



# **Granity a kontinentální kůra**

## **IV**

### **(Chemické složení granitů)**

**David Buriánek**

- **IV. 1. Chemické složení hornin**
- **IV. 2. Význam chemického složení turmalinických granitů pro identifikaci jejich geneze**
- **IV. 3. Horninotvorné minerály obsahující bór**
- **IV. 4. Zdroje bóru při anatexi metapelitů**
- **IV. 5. Dehydratační tavení nebo přínos fluid?**
  - A. Dehydratační tavení muskovitu
  - B. Dehydratační tavení biotitu
- **VI. 6. Indikátory frakční krystalizace a parciálního tavení v granitické tavenině**
- **VI. 7. Diferenciace granitů**
- **VI. 8. Chování REE Y, Th a U během tavení metapelitů a diferenciace magmatu**
- **VI. 9. Peraluminické granity vzniklé výraznou diferenciací korových tavenin**

# IV. 1. Chemické složení hornin

1																	2	
1	H 1.0079																	He 4.0026
2	Li 6.941	Be 9.0122											B 10.811	C 12.011	N 14.007	O 15.999	F 18.998	Ne 20.18
3	Na 22.99	Mg 24.305											Al 26.982	Si 28.086	P 30.974	S 32.066	Cl 35.453	Ar 39.948
4	K 39.098	Ca 40.078	Sc 44.956	Ti 47.88	V 50.941	Cr 51.996	Mn 54.938	Fe 55.847	Co 58.933	Ni 58.693	Cu 63.546	Zn 65.39	Ga 69.723	Ge 72.61	As 74.922	Se 78.96	Br 79.904	Kr 83.8
5	Rb 85.468	Sr 87.62	Y 88.906	Zr 91.224	Nb 92.906	Mo 95.94	Tc (97.91)	Ru 101.07	Rh 102.91	Pd 106.42	Ag 107.87	Cd 112.41	In 114.82	Sn 118.71	Sb 121.76	Te 127.6	I 126.9	Xe 131.29
6	Cs 132.91	Ba 137.33	La 138.91	Hf 178.49	Ta 180.95	W 183.84	Re 186.21	Os 190.23	Ir 192.22	Pt 195.08	Au 196.97	Hg 200.59	Tl 204.38	Pb 207.2	Bi 208.98	Po (209)	At (210)	Rn (222)
7	Fr (223)	Ra (226)	Ac (227)	Rf (261.1)	Db (262.1)	Sg (263.1)	Bh (262.1)	Hs (265.1)	Mt (266.1)	Uun (269)	Uuu (272)	Uub (277)						

Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	140.12	140.91	144.24	(144.9)	150.36	151.97	157.25	158.93	162.5	164.93	167.26	168.93	173.04	174.97
Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
	232.04	231.04	238.03	(237)	(244.1)	(243.1)	(247.1)	(247.1)	(251.1)	(252.1)	(257.1)	(258.1)	(259.1)	


Alkali Metal	Actinides
Alkali Earth	Lanthanides
Metal	Non-metal
Trans. Met.	Halogen
	Noble Gas


- Horninové analýzy se dnes nejčastěji provádí těmito technikami: pro určení jak hlavních tak stopových prvků 1) X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF), 2) Atomic Absorption Spectrometry (AAS)
- Chemické složení horniny závisí na: 1) složení zdrojového materiálu, 2) hloubce v níž se horniny vytavily, 3) tektonickém prostředí vzniku, 4) sekundárních alterací

1A												3A	4A	5A	6A	7A	Z	Row		
1	H																	1	1	
2	Li	2	Be											3	4	5	6	7	8	2
3	Na	10	Mg											13	14	15	16	17	18	3
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	4	
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	5	
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	6	
7	87	88	89	105	106	107		109											7	

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104

 Major elements as oxides

 Rare earth elements in ppm

 Trace elements in ppm

 Volatiles

## Prvky které bývají analyzovány

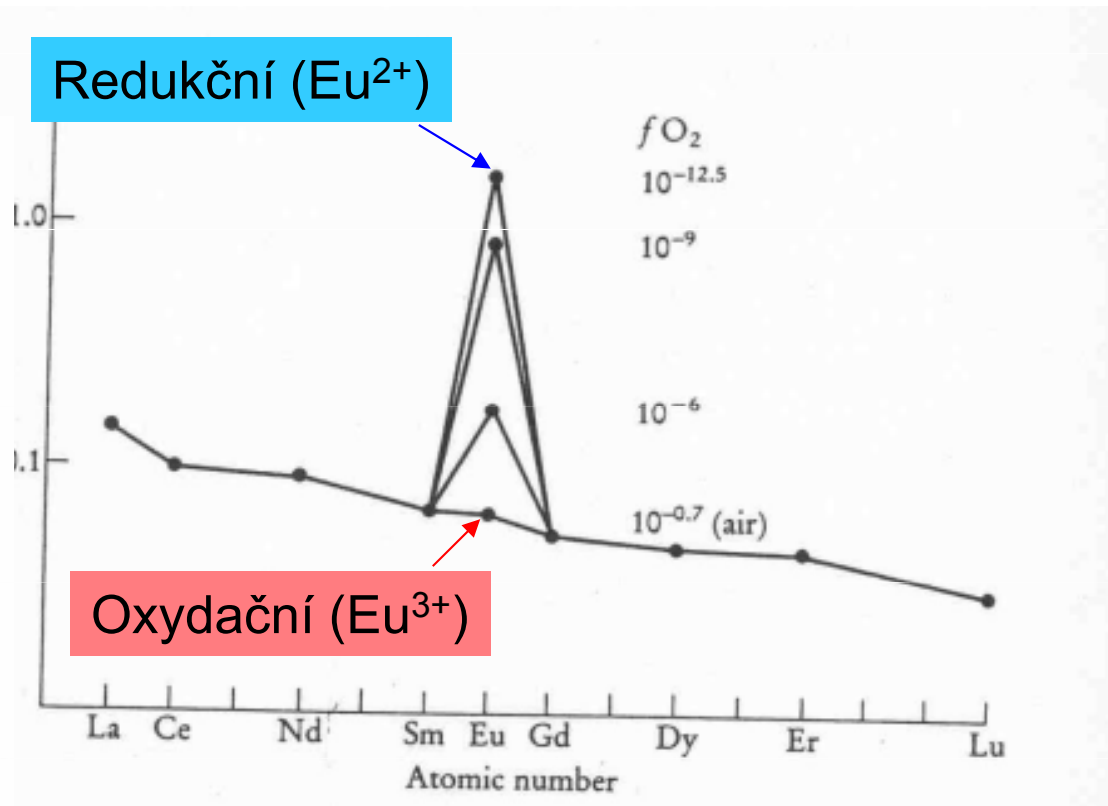
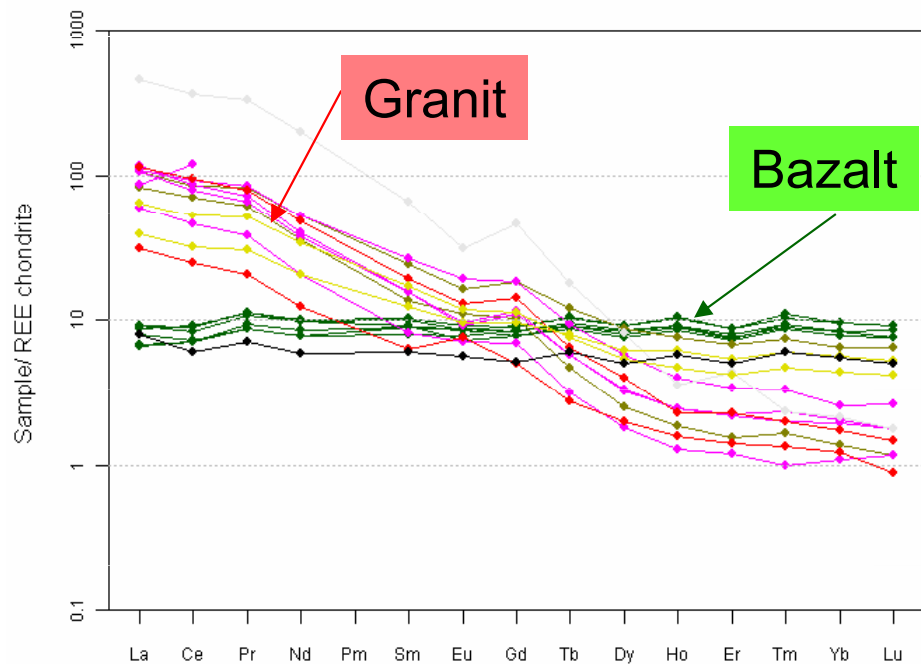
- Hlavní prvky: V hornině bývá zastoupeno maximálně 13 hlavních prvků, které uvádíme v hmotnostních procentech (wt%).
- **1) Hlavní oxidy - obsah v běžných vyvřelinách:**
- SiO<sub>2</sub> 35 - 80 wt%
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 8 - 22 wt%
- TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ferric), FeO (ferrous), MnO, MgO, CaO 4 - 30 wt%
- Na<sub>2</sub>O 1.5 - 8 wt%
- K<sub>2</sub>O 0.5 - 8 wt%
- H<sub>2</sub>O<sup>+, -</sup> až několik wt%
- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> < 0.15 wt%
- CO<sub>2</sub> až několik wt%
- **2) Vedlejší prvky**
- většinou se uvádí v ppm jen někdy v wt %: Li, Be, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, Pb, F, Cl, S.
- Bazalty - Cr, Ni, Cu
- Granity pegmatity - Li, Be, a Ba

- Frakcionační indexy mají ukazovat jak je vzorek z určité magmatické suity. Je to pokus zařadit daný vzorek do vývojové posloupnosti magmatické suity. Více vzorku nám může poskytnout představu o vývojové řadě.
- **Mg-Fe poměr** - Používá se pro bazické vyvřeliny ( $\text{MgO}/\text{MgO}+\text{FeO}$  (ferrous),  $\text{MgO}/\text{MgO}+\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$  (ferric) nebo  $\text{Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}$  (uses atomic proportions of the cations)).
- **Normativní Ab/Ab+An** - Je založen na obsahu  $\text{Na}_2\text{O}$  a  $\text{CaO}$ . Používá se pro granitické horniny protože není vhodný pro horniny bohaté na mafické minerály.
- Další indexy jsou založeny na komplexnějším zhodnocení horniny
- **Solidification Index** (Kuno, 1959)  $\text{SI} = 100 \text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$
- Pro bazalt je tento index podobný Mg/Fe poměru. Jak postupuje frakcionace obohacuje se zbytková tavenina alkáliemi  $\text{Na}_2\text{O}$  a  $\text{K}_2\text{O}$ . Pro mafické horniny je SI vysoký, pro felsické horniny SI nízký.
- **Diferenciační Index** (Thornton and Tuttle, 1960)  $\text{DI} = \text{normativní } \text{Q}+\text{Or}+\text{Ab}+\text{Ne}+\text{Ks}+\text{Lc}$
- Je založen na normativních minerálech. Pro mafické horniny je DI nízký, pro felsické je DI vyšší.

- LILE = *Large Ion Lithophile Elements* (Cs, Rb, K, Ba, Sr, Pb)
  - Velké atomy s malým nábojem
  - nekompatibilní pro část horninotvorných minerálů (Ba, Rb vstupují se za K do Kfs slíd a amfibolu, Rb vstupuje snadněji do slíd (Bt) a Kfs než do Amp. Sr vstupuje za Ca do plagioklasu ale ne do Px, podstatně v menším množství může vstupovat do Kfs za K)
  - Typické je že se koncentrují ve fluidech (také mohou být důležité během zvětrávání)
- HFSE = *High Field Strength Elements* (Sc, Y, Th, U, Pb, Zr, Hf, Ti, Nb, Ta)
  - Chovají se různě ale většinou jsou nekompatibilní kromě některých výjimek (Y se výrazně se může koncentrovat v Grt a Amp, někdy také v Ttn a Ap; Nb v Amp)
  - Zr, Hf výrazně nekompatibilní k běžným horninotvorným minerálům ale mohou nahrazovat Ti v rutilu a koncentrují se v zirkonu
  - Ve fluidech nejsou běžně mobilní a nejsou citlivé na zvětrávání
  - Jsou dobrými petrogenetickými indikátory
  - Některé páry prvku HFSE mají podobné chování Nb a Ta (Nb/Ta v chodritu  $\approx 15-20$ ), Zr a Hf (Zr/Hf v chodritu  $\approx 30-35$ ) – frakcionace probíhá k Nb od Ta a k Zr od Hf
- REE = *Rare Earth Elements* (La Ce Pr Nd (Pm) Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu)
  - Technicky vzato náleží k HFS
  - Chovají se různě ale většinou jsou nekompatibilní s výjimkou některých minerálů a v jednotlivých minerálech se jednotlivé REE chovají různě, navíc nejsou příliš citlivé ke zvětrávání
  - Jsou dobrými petrogenetickými indikátory

- Vzácné zeminy - *Rare Earth Elements* (REE) jsou to lantanoidy s atomovým číslem 57 - 71
- uvádí se v ppm nebo mg/g
- Grt koncentruje HREE, také Px a Amp koncentrují HREE ale méně
- Titanit a plagioklasy koncentrují LREE
- REE jsou běžně trojmocné ( $\text{La}^{3+}$ )
- Eu je v minerálech přítomno jako  $\text{Eu}^{3+}$  nebo  $\text{Eu}^{2+}$
- $\text{Eu}^{2+}$  je výrazně kompatibilní (živce) a je typické pro redukční podmínky
- $\text{La}/\text{Yb}$  (or  $\text{La}_N/\text{Yb}_N$ , nebo  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ ) ukazuje sklon křivky REE

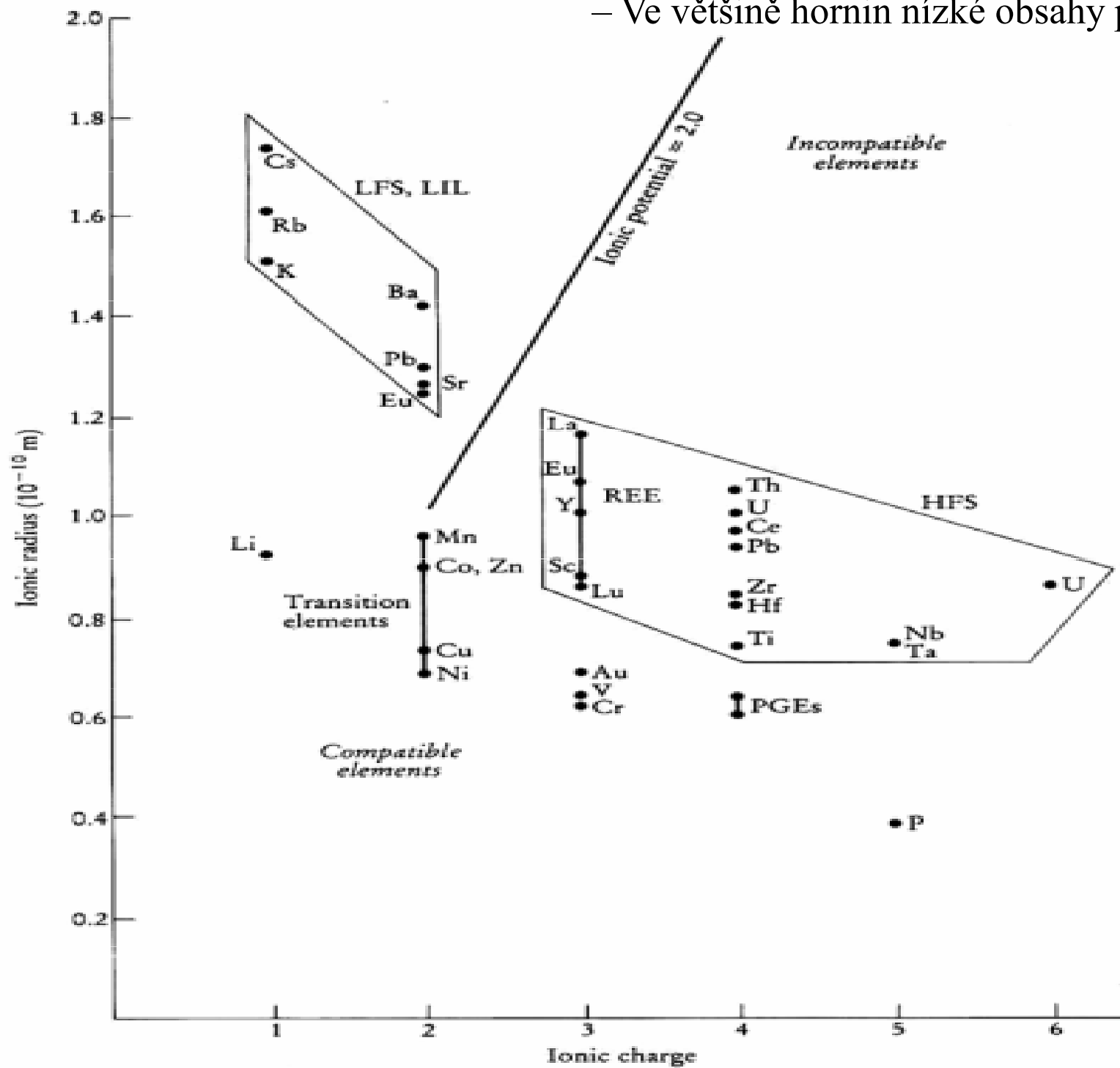
$$\frac{Eu}{Eu^*} = \frac{Eu_N}{\frac{1}{2} (Sm_N + Gd_N)}$$





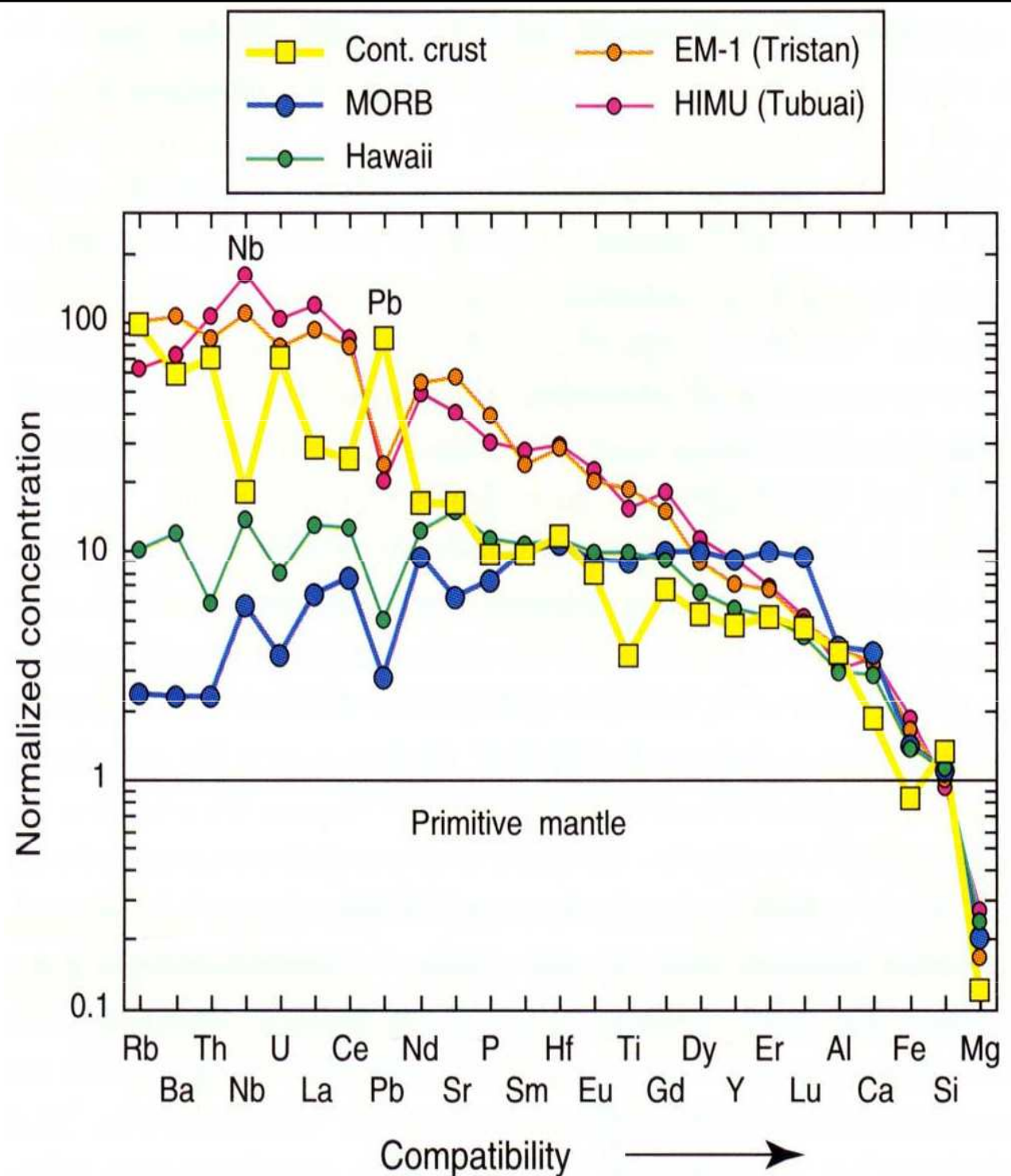
- PGE = *Platinum Group Elements* (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au)

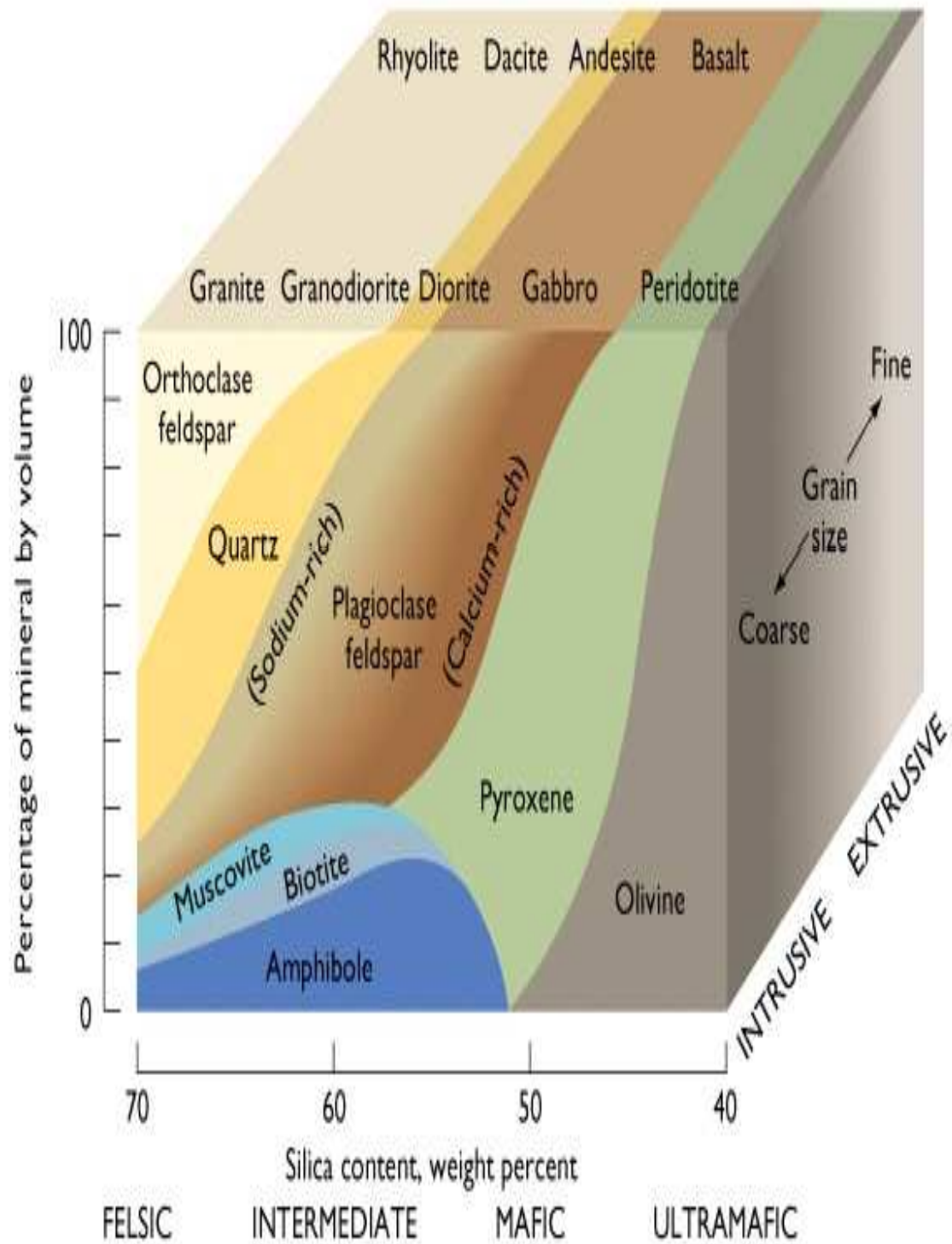
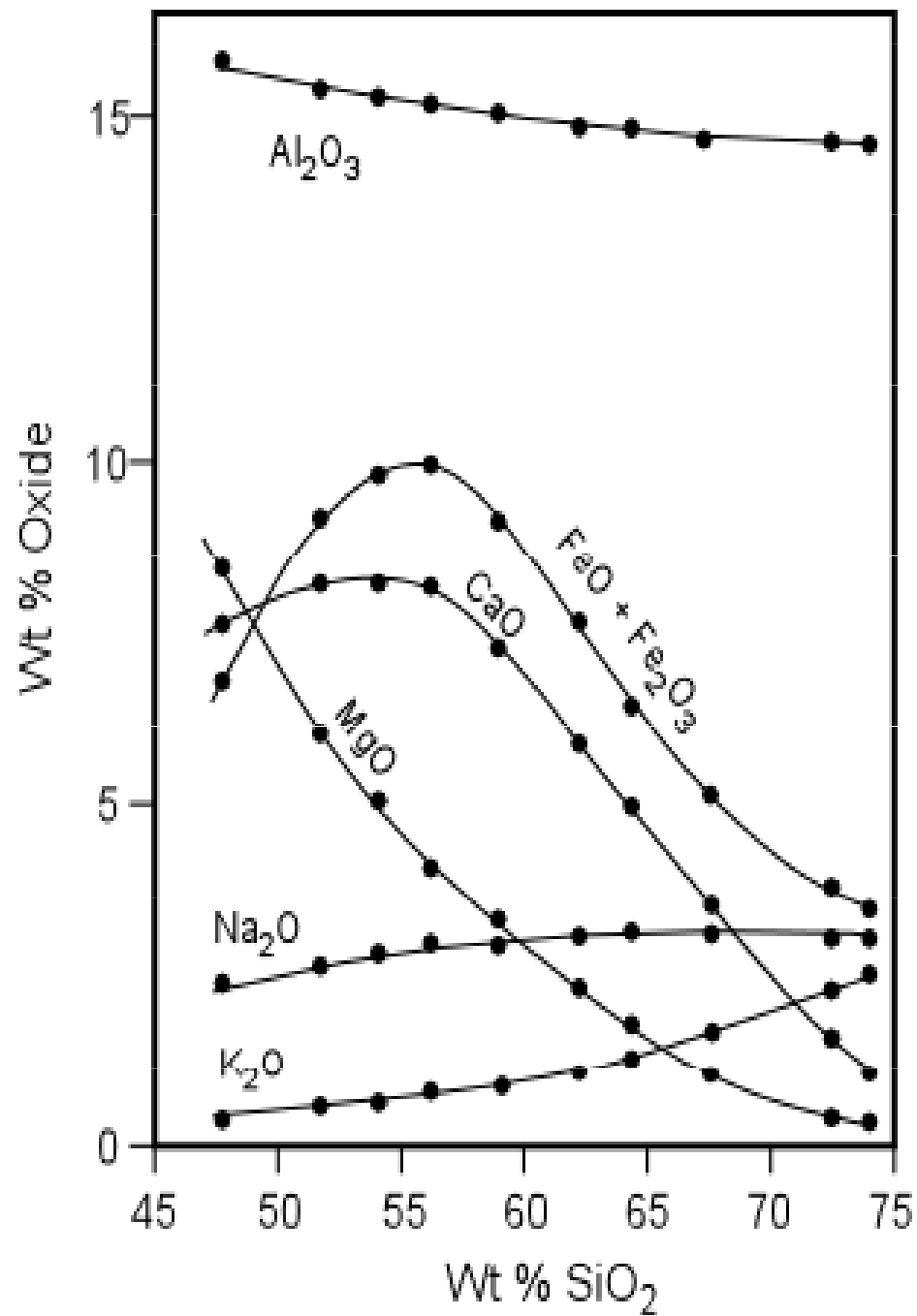
– Ve většině hornin nízké obsahy pod detekčním limitem



- Tranzitní prvky = *Transition elements* (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn)

- všechny jsou kompatibilní
- mají nízkou mobilitu ve fluidní fázi
- velké rozdíly v různých horninách
- vysoké obsahy v bazických a ultrabazických horninách
- nízké obsahy ve felzických horninách včetně granitů
- V, Ti ukazují na intenzivní frakcionaci Fe-Ti oxidů nebo Ti minerálů (ilmenit nebo titanomagnetit, titanit).





## Geochemická frakcionace během tavení

### Složení počáteční taveniny ovlivňuje:

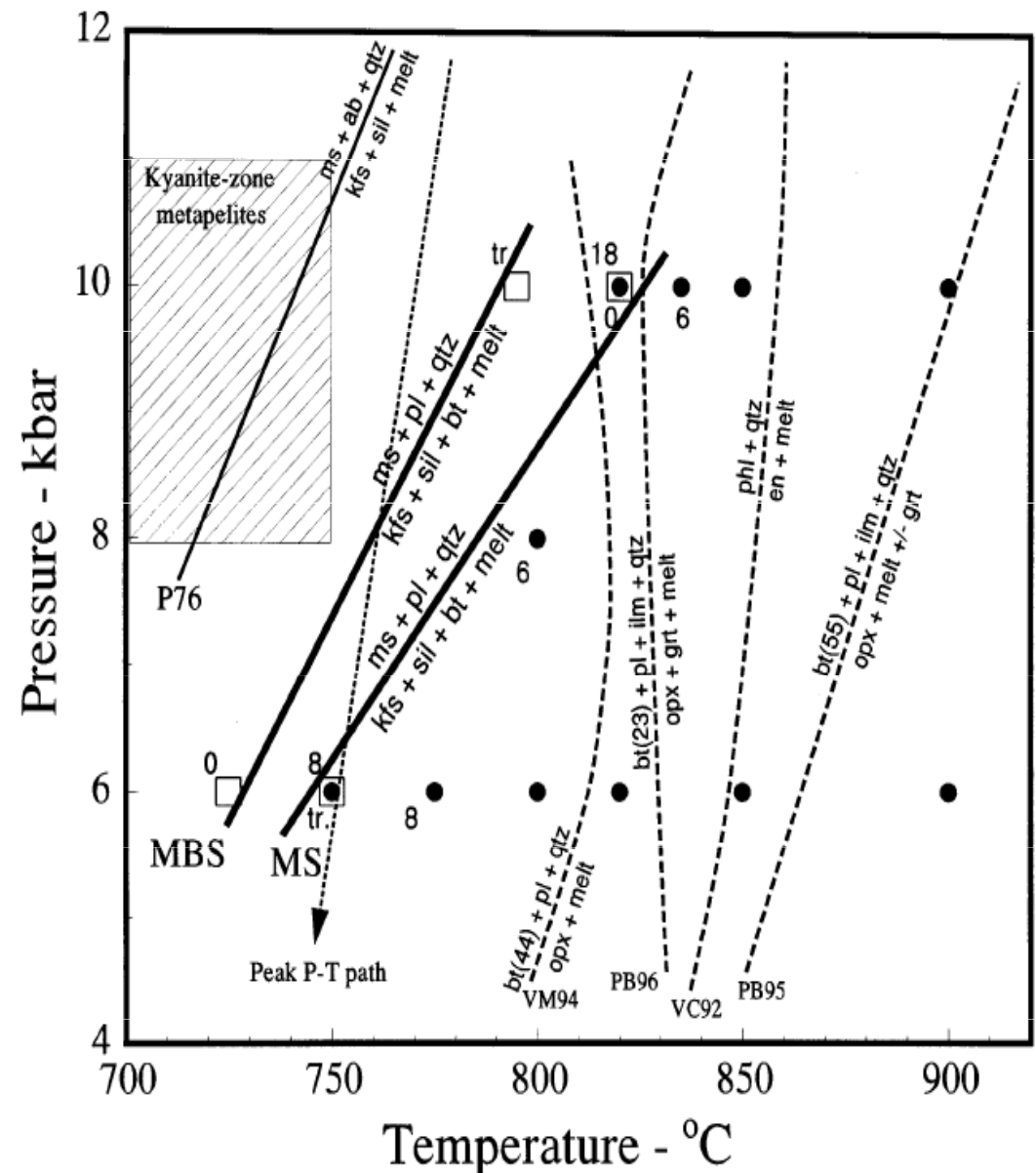
- Složení zdrojových hornin avšak většina tavenin, které vznikají v kontinentální kůře mají granitové až tonalitové složení
- Důležité jsou PT podmínky během tavení
- Množství fluidní fáze a její složení (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, F, Cl)

### Složení taveniny během pokračujícího tavení:

- Podstatné je zda je tavení rovnovážné nebo nerovnovážné a zda jde o tavení frakční, nebo rovnovážné
- S narůstajícím stupněm tavení tavenina odnáší snadno tavitelných prvků jako je Na, K a LIL prvky.
- Postupně tedy v nově vznikající pozdější tavenině roste množství refraktorních prvků jako je Ca, Mg, Fe Sr, REE
- Během celého tavení by však měly zůstat zachovány poměry <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O stejně jako poměry mezi dvěma k tavenině nekompatibilními (Zr/Hf) nebo kompatibilními (Rb/Sr) prvky. Tyto poměry budou podobné jako ve zdrojové hornině.
- Poměr mezi kompatibilním a nekompatibilním prvkem by měl klesat (Rb/Zr).

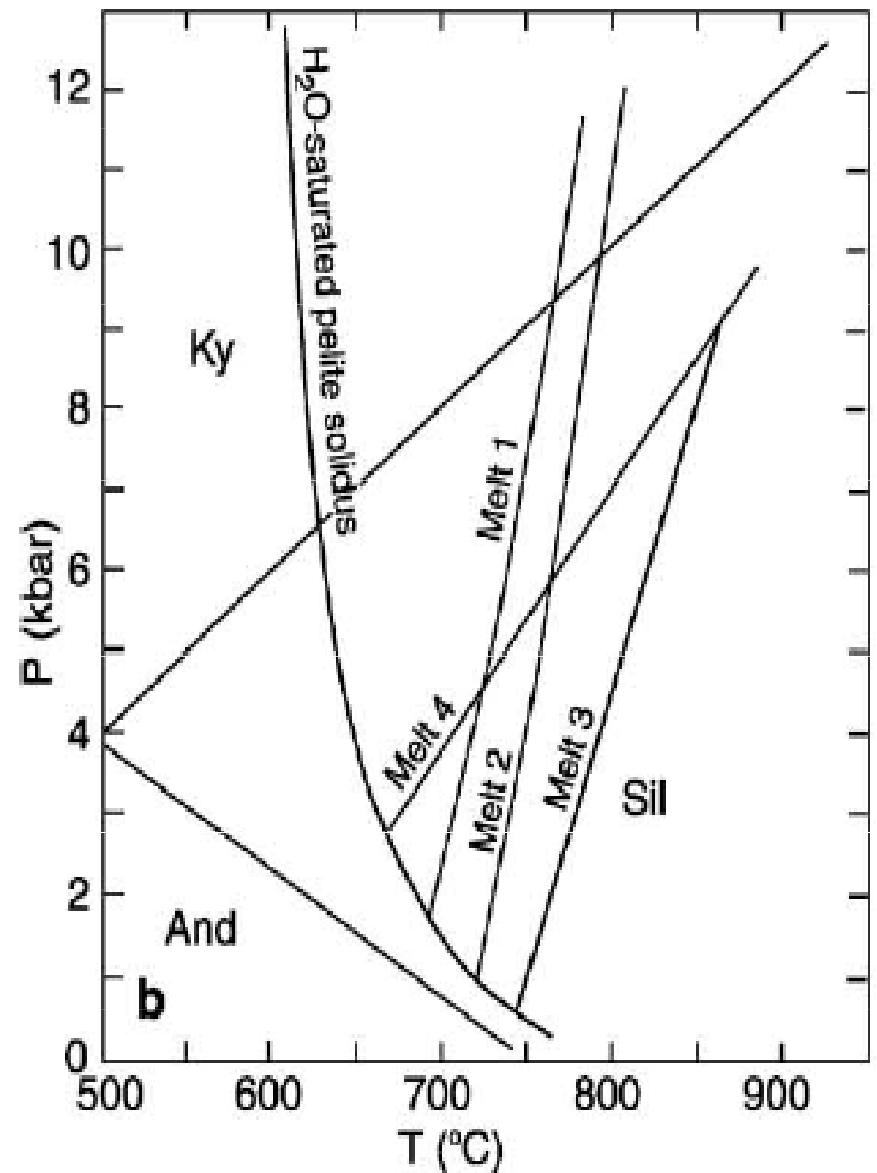
## IV. 2. Význam chemického složení peraluminických granitů pro identifikaci jejich geneze

- Chemické složení peraluminických granitů odráží:
  - složení materiálu jehož tavením vznikly
  - intenzitu tavení zdrojových hornin
  - stupeň frakcionace vzniklé taveniny.
- Většinou není možné jen na základě chemického složení určit, nakolik se jednotlivé faktory na vzniku podílely.



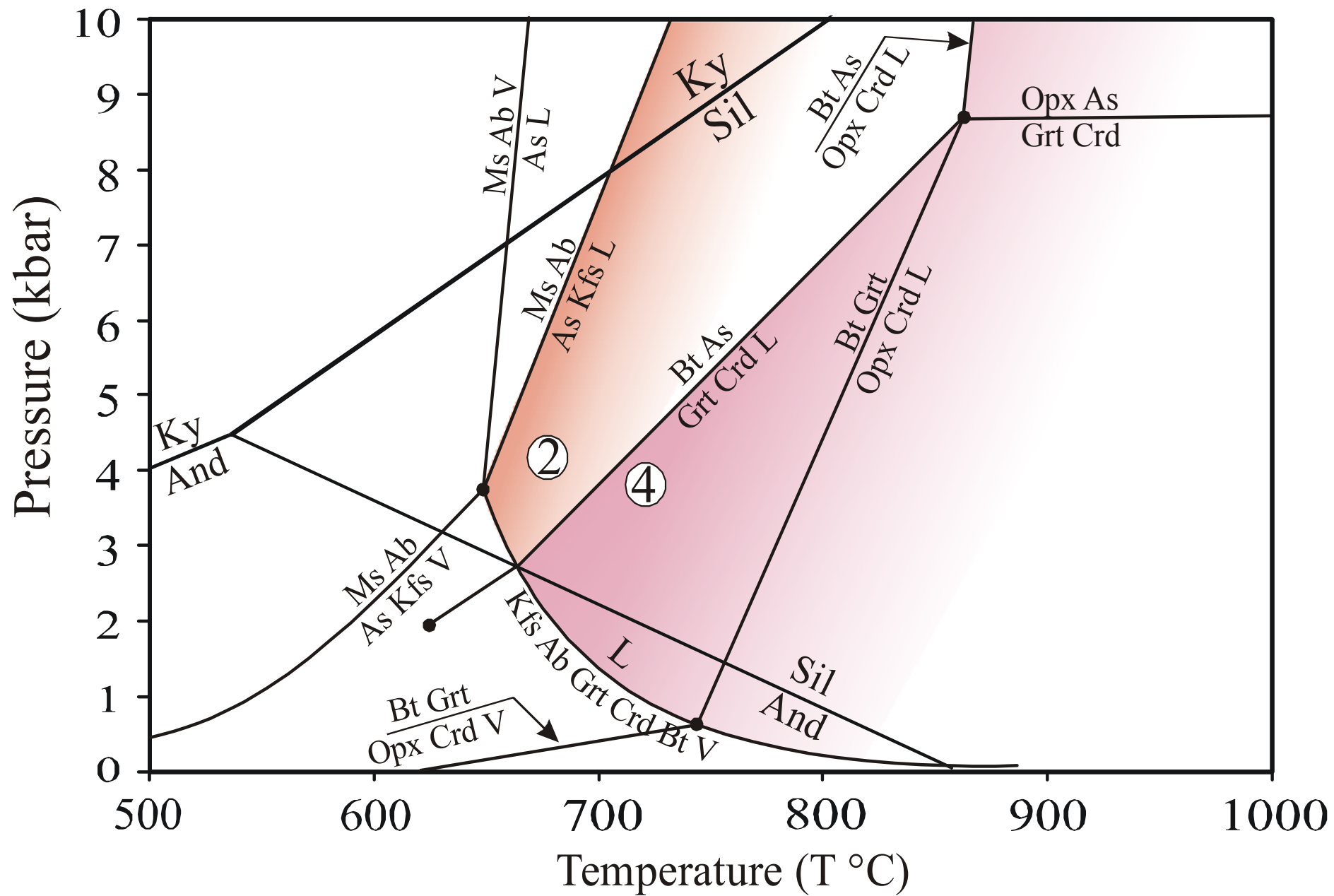
Srovnání muskovitového a biotitového dehydratačního tavení (experimentální data různých autorů viz zkratky)

- Ve Fanerozoiku jsou tyto S-granity generovány při pozdně- až post-orogenní anatexi probíhající při kontinentální kolizi.
- Podle Patiño Douce (1999) jsou turmalinické peraluminické leukogranity vázány na oblasti tektonického stluštění kontinentální kůry.
- Tyto granity tvoří drobná intrusivní tělesa v středně nebo silně metamorfovaných orogenních pásech.
- Vznikly jako produkt dehydratačního tavení muskovitu.
- Dehydratační tavení biotitu zde hrálo pouze okrajovou úlohu.
- Jejich vznik je spojen s dekompresním tavením během rychlého výzdvihu.
- Dehydratační tavení biotitu produkují Ms-Bt granity někdy s Grt



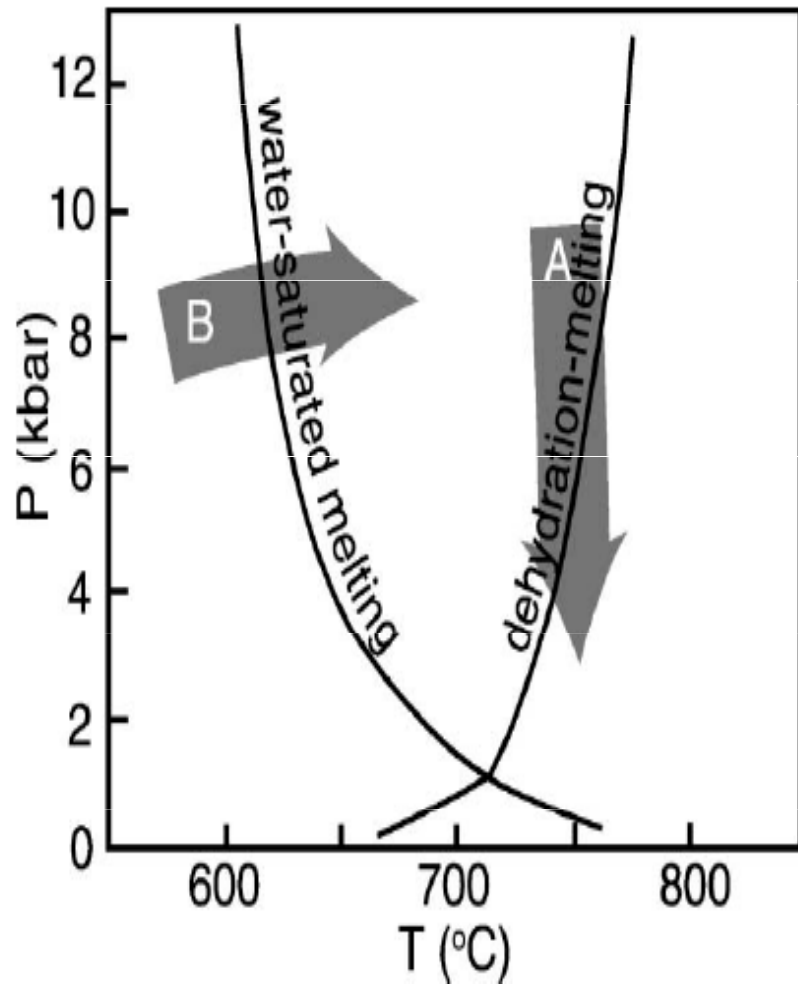
#### MELTING REACTIONS





PT diagram (upraveno podle Spear et al., 1999) znázorňující vybrané reakce v systému KFMASH včetně dvou hlavních dehydratačních reakcí rozpadu muskovitu a biotitu. Čísla označují pole, v němž jsou taveniny vzniklé dehydratačním tavením biotitu (4) a muskovitu (2) stabilní.

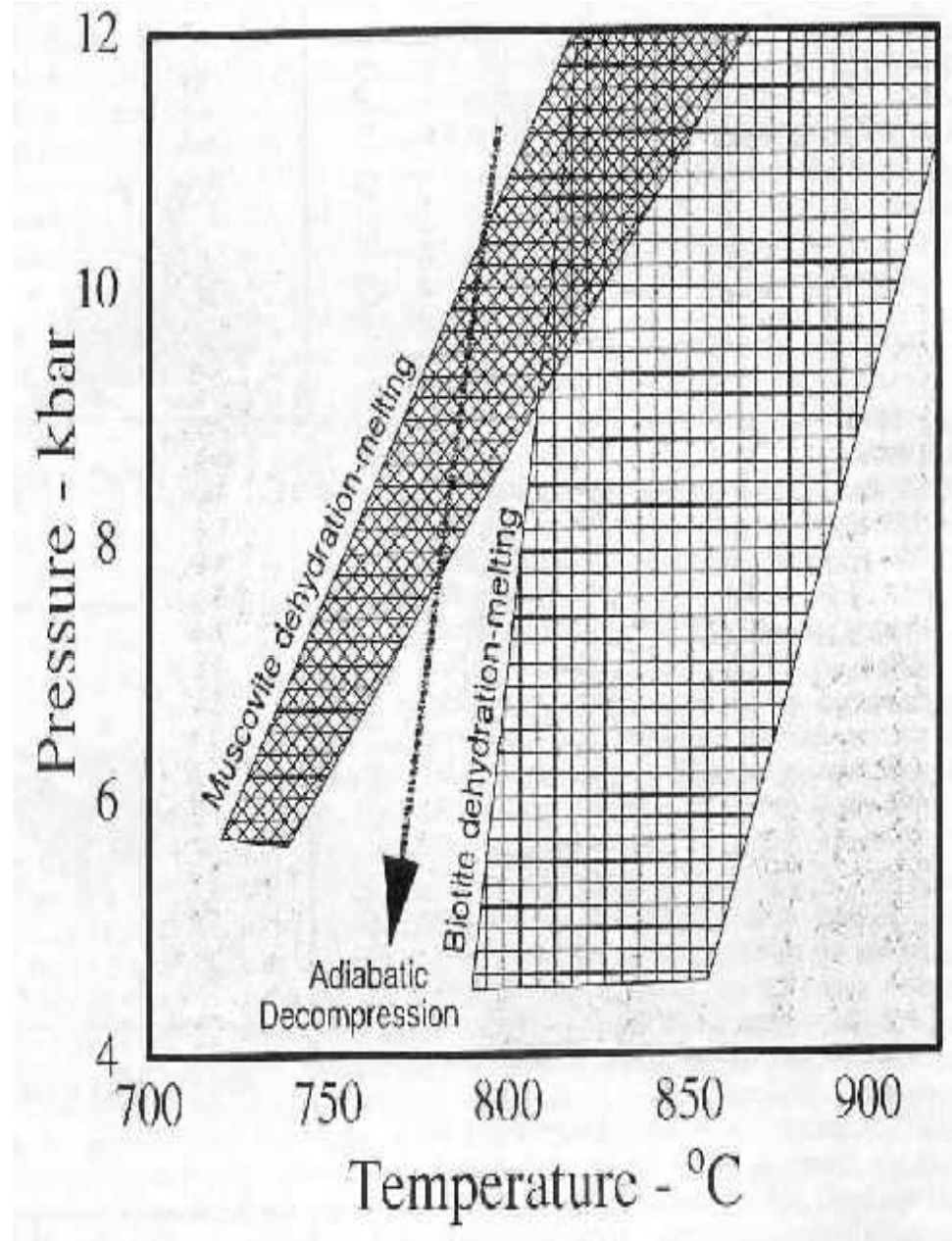
- Během běžné orogenní regionální metamorfózy (PT dráha po směru hodinových ručiček) můžeme pozorovat řadu reakcí které produkují taveninu.
- Při vzrůstu teploty nejdříve vzniká tavení s přínosem vody a vzniká tak tavenina saturovaná vodou.
- Vzniká tak většinou jen méně než 3 % taveniny.
- Další reakce produkují vodou nesaturované taveniny vzniklé rozpadem slíd.



P–T diagram ukazuje metamorfní vývoj H<sub>2</sub>O-saturovaných pelitů solidus a typické dehydratační reakce (Le Breton a Thompson, 1988). šipky ukazují směr vzniku taveniny během dekompresního výzdvihu (A) a prográdní metamorfózy během zahřívání horniny při zanořování (B.H. Norlander et al. / Lithos 61 (2002) 103–125)



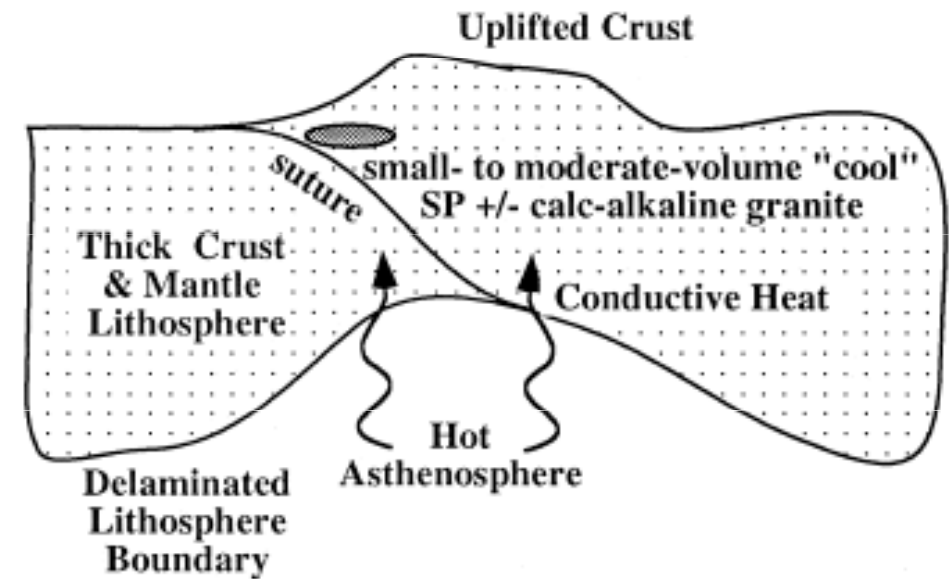
- Když tavenina zůstane jako součást horniny na místě krystalizace vede téměř k reversibilním reakcím.
- Pokud je hornina exhumována po dekompresní PT dráze probíhají dva hlavní typy krystalizačních reakcí
- Pokud hornina překříží reakci produkující taveninu nebo vodou saturovaný solidus může vznikat granitová tavenina.
- Druhou možností je že slídy, které nebyly spotřebovány během prohrádních reakcí reagují s taveninou.
- Výsledkem jsou bezvodé minerální asociace granulitů a voda, která produkuje taveninu v okolních horninách.



*PT diagram s vymezenými oblastmi dehydratačního tavení muskovitu a biotitu. Šipkou je označen typický směr PT dráhy hornin, které prodělaly dekompresní tavení (Patiño Douce, 1999).*

- Sylvester (1998) rozděluje post-kolizní peraluminické granity (PPG) na dvě skupiny:
  1. PPG vázané na vysoce-tlakou kolizi (Alpy, Hymalaje). Po této kolizi vzniká malé množství taveniny s „nízkou“ teplotou ( $\leq 875$  °C). Jejich vznik bývá spojován post-kolizním výzdvihem ztluštěné kontinentální kůry ( $> 50$  km), během něhož docházelo k dekompresnímu tavení kůry prohřáté teplem dodaným radioaktivním rozpadem (K, U, Th).
  2. PPG vázané na vysoce teplotní kolizi (Hercynský orogen). Zde vzniká v kontinentální kůře o běžné tloušťce ( $\leq 50$  km) velký objem „horkého“ magmatu ( $\geq 875$  °C) a to díky přínosu tepla z pláště.

### (A) High-Pressure Collision (Alps, Himalayas)



### (B) High-Temperature Collision (Hercynides, Lachlan)

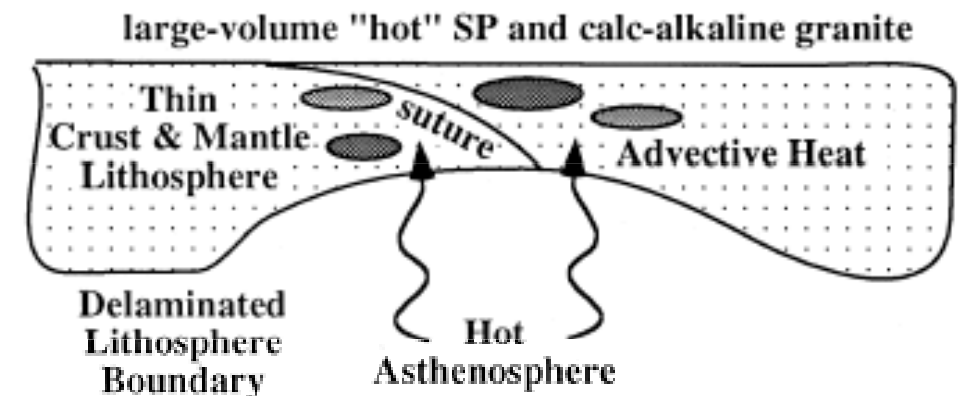
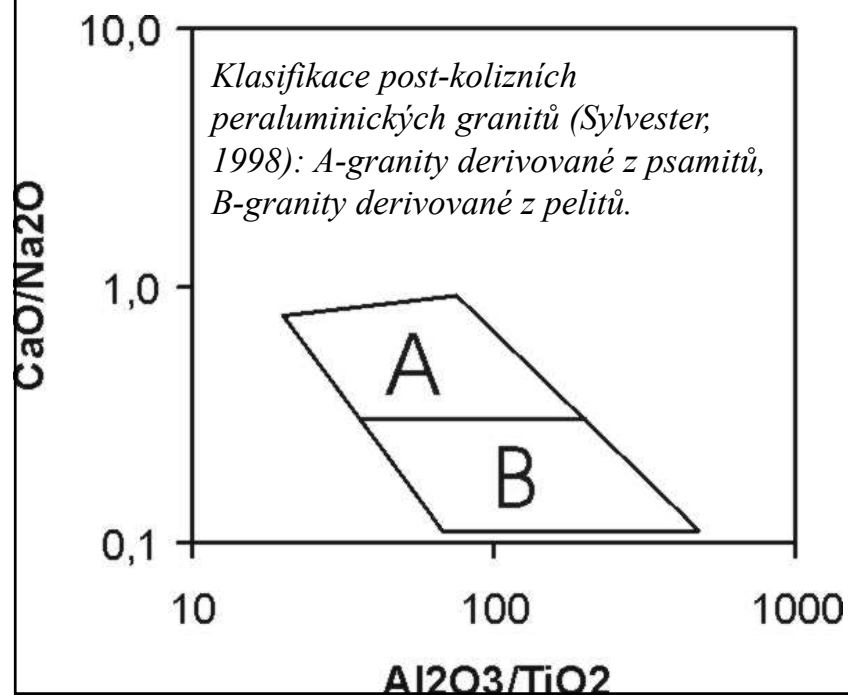
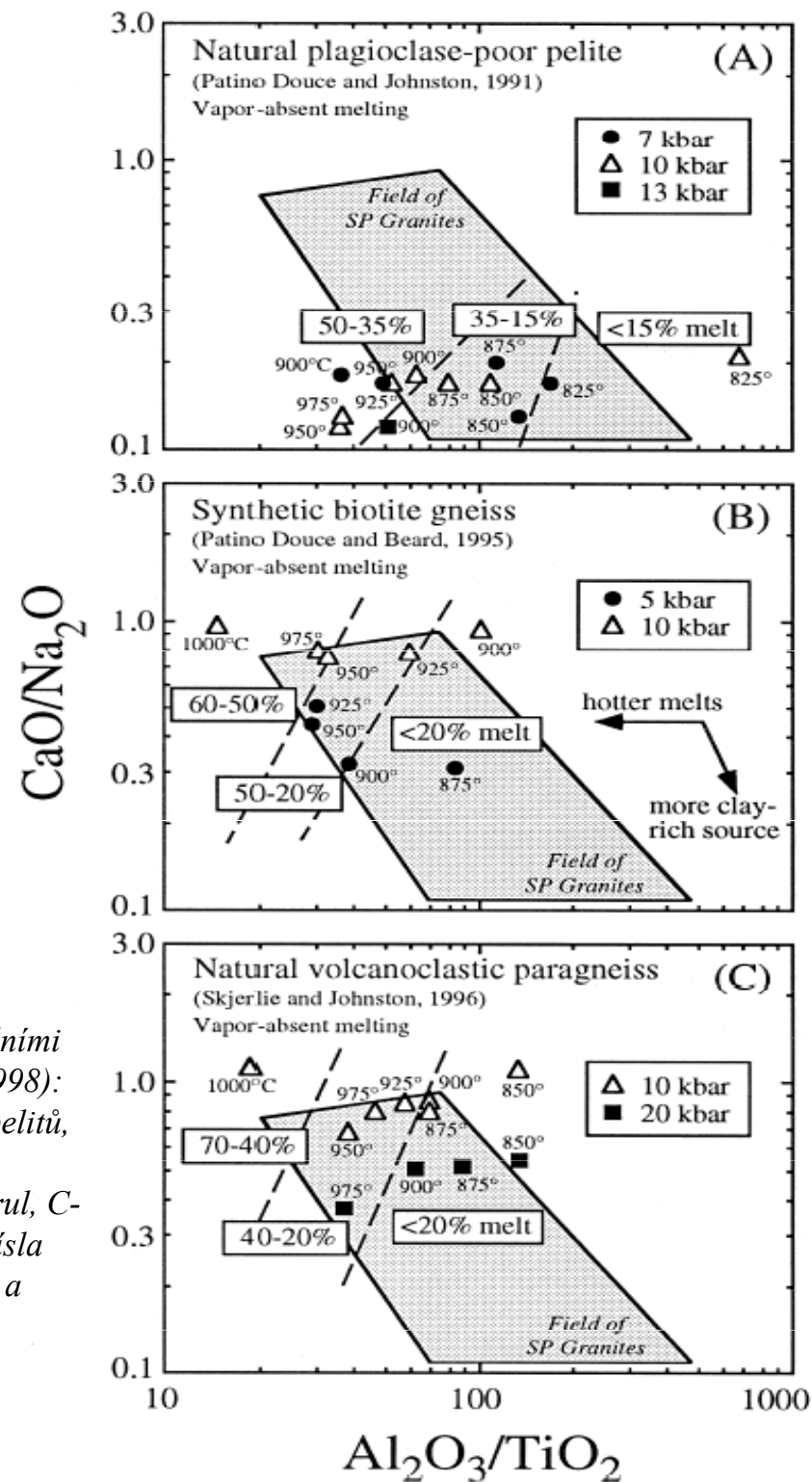


Fig. 1. Schematic representation of the generation of post-collisional SP granites in (A) thick, high-pressure orogens, and (B) thin, high-temperature orogens. Not drawn to scale. Intermediate cases would be likely where crustal thicknesses on opposing sides of the suture differed significantly.

- Poměry některých hlavních oxidů nám mohou hodně říci o původu a genezi leukogranitů (Sylvester, 1998).
- Post-kolizní peraluminické granity (PPG) s nízkým poměrem  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  ( $< 0,3$ ) byly derivovány z pelického materiálu zatímco granity s poměrem  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  vyšším než 0,3 vznikly z materiálu psamitického (obr.).
- PPG s nízkým poměrem  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  vznikly za vyšších teplot ( $\geq 875$  °C) než granity, které mají tento poměr vysoký.



Diagramy s experimentálními výsledky pro (Sylvester, 1998): A-taveniny derivované z pelitů, B-taveniny derivované z syntetických biotitických rul, C-vulkanoklastických rul. Čísla ukazují množství taveniny a teplotu experimentů.



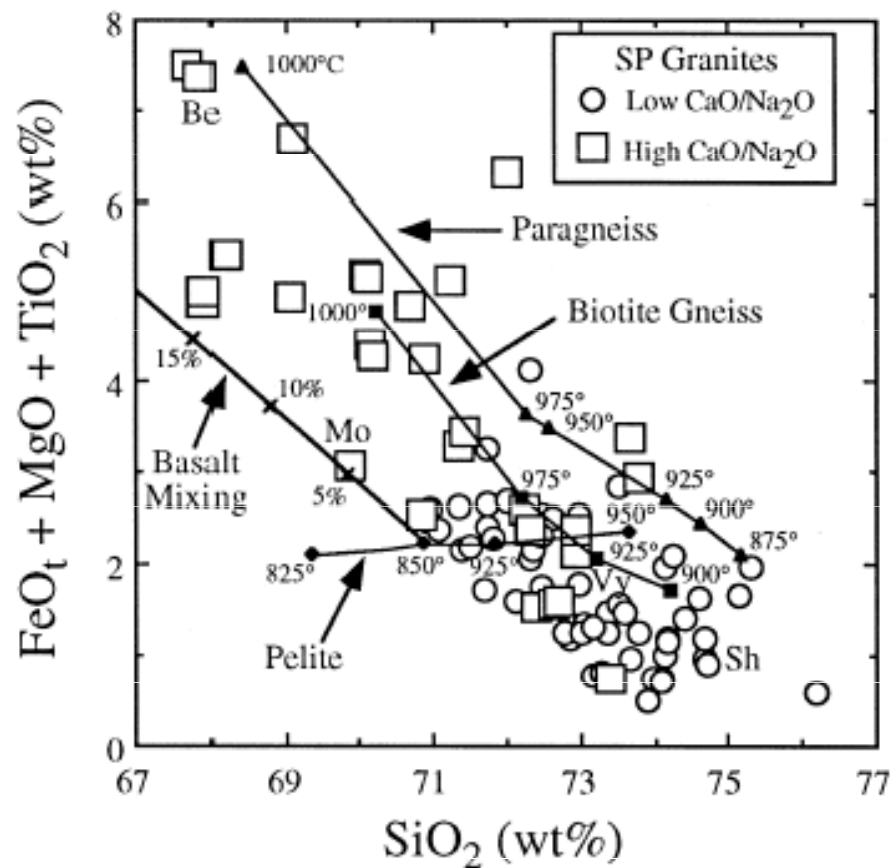


Fig. 6.  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{FeO}_t + \text{MgO} + \text{TiO}_2$  (wt.%) for low ( $< 0.3$ ) and high ( $> 0.3$ )  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ , post-collisional SP granite intrusions (data sources as in Fig. 2), compared to experimental vapor-absent 10 kbar melts of natural pelite (Patiño Douce and Johnston, 1991), synthetic biotite gneiss (Patiño Douce and Beard, 1995) and natural volcanoclastic paragneiss (Skjerlie and Johnston, 1996). End-member intrusions labelled as in Fig. 3. Also shown is part of the basalt/pelite-derived melt mixing curve of Fig. 5C. Temperatures of the experiments and percentages of basalt mixing are indicated.

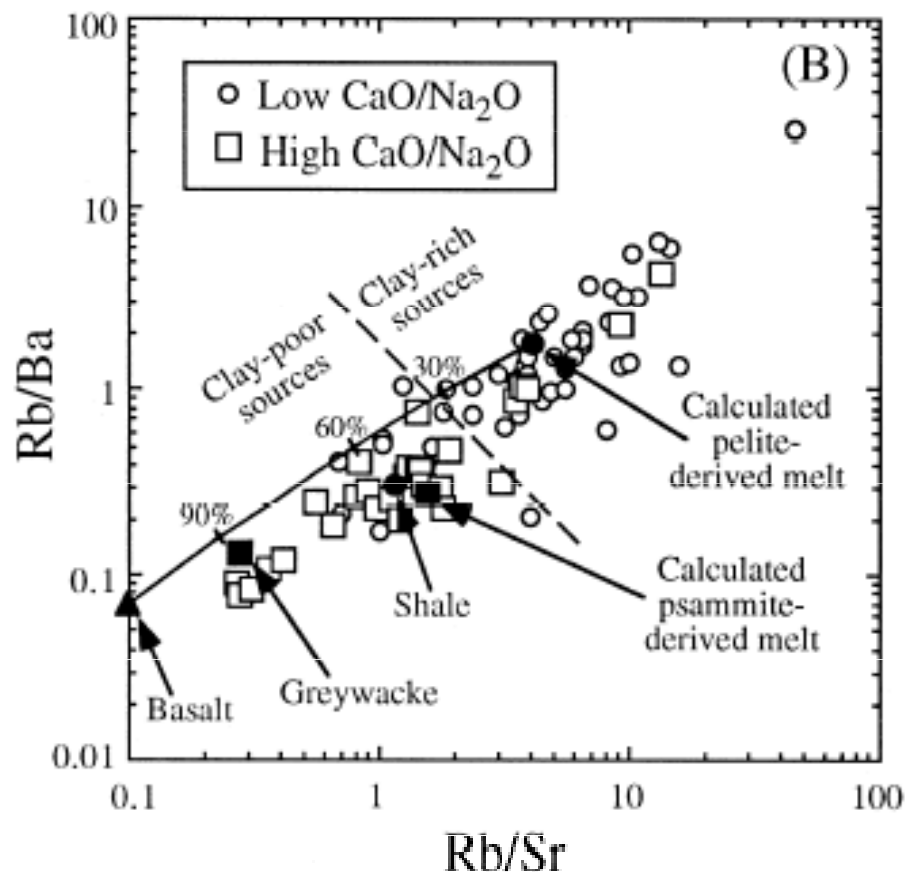


Fig. 7.  $\text{Rb}/\text{Sr}$  and  $\text{Rb}/\text{Ba}$  ratios for post-collisional SP granite intrusions subdivided on the basis of (A) orogen and (B) low ( $< 0.3$ ) and high ( $> 0.3$ )  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  ratio. Data sources as in Fig. 2. End-member intrusions labelled as in Fig. 3, except Moschumandl, for which there are incomplete data. The dashed line divides SP granites derived mostly from clay-poor sources from those formed mostly from clay-rich source rocks. Also plotted are calculated compositions of pelite- and psammite-derived SP granite melts, the average compositions of Phanerozoic basalt, shale and greywacke of Condie (1993), and a calculated basalt/pelite-derived melt mixing curve (with various percentages of mixing indicated).

## IV. 3. Horninotvorné minerály obsahující bór

- Jedním z hlavních zdrojů B pro granitické taveniny jsou fylosilikáty. Metamorfní slídy obsahují od 10 do 200 ppm B, přičemž větší obsahy bóru mají světlé slídy než biotit (Ahmad a Wilson, 1981).
- Ačkoli kyanit a andalusit obsahují maximálně 200 ppm B, sillimanit může zadržovat 2000 - 3200 ppm B (Grew et al. 1990).
- Ostatní horninotvorné silikáty jako živce, křemen, amfiboly či pyroxeny obsahují maximálně 10 ppm B.
- K petrologicky nejvýznamnějším minerálům, které jsou zdrojem B, patří turmalín. Turmalín je stabilní v širokém rozmezí PT podmínek a k jeho tavení dochází až ve vyšších stupních amfibolitové facie.
- Ostatní borosilikáty jsou rozšířeny daleko méně a nemají proto jako zdroj B pro granity tak velký význam. Patří sem : axinit:  $\text{Ca}_2(\text{FeMgMn})\text{Al}_2\text{B}(\text{Si}_2\text{O}_7)_2\text{O}(\text{OH})$ , danburit:  $\text{CaB}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ , datolit:  $\text{CaB}(\text{SiO}_4)(\text{OH})$ . Tyto tři minerály se vyskytují nejčastěji v mramorech bohatých na silikáty a vápenatosilikátových horninách. V metapelitech a granulitech se může objevit dumortierit:  $\text{Al}_7(\text{BO}_3)(\text{SiO}_4)_3\text{O}_3$  či korerupin:  $\text{Mg}_4\text{Al}_6[(\text{BO}_4)(\text{SiO}_4)_4(\text{O},\text{OH})_2]$ .

## IV. 4. Zdroje bóru při anatexi metapelitů

- Turmalín je nejběžnějším borosilikátem v metamorfitech a zůstává stabilní až do podmínek amfibolitové facie (Henry a Dutrow, 1996). Schreyer a Werding (1997) uvádí že při tlaku 5kbar je dravit v přítomnosti bórem bohatých fluid stabilní do 900 °C, zatímco dravit bez alkálií je za stejných podmínek stabilní do 830 °C.
- Stabilitu turmalínu také výrazně ovlivňuje složení fluidní fáze. Dravit bez alkálií je v fluidní fázi nesaturované bórem stabilní jen do 730 °C (Werding a Schreyer, 1984).
- Acosta-Vigil ed al. (2001) předpokládají, že turmalínem bohaté metasedimenty jsou vhodným protolitem pro vznik turmalinických leukogranitů. Například anatexí protolitu obsahujícího 5 hmot.% turmalínu může vzniknout přibližně 20 až 30 hmot. % taveniny saturované turmalínem.
- Podle jiných autorů jsou zdrojem pro vznik turmalinických granitů slídy obsažené v metapelitech.
- Bór potřebný pro vznik turmalínu však nemusí mít původ přímo v zdrojové hornině granitů, ale může být přinášén fluidní fází. Zdrojem takových fluid mohou být metamorfovaná ložiska evaporitů (Acosta-Vigil ed al. 2001).

- Nízká kompatibilita B v běžných horninotvorných minerálech (obsahy B živcích a slídách 10–200 (vzácně 1000) ppm ; Grew et al. 1990. Důležitý může být boromuskovit.
- Sillimanit někdy 2000 - 3200 ppm B.
- Turmalín je hlavním minerálem B v granitech a metapelitech (e.g. Henry & Dutrow, 1992).

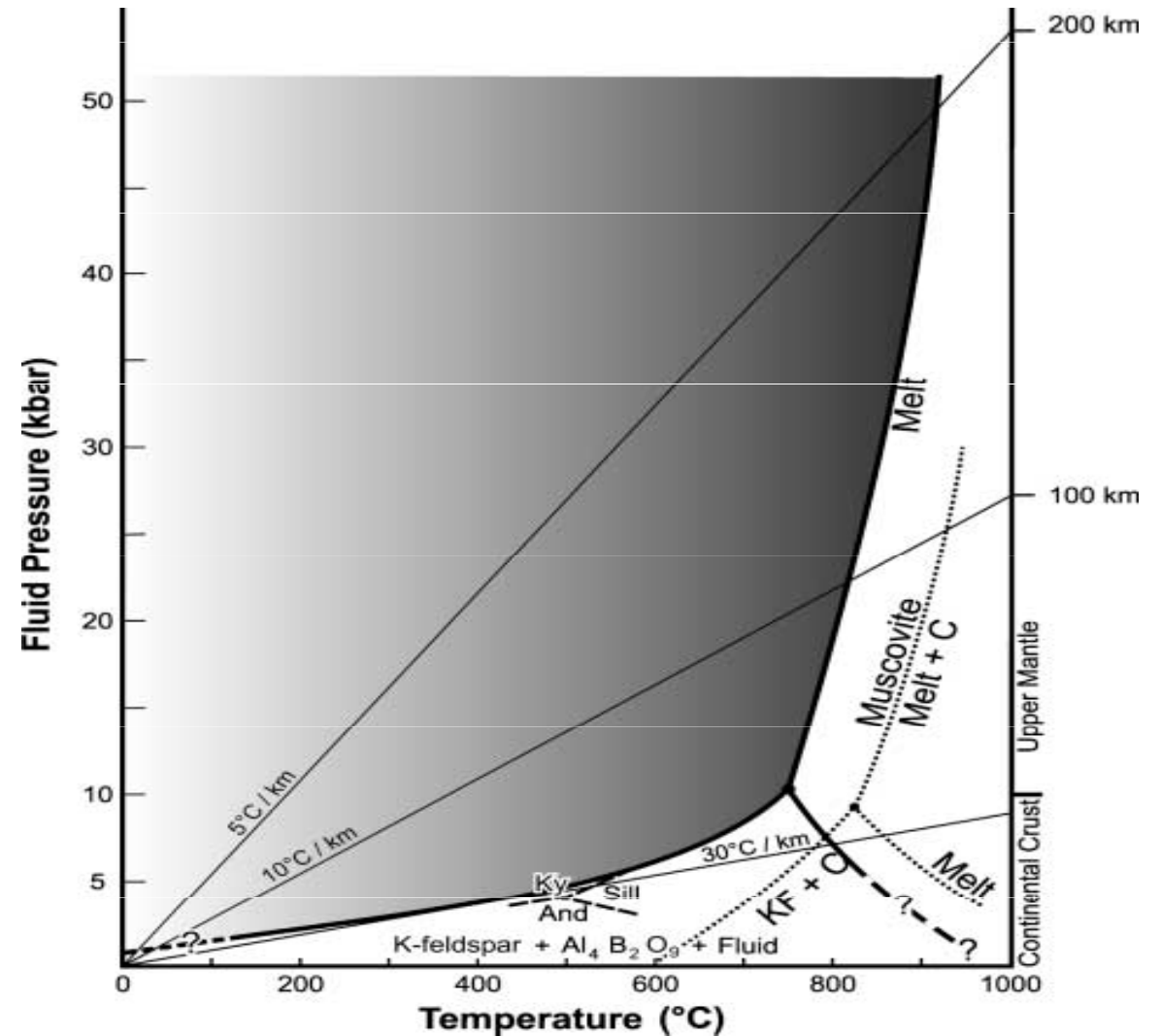


Tu ve svorech Grt-St

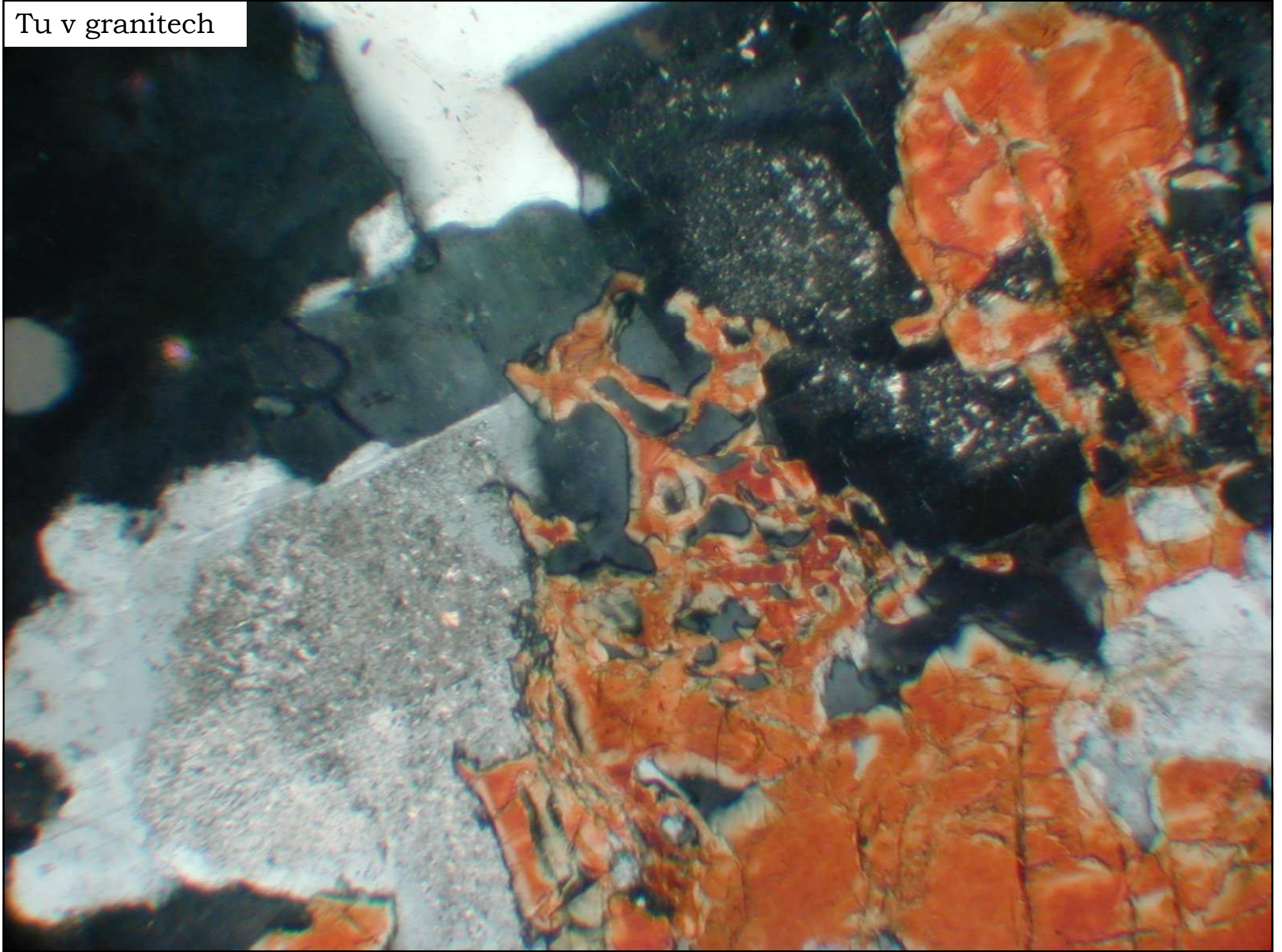


Tu v rulách Grt-Sill

Summarizing pressure-temperature plot showing the stability field of boromuscovite (shaded) **Jung – Schreyer (2002)**



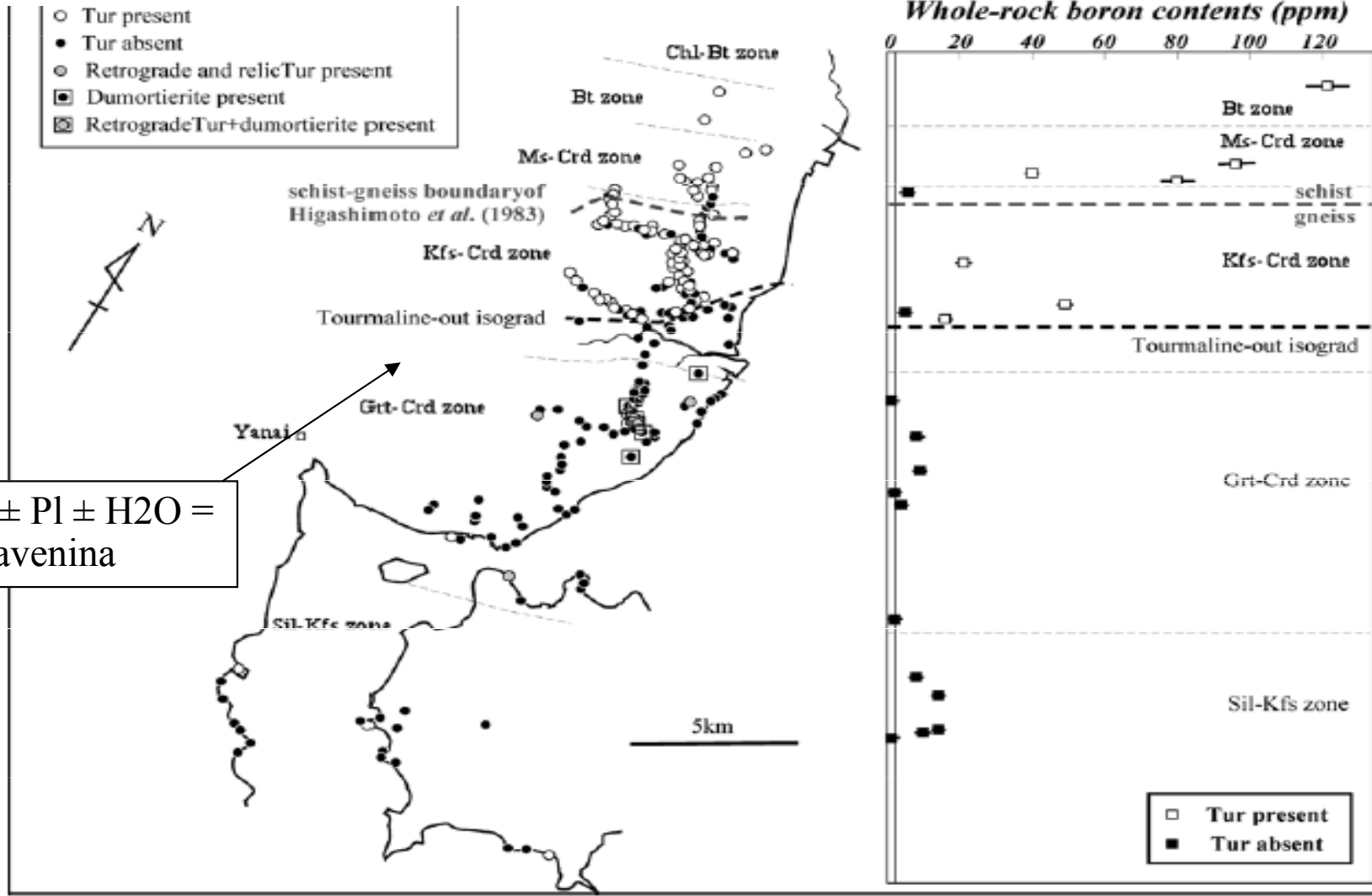
Tu v granitech





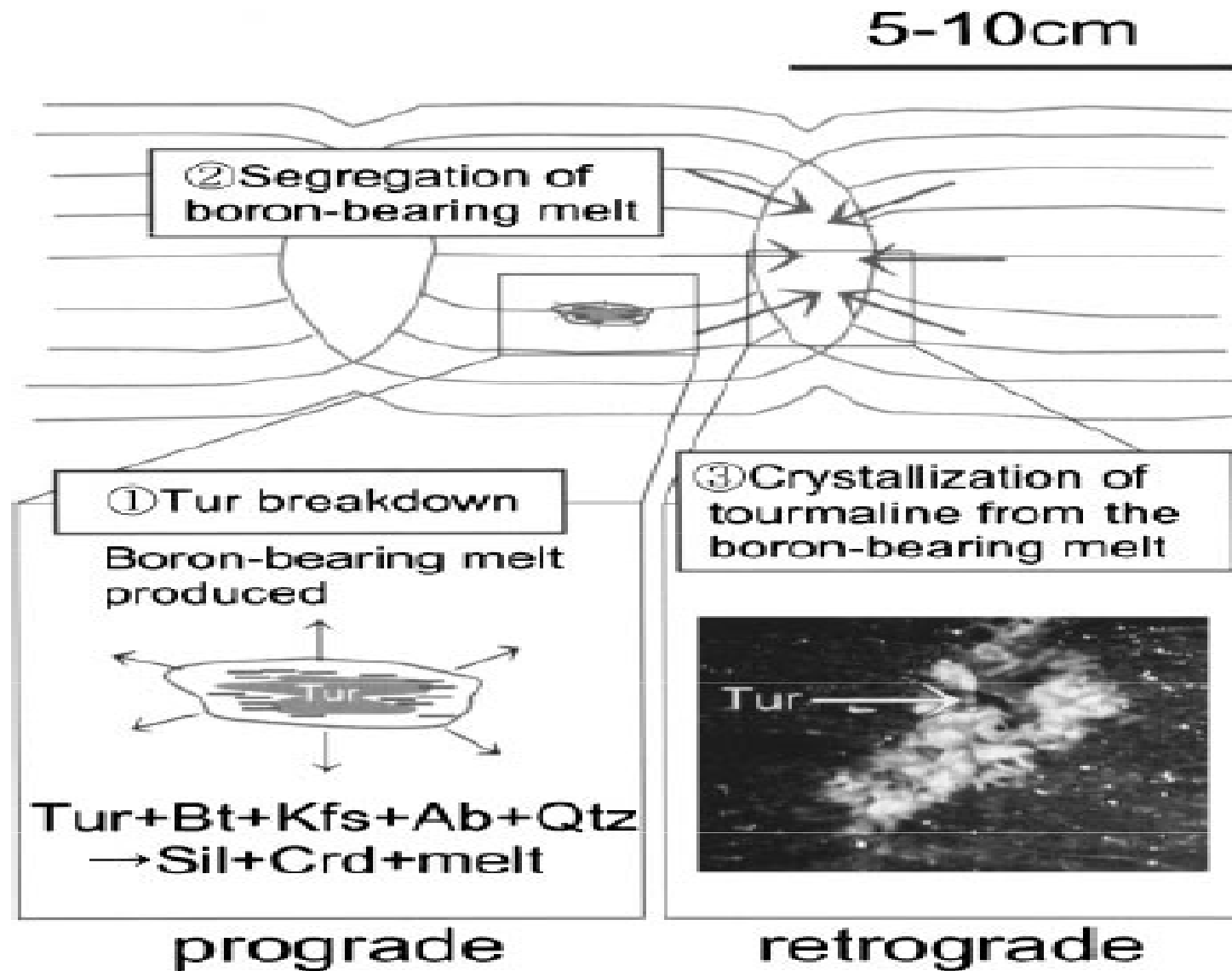
# Rozpad turmalínu

## YANAI AREA



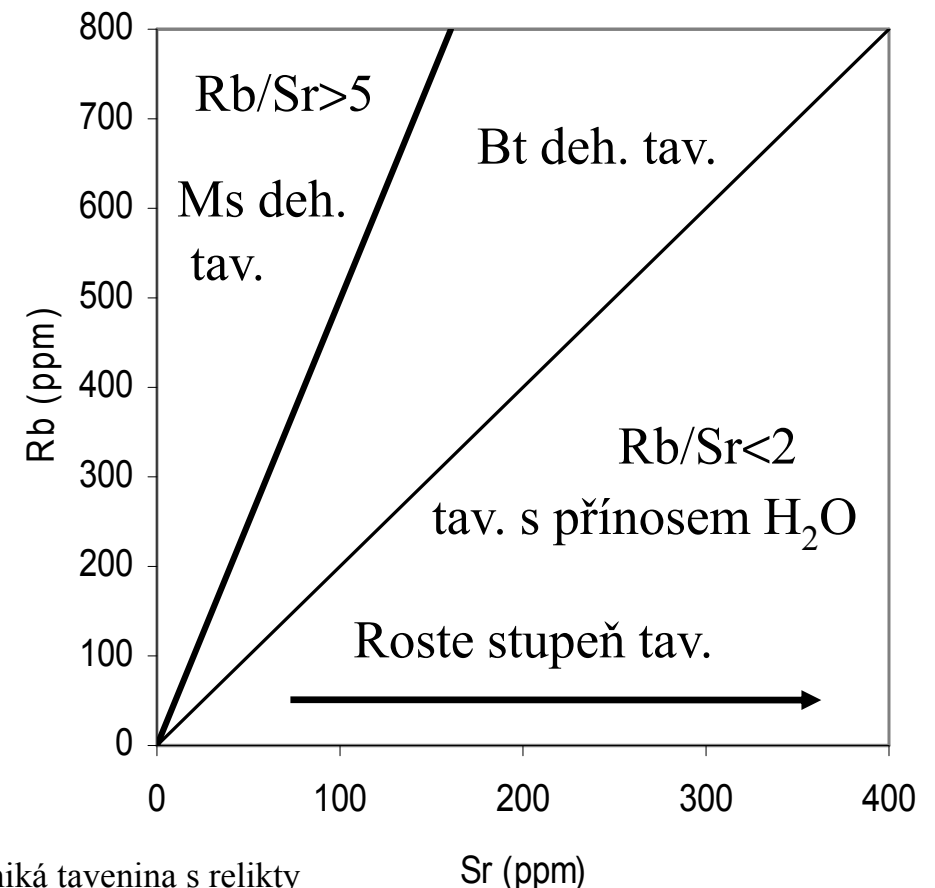
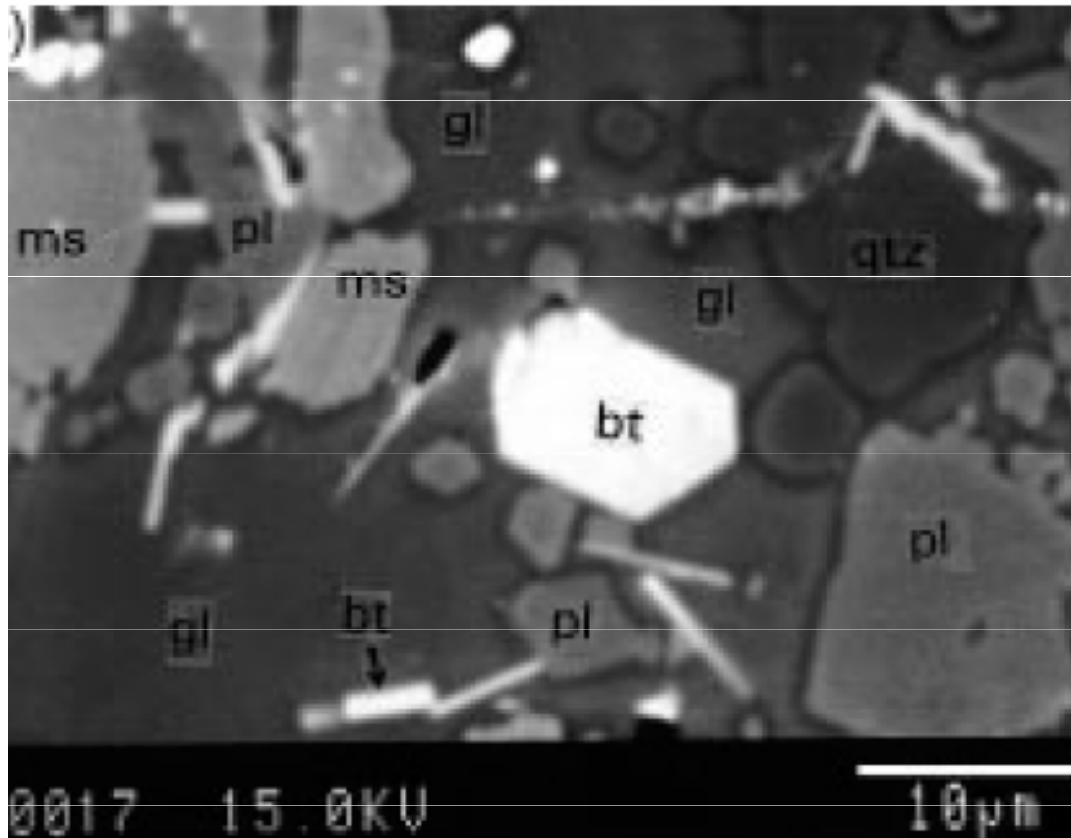
- Ryoke metamorfní pás, SW Japonsko (**Kawakami – Ikeda, 2003**):
- 1. Izograda rozpadu turmalínu se nachází uvnitř Kfs–Crd metamorfní zóny, k ochuzení rul o B dochází v důsledku rozpadu Tu..
- 2. Retrogradní dumortierity a turmalíny krystalují z B bohatých fluid které vznikly v důsledku krystalizace B bohaté taveniny.

- Absence turmalínu v migmatitové zóně souvisí s rozpadem tohoto minerálů a přechodem B do taveniny (**Kawakami, 2001**).
- K rozpadu turmalínu dojde v důsledku dehydratačních reakcí (**Kawakami, 2001**).
- B uvolněný těmito reakcemi ovlivňuje mobilitu taveniny – viskozitu, a teplotu solidu taveniny což umožňuje snadnější uvolnění taveniny (**Kawakami, 2001**).



## IV. 5. Dehydratační tavení nebo přínos fluid?

- Tavenina vznikající dehydratačním tavením má vyšší poměry Rb/Sr a nižší obsah Ba než tavenina vzniklá tavením metapelitů za přínosu fluid.
- Například podle Harrise et al. (1993) při dehydratačním tavení metapelitů vzniká tavenina s poměrem Rb/Sr >5 zatím co při tavení za přínosu H<sub>2</sub>O je poměr Rb/Sr <2.



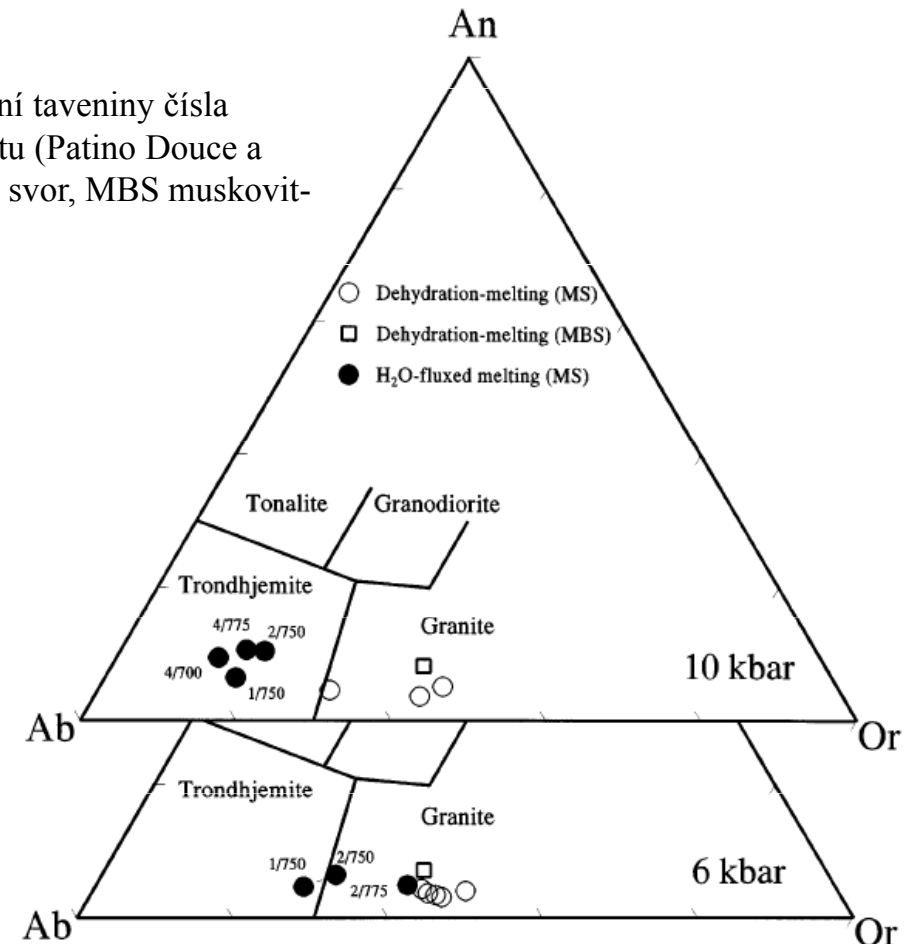
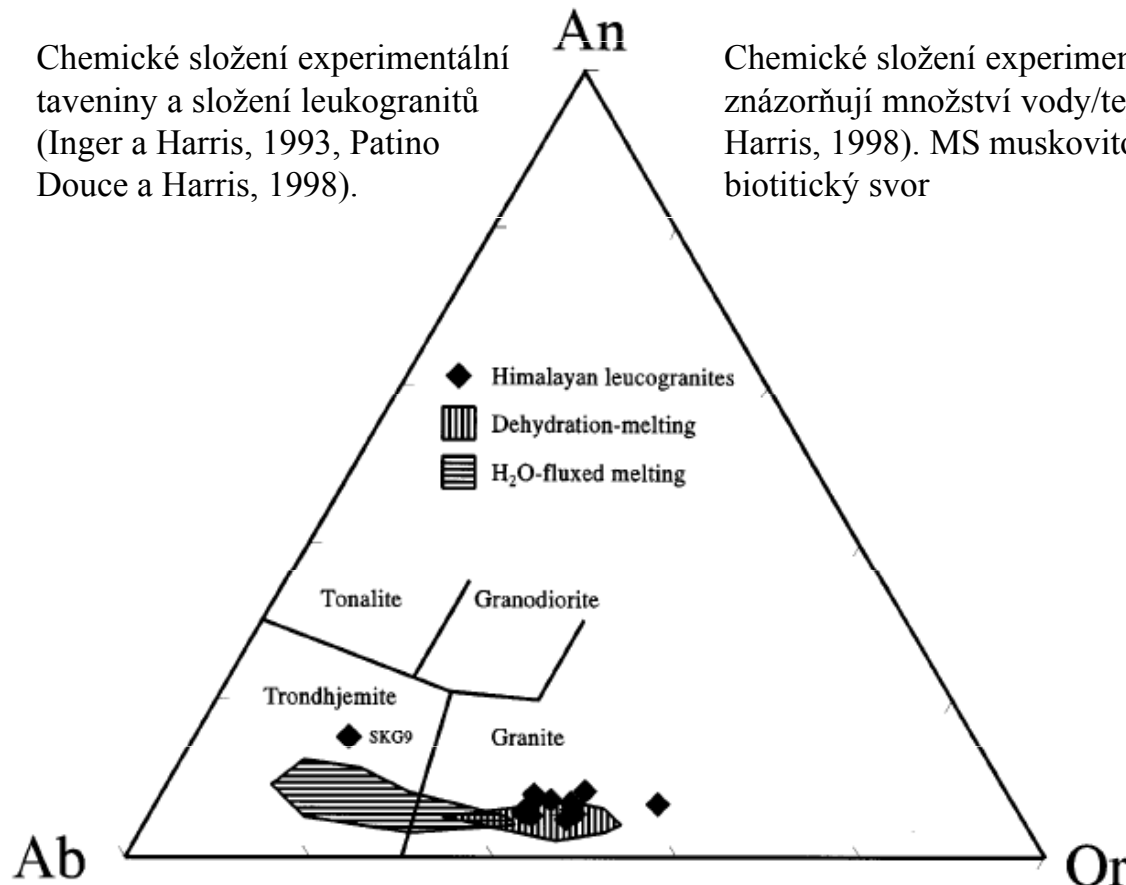
BSE obrázek výsledku experimentu tavení s 2% H<sub>2</sub>O (MS): 6kbar a 750 °C vzniká tavenina s relikty Ms, Pl, Qtz a chybí typické struktury pro dehydratační tavení (Patino Douce a Harris, 1998).

- Také obsahy hlavních oxidů v tavenině jsou odlišné.
- Při dehydratačním tavení muskovitu (při 6, 8 a 10 kbarech) vzniká tavenina odpovídající svým chemickým složením peraluminickým leukogranitům, ale tavením metapelitů za přítomnosti H<sub>2</sub>O vzniká magma trondhjemitického složení (Patino-Douce a Harris, 1998).
- Tyto rozdíly jsou způsobeny rozdílnými poměry minerálů, které do tavení vstupují. V prvním případě lze dehydratační tavení muskovitu popsat:
- $22Ms + 7Pl + 8Qtz = 25 \text{ tavenina} + 5Kfs + 5Sil + 2Bt$
- v případě, že je do systému přinášena voda může tato reakce proběhnout takto:

- $9Ms + 15Pl + 7Qtz + xH_2O = 31 \text{ tavenina}$

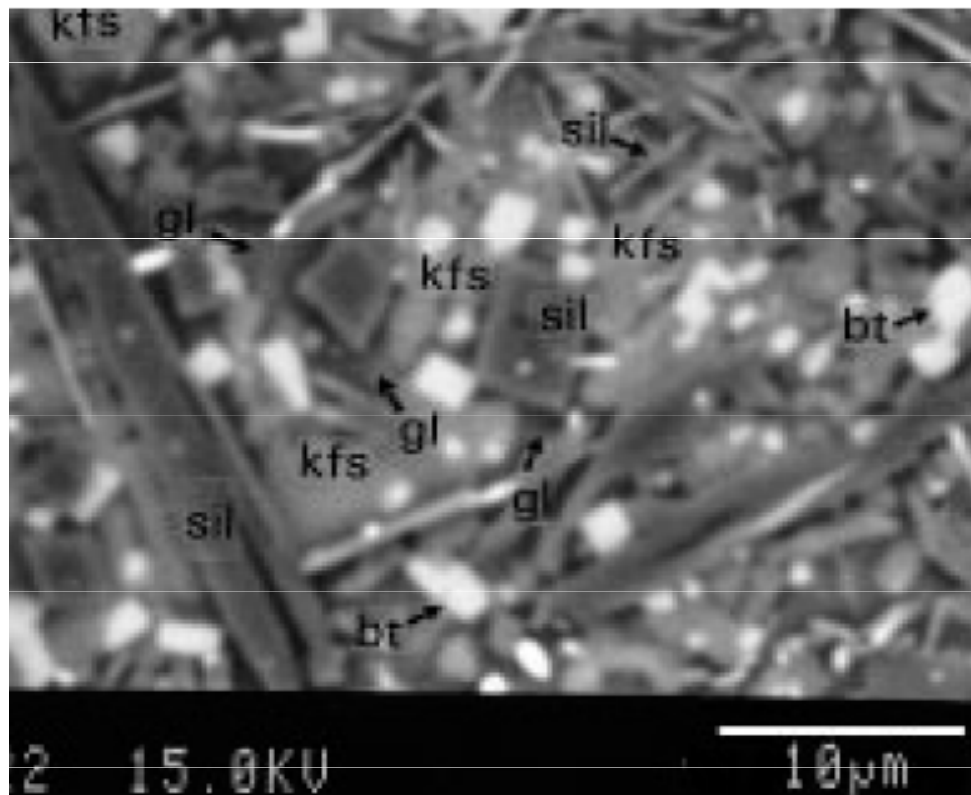
Chemické složení experimentální taveniny a složení leukogranitů (Inger a Harris, 1993, Patino Douce a Harris, 1998).

Chemické složení experimentální taveniny čísla znázorňují množství vody/teplotu (Patino Douce a Harris, 1998). MS muskovitový svor, MBS muskovitbiotitický svor

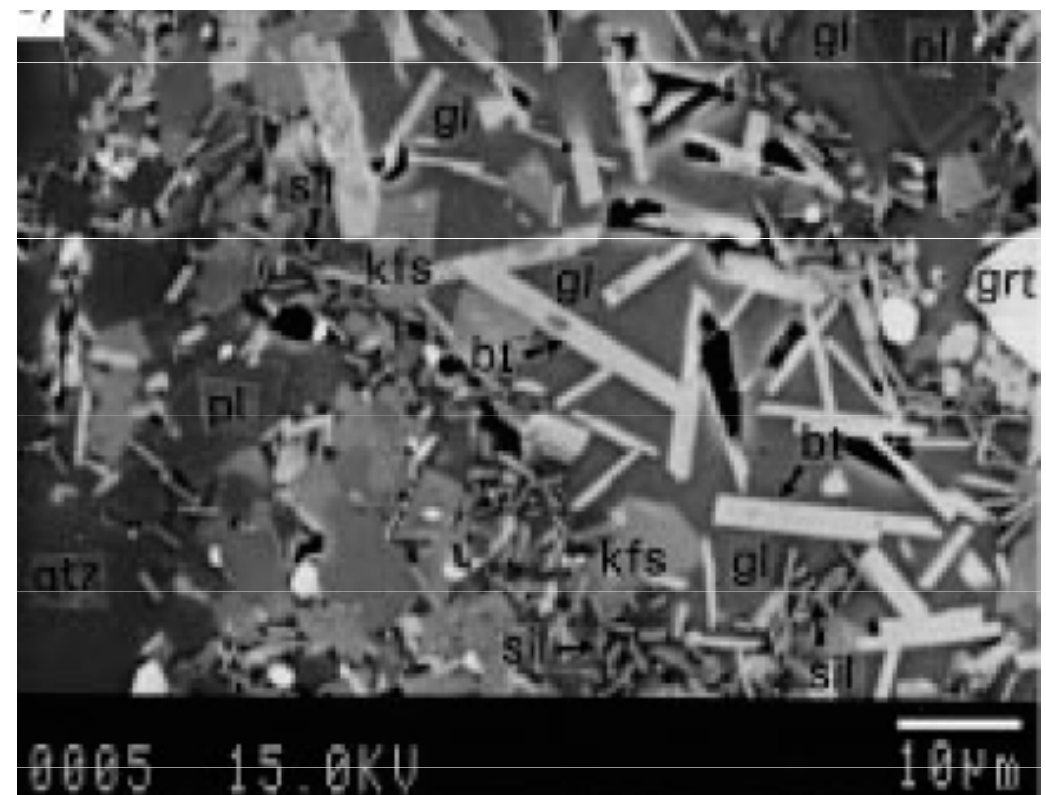


## A. Dehydratační tavení muskovitu

- Rozpadem muskovitu vzniká relativně malé množství taveniny, avšak často s vysokými obsahy B (Nabelek a Bartlett, 2000).
- Právě proto jsou takové taveniny vhodným protolitem pro vznik turmalinických granitů.
- Produktem dehydratačního tavení muskovitu je tavenina s nízkým obsahem Fe a Mg avšak s vysokým poměrem Fe/(Fe+Mg). Typický je nízký obsah Sr a vysoký obsah Rb.
- Obsah Ba je nízký, protože během tavení vzniká reziduum obohacené draselným živcem, ve kterém se Ba koncentruje (Inger a Harris, 1993).



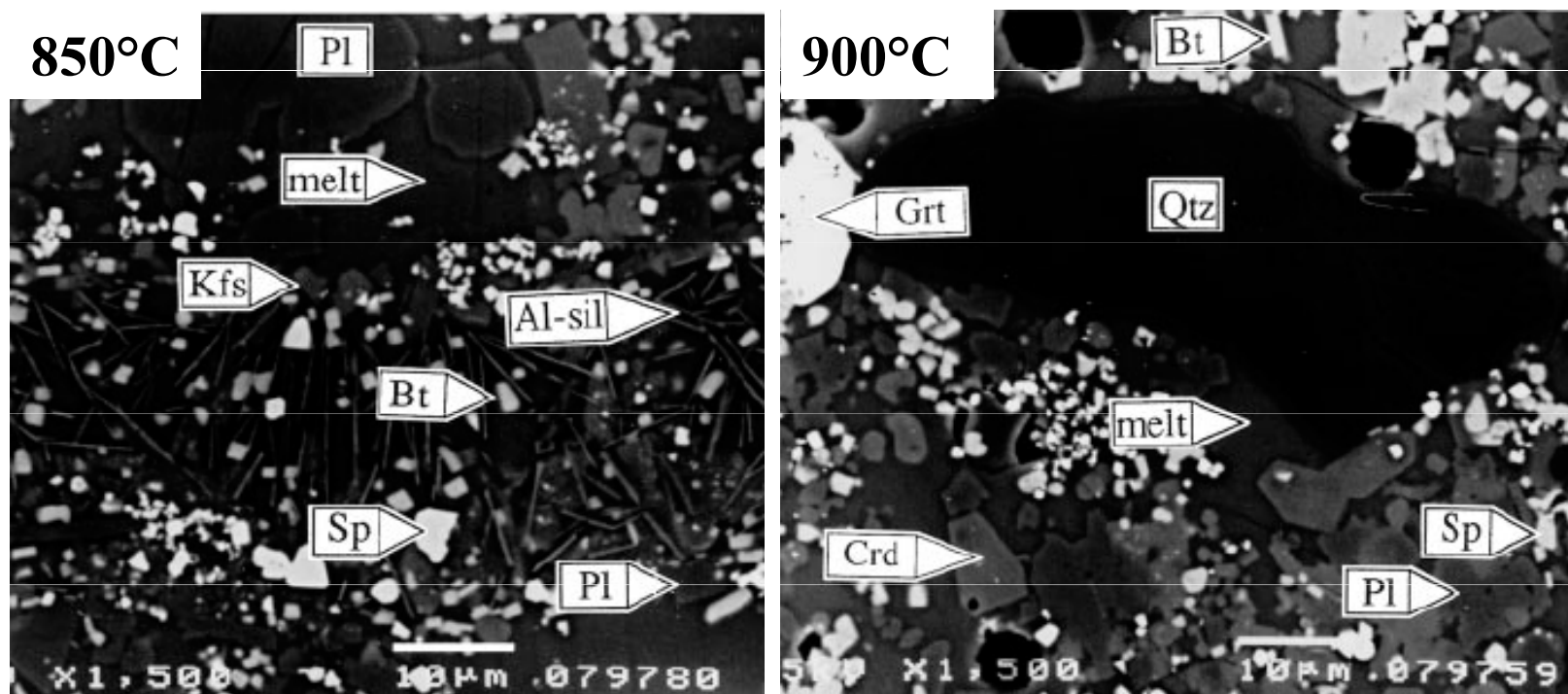
BSE obrázek výsledku experimentu Ms dehydratačního tavení (MS): 6kbar a 800 °C rozpadem Ms vzniká Sill+Bt+Kfs+tav. (Patino Douce a Harris, 1998).



BSE obrázek výsledku experimentu Ms dehydratačního tavení (MBS): 10kbar a 820 °C rozpadem Ms vzniká Sill+Bt+Kfs+Grt+tav (Patino Douce a Harris, 1998).

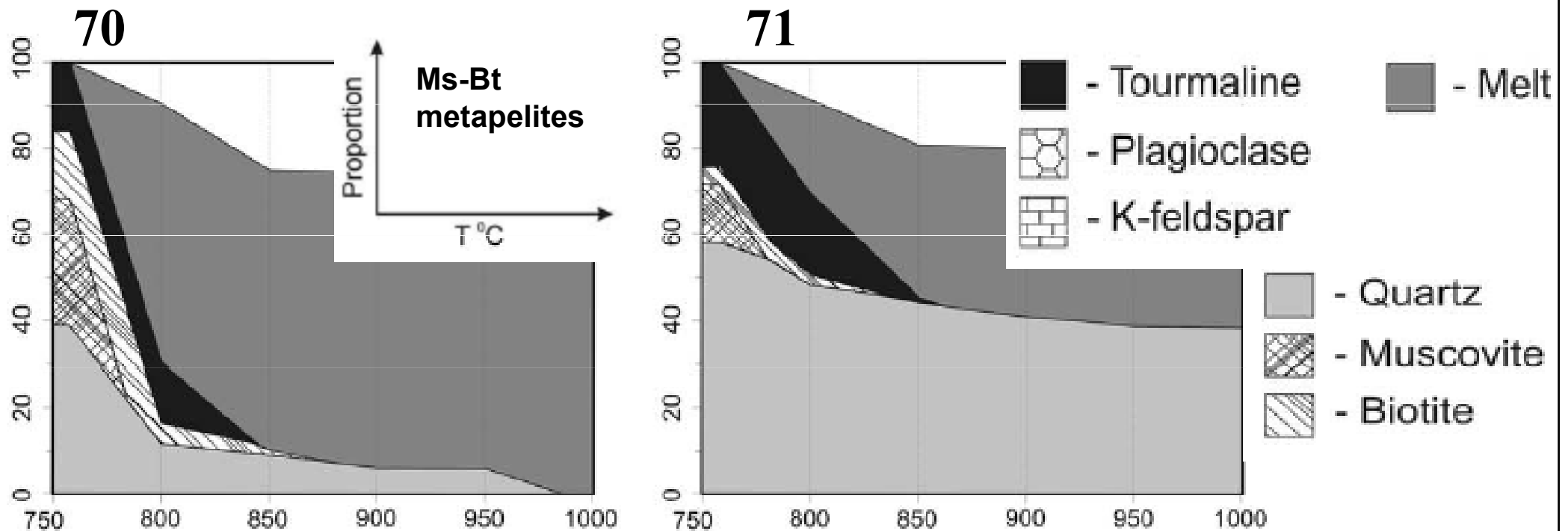
## • **B. Dehydratační tavení biotitu**

- V metamorfovaných horninách je zastoupení B v biotitu (1-53 ppm) ve srovnání s muskovitem (10-1340 ppm) nízké (Henry a Dutrow, 1996), avšak v průběhu dehydratačního tavení biotitu může docházet k rozpadu bórem bohatých minerálů jako je turmalín.
- Vzniklá tavenina má vyšší obsahy Fe a Mg poměr  $Fe/(Fe+Mg)$  závisí na složení zdrojového biotitu a na stupni tavení (Nabelek a Bartlett, 2000).
- Tavenina bývá obohacena Ti, protože tento prvek je v biotitu zastoupen podstatně více než v muskovitu (Nabelek a Glascock, 1995).
- Oproti tavenině vzniklé dehydratačním tavením muskovitu bude mít tato tavenina nižší obsahy Rb a naopak vyšší obsahy Sr a Ba.



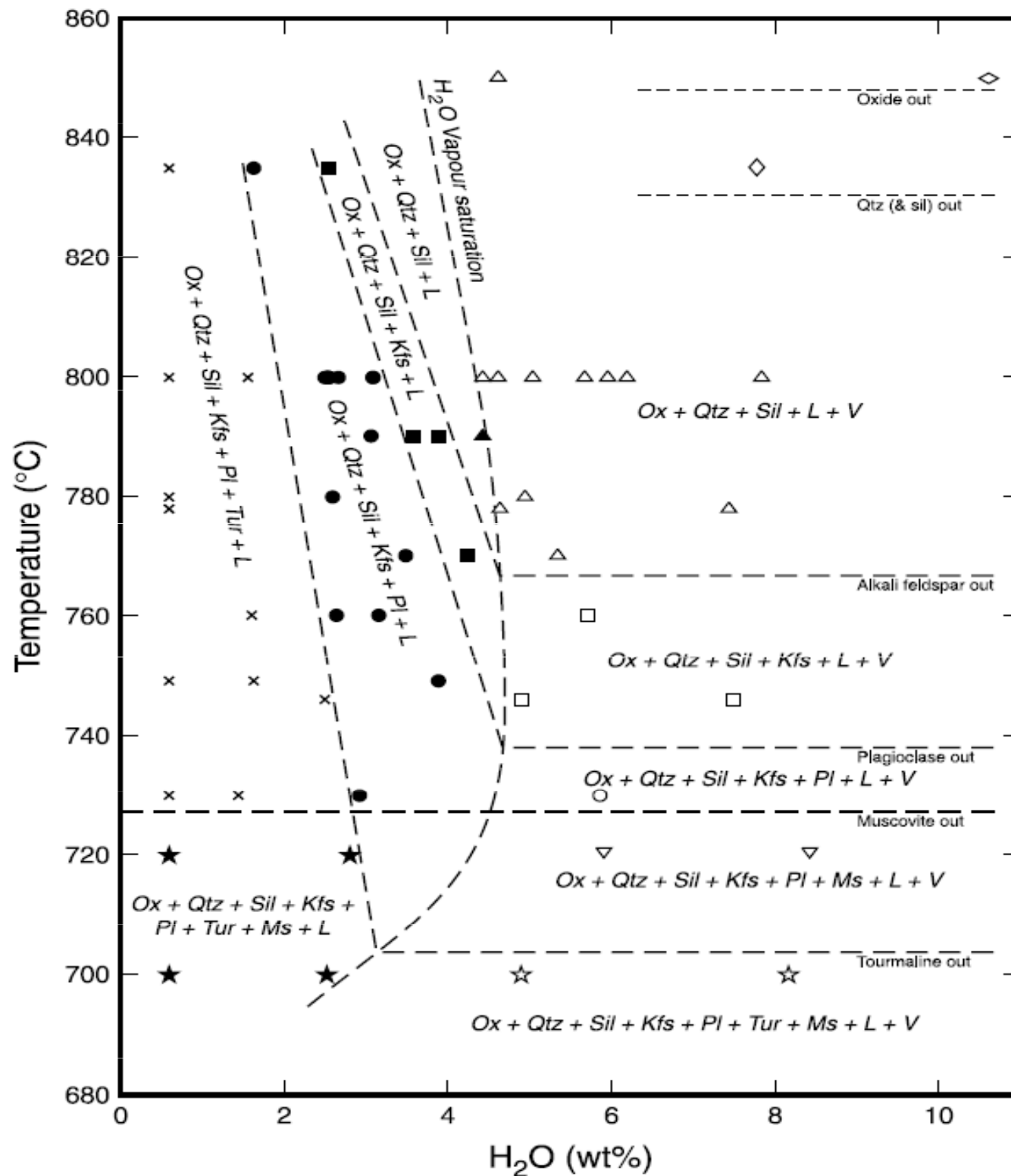
BSE obrázek výsledku experimentu Bt dehydratačního tavení: 6kbar. (Castro et al., 2000).

- Mezi 750 and 800 °C, mizí kompletně muskovit v důsledku dehydratačního tavení Ms+Bt (Spicer – Stevens – Buick, 2004)
- $18.8Qtz + Bt + 4Ms + 0.3Tur = 8Melt + 1.6Spl + 0.5Crd$
- Touto reakcí může vznikat ve slídami bohatých vzorcích až 60% taveniny při 800 °C
- Během této reakce je částečně konzumovaný turmalín (přednostně je konzumovaná elbaitová komponenta).



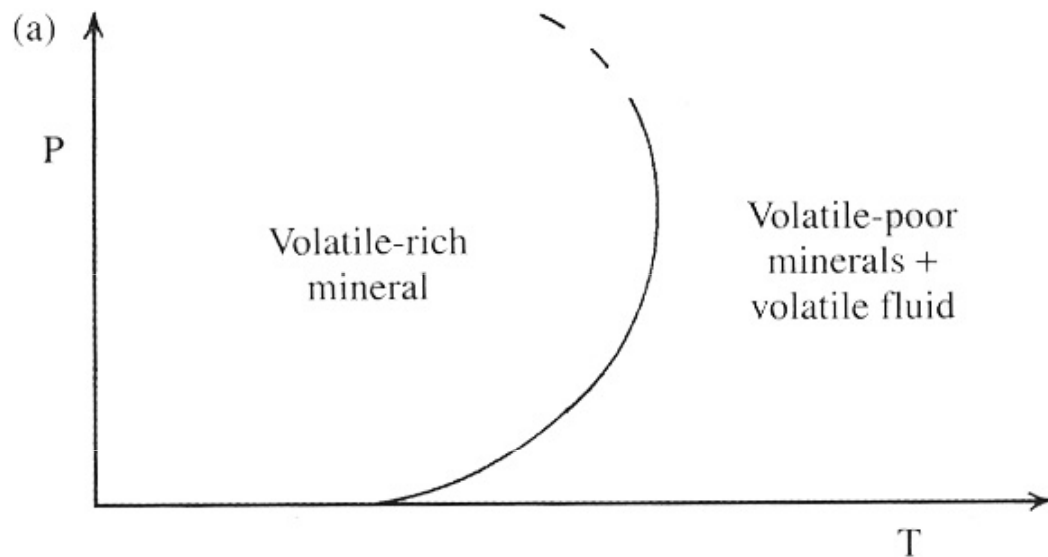
Phase proportions in the run products expressed as a function of temperature (EXPERIMENTS). A Melt proportions relative to those of the principle reactant minerals in the four samples. This highlights the relatively low temperature production in the two mica metapelites between 850 and 900C, and the control of melt fraction at very high temperature by bulk rock water content (Spicer – Stevens – Buick, 2004)

# IV. 6. Krystalizace granitické taveniny



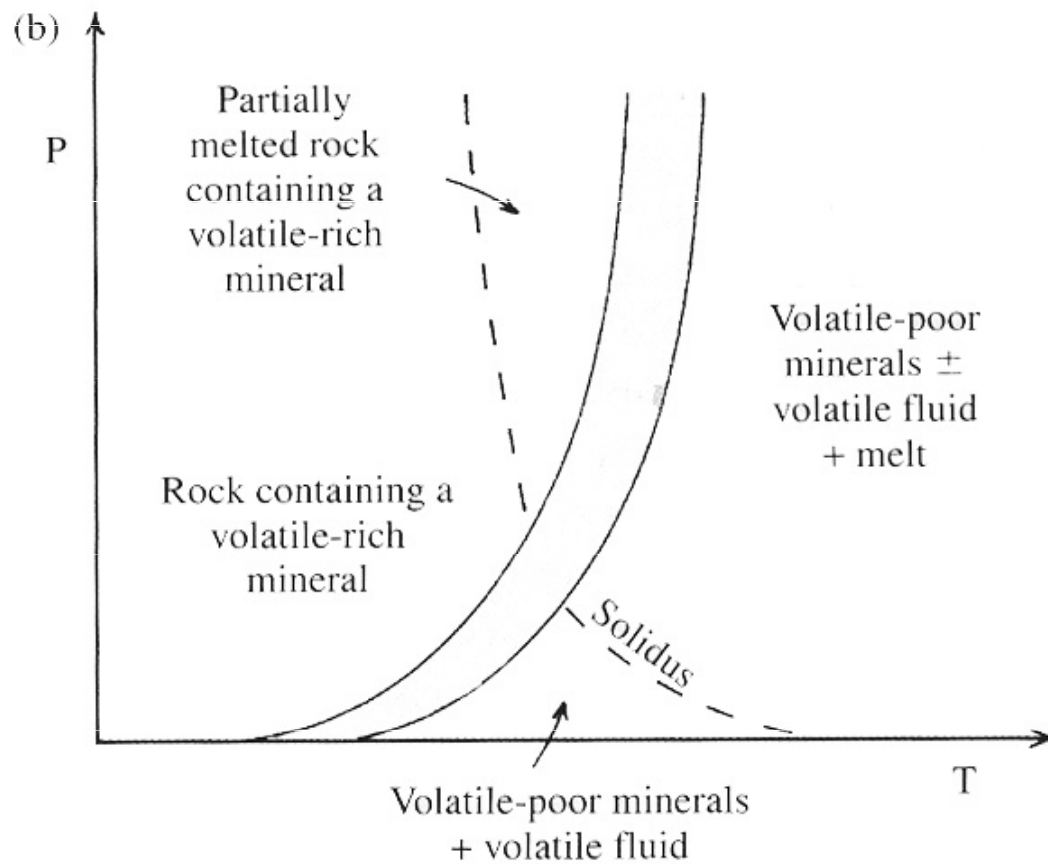
Fázový diagram pro granity Při 0,15 Gpa (Attrill a Gibb, 2003)





1) termální energie + minerál bohatý H<sub>2</sub>O = minerál bez H<sub>2</sub>O nebo chudý H<sub>2</sub>O + H<sub>2</sub>O fluida

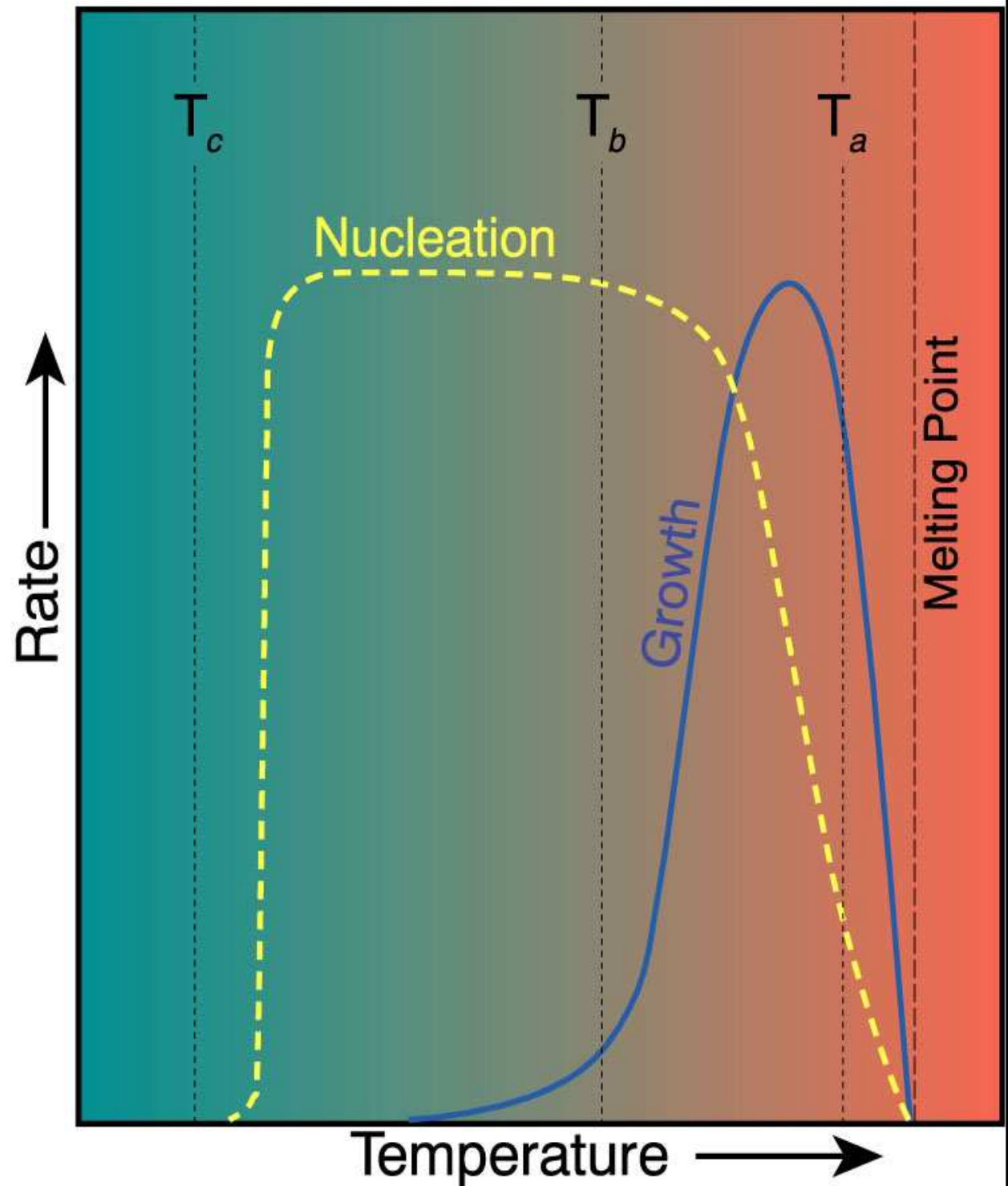
2) termální energie + minerál bohatý H<sub>2</sub>O = minerál bez H<sub>2</sub>O nebo chudý H<sub>2</sub>O + tavenina



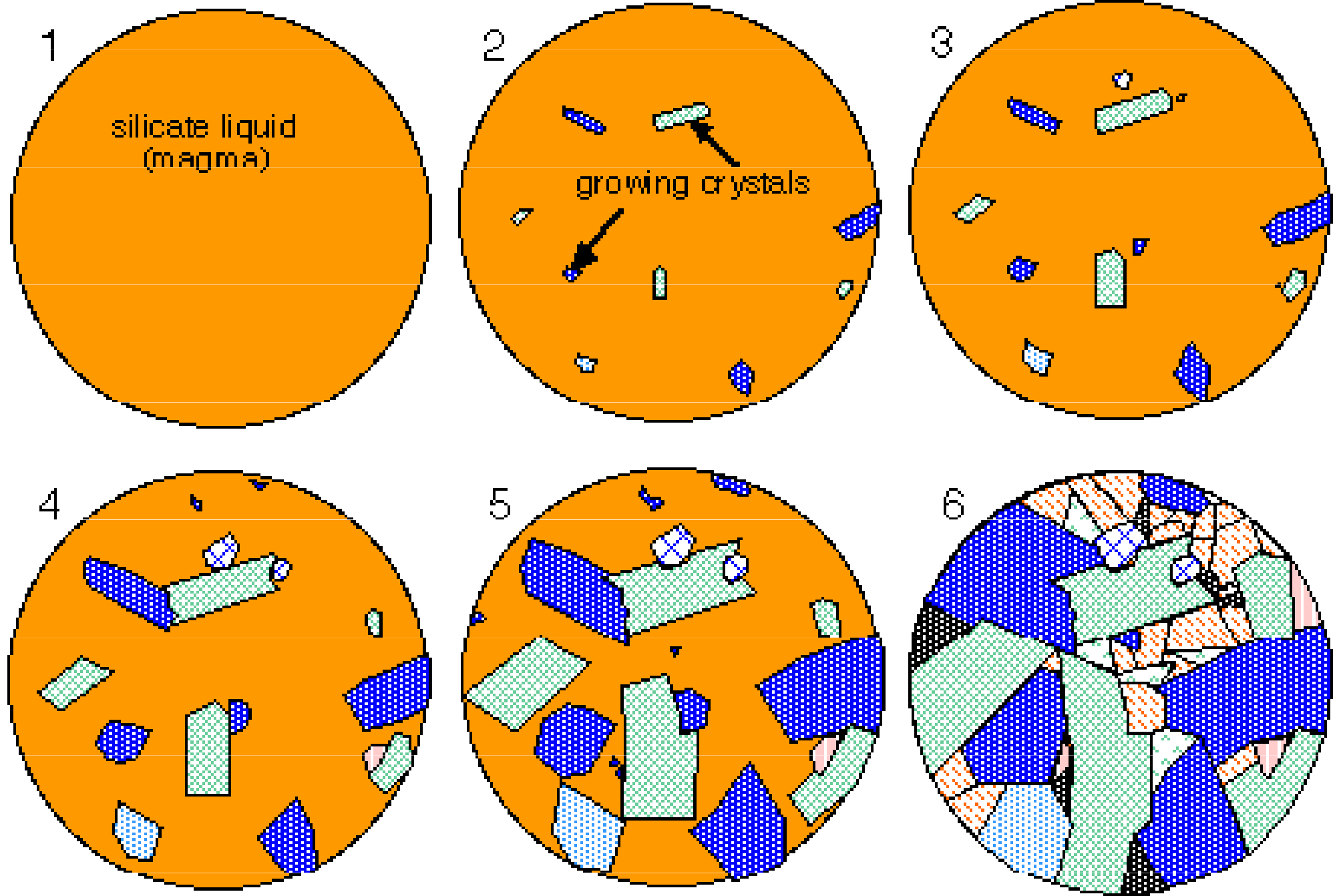
3) podobně funguje také krystalizace tavenina = termální energie + minerál bohatý H<sub>2</sub>O nebo minerál + H<sub>2</sub>O

volná fluidní fáze může reagovat s již vykrytalovanými minerály

- idealizované poměry mezi nukleací a růstem krystalů v závislosti na teplotě a rychlosti krystalizace pod bodem tavení
- pomalé chladnutí má za následek jen malému podchlazení ( $T_a$ ),
- tak vzniká malé množství velkých krystalů
- rychlé chladnutí umožňuje větší podchlazení ( $T_b$ ),
- výsledkem je pomalejší růst a rychlejší nukleace což produkuje drobné krystaly
- velmi rychlá krystalizace má za následek malou nebo žádnou nukleaci a růst ( $T_c$ ) produktem je sklo

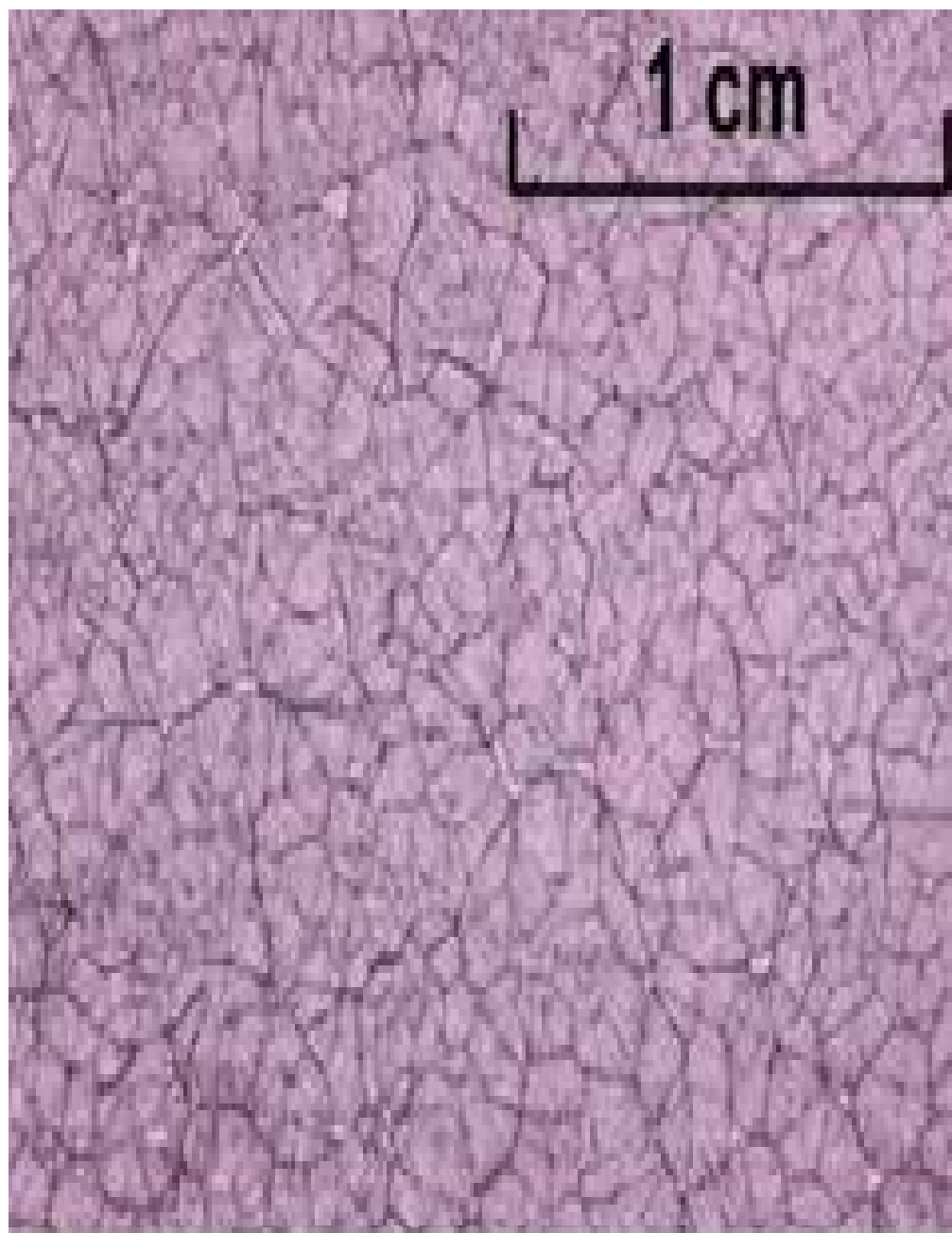


cooling and crystallizing →

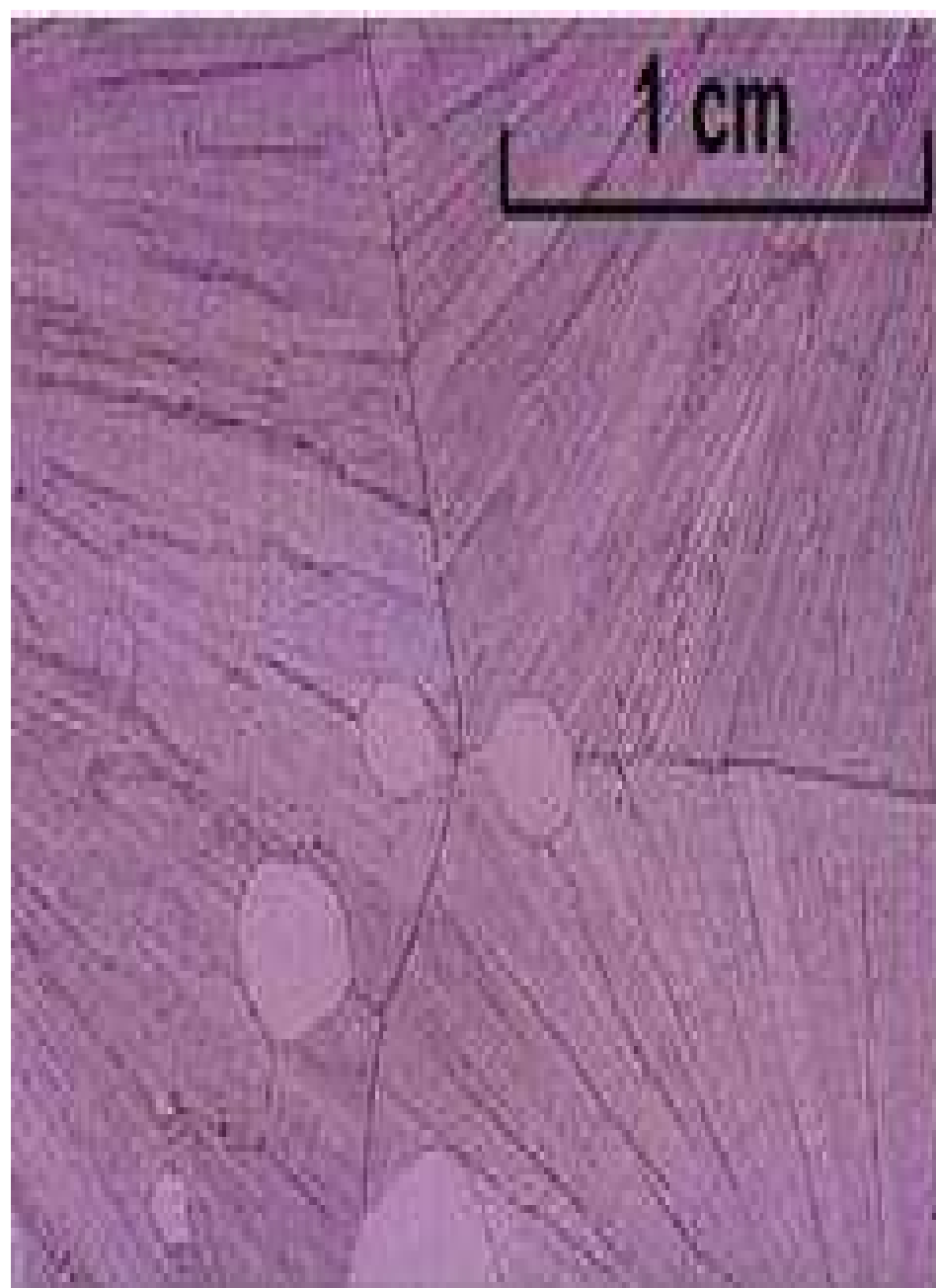


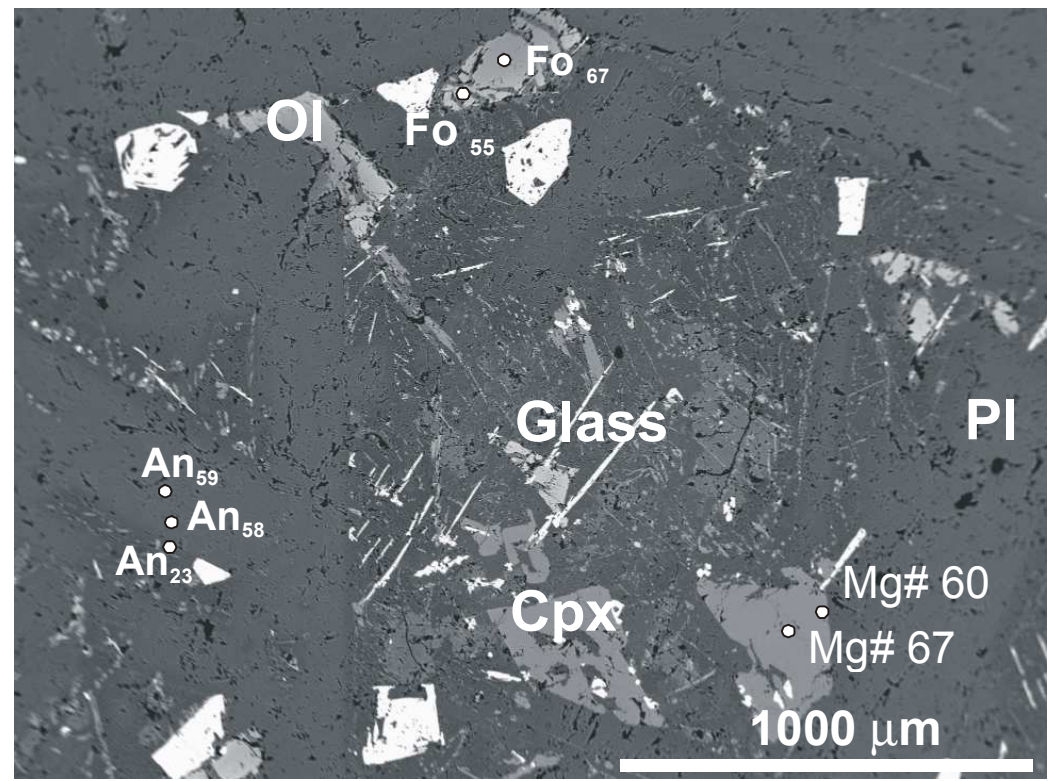
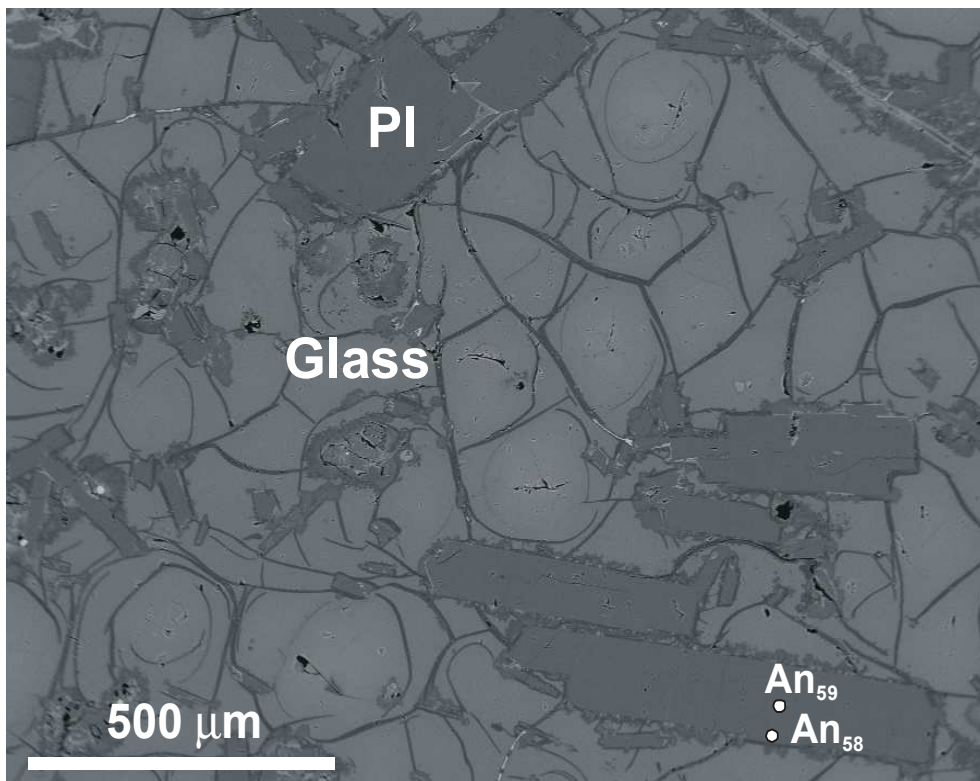
network of intergrown crystals;  
all magma used up

Rychlá krystalizace



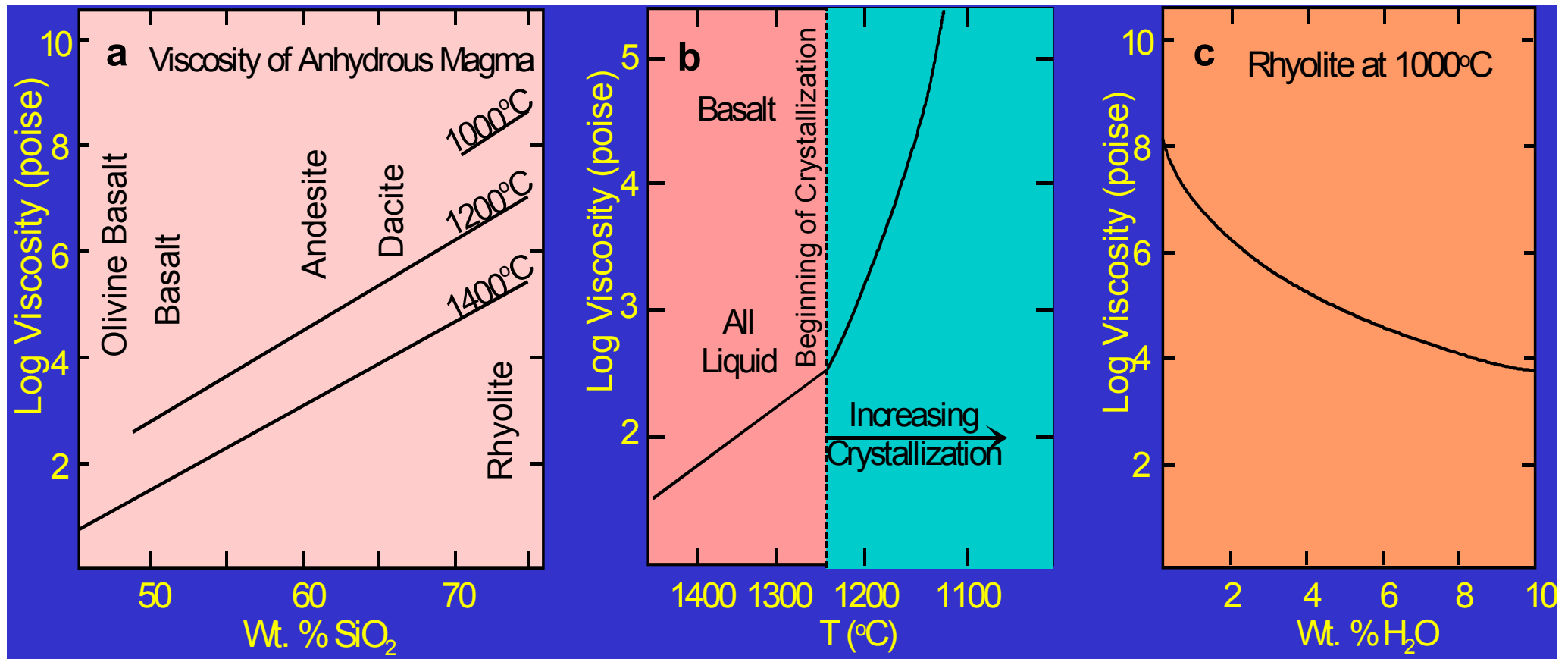
Pomalá krystalizace





Bazalty-příklad



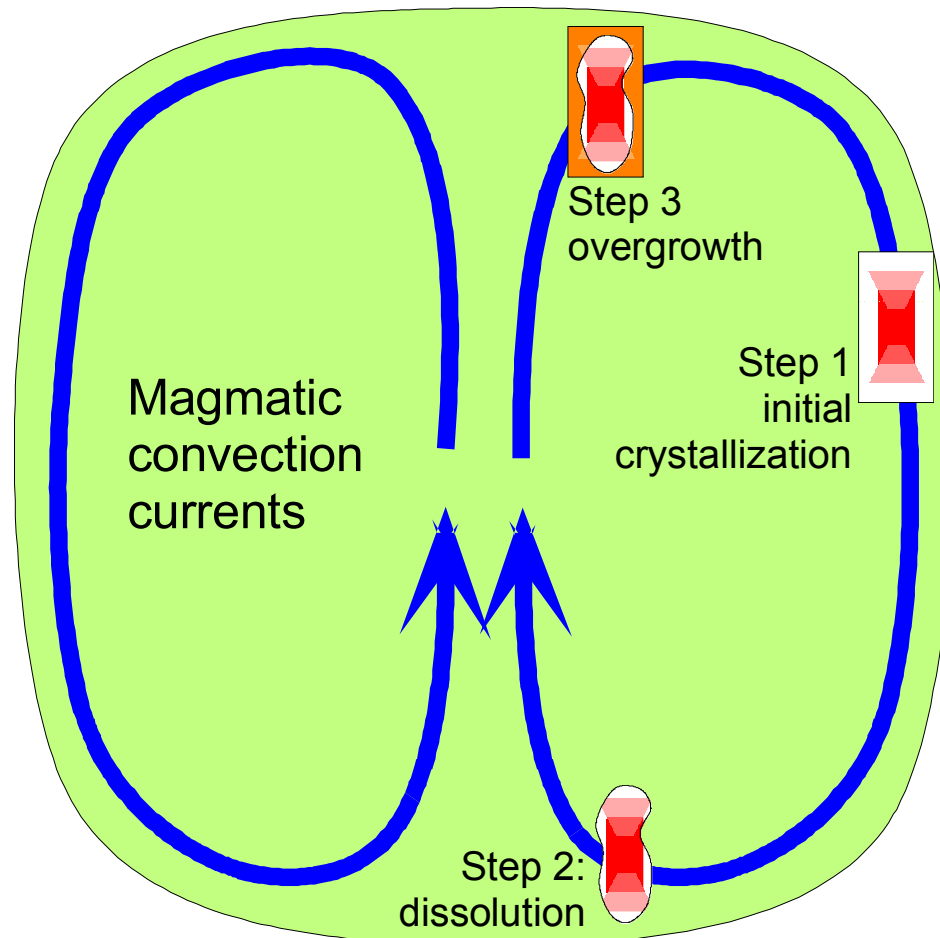


a) Vypočtená viskozita bezvodé silikátové taveniny za atmosferického tlaku, počítáno metódou Bottinga a Weill (1972) (Hess (1989), Origin of Igneous Rocks. Harvard University Press).

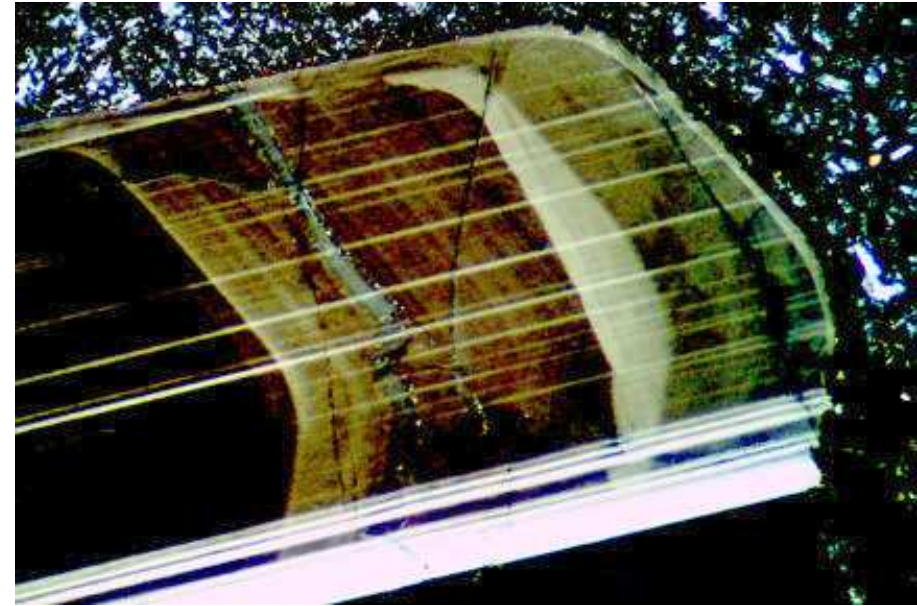
b) Změna viskozity bazaltové taveniny v závislosti na teplotě během krystalizace (Murase and McBirney, 1973), Geol. Soc. Amer. Bull., 84, 3563-3592.

c) Změna viskozity ryolitové taveniny při teplotě 1000°C s nárůstem obsahu H<sub>2</sub>O v tavenině (Shaw, 1965, Amer. J. Sci., 263, 120-153).

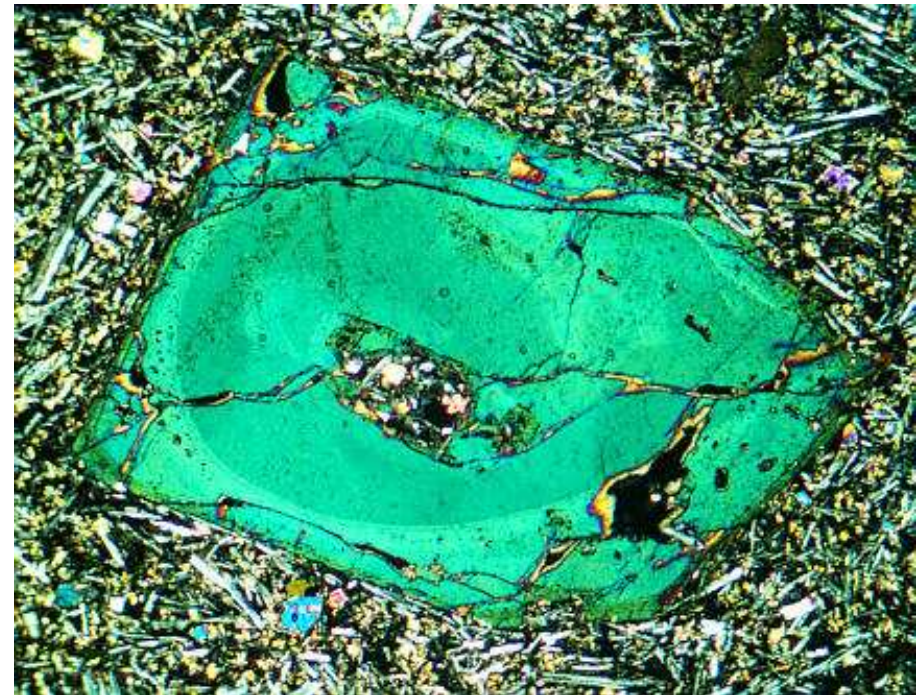
# Convection-controlled dissolution and zoning



Crystal growth and convection into different temperature, pressure, or composition regions, can result in multiple episodes of growth and dissolution.



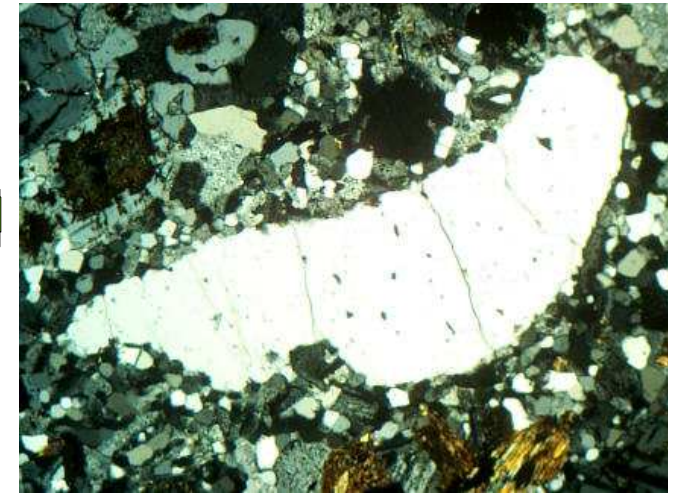
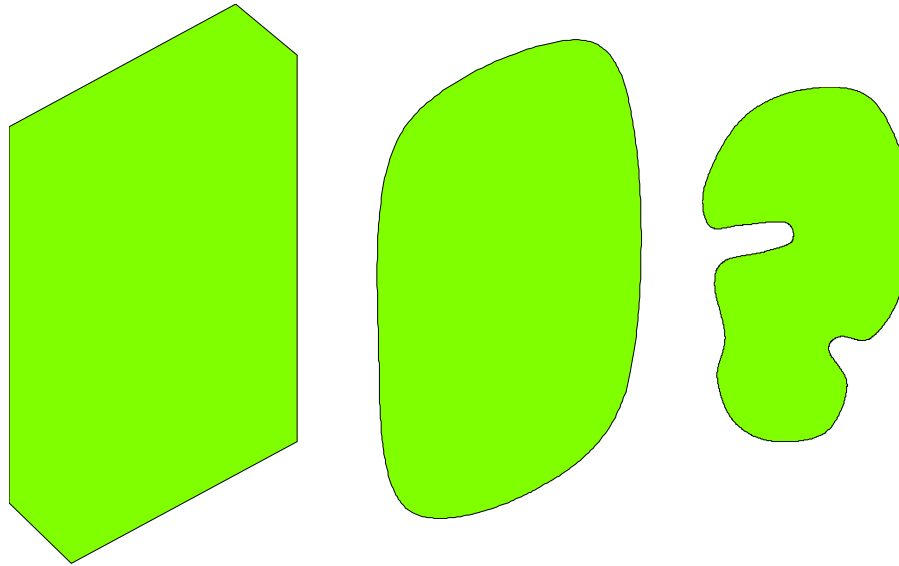
Zoned plagioclase with internal unconformities.



Augite with rounded, resorbed core.

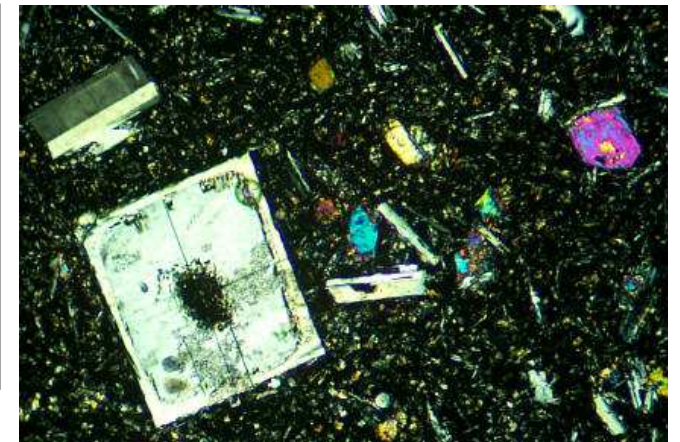
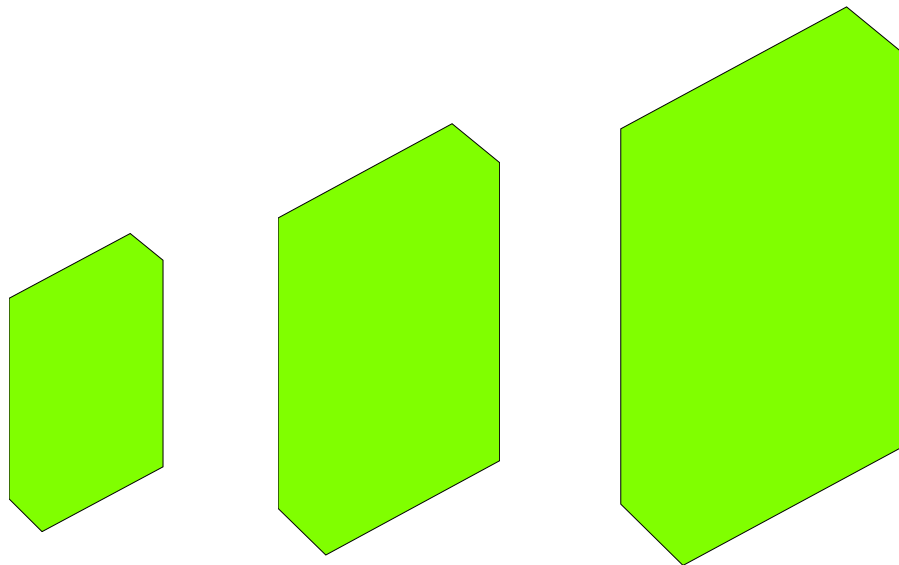
# Mineral growth and dissolution in magmas

Dissolution  
(resorption) of  
phenocrysts or  
xenocrysts



Resorbed quartz phenocryst in a dacite porphyry.

Regular growth

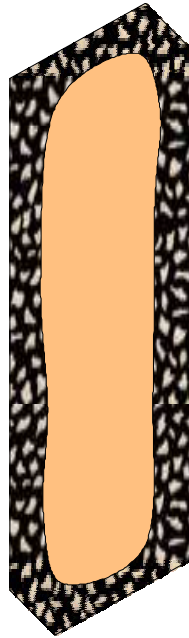


Euhedral phenocrysts of plagioclase and olivine in a basalt.

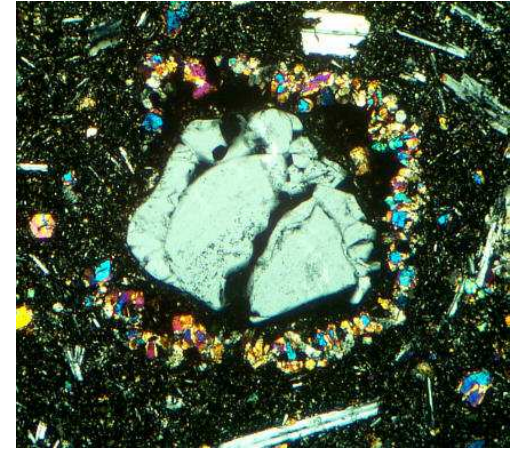


# Other reaction relationships in magmas

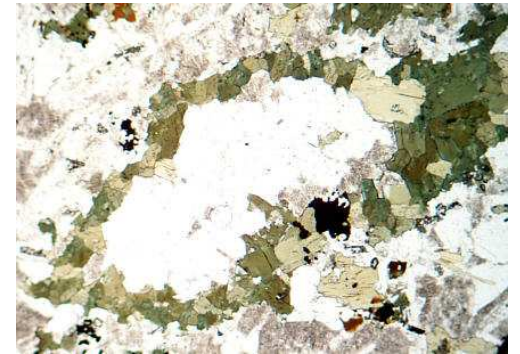
Dehydration of hydrous minerals to an anhydrous assemblage.



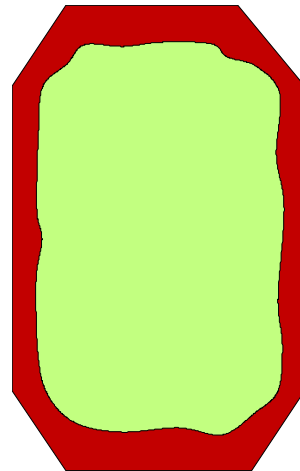
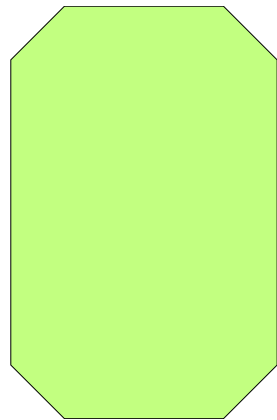
Quartz xenocryst rimmed by augite in an olivine basalt.



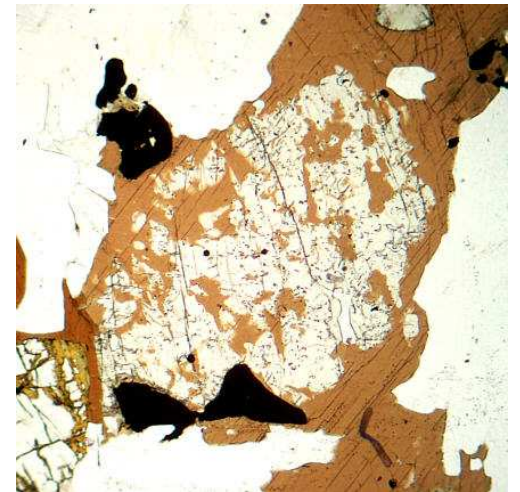
Quartz xenocryst rimmed by hornblende in a syenite porphyry.

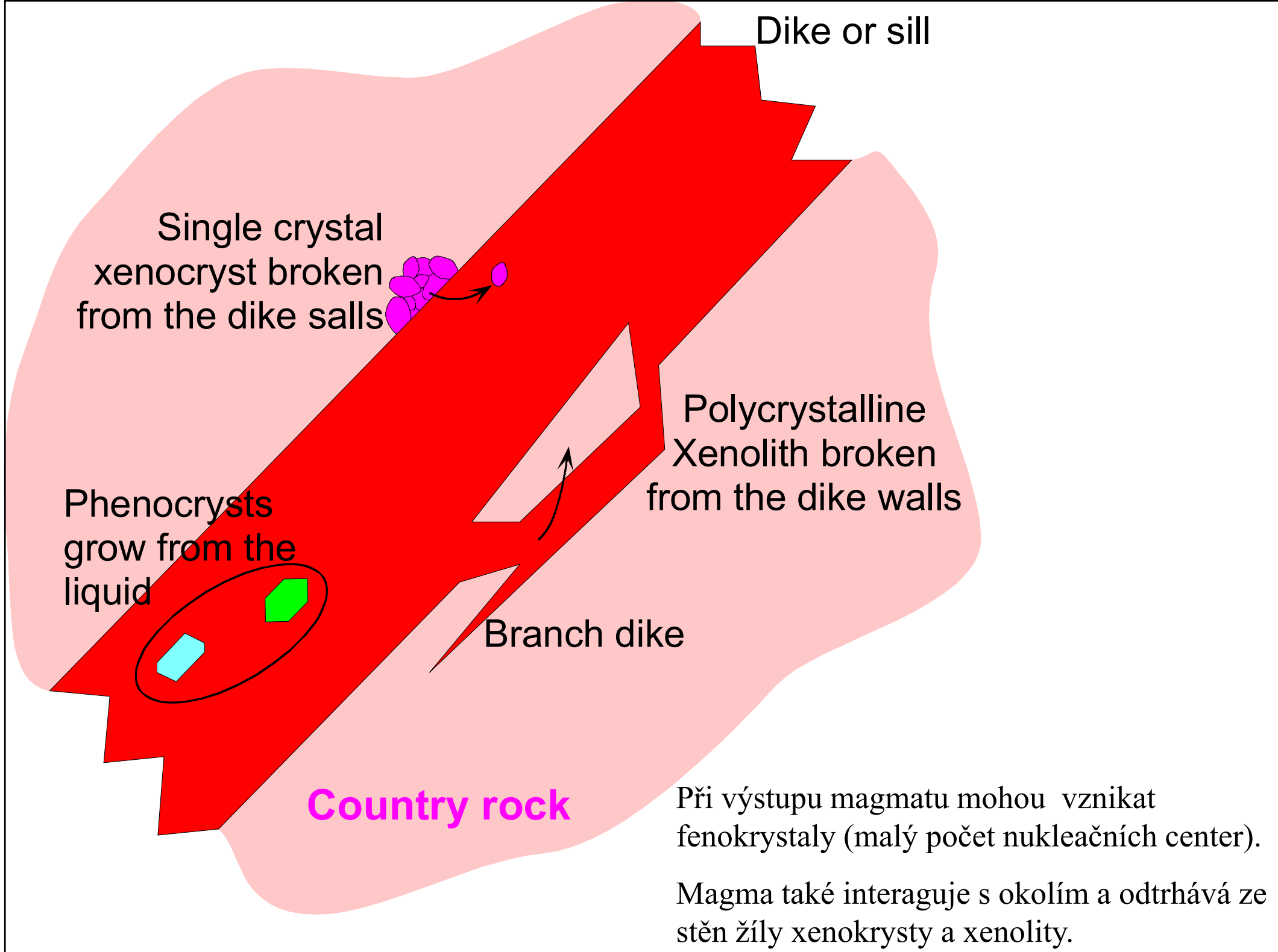


Overgrowths of one mineral on another due to a peritectic reaction or disequilibrium.



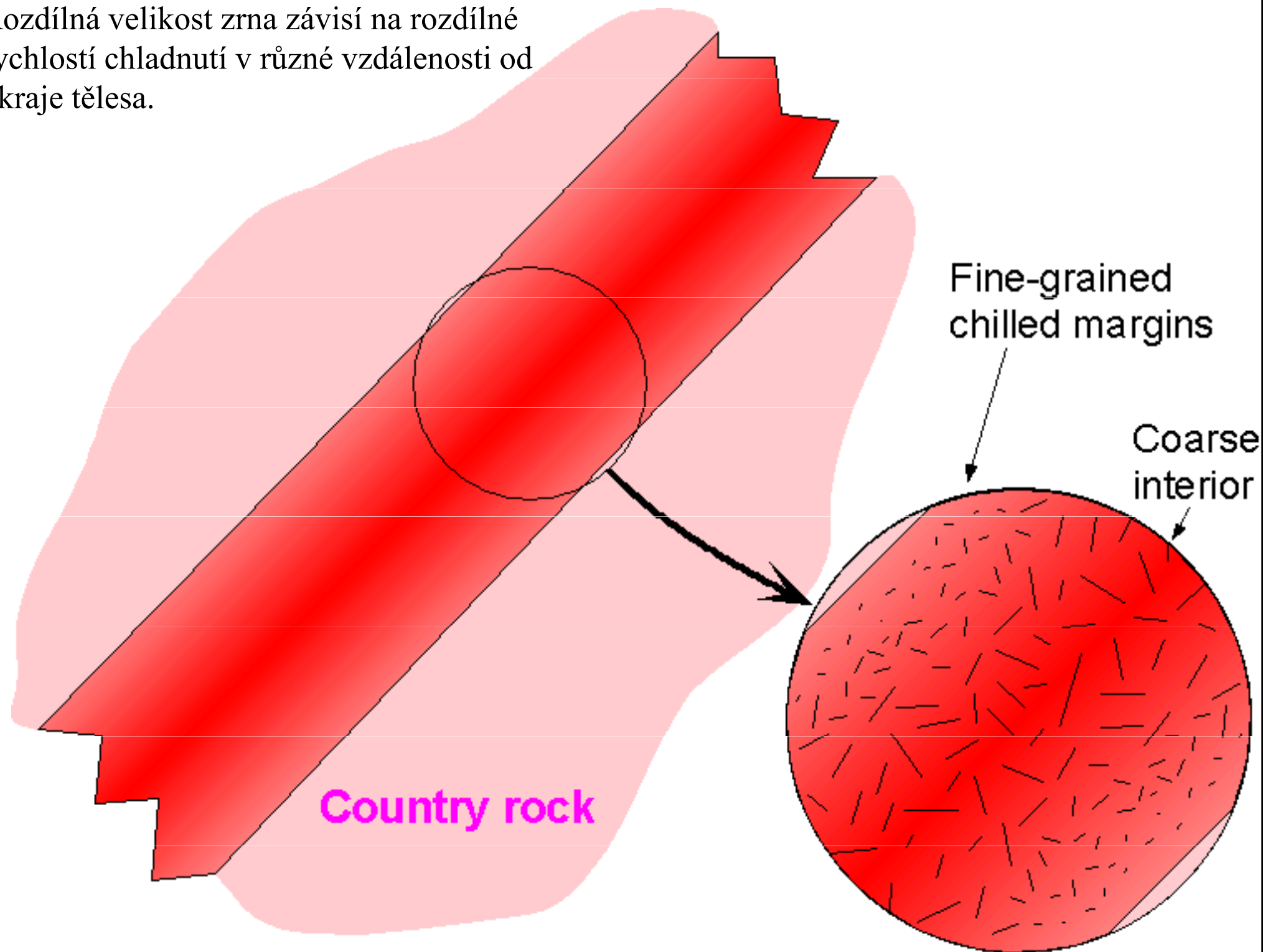
Augite rimmed and partly replaced by brown hornblende in an olivine gabbro.



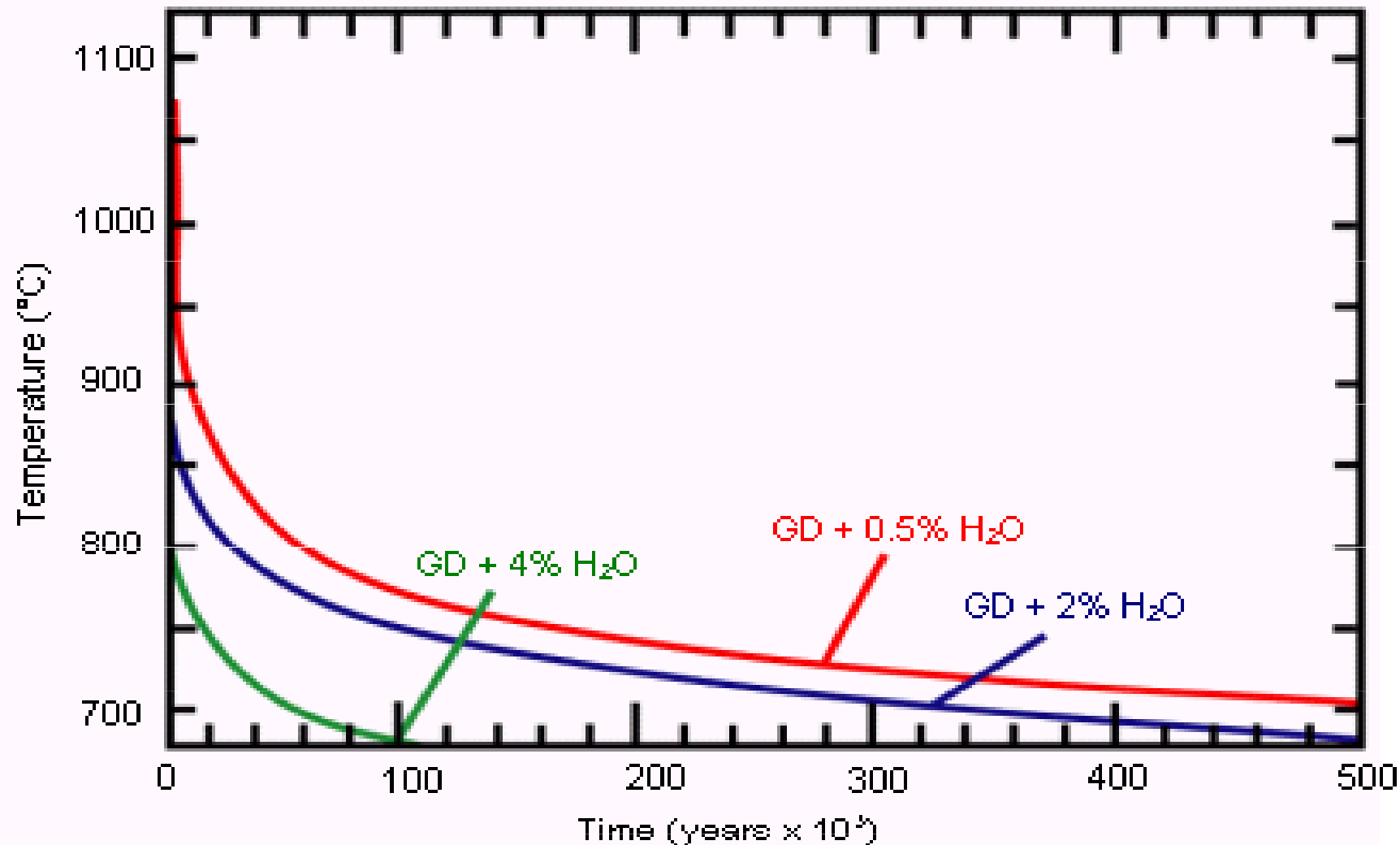


Při výstupu magmatu mohou vznikat fenokrystaly (malý počet nukleačních center).  
Magma také interaguje s okolím a odtrhává ze stěn žíly xenokrysty a xenolity.

Rozdílná velikost zrna závisí na rozdílné rychlostí chladnutí v různé vzdálenosti od okraje tělesa.



# Voda a krystalizace taveniny

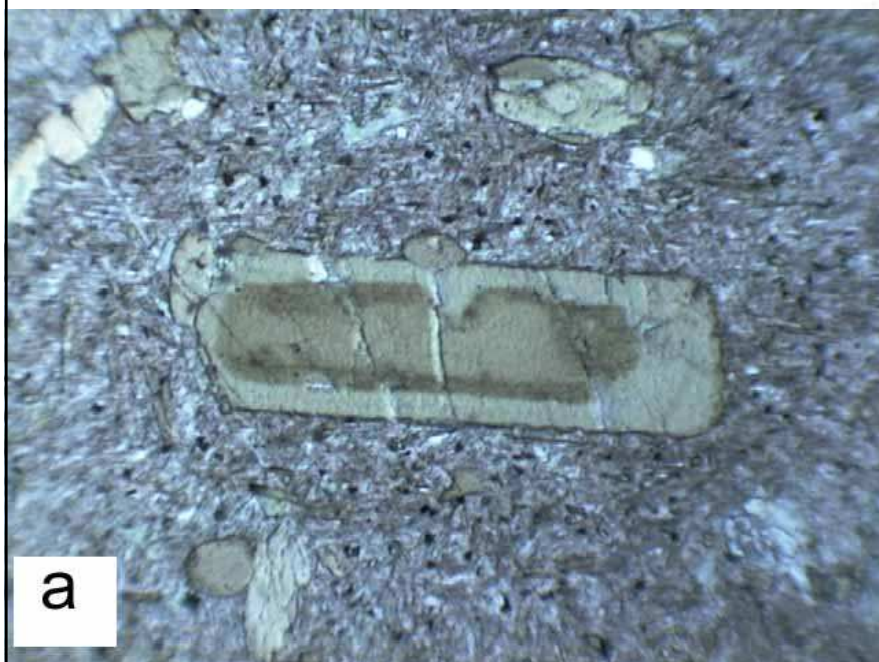


**Figure 2.** Influence of magma water content on the cooling history of granodiorite (GD) plutons (radius = 5km, magma chamber/country rock contact temperature = 600°C, emplacement pressure = 2kbar). Increasing the water content by a factor of 2 (from 2 to 4wt%) decreases solidification times by a factor of about 7 (after Spera [97]).

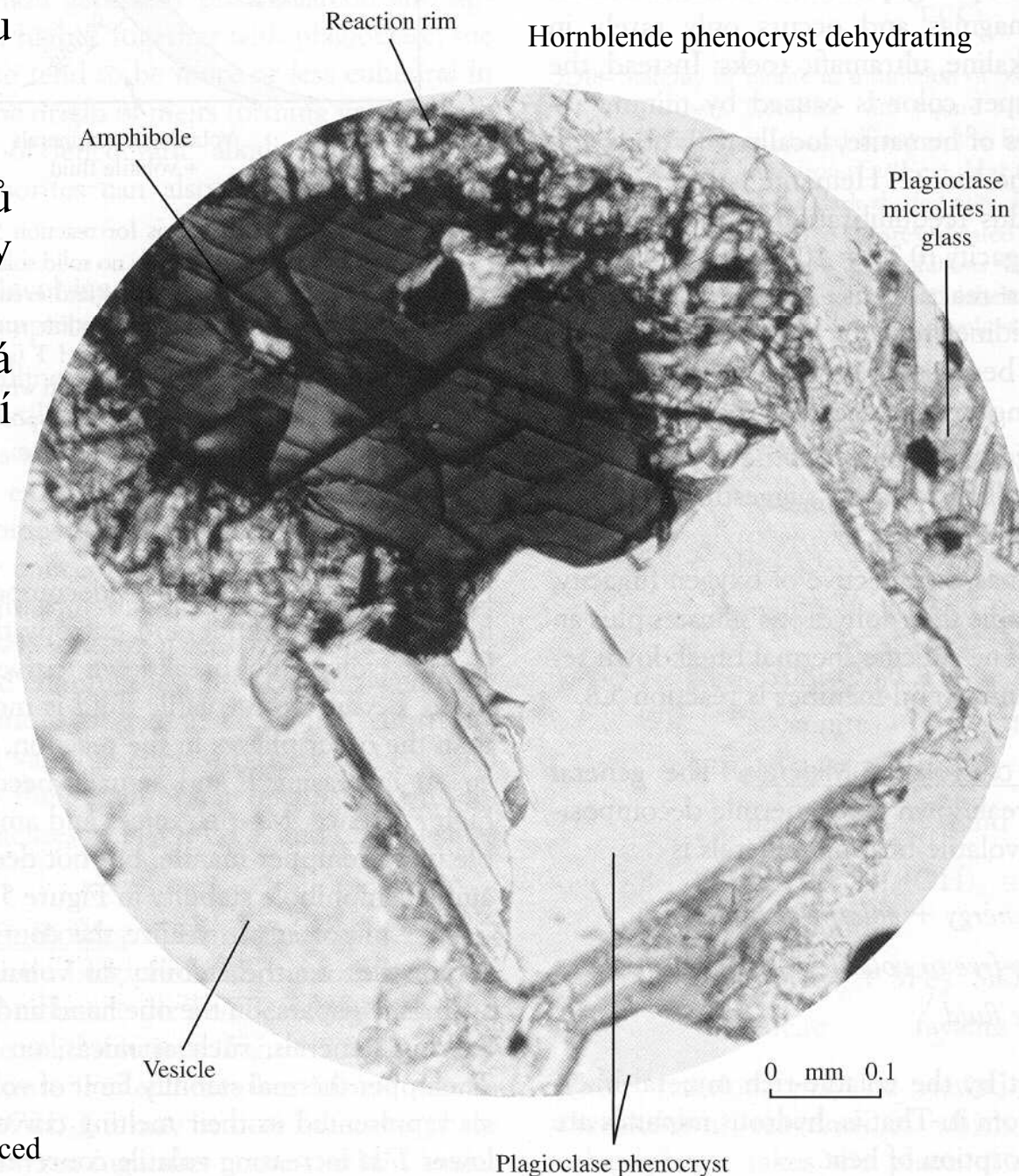
# Nerovnovážné reakce při krystalizaci (disequilibrium) – důkaz fluid v tavenině

## Důkazy

- izolovaná xenomorfní zrna nesou známky rozpouštění
- reakční lemy
- složená zonálnost minerálů (compositionally zoned) minerály vzniklé neúplnou reakcí
- přítomnost minerálních zrn, která jsou v daném systému nestabilní (olivín v granitu)

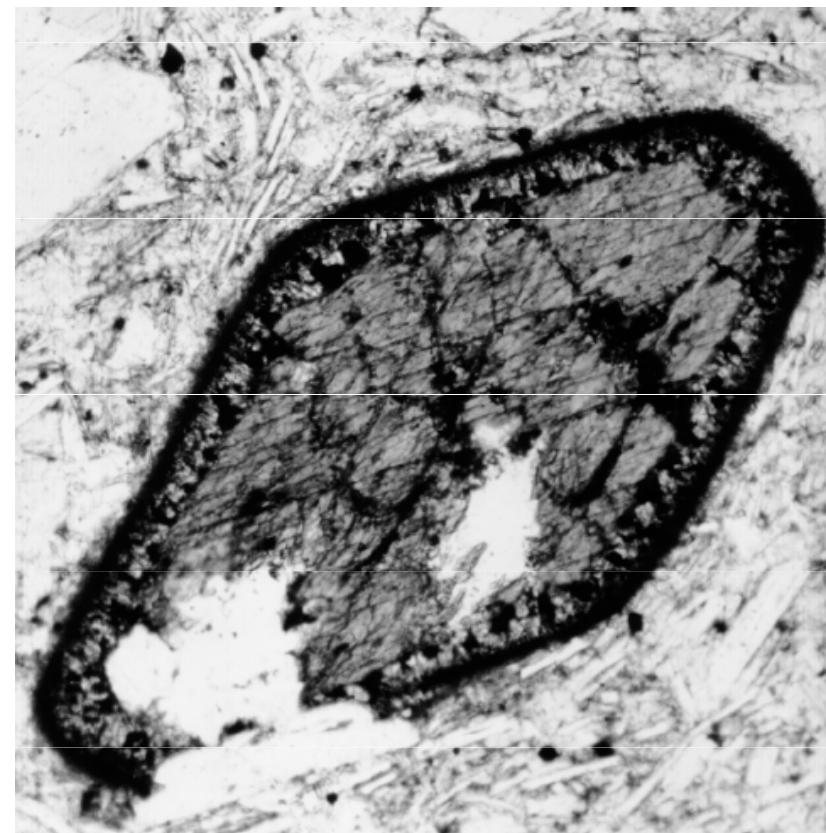
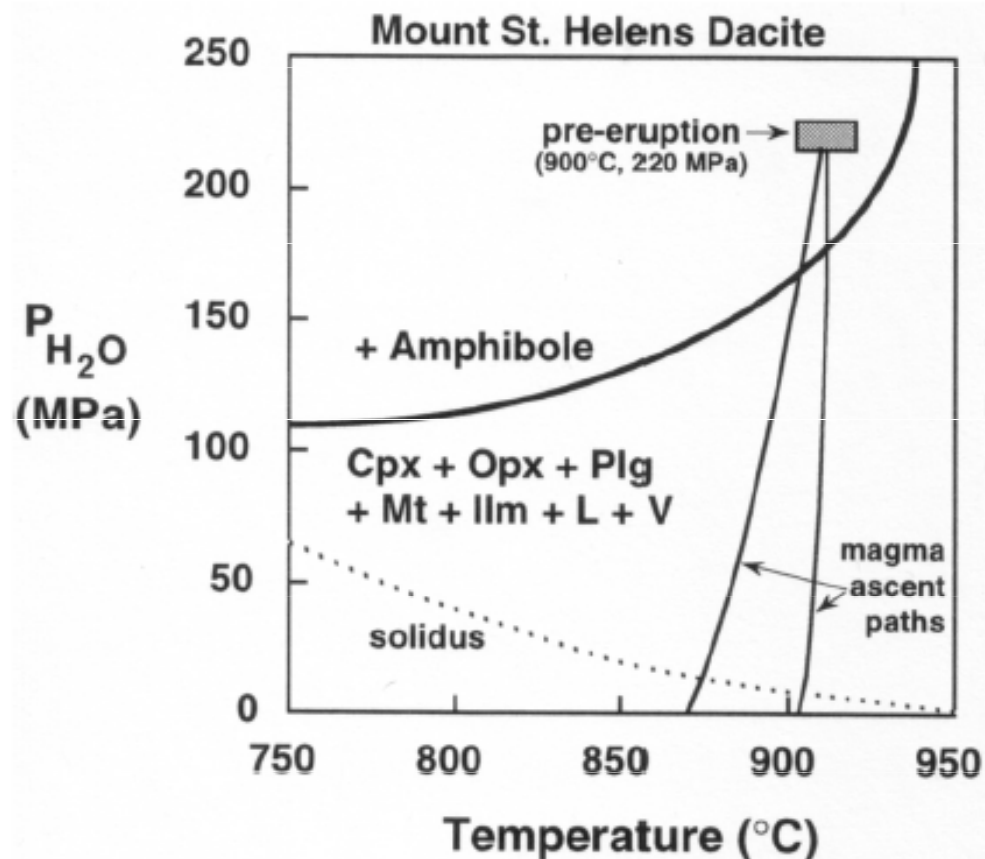


Compositionally zoned hornblende phenocryst with pronounced color variation visible in plane-polarized light. Field width 1 mm.



## Příklad reakčního lemu kolem amfibolu

- reakční lem vzniká v důsledku snížení tlaku fluid během výstupu magmatu k povrchu
- amfibol se na okraji rozpadá na pyroxeny, magnetit, plagioklas a ilmenit
- z mocnosti reakčního lemu můžeme usuzovat na rychlost výstupu taveniny k povrchu
- u vulkánu Mount St. Helens je hloubka magmatického krbu kolem 6-16 km a magma může vystupovat rychlostí 15-66 m/h



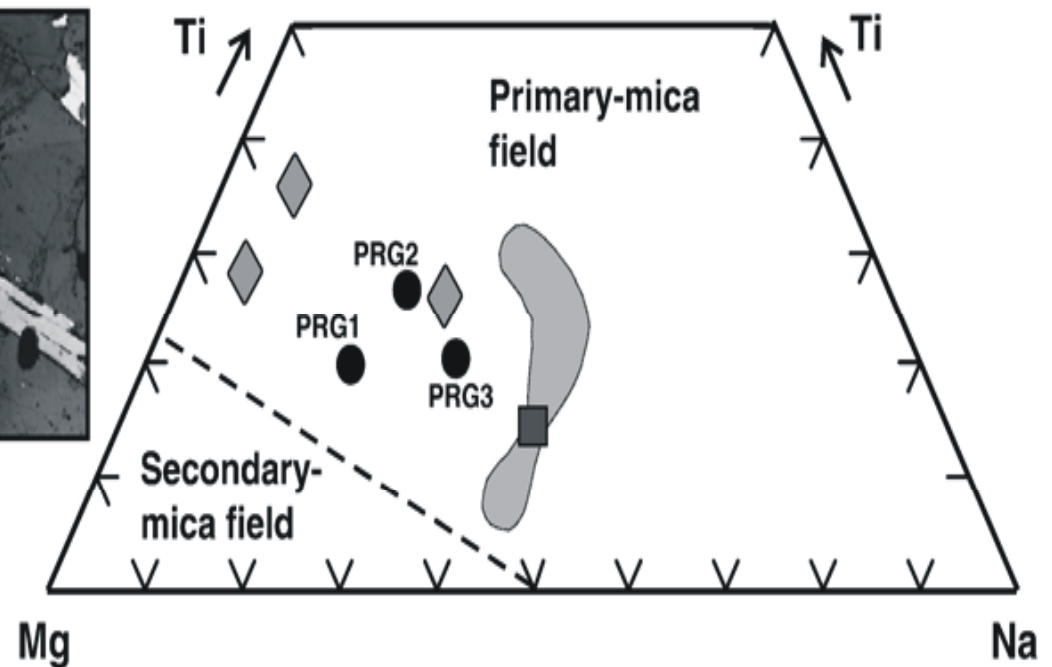
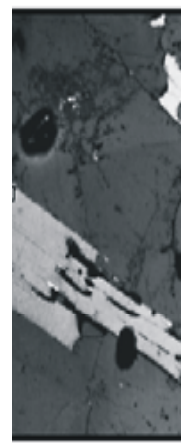
P-T diagram ( $P_{water} = P_{total}$ ) ukazující stabilitu amfibolu pro dacity z Mount St. Helens (Rutherford and Hill, 1993) s vyznačením možné dráhy výstupu magmatu z magmatického krbu během erupce v roce 1980: Cpx = klinopyroxen, Opx = ortopyroxen, Plg = plagioklas, Mt = magnetit, Ilm = ilmenit

Hornblende phenocryst in an andesite formed during an ancient eruption of Mount Shasta, CA.

## Primární a sekundární muskovit

Skupina dioktaedrických slíd:

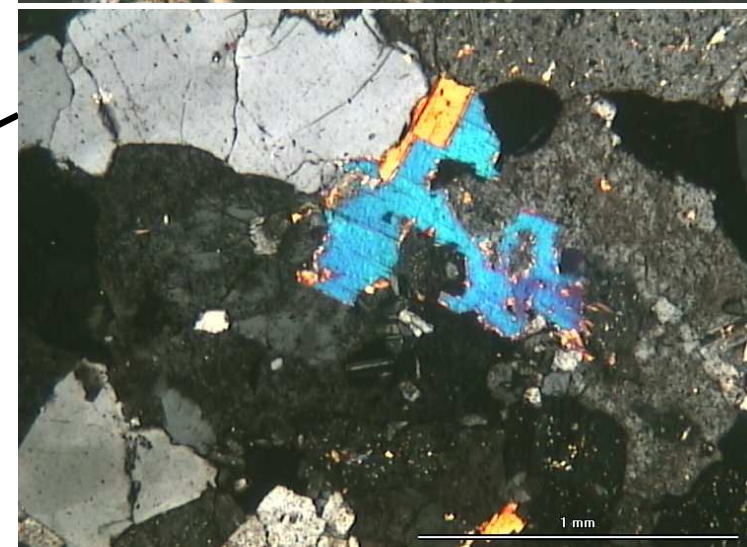
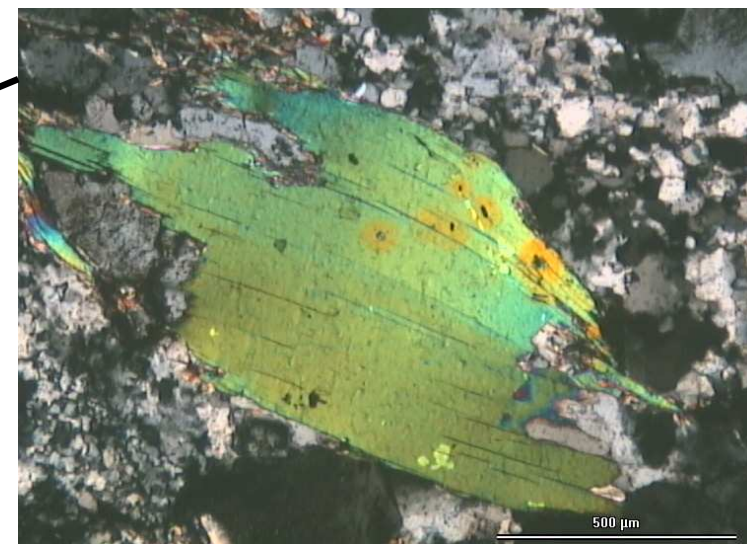
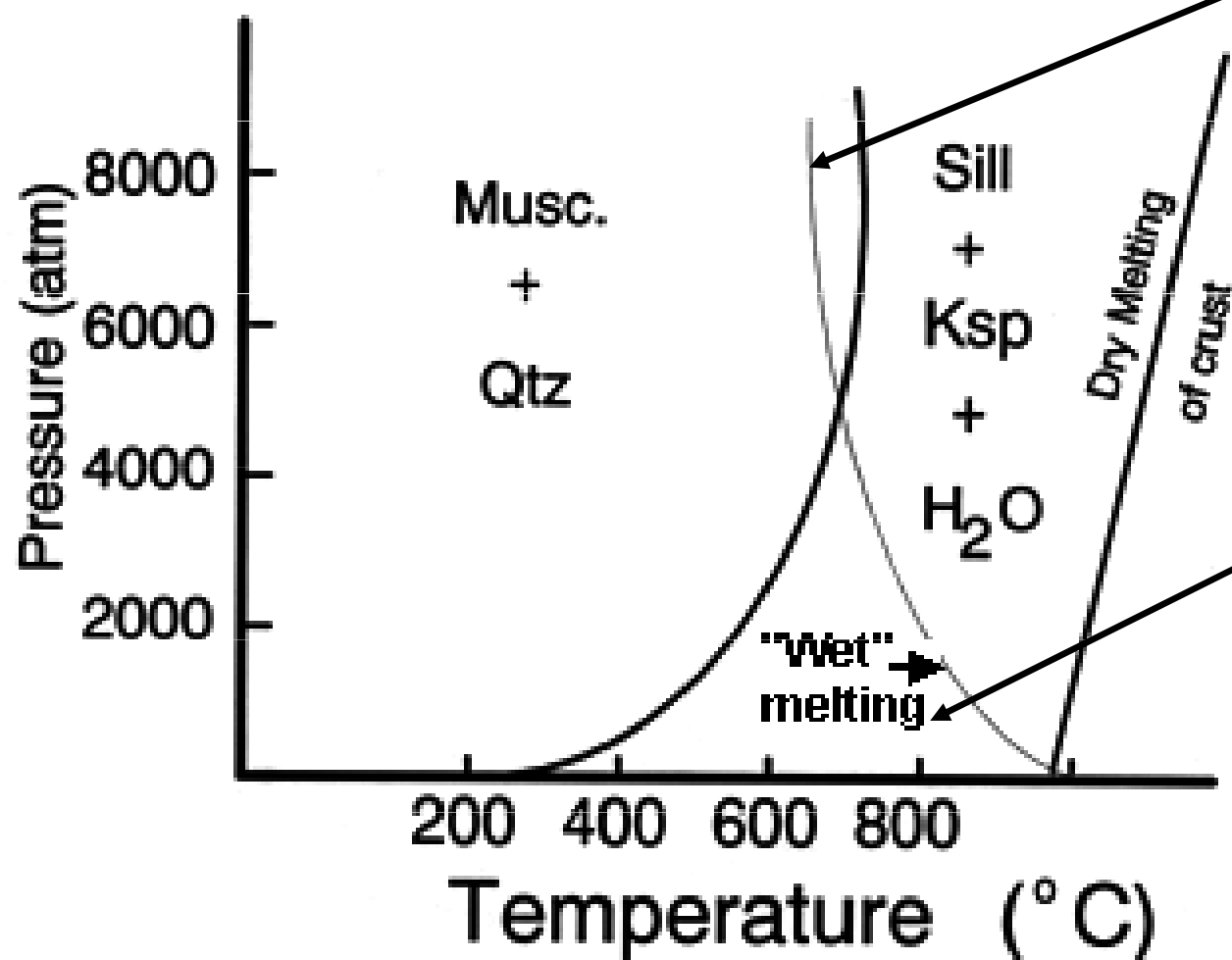
- Muskovit:  $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Paragonit:  $\text{NaAl}_2[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Mg-Al-seladonit:  $\text{K}[\text{MgAl}][\text{Si}_4]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Fe-Al-seladonit:  $\text{K}[\text{FeAl}][\text{Si}_4]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$



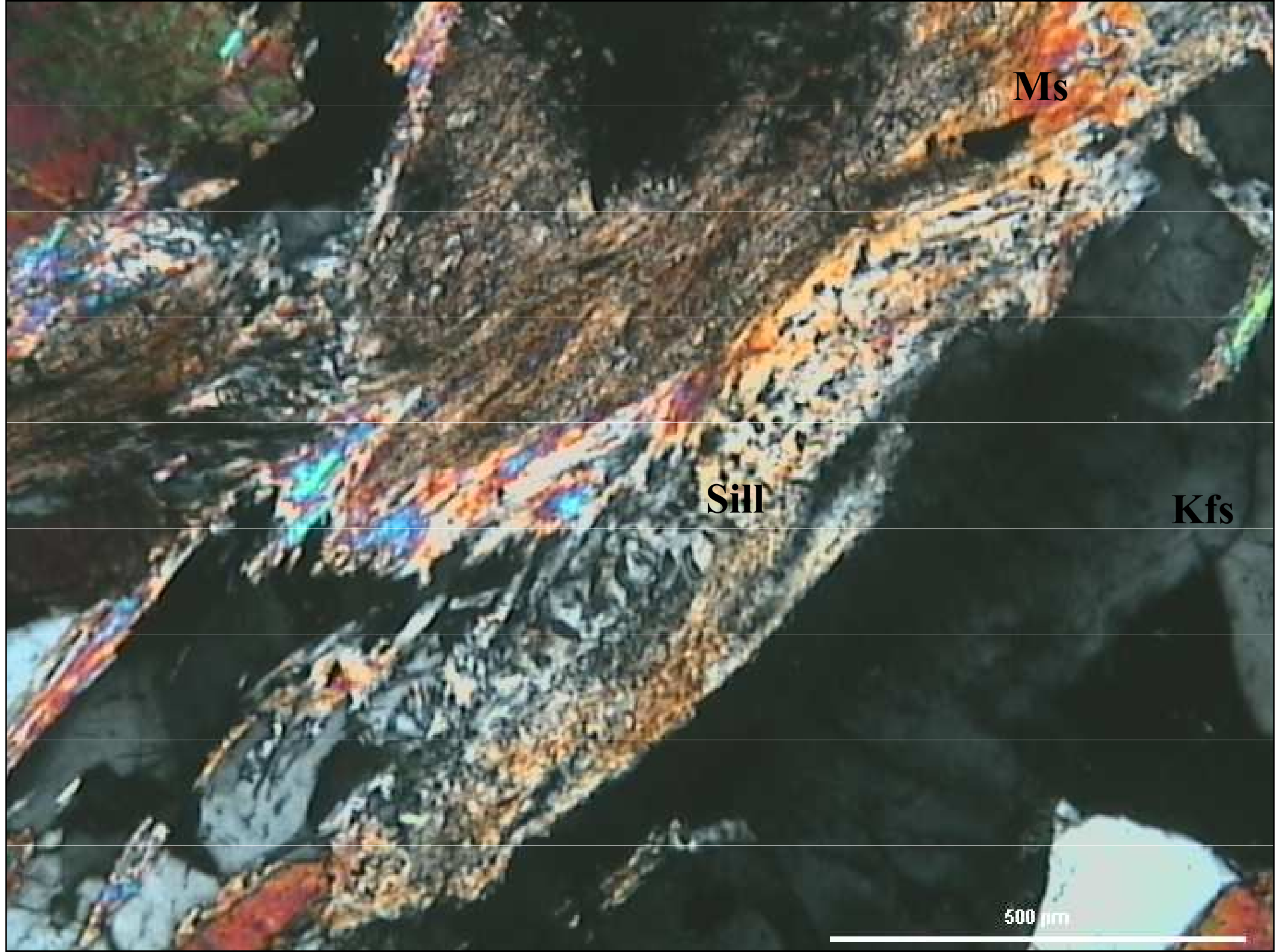
- Muskovit je jedním z typických minerálů pro peraluminické granity.
- Křivka ohraničující pole stability muskovitu protíná křivku tavení granitu zhruba při 3,5 kbarech a 700 °C.
- Takže muskovity krystalují z taveniny jen za tlaku nad 3,5 kbar při nižším tlaku mohou vznikat jen pozdějšími procesy v již utuhlé hornině.
- Při vzrůstu zastoupení bóru v tavenině klesá hranice stability muskovitu do nižších tlaků (Pichavant, 1987).
- Primární magmatický muskovit je bohatší na Ti, Al, Na a naopak chudší na Mg a Si (Deer et. al., 1992).

- Drobné lupínky muskovitu uvnitř draselného živce, vznikají sekundárně uvolněním Si a K z živce, podobně jako muskovity vzniklé rozpadem cordieritu.
- Primární muskovit se od sekundárního liší nejen texturně, ale i chemicky.
- Oba typy muskovitů je někdy možné rozlišit podle minerální asociace. Je-li minerální asociace chudá na hliník, je pravděpodobně muskovit sekundární.

**muscovite + quartz = K-feldspar + Sillimanite + H<sub>2</sub>O**





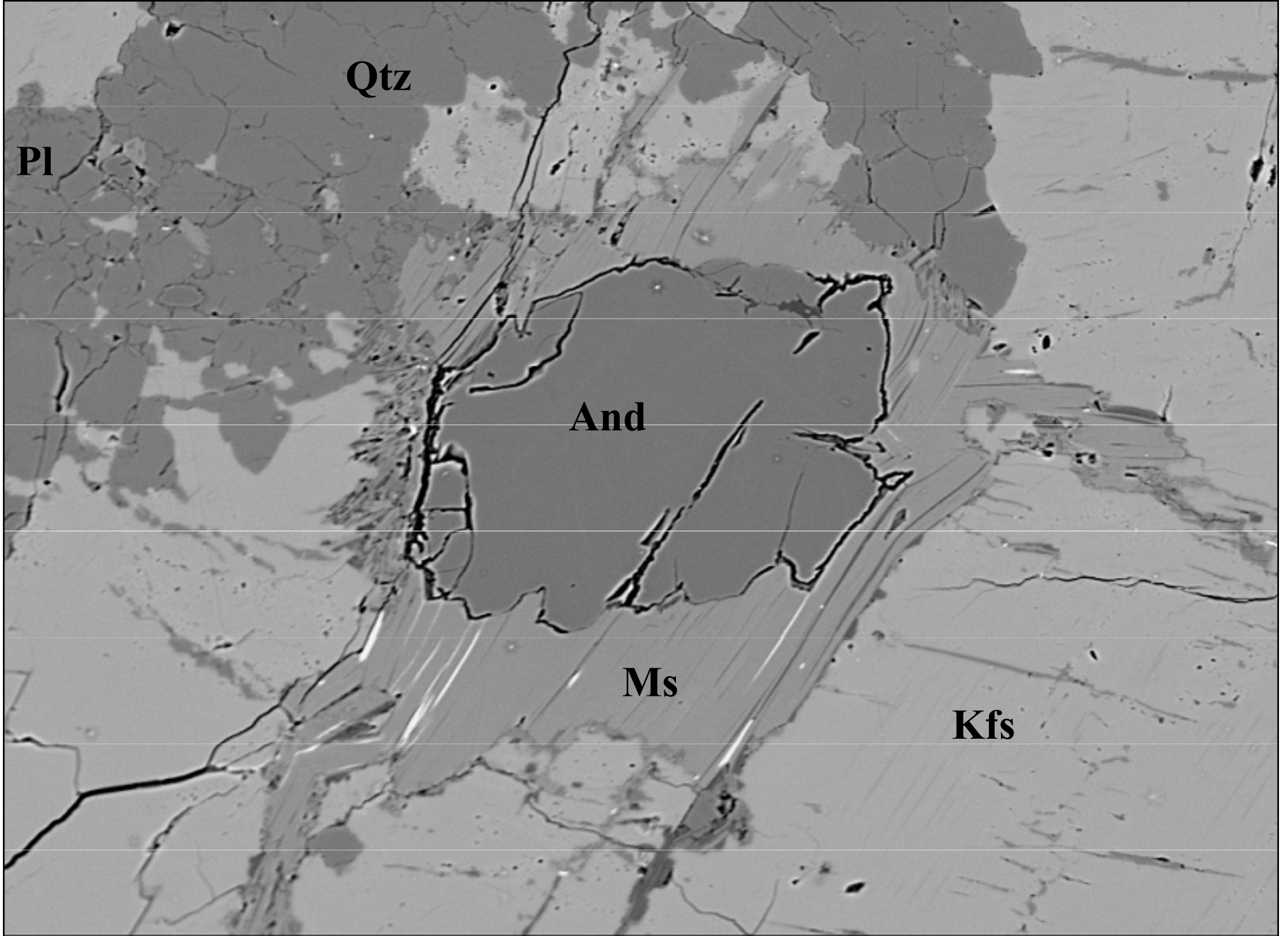


**Ms**

**Sil**

**Kfs**

500 μm



**Qtz**

**Pl**

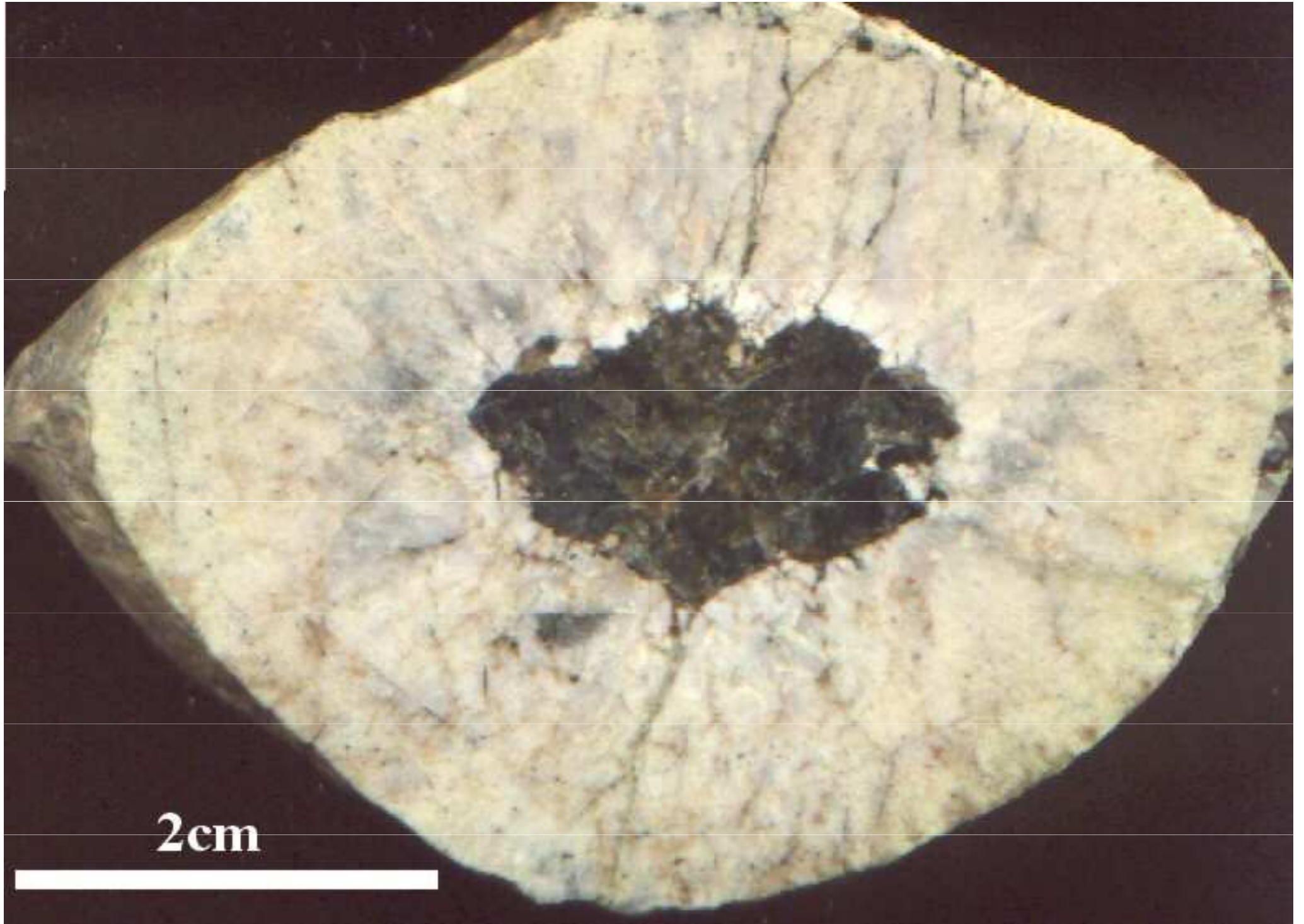
**And**

**Ms**

**Kfs**

100. um BSE 15. kV

# Cordierit



2cm

- Na základě texturních znaků rozdělil Clarke (1995) cordierity ve vyvřelinách na několik skupin:

### **Cordierity typ 1:**

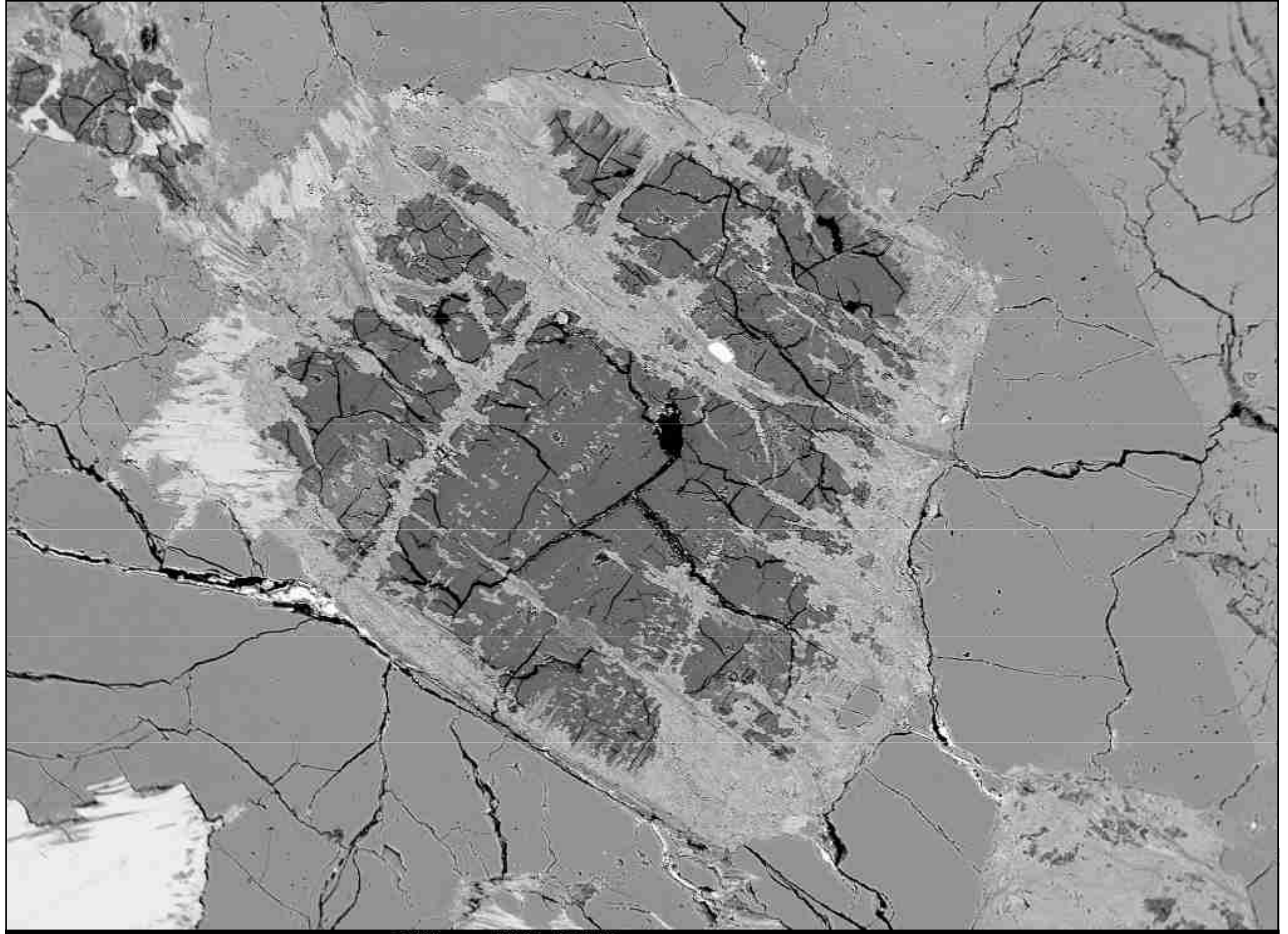
- Metamorfní: jsou prostorově spjaté s enklávami metamorfitů.
- Jde o xenokrysty uvolněné rozpadem xenolitů v důsledku rozdílné termální roztažnosti jednotlivých minerálů. Jejich poikilitická zrna jsou v nerovnováze s okolním magmatem.
- Do stejné skupiny patří i restitické cordierity, které v sobě často uzavírají biotit, sillimanit či spinel (hercynit).

### **Cordierity typ 2:**

- Magmatické vznikly krystalizací z magmatu. Tuto skupinu dále dělí na peritektické a kotektické.
- Peritektické vznikly reakcí pevné fáze s taveninou například:  $L + Kfs + Grt = Crd + Bt + Qtz$ . Tyto cordierity často lemují pelitické xenolity nebo minerály, jako je granát.
- Kotektické rostly přímou krystalizací z magmatu a jsou s ním v rovnováze. Jsou často automorfní a obsahují inkluze minerálů, které tvoří okolní horninu.

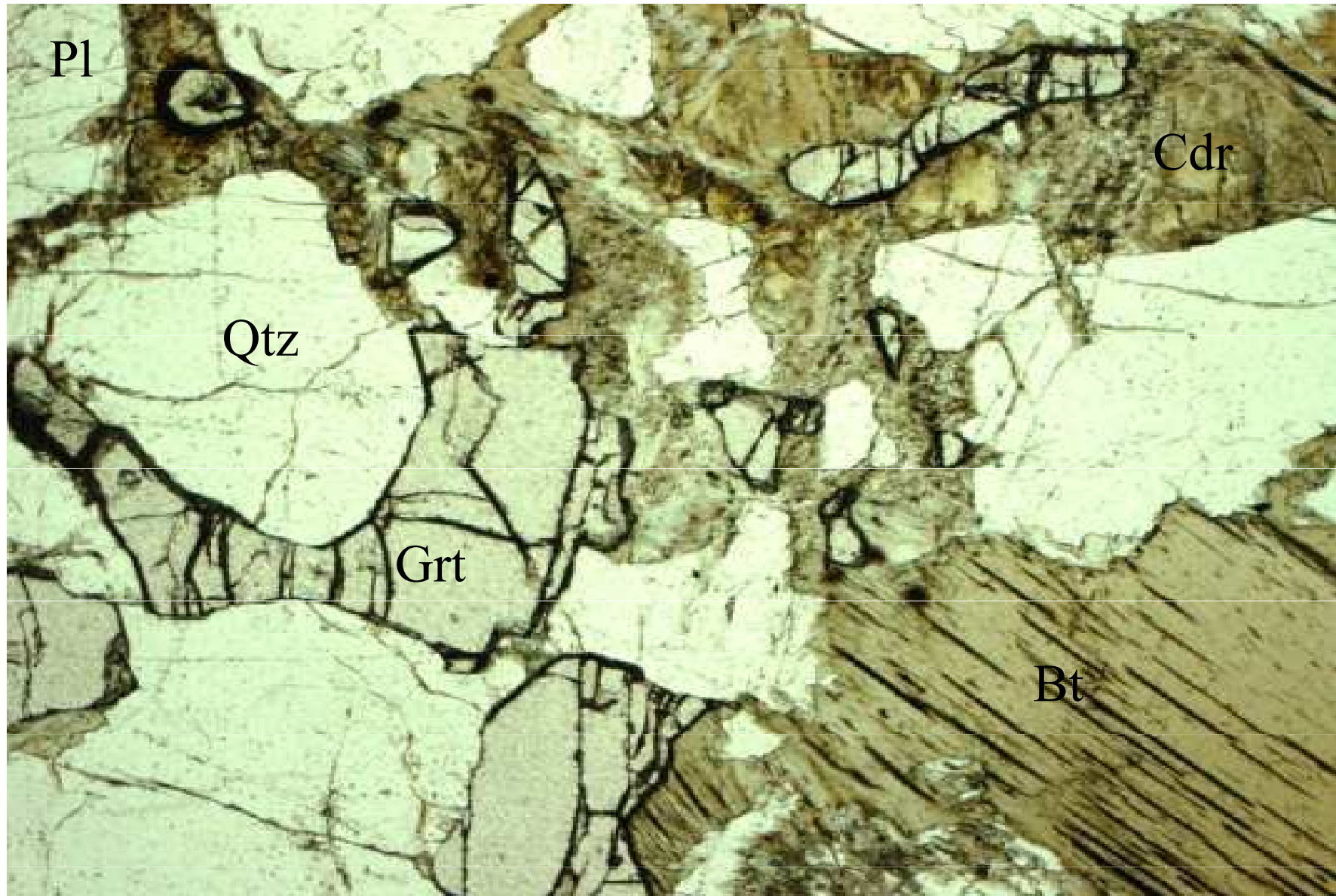
### **Cordierity typ 3:**

- Metasomatické (vzniklé v subsolidu) od automorfních po xenomorfní zrna nebo jejich shluky vznikající podél oslabených zón v granitech (například mohou podél pukliny tvořit „řetězce“ krystalů). Často bývají tyto cordierity lemovány leukokratním lemem.
- Leukokratní lemy bez biotitu mohly například vznikat reakcí: živec + biotit + fluidní fáze 1 = cordierit + (Na – K) fluidní fáze 2. Někdy se pseudograficky prorůstají s křemenem.



500.  $\mu\text{m}$  ESE 15. kV

- Dekompresní reakce



- Na základě klasifikace cordieritů vzniklých krystalizací z granitové taveniny (Clarke, 1995) můžeme tento minerál označit jako peritektický.
- Patrně vznikl reakcí: tavenina + Grt + Qtz + Sil = Cdr + Bt během výstupu a chladnutí granitového magmatu.

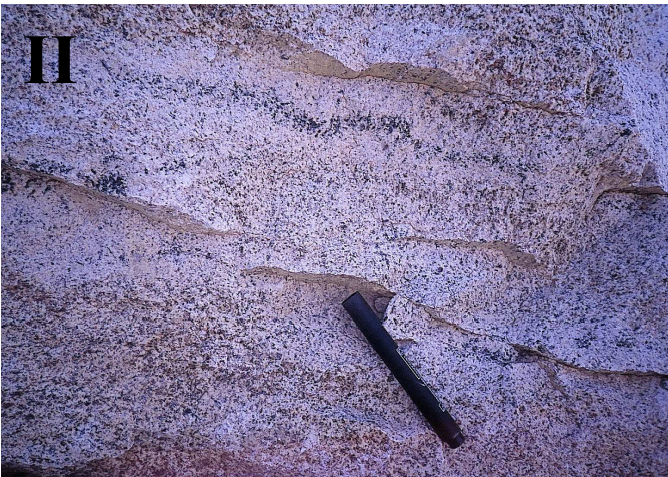
I



# Texturní rozdělení turmalínu v granitech

- I) Automorfní až hypautomorfní zrna rozptýlená v muskovitickém granitu.
- II) Automorfní až hypautomorfní zrna tvořící nepravidelné smouhy až žíly (mocnost od 1 cm do 5 cm) v muskovit-biotitickém granitu. Kolem těchto struktur bývá vyvinut leukokratický lem.
- III) Xenomorfní zrna zatlačující živce situovaná v blízkosti puklin, nebo koncentrovaná do drobných shluků podobných orbikulí.
- IV) Automorfní až hypautomorfní sloupce na puklinách granitů často uspořádané do radiálně paprscitých agregátů.

II

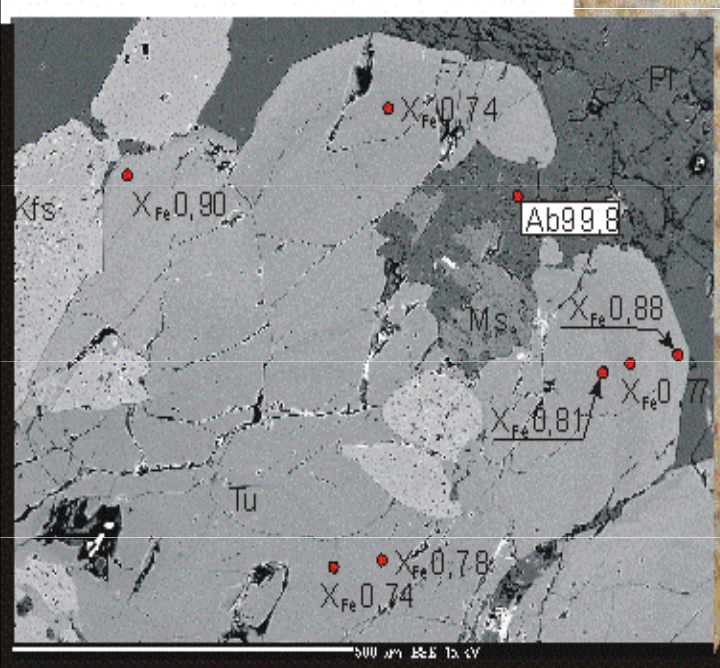
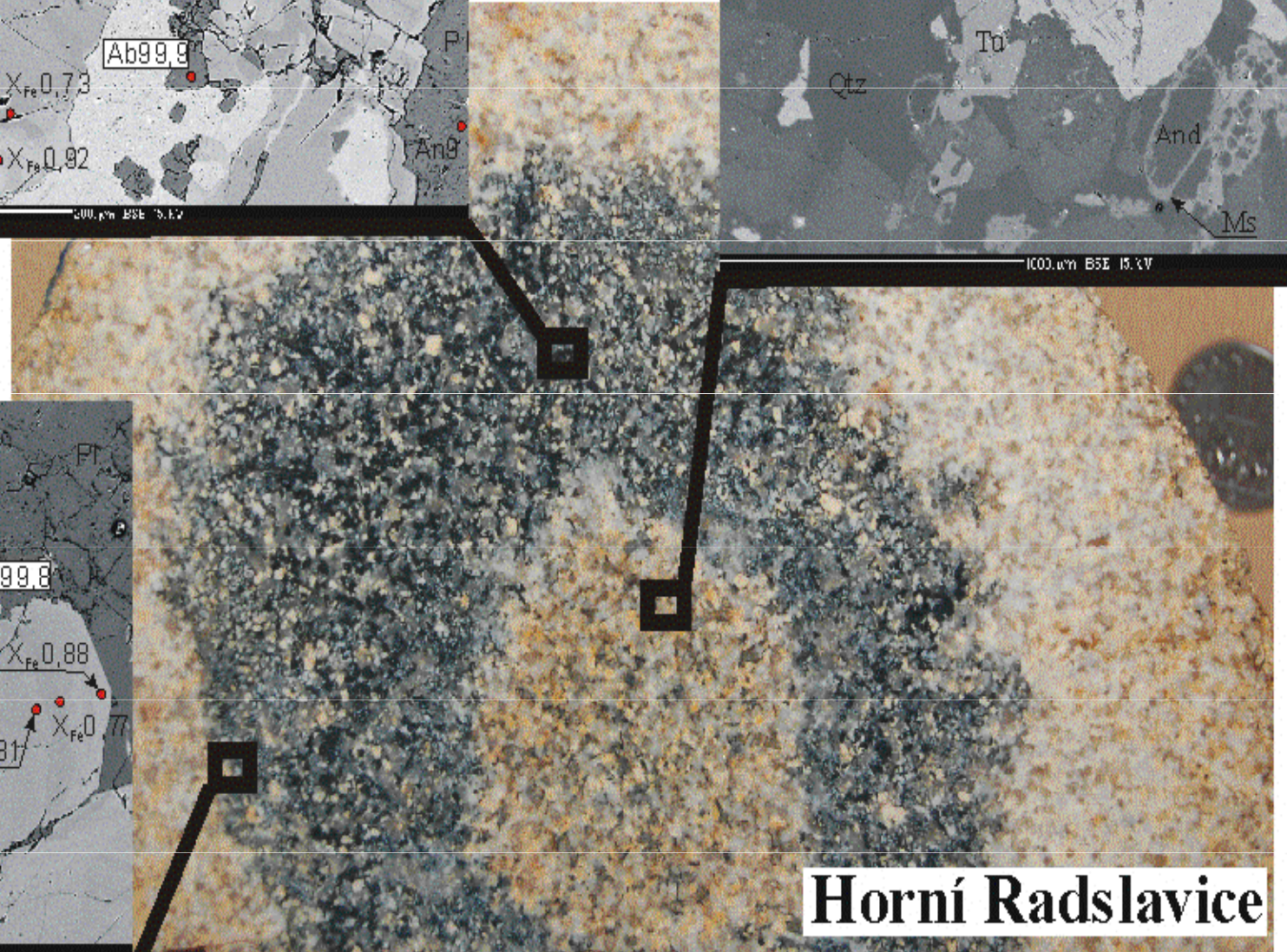
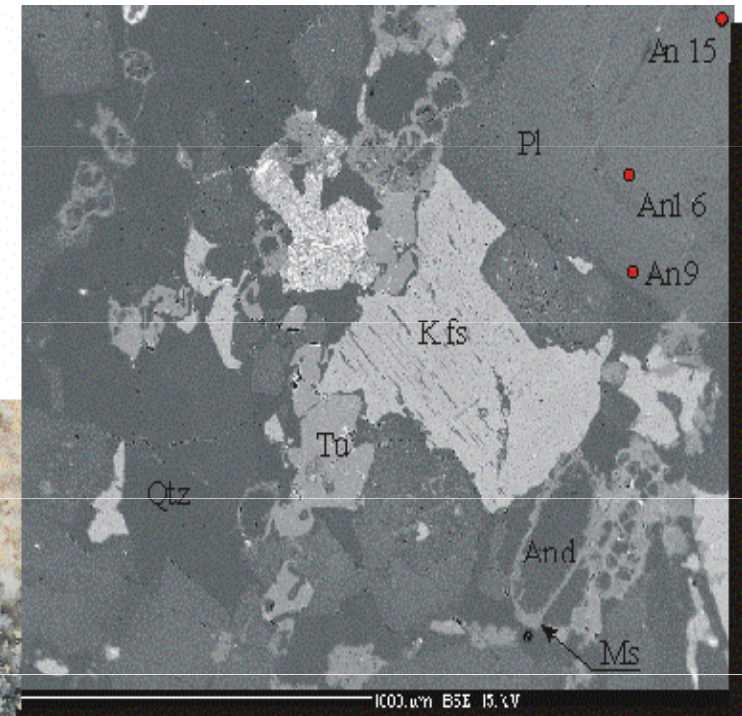
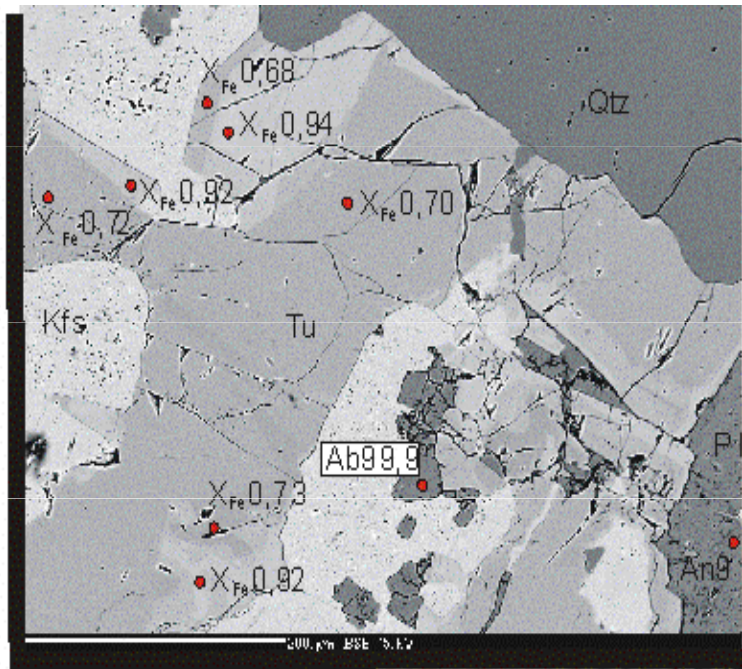


IV



III

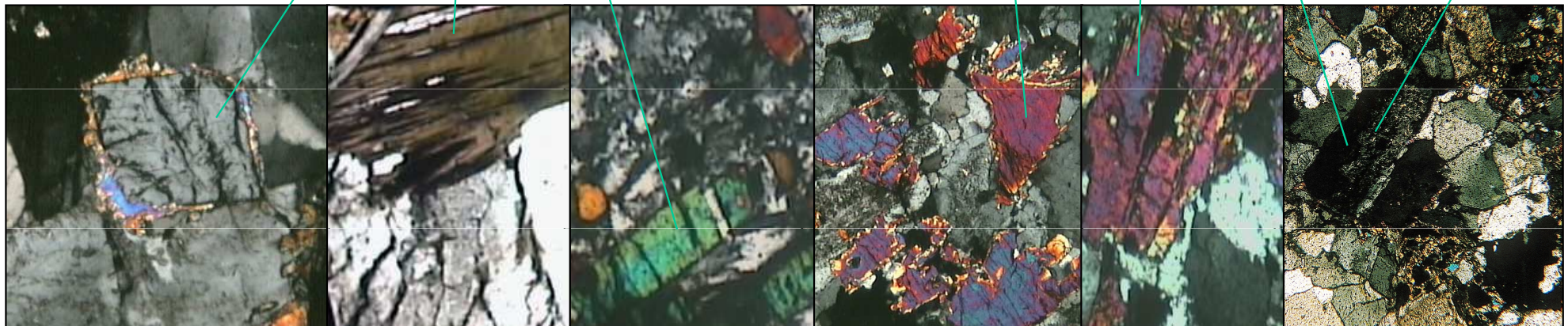
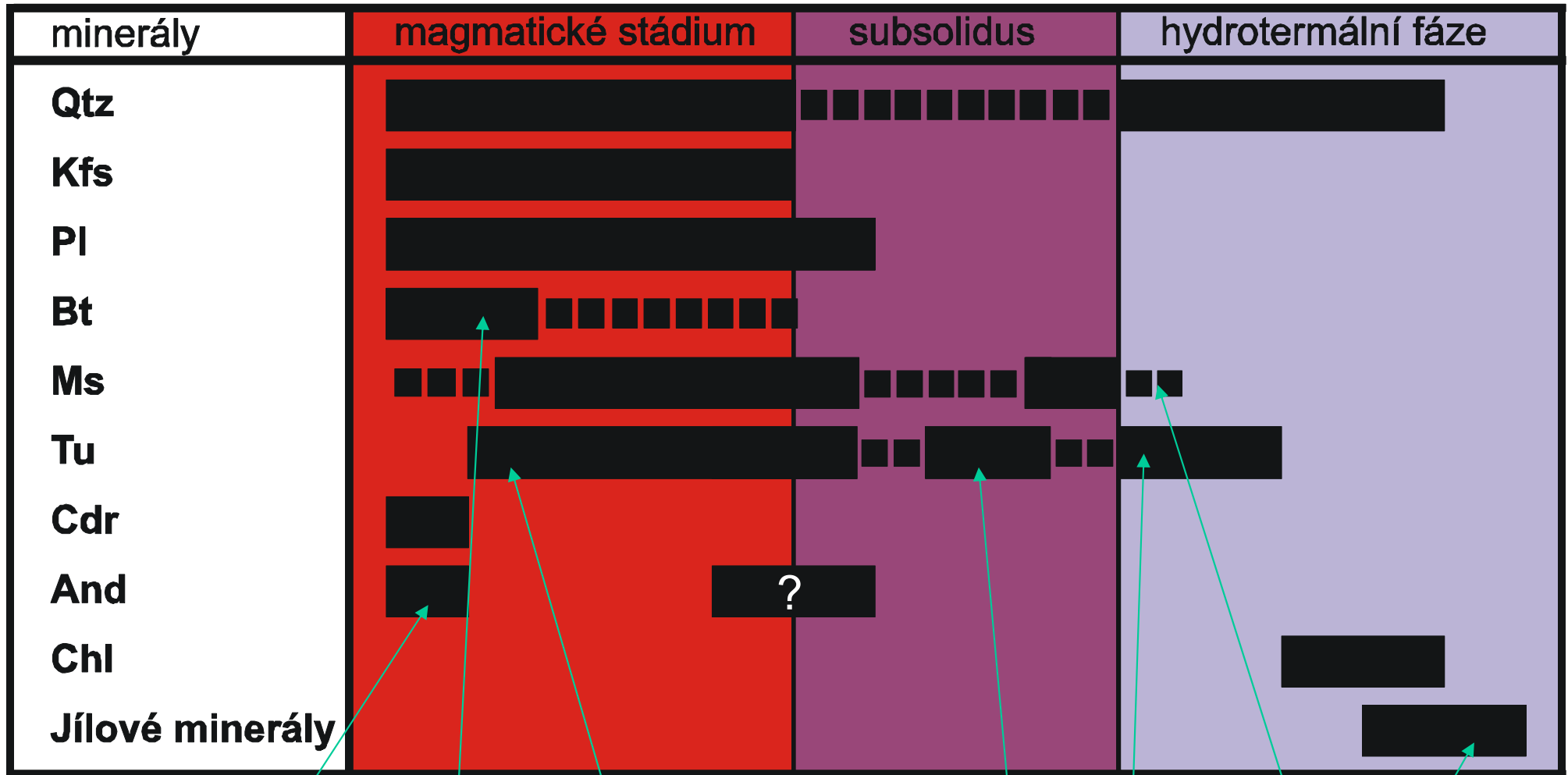


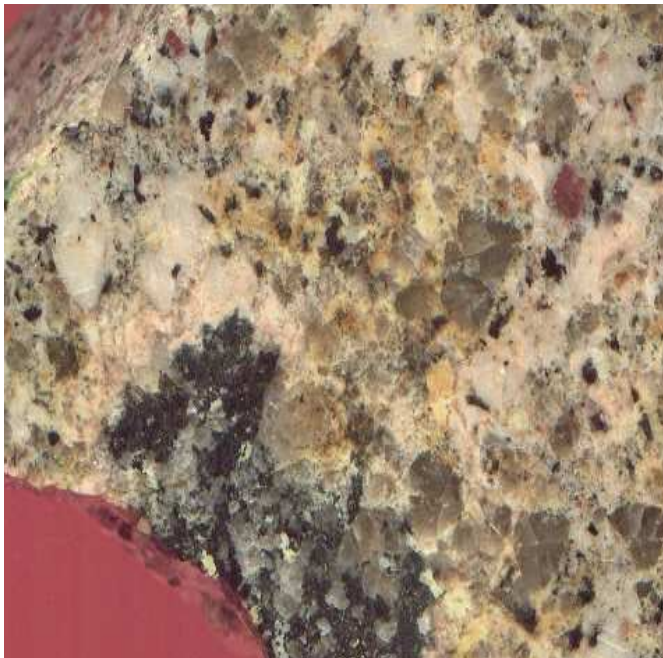
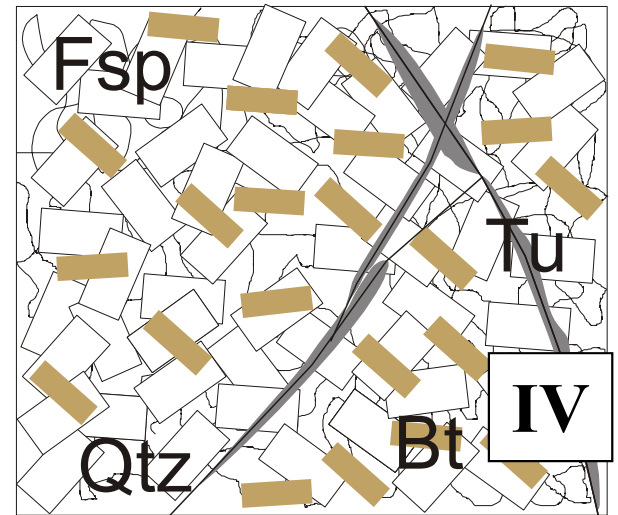
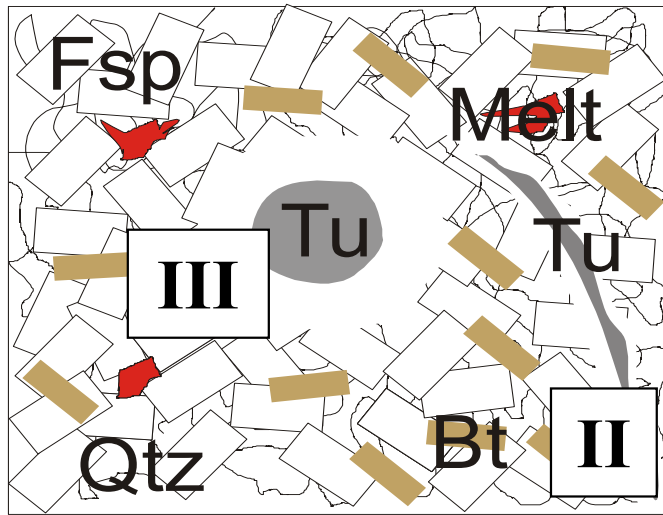
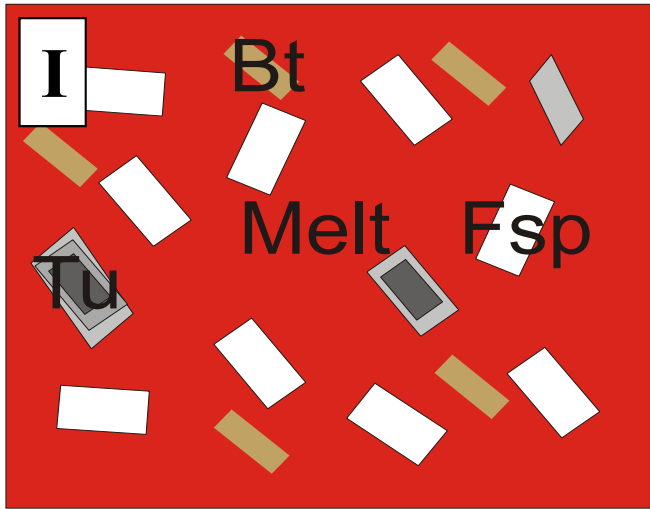


**Horní Radslavice**



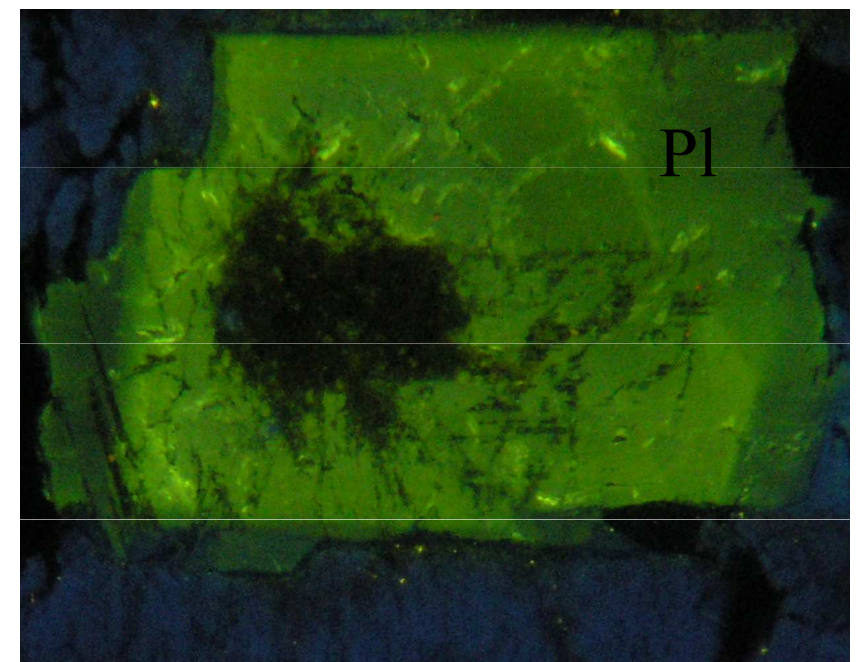
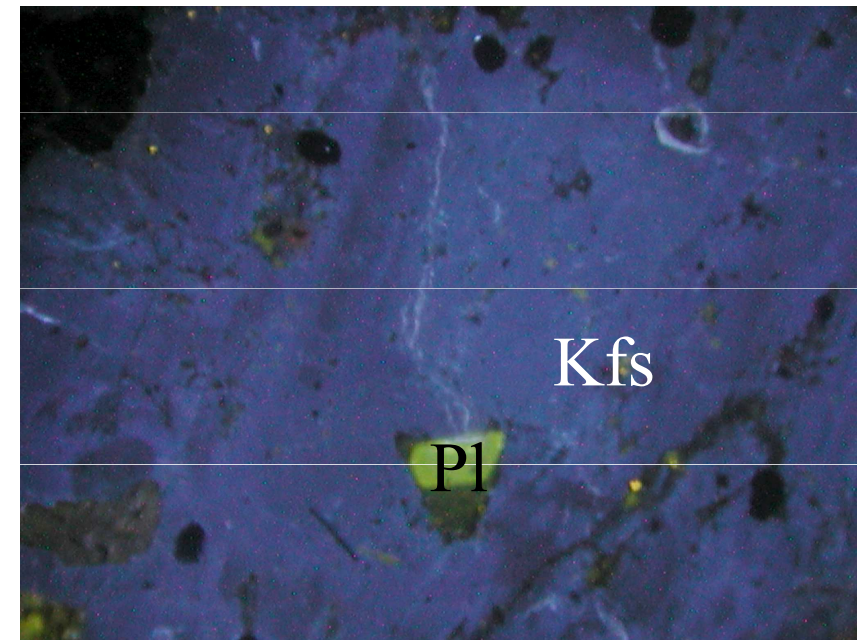
# Schéma sukcese krystalizace minerálu v granitech typu Ořechov



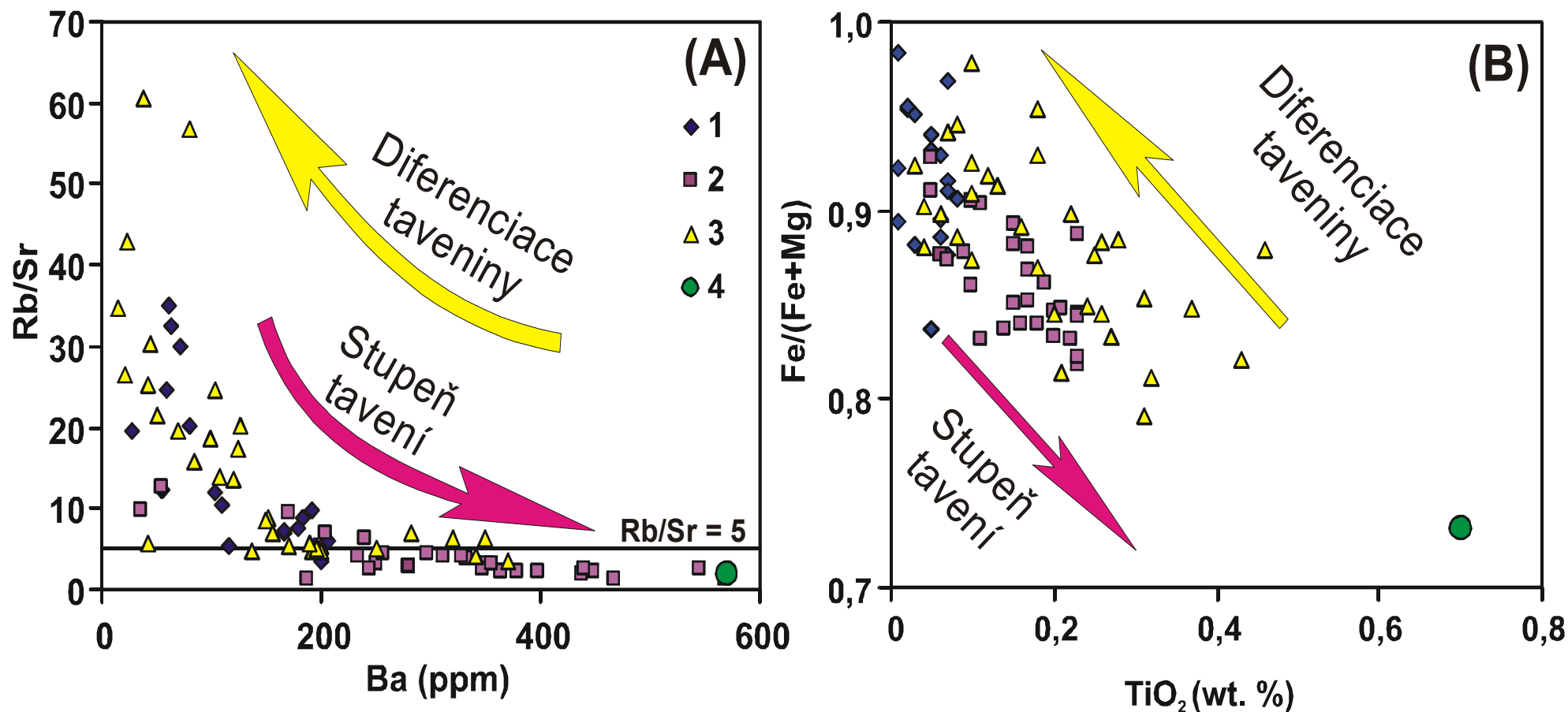


# VI. 6. Indikátory frakční krystalizace a parciálního tavení v granitické tavenině

- Interpretace chování většiny prvků v granitické tavenině je složitá, protože mohou vstupovat do struktury řady minerálů.
- Proto se při modelování krystalizace granitů používají alkalické kovy a alkalické zeminy (především Rb, Sr a Ba), které jsou v podstatné míře zastoupeny pouze v živcích a slídách.
- Draselné živce koncentrují Rb, Ba, Eu a plagioklasy Sr (Bea et al., 1994; Bea, 1996; Icenhower a London, 1996).
- Problémem ale zůstává skutečnost, že distribuční koeficienty jsou výrazně závislé na dalších charakteristikách systému (PTX podmínky).
- To je zvláště zřetelné u Eu, jehož množství v granitické tavenině často odráží spíše fugacitu kyslíku než stupeň diferenciacce (Terakado a Fujitani, 1995).



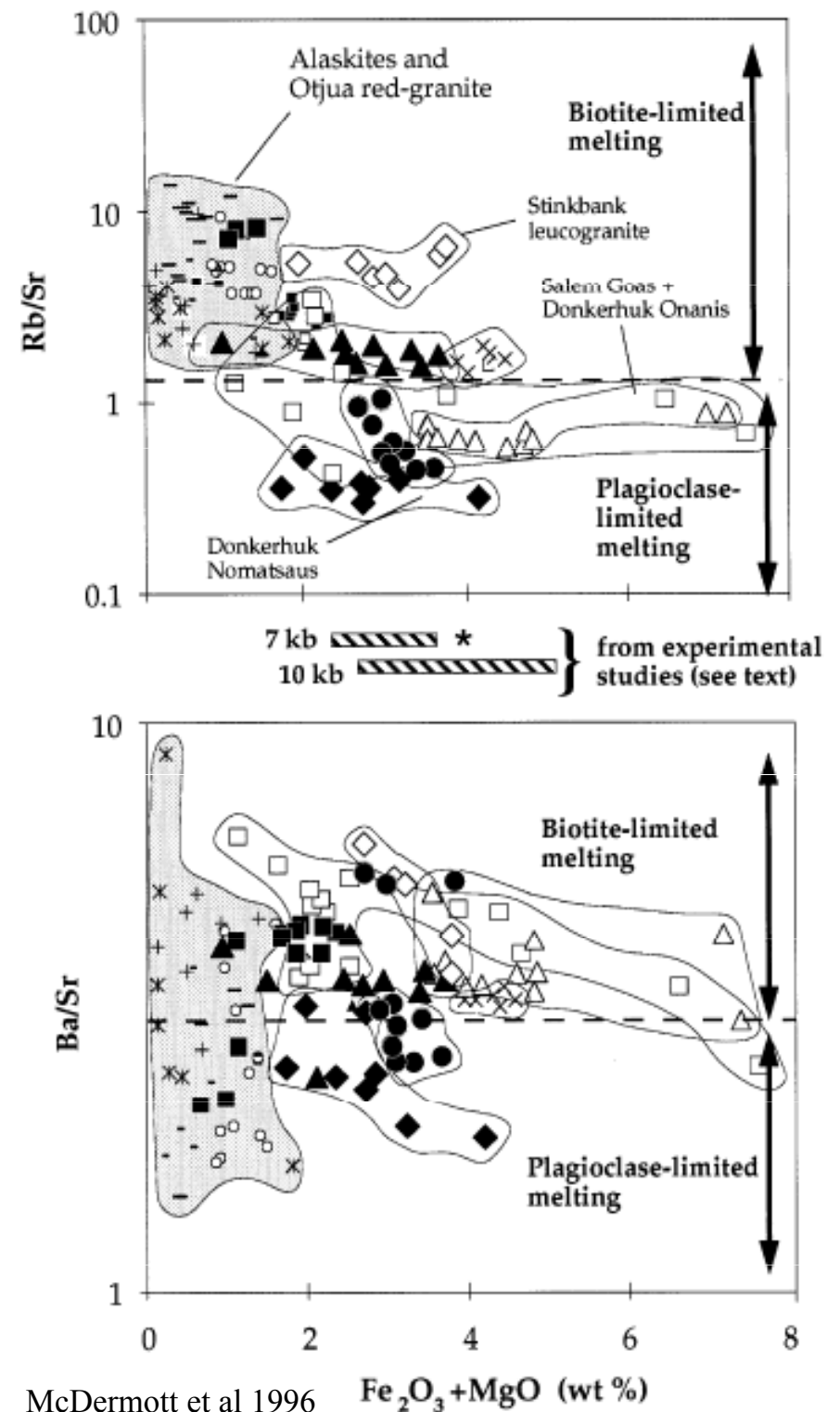
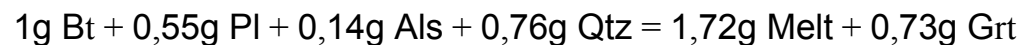
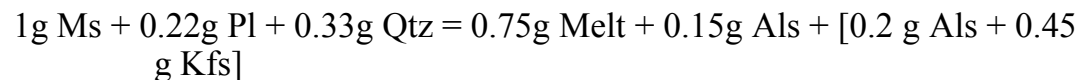
- Data použitá v diagramech pocházejí z těchto zdrojů: granity vzniklé dehydratačním tavením muskovitu a biotitu (Visonà a Lombardo, 2002), cínonosné frakcionované granity (Stone, 1992, Manning a Hill, 1990; Sawka et al. 1990; Schwartz a Askury, 1989, Rozendal a Bruwer, 1995), průměrné složení metasedimentu (Ayres a Harris, 1997).



Diagramy Rb/Sr-Ba (A) a Fe/(Fe+Mg)-TiO<sub>2</sub> (B) s vyznačenými trendy frakcionace taveniny a vzrůstu stupně tavení. V diagramech jsou vyneseny hodnoty převzaté z literatury uvedené v textu: 1) granity vzniklé dehydratačním tavením muskovitu, 2) granity vzniklé dehydratačním tavením biotitu, 3) diferenciované cínonosné granity, 4) průměrné složení metasedimentu v oblasti Zaskar (Himaláje).

- Vysoké obsahy Rb, Li a Cs však zároveň mohou indikovat vznik granitů dehydratačním tavením slíd (Icenhower a London, 1996).
- U slabě diferenciovaných granitů vzniklých dehydratačním tavením může poměr Rb/Sr ukazovat na mechanismus vzniku magmatu (Inger a Harris, 1993; Harrison et al., 1999).
- Horniny s poměrem Rb/Sr > 5 byly derivovány dehydratačním tavením muskovitu.
- Horniny s Rb/Sr < 4,5 dehydratačním tavením biotitu.
- Příklady reakcí použitých při modelování:

McDermott et al 1996

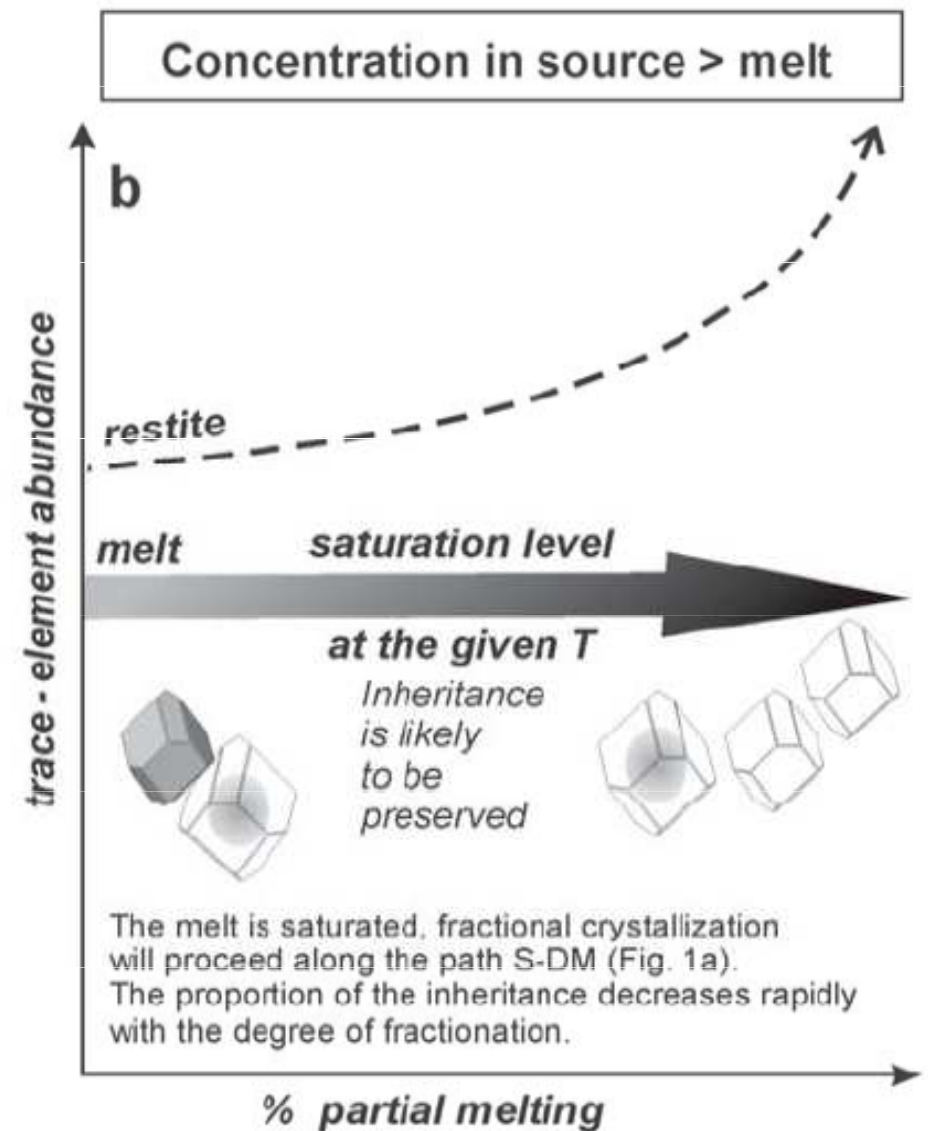


McDermott et al 1996

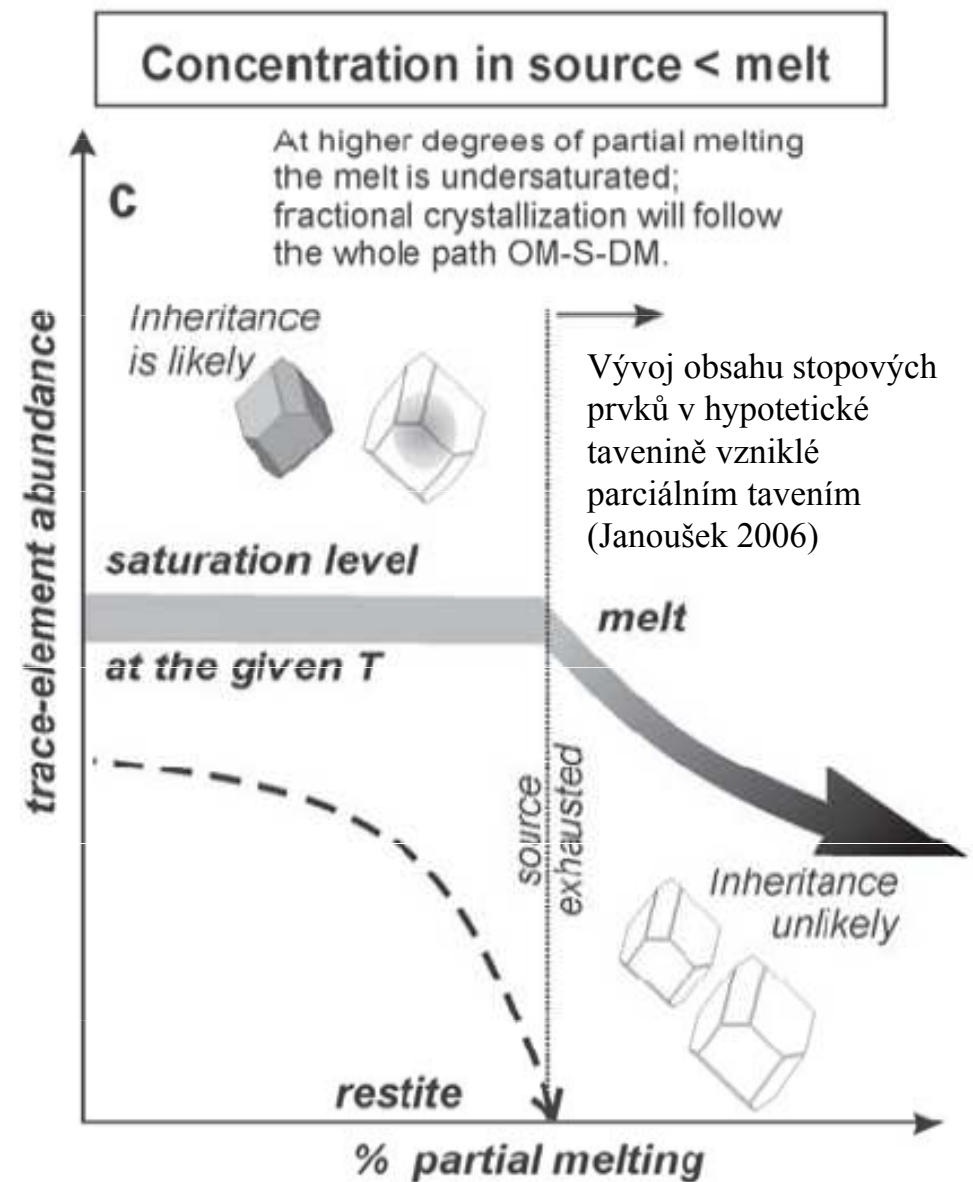
# Chování akcesorických minerálů při parciálním tavení

- existují dva základní scénáře jak se chovají akcesorické minerály při tavení (Watson a Harrison 1984)
- 1) koncentrace stopového prvku v protolitu je větší než saturační hodnota
- 2) koncentrace stopového prvku v protolitu je menší než saturační hodnota
- Při tavení je také důležitá kinetika těchto procesů velmi malá zrna zirkonu se v tavenině rozpustí už  $< 700^{\circ}\text{C}$  reliktů krystalů nad  $120\ \mu\text{m}$  mohou přetrvat i teploty  $850^{\circ}\text{C}$  (Watson, 1996)
- **1) koncentrace stopového prvku v protolitu je větší než saturační hodnota**
- tavenina byla satureována během tavení a obsah prvku v tavenině je konstantní a nezávislý na množství vzniklé taveniny
- přebytek prvku se ukládá v restitu a roste s intenzitou tavení
- v tavenině jsou přítomny xenokrysty z původního protolitu ale jejich množství klesá s intenzitou tavení

Vývoj obsahu stopových prvků v hypotetické tavenině vzniklé parciálním tavením (Janoušek 2006)



- **2) koncentrace stopového prvku v protolitu je menší než saturační hodnota**
- tavenina byla saturována jen v omezeném časovém intervalu než se vyčerpá množství přítomné v protolitu
- nebývají přítomny xenokrysty nebo zděděné krystaly
- restity po takovém tavení pak neobsahují akcesorické minerály obsahující zmíněný prvek
- důležitý je poměr rychlosti rozpouštění akcesorické fáze v protolitu oproti rychlosti uvolnění taveniny



- akcesorické fáze mohou být fyzikálně odděleny od taveniny (inkluze v minerálech restitu)
- Rychlost rozpouštění ovlivňuje množství vody v tavenině (v tavenině chudé na vodu se akcesorické minerály rozpouští pomaleji).

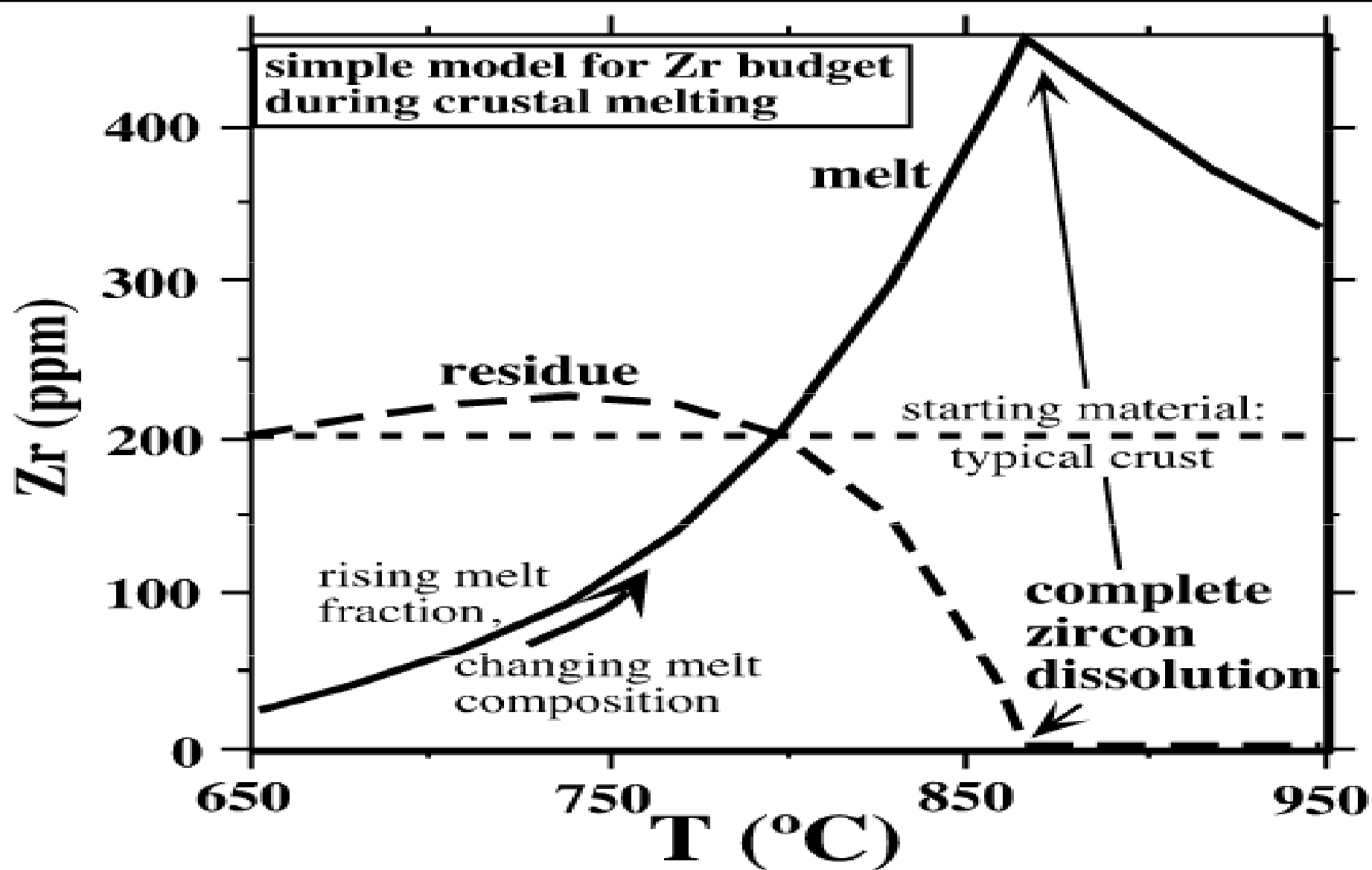
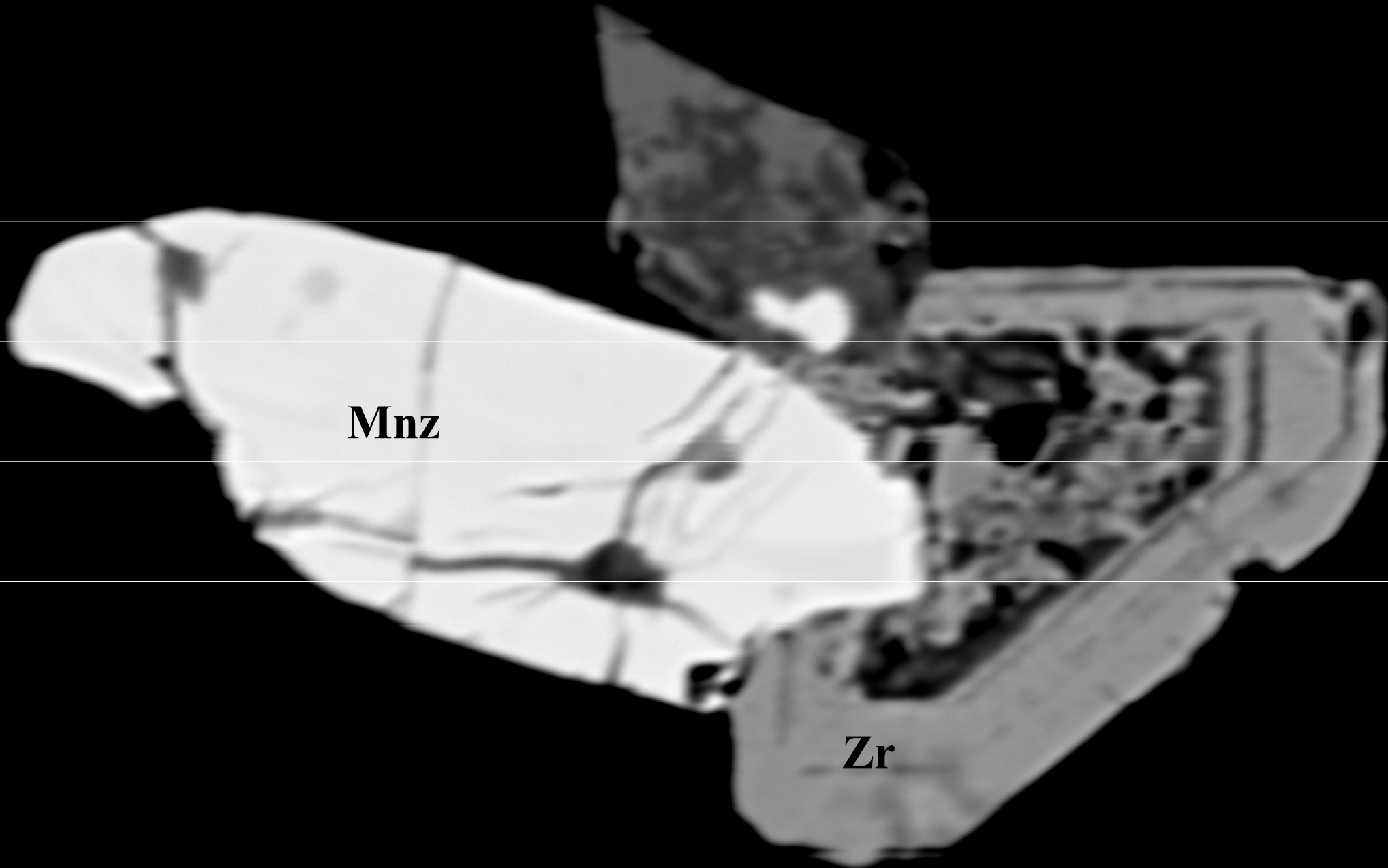


Figure 4. Schematic representation of Zr concentrations in evolving melts and residues during melting of typical crustal rock. Initial Zr concentration is taken as 200 ppm; melt composition is assumed to become less felsic (increasing  $M$ ). Zr concentration in residue first rises (because initial concentration in melt at low  $T$  [temperature] is low), then falls as solubility and melt fraction rise; Zr in melt rises until all (accessible) zircon dissolves. (Miller, 2003)





**Mnz**

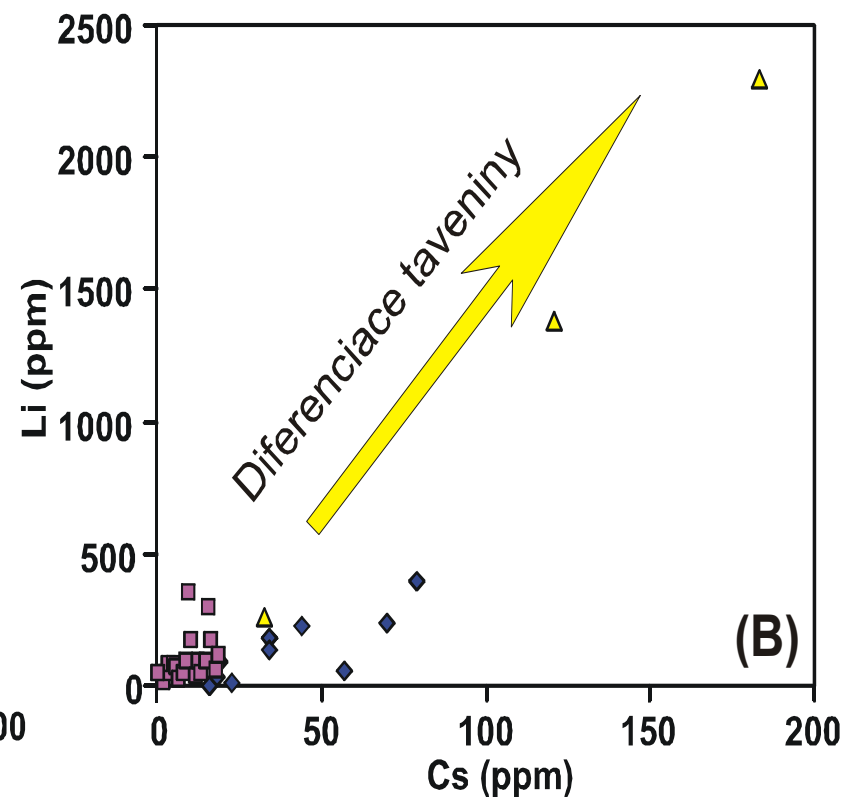
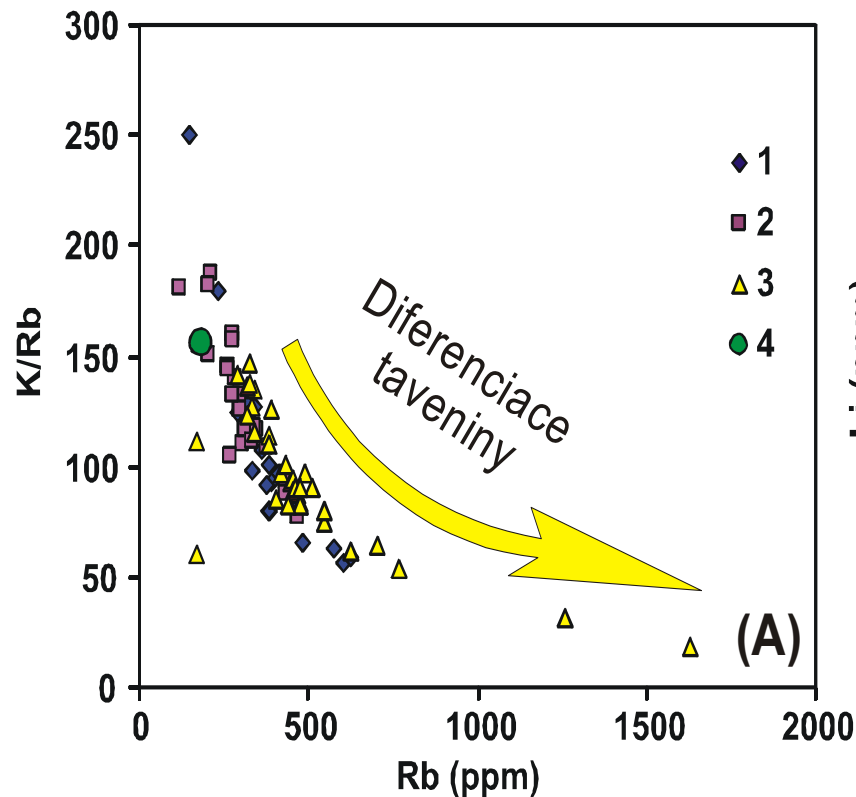
**Zr**

20.  $\mu\text{m}$  BSE 15. kV

## VI. 7. Diferenciace granitů

- Pro studium diferenciace peraluminických granitů použili Dostal a Chatterje (2000) poměru Nb/Ta a Zr/Hf. Niob a tantal jsou si chemicky velmi podobné mají i stejnou valenci (5+), proto se i podobně chovají během mnoha geologických procesů.
- Během krystalizace magmatu jsou oba prvky nekompatibilní a mohou se výrazně koncentrovat ve vysoce frakcionovaných horninách. Také zirkonium a hafnium mají stejnou valenci (4+) a jsou si geochemicky velmi podobné.
- Koncentrace Zr a Hf v tavenině při krystalizaci roste, a to až do doby, kdy začne krystalovat zirkon.
- U peraluminických leukogranitů můžeme pozorovat pokles obsahu Zr a Hf s postupující frakcionací, ale jejich vzájemný poměr Zr/Hf zůstává konstantní.
- Poměrně stabilní poměr Zr/Hf je vysvětlují autoři tím, že jsou jejich distribuční koeficienty mezi pevnou fází a taveninou podobné.
- V rozporu s tímto tvrzením je skutečnost že v zirkonu s nárůstem diferenciace poměr Zr/Hf klesá (Deer et al. 1992).
- Při vzrůstu stupně frakcionace stoupá obsah Nb a Ta, ale poměr Nb/Ta klesá.
- Poměr Nb/Ta může být výrazně ovlivněn působením fluid a je v kontinentální kůře nižší než v plášti nebo v chondritech. Zatím co poměr Zr/Hf je v kontinentální kůře konstantní a dosahuje hodnot typických pro chondrity (kolem 36).
- Obsah Ta pozitivně koreluje s obsahy Rb, Li a F. Obsahy těchto prvků výrazně stoupají v horninách, které prošly výraznou diferenciací.

- Během diferenciacie granitů stoupá ve zbytkové tavenině poměr Rb/Ba a obsah Si, Na, Rb, Li, Cs, F, Sn, avšak naopak klesá obsah Fe, Mg, Ti, Ca, K, Ba, Sr, REE a poměr K/Rb (Dostal a Chatterjee, 2000; Ramiréz a Grudving, 2000).
- Pro chondrity se poměr K/Rb pohybuje kolem 242 (Anders a Grevesse, 1989) a u většiny korových hornin se setkáváme s hodnotami mezi 150 až 350 (Taylor, 1965).
- Při nárůstu stupně diferenciacie vstupuje Rb přednostně do zbytkové taveniny a ve vysoce frakcionovaných granitech může poměr K/Rb klesat až pod 50.
- Nízké poměry K/Rb ( $K/Rb < 100$ ) jsou některými autory považovány za indikátory interakce horniny s magmatickými fluidy nebo krystalizace granitu za přítomnosti fluidní fáze bohaté vodou (Clarke, 1992; Shearer et al., 1985).



Diagramy K/Rb-Rb (A) a Li-Cs (B) s vyznačenými trendy frakcionace taveniny. V diagramech jsou vyneseny hodnoty převzaté z literatury uvedené v textu: 1) granity vzniklé dehydratačním tavením muskovitu, 2) granity vzniklé dehydratačním tavením biotitu, 3) diferenciované cínonosné granity, 4) průměrné složení metasedimentu v oblasti Zaskar (Himaláje)

## VI. 8. Chování REE Y, Zr, Th a U během tavení metapelitů a diferenciacce magmatu

- Obsahy vzácných zemin (REE) v peraluminických granitech jsou z velké části řízeny chováním akcesorických minerálů.
- Obsahy LREE a MREE jsou vázány především na apatit a monazit, zatímco HREE jsou vázány hlavně v granátu, zirkonu, apatitu, případně xenotimu (Ayres a Harris, 1997; Förster, 1998 a, b; Wark a Miller, 1993, Bea, 1996).
- Granát, apatit a monazit jsou hlavními nositeli REE v metapelitech (Ayres a Harris, 1997).
- Během tavení metapelitů většina granátu přechází do reziduální fáze. Chování REE v takto vzniklé granitové tavenině je řízeno hlavně monazitem a apatitem.
- Obsahy LREE a Th jsou závislé především na chování monazitu.
- Zirkony se na celkovém obsahu REE podílí jen podružně.
- Avšak z apatitu obsaženého v metapelitech se do taveniny dostává zhruba 10% LREE přibližně 50% MREE a > 90% HREE (Ayres a Harris, 1997).
- Podle těchto autorů není záporná Eu anomálie v himalájských leukogranitech výsledkem frakcionace plagioklasů či draselných živců, ale je řízena chováním apatitu a monazitu.
- Toto zjištění je však v rozporu se závěry Bea (1996), který předpokládá že přibližně 90 wt.% Eu v peraluminických granitech je obsaženo v živcích.

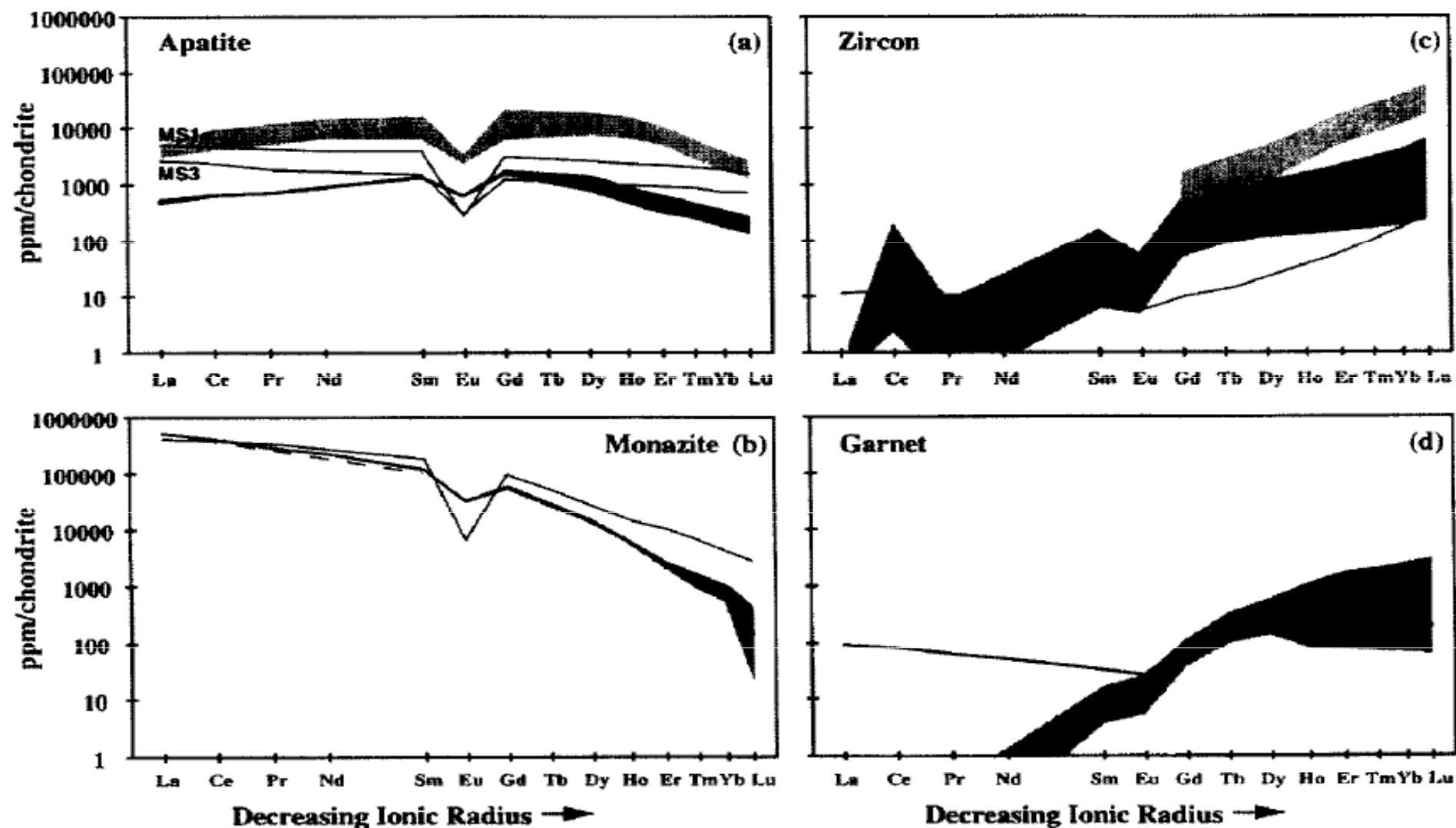


Fig. 3. (a, b) Chondrite-normalised REE concentrations for REE-bearing phases in Zanskar metapelites. (a) Apatite: dark shading and thick line = range and average PAN3 apatite compositions; light shading = range of apatite compositions in Naegi granite (Suzuki et al., 1990); thin solid lines = apatites ms-1 and ms-3 in peraluminous migmatite (Bea et al., 1994). (b) Monazite: shading and thick line = range and average PAN3 monazite compositions; thin solid line = average monazite in peraluminous migmatite (Bea et al., 1994); dashed line = average monazite composition from Rapp and Watson (1986). (c) Zircon: dark shading and thick line = range and average PAN3 zircon compositions; light shading = range of zircon compositions in Naegi granite (Suzuki et al., 1990); thin line = zircon ms-1 in peraluminous migmatite (Bea et al., 1994). (d) Garnet: shading = range of compositions from SIMS analysis of PAN2 garnets; solid line = garnet composition from INAA bulk analysis of PAN2 garnet separate.

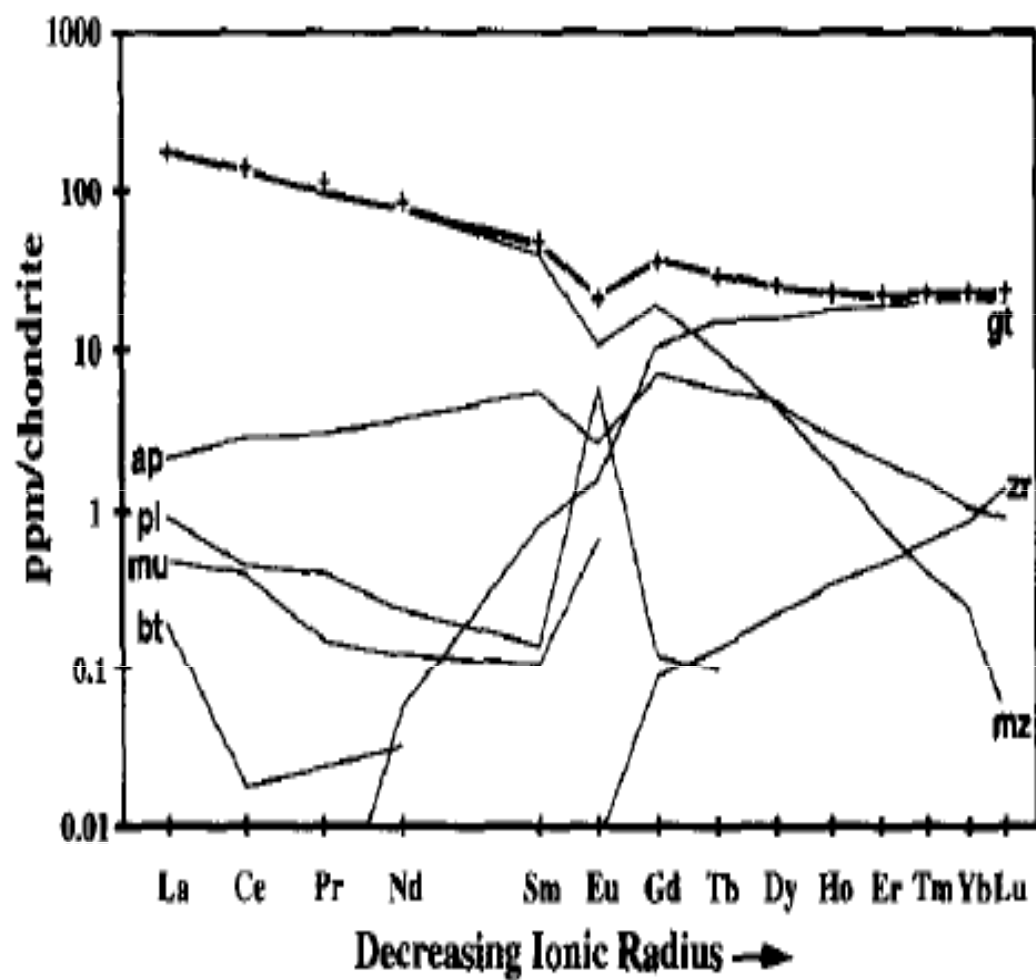


Fig. 4. Modelled chondrite-normalised REE distributions between phases in metapelite assemblage calculated by mass balance using mineral weight percentages given in Table 3 (row 1); + = measured bulk-rock data for PAN2; thick line = modelled values for PAN2; *ap* = average apatite (PAN3); *mu* = average muscovite (PAN2); *pl* = average plagioclase (PAN3); *bt* = average biotite (PAN2); *mz* = average monazite (PAN3); *zr* = average zircon (PAN3); *gt* = bulk INAA garnet analysis (Tb–Lu) and mean La–Gd from SIMS (PAN2).

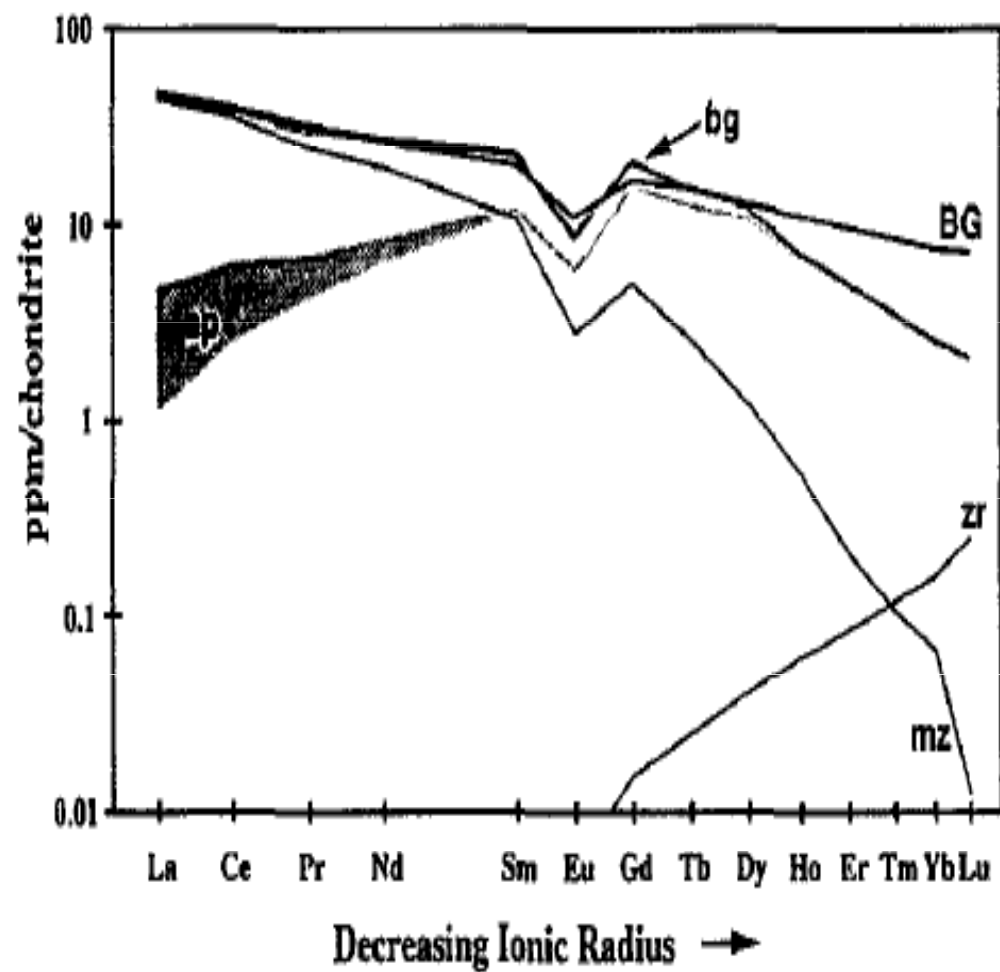
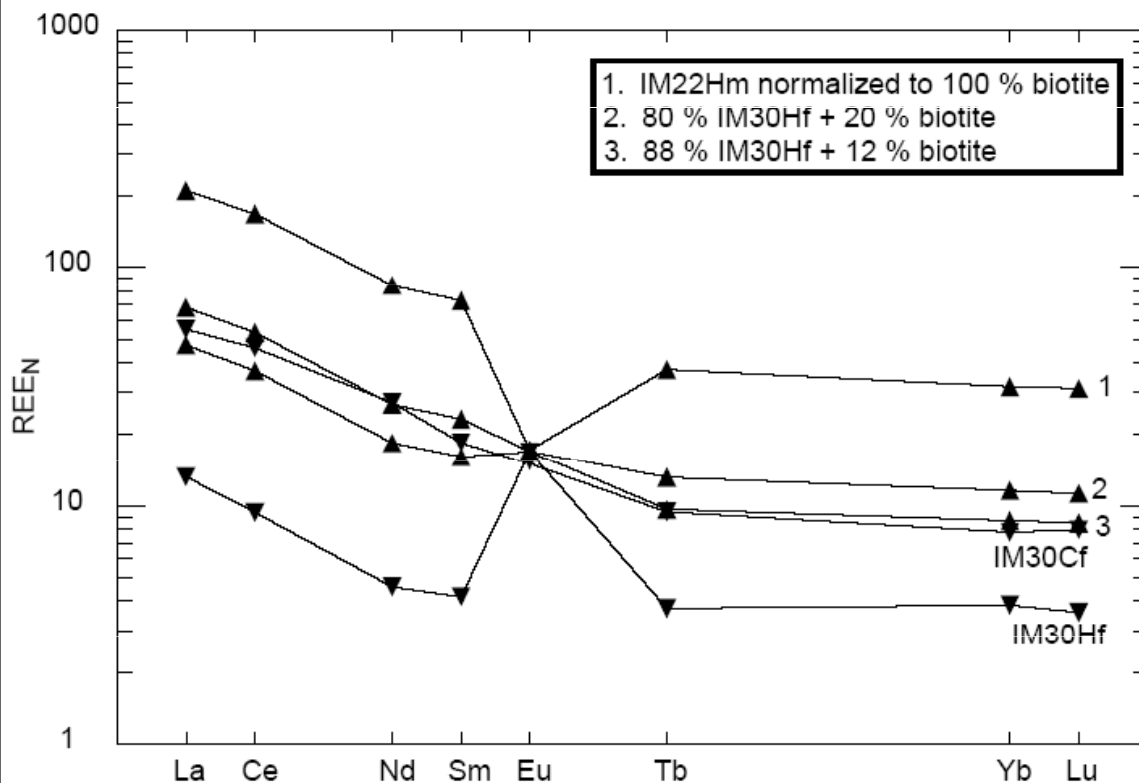


Fig. 6. Chondrite-normalised REE contributions of accessory phases to the total REE budget of biotite leucogranites; *BG* (thick line) = average biotite leucogranite composition; *bg* (shaded line) = modelled biotite leucogranite; *ap* (light shading) = possible range of contributions from apatite; *zr* = zircon; *mz* = monazite.

- Chování akcesorických minerálů během parciálního tavení je výrazně ovlivněno tím, zda jsou tyto situovány na hranicích zrn nebo uzavřeny uvnitř minerálů (Watson et al., 1989).
- Zatím co v prvním případě jsou minerály přístupné tavenině a mohou se v ní rozpouštět, v druhém případě jsou při parciálním tavení často od taveniny izolovány a zůstávají v restitu.
- Právě akcesorie jako monazit, xenotim a zirkon jsou často uzavřeny v minerálech (> 70 wt.% těchto akcesorií), a to zejména v biotitu (Bea, 1996). Z toho vyplývá, že chování akcesorií je během tavení výrazně ovlivněno chováním biotitu. Při tavení metapelitů vzrůstá s nárůstem teploty (stupně tavení) obsah REE a poměr LREE/HREE

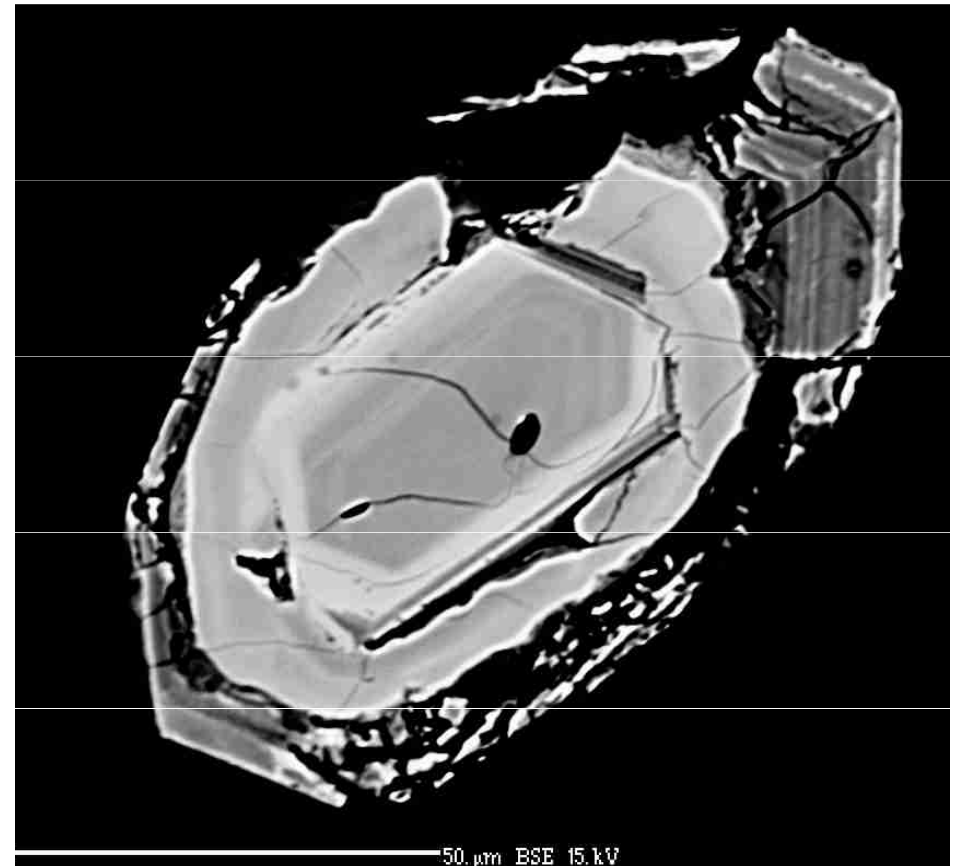


Modelovaný tvar křivky vzácných zemin anatektických granitů jako výsledek tavení biotitu s akcesorickými fázemi, IM30HF je složení leukosomu (Milord et al. 2001).



# Zirkon

- Je to nesosilikát s obecným vzorcem:  $ABO_4$
- $A = Zr^{4+}, Hf^{4+}, Y^{3+}, REE^{3+}$  (také  $Ce^{4+}$ ),  $Sc^{3+}, Ca^{2+}, U^{4+}, Th^{4+}, Nb^{5+}, Ta^{5+}, Ti^{4+}, Pb^{2+}, Fe^{2+}$  a  $Fe^{3+}$
- $B = Si^{4+}, Al^{3+}, P^{5+}, S^{6+}$
- $O = O^{2-}, OH, F, Cl$
- Důležité substituce jsou:
  - 1)  $Zr = Hf$  (zirkon – hafnon)
  - 2)  $Zr + Si = (Y, REE) + P$  (zirkon – xenotim)
  - 3)  $Zr = (U, Th)$  (zirkon – coffinit nebo thorit)
  - 4)  $2 Zr = (REE, Fe)^{3+} + (Nb, Ta)$
  - 5)  $2 Si = Al + P$
  - 6)  $Zr + O = REE + (OH, F)$

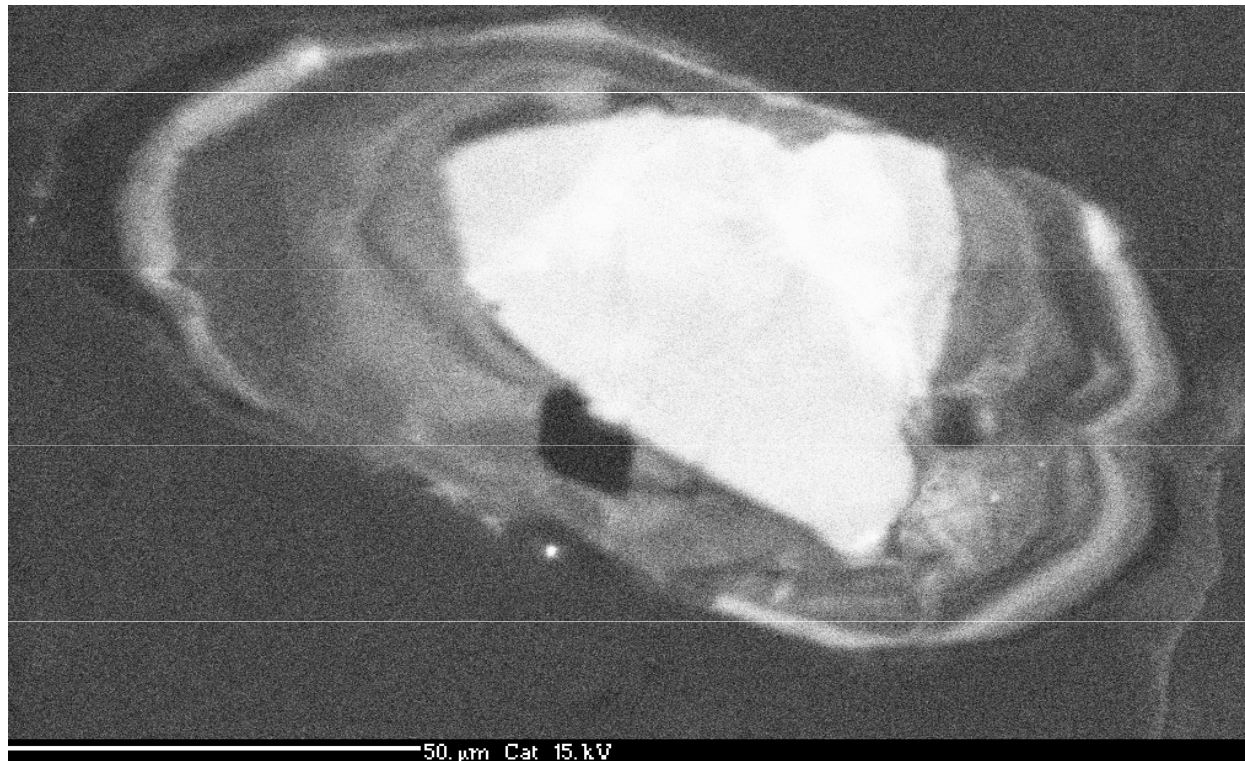


- Podle Deera et. al. (1992) obsah Hf v zirkonu stoupá se stupněm diferenciacie granitů.
- Zirkon obecně preferuje spíše těžké REE (Gd-Lu) oproti lehkým REE (La-Eu).
- Zirkony navíc mívají pozitivní Ce anomálii způsobenou tím, že  $Ce^{3+}$  má iontový poloměr blízký  $Zr^{4+}$ .
- Zirkony také mívají zápornou Eu anomálii, protože Eu nemá pro strukturu zirkonu vhodný iontový poloměr.



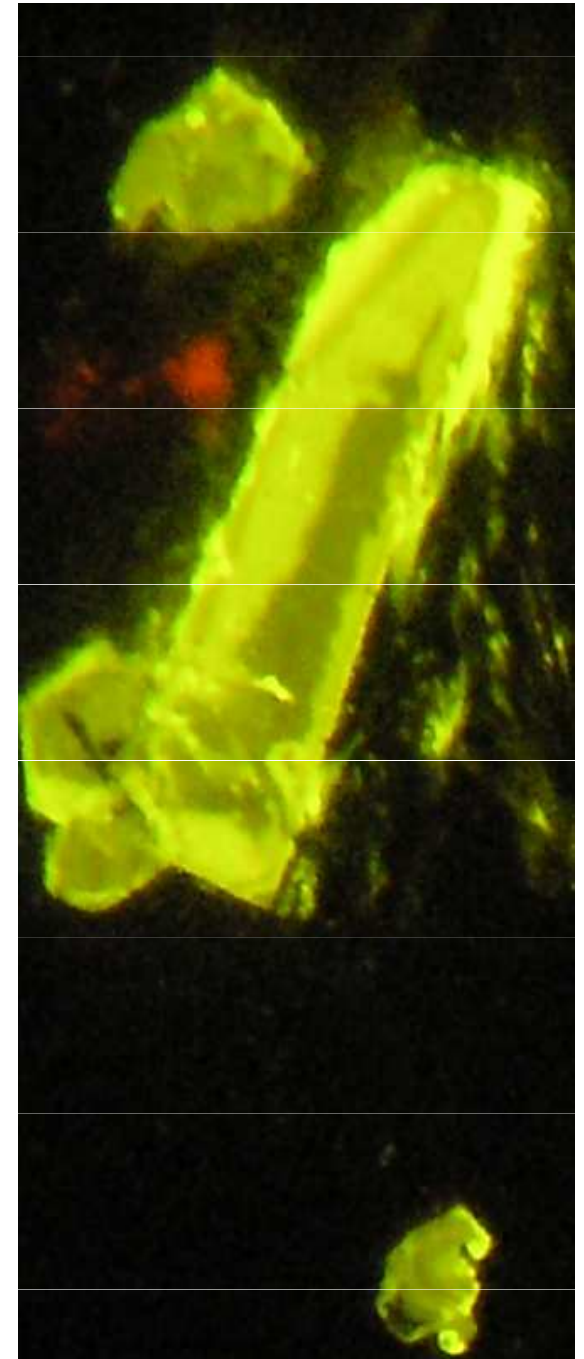
## Zonálnost zirkonu

- Bez zonálnosti jsou pouze zirkony krystalující rychle ve stabilních P-T-X podmínkách ( např. některé pegmatity nebo A-typy granitů).
- Oscilační zonalita odráží výkyvy P-T-X podmínek během krystalizace.
- Sektorová zonálnost je indikátorem rychlého růstu, kdy byla rychlost obsazování jednotlivých krystalových ploch vyšší, než rychlost ustavování rovnováhy s okolní taveninou.
- Nepravidelná zonálnost vzniká, jestliže mezi jednotlivými zónami byly velké časové intervaly, což také znamenalo velké rozdíly v P-T-X podmínkách. Častá jsou například reliktní jádra, která se zachovala z období před vznikem granitu.

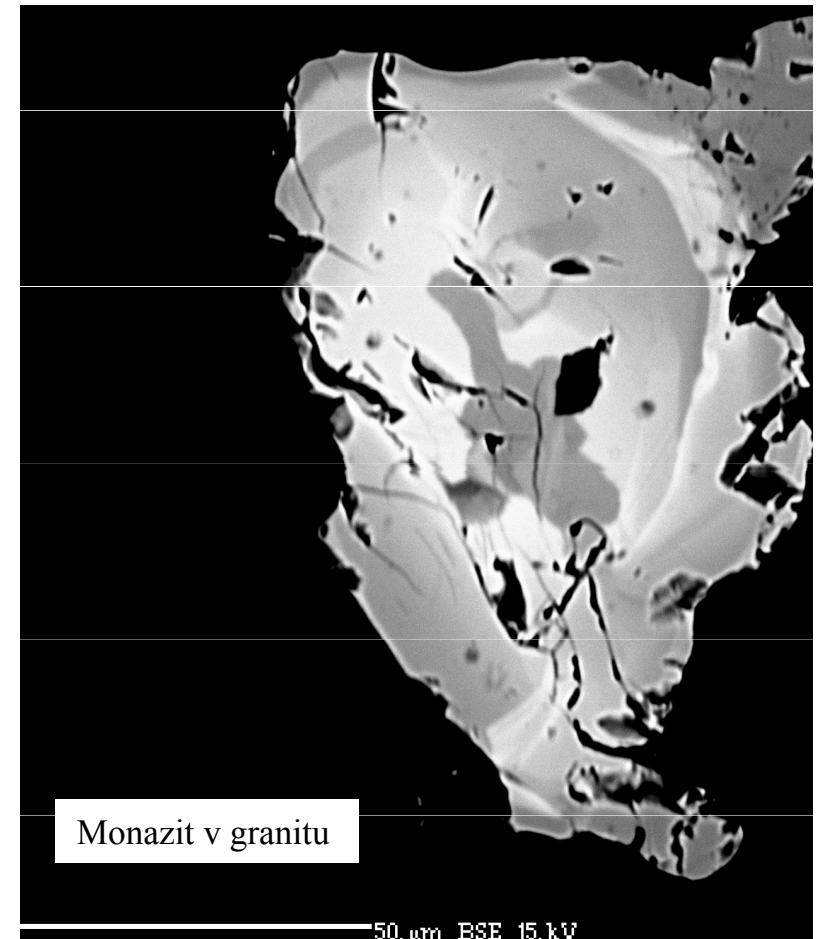


## Primární Fosforečnany

- V peraluminických granitech se vyskytují především apatit –  $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ , monazit  $\text{CePO}_4$  a xenotim  $\text{YPO}_4$  ve speciálních případech se však můžeme setkat s celou řadou dalších jako je amblygonit, trifylín a podobně.
- Podle Harrise a Ayrese (1997) je obsah vzácných zemin v leukokrátých S-typových granitech závislý především na chování monazitu a apatitu během tavení a krystalizace.
- Ostatní minerály jako je zirkon nebo hlavní horninotvorné minerály (muskovit, plagioklas, granát, biotit) ovlivňují zastoupení REE jen velmi málo.
- Podle těchto autorů není záporná europiová anomálie v Himalájských leukogranitech výsledkem frakcionace plagioklasů či draselných živců, ale je řízena chováním apatitu a monazitu.
- V přírodě nacházíme téměř čisté koncové členy fluor-apatitu, chlor-apatitu i hydroxyl-apatitu.
- U syntetických apatitů byla zjištěna úplná mísivost, zatímco v přírodě nacházíme jen OH-F apatity do 10 mol. % Cl-apatitu, nebo téměř čisté chlor-apatity.
- Pro granity jsou typické OH-F-apatity často s příměsí Mn. Apatity koncentrují těžké i lehké vzácné zeminy, přičemž většinou bývají slabě obohaceny na HREE.



- Monazity výrazně koncentrují především LREE a mývají negativní europiovou anomálii.
- Monazit vytváří izomorfní řadu s huttonitem ( $\text{ThSiO}_4$ ) a brabantitem ( $\text{CaTh PO}_4$ ).
- Podle Harrise a Ayrese (1997) mají monazity z granitu nižší obsahy huttonitové komponenty než monazity v migmatitech jejichž natavením granity vznikly.
- Podle Forstera (1998) obsahují monazity z vysoce diferenciovaných S-typových granitů (bohatých na F a Li) vyšší obsahy brabantitové komponenty než méně diferenciované granity.
- Xenotimy jsou typické pro peraluminické granity s nízkými obsahy Ca. Mají nízké obsahy Th a LREE naopak výrazně koncentrují HREE.
- Podle Wolfa a Londna (1995) stoupá rozpustnost apatitu v tavenině od metaluminických granitů (0,1 hmot%) k peraluminickým (0,7 hmot %).
- Peraluminické magma vzniklé tavením metapelitů může rozpustit většinu nebo všechny apatit obsažený ve zdrojové hornině.
- Proto mívají S-typové peraluminické granity vysoké obsahy  $\text{P}_2\text{O}_3$  (0,3 – 1,5 %).
- Zatímco rozpustnost apatitu v silně peraluminickém magmatu je vysoká ( při  $750^\circ\text{C}$  a 200 MPa 0,7 hmot. %  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), rozpustnost monazitu a xenotimu je podstatně nižší  $< 0,05$  hmot%  $\text{P}_2\text{O}_5$ .



Monazit v granitu

- Při diferenciaci S-typových granitů obsahy REE, Y, Th a U klesají s nárůstem stupně diferenciaci (Bea et al., 1994), tento trend je ale u I-typových granitů opačný (Sawka a Chappell, 1988).
- Nízké obsahy LREE a Th v diferenciovaných felzických horninách bývají spojovány s frakcionací monazitu (Wark a Miller, 1993).

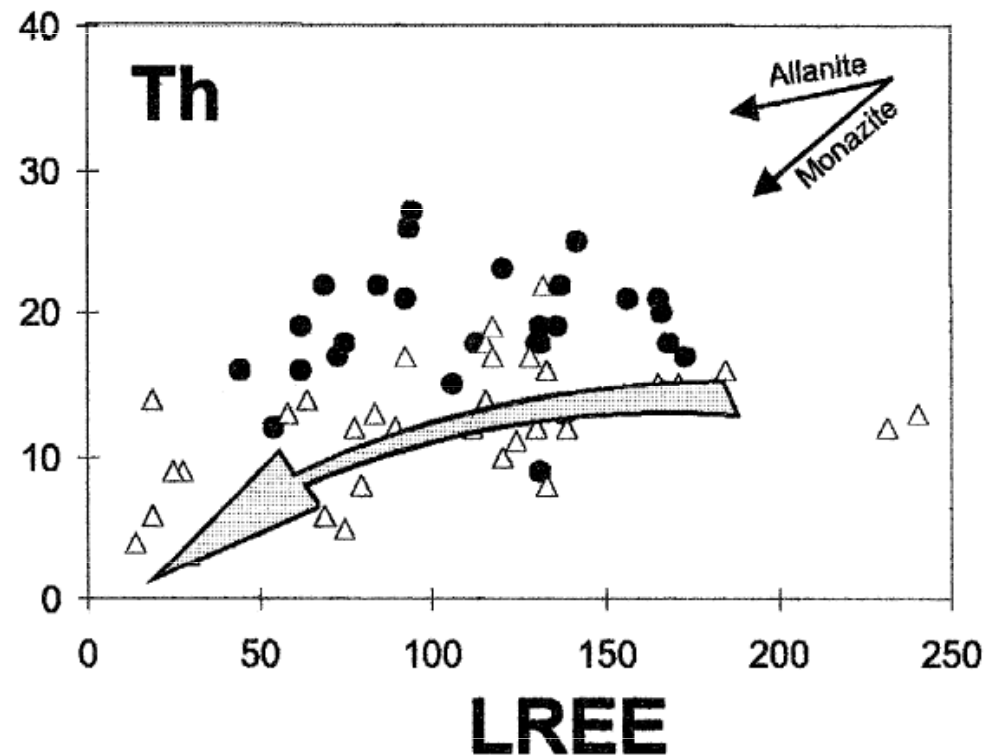
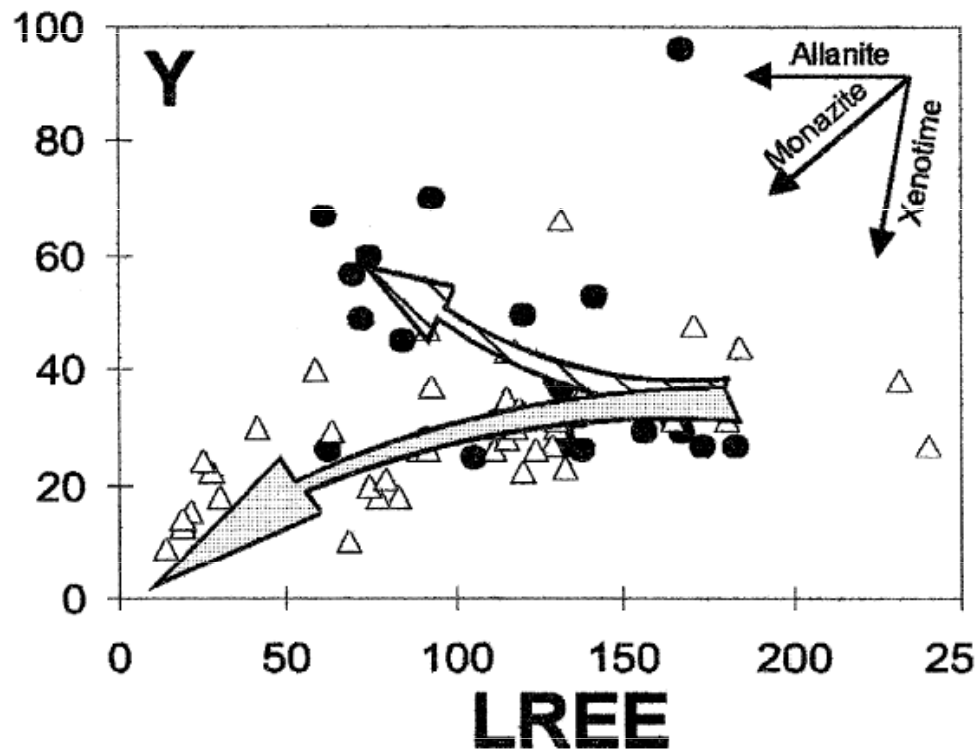
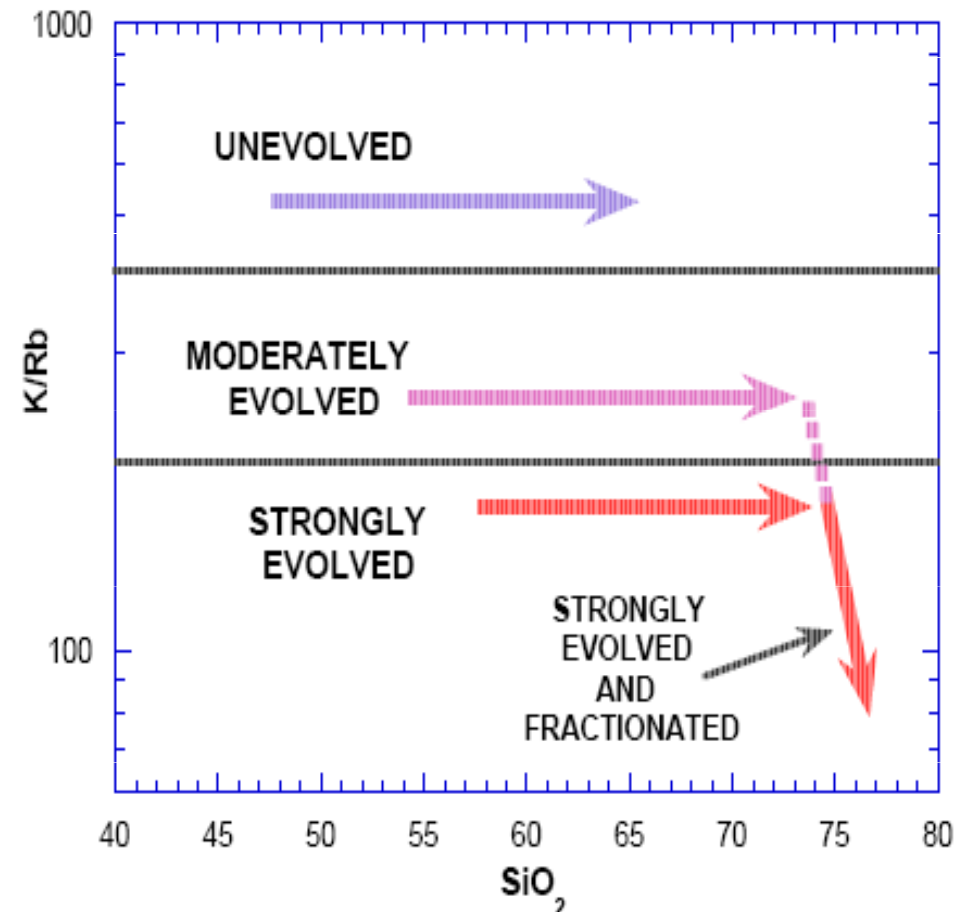


Diagram (Villaseca 1998) ukazuje vliv akcesorických minerálů na složení granitů během frakcionace

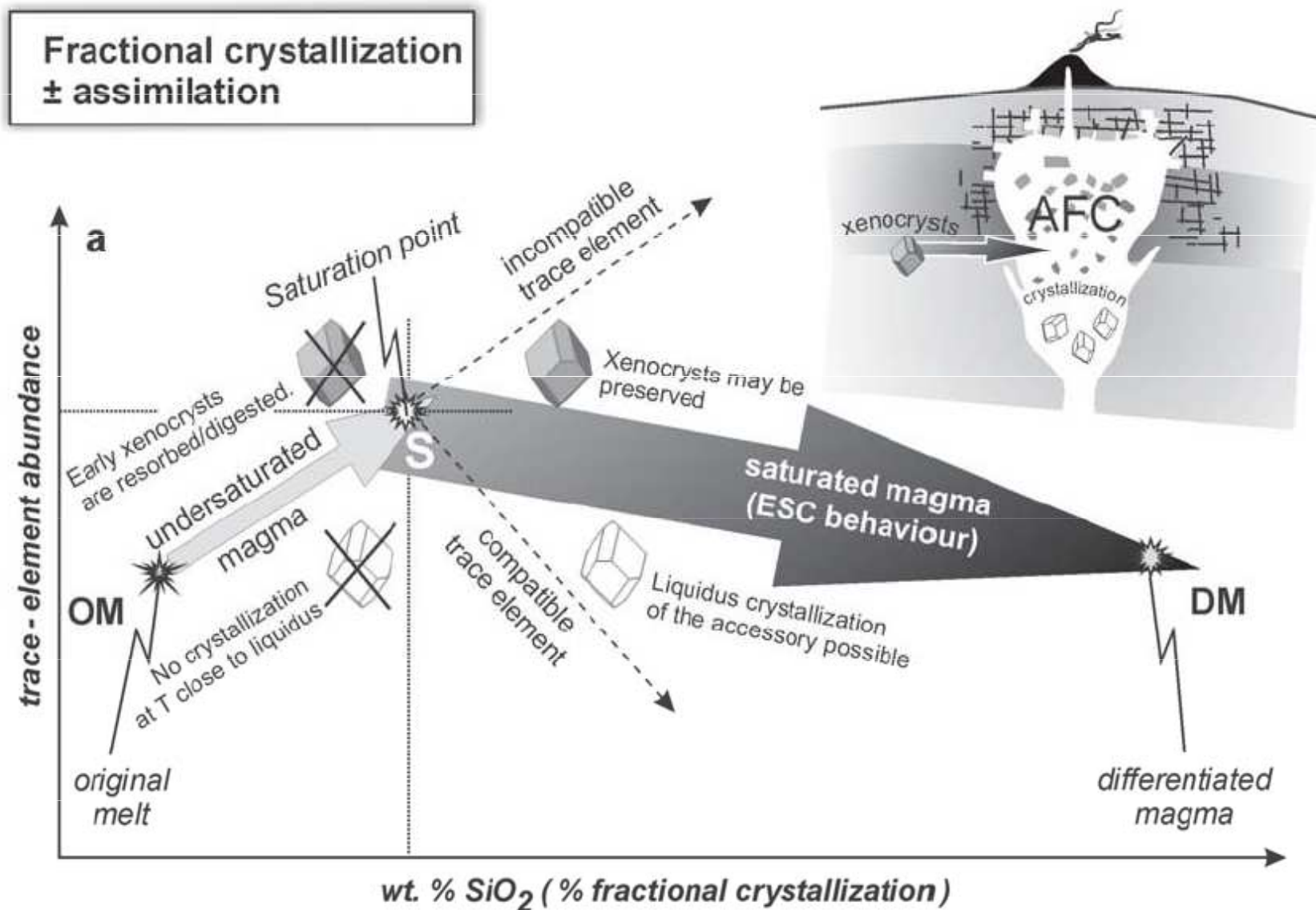
# VI. 9. Peraluminické granity vzniklé výraznou diferenciací korových tavenin

- Chemické složení těchto granitů má poměrně velký rozptyl, což je dáno rozdílným stupněm diferenciaci a rozdílným složením zdrojového materiálu.
- Obecně lze říci že jde o horniny s vysokým obsahem  $\text{SiO}_2$ , Sn, Li, Rb, Cs, W, Mo, Be a F (Pollard et al., 1987).
- Z experimentů vyplývá, že diferenciaci vede ke vzniku magmat s vysokým obsahem normativního albitu a velmi nízkou teplotou solidu, likvidu a viskozitou (Manning, 1981; Pichavant a Manning, 1984).
- Vysoká rozpustnost vody v bórem bohaté granitové tavenině je patrně jedním z nejdůležitějších faktorů, ovlivňujících vznik výrazných hydrotermálních alterací spojených s těmito horninami.
- Během diferenciaci je zřetelný pokles nejen obsahu Sr, ale i Ba, Fe, Mg, Ti, Ca, K, REE. Je tedy zřejmé že poměr Rb/Sr není závislý jen na způsobu tavení, ale i na stupni frakcionace (Inger a Harris, 1992).



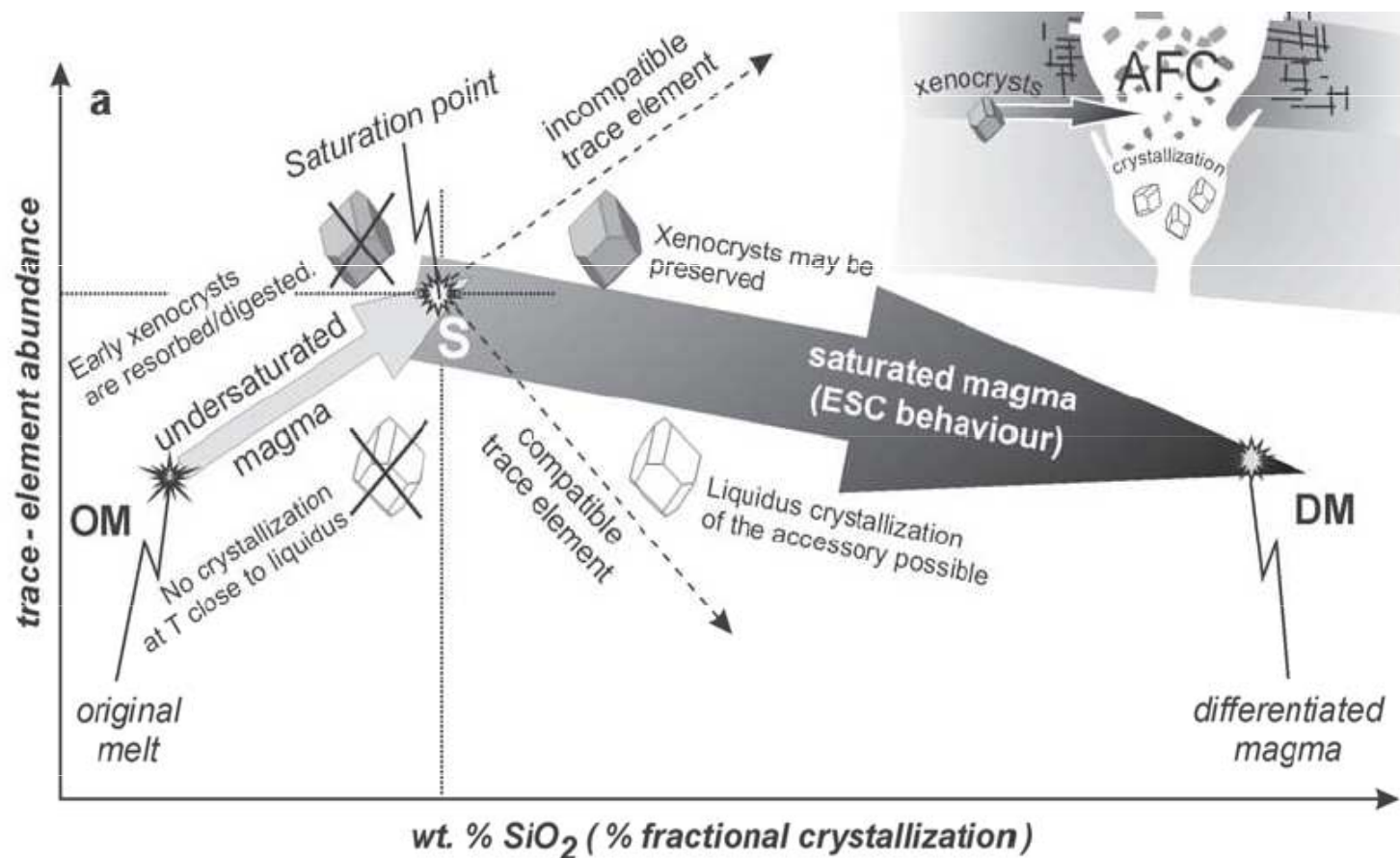
K/Rb diagram zobrazující vývoj chemického složení granitů

- Frakcionace akcesorických minerálů má výrazný vliv na změny chemického složení magmatu během krystalizace (Evans a Hanson, 1993).
- Prvky které jsou nekompatibilní pro hlavní horninotvorné minerály se koncentrují v akcesorických minerálech: Zr v zirkonu, P v apatitu, P a LREE (Ce) v monazitu, P a HREE v xenotimu (tyto prvky se označují - essential structural constituents (ESC)).



Vývoj obsahu stopových prvků v hypotetické magmatické suitě která se vyvíjí frakční krystalizací (Janoušek 2006), ke krystalizaci akcesorických minerálů dochází jen když je překročen saturační bod (S).

- V tomto modelu se během první fáze krystalizace krystalují pouze hlavní horninotvorné minerály a obsah P, Zr, REE v tavenině roste až do bodu S.
- V bodě S je zbytek magmatu saturován stopovými prvky a začínají růst akcesorické minerály.
- Pokud je magma saturováno například Zr, mohou se zachovat starší xenokrysty z okolních hornin nebo zděděné z protolitu (inheritance, xenocrysts)



Vývoj obsahu stopových prvků v hypotetické magmatické suitě která se vyvíjí frakční krystalizací (Janoušek 2006), ke krystalizaci akcesorických minerálů dochází jen když je překročen saturační bod (S).

## VI. 10. Tavenina a fluidní fáze

- Řada prvků, mezi něž patří také bór, má tendenci se koncentrovat ve zbytkových fluidech.
- Tato fluida pak mohou reagovat nejen s horninami v okolí plutonu, ale i přímo s granitem a to buď za podmínek solidu nebo raného subsolidu.
- Ve větších plutonických komplexech se fluidní fáze hromadí v apikální části plutonů.

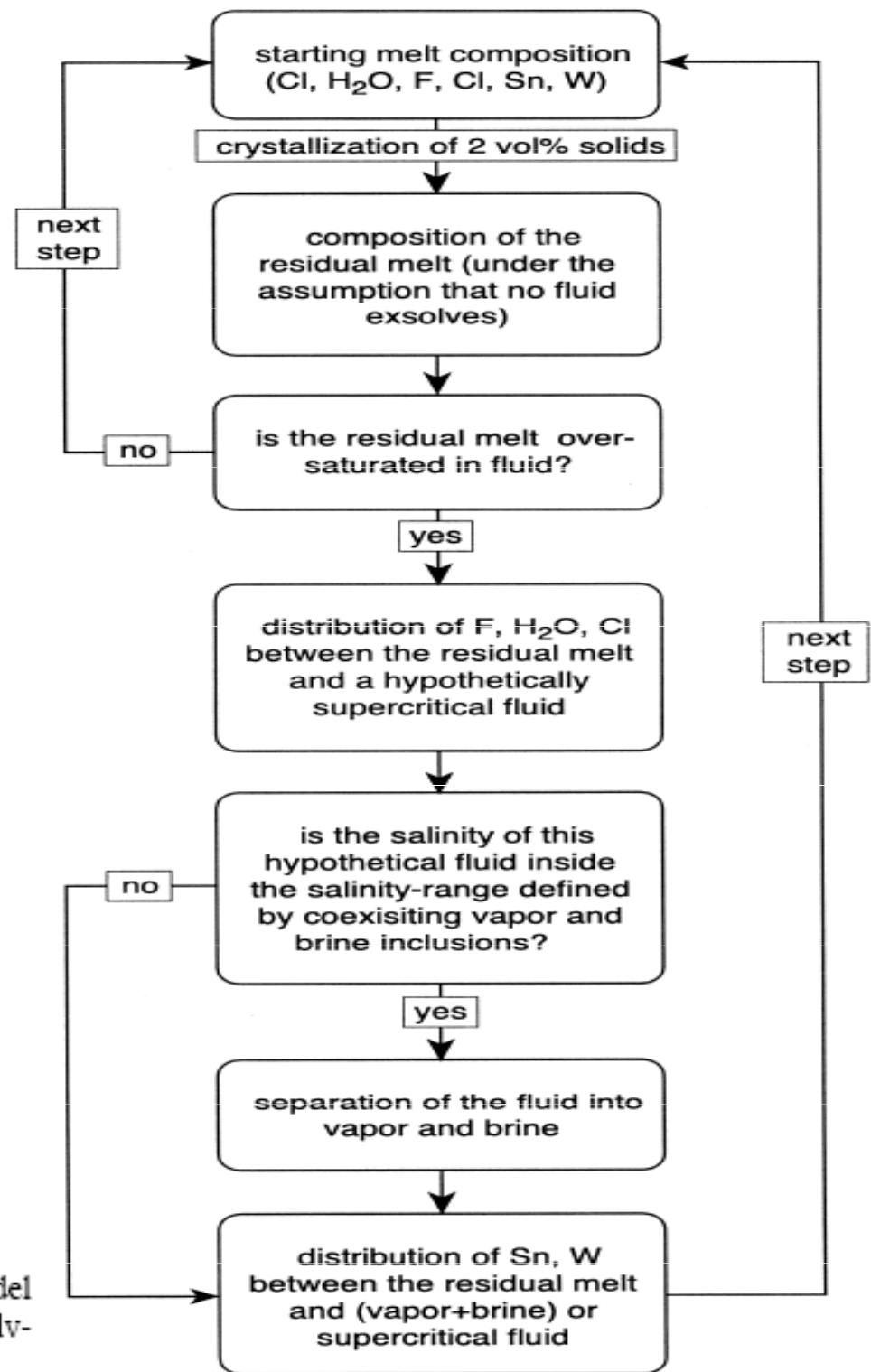
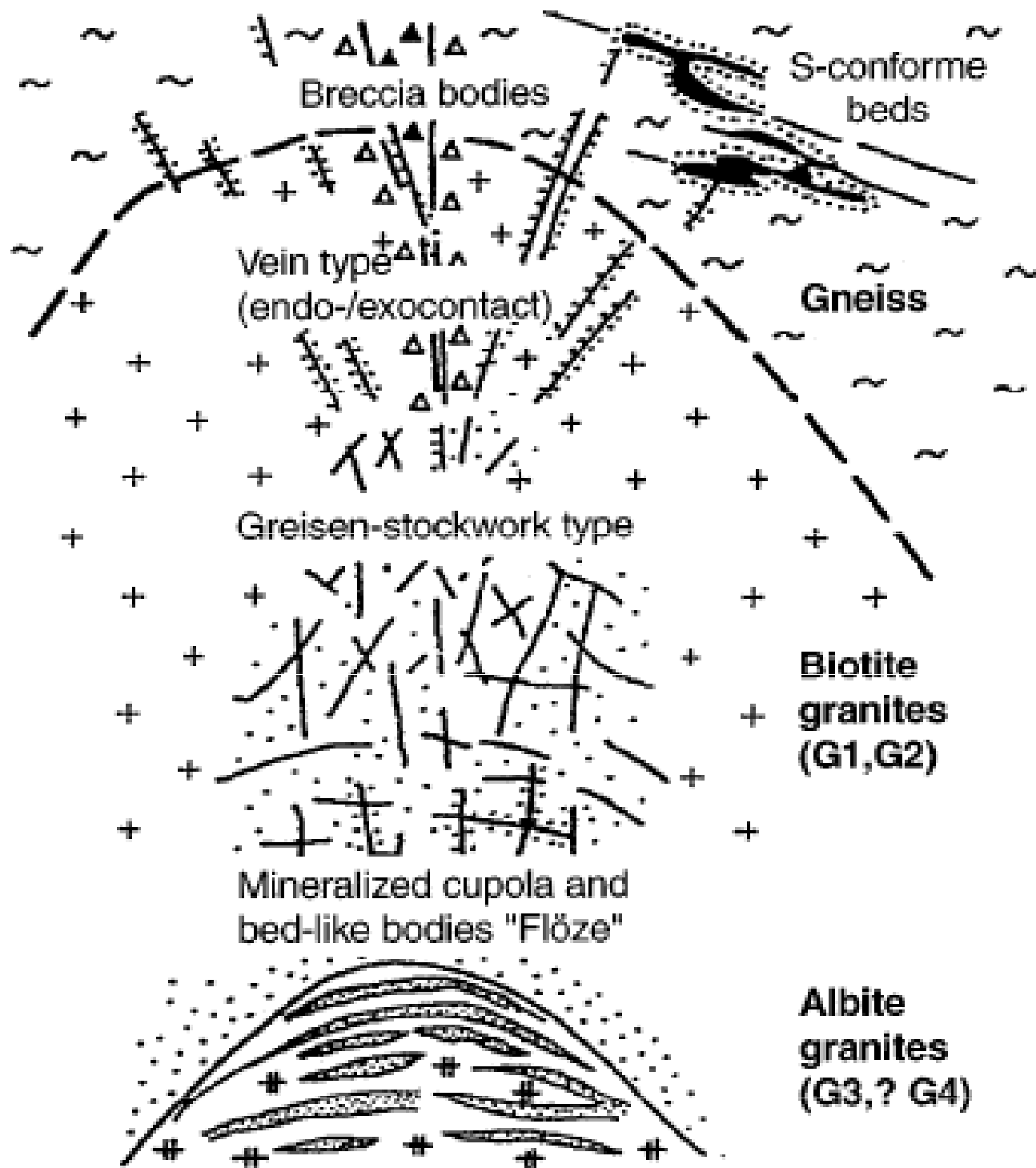


Fig. 9. Simplified flow diagram of the Rayleigh fractionation model that was used to predict the composition of residual melts and exsolving fluids as a function of the crystallization degree.





Mnohá endokontaktní ložiska jako greiseny nebo Qtz žíly s kasiteritem a wolframitem jsou vázány na granitové kupole, nebo jejich nejbližší okolí.

Ložiska Sn rud bývají svázány s Bt nebo Ms granity (S-typ nebo A-typ)

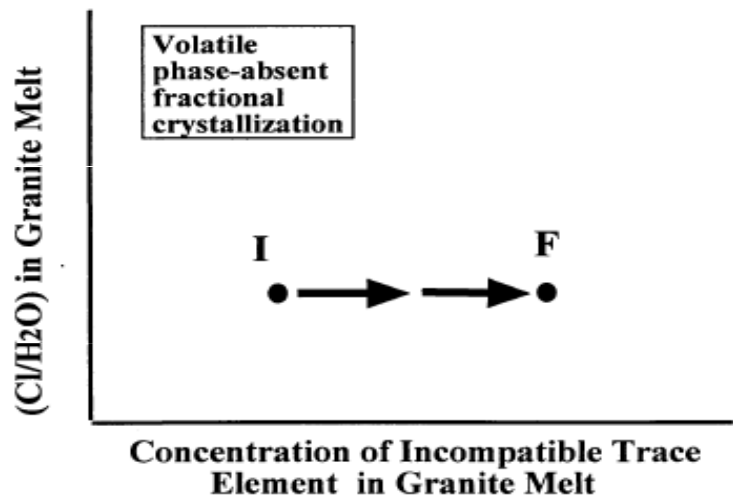
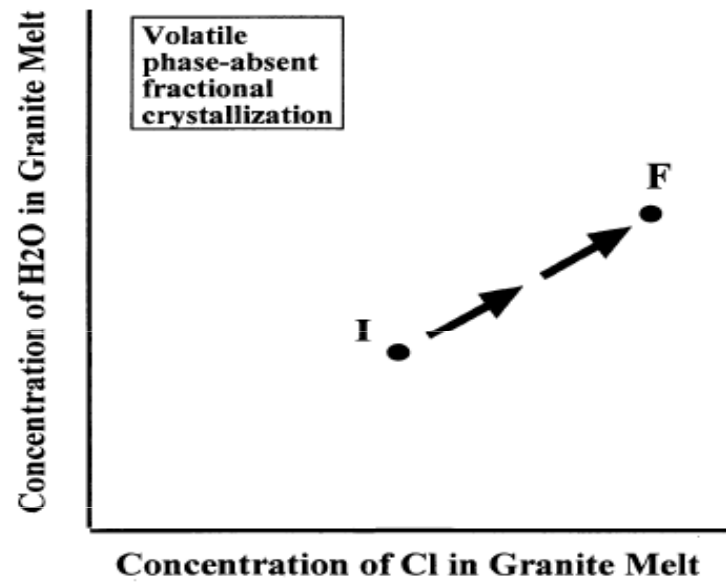


Fig. 4. Schematic plots showing expected changes in (a) abundances of H<sub>2</sub>O and Cl and (b) abundances of trace elements vs. (Cl/H<sub>2</sub>O) ratio in granite melt during progressive crystal fractionation at volatile phase-absent conditions. All elements and volatiles are assumed to exhibit comparatively incompatible behavior with respect to crystalline phase assemblage. Under these conditions, the (Cl/H<sub>2</sub>O) ratio remains constant as concentrations of the incompatible trace elements increase with melt evolution. Initial concentrations in melt shown as "I," and final concentrations in melt as "F." Webster, Robbert, 2001

- a.
  - Většina prvků je i během postmagmatických procesů spojených s hydrotermálními fluidy vysoce mobilní. Mohou dokonce migrovat i REE, Y, Th a U.
  - Schopnost hydrotermálního roztoku přenášet takové prvky je závislá na stabilitě akcesorických minerálů vůči fluidům.
  - Podle Bea (1996) mohou tyto prvky poměrně snadno migrovat zejména z minerálů postižených metamiktizací (například primární allanit může produkovat sekundární LREE karbonáty).
- b.
  - Avšak akcesorické minerály v peraluminických granitech (monazit, xenotim, huttonit) jsou podstatně stabilnější než v metaluminických a peralkalických horninách (allanit, thorit).
  - Velmi mobilní jsou při interakci s hydrotermálními fluidy alkalické kovy a to zejména Rb (Rollinson, 1993).