



Granity a kontinentální kůra
II
(geochemické modelování granitů)

David Buriánek

- **II. 1. Experimenty-úvod**
- **II. 2. Binární systém alkalických živců Ab-An**
- **II. 3. Binární systém alkalických živců Ab-Kfs**
- **II. 4. System $KAlSi_2O_6 - SiO_2$**
- **II. 5. Systém Qtz-Ab-Or (Haplogranity)**
- **II. 6. Systém Ab-H₂O**
- **II. 7. Třísložková soustava Kfs-Ab-An**
- **II. 8. Vodou saturovaný granitový systém (Qtz-Kfs-Pl)**
- **II. 9. Oxidačně redukční podmínky a vliv slíd a amfibolu**
- **II. 10. Role vybraných prvků v granitové tavenině**
 - A. Chování fosforu v magmatickém procesu
 - B. Chování fluoru v magmatickém procesu
 - C. Chování bóru v magmatickém procesu
- **II. 11. Systém Qtz-Ab-Or-Al₂O₃**
- **II. 12. Systém Qtz-Ab-Or-B₂O₃**
- **II. 13. Systém KFMASH**
- **II. 14. Voda v tavenině granitů**
- **II. 15. Shrnutí experimentů**

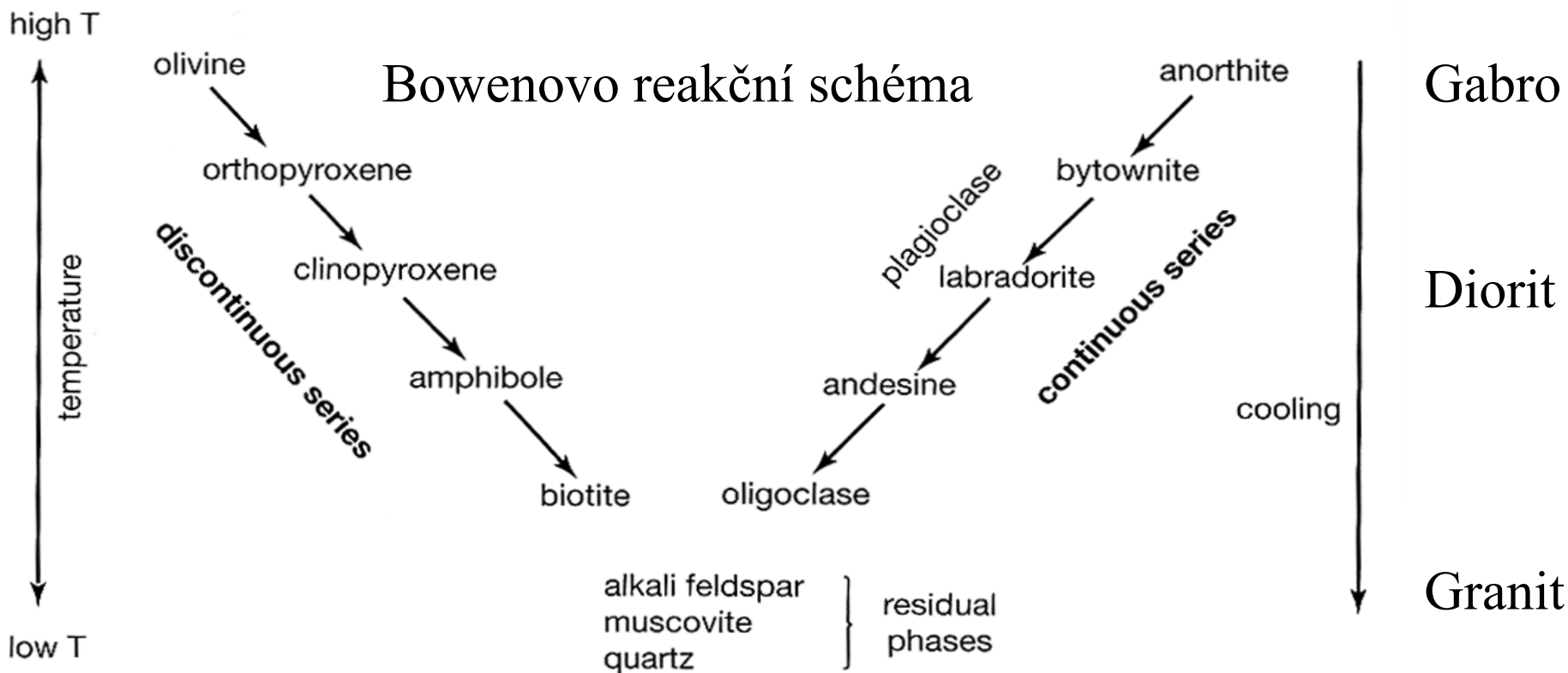
II. 1. Experimenty-úvod

- Ve soustavách složených ze dvou komponent mají invariantní asociace čtyři fáze, univariantní asociace mají tři fáze, divariantní asociace mají dvě fáze a trivariantní asociace mají jednu fázi.
- je zpravidla uveden v pascálech (v MPa nebo GPa), obvykle ale v barech (1 bar = 0,1 MPa)
- Vnější podmínky pro platnost většiny použitých stavových diagramu: děj je izochorický (stejnotlaký – tj probíhá při neměnném okolním tlaku) a většinou také dostatečně pomalý aby mohly probíhat difuzní děje v pevné látce.
- Pole stabilních asociací jsou oddělena křivkou **likvidu** (l) a linií **solidu** (s).
- **Difuze** je pronikání částic (zpravidla molekul i atomů) z oblasti vyšší koncentrace do oblasti nižší koncentrace, probíhající do té doby, než se koncentrace vyrovnají. K difúzi dochází v plynech, kapalinách a omezeně i v pevných látkách.

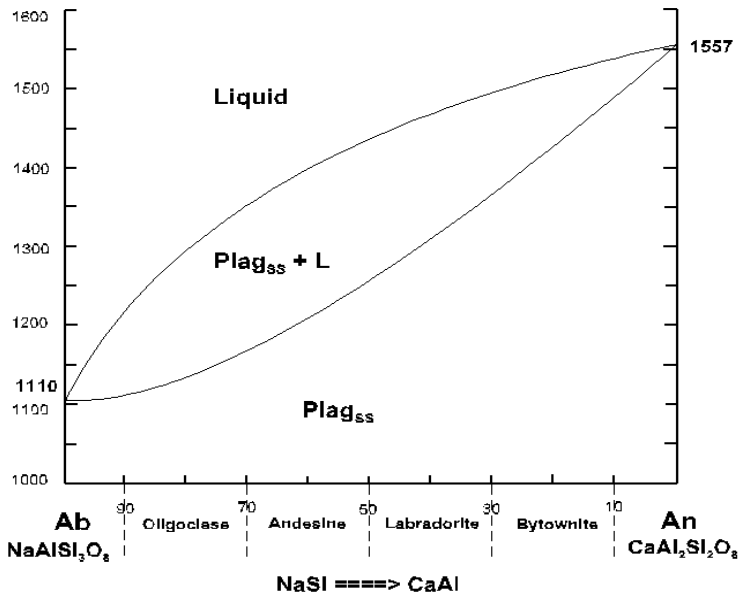
Vznik granitické taveniny



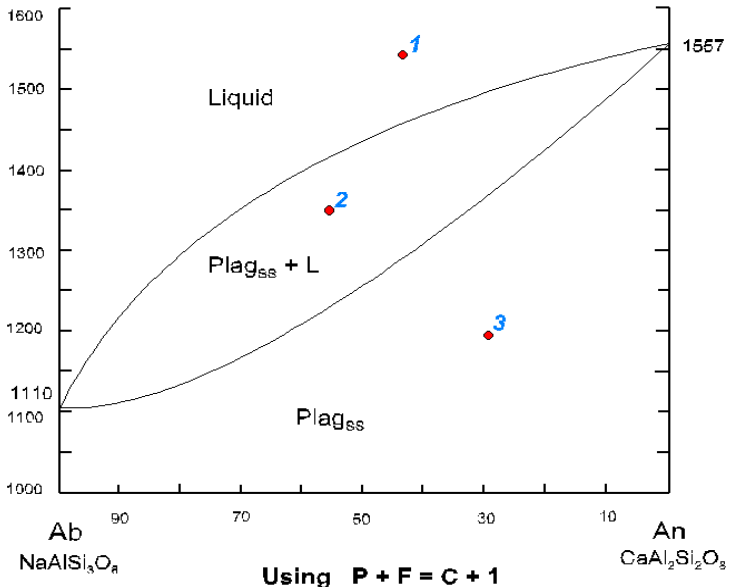
- 1) tavením sedimentárního protolitu v kůře (jílovce, pískovce)
- $Ms+Qz+Pl = melt+Sill+Kfs$ (740°C, 7kbar)
- $Bt+Sill+Qz+Pl = melt+Grt/Crd+Kfs$ (850°C, 10 kbar)
- $Bt+Qz+Pl = melt+Opx\pm Cpx+Kfs$ (900°C, 10 kbar)
- 2) intenzivní frakcionací plášťového magmatu



II. 2. Binární systém alkalických živců Ab-An



Phase Rule



At Point 1
 $P = 1$
 $C = 2$
 $F = 2$

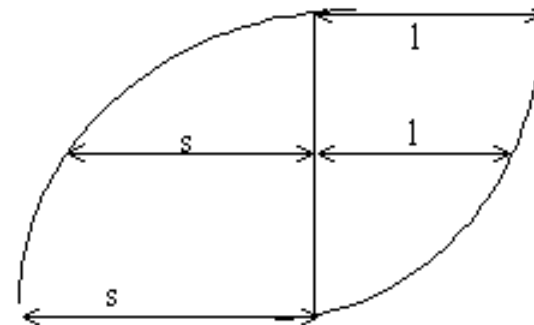
At Point 2
 $P = 2$
 $C = 2$
 $F = 1$

At Point 3
 $P = 1$
 $C = 2$
 $F = 2$

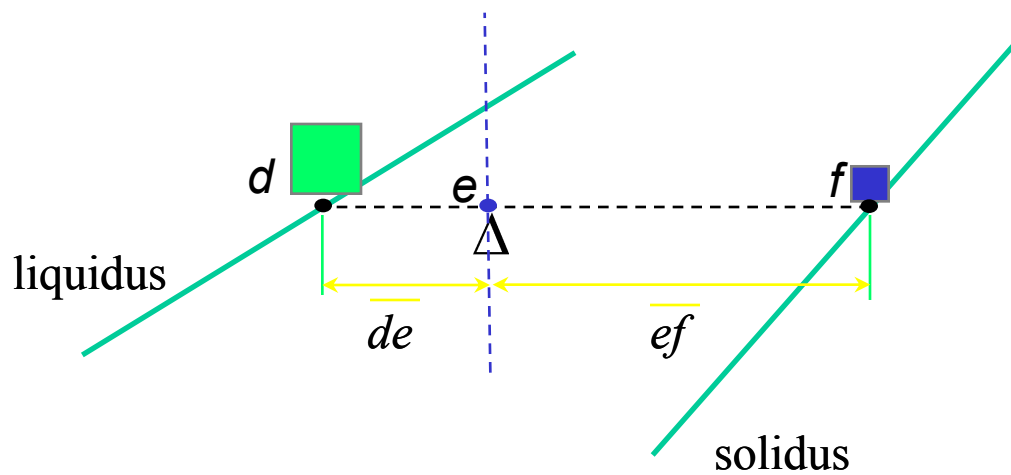
- Plagioklasy tvoří izomorfní řadu s úplnou mísivostí
- **Likvidus:** křivka v T-X diagramu určuje spodní hranici taveniny bez krystalů a zároveň popisuje složení taveniny, která koexistuje v rovnováze s krystaly.
- **Solidus:** křivka určuje spodní hranici výskytu taveniny v systému
- Likvidus a solidus vytváří smyčku, která spojuje body tání čistého albitu a anortitu
- V tomto univariantním systému spolu koexistují v dvoufázové oblasti (2) krystaly s vyšším obsahem An a tavenina s vyšším obsahem Ab než je průměrné složení systému.

Princip pákového pravidla:

$$\frac{\text{■ Množství taveniny}}{\text{■ Množství pevné fáze}} = \frac{\overline{ef}}{\overline{de}}$$

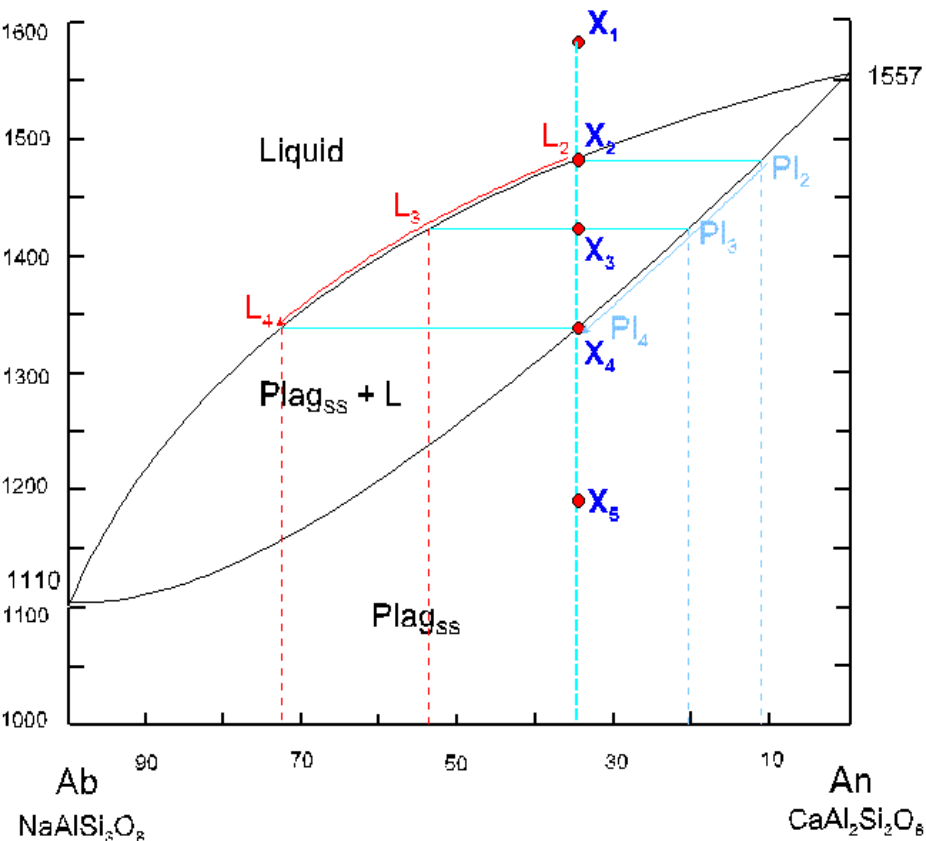


kde d = složení taveniny, f = složení solidu
a e = celkové složení



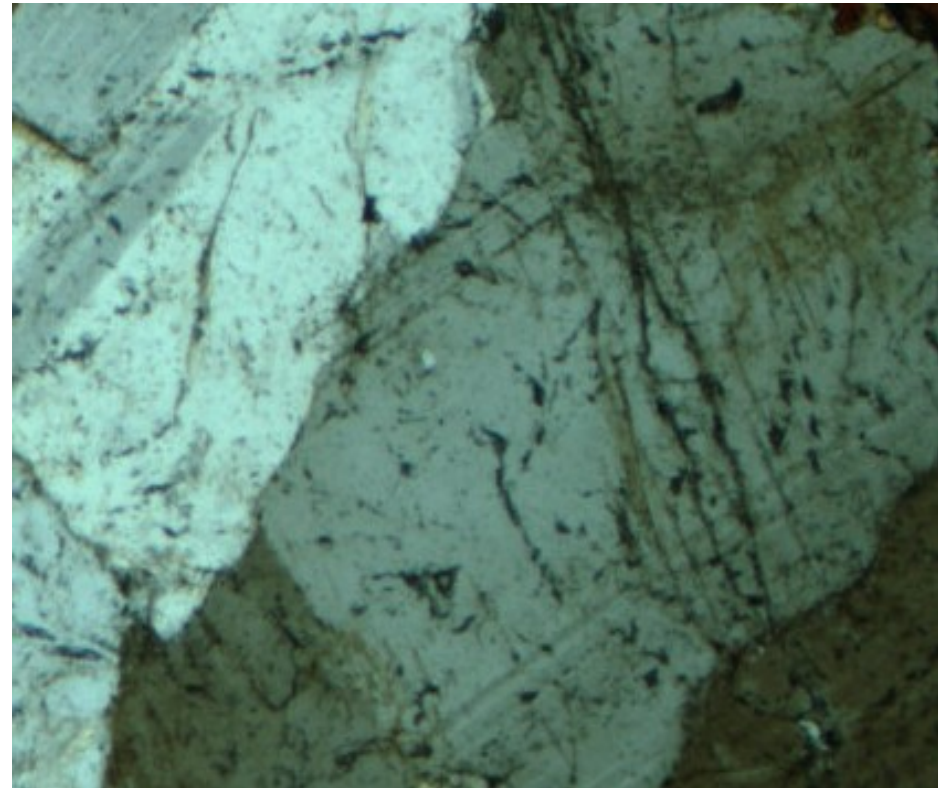
- **Rovnovážná krystalizace**
- Musí docházet k difuzní výměně iontů mezi taveninou a krystaly přičemž ta je rychlejší než krystalizace.

Equilibrium Crystallization



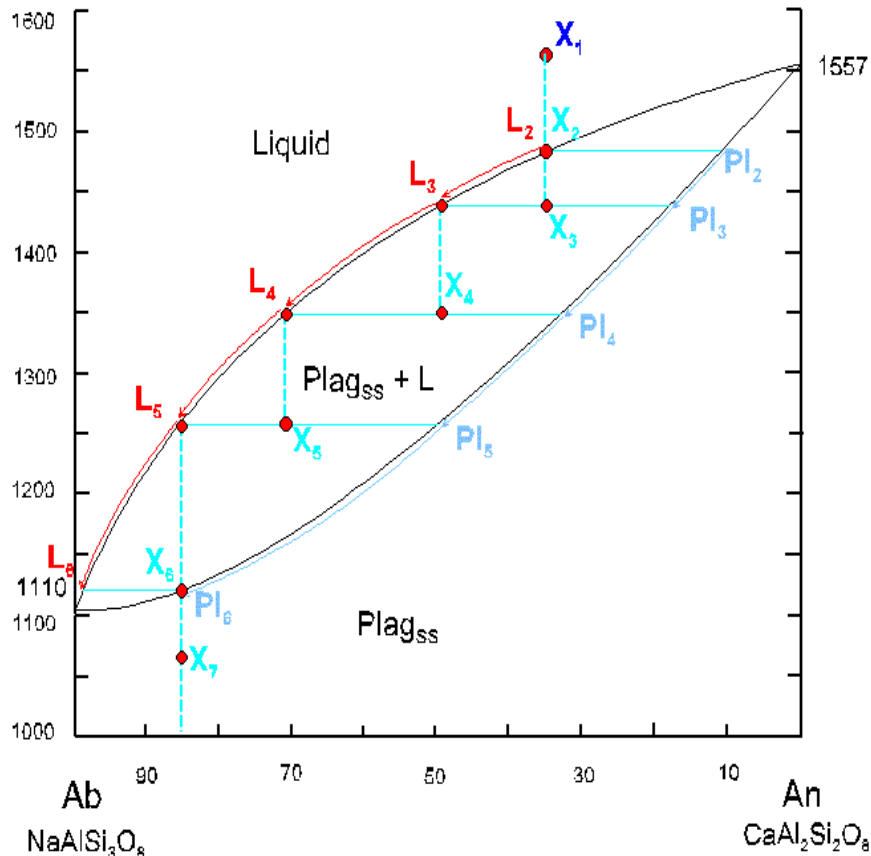
Composition X - 65% An - 35% Ab. Bulk Composition remains unchanged, so our final solid must be a mixture of An + Ab in the proportions 65:35. Liquid compositions change from L_2 to L_4 and is in equilibrium with plagioclase which changes composition from Pl_2 to Pl_4 .

- výsledkem jsou chemicky homogenní krystaly
- mají stejné složení jako původní tavenina



- **Frakční krystalizace**
- Krystaly a tavenina spolu nemají možnost reagovat v důsledku oddělení krystalů (gravitační diferenciacie nebo rychlá krystalizace).

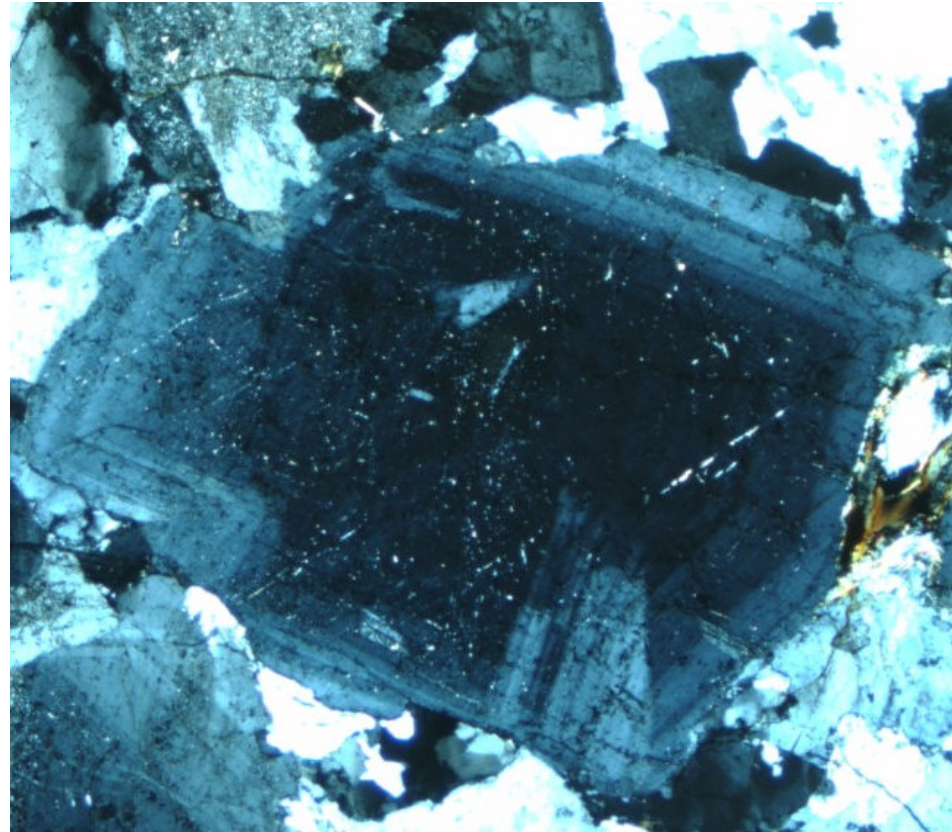
Fractional Crystallization



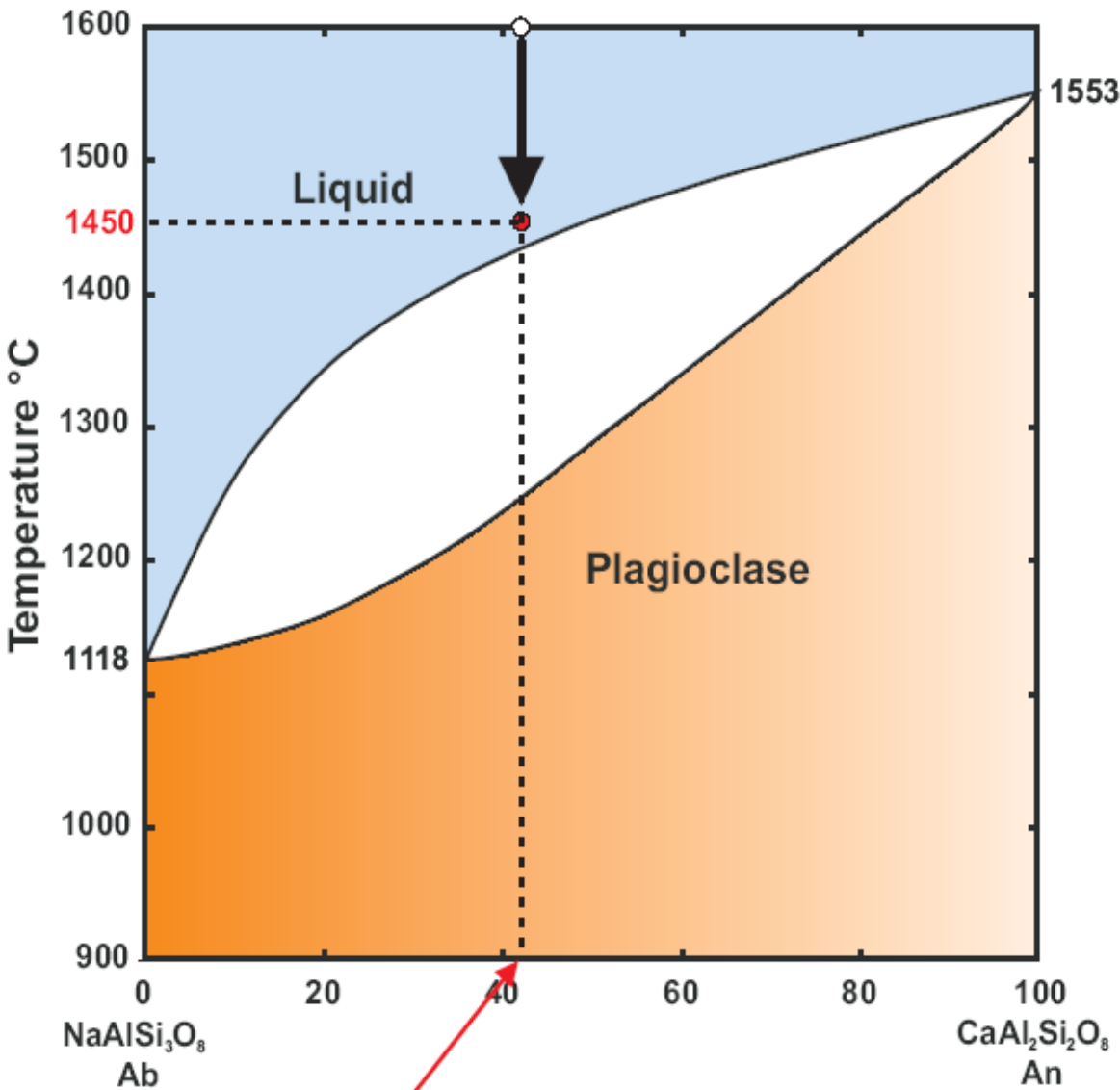
With each batch of crystals removed a new liquid is left over and it begins crystallizing a new plagioclase of composition shown on the solidus surface.

What is the composition of the last liquid and the final solid produced as result of pure fractional crystallization of any initial bulk composition?

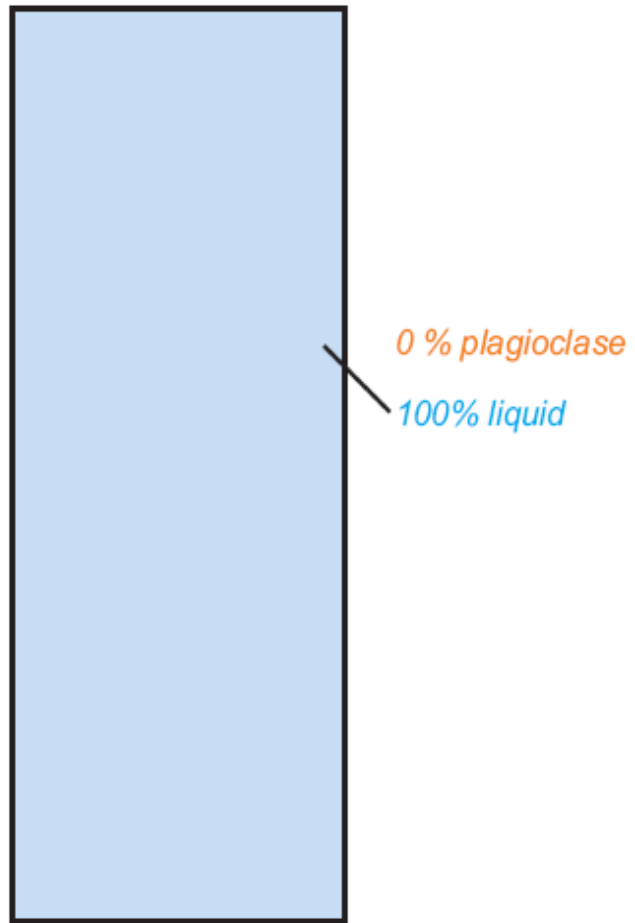
- výsledkem jsou chemicky zonální krystaly okraje krystalů mají v ideálním případě složení čistého Ab



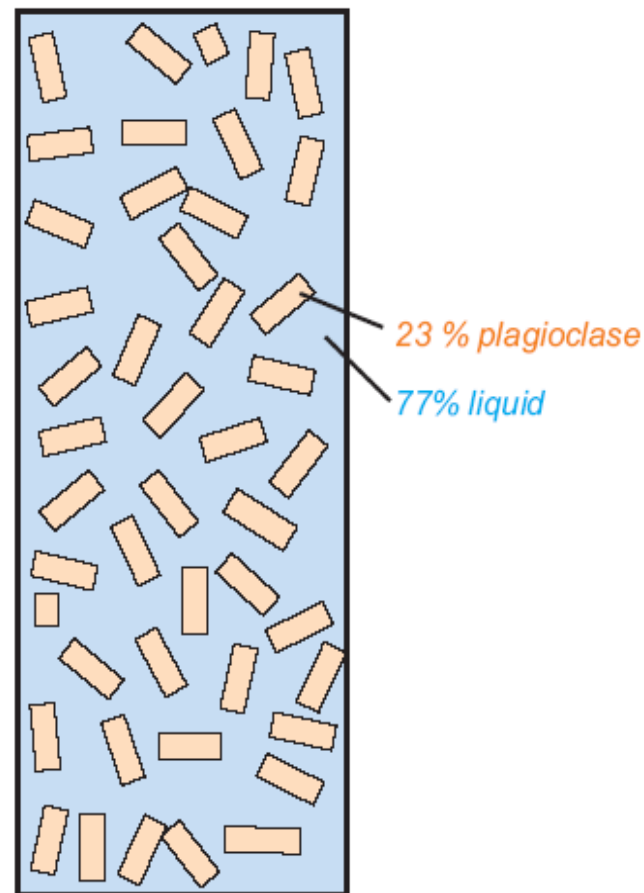
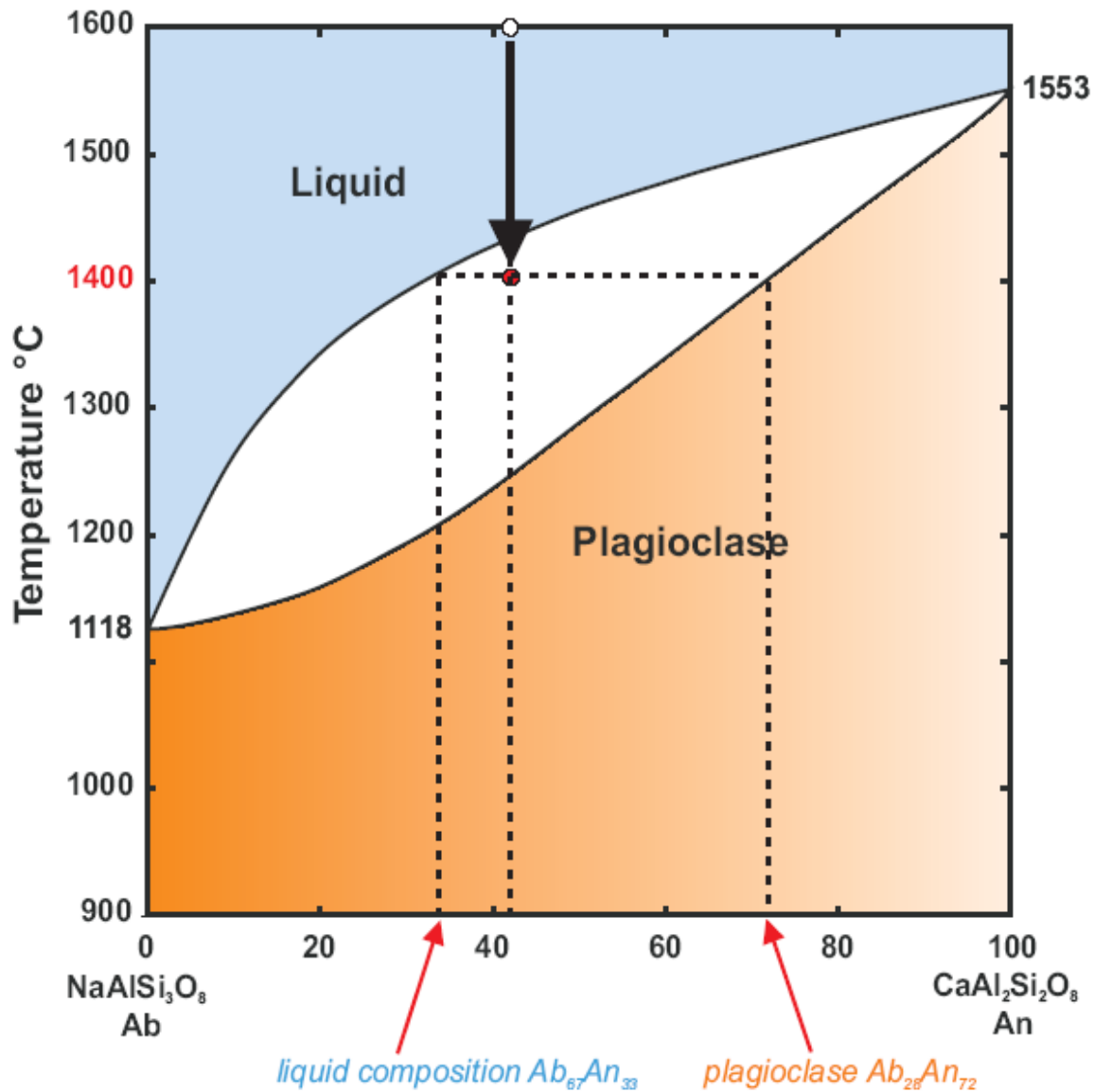
Albite-Anorthite System at 0.1 Mpa (1 atmosphere)



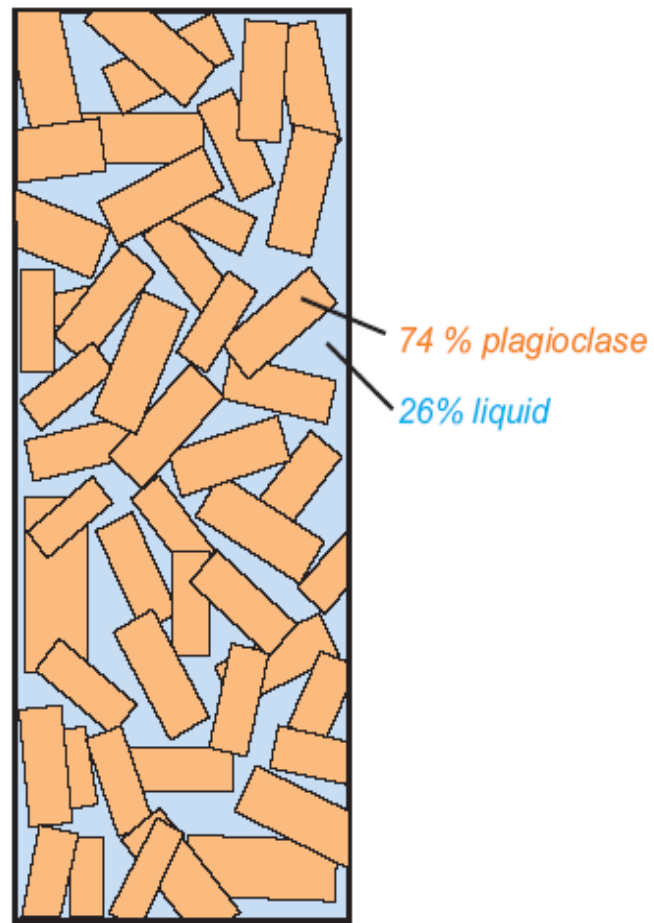
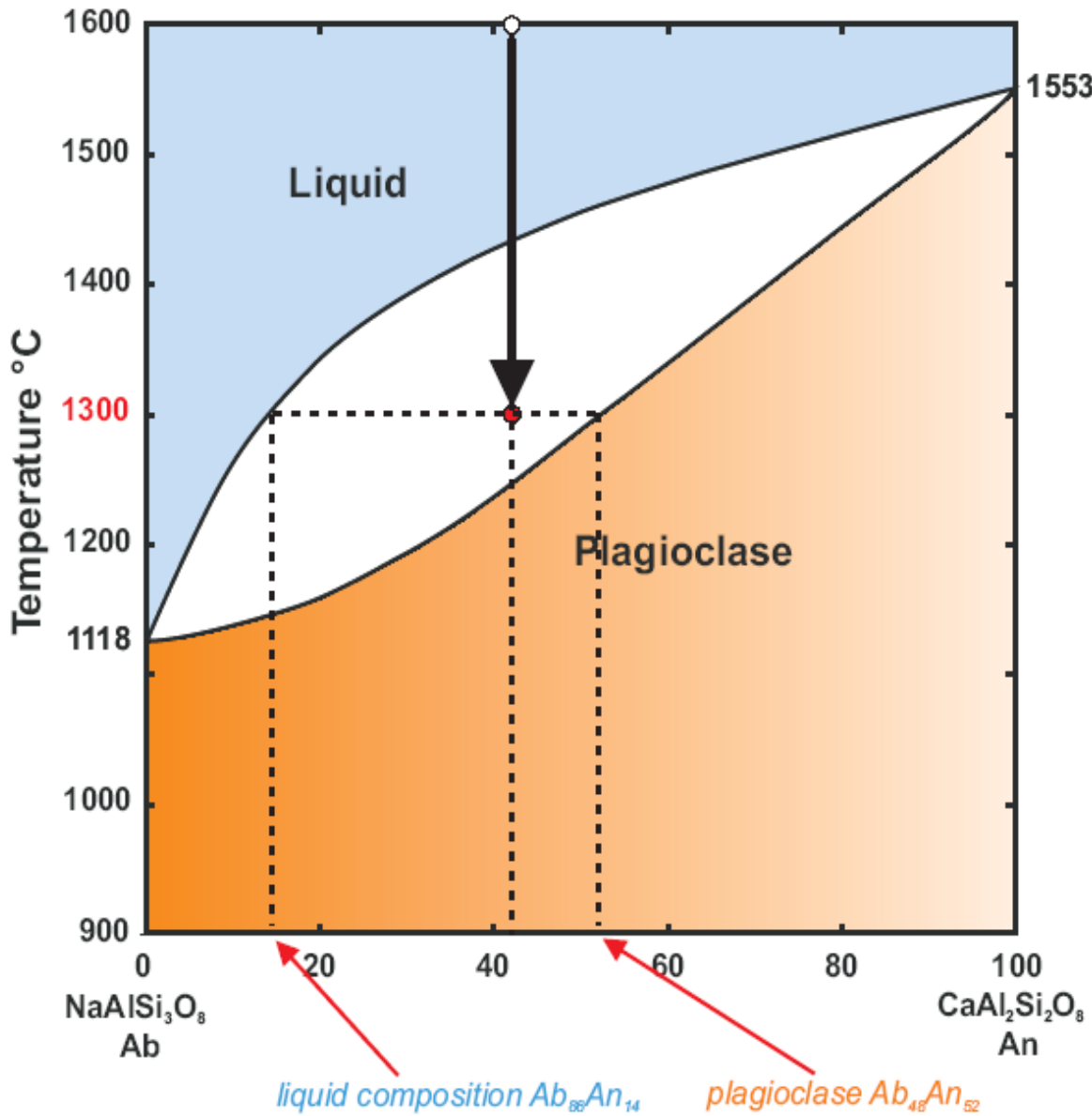
liquid composition $\text{Ab}_{58}\text{An}_{42}$ no plagioclase crystals



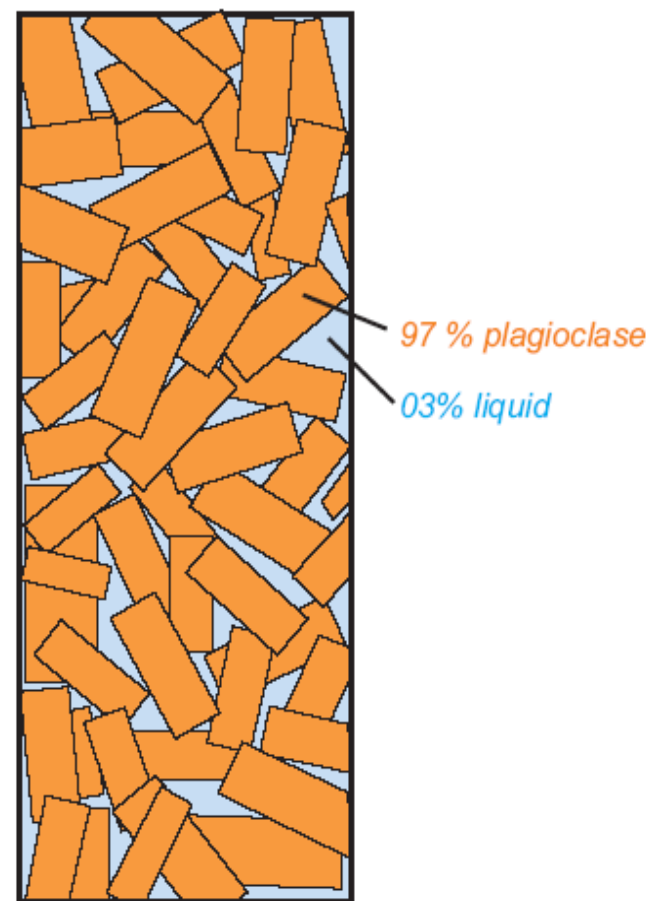
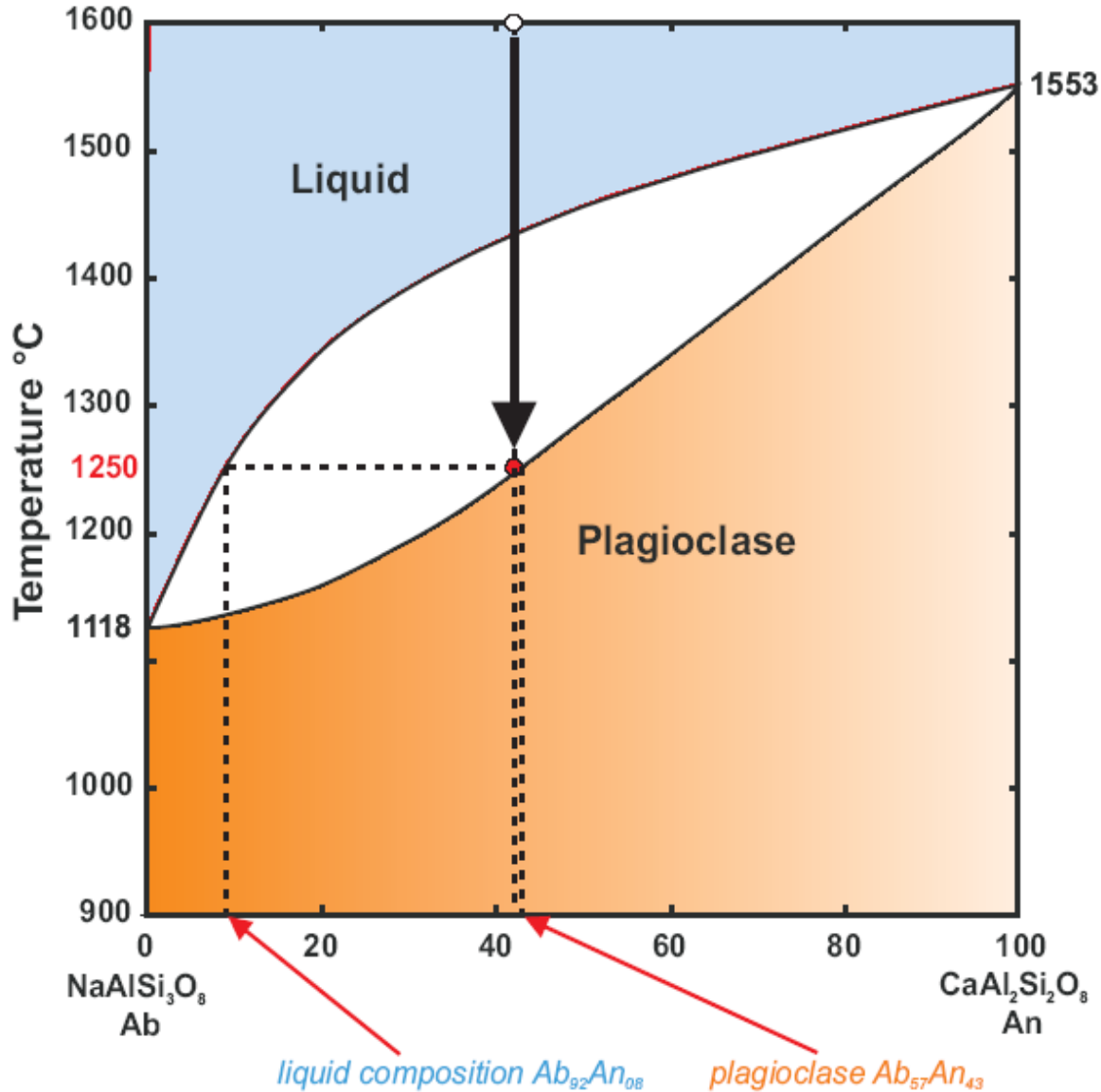
Albite-Anorthite System at 0.1 Mpa (1 atmosphere)



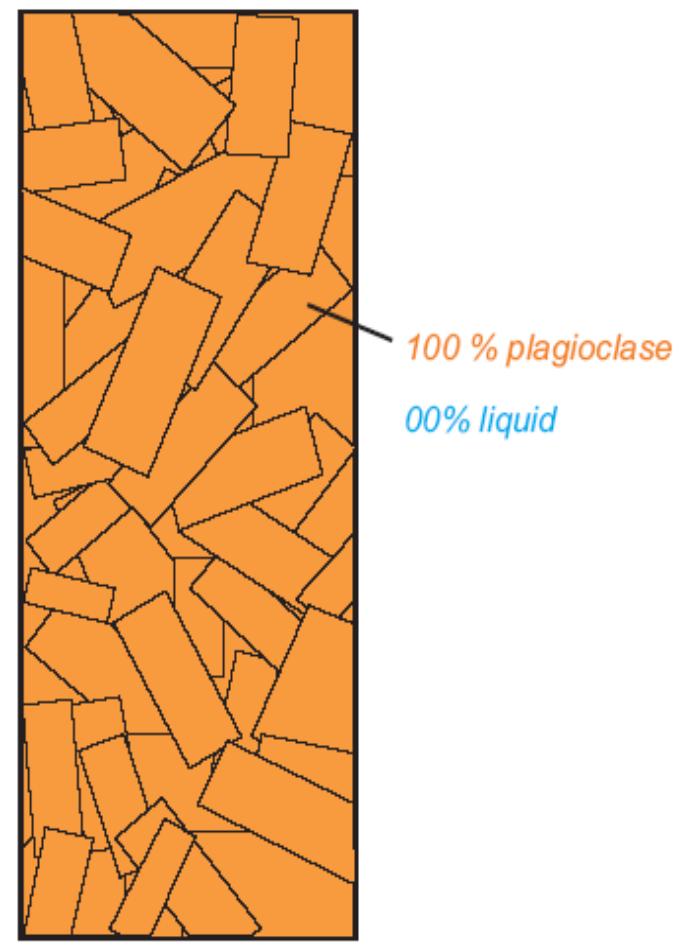
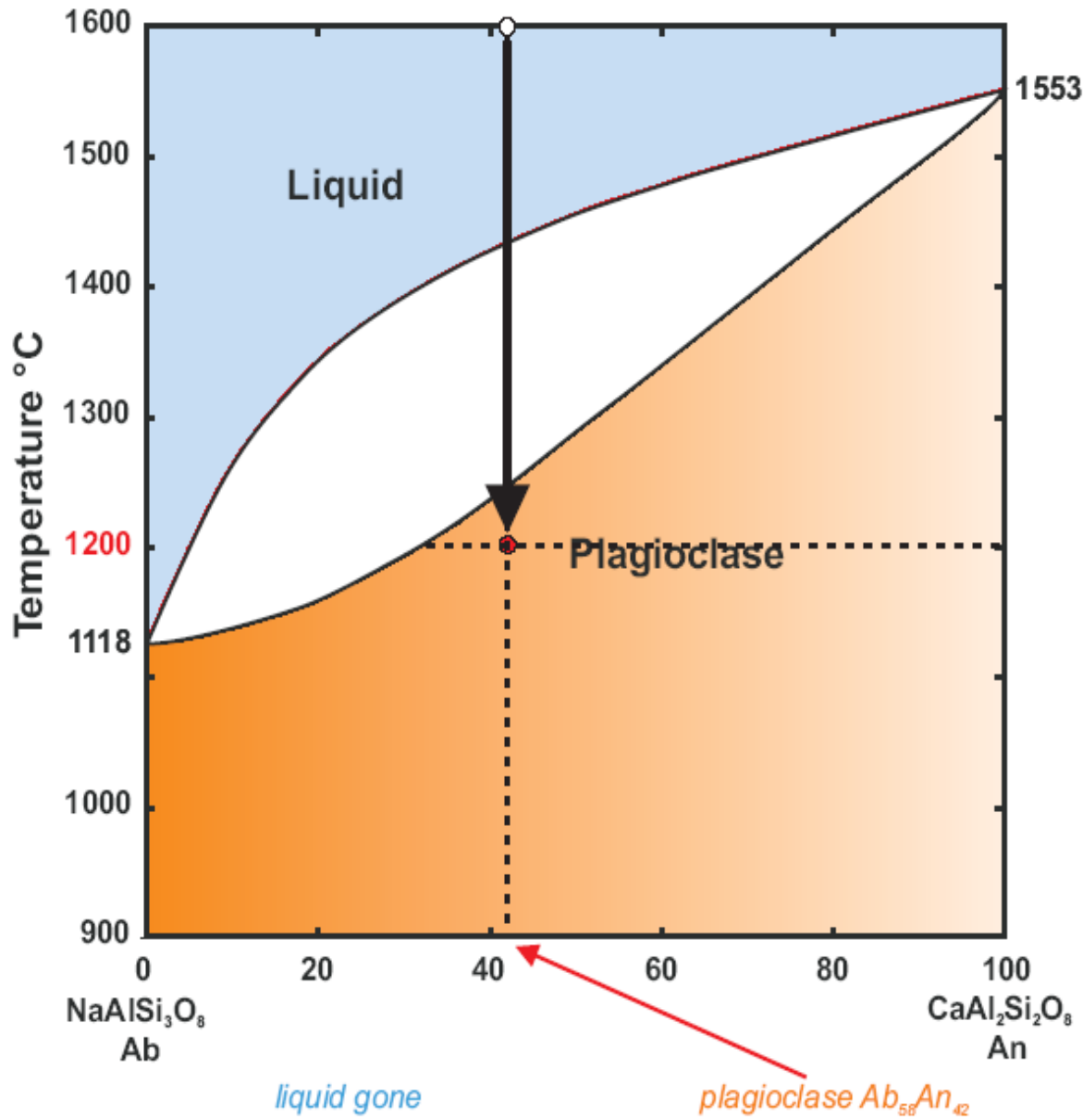
Albite-Anorthite System at 0.1 Mpa (1 atmosphere)



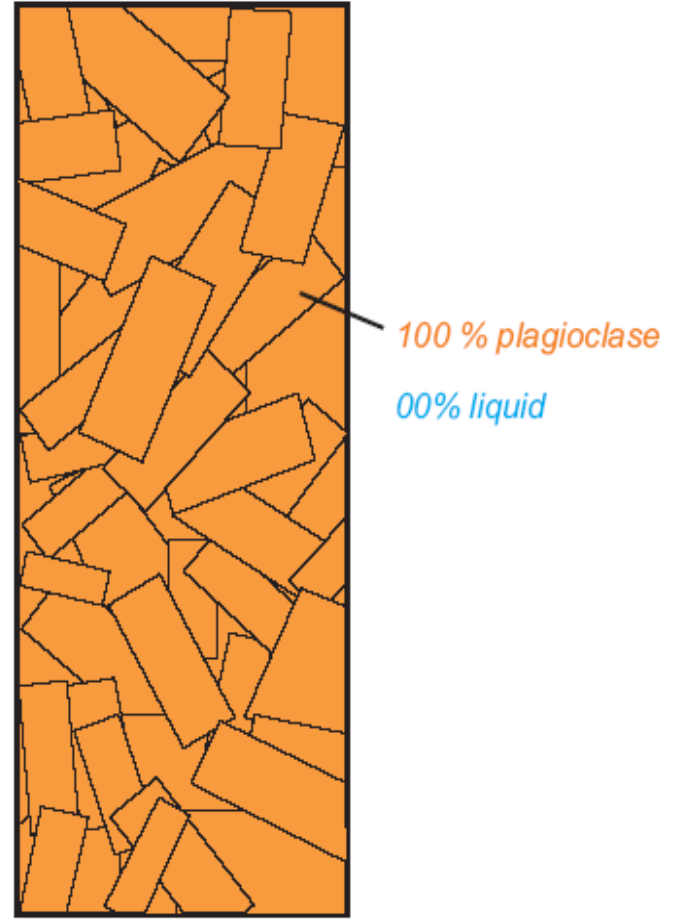
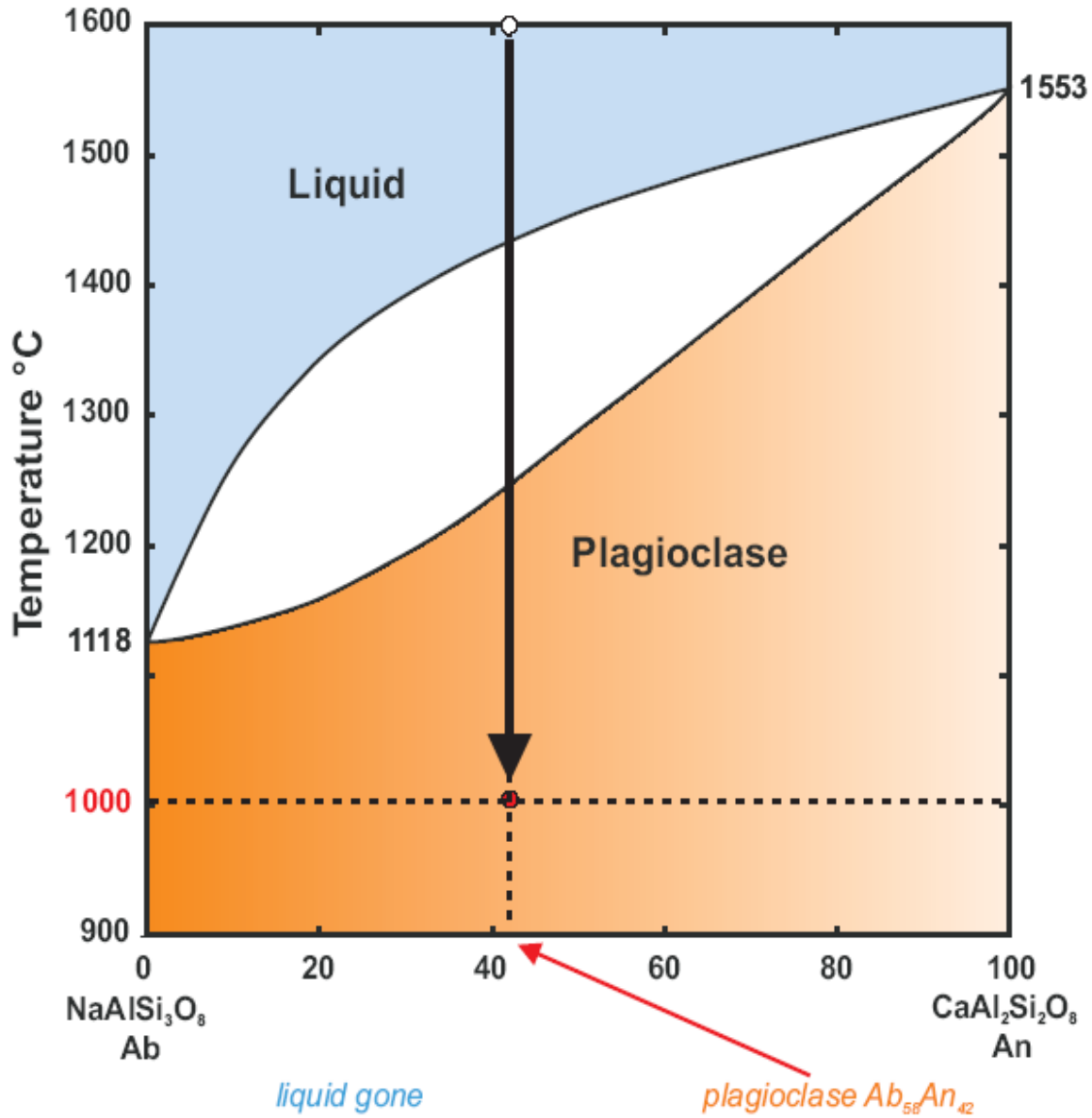
Albite-Anorthite System at 0.1 Mpa (1 atmosphere)



Albite-Anorthite System at 0.1 Mpa (1 atmosphere)



Albite-Anorthite System at 0.1 Mpa (1 atmosphere)



• Přidáním vody případně dalších komponent snížíme teplotu krystalizace

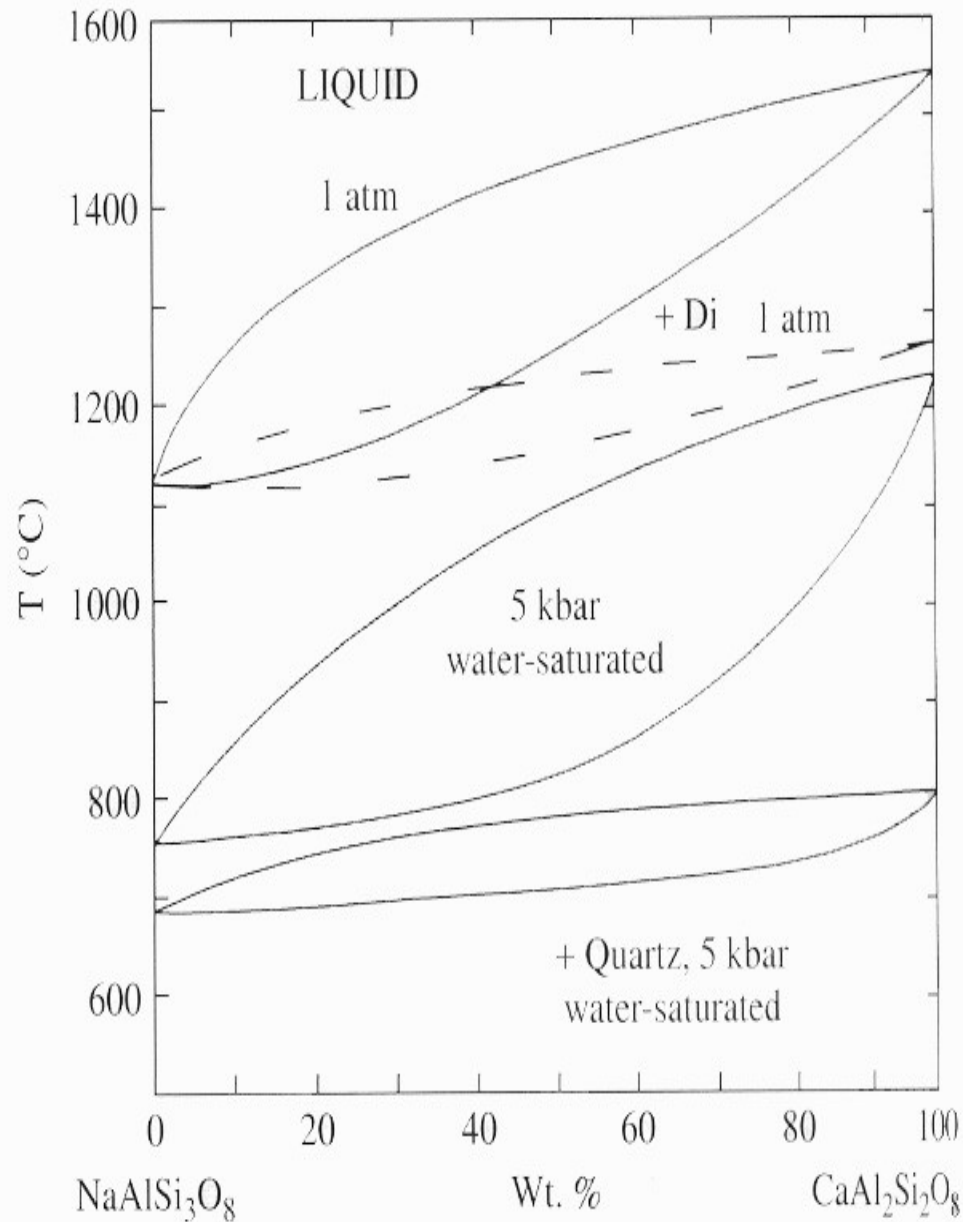
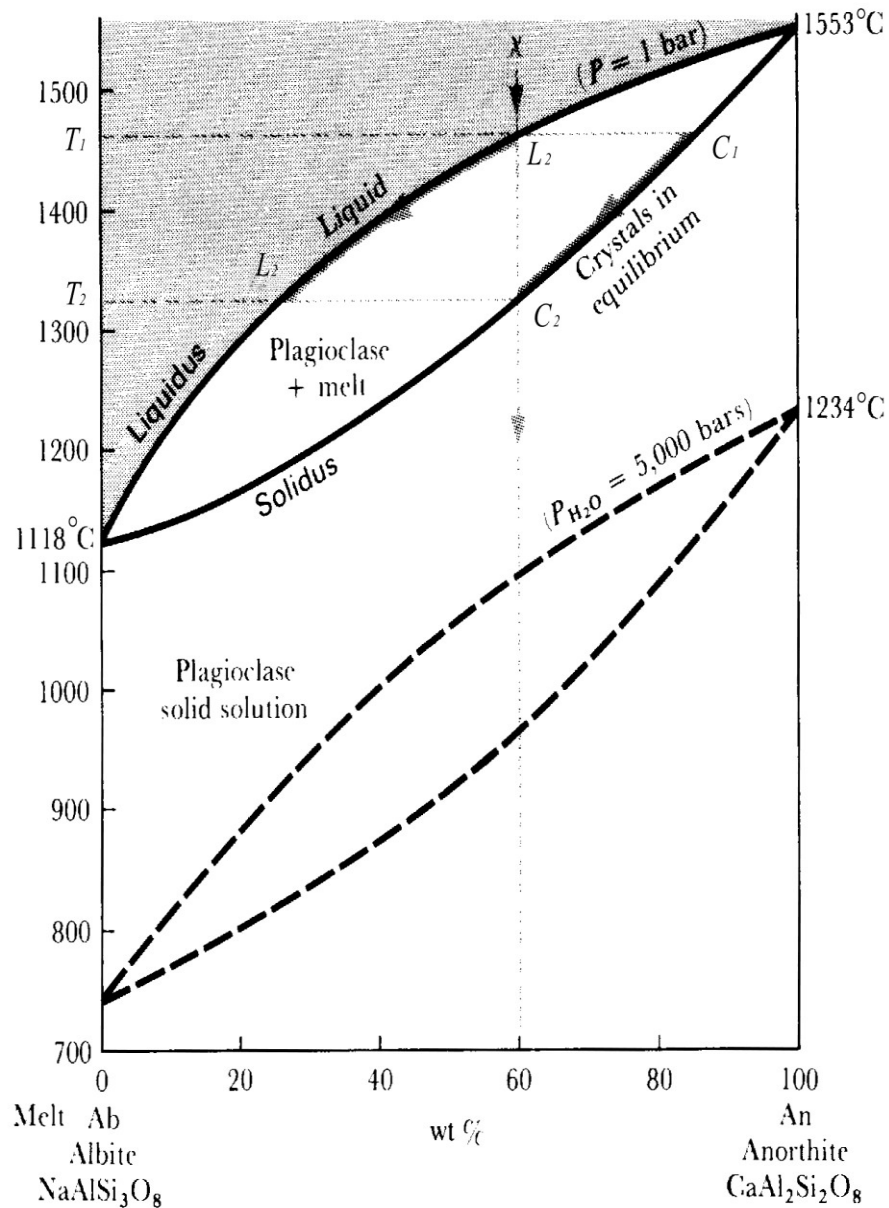


Figure 4-4 The plagioclase series.

(Based on Bowen, 1913, p. 583, and Yoder and others, 1957.)

Diagram (Johannes, 1978; Morse, 1980) ukazující vliv tlaku H₂O a další komponenty (Di) na teplotu tavení v binárním systému An-Ab

• Za nižších tlaků je teplota krystalizace nízká

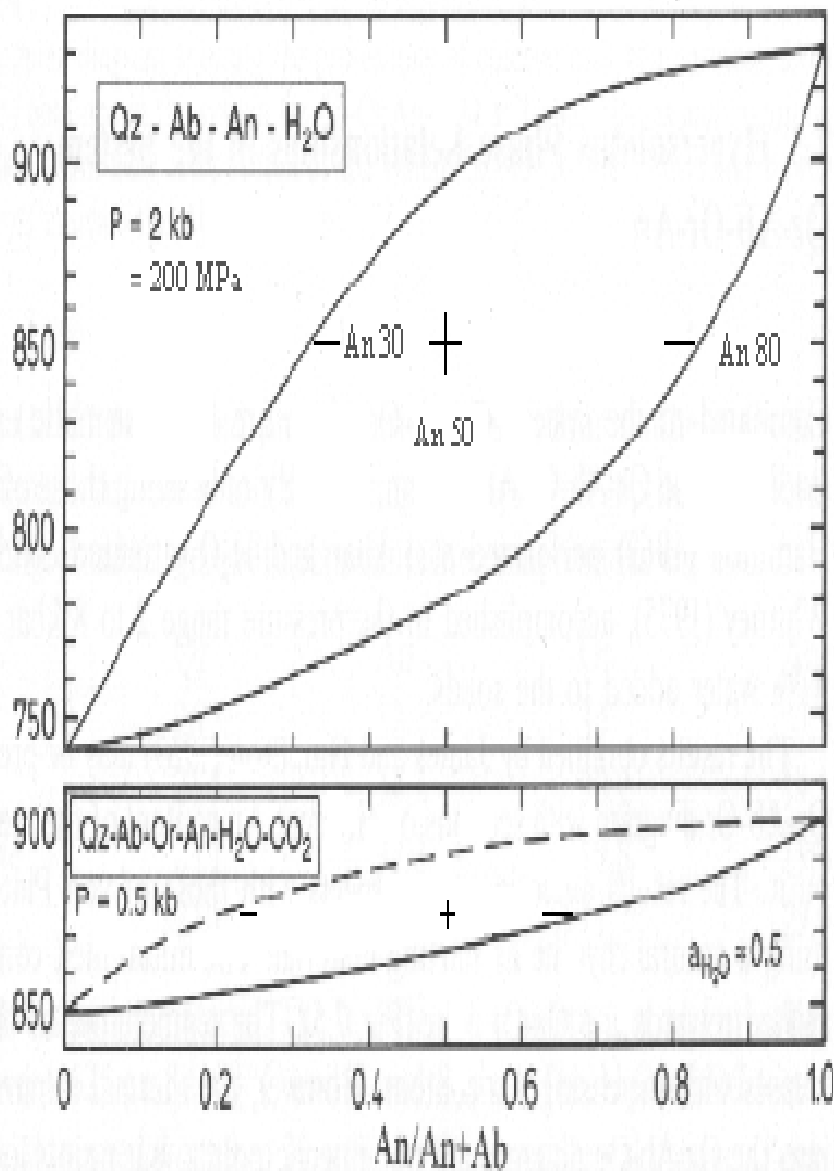


Diagram (Johannes, 1989, Contrib. Min. Pet. 84, 264 - 273) ukazuje že, pokud do systému přidáme Qtz, vodu a případně Or teplota se sníží a celá smyčka je plošší

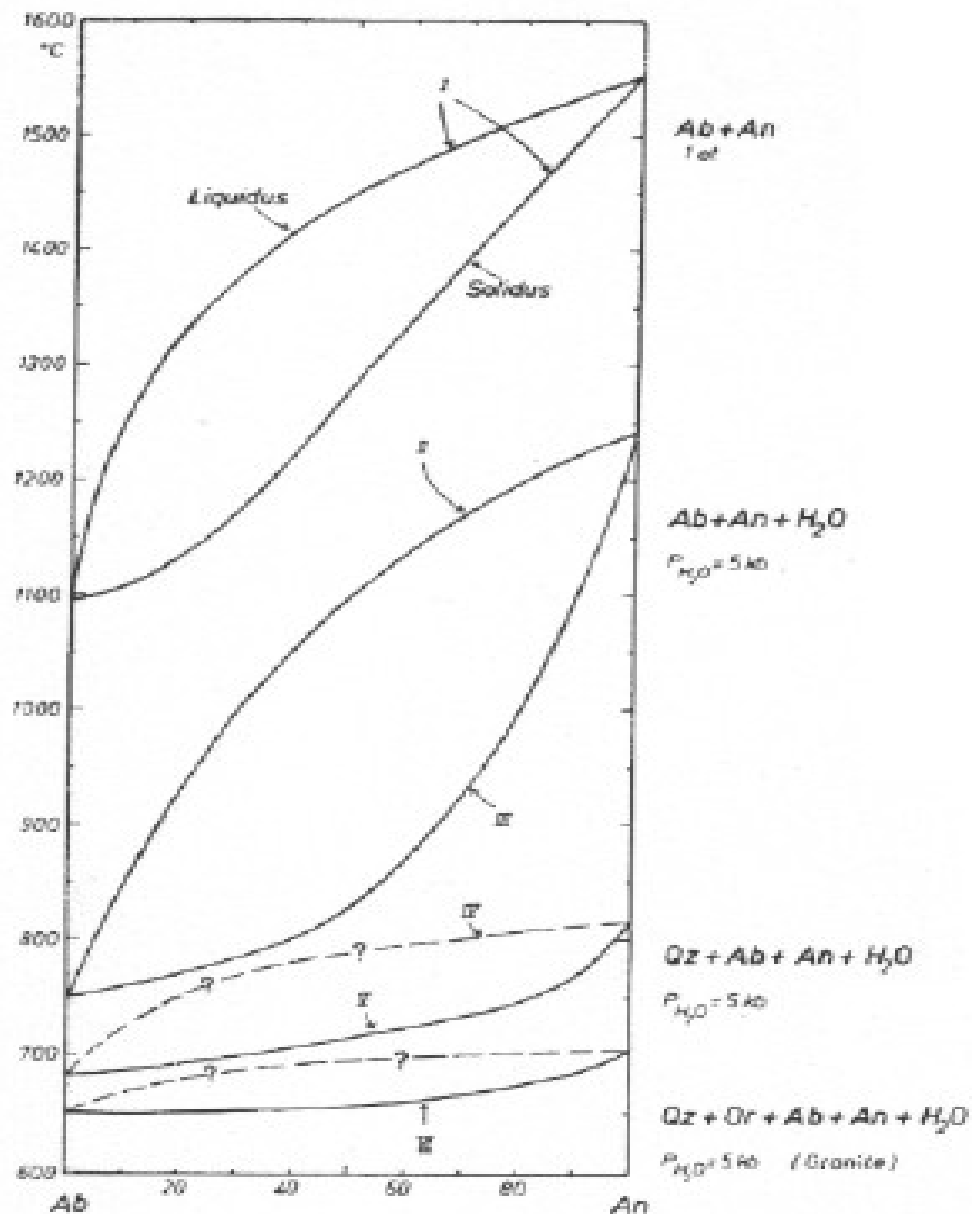
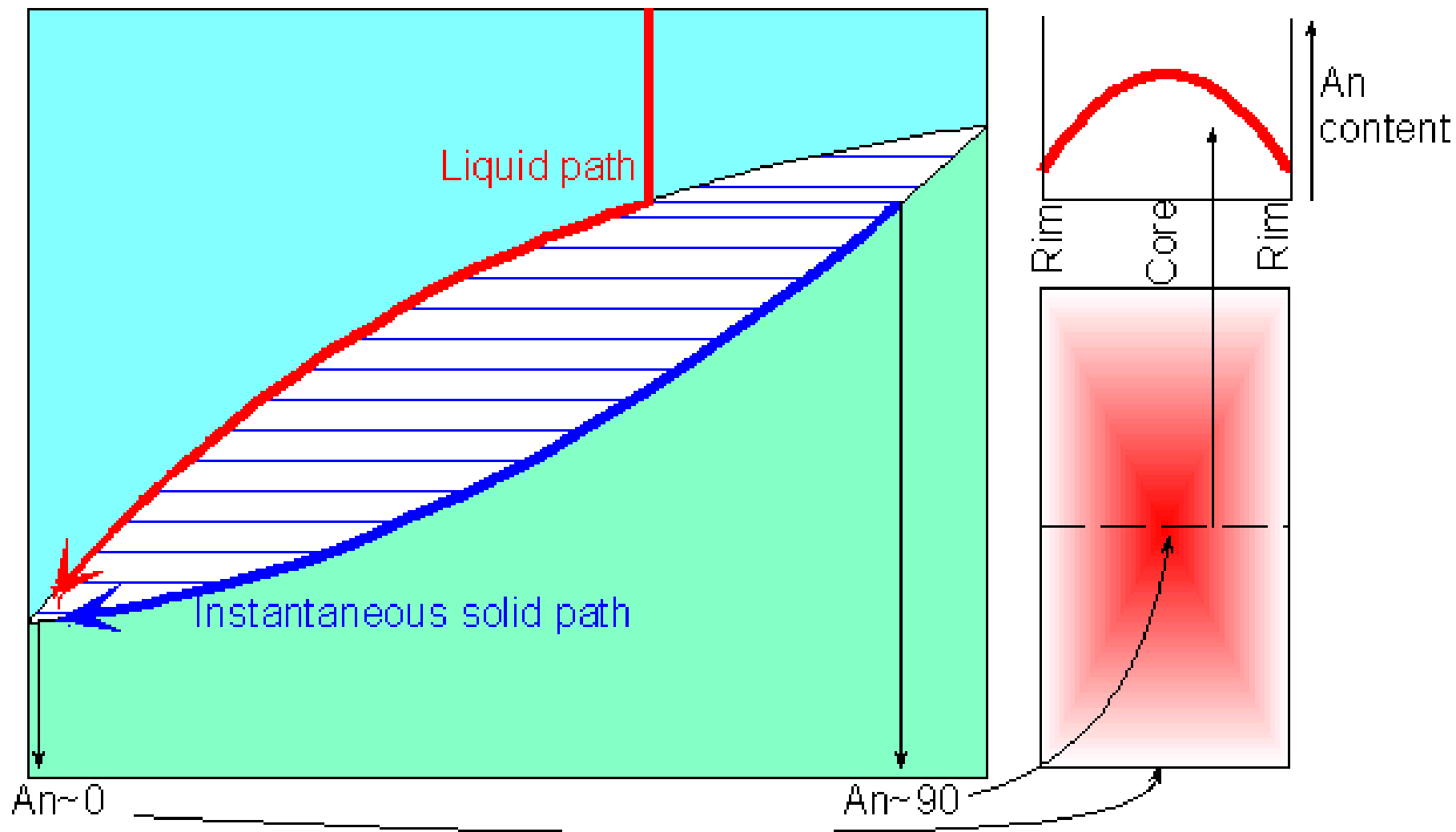


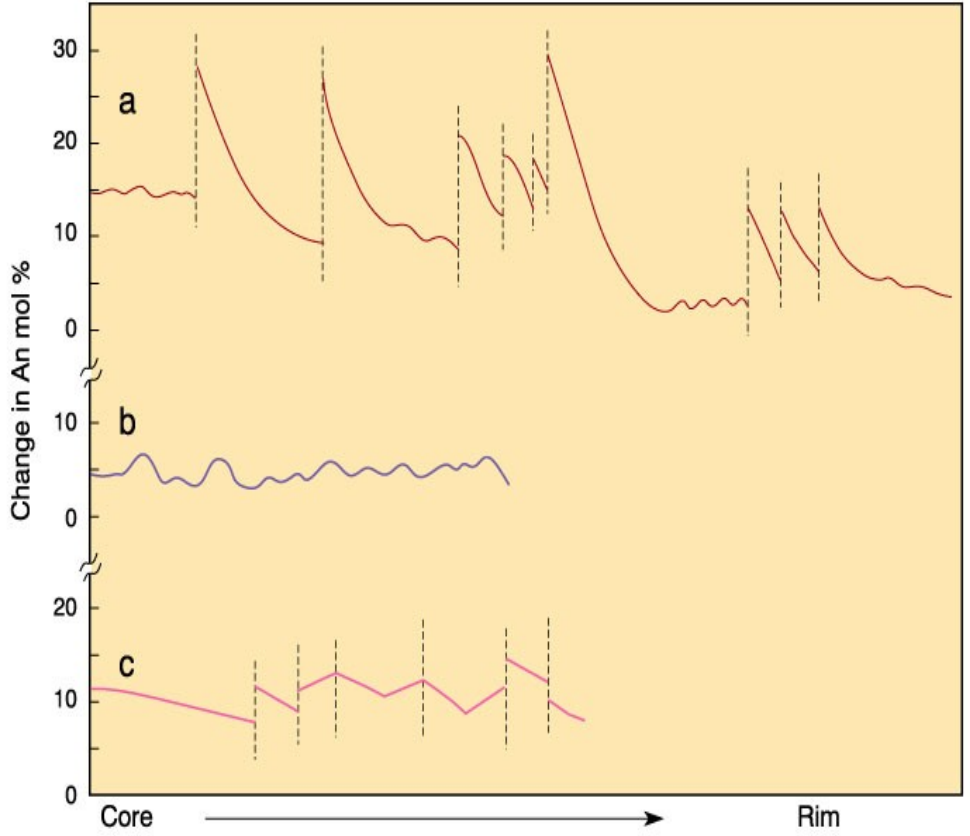
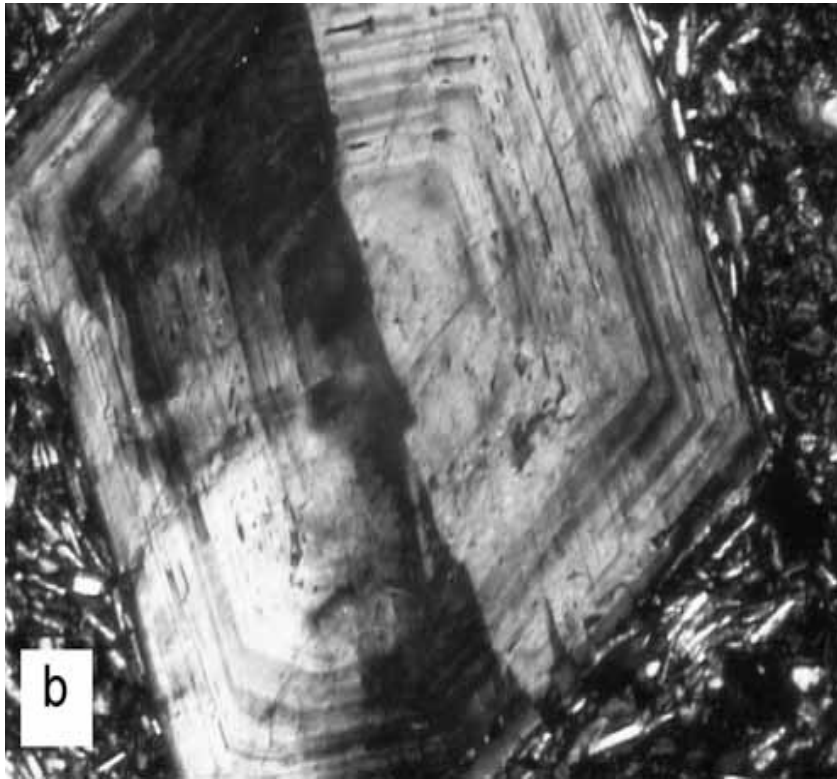
Diagram (Johannes & Holtz, 1991, Trans. Roy.Soc.Edin. Earth Sci. 83, p 417-422) při nízkém tlaku se teplota dále snižuje a smyčka je ještě více plochá

Vznik normální zonálnosti plagioklasů

"Normal" zoning in a plagioclase crystal.

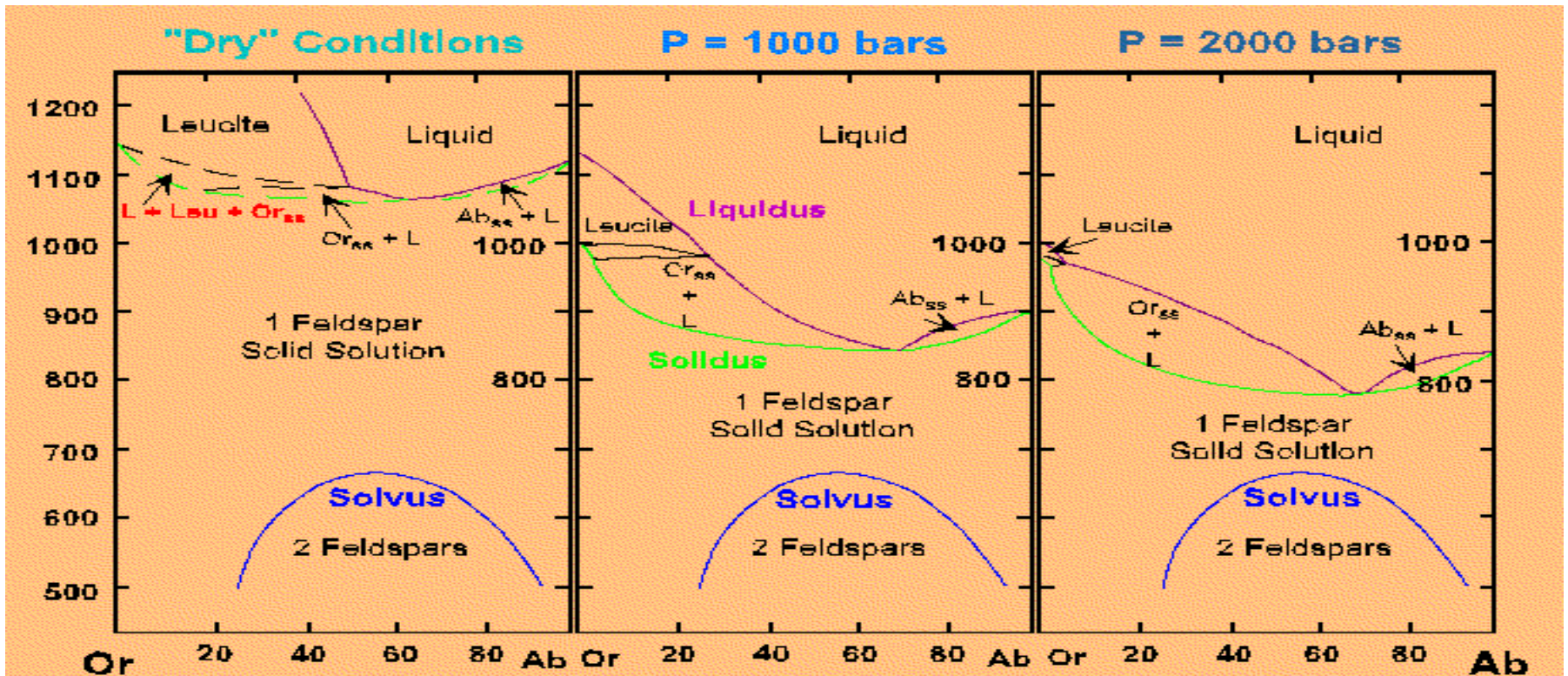


- **Vznik oscilační zonálnosti plagioklasů**
- a) Opakující se ostrá zonálnost (magma mixing).
- b) Malé nepravidelné oscilace způsobené s lokální nerovnovážnou krystalizací.
- c) Komplexní oscilace způsobená magma mixingem a lokální nerovnovážnou krystalizací.



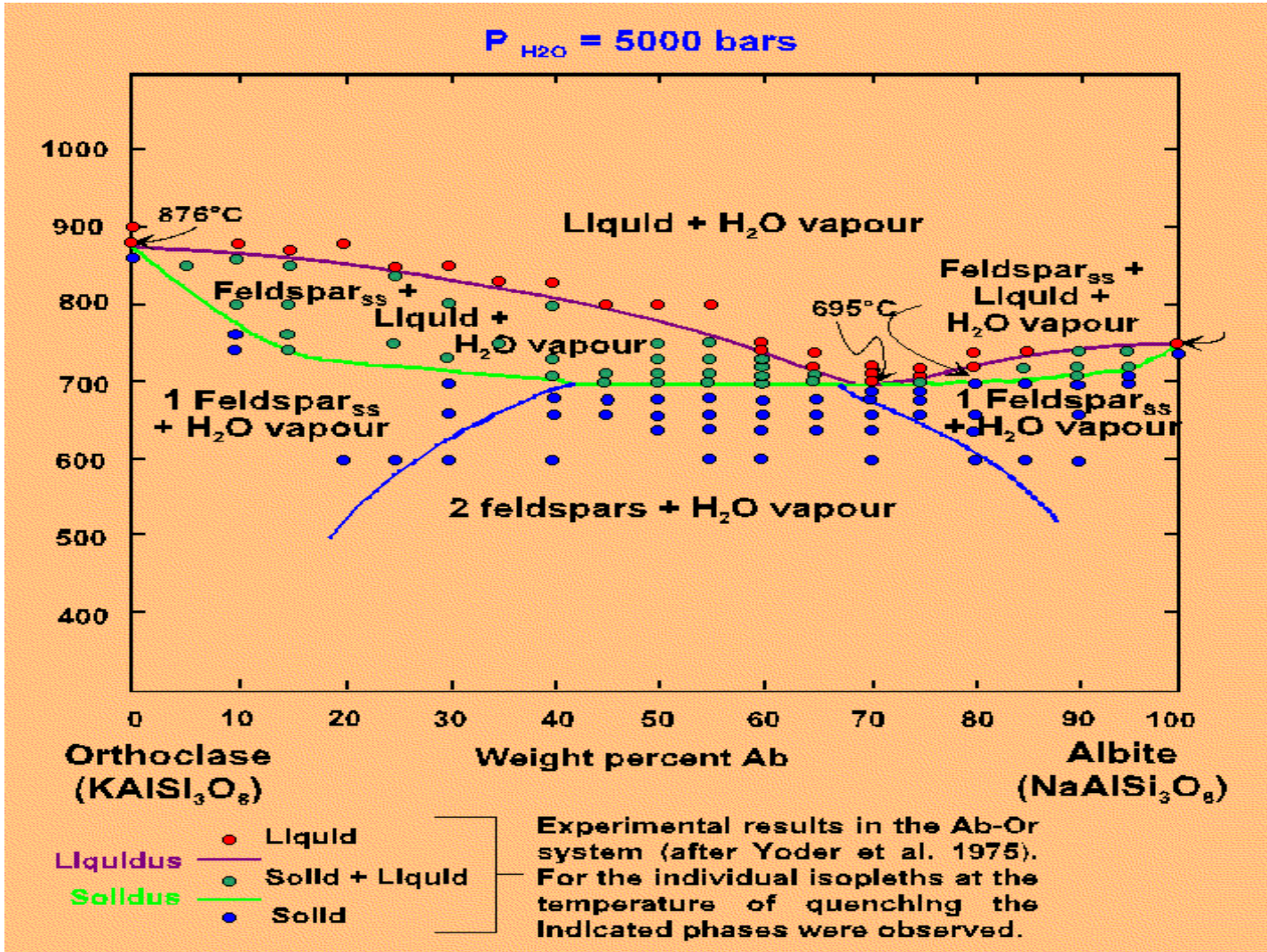
II. 3. Binární systém alkalických živců Ab-Kfs

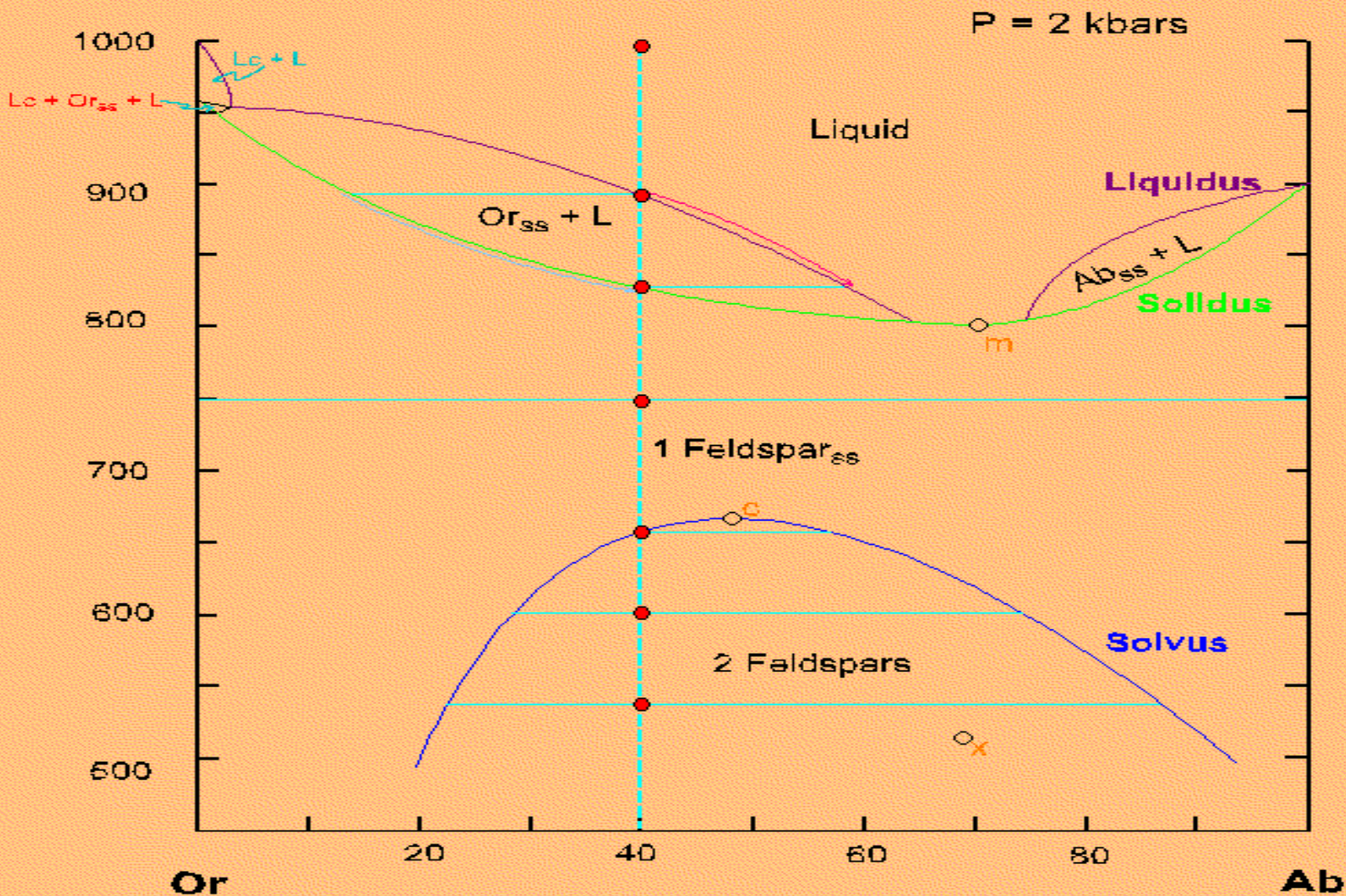
- Při tavení v bezvodém systému Ab-Kfs se objevuje poměrně rozsáhlé pole stability leucitu.
- Takový systém pak není binární a mluvíme o inkongruentním tavení.
- Vzniká tak tavenina rozdílného složení, než původní pevná fáze a nová fáze leucit (KAlSi_2O_6).



At low pressures the system is pseudo-binary, with Leucite appearing on the liquidus as a primary phase. The pseudo-binary nature comes from the fact that the composition of Leucite (KAlSi_2O_6) cannot be represented in terms of the two end member components Orthoclase (KAlSi_3O_8) and Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), and the presence of the three phase field $\text{L} + \text{Leu} + \text{Or}_{\text{ss}}$.

- Pokud ale zvýšíme tlak vody, pole stability leucitu se zmenší nebo úplně zmizí.
- Vznikne tak binární systém, jehož chování je výrazně ovlivněno tlakem vody.
- Sledujeme-li chování systému Ab-Kfs při vzrůstu obsahu vody v tavenině, vidíme že se vyvíjí od krystalizace hypersolvu až ke krystalizaci v subsolvu.



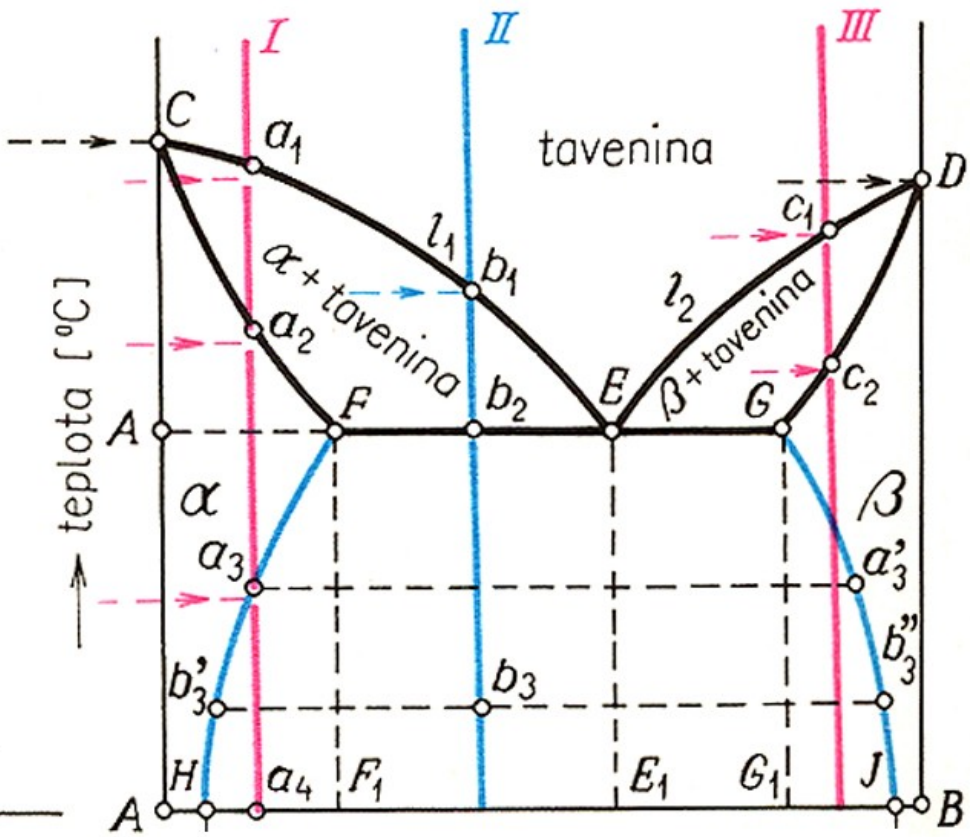
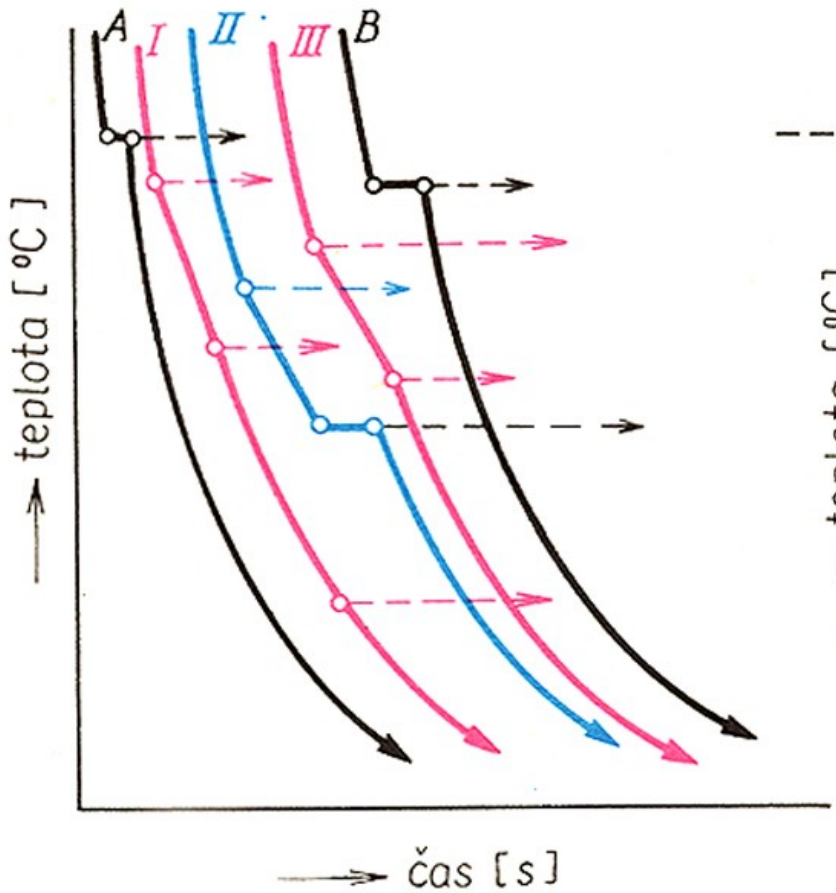


Phase Rule - $P + F = C + 1$

Applying the Phase Rule at **m**, **c** and **x**

At m	At c	At x
P = 2	P = 3	P = 2
F = 1	F = 0	F = 1

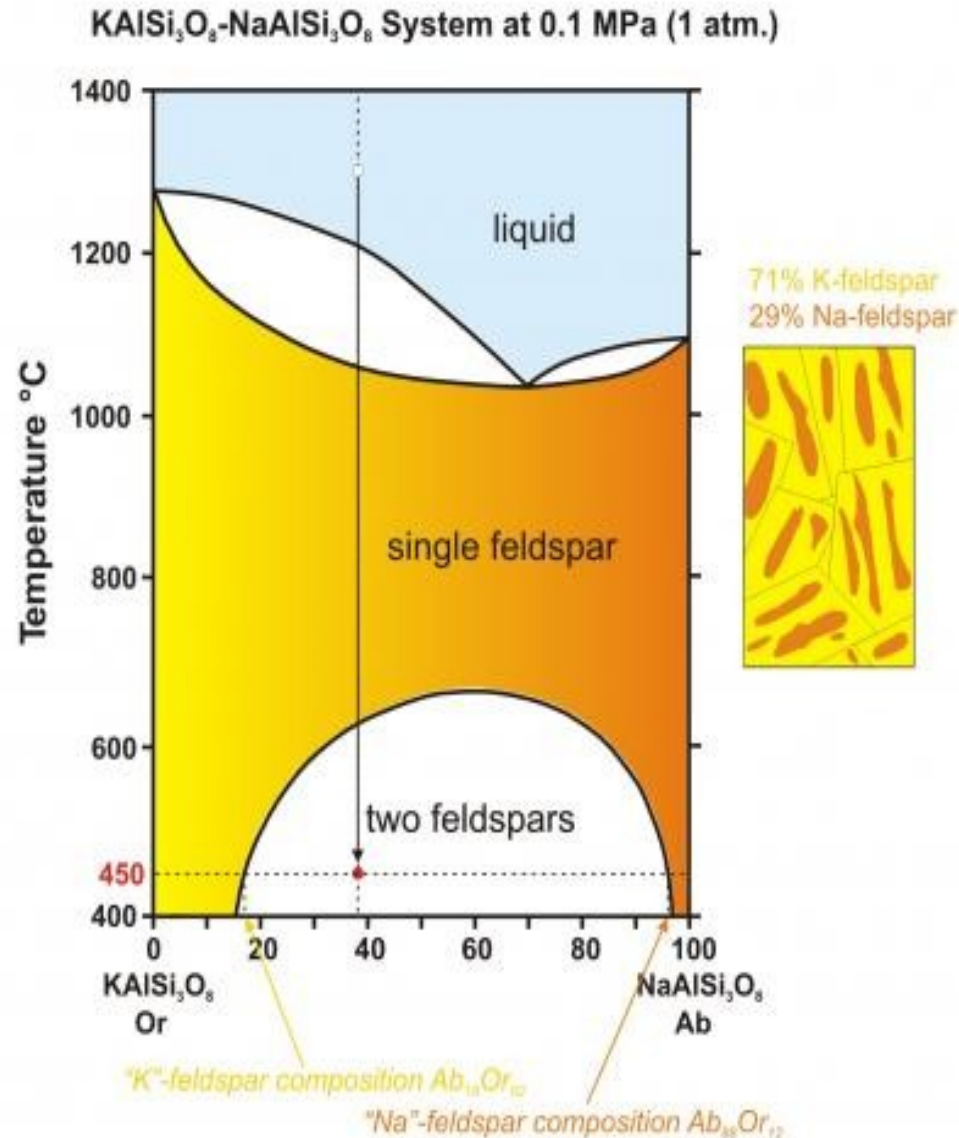
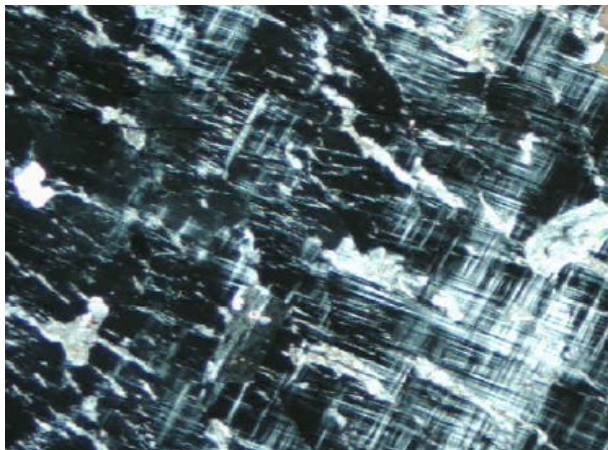
- **Eutektikum** je tavenina takové poměrové směsi dvou nebo více složek, z níž tyto složky při dosažení určité minim. teploty krystalizují najednou.
- Například v některých granitech takto krystalizuje prorůstající se směs křemene a živce.



Změny teploty během krystalizace taveniny

Hypersolvus:

- Při malých obsazích vody (několik hm. %) spěje tavenina při krystalizaci do teplotního minima.
- Při krystalizaci z taveniny s převahou Kfs komponenty vzniká pevný roztok draselného živce s podílem albitové komponenty.
- Takto vzniklé krystaly jsou však stabilní jen po určitou teplotu-teplotu solvu.
- Klesne-li teplota pod solvus, rozpadne se původní pevný roztok na dva nové (jeden s převahou Kfs, druhý s převahou Ab). Tímto odmíšením na dvě fáze vznikají perity.

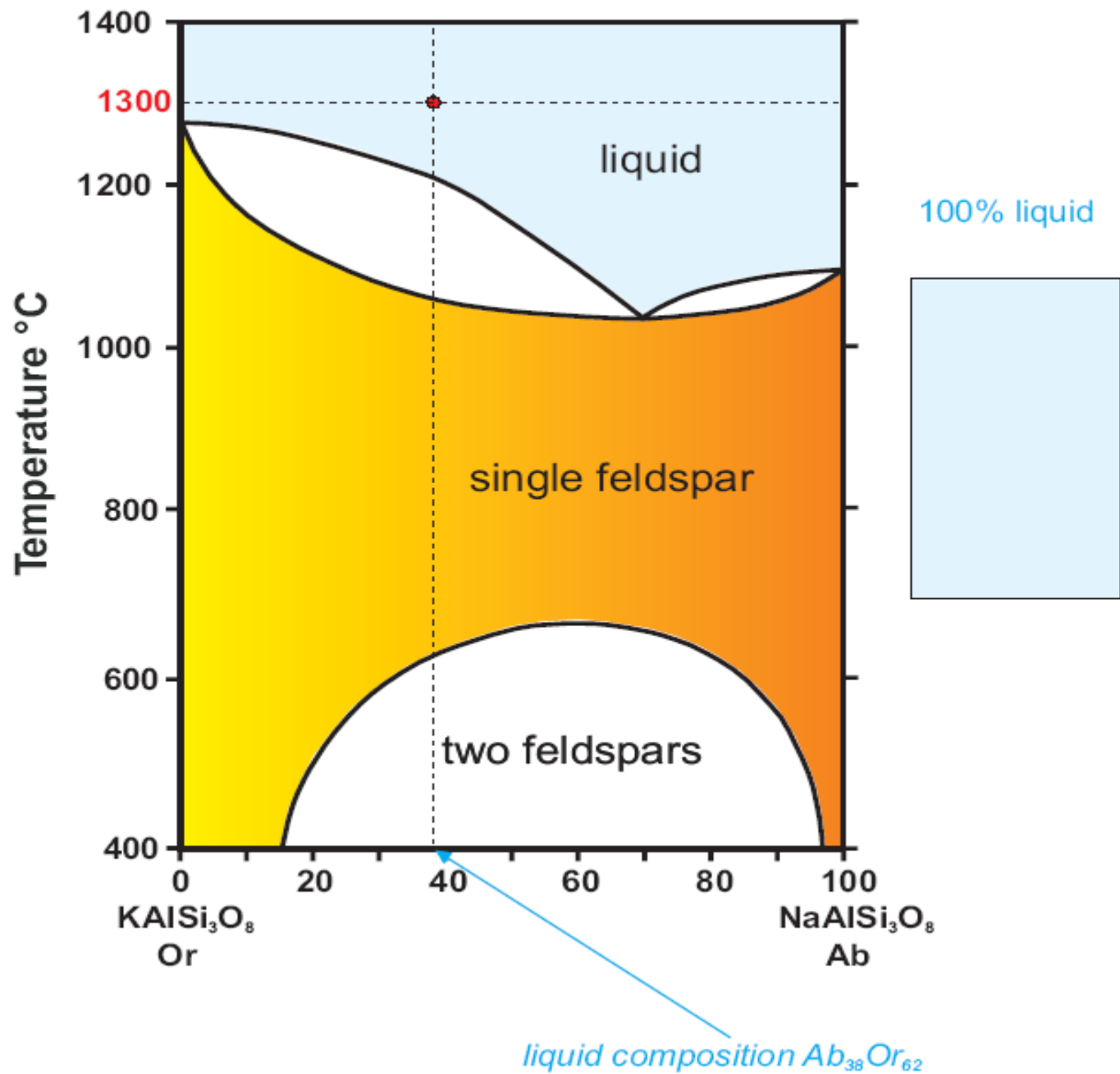




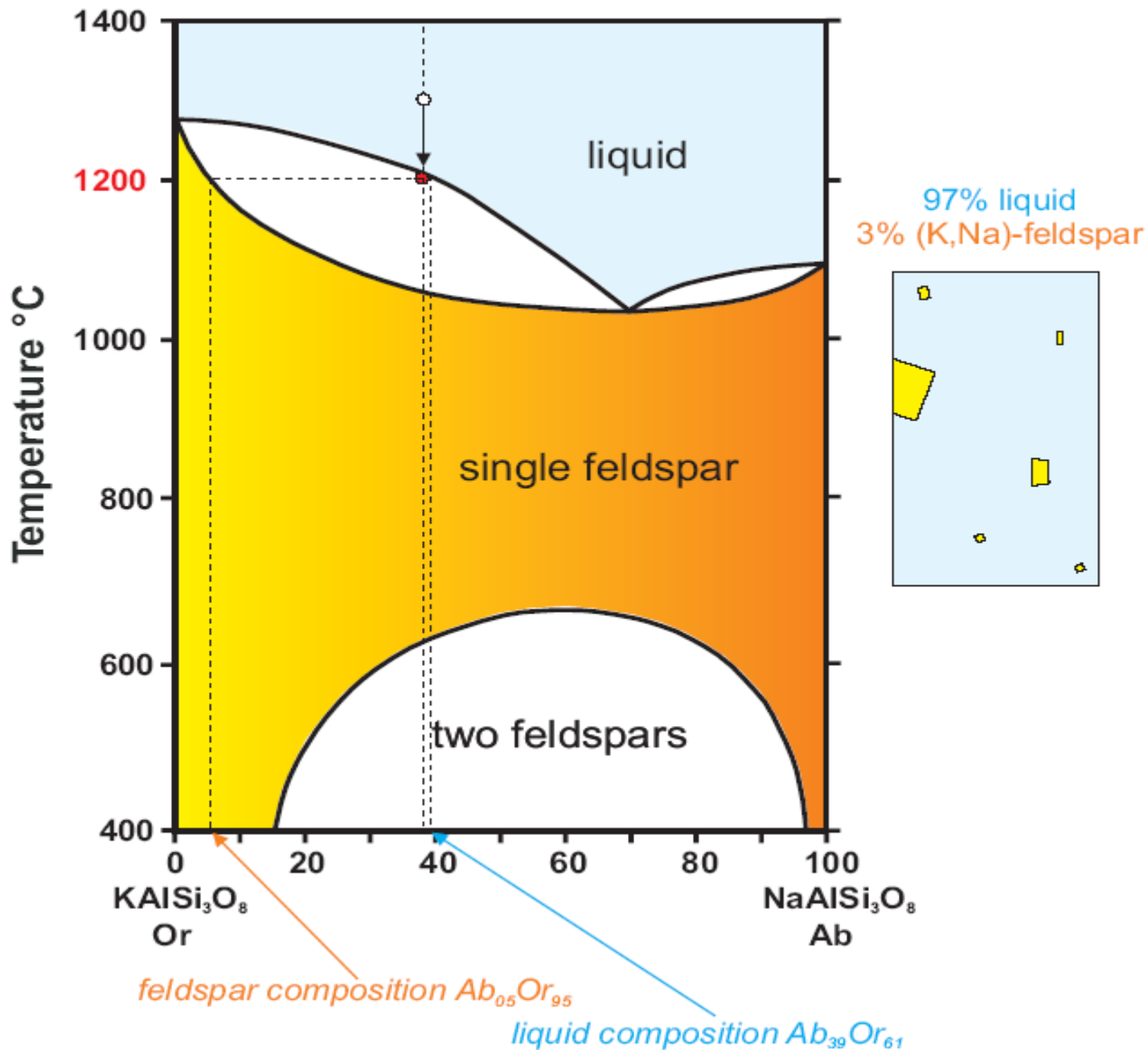


Ringový komplex Cauro-Bastelica (Korsika, přehrada Tolla) hypersolvní fayalitový granit

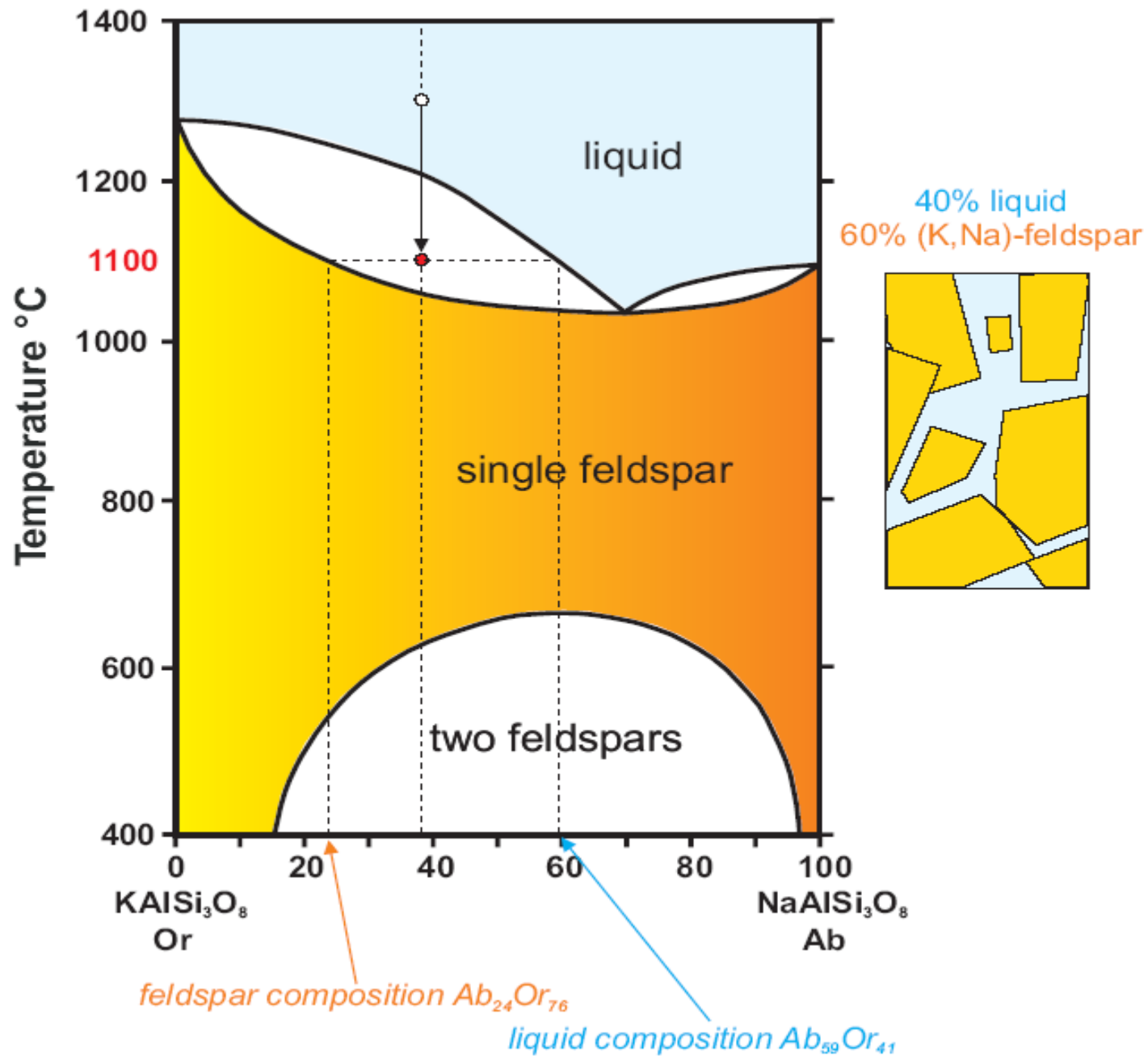
KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 0.1 Mpa (1 atm.)



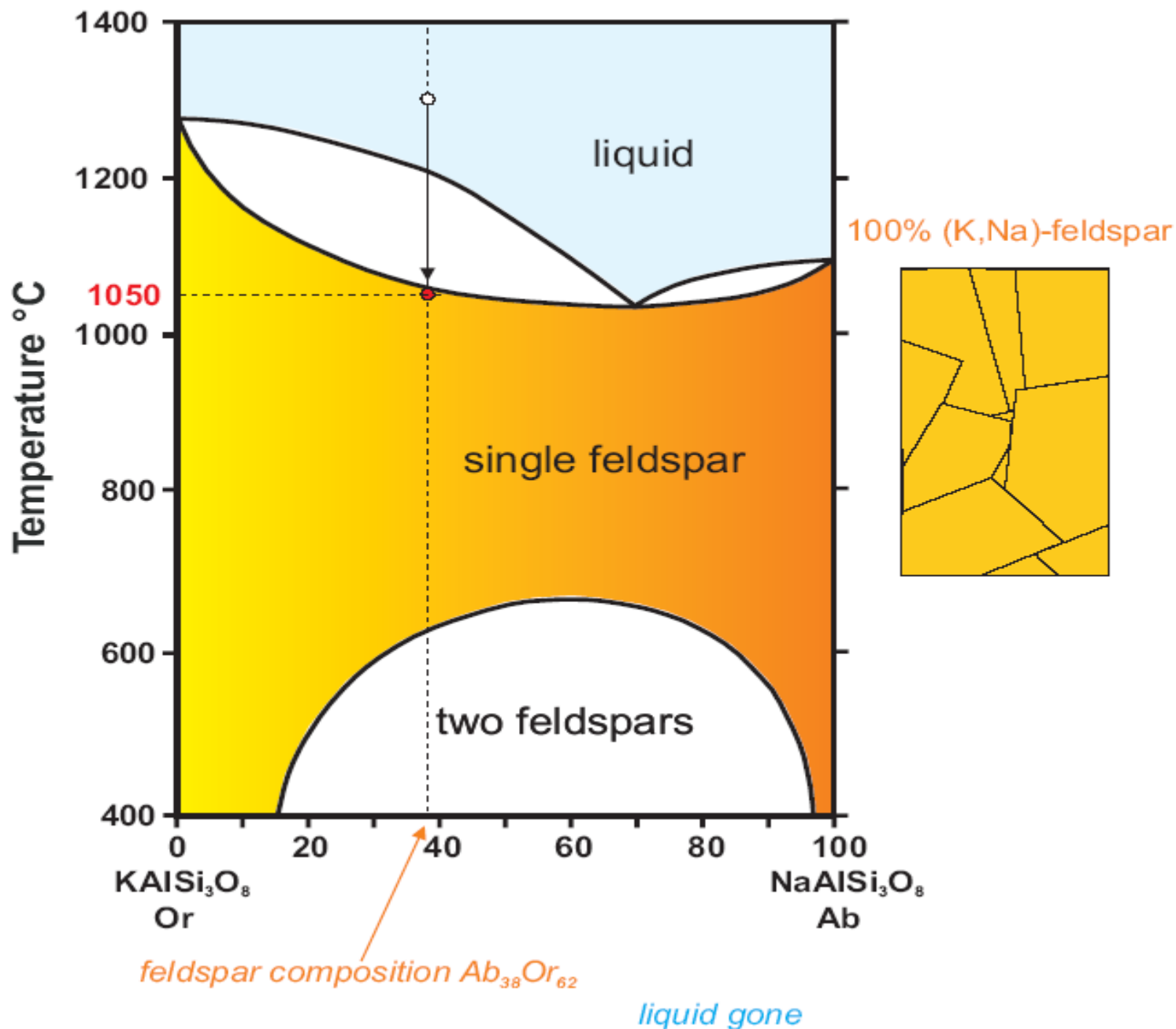
KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 0.1 Mpa (1 atm.)



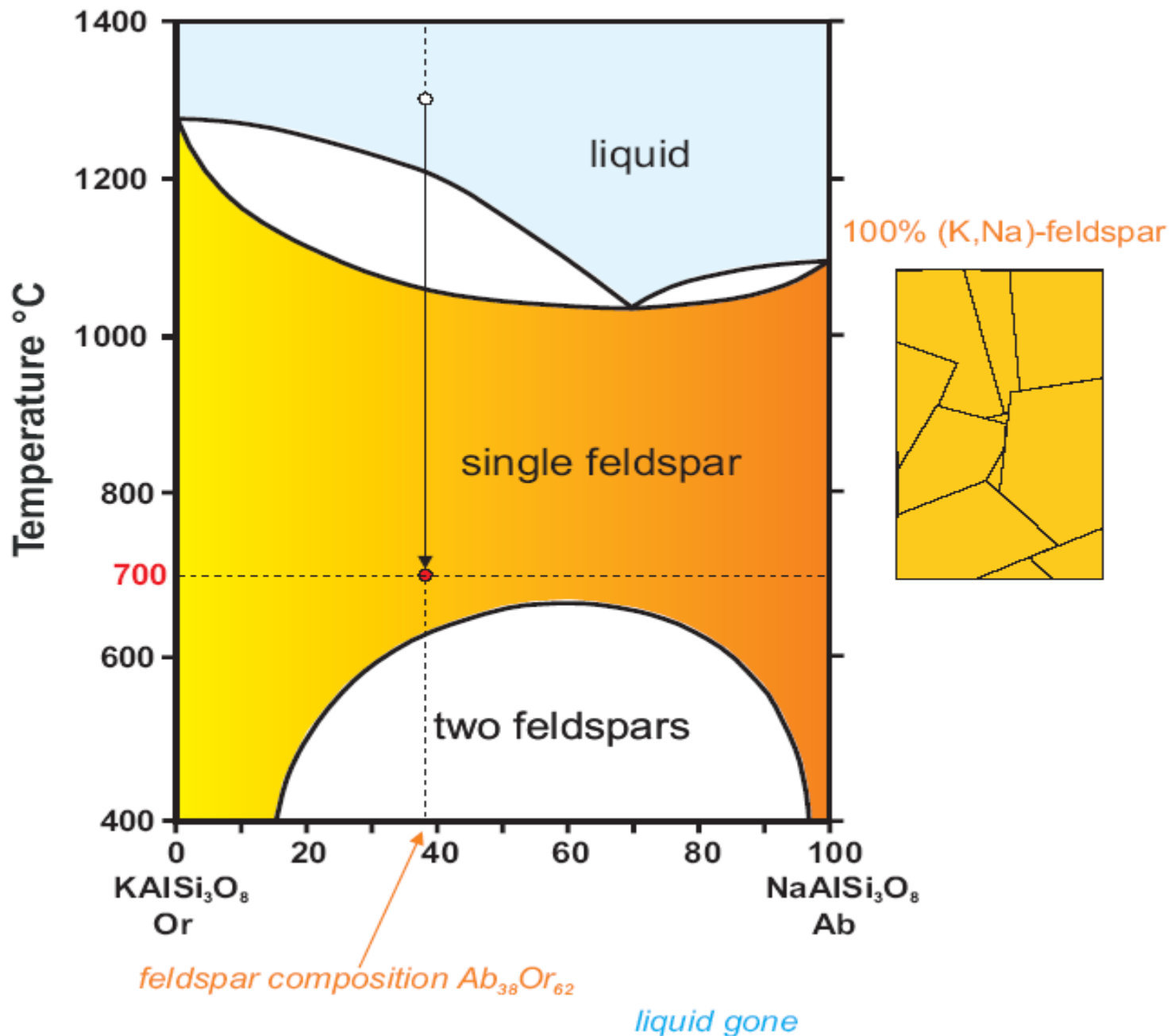
KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 0.1 MPa (1 atm.)



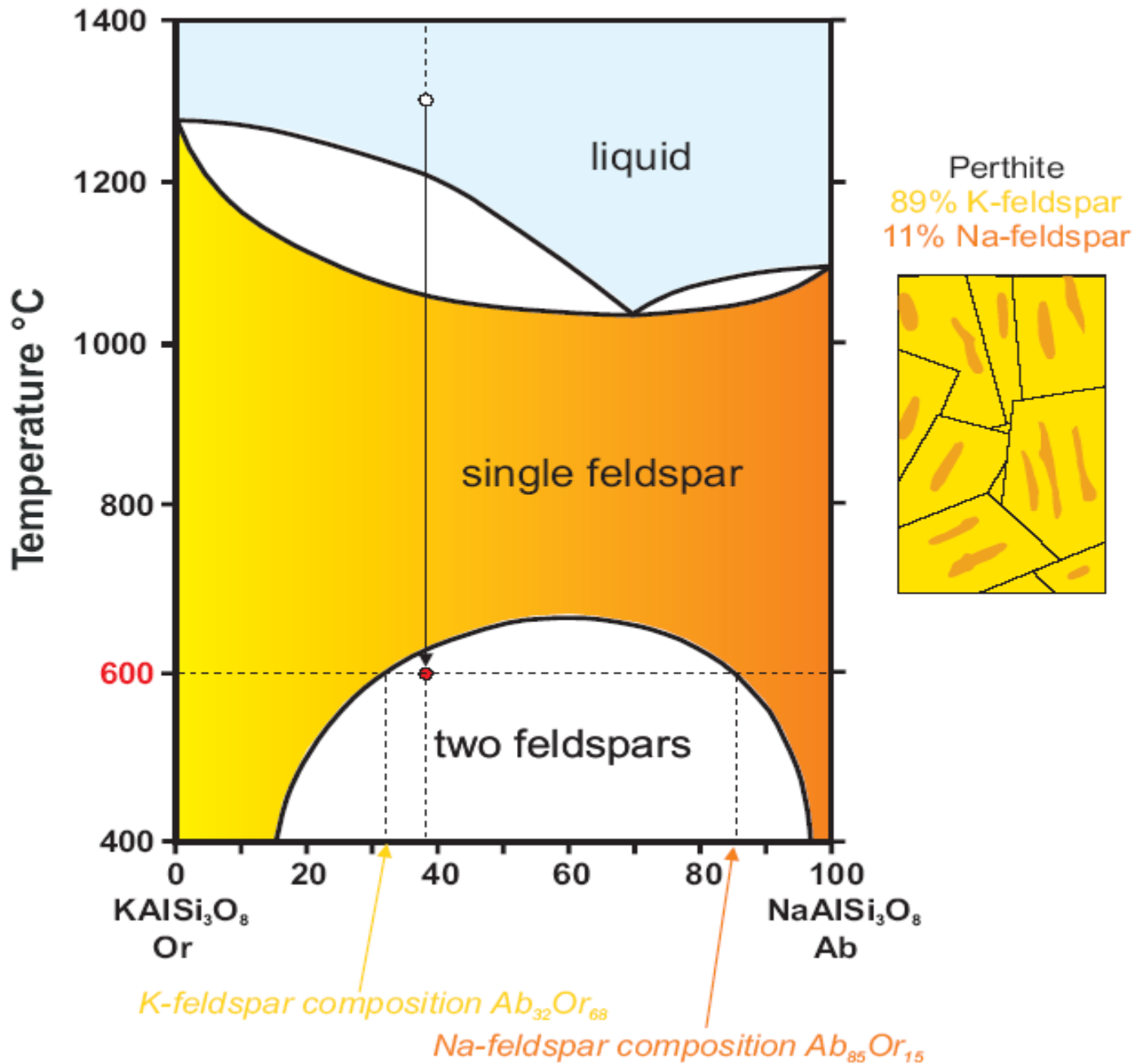
KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 0.1 MPa (1 atm.)



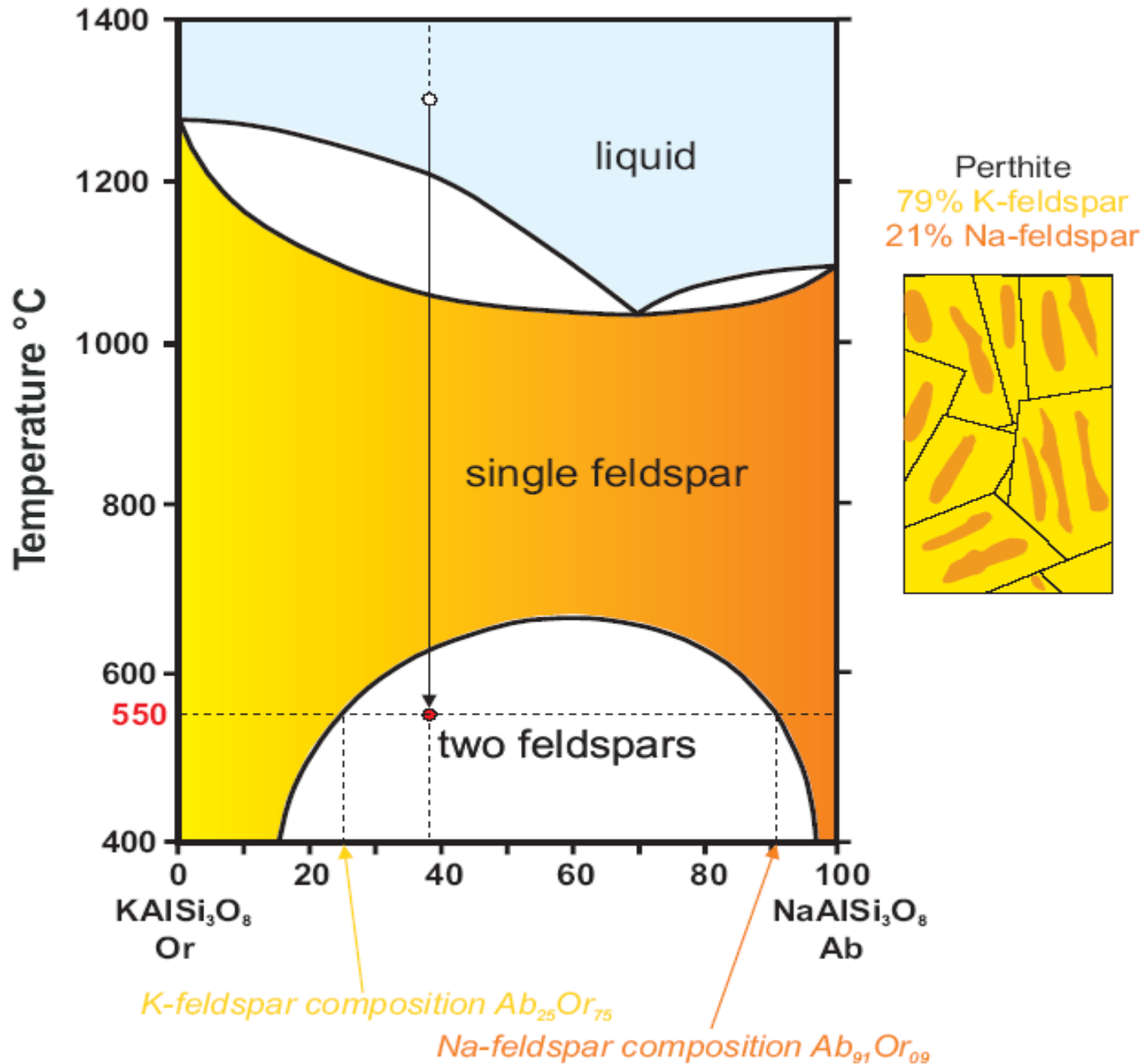
KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 0.1 MPa (1 atm.)



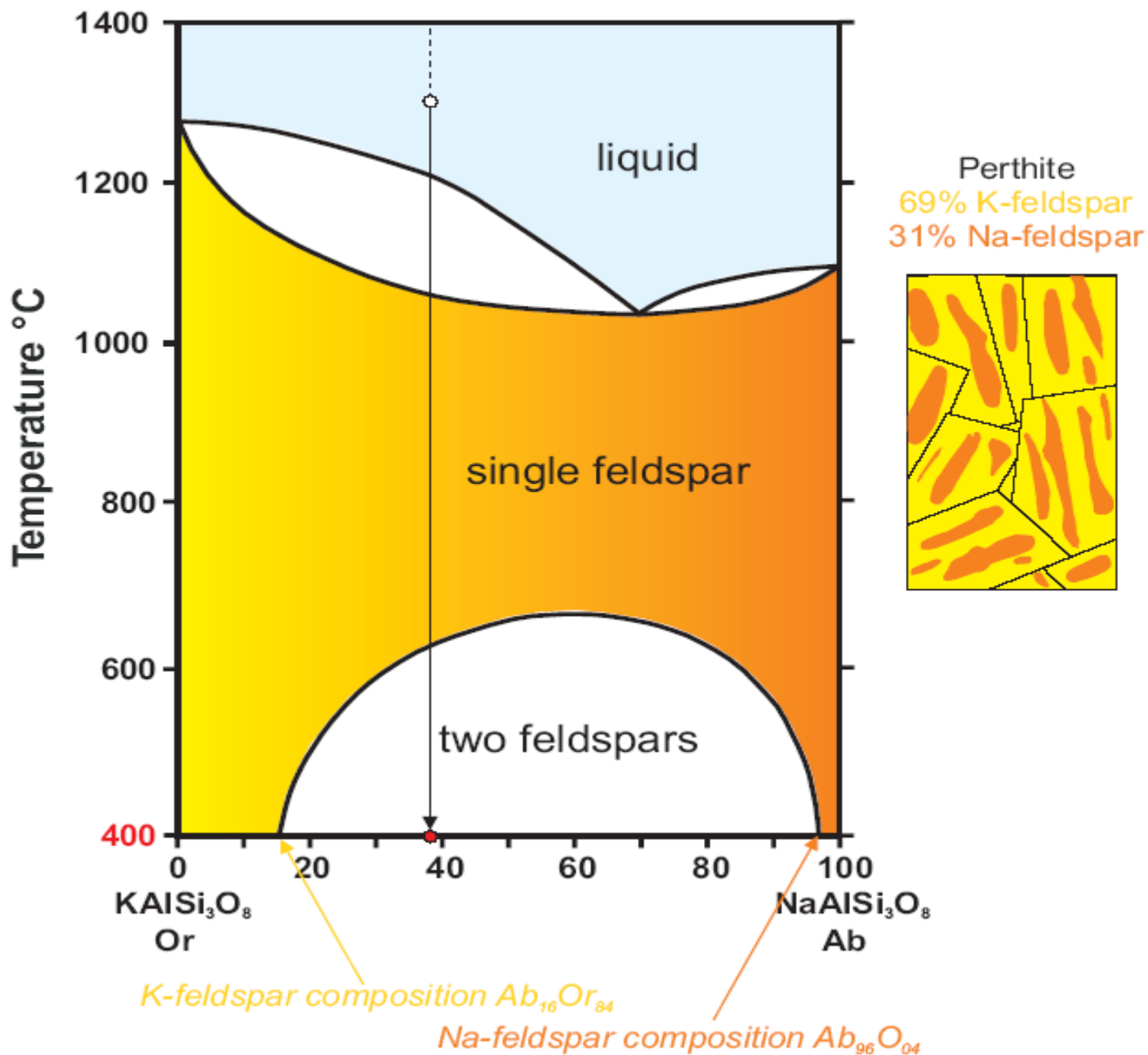
KAISi₃O₈-NaAISi₃O₈ System at 0.1 MPa (1 atm.)



KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 0.1 MPa (1 atm.)

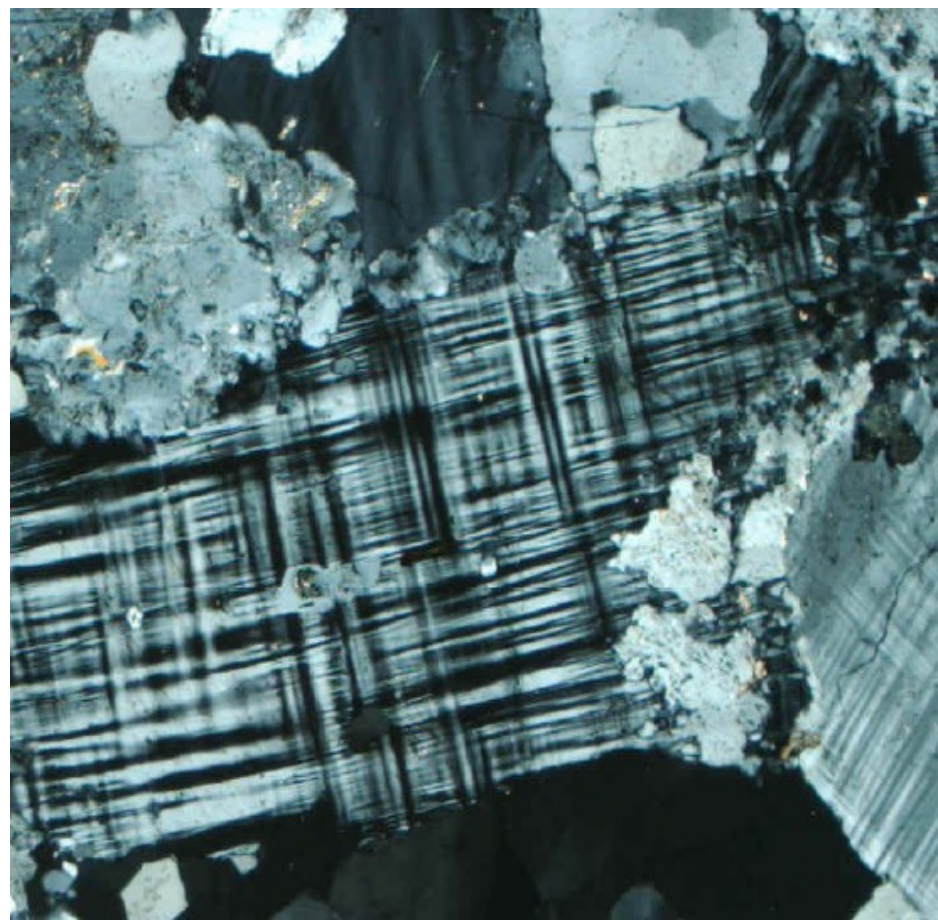
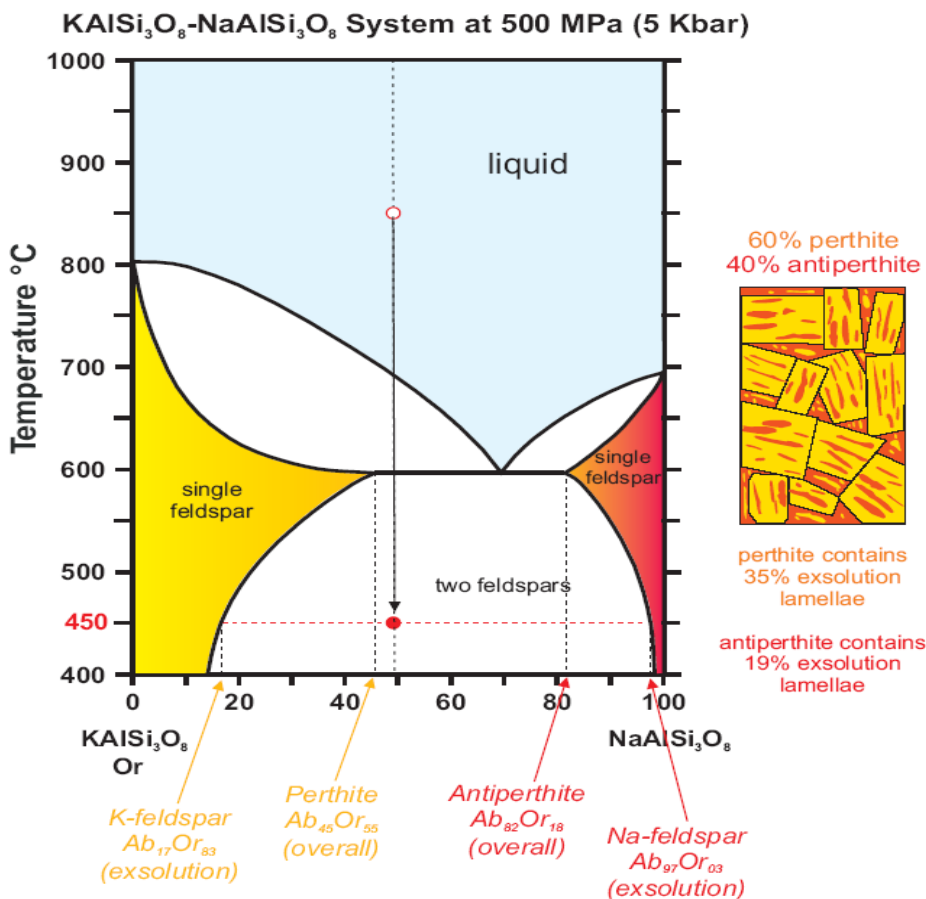


KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 0.1 MPa (1 atm.)

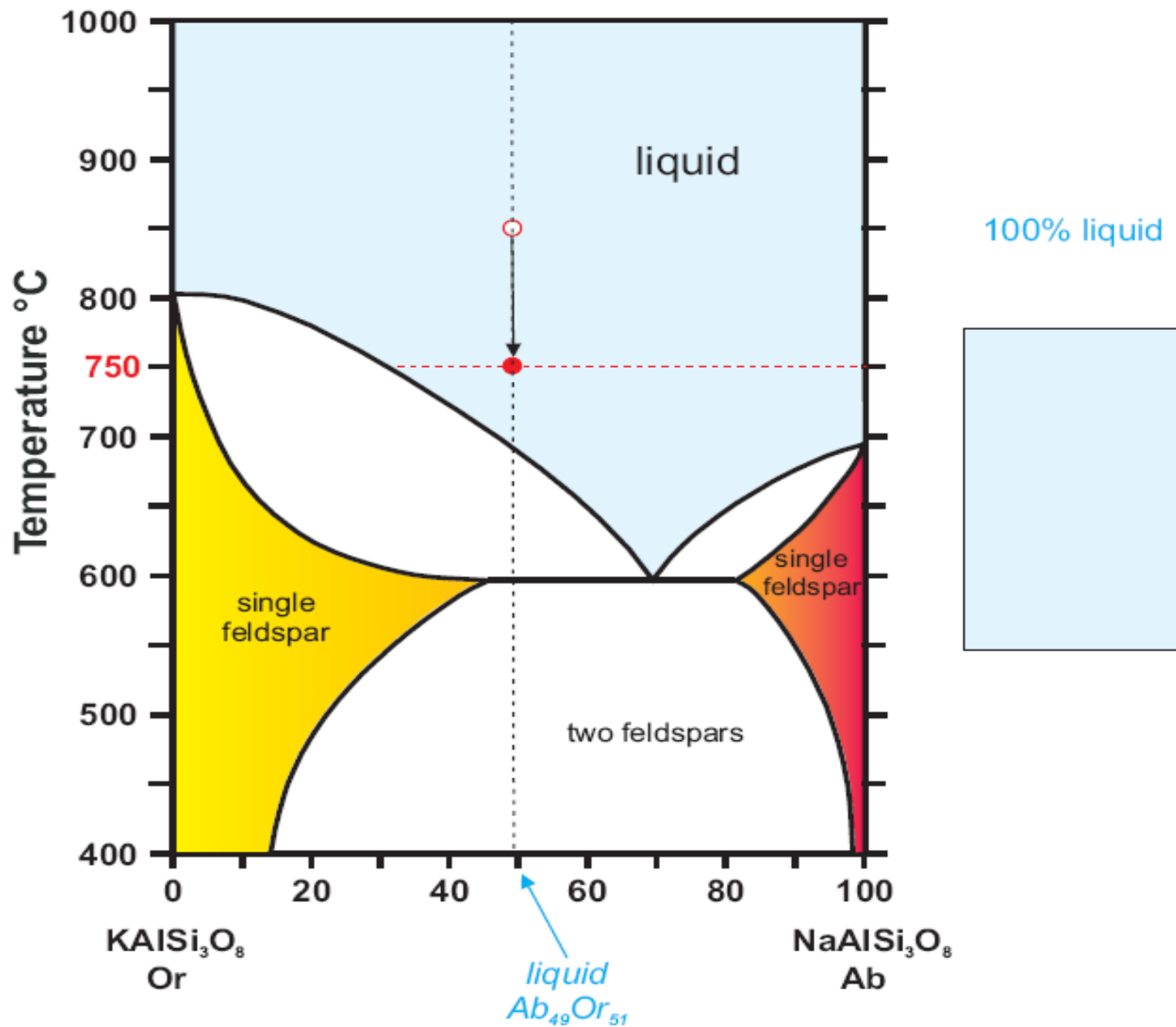


Subsolvus:

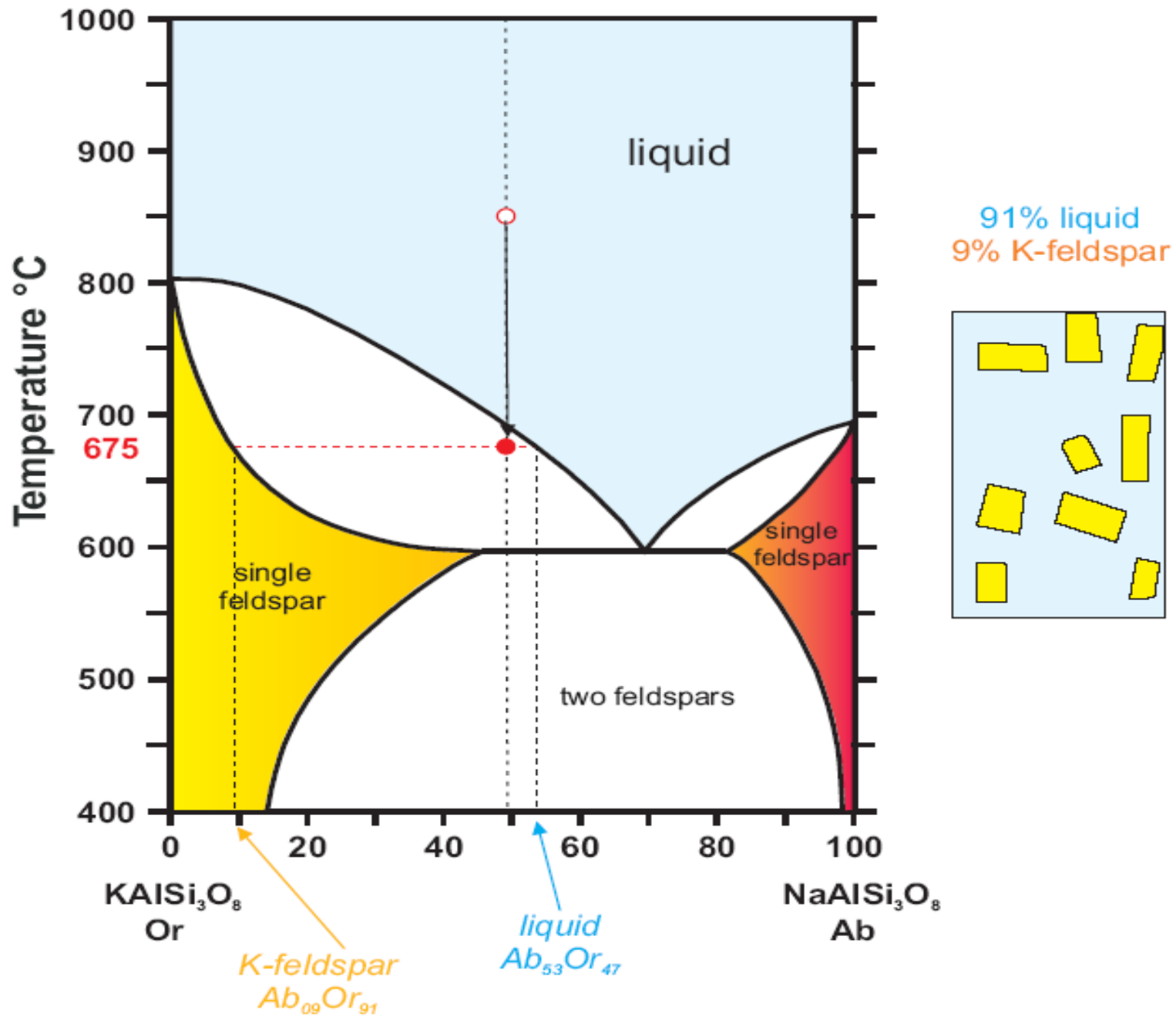
- S nárůstem množství vody v systému se k sobě křivky solidu a solvu přibližují, až se dotknou.
- Místo bodu teplotního minima se objevuje eutektický bod.
- V takovém případě tavenina utuhne přímo v podobě dvou živců.
- Oba živce se během dalšího chladnutí pod solvem mohou dále rozdělit, ale toto odmíšení již nebývá tak patrné a často jej pozorujeme jen u draselných živců.



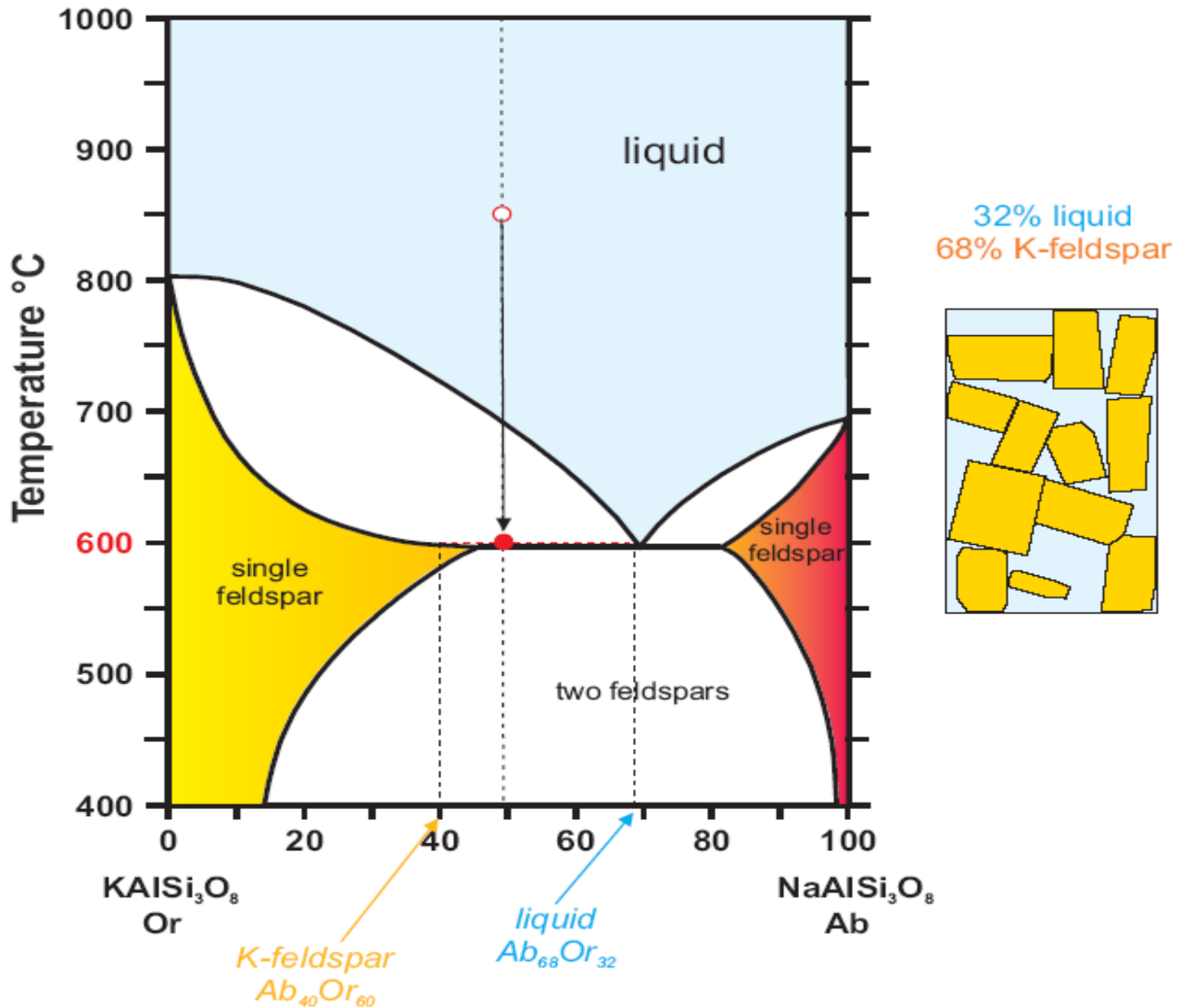
KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 500 MPa (5 Kbar)



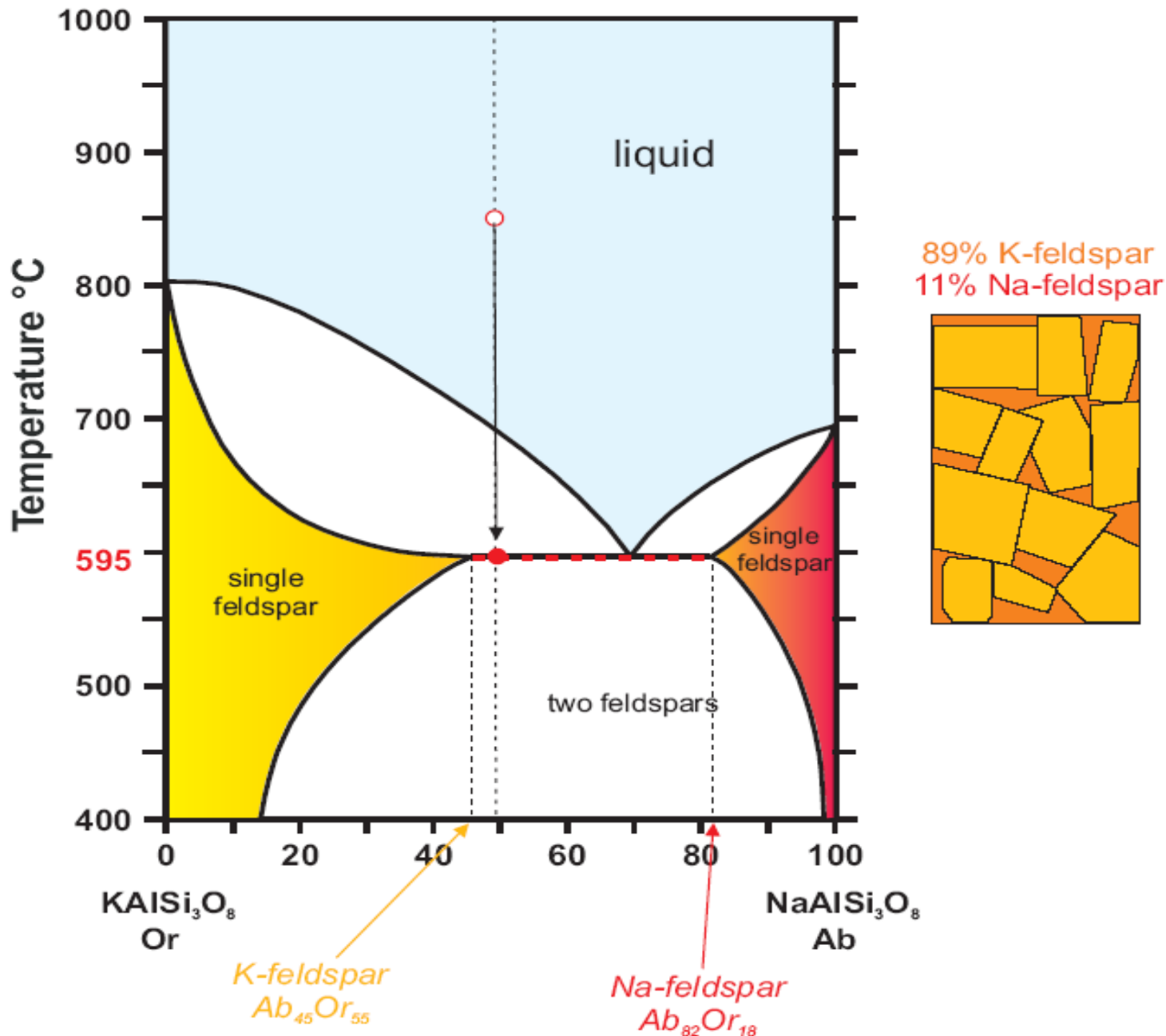
KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 500 MPa (5 Kbar)



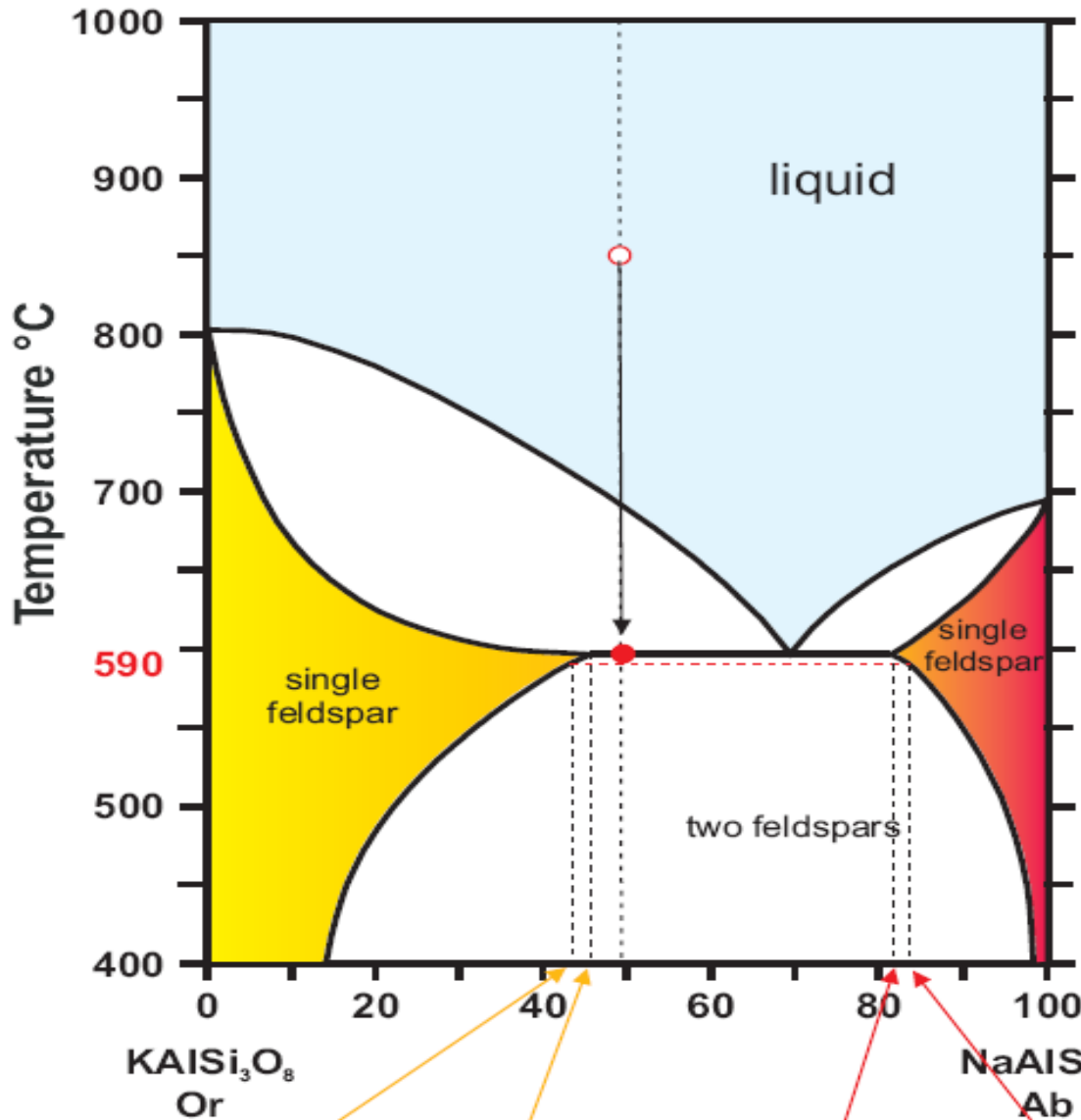
KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 500 MPa (5 Kbar)



KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 500 MPa (5 Kbar)



KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 500 MPa (5 Kbar)



85% perthite
15% antiperthite



perthite contains
5% exsolution
lamellae

antiperthite contains
5% exsolution
lamellae

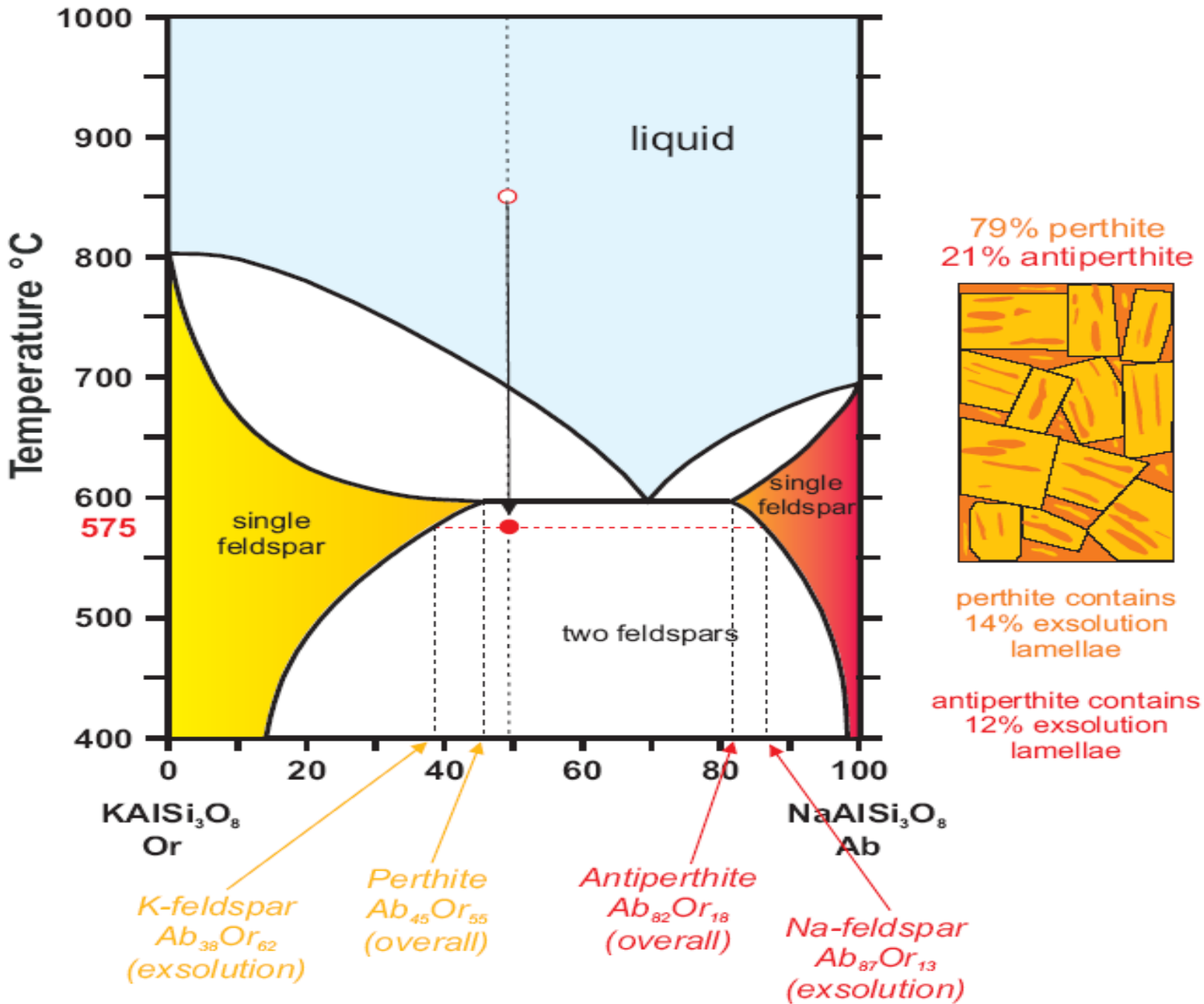
K-feldspar
Ab₄₃Or₅₇
(exsolution)

Perthite
Ab₄₅Or₅₅
(overall)

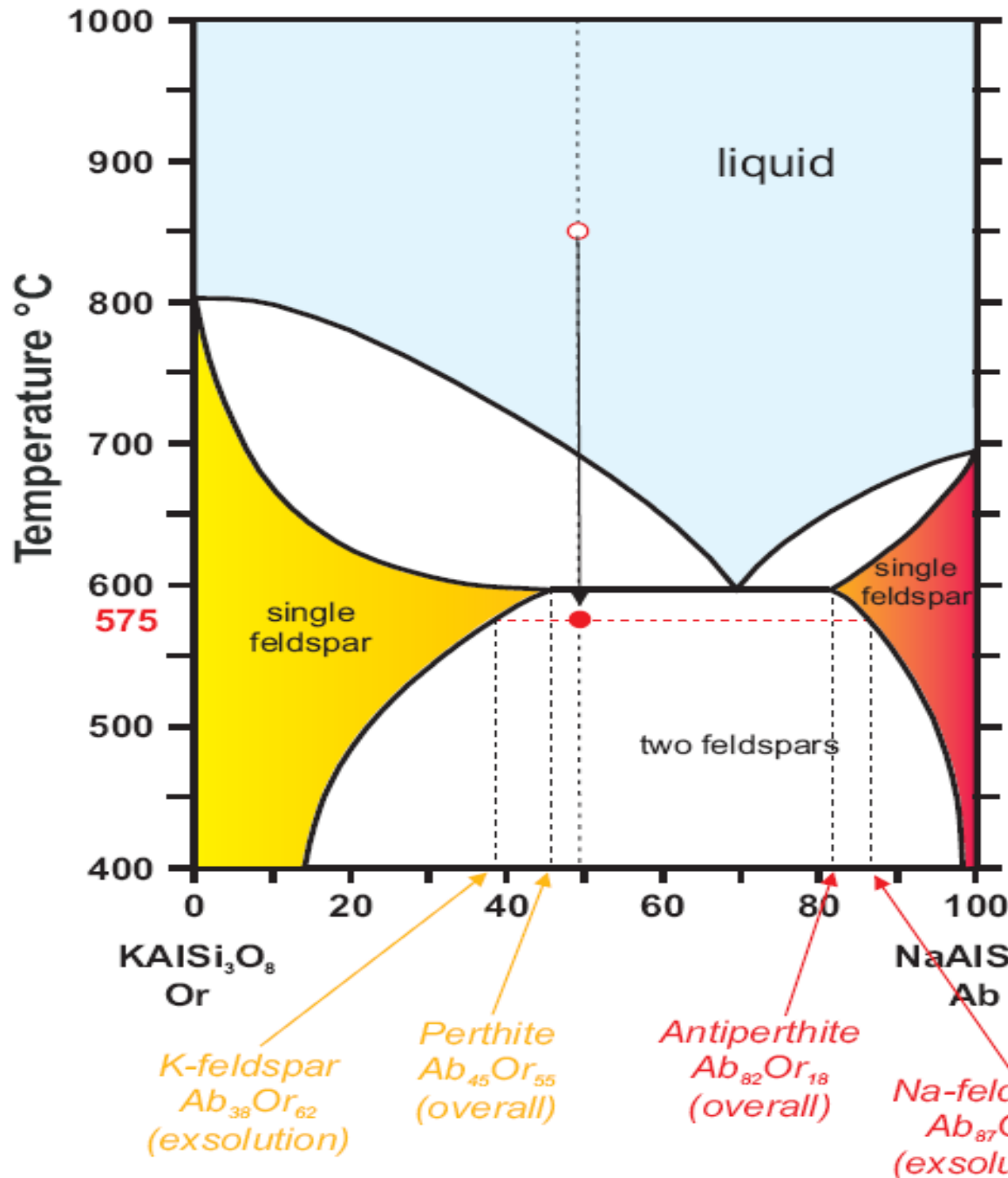
Antiperthite
Ab₈₂Or₁₈
(overall)

Na-feldspar
Ab₈₄Or₁₆
(exsolution)

KAISI₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 500 MPa (5 Kbar)



KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 500 MPa (5 Kbar)



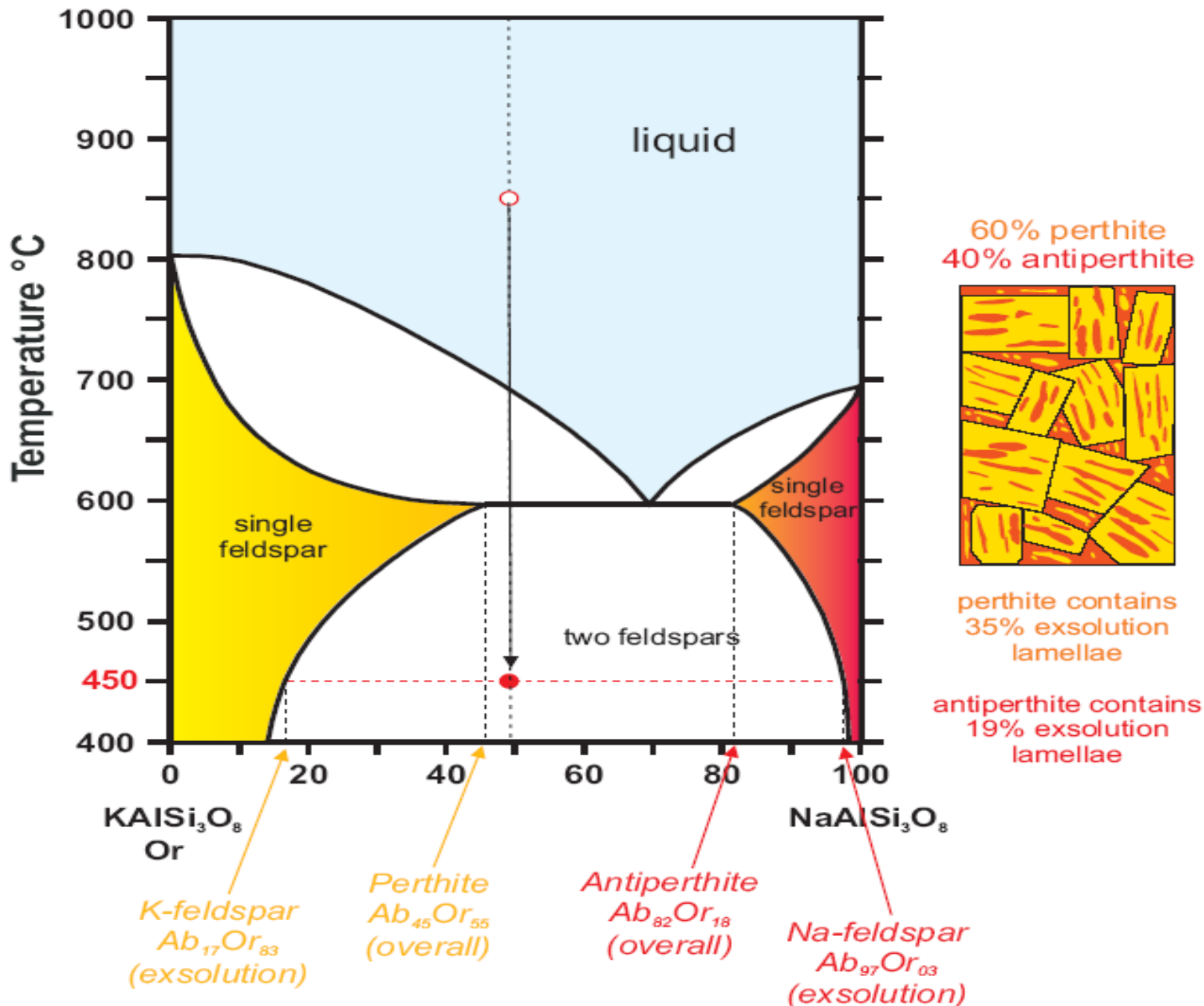
79% perthite
21% antiperthite



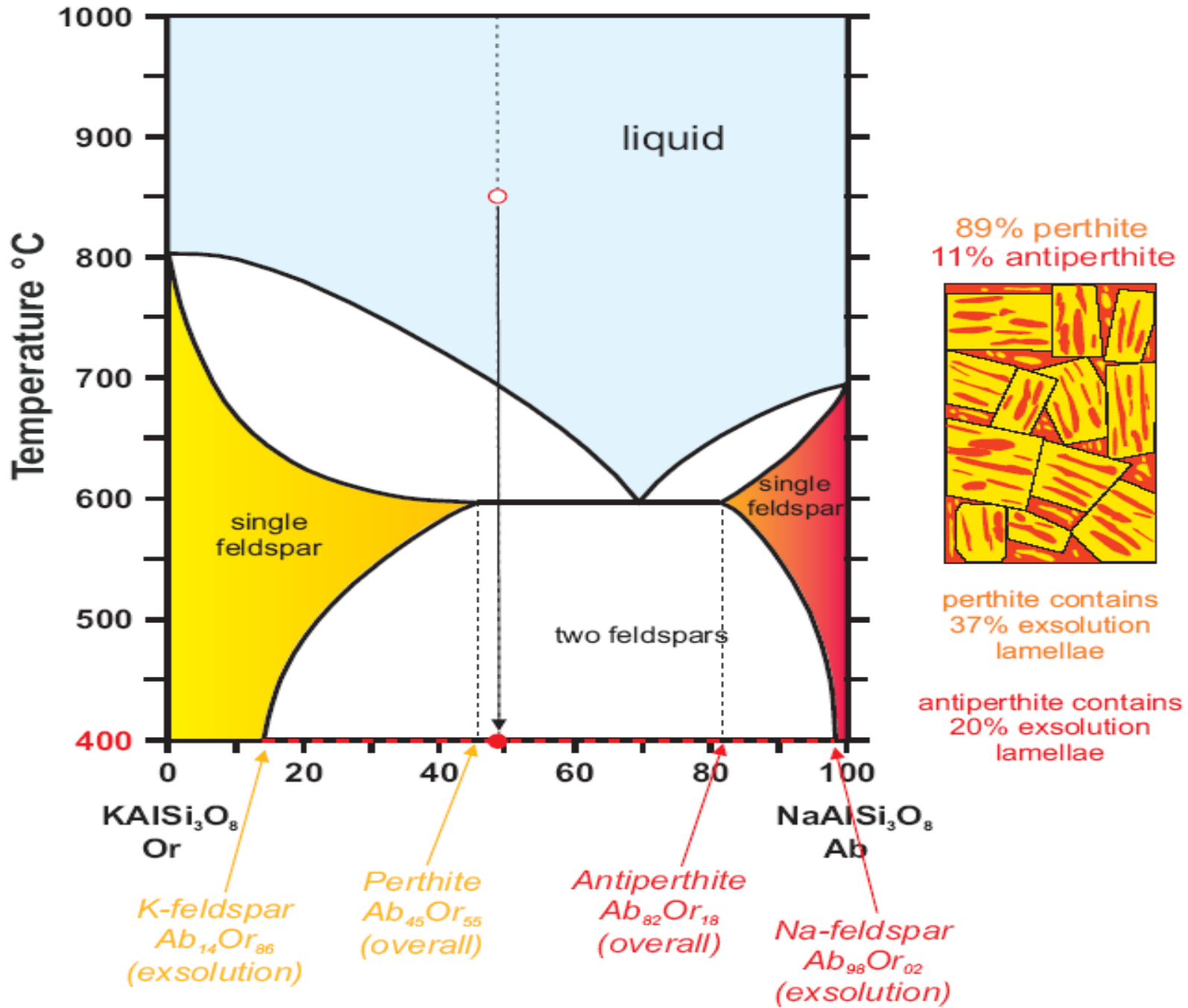
perthite contains
14% exsolution
lamellae

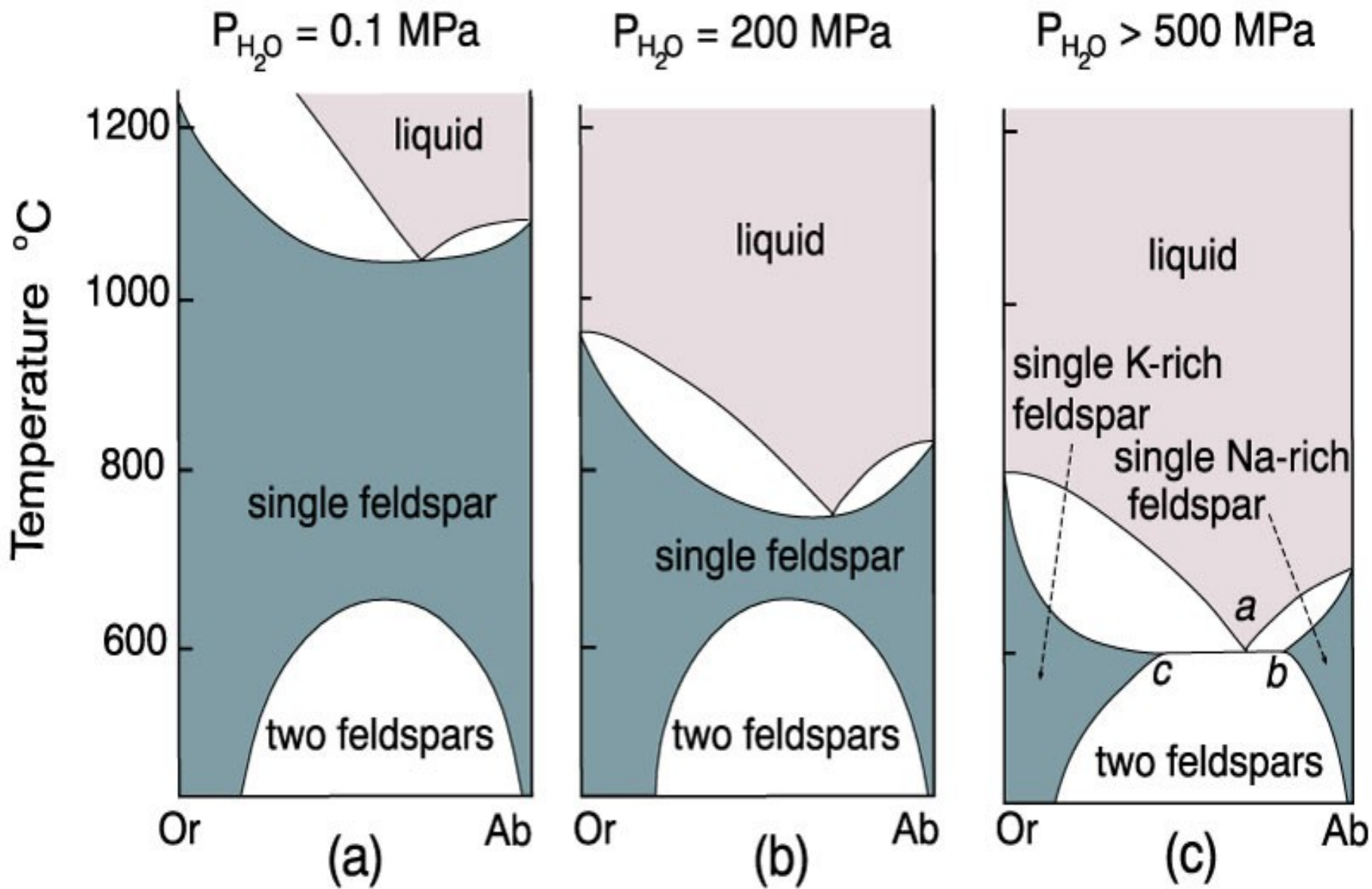
antiperthite contains
12% exsolution
lamellae

KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 500 MPa (5 Kbar)



KAISi₃O₈-NaAlSi₃O₈ System at 500 MPa (5 Kbar)

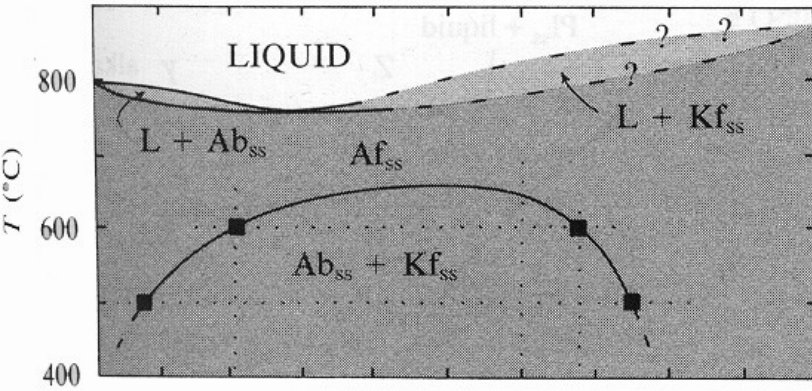




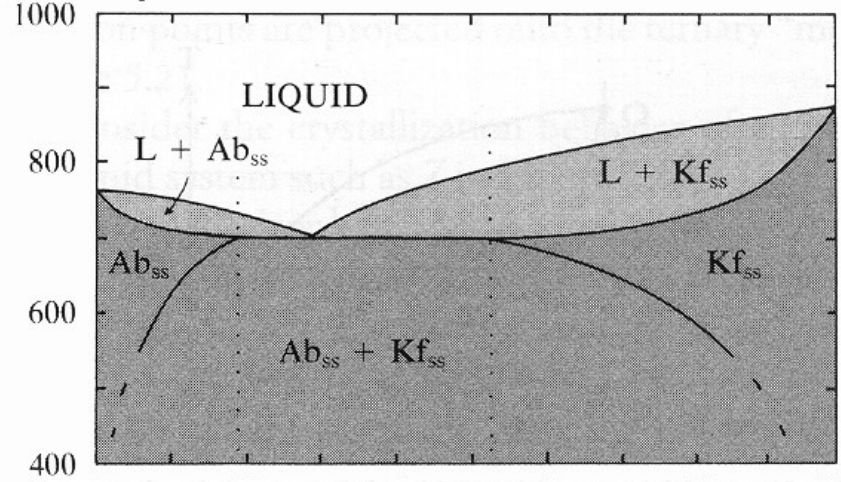
Hypersolvni vs. Subsolvni granity

Yoder et al., 1957; Morse, 1970

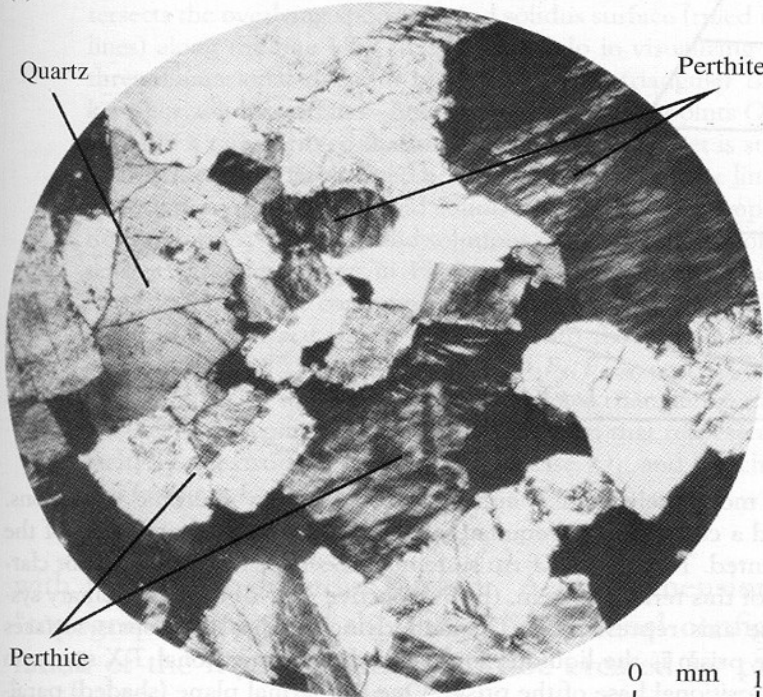
$P_{H_2O} = 0.3 \text{ GPa}$



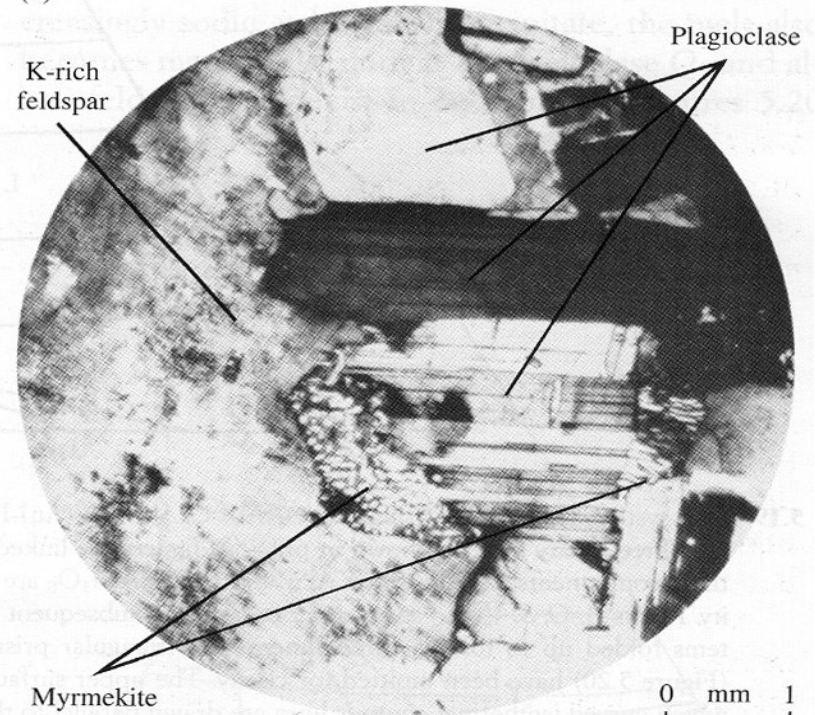
$P_{H_2O} = 0.5 \text{ GPa}$



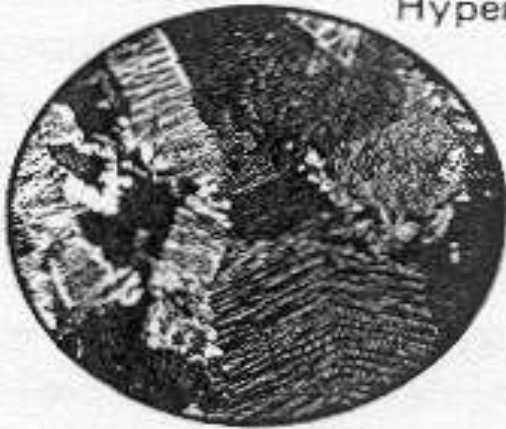
(a)



(b)



Hypersolvus

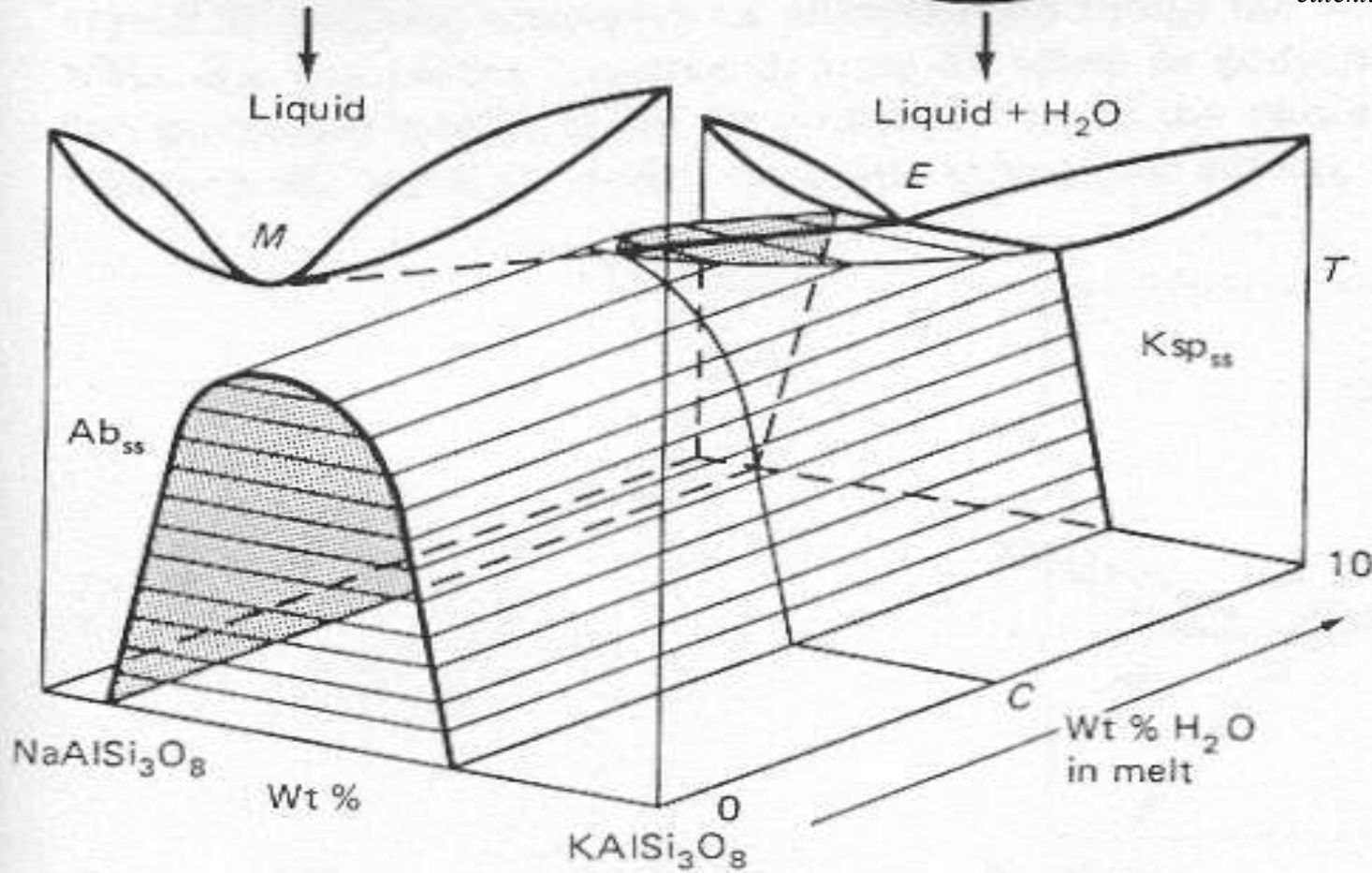


Subsolvus



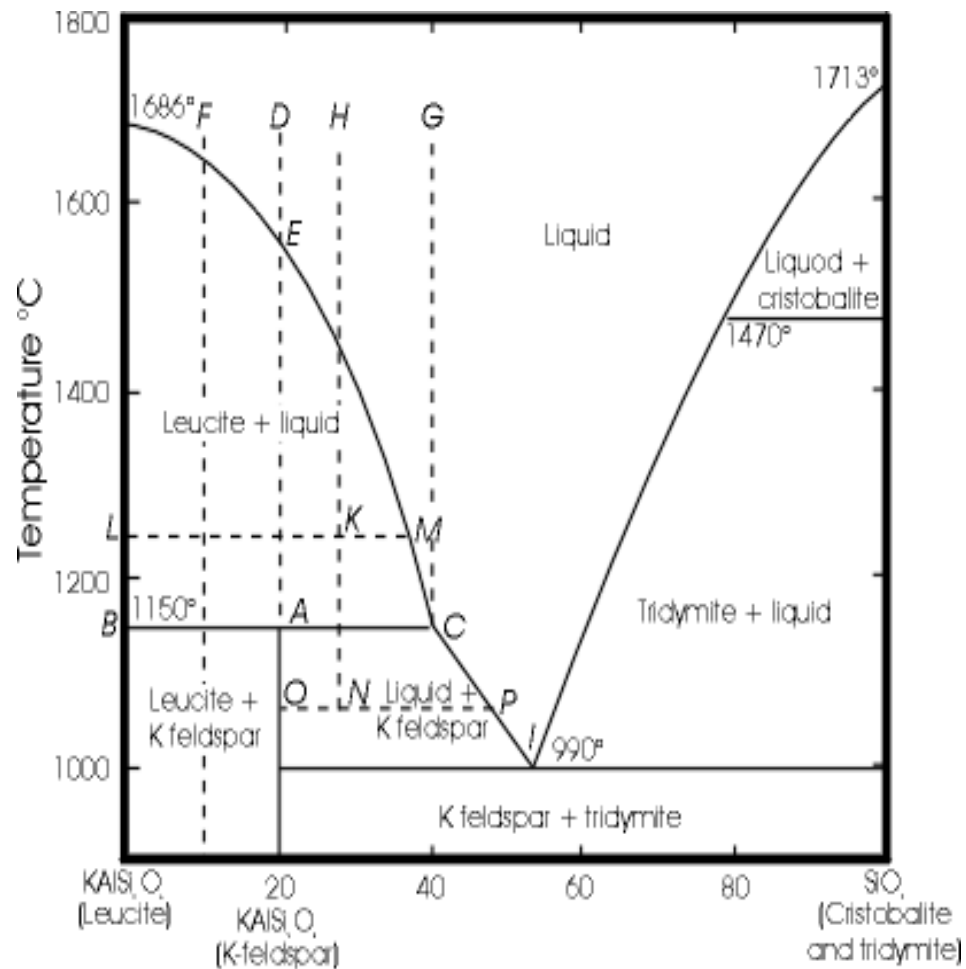
Schematický náčrt znázorňující vliv vzrůstu množství vody v tavenině na chování křivky likvidu v systému Ab-Kfs při tlaku 0.5 GPa.

Teplotní minimum (M) po překročení kritické koncentrace (C) vody v tavenině mění na eutektikum (E).



II. 4. System KAlSi_2O_6 - SiO_2

- Systém KAlSi_2O_6 - SiO_2 je dobrým příkladem inkongruentního tavení.
- Při teplotě peritektického bodu dojde k reakci taveniny s leucitem za vzniku K-živce.
- Eutektickém bodě bude mít tavenina eutektické složení a bude z ní krystalizovat K-živec a tridymit až do jejího úplného utuhnutí.
- Výsledná hornina tedy bude tvořena relativně starším K-živcem (produkt peritektické reakce) a relativně mladším K-živcem a tridymitem (produkt utuhnutí eutektické směsi).



Tavenina D

Tavenina D chladne až na teplotu E, kdy se objeví leucit a jeho krystalizace pokračuje dokud se složení pohybuje po křivce leucit+tavenina až k bodu C (1150°).

V peritektickém bodě C vzniká Kfs reakcí: Liquid + Leucit → K feldspar a Kfs vzniká dokud se nespotřebuje všechna tavenina a leucit,

Po tuto dobu zůstává teplota stejná, na konci tohoto procesu zůstane pouze Kfs

Tavenina F

Tavenina F chladne až do chvíle kdy začne vznikat leucit a pak krystalizace pokračuje až do peritektického bodu C

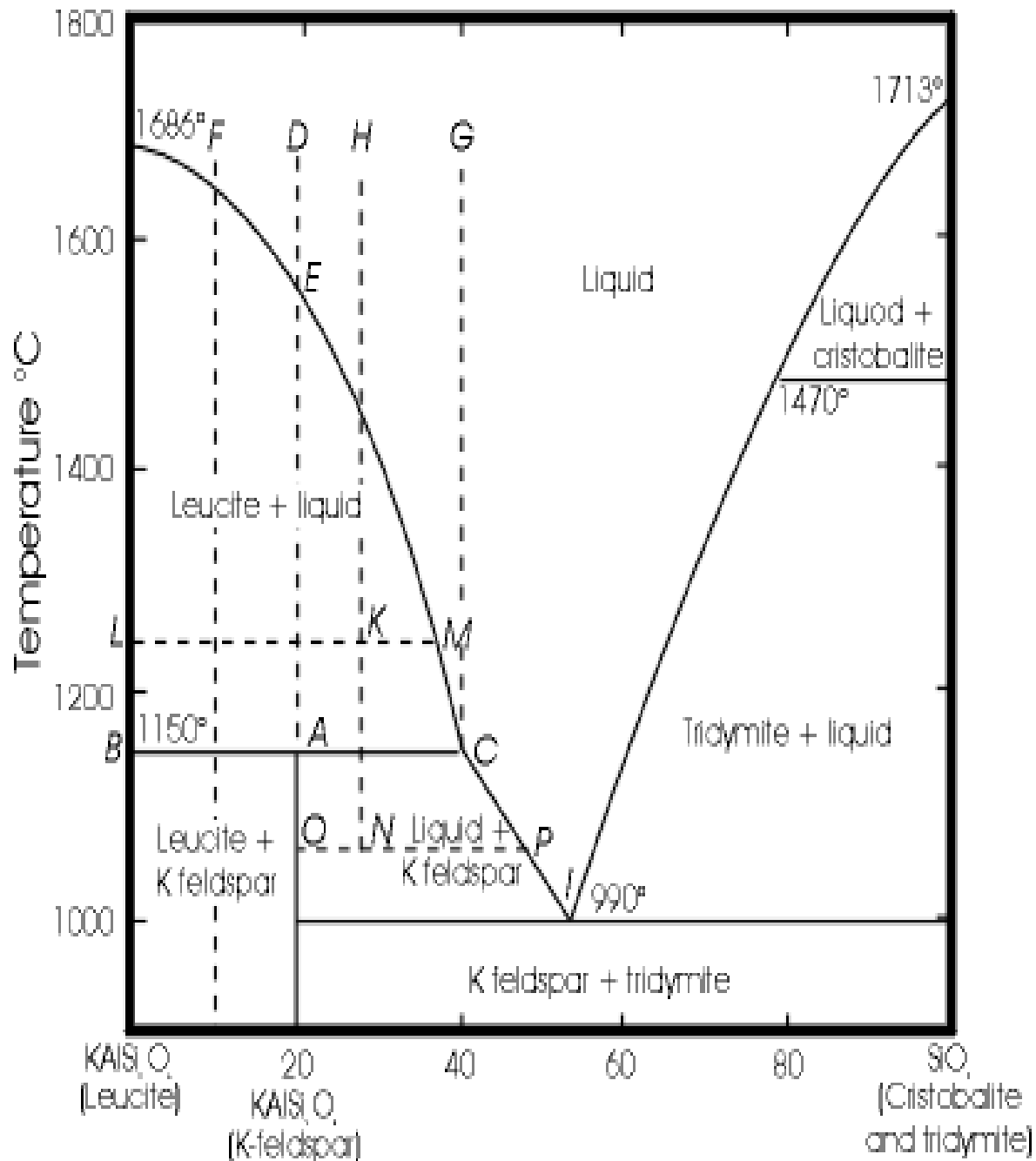
V bodě C se leucit mění na Kfs ale leucitu je více než taveniny a tak zůstane zachován a výsledkem je směs leucitu a Kfs.

Procentuální zastoupení pevné fáze pákovým pravidlem (50% leucit a 50% Kfs).

Tavenina H

Chová se zpočátku jako předchozí ale v peritektickém bodě C je v nadbytku tavenina.

Tavenina + Kfs se proto dále pohybuje do bodu I kde utuhne jako směs tridimitu a Kfs.



II. 4. System $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - KAlSi_3O_8 - SiO_2

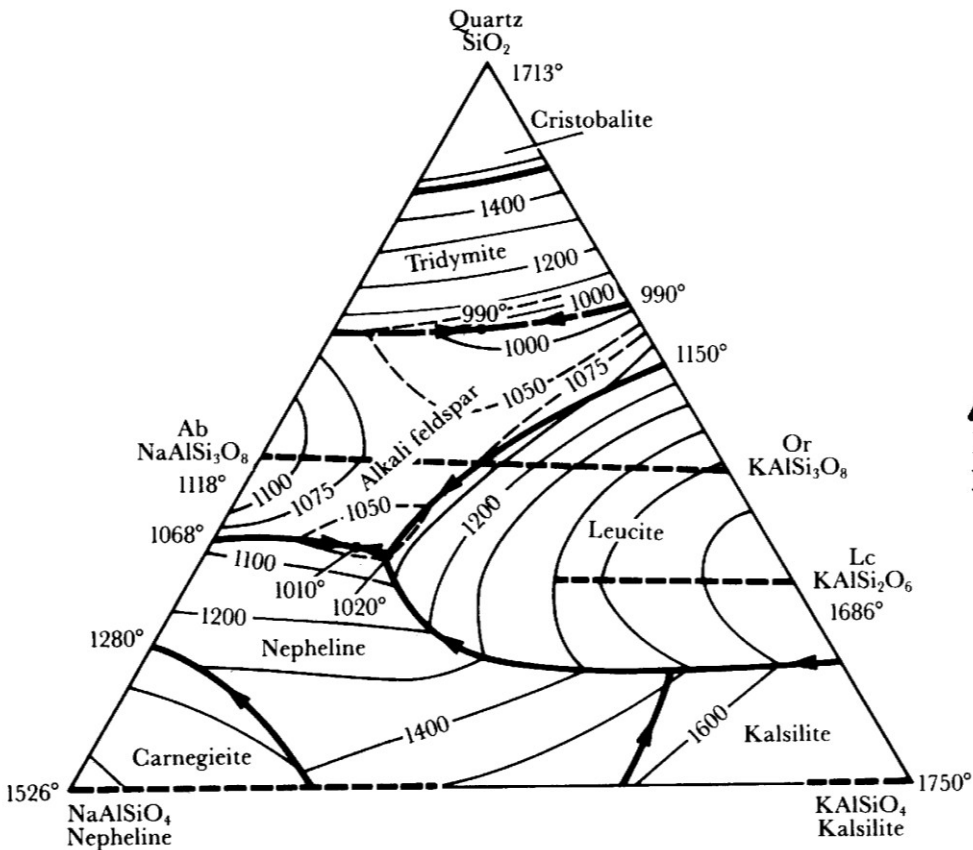


Figure 8-13 Ternary system Q-Ne-Ks at $P_{\text{H}_2\text{O}} = 1$ bar, showing temperature contours on the liquidus. Compositional ranges shown for minerals crystallizing in the system—primarily alkali feldspar, nepheline, and leucite. (After Schairer, 1950, and Fudali, 1963.)

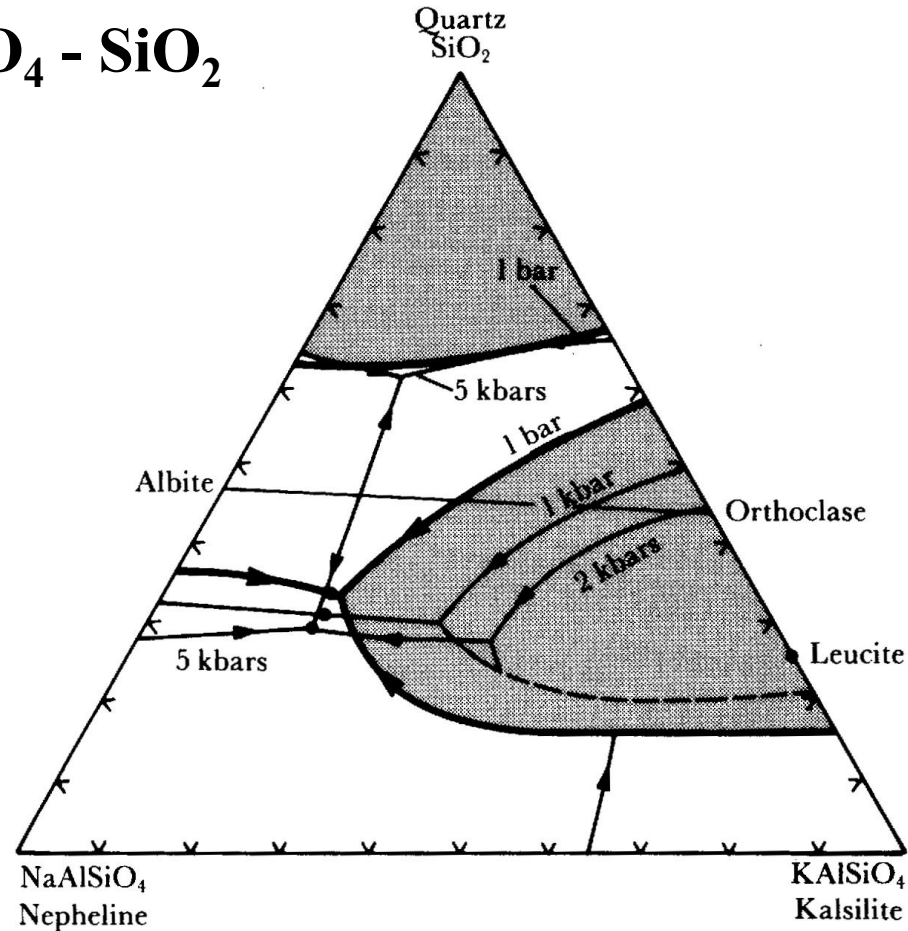


Figure 8-14 Ternary system Q-Ne-Ks showing shift of phase boundaries with water pressure. (After Schairer, 1950, Morse 1969, and Taylor and MacKenzie, 1975.)

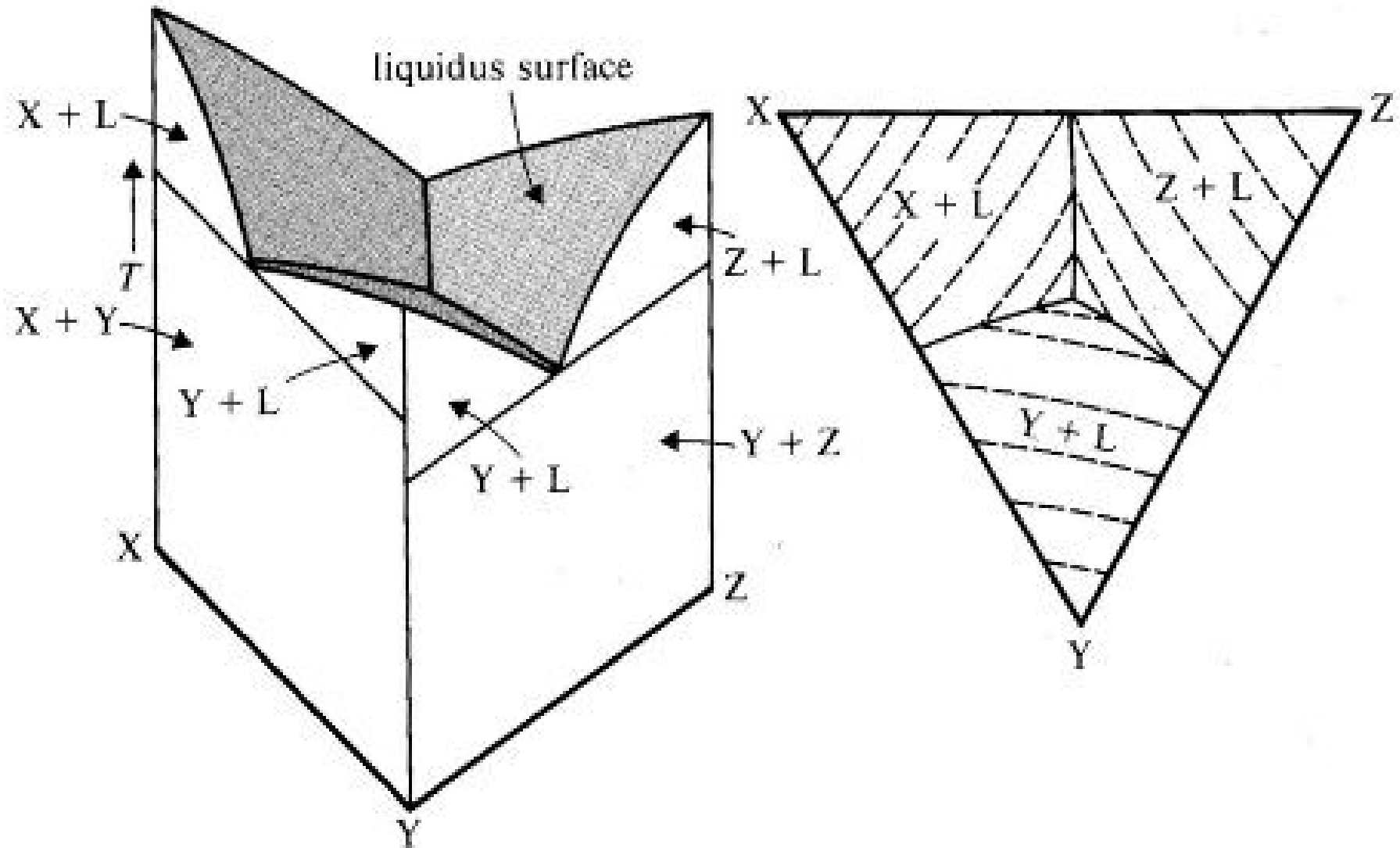
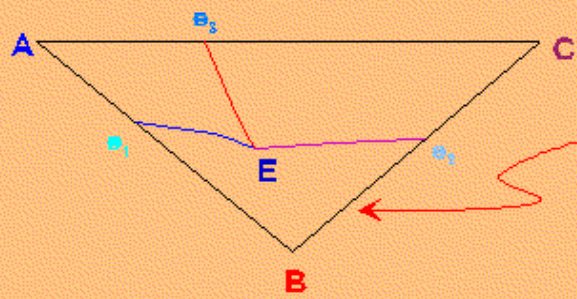


Figure 4.3 Perspective view of ternary T - X prism (left) and liquidus projection with thermal contours (right).



Copy of the base of the triangle onto which the liquidus surface has been projected, showing the positions of the binary eutectics (e_1 , e_2 , e_3) and the ternary Eutectic (E).

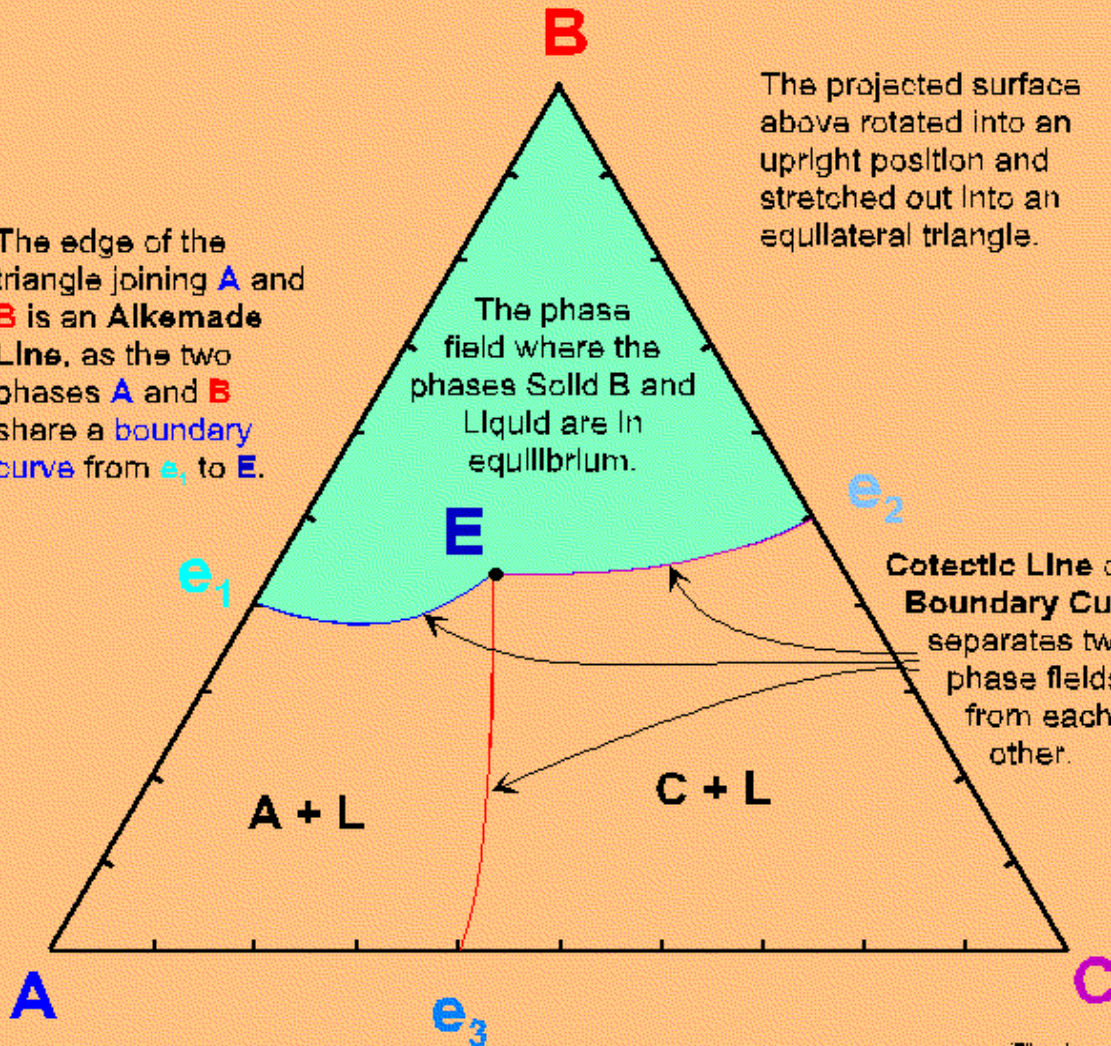
Kotectická křivka (Cotectic lines) linie ve fázovém diagramu na níž dochází ke krystalizaci dvou nebo více fází zároveň

The edge of the triangle joining **A** and **B** is an **Alkemade Line**, as the two phases **A** and **B** share a **boundary curve** from e_1 to **E**.

The projected surface above rotated into an upright position and stretched out into an equilateral triangle.

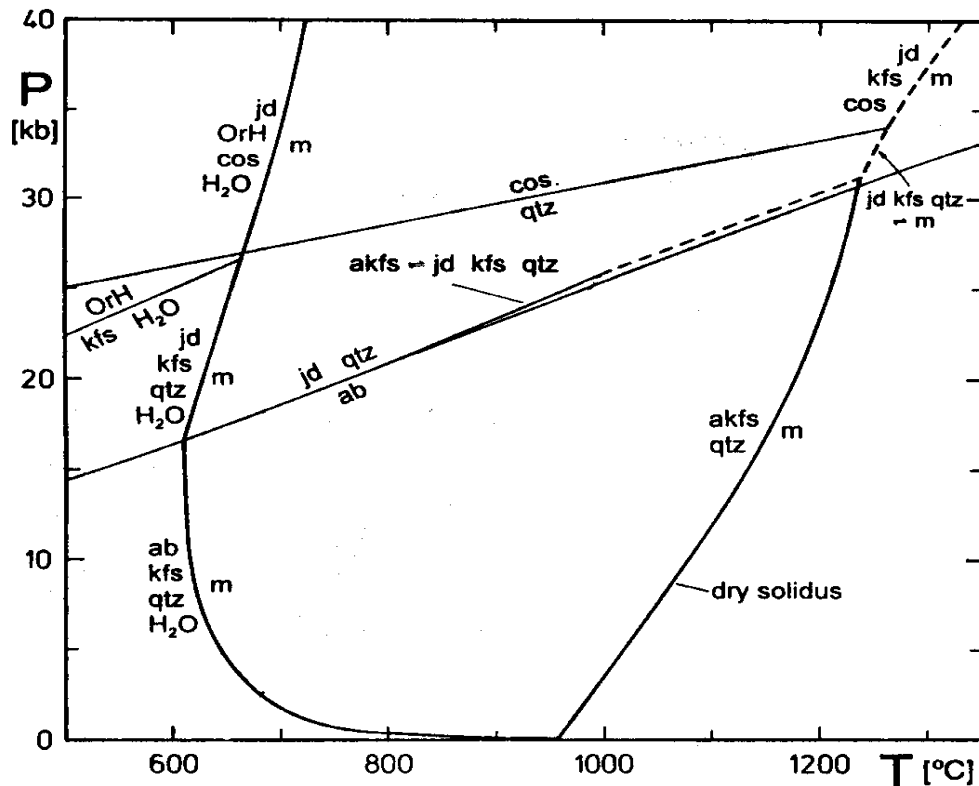
The phase field where the phases Solid **B** and Liquid are in equilibrium.

Cotectic Line or Boundary Curve separates two phase fields from each other.



II. 5. Systém Qtz-Ab-Or (Haplogranity)

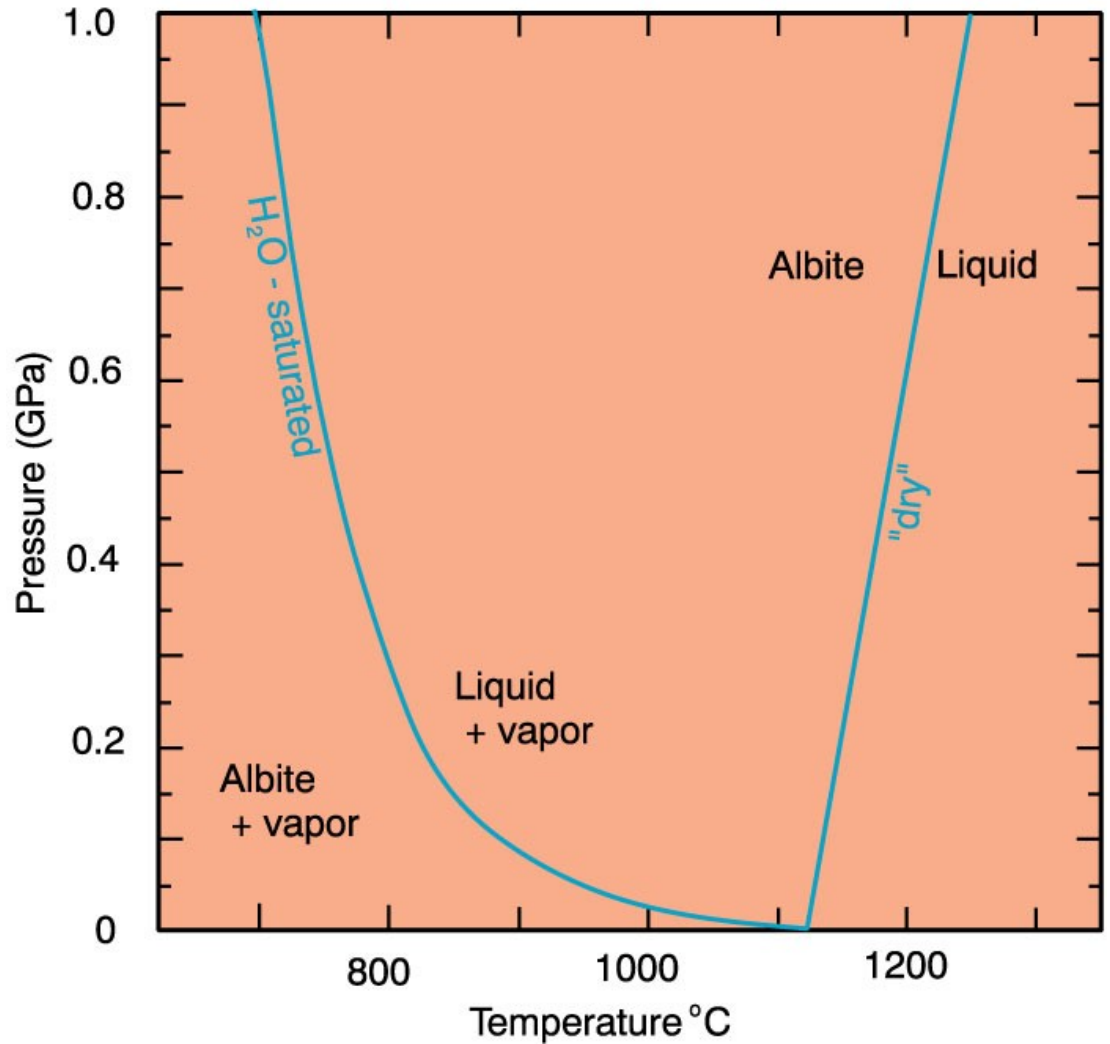
- V případě, že je tavenina nasycena vodou, můžeme pozorovat v intervalu od tlaku 1 bar do 4 kbar značný pokles teploty solidu s nárůstem tlaku.
- S dalším nárůstem tlaku je již pokles teploty podstatně menší.
- S poklesem aktivity vody v haplogranitické tavenině se teplota solidu posouvá do vyšších teplot.
- Poněkud jinak se chová „suchá“ haplogranitická tavenina, u níž s nárůstem tlaku naopak stoupá teplota solidu a to zhruba o 10°C na 1 kbar (obr.).



PT Diagram zobrazující křivky solidu pro taveninu vodou nasycenou a bezvodou v systém Qtz-Ab-Or (akfs – alkalické živce, jd – jadeit, cos - coesit, m – tavenina). Diagram je převzat z práce Johannese a Holtze (1996).

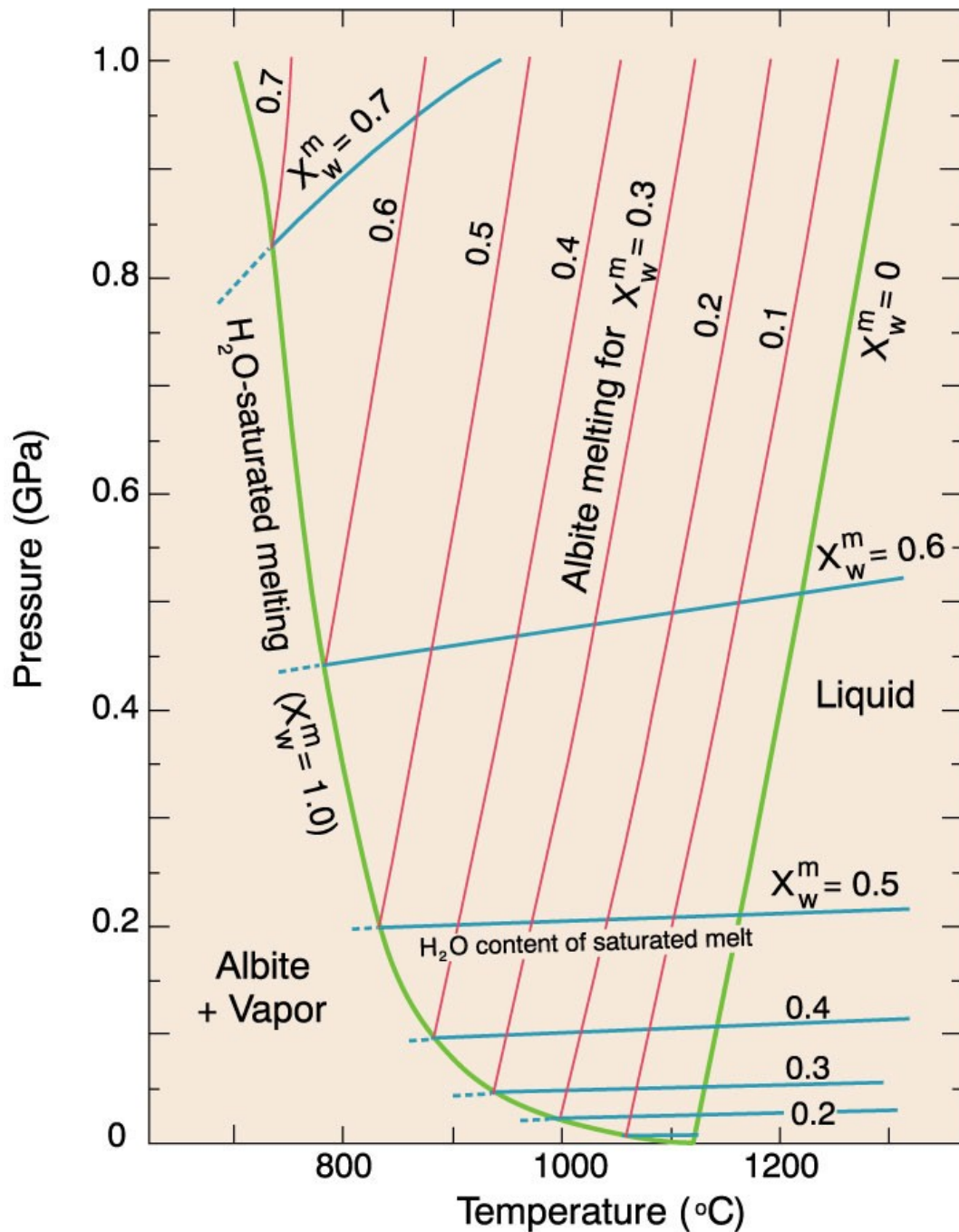
II. 6. Systém Ab-H₂O

- Tvar křivky vodou nasycené a bezvodé taveniny je odlišný



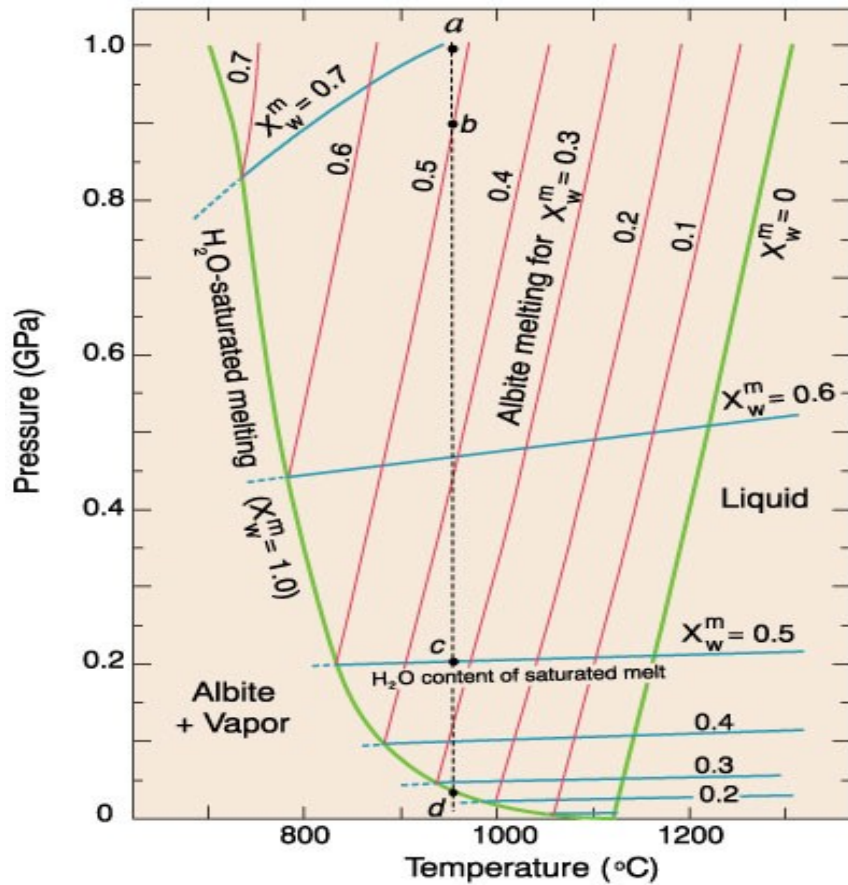
*The effect of H₂O saturation on the melting of albite, from the experiments by Burnham and Davis (1974). *A J Sci* 274, 902-940. The "dry" melting curve is from Boyd and England (1963). *JGR* 68, 311-323.*

- Červená křivka = tavení pro dané množství mol % vody v tavenině (X_w^m)
- Modrá křivka = obsah vody ve vodou nasycené tavenině
- Pod modrou křivkou je tavenina s určeným množstvím vody přesycená



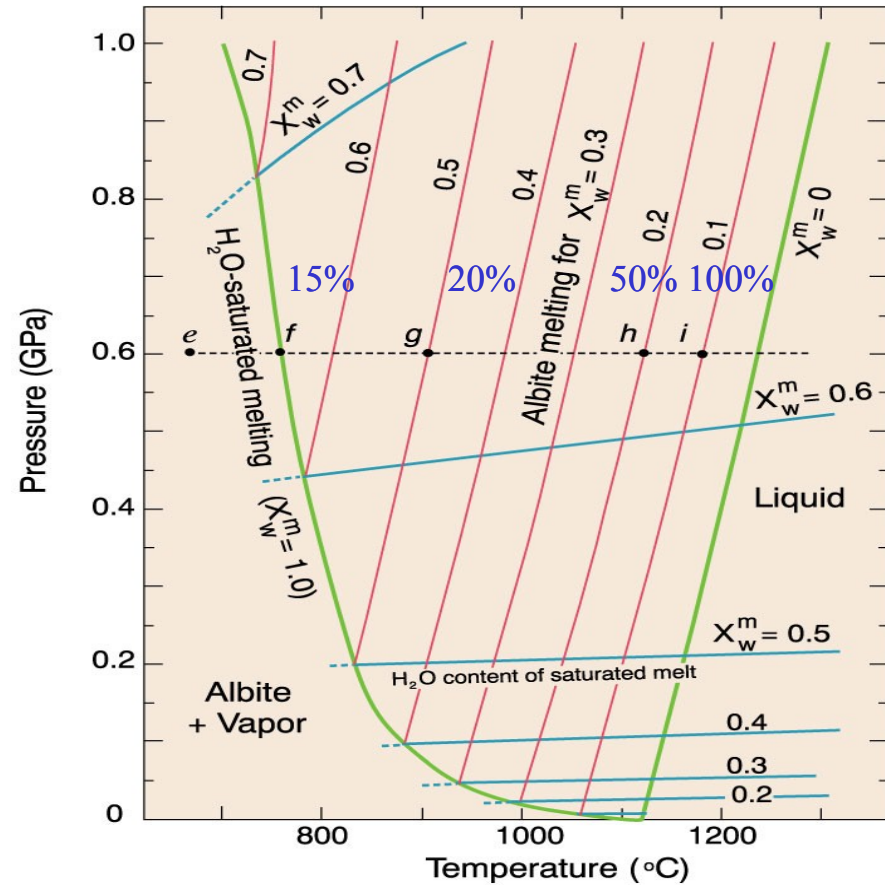
Isotermální podmínky

- Vývoj taveniny s poměrem Ab:voda = 1:1 ($X_w^m = 0,5$) z bodu a 925°C a 1 GPa množství mol % vody v tavenině do bodu d při zemském povrchu.
- Stoupající magma s fixním obsahem vody nekrytaluje
- Z bodu b do c se magma zahřívá (superheated) v bodě c je tavenina vodou saturovaná
- Z bodu c do d roste množství volné vody a množství vody v tavenině klesá na 30%.
- Při povrchu dokonce uvolňuje vodu do okolí

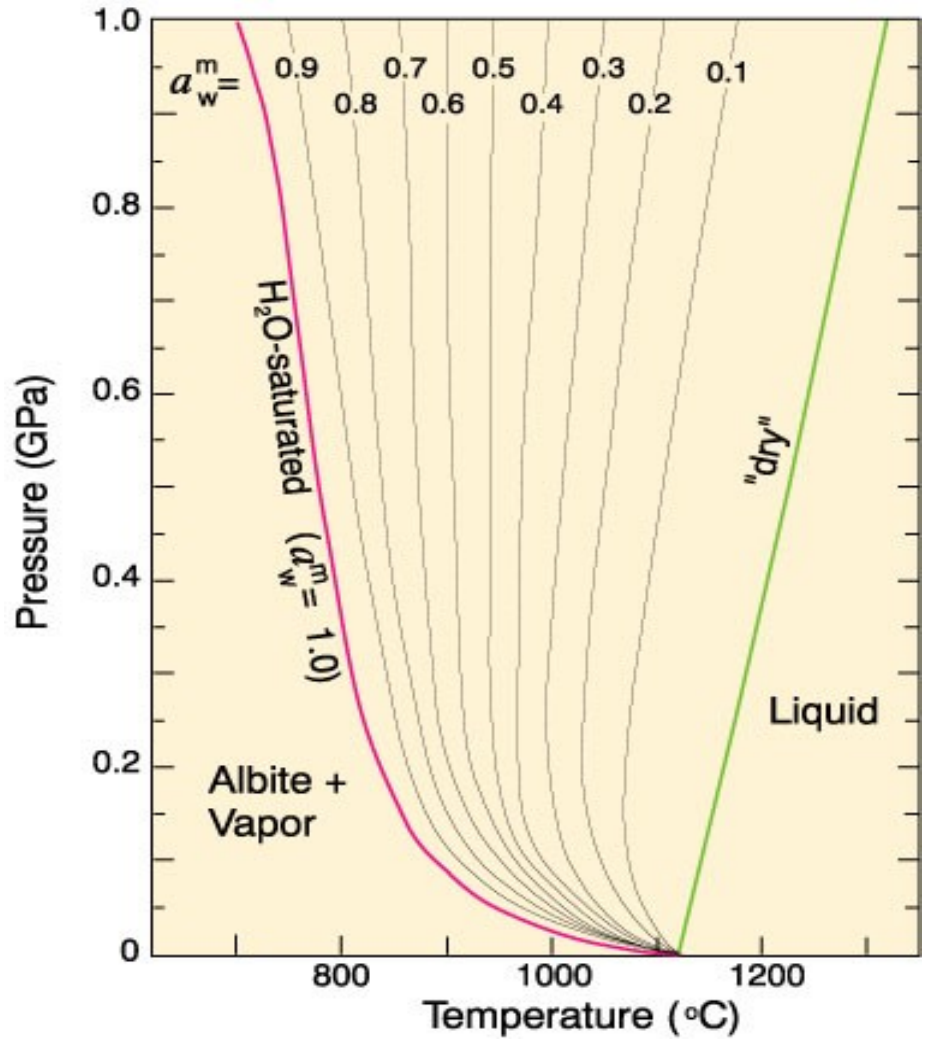
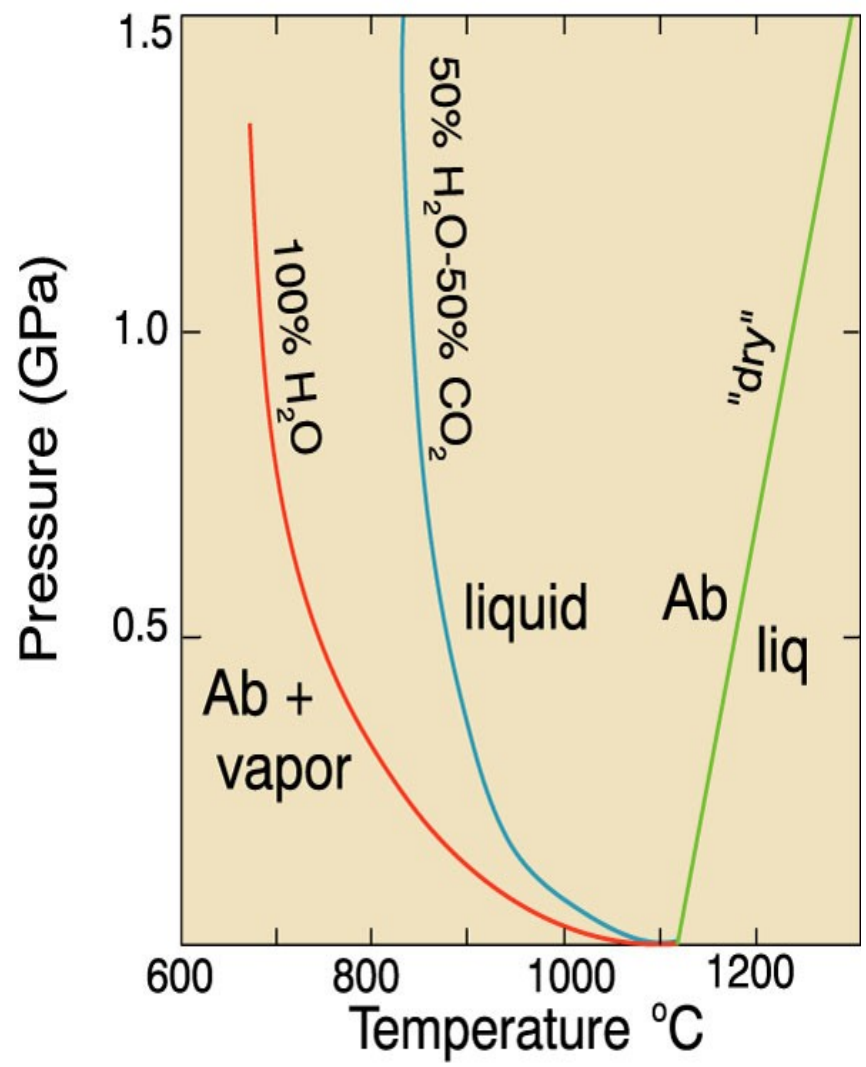


Isobarické podmínky

- Vývoj taveniny s obsahem vody 10 mol % z bodu i 0,6 GPa.
- Se snižující se teplotou klesá množství taveniny.
- V bodě e je albit krystalovaný a v bodě f vzniká tavenina avšak protože obsah vody je jen 10% vznikne jen 15% taveniny (10/65)
- V bodě g vznikne 20% taveniny (10/50) v bodě h 50% a teprve v bodě i 100%
- Teplotu tavení výrazně ovlivňuje přítomnost vody ale množství taveniny je výrazně závislé na množství vody.



- Tavení albitu s fixní aktivitou vody
- Fluida se skládají ze směsy CO₂-H₂O ($P_f = P_{total}$)

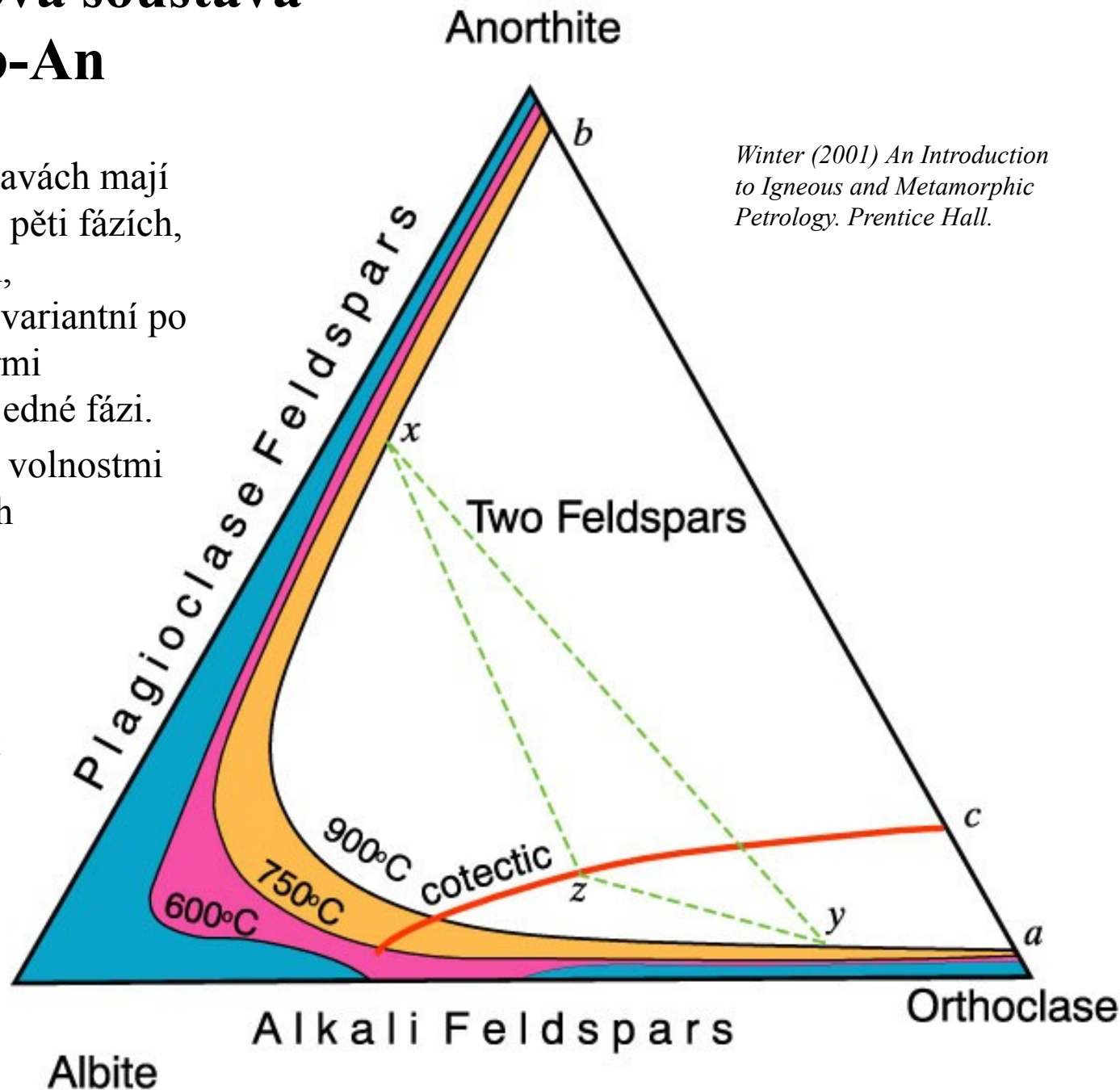


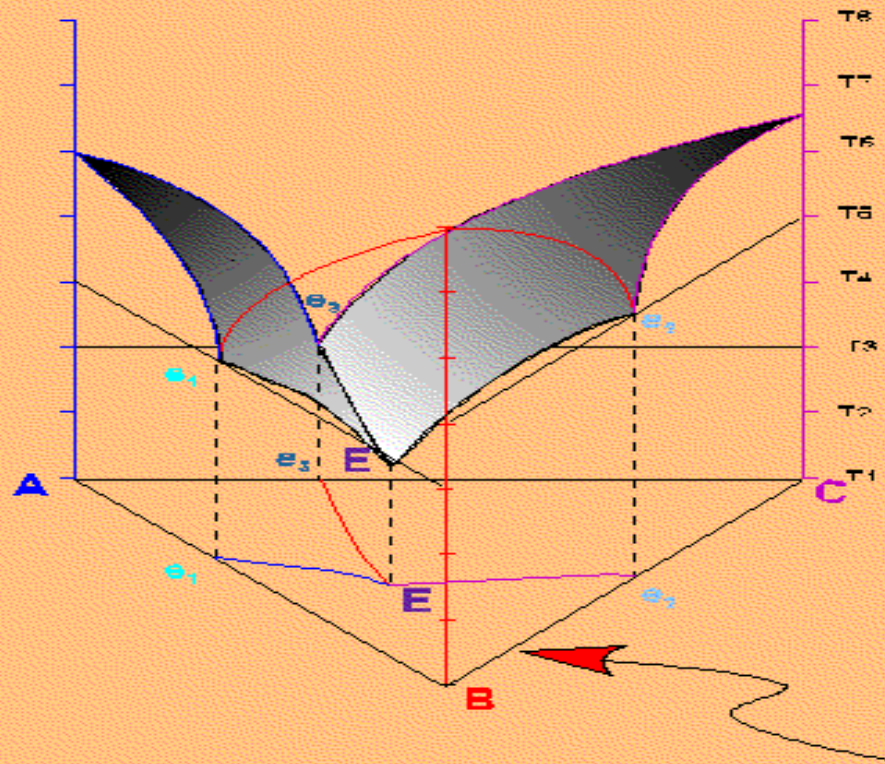
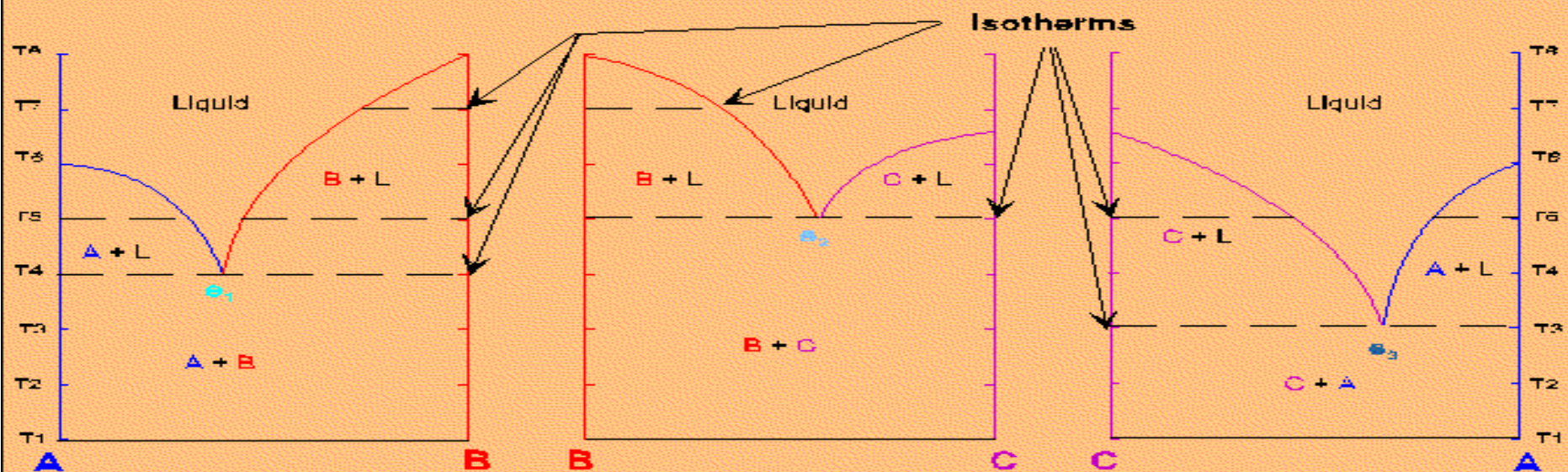
From Burnham and Davis (1974). *A J Sci.*, 274, 902-940.

II. 7. Třísložková soustava

Kfs-Ab-An

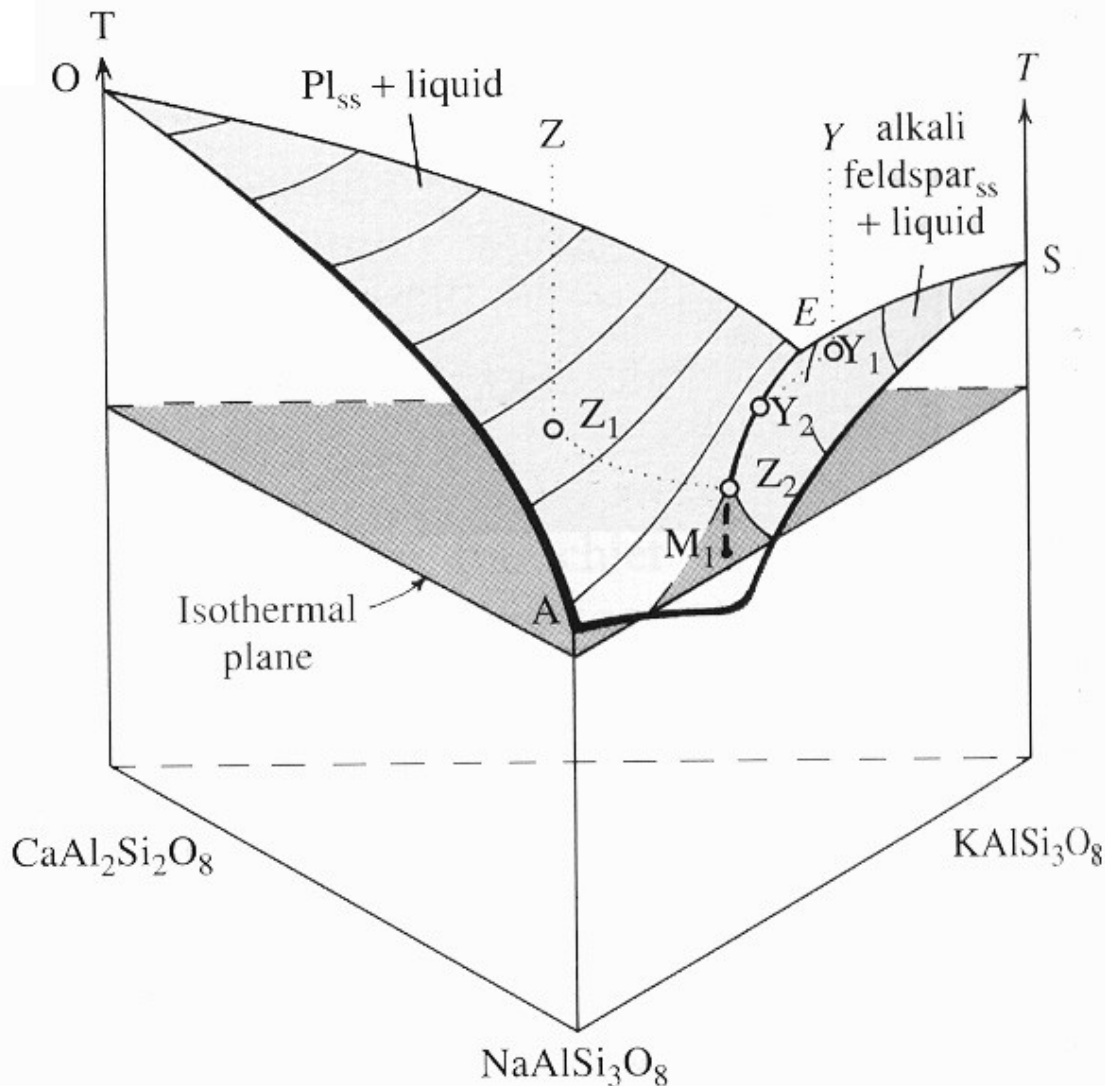
- V trojsložkových soustavách mají invariantní asociace po pěti fázích, univariantní po čtyřech, divariantní po třech, trivariantní po dvou a asociace se čtyřmi volnostmi mají jen po jedné fázi.
- Asociace s 5 nebo více volnostmi nejsou v trojsložkových soustavách možné.
- Trojúhelník ukazuje složení koexistujících živců při teplotě 900°C



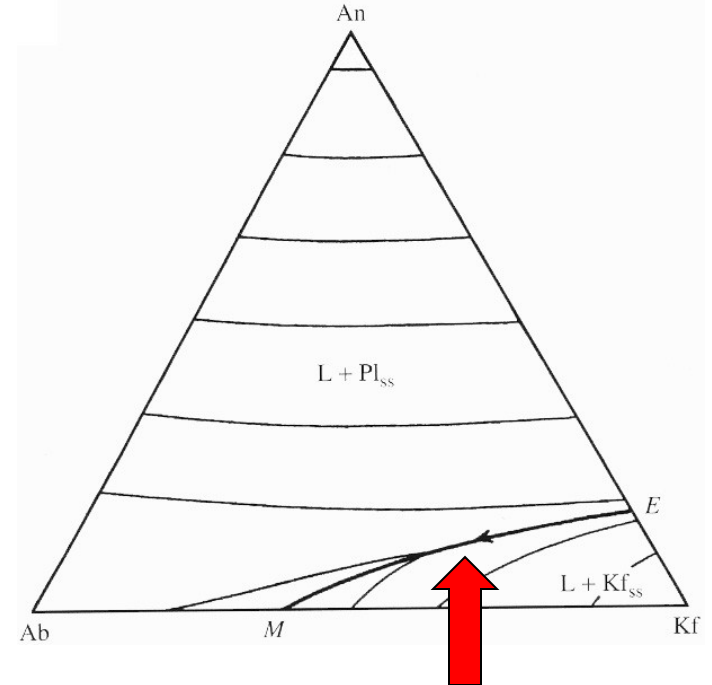


Each ternary diagram is constructed using three binary diagrams. The **AB**, **BC** and **CA** systems above. The ternary diagram represents the projection of the liquidus surface onto the base of the triangle formed when the binary diagrams are joined together. This surface is contoured with the temperature interval representing the contour interval.

The projection of the three dimensional liquidus surface onto the base of the triangle to present a two-dimensional view of the surface.



Průřez přes povrch likvidu



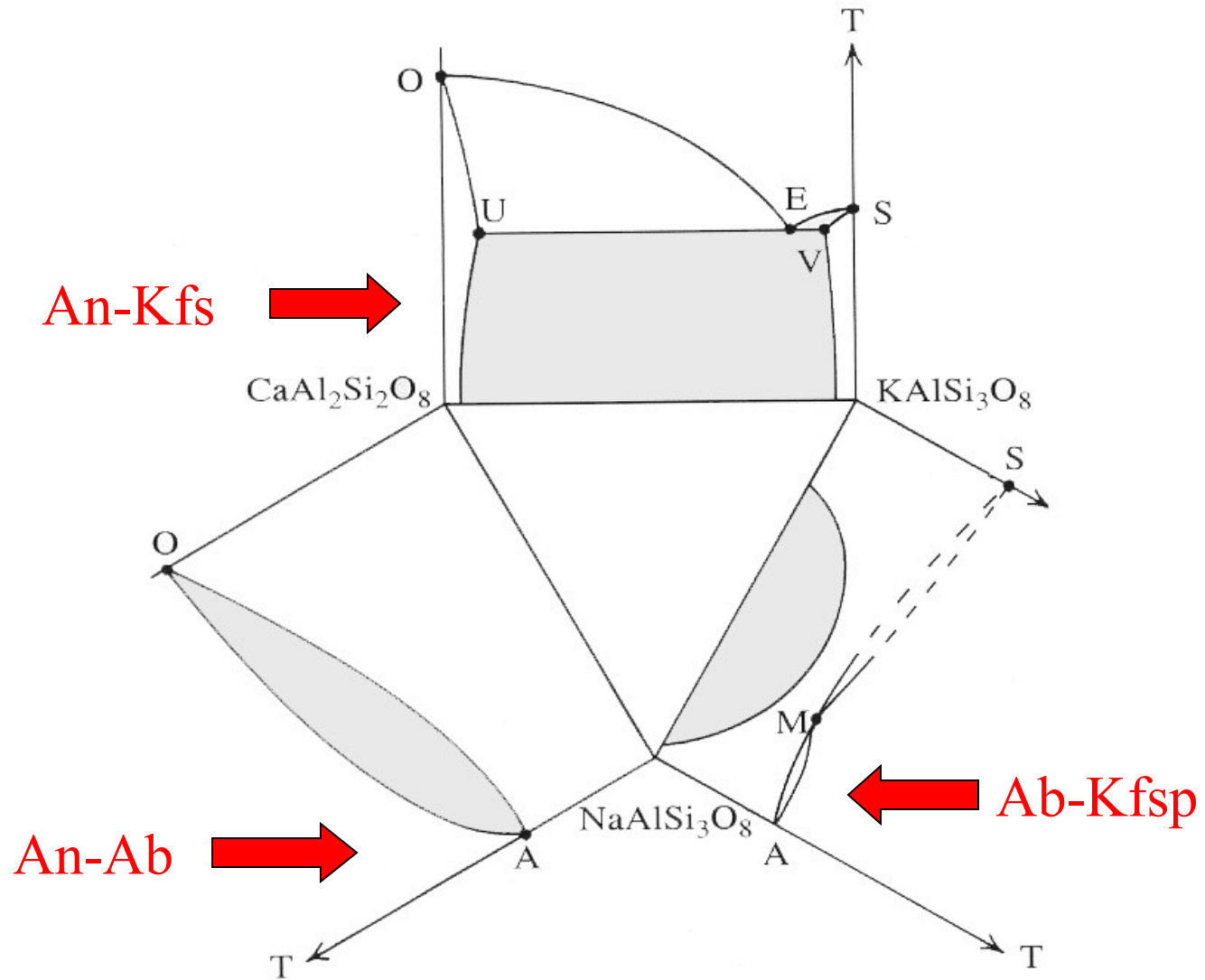
teplota padá z E směrem k M

cotectic

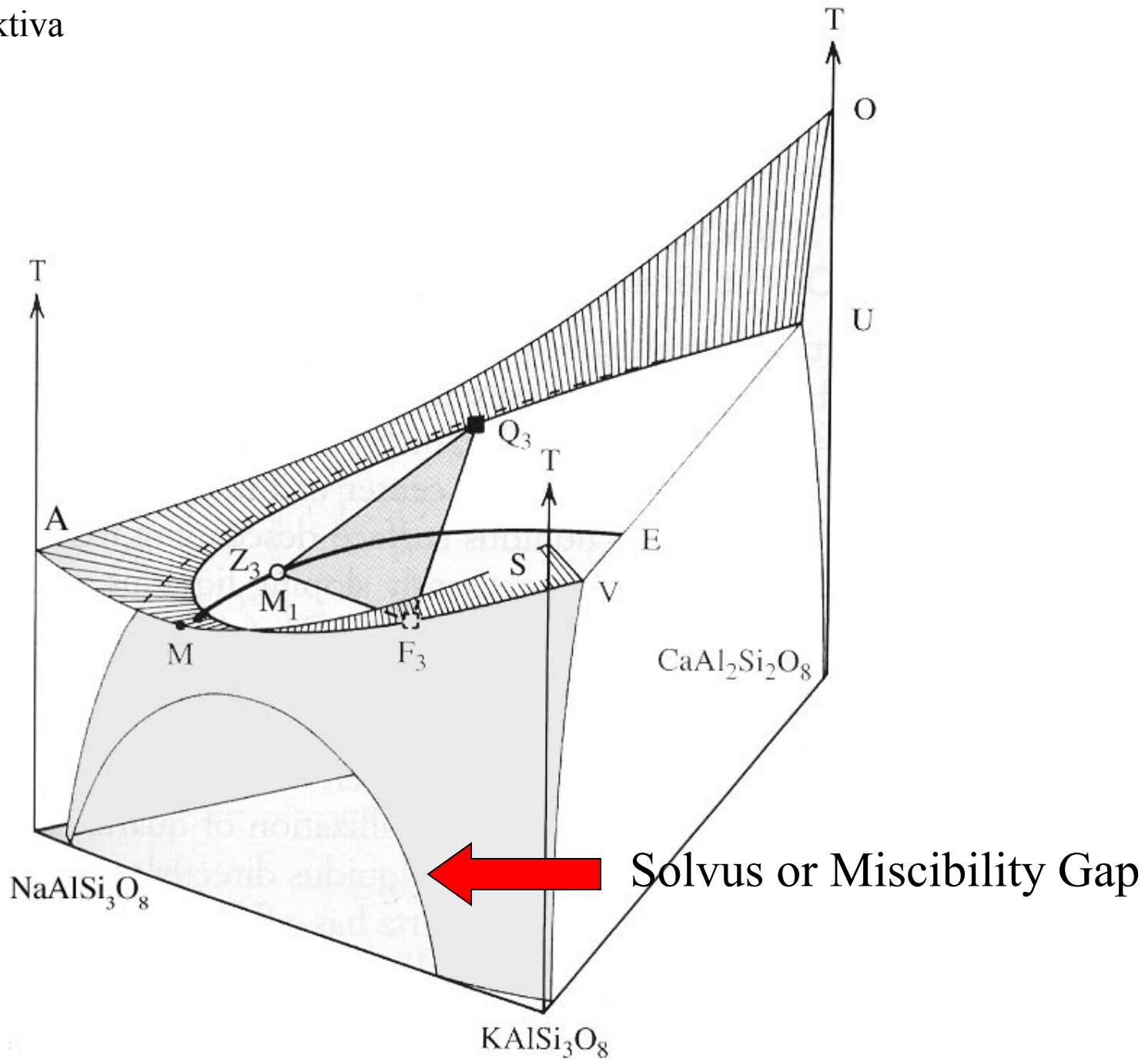
The conditions of pressure, temperature and composition under which two or more solid phases crystallize at the same time from a single liquid over a finite range of decreasing temperature.

1994, 66, 580

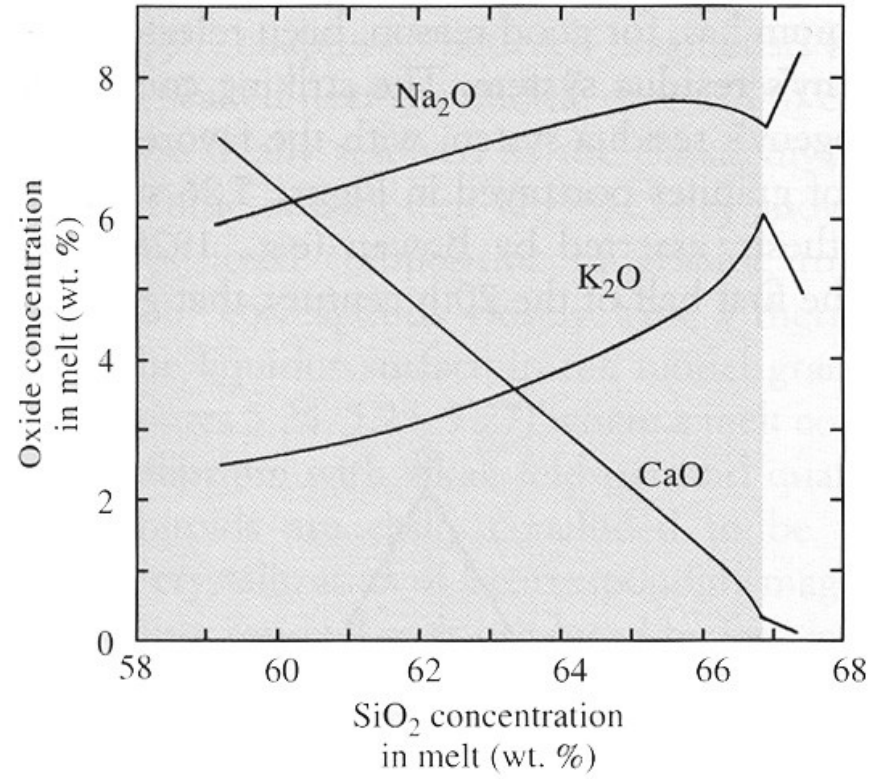
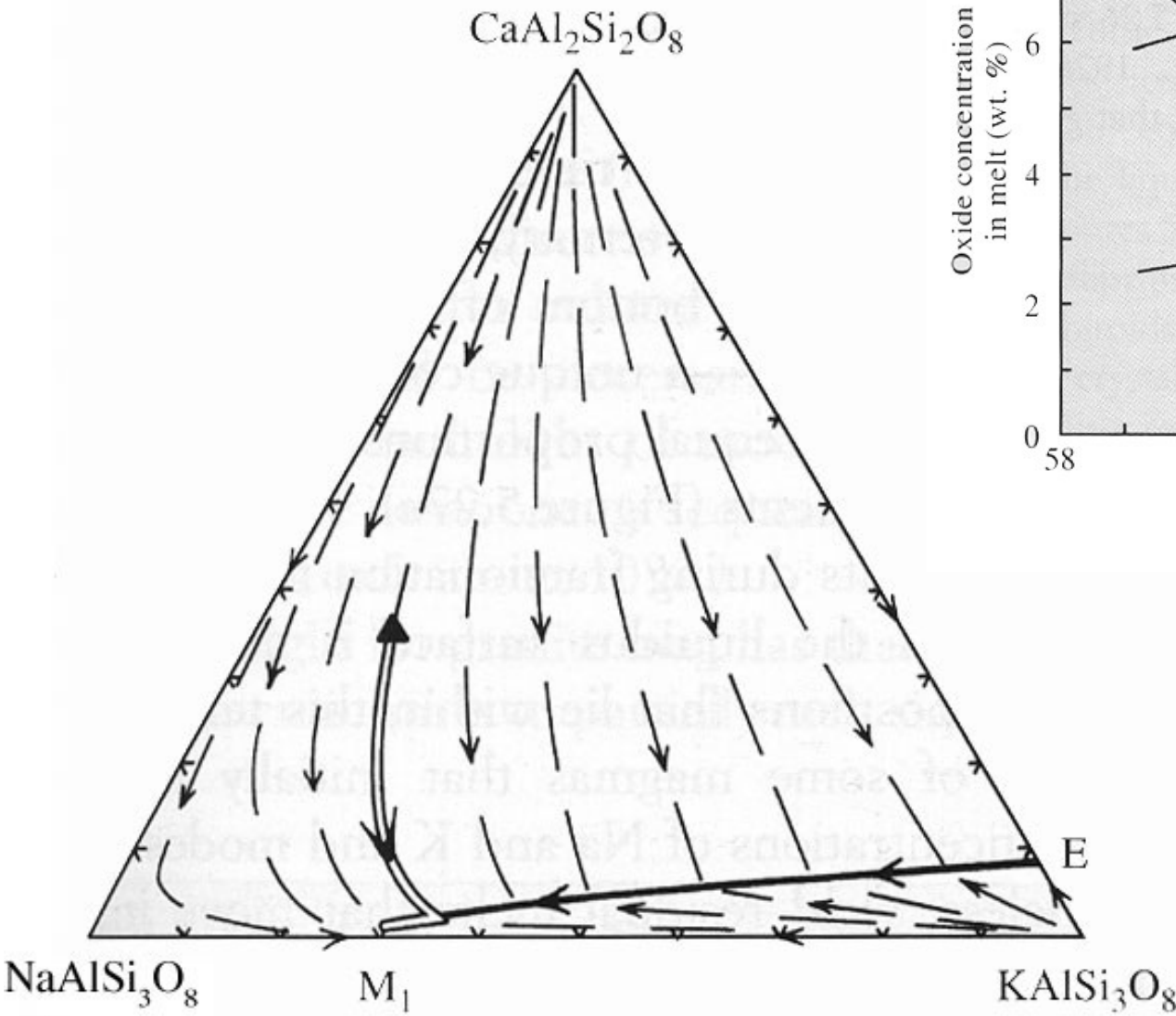
System An-Kfs-Ab



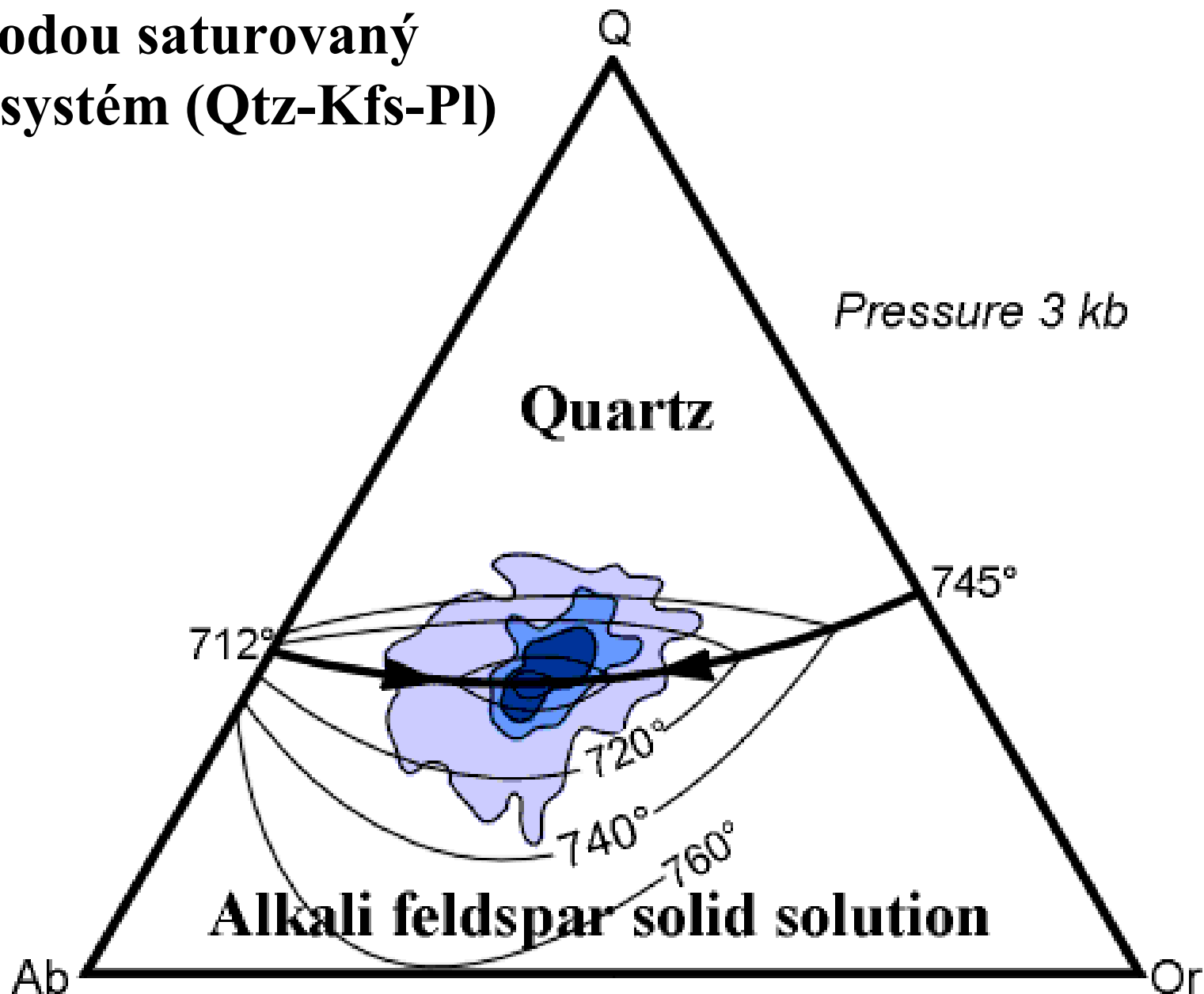
An-Ab-Kfs perspectiva



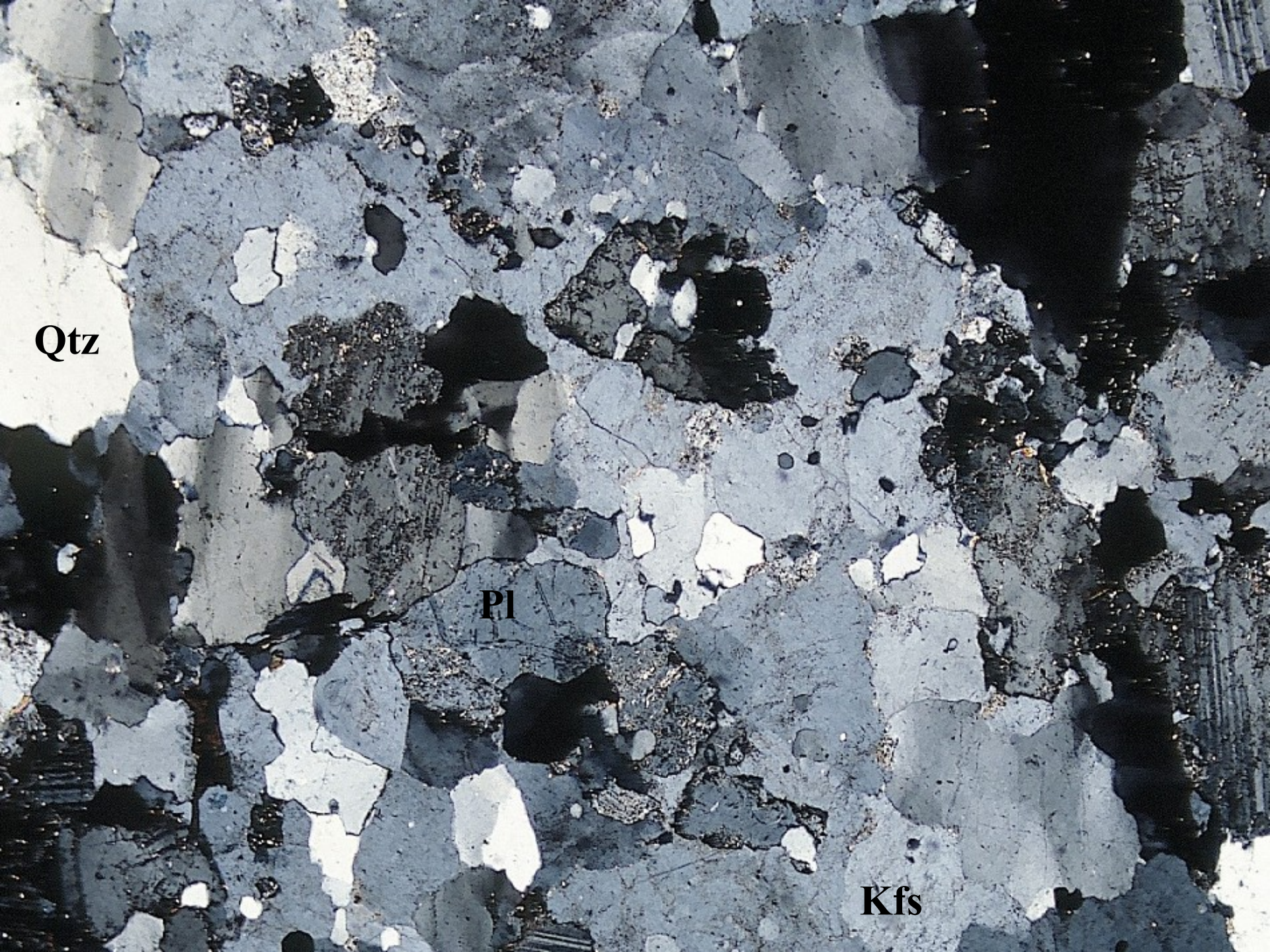
Vývoj chemického složení v systému An-Ab-Kfs



II. 8. Vodou saturovaný granitový systém (Qtz-Kfs-Pl)



Shaded area is contour of 3000 "granites"

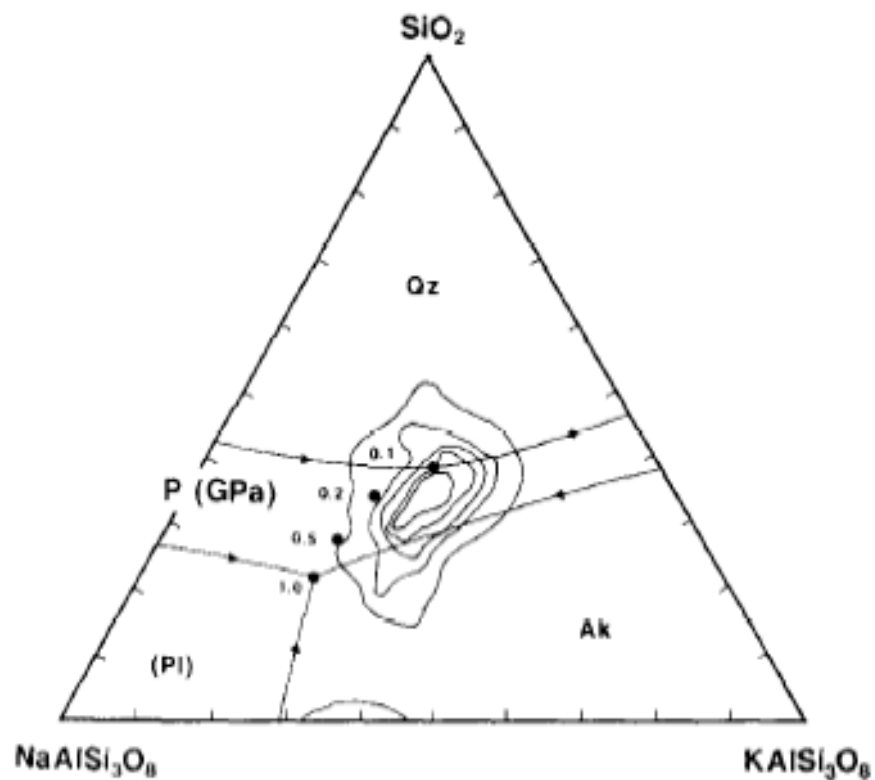
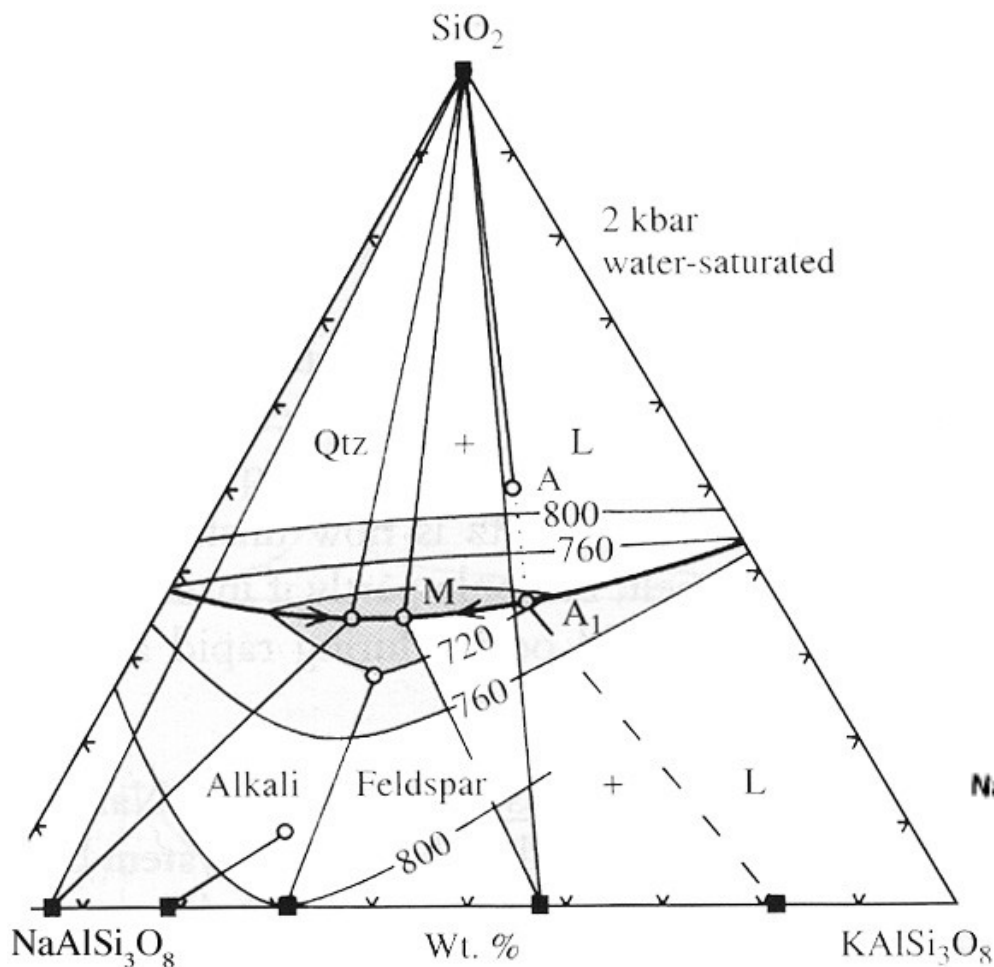


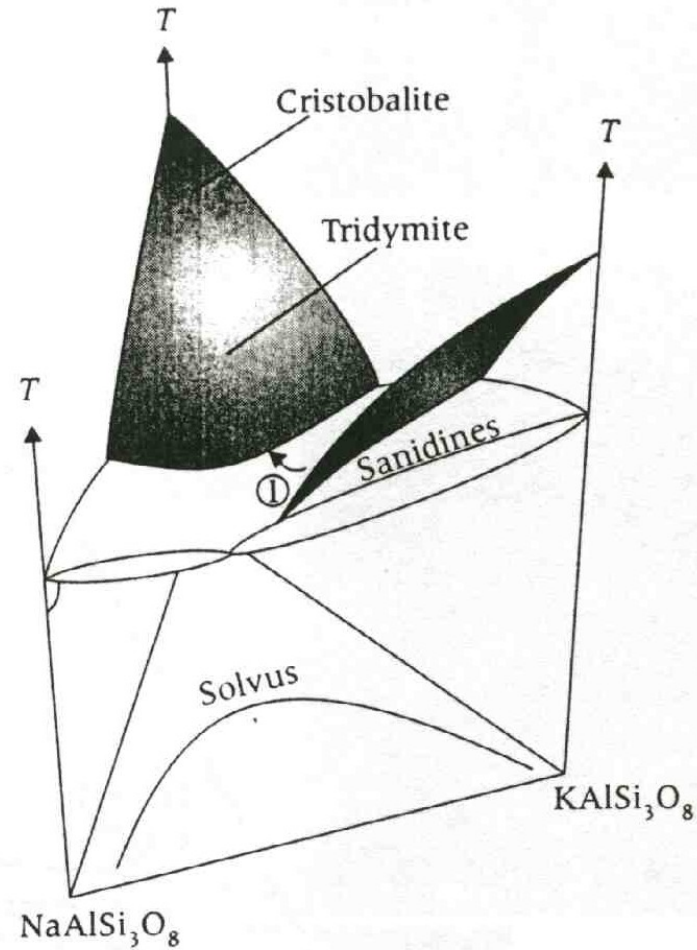
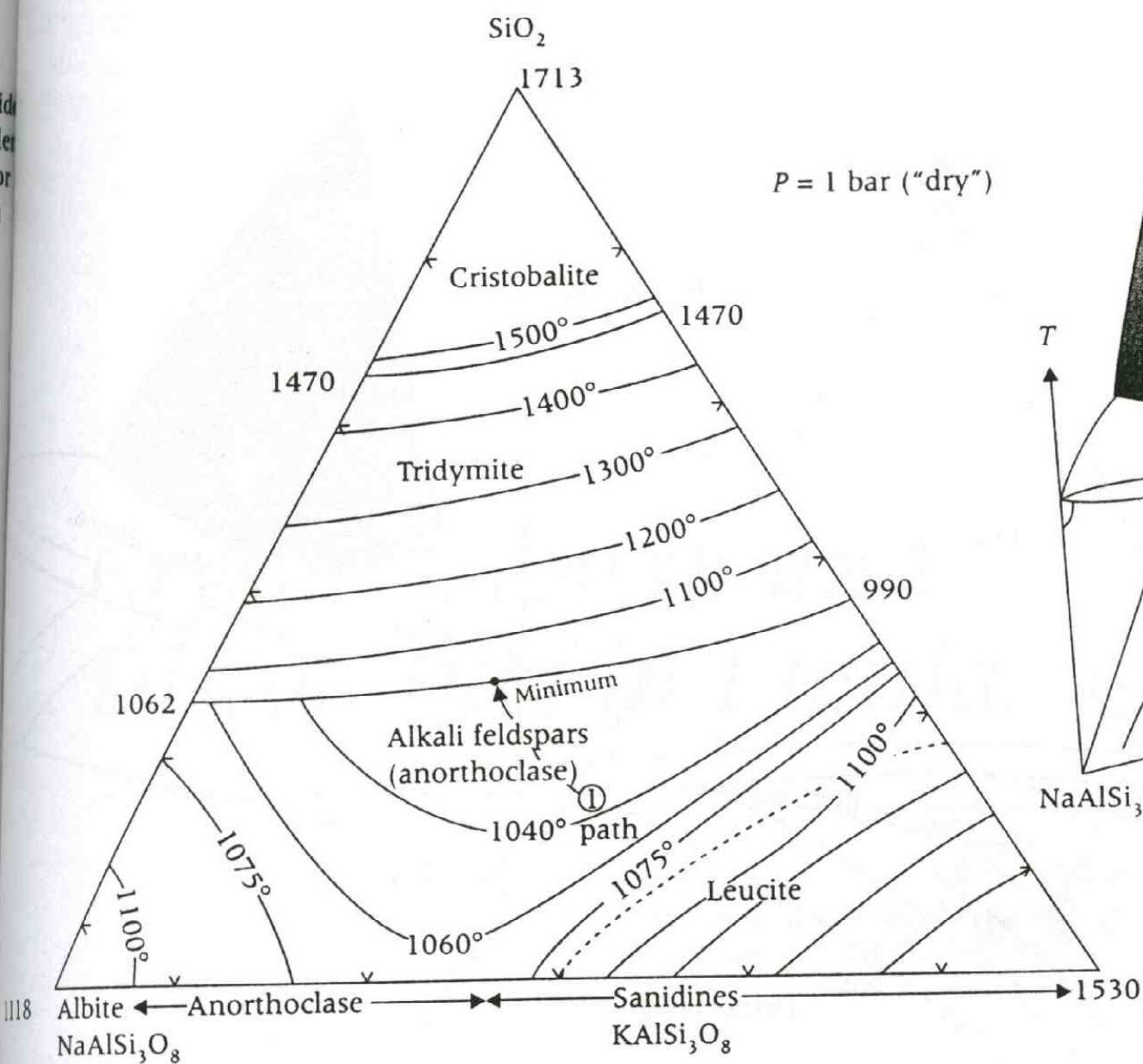
Qtz

Pl

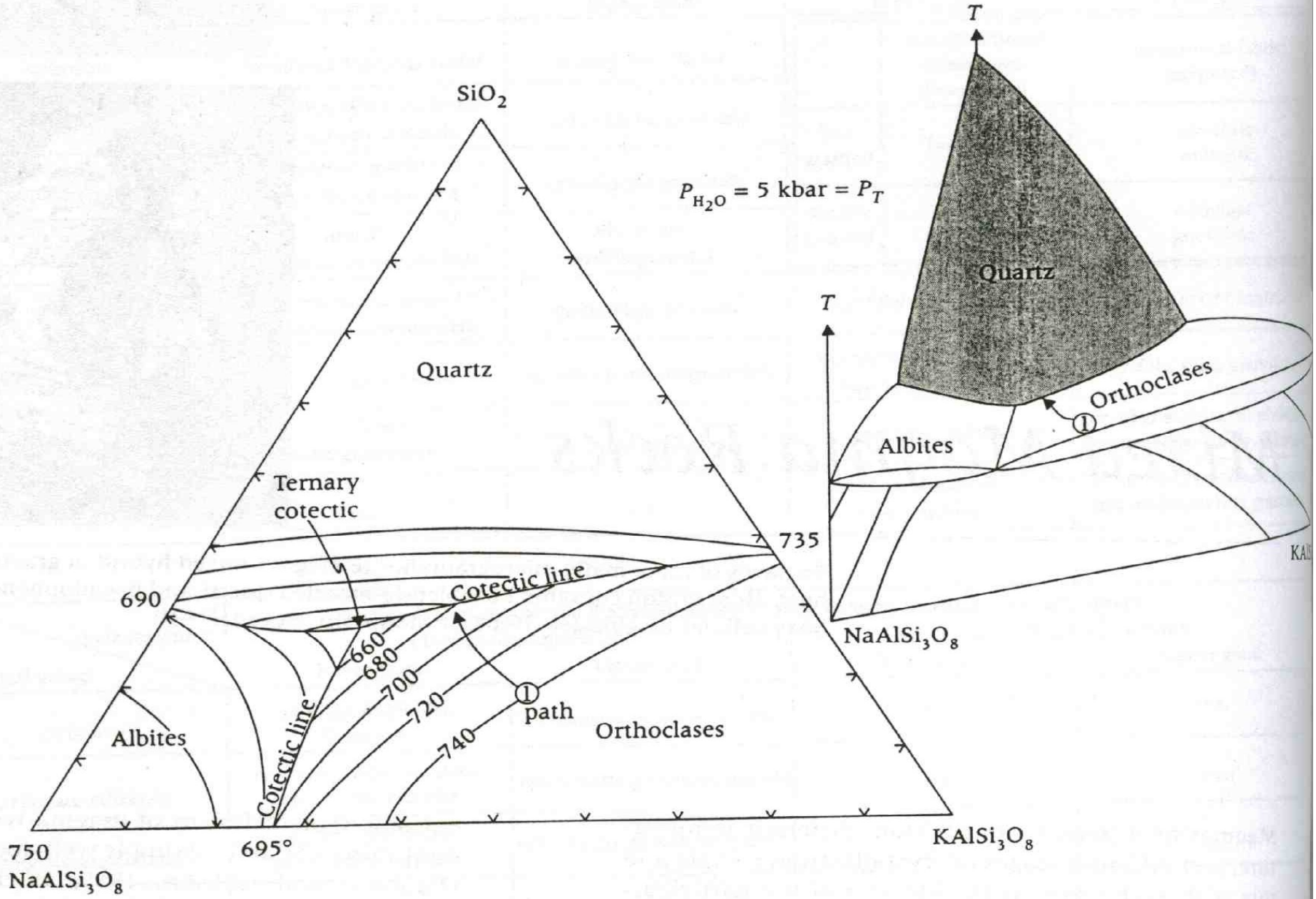
Kfs

- Tuttle a Bowen (1957) studovaly systém Qtz-Kfs-Pl-H₂O pro tlaky 0,05-0,3 Gpa.
- Diagram představuje složení eutektika a zároveň první taveniny v definovaném systému.
- Za tlaků v rozsahu atmosferického až 0,35 Gpa leží termální minimum na kotektické linii tavenina-Kfs-Qtz-H₂O a za tlaků nad 0,35 Gpa se mění na ternární eutektikum tavenina-Kfs-Pl-Qtz-H₂O.

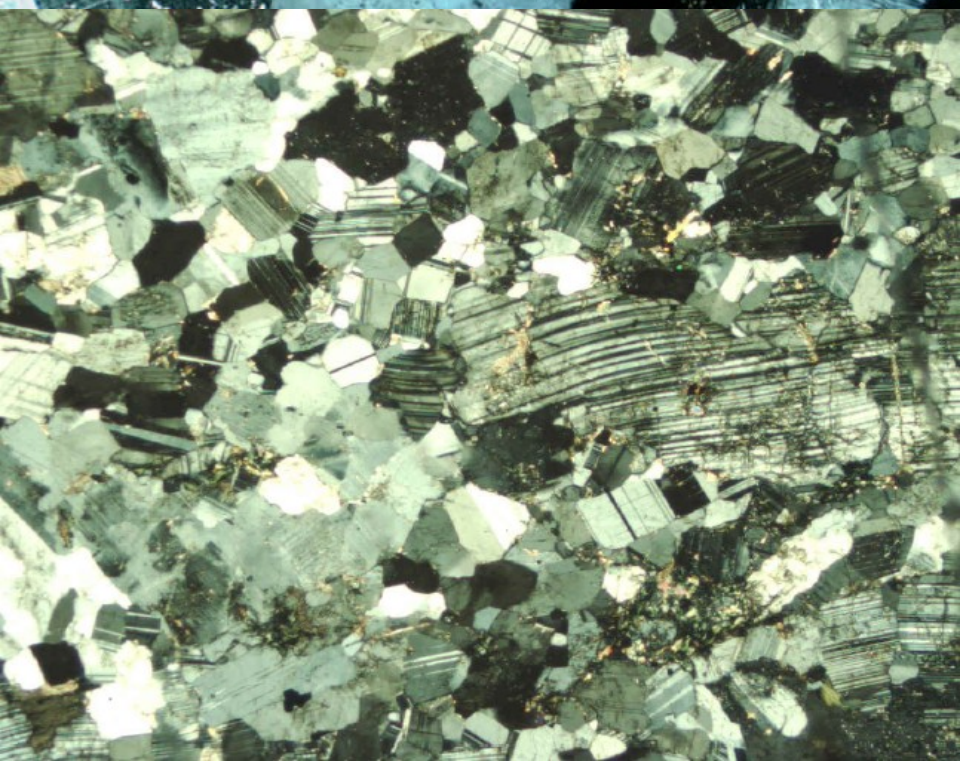
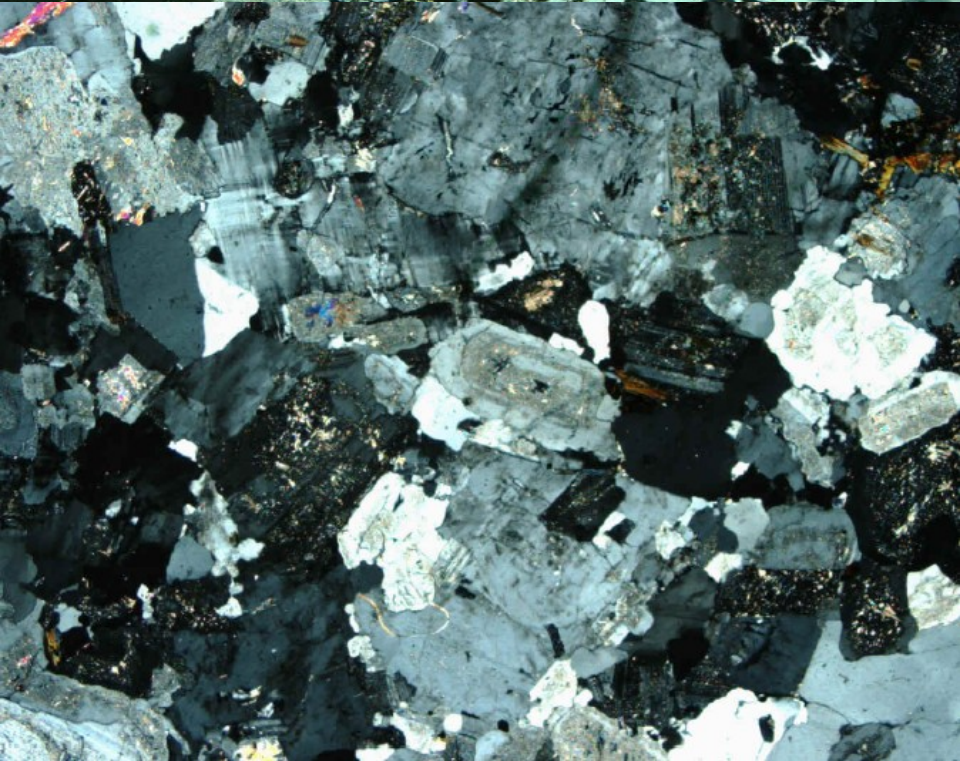
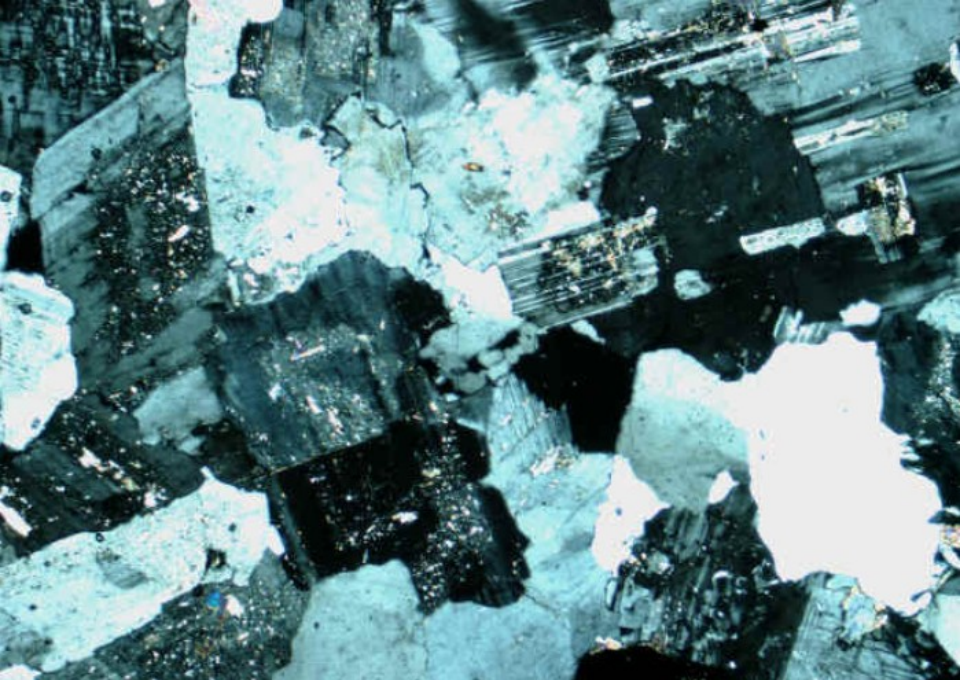
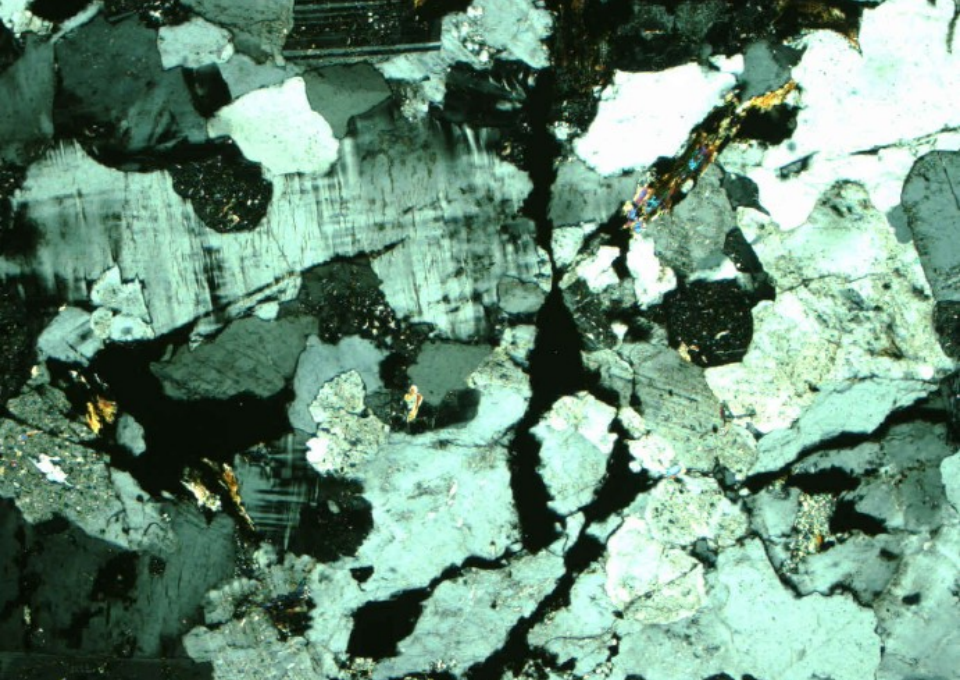


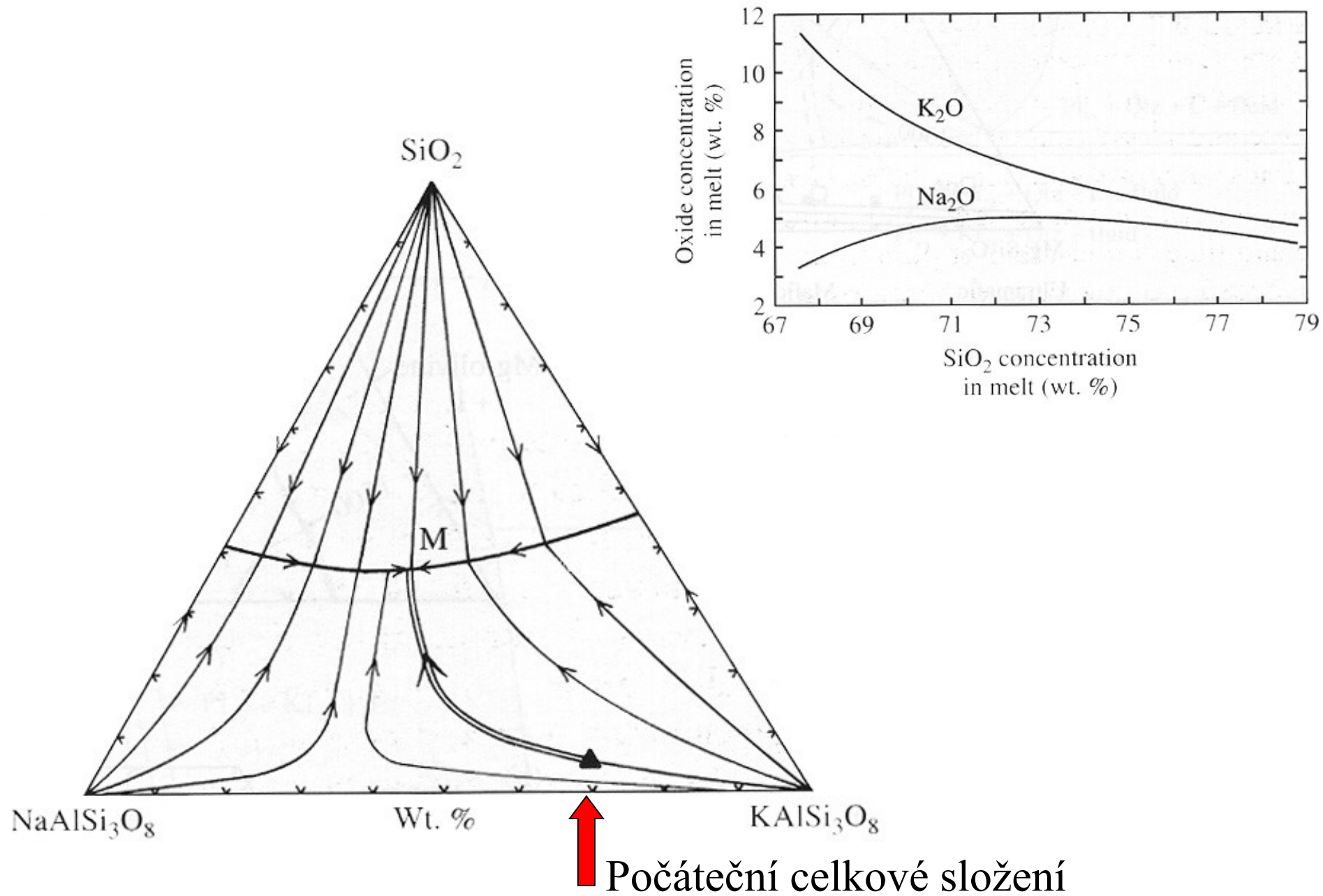


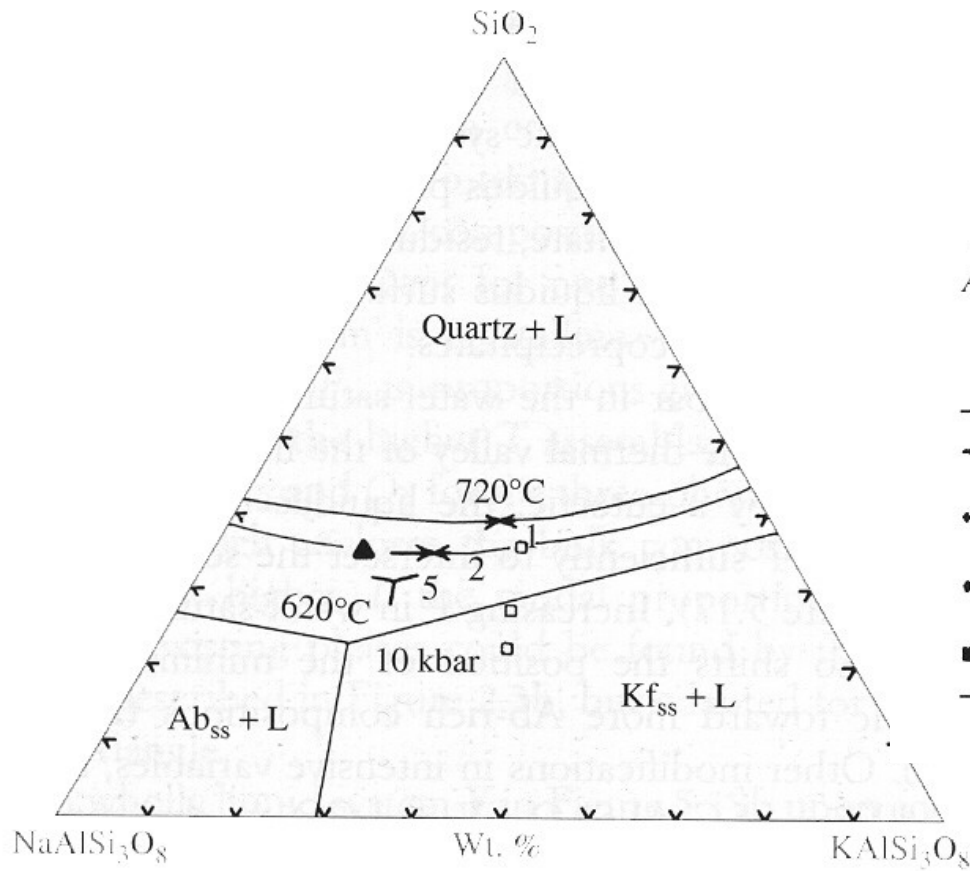
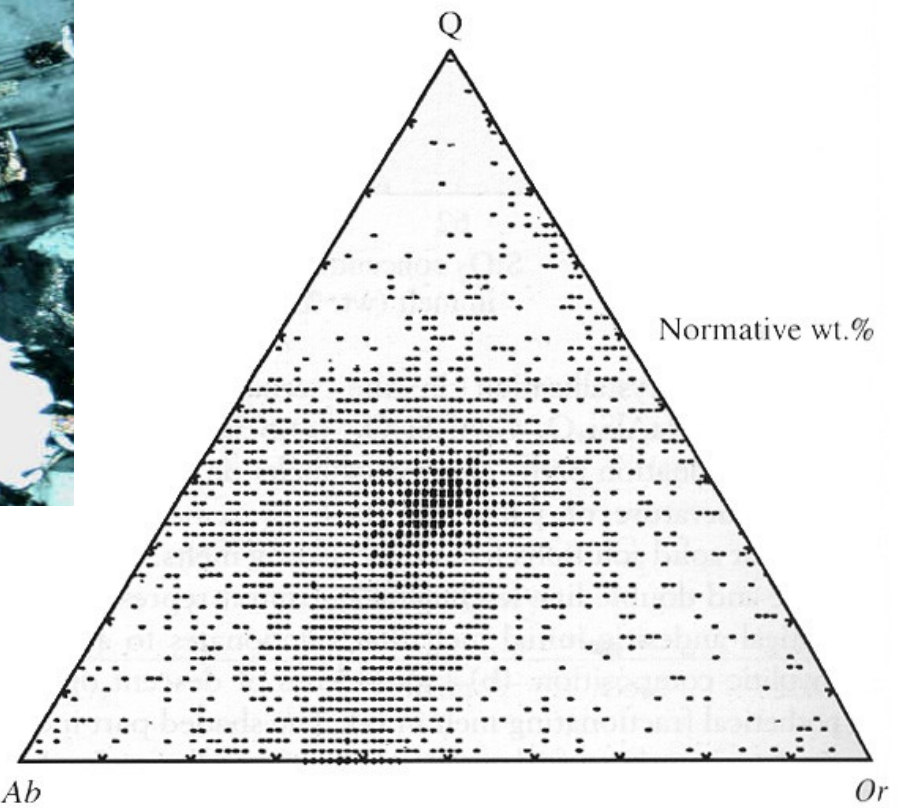
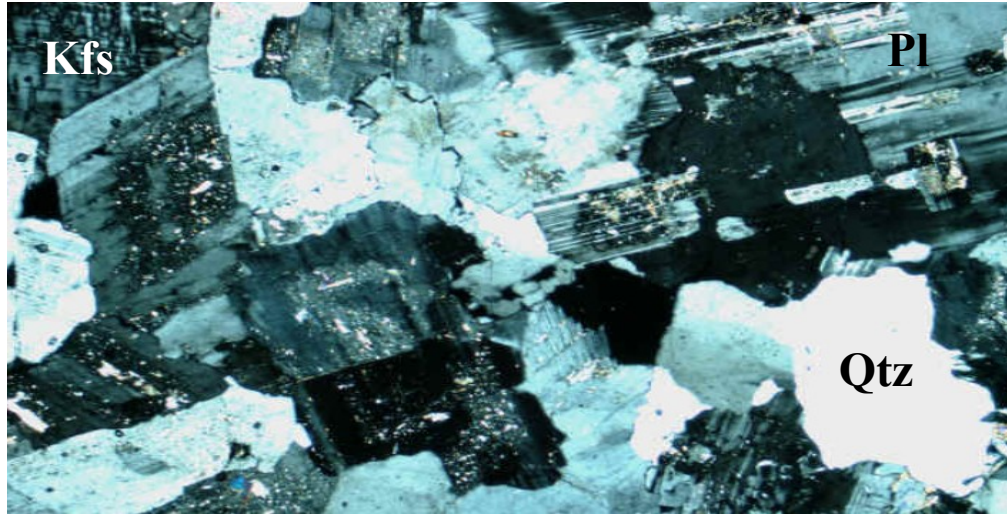
Ternární granitový systém Ab-Or-Qtz pro tlak H₂O 1 bar (Schairer, 1957 a Tuttle a Bowen, 1958)



Ternární granitový systém Ab-Or-Qtz pro tlak H₂O 5 kbar (Schairer, 1957 a Tuttle a Bowen, 1958)







	Upper limit of analyses	Total analyses	Analyses as %
-	10	3,724	48.6
•	21	1,805	23.6
•	43	1,649	21.6
■	54	481	6.3
Total		7,659	100.1

- Je poměrně dobrá shoda mezi složením většiny granitů a tímto diagramem ale mnoho granitů je oproti předpokladům obohaceno o Kfs ve srovnání s předpokládaným eutektickým složením.
- To můžeme vysvětlit přítomností anortitové komponenty v tavenině.
- Granity se také většinou netaví za podmínek kdy je tavenina nasycena H_2O .

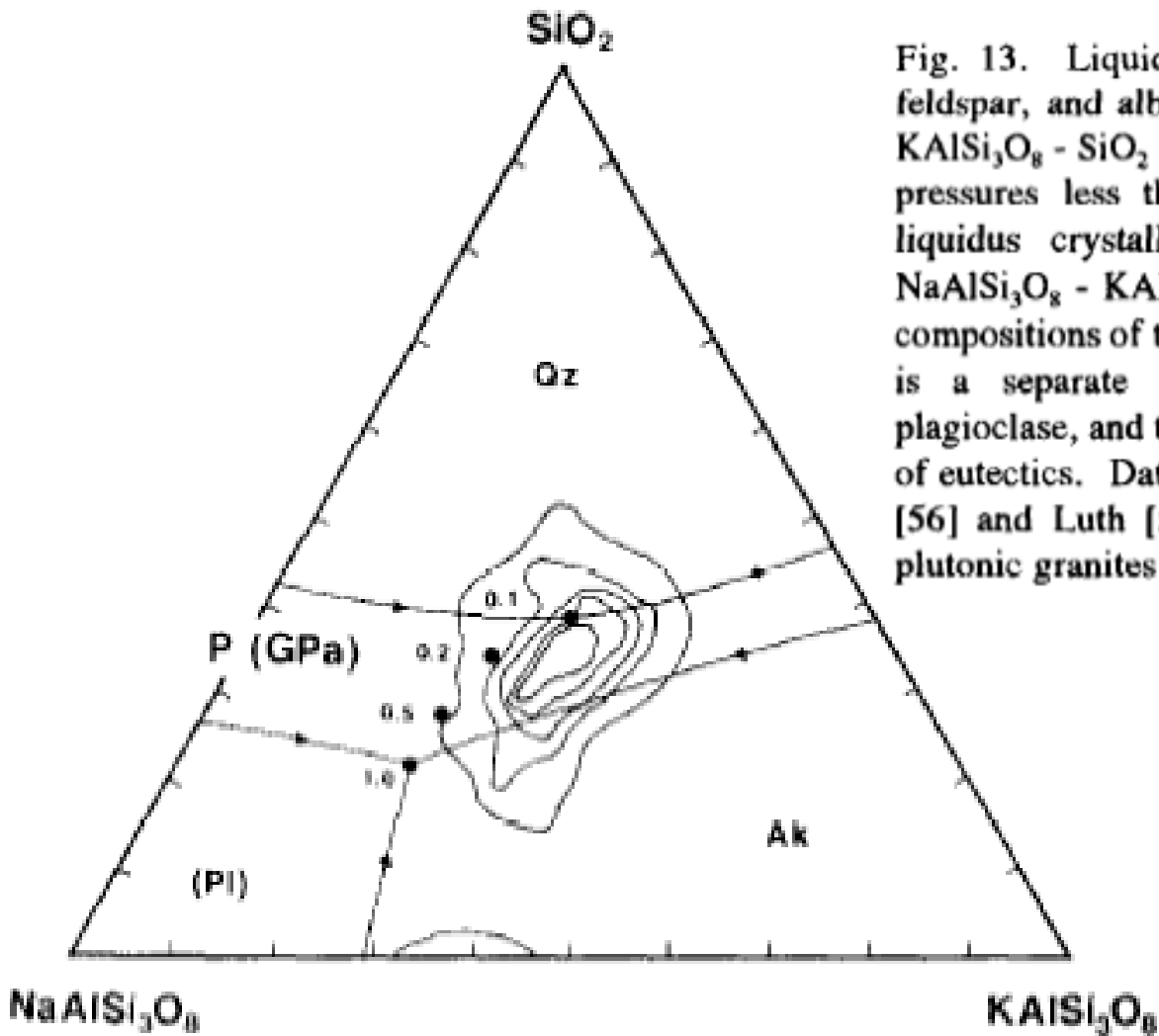
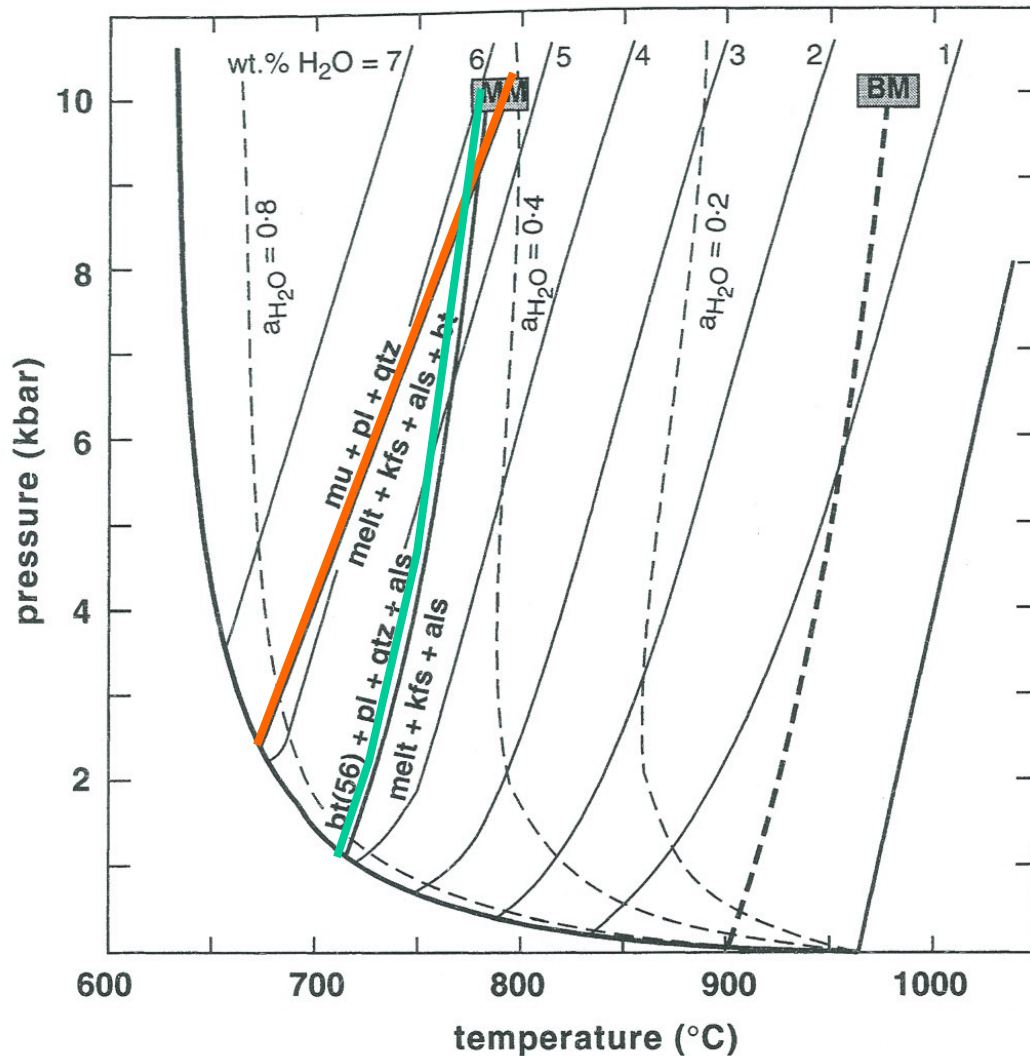


Fig. 13. Liquidus crystallization fields of quartz, alkali feldspar, and albite plagioclase in the system $NaAlSi_3O_8 - KAlSi_3O_8 - SiO_2 - H_2O$ at the water pressures indicated. At pressures less than about 0.35 GPa the alkali feldspar liquidus crystallization field extends across the join $NaAlSi_3O_8 - KAlSi_3O_8$, and the closed circles position the compositions of thermal minima. At higher pressures there is a separate liquidus crystallization field of albite plagioclase, and the closed circles position the compositions of eutectics. Data from Tuttle and Bowen [87], Luth et al. [56] and Luth [55]. Contours are compositions of 571 plutonic granites from Tuttle and Bowen [87].



P-T diagram ukazuje křivky solidu pro haplogranitickou taveninu za podmínek taveniny bezvodé a taveniny nasycené vodou (tlustá plná čára)

Přerušovaná tenká čára označuje křivky solidu pro různé obsahy vody

Dehydratační reakce muskovitu je označena červeně a biotitu zeleně.

Tlustá přerušovaná čára je maximum stability biotitu

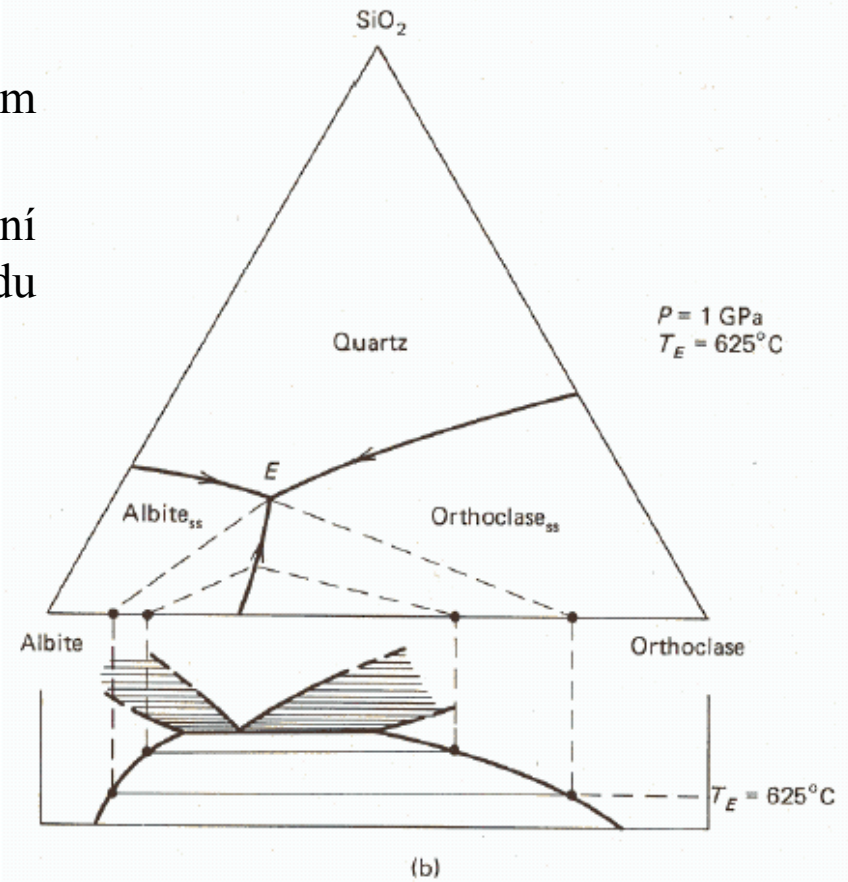
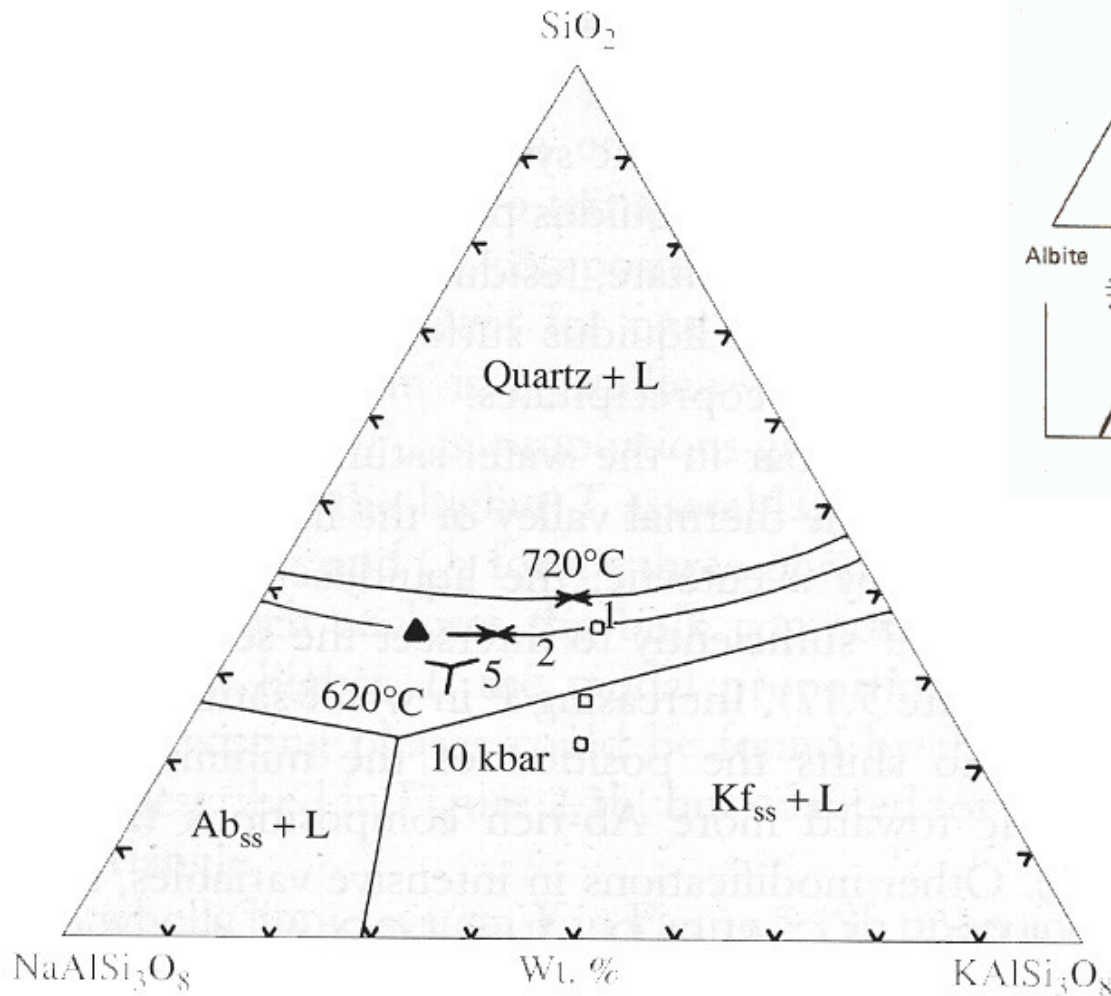
Tenké plné čáry značí minimální obsah vody v granitické tavenině

Tenké přerušované čáry ukazují solidus granitické taveniny pro různou aktivitu vody

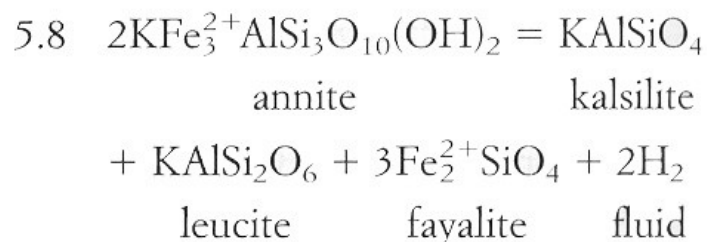
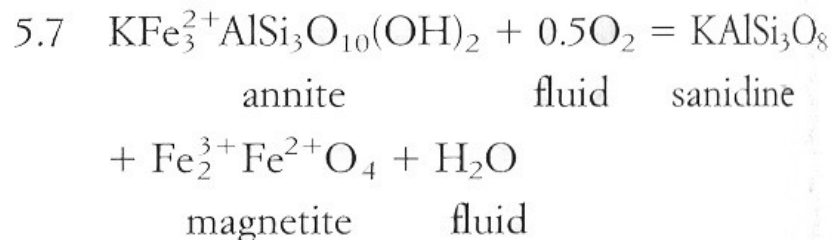
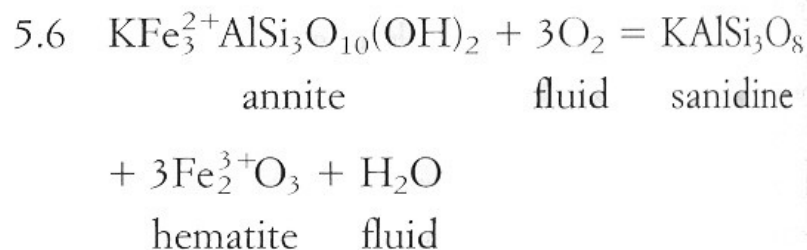
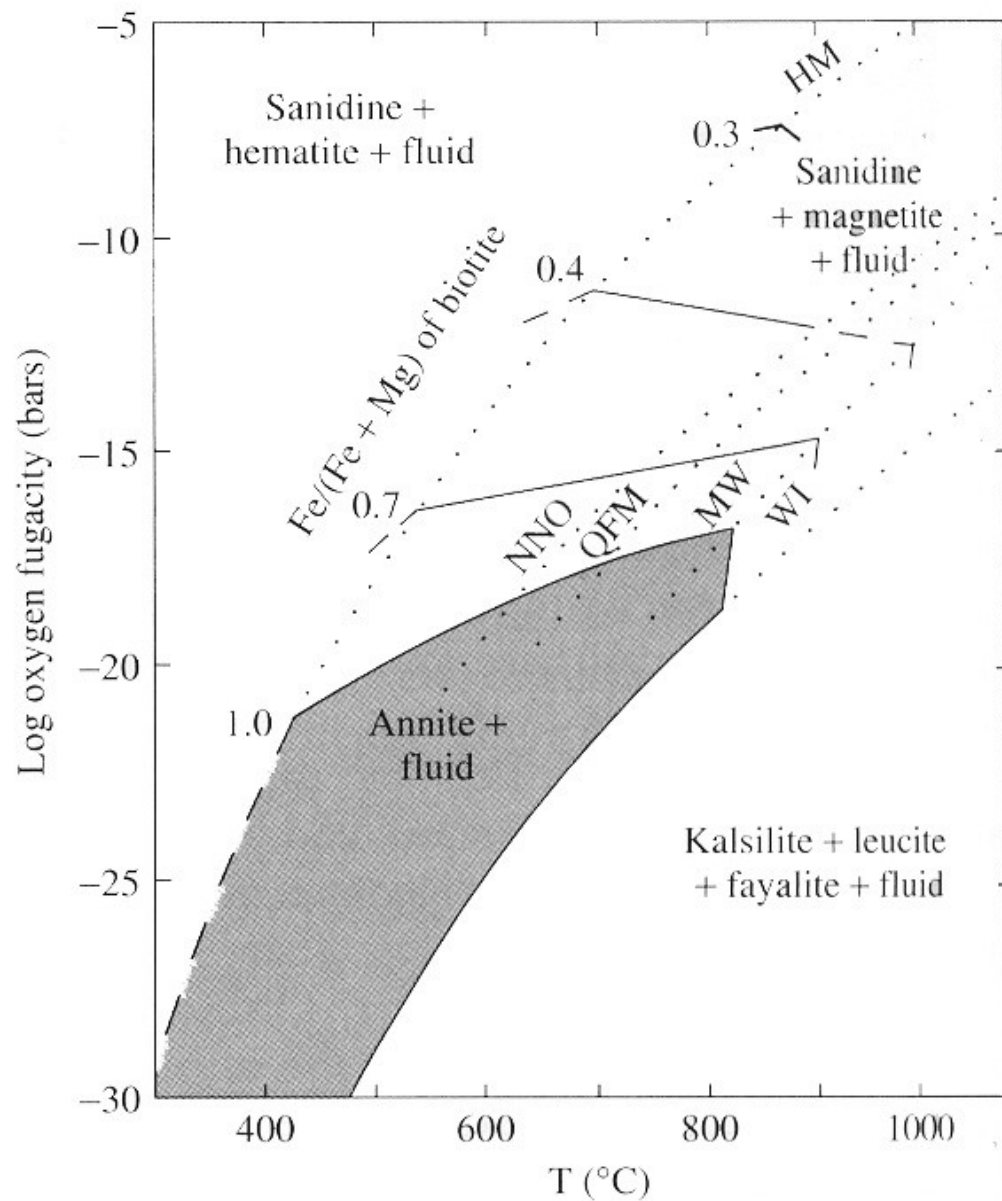
Nabelek a Bartlett (2000) *Trans. Roy. Soc. Edinburgh* 91.

Vliv tlaku na krystalizaci granitů

- teplota ternárního minima klesá se vzrůstem tlaku
- ternární minimum se mění na ternární eutektikum v důsledku protnutí solvu a solidu taveniny



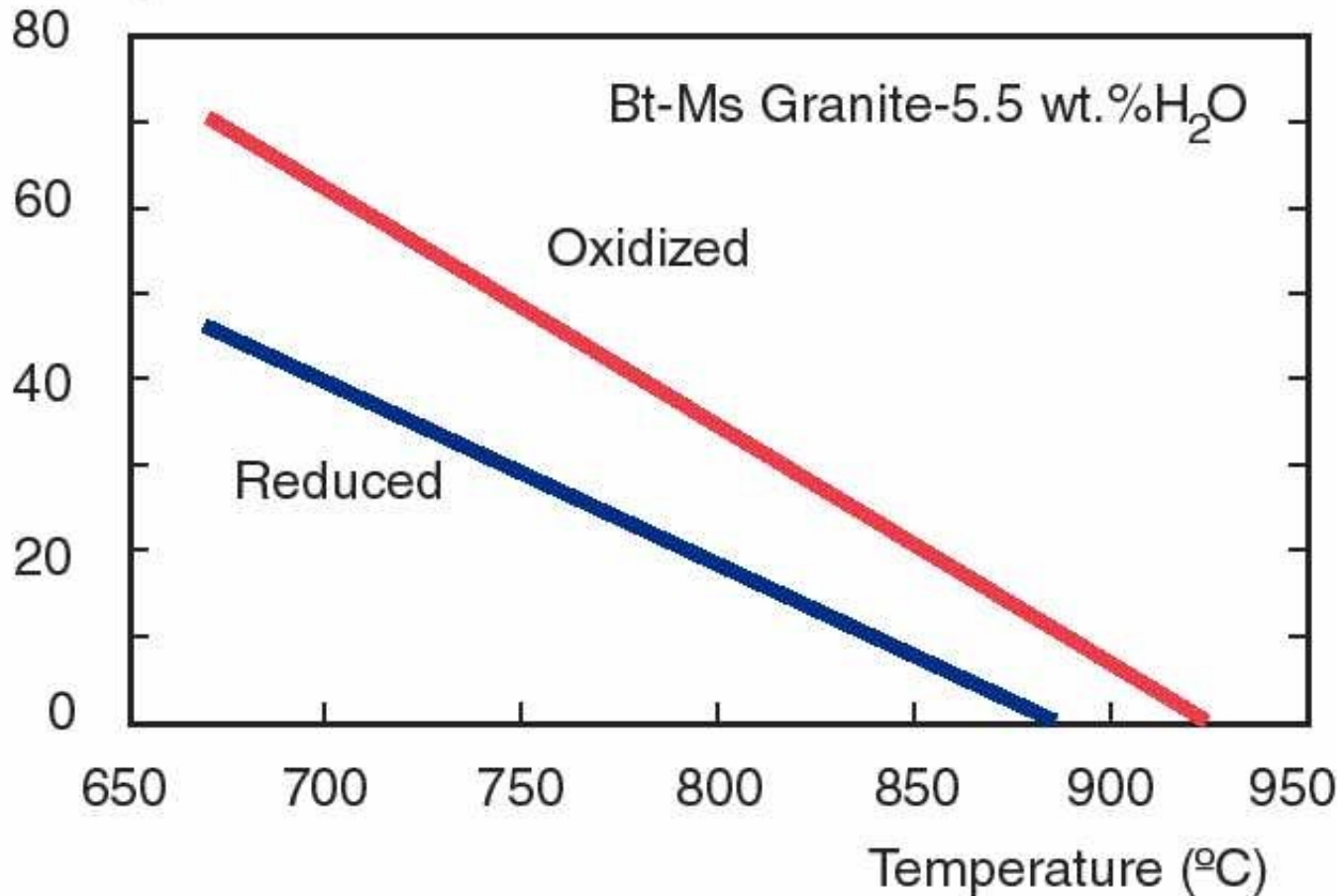
II. 9. Oxidačně redukční podmínky a vliv slíd a amfibolu



Wones & Eugster, 1965

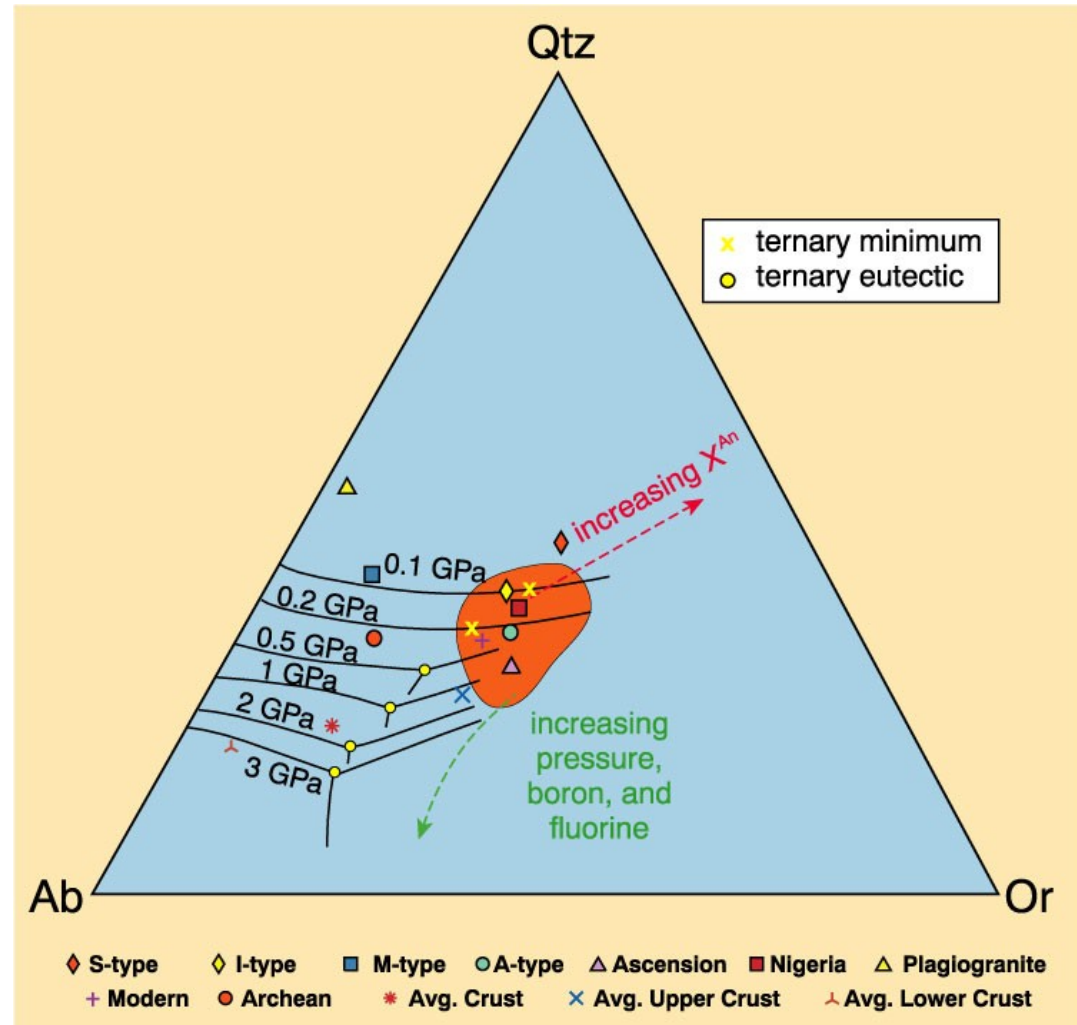
- fO_2 má vliv nejen na stabilitu tmavých minerálů ale i na stabilitu tektosilikátů (Dall'Agnolet al., 1994).
- Pro danou teplotu a obsah H_2O platí že redukční podmínky korespondují s nižším poměrem krystaly tavenina než oxidační podmínky (Scaillet et al., 1997).

wt.% crystals



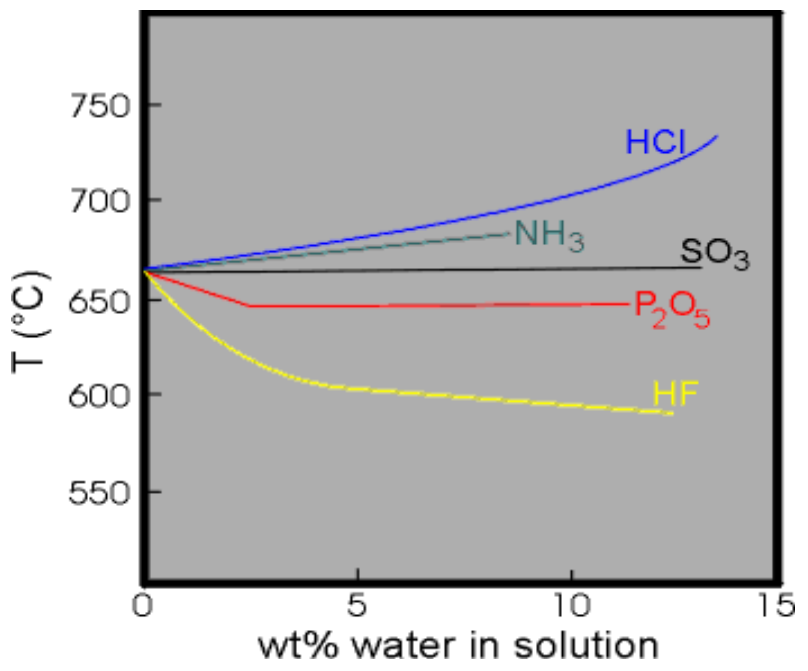
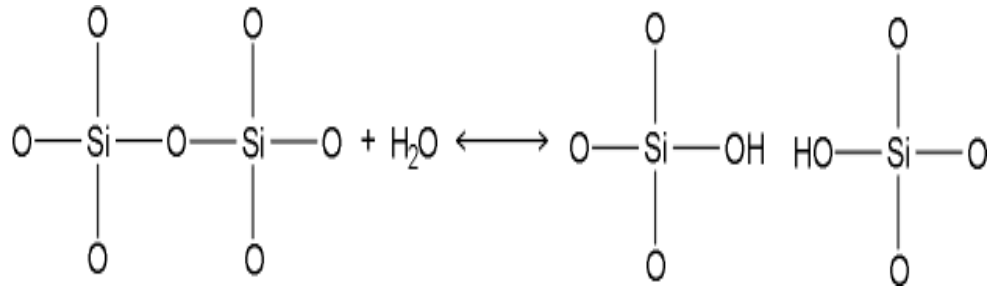
II. 10. Role vybraných prvků v granitové tavenině

- Koncentrace bóru v granitových taveninách bývá nízká, obvykle nepřesahuje 1 hm. % (Pichavant a Manning, 1984).
- Během frakcionace však může obsah boru v tavenině výrazně narůstat.

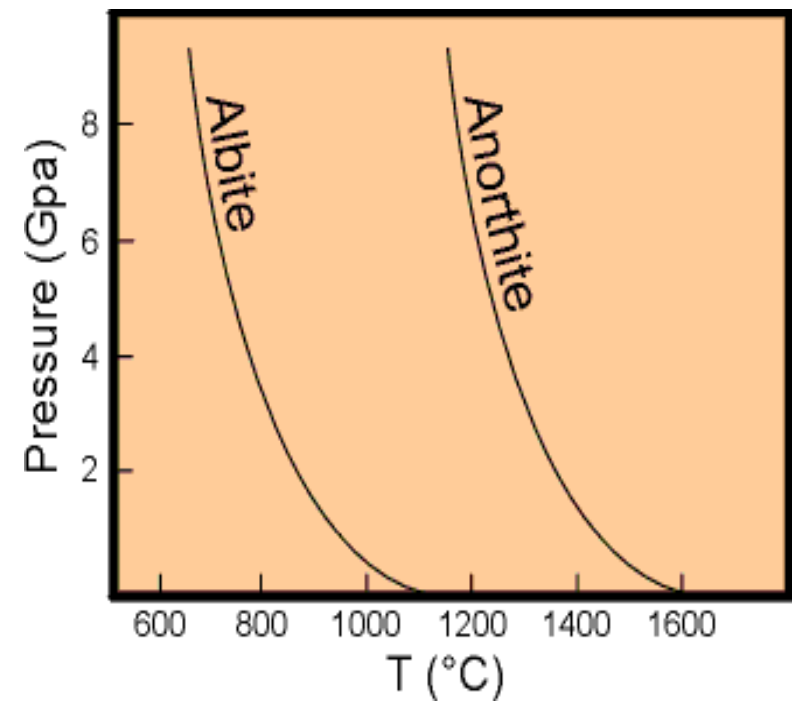


The Ab-Or-Qtz system with the ternary cotectic curves and eutectic minima from 0.1 to 3 GPa. Included is the locus of most granite compositions from Figure 11-2 (shaded) and the plotted positions of the norms from the analyses in Table 18-2. Note the effects of increasing pressure and the An, B, and F contents on the position of the thermal minima. From Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

- Složení magmatických fluid: CO_2 , H_2O , SO_2 , CO , H_2 , S_2 , HCl , F , B
- 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).



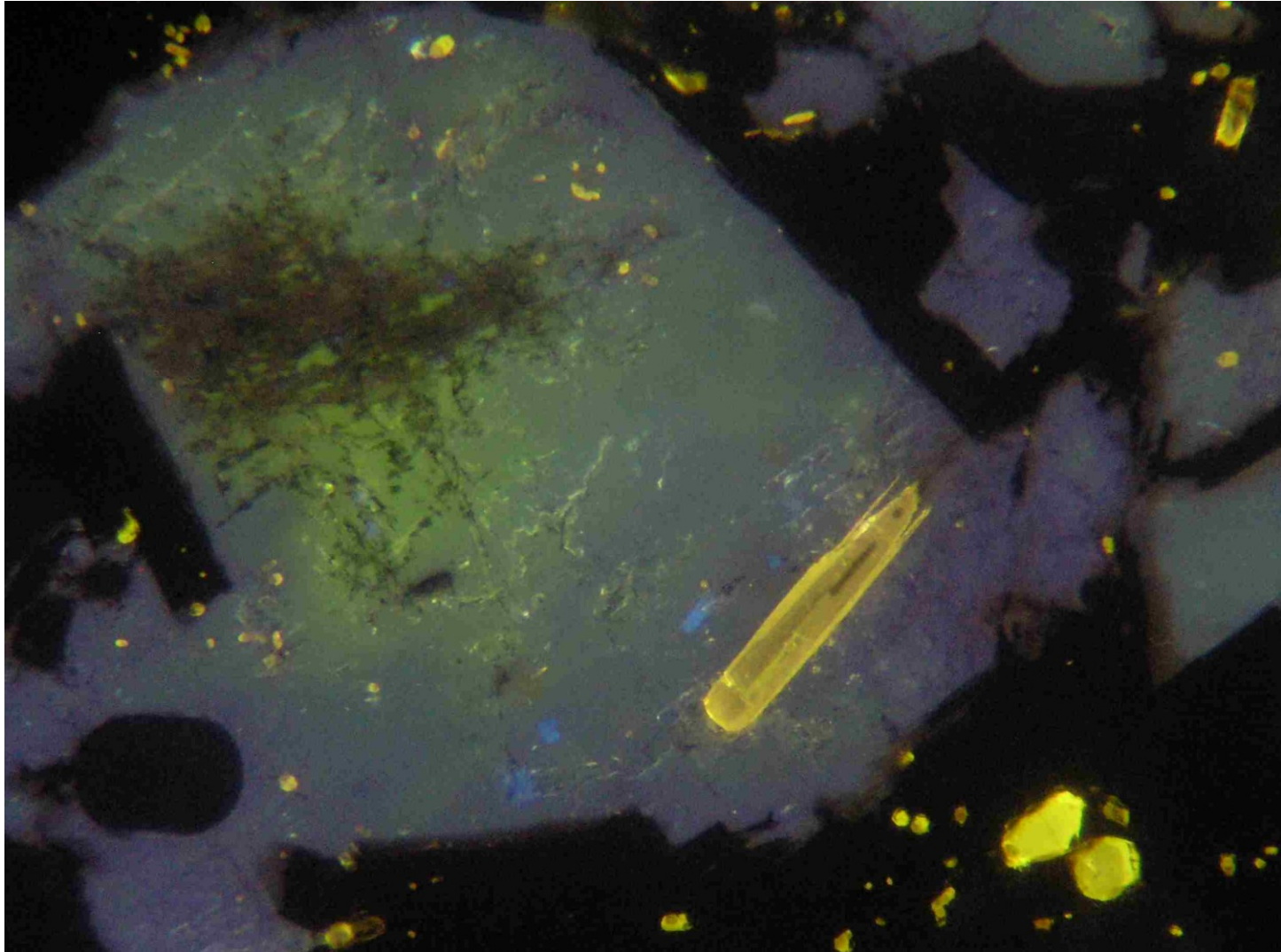
Vliv dalších komponent na teplotu solidu taveniny.



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

A. Chování fosforu v magmatickém procesu

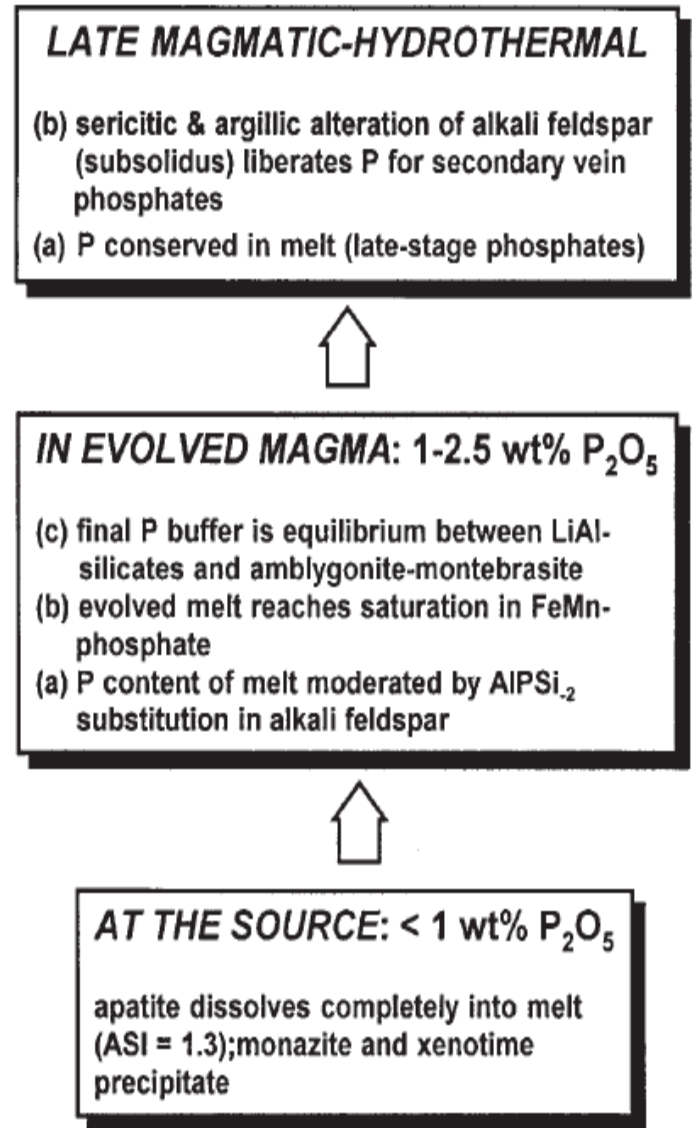
- Při tavení metapelitů je zdrojem fosforu pro granitovou taveninu především apatit, zatímco ostatní fosforečnany (xenotim, monazit) mají jen okrajový význam.



Apatit v granitu

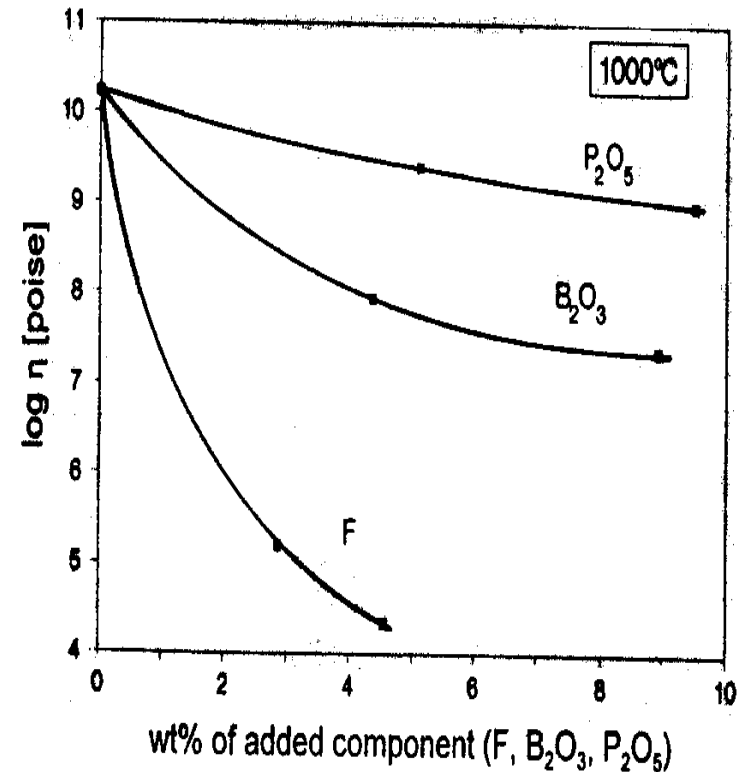
A. Chování fosforu v magmatickém procesu

- Peraluminické granitické taveniny mohou při teplotě 750 °C obsahovat až 0,7 wt % P_2O_3 (Wolf a London, 1994).
- Během krystalizace je P v peraluminických granitech vázán nejen do akcesorických fosforečnanů, ale i do alkalických živců.
- Distribuční koeficient mezi alkalickými živci a taveninou je 2,05(ASI)-1,75 (London et al., 1993).
- Avšak obsahy P v horninách jsou obvykle nižší, než jaké by podle obsahu živců měly být.
- Tento jev autoři vysvětlují buď oddělením fosforem bohaté zbytkové taveniny (Bea et al. 1994), nebo mladší alterací (sericitizace), při níž se fosfor z živců uvolnil (London, 1992).
- Vysoce diferenciovaná magmata mohou obsahovat 1-2,5 wt % P_2O_5 , v takových granitech se může objevit celá řada Fe-Mn-Al fosfátů.
- Fosfor patří mezi prvky, které výrazněji nevstupují do fluidní fáze (London et al., 1993).



B. Chování fluoru v magmatickém procesu

- Zdrojem fluoru při tavení kontinentální kůry jsou především slídy a amfiboly (Icenhower a London, 1995).
- Distribuční koeficient mezi biotitem a taveninou experimentálně určili Icenhower a London (1997): $D_F^{Bt/melt} = 0,1008 * (100 * (Mg / \{Mg + Fe + Mn\})) - 1,08$.
- Taveniny vzniklé dehydratačním tavením slíd mívají desítky až tisíce ppm F (Visonà a Lombardo, 2002).
- V peraluminických magmatech jsou hlavními minerály, které koncentrují fluor, slídy a apatit; ve výrazně diferenciovaných granitech se mohou objevit fluorit a topaz (Audétat et al., 2000).
- Topaz a fluorit však často nekrytalují přímo z magmatu, ale z fluid provázejících závěrečné fáze krystalizace (pneumatolytické a hydrotermální procesy).
- Pro obsahy 1-4 wt % F v tavenině se distribuční koeficient mezi fluidní fází a taveninou pohybuje kolem 0,3.



Vliv fosforu, bóru a fluoru na viskozitu haplogranitické taveniny. Bezvodá tavenina má složení: Qtz36Ab39Or25 (Dingwell et al. 1993).

C. Chování bóru v magmatickém procesu

- Bór ovlivňuje fyzikální vlastnosti taveniny.
- Snižuje teplotu solidu granitové taveniny - experimentálně bylo zjištěno, že již 5 hm. % B ve vodou nasycené granitové tavenině snižuje teplotu solidu o 60°C i více (London, 1996).
- Bór zvyšuje rozpustnost H₂O v tavenině (Pichavant, 1981 a 1983) a zároveň (obr.) snižuje viskozitu taveniny (Dingwell et al., 1993).
- Aby mohl turmalín z peraluminické taveniny krystalovat, musí podle experimentů prováděných za teplot 700-450 °C obsah B₂O₃ v tavenině přesáhnout 2 hm.% (Wolf-London, 1997).
- Podle těchto autorů může turmalín vznikat reakcemi (1) a (2):
- $$KFe_3AlSi_3O_{10}(OH)_2 + NaAlSi_3O_8 + 2,5 Al_2SiO_5 + 0,5 SiO_2 + 1,5 B_2O_3 + H_2O = NaFe_3Al_6(BO_3)_3Si_6O_{18}(OH)_4 + KAlSi_3O_8 \quad (1)$$
- $$Fe_2Al_4Si_5O_{18} + FeAl_2O_4 + NaAlSi_3O_8 + 1,5 B_2O_3 + 2 H_2O = NaFe_3Al_6(BO_3)_3Si_6O_{18}(OH)_4 + 0,5 Al_2SiO_5 + 1,5 SiO_2 \quad (2)$$
- Pokud v tavenině nemohou probíhat reakce (1) a (2), přechází bor do zbytkových fluid. Distribuční koeficient mezi fluidy a taveninou se pohybuje od < 1 do 3 (London, 1997).
- Zbytková fluida pak reagují především s biotitem a amfibolem v horninách obklopujících intruzi a vytváří akumulace turmalínu.

- Bór se poměrně špatně začleňuje do struktury většiny v granitech běžných minerálů (Qtz, Pl, Kfs).
- Často se koncentruje ve zbytkové tavenině nebo vytváří turmalín.
- Při krystalizaci peraluminických granitů často z počátku krystaluje biotit, cordierit, či granát.
- Jak krystalizace pokračuje, klesá v magmatu obsah femických prvků a stoupá obsah B_2O_3 .
- Tento proces vede k tomu, že místo biotitu (cordieritu, granátu) začíná krystalovat turmalín.
- Při teplotě 700-450 °C může turmalín krystalizovat jen když obsah B_2O_3 v peraluminické tavenině přesáhne 2 wt. % (Wolf a London, 1997).

LATE MAGMATIC-HYDROTHERMAL

- (b) abundant tourmaline precipitated where magmatic vapor (source of B) mixes with wallrock vapor (source of Fe & Mg)
- (a) most B transferred from melt to vapor phase



IN EVOLVED MAGMA: 1-4 wt% B_2O_3 AT TOURMALINE SATURATION

- (c) when biotite and cordierite are exhausted, B increases unbuffered
- (b) B content of melt increases by fractional crystallization to saturation in tourmaline
- (a) biotite, cordierite, or garnet are first FeMg silicates

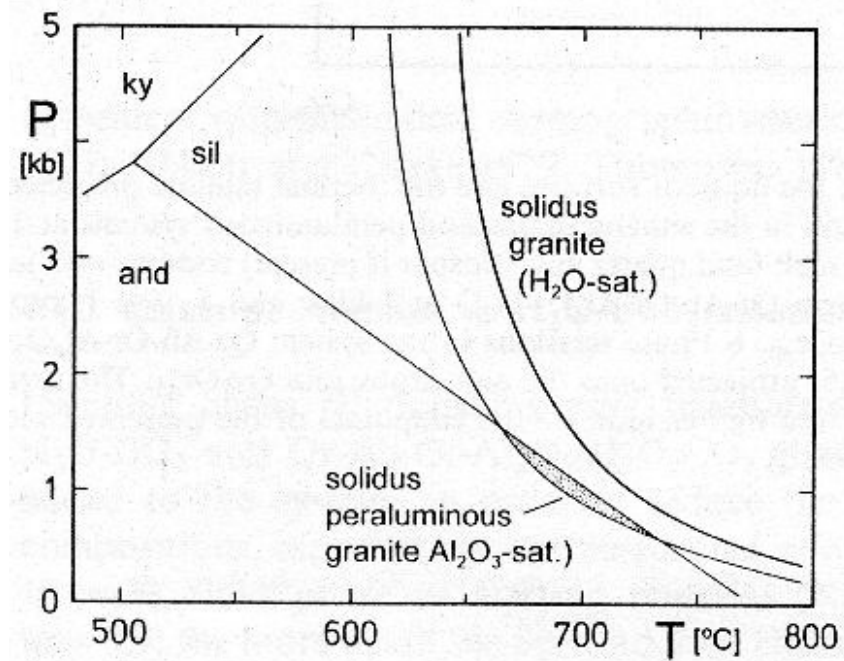
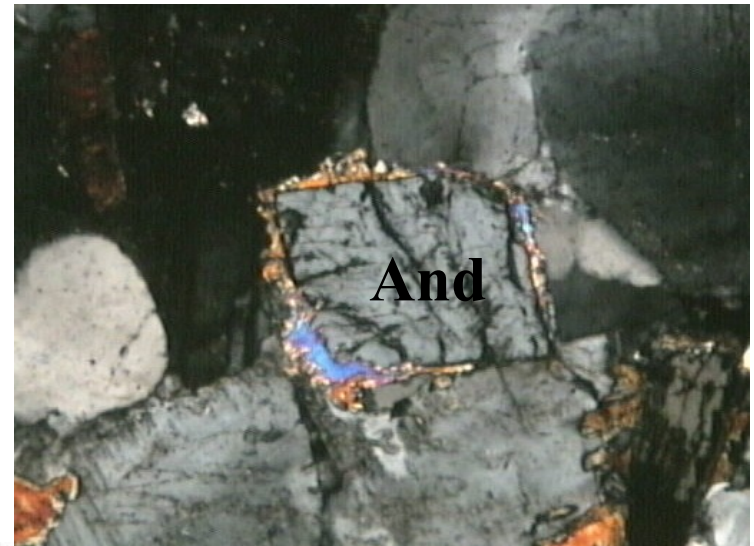


AT THE SOURCE: < 2 wt% B_2O_3

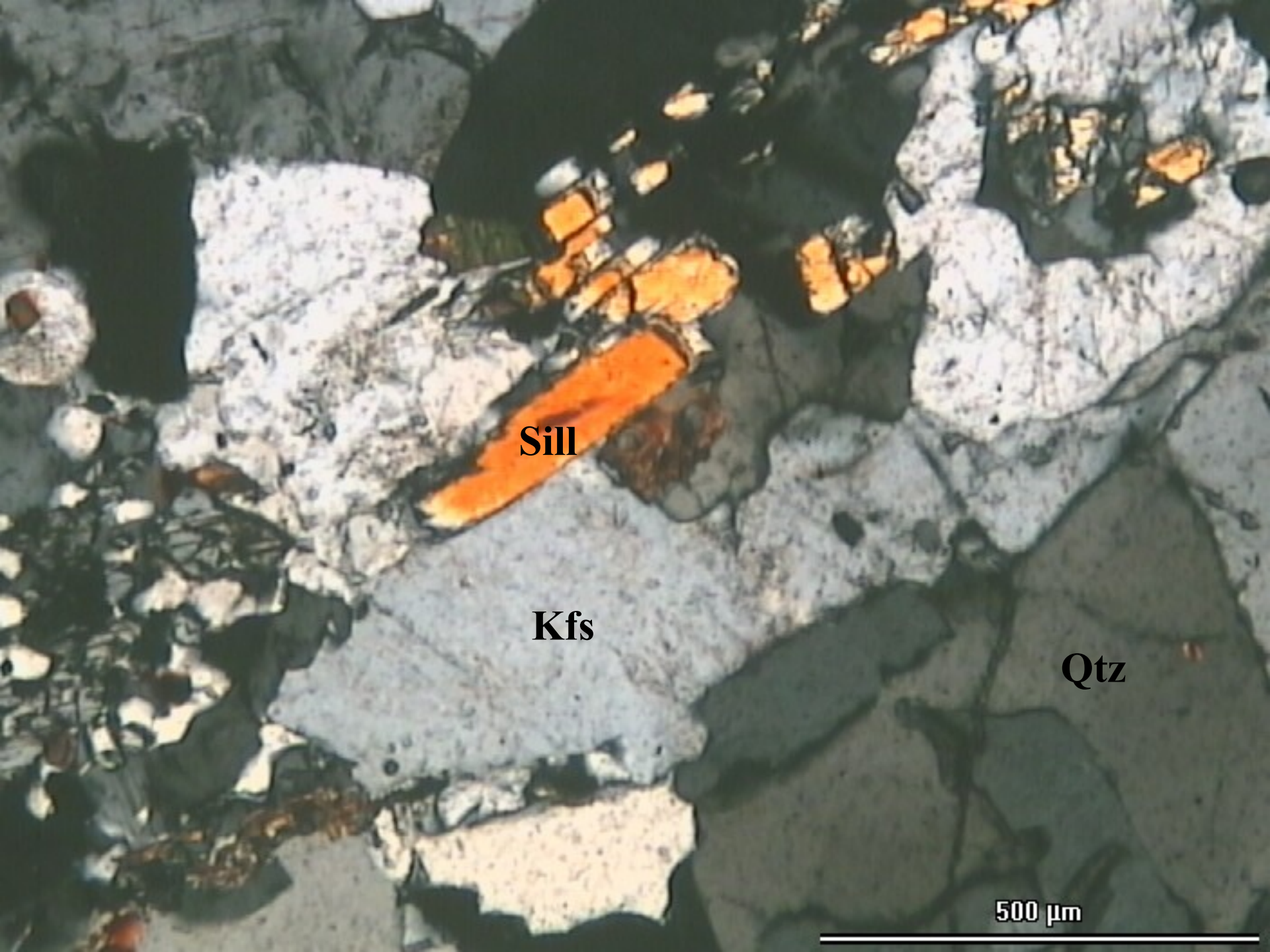
in most host rocks, tourmaline will be consumed completely; first melts under-saturated in tourmaline

II. 11. Systém Qtz-Ab-Or-Al₂O₃

- Tento systém lze při určitém zjednodušení ztotožnit s peraluminickými granity, které vznikají tavením kontinentální kůry.
- Porovnáme-li složení taveniny v minimu u subaluminické horniny a peraluminické horniny, vidíme posun k vyšším obsahům Qtz.
- Peraluminické horniny také mají nižší teploty tavení (o 20-25 °C). Teplota solidu v peraluminických horninách může být navíc výrazně snížena přítomností prvků, které se obvykle koncentrují v zbytkové tavenině (B, F, Li).
- Právě nižší teplota tání (obr.) spolu s přesycením magmatu hliníkem je příčinou toho, že v některých granitech krystalují alumosilikáty především andalusit, které jsou v ostatních granitech interpretovány jako restity.



PT diagram zobrazující pozici křivek solidu pro subaluminickou křemen-živcovou taveninu a peraluminickou křemen-živcovou taveninu. Trojný bod pro Al₂SiO₅ je stanoven podle Holdaway (1971) Vyšrafovaná plocha vyznačuje podmínky za nichž může z peraluminické taveniny krystalovat andalusit (Johannes a Holtz 1996).

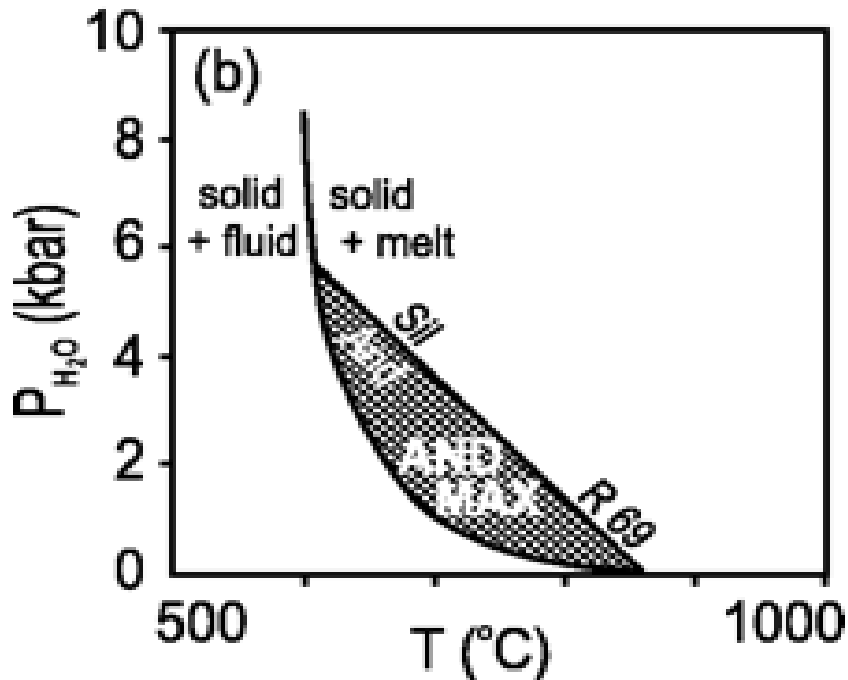
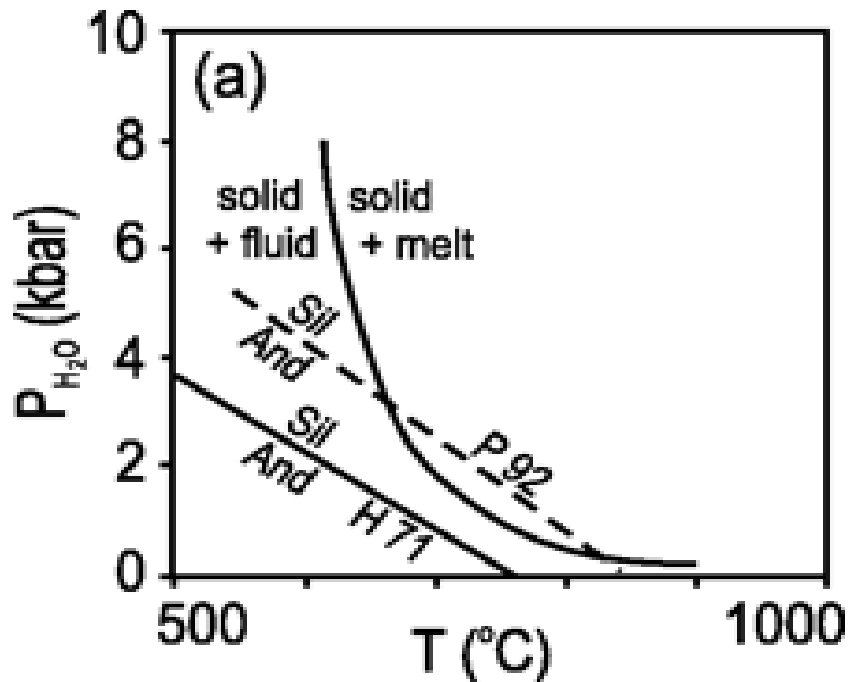


Sill

Kfs

Qtz

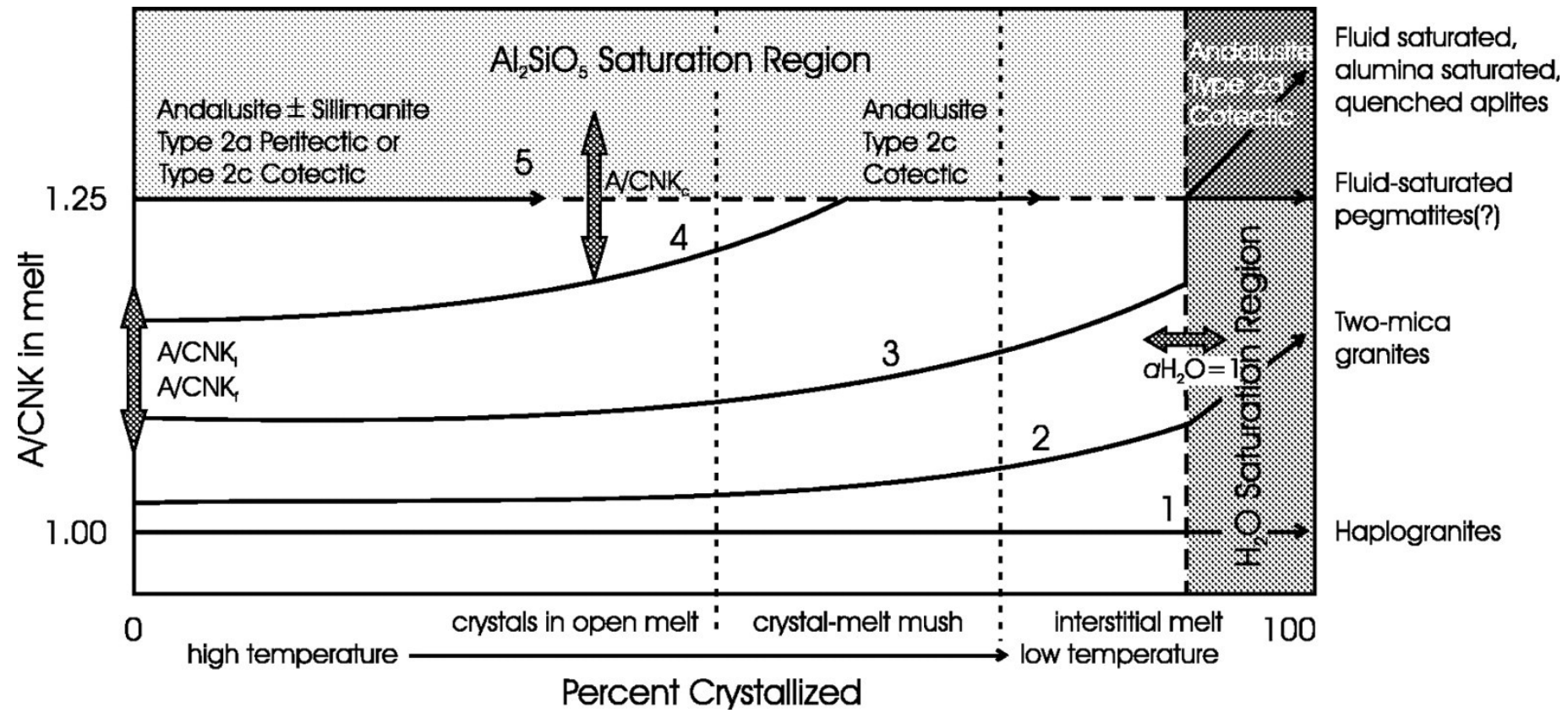
500 μm

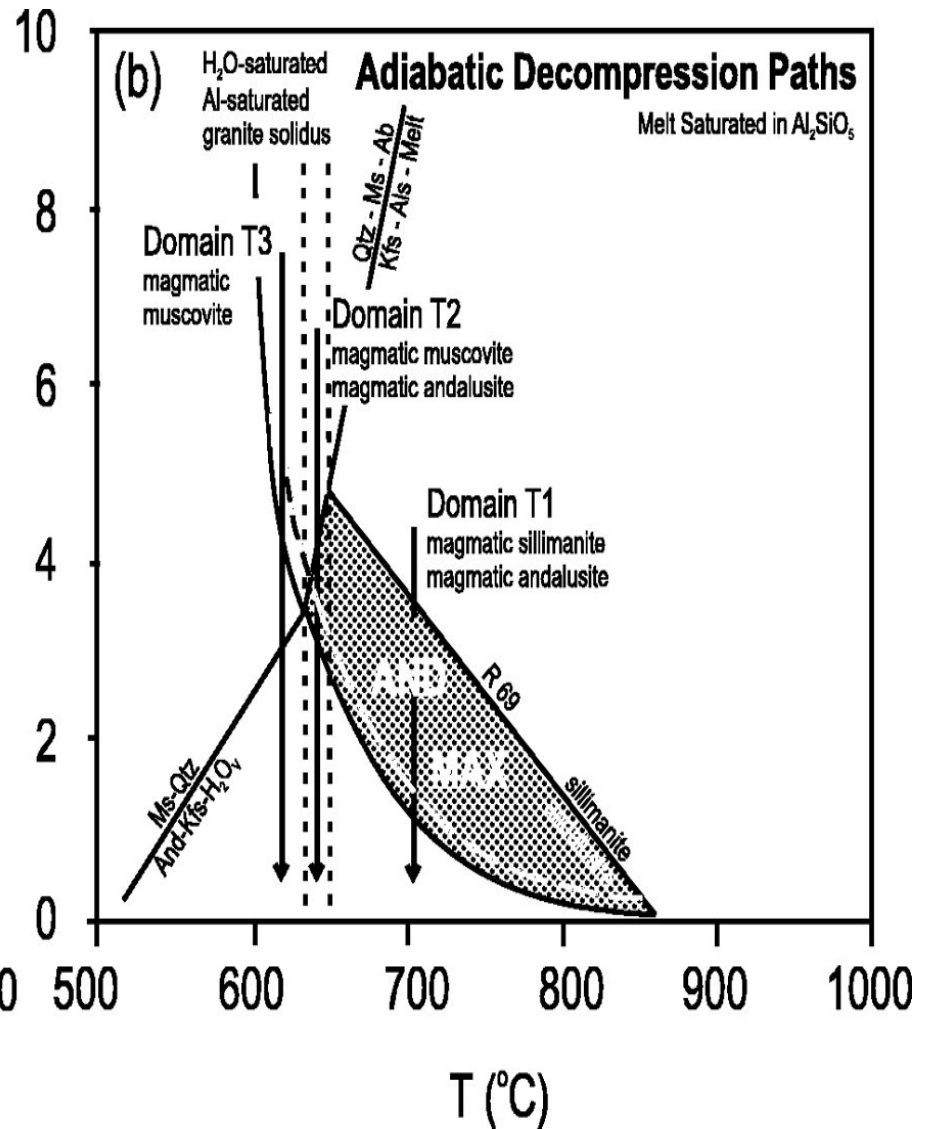
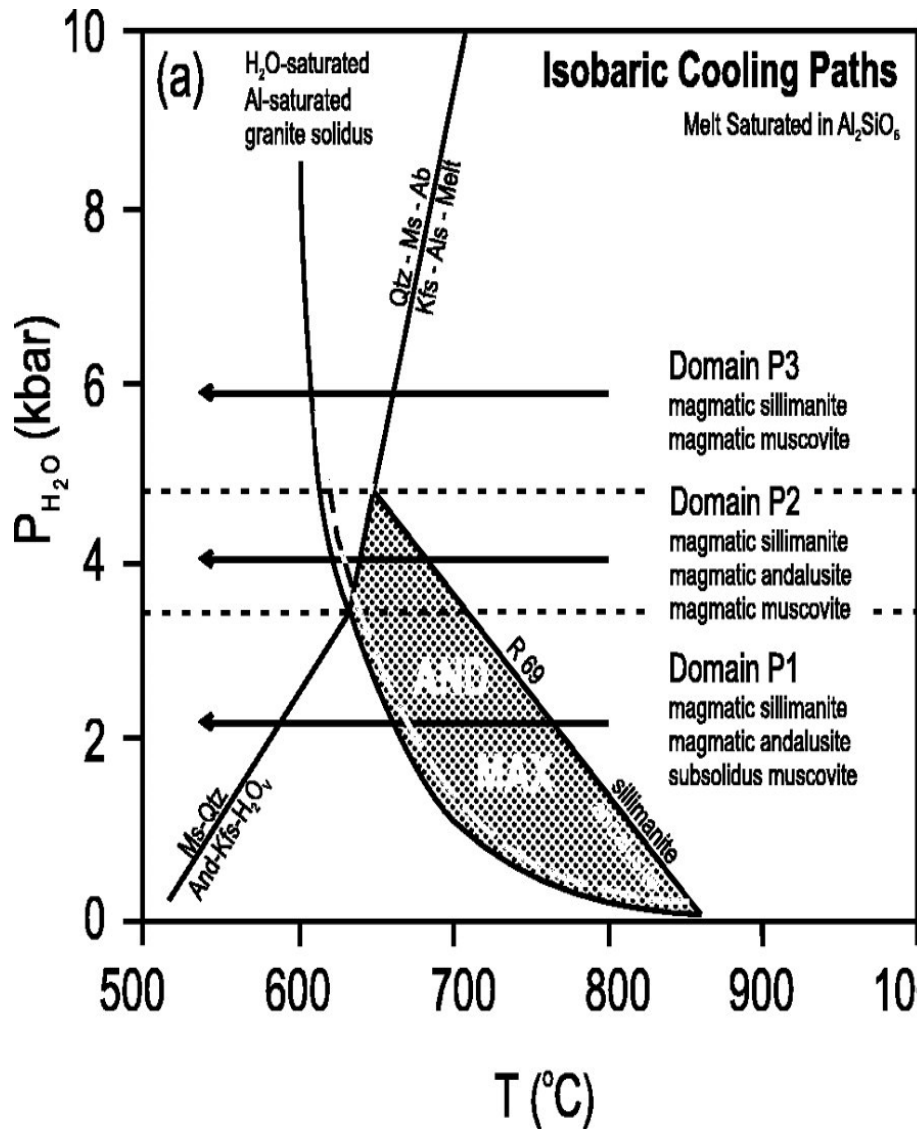


- Vztah mezi solidem granitové taveniny a stabilitou mezi Sill a And závisí nejen na složení taveniny.
- a) Kombinace haplogranitické taveniny (Tuttle & Bowen, 1958) a And = Sill hranice podle Holdawaye (1971) ukazuje že by andalusit v granitech vznikat neměl.
- Kombinace haplogranitické taveniny (Tuttle & Bowen, 1958) a And = Sill hranice podle Pattisona (1992 ; P92) krystalizaci And za omezených PT podmínek umožňuje.
- b) Kombinace solidu peraluminické taveniny (Johannes & Holtz, 1996) a And = Sill hranice podle Richardsona et al. (1969 ; R69) rozšiřuje pole stability And + tavenina na maximum (AND MAX'). CLARKE, D. B. et al. J. Petrology 2005 46:441-472

- Diagram A/CNK vs. procento krystalizace haplogranitické taveniny zobrazuje dráhy krystalizace pro různé taveniny:
- 1) krystalizuje jen Qtz + Fsp
- 2) krystalizují slídy ve slabě peraluminické tavenině
- 3) dojde k saturaci Al_2SiO_5 v důsledku kombinace frakcionace živců a saturaování taveniny vodou, nebo poklesem tlaku což vede k poklesu rozpustnosti hliníku a vody
- 4) dojde k saturaci Al_2SiO_5 v důsledku krystalizace živců
- 5) od začátku saturace Al_2SiO_5

CLARKE, D. B. et al. J. Petrology 2005 46:441-472

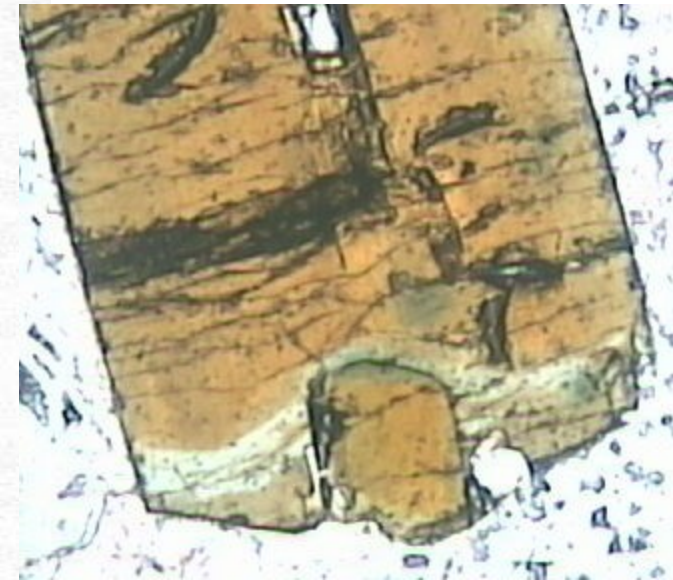
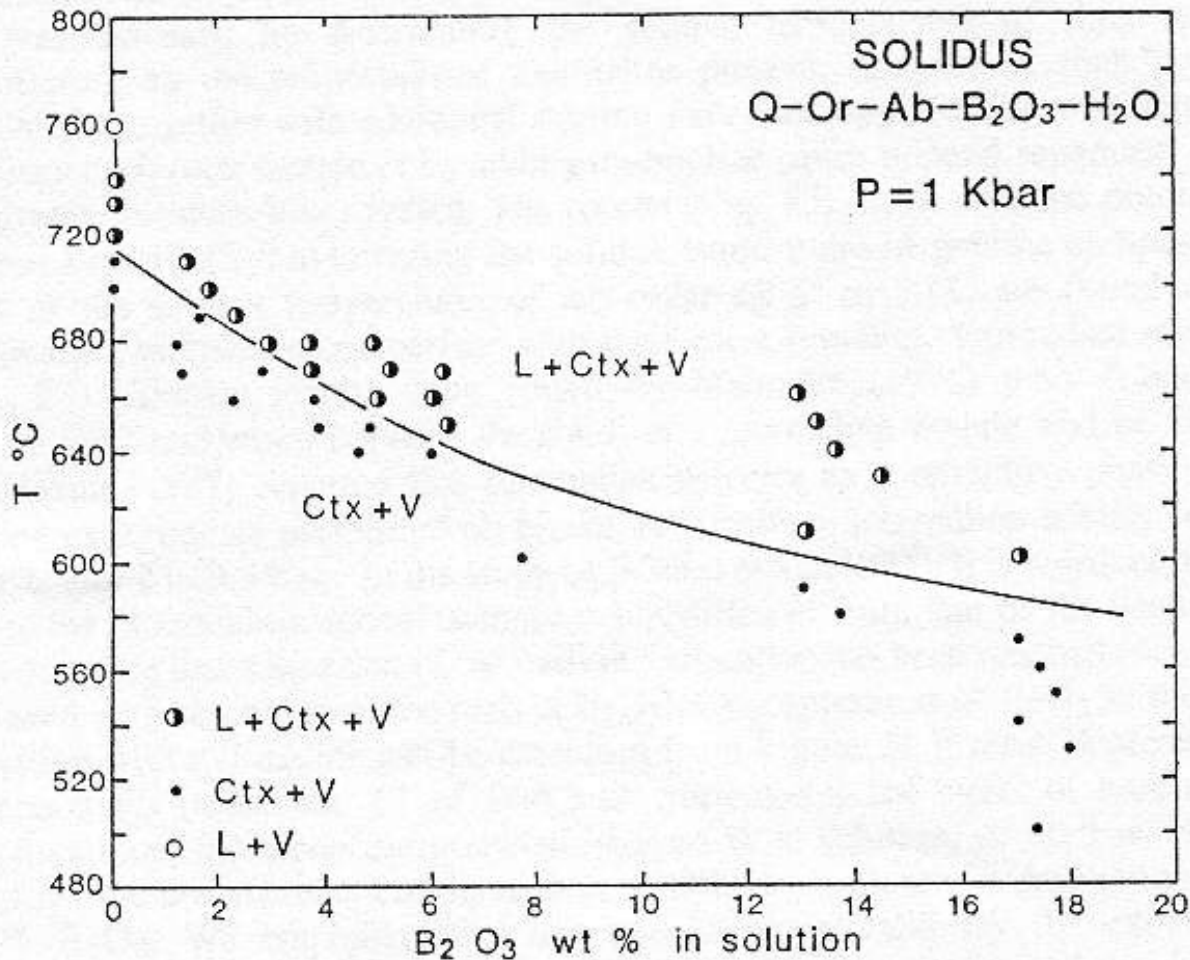




Vznik magmatického andalusitu v PT diagramu. Oblast oblast definovaná jako AND MAX ohraničuje vodou saturovaný solidus peraluminické granitové taveniny (Johannes & Holtz, 1996), reakce And = Sil (R69; Richardson *et al.* 1969). (a) Dráha isobarického chladnutí (Isobaric cooling paths). (b) Dráha adiabatické dekomprese (Adiabatic decompression paths). CLARKE, D. B. et al. J. Petrology 2005 46:441-472

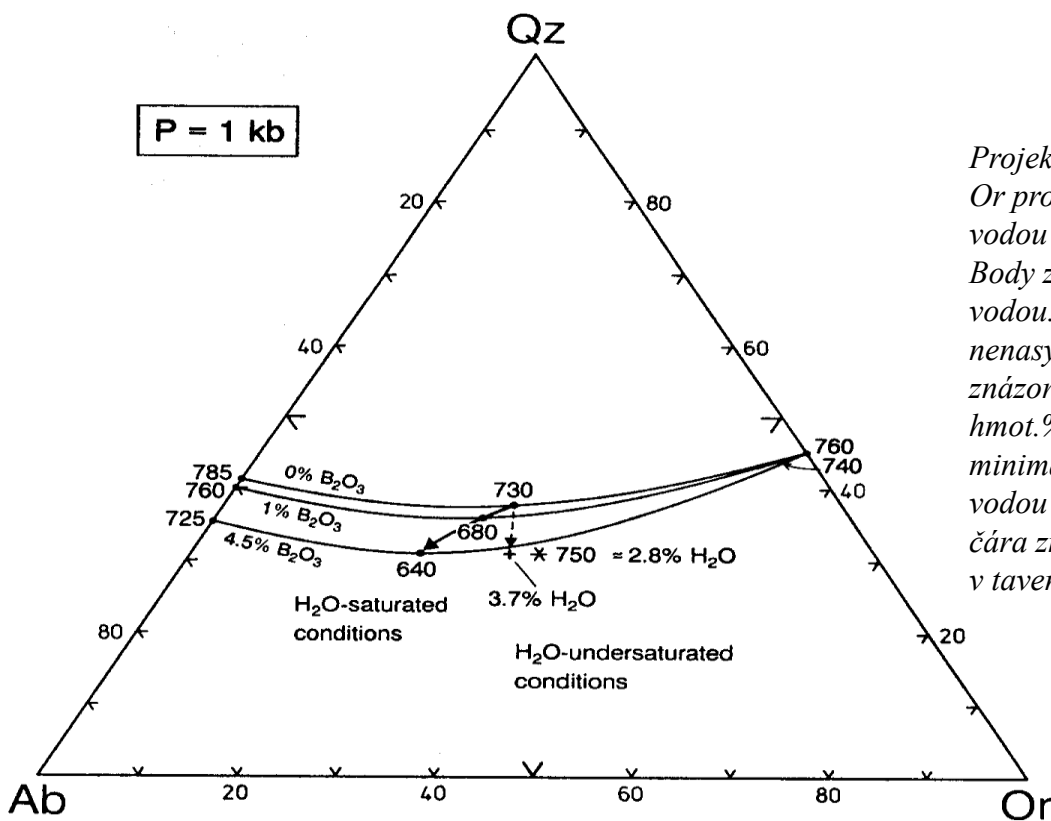
II. 12. Systém Qtz-Ab-Or-B₂O₃

Pichavant (1981) zjistil, že teplota solidu výrazně klesá, jestliže ve fluidní fázi narůstá množství B₂O₃ (obr.). Experiment byl prováděn při tlaku 1 kbar v systému saturovaném vodou.



Změna teploty počátku tavení v systému Q-Ab-Or v závislosti na koncentraci B₂O₃ ve fluidní fázi při tlaku 1 kbar (Pichavant, 1981): L = tavenina, V - fluidní fáze, Ctx = krystalická fáze.

- Při vzrůstu obsahu B_2O_3 se kotektická křivka v trojúhelníkovém diagramu Qtz-Ab-Or posouvá směrem k spojnici Ab-Or (Pichavant, 1987).
- Tento posun kotektické křivky a s ním spojený pokles kotektické teploty je výraznější v systémech bohatších na Ab-komponentu (obr.).
- Současně je možné pozorovat posun složení taveniny v teplotním minimu s nárůstem obsahu B_2O_3 k Ab vrcholu trojúhelníku.
- Jestliže snižujeme obsah H_2O v tavenině za konstantního tlaku, stoupá teplota likvidu.
- Zároveň se složení taveniny v teplotním minimu posouvá ke spojnici Qtz-Or, přičemž obsah Qtz je konstantní.

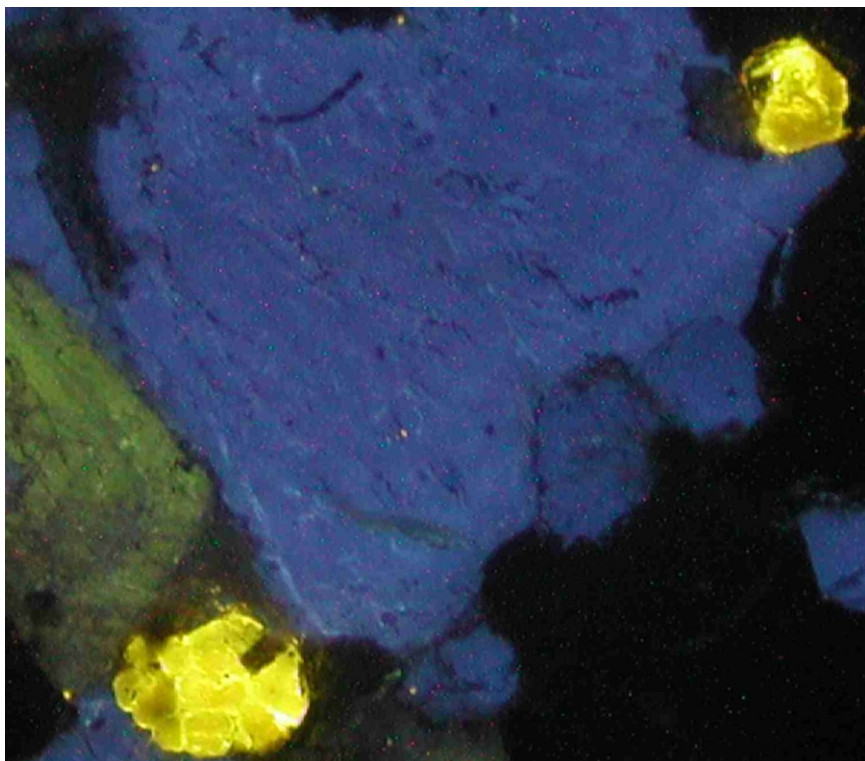


Projekce kotektických křivek a minim taveniny v systému Qtz-Ab-Or pro 0, 1, 4,5 hmot.% B_2O_3 . Experimenty byly prováděny ve vodou nasyceném systému při tlaku 1 kbar (Pichavant, 1987). Body znázorňují pozici minima a eutektika v systému nasyceném vodou. Hvězdička složení minima pro 4,5 hmot. % B_2O_3 v systému nenasyceném vodou (zhruba 2,8 hmot.% vody v tavenině). Křížek znázorňuje hypotetickou pozici minima pro 4,5 hmot.% B_2O_3 a 3,7 hmot.% vody v tavenině. Plná šipka znázorňuje vývoj složení minima s nárůstem obsahu B_2O_3 za podmínek nasycení magmatu vodou (s teplotou narůstá obsah vody v tavenině). Přerušovaná čára znázorňuje vývoj minima při konstantním obsahu vody v tavenině (3,7 hmot.% vody).

Fig. 129. Eutectic curves and liquidus minima in the Qtz-Ab-Or system.



- Složení fluidní fáze, která je v rovnováze s haplogranitickou taveninou, je přítomností či nepřítomností bóru výrazně ovlivněno.
- Pro fluidní fázi v systémech bohatých bórem je typická převaha Si nad alkáliemi a velmi nízký poměr Al/alkálie.
- Jestliže v haplogranitickém systému stoupá množství bóru, vzrůstá zároveň i podíl Na a klesá podíl Si a Al ve fluidní fázi.
- Přítomnost bóru ovlivňuje chování fluid podobně jak přítomnost chlóru.
- Chlór se ale chová kvantitativně poněkud jinak. Například poměr alkalií ve fluidní fázi stoupá výrazněji, než tomu bylo při vzrůstu koncentrace bóru.



II. 13. Systém KFMASH

- Dehydratačním tavení metapelitů $Bt + Ms + Qtz + Fsp$ vzniká tavenina a reziduum $Sil + Grt + Cdr + Px$ (hypersten).
- Tavenina vzniká v teplotním rozsahu 600-650 °C v celém rozsahu kůry s přínosem vody nebo 650-750 °C při tavení dehydratačním (15-40 km).

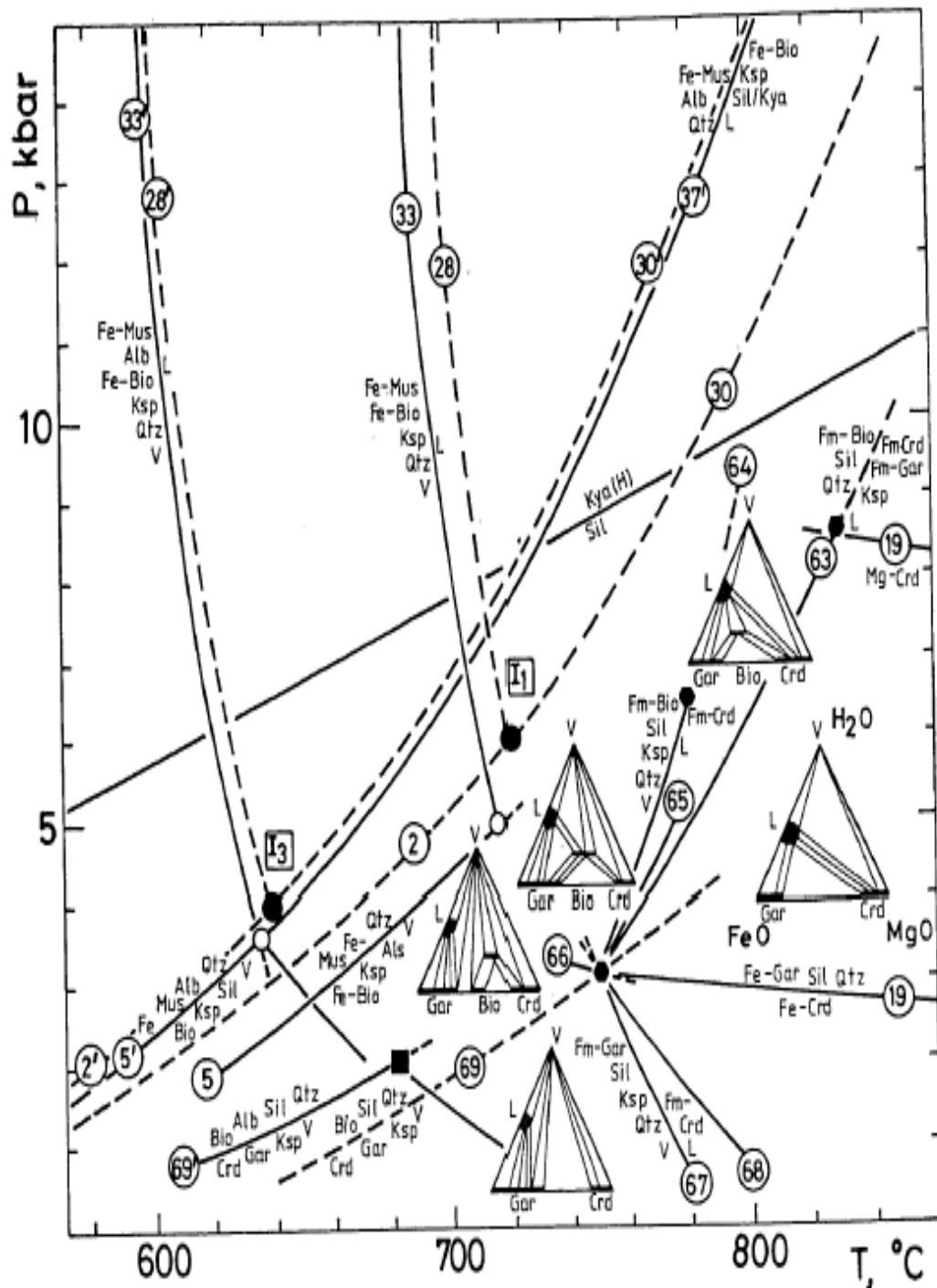


Diagram znázorňující hlavní reakce v systému NKFMAŠH
Thompson 1982

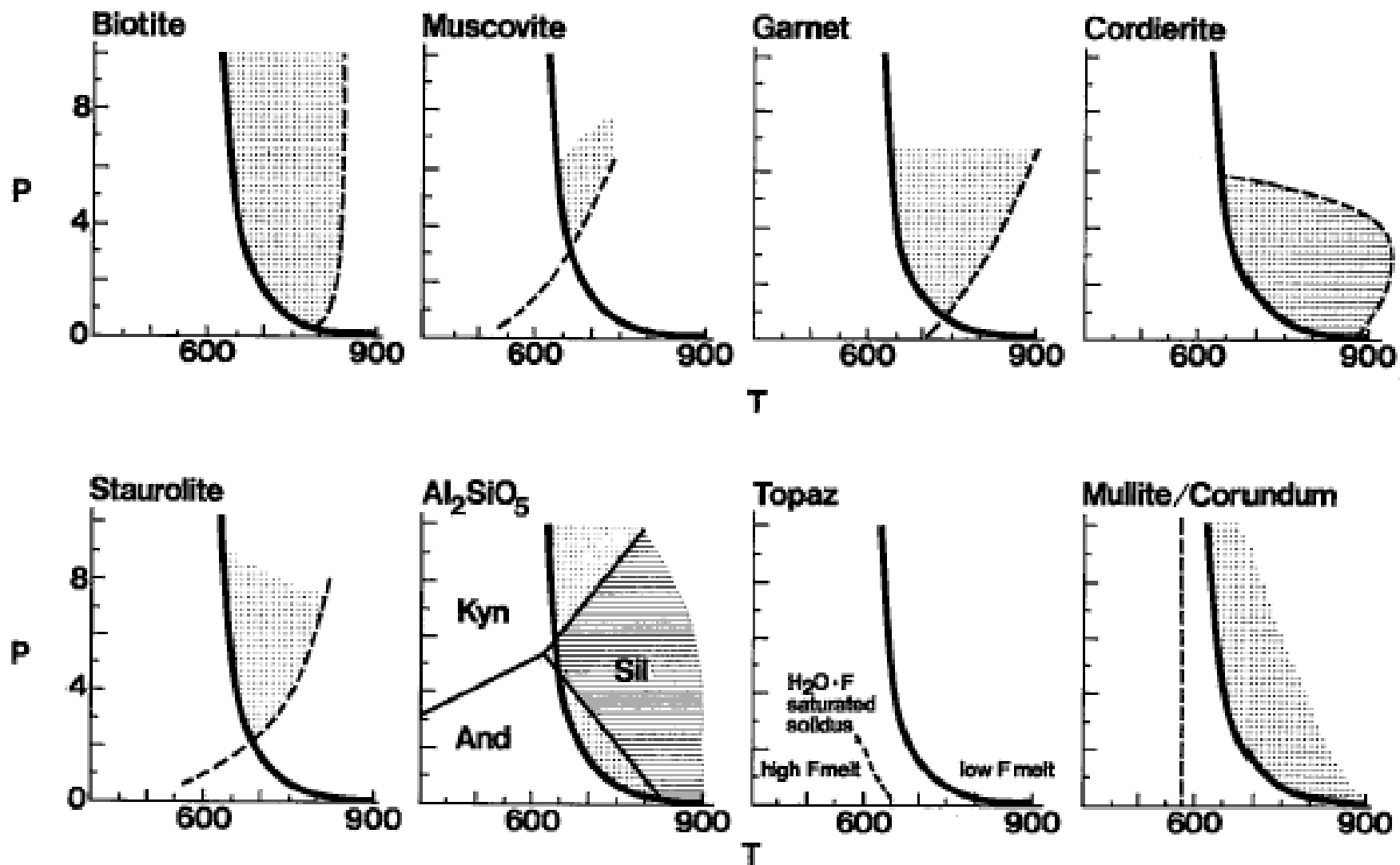


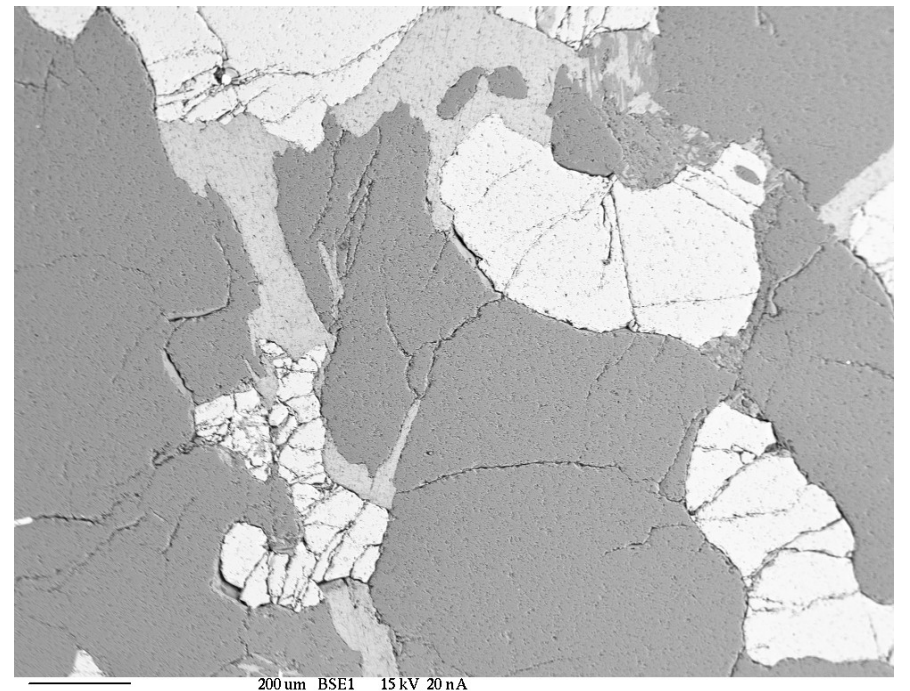
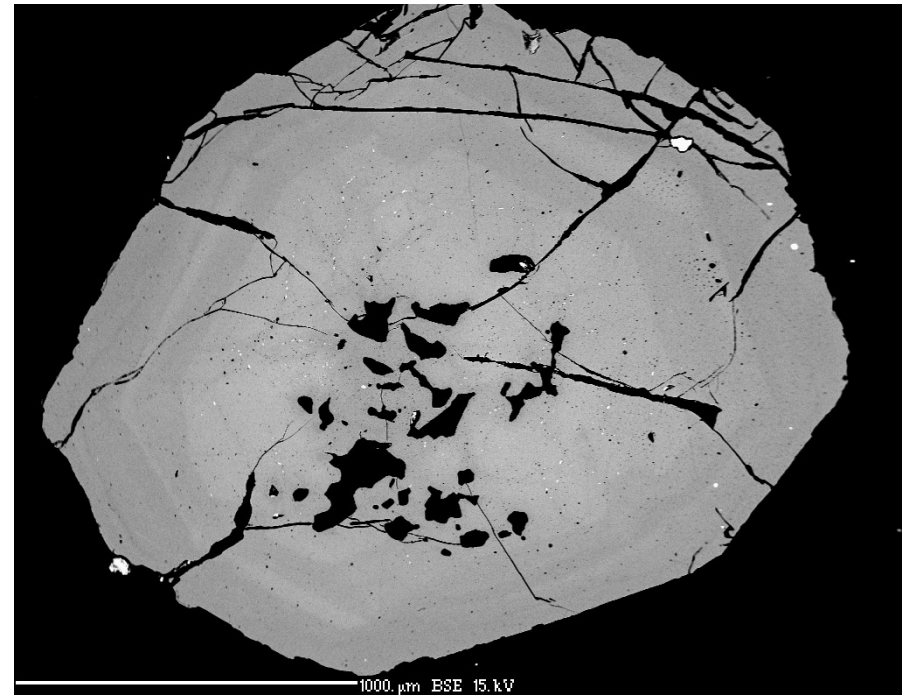
FIG. 1. Simplified P-T stability fields for some of the phases found in peraluminous granites and their relationship to the field of silicate melts. Overlap of the two fields (shaded) indicates that a primary magmatic origin for that phase is possible; however, the positions of all stability curves, including that of the granite solidus, are sensitive to many chemical parameters. The result may be to expand, contract or even eliminate the areas of overlap in the natural system. Sources of stability curves: biotite, Clemens & Wall 1981; muscovite, Althaus *et al.* 1970; cordierite, Clemens & Wall 1981; staurolite, Richardson 1968; aluminosilicates, Richardson *et al.* 1969; topaz, Glyuk & Anfilogov 1973; mullite and corundum, Roy & Osborn 1954.

Skupina granátu

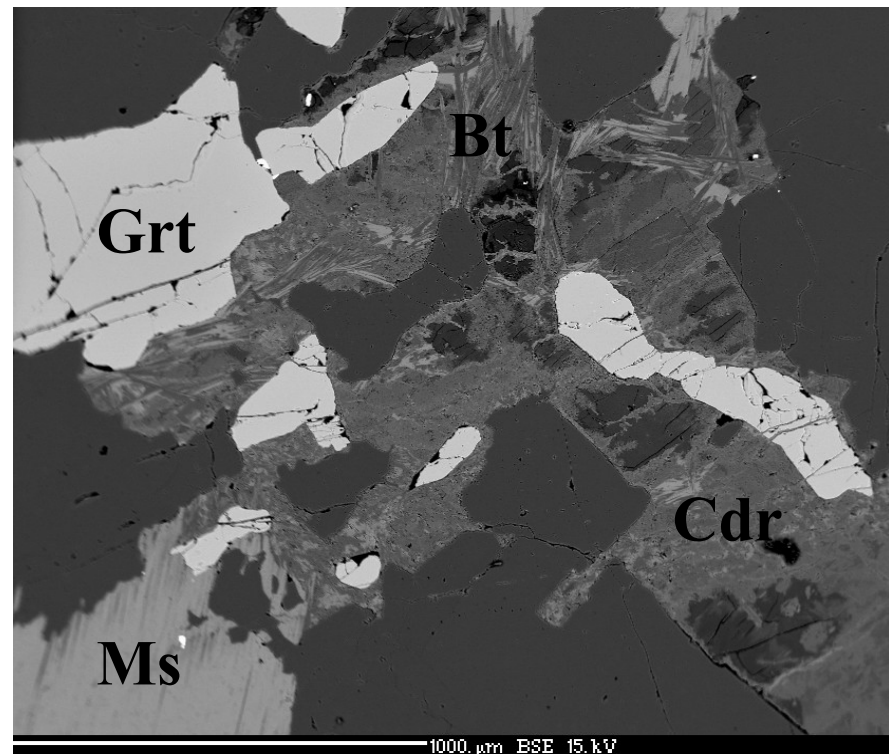
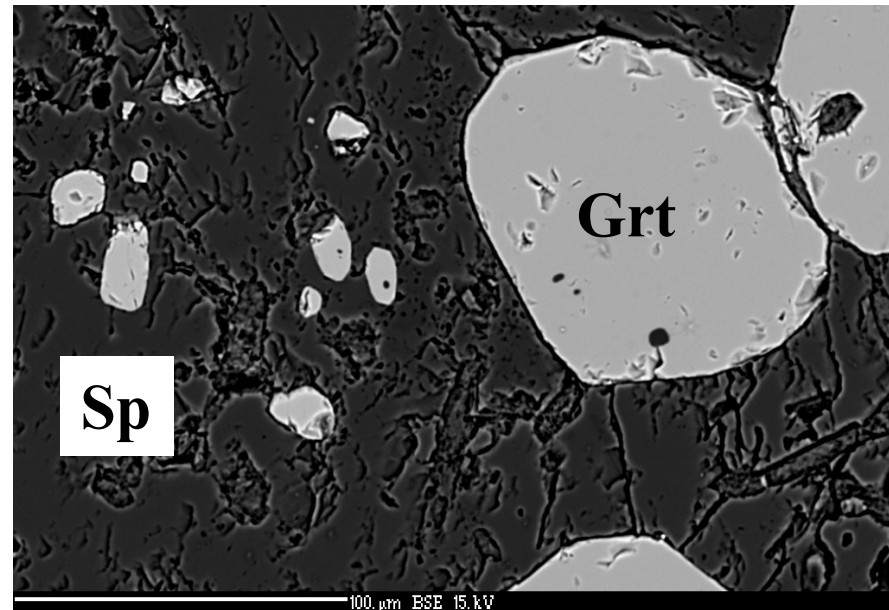
Krychlový nesilikát $X_3Y_2Si_3O_{12}$

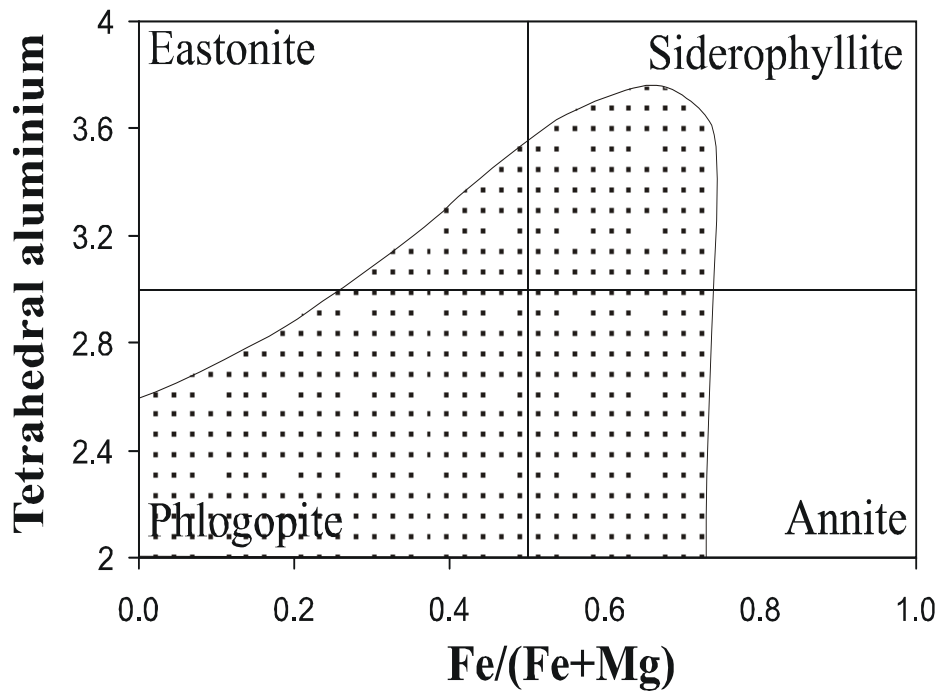
X: Fe^{2+} , Mg, Mn Ca; Y: Al, Fe^{3+} , Cr

- Pyrop $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$
 - Almandin $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$
 - Spessartin $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$
 - Grosular $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$
 - Andradit $Ca_3Fe^{3+}_2Si_3O_{12}$
- Pro peraluminosní horniny je typický granát s výrazným podílem spessartinové komponenty (Deer et al., 1992).
- Avšak nemusí to platit pro granitické horniny metaluminosní.
- Granát v peraluminických granitech bývá výrazně naboacen na HREE a má slabou negativní Eu anomálii (Harris a Ayres, 1997).



- Při vzniku taveniny se fluidní fáze uvolňují reakcemi, které spotřebovávají minerály obsahující ve své struktuře vodu (biotit, amfibol) a produkují minerály bezvodé jako je například granát nebo pyroxen.
- Granát se tedy při tavení metapelitů hromadí v restitu.
- V granitech se podle Clarkeho (1981) objevuje granát jako součást xenolitů nebo jako xenokrysty.
- Může vznikat jako důsledek reakce xenolitu metapelitu s taveninou (xenolit je vůči magmatu bohatý na Mn, a Al případně i Fe) či přímo krystalovat z taveniny.
- Konečně může vznikat reakcí dříve vzniklých minerálů s taveninou například reakcemi: $\text{Liq} + \text{Bt} = \text{Grt} + \text{Ms}$ a $\text{Liq} + \text{Sil} = \text{Bt} + \text{Grt}$.
- Při krystalizaci z magmatu, zvláště u aplitů a pegmatitů, roste Mn/(Mn + Fe + Mg) v granátu s nárůstem stupně diferenciace.





Biotit

- Flogopit: $\text{KMg}_3[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Annit: $\text{KFe}_3[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Eastonit: $\text{K}[\text{Mg}_2\text{Al}][\text{Al}_2\text{Si}_2]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Siderofylit: $\text{K}[\text{Fe}_2\text{Al}][\text{Al}_2\text{Si}_2]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

Diagram Al-Fe/(Fe+Mg) pro klasifikaci biotitů s vyznačeným polem do nějž spadá většina přírodních biotitů (Deer et. al., 1992).

- Nejvýrazněji se v biotitech mění poměr Fe/Mg a obsah Al dále se může měnit obsah Ti (jestliže přibývá v biotitu množství Ti, mění se jeho barva ze zelené přes hnědou až na oranžovou).
- Obecně v magmatických systémech platí, že s nárůstem kyselosti horniny roste v biotitu obsah Fe^{2+} a klesá Mg (Deer et. al., 1992).
- Podobný trend je možné pozorovat i v jednotlivých intruzích, porovnáme-li biotity, které vznikaly v raných stádiích krystalizace s biotity pozdními.
- Navíc mohou být pozdní biotity bohatší na Al a Fe^{3+} a naopak klesá obsah Si a Ti.
- Podobně se mohou chovat i stopové prvky: poměry Ge:Al, Li:Mg, Mn: Fe^{2+} a Rb:K stoupají a poměry Ni:Mg, Co: Fe^{2+} a Ba:K klesají.

- Stabilitou flogopitu v peraluminické granitové tavenině se zabývali Grochau a Johannes (1997). Při 5 kbarech a aktivitě $H_2O = 1$ je flogopit stabilní do teplot $1000^{\circ}C$, s poklesem aktivity H_2O se pole stability flogopitu zmenšuje.
- Při experimentech vznikl rozpadem flogopitu enstatit. Grochau a Johannes (1997) předpokládají, že část biotitu v granitech bohatých na mafické minerály nemusela krystalizací z magmatu.
- Biotit v takových horninách mohl vznikat reakcí restitových minerálů (jako je například granát, nebo pyroxen) s magmatem během jeho výstupu k povrchu (změna P-T podmínek).
- Granity chudé na mafické minerály (leukogranity) vznikaly za nízkých teplot ($< 800^{\circ}C$).



II. 14. Voda v tavenině granitů

- Množství vody které je rozpuštěné v granitické tavenině závisí na tlaku teplotě, složení taveniny, a aktivitě vody (Holtz 2001).
- Taveniny které vznikaly za vysokých teplot (např. A-typové granity) obsahují při PT podmínkách 800-900 °C a 3-7 kbar obsahují až do 20%.
- Taveniny generované tavením křemen-živcových hornin za nízkých teplot (kolem 750 °C) obsahují pod 5%.

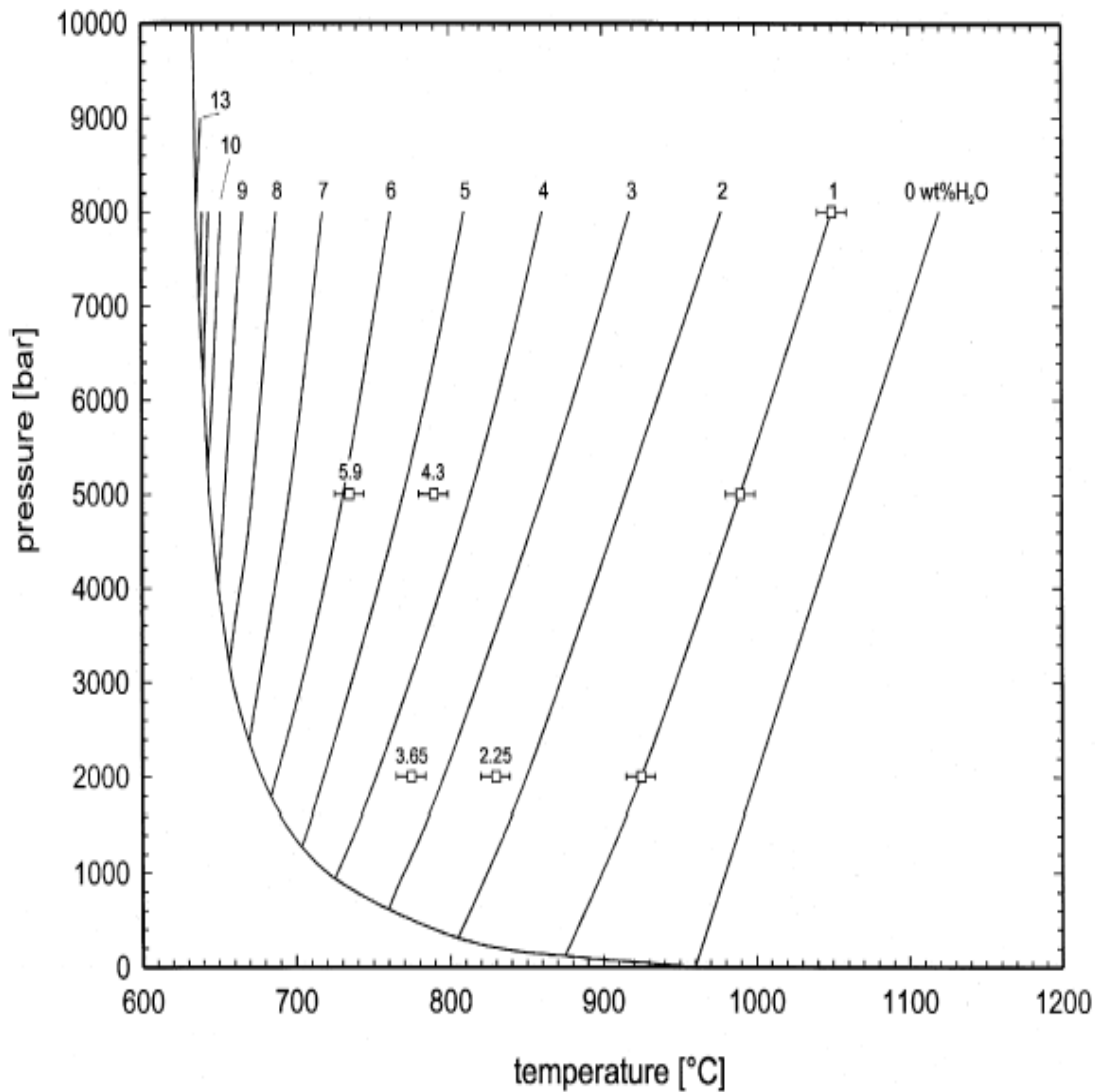
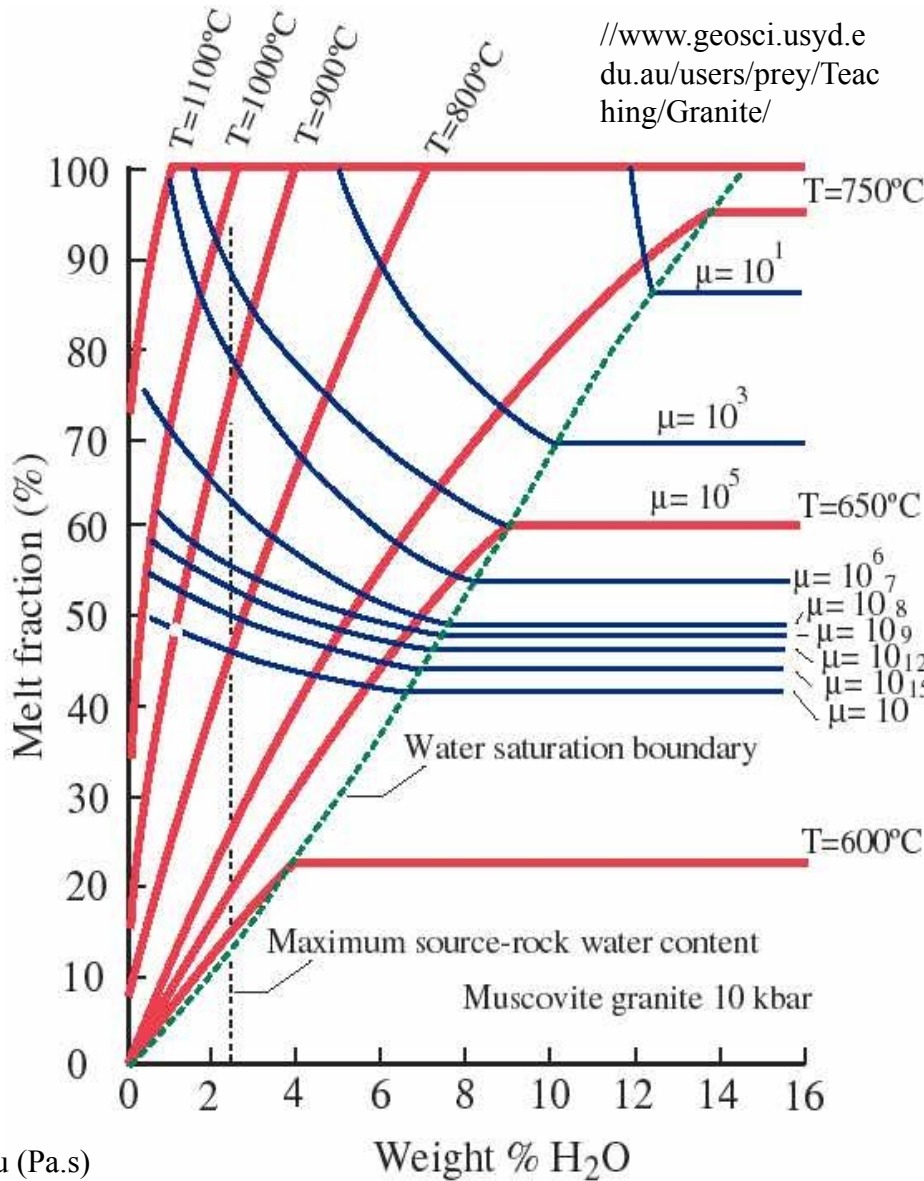
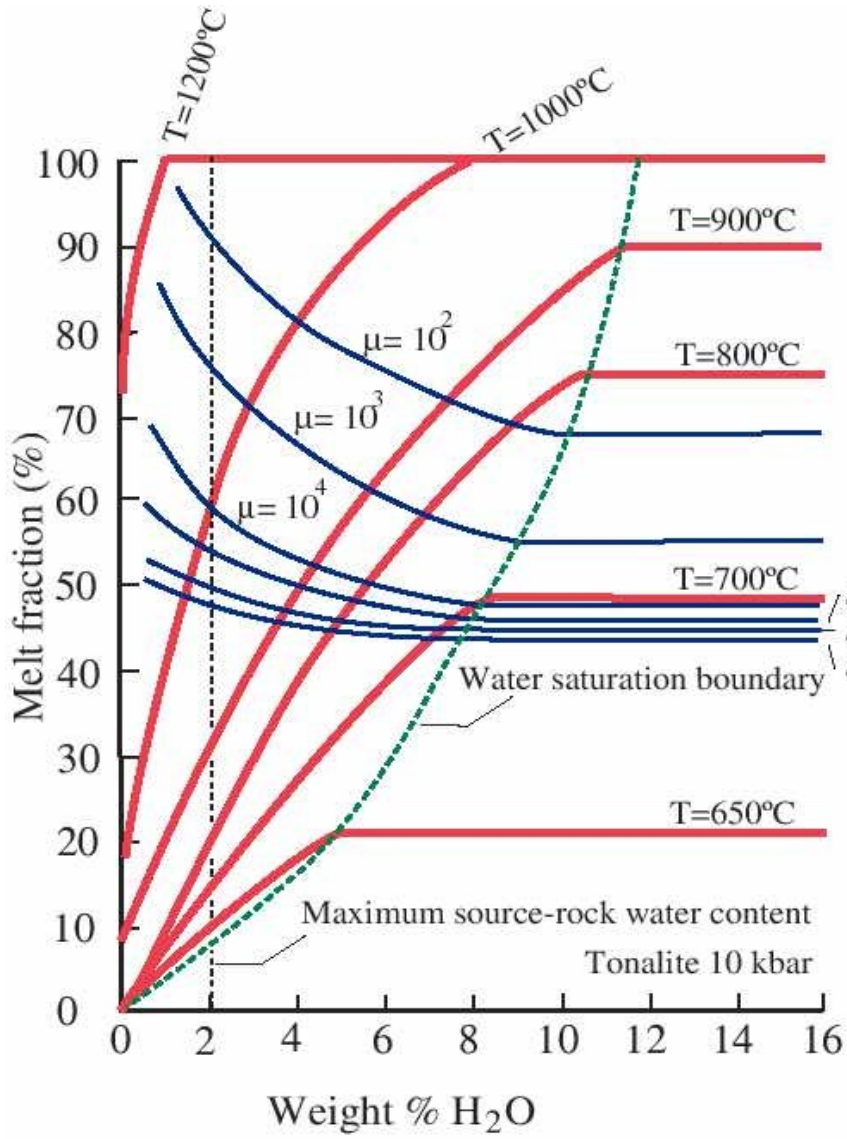


Fig. 4. Water-saturated solidus curve and liquidus curves for given amounts of H₂O in natural subaluminous granitic and rhyolitic systems with eutectic or minimum compositions. The liquidus curves indicate the minimum water content that can be dissolved in melts at given P and T . The squares indicate the liquidus conditions of eutectic or minimum compositions containing the indicated water content (results from phase relations studies, see text). Note that the 1 wt.% H₂O liquidus curve is constrained by three datasets.

- Množství vody ovlivňuje množství taveniny vzniklé při určité teplotě.
- Množství taveniny ale zůstává konstantní po dosažení saturace taveniny
- Za velmi vysokých teplot vzniká velké množství taveniny i v systému chudém na vodu

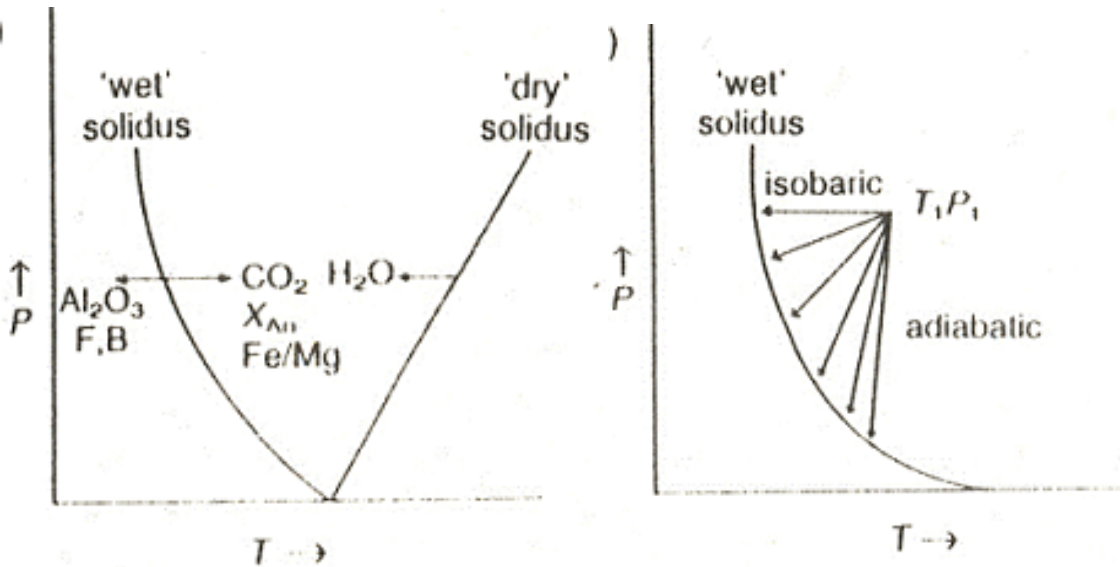


//www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/Teaching/Granite/

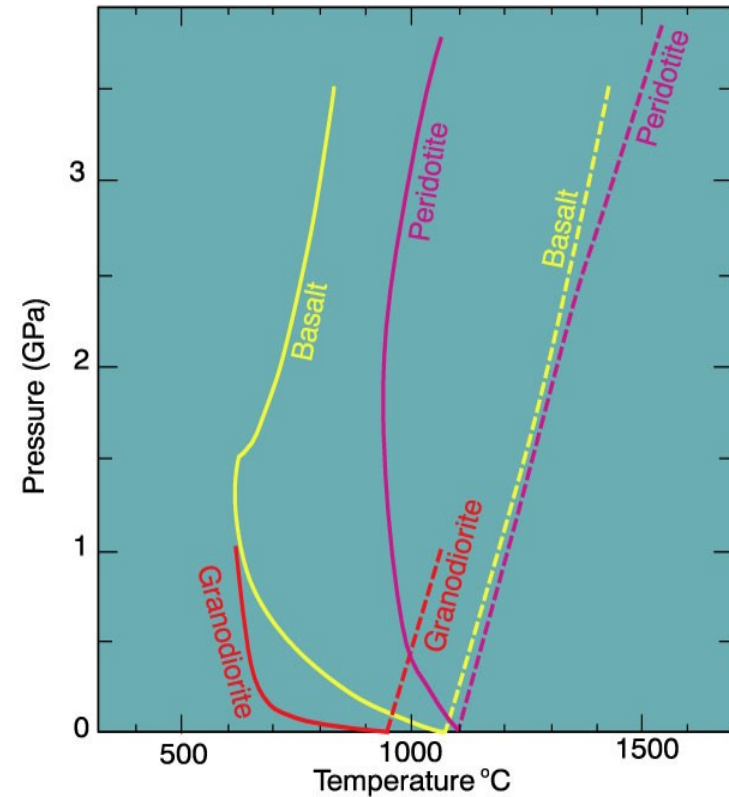
Role vody při produkci taveniny červené čáry značí teplotu modré viskozitu (Pa.s)

II. 15. Shrnutí experimentů

- Solidus všech hornin je nižší za přítomnosti vody
- Teplota tavení a krystalizace je výrazně ovlivněna chemickým složením taveniny a složením fluidní fáze která sní koexistuje
- Ke krystalizaci může dojít snížením tlaku (adiabaticky) nebo teploty (isobaricky)
- Během krystalizace dochází k oddělení plynné fáze. K hlavním těkavým složkám magmatu patří H_2O , HCl , HF , SO_2 , SO_3 , H_2S , CO_2 , CO , N_2 , Cl .

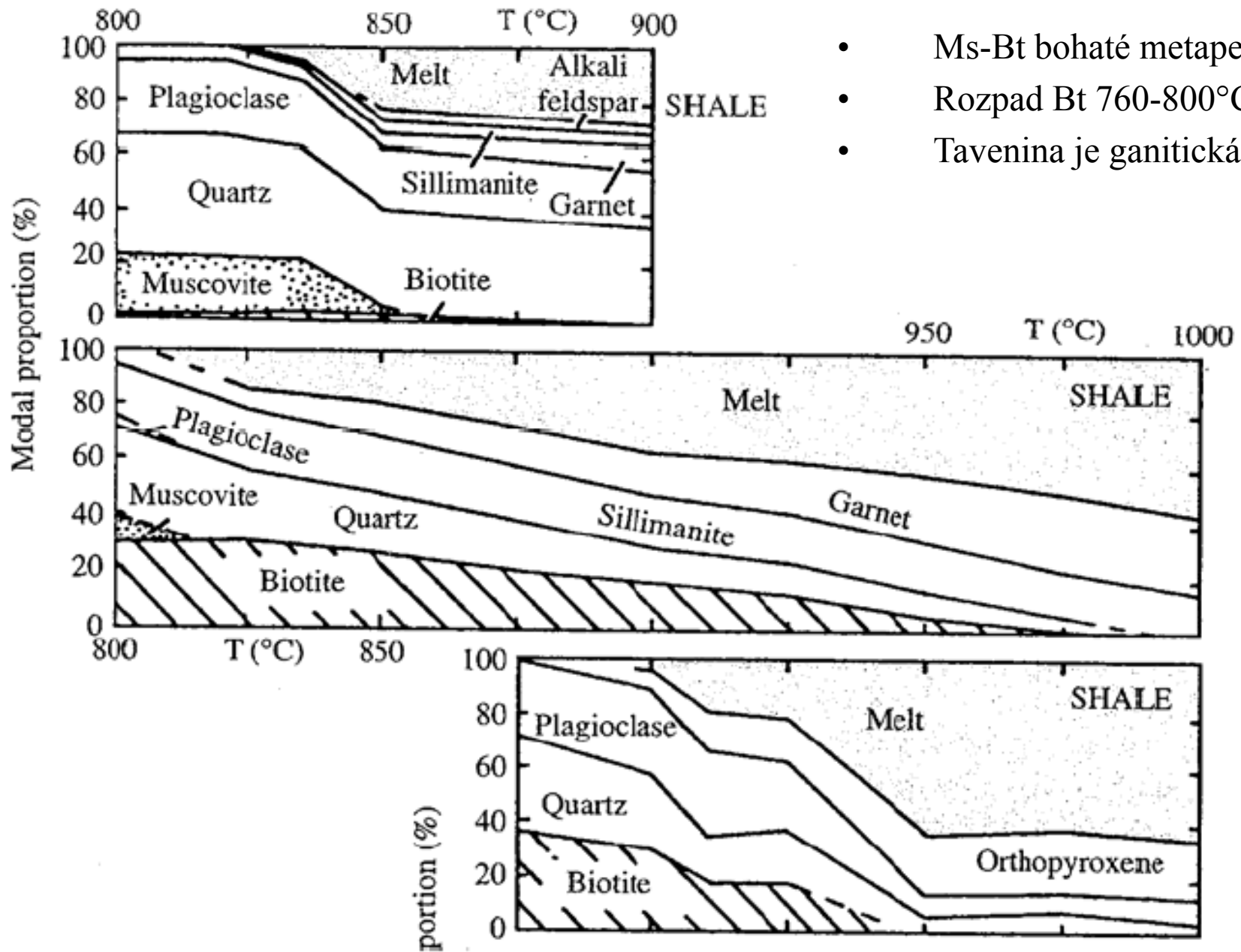


H₂O-saturated (solid) and H₂O-free (dashed) solidi (beginning of melting) for granodiorite (Robertson and Wyllie, 1971), gabbro (Lambert and Wyllie, 1972) and peridotite (H₂O-saturated: Kushiro et al., 1968; dry: Ito and Kennedy, 1967).

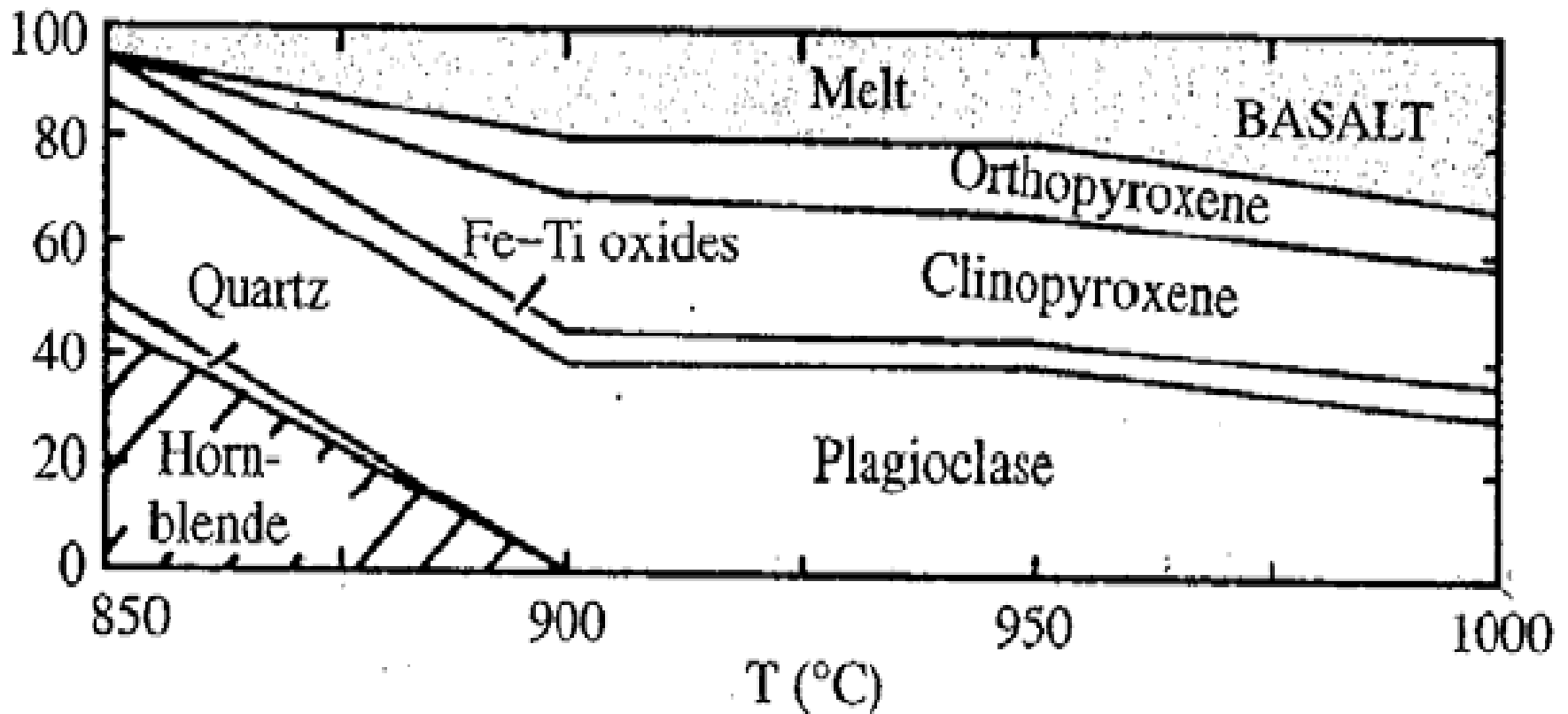


Dehydratační tavení metapelitů

- Ms-Bt bohaté metapelity
- Rozpad Bt 760-800°C/10 kbar.
- Tavenina je ganitická



Dehydratační tavení bazaltů



- Metabazalty a amfibolity mohou být postiženy dehydratačním tavením.
- $Hb + Qtz = \text{tavenina} + Opx + Cpx \pm Grt + Pl$
- Tavení začíná při 850-900°C/10 kbar.
- Tavenina je tonalitická až trondhjemitická (bohatá Ca)