

# **G4021 Magmatická a metamorfní petrologie**

## **4. Metamorfóza hornin bohatých Mg a Ca**

# 1. Celkové chemické složení horniny (zjednodušené)

- kvarcity	$\text{SiO}_2$
- křemen-živcové horniny	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-Na}_2\text{O-CaO-H}_2\text{O}$
- metapelity	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-MgO-FeO-H}_2\text{O}$
- metabazity	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-MgO-FeO-H}_2\text{O}$
- vápenatosilikátové horniny	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-CaO-MgO-H}_2\text{O}$
- metakarbonáty	$\text{MgO-CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$
- křemité dolomity	$\text{MgO-CaO-SiO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$
- ultramafity	$\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$

## Jiné chemické systémy (méně časté)

- cordierit-antofylitové horniny	$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-FeO-H}_2\text{O}$
- železná formace	$\text{SiO}_2\text{-FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$
- manganolity, smirky	

## Jiná označení chemických systémů:

- křemen-živcové horniny	NASH, CASH a CKNASH
- metapelity	KMASH, KFASH a KFMASH
- ultramafity	MS-H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub> , CMS-H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub>

# Metamorfóza ultramafických hornin

	1	2	3	4
SiO <sub>2</sub>	39,53	33,10	38,37	42,28
TiO <sub>2</sub>	0,01	0,01	0,06	st.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,93	0,72	1,70	1,70
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,01	0,38	0,62	0,18
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O	st.	0,31	0,56	0,12
K <sub>2</sub> O	st.	st.	0,06	st.
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0,89	14,46	11,53	3,64
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0,16	1,93	0,46	—
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	st.	0,07	0,09	st.
CO <sub>2</sub>	—	—	—	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 %

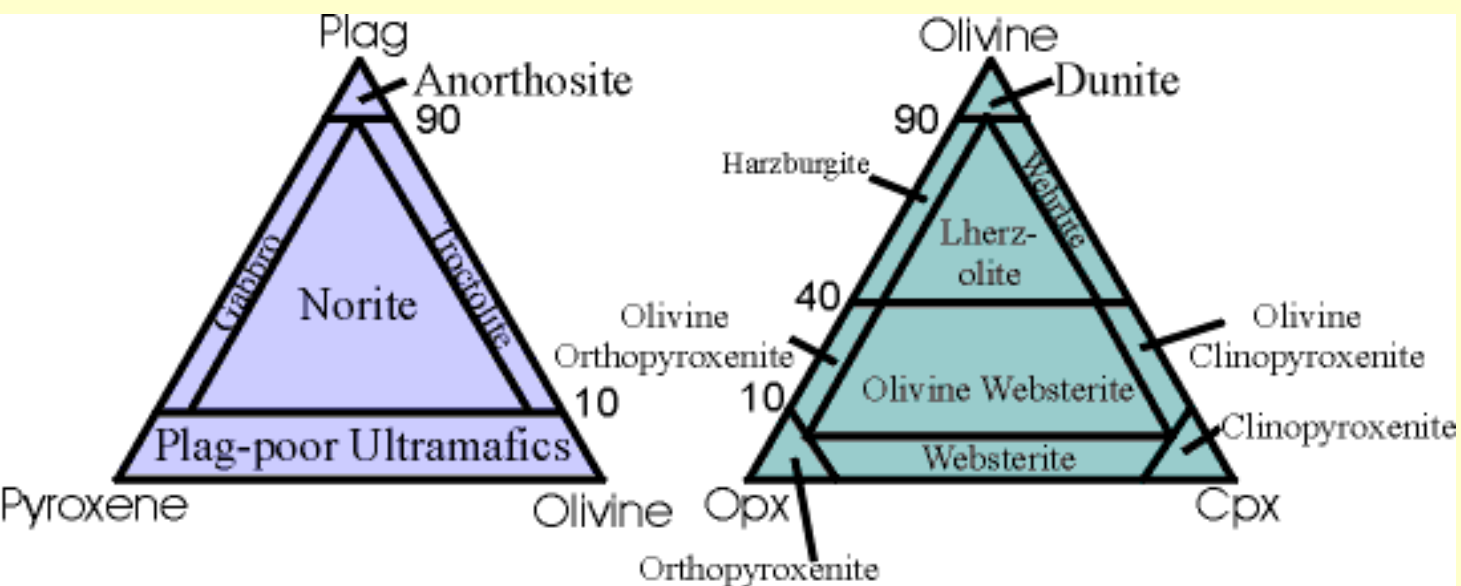
- geochemicky – utrabazické horniny (SiO<sub>2</sub> < 45 hm %)

**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, Sp) okolo granátu

# Ultramafické vyvřelé horniny



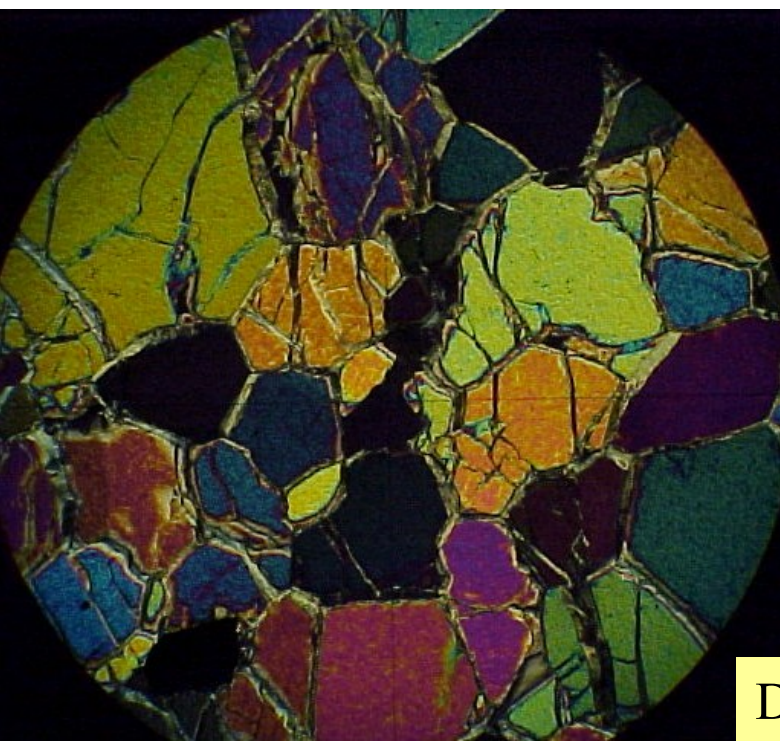
## Nejčastější alterace:

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

Klinopyroxen → amfibol +

hydratované Ca-Al silikáty + chlorit

Plagioklas → Ca-Al silikáty + jílové minerály + kalcit



Dunit

**Opx:**  $(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$

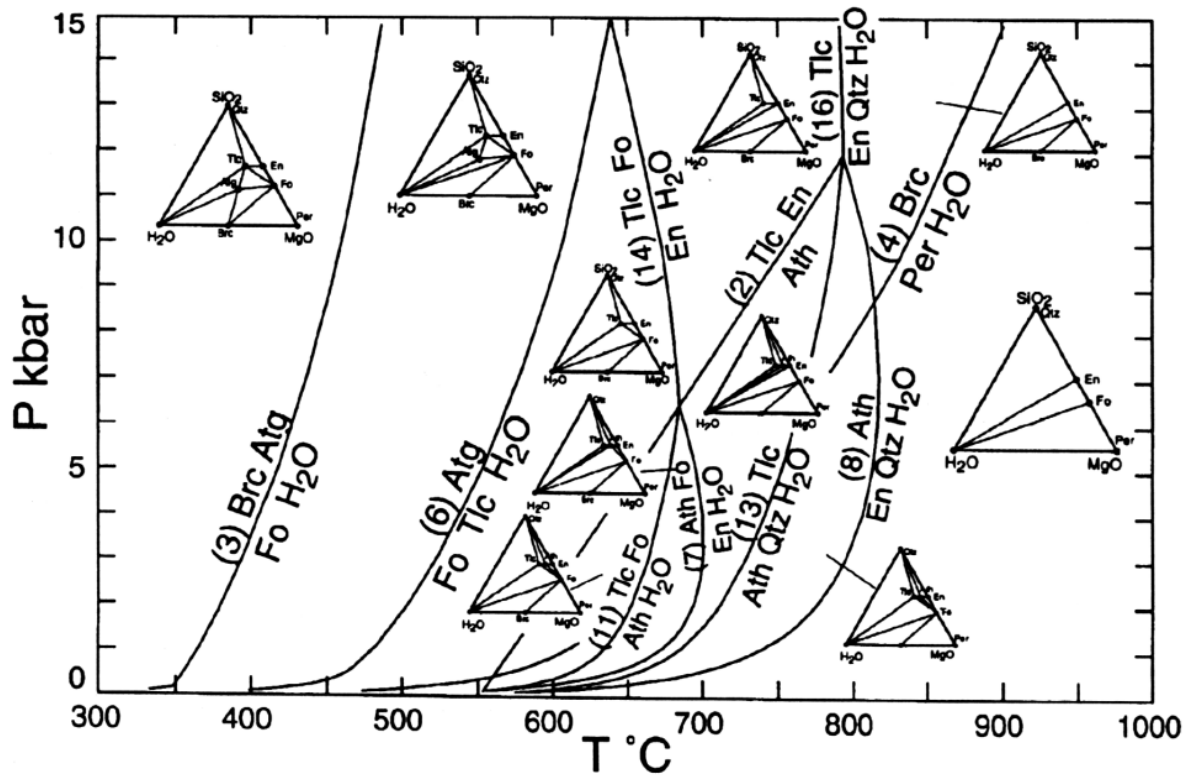
**Cpx:**  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$

**Ol:**  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$

- 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) – serpentinové minerály + relikty primárních minerálů peridotitů
- serpentinity 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>)
- serpentizace - značný přínos H<sub>2</sub>O + SiO<sub>2</sub> CO<sub>2</sub> - výrazné zvýšení objemu hornin (pro zachování objemu je nutný značný odnos MgO)
- Zdroje H<sub>2</sub>O:
  - a) pozdní granitické intruze bohaté vodou
  - b) okolní horniny (nemet.- nízko met.)
  - c) litologická rozhraní a zlomy
-

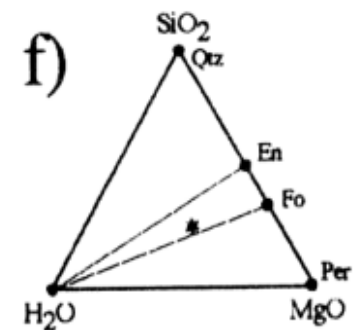
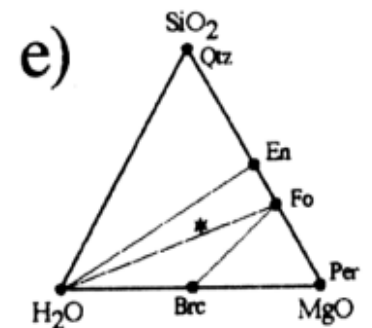
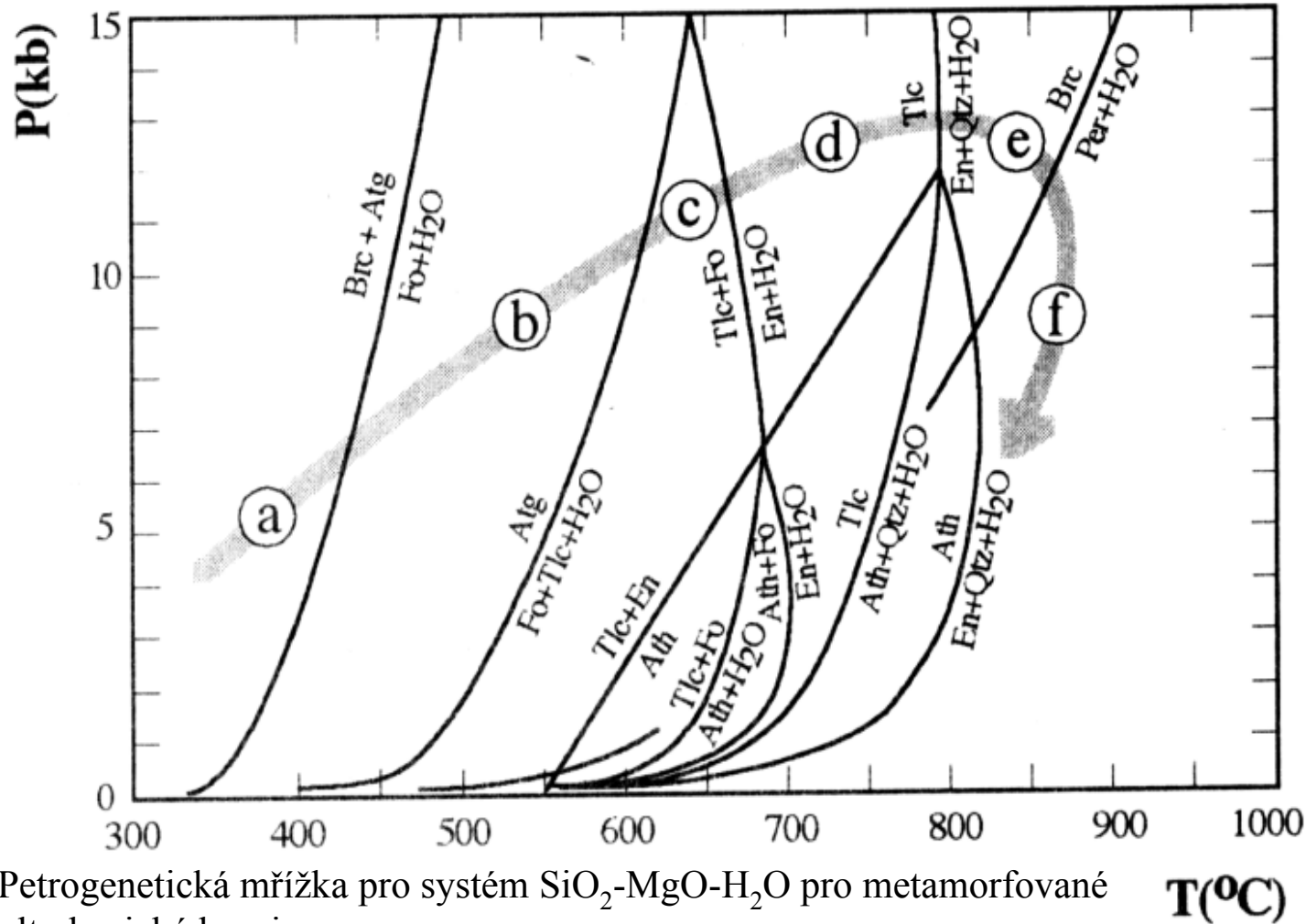
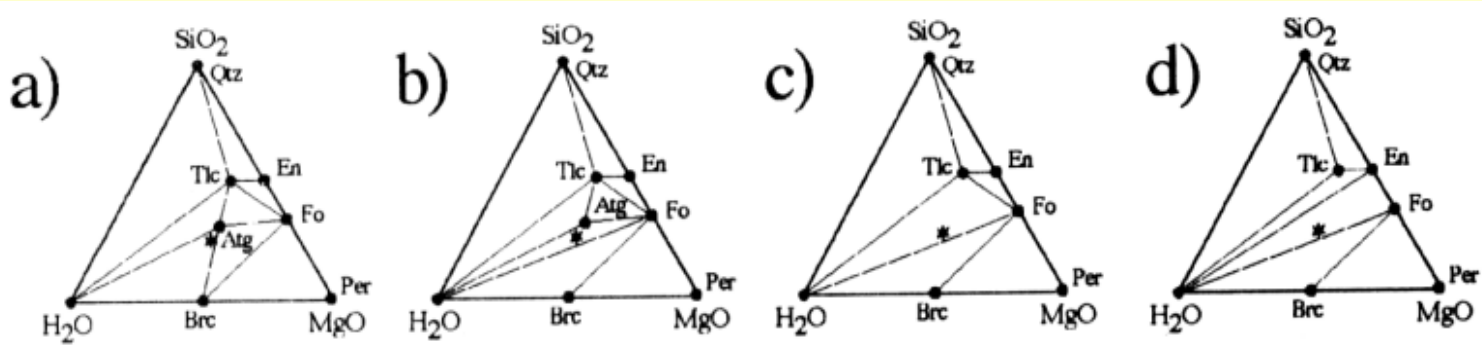
# • *Fázové vztahy v ultramafitech*

- systémy: CMS, MSH, CMSH, FeO (FMSH, CFMSH), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>
- **Systém SiO<sub>2</sub>-MgO-H<sub>2</sub>O**
- antigorit stabilní do cca 500-600°C (nejvyšší stupeň z minerálů serp. skupiny)
- antofylit (Mg-Oamf) stabilní mezi cca 600-800° při P < 12kbar
- progresivní metamorfóza – uvolňování H<sub>2</sub>O, ta zůstává v systému



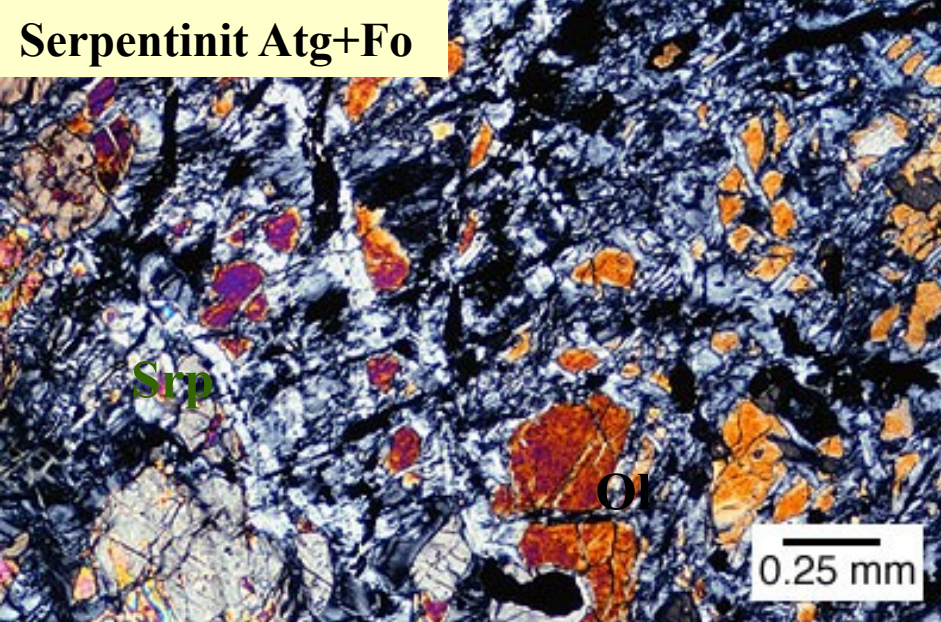
Zjednodušená MSH mřížka pro ultramafické horniny (sestaveno na základě termodynamických databází Bermana, Konopásek et al. 1998 převzato ze Spear 1993)

Facie	Kritická asociace	Al-fáze
nízkých stupňů	chryzotil + mastek + tremolit	chlorit
zelených a modrých břidlic	brucit + antigorit + diopsid	chlorit
	forsterit + antigorit + diopsid	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 rohvců (nízký P)	forsterit + ortopyroxen + klinopyroxen	plagioklas
granulitová (střední P)	forsterit + ortopyroxen + klinopyroxen + hornblend	spinel
eklogitová (vysoký P)	forsterit + ortopyroxen + klinopyroxen	granát



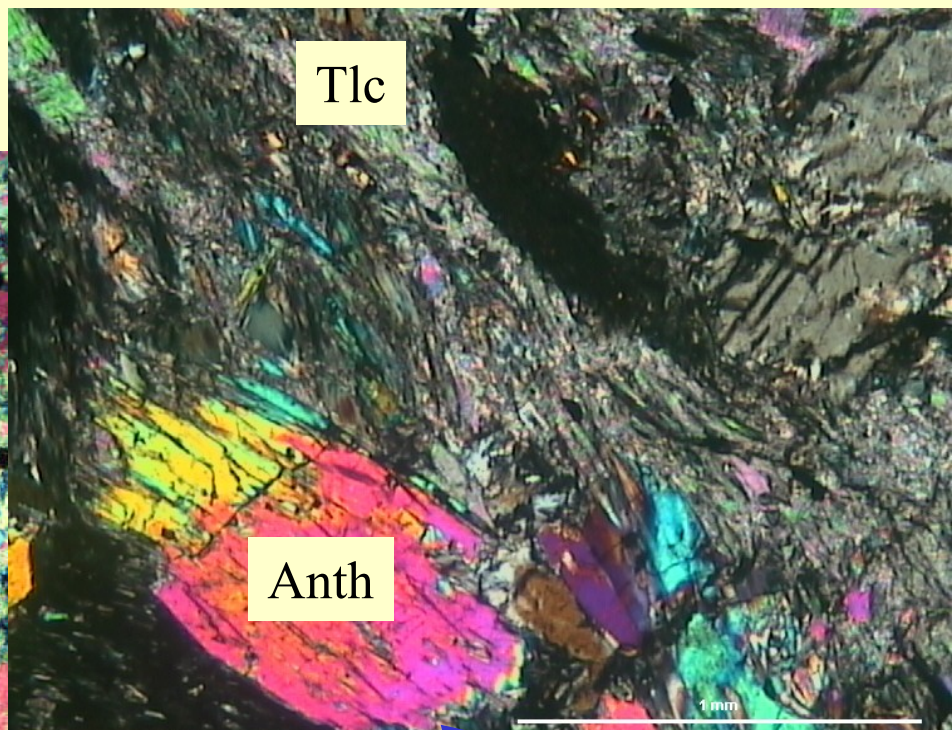
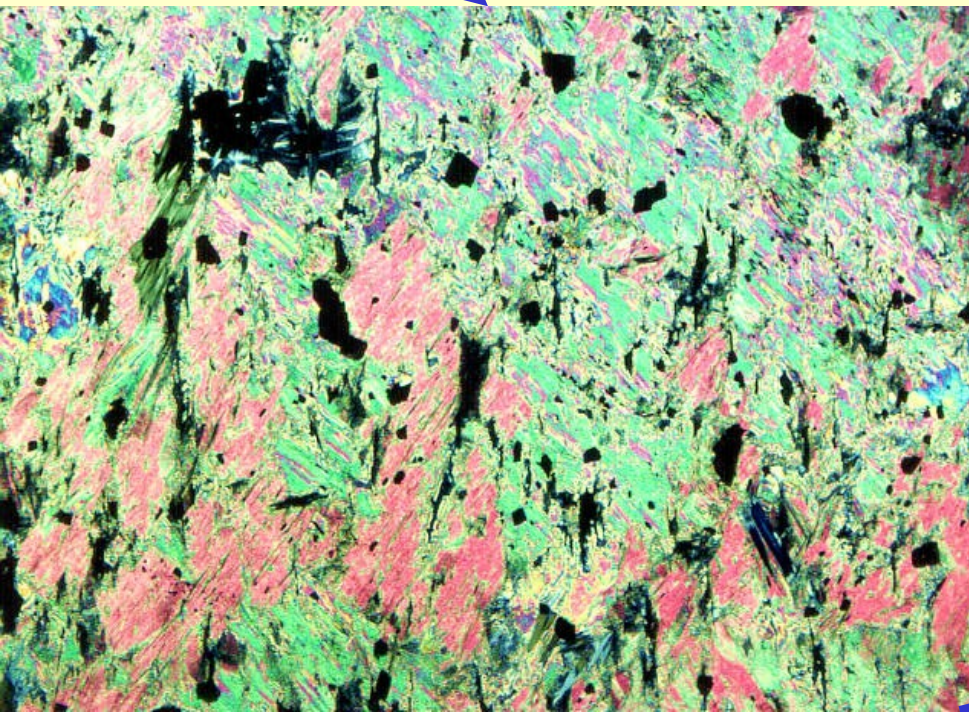
Petrogenetická mřížka pro systém  $\text{SiO}_2\text{-MgO-H}_2\text{O}$  pro metamorfované ultrabazické horniny





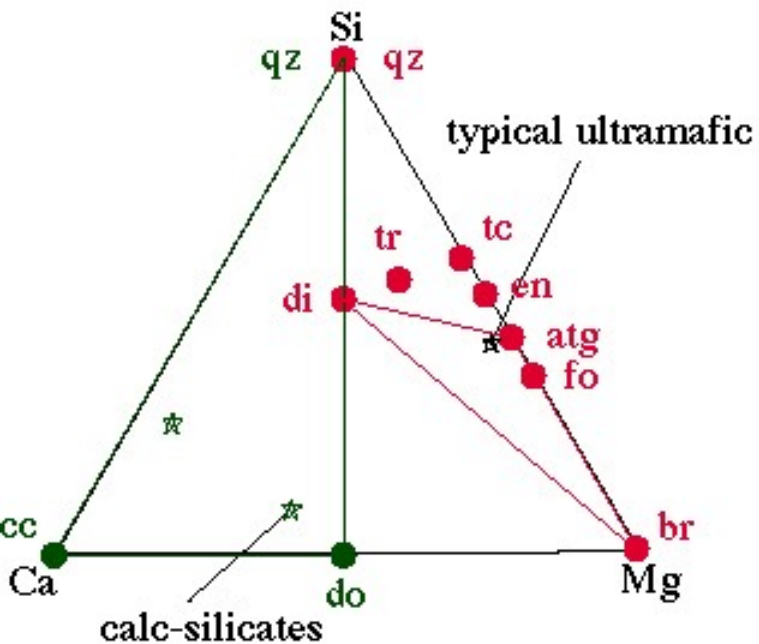
**Tlc+Fo**

**Mastková břidlice**



**Anth+Tlc**

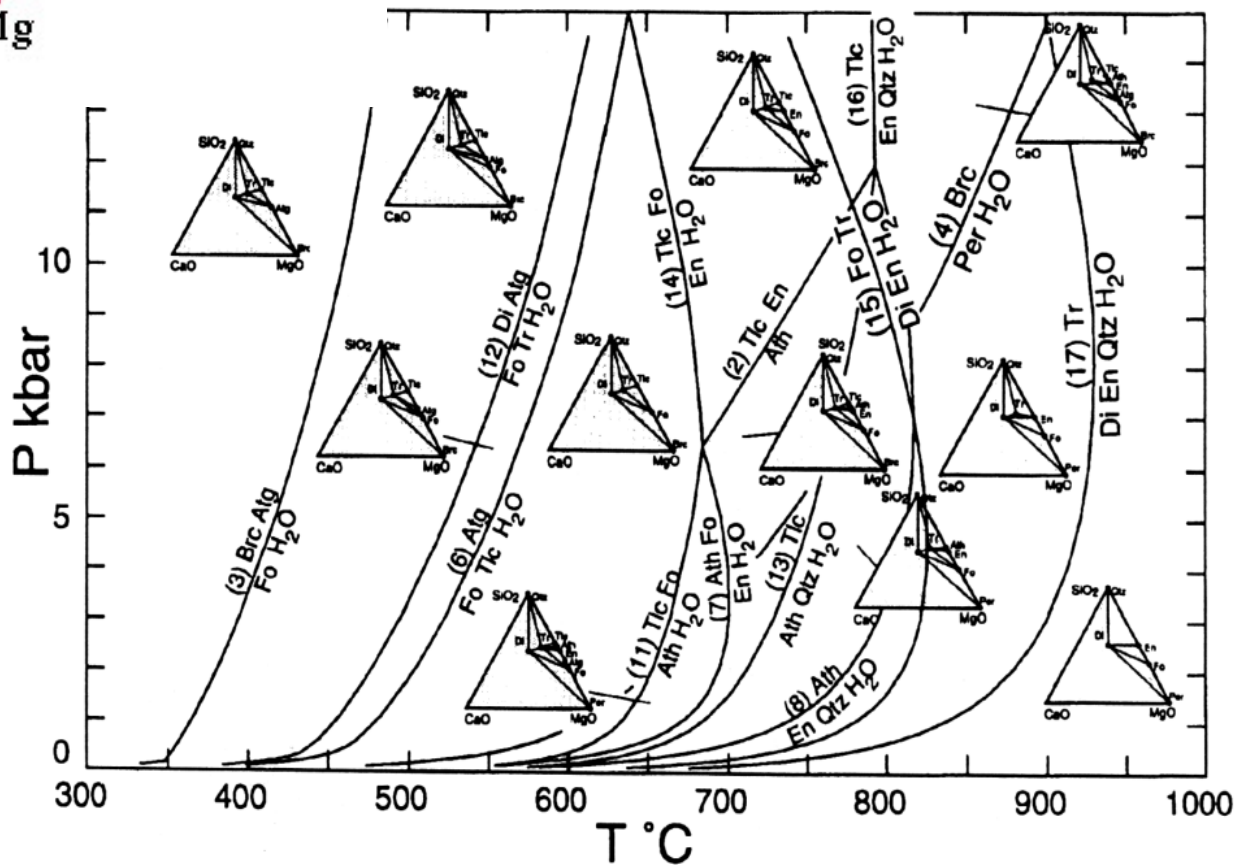
**Antofylitová skalina**



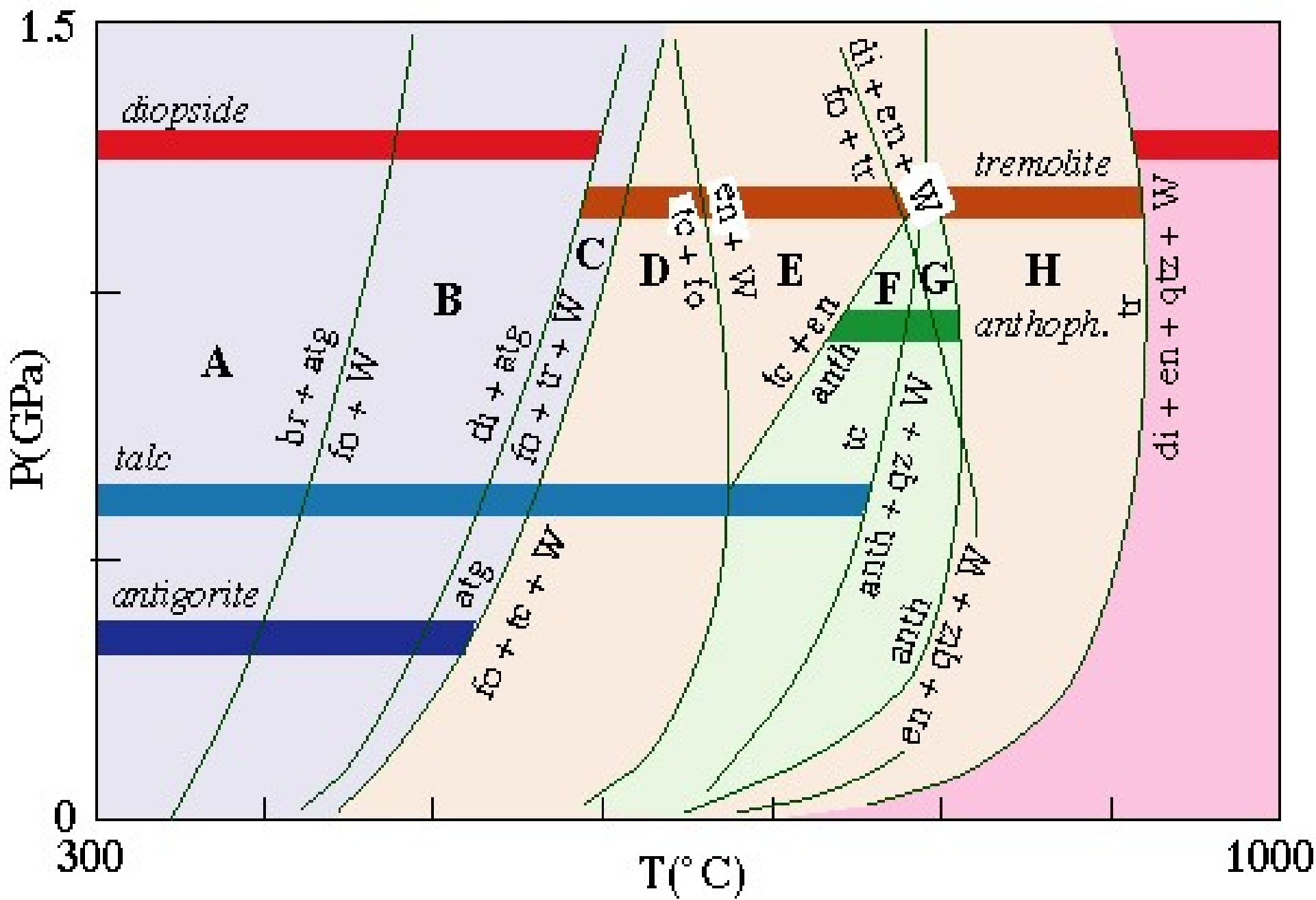
qz: quartz  
 tc: talc  
 tr: tremolite  
 en: enstatite  
 di: diopside  
 atg: antigorite  
 fo: forsterite  
 cc: calcite  
 do: dolomite  
 br: brucite

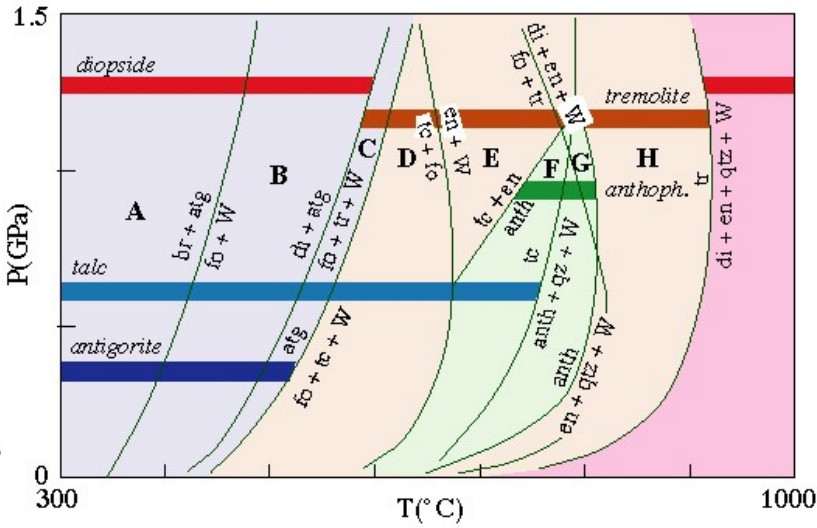
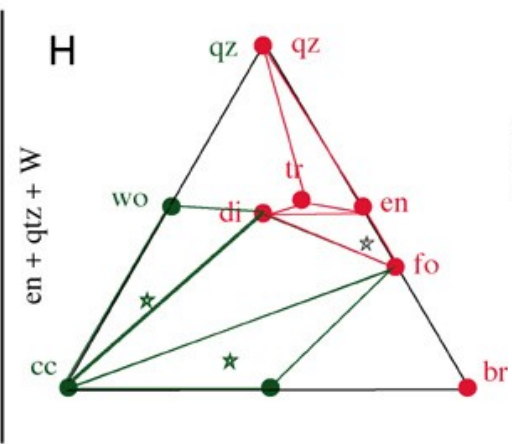
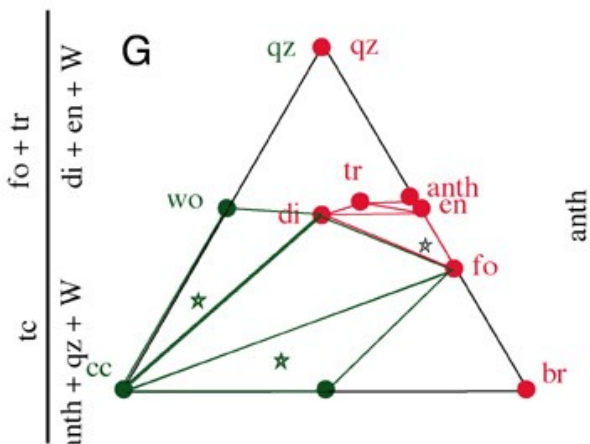
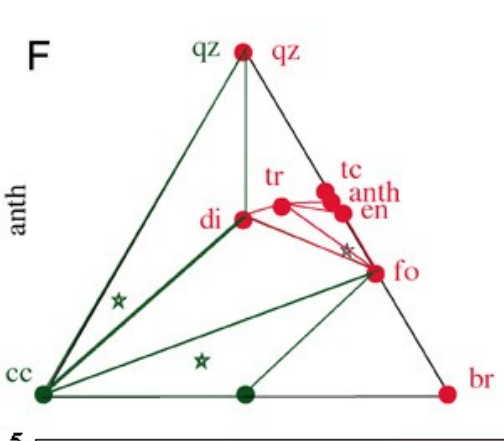
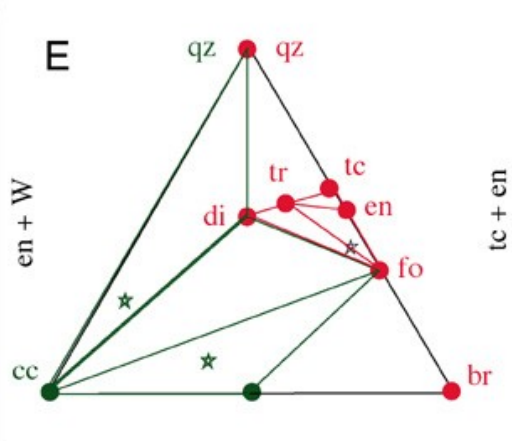
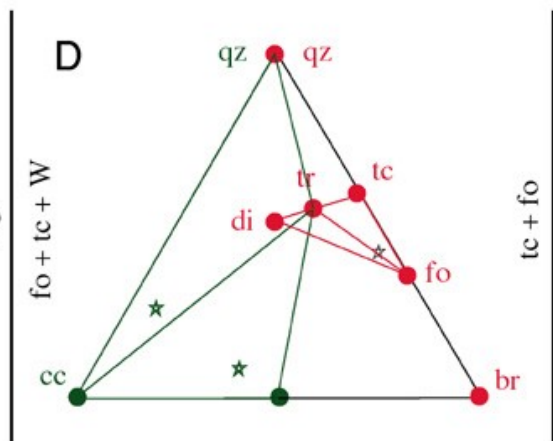
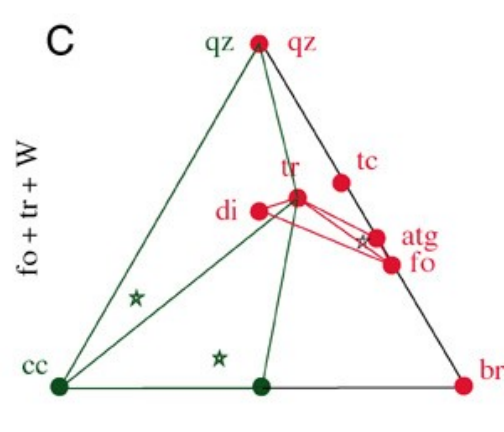
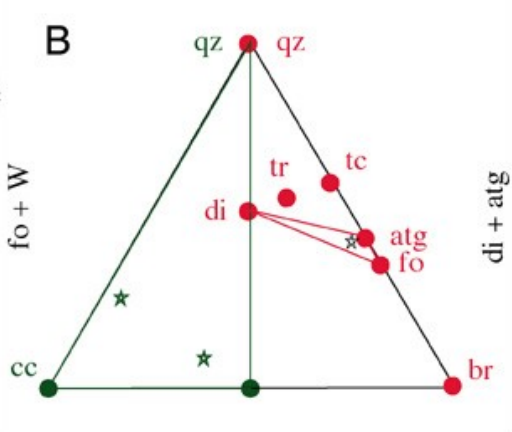
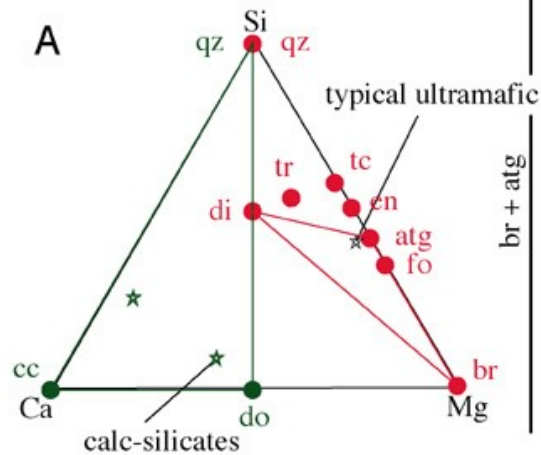
## Fázové vztahy v ultramafitech

- **Systém SiO<sub>2</sub>-MgO-CaO-H<sub>2</sub>O**
- projekce z pozice H<sub>2</sub>O – jen asociace koexistující s čistou vodní fluidní fází (a<sub>H<sub>2</sub>O</sub>=1)



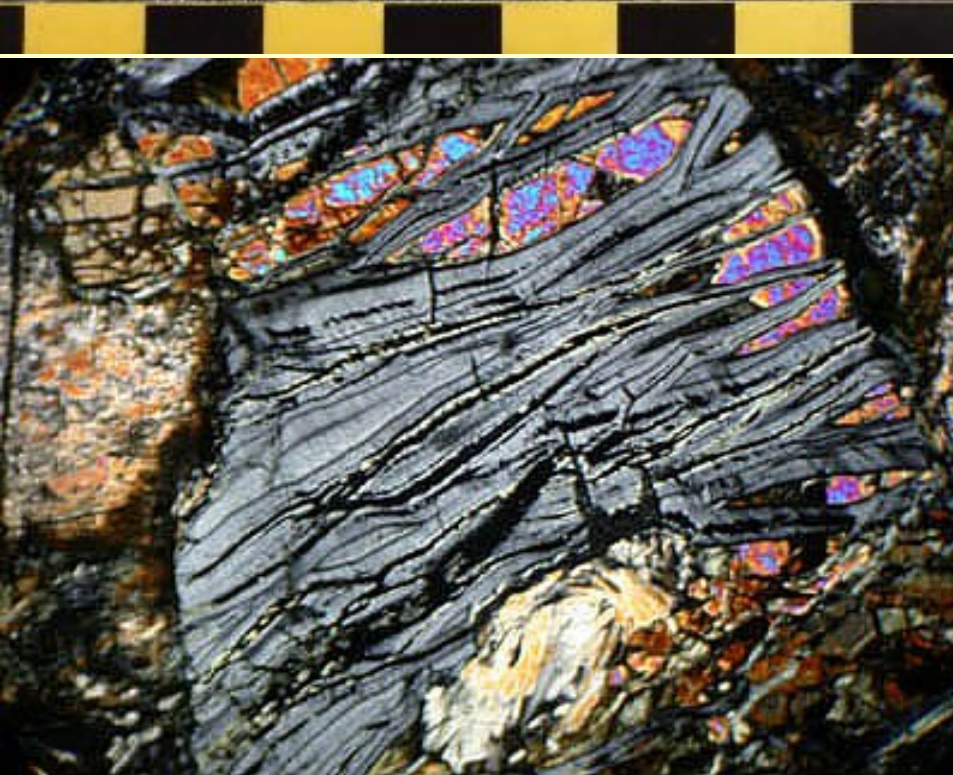
Zjednodušená CMSH mřížka pro ultramafické horniny (sestaveno na základě termodynamických databází Bermana, Konopásek et al. 1998 převzato ze Speara 1993)



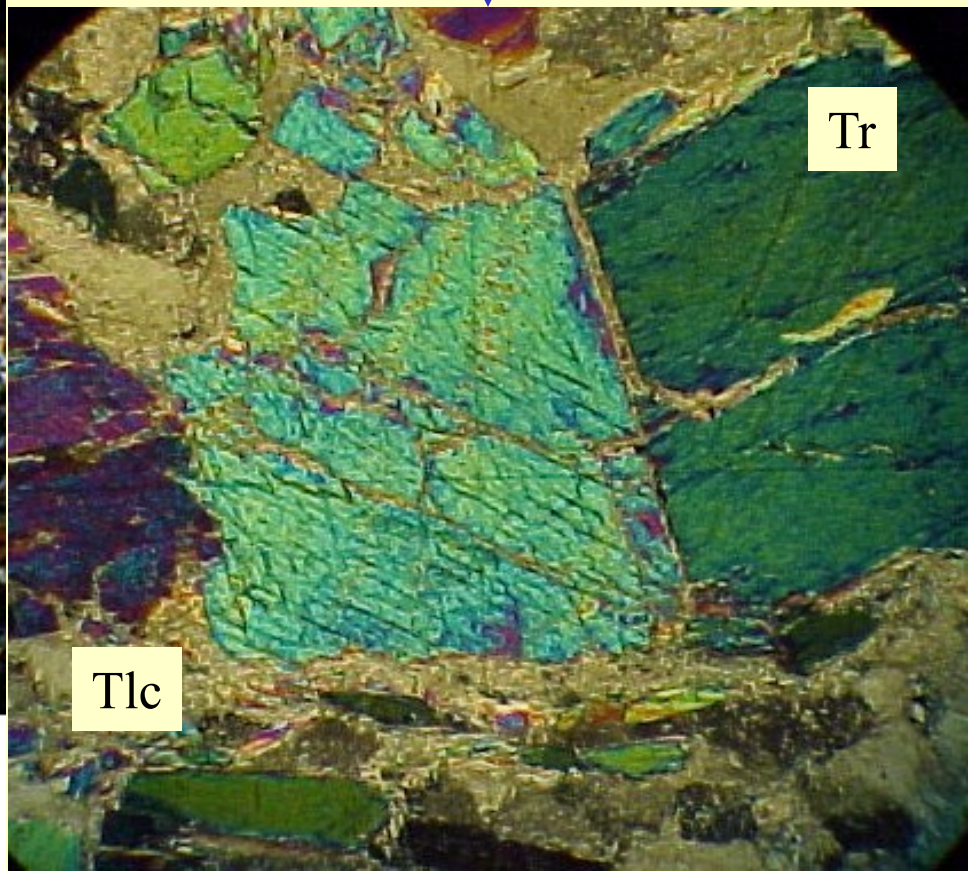


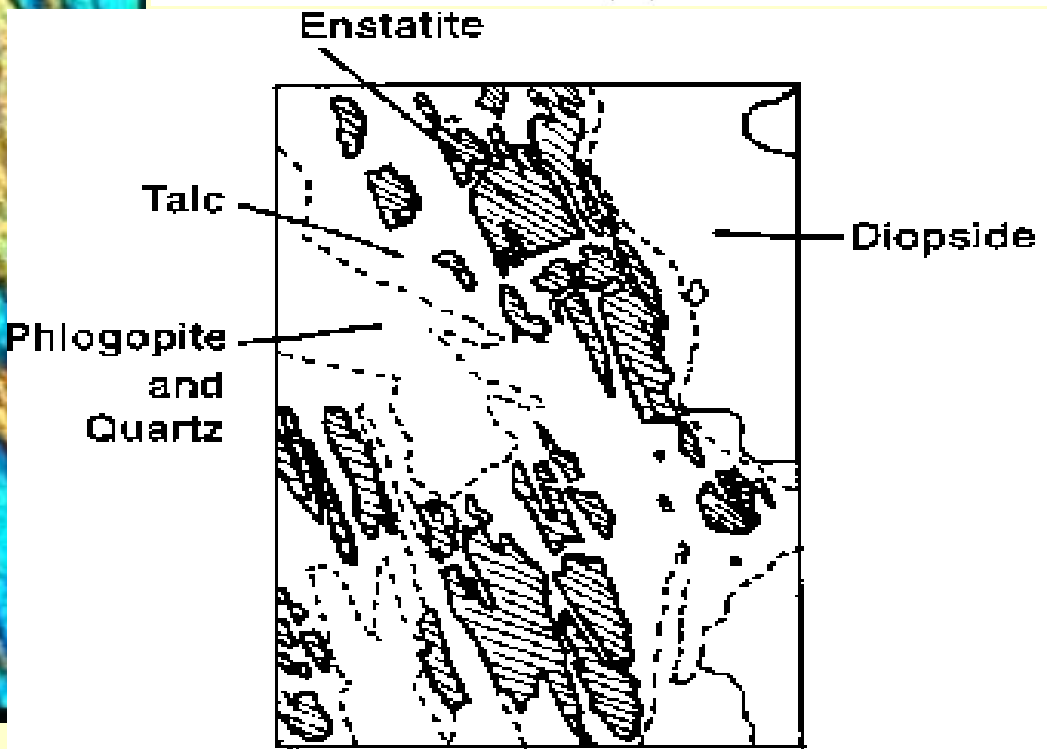
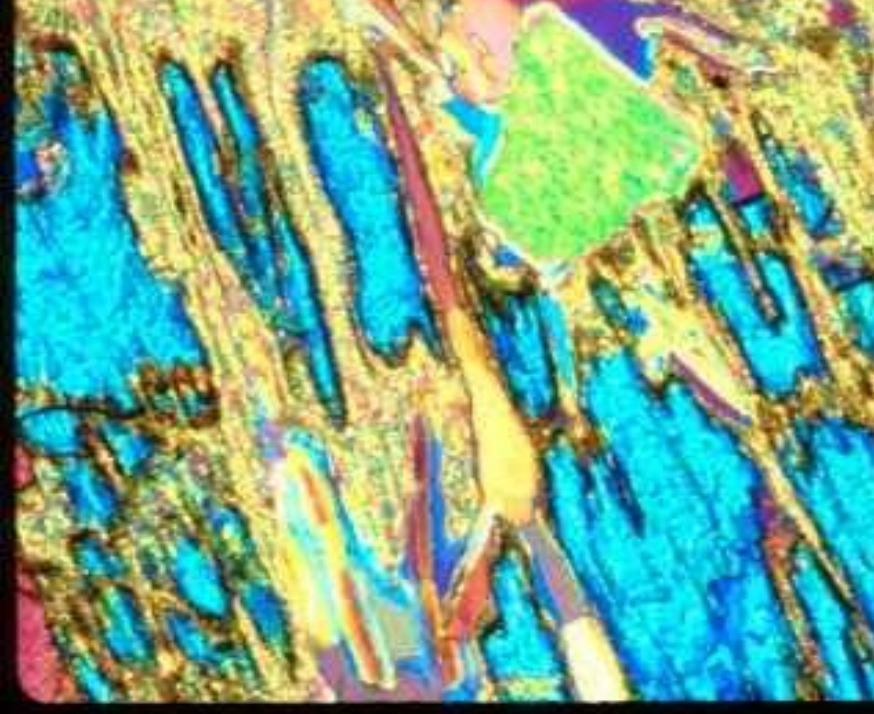
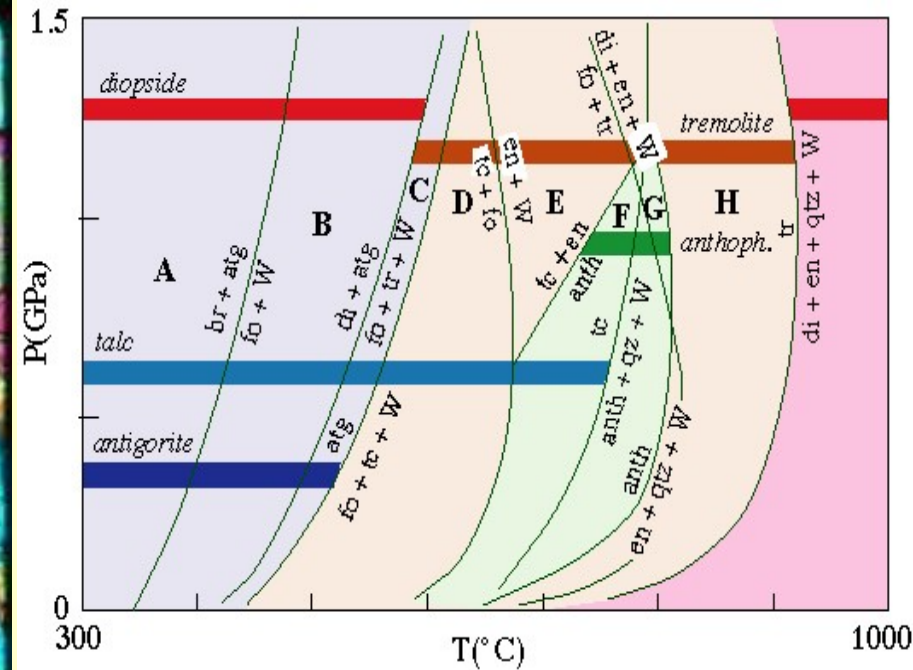
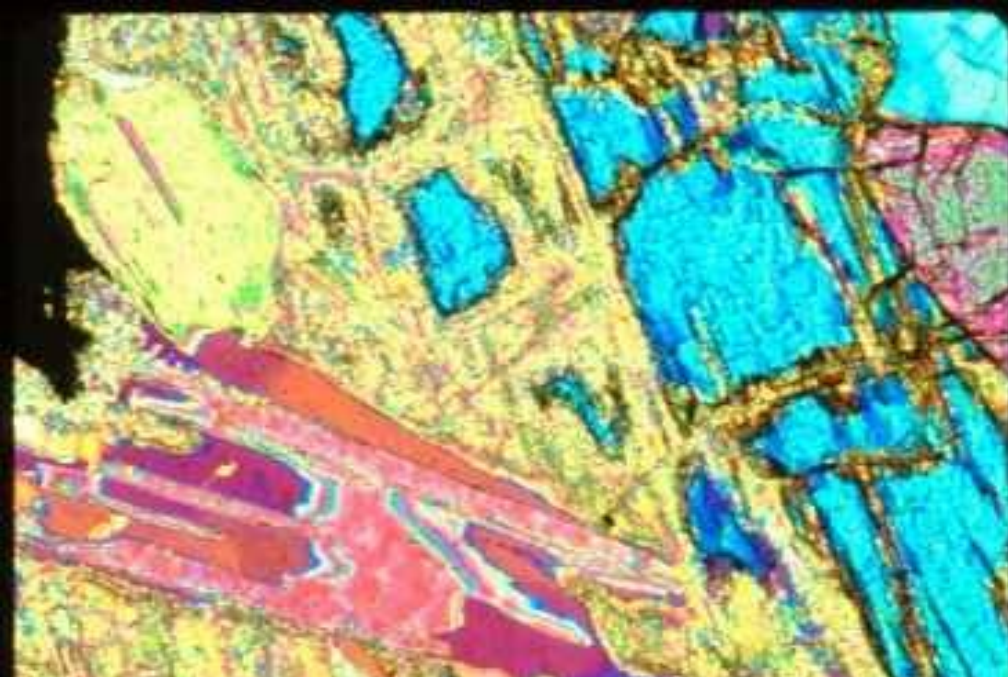


Tremolit-  
mastková  
břidlice



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

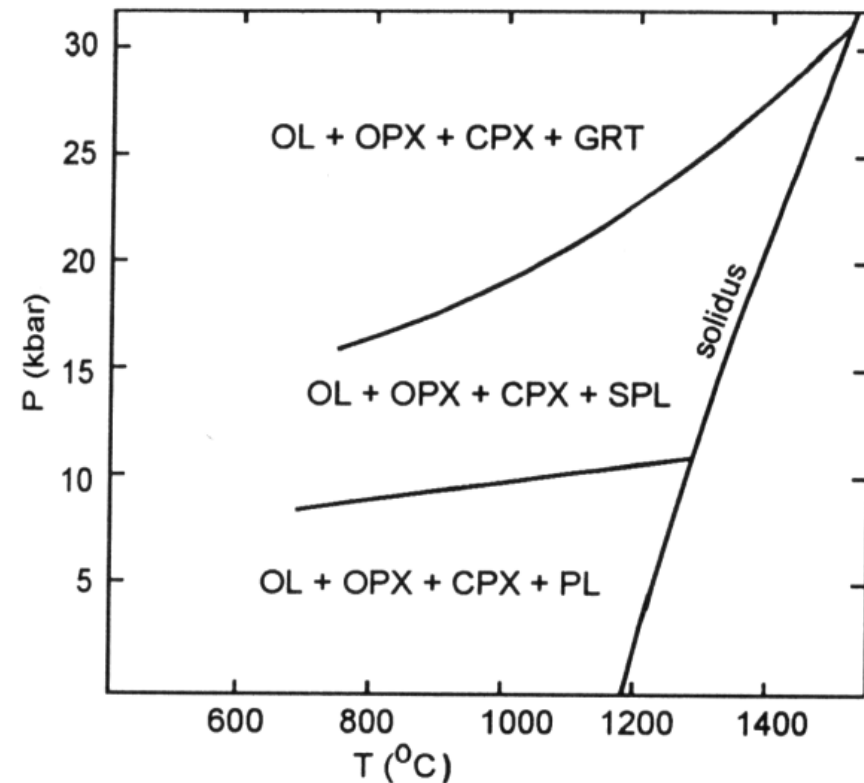


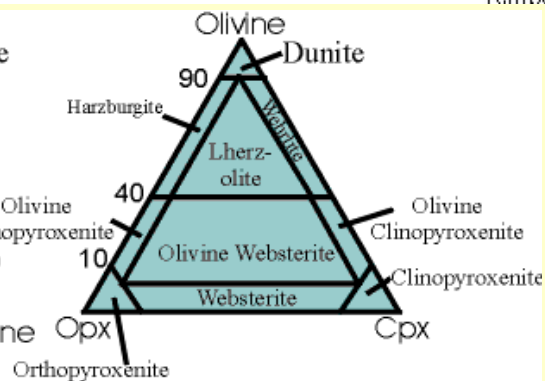
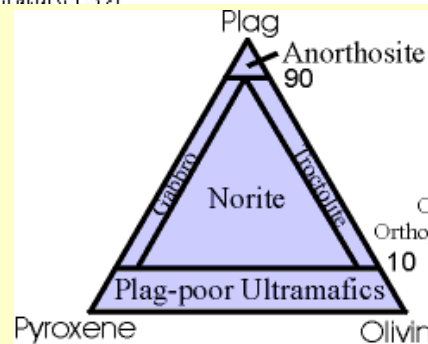
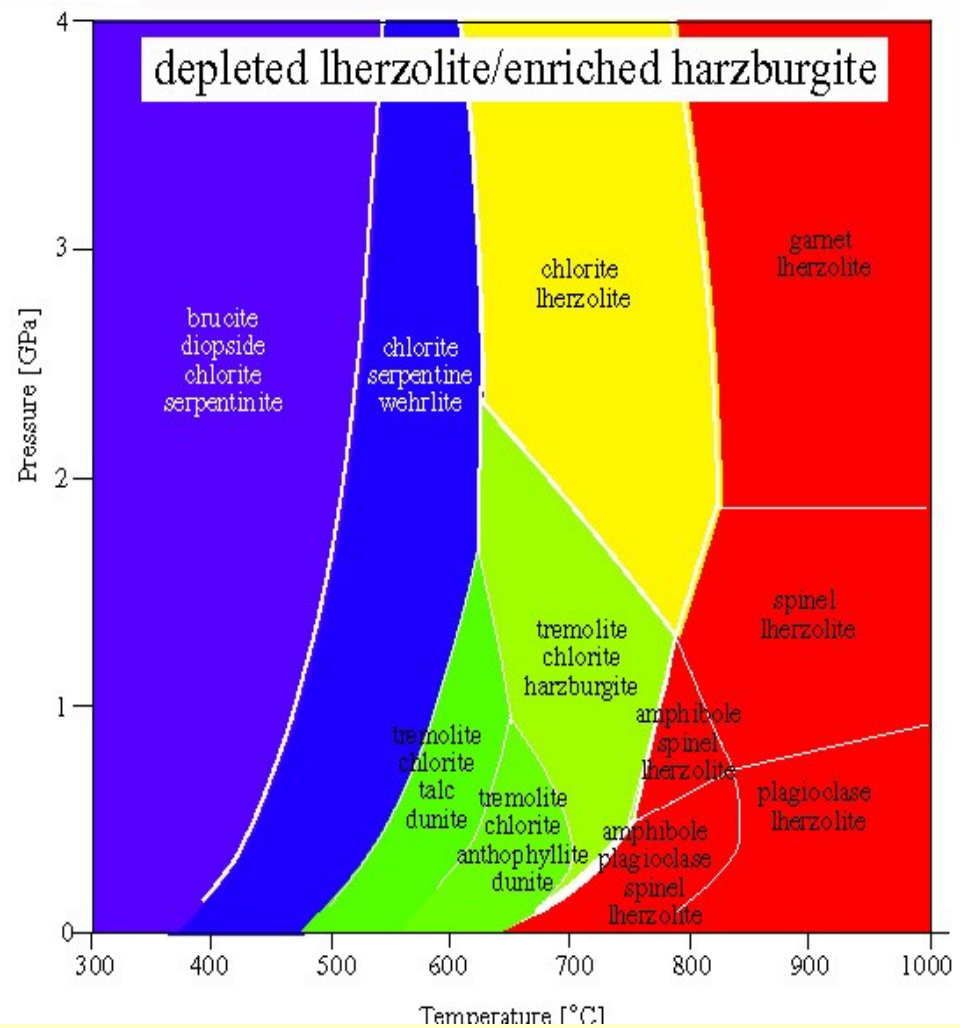
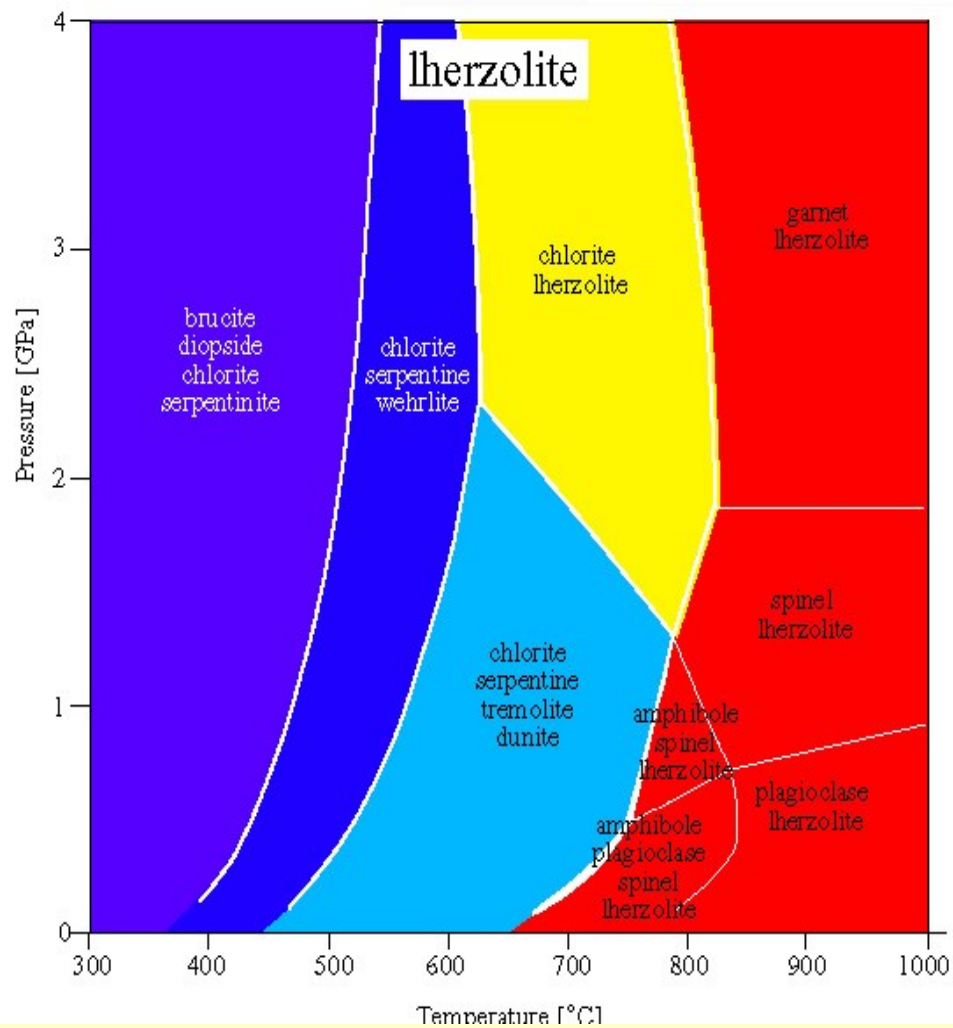


- **typy ultramafických hornin** (nyní v zemské kůře)
- alpský (orogenní) - fragmenty pláště (čocky, xenolity) tektonicky transportované během orogenních procesů z oblasti *pod oceánskou kůrou*, součást ofiolitových komplexů, často lherzolitické složení, častá serpentinizace a rekrystalizace
- plášťové fragmenty ze *subkontinentální* části pláště, součást krustálních sekvencí, diferenciáty basaltických magmat – harzburgitické či dunitické složení
- vyneseny z pláště jako xenolity v kimberlitech a basaltech společně s HT eklogity (menší část).

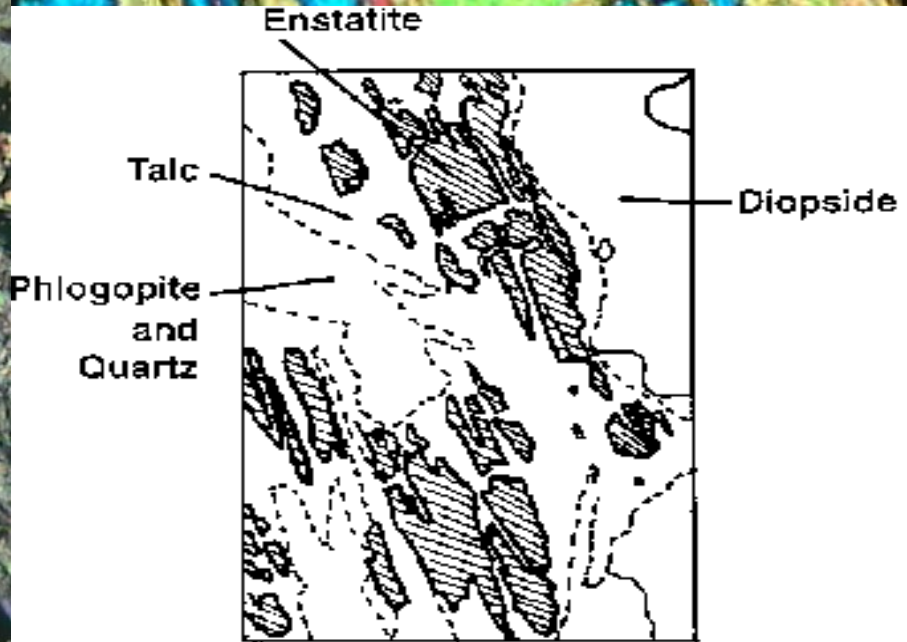
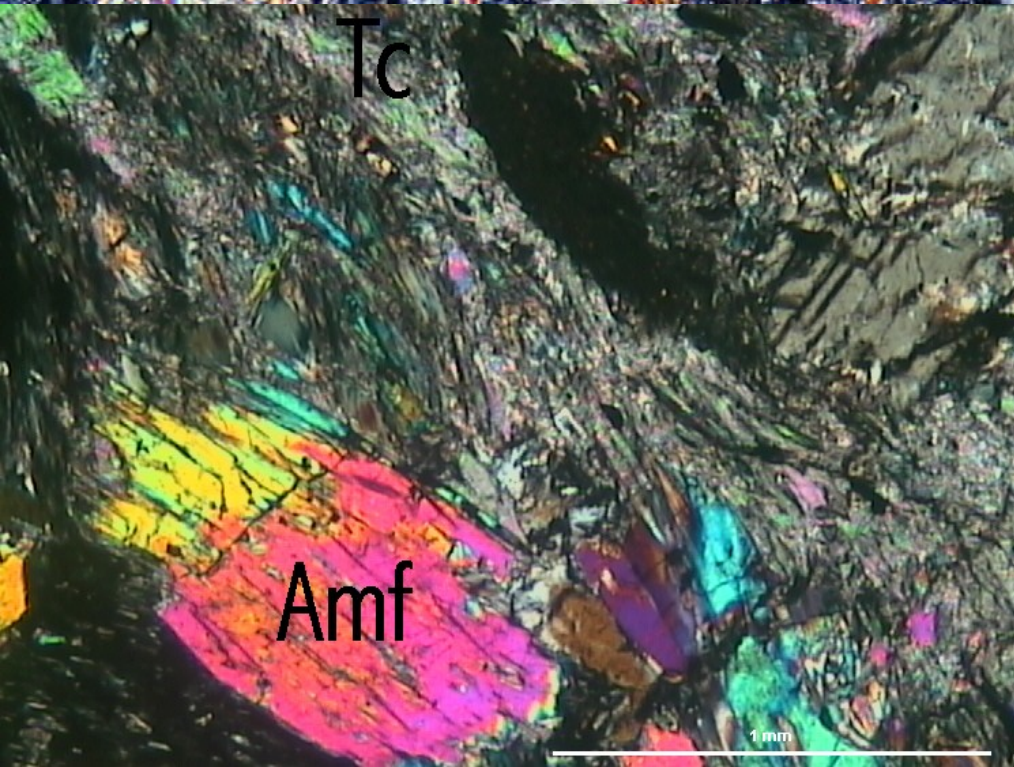
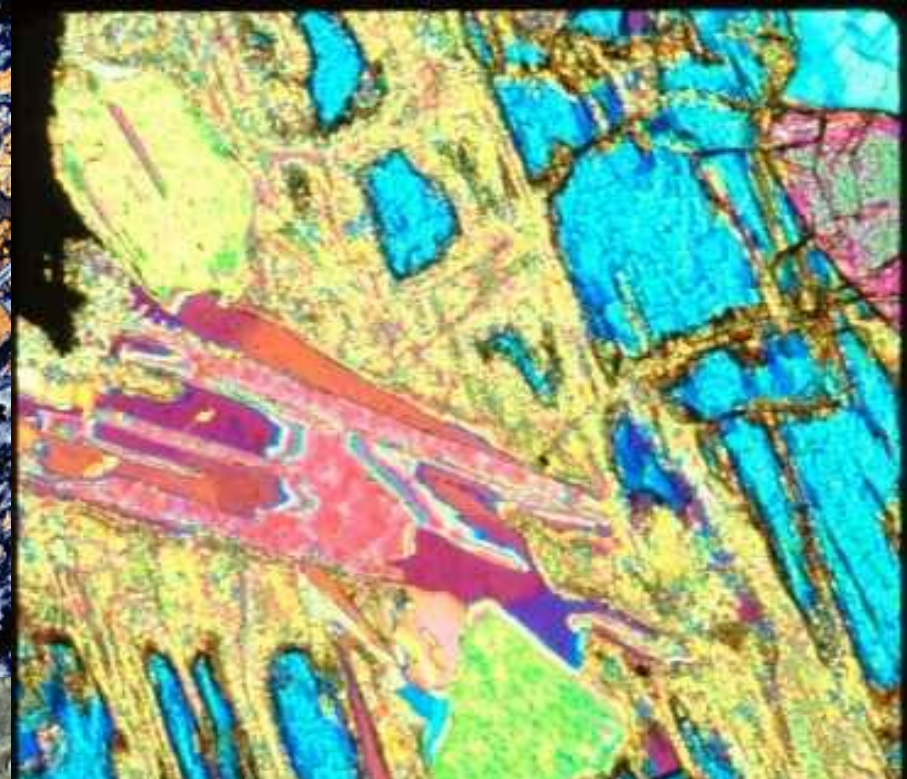
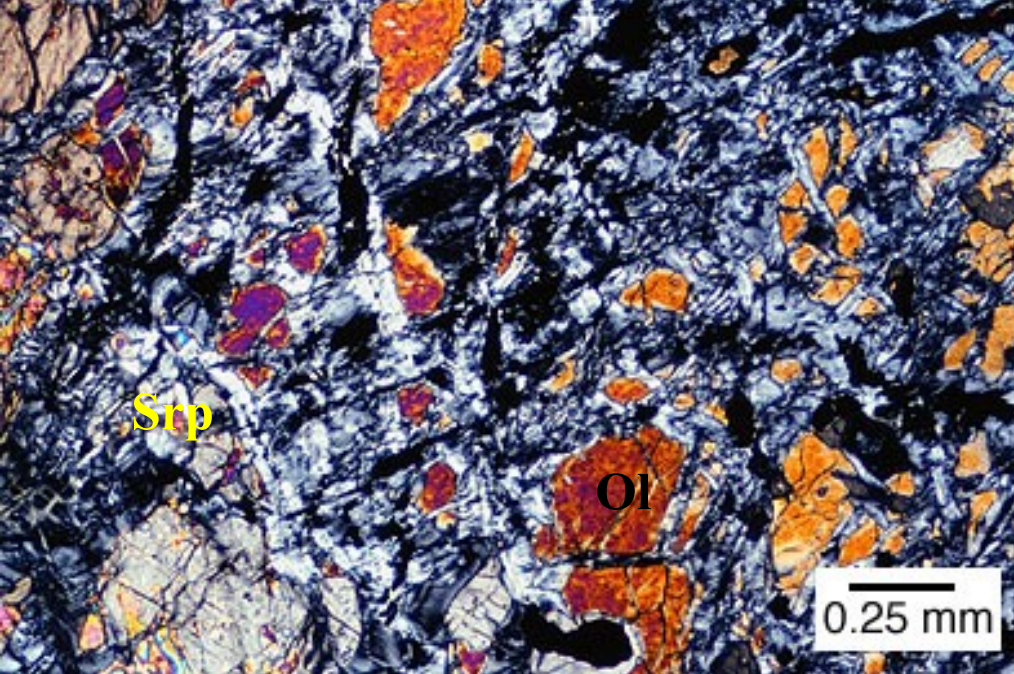
- v orogénech často tělesa peridotitů uspořádána v nesouvislých páslech X00- 1000 km dlouhých, paralelních se strukturními prvky orogénu
- ultramafické pásy souvisejí s kolizí a následnou subdukcí oceánské kůry pod kontinent (indikují zóny dřívějších subdukcí)

*PT-diagram ukazující pole stability lherzolitů s různými asociacemi.*







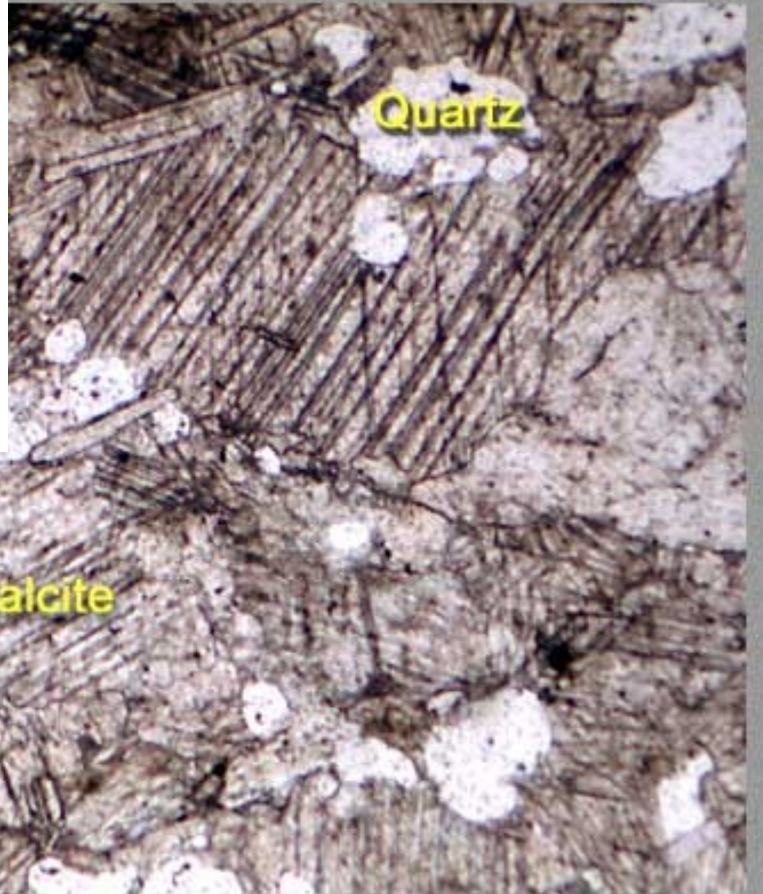


# Metamorfóza karbonátových hornin

- Karbonátové horniny, většinou vždy znečištěné silikátovou příměsí, lze rozdělit podle jejich mineralogického (chemického) složení a přítomnosti fluidní fáze do několika systémů:
- kalcitické                      CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>                      CS-HC
- dolomitické                      CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>                      CMS-HC
- vápenato-silikátové              K<sub>2</sub>O-CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>              KCMAS-HC
- 
- typické minerály: kalcit, dolomit, tremolit, forsterit, diopsid, wollastonit, mastek, periklas, brucit, křemen, dále grosular, vesuvian, spinel, chlorit, flogopit, minerály skupiny humitu
- pro karbonátové horniny jsou rozhodujícími faktory především teplota a aktivita fluid, tedy poměr  $H_2O/CO_2 = X_{CO_2}$
- v některých horninách se uplatňuje také F
- tyto horniny nejsou příliš vhodné pro odhad výše tlaku, s výjimkou nízkotlakého periklasu



1cm



Quartz

Pyrite

Calcite

PPL  XPL

1mm

- ***Fázové vztahy v metakarbonátech***

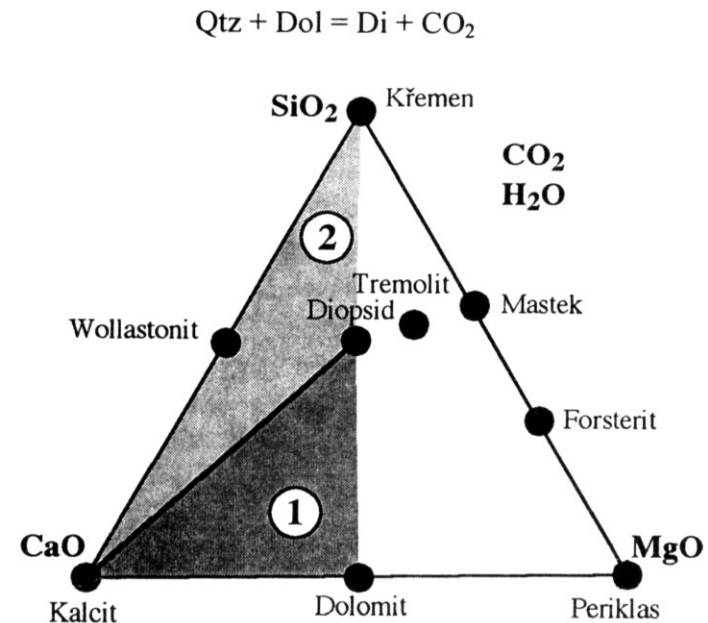
- Fázové vztahy se zobrazují v izobarických T-  $X_{\text{CO}_2}$  diagramech, v různých chemických systémech. Existuje poměrně velké množství reakcí, které jsou vzhledem k jednoduchosti systému experimentálně poměrně přesně definované v P-T diagramech.

- **některé důležité reakce:**

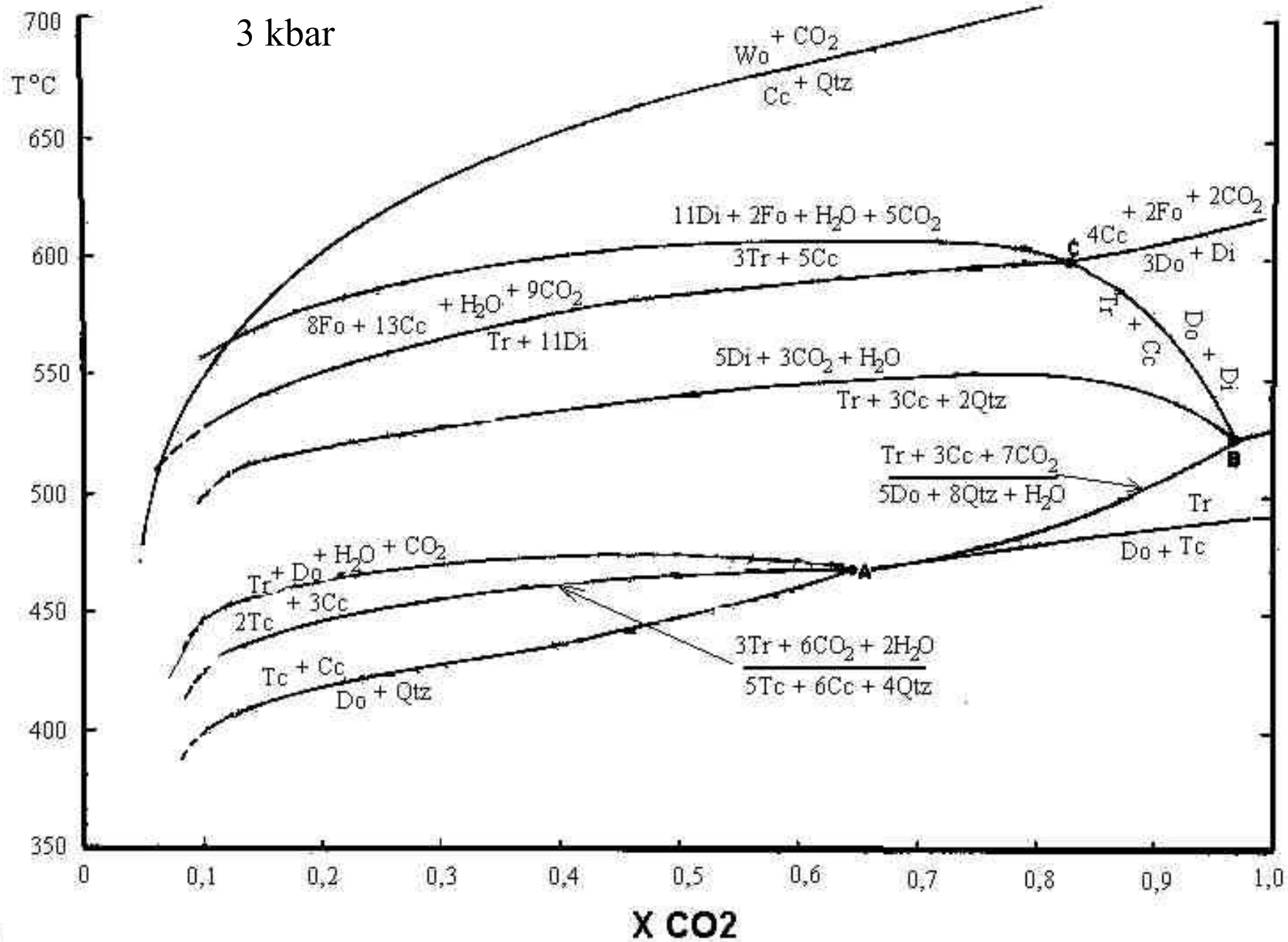
- CS-C: kalcit + křemen = wollastonit +  $\text{CO}_2$
- CMS-HC: tremolit + dolomit = forsterit + kalcit +  $\text{CO}_2$  +  $\text{H}_2\text{O}$  (dolomit. vápence)
- CMS-HC: dolomit + křemen +  $\text{H}_2\text{O}$  = tremolit + kalcit +  $\text{CO}_2$       500C/5kb
- CMS-HC: dolomit + křemen = diopsid +  $\text{CO}_2$       670C/8kb

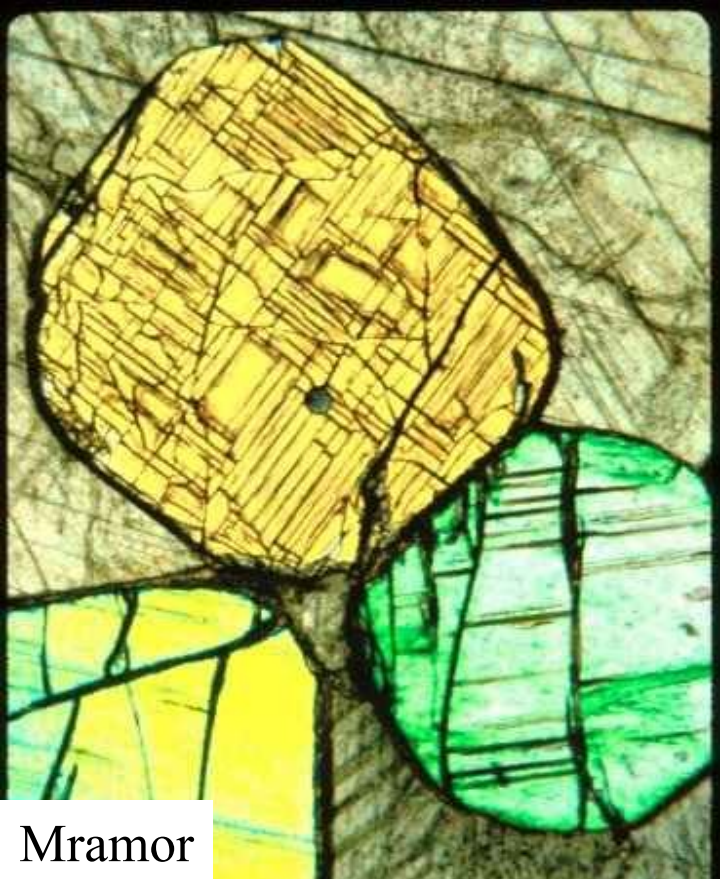
- ❖ metamorfní vývoj může být ovlivňován teplotou nebo  $X_{\text{CO}_2}$

- ❖ je často komplikované rozpoznat, který z činitelů měl hlavní význam

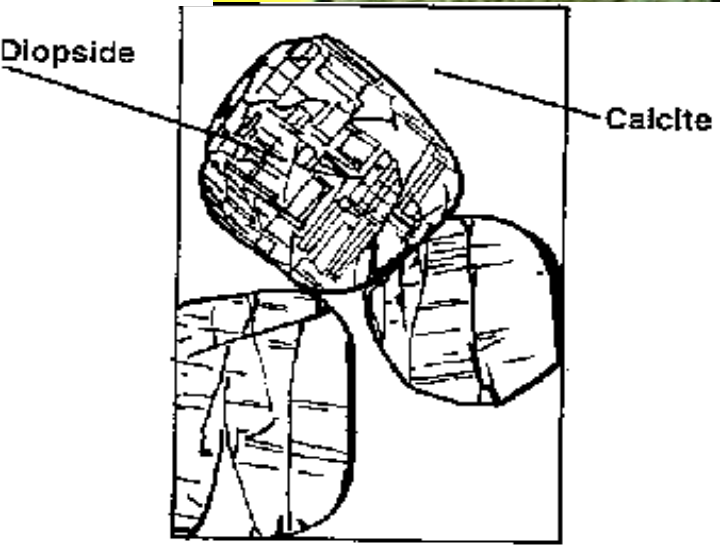


3 kbar





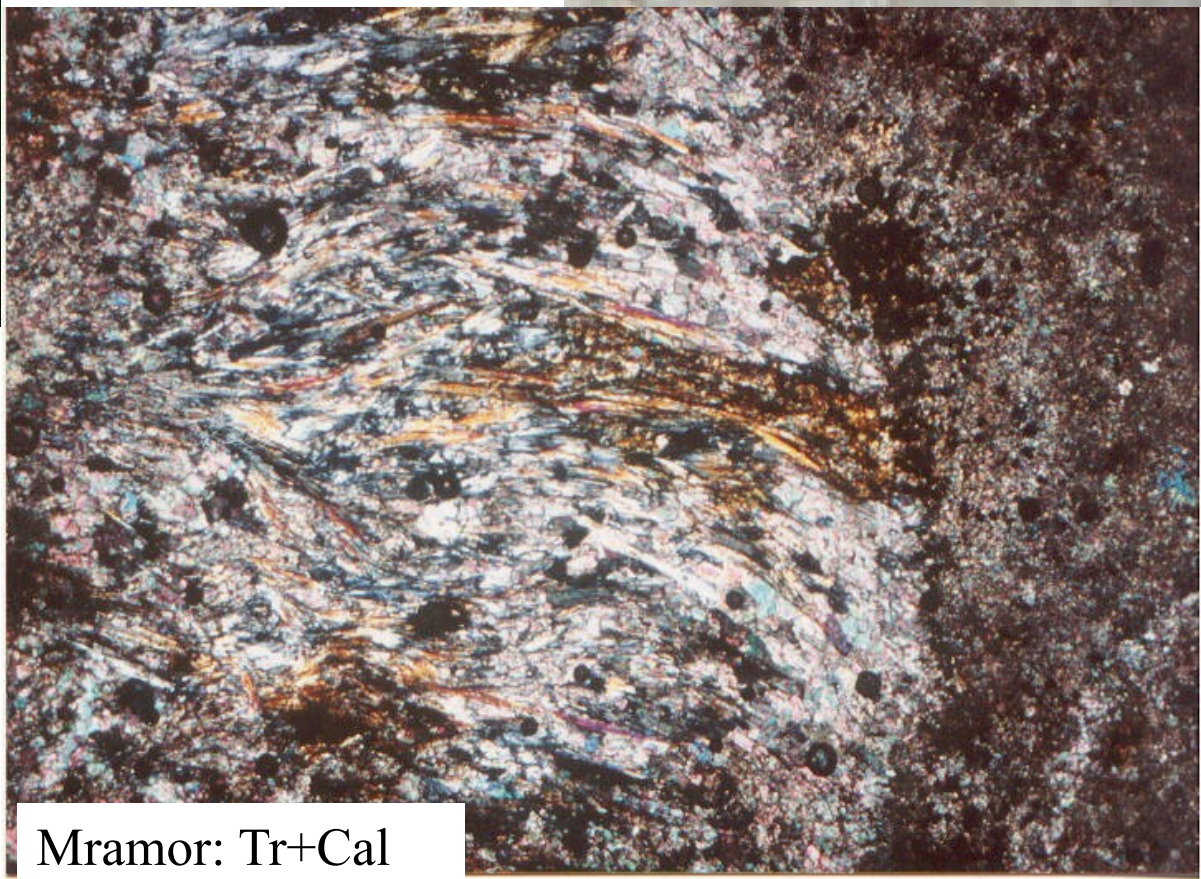
Mramor



Wo

Cal

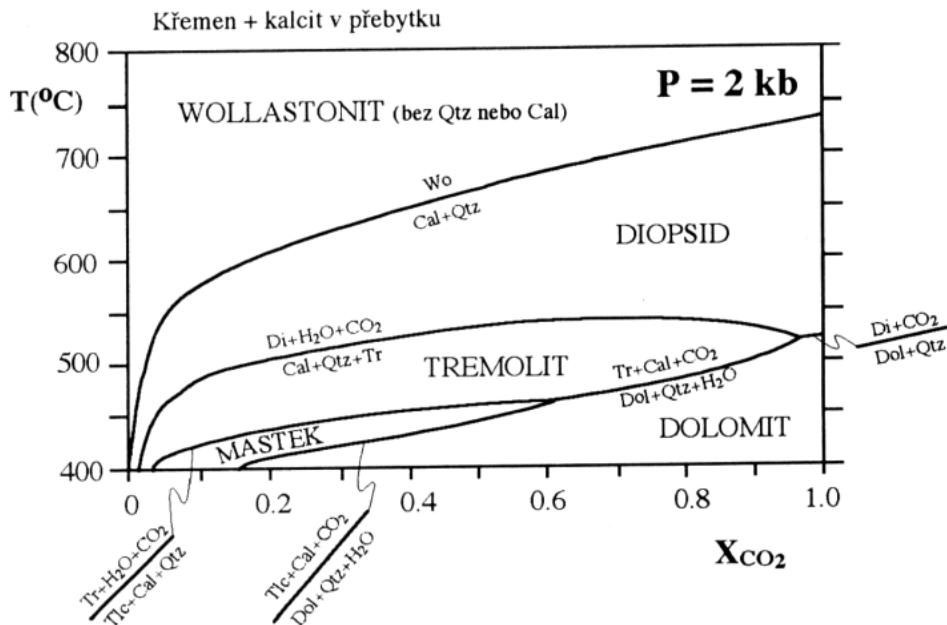
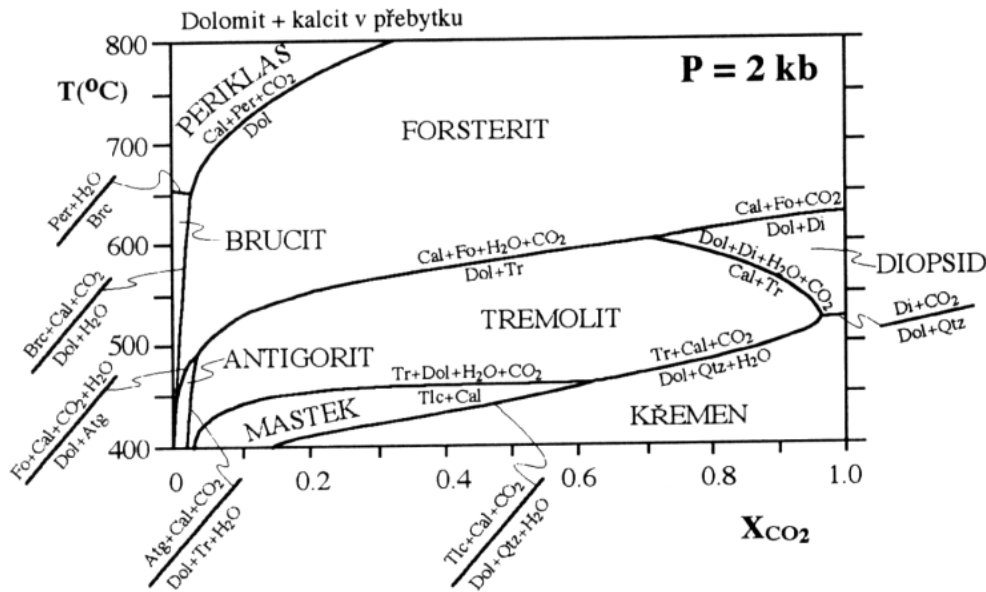
*Xenolit mramoru v tonalitu*



Mramor: Tr+Cal

## Typické minerály karbonátových hornin:

Křemen	$\text{SiO}_2$
Kalcit	$\text{Ca}(\text{CO}_2)_3$
Wollastonit	$\text{CaSiO}_3$
Granát	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
Tremolit	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})$
Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$

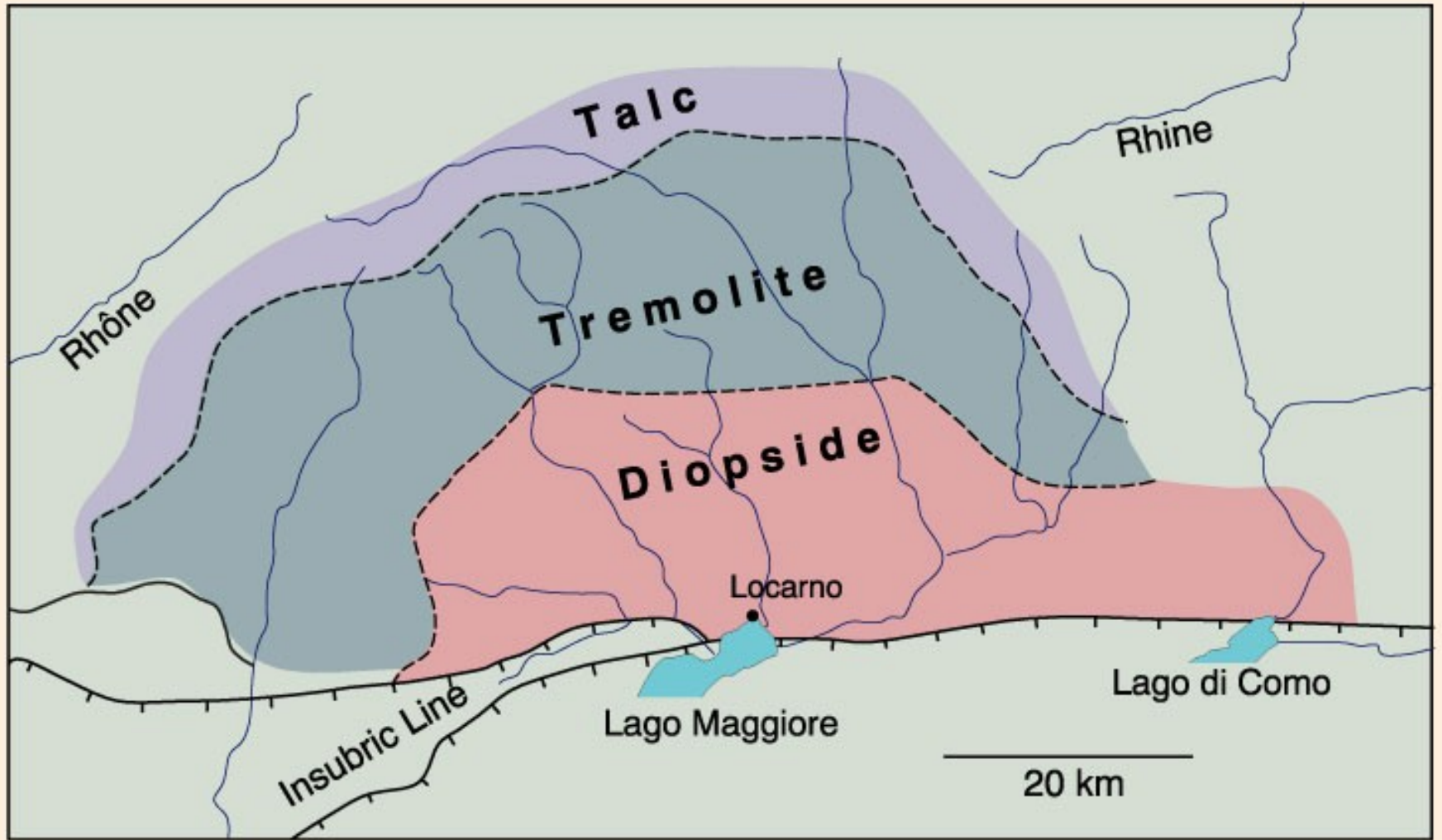


Důležitou roli hraje také nasycenost systému  $\text{SiO}_2$

V dolomitických vápencích (dolomit a kalcit v přebytku):

1) pole stability tremolitu posunuto do vyšších teplot

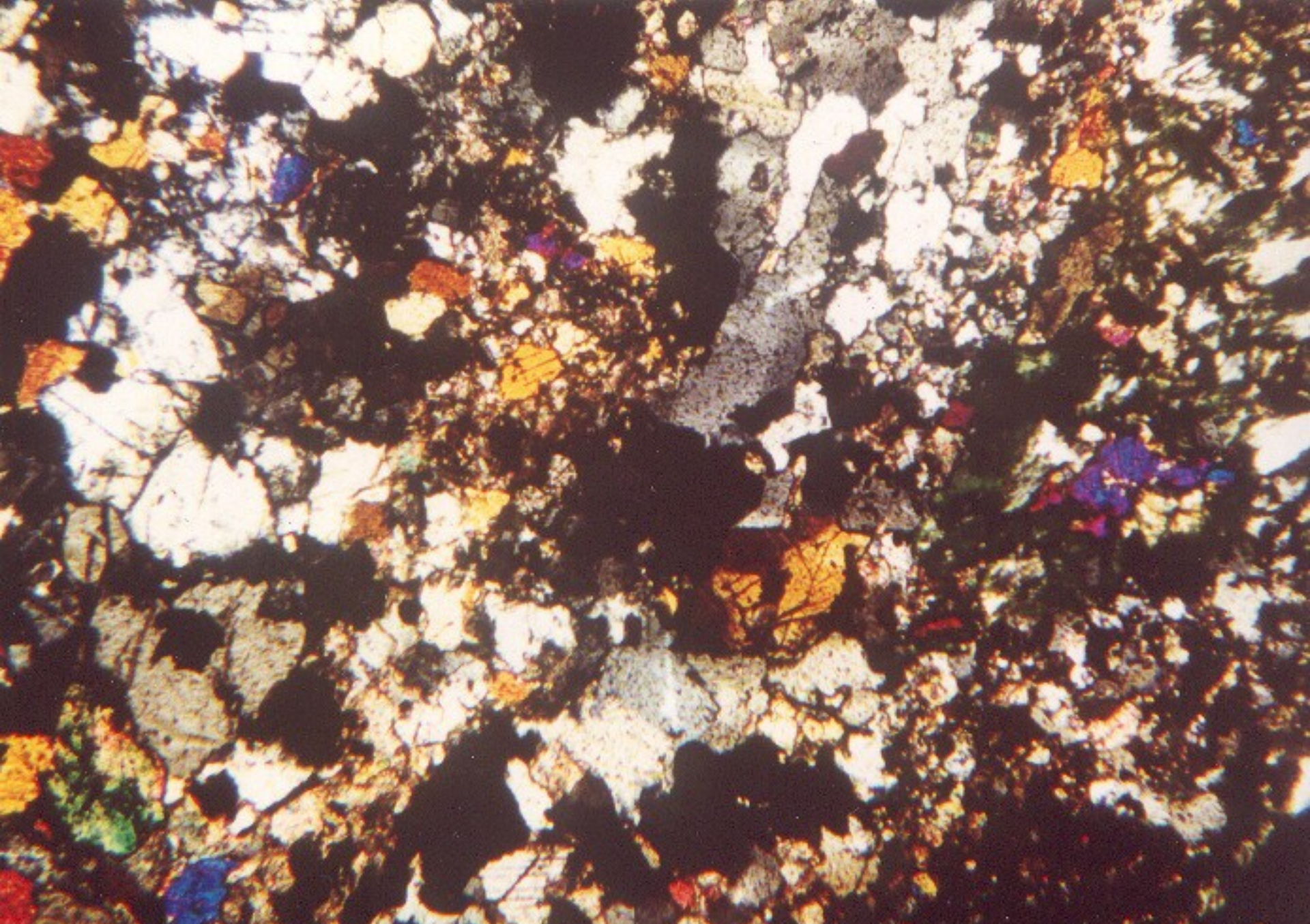
2) v oblasti vysokých teplot a nízkého  $X_{\text{CO}_2}$  (až do  $X_{\text{CO}_2} = 0.3$  pro  $800^\circ\text{C}$ ) je stabilní forsterit (asociace  $\text{Cal}+\text{Fo}+\text{CO}_2$ ) namísto wollastonitu



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.



- ***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
- problémem je odhad tlaku
- systému CAS( $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ ), i když horniny prakticky vždy obsahují také Mg,  $\text{Fe}^{2+}$  a často také  $\text{Fe}^{3+}$ , F
- dochází často k metasomatóze (přínosu a odnosu látek nepočítáme-li  $\text{H}_2\text{O}$  a  $\text{CO}_2$ )
- 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  $\text{H}_2\text{O}$ , silné projevy metasomatózy, většinou kontaktního, méně regionálního původu
- b) erlány - většinou regionálního původu, projevy metasomatózy slabé, jednoduché minerální asociace
- c) rohovce - většinou kontaktního původu, velmi jednoduché minerální asociace
- d) rodingity – metasomatického původu, vysoká aktivita  $\text{H}_2\text{O}$ , jsou vázané na serpentinity

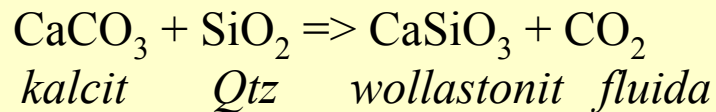
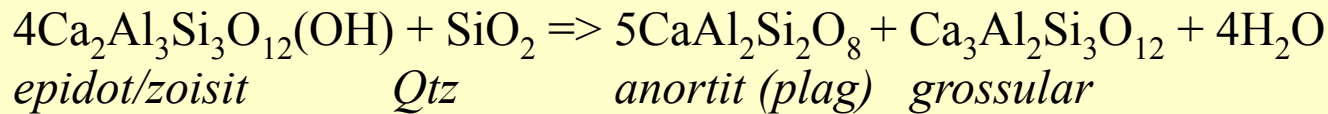


Erlan: Di+Pl+Qtz

# *Minerální reakce v systému*

## *CAS(H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>) a CMAS(H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>)*

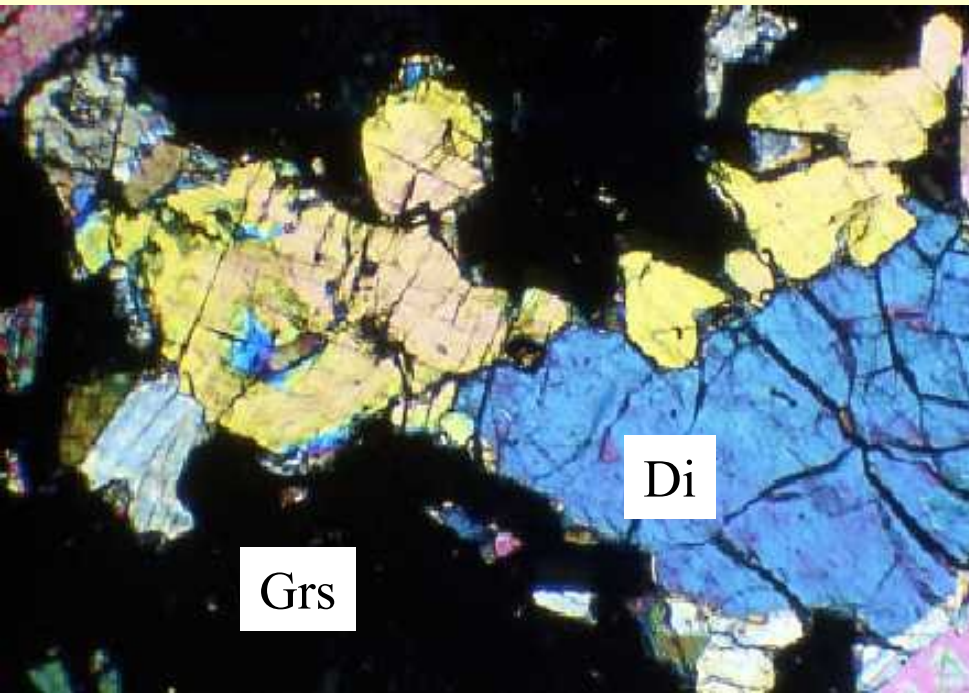
- T-X<sub>CO<sub>2</sub></sub> diagramech je experimentálně velmi dobře ověřený:
- typické reakce:
- CS(CO<sub>2</sub>): kalcit + křemen = wollastonit + CO<sub>2</sub>
- CAS: grosular + křemen = anortit + wollastonit
- CAS(CO<sub>2</sub>): anortit + křemen + kalcit = grosular + CO<sub>2</sub>
- CAS(H<sub>2</sub>O): klinozoit + křemen = grosular + anortit + H<sub>2</sub>O

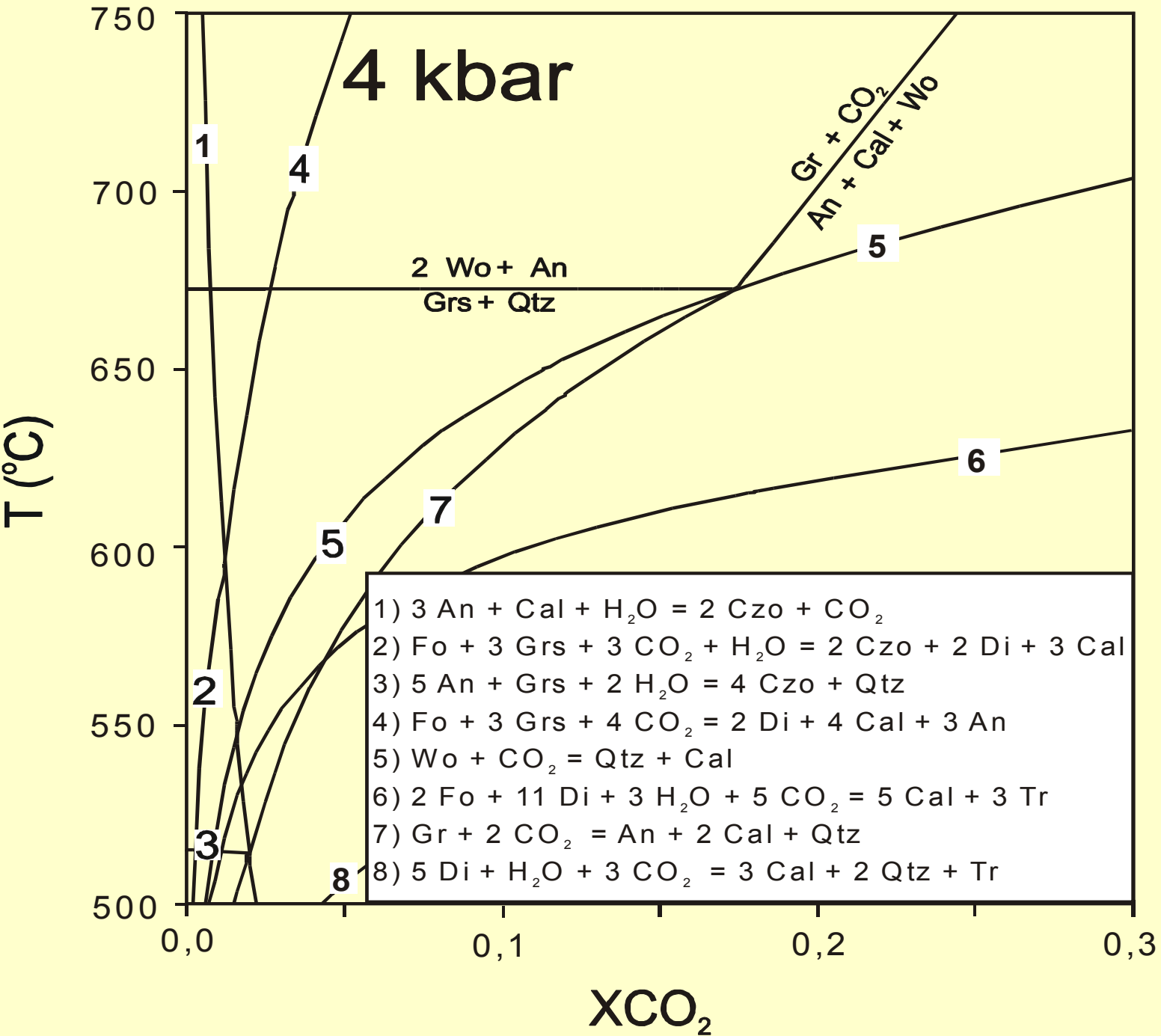


# Vápenato-silikátové horniny

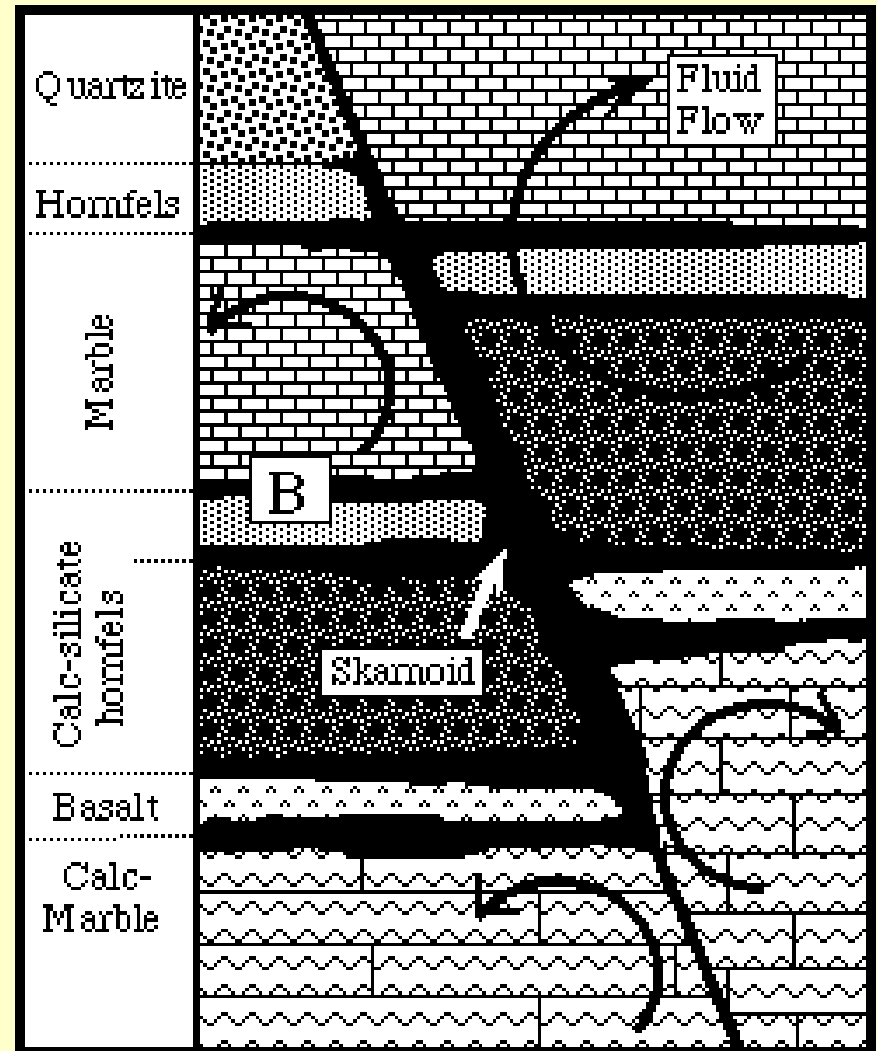
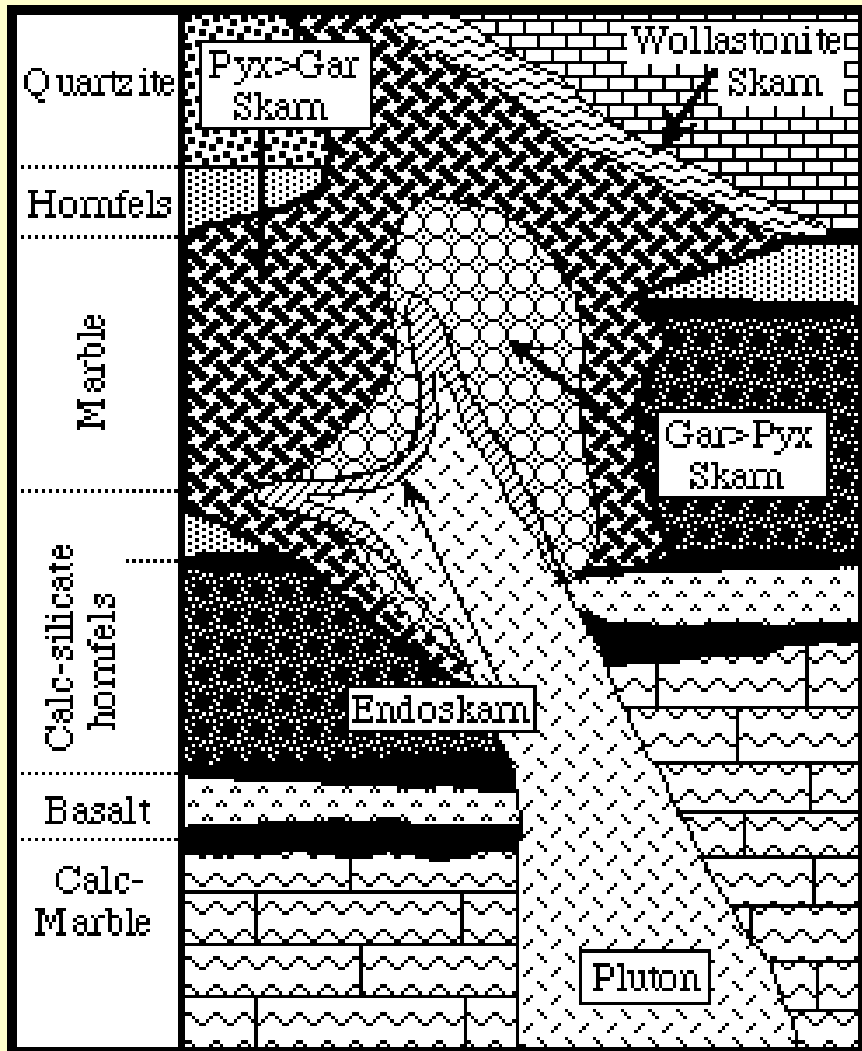


Porfyroblast grossularu v mramoru



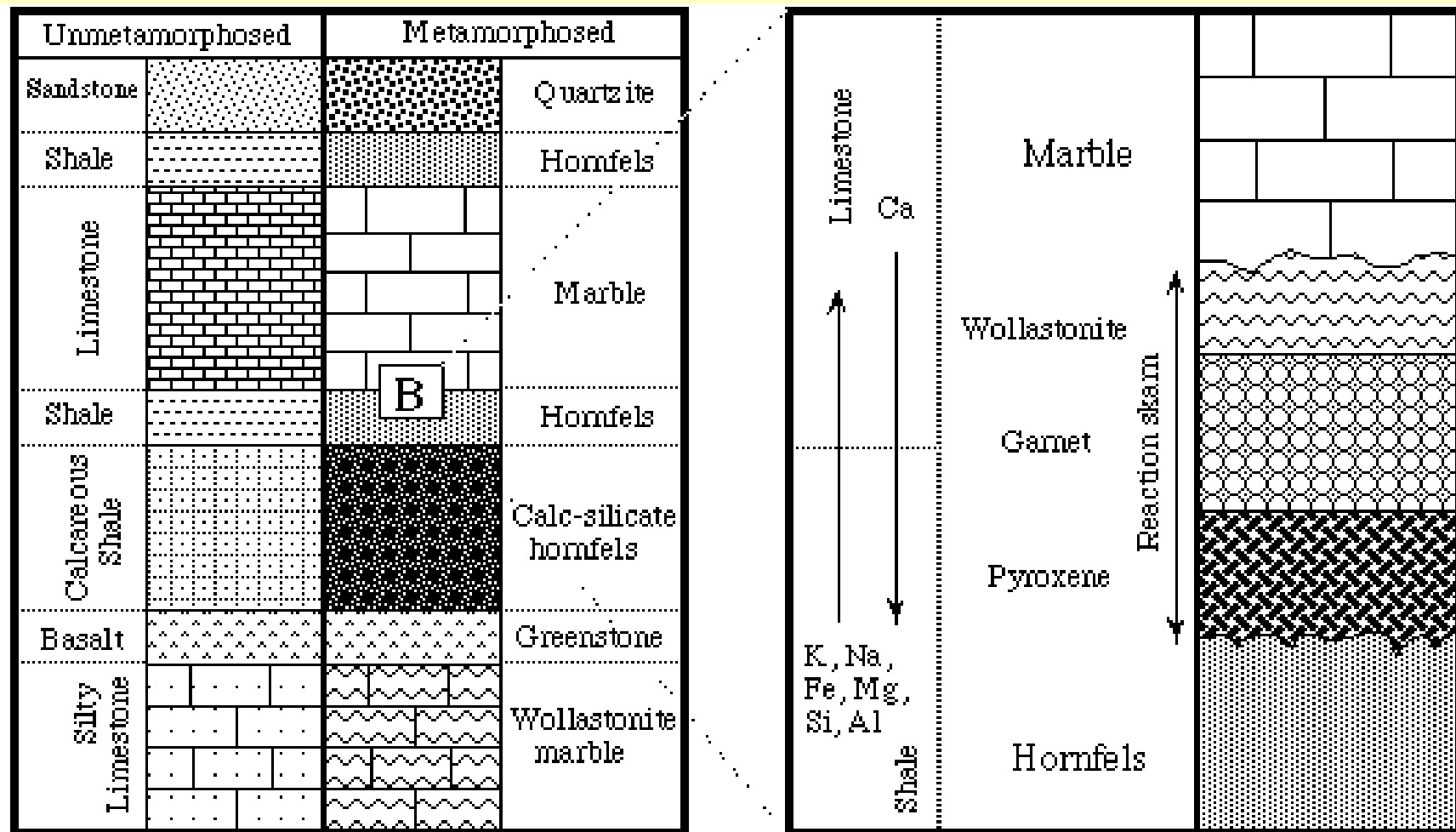


skarny – silikátová hornina obsahující Ca-Fe-Mg . Typické minerály: granáty (grosular-andradit-almandin), pyroxen (diopsid-hedenbergit), plagioklasy (podružně), wollastonit, epidot, vesuvian, kalcit, křemen, skapolit.

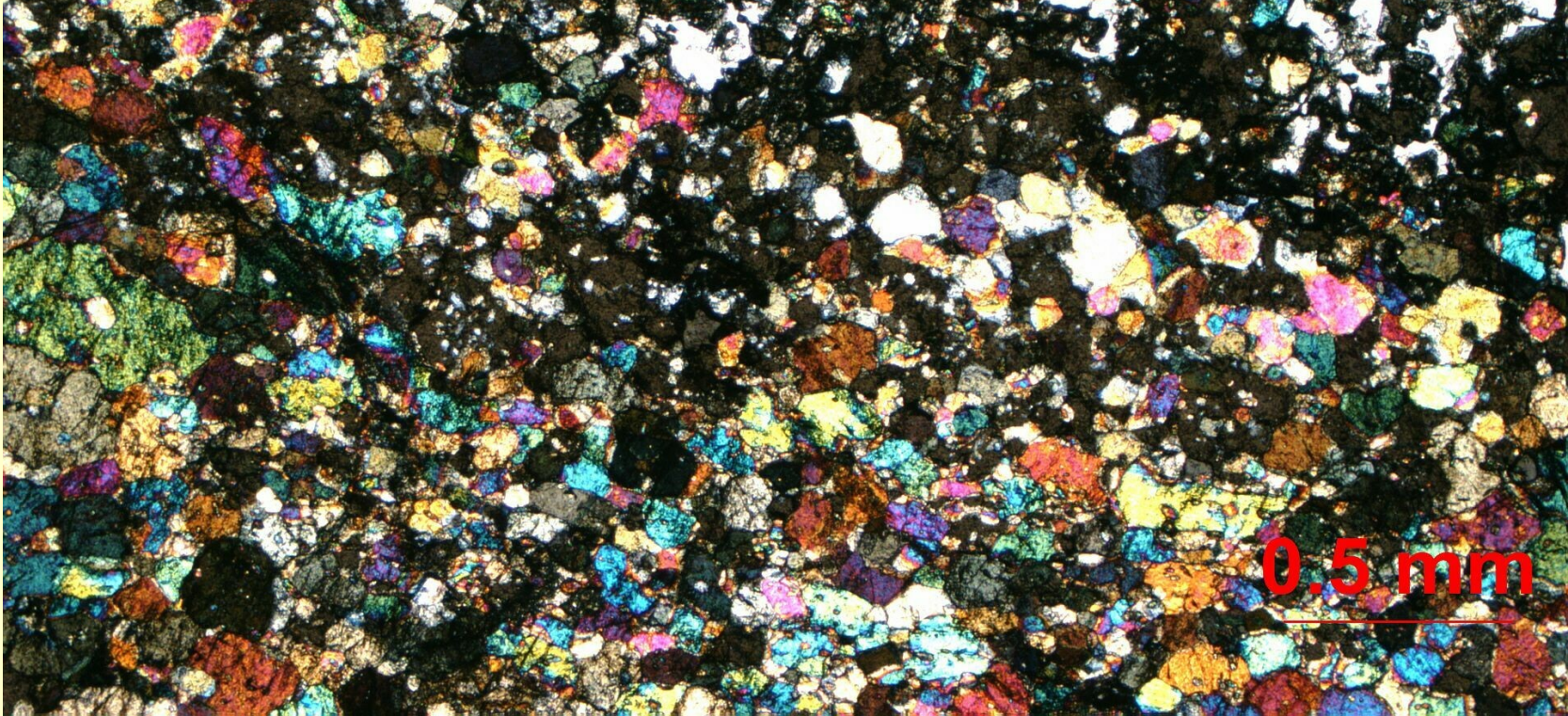
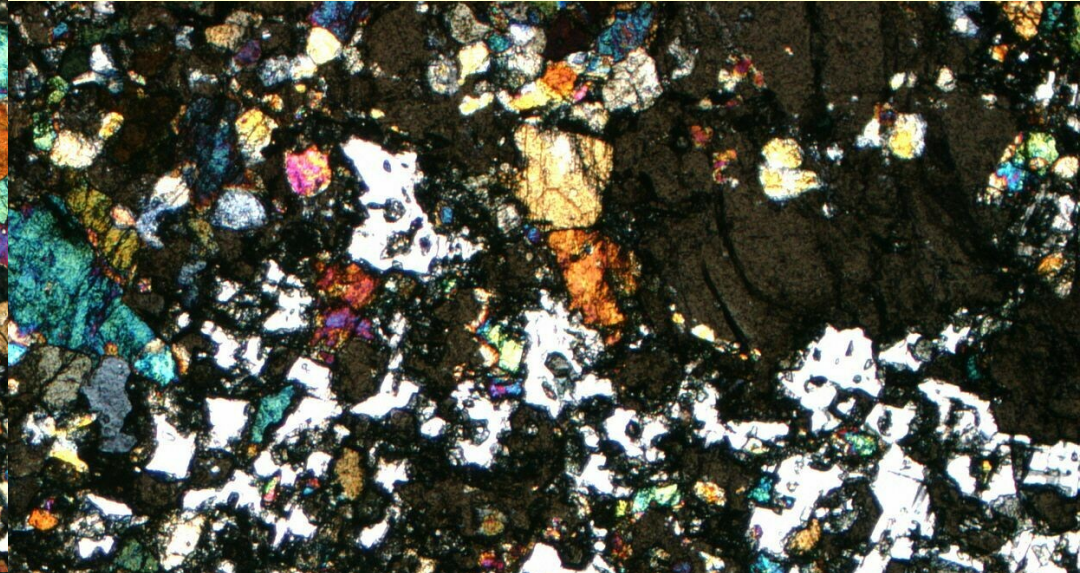
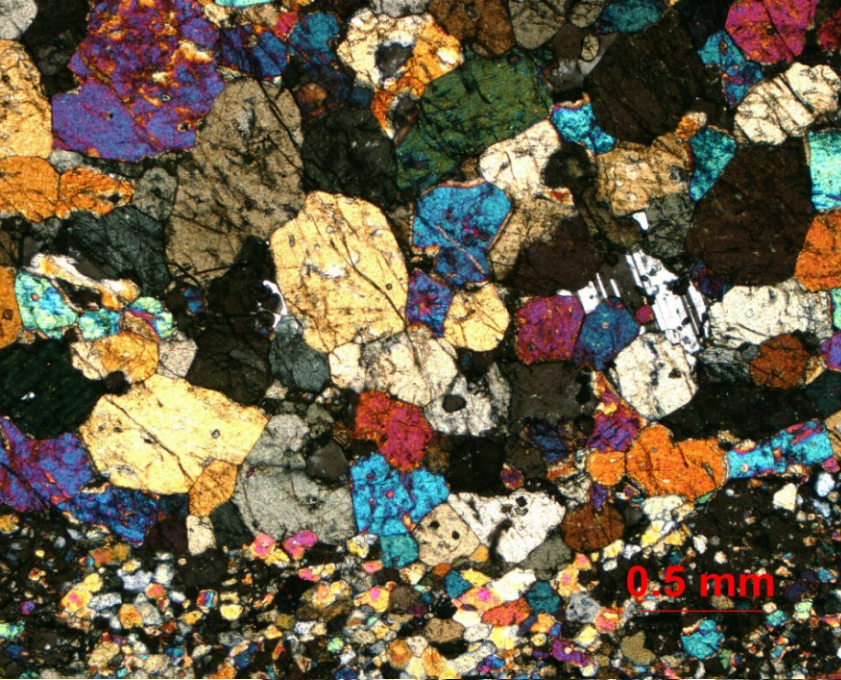


1) metasomatóza mezi dvěma chemicky kontrastními horninami během regionální metamorfózy ( např. rohovcové konkrece v mramoru)

křemen  $\Rightarrow$  wollastonit  $\Leftarrow$  kalcit



# Skarn



Px +  
Grt +  
Mag +  
Qtz

0.5 mm



# 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
- Naprostá většina obrazového materiálu pochází z celé řady internetových stránek věnujících se metamorfní petrologii