

# Metamorfni petrologie II

## 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.

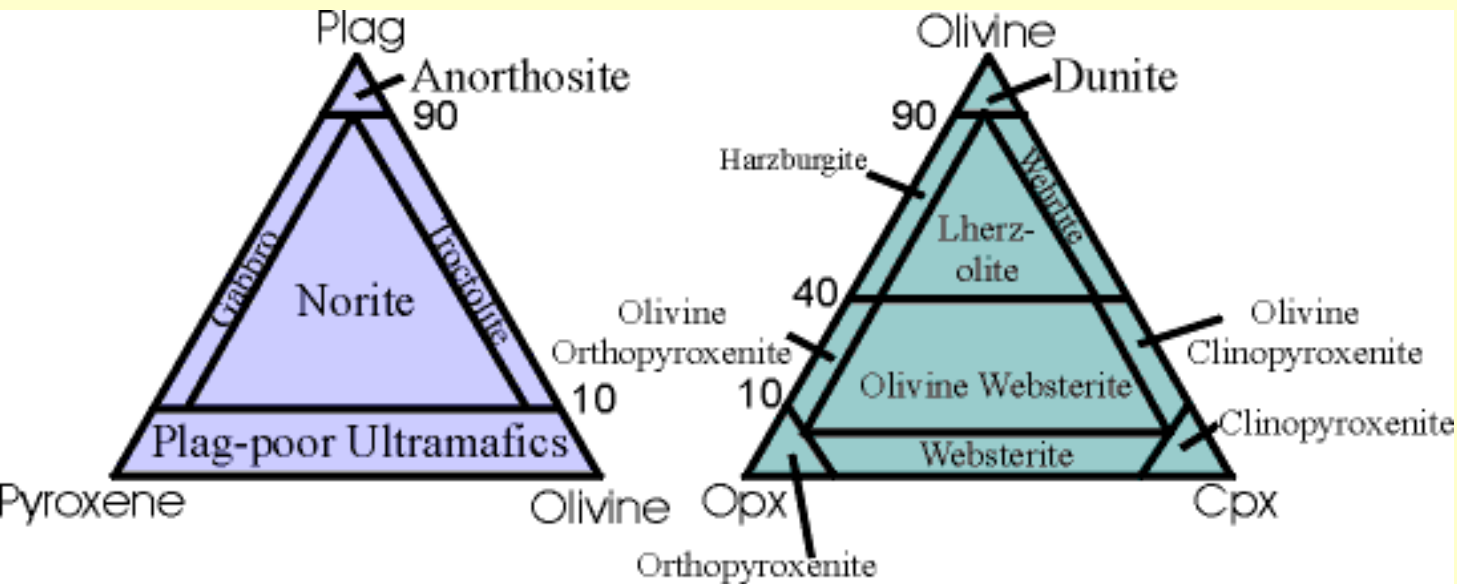
- hlavní horninový typ zemského pláště
- složeny hlavně z Mg-silikátů, světlé součástky < 10 %
- geochemicky – utrabazické horniny (SiO<sub>2</sub> < 45 hm %)

**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

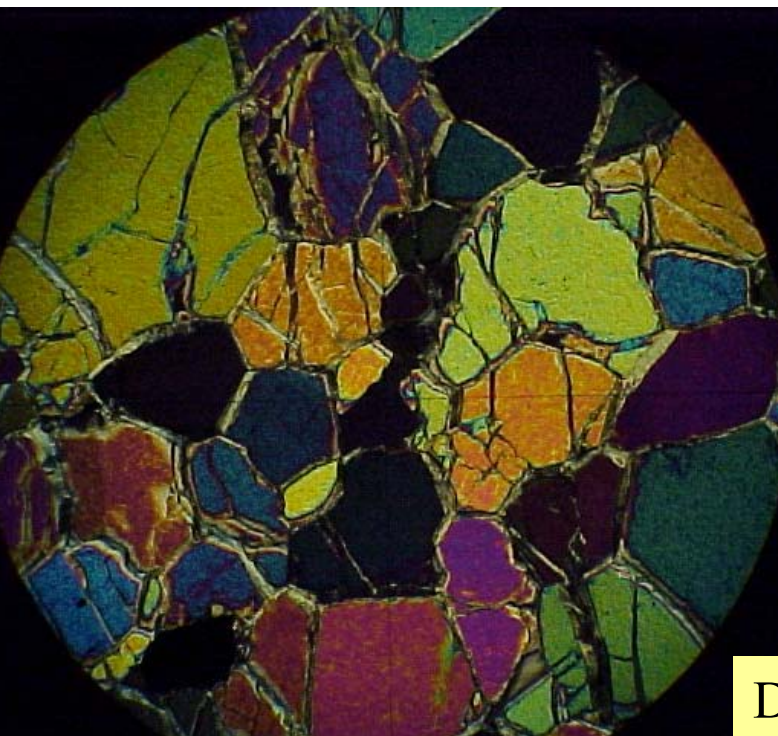


## Nejčastější alterace:

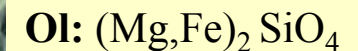
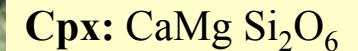
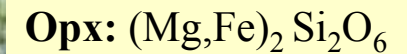
Olivín + ortopyroxen  
 → serpentín + Fe oxidy + mastek + brucit

Klinopyroxen → amphibol + hydratované Ca-Al silikaty + chlorit

Plagioklas → Ca-Al silikaty + jílové minerály + kalcit



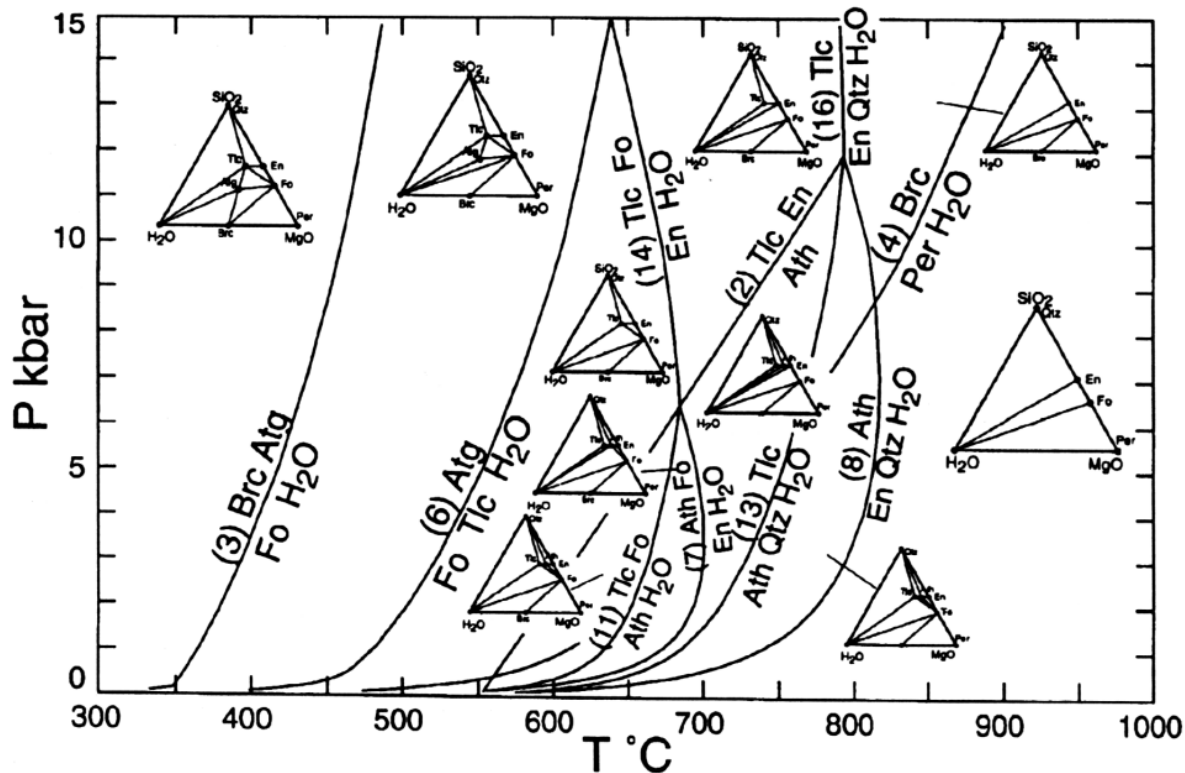
Dunit



- 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
-

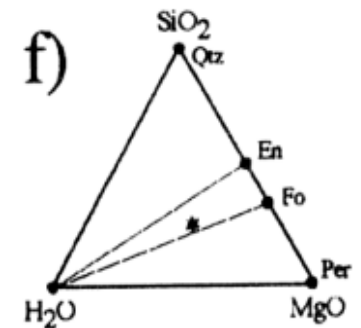
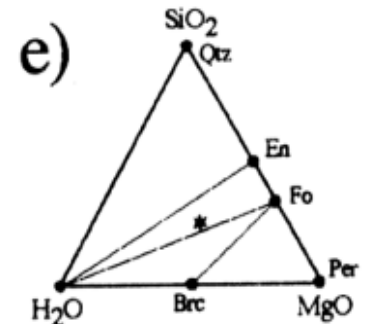
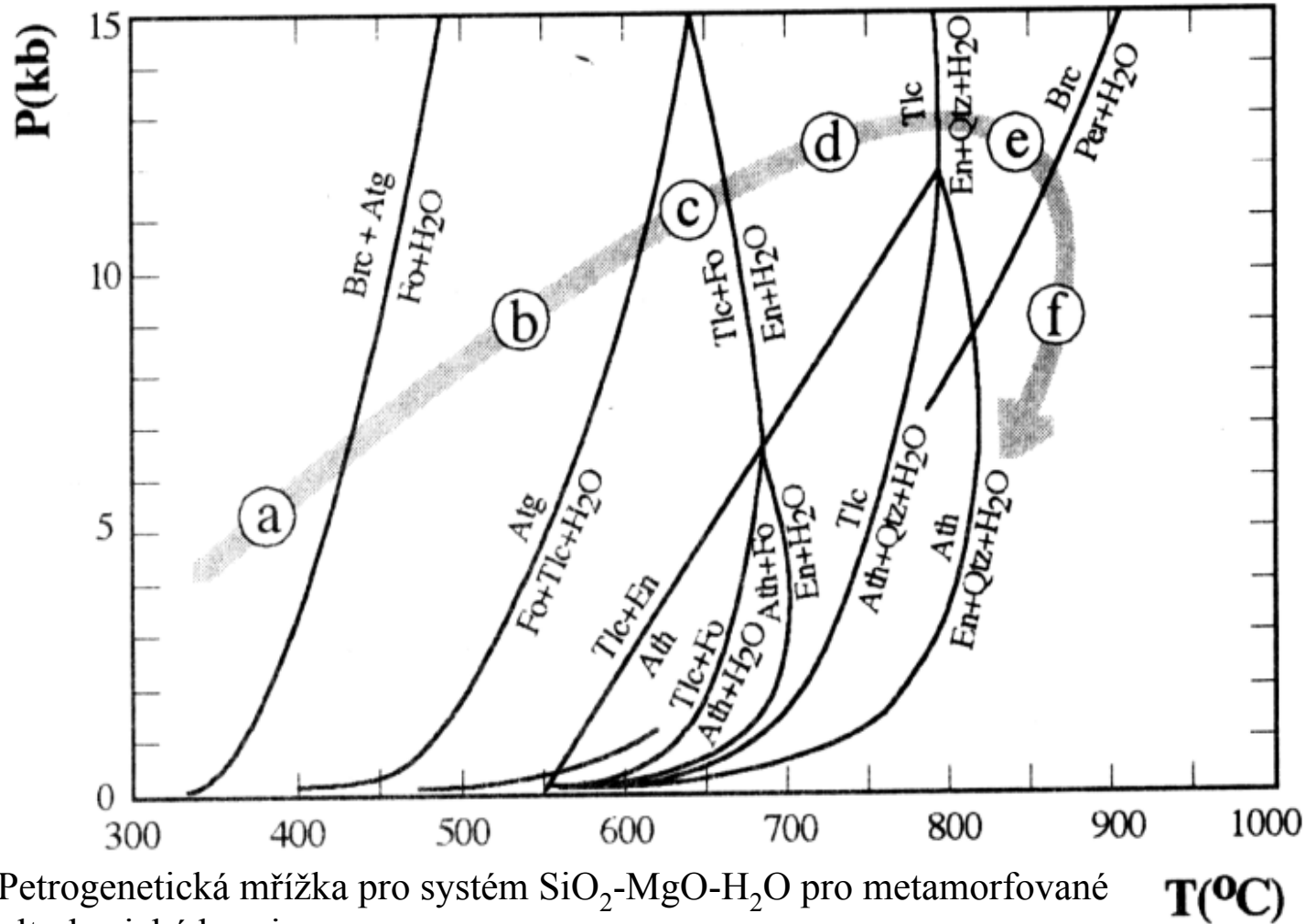
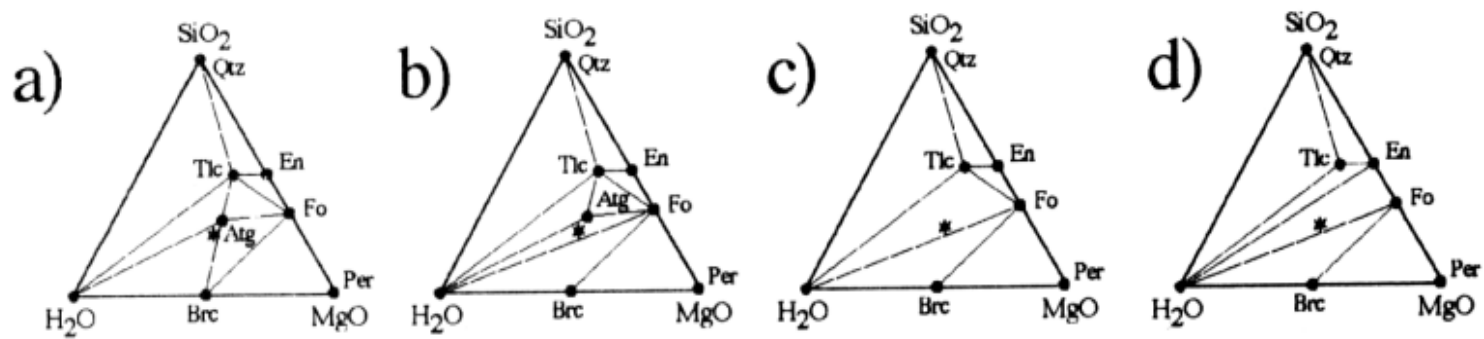
# • *Fázové vztahy v ultramafitech*

- systémy: CMS, MSH, CMSH,  $\pm$  FeO (FMSH, CFMSH),  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$
- **Systém  $\text{SiO}_2$ -MgO- $\text{H}_2\text{O}$**
- antigorit stabilní do cca 500-600°C (nejvyšší stupeň z minerálů serp. skupiny)
- antofylit (Mg-Oamf) stabilní mezi cca 600-800° při  $P < 12$ kbar
- progresivní metamorfóza – uvolňování  $\text{H}_2\text{O}$ , ta zůstává v systému



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	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
pyroxenických rohvců (nízký P)	forsterit + ortopyroxen + hornblend	spinel
granulitová (střední P)	forsterit + ortopyroxen + klinopyroxen	plagioklas
eklogitová (vysoký P)	forsterit + ortopyroxen + klinopyroxen + hornblend	spinel
	forsterit + ortopyroxen + klinopyroxen	granát

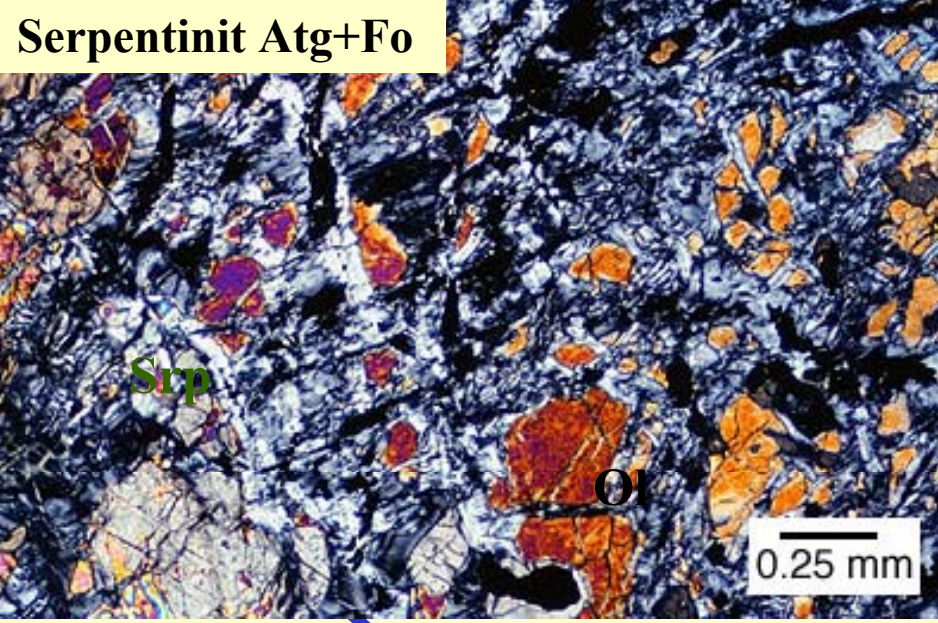


Petrogenetická mřížka pro systém  $\text{SiO}_2\text{-MgO-H}_2\text{O}$  pro metamorfované ultrabazické horniny

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



**Serpentinít Atg+Fo**



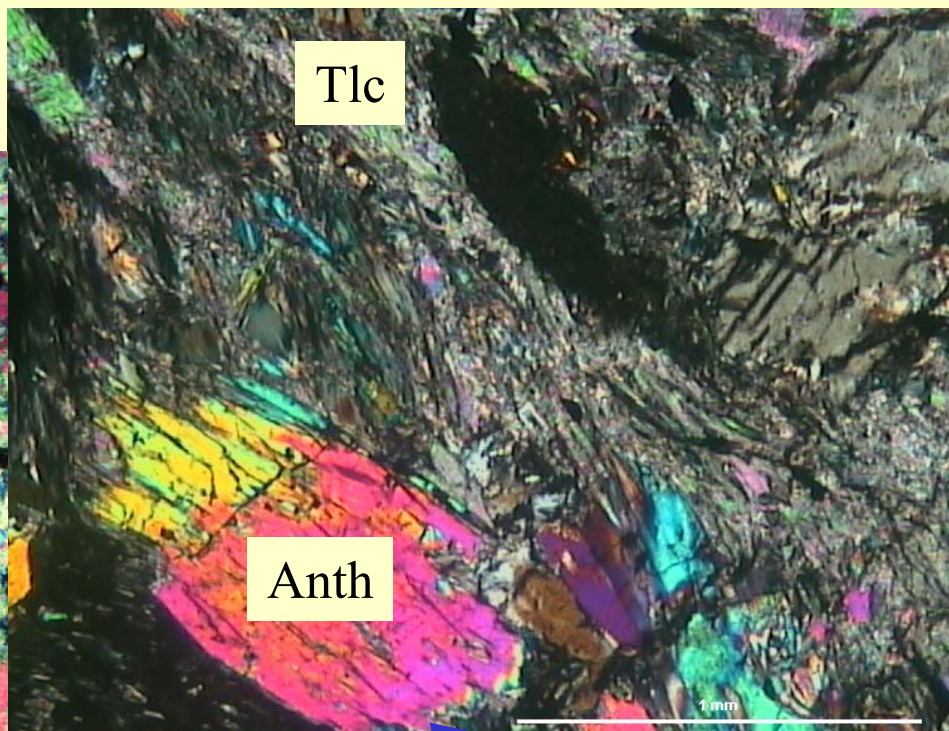
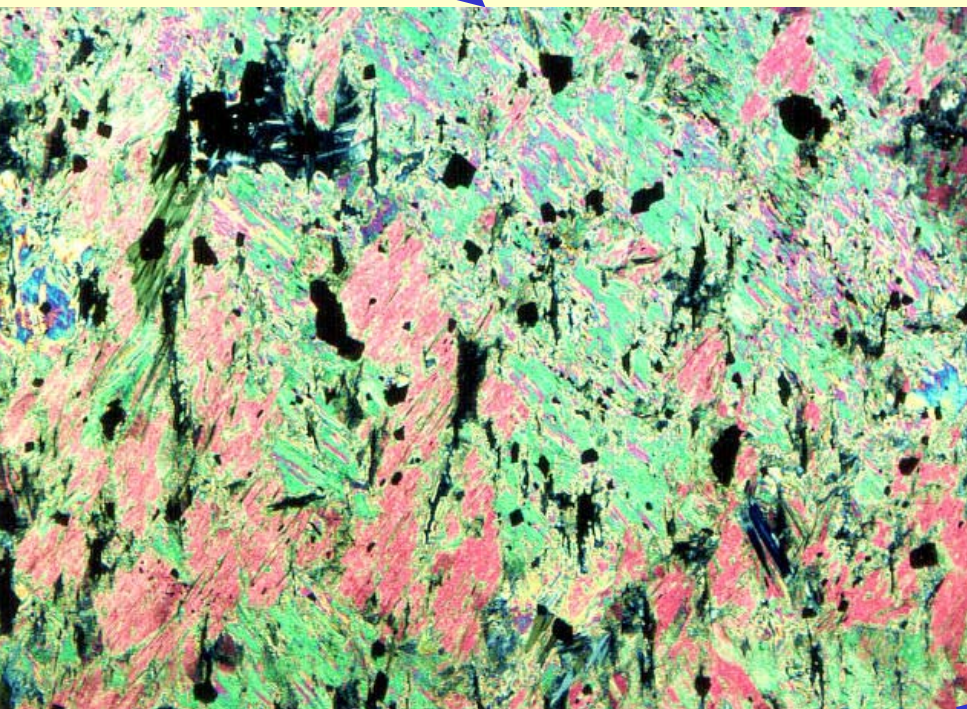
Srp

Ol

0.25 mm

**Tlc+Fo**

**Mastková břidlice**



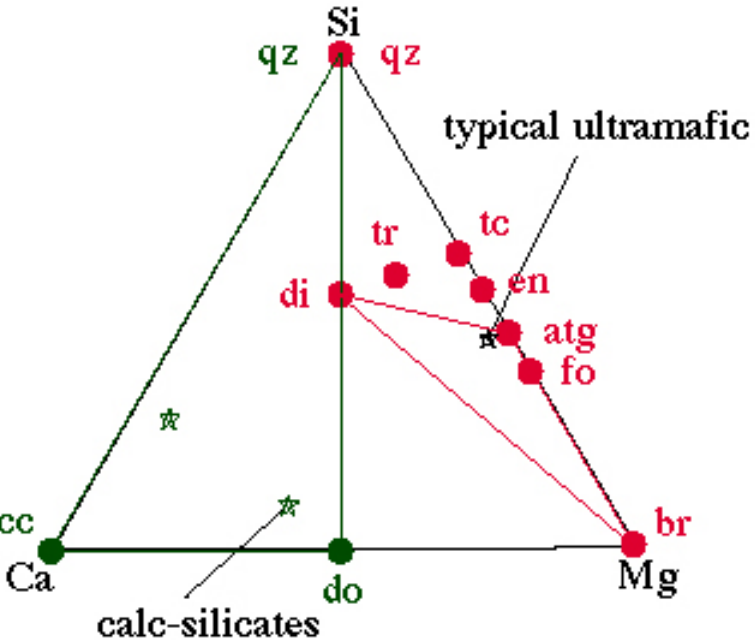
Tlc

Anth

1 mm

**Anth+Tlc**

**Antofylitová skalina**

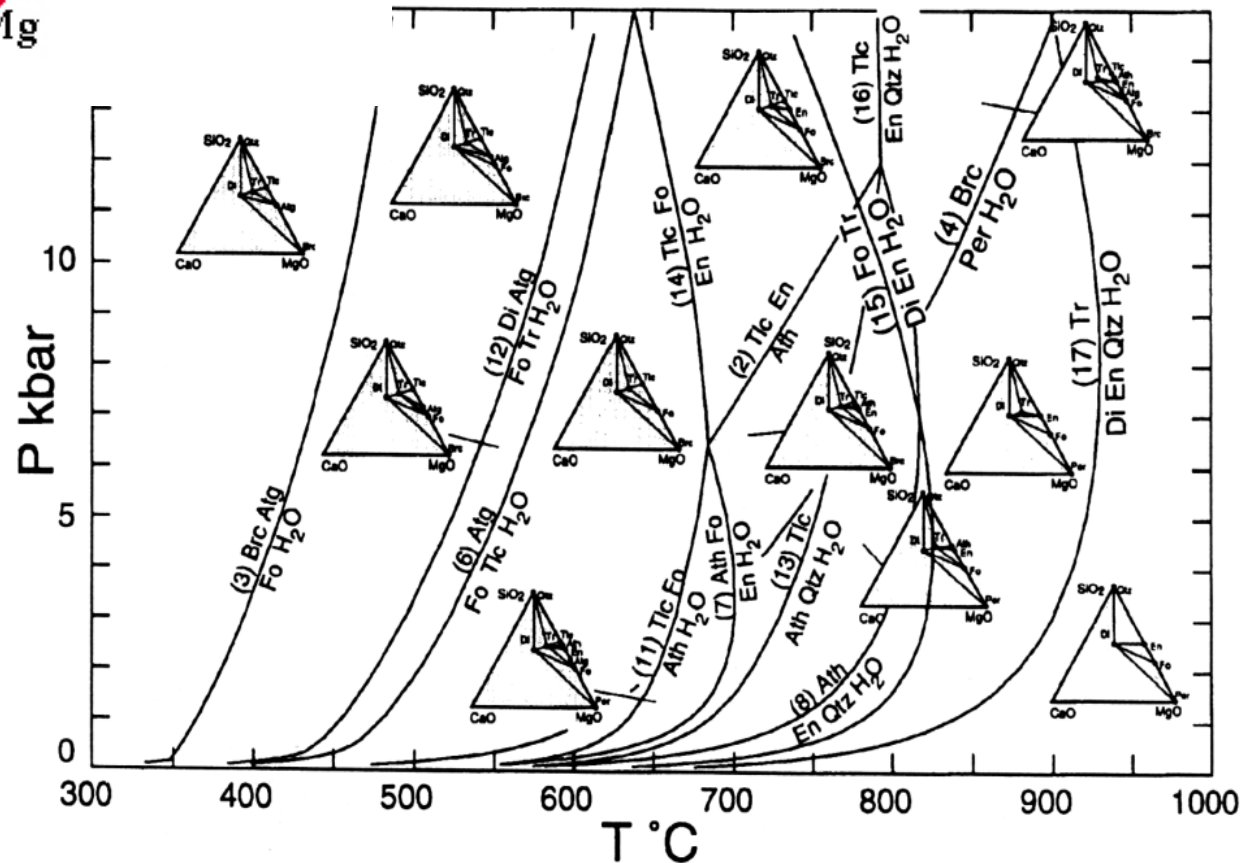


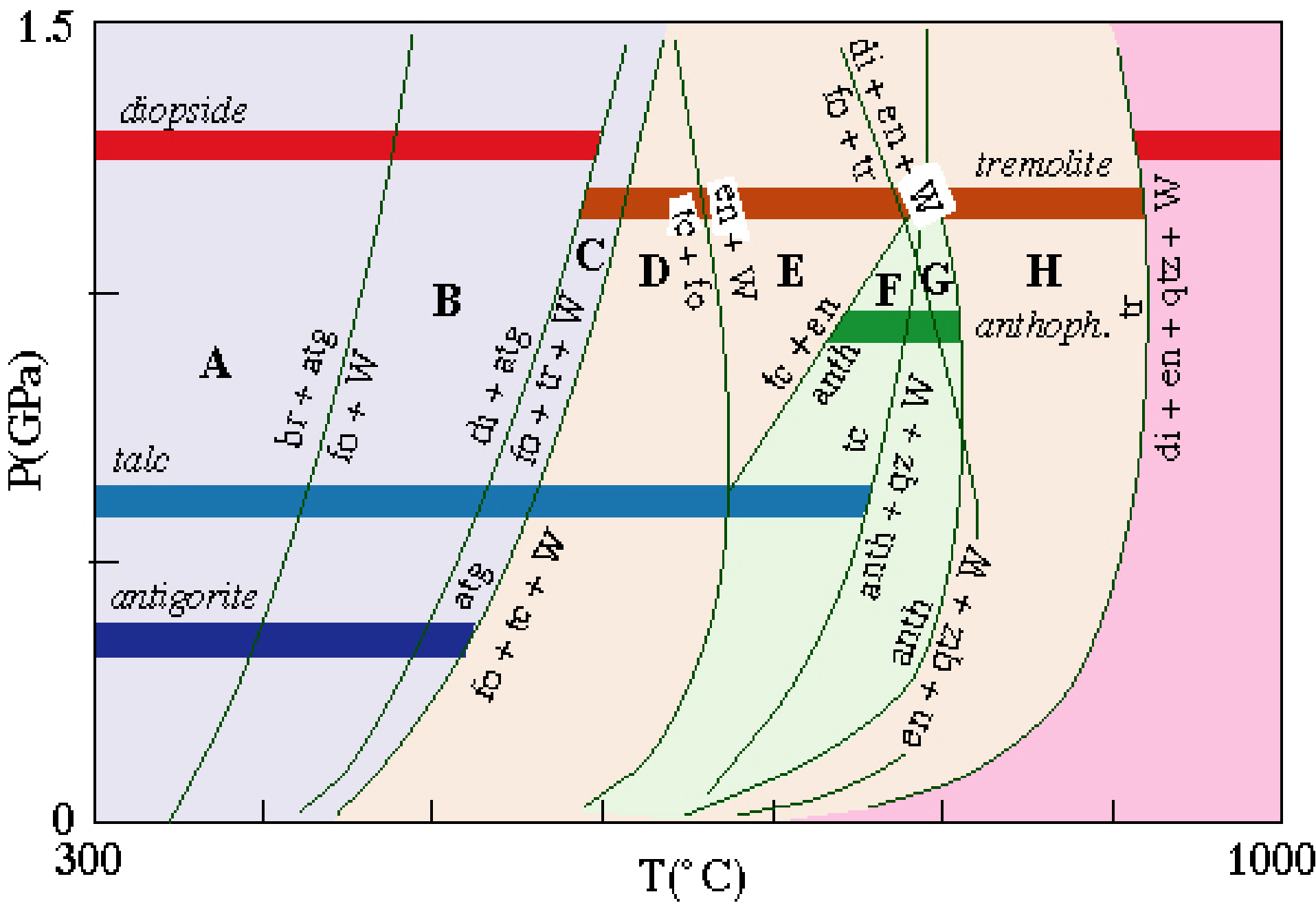
qz: quartz  
 tc: talc  
 tr: tremolite  
 en: enstatite  
 di: diopside  
 atg: antigorite  
 fo: forsterite  
 cc: calcite  
 do: dolomite  
 br: brucite

## Fázové vztahy v ultramafitech

- Systém  $\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO-H}_2\text{O}$
- projekce z pozice  $\text{H}_2\text{O}$  – 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)



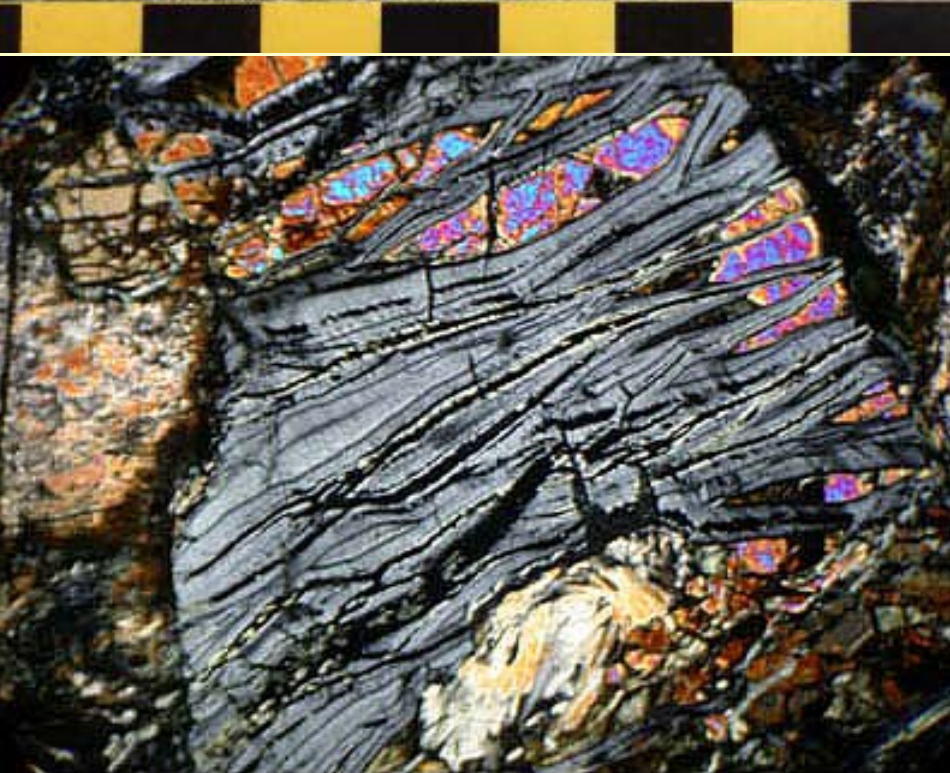




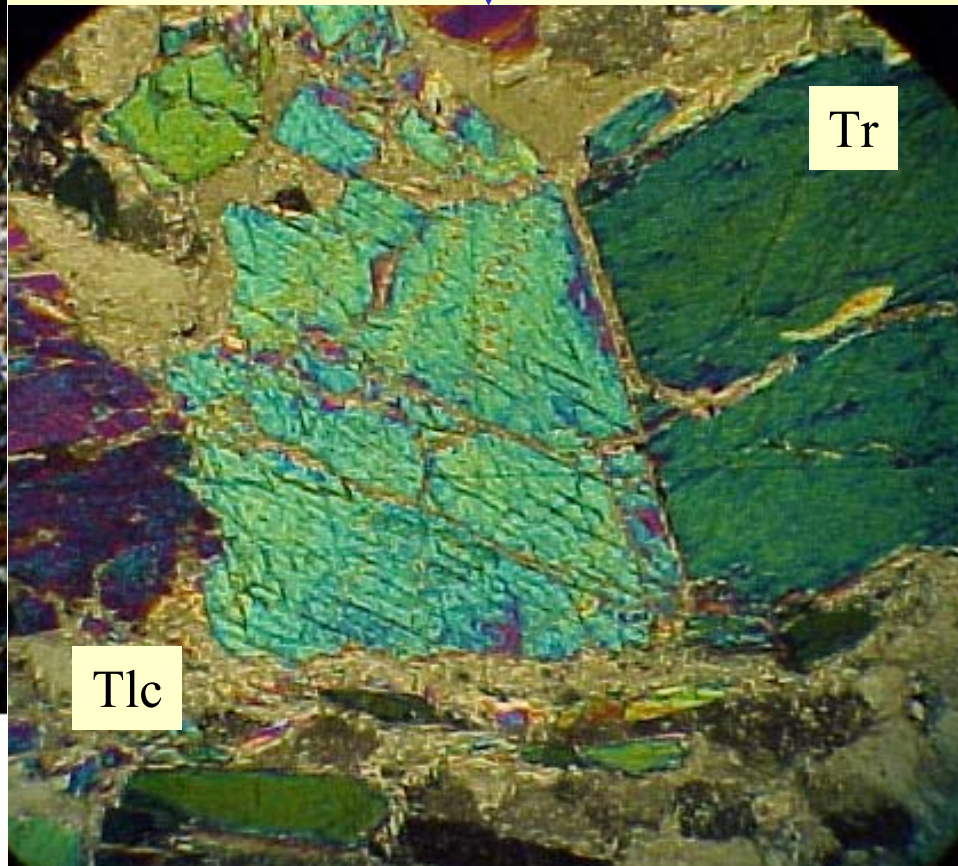
# Serpentinit

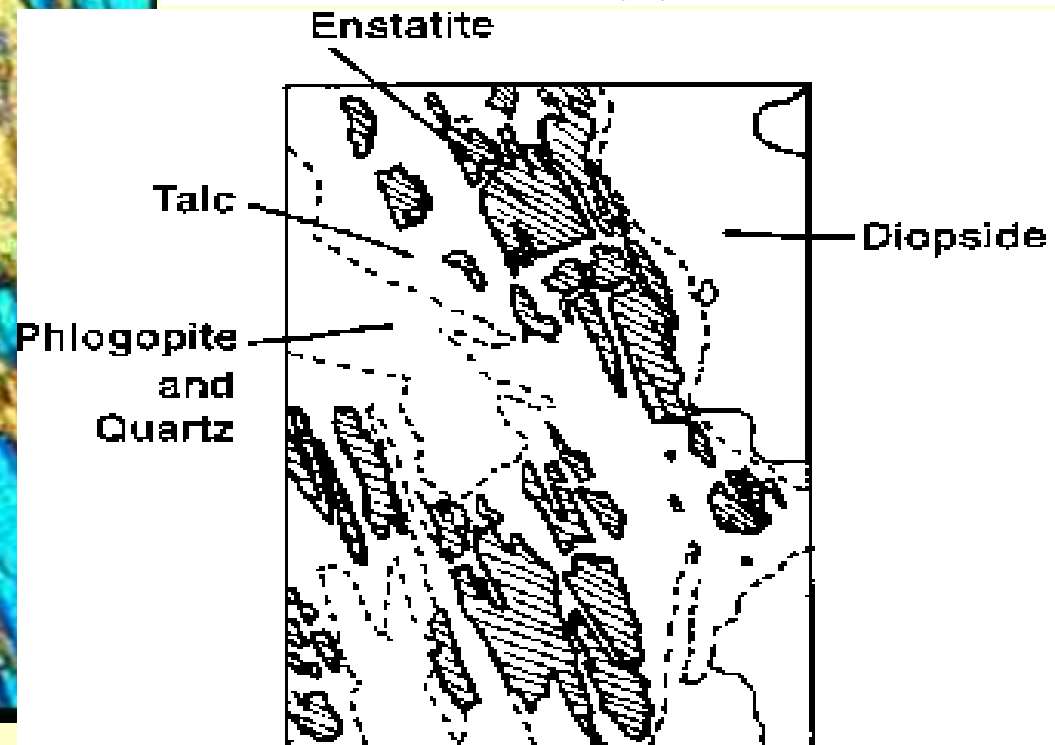
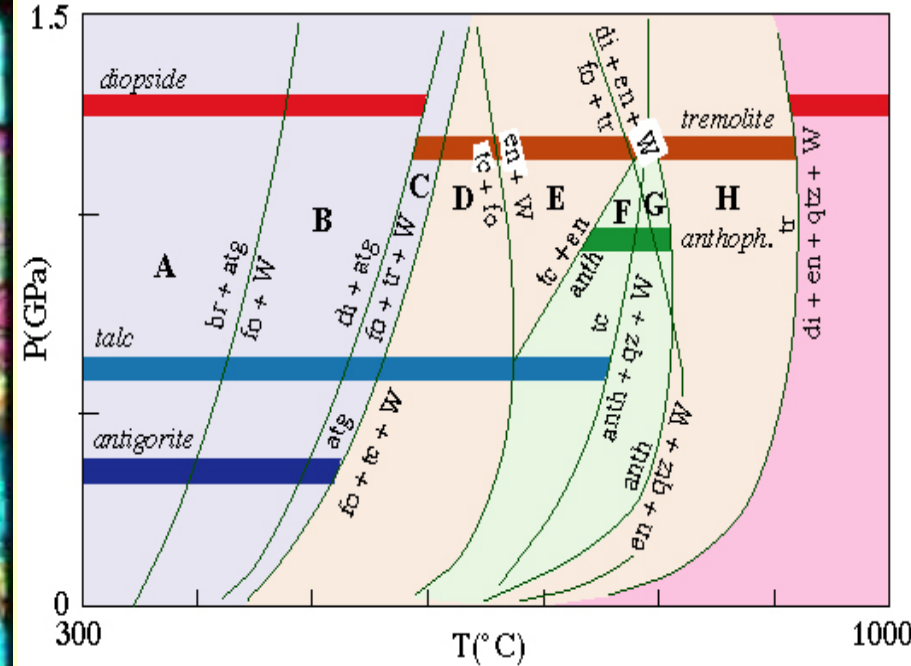
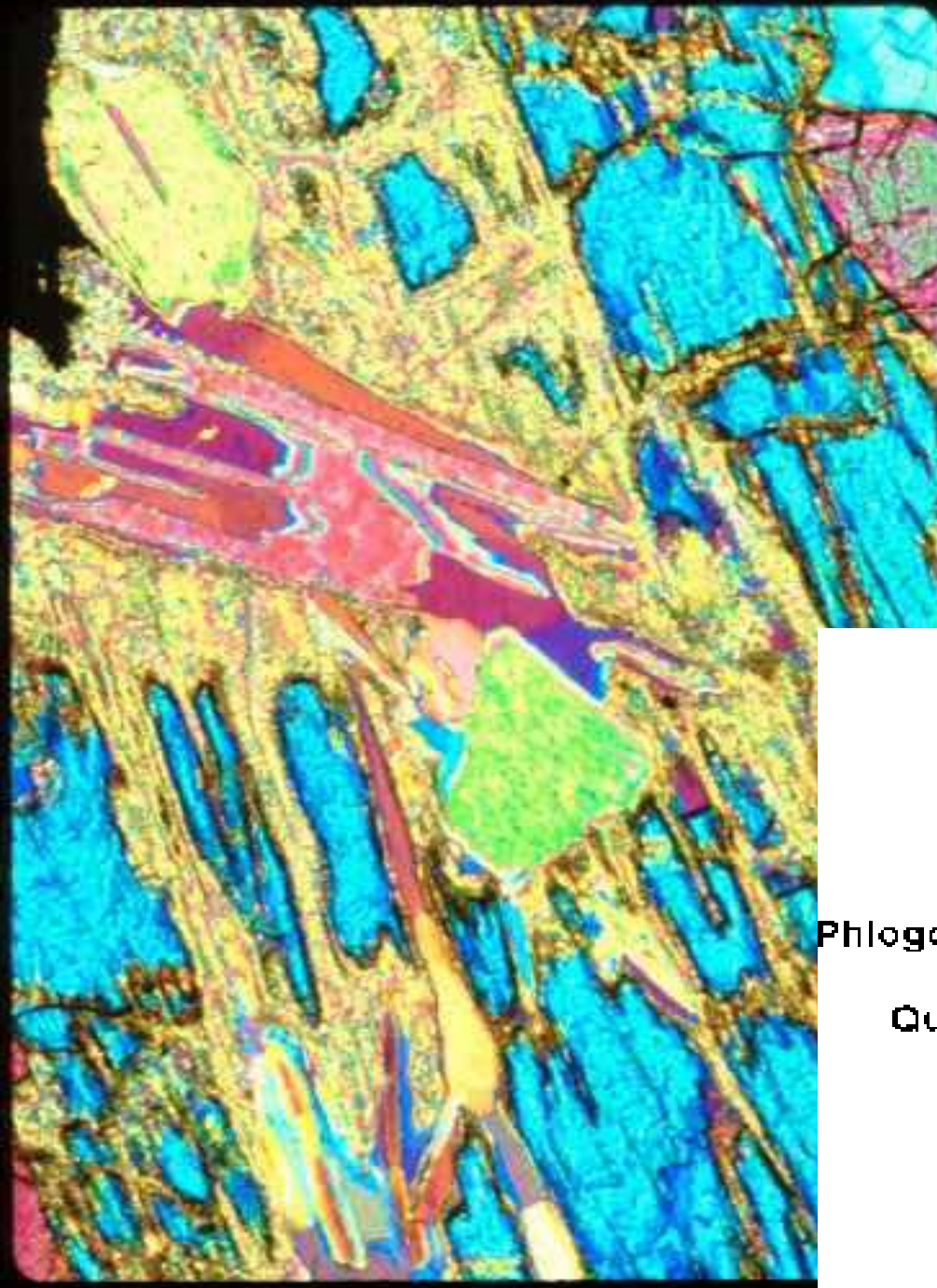


# Tremolit- mastková břidlice



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

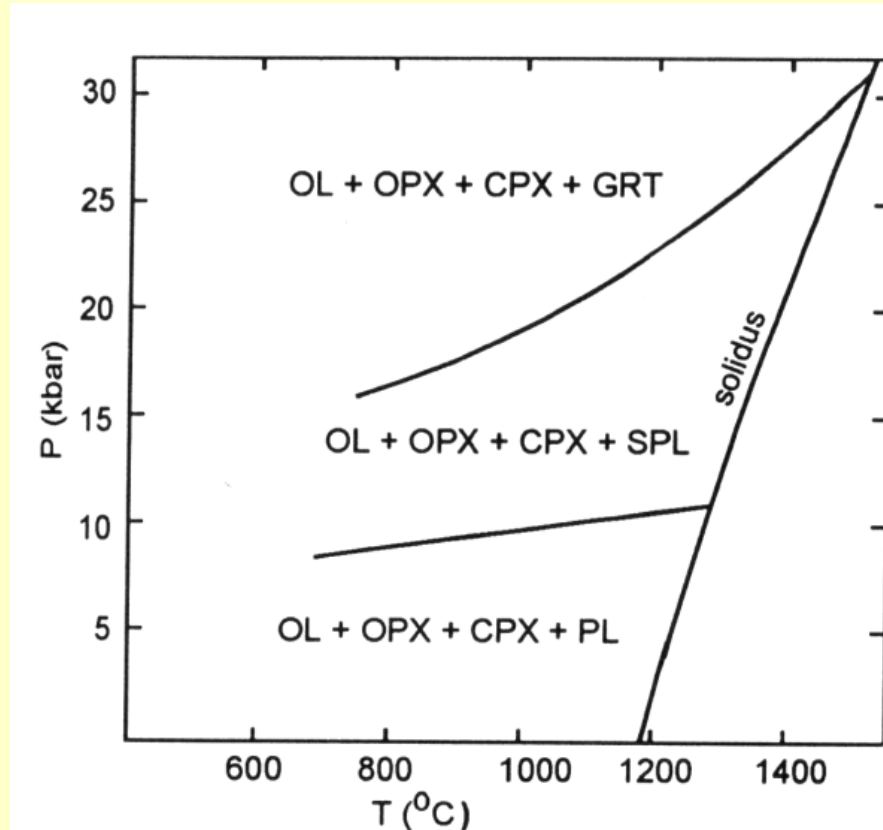


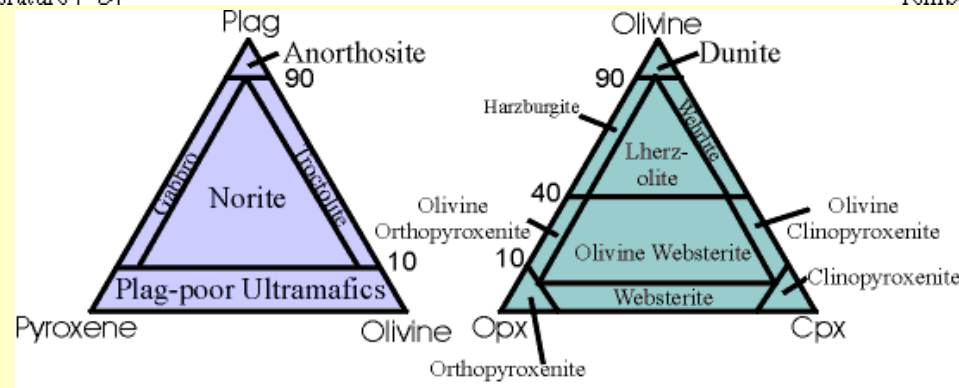
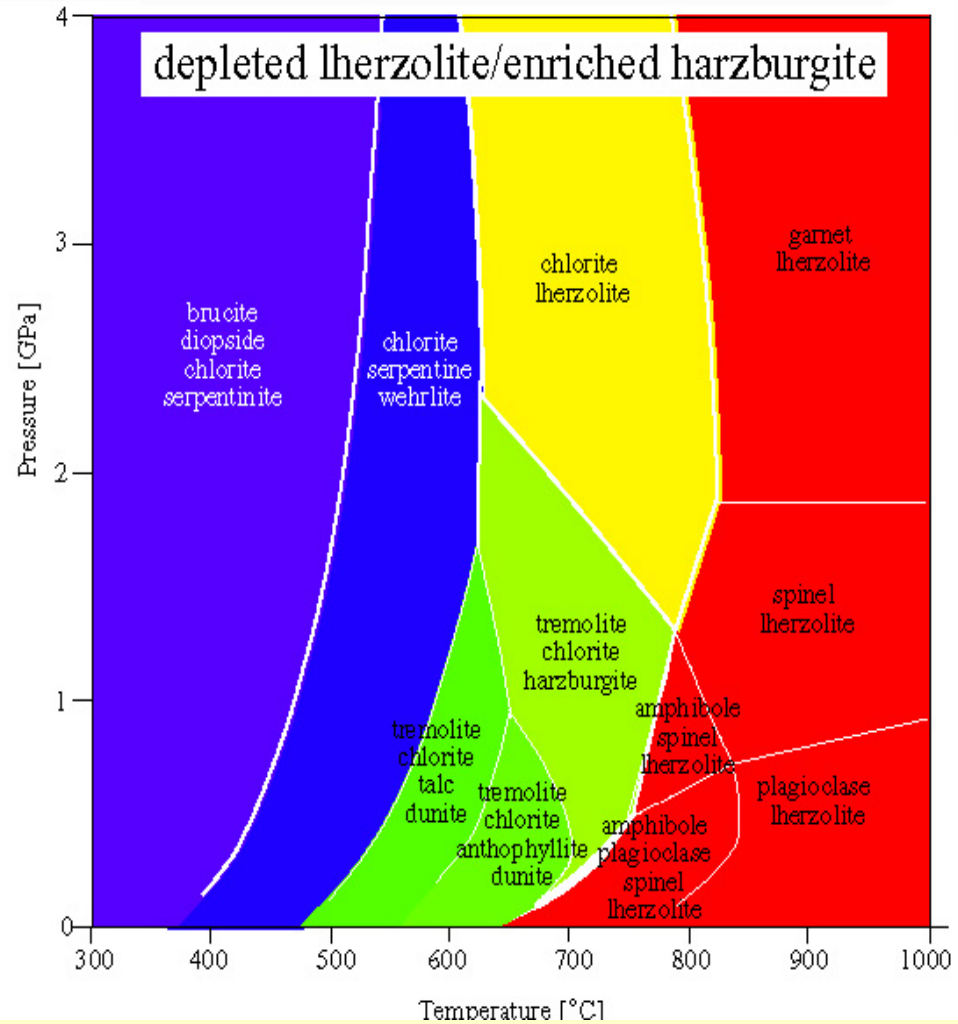
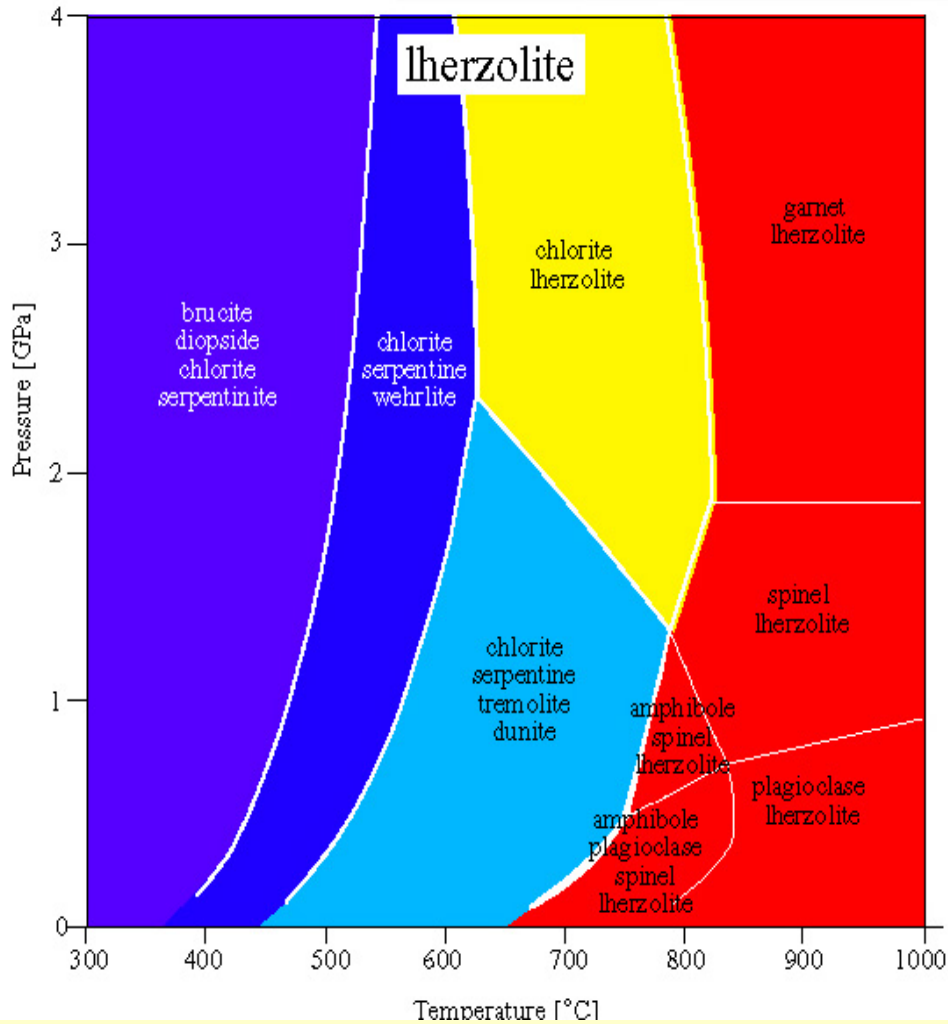


- **typy ultramafických hornin (nyní v zemské kůře)**
- ○ alpský (orogenní) - fragmenty pláště (čočky, xenolity) tektonicky transportované během orogenních procesů z oblasti *pod oceánskou kůrou*, součást ofiolitových komplexů, často lherzolitické složení, častá serpentinizace a rekrystalizace
- ○ plášťové 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).

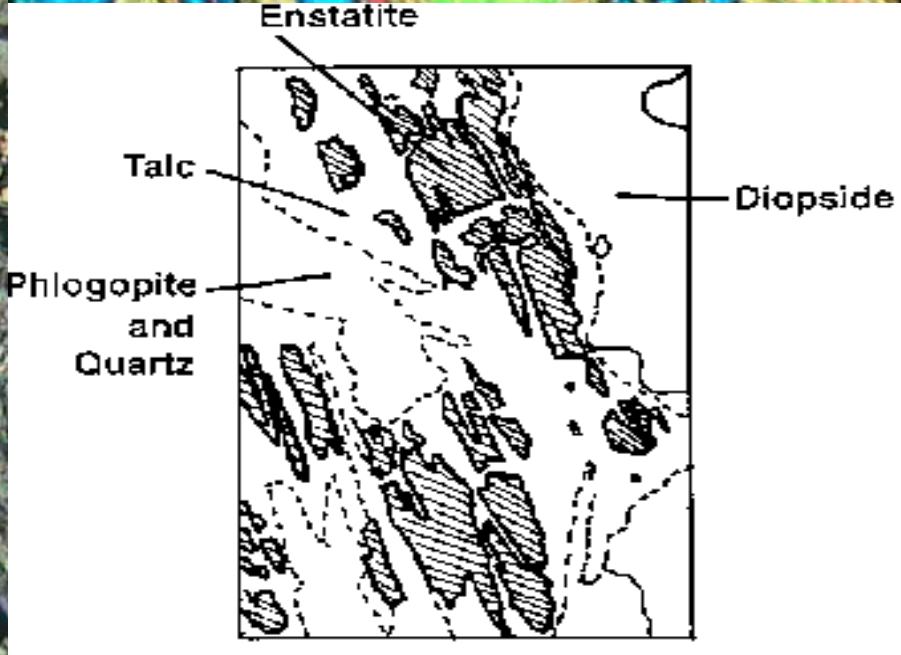
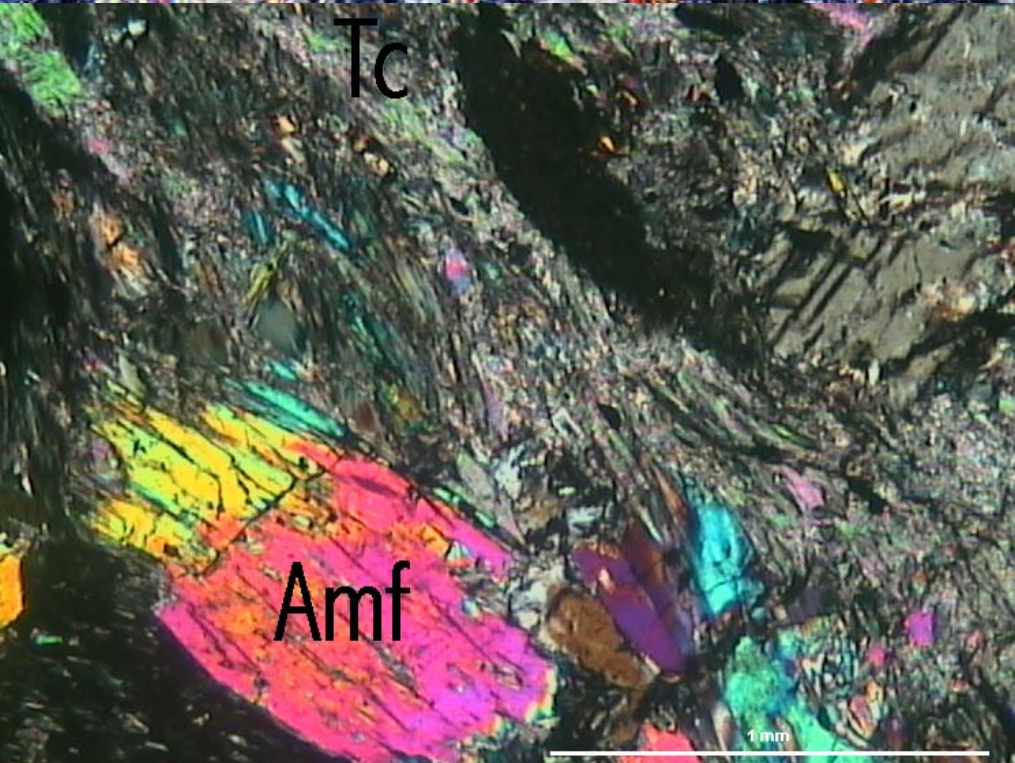
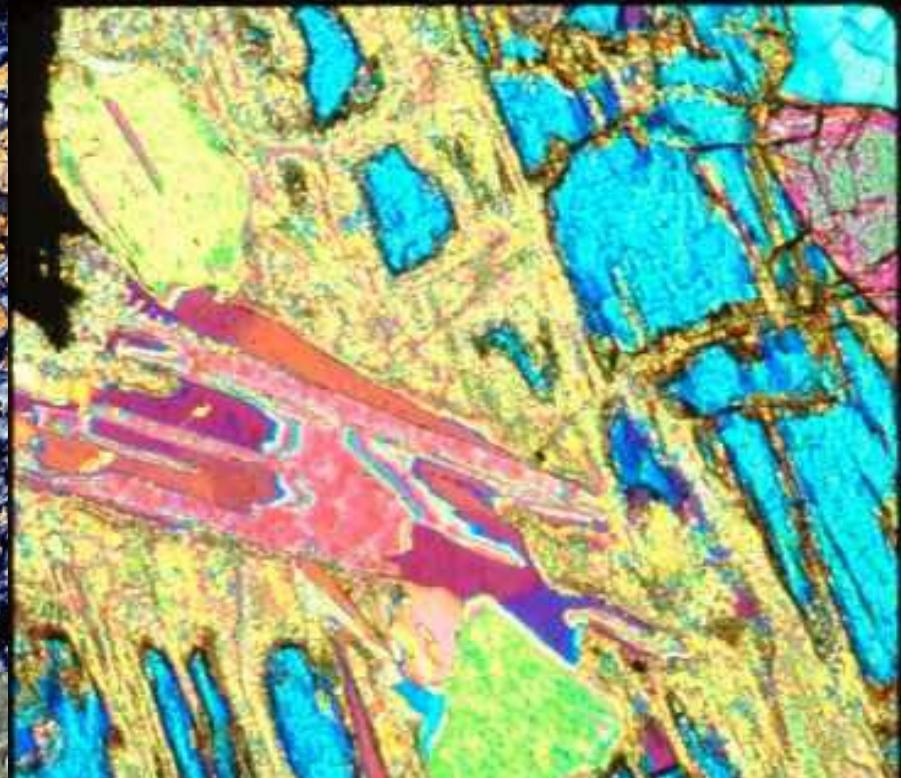
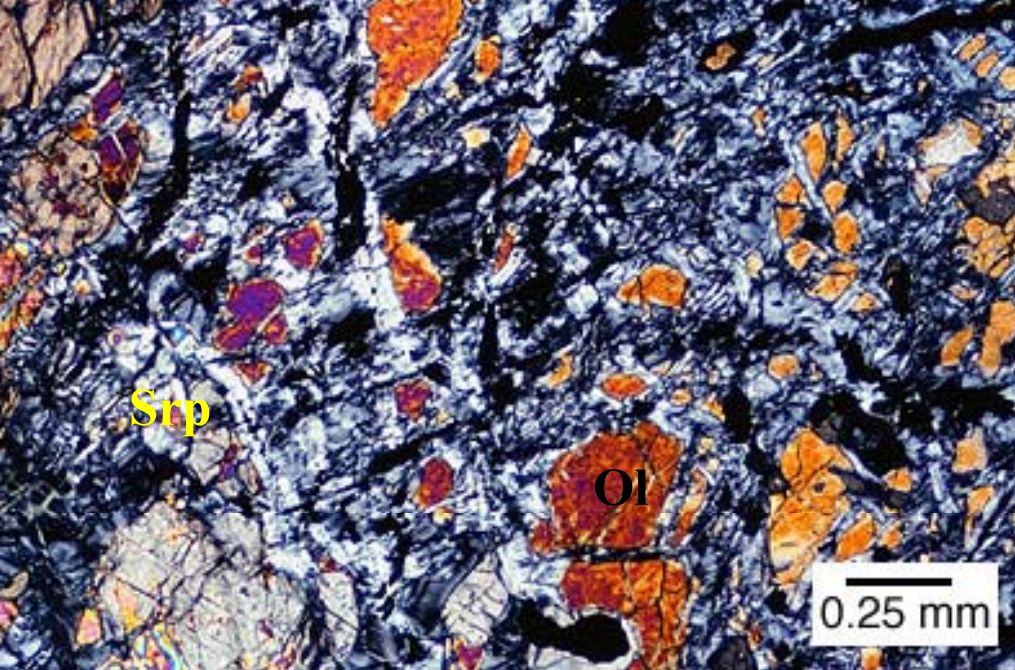
- v orogénech často tělesa peridotitů uspořádána v nesouvislých páslech X00-1000 km dlouhých, paralelních se strukturními prvky orogénu
- desková tektonika - ultramafické pásy souvisejí s kolizí a následnou subdukcí oceánské kůry pod kontinent (švy indikující **zóny dřívějších subdukcí**)

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







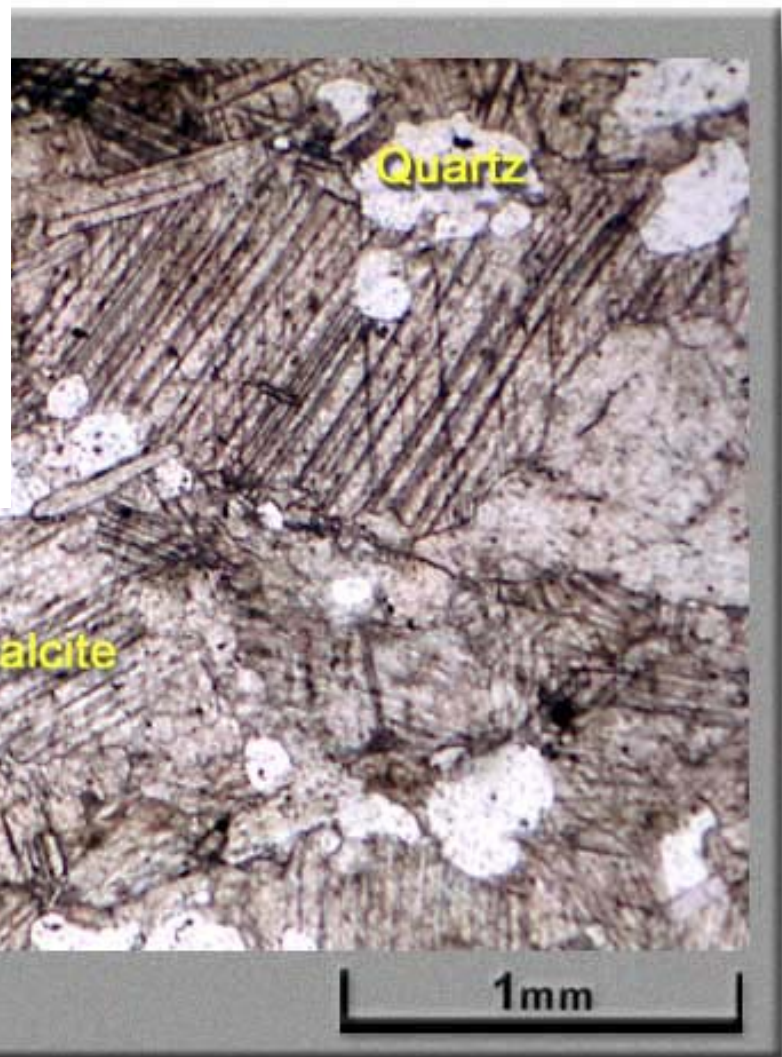
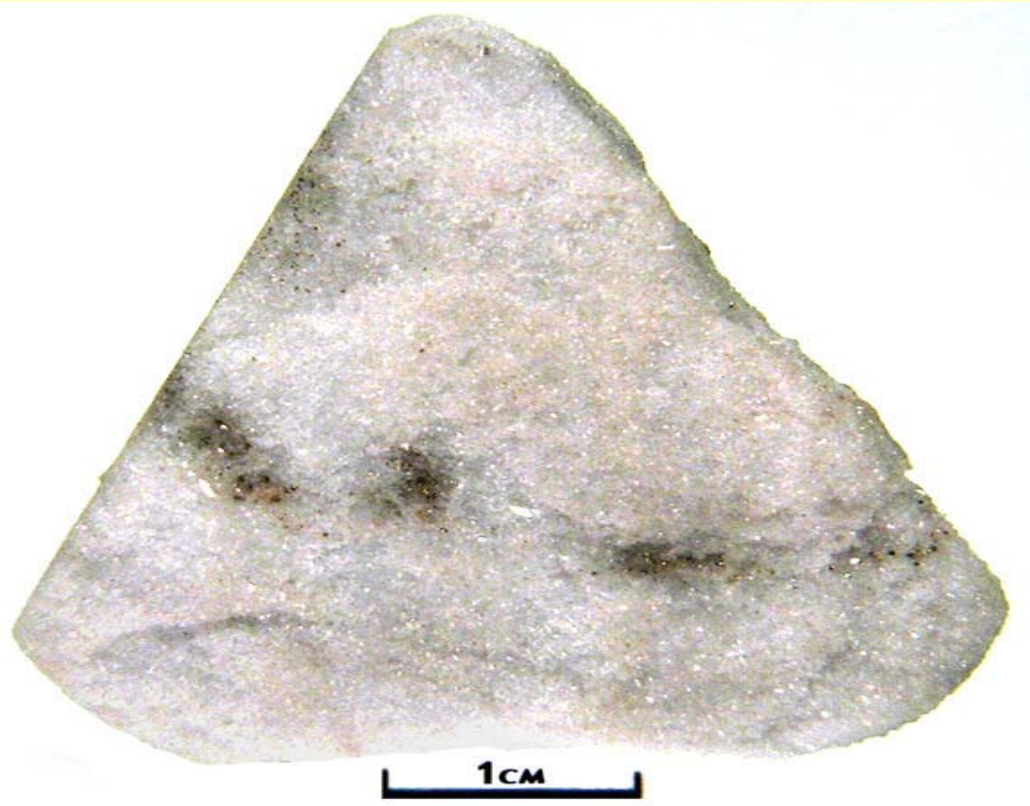


# Metamorfóza karbonátových hornin

- 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
• horniny silně znečištěné silikáty	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.



Quartz

Pyrite

Calcite

PPL XPL

1mm

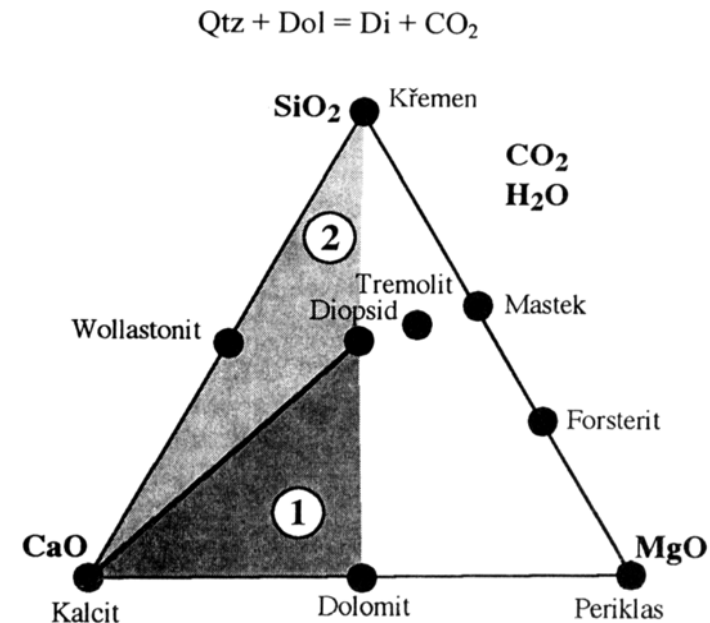
- ***Fázové vztahy v metakarbonátech***

- 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.

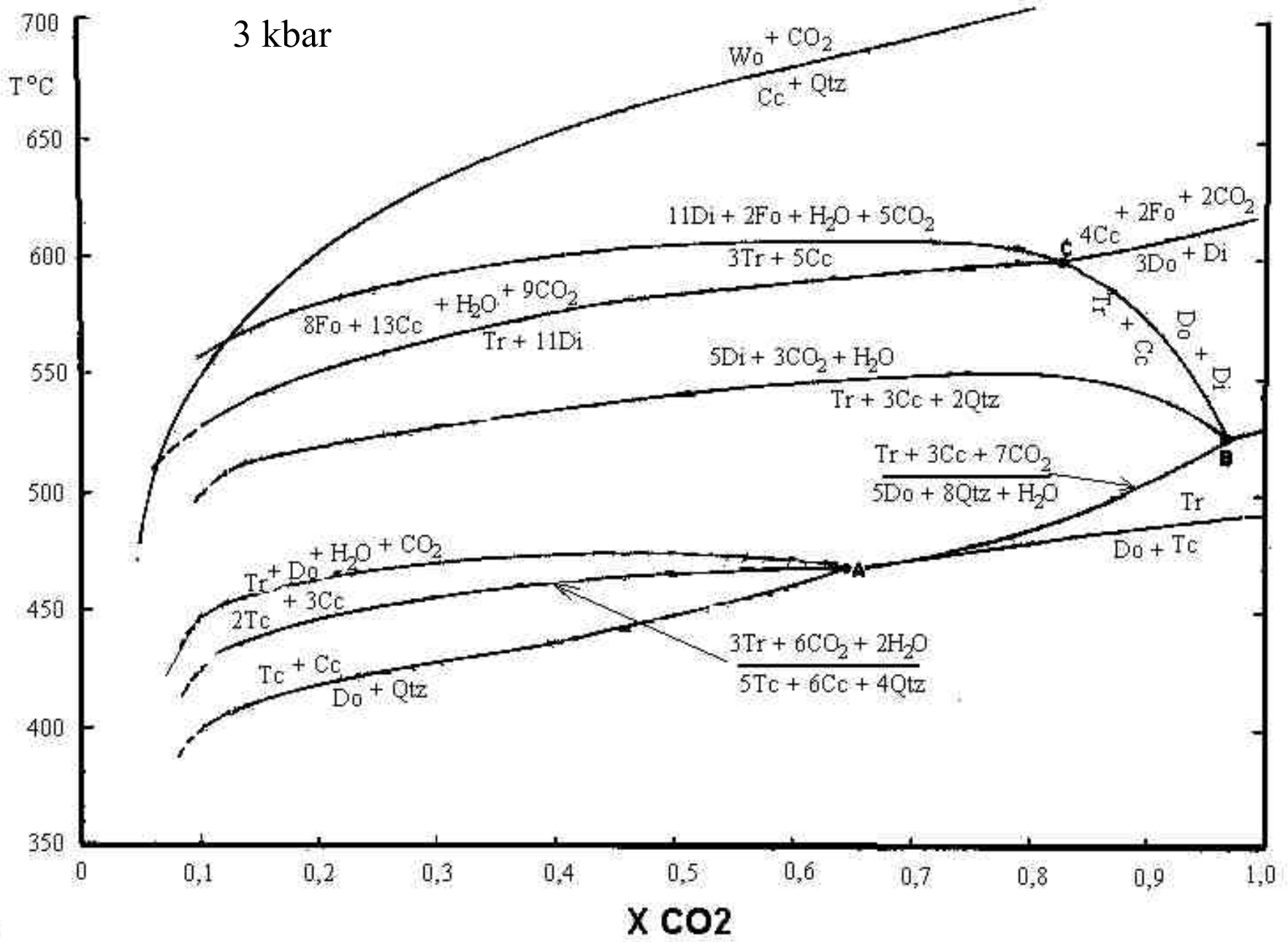
- **některé důležité reakce:**

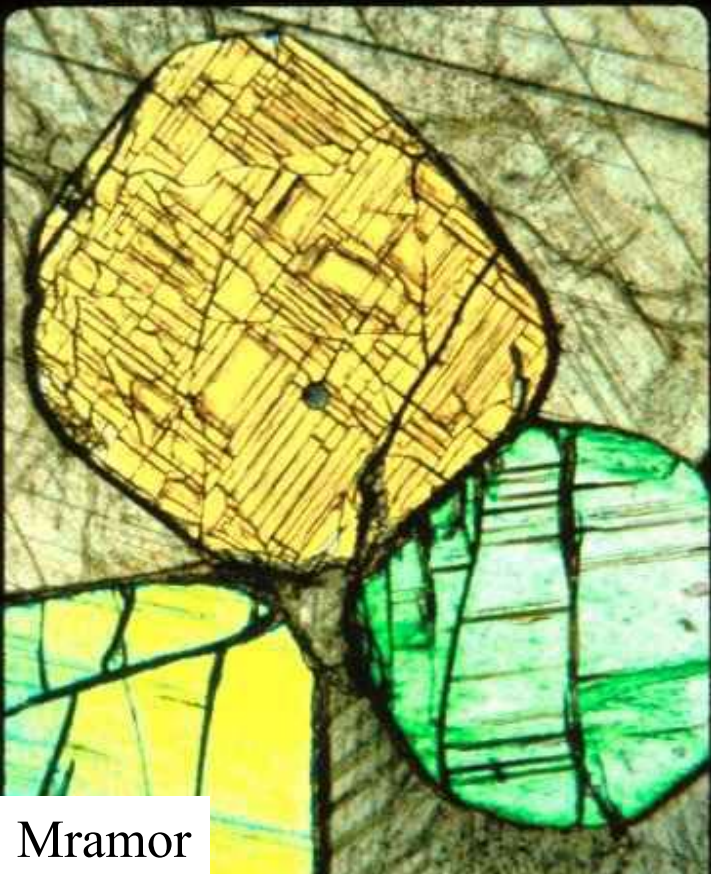
- CS-C: kalcit + křemen = wollastonit +  $\text{CO}_2$
- CMS-HC: tremolit + dolomit = forsterit + kalcit +  $\text{CO}_2$  +  $\text{H}_2\text{O}$  (dolomit. vápence)
- CMS-HC: dolomit + křemen +  $\text{H}_2\text{O}$  = tremolit + kalcit +  $\text{CO}_2$       500C/5kb
- CMS-HC: dolomit + křemen = diopsid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

• Metamorfní vývoj může být ovlivňován teplotou nebo  $X_{\text{CO}_2}$ , je ale často komplikované rozpoznat, který z činitelů měl hlavní význam

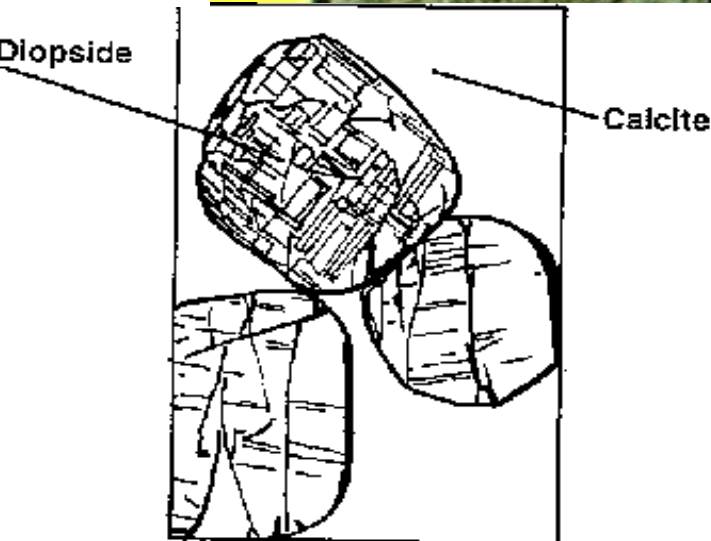


3 kbar





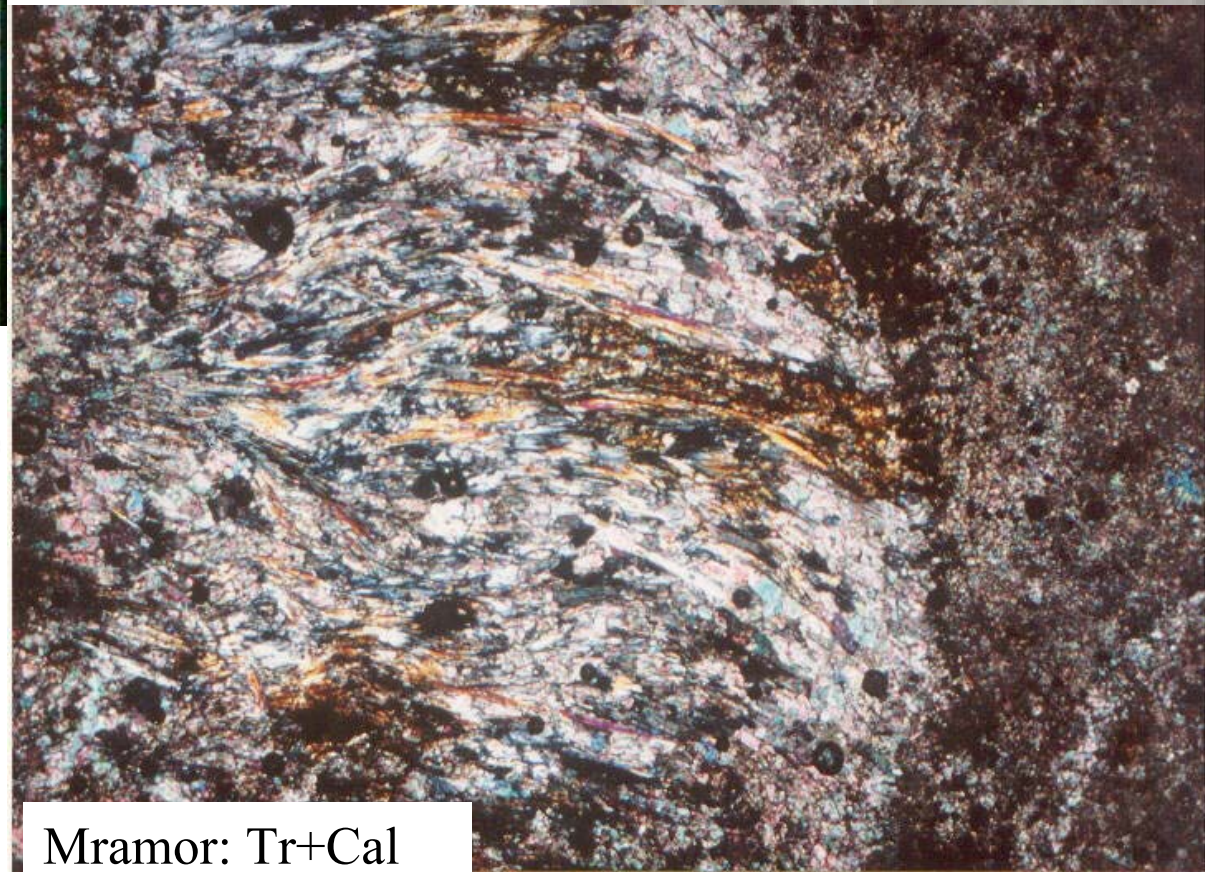
Mramor



Wo

Cal

*Xenolit mramoru v tonalitu*



Mramor: Tr+Cal

## Typické minerály karbonátových hornin:

Křemen  $\text{SiO}_2$

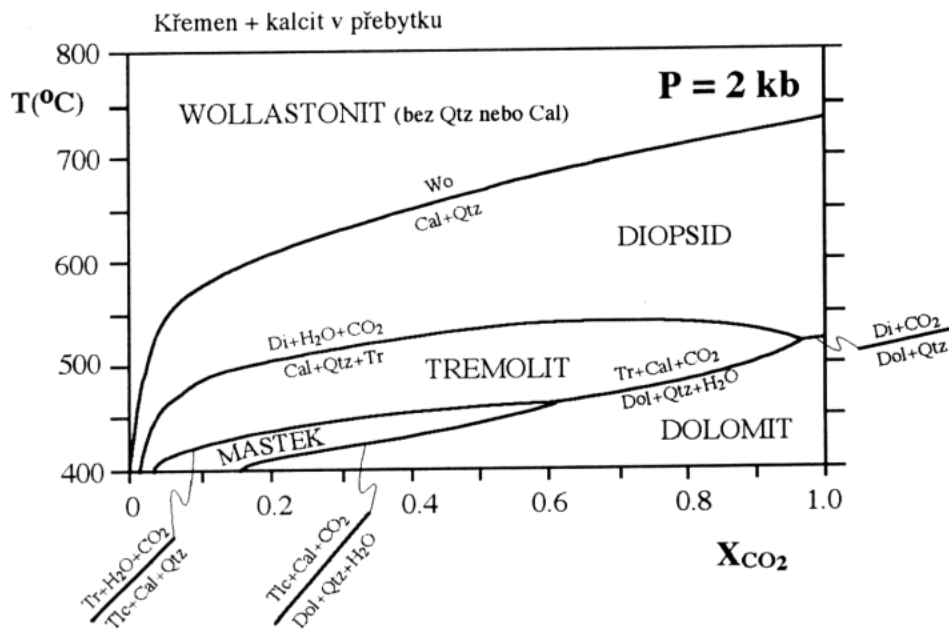
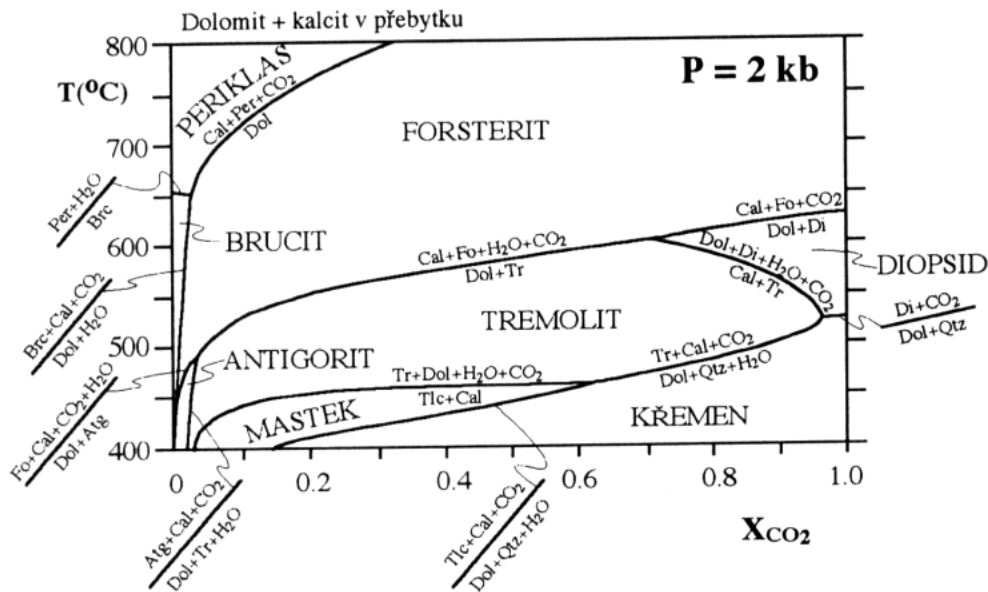
Kalcit  $\text{Ca}(\text{CO}_2)_3$

Wollastonit  $\text{CaSiO}_3$

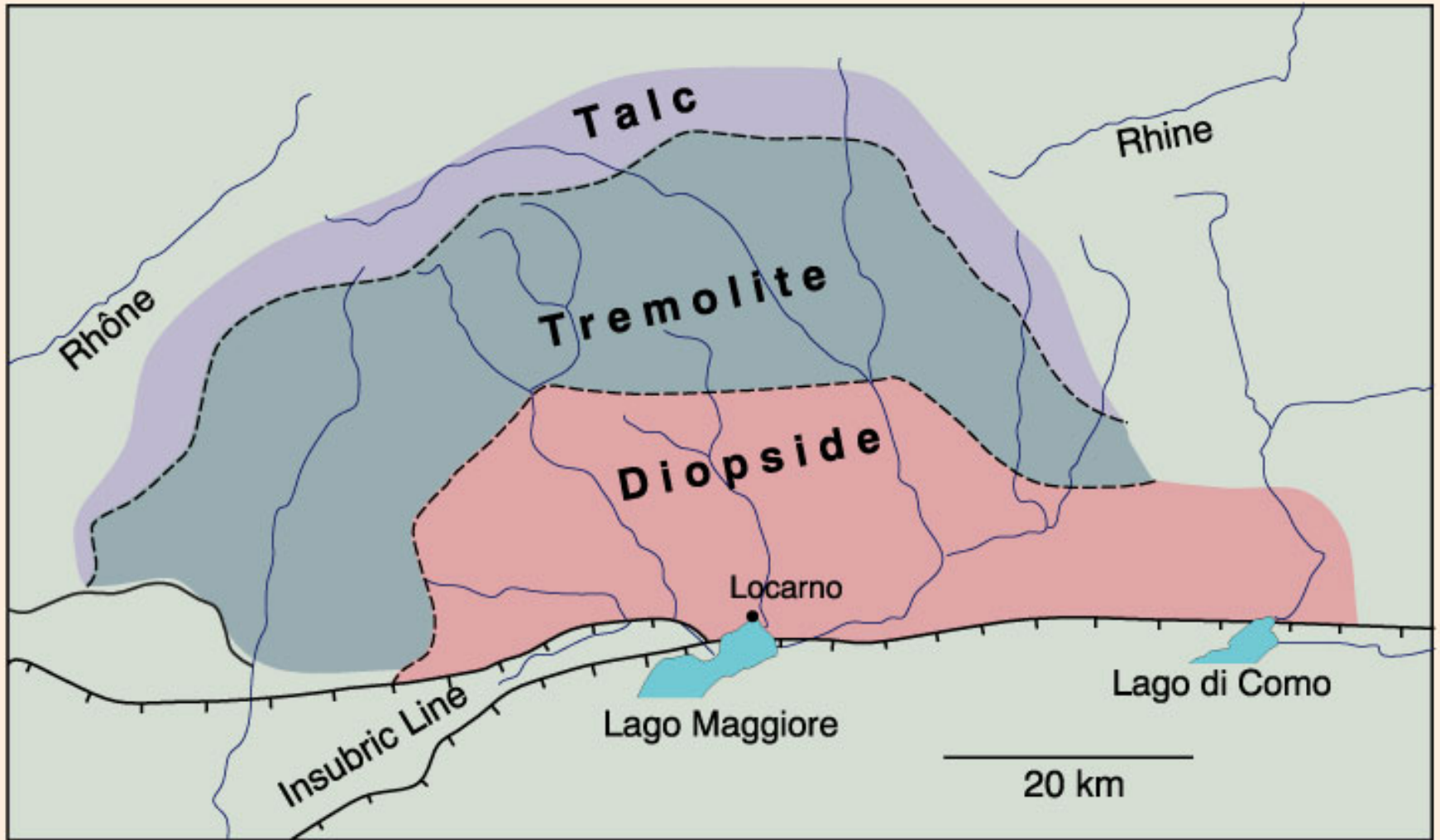
Granát  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

Tremolit  $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})$

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



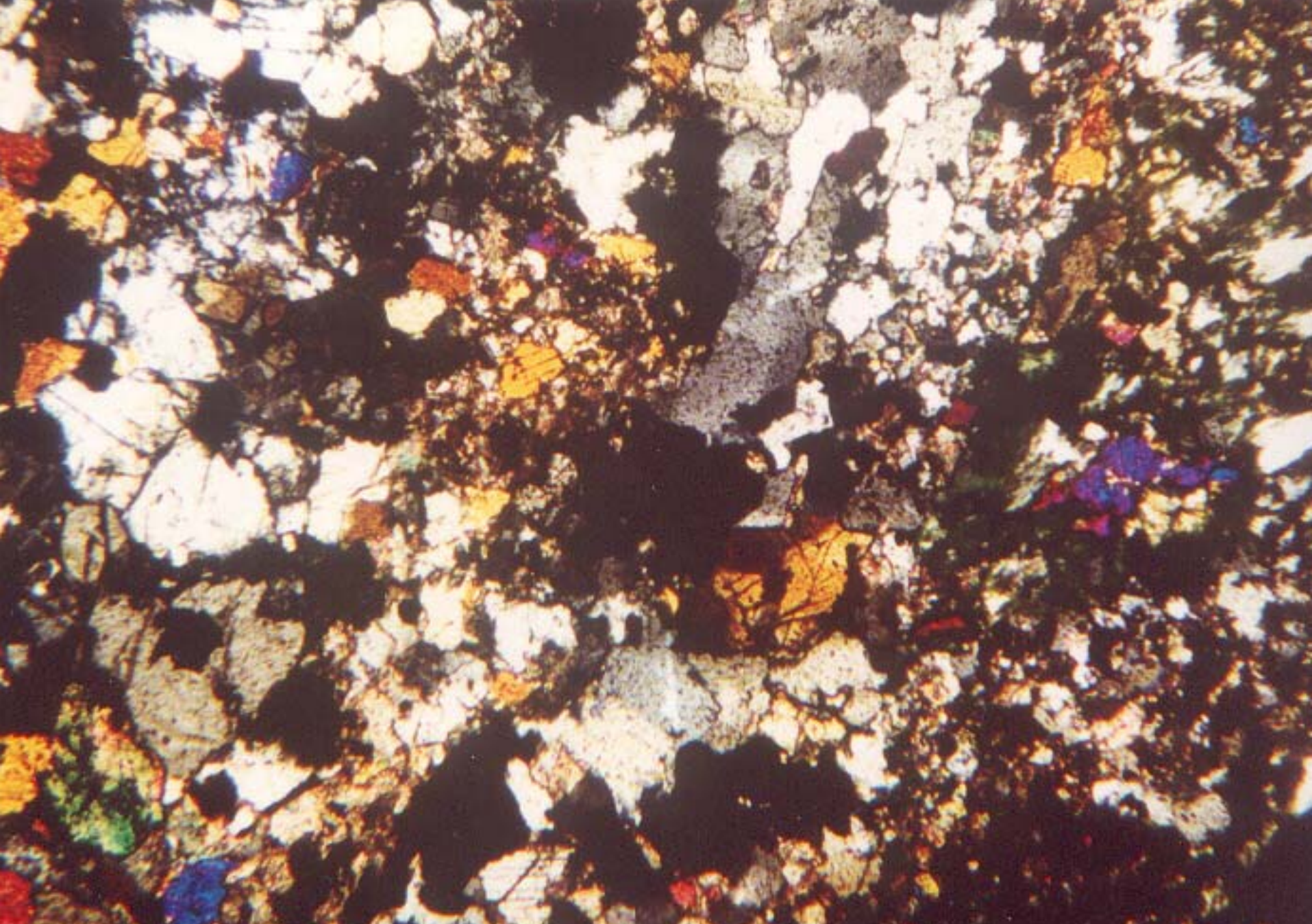
- Důležitou roli hraje také nasycenost systému  $\text{SiO}_2$ .
- V dolomitických vápencích (dolomit a kalcit v přebytku) je pole stability tremolitu posunuto a rozšířeno do vyšších teplot a v oblasti vysokých teplot a nízkého  $X_{\text{CO}_2}$  (ale až do  $X_{\text{CO}_2} = 0.3$  pro  $800^{\circ}\text{C}$  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.

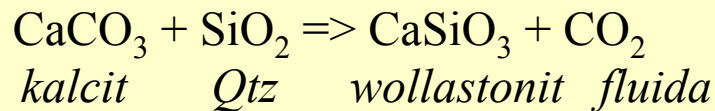
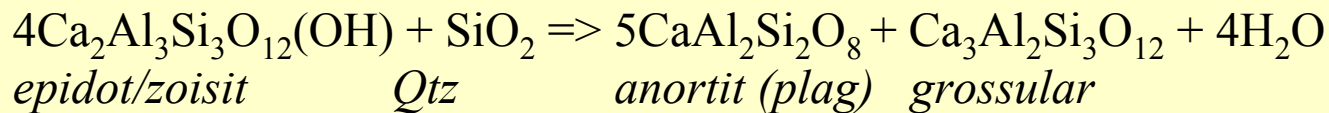


- ***vápenato-silikátové horniny***
- Do této skupiny lze zařadit řadu geneticky poměrně odlišných hornin, především Ca-skarny, erlány, kalcitické mramory bohaté silikáty, kontaktní rohovce a rodingity. Značným problémem u těchto systémů je odhad tlaku, proto je vhodné studovat i další horniny, které mohly vznikat při procesu kontaktní (regionální) metamorfózy.
- Minerální reakce a složení hlavních minerálů lze nejlépe vyjádřit v jednoduchém systému CAS(H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>), i když horniny prakticky vždy obsahují také Mg, Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup> ale také např. F.
- U těchto hornin dochází často k metasomatóze, tedy přínosu a odnosu látek nepočítáme-li H<sub>2</sub>O a CO<sub>2</sub>.
- 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 H<sub>2</sub>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 H<sub>2</sub>O, jsou vázané na serpentinit



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>)***
- Minerální reakce jsou velmi dobře prostudované a jejich průběh v 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



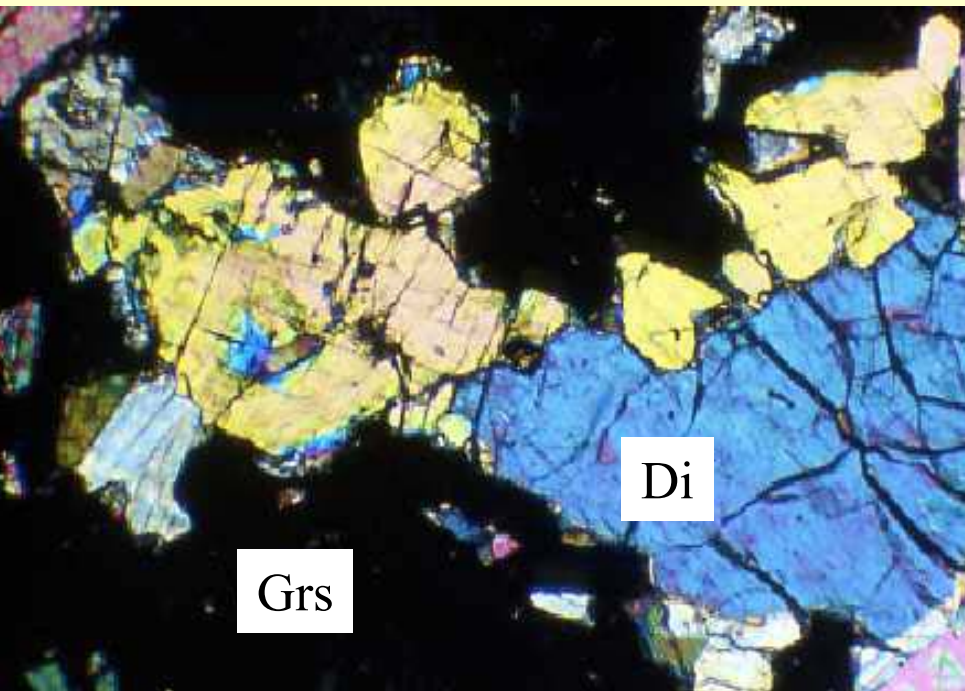
## Vápenato-silikátové horniny

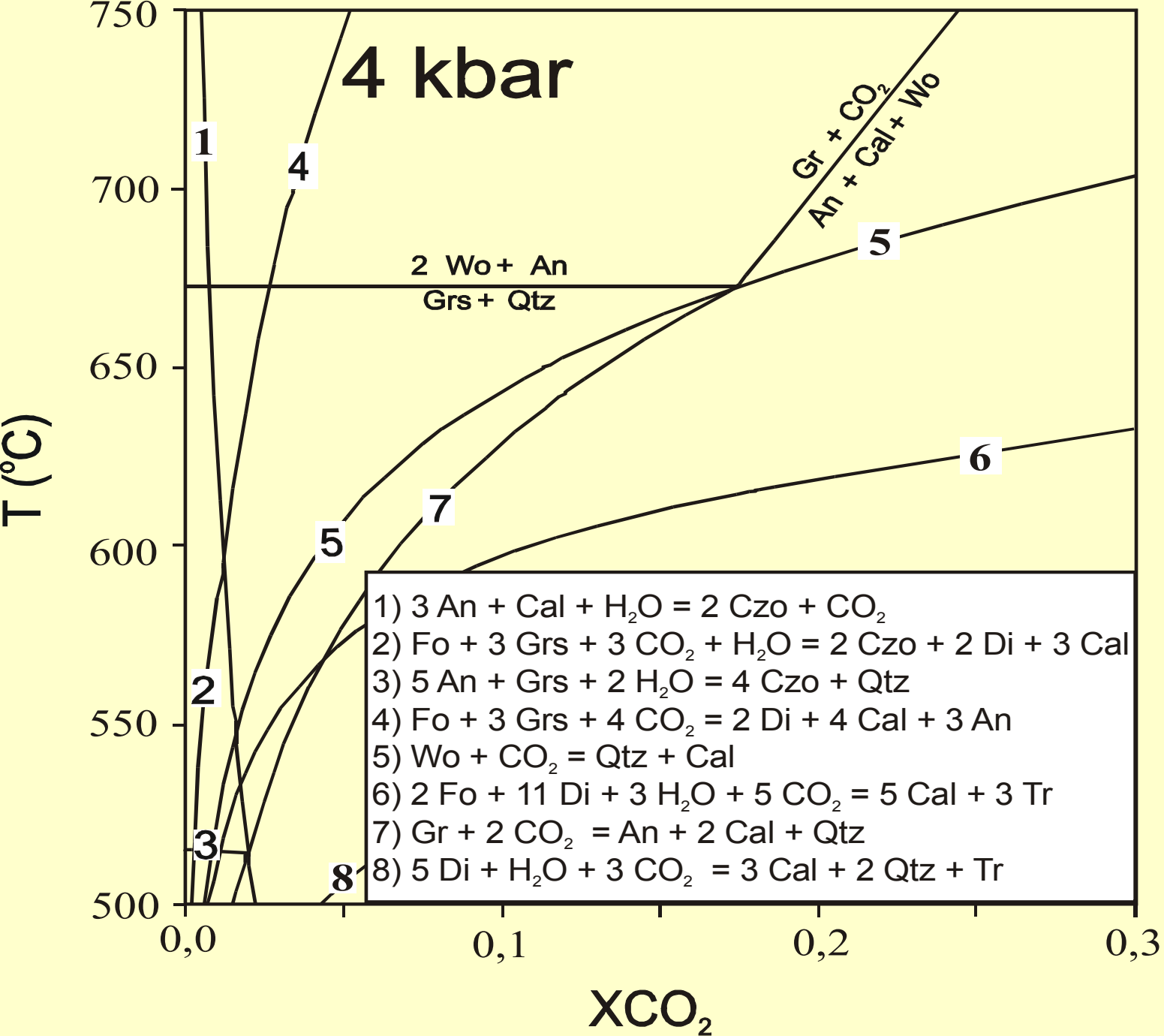


## Vápenato-silikátová hornina (Grs+An+Cal)

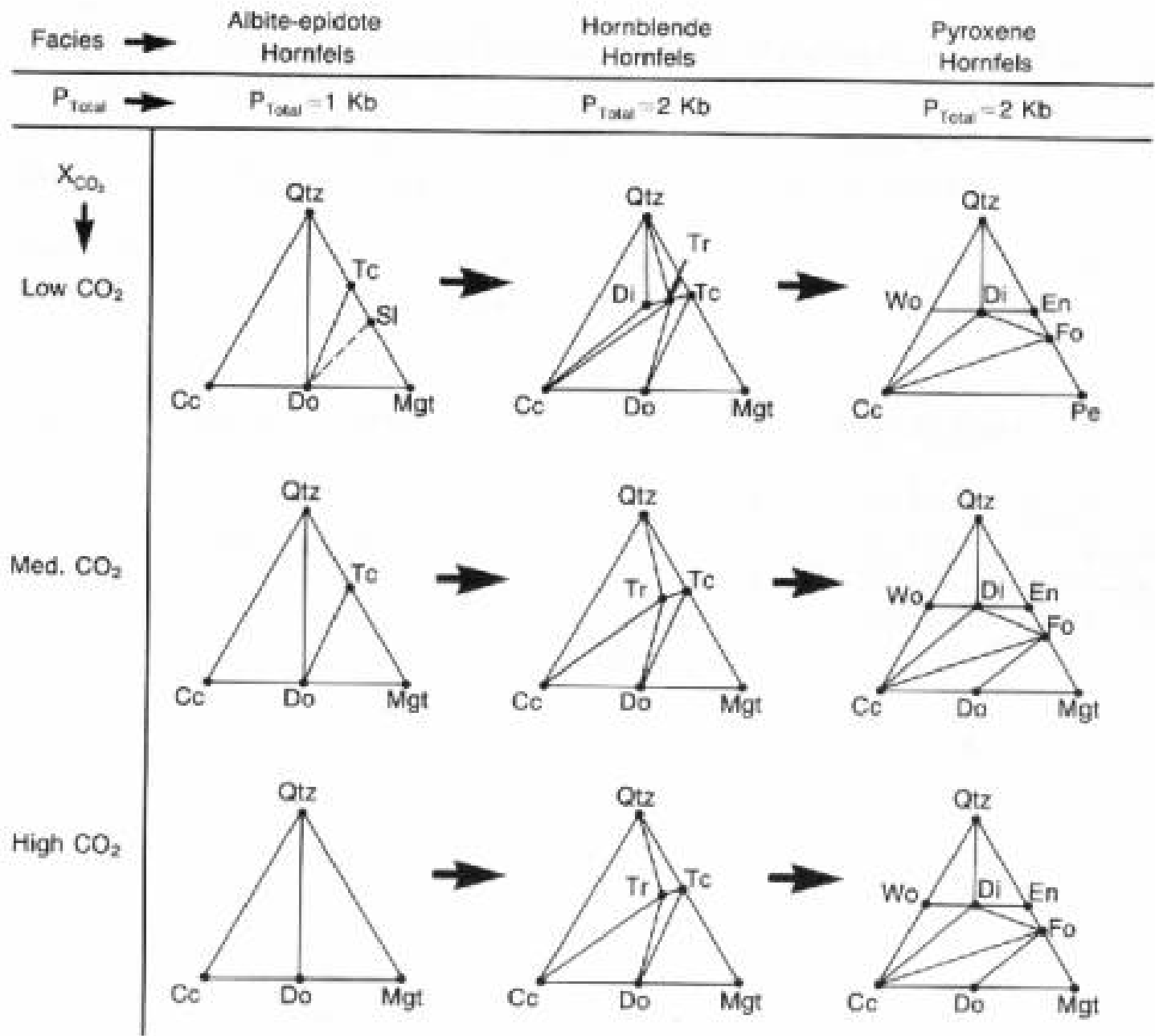


## Porfyroblast grossularu v mramoru

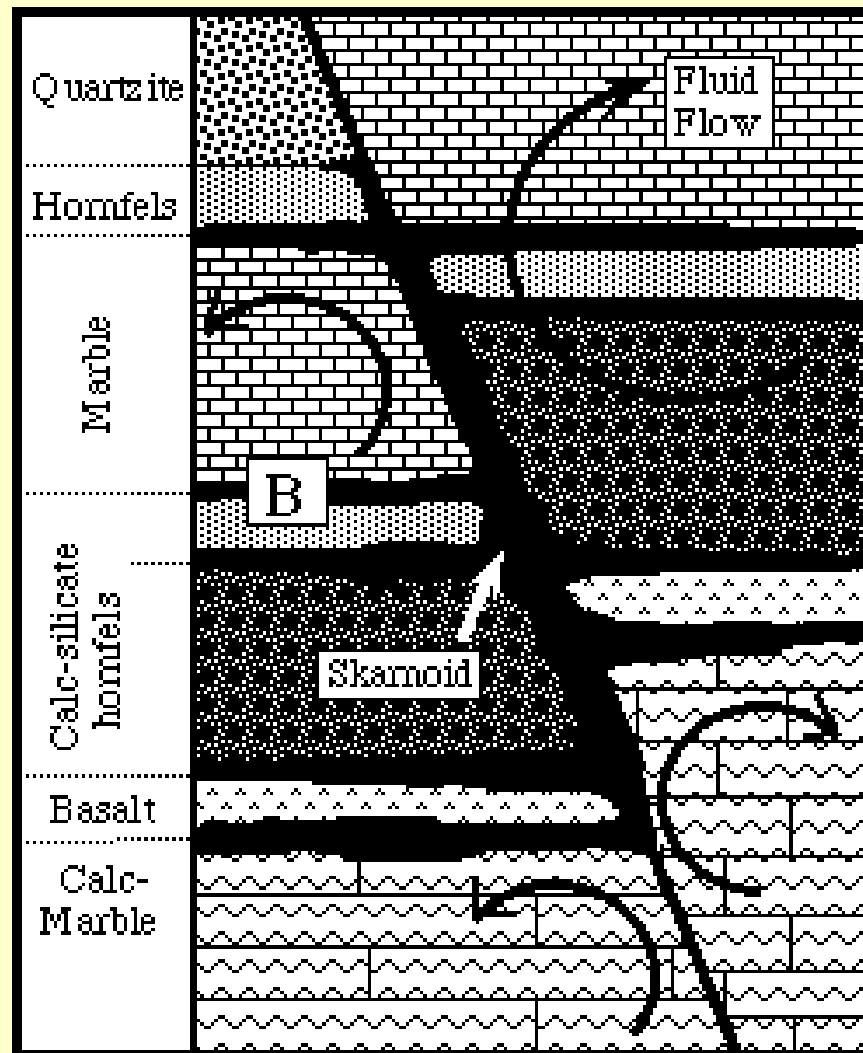
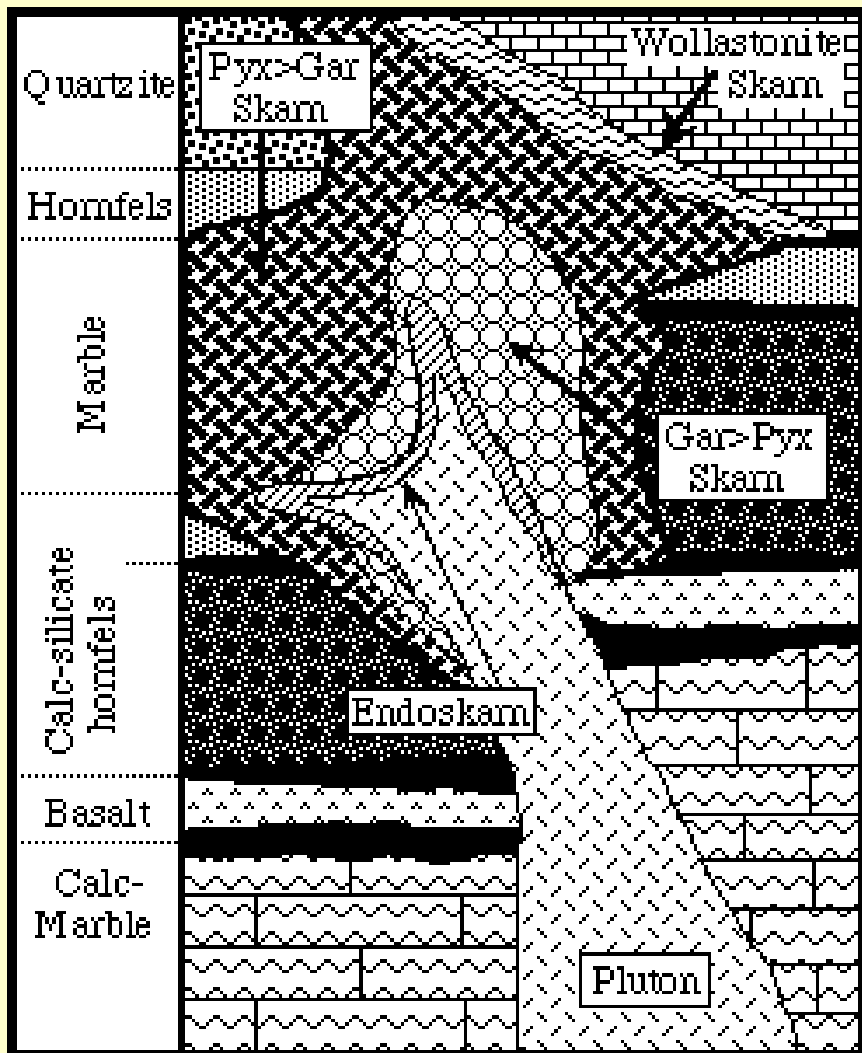




# Kontaktní metamorfóza mramorů

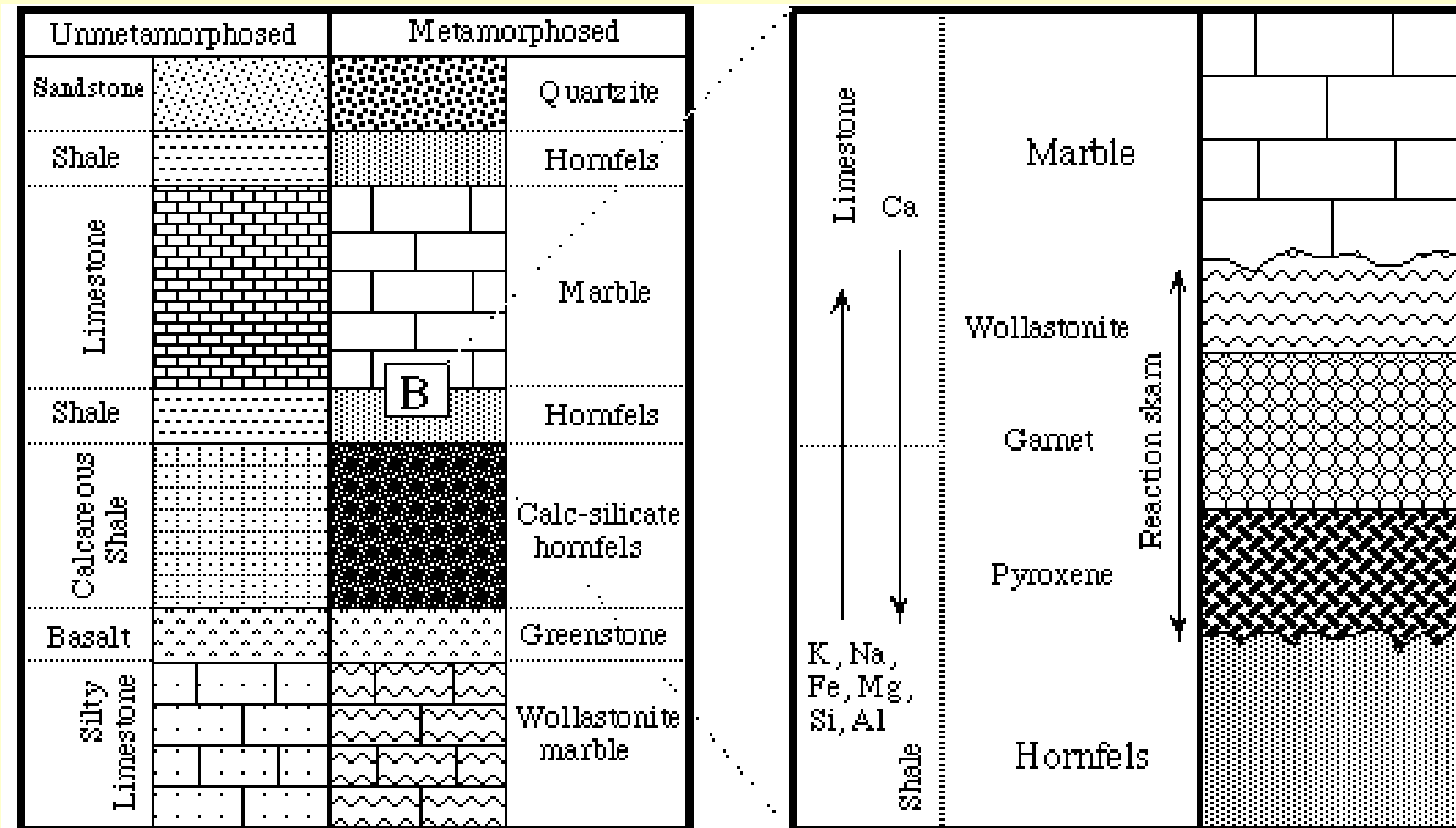


skarny – silikátová hornina obsahující Ca-Fe-Mg . Typické minerály: granáty (grosular-andradit-almandin), pyroxen (diopsid-hedenbergit), plagioklasy (podružně), wollastonit, epidot, vesuvian, kalcit, křemen, skapolit.



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

křemen  $\Rightarrow$  wollastonit  $\Leftarrow$  kalcit





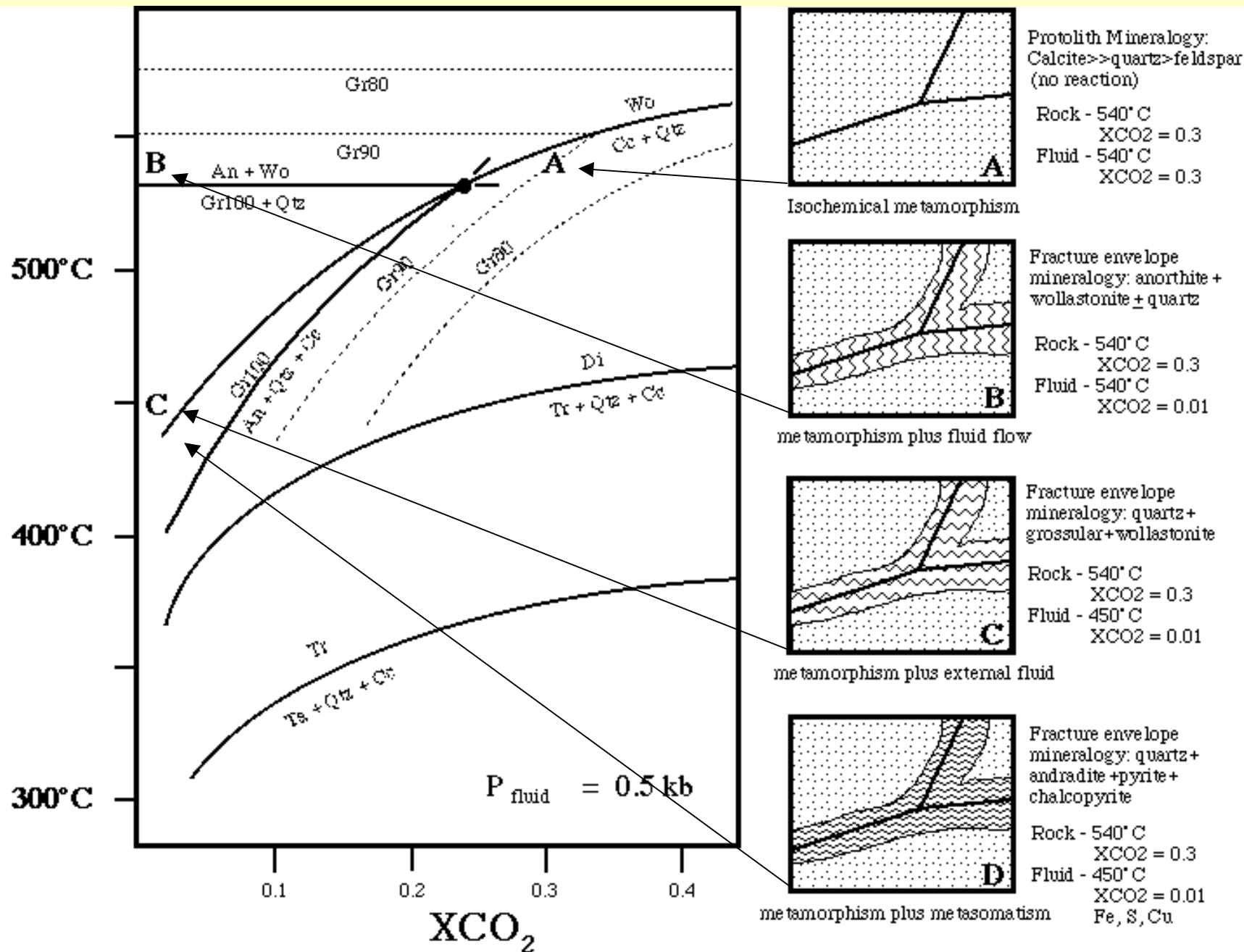
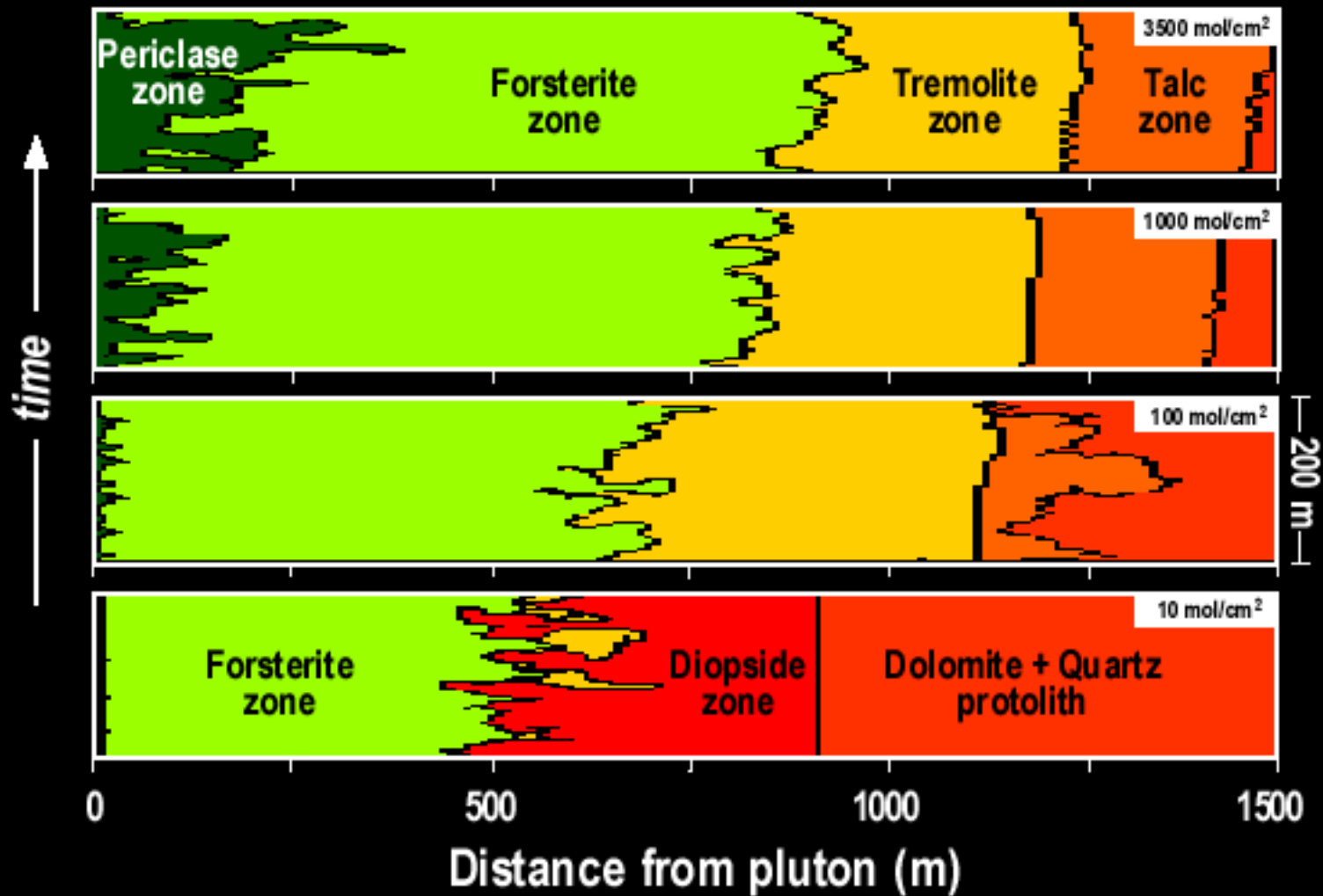
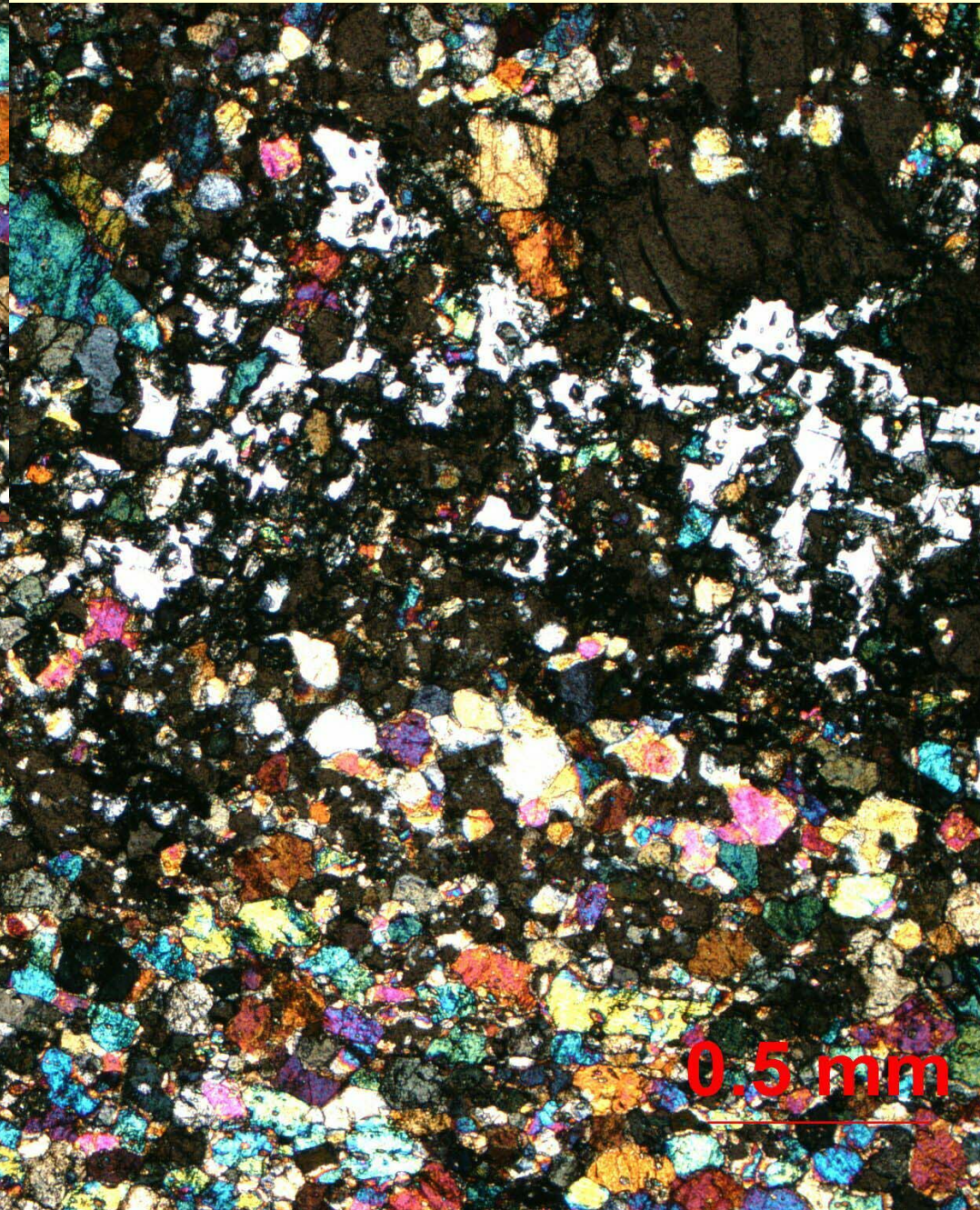
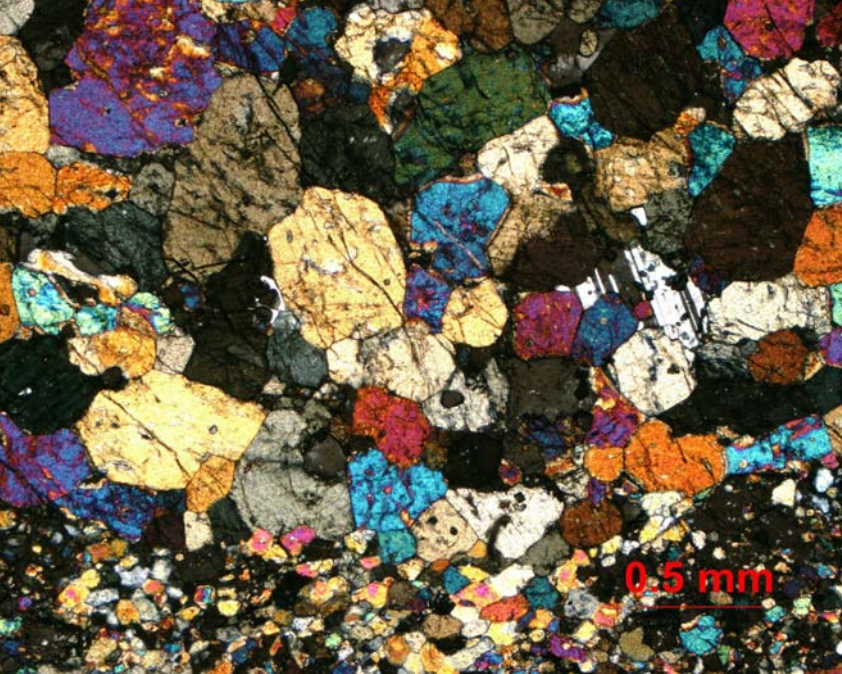


Figure 2



# Skarn



Px +  
Grt +  
Mag +  
Qtz

# 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