

G4021 Magmatická a metamorfní petrologie

5. P-T-t dráhy v metamorfovaných horninách

• **Připomenutí:**

- **typy metamorfních změn:**

- 1) **metamorfní krystalizace**

- 2) **texturní změny**

- 3) **chemické složení**

- **chemické reakce a fázové změny – progradní, retrogradní**

- **minerální asociace**

- **deformace (zóny velké a malé deformace)**

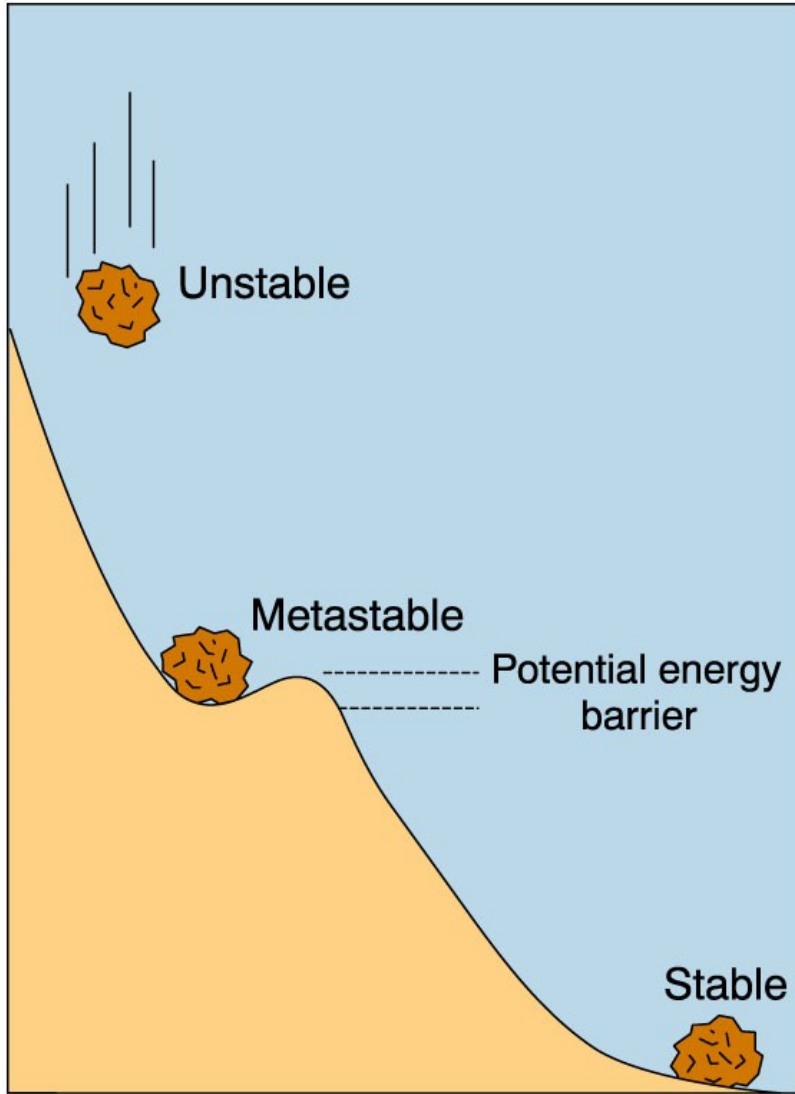
- **Metody:**

- 1) **nutné detailní studium výbrusů**

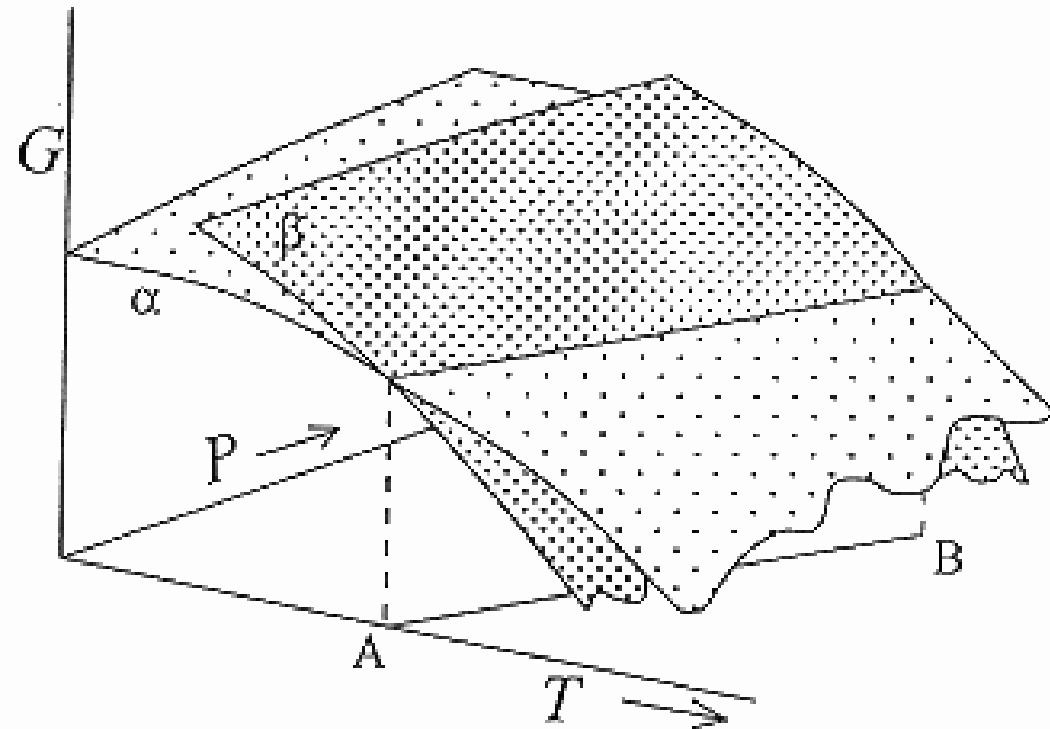
- 2) **zjištění chemického složení minerálů – elektronová mikrosonda**

- 3) **chemického složení horniny**

I. Termodynamika

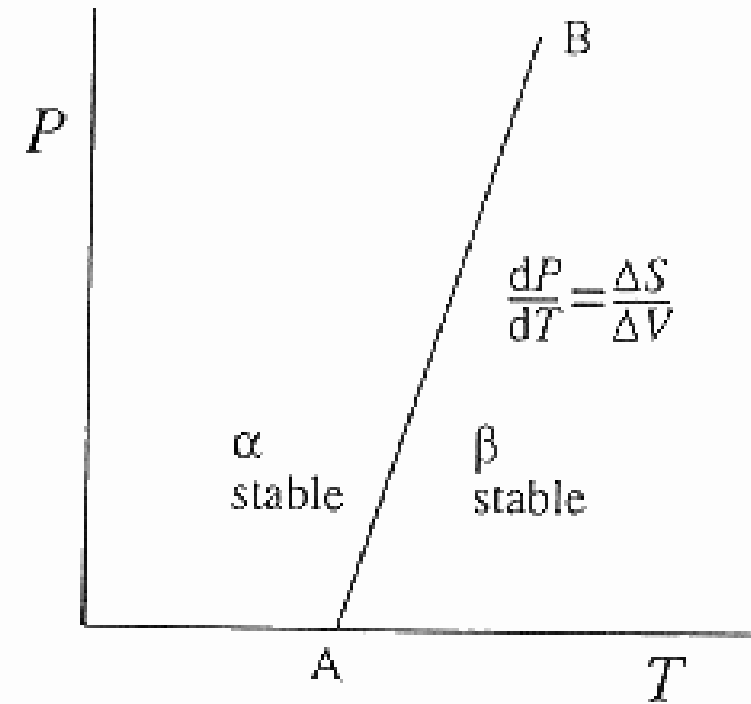


- Přírodní systémy směřují do stavu s minimální vnitřní energií.



(a)

Figure 10-7



(b)

$$G = H - TS$$

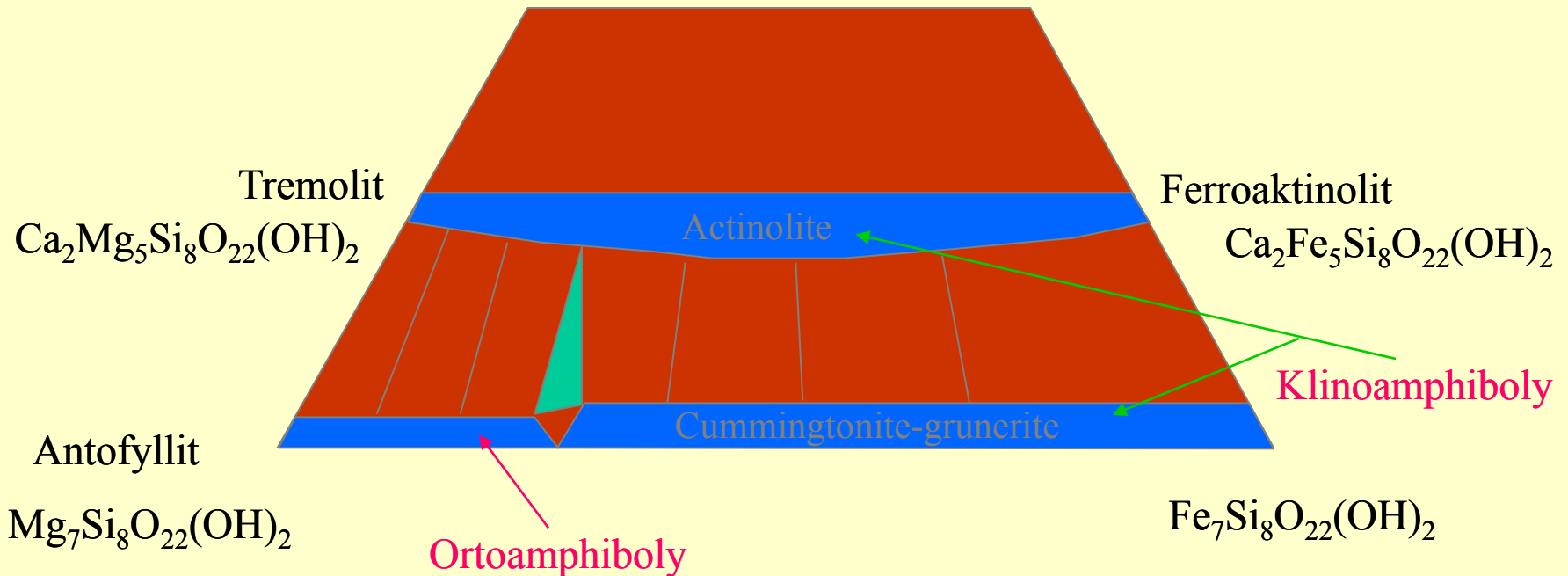
G = Gibbsova volná energie

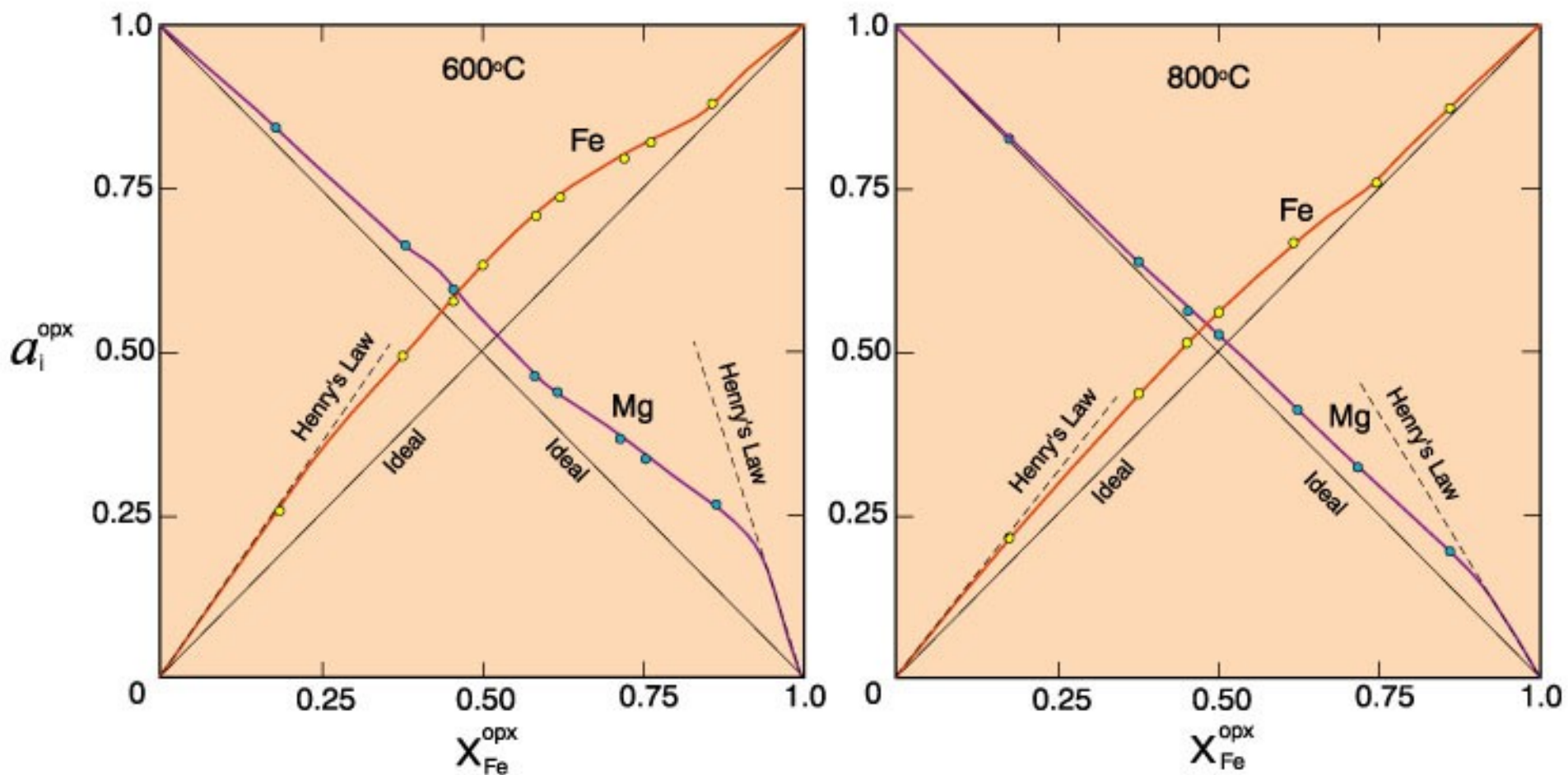
H = Entalpie

T = Teplota (Kelviny)

S = Entropie

- Pevné roztoky
- Řada minerálů tvoří plynulé přechody
- substituce
- ortopyroxeny $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{SiO}_3$

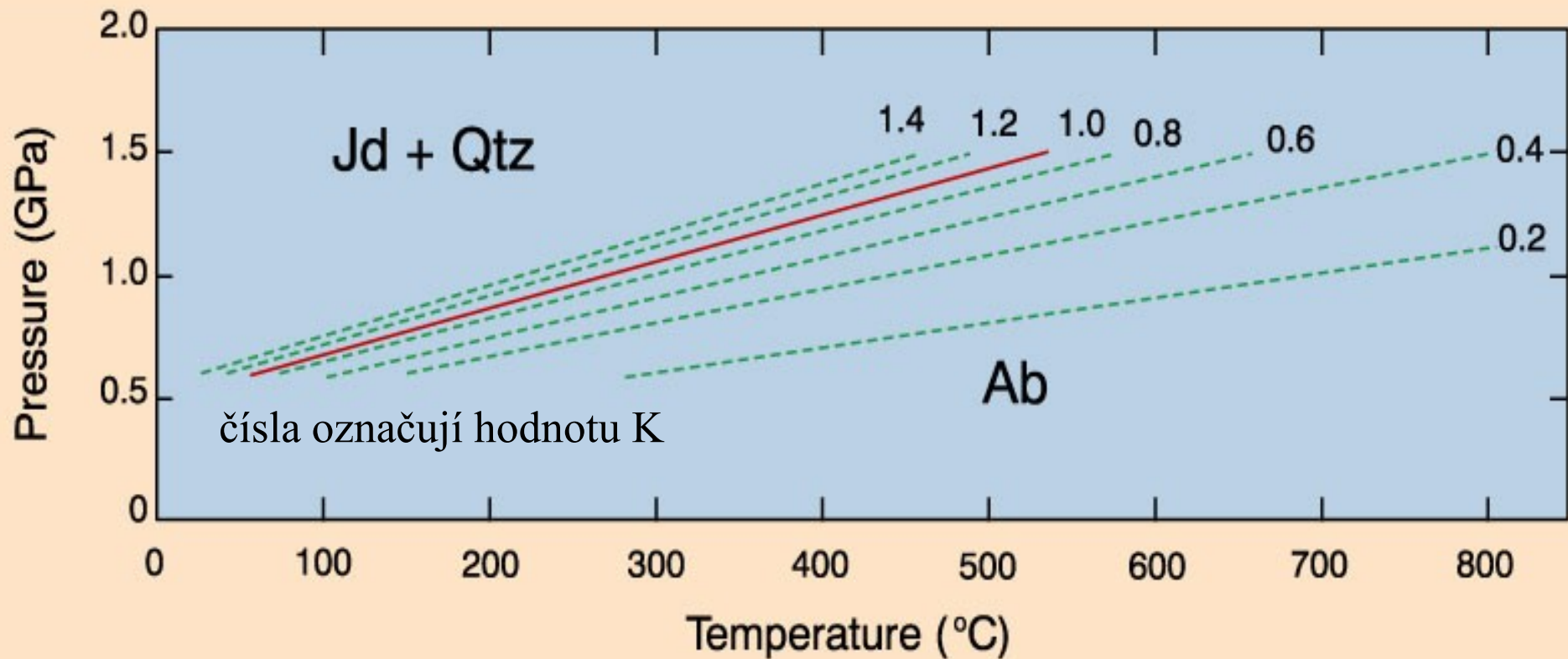




Vztah mezi aktivitou a složením pro ortopyroxeny skupiny enstatit-ferrosilit při 600°C a 800°C. kroužky jsou exp. data Saxena a Ghose (1971); křivky jsou modely pro jednoduchou směs (Saxena, 1973) *Thermodynamics of Rock-Forming Crystalline Solutions*. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

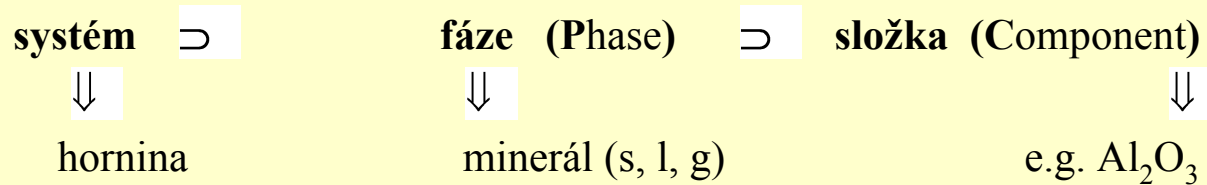
efekt přítomnosti Ca pro reakci albit = jadeit + křemen

$$K = \frac{X_{Jd}^{Pyx} X_{SiO_2}^Q}{X_{Ab}^{Plag}}$$



P-T diagram pro reakci Jadeit + Křemen = Albit pro rozdílné K (SUPCRT (Helgeson *et al.*, 1978). Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall).

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, 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 (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:

$$\mathbf{F = C - P + 2}$$

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 - metamorfní reakce

- znázornění – *P-T* diagramy

počet stupňů volnosti

- divariantní pole
- univariantní křivka
- invariantní bod

2

1

0

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

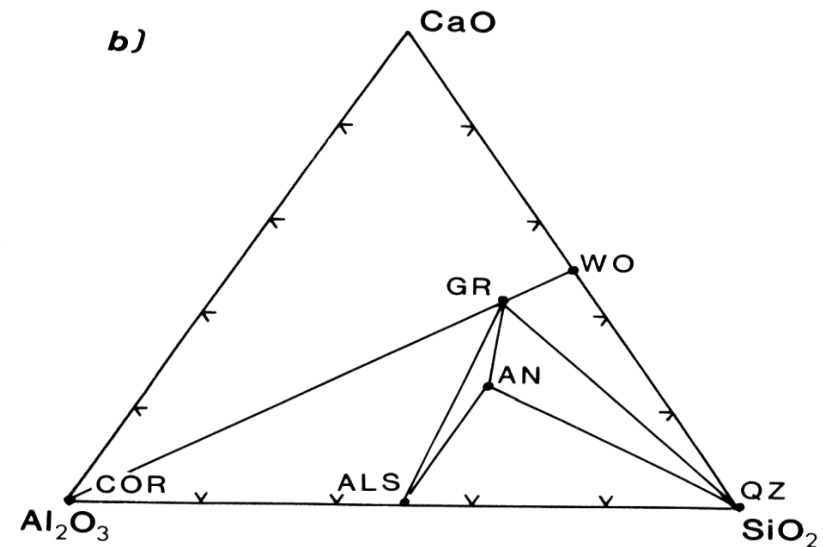
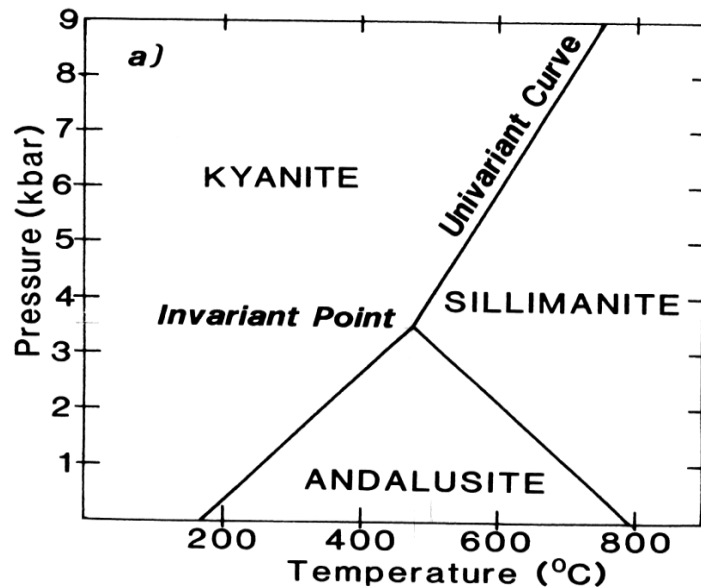
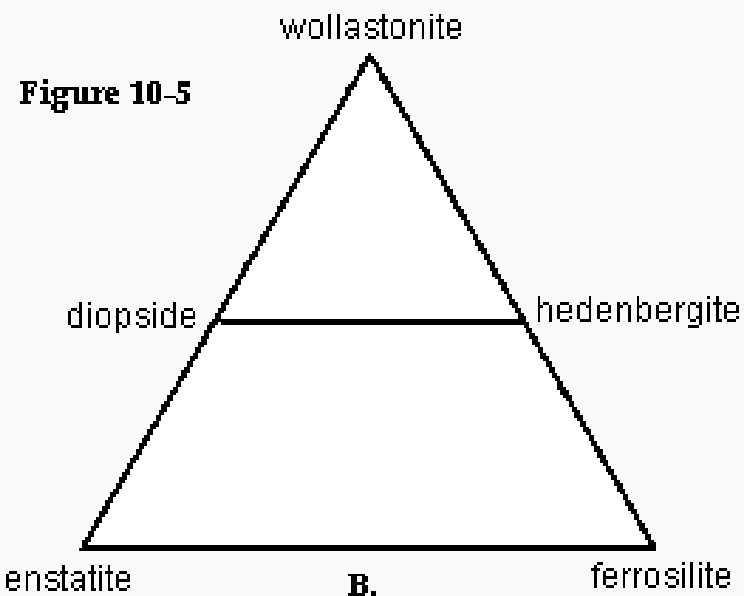
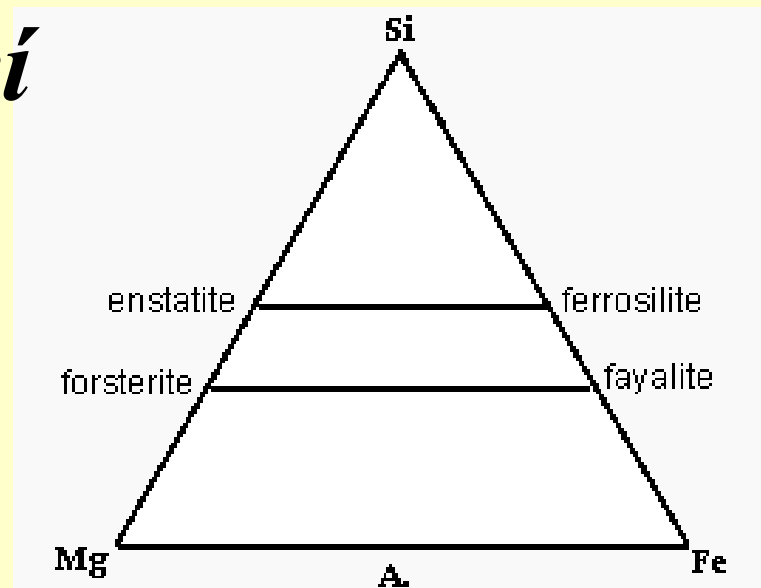
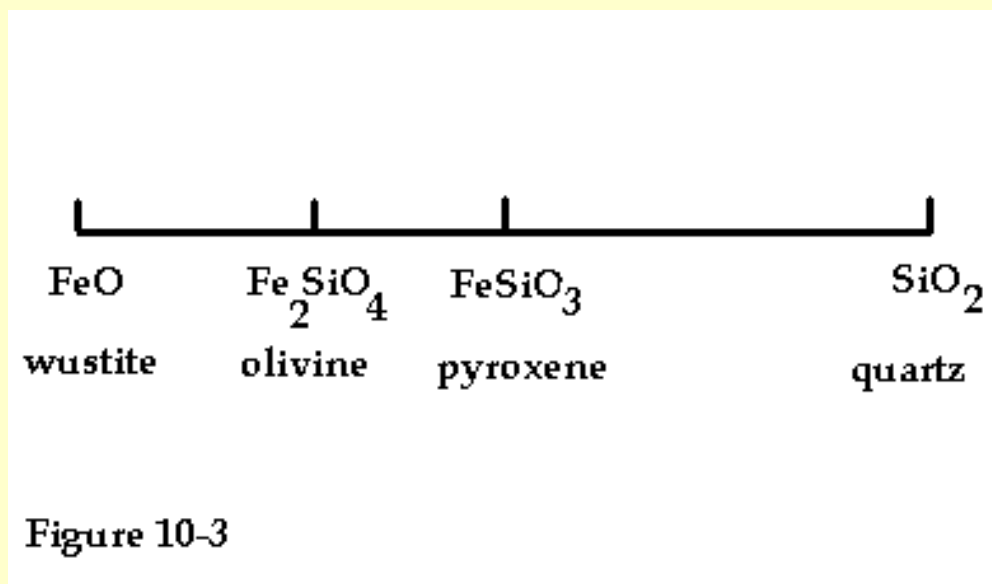


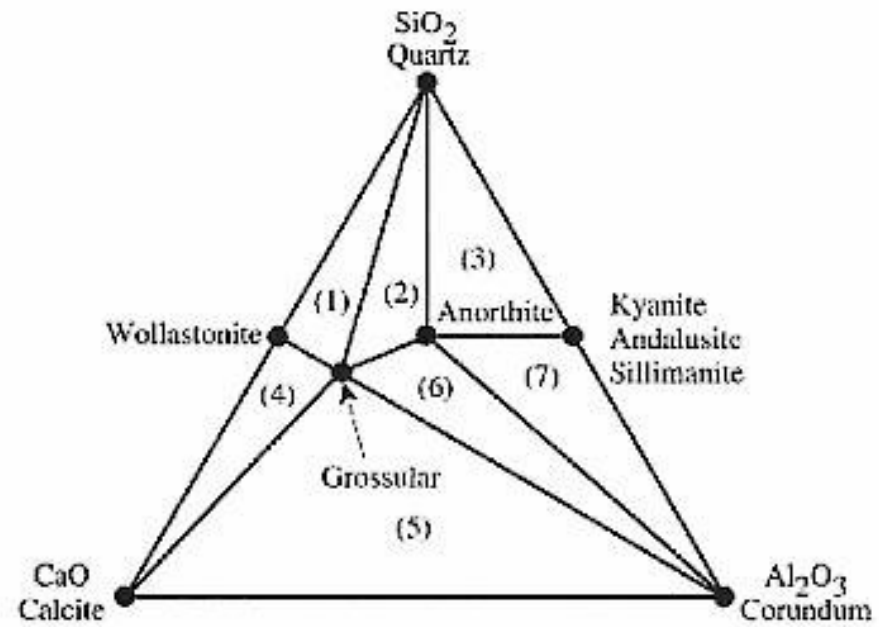
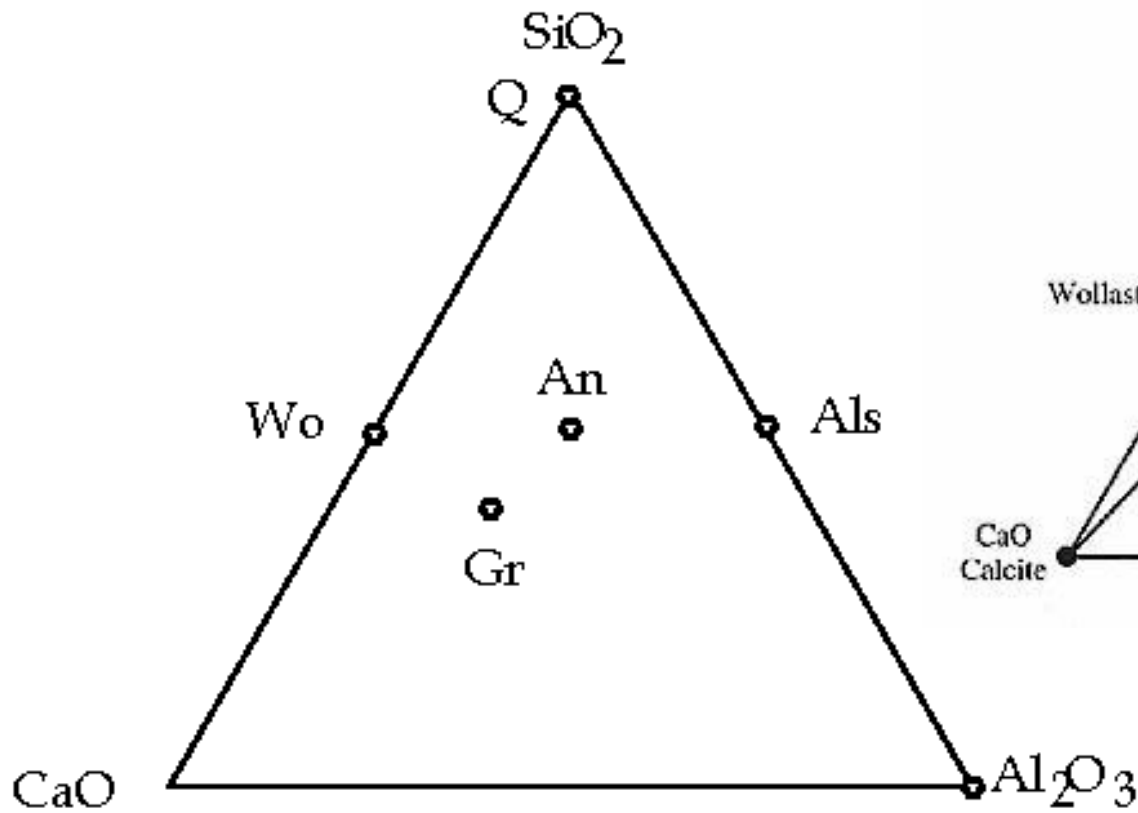
Fig. 2.1 a) Pressure–temperature diagram illustrating the stability fields of andalusite, kyanite and sillimanite, according to Holdaway (1971) (see also Fig. 3.12). b) Compositional diagram showing the compositions and stable relationships between corundum (COR), wollastonite (WO), grossular (GR), anorthite (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.

Grafické zobrazování minerálních asociací

asociací

- 2 komponenty
- 3 komponenty





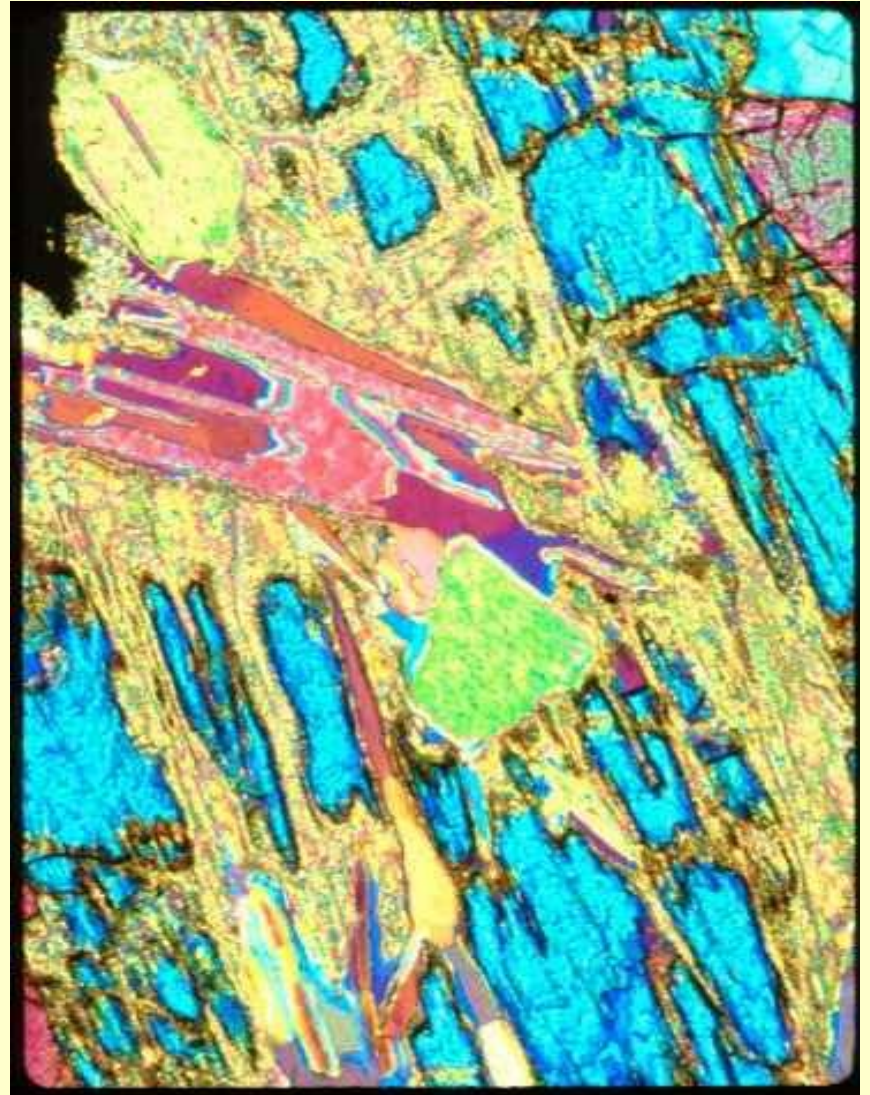
Mineral	Moles CaO	Moles Al ₂ O ₃	Moles SiO ₂	% CaO	% Al ₂ O ₃	% SiO ₂
anorthite	1	1	2	25	25	50
grossular	3	1	3	43	14	43

Metamorfní změny

- **1) Fázové změny (isochemická metamorfóza)**
- **2) Odmíšení**
- **3) Metamorfní reakce**
 - **a) diskontinuální** - zánik minerálu/minerální asociace a krystalizace/stabilizace nové, rovnováha reaktantů a produktů jen na univariantní křivce, reaktant či produkt 1 fáze (terminálové reakce)/2 fáze (*křížení spojovacích linií*)
 - **b) kontinuální** - mění se chemické složení zúčastněných minerálů (vzájemná konzumace): nevzniká žádný nový minerál, divariantní pole
 - **c) Devolatilizační reakce**
 - **d) Ox-Red. reakce**
- **4) Natavení**
- **5) Metasomatóza**

II. Metody odvození P-T podmínek

- **1 Metamorfní facie**
- **2 Petrogenetické mřížky**
- **3 Zonálnost minerálů**
- **4 Geotermobarometry**
- **5 Fluidní inkluze**
- **6 Indikátory Pt podmínek def.**
(mikrotektonické indikátory PT)



1. Metamorfnní Facie

- Eskola (1915) odvodil koncept metamorfnních facií (bazické horniny):
 - 1) Metamorfnní facie zahrnuje horniny, které byly metamorfovány za stejných podmínek.
 - 2) Jestliže horniny stejného chemického složení jsou tvořeny stejnými minerály, pak náleží jedné facií.
 - 3) Podmínkou je aby hornina byla v rovnováze s metamorfnními podmínkami (retrográdní met.).

pelity	mafické horniny	nečisté dolomitické mramory
biotitová zóna	facie zelených břidlic	mastek
granátová zóna	facie epidotických amfibolitů	tremolit - aktinolit
staurolitová zóna		
staurolit-kyanitová zóna	amfibolitová facie	diopsid
sillimanitová zóna		
sillimanit - K-živcová zóna	granulitová facie	diopsid, forsterit

Table 25-1. Definitive Mineral Assemblages of Metamorphic Facies

Facies	Definitive Mineral Assemblage in Mafic Rocks
Zeolite	zeolites: especially laumontite, wairakite, analcime
Prehnite-Pumpellyite	prehnite + pumpellyite (+ chlorite + albite)
Greenschist	chlorite + albite + epidote (or zoisite) + quartz ± actinolite
Amphibolite	hornblende + plagioclase (oligoclase-andesine) ± garnet
Granulite	orthopyroxene (+ clinopyroxene + plagioclase ± garnet ± hornblende)
Blueschist	glaucophane + lawsonite or epidote (+ albite ± chlorite)
Eclogite	pyrope garnet + omphacitic pyroxene (± kyanite)
Contact Facies	Mineral assemblages in mafic rocks of the facies of contact metamorphism do not differ substantially from that of the corresponding regional facies at higher pressure.

After Spear (1993)

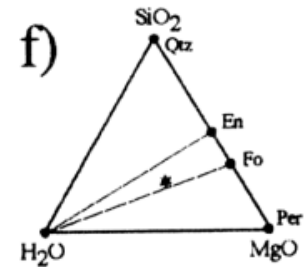
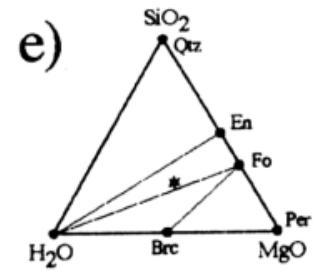
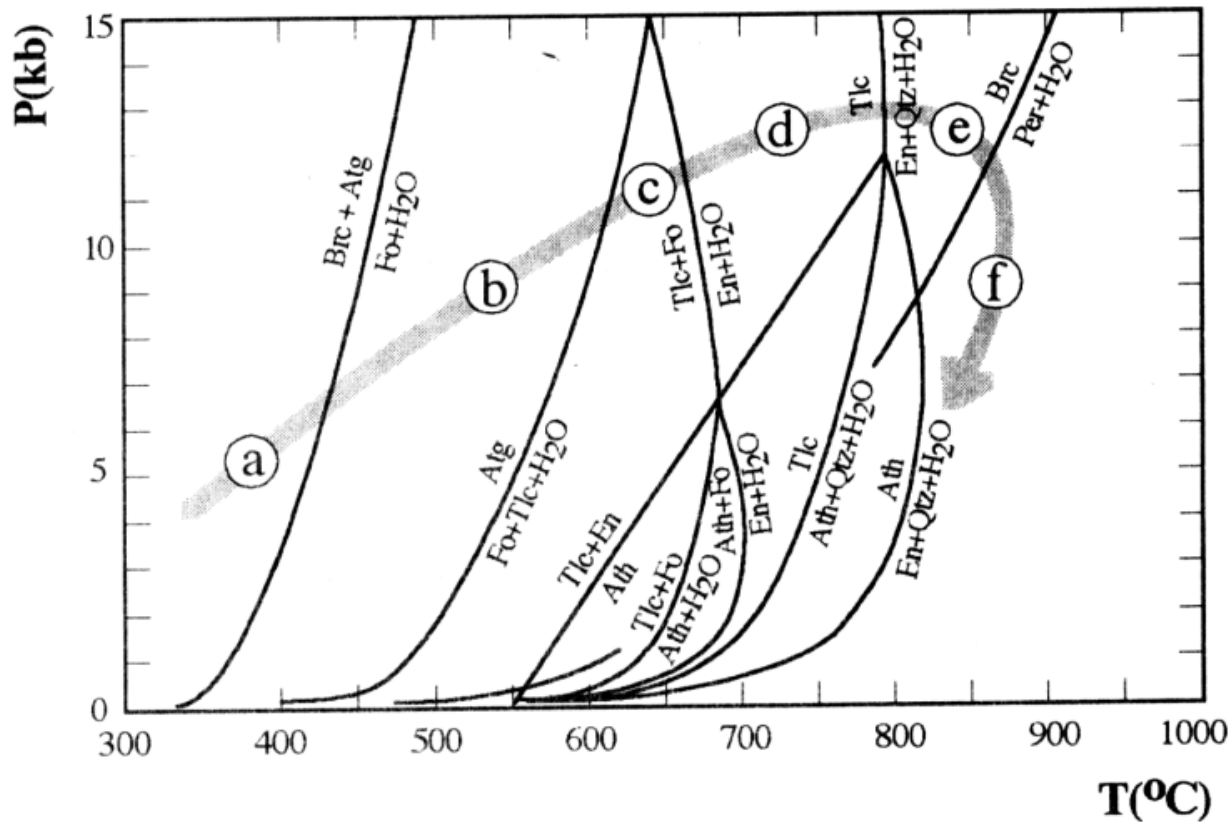
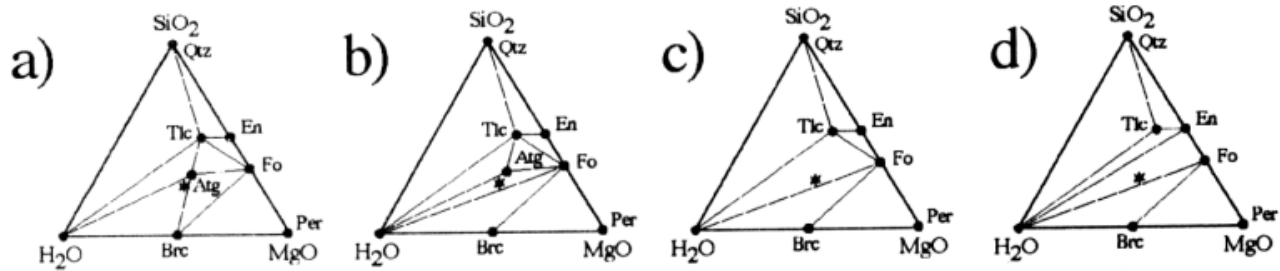
2. Petrogenetické mřížky

- 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 poli podle pozice pozorovaných reakcí
- odpovídající celkové složení hornin

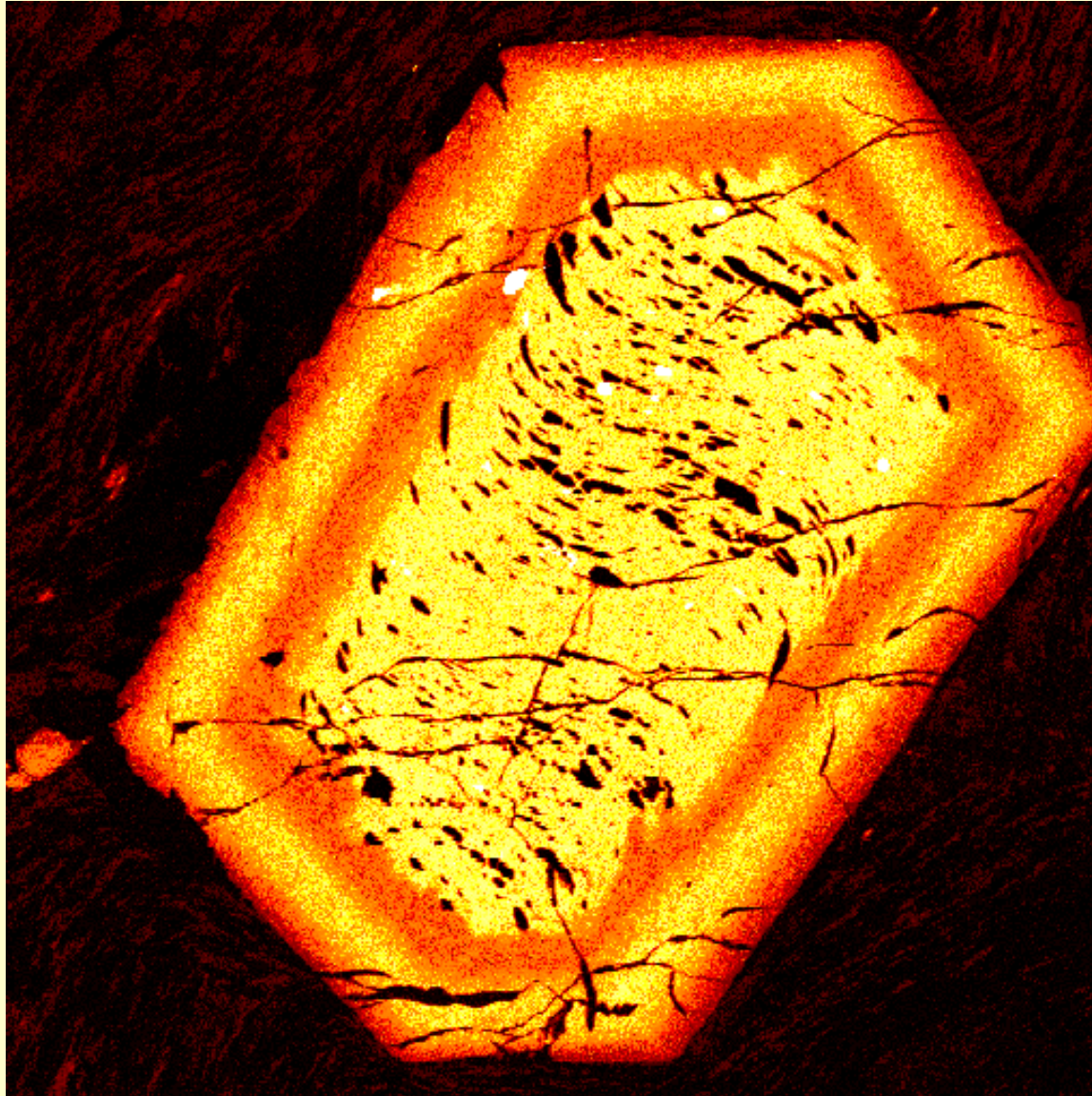
Konstrukce petrogenetické mřížky

- 1) experimenty
- 2) termodynamické výpočty
 - A) definice systému
 - B) výpočet všech reakcí
 - C) určení stabilních a metastabilních větví křivek

Petrogenetické mřížky a celkové složení systému

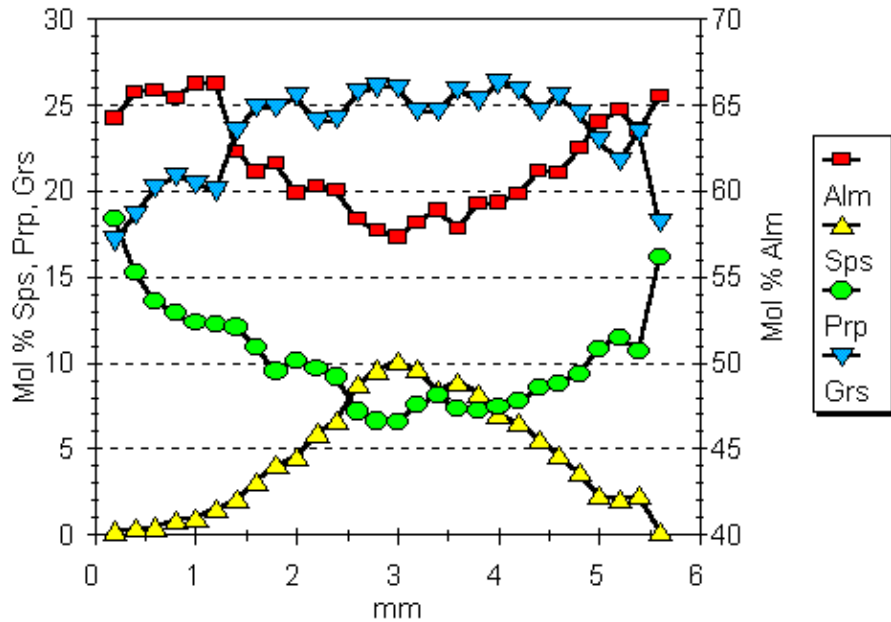


3) Zonálnost minerálů

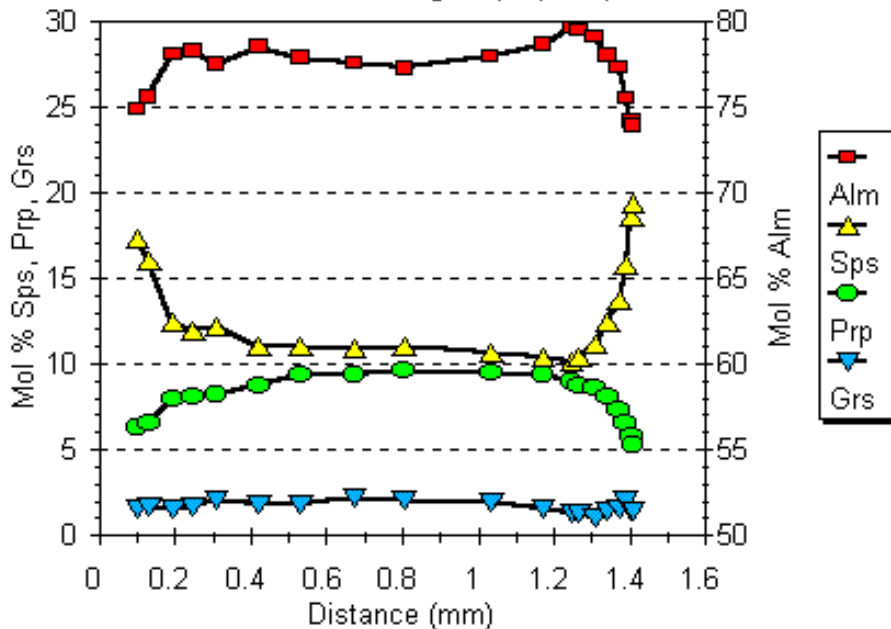


- Závisí na chem. složení systému a PT

Suru Valley traverse
L429 Donara nappe



Umasi La Traverse
ZD52 Malung Tokpo (MWD)



Využití granátu v petrologii

A) Zonálnost granátu

Dobrá mísivost jednotlivých granátových komponent umožňuje vznik zonálních zrn. Zonálnost může poskytnout informace o procesech jimiž hornina při růstu granátu ale i po skončení jeho růstu prošla.

Zonálnost dělíme na:

1) Růstovou zonálnost - Vzniká při růstu granátového zrna a odráží změny P-T podmínek nebo změny v chemizmu v blízkém okolí granátu

2) Difúzní zonálnost - Vzniká v granátu až po jeho vzniku díky difúzi. Procesy difúze se výrazněji projevují na malých zrnech a na zrnech z více metamorfovaných hornin (difúze roste exponenciálně s rychlostí s níž klesá teplota a proto se difúzní zonálnost výrazněji projevuje u hornin vyššího stupně metamorfózy než u hornin, které prošly jen metamorfózou nižšího stupně.

Zonálnost přírodních granátu je většinou výsledkem kombinace růstové a difúzní zonálnosti.

4) Geotermobarometry

- pojetí: rovnovážný stav existující v metamorfovaných horninách odráží vrcholné teplotní podmínky metamorfózy
- využití složení minerálů v rovnovážné asociaci – to může být velmi citlivým indikátorem P-T podmínek a P-T drah
- geotermobarometrie je založena na rovnovážných reakcích – **rovnovážná konstanta či distribuční koeficient** = $f(P, T)$ – určuje jednu linii na diagramu P-T

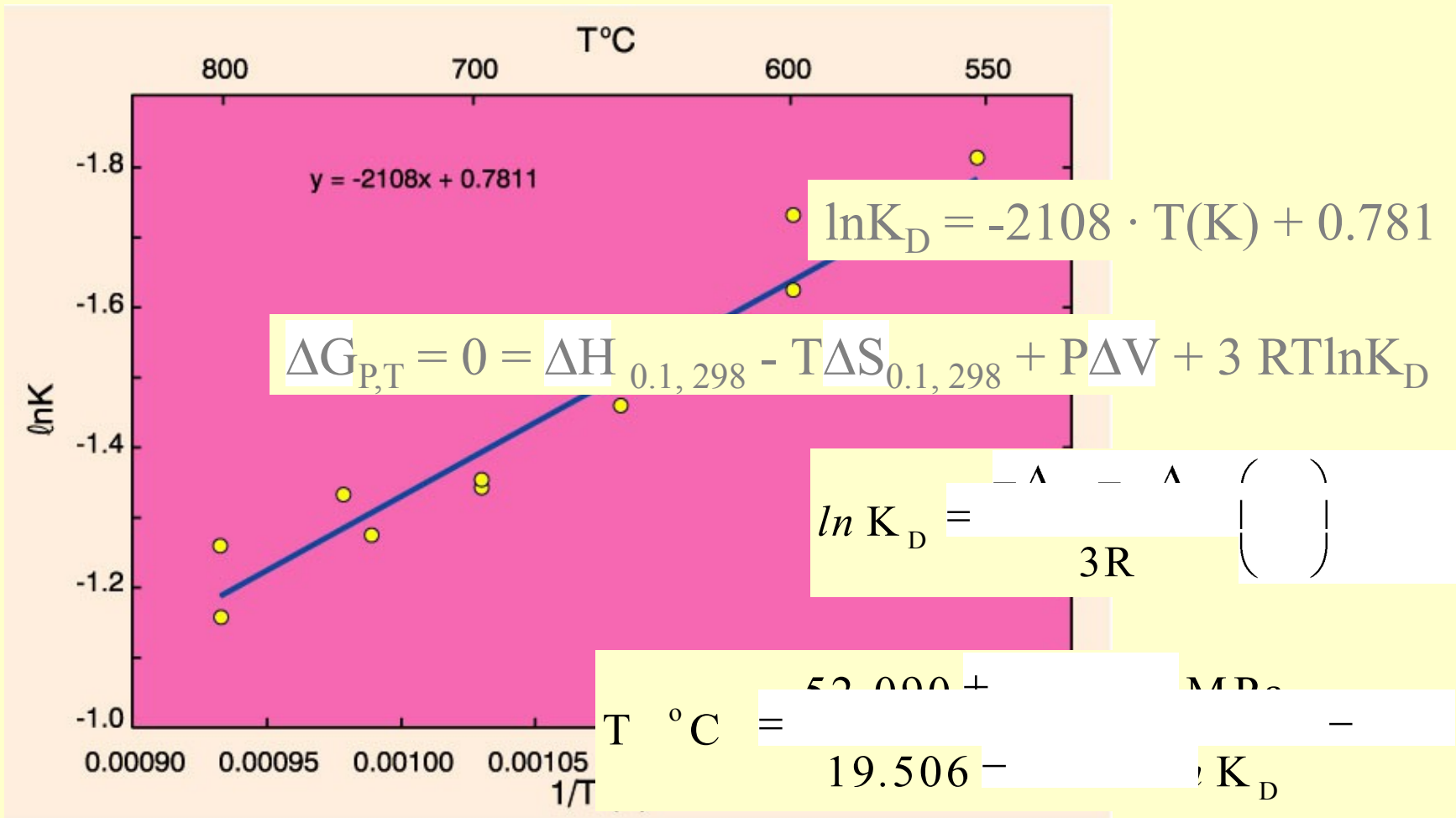
- **Rovnováhy:** porfyroblasty mohou poskytovat informaci o části PT dráhy. Okraje zaznamenávají podmínky kdy naposledy hornina dosáhla termodynamické rovnováhy ve střezech se mohou zachovat lokální rovnováhy (starší met.)
- **Retrogrese:** u hornin, které chladly pomalu dochází k retrográdním přeměnám (chloritizace).
- **Kalibrace a citlivost:** kalibrace na jiné PT, různá citlivost za rozdílných teplot (solvní, izotopové)
- **Efekt dalších komponent a chemického složení**

- **Typy**
- kalibrace experimentální – měření K jako funkce P a T, idealizované systémy
- empirické - měření K v přírodních asociacích, kde P a T zjišťováno jinak
- termodynamické

Geothermometry - kalibrace

Table 27-2. Experimental results of Ferry and Spear (1978) on a Garnet-Biotite Geothermometer

T °C	Initial X(Fe-Bt)	Final X(Fe-Bt)	Final X(Fe-Grt)	Final (Mg/Fe)Grt	Final (Mg/Fe)Bt	K	T Kelvins	1/T Kelvins	lnK
799	1.00	0.750	0.905	0.105	0.333	0.315	1072	0.00093	-1.155
799	0.50	0.710	0.896	0.116	0.408	0.284	1072	0.00093	-1.258
749	0.50	0.695	0.896	0.116	0.439	0.264	1022	0.00098	-1.330
738	1.00	0.730	0.906	0.104	0.370	0.281	1011	0.00099	-1.271
698	0.75	0.704	0.901	0.110	0.420	0.261	971	0.00103	-1.342
698	0.50	0.690	0.896	0.116	0.449	0.258	971	0.00103	-1.353
651	0.75	0.679	0.901	0.110	0.473	0.232	924	0.00108	-1.459
651	0.50	0.661	0.897	0.115	0.513	0.224	924	0.00108	-1.497
599	0.75	0.645	0.902	0.109	0.550	0.197	872	0.00115	-1.623
599	0.50	0.610	0.898	0.114	0.639	0.178	872	0.00115	-1.728
550	0.75	0.620	0.903	0.107	0.613	0.175	823	0.00122	-1.741
550	0.50	0.590	0.898	0.114	0.695	0.163	823	0.00122	-1.811
601	0.50	0.500	0.800	0.250	1.000	0.250	874	0.00114	-1.386
601	0.25	0.392	0.797	0.255	1.551	0.164	874	0.00114	-1.807
697	0.75	0.574	0.804	0.244	0.742	0.329	970	0.00103	-1.111
697	0.25	0.468	0.796	0.257	1.137	0.226	970	0.00103	-1.487



Graph of $\ln K$ vs. $1/T$ (in Kelvins) for the Ferry and Spear (1978) garnet-biotite exchange equilibrium at 0.2 GPa from Table 27-2. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

- $\Delta G = \Delta H - T\Delta S + (P-1)\Delta V$

1. a 2. zákon termodynamiky

- $\Delta G_{P,T} = 0$

rovnováha systému (reakční křivka v P-T)

- $0 = \Delta H^0 - T \Delta S^0 + (P-1) dV^0 + RT \ln K$

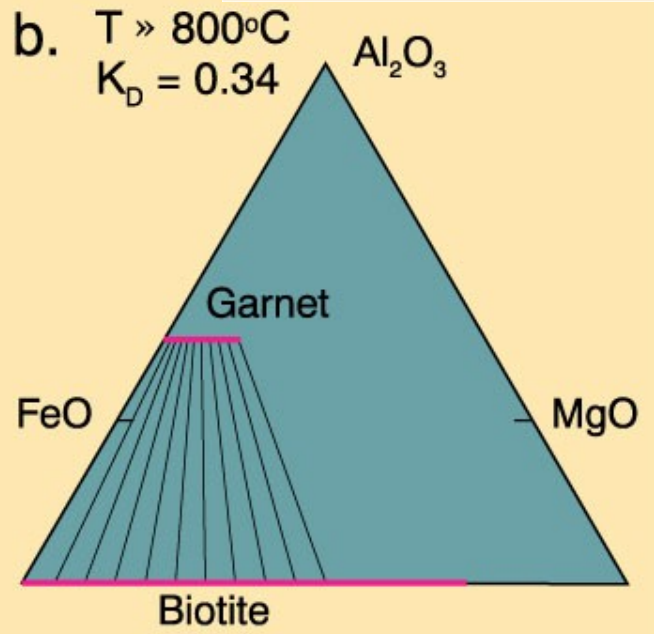
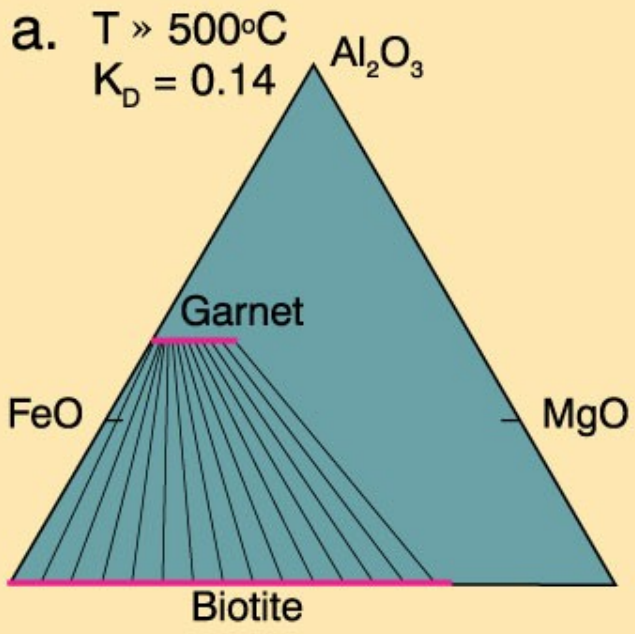
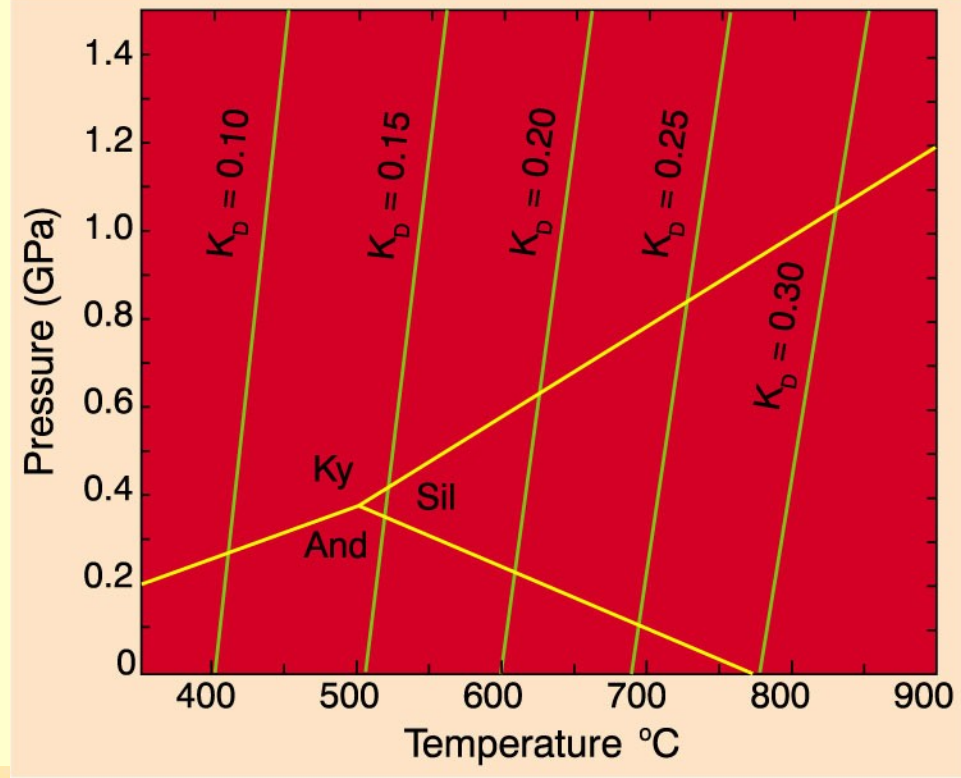
(P a T závislost rovnovážné konstanty)

- **distribuční koeficient K_d** – pro výměnné reakce



- $K_D = \frac{X_{Mg}^{Grt} X_{Fe}^{Bt}}{X_{Fe}^{Grt} X_{Mg}^{Bt}} = (Mg/Fe)^{Grt}/(Mg/Fe)^{Bt}$

Termometry –
 malá závislost na P (malá ΔV)
 velká ΔS a ΔH (výměnné reakce
 – exchange)



• **Výměnné termometry**

1- **Olivín-ortopyroxen-spinel-granát (Ol-Sp, Ol-Opx, Grt-Ol):**

- Fe-Mg výměna mezi fázemi
- Většinou kalibrováno experimentálně (vysoké teploty)
- Plášťové horniny (peridotity, nebo jiné horniny v eklogitové a granulitové facii)

2- **Granát-klinopyroxen:**

- Velmi rozšířený, řada kalibrací (Ellis and Green (1979))
- Určení T v eklogitech, peridotitech, granulitech (granulitová až amfibolitová facie).

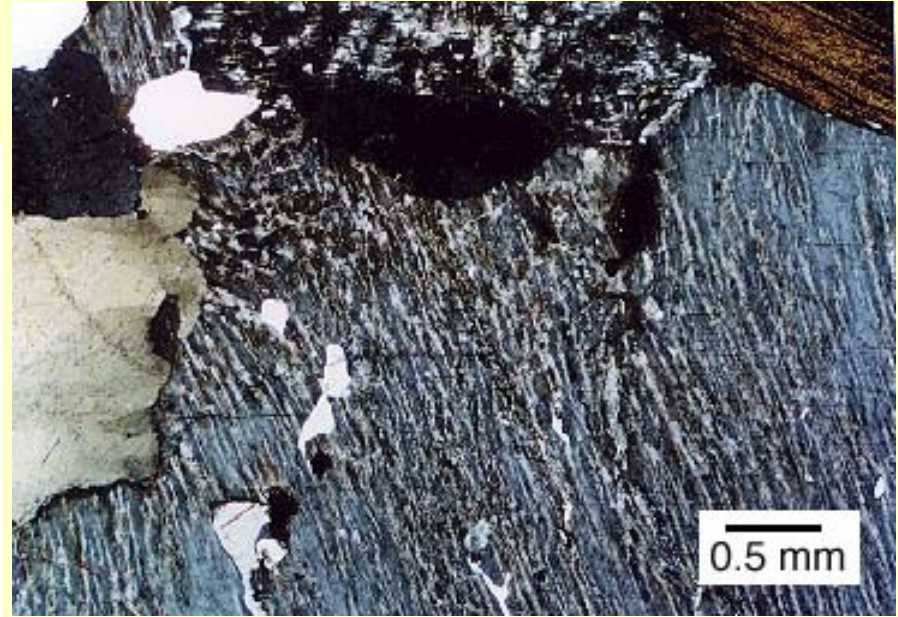
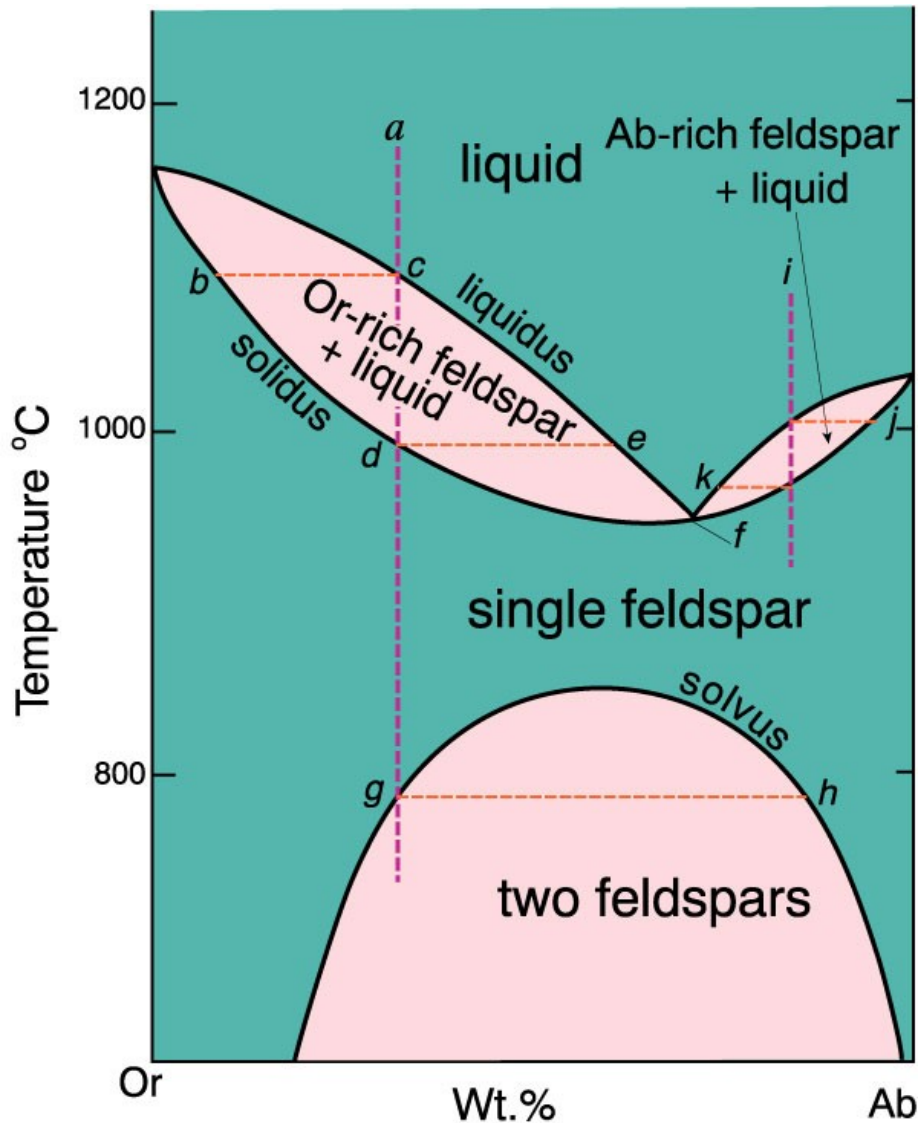
3- **Granát-biotit:**

- Řada kalibrací (např. Ferry and Spear (1979))
- Amfibolitová facie v metapelitech

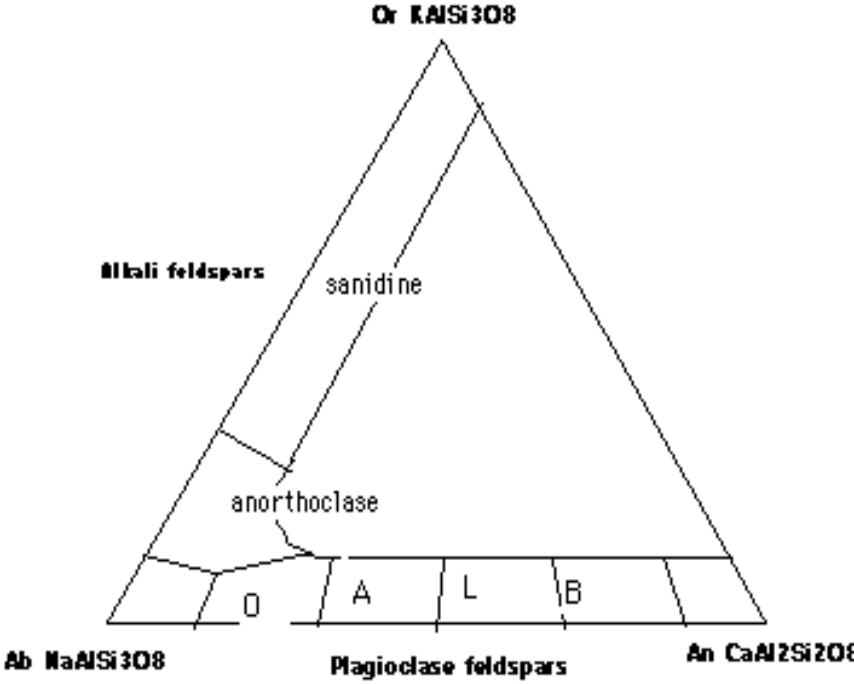
4 - **Reakce ovlivněné fluidní fází**

- *The magnetite - ilmenite thermometer:*
- System Fe-Ti-O.
- Dvě reakce
- A) závislá na fO_2 : $Mgt + O_2 = Hm$;
- B) závislá na T: $Usp + Hem = Mgt + Ilm$.

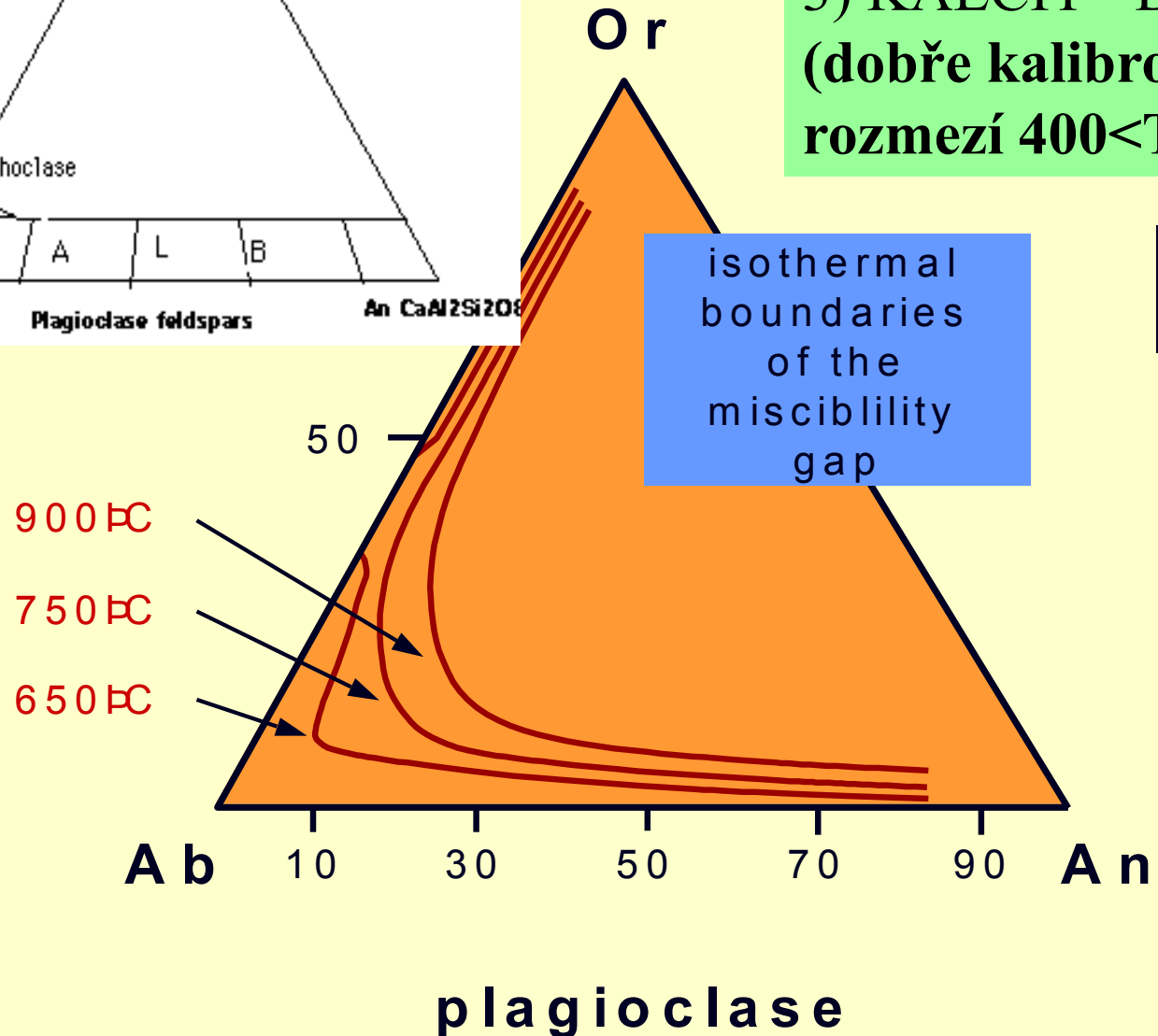
Termometry pomocí solvu



- 1) Nutná dostatečná velikost odmíšenin
- 2) Nesmí být postižen metasomaticky



1) ENSTATIT – DIOPSID
 2) TERNÁRNÍ ŽIVCE
(Granulitová facie)
 3) KALCIT - DOLOMIT
(dobře kalibrován v rozmezí $400 < T < 800$ C.)

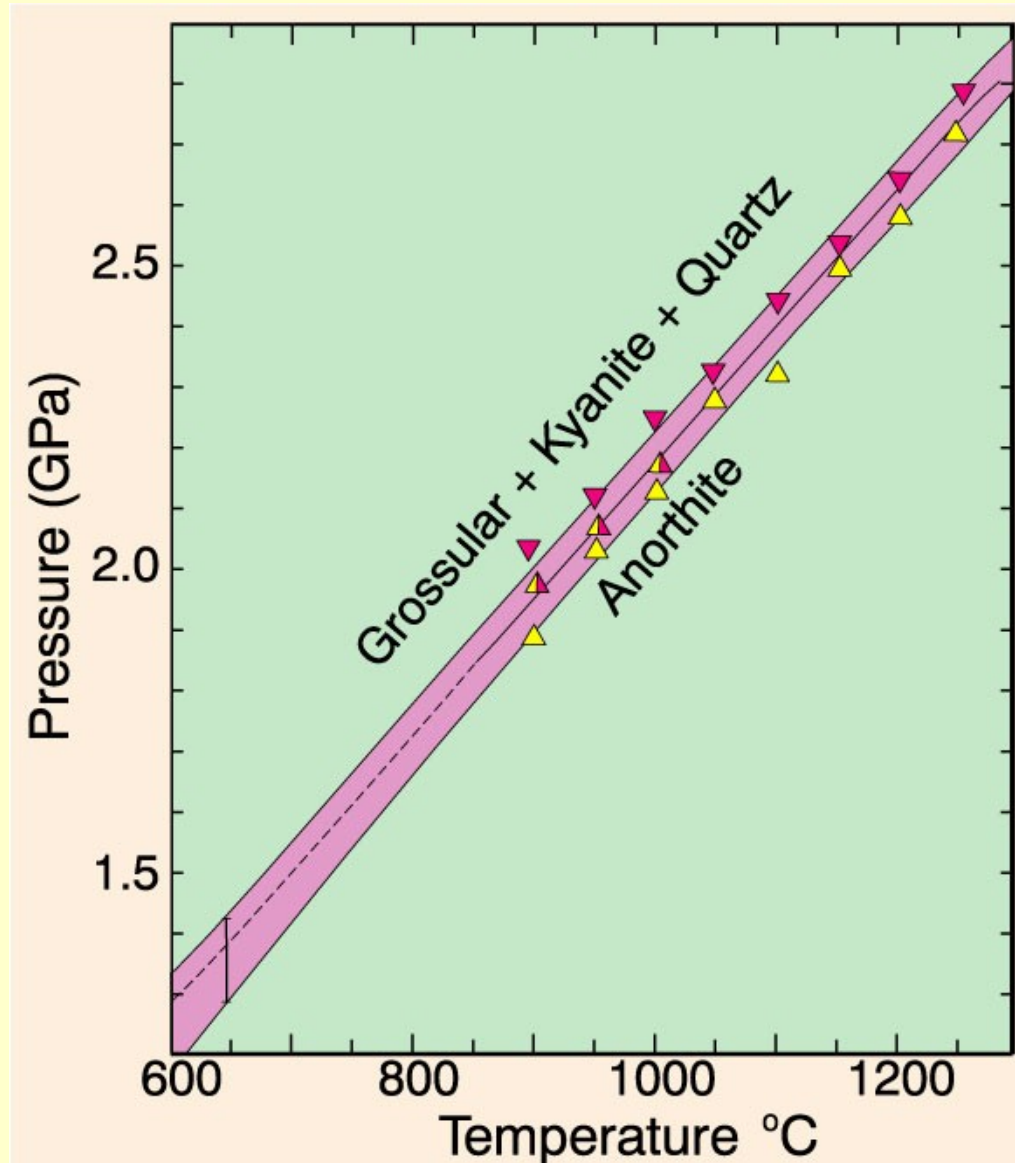


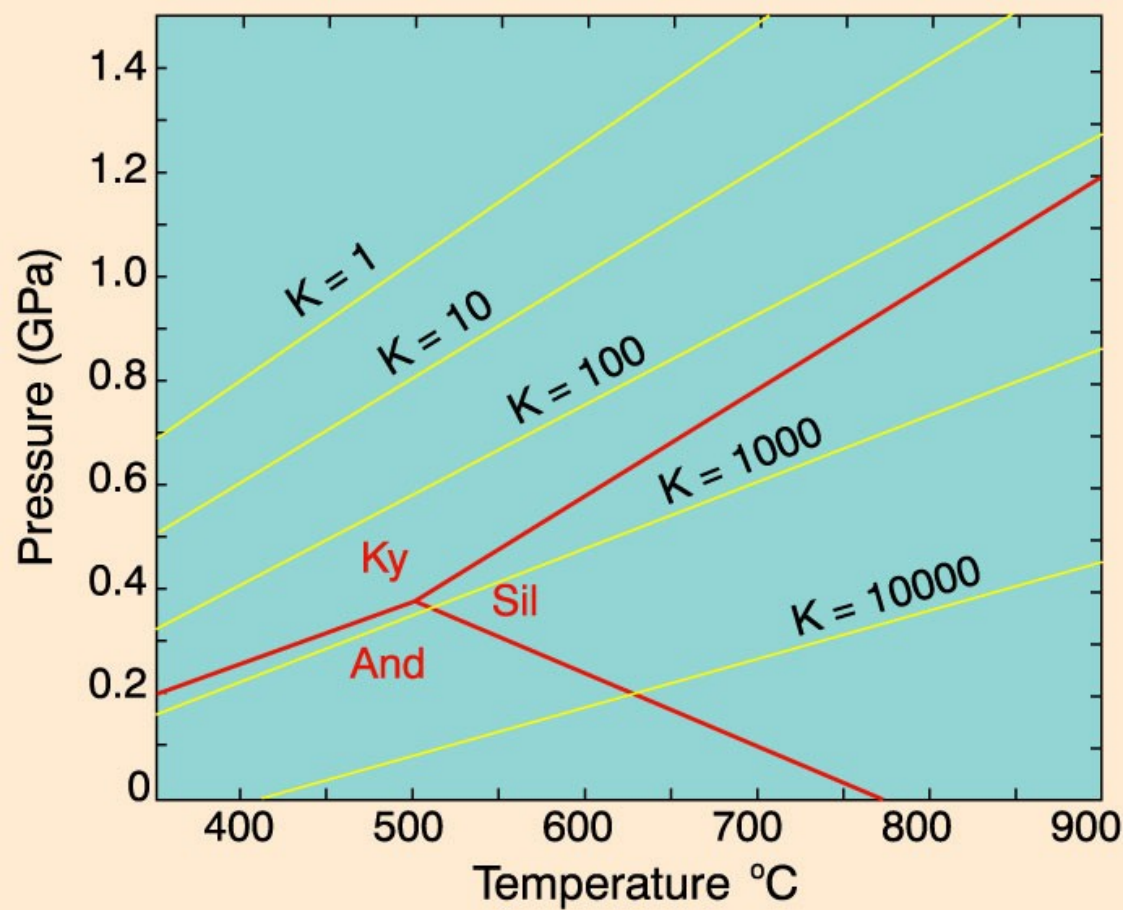
Geobarometry

-malá závislost na T (nízké dP/dT) velká ΔV
(kontinuální reakce)

-GASP

P-T phase diagram showing the experimental results of Koziol and Newton (1988), and the equilibrium curve for reaction (27-37). Open triangles indicate runs in which An grew, closed triangles indicate runs in which Grs + Ky + Qtz grew, and half-filled triangles indicate no significant reaction. The univariant equilibrium curve is a best-fit regression of the data brackets. The line at 650°C is Koziol and Newton's estimate of the reaction location based on reactions involving zoisite. The shaded area is the uncertainty envelope. After Koziol and Newton (1988) *Amer. Mineral.*, 73, 216-233





P-T diagram contoured for equilibrium curves of various values of K for the GASP geobarometer reaction: $3 \text{ An} = \text{Grs} + 2 \text{ Ky} + \text{Qtz}$. From Spear (1993) *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineral. Soc. Amer. Monograph 1.

Table 27-3. Mineral Compositions, Formulas, and End-Members for Sample 90A from Mt. Moosilauke, New Hampshire

Wt. % Oxides	Garnet	Biotite	Muscovite	Plagioclase
SiO ₂	37.26	34.22	44.50	64.93
Al ₂ O ₃	21.03	18.97	34.50	22.59
TiO ₂		1.23	0.40	
FeO	32.45	17.50	0.70	
MgO	2.46	9.98	0.46	
MnO	6.08	0.12	0.02	
CaO	1.03	0.01	0.03	2.90
Na ₂ O		0.27	1.64	9.36
K ₂ O		7.79	8.05	0.45
Total	100.31	90.09	90.30	100.23

Cations				
Si	3.00	5.43	6.17	2.84
Al ^{IV}	2.00	2.57	1.83	1.17
Al ^{VI}		0.98	3.81	
Ti		0.15	0.04	
Fe	2.19	2.32	0.08	
Mg	0.30	2.36	0.10	
Mn	0.42	0.02	0.00	
Ca	0.09		0.00	0.14
Na		0.08	0.44	0.83
K		1.58	1.42	0.03
Fe/(Fe+Mg)	0.88	0.50	0.46	
	Prp 10			An 14
	Alm 73			Ab 83
	Sps 14			Or 3
	Grs 3			

From Hodges and Spear (1982) and Spear (1993).

- $\Delta G = \Delta H - T\Delta S + (P-1)\Delta V$

1. a 2. zákon termodynamiky

- $\Delta G_{P,T} = 0$

rovnováha systému (reakční křivka v P-T)

- $0 = \Delta H^0 - T \Delta S^0 + (P-1) dV^0 + RT \ln K$

(P a T závislost rovnovážné konstanty)



- **$K_{eq} = a_{Ilm}^3 a_{Alsil} a_{Qtz}^2 / a_{Alm} a_{Rt}^3 = a_{Alm} + a_{Rt}^3 - a_{Ilm}^3 - a_{Alsil} - a_{Qtz}^2$**

- **$a = \gamma X$ (čisté koncové členy = 1, ideální míšení = X_A)**

- ***Geobarometry***

1) Anorthite = Grossularite + Al-silicate + Qz (GASP):

- Metapelity (Koziol and Newton (1988)), amfibolitová facie

2) Ilmenite + Kyanite + Qz = Almandine + Rutile (GRAIL):

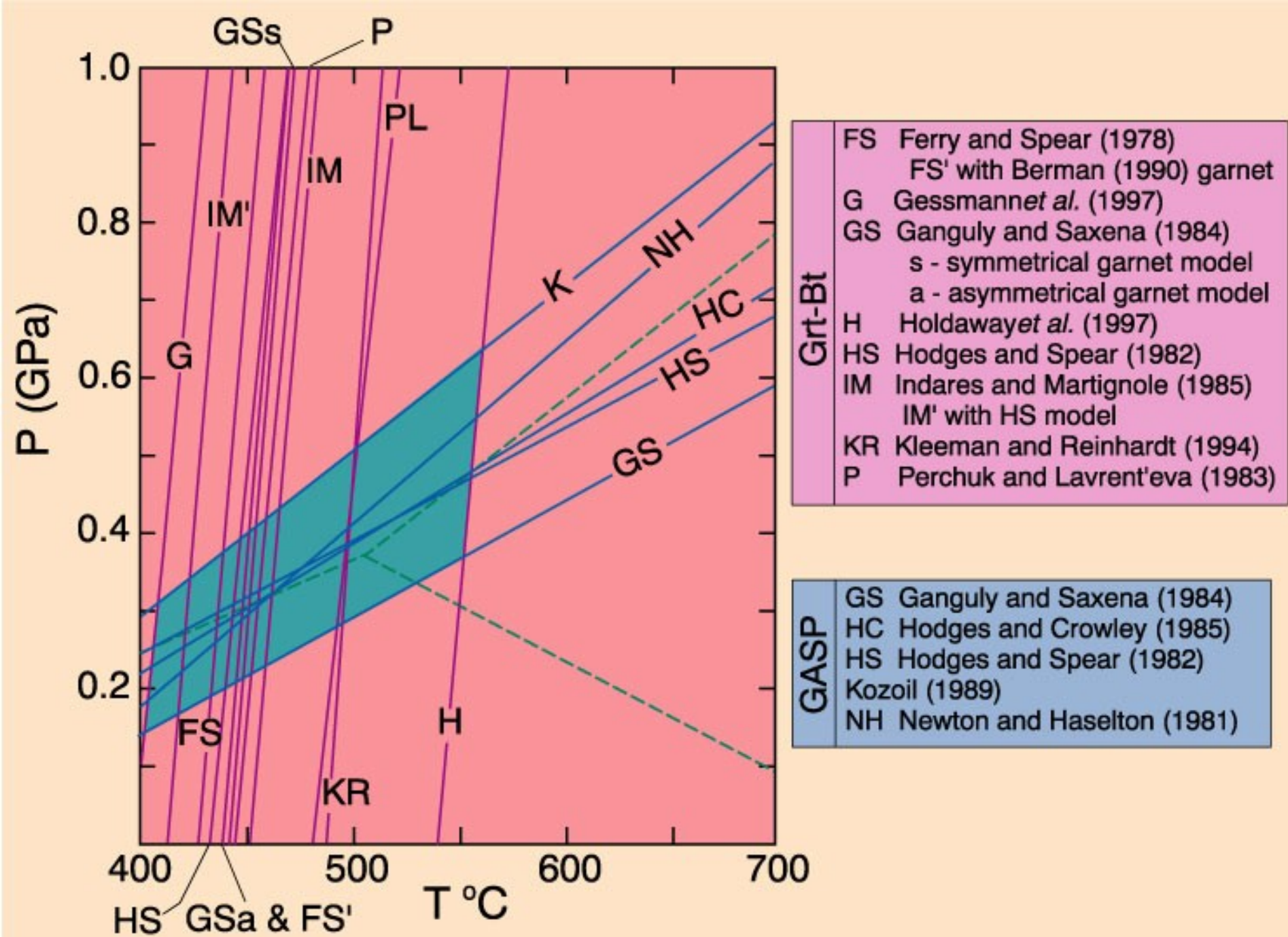
- Metapelity (Bohlen et al. (1982))

3) Albite = Jadeite + Qz:

- Modré břidlice (metabazity a některé metapelity a metagranity)

(5) Ilmenite + Anorthite + Quartz = Garnet + Rutile (GRIPS):

- Dvě reakce: $Gt + Ky + Qz = An$, and $Gt + Rt = Ilm + Ky + Qz$.
- Kalibrováno experimentálně (Bohlen a Liotta (1986)).



Výměnné termometry (záměnné reakce, exchange thermometers)

- výměna prvků (zejm. Fe a Mg) mezi dvěma koexistujícími minerály
- distribuční koeficient $K_D = (Fe/Mg)_A / (Fe/Mg)_B$
- Grt-Bt, Grt-Crd, Grt-Cpx, Grt-Hb, Grt-Chl, Grt-Opx, Grt-Ol, Bt-Tour, Grt-Ilm (Fe-Mn)
- Minerály se musí dotýkat

Solvní termometry (solvus thermometers)

- distribuce prvků v rámci solvu, pro isostrukturní fáze (založeno na mísitelnosti minerálů za různých teplot).
- Za nižších teplot se původně homogenní pevný roztok rozdělí na dvě fáze
- 2 Px, 2 Fs, Clc-Dol, Ms-Pg

Kontinuální reakce (net-transfer reactions)

- při reakci se mění složení, struktura a někdy i počet fází, velké změny objemu
- reaktanty a produkty koexistují přes velký interval P-T
- Grt-Pl-Qtz- Al_2SiO_5 (GASP, Grt-Pl-Ms-Bt, Grt-Pl-Hb-Qtz, Grt-Pl-Ol, Grt-Pl-Opx/Cpx-Qtz, Grt-Pl-Rt-Ilm-Qtz (GRIPS), Grt-Rt-Ilm- Al_2SiO_5 -Qtz (GRAIL), Grt-Crd-Sill-Qtz, Px-Ol-Qtz, Px-Plg-Qtz, Phengite

Postup při určení P-T podmínek

1. měření složení koexistujících minerálů - elektronová mikrosonda
2. výběr vhodné kalibrace (rozmezí složení fází, podmínek kalibrace)
3. ΔH , ΔS , ΔV , popř. ΔC_p (ΔC_v) – z experimentů či termodynamických tabulek
4. do P-T diagramu vyneseme linie získané z termometrů a barometrů
5. data vyneseme do PT diagramu, a průsečík dává P-T podmínky

Interpretace – pozor na:

- opravdu minerální složení odpovídají rovnovážné koexistenci?

testy rovnováhy - rovnováhu nelze dokázat, lze ji jen vyvrátit

- reekvilibrace – průběh spojitých reakcí – odráží se na zonalitě minerálů

výměnné reakce – na kontaktu minerálů T_C (Fe-Mg Grt-Bt 525-580 C),
v jádrech vyšší T ale ne nutně „peak“

kontinuální reakce – jsou přítomny všechny minerály v asociaci

ODLIŠNÁ ZONALITA

- analyzovat zonalitu a snažit se přiřadit správné části minerálů k sobě

- komplikace i difuzní homogenizace minerálů (Grt) – jádro už nemusí mít složení odpovídající vrcholu met.

- ❖ důležitými faktory ovlivňujícími složení minerálů při výměnných reakcích jsou

- rychlost difuze v obou minerálech

- rychlost ochlazování

- velikost zrn

termobarometrie konvenční – jednotlivé termometry a barometry

vnitřně konsistentní termodynamické databáze – určení pozice reakce

studium fázových vztahů a minerálních rovnováh

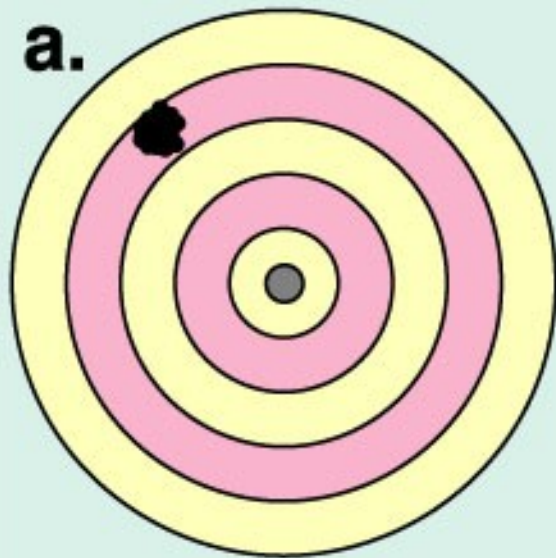
TWQ (Berman 1991) (ex-GEO-CALC -Berman et al. 1987)

THERMOCALC (Powell – Holland v. 2.75 1999, dataset JMG 16, 1998) konstrukce fázových diagramů v P-T

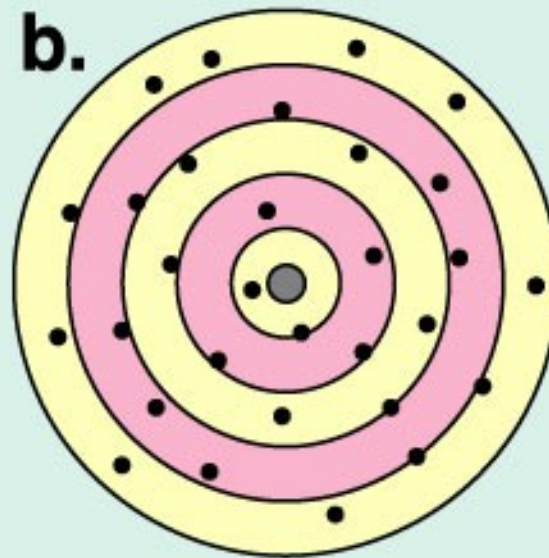
diagramy kompatibility (X za konst. P a T, eg AFM)

pseudosections (řezy) – pole stability fází a asociací (P-T, P-X, T-X)

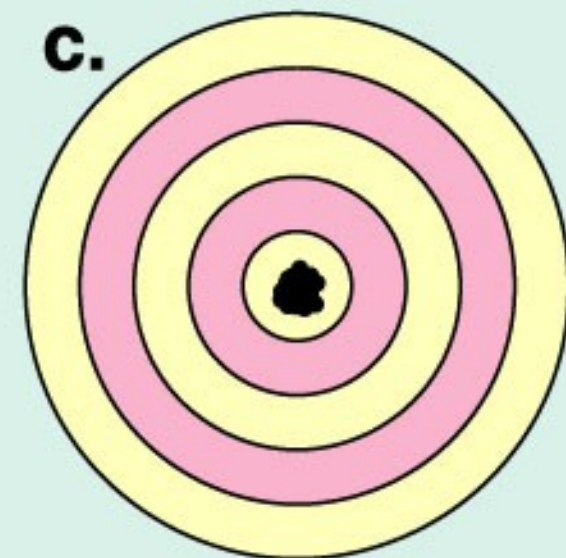
Správnost a přesnost



Precise, but
not accurate



Accurate, but
not precise



Precise and
accurate

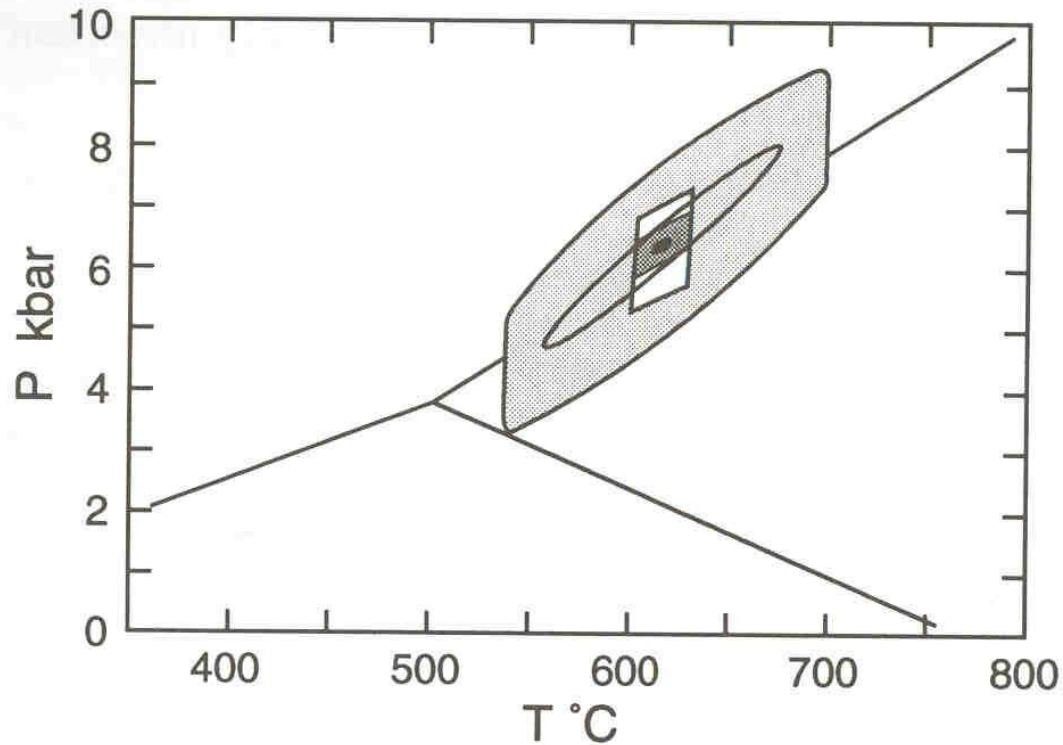


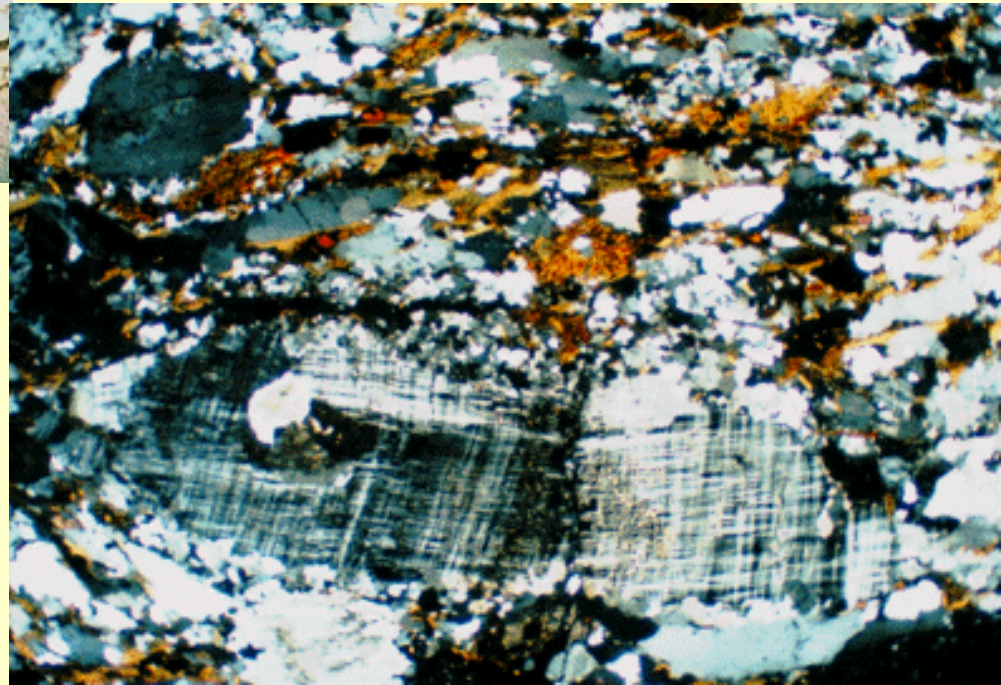
Figure 15-13. P-T diagram showing calculated uncertainties in the application of the GASP geobarometer and the garnet-biotite geothermometer. The small ellipsoid represents propagated analytical precision, the small dark parallelogram is the error from natural compositional heterogeneities, the larger parallelogram is the error from the choice of activity models, the large, thin ellipse is the error from uncertainties in the calibration of the geobarometer and geothermometer and the largest region is the combination of all of these uncertainties. After Kohn and Spear (1991b).

5) Mikrotektonické indikátory PT

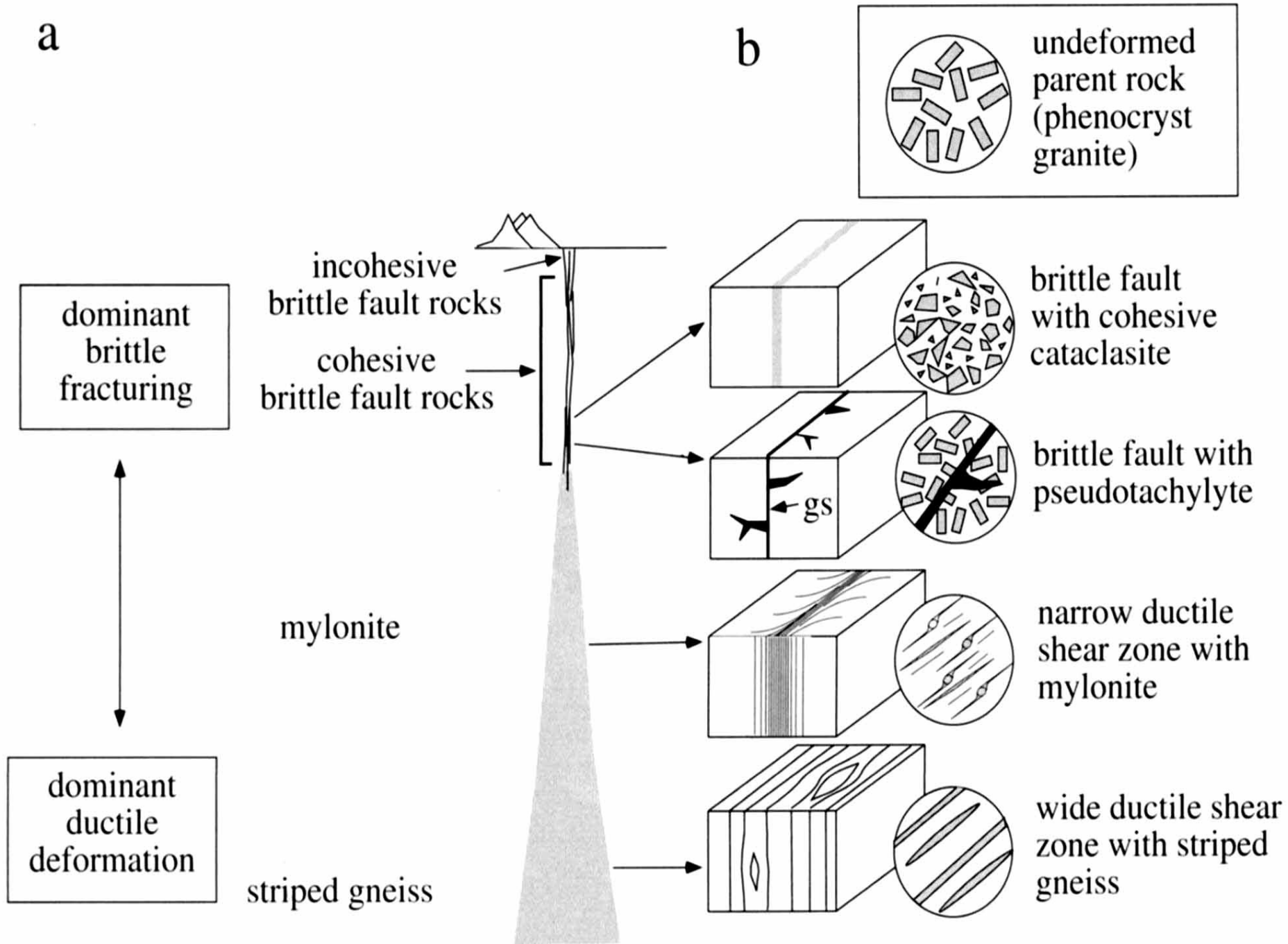
(Indikátory PT podmínek během deformace)



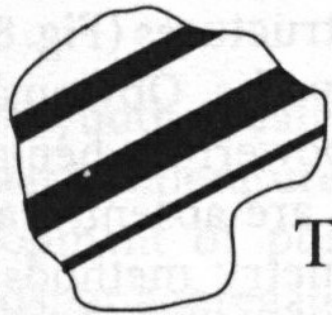
- Jednotlivé minerály se chovají při deformaci rozdílně
- Def.: plastická , křehká
- Založeno na experimentech
- Vliv fluidní fáze



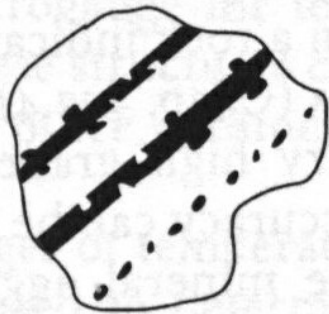
Minerals present: Quartz, plagioclase, microcline, biotite, others too small to see.
Rock type: Granite, Town Mtn. porphyritic
General Location: Wolf Mountain Intrusion, Wolf Mtn. Ranch



Pouze hrubý odhad PT



Type II
150-300 °C

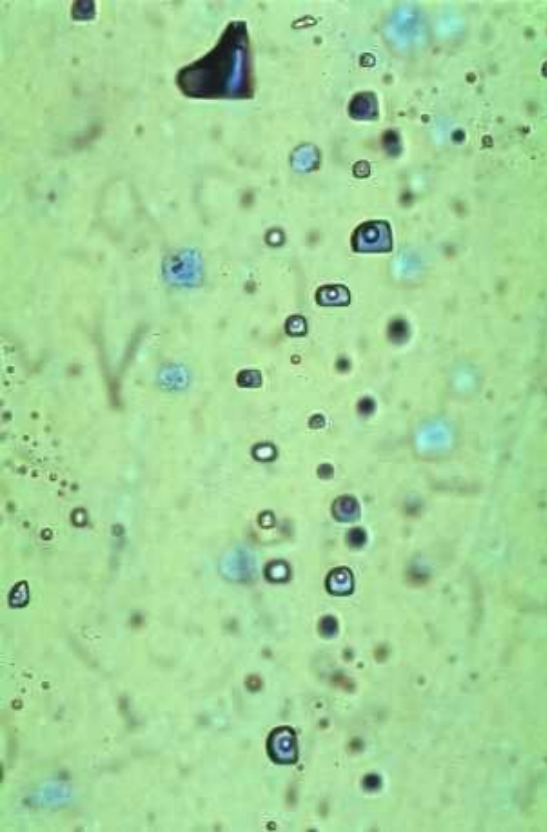


Type IV
>250 °C

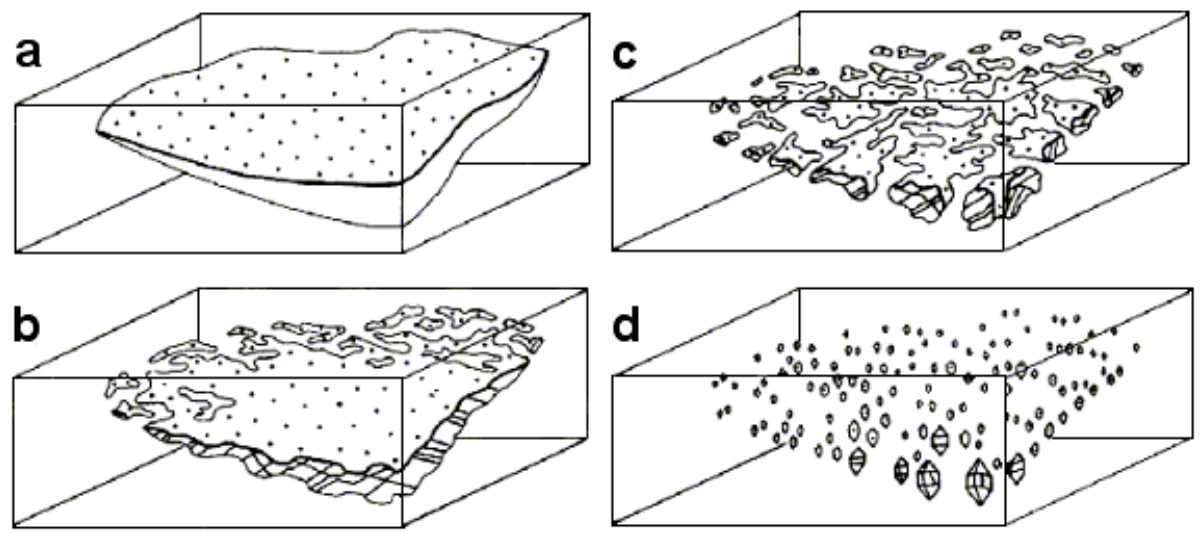
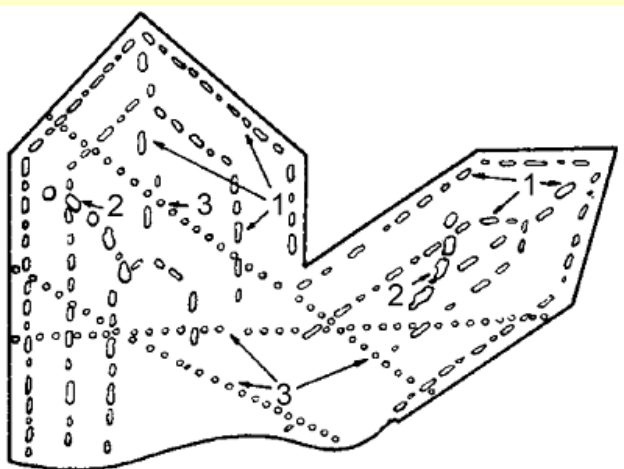


Dvojčatné lamely v kalcitu
vzniklé v důsledku deformace

6) Fluidní inkluze



- Inkluze (uzavřenina) reprezentuje část krystalu, která z hlediska látkového neodpovídá jeho zákonité struktuře, je během růstu či rekrystalizace krystalu hermeticky izolována a vytváří s ním fázovou hranici.
- primární (vznikly současně s hostitelským minerálem a jejich složení zhruba reprezentuje prostředí vzniku minerálu),
- sekundární inkluze (vznikly později, než hostitelský minerál a jsou situovány podél mladších trhlin v krystalech)
- primárně-sekundární (vznikaly během růstu krystalu).



Využití:

- teplota vzniku minerálu
- tlak při vzniku minerálu
- látkové složení fluida z něhož minerál vznikl
- přibližnou koncentraci jednotlivých složek v tomto fluidu
- stav fluida ze kterého minerál vznikl (homogenní x heterogenní)

Podmínky

- Hostitelský krystal je "chemicky nepropustný".
- Inkluze představují chemicky uzavřený (isopleťový) systém.
- Objem inkluze je konstantní, tzn. isochorický systém.

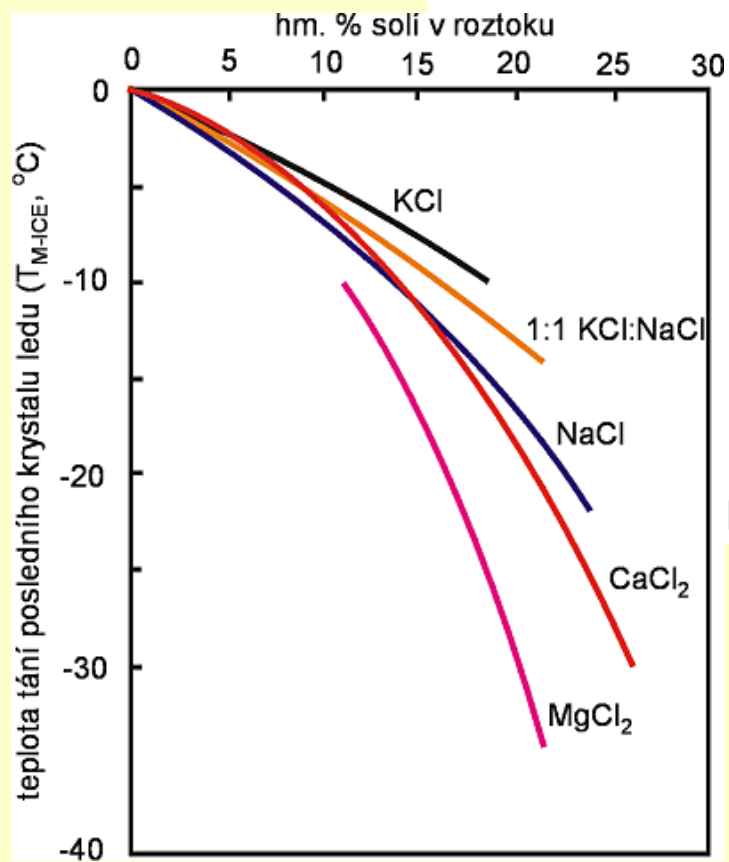
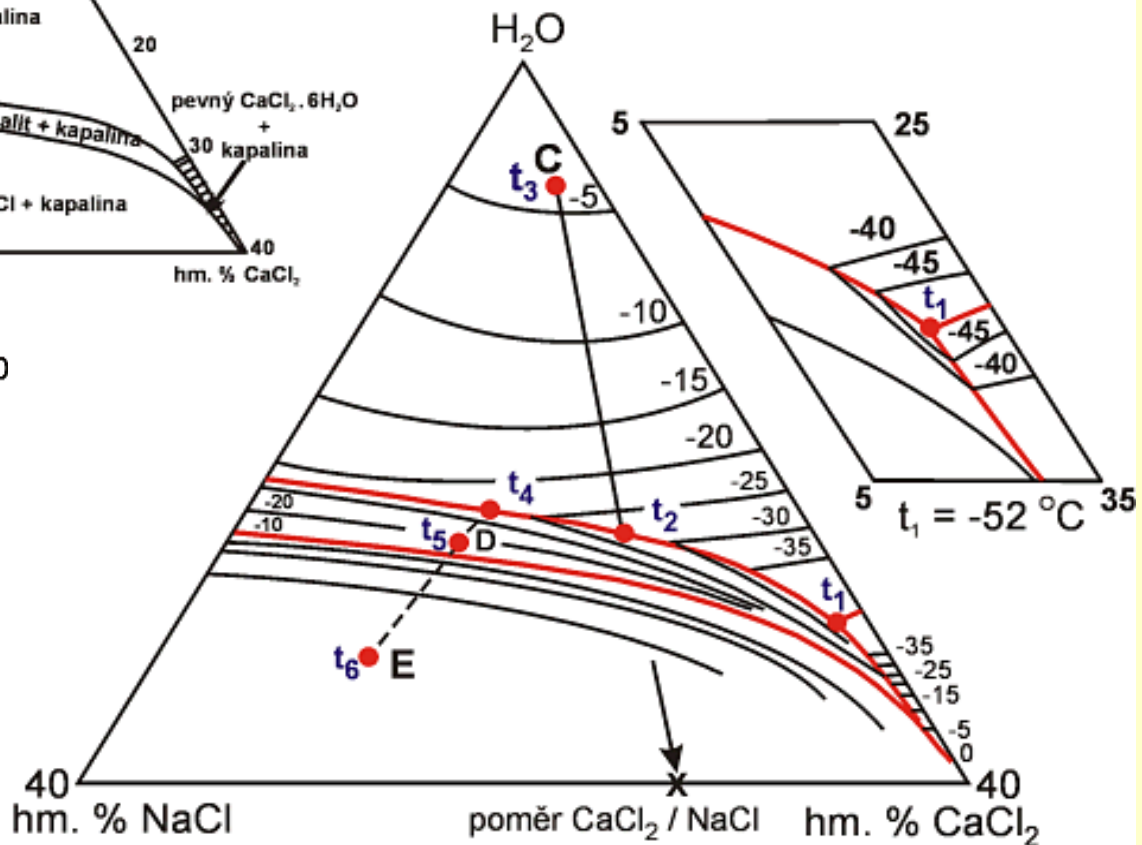
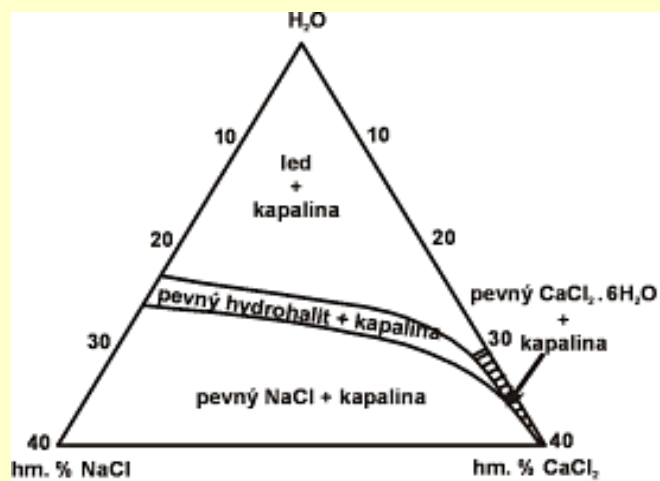
Výhody:

- levné
- široké spektrum informací

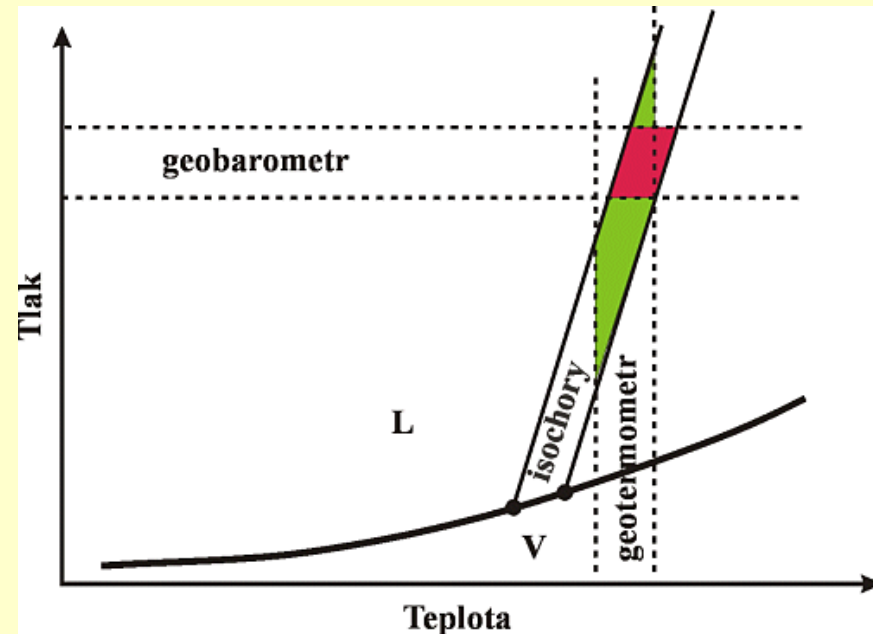
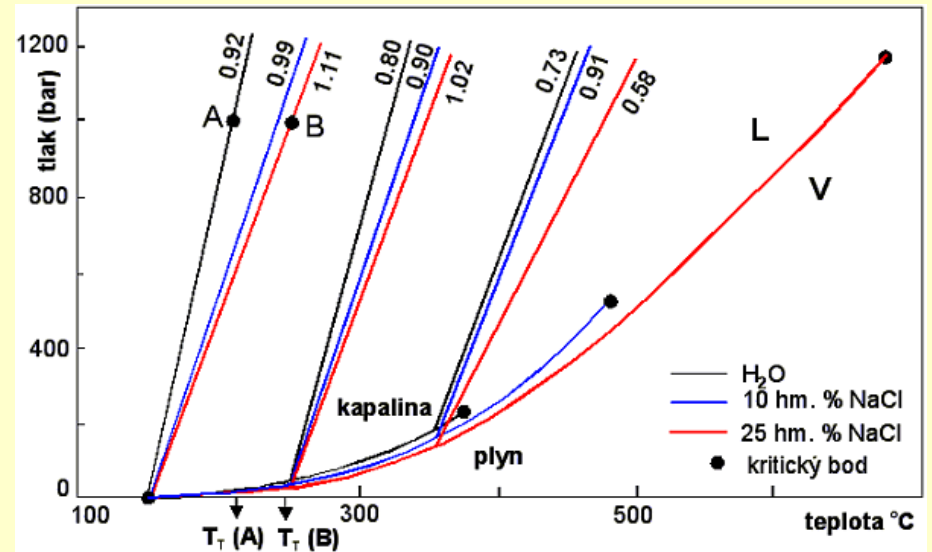
Nevýhody:

- pracné založeno na zkušenosti
- omezené využití v metamorfní petrologii

- $T_m\text{-ice}$ = teplota tání ledu (teplota při níž z inkluze zmizí všechny led).
- T_h = teplota homogenizace (teplota, při níž se celý obsah inkluze přemění v jednu fázi nejčastěji kapalinu nebo plyn). Jestliže známe tlak, při němž inkluze vznikla, můžeme vypočítat z této hodnoty teplotu roztoku při uzavření inkluze.
- T_e = teplota eutektika (teplota, při níž se v zcela zmrazené inkluzi poprvé objeví kapalná fáze). Umožňuje nám zhruba určit chemické složení solí, které jsou v inkluzi obsaženy.
- Při výpočtu salinity podle teploty tání ledu vzorec (Bonar, 1993) pro systém H₂O-NaCl:
- ***Salinita (hm % NaCl_{ekv.}) = 0,00 + 1,78θ - 0,0442θ² + 0,000557 θ³***
- *Kde θ odpovídá -1*(T_{m-ice}). Tato rovnice platí pro rozmezí salinit 0 až 23,2 hm% a T_{m-ice} od 0 do -21,2 °C.*

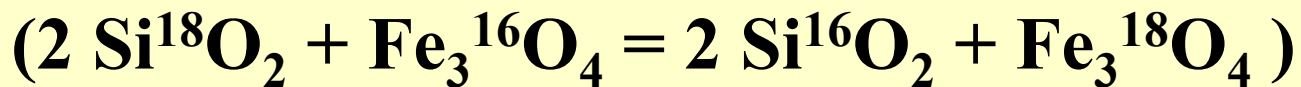


- PT podmínky při vzniku inkluzí můžeme určit, jestliže známe teplotu homogenizace, chemické složení studované inkluze a teplotu vzniku minerálu zjištěnou jiným nezávislým termometrem.
- Teplota vzniku takových inkluzí pak leží v průsečíku izochor a hodnot zjištěných nezávislým termometrem. Diagramy izochor byly pro řadu typů roztoků publikovány nebo můžeme izochory vypočítat.
- Pro vodné roztoky (H_2O , $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$, $\text{H}_2\text{O}-\text{KCl}$, $\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2$) se nejčastěji užívá rovnice odvozená autory Zhang a Frantz (1987).



Další možnosti

- **Krystalinita ilitu**
- **Odraznost vitrinitu**
- **Index barevné přeměny konodontů (Conodont Colour index)**
- **Isotopové geothermometry**



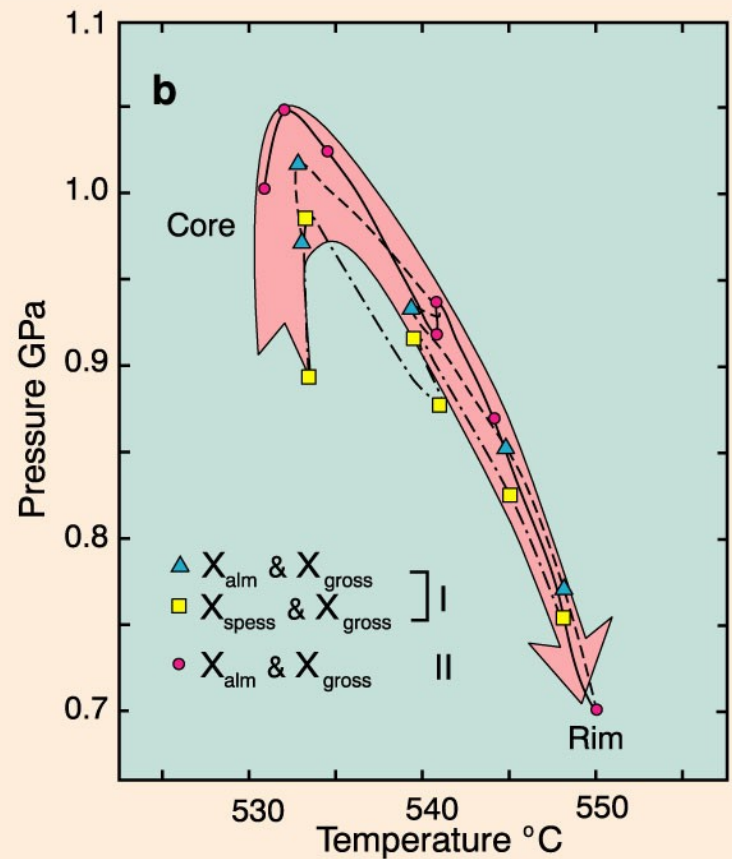
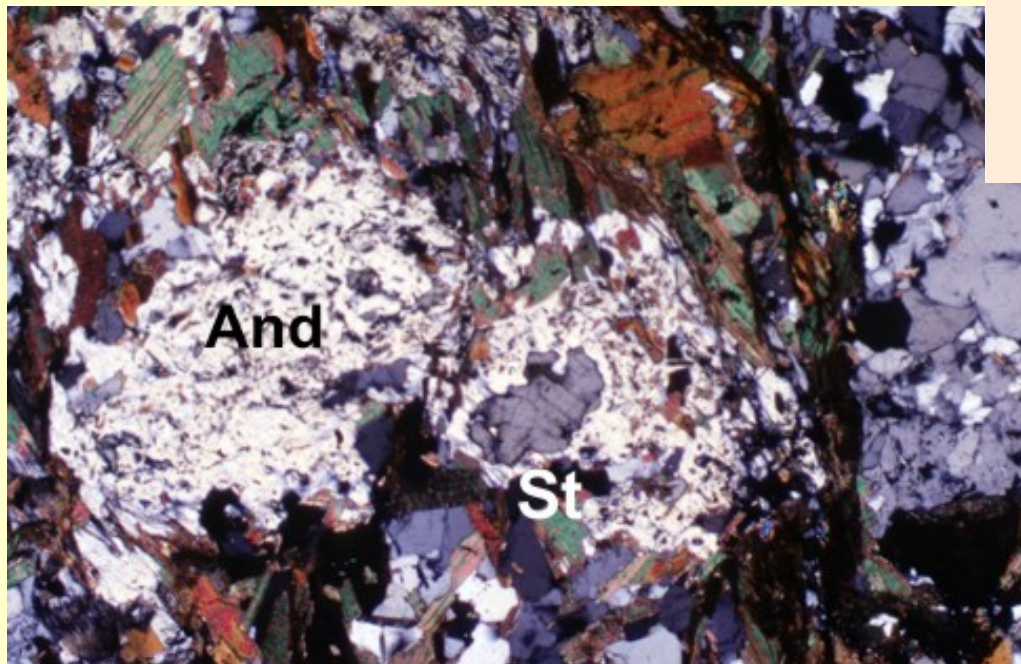
Kromě izotopové geoterometrie jsou ostatní určeny výhradně pro slabě metamorfované sedimenty.

P-T-t dráha pojem a základní koncept

- **P-T-t path (metamorfní dráha P-T-t) = Pressure - Temperature - time**
- **vývoj metamorfovaných hornin v poli P-T v čase**
- **odrážejí tlakové a teplotní podmínky které prodělala hornina od začátku své metamorfní historie do své exhumace na zemském povrchu.**

- **základní koncept:**
 - **rovnovážné asociace v metamorfované hornině odrážejí T_{\max}**
 - **$\Rightarrow \Rightarrow$ stanovení P-T podmínek vrcholu metamorfózy**
 - **metamorfované horniny zaznamenávají sled rovnovážných stavů**
 - **$\Rightarrow \Rightarrow$ odvození dráhy P-T**

- většina hornin je produktem více metamorfních událostí, které po sobě následovaly a ty starší byly více či méně dokonale překryty mladšími pochody
- většinou je v hornině dobře zachycena především retrográdní fáze



P-T diagram ukazuje tři modelované “clockwise” P-T-t dráhy vypočtené na základě zonálnosti granátů (Selverstone *et al.* (1984) *J. Petrol.*, 25, 501-531 and Spear (1989). After Spear (1989) *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineral. Soc. Amer. Monograph 1).

P-T-t

- **P** = litostatický tlak (1kb = 0,1 GPa) ,
- **T** = teplota (°C, termodynamika Kelvin: $T \text{ (K)} = T \text{ (°C)} + 273.15$)
- **t** = čas
- 1) relativní
- 2) absolutní (Ma) - geochronologie - přiřazení zjištěného stáří k určité metamorfní události (konkrétní PT data)
- metoda U/Pb - zirkon, monazit, granát
- metoda Ar/Ar – amfibol, biotit, muskovit
- metoda Sm/Nd – Grt, WR

1) litostatický tlak

litostatický tlak (confining pressure, všesměrný)

$$P = \rho gh$$

ρ - hustota hornin nadložního sloupce

(granity 2,7, bazalty 3,0, peridotit 3,3 gcm⁻³)

g – tíhové zrychlení (9,8 ms⁻²)

h – hloubka

2.6-3.2kb \approx 10km hornin \Rightarrow

tj. nárůst s hloubkou cca 1 kbar/3 km

používané jednotky: 1 bar = 10⁵ Pa = 0,1 MPa

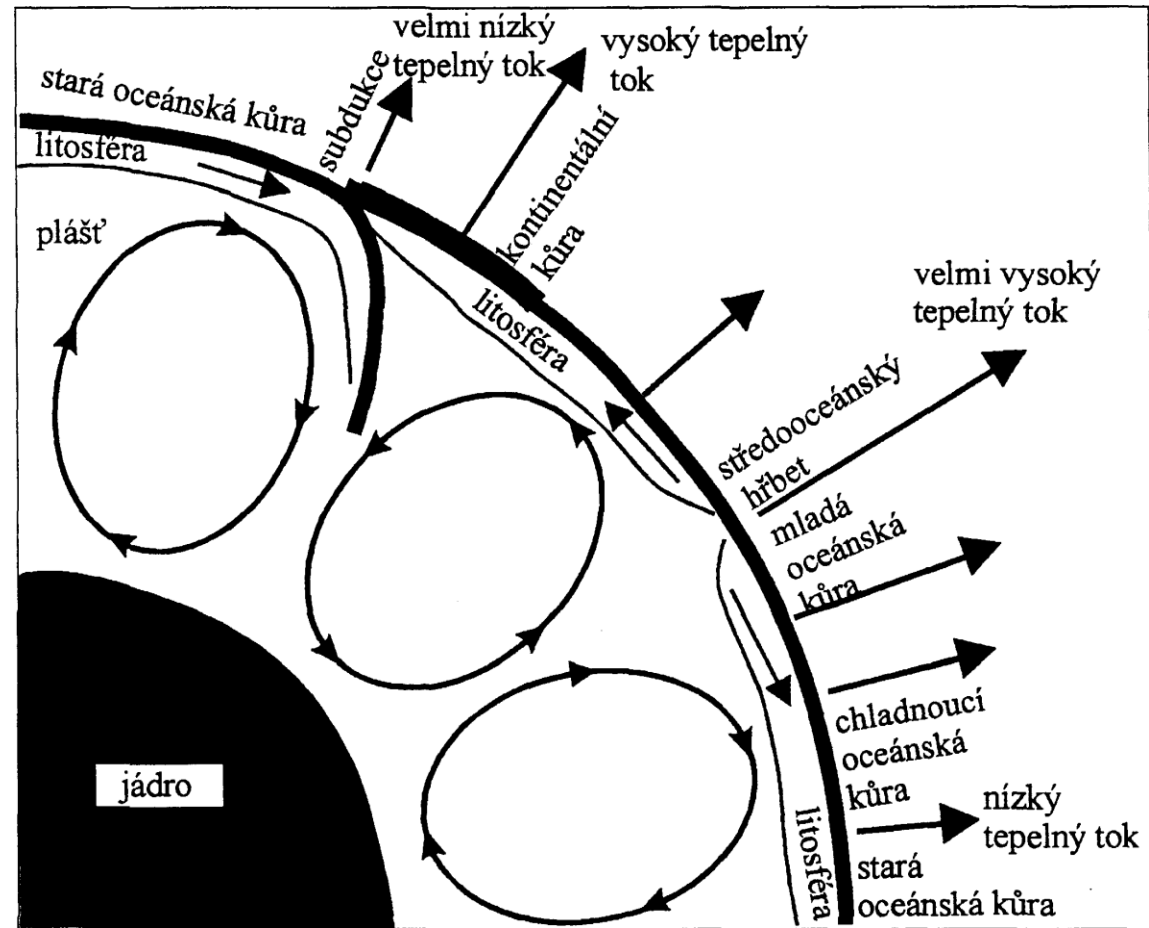
1 kbar = 0.1 GPa

2) Tepelný tok, geotermální gradient, geoterma

zdroje tepla

- tok tepla ze zemského pláště
- teplo uvolněné při radioaktivním rozpadu v kůře (U, Th)
- teplo přinesené magmatickými horninami
- endotermní metamorfní reakce

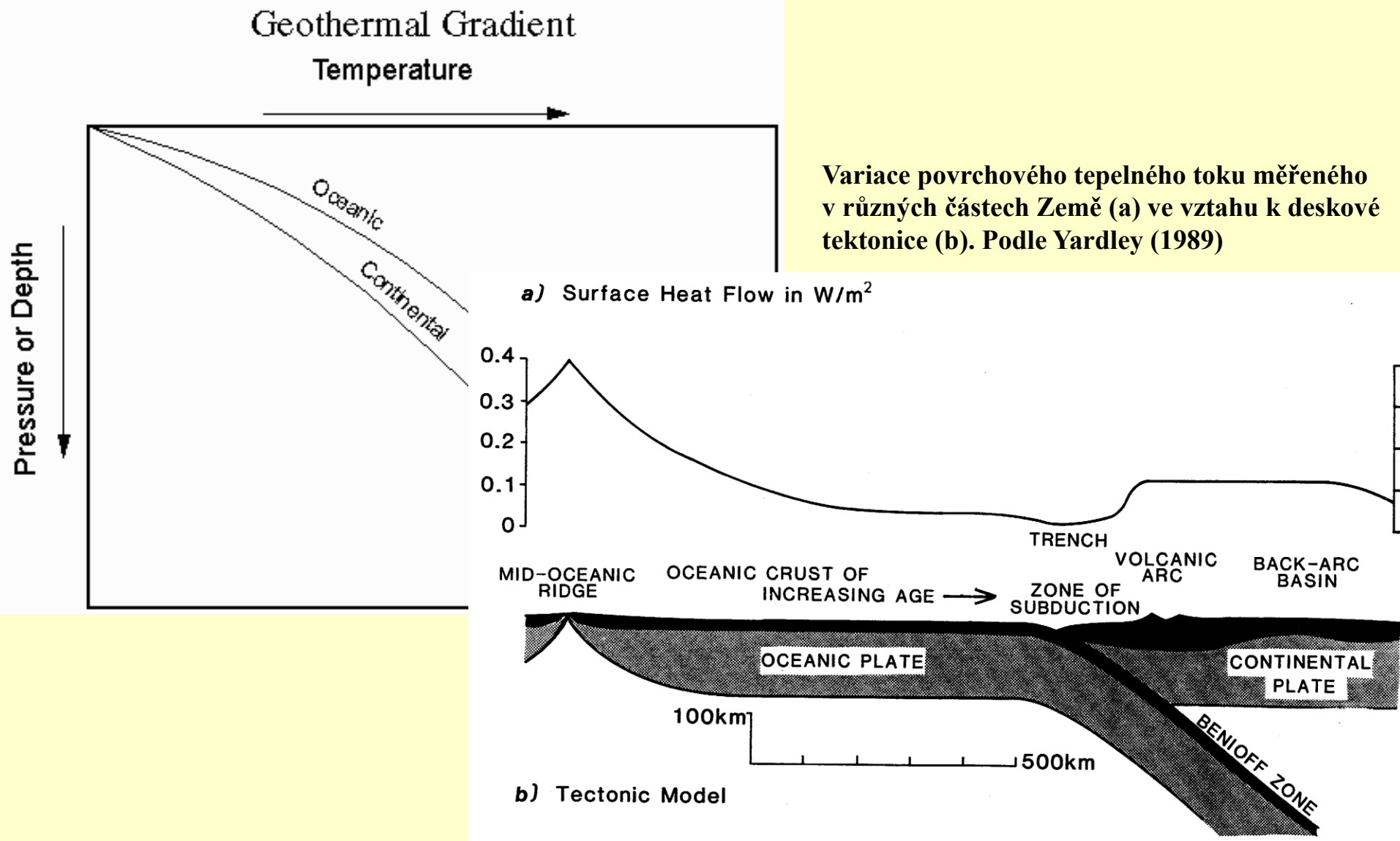
Rozdíly tepelného toku v různých geotektonických kontextech (Konopásek et al. 1998)

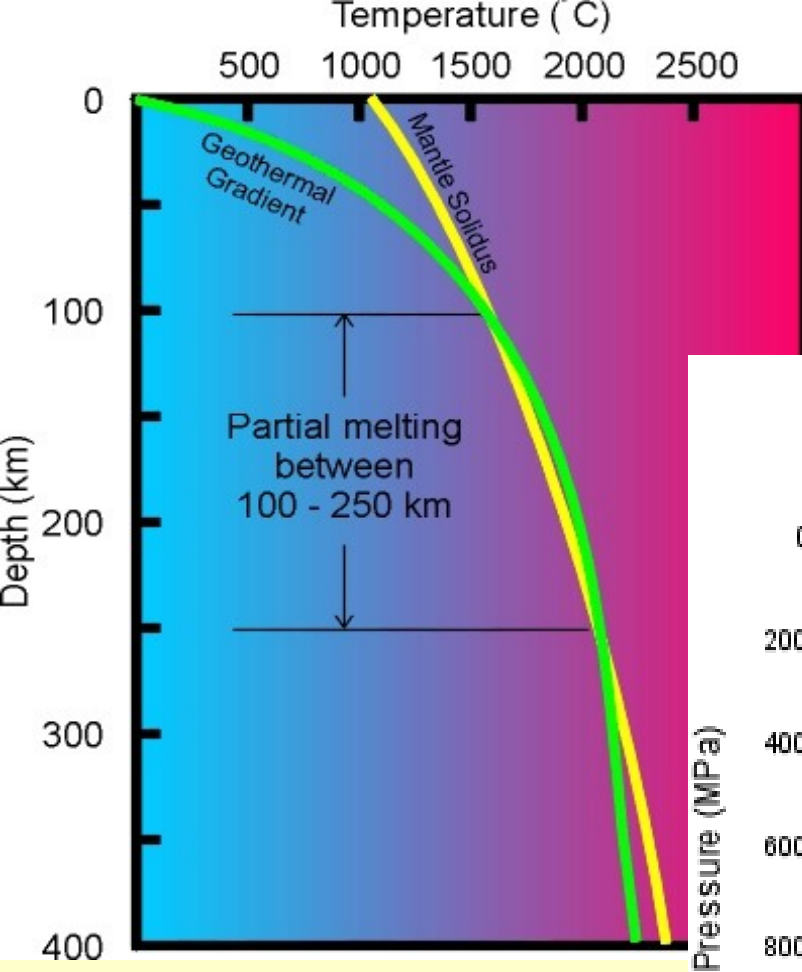


- **ZVÝŠENÍ t.t.** = výstup magmatu (konvexe, advekce), nebo tektonika – pohřbení hornin (ztluštění kůry - příkrovy), rychlý zdvih a eroze.
- relativní přemístění části zemské kůry vůči P a T gradientům (zdvih či pohřbení) nebo gradientů vůči kůře (intruze či snížení tepelného toku)

geotermální gradient (dT/dz) – avg. $15-30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ = sklon geotermny.

Měření tepelného toku na povrchu různý geotermální gradient v různých geotektonických prostředích



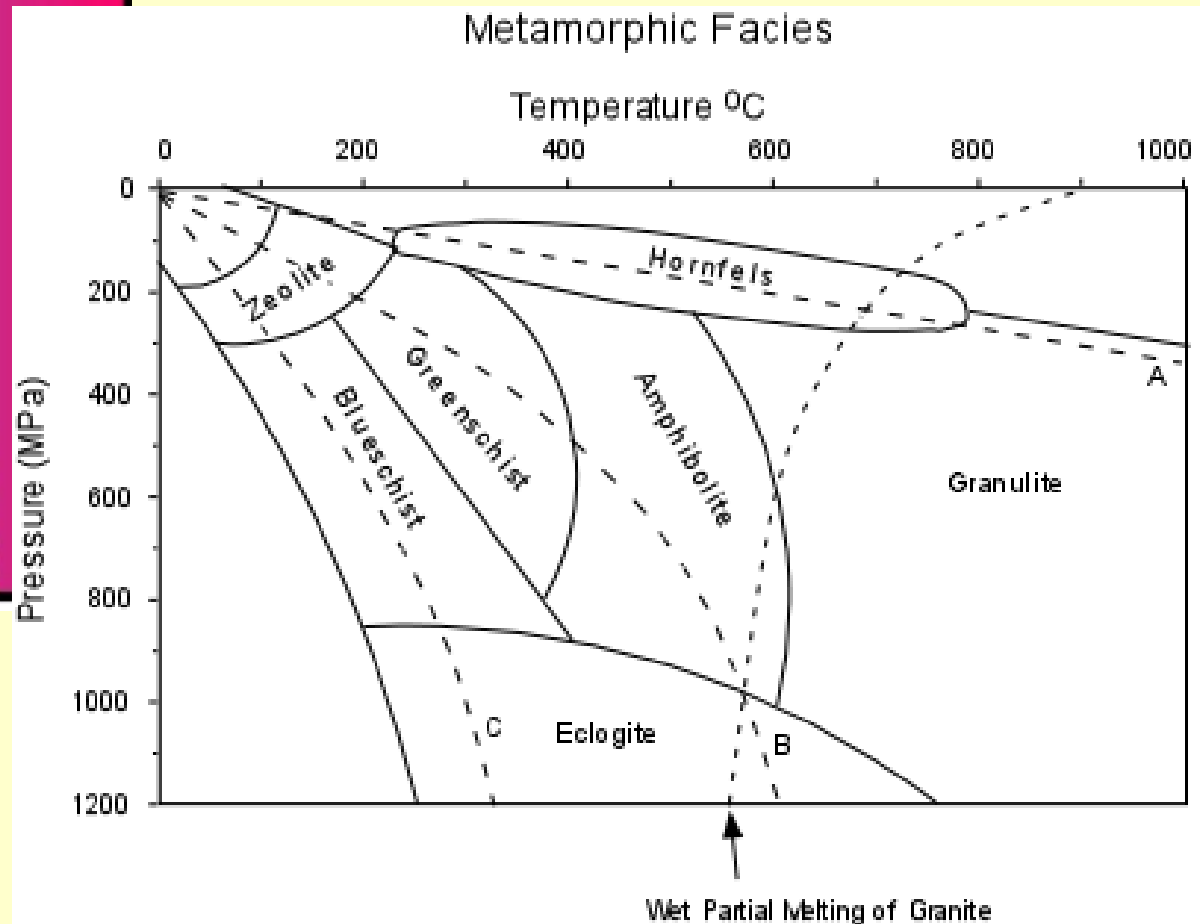


• **geoterma** (dT/dz - °C/km): z částí o různém **geotermálním gradientu**

T v závislosti na hloubce
v **určitém čase**

• **stálá** ($dT/dt = 0$) – stabilní oblasti kůry

• **porušená** – orogeny, tendence přiblížit se stálé



A = High Geothermal Gradient (contact metamorphism), Low P, High T

B = Normal Geothermal Gradient (regional metamorphism), High P, High T

C = Low Geothermal Gradient (subduction), High P, Low T



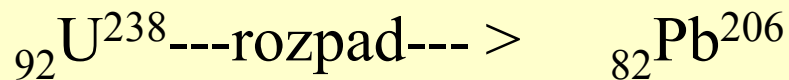
- Čas
- 1) relativní
- a) pre-tektonická žíla
- b) post-tektonická žíla



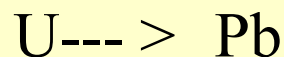
Čas

2) absolutní

${}_{92}\text{U}^{238}$	${}_{92}\text{U}^{235}$	
92	92	proton
<u>146</u>	<u>143</u>	neutron
238	235	



decay constant= 1.5369×10^{-10} /let

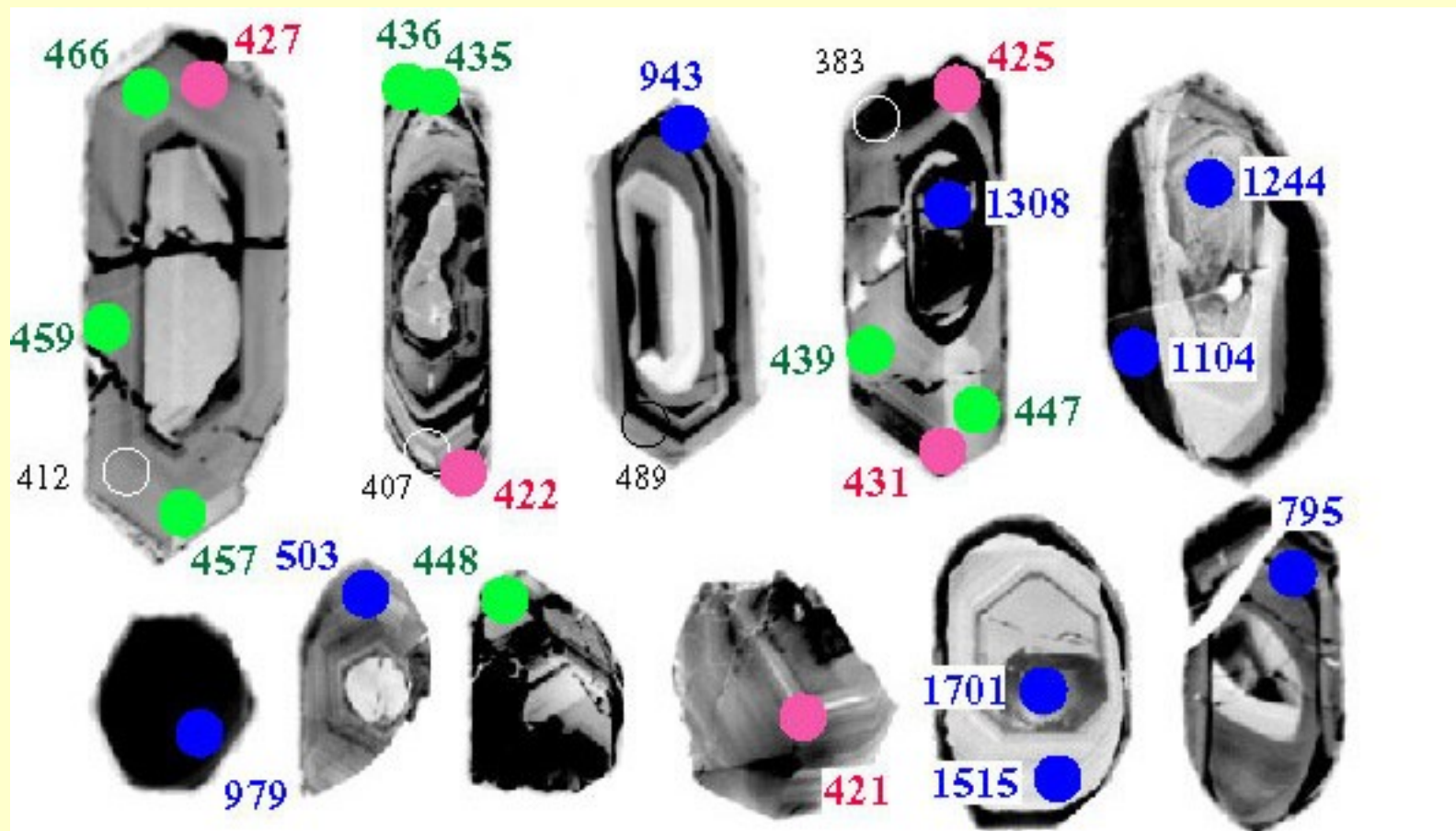


poločas rozpadu $\text{U}^{238} \text{---} > \text{Pb}^{206} = 4,5$ miliardy let

zirkon $(\text{Zr},\text{U})\text{SiO}_4$

- radioaktivita je samovolný rozpad nestabilních prvků na stabilní dceřinné prvky
- radioaktivita není závislá na chemických a fyzikálních faktorech

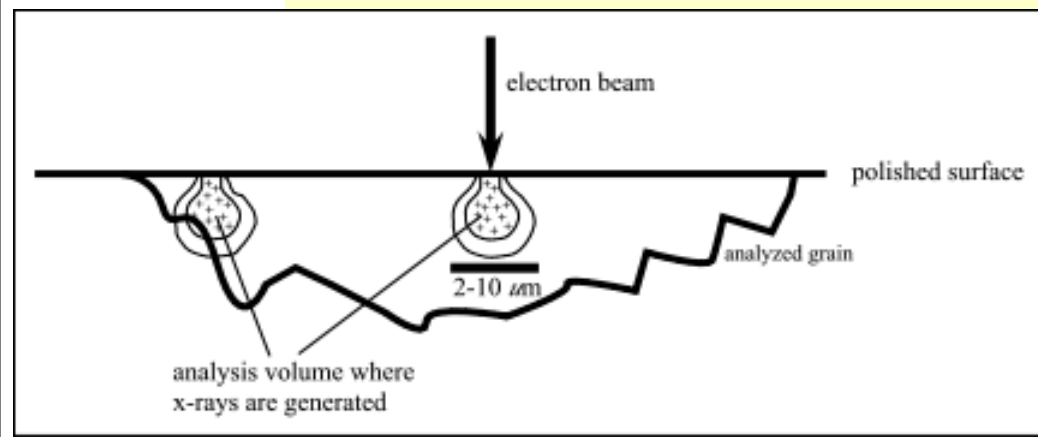
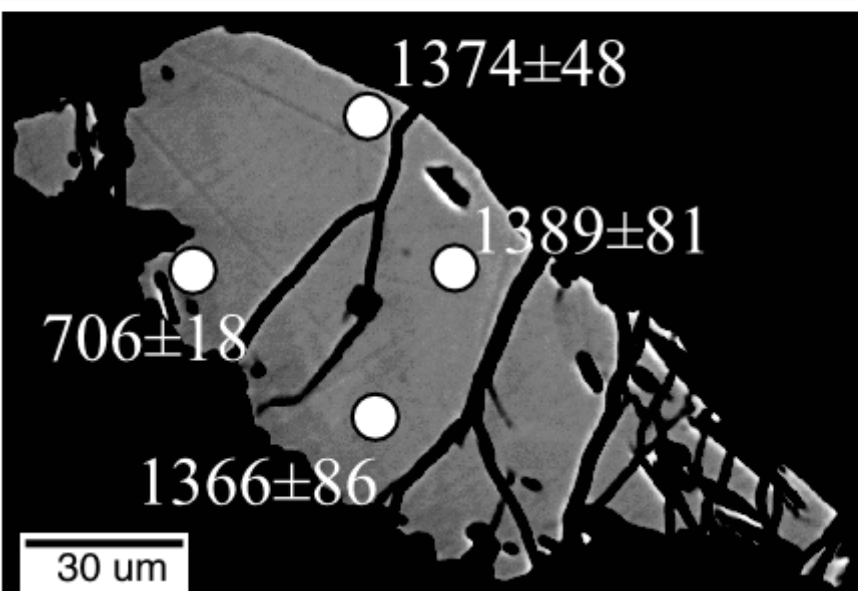
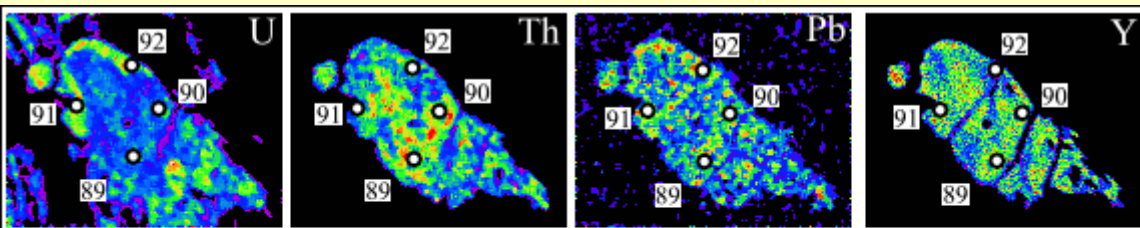
- minerály musí být produktem metamorfózy
- pozor na starší jádra
- minerály mohou být modifikovány mladší metamorfózou (K-Ar)



U-Pb monazit

$$Pb = \frac{Th}{232} [\exp(\lambda^{232} \tau) - 1] 208 + \frac{U(0.9928)}{238.4} [\exp(\lambda^{238} \tau) - 1] 206 + \frac{U(0.0072)}{235} [\exp(\lambda^{235} \tau) - 1] 207$$

where λ = decay constants
 τ = time in years



Mineral	Method	T (C)
Zircon	U-Pb	>800
Monazite	U-Pb	>800
Titanite (Sphene)	U-Pb	600
Garnet	Sm-Nd	>550
Hornblende	K-Ar	500
Muscovite	Rb-Sr	500
Muscovite	K-Ar	350
Apatite	U-Pb	350
Biotite	Rb-Sr	300
Biotite	K-Ar	280
K-Feldspar	K-Ar	200
Apatite	Fission Track	120

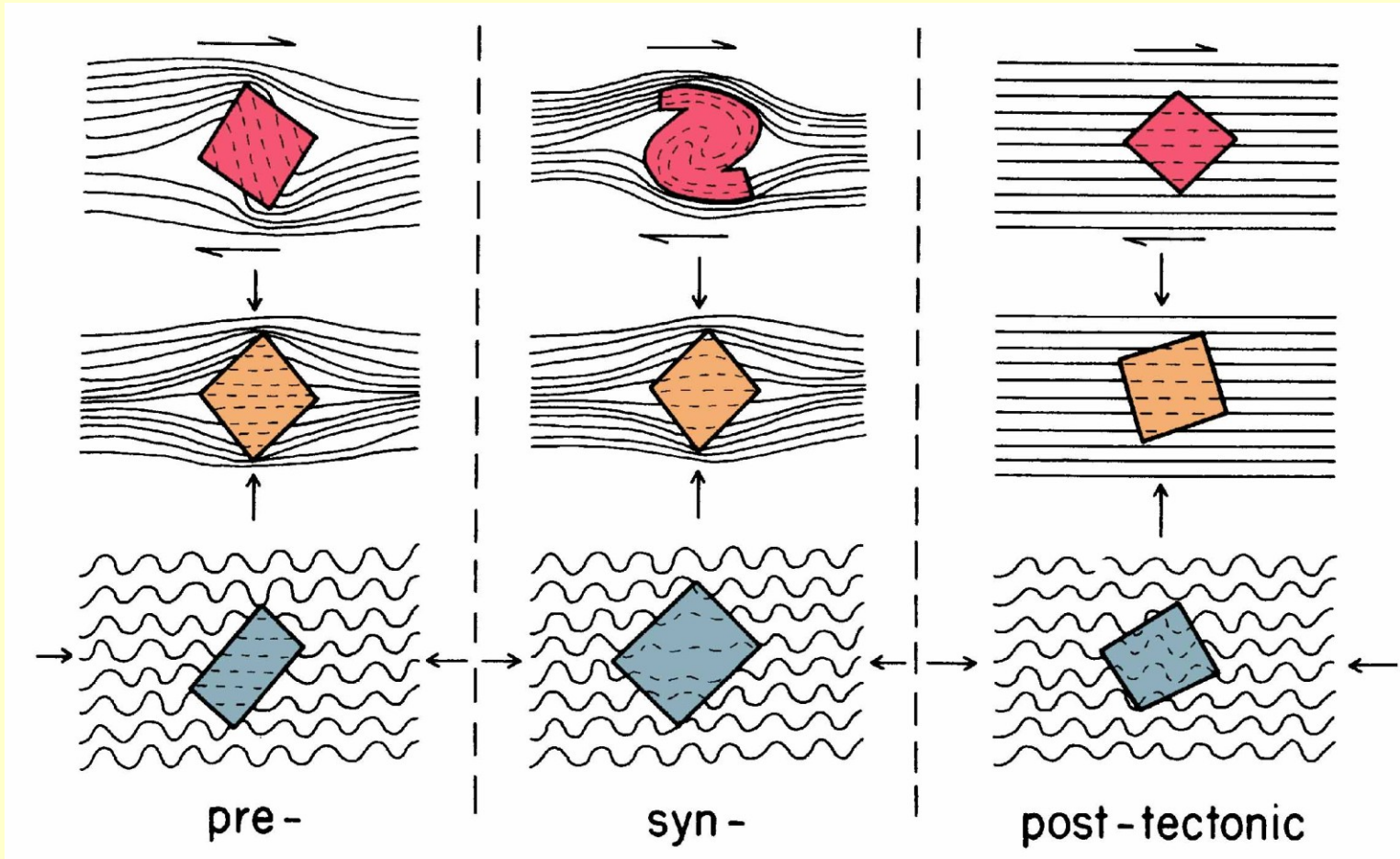
- T_C - „closure temperature“
teplota kdy přestává difuzní
ztráta dceřinného prvku
krystalu

U-Pb	
zirkon	>900
monazit	650–740
titanit	500–670
K-Ar a Ar-Ar	
amfibol	500–450
muskovit	350–400
biotit	300
mikroklín	150–250
Rb-Sr	
muskovit	450–500
biotit	350
ortoklas	320

Postupy a indikátory konstrukce trajektorií P-T-t

Rekonstrukce dráh P-T

- sled rovnovážných stavů v hornině $\Rightarrow \Rightarrow$ odvození dráhy P-T
- analýza **vztahů krystalizace a deformace** \Rightarrow rozlišení pre-, syn- a post-kinematických minerálů (asociací)

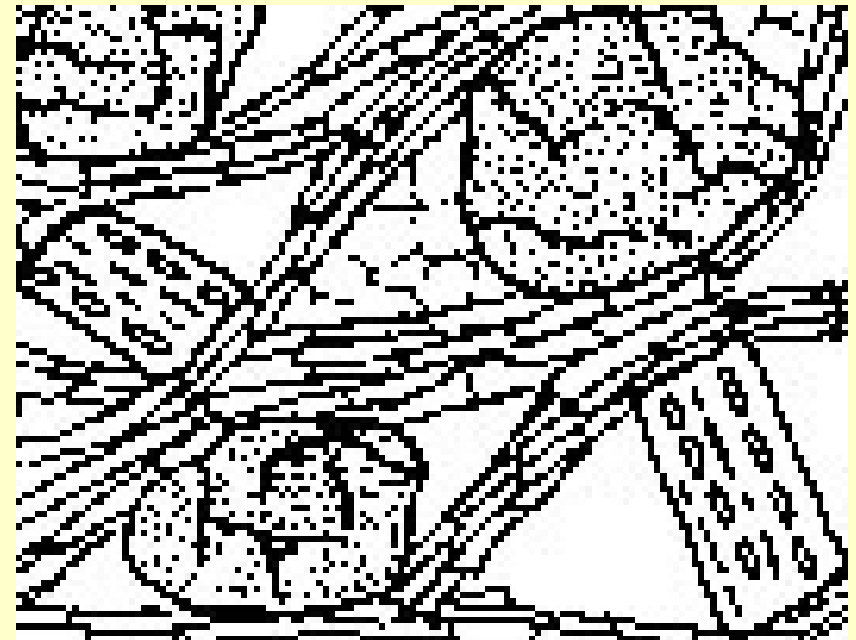
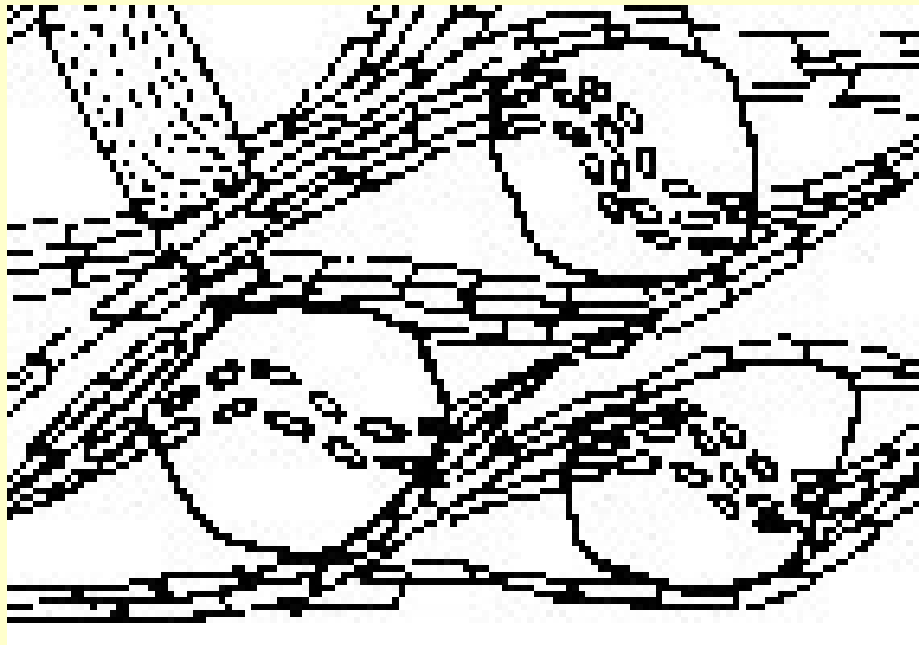


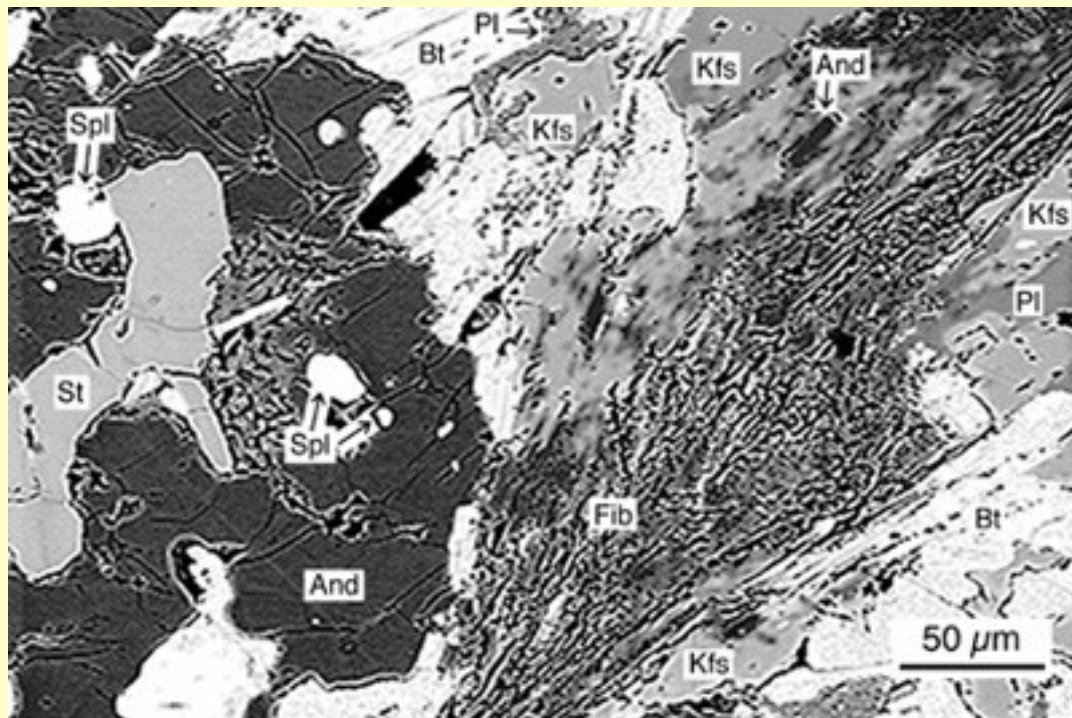
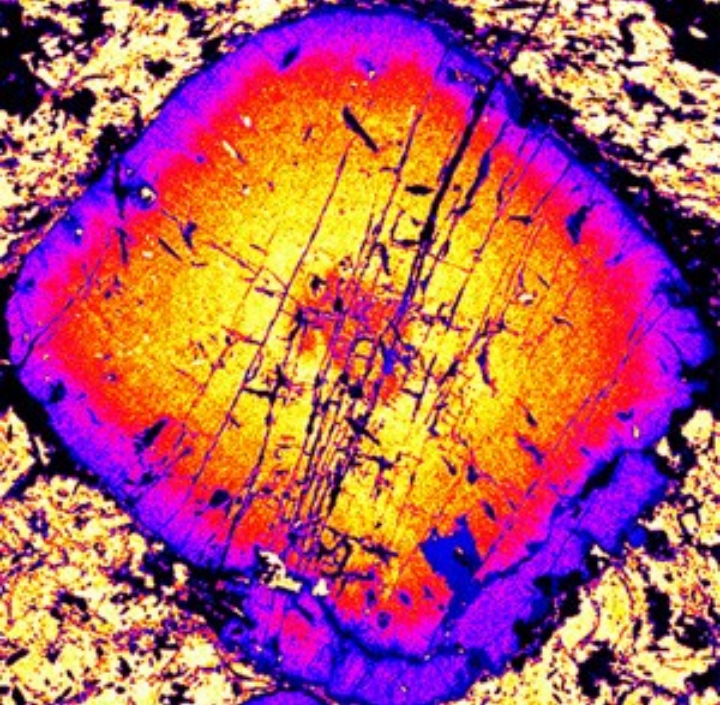
Krystalizace a deformace

1) Postkinematická stavba: Nová minerální asociace vznikla až po deformaci. Proto nové minerály přerůstají deformační stavby jako je foliace nebo vrásy.

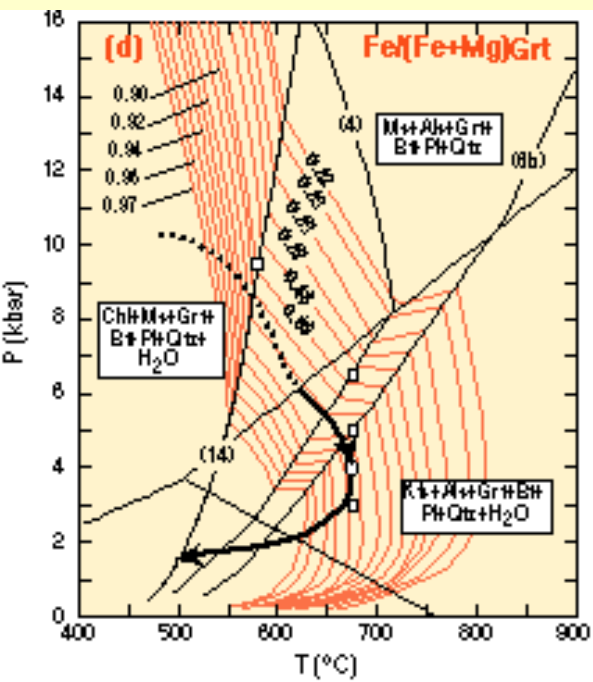
2) Synkinematická stavba: Minerály nové minerální asociace rostou během deformace (např. rotovaný granát vznik foliace).

3) Pretektonická stavba: minerály byly po svém vzniku postiženy deformací (vynikají tlakové stíny a undulosní zhášení).





Grt Ca X-Ray map

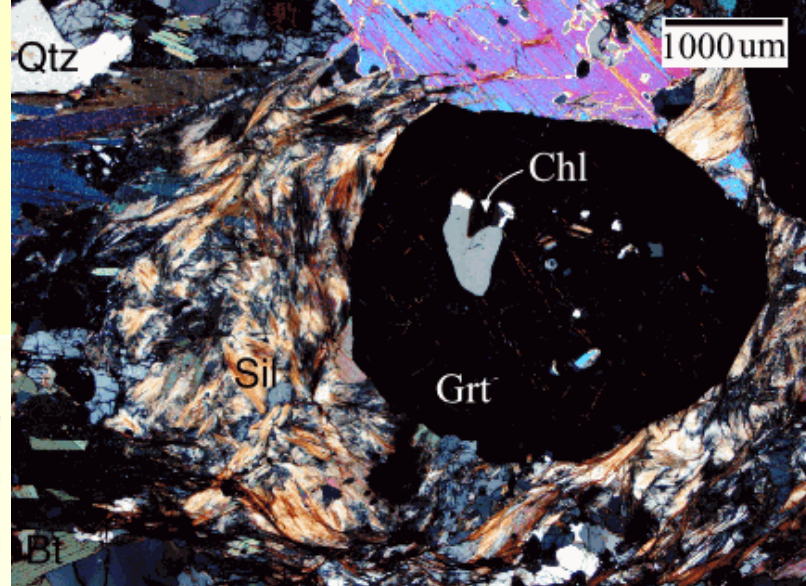


•indikátory konstrukce trajektorií P-T:

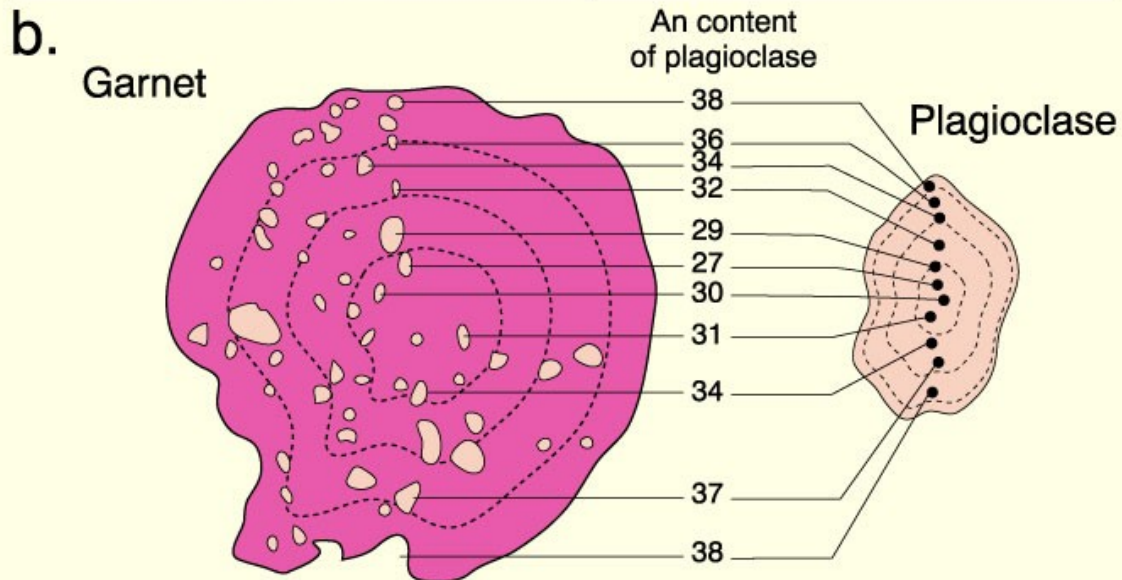
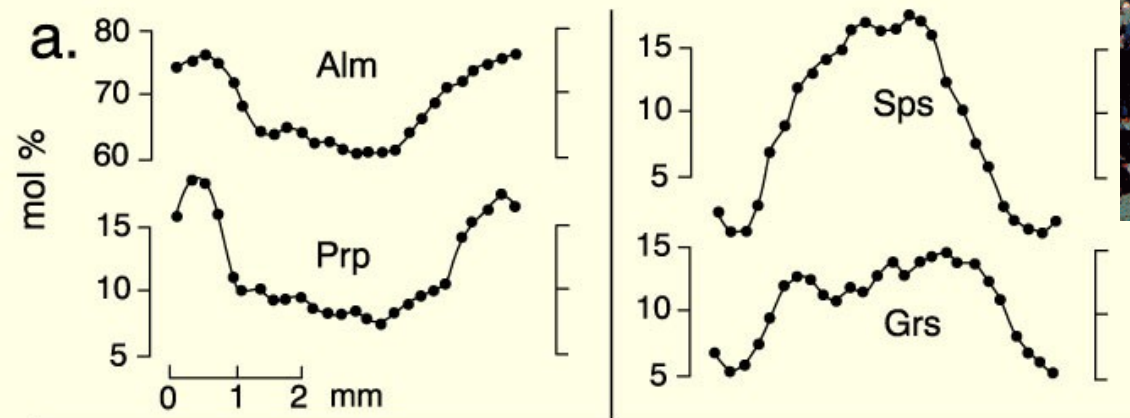
- * inkluze
- * reakční struktury
- * diagramy P-T-X
- * zonalita minerálů

- progradní zonálnost minerálů - lze využít k rekonstrukci části dráhy P-T
- retrogradní zonálnost minerálů je ale častější
- výměna prvků během chladnutí po vrcholu metamorfózy
- vzniká difuzní profil na okraji zrn (minerál s pomalejší difusí)
- vrcholné podmínky metamorfózy mohou být zachovány v jádrech minerálů
- T_C – „closure temperature“ teplota zaznamenaná geotermometrem který byl ovlivněn chladnutím, pro Grt-Bt (Fe-Mg) $\approx 525-580^\circ$

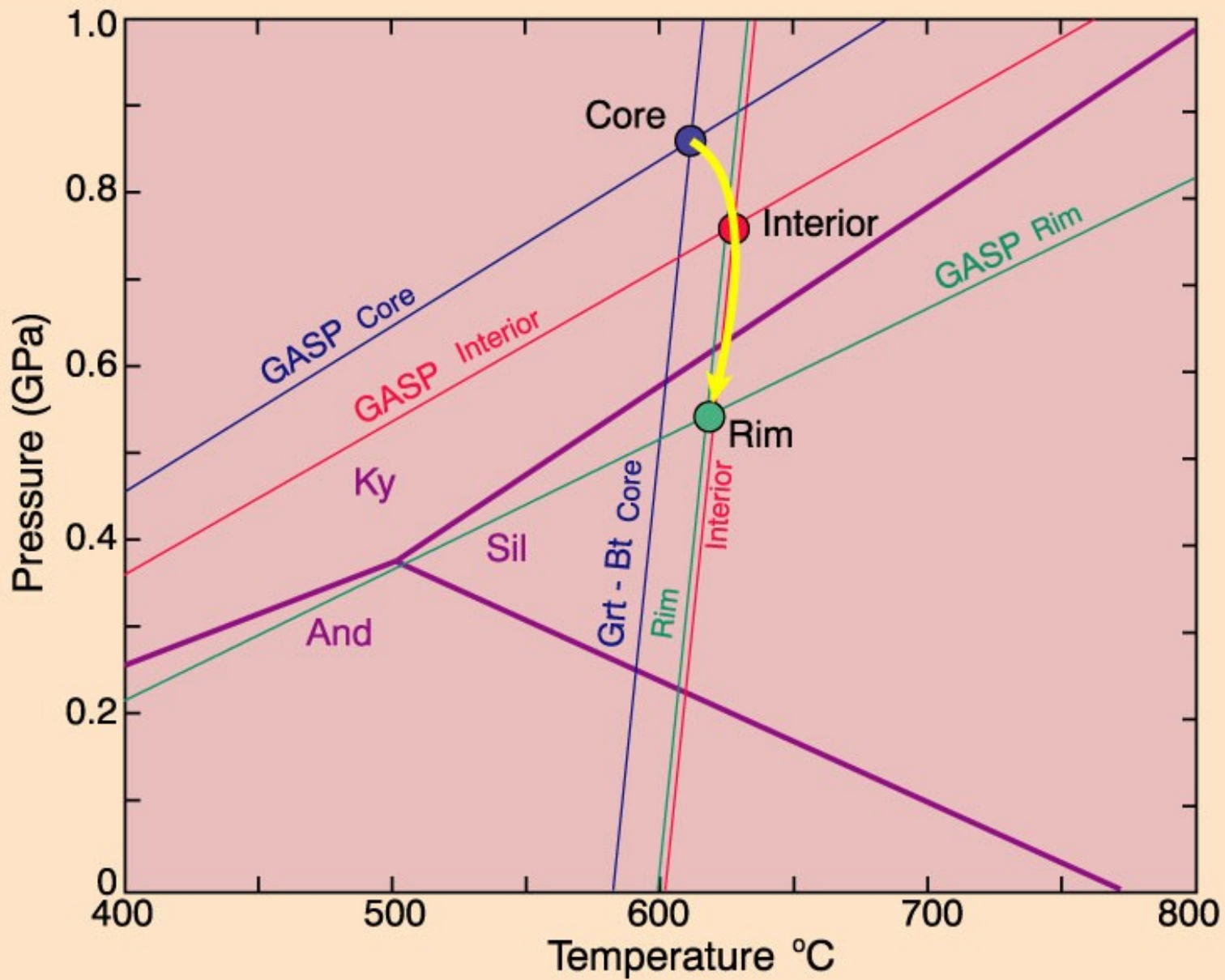
P-T dráhy



porfyroblast Grt obsahuje inkluze Chl a je lemován Sill



Chemická zonálnost Grt z metapelitů (Wopmay Orogen, Canada). a. Chemický profil přes Grt. b. An-obsah v Pl inkluzích v Grt který koresponduje se zonálností v Pl, St-Onge (1987) *J. Petrol.* 28, 1-22 .



The results of applying the garnet-biotite geothermometer of Hodges and Spear (1982) and the GASP geobarometer of Koziol (1988, in Spear 1993) to the core, interior, and rim composition data of St-Onge (1987). The three intersection points yield P-T estimates which define a P-T-t path for the growing minerals showing near-isothermal decompression. After Spear (1993).

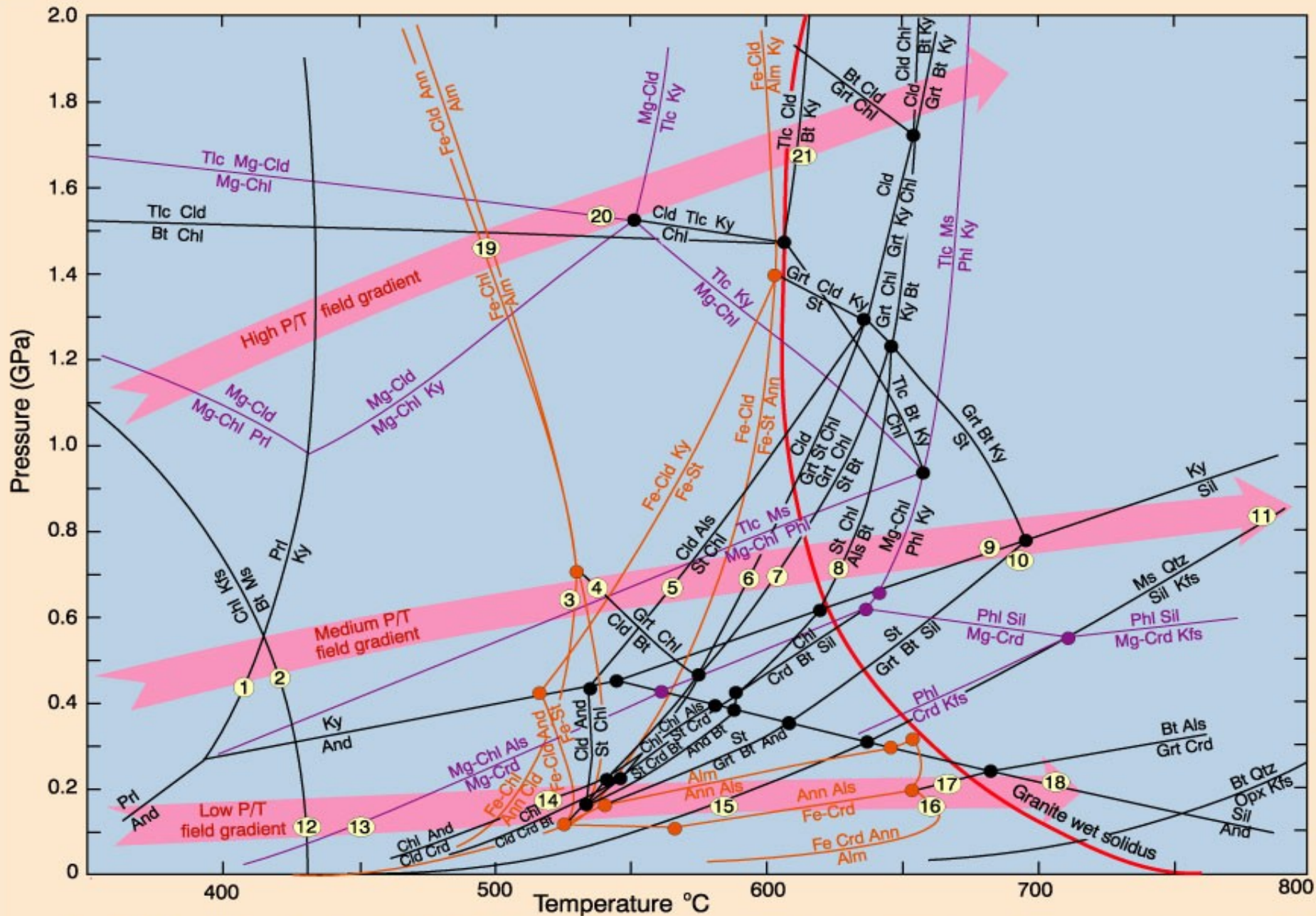
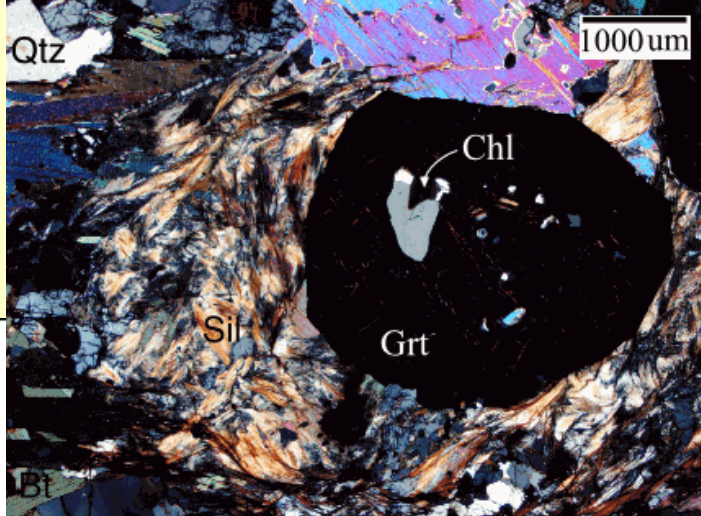
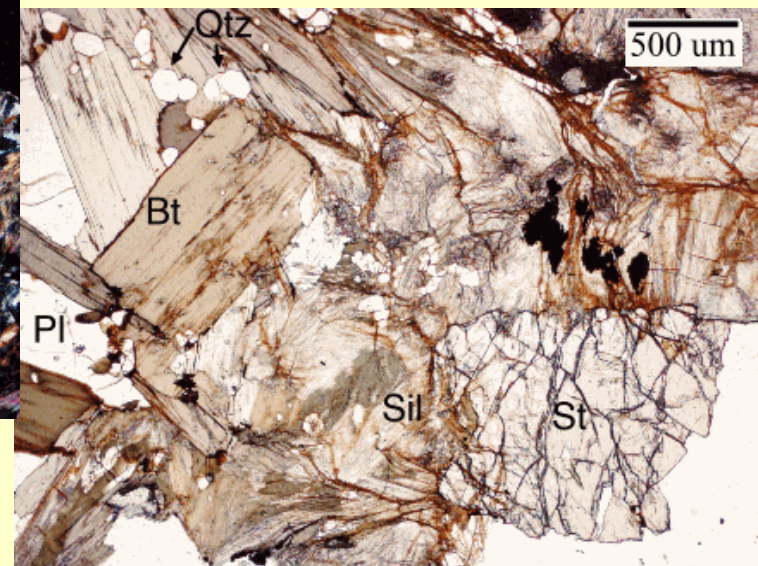


Figure 28-2. Petrogenetic grid for the system KFMASH at $P_{H_2O} = P_{total}$. Orange curves represent the system KFLASH and purple curves represent the system KMASH. Reactions are not balanced, and commonly leave out quartz, muscovite, and water, which are considered to be present in excess. Typical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

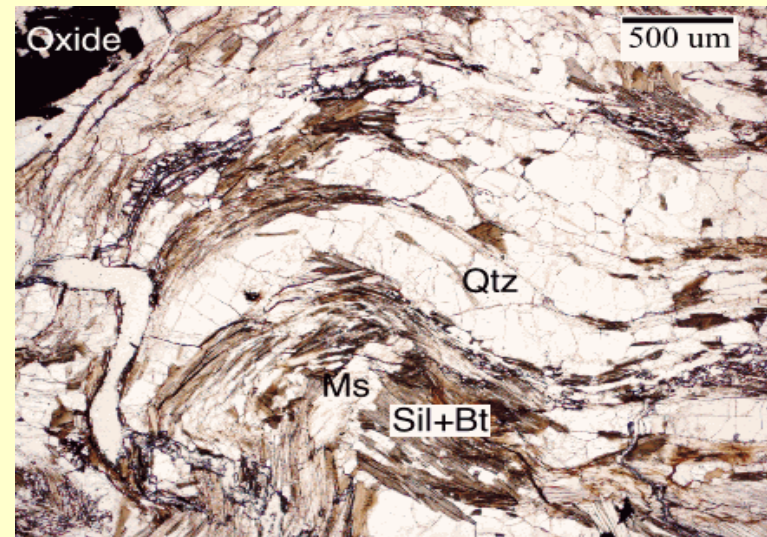
chloritoid + biotit =
granát + chlorit + H₂O



ganát + chlorit + muskovit = staurolit +
biotit + H₂O

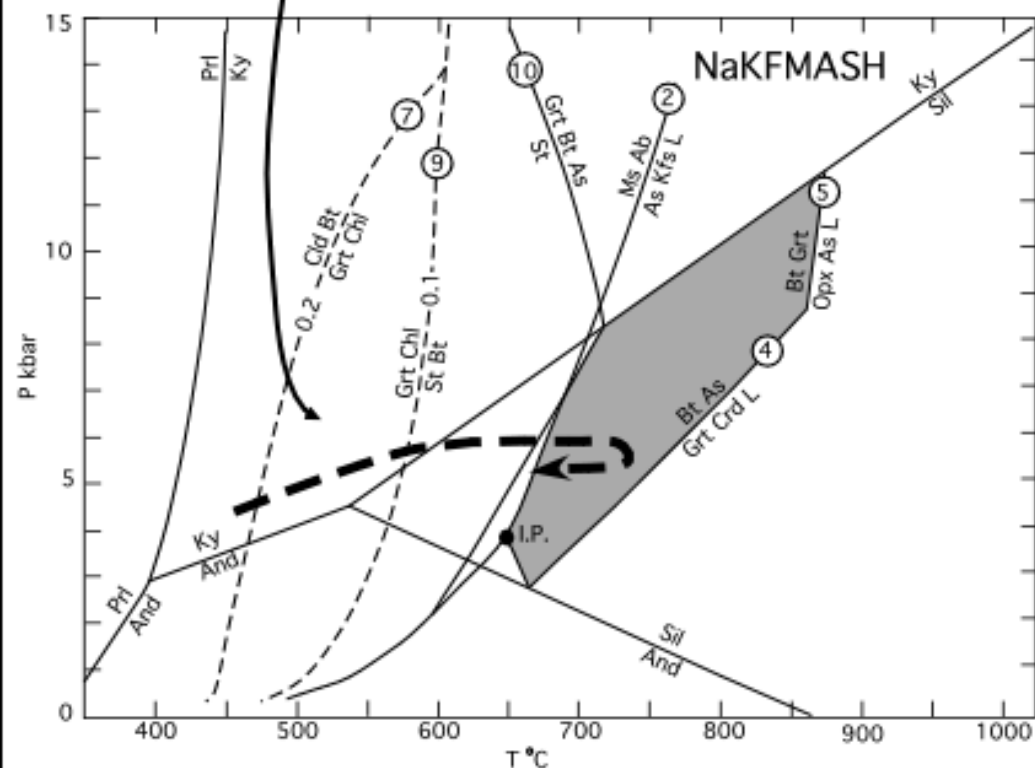


staurolit = ganát + biotit + Al₂SiO₅ (sillimanit)

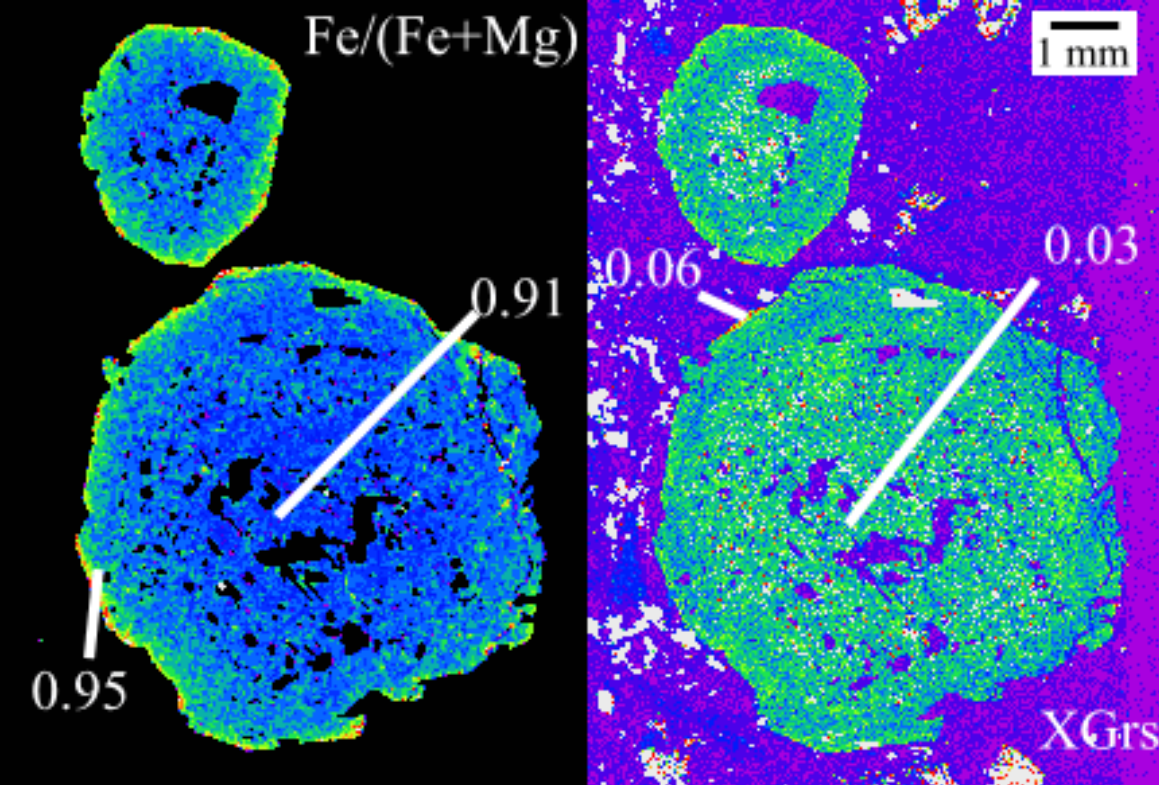


biotit + Al₂SiO₅ (sillimanit) = ganát + K-živec +
tavenina

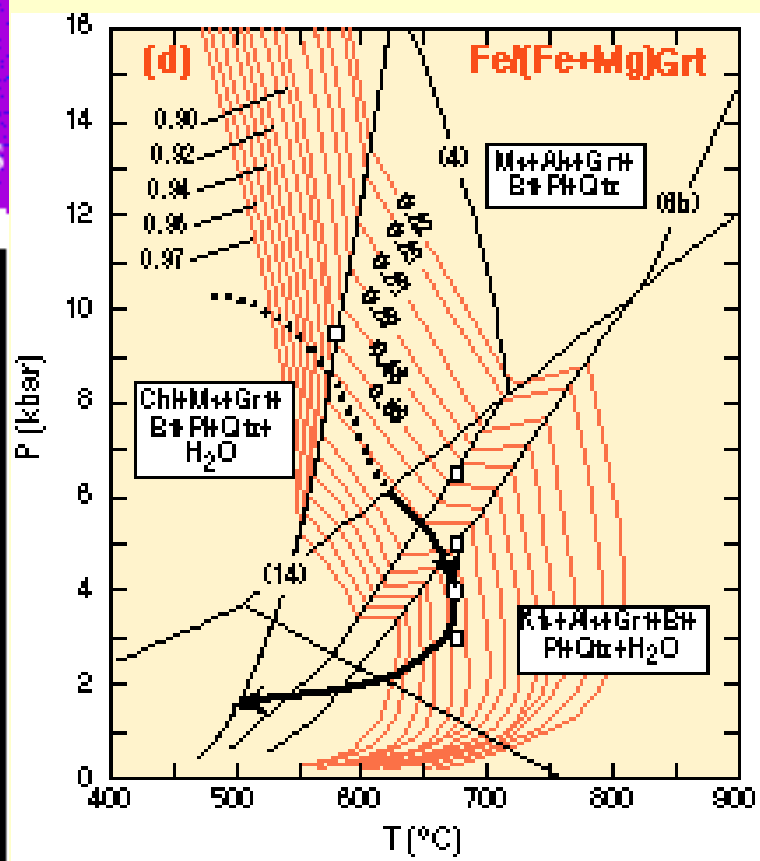
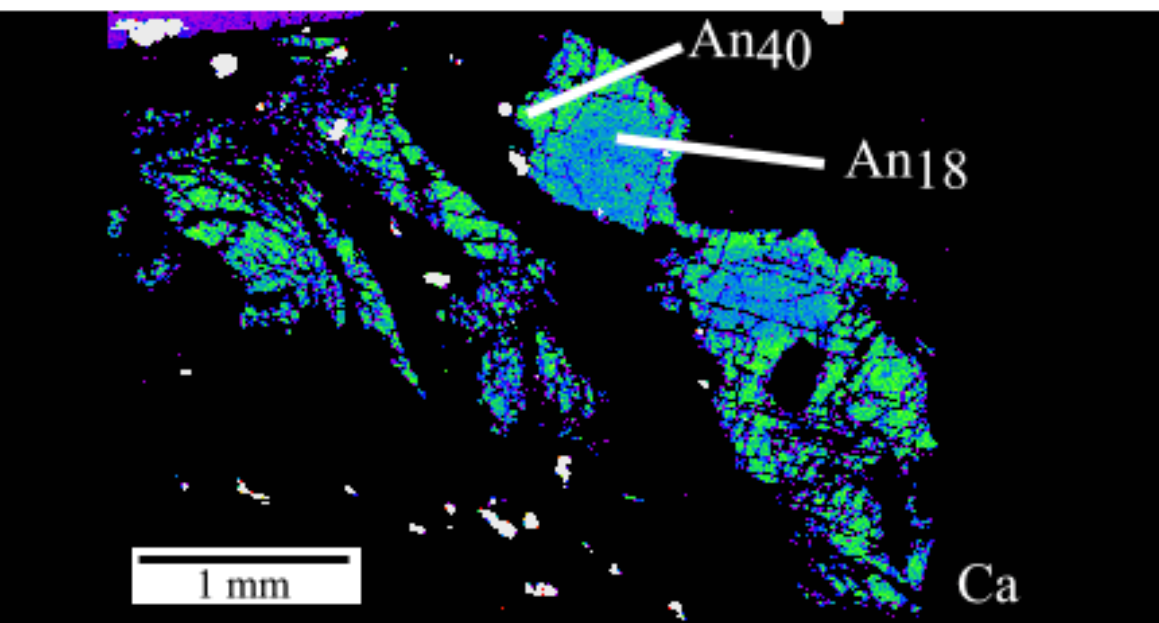
Grt + Chl
stability field
---0.2---
Mn/(Mn+Fe+Mg)
in grt



--- = SPECULATIVE P-T PATH



Garnet chemical zoning maps showing minor core to rim increases in Fe/(Fe+Mg) and calcium. Plagioclase zoning map shows a core to rim increase in percent anorthite



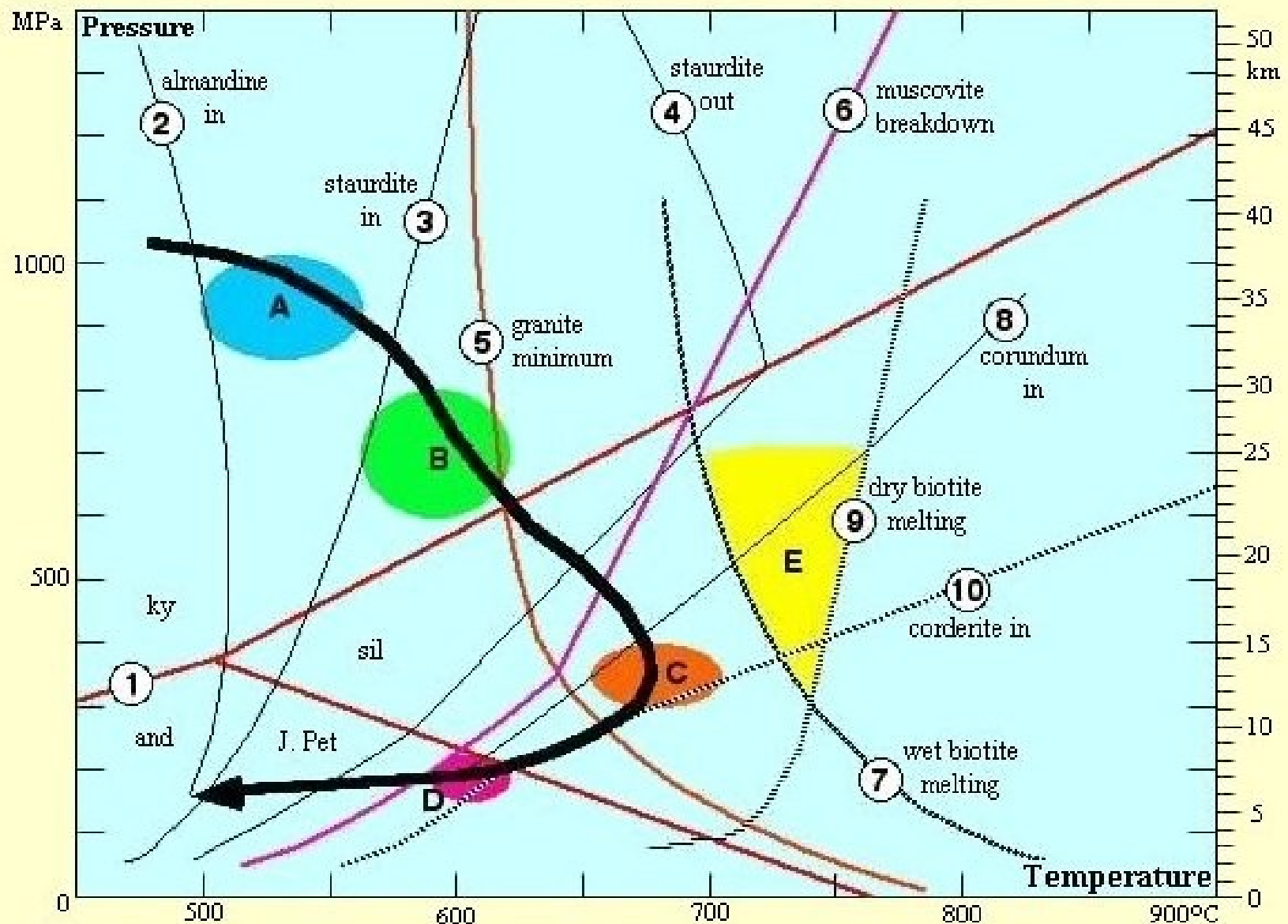
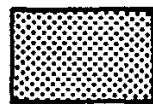
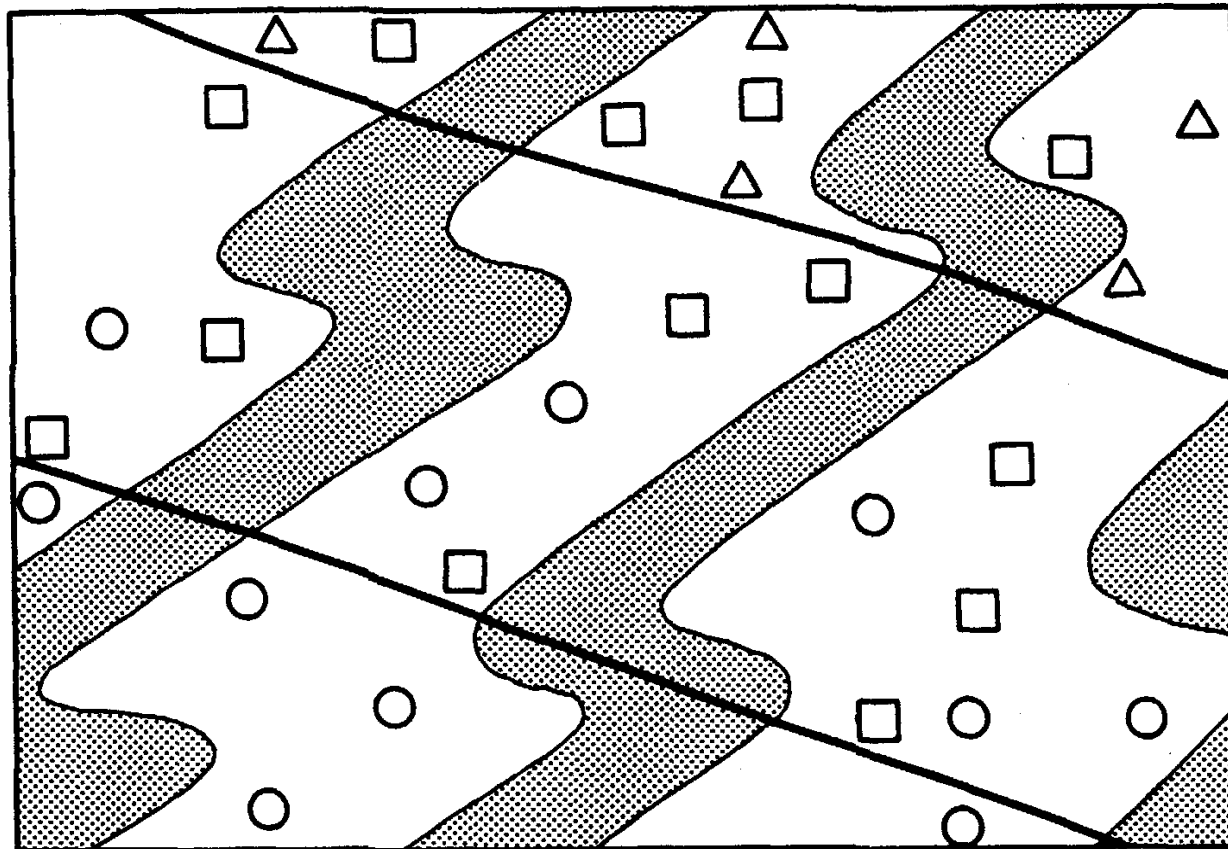


Fig. 2. Metamorphism of high-grade schist and pelitic gneiss from ODP Site 976. PT conditions are shown for garnet cores (A) and three successive mineral assemblages (B to D) in the high-grade schist, and for melting conditions in the pelitic gneiss (E). The P-T path for the high-grade schist is shown with a solid black arrow.



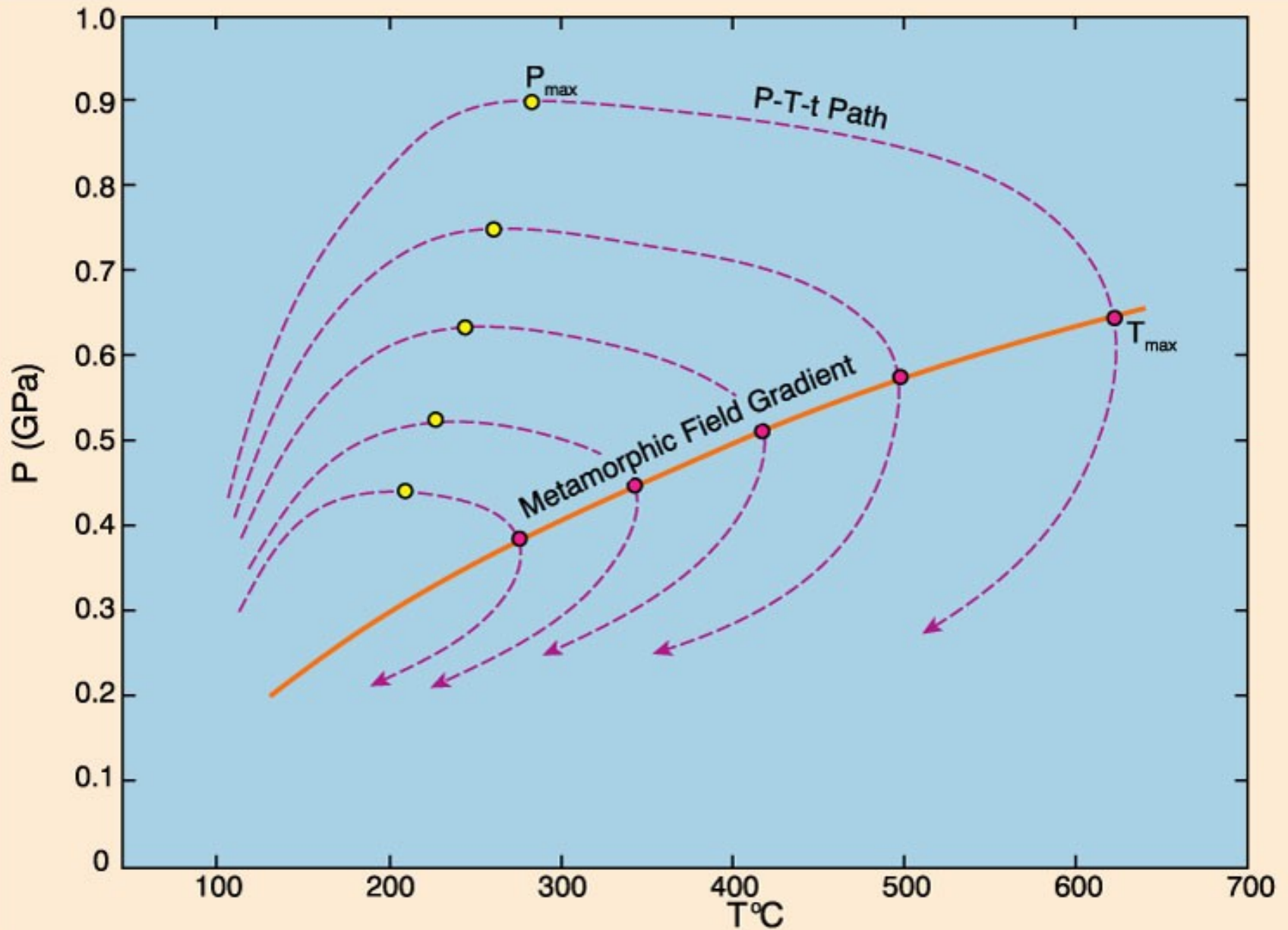
non-pelitic lithologies

— isograd

○ CHL - MS - AB - QZ

□ BIO - CHL - MS - AB - QZ

△ GT - BIO - CHL - MS - AB - QZ



A typical Barrovian-type metamorphic field gradient and a series of metamorphic P-T-t paths for rocks found along that gradient in the field. 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