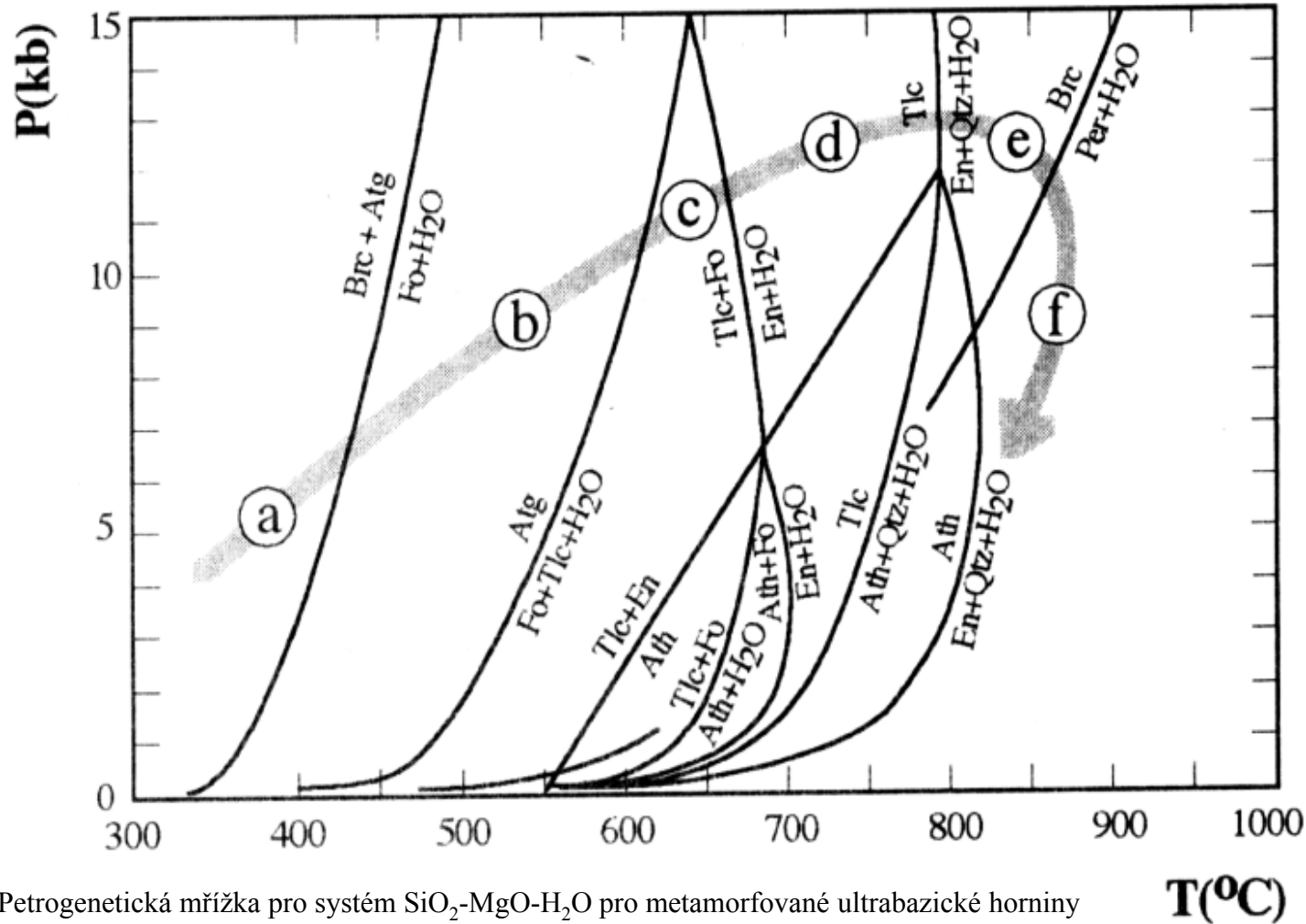
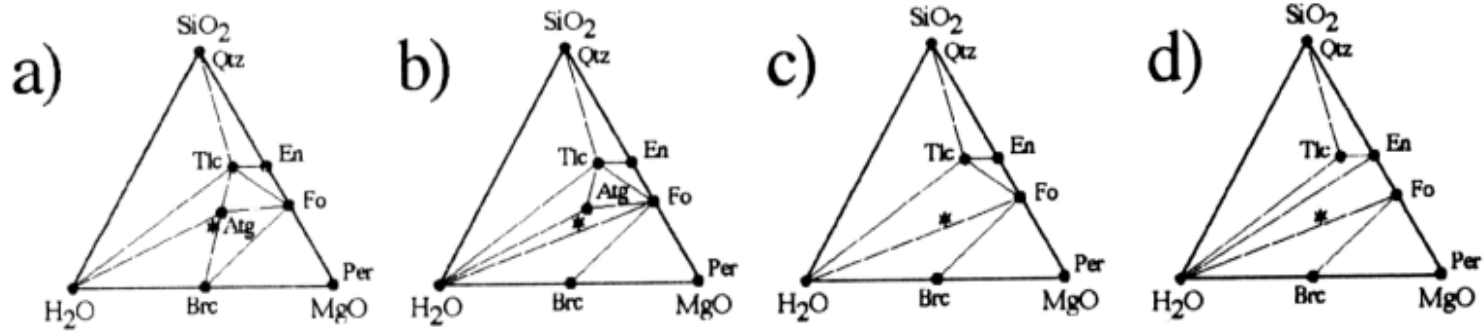
Ultramafic Rocks (water saturated)

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	

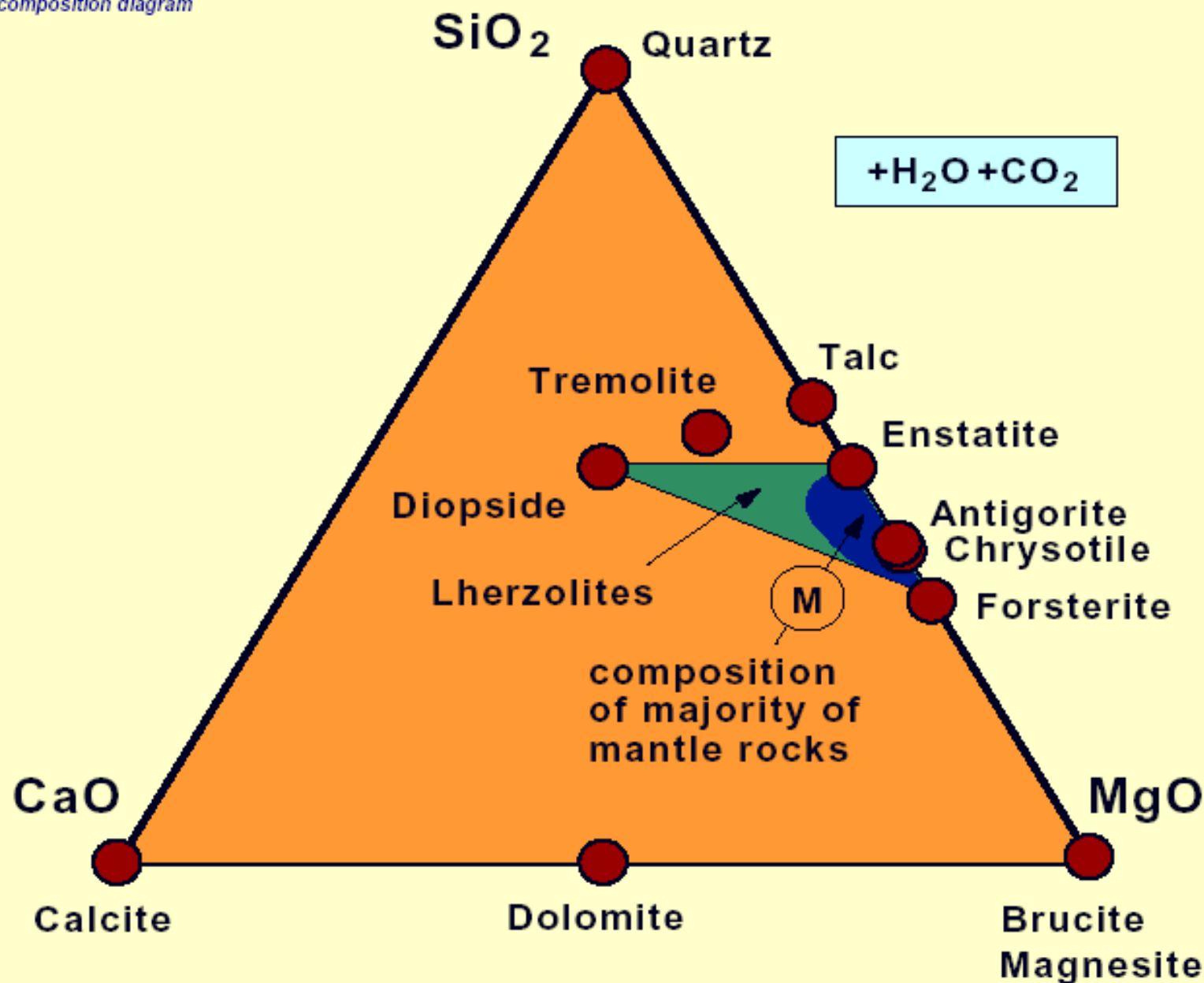


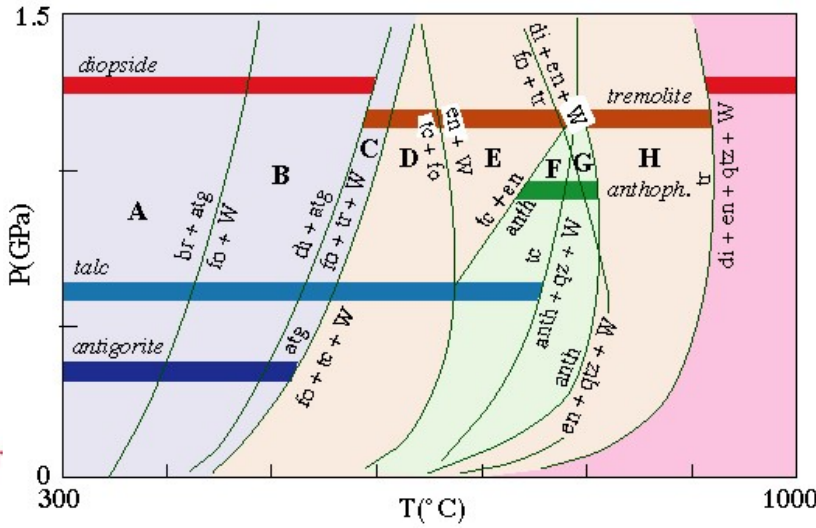
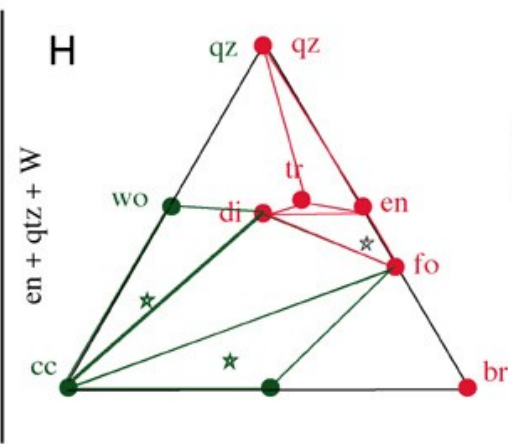
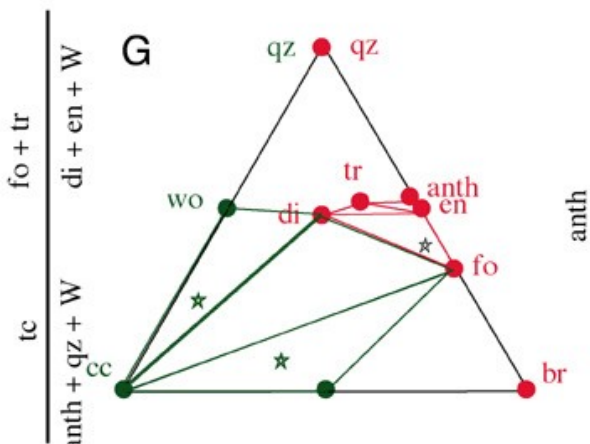
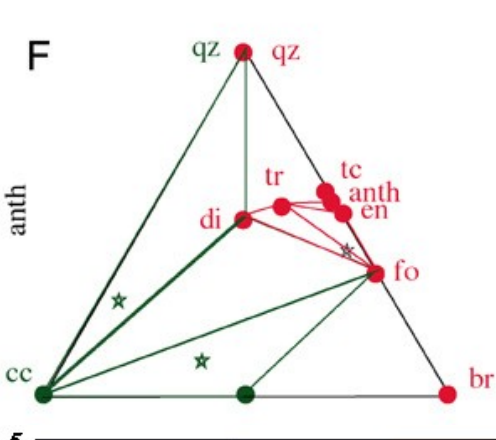
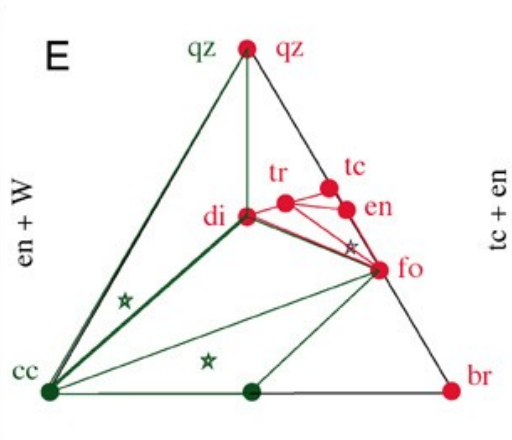
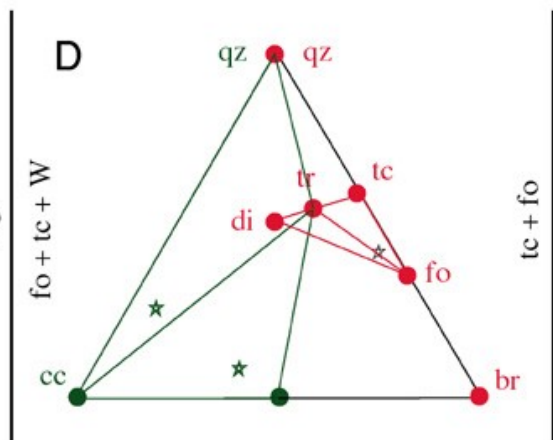
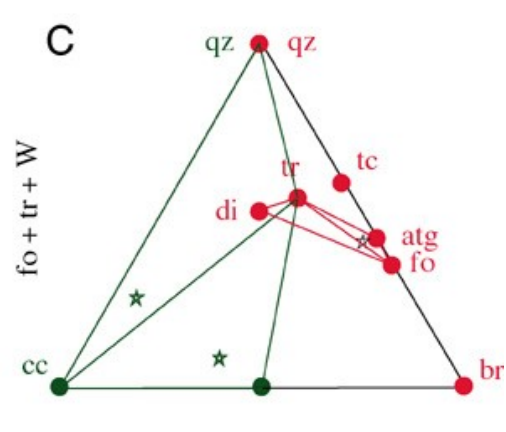
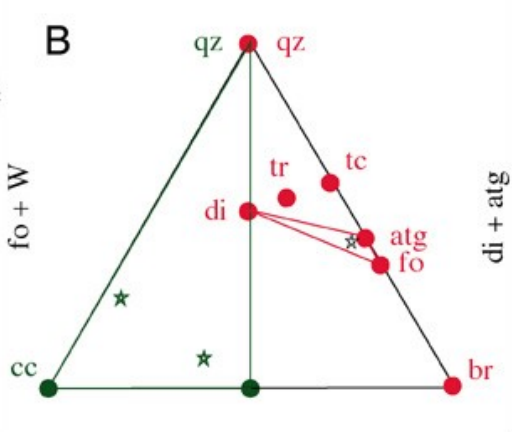
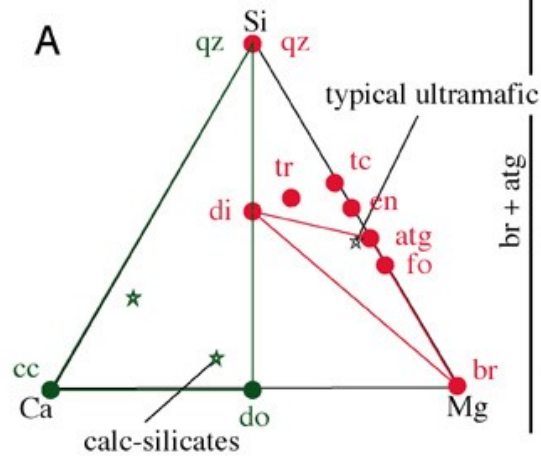
Prográdní metamorfóza ultrabazických hornin v systému CSMH

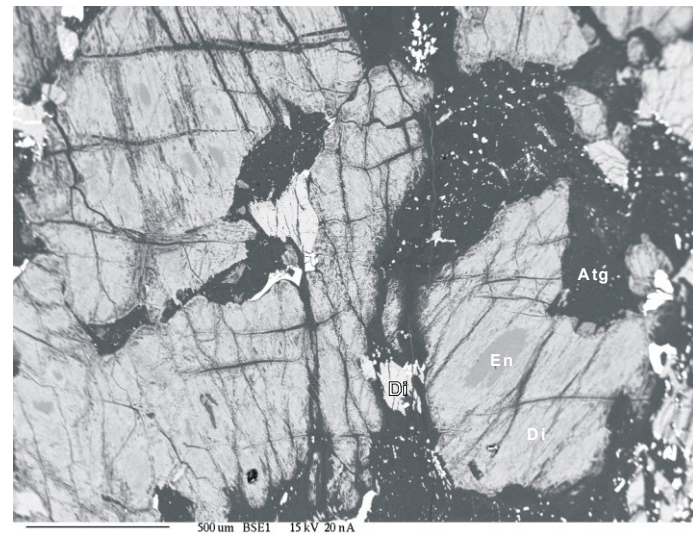
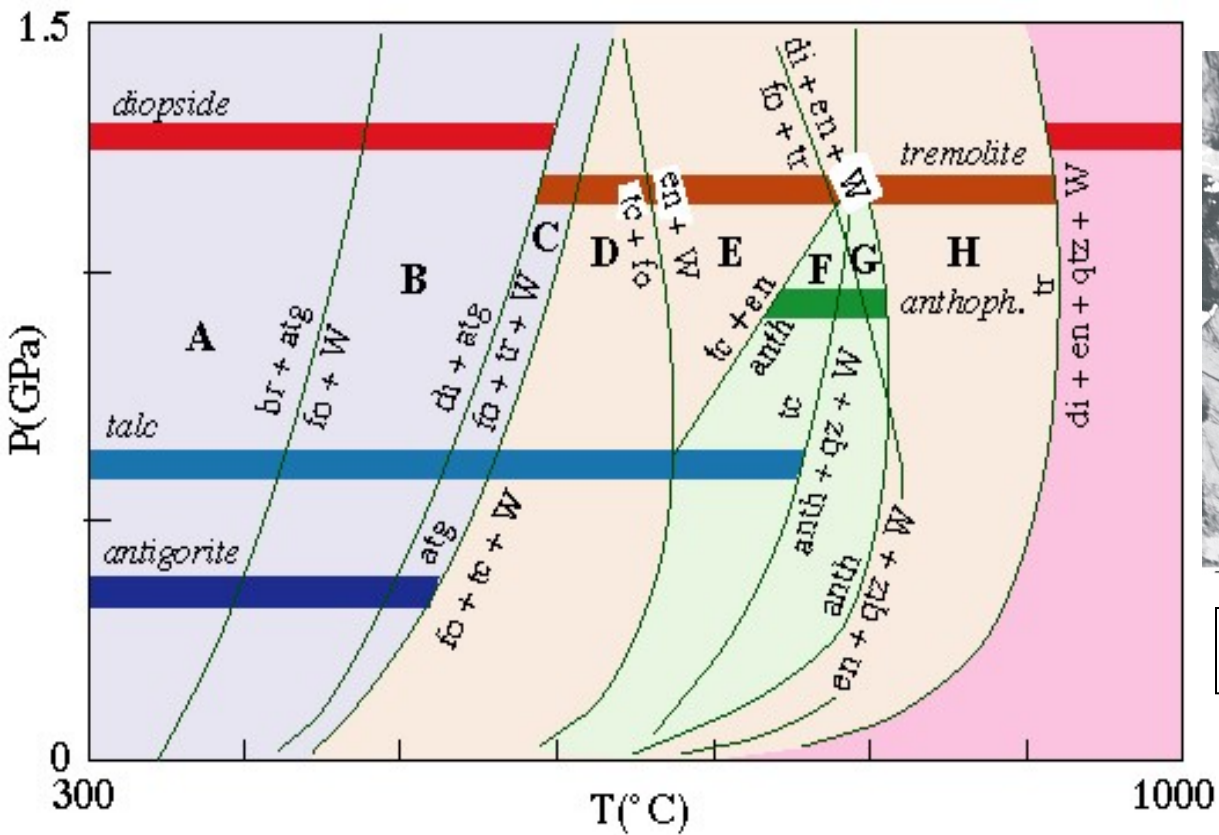




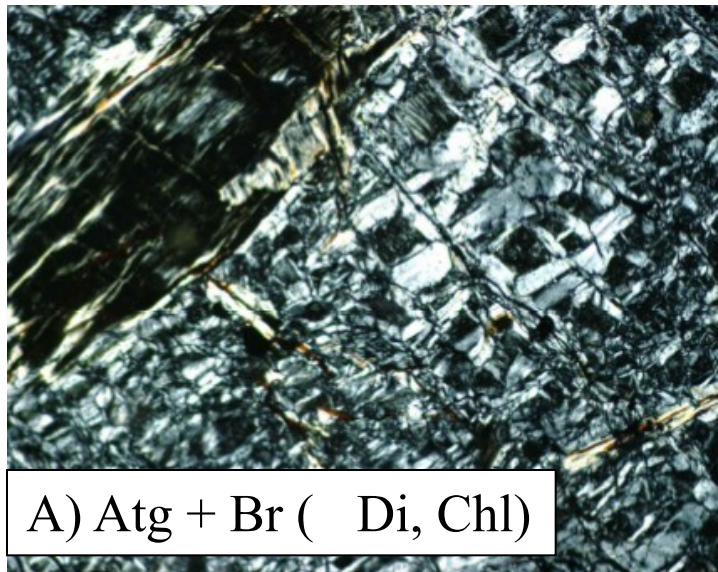
Petrogenetická mřížka pro systém SiO₂-MgO-H₂O pro metamorfované ultrabazické horniny



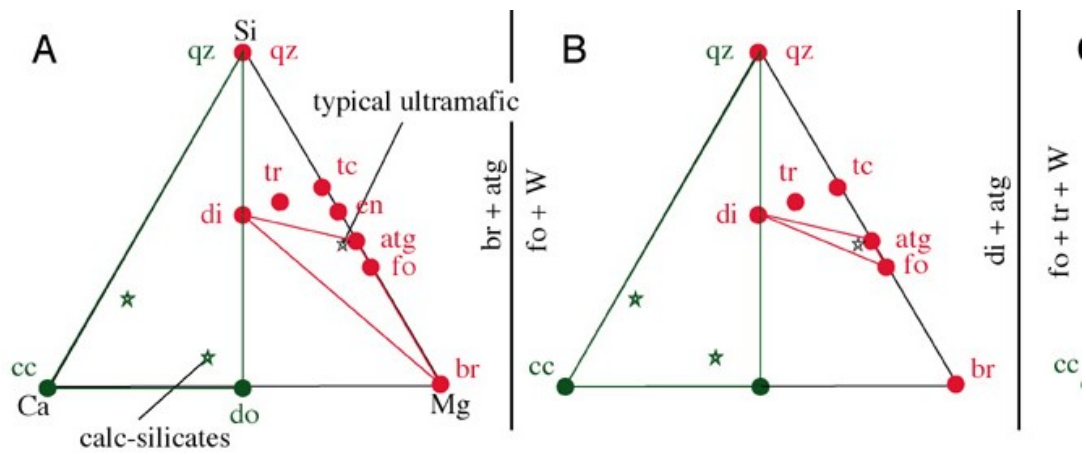


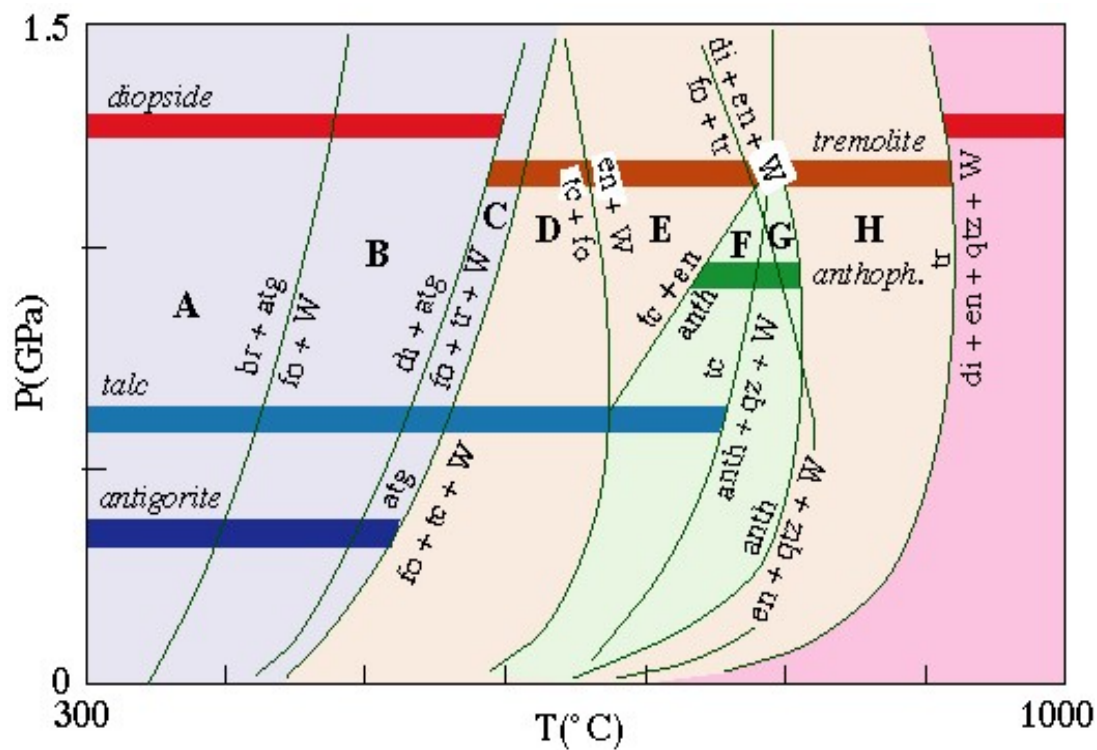
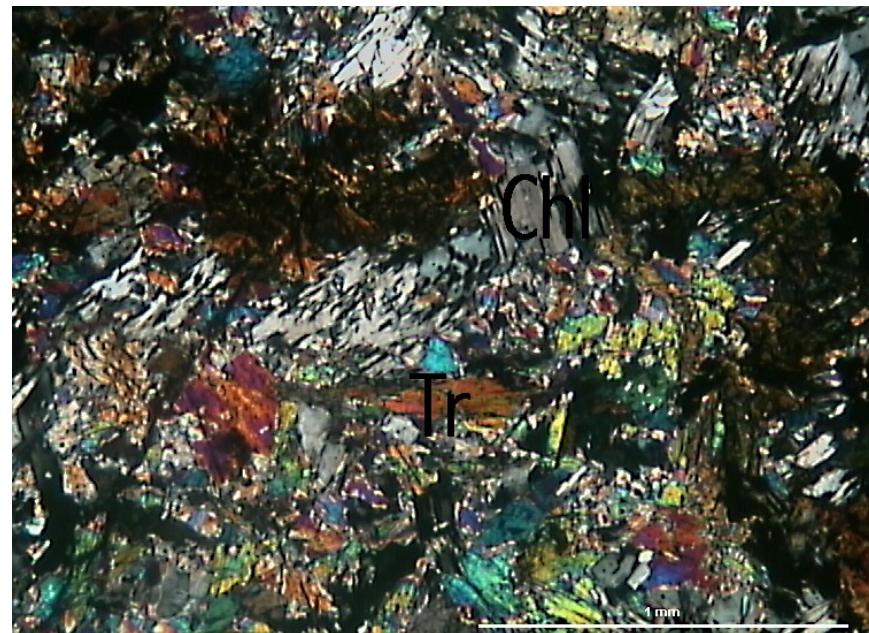
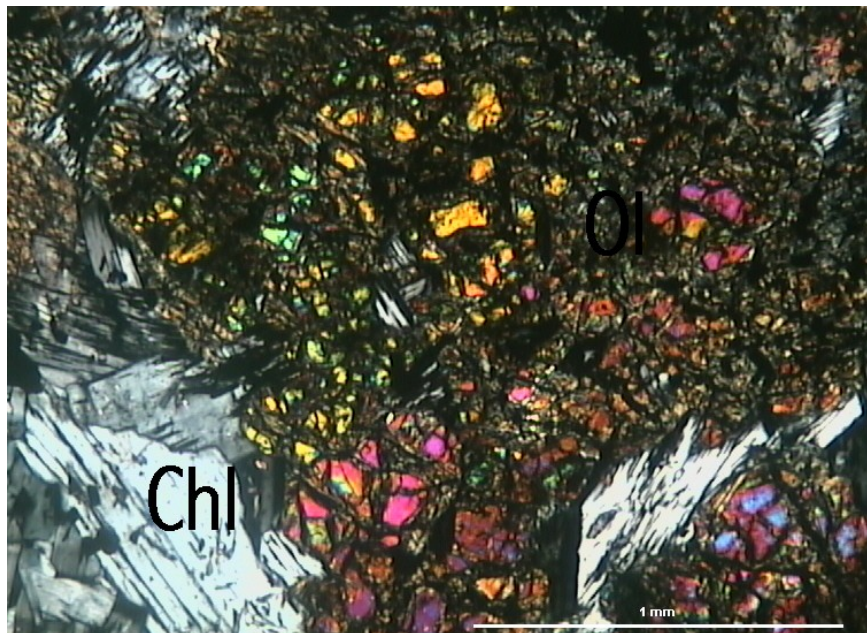


B) Atg + Di + Fo (Chl)

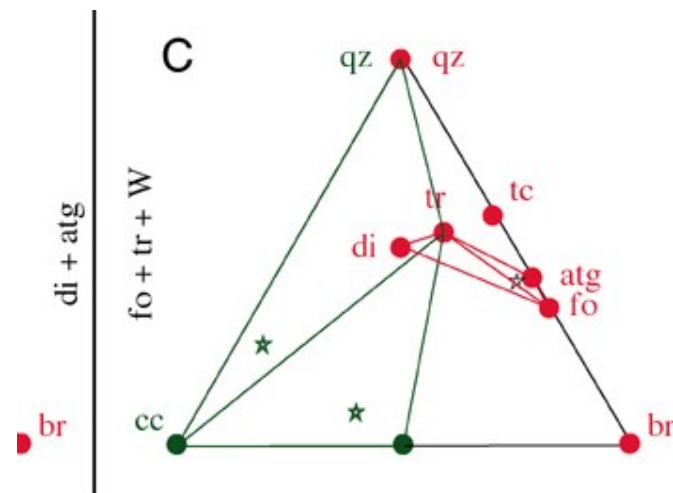


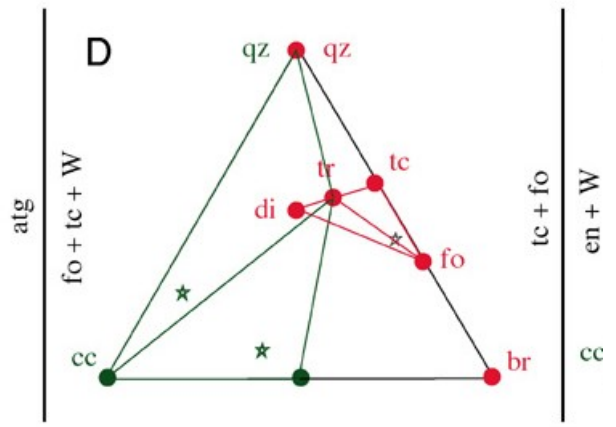
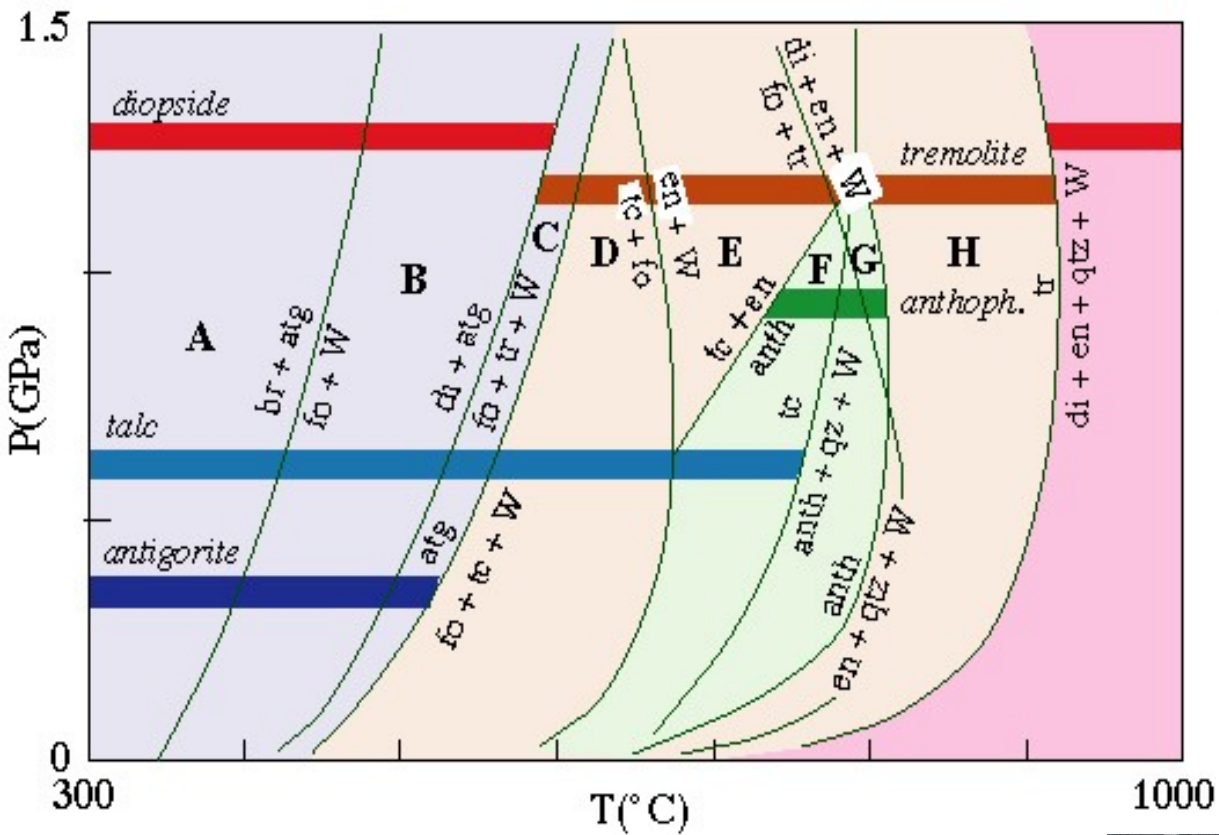
A) Atg + Br (Di, Chl)



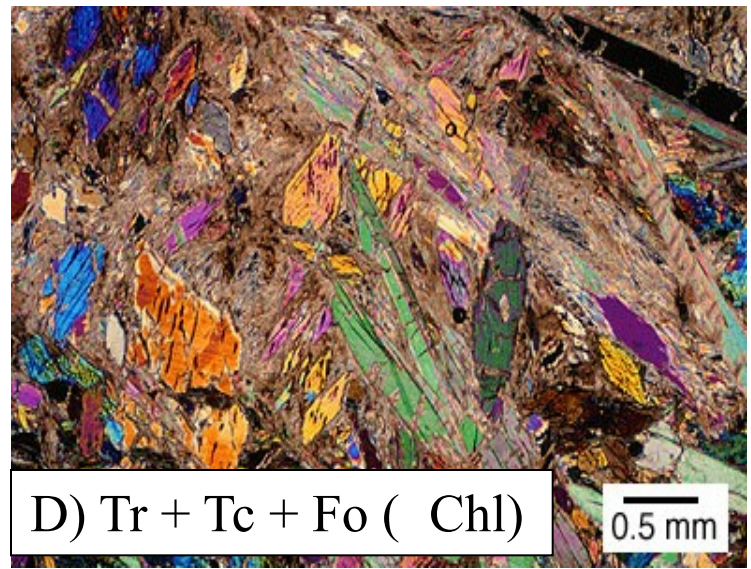


C) Tr + Atg + Fo + Chl

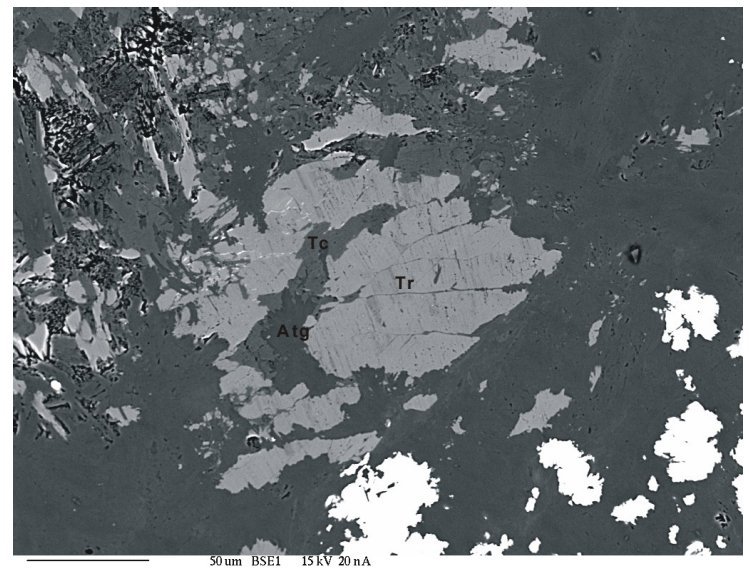




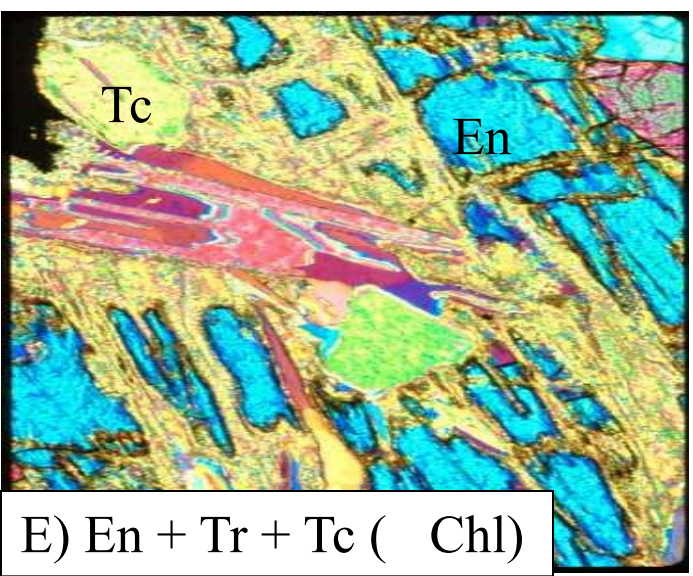
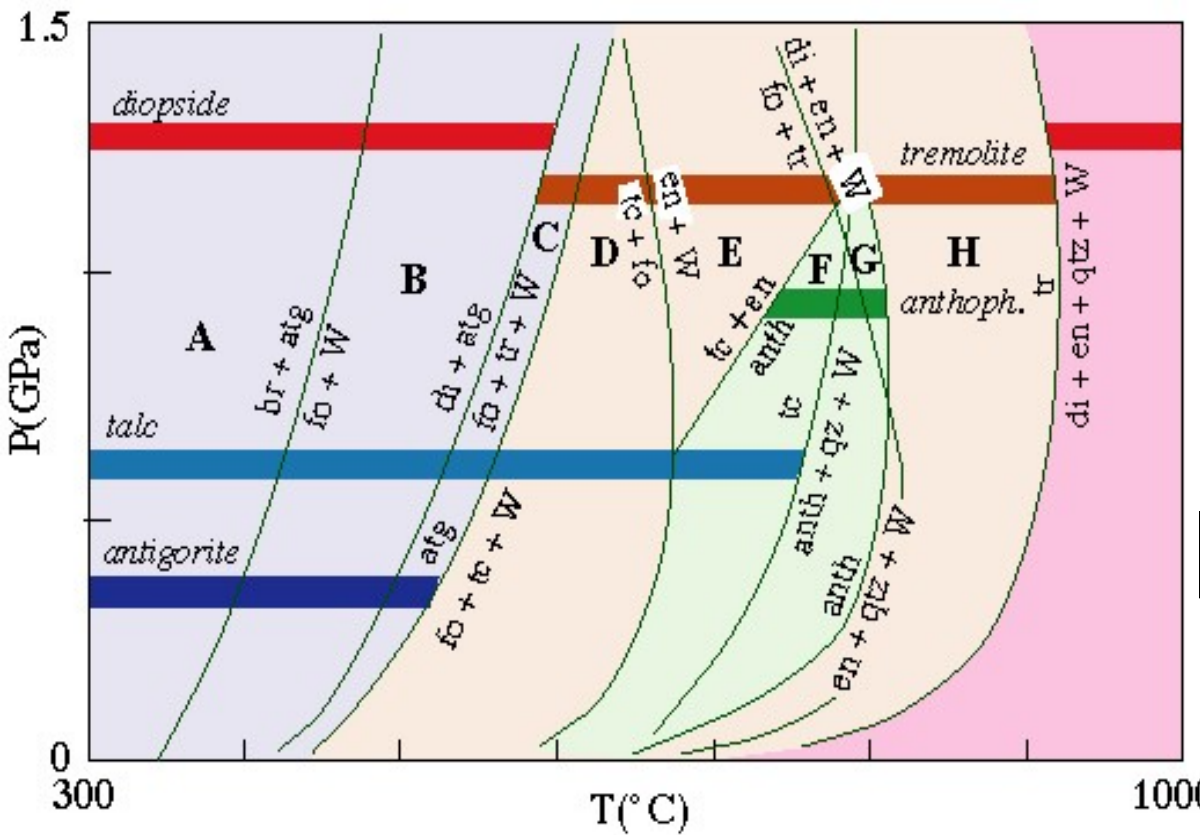
C) Tr + Atg + Fo (Chl)



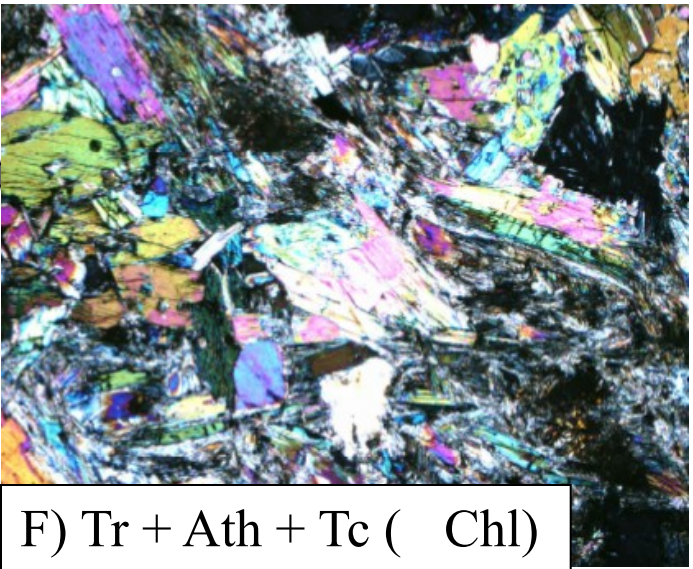
D) Tr + Tc + Fo (Chl)



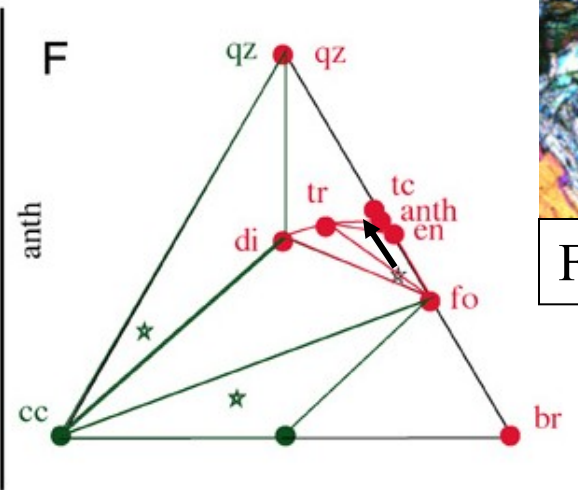
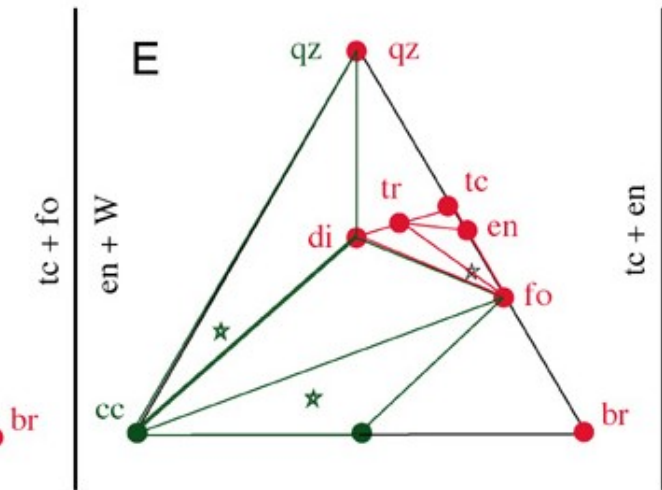
50 μm BSE1 15 kV 20 nA



E) En + Tr + Tc (Chl)



F) Tr + Ath + Tc (Chl)



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

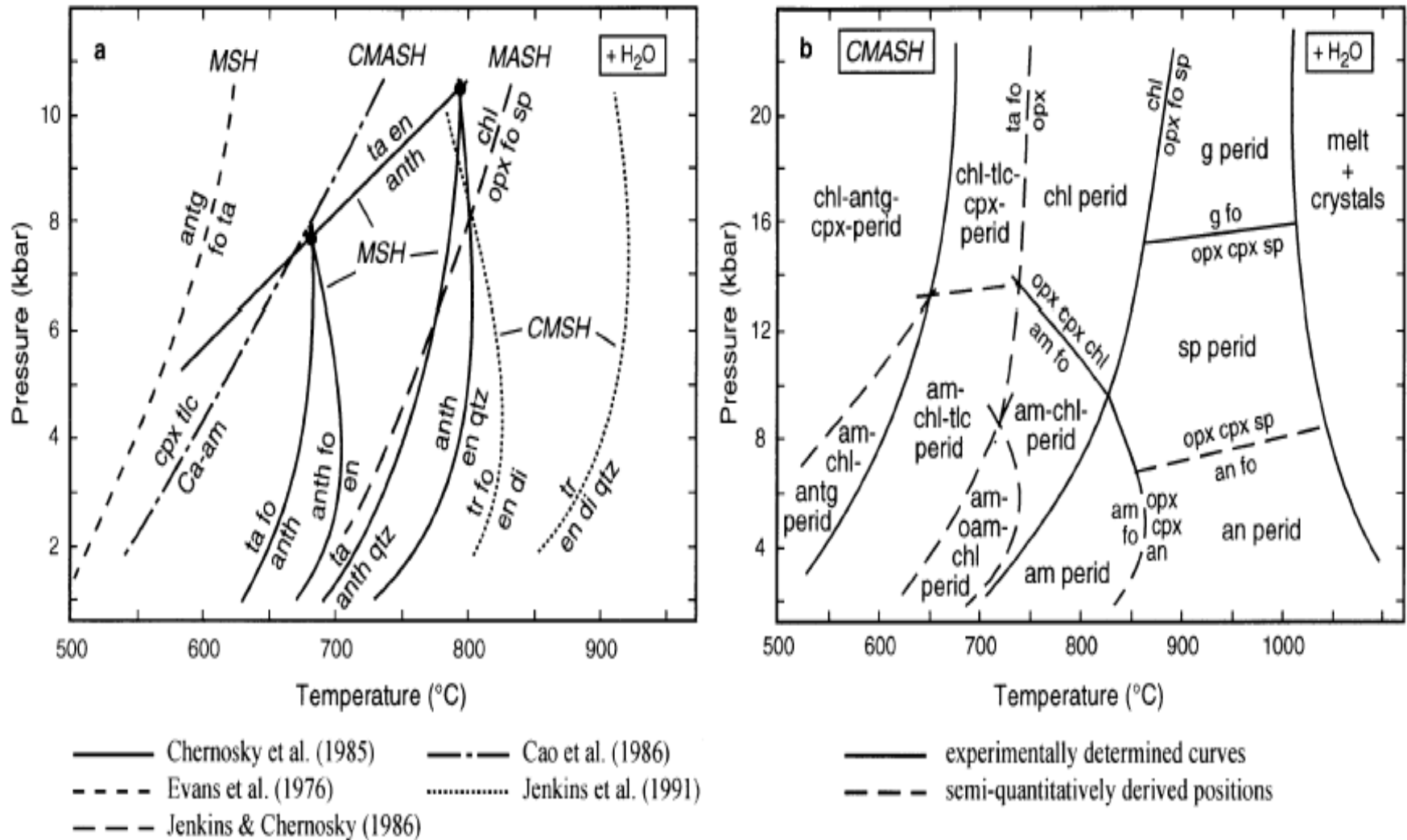
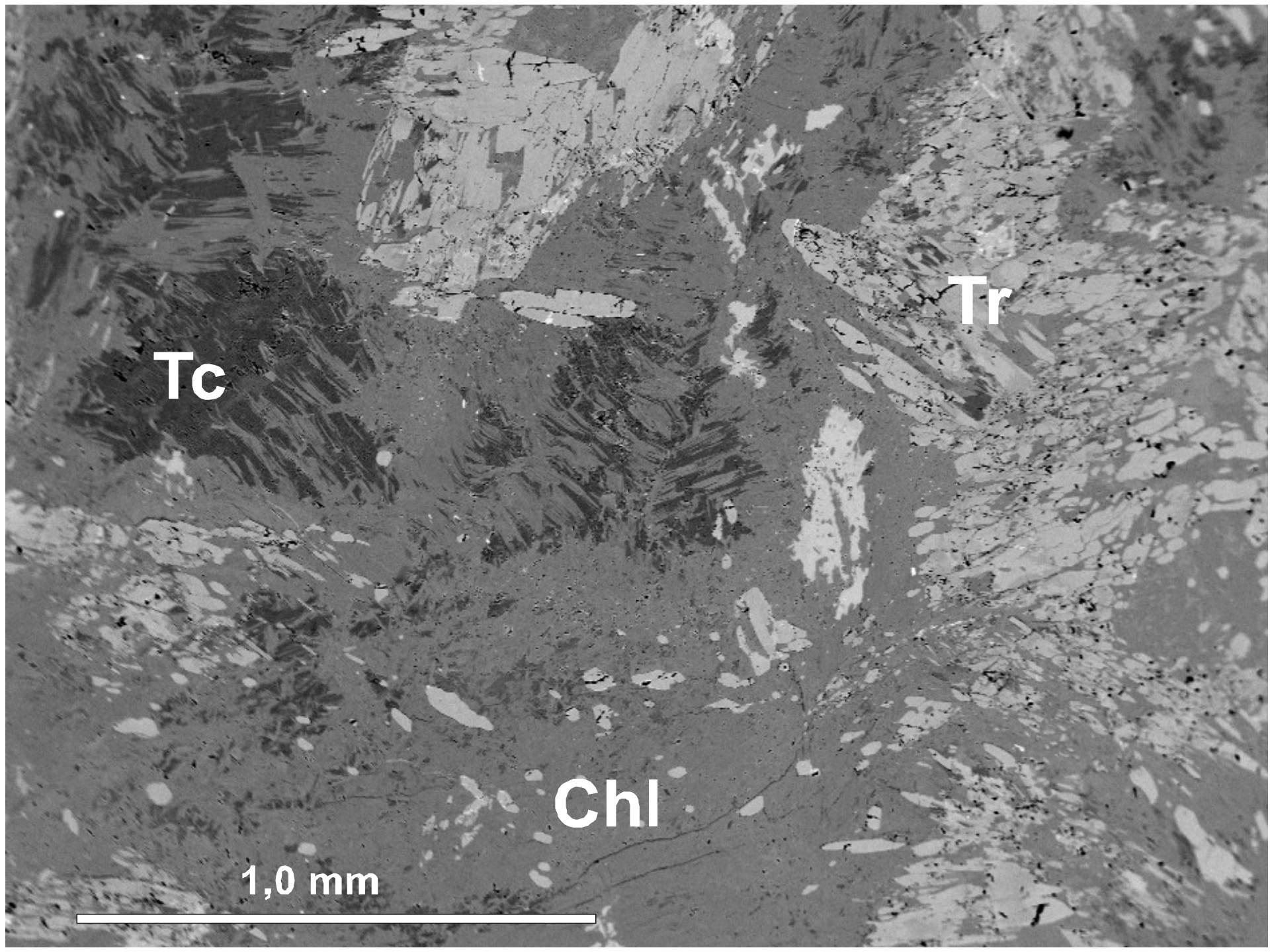


Fig. 2a Compilation of experimental data in various model systems. **b** Petrogenetic grid for peridotites of Jenkins (1981). *antg* antigorite; *g* garnet; *perid* peridotite; *qtz* quartz. For other abbreviations see

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



Tc

Tr

Chl

1,0 mm

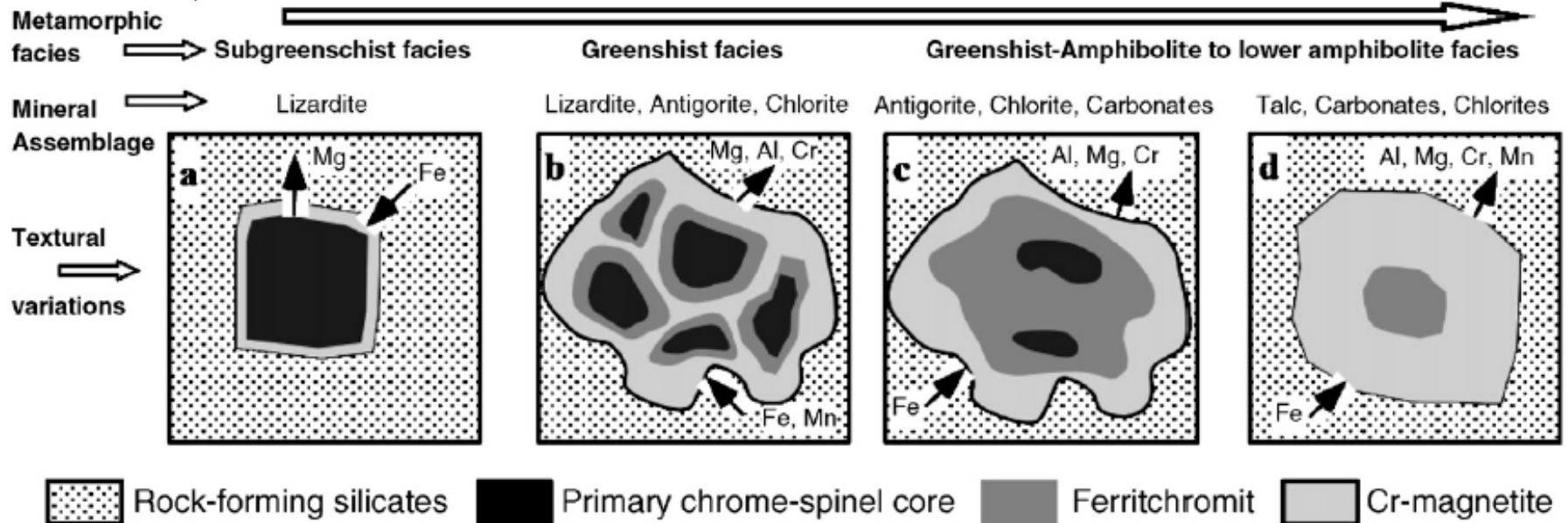
CMASH			CMFASH		
Phases		Phase components	Phases		Phase components
Chlorite (chl)	clin ames	$Mg_4MgAl[Si_3Al]O_{10}(OH)_2$ $Mg_4Al_2[Si_2Al_2]O_{10}(OH)_2$	clin daph ames		$Mg_4MgAl[Si_3Al]O_{10}(OH)_8$ $Fe_4FeAl[Si_3Al]O_{10}(OH)_8$ $Mg_4Al_2[Si_2Al_2]O_{10}(OH)_8$
Ca-Amphibole (am)	tr ts	$Ca_2Mg_3Mg_2[Si_8]O_{22}(OH)_2$ $Ca_2Mg_3Al_2[Si_6Al_2]O_{22}(OH)_2$	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	$FeAl_2O_4$

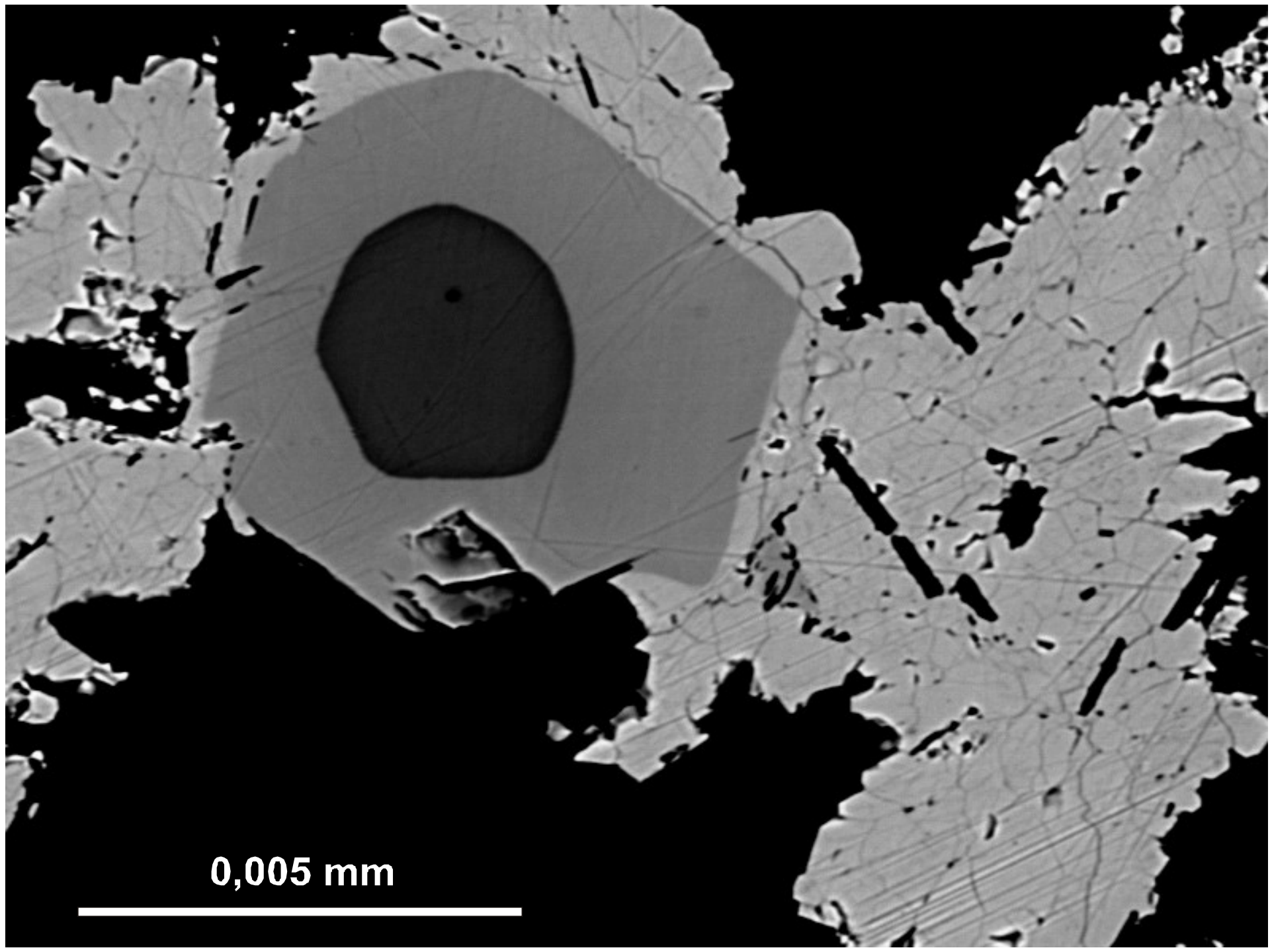
Spinelidy jako indikátor stupně metamorfózy

- během progradní metamorfózy dochází k postupné změně chemického složení původního chromitu
- vzniká chromem 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:*

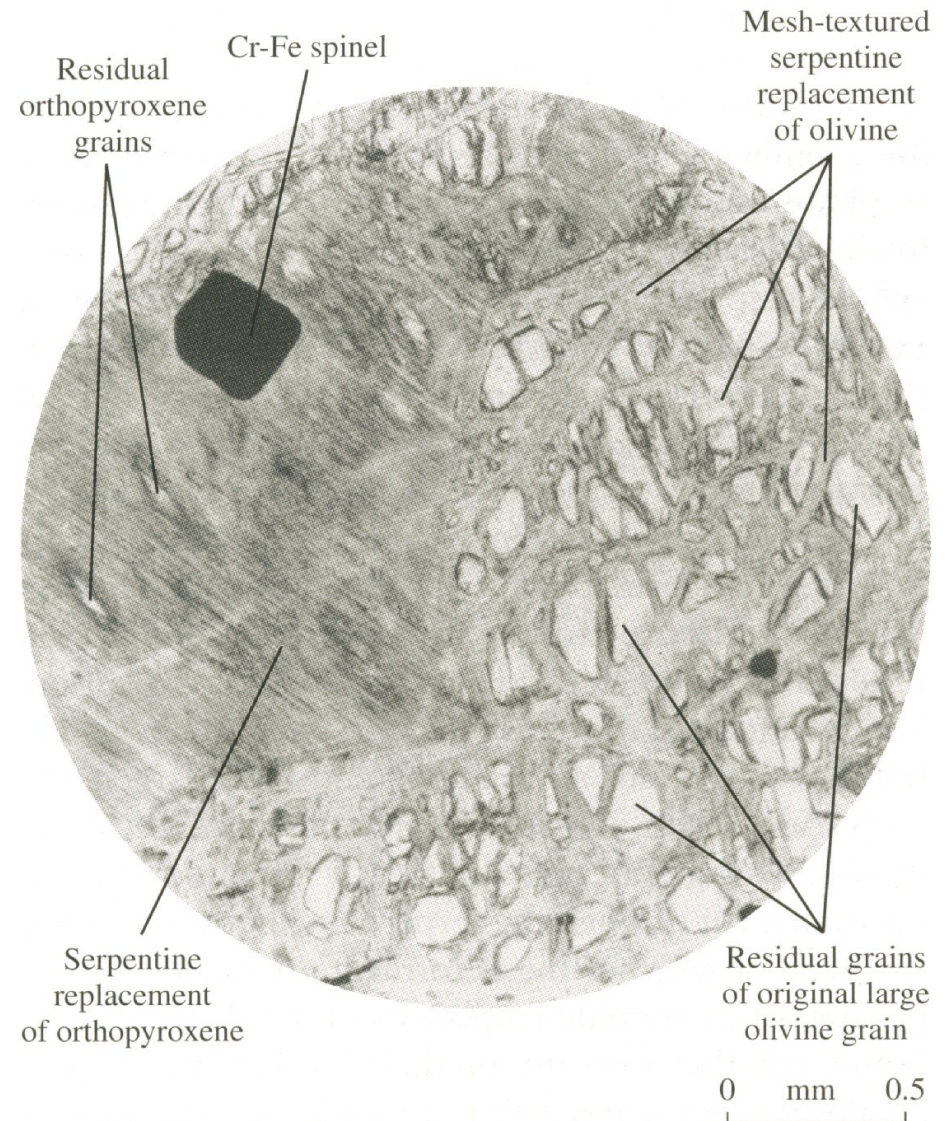
- Olivín → serpentín

- ortopyroxen → serpentín

- Olivín + ortopyroxen → serpentín + Fe oxidy + mastek + brucit

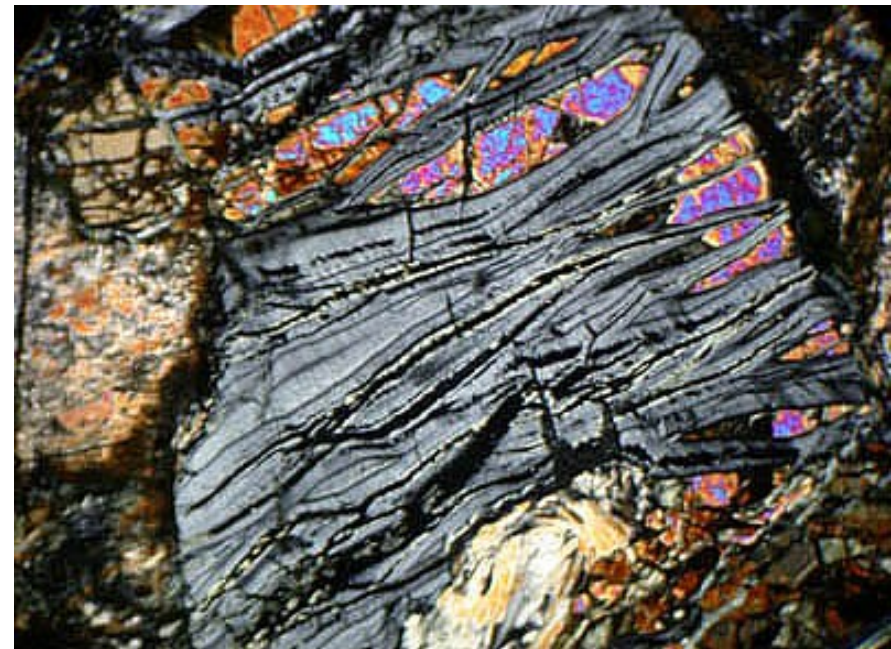
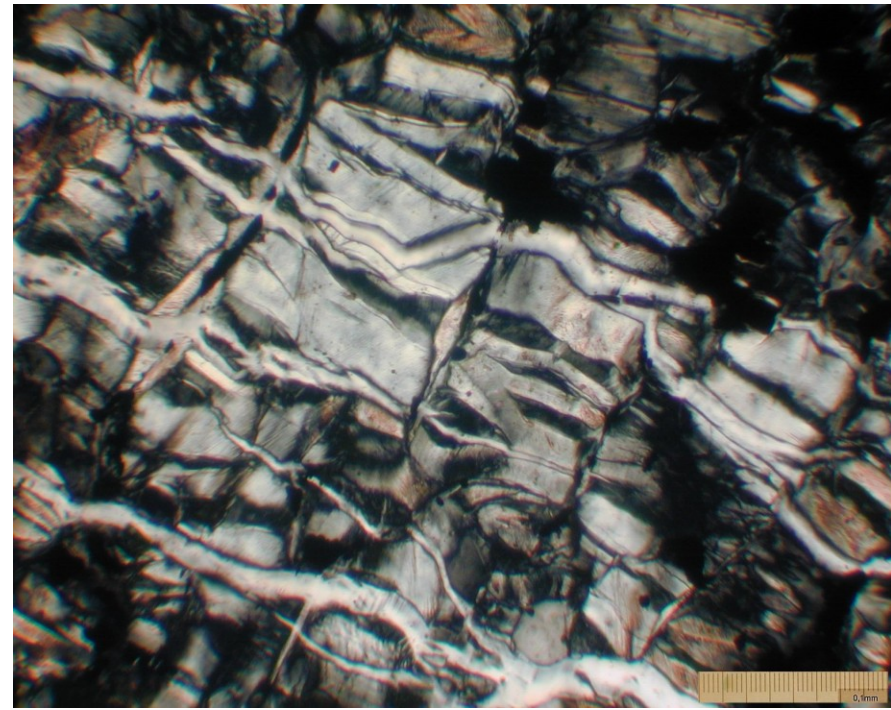
- Klinopyroxen → amfibol + hydratované Ca-Al silikáty + chlorit

- 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 % H₂O
- serpentinity vznikly interakcí s mořskou vodou nebo meteorickou vodou (¹⁸O)
- 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 cm³ 111 cm³ 25 cm³

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



forsterite serpentine

271 cm³ 221 cm³

865 g 90 g 554 g



brucite removed in solution

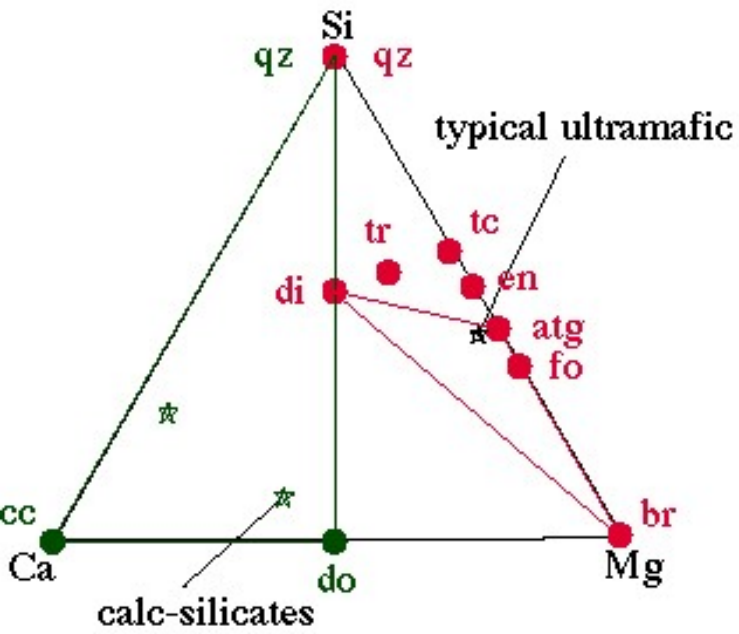
49 cm³ 116 g 173 g 129 g

$\Delta V \sim 0$

- 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

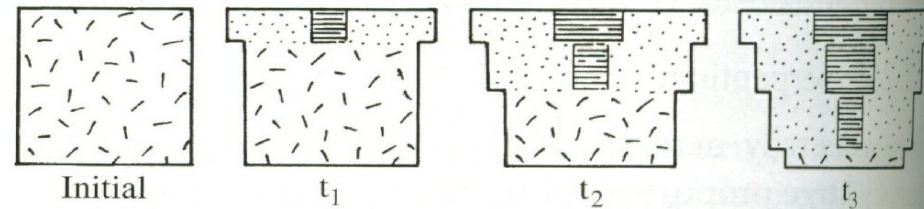
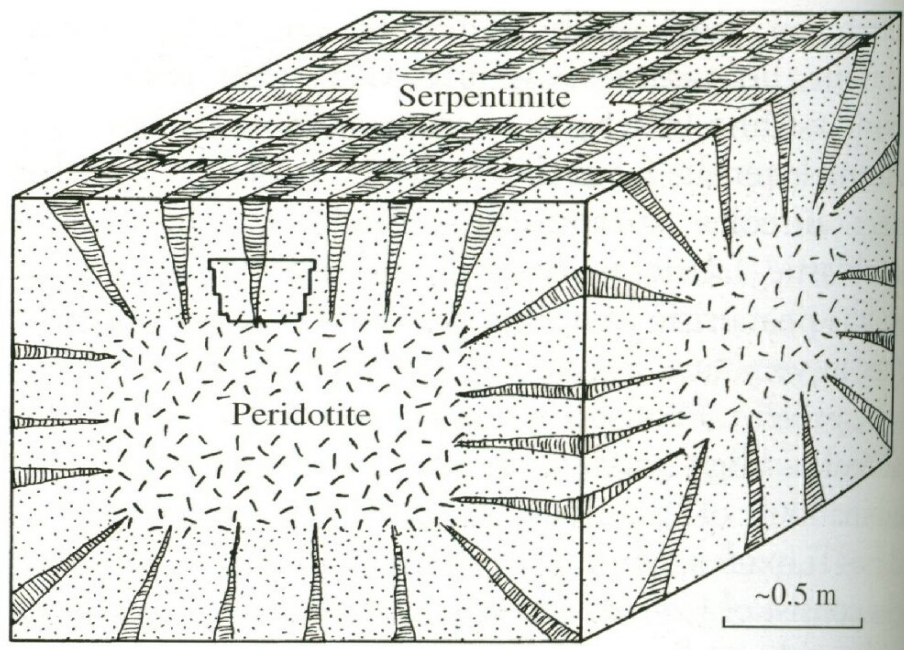
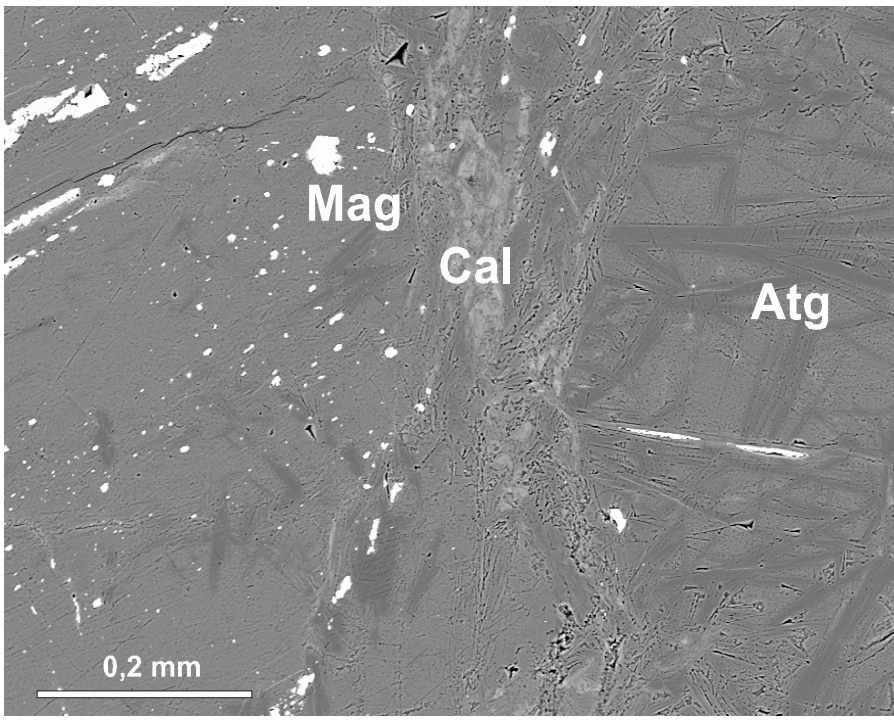
- všechno Mg a Si v oceánu může být produktem reakcí na středooceánských hřbetech
- avšak v různě intenzivně serpentinizovaných peridotitech je poměr SiO₂ / (MgO + CaO + MnO + NiO + FeO) zachován

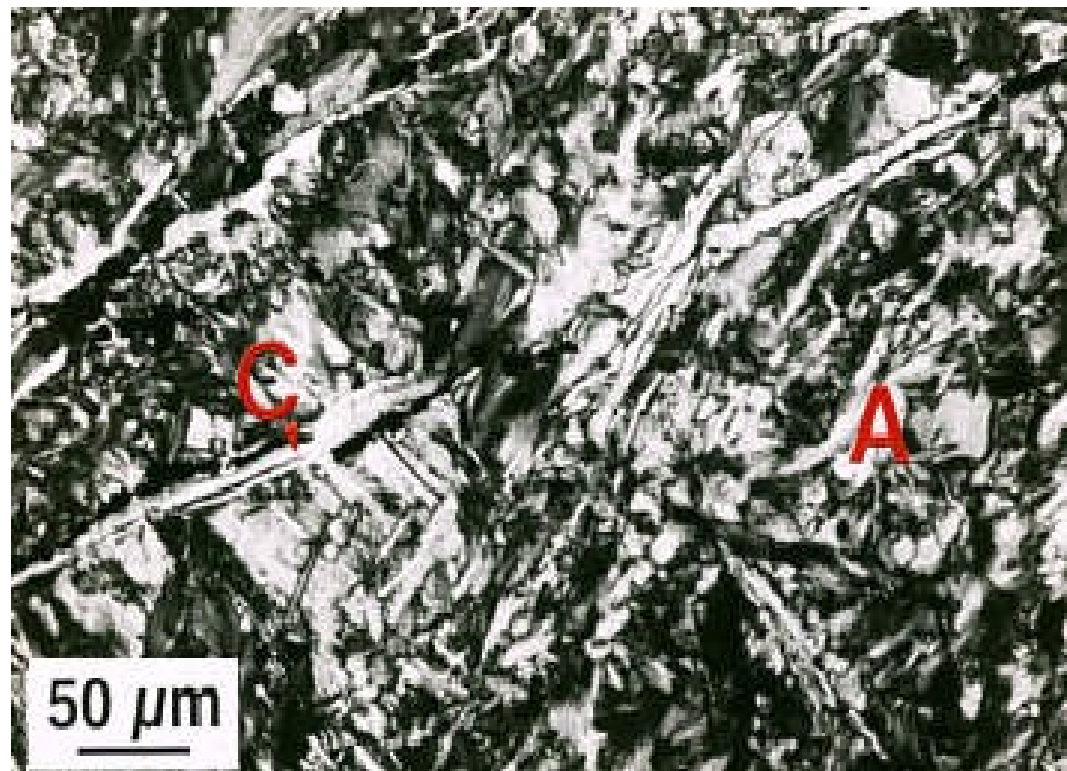
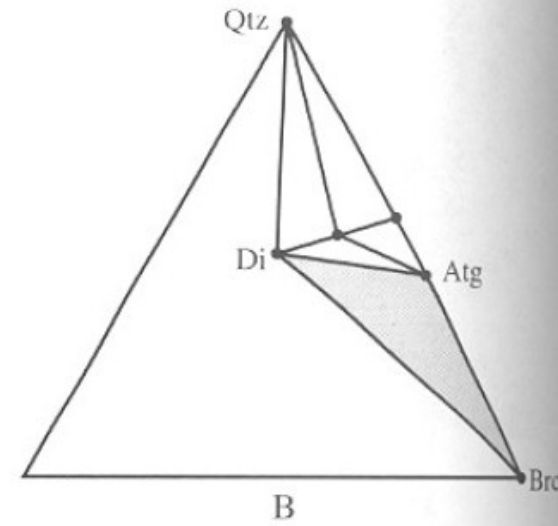
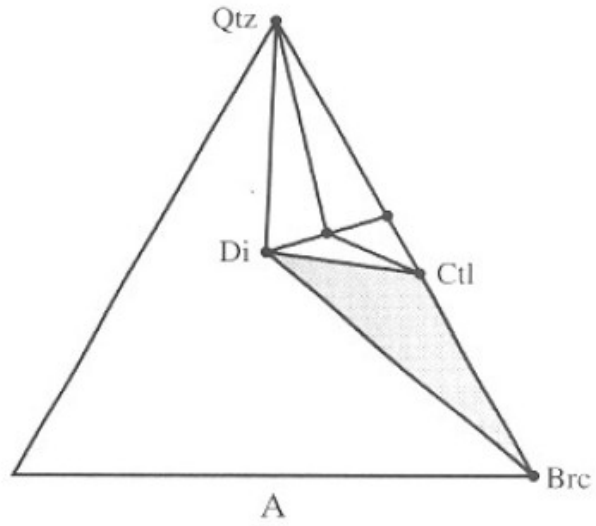
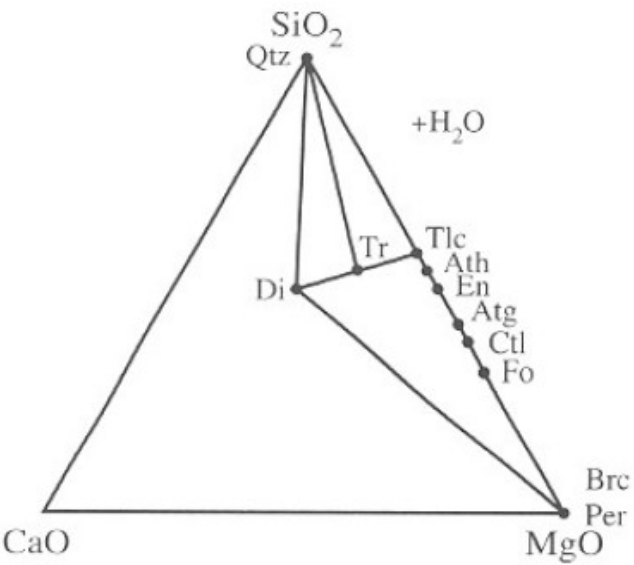
- Zdroje H₂O:
 - a) pozdní granitické intruze bohaté vodou
 - b) okolní horniny (nemet.- nízko met.)
 - c) litologická rozhraní a zlomy



- 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) = chrysotil, A (Atg) = antigorit

- sepentinity mají nižší hustotu oproti primárním dunitům a peridotitům (2,6-2,8 g/cm³ vs. 3,3 g/cm³)

➤ **Lizardit**

< 200 °C, do ~ 20 kbar

facie zelených a modrých břidlic

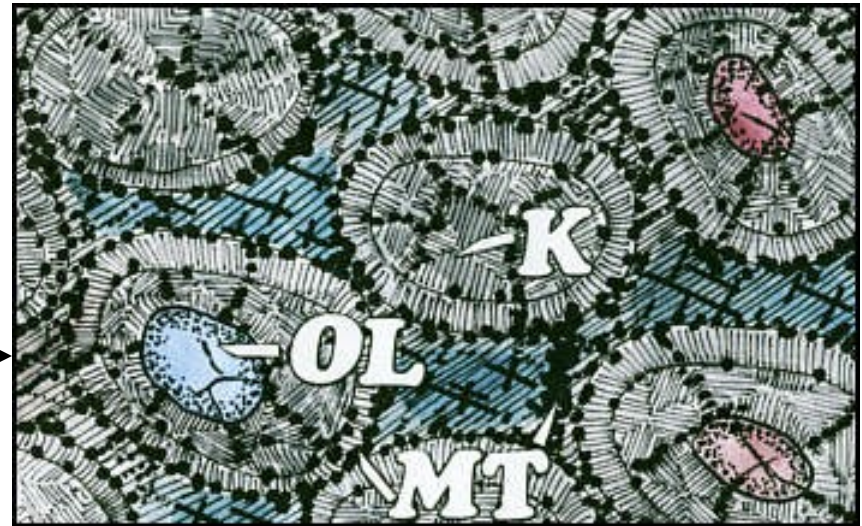
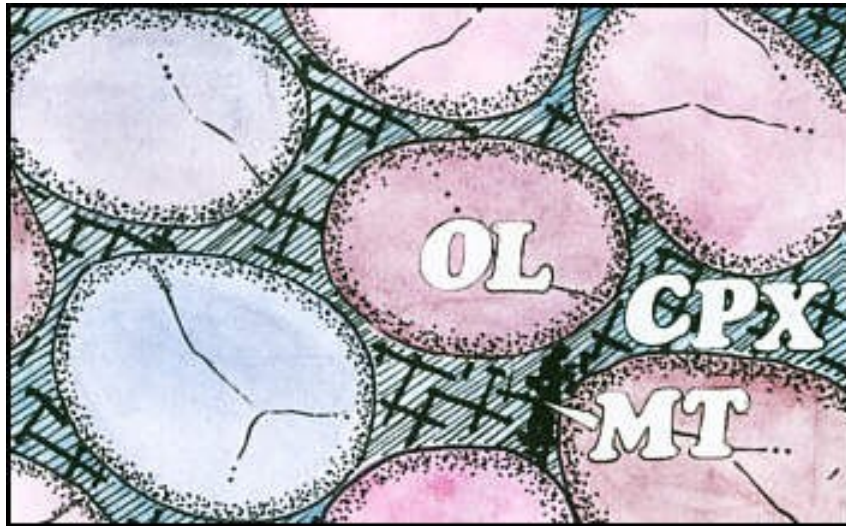
➤ **Chrisotil**

< 200 °C do ~300 °C, < 3-4 kbar

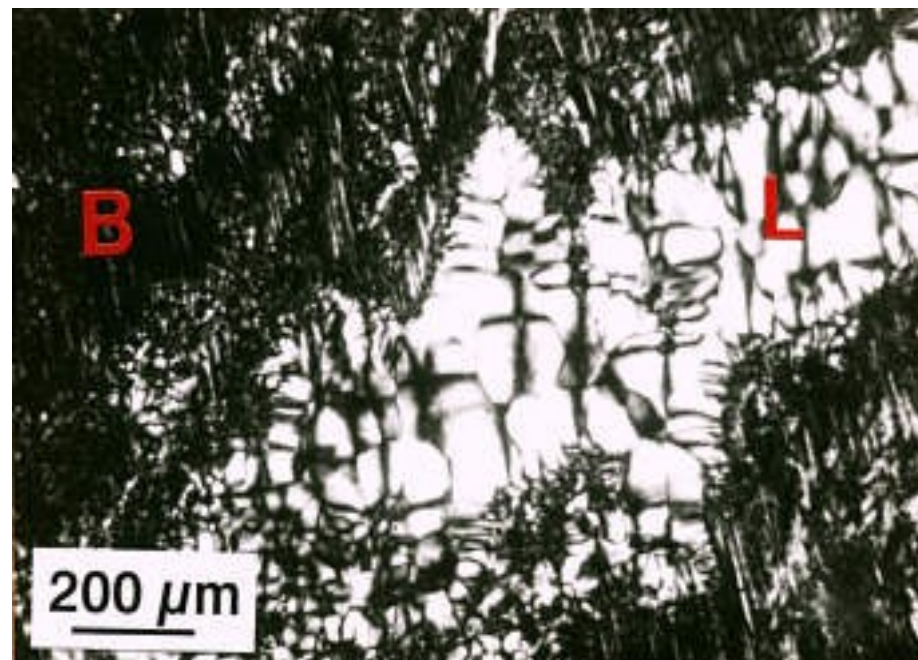
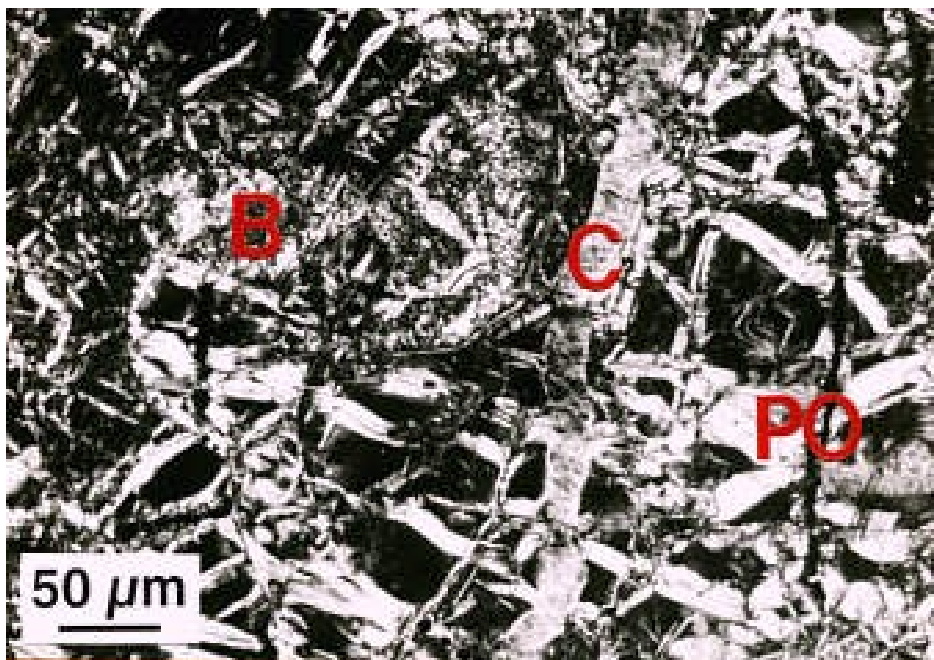
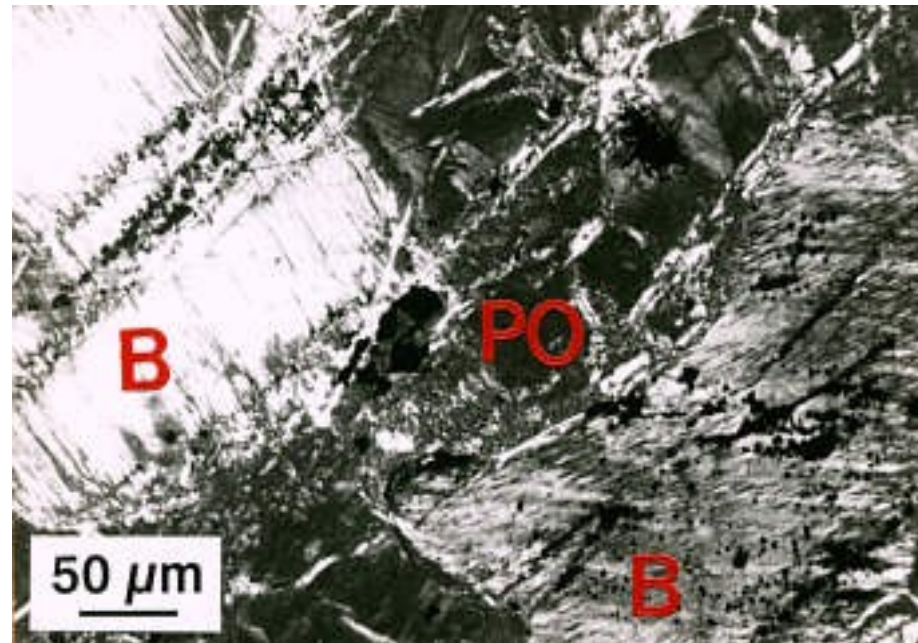
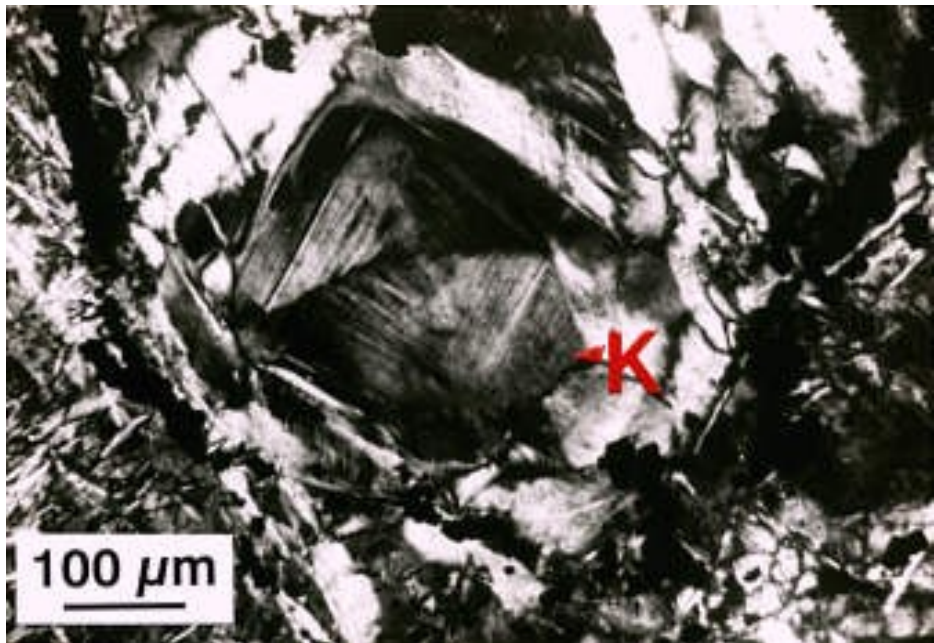
➤ **Antigorit**

< 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

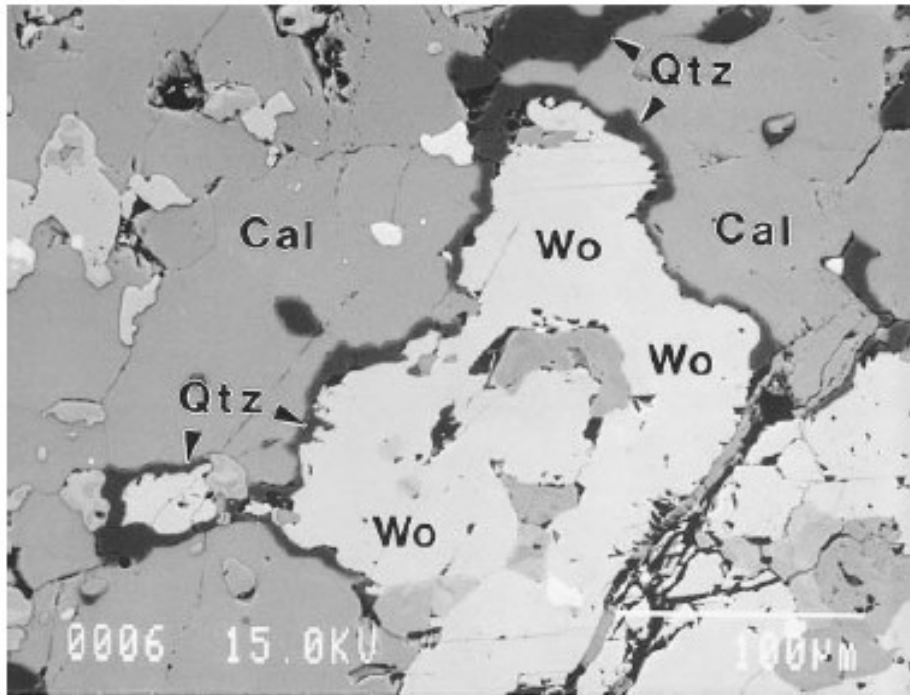
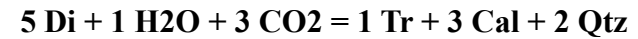
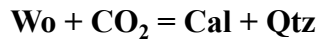


FIGURE 4. Backscattered electron (BSE) image of continuous rim of quartz (Qtz) around wollastonite (Wo) in a matrix of calcite (Cal) illustrating incipient progress of retrograde Reaction 2 (in reverse) in siliceous limestone from the Ritter Range pendant, California. Sample 2O of Ferry et al. (1998).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

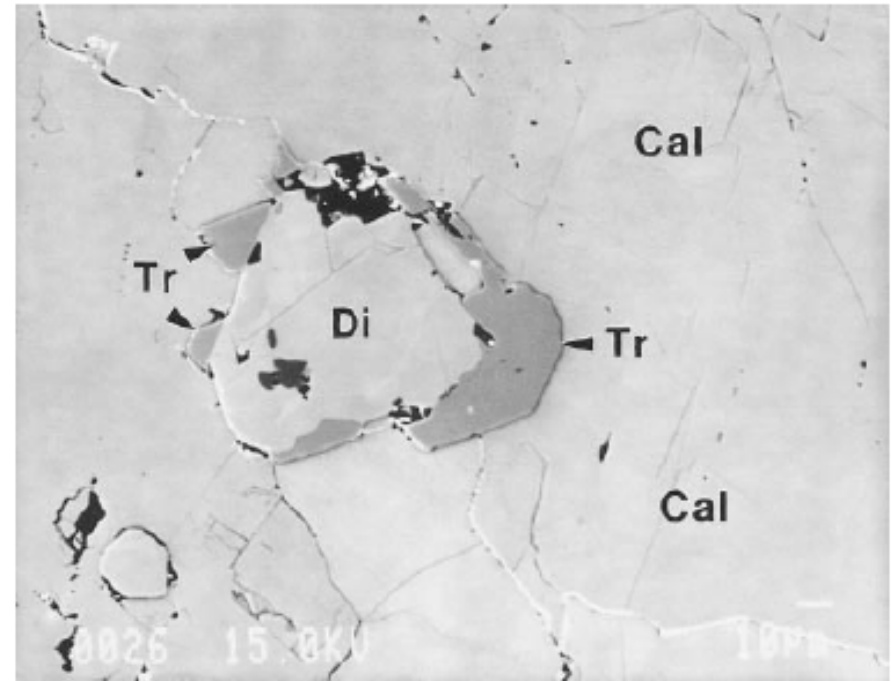
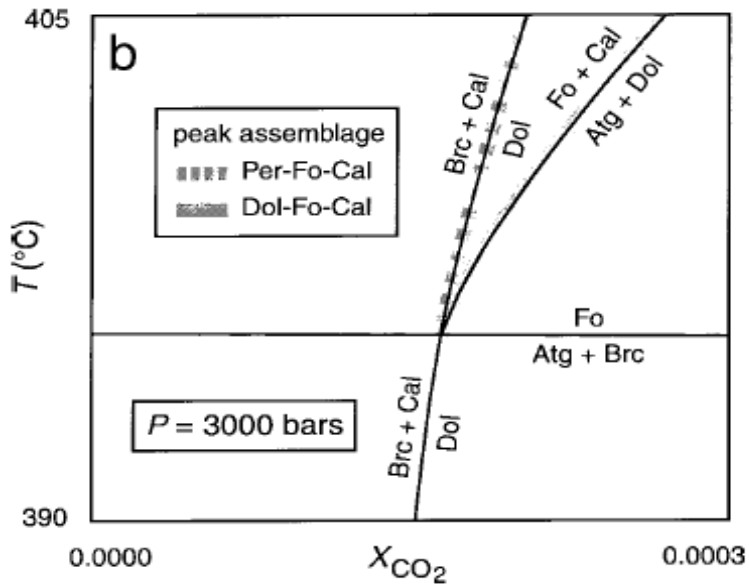
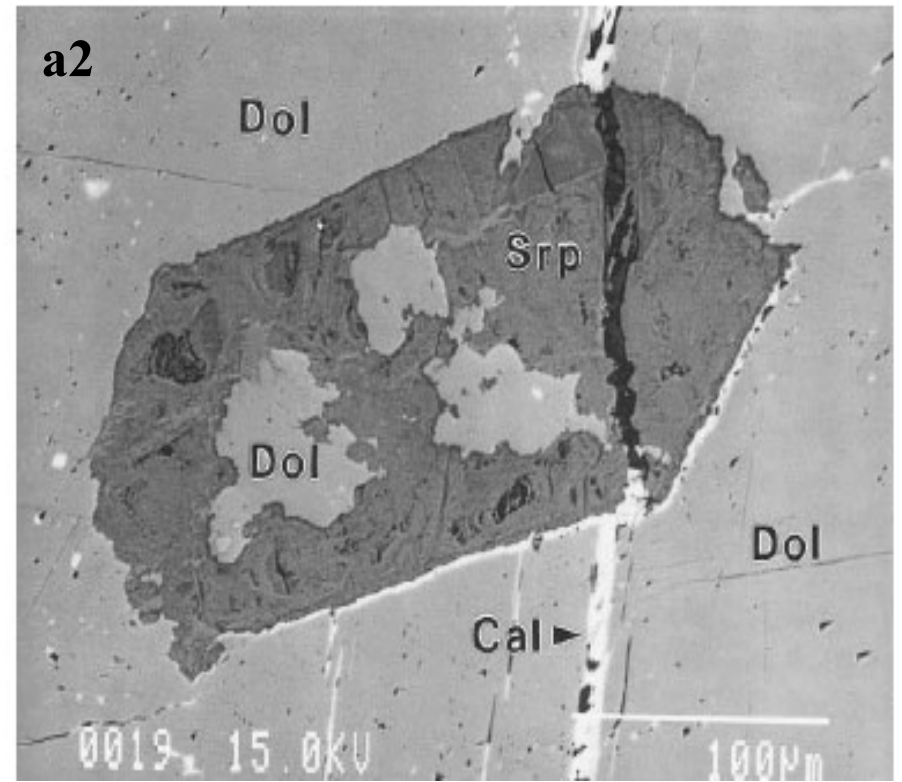
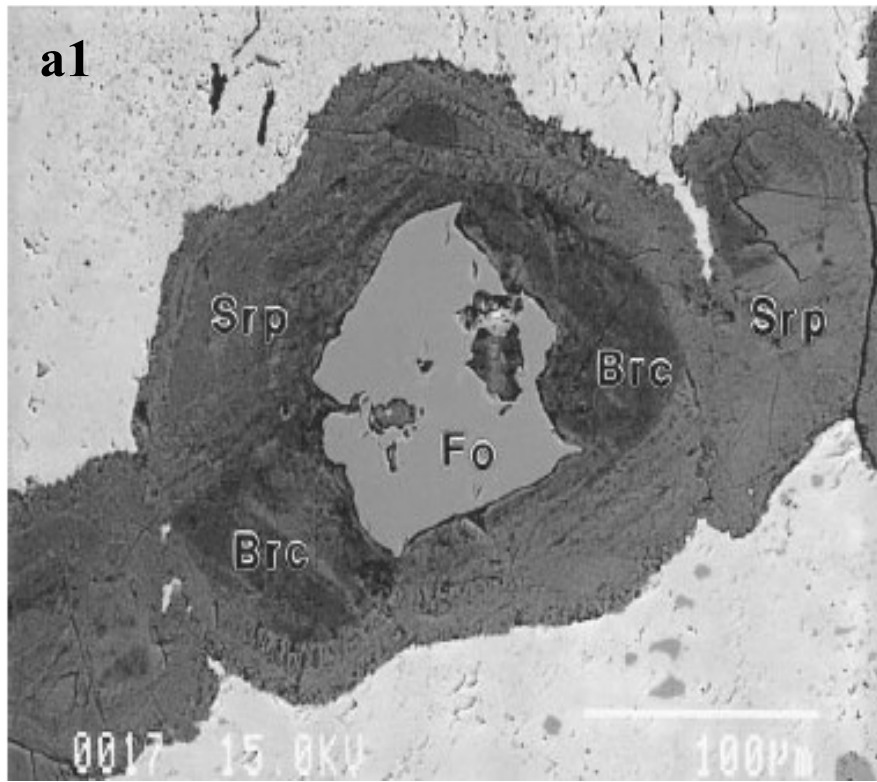


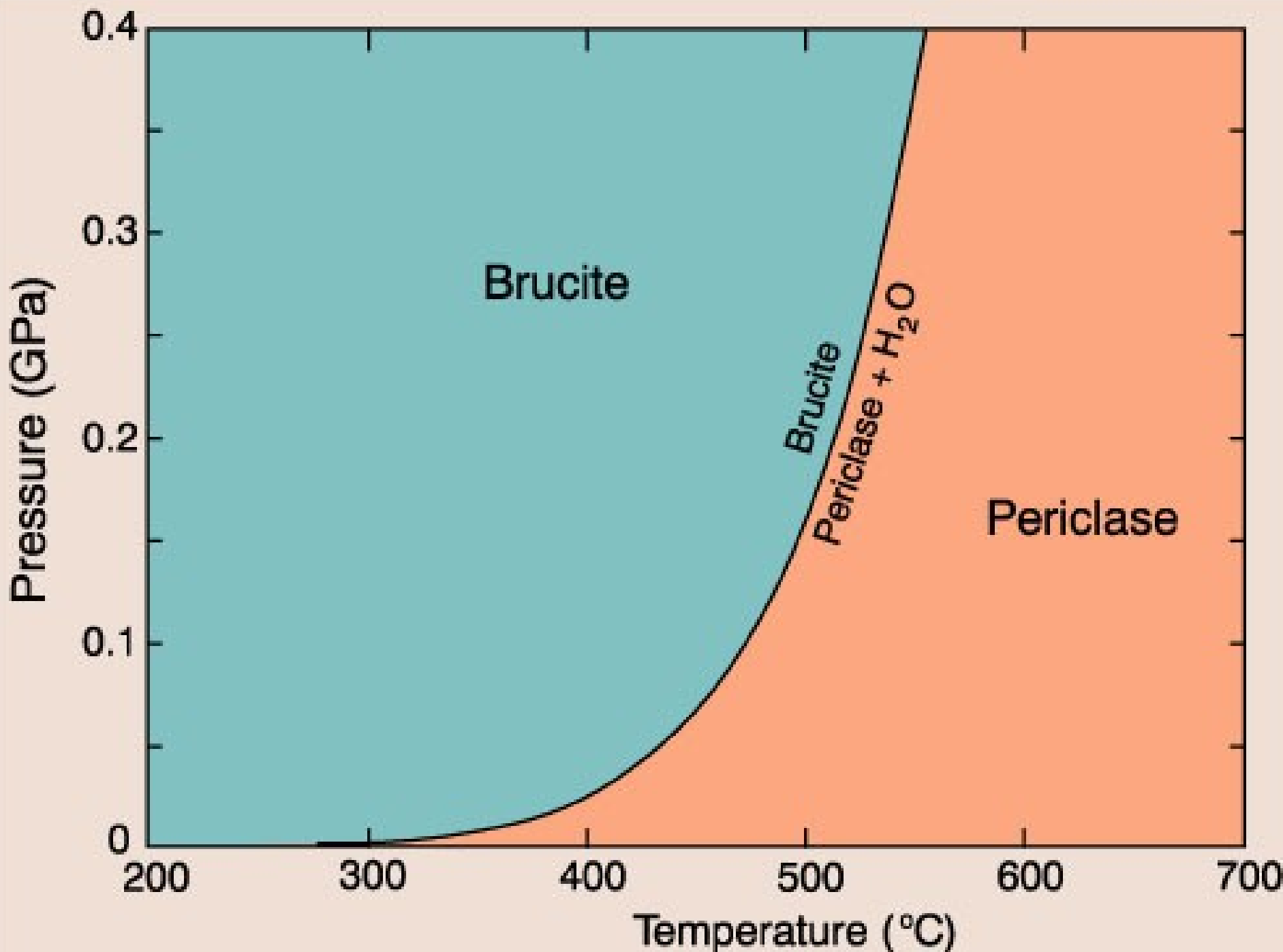
FIGURE 5. BSE image of subhedral tremolite (Tr) crystals developed at the margin of diopside (Di) in contact with calcite (Cal), illustrating incipient progress of retrograde reaction 3 in siliceous limestone from the Ritter Range pendant, California. Sample 4H of Ferry et al. (1998). Long dimension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



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

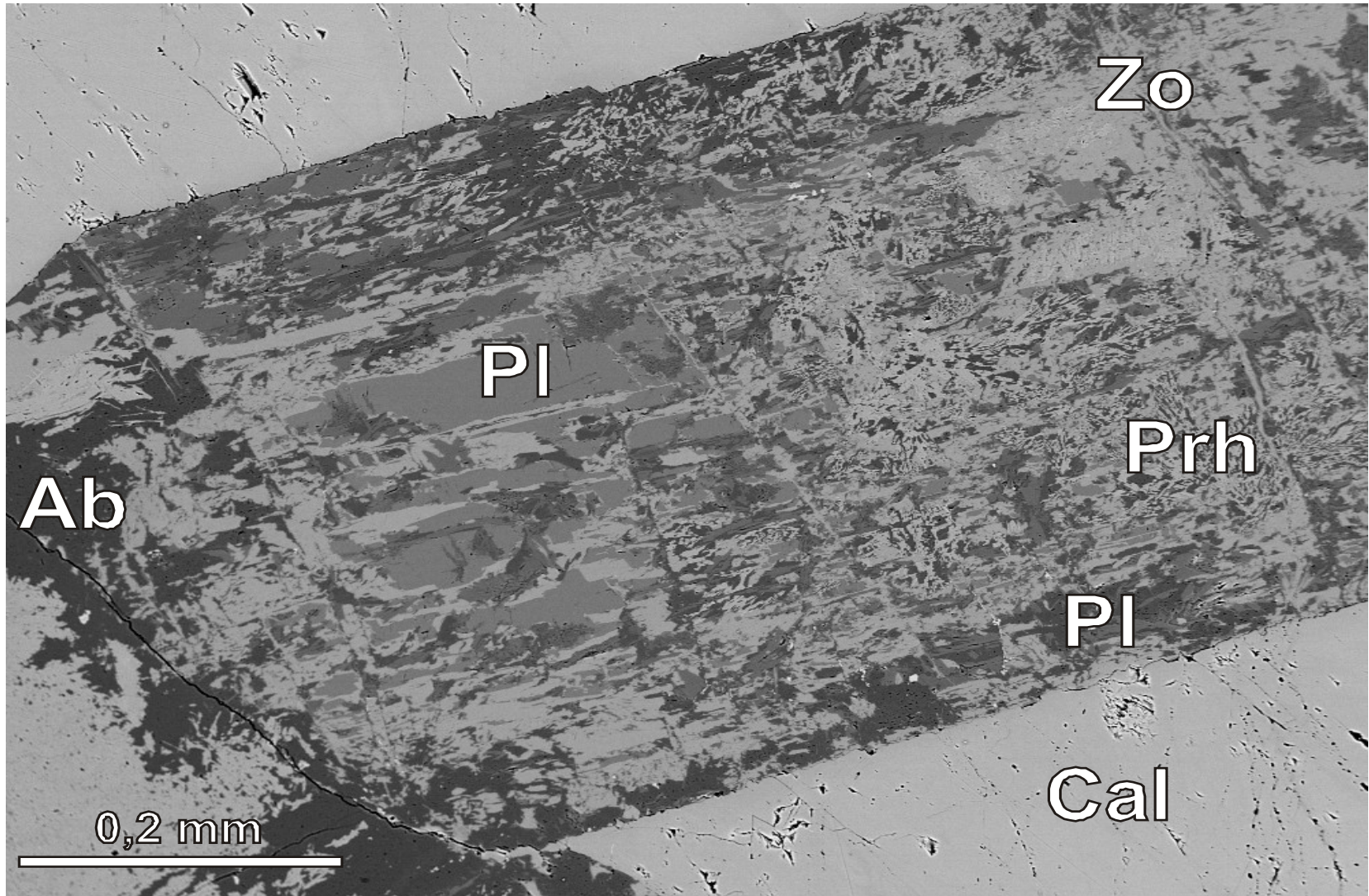
a2) $34 \text{ Fo} + 20 \text{ Cal} + 20 \text{ CO}_2 + 31 \text{ H}_2\text{O} = \text{Srp (Atg)} + 20 \text{ Dol}$ (Ferry 2000)

- T - X_{CO_2} diagram ukazující vztahy mezi dolomitem (Dol), brucitem (Brc), antigoritem (Atg), forsteritem (Fo), a CO_2 - H_2O fluidy při 3000 bars
- čárkované a šedé čáry ukazují vývoj periklasového a dolomitového mramoru během chladnutí (Ferry 2000)

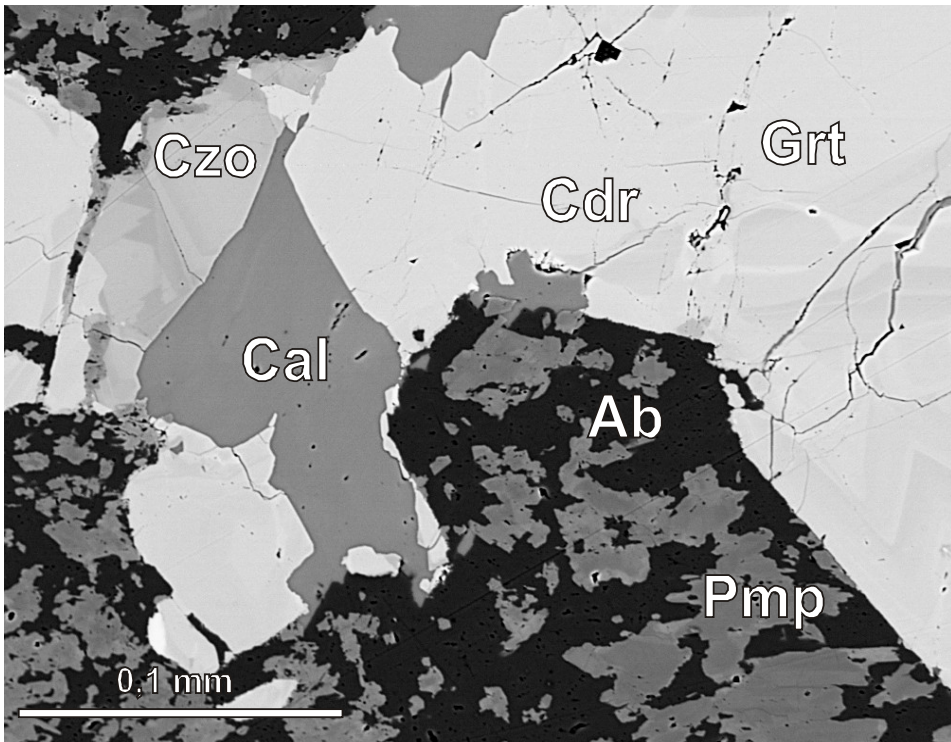
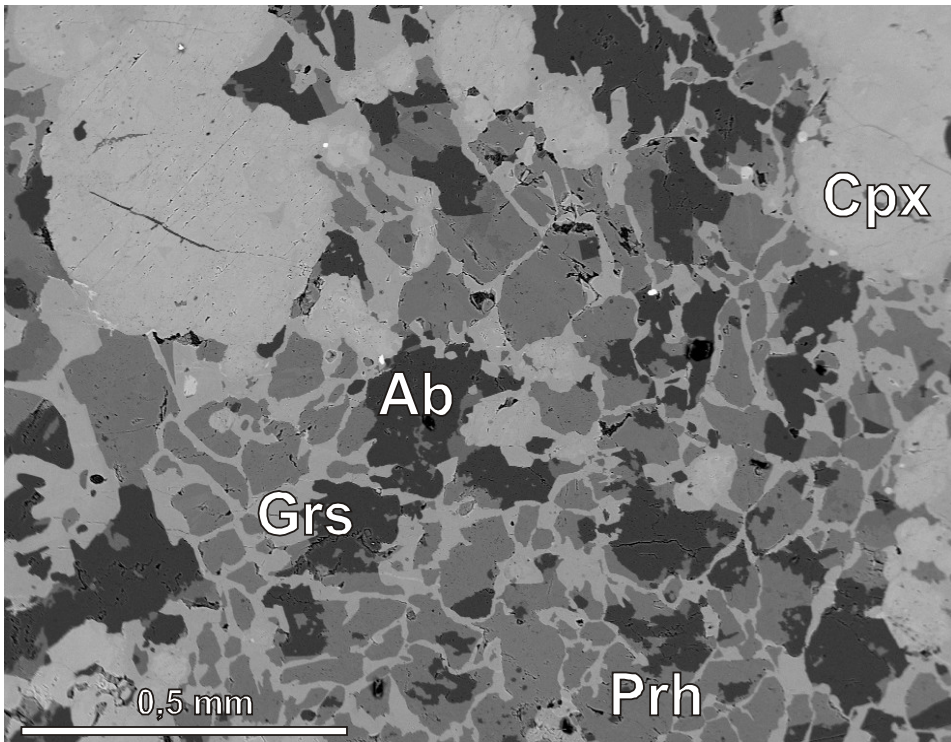
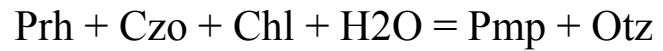
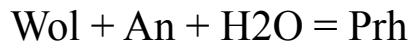
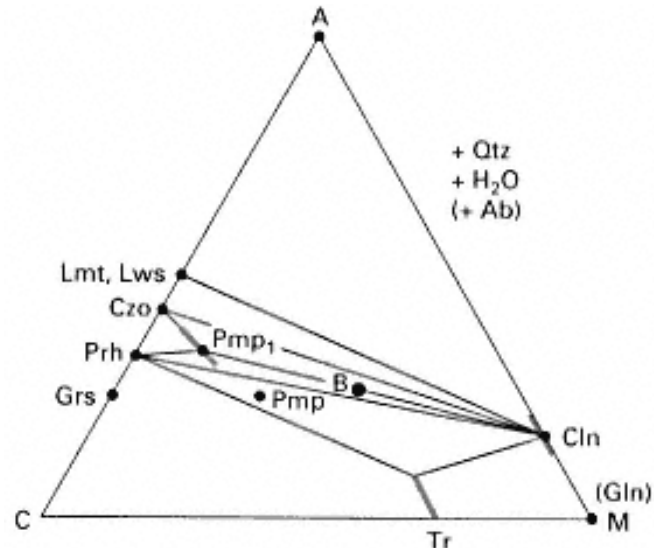


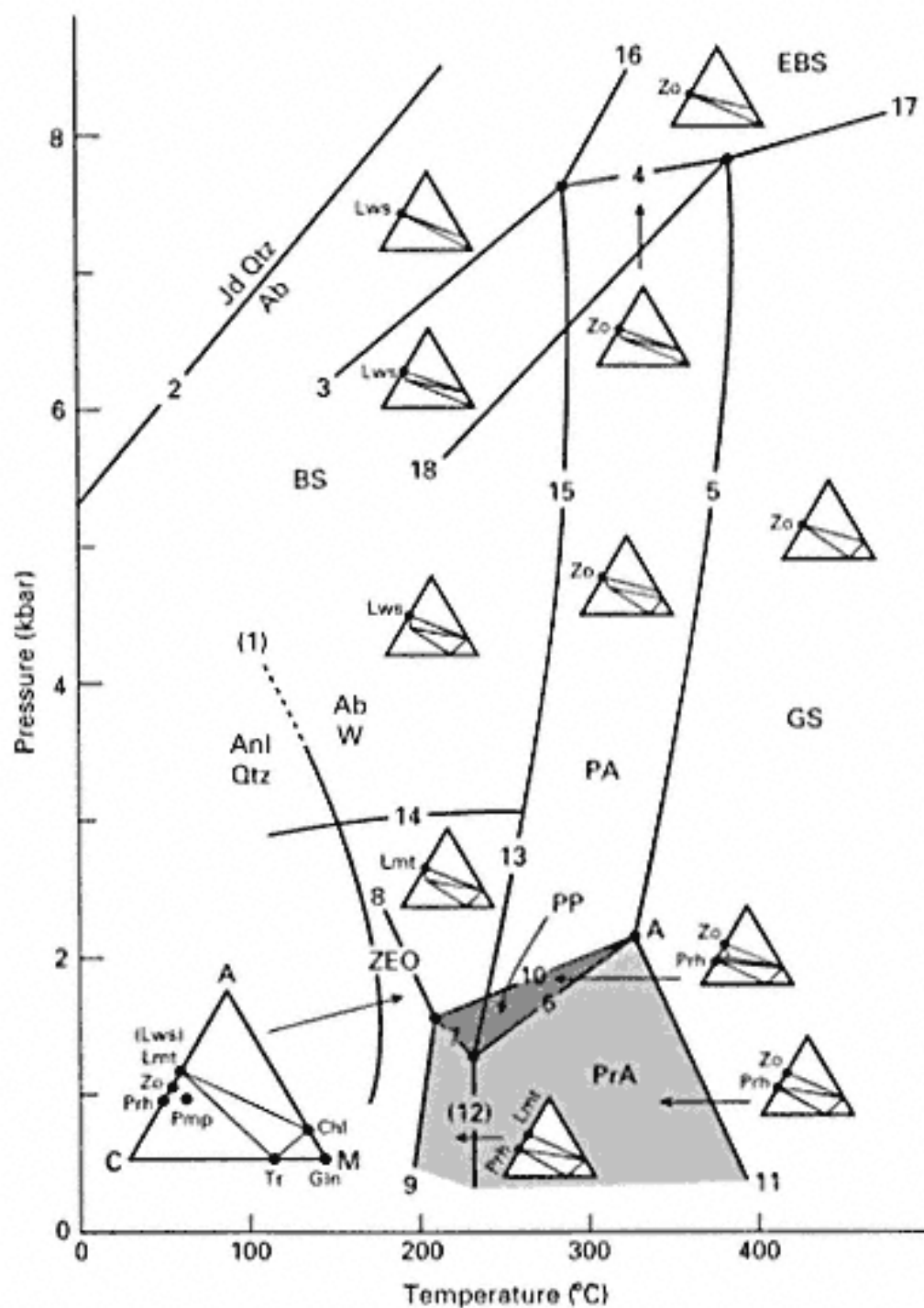
6. Metamorfóza nízkého stupně bazických hornin a vápenatosilikátových hornin (význam hydratačních reakcí)

- 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



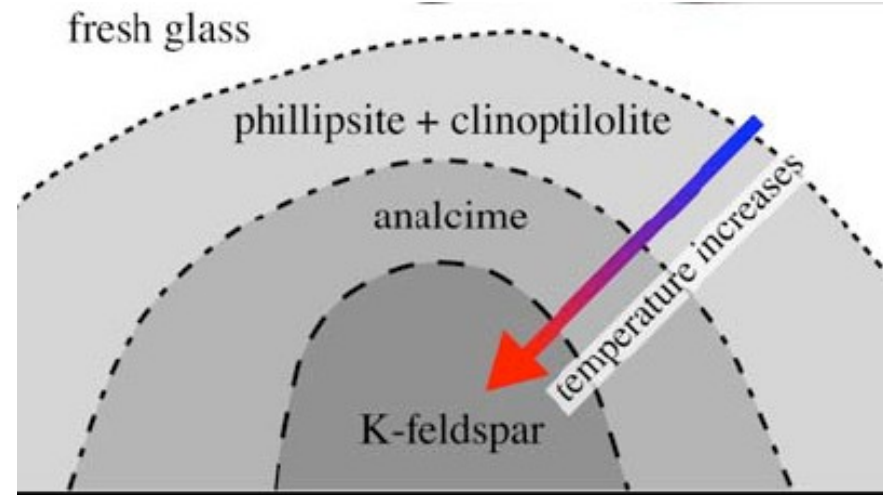


- Reakce v systému NCMASH (Liou et al., 1985a, 1987):
- Na_2O CaO MgO Al_2O_3 SiO_2 H_2O

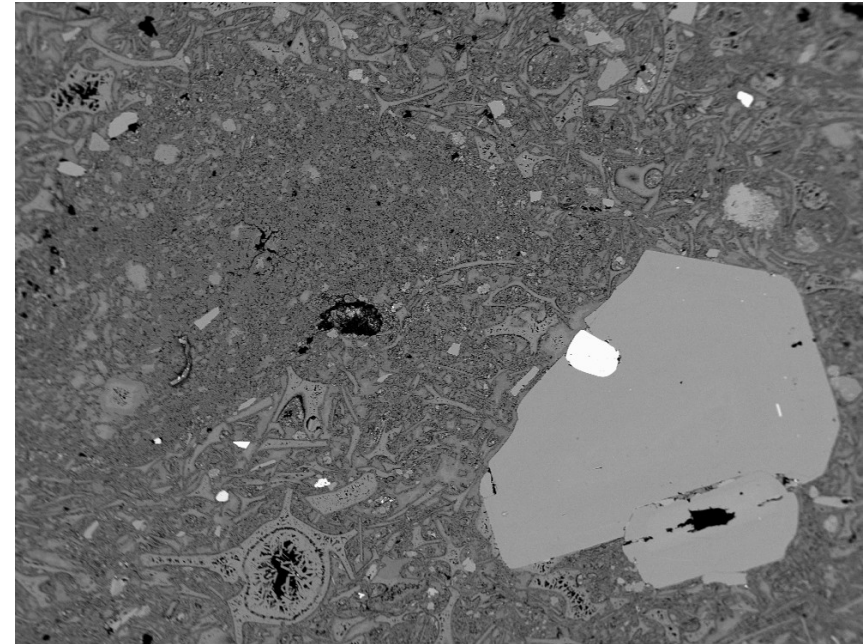
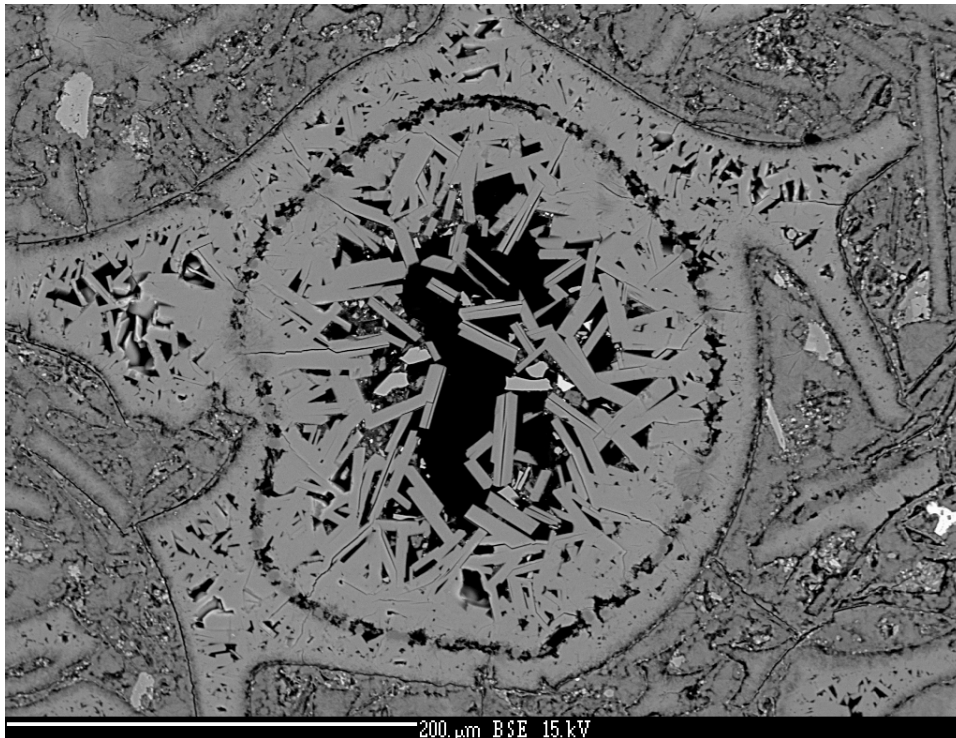
1. $\text{Anl} + \text{Qtz} = \text{Ab}$
2. $\text{Jd} + \text{Qtz} = \text{Ab}$
3. $\text{Gln} + \text{Lws} = \text{Pmp} + \text{Chl} + \text{Ab} + \text{Qtz}$
4. $\text{Gln} + \text{Czo} + \text{W} = \text{Pmp} + \text{Chl} + \text{Ab}$
5. $\text{Pmp} + \text{Chl} + \text{Qtz} = \text{Czo} + \text{Tr} + \text{W}$
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 + H₂O (NASH)
 - stilbit = laumontit + křemen + H₂O (CASH)

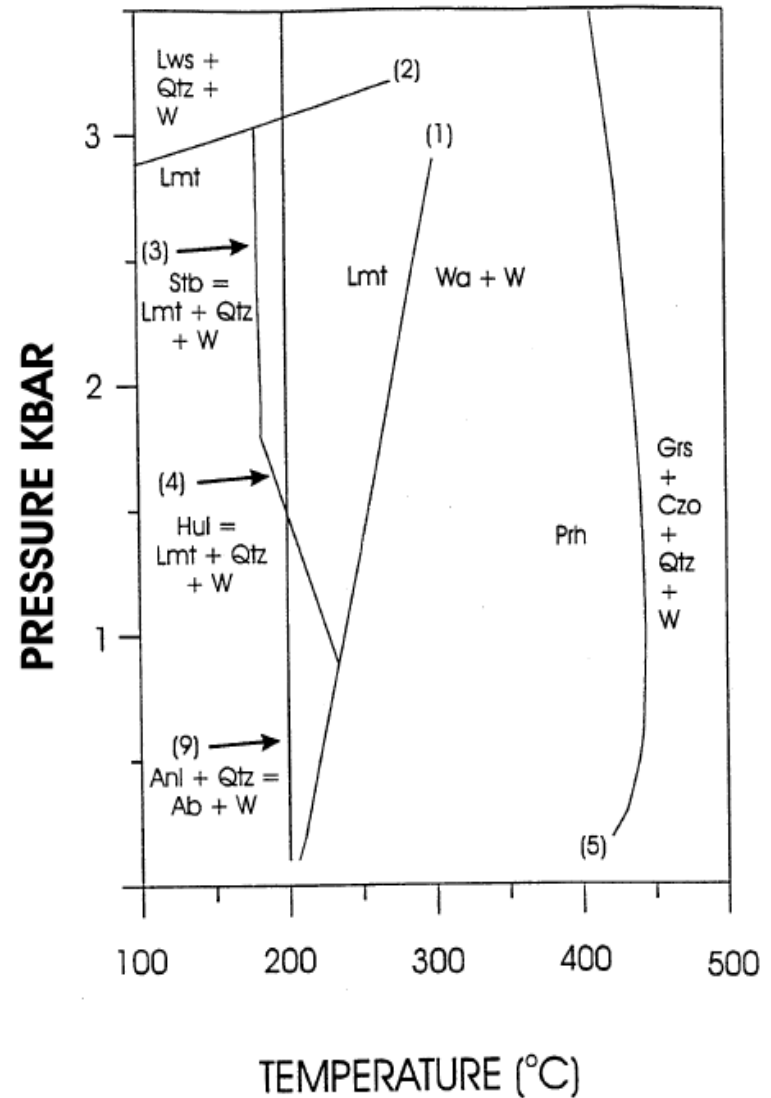


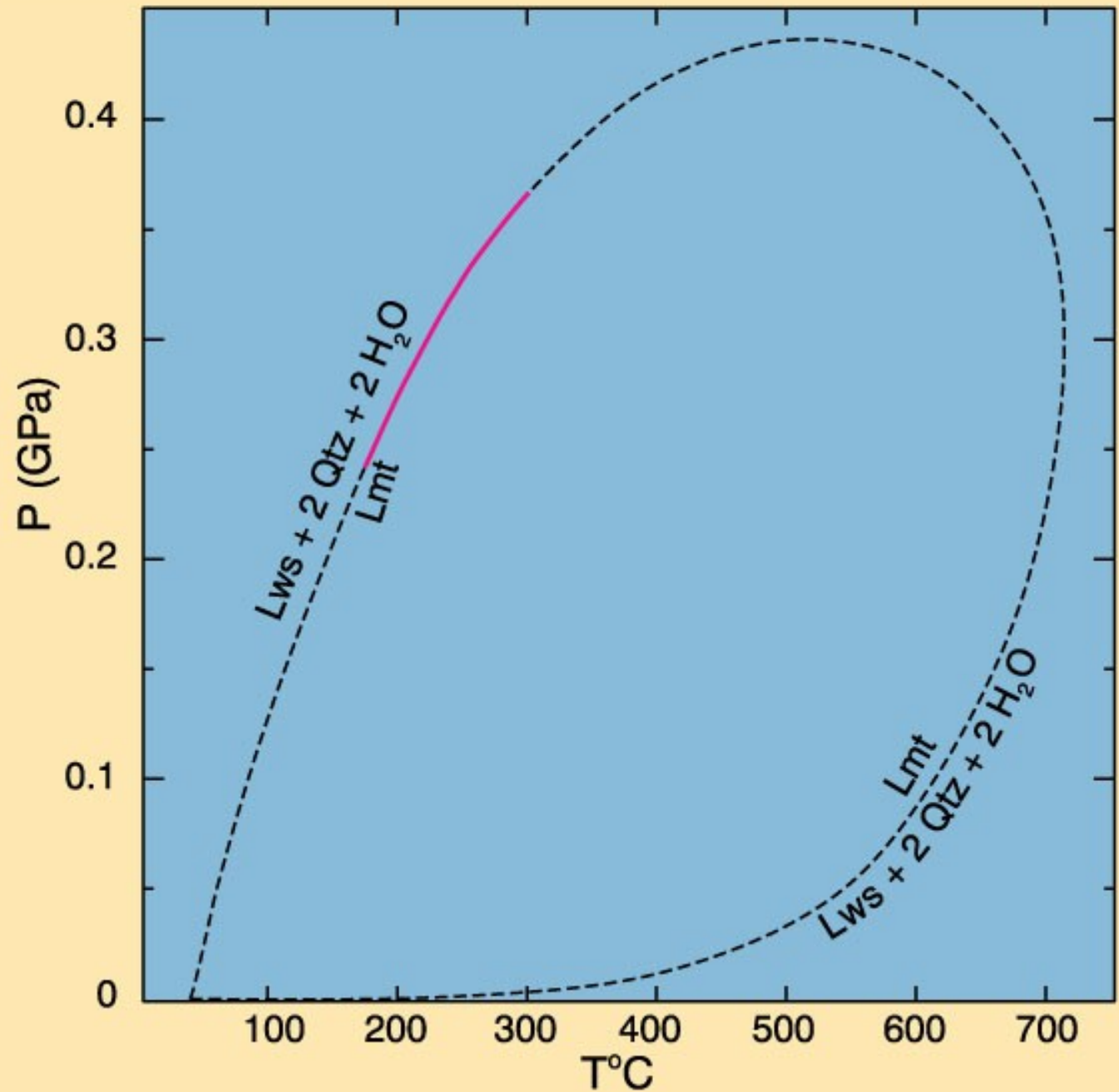
Příklad hydrotermální alterace vulkanického lávového proudu



úlovek vulkanického skla přeměněný na zeolity

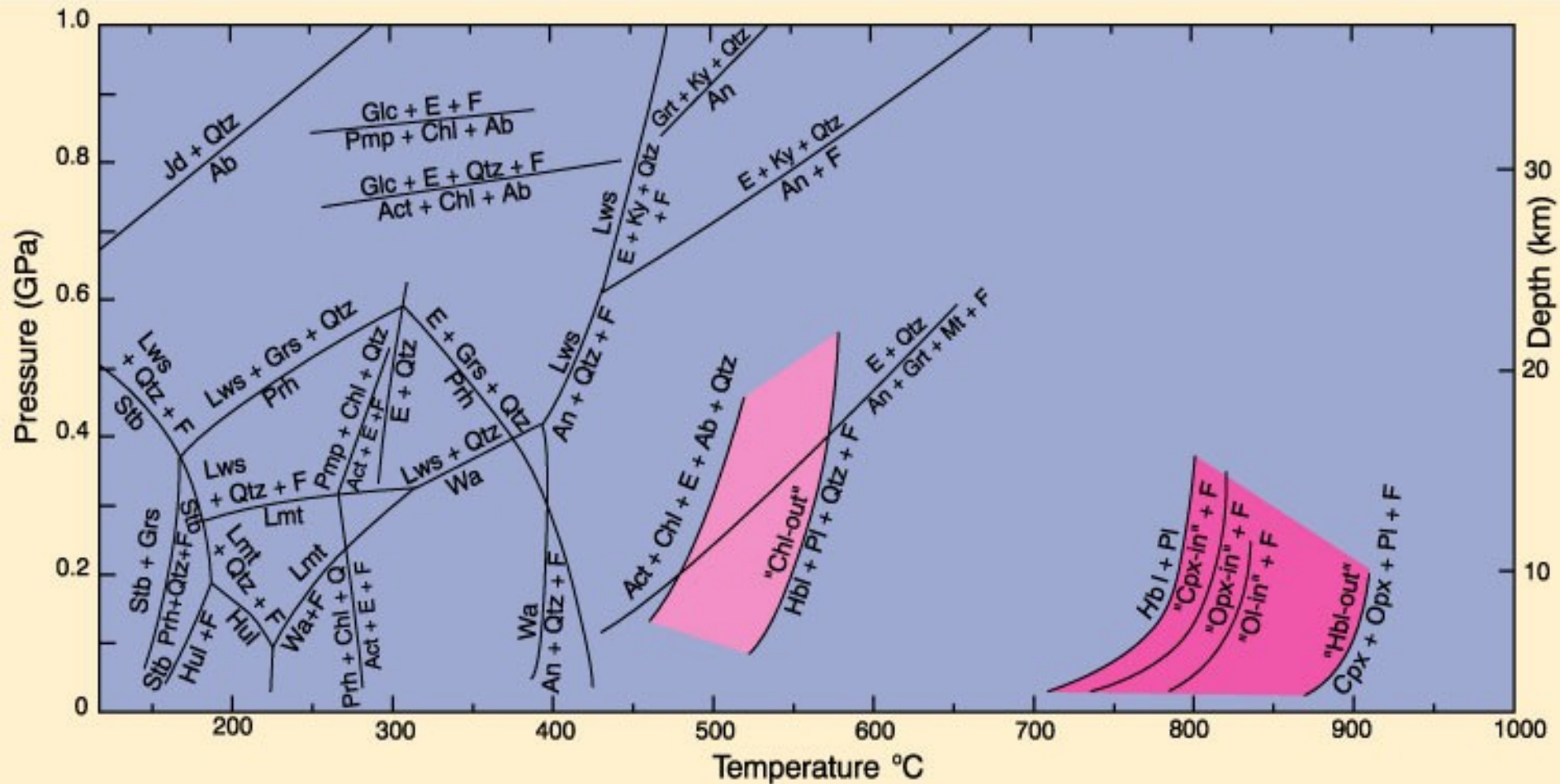
- zeolity jsou hydratované alumosilikáty obsahující alkálie (K, Na), alkalické zeminy (Ca, etc.) a vodu
- jejich struktura umožňuje opakovanou hydrataci a dehydrataci stejně jako iontové výměny
- nejdůležitější zeolity:
 - **Natrolit** – kosočtverečný ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
 - **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



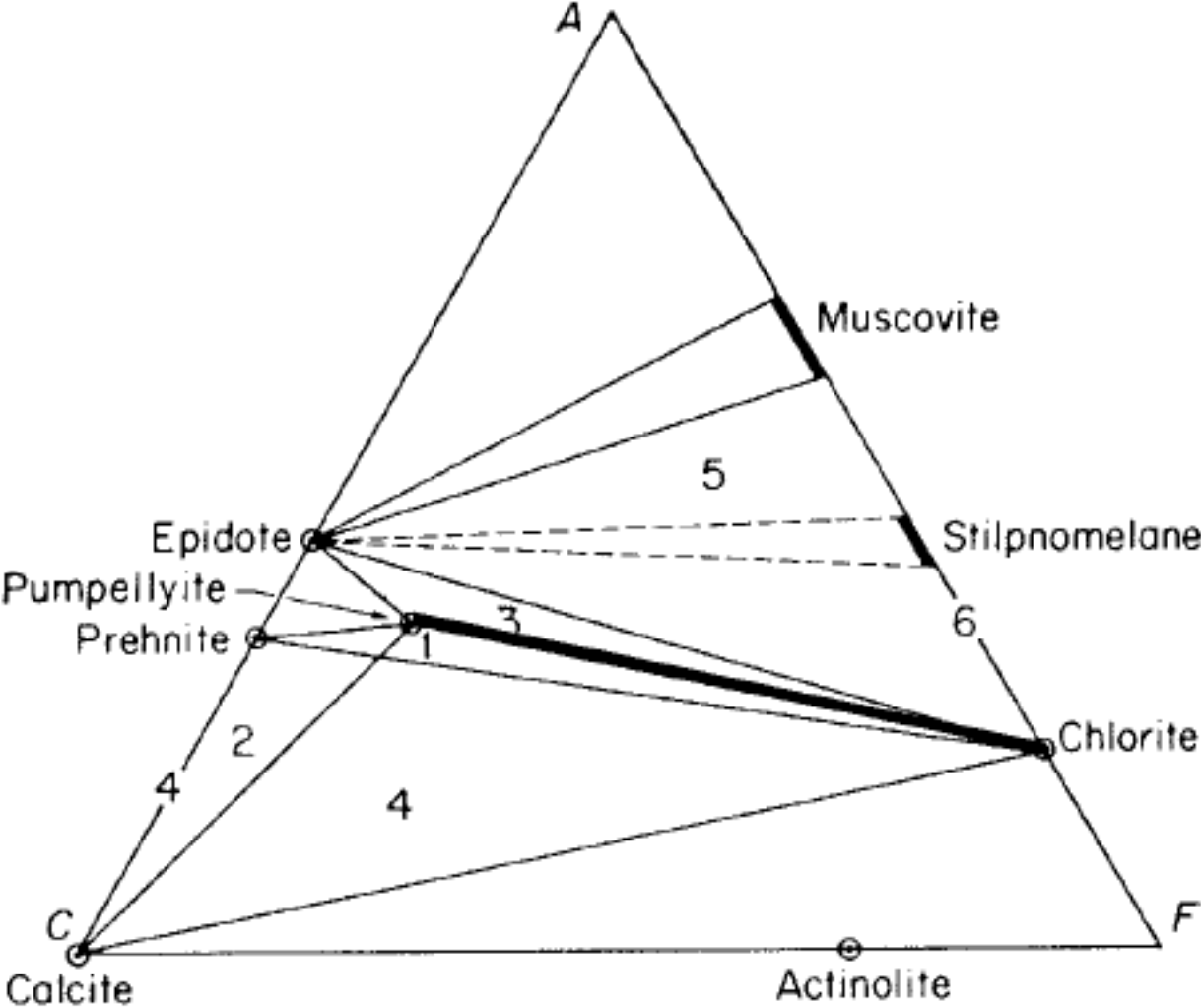


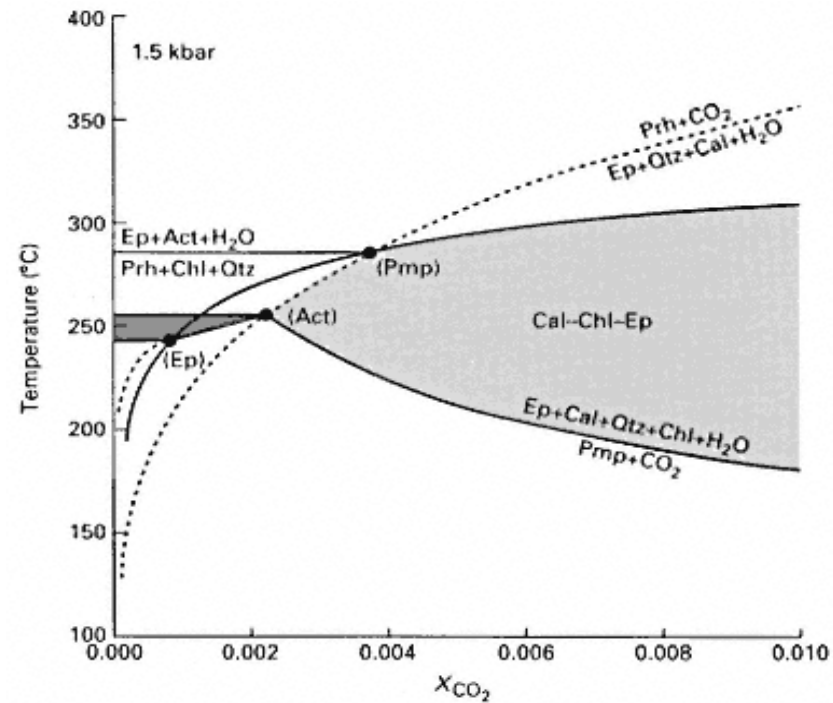
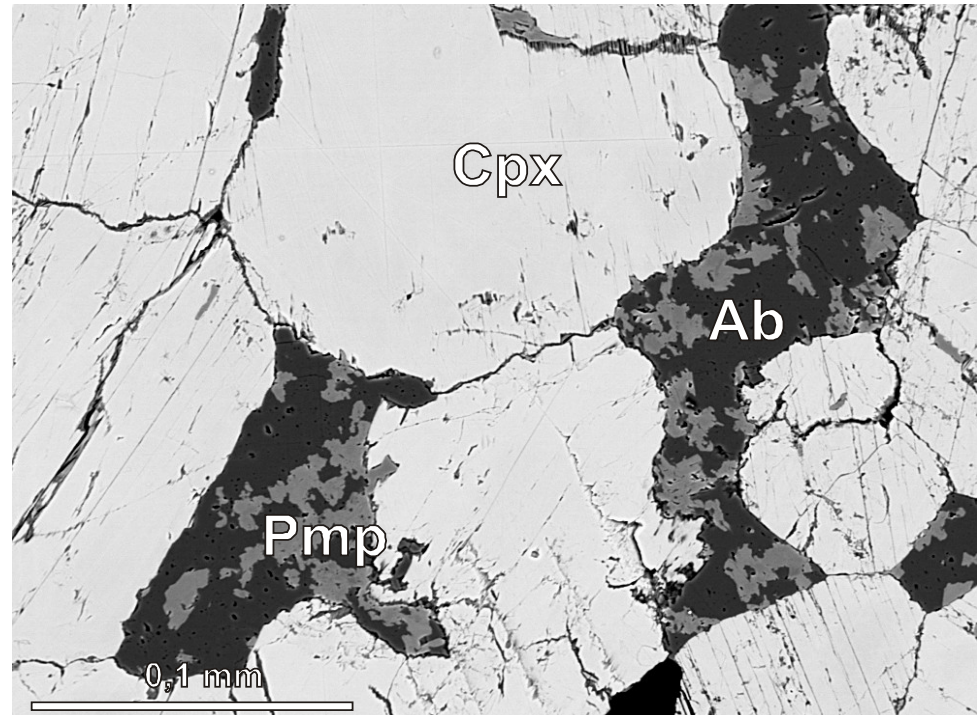
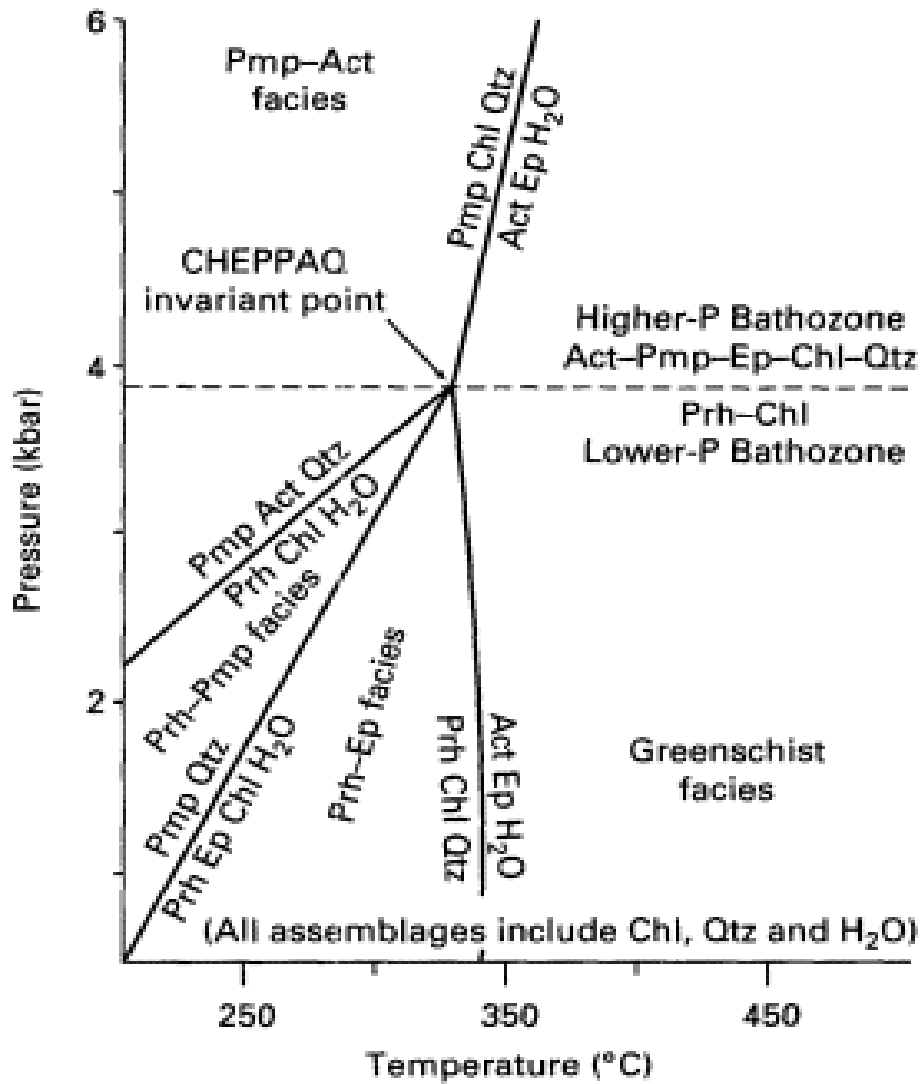
P-T reakční křivka pro dehydrataci laumontitu ukazující teoretickou smyčku kterou může reakce udělat za velmi vysokých tlaků. Většinou bývá horní část a část za nízkých teplot metastabilní. Avšak teoreticky může dojít k tomu že za nízkých teplot a vysokých tlaků dojde k retrográdní dehydrataci tohoto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

- důležité reakce:
 - CASH: laumontit = lawsonit + H₂O (200-250 C, P > 3kbar)
 - CASHCO₂: laumontit + kalcit = prehnit + křemen + H₂O + CO₂ (ca 3kbar/300-400 C)
- horní hranici zeolitové facie:
 - za nízkých tlaků: epidot + křemen + H₂O = laumontit + prehnit
 - za vyšších tlaků: epidot + chlorit + křemen + H₂O = laumontit + pumpellyit



B) prehnit pumpellyitová facie

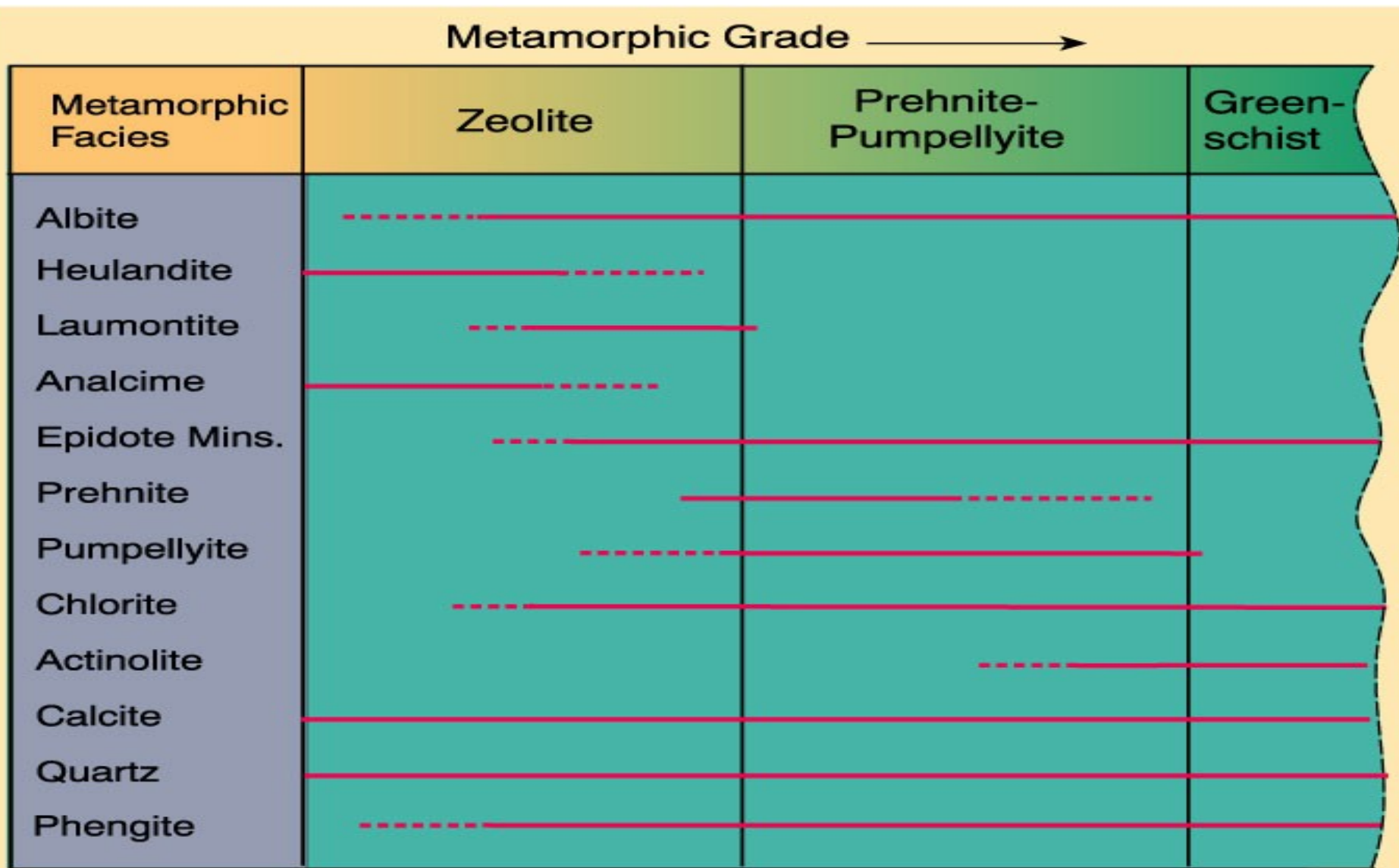


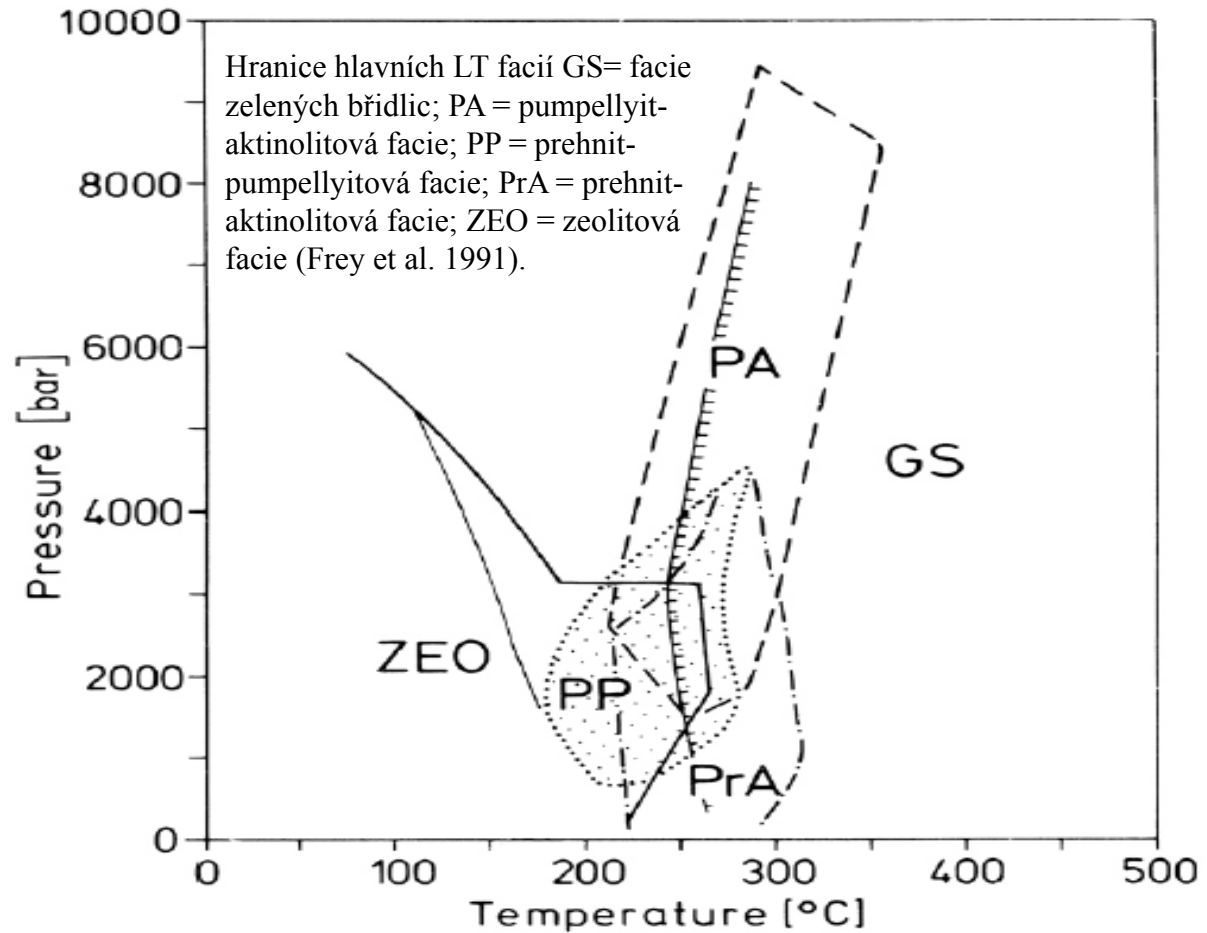


- $\text{Prh} + \text{Chl} + \text{Qtz} = \text{Act} + \text{Ep} + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{Pmp} + \text{Qtz} = \text{Prh} + \text{Czo} + \text{Chl} + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{Prh} + \text{Chl} + \text{H}_2\text{O} = \text{Pmp} + \text{Act} + \text{Qtz}$
- $10\text{Pmp} + 21\text{Qtz} + 14\text{H}_2\text{O}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

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 + H₂O (> 5-6kbar)





Facie	Metabazity	Pelity (+ Qz)
Zeolitová	zeolity	jílové minerály (illit-paragonit, chlorit-smektit)
Prehnit-pumpellyitová	Prh – Pmp – Chl – Ab	jílové minerály (illit, paragonit-smektit, chlorit-smektit)
Pumpellyit-actinolitová	Pmp – Act – Chl – Ab	jílové minerály (illit, paragonit, chlorit-smektit)
Zelených břidlic	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