

Význam fluidní fáze pro metamorfní procesy na příkladu

metamorfizma
hornin bohatých na Mg a Ca

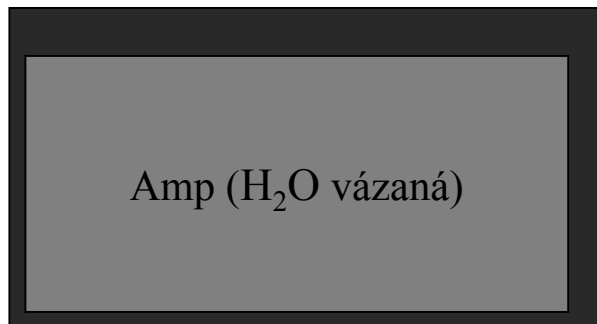
I .

1) Význam fluidní fáze pro metamorfózu

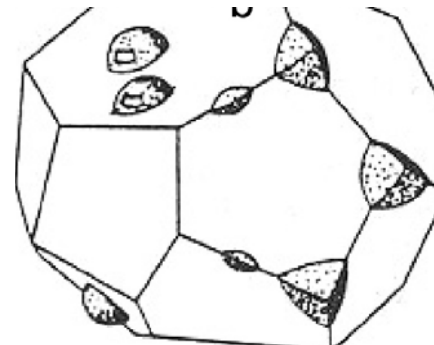
Pozice fluid v horninách:

- vázaná fluida některé minerály (karbonáty, amfiboly, slídy) obsahují ve své struktuře $(\text{OH})^-$, $(\text{CO}_2)^{2-}$
- fluida absorbovaná na povrch zrn: vrstva molekul H_2O a CO_2 o tloušťce několika Å , pohyblivost těchto molekul závisí na okolním PT a charakteristikách povrchu zrna (přilnavost, elektrostatické vlastnosti, atd.).
- fluida rozpuštěná v silikátové tavenině: v migmatitech se voda ze slíd nebo amfibolů stává součástí taveniny a zůstává bezvodý restit
- volná fluida jsou v pórech mezi minerálními zrny a na drobných puklinách:
 - a) na základě geof. dat se zdá, že ve svrchní kůře (\sim do 15 km) se fluida pohybují po puklinách, které komunikují s povrchem ($P_{\text{fluid}} < P_{\text{litosstatický}}$)
 - b) ve spodní kůře je pohyb fluid vázán na síť horizontálních puklin bez komunikace s povrchem ($P_{\text{fluid}} = P_{\text{litosstatický}}$).

H_2O absorbovaná na povrchu zrna



H_2O volná



Složení metamorfních fluid:

- H_2O , CO_2 , F, Cl, N_2 , CH_4 , SH_2
- metamorfní fluida jsou směsí několika komponent proto užíváme P_{pf} (je funkcí celkového tlaku P_s a molárního zlomku složky ve fluidní fázi)

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = P_s \left(\frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 \dots} \right) = P_s X_{\text{H}_2\text{O}}$$

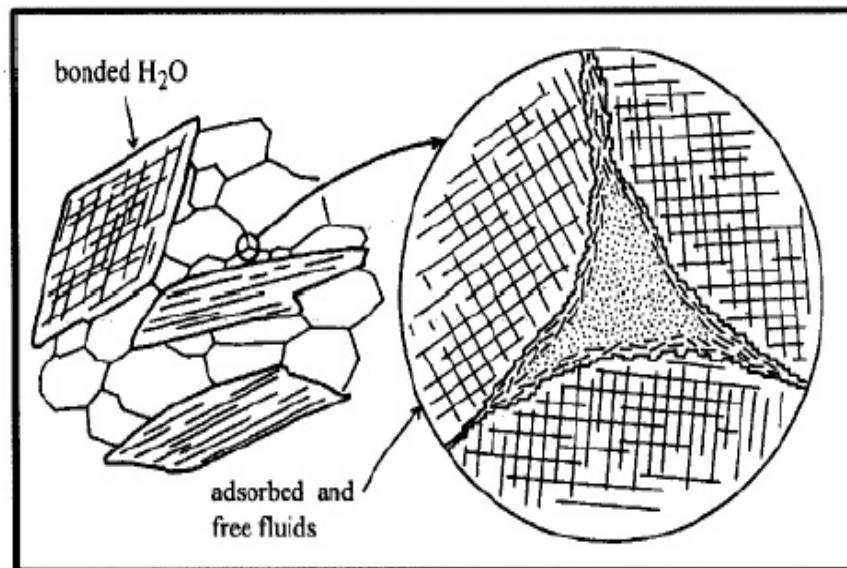
$$P_s \text{ or } P_{\text{total}} = \Sigma P_{\text{pf}} = P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{CO}_2} + P_{\text{CH}_4} \dots$$

- to platí jen pro ideální plyny při termodynamických výpočtech užíváme fugacitu jako vyjádření chemického potenciálu ve fluidní fázi.

$$\mu_{\text{CO}_2}(T, P, x) = \mu^{\circ}_{\text{CO}_2} + RT \ln f_{\text{CO}_2}$$

kde $\mu^{\circ}_{\text{CO}_2} = \mu_{\text{CO}_2}(T, 1, 1)$

$\begin{matrix} P = 1 \text{ bar} & X_{\text{CO}_2} = 1 \\ \swarrow & \searrow \\ \mu_{\text{CO}_2}(T, 1, 1) \end{matrix}$



obr. rozdíl mezi volnou absorbovanou a vázanou vodou v horninách

Zdroj fluid v horninách (voda):

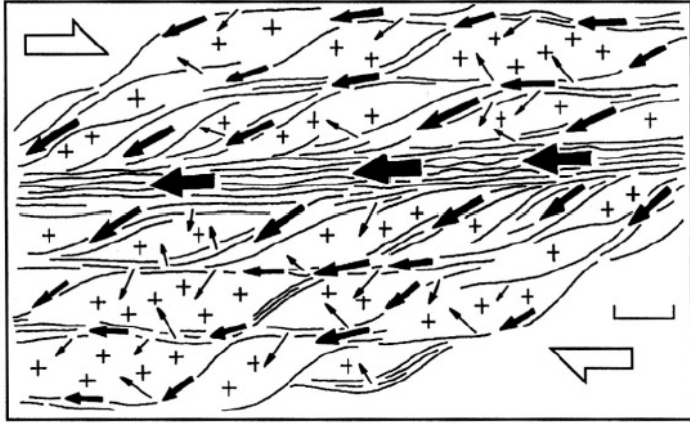


FIG. 100 — *Deformation of gabbros of the oceanic crust and percolation of fluid phase in a shear zone (after Mével, 1988).*

The black arrows represent the importance of hydrothermal flow schematically, according to their dimensions. The weakly to uncontaminated gabbro (cross pattern) forms blocks surrounded by the schistosity. (Scale : 10 cm to 1 m),

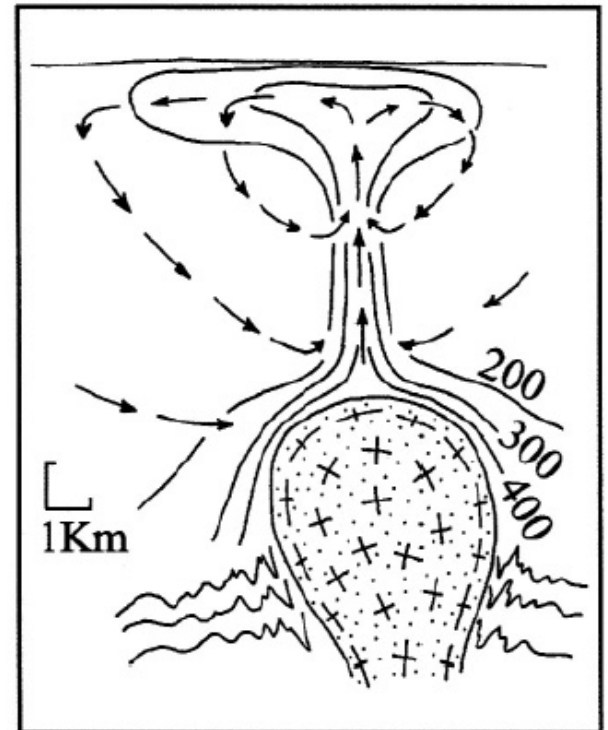
FIG. 61 — *Schematic diagram of a convective hydrothermal system developed in the roof of an intrusion (crosses) (after Fyfe and Henley, 1973).*

The fluid phase (water vapour and hydrocarbonic fluid) has a high fugacity around the intrusion and reaches the low energy (low pressure and temperature) near-surface domain. Cooled and condensed near the surface, the fluid phase sinks to depth following the convection circuit shown by the arrows. This circulation is accompanied by a convective heat transfer toward the surface, forming a hydrothermal plume over the intrusion (isotherms in degrees C). Silicates are dissolved by the high temperature fluids and the cations in solution precipitate at low temperature along the hydrothermal veins (*cf.* Fig. 63) which characterize former convective systems (see also Fig. 98).

➤ v pórech mezi jednotlivými zrny, v inkluzích, v trhlinách
⇒ do větších hloubek se dostává například na subdukčních zónách

➤ magmatická fluida – uvolňují se během krystalizace magmatu – typické intermediální až kyselé magma (Amp, Bt) obsahuje 3-4 wt.% H₂O

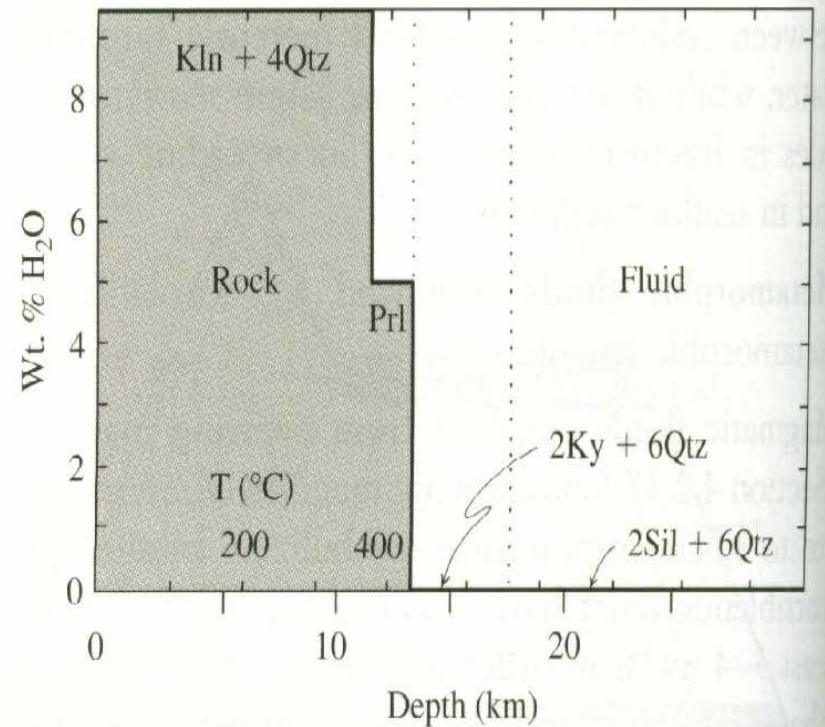
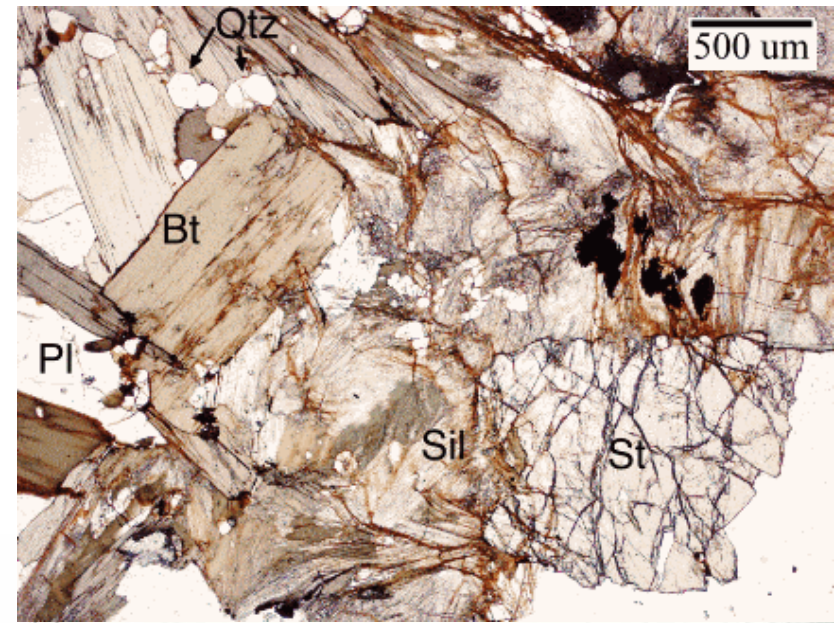
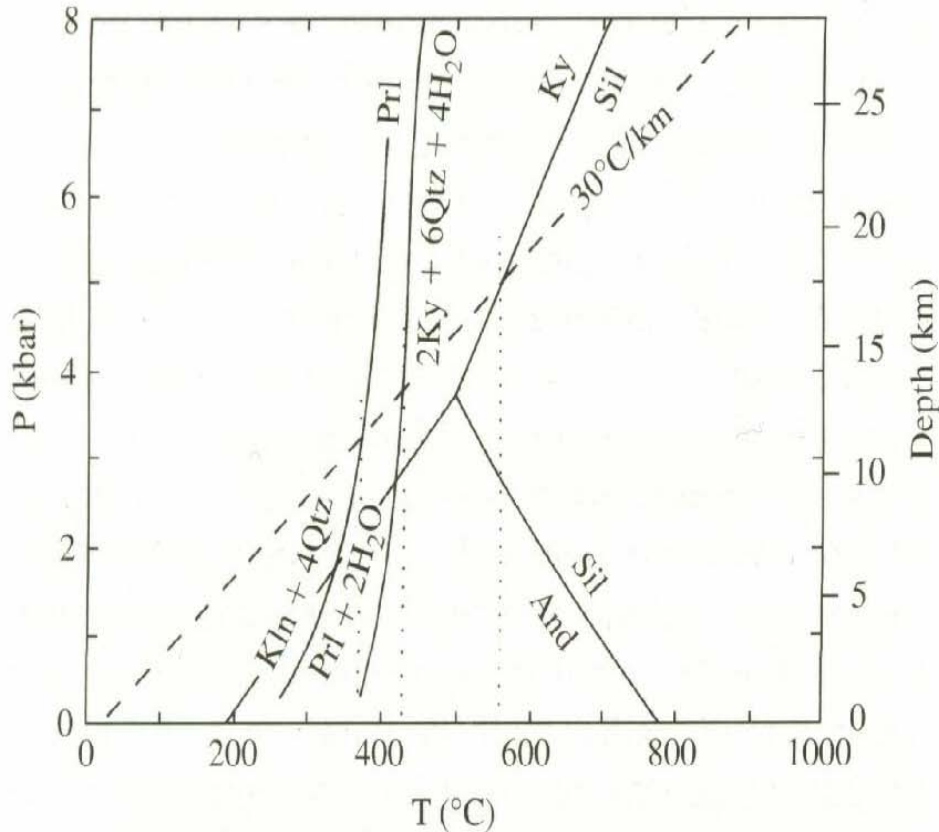
➤ metamorfní fluida – reakce uvolňující vodu – lawsonit (11 wt % H₂O), Mg-chloritoid (8 wt %), mastek (5 wt %), zoisit (2 wt %)

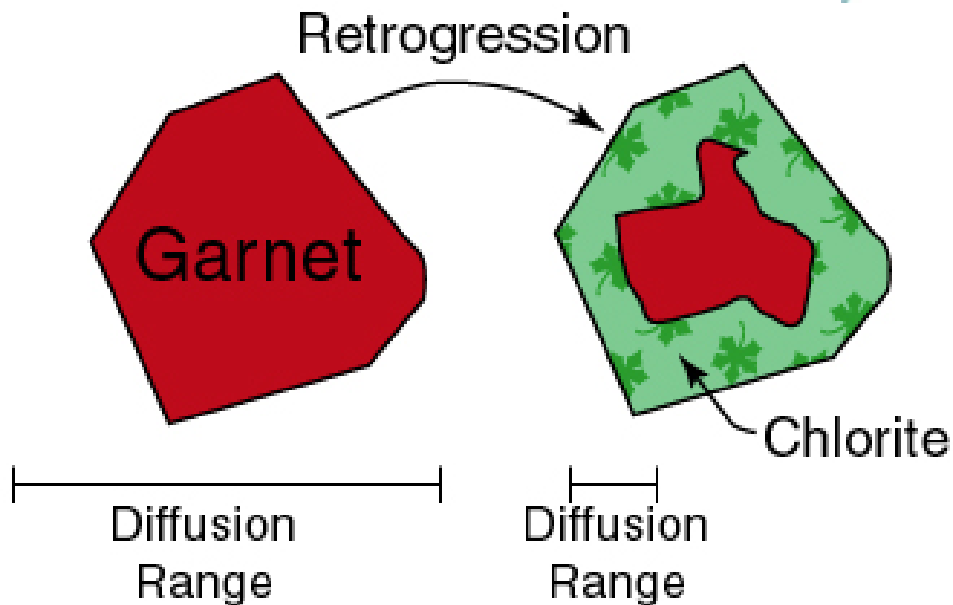
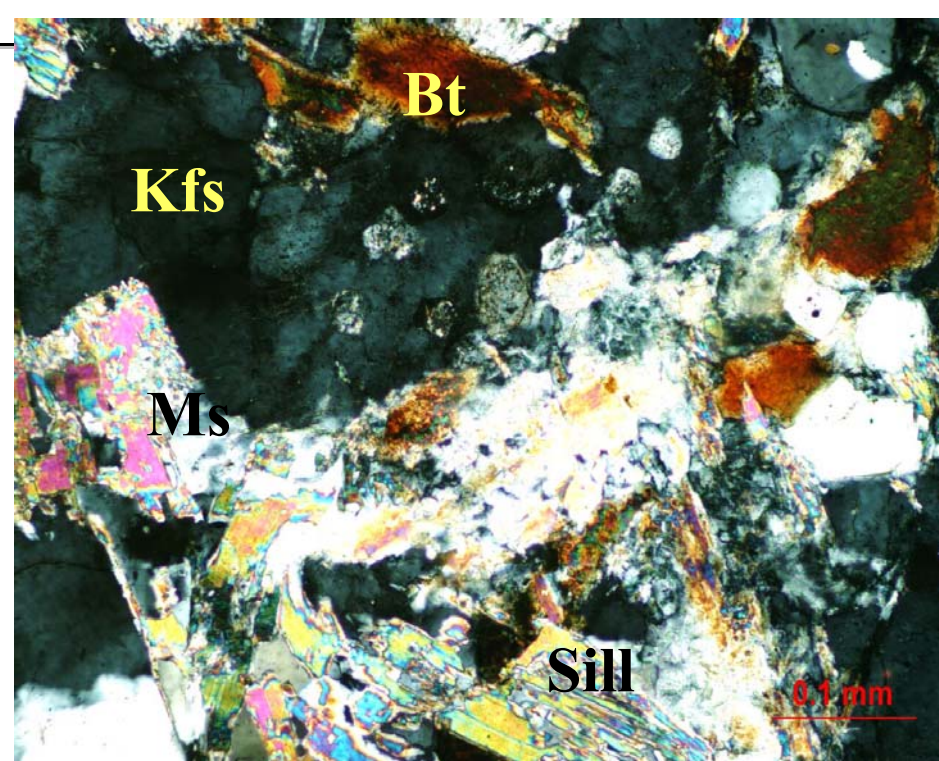
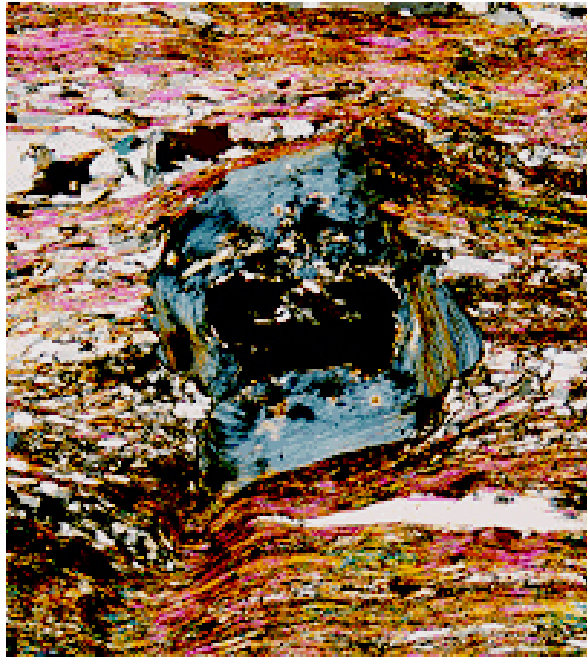


➤ **prográdní metamorfní reakce na nichž se účastní H₂O jsou dehydratační**

staurolit = granát + biotit + Al₂SiO₅ + H₂O

příklad dehydratačních reakce v uzavřeném systému



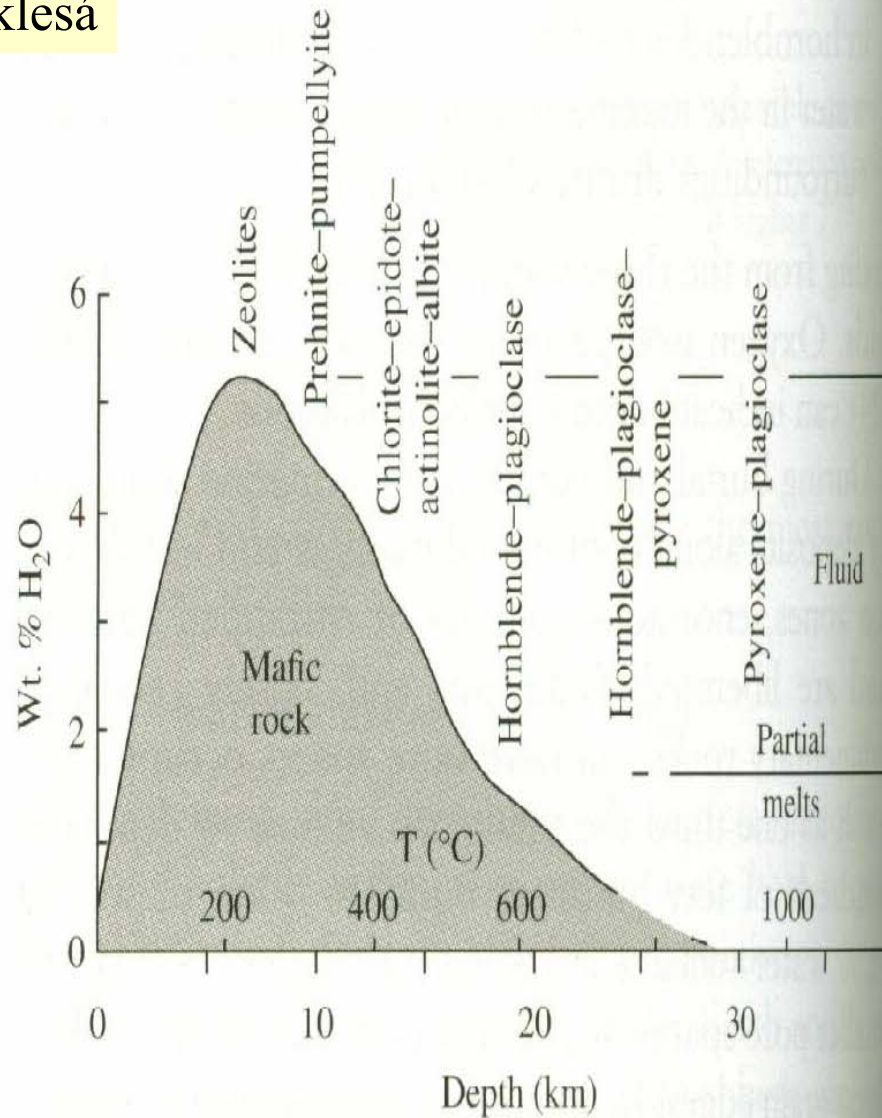
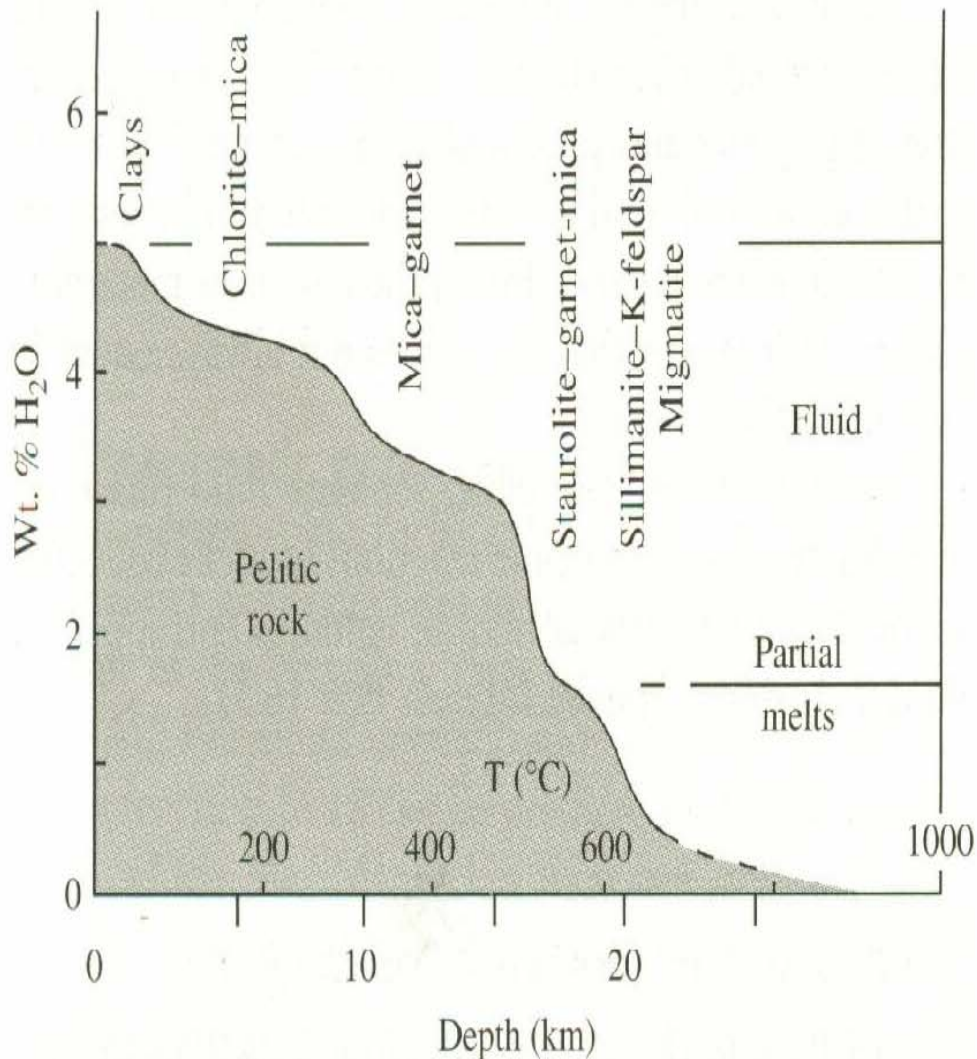


➤ retrográdní metamorfní reakce na nichž se účastní H_2O jsou hydratační

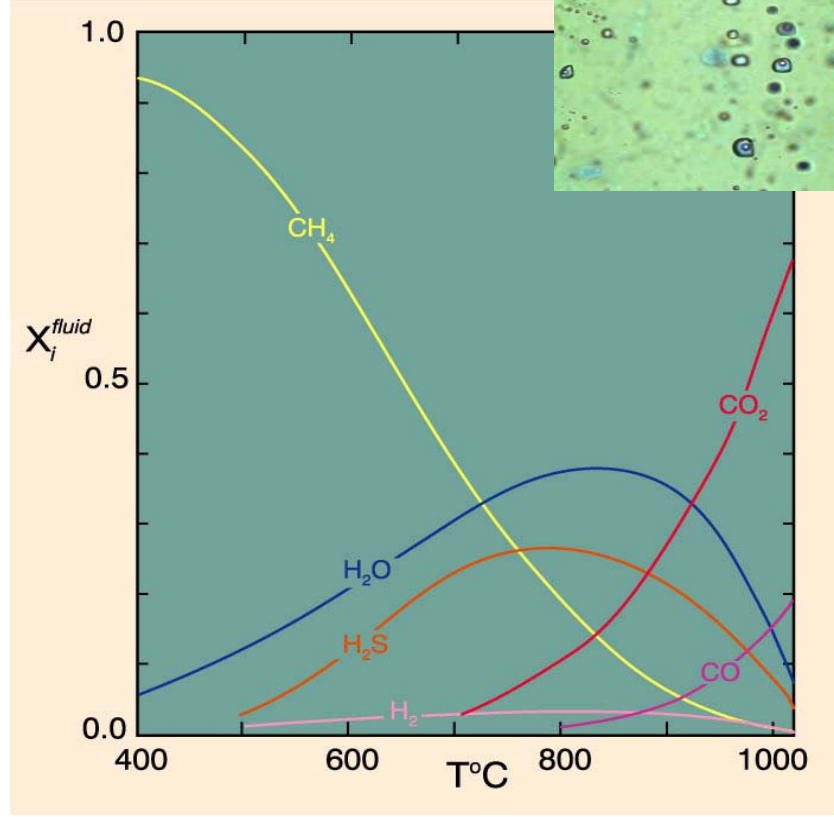
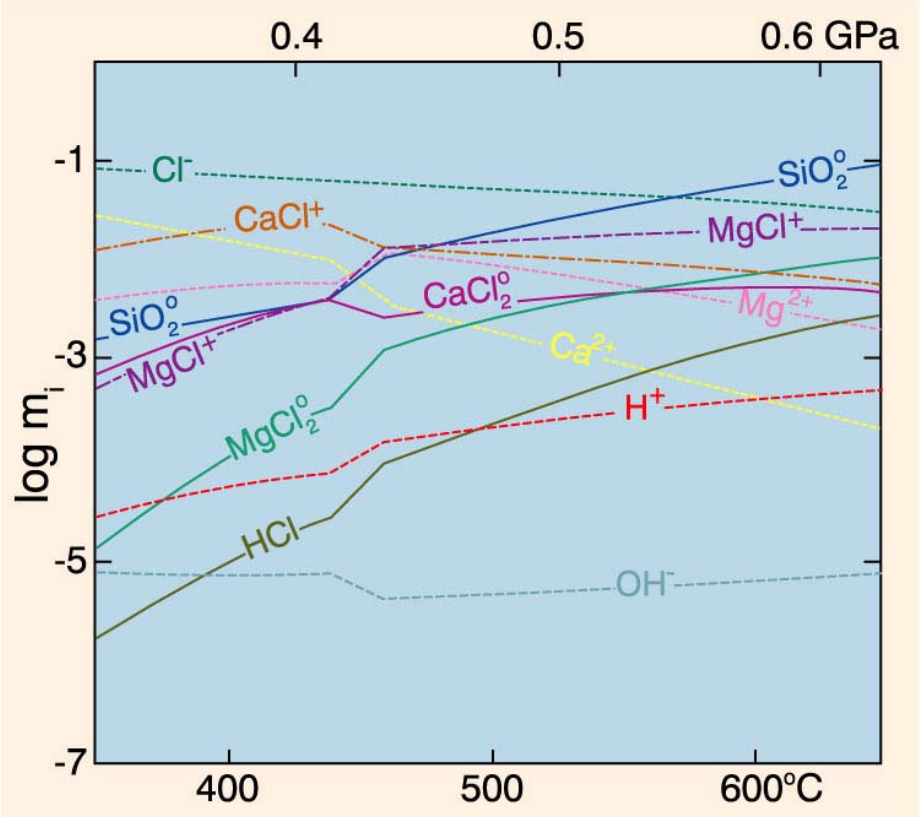
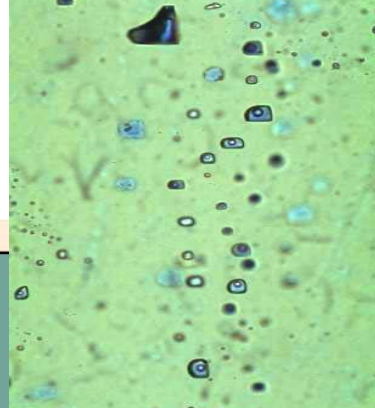
➤ příklady: vznik Chl z Grt nebo
 $K\text{-živec} + Al_2SiO_5 + H_2O = \text{muskovit} + \text{křemen}$

- devolatilizační reakce - endotermické (spotřebovávají teplo)
- hydratační reakce - exotermické (produkují teplo)

S narůstající hloubkou obsah H₂O v horninách klesá



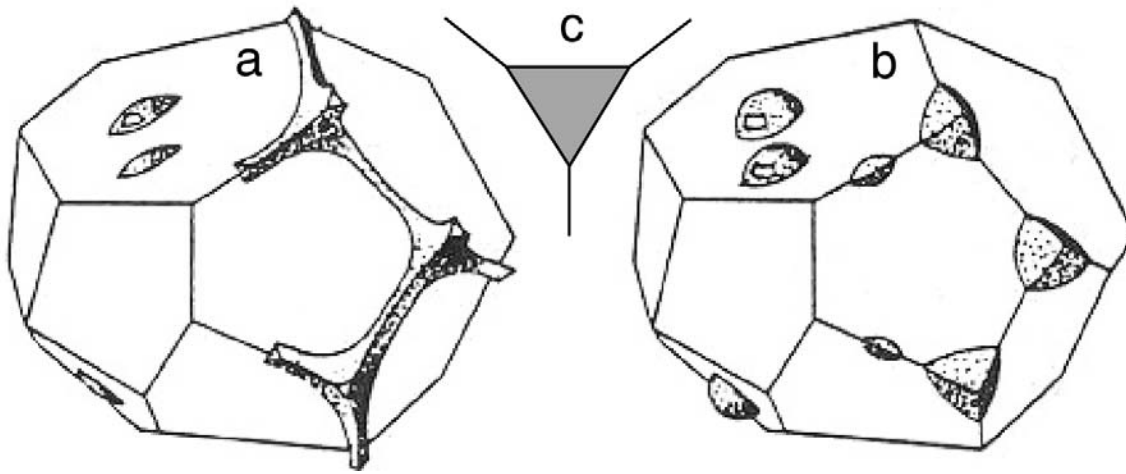
- složení fluidní fáze se může výrazně měnit s hloubkou.



Složení H_2O – chloridových fluid vypočítané pro ultramafické složení okolních hornin a při geotermalním gradientu $0,1^\circ\text{C}/\text{bar}$: m_i je molalita. Eugster a Baumgartner (1987) *Mineral solubilities and speciation in supercritical metamorphic fluids*. In I. S. E. Carmichael and H. P. Eugster (eds.), *Thermodynamic modeling of geological materials: Minerals, fluids, melts*. Rev. in Mineralogy, 17, Mineral. Soc. Amer, pp. 367-403. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

C-O-H-S fluida koexistující s grafitem při tlaku 0,2 GPa s f_{O_2} pufrovanými křemenem-faialitem-magnetitem a f_{S_2} je řízena pyrhotinem o složení $\text{Fe}_{0,905}\text{S}$. Holloway (1981) *Compositions and volumes of supercritical fluids in the Earth's crust*. In L. S. Hollister and M. L. Crawford (1981). *Short Course in Fluid Inclusions: Applications to Petrology*. Mineral. Assoc. Canada. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

- fluida se v hornině pohybují podél puklin a intergranulár
- koncentrují se hlavně v trojných bodech kde je v kontaktu několik minerálních zrn



Three-dimensional distribution of fluid about a single grain at $\theta < 60^\circ$ (left) and $\theta > 60^\circ$ (right). In the center is a cross section through a fluid tube at the intersection of three mineral grains for which $\theta = 60^\circ$. After Brenan (1991) Development and maintenance of metamorphic permeability: Implications for fluid transport. In D. M. Kerrick (ed.), *Contact Metamorphism. Rev. in Mineralogy*, 26, Mineral. Soc. Amer, pp. 291-320.

- tlak fluid v systému většinou odpovídá litostatickému tlaku nebo je nižší ($P_{fluid} = P_{H_2O} + P_{CO_2}$).
- pokud je tlak fluid ve spodní kůře nižší je to způsobeno tím že v hornině nejsou minerály obsahující těkavé složky (např. granuly)
- fluida uvolněná metamorfními reakcemi mají tendenci migrovat do oblastí s nižším tlakem.

Pohyb fluid v zemské kůře

V podmínkách zemské kůry mají hydrotermální roztoky charakter vodných roztoků o teplotě 50 až 700 °C

Do větších hloubek se hydrotermální roztoky dostávají:

- 1) na subdukčních zónách (v pórech sedimentů, v minerálech)
- 2) podél významných zlomů

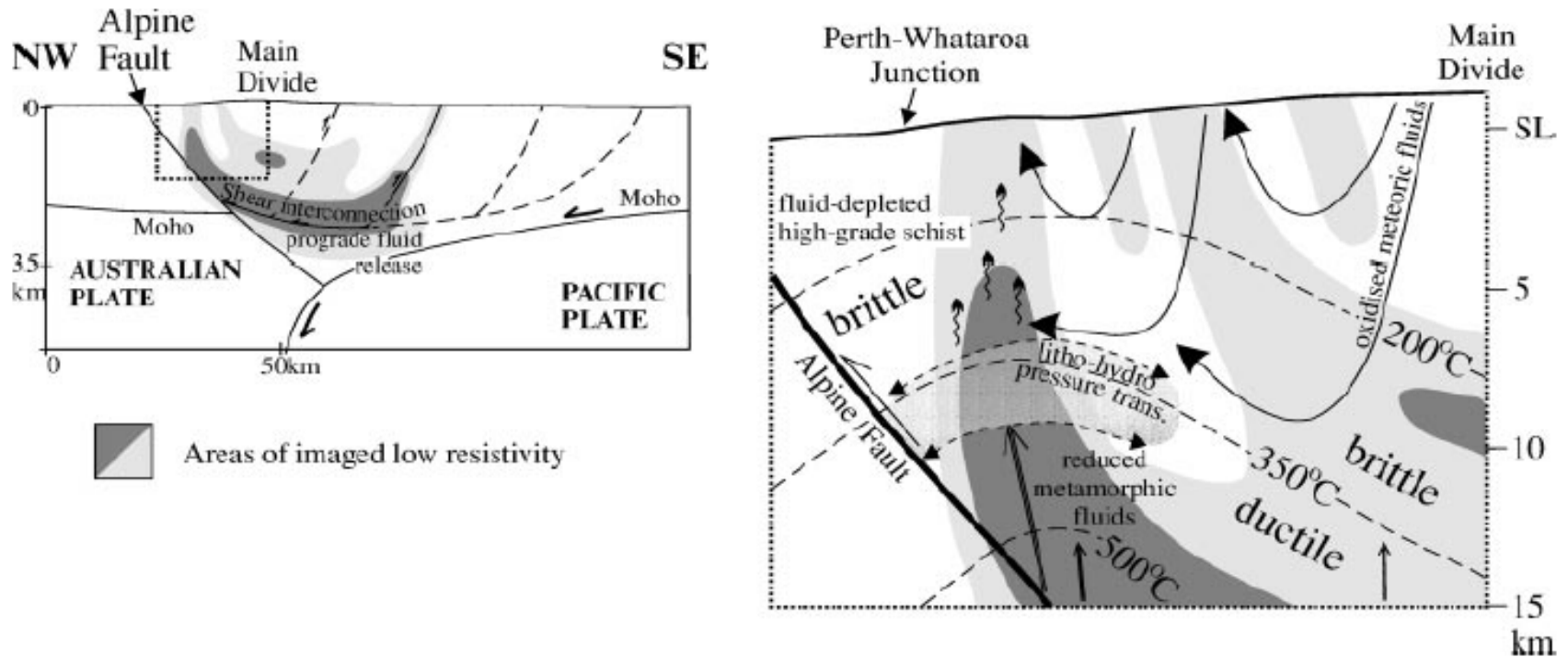
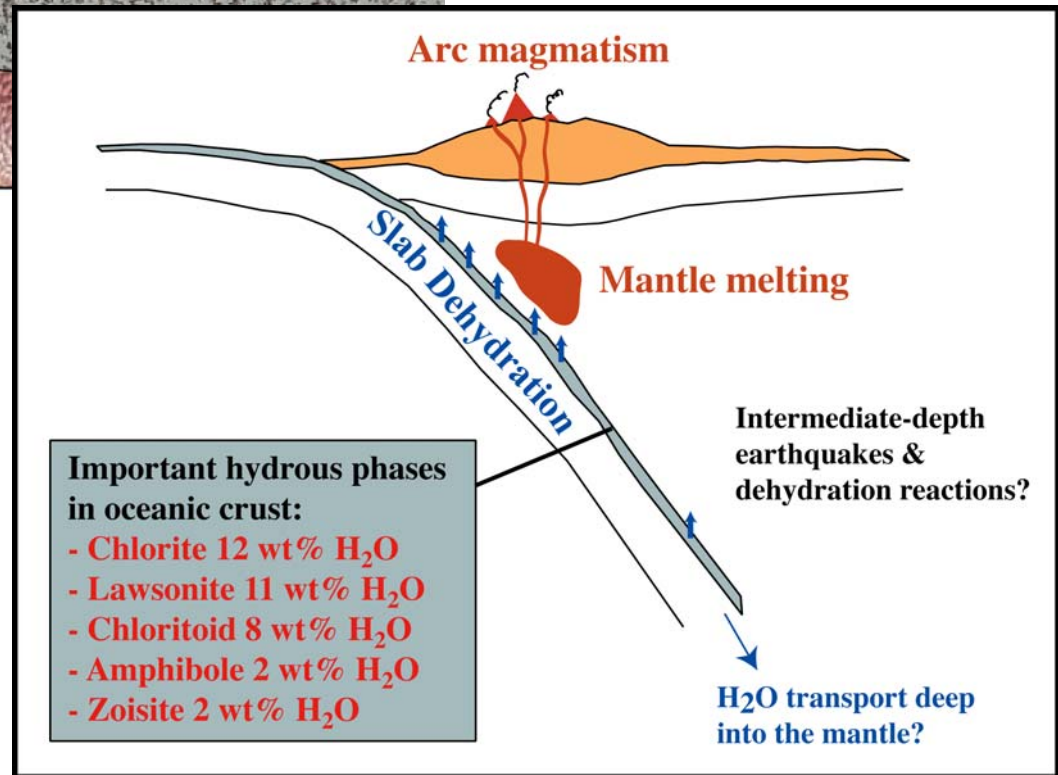
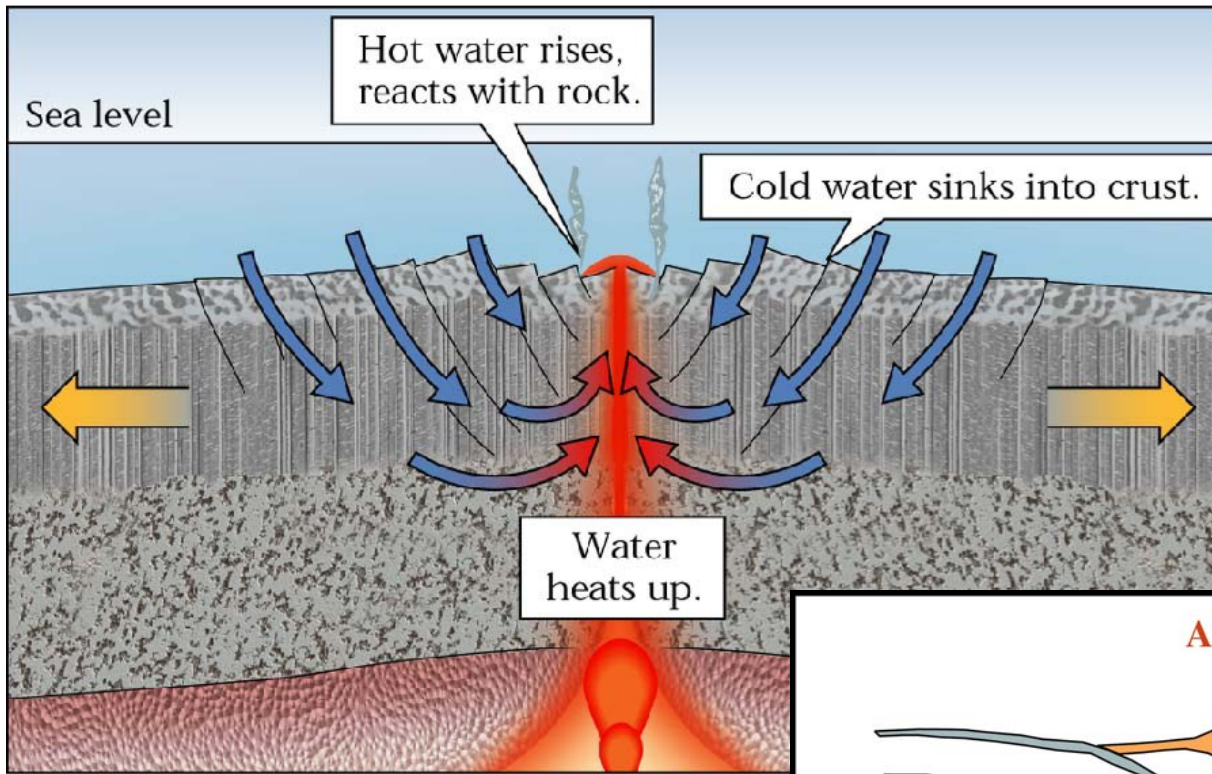
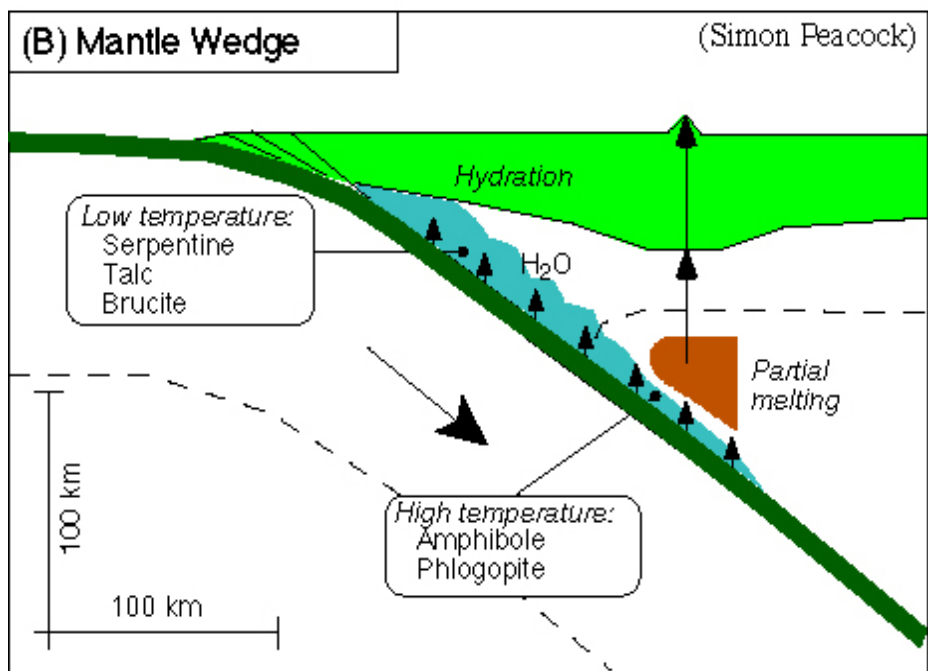
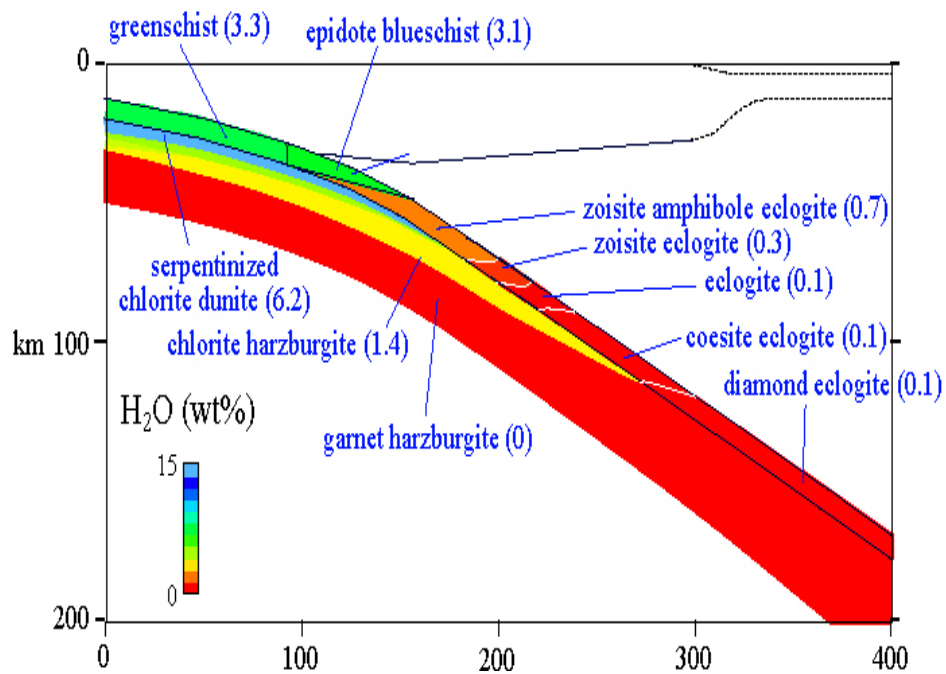
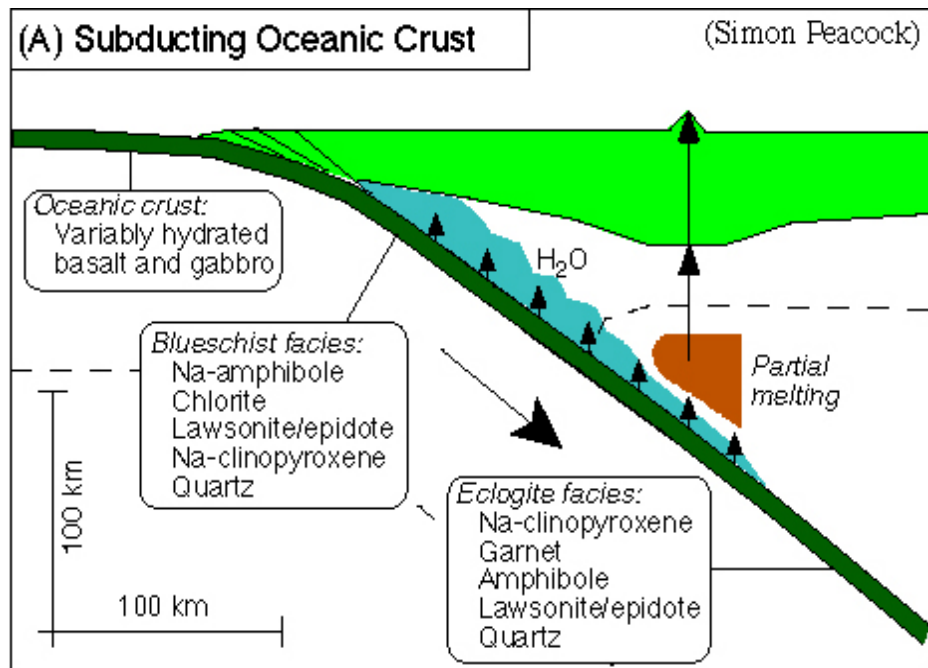
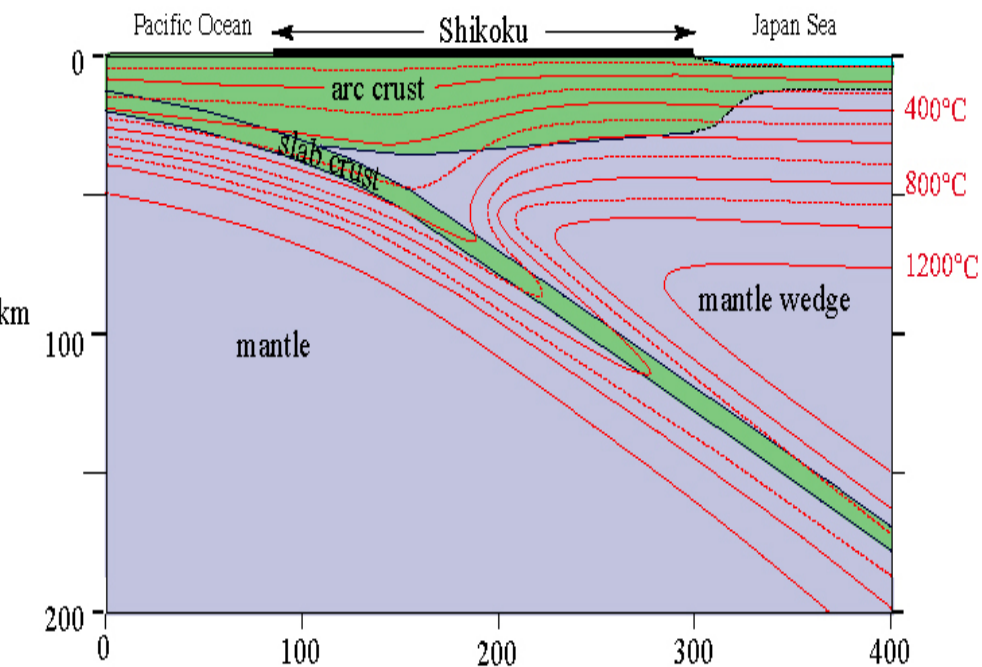
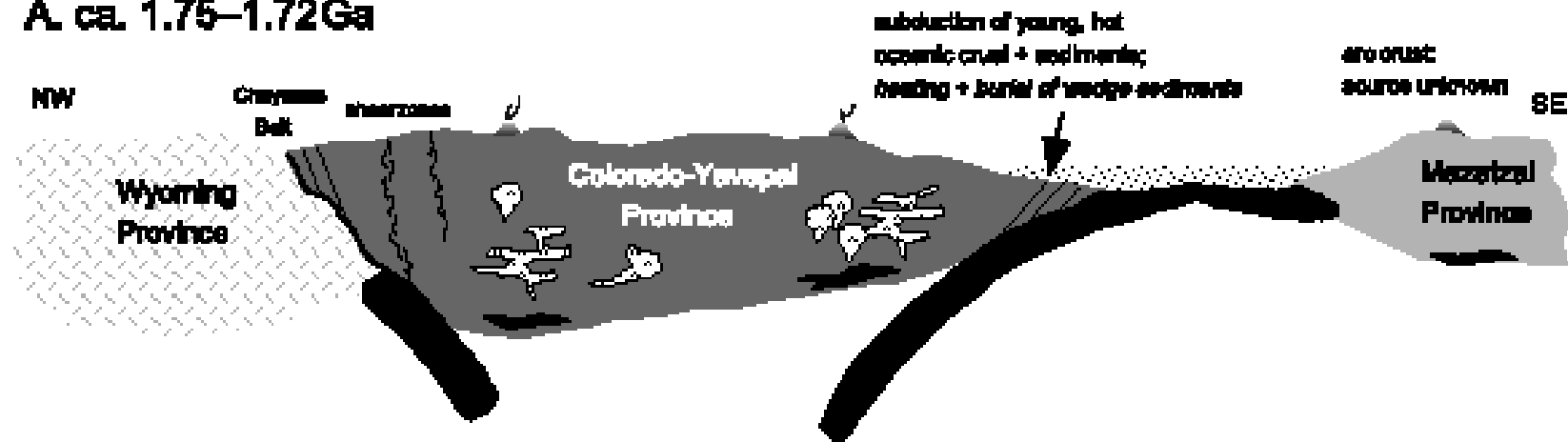


Fig. 7. Interpretive geologic cross-section beneath the Southern Alps, with pattern of fluid flow based on magnetotelluric data from the SIGHT (South Island Geophysical Transect) programme at Perth-Whataroa, after Wannamaker *et al.* (2001). See text for explanation.





A. ca. 1.75–1.72 Ga



B. ca. 1.70 Ga

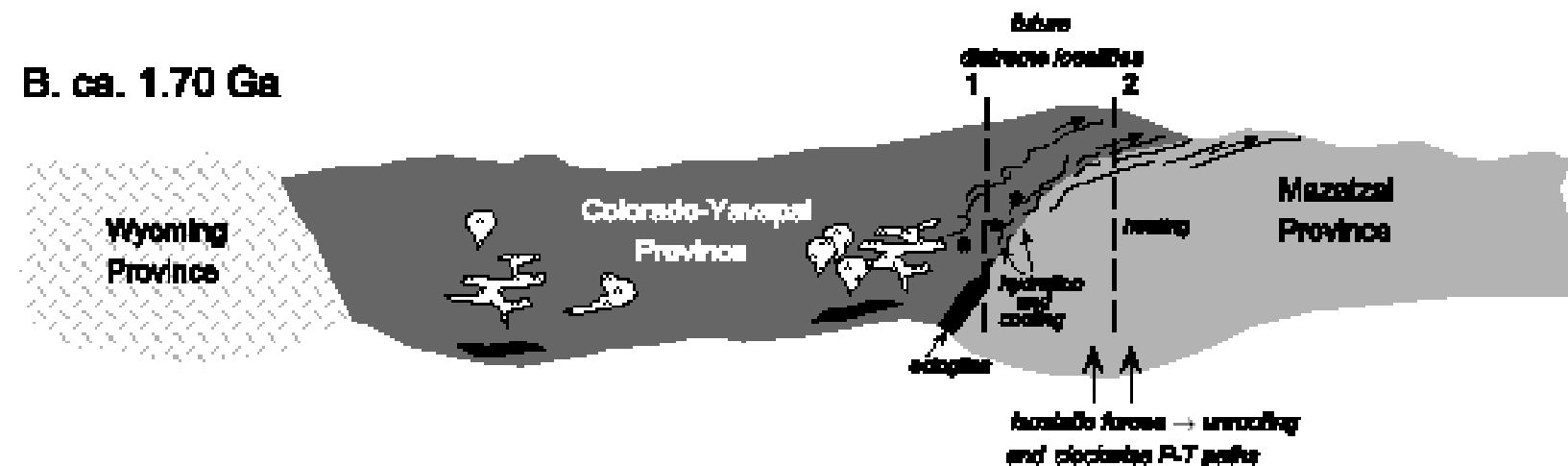


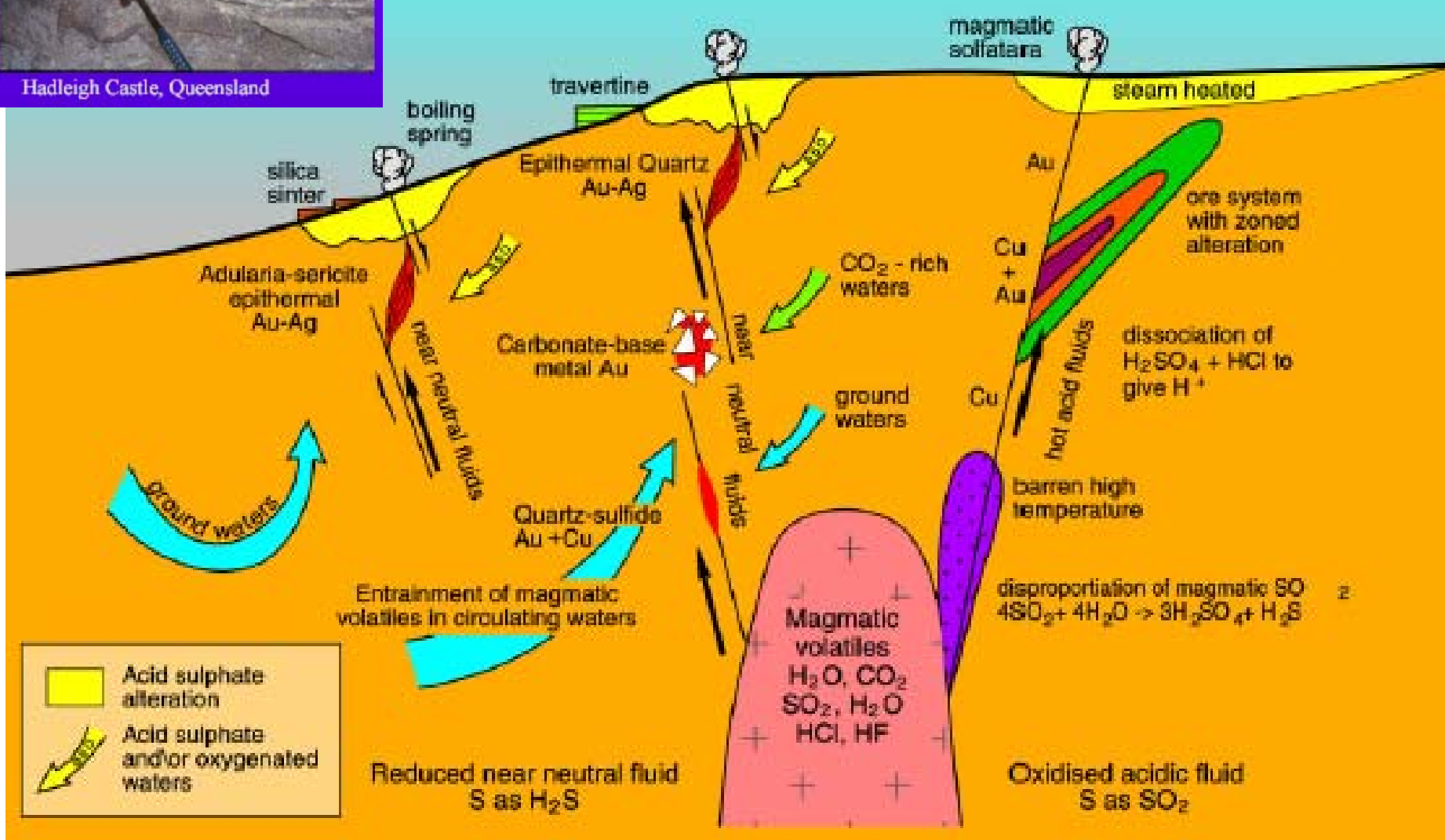
Figure 7. Tectonic cartoons illustrating possible tectonic setting of the Yavapai-Mazatzal boundary at different times; vertical exaggeration is ~3:1. (A) Setting ca. 1.75–1.72 Ga: Yavapai-Mazatzal convergence is accommodated by northwest-dipping subduction of young, hot, oceanic crust. Rocks at southeast margin of the Yavapai province undergo heating and burial at this time, whereas Mazatzal arc crust is little affected by tectonism. Eclogites form during subduction of oceanic crust beneath Yavapai province. (B) Setting ca. 1.70 Ga, during collision between Yavapai and Mazatzal crust. Collision causes shearing along suture, development of southeast-vergent thrust belt and overthickening of Mazatzal crust, and hydration of Yavapai crust in response to heating and devolatilization of Mazatzal crust + oceanic sediments. Continued convergence likely causes steepening of suture. Dashed lines labeled 1 and 2 show future (Tertiary) locations of northwest and southeast diatreme populations. *P-T*—pressure-temperature.



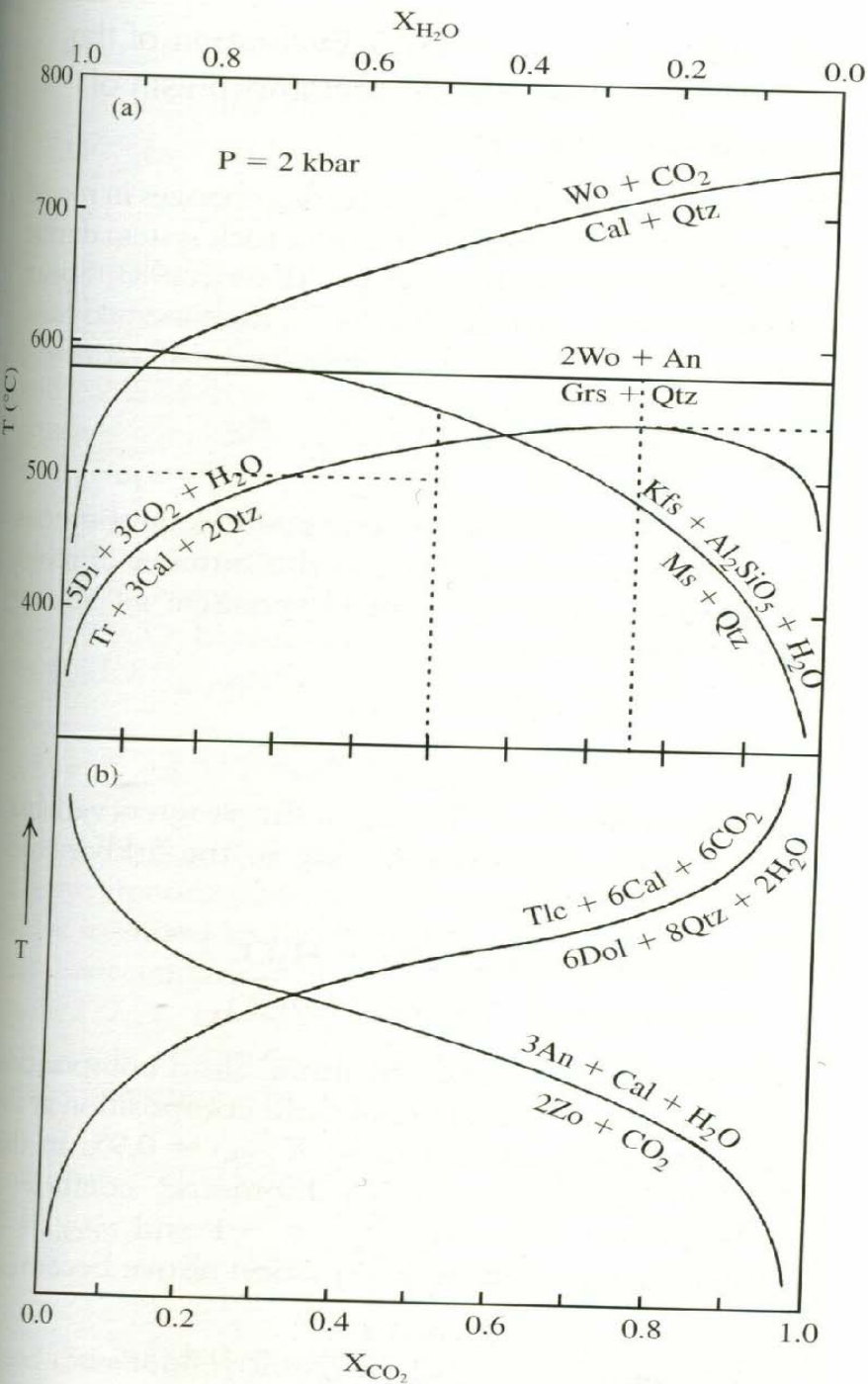
Hadleigh Castle, Queensland

Low Sulfidation

High Sulfidation



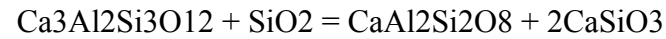
2) Rozdělení metamorfních reakcí v horninách bohatých Ca a Mg



- V metamorfovaných horninách se běžně setkáváme s těmito typy reakcí:

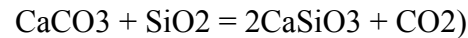
• 1) pevná látka – pevná látka

- $\text{Grs} + \text{Qtz} = \text{An} + \text{Wo}$



• 2) dekarbonatizační reakce

- $\text{Cal} + \text{Qtz} = \text{Wo} + \text{CO}_2$



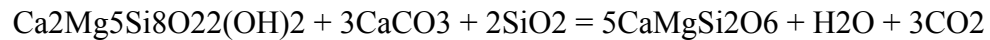
• 3) dehydratační reakce

- $\text{Ms} + \text{Qtz} = \text{Kfs} + \text{Sil} + \text{H}_2\text{O}$

• 4) reakce produkující H_2O a CO_2

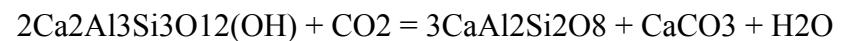
- $\text{A} = \text{B} + n\text{H}_2\text{O} + n\text{CO}_2$

- $\text{Tr} + \text{Cal} + \text{Qtz} = \text{Di} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$



• 5) reakce konzumující CO_2 a produkující H_2O

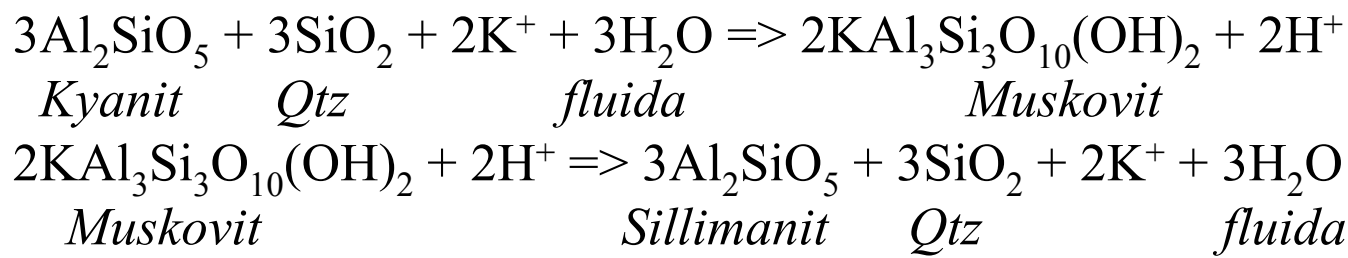
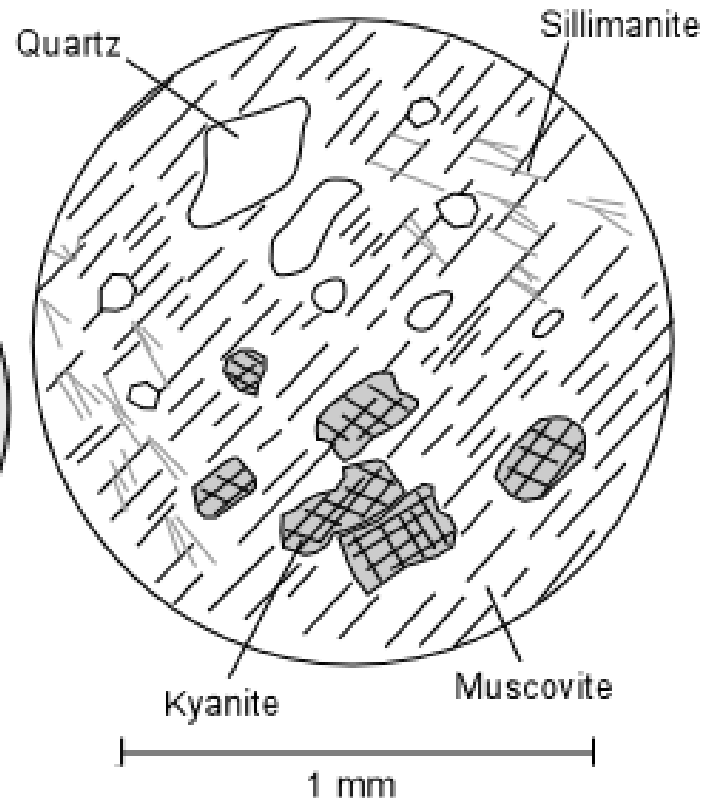
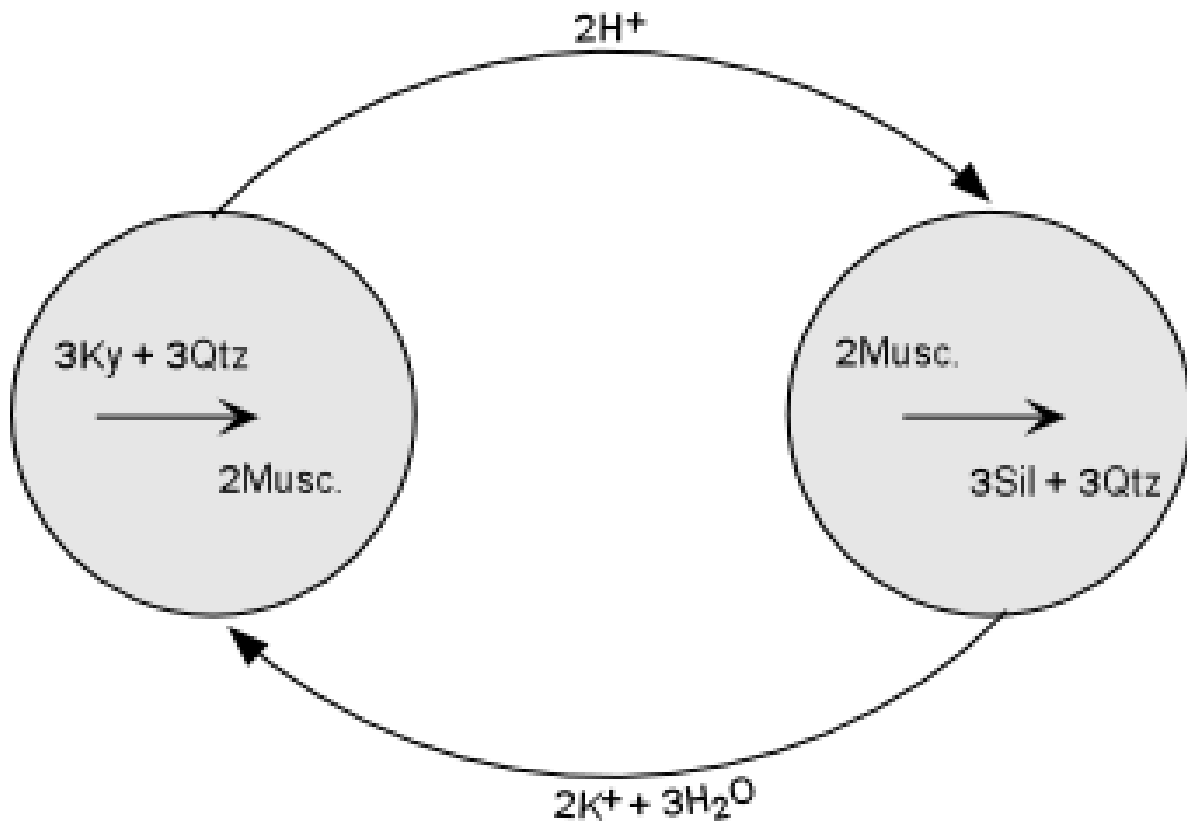
- $\text{Zo} + \text{CO}_2 = \text{An} + \text{Cal} + \text{H}_2\text{O}$



• 6) reakce konzumující H_2O a produkující CO_2

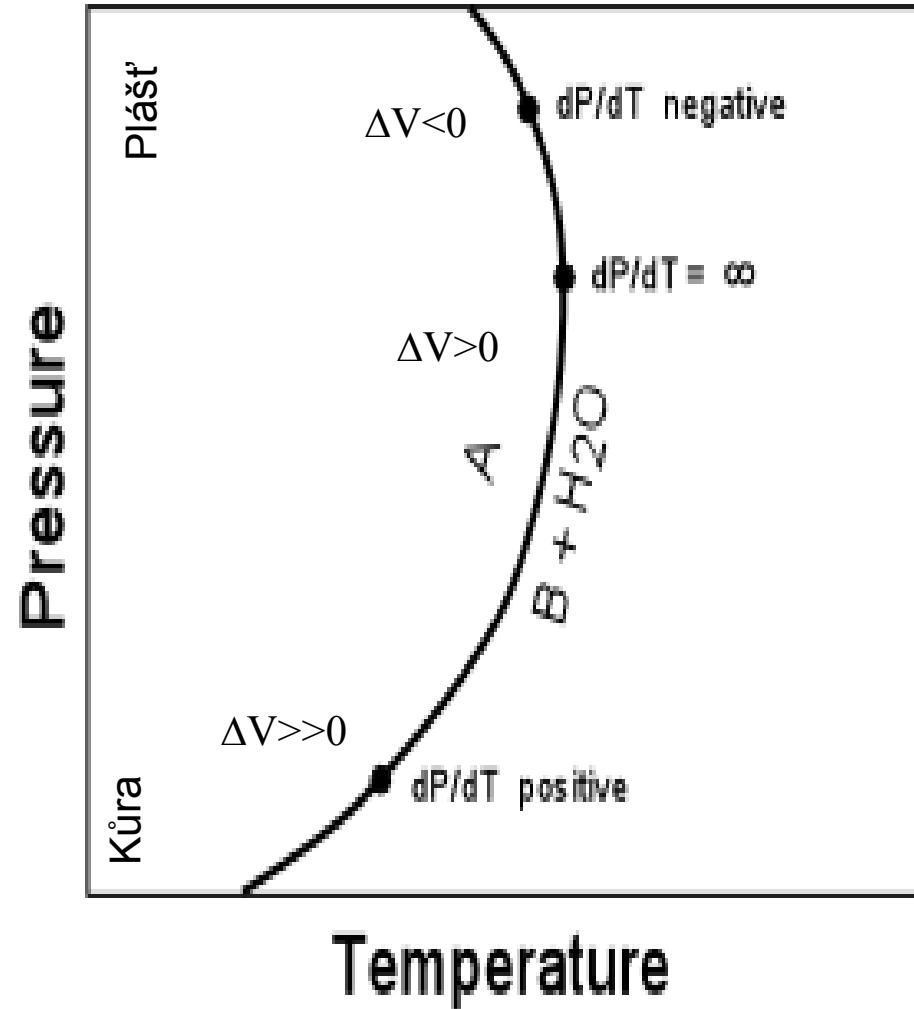
- $\text{Dol} + \text{Qtz} + \text{H}_2\text{O} = \text{Tc} + \text{Cal} + \text{CO}_2$

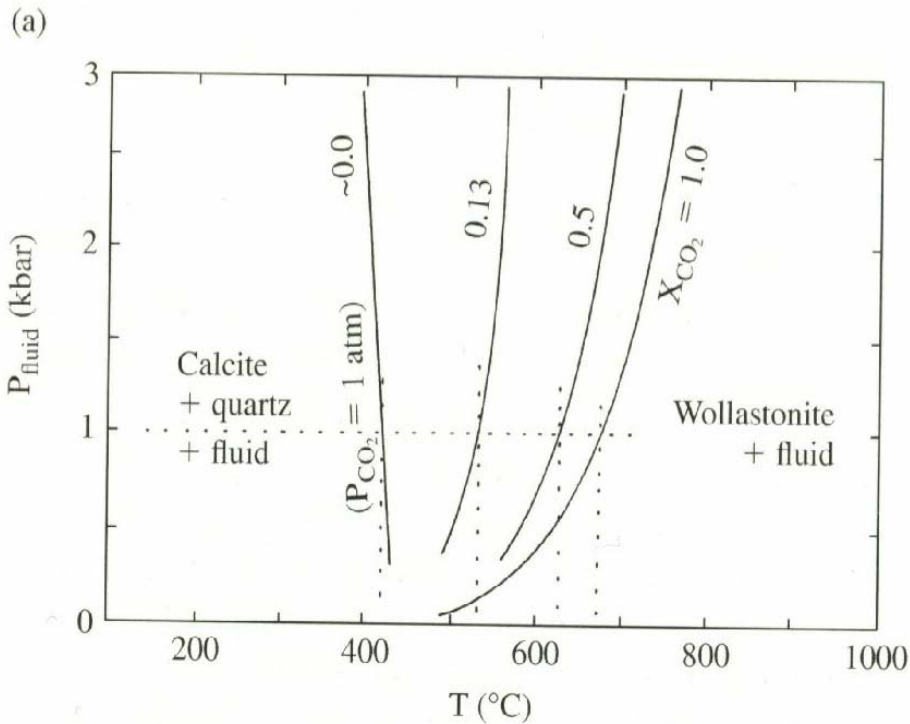
- Nejvyšší stabilitu má minerál pokud není v systému přítomna žádná potenciální reaktivní fáze.
- $\text{kalcit} = \text{CaO} + \text{CO}_2$ ($\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$) proběhne až při teplotách kolem $1200\text{ }^\circ\text{C}$
- $\text{kalcit} + \text{křemen} = \text{wollastonit} + \text{CO}_2$ ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 = \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$) již při $600\text{ }^\circ\text{C}$
- Změna ΔG při $600\text{ }^\circ\text{C}$ a $0,1\text{ MPa}$ je pro tu reakci -54 KJ/mol zatím co pro rozklad kalcitu je to $+33\text{ KJ/mol}$ (připomenutí: podmínkou rovnováhy pro reakci je $\Delta G = 0$).
- Fluidní fáze ovlivňuje také reakce v nichž přímo nevystupuje např. $\text{Ky} \Rightarrow \text{Sil}$



3) Dehydratační a dekarbonatizační reakce

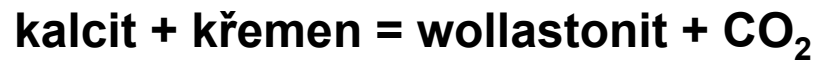
- $A \rightleftharpoons B + H_2O$
- pro tuto obecnou dehydratační reakci platí:
- $dP/dT = \Delta S/\Delta V$
- $\Delta S = S_B + S_{H_2O} - S_A = \Delta S_{\text{solids}} + S_{H_2O}$
- $\Delta V = V_B + V_{H_2O} - V_A = \Delta V_{\text{solids}} + V_{H_2O}$
- nárůstem teploty většinou znamená pozitivní ΔS hlavně pro reakce kde je produktem plyn nebo fluida (mají větší entropii než pevná fáze)
- při nízkém tlaku a vysoké teplotě mají fluida malou hustotu a ΔV pro reakci je relativně velké směrnice dP/dT je pozitivní
- při vyšších tlacích poblíž kontinentální geotermie jsou fluida stlačena více a ΔV je menší
- při vysokých tlacích (plášť) může být ΔV negativní, protože je ale ΔS stále pozitivní zakřivuje se reakční linie zpět



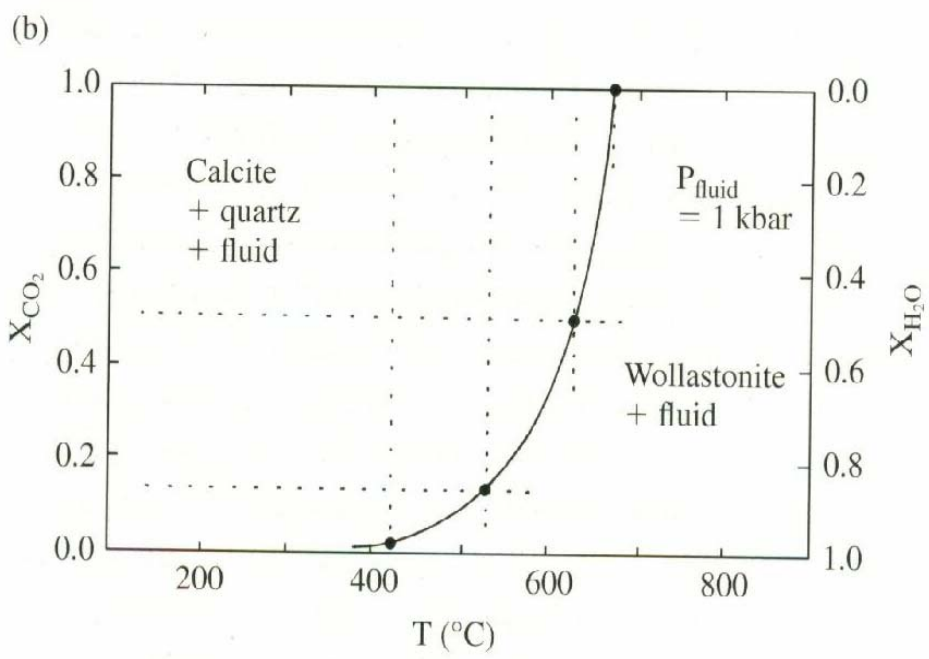


- Pozici dehydratačních a dekarbonizačních reakcí ovlivňuje poměr H_2O a CO_2

- příkladem může být reakce:



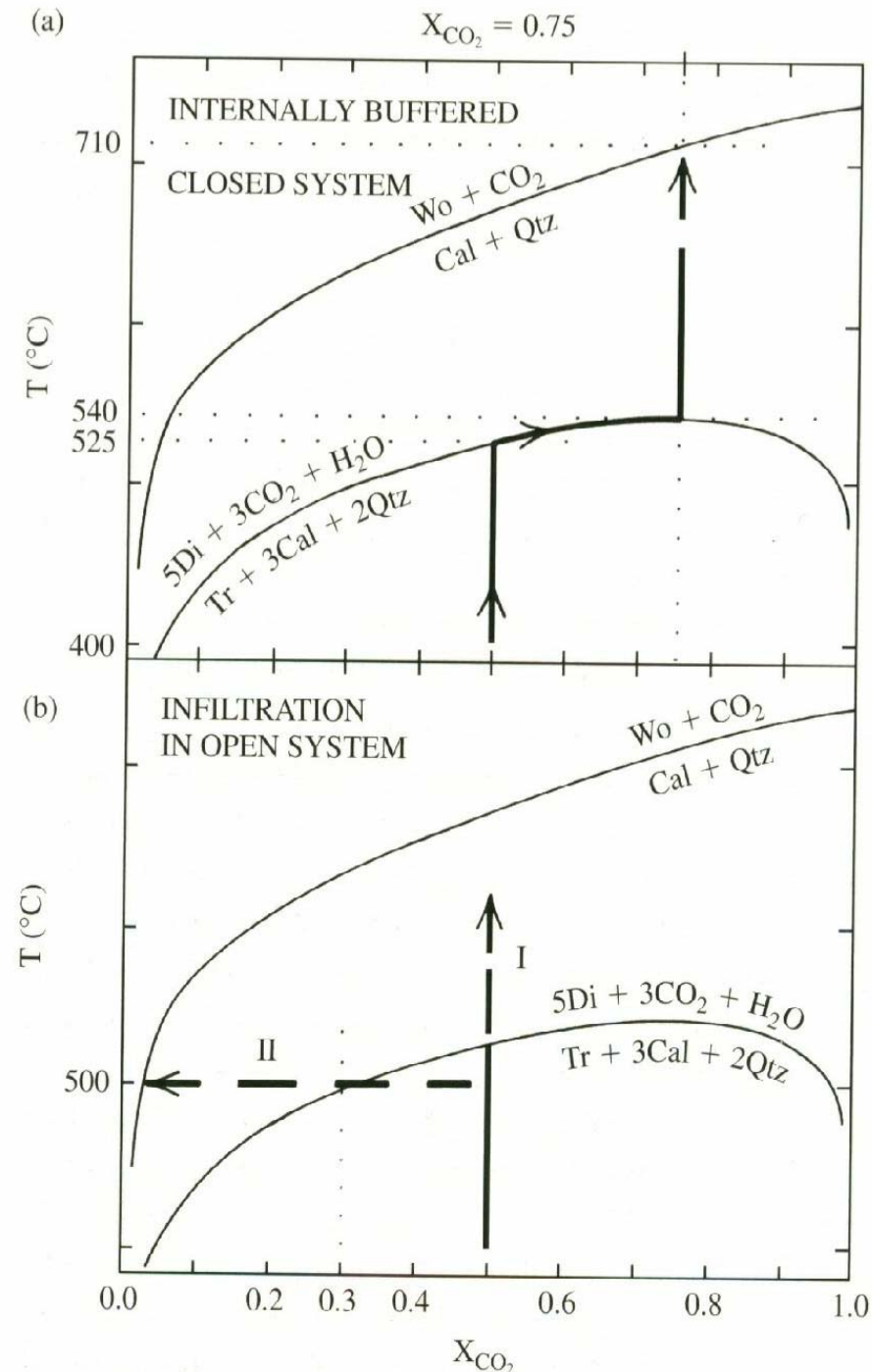
- P_{CO_2} stoupá se vzrůstem teploty
- pole stability karbonátů je redukováno přítomností vody ($P_{\text{CO}_2} < P$) a naopak u metapelitů přítomnost CO_2 ve fluidní fázi redukuje pole stability hydratovaných silikátů ($P_{\text{H}_2\text{O}} < P$)
- pokud není v systému dostatek fluidní fáze může zůstat část reaktantů stabilní i v poli stability produktu



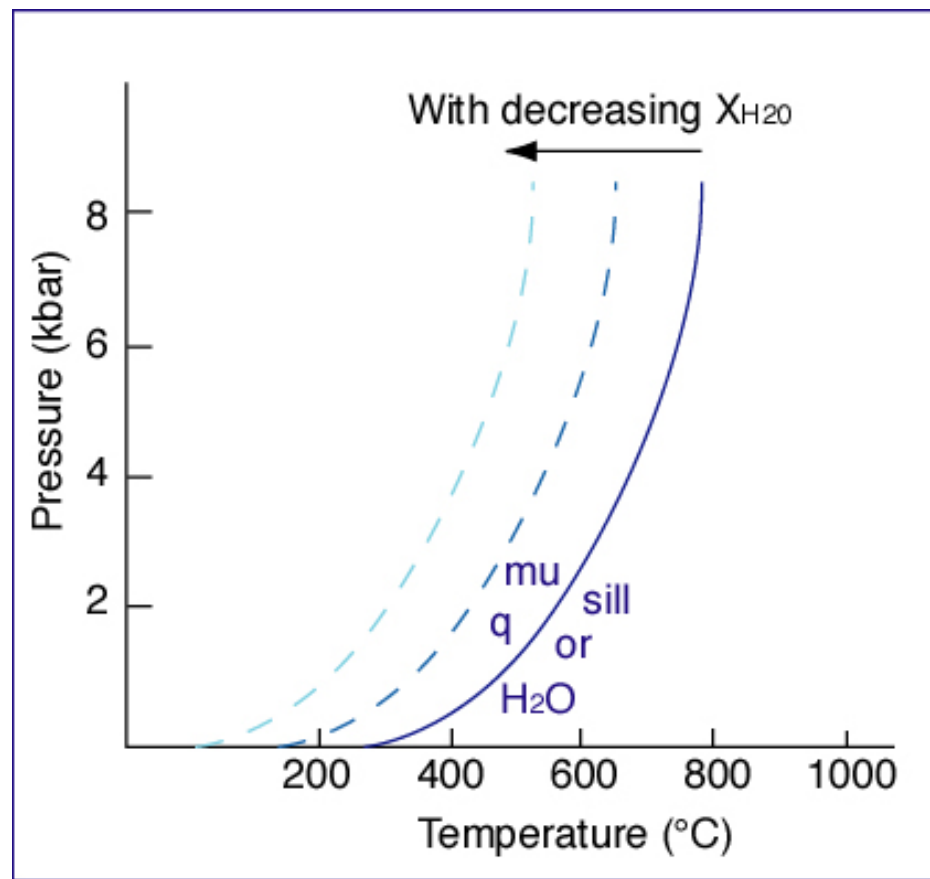
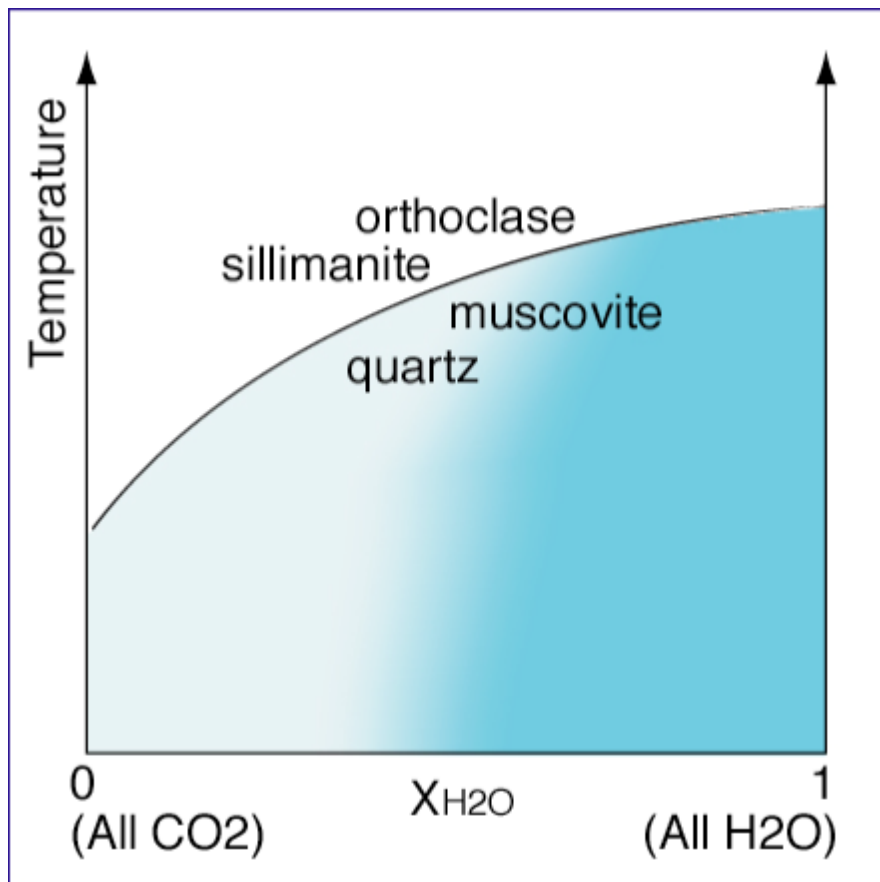
Univariant decarbonation curves for reaction 16.23 as a function of composition of the fluid. Compare Figure 16.16. Dotted lines show correspondence between specific values of T , P , and composition in the two diagrams. (a) $P_{\text{fluid}} = P_{\text{H}_2\text{O}} + P_{\text{CO}_2}$ and $X_{\text{CO}_2} + X_{\text{H}_2\text{O}} = 1$. (b) Reaction curve in T - X_{CO_2} ($X_{\text{H}_2\text{O}}$) space at $P_{\text{fluid}} = 1 \text{ kbar}$. The four data points defining the curve are taken from (a). From experimental work of H. J. Greenwood.

Uzavřený a otevřený systém při metamorfóze karbonátů

- a) V uzavřeném systému zůstává CO_2 produkované během metamorfních reakcí a X_{CO_2} během reakcí stoupá – regionální metamorfóza
- b) otevřený systém do horniny jsou přinášena fluida z okolí – kontaktní metamorfóza



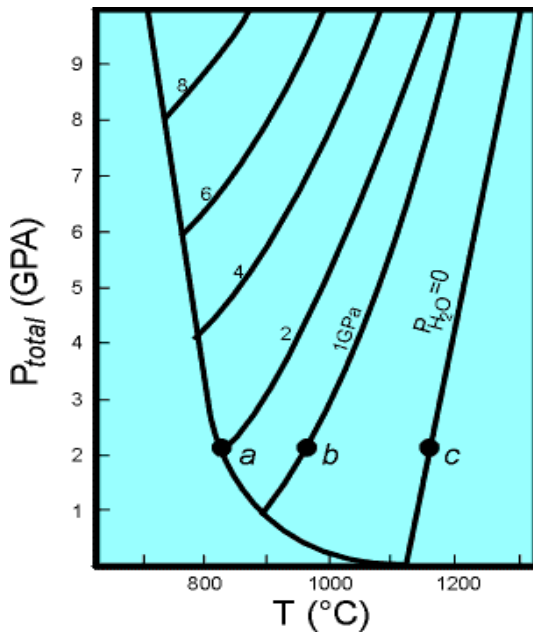
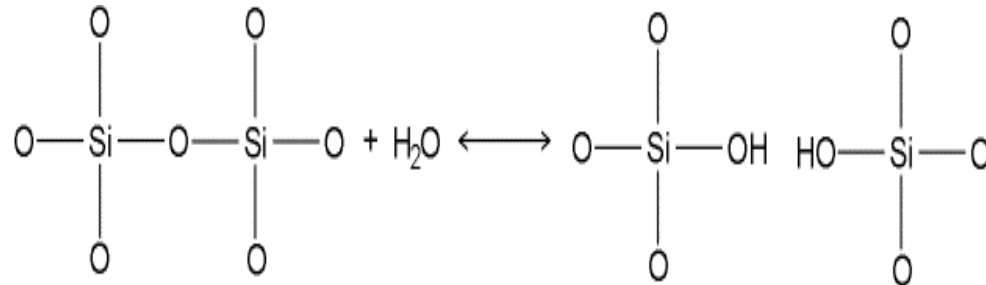
- poměr H_2O a CO_2 ovlivňuje také dehydratační reakce
- Vliv $X_{\text{H}_2\text{O}}$ je dobře patrný na reakci $\text{Ms} + \text{Qtz} = \text{Sill} + \text{Kfs} + \text{H}_2\text{O}$
- $X_{\text{H}_2\text{O}} = \text{H}_2\text{O}/(\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2)$
- při vyšším $X_{\text{H}_2\text{O}}$ roste teplota při níž dochází k reakci



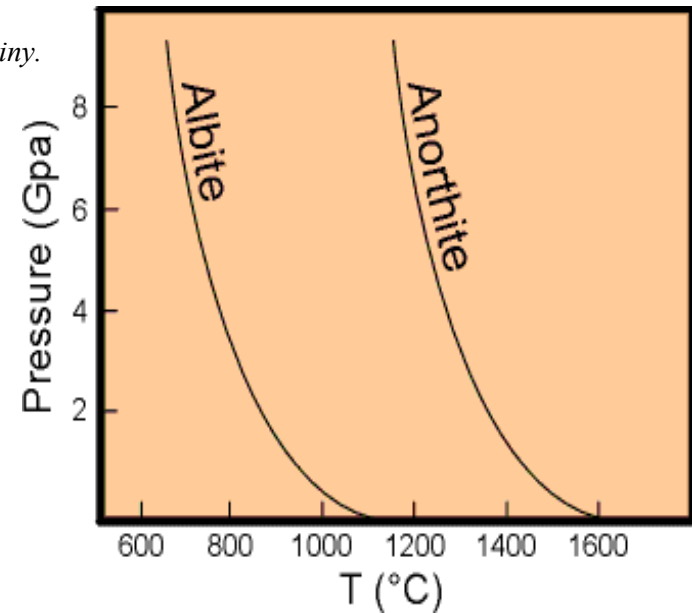
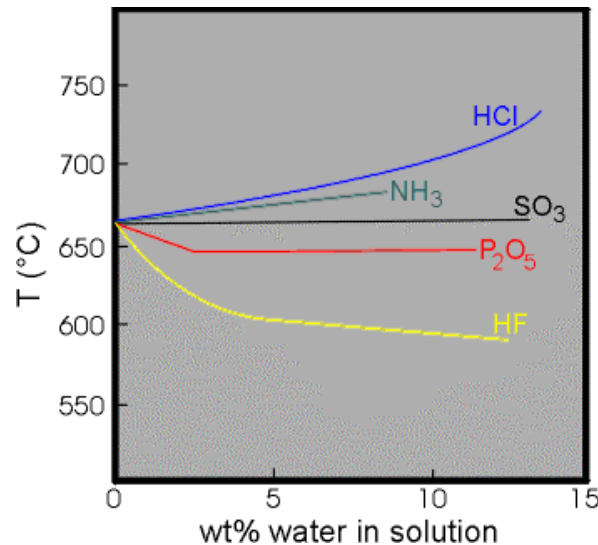
4) fluidní fáze a tavenina



- Složení magmatických fluid: CO_2 , H_2O , SO_2 , CO , H_2 , S_2 , HCl
- vodou nasycená tavenina (water saturated melt): obsahuje tolik vody kolik za daných PT je možné a musí koexistovat s fluidní fází (závisí na složení taveniny a $X_{\text{H}_2\text{O}}$).
- přítomnost vody vede ke: snížení teploty solidu a likvidu + depolymerizaci: rozpadu O-O vazeb mezi tetraedrickými skupinami (drasticky se snižuje viskozita).



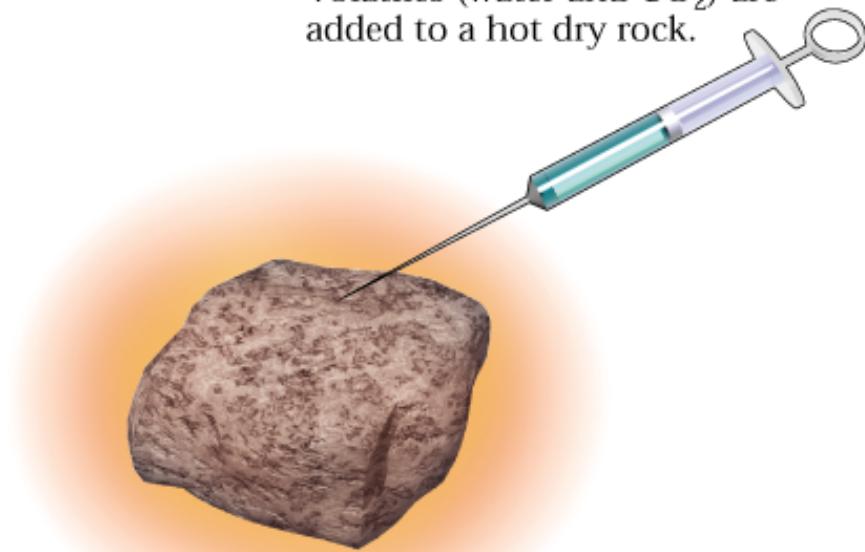
2) Vliv dalších komponent na teplotu solidu taveniny.



1) Vliv vzrůstu P na chování vodou saturované (a) částečně saturované (b) a bezvodé taveniny (c).

3) Vzrůst PH_2O snižuje teplotu krystalizace albitu a anortitu ve vodou nasycené tavenině

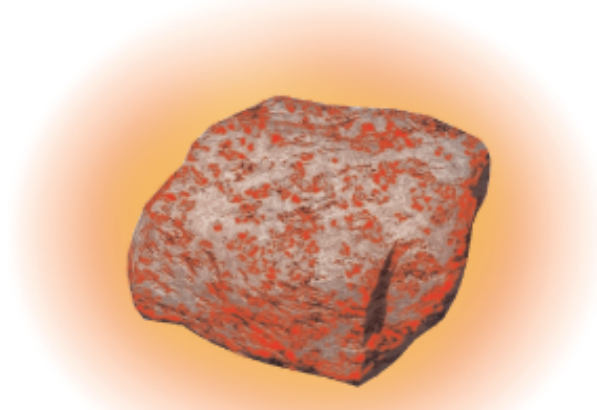
Volatiles (water and CO₂) are added to a hot dry rock.



Solid



Time



Solid plus melt

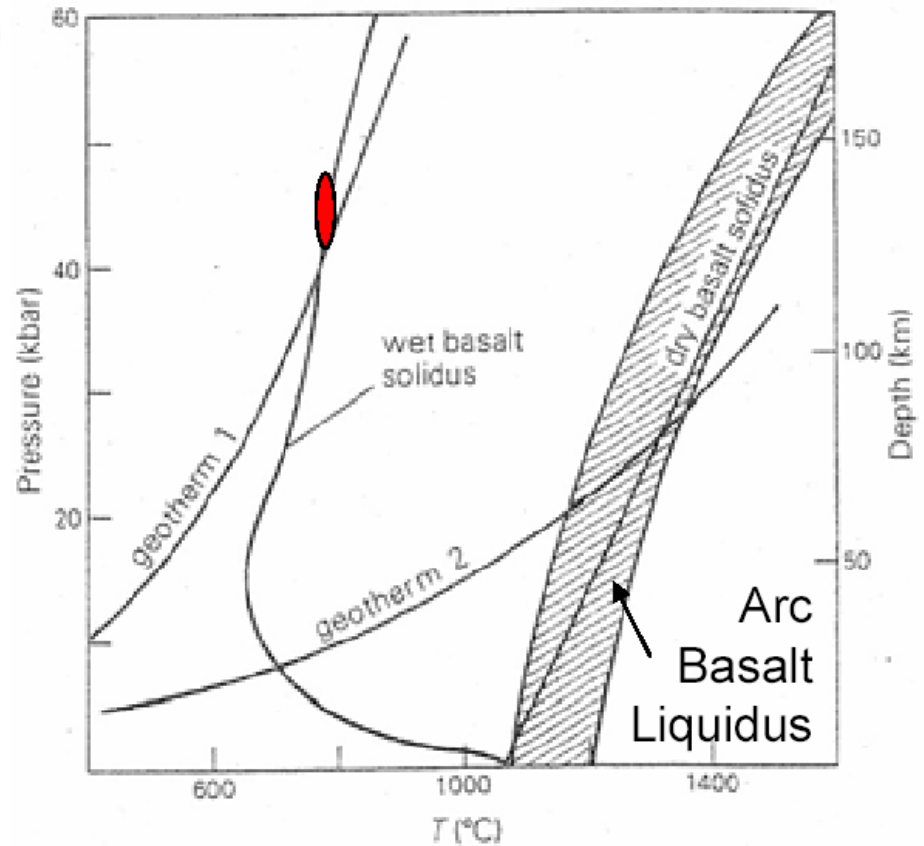
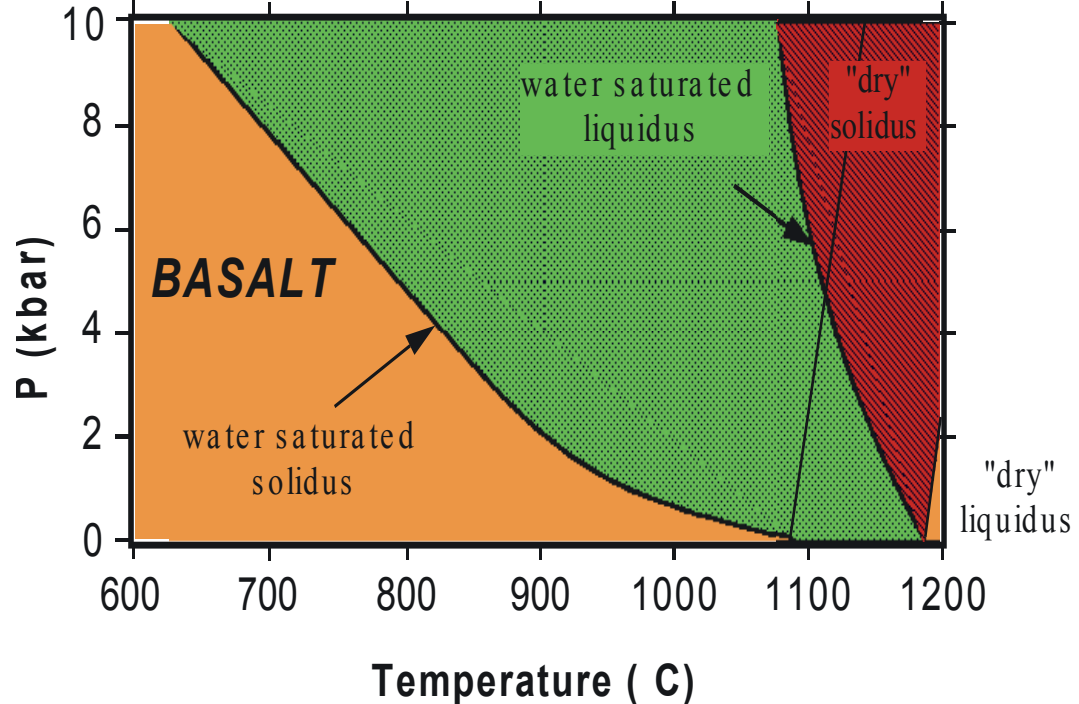


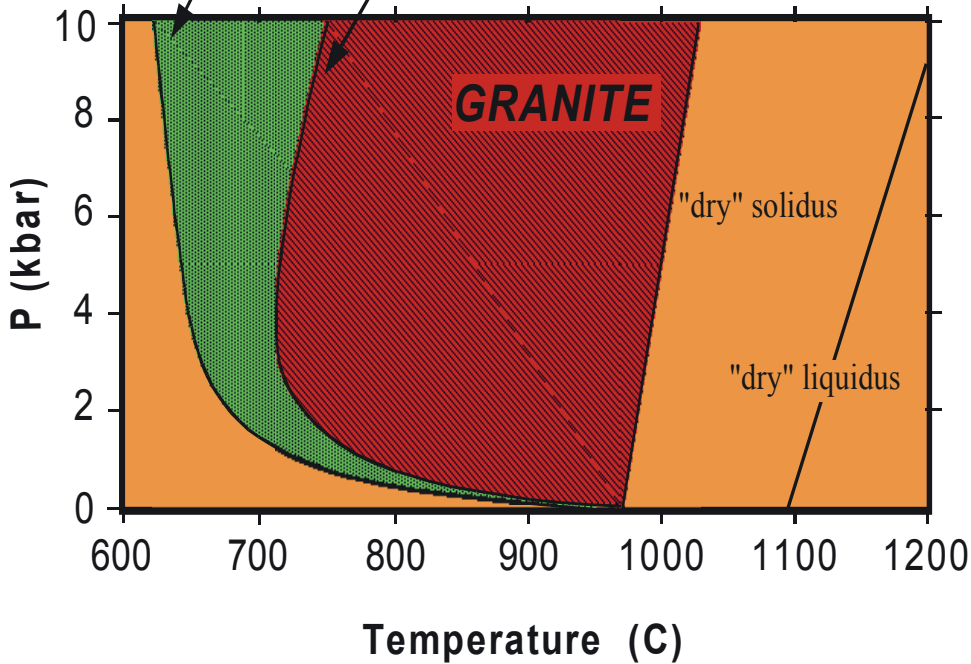
Figure 6.9 Solidi for basic rocks under anhydrous and water-saturated conditions. The shaded area represents the range of andesite liquidus temperatures. Geotherms 1 and 2 are two possible thermal gradients within the upper part of the subducted slab. Geotherm 1: a cold slab model in which the upper part of the slab is cooled by endothermic dehydration reactions. Geotherm 2: a warm slab model in which the upper surface of the slab is heated by frictional effects. (After Gill 1981, Fig. 8.1, p. 232).

teplota krystalizace
je výrazně závislá
na složení taveniny

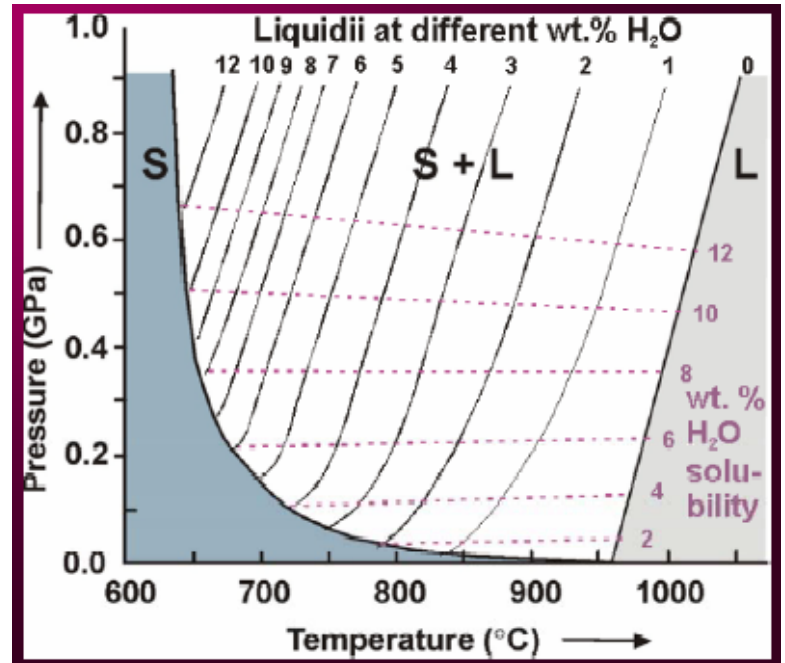


water saturated solidus

water saturated liquidus

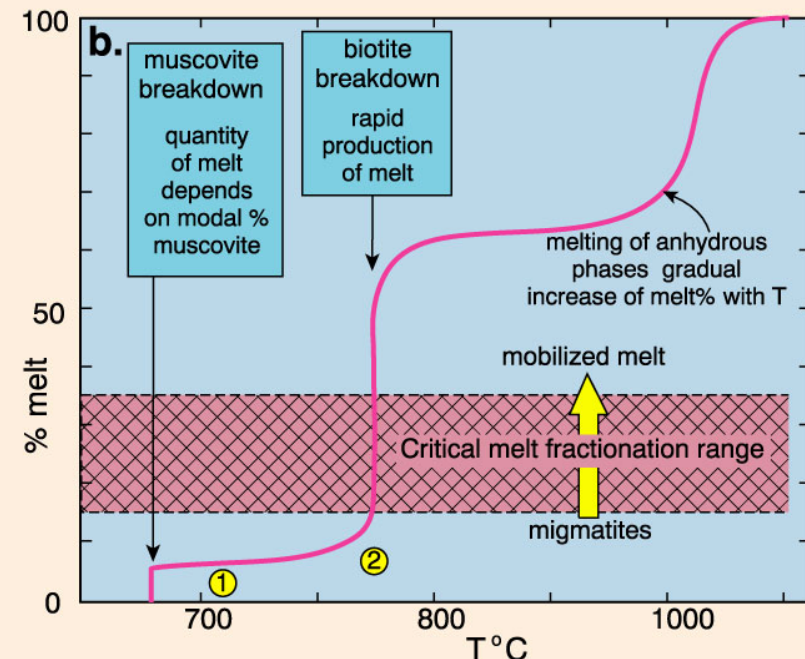
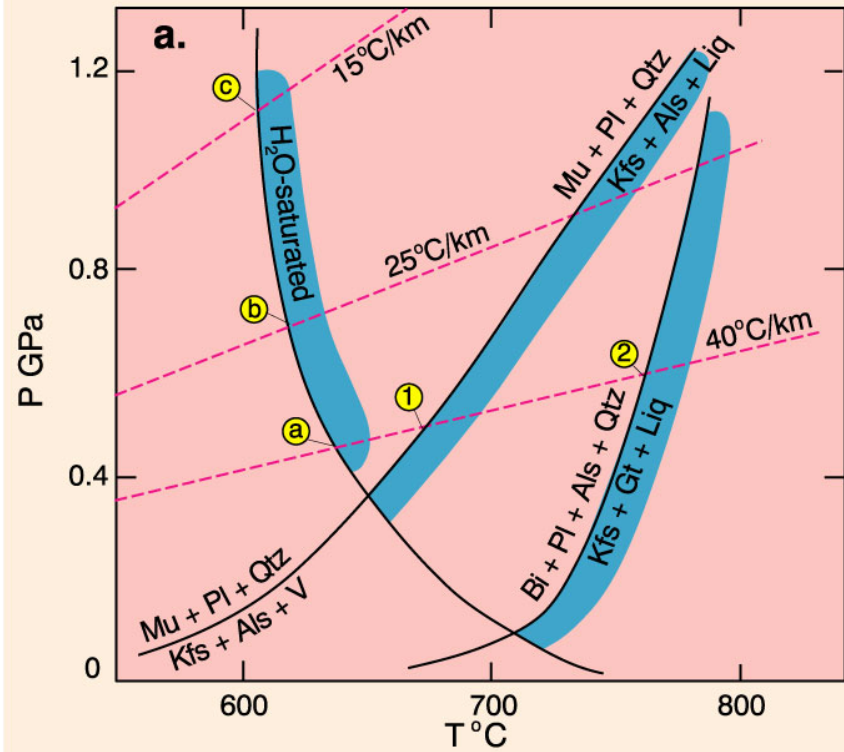


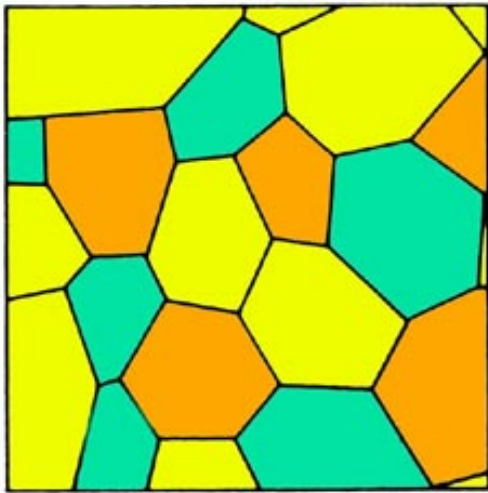
Temperature (C)



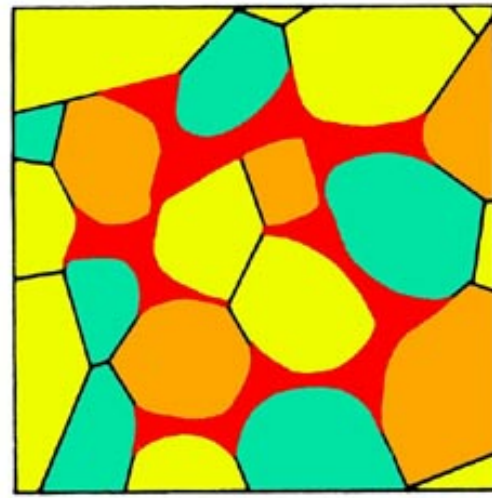
Chování fluid během migmatitizace

- *Dehydratační tavení muskovitu*
- KASH: muskovit + plagioklas + křemen = K-živec + Al_2SiO_5 + tav. (1)
- *Dehydratační tavení biotitu*
- KFMASH: biotit + plagioklas + sillimanit + křemen = granát + K-živec + tav. (2)
- KMASH: flogopit + sillimanit = Mg-cordierit + K-živec + tav. (3)
- KFMASH: biotit = ortopyroxen + K-živec + tav. (4)
- KFMASH: biotit + granát = ortopyroxen + K-živec + cordierit + tav. (5)

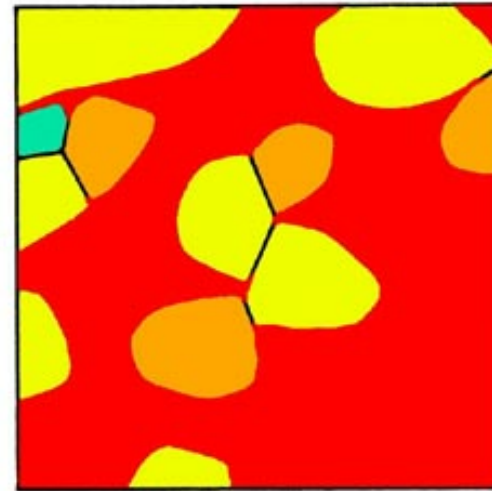




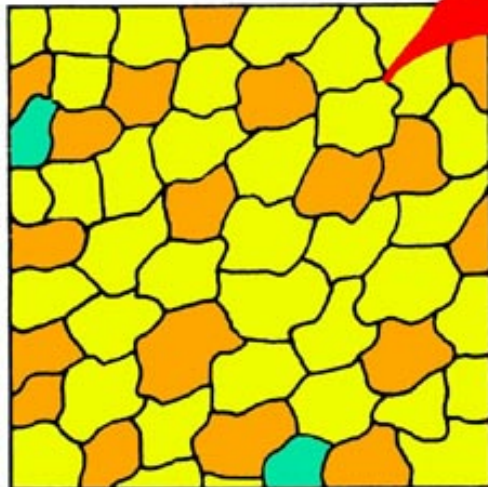
(1)



(2)



(3)



(4)

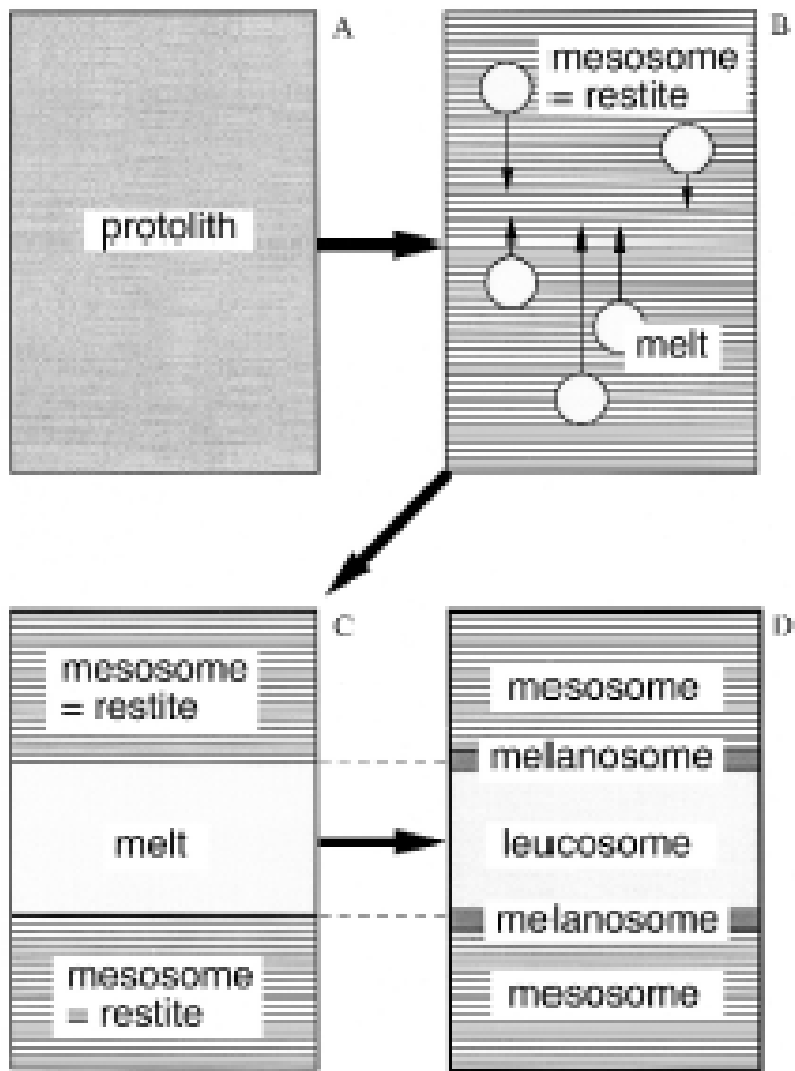
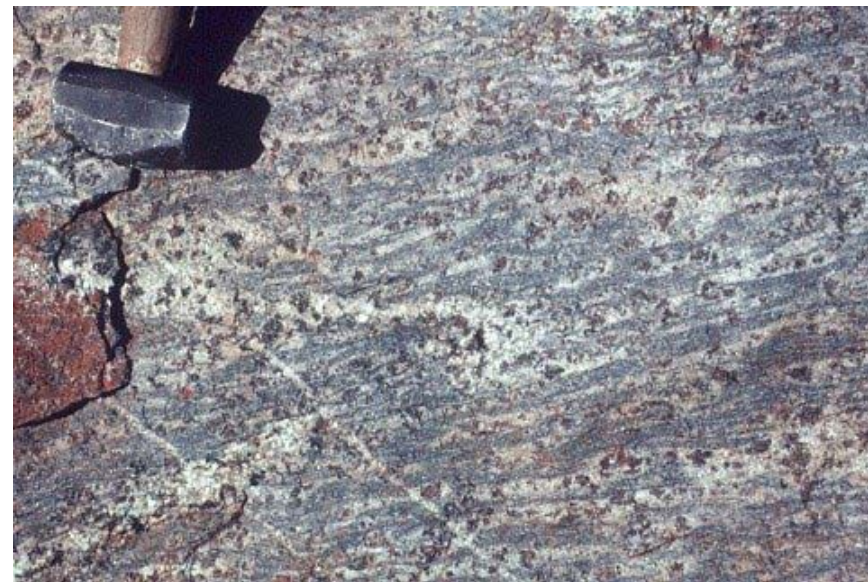
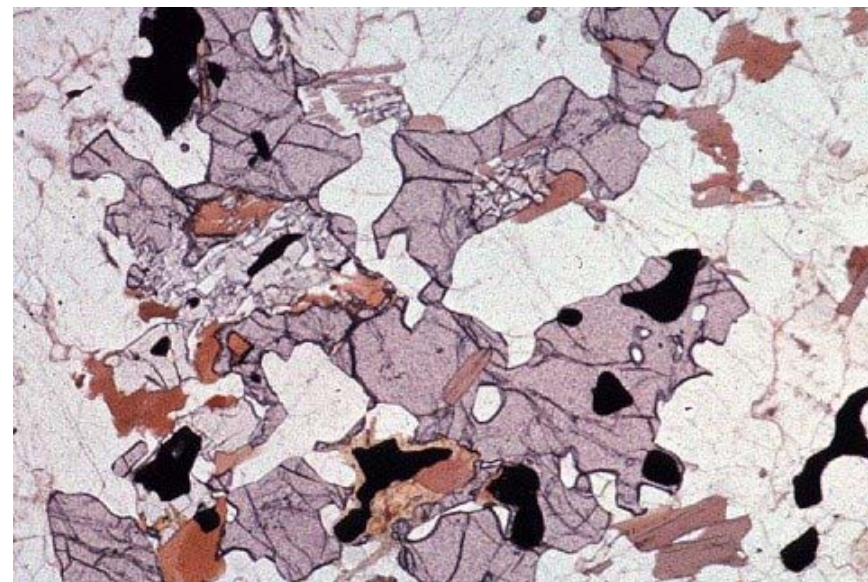


Fig. 6. New migmatite model involving a three-stage process in a closed system: prograde partial melting resulting in restite (mesosome) and melt (A > B); melt segregation and collection in specific layers (B > C); and back reaction between in situ melt and adjacent restite to form a leucosome-melanosome pair (C > D).

Kriegsman (2001)



Migmatit tvořený světlým mesosomem (Qtz+Fsp) tmavý melanosom tvoří Grt+Bt.



Tavenina krystalující na místě uvolnila vodu (kolem 5 hmotnostních % při 750°C, 5kbar). Díky tomu došlo ke hydratační reakci produkující na úkor granátu biotit. Výsledný migmatit má složení Qtz+Fsp+Bt+Sill+Grt.

5) *Celkové chemické složení Ca a Mg bohatých horniny (zjednodušené)*

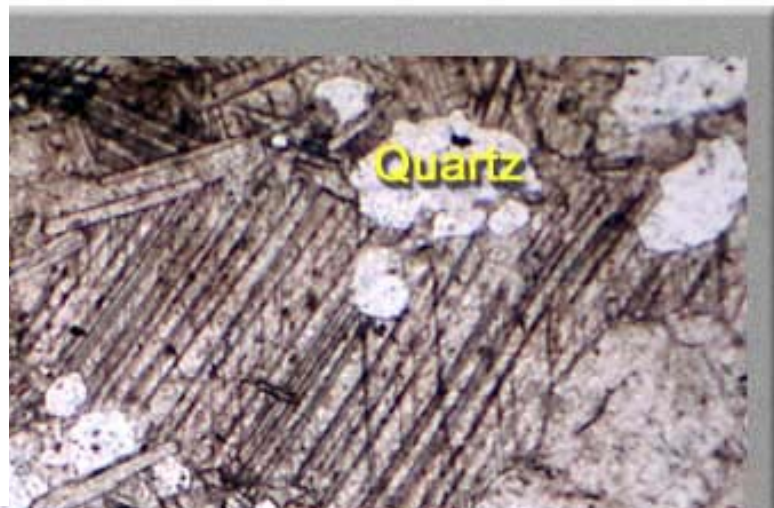
- kvarcity SiO_2
- křemen-živcové horniny $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-Na}_2\text{O-CaO-H}_2\text{O}$
- metapelity $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-MgO-FeO-H}_2\text{O}$
- metabazity $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-MgO-FeO-H}_2\text{O}$
- vápenatosilikátové horniny $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-CaO-MgO-H}_2\text{O}$
- metakarbonáty $\text{SiO}_2\text{-CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$
- křemité dolomity $\text{MgO-CaO-SiO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$
- ultramafity $\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$

A) Metamorfóza karbonátových hornin

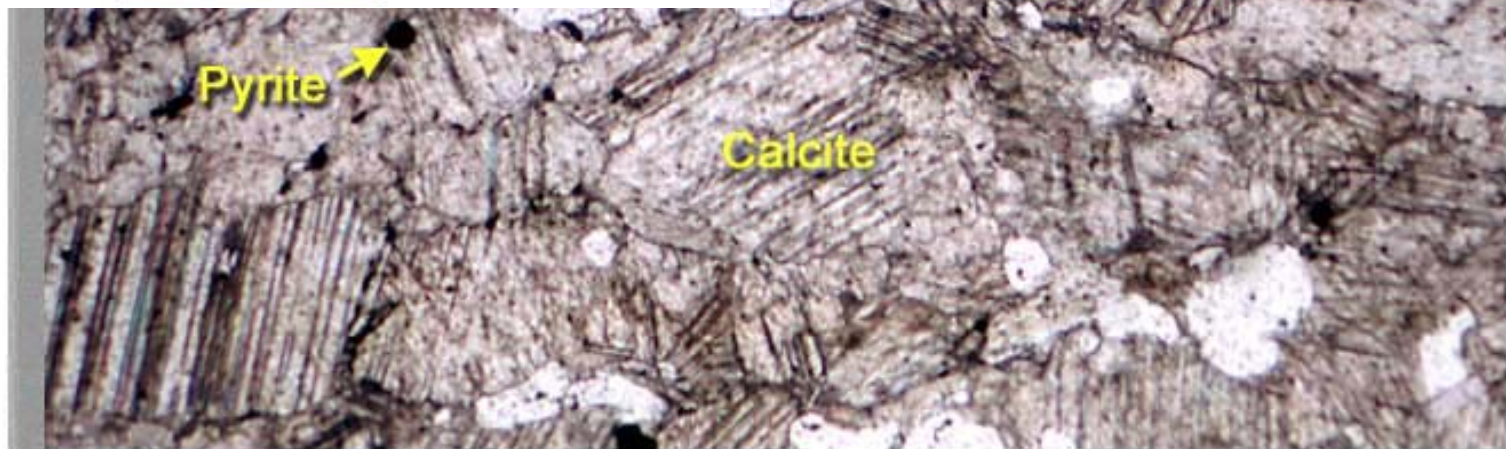
- Karbonátové horniny, většinou vždy znečištěné silikátovou příměsí, lze rozdělit podle jejich mineralogického (chemického) složení a přítomnosti fluidní fáze do několika systémů:
- kalcitické $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_2$ CS-HC
- dolomitické $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_2$ CMS-HC
- vápenatosilikátové h. $\text{K}_2\text{O-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_2$ 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 $\text{H}_2\text{O/CO}_2 = X_{\text{CO}_2}$. 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_{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.

- **CMSCH**

dolomit = kalcit + periklas + CO₂ ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2 = \text{CaCO}_3 + \text{MgO} + \text{CO}_2$)

- **CTSCH**

rutil + kalcit + křemen = titanit + CO₂ ($\text{TiO}_2 + \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 = \text{CaTiSiO}_5 + \text{CO}_2$)

- **CASH**

grosular + křemen = anortit + wollastonit ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{SiO}_2 = \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{CaSiO}_3$)

- **CASCH**

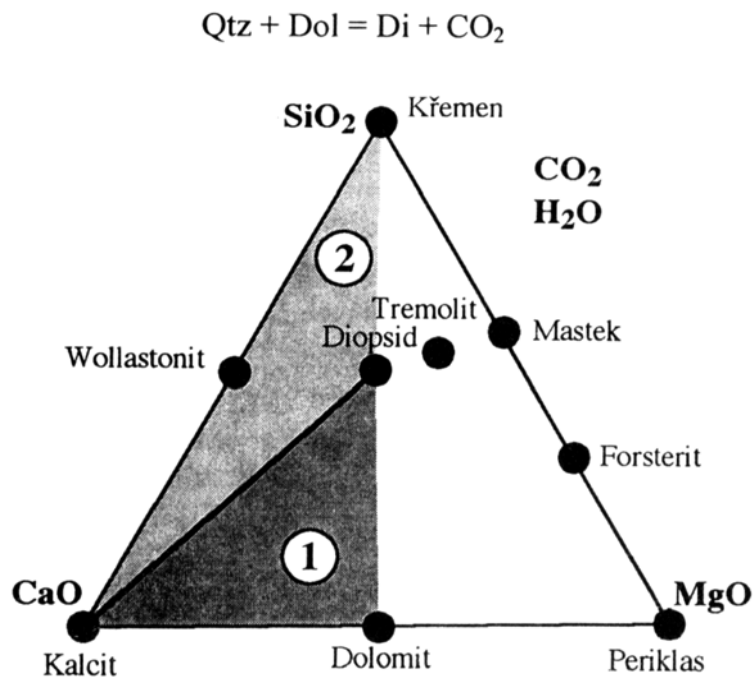
zoisit + CO₂ = anortit + kalcit + H₂O ($2\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH}) + \text{CO}_2 = 3\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$)

- **KCMASCH**

flogopit + kalcit + křemen = Kfs + tremolit + H₂O + CO₂ ($5\text{KMg}_3\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2 + \text{CaCO}_3 + 2\text{SiO}_2 = 5\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 3\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$)

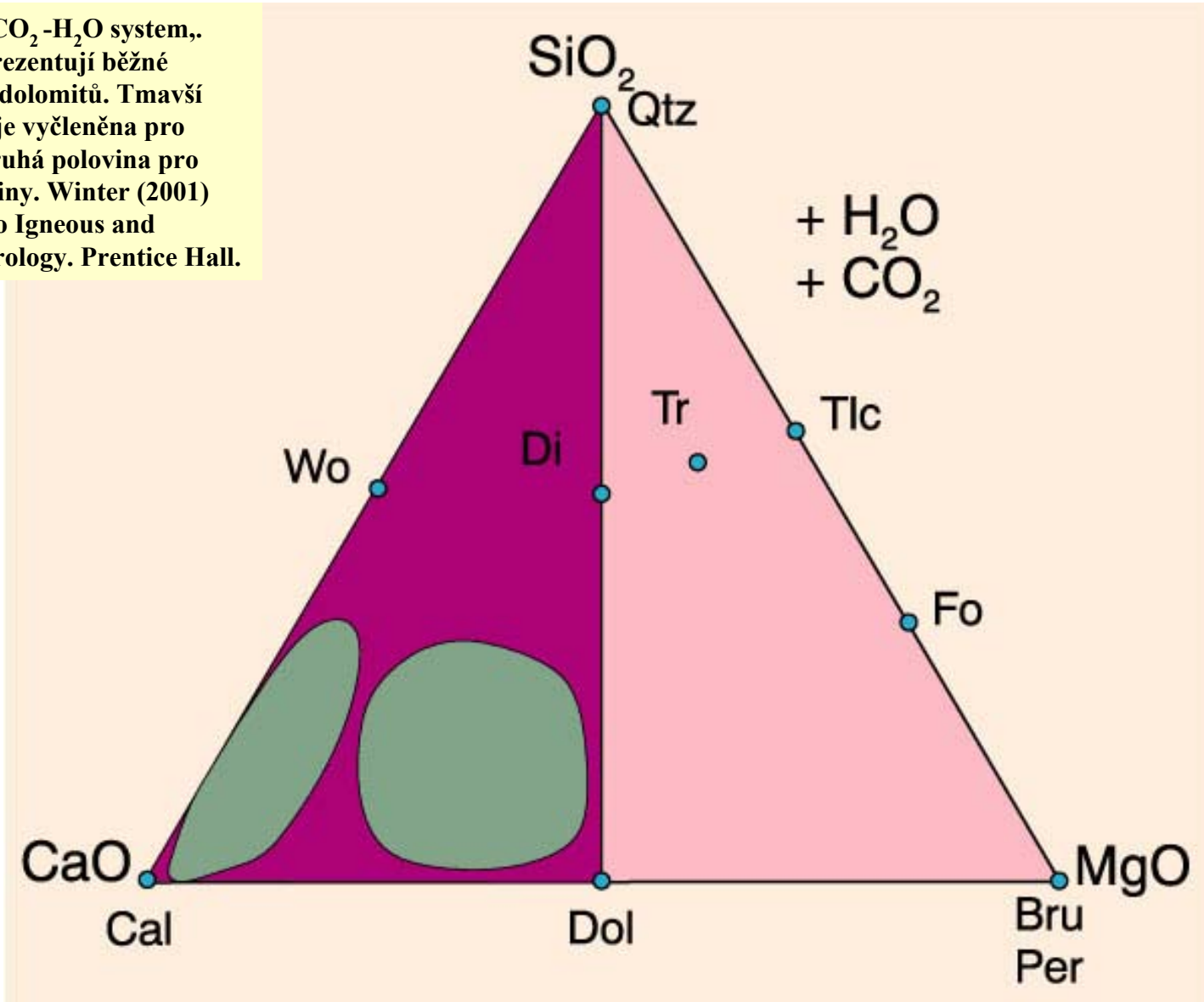
Typické minerály karbonátových hornin:

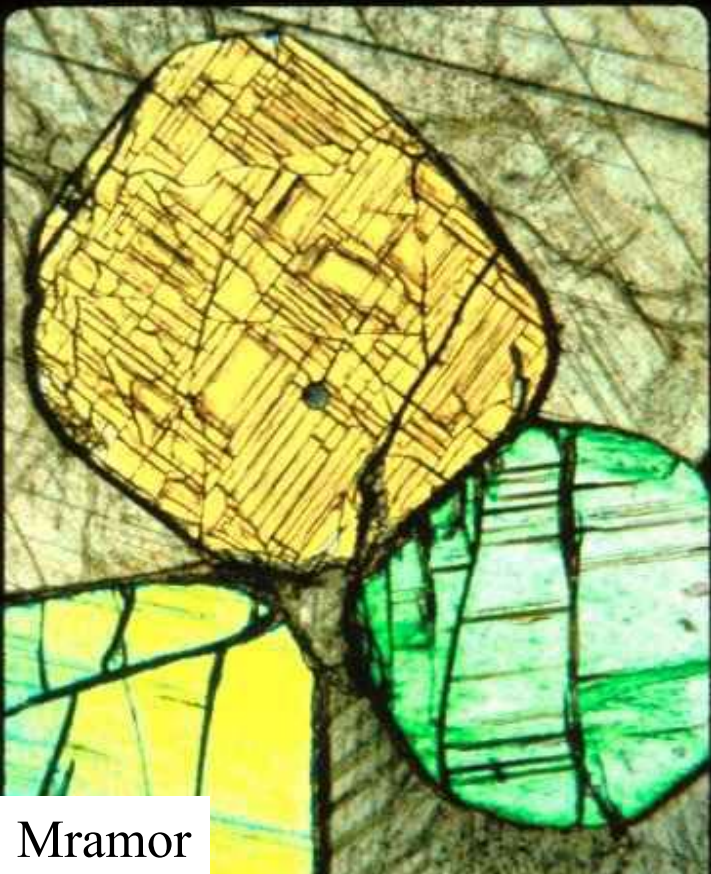
Křemen	SiO_2
Kalcit	CaCO_3
Dolomit	$\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$
Wollastonit	CaSiO_3
Forsterit	Mg_2SiO_4
Tremolit	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})$
Diopsid	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
Mastek	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Antigorit	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Humit	$(\text{Fe},\text{Mg})_7(\text{SiO}_4)_3(\text{F},\text{OH})_2$
Klinohumit	$\text{Mg}_9(\text{SiO}_4)_4(\text{OH},\text{F})_2$
Mejonit	$\text{Ca}_4\text{Al}_3\text{Si}_9\text{O}_{24}\text{CO}_3$ ("3An.Cc")
Marialit	$\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_9\text{O}_{24}\text{Cl}$ ("3Ab.NaCl")



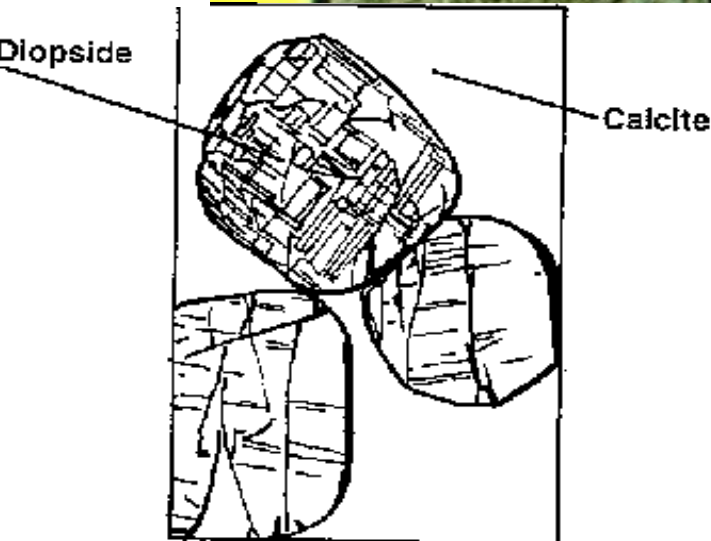
Dolomitické mramory

CaO-MgO-SiO₂-CO₂-H₂O system.,
zelené plocha reprezentují běžné
složení vápenců a dolomitů. Tmavší
část trojúhelníku je vyčleněna pro
metakarbonáty druhá polovina pro
ultrabazické horniny. Winter (2001)
An Introduction to Igneous and
Metamorphic Petrology. Prentice Hall.





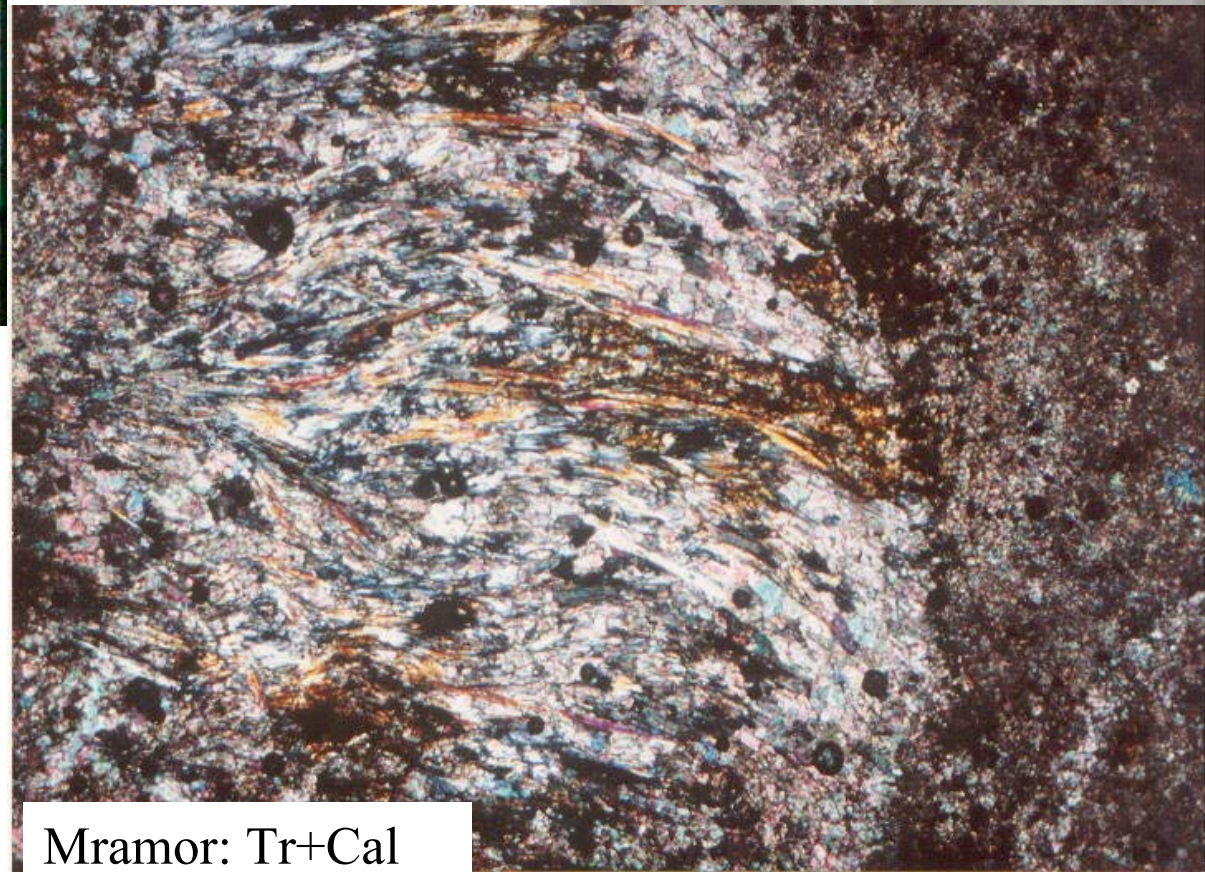
Mramor



Wo

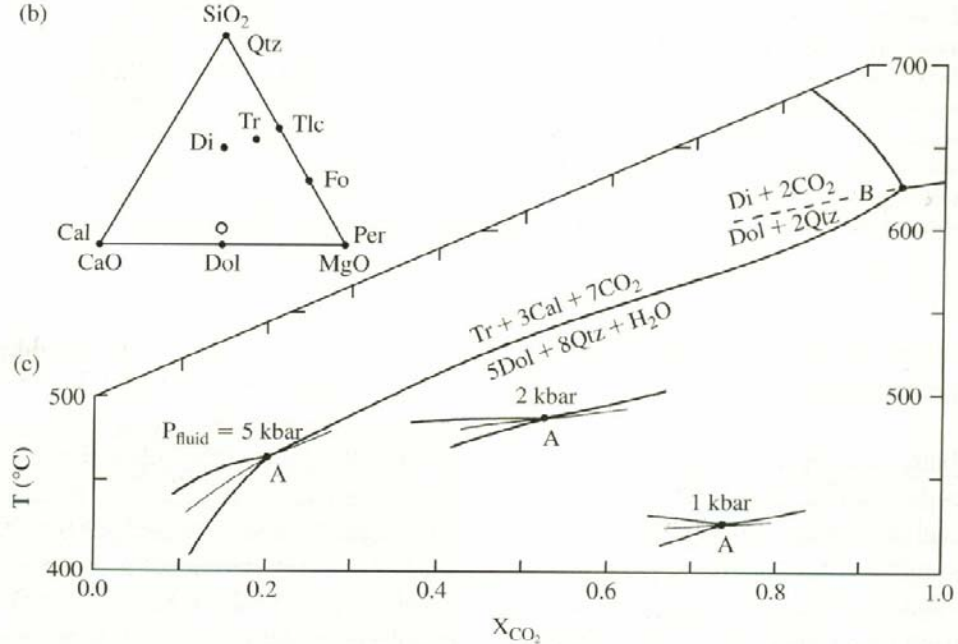
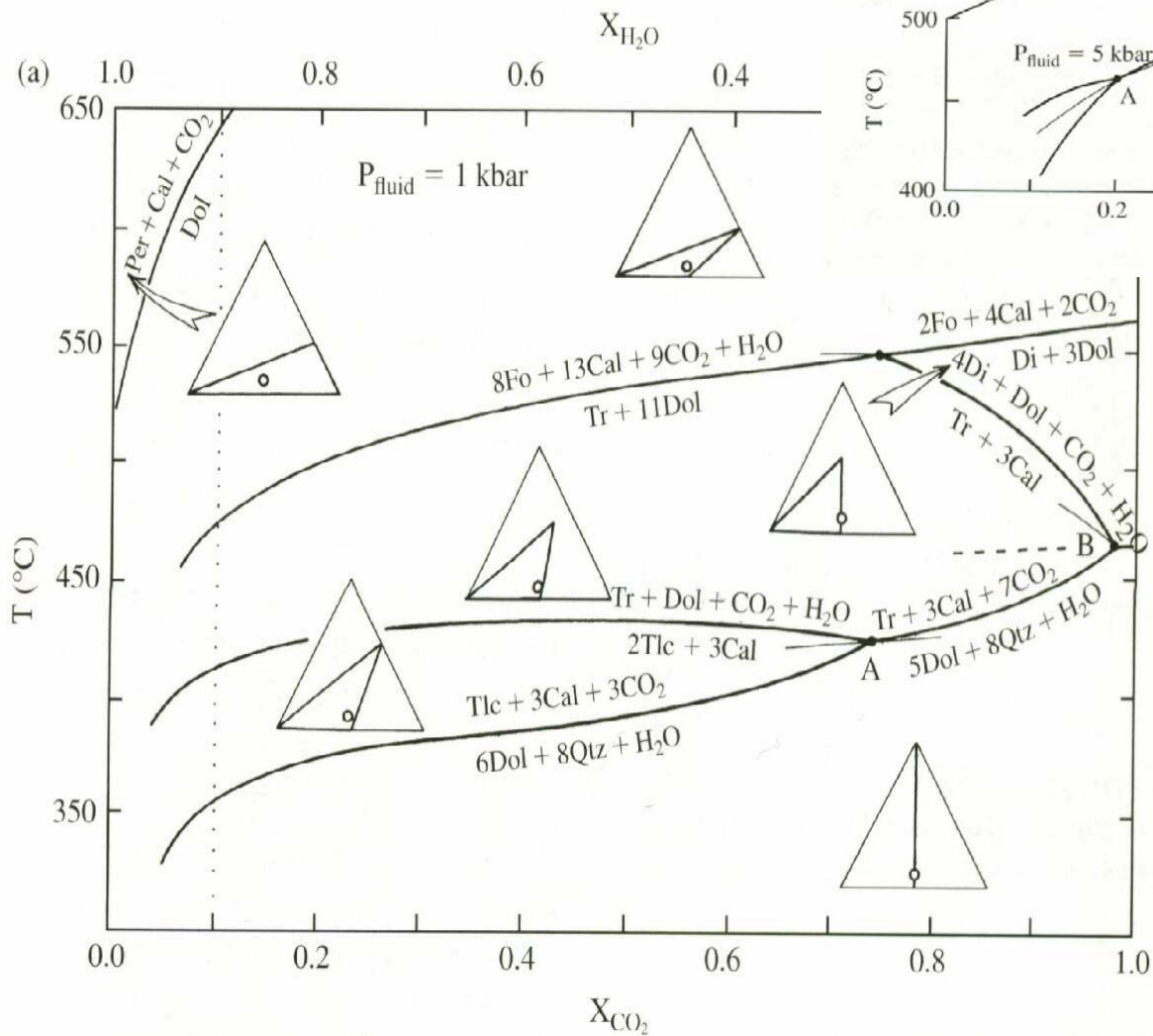
Cal

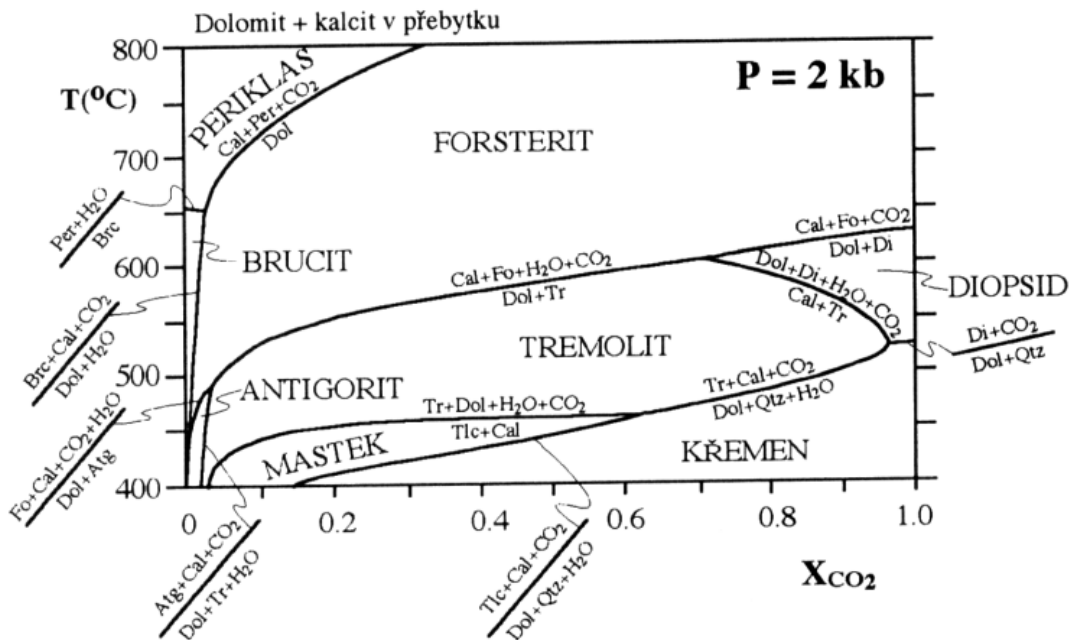
Xenolit mramoru v tonalitu



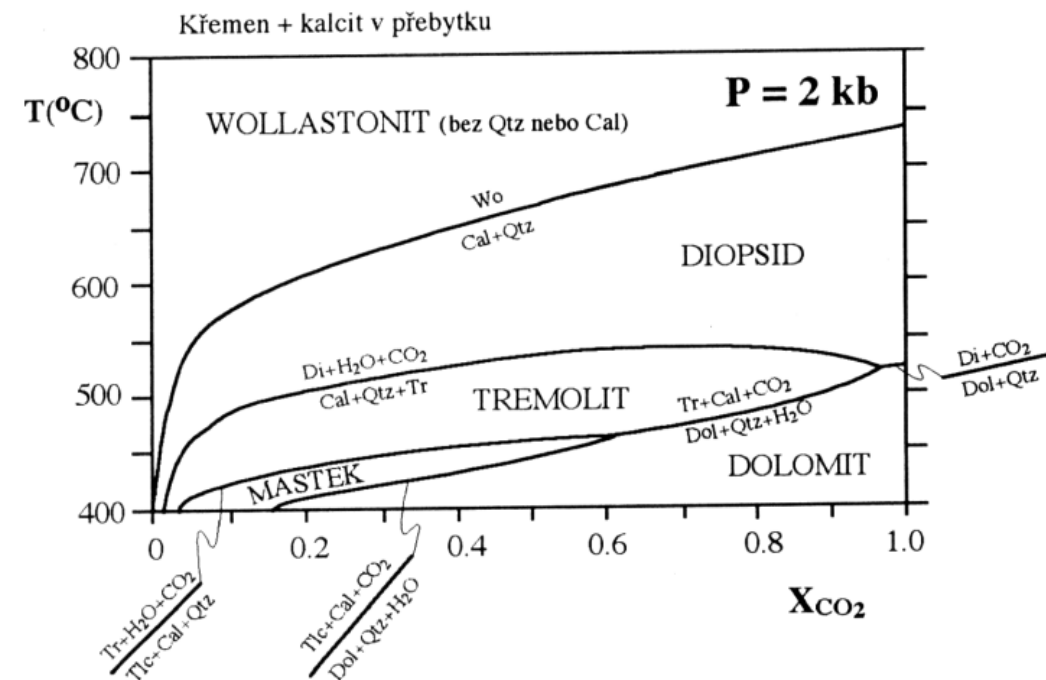
Mramor: Tr+Cal

Pozice reakcí v PT diagramu je výrazně závislá na složení fluidní fáze



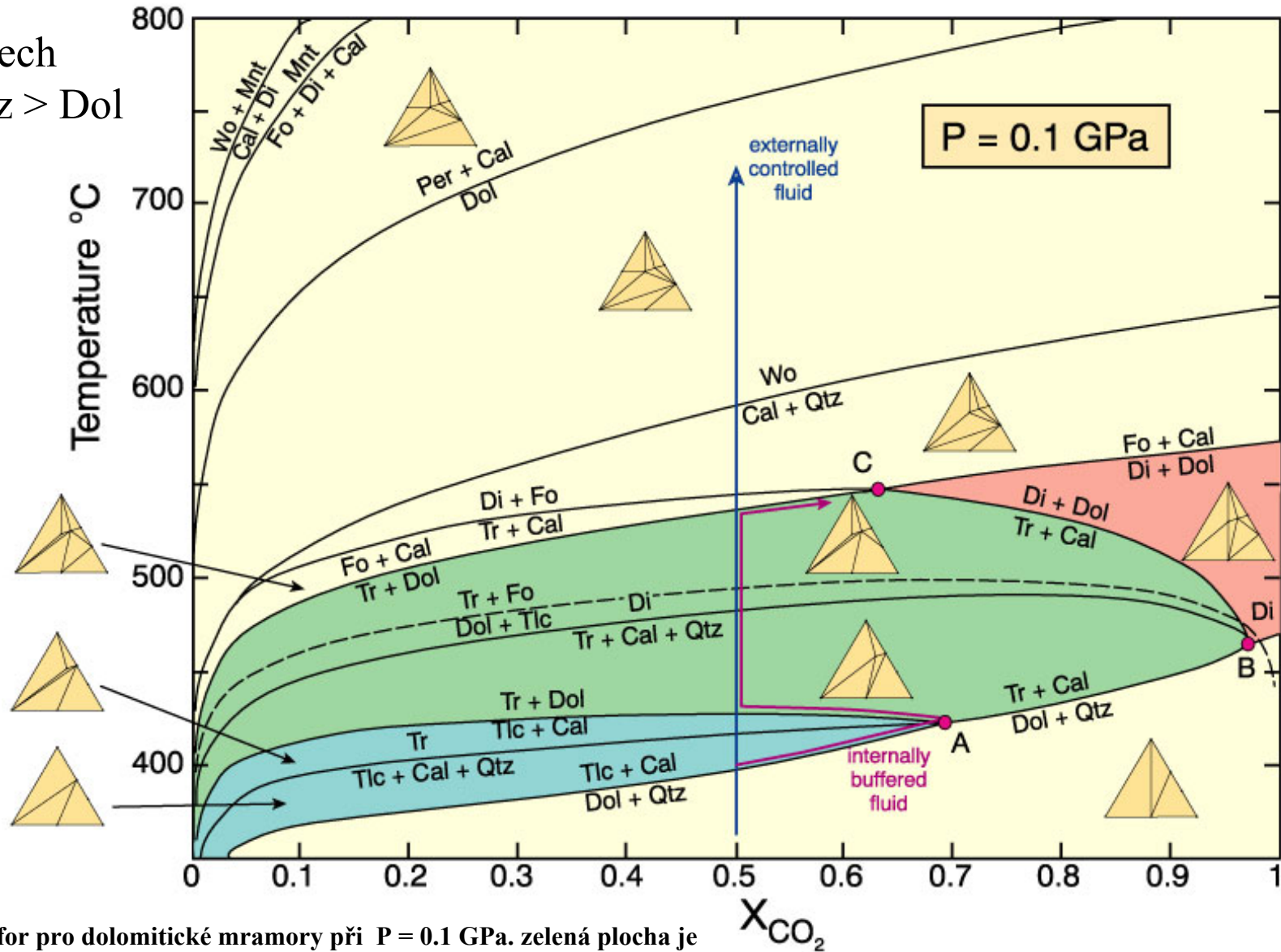


- Důležitou roli hraje také nasycenost systému SiO_2 .
- V dolomitických vápencích (dolomit a kalcit v přebytku)
 1. je pole stability tremolitu posunuto a rozšířeno do vyšších teplot
 2. podstatně je redukováno pole diopsidu na oblast vysokých X_{CO_2}
 3. až do $X_{CO_2} = 0.3$ pro $800^\circ C$ je stabilní forsterit. (asociace Cal+Fo+CO₂) namísto wollastonitu

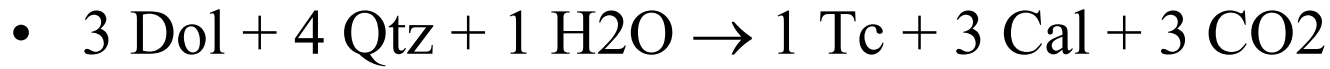


Metamorfóza mramoru v podmínkách otevřeného systému

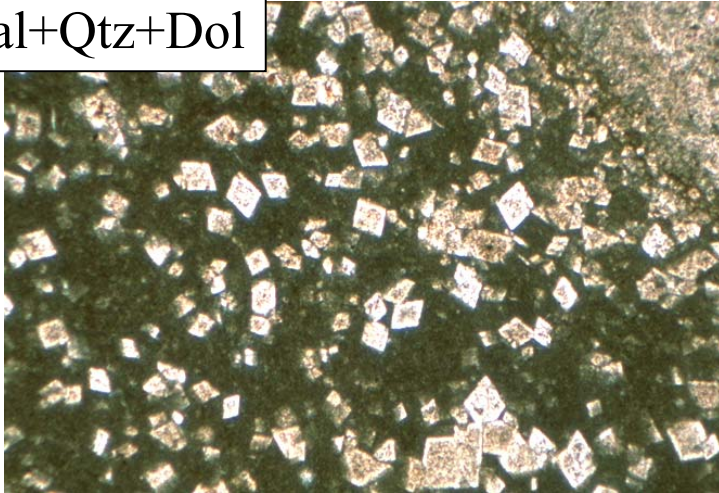
A) v mramorech
kde $\text{Cal} > \text{Qtz} > \text{Dol}$
 $P = 1 \text{ kbar}$



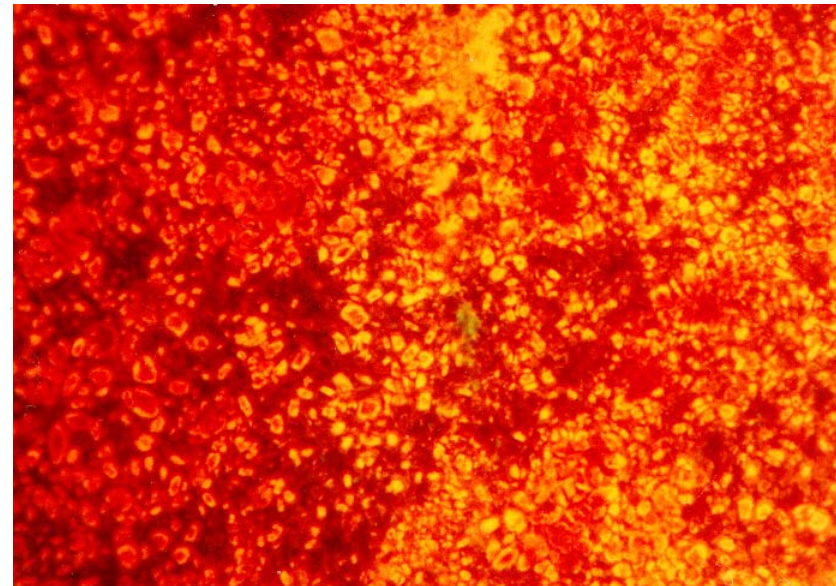
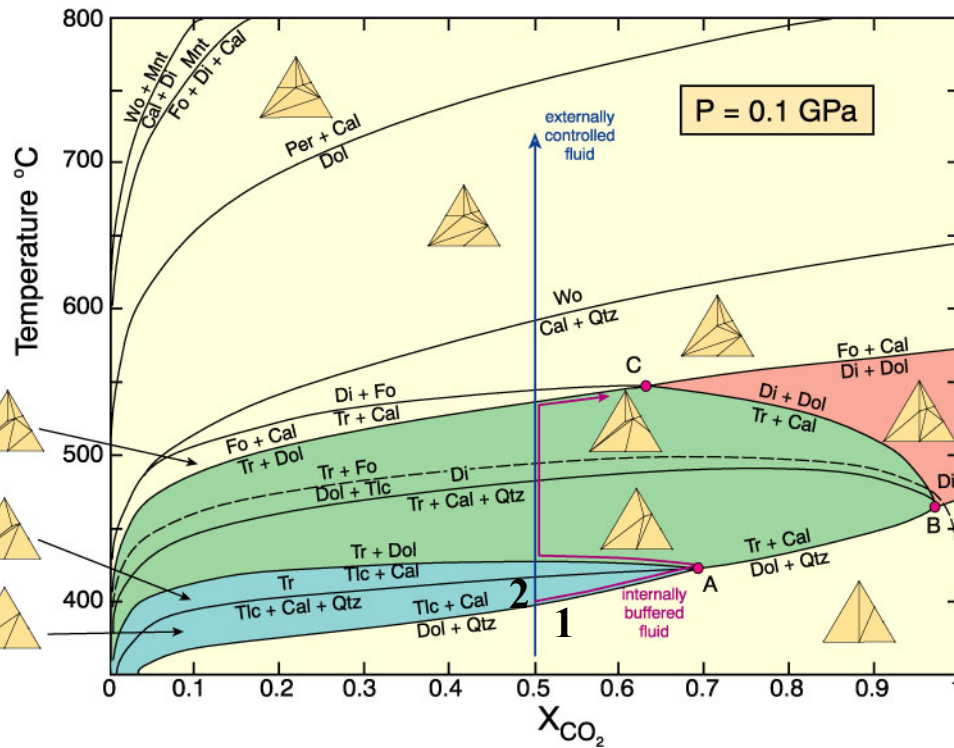
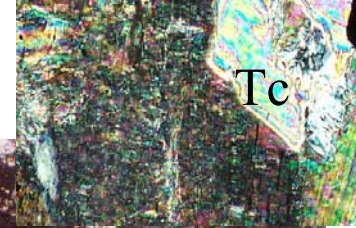
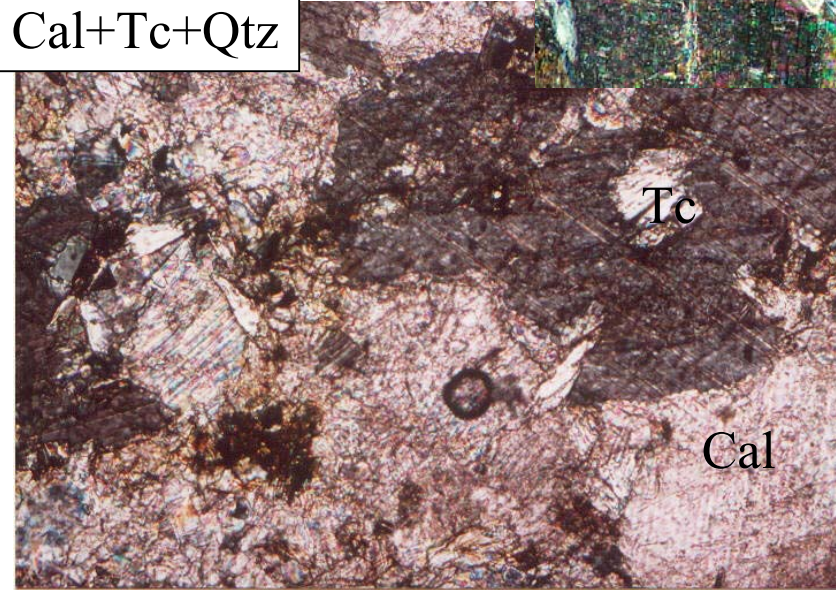
T - X_{CO_2} diagram for pro dolomické mramory při $P = 0.1 \text{ GPa}$. zelená plocha je pole stability Tr, červené pole = Dol + Di, modré pole = Dol + Tc. Winter (2001)
An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.



1) Cal+Qtz+Dol

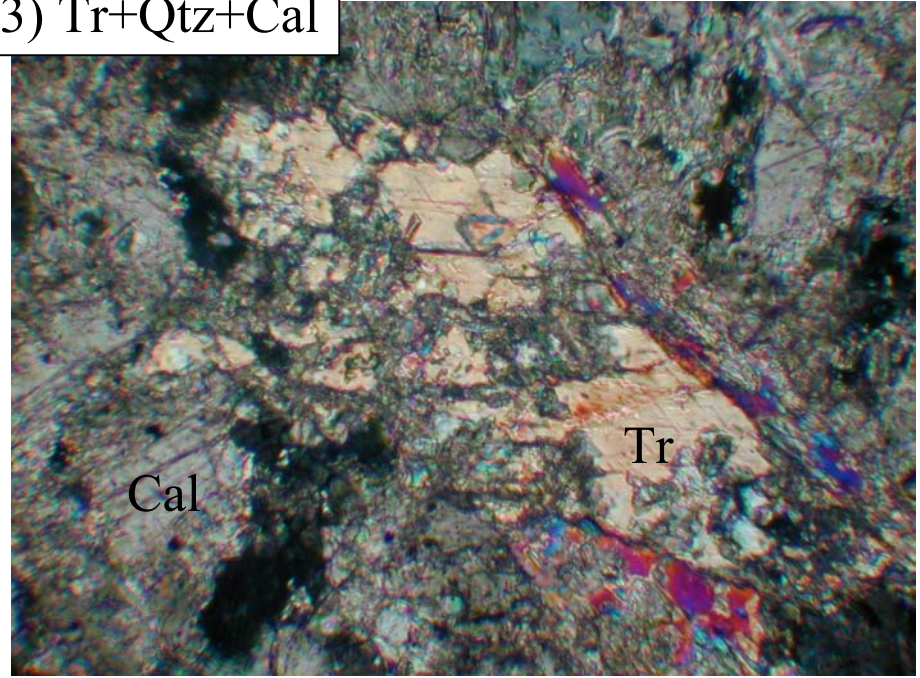


2) Cal+Tc+Qtz

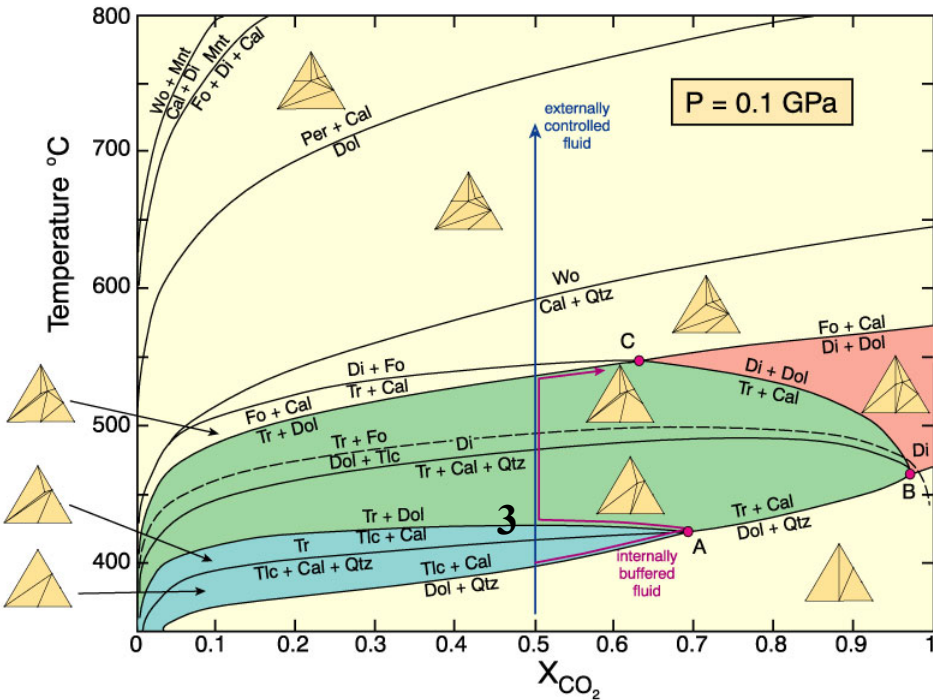
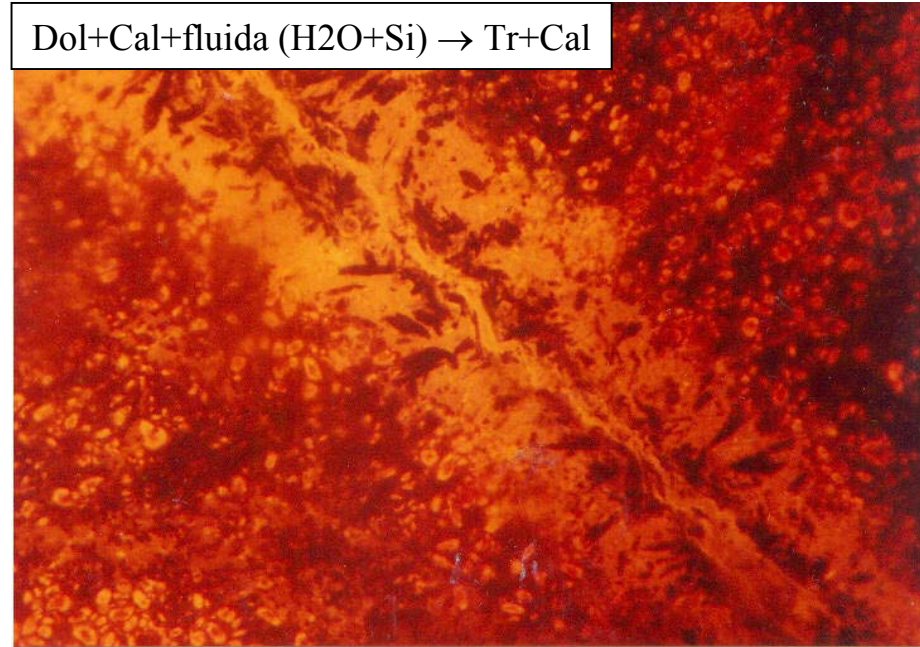


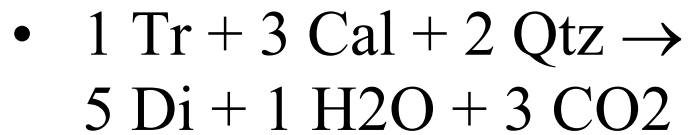
- $5 \text{ Tc} + 6 \text{ Cal} + 4 \text{ Qtz} \rightarrow 3 \text{ Tr} + 2 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ CO}_2$
- d) $\text{Tc} + \text{Cal} \rightarrow \text{Tr} + \text{Dol}$
jen v dolomitických mramorech kde $\text{Tc} > \text{Qtz}$

3) Tr+Qtz+Cal

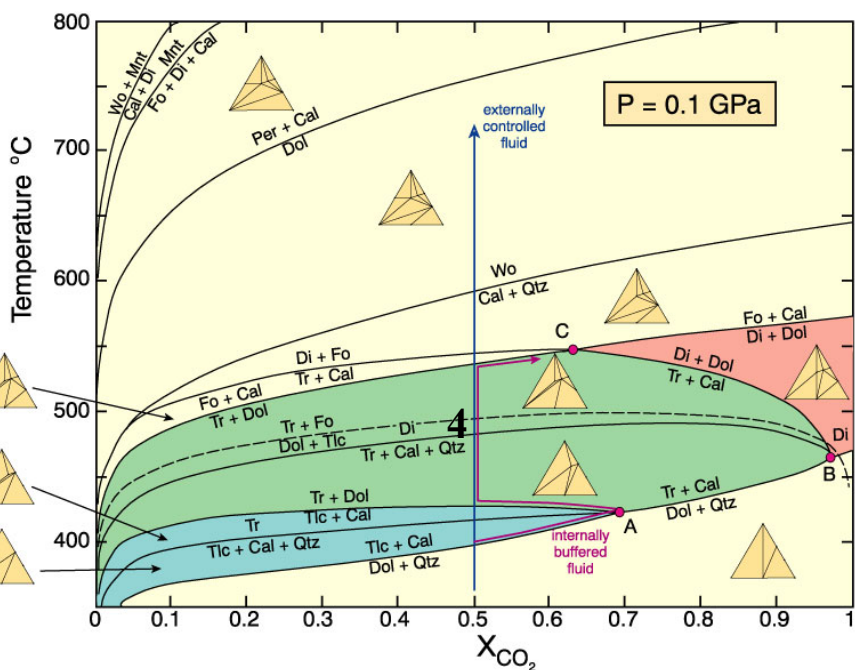
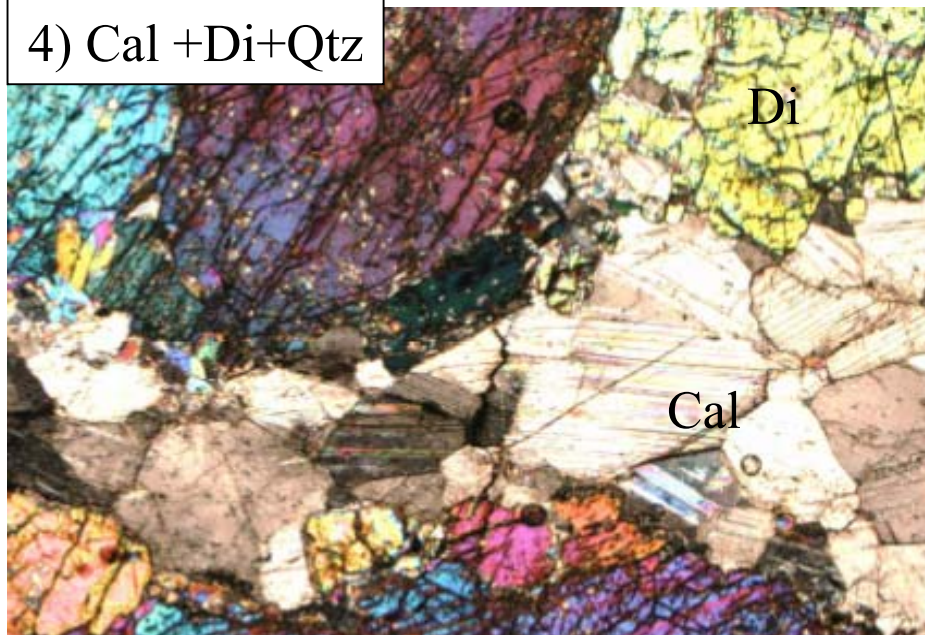


Dol+Cal+fluida (H₂O+Si) → Tr+Cal

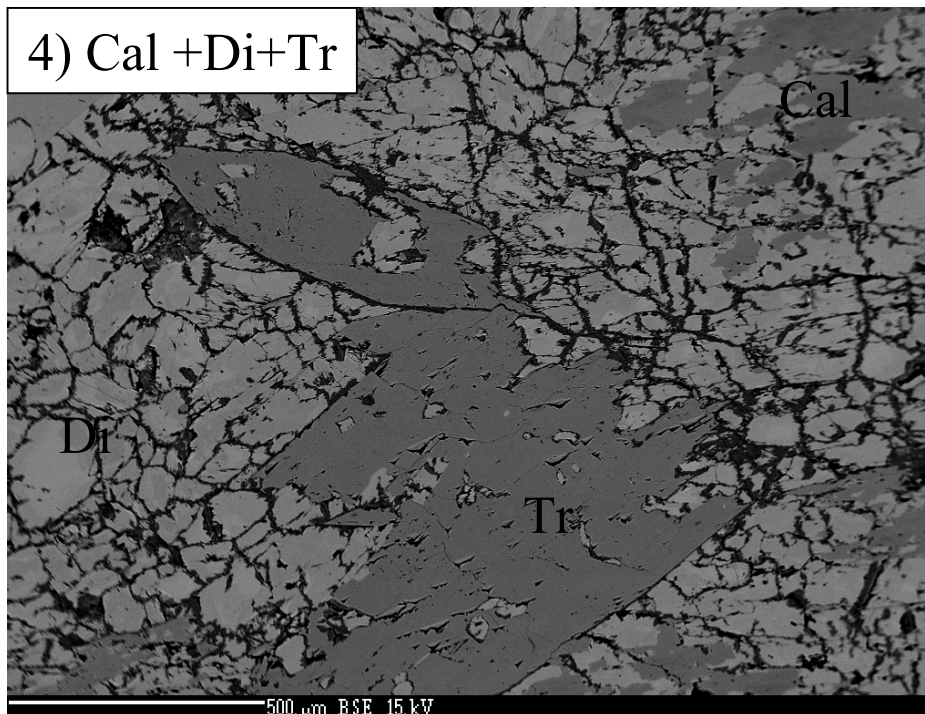




4) Cal + Di + Qtz

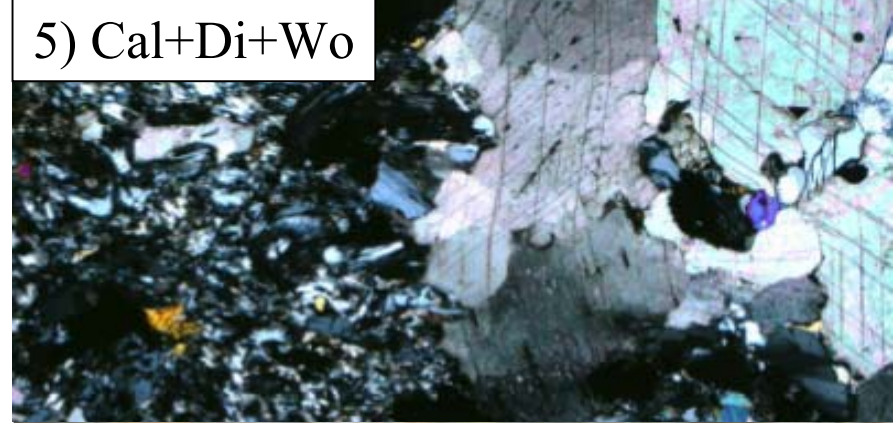


4) Cal + Di + Tr



5) Cal+Di+Wo

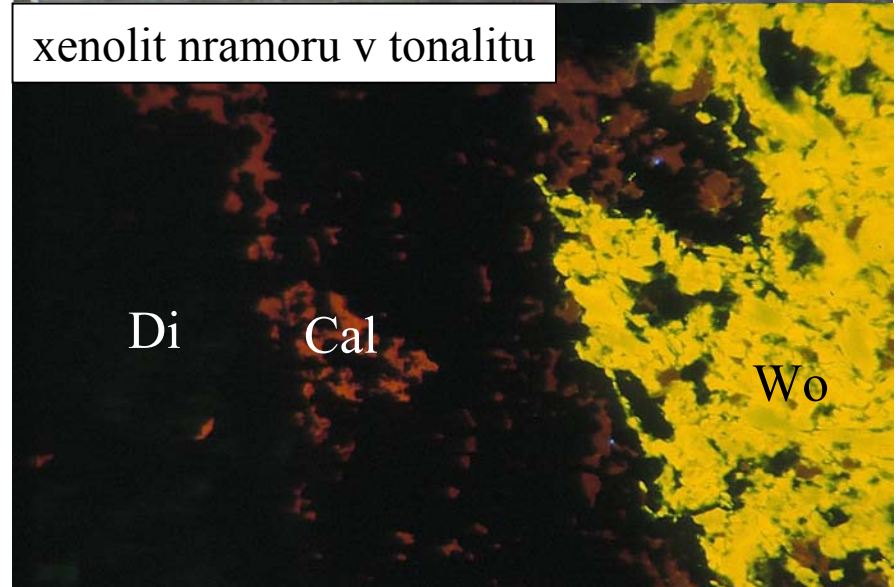
- $\text{Cal} + \text{Qtz} \rightarrow \text{Wo} + \text{CO}_2$
- typická reakce pro kontaktně metamorfované horniny
- jen v mramorech kde $\text{Qtz} > \text{Tr}$
(pak reakce $\text{Tr} + \text{Cal} + \text{Qtz} \rightarrow \text{Di} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ produkuje minerální asociaci: $\text{Di} + \text{Cal} + \text{Qtz}$)



Wo Cal

Di+Qtz

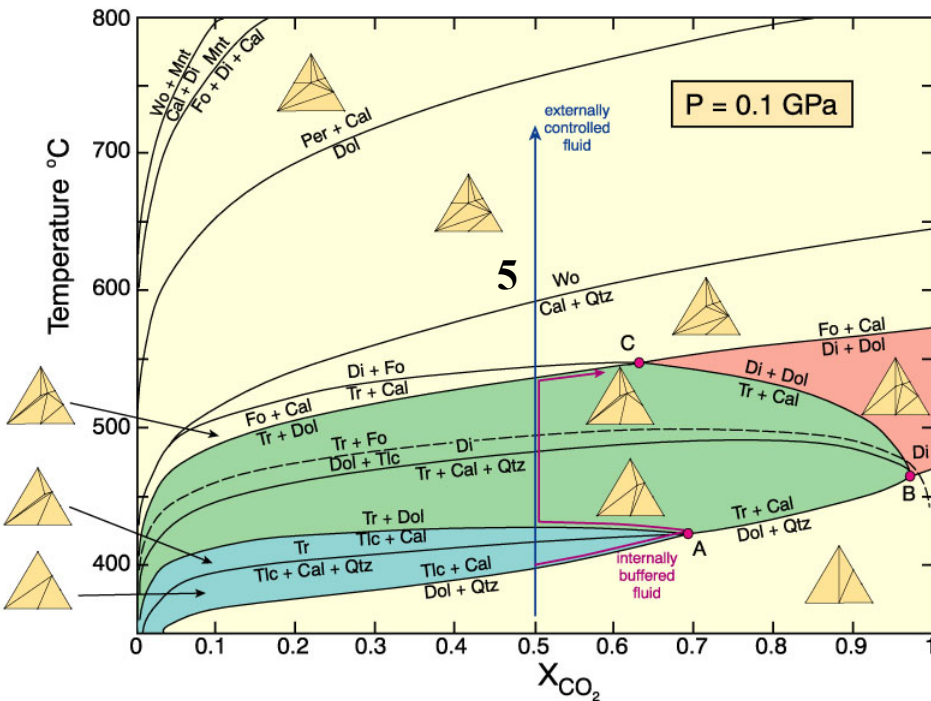
xenolit nramoru v tonalitu



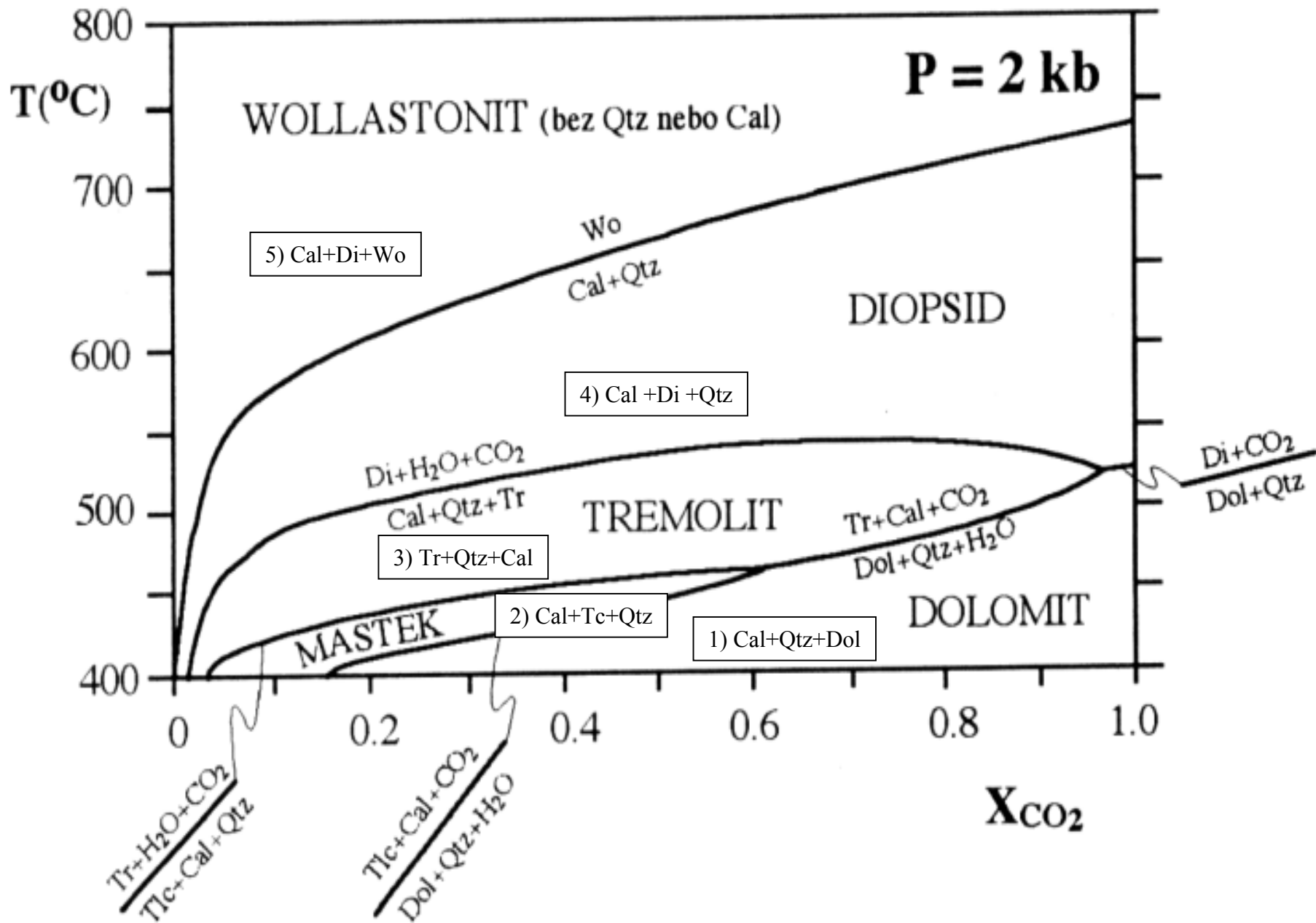
Di

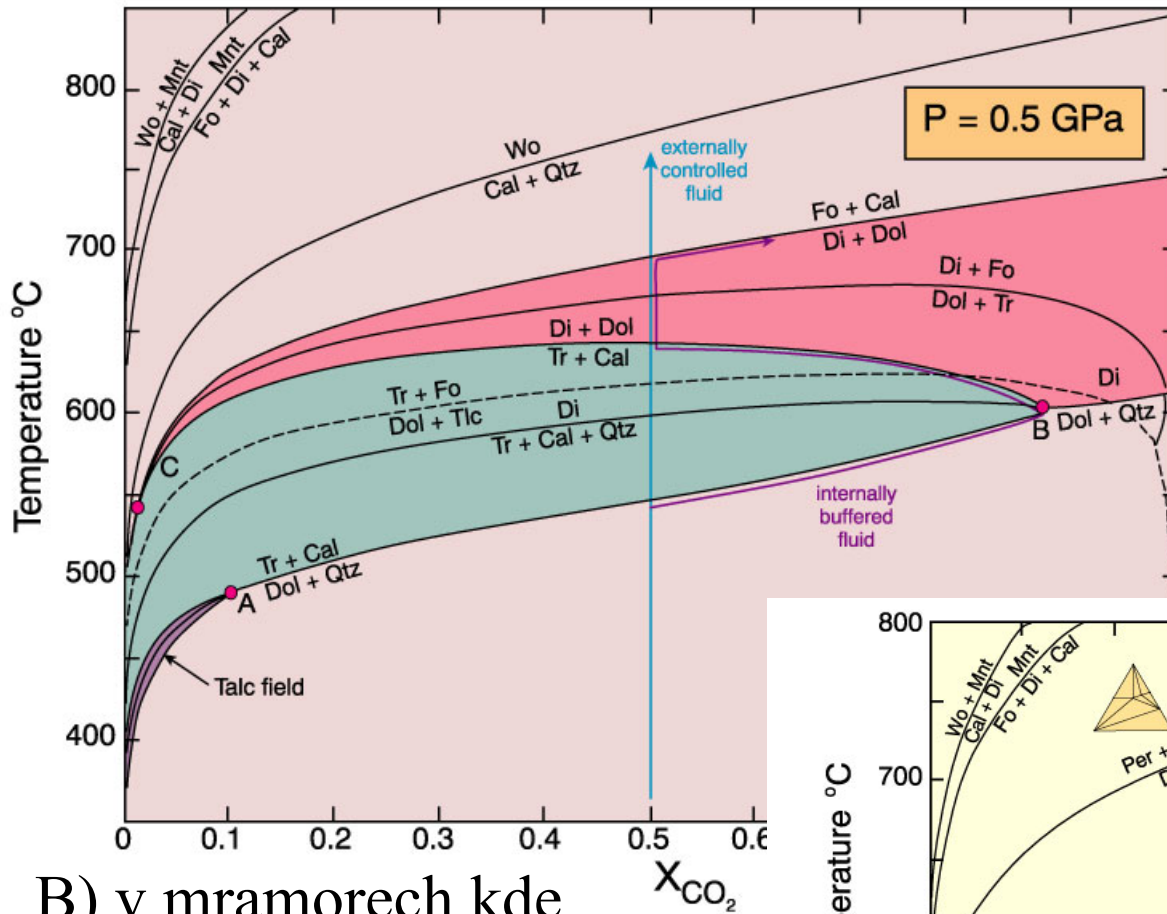
Cal

Wo



Křemen + kalcit v přebytku





B) v mramorech kde
 $Cal > Dol > Qtz$ ($Tr > Dol$)

$P = 5$ kbar

1) $Cal + Dol + Qtz$

2) $Cal + Tr + Dol$

3) $Cal + Di + Dol$

4) $Cal + Fo + Di$

B) v mramorech kde
 $Cal > Dol > Qtz$ ($Tr > Dol$)

$P = 1$ kbar

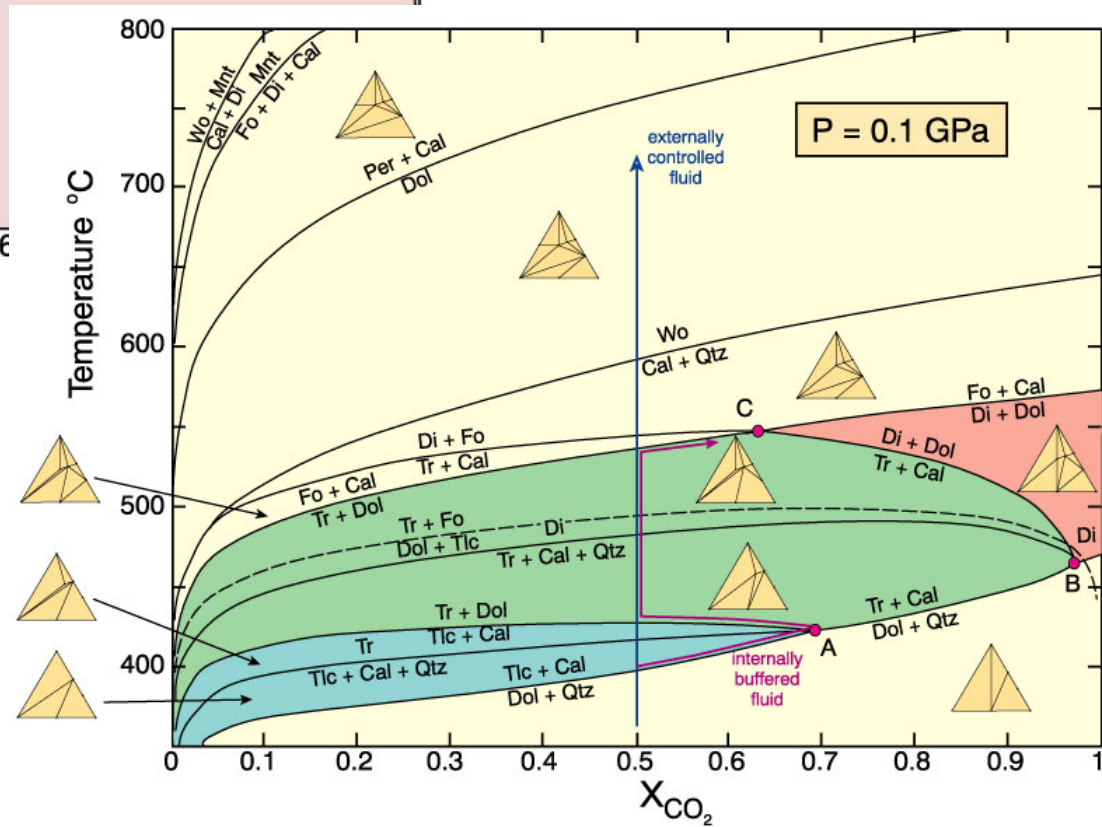
1) $Cal + Dol + Qtz$

2) $Cal + Tc + Dol$

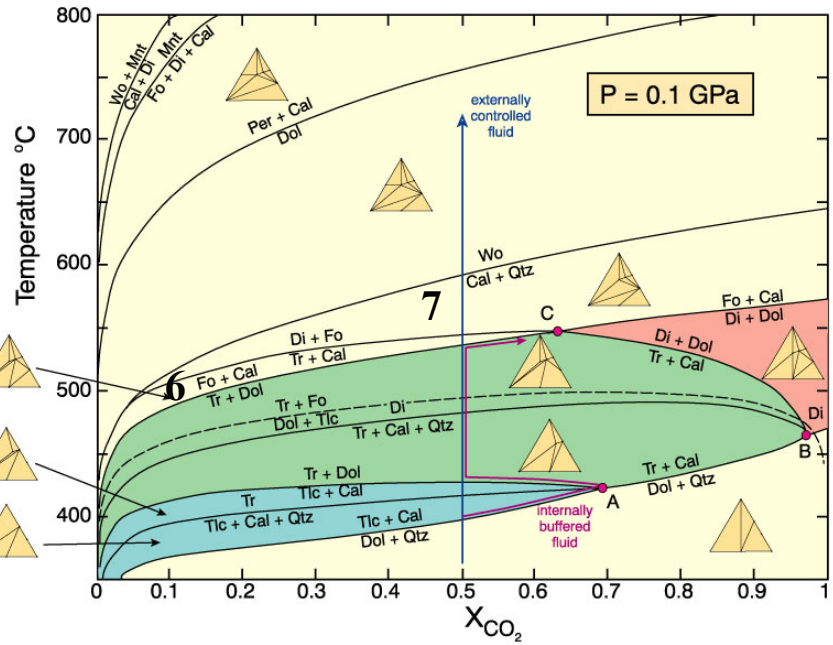
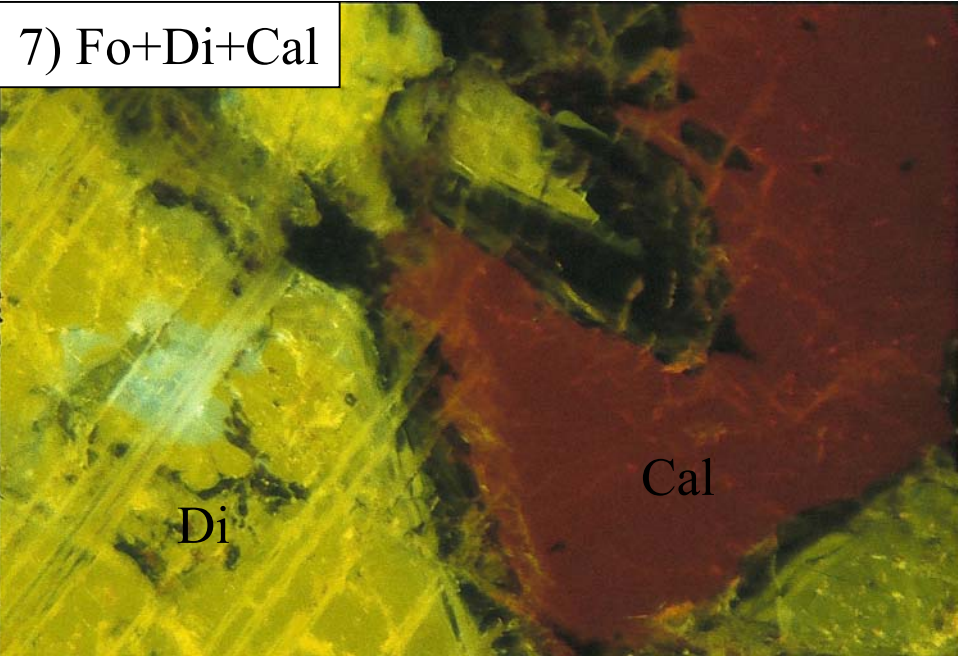
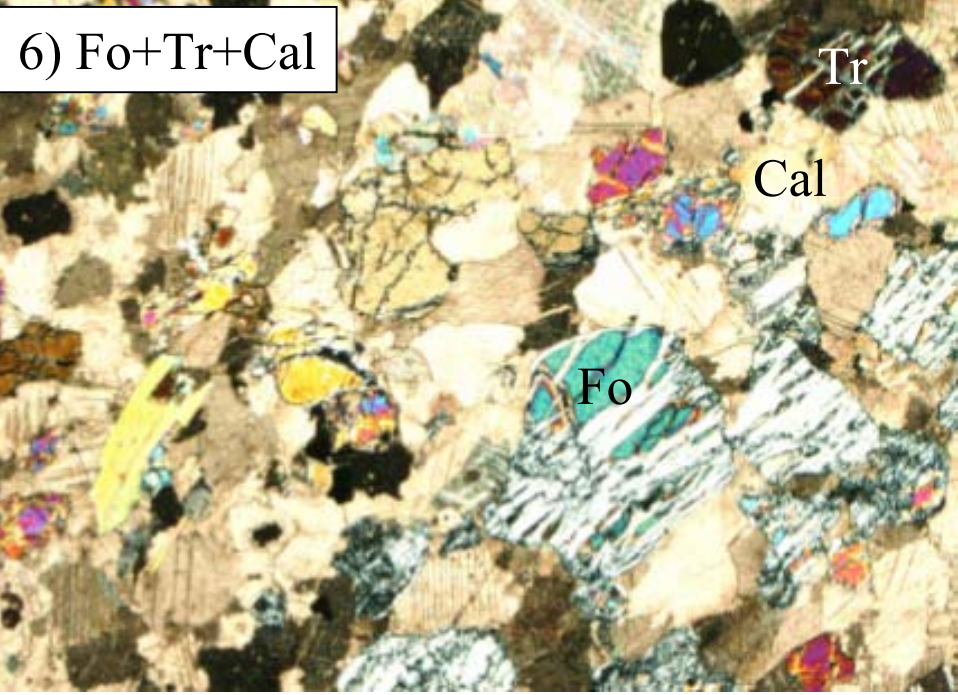
3) $Cal + Tr + Dol$

4) $Cal + Fo + Tr$

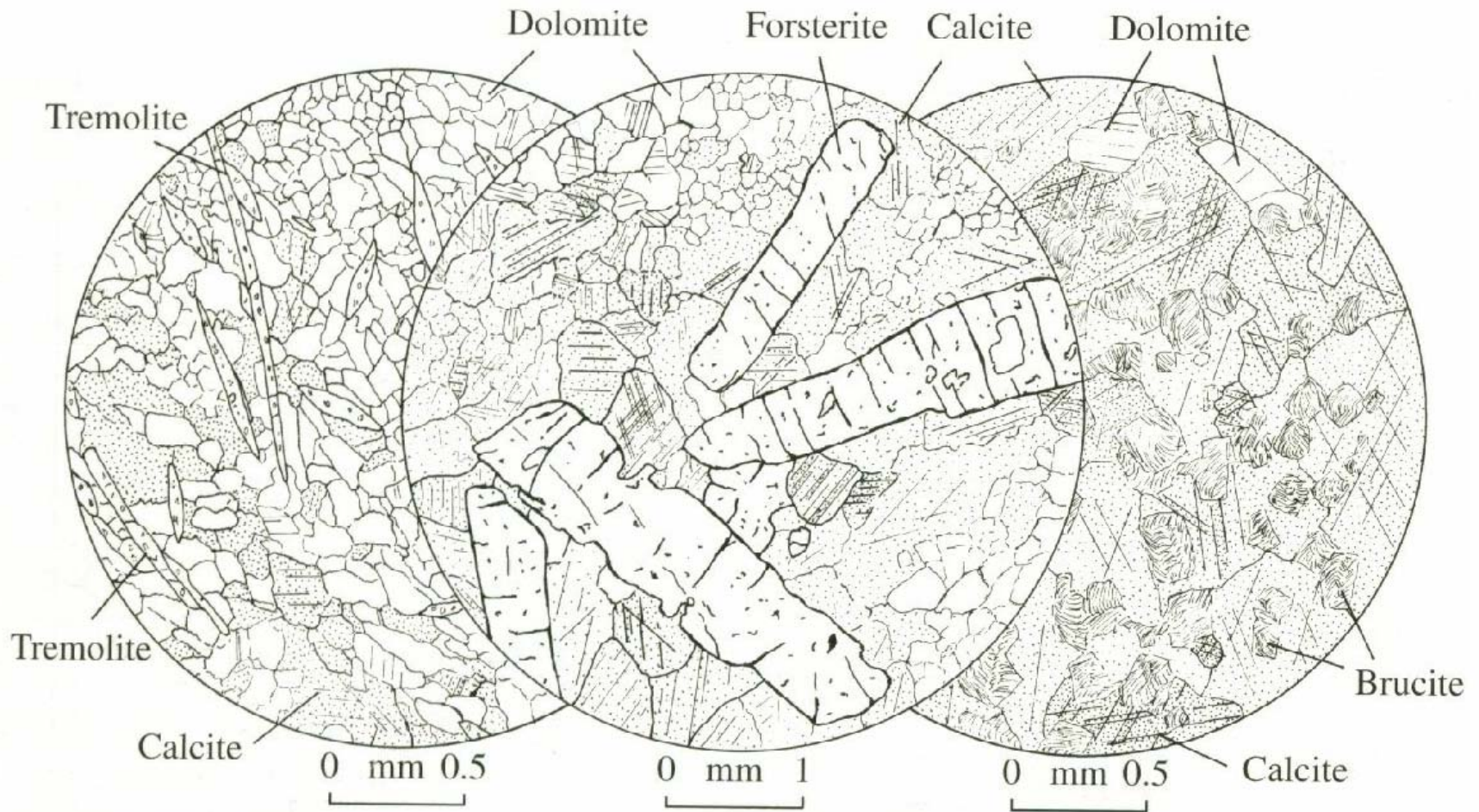
5) $Cal + Fo + Di$



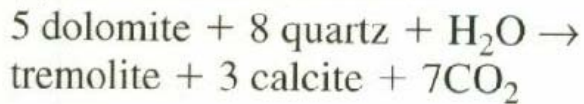
- $1\text{Tr} + 11\text{Dol} \rightarrow 8\text{Fo} + 13\text{Cal} + 1\text{H}_2\text{O} + 9\text{CO}_2$
- V regionálně met. komplexech se tato minerální asociace vyskytuje až při hranic amfibolitové facie s granulitovou (600-700 °C, 5-6 kbar)
- v Cal bohatých mramorech kde $\text{Tr} > \text{Dol}$ ($3\text{Tr} + 5\text{Cal} \rightarrow 11\text{Di} + 2\text{Fo} + 3\text{H}_2\text{O} + 5\text{CO}_2$)



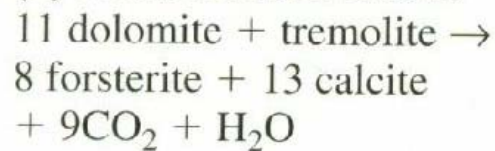
C) v mramorech kde $\text{Cal} > \text{Dol} > \text{Qtz}$ ($\text{Dol} > \text{Tr}$) nebo $\text{Dol} > \text{Cal} > \text{Qtz}$, $P = 1 \text{ kbar}$



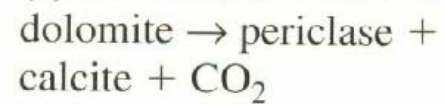
(a) TREMOLITE ZONE



(b) FORSTERITE ZONE

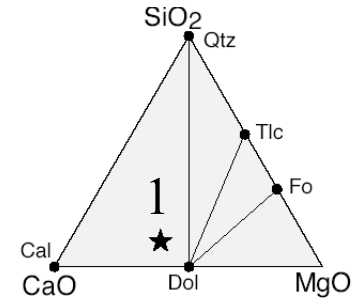
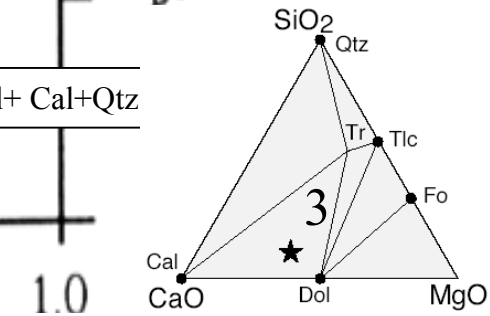
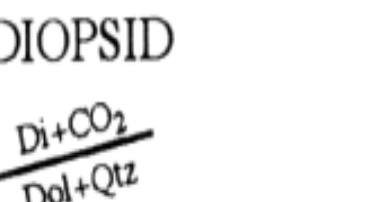
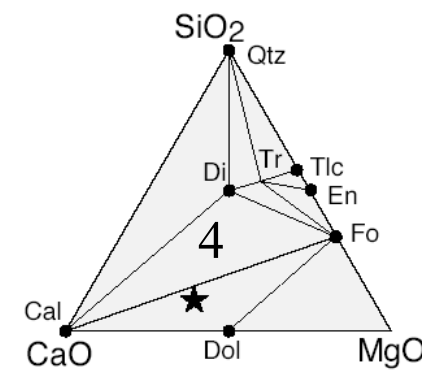
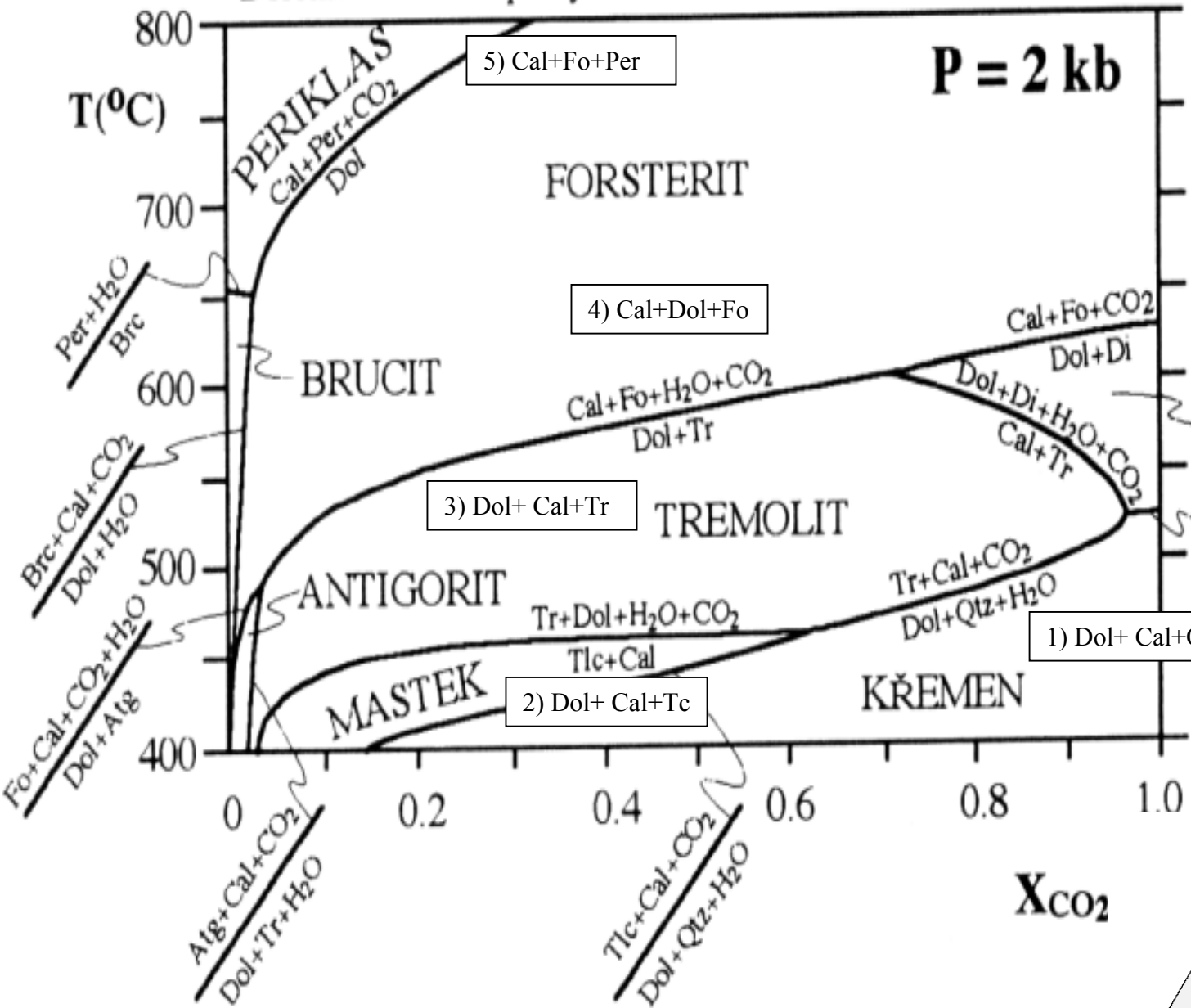


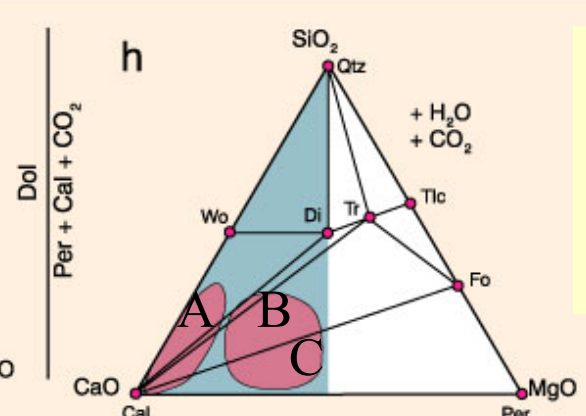
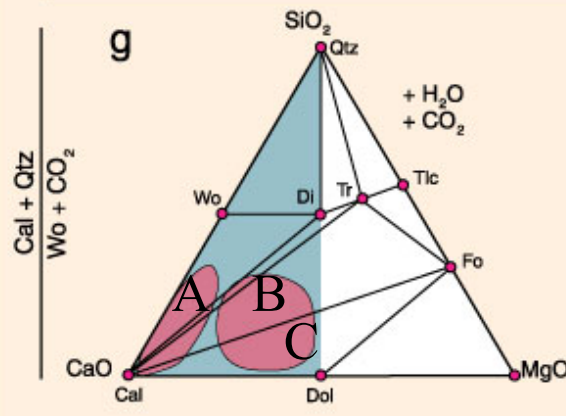
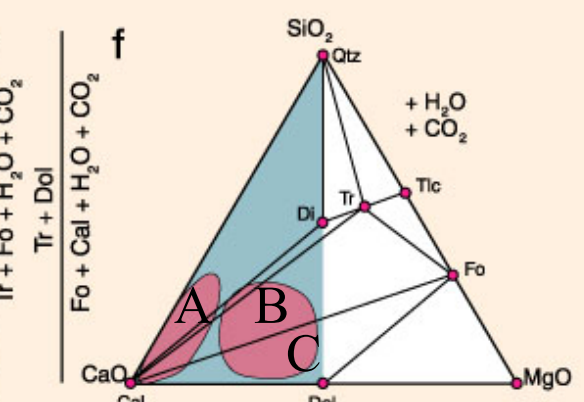
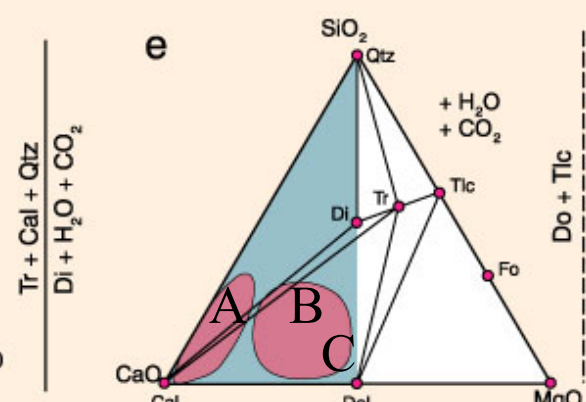
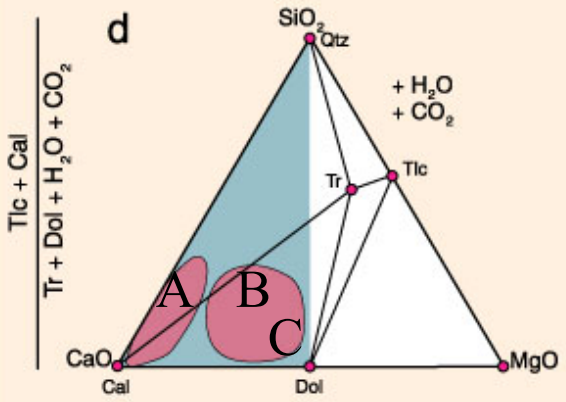
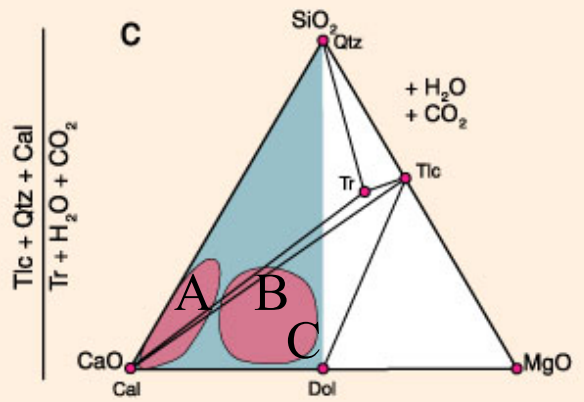
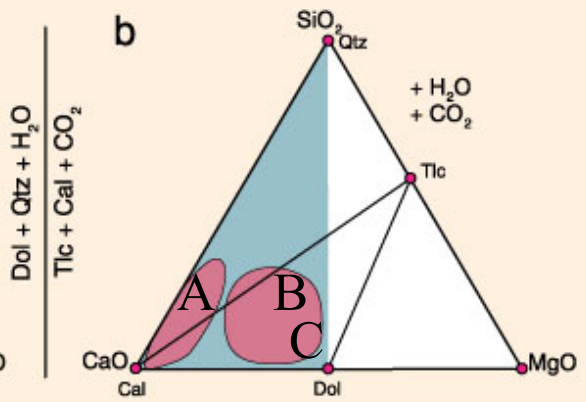
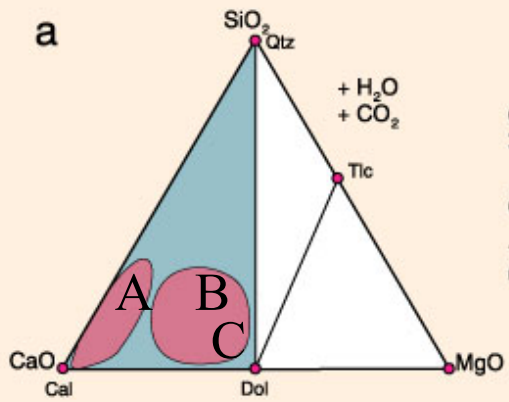
(c) PERICLASE ZONE



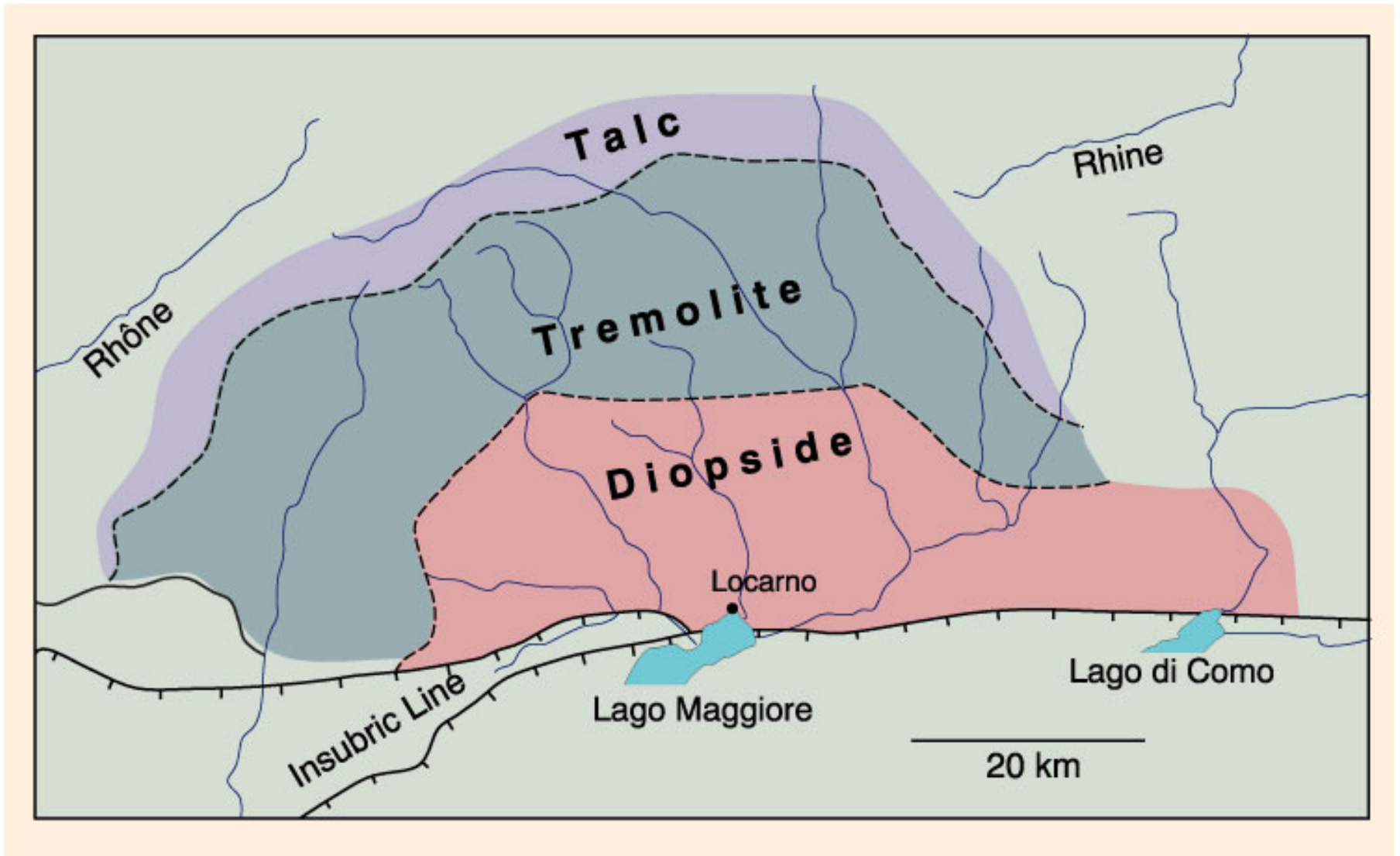
(Retrograde:
 $\text{periclase} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{brucite}$)

Dolomit + kalcit v přebytku





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.