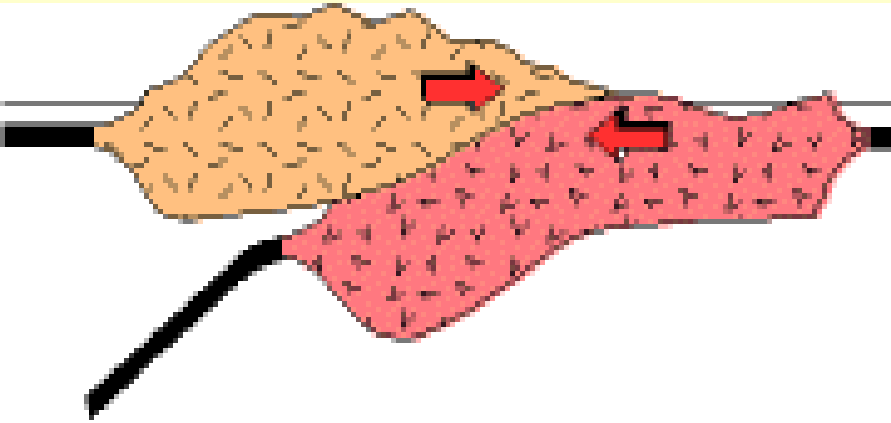


# **G4021 Magmatická a metamorfní petrologie**

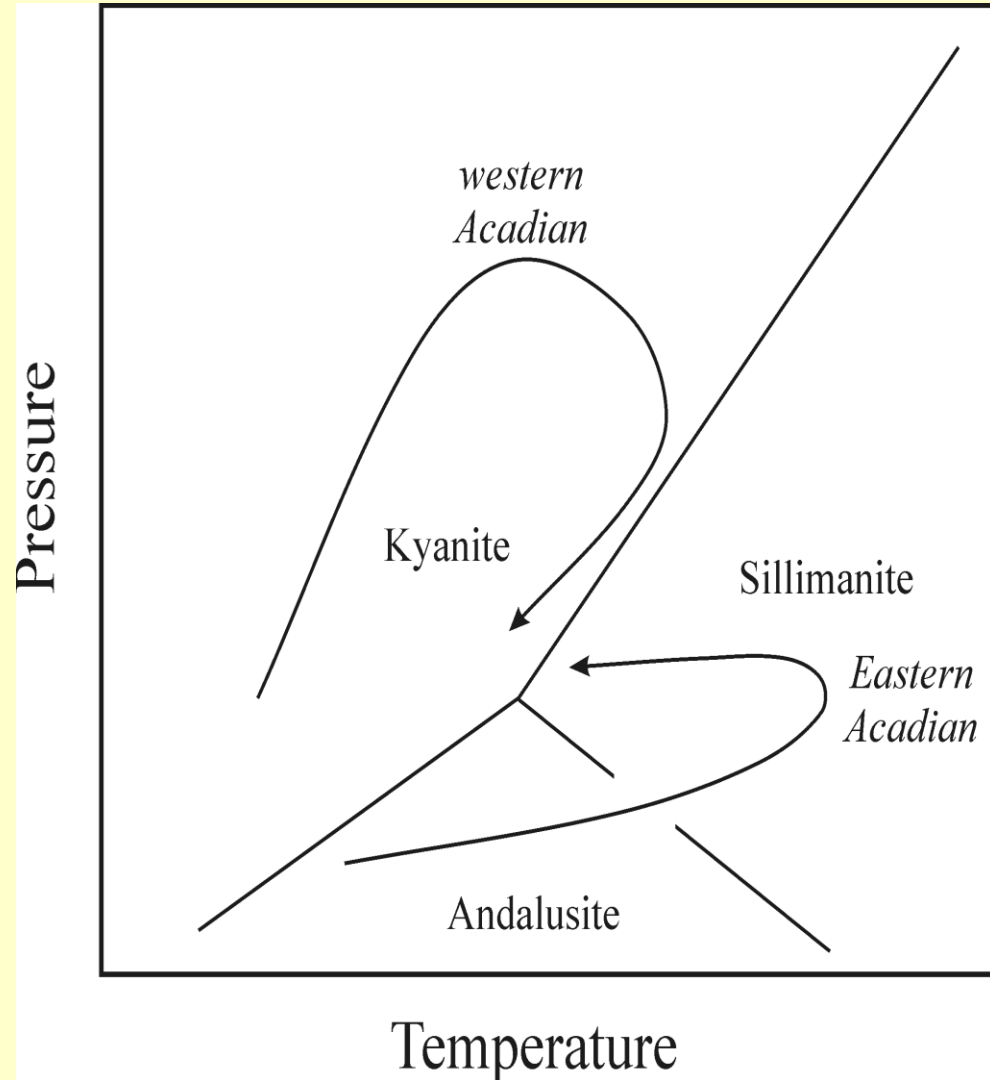
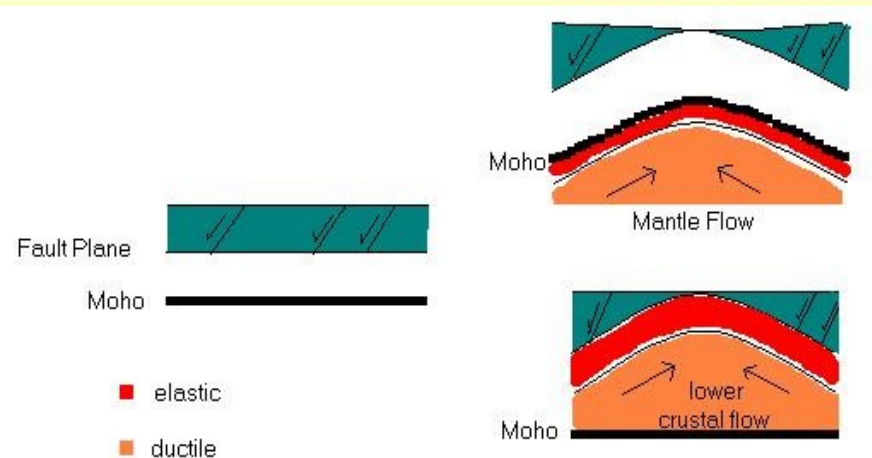
**P-T-t dráhy v metamorfovaných horninách –  
interpretace a modely**

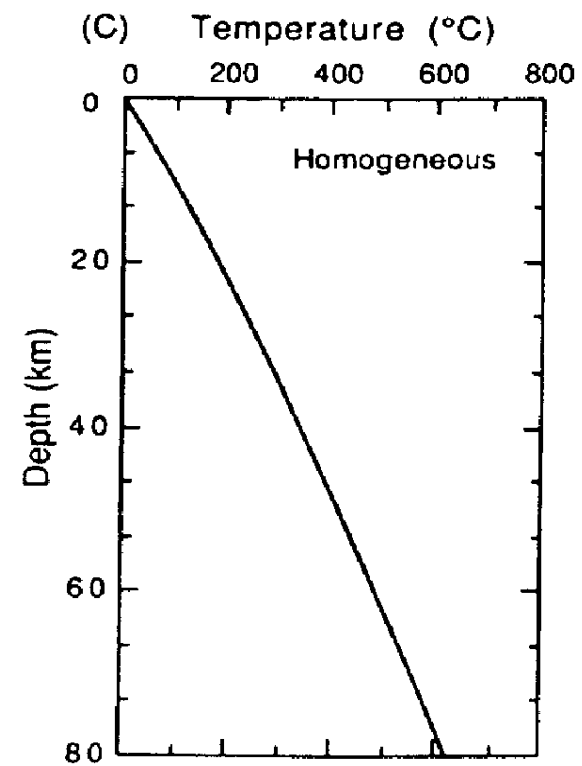
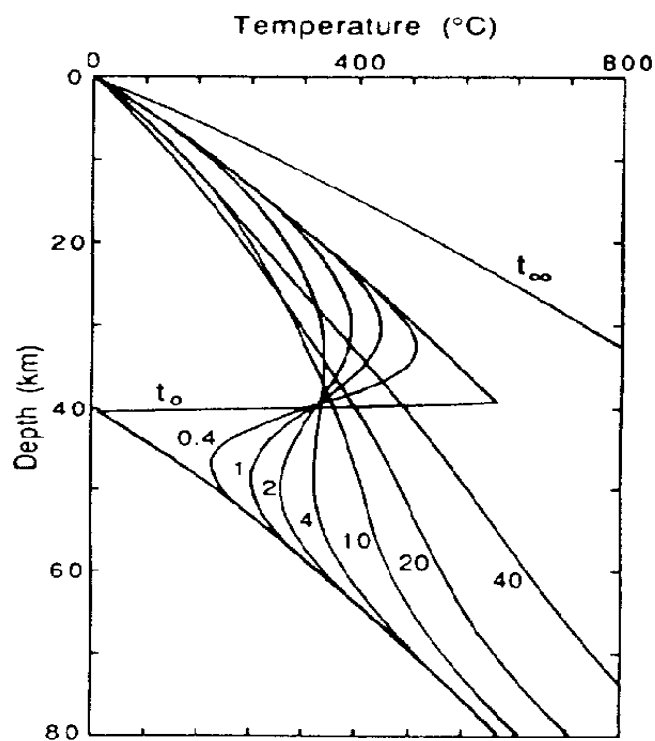
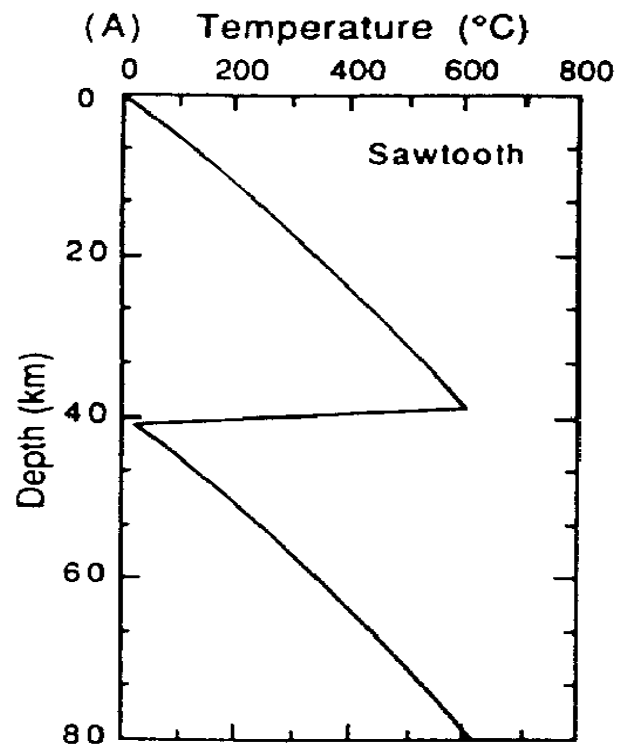
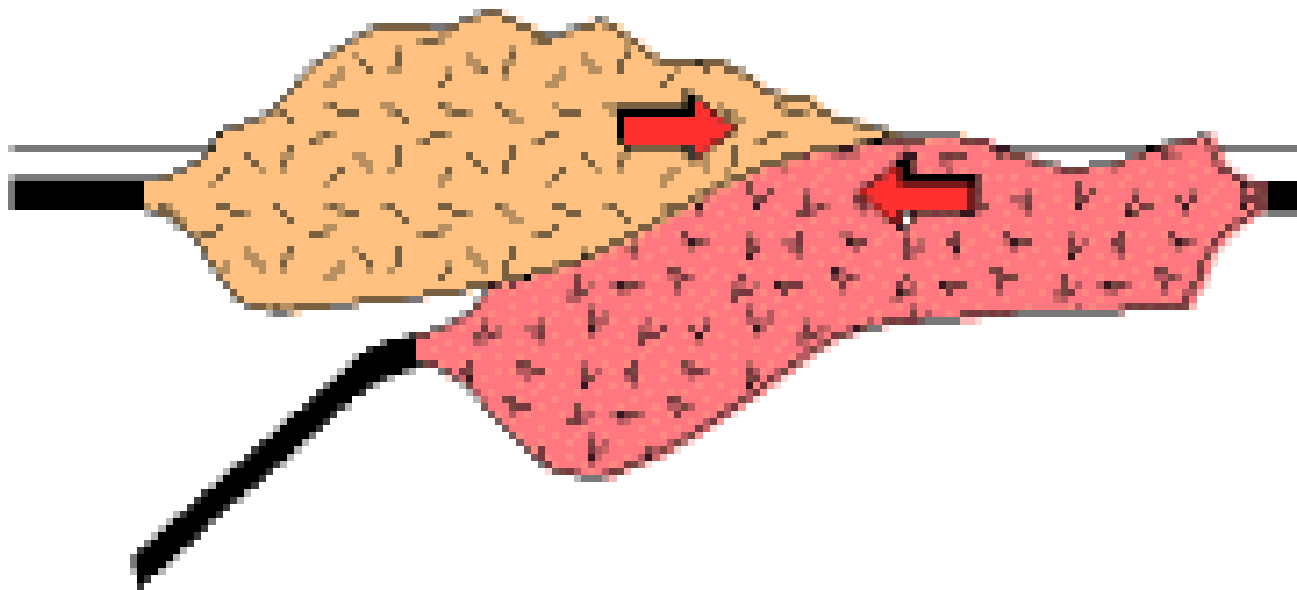
# Popis dráh P-T -t

- **P-T CW (clockwise)** - po směru hodinových ručiček = pohřbení, subdukce

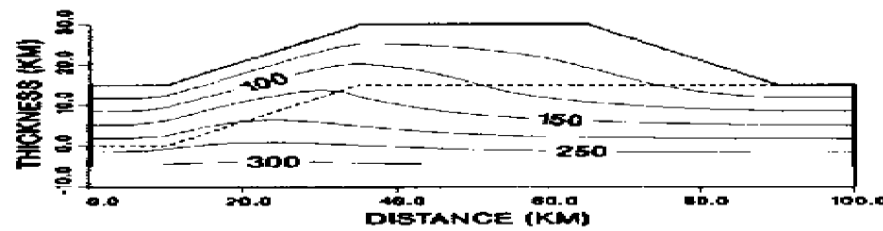
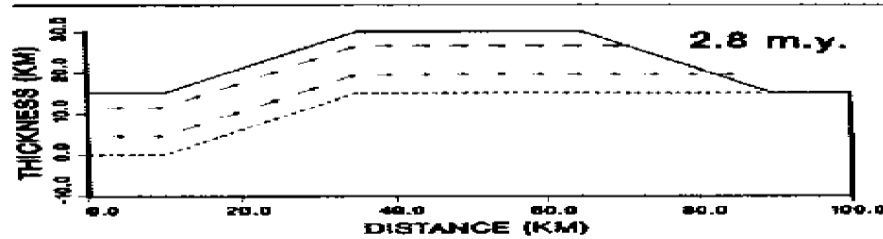
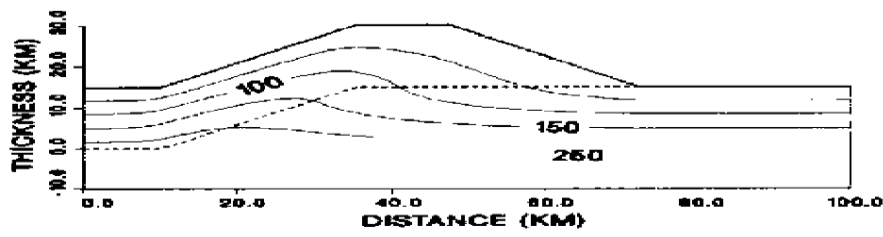
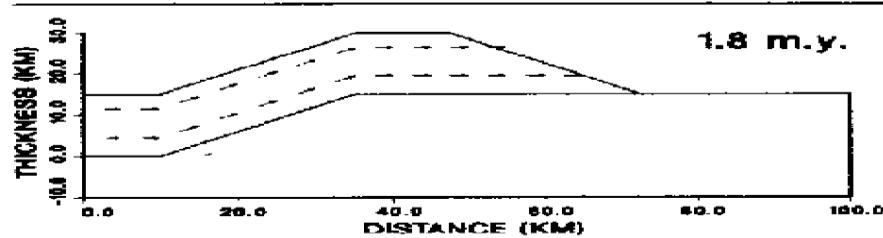
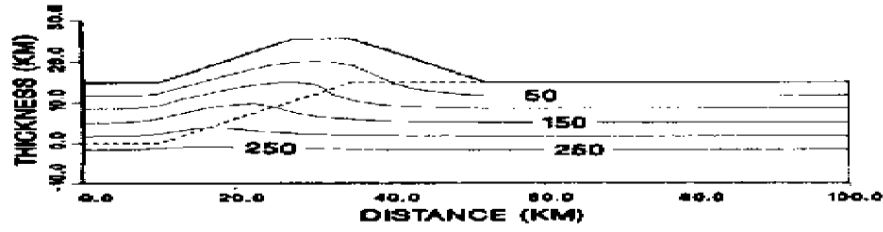
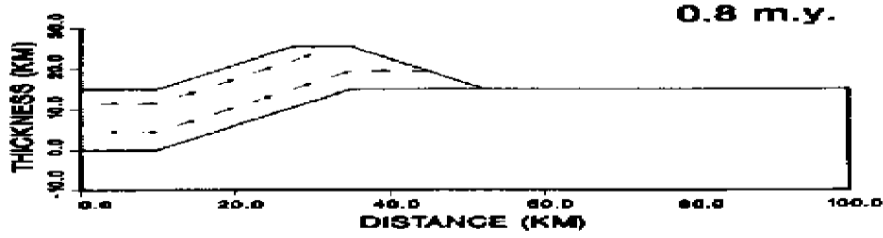


- **CCW (counter-clockwise)** - magmatic underplating - prográdní část dráhy

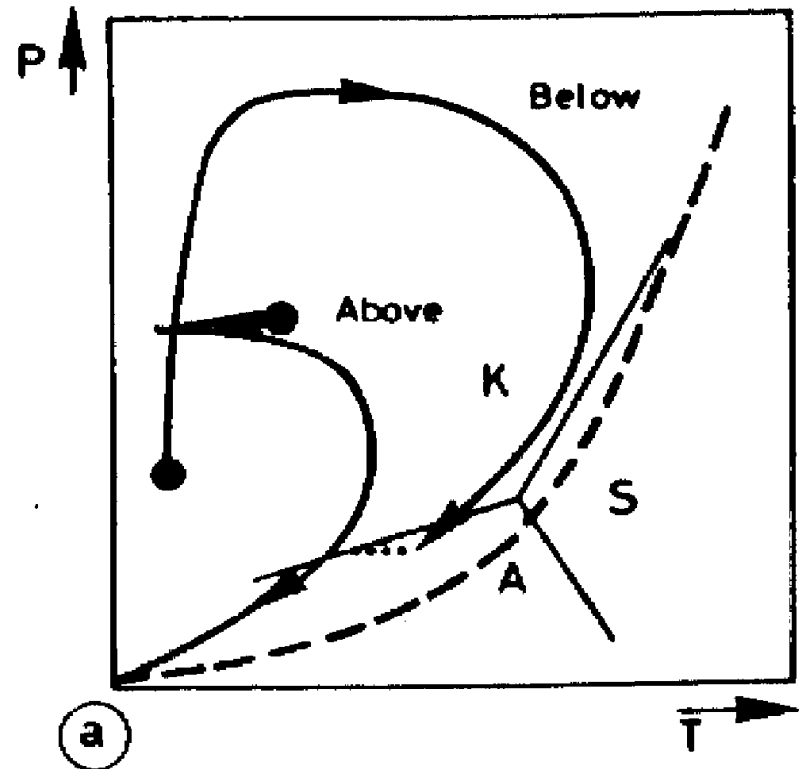


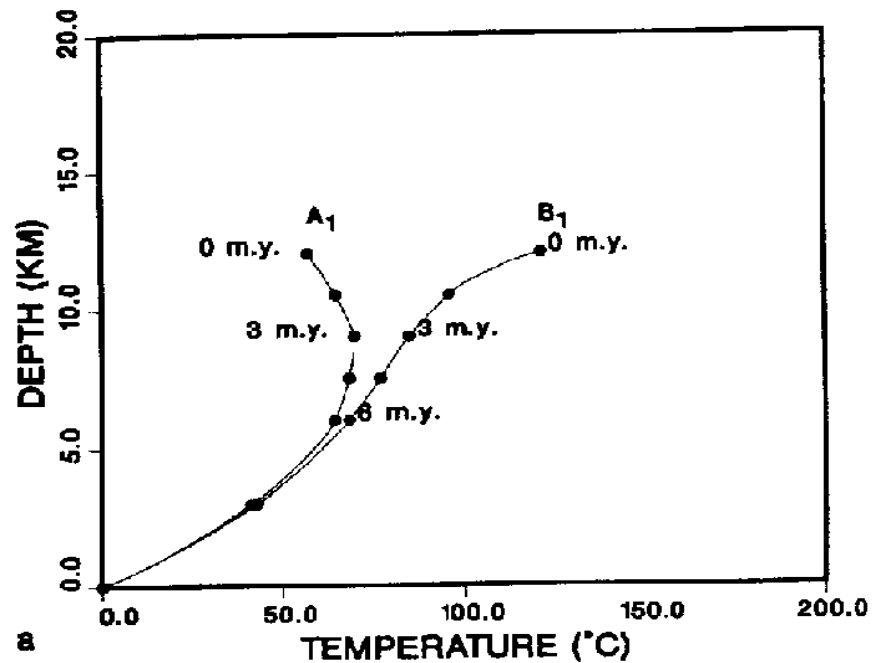
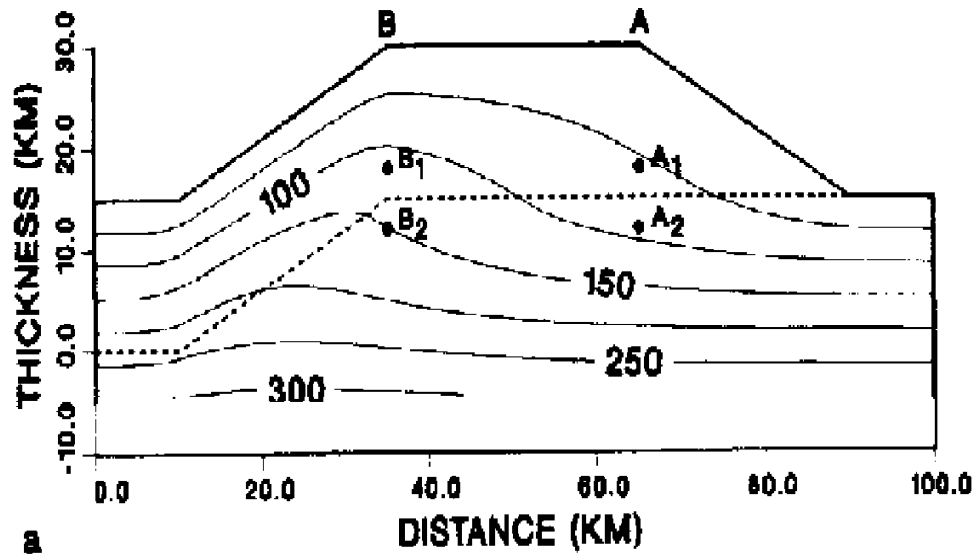


Model pro rychlost nasuvání 2 cm/rok

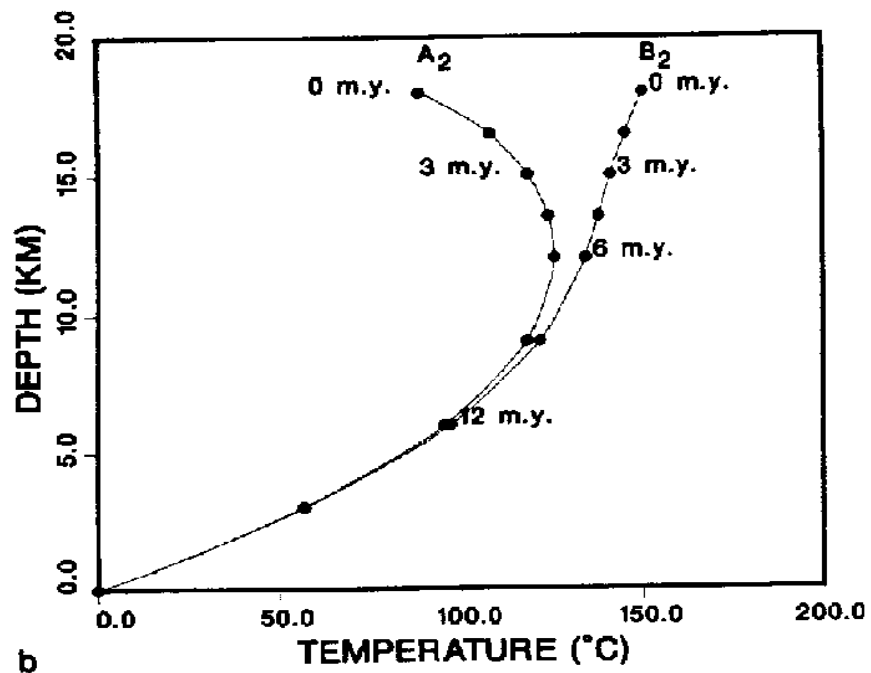
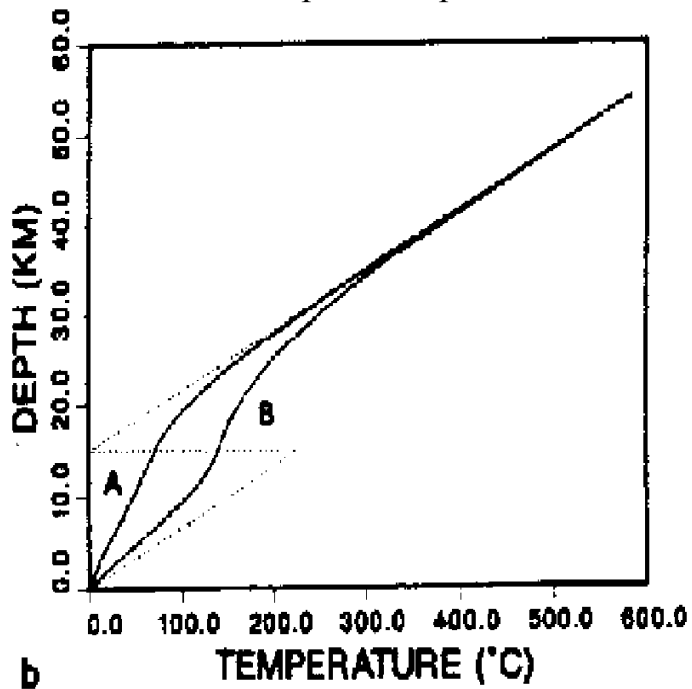


THRUSTING / EROSION



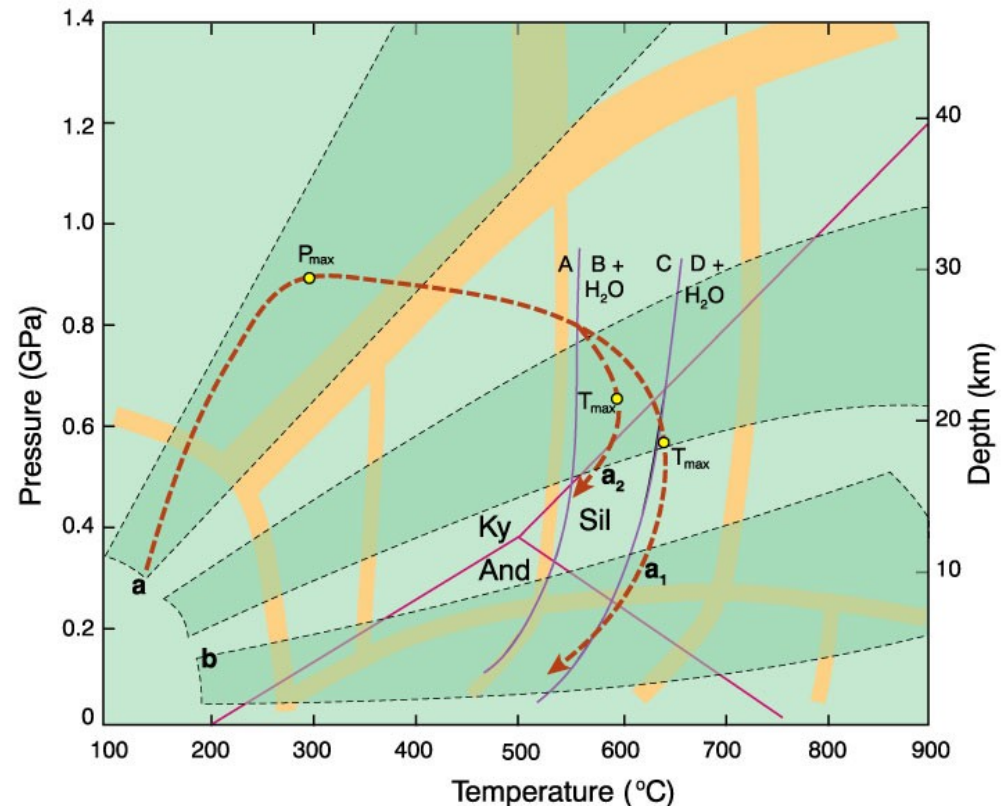


Termální a strukturní model příkrovů po ukončení nasouvání



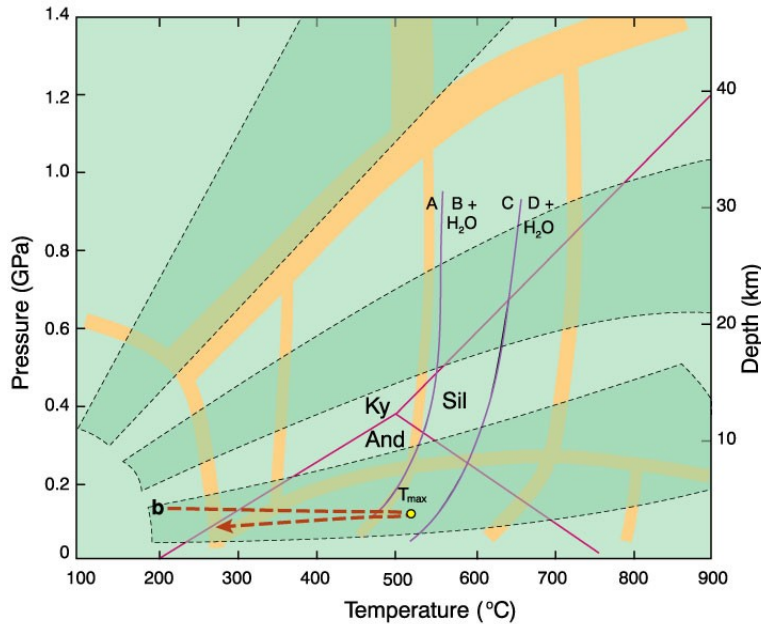
## P-T-t draha (a) je typická pro orogenetická pásma kde dochází ke stluštění kontinentální kůry is (crustal thickening)

- během nárůstu mocnosti kontinentální kůry roste tlak (vzrůst tlaku se v horninách projeví okamžitě ( $P_{\max}$ ), ale tepelný tok je pomalý proces a tak nějakou dobu trvá než dosáhne teplota maximálních hodnot)
- v kontinentální kůře je hodně radioaktivních prvků a určité teplo také mohou dodávat magmatické horniny a proto postupně roste teplota hornin až na hodnotu ( $T_{\max}$ )
- **Eroze** způsobí že tloušťka kůry se brzy začne snižovat a tlak začne klesat
- k poklesu tlaku dochází většinou dříve než hornina dosáhne rovnováhy s orogenetickou geotermou (proto většinou teplota roste i během poklesu tlaku)



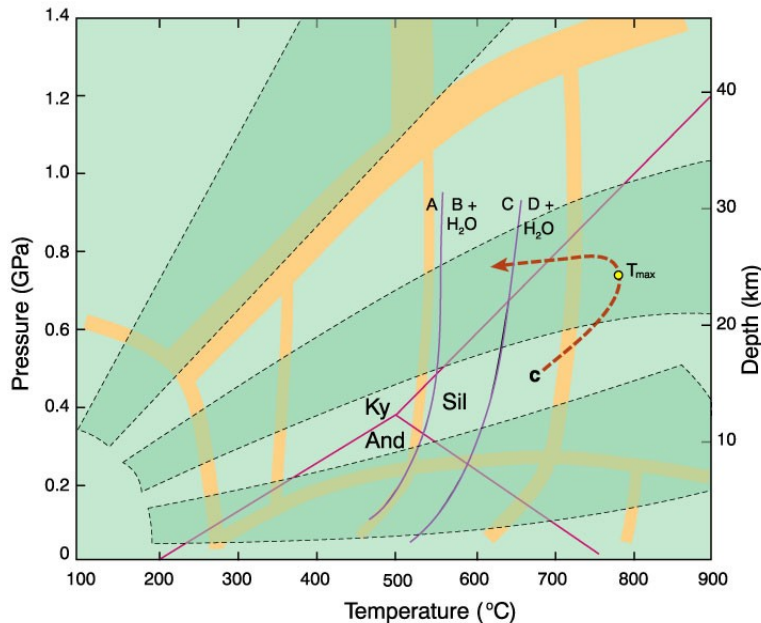
## P-T-t draha (b) je typická pro magmatickou intruzi do malých hloubek

- v první fázi nárůst a poté pokles teploty spojené s intruzí a chladnutím tělesa vyvřelých hornin, vše za relativně konstantního tlaku
- často přechody mezi a-b (regionální kontaktní met.)



## P-T-t draha (c) proti směru hodinových ručiček “counterclockwise”

- vyskytují se ve vysoce metamorfovaných rulách, které jsou produktem kontaktní metamorfózy spojené s intruzí většinou bazických hornin do spodní a střední kůry.



- P-T a vrcholné metamorfní podmínky - vysoce metamorfované horniny
- pojmy progradní a retrogradní spojeny s tektonickým procesem, nejen s T
- **A) Progradní část dráhy:** nebývá zachována – starší metamorfní procesy překryty vrcholnými PT podmínkami
- **B) Retrogradní část dráhy :**
  - 1) izotermální snížení tlaku neboli dekomprese (**isothermal decompression - ITD**): tektonické ztluštění kůry a následná erozní či **tektonická** exhumace
  - 2) izobarické chladnutí (**isobaric cooling - IBC**) například horniny v kontaktním dvoře magmatických těles



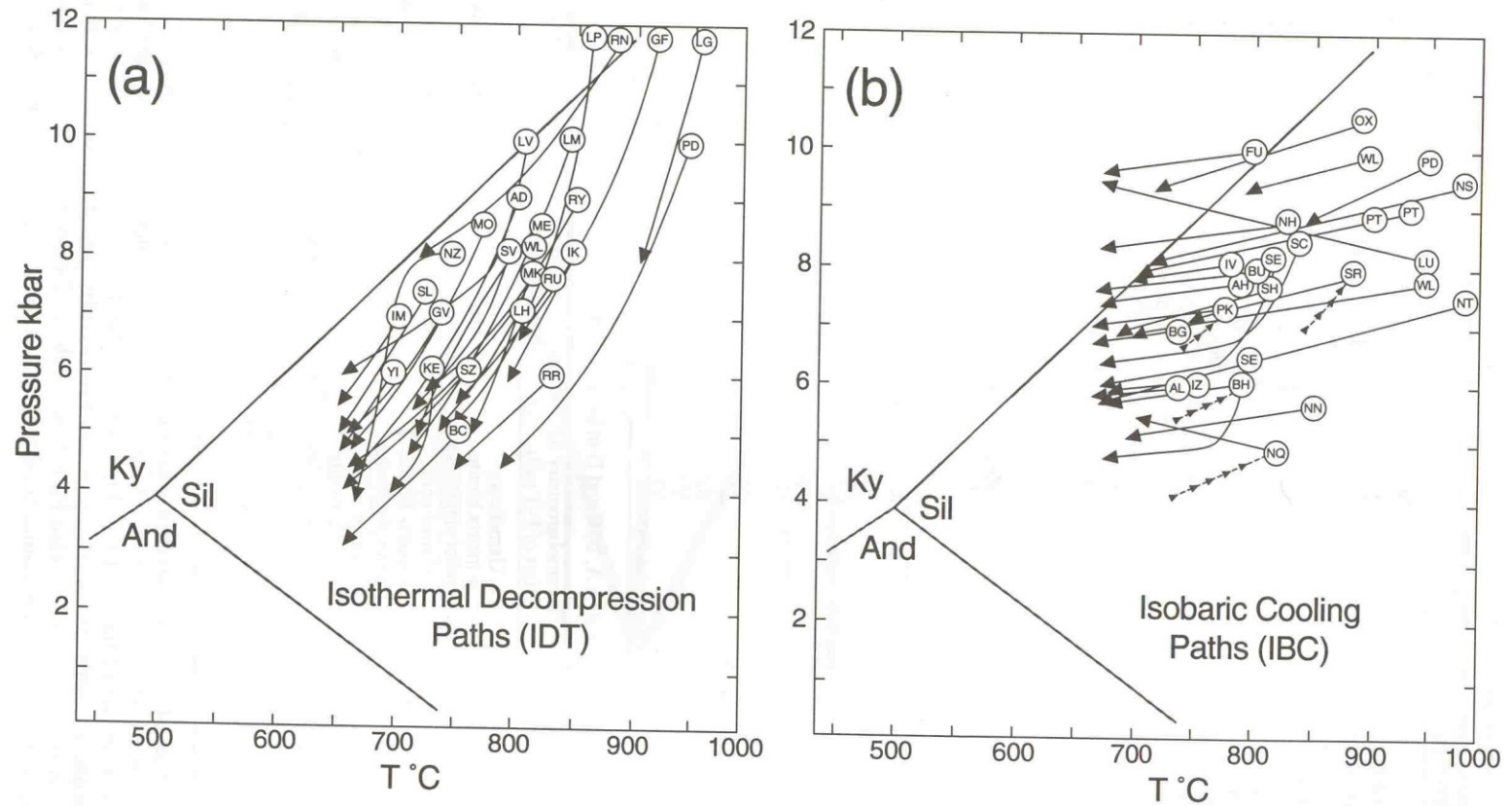
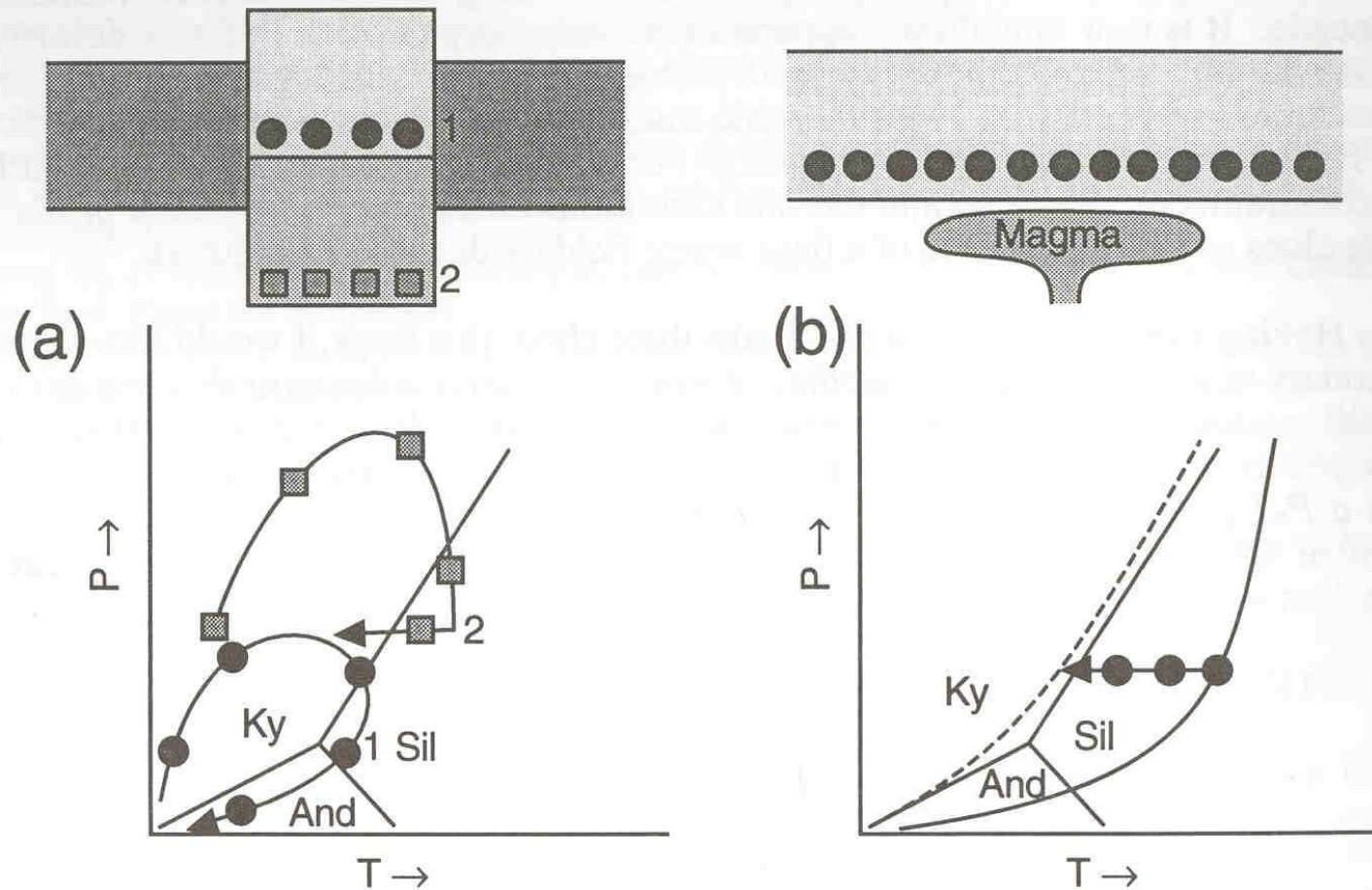


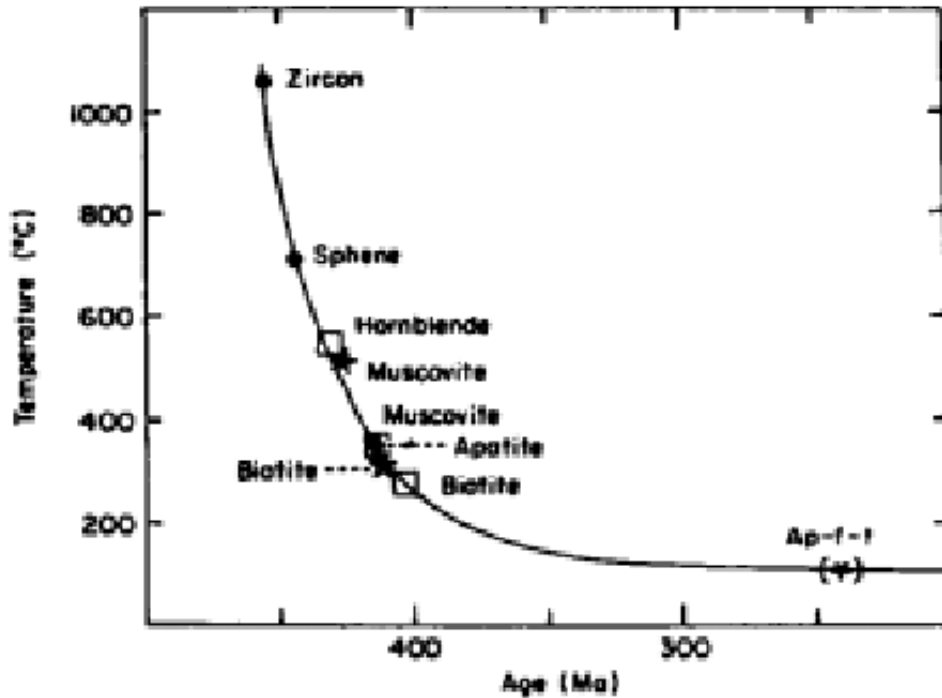
Figure 21-25. P-T paths from granulites. (a) Isothermal decompression paths. (b) Isobaric cooling paths. Abbreviations for areas in Table 21-1. From Harley (1989).

- **ITD  $\Rightarrow$  CW dráha P-T (ztluštění kůry)**
- **IBC  $\Rightarrow$  magmatická tělesa, magmatická akrece na bázi kůry**



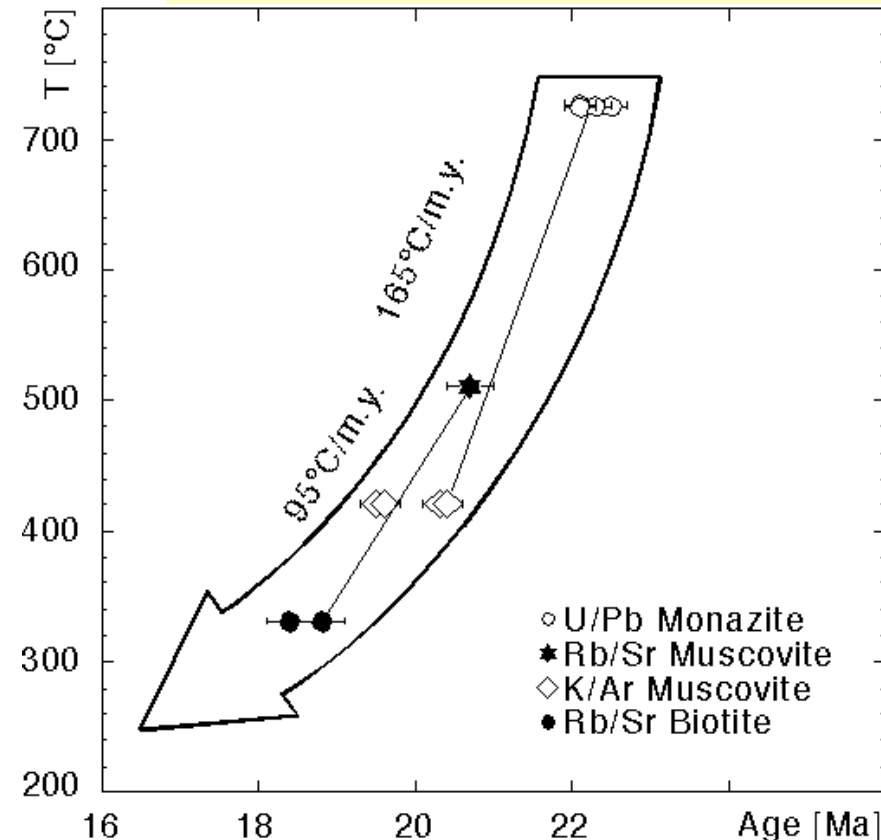
**Figure 21-28.** Tectonic cartoons and P-T paths showing two possible scenarios to produce isobaric cooling paths. (a) Crustal doubling model. Rocks at the base of the upper crust (labeled 1) will have clockwise P-T loops and will be exhumed during the first orogenic cycle. Rocks labeled 2 will have overall clockwise loops but will have a significant period of isobaric cooling, which may obscure any evidence for early high pressure metamorphism. A second orogeny is required to exhume these rocks. (b) Magma underplating model. An elevated geotherm caused by magma underplating will eventually evolve to a steady state geotherm and rocks will undergo isobaric cooling. A subsequent orogeny is required to exhume these rocks. From Ellis (1987).

# Časové zařazení metamorfózy



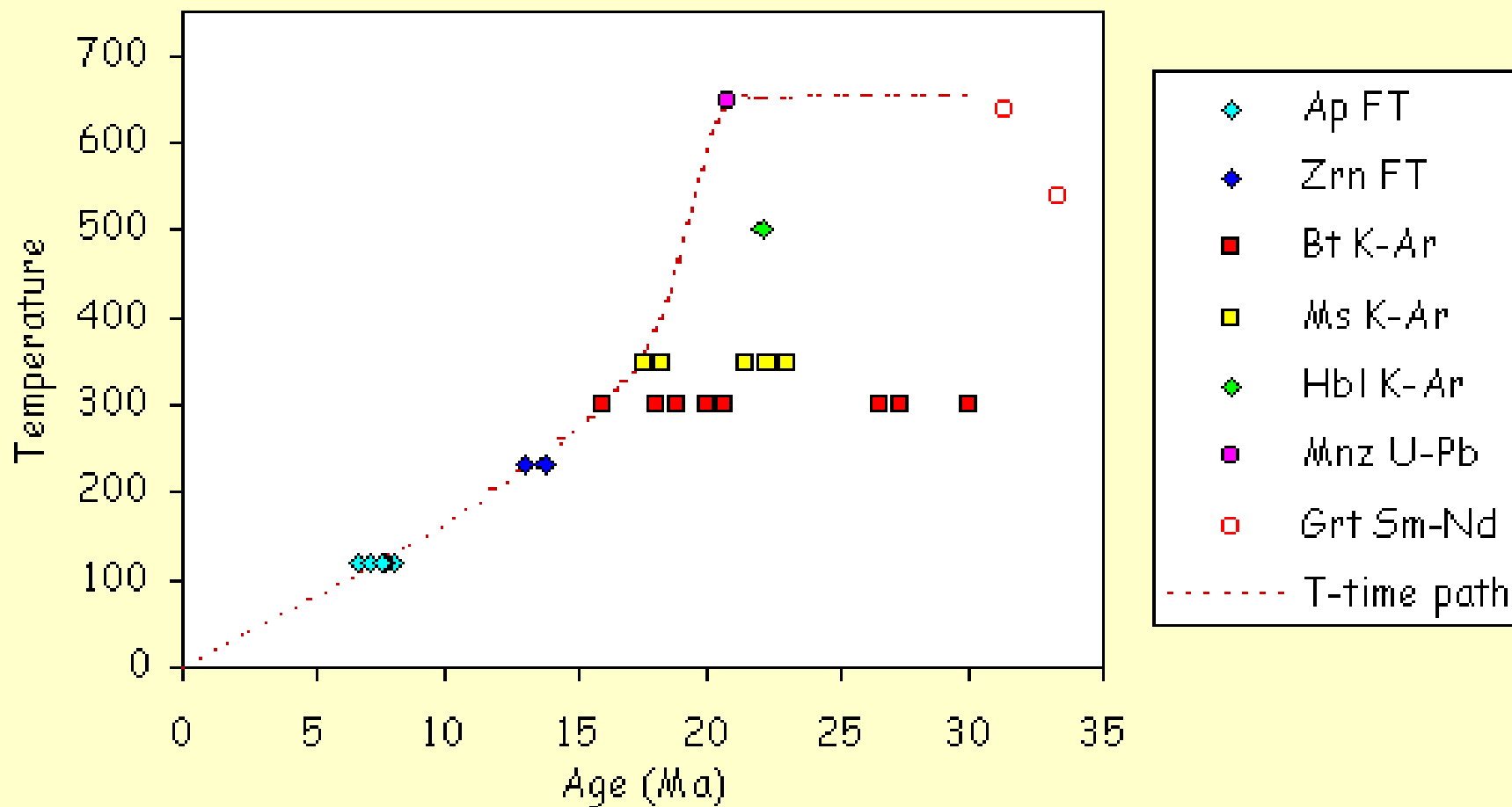
Křivka chladnutí syenitu Glen Dessary, Skotsko, odvozená na základě blokujících teplot různých izotopických systémů (van Breemen et al. 1979).

Kolečka: U-Pb, hvězdičky: Rb-Sr, čtverečky: K-Ar.



- **Termochronologie** = historie T-t (datování minerálů s různou  $T_C$ )
- $T_C$  - teplota kdy přestává difuzní ztráta dceřinného prvku krystalu
- rychlé chladnutí - odpovídá krystalizaci krystalu

### Shafat cooling history



# Tektonické interpretace

Dráhy PT = odraz souhry **tektonických procesů a tepelného toku**

Metamorfóza - tektonicky aktivní pásma se zvýšeným tepelným tokem, i.e. aktivní kontinentální okraje (**konvergentní**, divergentní, mobilní, orogenní pásma) – velký rozsah

Metamorfóza indikuje určité geotektonické prostředí.

## Simulace metamorfních událostí

Na základě zjištěných PTt dat se tvoří model  
Modely vychází z numerického modelování  
nebo z experimentů

Termální a mechanické **modely** umožňující sledovat veličiny, které kontrolují metamorfózu: procesy jako zanoření (burial) a zdvih (exhumation) **rychlé** - silně ovlivní tepelnou strukturu zemské kůry

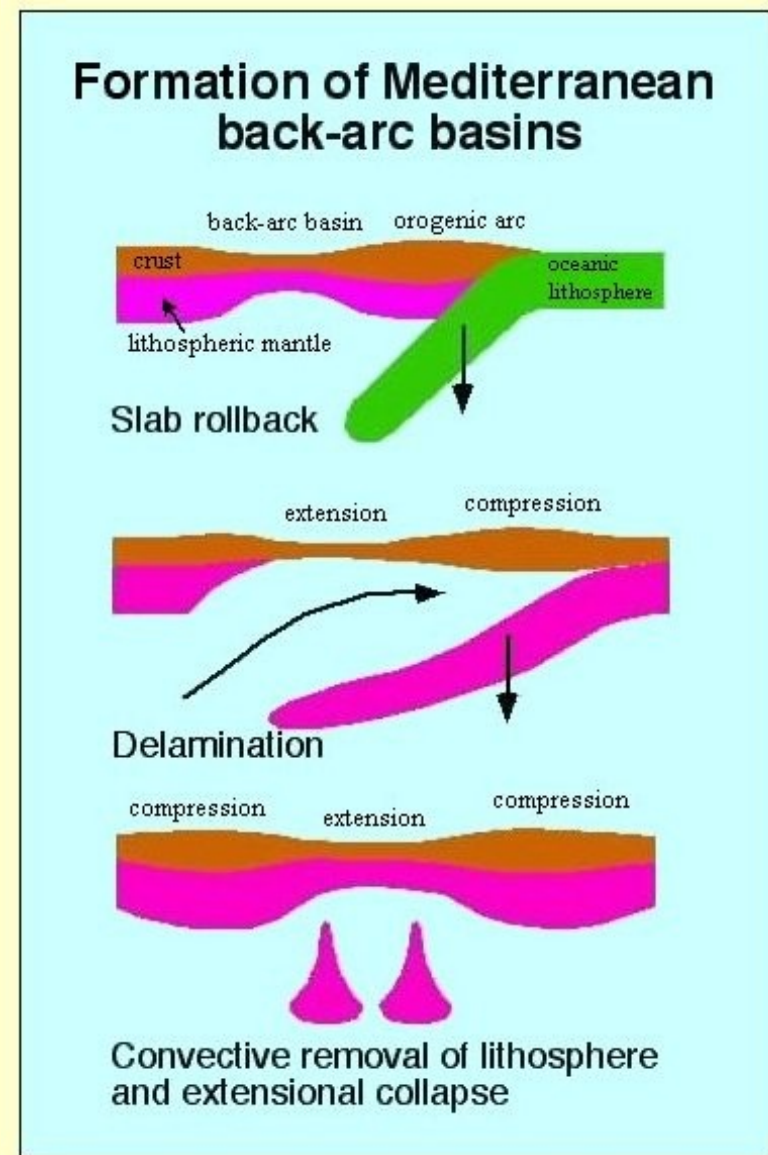


Fig. 4. Current models for the formation of Mediterranean back-arc basins. Top: a subducting slab includes extension in the back arc accompanied by rollback of the subduction hinge. Middle: delamination of lithospheric mantle creates a pattern of induced mantle convection and asymmetrically disposed extension and compression of the overlying crust. Bottom: convective removal of lithospheric mantle creates a region of high gravitational potential energy, which then extends. These models predict differing thermal structures in the crust and lithosphere beneath the basin.

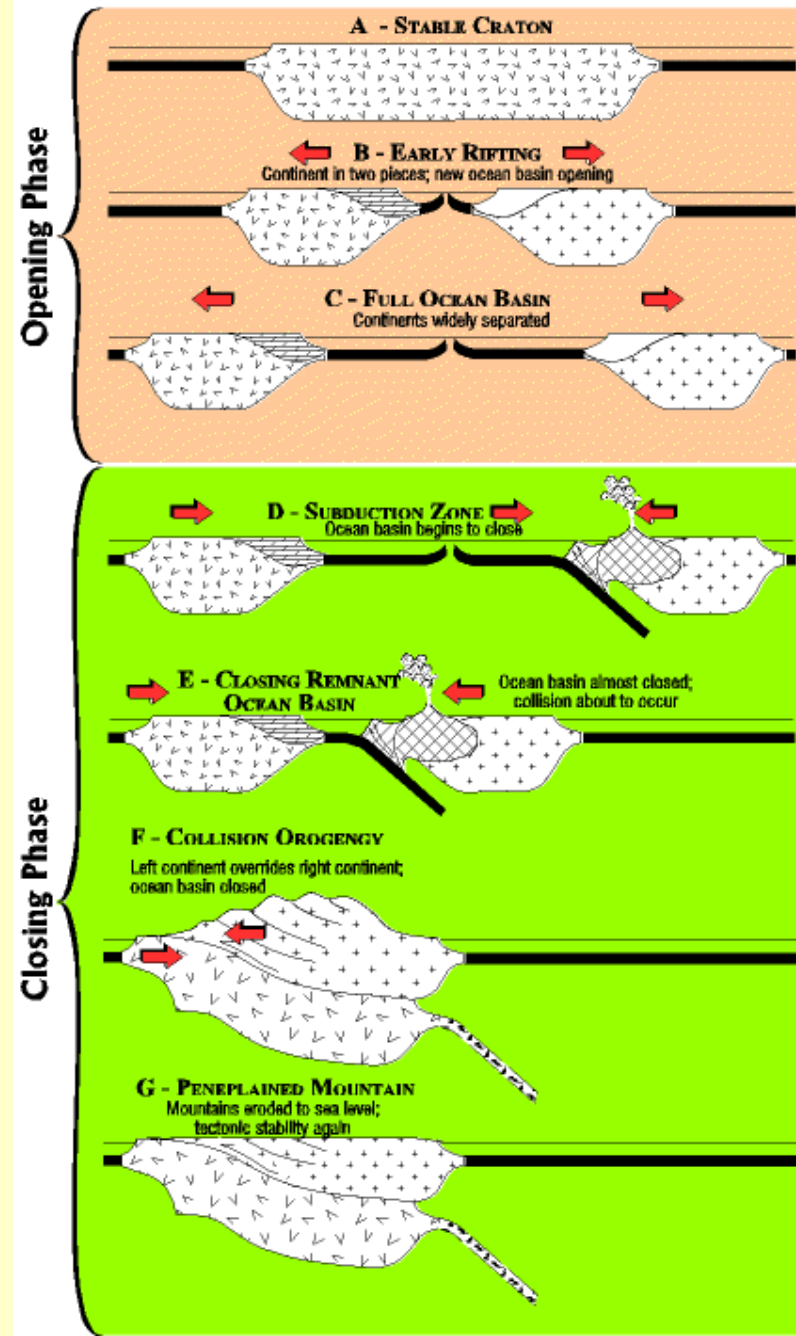
- **Důležité údaje**

- (1) Teplotu  $> 800\text{ C}$  nemůžeme v kůře dosáhnout bez tepelného zdroje (magma).
- (2) Při vzniku příkrovů je možné pozorovat rozdílnou P-T-časovou dráhu pro spodní a svrchní příkrov.
- (3) Délka trvání regionální metamorfózy se počítá na desítky miliónů let zatímco kontaktní metamorfóza 10000 let.

# 1) Porušení tepelné a geologické struktury kůry

- (a) Subdukce studené oceánské desky pod oc/kont → stlačené geotermy
- (b) Ztluštění kůry (kontinentální) – násuny homogenní ztluštění kůry
- (c) Ztenčení kůry - extenzí (intrakontinentální rifting), gravitační skluz příkrovů
- (d) Vrásnění
- (e) Intruze magmatu

**A Simple Wilson Cycle**  
The Opening and Closing of An Ocean Basin



## 2) Relaxace tepelného porušení směrem ke stálému stavu (steady state)

- po skončení tektonického procesu

## 3) Změna hloubky horniny v důsledku zdvihu a eroze nebo tektonického ztenčování

- ztluštělá kůra je isostaticky nestabilní (není v isostatické rovnováze)
- ⇒ **zdvih a eroze** (pohoří geomorf. nestabilní) eroze ⇒ denudace/odstranění nadložních hornin ⇒ exhumace hornin

Model ET84 – eroze 0.29mm/rok

- ⇒ **tektonické ztenčování** – svrchní kůra – gravitační skluzy či poklesy (low-angle)  
střední a spodní kůra – duktilní střižná deformace.

Model ET86 – tektonické ztenčování 1mm/rok

- změna mocnosti kůry
  - hornina se „vrací“ od relaxované geotermie ke stálé
  - snížení tlaku a pohyb horniny blíže k povrchu - chladnutí



# Rychlost výstupu hornin a tvar retrográdní dráhy P-T

- 
- **Zachování minerálních asociací z P-T<sub>max</sub>**
- podmíněno rychlým transportem horniny, ne výměna tepla s okolím, rychlé zchlazení  $\Rightarrow$  původní minerální asociace zachovány až k povrchu
- pomalá rychlost transportu, výměna tepla s okolím  $\Rightarrow$  reekvilibrace minerální asociace v transportovaném bloku, zanikají informace o původní metamorfóze

# Faktory kontrolující metamorfní dráhy P-T

- procesy tektonické i sedimentární (mocné sedimentární sekvence, eroze)
- přenos hmoty a tepla během vývoje orogenních zón

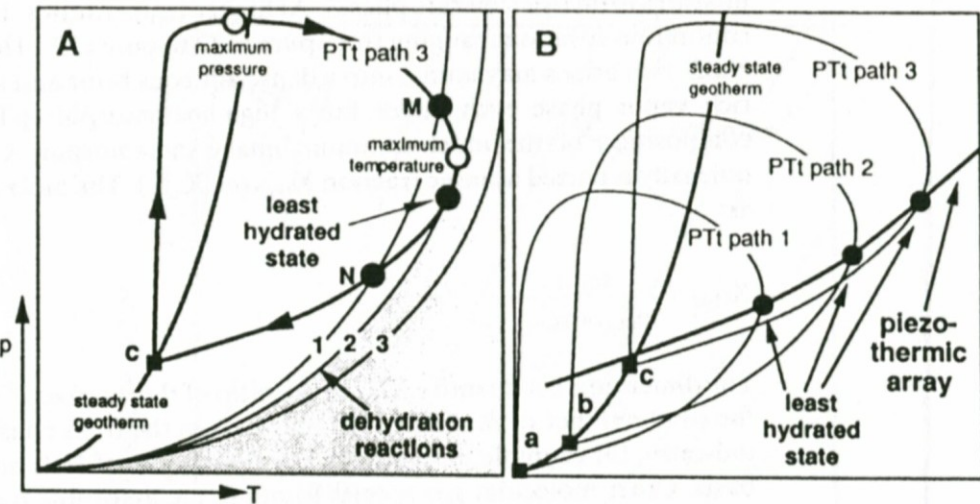


Fig. 3.12. A pTt path of a volume element at depth *c* of Fig. 3.11. The mineral assemblage stable at the tangent point of the path with dehydration reaction 2 will, in general, be preserved in metamorphic rocks. The tangent point corresponds to the least hydrated state of the rock. B Clockwise pTt loops for volumes of crust from different depth levels (Fig. 3-11). The mineral assemblage of the individual volumes corresponds to the least hydrated state for that volume. The pT points of the least hydrated state from all samples of a metamorphic terrain define a curve that is known as piezo-thermic array

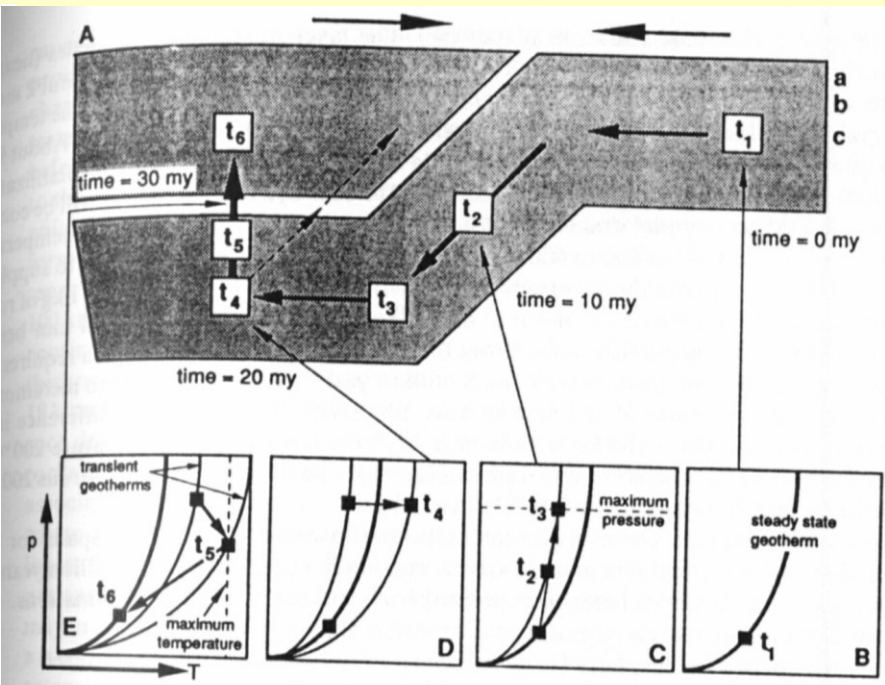
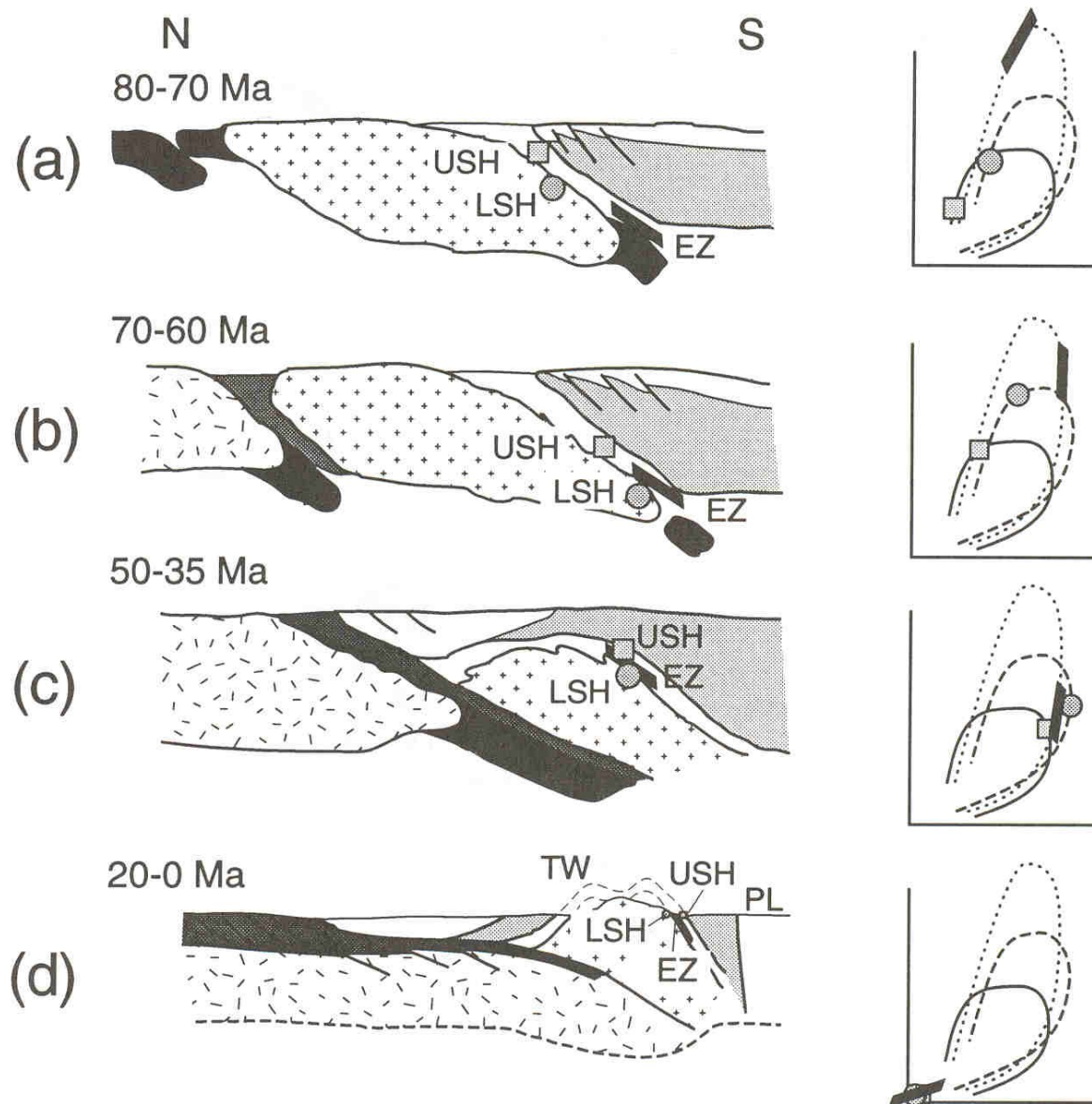
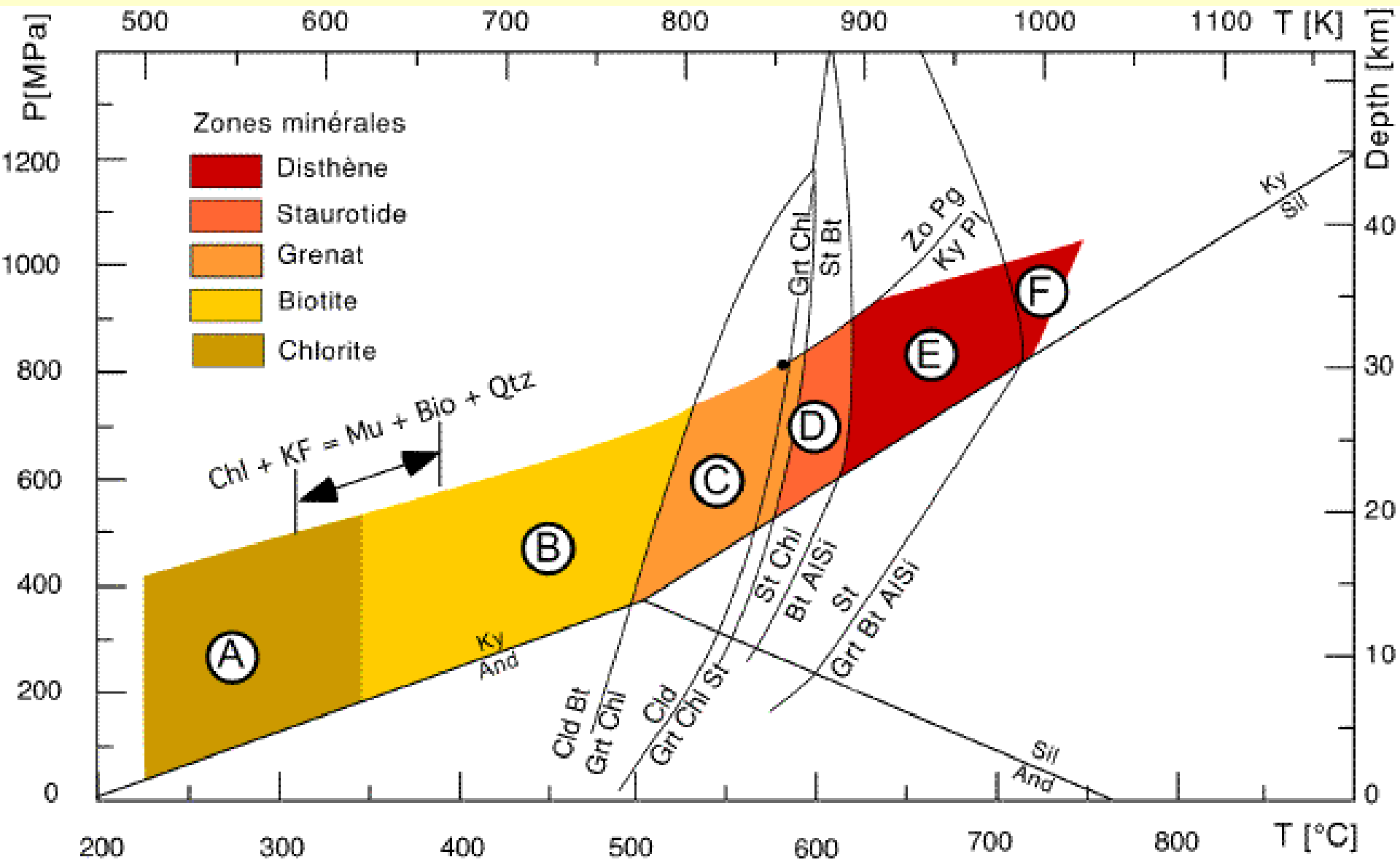


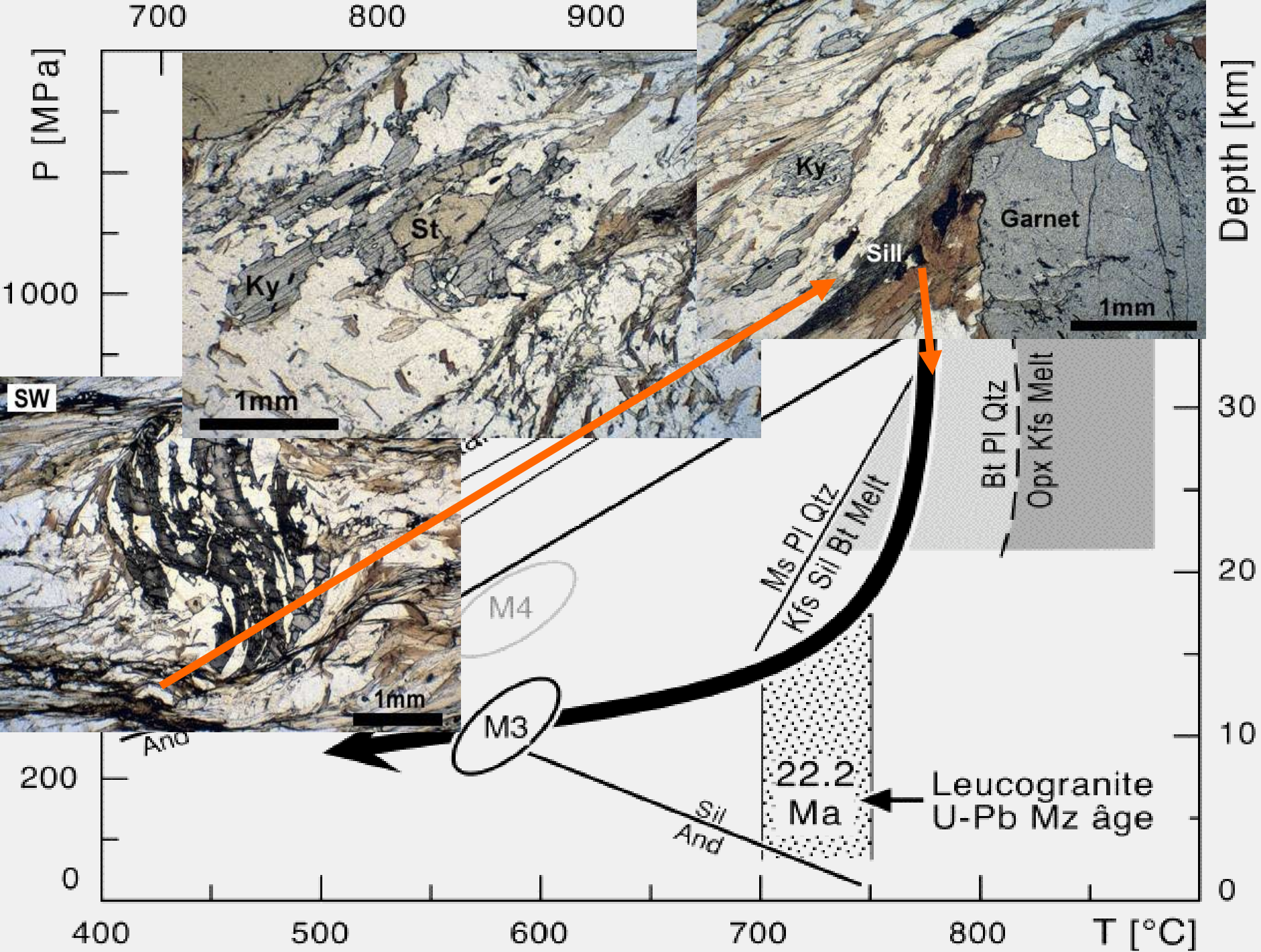
Fig. 3.11A-E. Schematic diagram showing the position of a volume element in the crust as a function of time during a continent-continent collision and the corresponding paths followed by the element in pT space

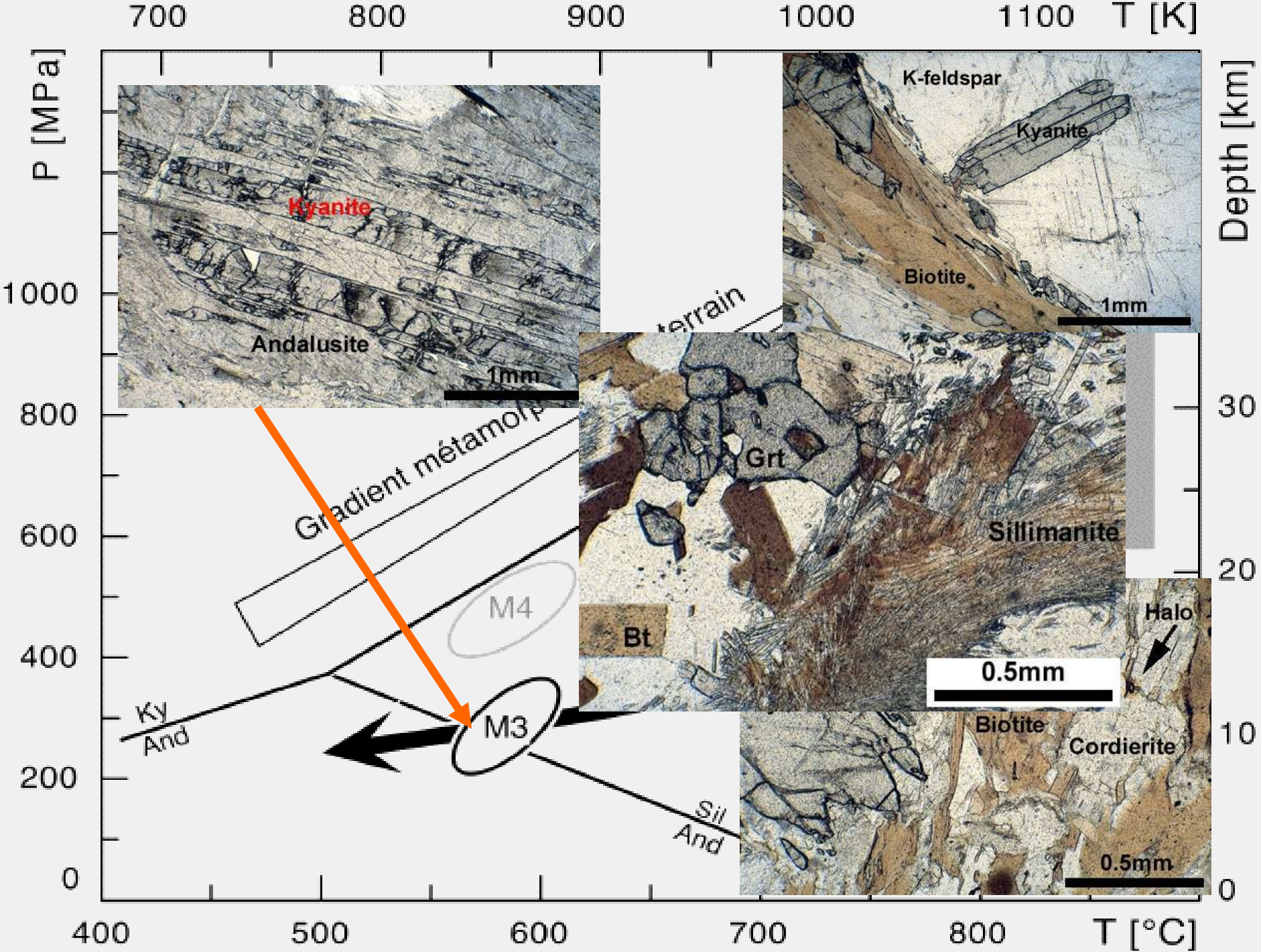


**Figure 21-7.** A series of tectonic cartoons depicting the evolution of the Tauern Window in the eastern Alps, Austria. Dot = The Lower Schieferhülle (LSH) ; Square = Upper Schieferhülle (USH) ; Parallelogram = Eclogite zone (EZ). P-T diagrams show approximate positions of units along P-T paths at various stages of convergence. Modified after Selverstone (1985).

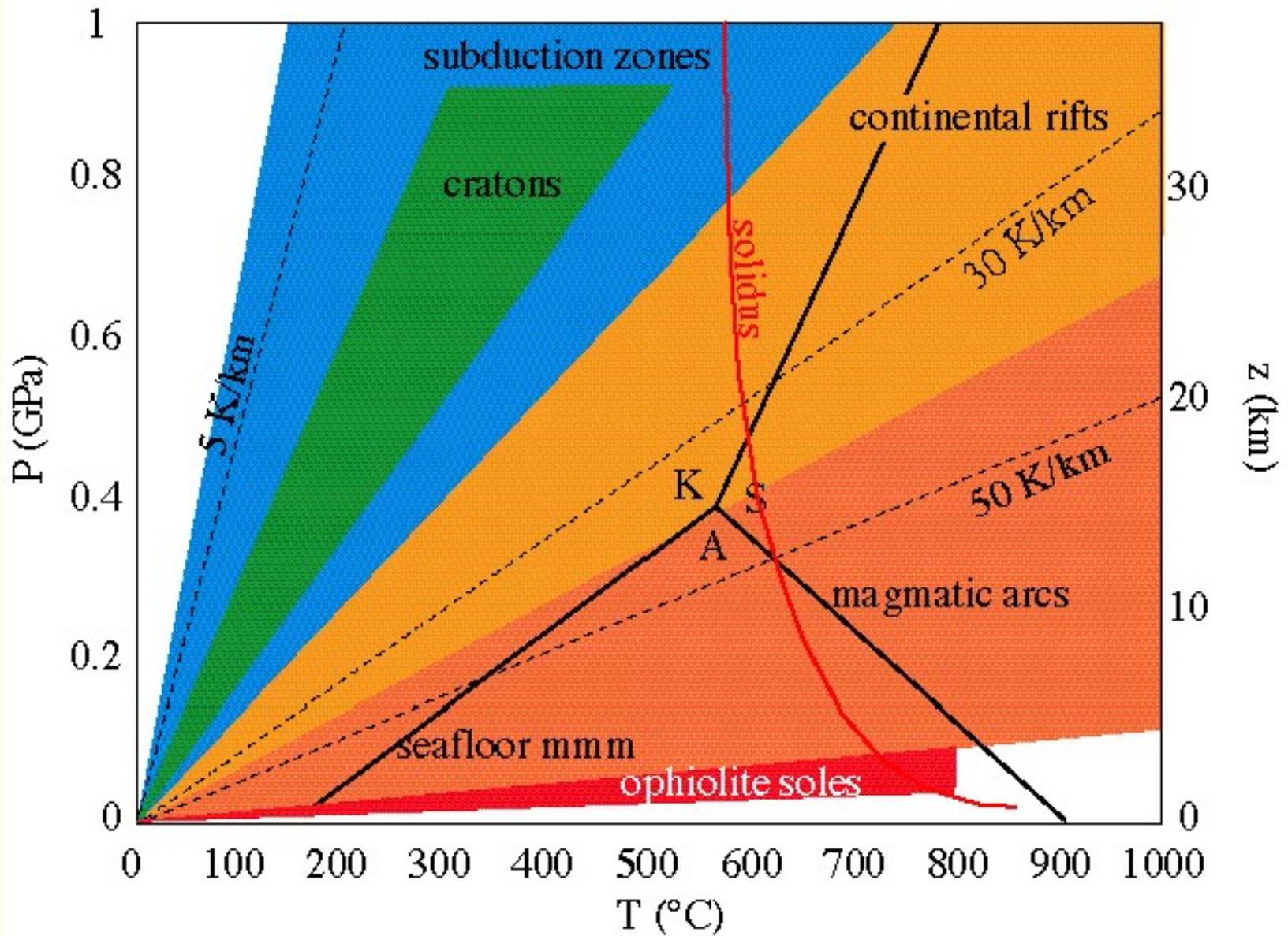
# Příklad



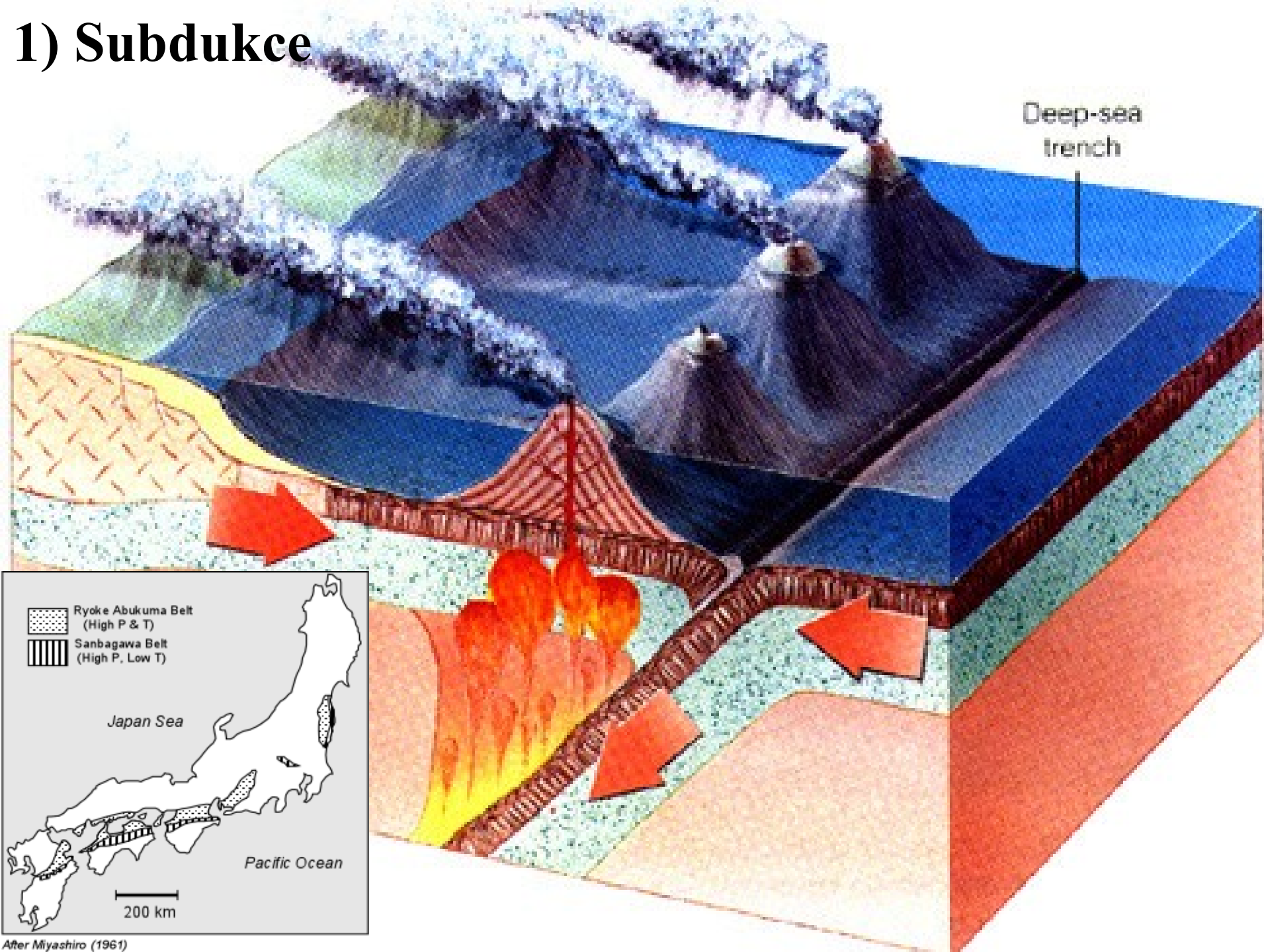




# Modely



# 1) Subdukce



Ryoke Abukuma Belt  
(High P & T)

Sanbagawa Belt  
(High P, Low T)

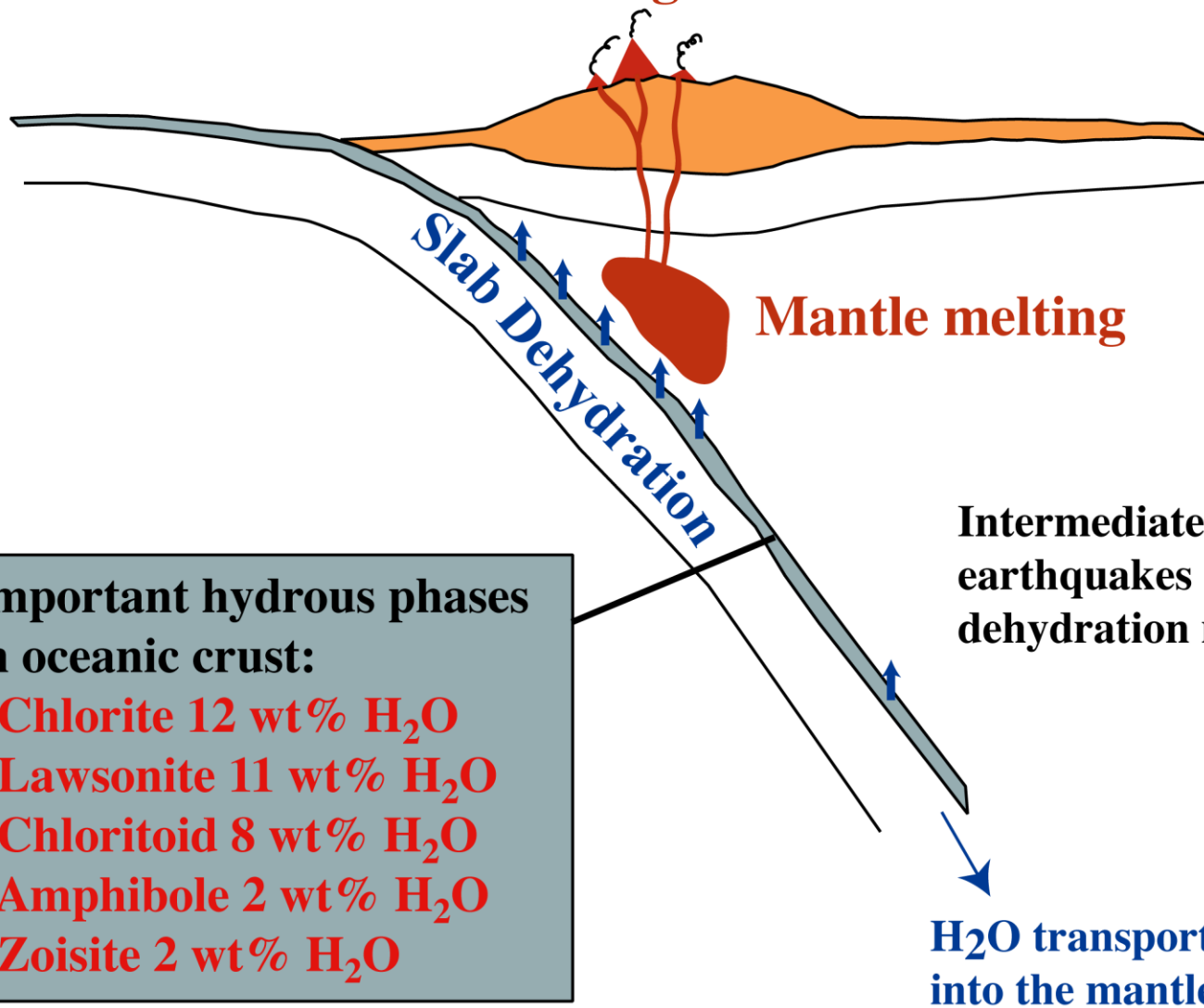
Japan Sea

Pacific Ocean

200 km

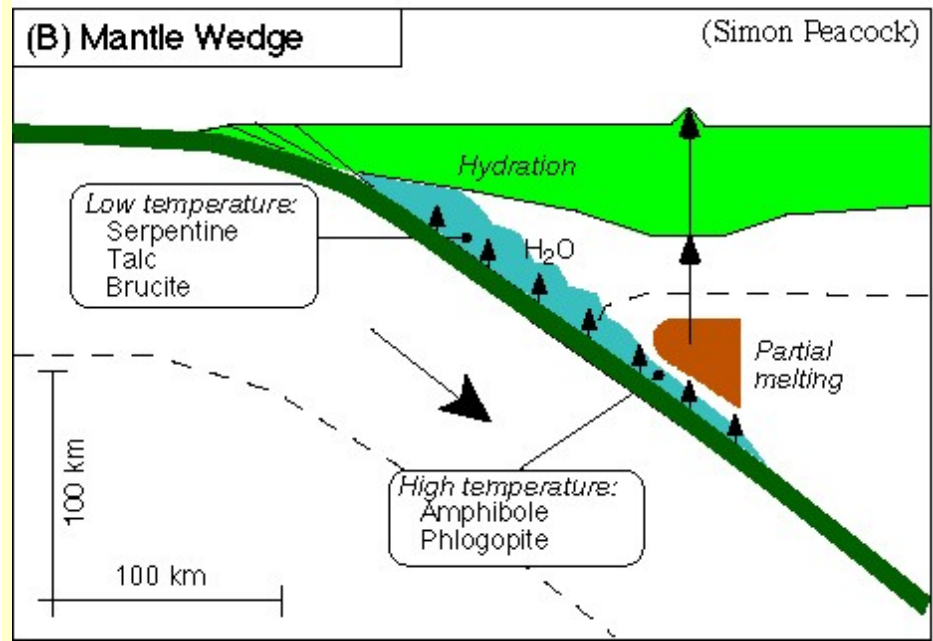
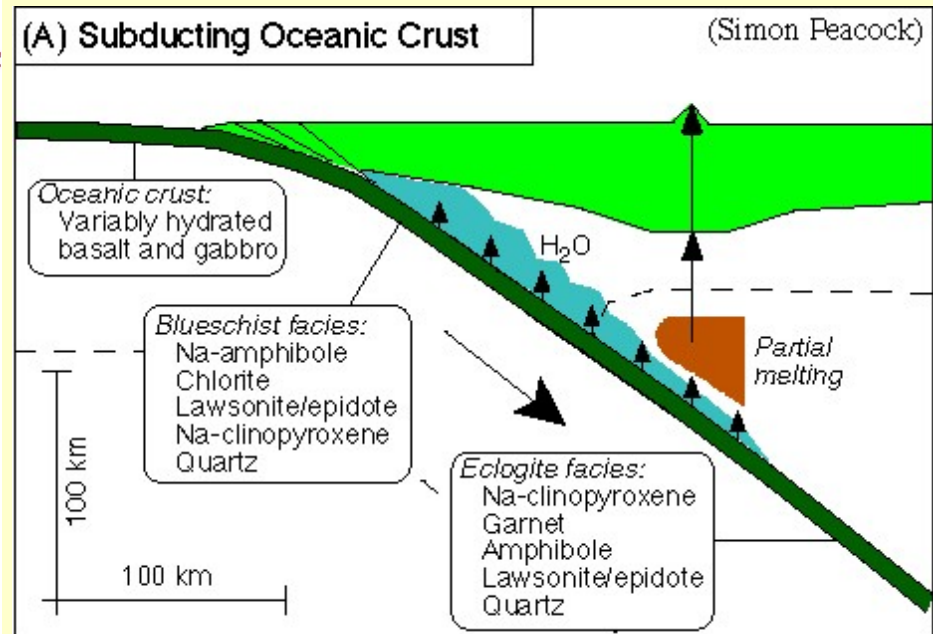
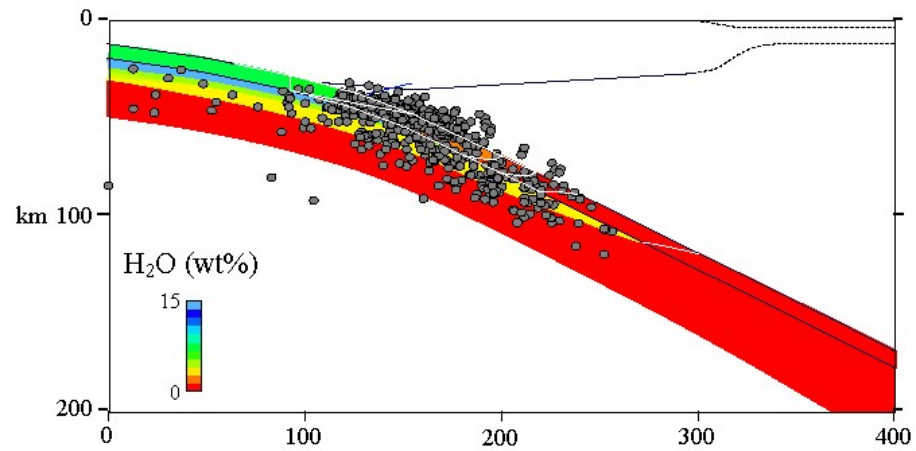
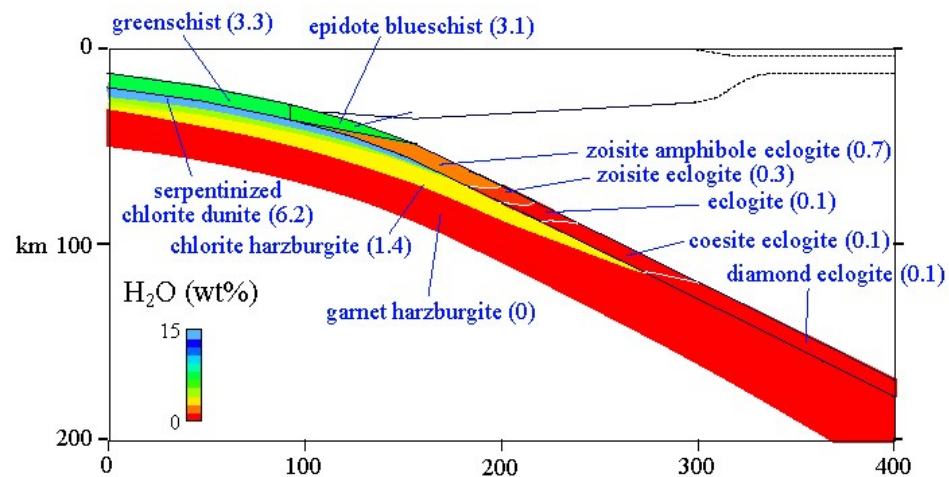
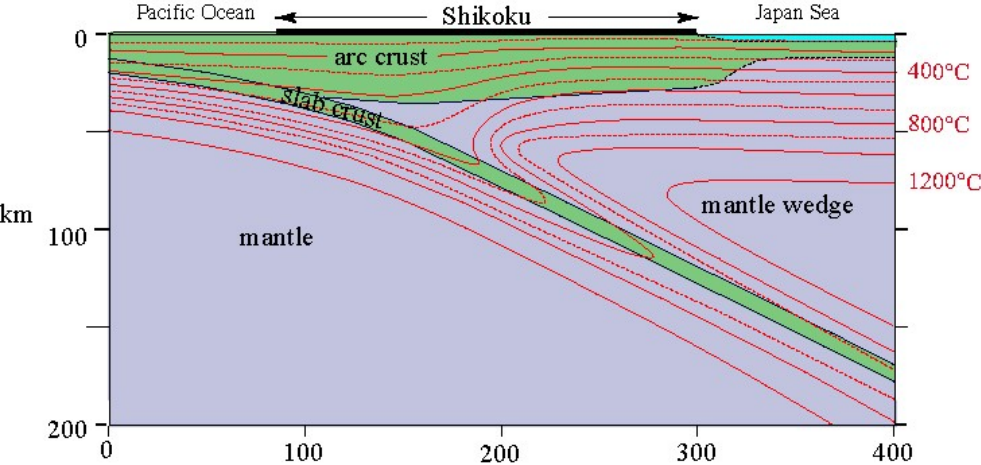


## Arc magmatism



Important hydrous phases  
in oceanic crust:

- Chlorite 12 wt% H<sub>2</sub>O
- Lawsonite 11 wt% H<sub>2</sub>O
- Chloritoid 8 wt% H<sub>2</sub>O
- Amphibole 2 wt% H<sub>2</sub>O
- Zoisite 2 wt% H<sub>2</sub>O



# Literatura

- Dudek, A. - Fediuk F. - Palivcová M. (1962): Petrografické tabulky
- Hejtman, B. (1962): Petrografie metamorfovaných hornin
- Konopásek, J. – Štípská P. – Klápková H. – Schulmann K. (1998): Metamorfní petrologie
- Naprostá většina obrazového materiálu pochází z celé řady internetových stránek věnujících se metamorfní petrologii