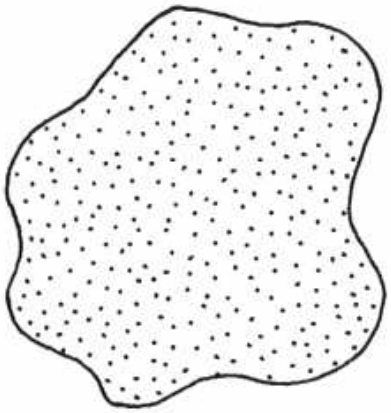
Magmatické systémy

Na rozdíl od povrchových procesů a vzniku sedimentárních hornin nemůžeme většinou magmatické procesy pozorovat přímo. Pouze ve výjimečných případech extrudujících nexplozivních procesů se na vznik magmatických hornin můžeme podívat blíže.

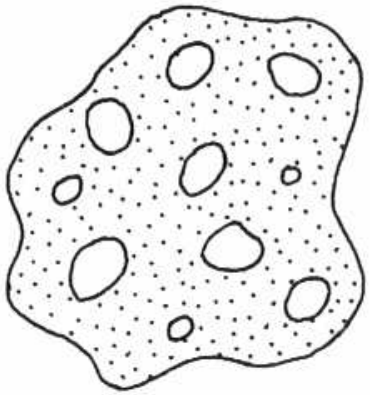
Magma

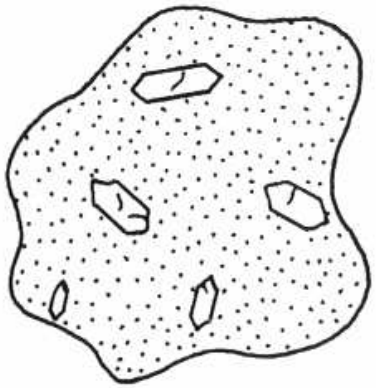
- Termín zavedl 1825 Scope: „… složená kapalina skládající se z pevných částic suspendovaných v kapalině jako je bahno …“
- Teploty: při povrchu 1 200 až 700 °C (vysoké hodnoty pro mafická magmata s nízkým obsahem SiO_2; karbonatické lávy až 600 °C).
- Hustota: kolísá mezi 2,2 až 3,0 g/cm^3 a jsou obecně o něco nižší než pro pevné horniny stejného složení

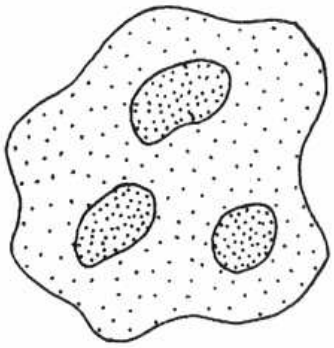
Magma se obvykle skládá z mobilní směsi suspendovaných pevných částic, taveniny a plynné fáze.

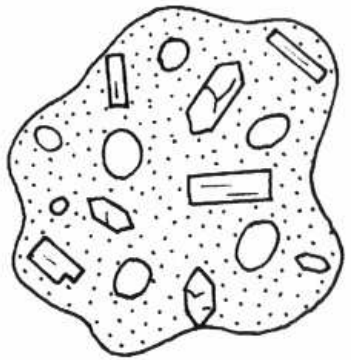


- Počet fází závisí na třech intenzivních proměnných – P, T a X.
- Dostatečně vysoká T – homogenní tavenina.
- Obvykle převaha Si a O.
- Výjimečně dvě taveniny: karbonátová a silikátová (nemísitelné).





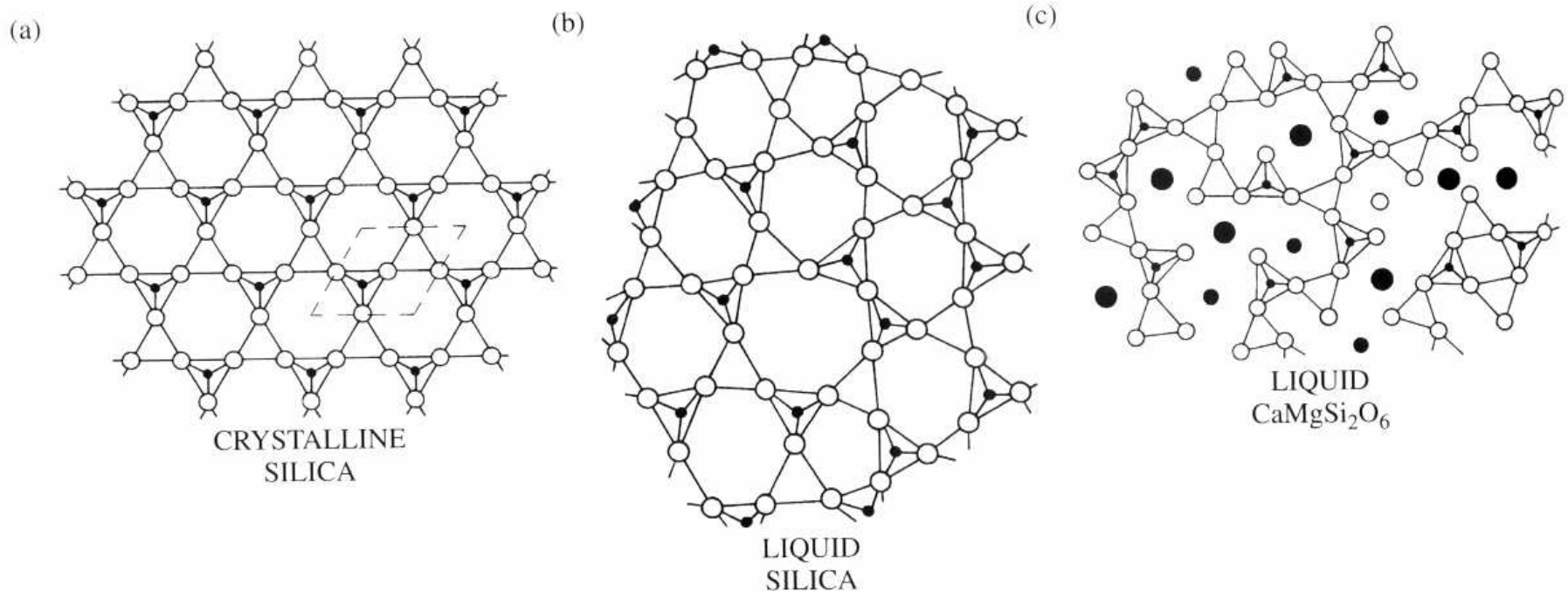




Atomová struktura

- určuje vlastnosti
- tavenina zachovává uspořádání částic v rozsahu několika molekulových jednotek, zůstává koordinace kationů
- malá změna entropie SiO_2(s) – SiO_2(l): trojrozměrný polymer Si–O
- 4 typy iontů: (1) síť vytvářejících – Si^{4+}, (2) můstkové kyslíky, (3) síť modifikující (Ca, Mg…) (4) nemůstkové kyslíky
- poměr nemůstkové kyslíky:síťové kationy = stupeň polymerizace
- viskozita (stupeň polymerizace; Fe^{2+} - modifikující, Fe^{3+} - síťový)
- stoupající tlak – nižší stupen polymerizace

Atomová struktura

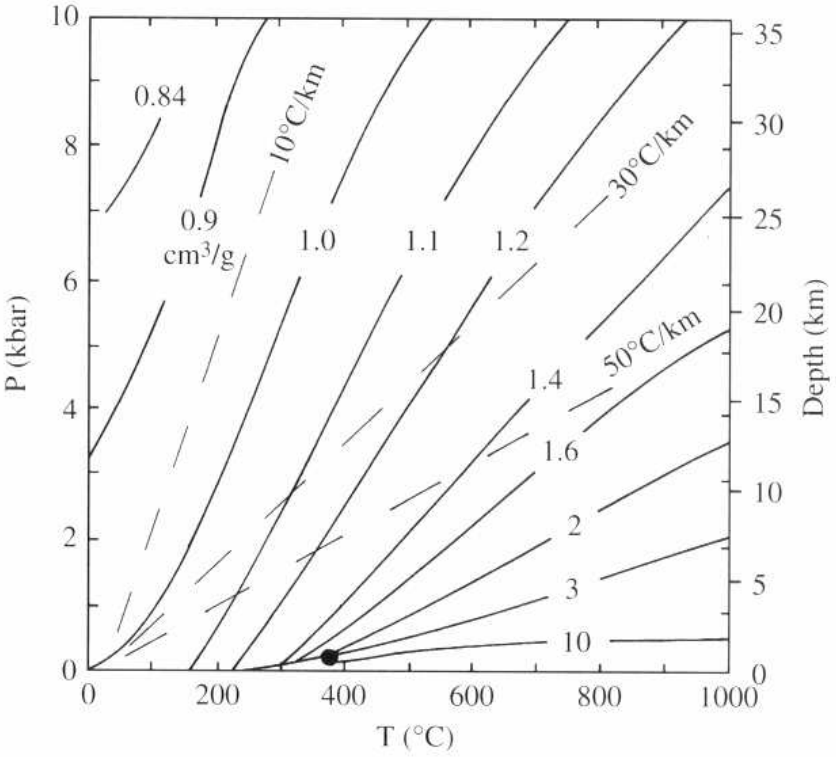


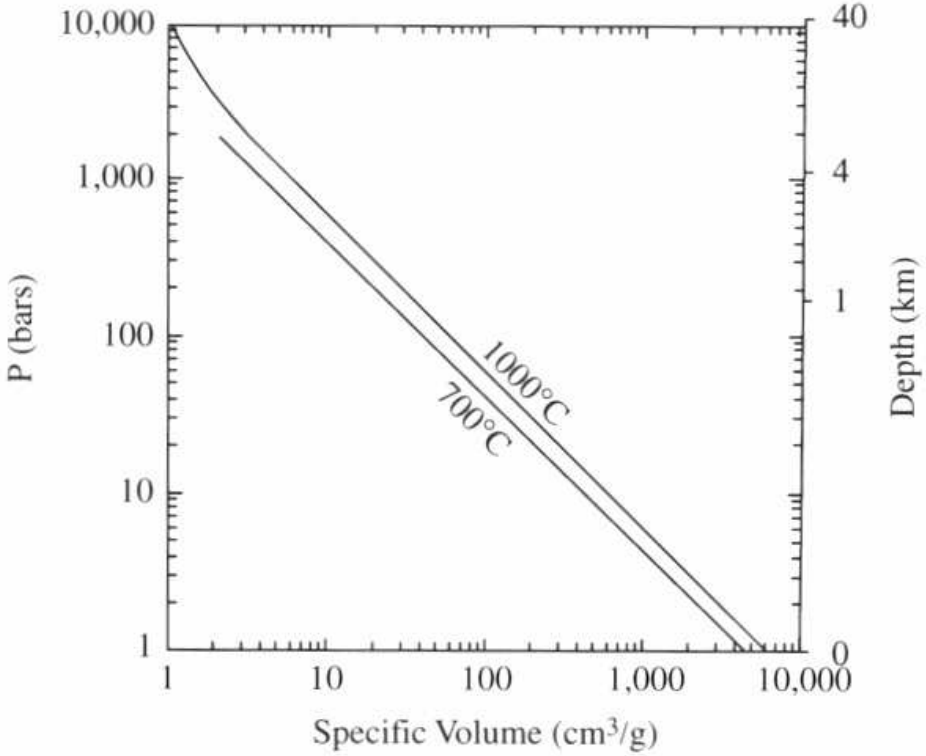
Role těkavých složek

- H_2O, CO_2, H_2, HCl, N_2, HF, F_2, Cl_2, SO_2, H_2S, CO, O_2, NH_3, S_2, He, Ar
- Kritický bod (voda: 21,8 MPa, 371 °C; CO2: 7,3 MPa, 31 °C) – fluidní stav
- Těkavá fluida (v hloubkách pod 1 km mizí rozdíl mezi kapalným a plynným stavem): hustota < 2 g/cm^3, specifický objem > 0,5 cm^3/g
- Tlak fluid

Role těkavých složek

Specifický objem vody



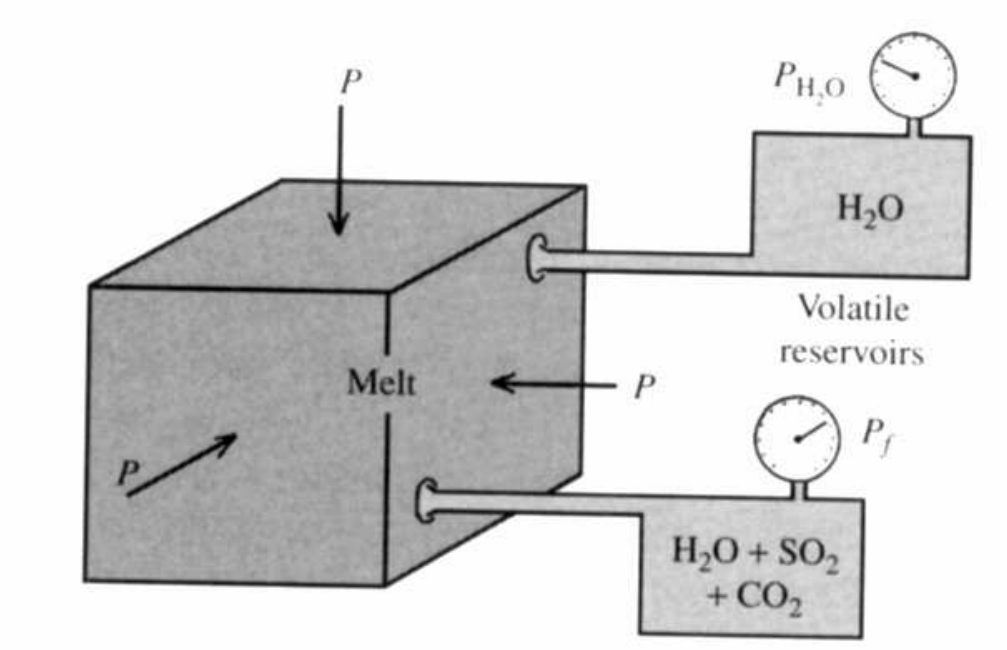


Rozpustnost těkavých složek v silikátových taveninách

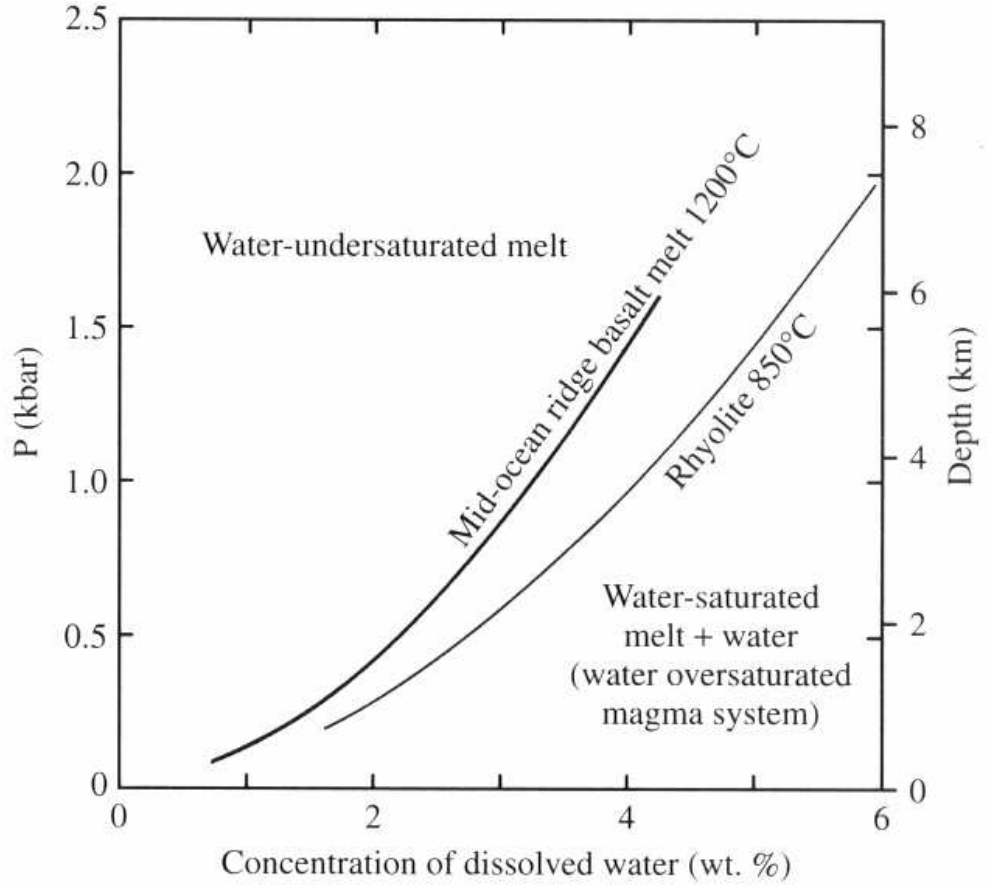
Tavenina s rozpuštěnými těkavými složkami =

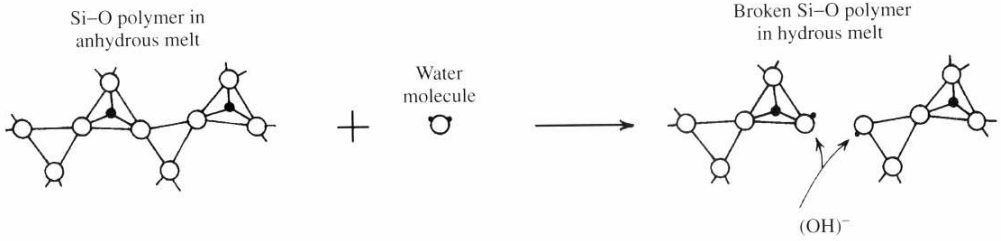
= tavenina + těkavé složky

$$V_{t+f} < V_t + V_f$$

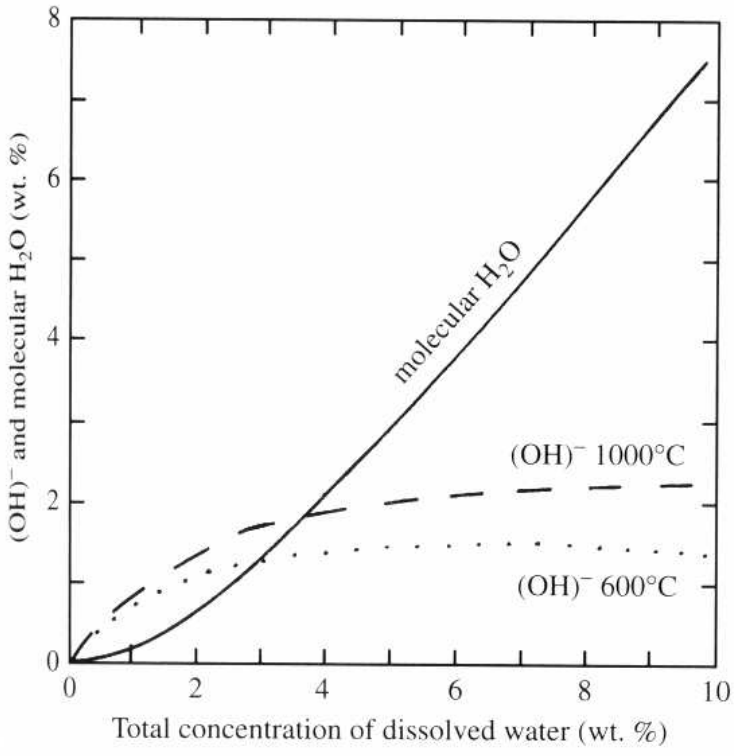


H_2O





- **Rozpustnost přibližně úměrná $P_{H2O}^{0,5}$ -> mechanismus**
- **$H_2O + O_2^- = 2\ OH^-$**
- **Drasticky snižuje viskozitu**



CO_2

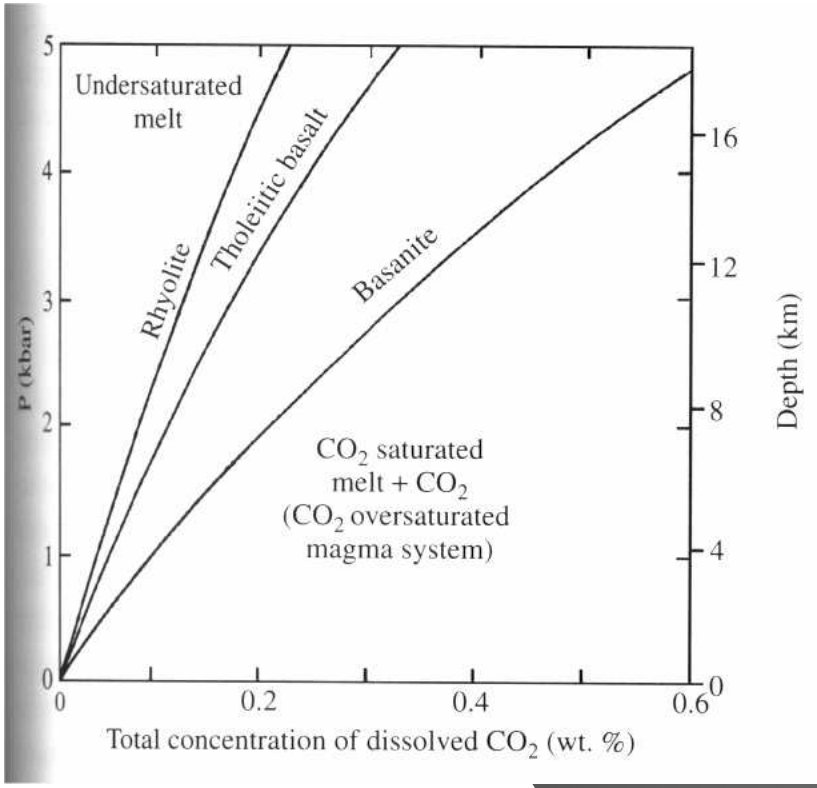
zhruba o řád menší než u vody za srovnatelných tlaků, roste s obsahem SiO_2 a H_2O; neváže se na můstkové kyslíky

S

Menší než několik tisíc ppm – S^{2-} v H_2O chudých ulktramafických a mafických magmatech, SO_4^{2-} ve vodou bohatých intermediárních a kyselých magmatech. Poměr závisí na koncentraci rozpuštěného O_2. Z redukovaných mafických magmat se odmísí tavenina S-Fe-Cu

F

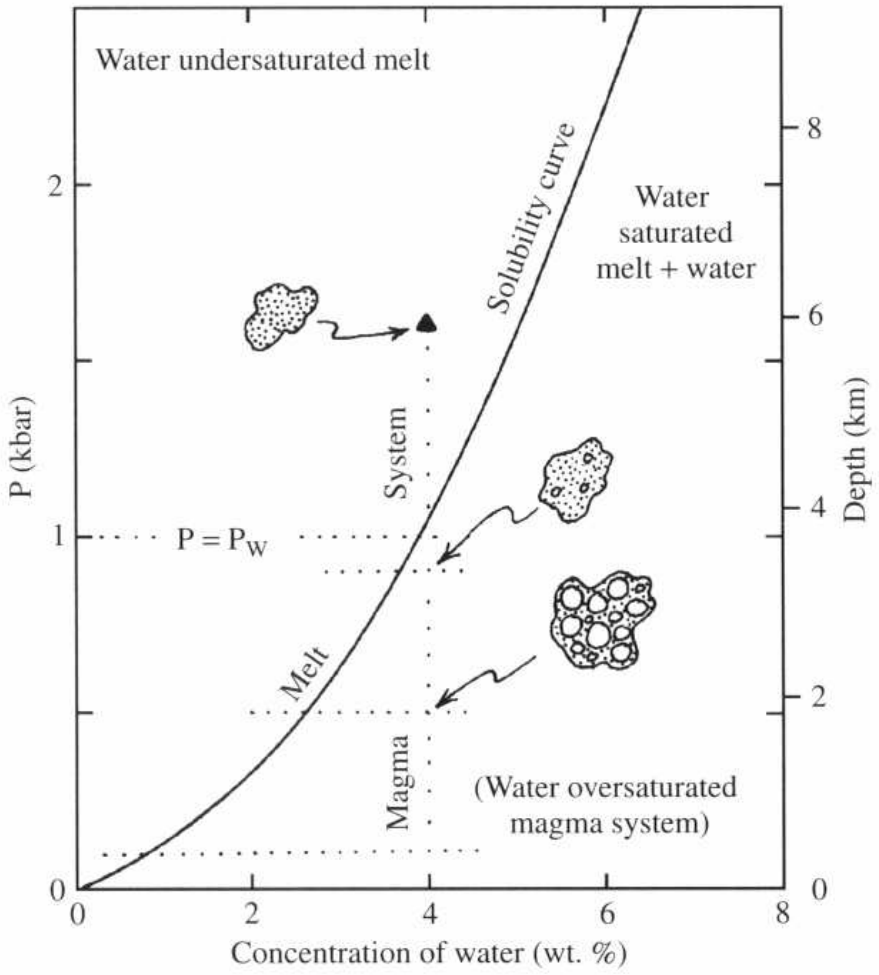
Experimentálně až 10 hm. %, výrazná depolymerace



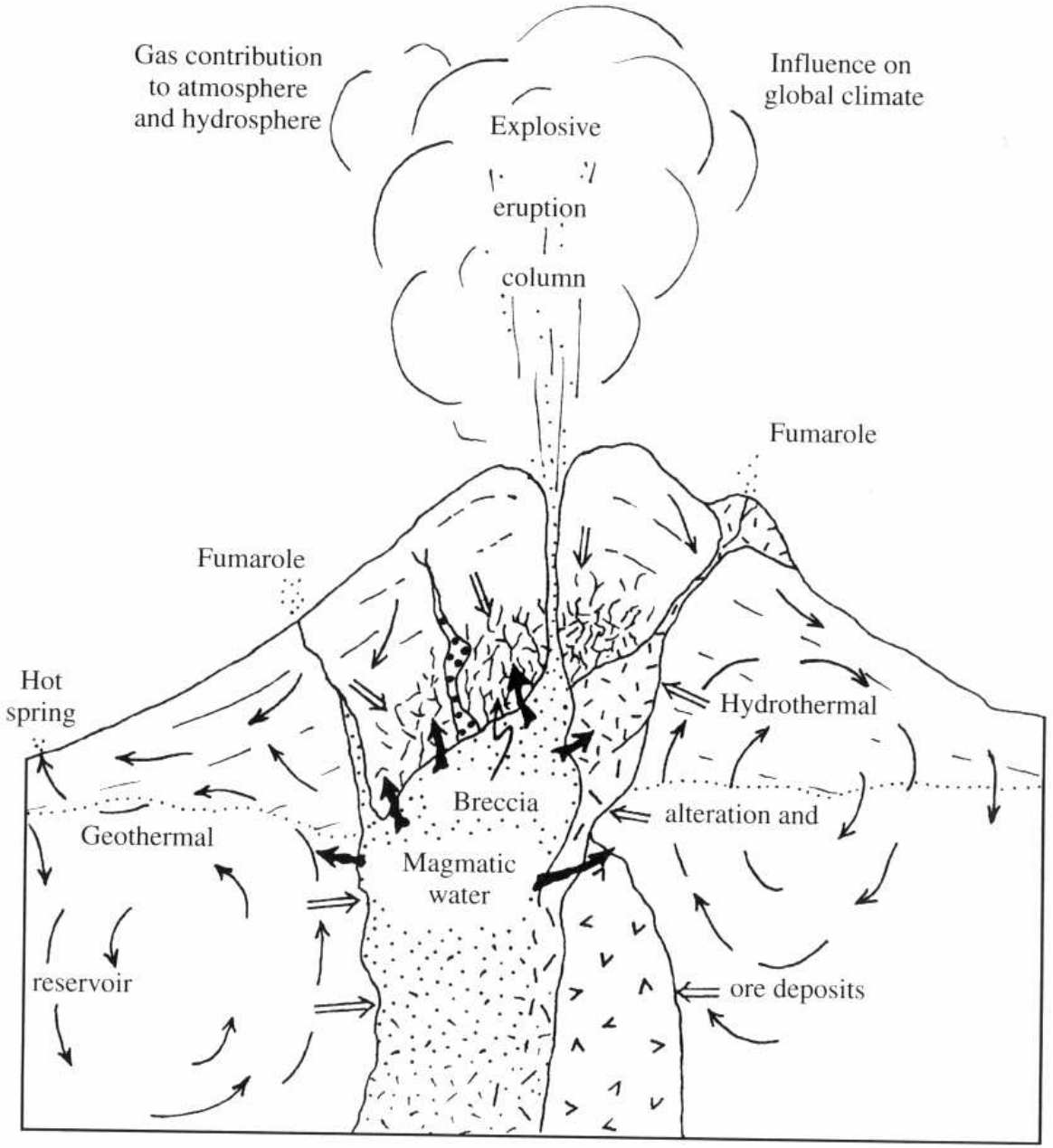
Oddělení těkavých látek od taveniny

Při výstupu z pláště nebo kůry se stává magma nasycené těkavými složkami. Jejich nadbytek se odděluje do koexistující fluidní fáze – exoluce, var

- **původně vodou nenasycené magma se stává přesycené v důsledku klasajícího celkového tlaku**
- **krystalizace bezvodých minerálů i za konstantního tlaku – přesycení fluidy – retrográdní, sekundární var; může k němu docházet i při klesající teplotě!**



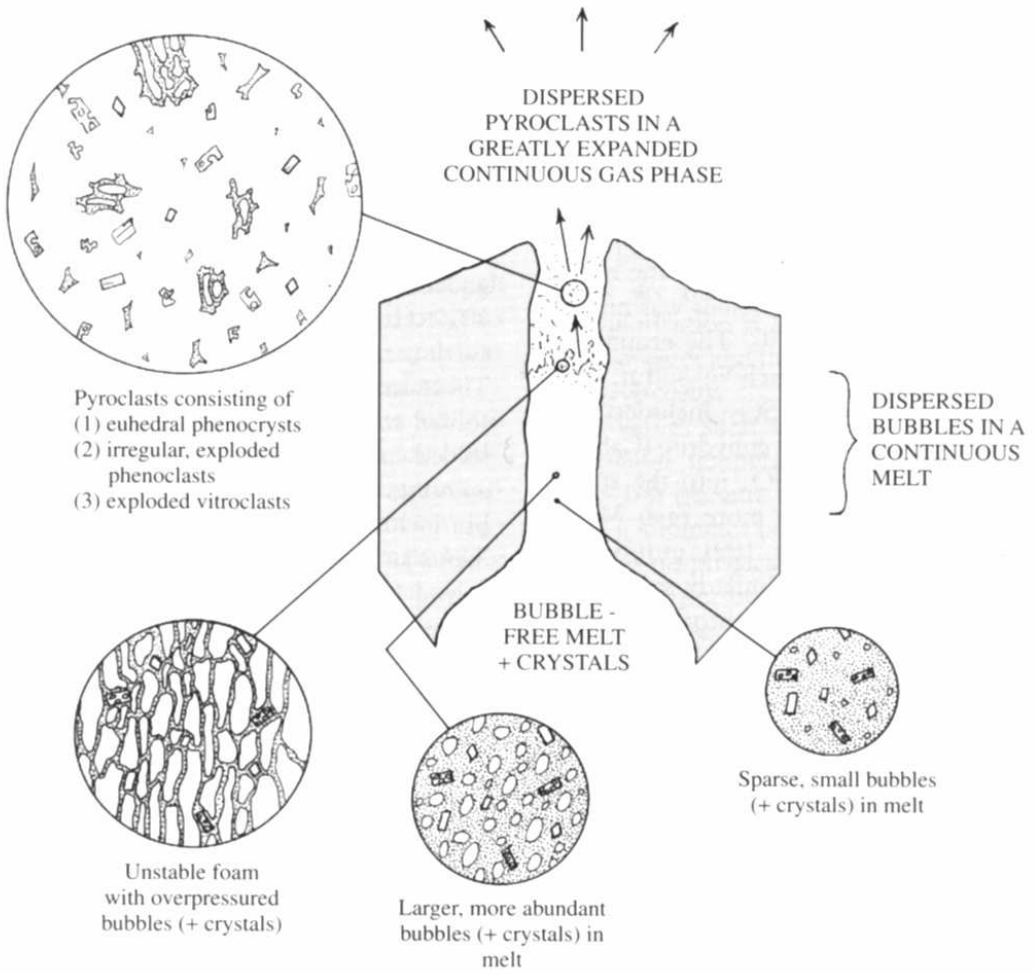
Oddělení fluidní fáze přispívá k dalšímu chlazení magmatického tělesa; chlazené může být tak rychlé, že vede k „zamrtznutí“ systému. Ve fluidní fázi se koncentrují nekompatibilní prvky a ta se hromadí ve svrchní části magmatického krbu (Mt. Pinatubo, Filipíny, červen 1991 – 17 megatun SO_2 do atmosféry; celkem vyvrženo 5–10 km^3 materiálu; S pochází ze 40–90 km^3 magmatu pod sopkou).



Důsledky exoluce fluid

Explosivní vulkanismus

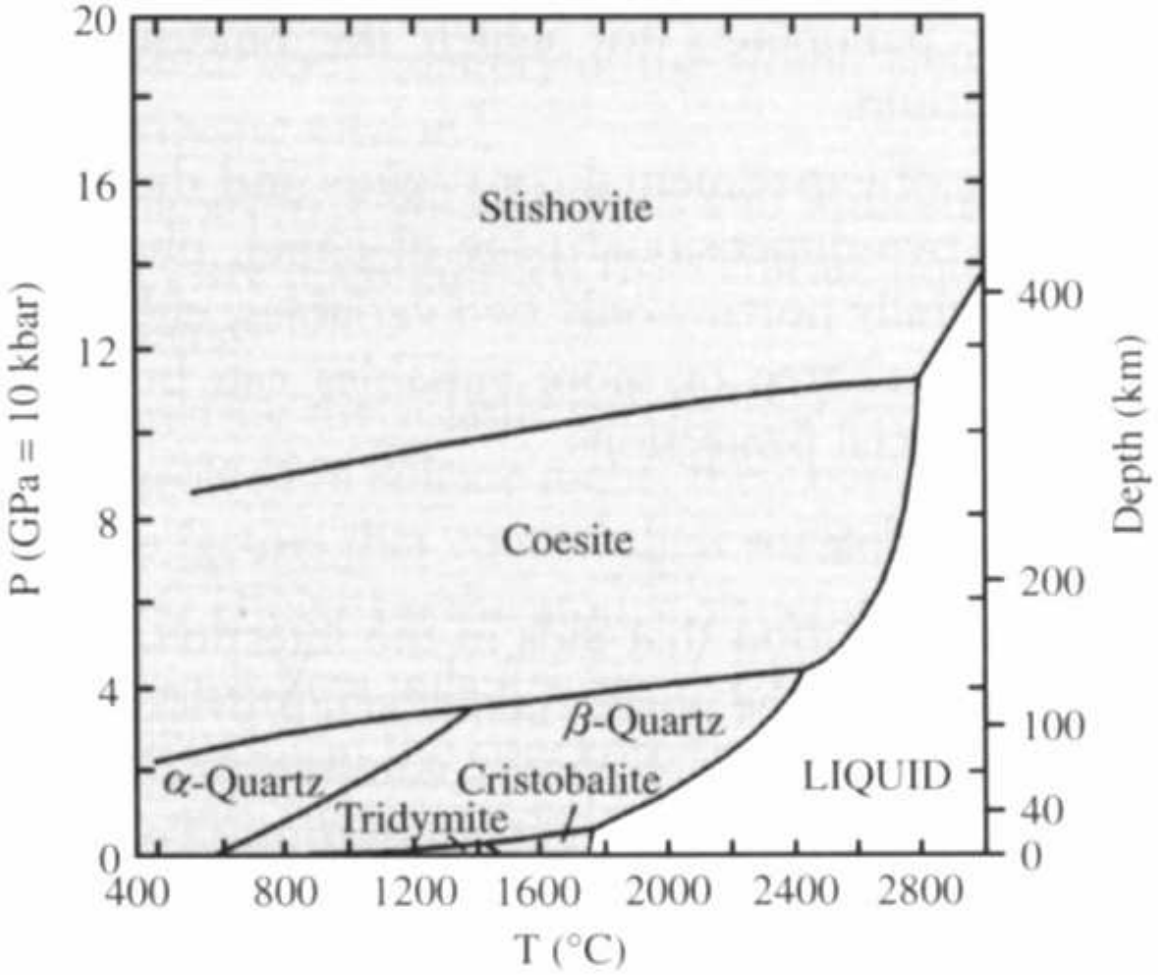
- **0,9 kbar – 3,6 % H_2O, 0,5 kbar – 2,6 % H_2O, 0,1 kbar – < 1 % H_2O**
- **objem fulidní fáze je mnohem větší než má stejné množství těkavých látek, které jsou rozpuštěný v tavenině – 99,3 : 22,3 cm3/mol H_2O v systému $NaAlSi_3O_8$ – H2O při 950 °C a 1 kbar)**
- **fluidní fáze se rozpíná podle stavové rovnice ideálního plynu (PV = nRT)**
- **aerosoly, fumaroly, hydrotermální roztoky, rudní ložiska, alterované horniny, geotermální rezervoáry.**



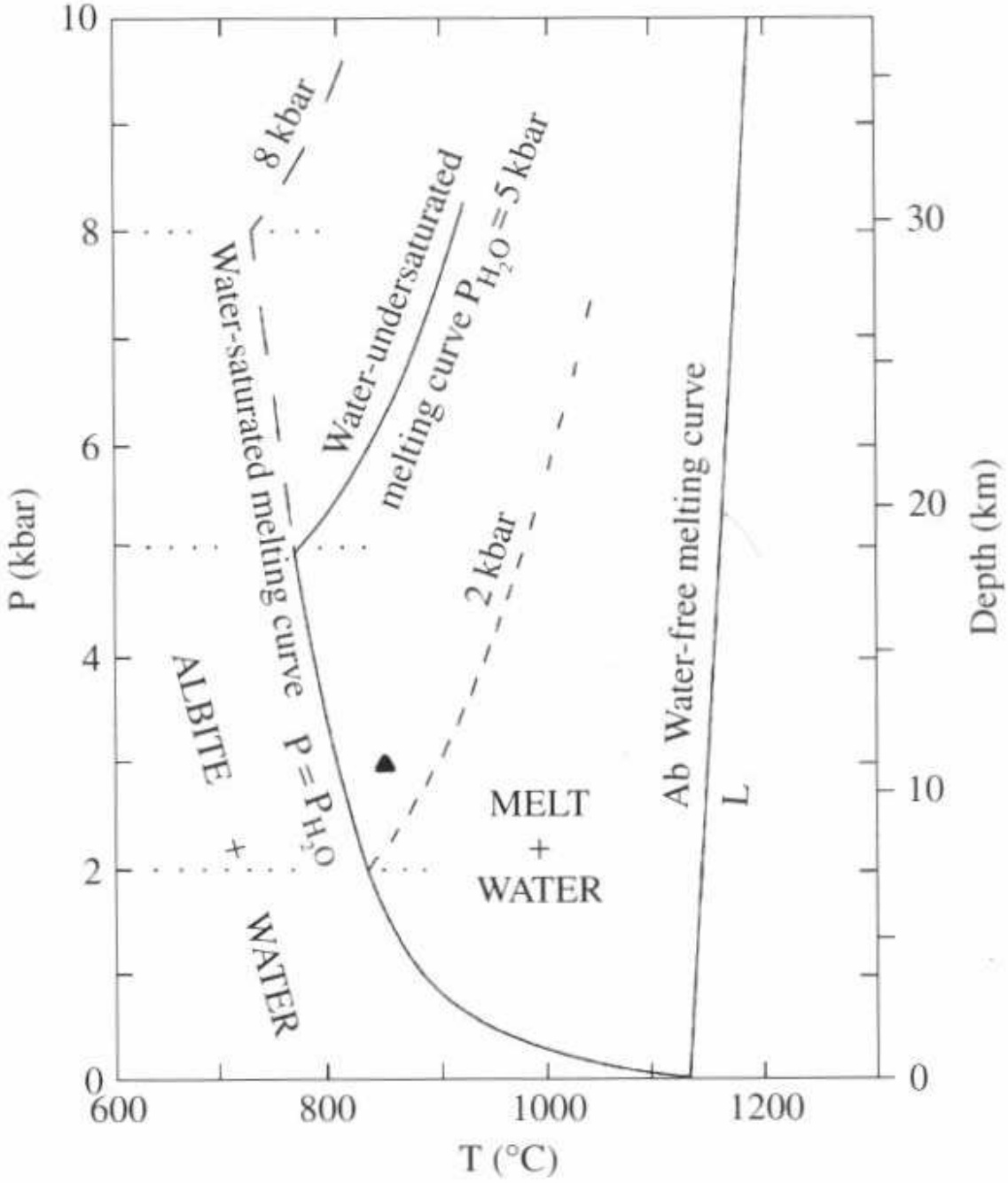
Rovnováhy krystaly-tavenina v magmatických systémech

Fázové diagramy

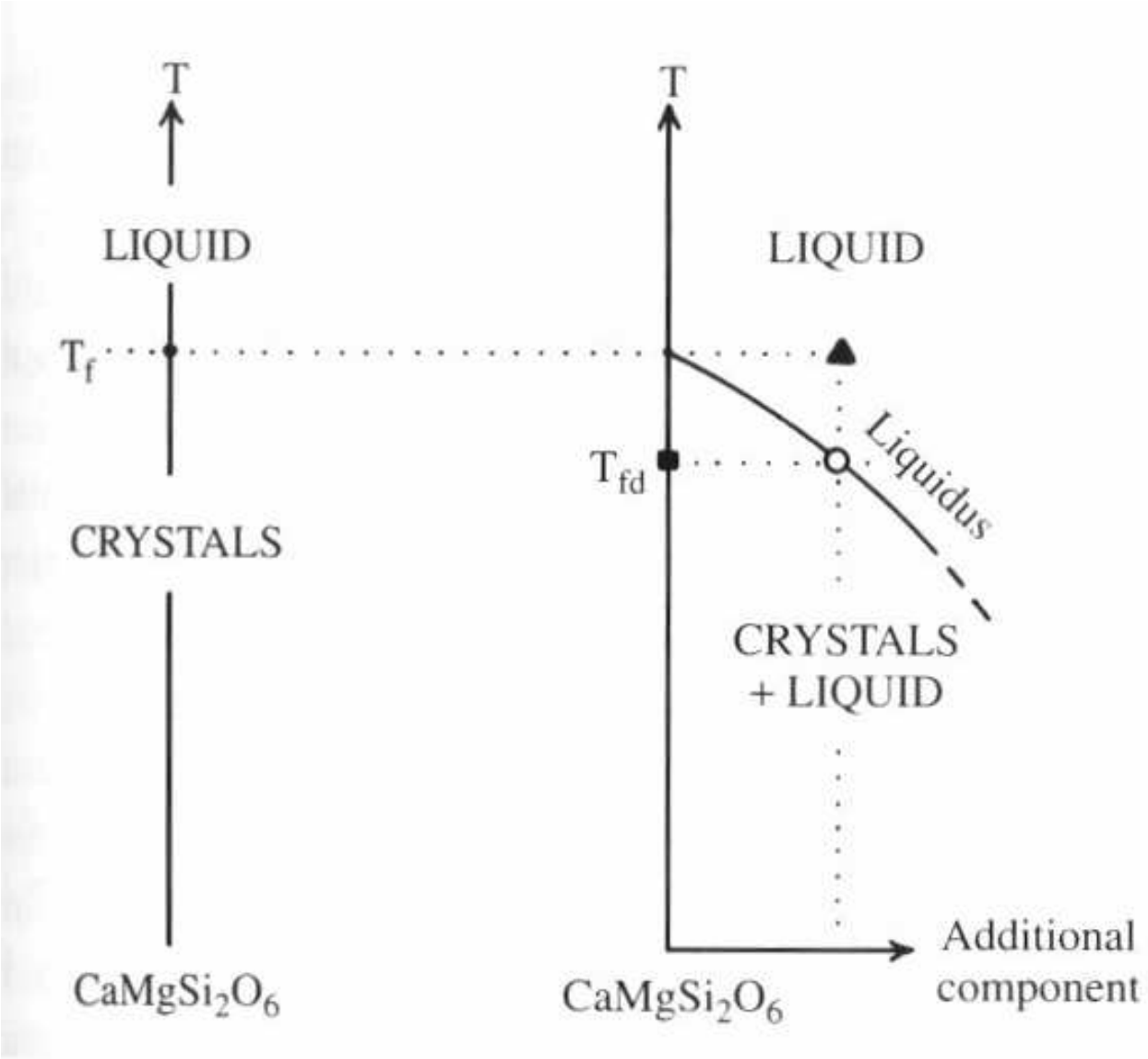
Tavení čistých minerálů a polymorfismus



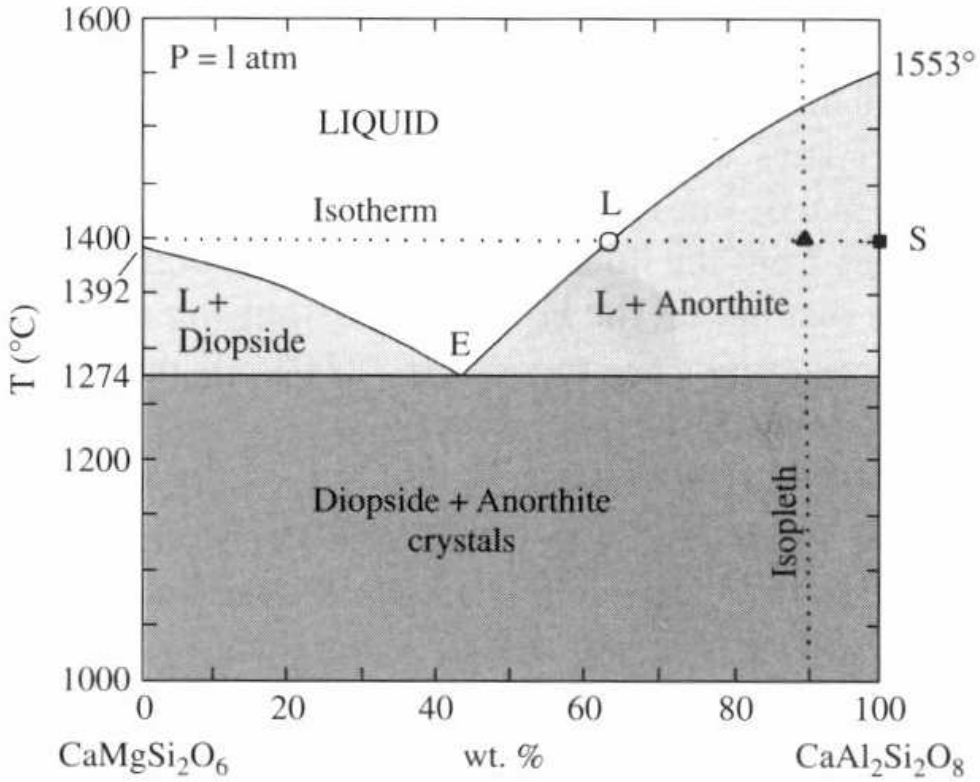
Fázové diagramy



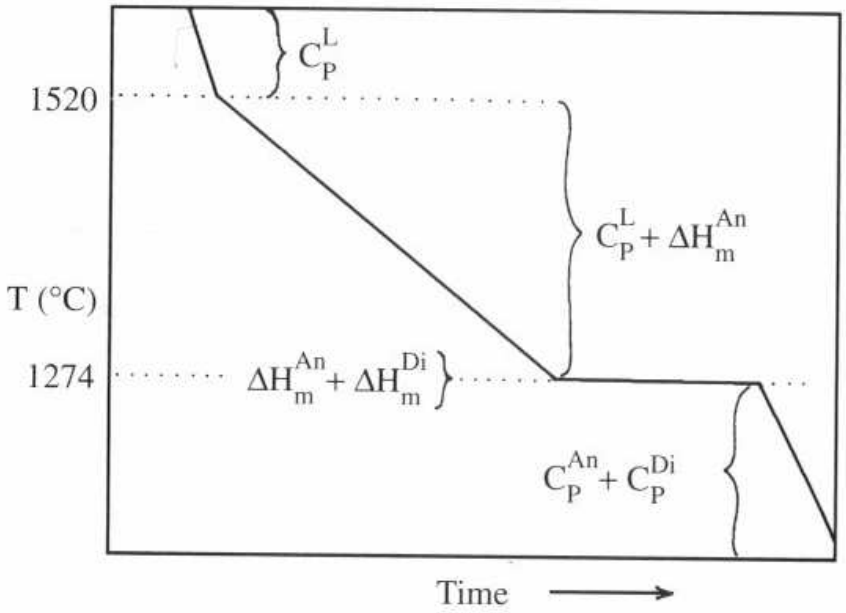
Fázové rovnováhy binárních systémů



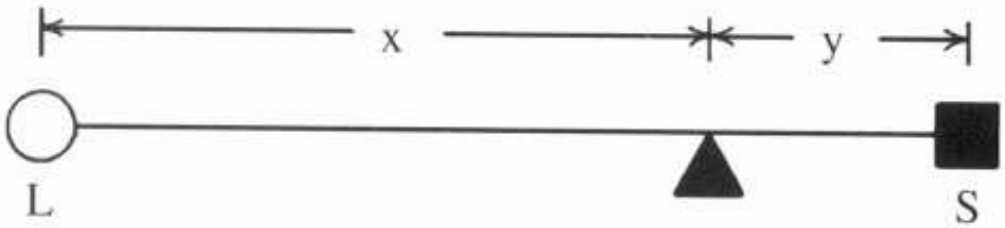
Fázové rovnováhy binárních systémů



Chladnutí

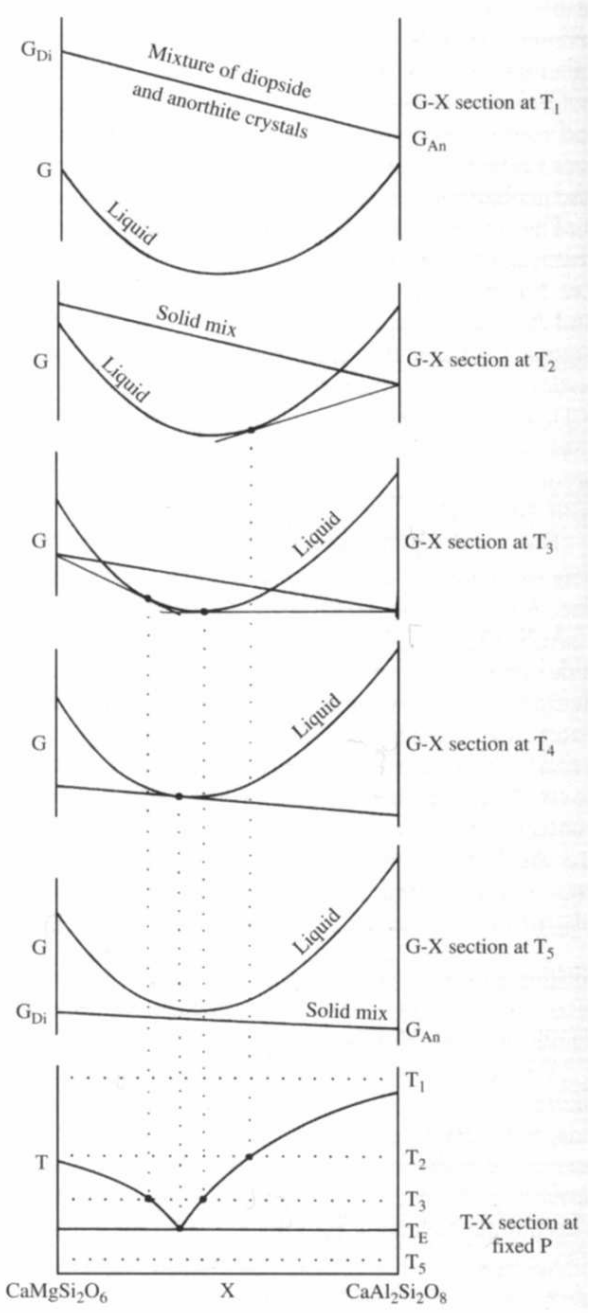


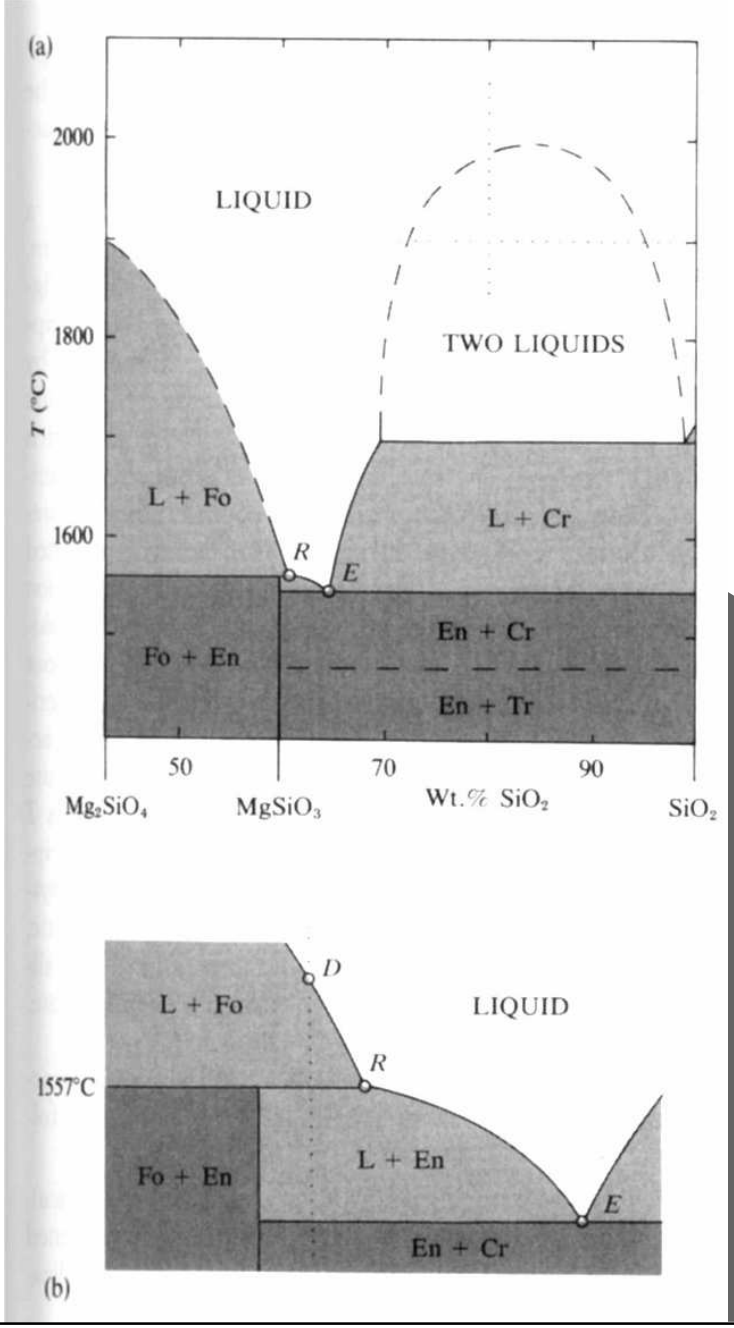
Pákové pravidlo



G-T-X profil

Peritektický bod: $Mg_2SiO_4 + SiO_2 = 2\ MgSiO_3$





Krystalizace

Ideální rovnovážná krystalizace

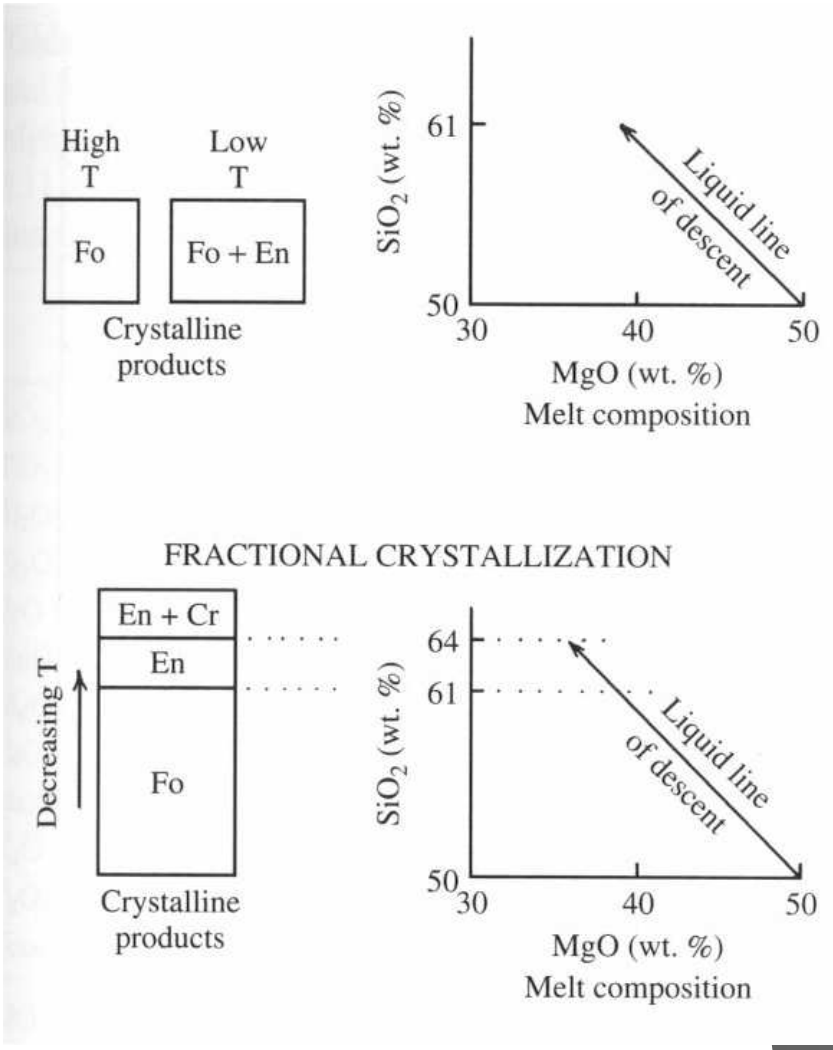
- **Po celou dobu krystalizace zachovávána rovnováha mezi krystaly a taveninou**

Ideální frakční krystalizace

Krystaly jsou okamžitě „izolovány“ od taveniny.

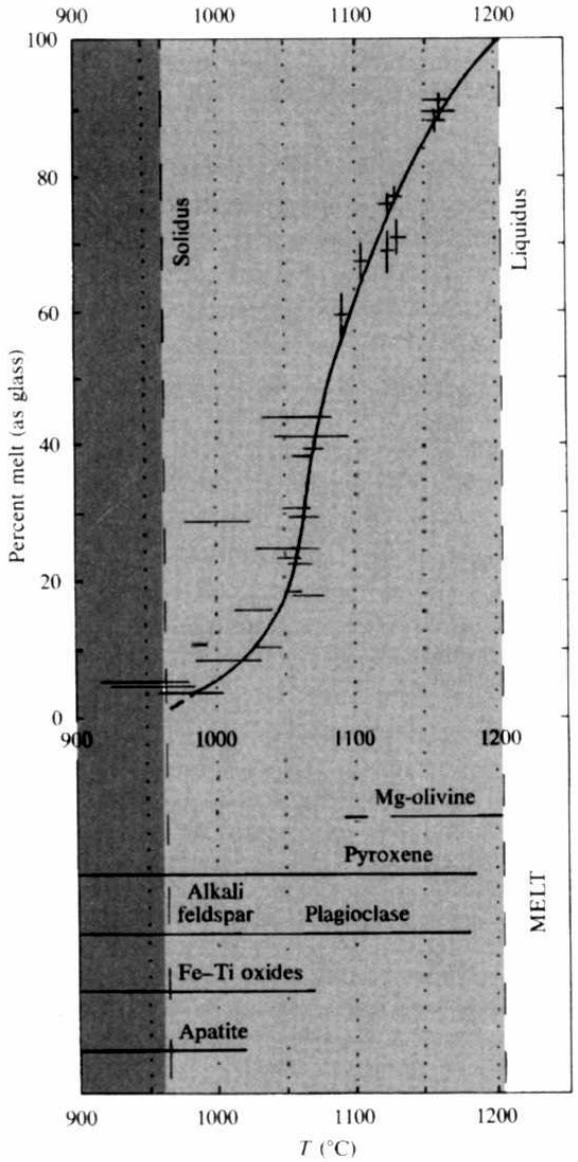
- **krystaly jsou odděleny od taveniny v důsledku rozdílné hustoty**
- **krystaly s taveninou nereagují v důsledku pomalé rychlosti vzájemné interakce**
- **povrchová vrstva je izolována od taveniny další přirůstající vrstvou**

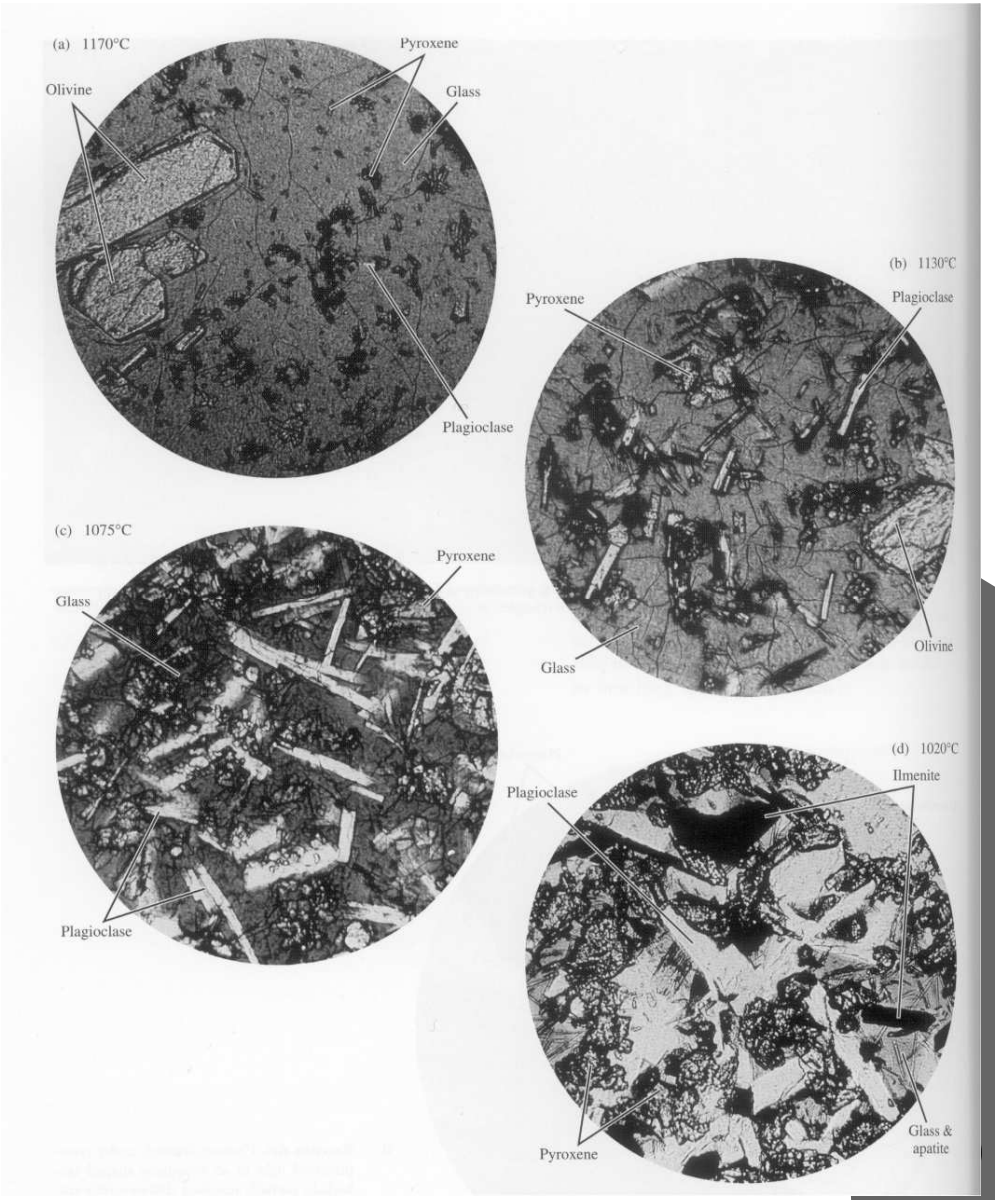
Složení reziduální taveniny



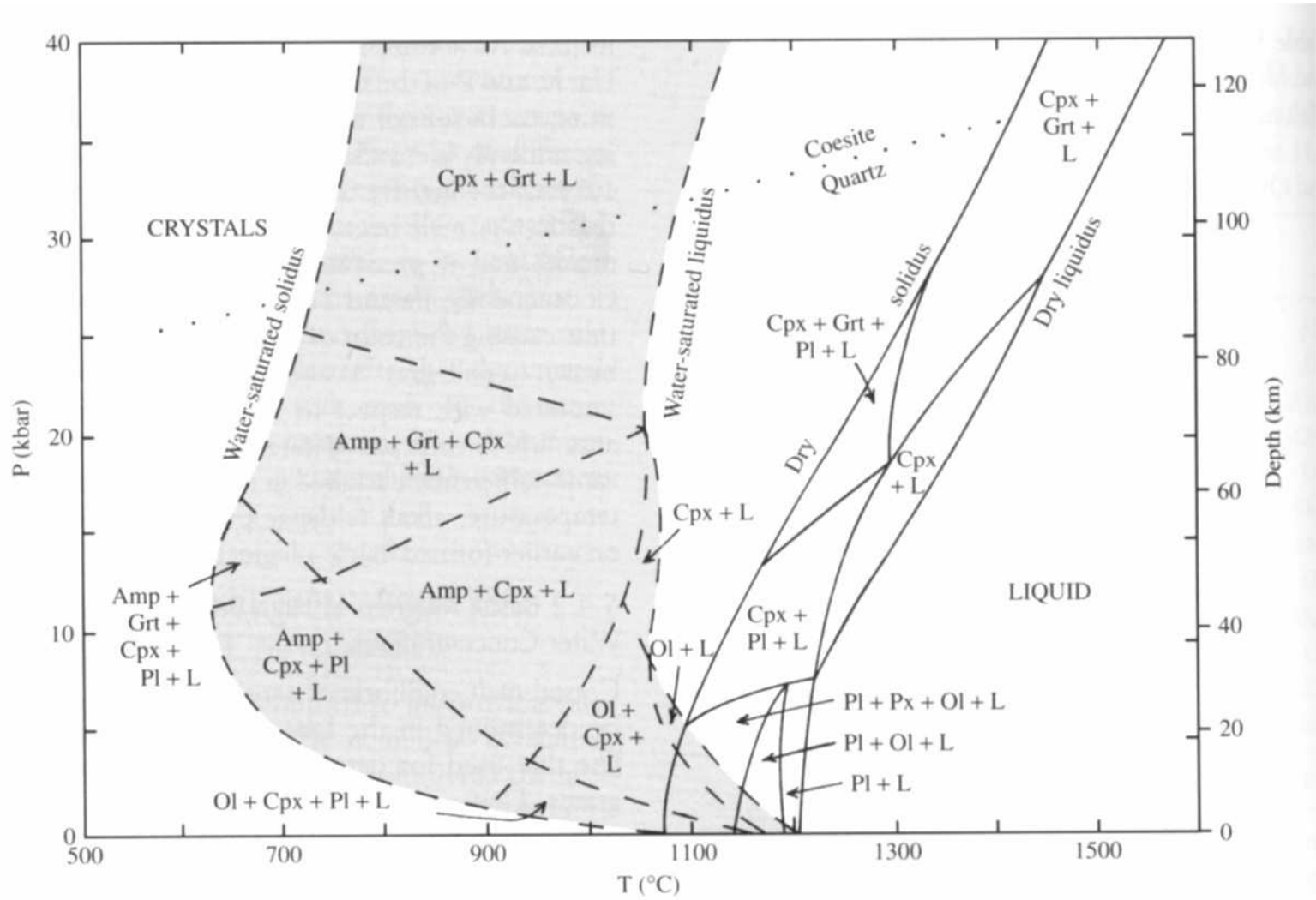
Krystalizace reálných bazaltových magmat

Makaopuhi bazalt
1963 Kilauea, Hawaii – Makaopuhi kráter

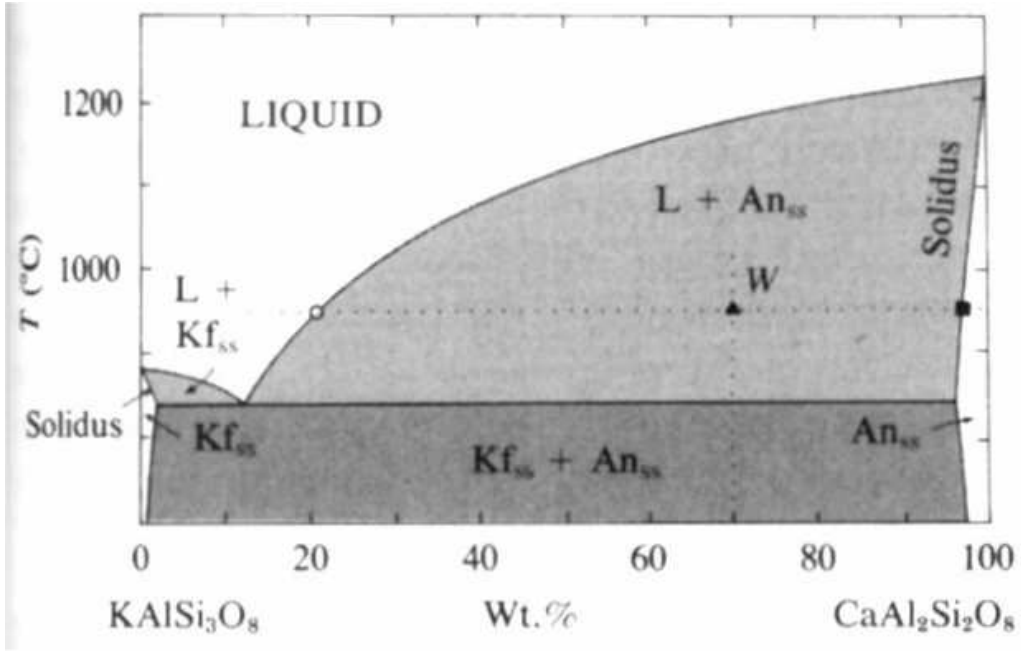




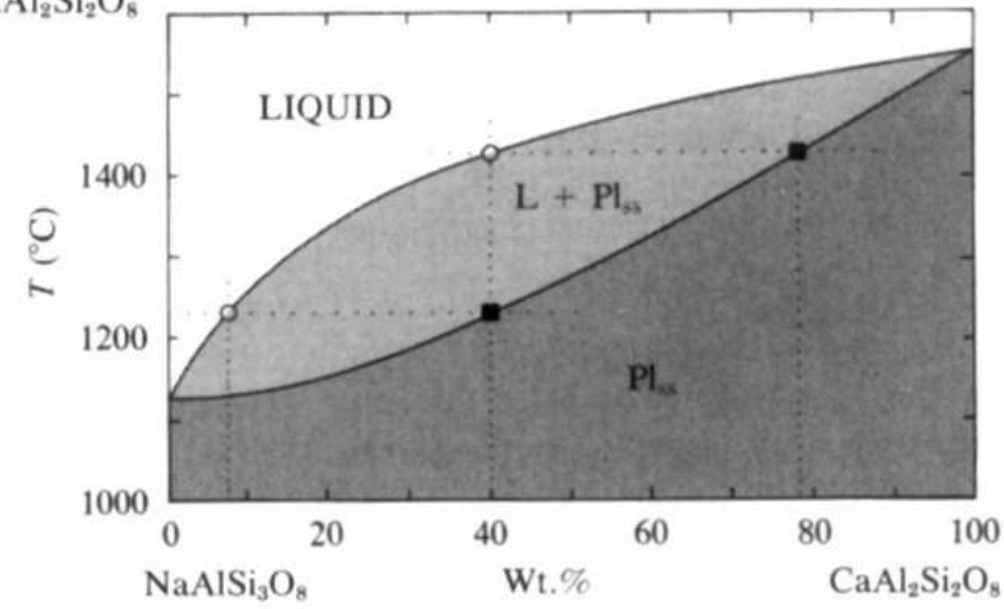
Obecný diagram pro tholeitové bazalty



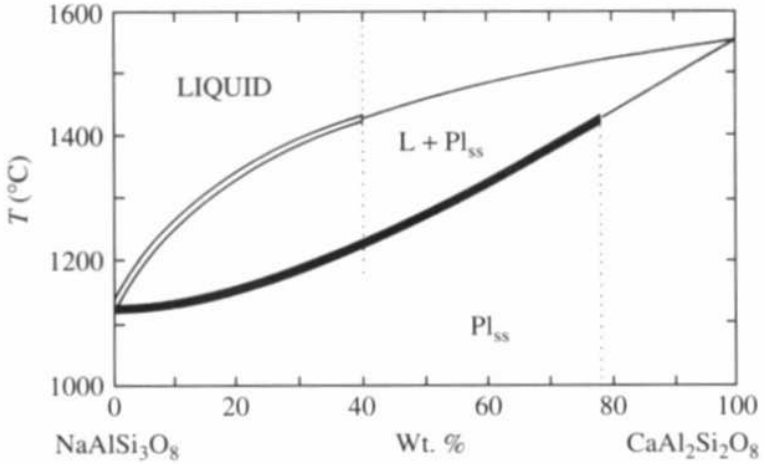
Fázové diagramy živců

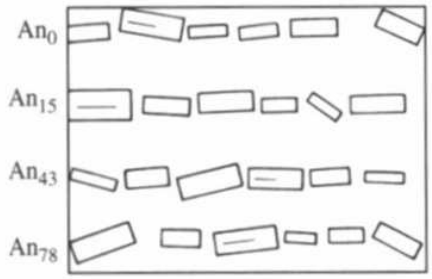


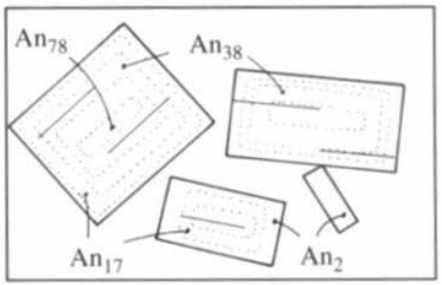
$Na^{+}Si^{4+} = Ca^{2+}Al^{3+}$



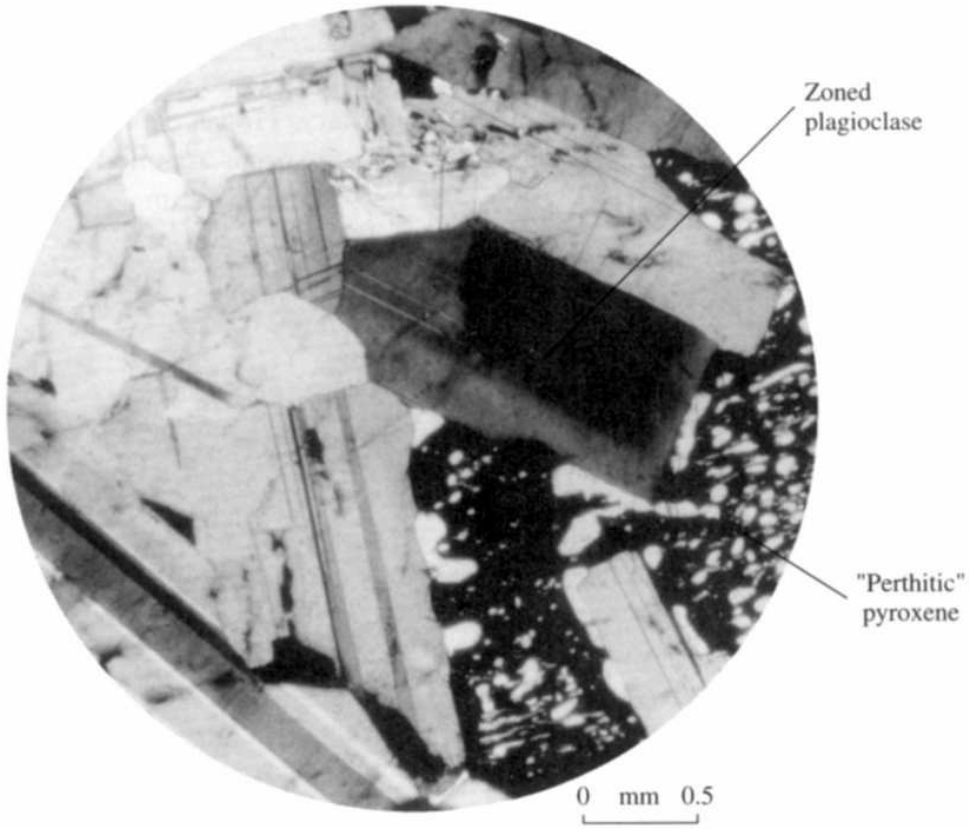
Fázové diagramy živců







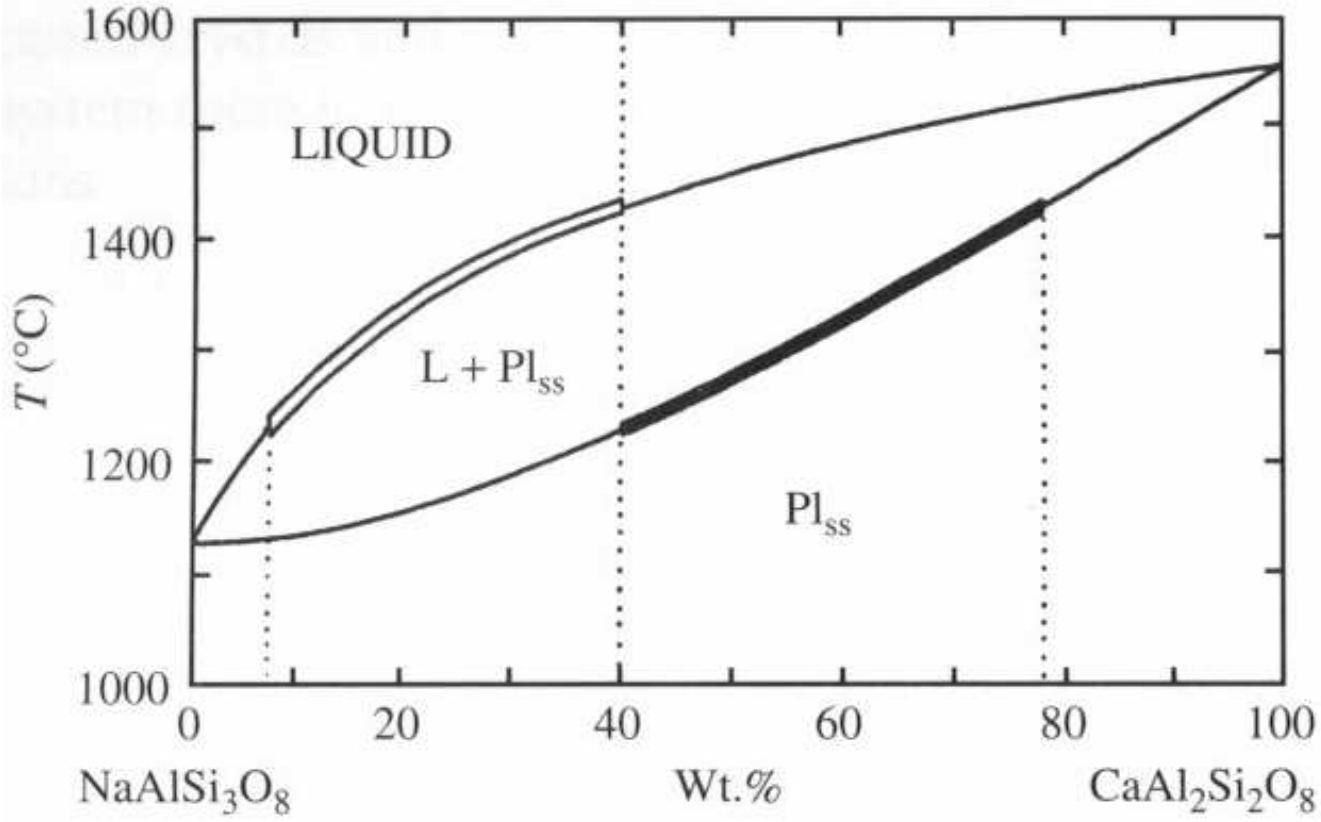
Frakční krystalizace

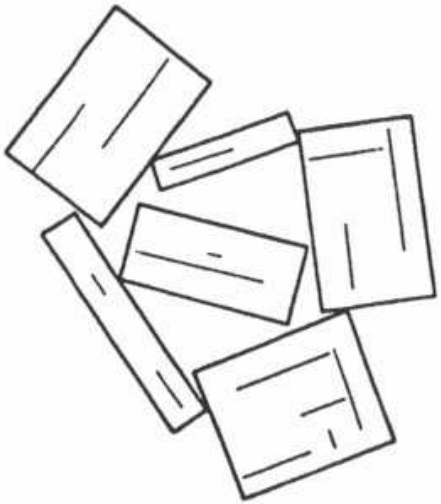


Zonální plagioklas z gabra, Skaergaard intruze, Grónsko; v pevné fází odmíšený pyroxen (Ca-bohatý a Ca-chudý člen).

Fázové diagramy živců

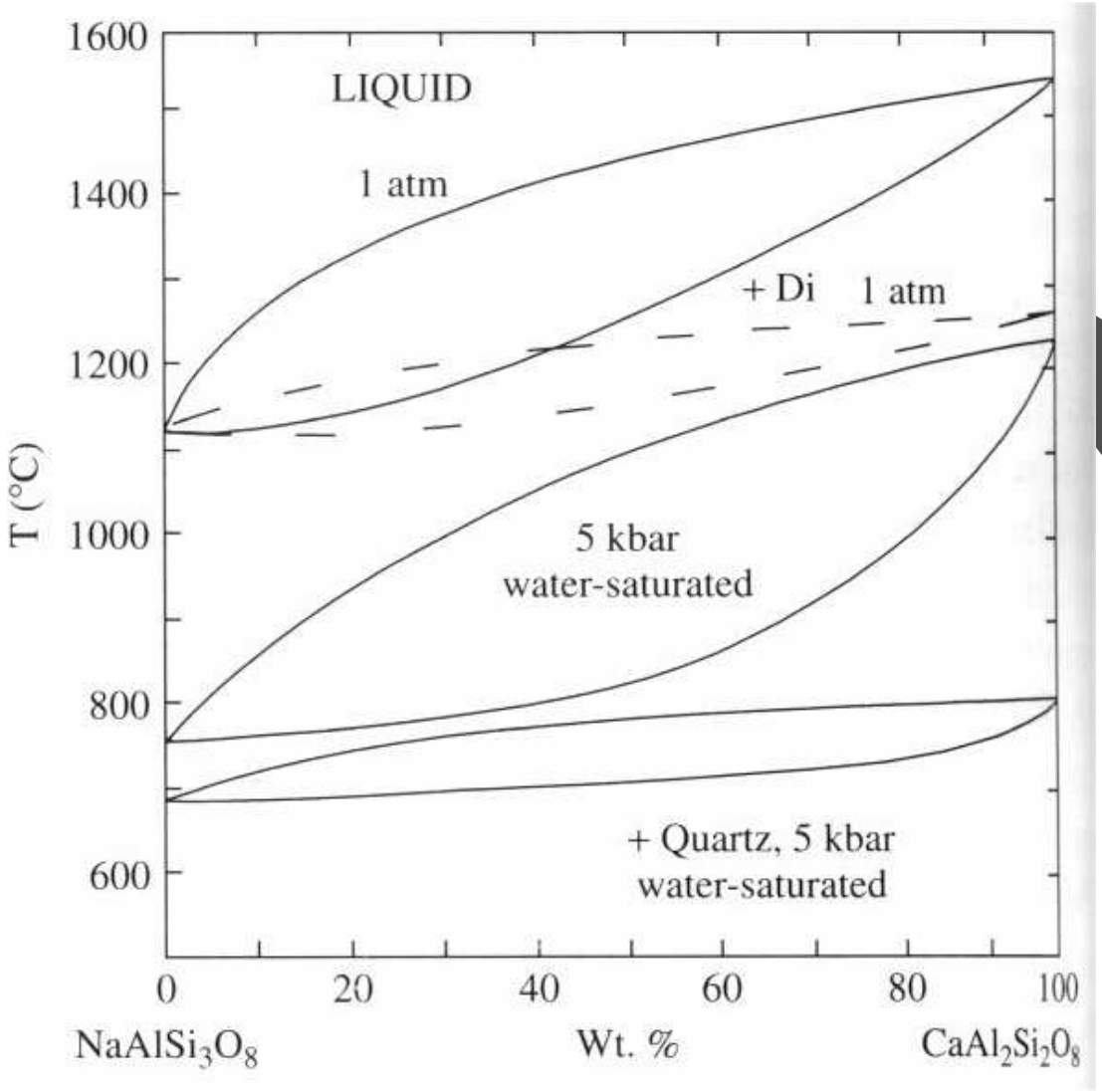
Rovnovážná krystalizace





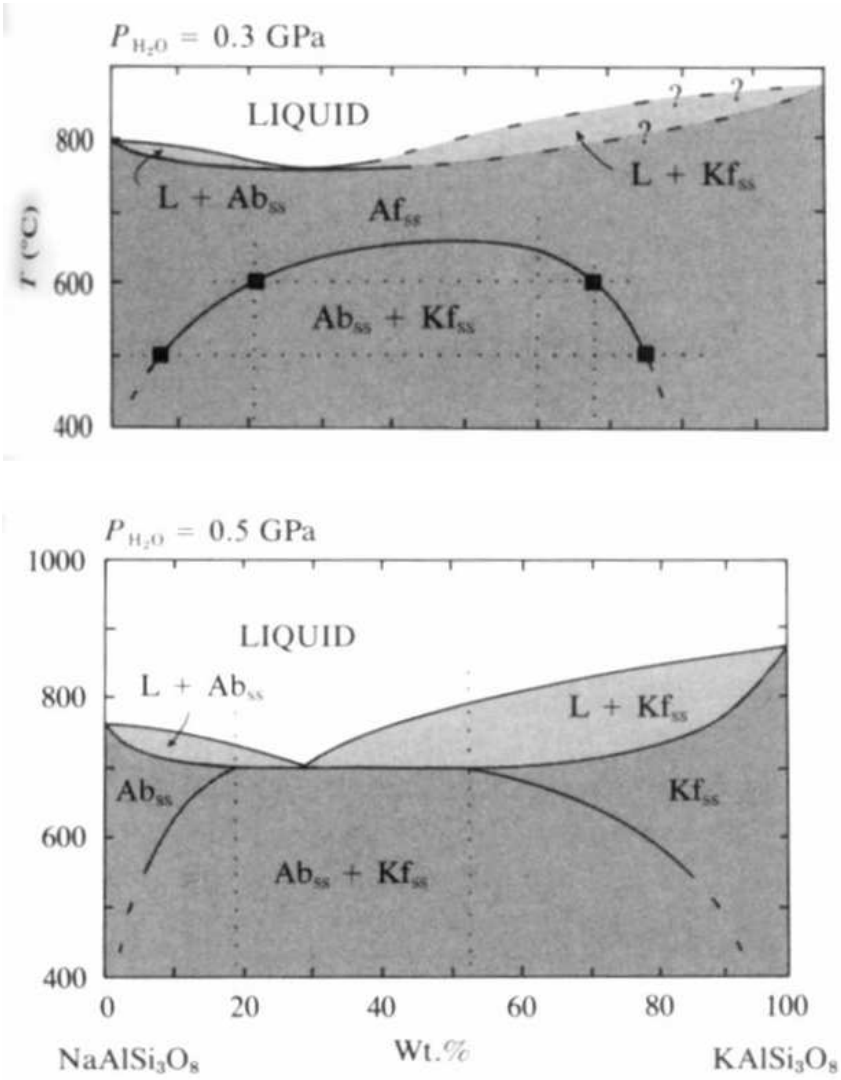
Fázové diagramy živců

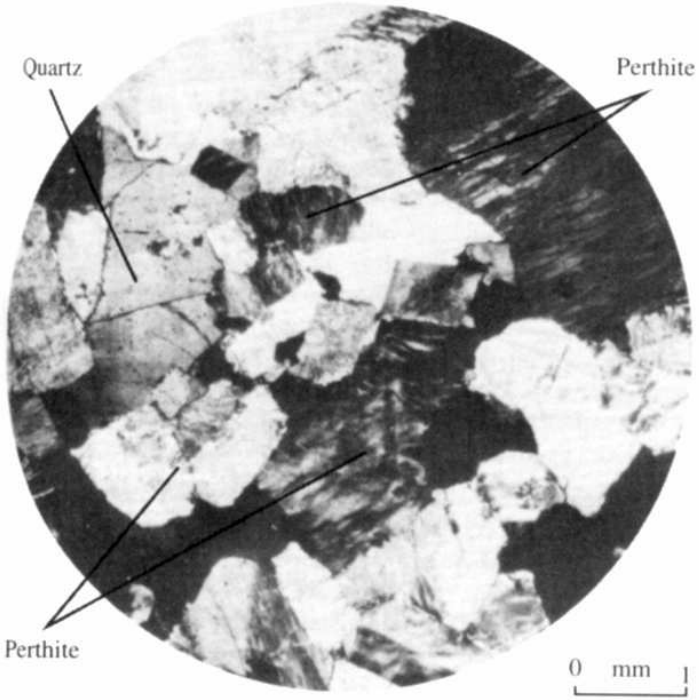
Ternární systém Kf-Ab-An

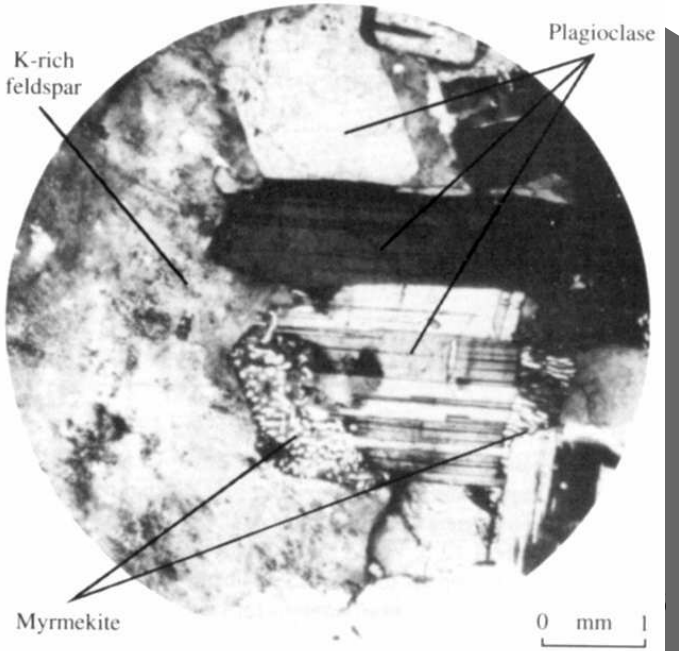


Fázové diagramy živců

Ternární systém Kf-Ab-An



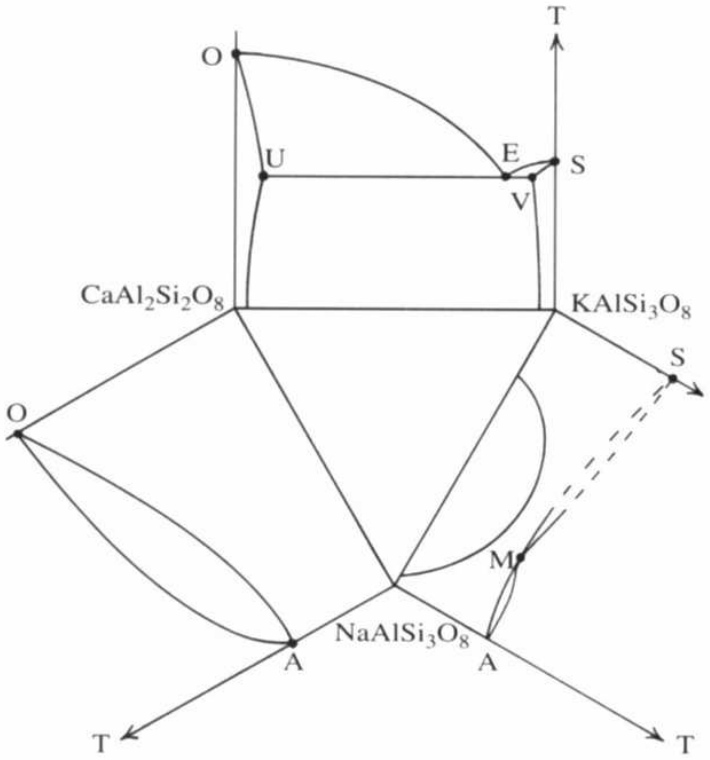


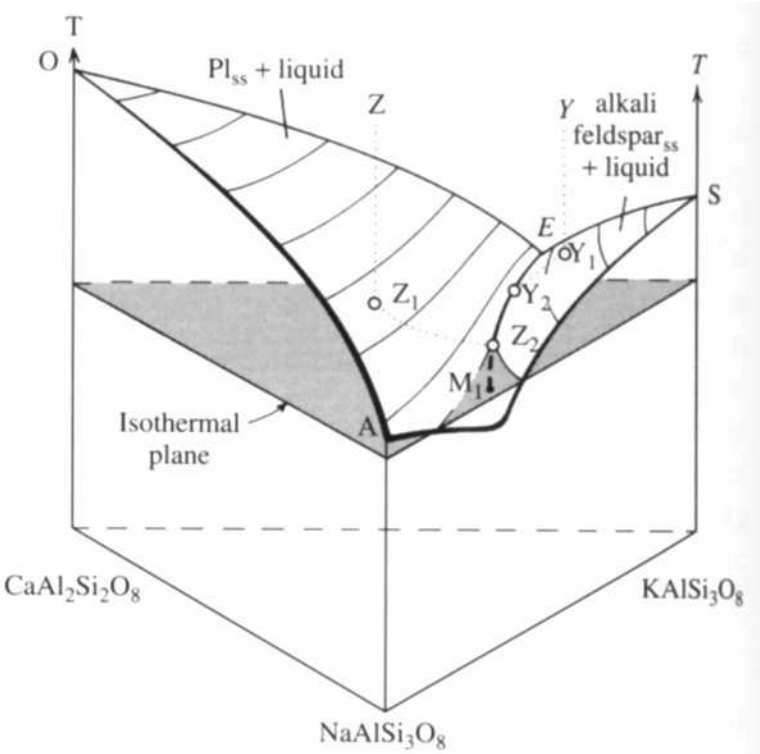


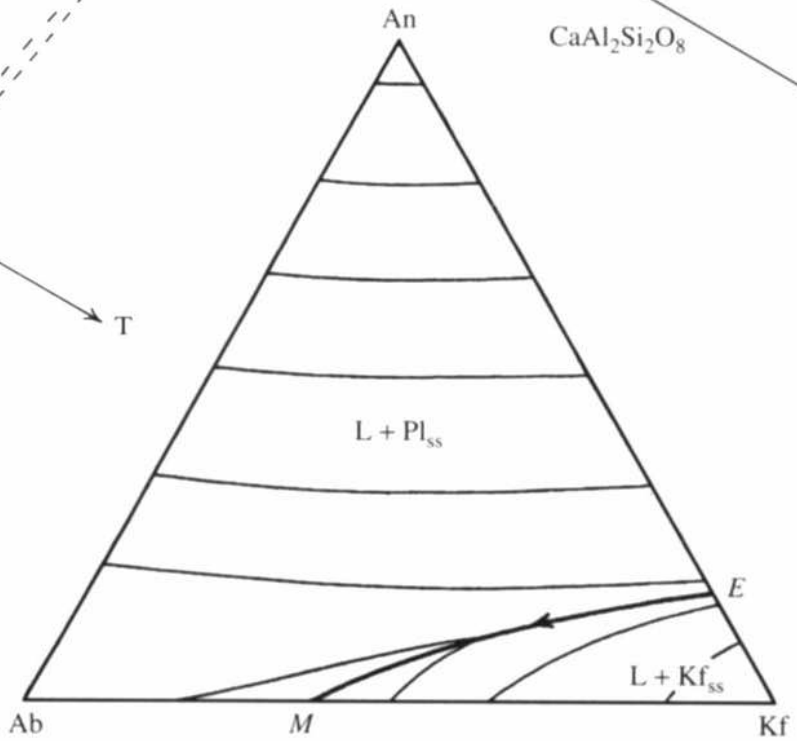
Josef Zeman

Fázové diagramy živců

Ternární systém Kf-Ab-An

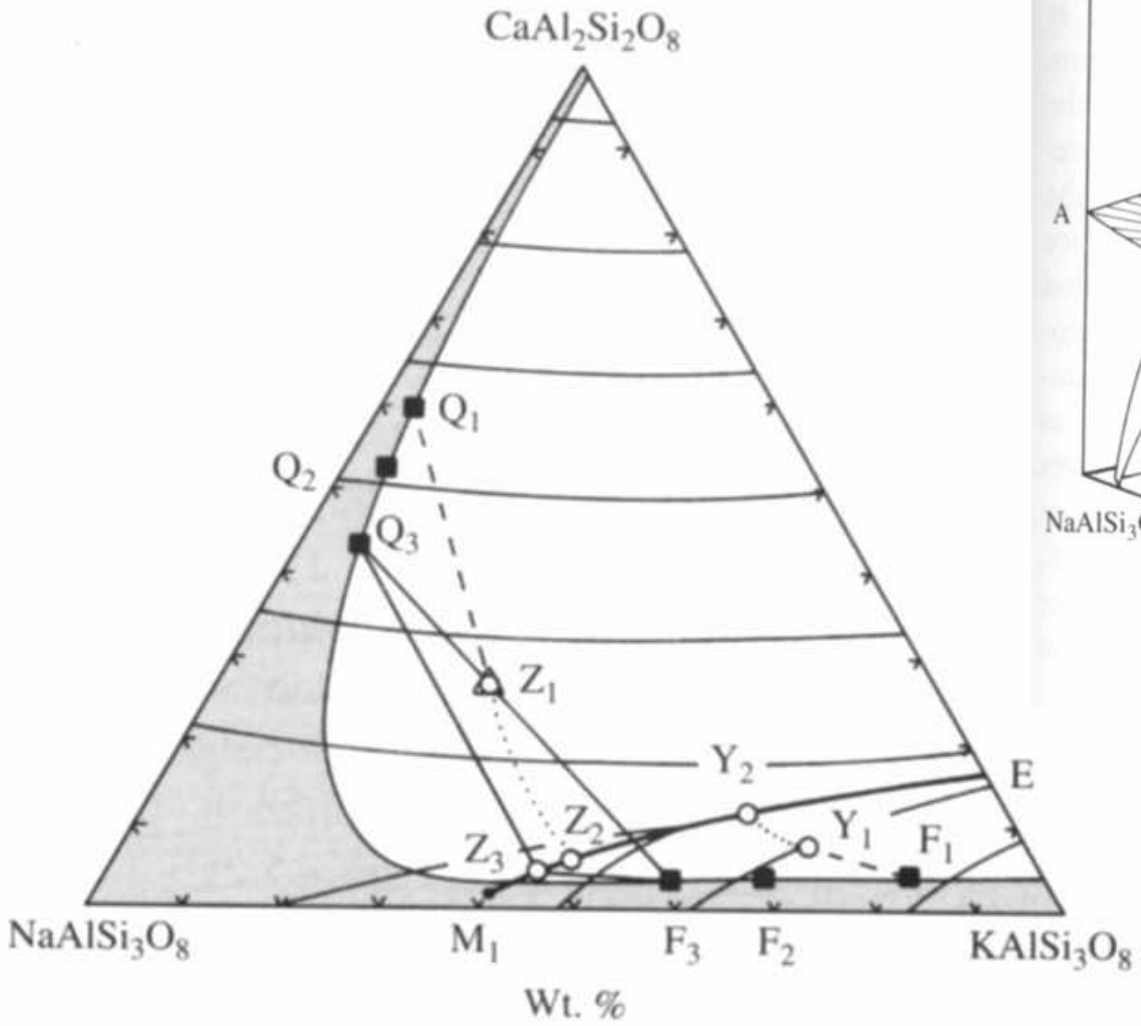


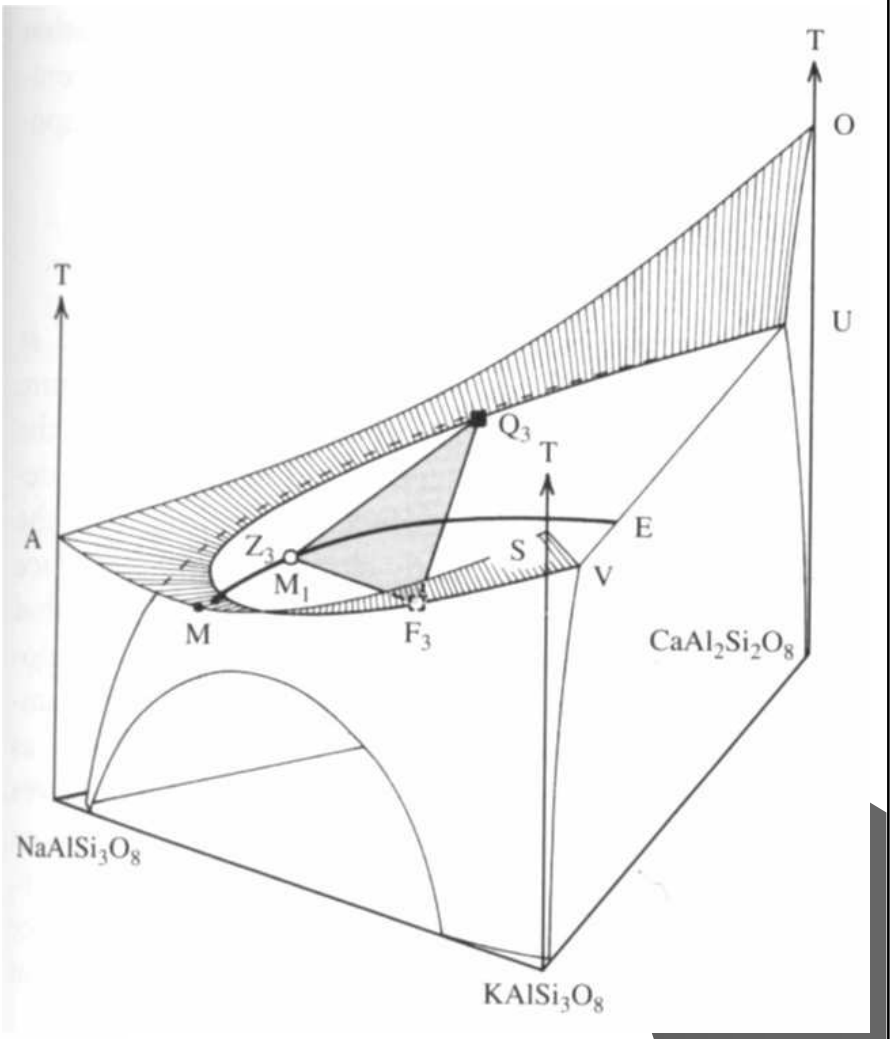




Fázové diagramy živců

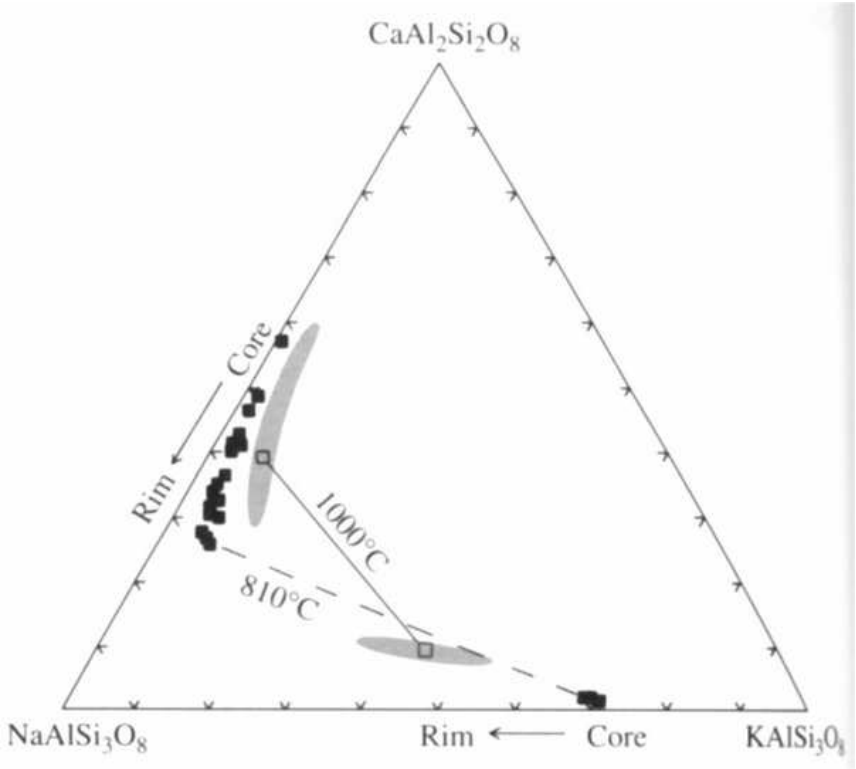
Ternární systém Kf-Ab-An





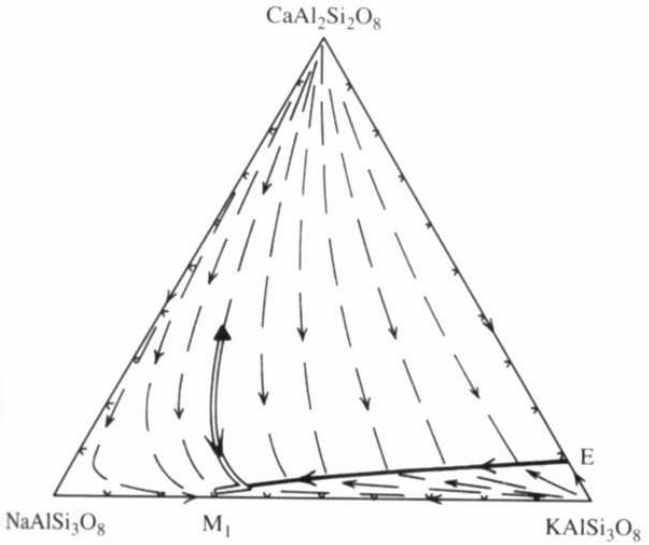
Fázové diagramy živců

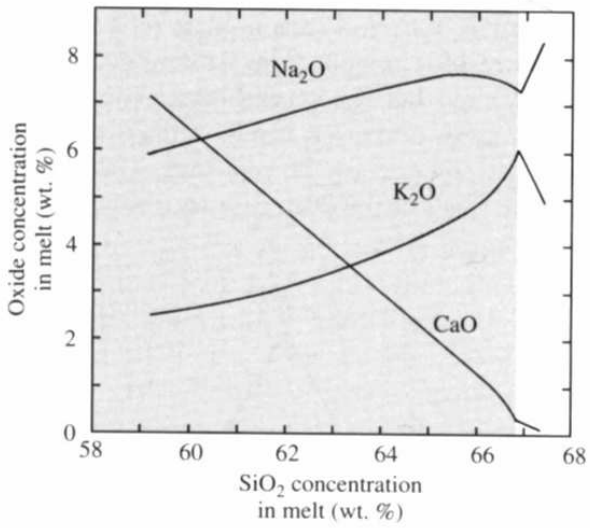
Ternární systém Kf-Ab-An



1 000 °C – trachybazalt
810 °C – ryolitové pumy v tufu

Frakční krystalizace

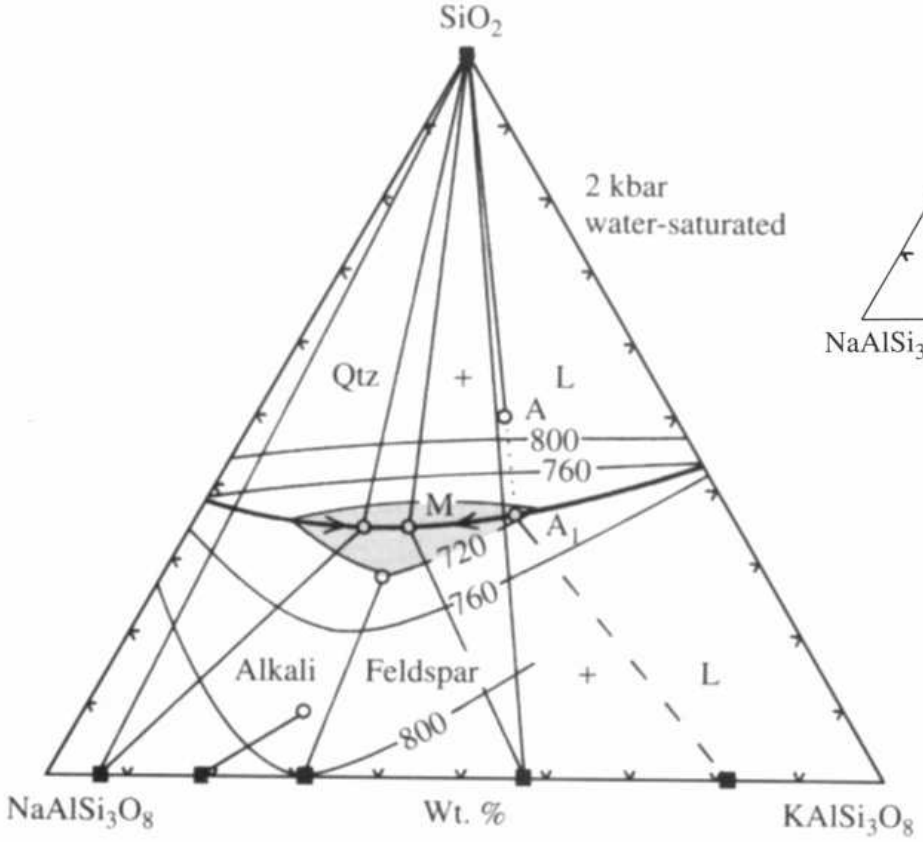


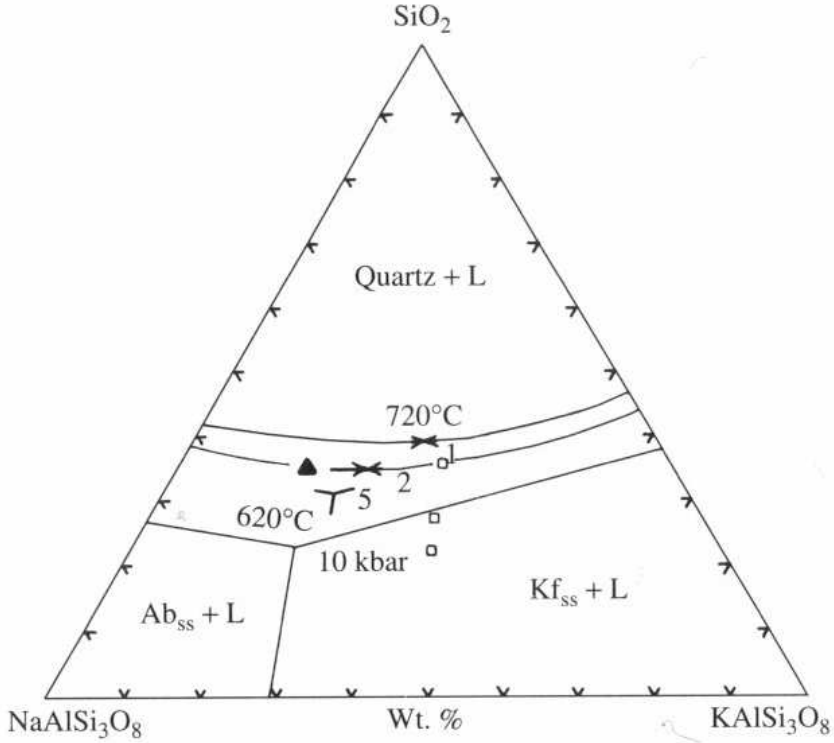


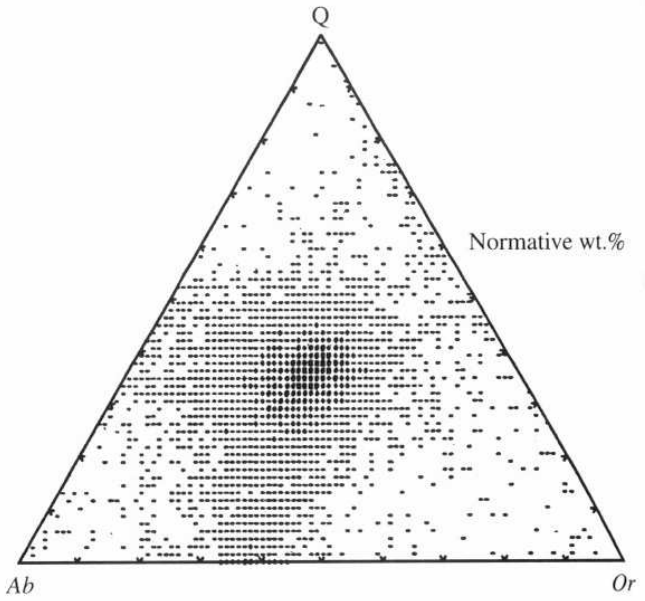
Fázové diagramy živců

Ternární systém Kf-Ab-SiO_2

Vliv vody





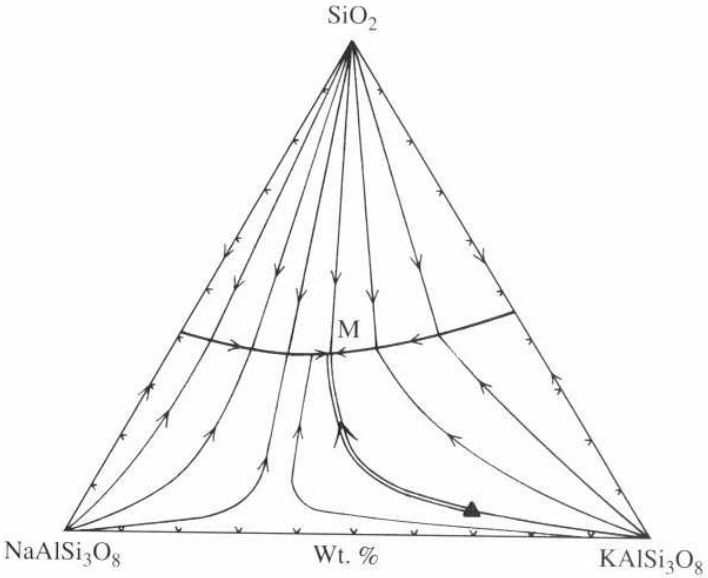


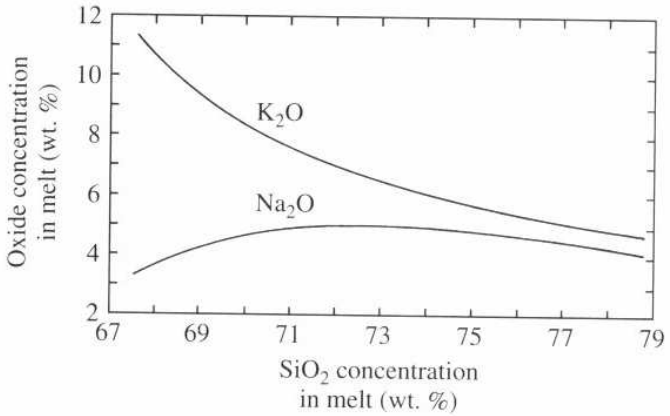
7 659 granitických hornin

Fázové diagramy živců

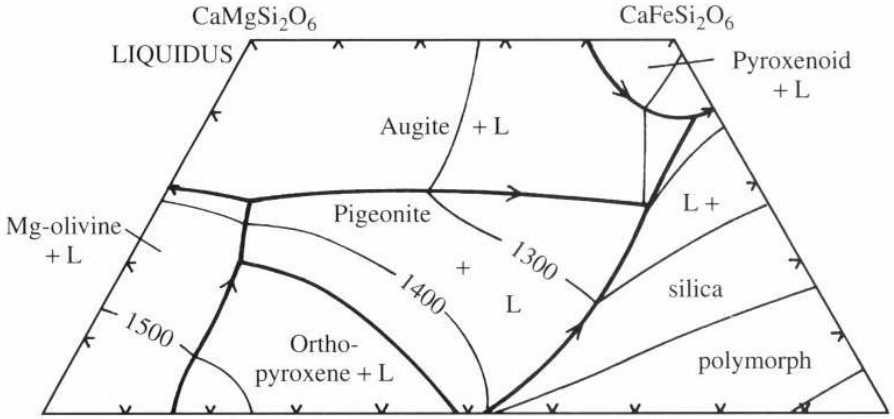
Ternární systém Kf-Ab-SiO_2

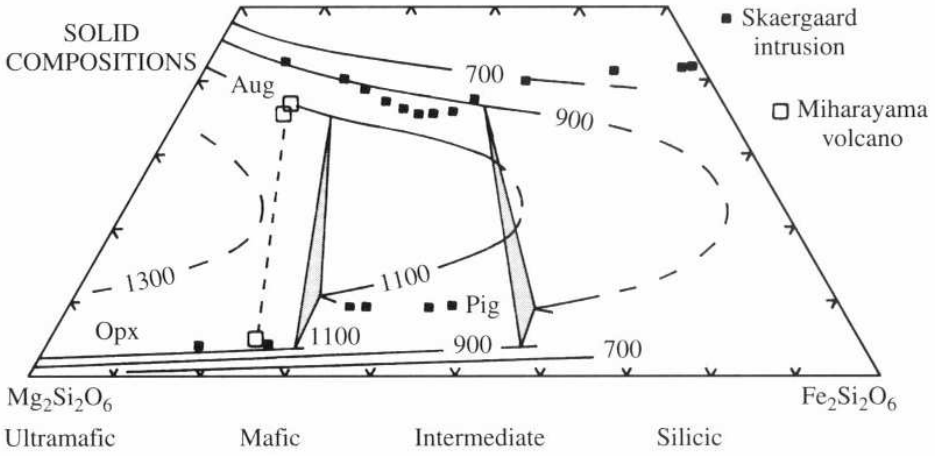
Frakční krystalizace





Přítomnost dalších fází: olivín a pyroxeny





- **Tři koexistující pyroxeny - trojúhelníky**
- **Plné čtverečky – Skaergaard intruze**
- **Prázdné čtverečky – fenokrysty z bazaltových proudů Mihara-yama vulkánu**

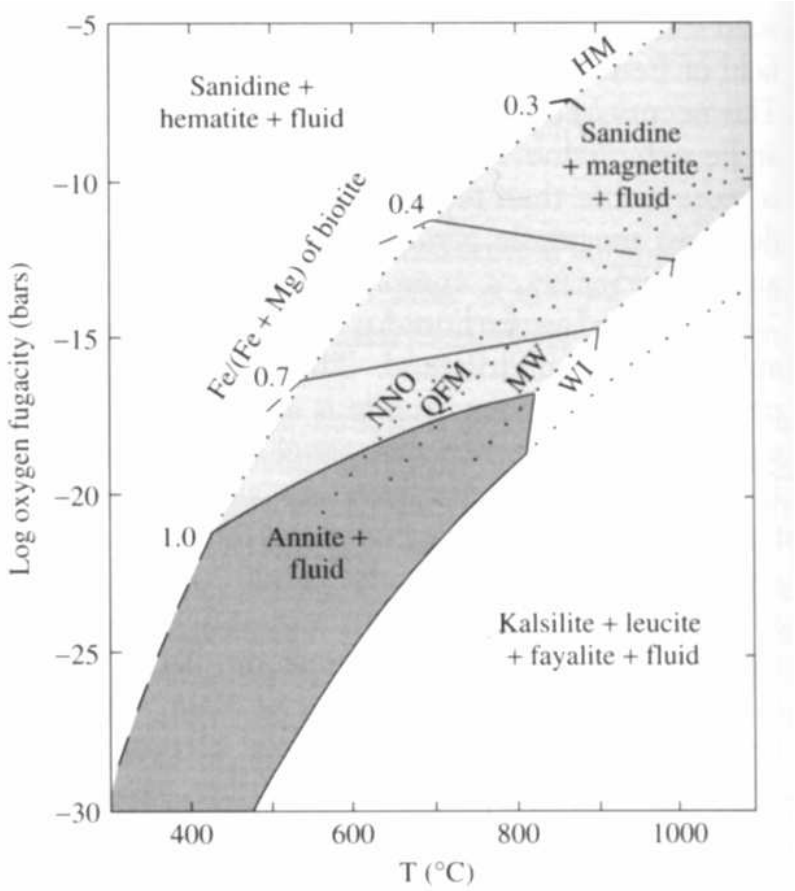
Fázové diagramy slíd a amfibolů

Stabilita Mg-Fe biotitu (Fe slída – annit)

$$KFe_3^{2+}AlSi_3O_{10}(OH)_2 + 3\ O_2 = KAlSi_3O_8 + 3\ Fe_2^{3+}O_3 + H_2O$$

$$KFe_3^{2+}AlSi_3O_{10}(OH)_2 + 0{,}5\ O_2 = KAlSi_3O_8 + Fe_2^{3+}Fe^{2+}O_4 + H_2O$$

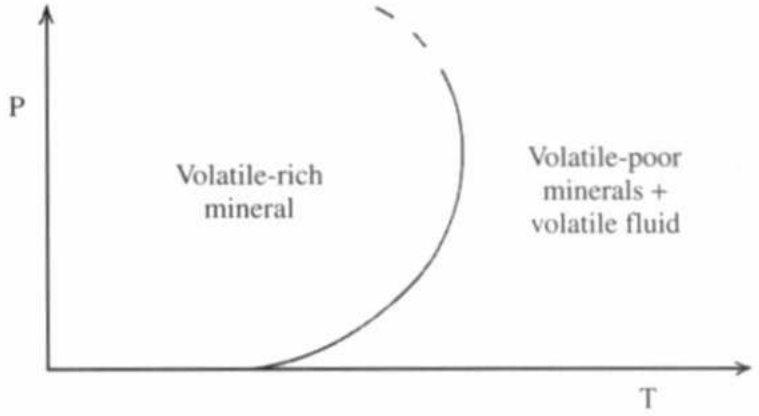
$$KFe_3^{2+}AlSi_3O_{10}(OH)_2 + 0{,}5\ O_2 = KAlSiO_4 + KAlSi_2O_6 + Fe_2^{2+}SiO_4 + 2\ H_2$$

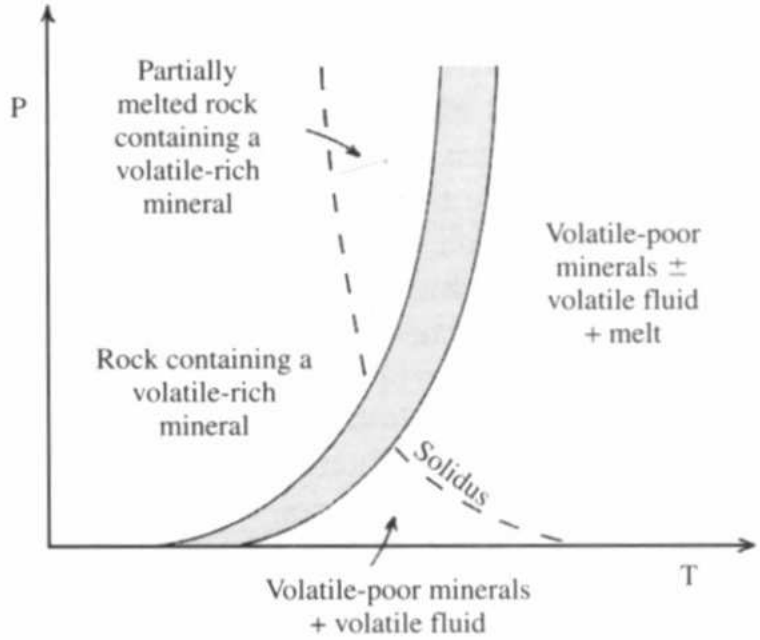


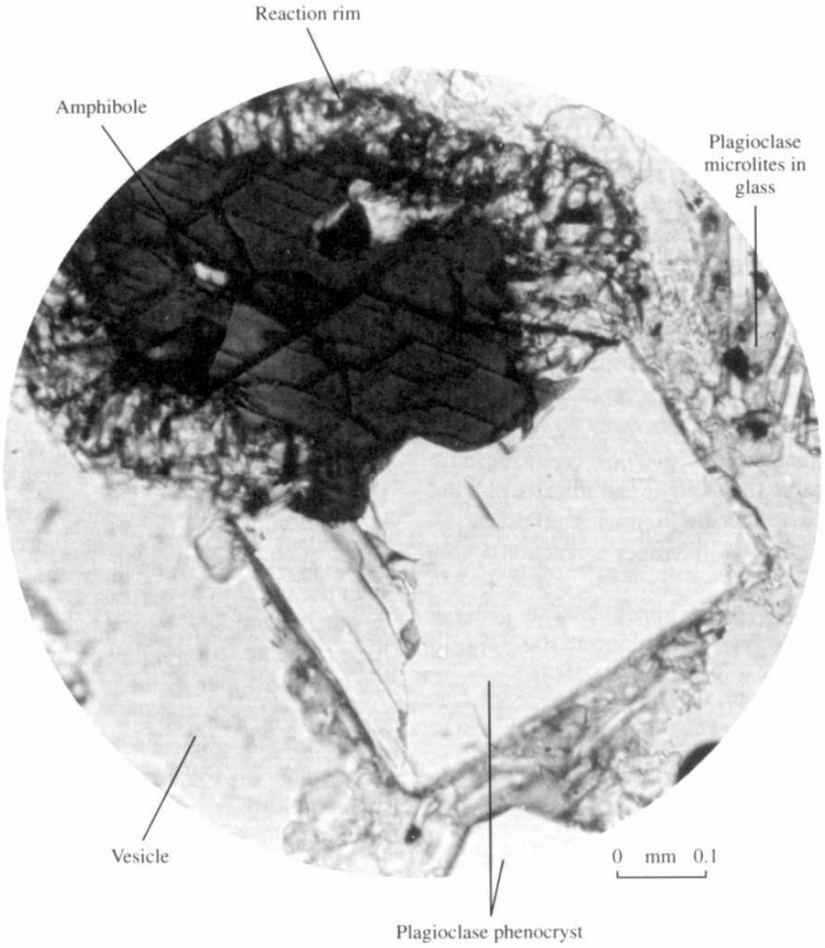
QFI: $Fe_2SiO_4 = 2\ Fe + SiO_2 + O_2$
WI: $2\ FeO = 2\ Fe + O_2$
MW: $2\ Fe_3O_4 = 6\ FeO + O_2$
QFM: $2\ Fe_2O_3 + 3\ SiO_2 = 3\ Fe_2SiO_4 + O_2$
HM: $6\ Fe_2O_3 = 4\ Fe_3O_4 + O_2$
NNO: $2\ NiO = 2\ Ni + O_2$ (nevyskytuje se v přírodě)

Termická stabilita minerálů s těkavými složkami

teplo + minerál bohatý na těkavé složky = minerál bez těkavých složek + fluidní fáze







St. Helen – rovnováha magmatu při 900 °C a 2,2 kbar (hloubka 8 km)

amfibol -> opx, cpx, plagioklas, ilmenit

amfibol reagoval s taveninou

Geotermometry a geobarometry

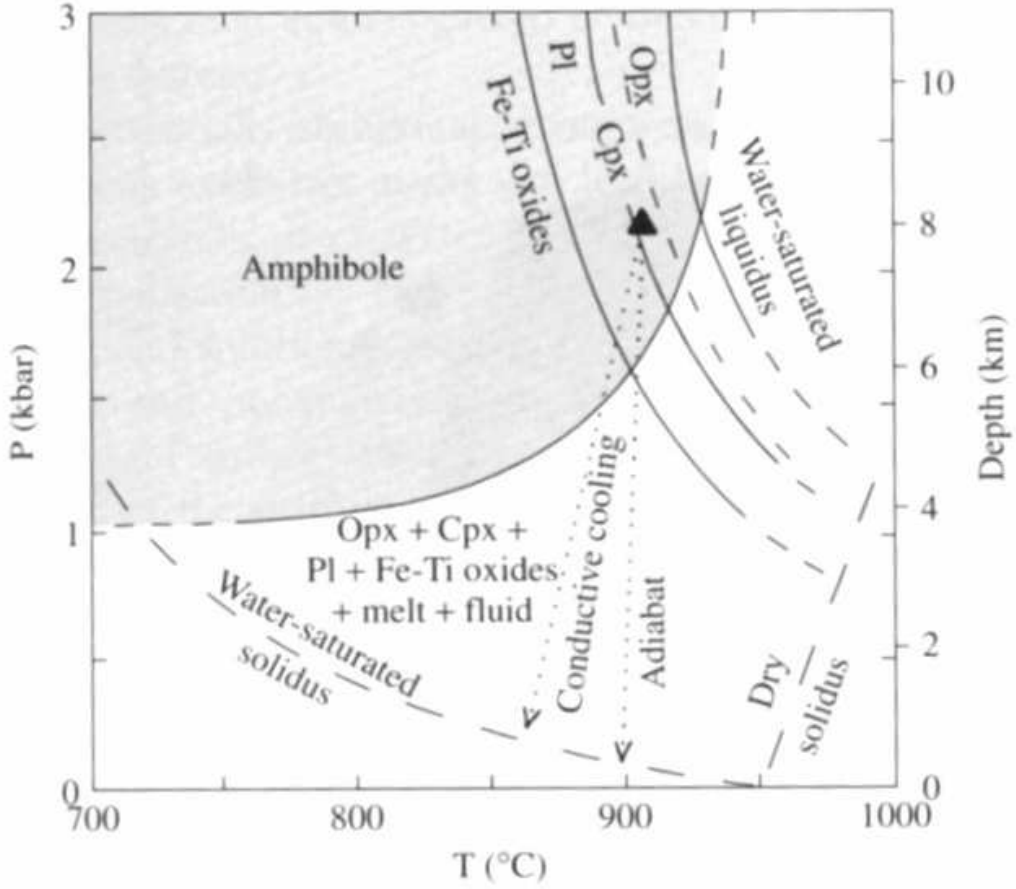
Fe-Ti oxidy:
ulvöspinel-magnetit Fe_2TiO_4-Fe_3O_4
ilmenit-hematit $FeTiO_3$-Fe_2O_3
Určíme: f_{O2} a T)

alkalický živec – plagioklas
Určíme: T

Cpx – opx
Určíme: T

Zastoupení Al v amfibolu
Určíme: P (musíme znát T, f_{O2})

Biotit + magnetit + K-živec
Určíme: fH2O (musíme znát P, T, f_{O2})



Odhad podmínek v magmatickém krbu před erupcí St. Helens (květen 1980).

Tečkovaná linie vyznačuje možné cesty výstupu magmatu, vedoucí k erupci.

Posouzení stavu rovnováhy v horninách

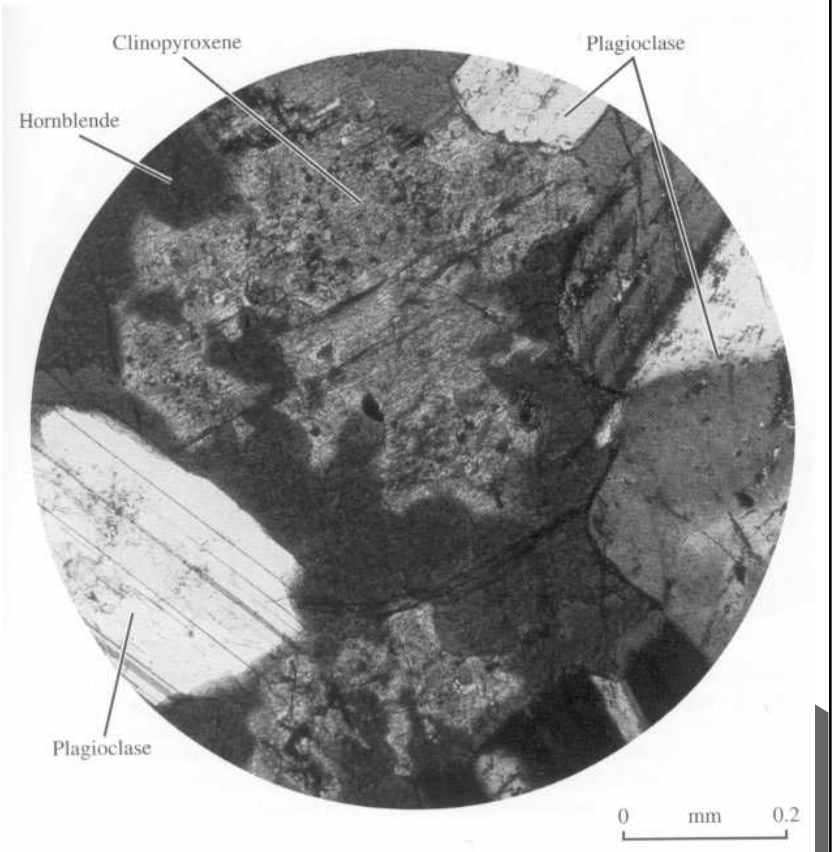
Užití geotermometrů a geobarometrů, stejně jako další interpretace geneze hornin, závisí na dosažení stabilní rovnováhy v průběhu krystalizace pozorované minerální asociace.

Rovnováha:

- **Omezení krystalů přirozenými krystalovými plochami, obklopenými sklem (původně taveninou)**
- **Další posouzení dosažení rovnováh závisí na konkrétních minerálech**

Nerovnováha (metastabilní stav):

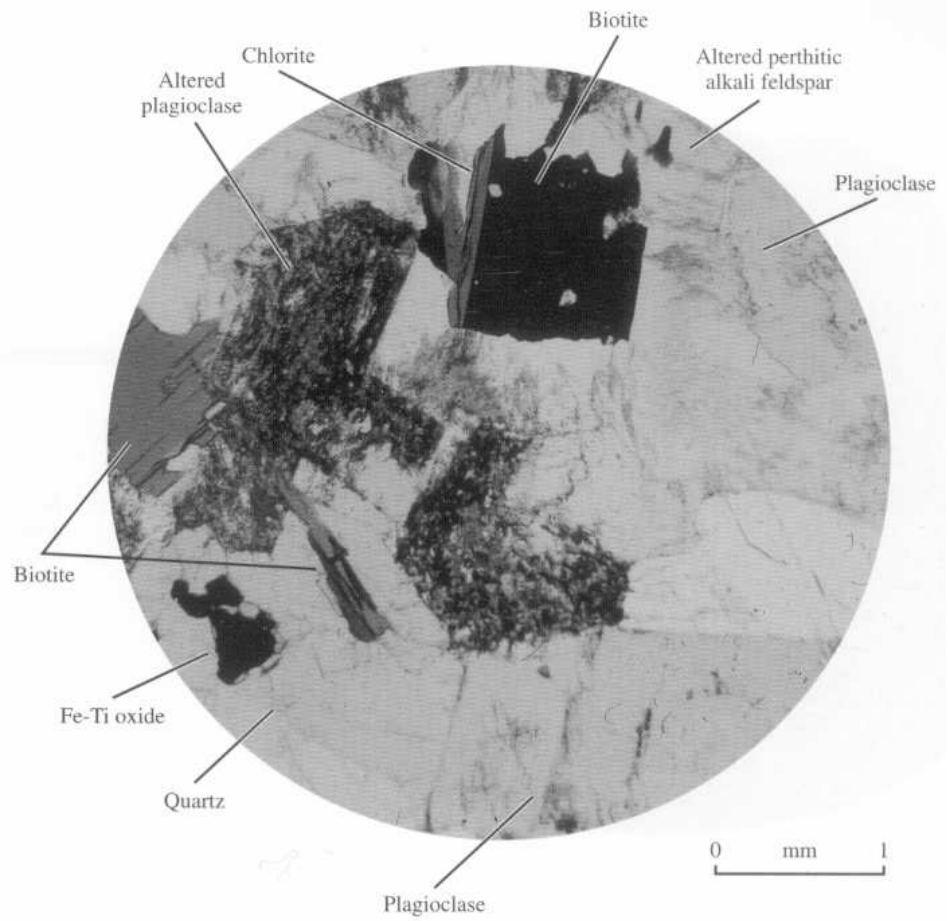
- **Izolovaná nepravidelná zrna minerálu v tavenině (parciální resorpce nebo rozpouštění)**
- **Reakční lemy jedné nebo více fází, které obklopují další nepravidelně omezený minerál (neúplná reakce)**
- **Zonální krystaly (nerovnovážná krystalizace). V některých případech představuje rovnováhu složení vnějšího lemu.**
- **Další indikátory: u vulkanických hornin přítomnost ol-Q, ol-pyroxen-sanidin, přítomnost dvou odlišných složení u minerálu jedné řady ss (mísení dvou odlišných magmat).**



Klinopyroxen parciálně resorbovaný amfibolem v dioritu.

Posouzení stavu rovnováhy v horninách

Granit alterovaný v pevné fázi – vysokoteplotní plagioklas a biotit rozloženy.



Biotit částečně nahrazený chloritem a plagioklas nahrazen fylosilikátem a epidotem(?).

Zkřížené nikoly.

Reakce v pevné fázi u magmatických hornin

Snížení teploty po utuhnutí

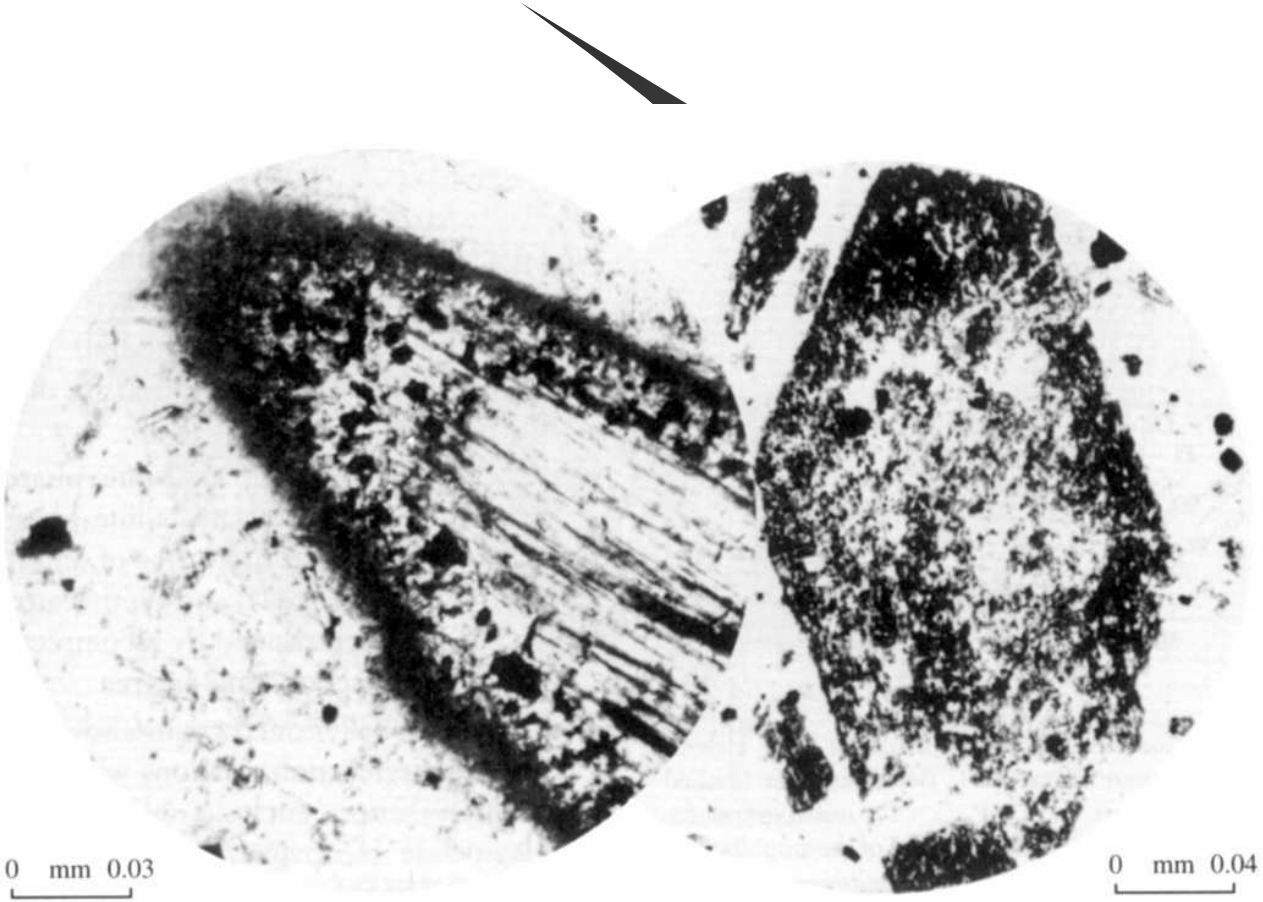
- **reakce pomalé**
- **reakce neúplné**
- **produkty velmi jenozrnné**
- **často metastabilní stav**

Vulkanické horniny:

- **železo částečně oxidováno na Fe3+**
- **amfiboly a biotity ztrácejí vodu**
- **rozdíl mezi reakcemi s taveninou: produkty velmi jemnozrnné**

Plutonické:

- **při nižších teplotách je zachováván zvýšený tlak: epidot, chlority, jílové minerály**



Částečně (vlevo) a úplně (vpravo) rozložený amfibol (produkty: Fe-Ti oxidy, cpx, opx, živce)