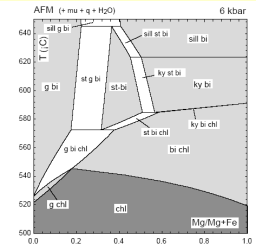
Petrologie G3021

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	SiO_2-Al_2O_3-K_2O-Na_2O-CaO-H_2O
-	metapelity	SiO_2-Al_2O_3-K_2O-MgO-FeO-H_2O
-	metabazity	SiO_2-Al_2O_3-Na_2O-MgO-FeO-H_2O
-	vápenatosilikátové horniny	SiO_2-Al_2O_3-K_2O-CaO-MgO-H_2O
-	metakarbonáty	MgO-CaO-SiO_2-CO_2-H_2O
-	ultramafity	SiO_2-MgO-CaO-CO_2-H_2O

jiné chemické systémy (méně časté)

-	cordierit-antofylitové horniny	SiO_2-Al_2O_3-MgO-FeO-H_2O
-	železná formace	SiO_2-FeO-Fe_2O_3-H_2O
-	manganolity, smirky	

jiná označení chemických systémů:

-	křemen-živcové horniny	NASH, CASH a CKNASH
-	metapelity	KMASH, KFASH a KFMASH
-	ultramafity	MS-H_2O-CO_2, CMS-H_2O-CO_2

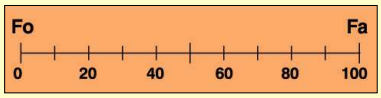
Znázornění chemického složení

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
En $MgSiO_3$ = 1 MgO + 1 SiO_2
Prp $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$ = 3MgO + 1Al_2O_3 + 3SiO_2

součet molárních zlomků = 1
MgO/(MgO+Al2O3) = 1/1+1 = 0,5
MgO/(MgO+Al2O3+SiO2) = 3/7
Al2O3 /(MgO+Al2O3+SiO2) = 1/7

- dvoukomponentní systém znázorňující složení olivínu

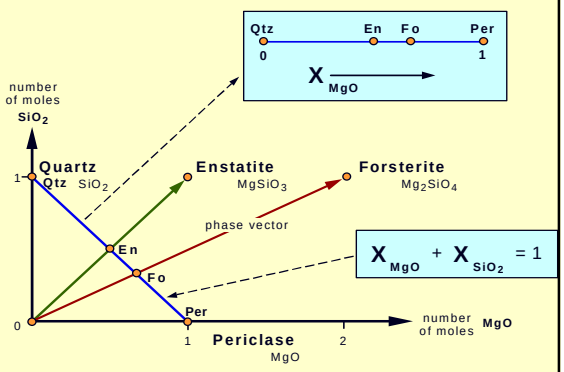


= Mg/(Mg+Fe)

Enstatit
$(Ca_{0.008}\ Mg_{1.839}\ Fe_{0.102}\ Mn_{0.002}\ Cr_{0.012}\ Al_{0.01}\ Fe^{3+}_{0.01})\ (Si_{1.972}\ Al_{0.028})O_6$

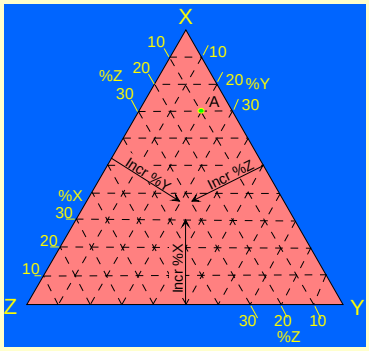
enstatit	$Mg_2Si_2O_6$		
			na 6 O
SiO_2	57,73	Si	1,972
TiO_2	0,04	Al	0,028
Al_2O_3	0,95	Al	0,01
Fe_2O_3	0,42	Ti	0,001
Cr_2O_3	0,46	Fe3+	0,01
FeO	3,57	Cr	0,012
MnO	0,08	Mg	1,839
NiO	0,35	Ni	0,01
MgO	36,13	Fe2+	0,102
CaO	0,23	Mn	0,002
Na_2O	-	Ca	0,008
K_2O	-	Na	-
H_2O+	0,52	K	-
H_2O-	0,04		
	100,52	Mg	93,9
		Fe	5,7
		Ca	0,4

Mg/(Mg+Fe)= 0,94
Mg/(Mg+Si)=0,48



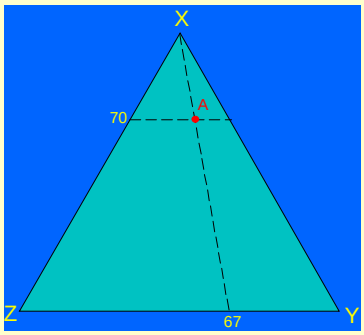
Ternární diagramy

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



Převzato z An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology, John Winter, Prentice Hall.

Metoda č. 2 : pro komponenty
70% X, 20% Y, a 10% Z
Postup:
10 + 20 = 30 = 100%
Y = 20 = 67%
Z = 10 = 33%

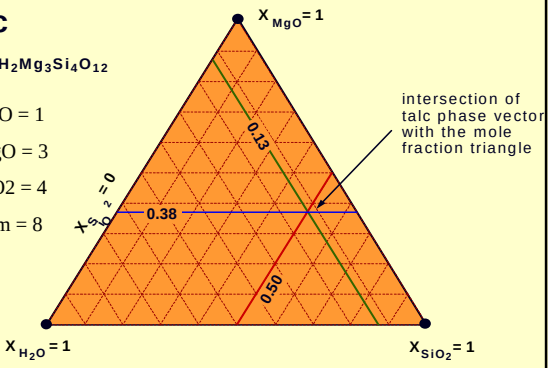


Převzato z An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology, John Winter, Prentice Hall.

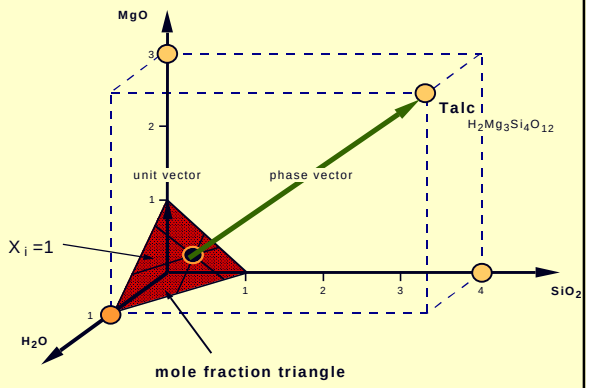
Talc

$H_2Mg_3Si_4O_{12}$

H2O = 1
MgO = 3
SiO2 = 4
Sum = 8



intersection of talc phase vector with the mole fraction triangle



Běžně užívané ternární diagramy

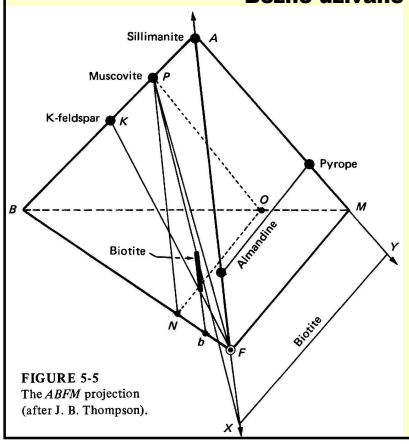


FIGURE 5-5
The *ABFM* projection (after J. B. Thompson).

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

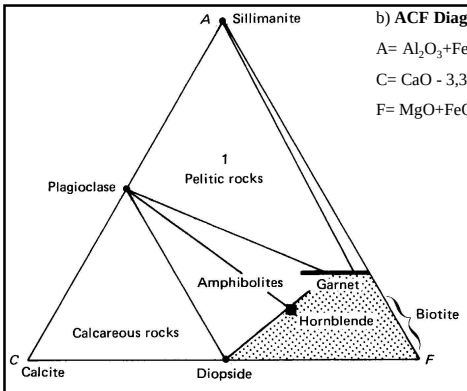
Metapelity

A=Al_2O_3

B=K_2O

F=FeO

M=MgO



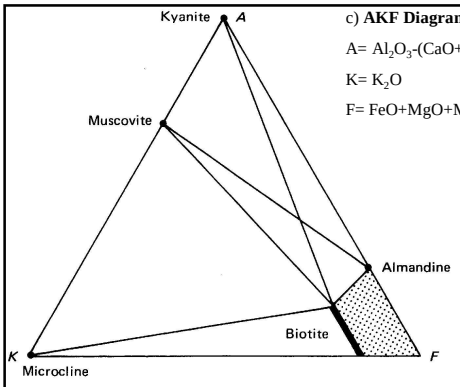
b) **ACF Diagram** (Eskola, 1900)

A= Al_2O_3+Fe_2O_3-(Na_2O+K_2O)

C= CaO - 3,3 P2O5

F= MgO+FeO+MnO

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)

A= Al_2O_3-(CaO+Na_2O+K_2O)

K= K_2O

F= FeO+MgO+MnO

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.

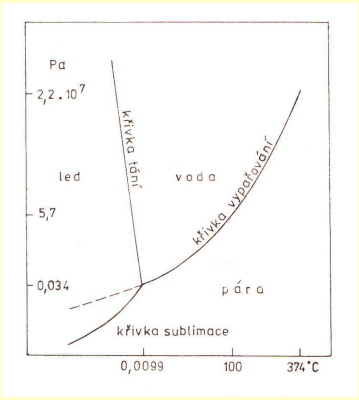
Fázové pravidlo

systém ⊃ **fáze** (**P**hase) ⊃ **složka** (**C**omponent)
⇓ ⇓ ⇓
hornina minerál (s, l, g) e.g. Al_2O_3

systém (hornina)
uzavřený - přes hranice systému může být přemísťována energie ale ne hmota
otevřený - hmota a energie mohou být přemísťovány přes hranice systému
fáze - fyzikálně oddělitelné části systému (pevné - minerál, kapalné, 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, Fe2O3, 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)
- **fáze** – minerál (P)
- **složky** – oxidy (C)
- proměnné **P, T, X** (chemické složení fází)
- při změně P či T – koexistující fáze již nejsou v rovnováze ⇒⇒ **metamorfní reakce**

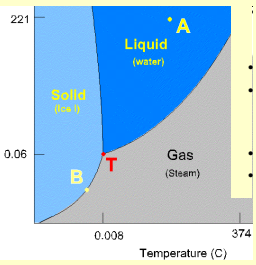
Příklad použití fázového pravidla



Příklad

$F = C + 2 - P$

$C = 1 (H_2O)$



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

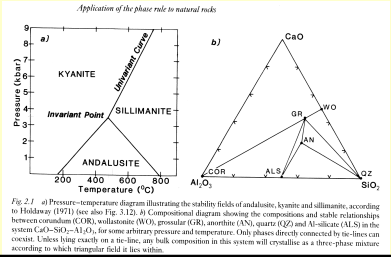


Fig. 2.1 a) Pressure–temperature diagram illustrating the stability fields of andalusite, kyanite and sillimanite, according to Holdaway (1971) (see also Fig. 3.12). b) Compositional diagram showing the compositions and stable relationships between corundum (COR), wollastonite (WO), grossular (GR), anorthite (AN), quartz (QZ) and Al-silicate (ALS) in the system CaO–SiO_2–Al_2O_3, 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:

$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$

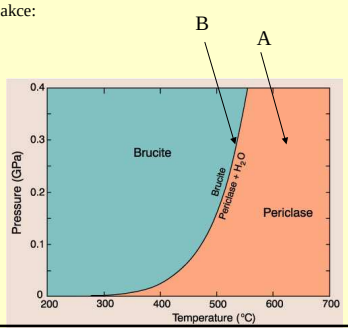
Per + Fluid = Bru

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

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

A) Per + H_2O = 2 = 2+2-2

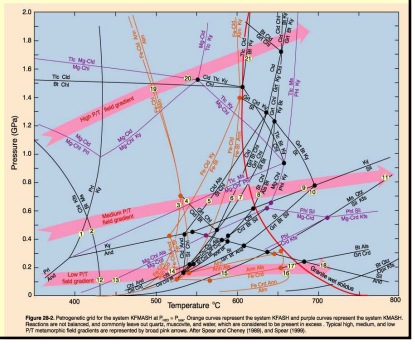
B) Per + H_2O + Bru = 1 = 2+2-3



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

Petrogenetické mřížky - definice

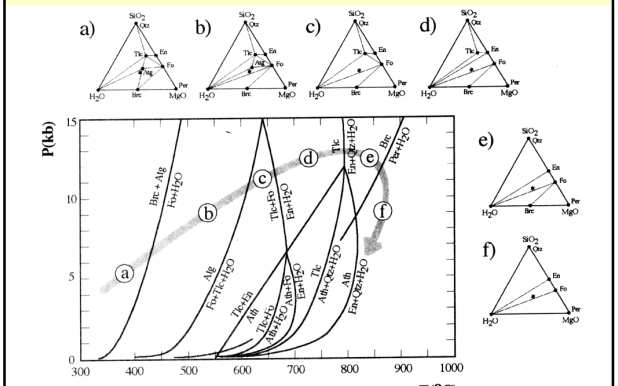
- shrnutí možných invariantních bodů a mezi nimi ležících reakcí v určeném chemickém systému
- založeny na experimentech, nebo termodynamické výpočty
- možnost umístění zjištěných minerálních asociací do specifických P-T polí
- lze sledovat vývoj horniny v P-T dle pozice pozorovaných reakcí
- důležité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



Rocks as Chemical Systems

rock type	*system*	*system acronym*
quartzite	SiO_2	S
quartzite	SiO_2 - H_2O	SH
metabauxite	Al_2O_3 - H_2O	AH
iron formation	FeO - SiO_2 - H_2O	FSH
siliceous bauxite	Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O	ASH
metaperidotite	MgO - SiO_2 - H_2O	MSH
haplogranite	$KAlSi_3O_8$ - $NaAlSi_3O_8$ - SiO_2	KNAS
iron formation	FeO - SiO_2 - H_2O - O_2	FSHO
carbonated BIF	FeO - SiO_2 - CO_2 - H_2O	FSCH
limestone	CaO - SiO_2 - CO_2 - H_2O	CSCH
whiteschist	MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O	MASH
metabauxite	K_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O	KASH
dry metaperidotite	CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2	CMAS
haplogranite	$KAlSi_3O_8$ - $NaAlSi_3O_8$ - SiO_2 - H_2O	KNASH
metagranite	K_2O - Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O	KNASH
dry metabasalt	CaO - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2	CMFAS
siliceous dolomite	CaO - MgO - SiO_2 - CO_2 - H_2O	CMSCH
haplopelite	K_2O - FeO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O	KMASH
metaperidotite	CaO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O	CMASH
metabauxite	K_2O - Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O	KASH
metapelite	K_2O - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O	KFMASH
metagranite	K_2O - Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O	KNASH
haplo-amphibolite	CaO - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O	CFMASH
amphibolite	Na_2O - CaO - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O	NCFMASH
most rocks	K_2O - Na_2O - CaO - FeO - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - CO_2 - H_2O - O_2	

Celkové složení horniny a petrogenetická mřížka



petrogenetická mřížka pro systém SiO_2-MgO-H_2O pro metamorfované ultrabazické horniny

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:

$A = Al_2O_3 + Fe_2O_3 - Na_2O - K_2O$

$C = CaO - 3{,}3\ P_2O_5$

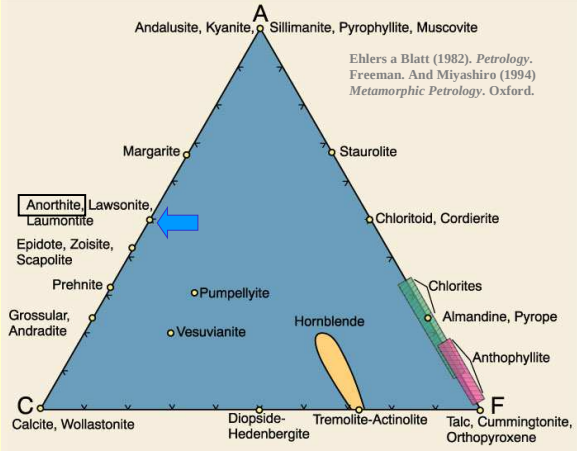
$F = FeO + MgO + MnO$

- Při vynášení koncových členů minerálů postupujeme takto:
- Anortit $CaAl_2Si_2O_8$
- A = 1 + 0 - 0 - 0 = 1, C = 1 - 0 = 1, F = 0
- celkem 2 ⇒ provedeme normalizaci na **1** a výsledkem pak je:

  A = 0.5

  C = 0.5

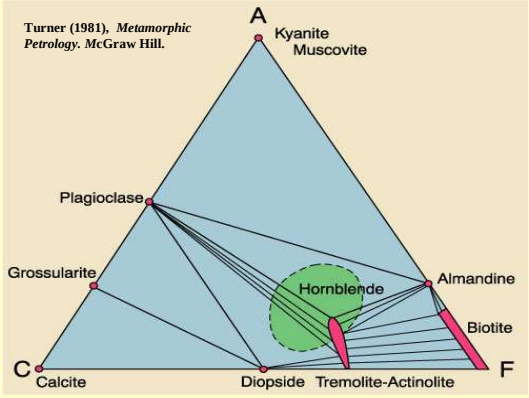
  F = 0



- **1) horniny** – celkový chemismus ze silikátové analýzy
- *korekce 1. - odpočet FeO, Fe_2O_3, CaO v akcesoriích (Mt, Ilm, Ttn)*
- 2) váhová procenta kysličníků / molekulární hmotnost = molekulární proporce (kvocienty)
- *korekce 2. – odpočet 3,3 x P_2O_5 (Apa) od CaO a* **Na_2O+K_2O** *od* Al_2O_3+Fe_2O_3

amfibolit					
	hm %	molekulová	molekulární		
	(wt %)	hmotnost	kvocient	A,C,F	
SiO_2	**48,09**	60	***0,8***		
TiO_2	1,57	80	0,02		
Al_2O_3	**15,16**	75	**0,2**	0,22-0,05	A=26
Fe_2O_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_2O	2,65	62	0,04		
K_2O	0,93	94	0,01		
H_2O+	1,44				
H_2O-	0,24				
P_2O_5	0,22	142	0		
CO_2	-				
Suma	99,74				100

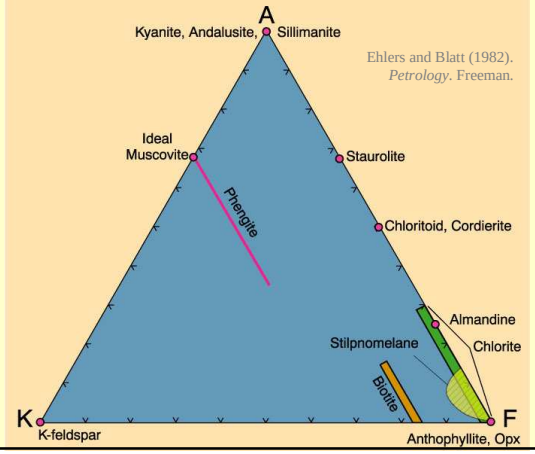
ACF diagram, pro určité PT podmínky (kyanitová zóna)



AKF diagram

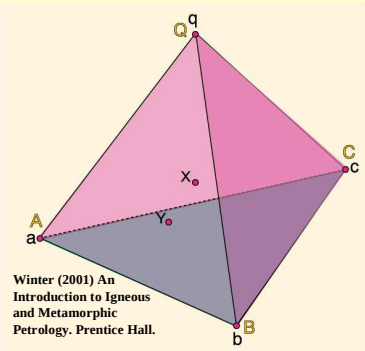
Protože **pelitické** sedimenty mají vysoké obsah Al_2O_3, K_2O, a naopak nízké obsahy CaO navrhl Eskola diagram který K_2O obsahuje AKF

$A = Al_2O_3 + Fe_2O_3 - Na_2O - K_2O - CaO$
$K = K_2O$
$F = FeO + MgO + MnO$



Zobrazení čtyř-komponentního systému

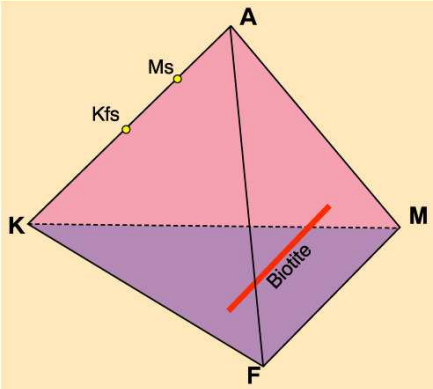
V systému ABCQ zobrazíme složky:
- X (ABCQ)
- Y (A_2B_2CQ)



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

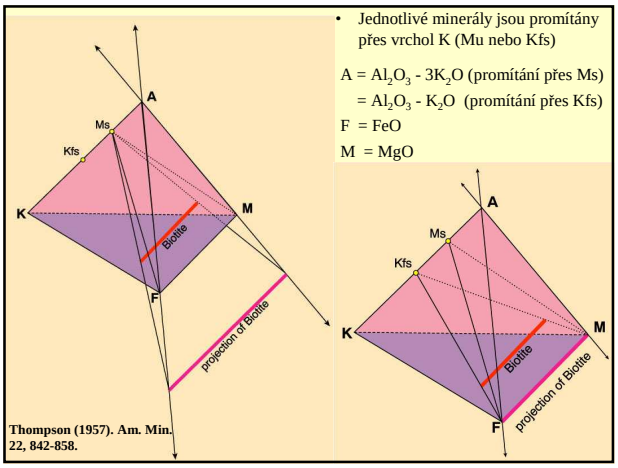
A(K)FM Diagram

$A = Al_2O_3$
$K = K_2O$
$F = FeO$
$M = MgO$



Minerály

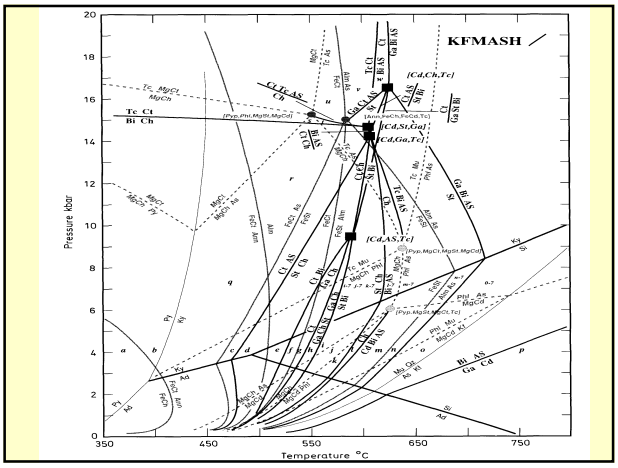
- V metapelitech 3 min. obsahují K_2O (Ms, Bt, Kfs)
- Almandin: $Fe_3\ Al_2\ [SiO_4]_3$ - Granát: $A^{2+}_3\ B^{3+}_2\ [SiO_4]_3$
- Muskovit: $K\ Al_2\ [Si_3AlO_{10}]\ (OH)_2$
- Flogopit: $K\ Mg_3\ [Si_3AlO_{10}]\ (OH)_2$
- Chlorit: $(Mg, Fe)_3\ [(Si, Al)_4O_{10}]\ (OH)_2\ (Mg, Fe)_3\ (OH)_6$
- Albit: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



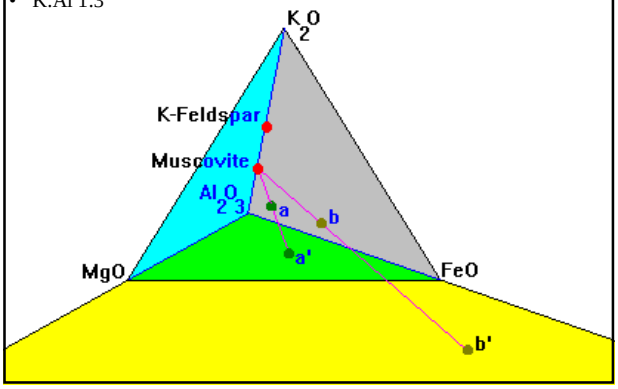
- Jednotlivé minerály jsou promítány přes vrchol K (Mu nebo Kfs)

$A = Al_2O_3 - 3K_2O$ (promítání přes Ms)
$= Al_2O_3 - K_2O$ (promítání přes Kfs)
F = FeO
M = MgO

Thompson (1957). Am. Min. 22, 842-858.

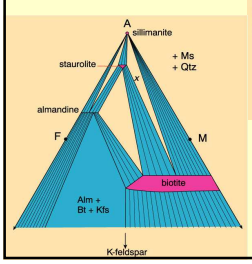


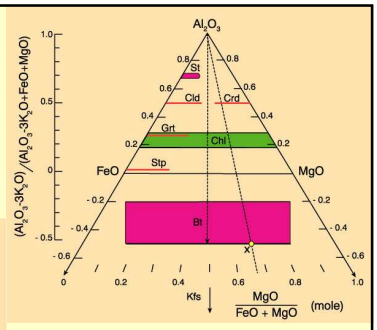
- **Muskovit: $K\ Al_2\ [Si_3AlO_{10}]\ (OH)_2$**
- do teplot kolem 750°C
- K:Al 1:3



Biotit (Ms): $KMg_2FeSi_3AlO_{10}(OH)_2$

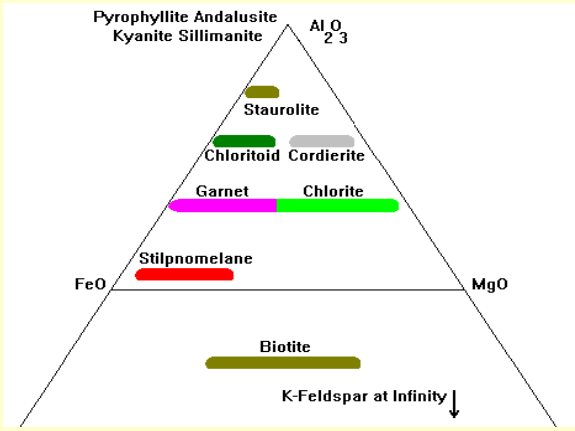
A = 0.5 - 3 * 0.5 = - 1
F = 1
M = 2
-1/(2 + 1 - 1) = -1/2 = -0.5
A = -0.5
F = 0.5
M = 1



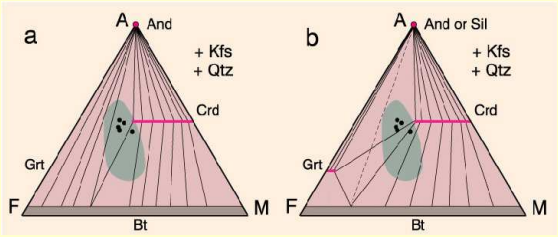


- Almandin: $Fe_3\ Al_2\ [SiO_4]_3$ - Garnát: $A^{2+}_3\ B^{3+}_2\ [SiO_4]_3$
- Muskovit: $K\ Al_2\ [Si_3AlO_{10}]\ (OH)_2$
- Flogopit: $K\ Mg_3\ [Si_3AlO_{10}]\ (OH)_2$
- Chlorit: $(Mg, Fe)_3\ [(Si, Al)_4O_{10}]\ (OH)_2\ (Mg, Fe)_3\ (OH)_6$
- Albit: $NaAlSi_3O_8$

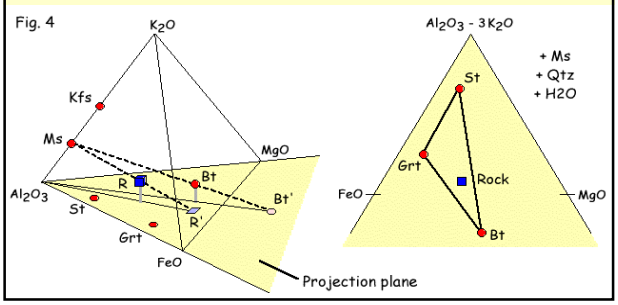
- Minerál **(Ms)**
- 1) oxidy přepočítat na molární hmotnostní kvoc. a na procenta (celek 100%)
- 2) F= X FeO
- 3) M = X MgO (1-XFeO)
- A = St ⇒(A12O3)/ (A12O3+FeO+MgO);
- Bt ⇒ (Al2O3/2) – (3*(K2O/2)/((Al2O3/2)+ FeO+MgO) – (3*(K2O/2))



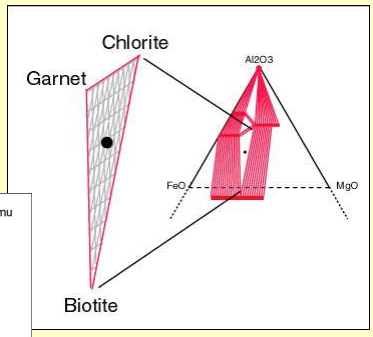
- **Draselný živec: $KAlSi_3O_8$**
- od teplot kolem 750°C
- K:Al 1:1

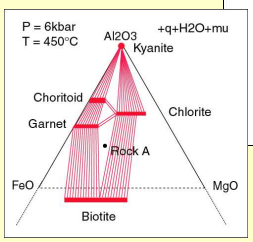


- Hornina **(Ms)**
- 1) oxidy přepočítat na molární hmotnostní kvoc. a na procenta (celek 100%)
- nutná korekce na plagioklas
- 2) F= X FeO
- 3) M = X MgO (1-XFeO)
- 4) A = (Al2O3 – 3*K2O-Na2O)/(Al2O3- 3*K2O-Na2O+FeO+MgO)

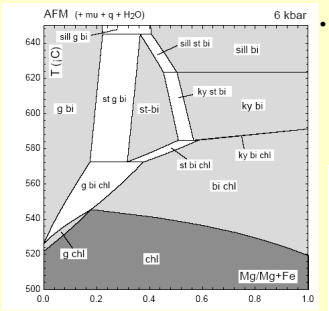


V metapelitu o vyznačeném chemickém složení bude stabilní minerální asociace Grt+Bt+Chl

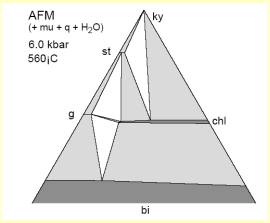


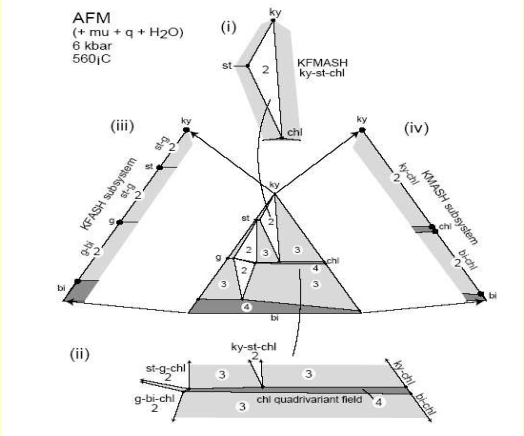


P-X a T-X řezy

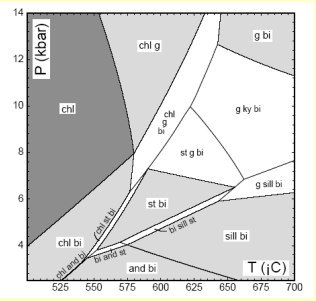


- **používají se k zobrazení fázových změn v horninách s různým chemickým složení za konstantního tlaku nebo teploty.**





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.**

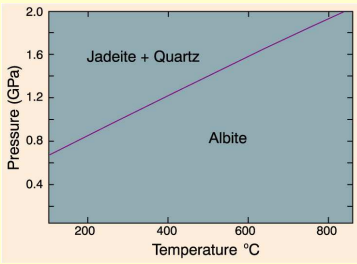
I. Metamorfní reakce

A) Diskontinuální

Univariantní reakce

zánik minerálu nebo minerální asociace a krystalizace ⇒ stabilizace nové

rovnováha reaktantů a produktů jen na univariantní křivce



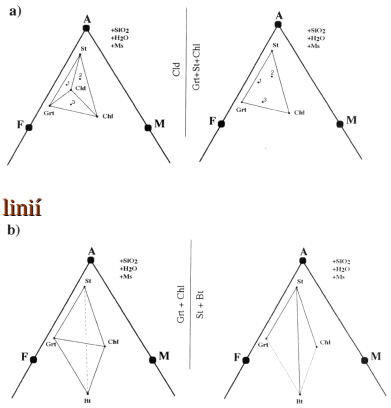
- $NaAlSi_2O_6 + SiO_2 = NaAlSi_3O_8$ (Jd, Qtz, Ab)
- $MgSiO_3 + CaAl_2Si_2O_8 = CaMgSi_2O_6 + Al_2SiO_5$ (En, An, Di, And)
- $4\,(Mg,Fe)SiO_3 + CaAl_2Si_2O_8 = (Mg,Fe)_3Al_2Si_3O_{12} + Ca(Mg,Fe)Si_2O_6 + SiO_2$
- Opx, Plag, Grt, Cpx, Qtz

terminálová reakce

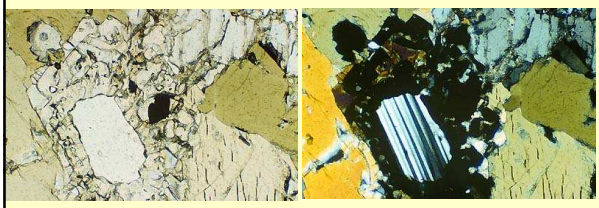
reaktant či produkt 1 fáze (1 fáze zmizí nebo se v systému naopak objeví)

křížení spojovacích linií

reaktant a produkt 2 fáze

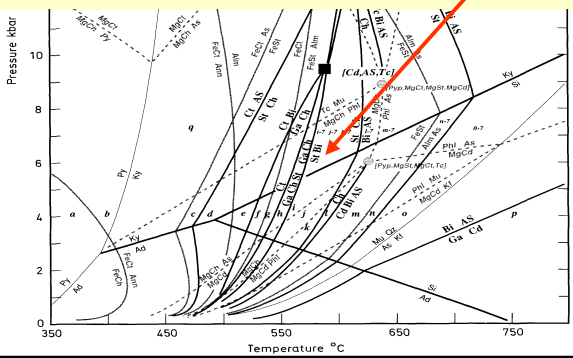


- **Reakční koróny**
- vznikají kolem minerálů, které jsou v minerální asociaci dané horniny nestabilní. Právě koróna uchránila tento minerál před přeměnou.

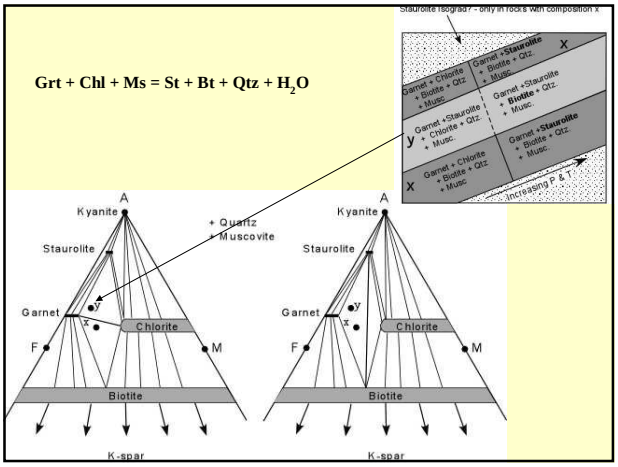


1) Koróna vznikla mezi plagioklasem a amfiboly obklopujícími plagioklasové zrno. Rovnoběžné a zkřížené nikoly

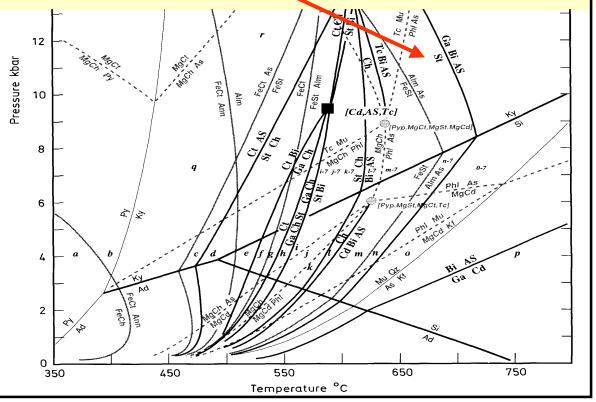
Grt + Chl + Ms = St + Bt + Qtz + H_2O



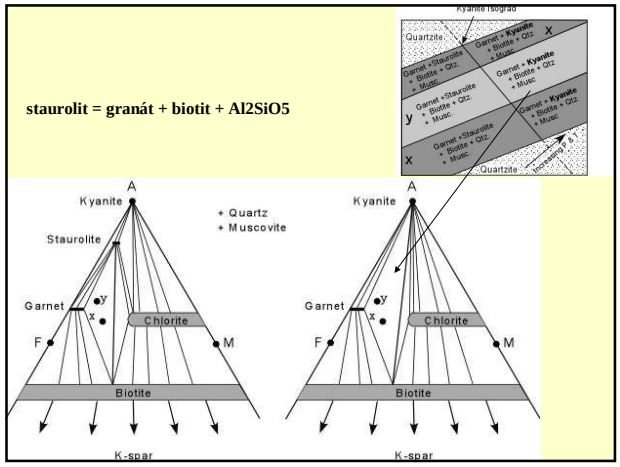
Grt + Chl + Ms = St + Bt + Qtz + H_2O

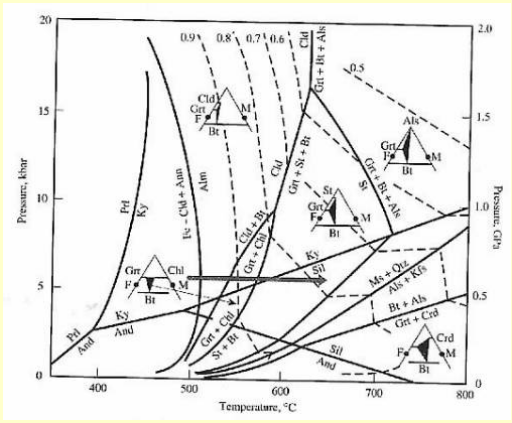


staurolit = granát + biotit + Al2SiO5

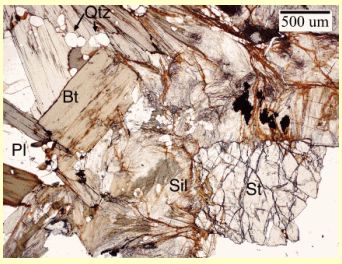


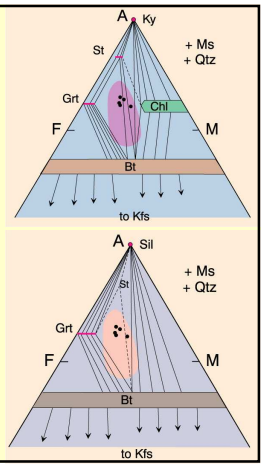
staurolit = granát + biotit + Al2SiO5





- **staurolit = granát + biotit + Al2SiO5 (sillimanit)**



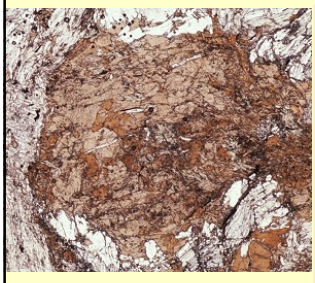


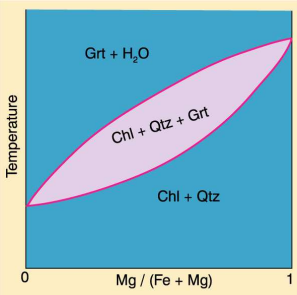
B) Kontinuální reakce

Divariantní reakce

– Chl + Ms + Qtz → Grt + Bt + H_2O

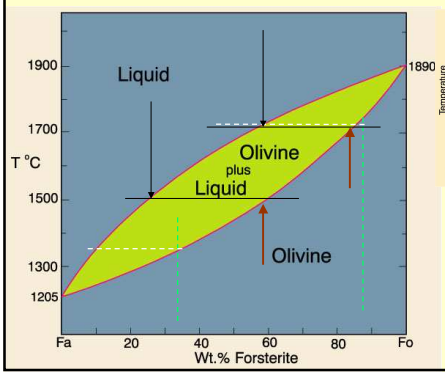
– Chl + Cld + Qtz → Grt + H_2O

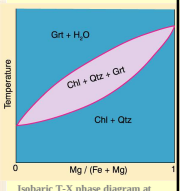




✓mění se chemické složení zúčastněných minerálů (vzájemná konzumace)

⇒ 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.

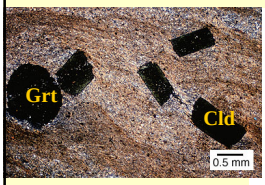
kontinuální reakce - nejčastější substituce $FeMg_{-1}$

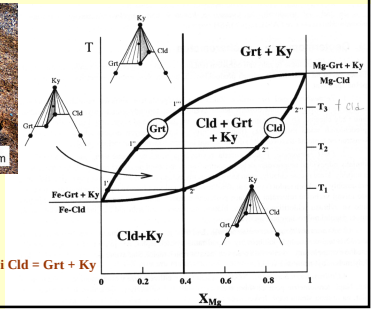
posun dílčích trojúhelníků s měnícími se P-T podmínkami k vrcholu F či M

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

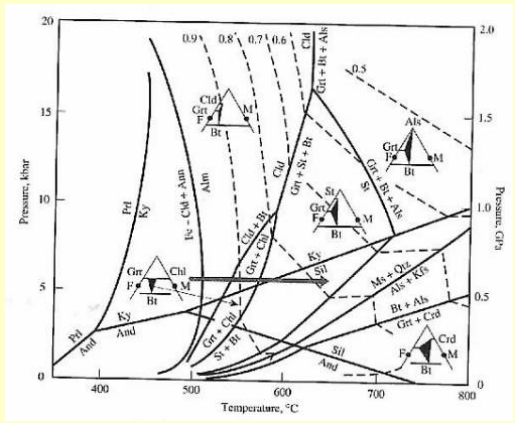
$$X_{Mg}^{Crd} > X_{Mg}^{Chl} > X_{Mg}^{Bt} > X_{Mg}^{Cld} > X_{Mg}^{St} > X_{Mg}^{Grt}$$

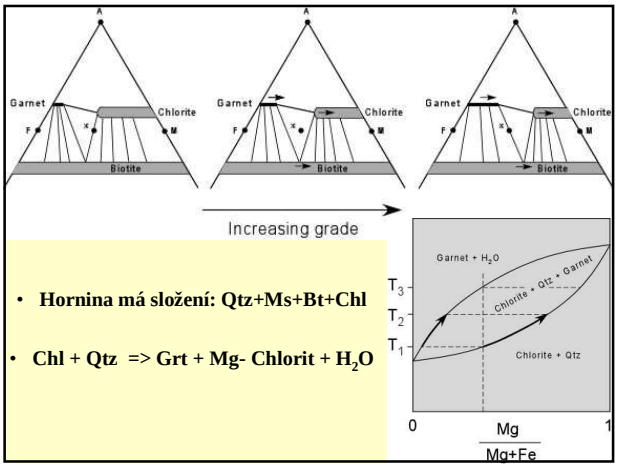
(viz pozice v AFM)





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



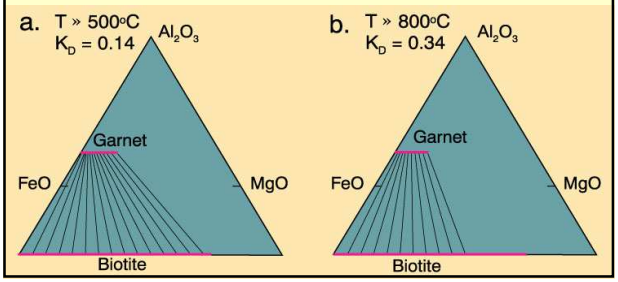


- **Hornina má složení: Qtz+Ms+Bt+Chl**
- **Chl + Qtz => Grt + Mg- Chlorit + H_2O**

$$MgSiO_3 + CaFeSi_2O_6 = FeSiO_3 + CaMgSi_2O_6$$

Annite + Pyrope = Phlogopite + Almandine

- Mg-Fe substituce
- oba minerály mají Mg a Fe komponentu ⇒ geotermometry



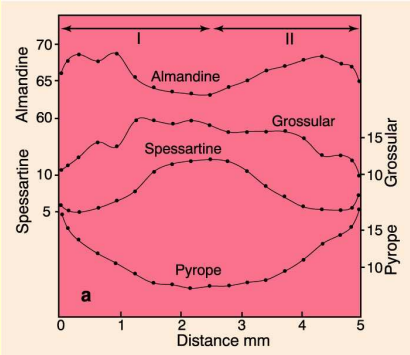
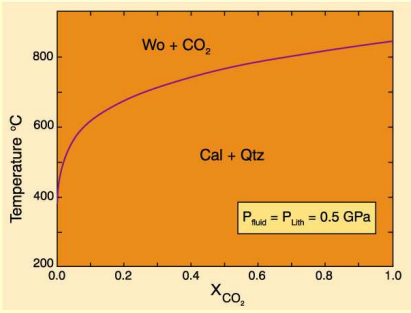


Fig. 25-13a. Chemical zoning profiles across a garnet from the Tauern Window. After Spear (1989)

C) Devolatilizační reakce

(dehydratační a dekarbonační reakce)

- pro většinu hornin postačuje system H_2O-CO_2



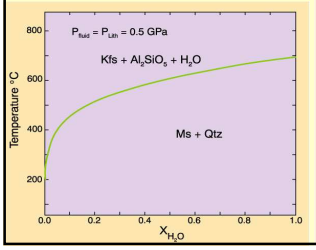
Pro karbonátoví horniny jsou důležité dekarbonační reakce

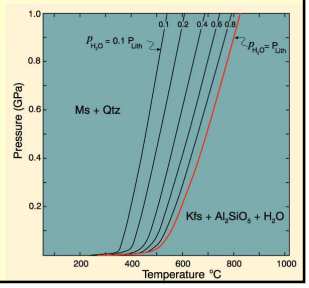
$CaCO_3 + SiO_2 = CaSiO_3 + CO_2$

- dehydratační reakce (typická pro metapelity):

- $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2 + SiO_2 = KAlSi_3O_8 + Al_2SiO_5 + H_2O$
- Ms Qtz Kfs Sill W
- závisí na parciálním tlaku H_2O (p_{H2O})
- H_2O-CO_2 system [$XH_20 = H_2O/(H_2O + CO_2)$]
- fluidní fáze může obsahovat také další podstatné složky (F, Cl, B)

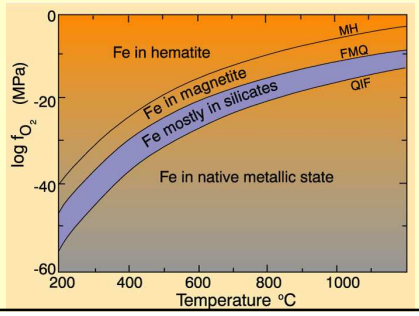
S poklesem obsahu x H2O je reakce tlačena do nižších teplot





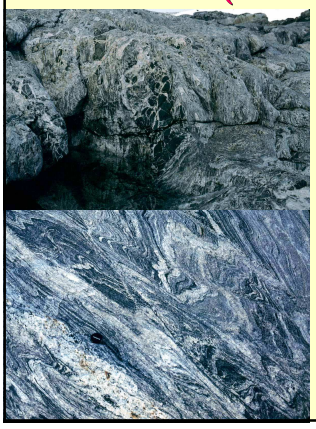
D) Oxidačně – redukční reakce

- $6\ Fe_2O_3 = 4\ Fe_3O_4 + O_2$ (MH)
- $2\ Fe_3O_4 + 3\ SiO_2 = 3\ Fe_2SiO_4 + O_2$ (FMQ)

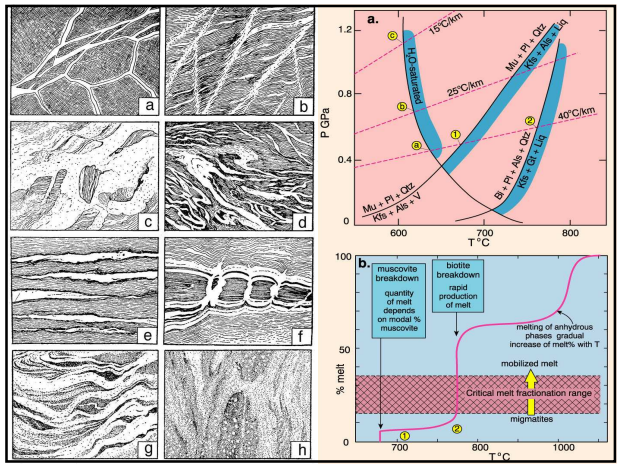


Isobaric T-f_{O2} diagram showing the location of reactions (26-13) - (26-15) used to buffer oxygen in experimental systems. After Frost (1991), *Rev. in Mineralogy*, 25, MSA, pp. 469-488.

II. Anatexe (natavení)



- proces na rozhraní magmatických a metamorfních procesů, reakce produkující novou fázi – 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



III. Metasomotóza

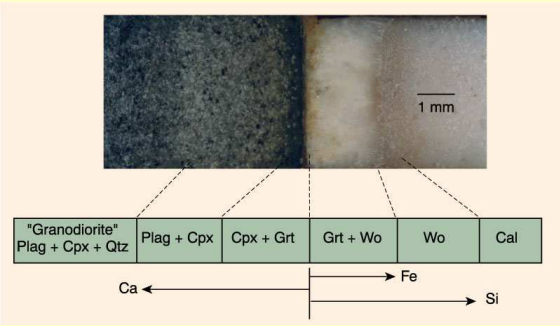
Petrogenetický pochod, při němž dochází k výměnným reakcím mezi látkami přinášenými z vnějších zdrojů a látkami původními.

- Výměnné reakce mezi látkami přinášenými 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

$2\ KAlSi_3O_8 + 2\ H^+ + H_2O = Al_2Si_2O_5(OH)_4 + SiO_2 + 2\ K^+$

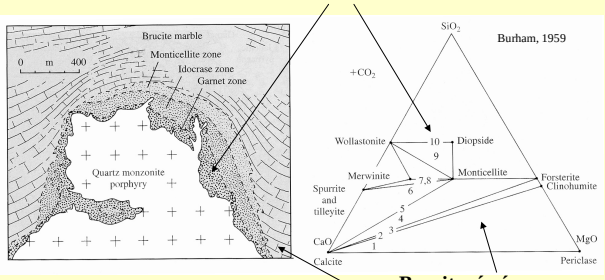
Kfs voda kaolinit



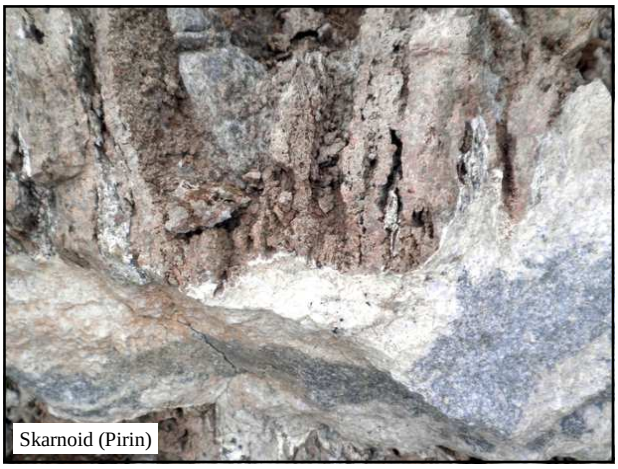
Zonation in an experimental skarn formed at the contact between granodiorite and limestone at 600°C, P_{fluid} = 0.1 GPa (X_{CO2} = 0.07). After Zharikov, V.A. and G.P. Zaraisky (1991) Experimental modeling of wall-rock metasomatism. In L. L. Perchuck (ed.), *Progress in Metamorphic and Magmatic Petrology. A Memorial Volume in Honor of D. S. Korzhinskii.* Cambridge University Press. Cambridge, pp. 197-245. Photo courtesy G. Zaraisky. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

Metasomatóza

Granátová zóna (Grt + Di + Wol)



Brucitová zóna (Cal + Br + Clhm + Sp)



Skarnoid (Pirin)

Literatura

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