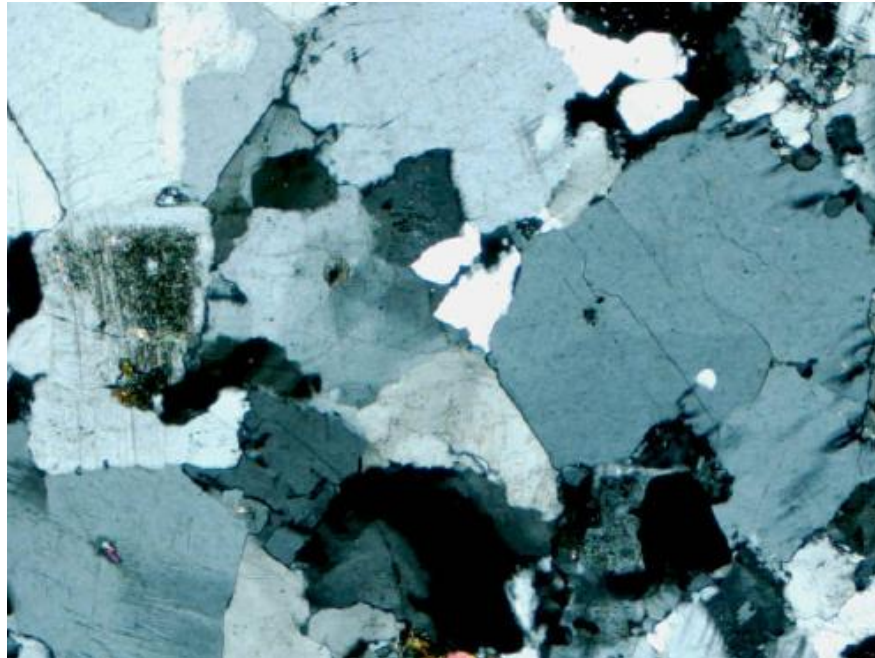


# Granity a kontinentální kůra

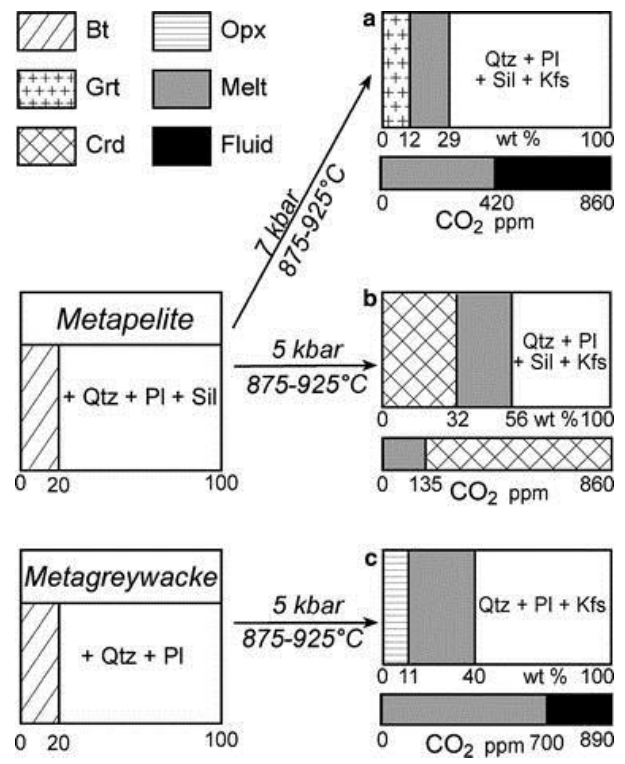
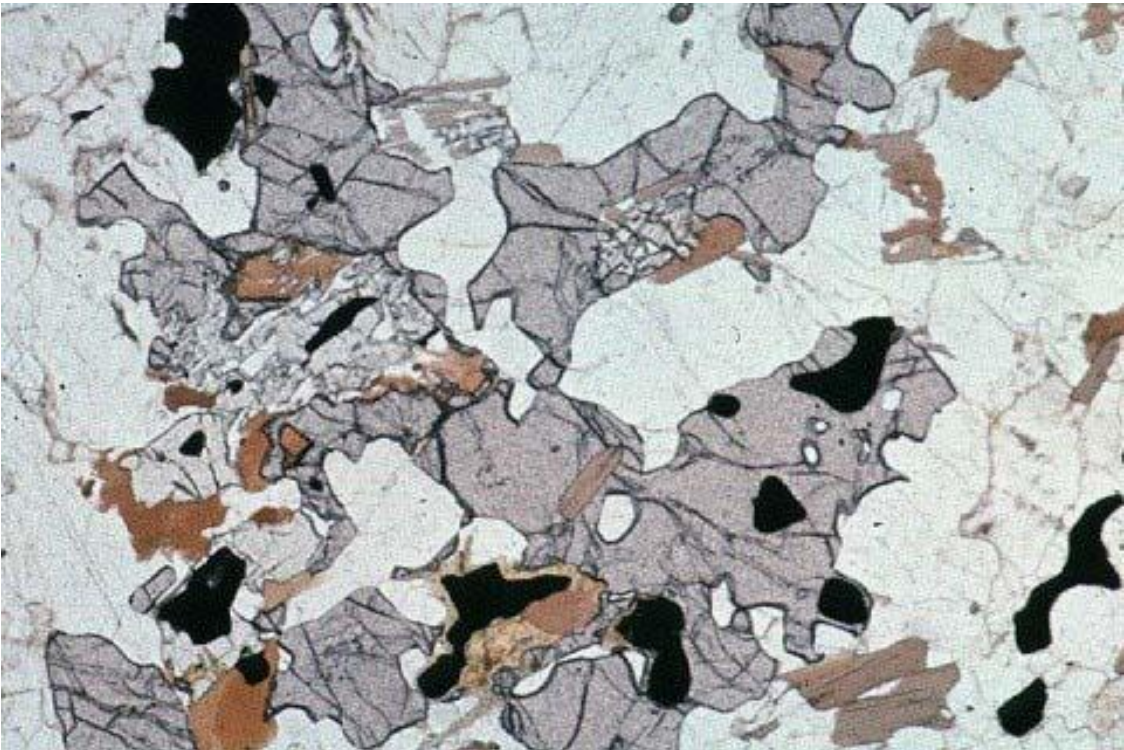
## III

(Vznik S-typových granitů)

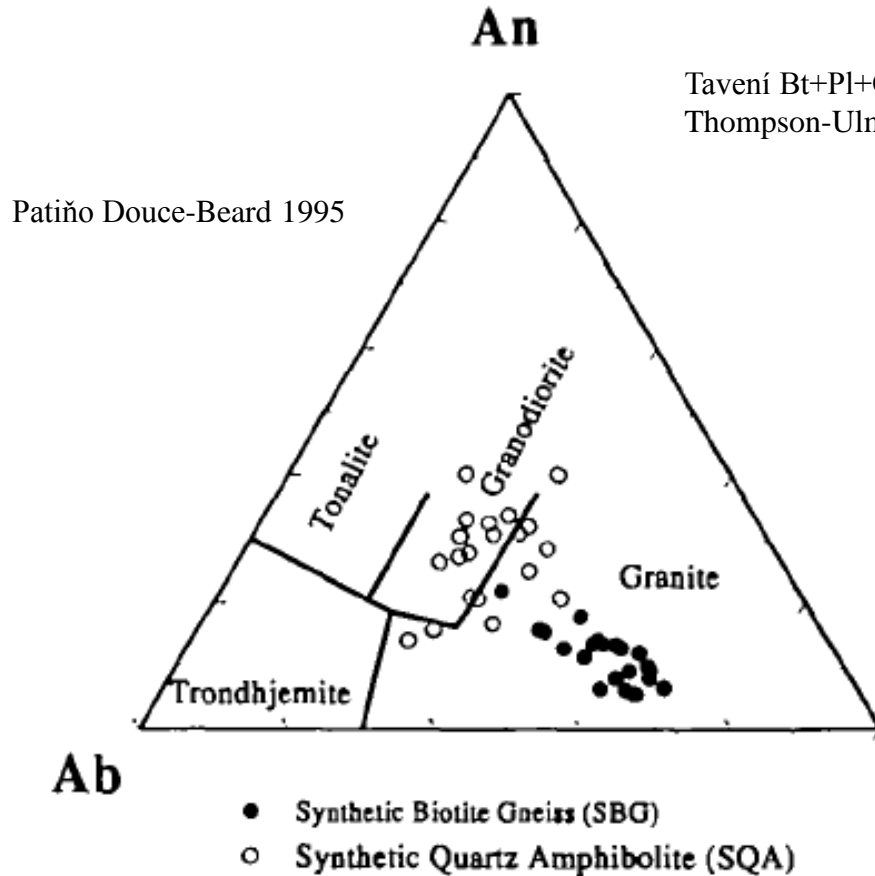
*David Buriánek*



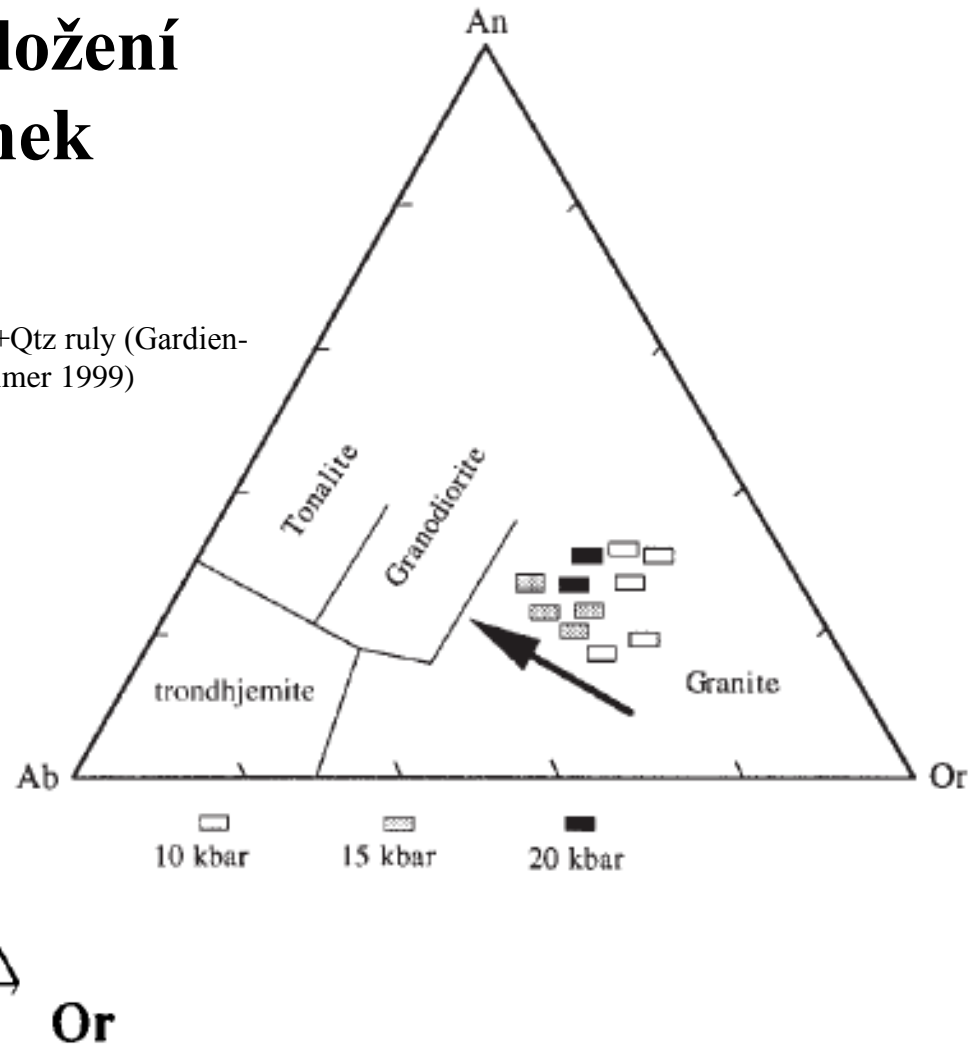
- III. 3. Vliv chemického složení protolitu a PT podmínek
- III. 4. Rychlost procesů produkujících granitovou taveninu
- III. 5. Migmatitizace
- III. 6. Mobilizace taveniny a vznik těles granitů
- III. 7. Segregace taveniny
- III. 8. Termální modely pro vznik orogenetických granitů
- III. 9. Hybridní granity
- III. 10. Vznik těles granitů



# III. 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

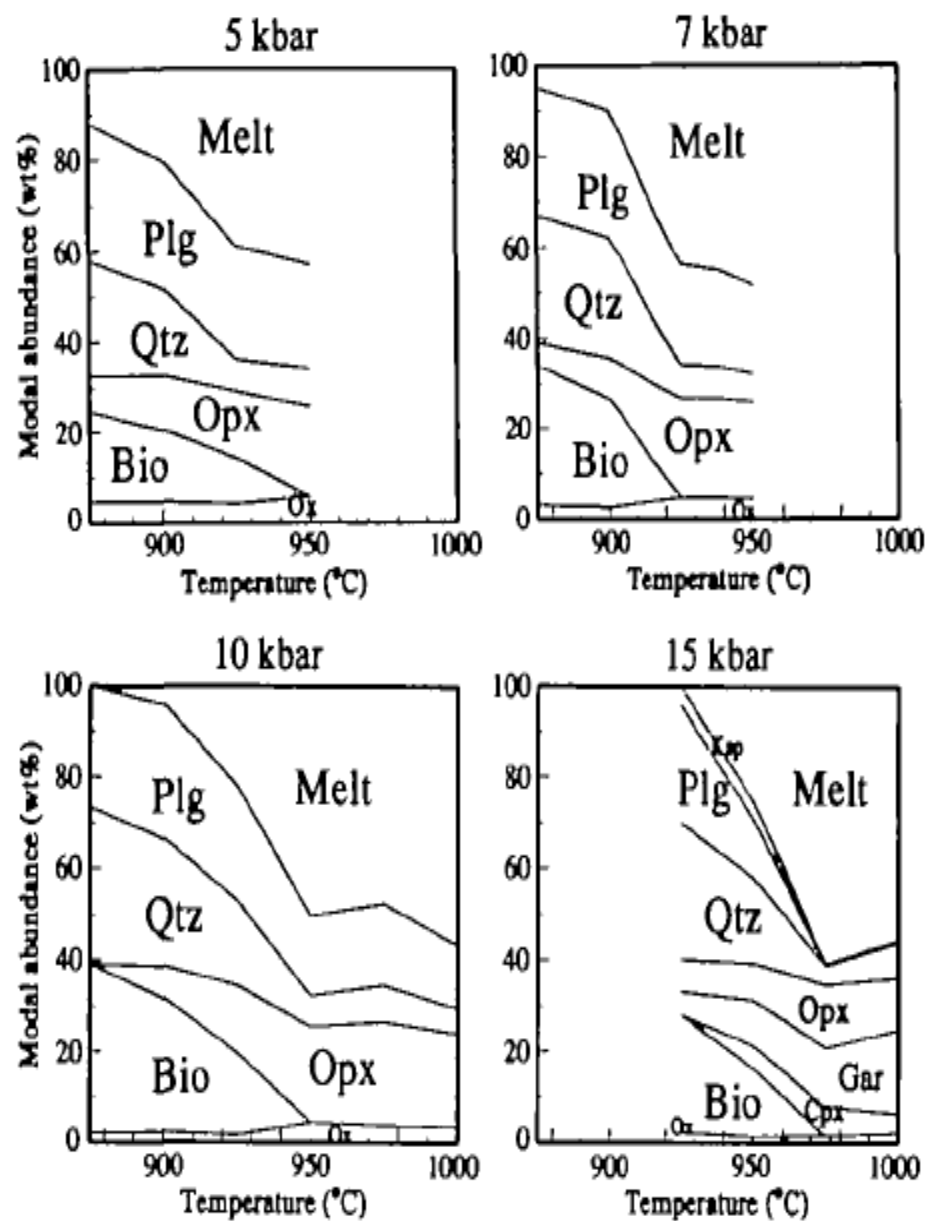


Fig. 6. Isobaric changes in modal compositions in SBG. Modes calculated by mass balance (see text and Table 4).

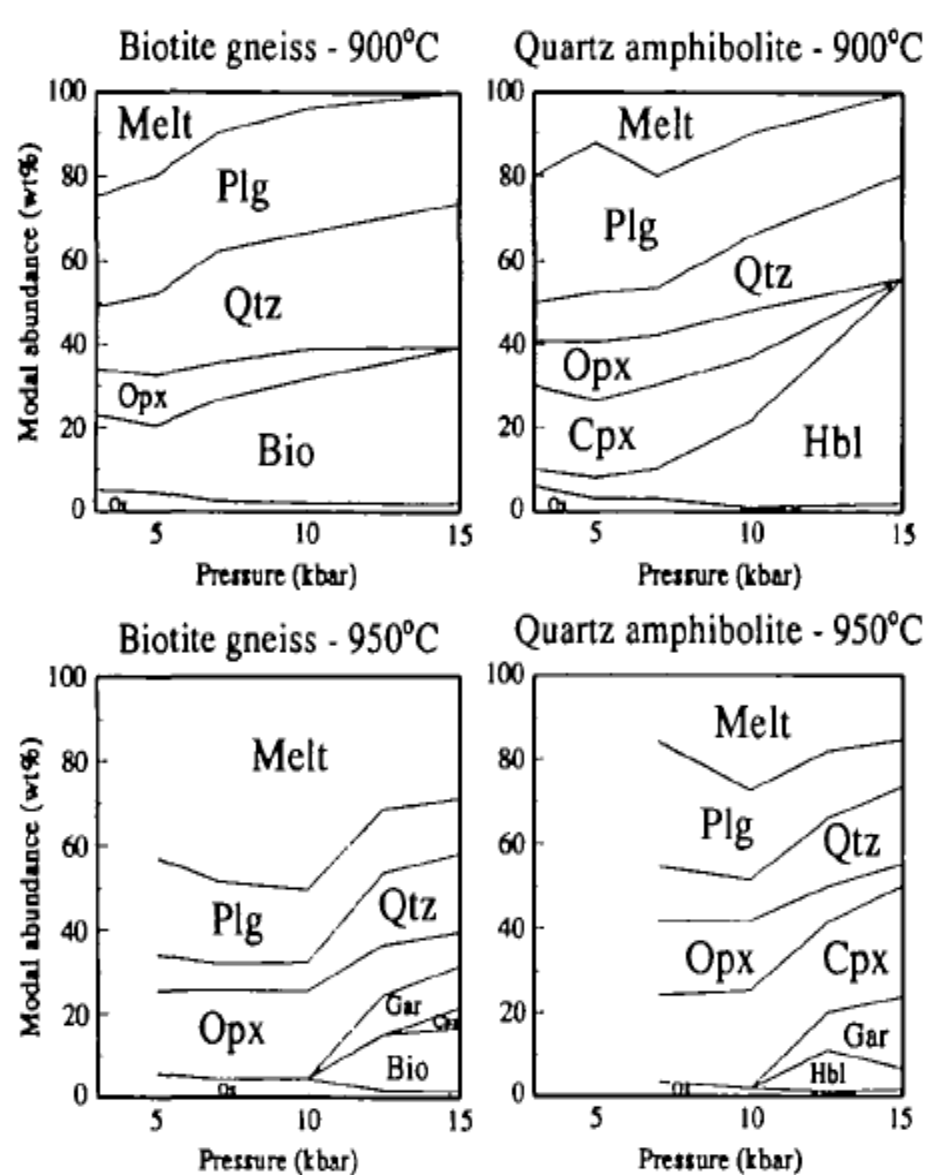


Fig. 8. Isothermal changes in modal compositions in SBG (left panels) and in SQA (right panels). Data for 12.5 kbar at 950°C interpolated between runs at 930°C and 960°C (see Table 4).

- 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

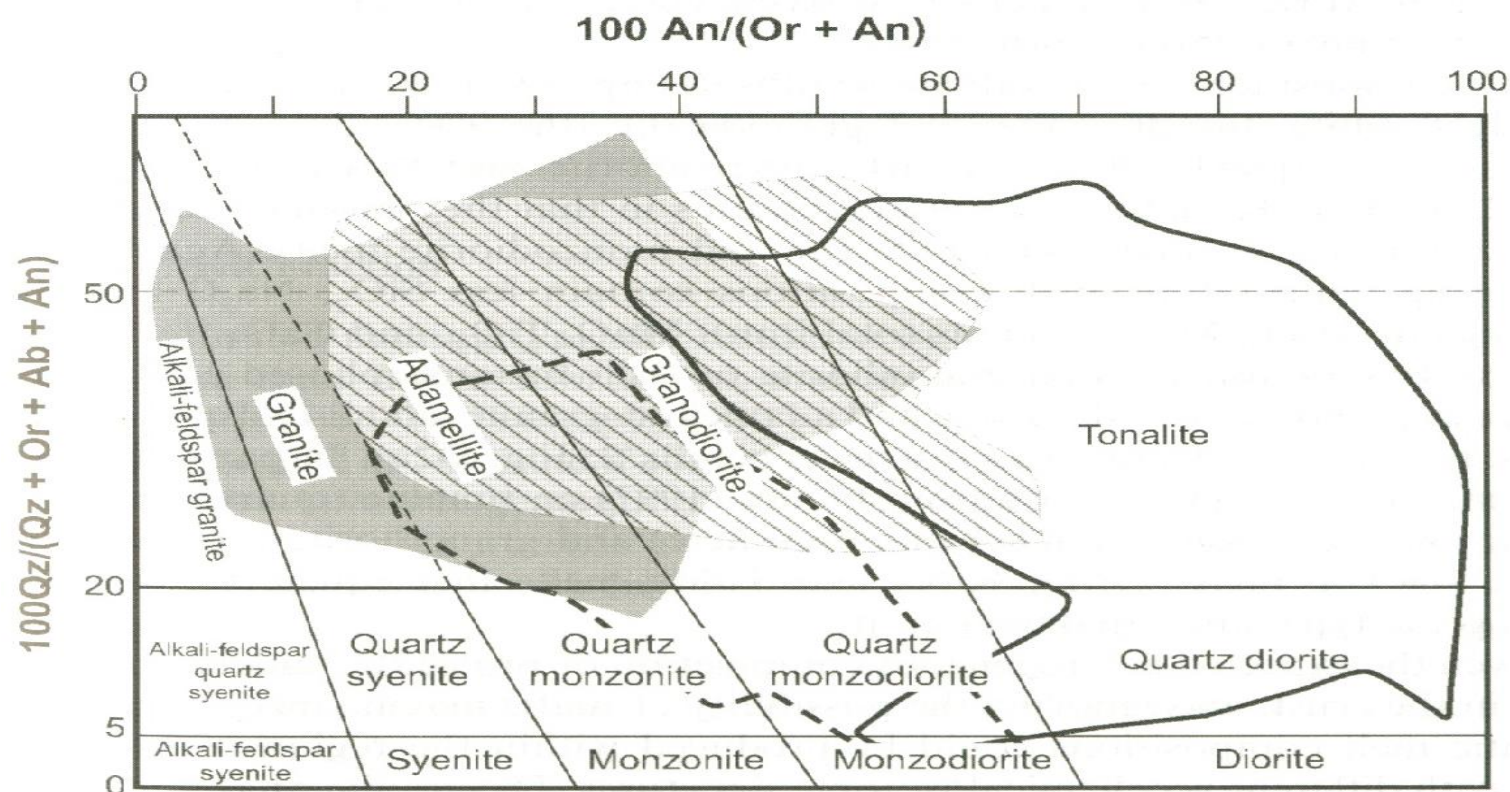
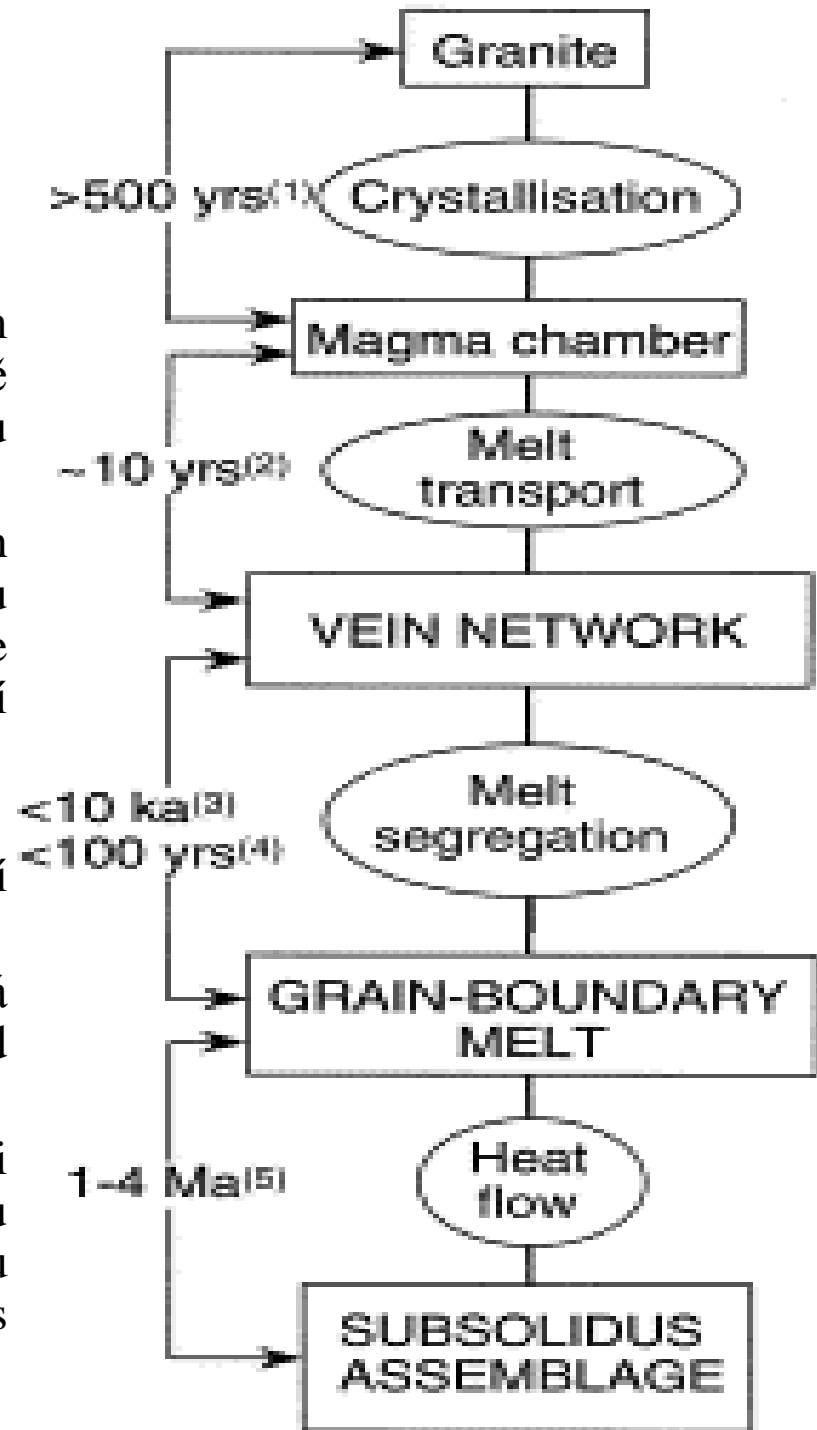


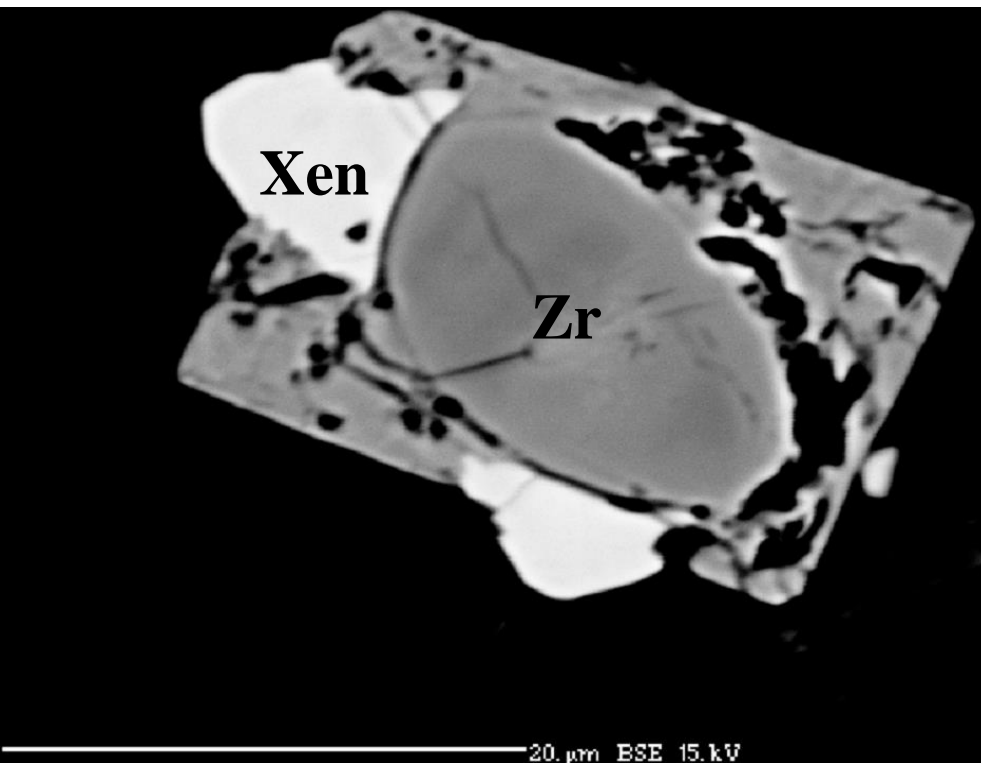
Figure 2.8. Summary diagram showing normative Qz, Or, Ab, An ratio composition fields of granite melts derived from melting of mica-bearing metasediments (grey-tone field); intermediate compositions (diagonal hatched field), mafic compositions (unshaded field enclosed by solid line; field enclosed by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



Quartz



K-feldspar

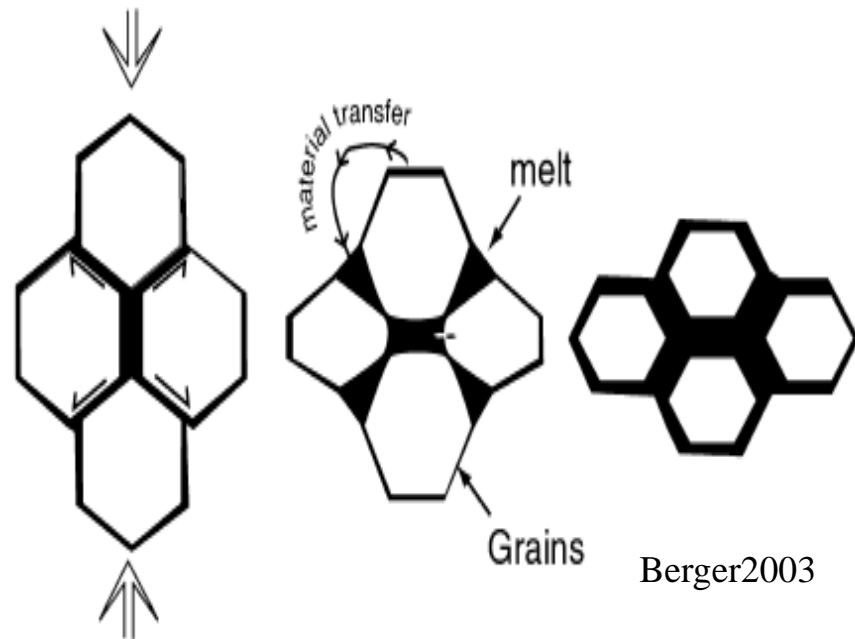


Plagioclase



Granite melt

- 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

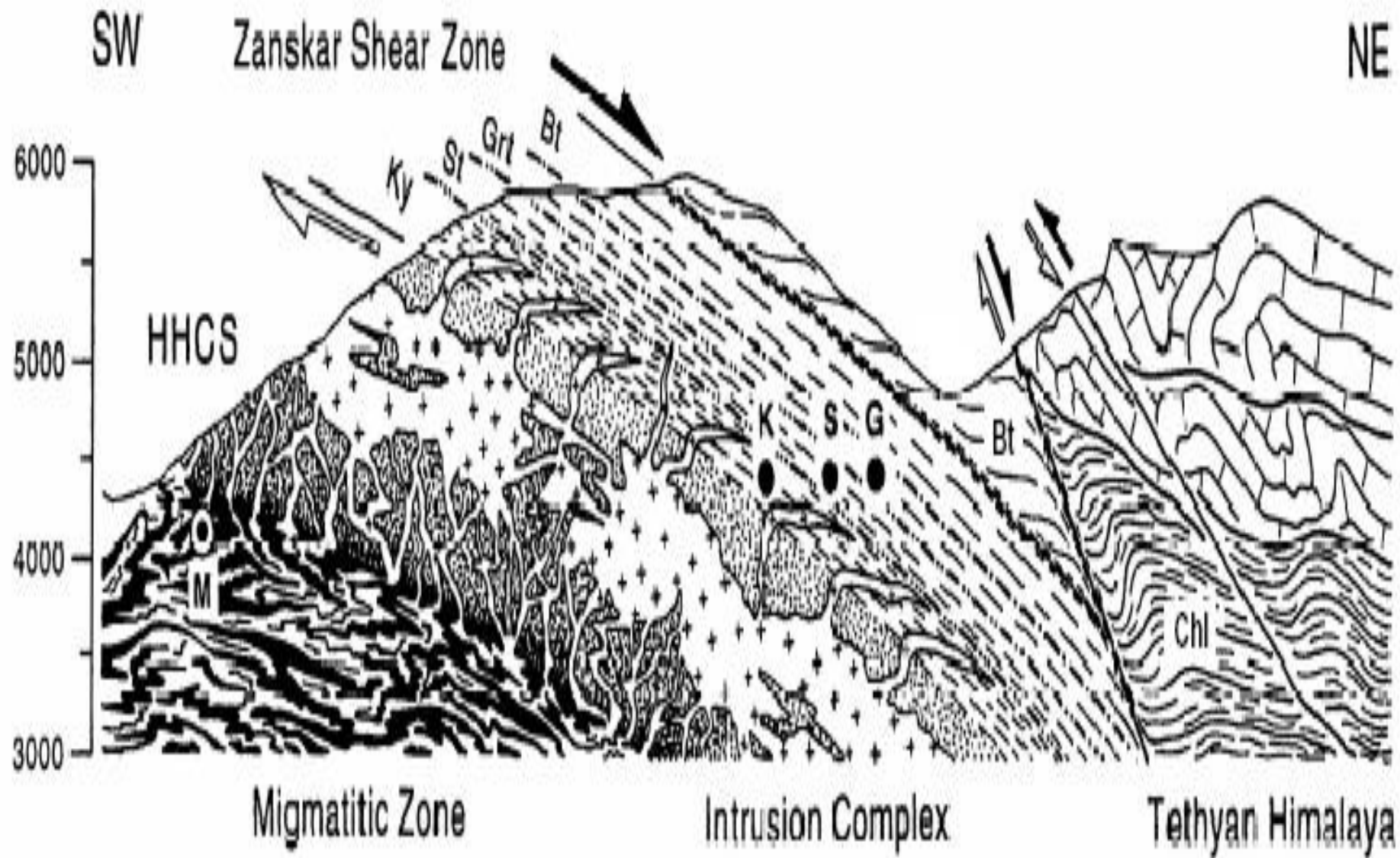


Tavení Qtz+Fsp v granulitech při 760 2 kbar a 3 dnů (Mehnert et al. 1973)





**Amfibolit na střižné zóně tonalitová tavenina**





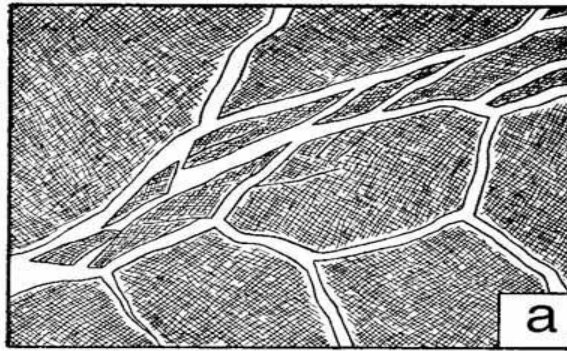
lom Křepínky – moldanubikum  
nově vzniklá tavenina (pegmatit)



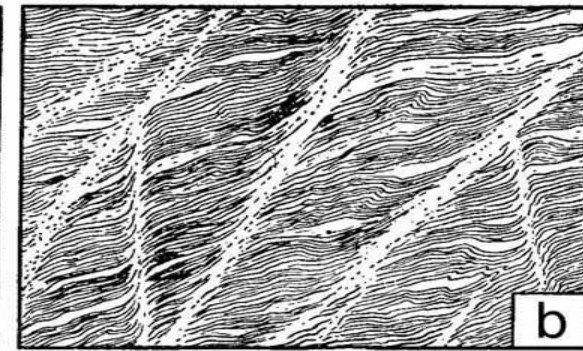
Tu granit - moldanubikum

# III. 5. Migmatitizace

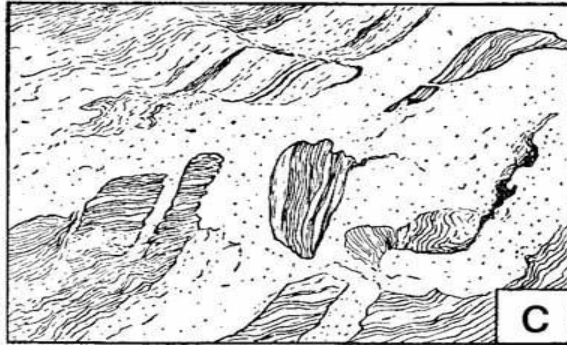
a. Agmatit (Breccia structure):  
ostrohrannné úlomky melanosomu  
tmelené leukosomem .



b. Diktyonity (Net-like structure):  
leukosom tvoří rozvětvenou síť žilek.



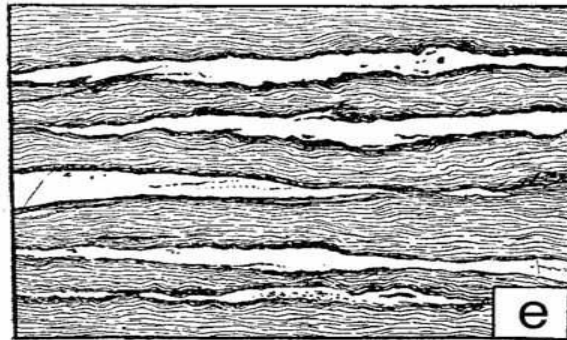
c. Agmatit s převahou leukosomu  
(Raft-like structure).



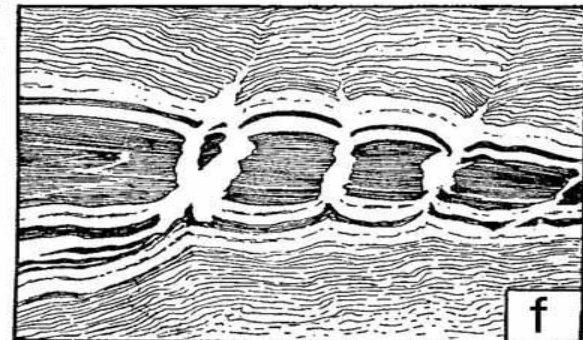
d. Migmatit s ptygmatickými žilkami  
- žilky silně zprohýbané.



e. Stomatit (Stromatic structure)  
střídají se pásy leukosomu a  
melanosomu a pásy probíhají více  
méně rovně.



f. Dilatonit (Dilation structure).

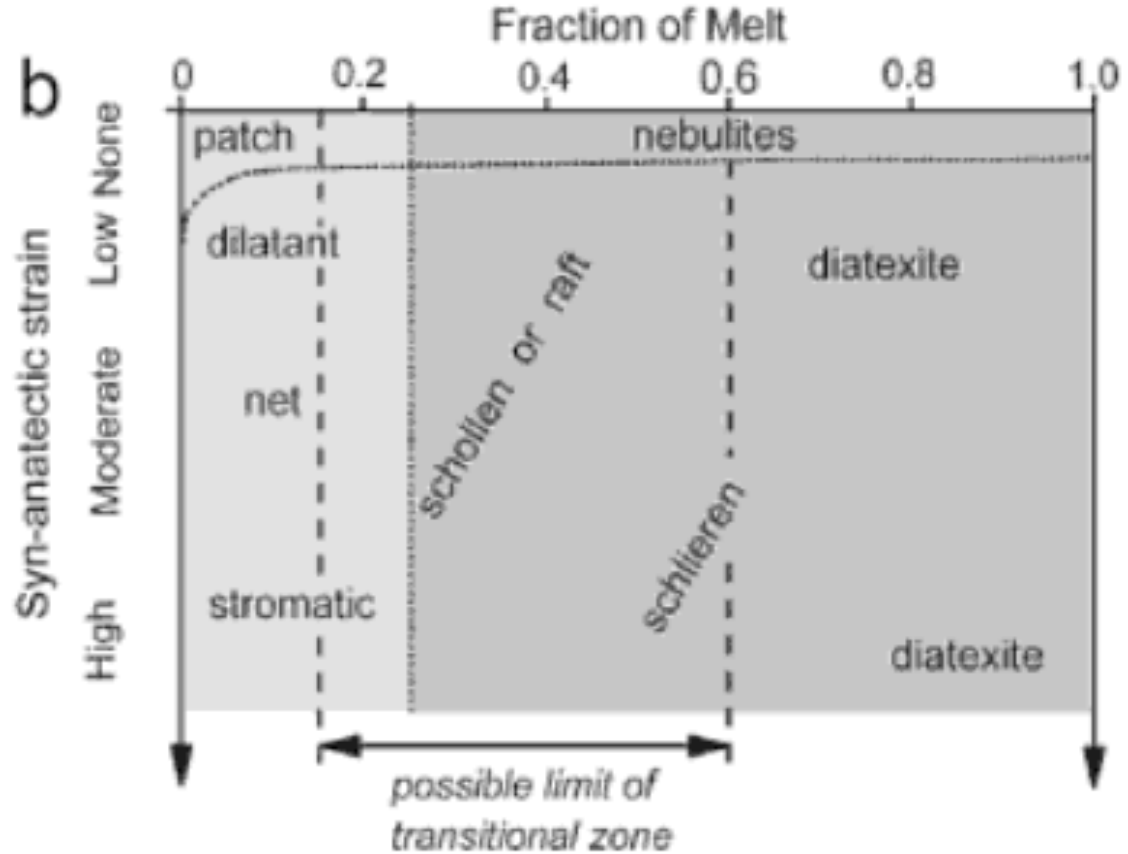
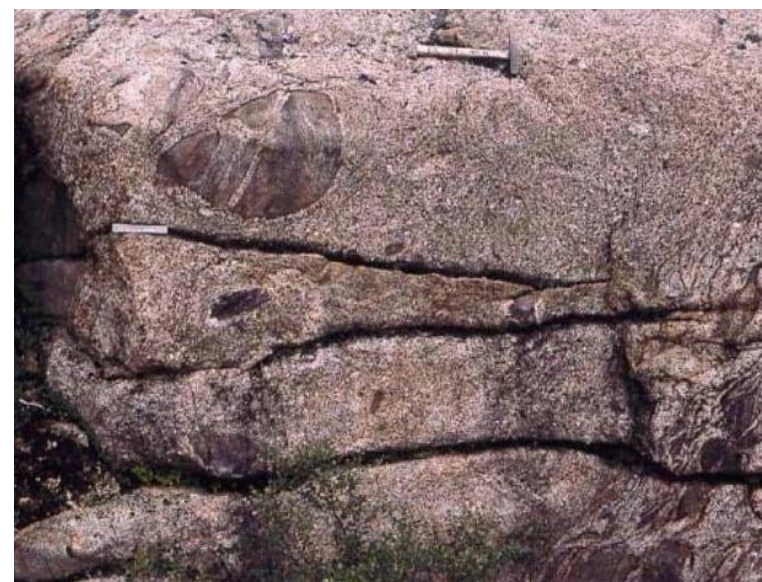


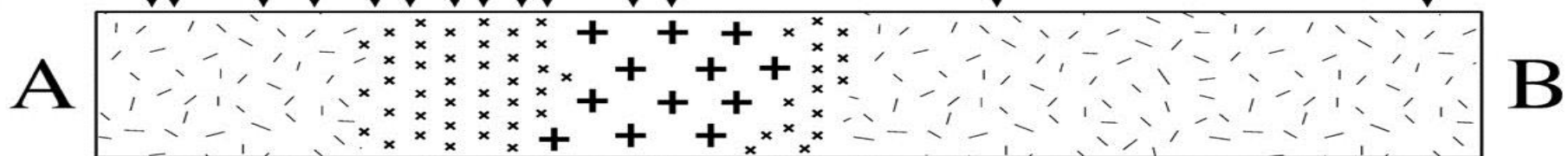
g. Stomatit s převahou leukosomu  
(Schleiren structure).



h. Nebulitický migmatit (Nebulitic structure):  
melanosom tvoří  
rozplývavé skvrny v leukosomu.  
*Upraveno podle knihy: Mehnert  
(1968) Migmatites and the Origin of  
Granitic Rocks. Elsevier.*







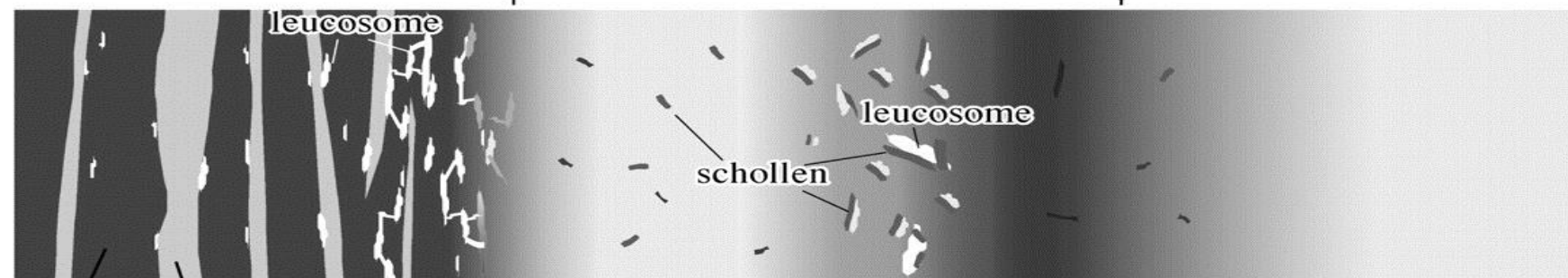
Saito S et al. J. Petrology 2007;48:79-111

Metatexite

Diatexite

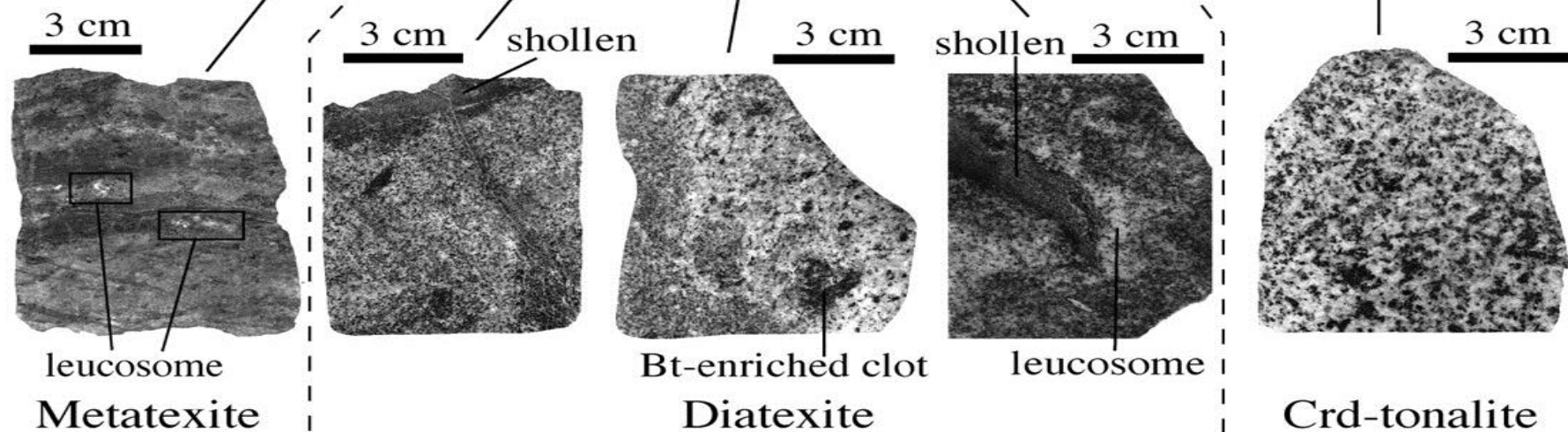
Crd-tonalite

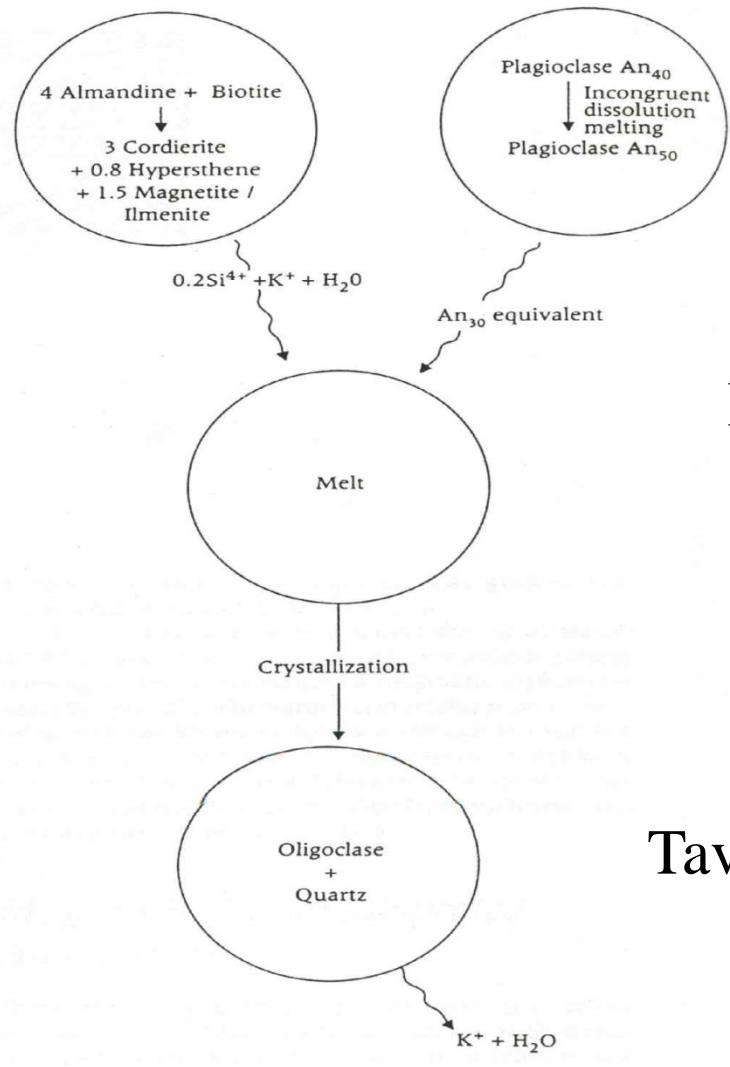
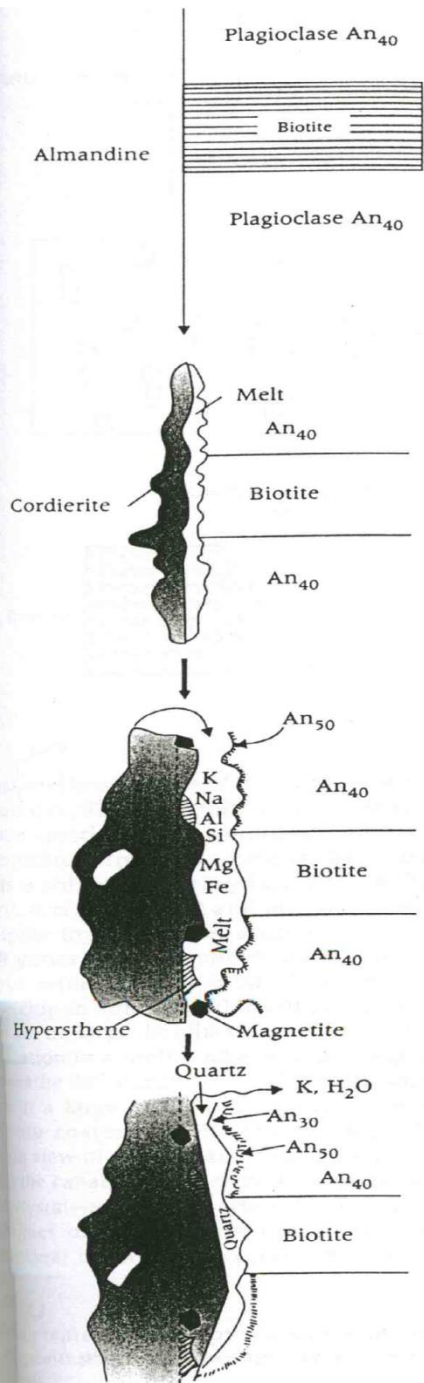
**(b)**



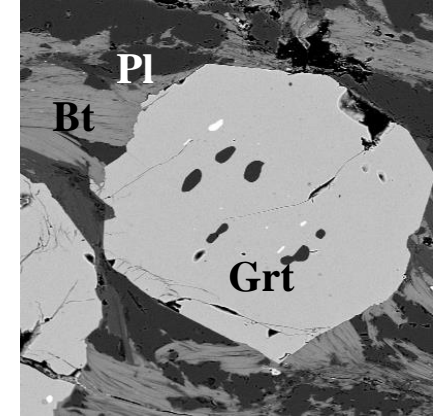
pelitic layer  
psammitic layer

**(c)**

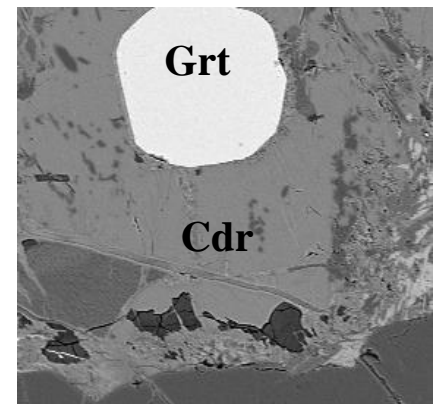




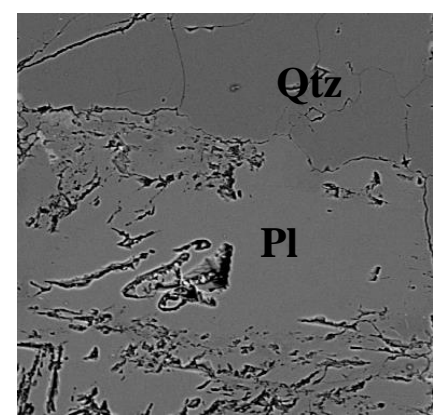
Rula



Restit



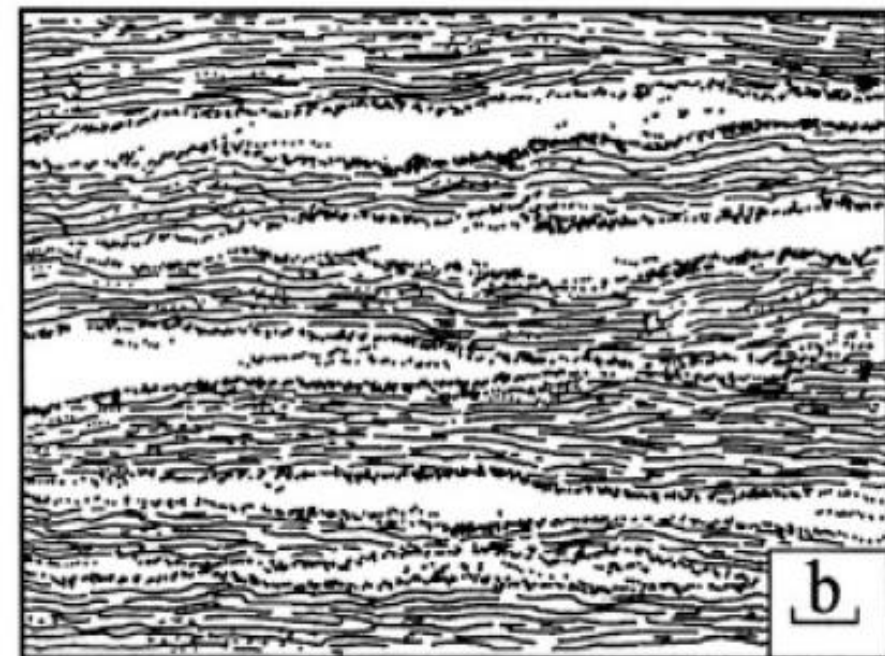
Tavenina





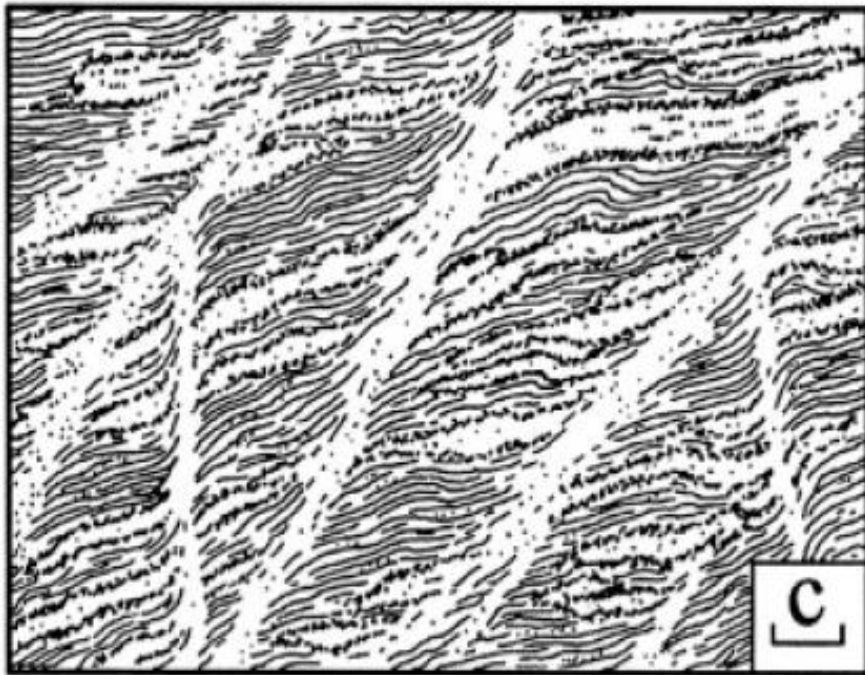


- a) Nebulitický migmatit (Nebulitic structure): melanosom tvoří rozplývavé skvrny v leukosomu. Velmi viskózní tavenina zůstává na místě svého vzniku.
- Krystaluje v podmínkách bez orientovaného tlaku nebo jen nízkého orientovaného tlaku.
  - Malá velikost kapes taveniny vede k tomu že tavenina nemá žádný vztlak.



- b) Stomatit (Stromatic structure) střídají se drobné pásy leukosomu a melanosomu.
- Pásy probíhají více méně rovně s původní foliací a v tom 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.*

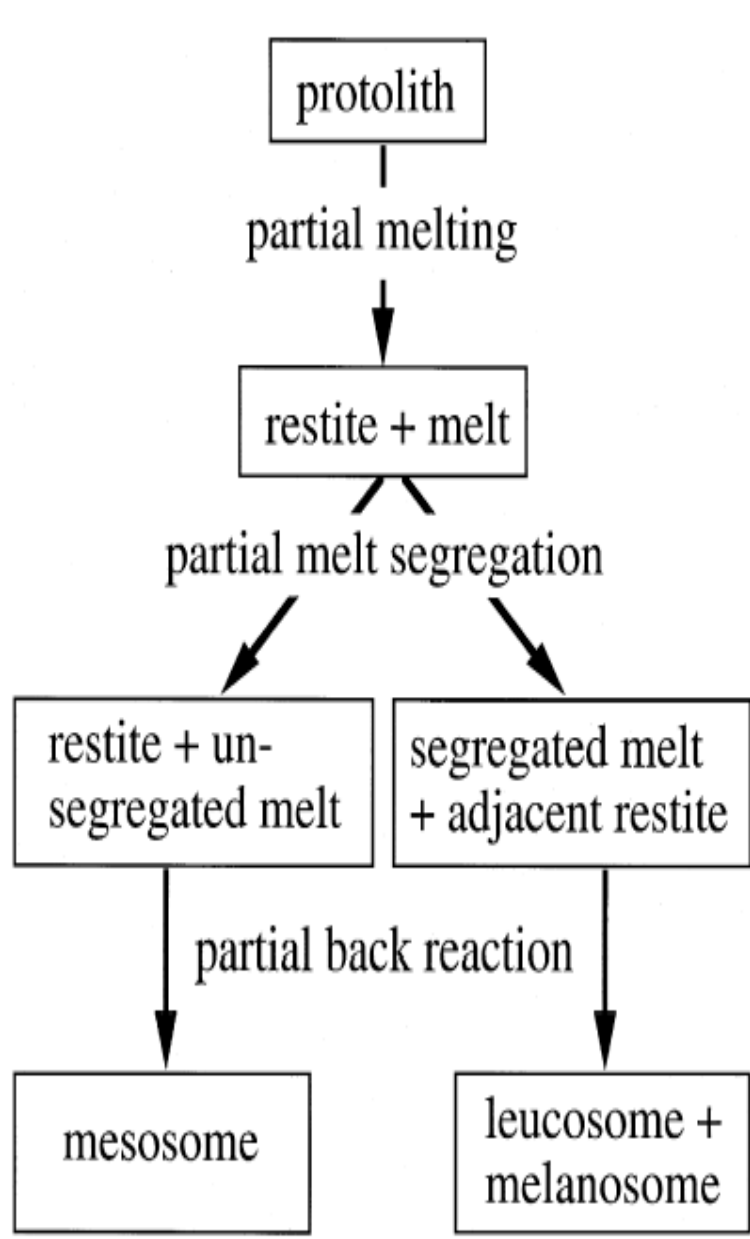
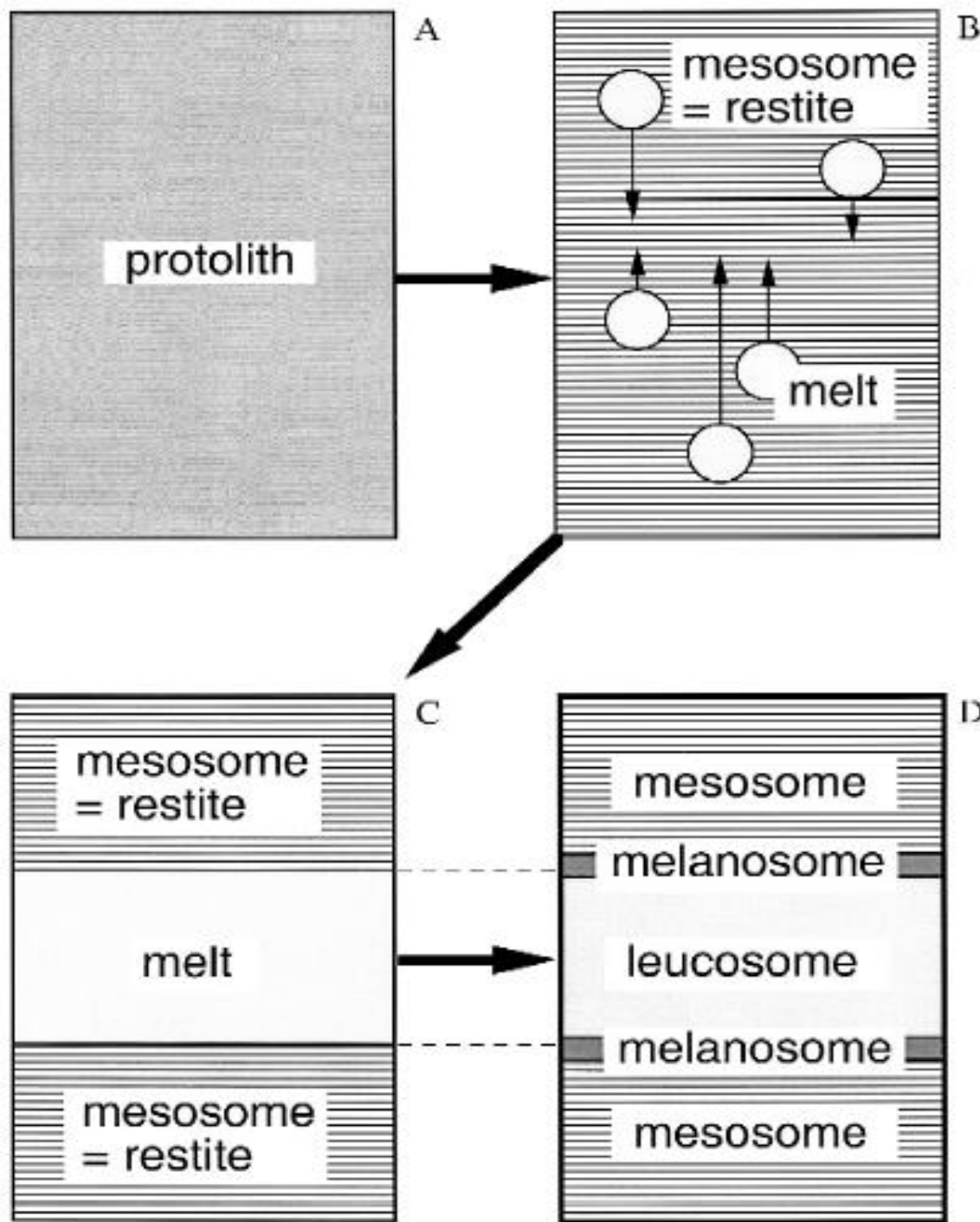


- c) Diktyonity (Net-like structure): leukosom tvoří rozvětvenou síť žilek.
- K oddělení taveniny došlo díky orientovanému tlaku.
  - Leukosom tvoří propojenou síť žilek.



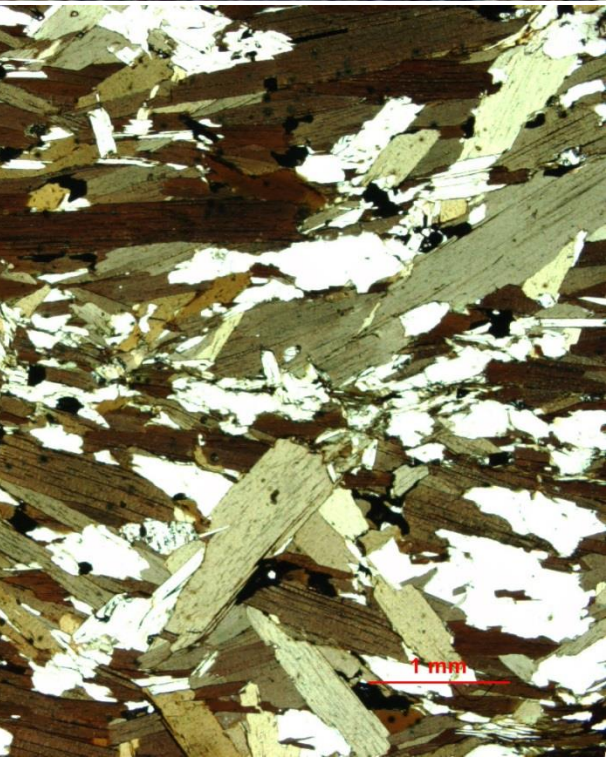
- d) Agmatit (Agmatite) ostrohranné bloky jsou obklopené leukosomem tvoří brekcii (nemusí nutně reprezentovat paleosom a melanosom)
- Porušení v důsledku hydraulického vztlaku taveniny.
  - Vznikají v horních částech migmatitických dómů. Představují kontakt mezi granity a migmatity.

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

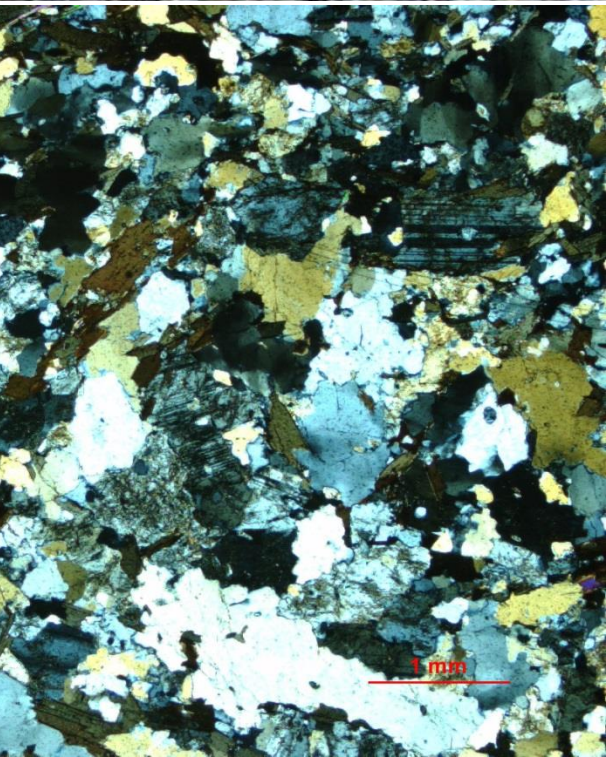




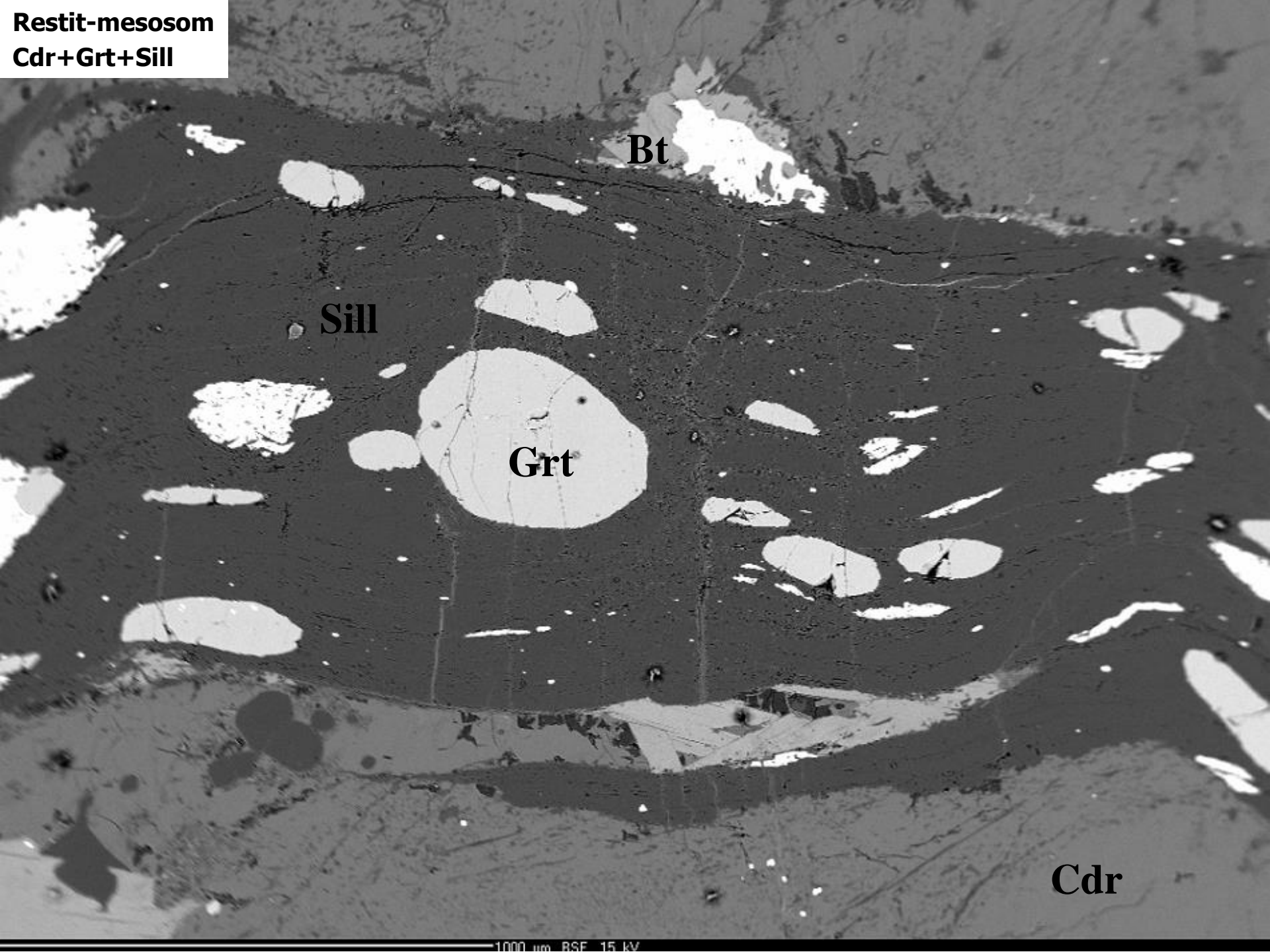
**Melanosom**  
 $Bt+Ms > Qtz+Fsp$   
 $\pm Grt, Tu$



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



**Restit-mesosom**  
**Cdr+Grt+Sill**

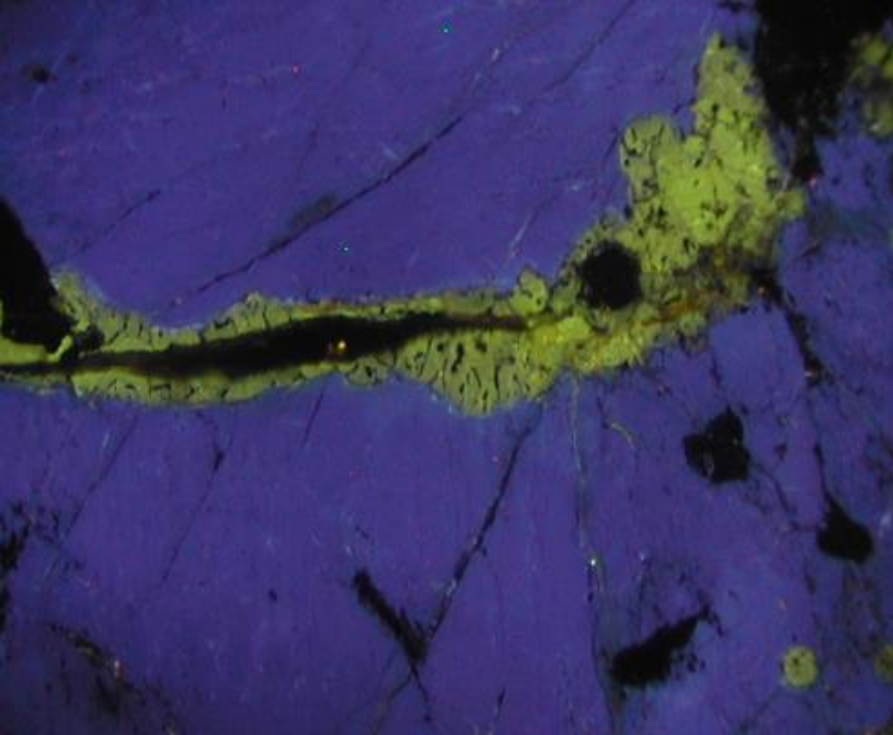


**Bt**

**Sill**

**Grt**

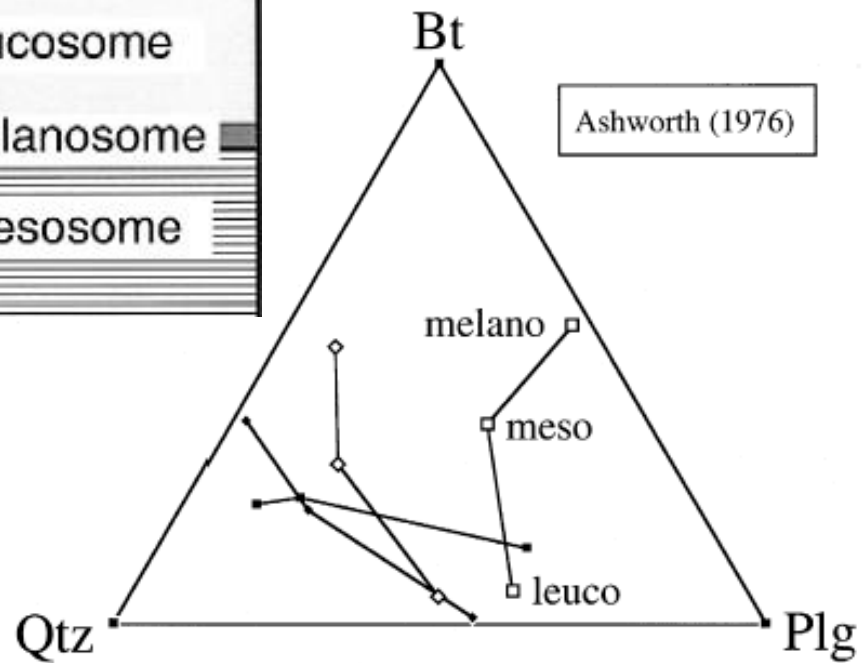
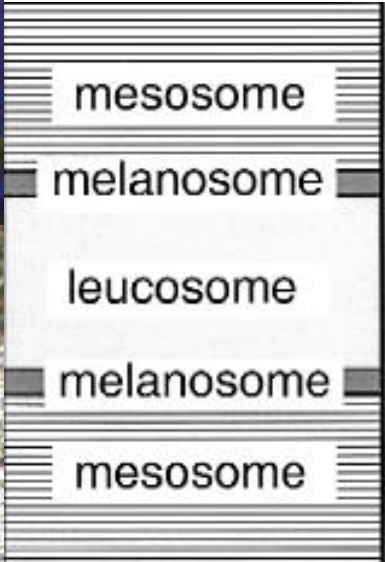
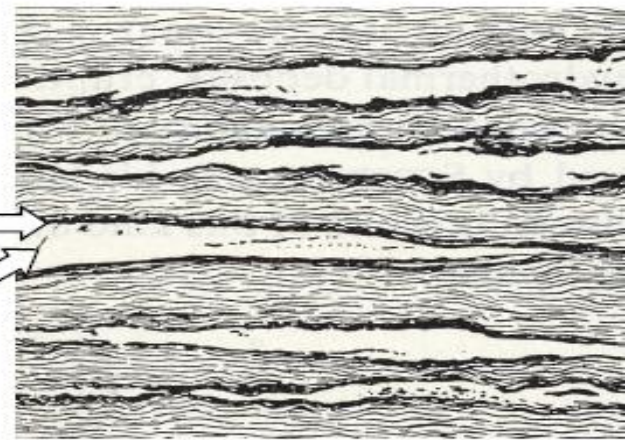
**Cdr**



# Leukosom

**melanosome**  
Containing mainly dark minerals

**leucosome**  
Containing mainly light minerals



Mesosom

Kfs

Qtz

Cdr

Bt

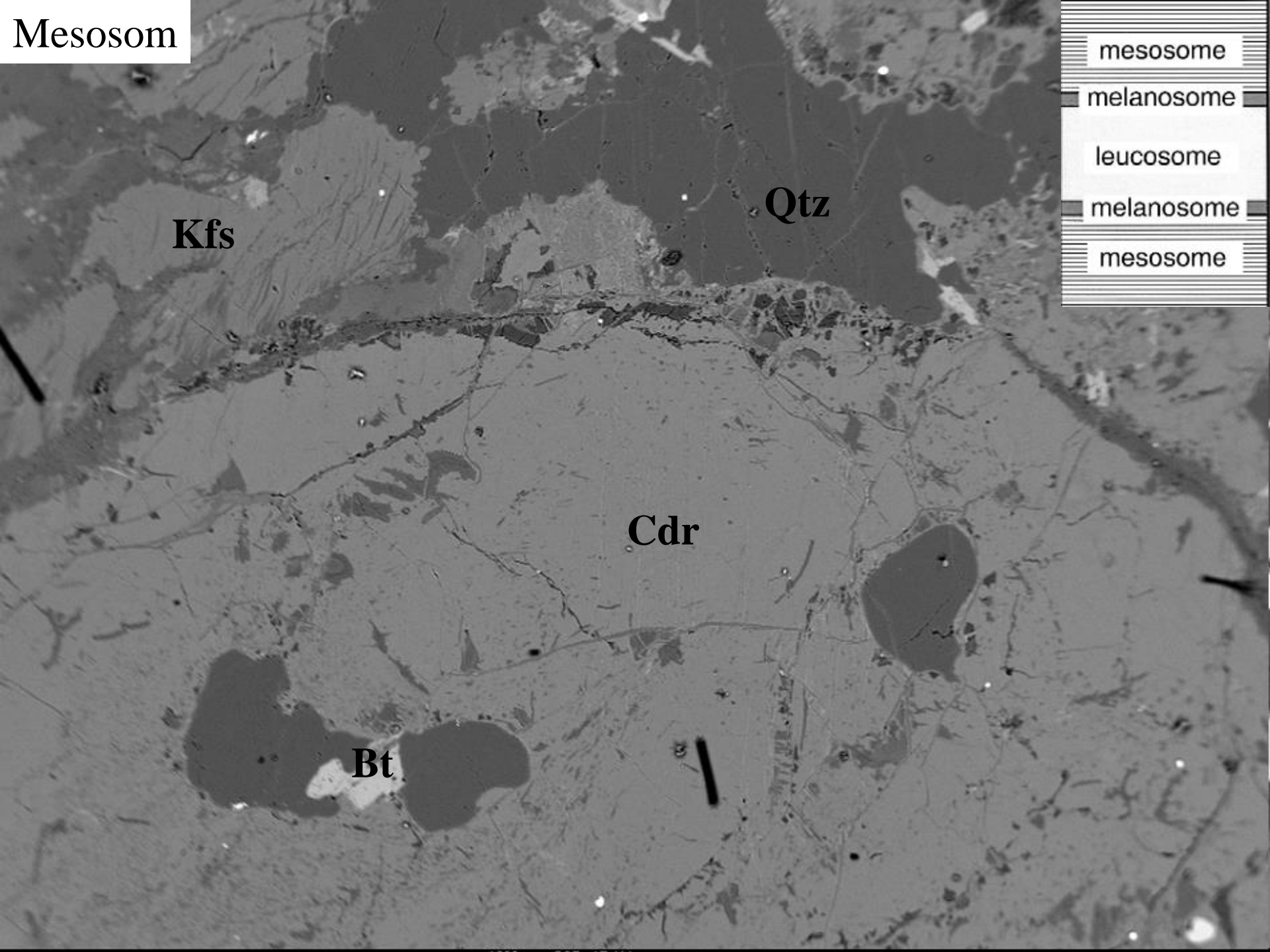
mesosome

melanosome

leucosome

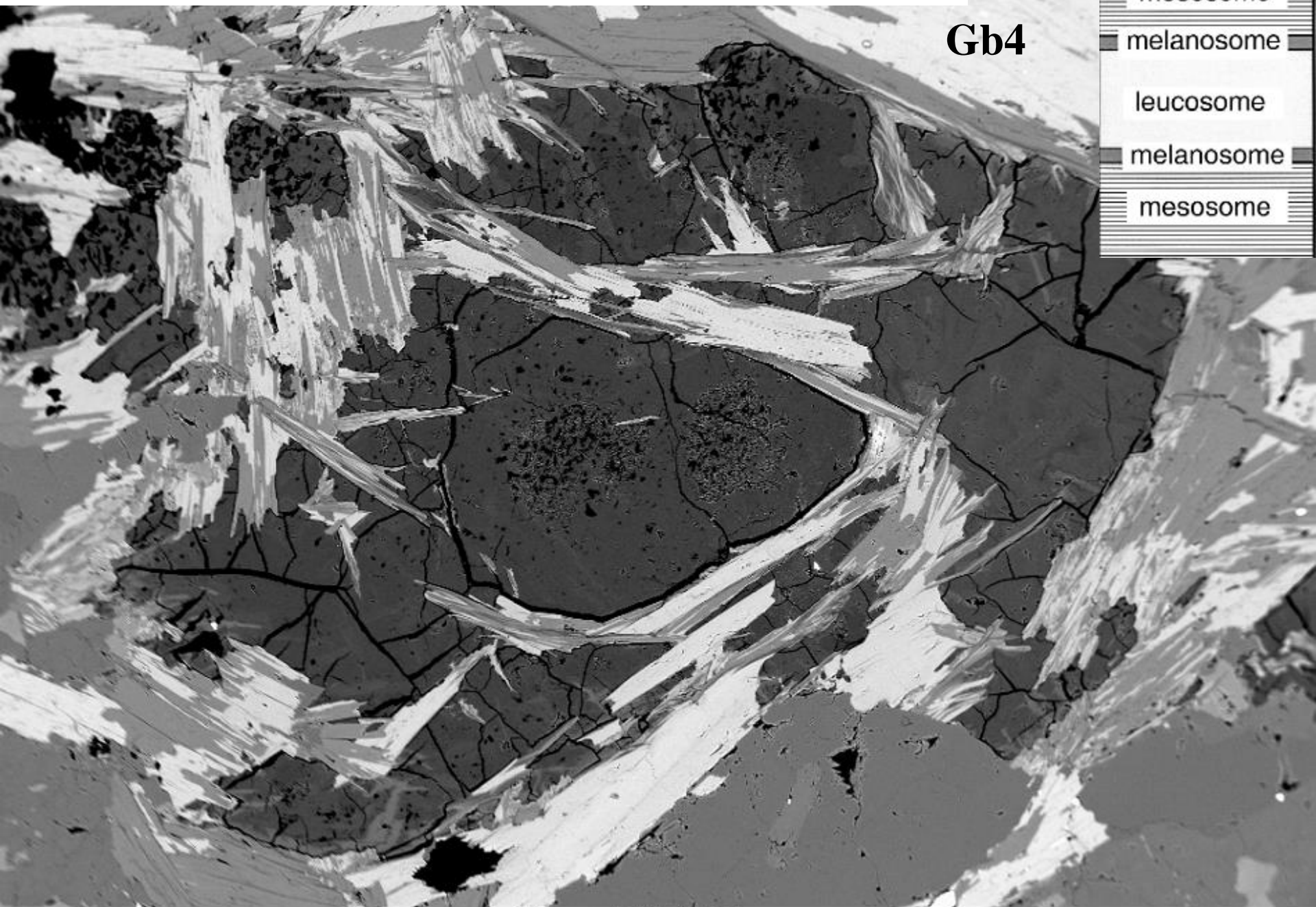
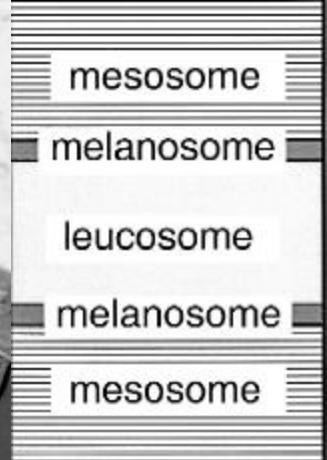
melanosome

mesosome



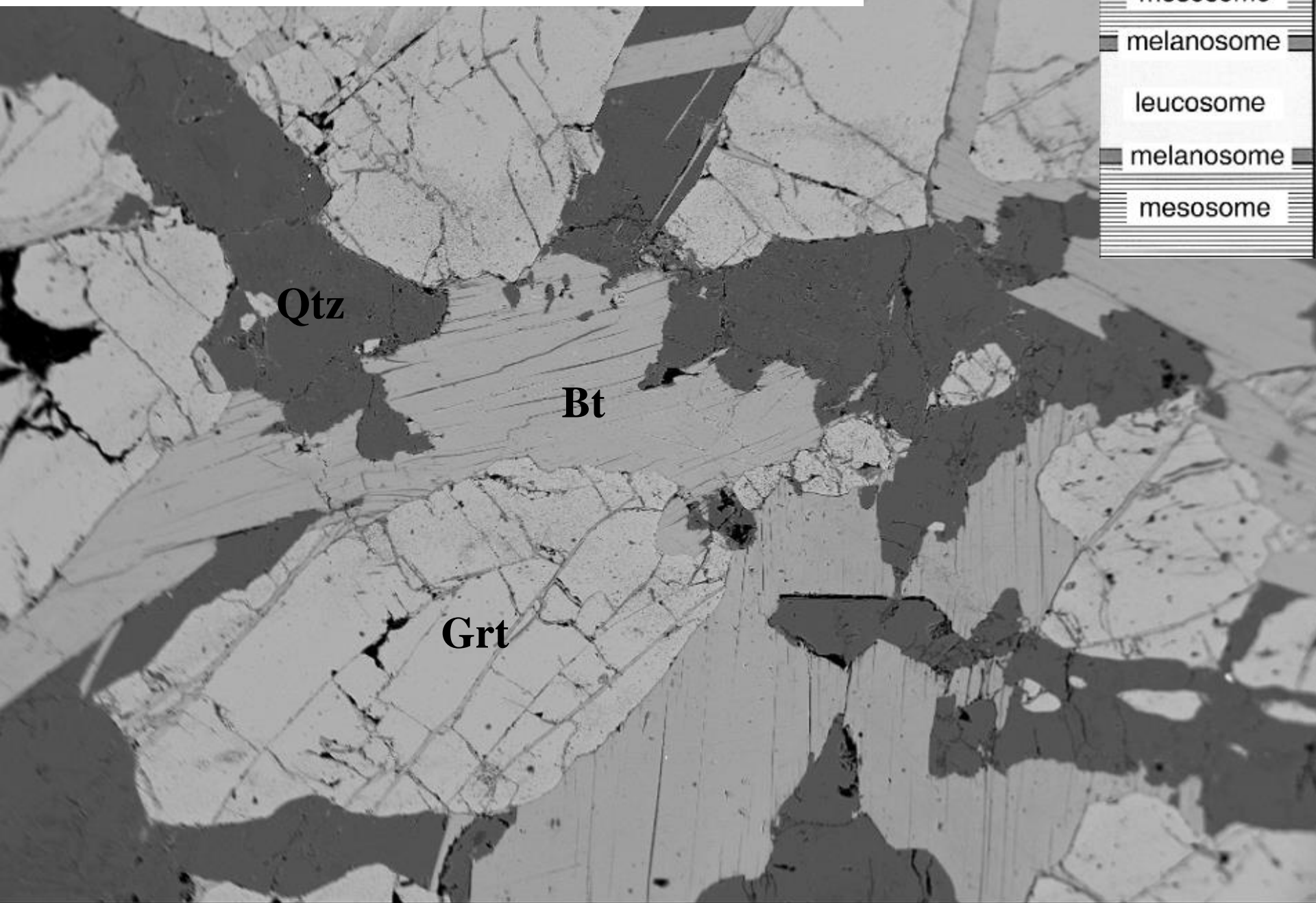
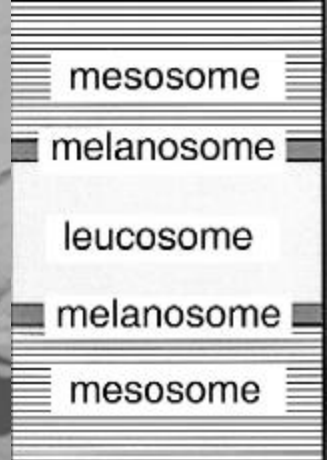
Mesosom -> melanosom (Cdr je zatlačován Bt a Ms)

Gb4





Mesosom -> melanosom (Grt je zatlačován Bt)

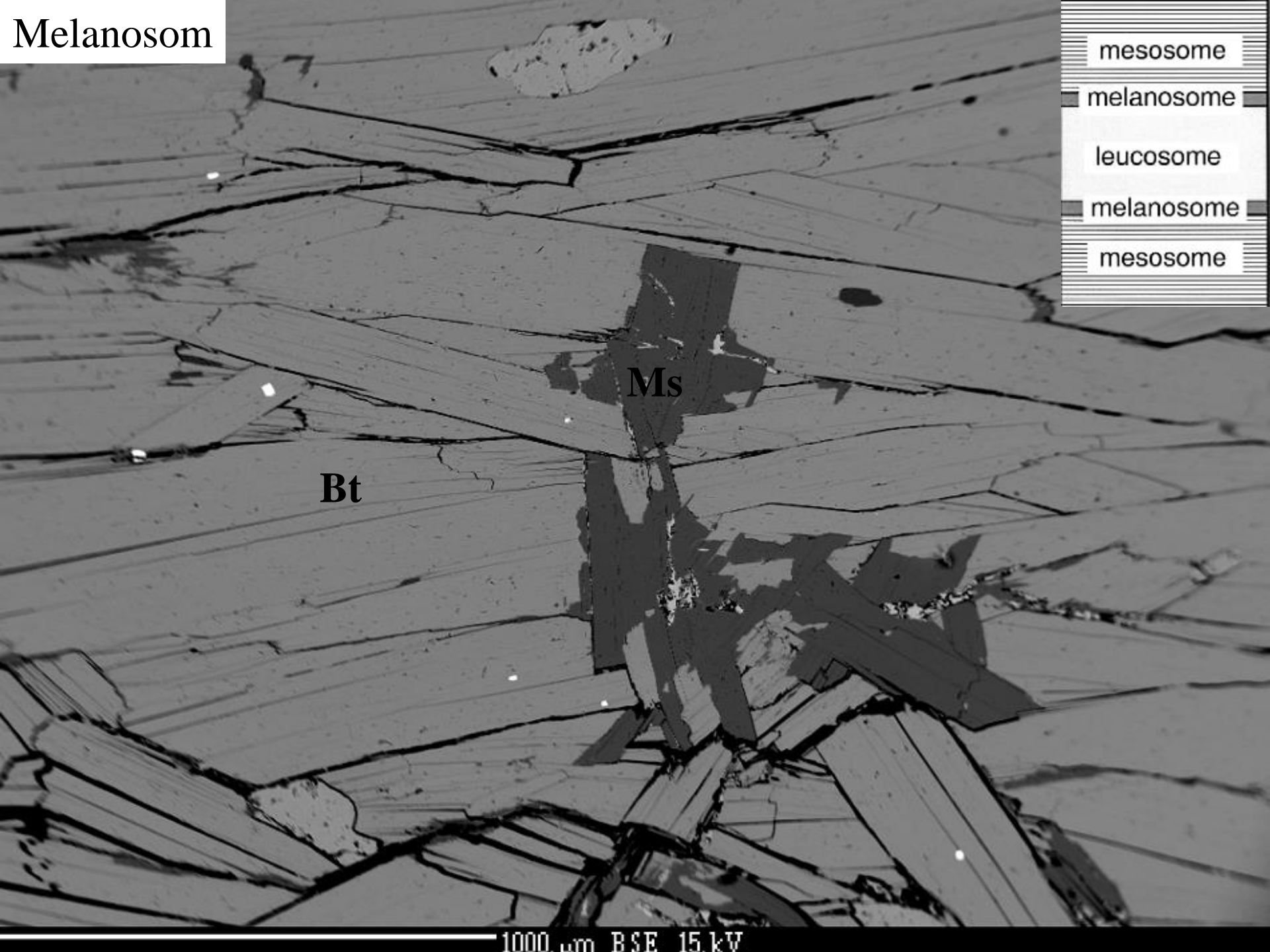
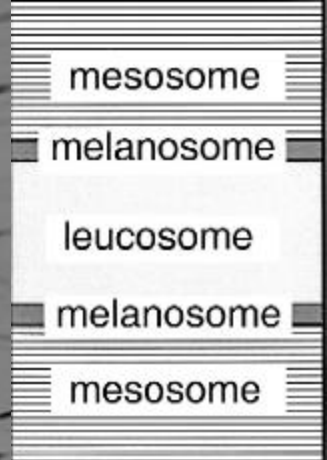


Grt

Bt

Qtz

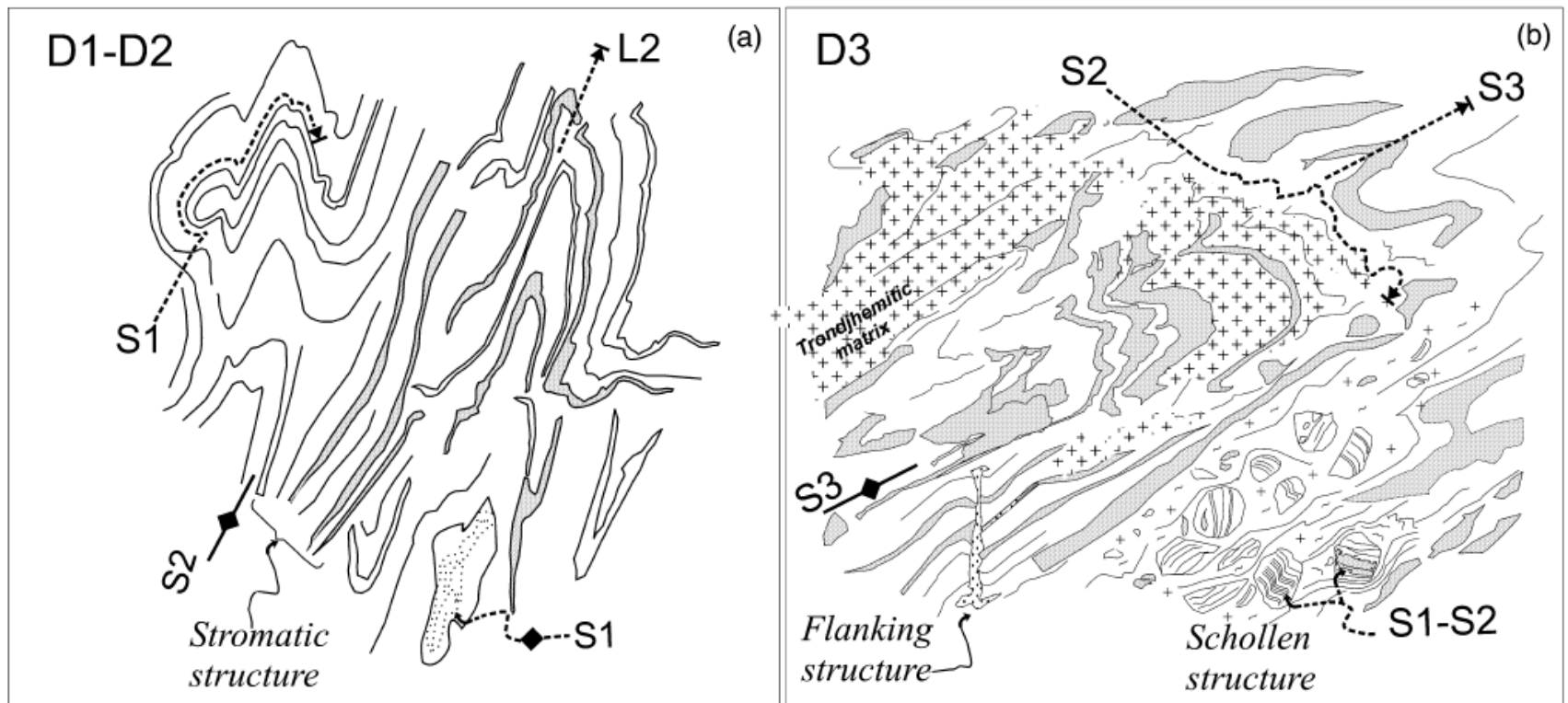
Melanosom



Bt

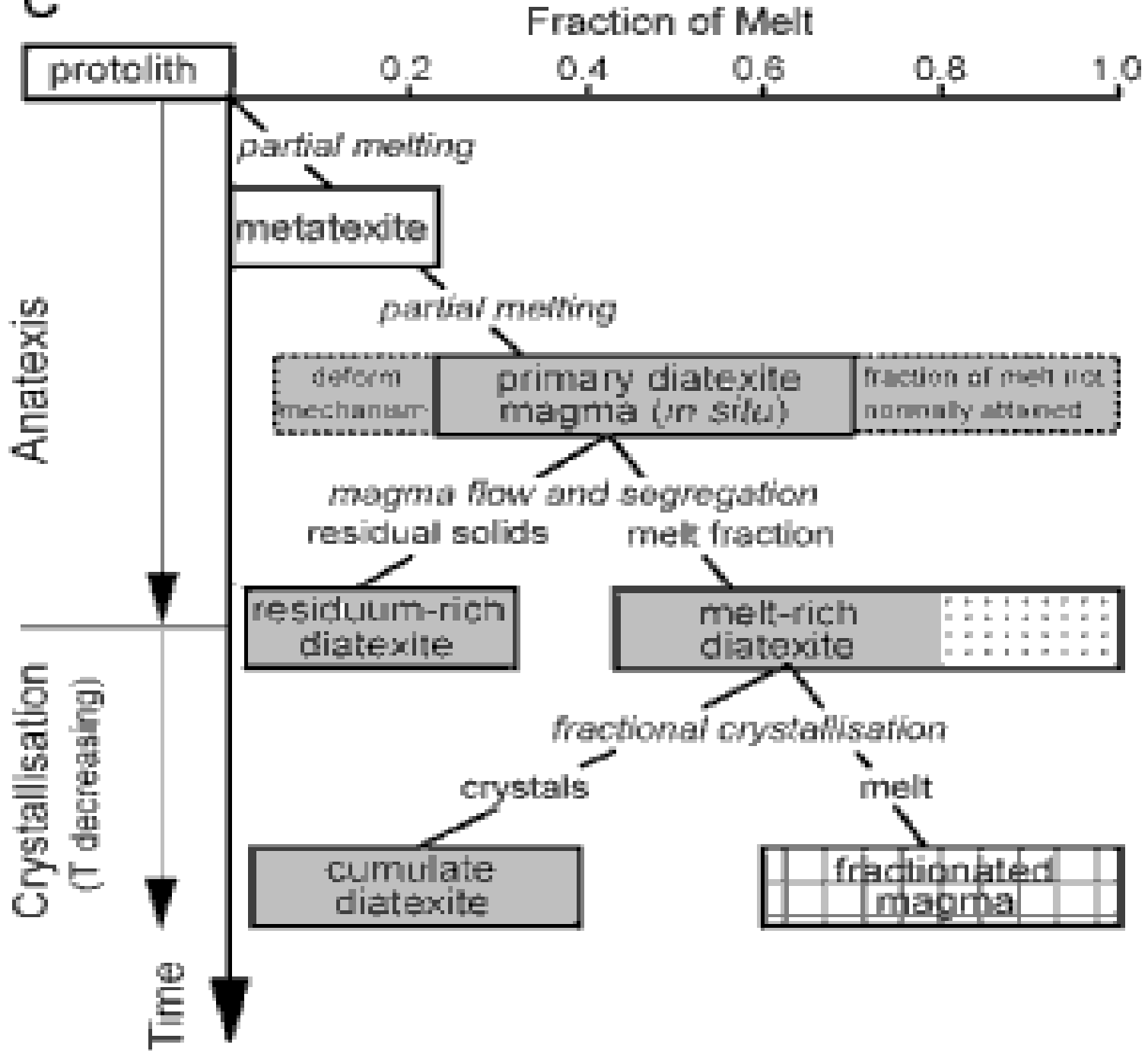
Ms

1000 μm BSE 15 kV



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





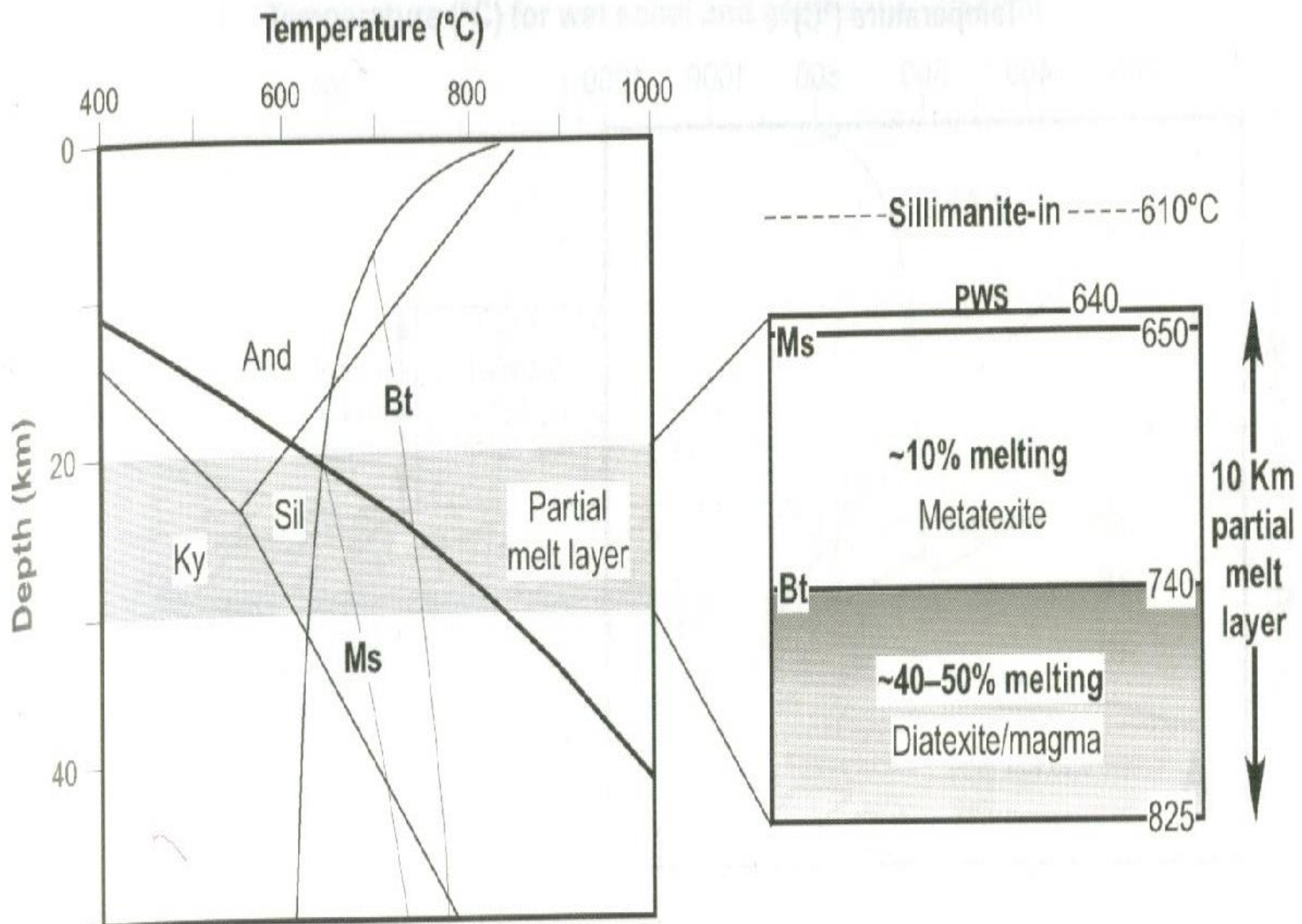


- Pokud se střídají leukokratické pásy s nízkým obsahem biotitu s pásy, které mají vysoký obsah slíd. Pásy mají mocnost od několika mm po několik cm. V takovém případě mluvíme o metatexitech tedy horninách, které si zachovaly strukturní znaky z období před migmatitizací (Brown 1997).



- 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**).

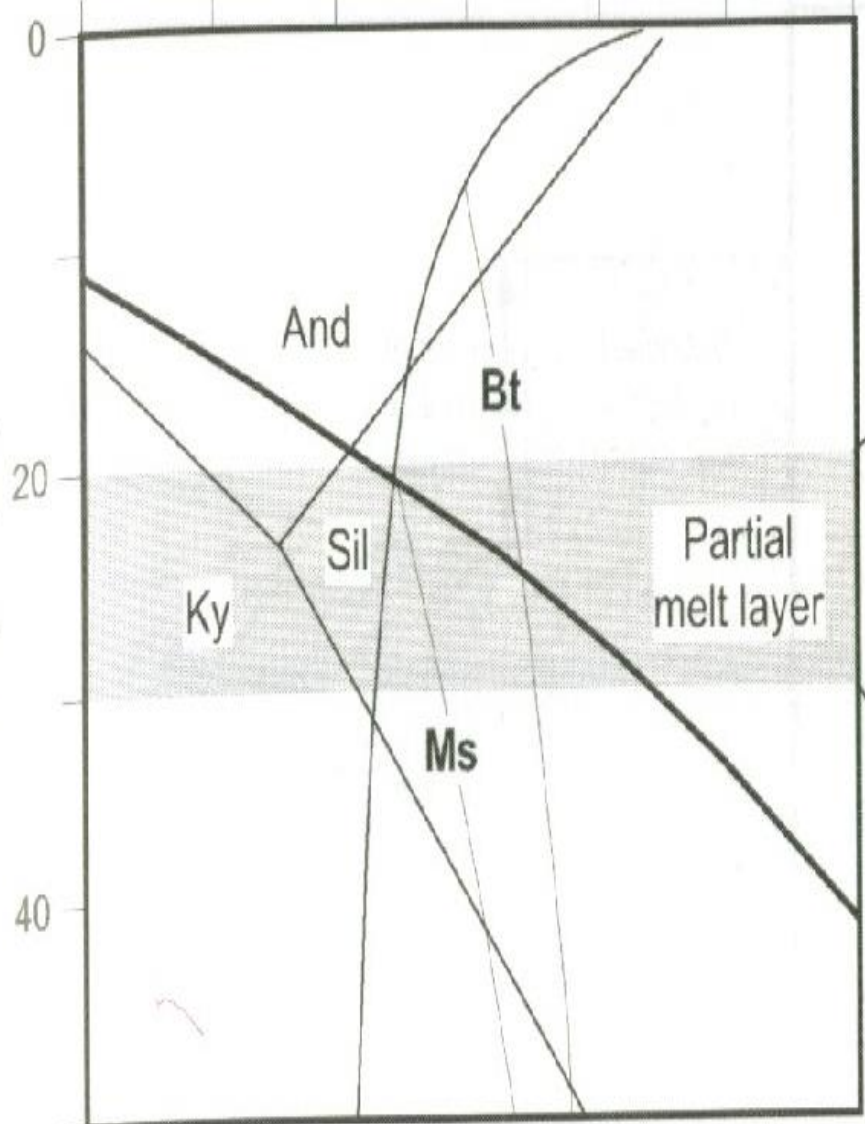




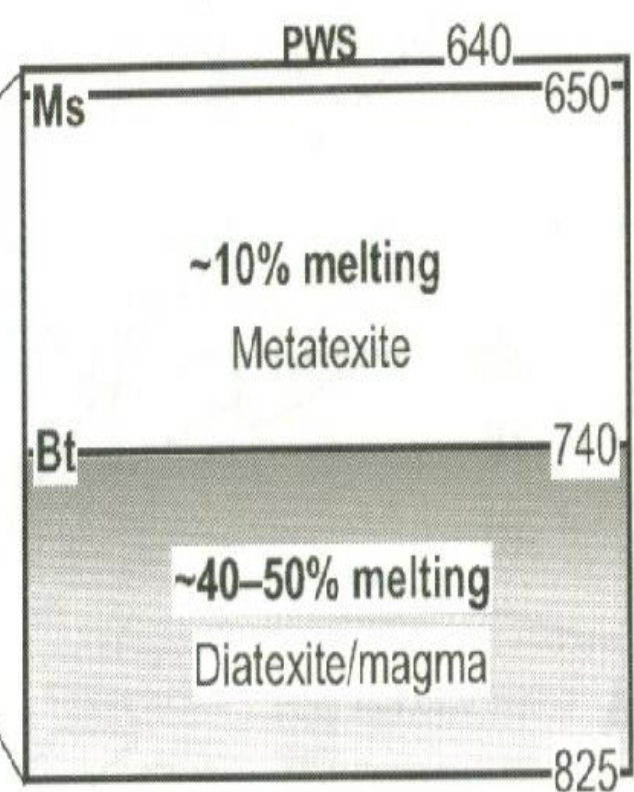
Temperature (°C)

400      600      800      1000

Depth (km)



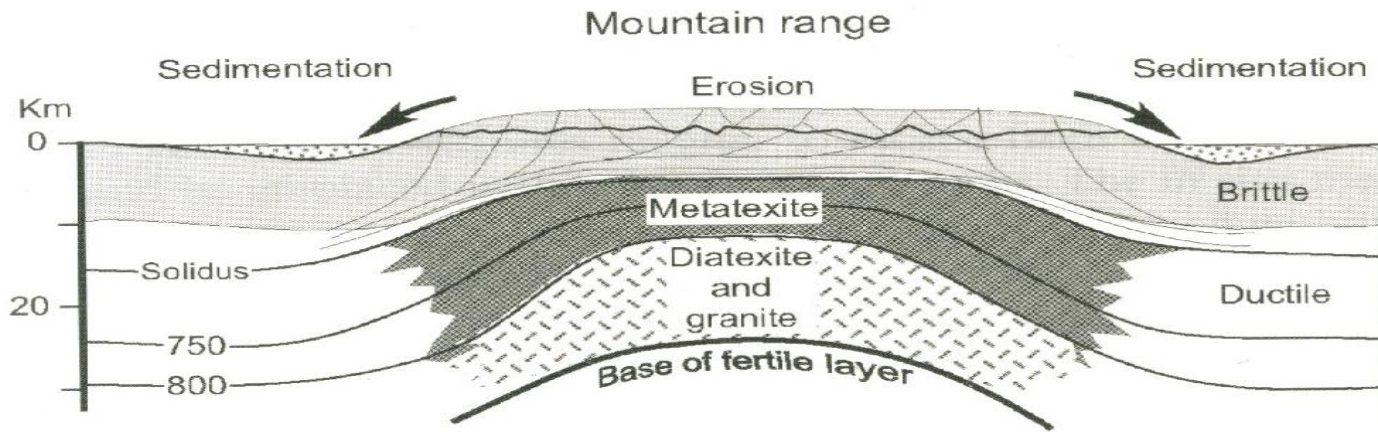
Sillimanite-in --- 610°C



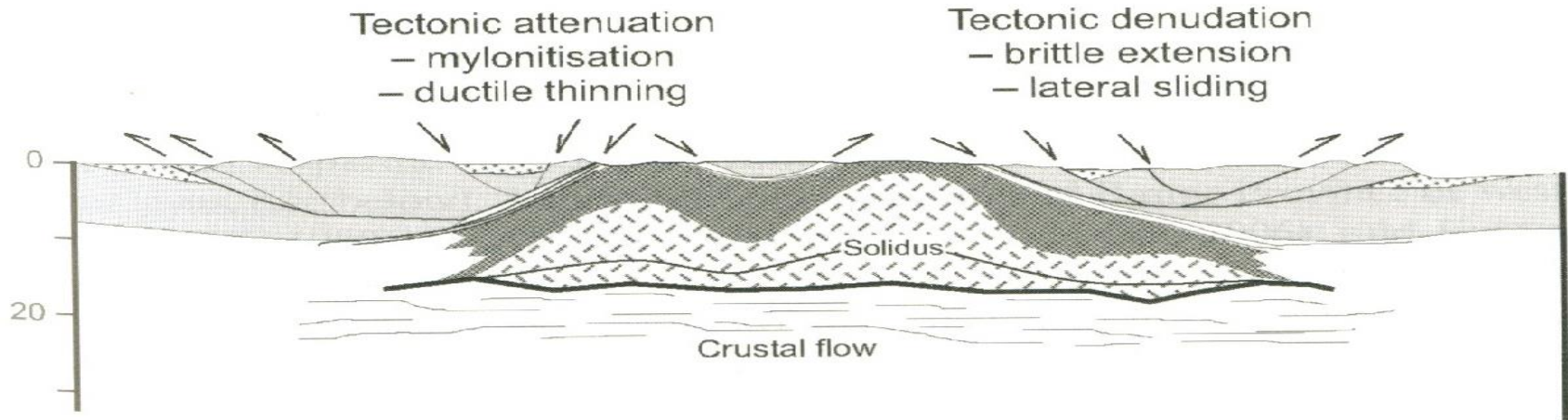
10 Km partial melt layer



## Beginning of late-orogenic collapse



## End of late-orogenic collapse



*Figure 2.42.* Generalised diagrams illustrating the mechanism of diapiric exhumation (after Fig. 10 of Vanderhaeghe et al. 1999). Two examples that could be explained by diapiric exhumation are the migmatite core complexes of the Velay Dome, French Variscides and the Thor-Odin dome area, Canadian Cordillera, described in Chapter 4 where thermobarometric, geochronological, structural and sedimentological data imply that 15–20 km of exhumation has occurred (Vanderhaeghe et al. (1999)).



OLYMPUS



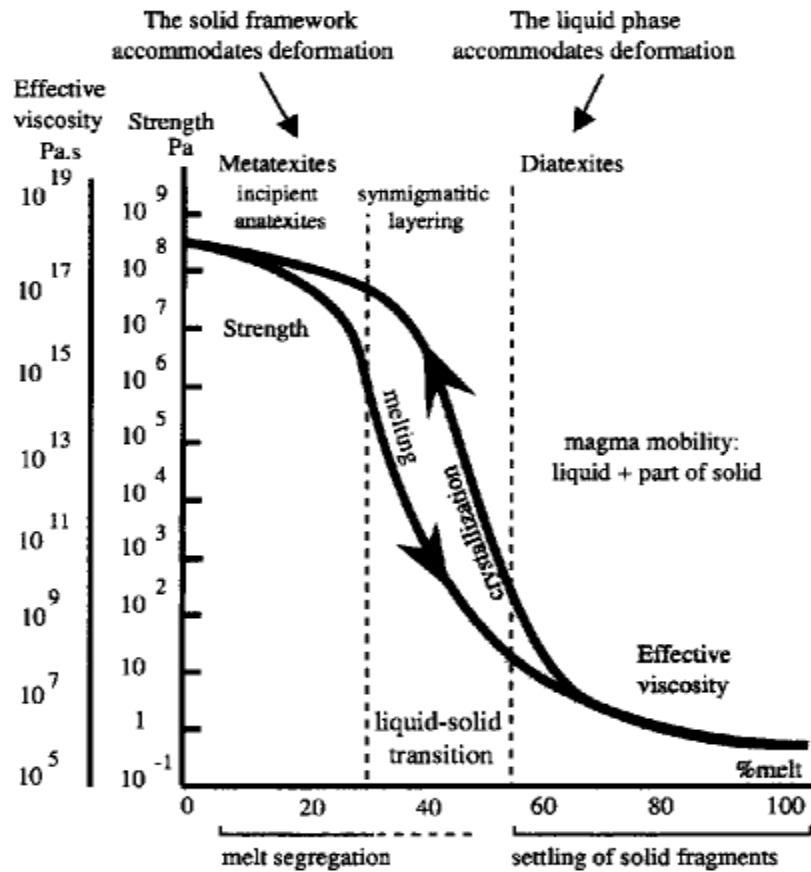






OLYMPIA

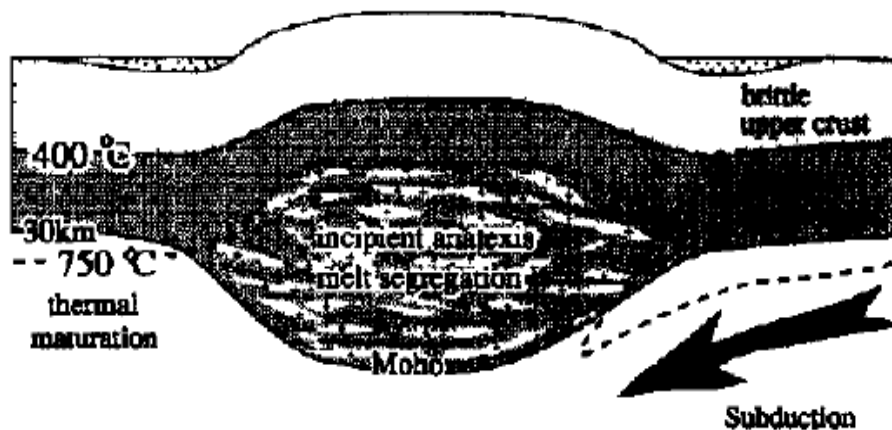
## III. 6. Mobilizace taveniny a vznik těles granitů



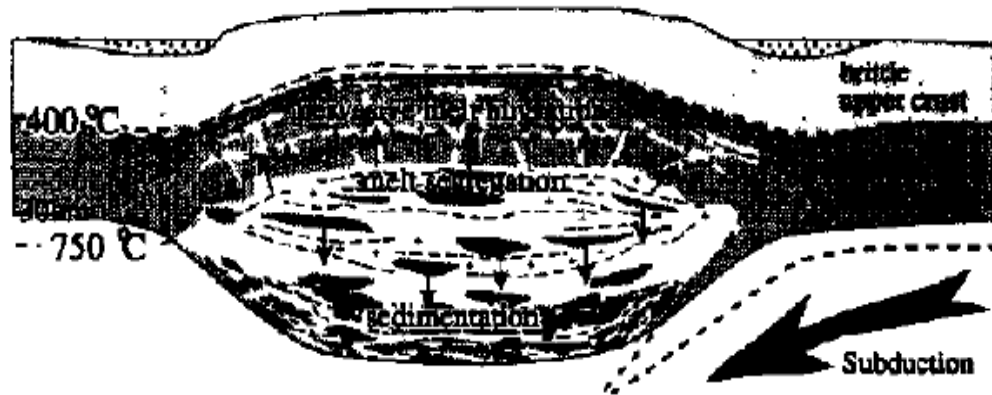
- Při parciálním tavení se první tavenina objevuje na hranici zrn.
- Během tavení je mobilita taveniny závislá na množství taveniny a jejích charakteristikách (viskozita)
- Metatexity mají reologii řízenou pevnou fází a u diatexitů se reologie řídí charakteristikami taveniny.
- Pokud je množství taveniny 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

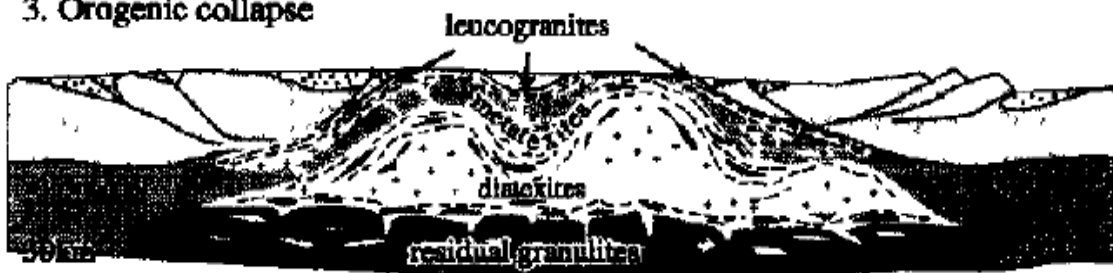
## 1. Early stage of crustal thickening



## 2. Prolonged crustal thickening



## 3. Orogenic collapse



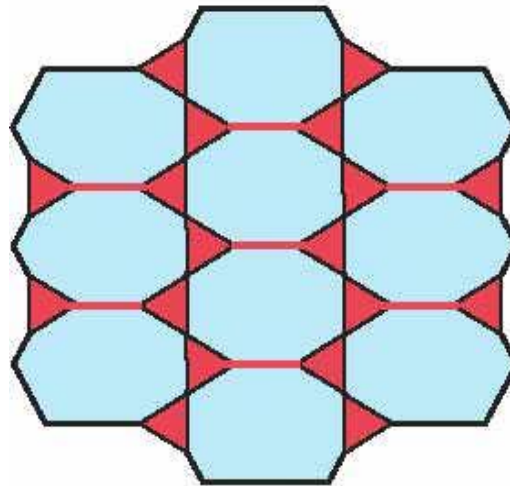
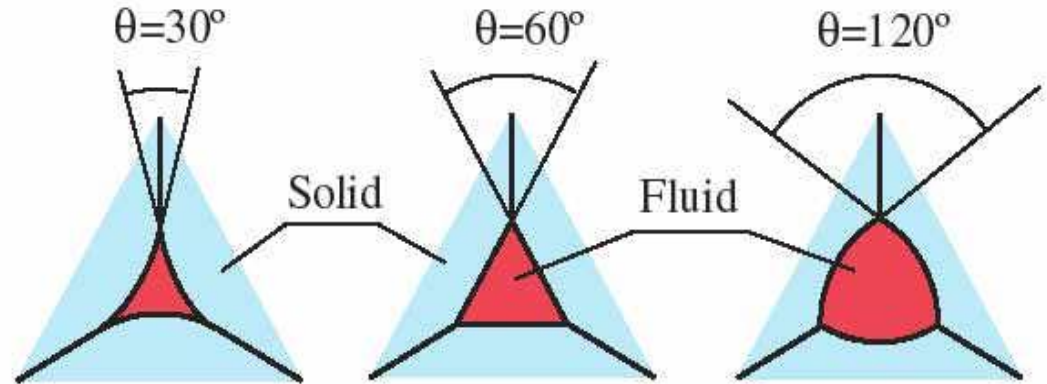
- Migmatitizace postihuje komplexy složené z metapelitů až metadrob.
- Probíhá za relativně nízkých PT podmínek pod 800 °C a kolem 4-7 kbar.
- U diatexitů může dojít k oddělení restitu od taveniny a vznikají leukogranity. Tento proces má řadu mezistupňů

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.

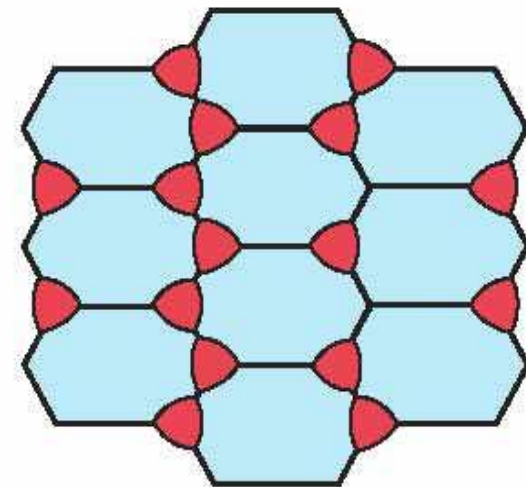


# III. 7. Segregace taveniny

- 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

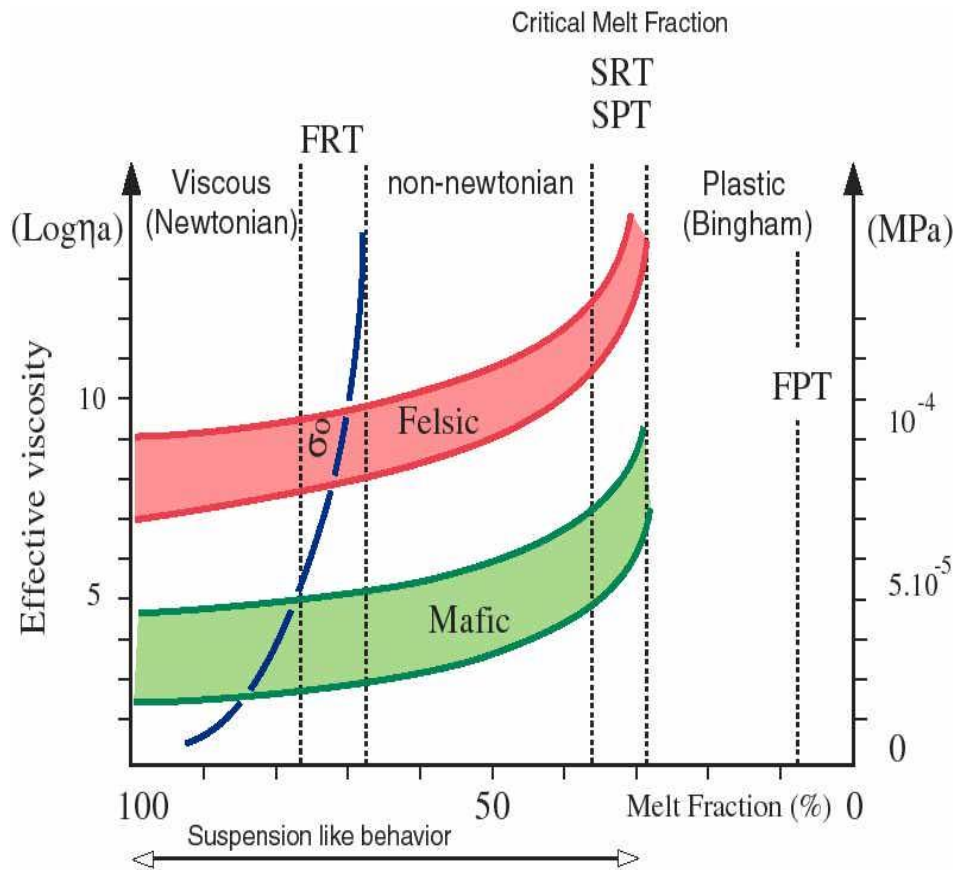


Permeable



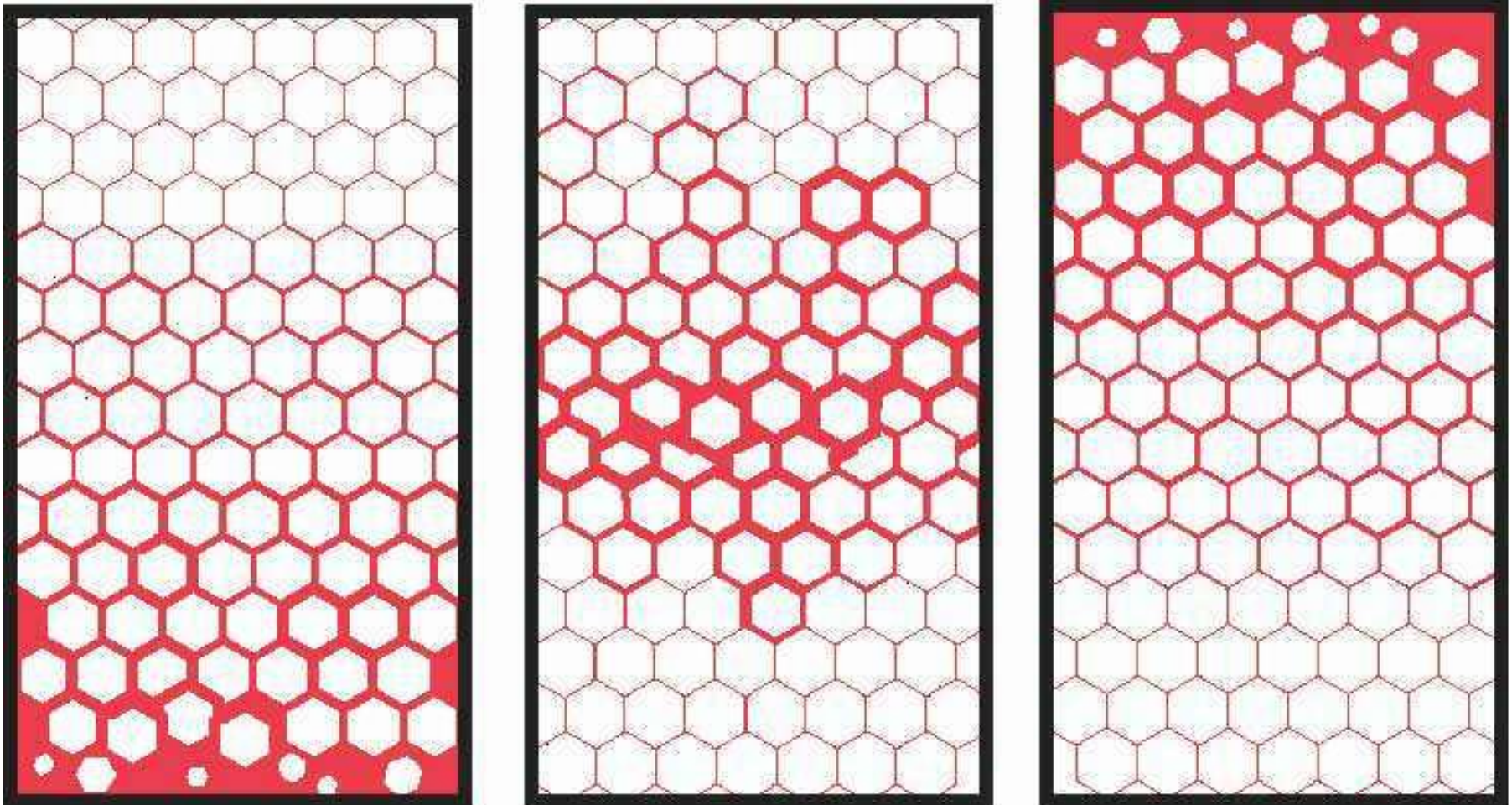
Impermeable

- 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



- Viskozita
  - s obsahem  $\text{SiO}_2$  v tavenině roste viskozita
  - s obsahem  $\text{H}_2\text{O}$  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  $H_2O$  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).

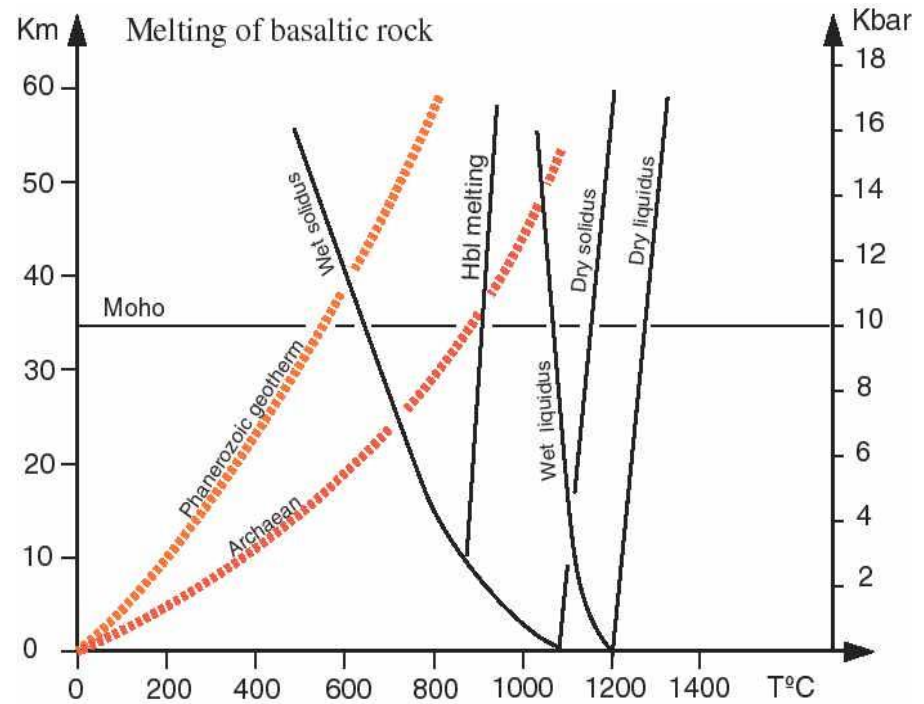
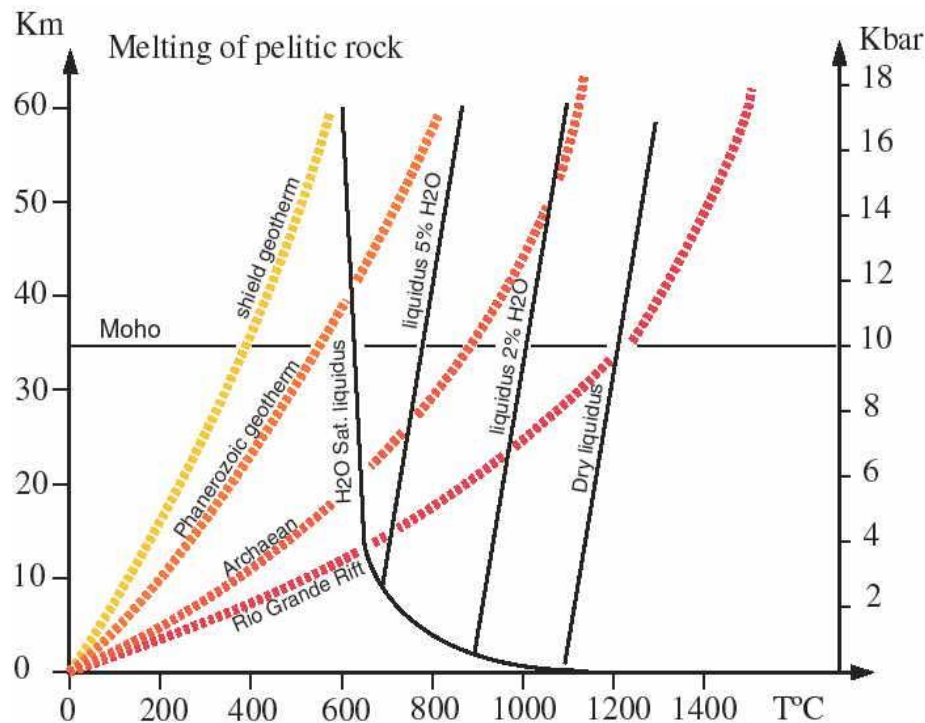


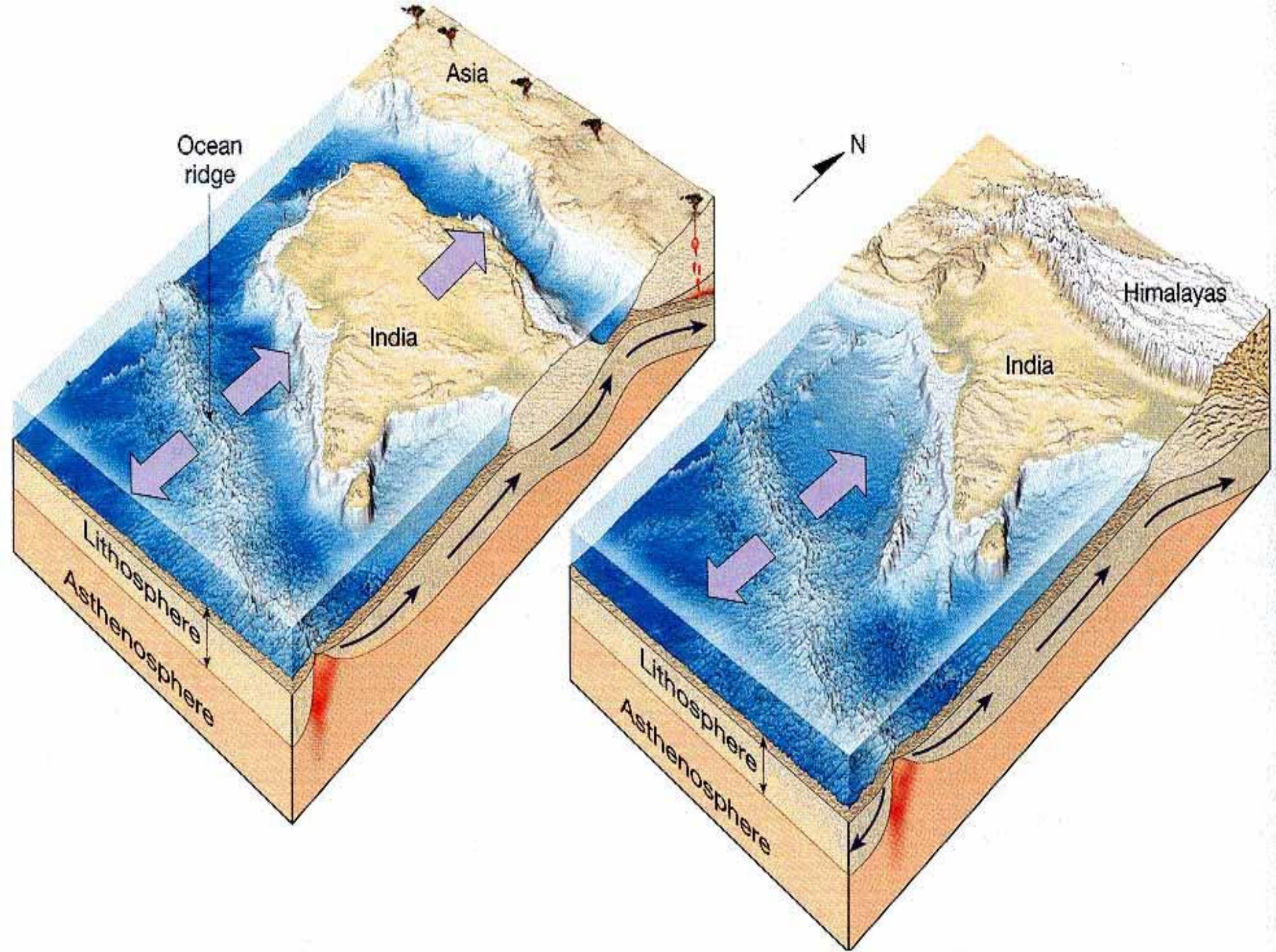
- 2) Segregace taveniny během deformace (Segregation during continuous deformation)
- Filter pressing - v důsledku duktilní deformace vrstev s různou viskozitou se separuje tavenina od horniny (je to podobné jako tvorba budin)
- Dilatant attractors – pokud během parciálního tavení probíhá deformace tavenina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



# III. 8. Termální modely pro vznik orogenetických granitů

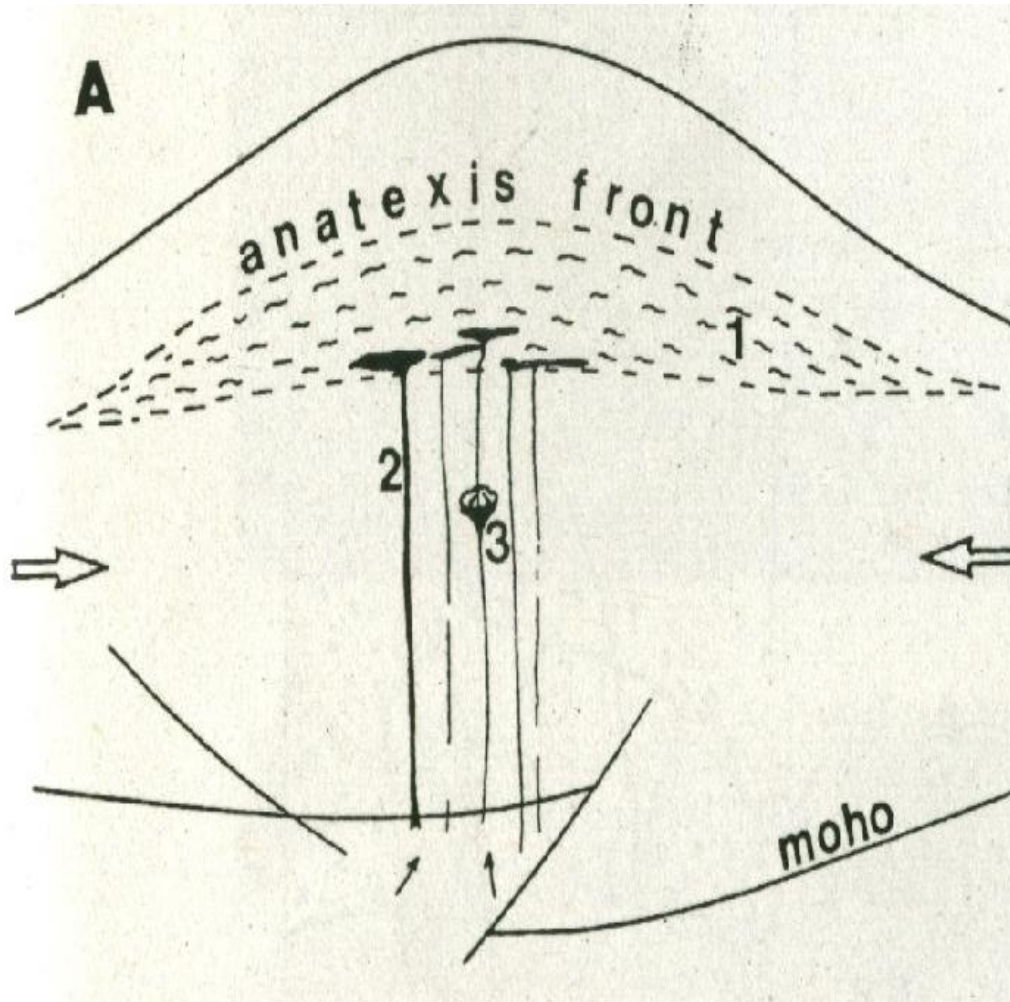
- parciální tavení pelitů začíná kolem 650°C pro běžnou kůru
- běžná kontinentální (fanerozoická) kůra má na hranici MOHO kolem (kolem 500-600 °C) takže k tavení většinou nedochází
- Aby došlo k tavení musí dojít k:
  - zvětšení mocnosti kontinentální kůry (crustal thickening)
  - ztenčení litosferického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





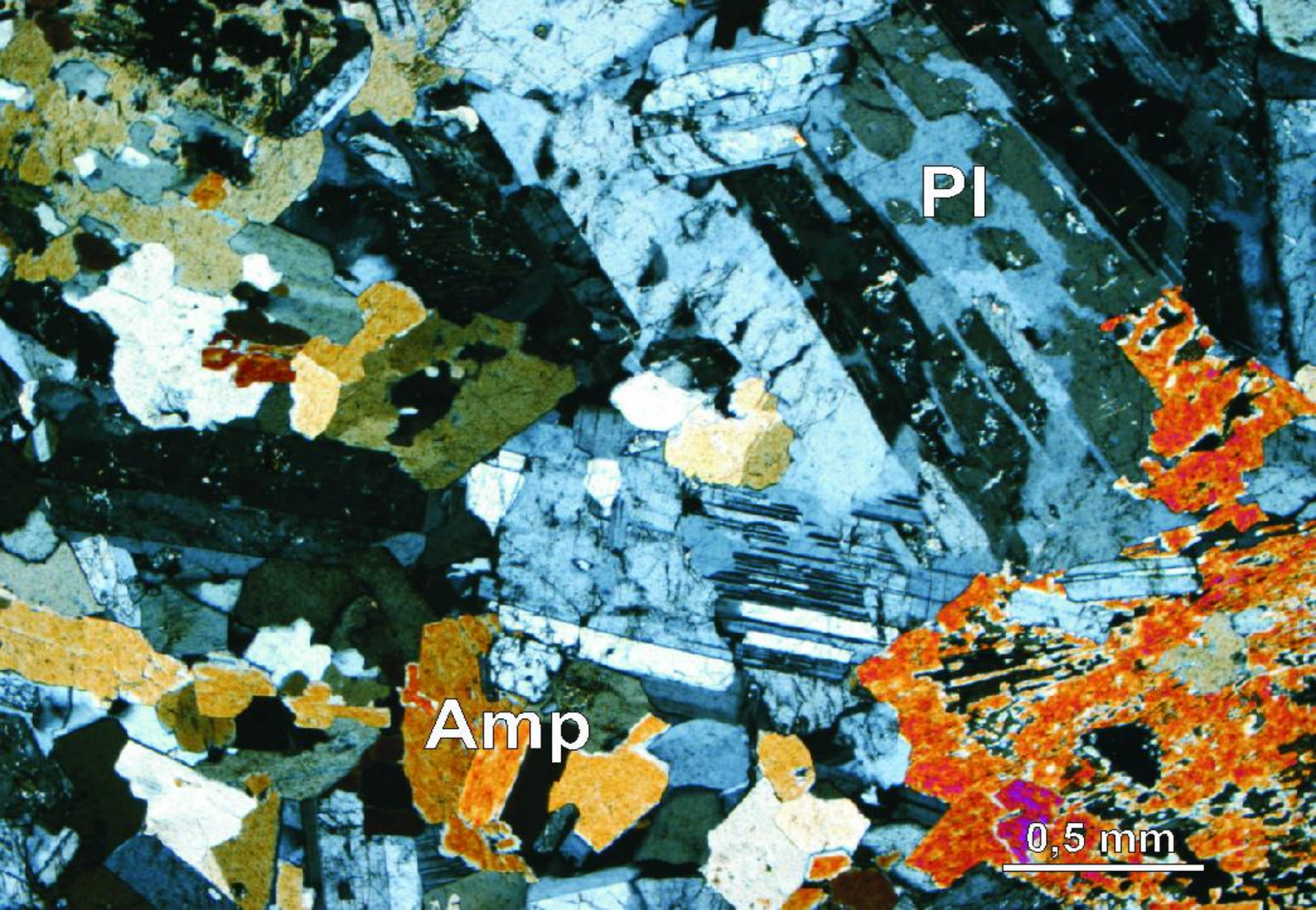


## III. 9. Hybridní granity



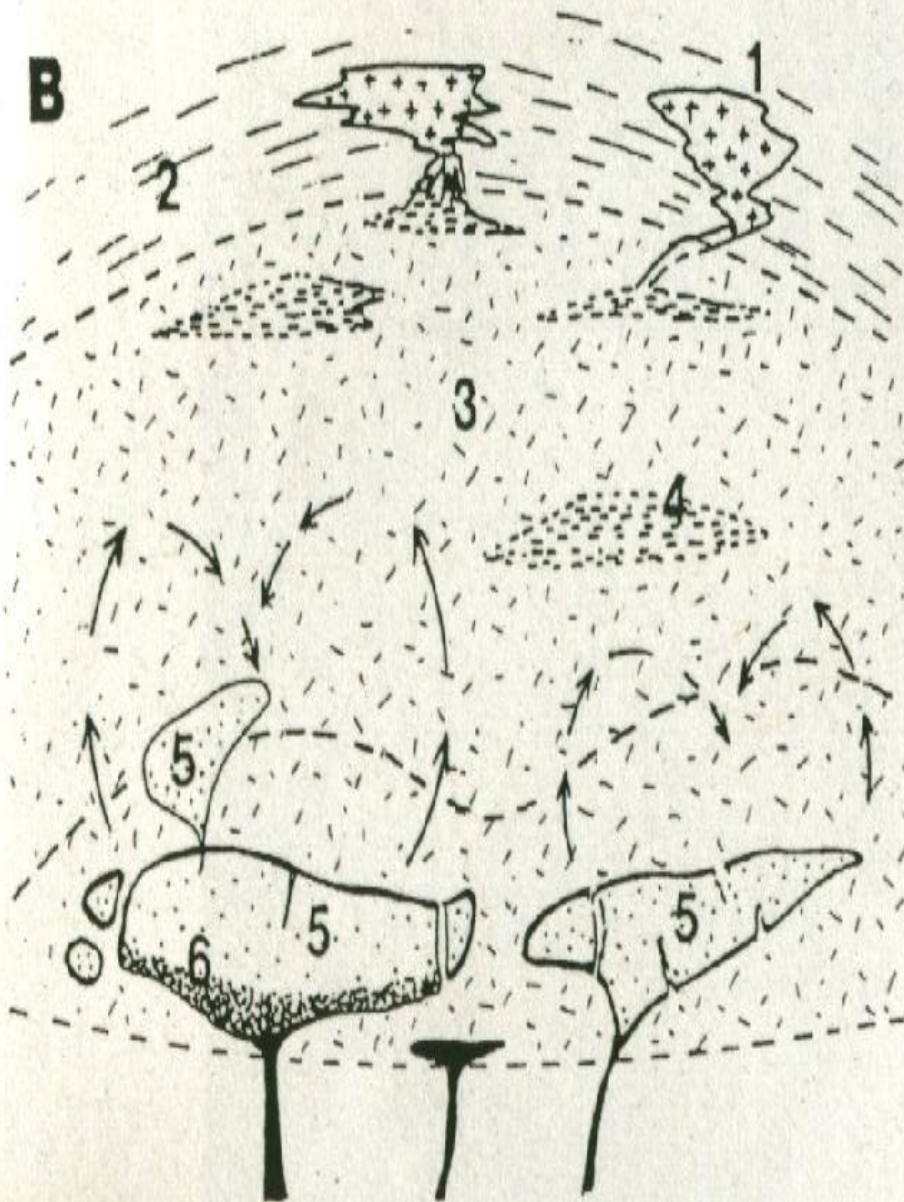
### CRUSTAL THICKENING

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



Amp gabro – plášťové magma (Nikaragua)

**B**

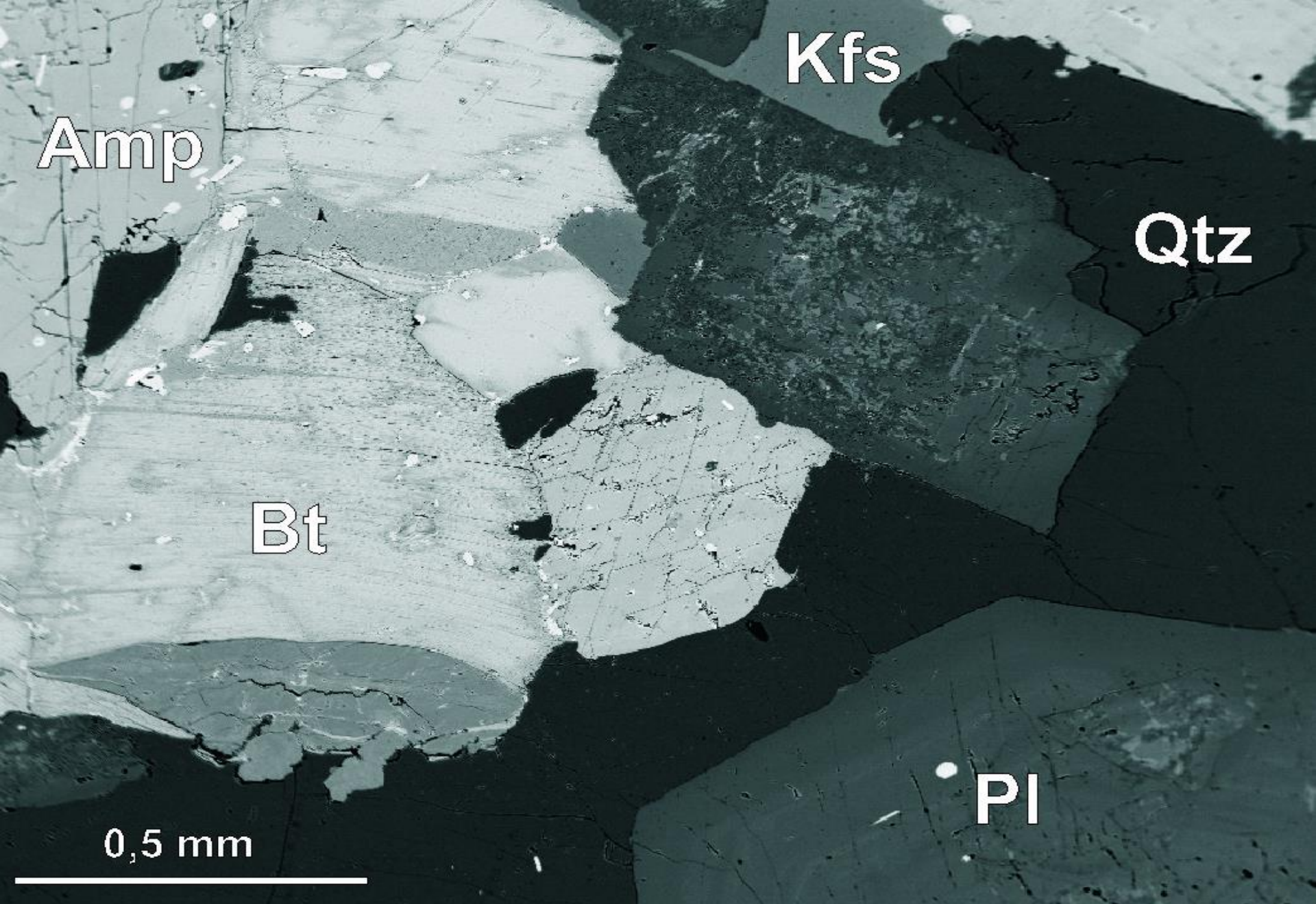


CONVECTION AND DISRUPTION OF SYNPLUTONIC DIKES

- (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

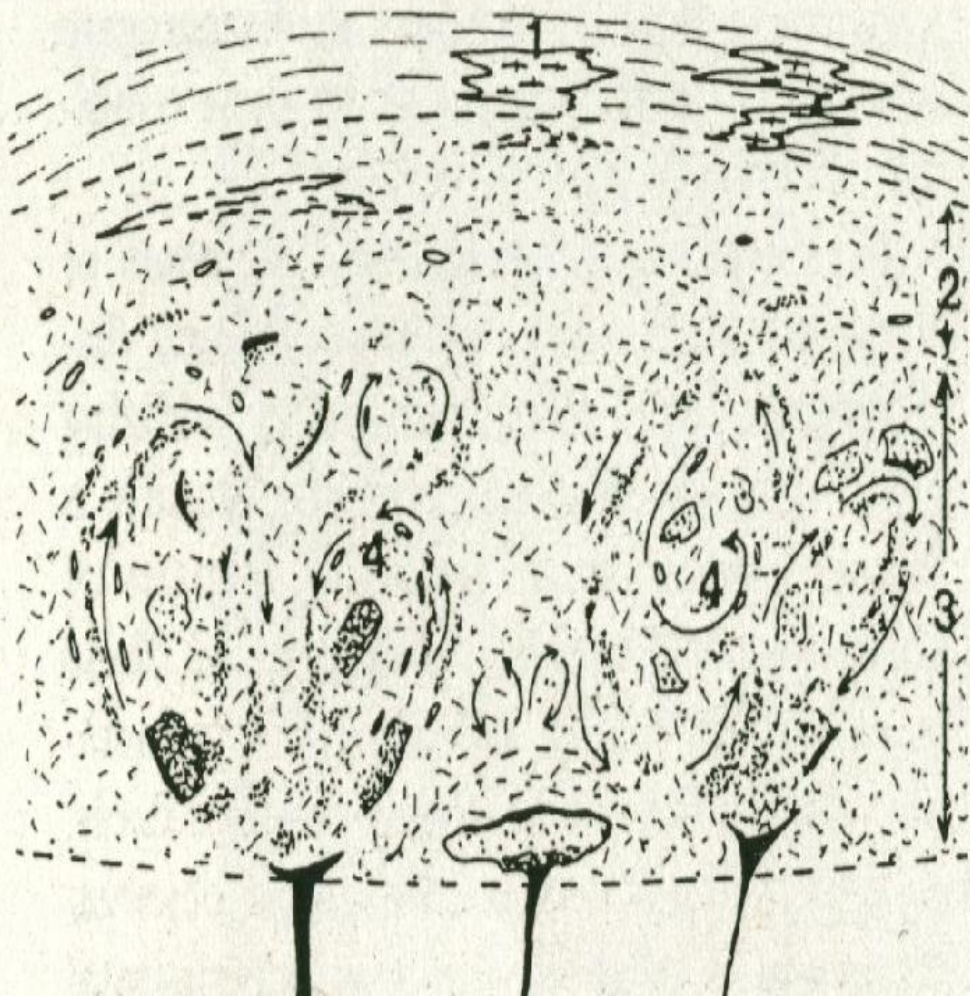


I-typový Amp-Bt granodiorit s enklávou dioritů vzniklý mixingem (Nikaragua)



I-tyový Amp-Bt granodiorit mixingem (Nikaragua)

C

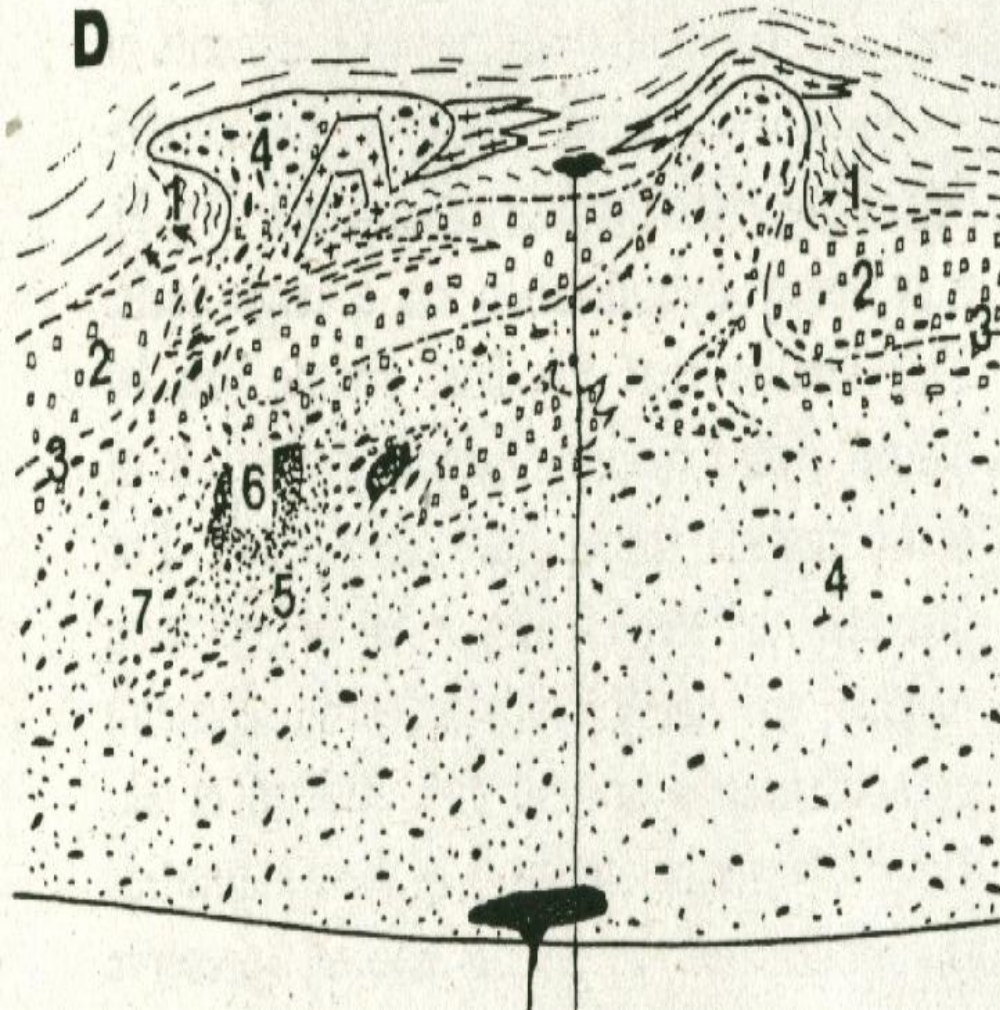


CONVECTION-FAVOURED MAGMA MIXING

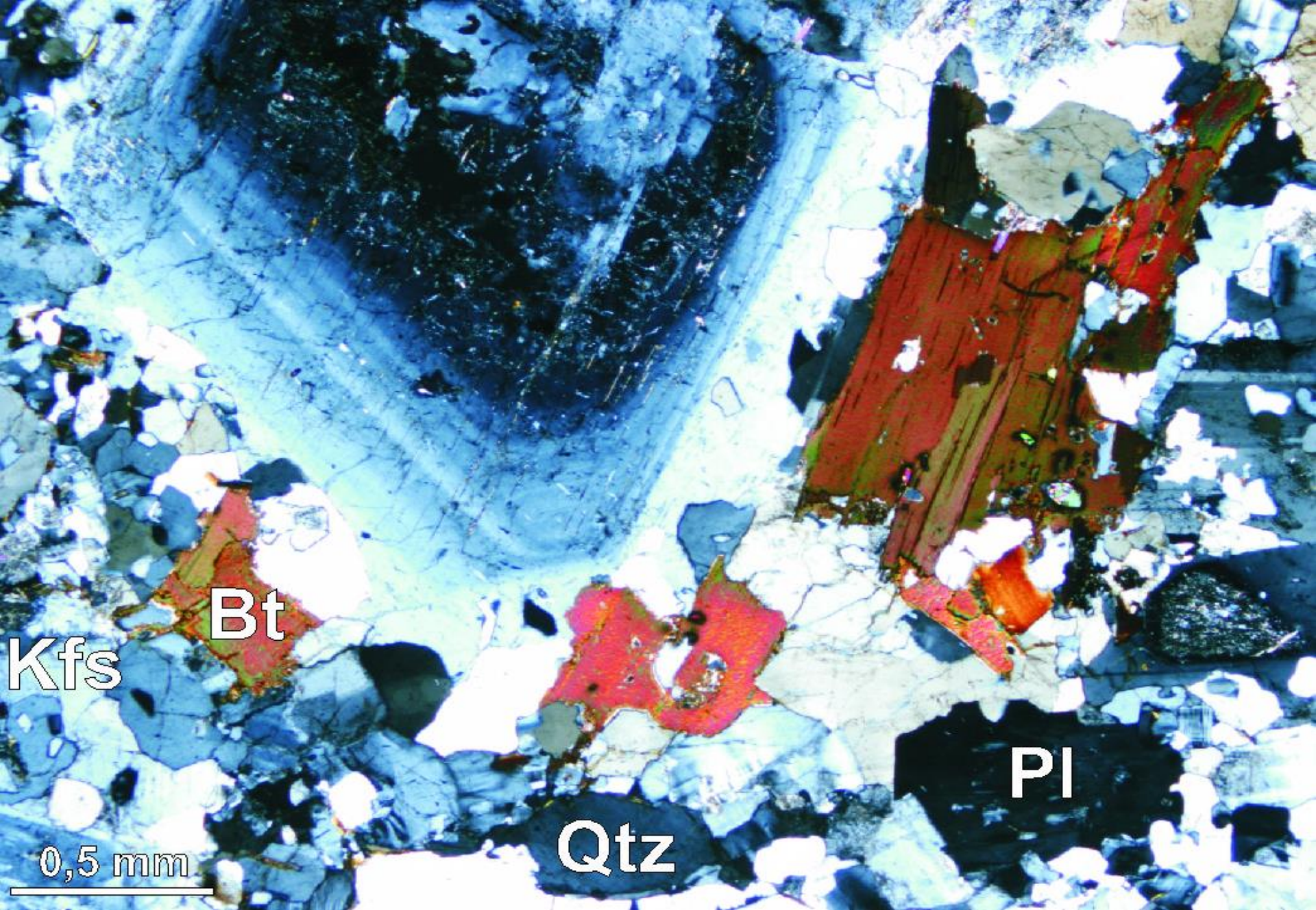
- (1) Deformed leucogranites
- (2) High-viscosity zone, non modified by mixing
- (3) Low-viscosity, mobile zone
- (4) Hybridization at thermal equilibrium by crystal mingling plus diffusive mixing

FINAL EMPLACEMENT STAGE (from field data)

**D**



- (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)

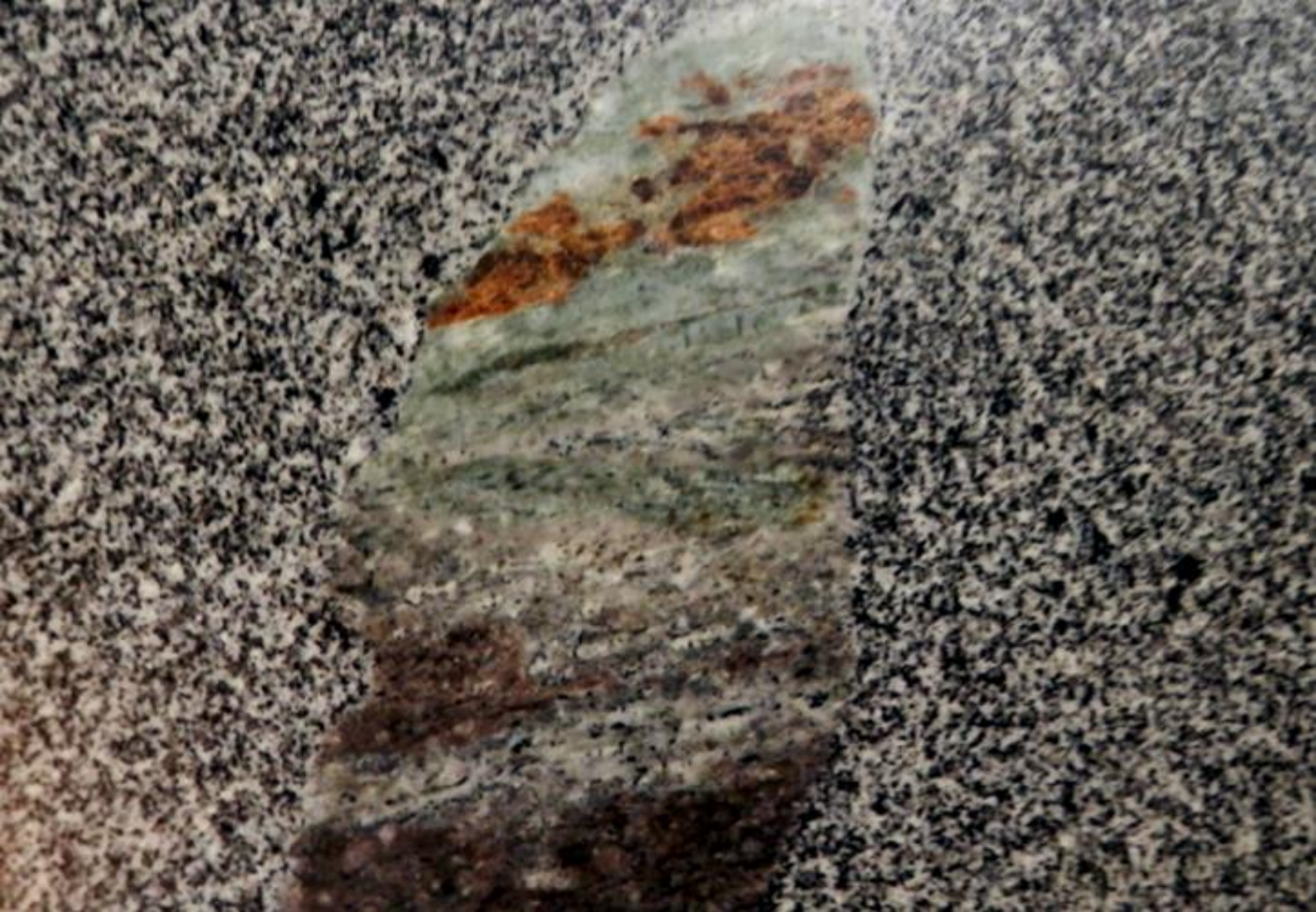


I-tyový Bt granodiorit vzniklý mixingem (Nikaragua)

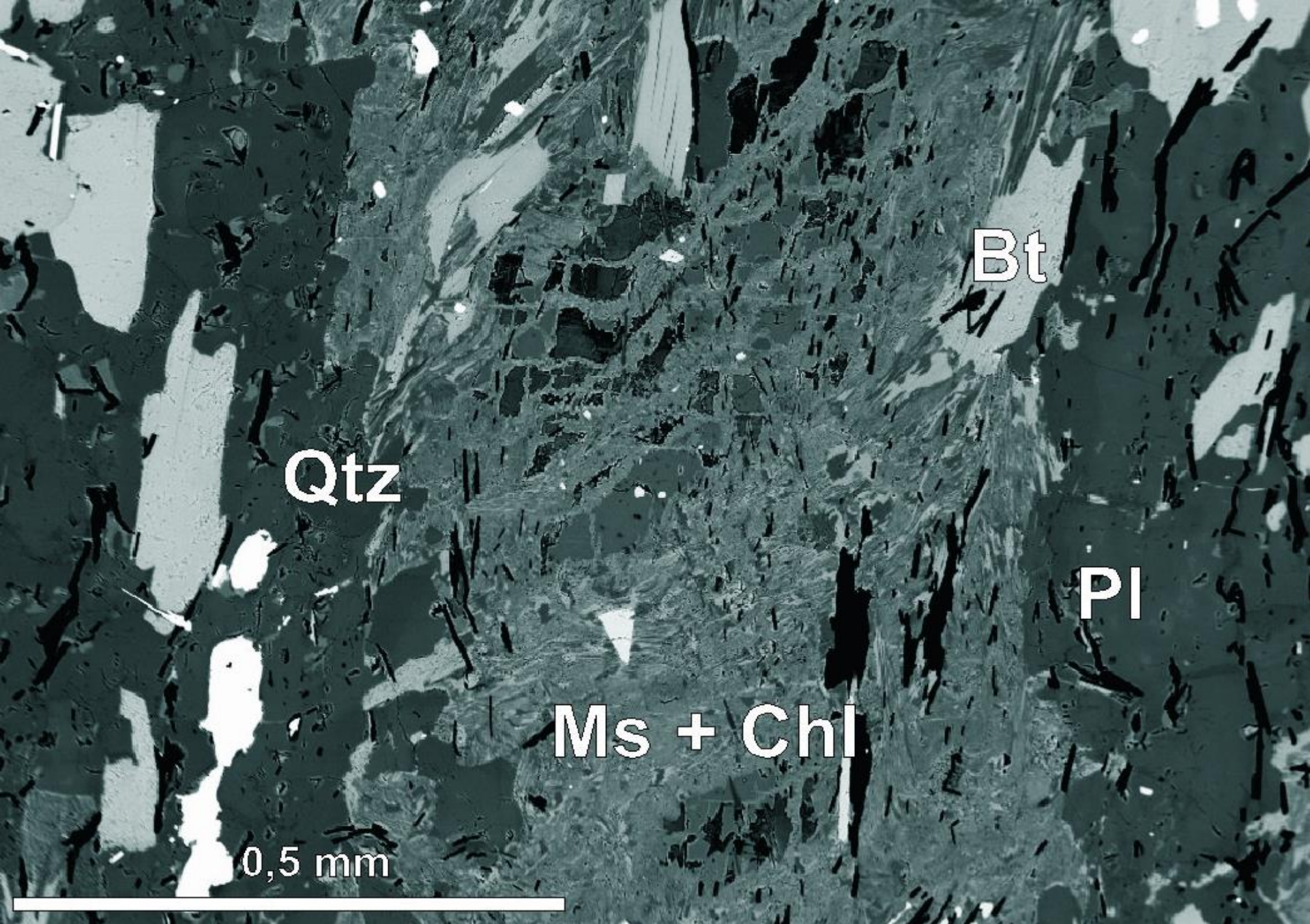




S-typový Cdr-Bt granit s xenolity migmatitů (Nikaragua)



Xenolit mramoru v granodioritu



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 monzogranites	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 ferromagnesian 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 batholiths with transitional contacts; at epizonal levels, each type can appear in isolated, single plutons			generally associated with minor bodies of ultramafic rocks
Crustal isotopic ratios $\delta^{18}\text{O} \geq 10\text{‰}$	isotopic ratios very variable; isotopic ratios are generally intermediate between mantelic and crustal ratios; mixing lines are characteristic			Sr initial ratio < 0.704
Sr initial ratio > 0.708				$\epsilon_{\text{Nd}} > 0$ generally (depleted mantle)
$\epsilon_{\text{Nd}} \ll 0$				
$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$	$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 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 variations explained by restite unmixing	developed by magma mixing (hybridization) between mantle-derived mafic magmas (M-type) and supracrustal anatectic (S-type) magmas			fractionation of mantle-derived, basaltic magmas