



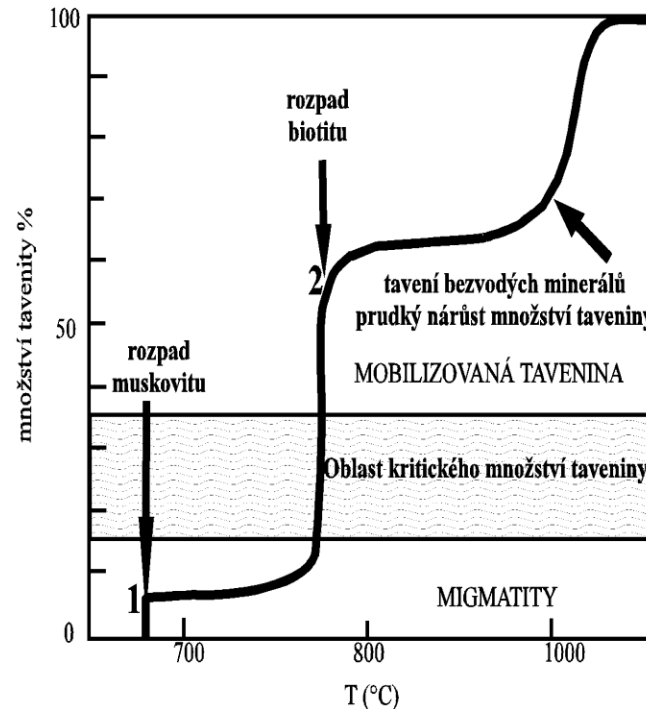
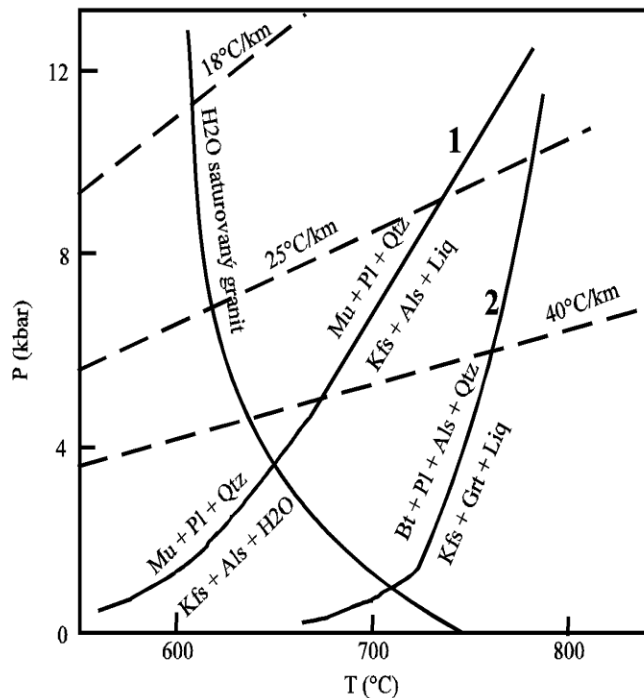
**Granity a kontinentální kůra**  
**III**  
**(Vznik S-typových granitů)**

**David Buriánek**

- **III. 1. Vznik granitové taveniny v kontinentální kůře**
- **III. 2. Vznik taveniny**
  - A. Muskovitové dehydratační tavení
  - B. Staurolitové dehydratační tavení
  - C. Biotitové dehydratační tavení
  - D. Epidotové dehydratační tavení
  - E. Amfibolové dehydratační tavení
  - F. Bezvodé tavení
- **III. 3. Vliv chemického složení protolitu a PT podmínek**
- **III. 4. Rychlost procesů produkujících granitovou taveninu**
- **III. 5. Migmatitizace**
- **III. 6. Mobilizace taveniny a vznik těles granitů**
- **III. 7. Segregace taveniny**
- **III. 8. Termální modely pro vznik orogenetických granitů**
- **III. 9. Hybridní granity**
- **III. 10. Vznik těles granitů**

# III. 1. Vznik granitové taveniny v kontinentální kůře

- Voda je jako volná fluidní fáze v kontinentální kůře přítomna maximálně do hloubek několika kilometrů (Yardley a Valley, 1997).
- Výjimku tvoří pouze nízcí metamorfované horniny vtažené rychle do velkých hloubek (subdukční zóny).
- Jinak probíhá vznik granitového magmatu jen za podmínek dehydratačního tavení.
- Modelováním tavení v metapelitech, kde veškerá fluida vznikla dehydratací přítomných silikátů, se zabývali Spear et al. (1999). Autoři studovali chování metapelitů s minerální asociací granát + sillimanit + muskovit + plagioklas + křemen a sestavili modely chování metapelitů v průběhu různých typů metamorfóz.



*PT diagram znázorňující dvě hlavní dehydratační reakce a jejich pozici vůči geotermálním gradientům 18, 25 a 40 °C/km. Druhý diagram znázorňuje přibližné množství taveniny, které je během dehydratačních reakcí produkováno. Je třeba upozornit, že diagram dává jen hrubý přehled o poměrném zastoupení taveniny produkované oběma reakcemi, protože množství vzniklé taveniny je závislé na modální m zastoupení muskovitu a biotitu ve zdrojové hornině. Diagram je převzat z práce Wintera (2001).*

- kontinentální kůře je přítomna řada minerálů, které během svého rozpadu mohou produkovat taveninu. Podle významu je můžeme seřadit: biotit-amfibol-muskovit-epidot-staurolit.

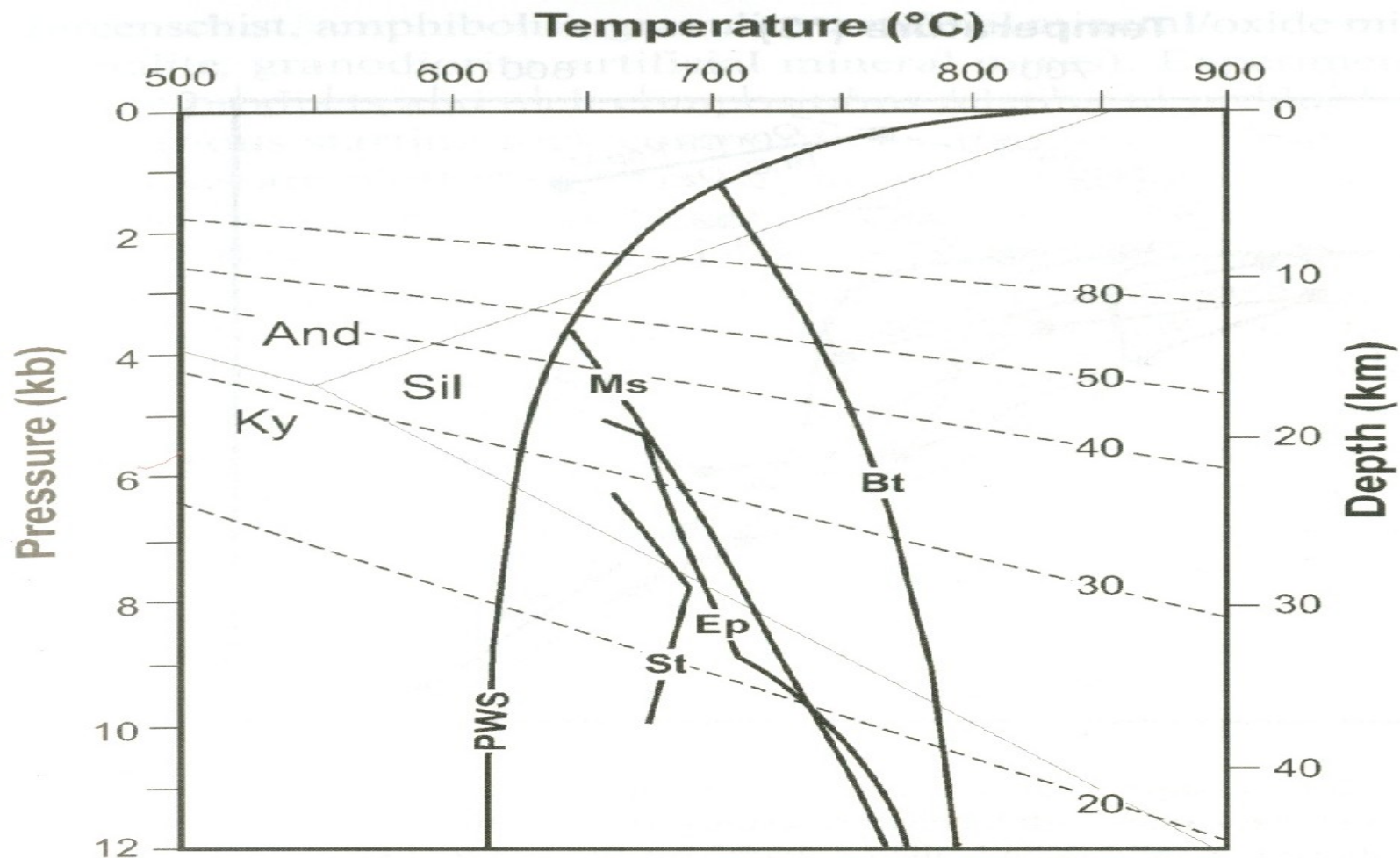
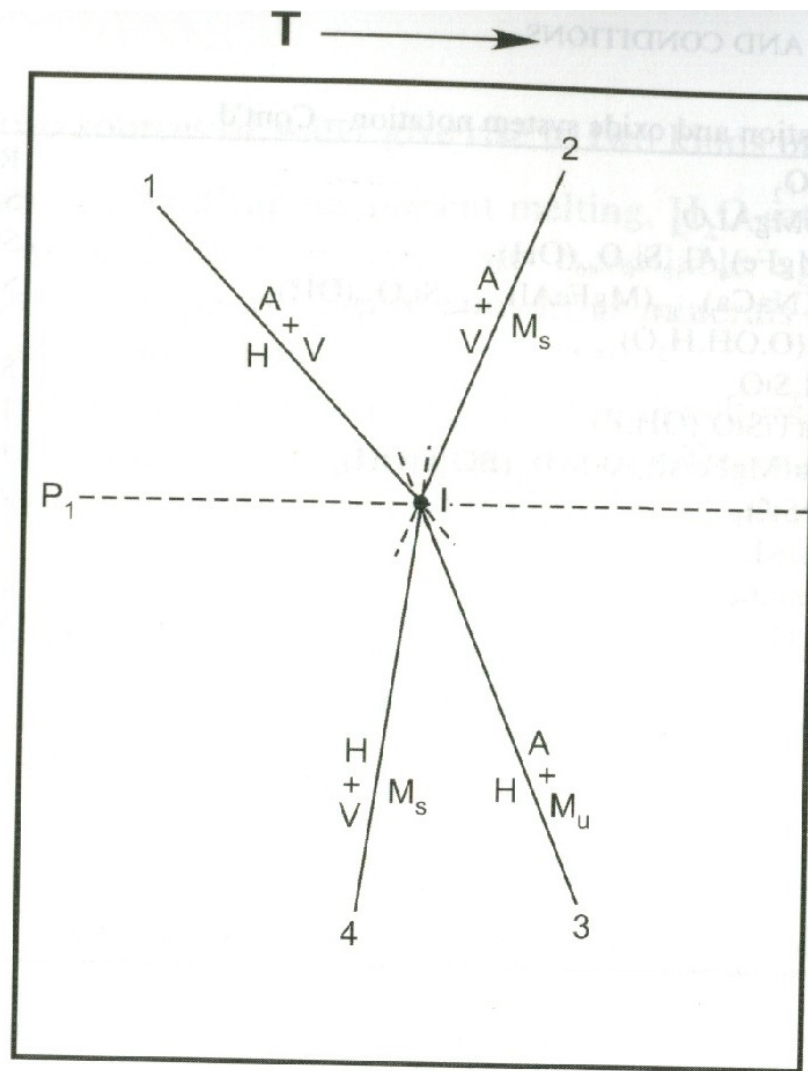


Figure 2.6. Stability curves for staurolite (after García-Casco et al. 2003) and epidote (in tonalite) (after Schmidt and Thompson 1996). PWS = Pelite wet solidus; Ms and Bt – muscovite and biotite-dehydration melting curves, respectively. Al-silicate stability fields after Pattison (1992). Labelled 20–80°C/km linear geothermal gradients are shown for reference.

- Granity jsou výsledkem řady po sobě jdoucích procesů které jsou v mnoha případech z geologického hlediska velmi rychlé:
  1. zahřátí protolitu a vznik taveniny na hranici zrn
  2. oddělení taveniny od protolitu
  3. výstup taveniny k povrchu
  4. frakcionace a diferenciacce
- Vznik a výstup taveniny může být velmi rychlá i méně než 350 tisíc let (ka).
- U granitů je určení tohoto intervalu často komplikované (neobsahují dostatek minerálů pro datování takto rychlých procesů).
- Tavení začíná když protolit protne v PT diagramu křivku solidu. K tomu může dojít třemi způsoby: prográdním zahříváním, přínosem fluid, dekompresí
- Ke vzniku granitové taveniny dochází velmi často až po vrcholu metamorfózy kdy již dochází k snižování tlaku ale horniny mají stále vysokou teplotu. Tedy během exhumace orogénu.

## III. 2. Vznik taveniny



*PT diagram znázorňující schematický vztah mezi subsolidovou dehydratační reakcí, H<sub>2</sub>O saturevaným dehydratačním tavením: H= hydratovaný minerál, A minerál bezvodý, V= voda, M<sub>s</sub>= H<sub>2</sub>O saturevaná tavenina, M<sub>u</sub>= H<sub>2</sub>O nesaturevaná tavenina, I= invariantní bod. Diagram je převzat z práce Chena a Grapes (2007).*

- Typologické vztahy mezi subsolidovou dehydratační reakcí, vodou saturevaným tavením a dehydratečním tavením je vyjádřen na obrázku.
- 1) hydratovaný minerál se rozpadá na vodu + bezvodý minerál
- 2) voda + bezvodý minerál reagují za vzniku hydratované taveniny
- 3) hydratovaný minerál se rozpadá na bezvodý restit a H<sub>2</sub>O nesaturevanou taveninu
- 4) hydratovaný minerál + voda produkují taveninu saturevanou vodou
- Tlak P<sub>1</sub> reprezentuje minimální tlak při němž hydratovaný minerál může koexistovat s taveninou

# A. Muskovitové dehydratační tavení

- První tavenina v tomto systému  $\text{Grt} + \text{Sill} + \text{Mu} + \text{Pl} + \text{Qtz}$  vzniká reakcí:

**Paragonit + křemen = sillimanit + albit + tavenina (3)**

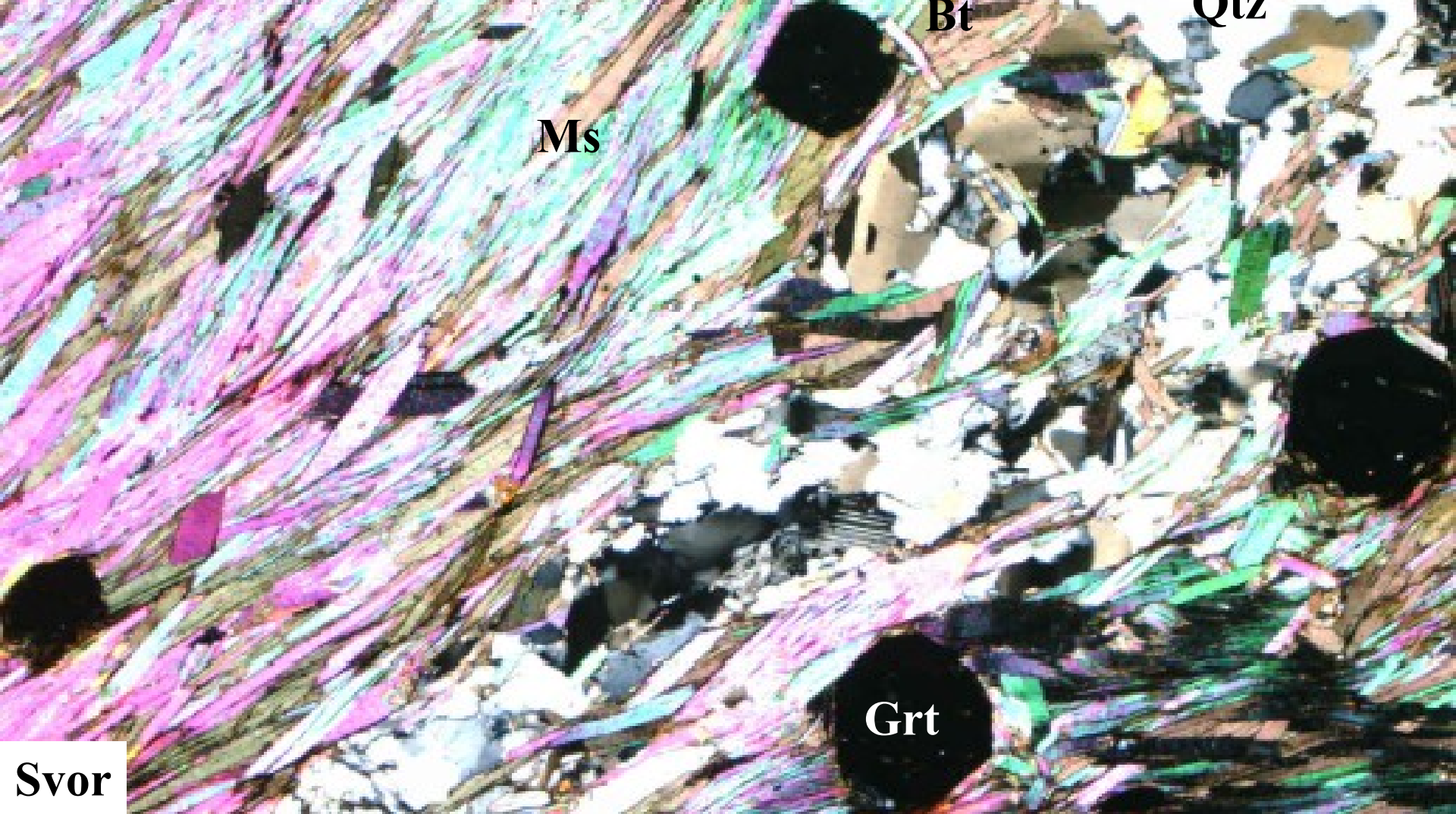
- Ale obsahy paragonitové komponenty v muskovitu bývají malé (20-5%), takže výsledné množství taveniny se pohybuje kolem 1-2 mod. %.
- Tavenina je oproti typickému granitovému minimu obohacena na Na.

- Poněkud větší množství taveniny produkuje reakce dehydratačního tavení muskovitu:

**Muskovit+plagioklas+křemen =  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ +draselný živec+tavenina (4)**

- Touto reakcí vzniká tavenina odpovídající objemově zhruba 70% původního muskovitu. Protože typické pelity obsahují 10-20 modálních procent muskovitu může touto reakcí vznikat 7-14 mod. % taveniny.
- Přítomnost Ca v systému posouvá reakci do vyšších teplot (okolo 625-700 °C pro 5 kbar).
- Když muskovit obsahuje Fe, Mg, a Ti bývá produktem reakce také cordierit, biotit a spinel.

**Muskovit (diokt.)**  
 $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  muskovit  
 $\text{NaAl}_2[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  paragonit  
 $\text{CaAl}_2[\text{Al}_2\text{Si}_2]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  margarit  
 $\text{K}[\text{MgAl}][\text{Si}_4]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  Mg-Al-celadonit  
 $\text{K}[\text{FeAl}][\text{Si}_4]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  Fe-Al-celadonit



**Svor**



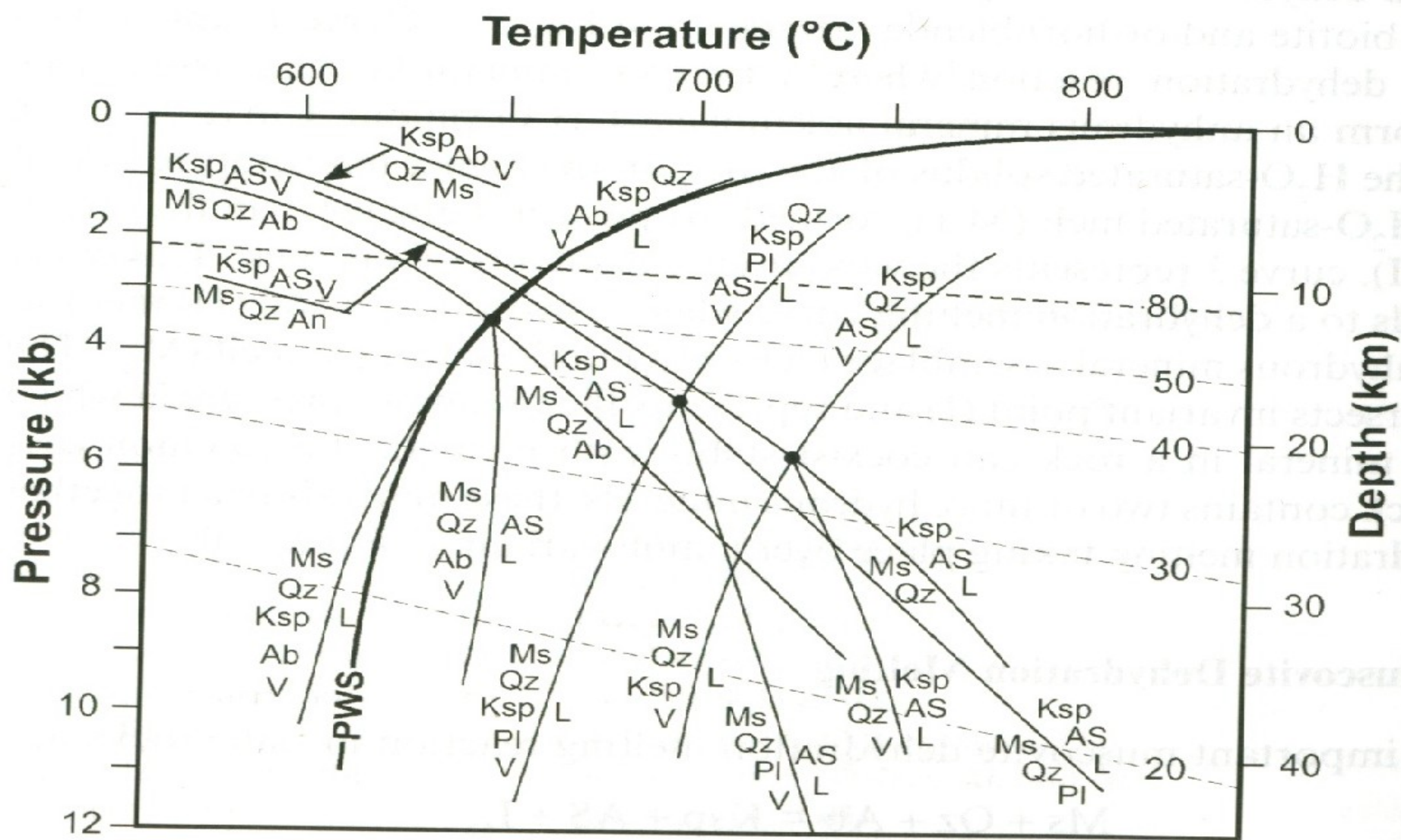
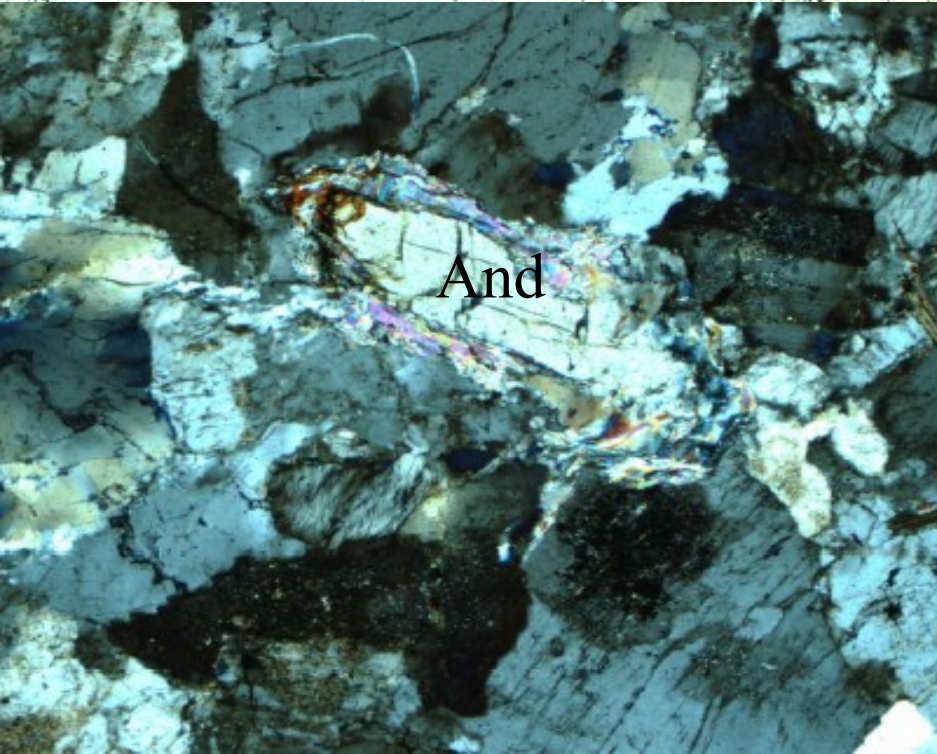
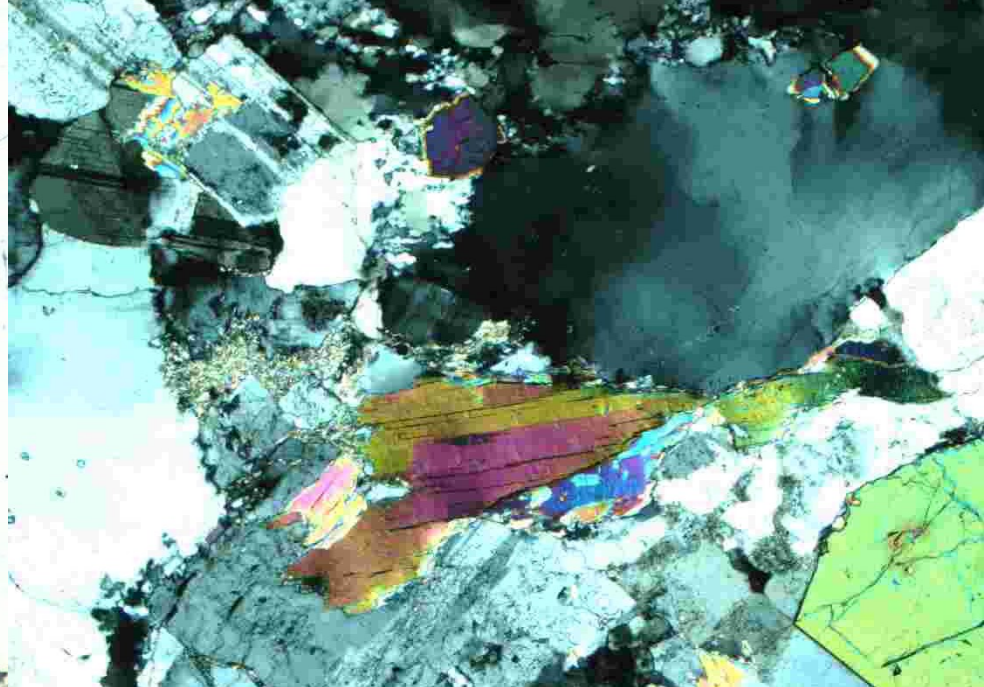
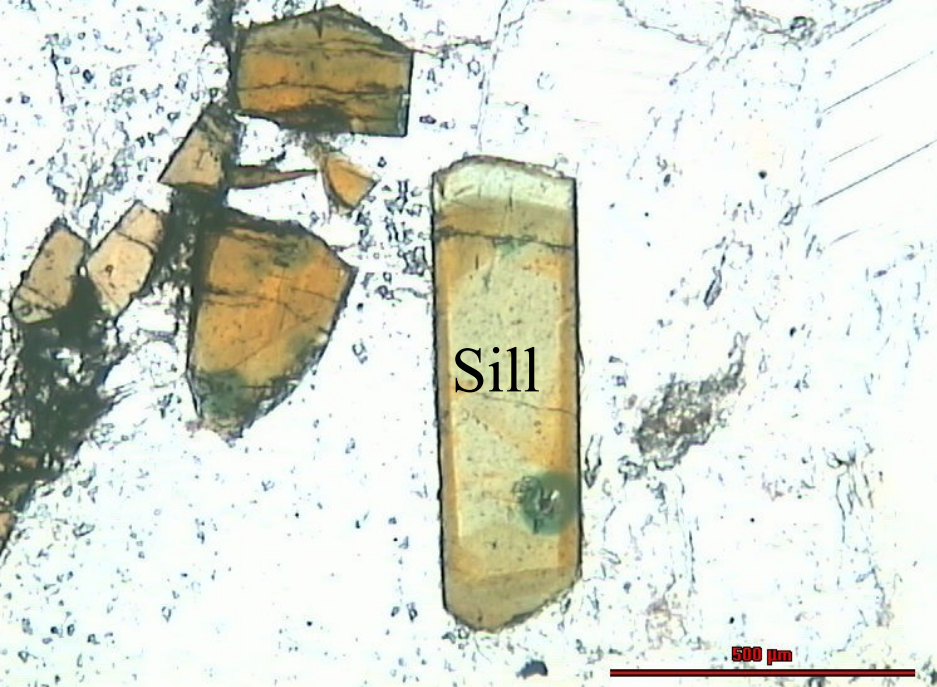


Figure 2.2. *P-T* diagram showing various subsolidus and suprasolidus muscovite breakdown reactions in the systems KASH, KNASH, and CKNASH (after Thompson and Algor 1977; Thompson and Tracy 1979). PWS = wet pelitic solidus after Thompson (1982). Labelled 20–80°C/km linear geothermal gradients are shown for reference. For chemical system and mineral abbreviations see Table 2.1.



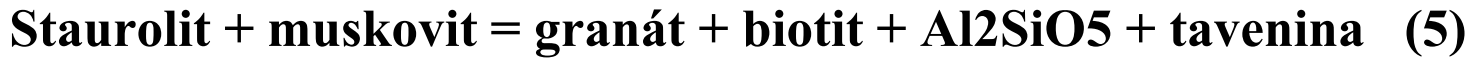
*Metagranit s turmalínom (Stará Říše, M) Qtz+Fsp+Ms+Tu*



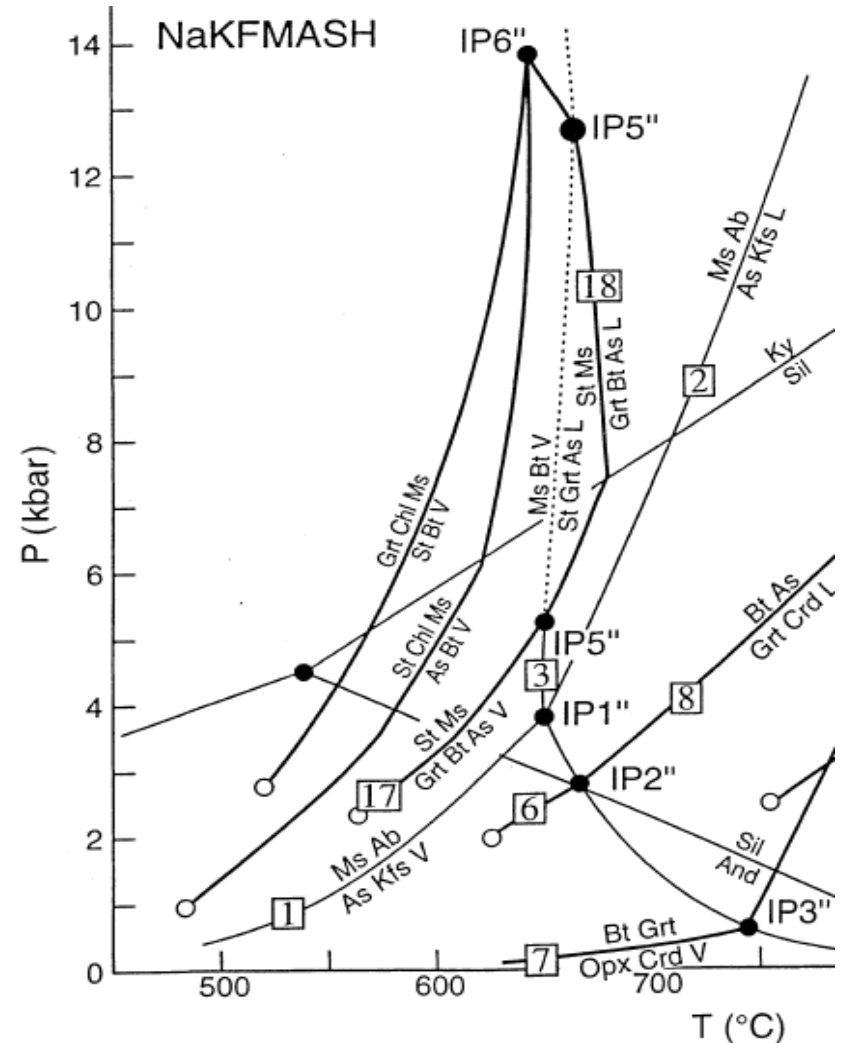
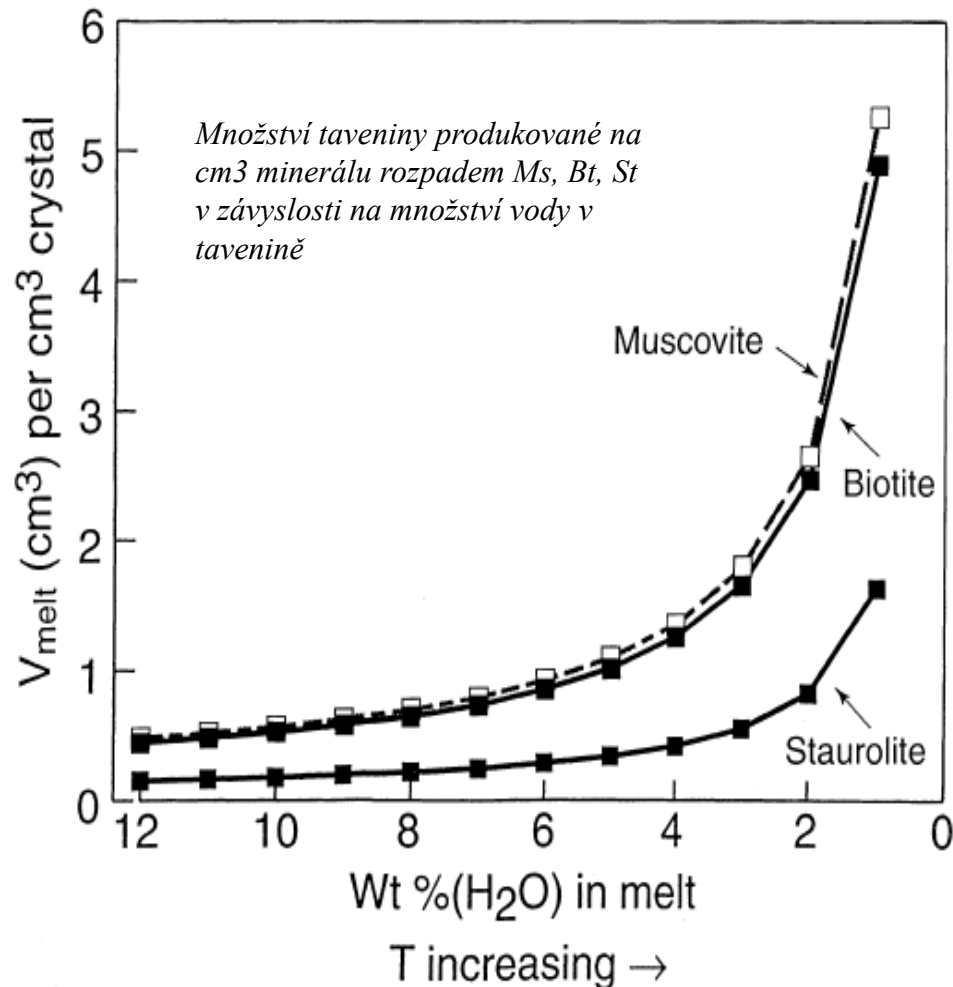
- $Pl+Kfs+Qtz+Ms\pm Bt\pm Tu \pm And$
- Akcesorické min.: apatit, zirkon, monazit, xenotim, ilmenit

## B. Staurolitové dehydratační tavení

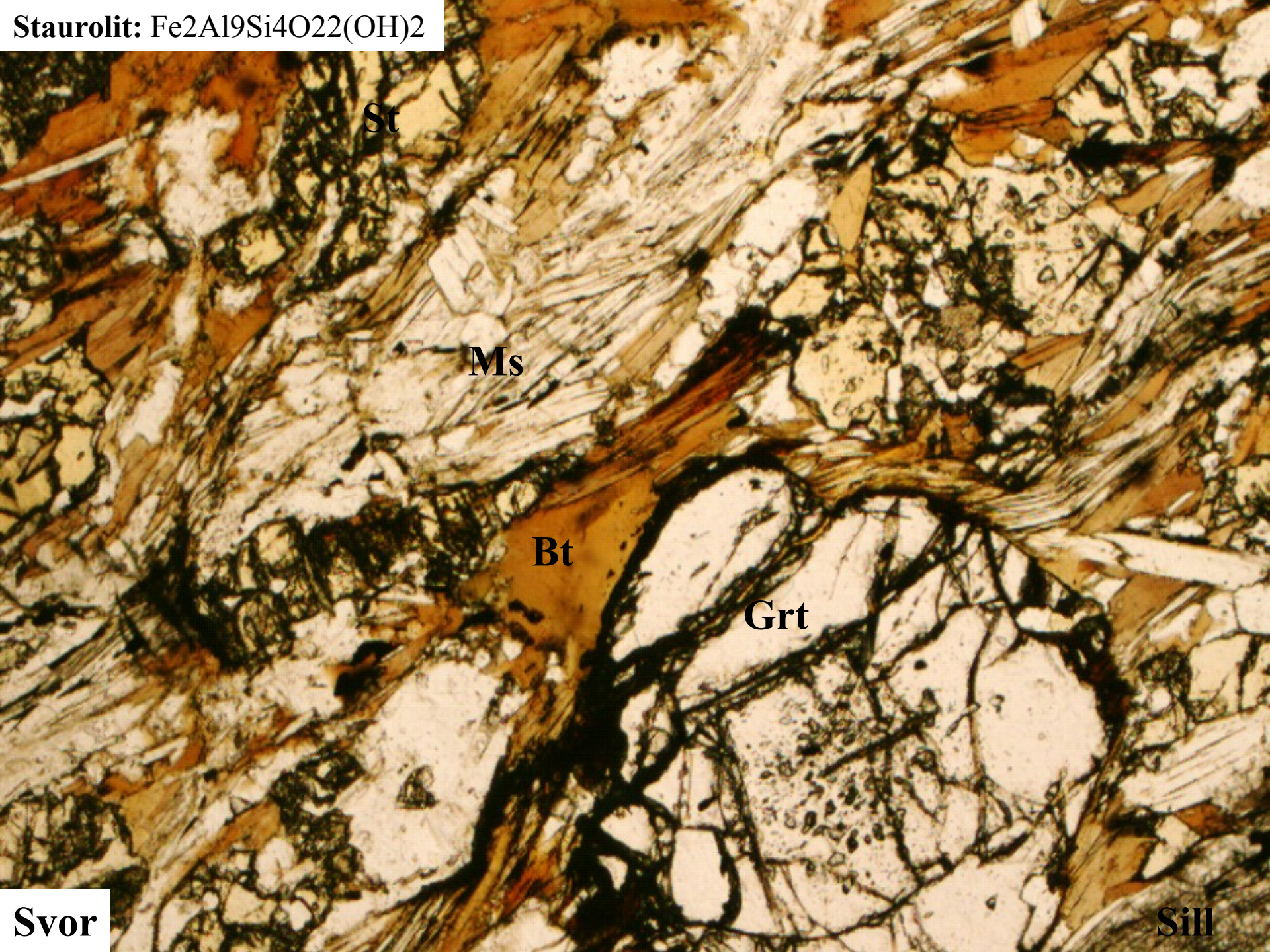
- Malé množství taveniny může vznikat i rozpadem staurolitu:



- Z 10 modálních procent staurolitu vzniknou 1,5-2 modální procenta taveniny.



**Staurolit:  $\text{Fe}_2\text{Al}_9\text{Si}_4\text{O}_{22}(\text{OH})_2$**



**St**

**Ms**

**Bt**

**Grt**

**Svor**

**Sill**

## C. Biotitové dehydratační tavení

- Další reakce produkující taveninu jsou založeny na rozpadu biotitu, k němuž může dojít několika způsoby z nichž nejběžnější jsou:

**Biotit +  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  + křemen = granát + cordierit + draselný živec + tavenina (6)**

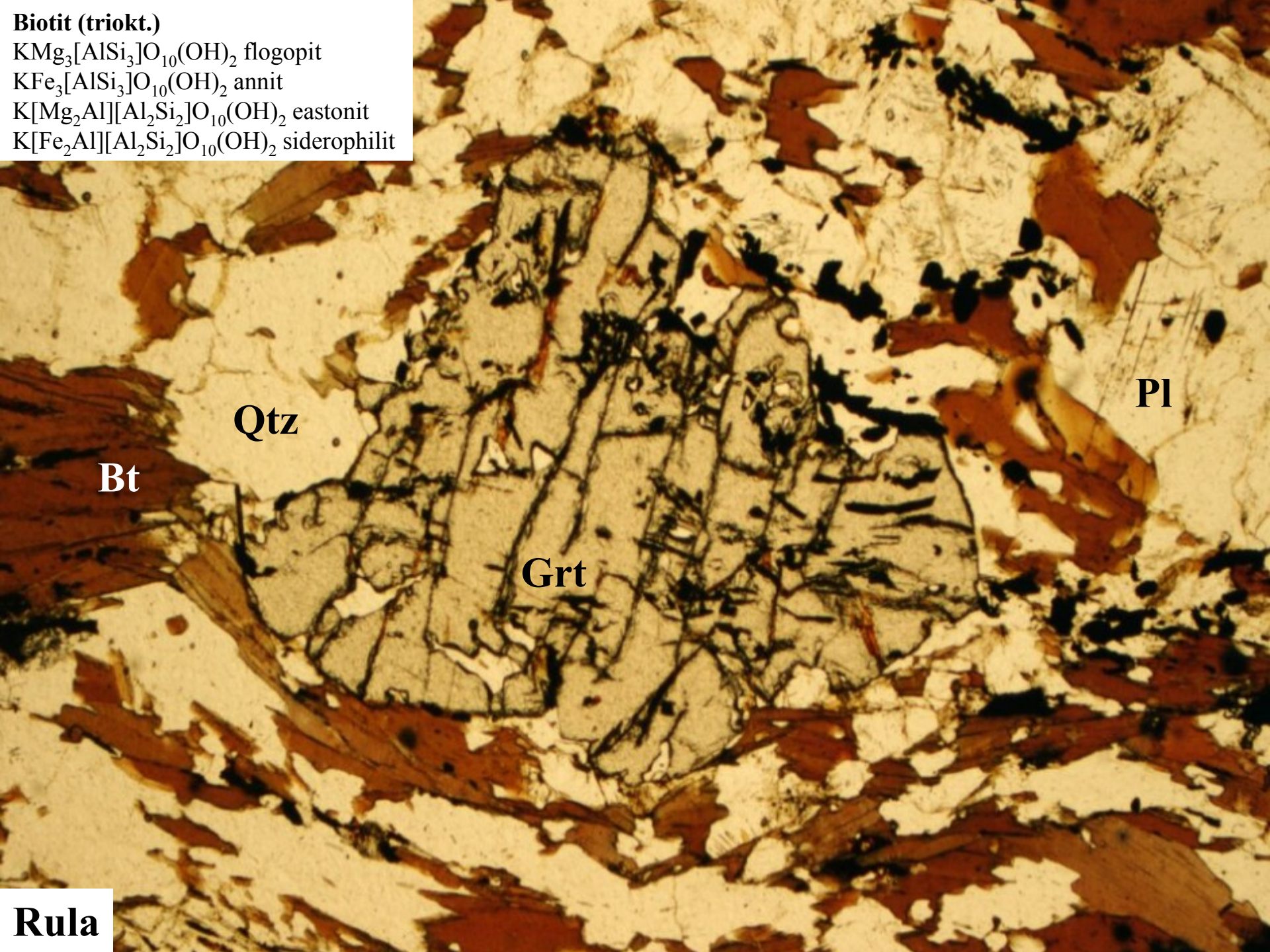
**Biotit + sillimanit = granát + draselný živec + tavenina (7)**

*Granit s granátem a  
restitickými enklávami  
(Třebíč)*

*Qtz+Fsp+Ms+Bt+Grt*



**Biotit (triokt.)**  
 $\text{KMg}_3[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  flogopit  
 $\text{KFe}_3[\text{AlSi}_3]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  annit  
 $\text{K}[\text{Mg}_2\text{Al}][\text{Al}_2\text{Si}_2]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  eastonit  
 $\text{K}[\text{Fe}_2\text{Al}][\text{Al}_2\text{Si}_2]\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  siderophilit



**Qtz**

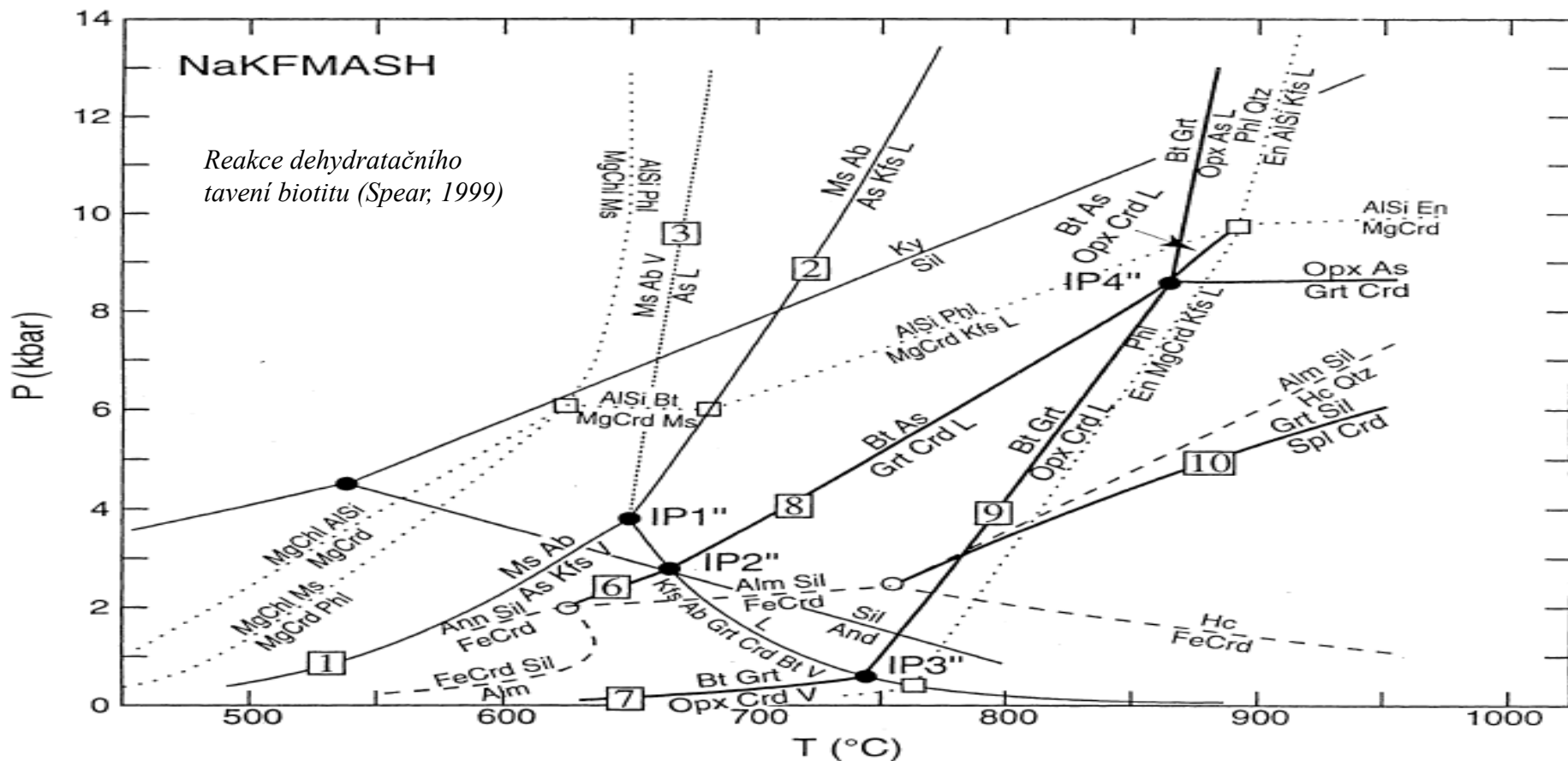
**Bt**

**Grt**

**Pl**

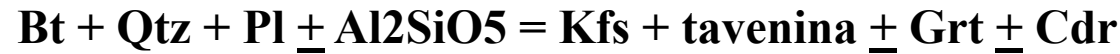
**Rula**

- Při reakci (6) je část vody uvolněné z biotitu vázaná do cordieritu (zhruba 19%).
- Hornina s 10-20 mod. % biotitu tak při tlaku 4 kbar a teplotě kolem 710 °C produkuje 7-14 mod. % taveniny.
- Za podmínek kolem 8 kbar a 850°C je rozpustnost vody v tavenině poloviční a tak ze stejného množství biotitu (10-20 modálních procent) vzniká 13-26 mod. % taveniny.
- Reakcí (7) může vzniknout z 10 modálních procent biotitu 7-16 mod. % taveniny.





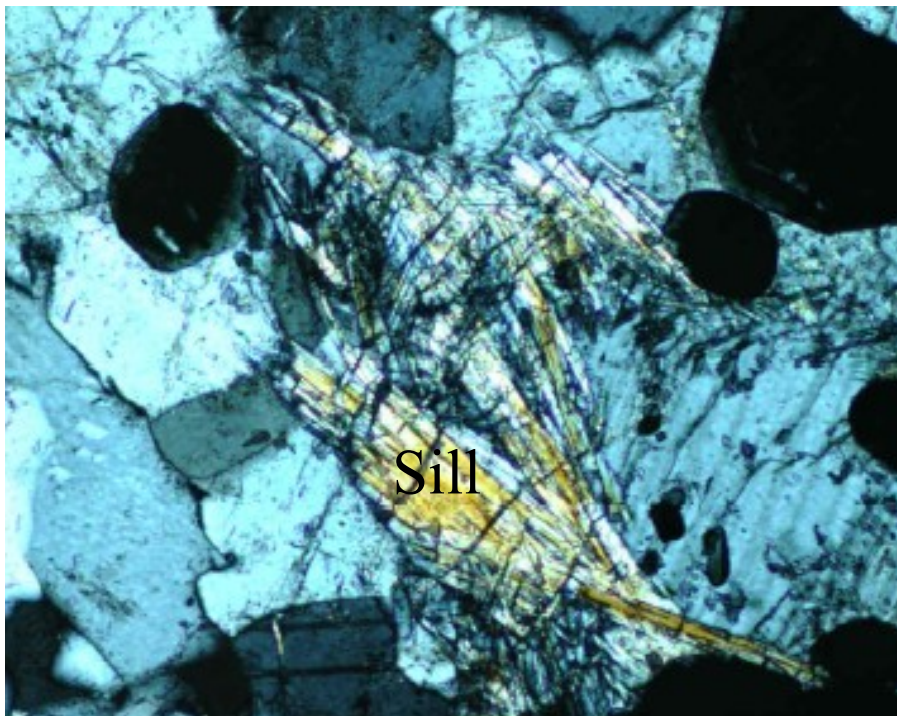
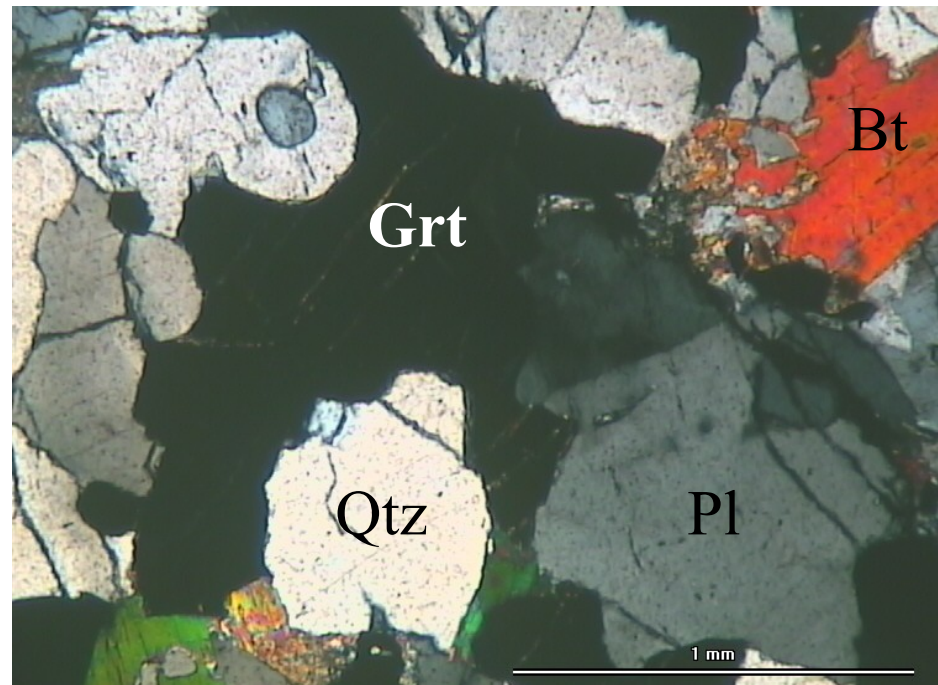
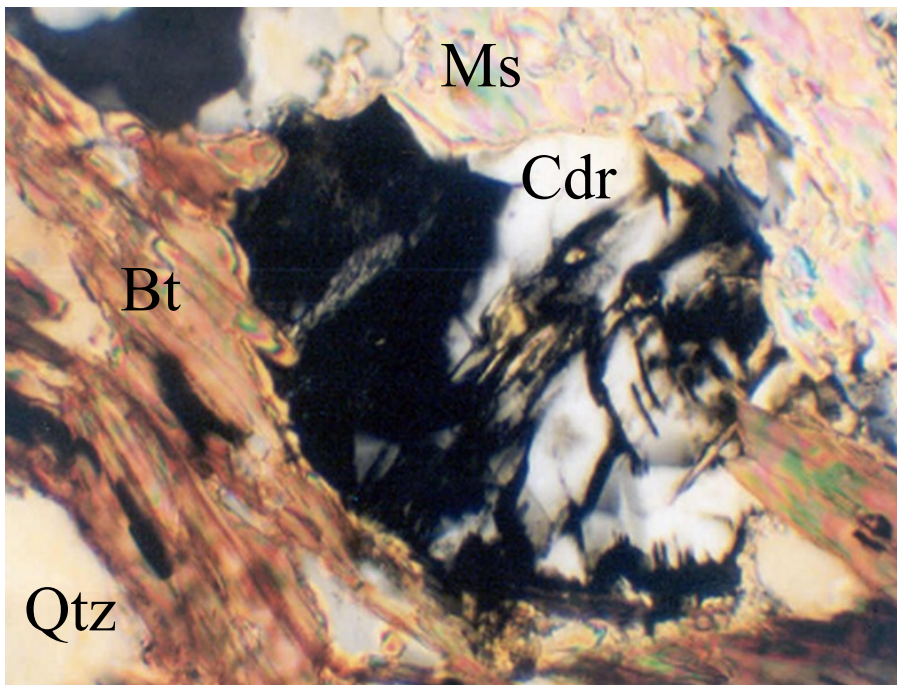
- Obecně můžeme reakce produkující taveninu rozpadem biotitu napsat takto:



- Jako další produkty se objevují Fe-Mg spinel, Ti magnetit, ilmenit, rutil, biotit, ortoamfibol
- Pozice dehydratační křivky závisí na složení biotitu.
- Vyšší obsahy Mg/(Mg+Fe), F a Ti posouvají křivku do vyšších teplot.
- Větší variabilita chemického složení biotitu vede k tomu že dehydratační tavení biotitu probíhá v širším rozsahu teplot než muskovitové dehydratační tavení.



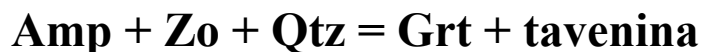
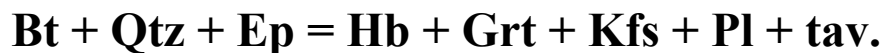
*Metagranit s granátem a turmalínom (Bystré, PK) Qtz+Fsp+Ms+Bt+Grt*



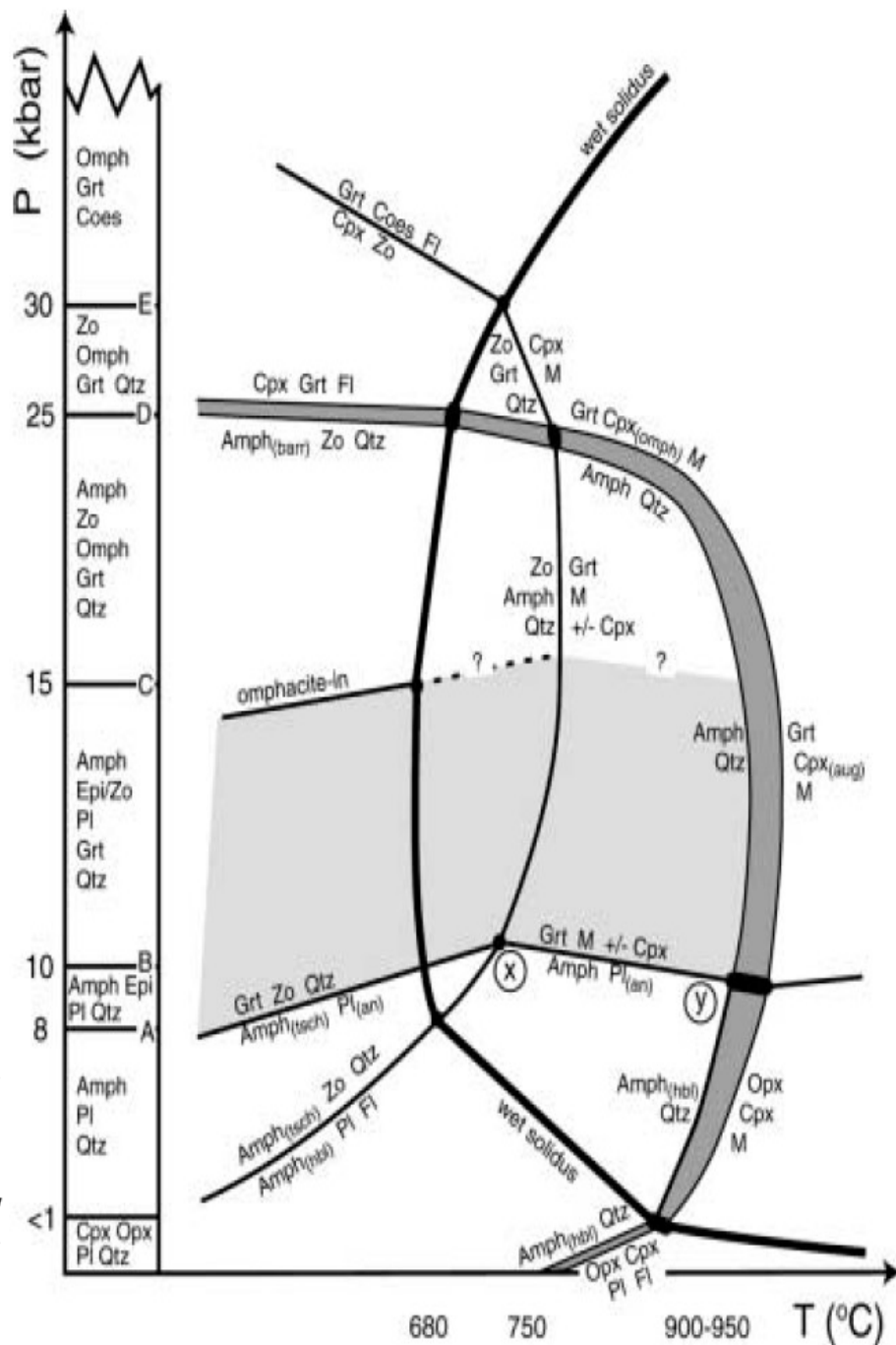
- $Pl + Kfs + Qtz + Bt \pm Ms \pm Grt \pm Tu \pm Sill$
- Akcesorické min.: apatit, zirkon, monazit, xenotim

# D. Epidotové dehydratační tavení

- Při tlacích nad 10 kbar je epidot první minerál v bazaltech a andezitech jehož rozpadem může vznikat tavenina (Vielzeuf a Schmid, 2001).
- V běžném metabazitu je 5-15 wt % epidotu a zněj vznikne jen malé množství taveniny (pod 10 %):



**Fig. 5** Phase diagram for the fluid-absent melting of a mid ocean ridge basalt (MORB) saturated with quartz/coesite at subsolidus conditions. *Column to the left* Assemblages just below the wet solidus (*thick line*). References: *A* Apter and Liou (1983); *B* Poli (1993); *C* Lambert and Wyllie (1972), and Poli (1993); *D* Pawley and Holloway (1993), Poli (1993), and see also Zhang et al. (1995) for Dabie-Shan; *E* Poli and Schmidt (1995). *Dark shaded field* Narrow multivariant field of amphibole + quartz breakdown. *Light shaded area* Wide multivariant field of amphibole + plagioclase breakdown. *Subscripts* Predominant phase components



monoklinické  
**epidot:**  $\text{Ca}_2(\text{FeAl})\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$   
**klinozoisit:**  $\text{Ca}_2\text{Al}_3((\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH}))$   
kosočtverečný  
**zoisit:**  $\text{Ca}_2\text{Al}_3((\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH}))$



Czo

Pl

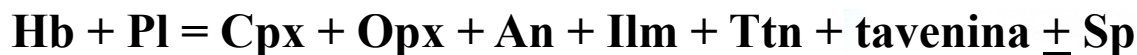
**Amfibolit s klinozoisitem**

# E. Amfibolové dehydratační tavení

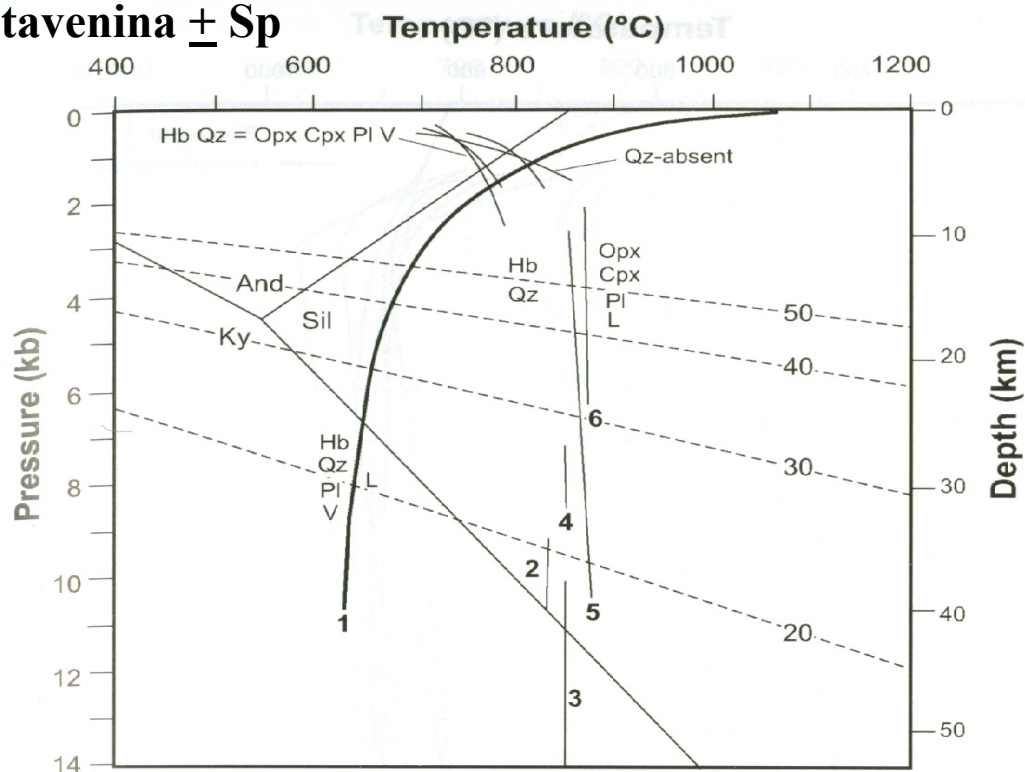
- Obecně můžeme reakce produkující taveninu rozpadem amfibolu napsat takto:



- Jako další produkty se objevují Fe-Mg spinel, titanit, ilmenit
- V systému kde není Qtz probíhá tavení za vyšších teplot reakcí:



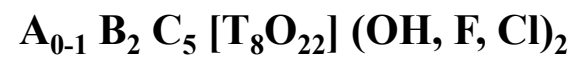
- Vyšší obsahy Mg/(Mg+Fe), F, Cl a Ti posouvají křivku tavení amfibolu do vyšších teplot.
- Biotity se při tlaku 5 kb rozpadají v rozsahu teplot 690-820 °C a amfiboly 920-970 °C v závislosti na složení.



*Reakce dehydratačního tavení amfibolu*

Hb + Qz and Hb with no Qz reaction curves from Choudhuri and Winkler (1967); Binns (1969); Spear (1981); 1. Piwinski (1968; tonalite 101); 2. Conrad et al. (1988); 3. Winther and Newton (1991); 4. Rushmer (1991); 5. Patiño-Douce and Beard (1995); 6. Beard and Lofgren (1991). Al-Silicate stability fields after Pattison (1992). Labelled 20–50°C/km linear geothermal gradients

Obecný vzorec amfibolu:

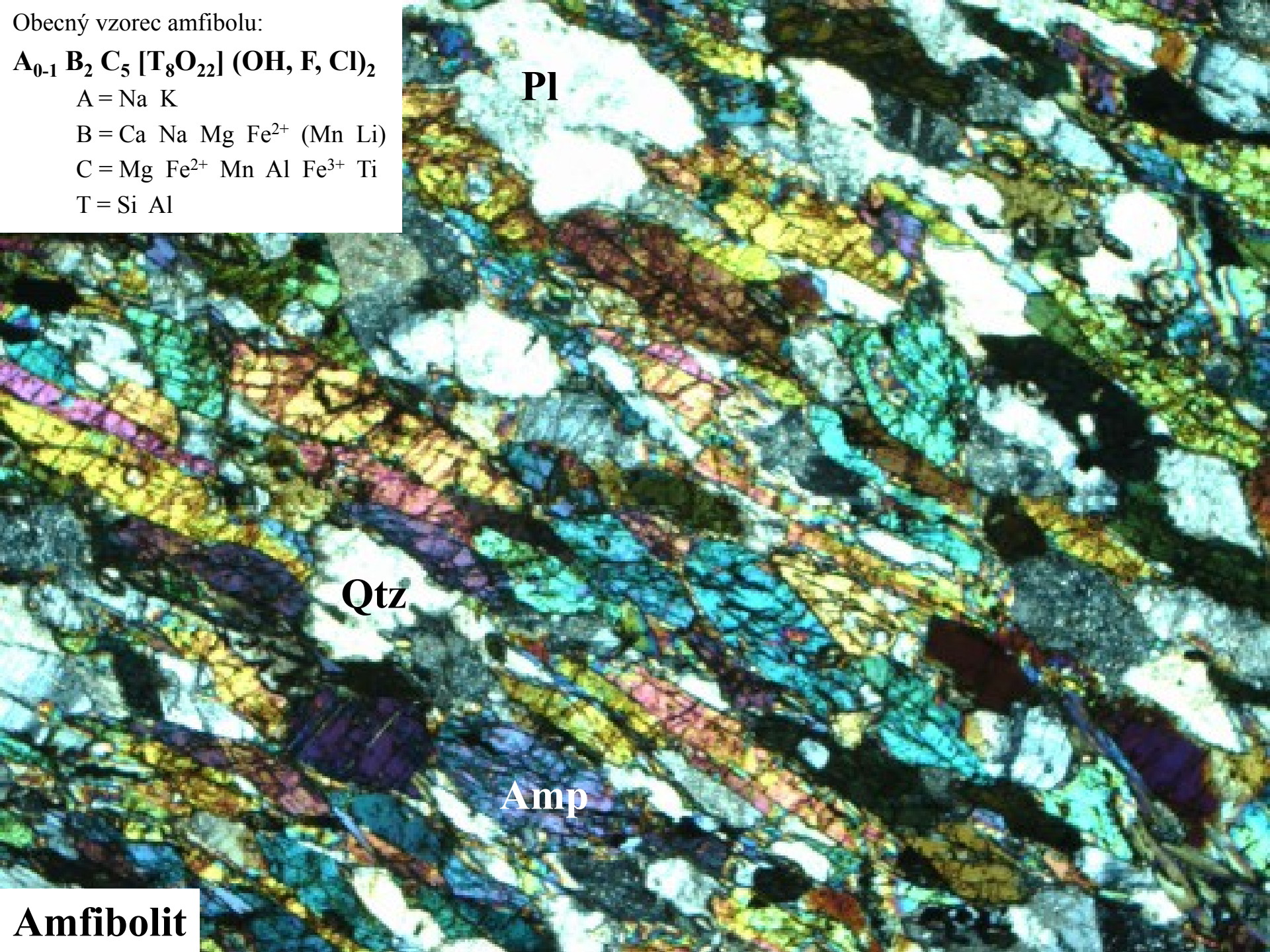


A = Na K

B = Ca Na Mg  $Fe^{2+}$  (Mn Li)

C = Mg  $Fe^{2+}$  Mn Al  $Fe^{3+}$  Ti

T = Si Al

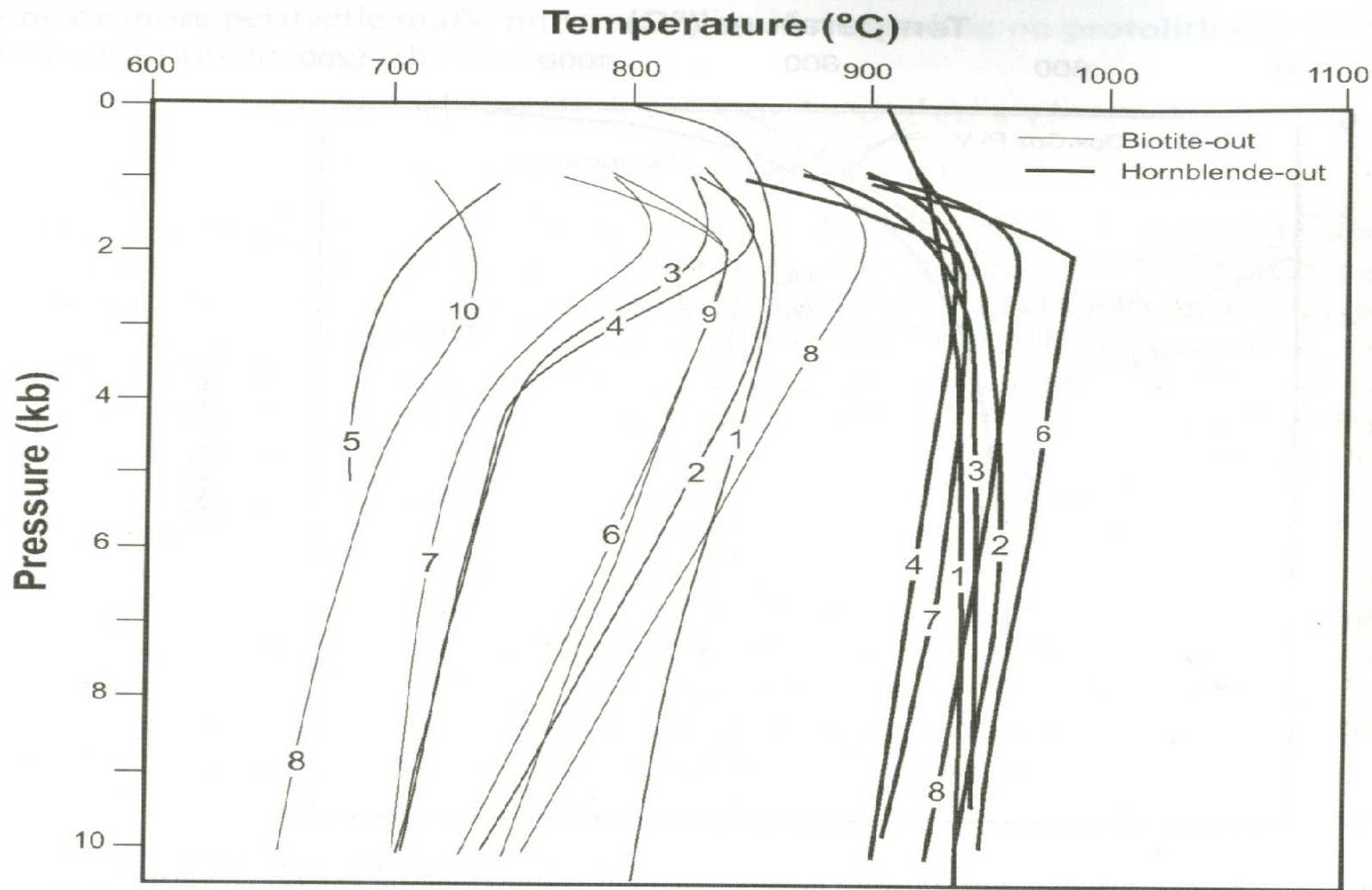


Pl

Qtz

Amp

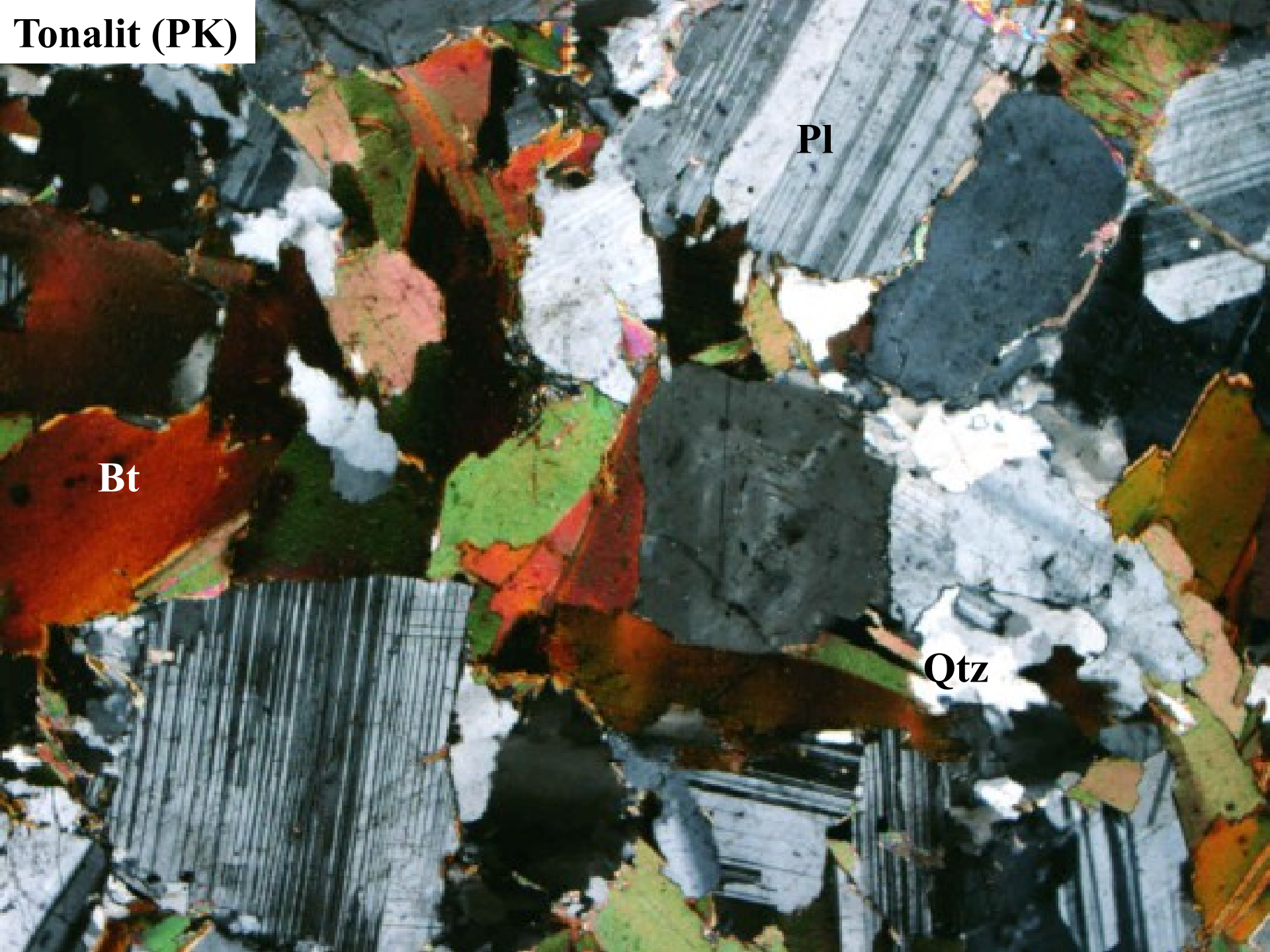
**Amfibolit**



*Figure 2.5. P-T diagram showing biotite- and hornblende-out reaction curves for various granitic compositions. 1. Tonalite (101) (Stern and Wyllie 1975); 2. Tonalite (101) (Piwinskii 1973a); 3. Granodiorite (103) (Piwinskii 1973a); 4. Granodiorite (102) (Piwinskii 1973a); 5. Granite (104) (Piwinskii 1973a); 6. Quartz diorite (DR510) (Piwinskii 1973b); 7. Quartz diorite (DR126) (Piwinskii 1973b); 8. Quartz diorite (CP2-1) (Piwinskii 1973b); 9. Granodiorite (JSP6-2) (Piwinskii 1973b); 10. Monzodiorite (MO-18) (Piwinskii 1973b).*



**Tonalit (PK)**



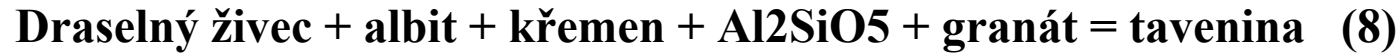
**Pl**

**Bt**

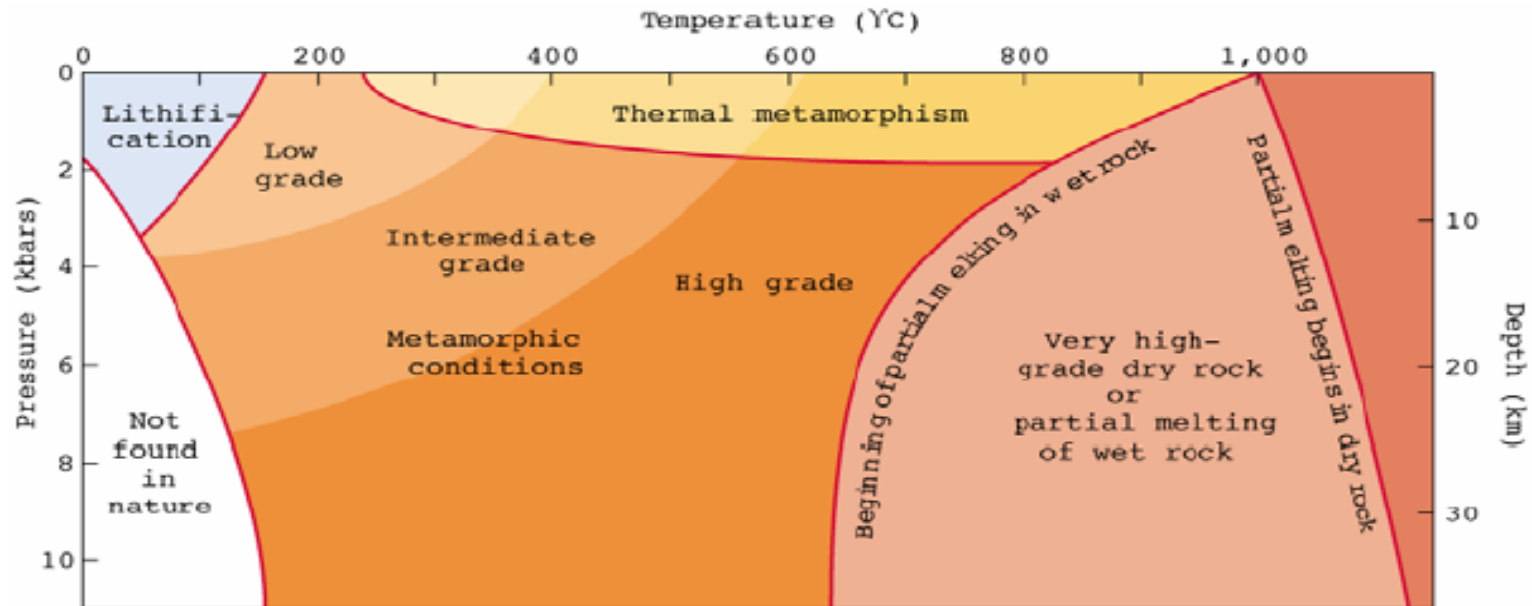
**Qtz**

# F. Bezvodé tavení

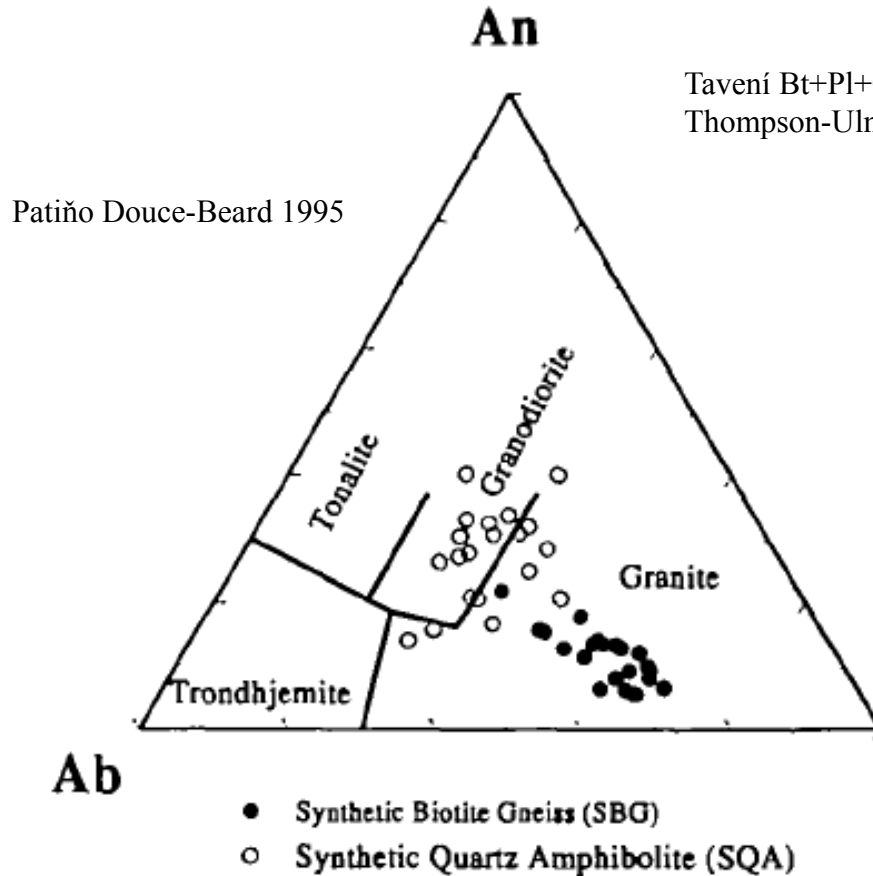
- Reakce produkující taveninu mohou probíhat dokonce i když je zkonsumován všechen biotit a muskovit, například reakcí:



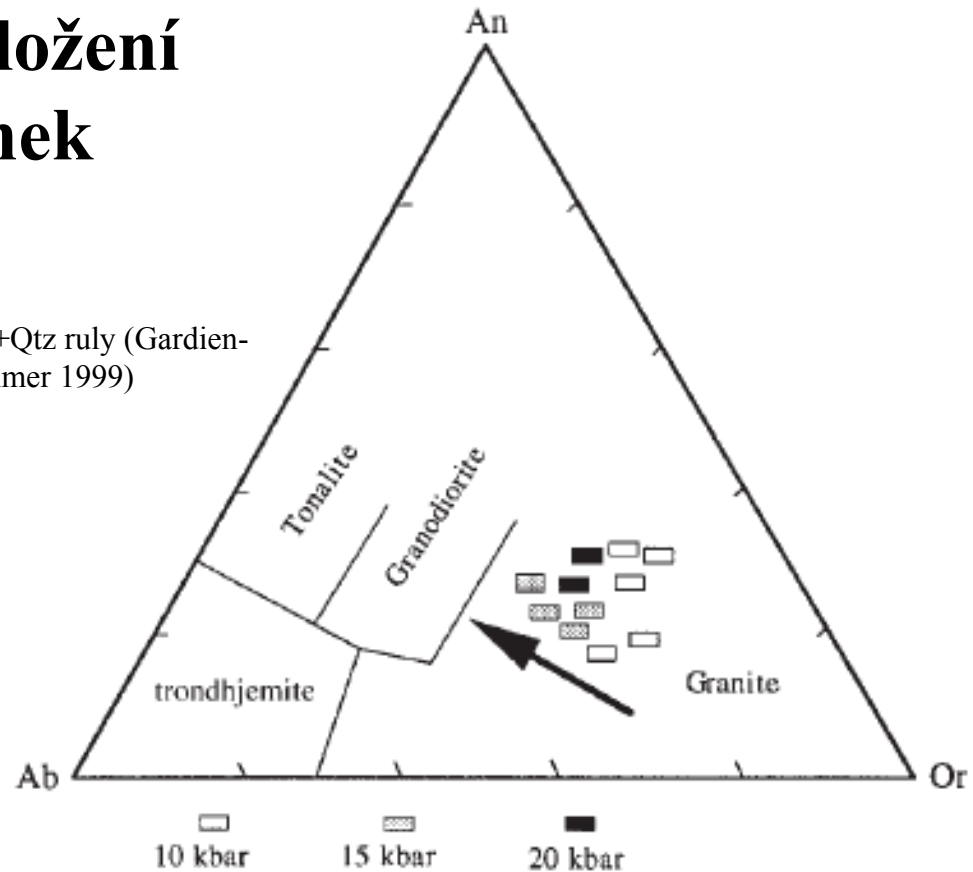
- Pokud hornina prošla těmito reakcemi, pohybuje se množství vzniklé taveniny kolem 26 mod. %.
- Takové množství taveniny se může uvolnit z matečné horniny a migrovat jako granitická tavenina. Clemens a Vielzeuf (1987) odhadují množství taveniny kritické pro zahájení její migrace na 20-35 obj. %.
- Jakmile v hornině nejsou další minerály, které by svým rozpadem mohly produkovat vodu a tavenina již opustila matečnou horninu, zastaví se i proces tavení probíhající díky reakci (8).



# III. 3. Vliv chemického složení protolitu a PT podmínek



Tavení Bt+Pl+Qtz ruly (Gardien-Thompson-Ulmer 1999)



- Chemické složení taveniny je ovlivněno složením protolitu, množstvím fluid a PT podmínkami vzniku

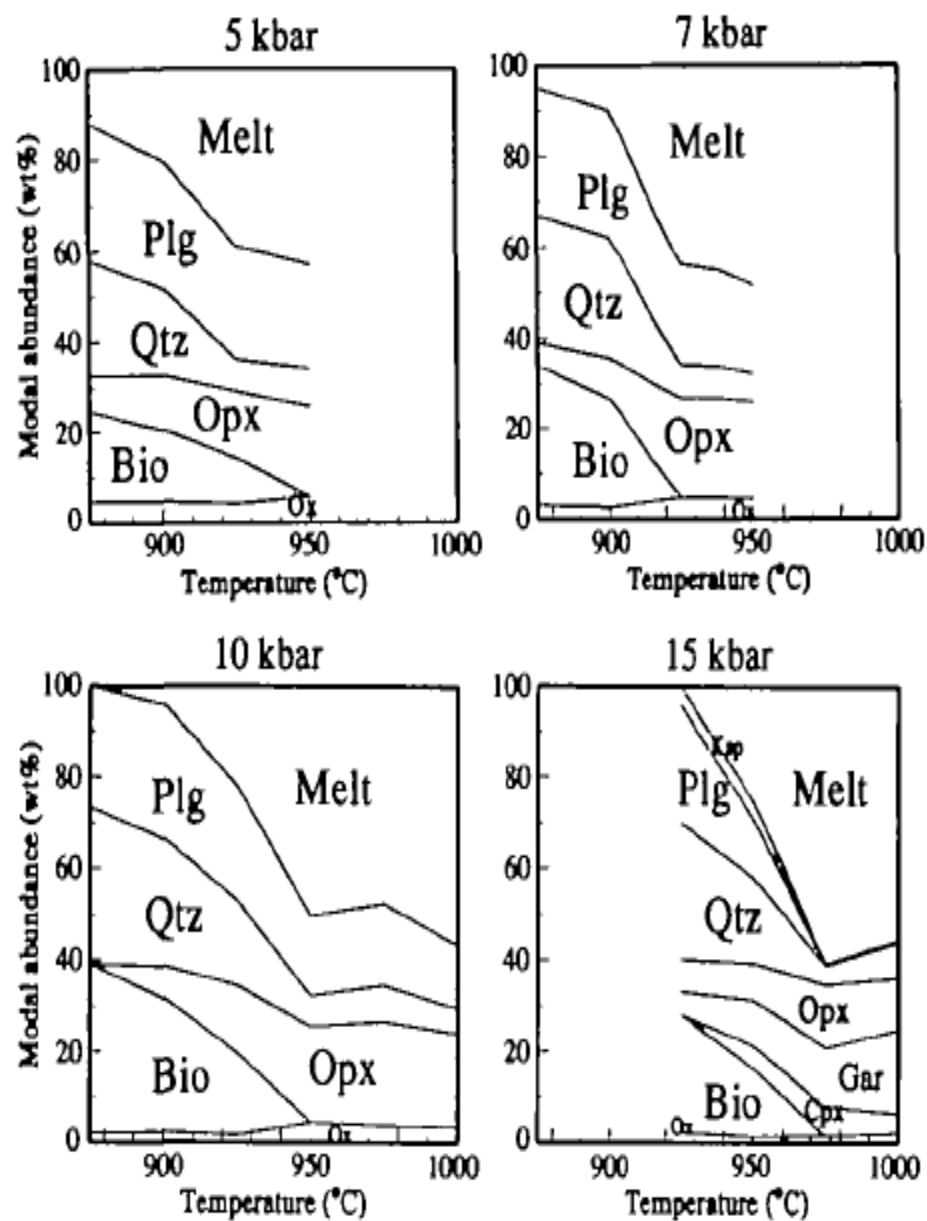


Fig. 6. Isobaric changes in modal compositions in SBG. Modes calculated by mass balance (see text and Table 4).

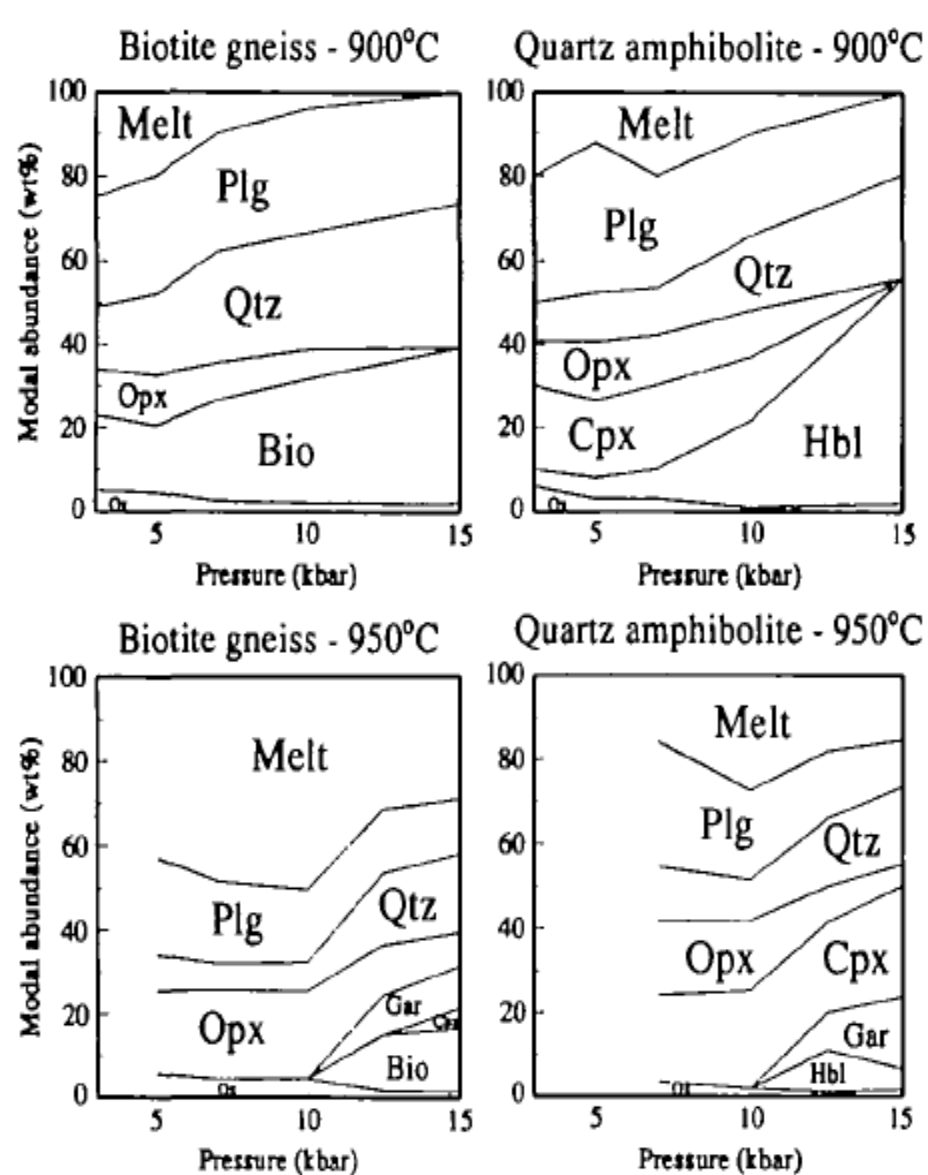


Fig. 8. Isothermal changes in modal compositions in SBG (left panels) and in SQA (right panels). Data for 12.5 kbar at 950°C interpolated between runs at 930°C and 960°C (see Table 4).

- Metasedimenty produkují taveninu převážně o složení granit až granodiorit
- Intermediální horniny produkují taveninu převážně granodioritového až tonalitového složení
- Bazické horniny produkují taveninu převážně tonalitového složení
- Draslíkem bohaté mafické horniny produkují taveninu granodioritového až adamelitového složení

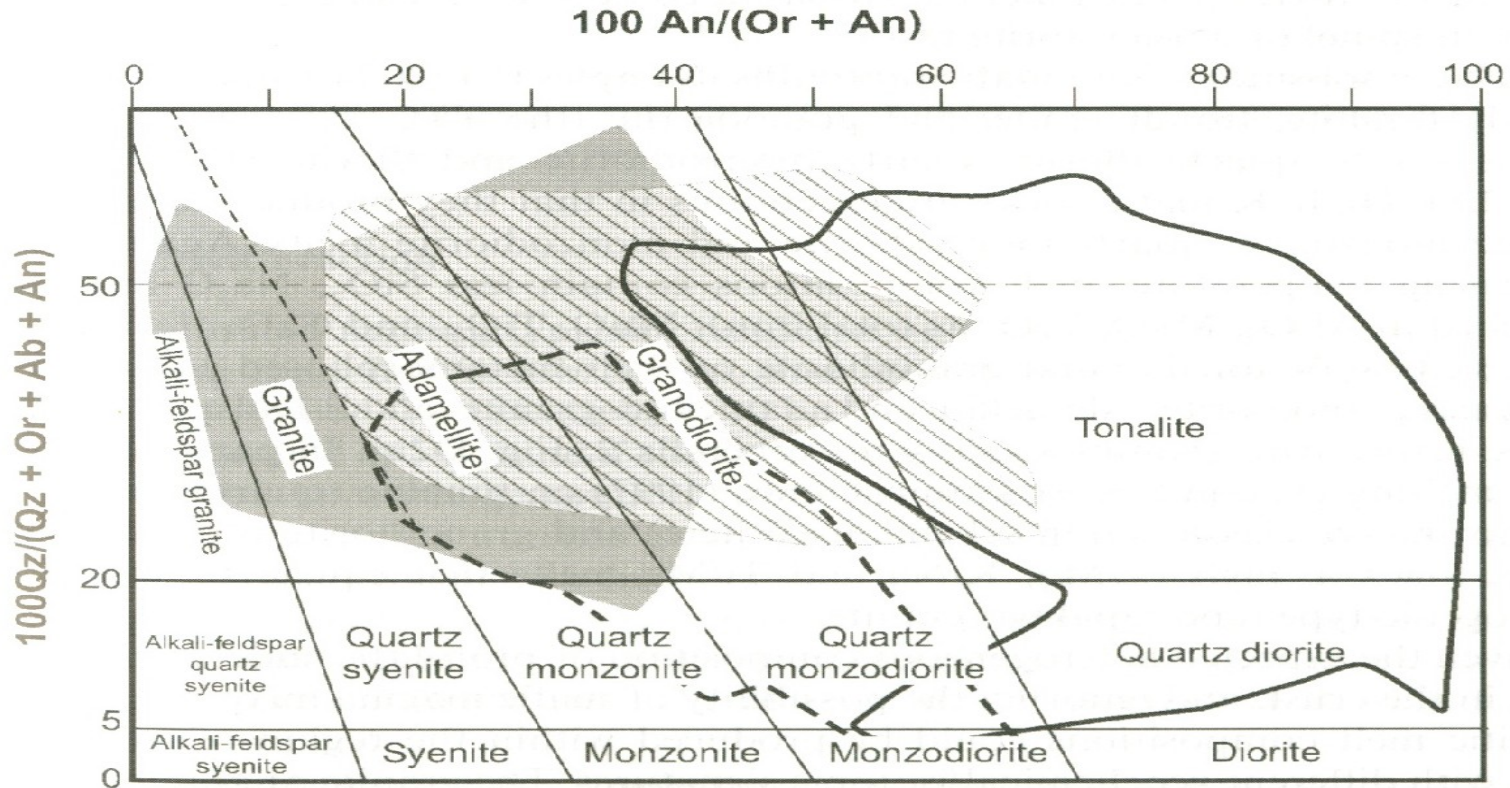
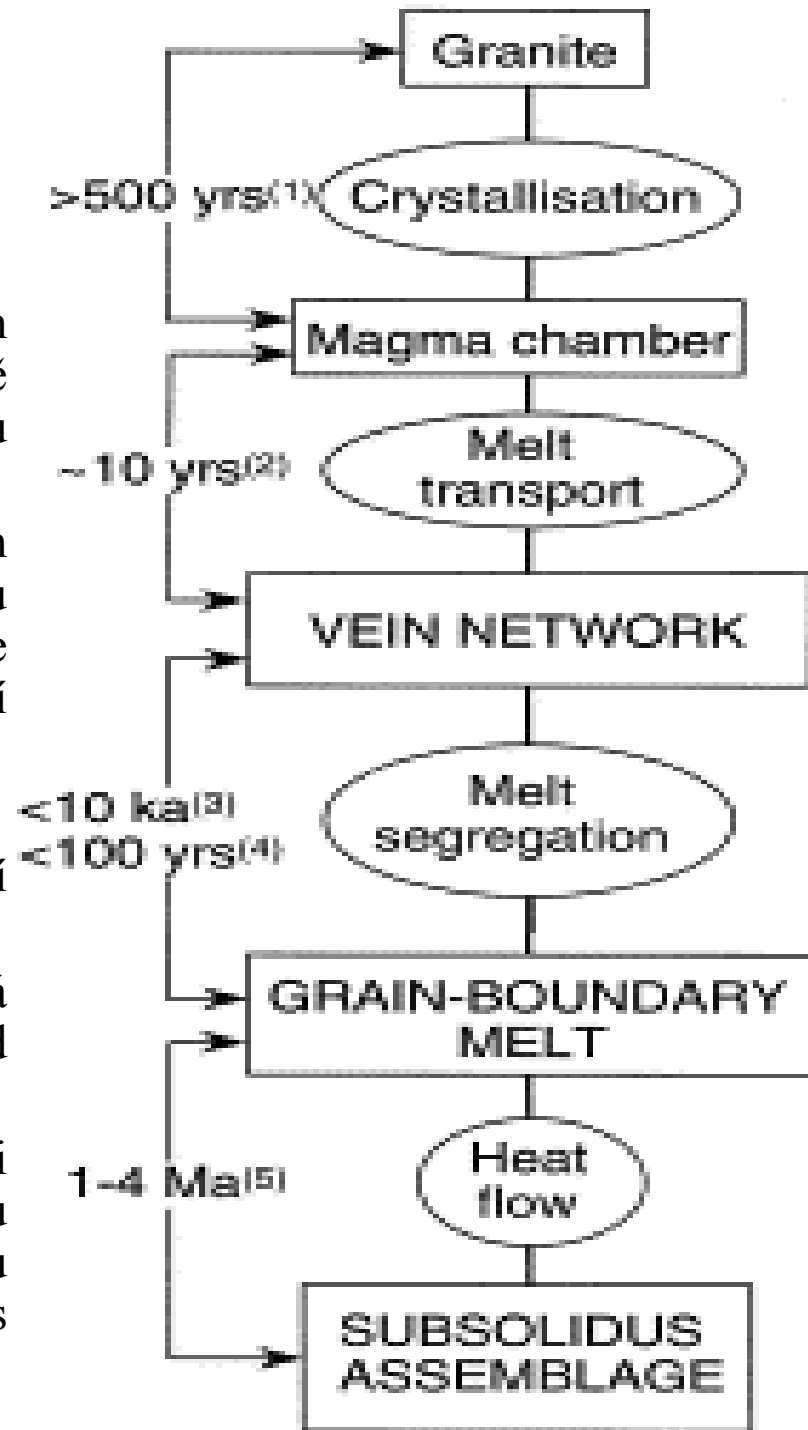


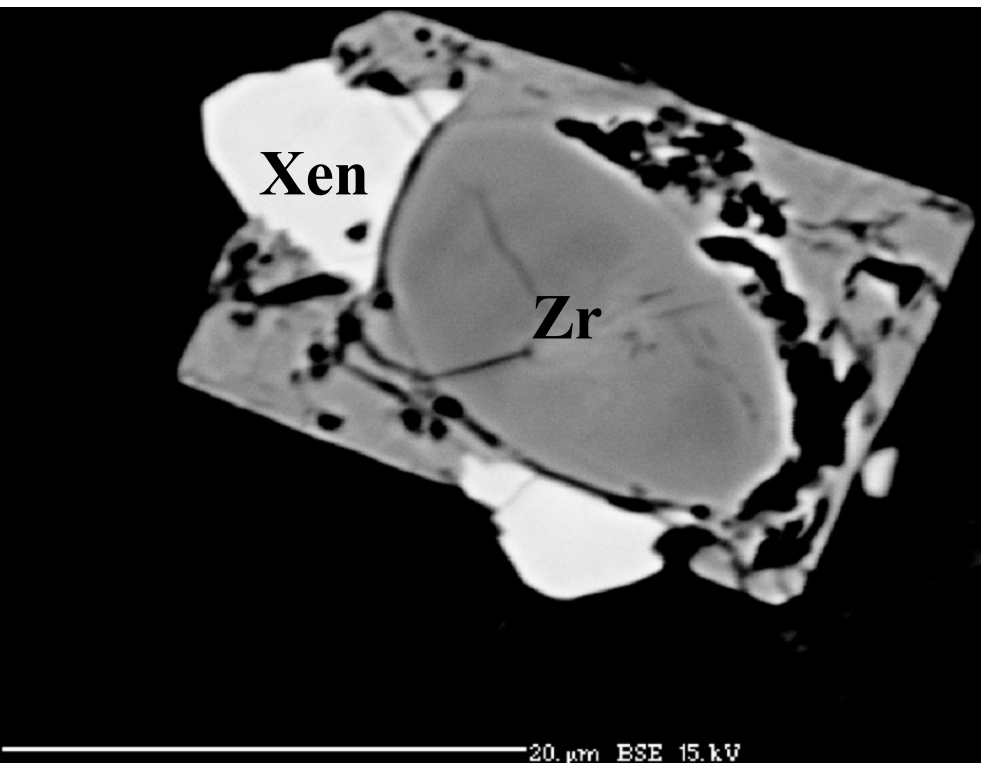
Figure 2.8. Summary diagram showing normative Qz, Or, Ab, An ratio composition fields of granite melts derived from melting of mica-bearing metasediments (grey-tone field); intermediate compositions (diagonal hatched field), mafic compositions (unshaded field enclosed by solid line; field enclosed by dashed line = K-rich mafic rocks). See Appendix 2 for details.

# III. 4. Rychlost procesů produkujících granitovou taveninu

- Tu a Ms-Bt granity vzniklé dehydratačním tavením indikují vznik za nízkého stupně parciálního tavení ( $F < 0.2$ ), ke vzniku taveniny dochází během 1-4 Ma.
- Rozdíly v chemickém složení a Sr izotopech jsou způsobeny odlišným složením protolitu a rozdílnou aktivitou vody během anatexe nebo rozdílným stupněm frakční krystalizace.
- Tavenina vzniká na hranici zrn.
- Přičemž k tomu aby reakce proběhla stačí často jen několik týdnů.
- Reakci navíc urychluje nejen zvýšená teplota ale i případná přítomnost fluid (inkongruentní tavení)
- Tavenina vzniklá takovým tavením je oproti typické tavenině vzniklé v minimu nabohacena na Si a Na díky rychlému rozpouštění paragonitové komponenty v Ms a křemene



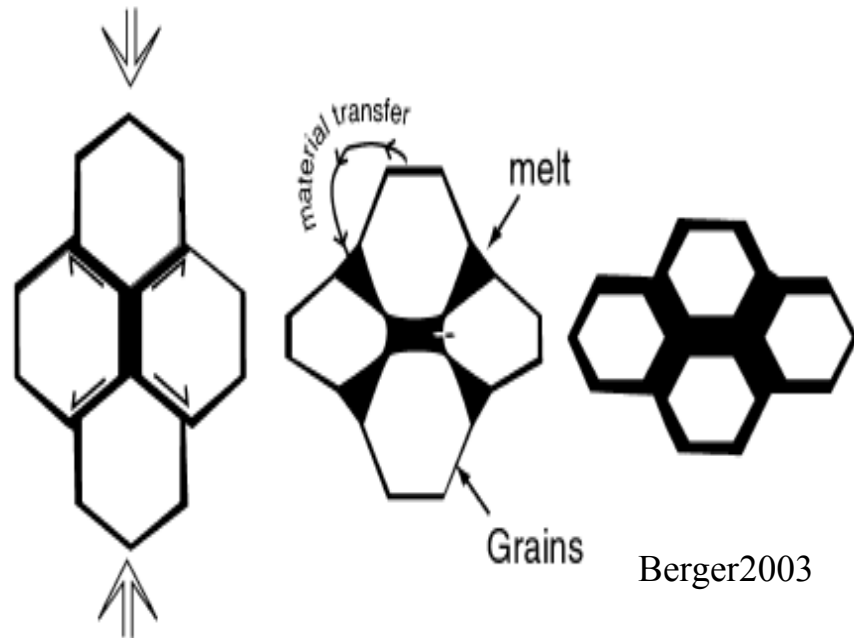
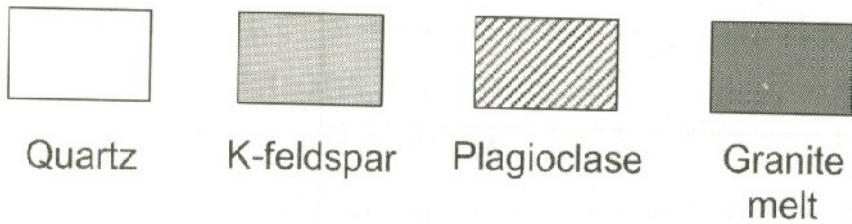
- Koncentrace LREE a Zr v granitické tavenině vzniklé anatexí závisí na rychlosti rozpouštění monazitu a zirkonu.
- Rychlost rozpouštění těchto minerálů závisí na: množství vody v tavenině, teplotě a rychlosti ohřevu protolitu.
- Pokud rychlost uvolňování taveniny z protolitu překročí rychlost rozpouštění těchto minerálů vznikne tavenina která není staurovaná Zr a LREE.
- Protože rychlost rozpouštění monazitu je menší než zirkonu (při určitých podmínkách) může při rychlém uvolnění taveniny vznikat magma saturované Zr ale podsycené LREE (Harris et al. 2000).
- Himalájské granity ukazují právě toto nenasycení LREE (různá teplota Mnz a Zr term.)
- To ukazuje že k oddělení magmatu došlo za méně než 10 tisíc let.



- Tavenina je z oblasti svého vzniku transportována do magmatického krbu kde může docházet ke změnám jejího složení v důsledku asimilace hornin z okolí a frakční krystalizace.
- Transport taveniny a její krystalizace může být u malých těles peraluminických granitů velmi rychlý řádově stovky let.
- U větších těles to mohou být tisíce let.



- Vznik a vývoj taveniny závisí na rychlosti ohřívání protolitu a ta je závislá na tektonickém prostředí.
- Množství taveniny při kterém se již může migrovat mezi zrna závisí na mnoha faktorech (nejméně  $F > 0.08-0.05$ )
- Výrazným faktorem je směrný tlak

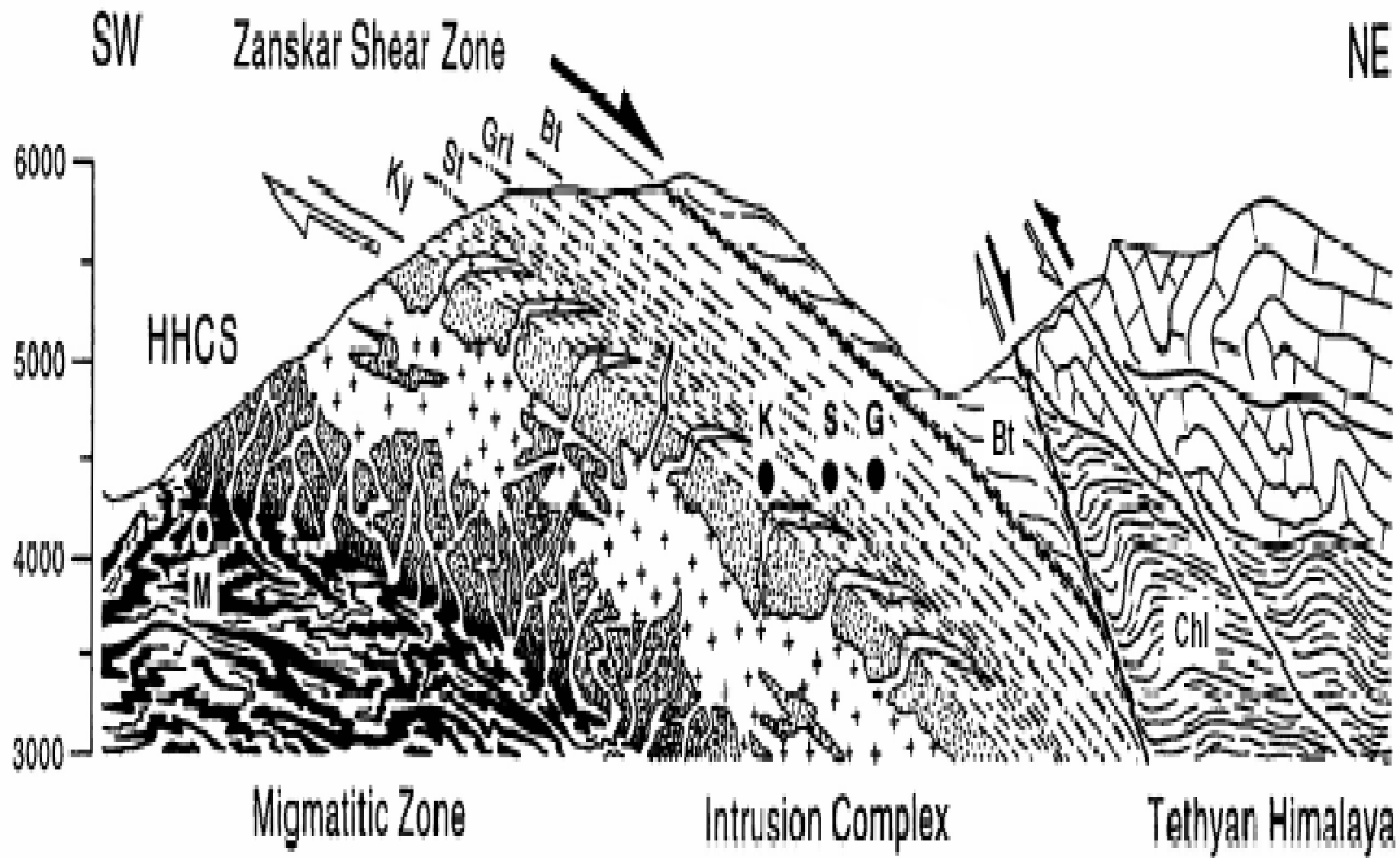


Tavení Qtz+Fsp v granulitech při 760 2 kbar a 3 dnů (Mehnert et al. 1973)





**Amfibolit na střižné zóně tonalitová tavenina**





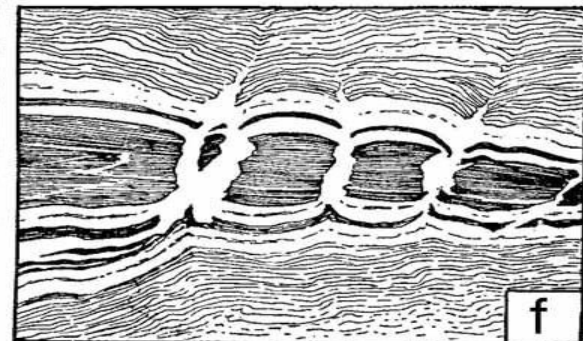
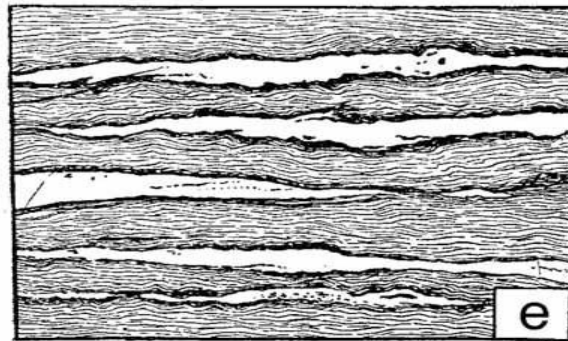
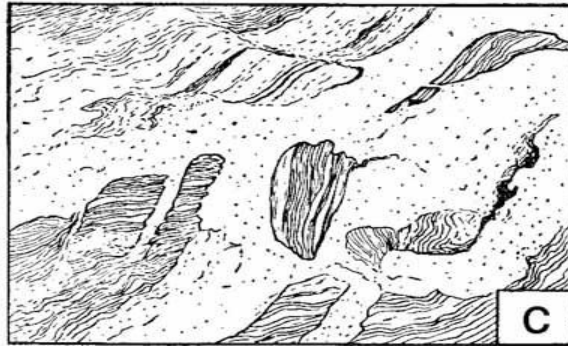
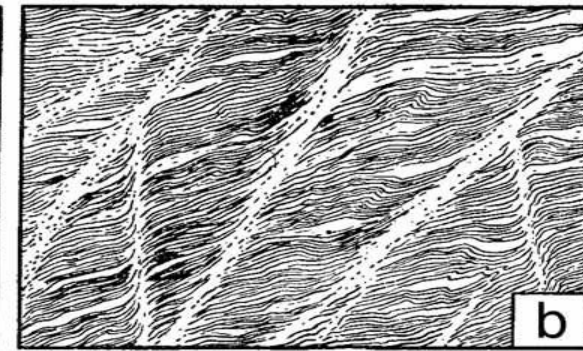
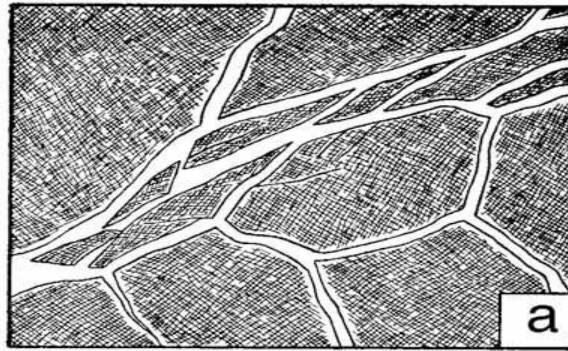
lom Křepínky – moldanubikum  
nově vzniklá tavenina (pegmatit)

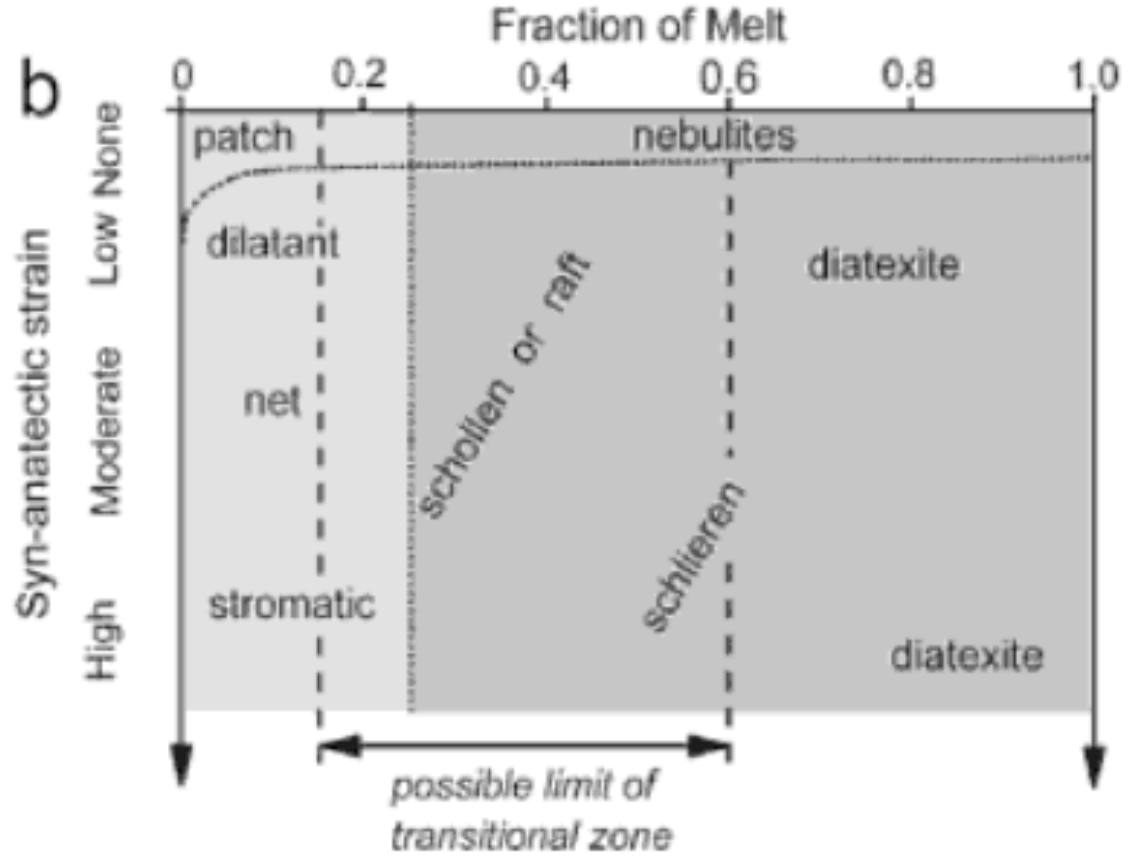
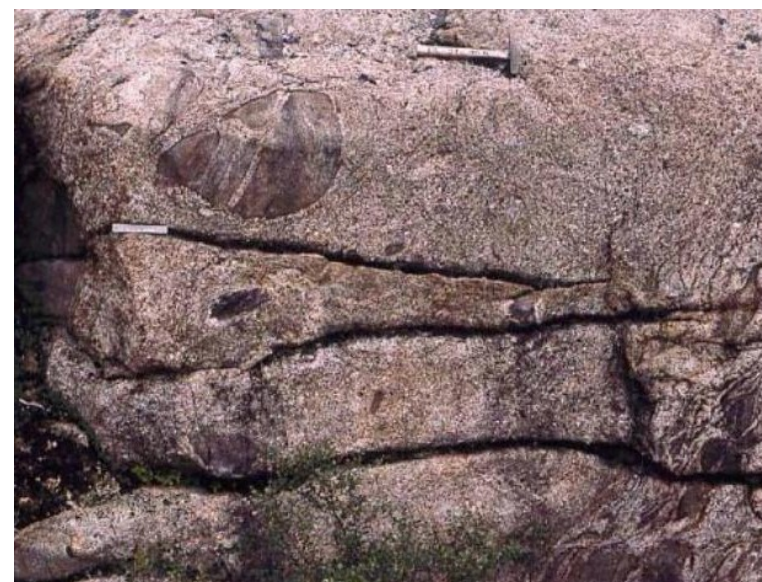
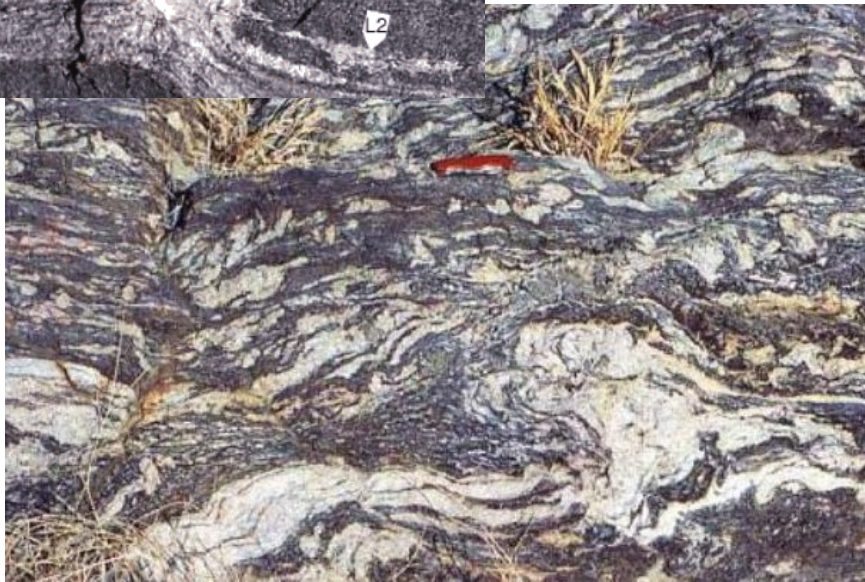
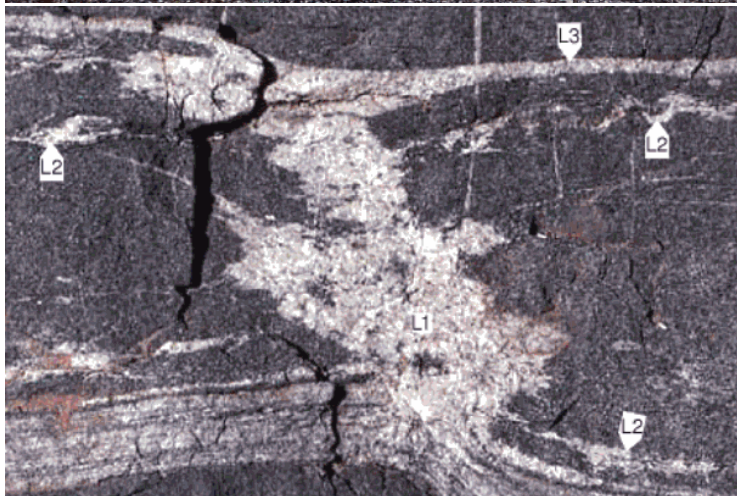


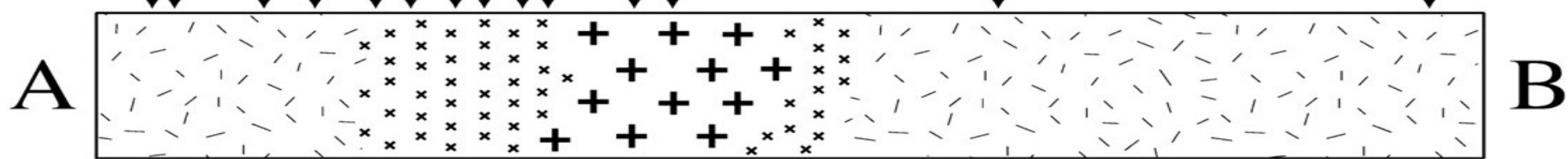
Tu granit - moldanubikum

# III. 5. Migmatitizace

- a. Agmatit (Breccia structure):  
ostrohrannné úlomky melanosomu  
tmelené leukosomem .
  - b. Diktyonity (Net-like structure):  
leukosom tvoří rozvětvenou síť žilek.
  - c. Agmatit s převahou leukosomu  
(Raft-like structure).
  - d. Migmatit s ptygmatickými žilkami  
- žilky silně zprohýbané.
  - e. Stomatit (Stromatic structure)  
střídají se pásy leukosomu a  
melanosomu a pásy probíhají více  
méně rovně.
  - f. Dilatonit (Dilation structure).
  - g. Stomatit s převahou leukosomu  
(Schleiren structure).
  - h. Nebulitický migmatit (Nebulitic  
structure): melanosom tvoří  
rozplývavé skvrny v leukosomu.
- Upraveno podle knihy: Mehnert  
(1968) Migmatites and the Origin of  
Granitic Rocks. Elsevier.*







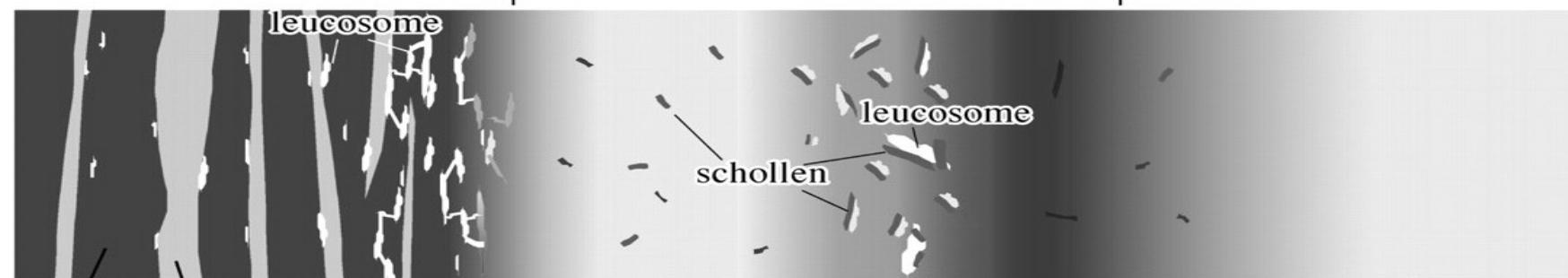
Saito S et al. *J. Petrology* 2007;48:79-111

Metatexite

Diatexite

Crd-tonalite

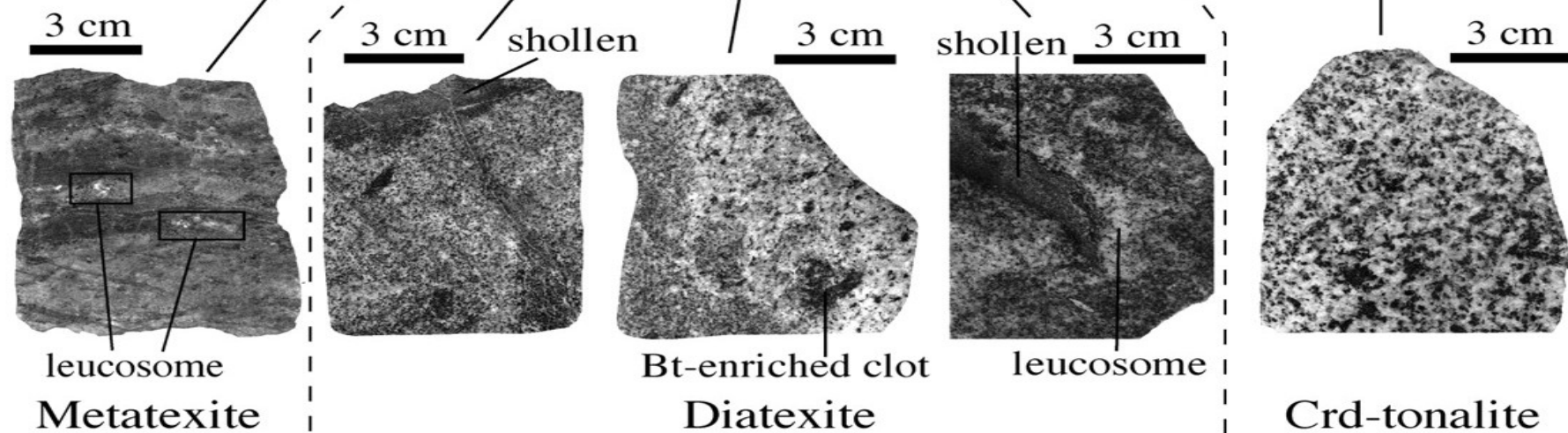
(b)

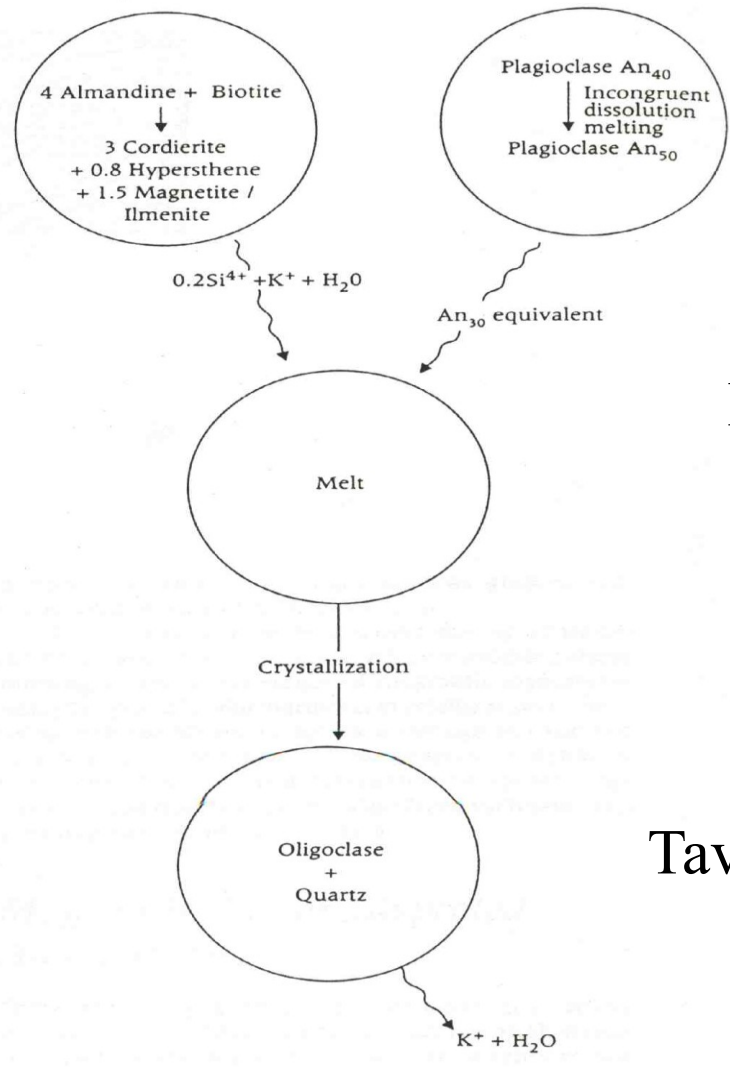
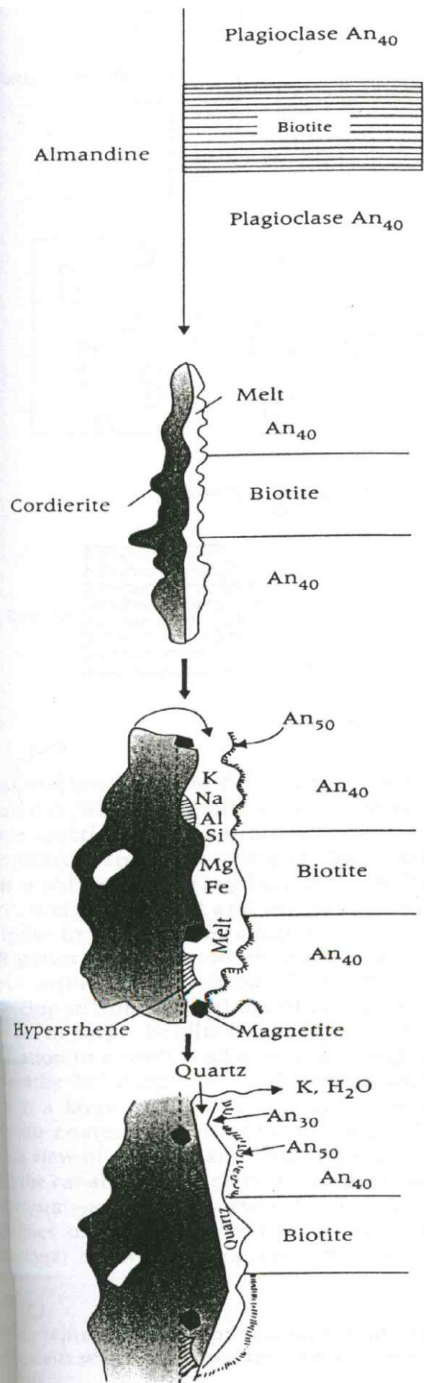


pelitic layer

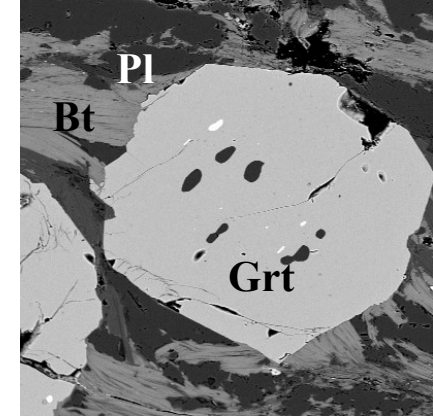
psammitic layer

(c)

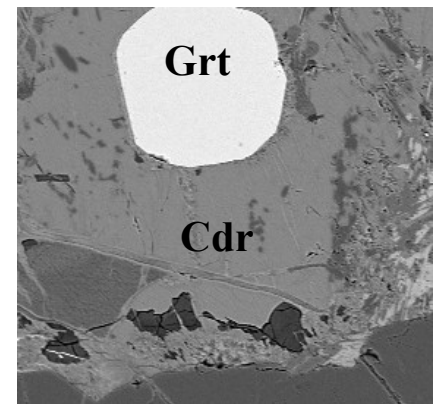




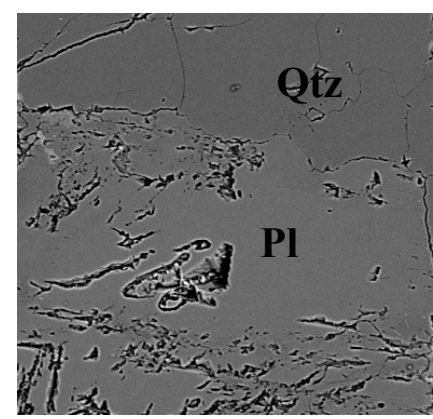
Rula



Restit



Tavenina

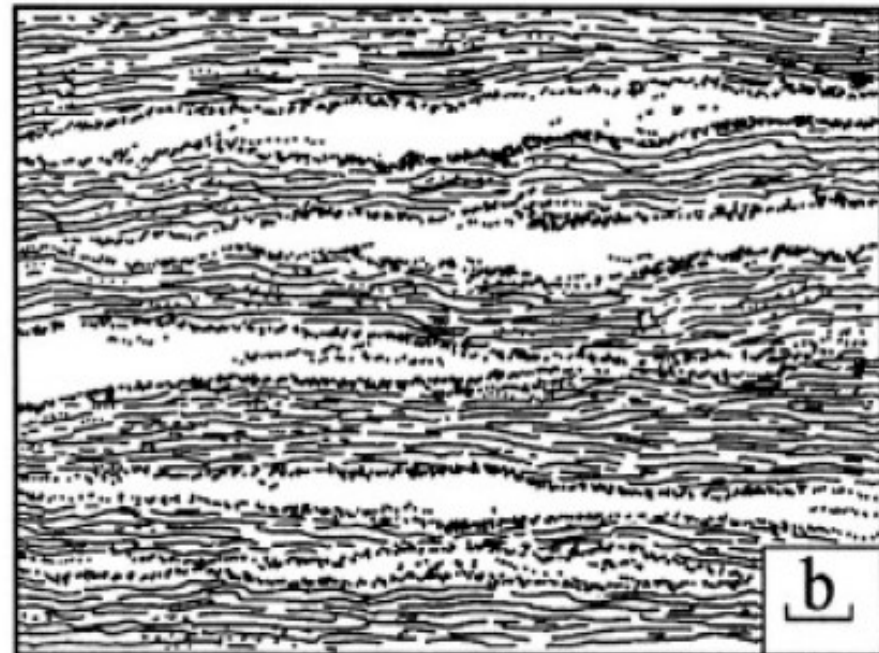






a) Nebulitický migmatit (Nebulitic structure): melanosom tvoří rozplývavé skvrny v leukosomu. Představuje počáteční stádium migmatitizace. Velmi viskózní tavenina zůstává na místě svého vzniku.

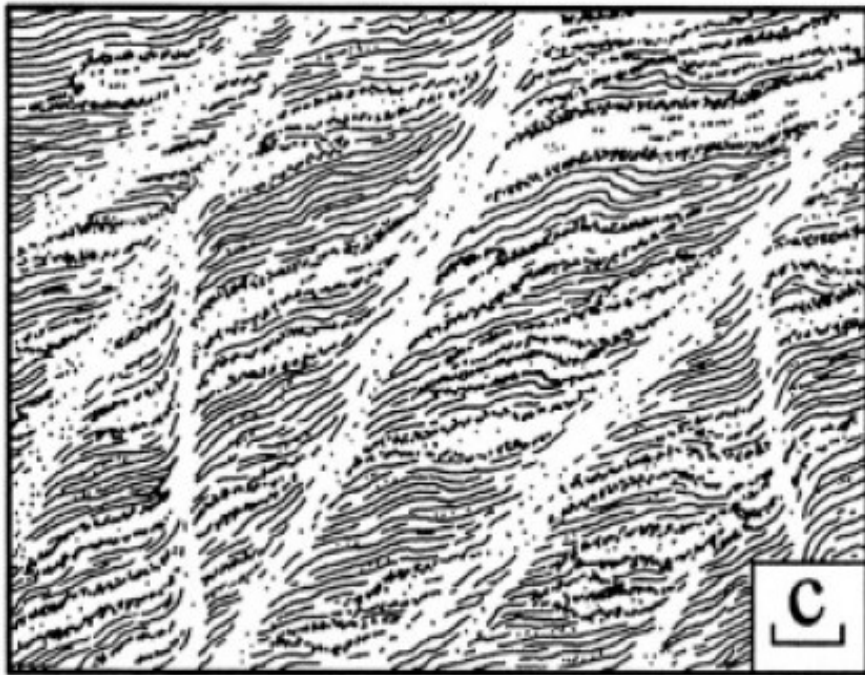
- Krystaluje v podmínkách bez orientovaného tlaku nebo jen nízkého orientovaného tlaku.
- Malá velikost kapes taveniny vede k tomu že tavenina nemá žádný vztlak.



b) Stomatit (Stromatic structure) střídají se drobné pasky leukosomu a melanosomu.

- Pásky probíhají více méně rovně s původní foliací a vtom případě jde pravděpodobně o tavení na místě.
- Někdy však mohou být rovnoběžné žilky k původní foliaci diskordantní a pak jde o mobilizovanou taveninu která proráží mesosom.

*Upraveno podle knihy: Mehnert (1968) Migmatites and the Origin of Granitic Rocks. Elsevier.*

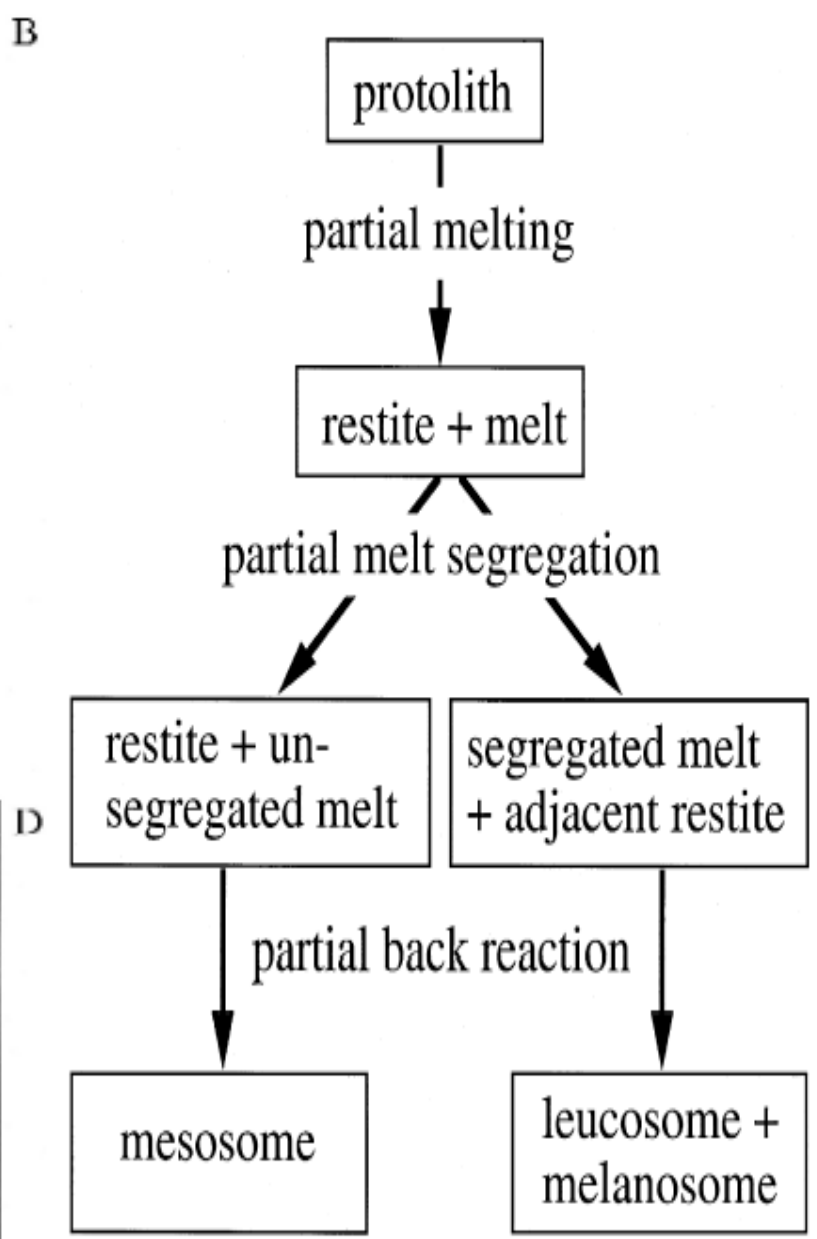
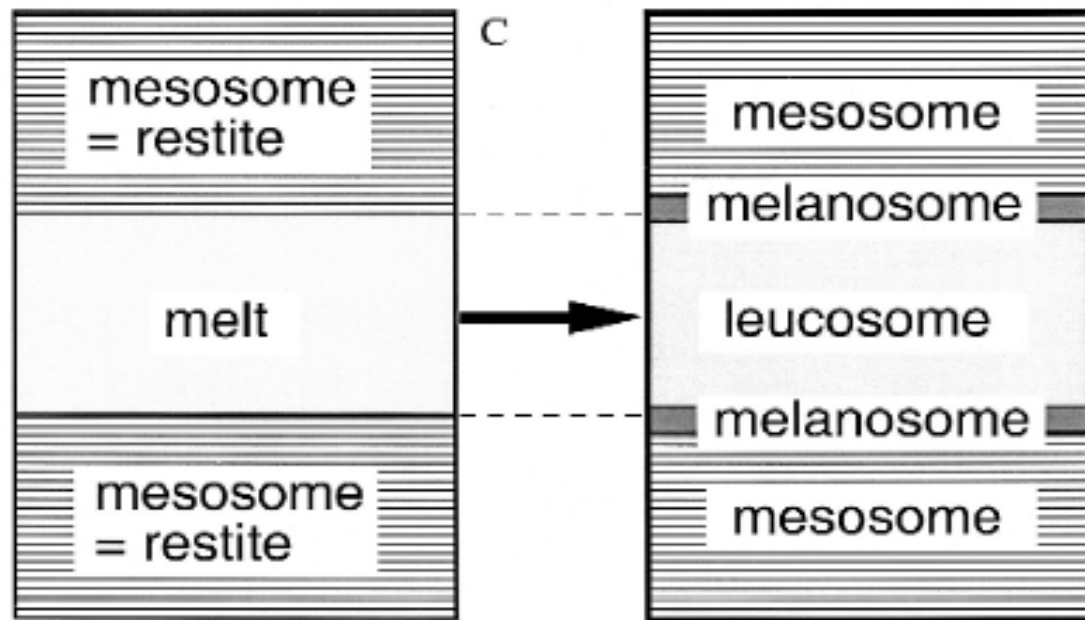
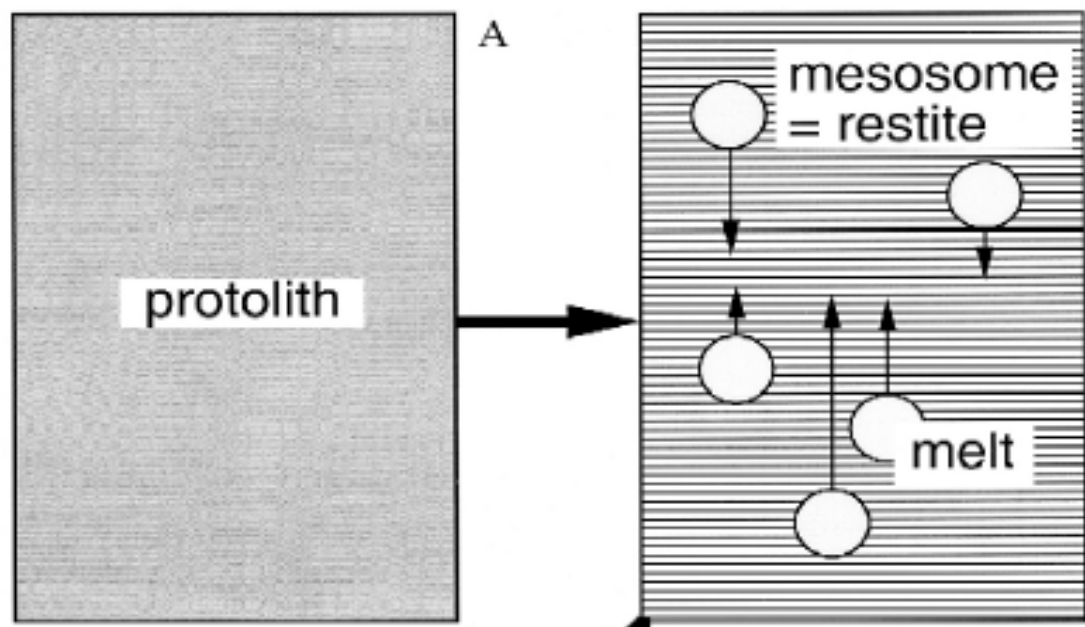


- c) Diktyonity (Net-like structure): leukosom tvoří rozvětvenou síť žilek.
- K oddělení taveniny došlo díky orientovanému tlaku.
  - Leukosom tvoří propojenou síť žilek.



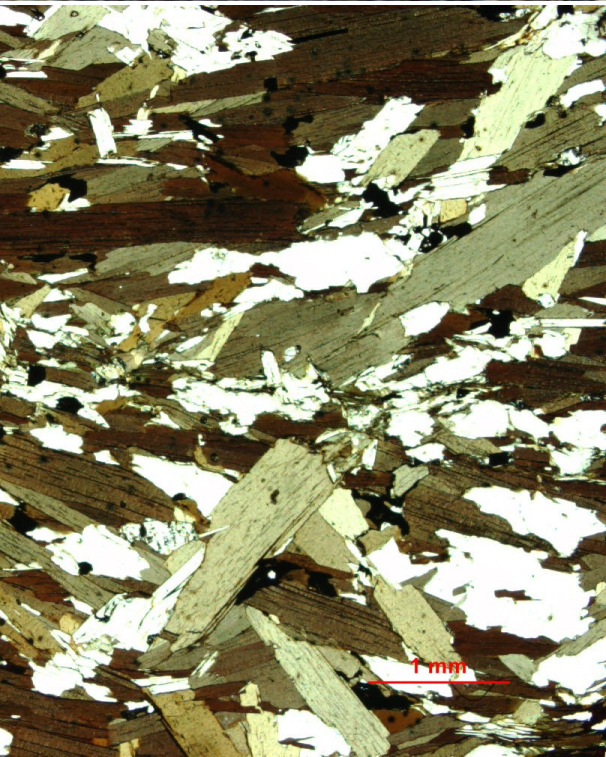
- d) Agmatit (Agmatite) ostrohranné bloky jsou obklopené leukosomem tvoří brekcií (nemusí nutně reprezentovat paleosom a melanosom)
- Porušení v důsledku hydraulického vztlaku taveniny.
  - Vznikají v horních částech migmatitických dómů. Představují kontakt mezi granity a migmatity.

*Upraveno podle knihy: Mehnert (1968) Migmatites and the Origin of Granitic Rocks. Elsevier.*

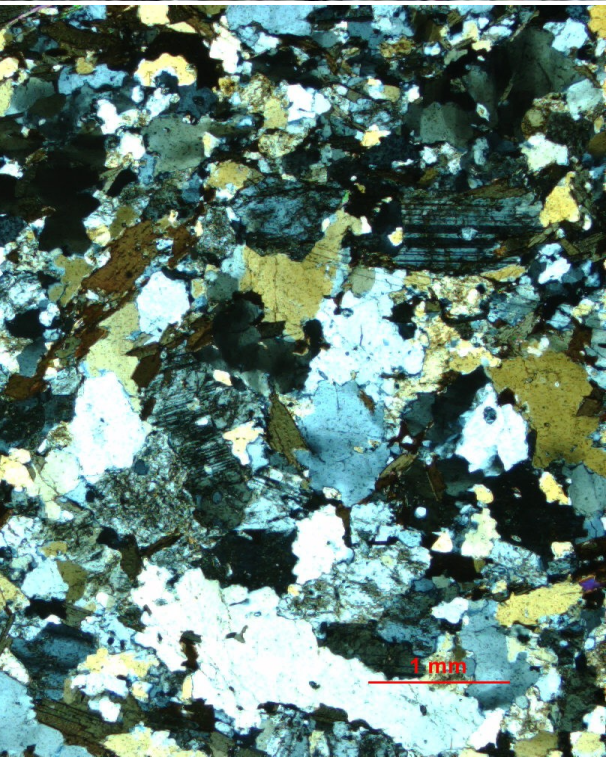




**Melanosom**  
 $Bt+Ms > Qtz+Fsp$   
Grt, Tu



**Leukosom**  
 $Bt+Ms < Qtz+Fsp$



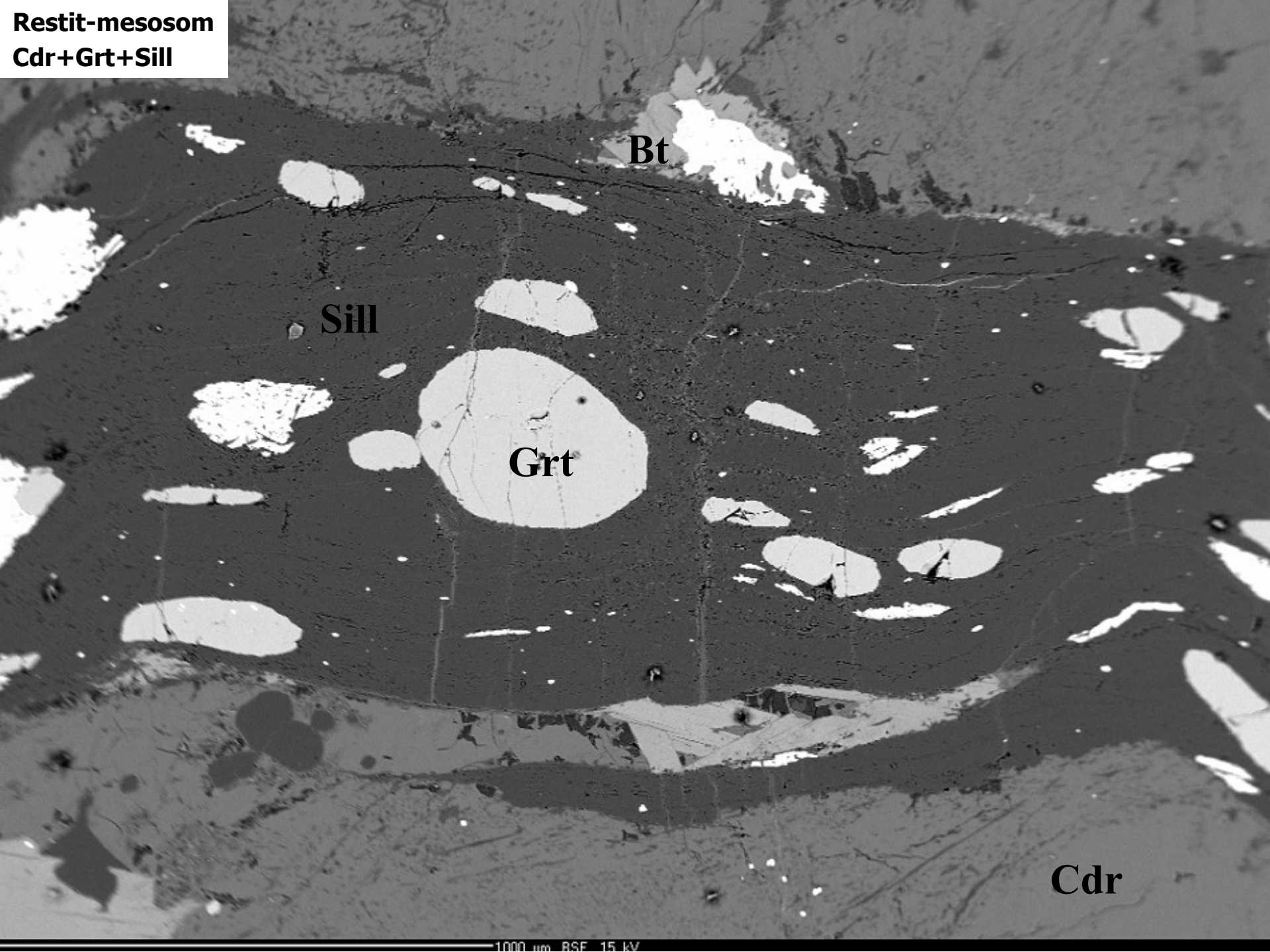
Restit-mesosom  
Cdr+Grt+Sill

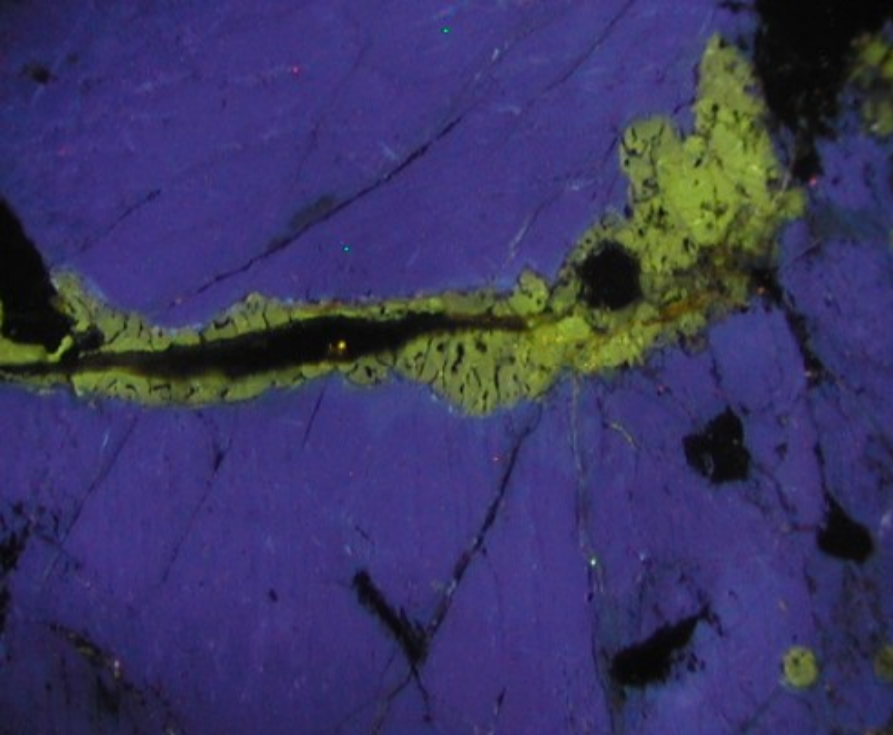
Bt

Sill

Grt

Cdr





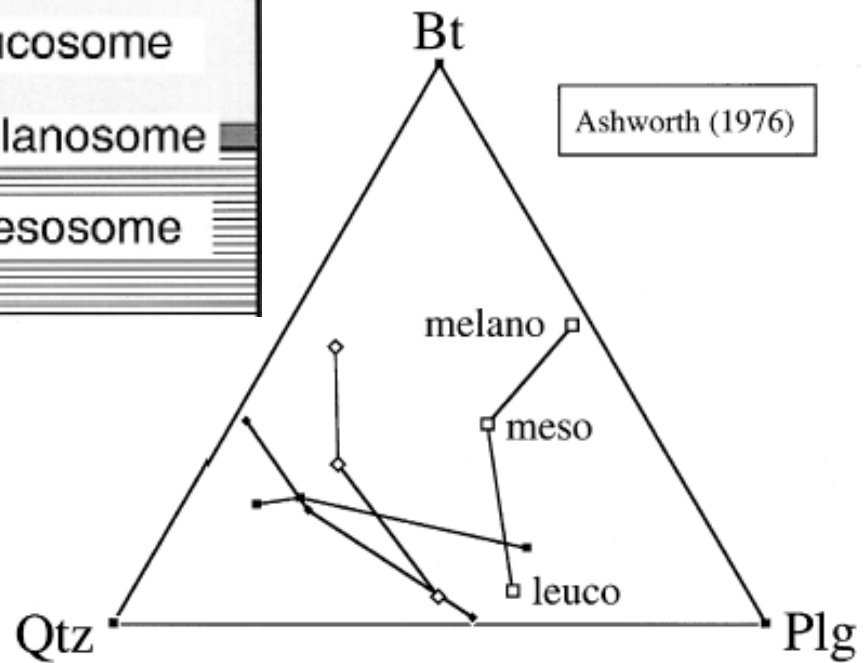
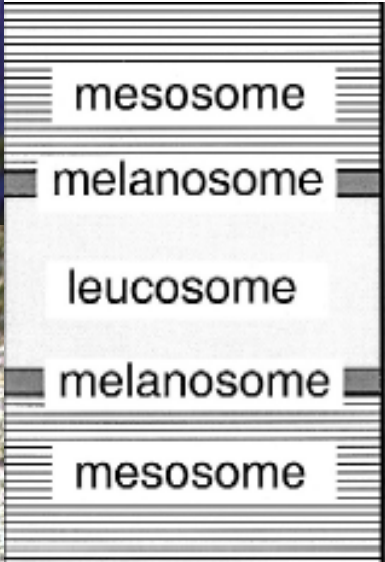
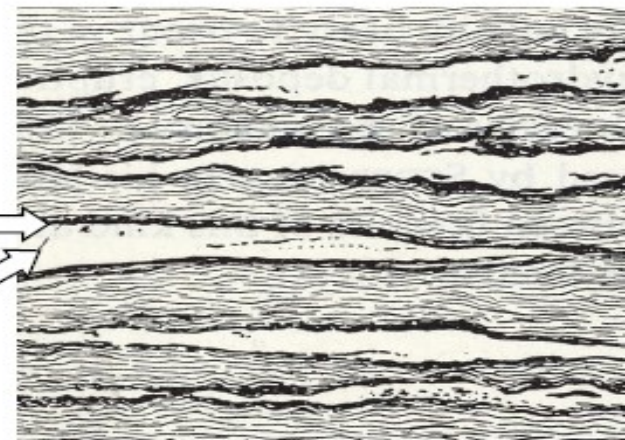
# Leukosom

**melanosome**

Containing mainly dark minerals

**leucosome**

Containing mainly light minerals



Mesosom

Kfs

Qtz

Cdr

Bt

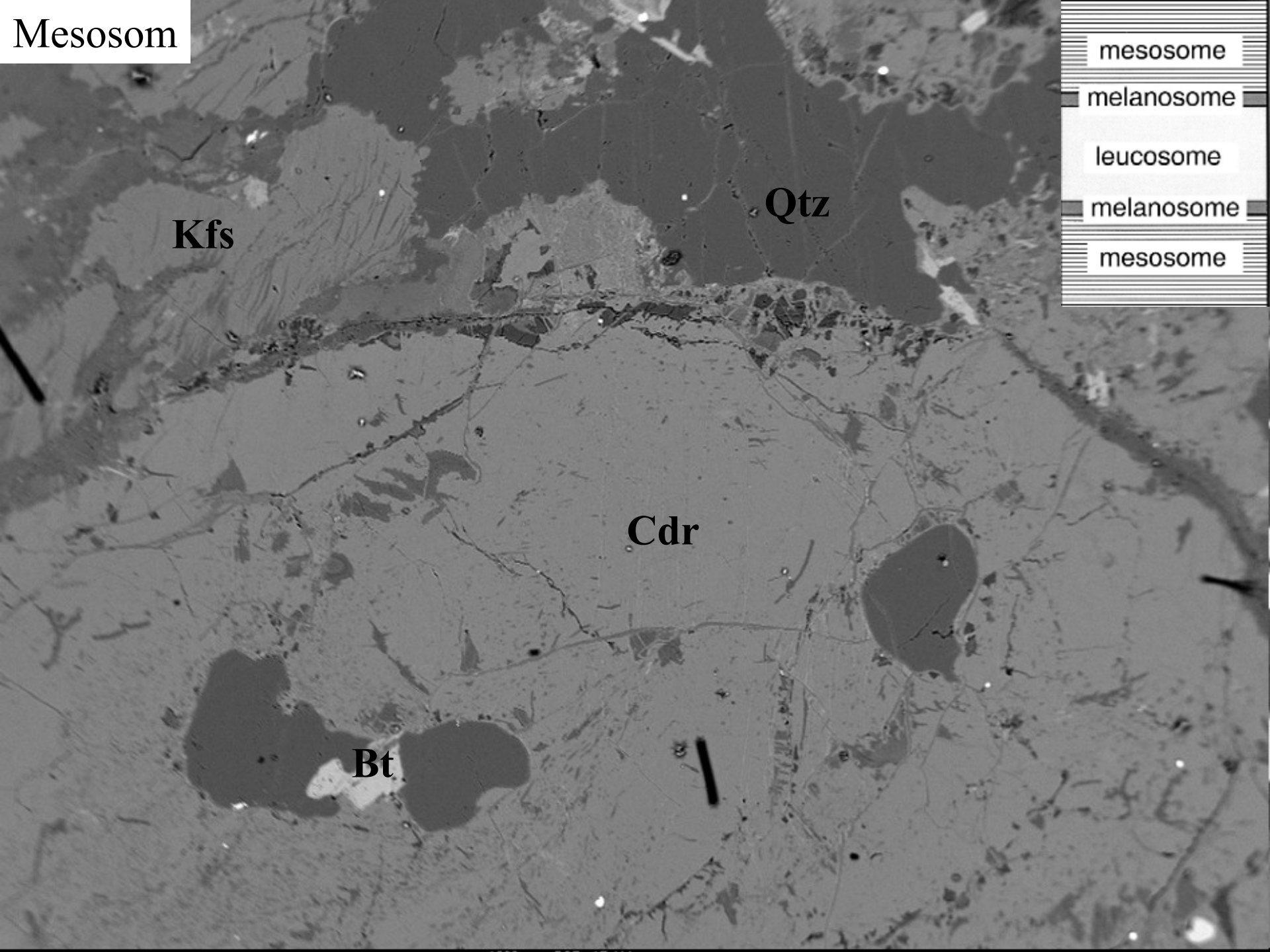
mesosome

melanosome

leucosome

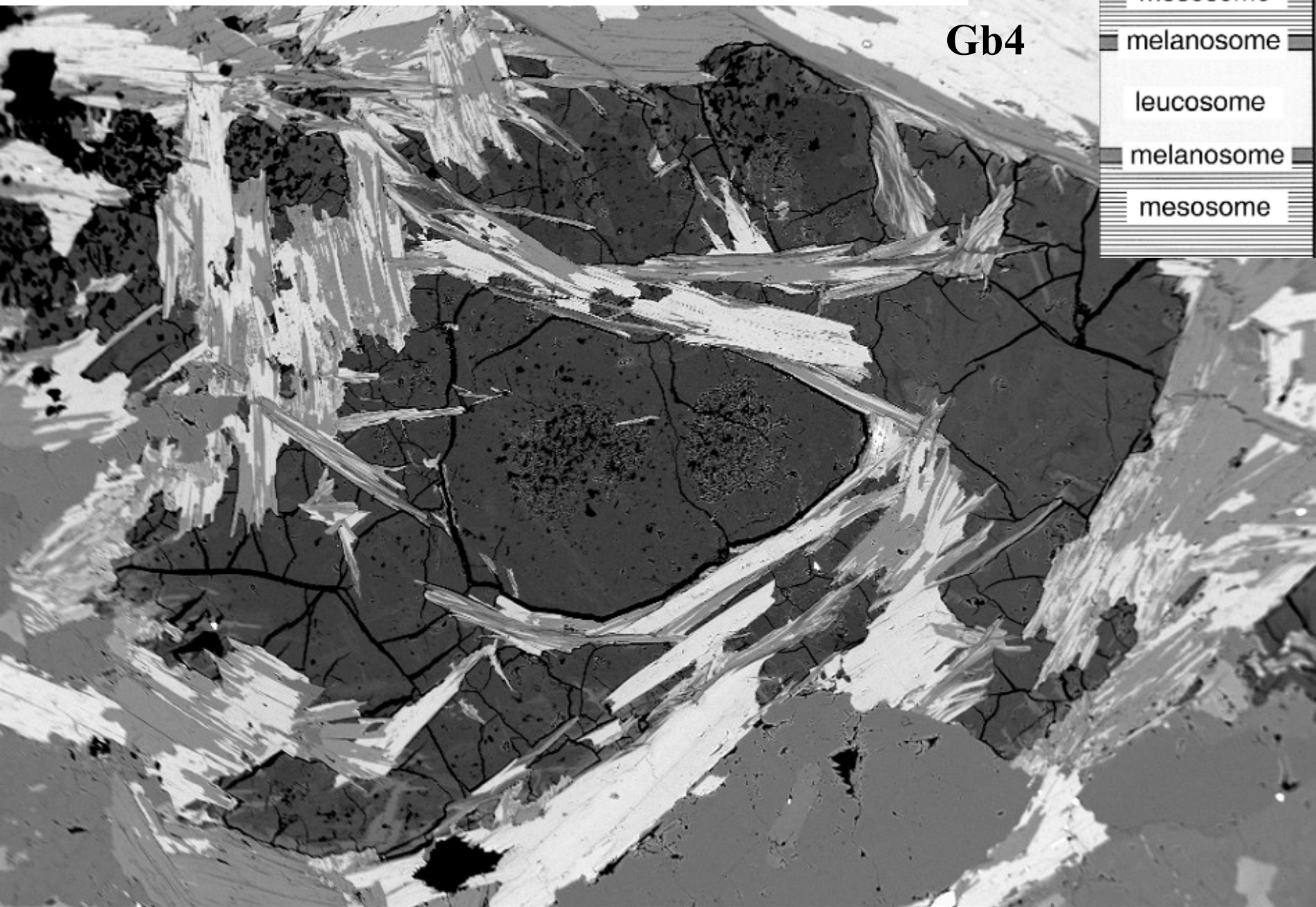
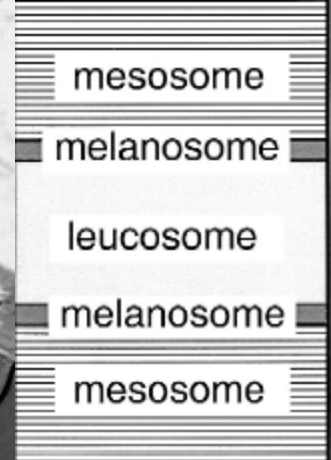
melanosome

mesosome



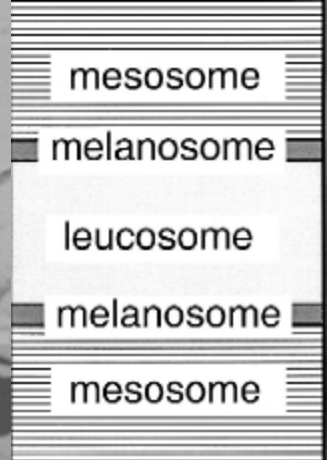
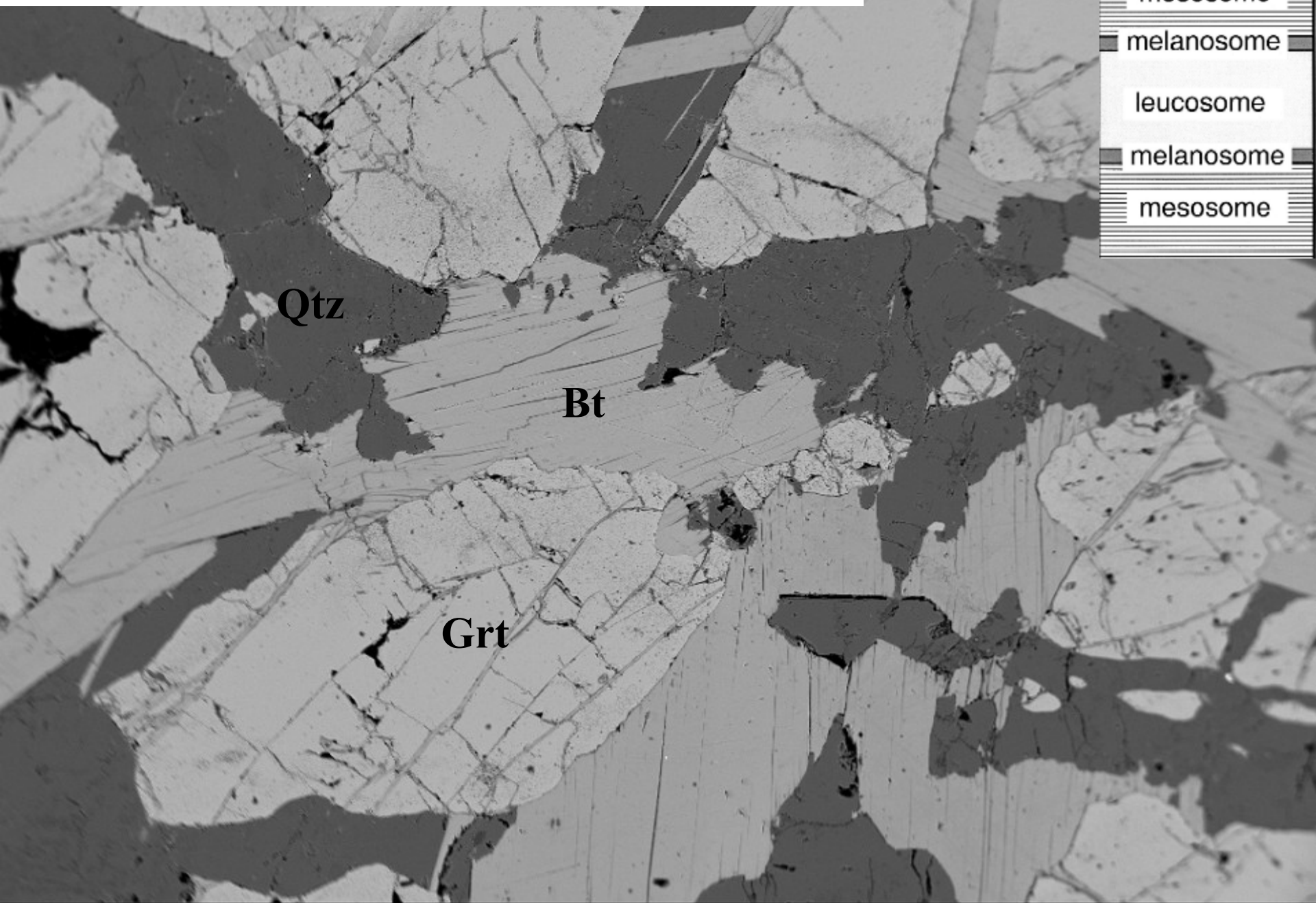
Mesosom -> melanosom (Cdr je zatlačován Bt a Ms)

Gb4



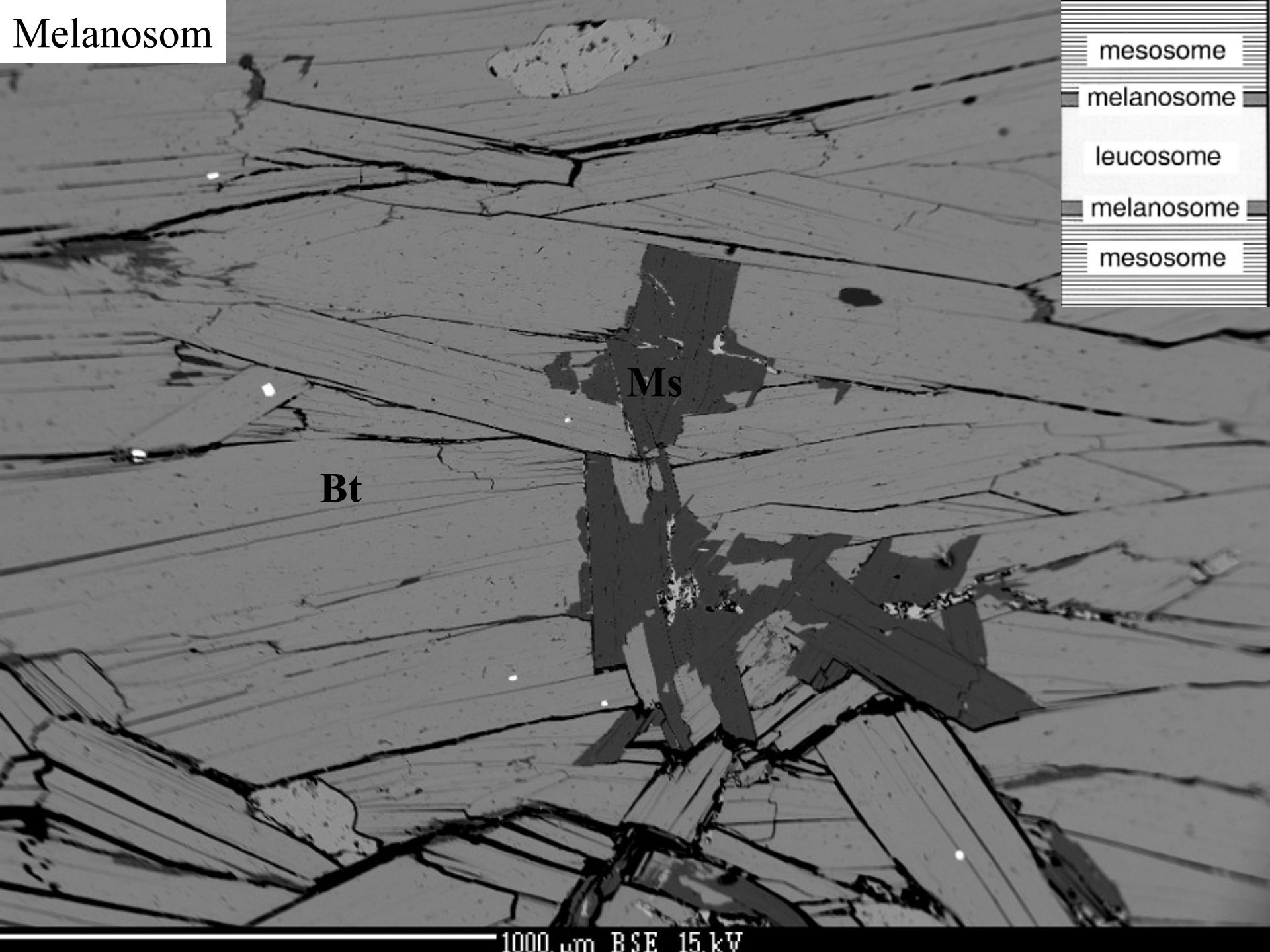
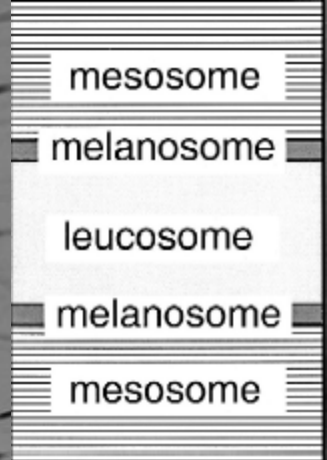


Mesosom -> melanosom (Grt je zatlačován Bt)



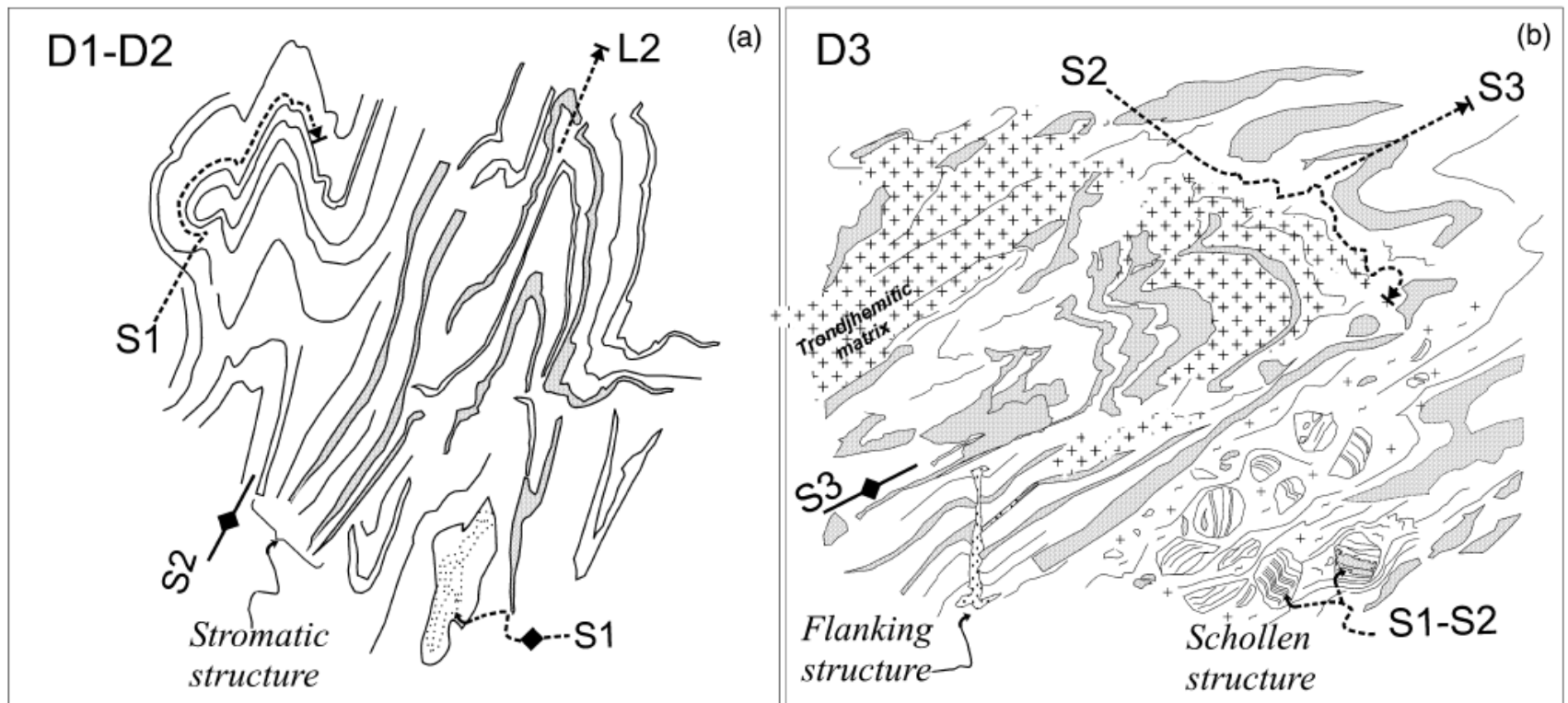
1000  $\mu\text{m}$  BSE 15 kV

Melanosom



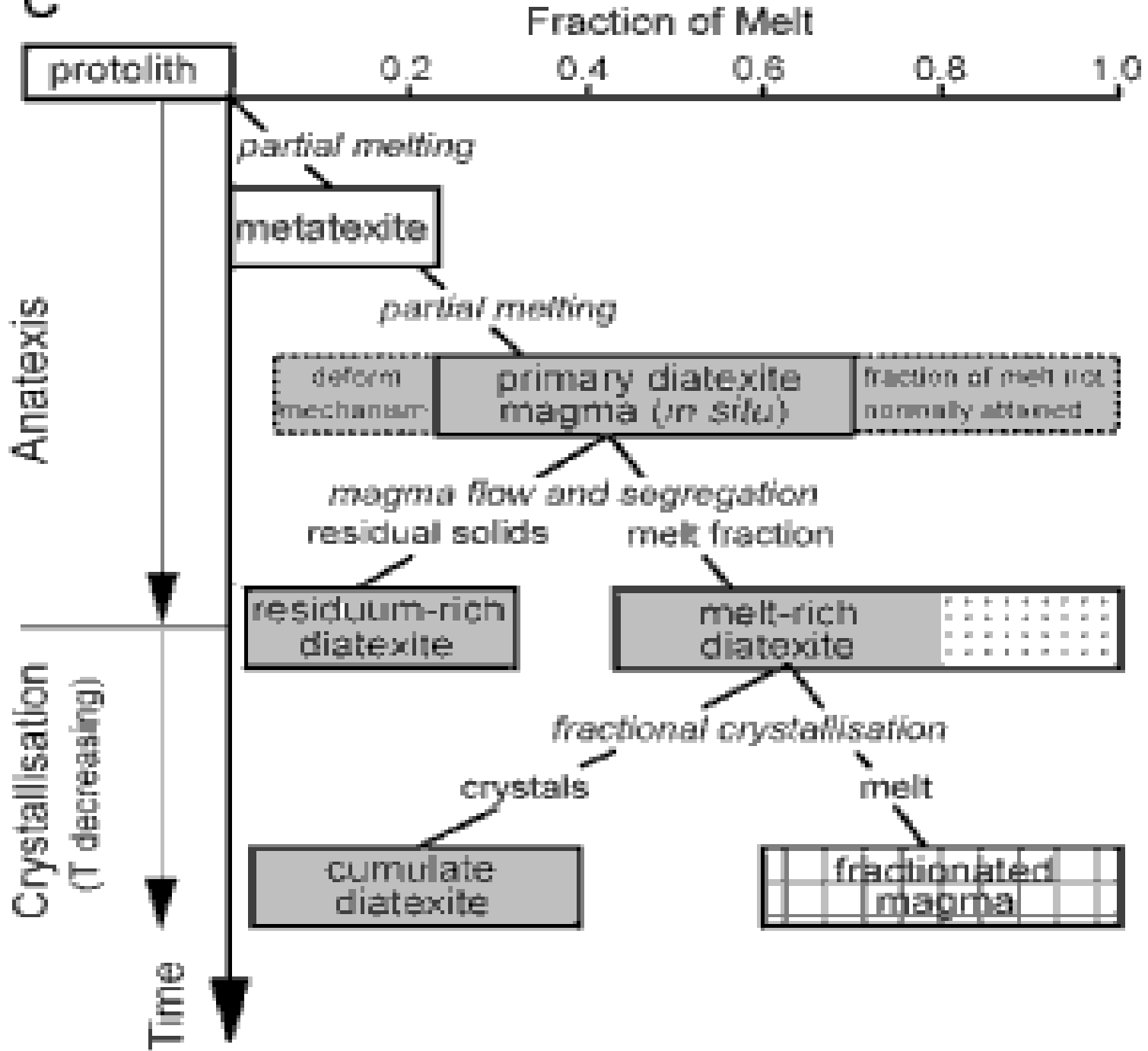
Ms

Bt



Migmatity mohou být výsledkem několika deformačních a metamorfních etap  
 CORONA-CHA'VEZ ET AL. 2006







- Pokud se střídají leukokratické pásy s nízkým obsahem biotitu s pásy, které mají vysoký obsah slíd. Pásy mají mocnost od několika mm po několik cm. V takovém případě mluvíme o metatexitech tedy horninách, které si zachovaly strukturní znaky z období před migmatitizací (Brown 1997).

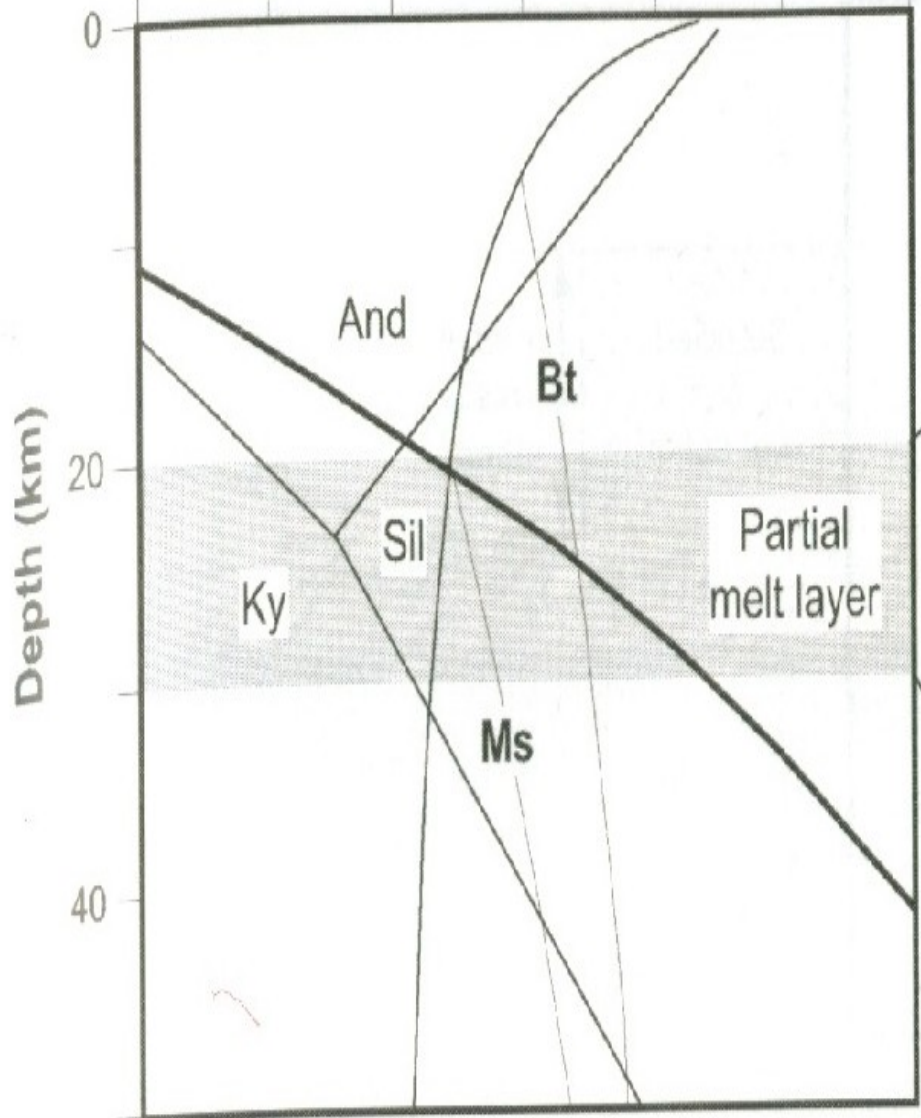


- Diatexity byly definovány jako horniny u nichž byla smazána stavba horniny před migmatitizací (Brown 1997). Diatexity jsou drobnozrnné až středně zrnité. Struktura je granoblastická a přednostní orientace je nevýrazná, nebo zcela chybí (**Dalečín**).

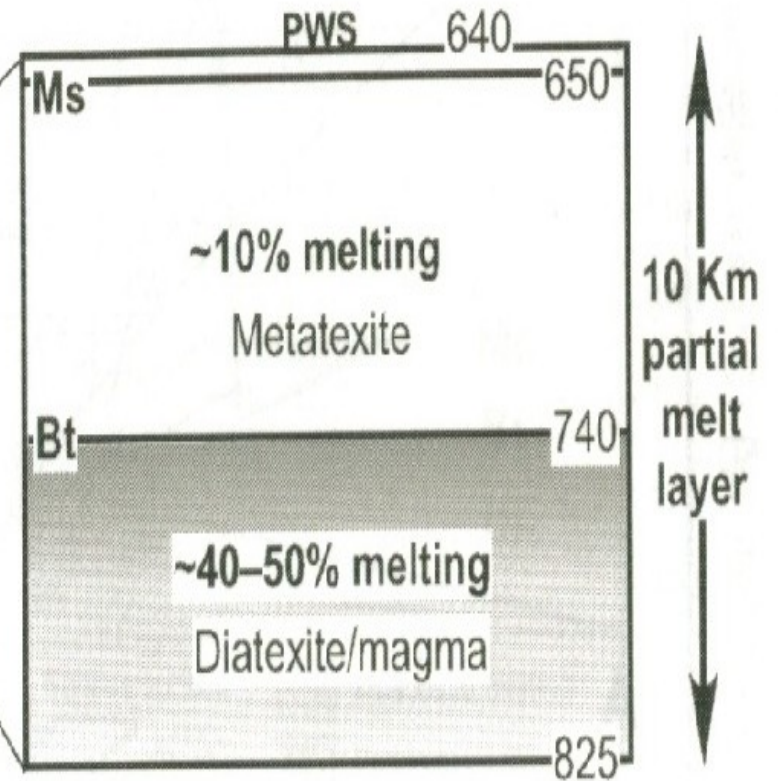


Temperature (°C)

400 600 800 1000



-----Sillimanite-in -----610°C









OLYMPUS

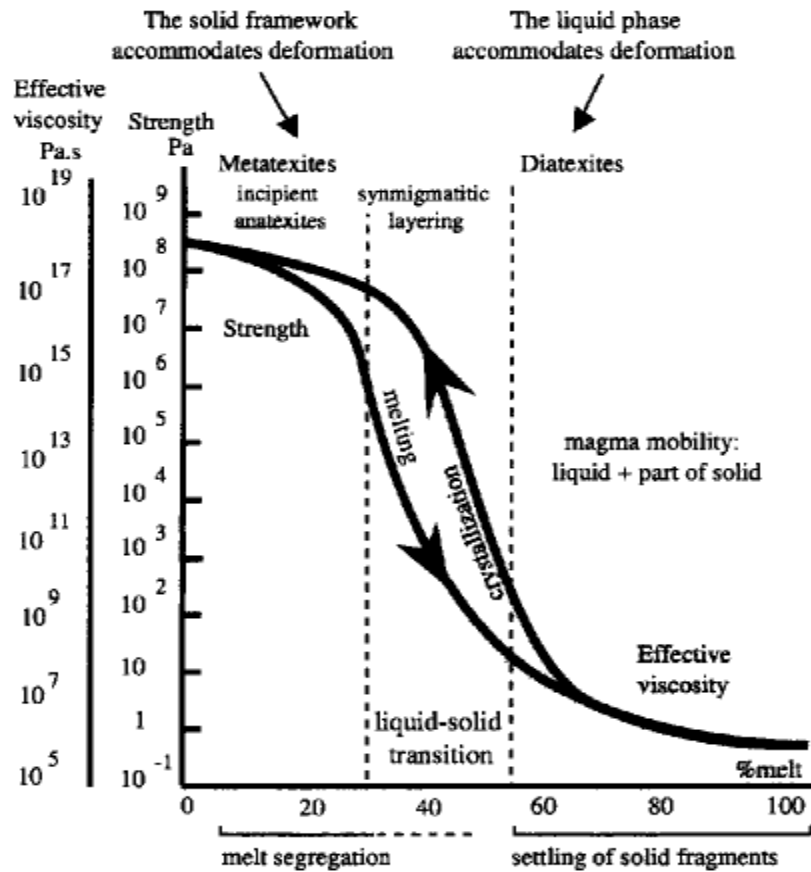








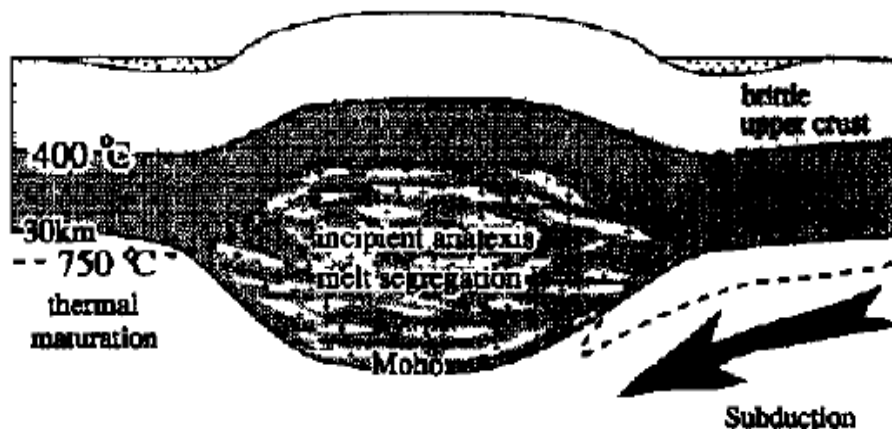
# III. 6. Mobilizace taveniny a vznik těles granitů



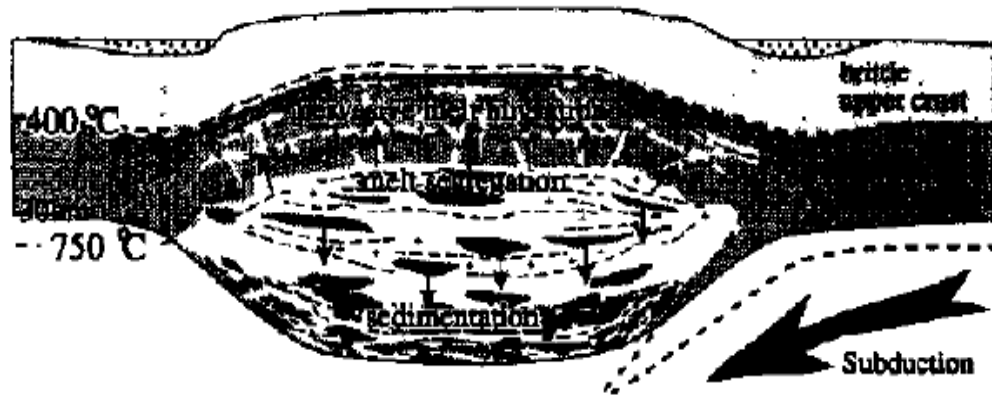
- Při parciálním tavení se první tavenina objevuje na hranici zrn.
- Během tavení je mobilita taveniny závislá na množství taveniny a jejích charakteristikách (viskozita)
- Metatexity mají reologii řízenou pevnou fází a u diatexitů se reologie řídí charakteristikami taveniny.
- Pokud je množství taveniny velké ( $F > 0,26-0,4$ ) může se tavenina migrovat a vytvářet tělesa granitů.
- Zóna mezi zdrojem taveniny (diatexity) a tělesy leukogranitů je tvořena sítí žilek od cm do několika metrů.
- Charakter této přechodné zóny je řízen reologickým kontrastem mezi pevnou fází a taveninou.

**Fig. 1 :** Behavior of a partially molten rock as a function of the liquid-solid proportions. Compilation of experimental data and theoretical rheological laws from Roscoe (1952) ; Arzi (1978) ; Van Der Molen and Paterson (1979) ; Rutter and Neumann (1995) ; Philpotts et al. (1996). Geometrical thresholds corresponding to melt connectivity and continuity of the solid framework are indicated on the horizontal axis. Melt connectivity, which controls the ability of melt to segregate by percolation through the continuous solid framework, is achieved for a melt fraction of a few %. The continuity of the solid fraction controls (1) the solid-liquid rheologic transition and thus magma mobility, and (2) settling of solid particles in the magma. Metatexites are identified as solid-dominated anatexites, whereas diatexites correspond to liquid-dominated ones. Segregation of a melt from cumulate phases also occurs during magma crystallization when the crystals in the mush form a continuous solid framework (Philpotts and Carroll, 1996). The liquid-solid proportions that correspond to the continuity of the solid framework is likely to be different during partial melting and crystallization (Philpotts et al., 1996; Vigneresse et al., 1996) Vanderhaeghe2001

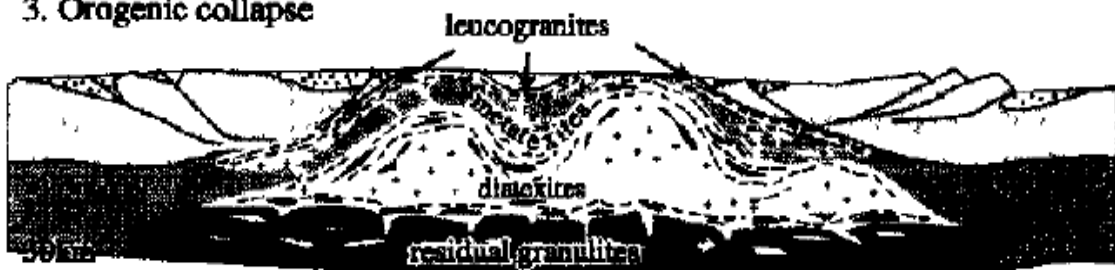
## 1. Early stage of crustal thickening



## 2. Prolonged crustal thickening



## 3. Orogenic collapse



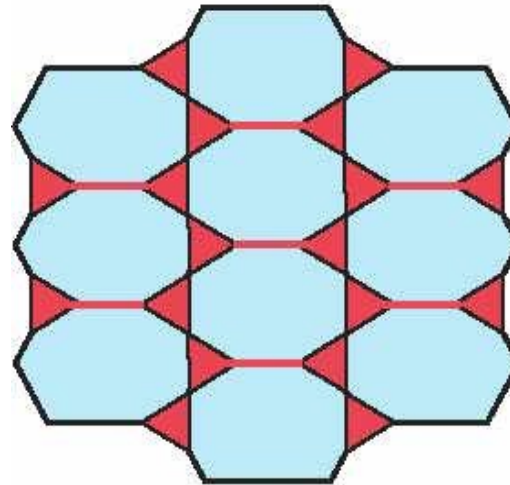
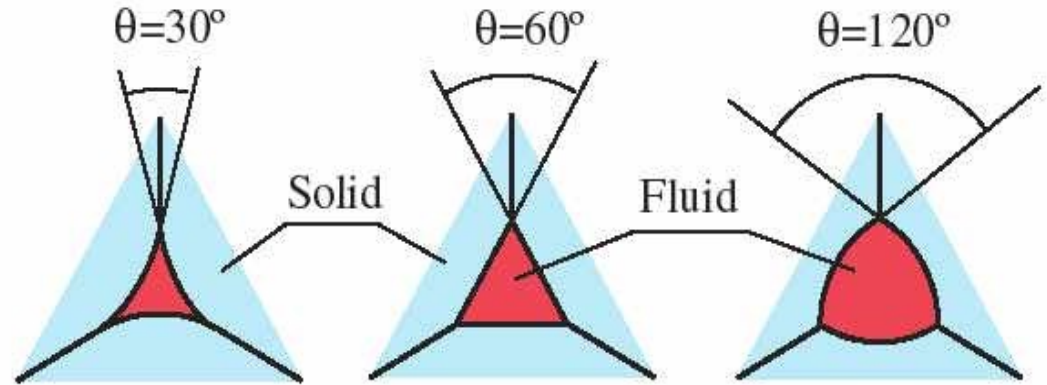
- Migmatitizace postihuje komplexy složené z metapelitů až metadrob.
- Probíhá za relativně nízkých PT podmínek pod 800 °C a kolem 4-7 kbar.
- U diatexitů může dojít k oddělení restitu od taveniny a vznikají leukogranity. Tento proces má řadu mezistupňů

Fig. 7: Model of partial melting during orogenic evolution following a period of crustal thickening. Isotherms 400 °C and 750 °C indicate the approximate location of the brittle-ductile transition and the solidus of crustal rocks, respectively. The large black arrows on the right side depicts subduction which is responsible for downward advection of isotherms. 1) The thickened orogenic crust is affected by incipient melting. Increase in temperature in the zone of thickened crust is assumed to be related to radioactive decay. 2) Partial melting of the orogenic crust is leading to the generation of an anatectic layer and to pervasive melt migration through a network of granitic veins connecting diatexites to granites emplaced at a higher structural level. Arrows pointing upward indicate the sense of melt migration and arrows pointing downward indicate the sense of settling particles. d) Exhumation and crystallization of a partially molten crust occurs in many examples during orogenic collapse accommodated by normal faulting and extension of the upper crust and by ductile flow of the lower crust.

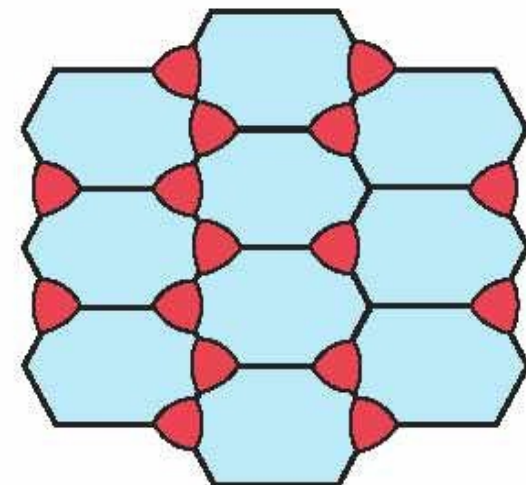


# III. 7. Segregace taveniny

- Segregace taveniny (Melt segregation): znamená oddělení taveniny od restitu během tavení
- závisí na propustnosti zdrojových hornin
- první tavenina vzniká na hranici zrn
- Kapsy tavenin se zvětšují se zvětšujícím se stupněm tavení
- dochází ke slučování jednotlivých dutin a ke vzniku sítě kanálků podél hranice zrn
- v granitovém systému jsou mezi zrny úhly 44-60° což umožňuje vznik intergranulárního filmu, který spojuje jednotlivá zrna (extrakce taveniny)
- pokud je úhel větší než 60° tavenina se neuvolní

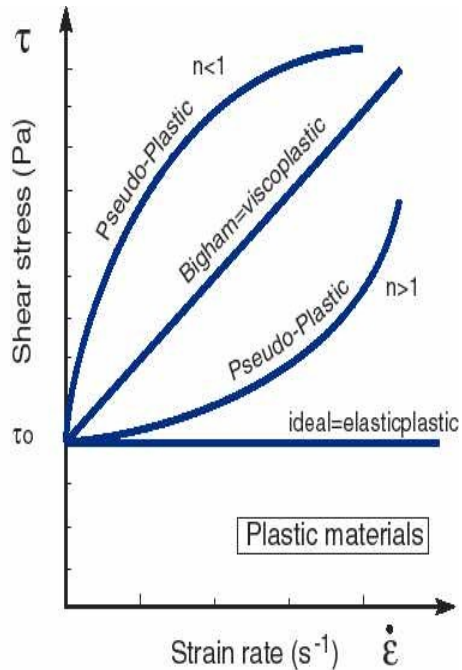
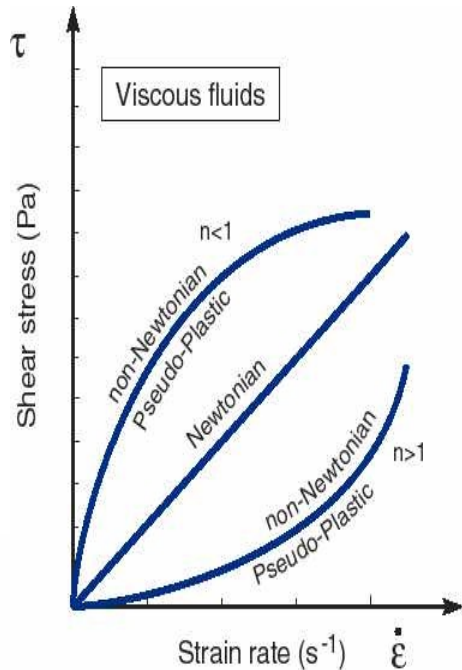
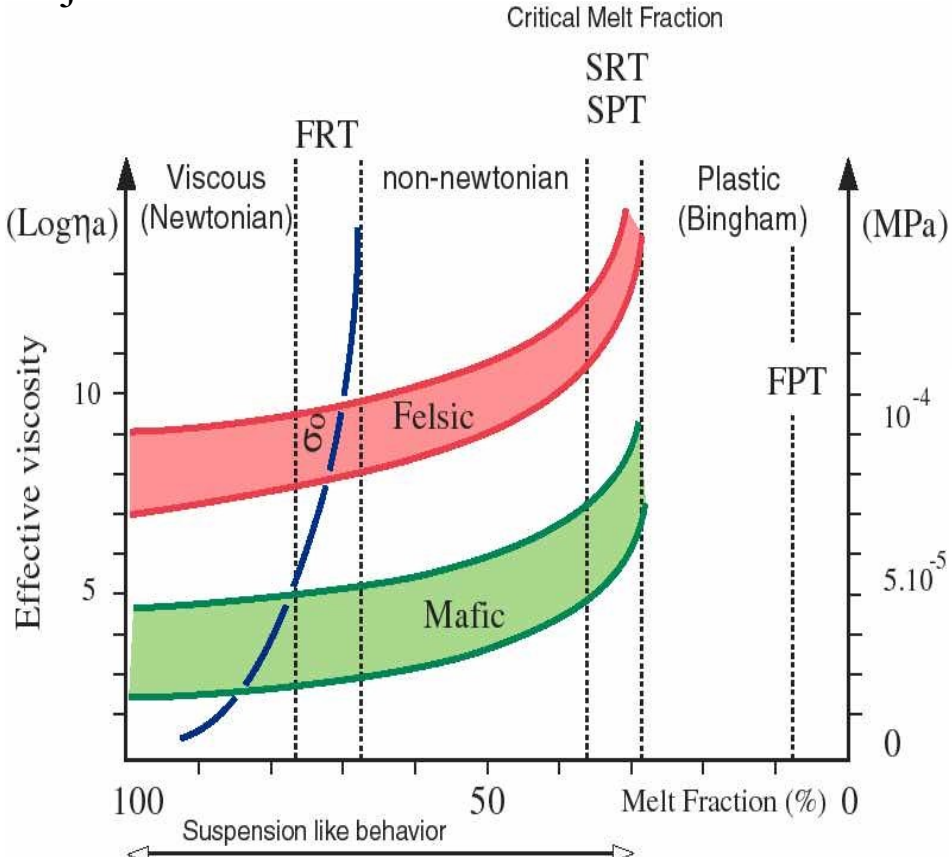


Permeable



Impermeable

- Parciální tavení je zodpovědné za diferenciaci kontinentální kůry
- Tavenina se může od horniny oddělit ale závisí to na viskozitě taveniny geometrii intergranulárních prostor mezi krystaly (McKenzie, 1984) a deformaci
- Základním parametrem který kontroluje oddělení, transport a vmístnění taveniny je viskozita



$$\tau = \eta \dot{\epsilon}$$

$$\tau = A \dot{\epsilon}^n$$

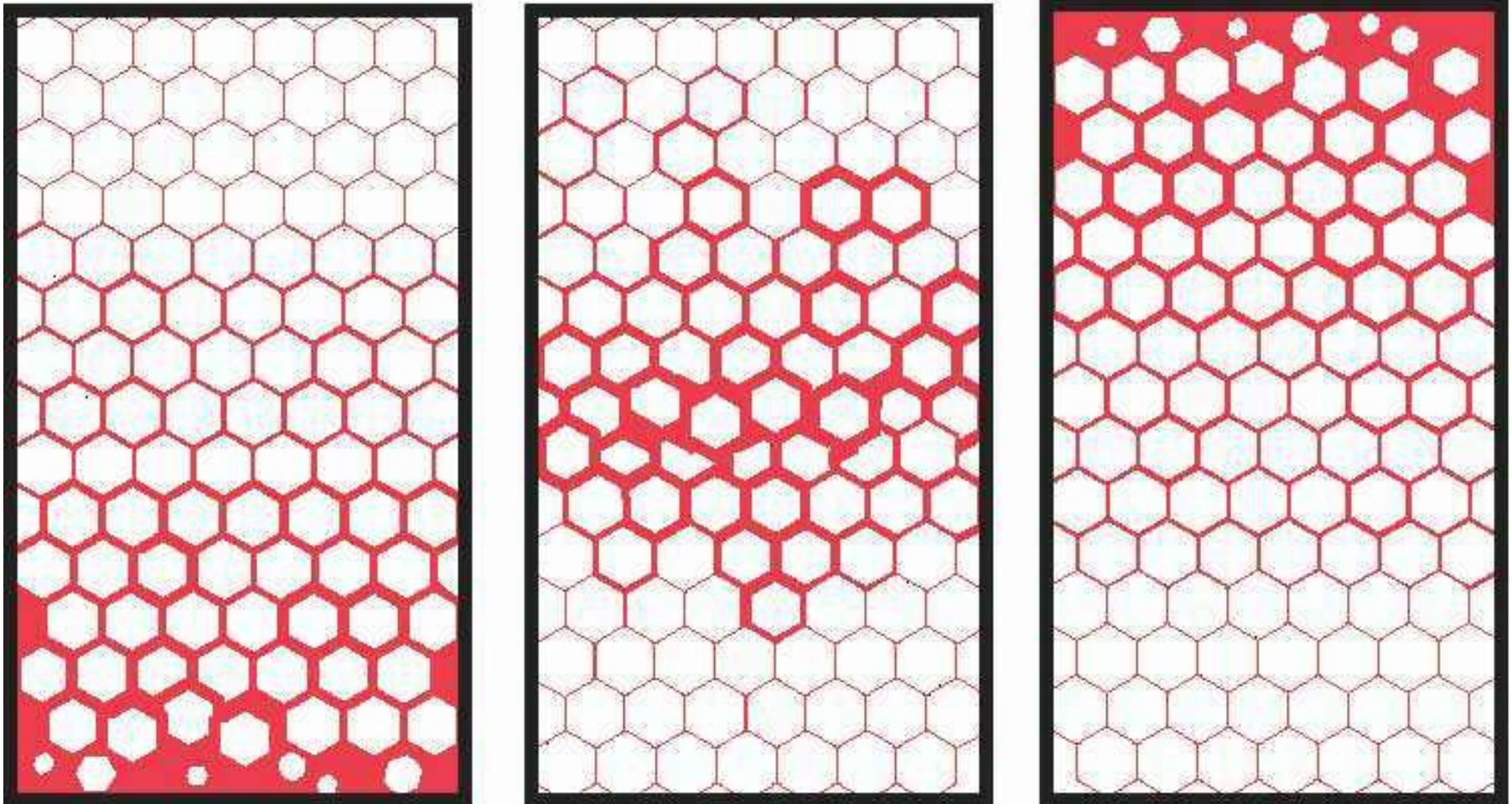
$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\epsilon}$$

$$\tau = \tau_0 + A \dot{\epsilon}^n$$

Viscosity is a measure of the resistance of a fluid to flow

- Viskozita s obsahem SiO<sub>2</sub> v tavenině roste viskozita s obsahem H<sub>2</sub>O v tavenině klesá viskozita viskozitu ovlivňuje množství a tvar krystalů během krystalizace viskozita roste

- Gravitační kompakce (Gravitational compaction): hustota restitu a taveniny je různá, kapsy taveniny musí být propojené, tento model je vhodný pro taveninu s nízkou viskozitou (McKenzie, 1984)
- Tímto způsobem nemohou vznikat velká a geologicky složitá tělesa





# Segregace taveniny iniciovaná deformací

## 1) Extenzní porušení pukliny (Extensional fracturing)

- Objevují v horninách s malým množstvím taveniny.
- Závisí na rychlosti deformace, tlaku fluid, orientovaném tlaku.
- V granitických systémech s nízkou aktivitou H<sub>2</sub>O dochází k pozitivní změně objemu během tavení což vede ke vzniku puklin.
- Lokální hydrostatický tlakový gradient umožňuje pohyb taveniny do puklin a oddělení taveniny, efekt tohoto mechanismu závisí velikosti poklesu tlaku, propustnosti horniny a době po kterou jsou pukliny otevřené.
- Tavenina s vyšším obsahem vody za tlaku pod 15 kbar má opačný efekt (má menší objem než reaktanty).

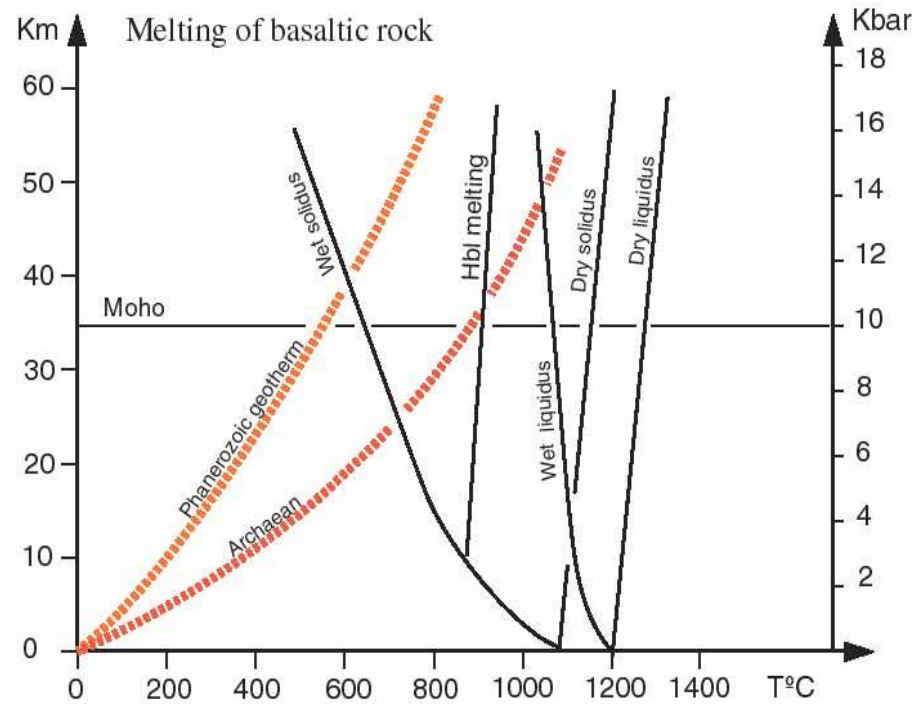
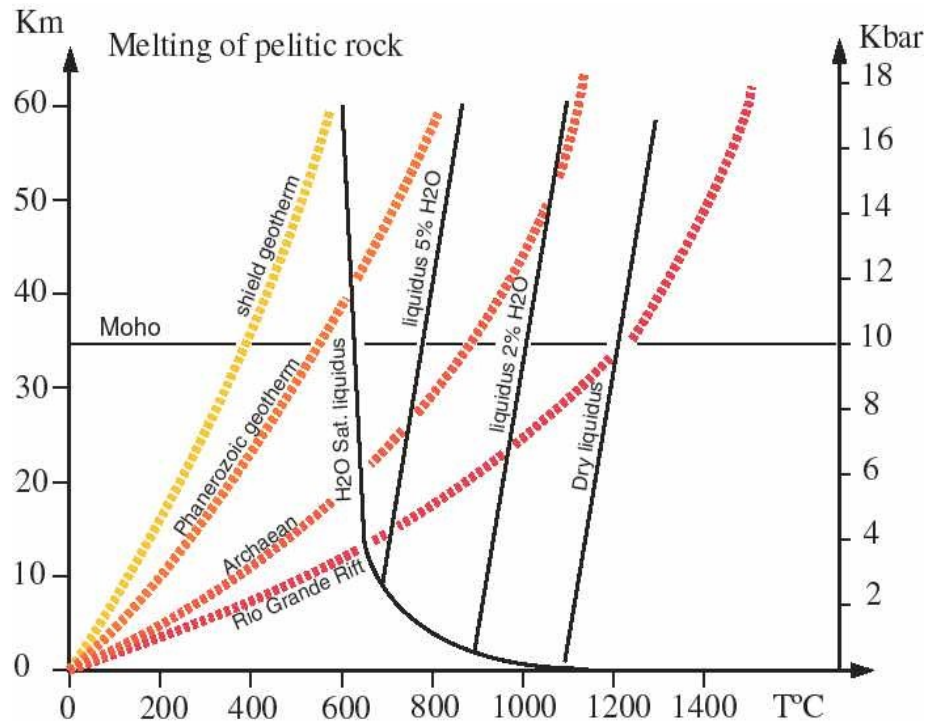


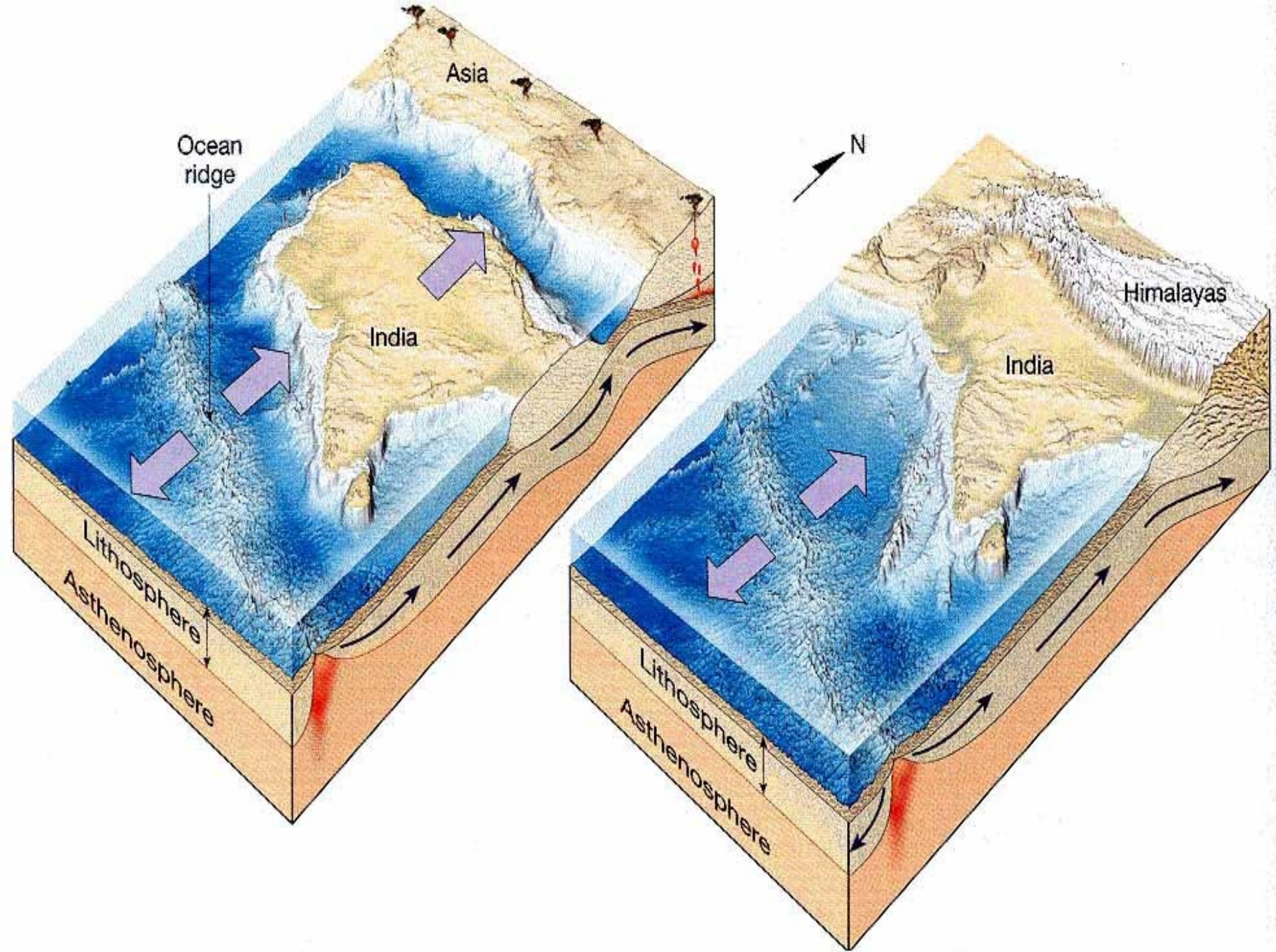
- 2) Segregace taveniny během deformace (Segregation during continuous deformation)
- Filter pressing - v důsledku duktilní deformace vrstev s různou viskozitou se separuje tavenina od horniny (je to podobné jako tvorba budin)
- Dilatant attractors – pokud během parciálního tavení probíhá deformace tavenina se shromažďuje ve střížných zónách, v tlakových stínech



# III. 8. Termální modely pro vznik orogenetických granitů

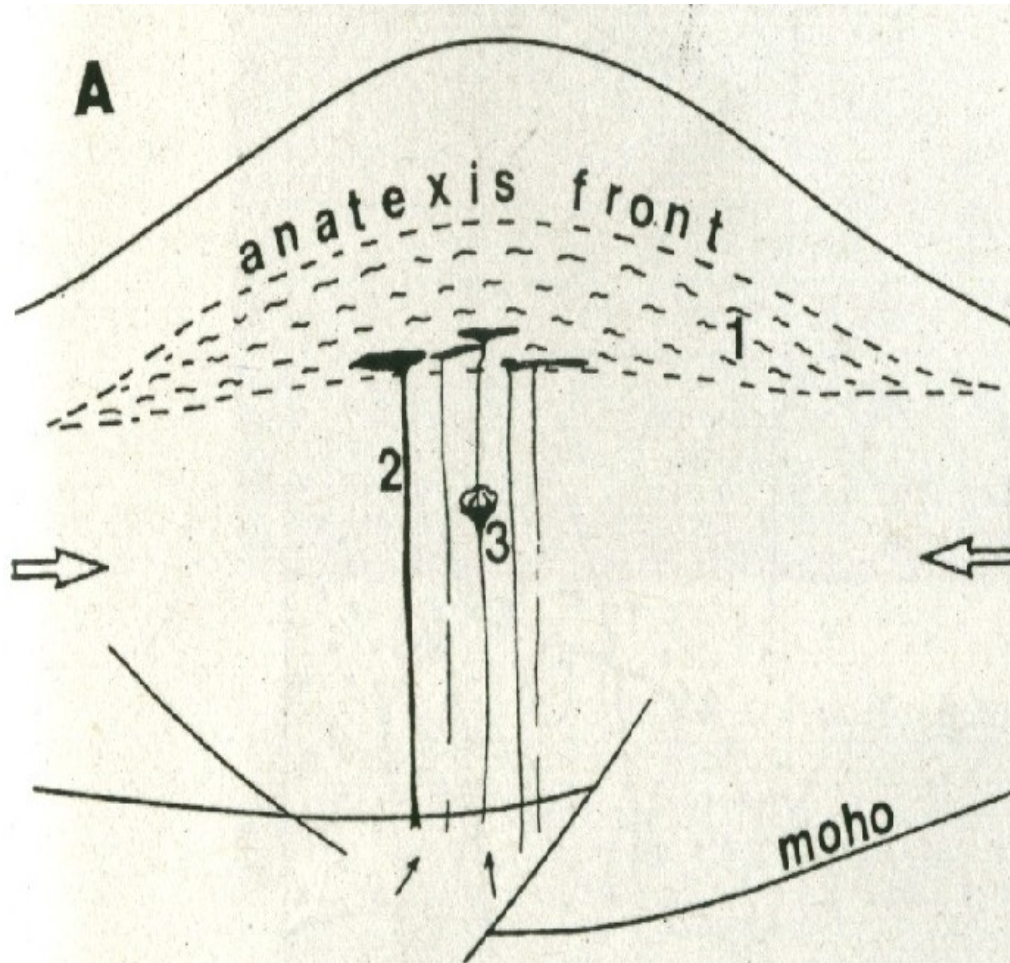
- parciální tavení pelitů začíná kolem 650°C pro běžnou kůru
- běžná kontinentální (fanerozoická) kůra má na hranici MOHO kolem (kolem 500-600 °C) takže k tavení většinou nedochází
- Aby došlo k tavení musí dojít k:
  - zvětšení mocnosti kontinentální kůry (crustal thickening)
  - ztenčení litosferického pláště (lithospheric mantle thinning) a podestlání bazickým magmatem (underplating of mafic magma)





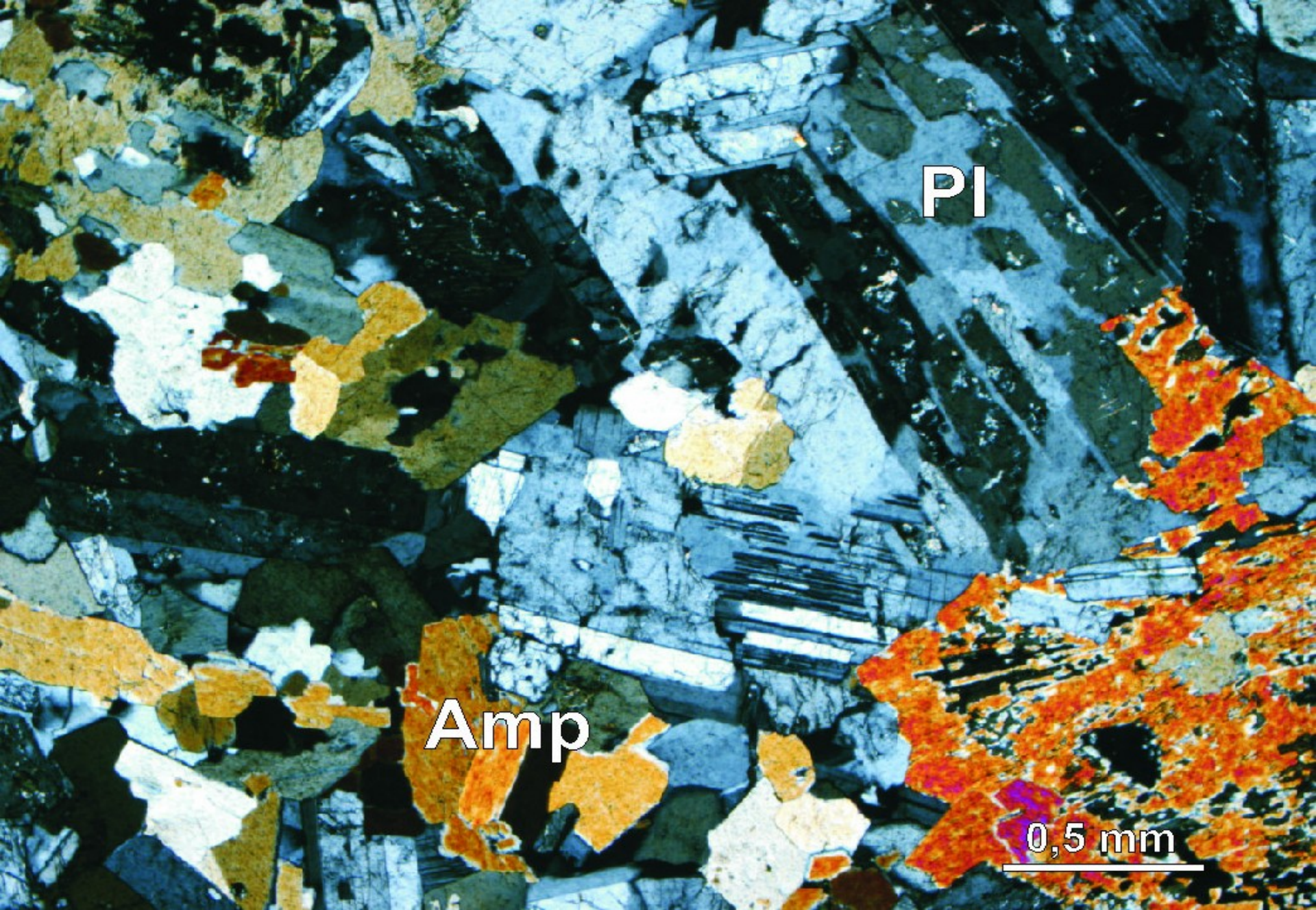


## III. 9. Hybridní granity



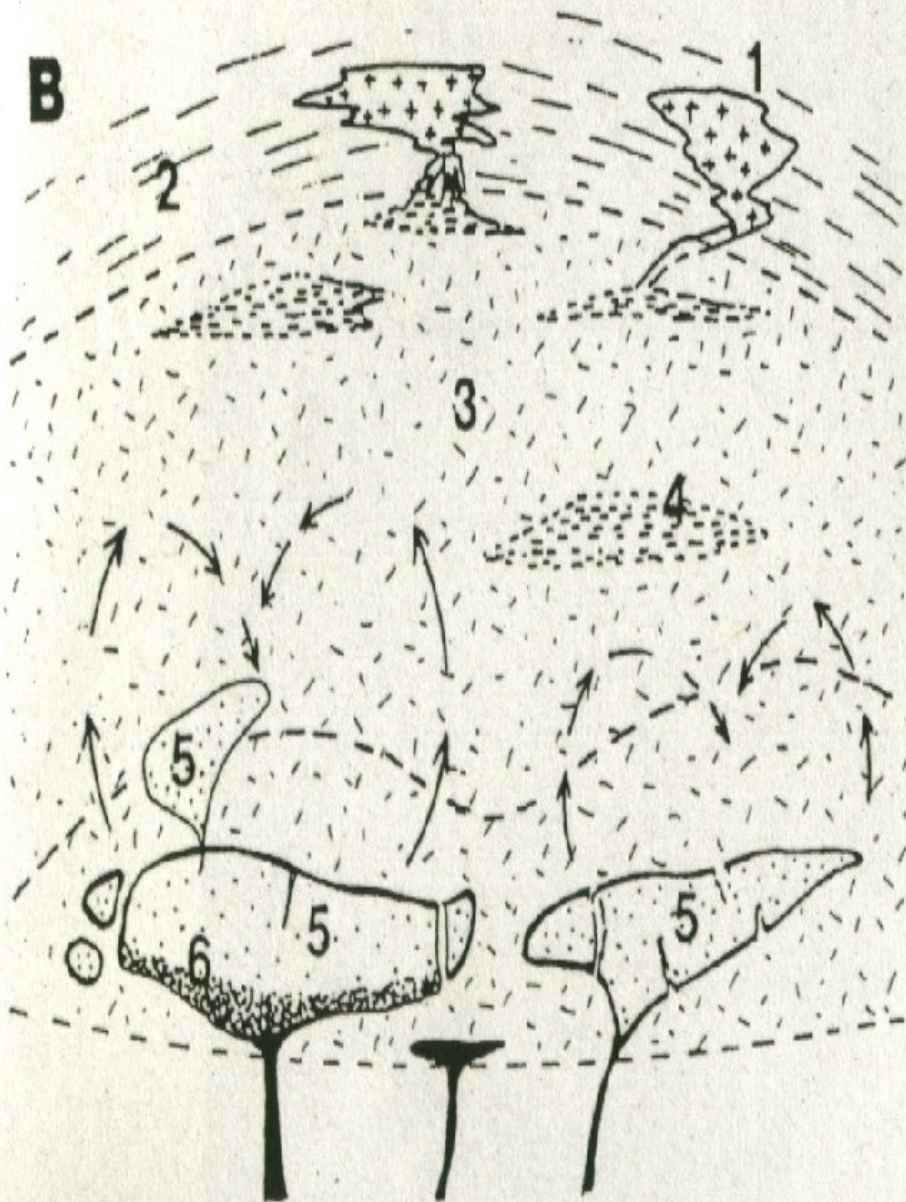
### CRUSTAL THICKENING

- (1) Supracrustal partial melting zone
- (2) Intrusion of mantle-derived magmas
- (3) Fractionation in intermediate magma chamber



Amp gabro – plášťové magma (Nikaragua)

**B**

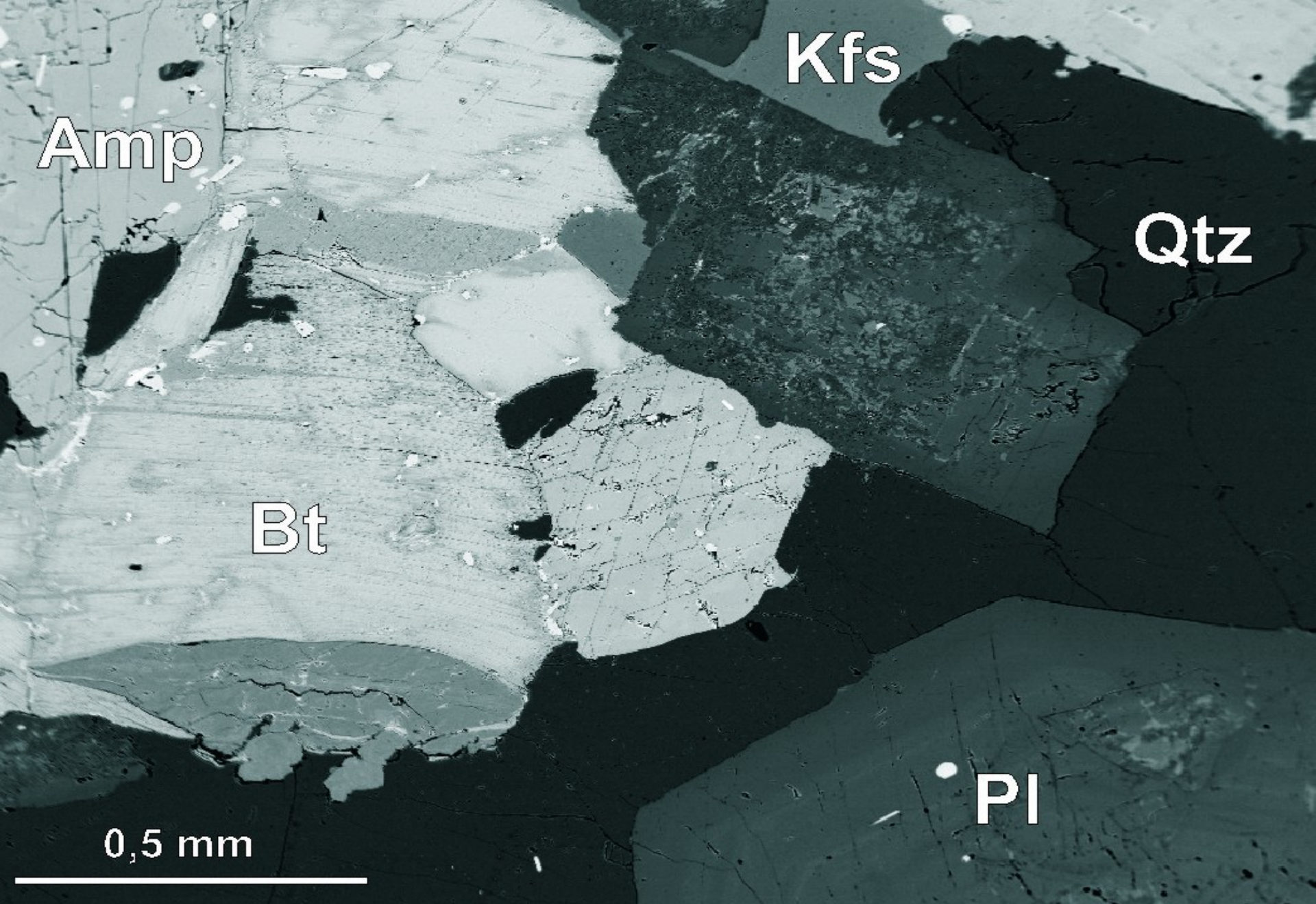


CONVECTION AND DISRUPTION OF SYNPLUTONIC  
DIKES

- (1) Early anatectic granites (S-type)
- (2) Medium-grade metamorphic rocks
- (3) Partially melted zone
- (4) Diatexitic zones
- (5) Fractionated tonalites (M-type)
- (6) Ultramafic cumulates

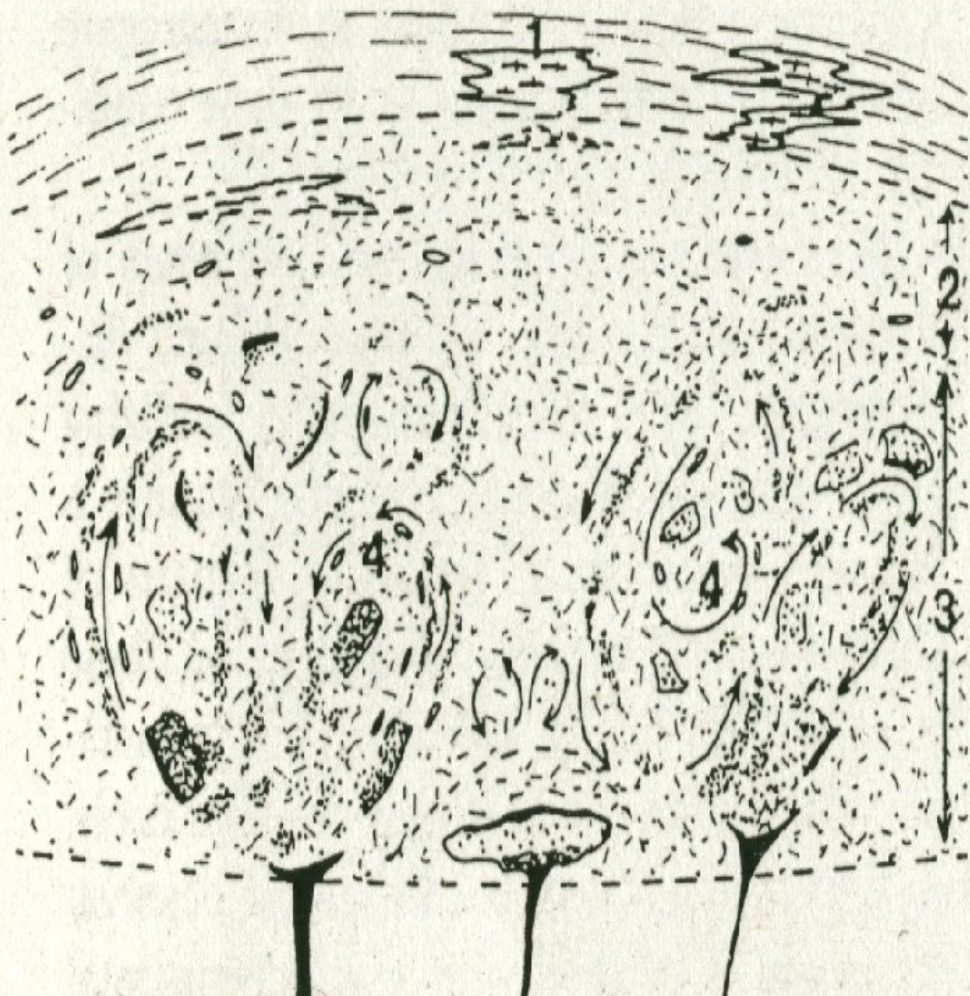


I-typový Amp-Bt granodiorit s enklávou dioritů vzniklý mixingem (Nikaragua)



I-typový Amp-Bt granodiorit mixingem (Nikaragua)

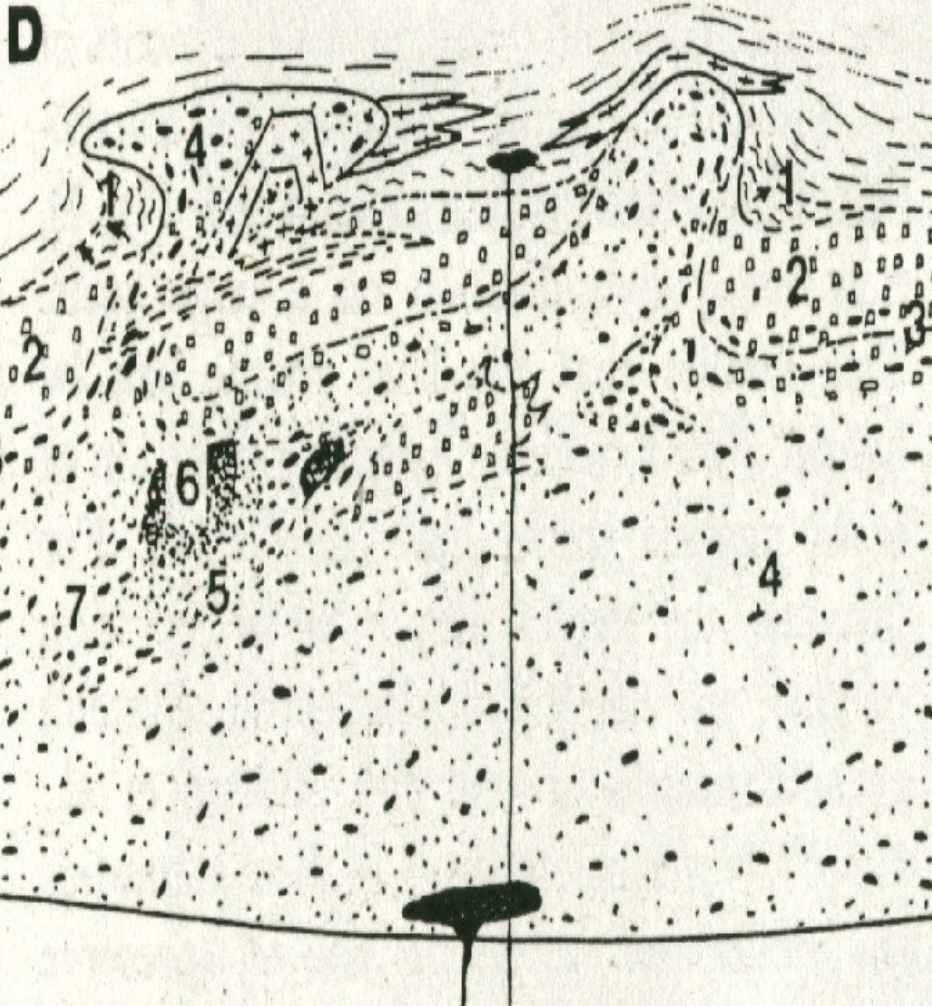
C



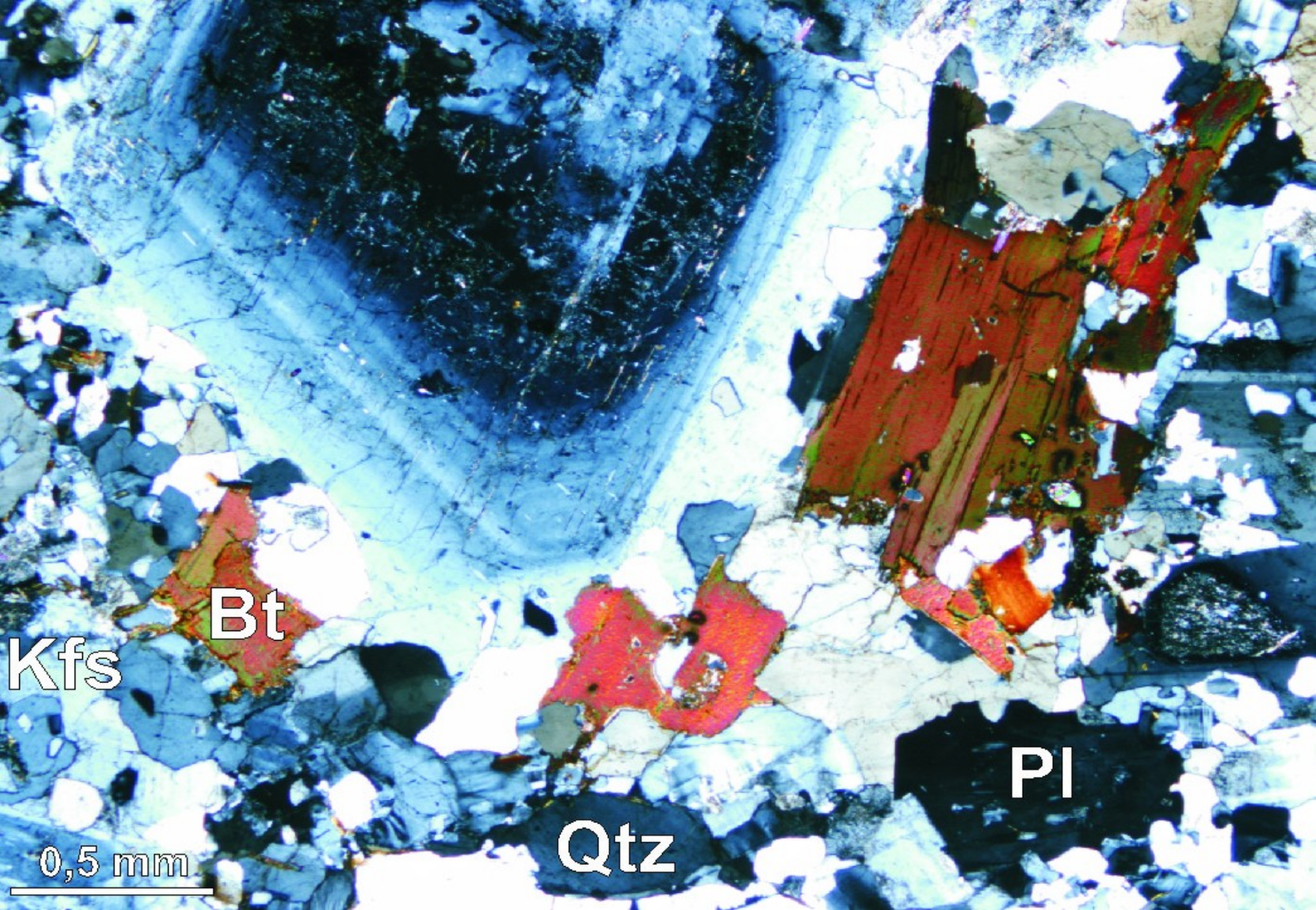
CONVECTION-FAVOURED MAGMA MIXING

- (1) Deformed leucogranites
- (2) High-viscosity zone, non modified by mixing
- (3) Low-viscosity, mobile zone
- (4) Hybridization at thermal equilibrium by crystal mingling plus diffusive mixing

FINAL EMPLACEMENT STAGE (from field data)



- (1) Late migmatites (locally)
- (2) Cordierite granites (S-type), not mixed
- (3) Granites with cordierite and mafic enclaves (Hs-type). Rich in K-felds. meg.
- (4) Hybrid granodiorites with enclaves (Hs-type mostly)
- (5) Hybrid tonalites with quartz xenocrysts. (Hm-type).
- (6) Ultramafic cumulates
- (7) Hybrid granodiorites with hornblende (Hss-type)

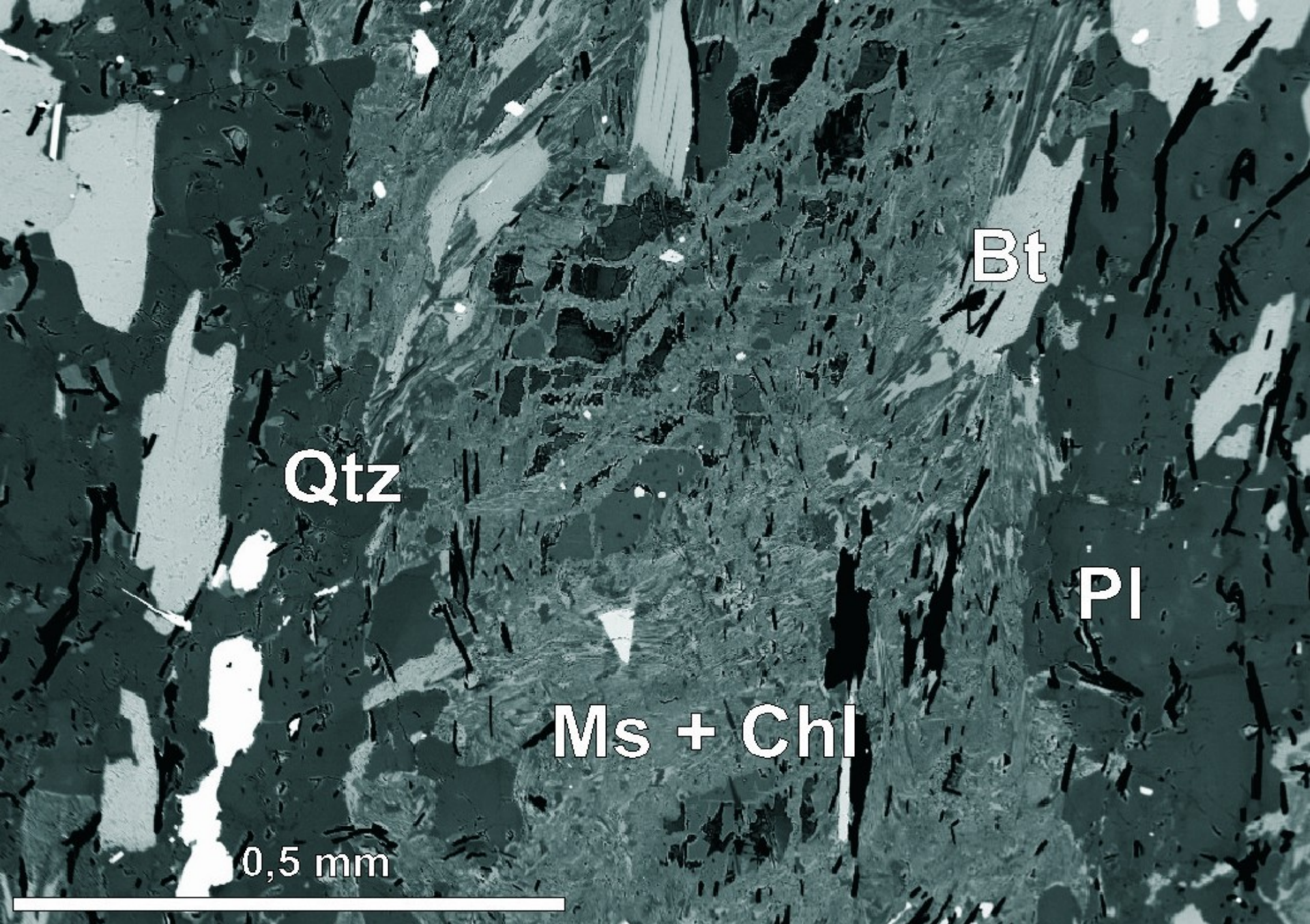


I-typový Bt granodiorit vzniklý mixingem (Nikaragua)





S-typový Cdr-Bt granit s xenolity migmatitů (Nikaragua)



Cdr-Bt xenolit v S-typovém granitu (Nikaragua)

Granitoid types

S-type	H <sub>s</sub> -type	H <sub>ss</sub> -type	H <sub>m</sub> -type	M-type
Leucogranites (2 mica) sienogranites to monzo- granites	monzogranites to granodiorites	granodiorites and tonalites	tonalites (fine grained mostly)	quartzdiorites and tonalites
Metamorphic restites (biot., sill., cord., etc.)	metamorphic restites, mafic enclaves scarce	mafic enclaves predominate	poor in enclaves scarce or no restites	only cumulate-like enclaves
Residual phases from the melting reaction (K-feld, cord, sill, etc.) biot.-sill. clots	K-felds. megacrysts and cord. from the melting reaction, biotite clots	K-felds. megacrysts resorbed. reaction cord → bi frequent, hb-bi clots	hb clots characteristics from px → hb reaction bi. → hb reaction	stable ferromagne- sian phases, only peritectic reactions
Simple zoning in plag., no resorption zones	complexly zoned plagioclases with conspicuous resorption zones			oscillatory, simple zoning in plag.
No xenocrysts	scarce or no xenocrysts (acicular apatite?)	hornblende clots xenocrysts	plag., K-felds. and q. xenocrysts	no xenocrysts
Major association with regional, high-grade metamorphism	generally associated with M-type and S-type granitoids in large batho- liths with transitional contacts; at epizonal levels, each type can appear in isolated, single plutons			generally associ- ated with minor bodies of ultra- mafic rocks
Crustal isotopic ratios $\delta^{18}\text{O} \geq 10\text{‰}$ Sr initial ratio > 0.708 $\epsilon_{\text{Nd}} \ll 0$	isotopic ratios very variable; isotopic ratios are generally intermediate between mantelic and crustal ratios; mixing lines are characteristic			Sr initial ratio < 0.704 $\epsilon_{\text{Nd}} > 0$ generally (depleted mantle)
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$		$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ close to 1	$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 1$	
Saturation alumina index (SAI) > 1		SAI close to 1	SAI < 1	tholeiitic affinities
Partial melting of metasedimentary rocks compositional varia- tions explained by restite unmixing	developed by magma mixing (hybridization) between mantle- derived mafic magmas (M-type) and supracrustal anatexic (S-type) magmas			fractionation of mantle-derived, basaltic magmas

### III. 10. Vznik těles granitů

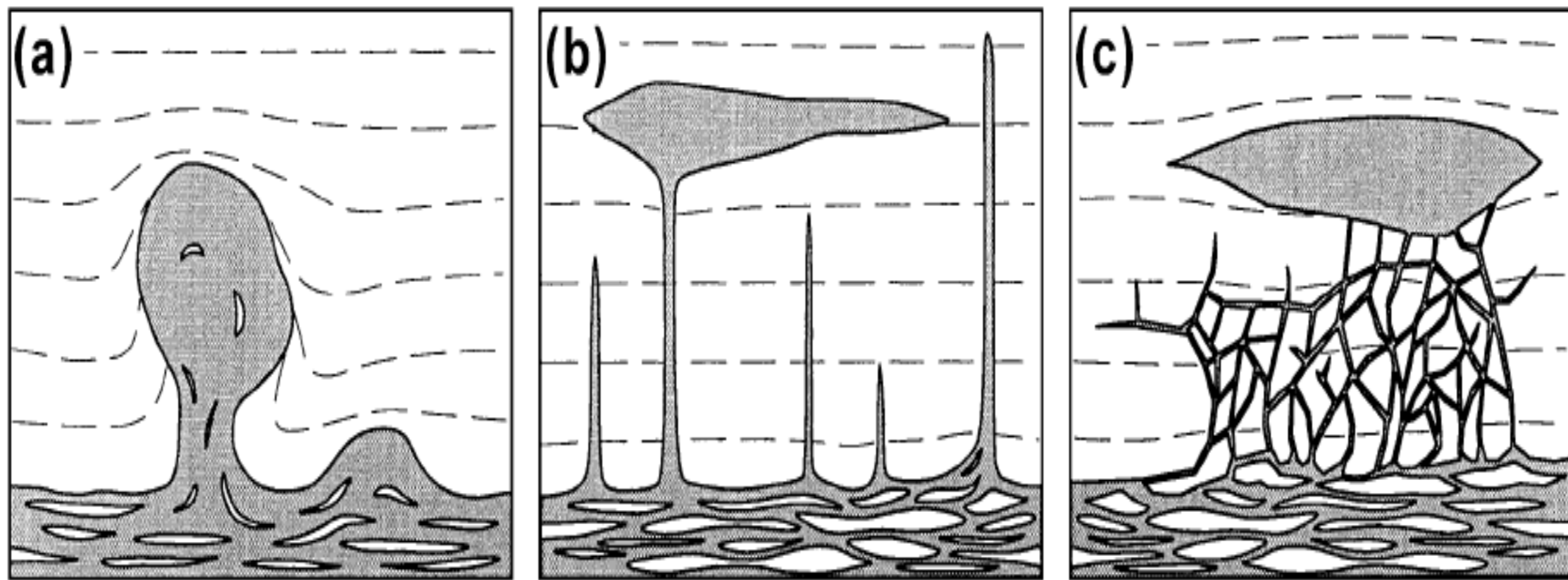


Fig. 1. Schematic sketches to illustrate the three dominant mechanisms for melt (grey) transport from a partially molten source below to a higher emplacement level. (a) Diapiric mobilisation of partially molten rock in large volumes. Wall rock is strongly deformed by rising diapirs. Unmelted rock or restite may be entrained or partly left behind. (b) Melt ascent by dykes, that emanate from the partially molten source and may freeze, or drain into a magma chamber. (c) Melt ascent through a permeable medium; here, a network of fractures. Porous flow would also fall into this category.

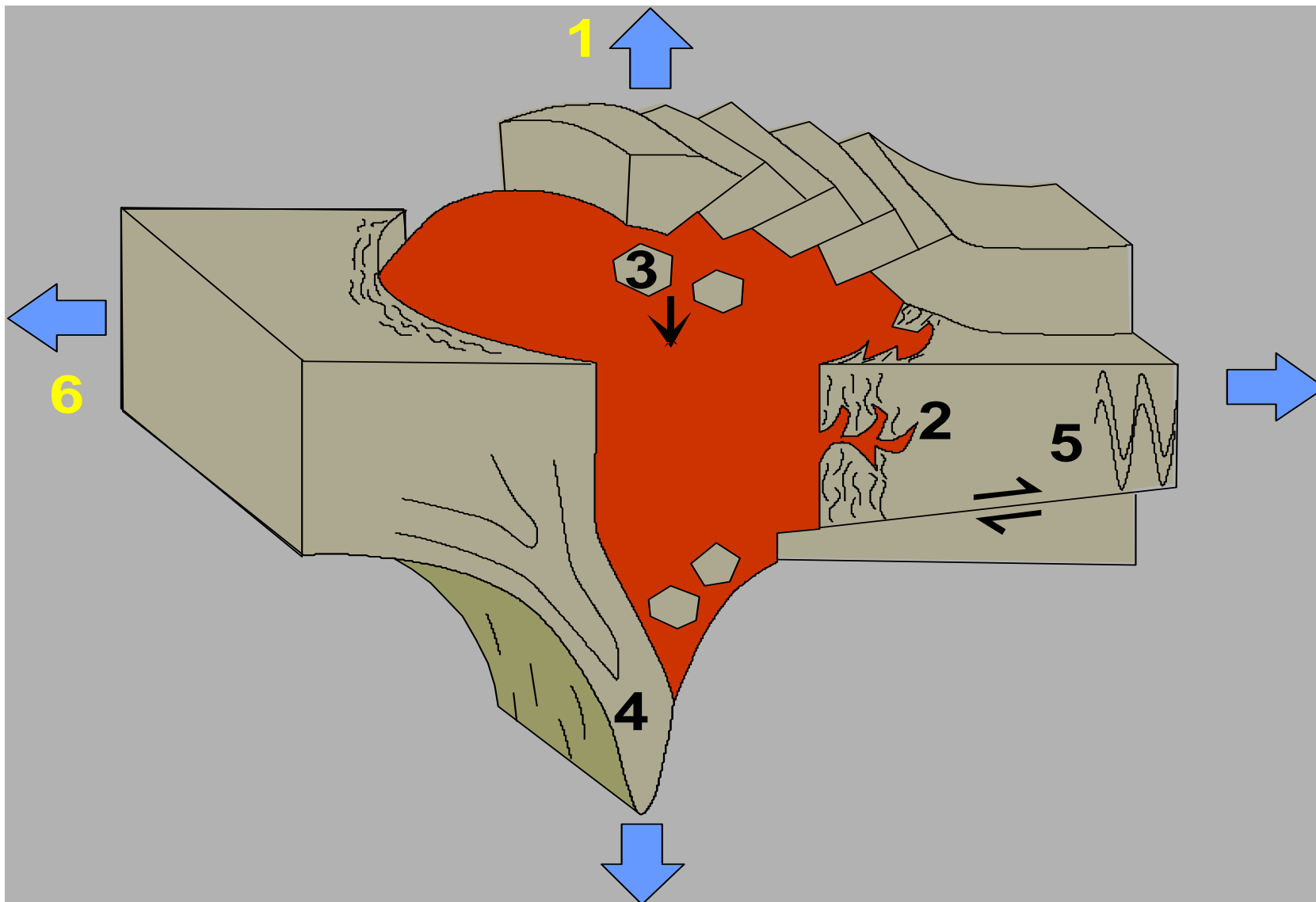
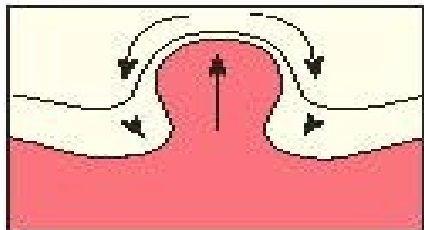
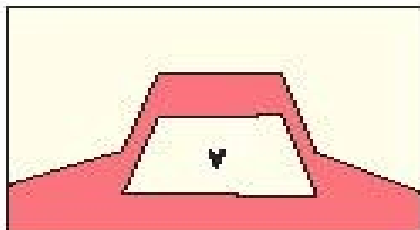


Diagram ilustruje předpokládané předpokládané mechanismy vmístění plutonu: **1**- doming (doming of roof); **2**- Parciální zonální tavení a asimilace (wall rock assimilation, partial melting, zone melting); **3**- stoping (stopping); **4**- plastická deformace okolních hornin (ductile wall rock deformation and wall rock return flow); **5**- boční posunutí okolních hornin podél zlomů (lateral wall rock displacement by faulting or folding); **6**- vmístění v extenzním prostředí (emplacement into extensional environment). Paterson *et al.* (1991), *Contact Metamorphism. Rev. in Mineralogy*, **26**, pp. 105-206. © Min. Soc. Amer.

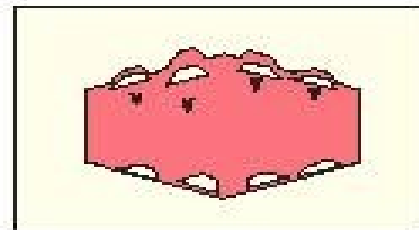
COUNTRY ROCKS MOVE DOWN (cross-sections)



Diapirism

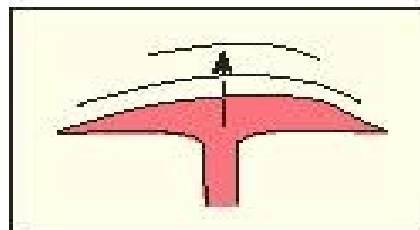


Cauldron subsidence



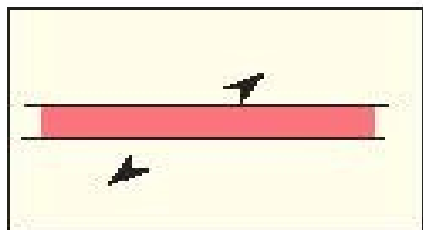
Stopping

COUNTRY ROCKS MOVE UP (cross-section)

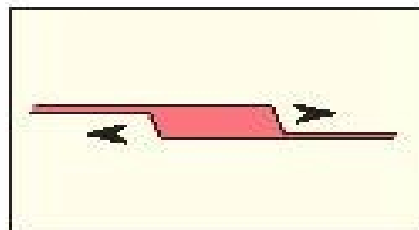


Doming

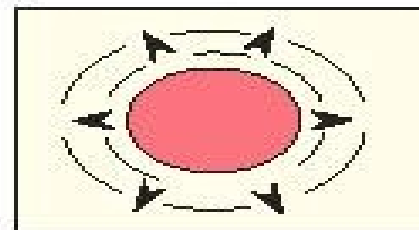
COUNTRY ROCKS MOVE Laterally (plan views)



Transensional

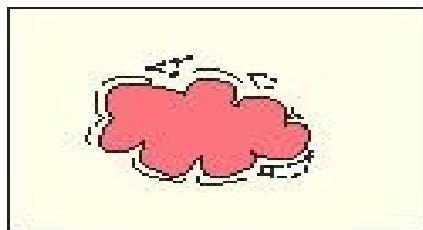


Transcurrent to transpressive

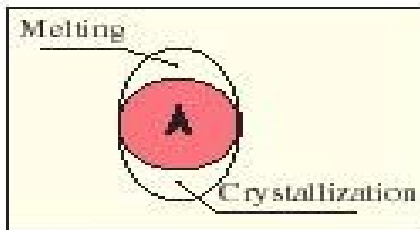


Ballooning

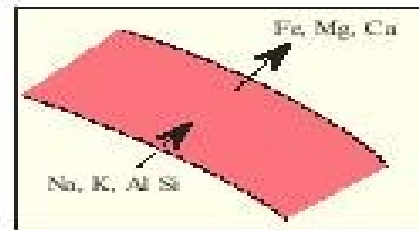
COUNTRY ROCKS DO NOT MOVE (cross-sections)



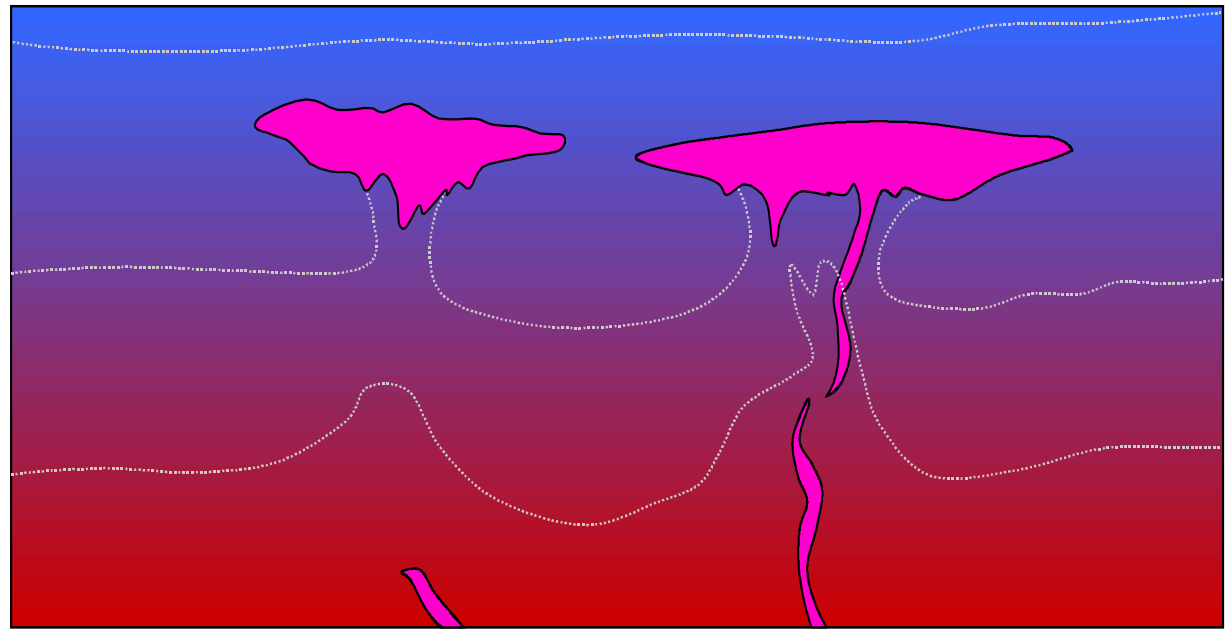
In-situ melting



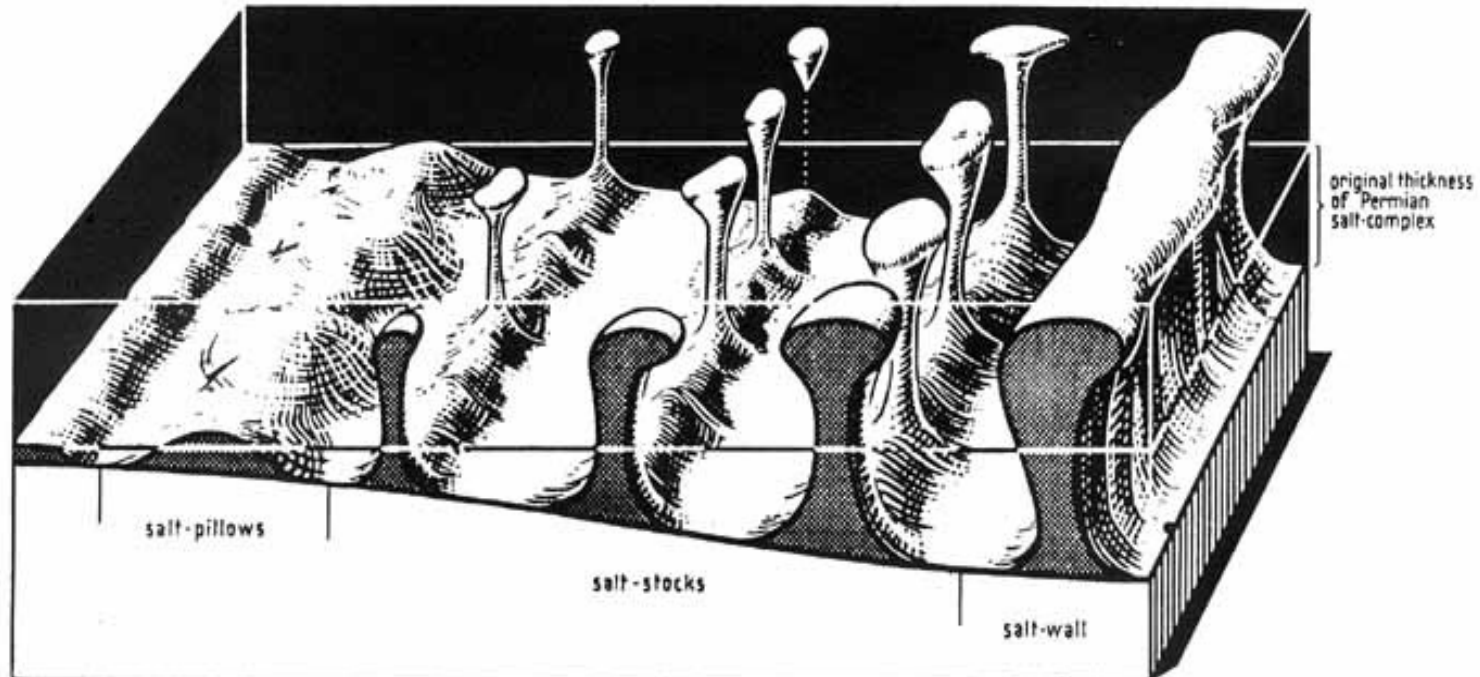
Zone melting



Granitization



Model vzniku diapiru vytvořený na centrifuze (Ramberg 1970, In Newell, G., and N. Rast, (1970) (eds.), Mechanism of Igneous Intrusion. Liverpool Geol. Soc., Geol. J. Spec. Issue no. 2)



Blok diagram solných diapirů v severním Německu Trusheim (1960), Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., 44, 1519-1540 © AAPG.

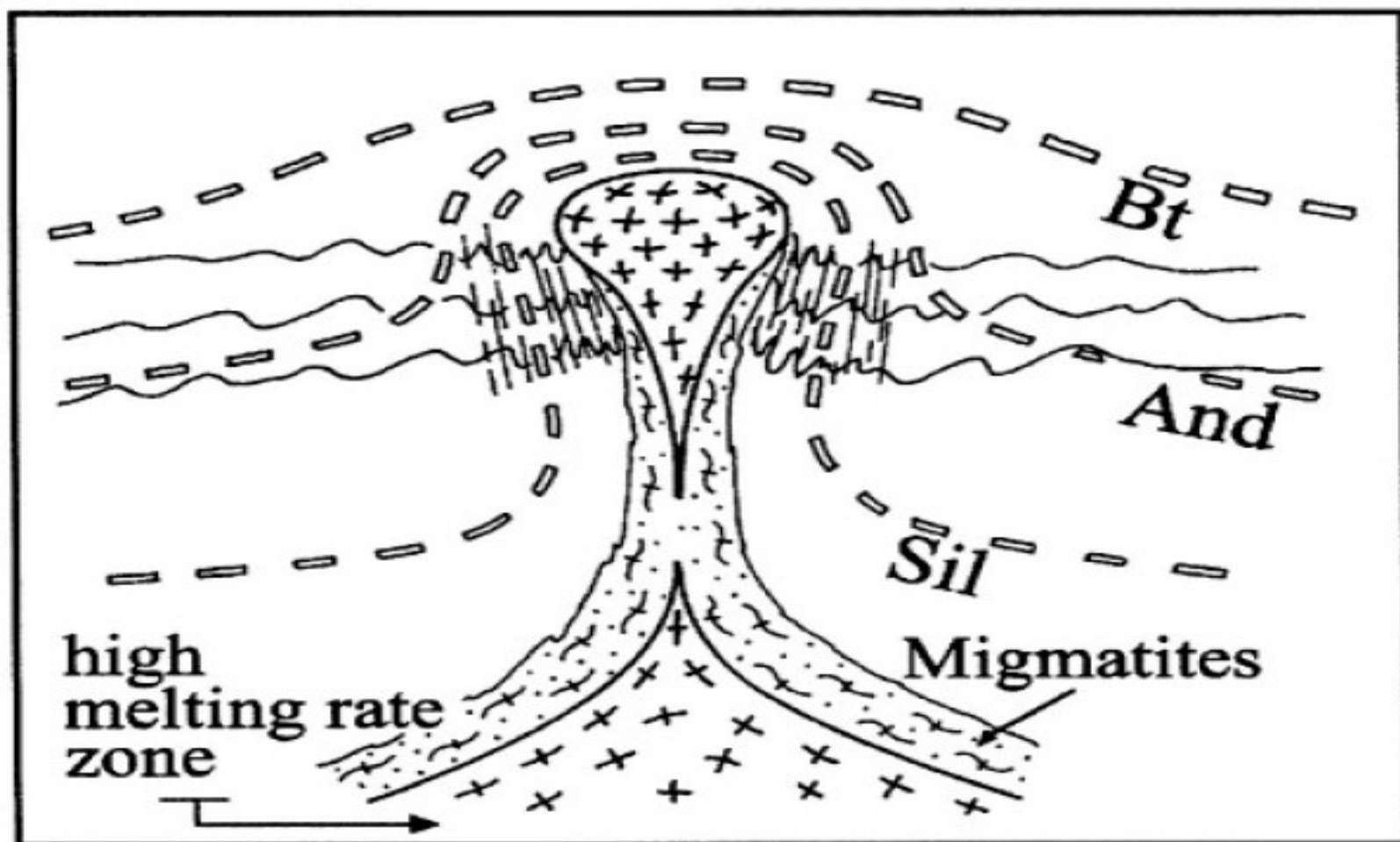
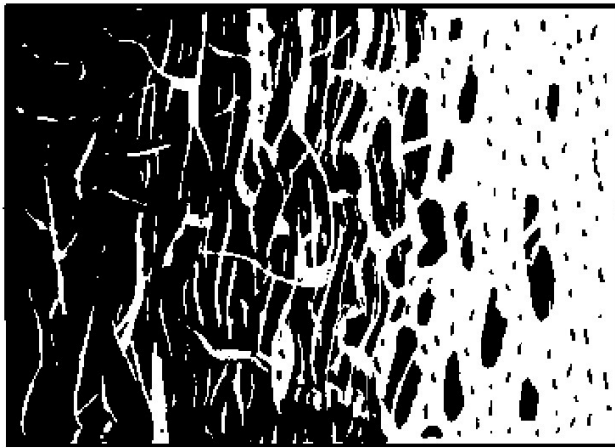


FIG. 59 — *Schematic diagram of the dynamic emplacement of a pluton (diapiric emplacement hypothesis) in the upper levels of the continental crust (after Flood and Vernon, 1978). The pluton propagates toward the surface from a largely melted lower crustal zone, driven by the Archimedes effect, based on the relatively low density of granitic magma relative to the wall rocks. This rise is facilitated by the high temperature of the material situated at the immediate contact of the intrusion at depth, which accompany it in its movement. In this perspective, the migmatites which appear in the internal zone of contact aureoles cannot be considered autochthonous. The general thermal configuration around the intrusion results in a progressive deformation of the regional isotherms, and not to a simple diffusion model such*





Foliace vyvinutá na okraji plutonu jako výsledek odlišného pohybu při kontaktu s okolím (Lahee 1961, Field Geology. © McGraw Hill. New York.



a. Injected

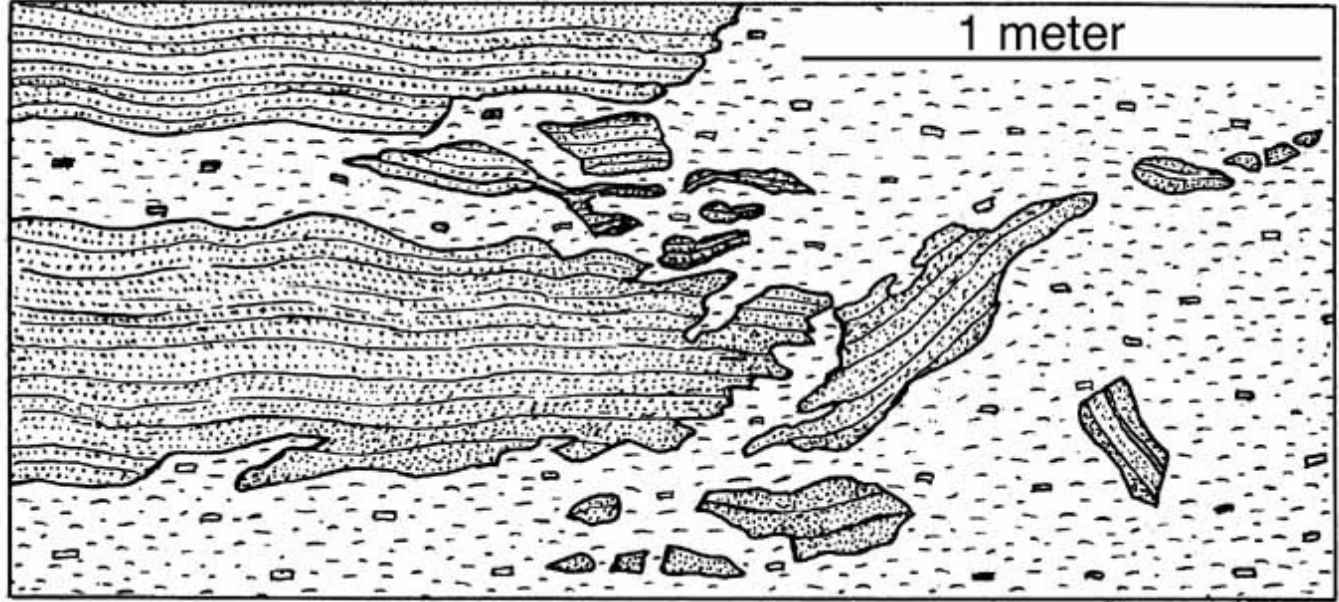


b. Permeated



c. Combination

Přechodná zóna mezi granitem a okolní horninou Compton (1962), Manual of Field Geology. © R. Compton.



Foliace překračující kontakt mezi okolní horninou a granitem, kontakt je typický pro pre- nebo syn-tectonický pluton. (Compton 1962, Manual of Field Geology. © R. Compton).

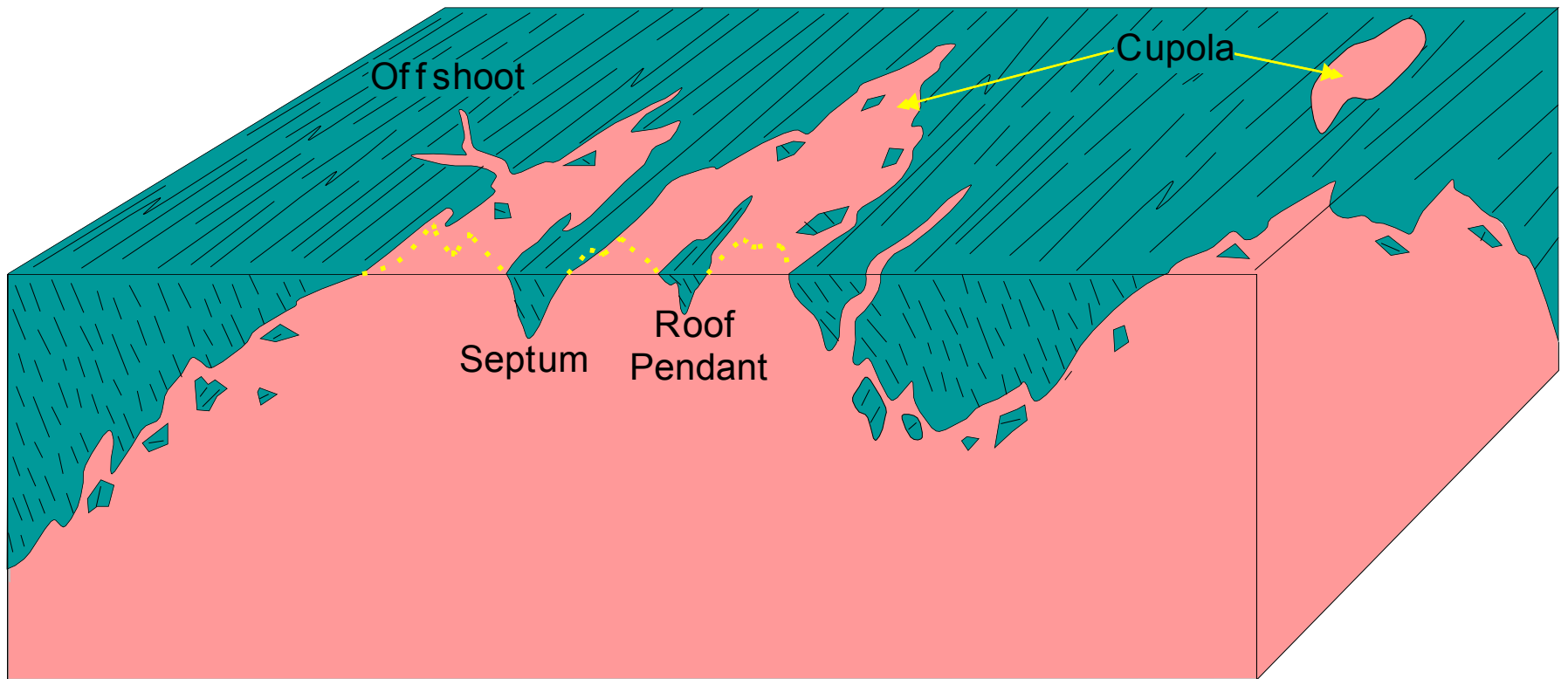




lom Křepínky – moldanubikum  
schlazený okraj xenolitu

lom Křepínky – moldanubikum (xenolity)



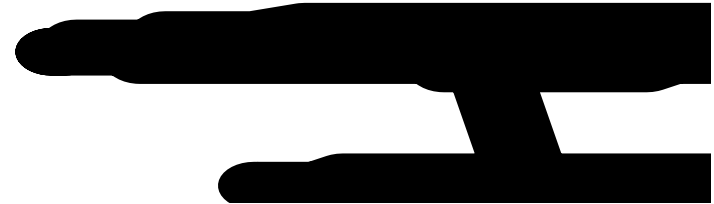


Blok diagram v rozsahu řady kilometrů (Lahee 1961, Field Geology. © McGraw Hill. New) York.

Intrusive dike



Intrusive sill



Intrusive lacolith (thick sill)



Intrusive pluton



- **Batolit** je velké těleso, jehož průměr směrem do hloubky roste a jeho podloží není známo. Batolity ve starých štítech zaujímají často plochy ve stovkách až tisících km<sup>2</sup>.

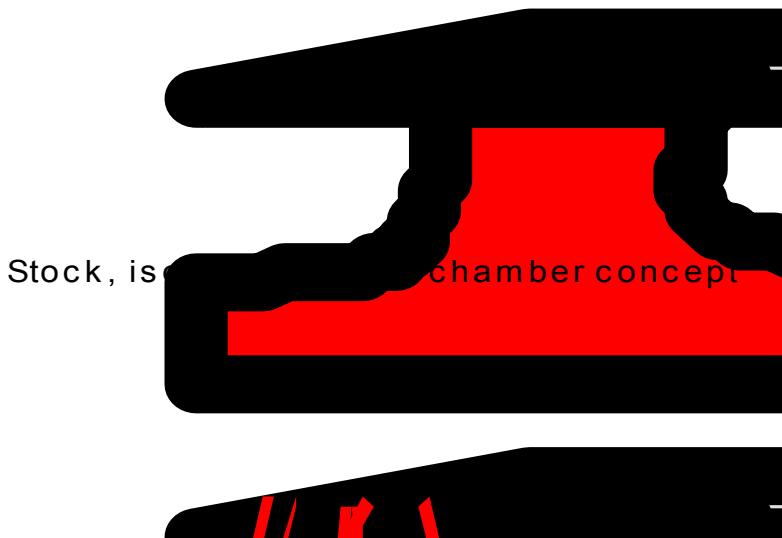
**Batholith**



Batholiths are generally large, composite plutonic bodies. They can cover tens of thousands of square kilometers and be made of large numbers of individual plutonic bodies. They form in regions that had large magma supplies for long periods, such as subduction zones or slow continental rifts.

- **Pluton** je pojem, který má více významů ze strukturního a tektonického hlediska. Podle tvaru se rozlišují např. plutony okrouhlé, větveného tvaru, vertikální s příkrými kontakty nebo horizontální plutony jazykovitého tvaru. Na rozdíl od batolitu je možné v některých částech plutonu navrtat jeho podloží.
- **Peň** jsou menší plutonická tělesa, která se vyznačují izometrickým, okrouhlým průřezem. Peň má většinou příkré okraje a má diskordantní poměr k okolí.
- **Apofýzy** jsou odnože vybíhající z většího hlubinného tělesa.

Stock, appendage of a batholith concept



Stocks are generally steep-walled plutons having an exposed area of <math><100\text{ km}^2</math>. They may be part of an unexposed larger plutonic complex, or isolated. Large magma chambers are generally thought to be fed from below via dikes.



**Kfs**

**Qtz**

**Pl**

**Bt**

