

Metamorfni petrologie I

5. Fázová petrologie

5. Fázová petrologie

Osnova:

- *Zobrazení složení horninotvorných minerálů a minerálních asociací*
- *Petrogenetické mřížky*
- *T-X a P-X řezy*
- *Fázové pravidlo*
- *Metamorfní reakce*
- *Anatexe*
- *Metasomatóza*

• **1. Celkové chemické složení 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 $\text{MgO-CaO-SiO}_2\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$
- - ultramafity $\text{SiO}_2\text{-MgO-CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$

jiné chemické systémy (méně časté)

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

jiná označení chemických systémů:

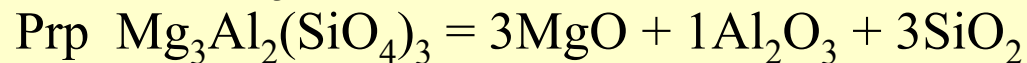
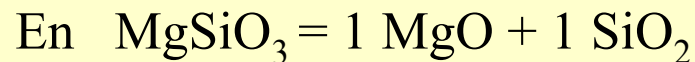
- - křemen-živcové horniny NASH, CASH a CKNASH
- - metapelity KMASH, KFASH a KFMASH
- - ultramafity MS-H₂O-CO₂, CMS-H₂O-CO₂

Znázornění chemického složení

minerály – bodový chemismus z elektronové mikrosondy

- 1) váhová procenta kysličníků/molekulová hmotnost = molekulární proporce (kvocienty)
 - 2) počet atomů kovů na určitý počet atomů O = kvocient kovu x (počet at. O/suma kvocientů O)
- např. Slavík et al. (1972)

poměr počtu molů = molární zlomek



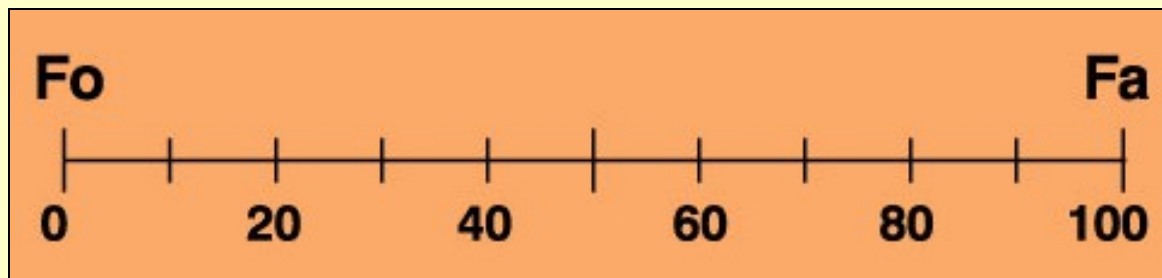
součet molárních zlomků = 1

$$\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3) = 1/1+1 = 0,5$$

$$\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2) = 3/7$$

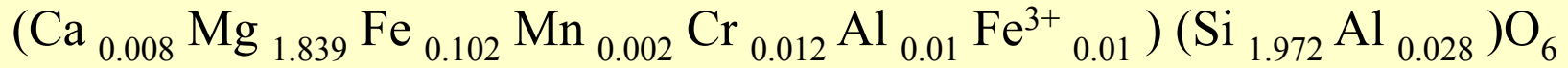
$$\text{Al}_2\text{O}_3 /(\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2) = 1/7$$

- dvoukomponentní systém znázorňující složení olivínu



$$= \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$$

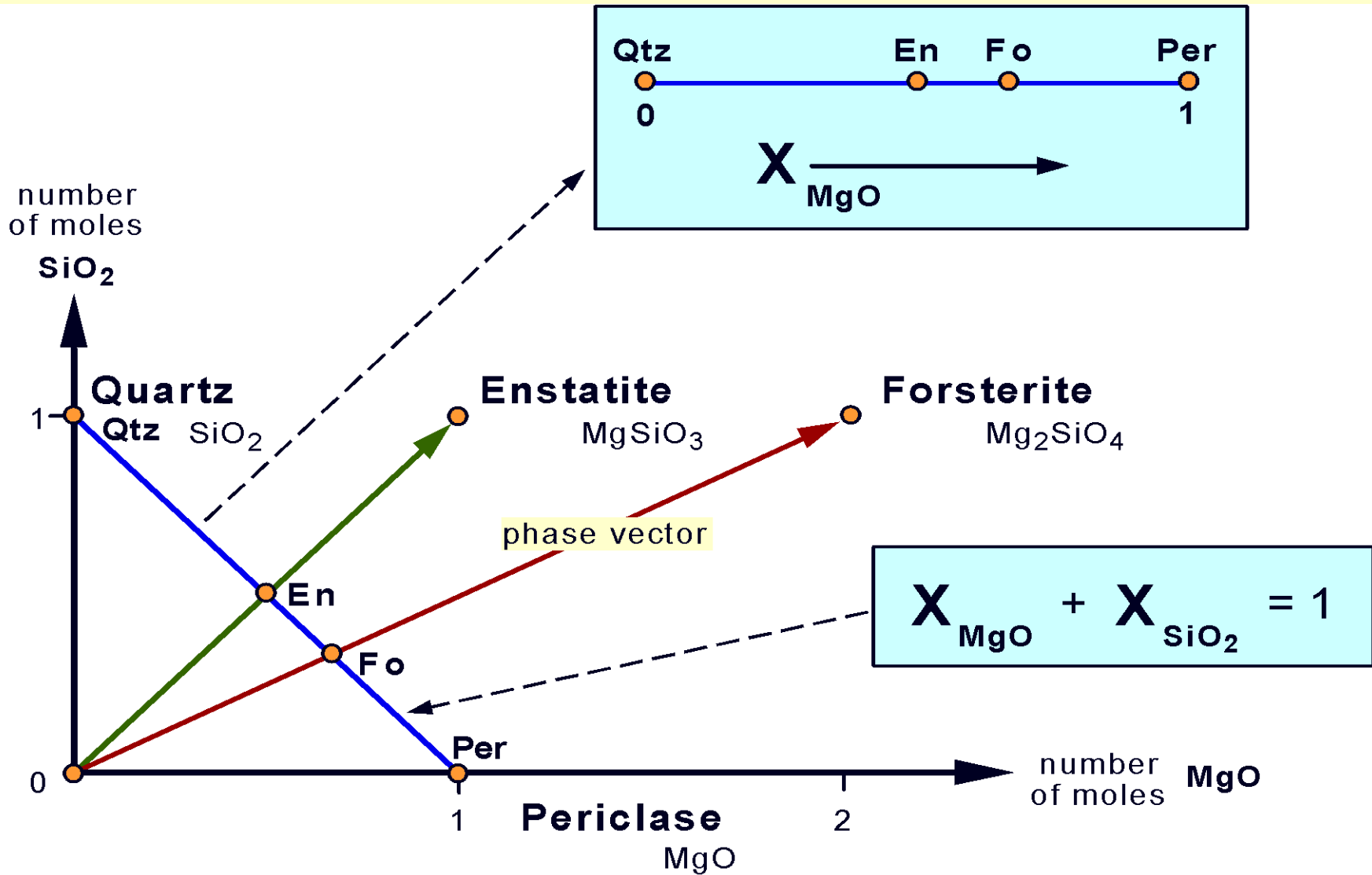
Enstatit



enstatit	Mg ₂ Si ₂ O ₆		
			na 6 O
SiO ₂	57,73	Si	1,972
TiO ₂	0,04	Al	0,028
Al ₂ O ₃	0,95	Al	0,01
Fe ₂ O ₃	0,42	Ti	0,001
Cr ₂ O ₃	0,46	Fe ³⁺	0,01
FeO	3,57	Cr	0,012
MnO	0,08	Mg	1,839
NiO	0,35	Ni	0,01
MgO	36,13	Fe ²⁺	0,102
CaO	0,23	Mn	0,002
Na ₂ O	-	Ca	0,008
K ₂ O	-	Na	-
H ₂ O+	0,52	K	-
H ₂ O-	0,04		
	100,52	Mg	93,9
		Fe	5,7
		Ca	0,4

$$\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}) = 0,94$$

$$\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Si}) = 0,48$$

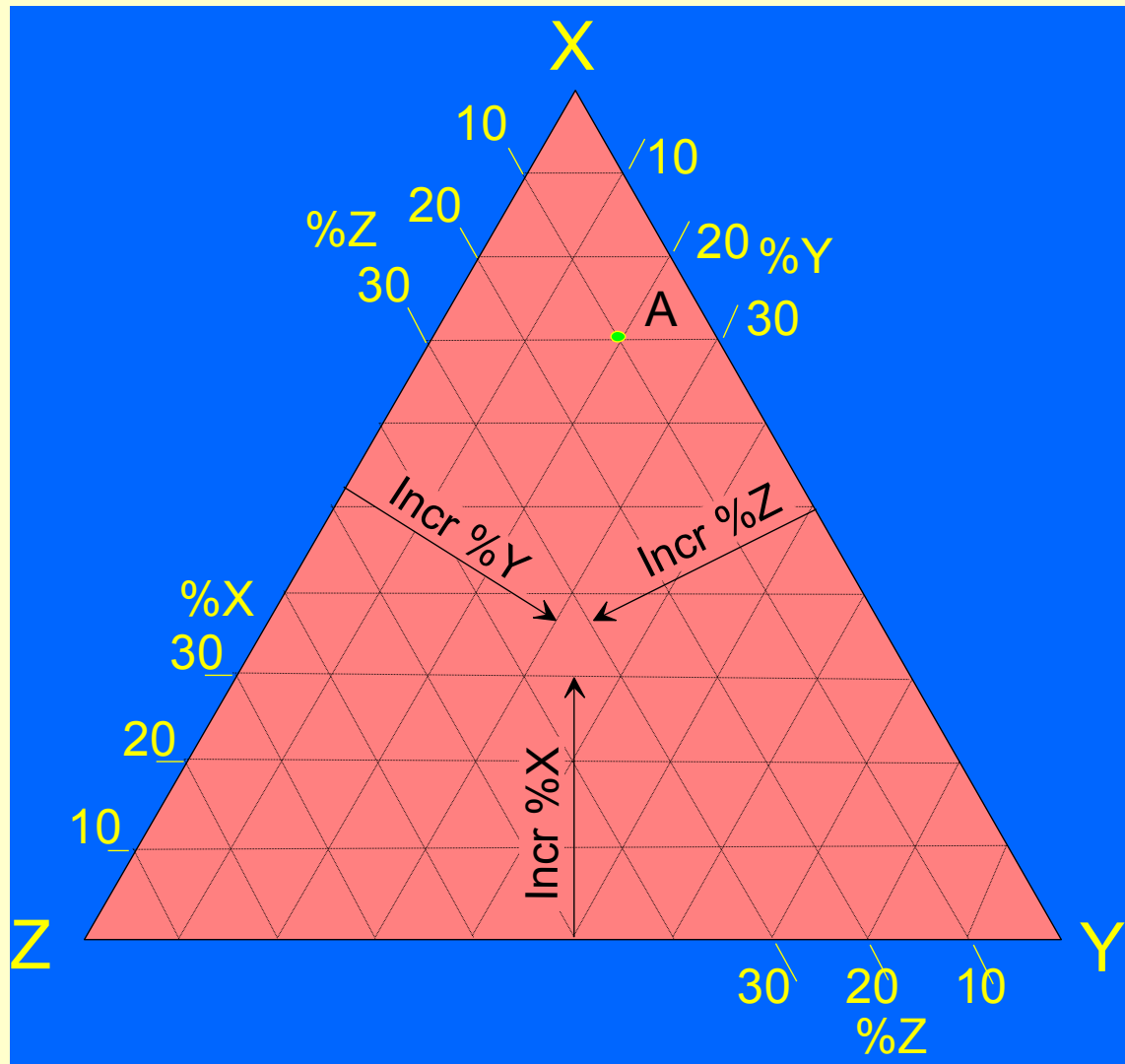


Ternární diagramy

Jak vynést hodnoty do ternárního diagramu:

a) zdrojová data XYZ normalizujeme na 100%

b) vyneseme do diagramu:
Metoda č. 1 : 70% X, 20% Y, a 10% Z



Metoda č. 2 : pro komponenty

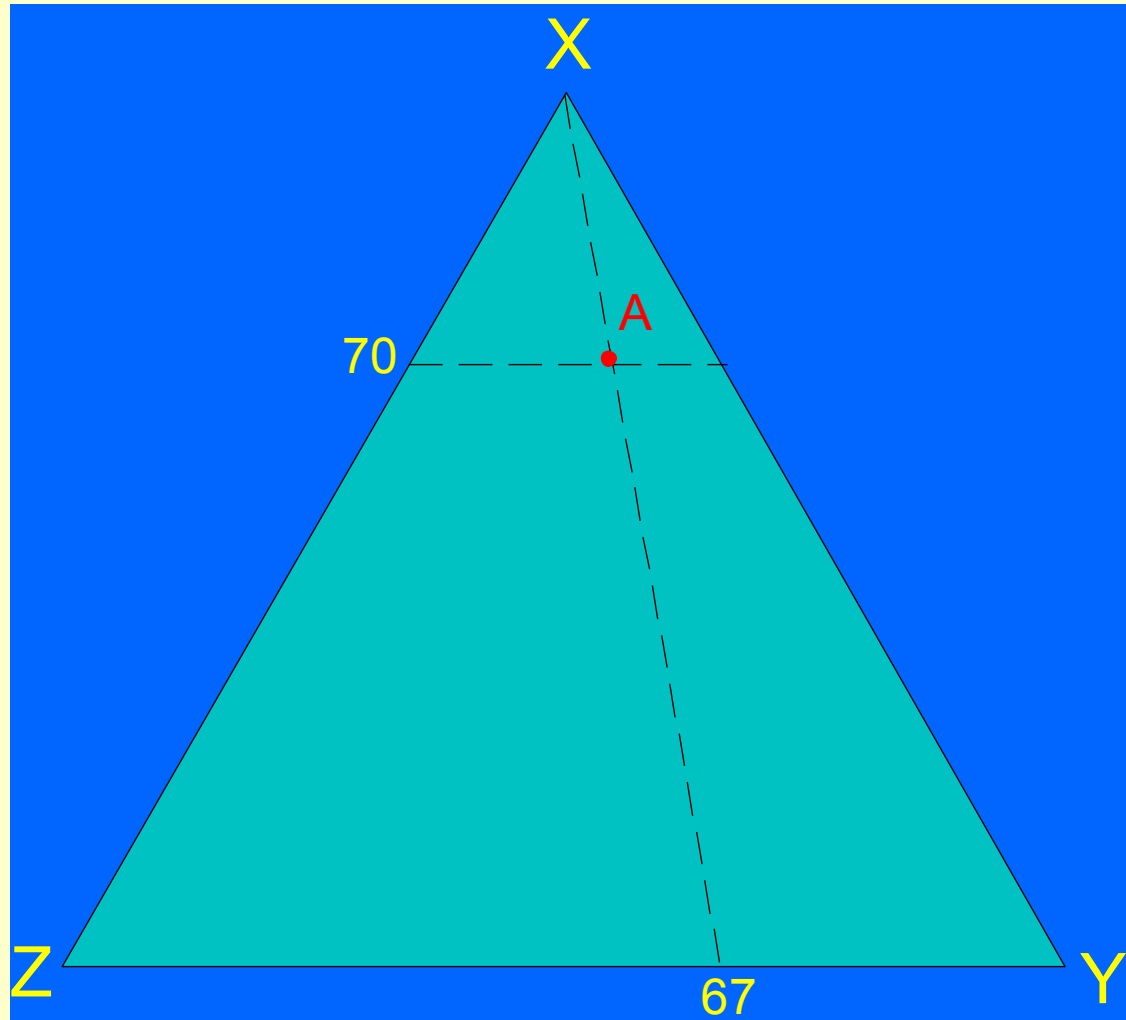
70% X, 20% Y, a 10% Z

Postup:

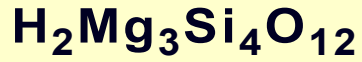
$10 + 20 = 30 = 100\%$

$Y = 20 = 67\%$

$X = 10 = 33\%$



Talc

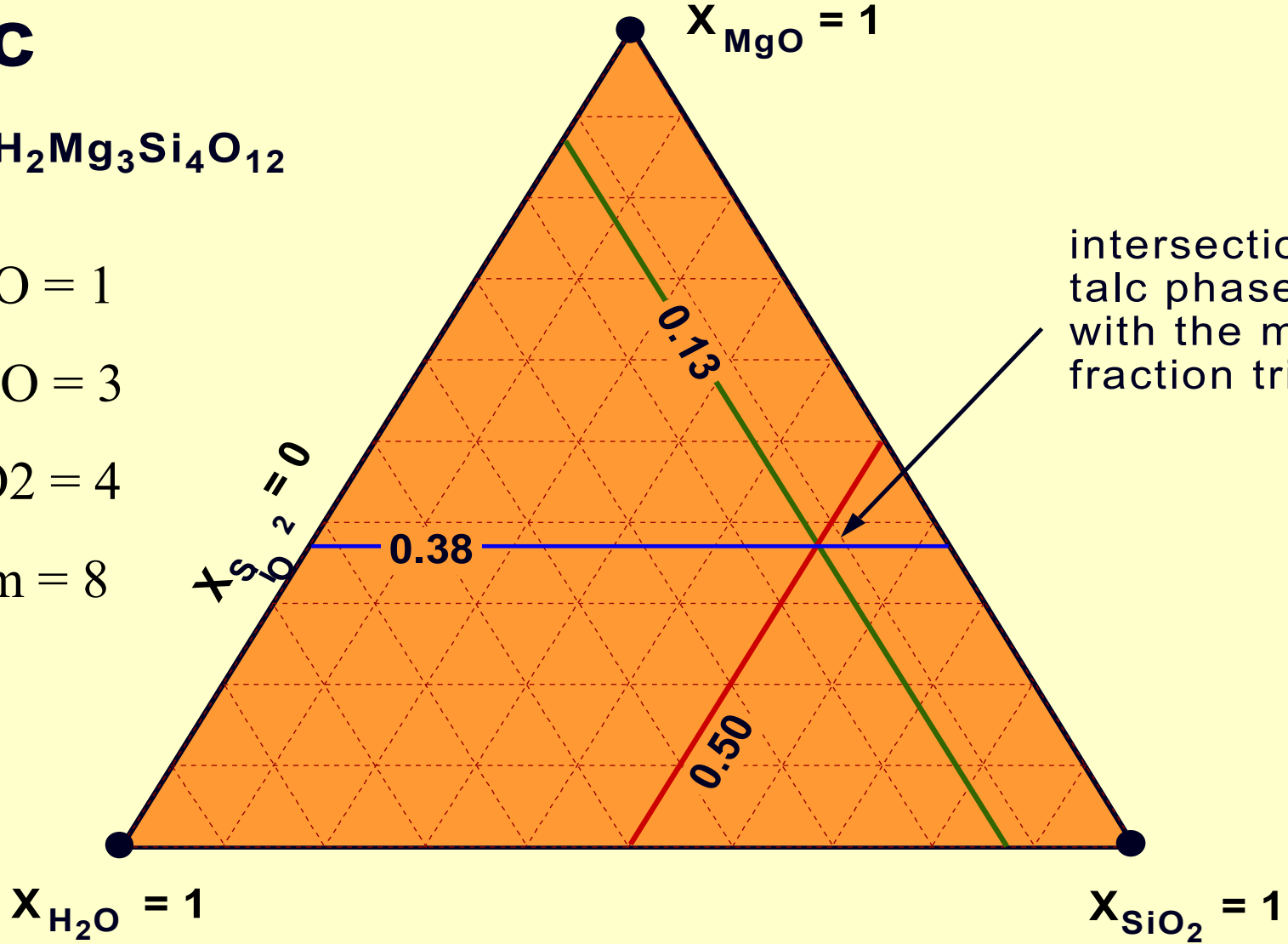


H₂O = 1

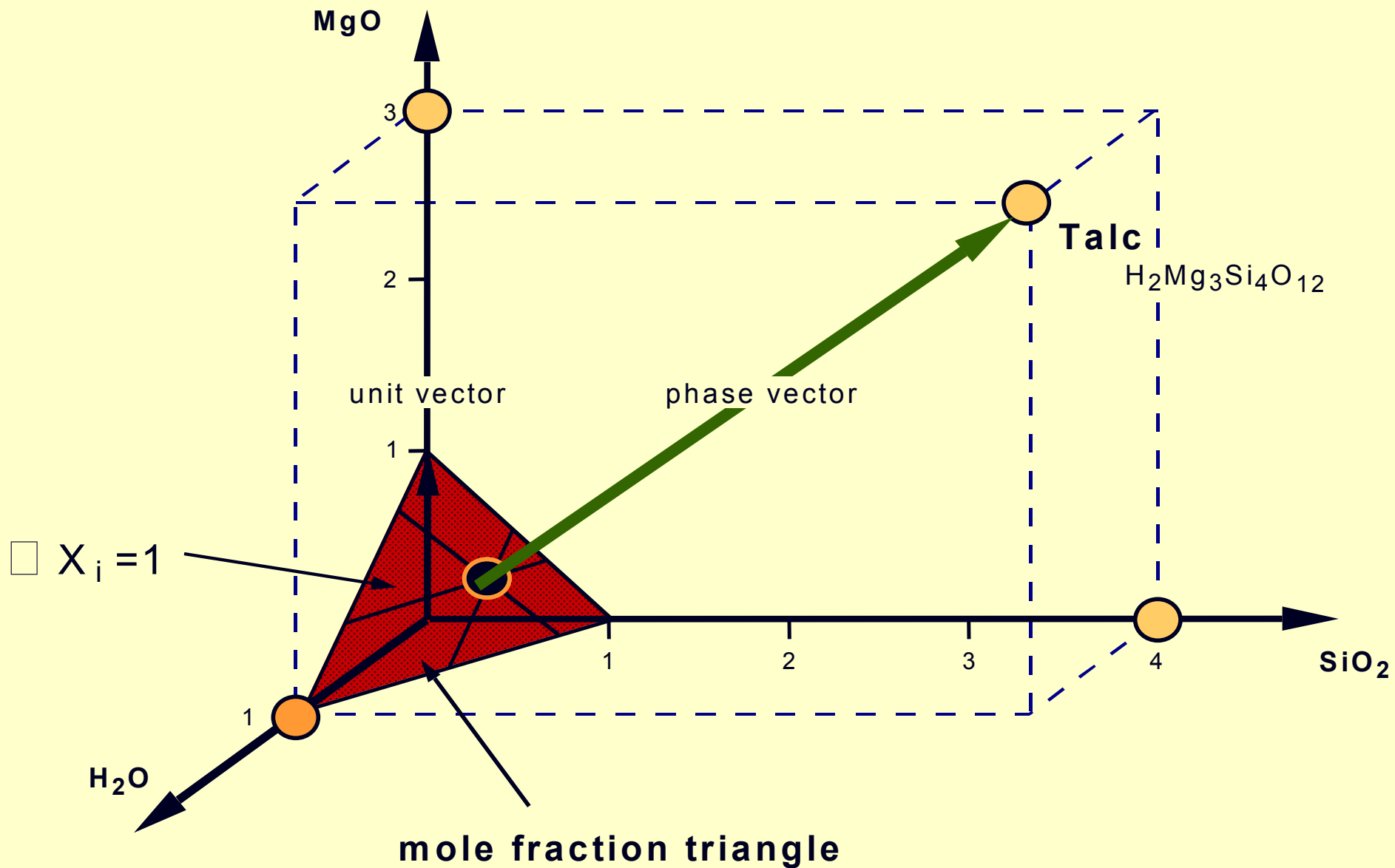
MgO = 3

SiO₂ = 4

Sum = 8



intersection of talc phase vector with the mole fraction triangle



Běžně užívané ternární diagramy

a) A(B)FM Diagram (J.B.Thompson 1957)

Metapelite

A=Al₂O₃

B=K₂O

F=FeO

M=MgO

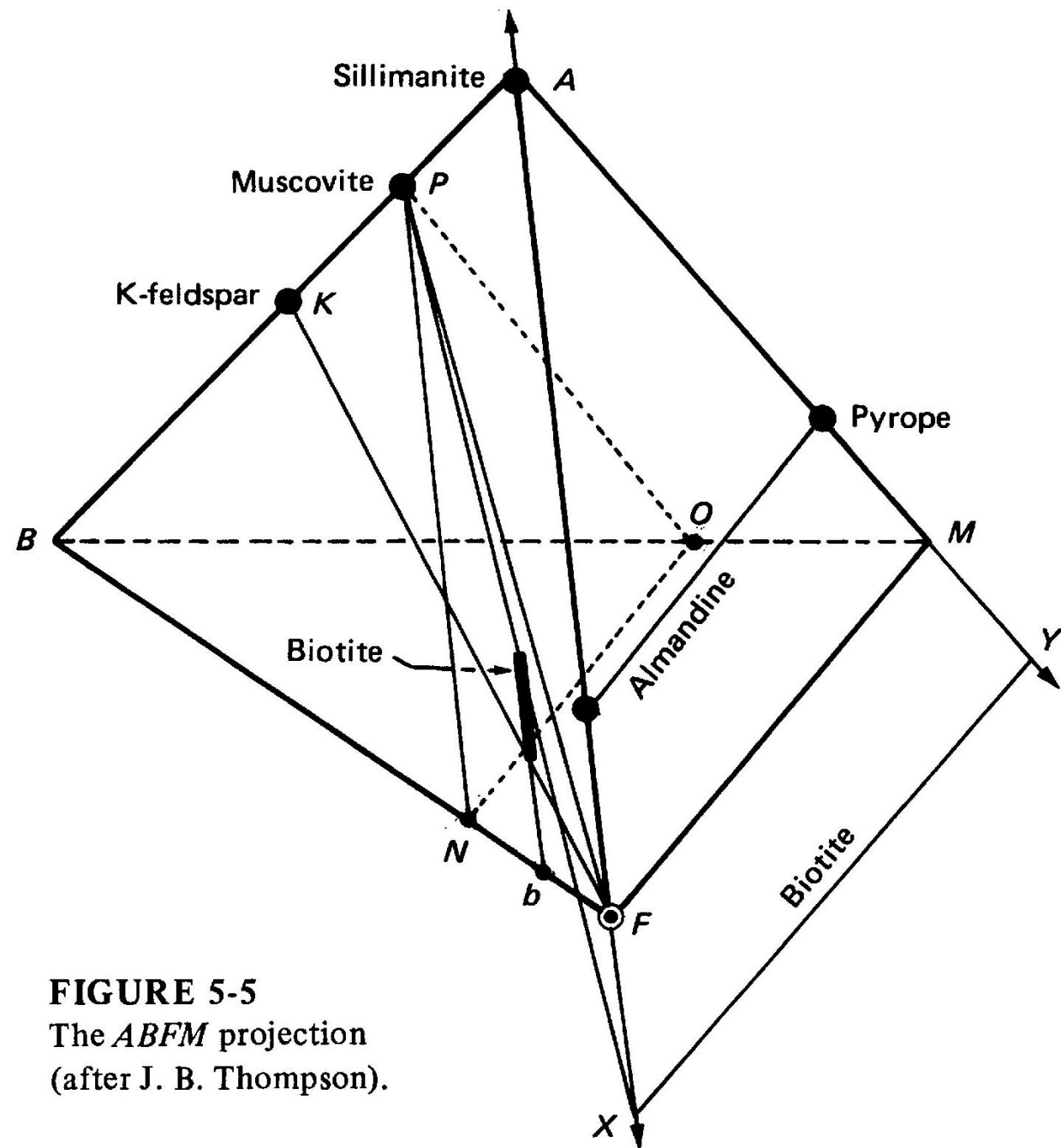


FIGURE 5-5
The *ABFM* projection
(after J. B. Thompson).

b) **ACF Diagram** (Eskola, 1900)

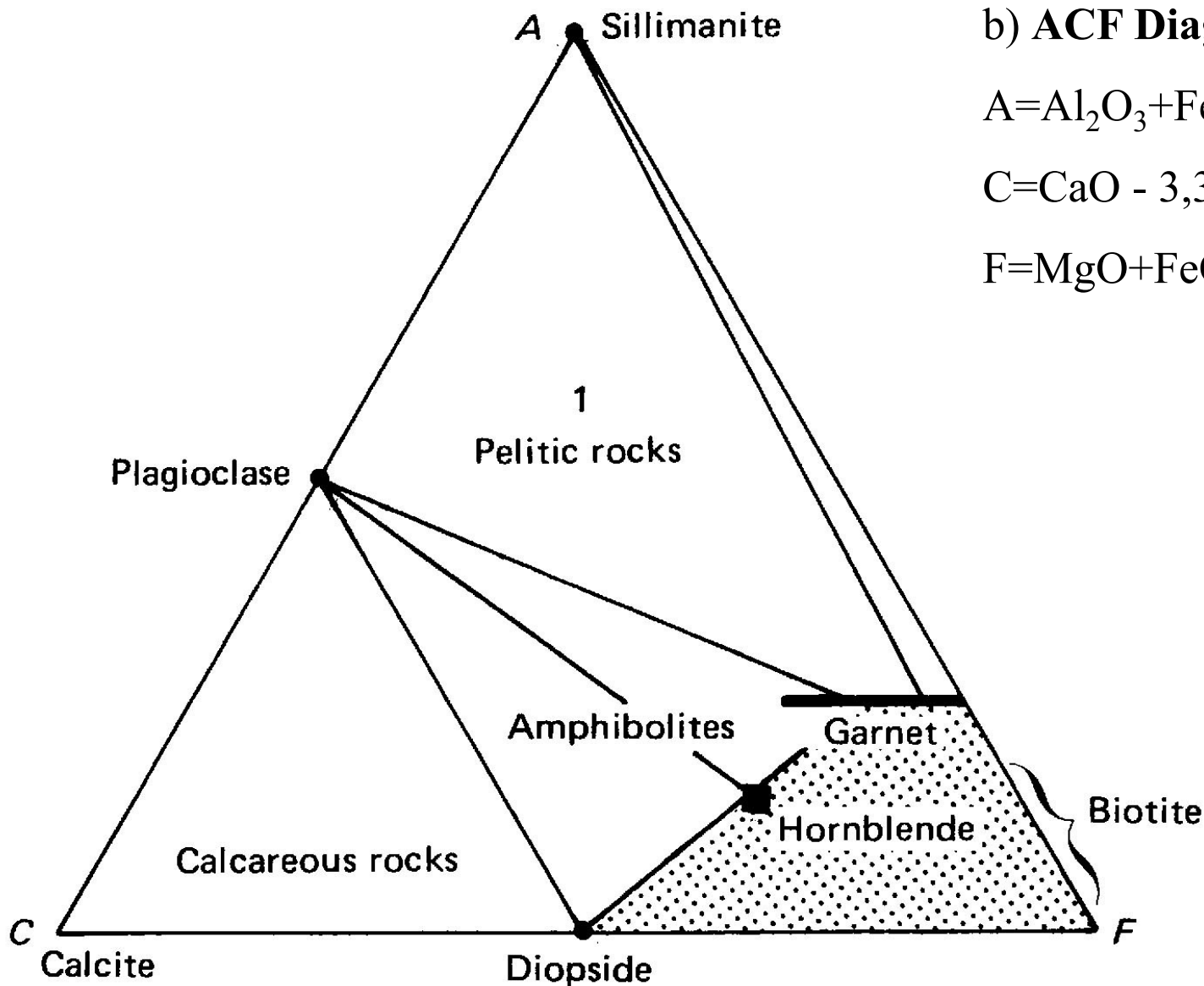
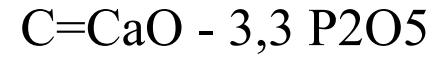
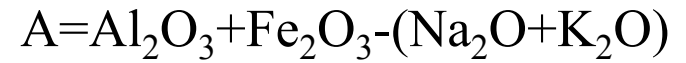


FIGURE 5-2

ACF diagram for mineral assemblages in quartzo-feldspathic gneisses and associated amphibolites in an area of southwestern Quebec (data from R. Kretz, 1959, 1963). Stippled field not recorded.

c) **AKF Diagram** (Eskola, 1900)

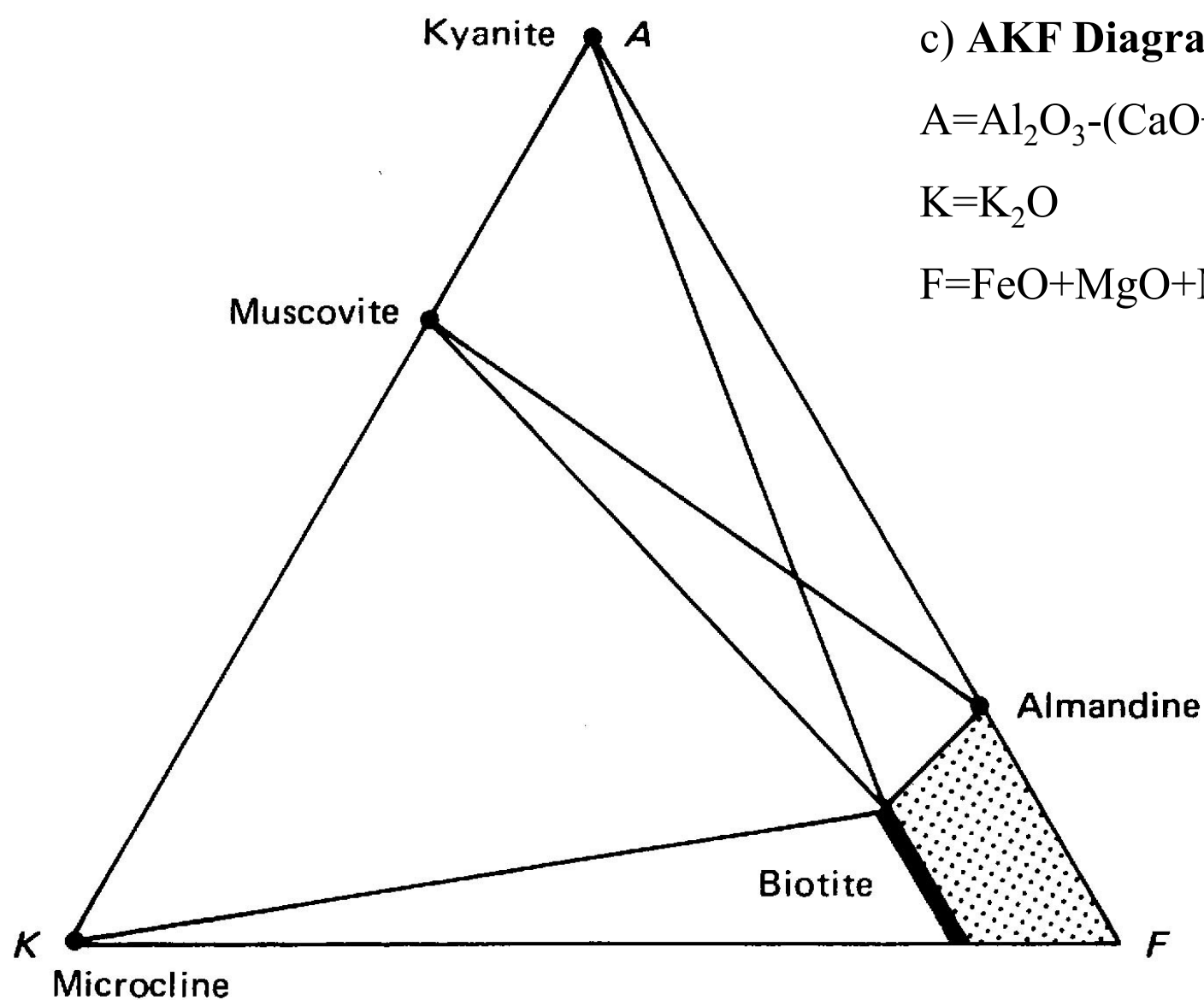
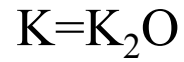
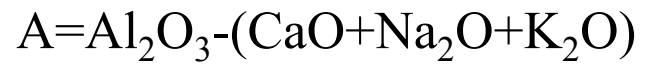
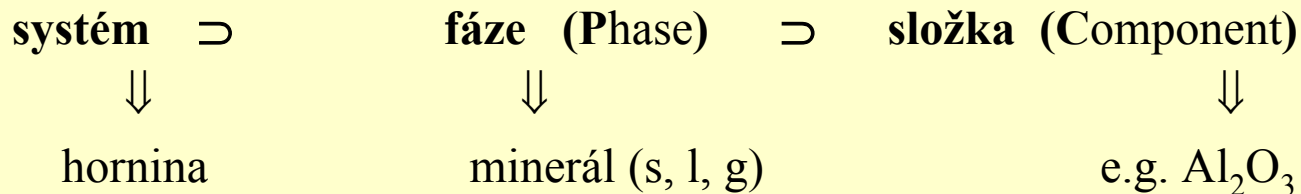


FIGURE 5-3

AKF diagram for quartz-bearing pelitic rocks of the kyanite zone in Glen Urquhart, northeastern Scotland. Data (from G. N. Francis, 1964) correspond to triangle 1 in Fig. 5-1. Stippled field not represented.

Fázové pravidlo



system (hornina)

uzavřený - přes hranice systému může být přemístována energie ale ne hmota

otevřený - hmota a energie mohou být přemístovány přes hranice systému

fáze - fyzikálně oddělitelné části systému (pevné - minerál, kapalně, plynné)

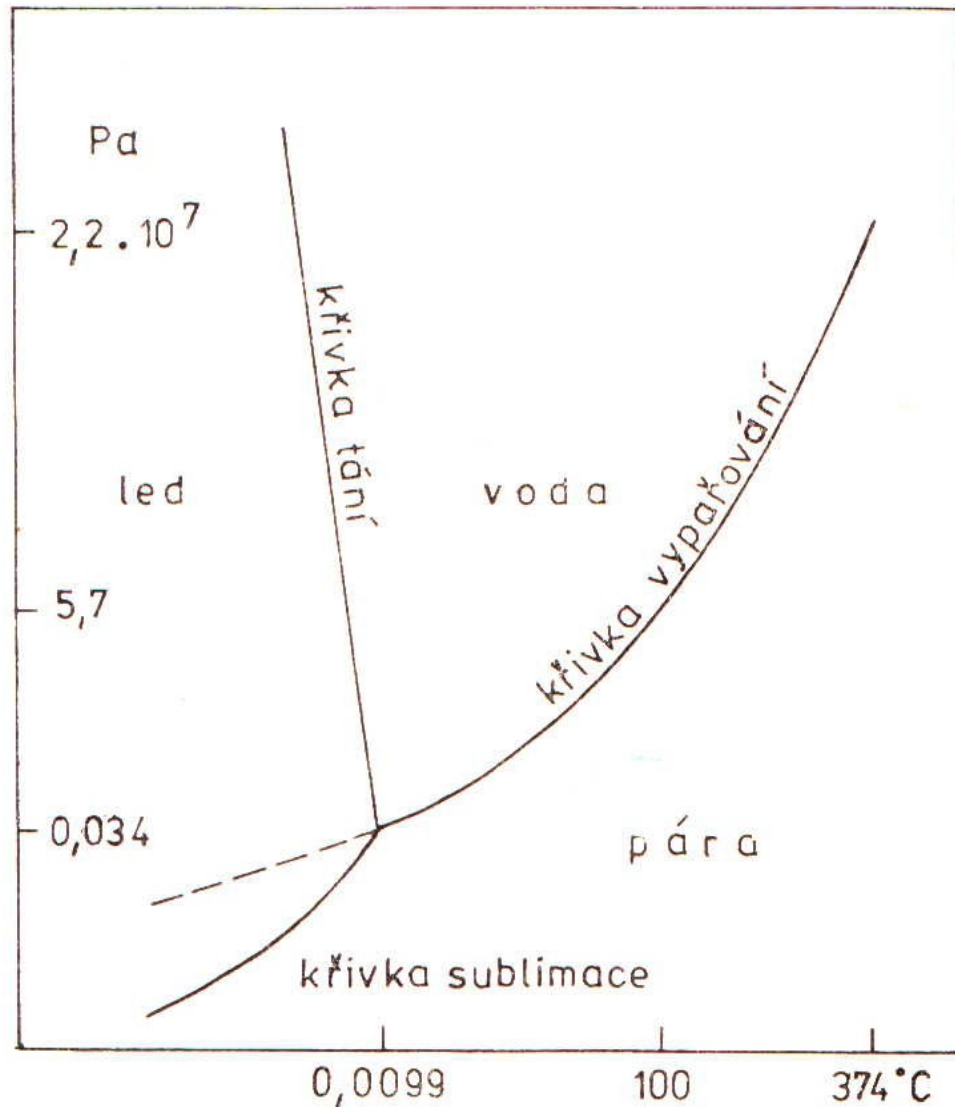
složky (komponenty) - části systému nutné k vytvoření fází, které chceme v systému uvažovat

- z hlediska fáz. pravidla - nejmenší počet chemických jednotek potřebný k popisu složení uvažovaných fází

- hlavní složky více než jedné fáze (SiO_2 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , K_2O , Na_2O , CaO , MnO , P_2O_5 , H_2O)

- **rovnováha** – nejstabilnější uspořádání atomů v systému, nastává když je systém v určitých P-T podmínkách dostatečně dlouhou dobu
- rovnovážná asociace – počet minerálů které mohou existovat stabilně v rovnováze určen **fázovým pravidlem**
- $$F = P - C + 2$$
- F – počet nezávislých stupňů volnosti čili počet **nezávisle proměnných** (lze je nezávisle měnit aniž by se měnila stabilita minerálních fází v systému)
- proměnné **P, T, X** (chemické složení fází)
- při změně P či T – koexistující fáze již nejsou v rovnováze $\Rightarrow \Rightarrow$ **metamorfní reakce**

Příklad použití fázového pravidla



Příklad

$$F = C + 2 - P$$

$$C = 1$$

A

$P = 1$ - voda

- $F = 2$ – dva stupně volnosti,
- Je zde stabilní jen jedna fáze voda teplota i tlak se mohou měnit nezávisle.

B

Bod B leží na hranici mezi dvěma poli

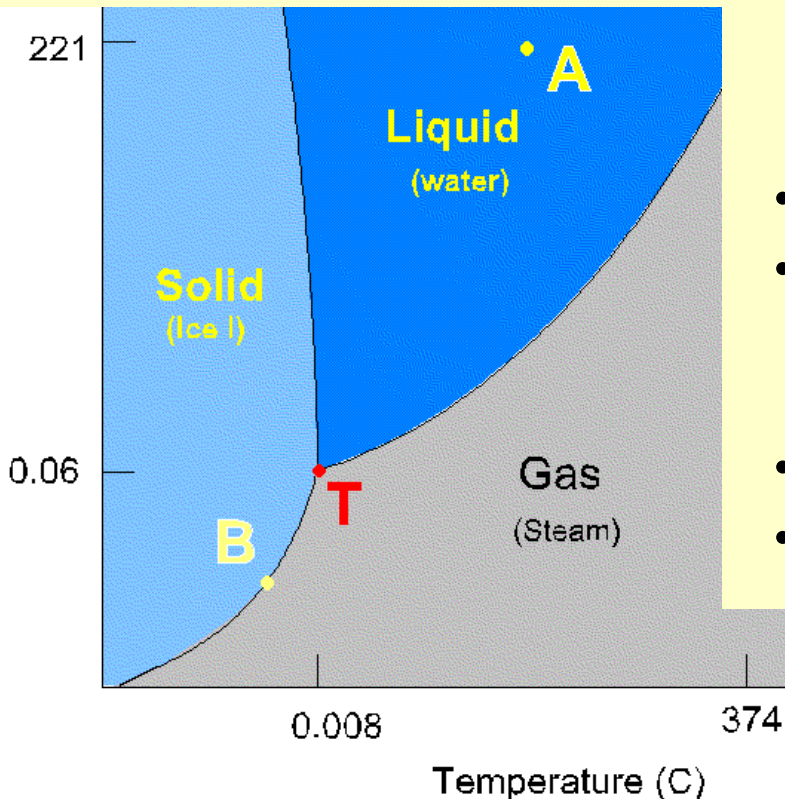
$P = 2$ – Led a pára,

- $F = 1$ – jeden stupeň volnosti
- jestliže se změní tlak změní se zároveň teplota

T

$P = 3$ – voda, pára a led

- $F = 0$ – žádný stupeň volnosti
- Všechny tři fáze jsou v rovnováze (equilibrium). Jestliže se změní jedna z proměnných systém se posune mimo bod T



- znázornění – *P-T* diagramy

- počet stupňů volnosti

- divariantní pole 2
- univariantní křivka 1
- invariantní bod 0

Application of the phase rule to natural rocks

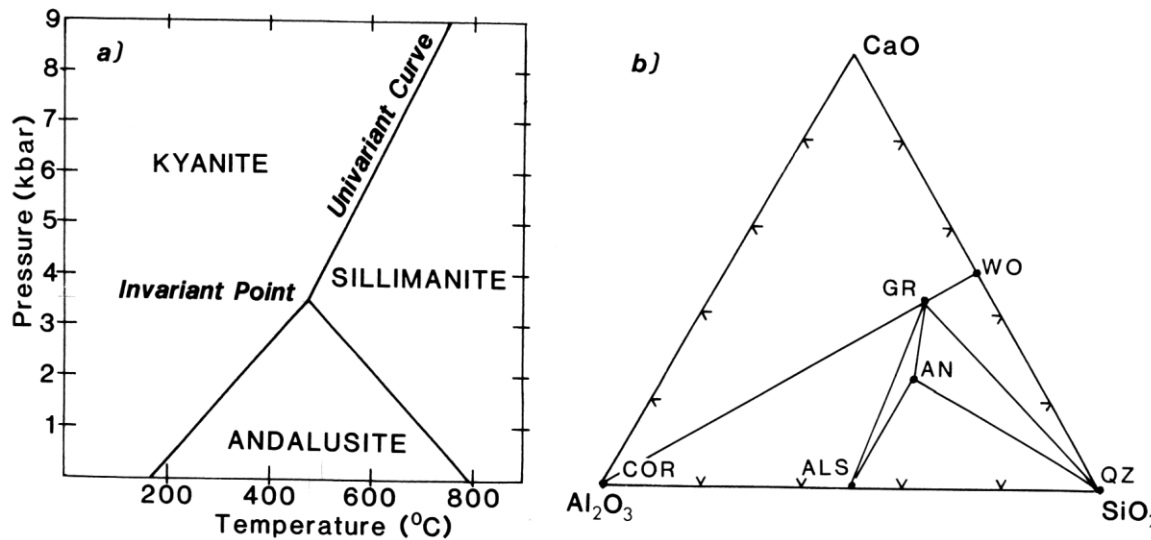


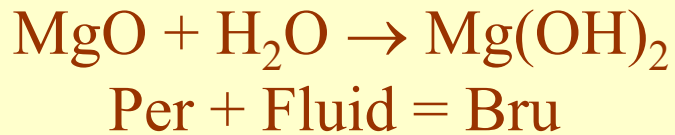
Fig. 2.1 a) Pressure-temperature diagram illustrating the stability fields of andalusite, kyanite and sillimanite, according to Holdaway (1971) (see also Fig. 3.12). b) Compositional diagram showing the compositions and stable relationships between corundum (COR), wollastonite (WO), grossular (GR), anorthite (AN), quartz (QZ) and Al-silicate (ALS) in the system CaO-SiO₂-Al₂O₃, for some arbitrary pressure and temperature. Only phases directly connected by tie-lines can coexist. Unless lying exactly on a tie-line, any bulk composition in this system will crystallise as a three-phase mixture according to which triangular field it lies within.

důsledek fázového pravidla: minerální asociace s *velkým počtem fází* bude mít jen *málo stupňů volnosti*, tedy rozsah podmínek za nichž krystalizovala bude přesněji omezen a bude snadnější jej určit na základě výsledků experimentů

Fázové pravidlo v metamorfovaných horninách

Máme jednoduchý systém ($C=2$), $MgO-H_2O$

- V systému mohou vznikat tyto fáze periklas (MgO), voda (H_2O), a brucit ($Mg(OH)_2$)
- může zde proběhnout tato reakce:

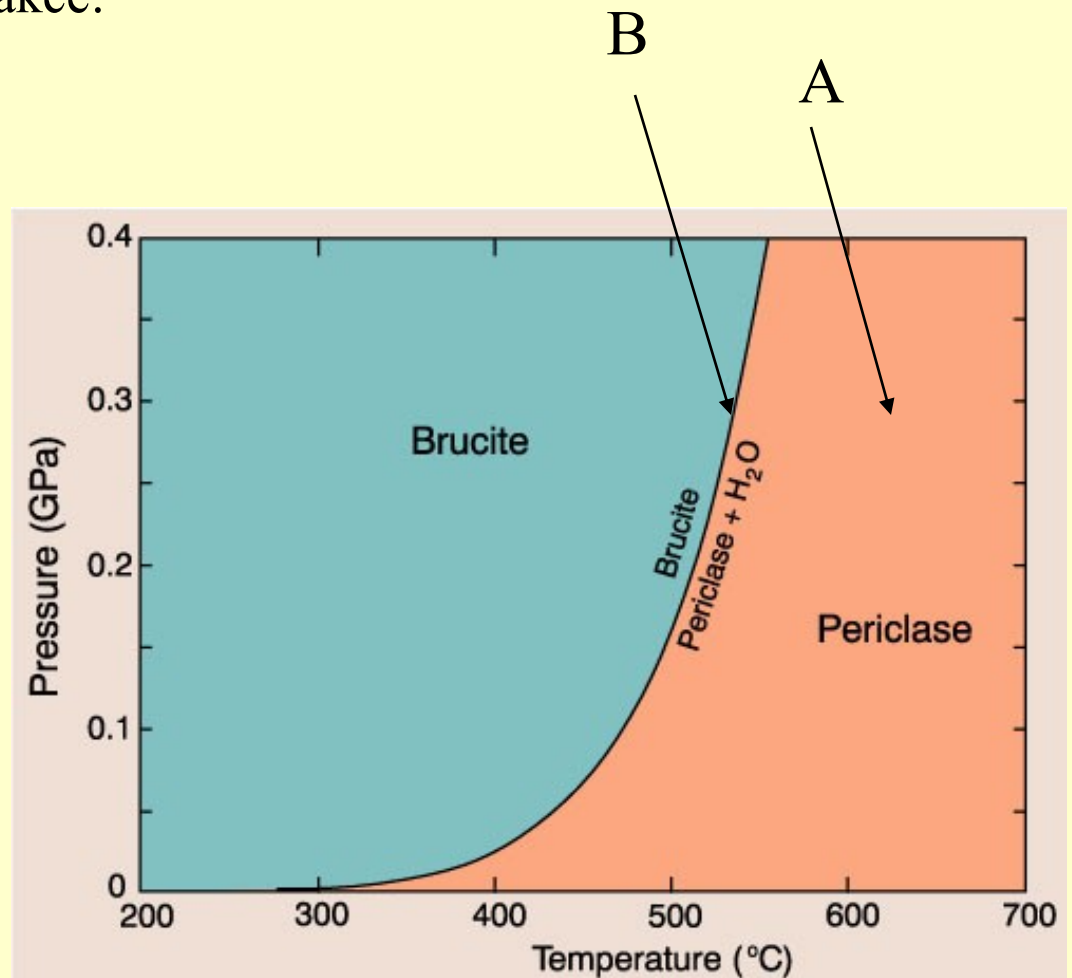


Jde o retrográdní reakci,
protože se teplota snižuje a
hornina hydratuje.

$$F_{(T,P,X)} = C + 2 - P$$

$$A) \text{Per} + H_2O = 2 = 2 + 2 - 2$$

$$B) \text{Per} + \text{Fluid} + \text{Bru} = 1 = 2 + 2 - 3$$



Petrogenetické mřížky - definice

- shrnutí možných invariantních bodů a mezi nimi ležících reakcí v určeném chemickém systému
- založeny na experimentech, nebo termodynamické výpočty
- možnost umístění zjištěných minerálních asociací do specifických P-T polí
- lze sledovat vývoj horniny v P-T dle pozice pozorovaných reakcí
- odpovídající celkové složení hornin

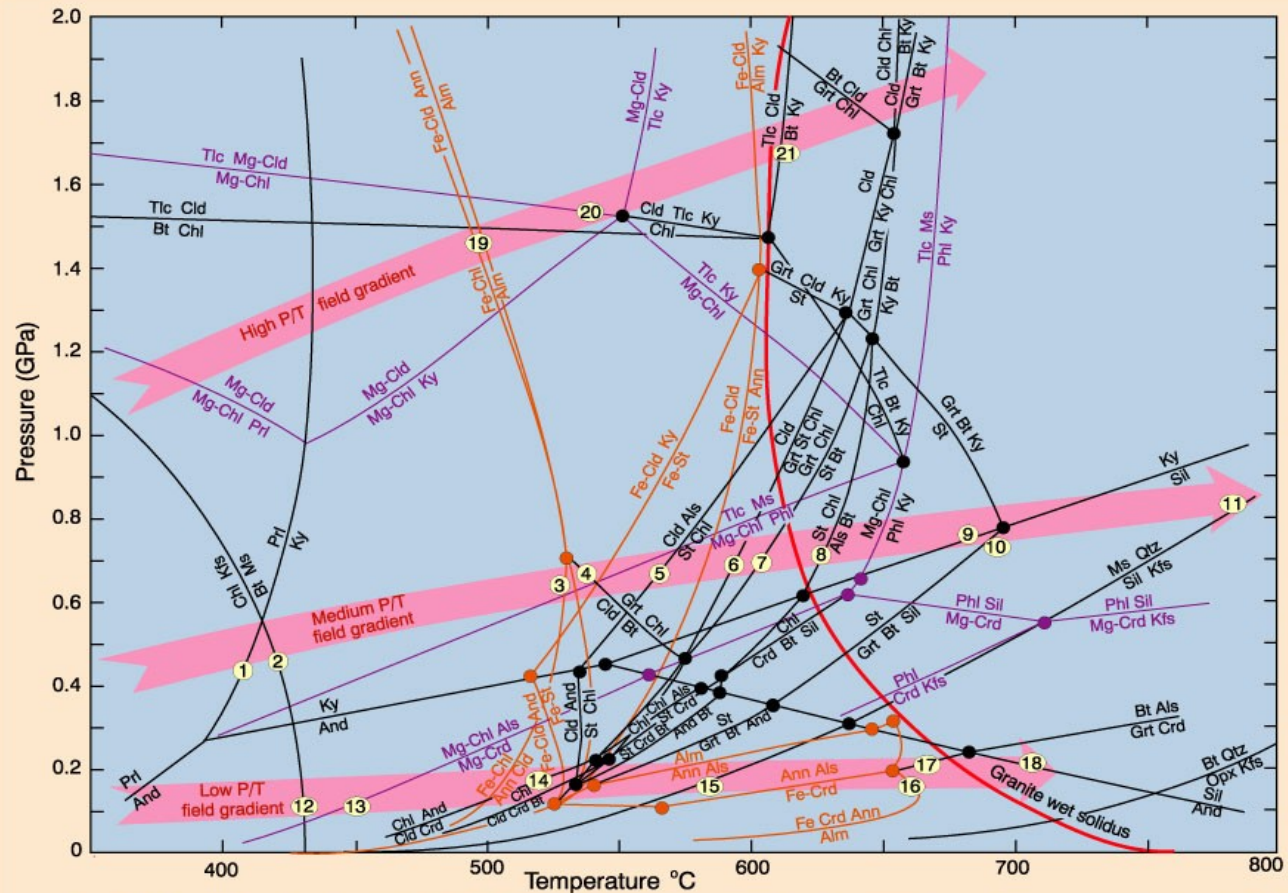


Figure 28-2. Petrogenetic grid for the system KFMASH at $P_{H_2O} = P_{tot}$. Orange curves represent the system KFMASH and purple curves represent the system KMASH. Reactions are not balanced, and commonly leave out quartz, muscovite, and water, which are considered to be present in excess. Typical high, medium, and low P/T metamorphic field gradients are represented by broad pink arrows. After Spear and Cheney (1989), and Spear (1999).

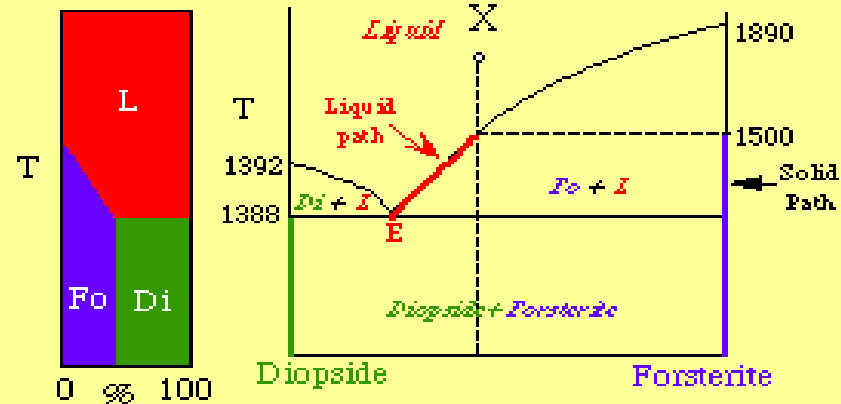
Rocks as Chemical Systems

<i>rock type</i>	<i>system</i>	<i>system acronym</i>
quartzite	SiO ₂	S
quartzite	SiO ₂ - H ₂ O	SH
metabauxite	Al ₂ O ₃ - H ₂ O	AH
iron formation	FeO - SiO ₂ - H ₂ O	FSH
siliceous bauxite	Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O	ASH
metaperidotite	MgO - SiO ₂ - H ₂ O	MSH
haplogranite	KAlSi ₃ O ₈ - NaAlSi ₃ O ₈ - SiO ₂	KNAS
iron formation	FeO - SiO ₂ - H ₂ O - O ₂	FSHO
carbonated BIF	FeO - SiO ₂ - CO ₂ - H ₂ O	FSCH
limestone	CaO - SiO ₂ - CO ₂ - H ₂ O	CSCH
whiteschist	MgO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O	MASH
metabauxite	K ₂ O - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O	KASH
dry metaperidotite	CaO - MgO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂	CMAS
haplogranite	KAlSi ₃ O ₈ - NaAlSi ₃ O ₈ - SiO ₂ - H ₂ O	KNASH
metagranite	K ₂ O - Na ₂ O - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O	KNASH
dry metabasalt	CaO - FeO - MgO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂	CMFAS
siliceous dolomite	CaO - MgO - SiO ₂ - CO ₂ - H ₂ O	CMSCH
haplopelite	K ₂ O - FeO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O	KMASH
metaperidotite	CaO - MgO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O	CMASH
metabauxite	K ₂ O - Na ₂ O - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O	KASH
metapelite	K ₂ O - FeO - MgO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O	KFMASH
metagranite	K ₂ O - Na ₂ O - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O	KNASH
haplo-amphibolite	CaO - FeO - MgO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O	CFMASH
amphibolite	Na ₂ O - CaO - FeO - MgO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - H ₂ O	NCFMASH
most rocks	K ₂ O - Na ₂ O - CaO - FeO - MgO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ - CO ₂ - H ₂ O - O ₂	

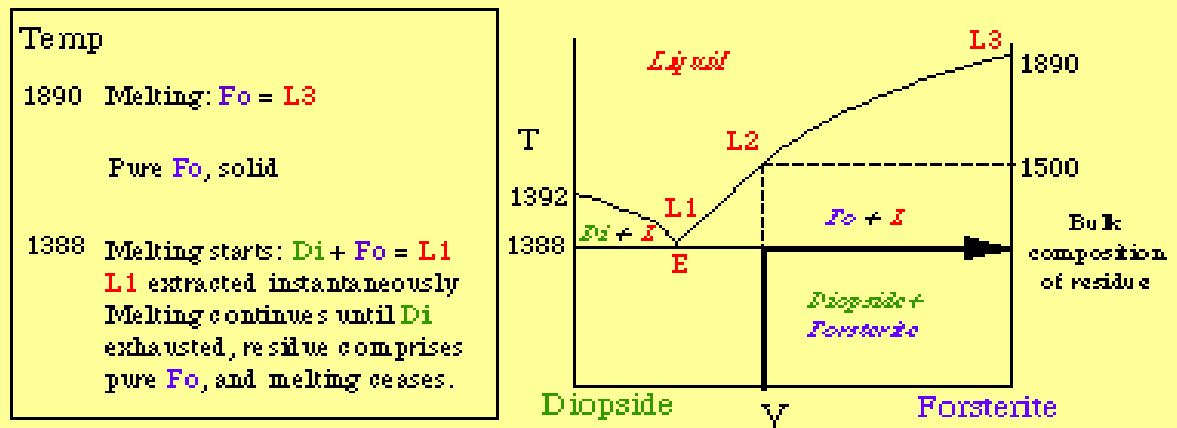
Vliv celkového chemického složení systému

System Fo - Di

Equilibrium crystallisation of X

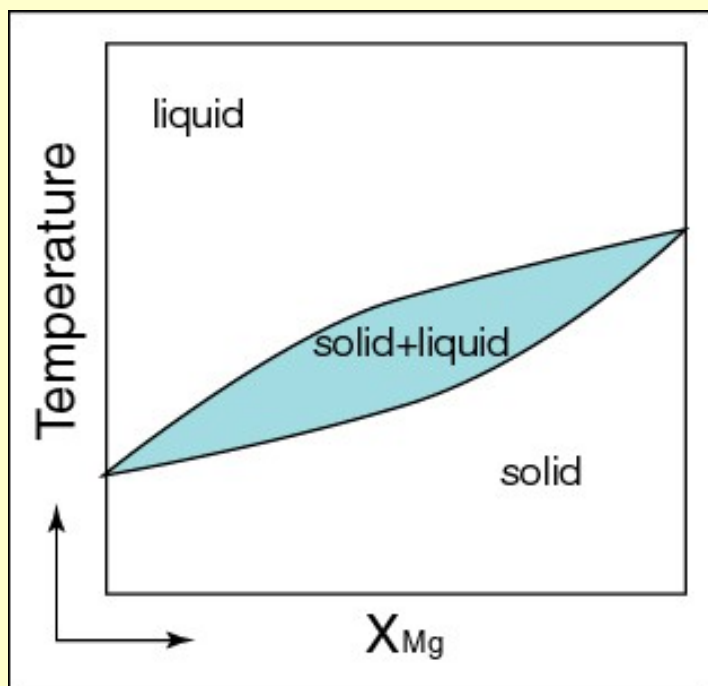


Fractional melting of Y

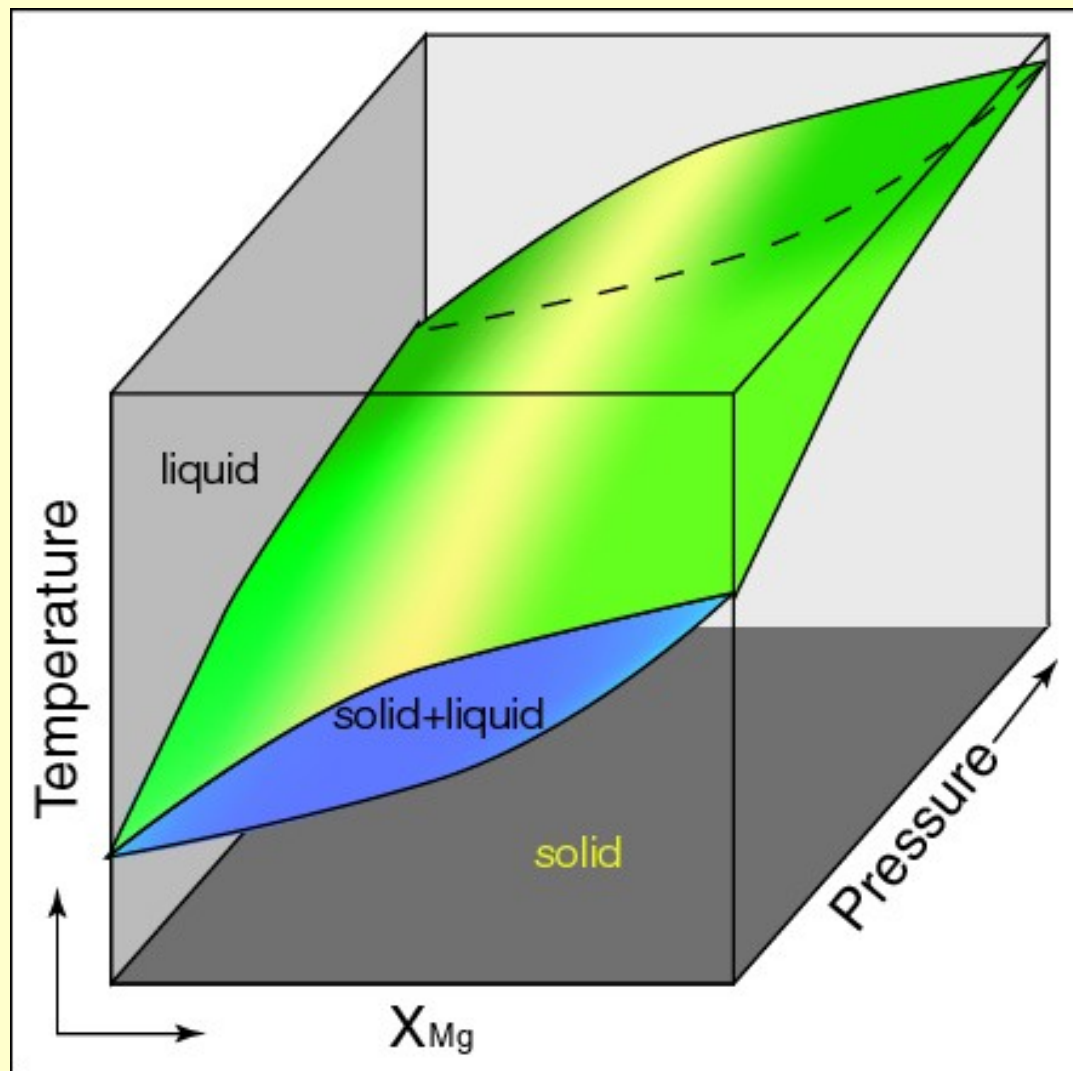


Under completely equilibrium conditions, melting and crystallisation follow exactly reversible paths. Under non-equilibrium (eg fractional melting, crystallisation) conditions, this is no longer true.

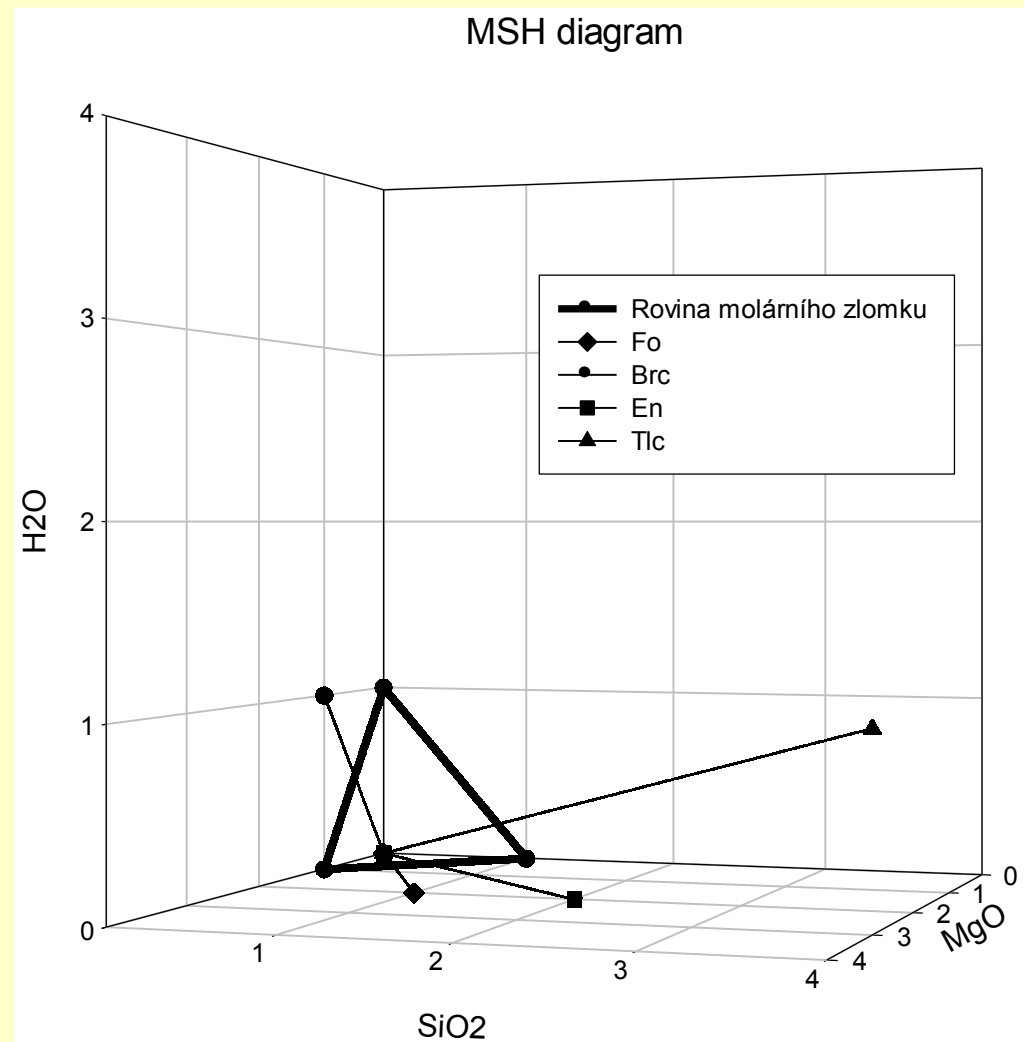
Stabilita minerální asociace je závislá zejména na tlaku, teplotě a chemickém složení systému



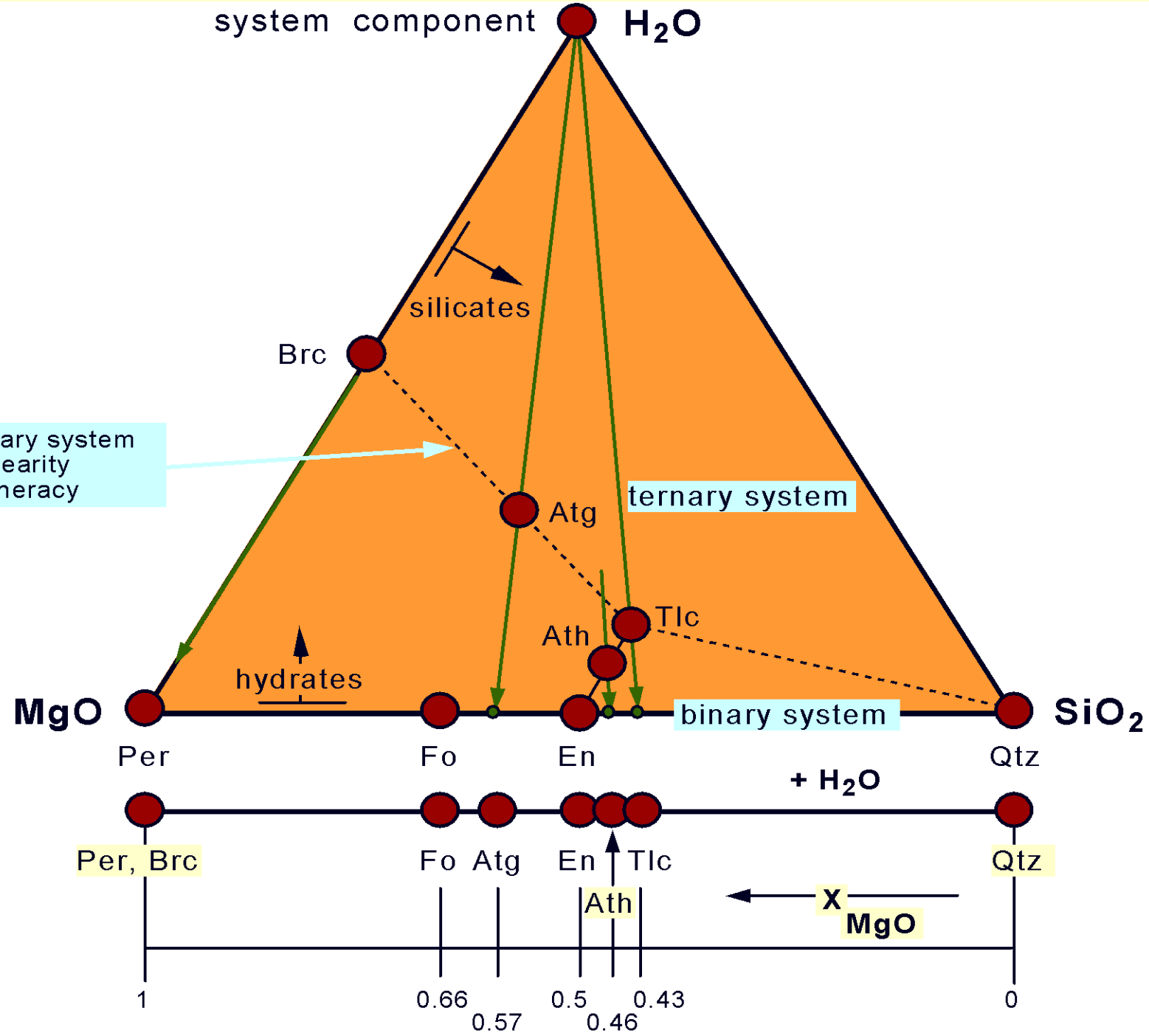
Izomorfní míšení mezi koncovými členy olivínu fayalitem (Fe_2SiO_4) a forsteritem (Mg_2SiO_4).



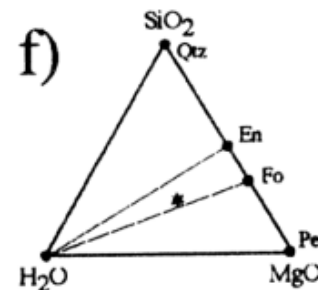
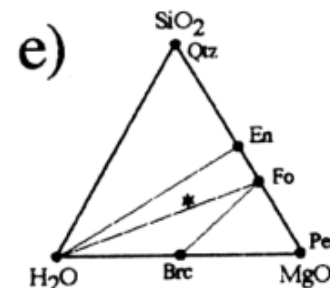
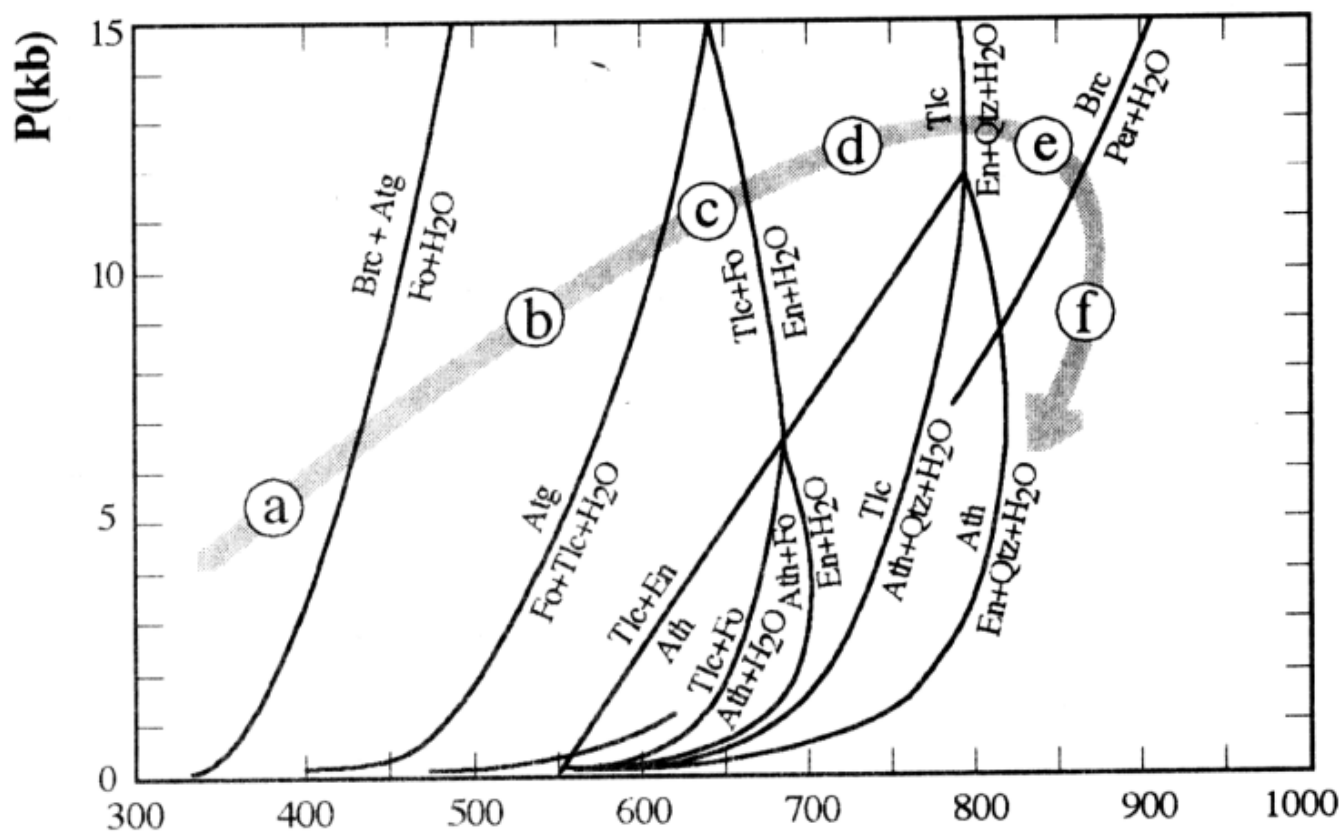
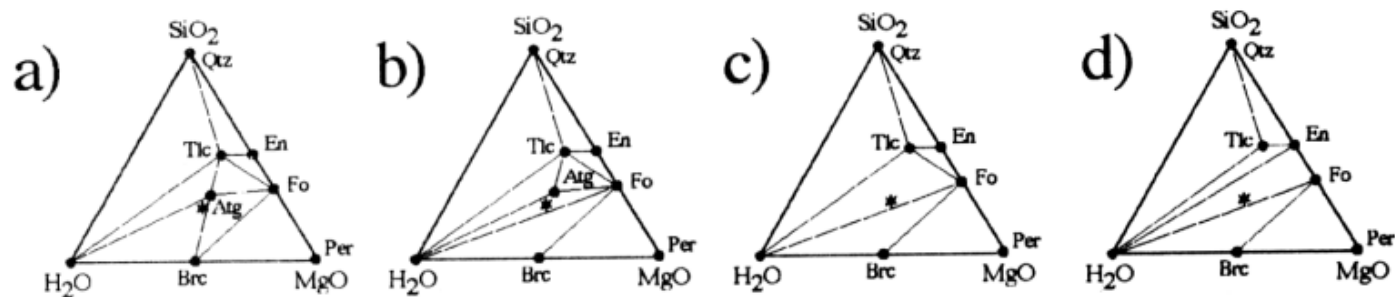
- ULTRABAZICKÉ HORNINY
- Pro zobrazení ultrabazických hornin je vhodný systém $\text{MgO} - \text{H}_2\text{O} - \text{SiO}_2$
- V těchto horninách se můžeme setkat s minerály:
- forsterit: Mg_2SiO_4
- brucit: $\text{Mg}(\text{OH})_2$
- mastek: $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{12}\text{H}_2$
- antofylit: $\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{24}\text{H}_2$
- antigorit: $\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{18}\text{H}_8$
- enstatit: $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$
- Krajní body trojúhelníku tvoří:
- periklas: MgO
- křemen: SiO_2
- voda: H_2O



system component H_2O



Celkové složení horniny a petrogenetická mřížka



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

T(°C)

ACF diagram

ACF diagram se užívá pro bazické horniny

Váhová procenta jsou převedena na molární ekvivalenty. Provedou se korekce na minerály s kterými se v diagramu nepočítá (apatit, titanit, ilmenit). Tyto korekce nemají na výsledek podstatnější vliv:

$$A = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O} - \text{K}_2\text{O}$$

$$C = \text{CaO} - 3.3 \text{P}_2\text{O}_5$$

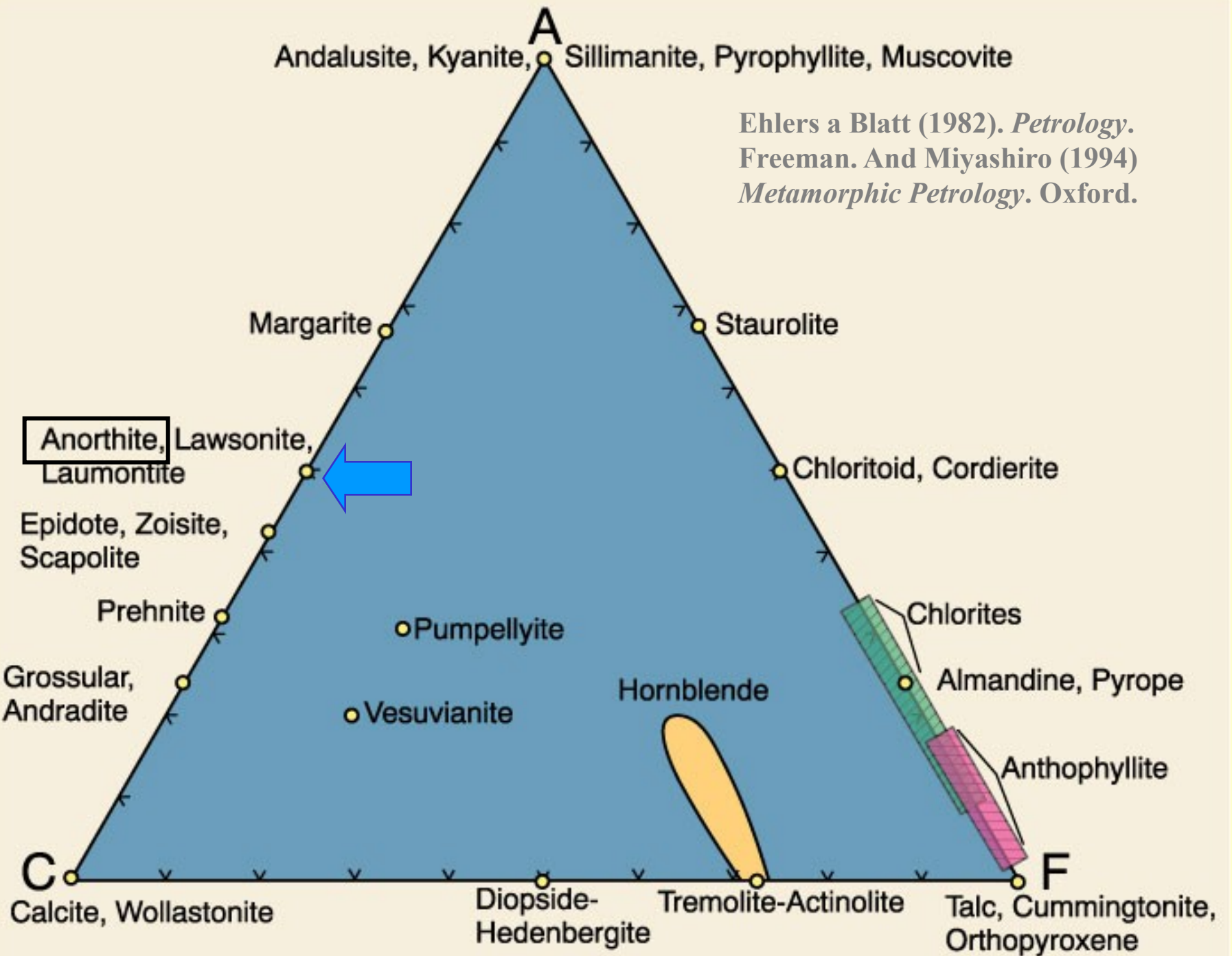
$$F = \text{FeO} + \text{MgO} + \text{MnO}$$

- Při vynášení koncových členů minerálů postupujeme takto:
- Anortit $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
- $A = 1 + 0 - 0 - 0 = 1$, $C = 1 - 0 = 1$, $F = 0$
- celkem 2, \Rightarrow provedeme normalizaci na **1** a výsledkem pak je:

$$A = 0.5$$

$$C = 0.5$$

$$F = 0$$

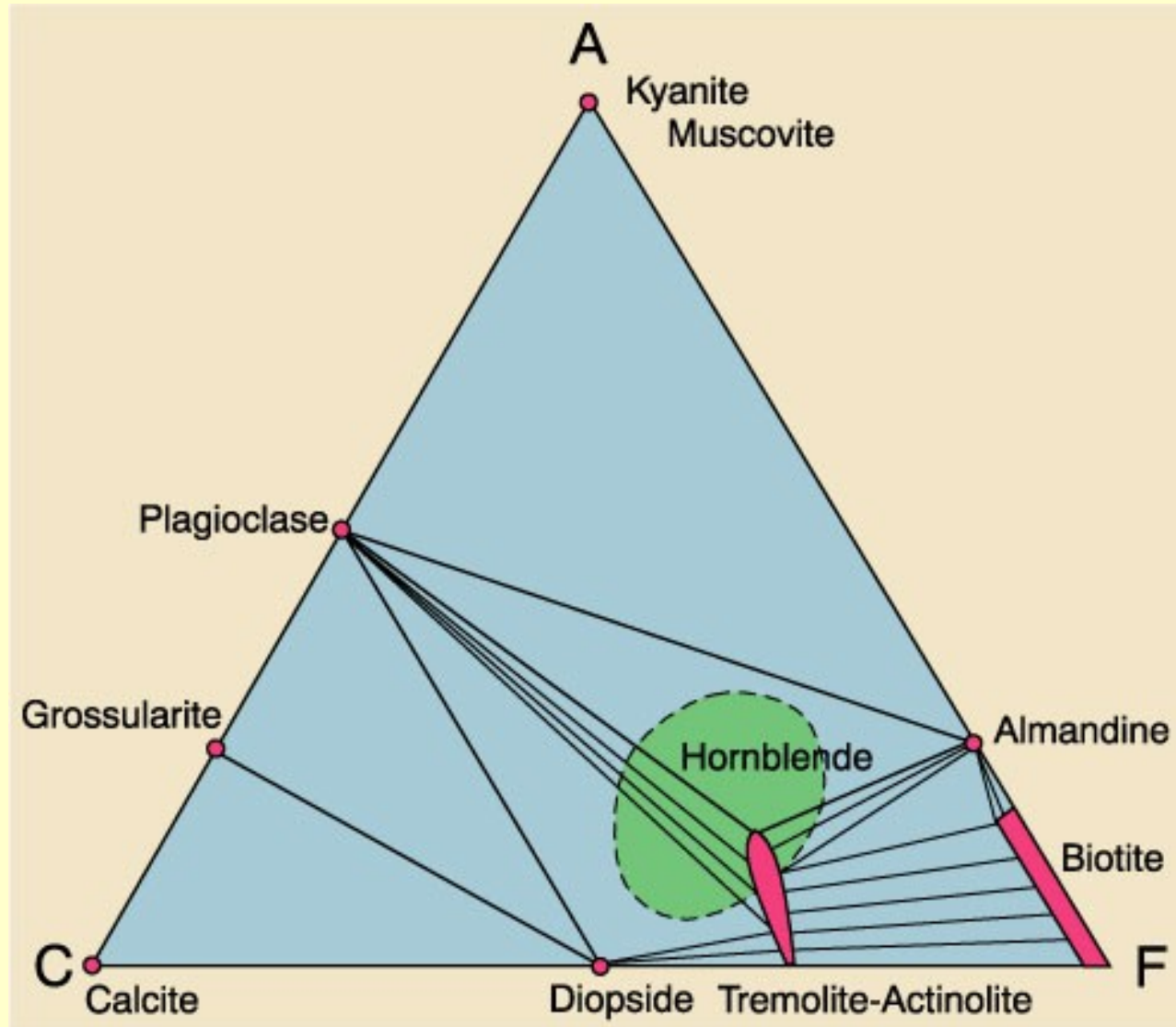


Ehlers a Blatt (1982). *Petrology*.
 Freeman. And Miyashiro (1994)
Metamorphic Petrology. Oxford.

- **1) horniny** – celkový chemismus ze silikátové analýzy
- *korekce 1. - odpočet FeO, Fe₂O₃, CaO v akcesoriích (Mt, Ilm, Ttn)*
- **2) váhová procenta kyslíčků/molekulární hmotnost = molekulární proporce (kvocienty)**
- *korekce 2. – odpočet 3,3xP₂O₅ (Apa) od CaO a Na₂O+K₂O od Al₂O₃+Fe₂O₃*

amfibolit	hm % (wt %)	molekulová hmotnost	molekulární kvocient	A,C,F	
SiO ₂	48,09	60	0,8		
TiO ₂	1,57	80	0,02		
Al ₂ O ₃	15,16	75	0,2	0,22-0,05	A=26
Fe ₂ O ₃	2,92	160	0,02		
FeO	9,22	72	0,13	0,31	B=47
MnO	0,21	71	0		
MgO	7,24	40	0,18		
CaO	10,35	56	0,18	0,18	C=27
Na ₂ O	2,65	62	0,04		
K ₂ O	0,93	94	0,01		
H ₂ O+	1,44				
H ₂ O-	0,24				
P ₂ O ₅	0,22	142	0		
CO ₂	-				
Suma	99,74				100

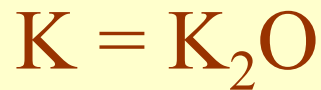
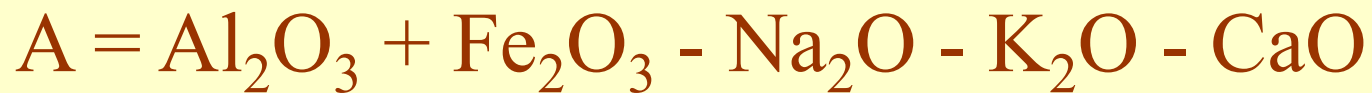
ACF diagram, pro určité PT podmínky (kyanitová zóna)

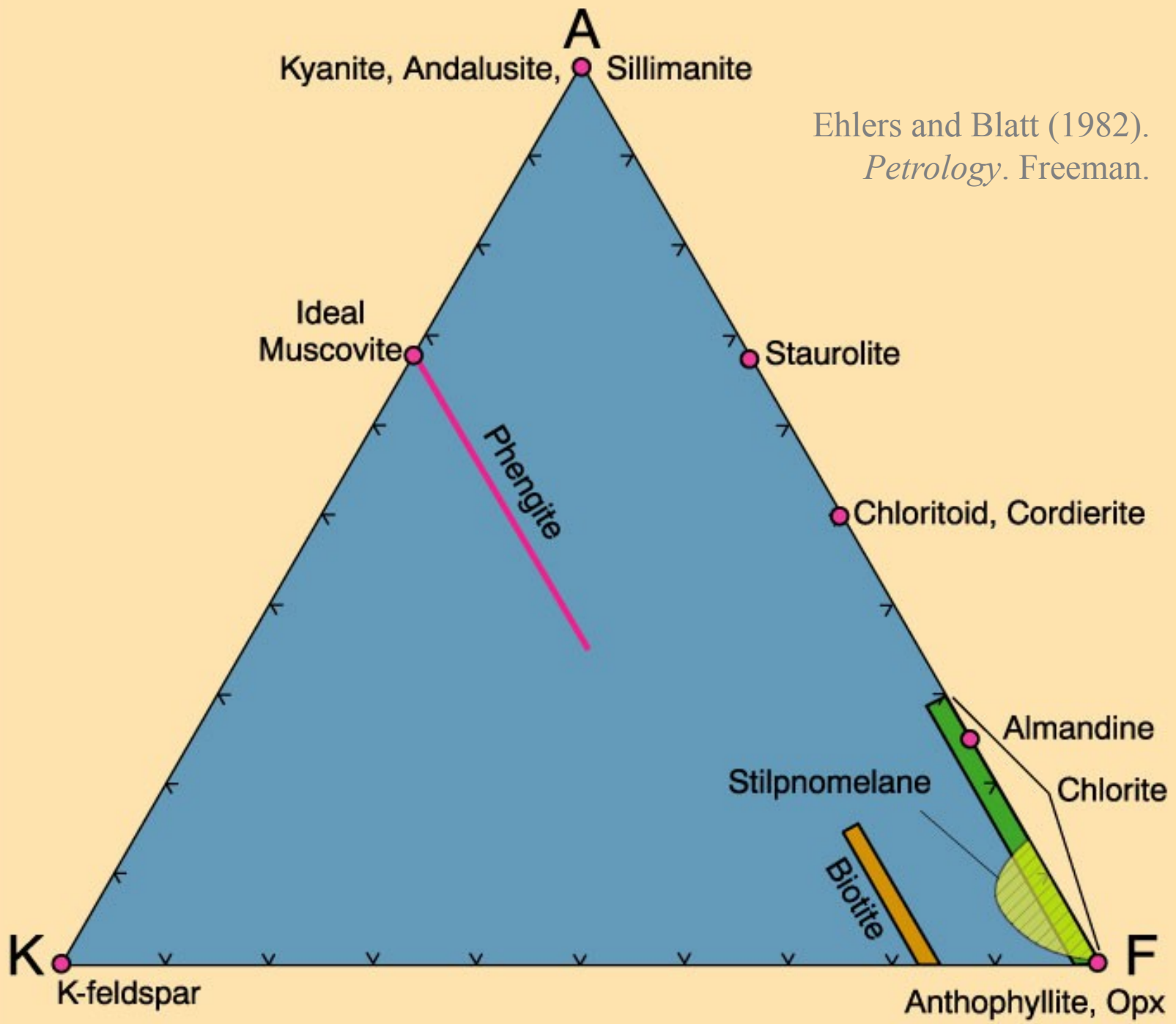


Turner (1981).
Metamorphic Petrology.
McGraw Hill.

AKF diagram

Protože **pelitické** sedimenty mají vysoké obsah Al_2O_3 , K_2O , a naopak nízké obsahy CaO navrhl Eskola diagram který K_2O obsahuje AKF



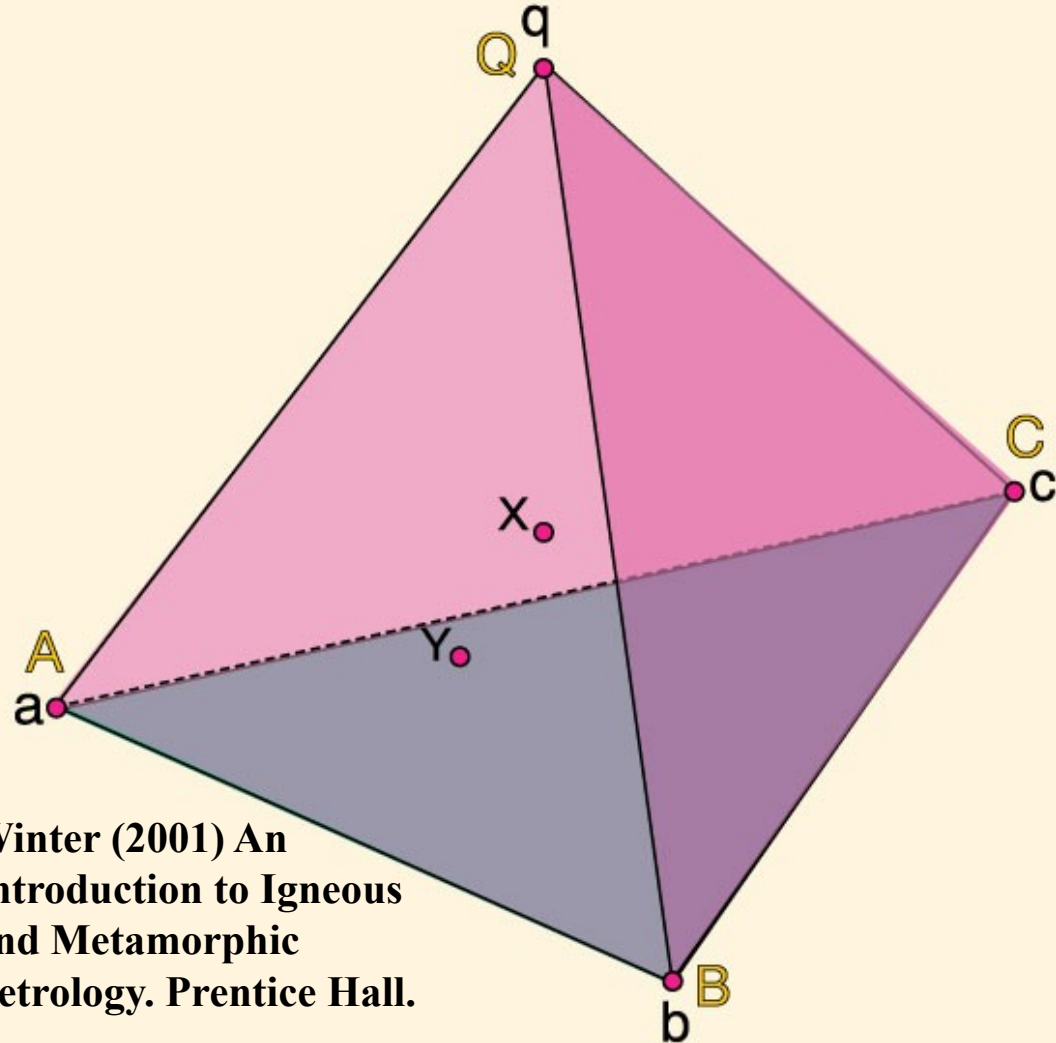


Ehlers and Blatt (1982).
Petrology. Freeman.

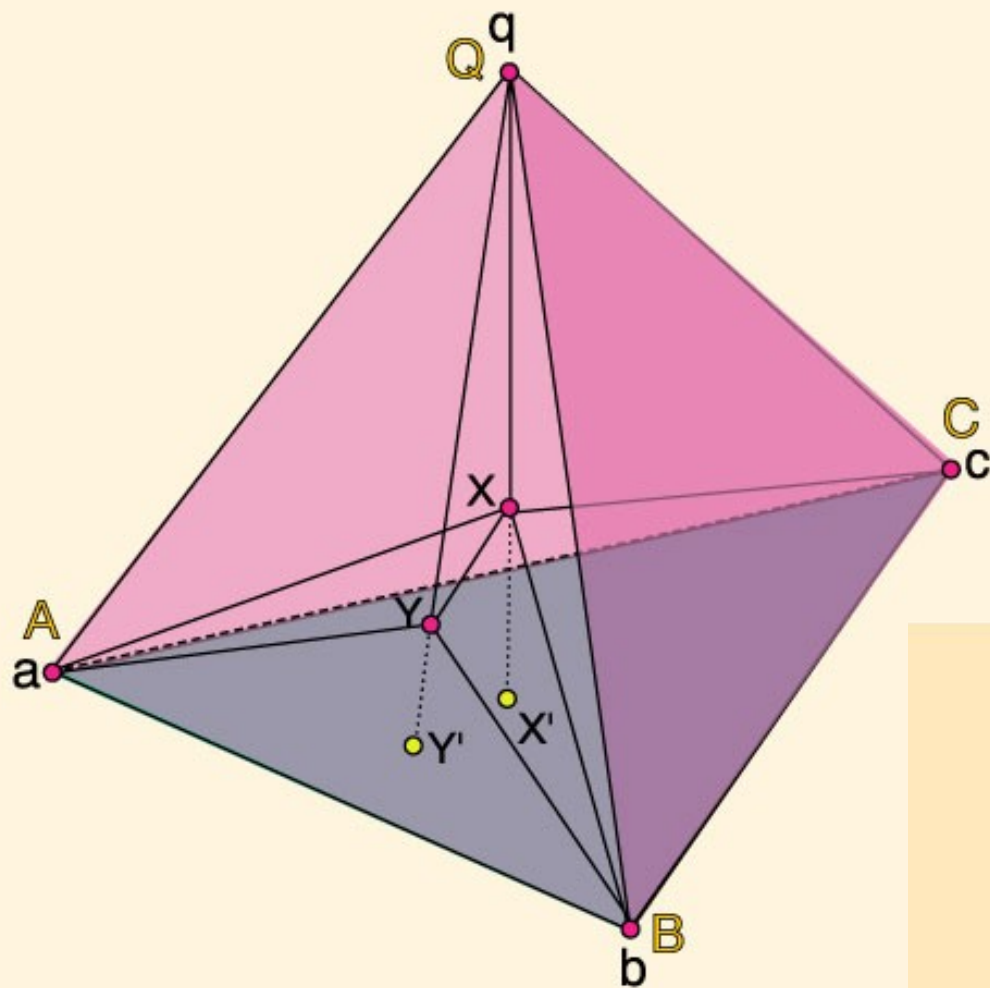
Zobrazení čtyř-komponentního systému

V systému ABCQ zobrazíme složky:

- X (ABCQ)
- Y (A_2B_2CQ)



Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

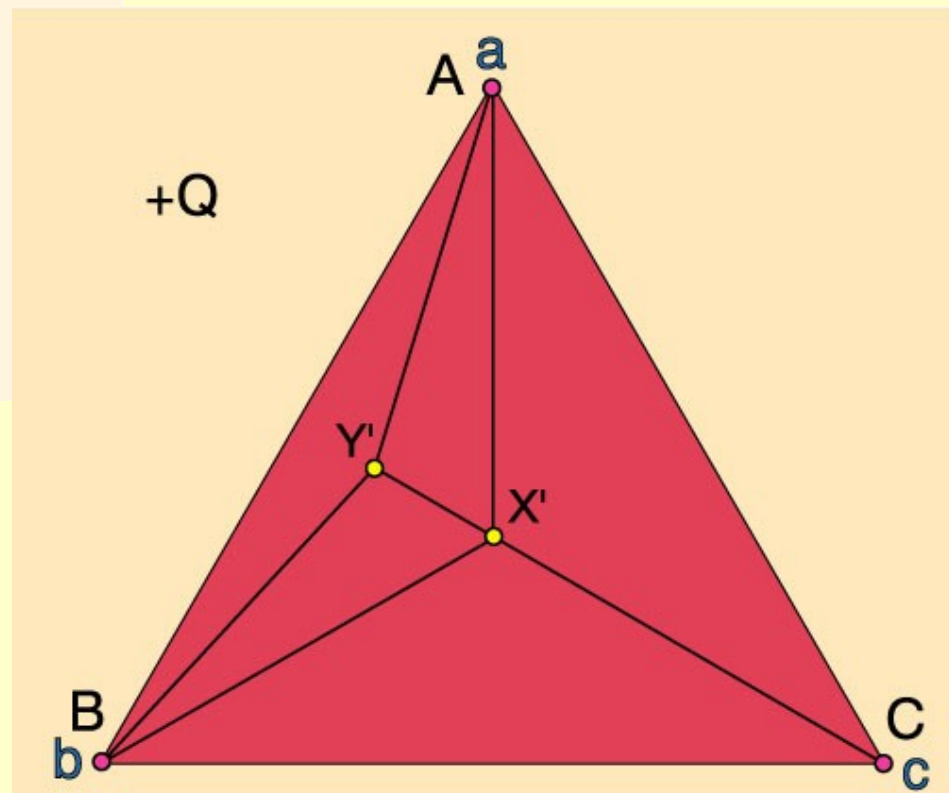


Promítnutí bodů X a Y přes vrchol Q. Složení v jednotlivých polích pak bude:

- (Q)-B-X-C
- (Q)-A-X-Y
- (Q)-B-X-Y
- (Q)-A-B-Y
- (Q)-A-X-C

bod $X = X'$ v diagramu $A:B:C = 1:1:1 = 33:33:33$

bod $Y = Y'$ v diagramu $A:B:C = 2:2:1 = 40:40:20$



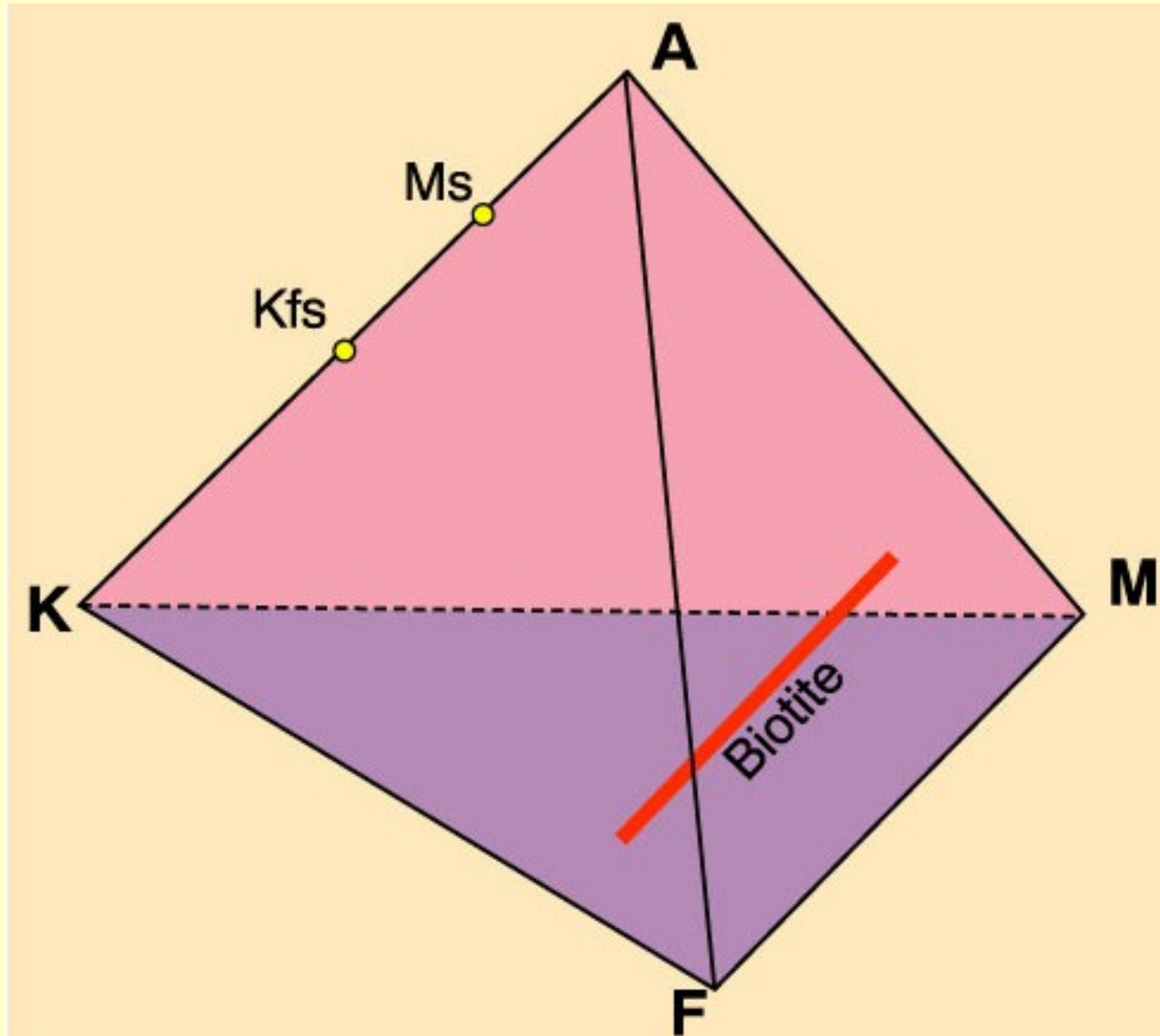
A(K)FM Diagram

A = Al_2O_3

K = K_2O

F = FeO

M = MgO



Minerály

- V metapelitech 3 min. obsahují K_2O (Ms, Bt, Kfs)
- Almandin: $Fe_3 Al_2 [SiO_4]_3$ - Granát: $A^{2+}_3 B^{3+}_2 [SiO_4]_3$
- Muskovit: $K Al_2 [Si_3AlO_{10}] (OH)_2$
- Flogopit: $K Mg_3 [Si_3AlO_{10}] (OH)_2$
- Chlorit: $(Mg, Fe)_3 [(Si, Al)_4O_{10}] (OH)_2 (Mg, Fe)_3 (OH)_6$
- Albit: $NaAlSi_3O_8$
- Draselný živec: $KAlSi_3O_8$

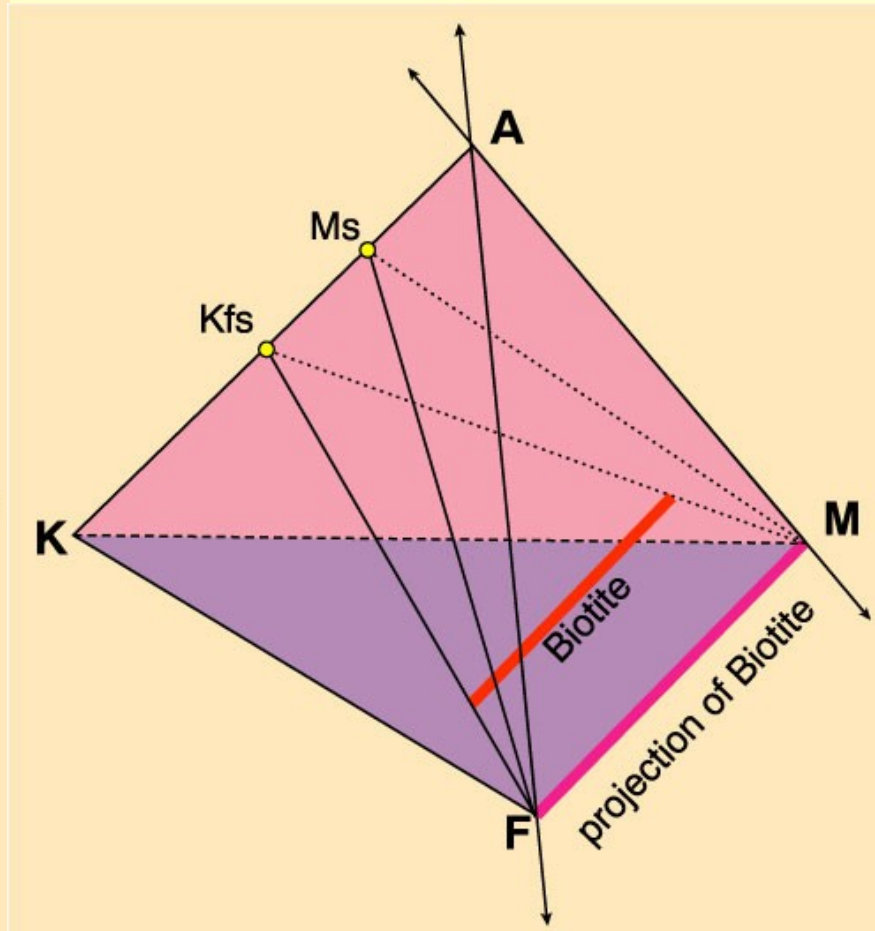
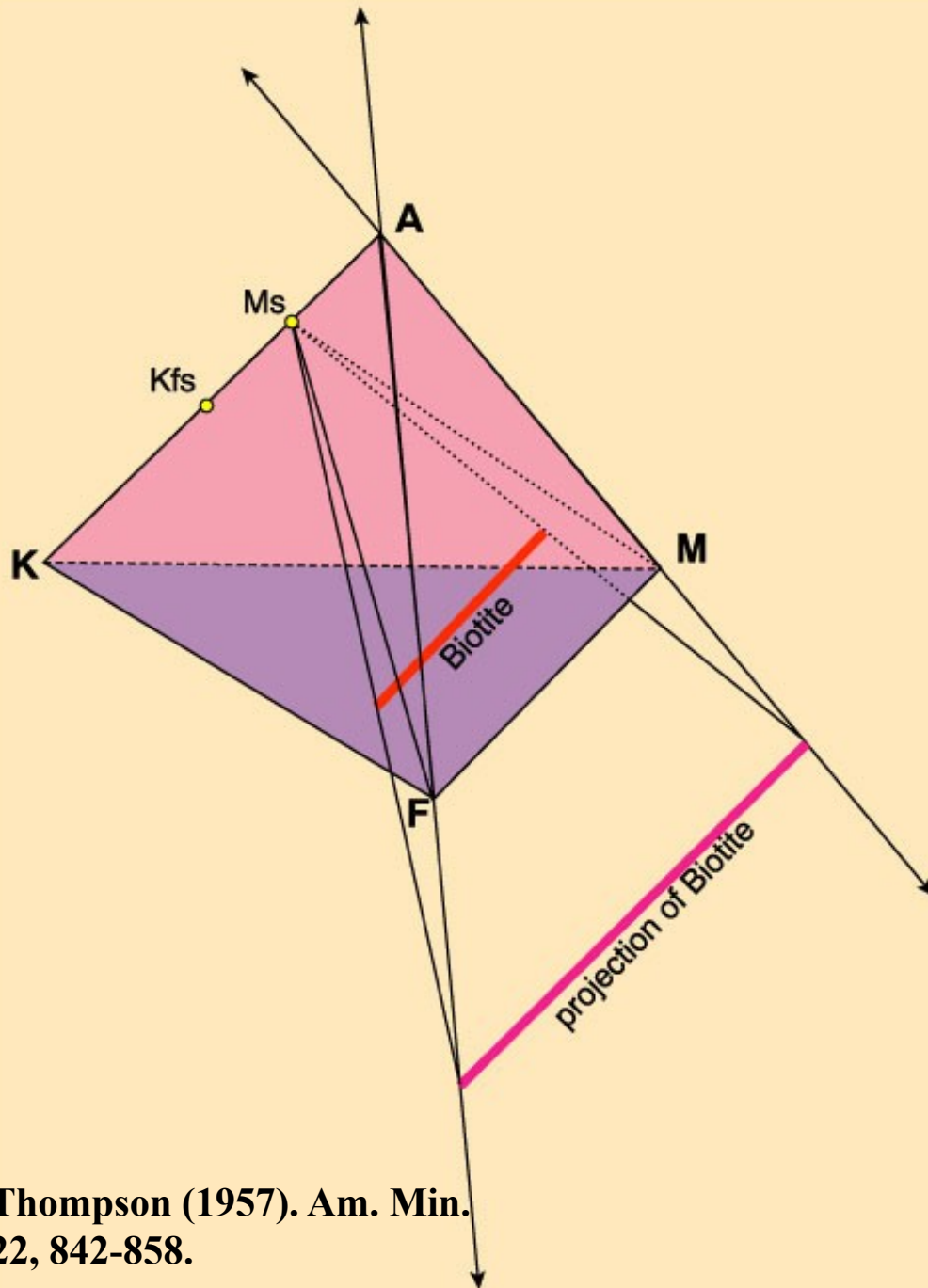
- Jednotlivé minerály jsou promítány přes vrchol K (Mu nebo Kfs)

A = $\text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{K}_2\text{O}$ (promítání přes Ms)

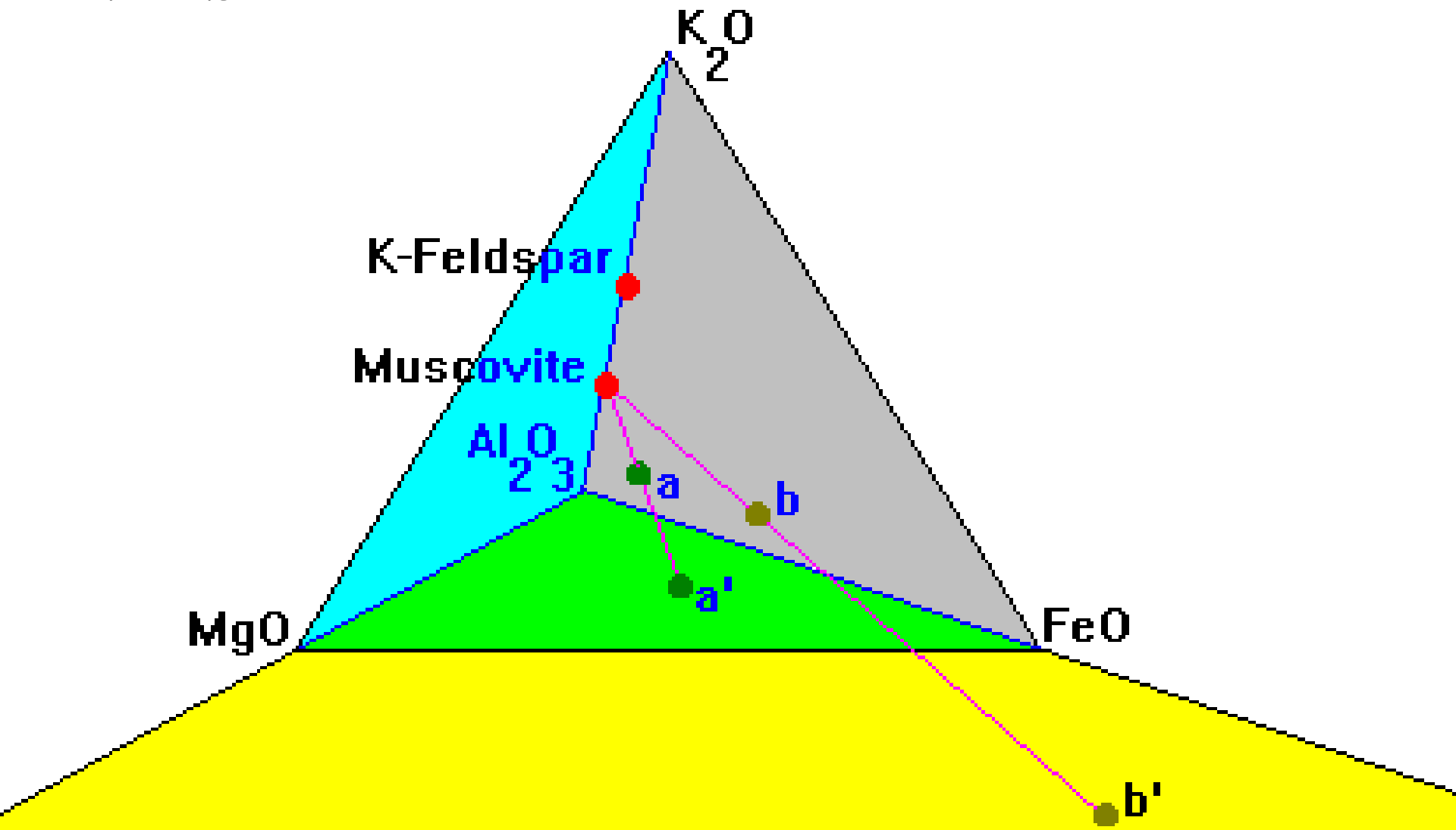
= $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}$ (promítání přes Kfs)

F = FeO

M = MgO



- **Muskovit:** $\text{K Al}_2 [\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] (\text{OH})_2$
- do teplot kolem 750°C
- K:Al 1:3



Biotit (Ms): $\text{KMg}_2\text{FeSi}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$

$$A = 0.5 - 3(0.5) = -1$$

$$F = 1$$

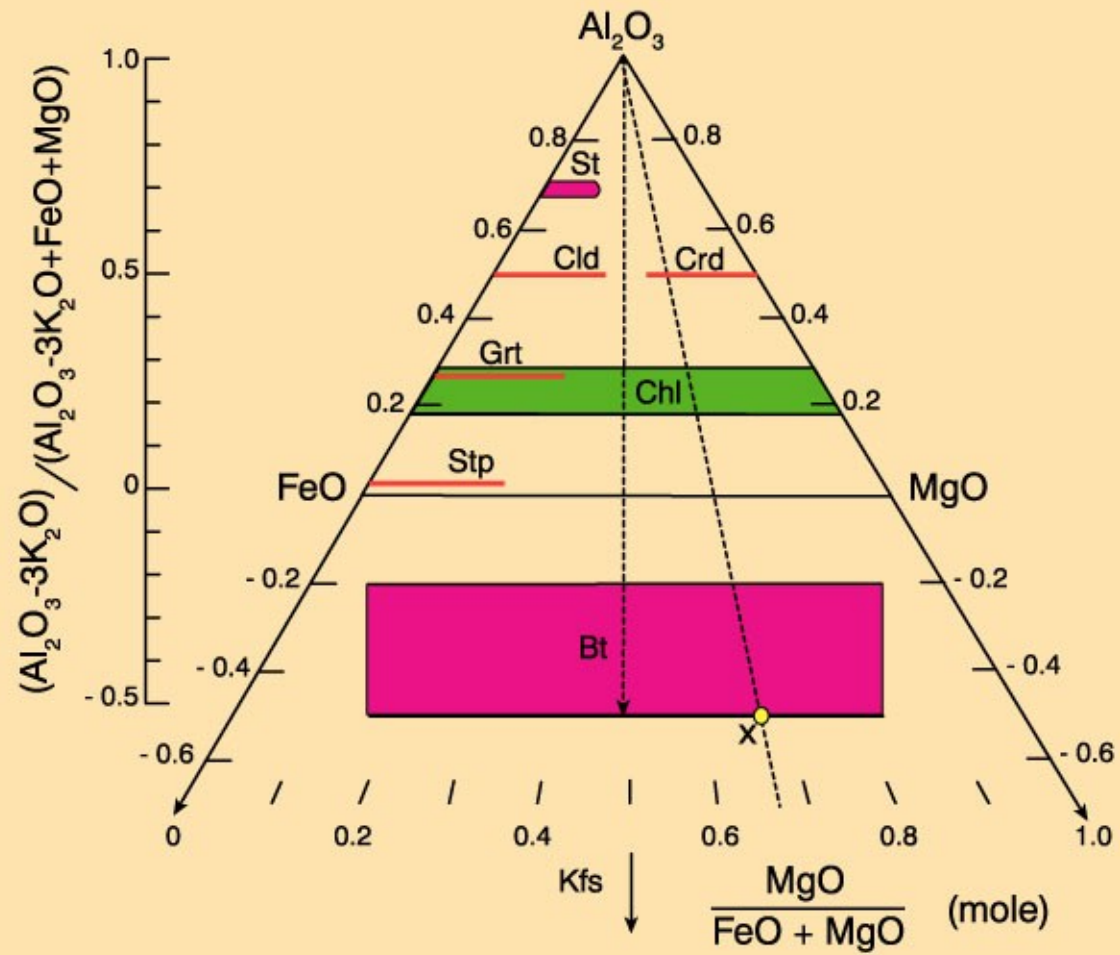
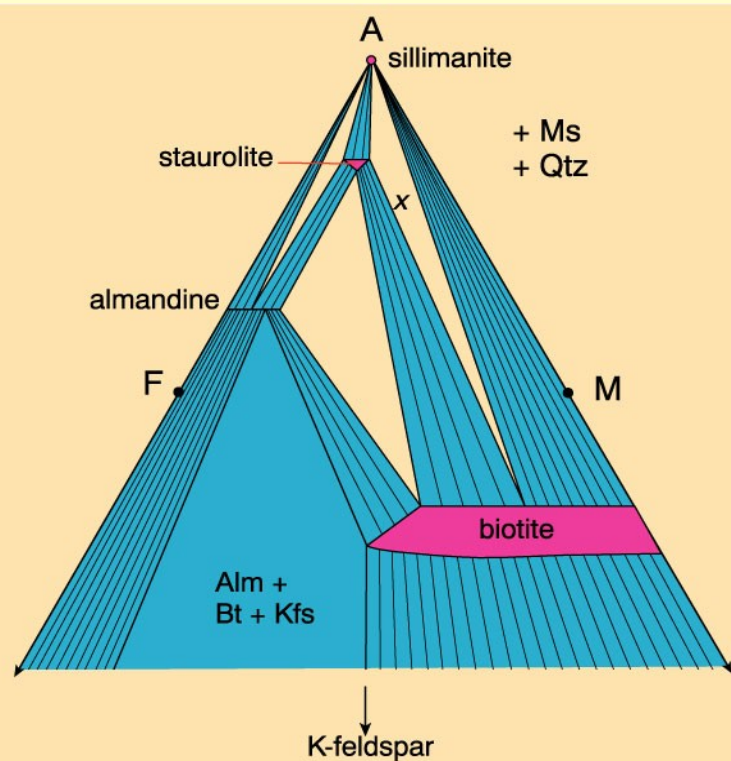
$$M = 2$$

$$1.0 / (2 + 1 - 1) = 1.0 / 2 = 0.5$$

$$A = -0.5$$

$$F = 0.5$$

$$M = 1$$



- Almandin: $\text{Fe}_3 \text{Al}_2 [\text{SiO}_4]_3$ - Garnát: $\text{A}^{2+}_3 \text{B}^{3+}_2 [\text{SiO}_4]_3$
- Muskovit: $\text{K Al}_2 [\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] (\text{OH})_2$
- Flogopit: $\text{K Mg}_3 [\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] (\text{OH})_2$
- Chlorit: $(\text{Mg, Fe})_3 [(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}] (\text{OH})_2 (\text{Mg, Fe})_3 (\text{OH})_6$
- Albit: $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

- Minerál (Ms)

- 1) oxidy přepočítat na molární hmotnostní kvoc. a na procenta (celek 100%)
- 2) $F = X \text{FeO}$
- 3) $M = X \text{MgO} (1 - X\text{FeO})$
- $A = \text{St} \Rightarrow (\text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO});$
- $\text{Bt} \Rightarrow (\text{Al}_2\text{O}_3/2) - (3 * (\text{K}_2\text{O}/2)) / ((\text{Al}_2\text{O}_3/2) + \text{FeO} + \text{MgO}) - (3 * (\text{K}_2\text{O}/2))$

Pyrophyllite Andalusite
Kyanite Sillimanite



Staurolite



Chloritoid



Cordierite

Garnet



Chlorite



Stilpnomelane



FeO

MgO

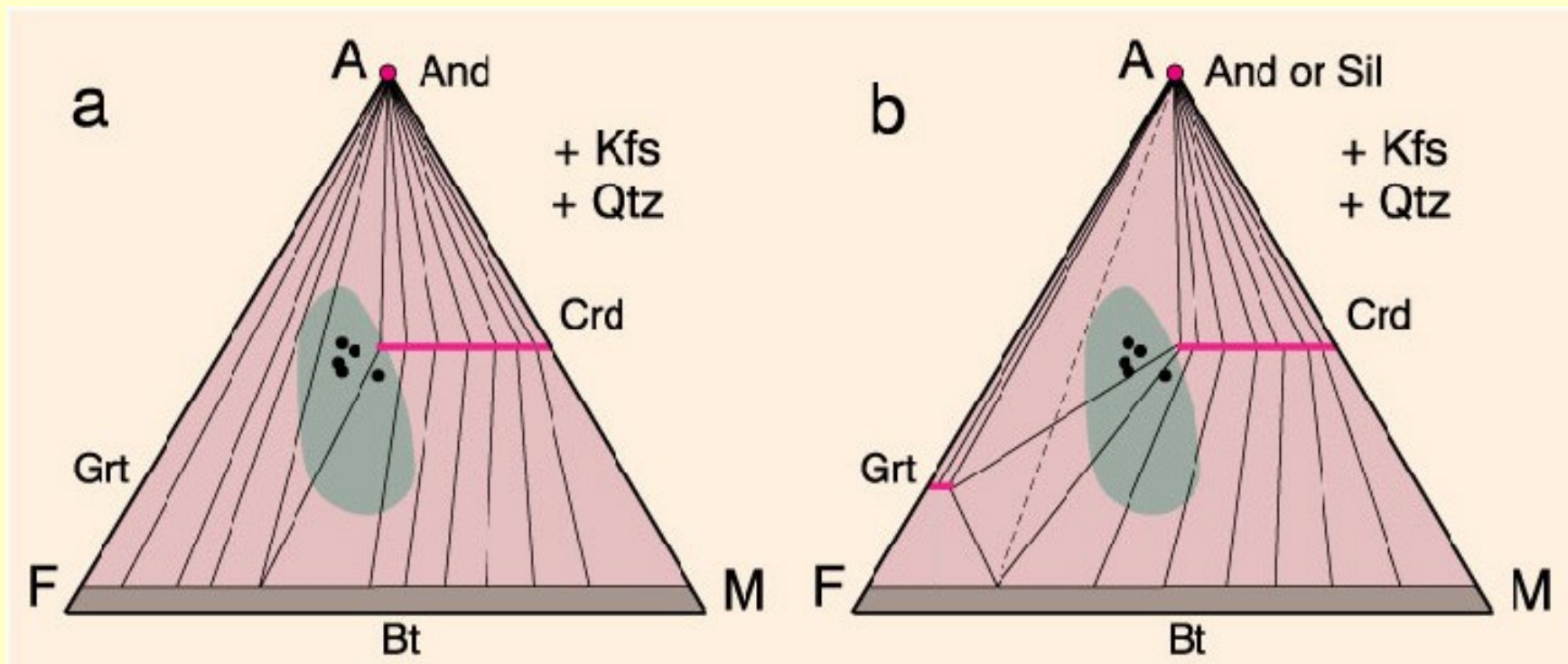
Biotite



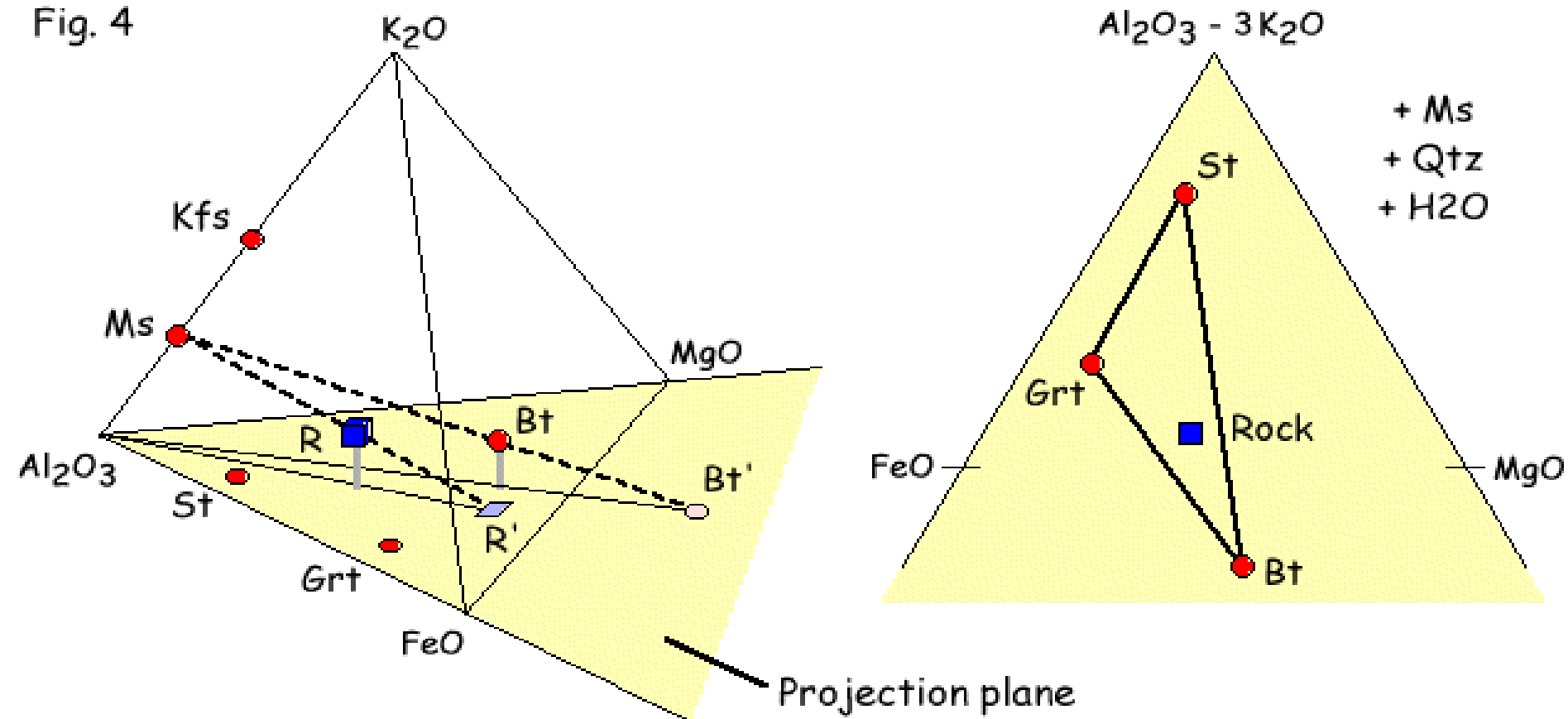
K-Feldspar at Infinity



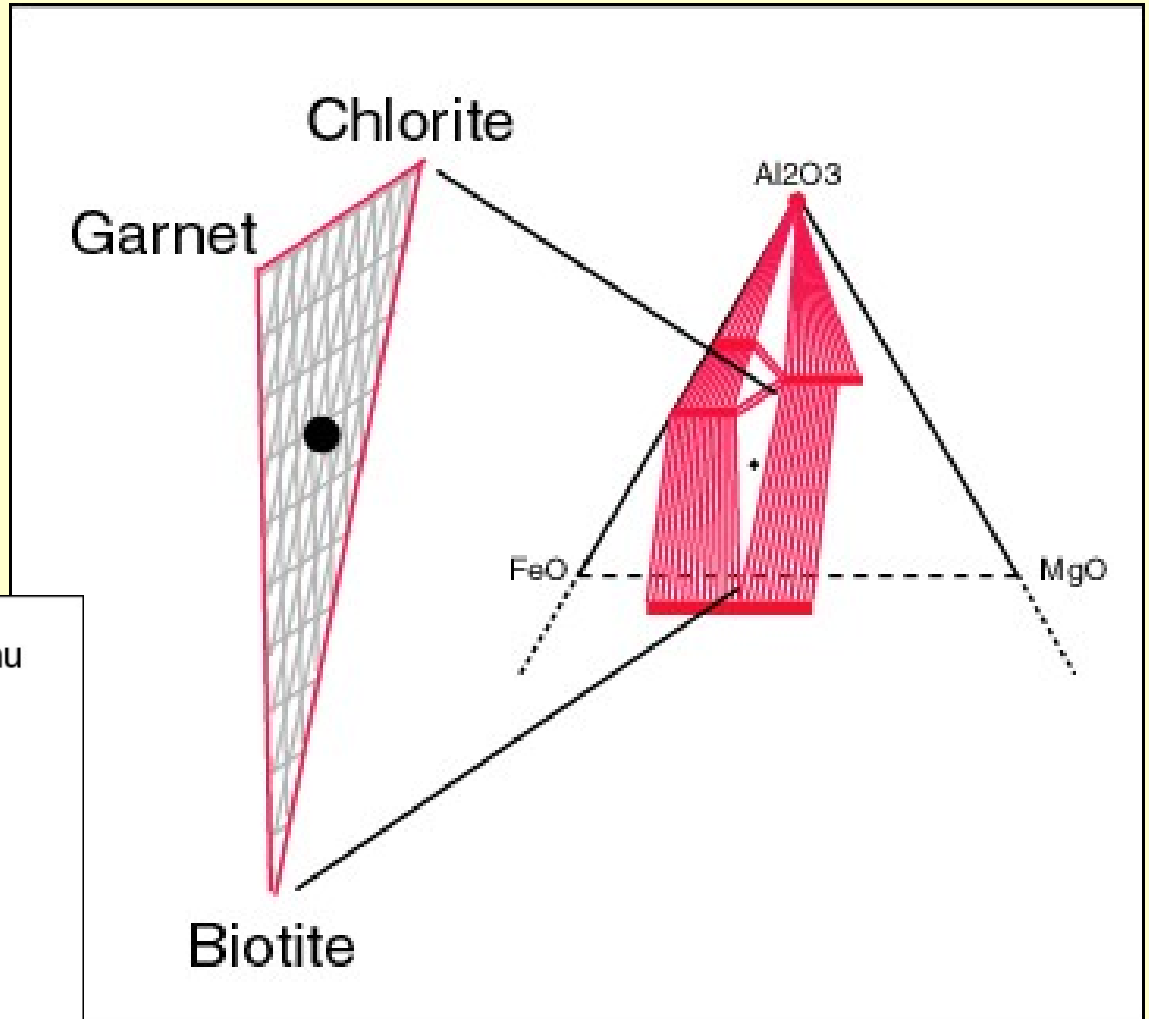
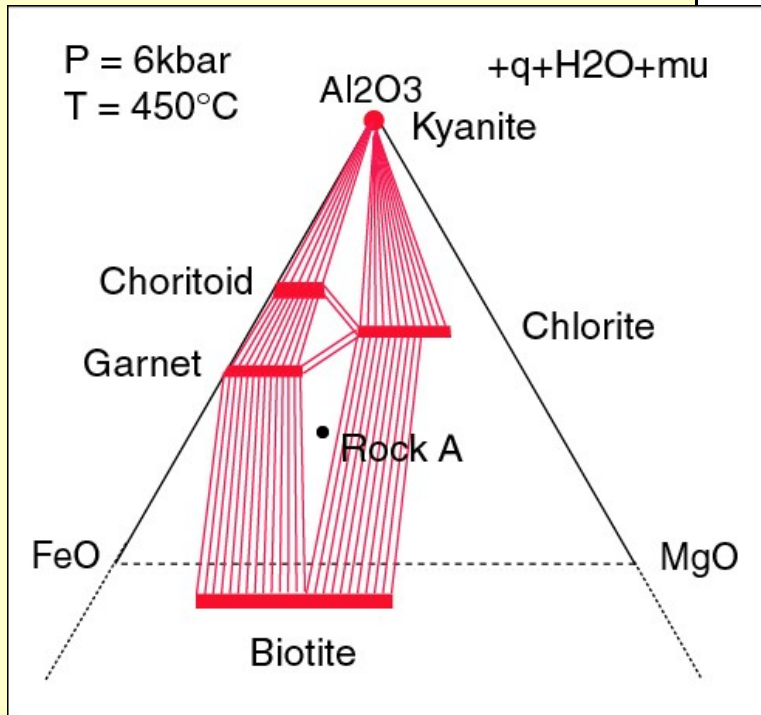
- **Draselný živec: KAlSi_3O_8**
- od teplot kolem 750°C
- K:Al 1:1



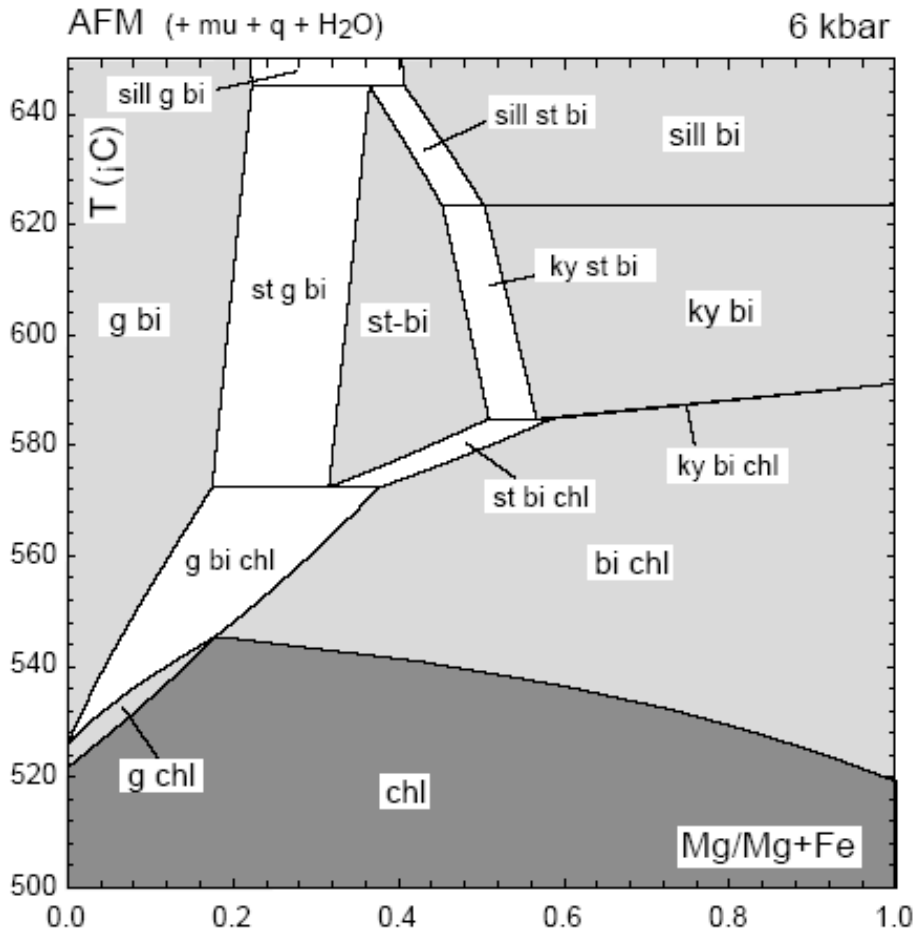
- Hornina (Ms)
- 1) oxidy přepočítat na molární hmotnostní kvoc. a na procenta (celek 100%)
- nutná korekce na plagioklas
- 2) $F = X \text{ FeO}$
- 3) $M = X \text{ MgO} (1 - X \text{ FeO})$
- 4) $A = (\text{Al}_2\text{O}_3 - 3 * \text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 - 3 * \text{K}_2\text{O} - \text{Na}_2\text{O} + \text{FeO} + \text{MgO})$



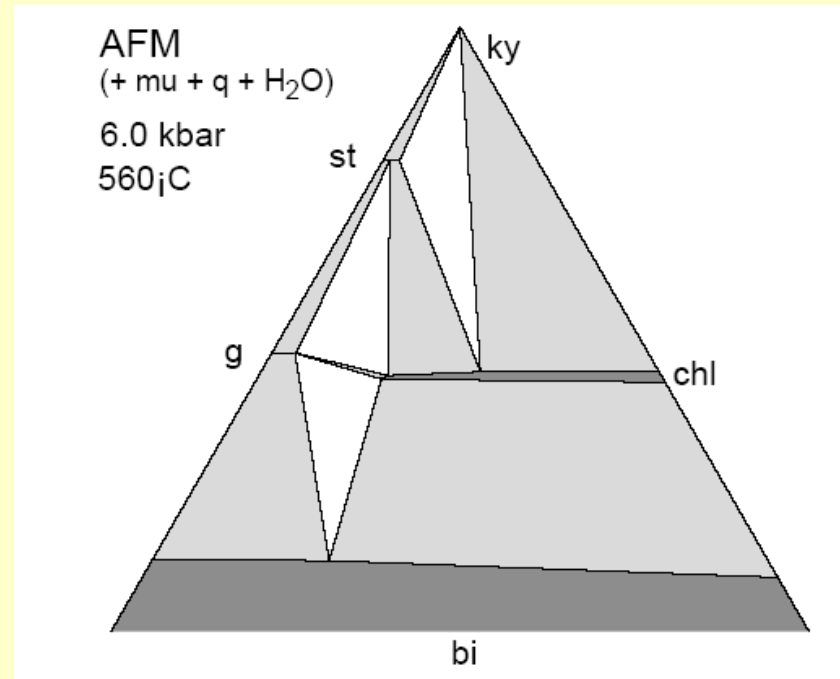
V metapelitu o
vyznačeném chemickém
složení bude stabilní
minerální asociace
Grt+Bt+Chl



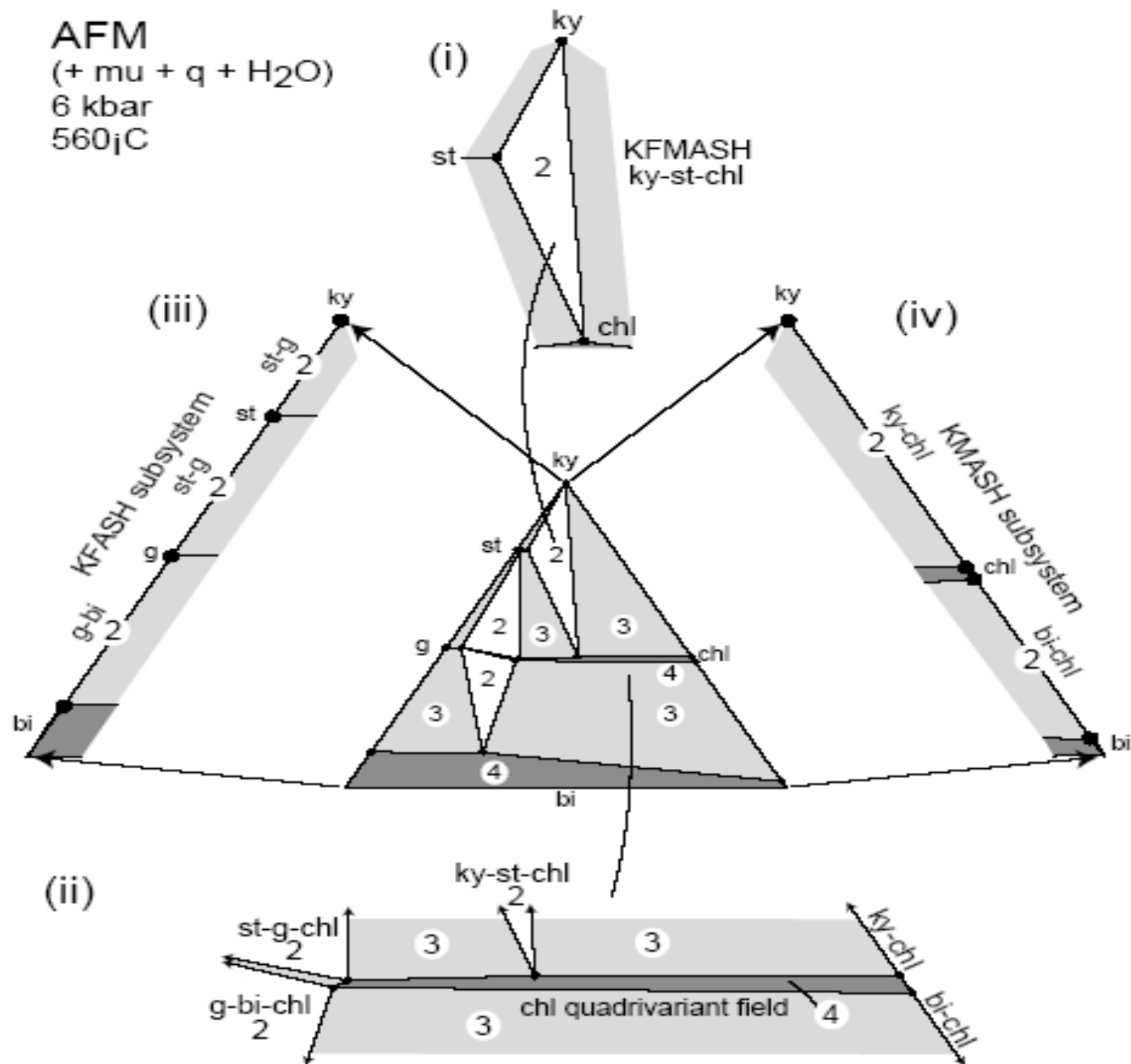
P-X a T-X řezy



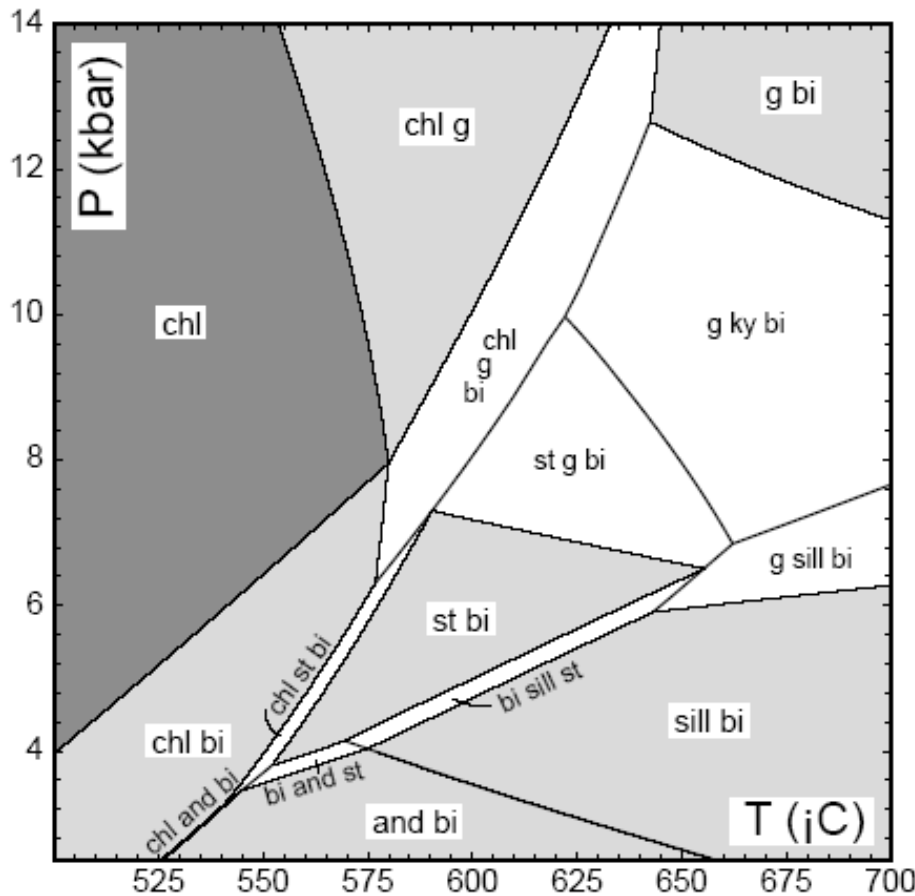
- používají se k zobrazení fázových změn v horninách s různým chemickým složením za konstantního tlaku nebo teploty.



AFM
(+ mu + q + H₂O)
6 kbar
560°C



PT řezy (pseudosekce)



- PT řezy jsou PT diagramy konstruovány pro určité chemické složení systému (horniny)
- PT řezy zobrazují pole stability minerálních asociací, které v dané hornině o daném chemickém složení skutečně probíhají systém

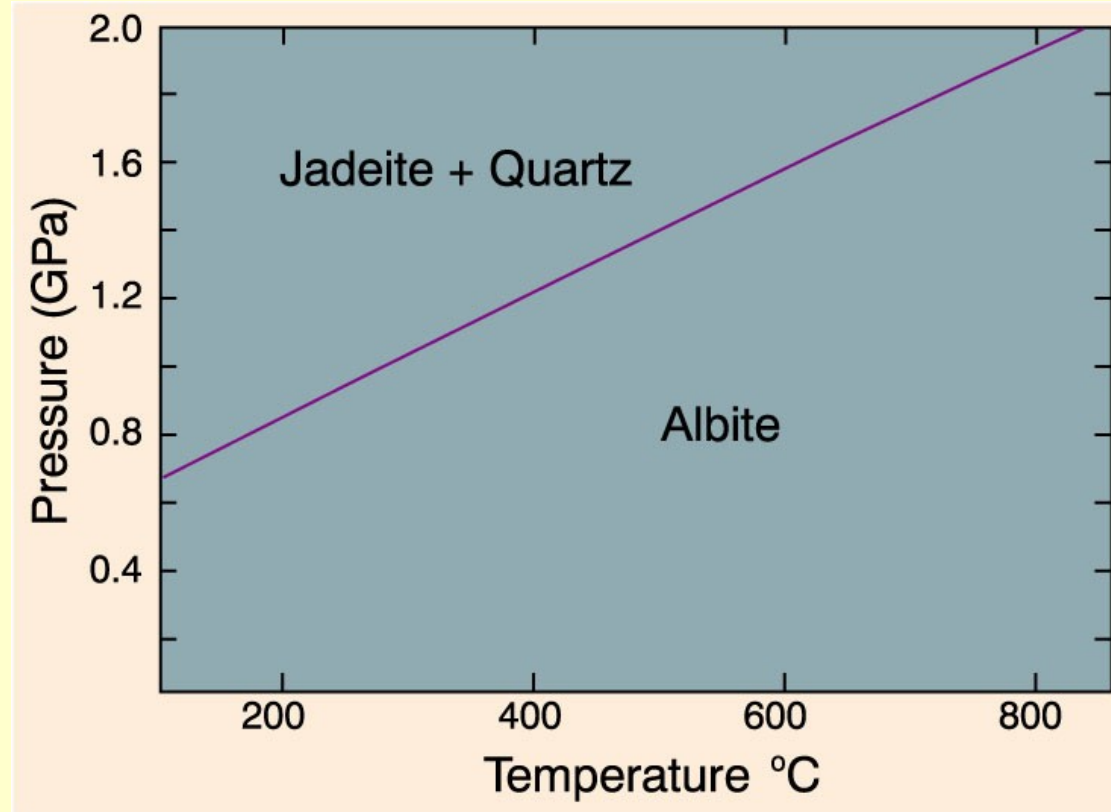
- Petrogenetické mřížky totiž zobrazují pouze univariantní reakce a prostor mezi nimi je reprezentován teoretickými poli stability odpovídajících divariantních minerálních asociací.

I. Metamorfní reakce

A) Diskontinuální Univariantní reakce

zánik minerálu nebo minerální asociace a krystalizace \Rightarrow stabilizace nové

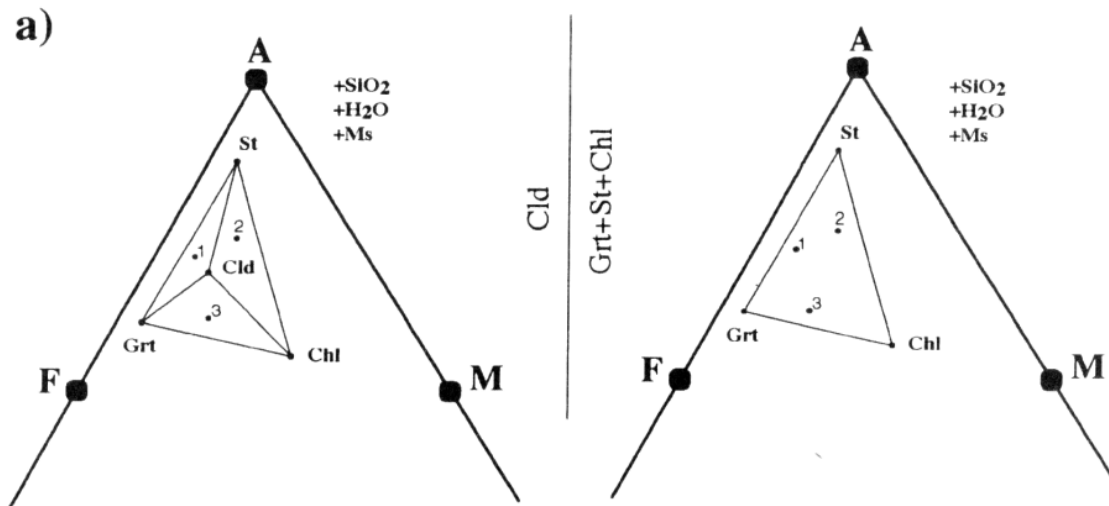
rovnováha reaktantů a produktů jen na univariantní křivce



- $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 + \text{SiO}_2 = \text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Jd Qtz Ab
- $\text{MgSiO}_3 + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = \text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + \text{Al}_2\text{SiO}_5$
En An Di And
- $4 (\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3 + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 = (\text{Mg,Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6 + \text{SiO}_2$
Opx Plag Grt Cpx Qtz

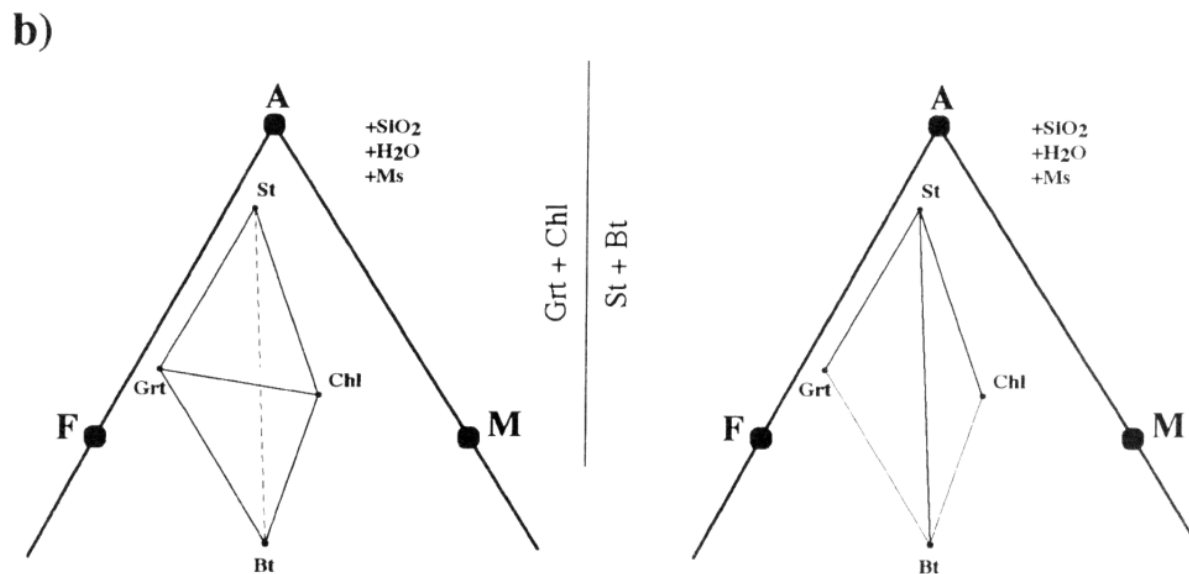
terminálová reakce

reaktant či produkt 1
fáze (1 fáze zmizí nebo
se v systému naopak
objeví)

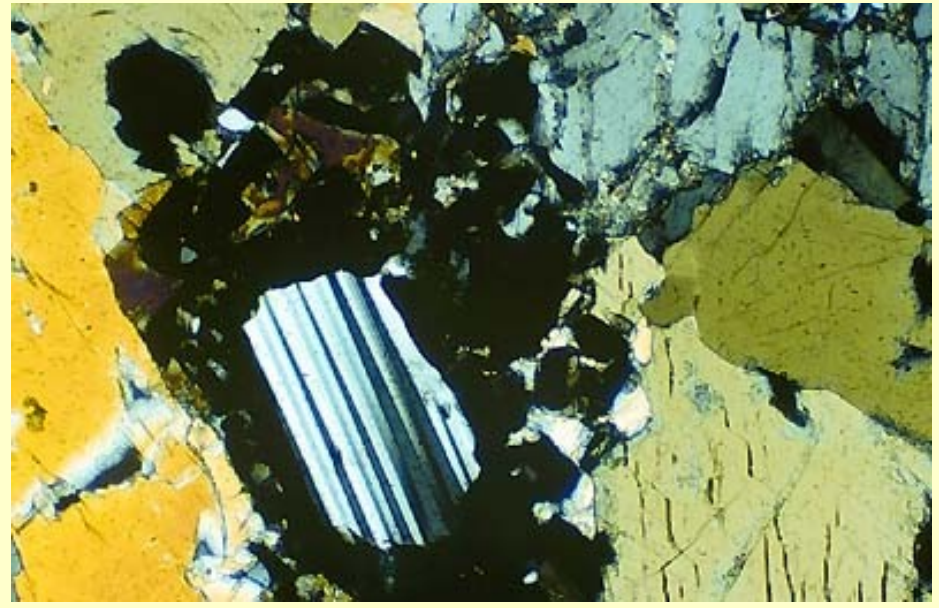
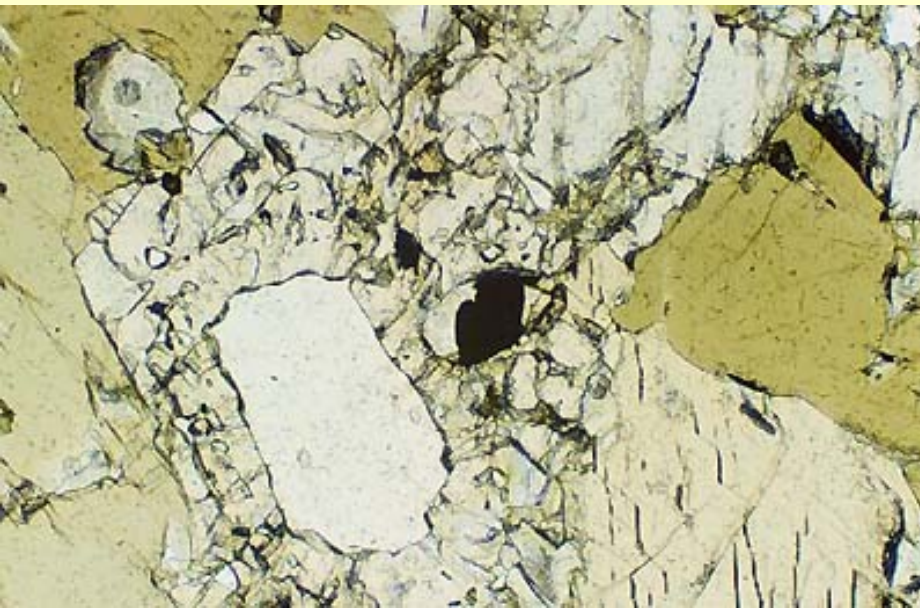


křížení spojovacích linií

reaktant a produkt 2
fáze

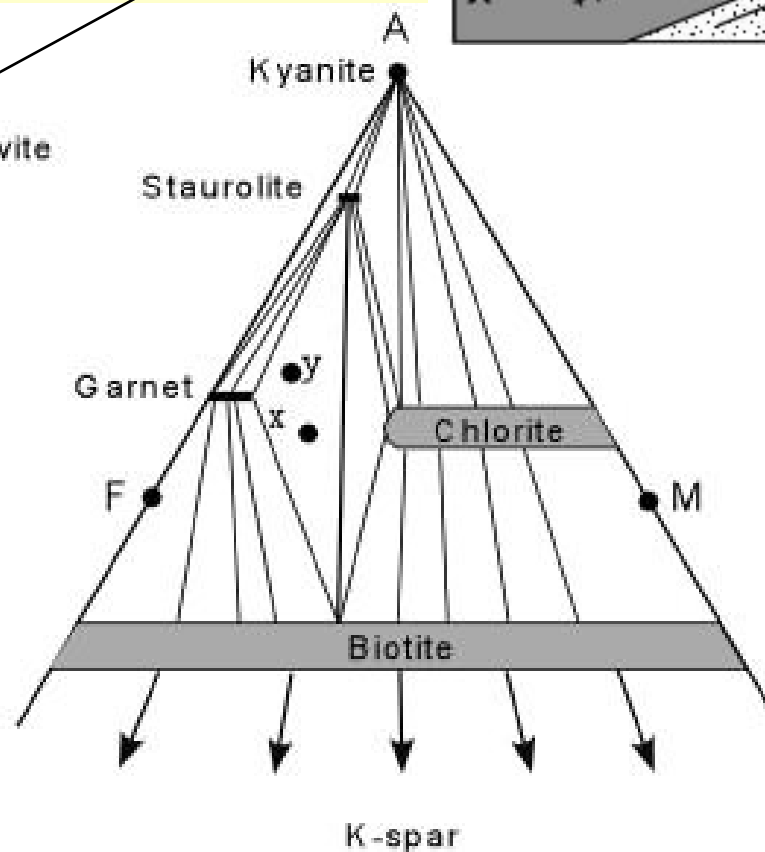
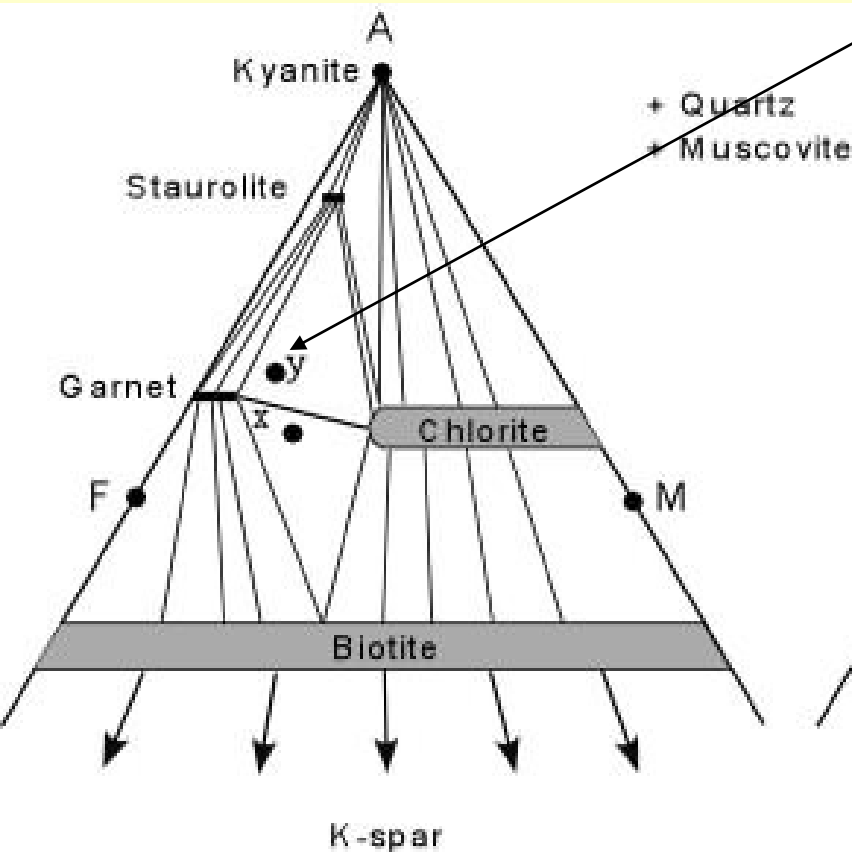
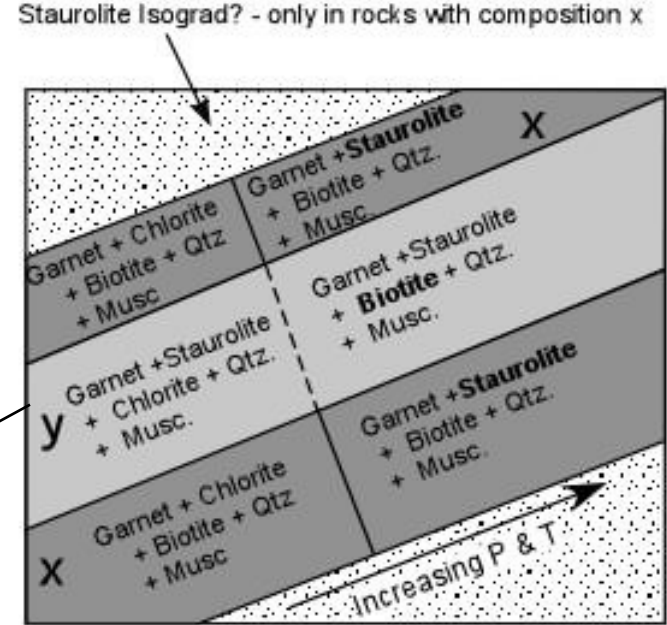


- **Reakční koróny**
- vznikají kolem minerálů, které jsou v minerální asociaci dané horniny nestabilní. Právě koróna uchránila tento minerál před přeměnou.

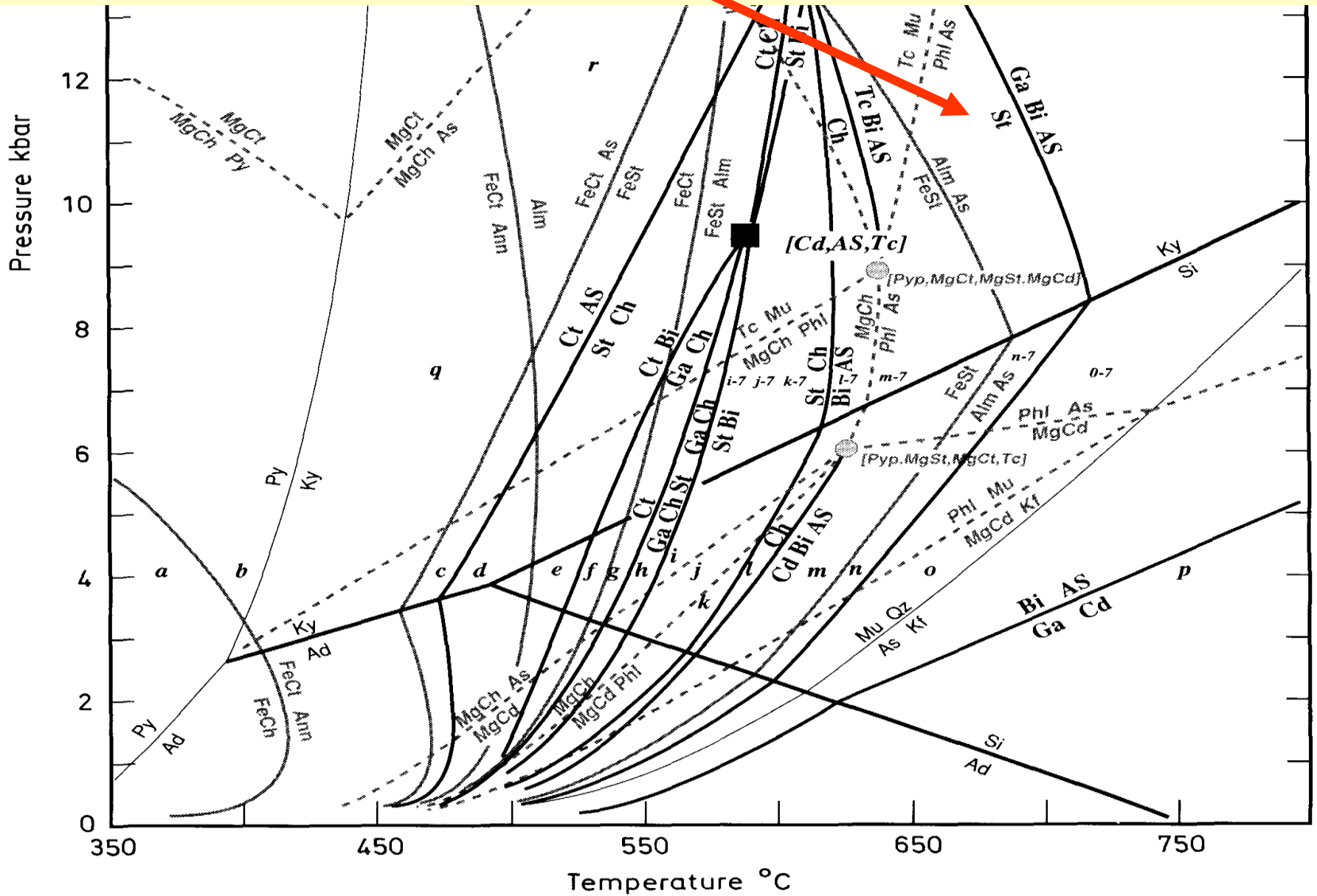


1) Koróna vznikla mezi plagioklasem a amfiboly obklopujícími plagioklasové zrnó.
Rovnoběžné a zkrřížené nikoly

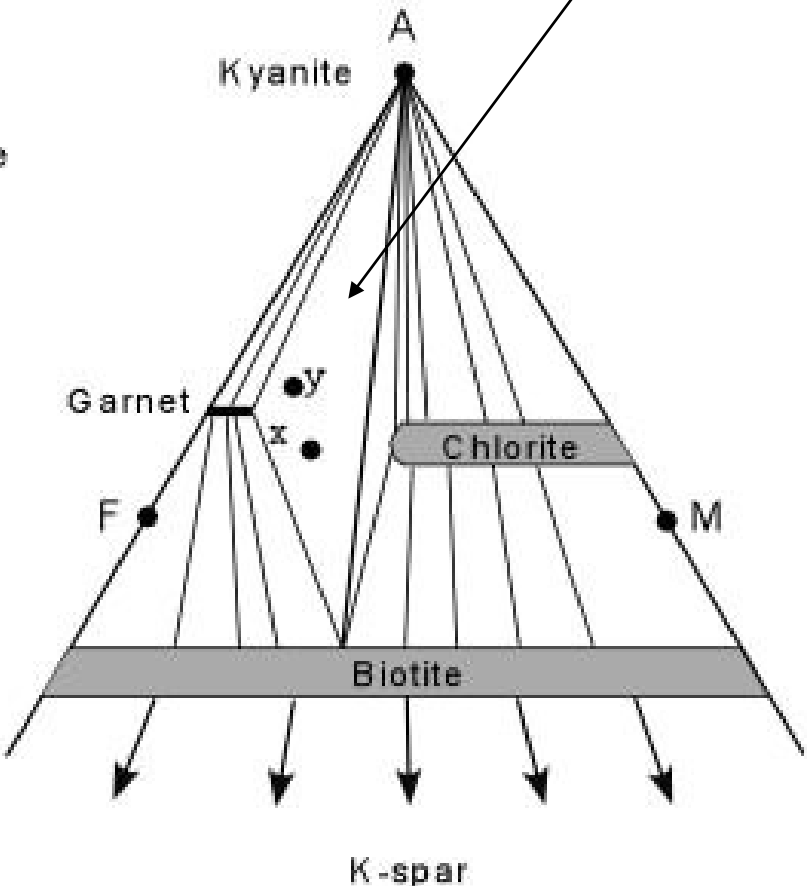
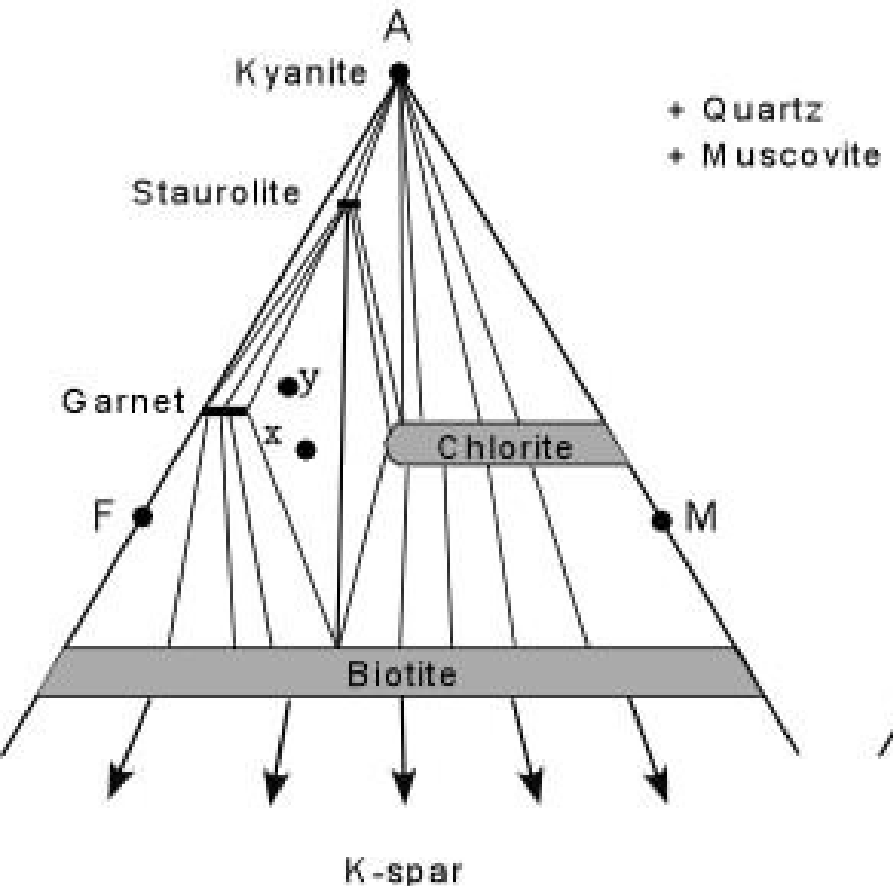
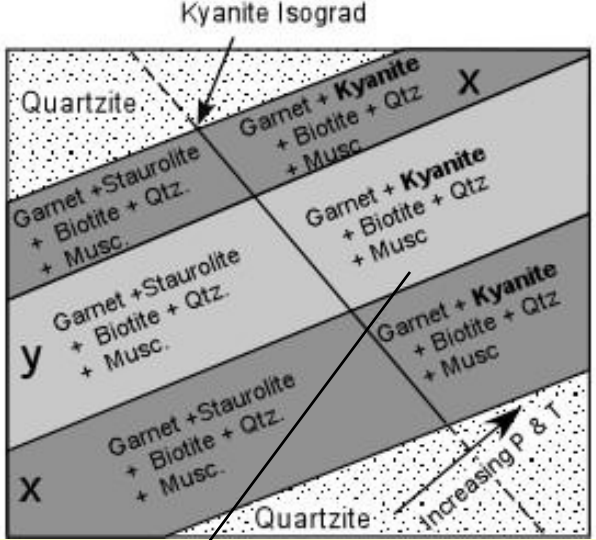
**Garnet + Chlorite + Muscovite =
Staurolite + Biotite + Quartz + H₂O**

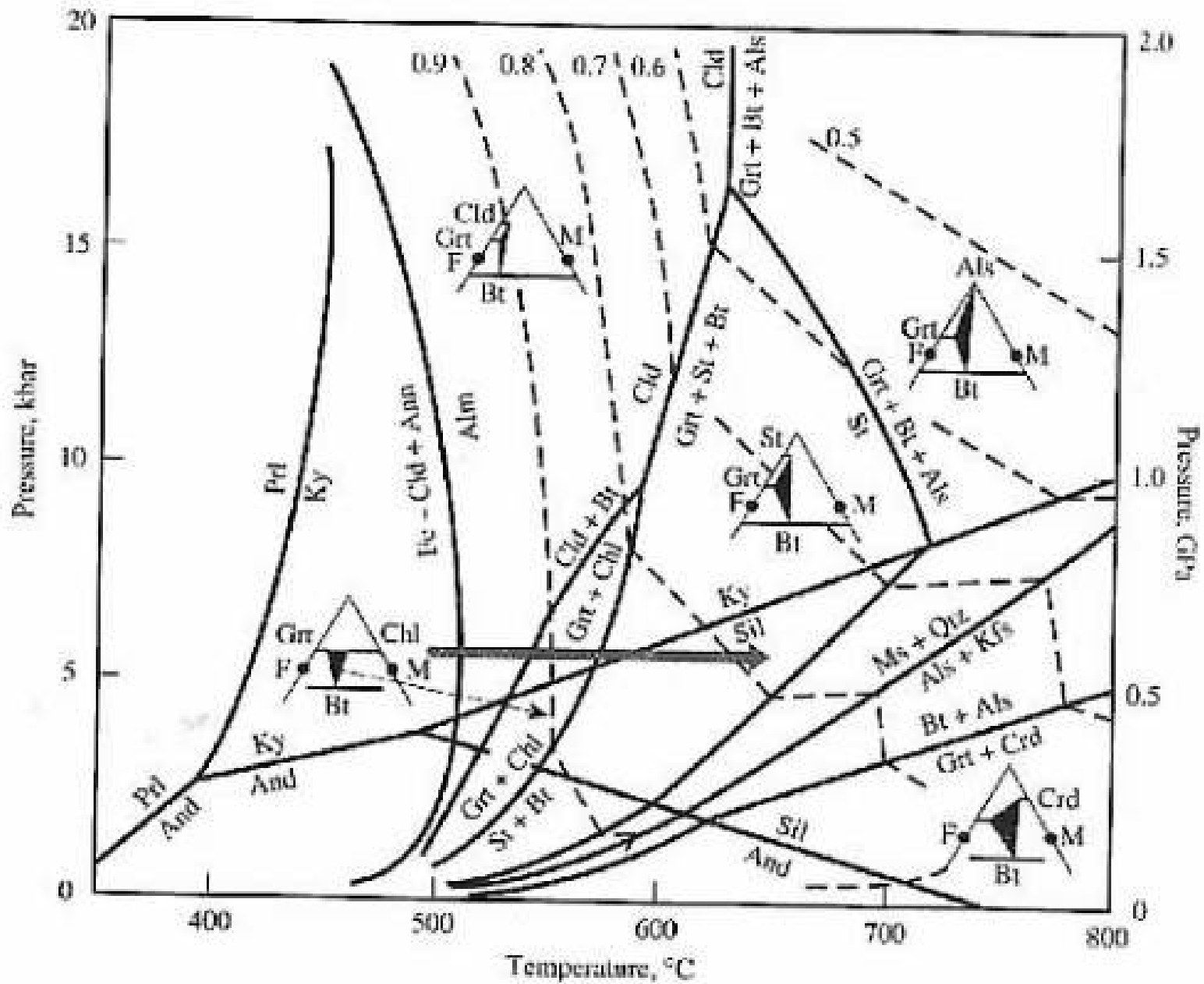


staurolite = garnet + biotite + Al_2SiO_5

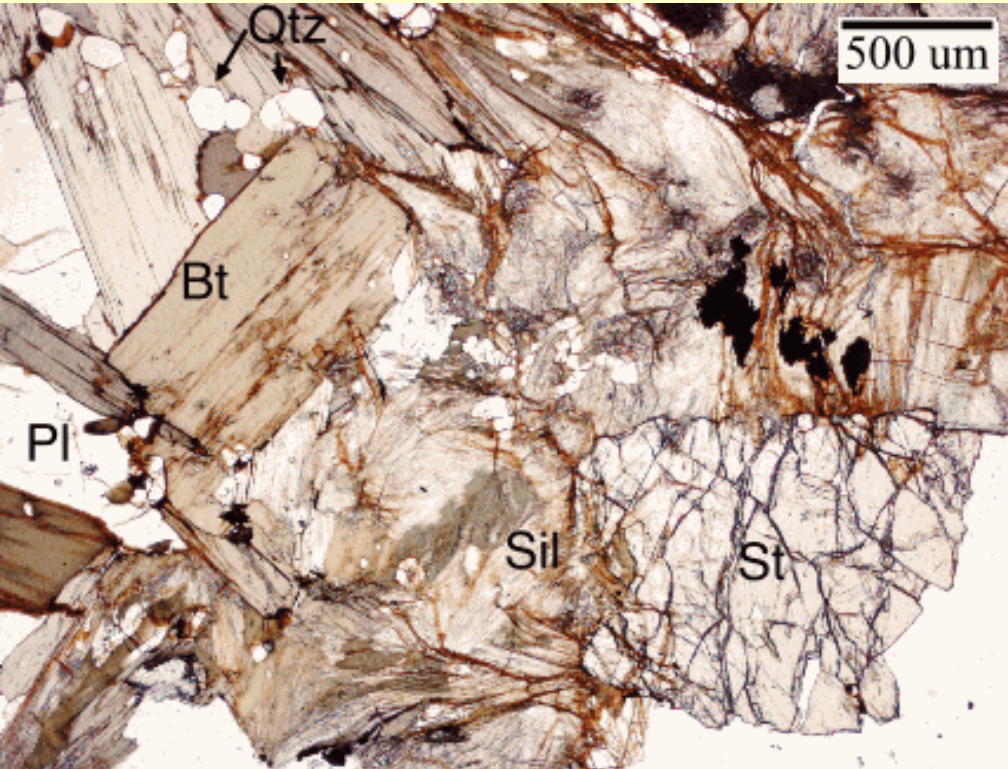


staurolite = garnet + biotite + Al_2SiO_5

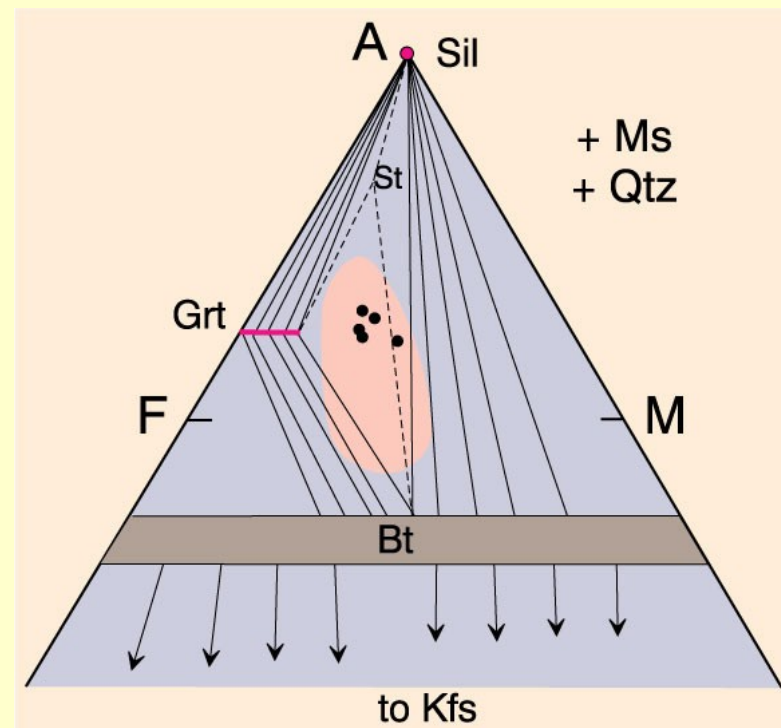
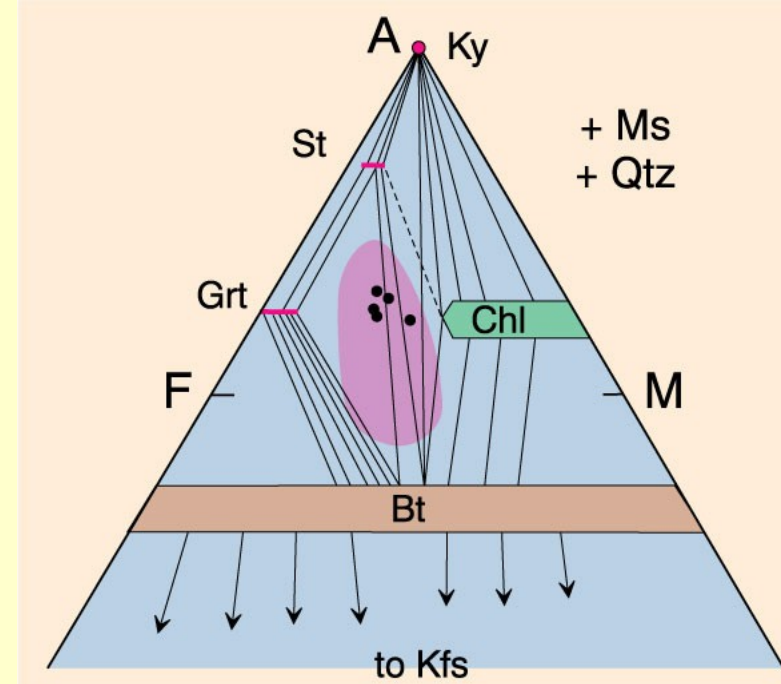




- **staurolite = garnet + biotite + Al₂SiO₅ (sillimanite)**



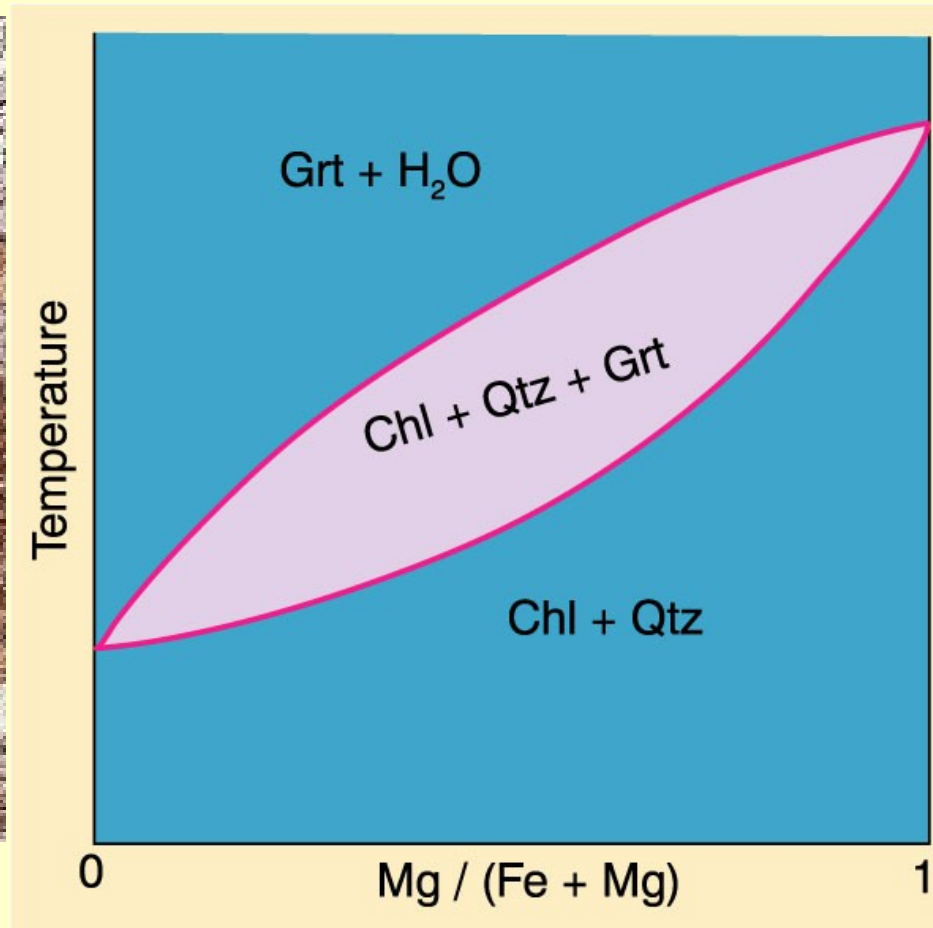
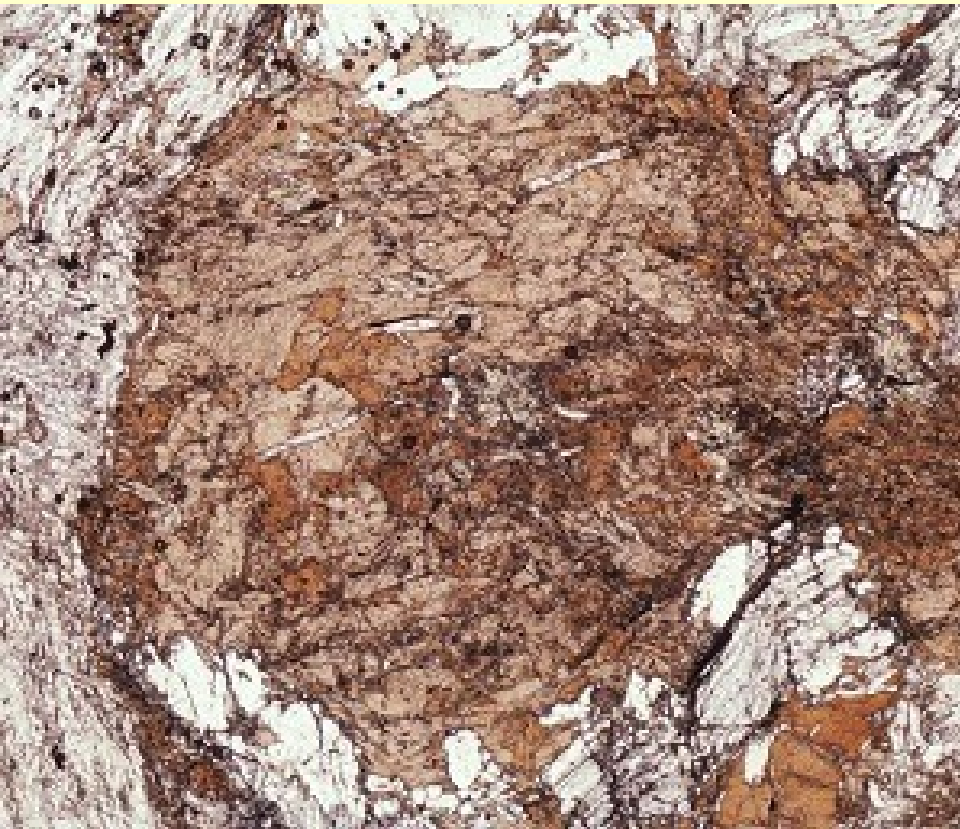
Plane polarized light digital image showing extensively resorbed Staurolite rimmed by sillimanite and biotite



B) Kontinuální reakce

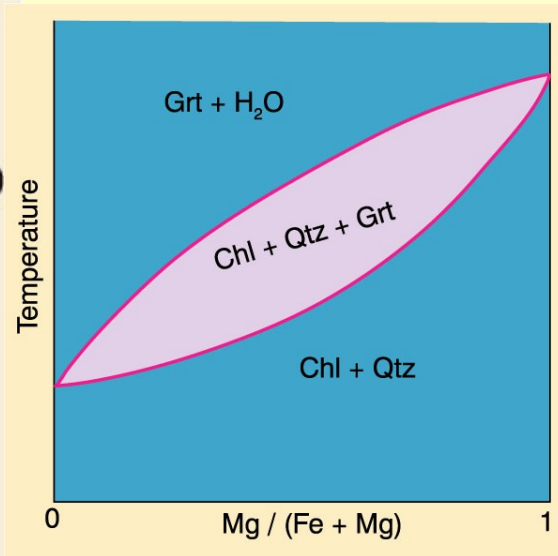
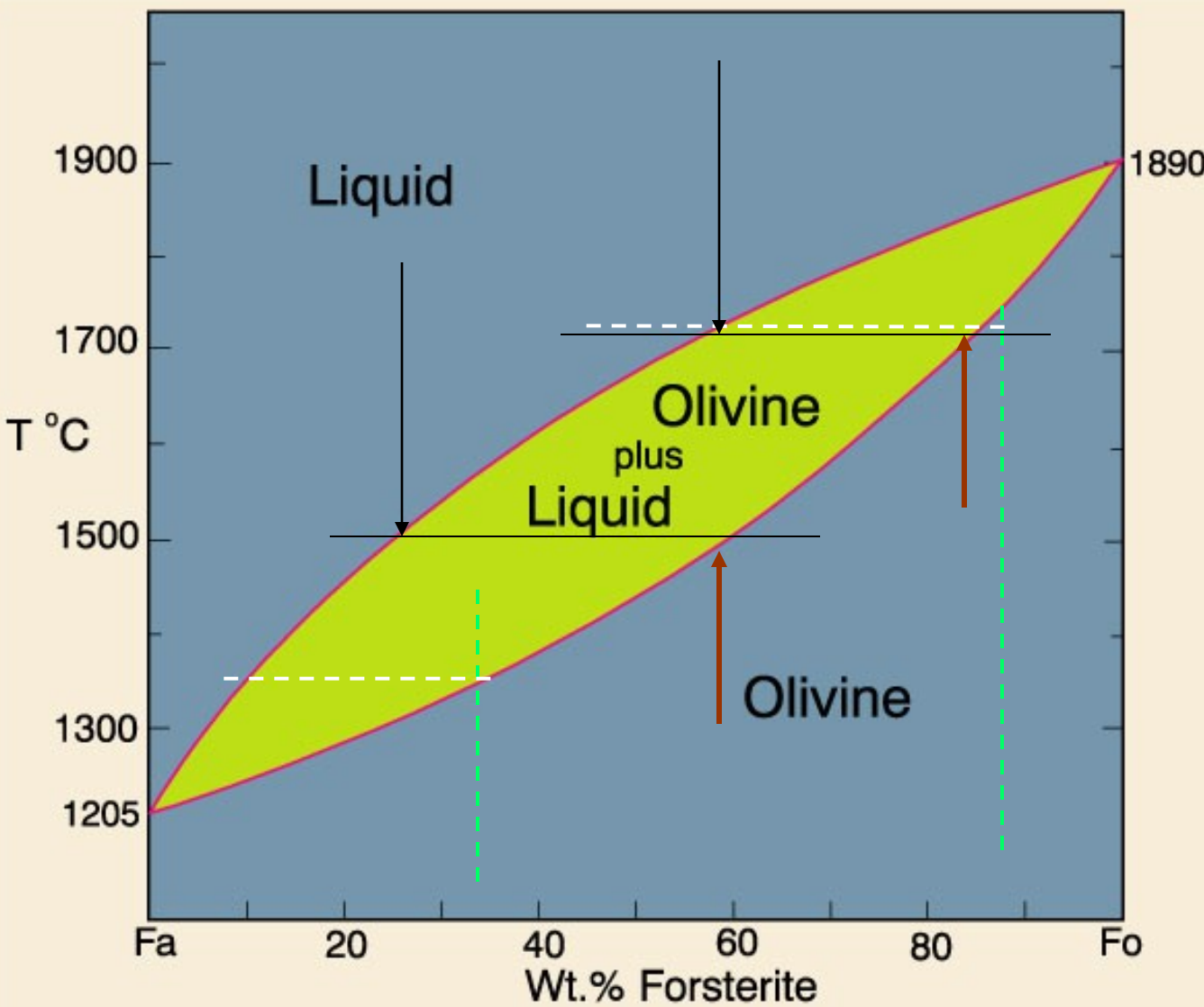
Divariantní reakce

- $\text{Chl} + \text{Ms} + \text{Qtz} \rightarrow \text{Grt} + \text{Bt} + \text{H}_2\text{O}$
- $\text{Chl} + \text{Cld} + \text{Qtz} \rightarrow \text{Grt} + \text{H}_2\text{O}$



✓ mění se chemické složení zúčastněných minerálů (vzájemná konzumace)

⇒ během divariantní reakce nevzniká žádný nový minerál



Isobaric T-X phase diagram at atmospheric pressure After Bowen and Shairer (1932), Amer. J. Sci. 5th Ser., 24, 177-213. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

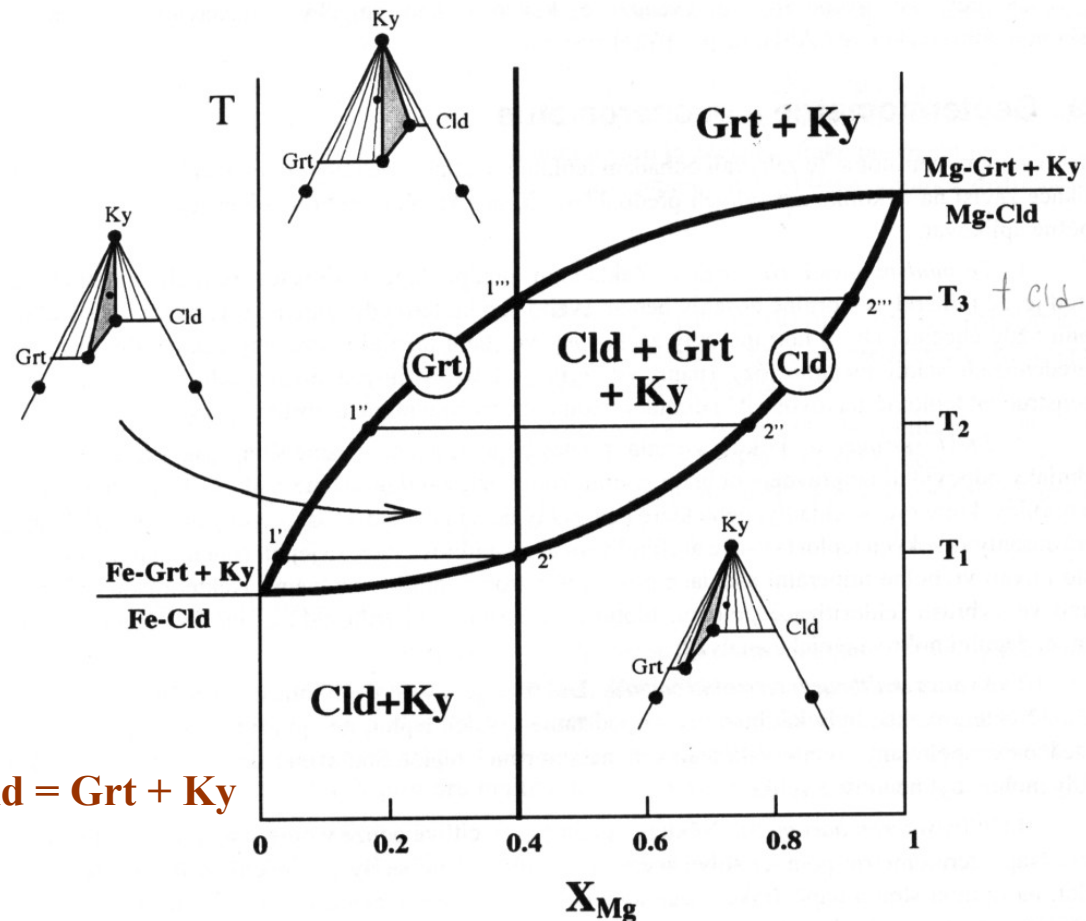
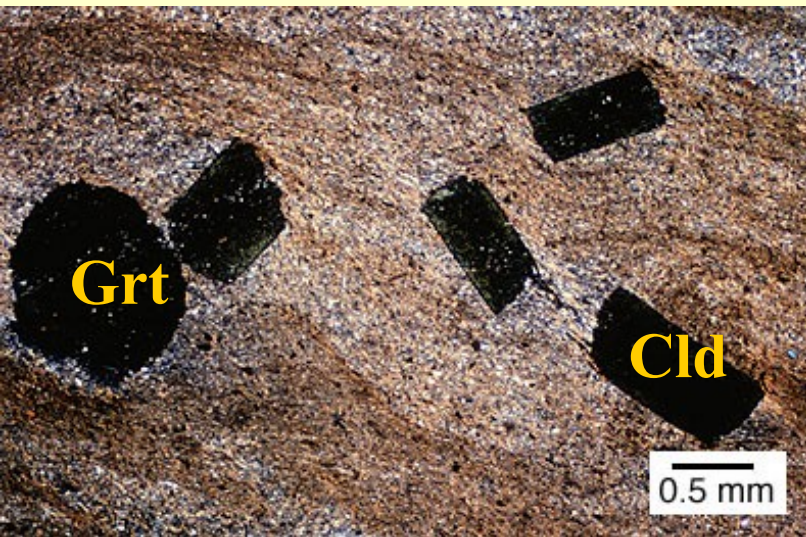
kontinuální reakce - nejčastější substituce FeMg_{-1}

posun dílčích trojúhelníků s měnicími se P-T podmínkami k vrcholu F či M

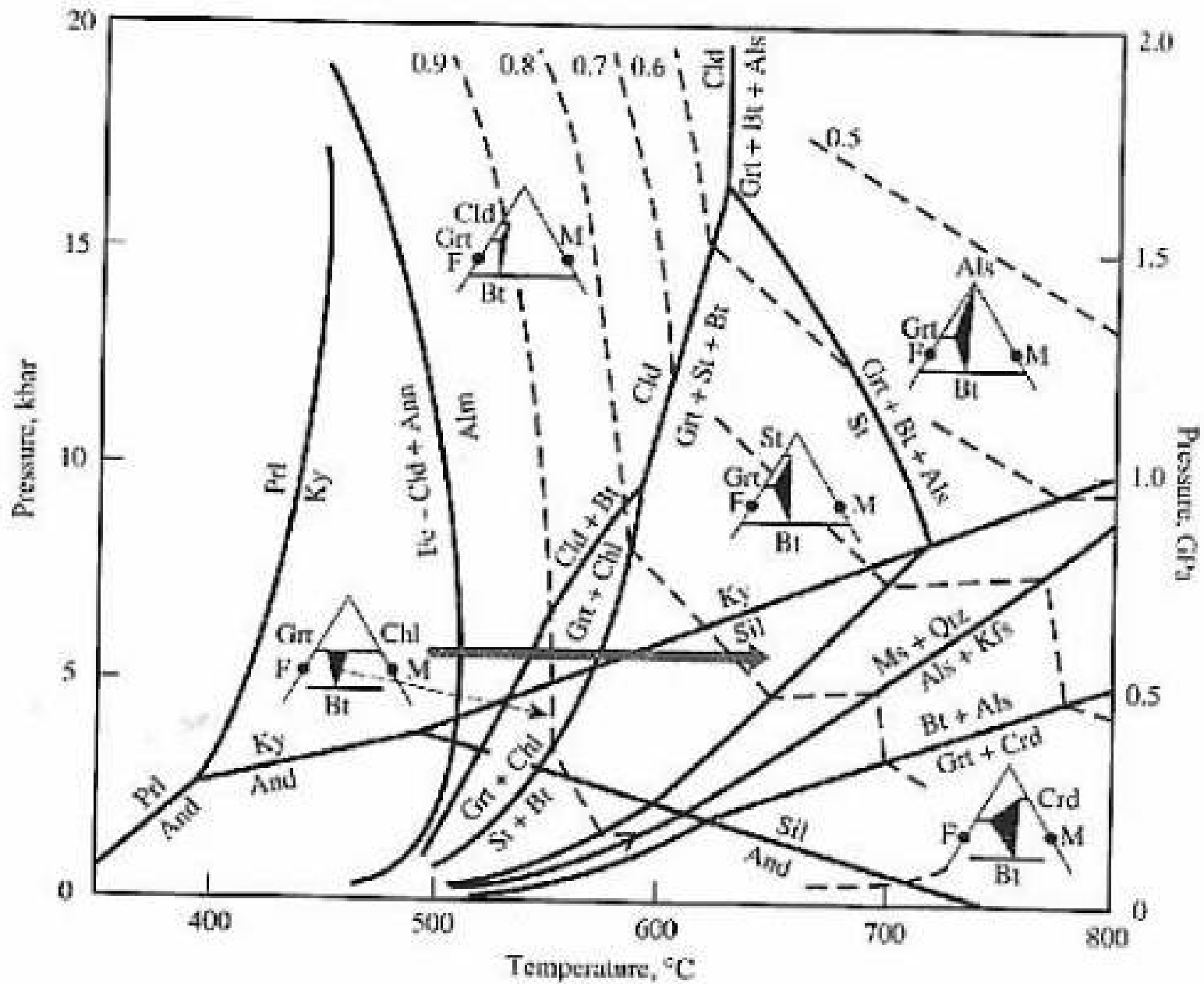
$X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ pro minerály různé (různá preference v různých mřížkách)

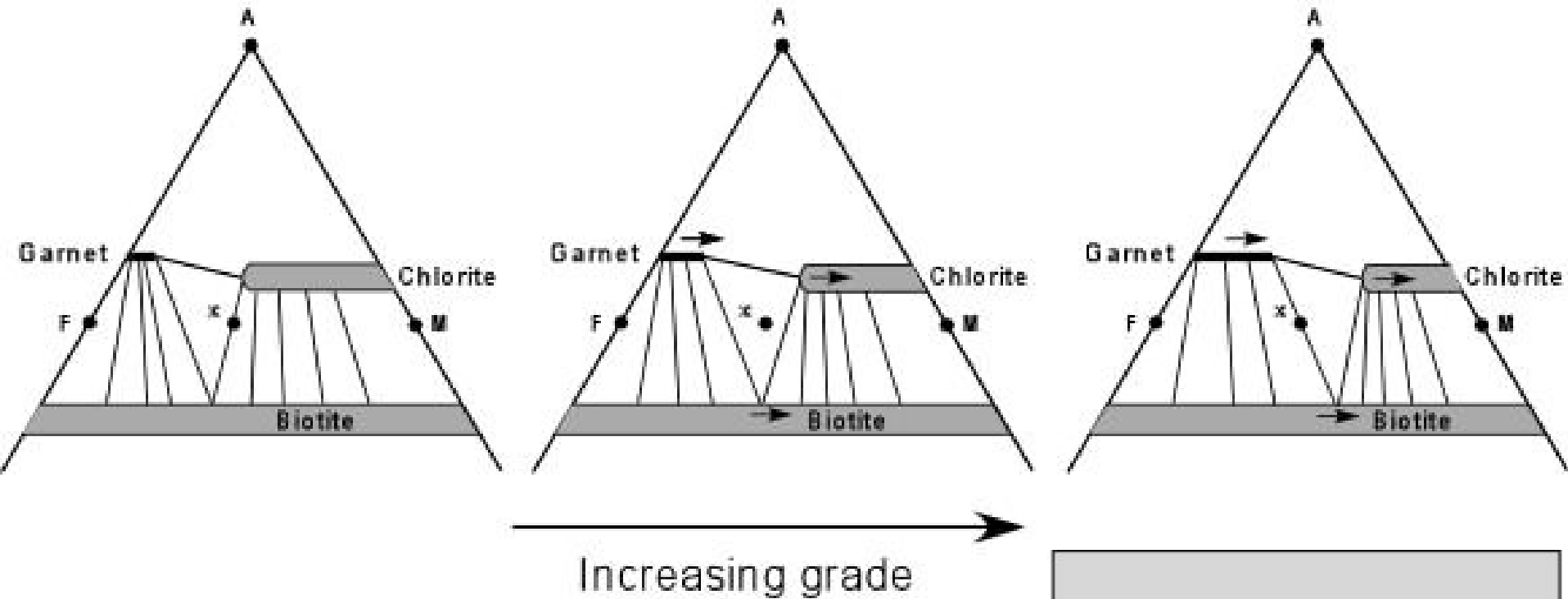
$$X_{\text{Mg}}^{\text{Crd}} > X_{\text{Mg}}^{\text{Chl}} > X_{\text{Mg}}^{\text{Bt}} > X_{\text{Mg}}^{\text{Cld}} > X_{\text{Mg}}^{\text{St}} > X_{\text{Mg}}^{\text{Grt}}$$

(viz pozice v AFM)

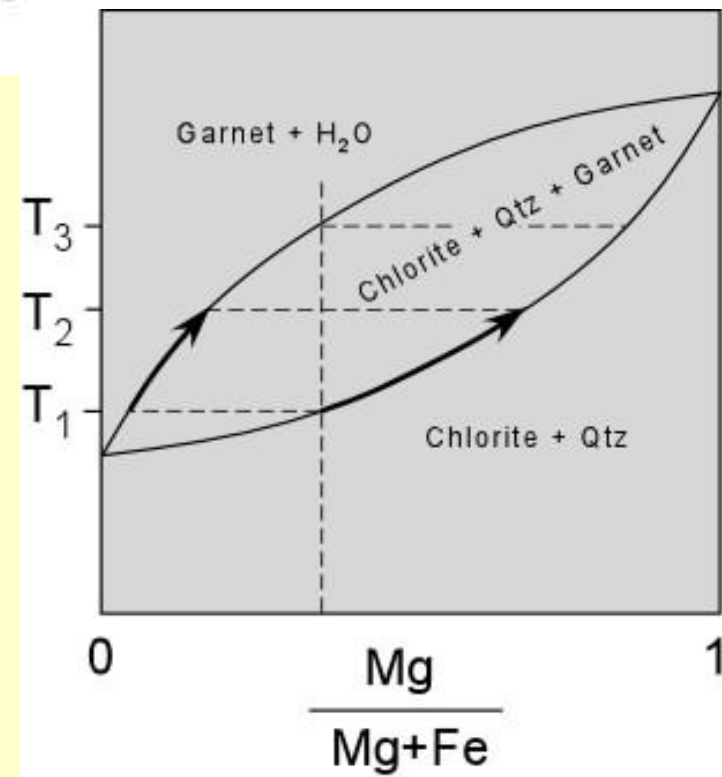


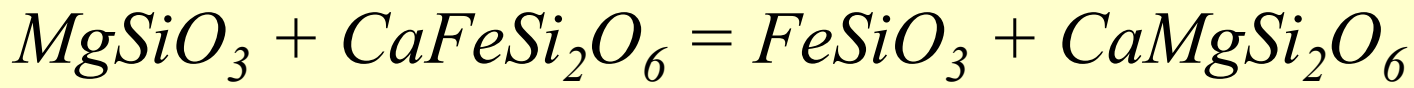
$T-X_{\text{Mg}}$ diagram pro kontinuální reakci $\text{Cld} = \text{Grt} + \text{Ky}$





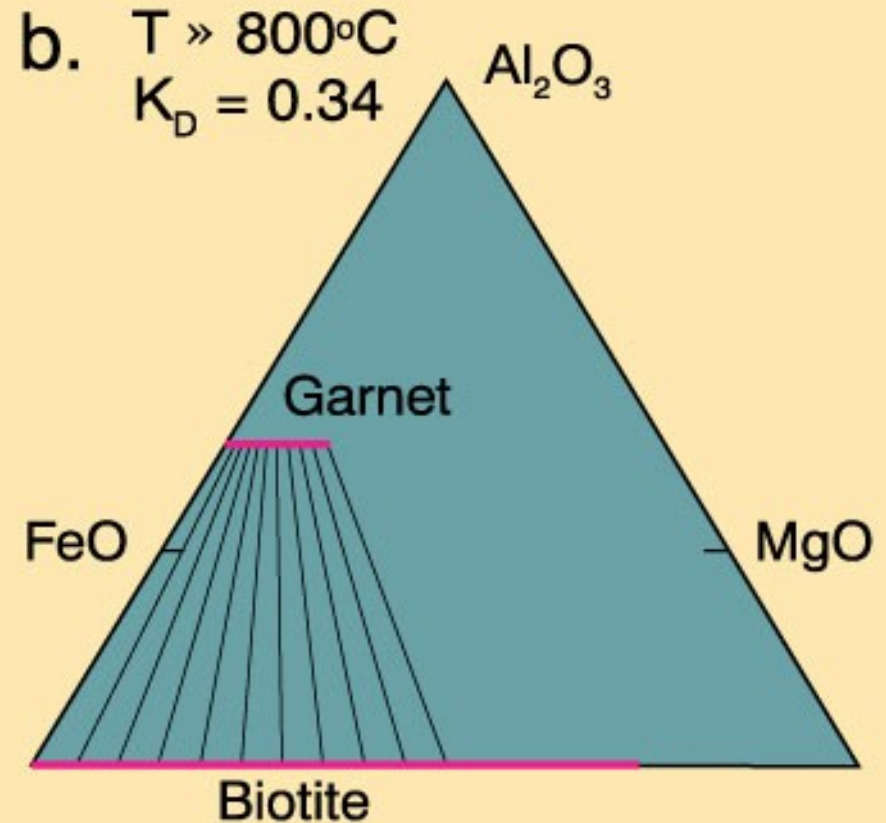
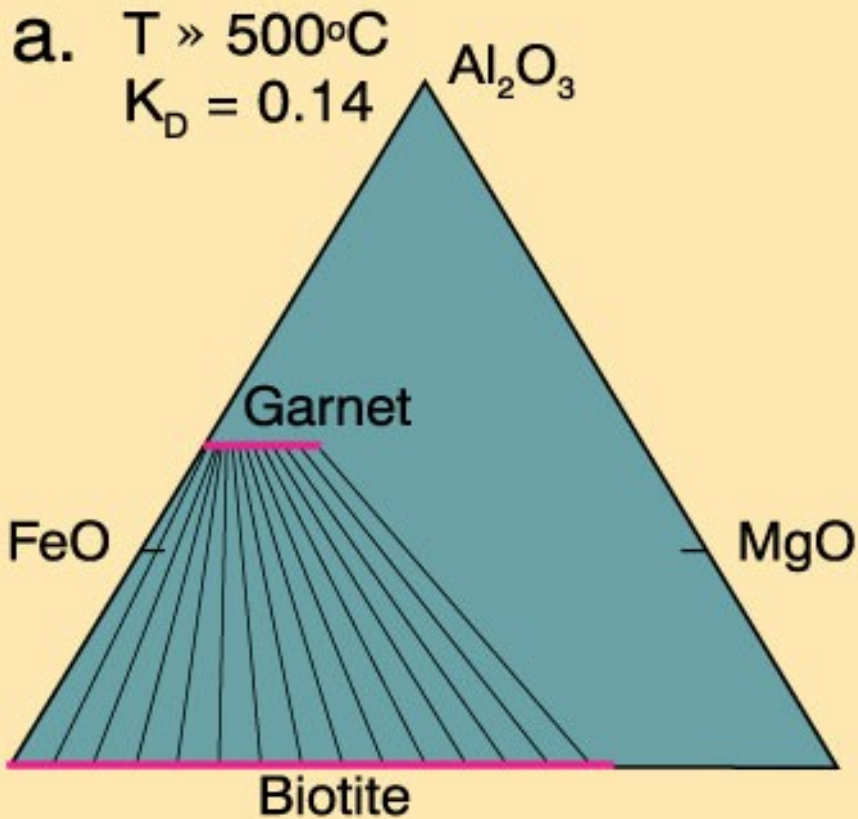
- Hornina má složení: Qtz+Ms+Bt+Chl
- $\text{Chl} + \text{Qtz} \Rightarrow \text{Grt} + \text{Mg-Chlorit} + \text{H}_2\text{O}$





Annite + Pyrope = Phlogopite + Almandine

- Mg-Fe substitute
- oba minerály mají Mg a Fe komponentu \Rightarrow geothermometry



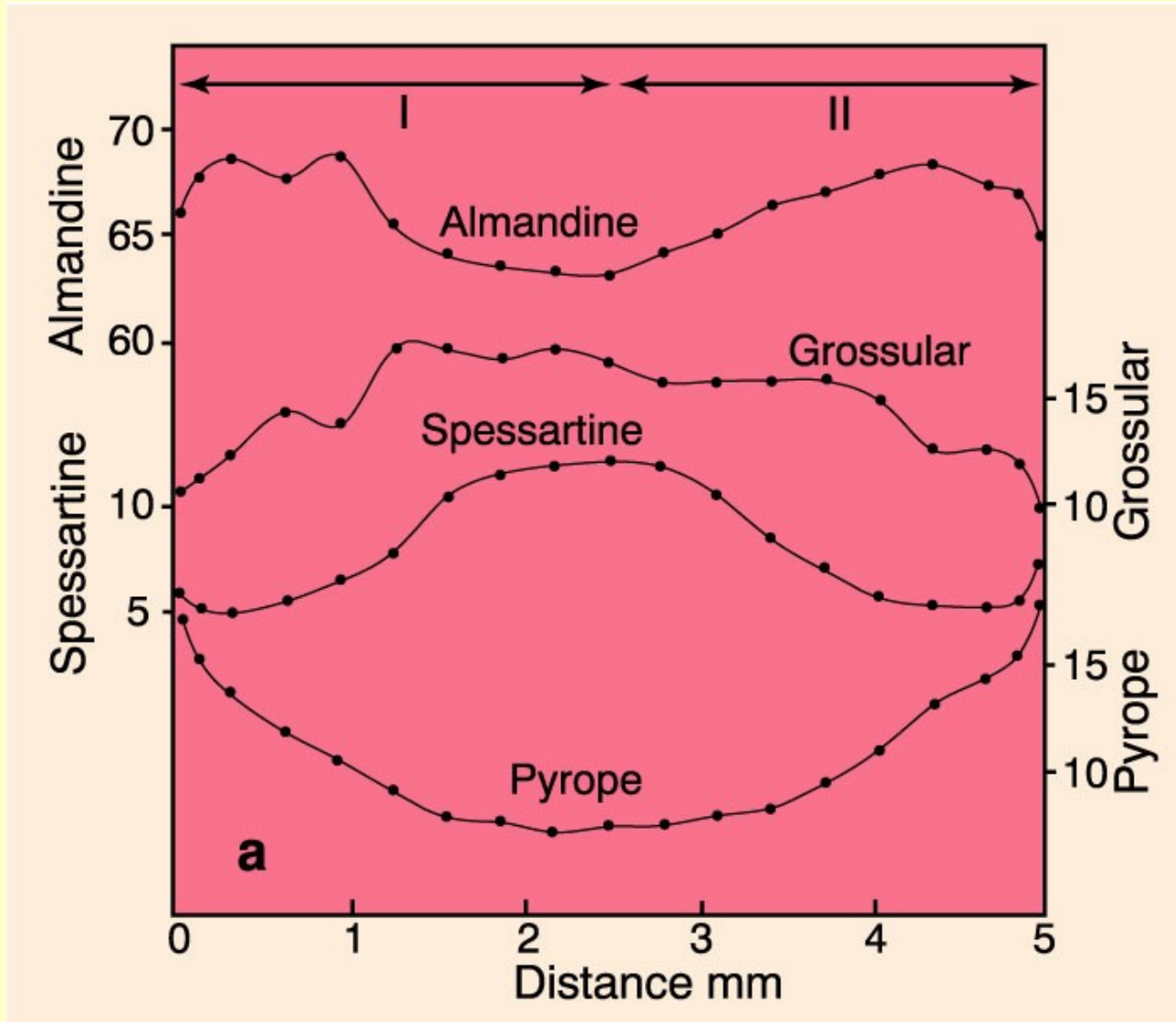
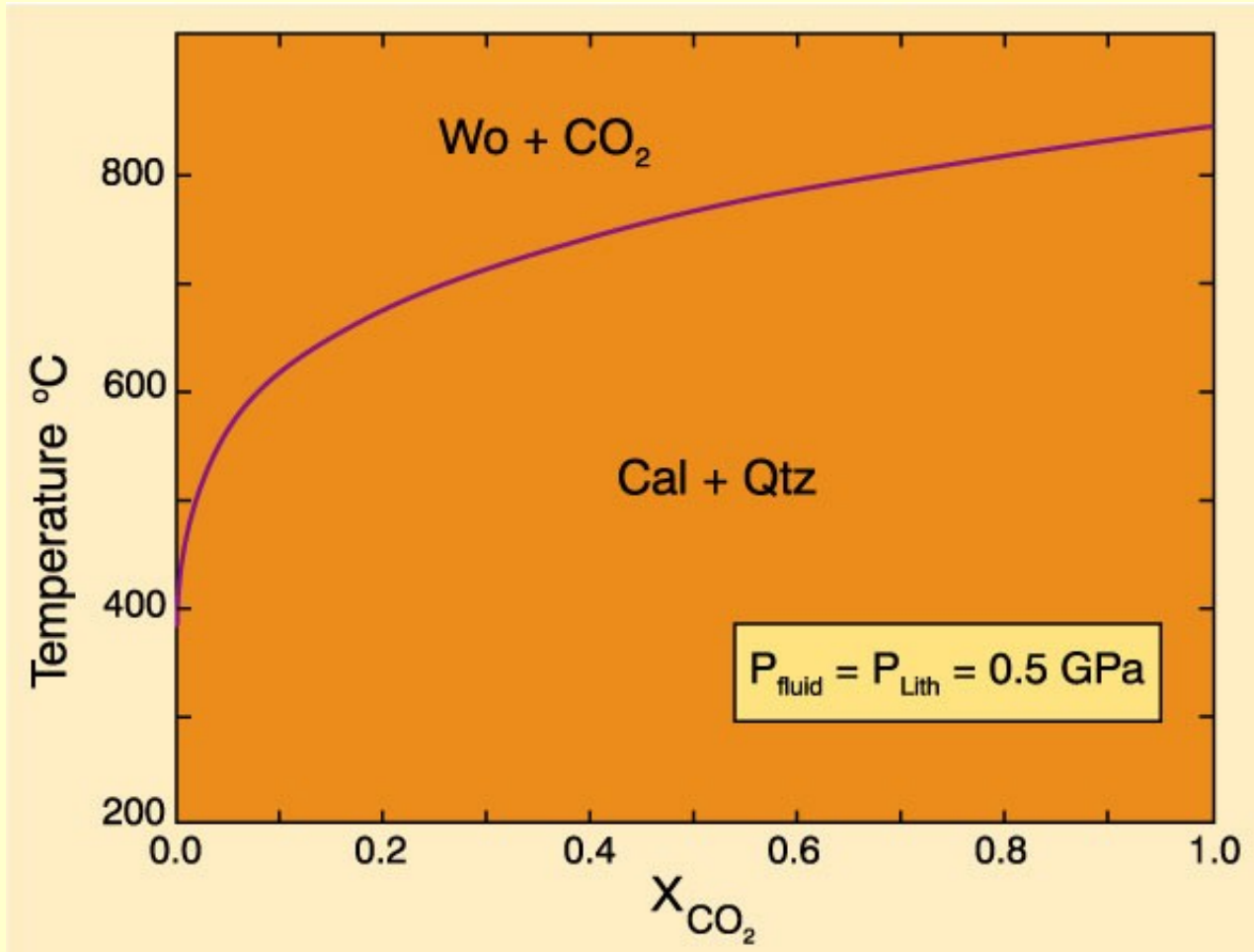


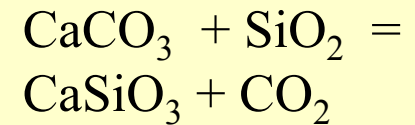
Fig. 25-13a. Chemical zoning profiles across a garnet from the Tauern Window. After Spear (1989)

C) Devolatilizační reakce (dehydratační a dekarbonační reakce)

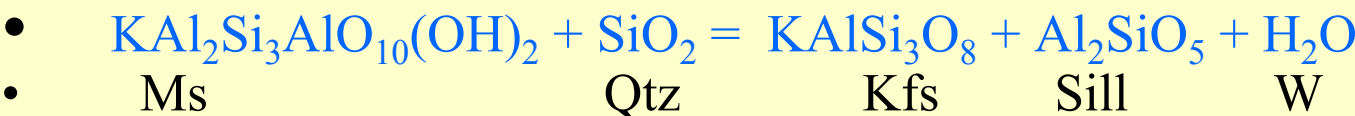
- pro většinu hornin postačuje system $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$



Pro karbonátové horniny jsou důležité dekarbonační reakce

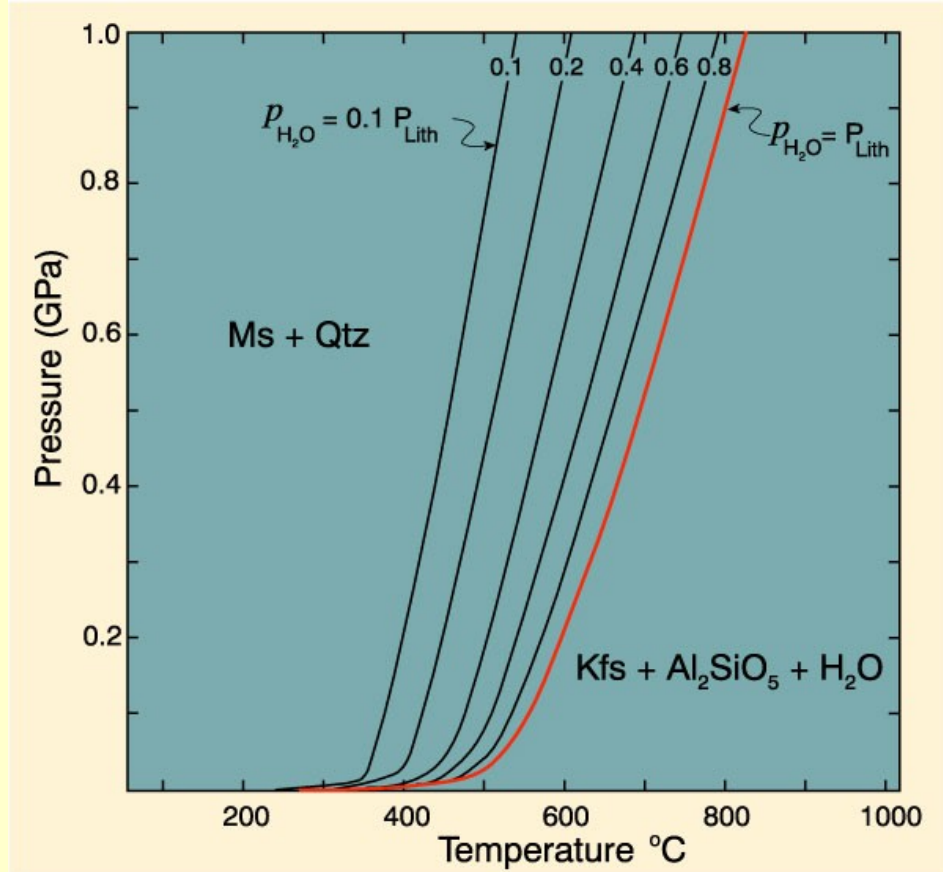
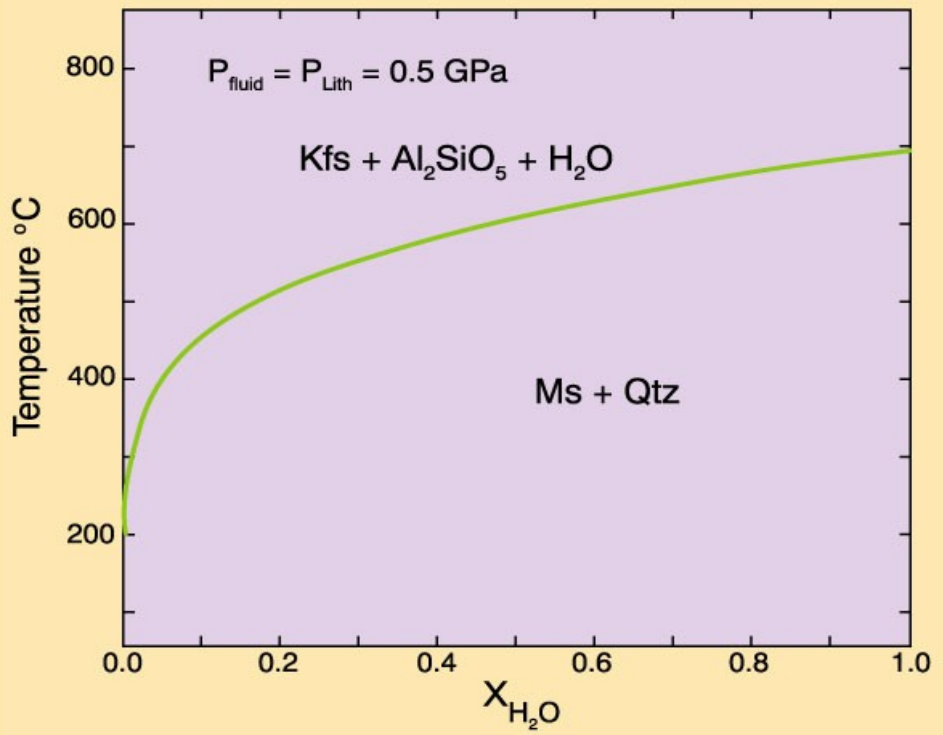


• **dehydratační reakce** (typická pro metapelitey):

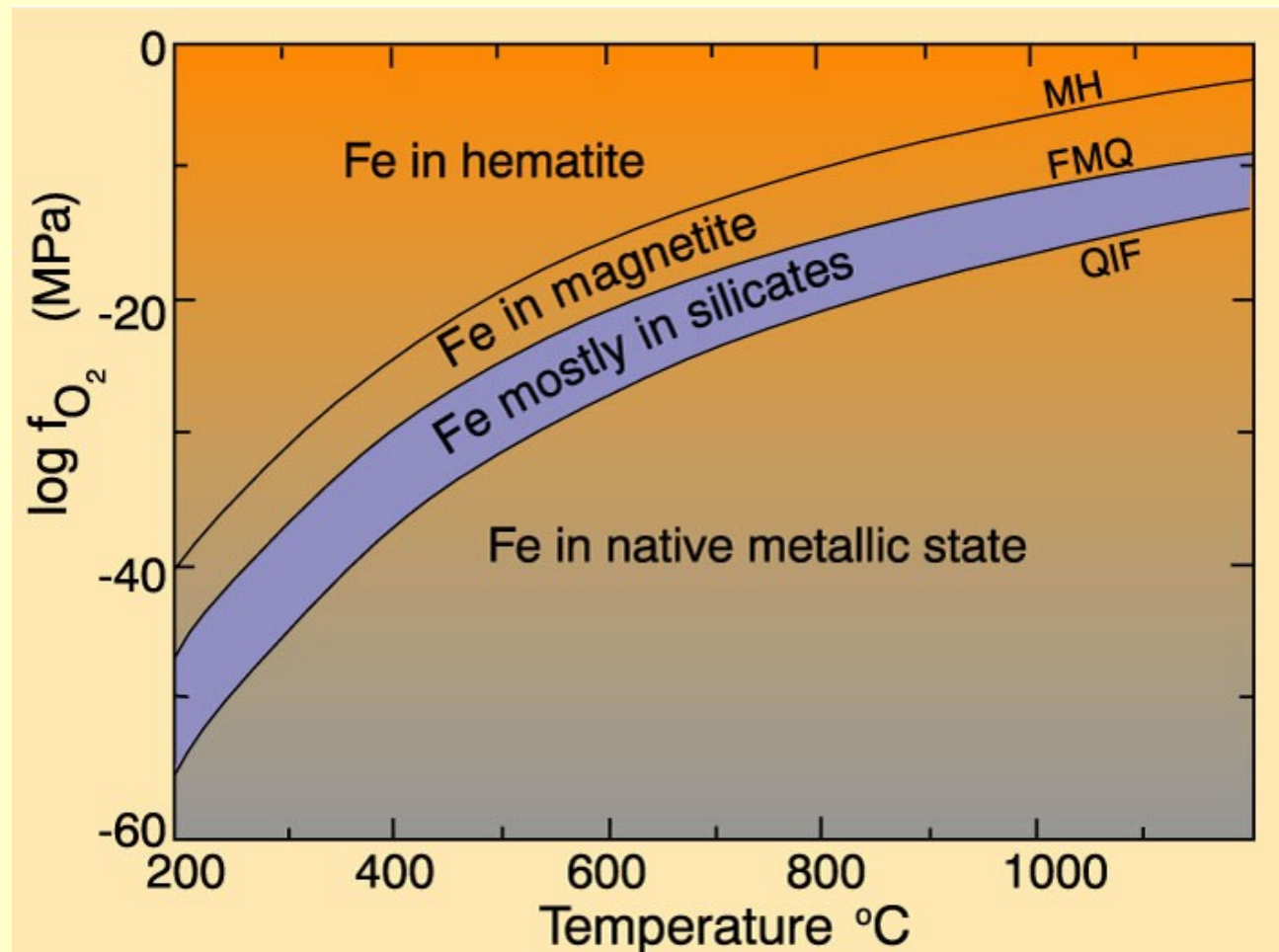
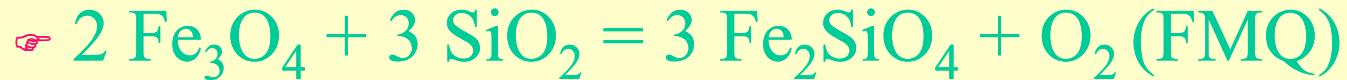


- závisí na parciální tlaku H_2O ($p_{\text{H}_2\text{O}}$)
- $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ system [$X_{\text{H}_2\text{O}} = \text{H}_2\text{O}/(\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2)$]
- fluidní fáze může obsahovat také další podstatné složky (F, Cl, B)

S poklesem obsahu x H2O je reakce tlačena do nižších teplot



D) Oxidačně – redukční reakce



Isobaric T-f_{O2} diagram showing the location of reactions (26-13) - (26-15) used to buffer oxygen in experimental systems. After Frost (1991), *Rev. in Mineralogy*, 25, MSA, pp. 469-488.

II. Anatexe (natavení)

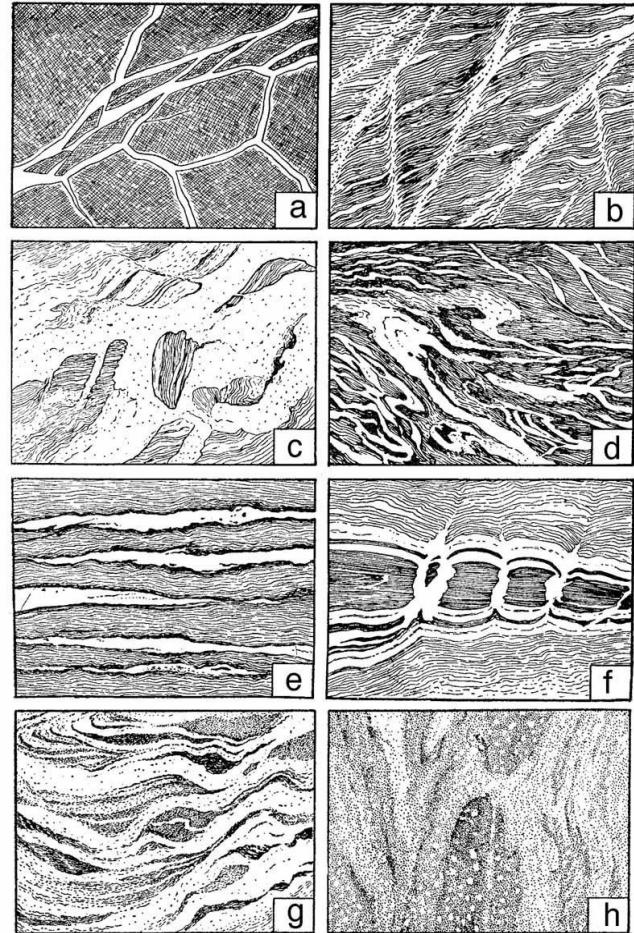


proces na rozhraní magmatických a metamorfních procesů, reakce produkující novou fází – taveninu

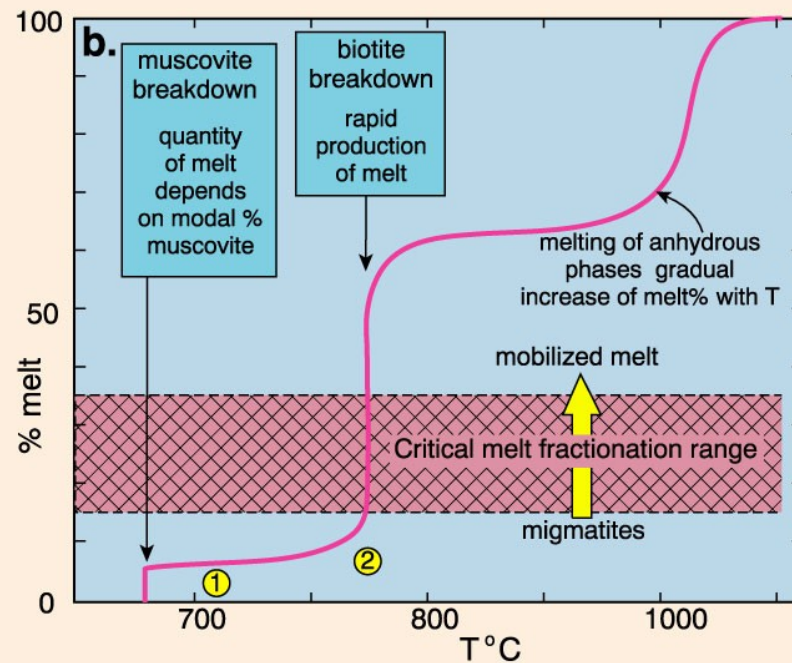
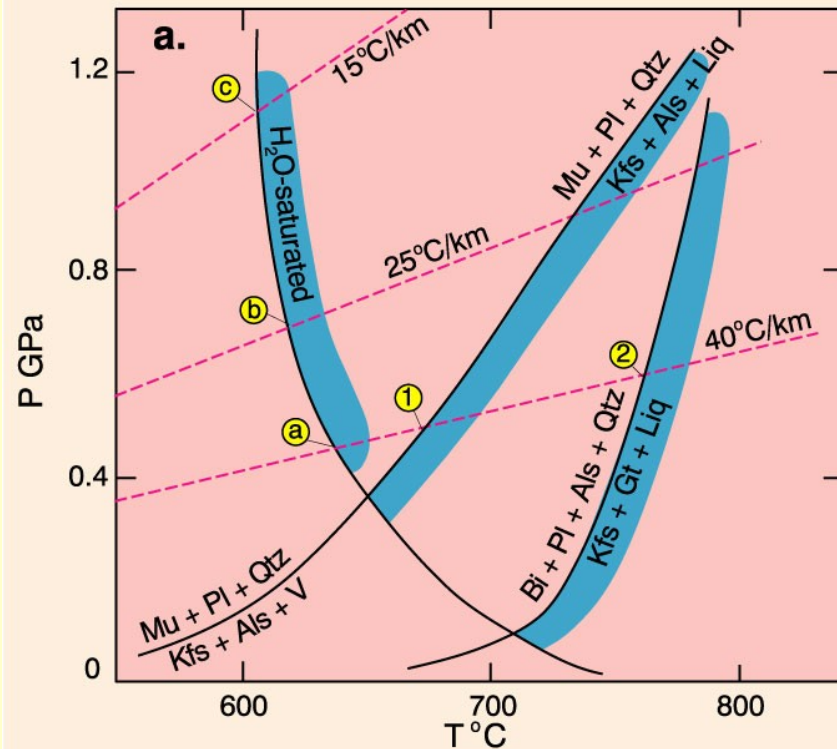
začátek tavení, množství a složení taveniny závisí na: **P, T, X** (složení protolitu), **obsahu a složení fluid (water-saturated vs. fluid-absent)**



- nejnižší T tavení – vodou nasycený granit (625 C/5 kbar)
- solidus bazických hornin za přebytku H_2O – cca 650 C ($P = 6$ kbar).
- při dehydratačním tavení produkován s taveninou Kfs + Opx, Grt, As

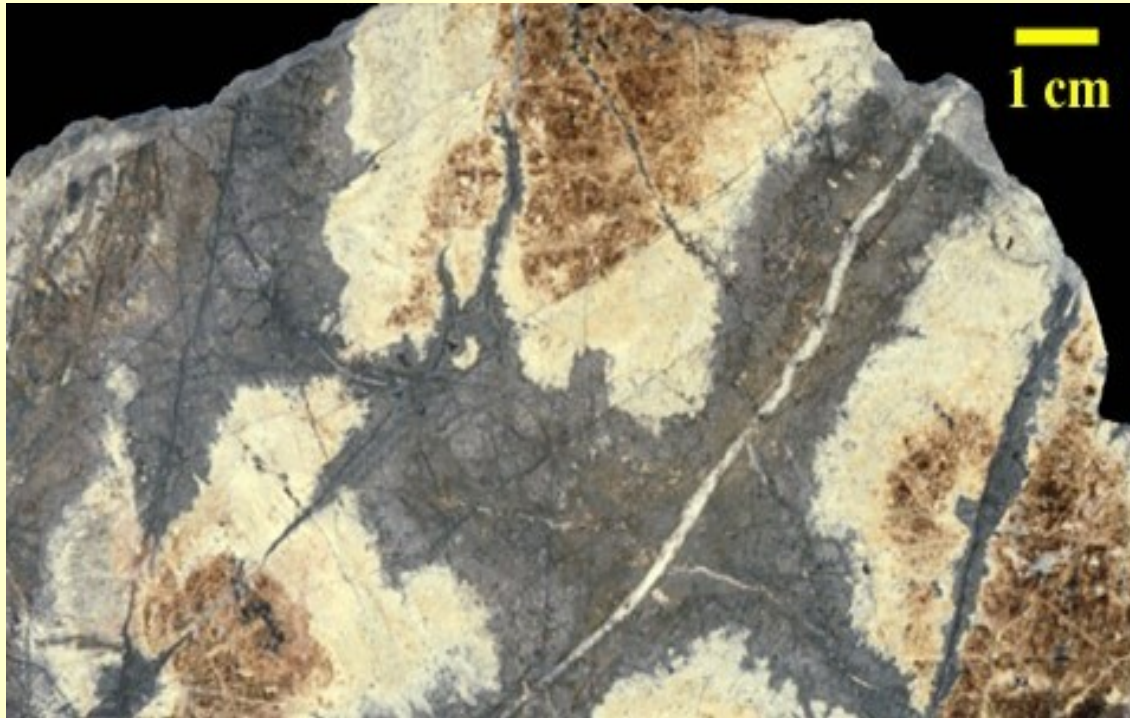


Some textures of migmatites.
 From Mehnert (1968) *Migmatites and the Origin of Granitic Rocks*. Elsevier.



Simplified P-T phase diagram and b. quantity of melt generated during the melting of muscovite-biotite-bearing crustal source rocks, after Clarke (1992) *Granitoid Rocks*. Chapman Hall, London; and Vielzeuf and Holloway (1988) *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98, 257-276. Shaded areas in (a) indicate melt generation. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

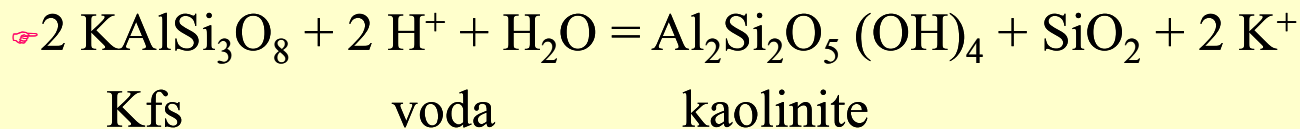
III. Metasomotóza

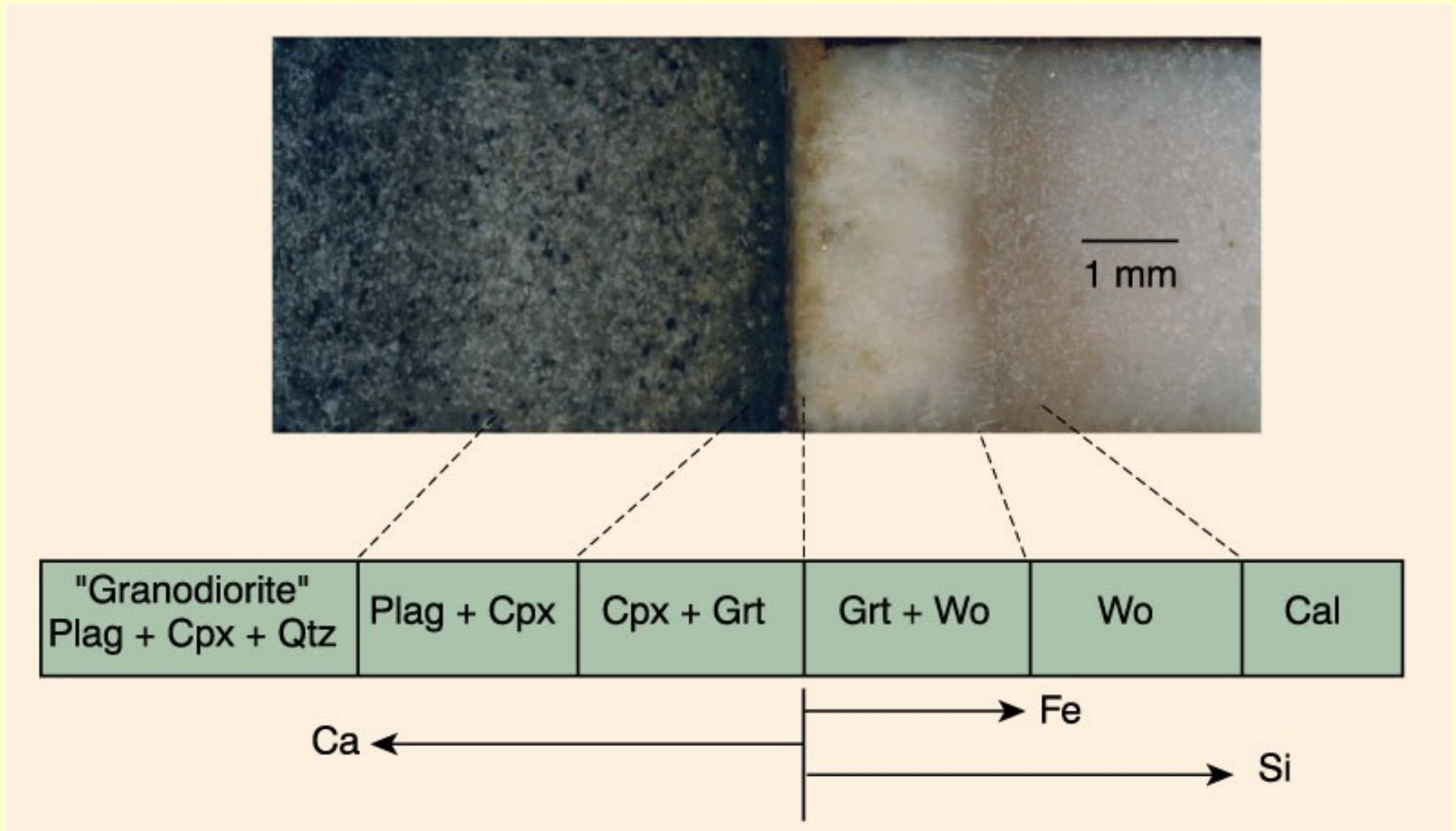


Petrogenetický pochod, při němž dochází k výměnným reakcím mezi látkami přinášnými z vnějších zdrojů a látkami původními.

- Výměnné reakce mezi látkami přinášnými fluidy z vnějších zdrojů (např. magma) a minerály v původní hornině.
- Postihuje: karbonátové horniny (skarny), ultrabazika (rodingity)
- Lokální rovnováhy

Některé minerály reagují s fluidy a vznikají nové minerální fáze





Zonation in an experimental skarn formed at the contact between granodiorite and limestone at 600°C, $P_{\text{fluid}} = 0.1 \text{ GPa}$ ($X_{\text{CO}_2} = 0.07$). After Zharikov, V.A. and G.P. Zاراisky (1991) Experimental modeling of wall-rock metasomatism. In L. L. Perchuck (ed.), *Progress in Metamorphic and Magmatic Petrology. A Memorial Volume in Honor of D. S. Korzhinskii*. Cambridge University Press. Cambridge, pp. 197-245. Photo courtesy G. Zاراisky. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

Literatura

- Dudek, A. - Fediuk F. - Palivcová M. (1962): Petrografické tabulky
- Hejtman, B. (1962): Petrografie metamorfovaných hornin
- Konopásek, J. – Štípská P. – Klápková H. – Schulmann K. (1998): Metamorfnní petrologie
- Naprostá většina obrazového materiálu pochází z celé řady internetových stránek věnujících se metamorfnní petrologii