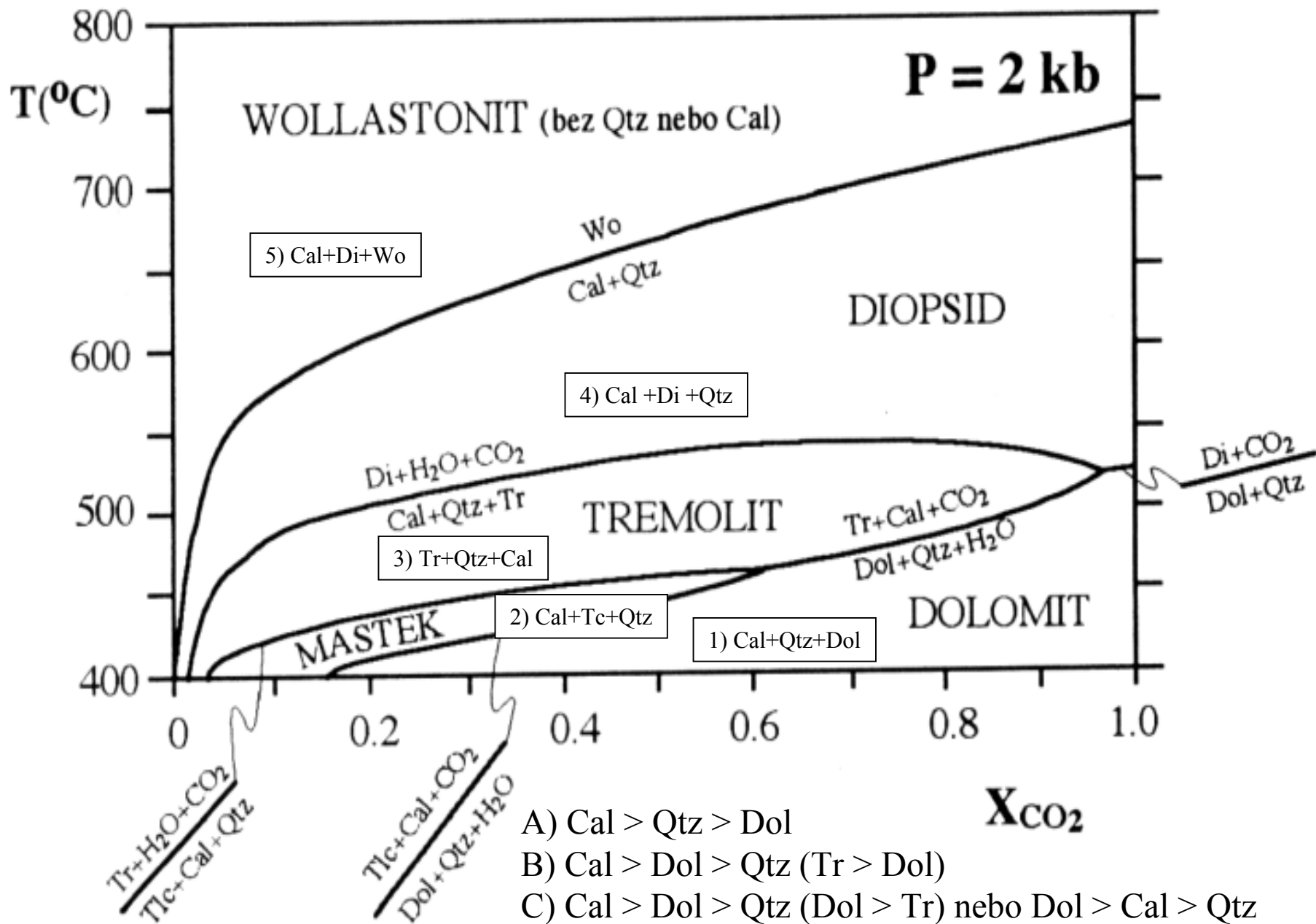


Význam fluidní fáze pro metamorfní procesy na příkladu

metamorfizma
hornin bohatých na Mg a Ca

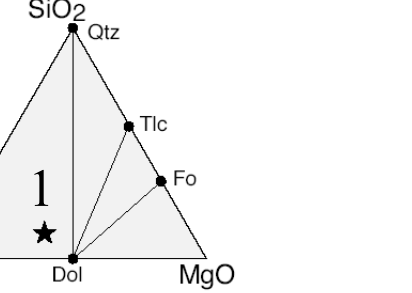
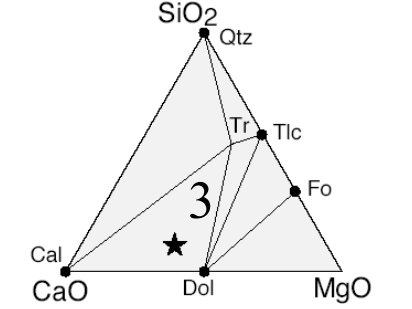
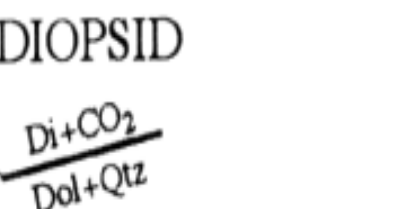
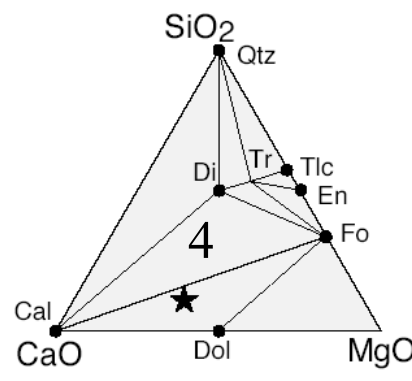
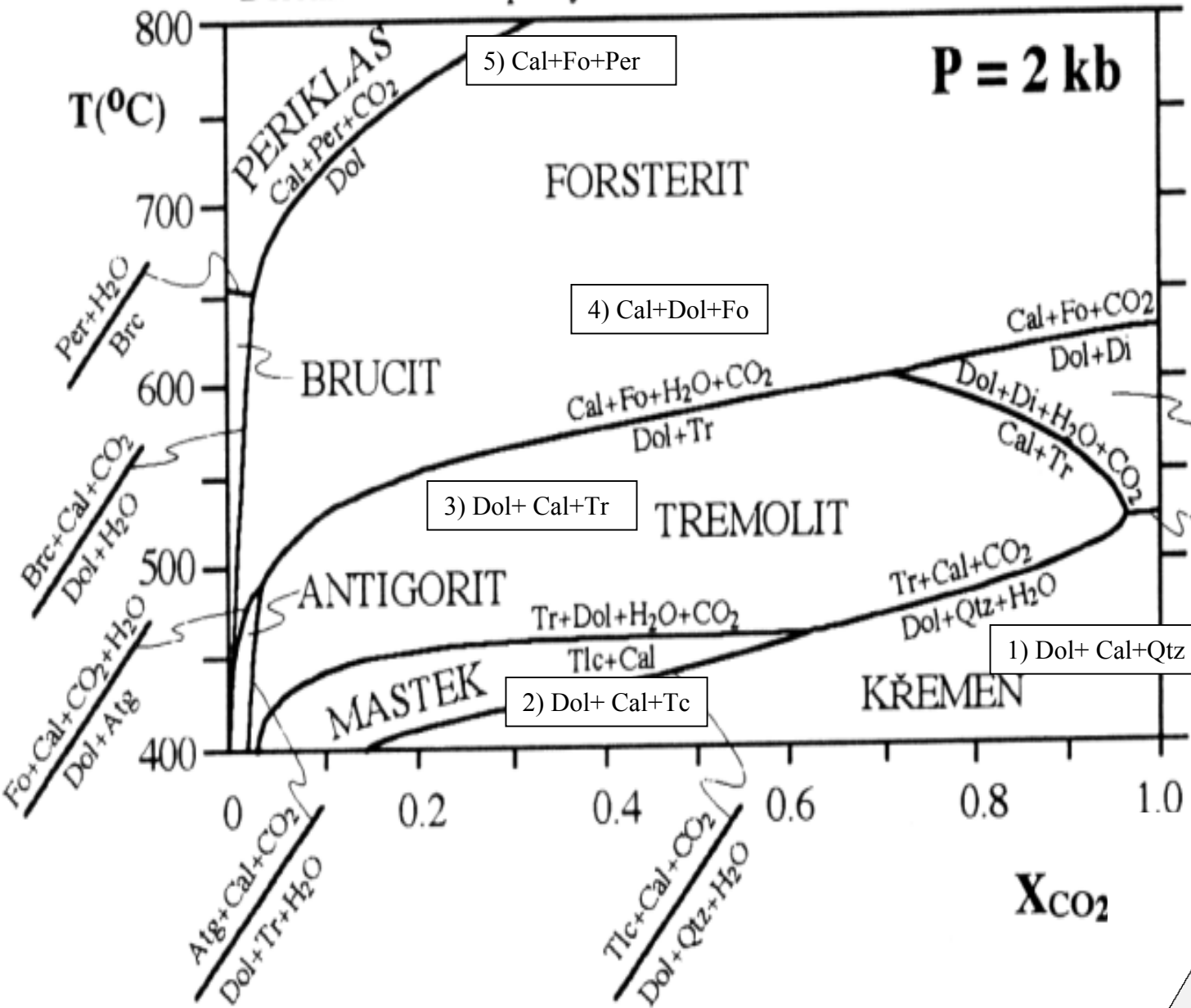
II.

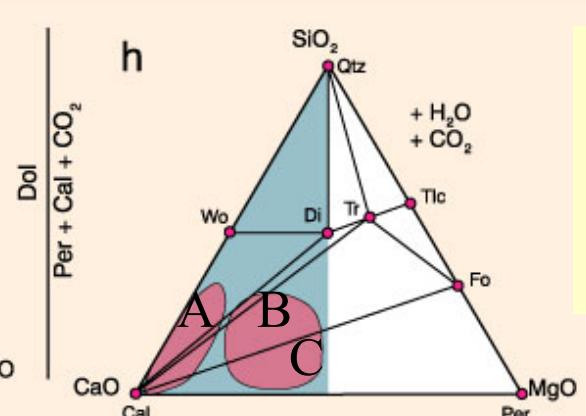
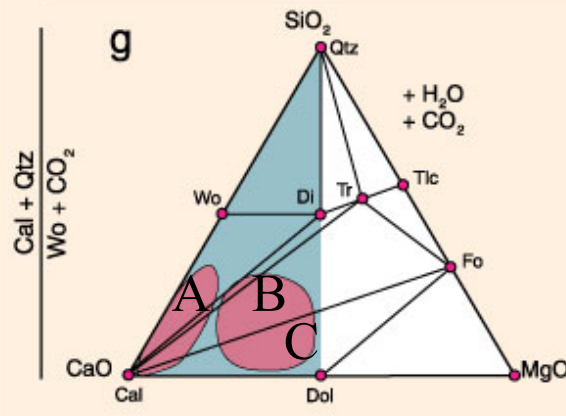
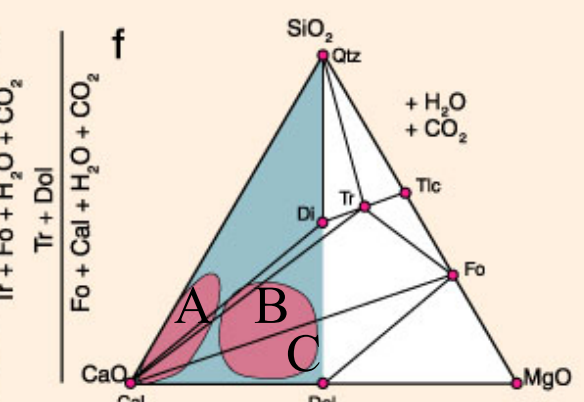
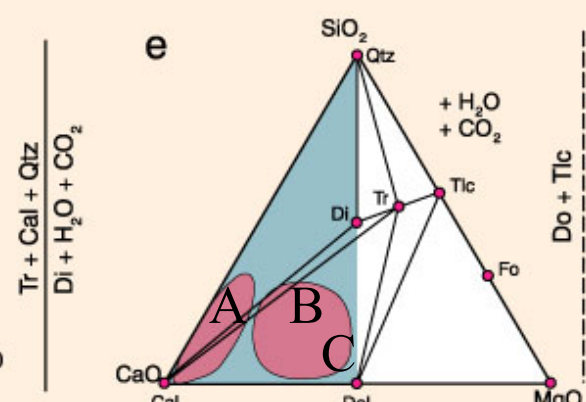
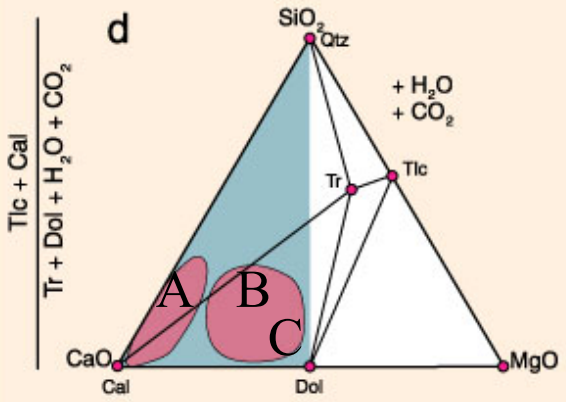
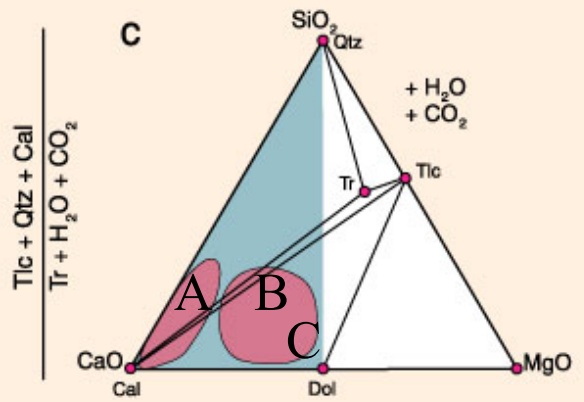
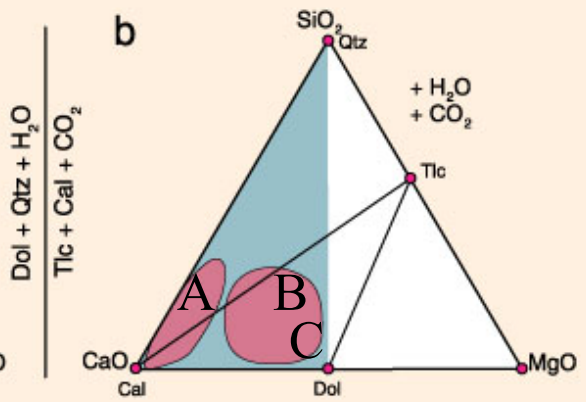
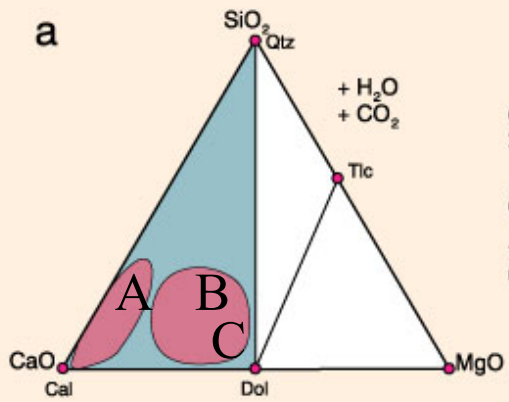
Křemen + kalcit v přebytku



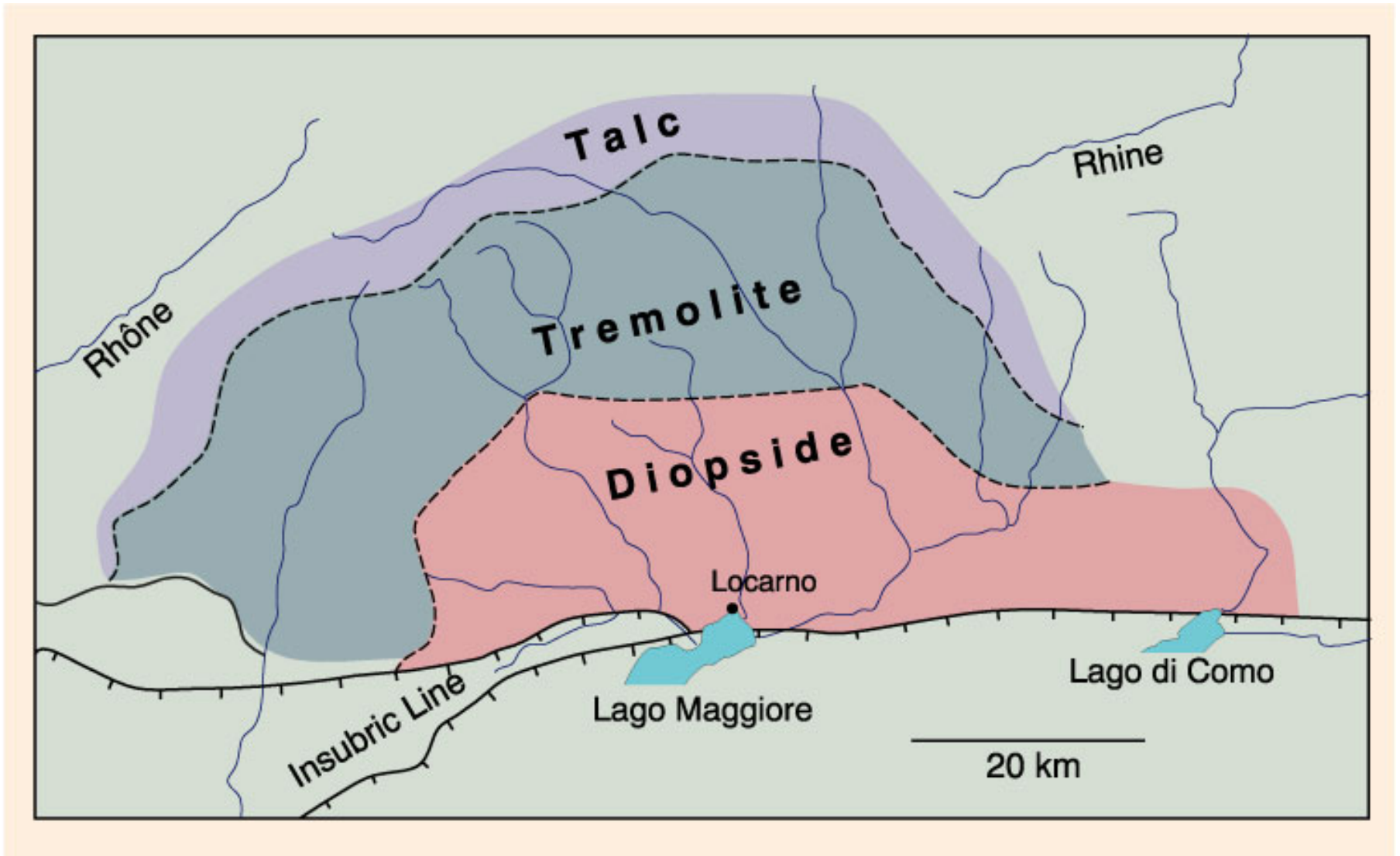
Dolomit + kalcit v přebytku

P = 2 kb





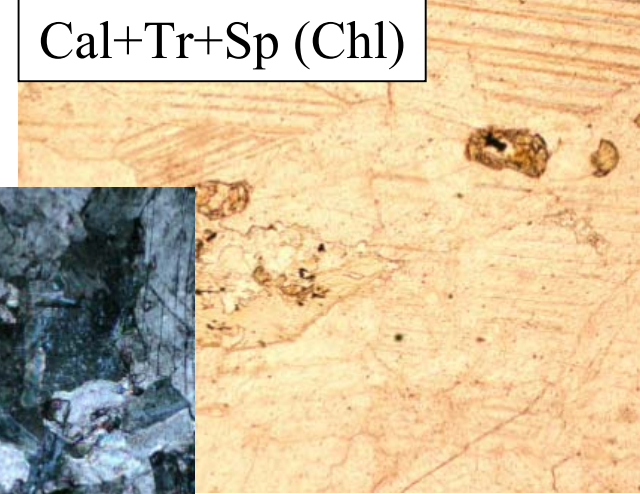
trojúhelníky CSM pro systém CaO-MgO-SiO₂-H₂O-CO₂ při tlaku 1 kbar a X_{CO₂} < 0.63 přerušovaná linie je určena pro horniny kde je Tr v převaze nad Cal nebo Qtz. Spear (1993) *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineral. Soc. Amer. Monograph 1.



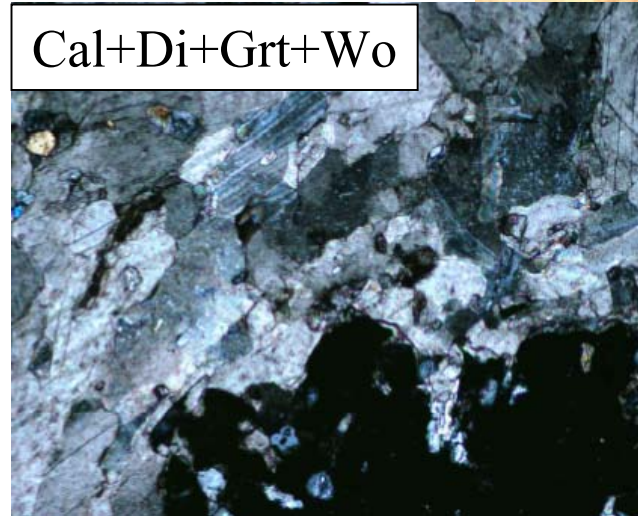
Metamorphic zones developed in regionally metamorphosed dolomitic rocks of the Lepontine Alps, along the Swiss-Italian border. After Trommsdorff (1966) *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 46, 431-460 and (1972) *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 52, 567-571. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

Další minerály v mramorech

Cal+Tr+Sp (Chl)

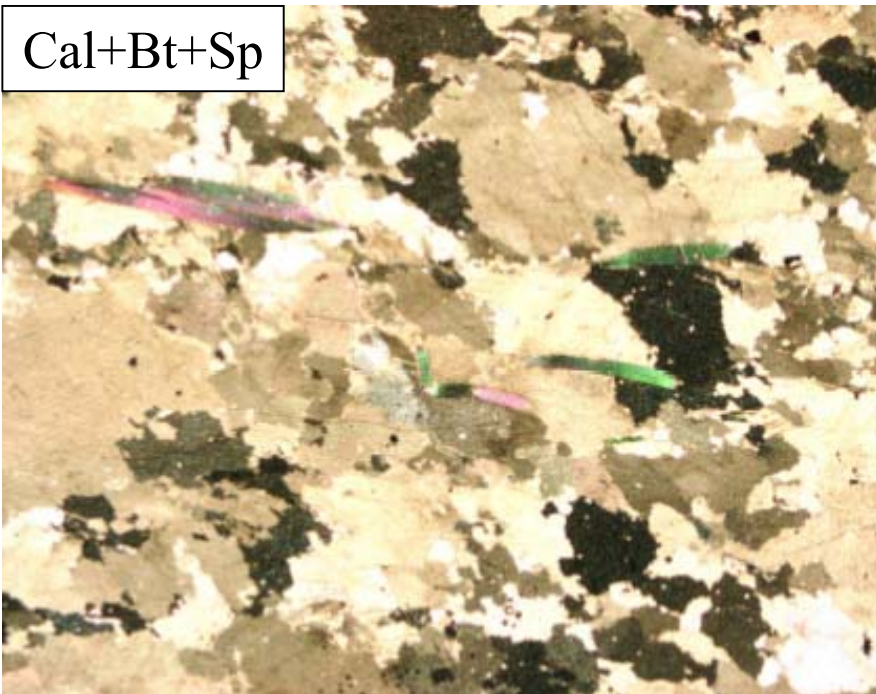


Cal+Di+Grt+Wo

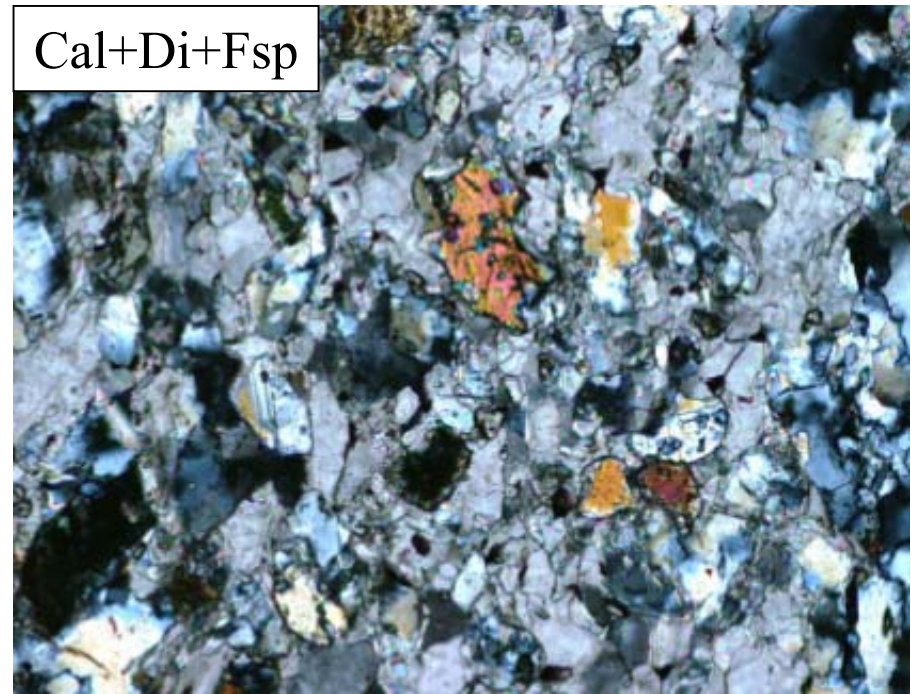


Granát vzniká na kontaktu s pegmatitem (přínos Al)

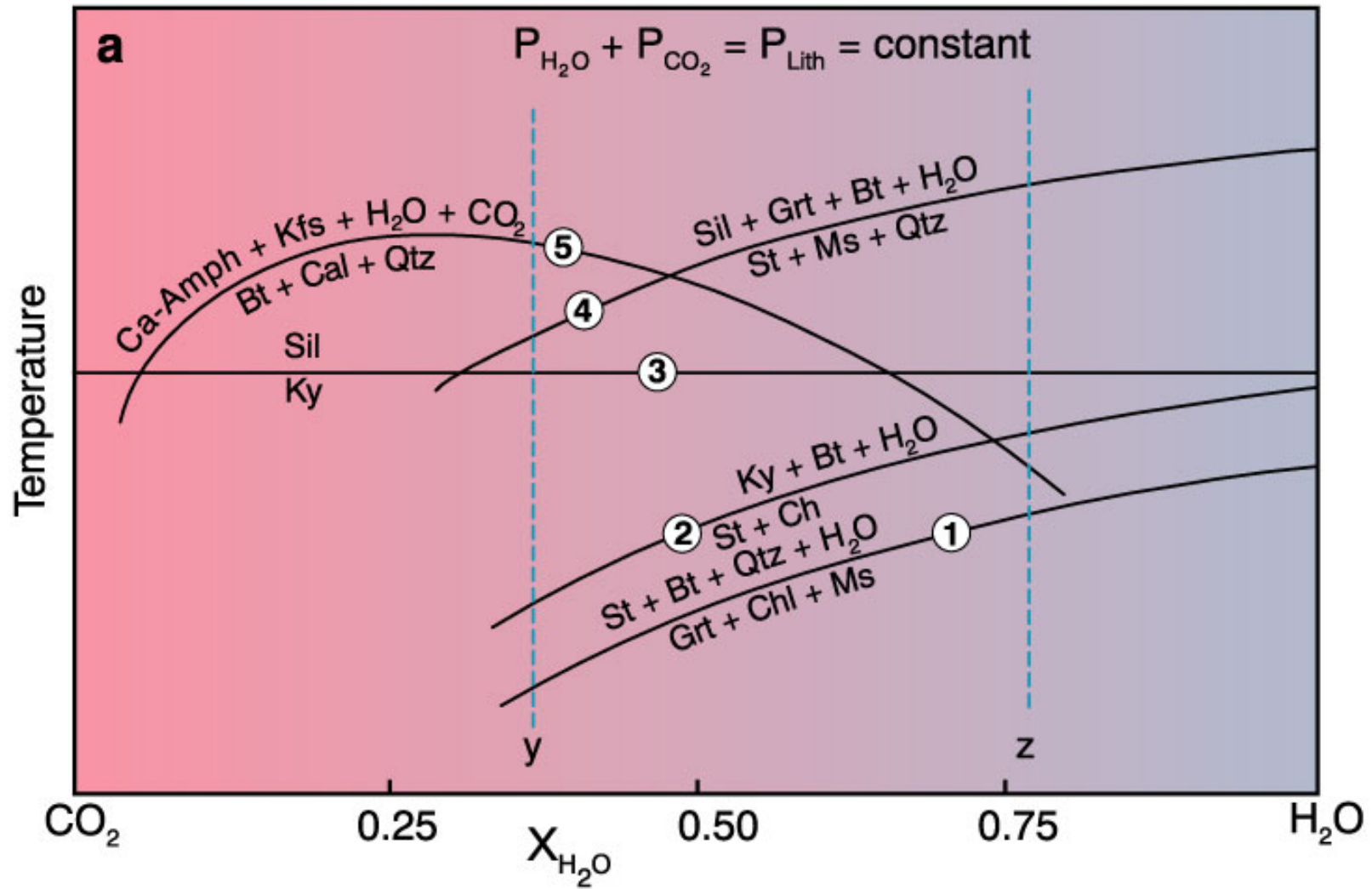
Cal+Bt+Sp



Cal+Di+Fsp



- Velmi často obsahovaly původní vápence kromě křemene také klasty živců, slíd a jílové minerály.
- většinou tyto komponenty zanedbáváme ale někdy jsme nuceni pracovat v systému $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-CaO-MgO-H}_2\text{O}$
- V takovém systému se mohou objevit minerály jako granát, spinel, živce, biotit (flogopit)



T- X_{H_2O} diagram ukazuje tvar a relativní pozici některých důležitých reakcí pro izogrady mapované v oblasti Whetstone Lake. Reakce 5 je dehydratační a dekarbonatizační pro vápňité horniny (maximální teploty dosáhne při $X_{H_2O} = 0.25$). Carmichael (1970) *J. Petrol.*, 11, 147-181,

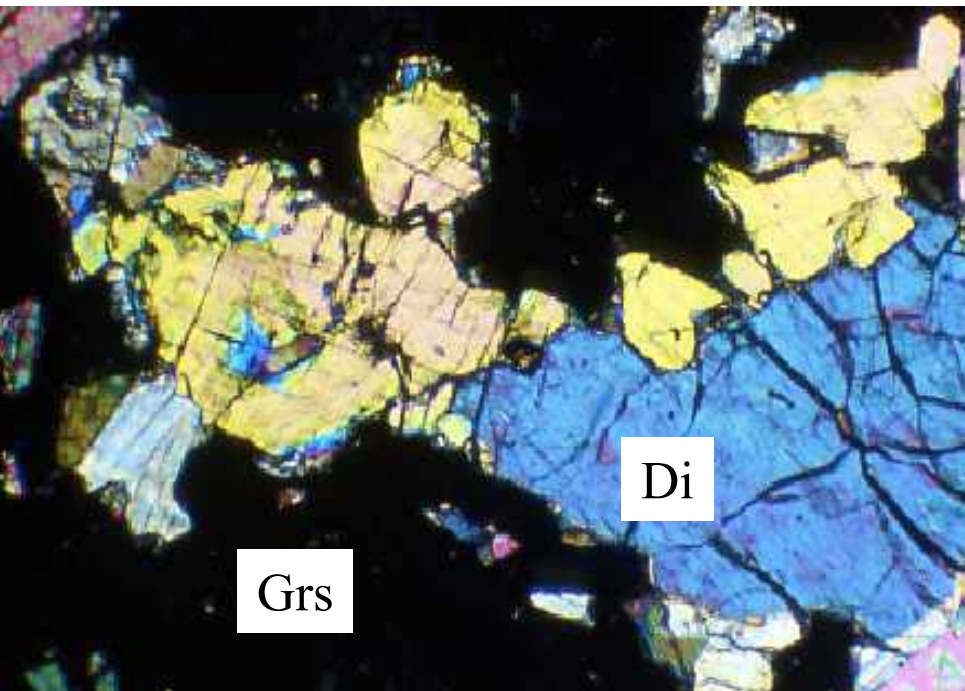
Vápenato-silikátové horniny

- Do této skupiny lze zařadit řadu geneticky poměrně odlišných hornin, především Ca-skarny, erlány, kalcitické mramory bohaté silikáty, kontaktní rohovce a rodingity. Značným problémem u těchto systémů je odhad tlaku, proto je vhodné studovat i další horniny, které mohly vznikat při procesu kontaktní (regionální) metamorfózy.
- Minerální reakce a složení hlavních minerálů lze nejlépe vyjádřit v jednoduchém systému CAS(H₂O-CO₂), i když horniny prakticky vždy obsahují také Mg, Fe²⁺ a Fe³⁺ ale také např. F.
- U těchto hornin dochází často k metasomatóze, tedy přínosu a odnosu látek nepočítáme-li H₂O a CO₂.
- Typické minerály: granáty (grosular-andradit-almandin), pyroxen (diopsid-hedenbergit), plagioklasy, wollastonit, epidot, vesuvian, kalcit, křemen, skapolit.
- **Typické znaky jednotlivých typů hornin:**
- a) skarny – většinou vázané na metakarbonáty, vysoká aktivita H₂O, silné projevy metasomatózy, většinou kontaktního, méně regionálního původu (Cpx+Qtz±Grt)
- b) erlány - většinou regionálního původu, projevy metasomatózy slabé, jednoduché minerální asociace (Cpx+Pl+Qtz±Grt)
- c) rohovce - většinou kontaktního původu, velmi jednoduché minerální asociace
- d) rodingity – metasomatického původu, vysoká aktivita H₂O, jsou vázané na serpentinit

Vápenato-silikátové horniny



Vápenato-silikátová hornina (Grs+An+Cal)



Porfyroblast grossularu v mramoru



- ***Důležité minerální reakce ve vápenatosilikátových horninách***

dekarbonatizační reakce

- CS(CO₂): kalcit + křemen = wollastonit + CO₂
- CAS(CO₂): anortit + křemen + kalcit = grosular + CO₂
- CTSCH: rutil + kalcit + křemen = titanit + CO₂
- $(TiO_2 + CaCO_3 + SiO_2 = CaTiSiO_5 + CO_2)$

reakce pevná fáze pevná fáze

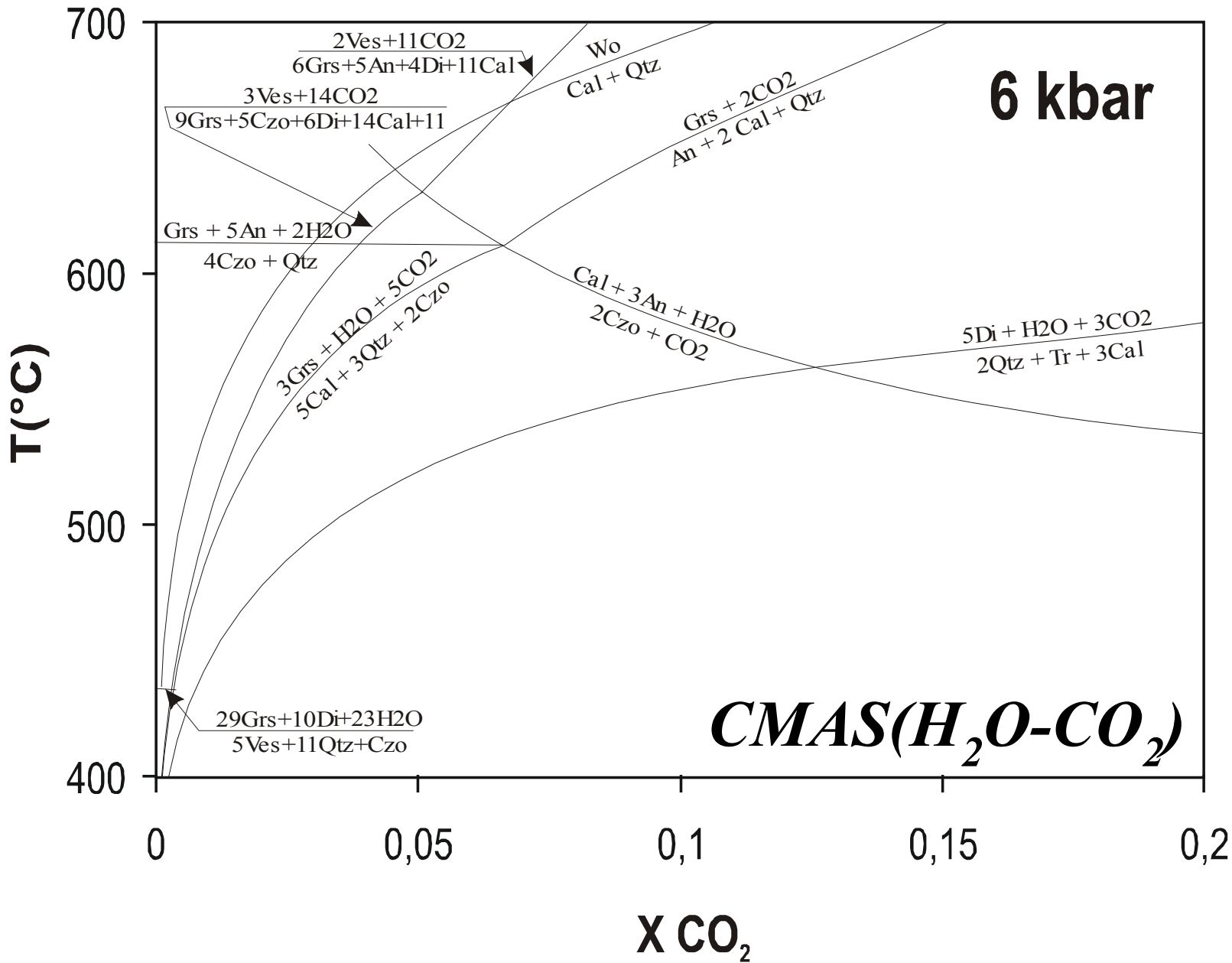
- CAS: grosular + křemen = anortit + wollastonit
- $(Ca_3Al_2Si_3O_{12} + SiO_2 = CaAl_2Si_2O_8 + 2CaSiO_3)$

dehydratační reakce

- CAS(H₂O): klinozoist + křemen = grosular + anortit + H₂O

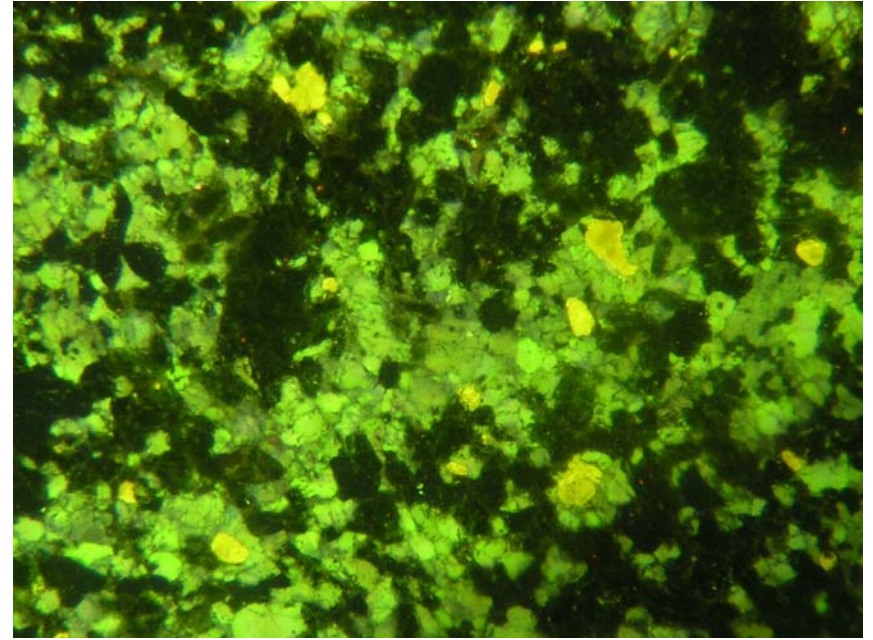
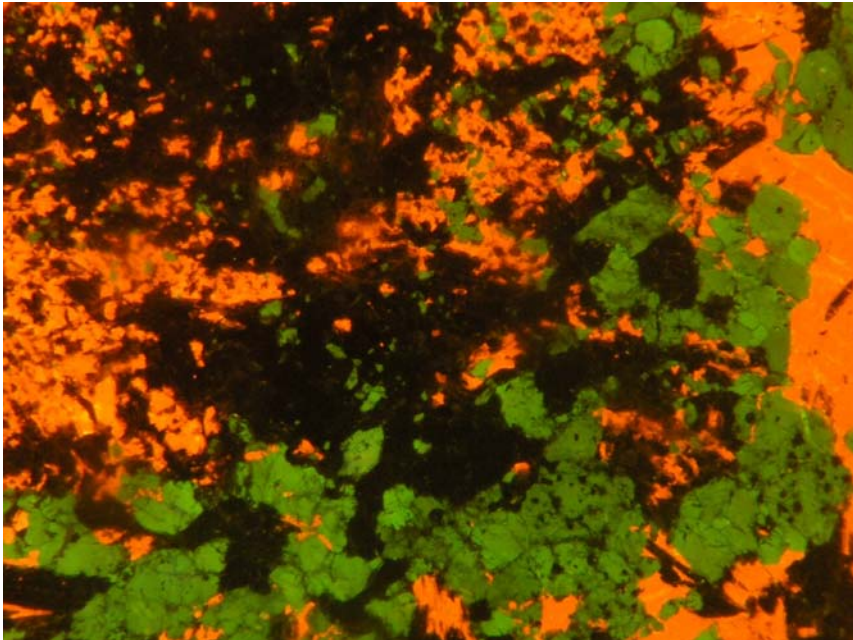
dekarbonatizačně-dehydratační reakce

- CASCH: zoisit + CO₂ = anortit + kalcit + H₂O
- $(2Ca_2Al_3Si_3O_{12}(OH) + CO_2 = 3CaAl_2Si_2O_8 + CaCO_3 + H_2O)$
- CMSCH: tremolit + kalcit + křemen = diopsid + H₂O + CO₂
- $(Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2 + 3CaCO_3 + 2SiO_2 = 5CaMgSi_2O_6 + H_2O + 3CO_2)$
- CMSCH: tremolit + dolomit = forsterit + kalcit + H₂O + CO₂
- $(Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2 + 11CaMg(CO_3)_2 = 8Mg_2SiO_4 + 13CaCO_3 + H_2O + 9CO_2)$
- KASCSH: muskovit + kalcit + křemen = ortoklas + anortit + H₂O + CO₂
- $(KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2 + CaCO_3 + 2SiO_2 = KAlSi_3O_8 + CaAl_2Si_2O_8 + H_2O + CO_2)$
- KCMASCH: flogopit + kalcit + křemen = draselný živec + tremolit + H₂O + CO₂
- $(5KMg_3Si_3AlO_{10}(OH)_2 + CaCO_3 + 2SiO_2 = 5KAlSi_3O_8 + 3Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2 + H_2O + CO_2)$

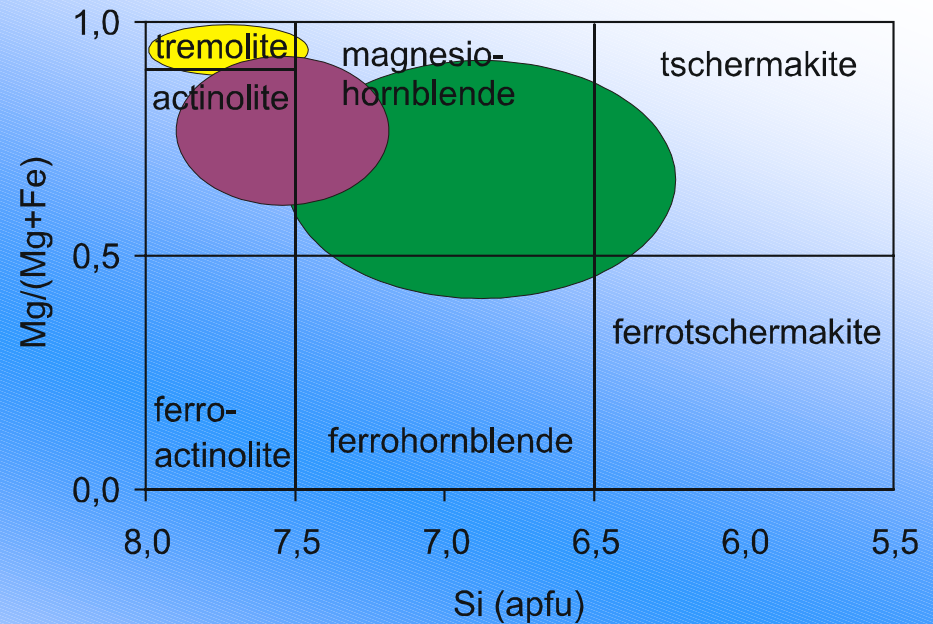
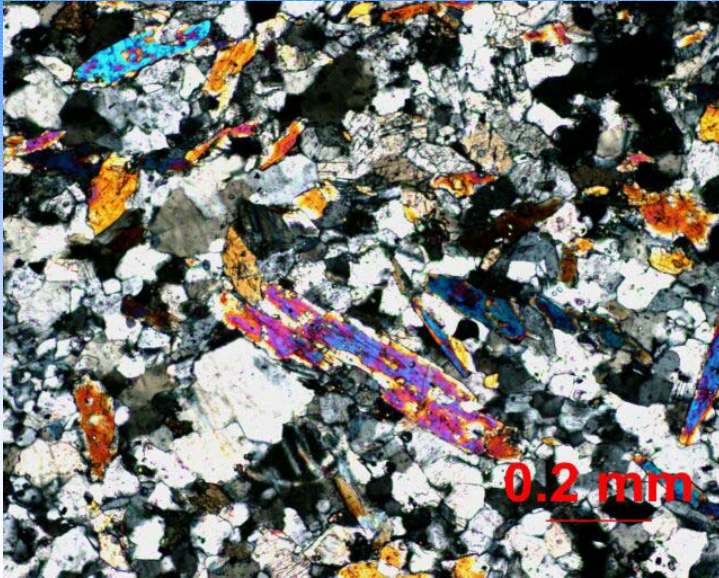


Erlany

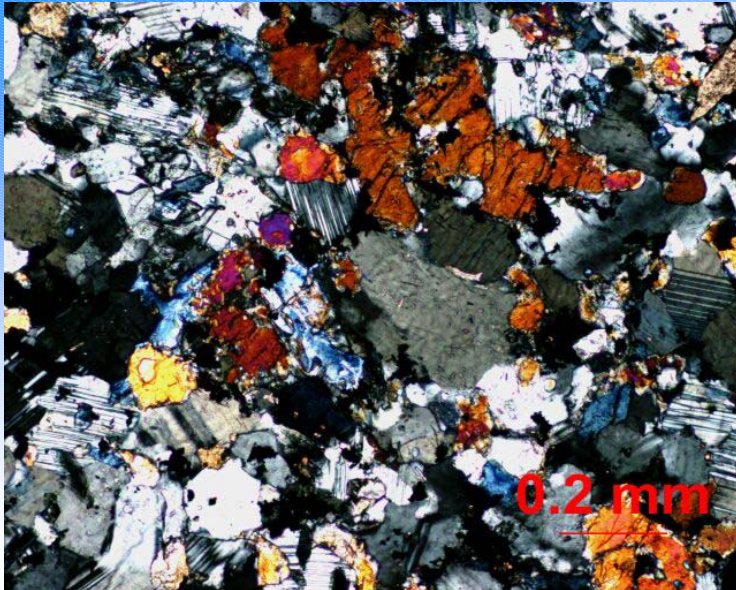
- tělesa často vázaná na mramory nebo amfibolity vzácně nodule
- $Di + Cal + Grt + Czo + Pl + Qtz \pm Ttn \pm Py \pm Amp \pm Ves \pm Wo$
- plagioklas (An 80-100 %)
- nízká metamorfóza LPLT (zelené břidlice): $Amp \pm Di + Czo + Cal + Pl + Qtz \pm Ttn$
- metamorfóza MPMT (amfibolitová facie): $Di + Cal + Grt + Pl + Qtz \pm Ttn$
- metamorfoza HPHT (granulitová facie): diopsid + forsterit + monticellit + spinel



Amfiboly



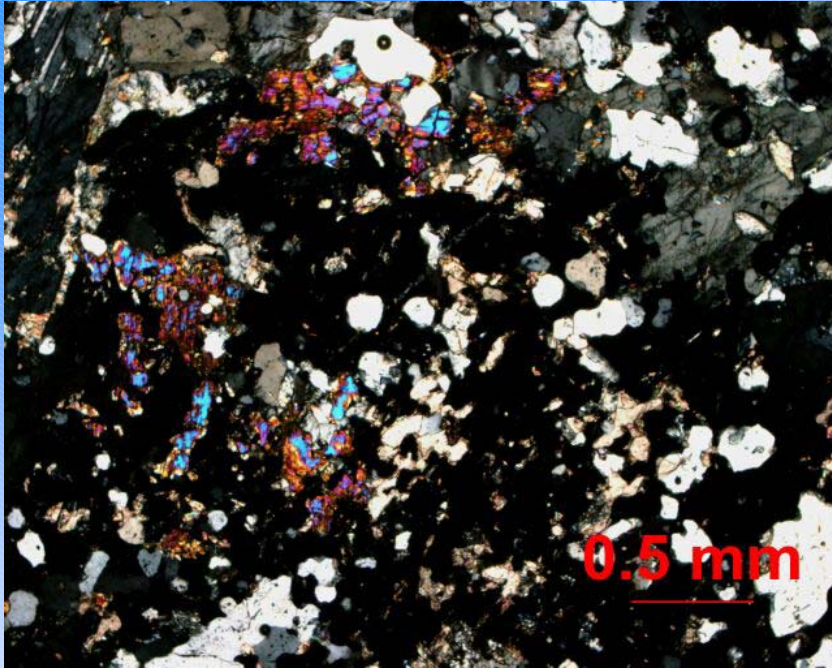
Klasifikační diagram pro amfiboly podle nomenklatury Leakeho et al. (1997):
žlutá - mramory, fialová – erlany, zelená - amfibolity



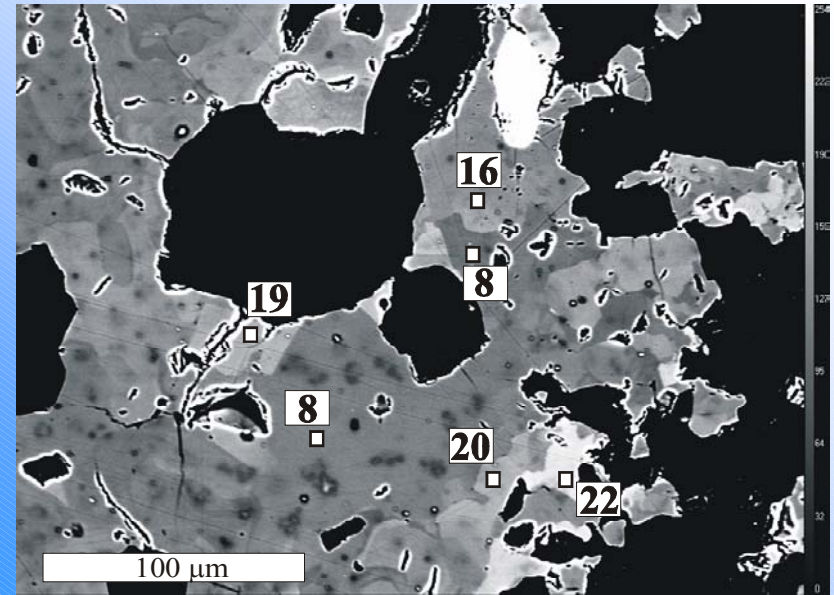
Klinozoisit - Epidot

Pokles obsahu Fe^{3+} směrem k okrajům zrna vzniká v důsledku progradní metamorfózy. Opačný trend je naopak produktem retrogradních přeměn jak naznačují studie zonálnosti epidotu v amfibolitech (Raith 1976). Podle Kitamury (1975) vzniká tento typ zonálnosti při poklesu teploty během isochemické metamorfózy, nebo v důsledku přínosu železa do systému.

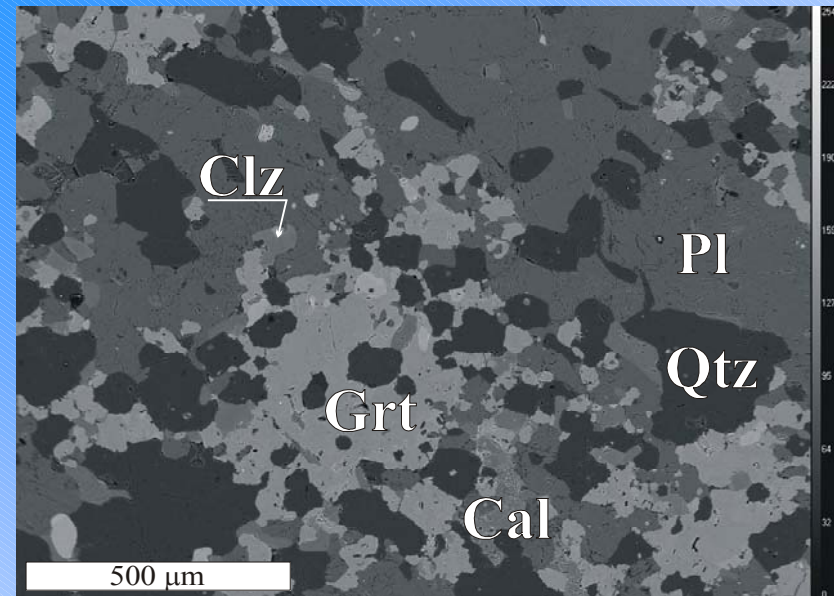
Granát



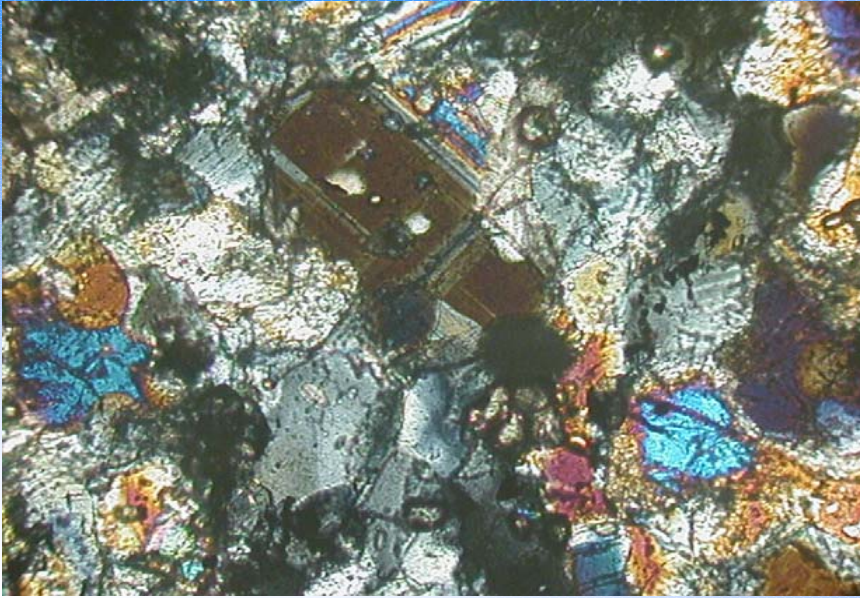
- svým složením se blíží čistému grossularu
- nejčastěji vzniká reakcí:
$$5\text{Cal} + 3\text{Qtz} + 2\text{Czo} = 3\text{Grs} + \text{H}_2\text{O} + 5\text{CO}_2$$



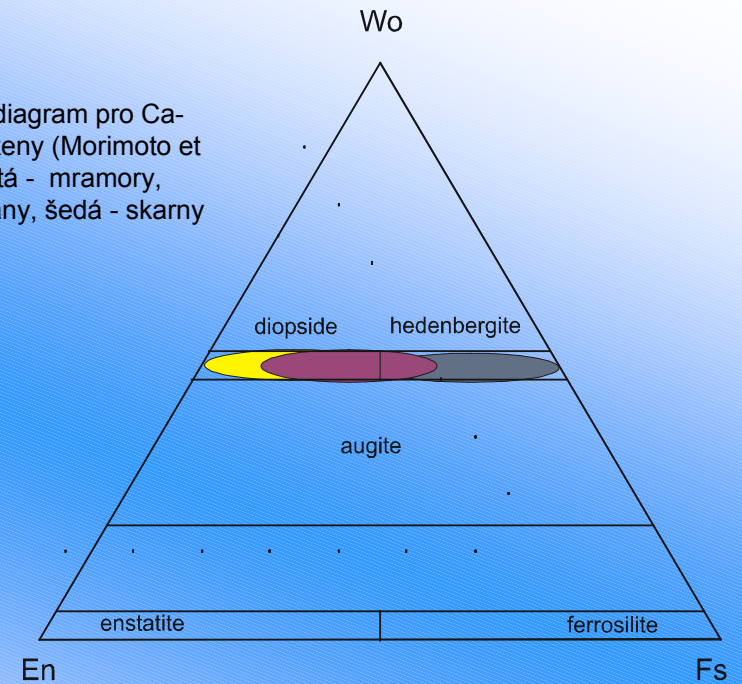
xenomorfně omezený nepravidelně zonální granát čísla označují procentuální zastoupení almandinové komponenty



Pyroxen



Klasifikační diagram pro Ca-Mg-Fe pyroxeny (Morimoto et al. 1988) žlutá - mramory, fialová – erlany, šedá - skarny

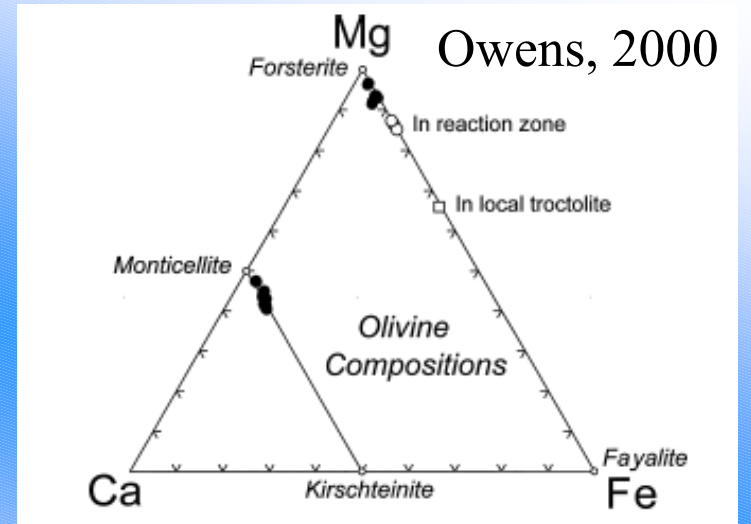


Olivín

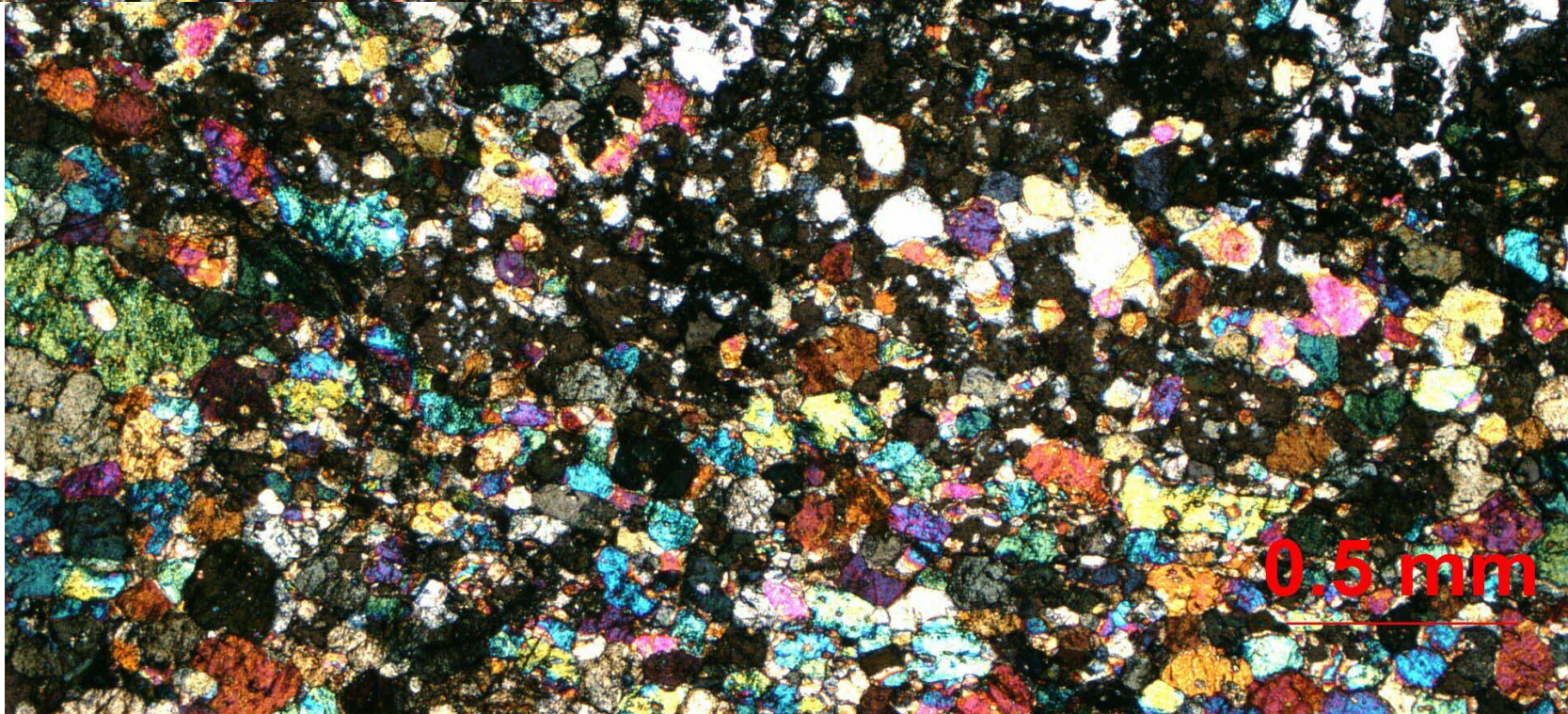
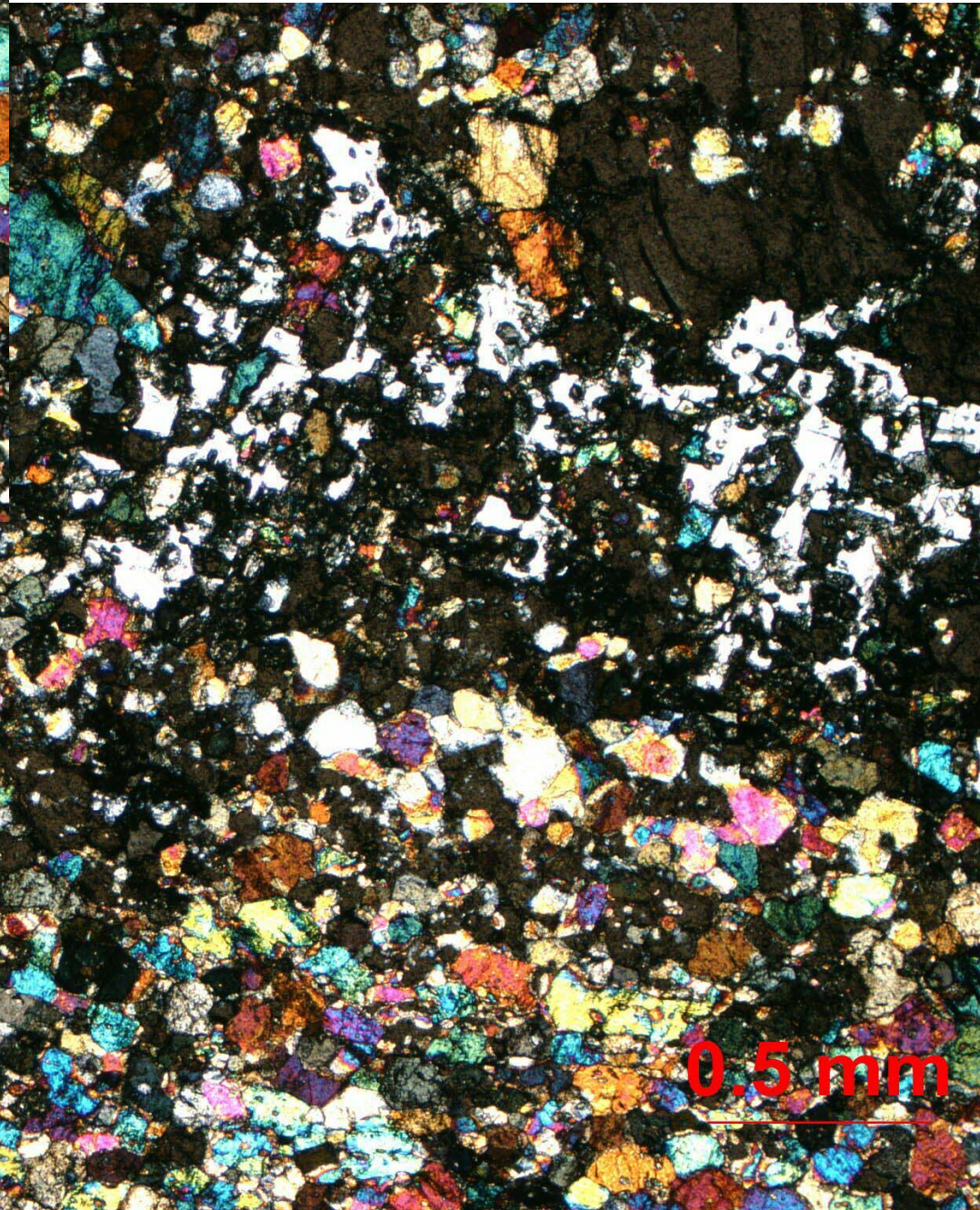
Reakce produkující monticellit:



diopsid + forsterit + kalcit = monticellit

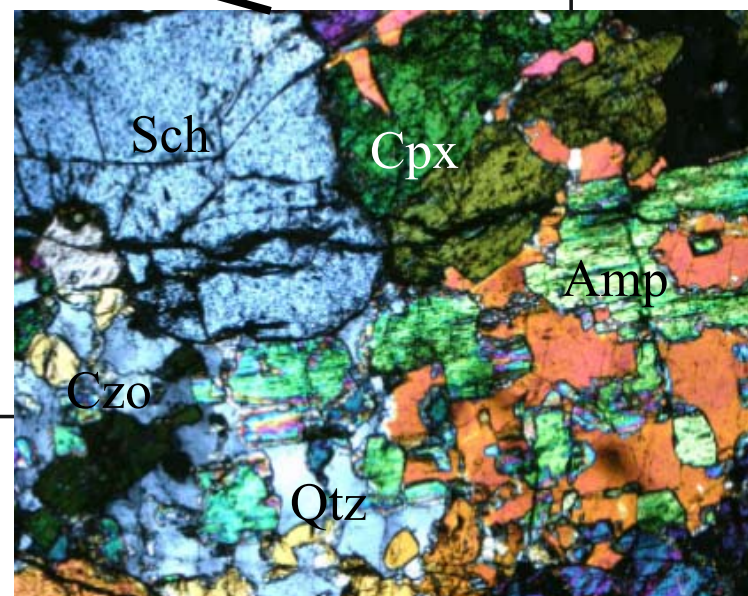
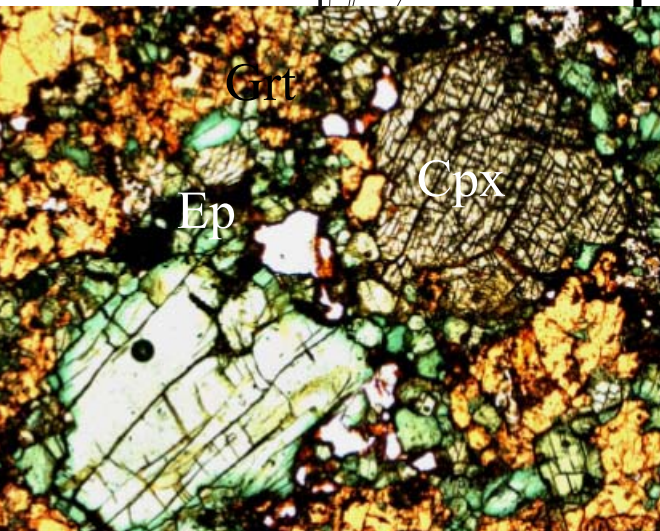
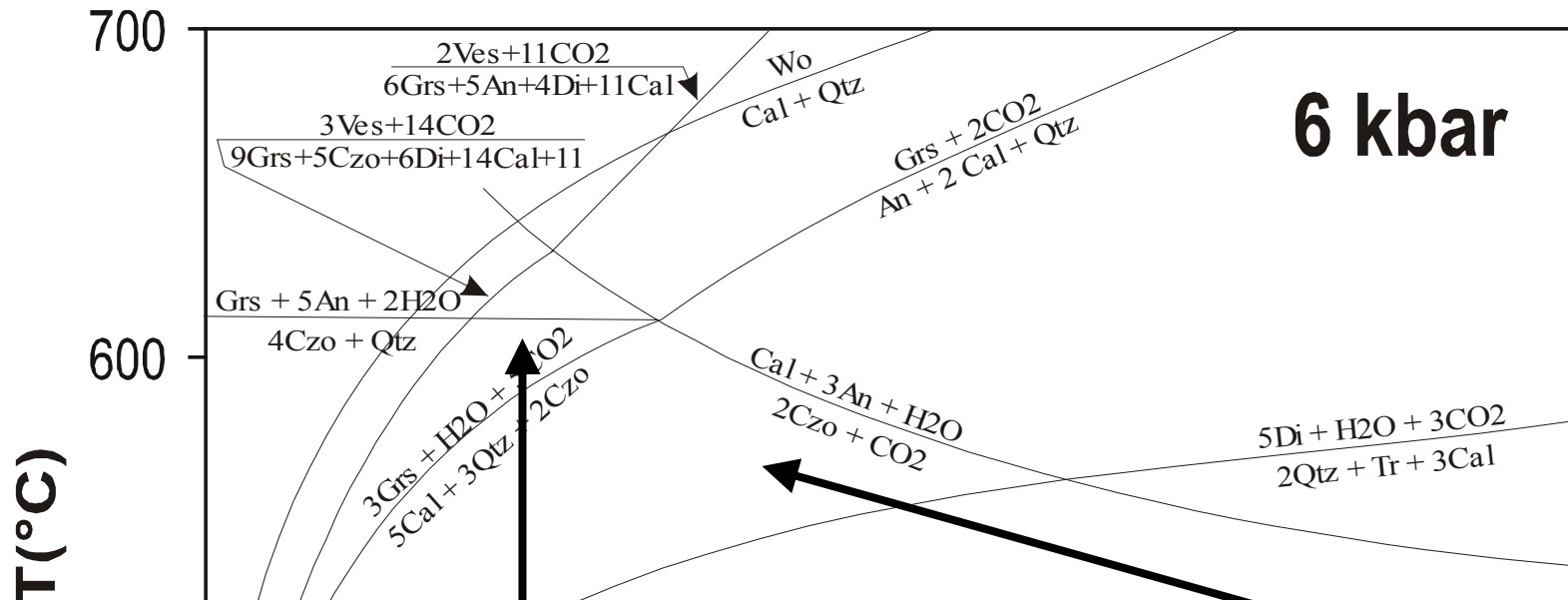


Skarny



Px +
Grt +
Mag +
Qtz

0.5 mm

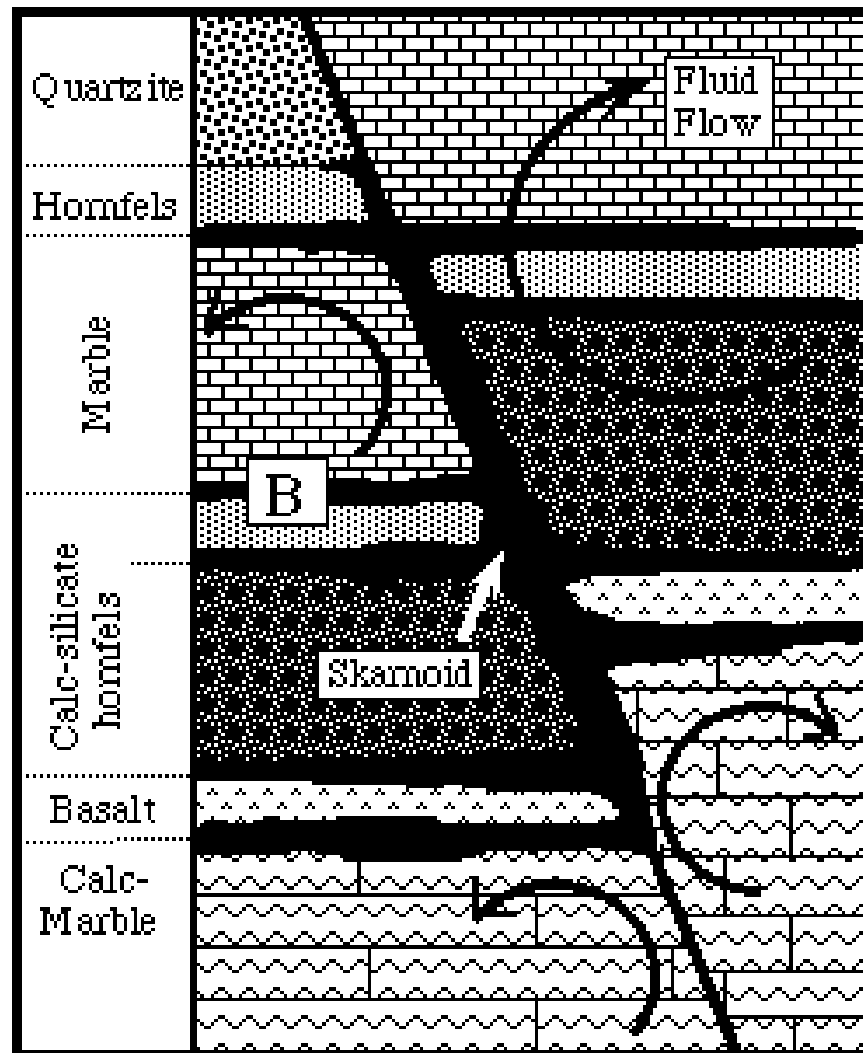
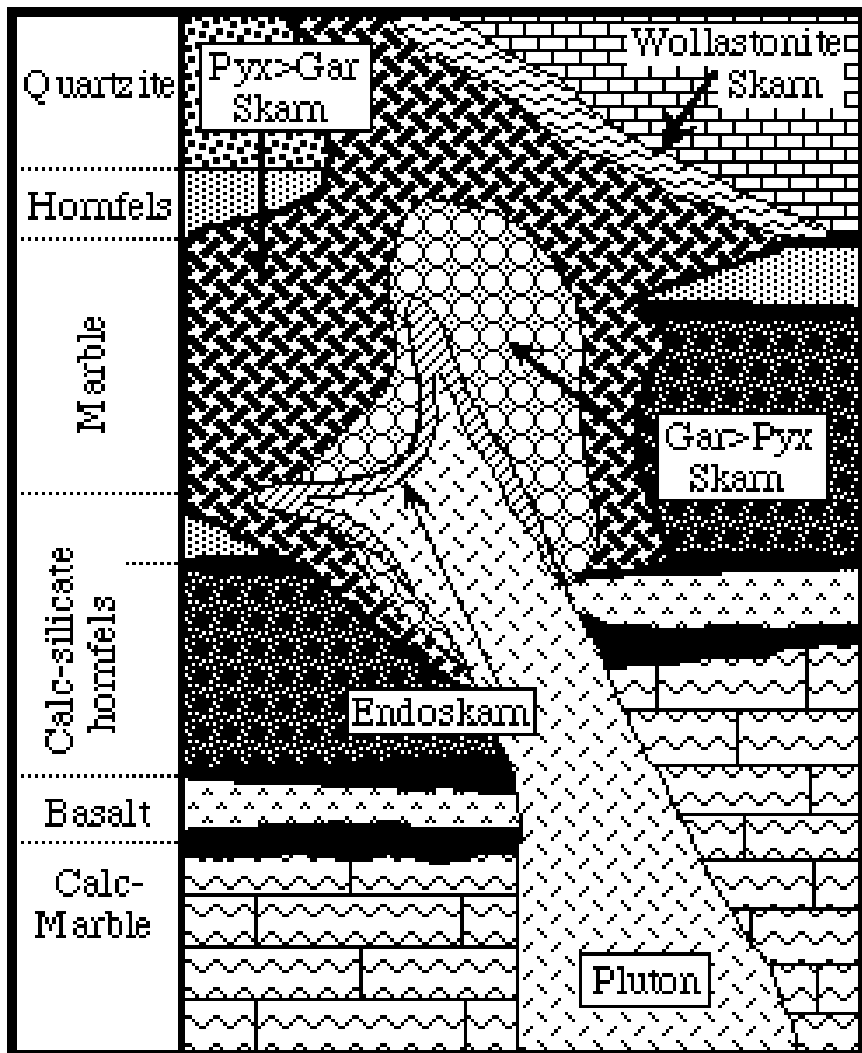


0,5

0,1

$X \text{CO}_2$

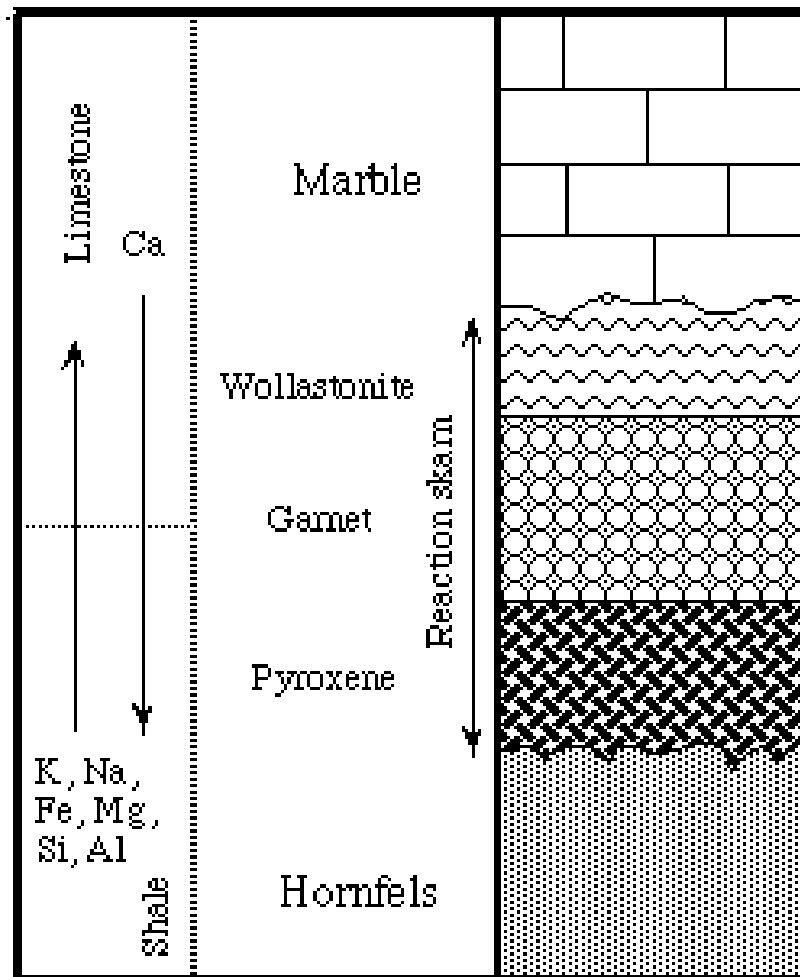
skarny – silikátová hornina obsahující Ca-Fe-Mg . Typické minerály: granáty (grosular-andradit-almandin), pyroxen (diopsid-hedenbergit), plagioklasy (podružně), wollastonit, epidot, vesuvian, kalcit, křemen, skapolit.

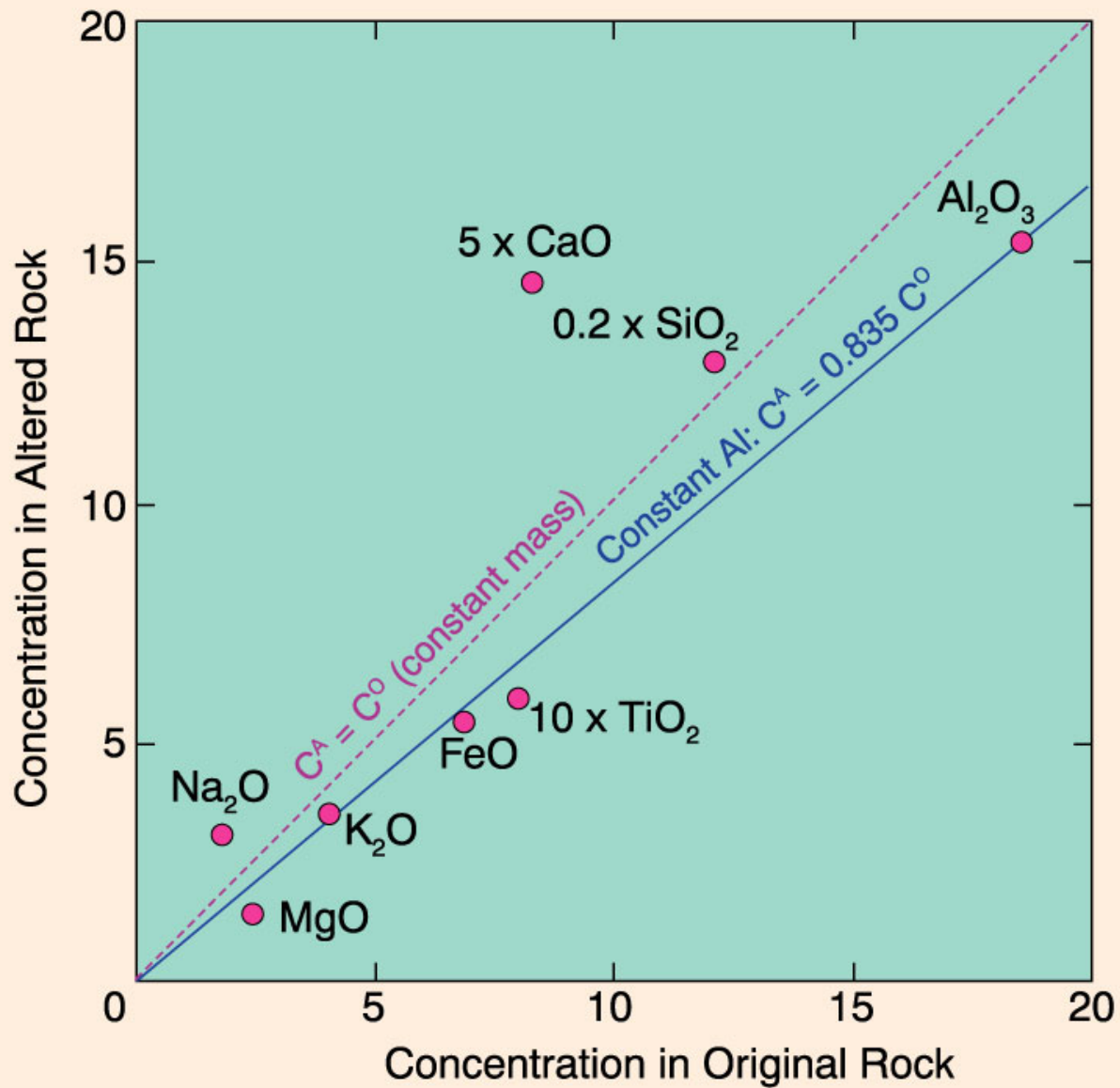


1) metasomatóza mezi dvěma chemicky kontrastními horninami během regionální metamorfózy (např. rohovcové konkrece v mramoru)

křemen \Rightarrow wollastonit \Leftarrow kalcit

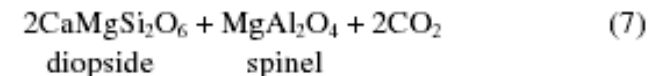
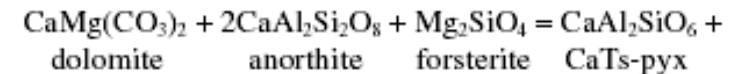
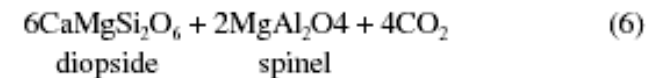
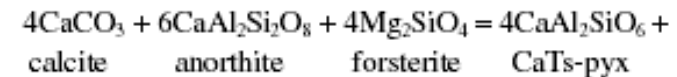
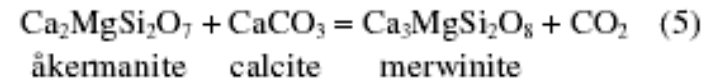
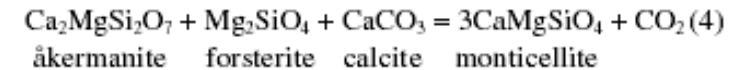
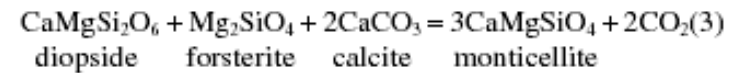
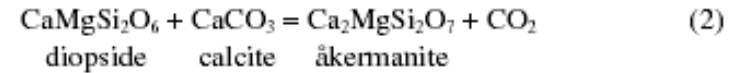
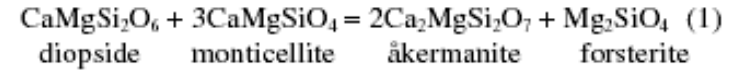
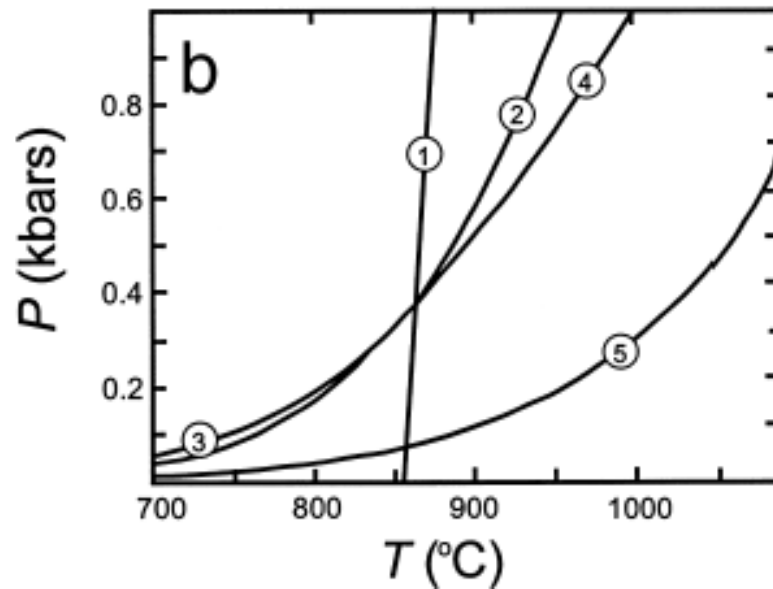
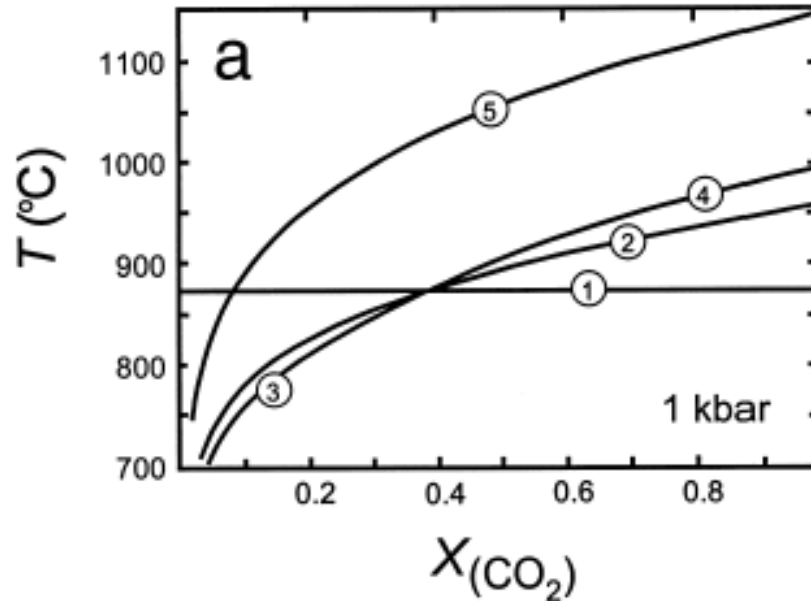
Unmetamorphosed		Metamorphosed	
Sandstone			Quartzite
Shale			Hornfels
Limestone			Marble
Shale			Hornfels
Calcareous Shale			Calc-silicate hornfels
Basalt			Greenstone
Silty Limestone			Wollastonite marble



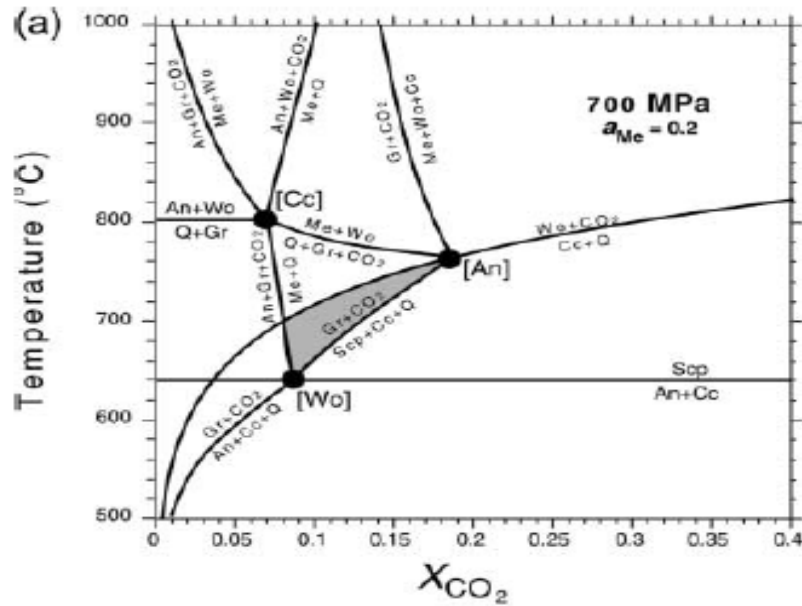
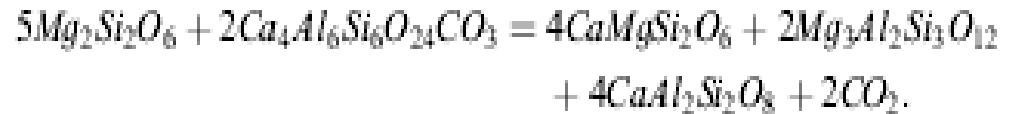


Isocon diagram of Grant (1986) for the data from Table 30-1. Some oxides have been scaled to provide a better distribution of data points. *Econ. Geol.*, 81, 1976-1982. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

metamorfoza LPHT (kontaktni)



Některé další zajímavé reakce



Yoshino (2001)

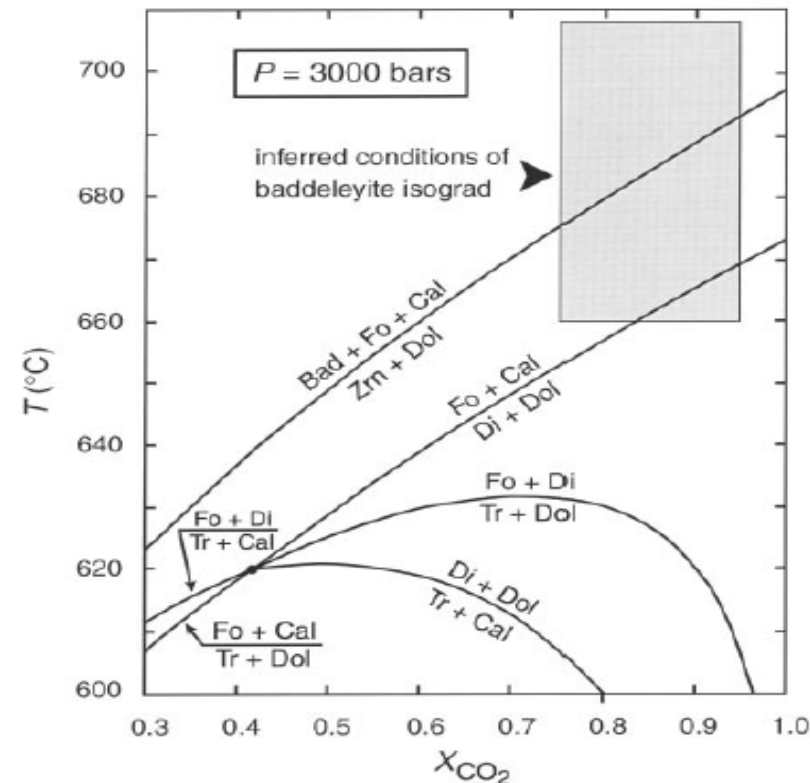
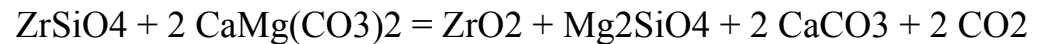


FIGURE 3. T - X_{CO_2} diagram illustrating selected phase equilibria among diopside (Di), dolomite (Dol), forsterite (Fo), calcite (Cal), tremolite (Tr), zircon (Zm), baddeleyite (Bad), and CO_2 - H_2O fluid at 3000 bars. Pressure is appropriate to contact metamorphism in the Ballachulish aureole, Scotland. All minerals assumed pure substances. Conditions of the Bad isograd predicted by the Zm-Dol-Bad-Fo-Cal equilibrium are consistent with conditions independently inferred from Cal-Dol thermometry and the Di-Dol-Fo-Cal equilibrium (shaded rectangle).

Ferry (2004)

Retrográdní přeměny

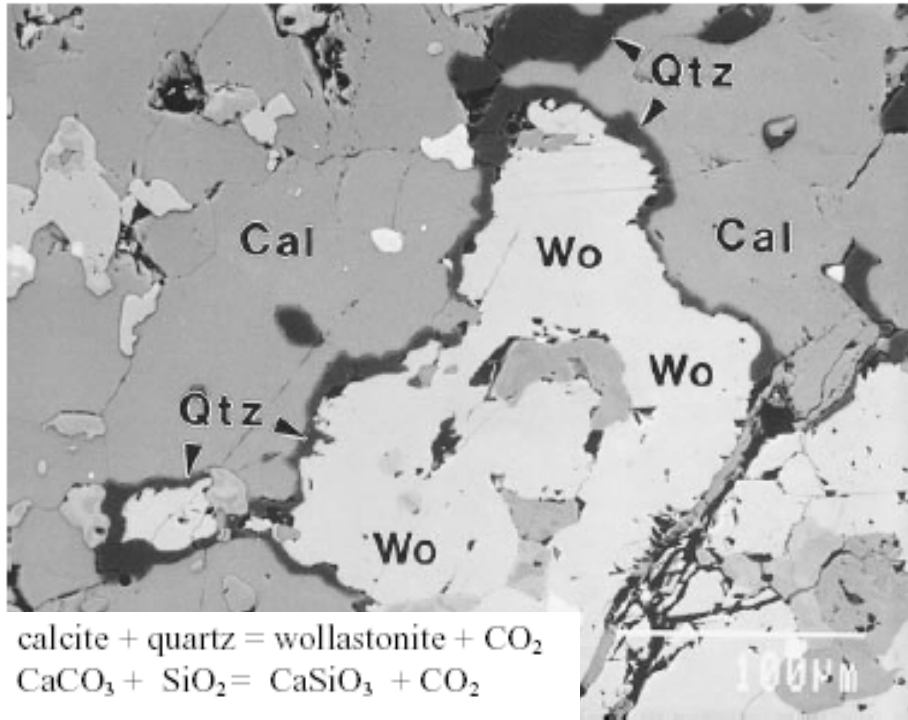


FIGURE 4. Backscattered electron (BSE) image of continuous rim of quartz (Qtz) around wollastonite (Wo) in a matrix of calcite (Cal) illustrating incipient progress of retrograde Reaction 2 (in reverse) in siliceous limestone from the Ritter Range pendant, California. Sample 2O of Ferry et al. (1998).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

- většina prográdních reakcí v systémech CMSH, CMASCH, KCMASCH má na straně produktů CO₂ ± H₂O.
- minerální asociace jsou odolnější proti retrográdním přeměnám a častěji zachovávají podmínky blízké vrcholným podmínkám metamorfózy
- zároveň se mnohdy setkáváme s nerovnovážnými asociacemi.

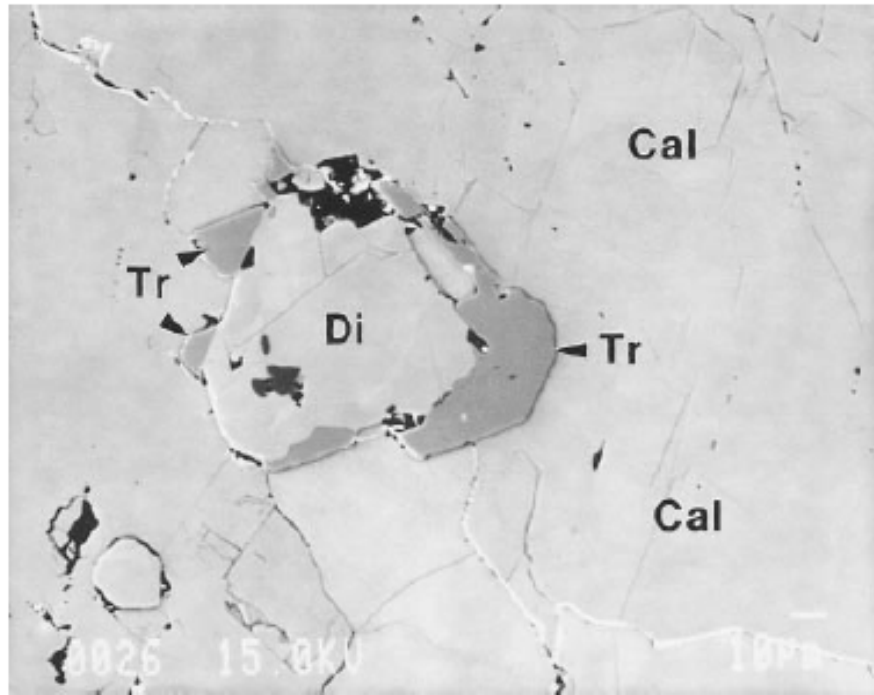
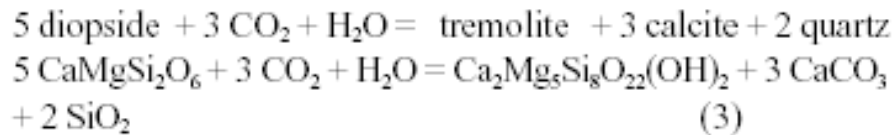


FIGURE 5. BSE image of subhedral tremolite (Tr) crystals developed at the margin of diopside (Di) in contact with calcite (Cal), illustrating incipient progress of retrograde reaction 3 in siliceous limestone from the Ritter Range pendant, California. Sample 4H of Ferry et al. (1998). Long dimension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

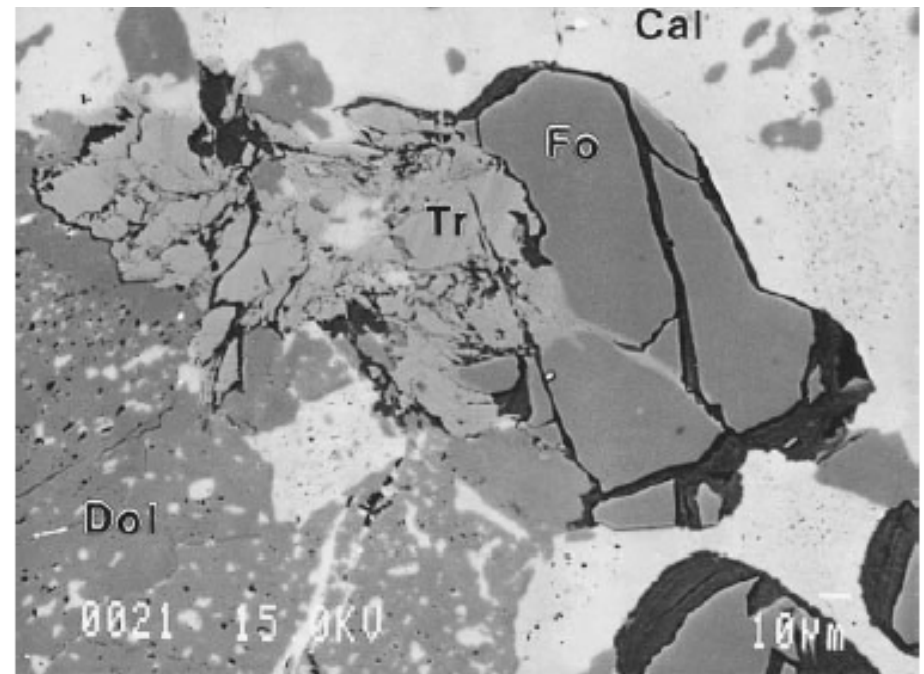
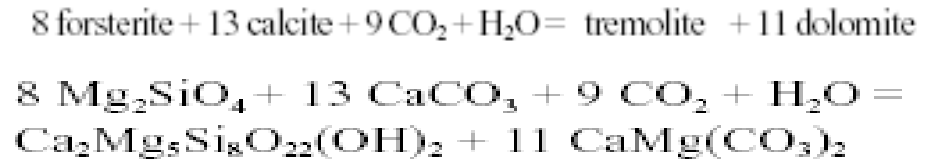


FIGURE 9. BSE image of partial replacement of forsterite (Fo) by tremolite (Tr) in a matrix of calcite (Cal) and dolomite (Dol), illustrating progress of retrograde Reaction 8 in siliceous dolomite from the Ballachulish aureole, Scotland. Sample 1A of Ferry (1996b). Long dimension of photo is 0.26 mm.

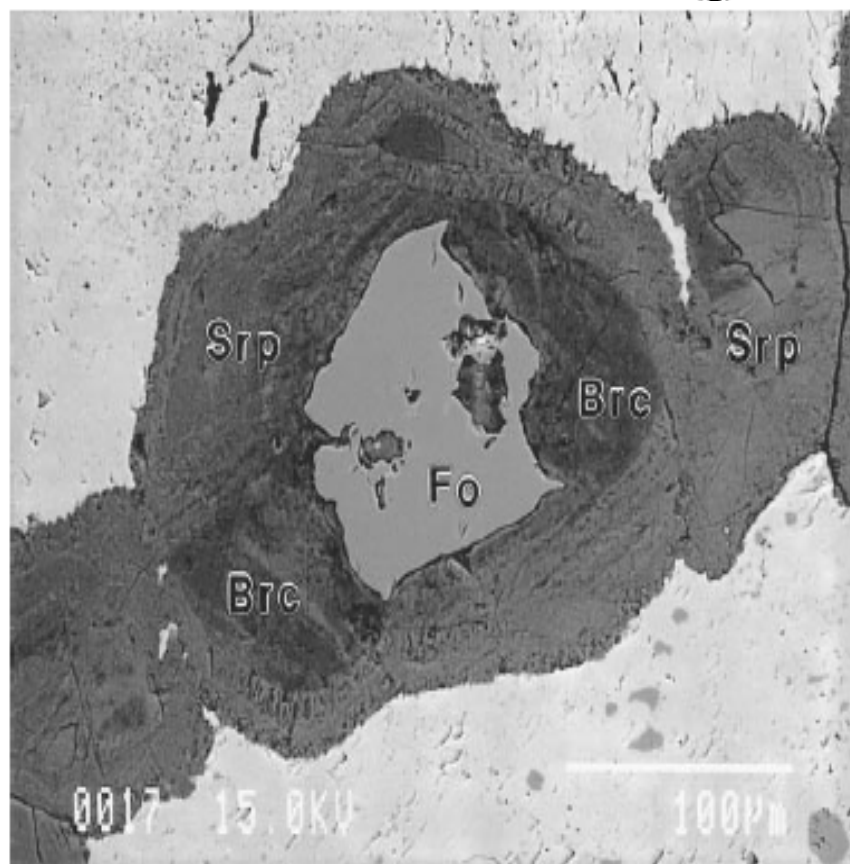
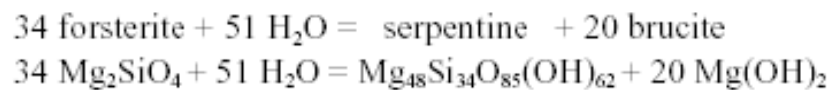


FIGURE 8. BSE image of direct replacement of forsterite (Fo) by an intergrowth of serpentine (Srp) and brucite (Brc), illustrating progress of retrograde Reaction 7 in siliceous dolomite from the Ballachulish aureole, Scotland. Sample 8C of Ferry (1996b). Long dimension of photo is 0.38 mm.

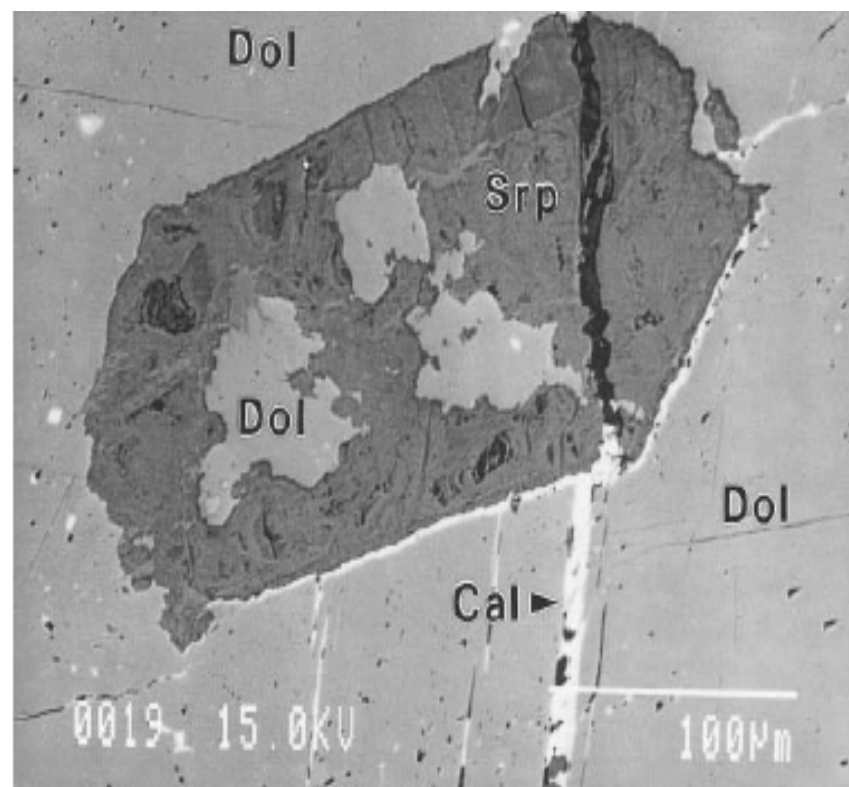
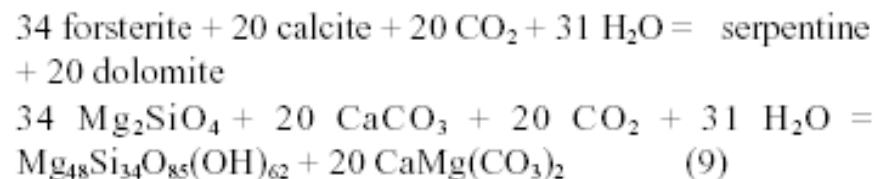
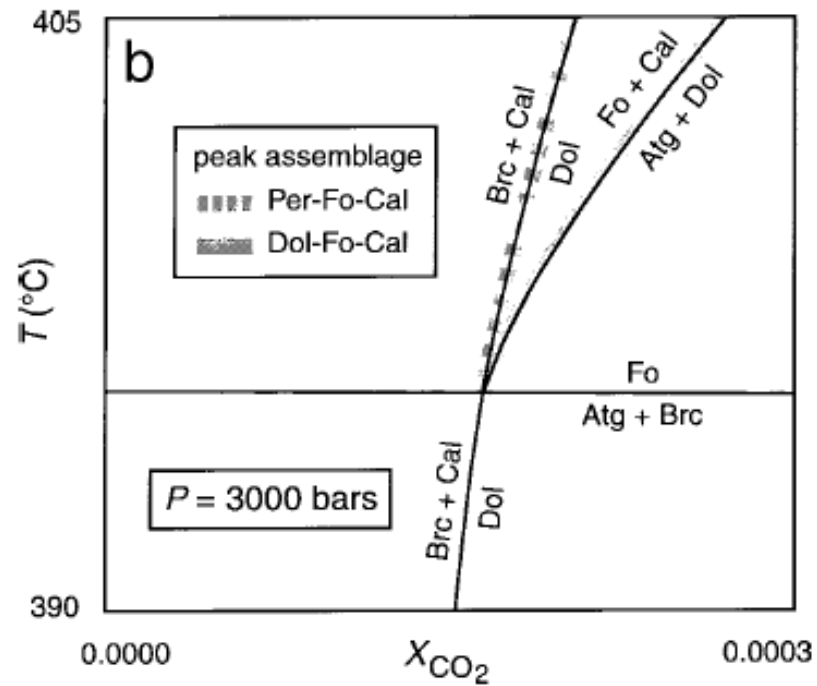
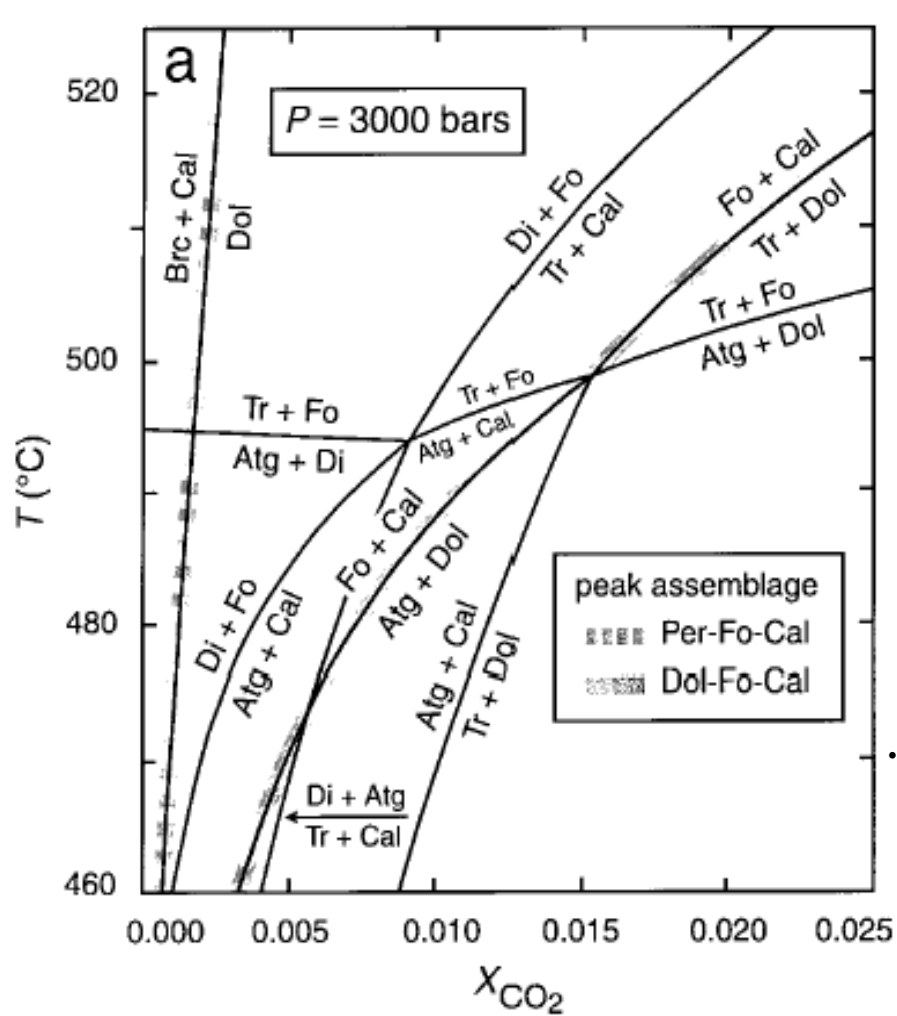


FIGURE 10. BSE image of pseudomorphic replacement of forsterite (Fo) by an intergrowth of serpentine (Srp) and dolomite (Dol), illustrating completion of retrograde Reaction 9 in siliceous dolomite from the Ballachulish aureole, Scotland. Brightest mineral is calcite (Cal). Sample 8B of Ferry (1996b). Long dimension of photo is 0.32 mm.



T- X_{CO_2} diagram illustrating selected phase equilibria among dolomite (Dol), brucite (Brc), calcite (Cal), serpentine, diopside (Di), tremolite (Tr), forsterite (Fo), and CO_2 - H_2O fluid at 3000 bars. Antigorite (Atg) taken as the thermodynamic model for serpentine. Pressure is appropriate to contact metamorphism in the Ballachulish aureole, Scotland. All minerals assumed pure substances. Shaded dashed and shaded solid curves illustrate the *T*- X_{CO_2} evolution of initially periclase-bearing and periclase-free siliceous dolomites, respectively, during cooling of the aureole and retrograde mineral-fluid reaction. If partial mineral-fluid equilibrium was attained, the two shaded curves explain the different retrograde mineral assemblages developed in initially periclase-bearing and periclase-free rocks as well as the replacement of Fo by serpentine + Brc in both rock types. (a) $T = 460\text{--}525$ °C, $X_{\text{CO}_2} = 0\text{--}0.025$. (b) $T = 390\text{--}405$ °C, $X_{\text{CO}_2} = 0\text{--}0.0003$.

B. Metamorfóza ultramafických hornin

	1	2	3	4
SiO ₂	39,53	33,10	38,37	42,28
TiO ₂	0,01	0,01	0,06	st.
Al ₂ O ₃	0,93	0,72	1,70	1,70
Cr ₂ O ₃	1,01	0,38	0,62	0,18
Fe ₂ O ₃	0,65	5,54	5,06	3,38
FeO	7,62	2,30	2,38	4,23
MnO	0,12	0,09	0,12	0,09
NiO	0,32	0,38	—	—
MgO	48,83	40,37	37,60	32,28
CaO	st.	0,31	1,06	1,55
Na ₂ O	st.	0,31	0,56	0,12
K ₂ O	st.	st.	0,06	st.
H ₂ O ⁺	0,89	14,46	11,53	3,64
H ₂ O ⁻	0,16	1,93	0,46	—
P ₂ O ₅	st.	0,07	0,09	st.
CO ₂	—	—	—	10,17
Suma	100,07	99,97	99,67	99,62

1. Dunit, Dun Mtn., Nový Zéland.

2. Serpentinizovaný dunit, Mayaguez, Portoriko.

3. Serpentin, Velké Vrbno, staroměstské pásmo.

4. Krupník, Sobotín, sobotínský masív.

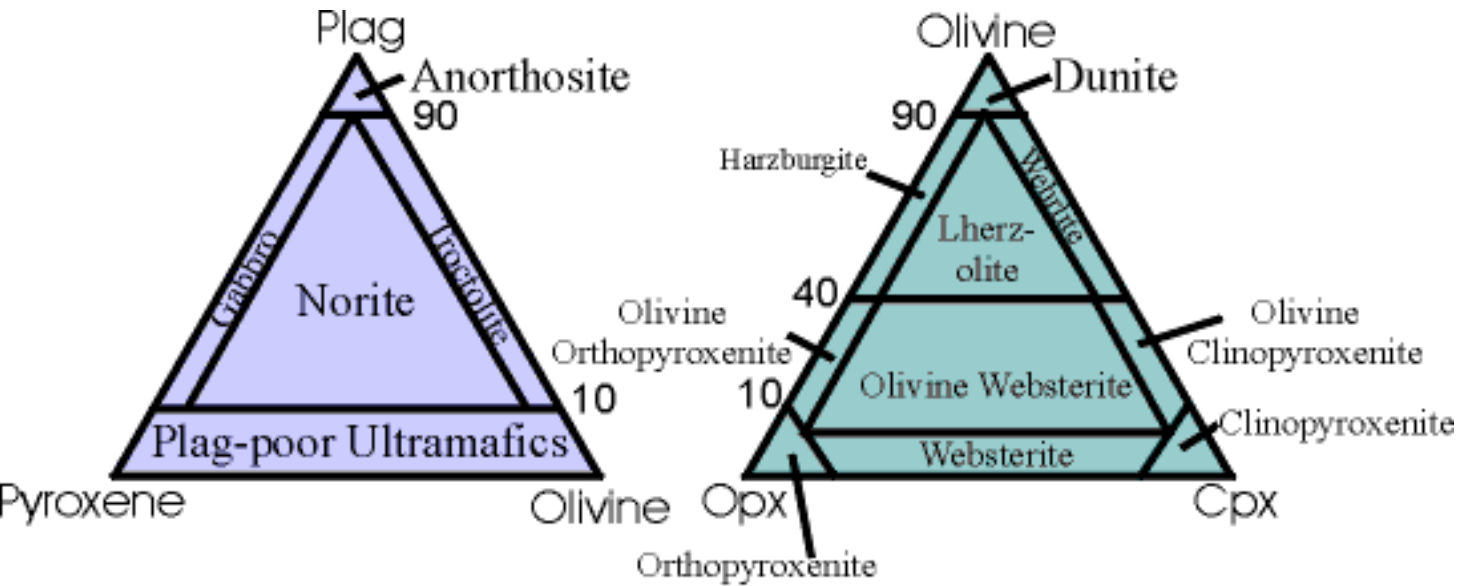
- hlavní horninový typ zemského pláště
- složeny hlavně z Mg-silikátů, světlé součástky < 10 %
- geochemicky – utrabazické horniny (SiO₂ < 45 hm %)

primární minerály - olivín bohatý Mg (Fo 88-95), ortopyroxen (enstatit), klinopyroxen (Cr-diopsid), chromit (akcesorie), granát (pyrop 60-75 mol.%), spinel, plagioklas – různé podmínky

sekundární minerály: minerály skupiny serpentinu (chryzotil, antigorit, lizardit, aj.) - nahrazují olivín nebo ortopyroxen (bastit), amfiboly (tremolit), mastek, magnezit, Mg-chlority, Mg-biotit, ilmenit, magnetit.

kelyfitické textury – radiálně paprscité lemy (Hb, Opx, Spi) okolo granátu

A) Ultramafické vyvřelé horniny

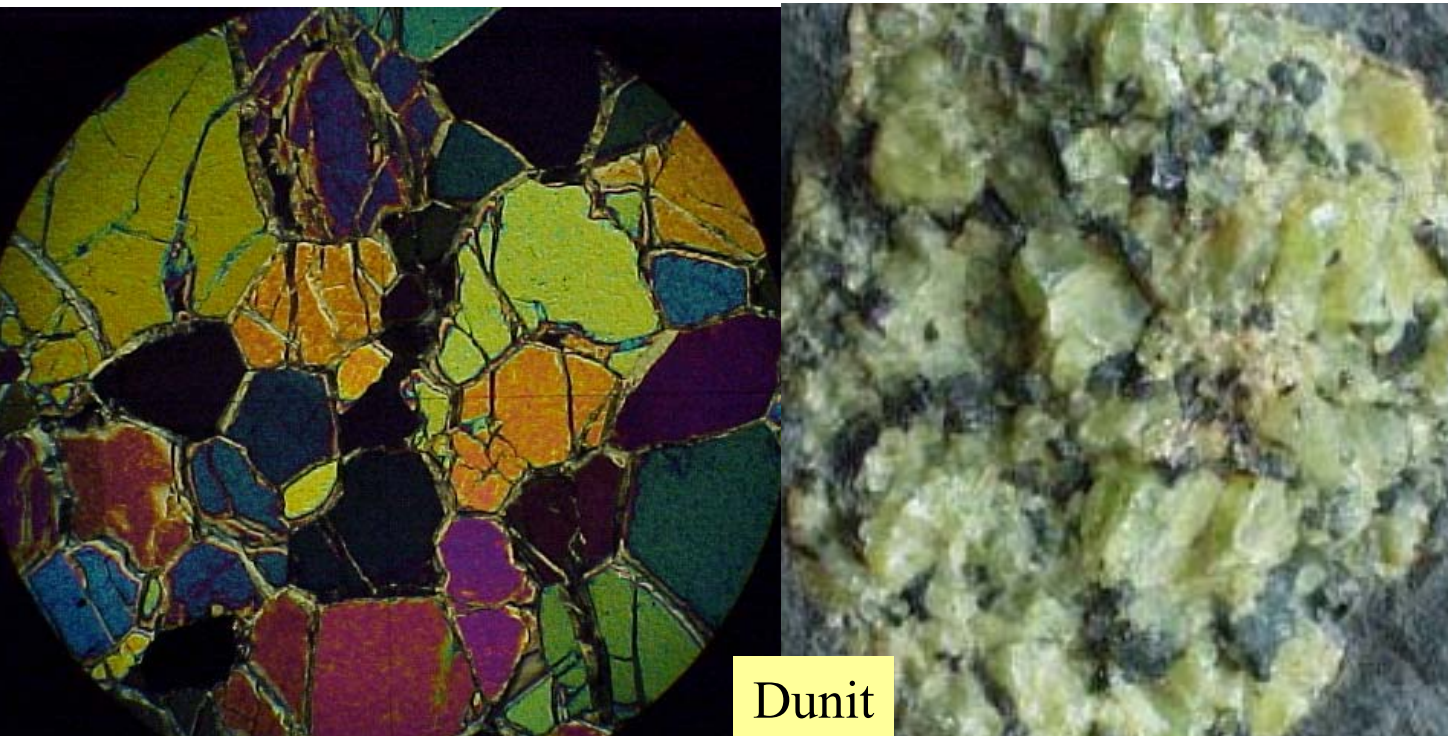


Nejčastější alterace:

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

Klinopyroxen → amphibol + hydratované Ca-Al silikaty + chlorit

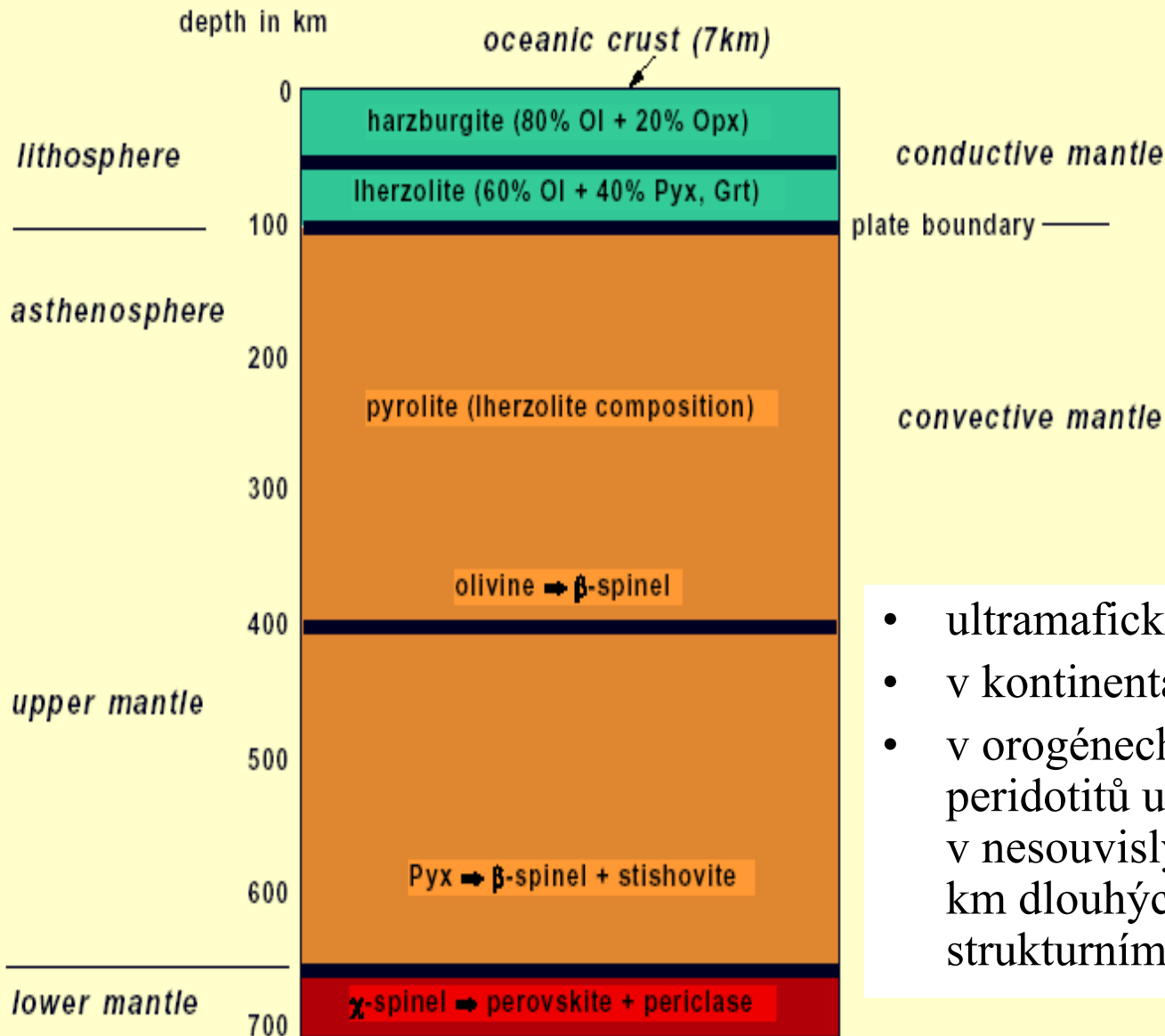
Plagioklas → Ca-Al silikaty + jílové minerály + kalcit



Dunit

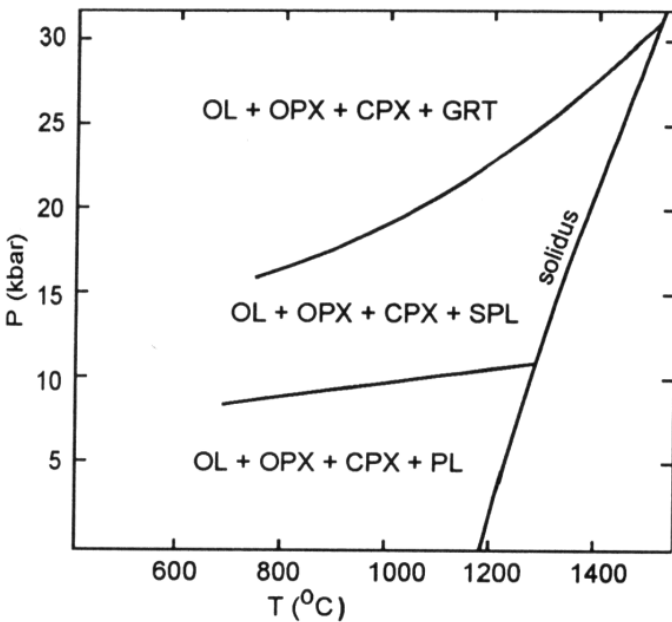
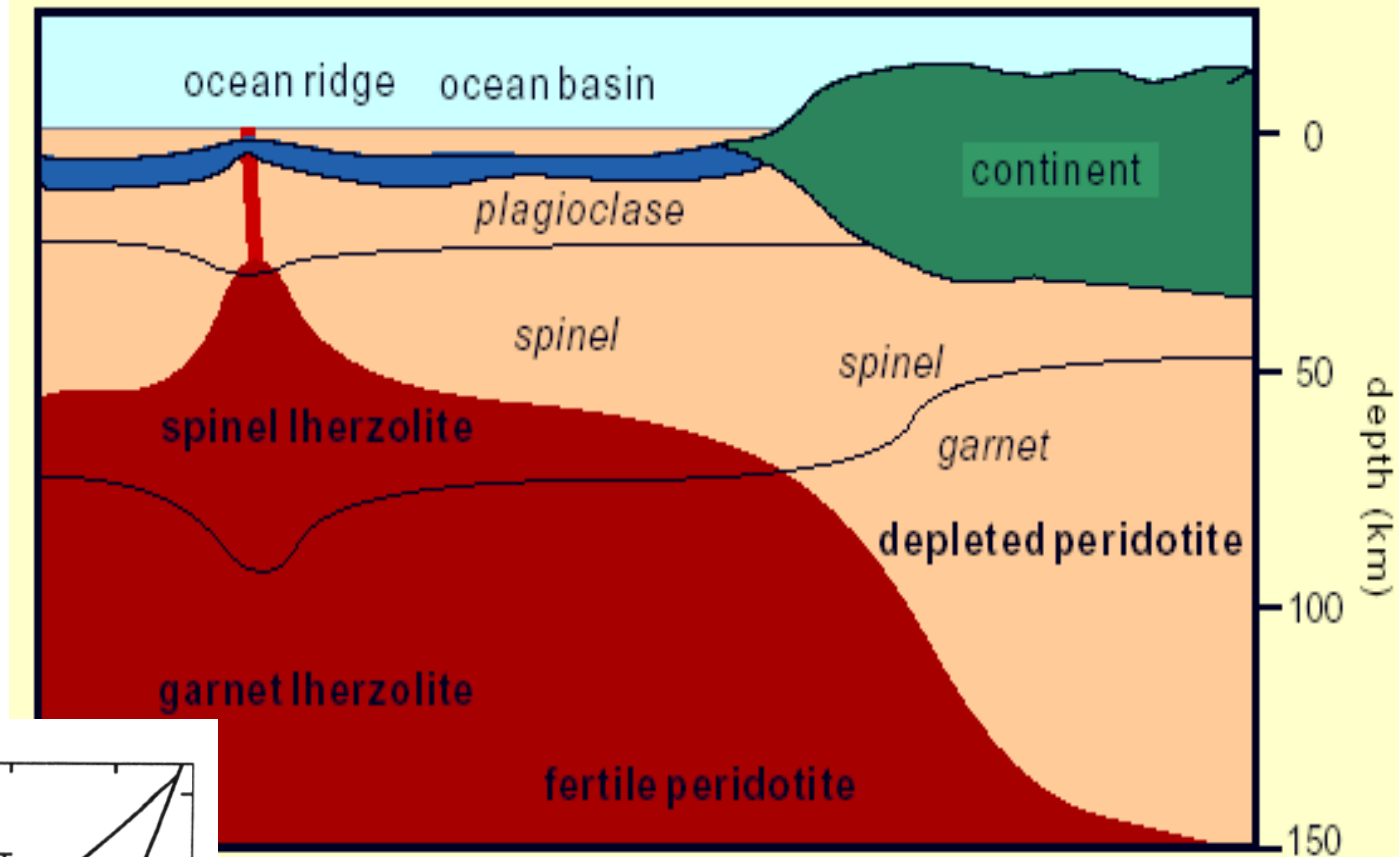


mantle structure



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

PT-diagram ukazující pole stability lherzolitu s různými asociacemi.



- ultramafické pásy souvisejí s kolizí a následnou subdukcí oceánské kůry pod kontinent (švy indikující zóny dřívějších subdukcí)

- **typy ultramafických hornin (nyní v zemské kůře)**

- a) alpský (orogenní) - fragmenty pláště (čočky, xenolity)

- tektonicky transportované během orogenních procesů z oblasti *pod oceánskou kůrou*
- součást ofiolitových komplexů, často lherzolitické složení
- častá serpentinizace a rekrystalizace
- alpská ultramafická tělesa leží podél výrazných strukturních či litologických rozhraní

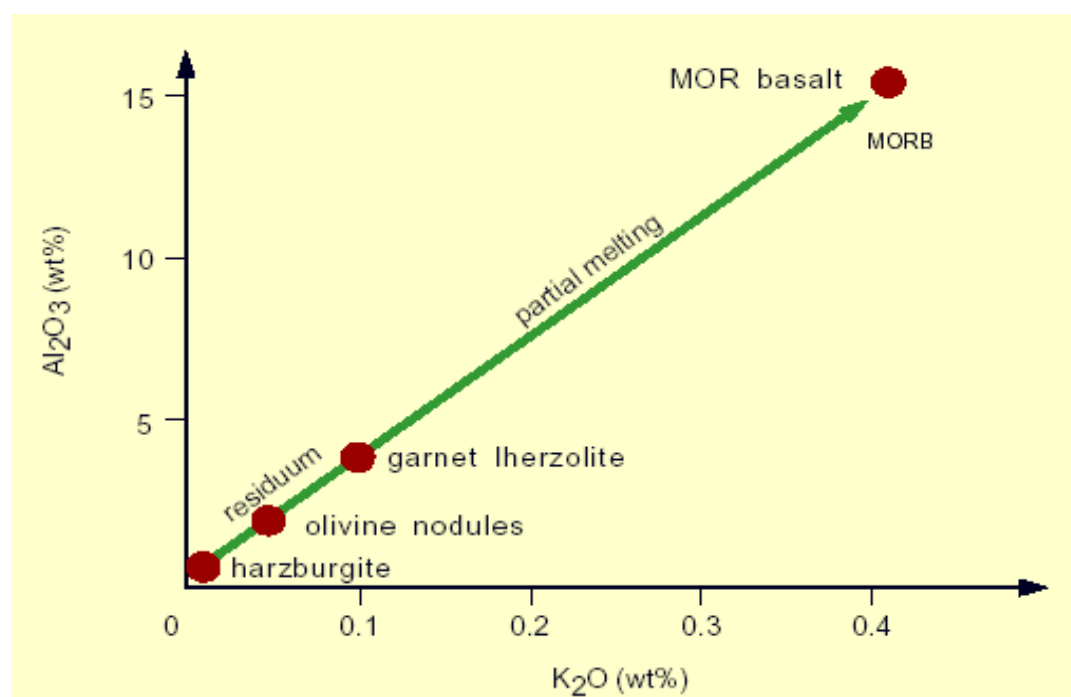
- b) plášťové fragmenty ze *subkontinentální* části pláště

- diferenciáty basaltických magmat – harzburgitické či dunitické složení
- součást krustálních sekvencí

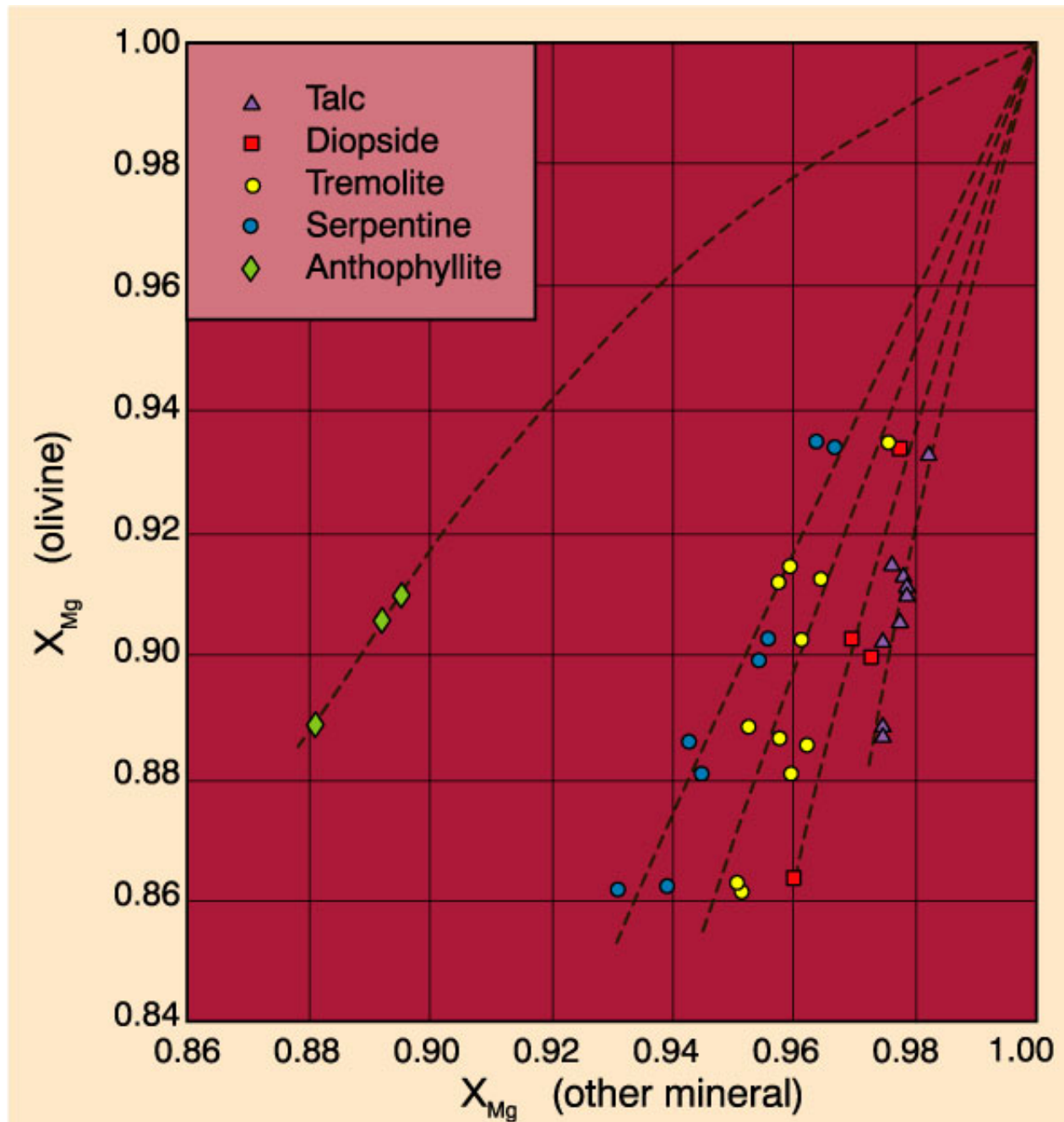
- c) vyneseny z pláště jako xenolity

- v kimberlitech a basaltech společně s HT eklogity (menší část)

*Vznik MORB bazaltů
diferenciací lherzolitů*

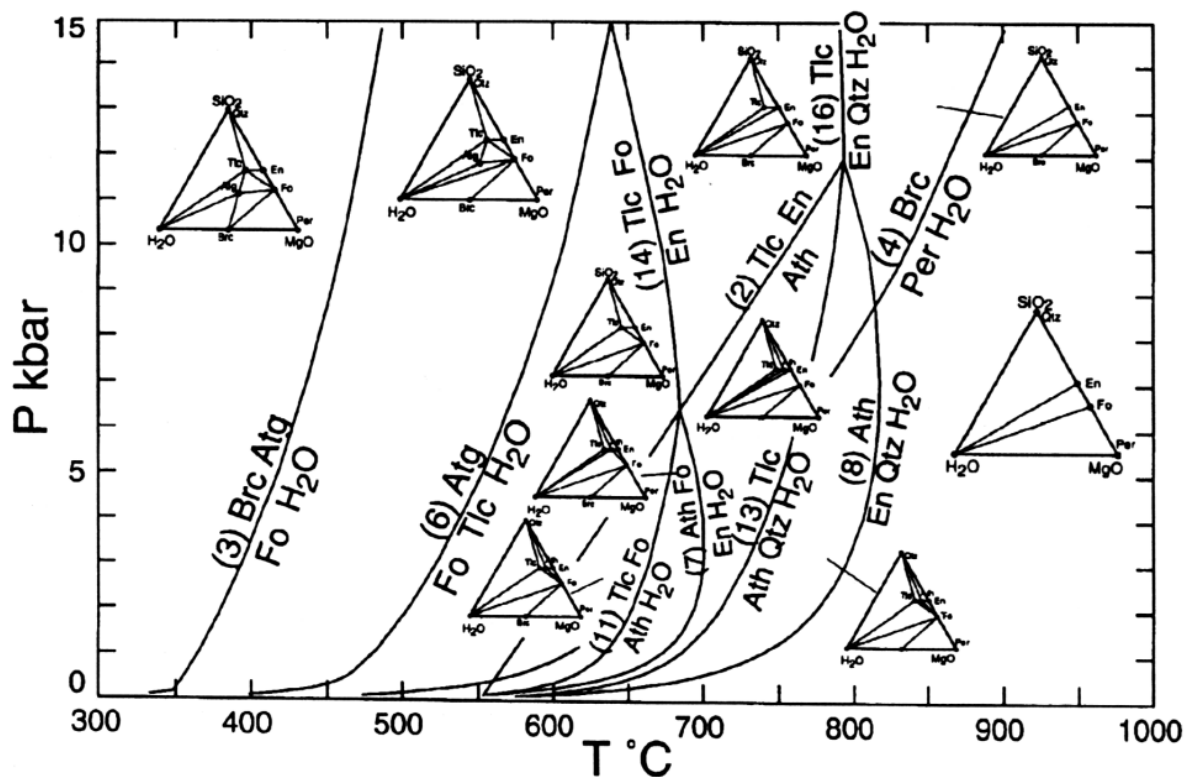


Partitioning of Mg/Fe in minerals in **ultramafic** rocks, Bergell aureole, Italy After Trommsdorff and Evans (1972). *A J Sci* 272, 423-437.



B) Fázové vztahy v ultramafitech

- systémy: CMS, MSH, CMSH, \pm 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 $\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
- 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)

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	chlorit
	forsterit + mastek + tremolit	chlorit
	forsterit + antofylit (nebo magnesio-cummingtonit)+ +tremolit	chlorit/ chromit
	forsterit + ortopyroxen + tremolit	chlorit/ chromit
	forsterit + ortopyroxen + hornblend	spinel
pyroxenických rohovců (nízký P)	forsterit + ortopyroxen + klinopyroxen	plagioklas
granulitová (střední P)	forsterit + ortopyroxen + klinopyroxen + hornblend	spinel
eklogitová (vysoký P)	forsterit + ortopyroxen + klinopyroxen	granát

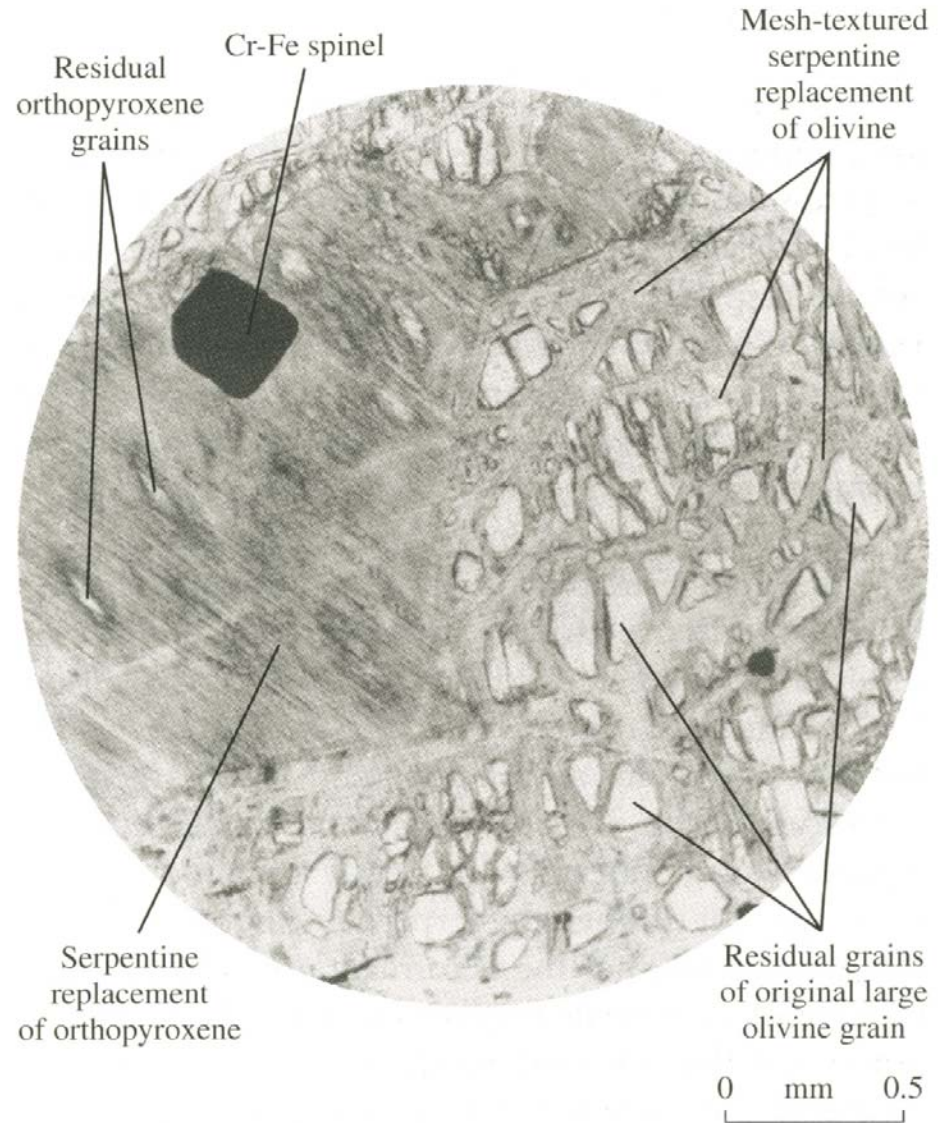
Granát (grt): pyropové složení, při Ca metasomatóze grossular

Spinel (sp): chromit-spinel

Plagioklas: anortit, albit (metasomasomatóza)

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

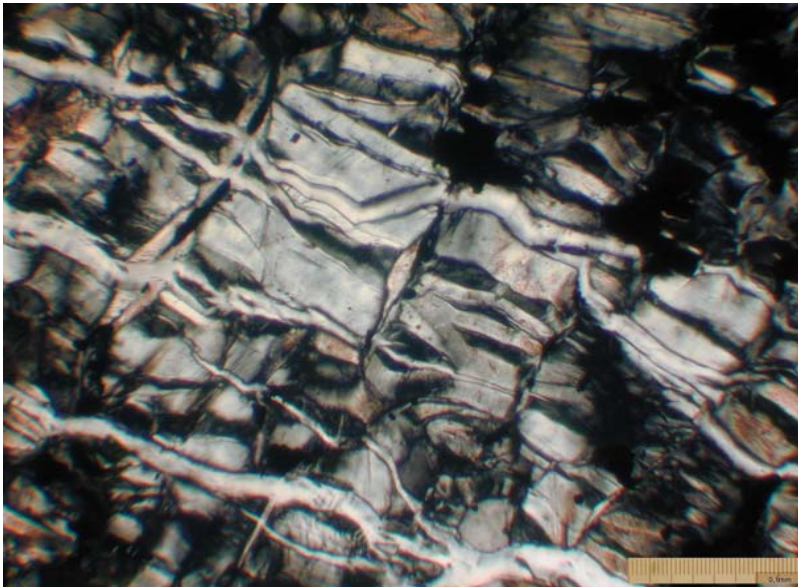
- **krupníky** — mastek, chlority, tremolit
- **mastkové břidlice**
- **tremolitové a antofylitové břidlice** (střední stupně metamorfózy)
- **rodingity** — metasomatické horniny bohaté Ca, spjaté se serpentizací (grosular, vesuvian, prehnit, chlorit, prehnit, diopsid)
- **serpentinity (hadce)** — serpentínové minerály + relikty primárních minerálů peridotitů



15.21 Partially serpentinized peridotite (harzburgite). Serpentine replacement of olivine progressed inward from internal fractures as water moved in, creating mesh texture. Serpentine has mostly replaced primary orthopyroxene, creating bastite texture. Primary Cr-Fe spinel is unaltered.

Serpentinit

- minerály serpentínové skupiny jsou stabilní v podmínkách facie zelených břidlic (lizardit a chrisotil 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.



Přeměna začíná podél puklin a štěpných trhlin (pyroxen, olivín)



Olivine crystal (high relief, strongly birefringent) replaced by serpentine in a mylonitized harzburgite from Oman. Crossed polars.

- serpentinity mohou vznikat v důsledku těchto dvou rozdílných reakcí :



forsterite	serpentine	brucite
------------	------------	---------

88 cm ³	111 cm ³	25 cm ³
--------------------	---------------------	--------------------

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



forsterite	serpentine
------------	------------

271 cm ³	221 cm ³
---------------------	---------------------

865 g	90 g	554 g
-------	------	-------



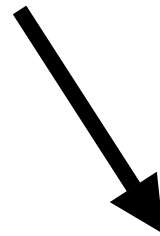
brucite	removed in solution
---------	---------------------

49 cm ³	116 g	173 g	129 g
--------------------	-------	-------	-------

$\Delta V \sim 0$



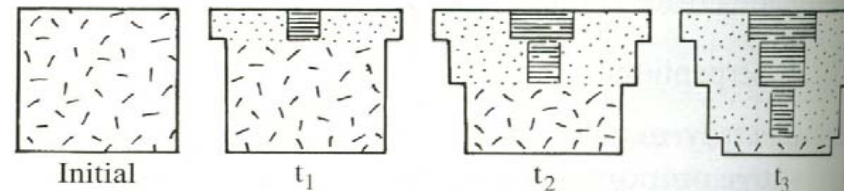
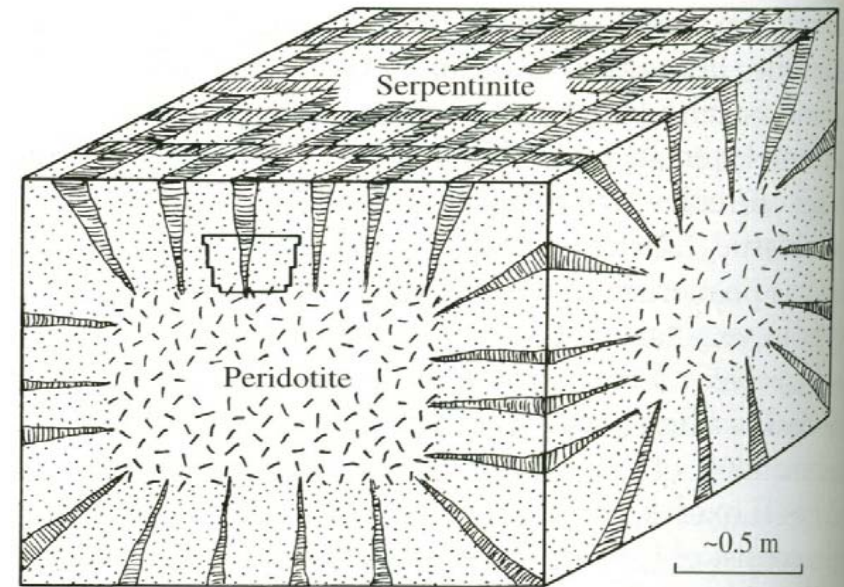
V tenké oceánské kůře může rozsáhlá serpentinizace na středooceánském hřbetě vyvolat výzdvih. Avšak nebyly pozorovány projevy expanze, ale není možné to říci s jistotou, protože velká tělesa serpentinitů porušují četné zlomy, které mohou souviset s vmístněním nebo s expanzí.



Všechno Mg a Si v oceánu může být produktem reakcí na středooceánských hřbetech. Avšak v různě intenzivně serpentinizovaných peridotitech je poměr $\text{SiO}_2 / (\text{MgO} + \text{CaO} + \text{MnO} + \text{NiO} + \text{FeO})$ zachován.

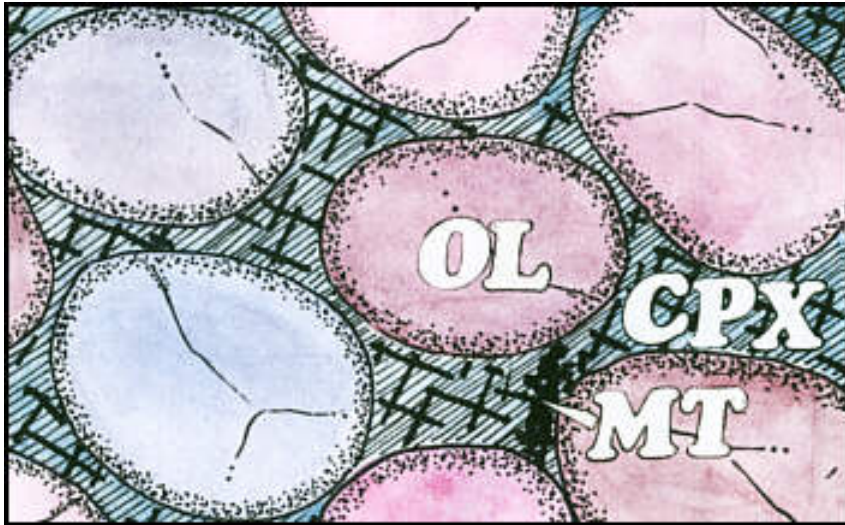
- serpentinity mají nižší hustotu oproti primárním dunitům a peridotitům (2,6-2,8 g/cm³ vs. 3,3 g/cm³)

- Ca je obsaženo v primárních Cpx ale není ve většině novotvořených fází → v otevřeném systému přechází do roztoků a migruje (rodingitizace)
- serpentinizace - značný přínos $H_2O \pm CO_2$ - výrazné zvýšení objemu hornin (pro zachování objemu je nutný značný odnos $MgO + SiO_2$ – k tomu však dochází patrně pouze částečně).
- Zdroje H_2O :
- a) pozdní granitické intruze bohaté vodou
- b) okolní horniny (nemet.- nízko met.)
- c) litologická rozhraní a zlomy

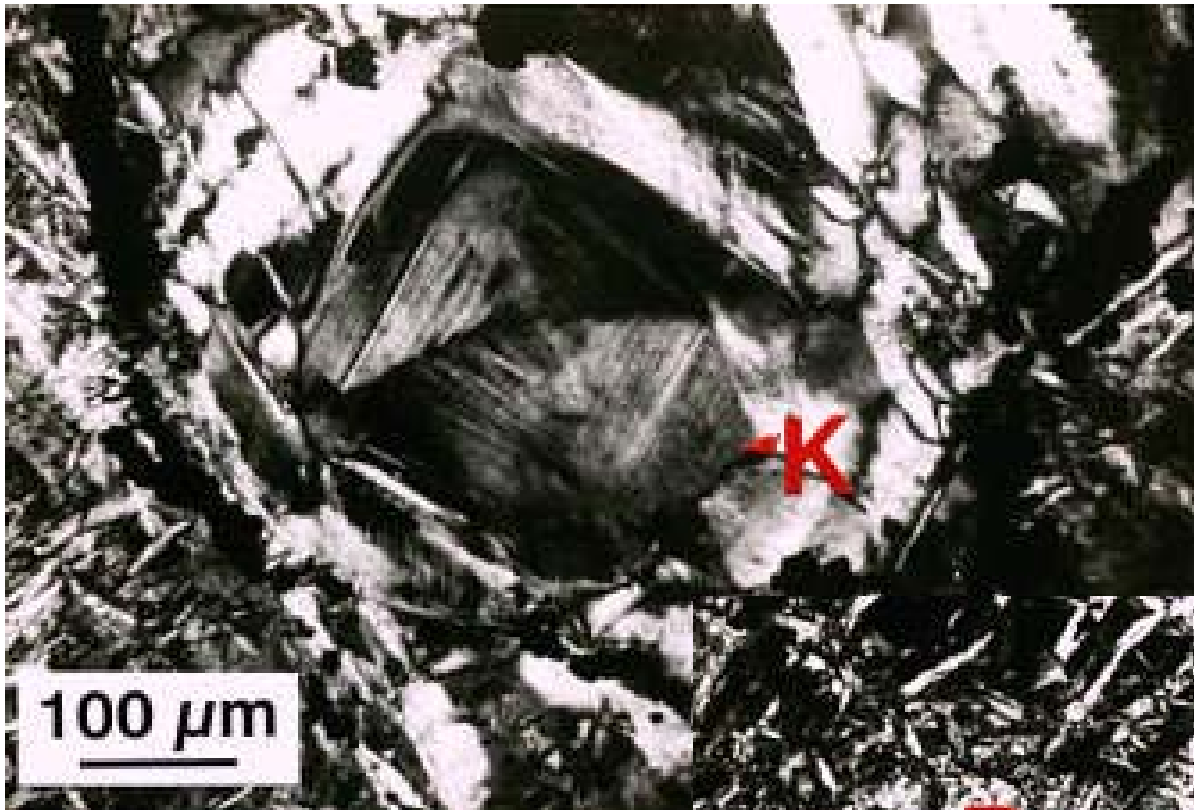


15.22 Kernel pattern and cross-fractures in serpentinized peridotite. Redrawn from O'Hanley (1992). As serpentinization penetrates into the core of peridotite, the accompanying volume increase produces tensile fractures in the surrounding serpentinite jacket. Progressive inward serpentinization creates outwardly wider chrysotile-filled fractures, as shown at successive steps in time t_1 , t_2 , and t_3 . Actual expansion and fracturing is more continuous. Fractures are oriented radially around the core, essentially perpendicular to the sharp core-rim interface, and, in a plane parallel to it, form a grid-pattern visible in top of the block.

Serpentinizace kumulátových ultrabazik

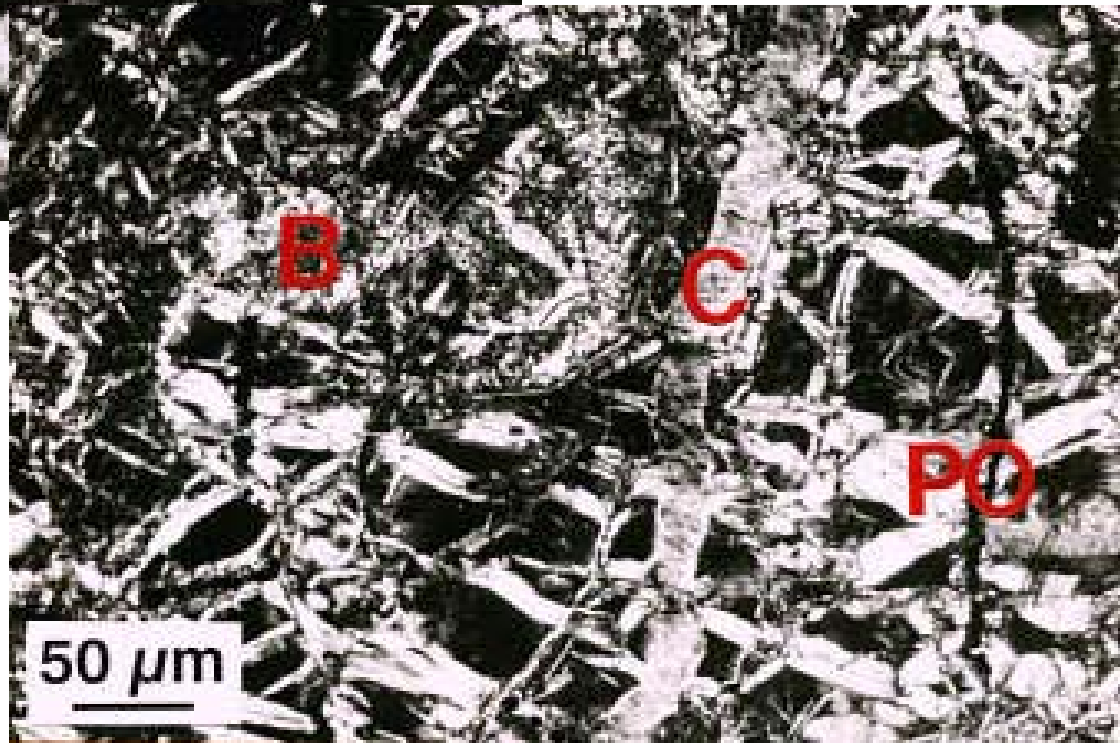


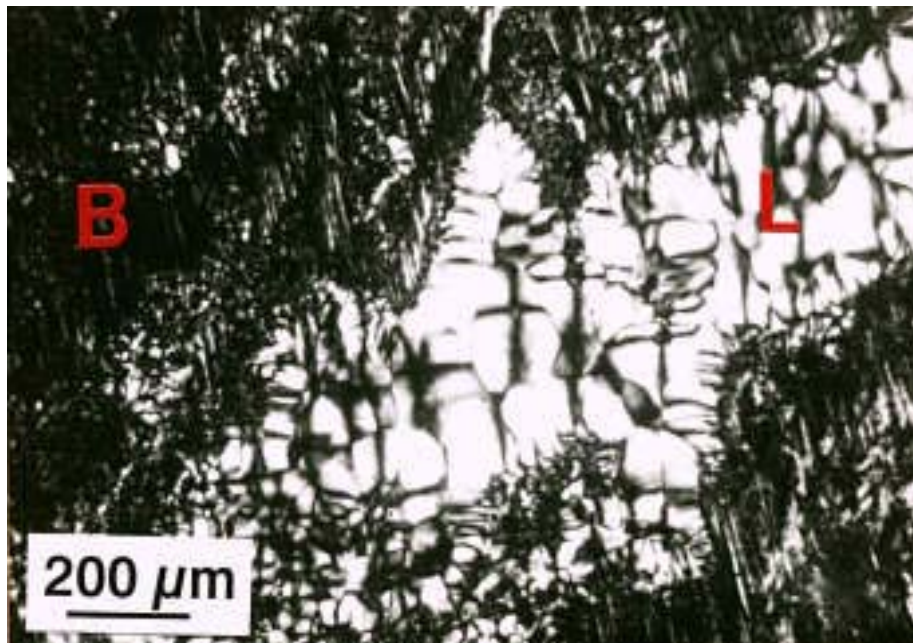
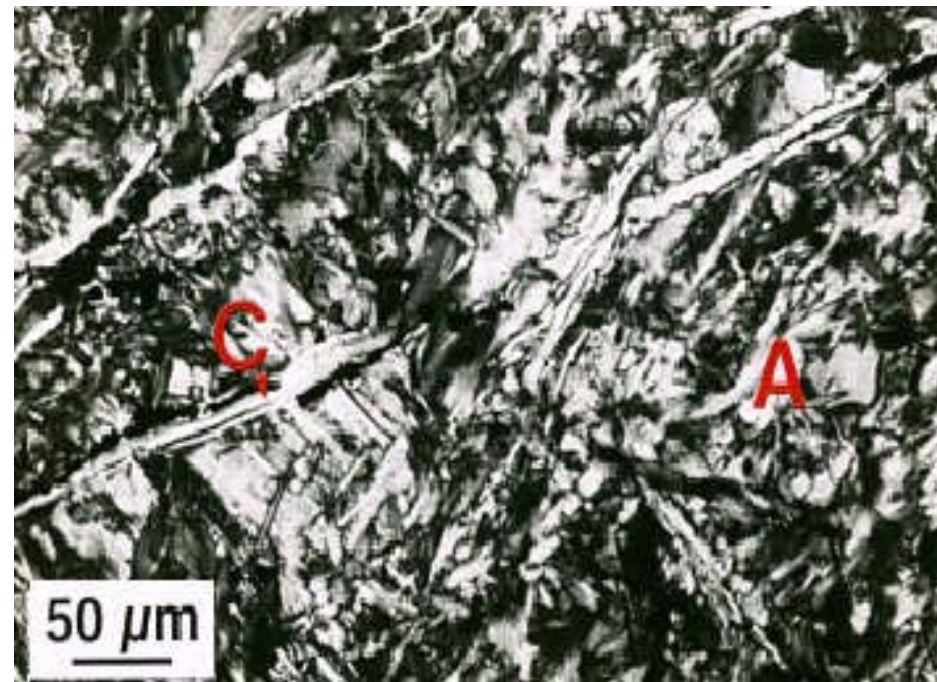
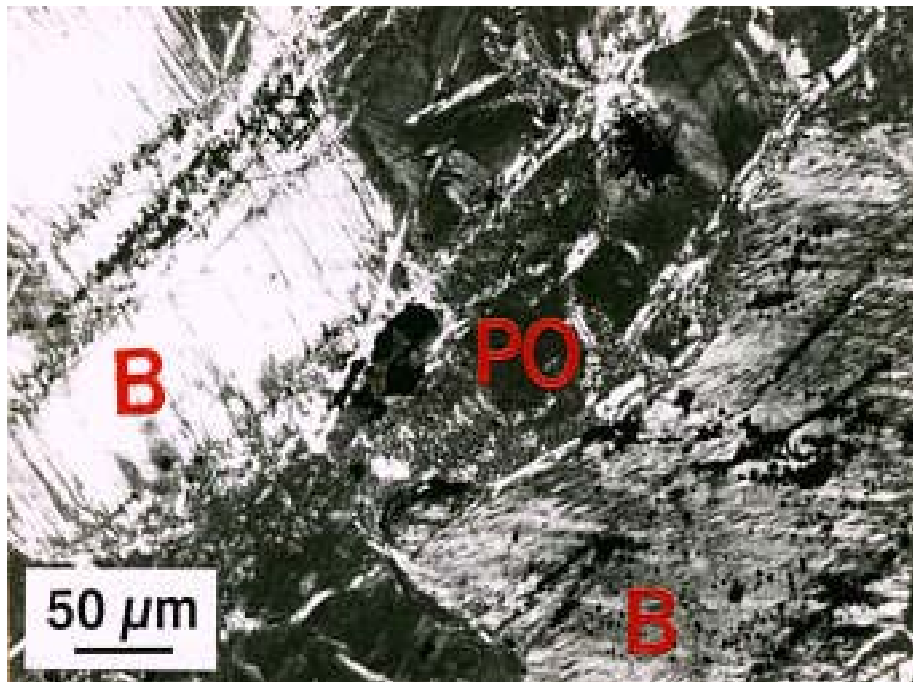
Ol = olivín, CPX = klinopyroxen, MT = magnetit, K = lizardit, A = antigorit, B = bastit (složený převážně s lizarditu), CHR = chrisotil



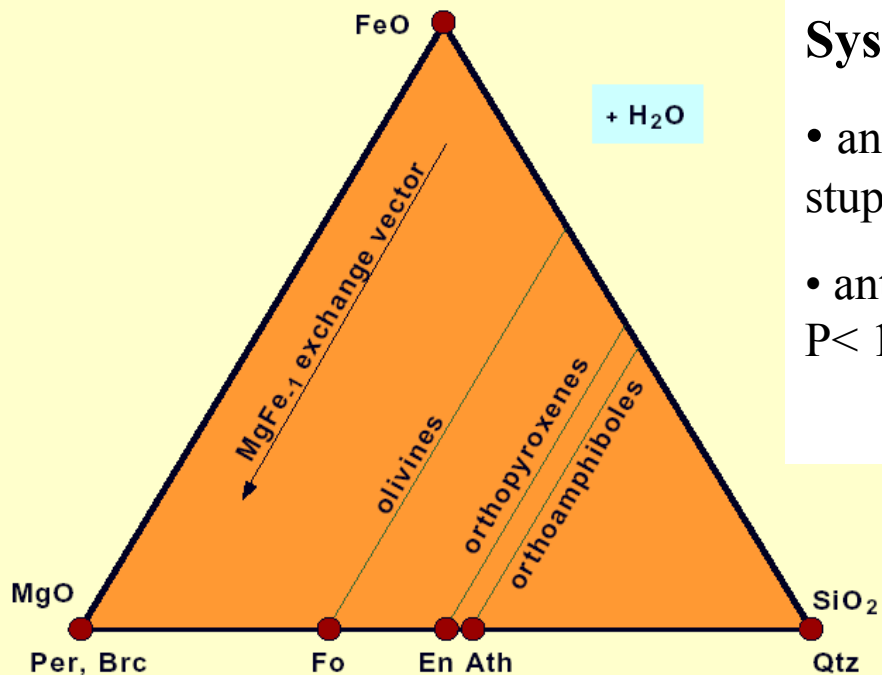
K = pseudomorfóza po olivínu lemovaná magnetitem

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





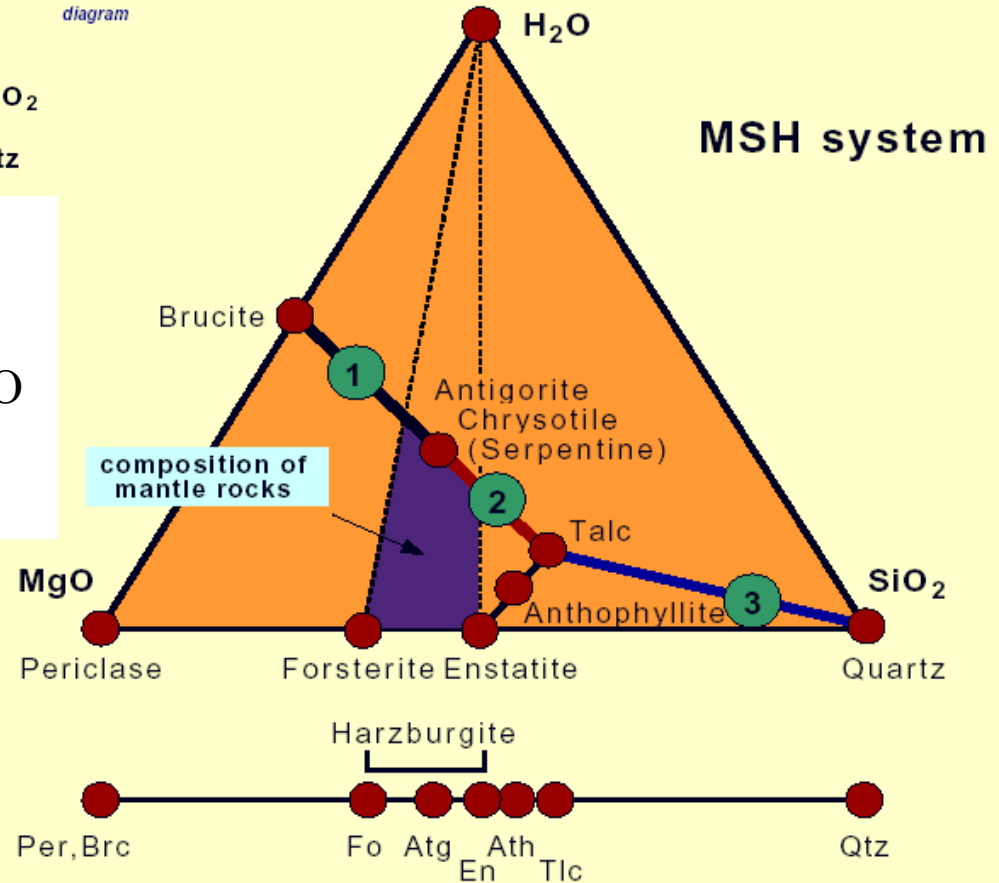
B = bastit (složený převážně s lizarditu), C = chrisotil, PO = pseudomorfóza po olivínu (lizardit), L = lizardit, A = antigorit



System $\text{SiO}_2\text{-MgO-H}_2\text{O}$

- antigorit stabilní do cca 500-600°C (nejvyšší stupeň z minerálů serp. skupiny)
- antofylit (Mg-Oamf) stabilní mezi cca 600-800° při $P < 12\text{kbar}$

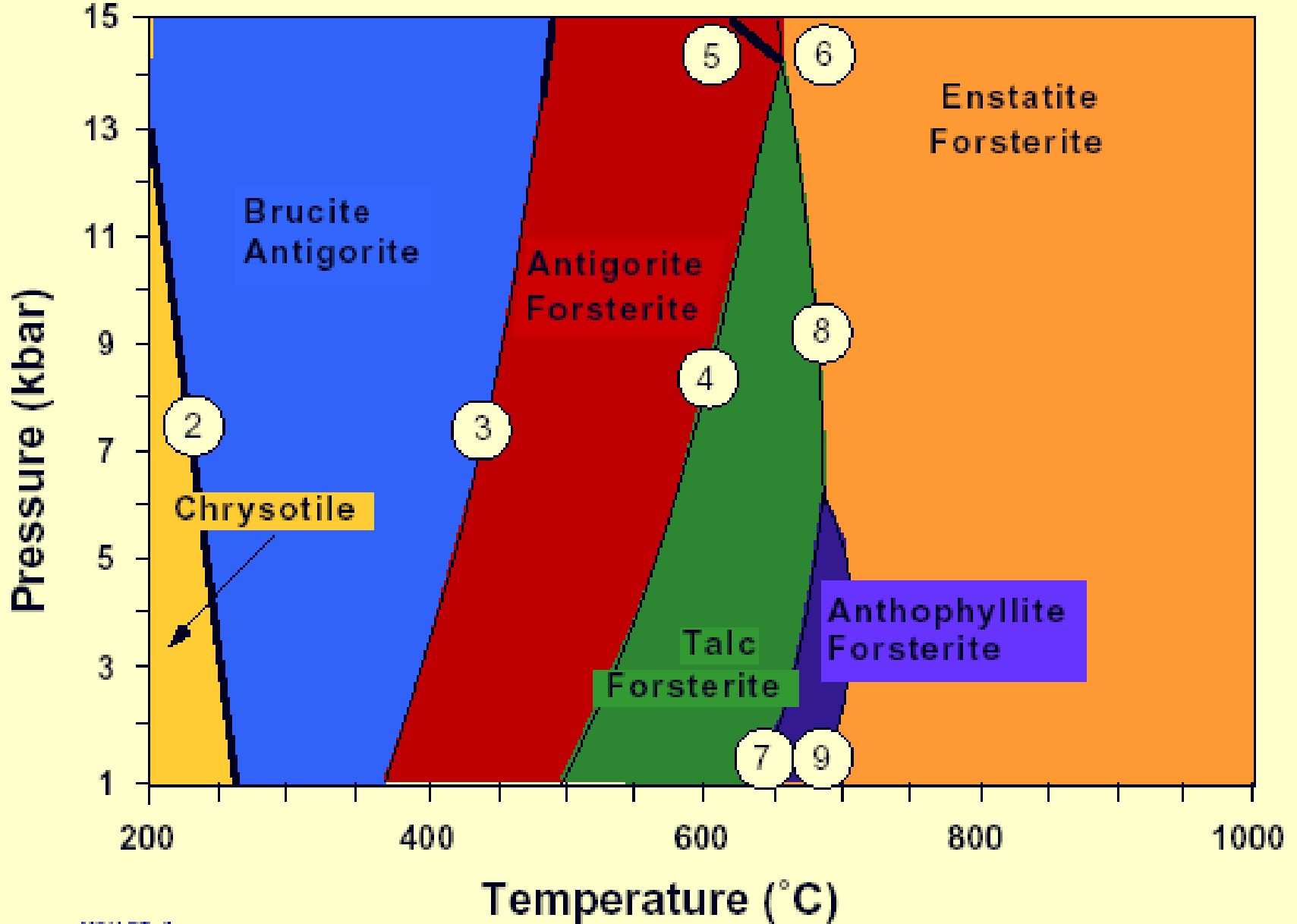
diagram



- mastek je stabilní i za vysokých teplot $\sim 750^\circ\text{C}$, a rozpadá se až v granulitové facii
- progresivní metamorfóza – uvolňování H_2O
- hlavní substituce Mg-Fe
- hydratační reakce

olivine normative rocks

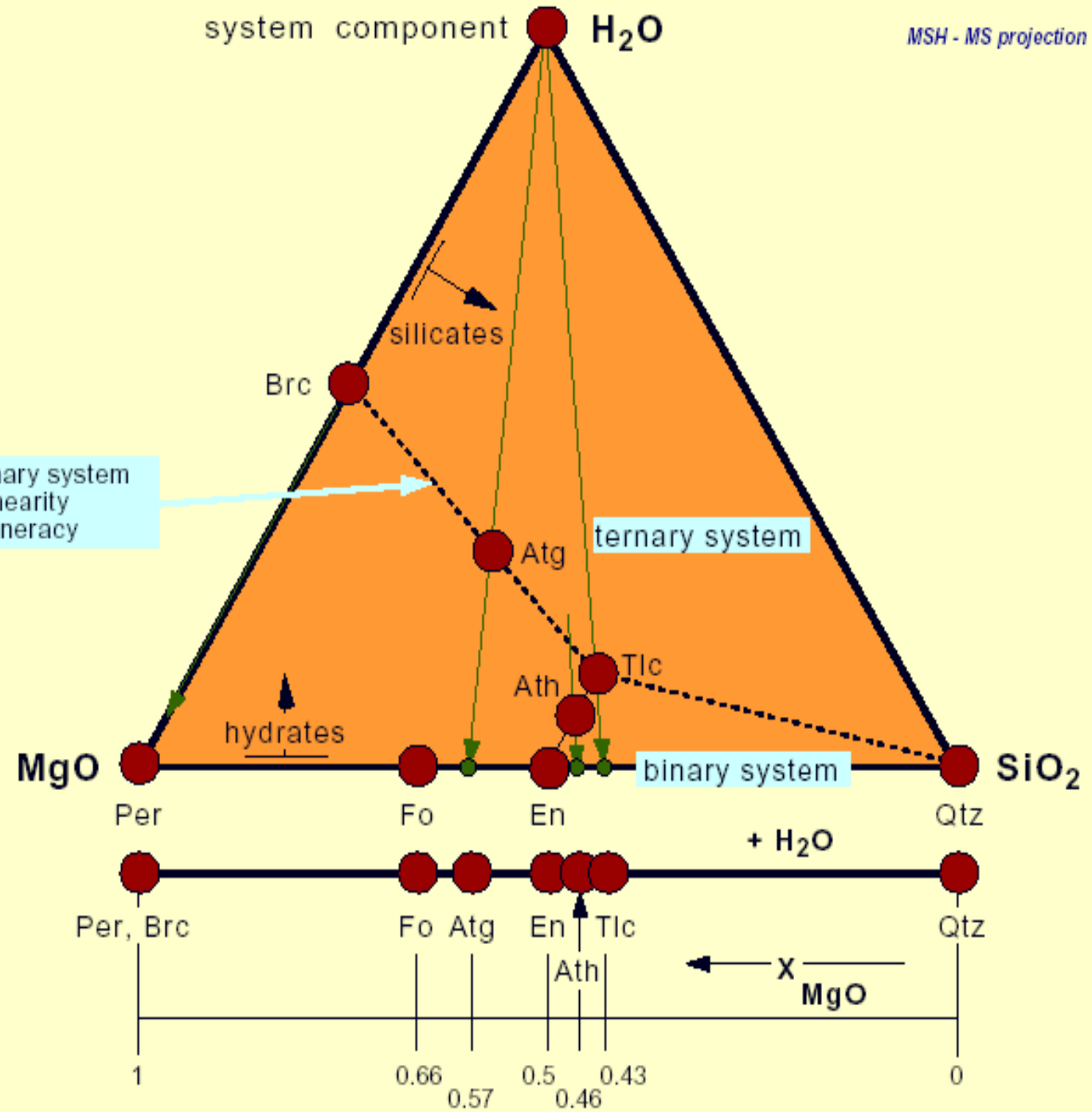
MSH subsystem, harzburgite system

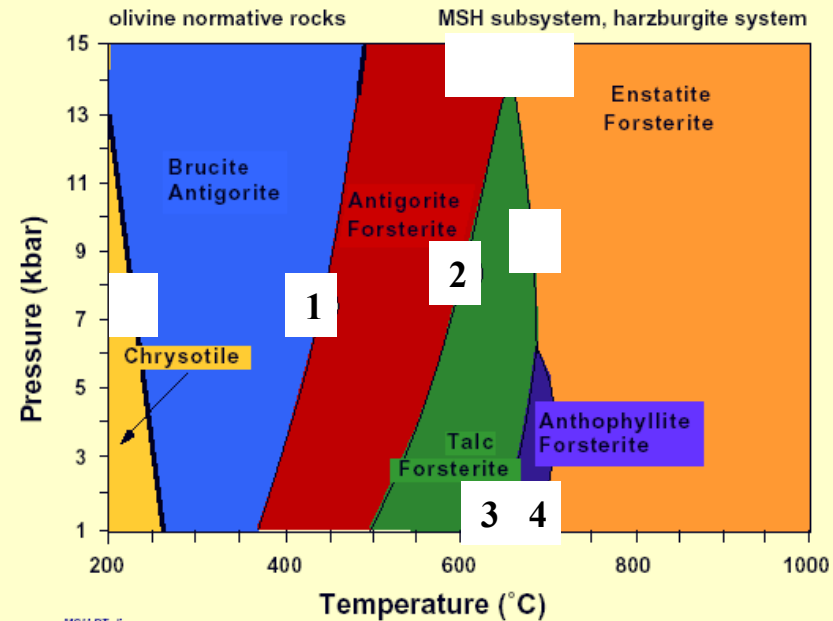


system component H_2O

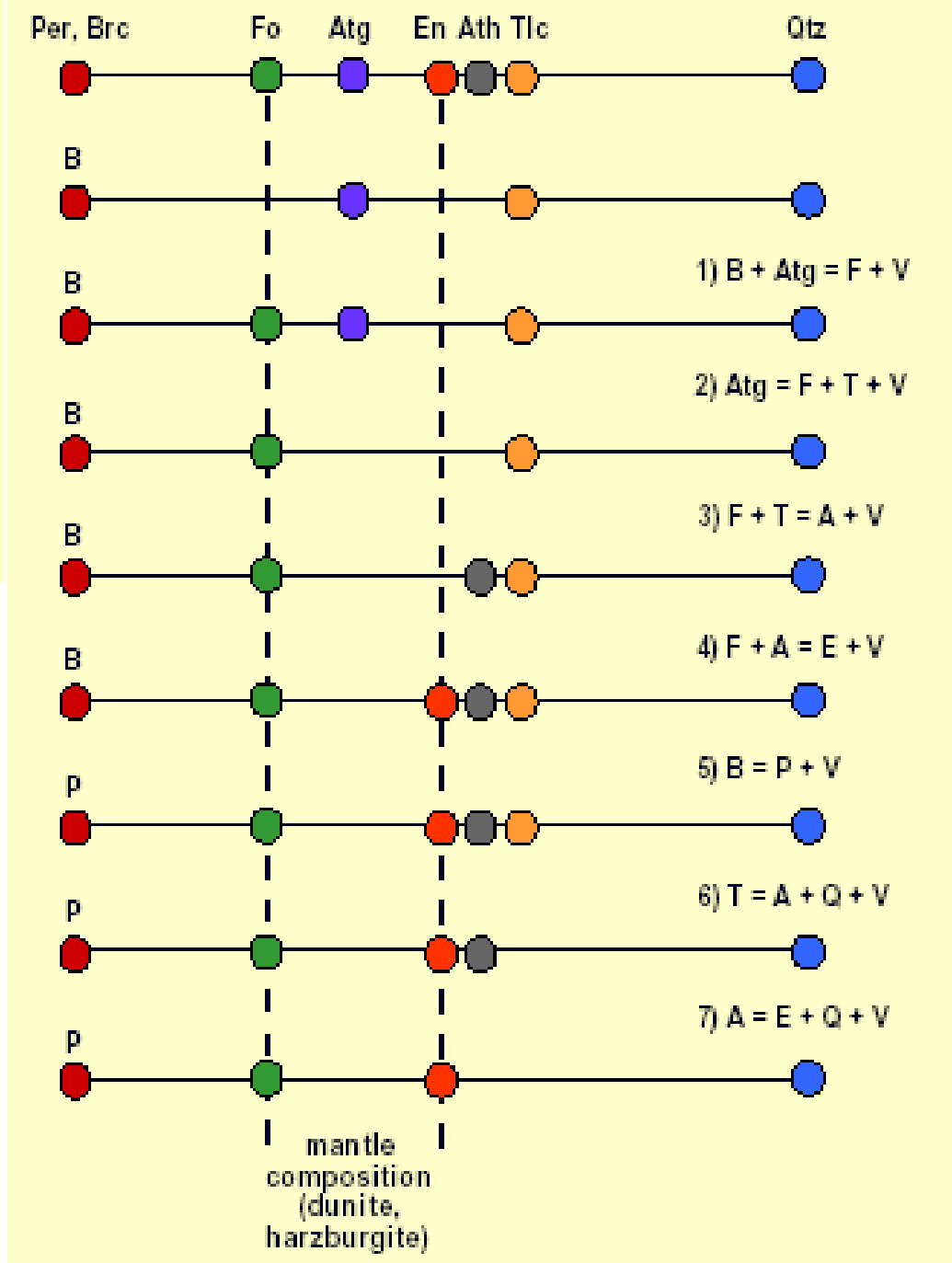
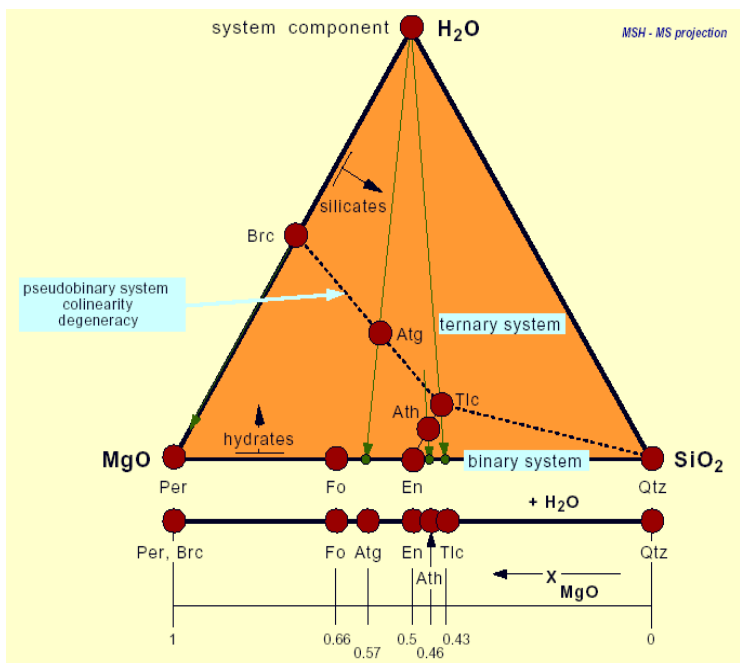
MSH - MS projection

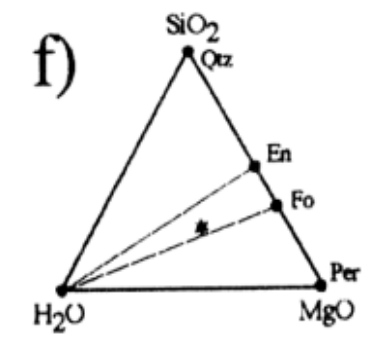
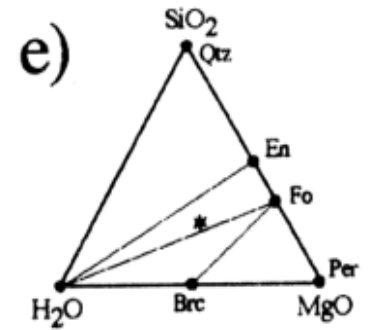
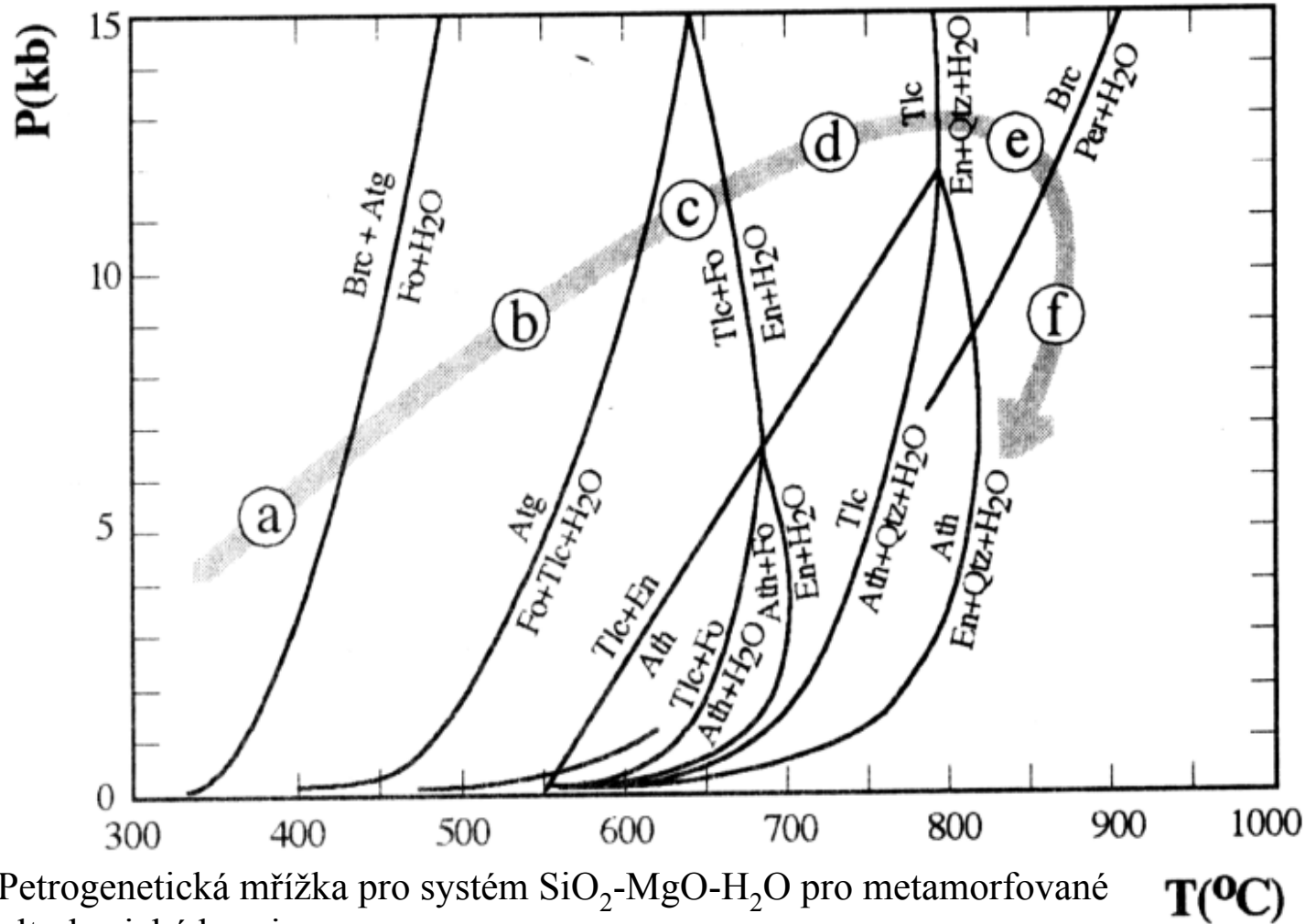
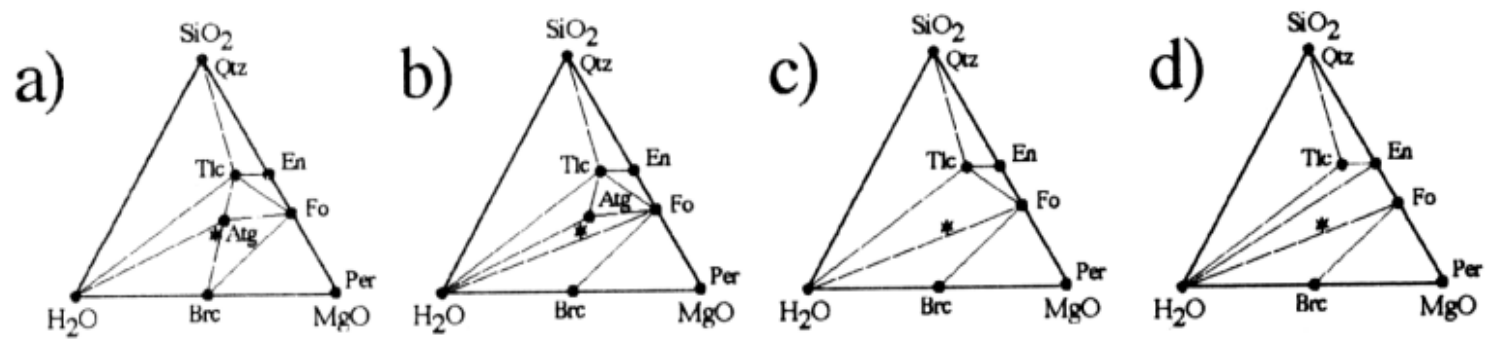
pseudobinary system
colinearity
degeneracy





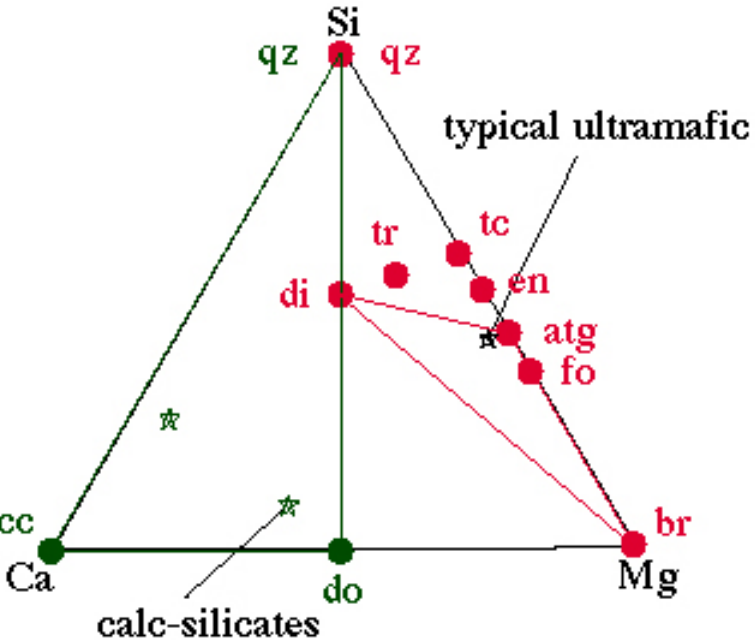
MSH PT-diagram





Petrogenetická mřížka pro systém $\text{SiO}_2\text{-MgO-H}_2\text{O}$ pro metamorfované ultrabazické horniny

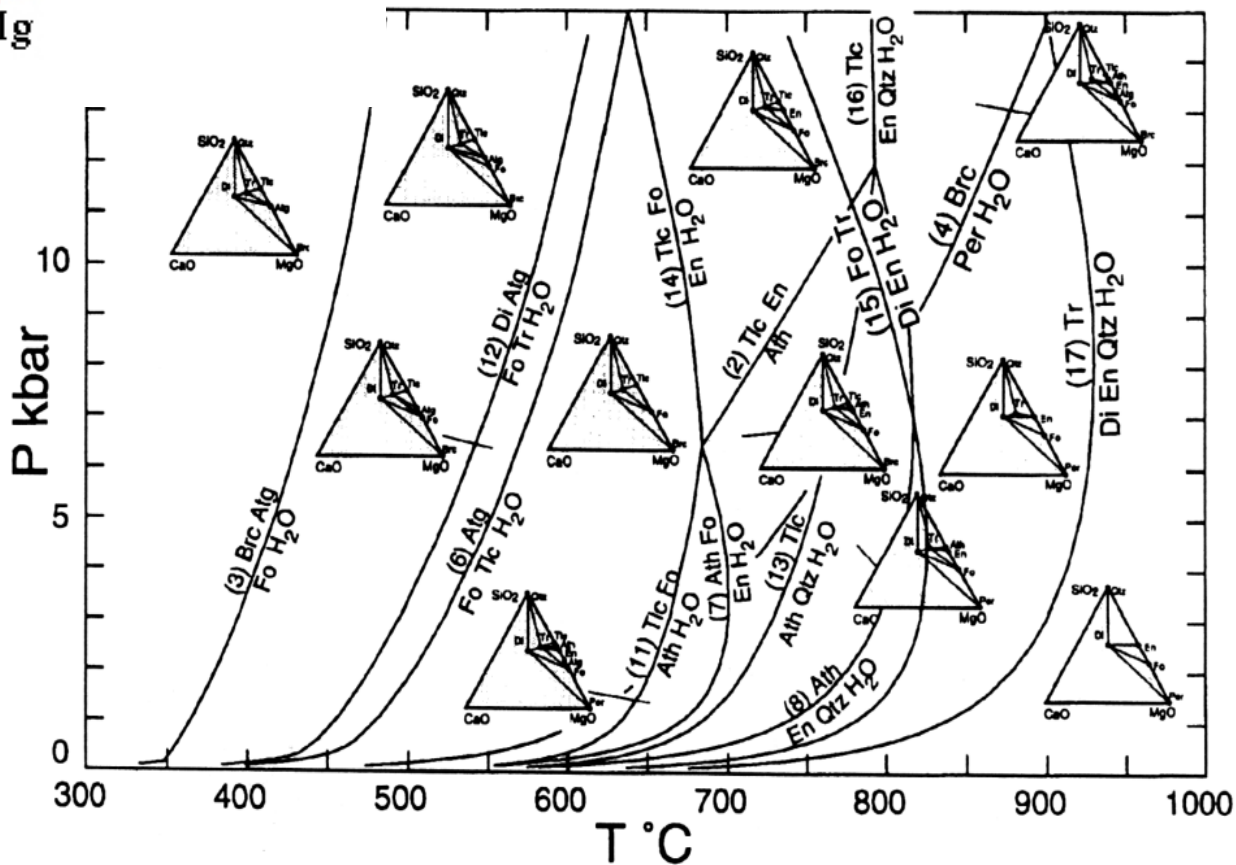
$T(^{\circ}\text{C})$



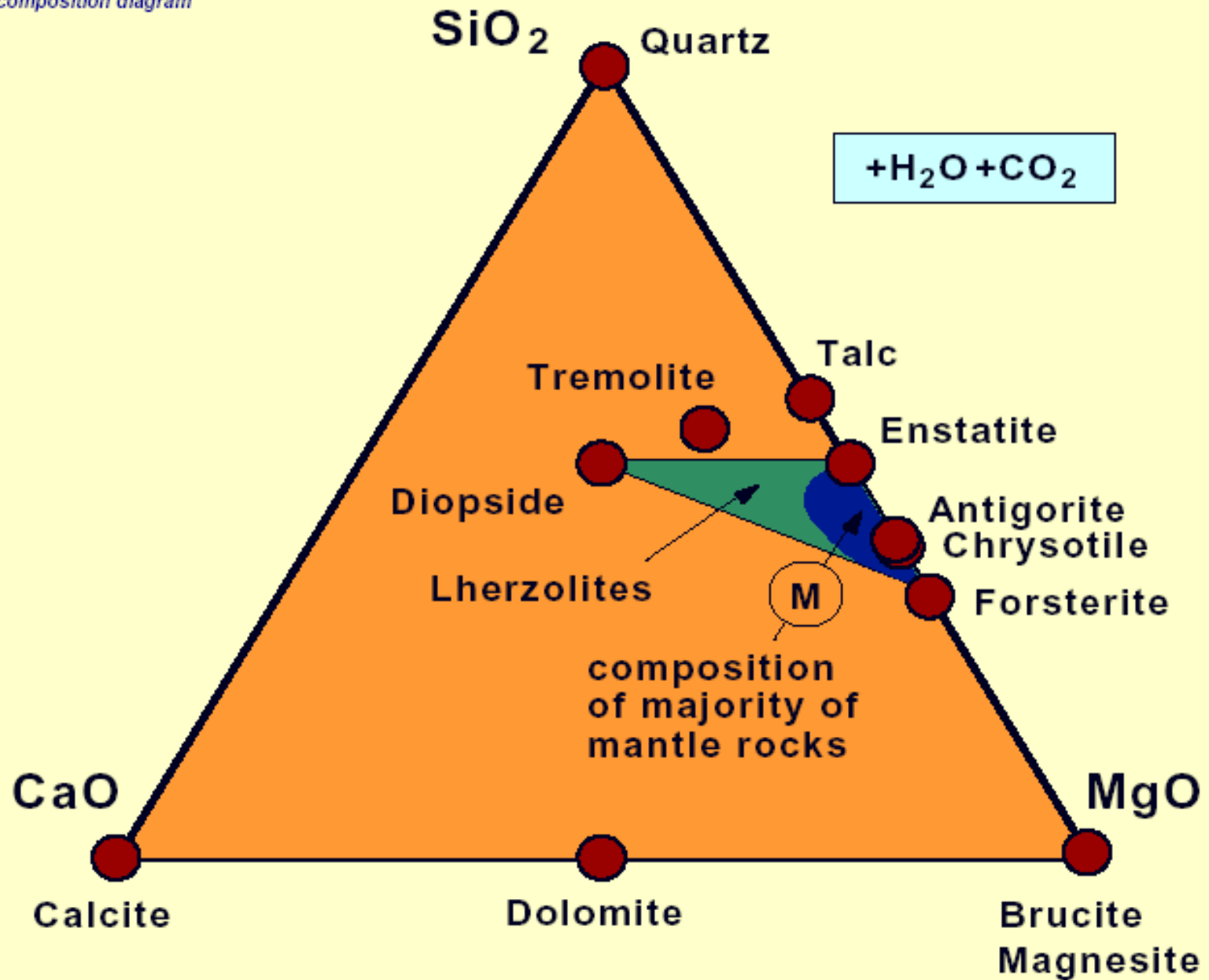
System $\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO-H}_2\text{O}$

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

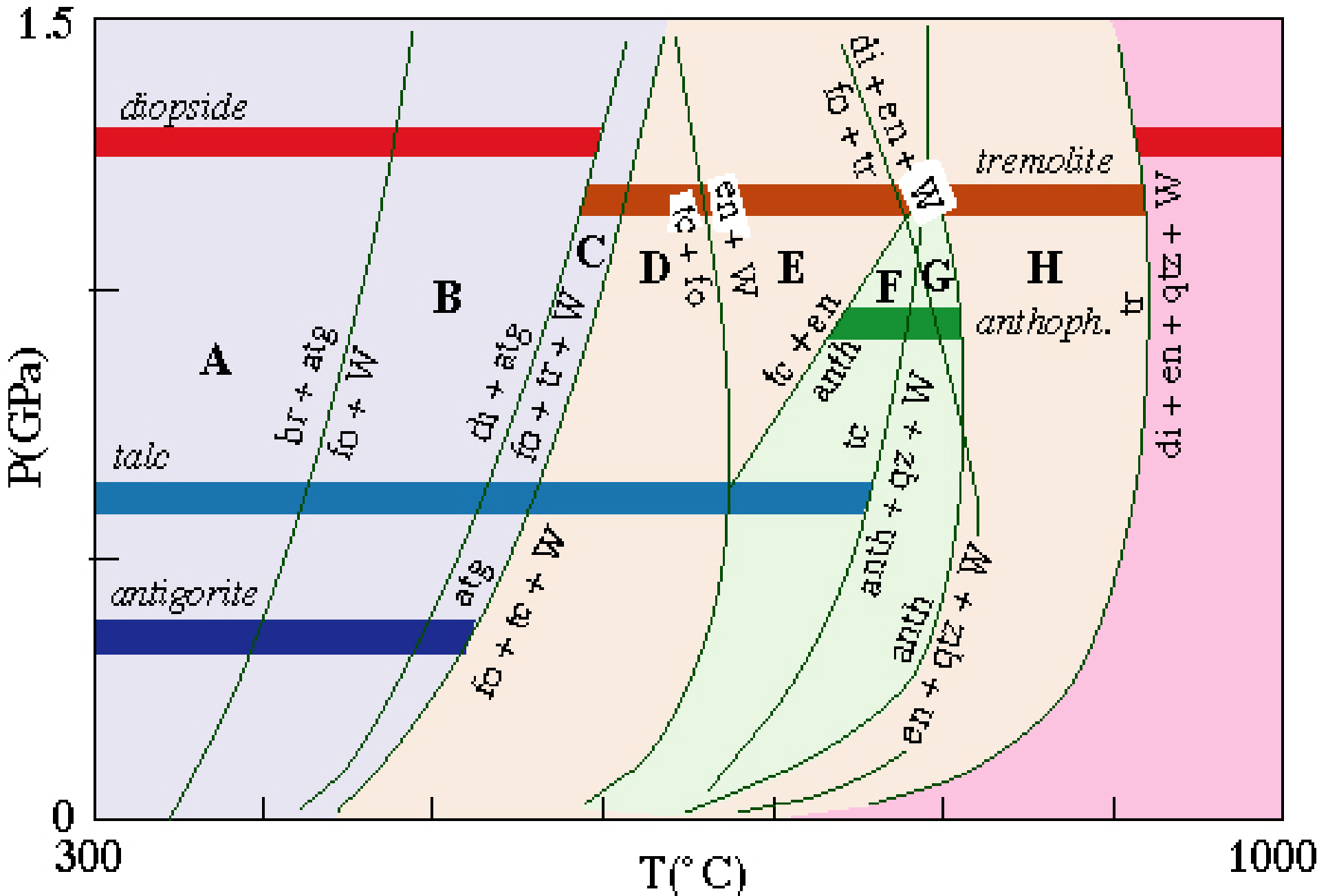
- projekce z pozice H_2O – jen asociace koexistující s čistou vodní fluidní fází ($a_{\text{H}_2\text{O}}=1$)

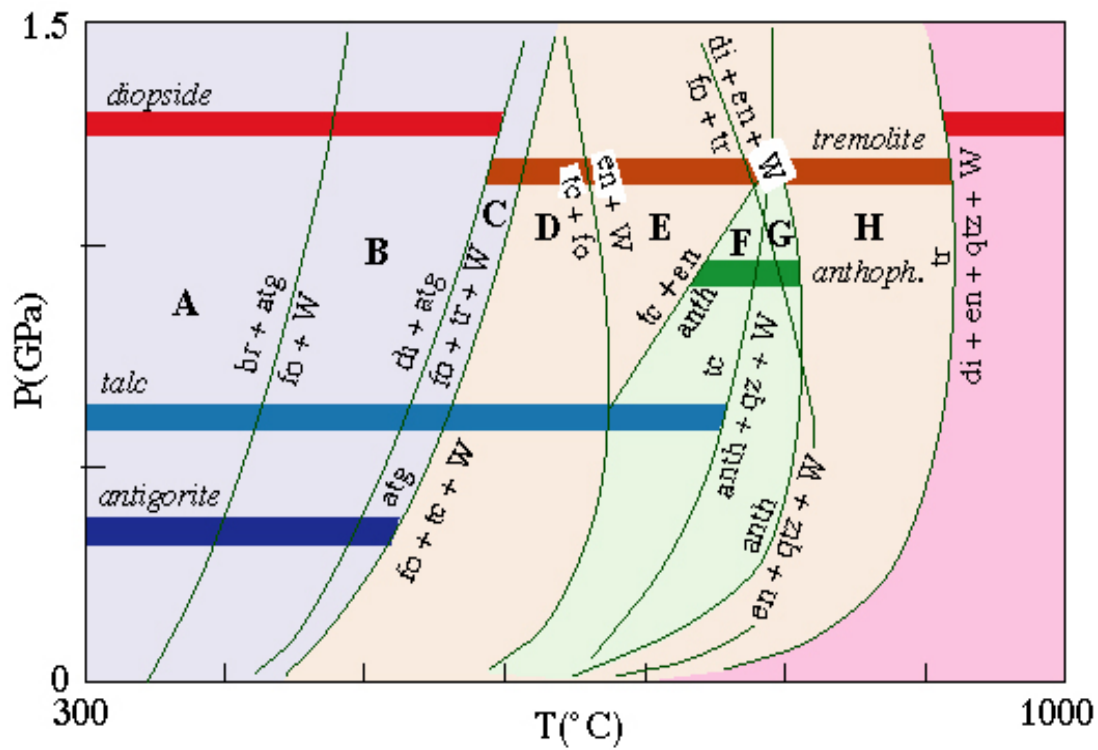
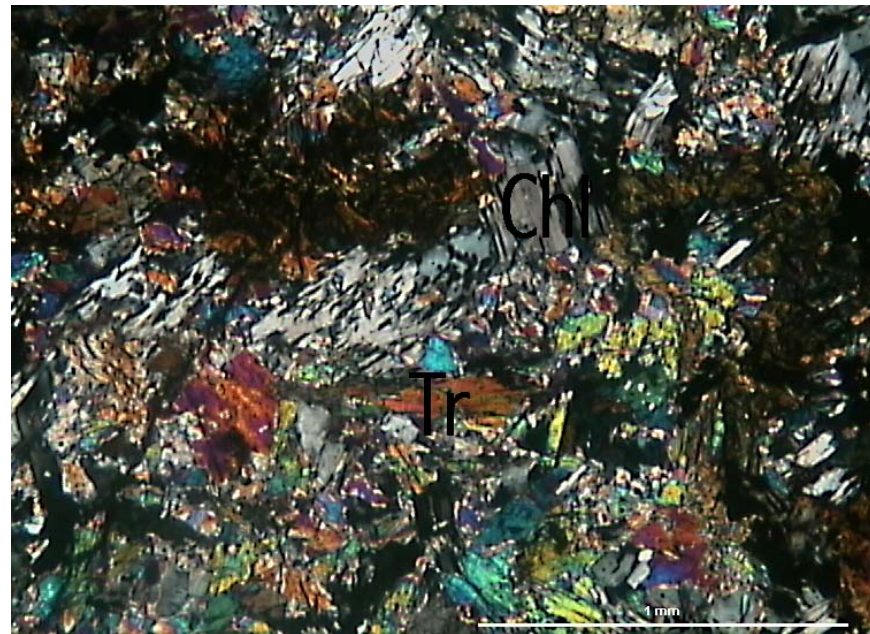
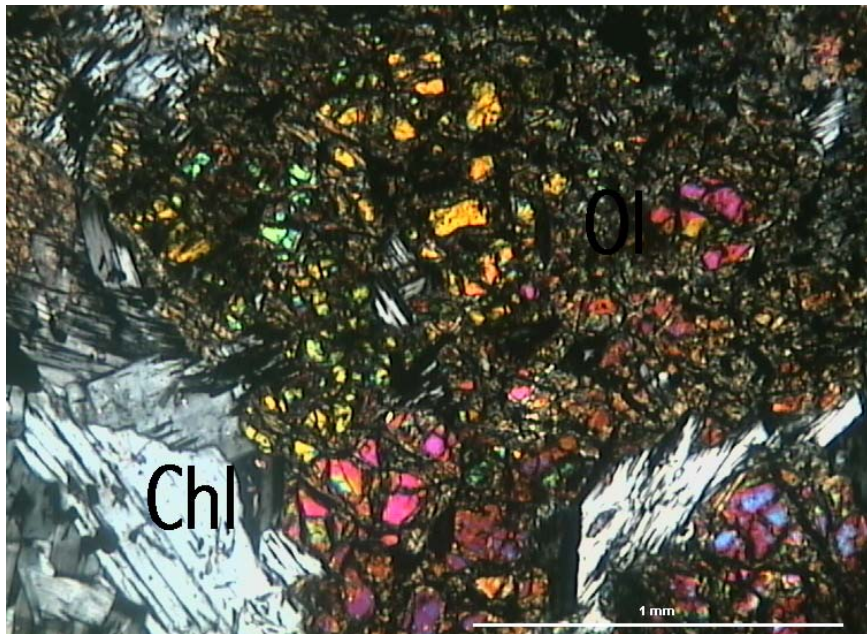


Zjednodušená CMSH mřížka pro ultramafické horniny (sestaveno na základě termodynamických databází Bernana, Konopásek et al. 1998 převzato ze Speara 1993)

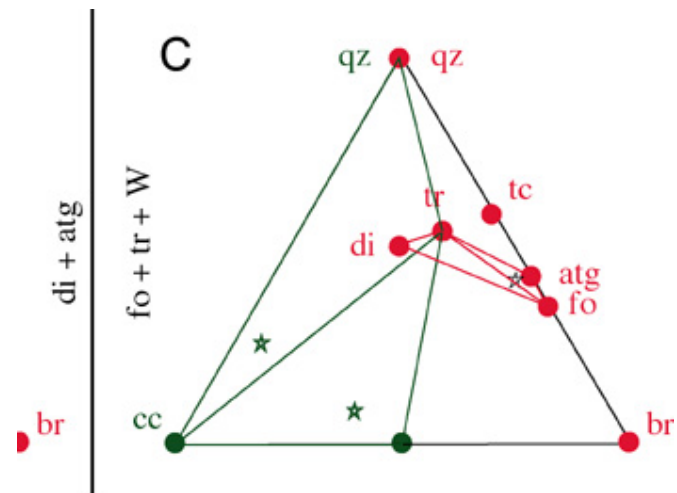


Prográdní metamorfóza ultrabazických hornin v systému CMSH





C) Tr + Atg + Fo + Chl



Význam hliníku v systému ultrabazických hornin

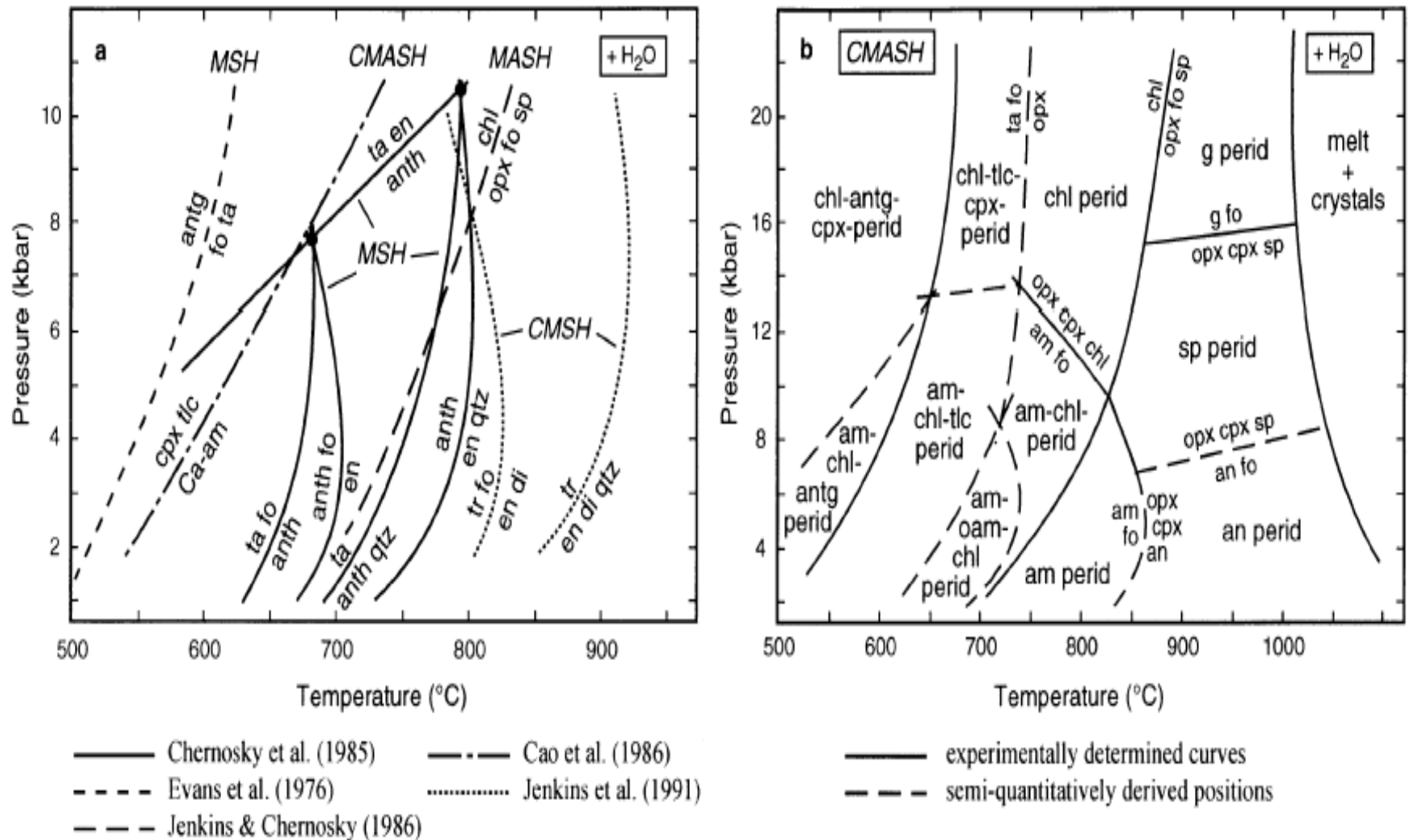
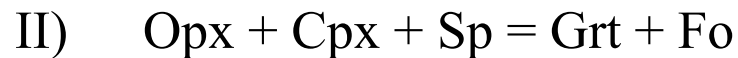
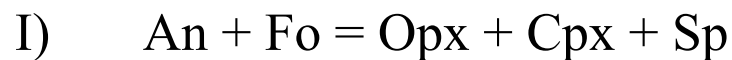
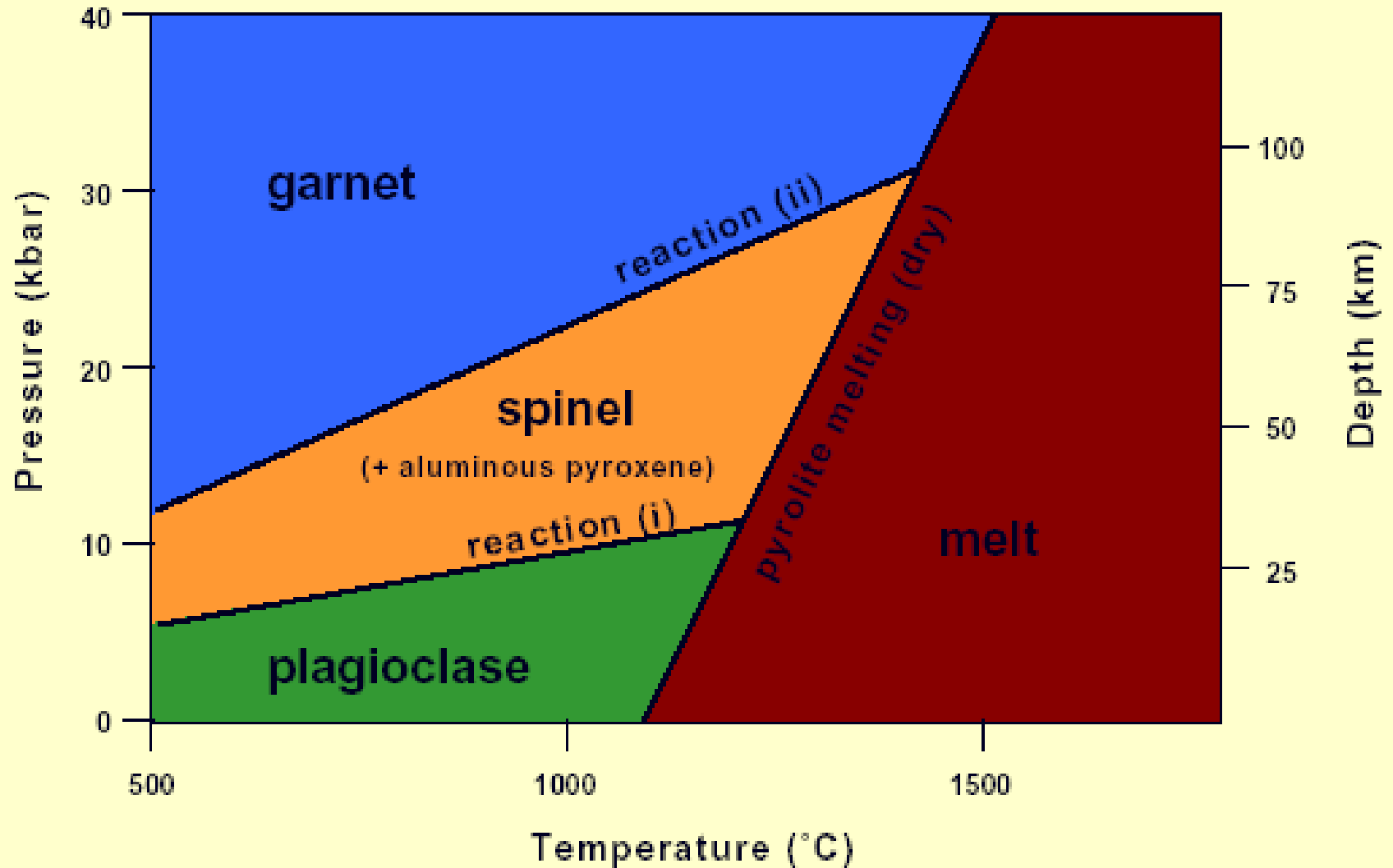
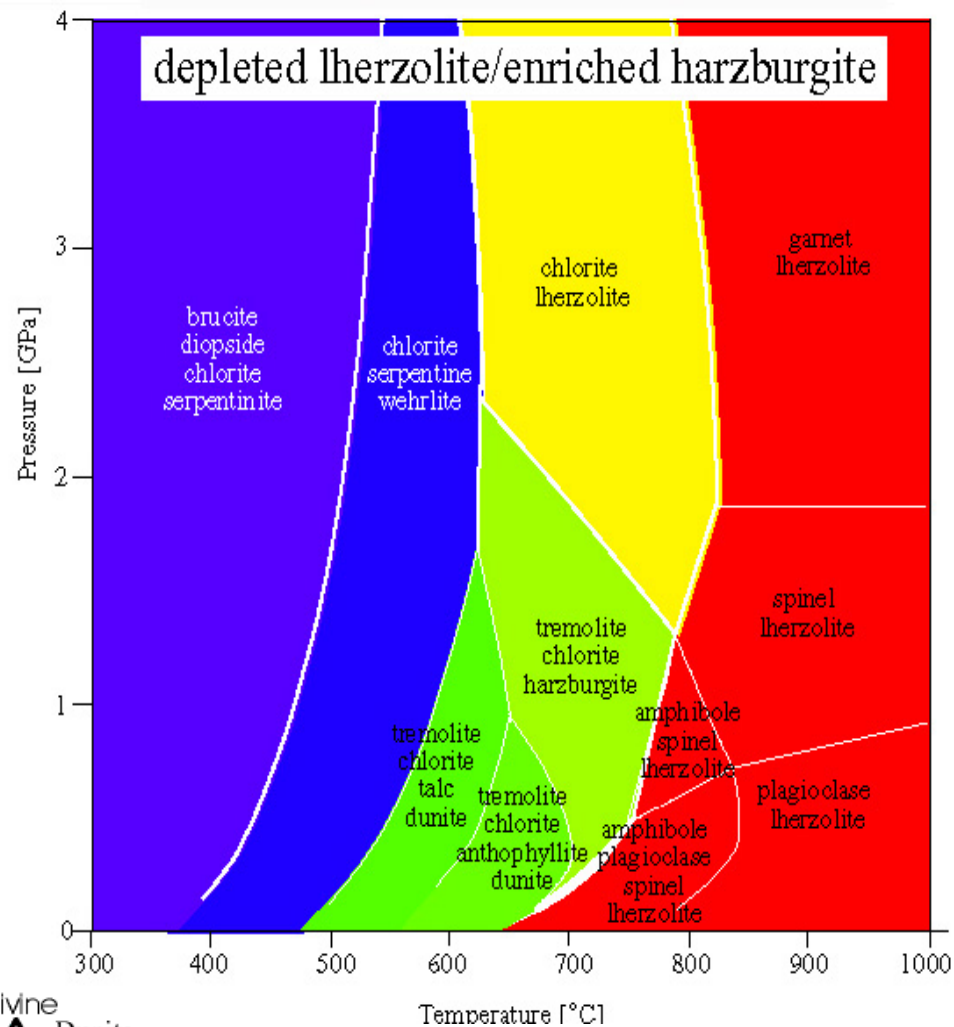
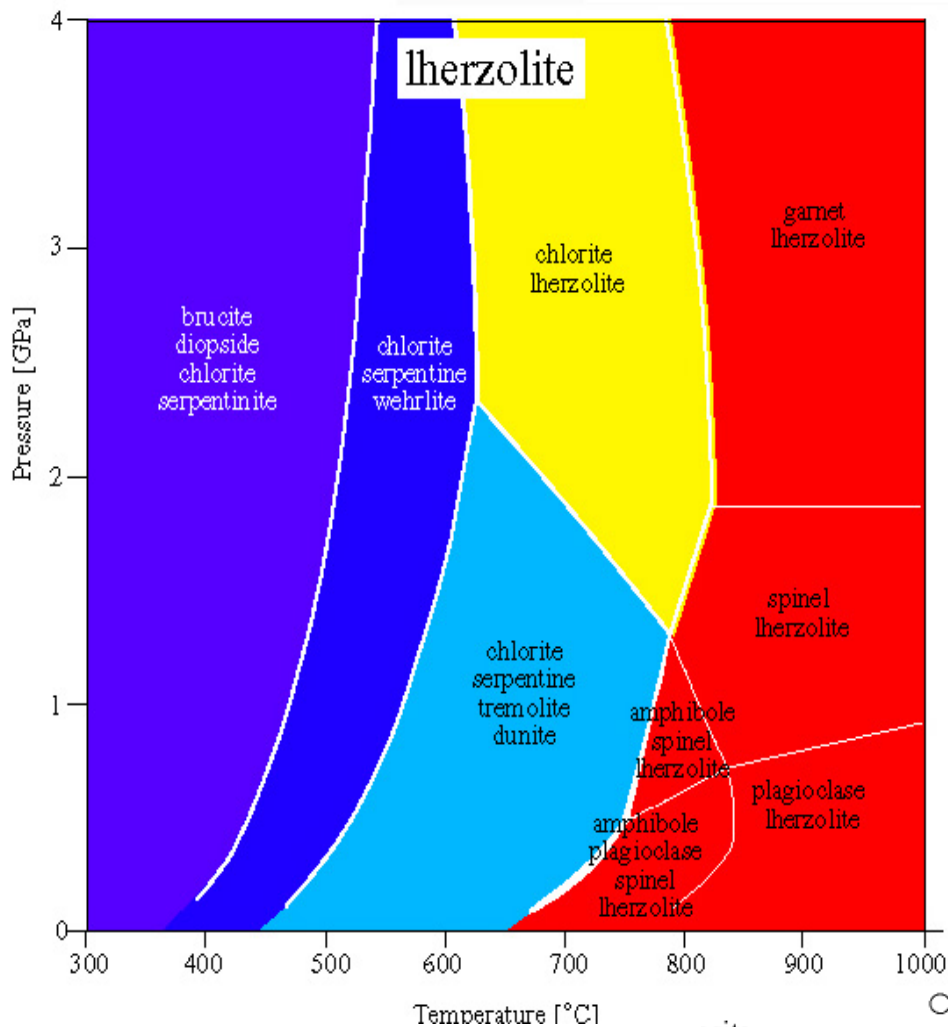


Fig. 2a Compilation of experimental data in various model systems. **b** Petrogenetic grid for peridotites of Jenkins (1981). *antg* antigorite; *g* garnet; *perid* peridotite; *qtz* quartz. For other abbreviations see

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

stable aluminous phase in lherzolite



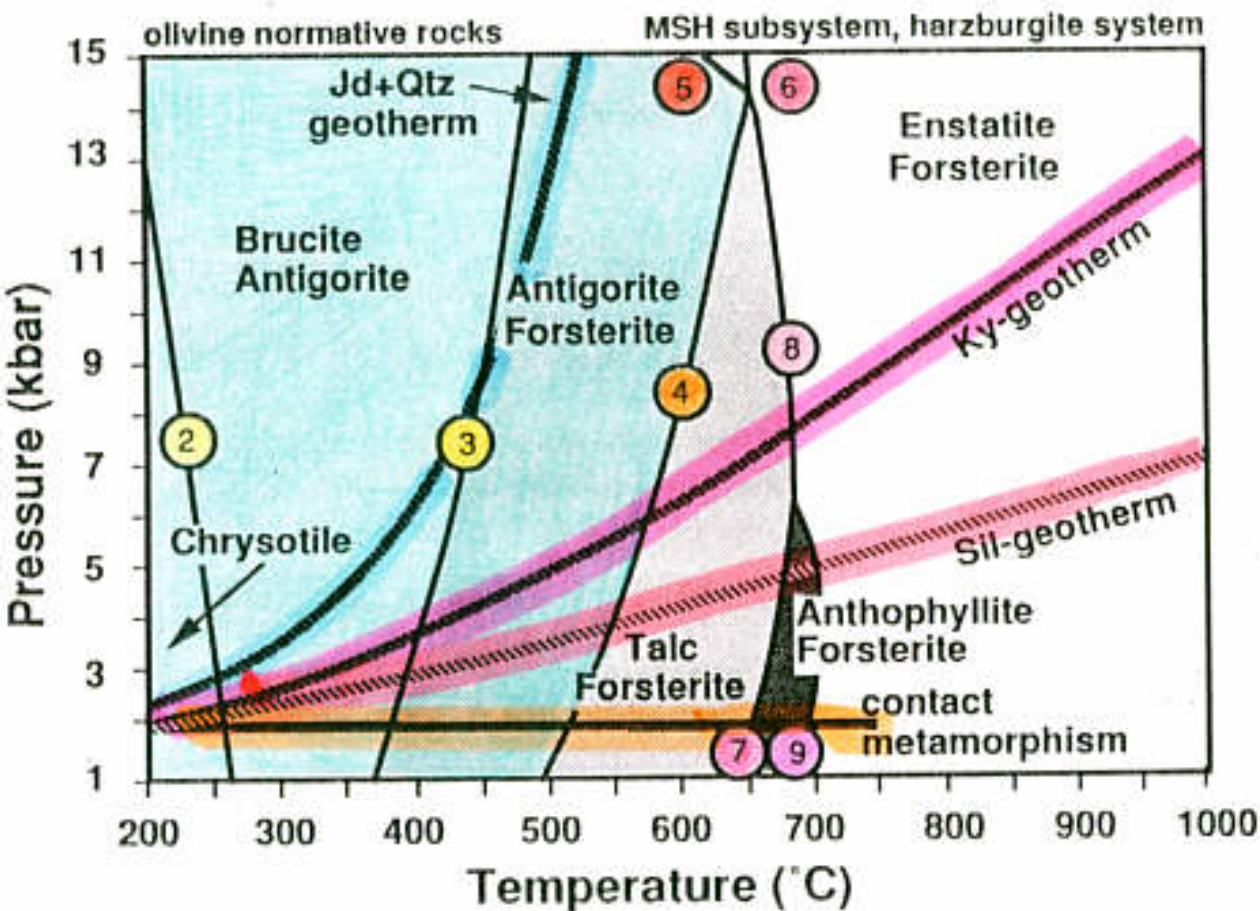


Stabilita fází v ultrabazických horninách závisí také na dalších složkách jako je například Fe

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		$Mg_2Mg[Si_4]O_{10}(OH)_2$ $Fe_2Fe[Si_4]O_{10}(OH)_2$ $Mg_2Al[Si_3Al]O_{10}(OH)_2$
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	$FeAl_2O_4$

Metamorfóza

ultrabazických hornin ve facii zelených a modrých břidlic



➤ 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

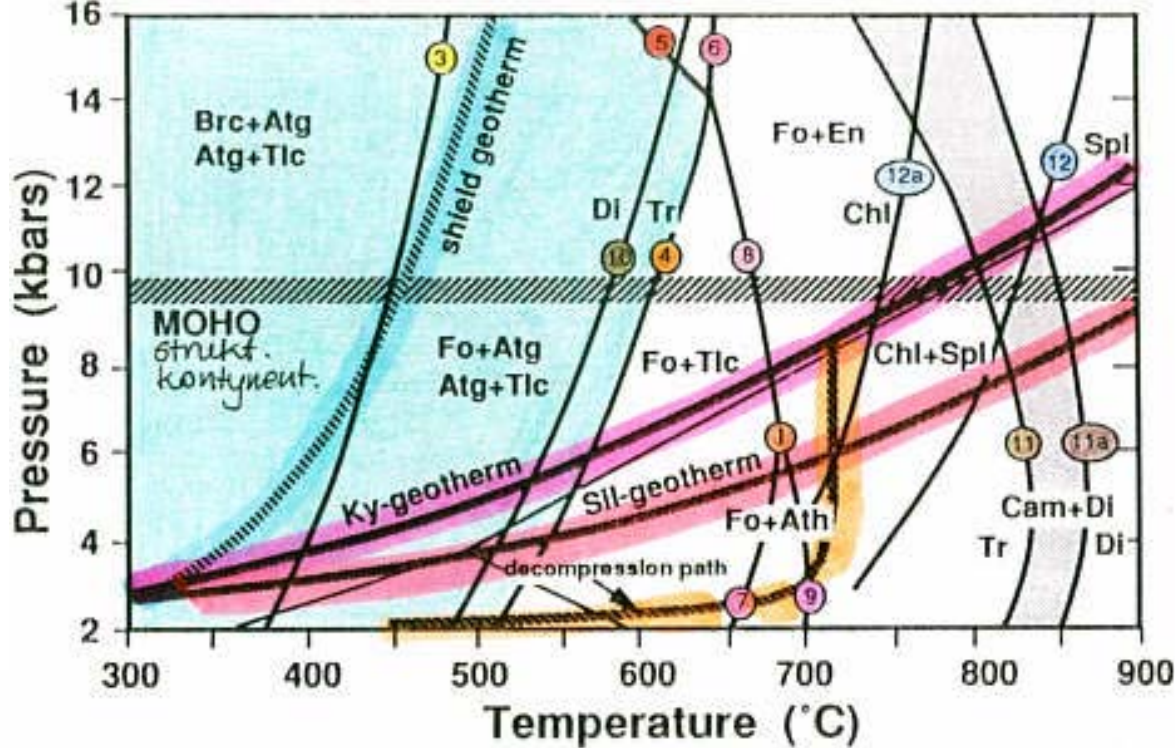
facie zelených a modrých břidlic

MSH



(1)	15 Clt + Tlc ⇒	Atg	First antigorite
(2)	17 Clt ⇒	Atg + 3 Brc	Last chrysotile
(3)	Atg + 20 Brc ⇒	34 Fo + 51 H ₂ O	First forsterite (low-T limit of Fo)
(4)	Atg ⇒	18 Fo + 4 Tlc + 27 H ₂ O	Last antigorite (high-T limit for serpentinites)
(5)	Atg + 14 Tlc ⇒	90 En + 55 H ₂ O	
(6)	Atg ⇒	14 Fo + 20 En + 31 H ₂ O	
(7)	9 Tlc + 4 Fo ⇒	5 Ath + 4 H ₂ O	Tlc-out (at lower P)
(8)	Tlc + Fo ⇒	5 En + H ₂ O	Tlc-out (at higher P)
(9)	Ath + Fo ⇒	9 En + H ₂ O	Anthophyllite-out

Metamorfóza ultrabazických hornin ve facii amfibolitové a eklogitové



MSH



①	15 Ctl+Tlc ⇒	Atg
②	17 Ctl ⇒	Atg+3 Brc
③	Atg+20 Brc ⇒	34 Fo+51 H ₂ O
④	Atg ⇒	18 Fo+4 Tlc+27 H ₂ O
⑤	Atg+14 Tlc ⇒	90 En+55 H ₂ O
⑥	Atg ⇒	14 Fo+20 En+31 H ₂ O
⑦	9 Tlc+4 Fo ⇒	5 Ath+4 H ₂ O
⑧	Tlc+Fo ⇒	5 En+H ₂ O
⑨	Ath+Fo ⇒	9 En+H ₂ O

First forsterite (low-T limit of Fo)
Last antigorite (high-T limit for serpentinites)

CMSH

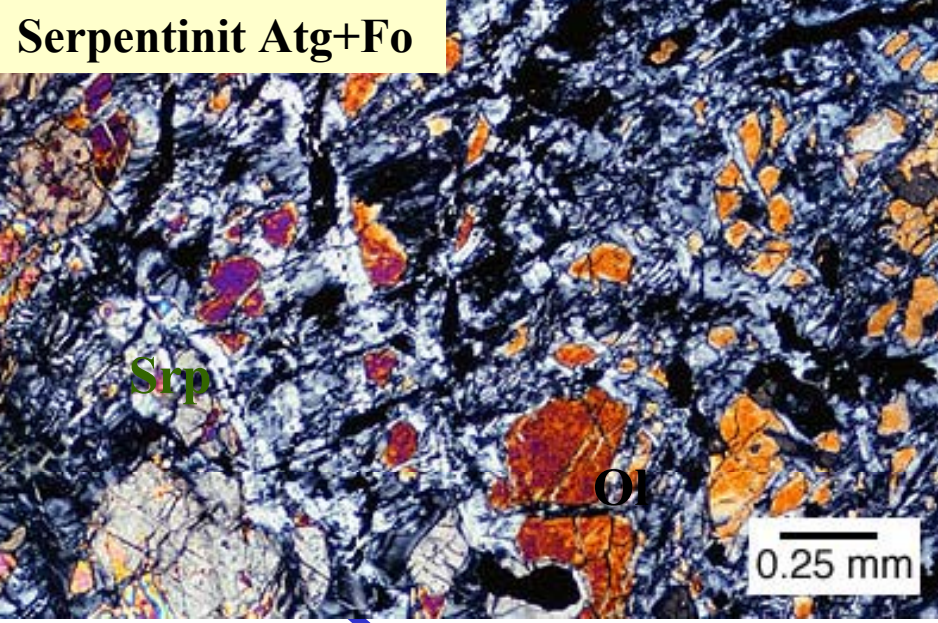
⑩	Atg+8 Di ⇒	18 Fo+4 Tr+27 H ₂ O	Upper limit for Di in serpentinites
⑪	Tr+Fo ⇒	5 En+2 Di+H ₂ O	Tremolite-out, Iherzolite assemblage

MASH

⑫	Chl ⇒	Fo+2 En+Spl+4 H ₂ O	Chlorite-out
---	-------	--------------------------------	--------------

⑪a	Amphibole + olivine ⇒	orthopyroxene + clinopyroxene + H ₂ O
⑫a	Chlorite ⇒	olivine + orthopyroxene + Fe-Mg spinel + H ₂ O

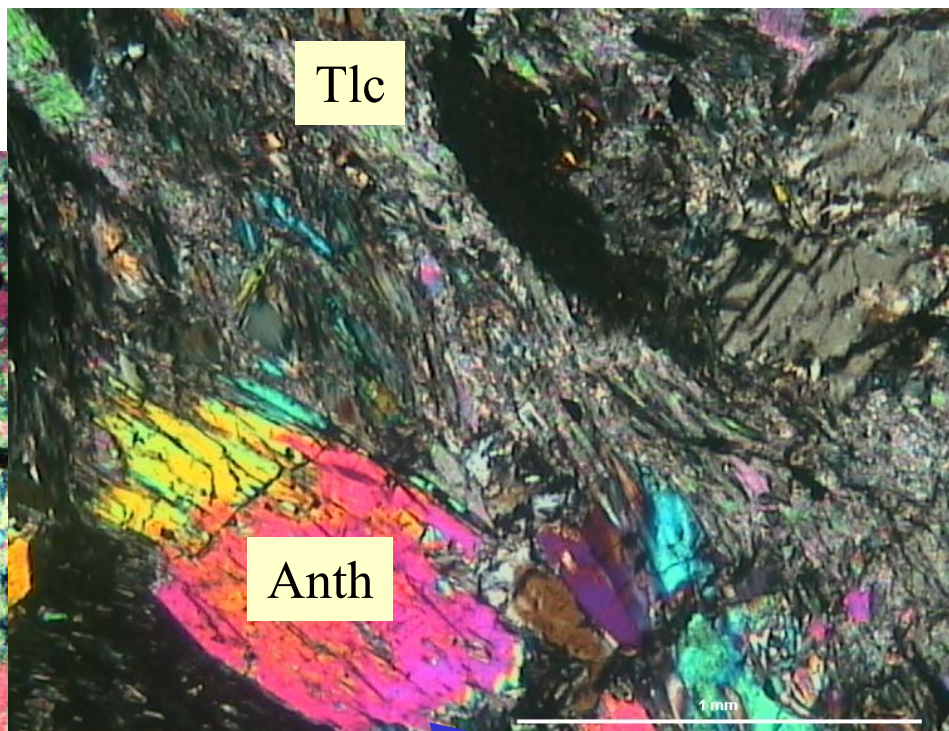
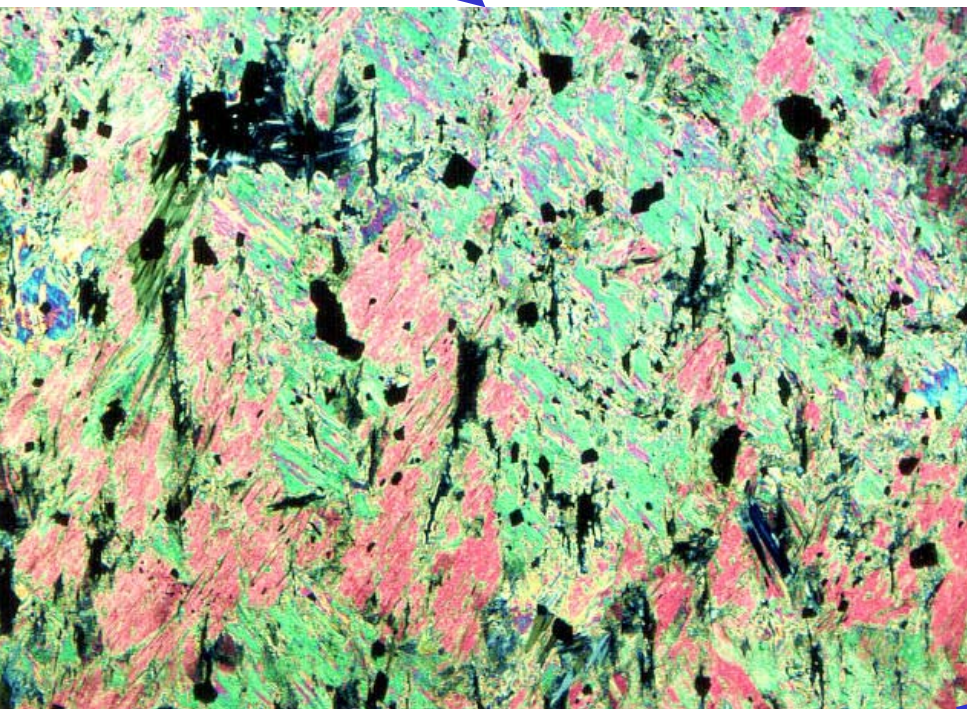
Serpentinit Atg+Fo



- antigorit je stabilní ve facii zelených břidlic
- tremolit je stabilní v amfibolitové facii a objevuje se při vymizení antigoritu
- diopsid je stabilní za nízkých a vysokých teplot tyto dvě pole jsou oddělena polem tremolitu

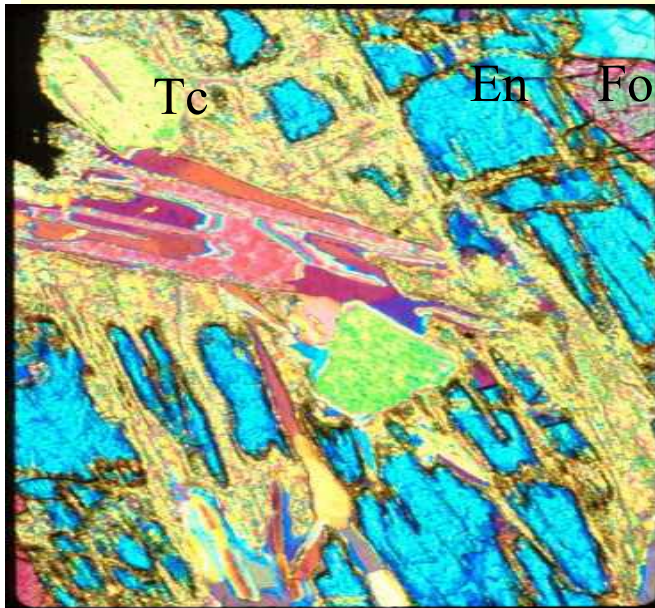
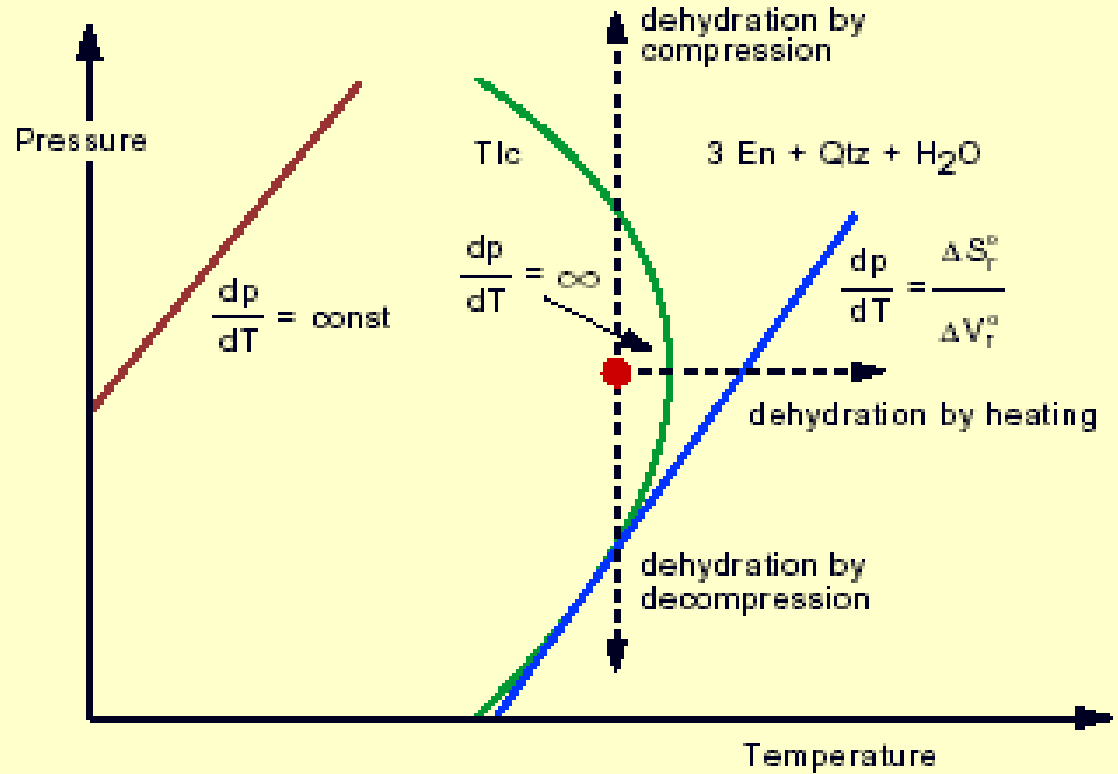
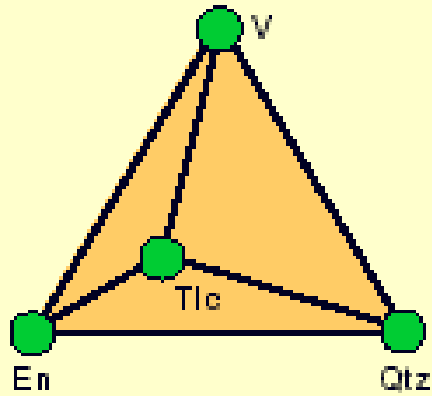
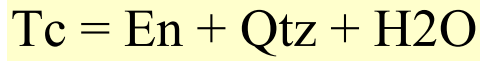
Tlc+Fo

Mastková břidlice



Anth+Tlc

Antofylitová skalina



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)

Literatura

- Dudek, A. - Fediuk F. - Palivcová M. (1962): Petrografické tabulky
- Hejtman, B. (1962): Petrografie metamorfovaných hornin
- Konopásek, J. – Štípská P. – Klápová H. – Schulmann K. (1998): Metamorfnní petrologie
- Naprostá většina obrazového materiálu pochází z celé řady internetových stránek věnujících se metamorfnní petrologii