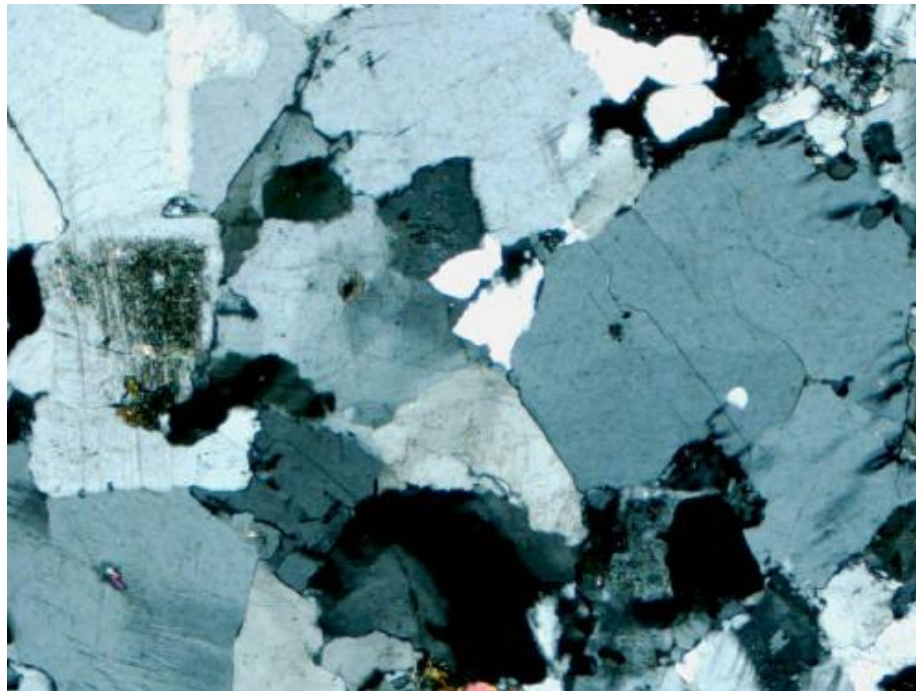


# Granity a kontinentální kůra

## 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	1											13	14	15	16	17	18	
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub						

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	161.97	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)	(269.1)	

Group colors

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

- 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), ICP (Atomová emisní spektroskopie s buzením v indukčně vázané plazmě = Inductively coupled plasma)
- 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	Row	
1	H											2	B	C	N	O	F	Ne	
2	Li	Be											3	Al	Si	P	S	Cl	Ar
3	Na	Mg	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Ac	Unp	Unh	Uns		Uue											

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

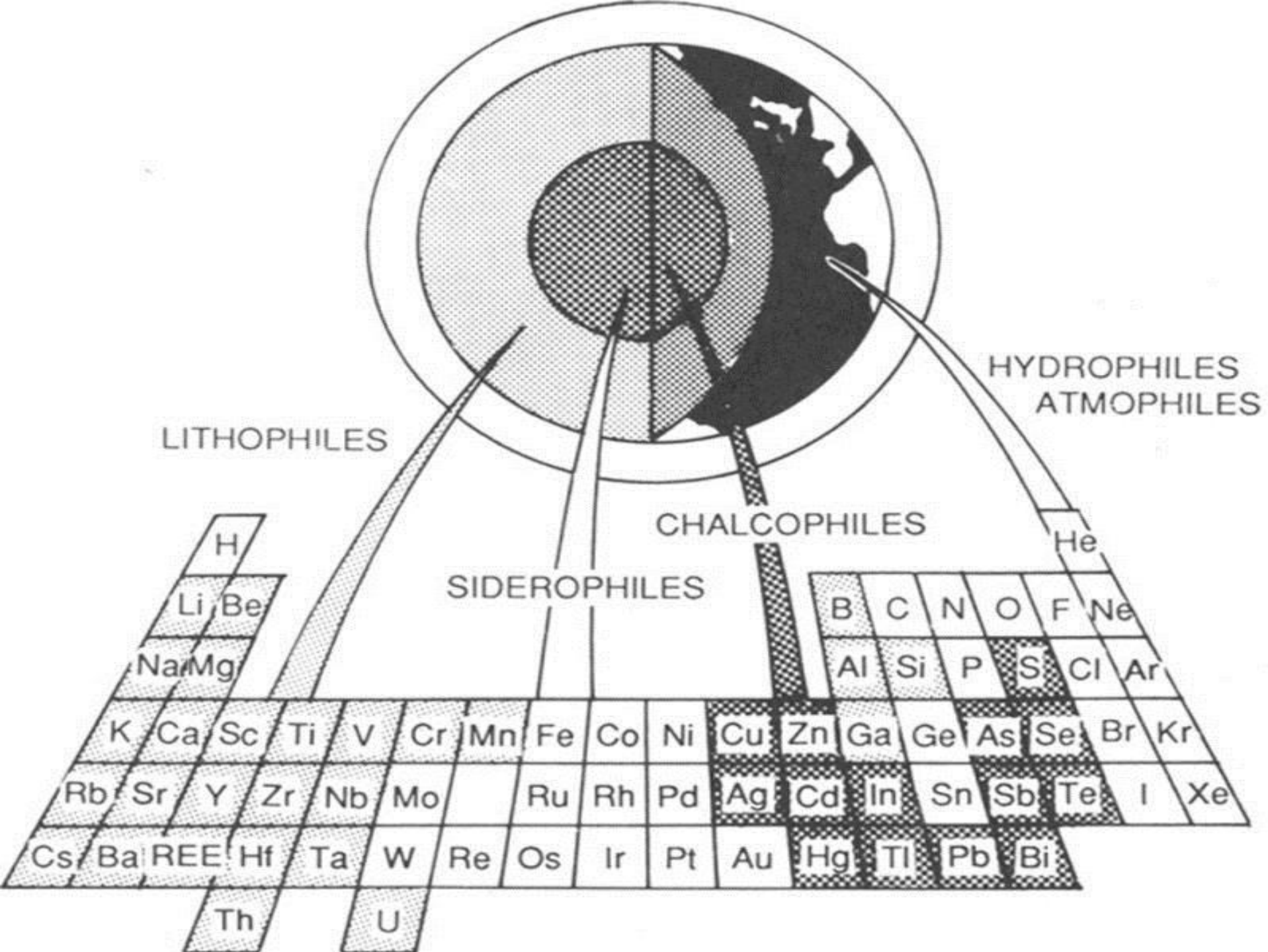
  Trace elements in ppm

  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  $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$  (proporce kationtů).
- **Normativní  $\text{Ab}/(\text{Ab}+\text{An})$**  - 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)

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn

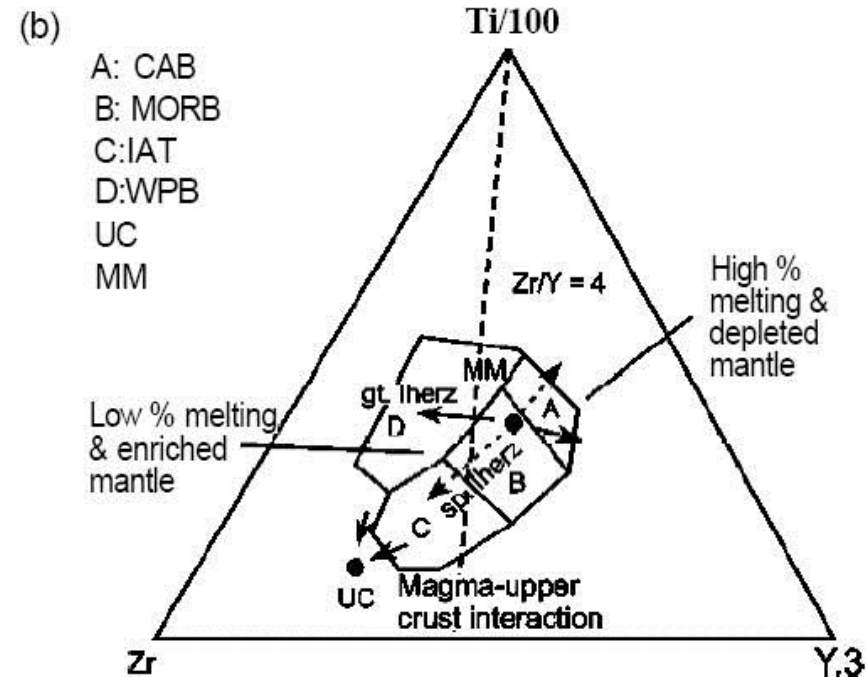
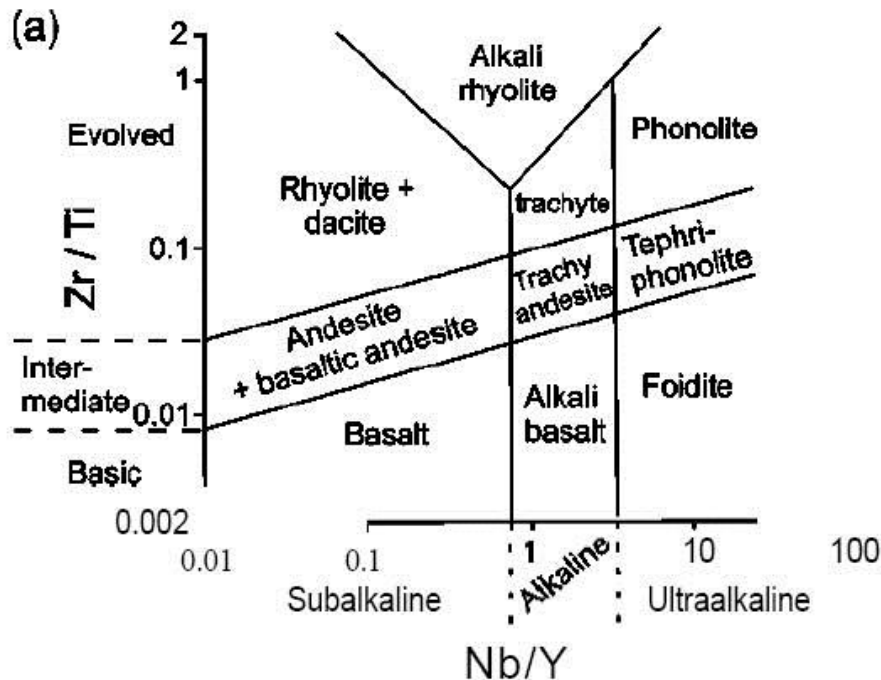
Th	U												
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

Siderophile
  Chalcophile
  Lithophile
  Atmosphile



• HFSE = *High Field Strength Elements* (Sc, Y, Th, U, 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

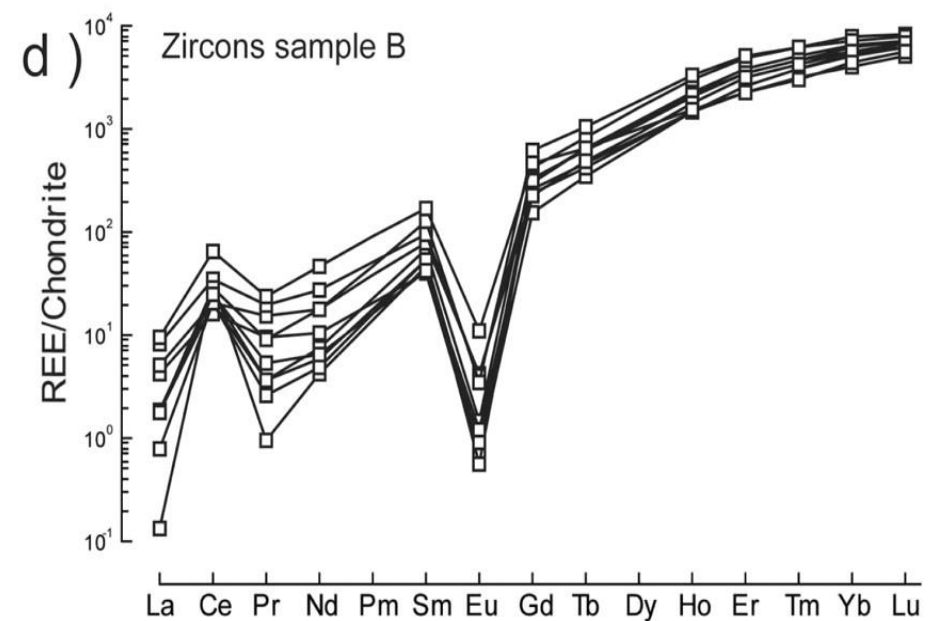
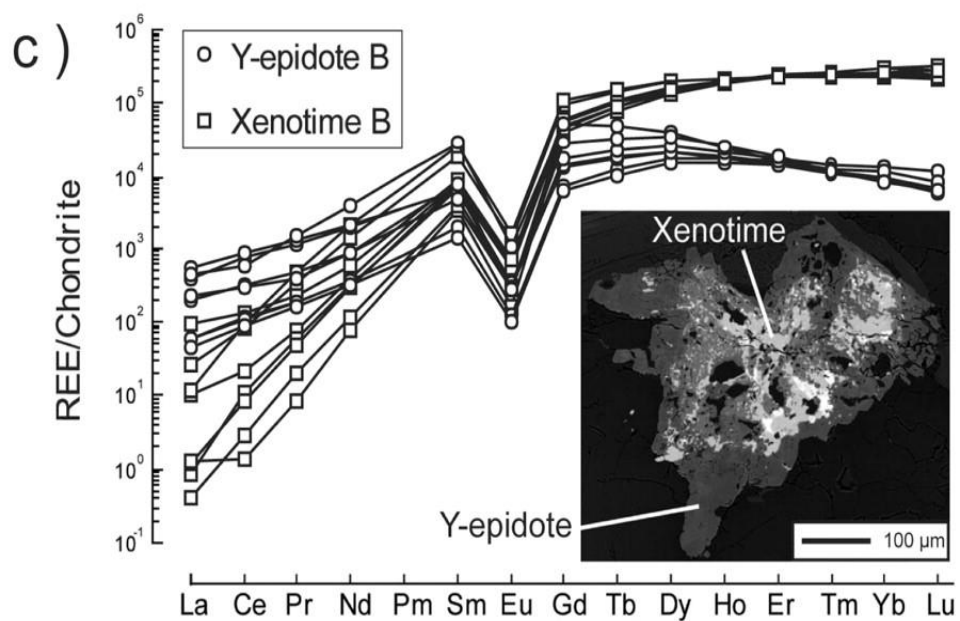
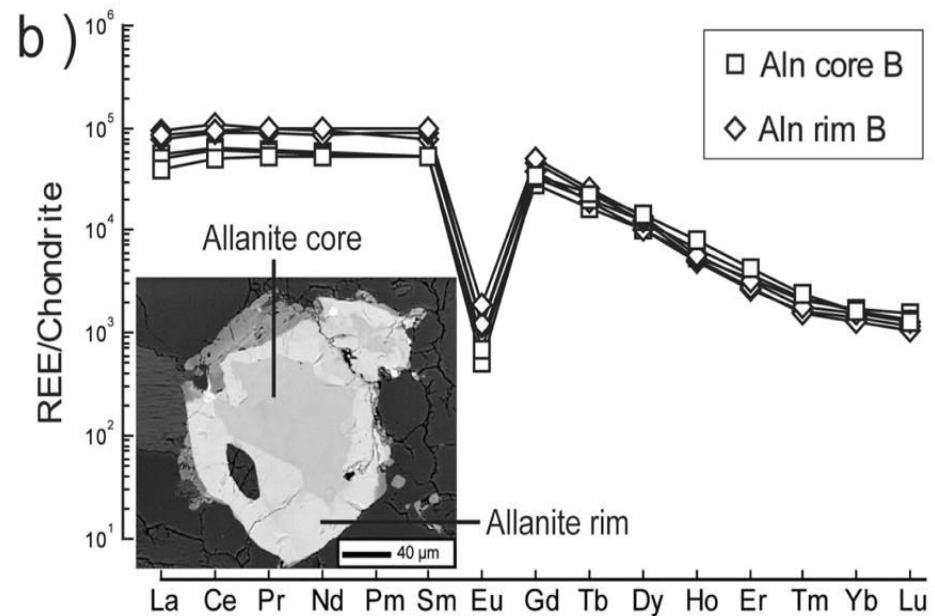
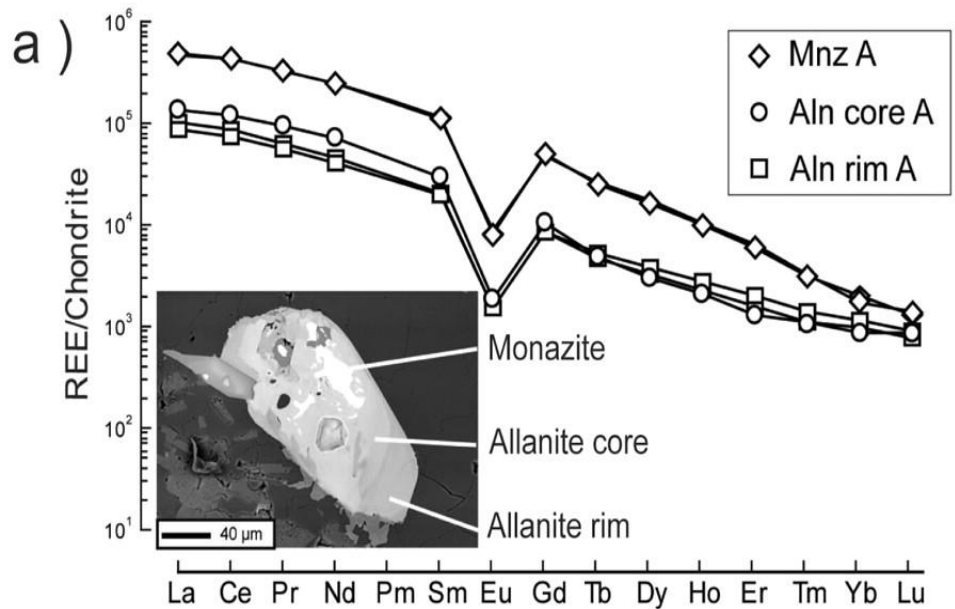


- REE = *Rare Earth Elements* (La Ce Pr Nd (Pm) Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu)
  - technicky vzato náleží k HFS
  - chovají se různě ale většinou jsou nekompatibilní
  - s výjimkou některých minerálů (monazit, xenotim allanit)
  - v jednotlivých minerálech se jednotlivé REE chovají různě
  - navíc nejsou příliš citlivé ke zvětrávání
  - jsou dobrými petrogenetickými indikátory
  - Vzácné zeminy (REE) jsou to lantanoidy s atomovým číslem 57 - 71

## *Periodic Table of the Elements*

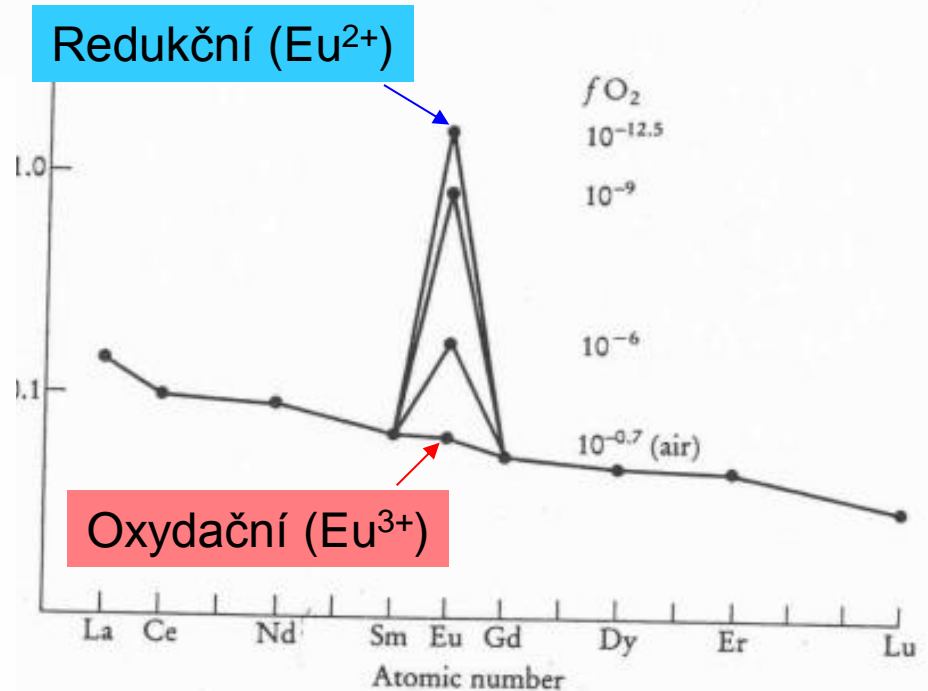
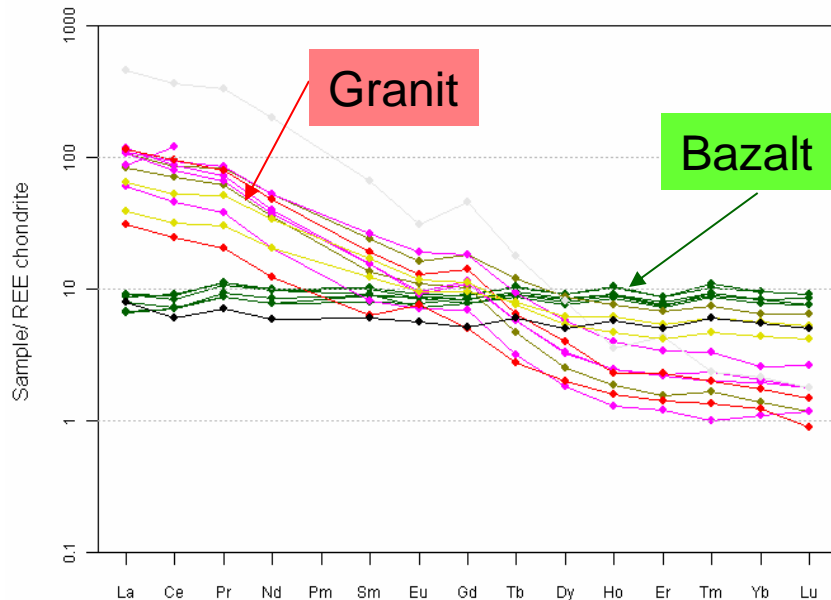
The image shows a standard periodic table of elements. Two red circles are drawn on the table to highlight the Lanthanide and Actinide series. The first circle is around the elements Scandium (Sc) and Yttrium (Y) in the 4th and 5th periods, respectively. The second, larger circle is around the entire Lanthanide series (La to Lu) and Actinide series (Ac to Lr) at the bottom of the table.

1																	18															
1																	2															
2	3	4											5	6	7	8	9	10														
3	11	12	13	14	15	16	17	18									19	20														
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36														
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54														
6	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
7	87	88	**	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118														
LANTHANIDE SERIES			57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71															
ACTINIDE SERIES			89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118



- 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

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



Granitic rocks and pegmatite

(4) Negative Eu anomaly



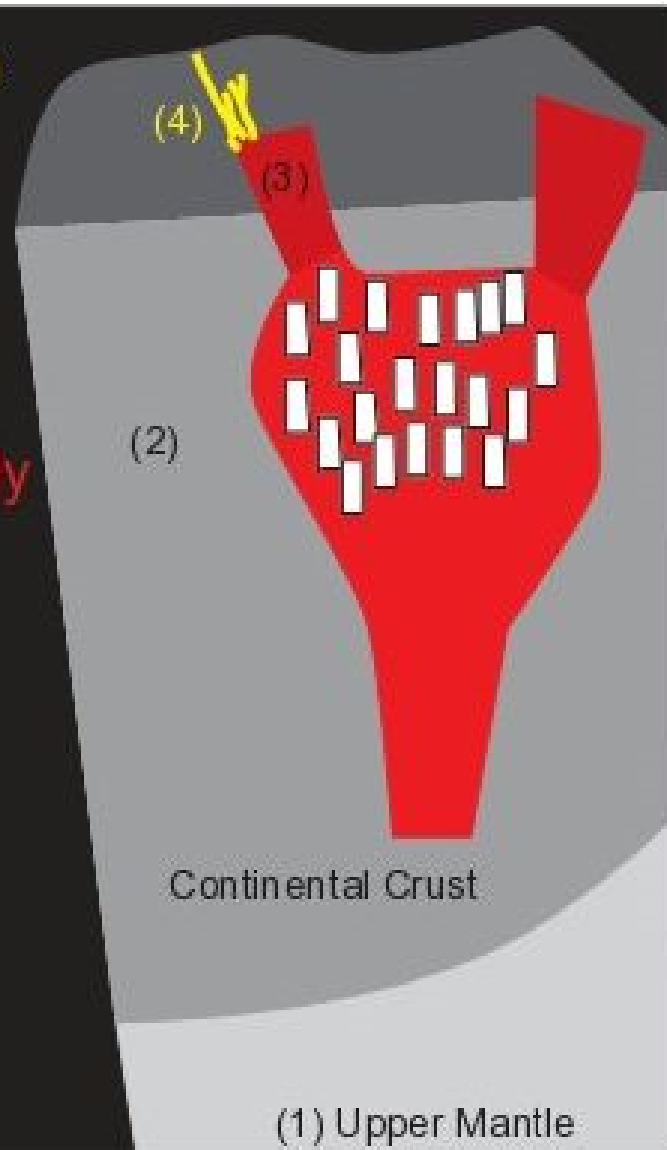
(2) Positive Eu anomaly



No Eu anomaly

In Meteorites

Chondrite



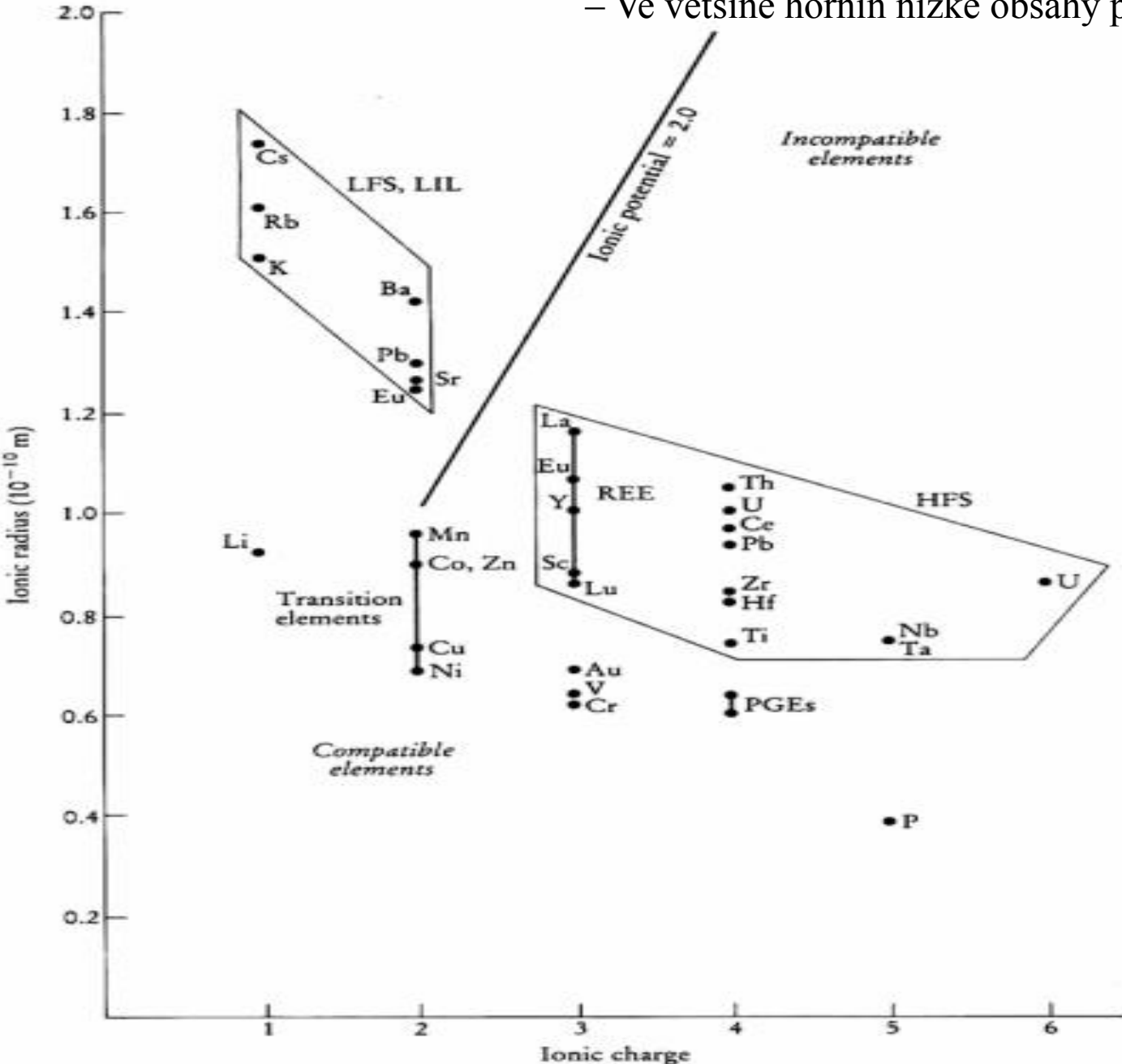
## SIMPLIFIED MODEL FOR THE EXPLANATION OF EU-ANOMALIES IN THE CONTINENTAL CRUST

1. REE-bearing rock forms magma (no Eu anomaly)
2. Accumulation of plagioclase and formation of anorthosite (positive Eu anomaly in rock)
3. Removal of remaining magma to higher levels of the Earth's crust. Pegmatite derived from anorthosite is depleted in plagioclase (negative Eu anomaly)
4. Further crystallization of minerals in the pegmatite distributes the remaining REE preferably into some minerals containing  $\text{Ca}^{2+}$ .

(modified from Stosch, unpubl.)

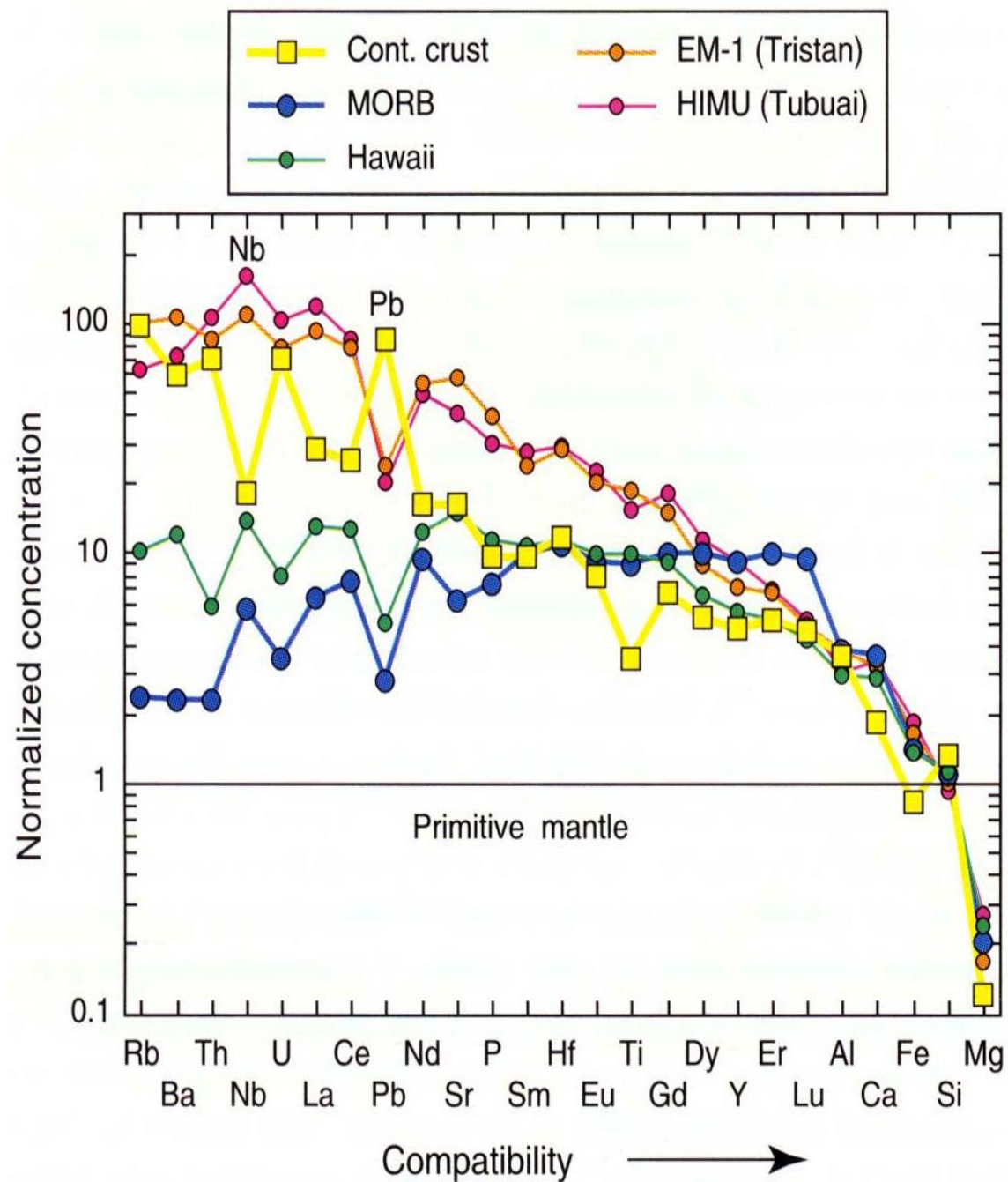
- PGE = *Platinum Group Elements* (Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Au)

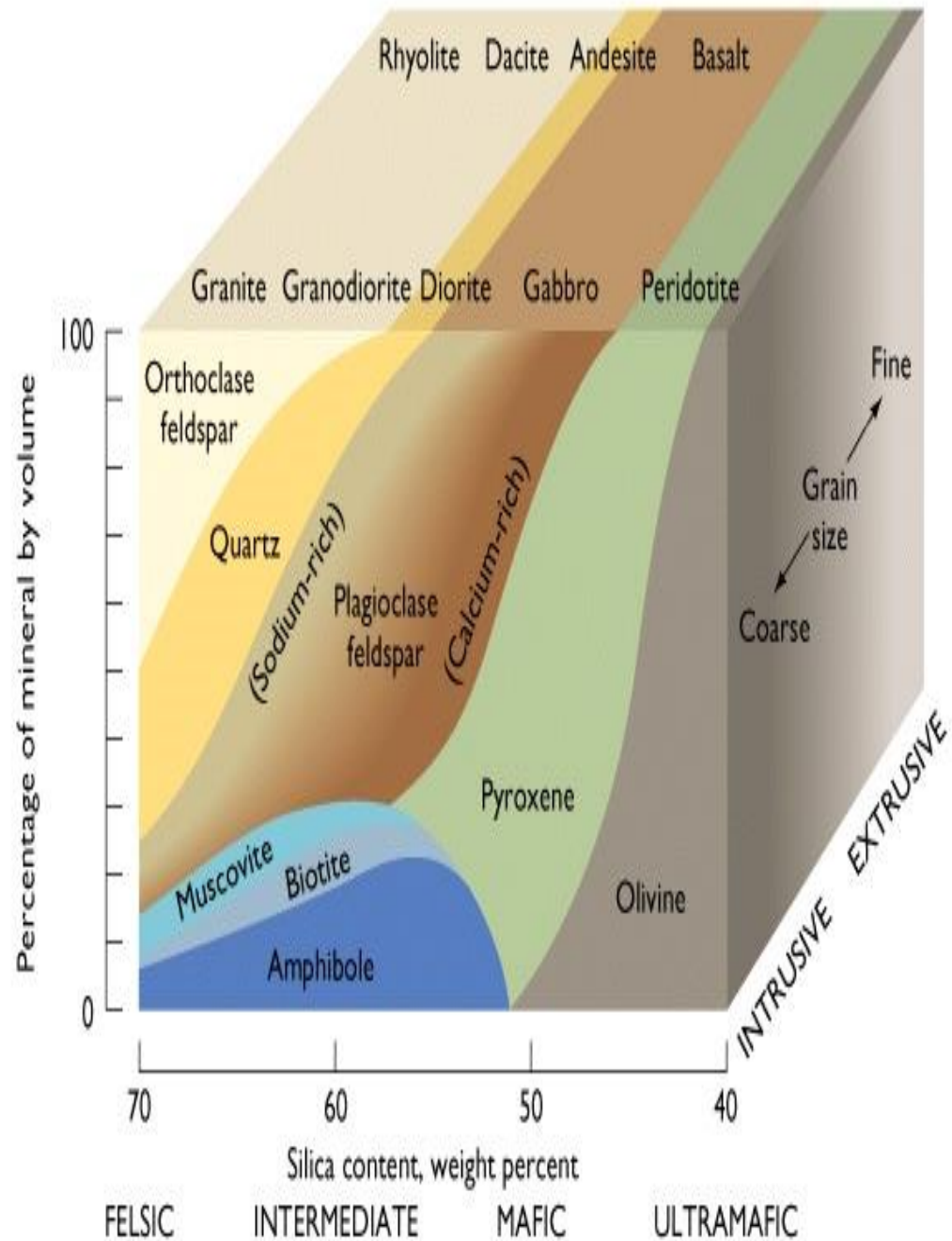
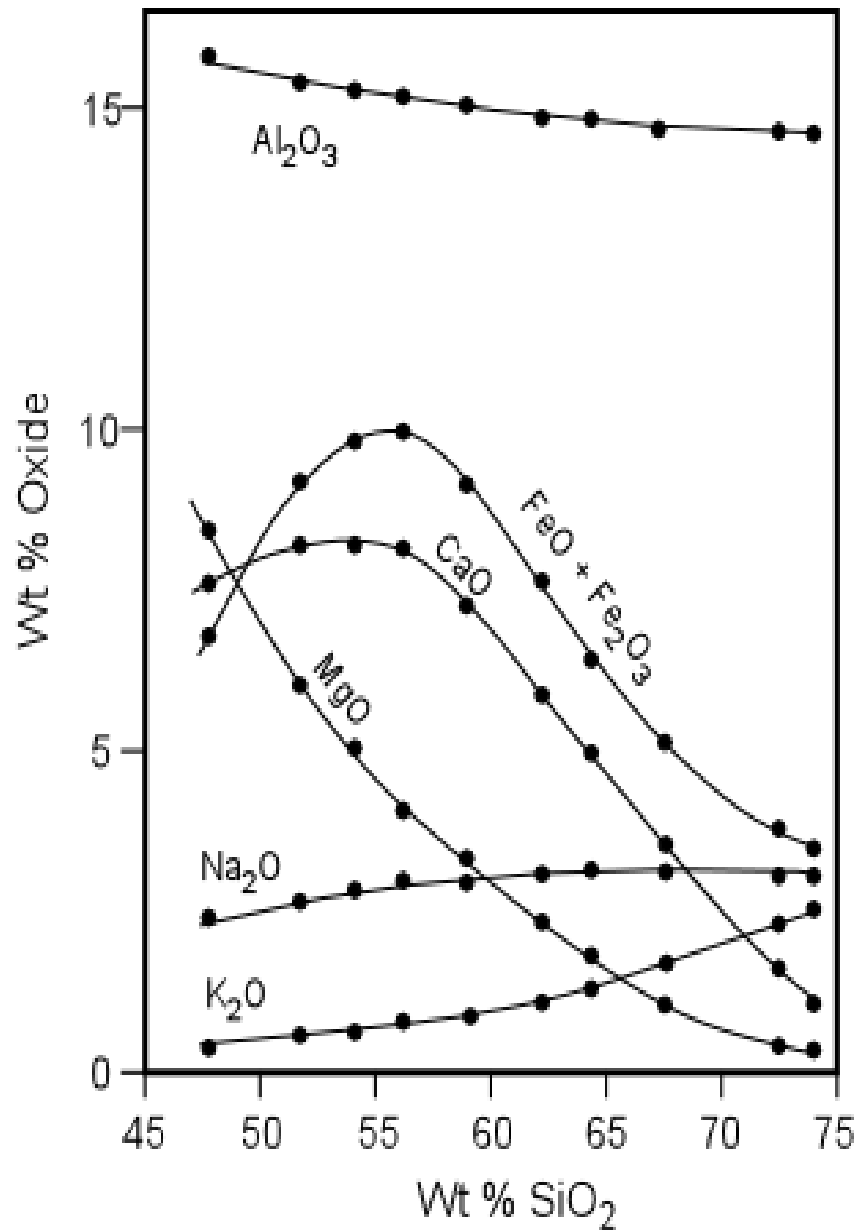
– Ve většině hornin nízké obsahy pod detekčním limitem



- 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:

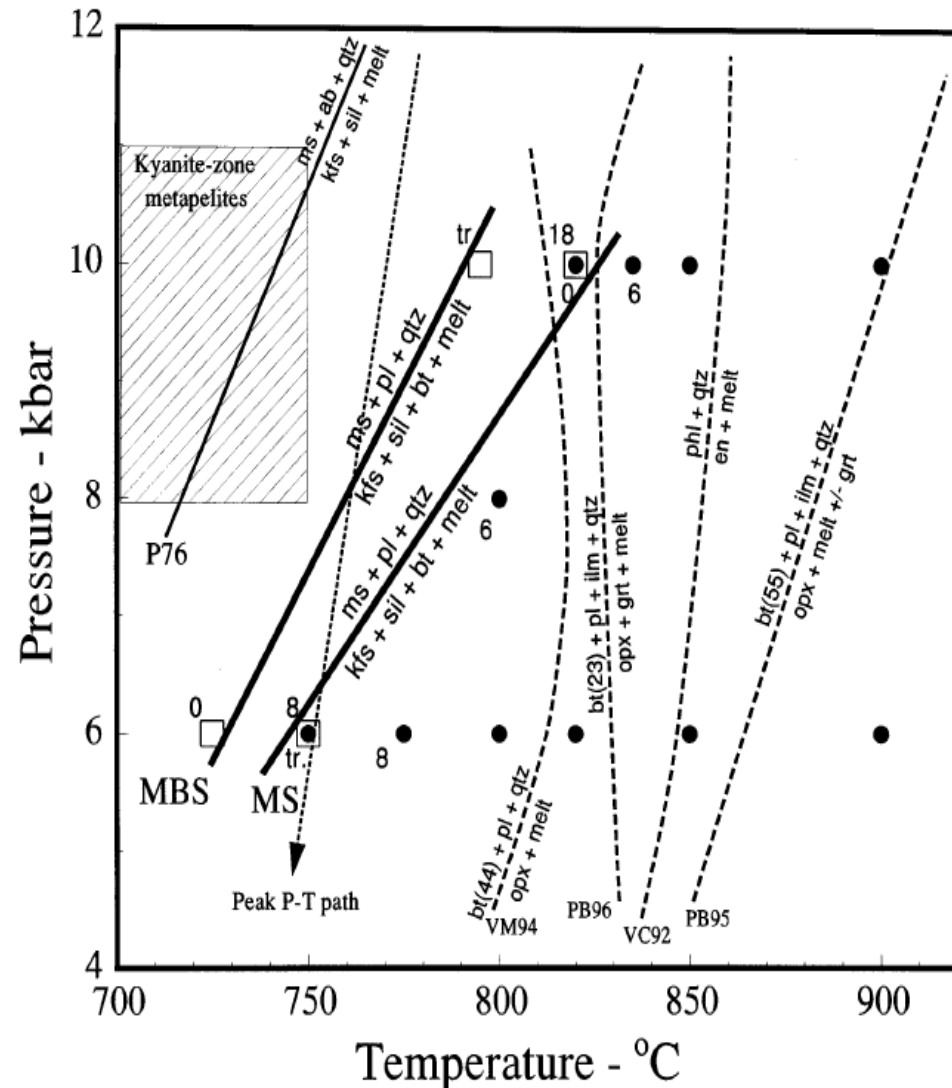
- složení zdrojových hornin
- většina tavenin, které vznikají v kontinentální kůře mají granitové až tonalitové složení
- důležité jsou PT podmínky během tavení
- množství fluidní fáze a její složení (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, F, Cl)

### Složení taveniny během pokračujícího tavení:

- tavení rovnovážné nebo nerovnovážné
- tavení frakční
- s narůstajícím stupněm tavení tavenina odnáší snadno tavitelných prvků jako je Na, K a LILE
- 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  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  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)

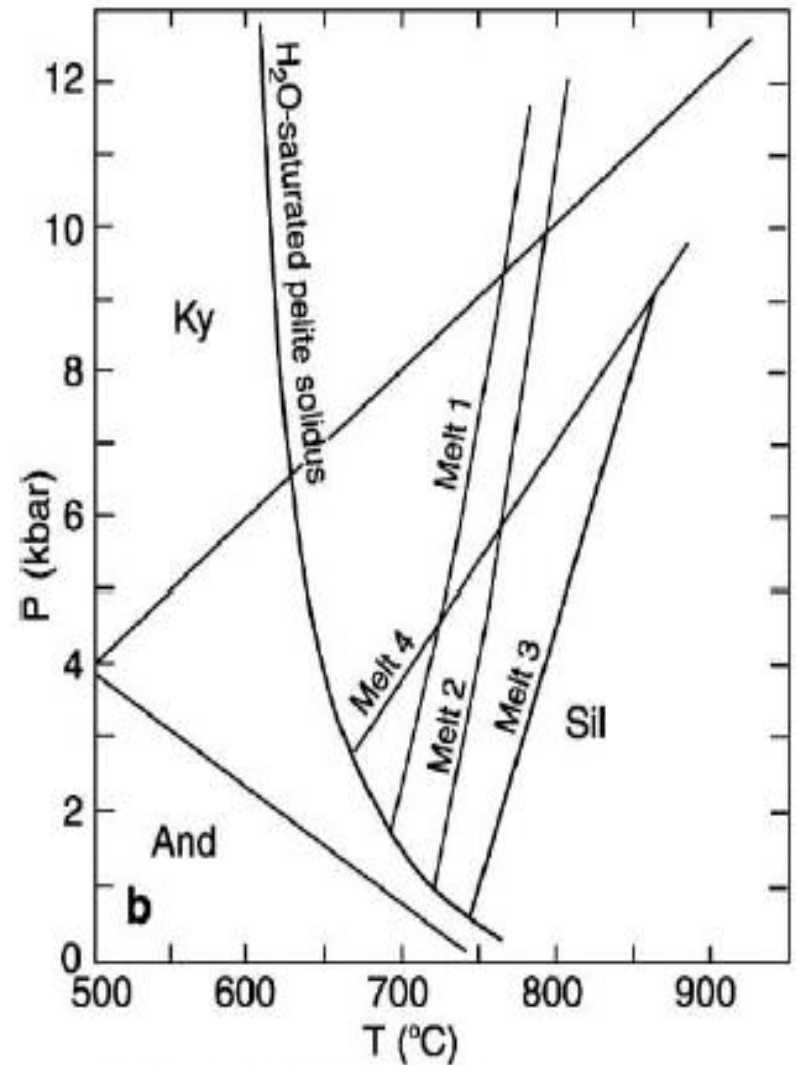
## IV. 2. Význam chemického složení peraluminických granitů pro identifikaci jejich geneze

- 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 ztlustění kontinentální kůry.
- Tyto granity tvoří drobná intrusivní tělesa v středně nebo silně metamorfovaných orogenních páslech.
- 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

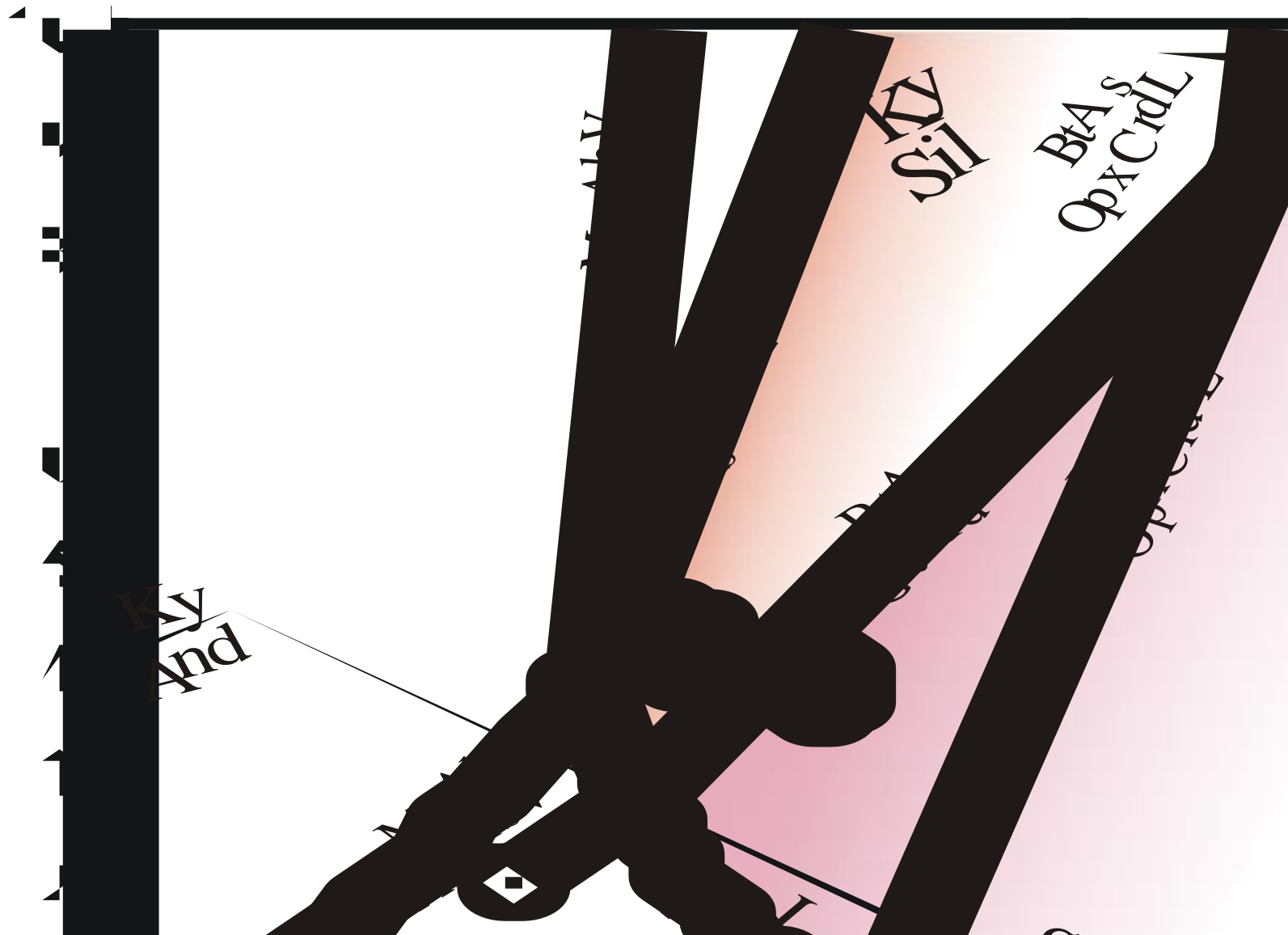
Melt 1: Ms + Pl + Qtz = Kfs + Sil + Bt + L

Melt 2: Bt + Ab + Sil + Qtz = Grt + Kfs + L

Melt 3: Bt + Pl + Qtz = Opx + Kfs + L

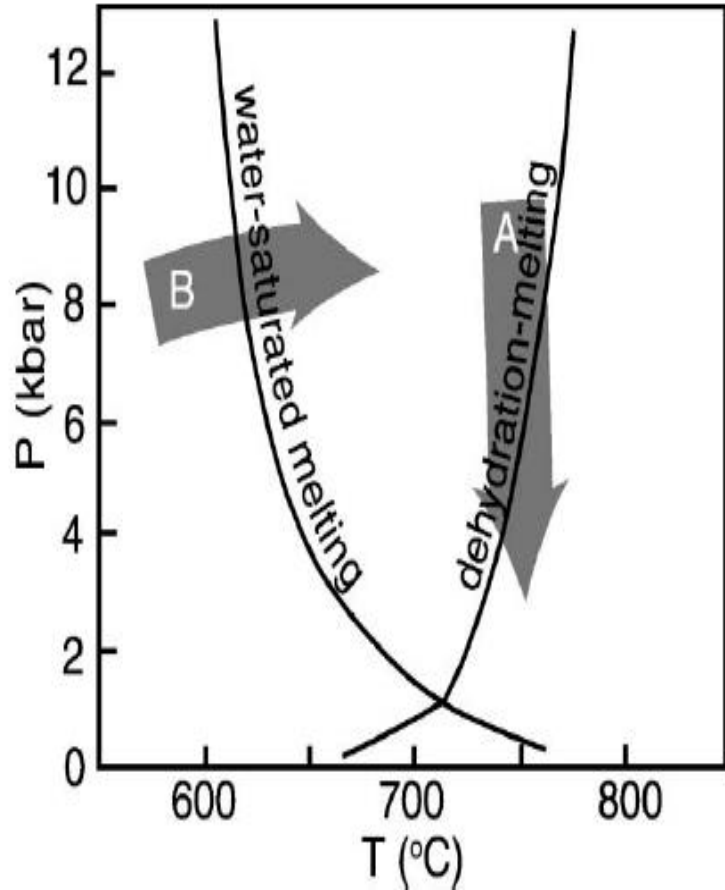
Melt 4: Bt + Sil = Grt + Crd + L

Pressure (k bar)



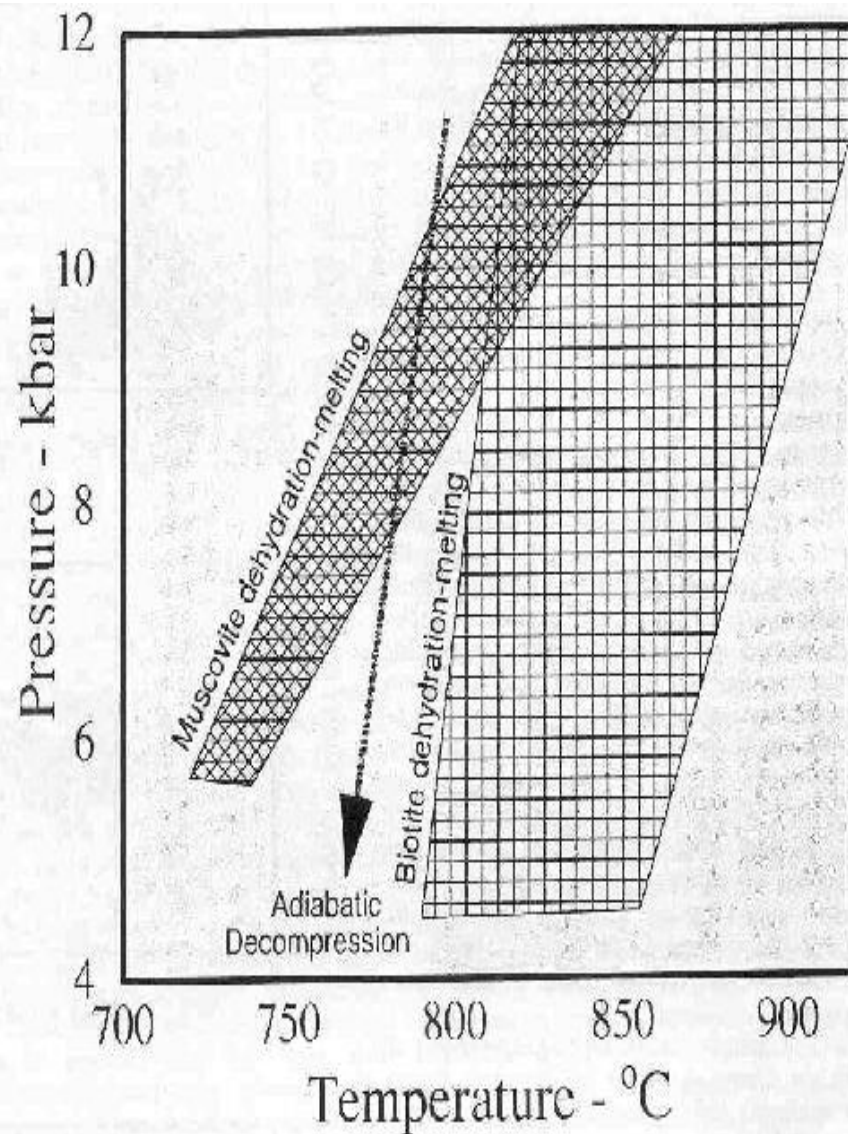
PT diagram (upraveno podle Spear et al., 1999) znázorňující vybrané reakce v systému KFMASH včetně dvou hlavních dehydratačních reakcí rozpadu muskovitu a biotitu. Číslo označuje pole, v němž jsou taveniny vzniklé dehydratačním tavením biotitu (4) a muskovitu (2) stabilní.

- 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)

- vzniká malé množství taveniny

- s „nízkou“ teplotou ( $\leq 875\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

- vznik bývá spojován post-kolizním výzdvihem ztluštěné kontinentální kůry ( $> 50\text{ km}$ )

- proces je provázen dekompresním tavením kůry prohřáté teplem dodaným radioaktivním rozpadem (K, U, Th)

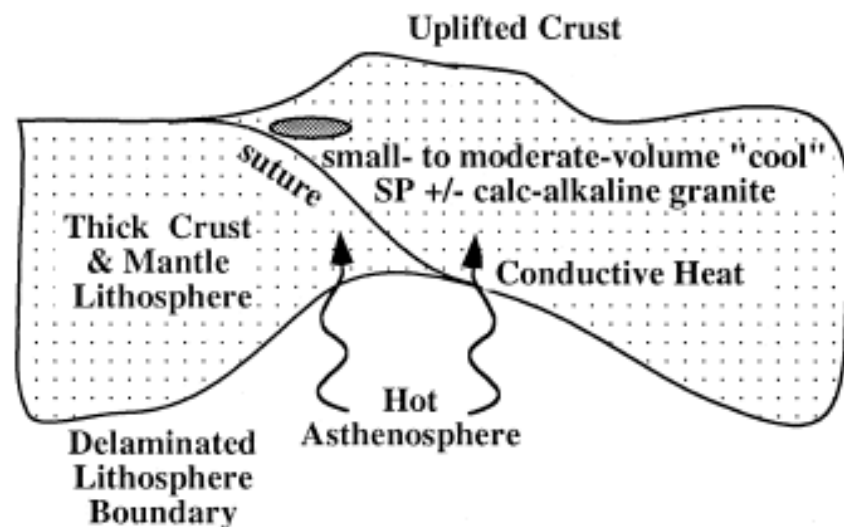
- 2) PPG vázané na vysoce teplotní kolizi (Hercynský orogen)

- vzniká v kontinentální kůře o běžné tloušťce ( $\leq 50\text{ km}$ )

- velký objem „horkého“ magmatu ( $\geq 875\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

- díky přínosu tepla z pláště

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



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

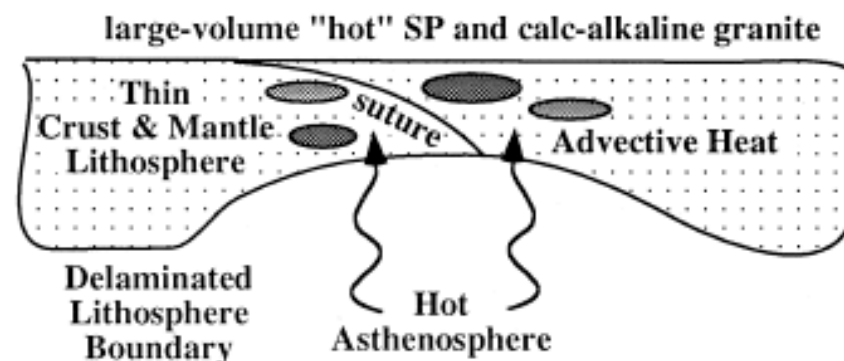
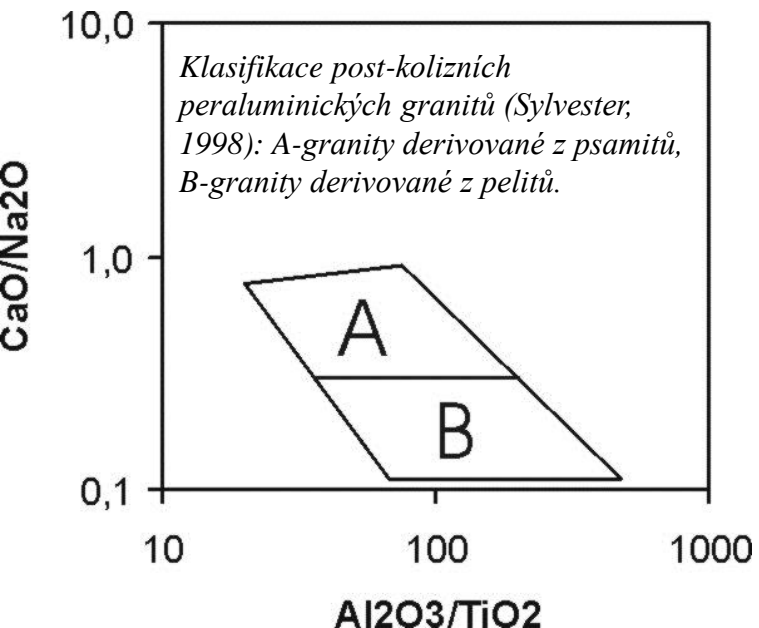
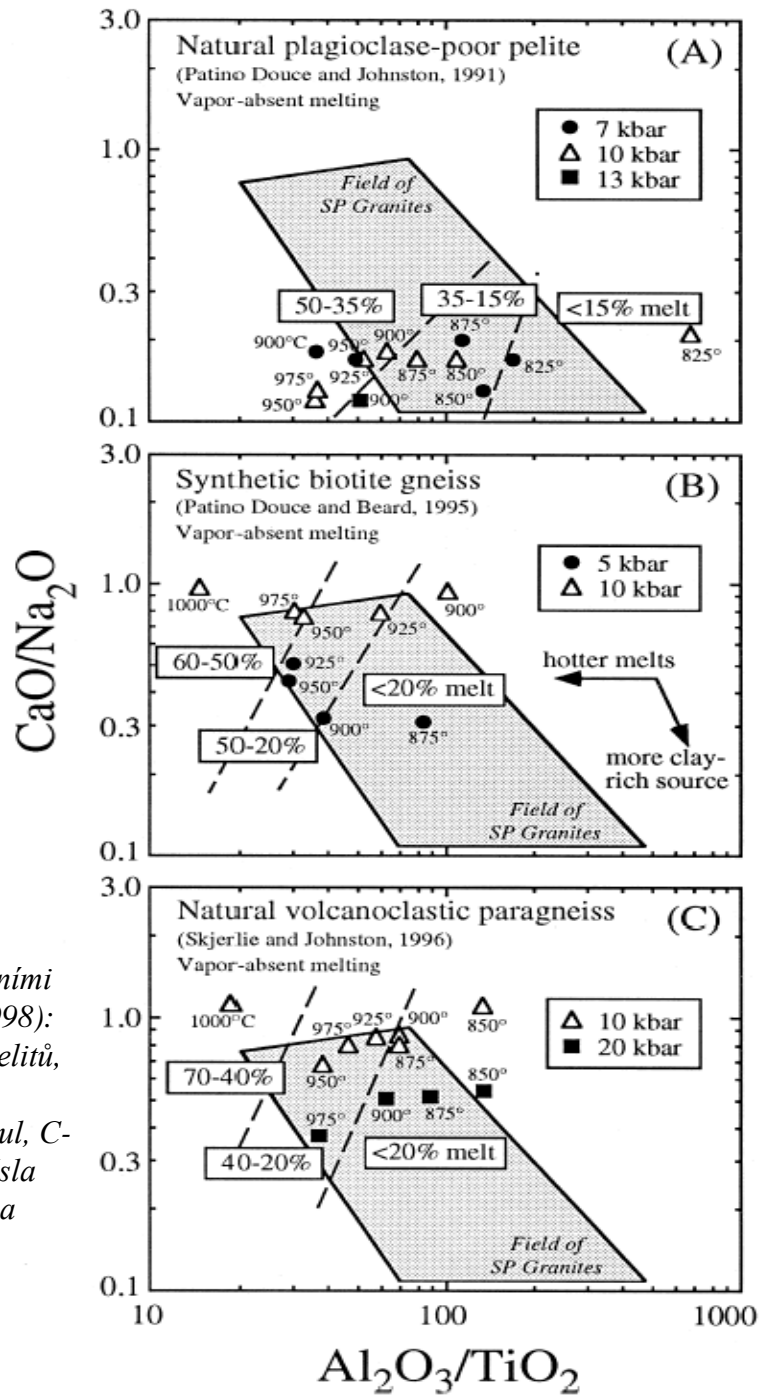


Fig. 1. Schematic representation of the generation of post-collisional SP granites in (A) thick, high-pressure orogens, and (B) thin, high-temperature orogens. Not drawn to scale. Intermediate cases would be likely where crustal thicknesses on opposing sides of the suture differed significantly.

- poměry některých hlavních oxidů nám mohou hodně říci o původu a genezi leukogranitů
- post-kolizní peraluminické granity (PPG) s nízkým poměrem  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  ( $< 0,3$ ) byly derivovány z pelitického materiálu
- granity s poměrem  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  vyšším než 0,3 vznikly z materiálu psamitického
- 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.*





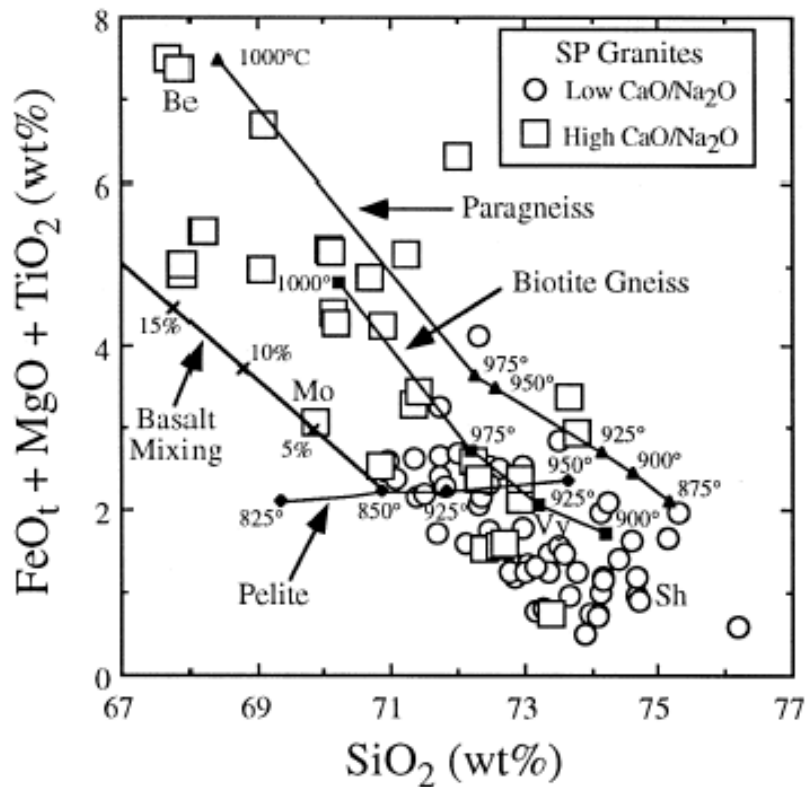


Fig. 6.  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{FeO}_t + \text{MgO} + \text{TiO}_2$  (wt.%) for low ( $< 0.3$ ) and high ( $> 0.3$ )  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ , post-collisional SP granite intrusions (data sources as in Fig. 2), compared to experimental vapor-absent 10 kbar melts of natural pelite (Patiño 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.

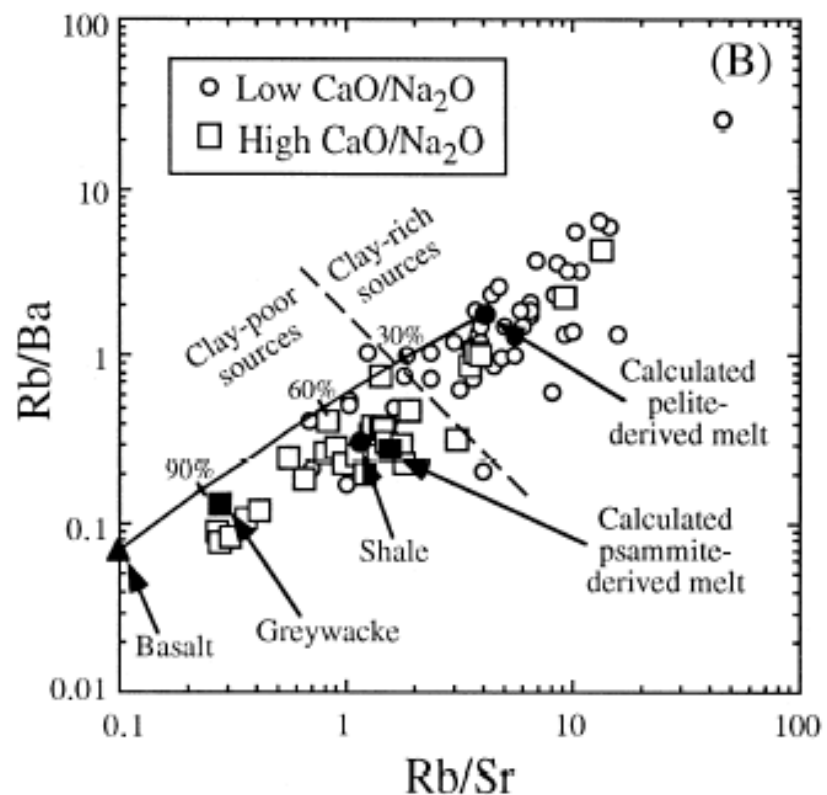
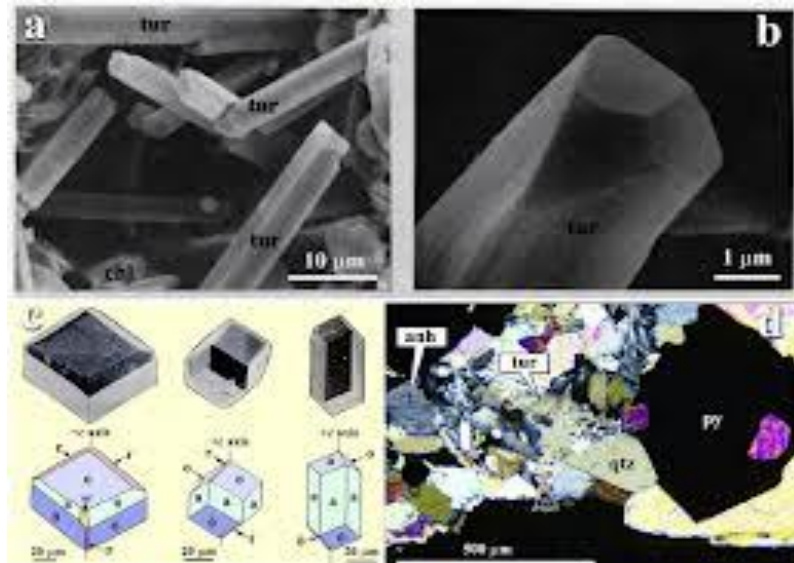


Fig. 7. Rb/Sr and Rb/Ba ratios for post-collisional SP granite intrusions subdivided on the basis of (A) orogen and (B) low ( $< 0.3$ ) and high ( $> 0.3$ )  $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$  ratio. Data sources as in Fig. 2. End-member intrusions labelled as in Fig. 3, except Moschumandl, for which 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)
- 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.
- hlavním zdrojem B v metapelitech je často turmalín
- turmalín je stabilní v širokém rozmezí PT podmínek
- k jeho tavení dochází až ve vyšších stupních amfibolitové facie

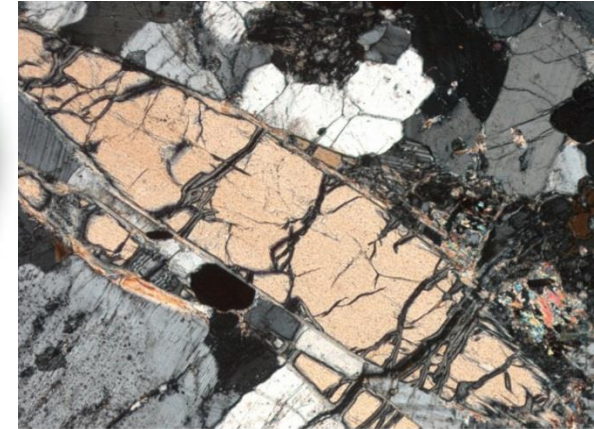


- ostatní borosilikáty jsou rozšířeny daleko méně a nemají proto jako zdroj B pro granity tak velký význam:
- v metapelitech a granulitech:
- dumortierit:  $\text{Al}_7(\text{BO}_3)(\text{SiO}_4)_3\text{O}_3$  či korerupin:  $\text{Mg}_4\text{Al}_6[(\text{BO}_4)(\text{SiO}_4)_4(\text{O},\text{OH})_2]$ .

dumortierit



korerupin



width 2.2 mm

© Potsdam University

- v mramorech bohatých na silikáty a vápenatosilikátových horninách:
- 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:  $\text{CaB}(\text{SiO}_4)(\text{OH})$ .

axinit



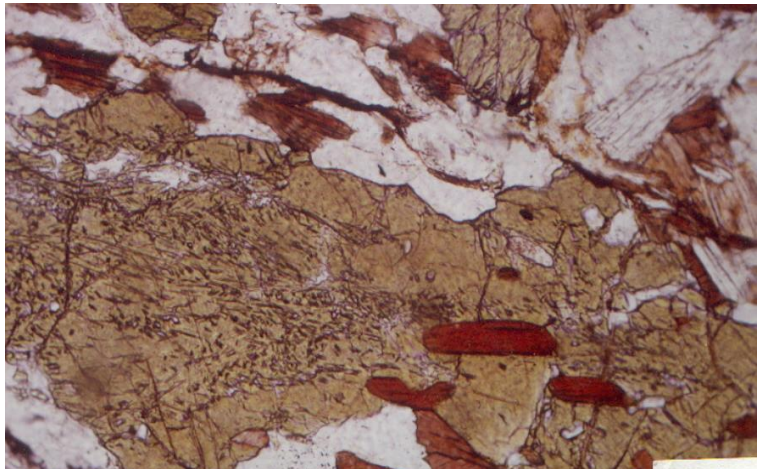
## IV. 4. Zdroje bóru při anatexi metapelitů

- Turmalín je nejběžnějším borosilikátem v metamorfitech
- zůstává stabilní až do podmínek amfibolitové facie (Henry a Dutrow, 1996)
- tlaku 5kbar je dravit v přítomnosti bórem bohatých fluid stabilní do 900 °C
- dravit bez alkálií je za stejných podmínek stabilní do 830 °C (Schreyer a Werding 1997)
- 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)
- 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 et 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)

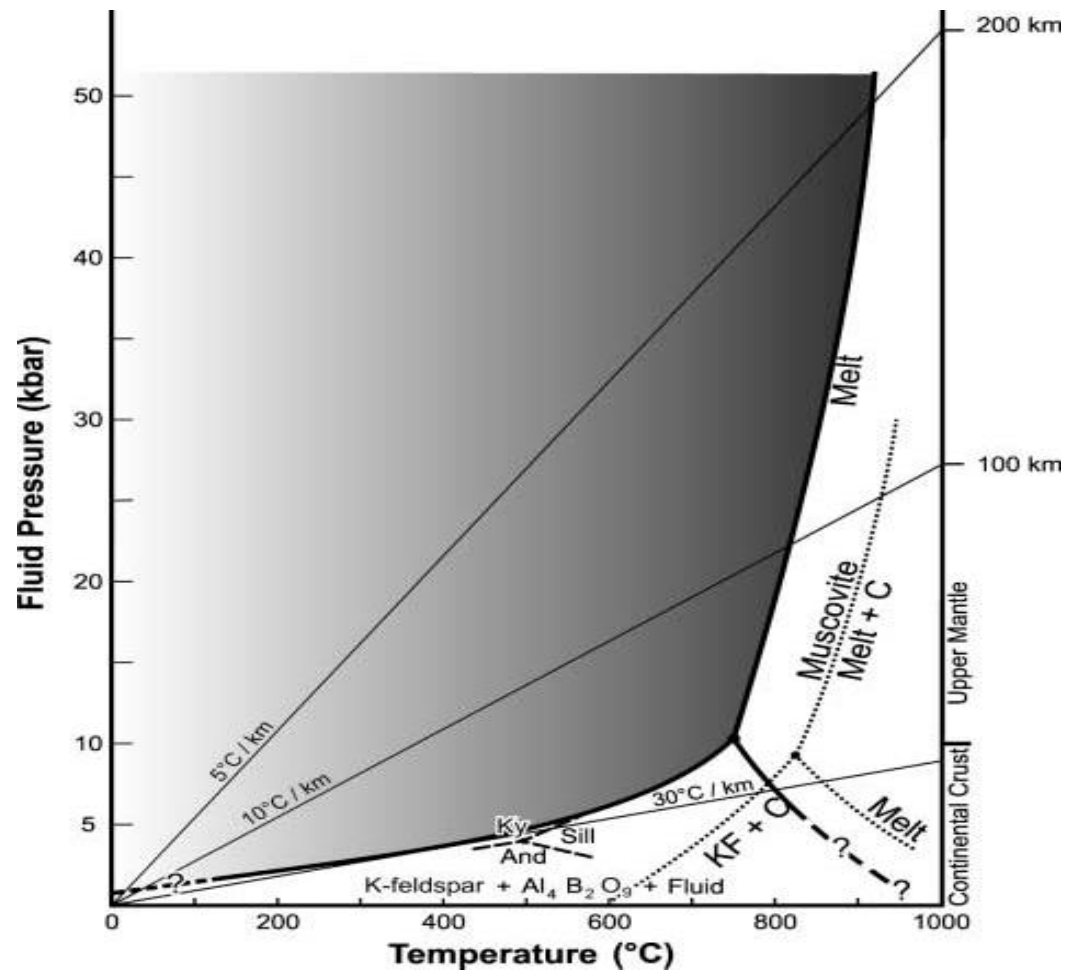


Tu ve svorech Grt-St

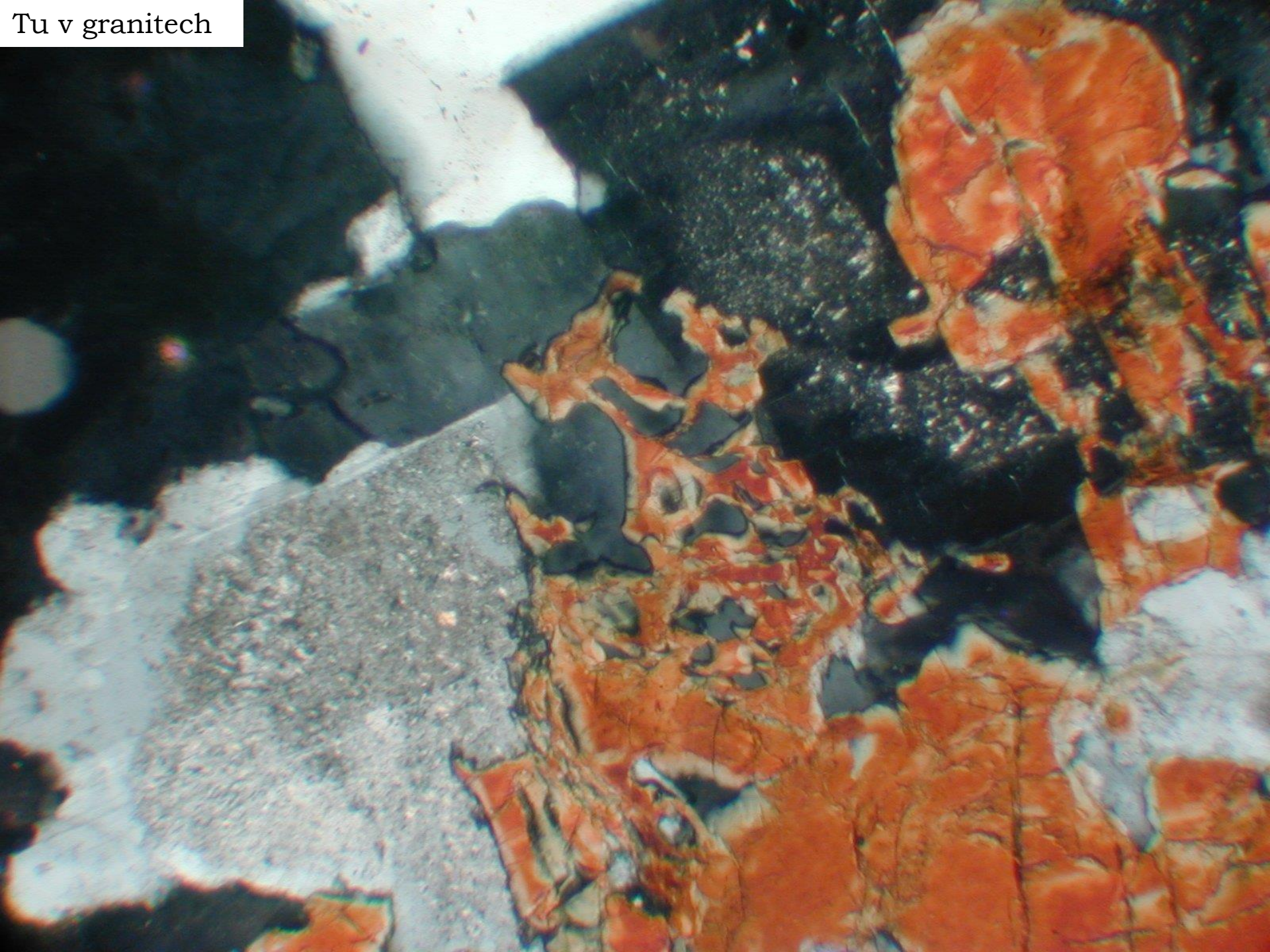


Tu v rulách Grt-Sill

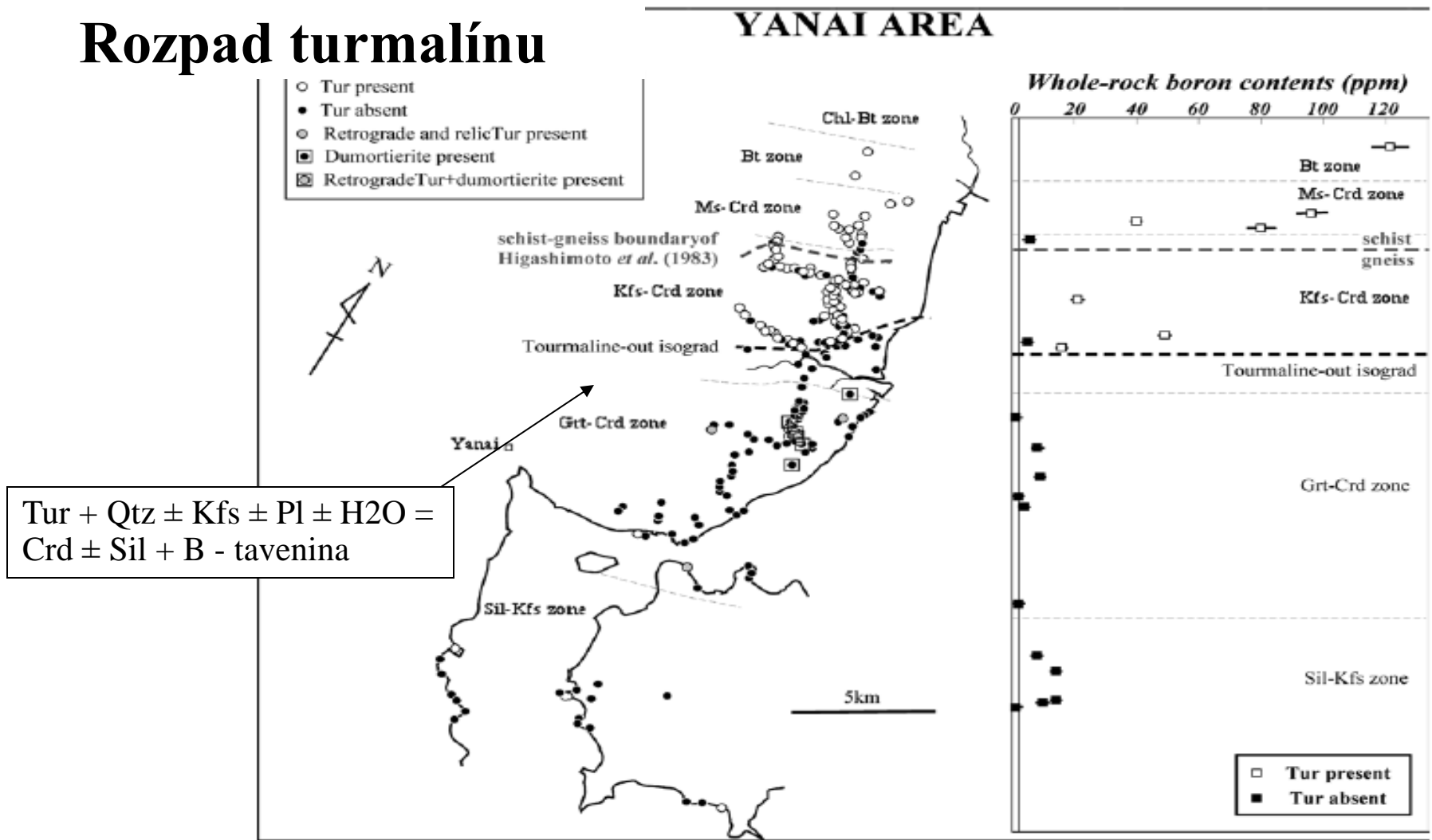
stabilita boromuskovitu **Jung – Schreyer (2002)**



Tu v granitech

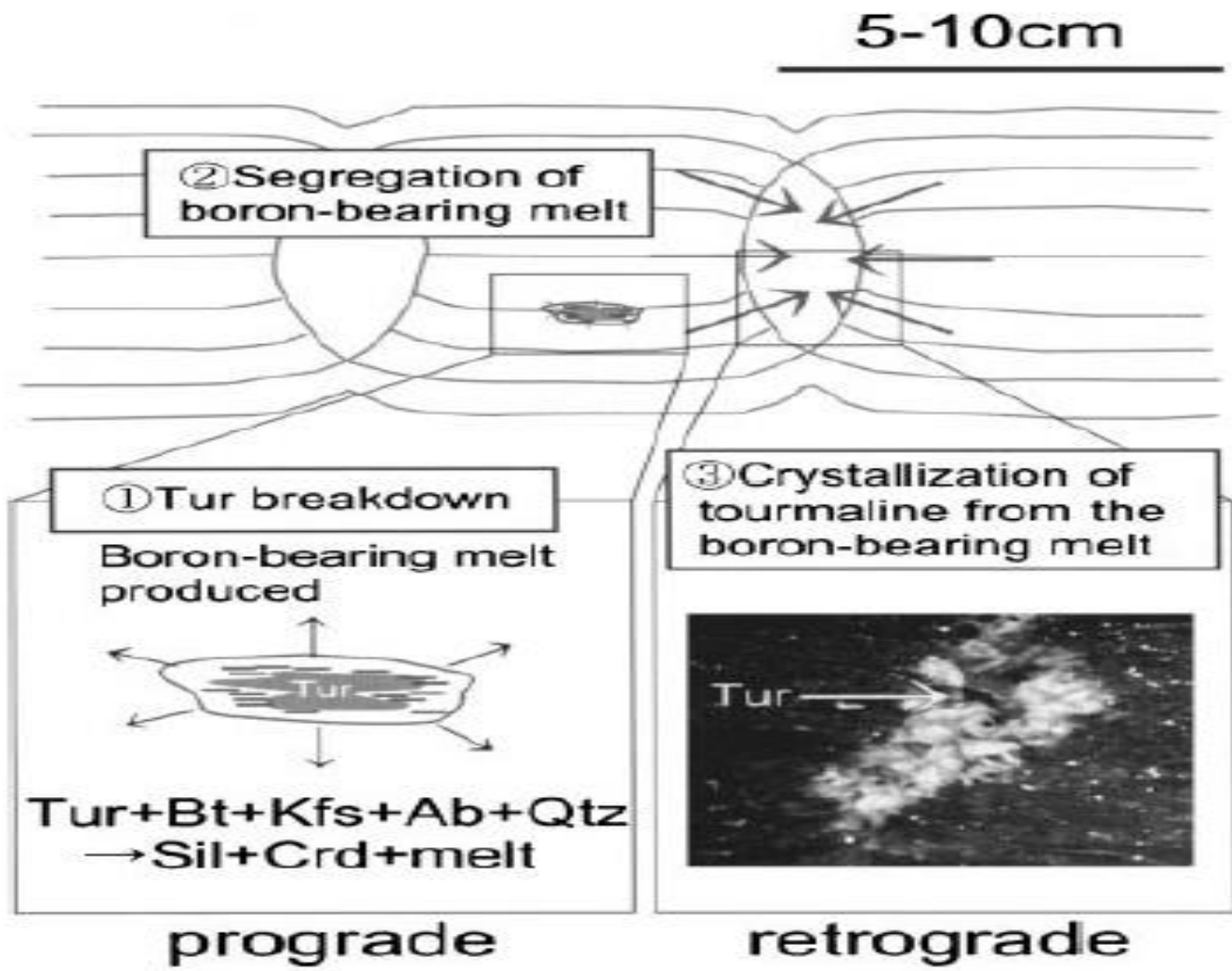


# Rozpad turmalínu



- 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. Retrográdní dumortierity a turmalíny krystalují z B bohatých fluid které vznikly v důsledku krystalizace B bohaté taveniny.

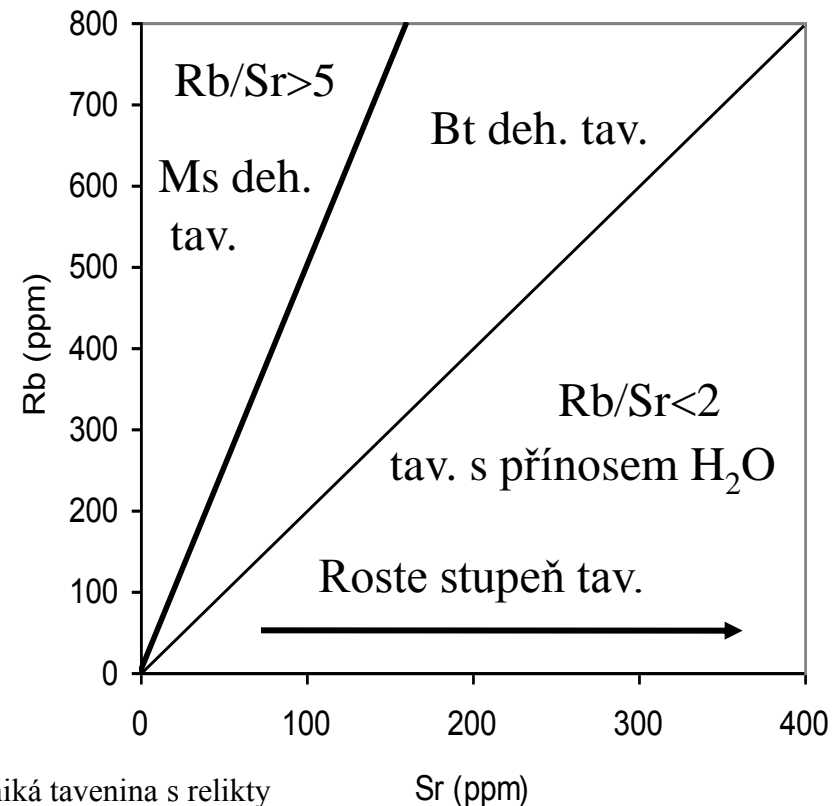
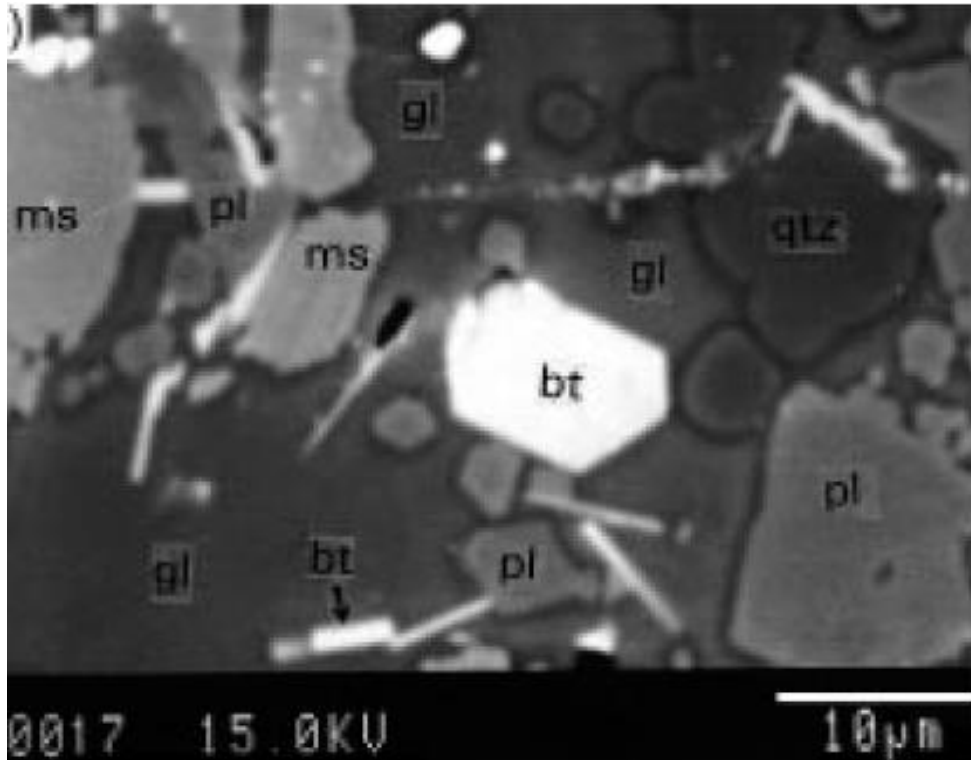
- Absence turmalínu v migmatitové zóně souvisí s rozpadem tohoto minerálů a přechodem B do taveniny (**Kawakami, 2001**).
- K rozpadu turmalínu dojde v důsledku dehydratačních reakcí (**Kawakami, 2001**).
- B uvolněný těmito reakcemi ovlivňuje mobilitu taveniny – viskozitu, a teplotu solidu taveniny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





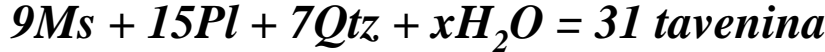
## IV. 5. Dehydratační tavení nebo přínos fluid?

- 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.

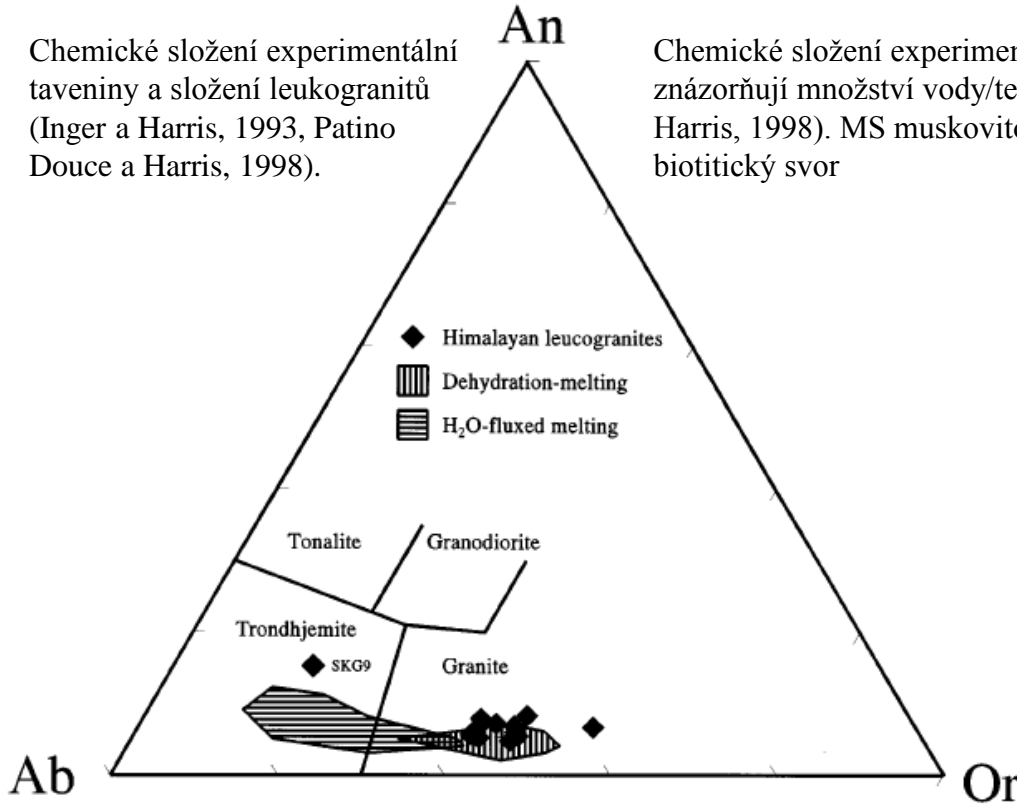


BSE obrázek výsledku experimentu tavení s 2% H<sub>2</sub>O (MS): 6kbar a 750 °C vzniká tavenina s relikty Ms, Pl, Qtz a chybí typické struktury pro dehydratační tavení (Patino Douce a Harris, 1998).

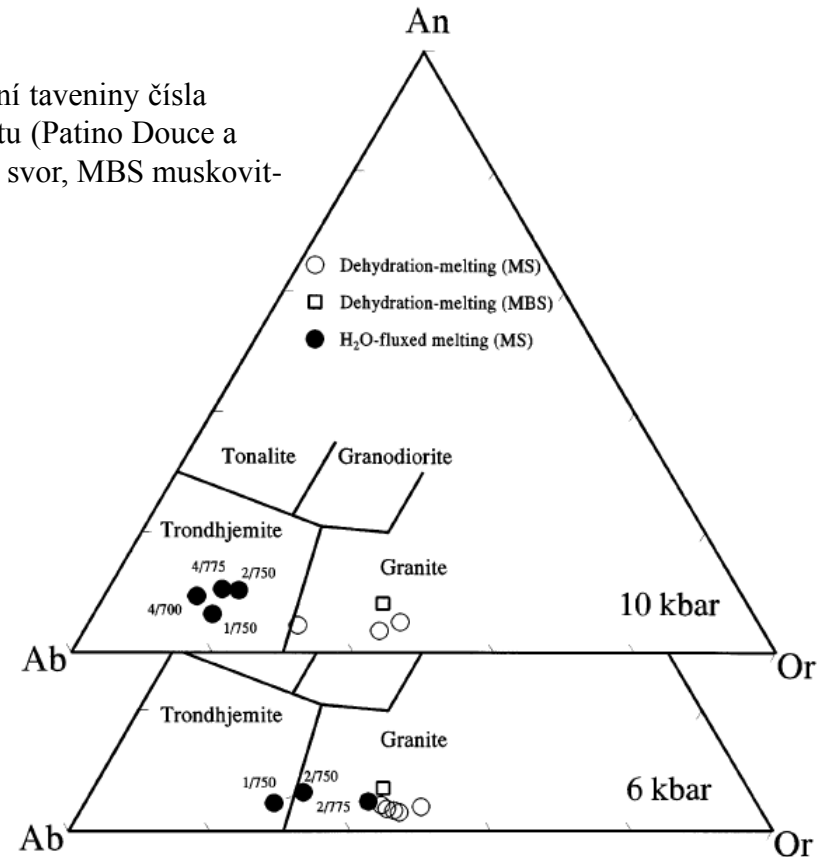
- Také obsahy hlavních oxidů v tavenině jsou odlišné.
- Při dehydratačním tavení muskovitu (při 6, 8 a 10 kbarech) vzniká tavenina odpovídající svým chemickým složením peraluminickým leukogranitům, ale tavením metapelitů za přítomnosti H<sub>2</sub>O vzniká magma trondhjemitického složení (Patino-Douce 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:



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

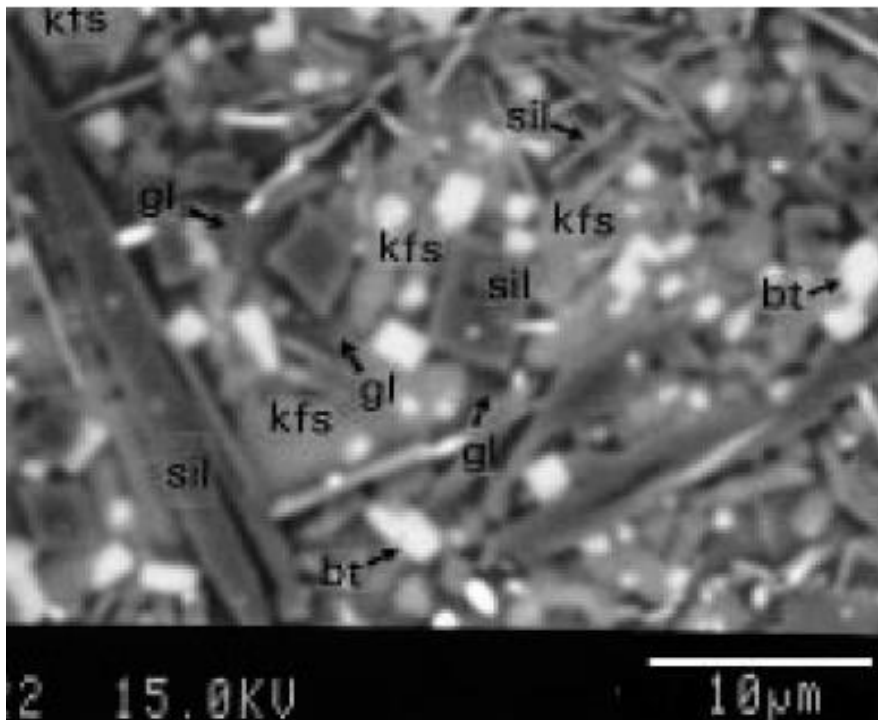


Chemické složení experimentální taveniny čísla znázorňují množství vody/teplotu (Patino Douce a Harris, 1998). MS muskovitový svor, MBS muskovit-biotitický svor

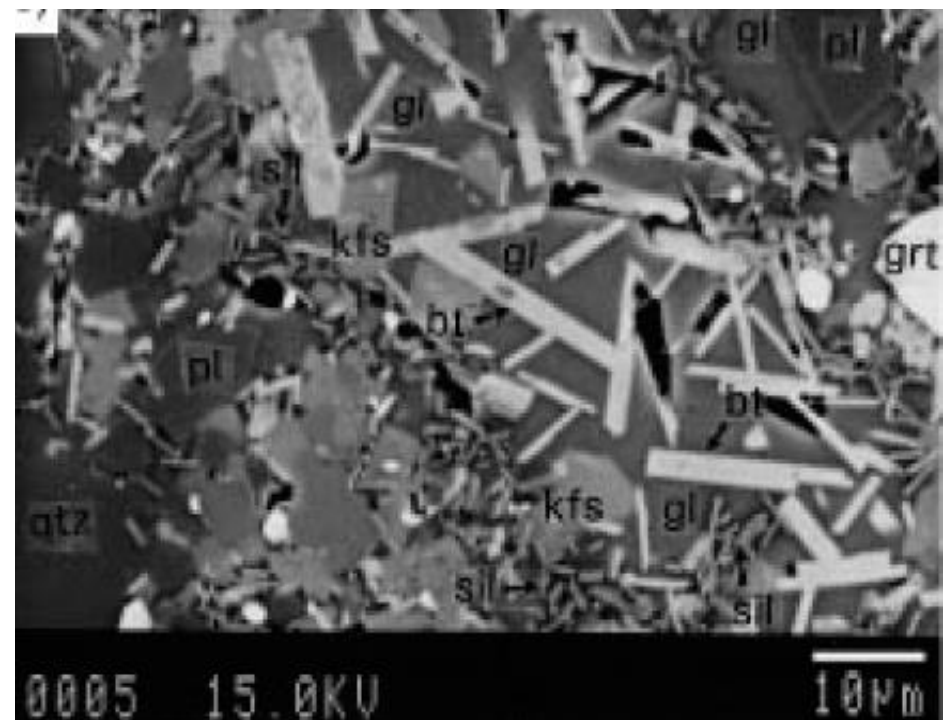


## A. Dehydratační tavení muskovitu

- 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).

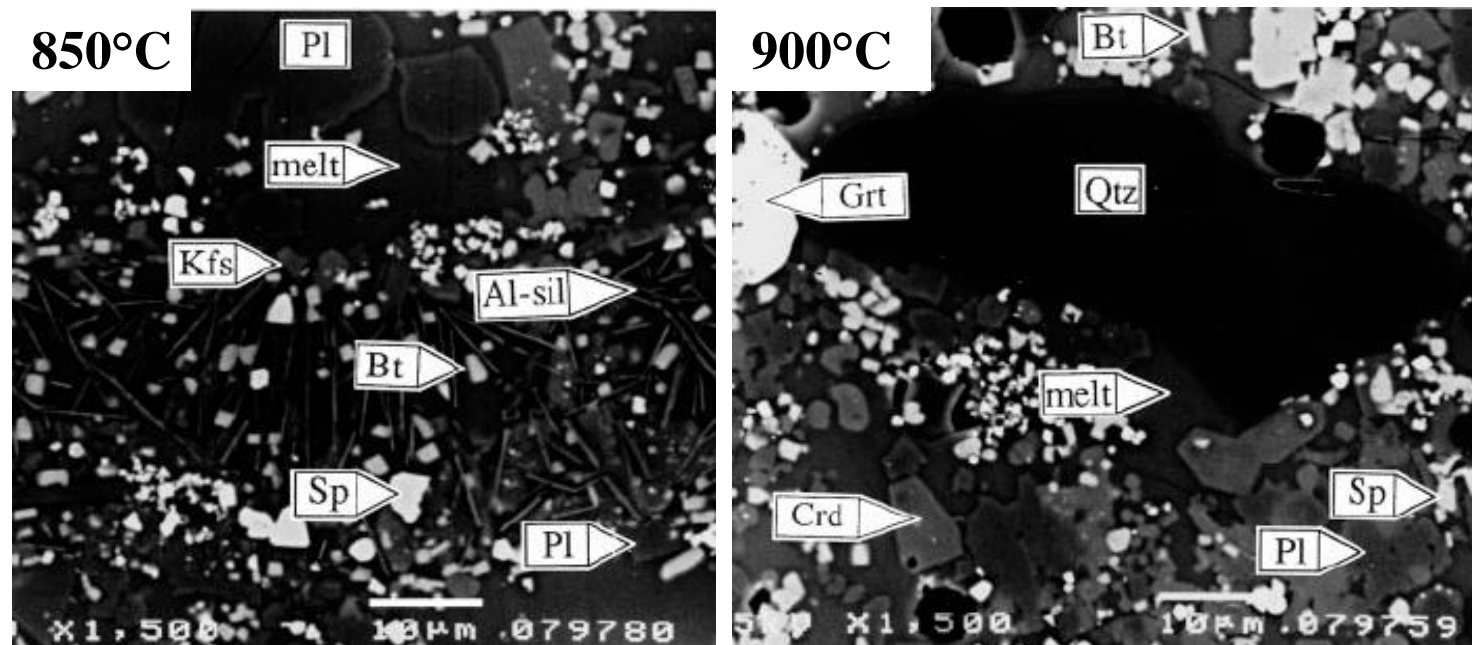
## B. Dehydratační tavení biotitu

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).

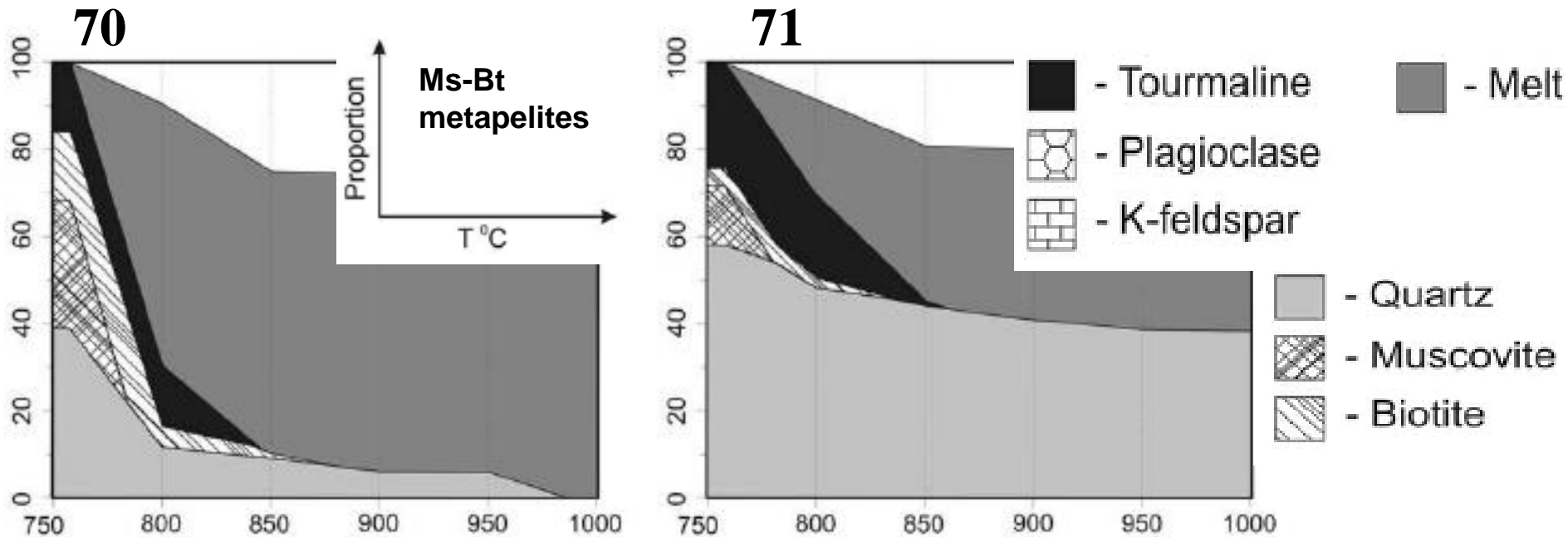
Tavenina bývá obohacena Ti, protože tento prvek je v biotitu zastoupen podstatně více než v muskovitu (Nabelek a Glascock, 1995).

Oproti tavenině vzniklé dehydratačním tavením muskovitu bude mít tato tavenina nižší obsahy Rb a naopak vyšší obsahy Sr a Ba.



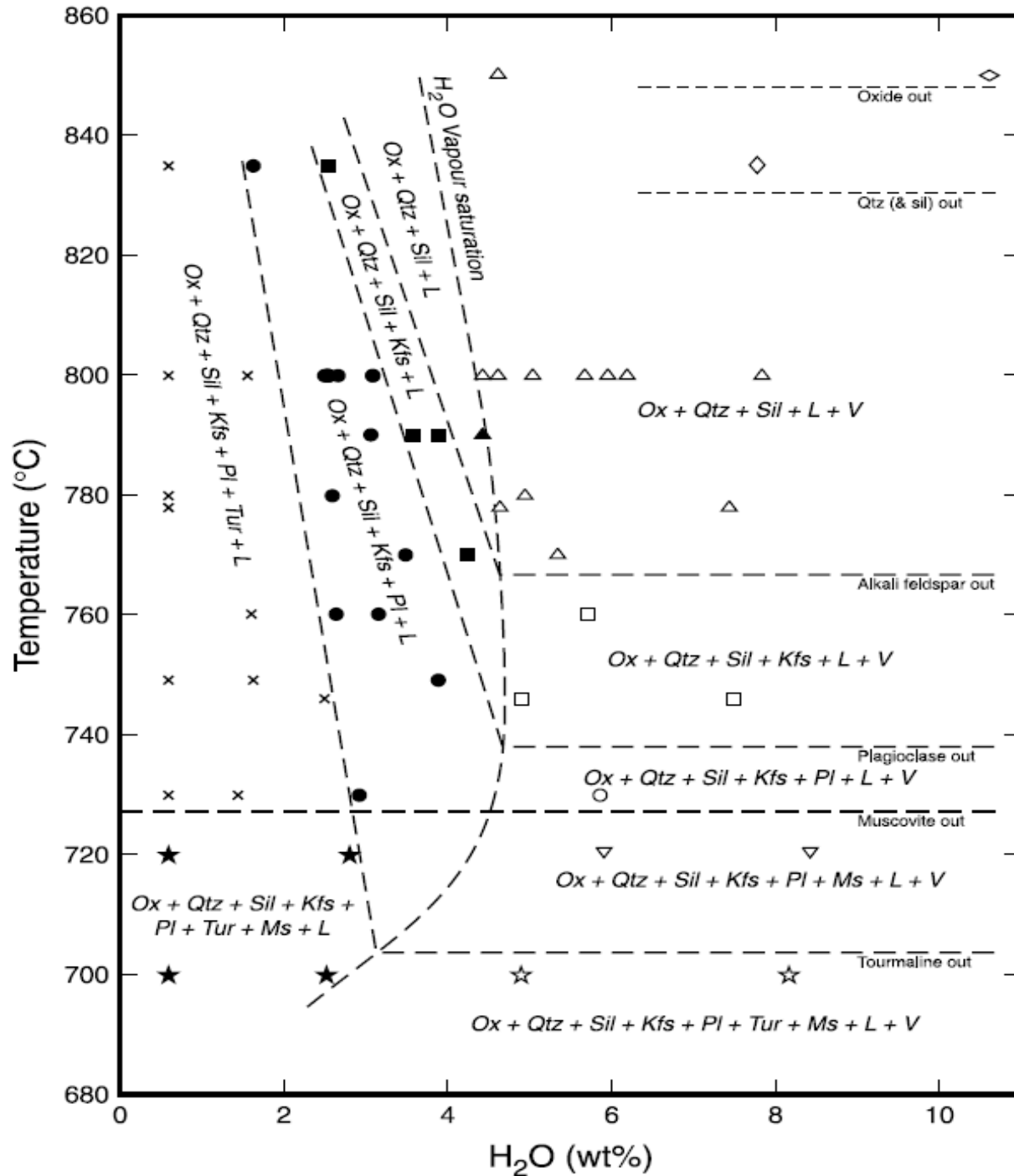
BSE obrázek výsledku experimentu Bt dehydratačního tavení: 6kbar. (Castro et al., 2000).

- Mezi 750 and 800 °C, mizí kompletně muskovit v důsledku dehydratačního tavení Ms+Bt (Spicer – Stevens – Buick, 2004)
- $18.8\text{Qtz} + \text{Bt} + 4\text{Ms} + 0.3\text{Tur} = 8\text{Melt} + 1.6\text{Spl} + 0.5\text{Crd}$
- 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).

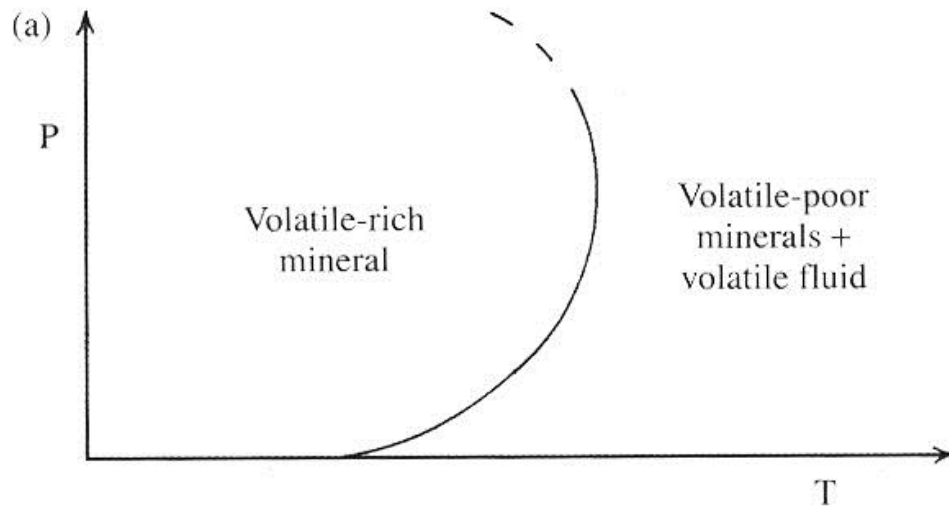


Phase proportions in the run products expressed as a function of temperature (EXPERIMENTS). A Melt proportions relative to those of the principle reactant minerals in the four samples. This highlights the relatively low temperature production in the two mica metapelites between 850 and 900C, and the 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)

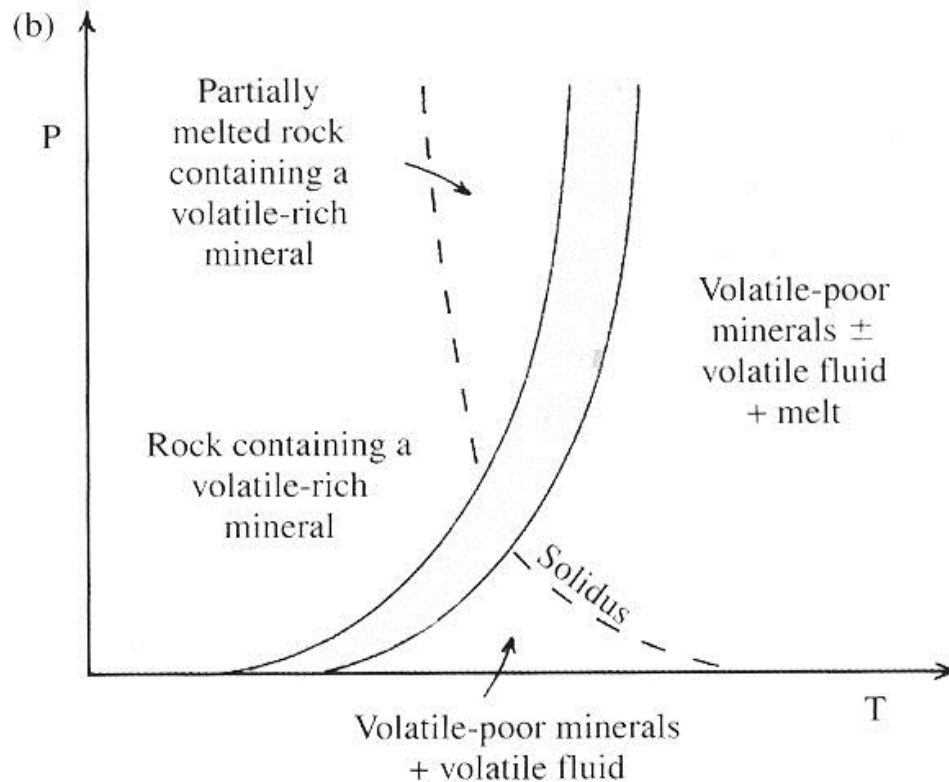


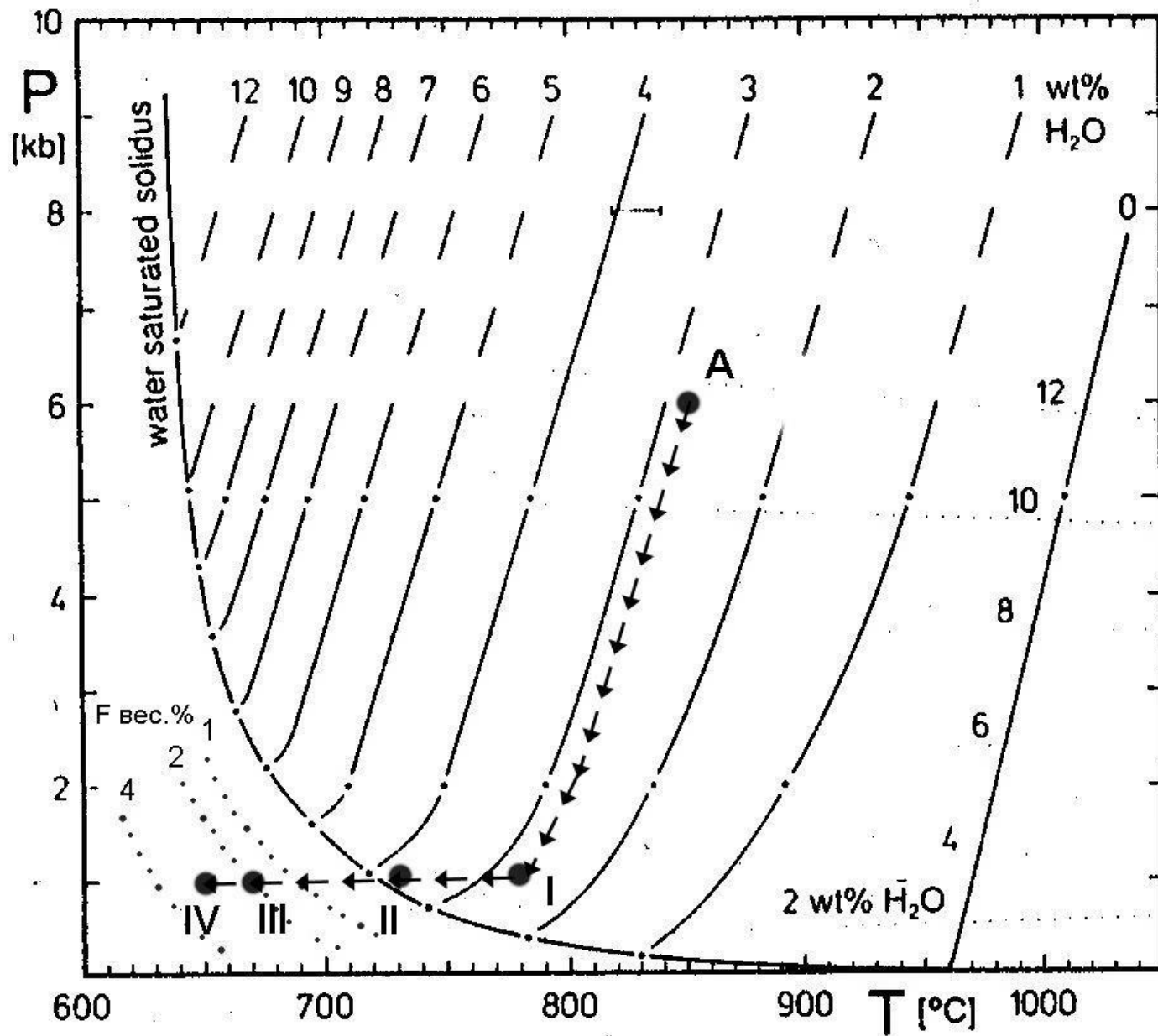
1) termální energie + minerál bohatý H<sub>2</sub>O = minerál bez H<sub>2</sub>O nebo chudý H<sub>2</sub>O + H<sub>2</sub>O fluida

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

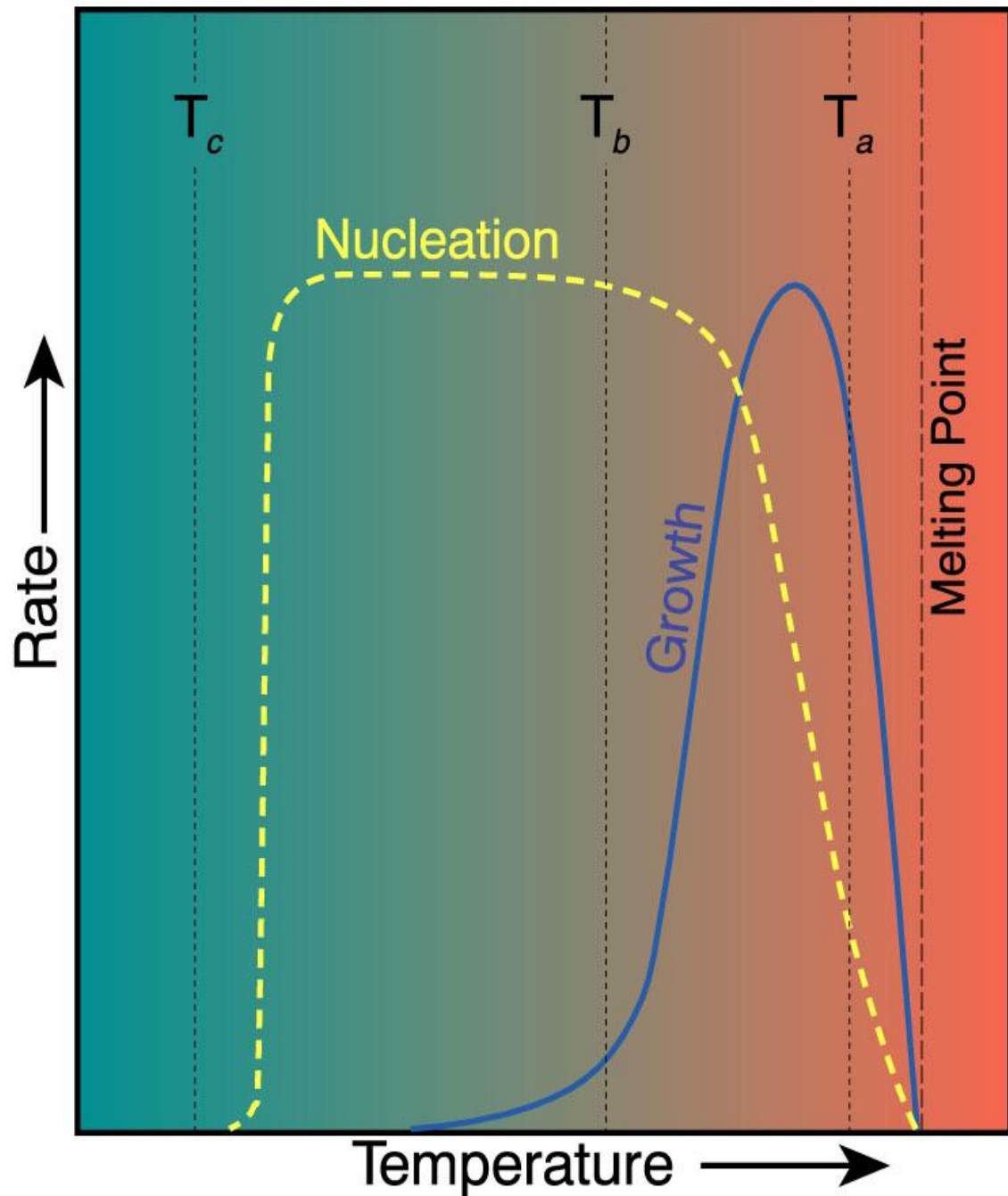




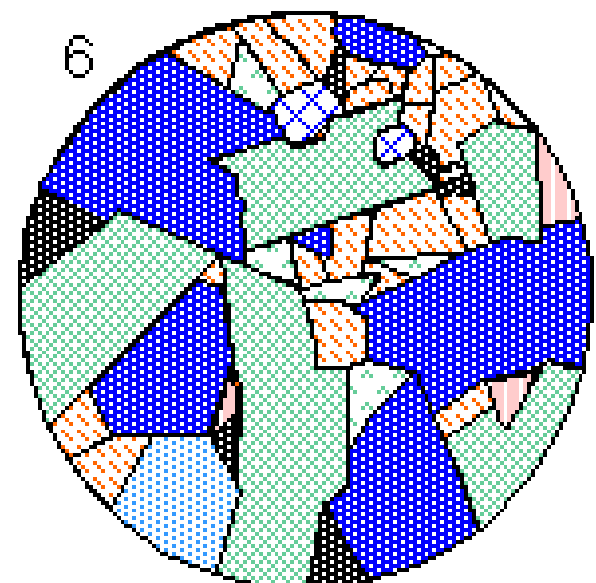
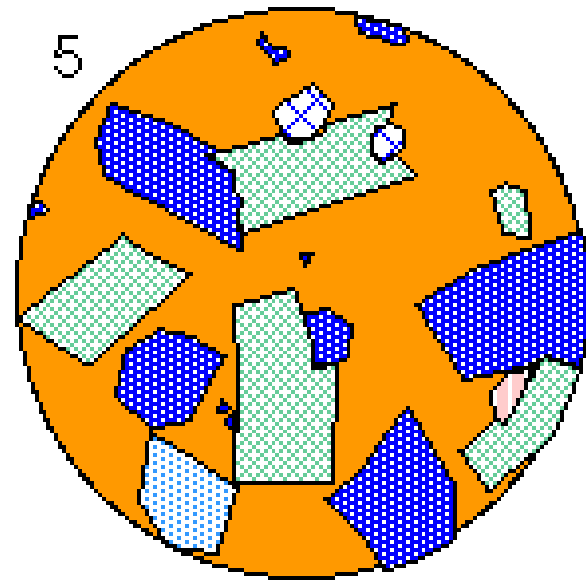
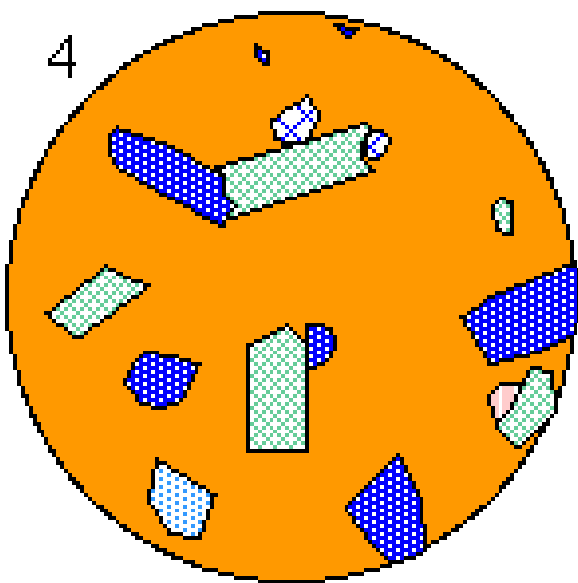
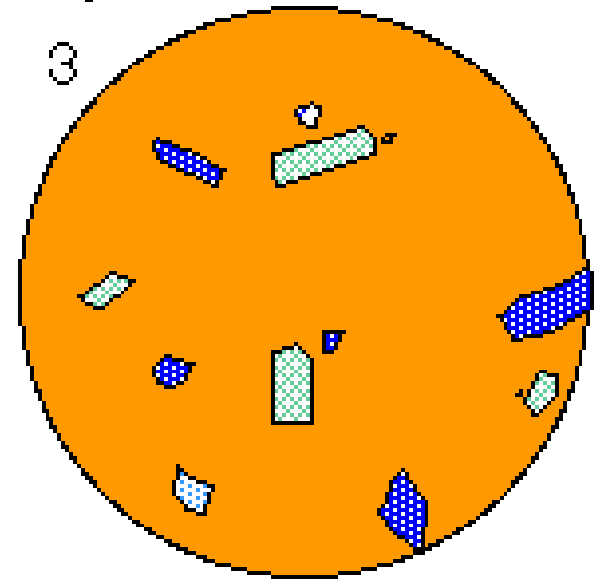
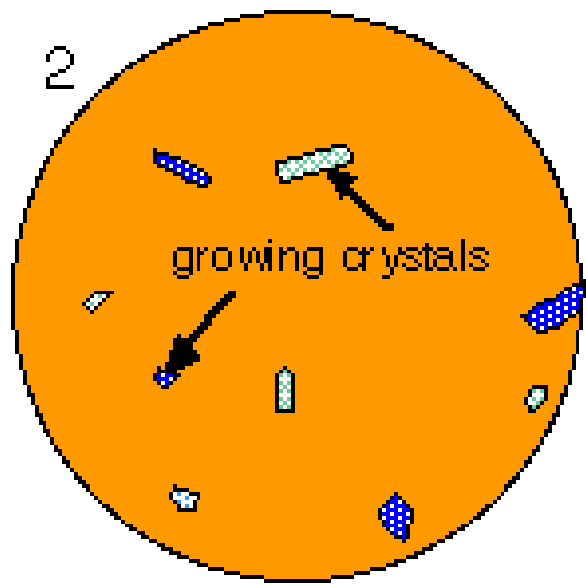
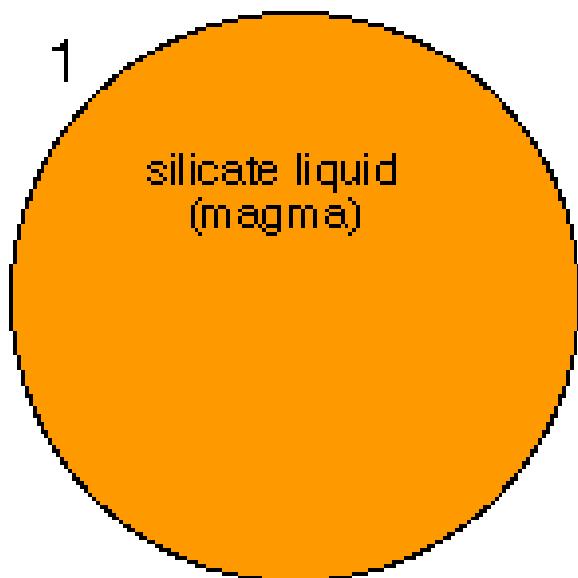
Zharikov V.A.,  
 Epelbaum M.B.,  
 Zraisky G.P., Simakin  
 A.G., Balashov V.N.  
 Numerical modeling of  
 heat- and mass-transfer  
 at greisen deposit  
 Akhcatau // Outlines  
 of physico-chemical  
 petrology. Moscow:  
 Nauka, 1988. V.15. P.38-  
 69 (in Russian).



- 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

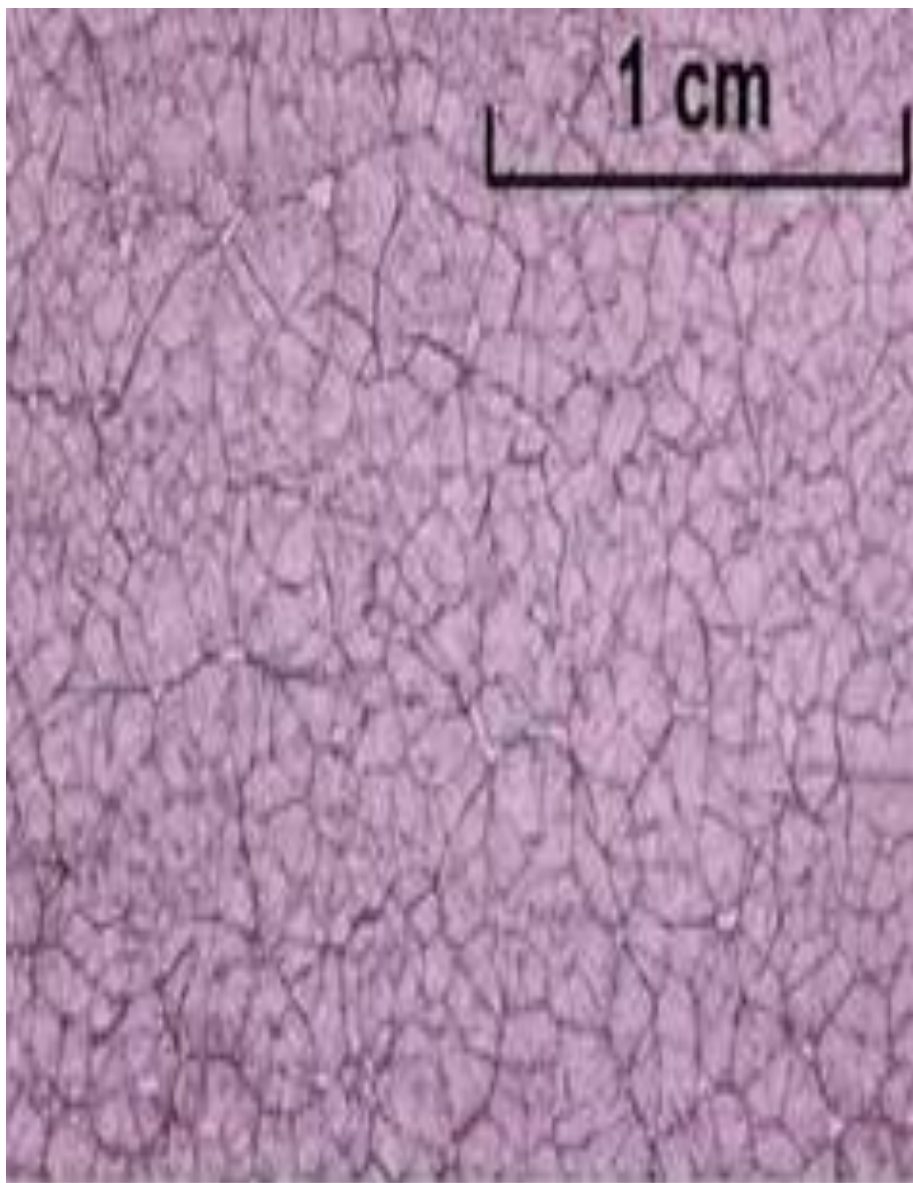


cooling and crystallizing →

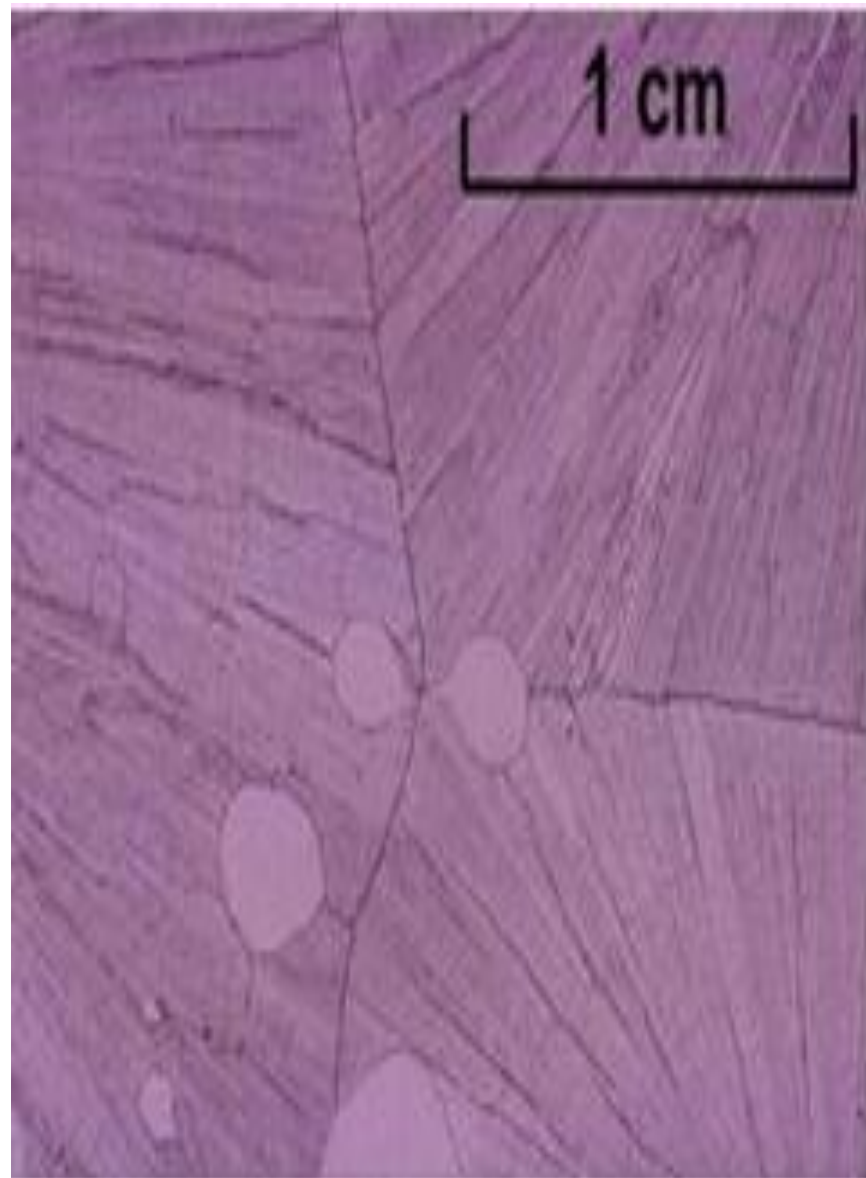


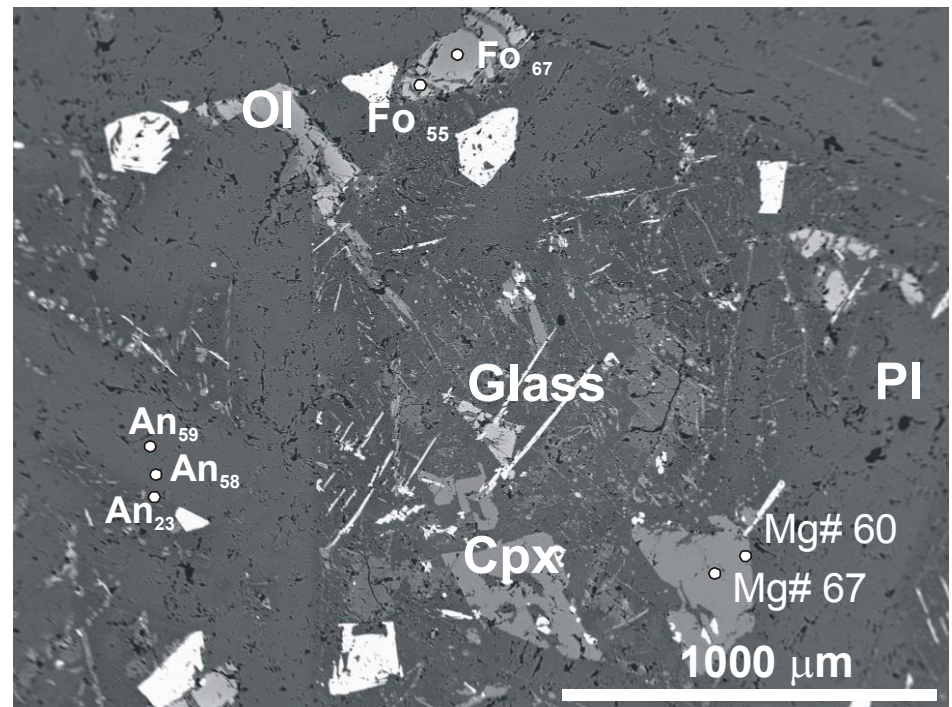
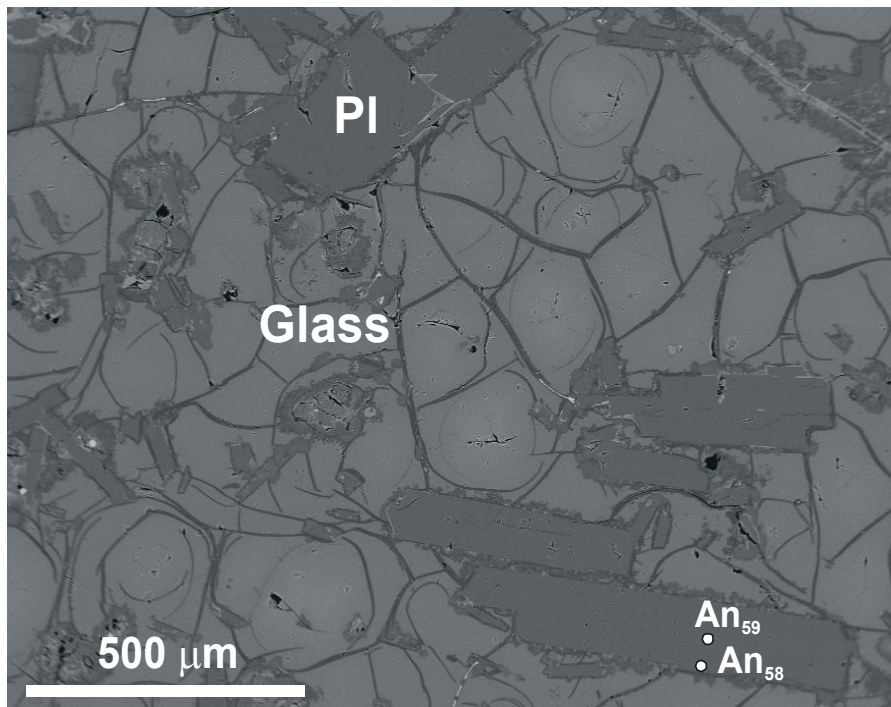
network of intergrown crystals;  
all magma used up

Rychlá krystalizace

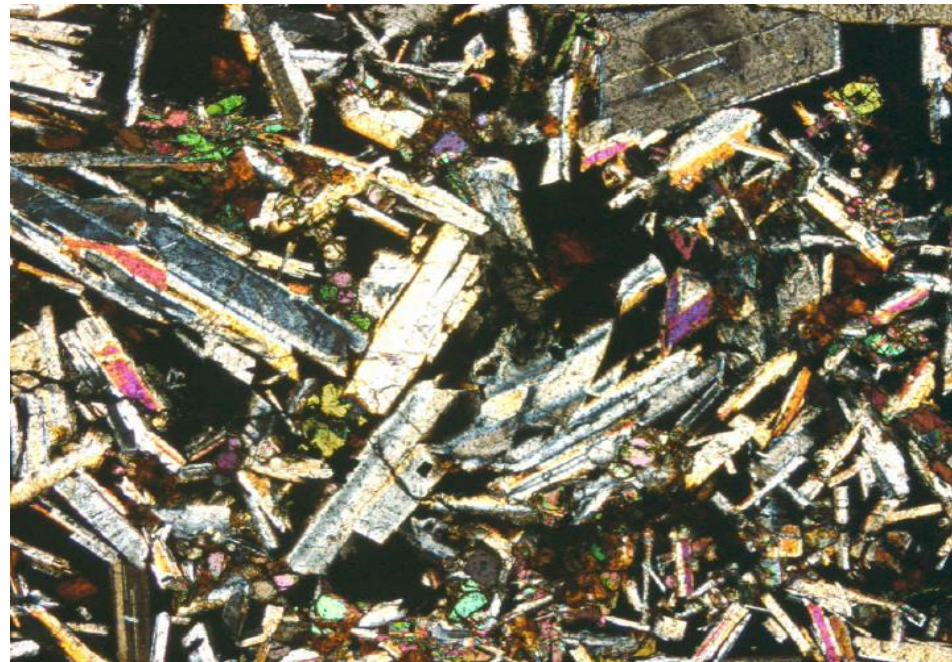


Pomalá krystalizace

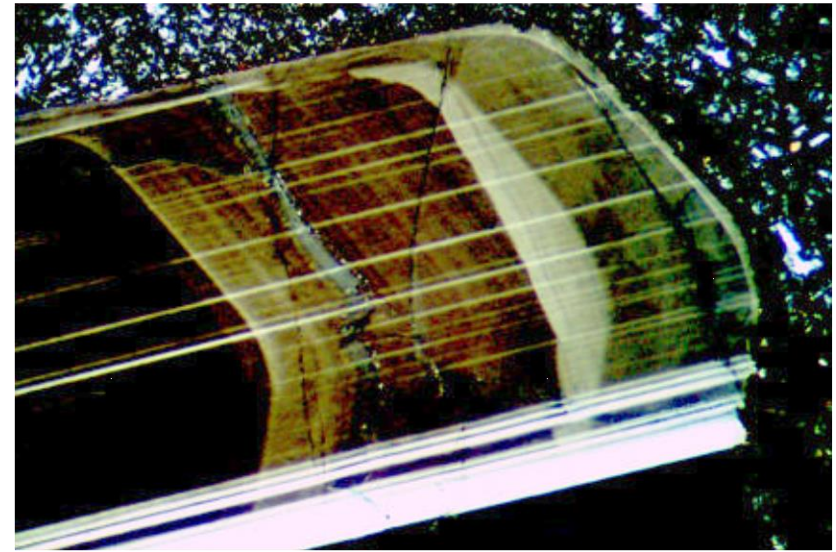
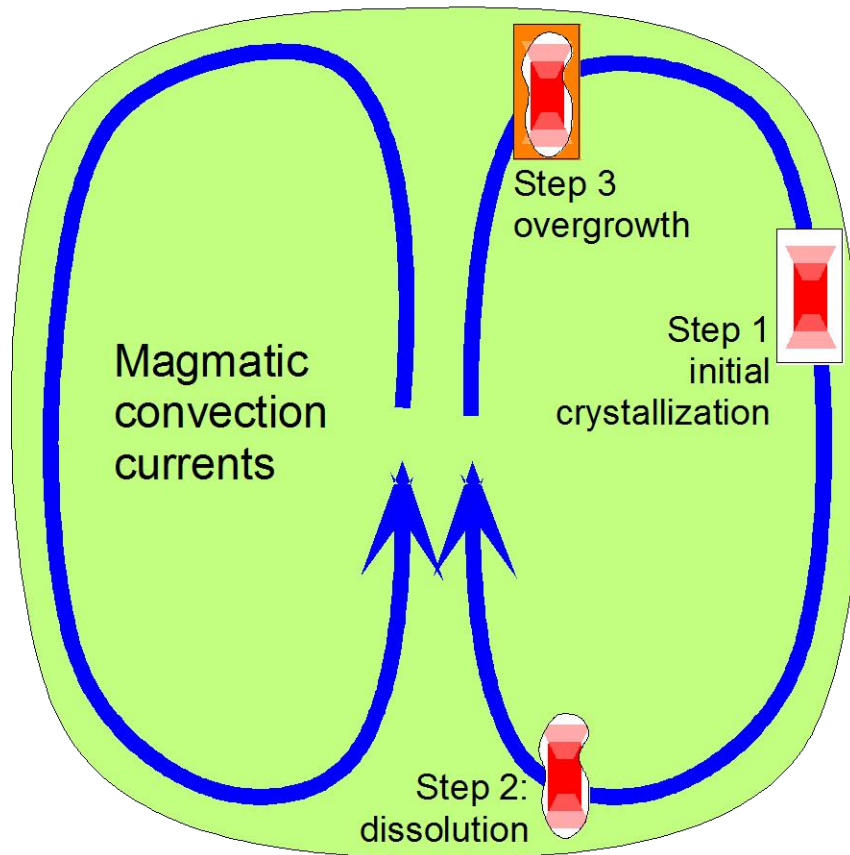




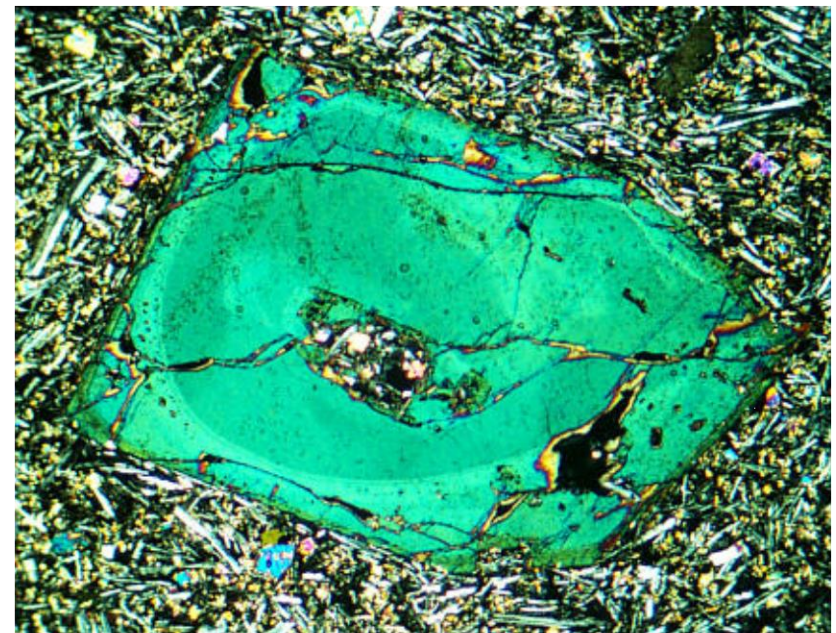
Bazalty-příklad



# Convection-controlled dissolution and zoning



Zoned plagioclase with internal unconformities.

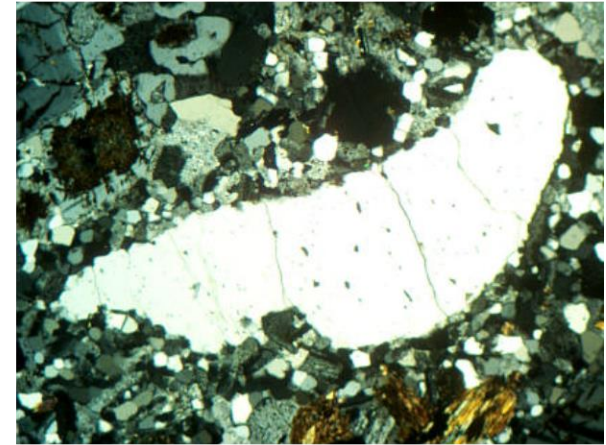
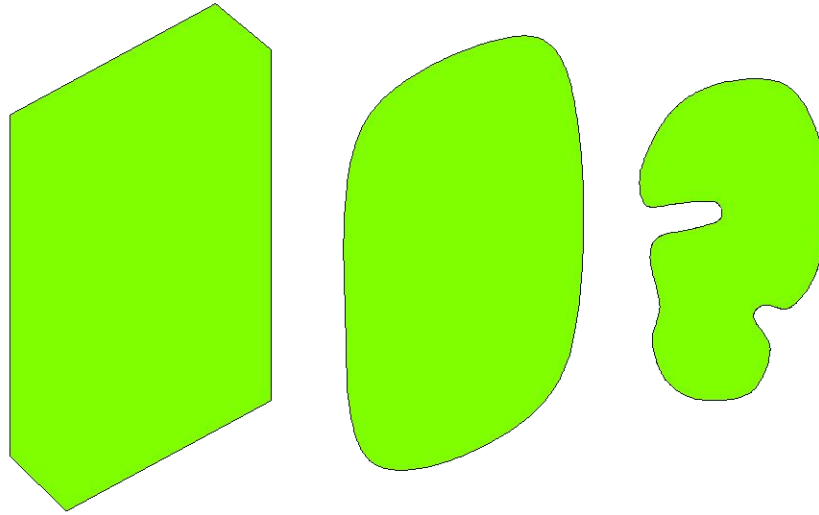


Augite with rounded, resorbed core.

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

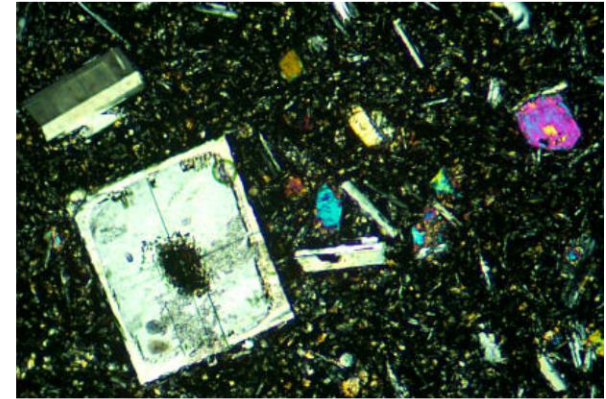
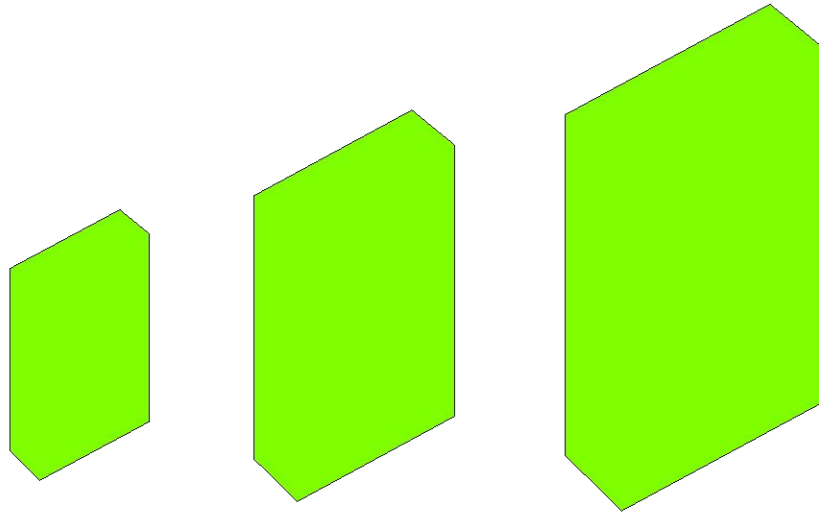
# Mineral growth and dissolution in magmas

Dissolution  
(resorption) of  
phenocrysts or  
xenocrysts



Resorbed quartz phenocryst in a dacite porphyry.

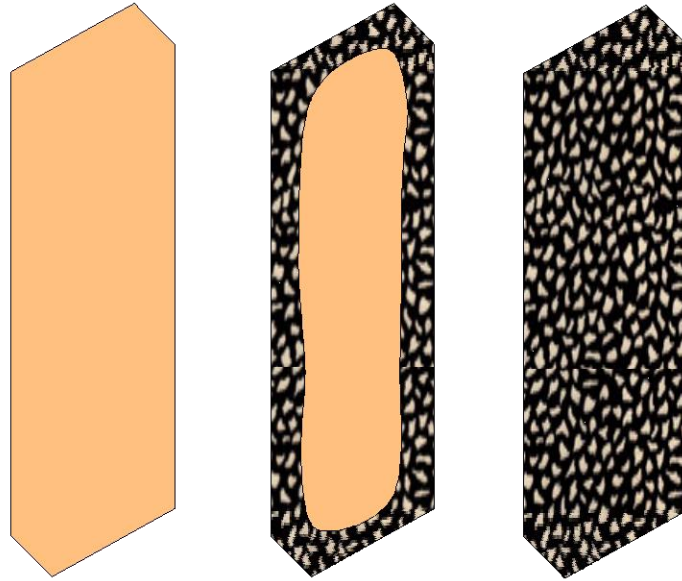
Regular growth



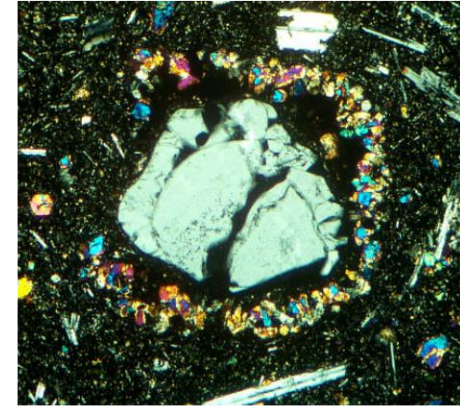
Euhedral phenocrysts of plagioclase and olivine in a basalt.

# Other reaction relationships in magmas

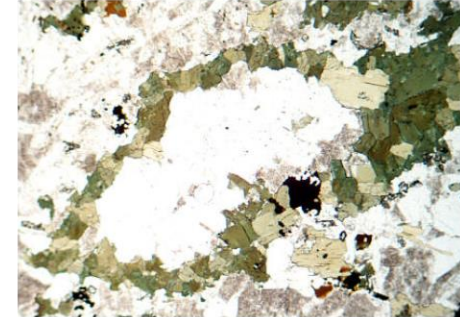
Dehydration of  
hydrous  
minerals to an  
anhydrous  
assemblage.



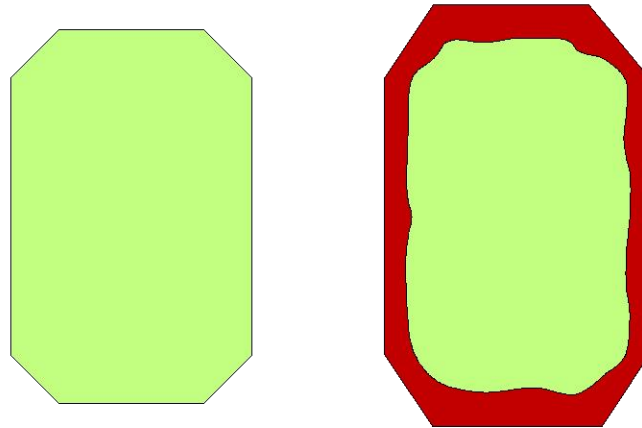
Quartz  
xenocryst  
rimmed by  
augite in an  
olivine basalt.



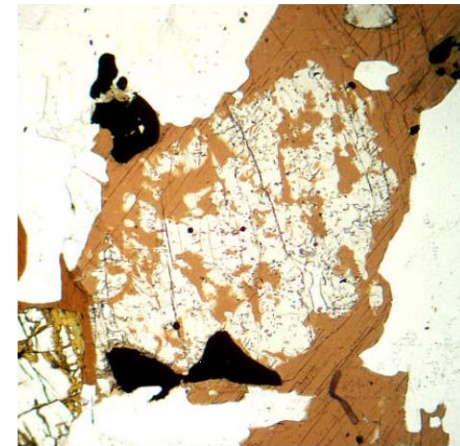
Quartz  
xenocryst  
rimmed by  
hornblende in  
a syenite  
porphyry.



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

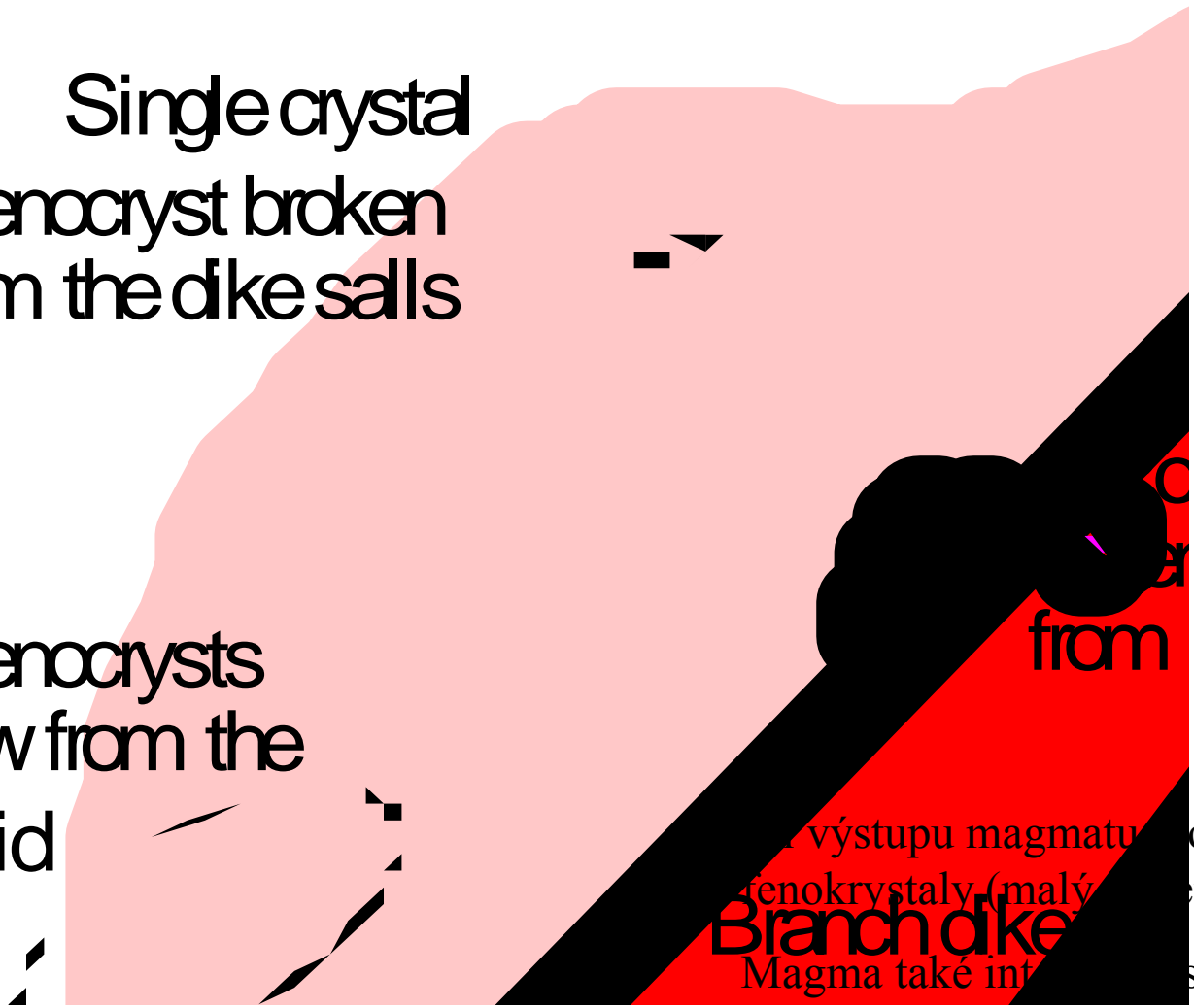


Augite  
rimmed and  
partly  
replaced by  
brown  
hornblende in  
an olivine  
gabbro.



Single crystal  
xenocryst broken  
from the dike walls

Phenocrysts  
grow from the  
liquid

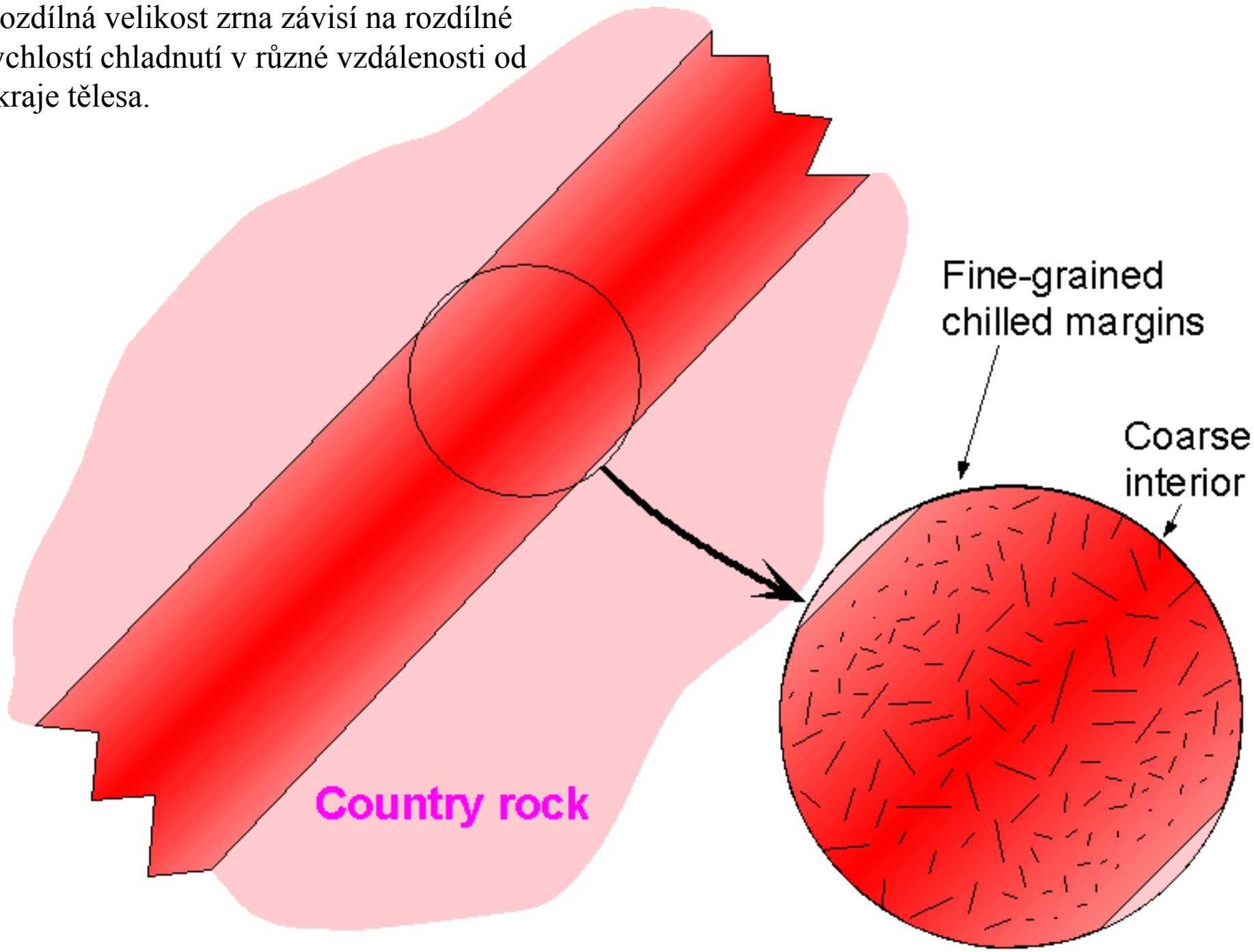


Branch dike

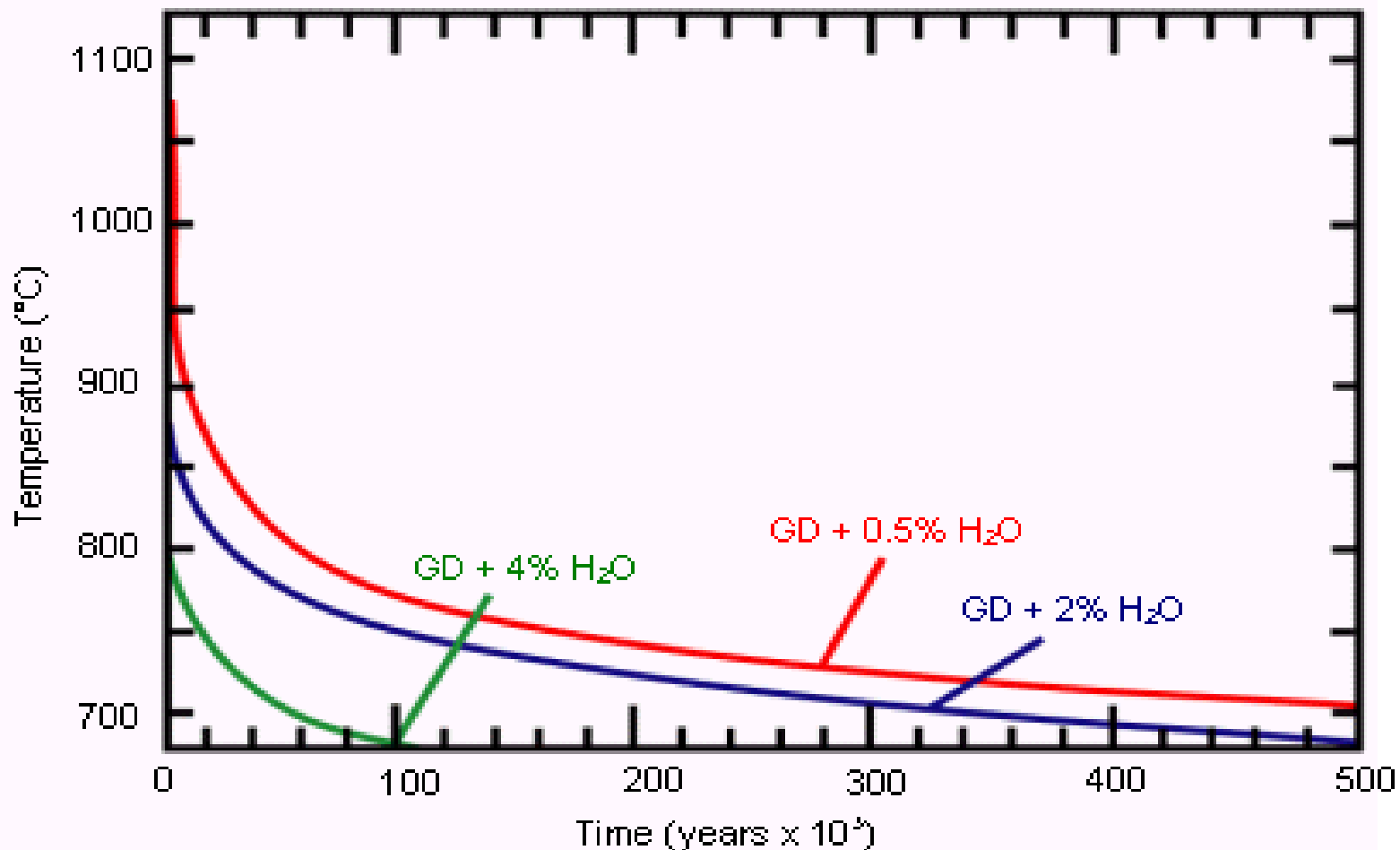
... při výstupu magmatu mohou vznikat  
fenokrystaly (malý ... et nukleačních center).  
Magma také int ... s okolím a odtrhává ze  
stěn žíly xenokrysty a xenolity.



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



# Voda a krystalizace taveniny

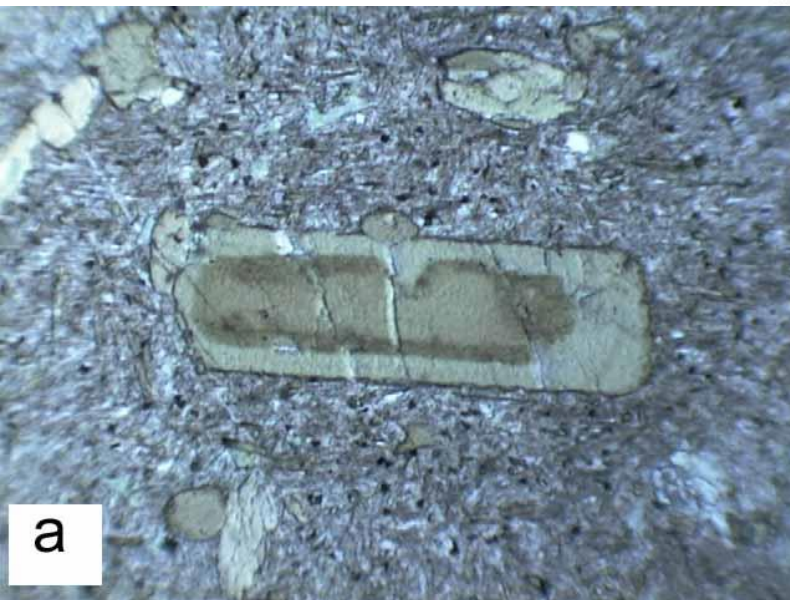


**Figure 2.** Influence of magma water content on the cooling history of granodiorite (GD) plutons (radius = 5km, magma chamber/country rock contact temperature = 600°C, emplacement pressure = 2kbar). Increasing the water content by a factor of 2 (from 2 to 4wt%) decreases solidification times by a factor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

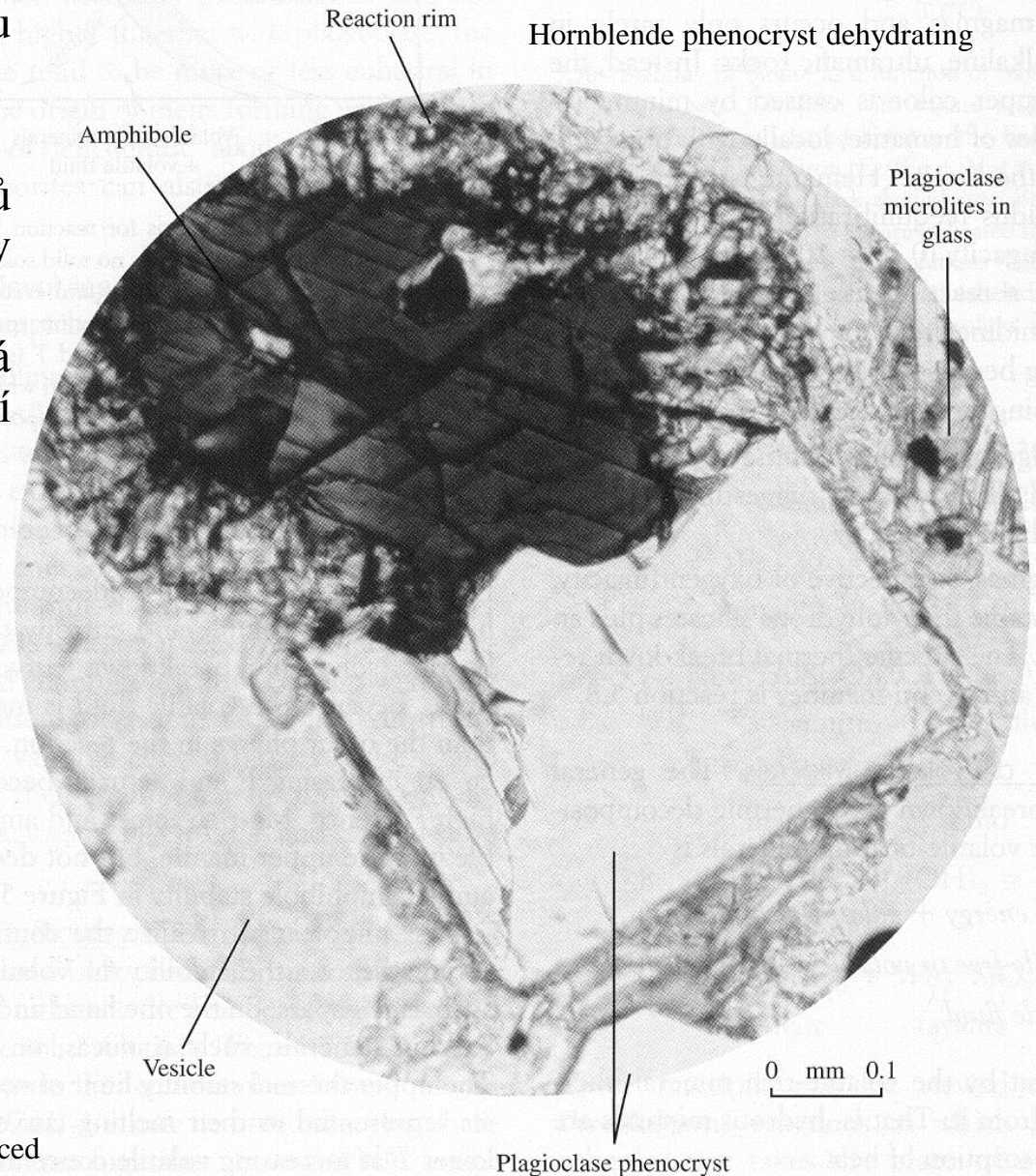
# Nerovnovážné reakce při krystalizaci (disequilibrium) – důkaz fluid v tavenině

## 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)

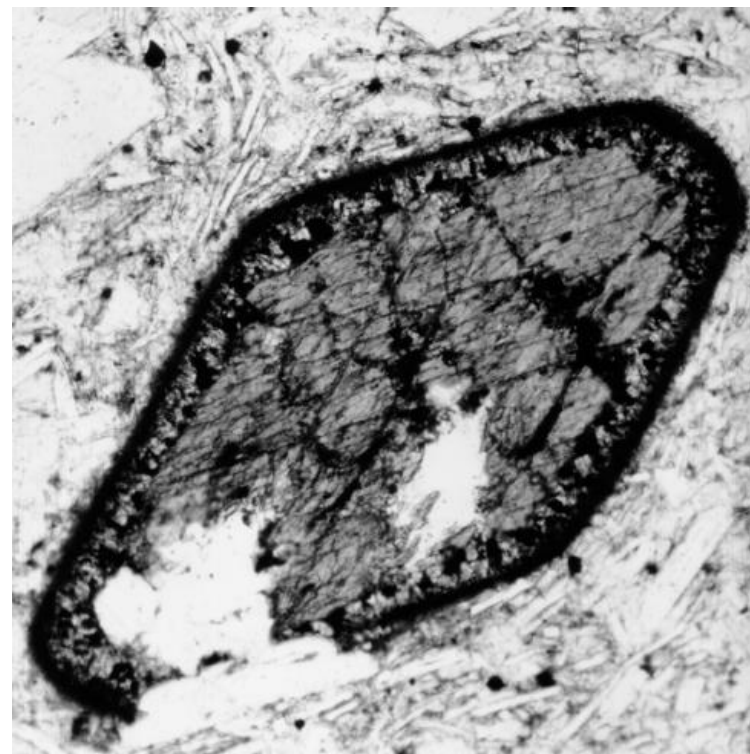
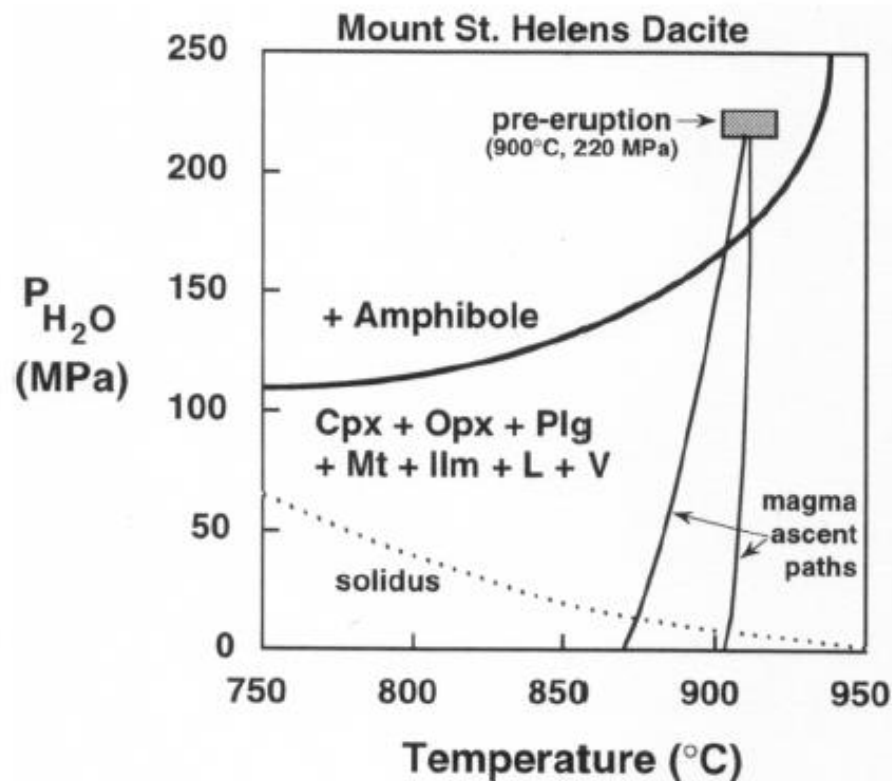


Compositionally zoned hornblende phenocryst with pronounced color variation visible in plane-polarized light. Field width 1 mm.



## 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



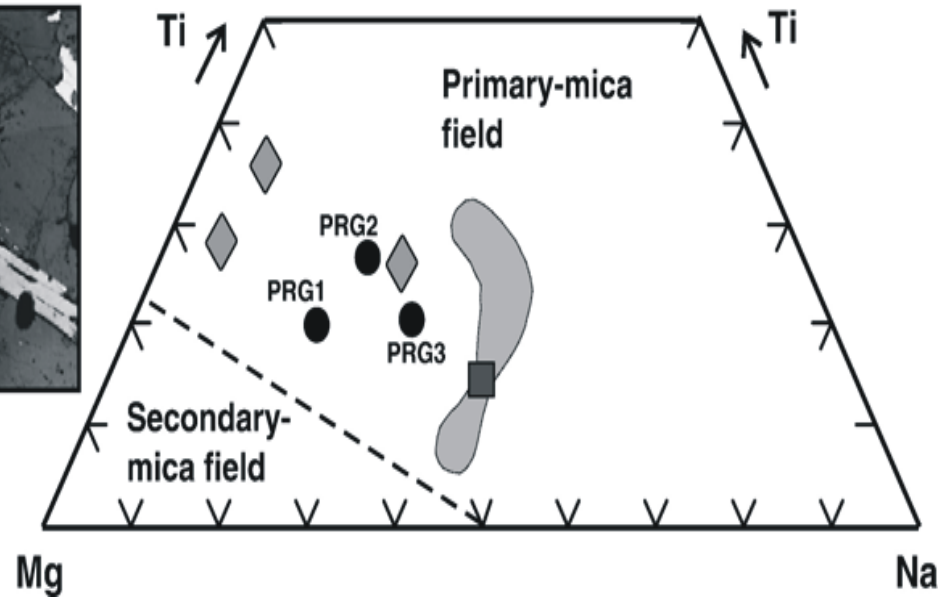
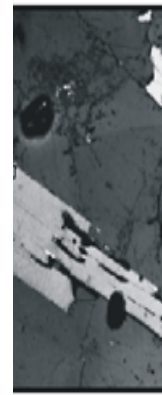
P-T diagram ( $P_{water} = P_{total}$ ) ukazující stabilitu amfibolu pro dacity z Mount St. Helens (Rutherford and Hill, 1993) s vyznačením možné dráhy výstupu magmatu z magmatického krbu během erupce v roce 1980: Cpx = klinopyroxen, Opx = ortopyroxen, Plg = plagioklas, Mt = magnetit, Ilm = ilmenit

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

## Primární a sekundární muskovit

Skupina dioktaedrických slíd:

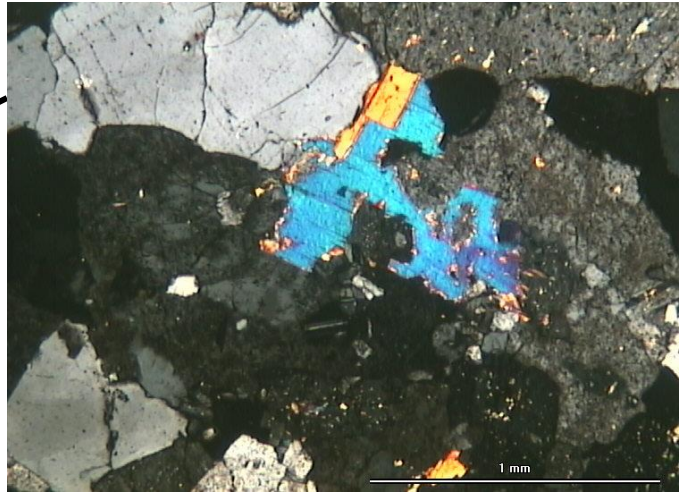
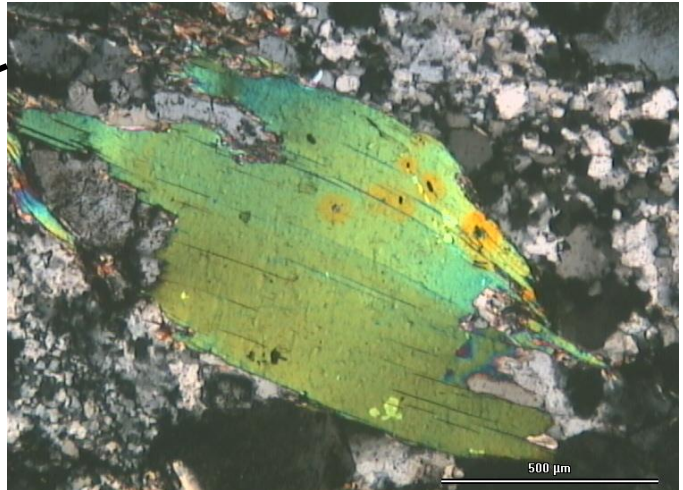
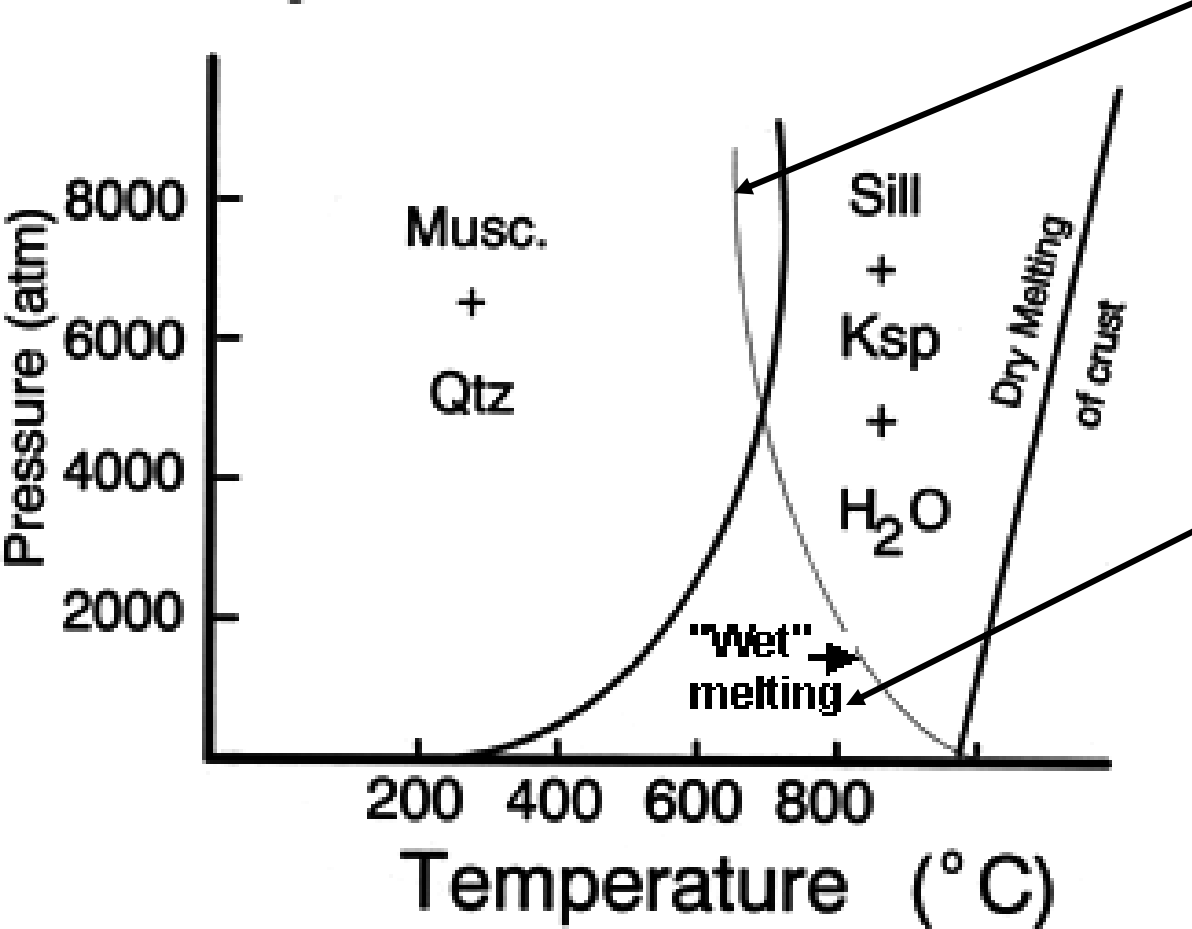
- Muskovit:  $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Paragonit:  $\text{NaAl}_2[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Mg-Al-seladonit:  $\text{K}[\text{MgAl}][\text{Si}_4]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Fe-Al-seladonit:  $\text{K}[\text{FeAl}][\text{Si}_4]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

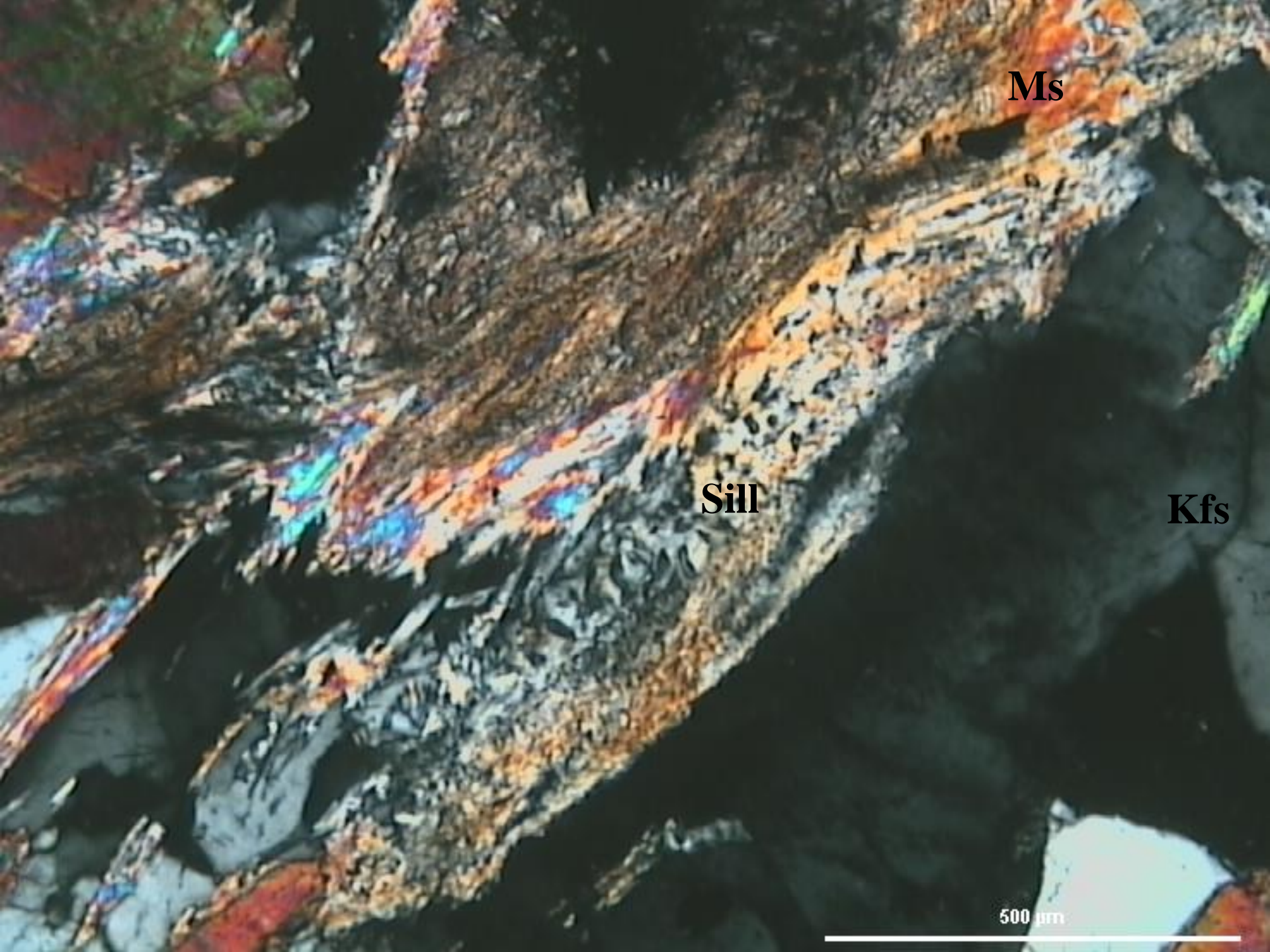


- Muskovit je jedním z typických minerálů pro peraluminické granity.
- Křivka ohraničující pole stability muskovitu protíná křivku tavení granitu zhruba při 3,5 kbarech a 700 °C.
- Takže muskovity krystalují z taveniny jen za tlaku nad 3,5 kbar při nižším tlaku mohou vznikat jen pozdějšími procesy v 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**



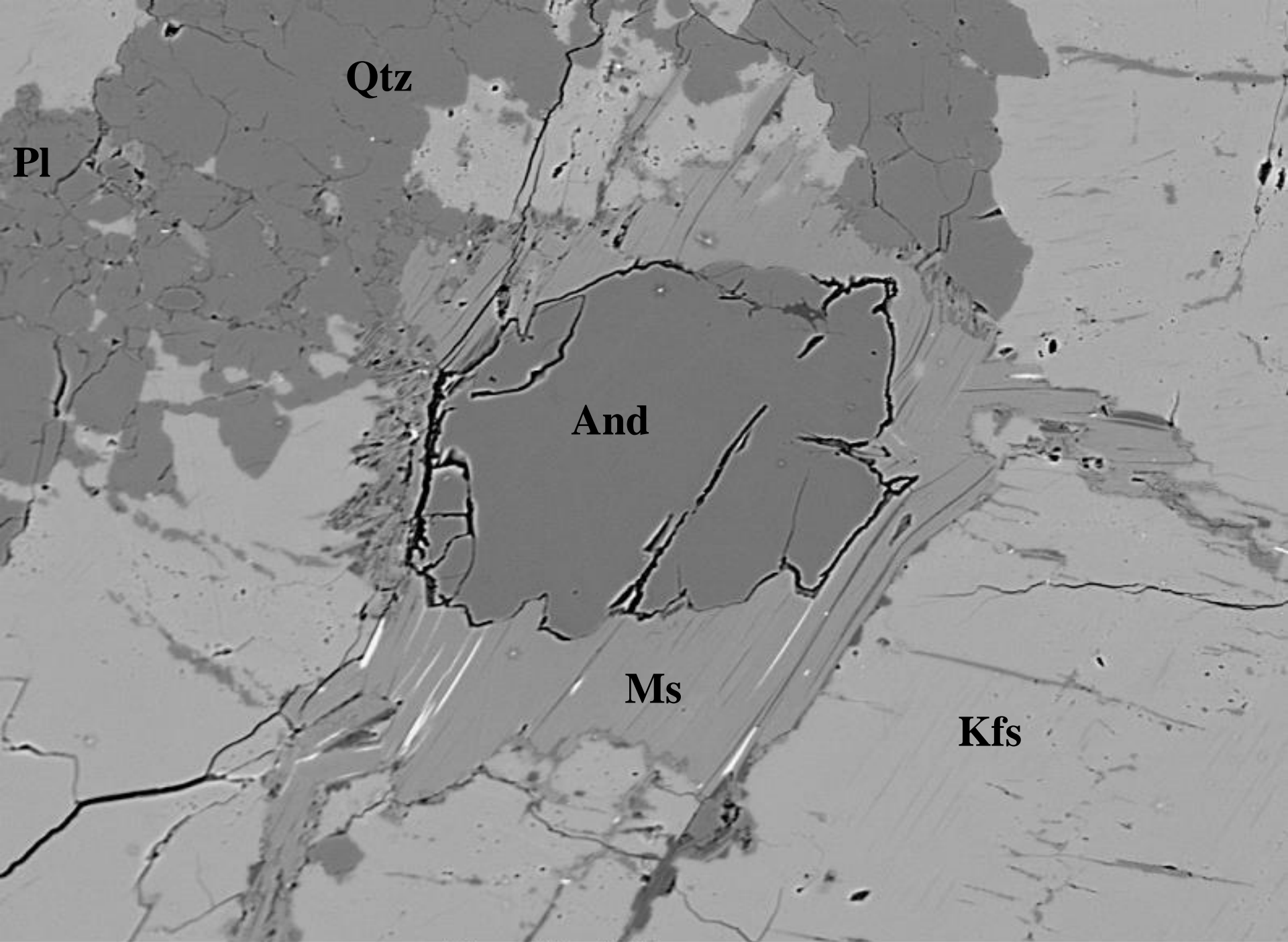


**Ms**

**Sill**

**Kfs**

500  $\mu$ m



**Qtz**

**Pl**

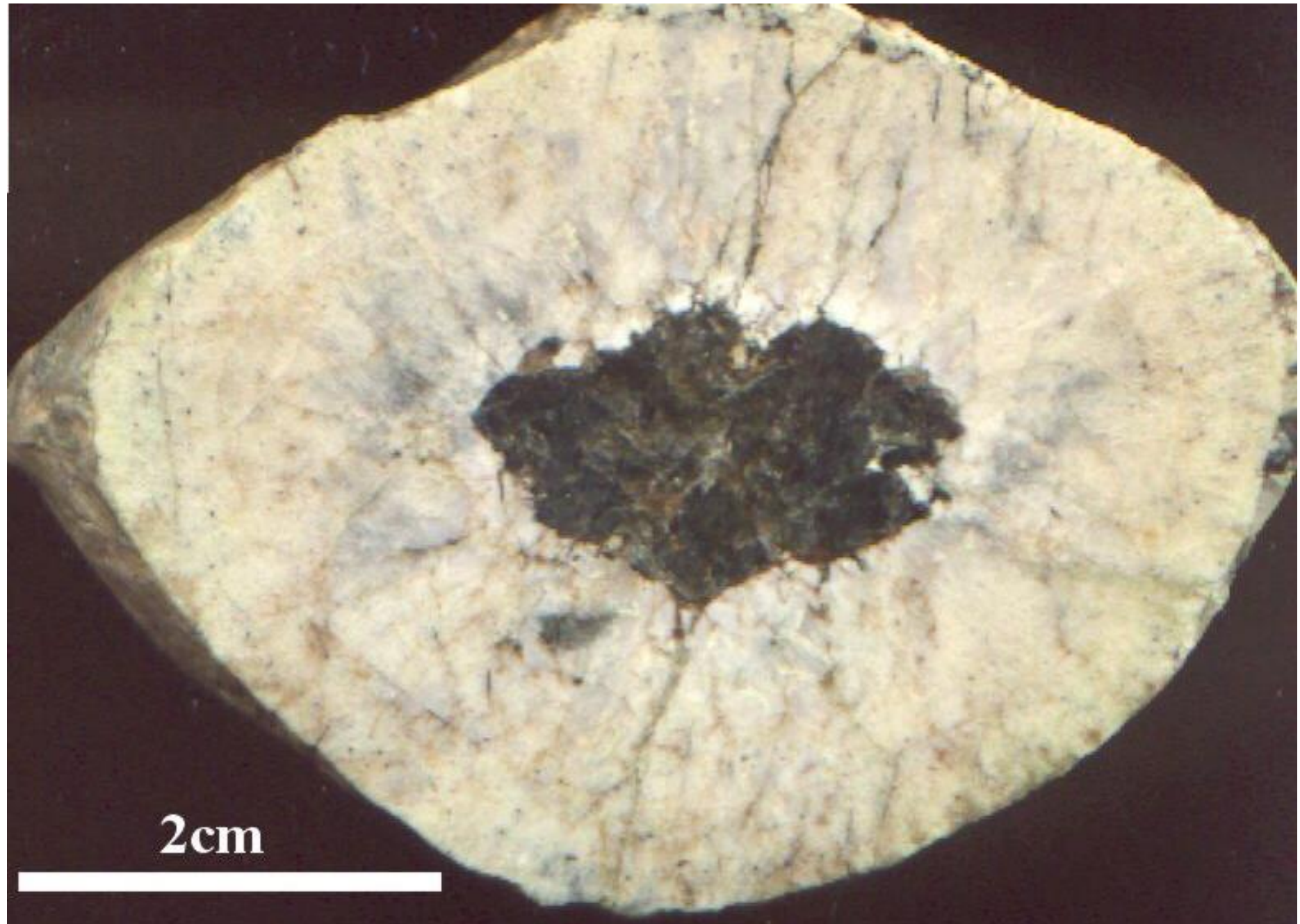
**And**

**Ms**

**Kfs**



# Cordierit

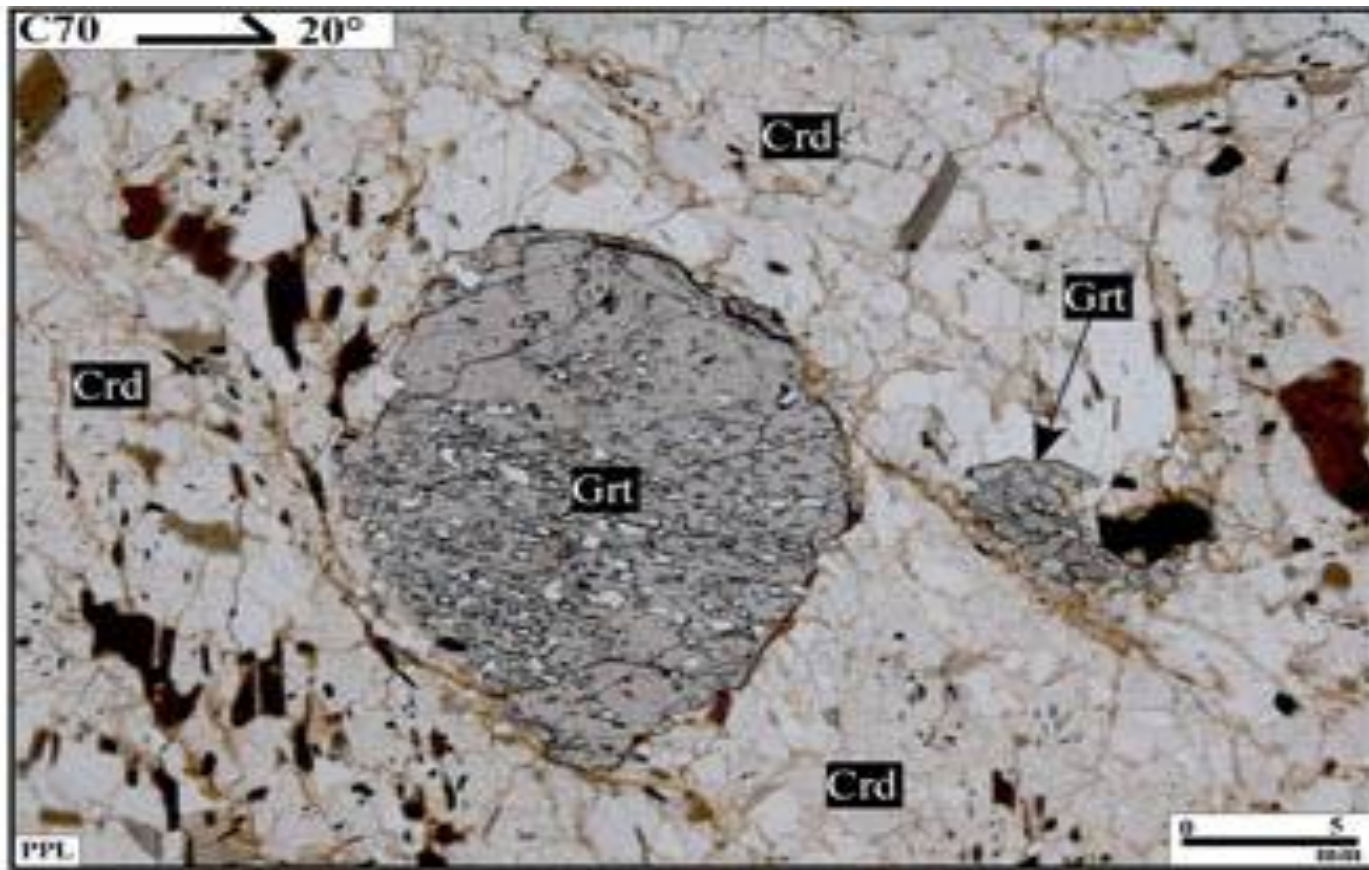


2cm

- 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).

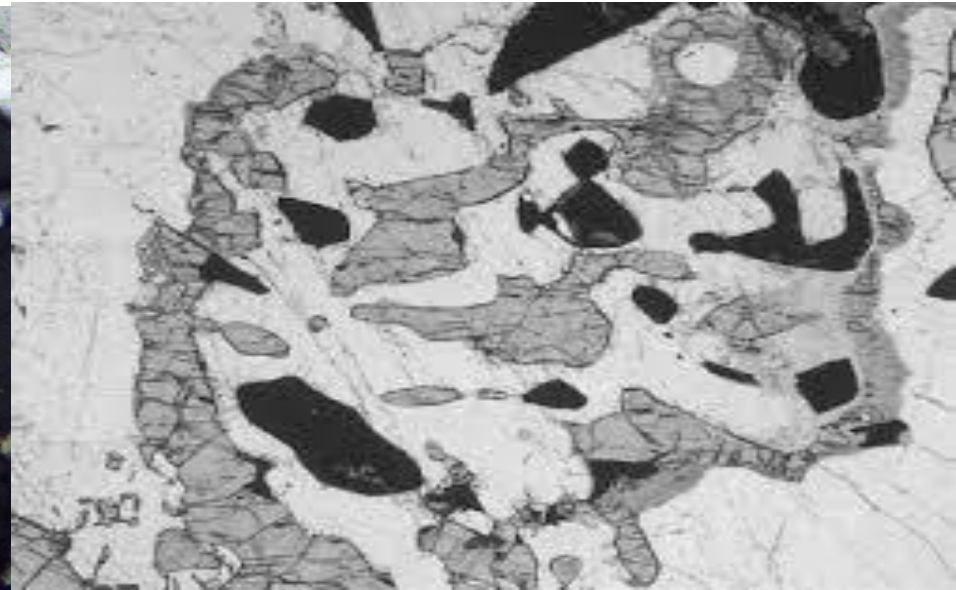
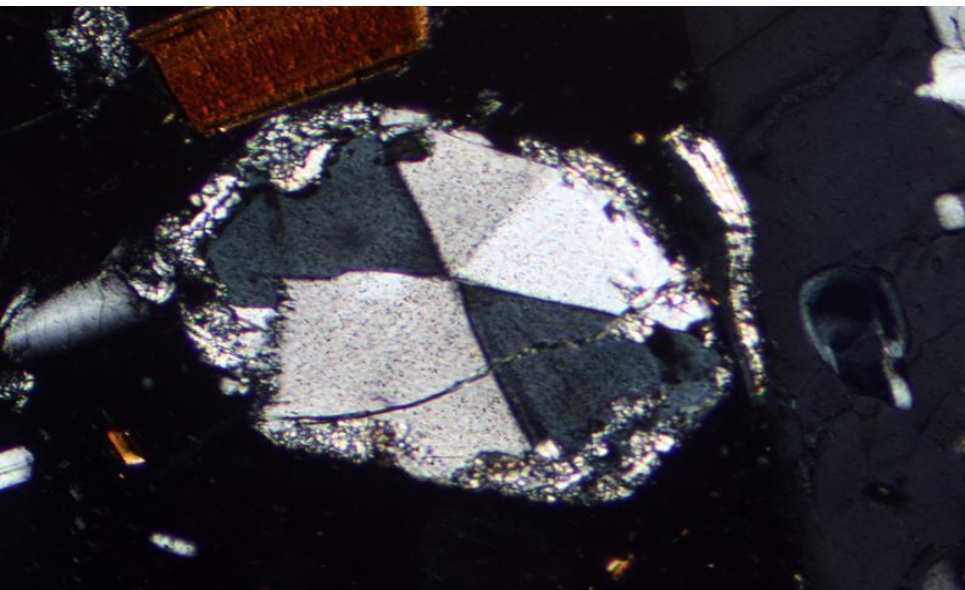


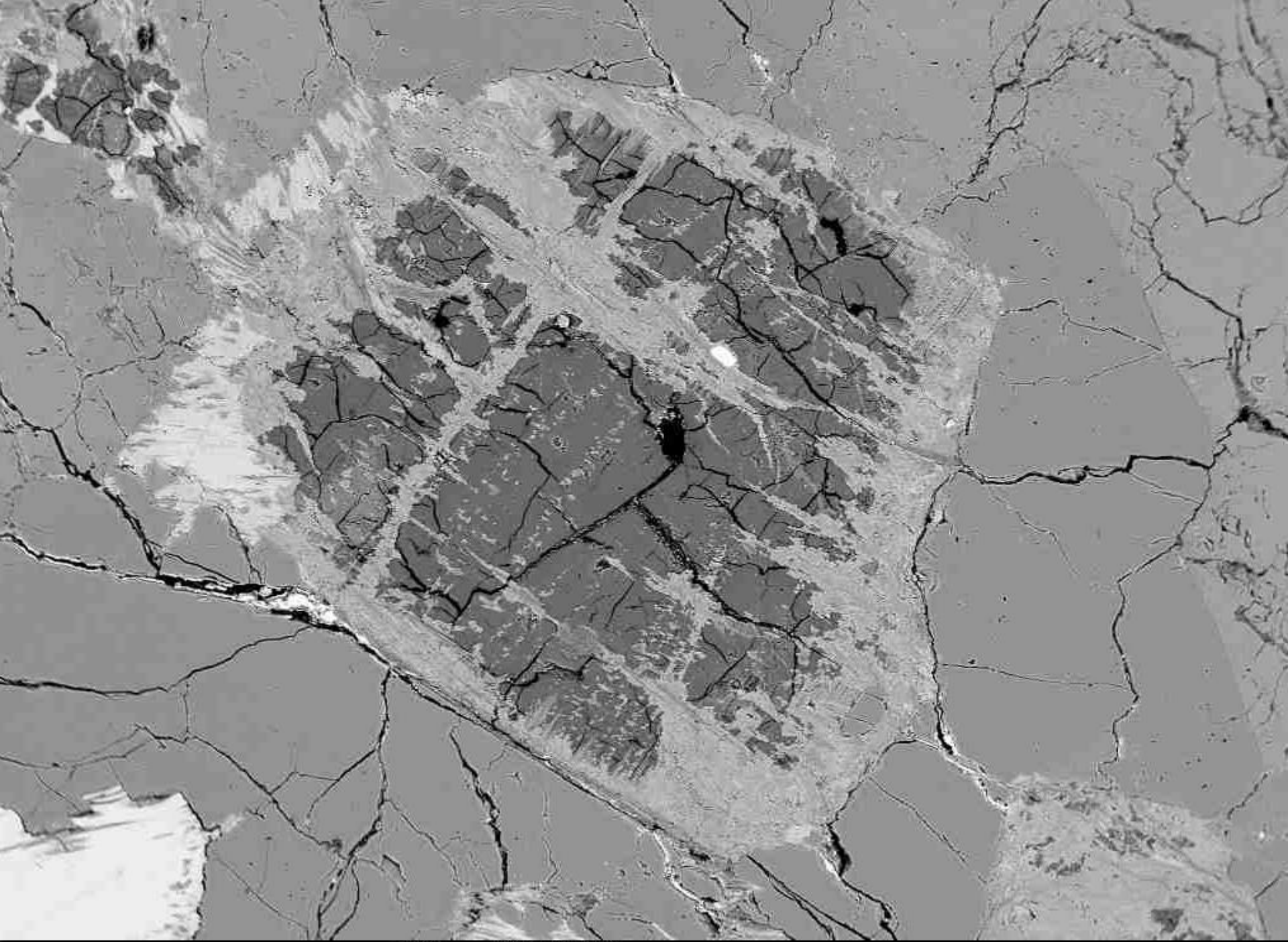
## Cordierity typ 2:

- 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:

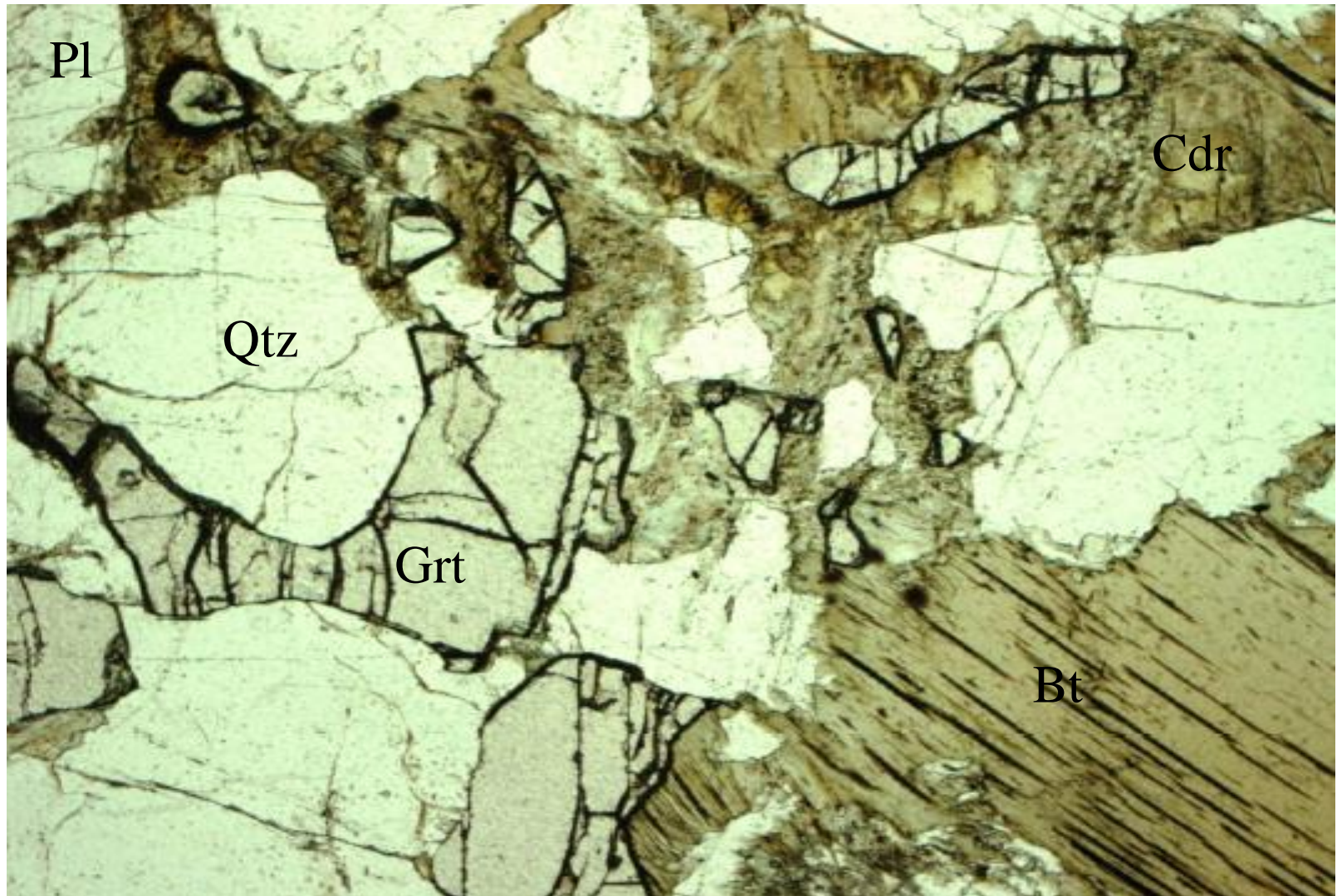
- Metasomatické (vzniklé v subsolidu) od automorfních po xenomorfní zrna nebo jejich shluky vznikající podél oslabených zón v granitech (například mohou podél pukliny tvořit „řetězce“ krystalů). Často bývají tyto cordierity lemovány leukokratickým lemem.
- Leukokratické lemy bez biotitu mohly například 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

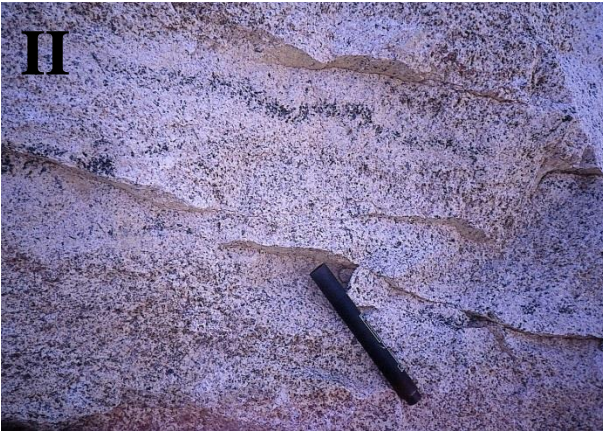


- Na základě klasifikace cordieritů vzniklých krystalizací z granitové taveniny (Clarke, 1995) můžeme tento minerál označit jako peritektický.
- Patrně vznikl reakcí: tavenina + Grt + Qtz + Sil = Cdr + Bt během výstupu a chladnutí granitového magmatu.

# Texturní rozdělení turmalínu v granitech



- I) Automorfní až hypautomorfní zrna rozptýlená v muskovitickém granitu.



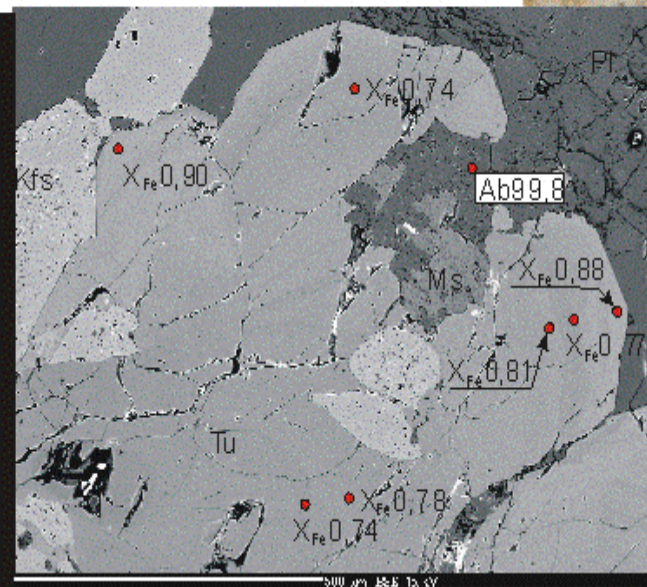
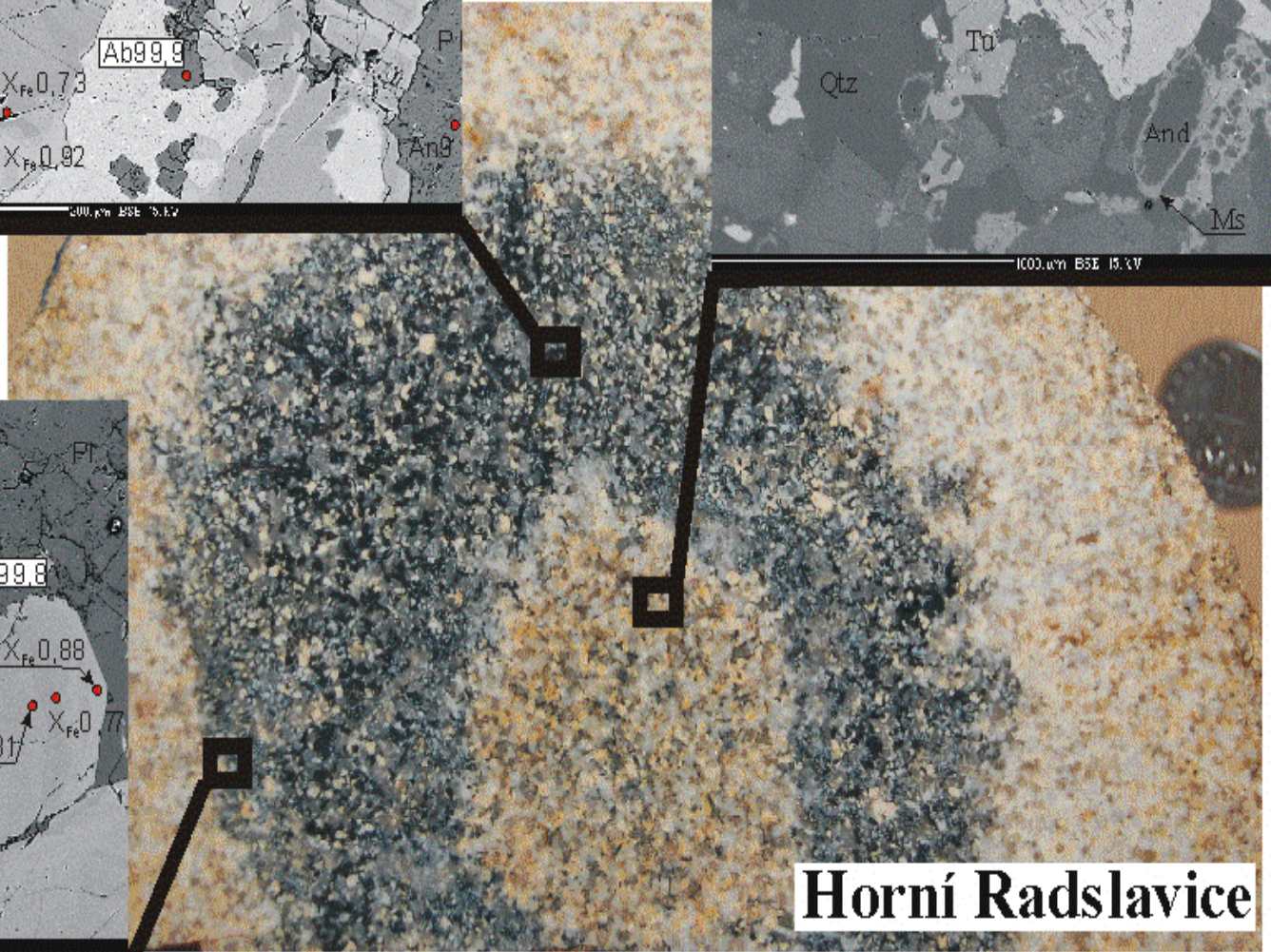
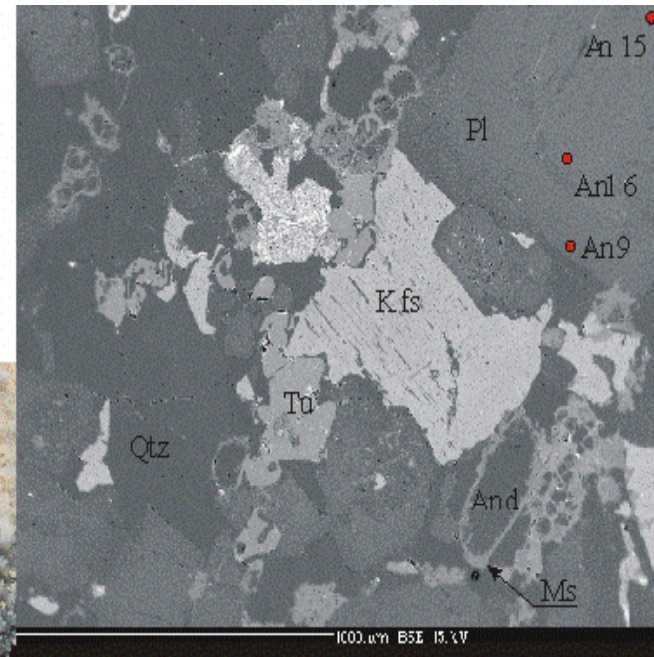
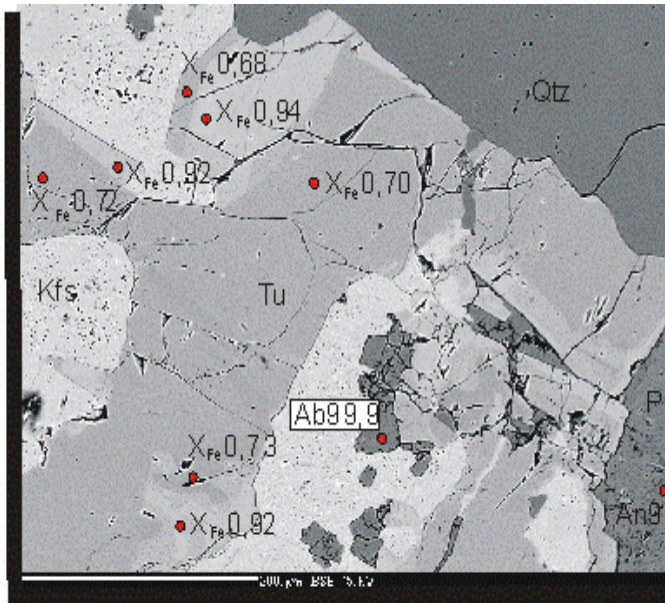
- II) Automorfní až hypautomorfní zrna tvořící nepravidelné smouhy až žíly (mocnost od 1 cm do 5 cm) v muskovit-biotitickém granitu. Kolem těchto struktur bývá vyvinut leukokratický lem.



- III) Xenomorfní zrna zatlačující živce situovaná v blízkosti puklin, nebo koncentrovaná do drobných shluků podobných orbikulí.

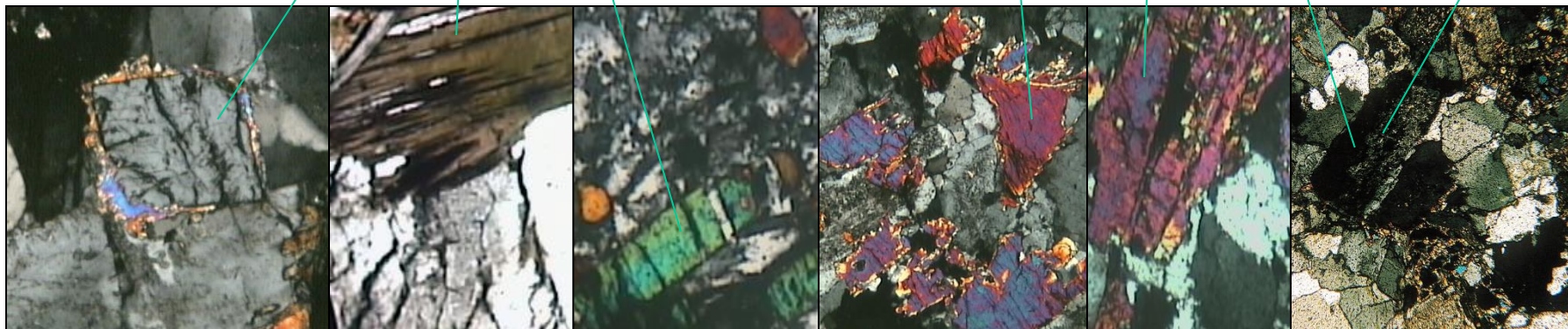
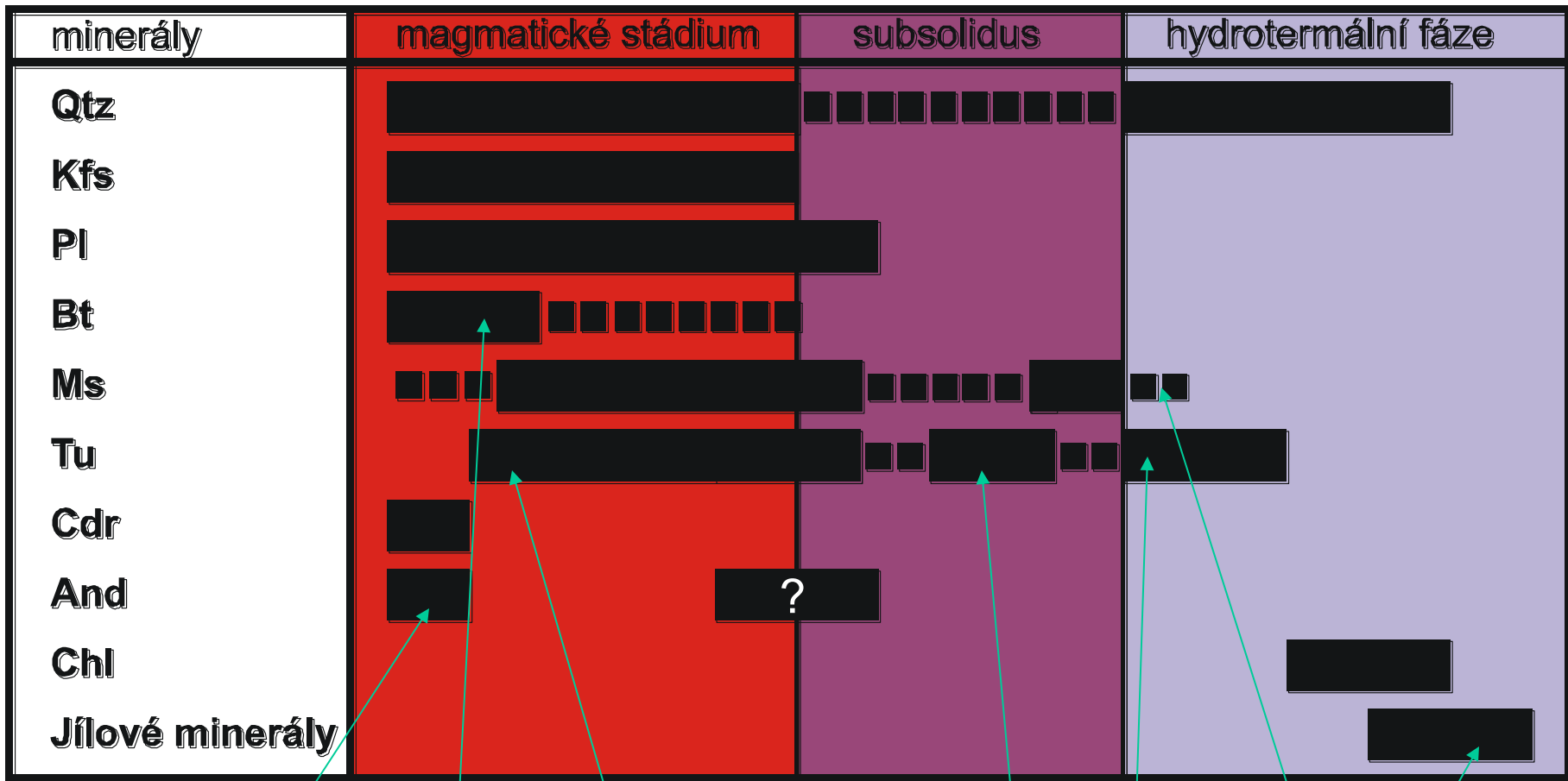
- IV) Automorfní až hypautomorfní sloupce na puklinách granitů často uspořádané do radiálně paprscitých agregátů.



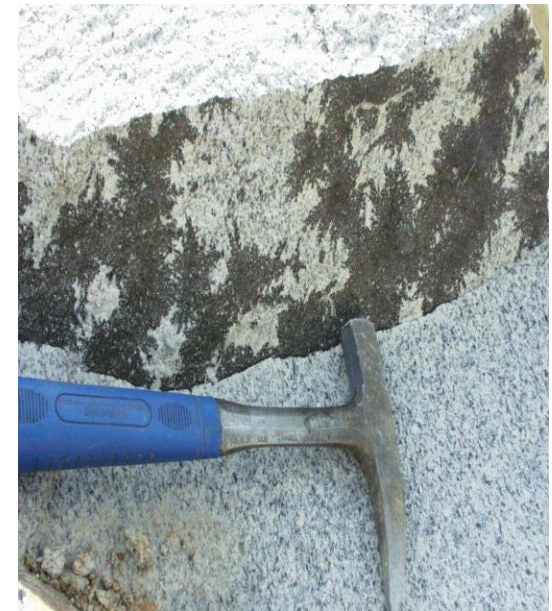
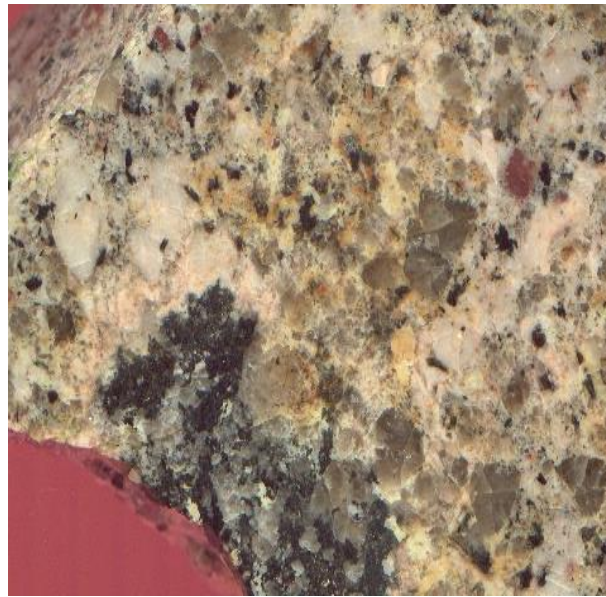
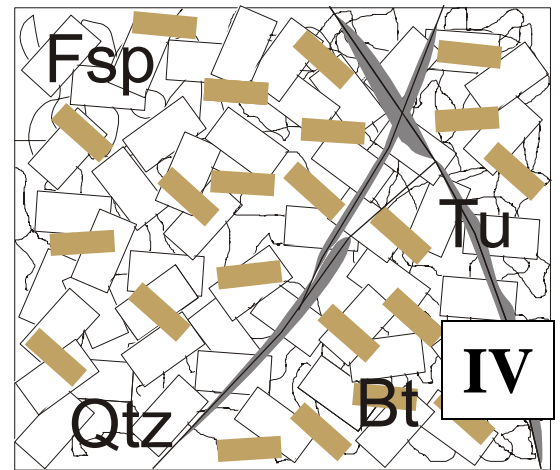
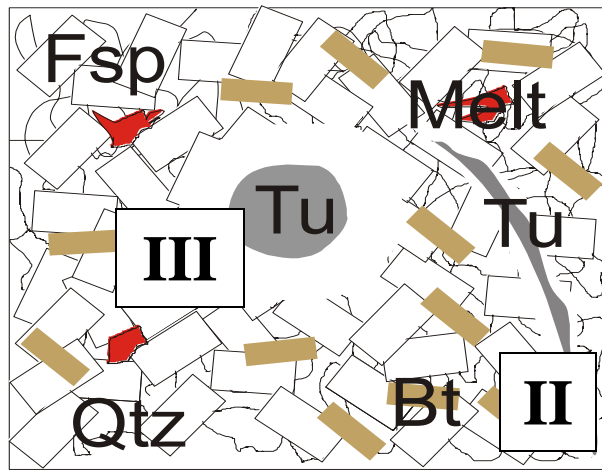
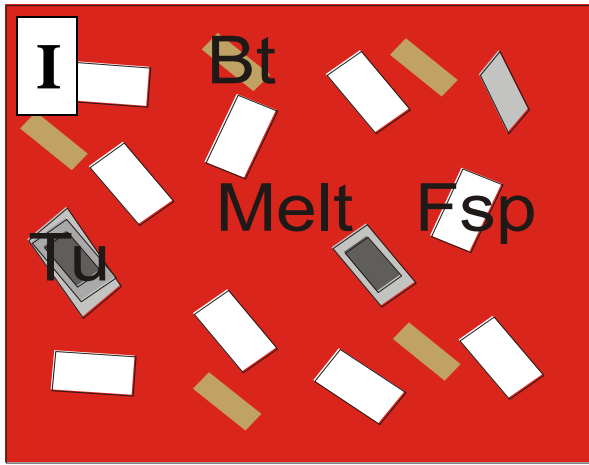


**Horní Radslavice**

# Schéma sukcese krystalizace minerálu v granitech typu Ořeňov

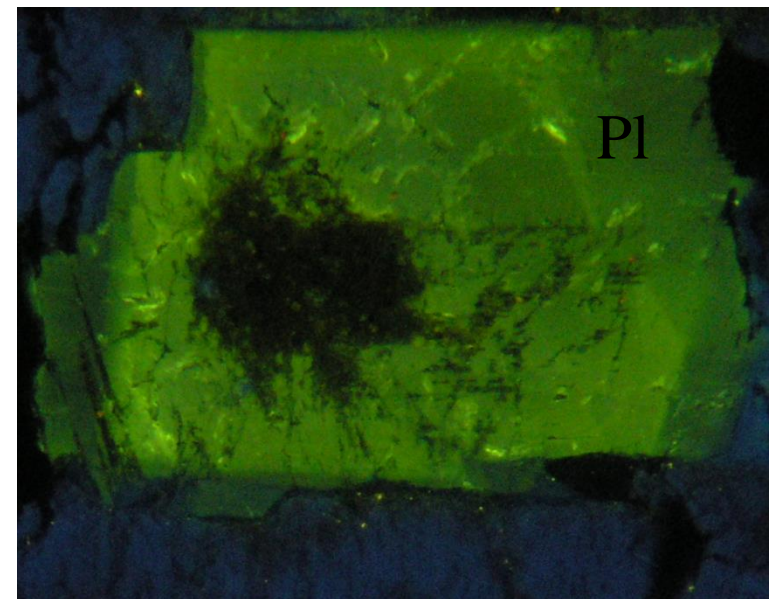
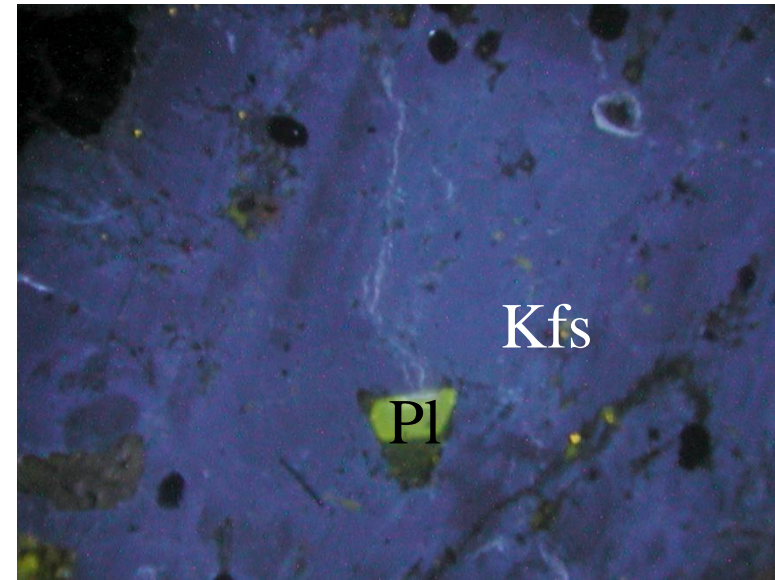




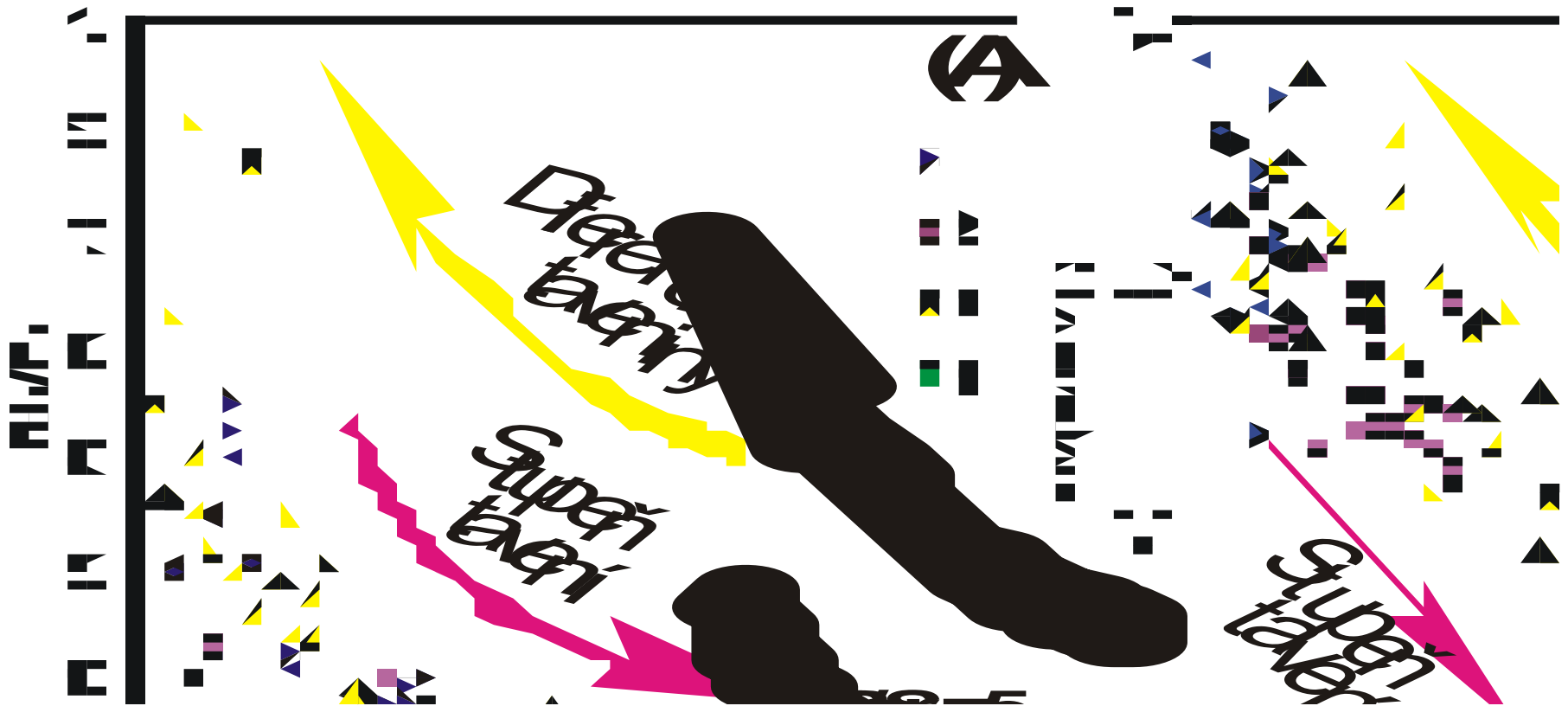


# VI. 6. Indikátory frakční krystalizace a parciálního tavení v granitické tavenině

- 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  $Fe/(Fe+Mg)-TiO_2$  (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).