

Variscan evolution of the Bohemian Massif

Ondřej Čadek, katedra geofyziky MFF

Fyzikální model Českého masívu:

Petra Maierová

*ve spolupráci s Karlem Schulmannem (EOST Strasbourg)
a Ondřejem Lexou (PřF UK)*

O čem dnes bude řeč

- Geologické problémy z fyzikální perspektivy
- Variský vývoj Českého masívu očima geofyzika (co víme, co tušíme a kde je v tom *fyzika*)
- Jaká jsou data, co chceme vysvětlit a jak se to dá modelovat: naše cesta k numerickému modelu
- Model exhumace spodní kůry (P.M.)
- Nezodpovězené otázky

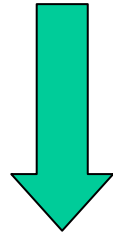
$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

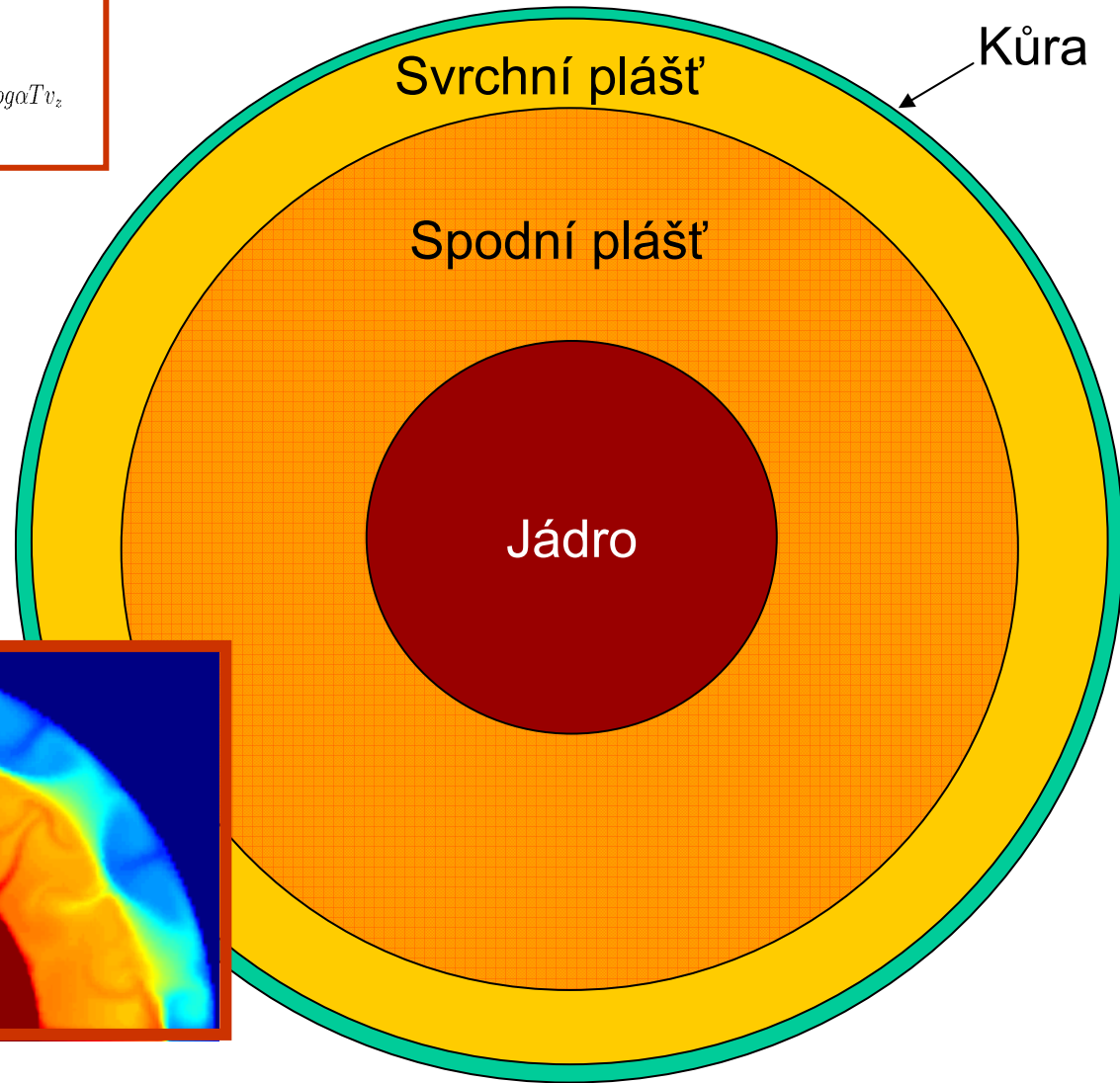
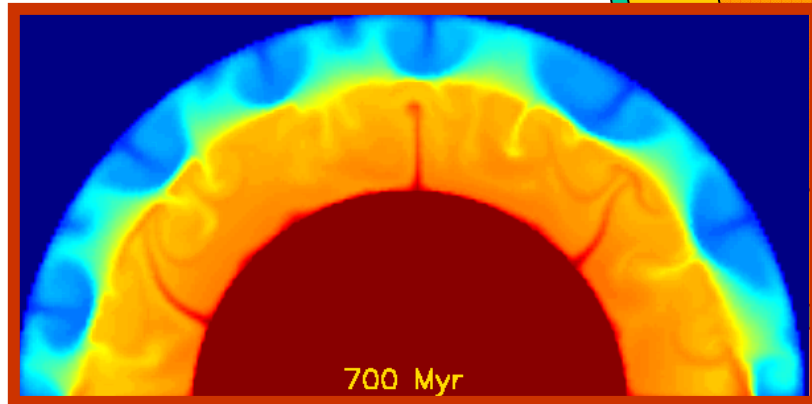
$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \eta(\nabla \mathbf{v} + \nabla^T \mathbf{v})$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (k \nabla T) + \boldsymbol{\sigma} : \nabla \mathbf{v} + \rho Q - \rho g \alpha T v_z$$

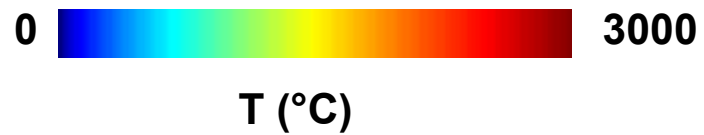
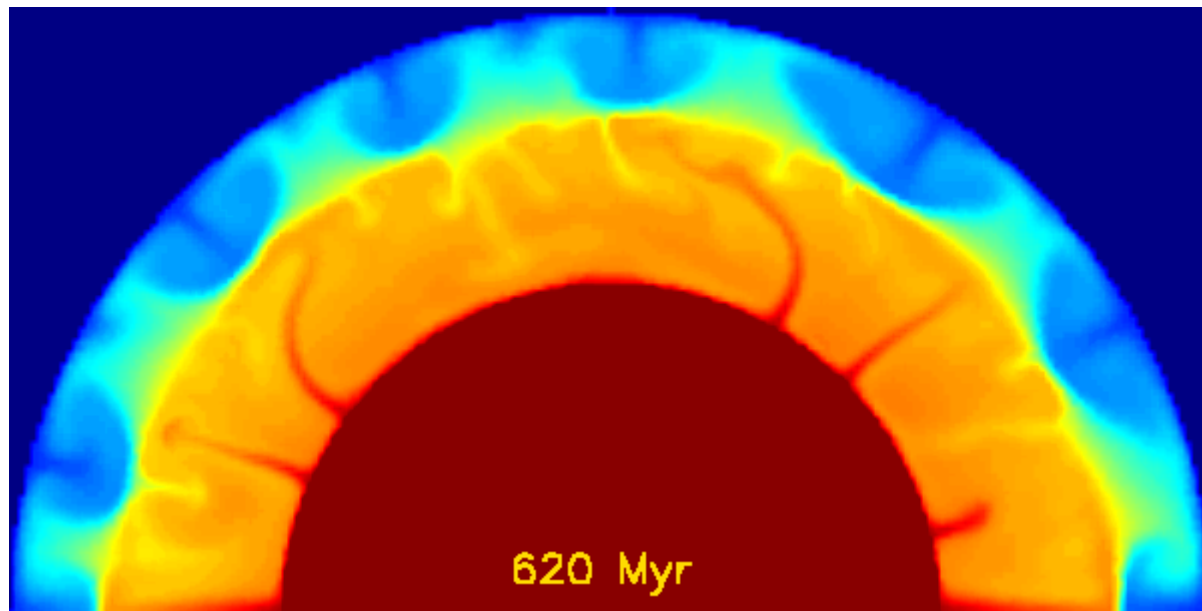
Rovnice

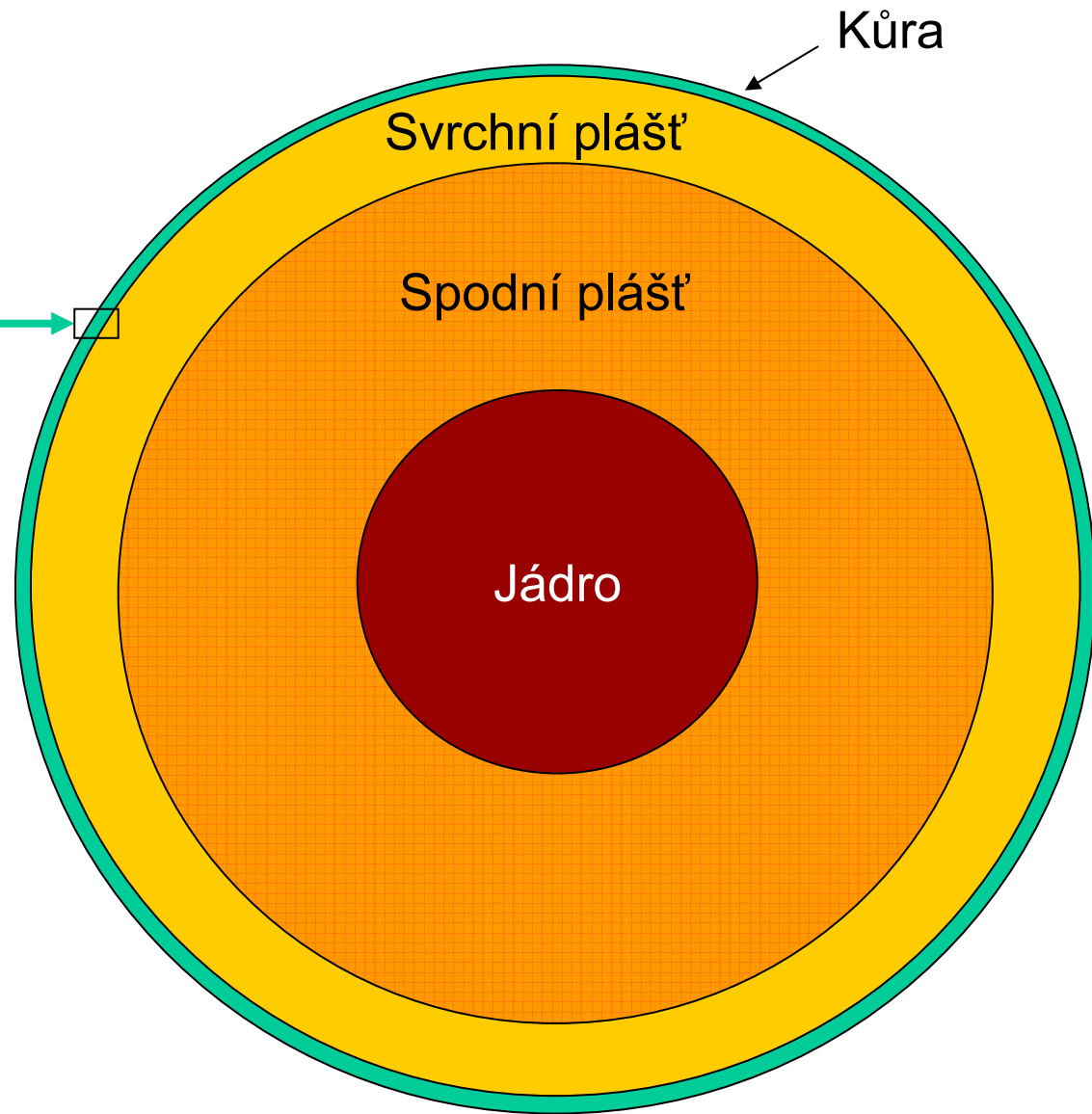
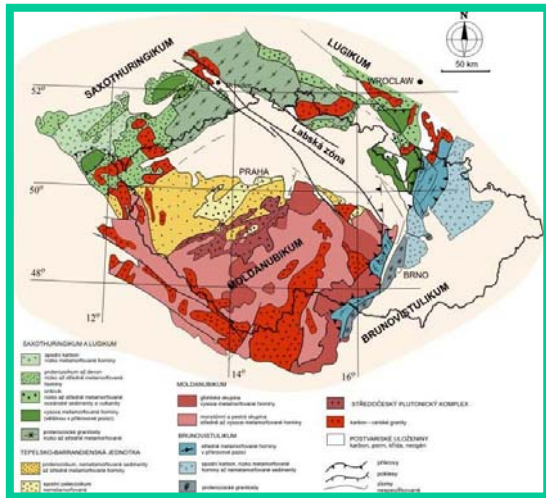


Model systému

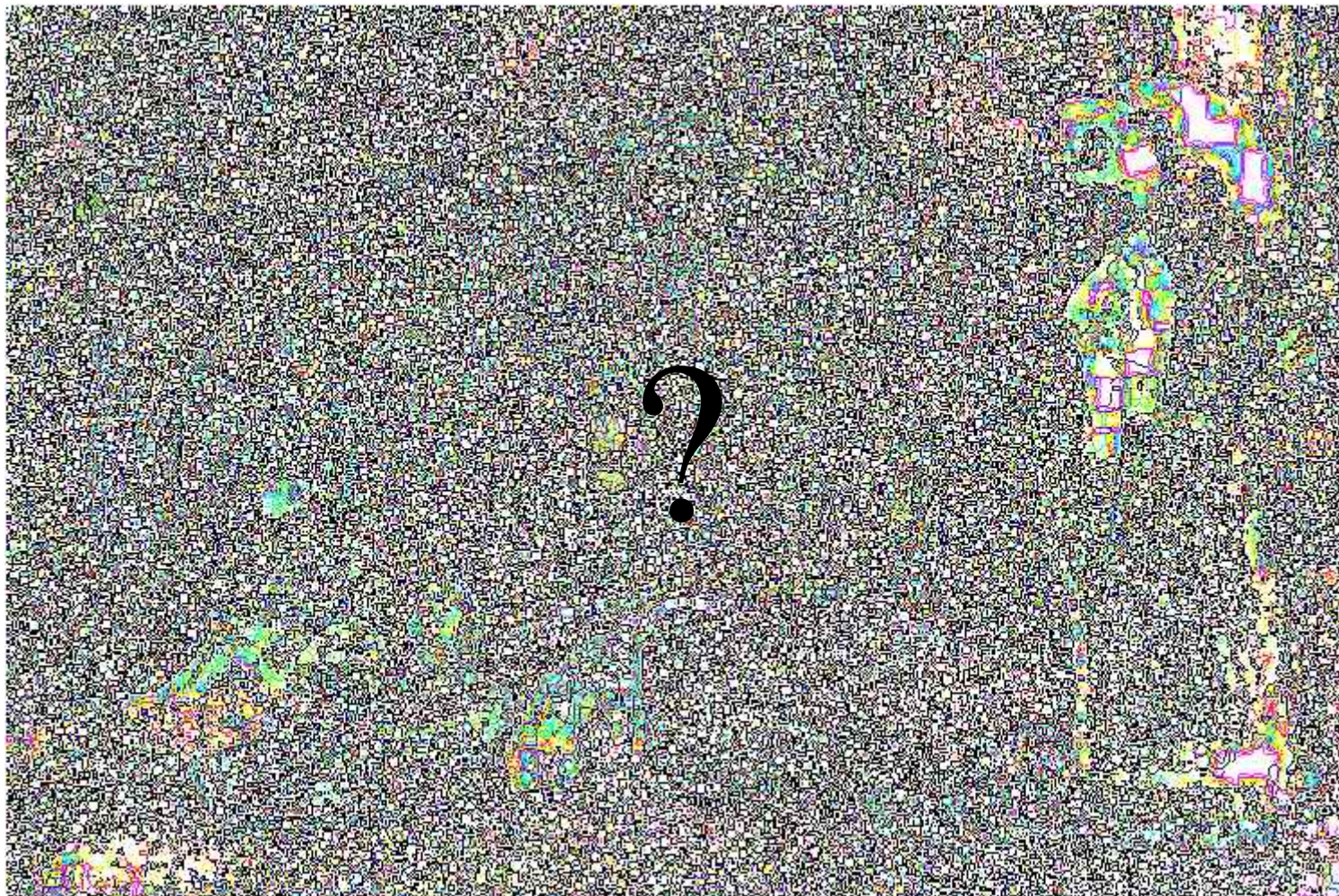


(Skoro) naprostý nedostatek informací
je základní metodické východisko
pro studium hluboké Země:

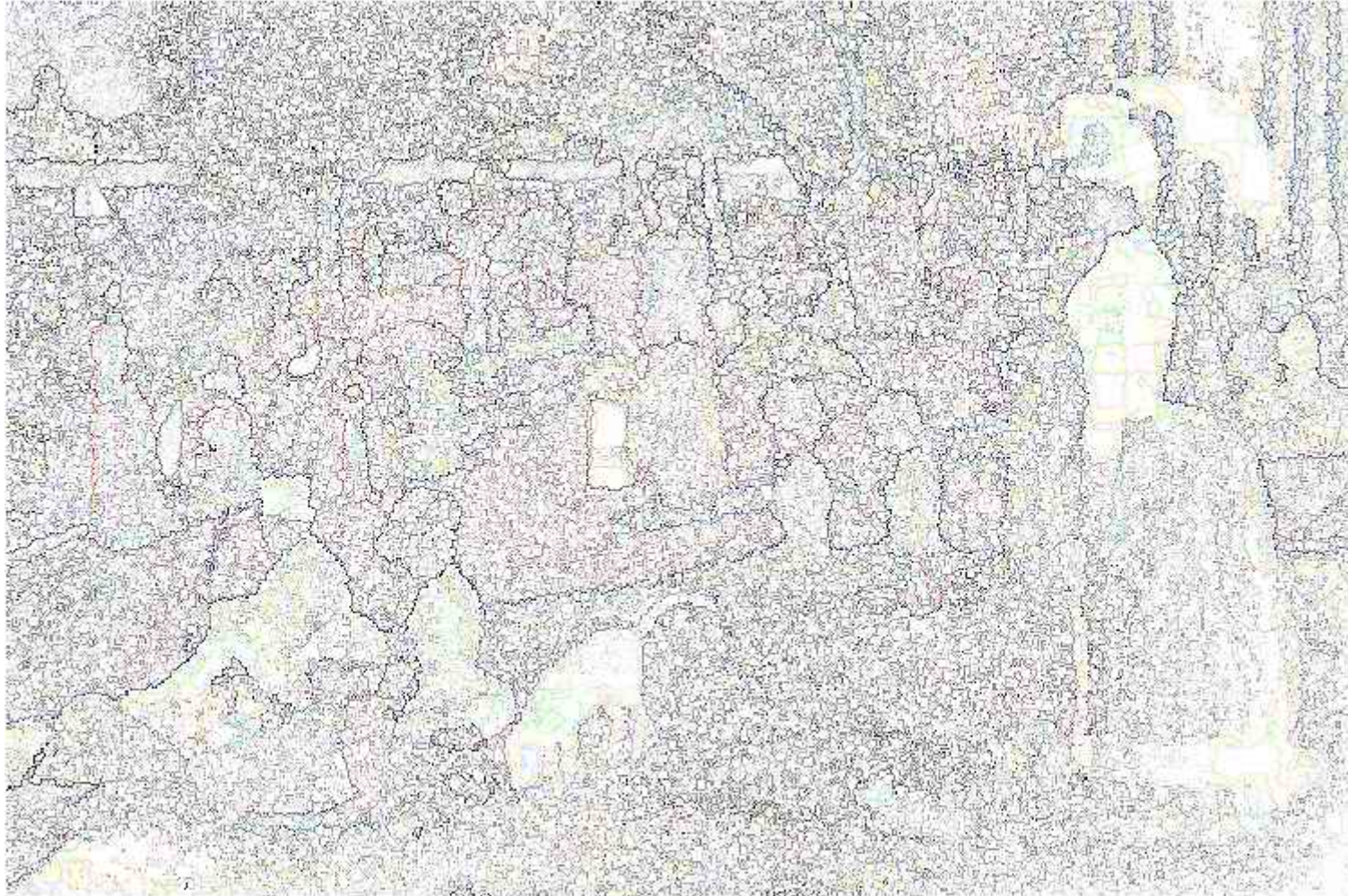


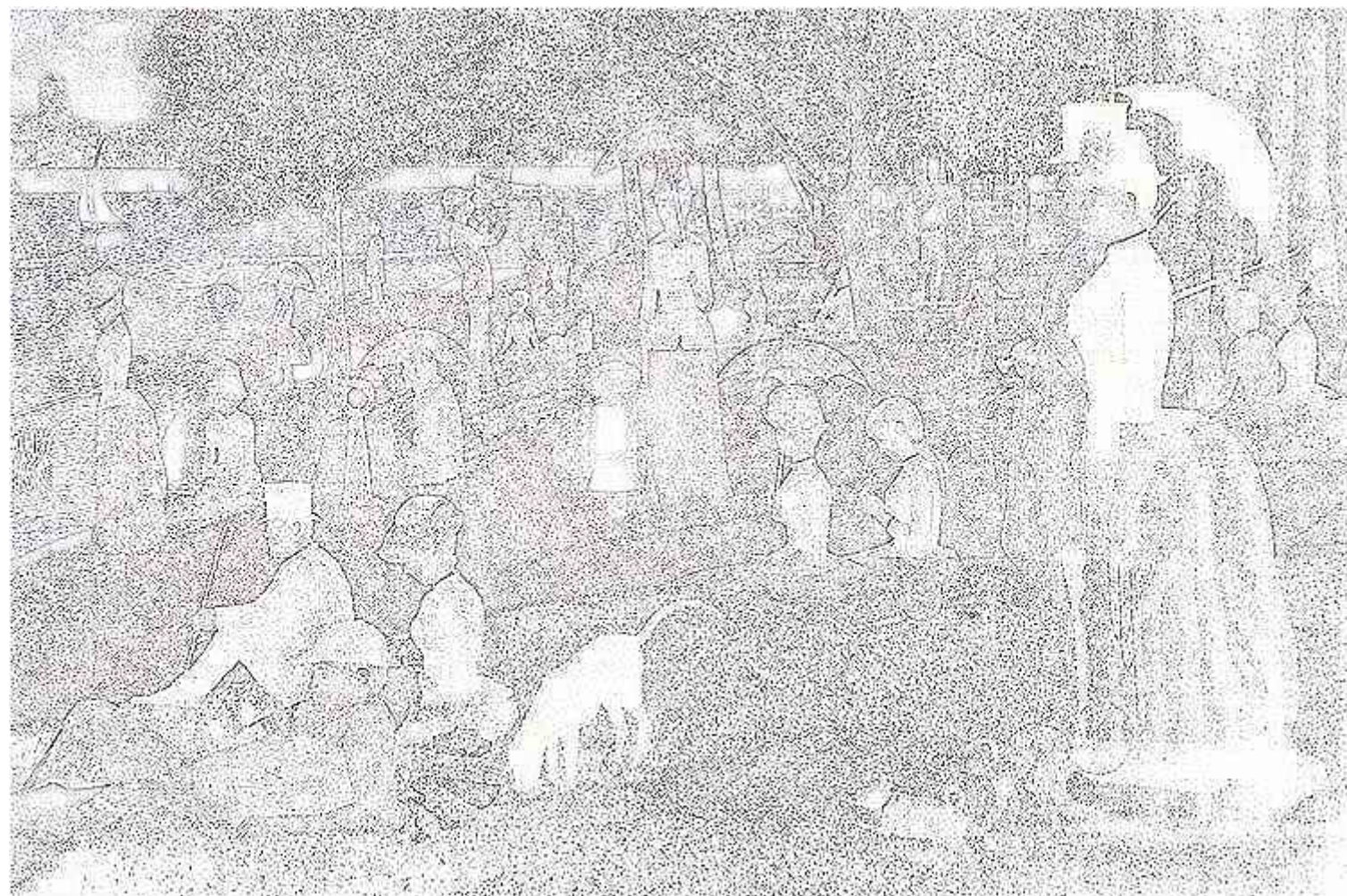


Geologických informací je až příliš mnoho...



...a jsou navíc zatemněny esoterickou terminologií.



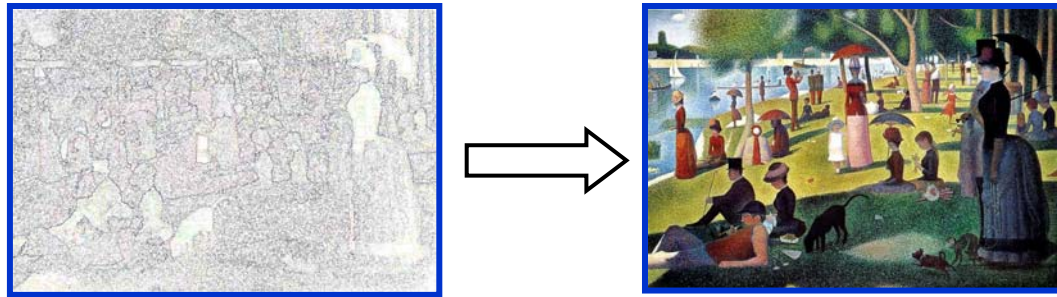






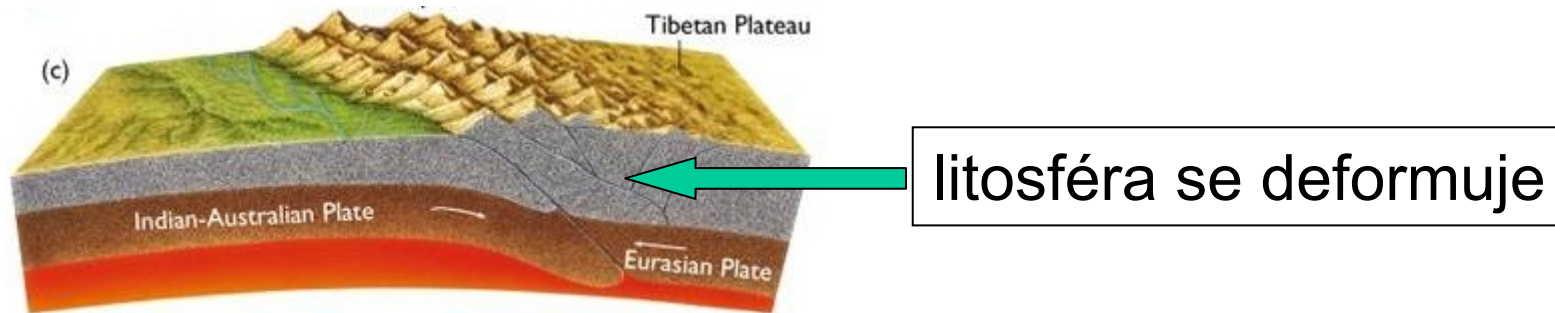


Jak pohlížet na geologická data, abychom jim byli schopni přiřadit fyzikální významy



1. Základním paradigmatem zůstává desková tektonika.
2. Vulkanismus vyžaduje teplo. Jeho složení indikuje hloubku, kde k tavení došlo.
3. Eroduje se to, co je výš, a sedimenty se ukládají tam, kde je to níž. Struktura a složení sedimentů vypovídají o tektonickém uspořádání a dalších procesech.
4. Přeměněné horniny vypovídají o p-T podmínkách, a mapují tedy konvekci v kůře resp. litosféře.

Desková tektonika a procesy v kůře



- kůra je silně heterogenní
- světlé horniny se mohou deformovat při podstatně nižších teplotách než plášťové horniny
- vysoká napětí → nízkoteplotní plasticita, křehké porušení
- vedle tradičních objemových sil hrají důležitou roli eroze – sedimentace a kontrakce – extenze

Vrásnění



~ 0.2 cm
—

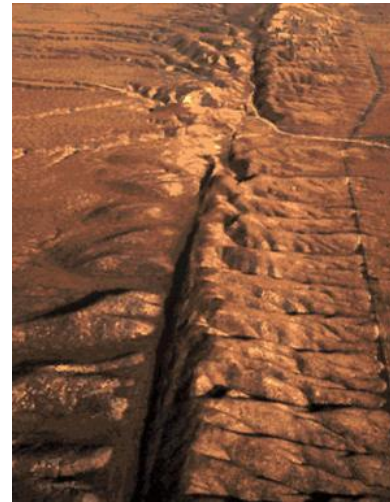


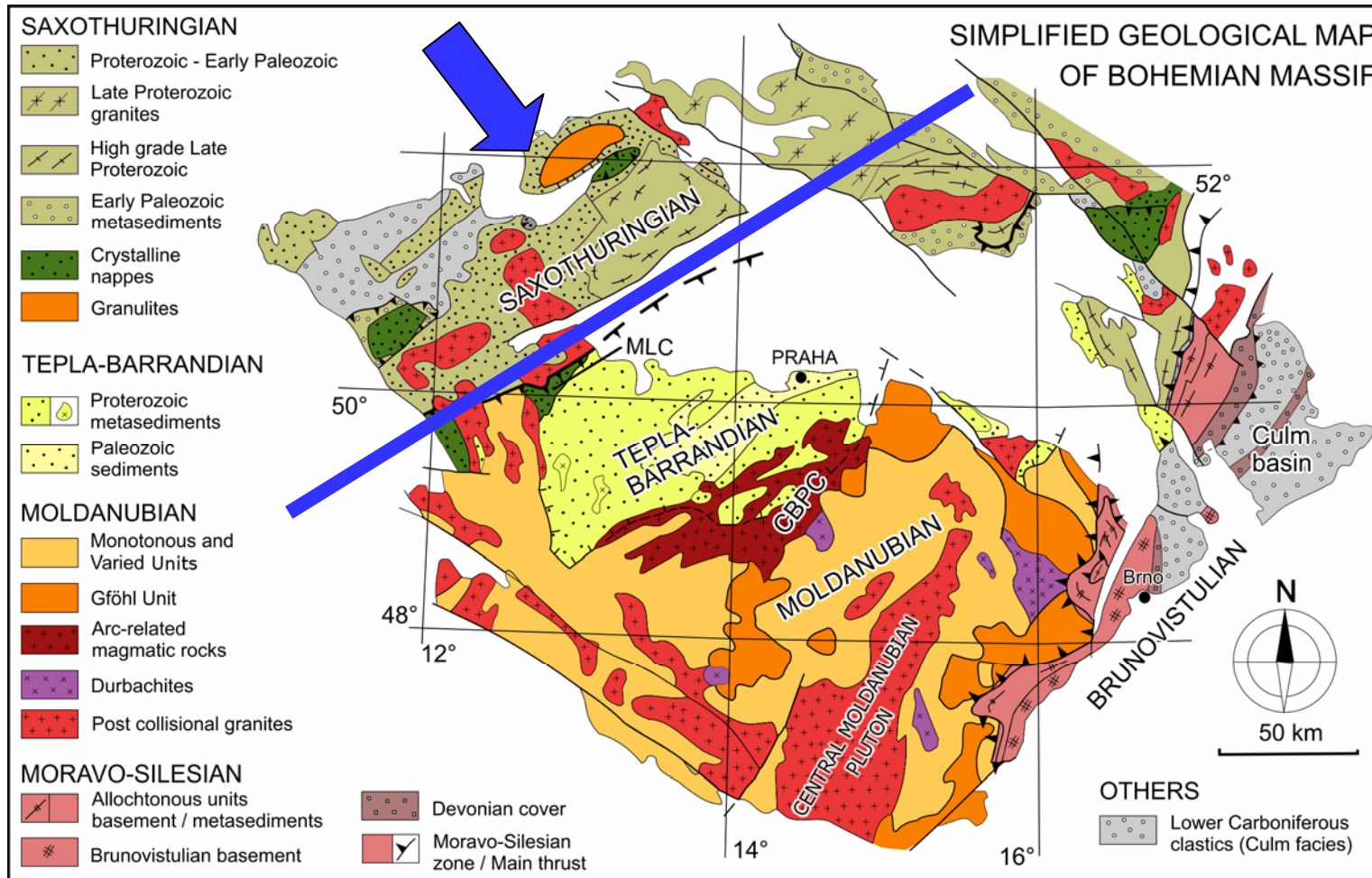
~ 0.2 m
—

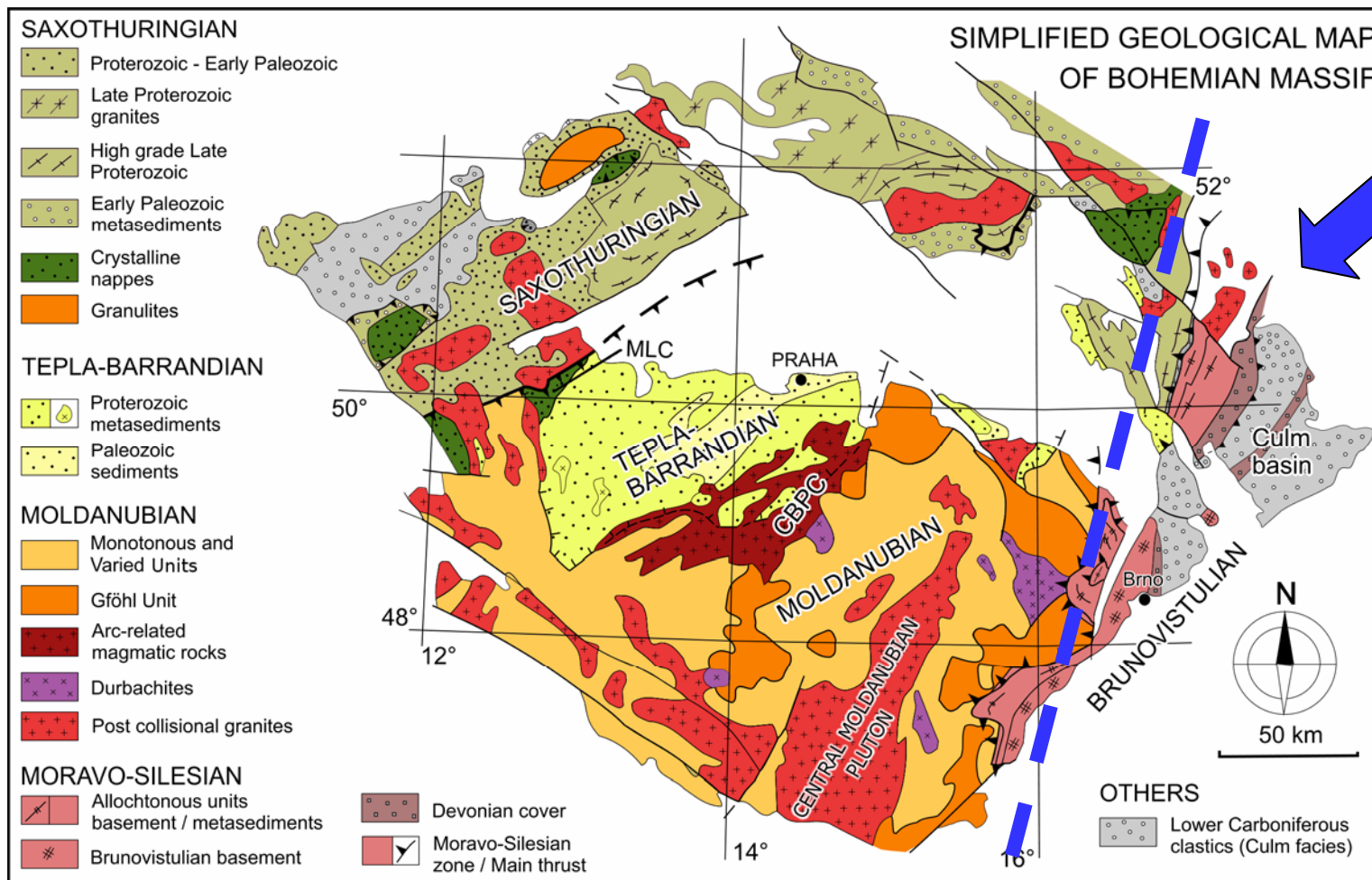


~ 2 m
—

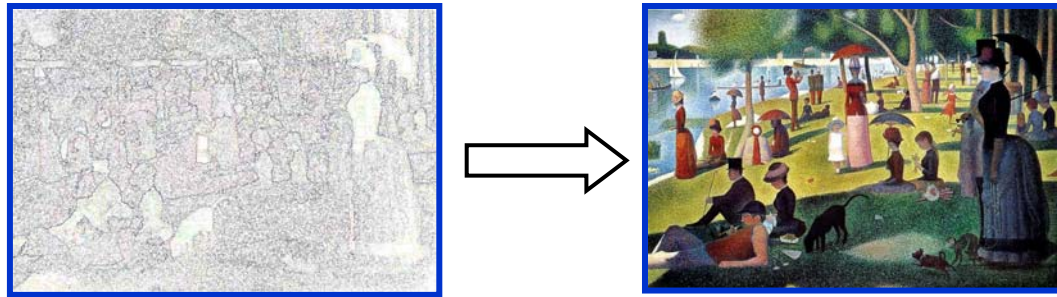
Křehká deformace





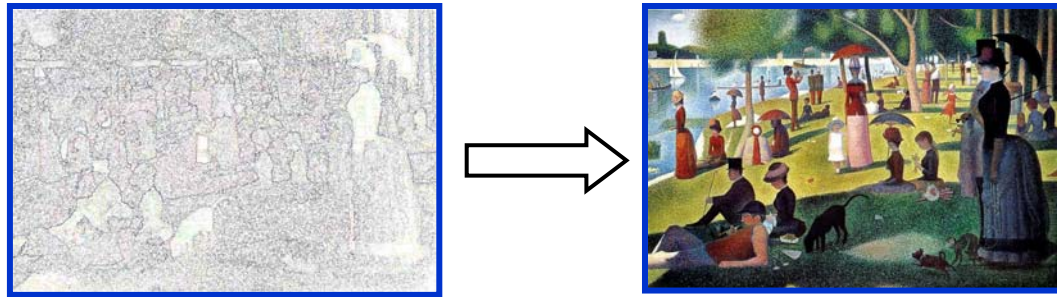


Jak pohlížet na geologická data, abychom jim byli schopni přiřadit fyzikální významy



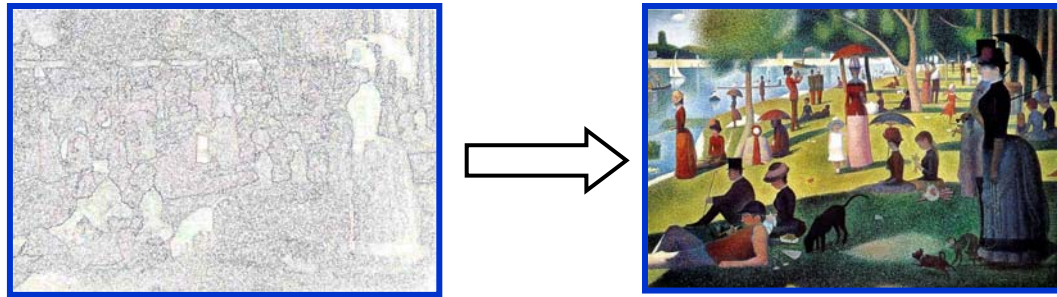
1. Základním paradigmatem zůstává desková tektonika.
2. Vulkanismus vyžaduje teplo. Jeho složení indikuje hloubku, kde k tavení došlo.
3. Eroduje se to, co je výš, a sedimenty se ukládají tam, kde je to níž. Struktura a složení sedimentů vypovídají o tektonickém uspořádání a dalších procesech.
4. Přeměněné horniny vypovídají o p-T podmínkách, a mapují tedy konvekci v kůře resp. litosféře.

Jak pohlížet na geologická data, abychom jim byli schopni přiřadit fyzikální významy

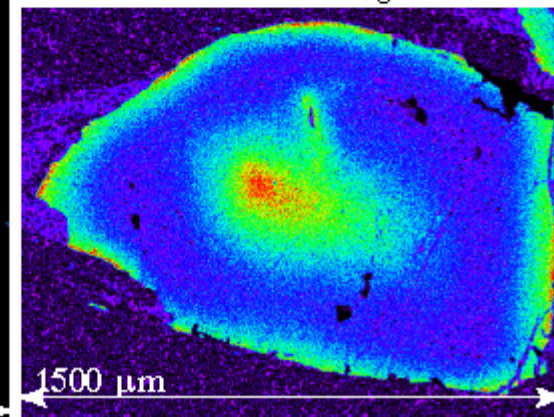
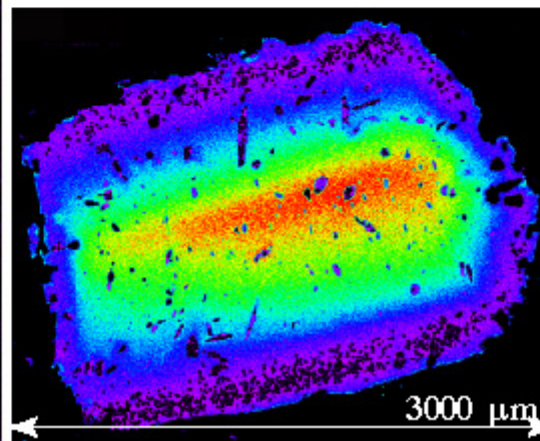
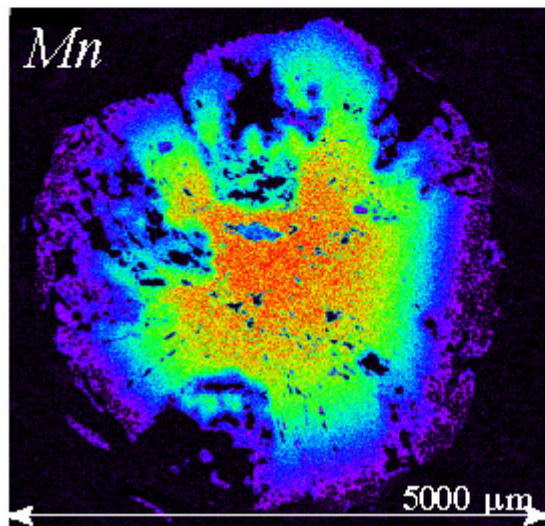
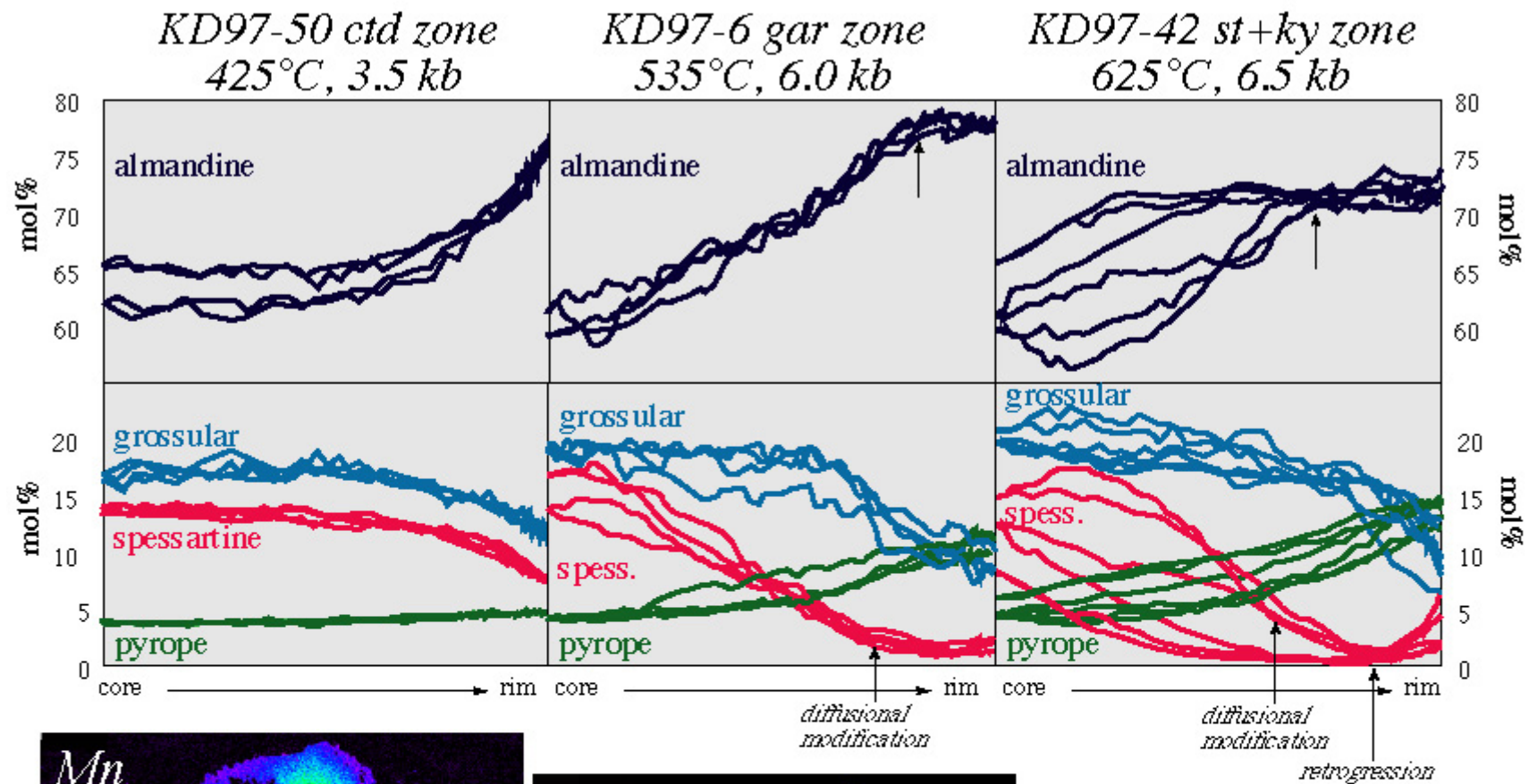


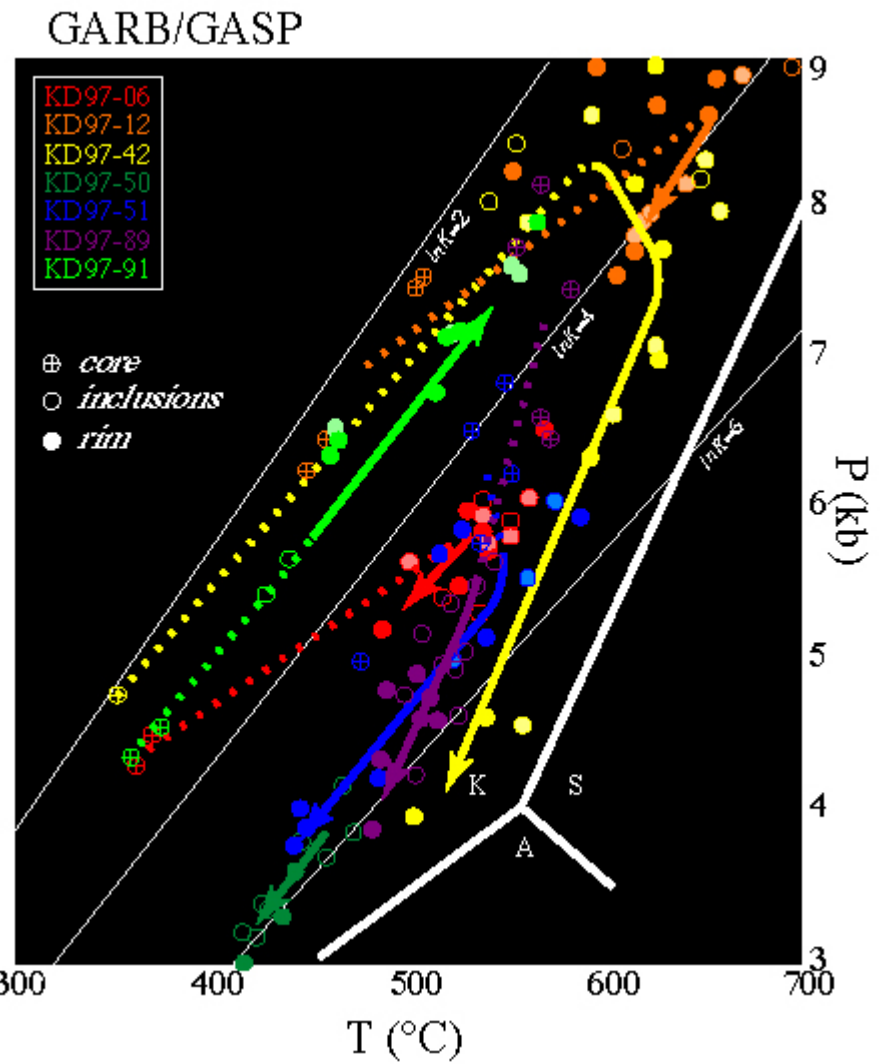
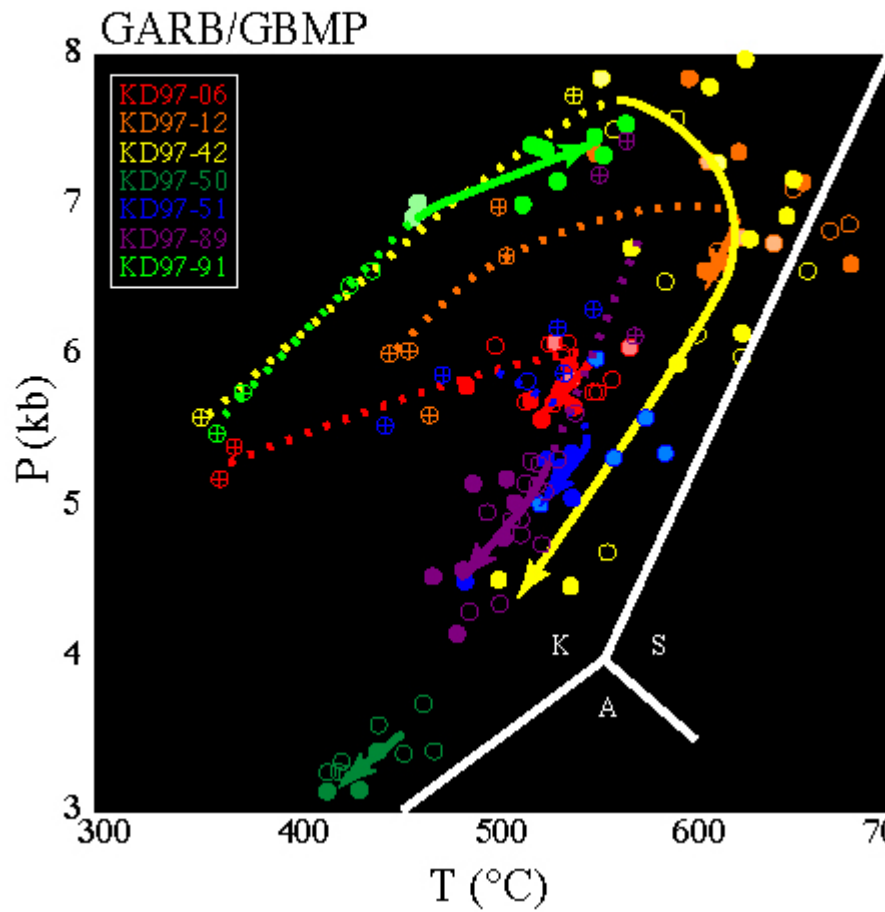
1. Základním paradigmatem zůstává desková tektonika.
2. Vulkanismus vyžaduje teplo. Jeho složení indikuje hloubku, kde k tavení došlo.
3. Eroduje se to, co je výš, a sedimenty se ukládají tam, kde je to níž. Struktura a složení sedimentů vypovídají o tektonickém uspořádání a dalších procesech.
4. Přeměněné horniny vypovídají o p-T podmínkách, a mapují tedy konvekci v kůře resp. litosféře.

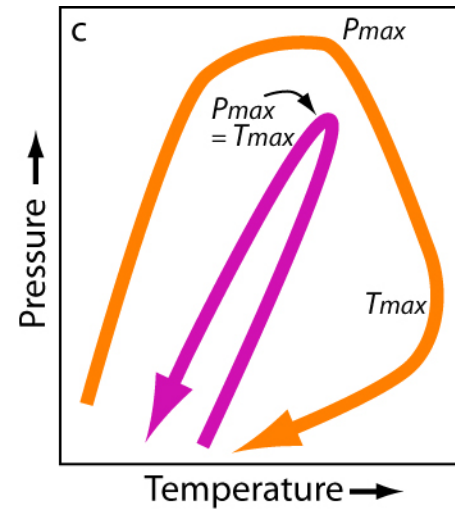
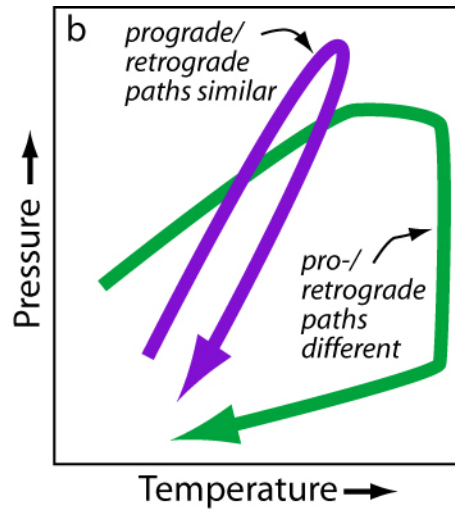
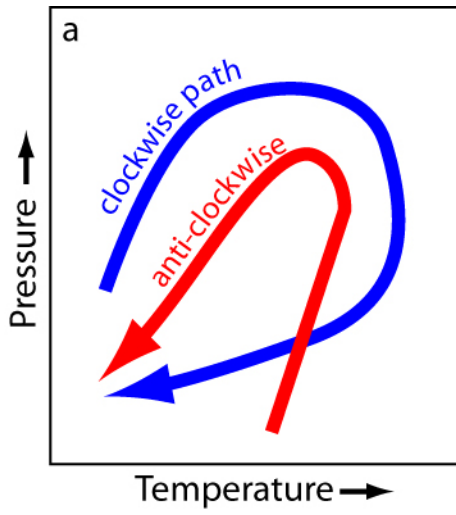
Jak pohlížet na geologická data, abychom jim byli schopni přiřadit fyzikální významy



1. Základním paradigmatem zůstává desková tektonika.
2. Vulkanismus vyžaduje teplo. Jeho složení indikuje hloubku, kde k tavení došlo.
3. Eroduje se to, co je výš, a sedimenty se ukládají tam, kde je to níž. Struktura a složení sedimentů vypovídají o tektonickém uspořádání a dalších procesech.
4. Přeměněné horniny vypovídají o p-T podmínkách, a mapují tedy konvekci v kůře resp. litosféře.



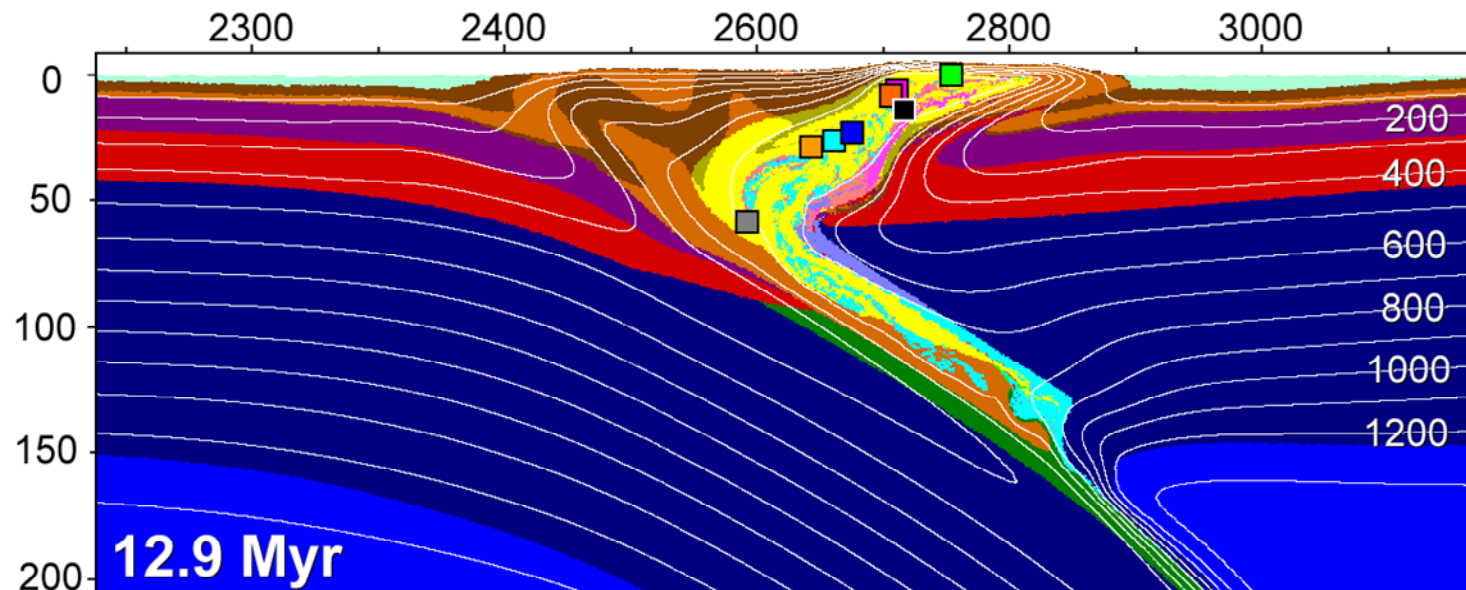




UHP rocks exhumation during incipient collision

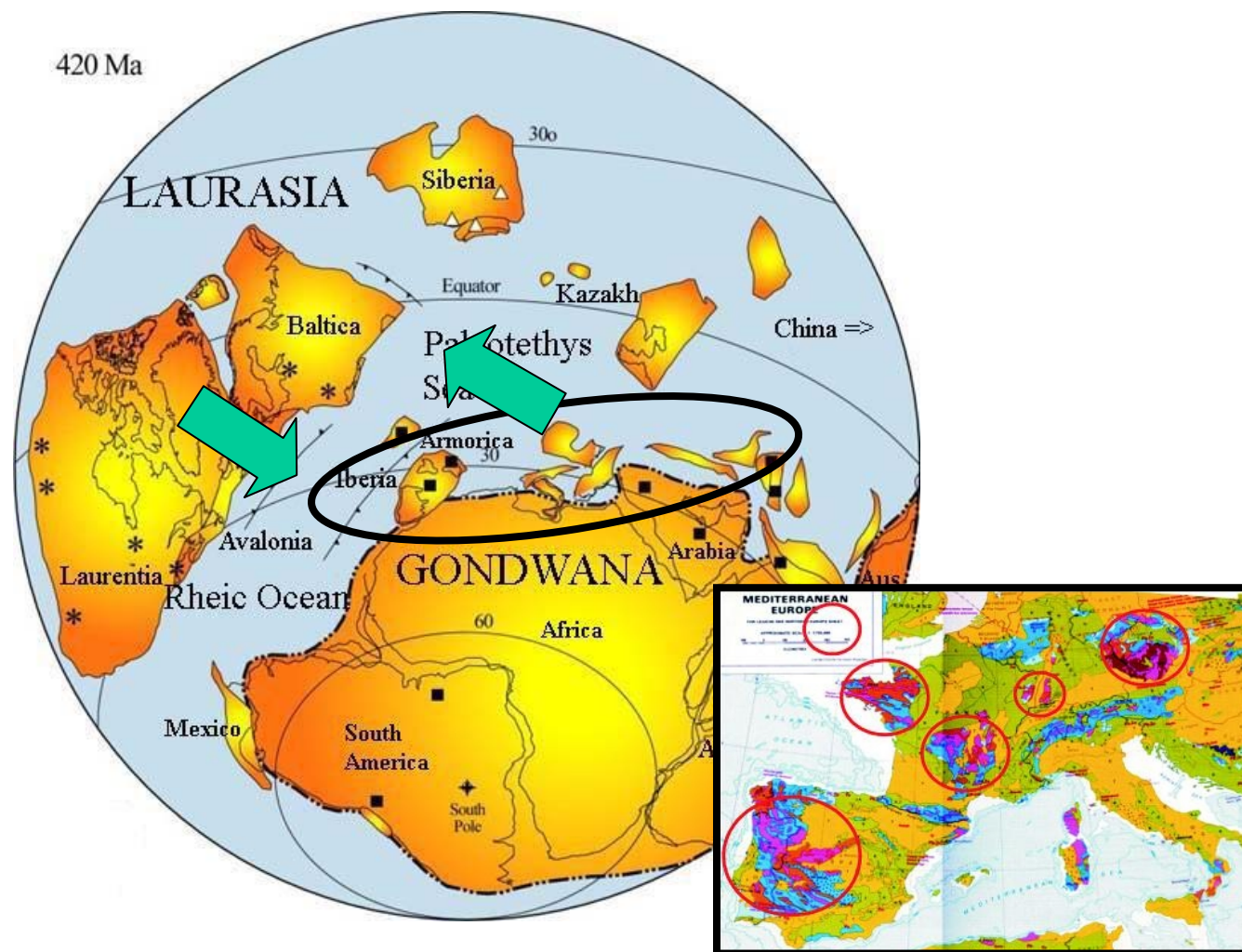
Gerya T.V., Perchuk, L.L., Burg J.-P. (2007) Transient hot channels: perpetrating and regurgitating ultrahigh-pressure, high temperature crust-mantle associations in collision belts. Lithos, doi: 10.1016/j.lithos.2007.09.017.

ftp://nazca.ethz.ch/tgerya/Reprints/Hot_Channel_LITHOS_1678_annotated.pdf









T. Gerya and co-workers

Rekonstrukce rozložení kontinentů před začátkem variské orogeneze





SIMPLIFIED GEOLOGICAL MAP OF BOHEMIAN MASSIF






SAXOTHURINGIAN

-  Proterozoic - Early Paleozoic
-  Late Proterozoic granites
-  High grade Late Proterozoic
-  Early Paleozoic metasediments
-  Crystalline nappes
-  Granulites



TEPLA-BARRANDIAN



-  Proterozoic metasediments
-  Paleozoic sediments

MOLDANUBIAN


-  Monotonous and Varied Units
-  Gföhl Unit
-  Arc-related magmatic rocks
-  Durbachites
-  Post collisional granites

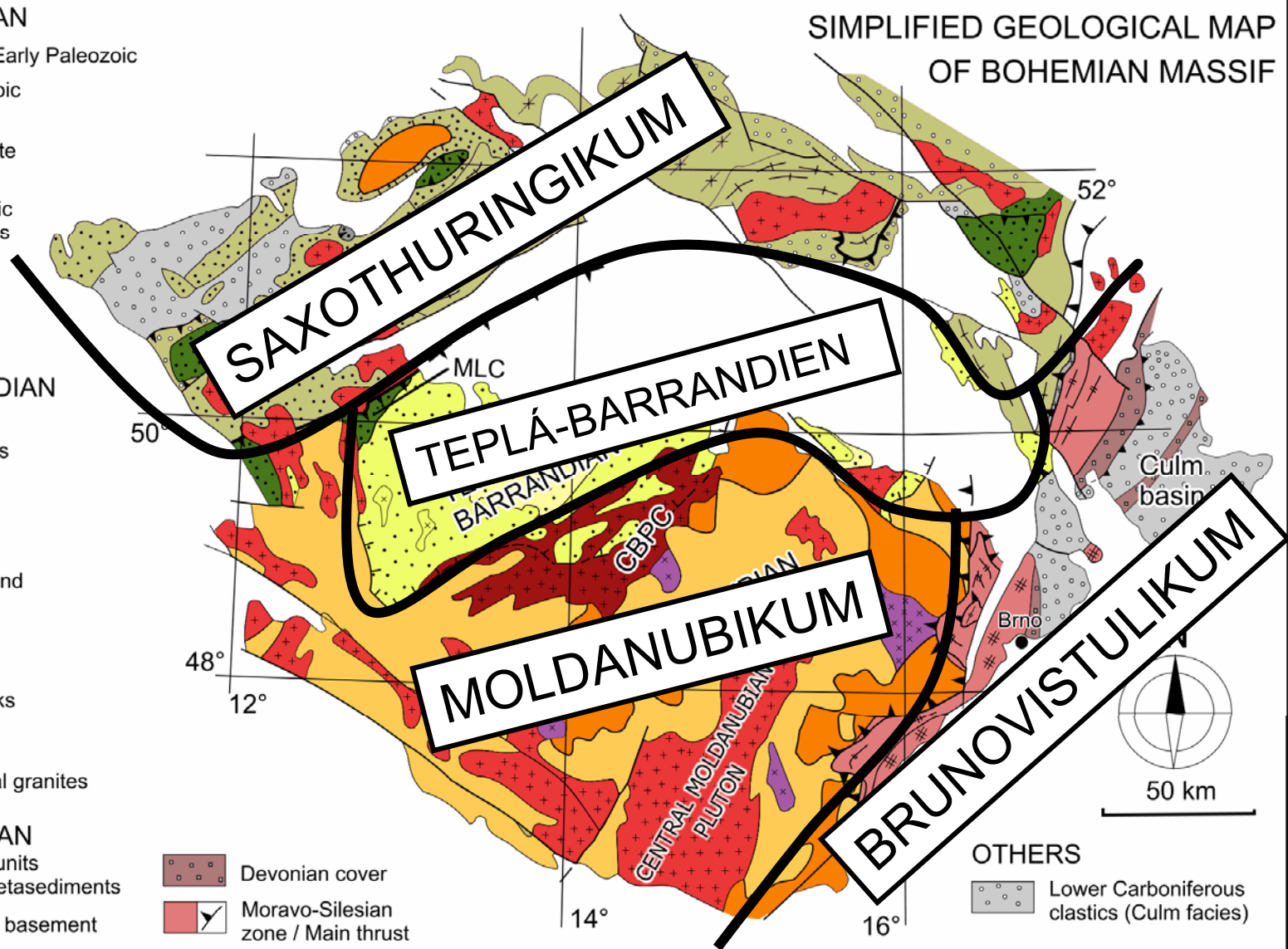
MORAVO-SILESIA

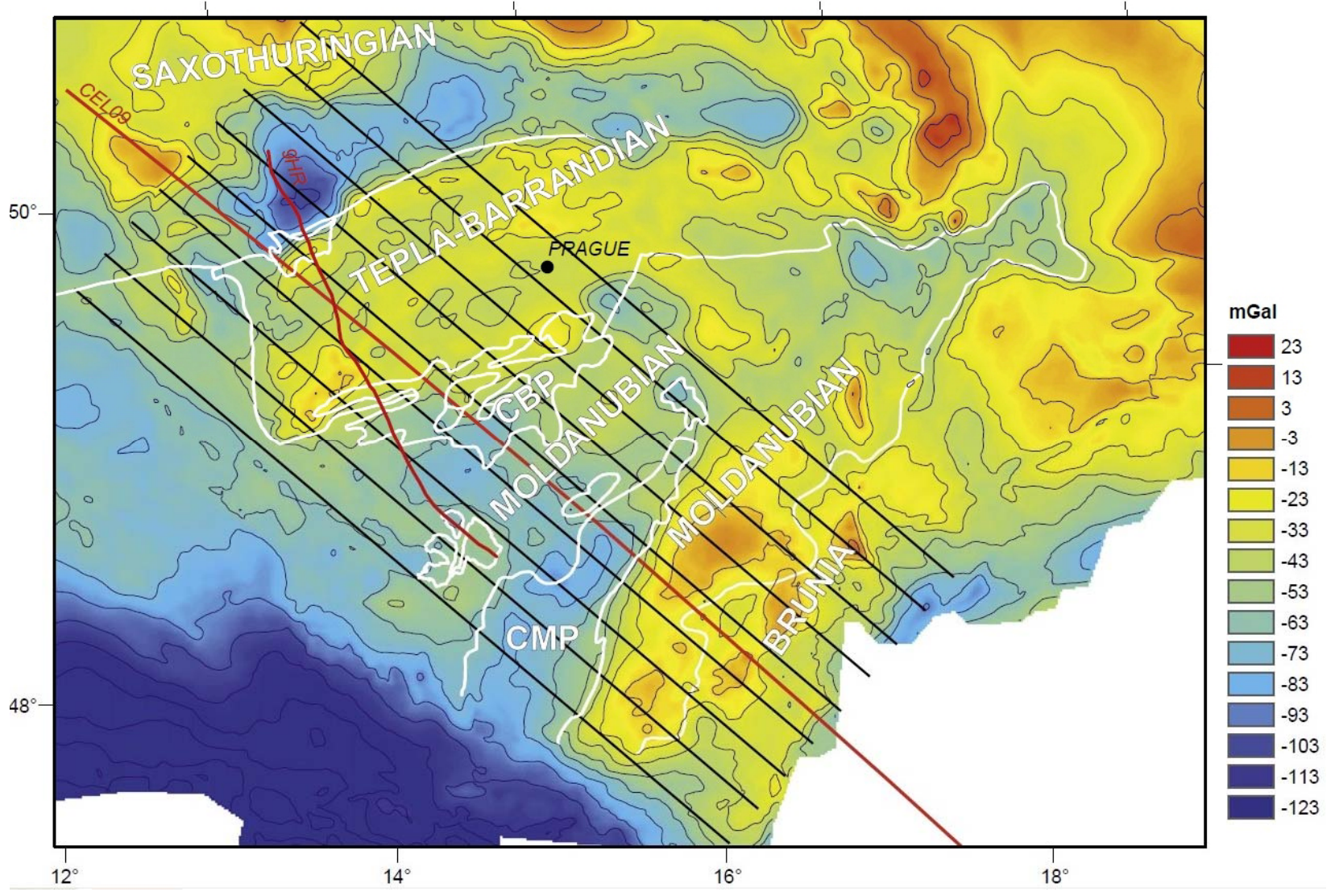
-  Allochthonous units basement / metasediments
-  Brunovistulian basement

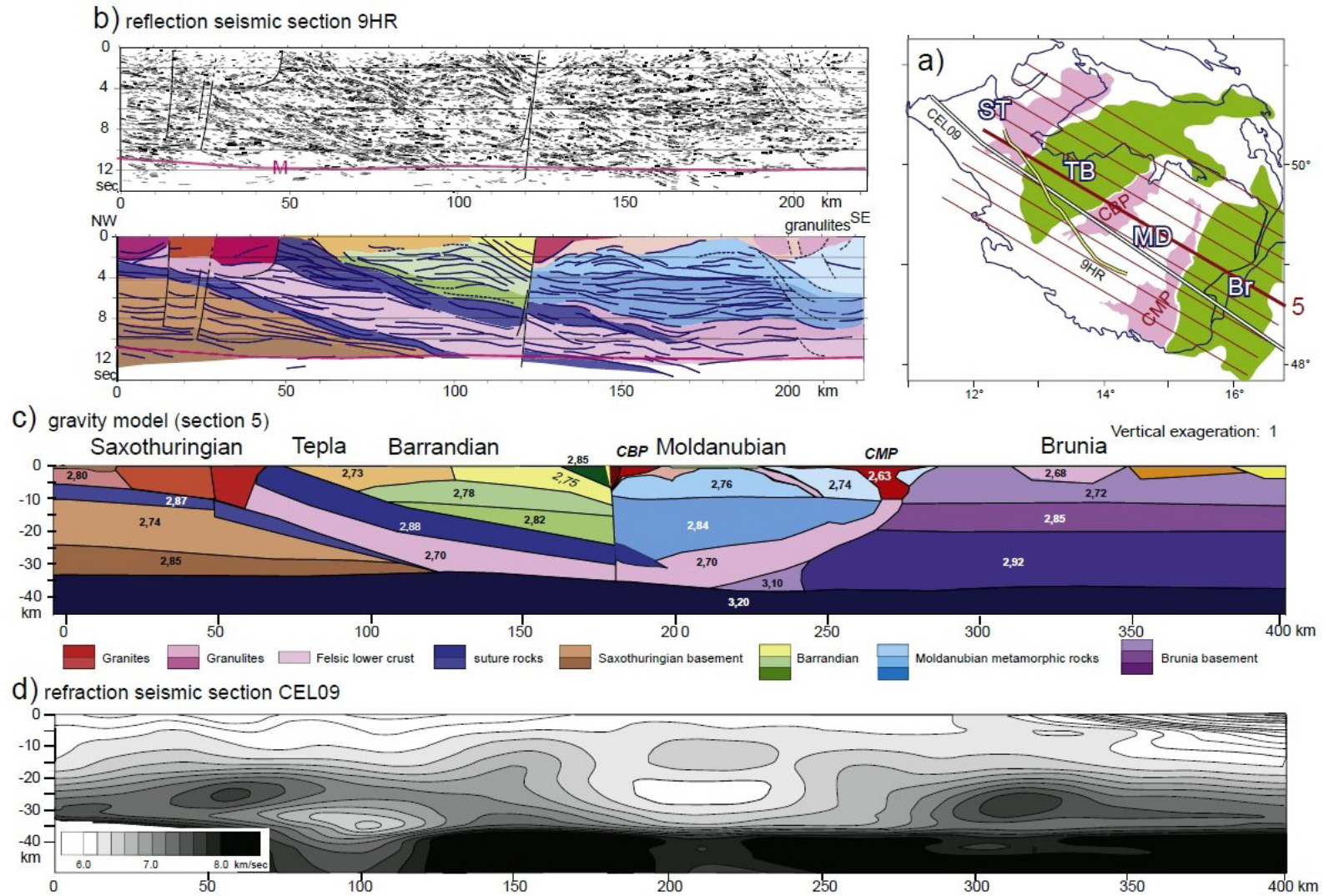
-  Devonian cover
-  Moravo-Silesian zone / Main thrust

OTHERS

-  Lower Carboniferous clastics (Culm facies)



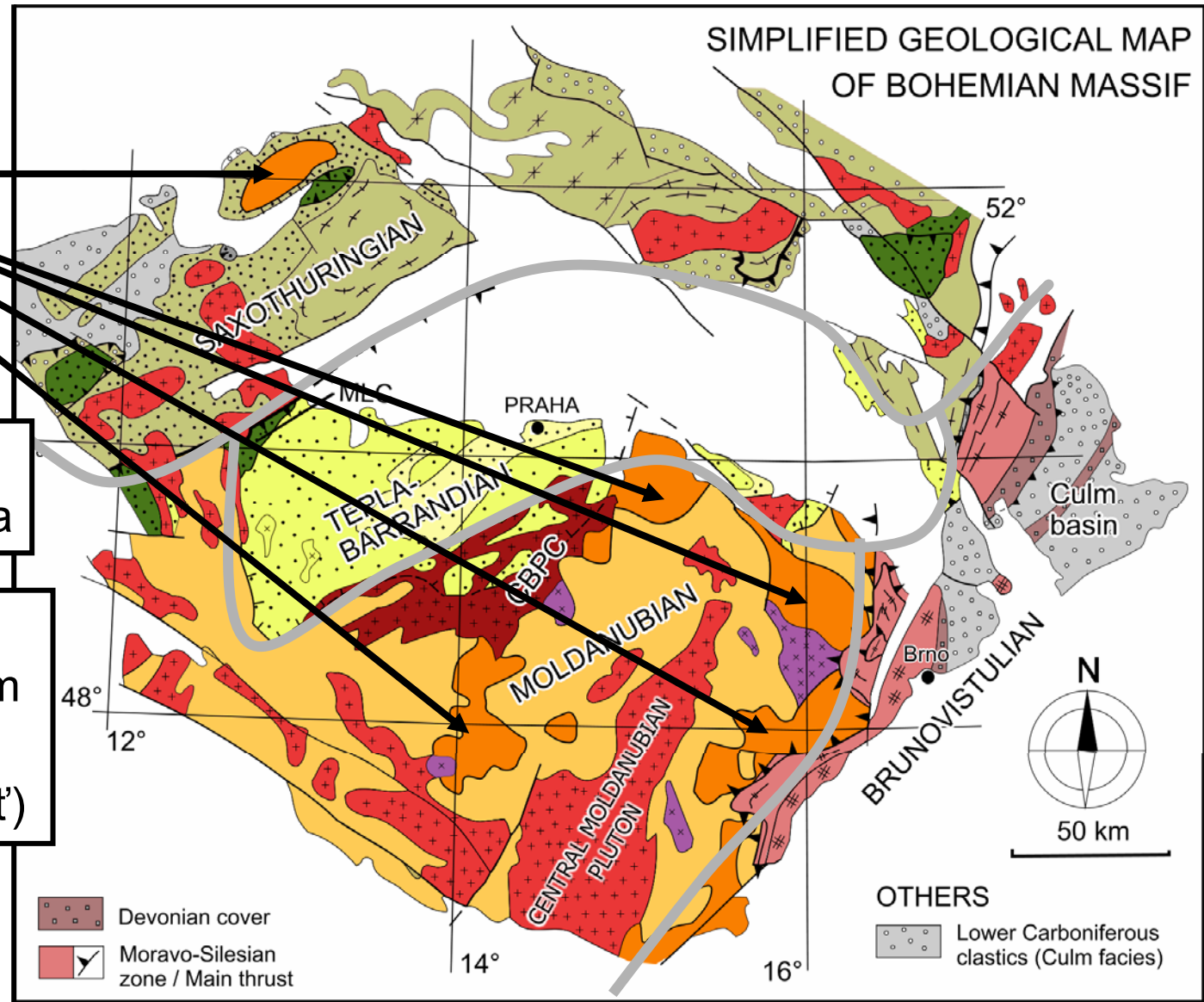




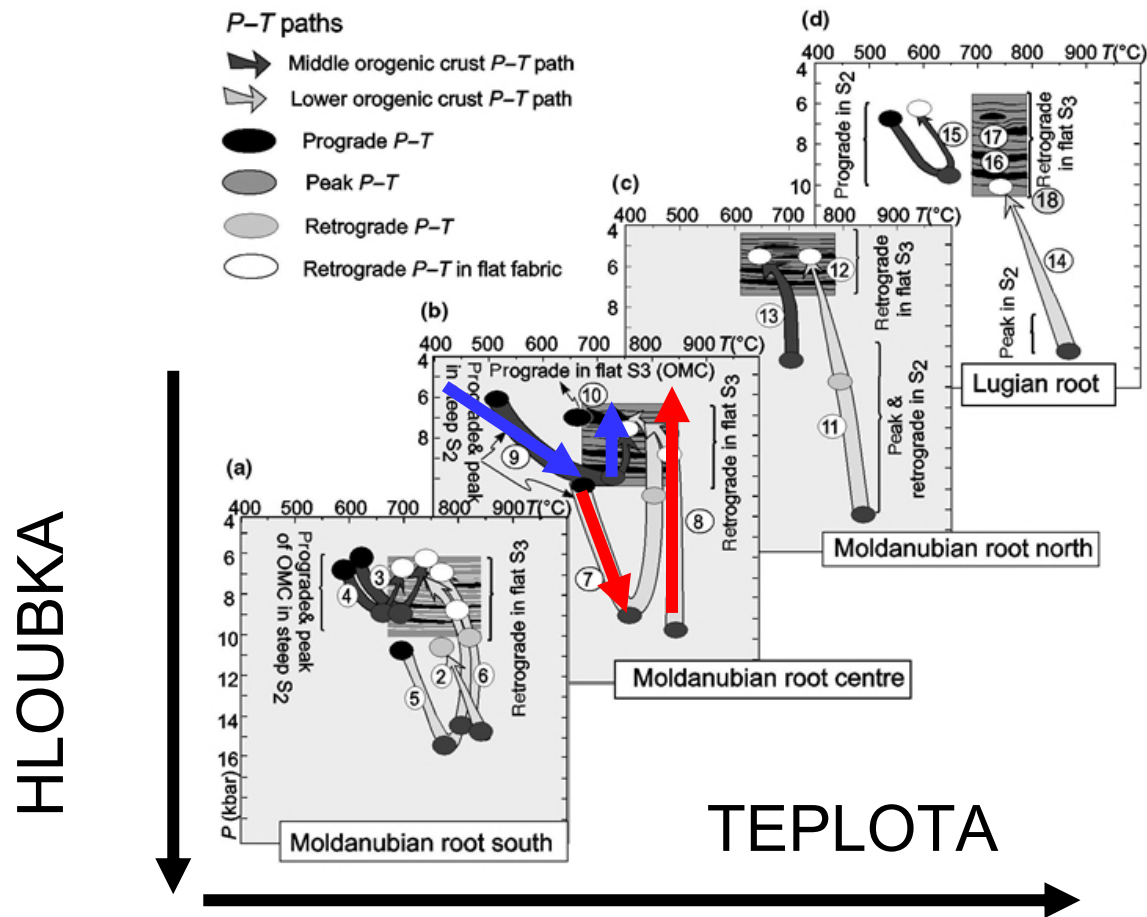
exhumovaná spodní kůra

granulity
gřohlská jednotka

stáří 340 Ma
hloubka 50-60 km
teplota > 800°C
+ peridotity (plášť)



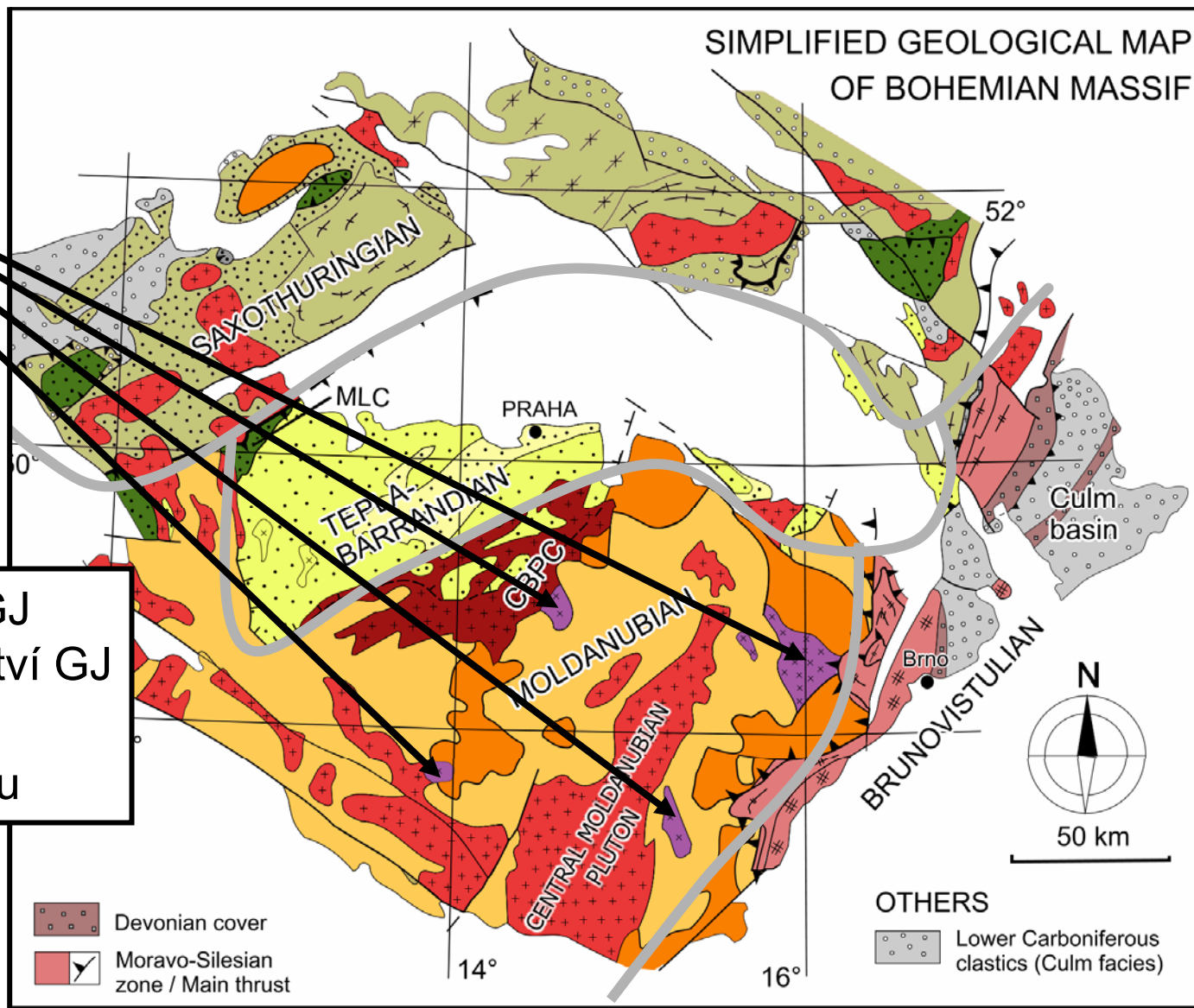
- Existence světlých granulitů a jejich P-T křivky: Granulity tvořily původně svrchní kůru ST, byly zataženy do hloubky až 60 km, zahřáty na cca 900 °C a vyneseny k povrchu.



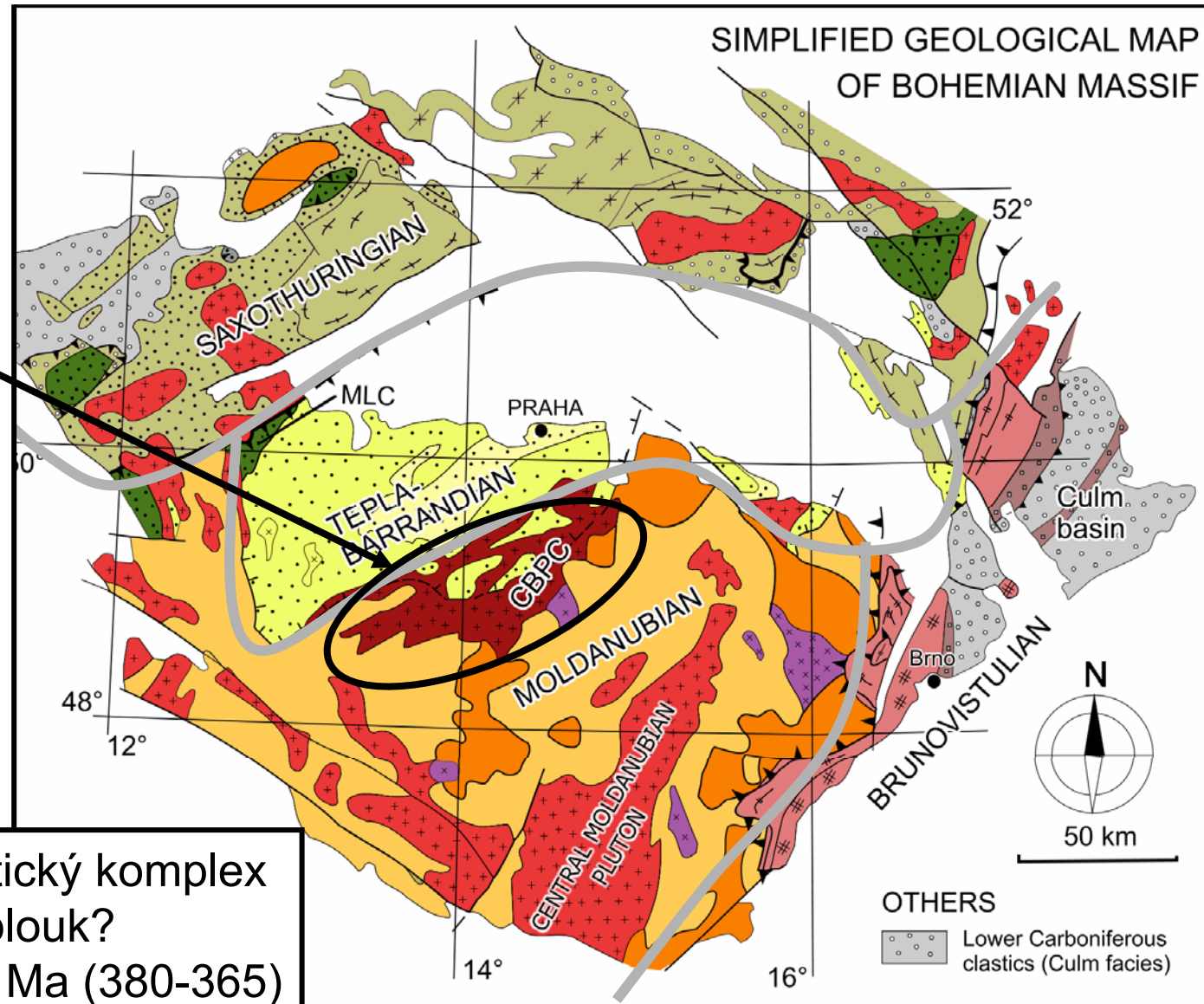
„durbachity“



- stáří podobné GJ
- vždy v sousedství GJ
- obsahuje plášťovou složku



Středočeský pluton

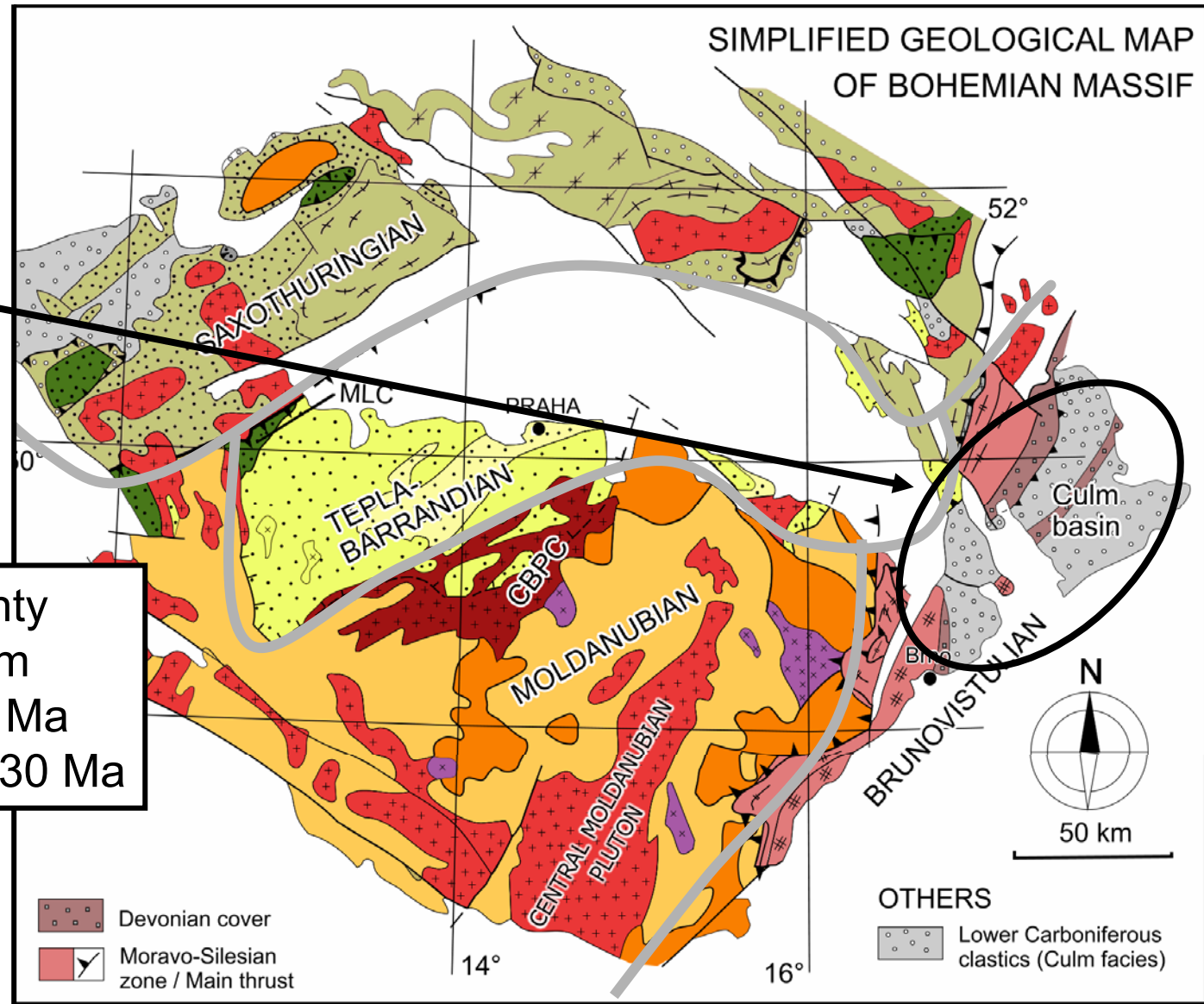


- složitý magmatický komplex
- magmatický oblouk?
- stáří ~360-335 Ma (380-365)
- umístění mezi T-B a M

SIMPLIFIED GEOLOGICAL MAP OF BOHEMIAN MASSIF

KULM

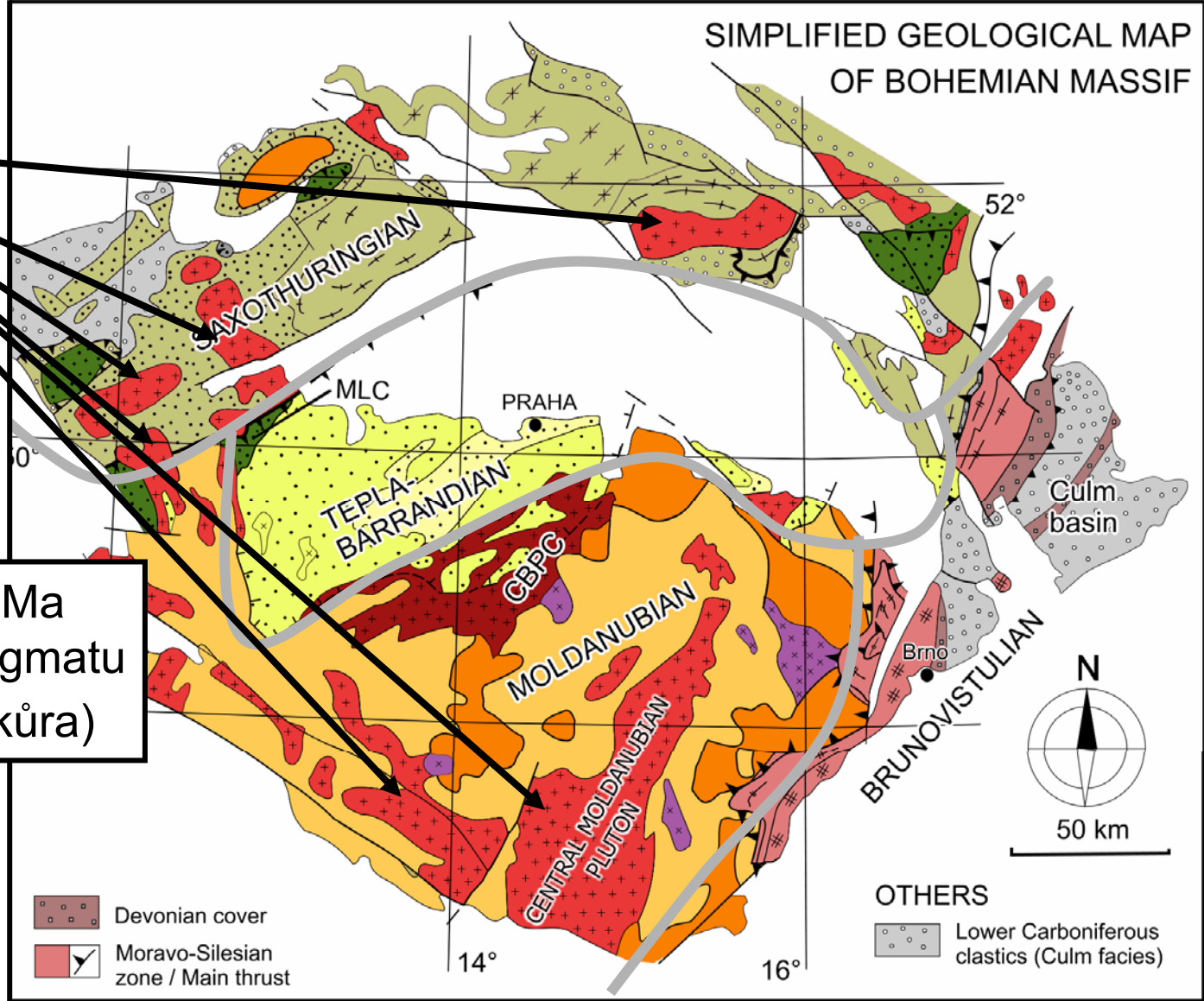
- flyšové sedimenty
- mocnost až 8 km
- stáří ~ 345-315 Ma
- granulity od ~ 330 Ma



pozdně variský magmatismus

SIMPLIFIED GEOLOGICAL MAP OF BOHEMIAN MASSIF

- stáří ~ 335-300 Ma
- velký objem magmatu
- světlé horniny (kůra)



Brunovistulian rifting

Saxothuringian
sedimentation

Barrandian
sedimentation

MLC metamorphism

CBP

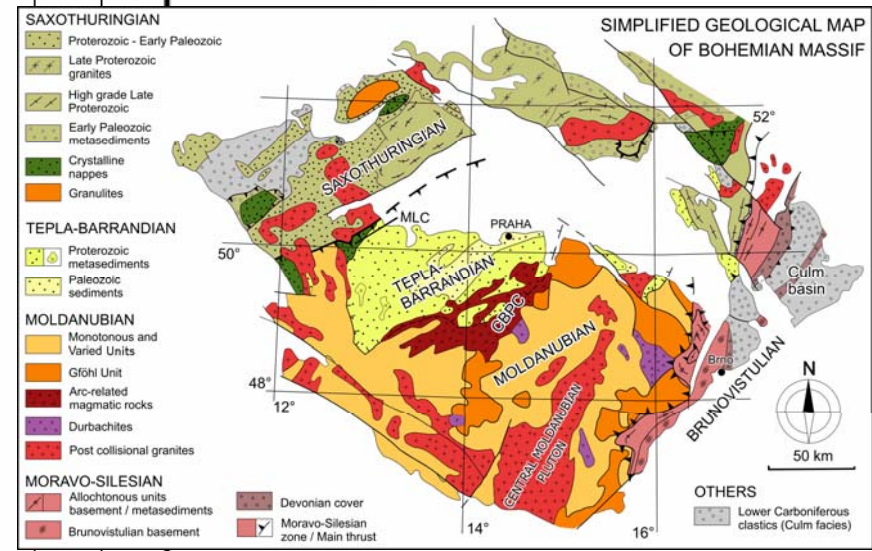
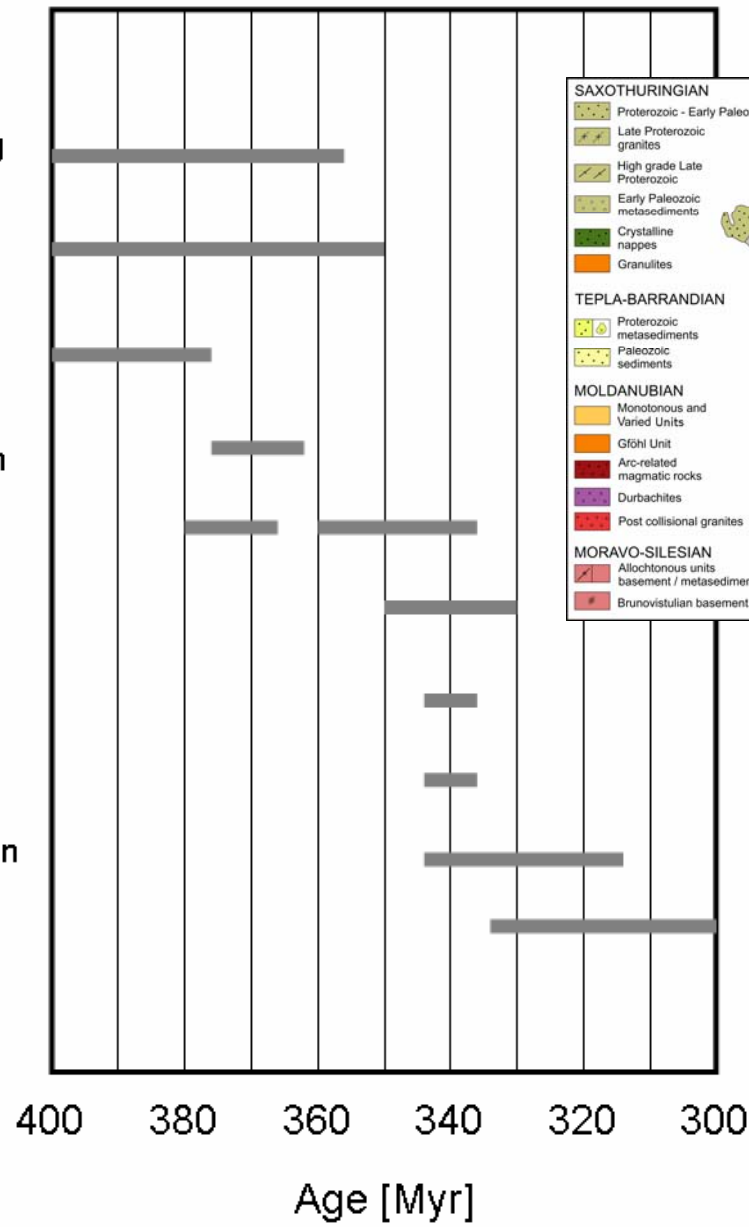
Elevator tectonics

Granulites

Durbachites

Flysch sedimentation

Late magmatism



CO VÍME

- oceánská a později kontinentální subdukce ST desky pod T-B a M; časové mezníky: cca 370 a 350 Ma
- první fáze vulkanismu (360-335 Ma) v centrální části na hranici T-B a M
- 345 Ma: vznik orogenu a počátek sedimentace (Culm)
- 340 Ma: exhumace spodní kůry (granulity) a vznik durbachitů
- cca 340-325 Ma: metamorfóza a deformace ve směru SSV-JJZ ve východní části ČM
- 330: granulity v sedimentech Culmu
- 335-300 Ma: druhá fáze vulkanismu, tentokrát spíše v periferních oblastech

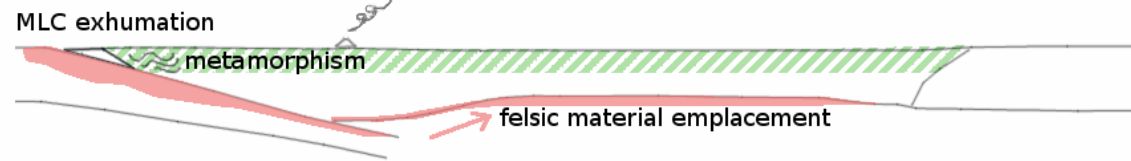
???

- přesnější chronologie
- vztah TB a M
- vulkanický oblouk nebo spíše souvisí s gravitačním kolapsem?
- proč současně na různých místech a proč tak rychle?
- vztah granulitů a durbachitů
- typ procesu: kontinentální kolize (subdukce?) na východě nebo důsledek delaminace?
- důsledek předchozích procesů nebo delaminace litosféry?

1) oceanic subduction (400?-380 Ma)



2) continental subduction (380-370 Ma)



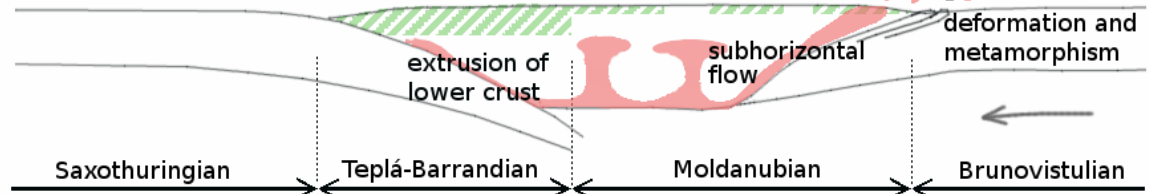
3) compressional stage (370-340 Ma)



4) turnover event (340 Ma)



5) indentation (340-325 Ma)



Saxothuringian

Teplá-Barrandian

Moldanubian

Brunovistulian

PŘEDPOKLÁDÁME

- přítomnost silně radioaktivní ST svrchní kůry na bázi M kůry na počátku (370 Ma)
- kompresi v důsledku subdukce na západě v první fázi
- indentaci Brunie na východě v druhé fázi

CHCEME VYSVĚTLIT

- vznik orogenu cca 345 My
- P-T podmínky vzniku granulitů a jejich rychlou exhumaci (340 Ma)
- deformační obraz pozorovaný v strukturně geologickém záznamu (horizontální kanálové tečení 340 Ma později)
- podmínky umožňující pozdní vulkanismus
- rozdíly mezi T-B a M

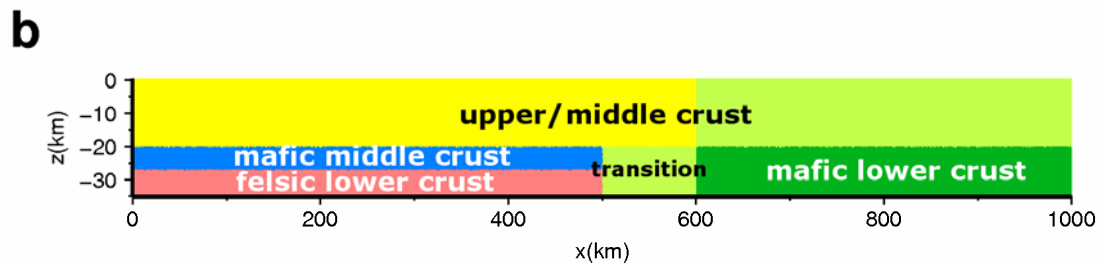
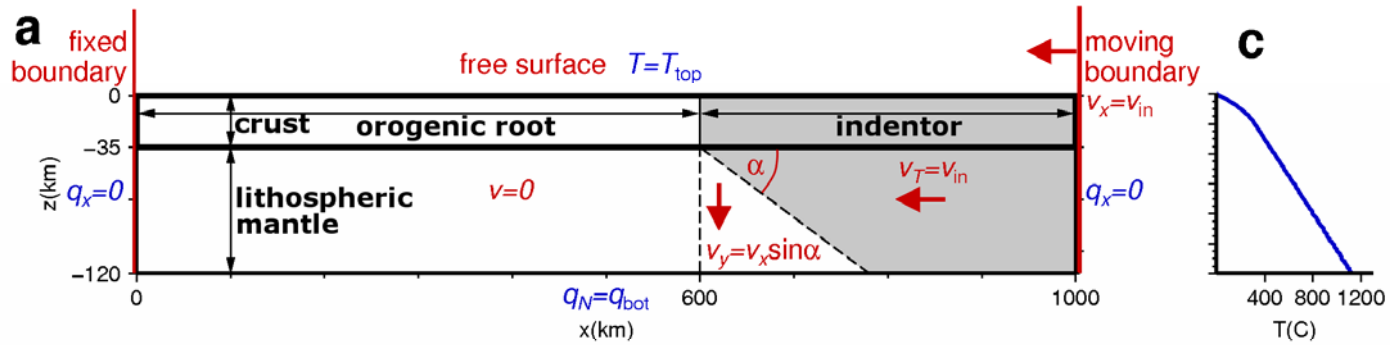
Model: *Petra Maierová*

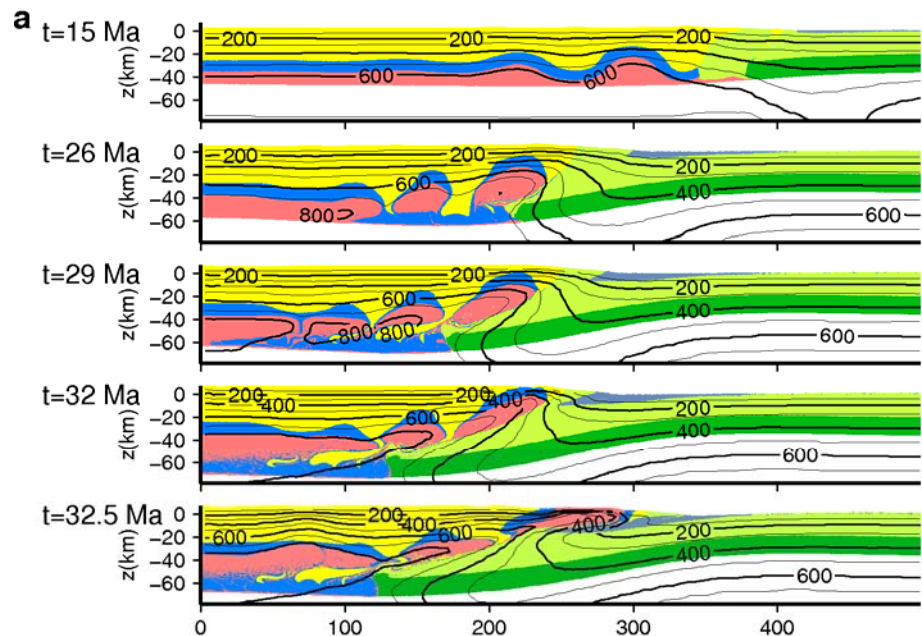
Metoda: konečné elementy (Elmer)

Ingredience:

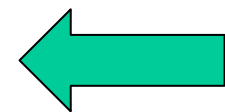
- volný povrch a proměnné hranice
- multifázový systém → markery
- eroze – sedimentace
- křehké porušení
- nelineární tečení (s vazbou na radiogenní zdroje a tavení)
- izostáze

Omezení: 2D, nezahrnuje lokální elasticitu, magmatismus je silně zjednodušen, petrologie nezávisí na PT

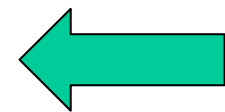




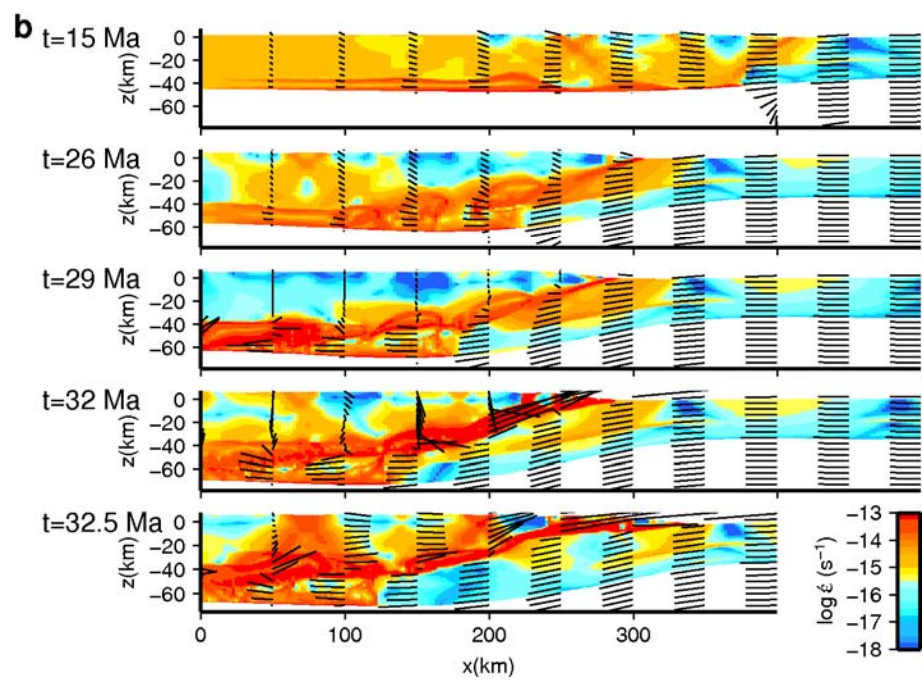
Začátek: 370 Myr

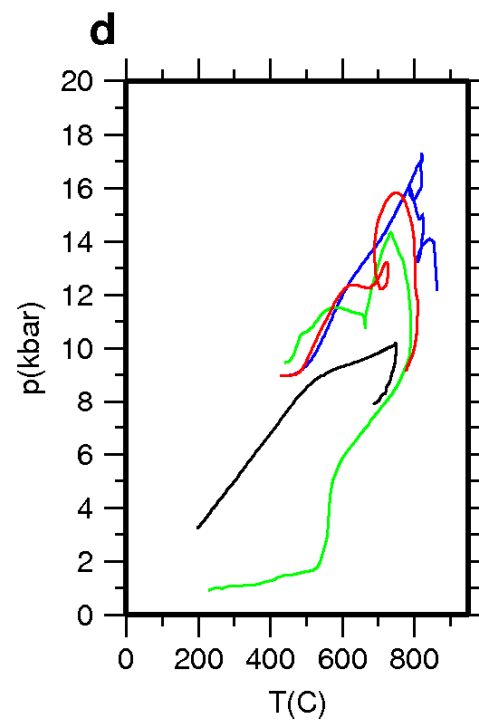
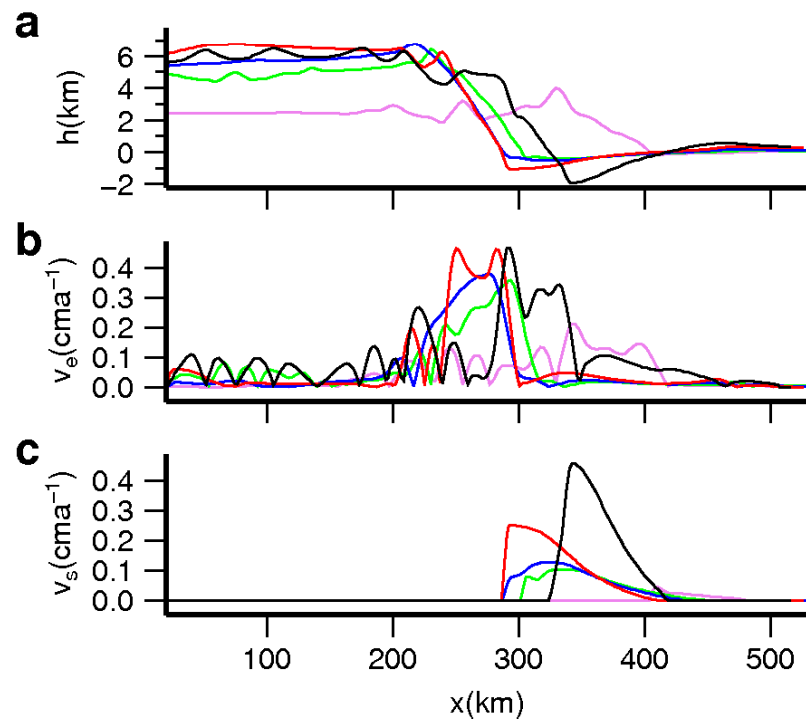


345 Myr

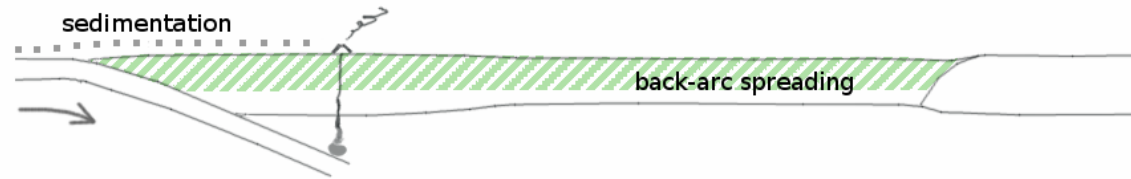


340 Myr





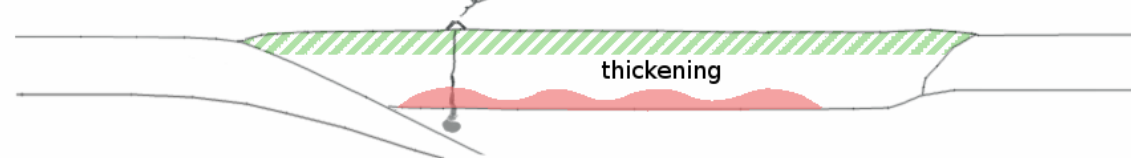
1) oceanic subduction (400?-380 Ma)



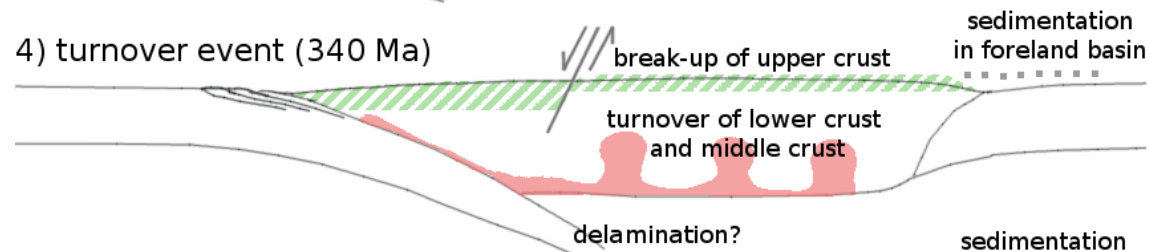
2) continental subduction (380-370 Ma)



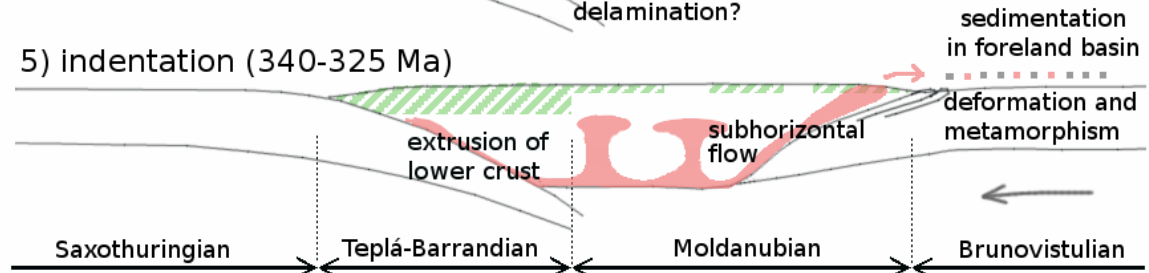
3) compressional stage (370-340 Ma)



4) turnover event (340 Ma)



5) indentation (340-325 Ma)



Saxothuringian

Teplá-Barrandian

Moldanubian

Brunovistulian

strength of the mantle layer of the underplated/subducted lithosphere in Expt. 1 (Fig. 5) was higher, then one would expect backward delamination and peeling of this layer instead of rupture. Break-off would occur later, when the length of the sinking mantle lithosphere is long enough to generate a sufficient pull force for breaking this strong layer. Such a process is observed in the next experiment where the same lithospheric model as in Expt. 1 is tested under lower temperature and hence with higher strength of the lithospheric layers (Table 1).

Experiment 3, Fig. 7: The initial stages of this



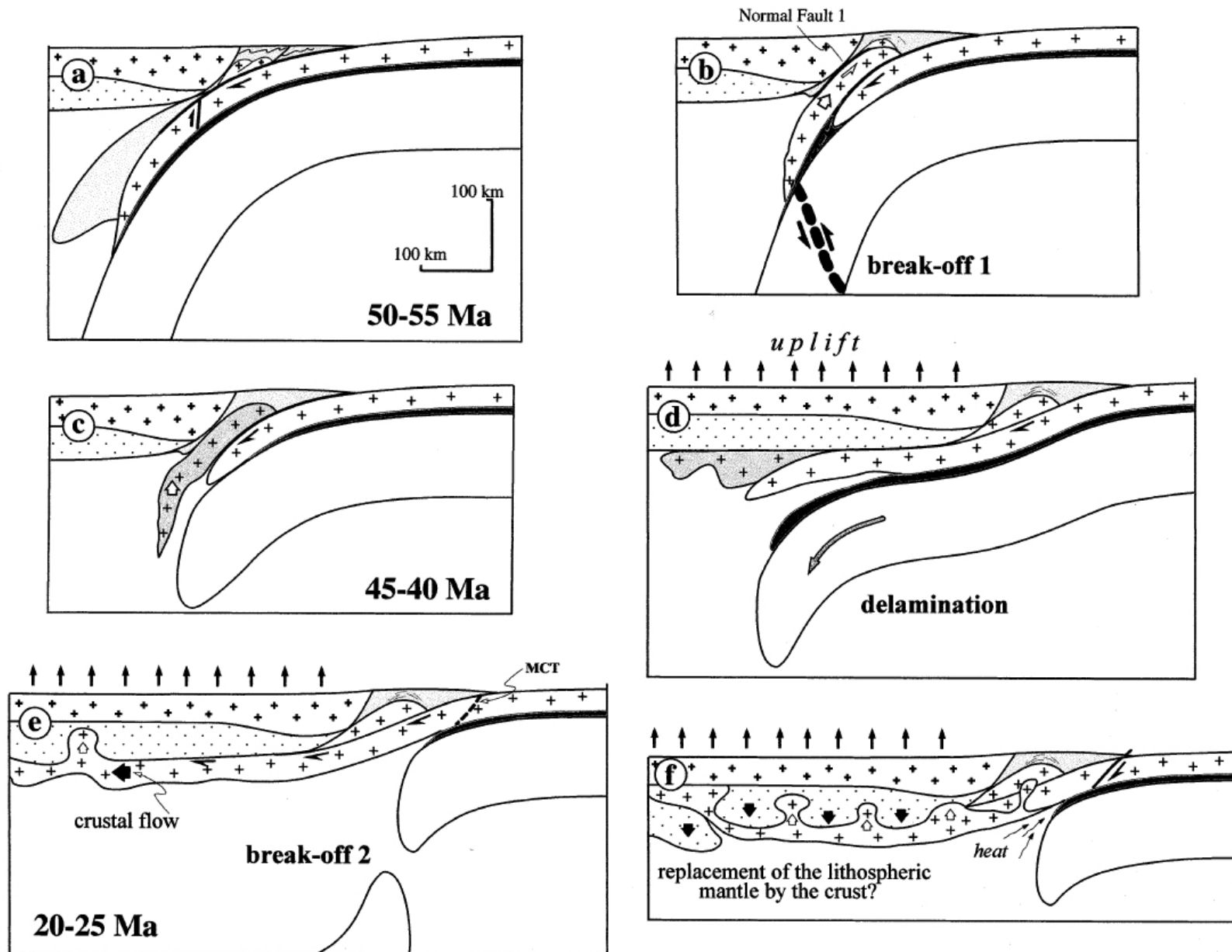
Fig. 5. Experiment 1: Tectonic underplating of the continental lithosphere break off (model parameters in Table 1).



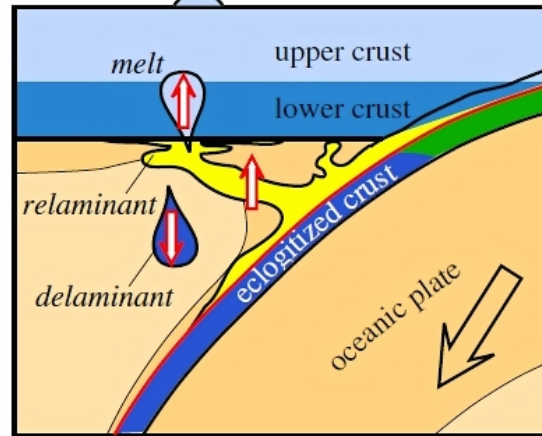
Fig. 6. Experiment 2: Tectonic underplating of the continental crust delamination-break off (model parameters in Table 1).

experiment are similar to Expt. 1, but the subducting lithospheric mantle separates from the tectonically underplated crust and peels back to the subduction front (Fig. 7f). This delamination is followed by break-off of the mantle layer, which could not be achieved because the sinking mantle layer reached the bottom of the box. The continental crust underplated the overriding plate (Fig. 7f) over 10 cm (~ 350 km in nature) and did not fail because it is colder and stronger than in Expt. 1.

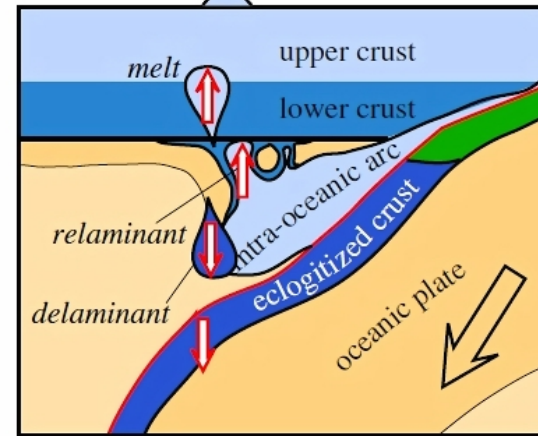
One can test many other parameter combinations, but the presented experiments provide enough information to predict other possible options for lithospheric/crustal behaviour: the principal elements are delamination, roll-back and break-off of the lithospheric mantle layer. The distance L of tectonic underplating depends on the crustal strength. Weakening of the crust with depth/temperature results in shorter L values. As



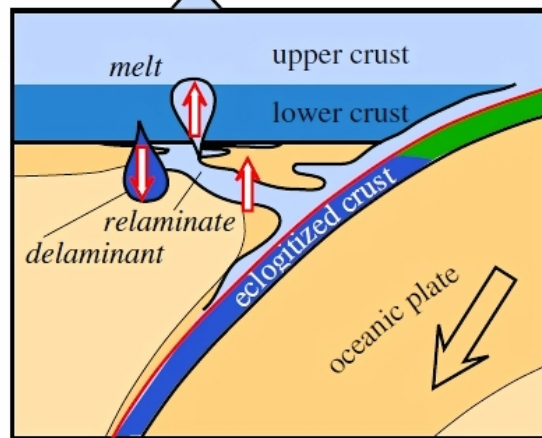
A) relamination of subducted sediment



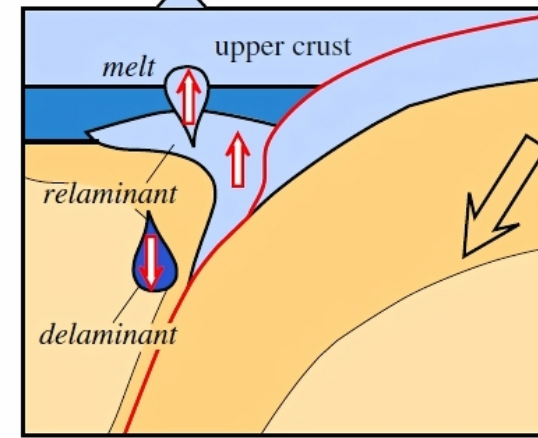
B) relamination of subducted intra-oceanic arc

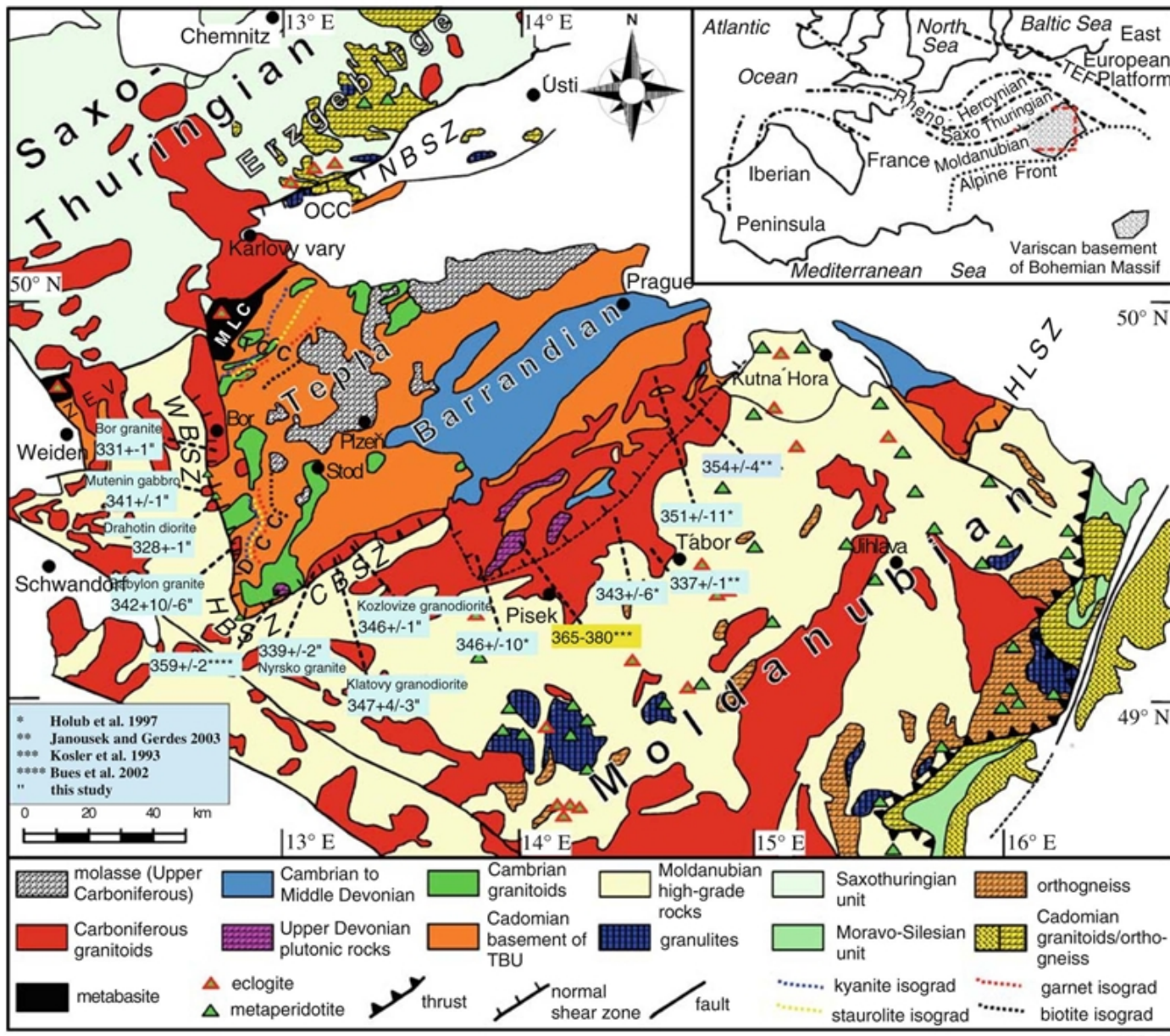


C) relamination of crust removed by subduction erosion

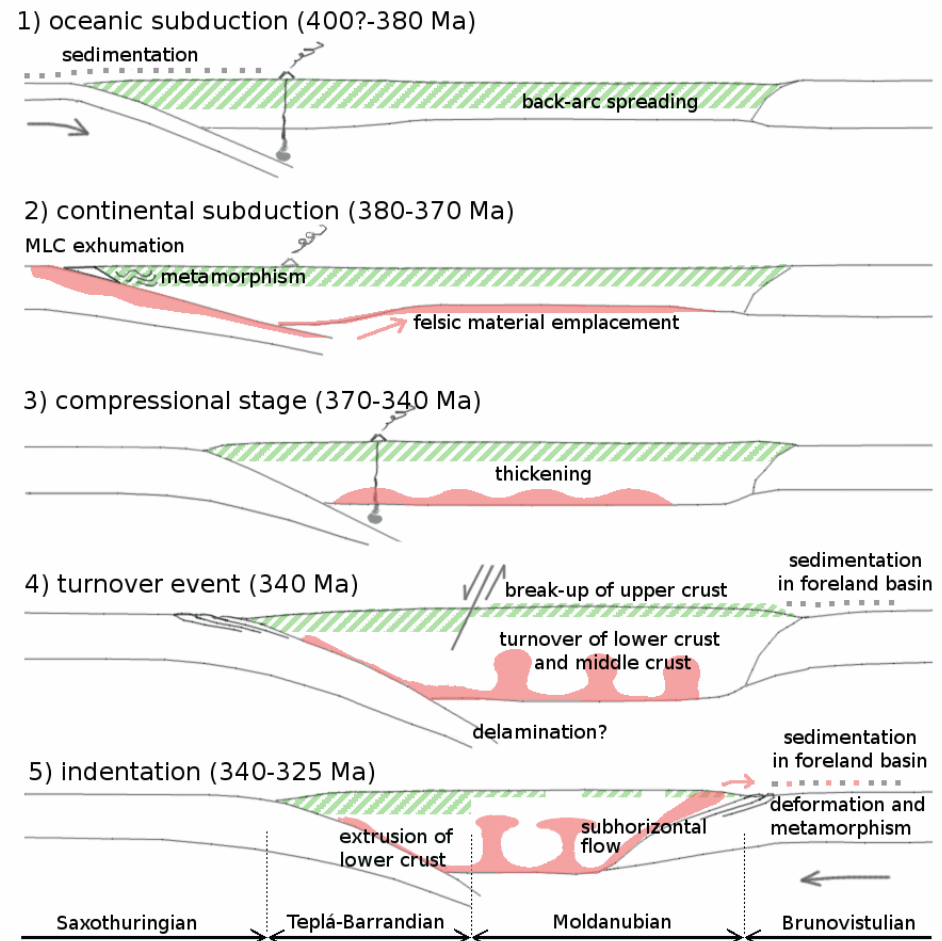
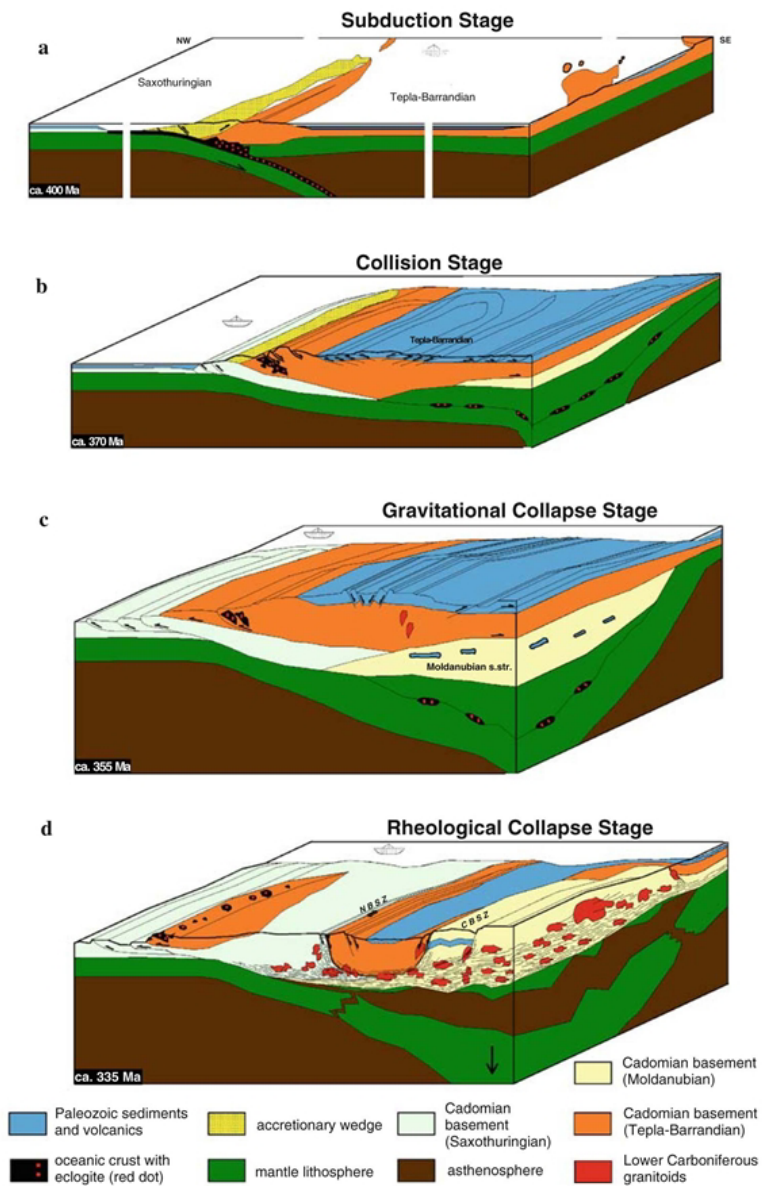


D) relamination of subducted continental crust





Dörr & Zulauf, 2010



Dörr & Zulauf, 2010

Závěr:

- existuje několik scénářů možného vývoje ČM, které víceméně rozumně vysvětlují základní data a některá vybraná pozorování
- model P.M. je z hlediska numerického modelování jednoznačně nejsofistikovanější
- klíčová je otázka zdrojů tepla a deformace
- k objasnění vývoje ČM je nezbytné pochopení procesů delaminace a relaminace na základě numerického modelu