

GEOTERMIKA

(přehled základů geotermiky)

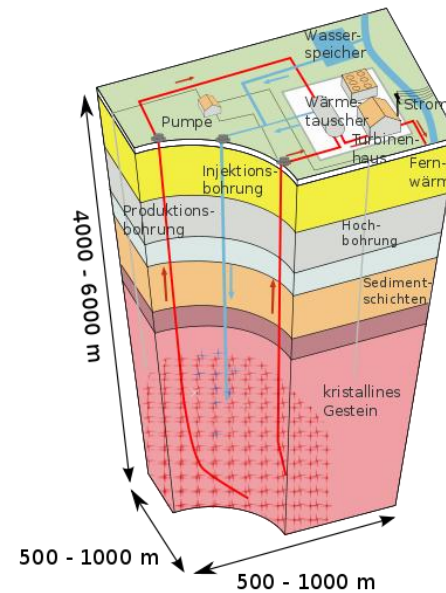
J. Havíř

Josef.Havir@ipe.muni.cz



Termika se zaměřuje na studium vlastností látek a jejich změn souvisejících s teplotou.

Na poznání tepelného stavu Země se zaměřuje **geotermika**.



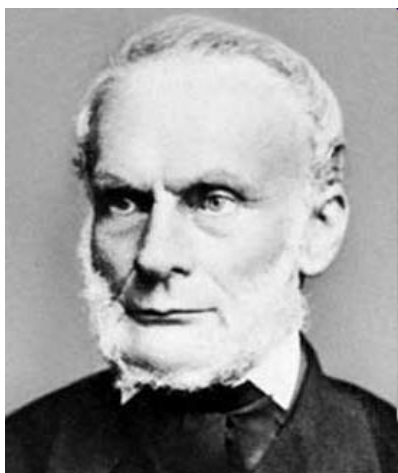
Geotermika

TEPLO A ŠÍŘENÍ TEPLA

teplo ... část vnitřní energie, kterou systém vymění při styku s jiným systémem formou tepelné výměny (nedochází ke konání práce)

Clausiusova formulace druhého termodynamického zákona:

Teplo nemůže při styku dvou těles různých teplot samovolně přecházet z tělesa chladnějšího na těleso teplejší.



Rudolf Julius Emanuel Clausius
(1822-1888)



Geotermika

Množství tepla Q přijatého fyzikálně a chemicky homogenním systémem při vzrůstu teploty o ΔT :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

m ... hmotnost systému

c ... měrná tepelná kapacita systému



ŠÍŘENÍ TEPLA

- vedením (kondukcí)
- tepelným zářením (radiací)
- prouděním (konvekcí)



Vedení (kondukce)

Přenos tepla Q vedením popisujeme pomocí tepelného toku q [W/m^2]

- množství tepla, které prochází danou plochou:

$$q = \frac{Q}{t \cdot S}$$

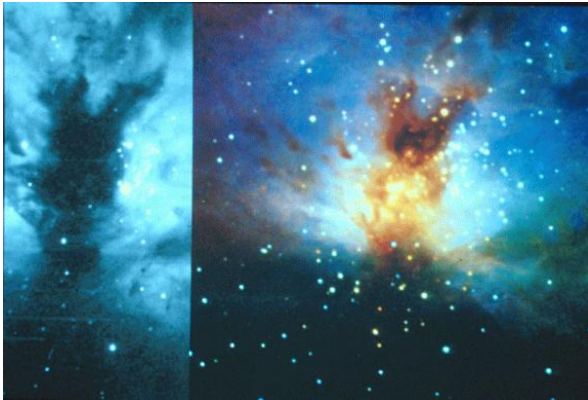
t ... čas

S ... velikost plochy



Tepelné záření (radiace)

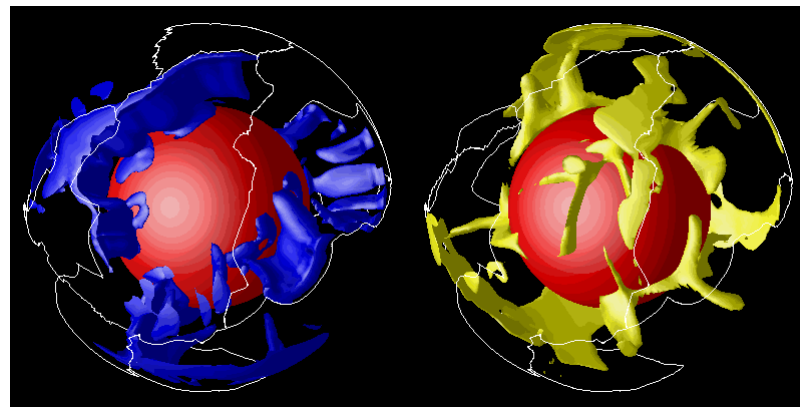
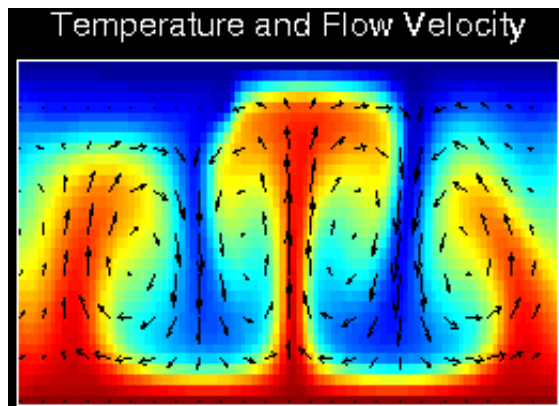
Tepelná energie Q je přenášena ve formě elektromagnetických vln (např. infračervené záření).



Přenos tepla prouděním (konvekce)

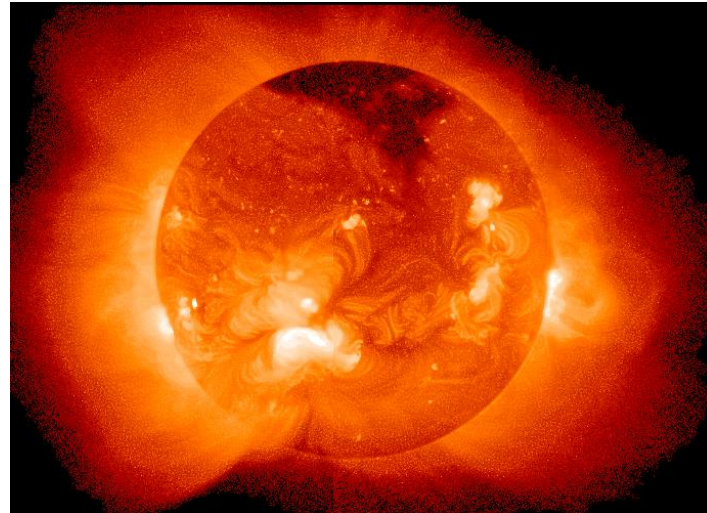
Dochází k proudění materiálu o různé teplotě. Tím dochází k přenosu a k promíchání částí materiálu s odlišnou teplotou a tedy k přenosu tepla z jedné části tělesa do druhé. Tento přenos může být rychlejší, než přenos vedením (kondukcí).

Teplejší materiál - nárůst objemu a pokles hustoty ... má tendenci stoupat
Chladnější materiál - vyšší hustota ... má tendenci klesat



ZDROJE TEPLA

- z vnějšku ... sluneční záření



- z vnitra ... geotermální gradient - pozorujeme nárůst teploty s hloubkou (na nárůst tepla v dolech upozorňoval Agricola v roce 1530).



**Georgius Agricola
(Georg Pauer)
(1494-1555)**



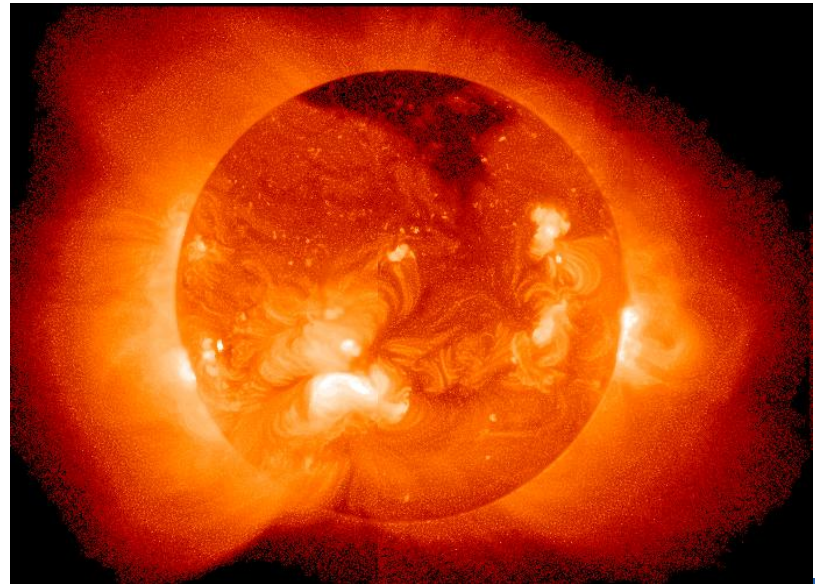
Geotermika

Vnější zdroje tepla

zásadní význam má **sluneční záření** –

asi $2 \cdot 10^{17}$ W (o cca 4 řády více, než teplo z nitra Země), cca 60% dosahuje povrchu Země

- minimální průnik do nitra Země
- zásadní význam pro povrchové procesy (atmosféra, hydrosféra, biosféra)



Vnitřní zdroje tepla

asi $4 \cdot 10^{13}$ W (tj. $4 \cdot 10^{13}$ J/s)

- zásadní význam pro procesy uvnitř zemského tělesa
(tektonické procesy, vulkanismus, metamorfóza)



průměrný **tepelný tok** z nitra Země je cca 87 mW/m^2

celková ztráta tepla z nitra Země je cca 44 TW

tepelný tok je nerovnoměrný:

- nejvyšší tepelný tok je koncentrován v geotermálních oblastech

- průměrný tepelný tok je u oceánské kůry vyšší, než u kontinentální kůry

(vliv tepla unikajícího v souvislosti s tvorbou oceánské kůry – cca 21 TW)

	plocha [10^6 km^2]	průměrný tepelný tok [10^{-3} W/m^2]	celková tepelná ztráta [10^{12} W]
kontinenty	201	65 ± 1.6	13.1 ± 0.3
oceány	309	101 ± 2.2	31.2 ± 0.7
celkem	510	87 ± 2.0	44.2 ± 1.0



Známe více vnitřních zdrojů tepla:

- rozpad radioaktivních prvků
- teplo produkované impakty a akrecí při počátečním stadiu vývoje Země
- teplo pocházející z komprese litosféry (např. generované slapovými silami)
- teplo vytvořené elektromagnetickými účinky magnetického pole Země
- teplo tvořené třením při klesání těžkých kovů do hlubších partií tělesa Země



Geotermika

Nejvýznamnějším zdrojem vnitřního tepla Země je **rozpad radioaktivních prvků (45-90%)**.

isotop	tepelná vydatnost isotopu [W/kg isotopu]	poločas rozpadu [roky]	průměrná hmotnostní koncentrace v plášti [%]	celková tepelná vydatnost v plášti [W/kg pláště]
^{238}U	9.46×10^{-5}	4.47×10^9	30.8×10^{-9}	2.91×10^{-12}
^{235}U	5.69×10^{-4}	7.04×10^8	0.22×10^{-9}	1.25×10^{-13}
^{232}Th	2.64×10^{-5}	1.40×10^{10}	124×10^{-9}	3.27×10^{-12}
^{40}K	2.92×10^{-5}	1.25×10^9	36.9×10^{-9}	1.08×10^{-12}



MECHANISMUS PŘENOSU TEPLA V LITOSFÉŘE

Na přenosu tepla v zemské kůře se nejvíce podílí procesy deskové tektoniky (středoocéánské rifty), v kontinentálním prostoru převládá přenos tepla kondukcí.

	procentuální zastoupení
tvorba zemské kůry	~70%
litosferická kondukcce	~25%
vulkanismus horkých skvrn	~5%
celkem	100%



Vedení tepla v litosféře

V zemské kůře se projevuje významně kondukce.

Teplota roste s hloubkou:

$$q = -k \frac{dT}{dz}$$

k ... tepelná vodivost materiálu [W/m.°C]

dT/dz ... termální gradient (změna teploty s hloubkou) [°C/m]



Plášťová konvekce

Náchylnost materiálu ke konvekci popisuje tzv. **Rayleighovo číslo Ra**
Vrstva materiálu je náchylná ke konvekci při $Ra > 1000$.

$$Ra = \frac{\alpha \cdot g \cdot d^4 \cdot (q + A \cdot d)}{k \cdot \kappa \cdot \nu}$$



**John William Strutt,
3rd Baron Rayleigh
(1842-1919)**



Geotermika

Rayleighovo číslo Ra:

$$Ra = \frac{\alpha \cdot g \cdot d^4 (q + A \cdot d)}{k \cdot \kappa \cdot \nu}$$

q ... tepelný tok na bázi vrstvy

A ... radiogenní tepelná produkce vrstvy

d ... tloušťka vrstvy

α ... tepelná roztažnost

g ... tíhové zrychlení

k ... tepelná vodivost

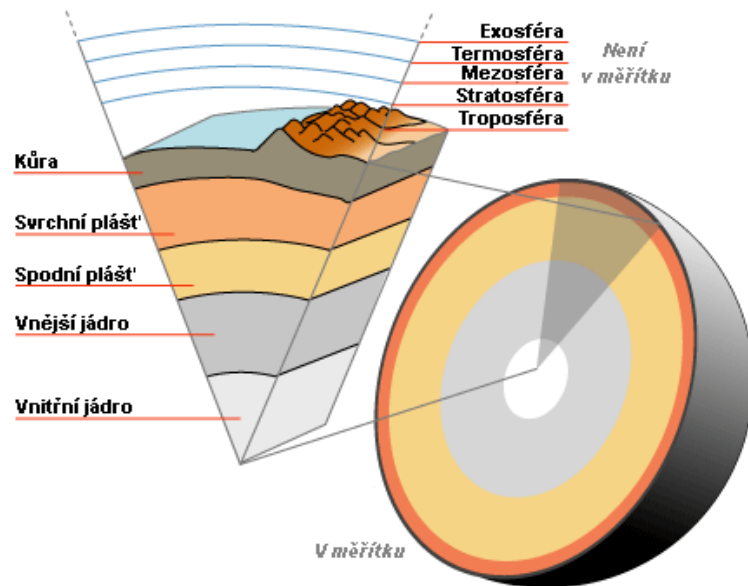
κ ... tepelná difuzivita

ν ... kinematická viskozita



Rayleighovo číslo pro zemský plášť:

$$Ra = \frac{\alpha \cdot g \cdot d^4 (q + A \cdot d)}{k \cdot \kappa \cdot \nu}$$

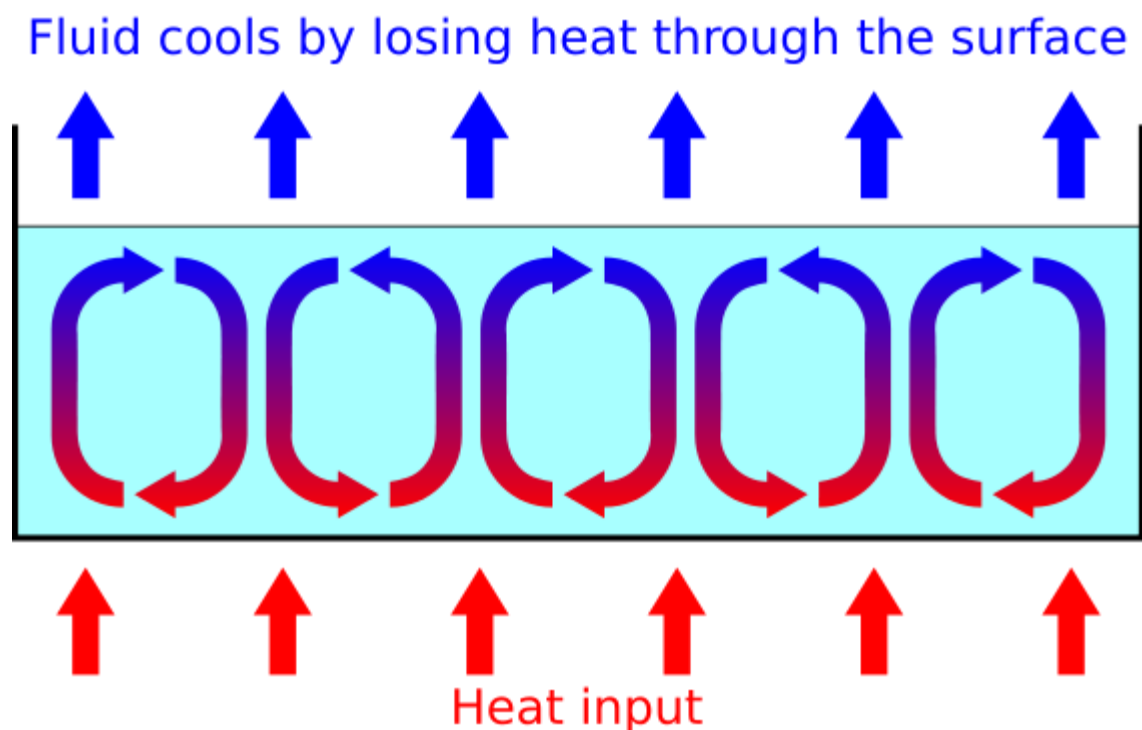


vrstva	mocnost [km]	Ra
svrchní plášť	700	10^6
spodní plášť	2000	3×10^7
celý plášť	2700	10^8

Je velmi vysoká pravděpodobnost, že v plášti probíhá silná konvekce.



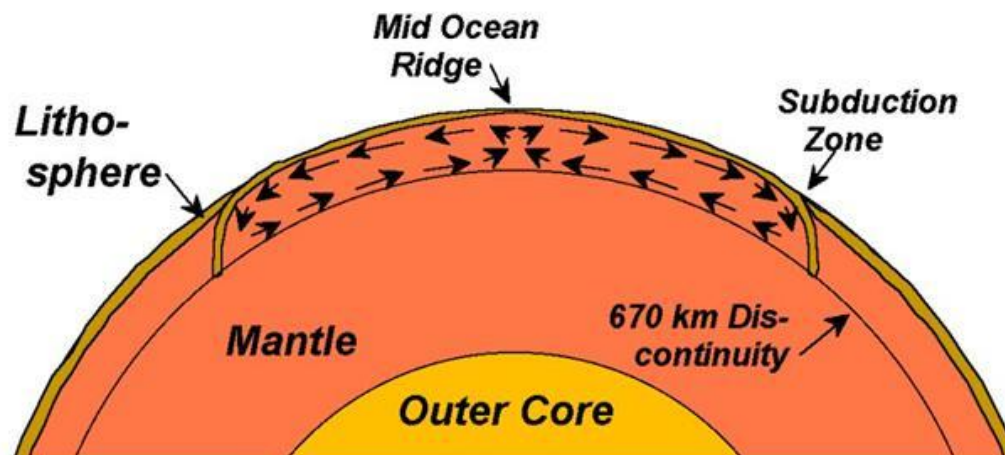
Horký materiál stoupá, chladný materiál klesá – dochází ke tvorbě konvenčních buněk a k cirkulaci materiálu.



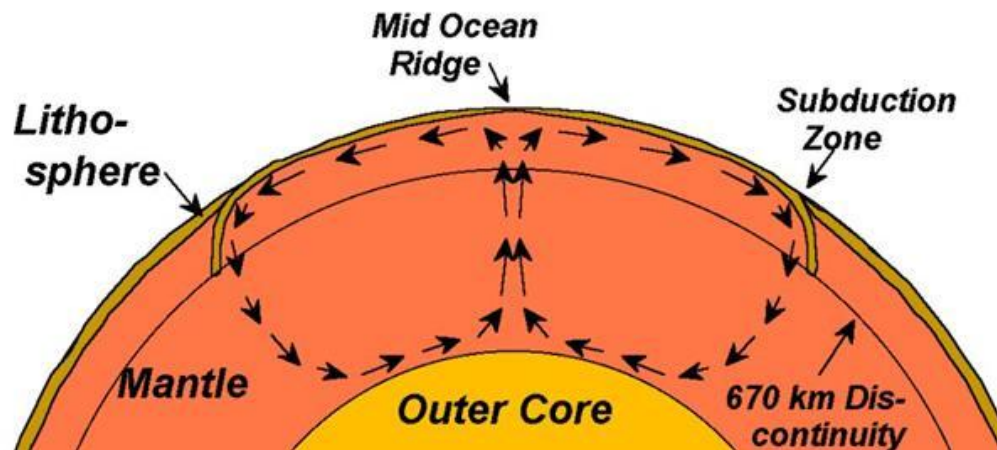
Geotermika

Dvouvrstevná nebo jednovrstevná konvekce?

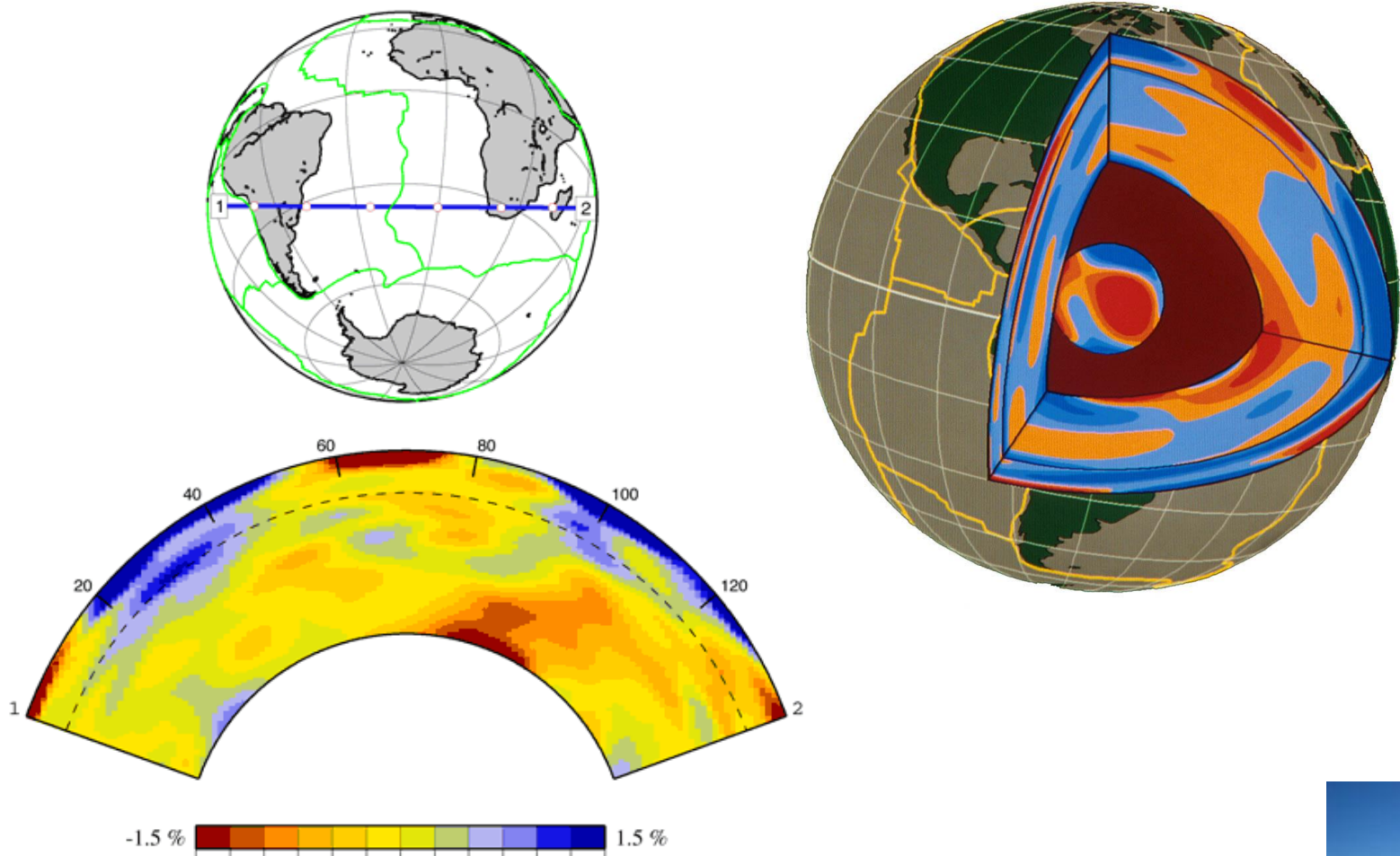
Upper Mantle Convection



Whole Mantle Convection

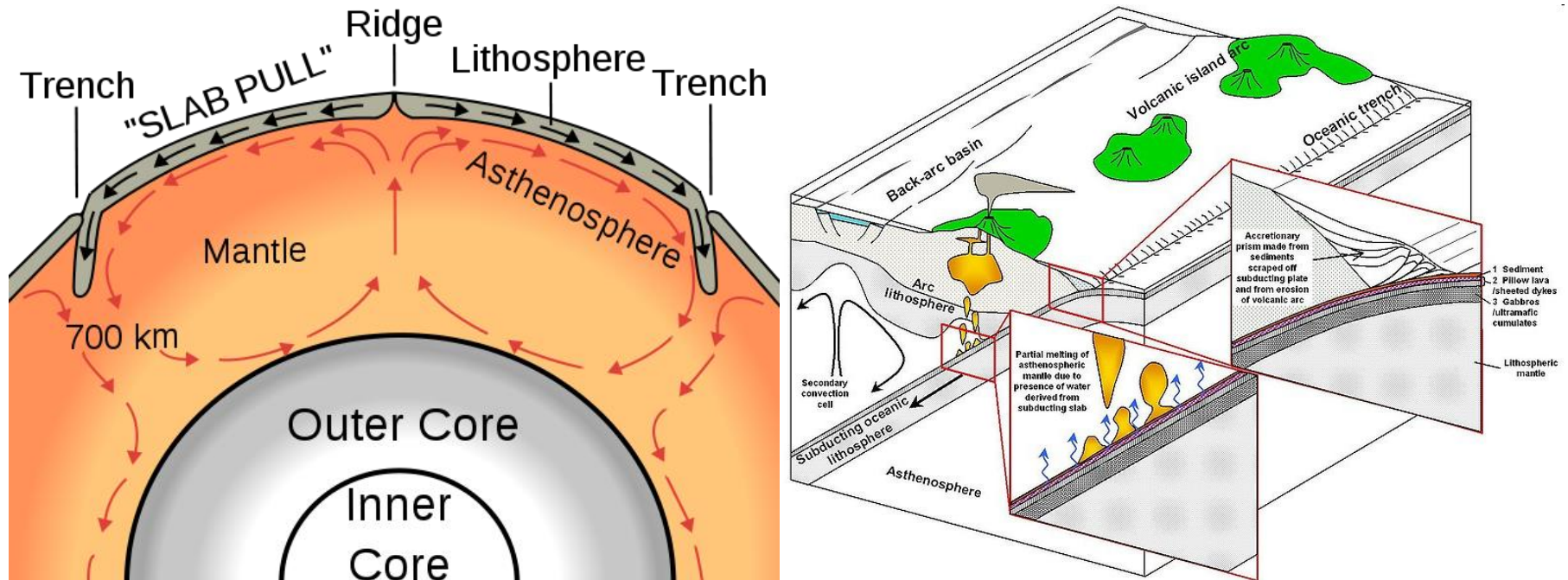


Seismická tomografie ukazuje teplotní (hustotní) 3D variabilitu zemského pláště, nevylučuje model dvouvrstevné konvekce.

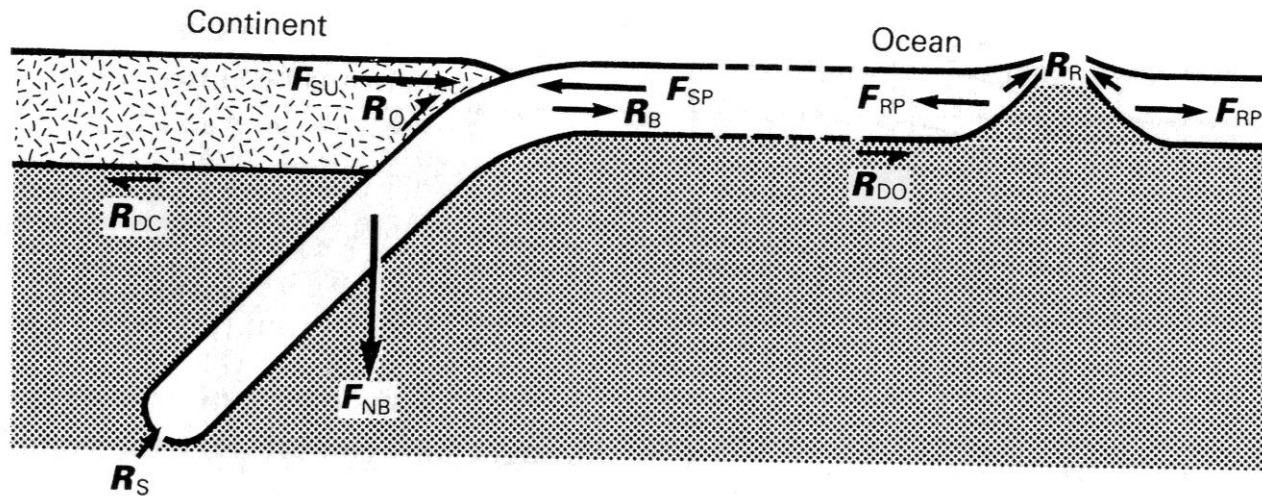


PROCESY SOUVISEJÍCÍ S PLÁŠŤOVOU KONVEKČÍ

Subdukce chladné oceánské kůry na deskovém rozhraní



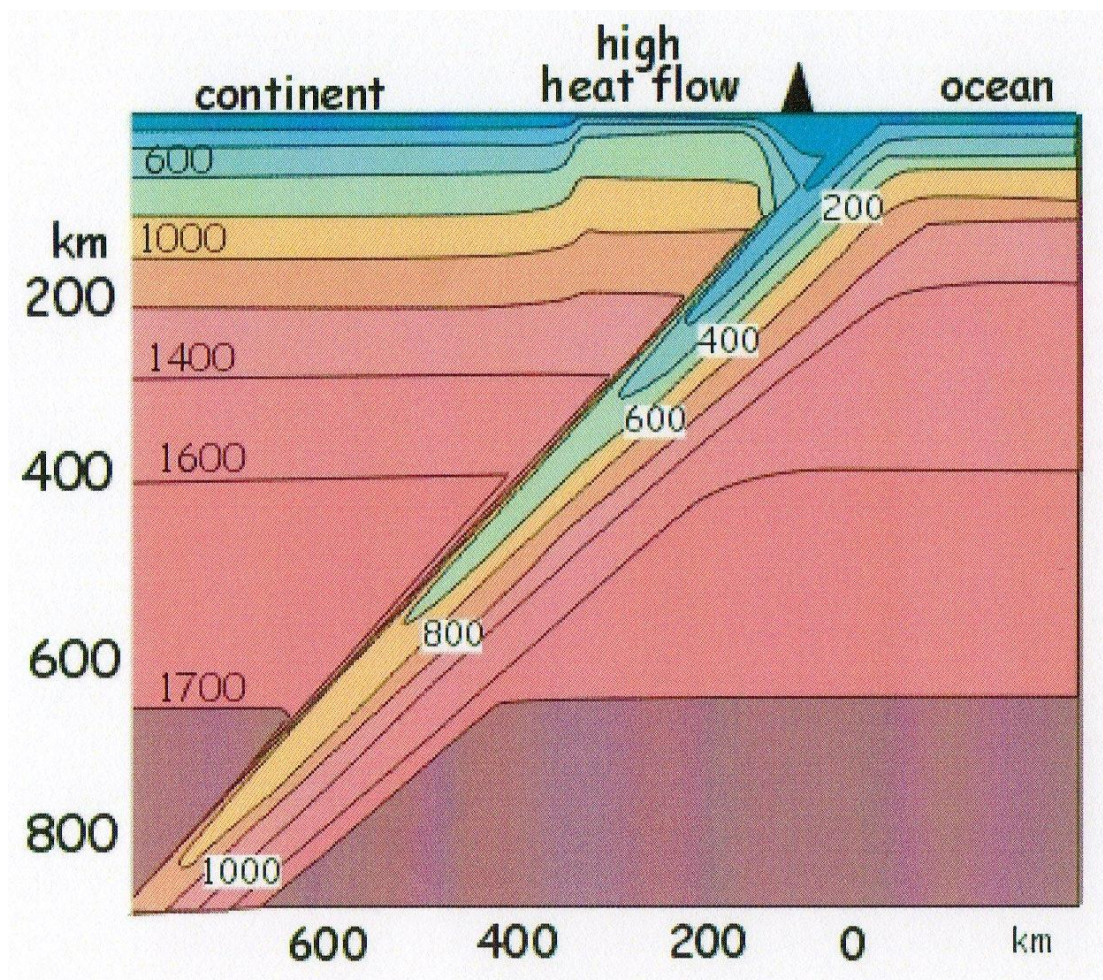
Chladná kůra se zanořuje do pláště vlivem gravitačních sil.



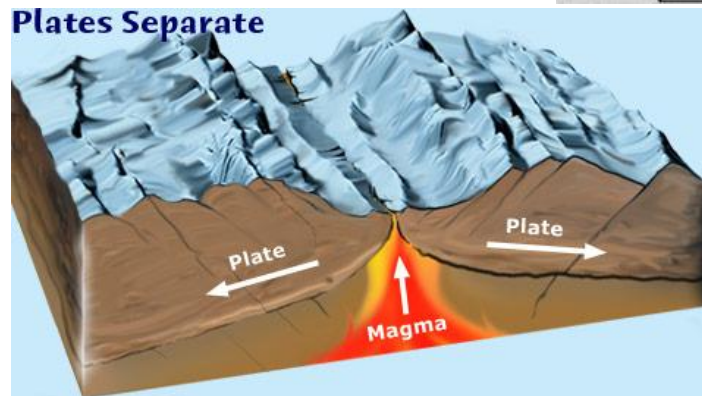
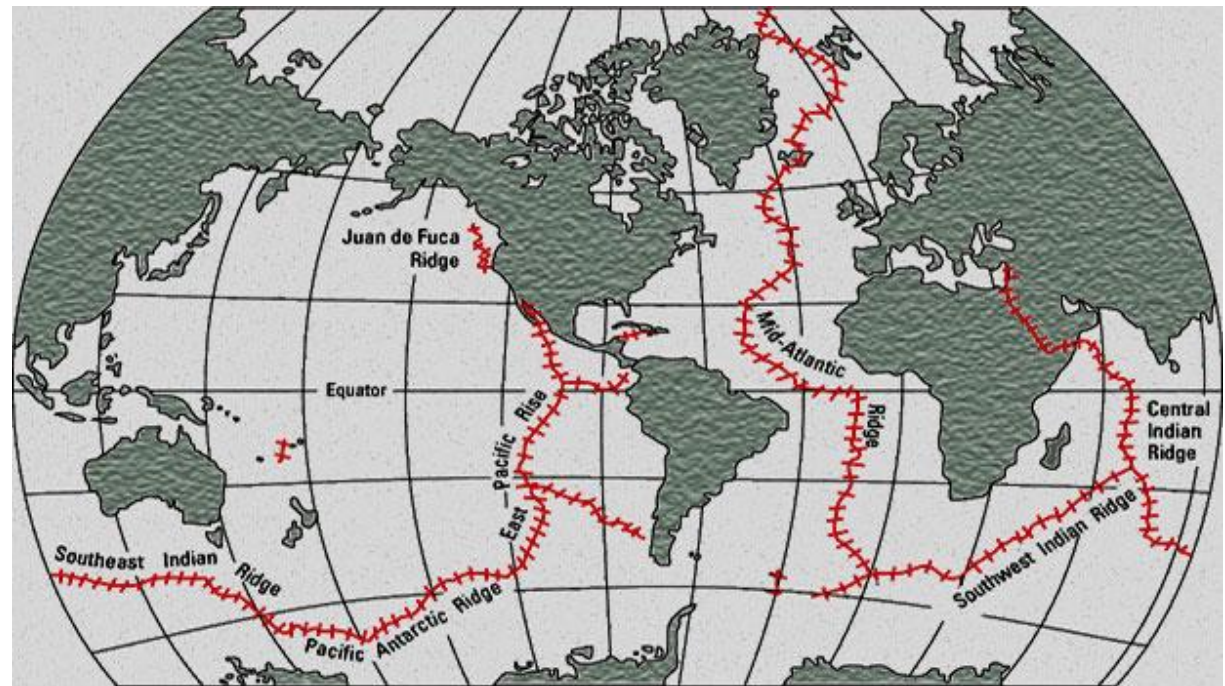
- | | |
|------------------------------|--|
| F_{RP} – Ridge push | R_R – Ridge resistance |
| F_{NB} – Negative buoyancy | R_B – Bending resistance |
| F_{SP} – Slab pull | R_S – Slab resistance |
| F_{SU} – Trench suction | R_O – Overriding plate resistance |
| | R_{DO} – Mantle drag under ocean |
| | R_{DC} – Mantle drag under continent |



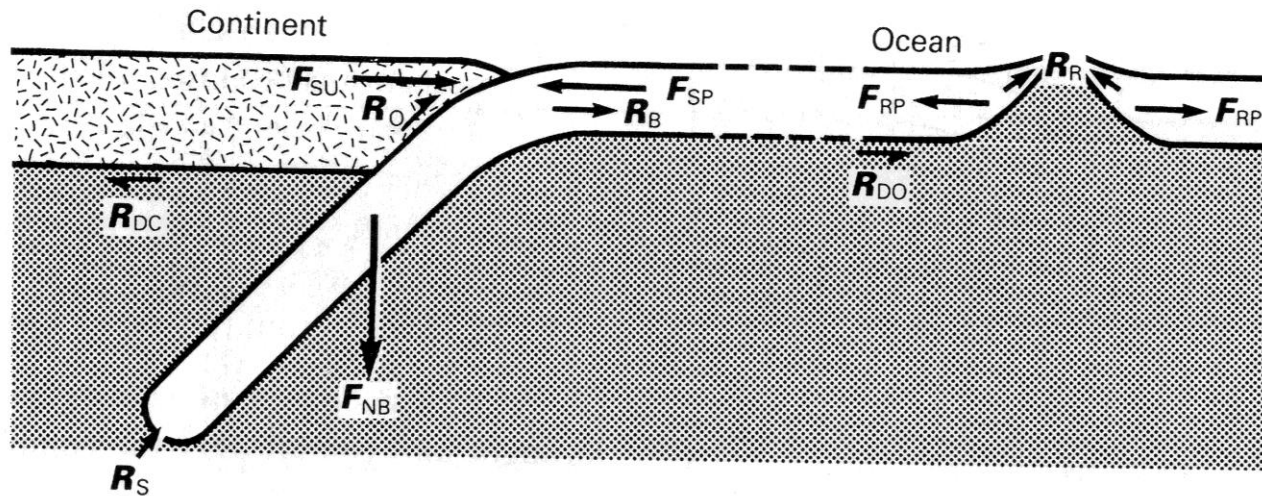
Dochází k deformaci izoterm, ponořující se deska je chladnější, než okolní plášť.



Výstup horkého materiálu v riftech



Výstup horkého materiálu v oblasti riftu vede k silám, které odtlačují desku od riftové struktury.



- | | |
|------------------------------|--|
| F_{RP} – Ridge push | R_R – Ridge resistance |
| F_{NB} – Negative buoyancy | R_B – Bending resistance |
| F_{SP} – Slab pull | R_S – Slab resistance |
| F_{SU} – Trench suction | R_O – Overriding plate resistance |
| | R_{DO} – Mantle drag under ocean |
| | R_{DC} – Mantle drag under continent |

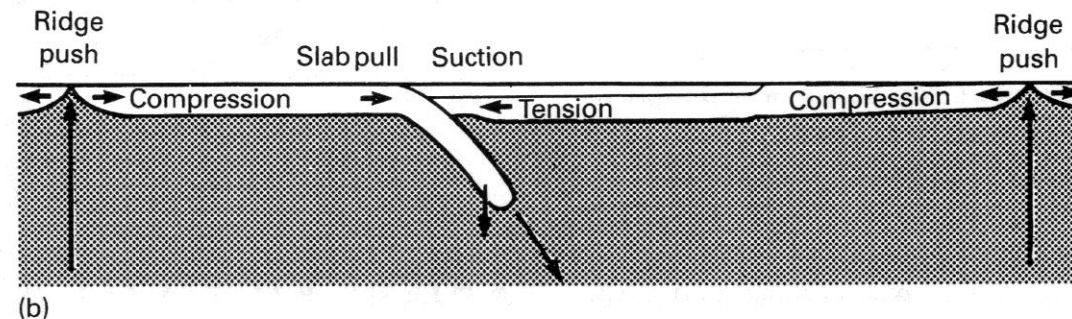
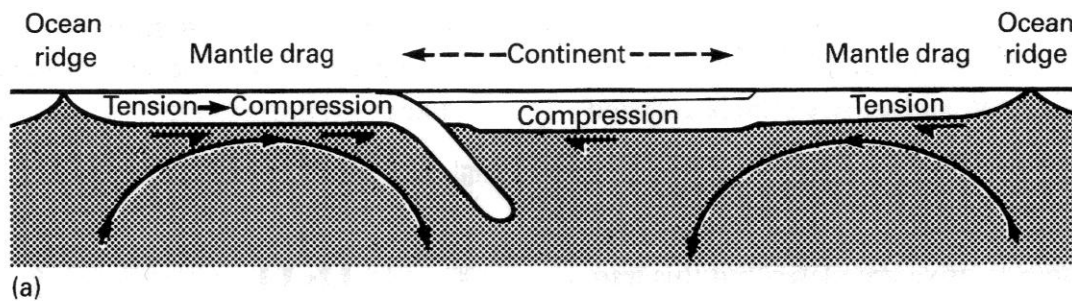


Hybné mechanismy deskové tektoniky:

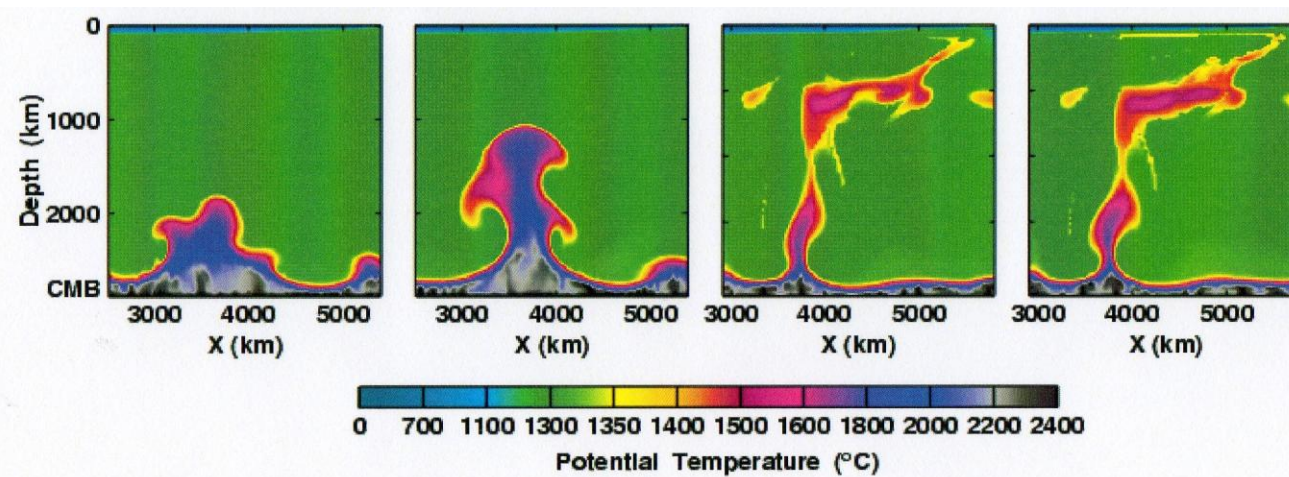
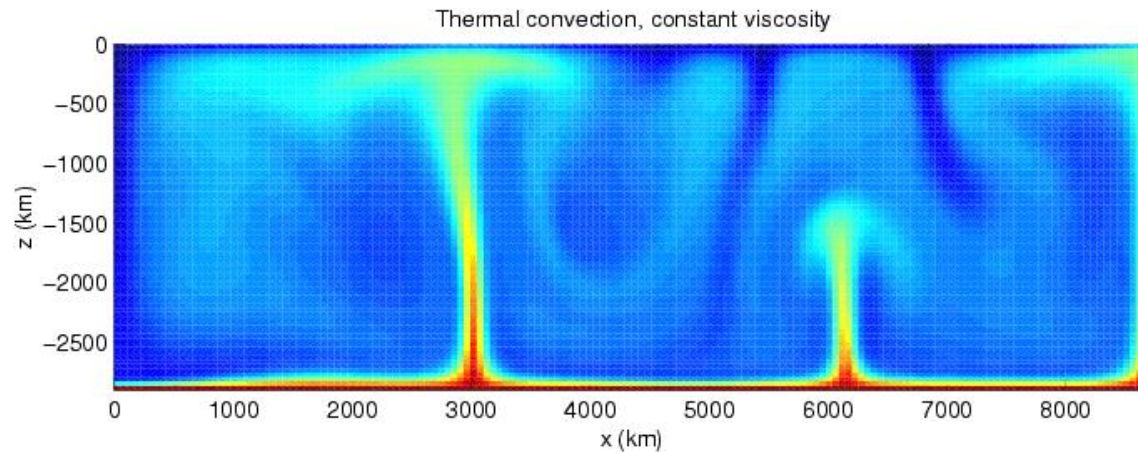
Gravitační síly působící na riftech a subdukčních zónách?

Síly způsobené pohybem materiálu v plášti?

Kombinace obojího?

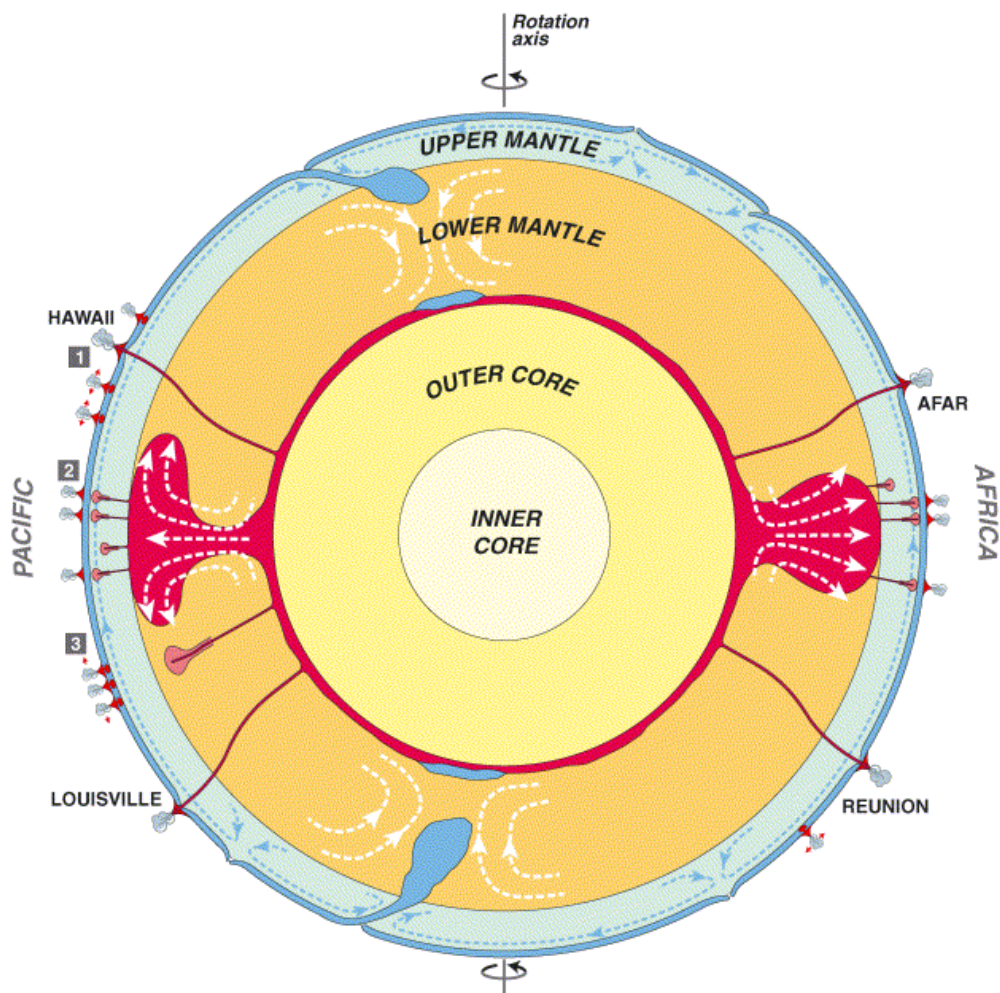


Plášťové chocholy (plumy)

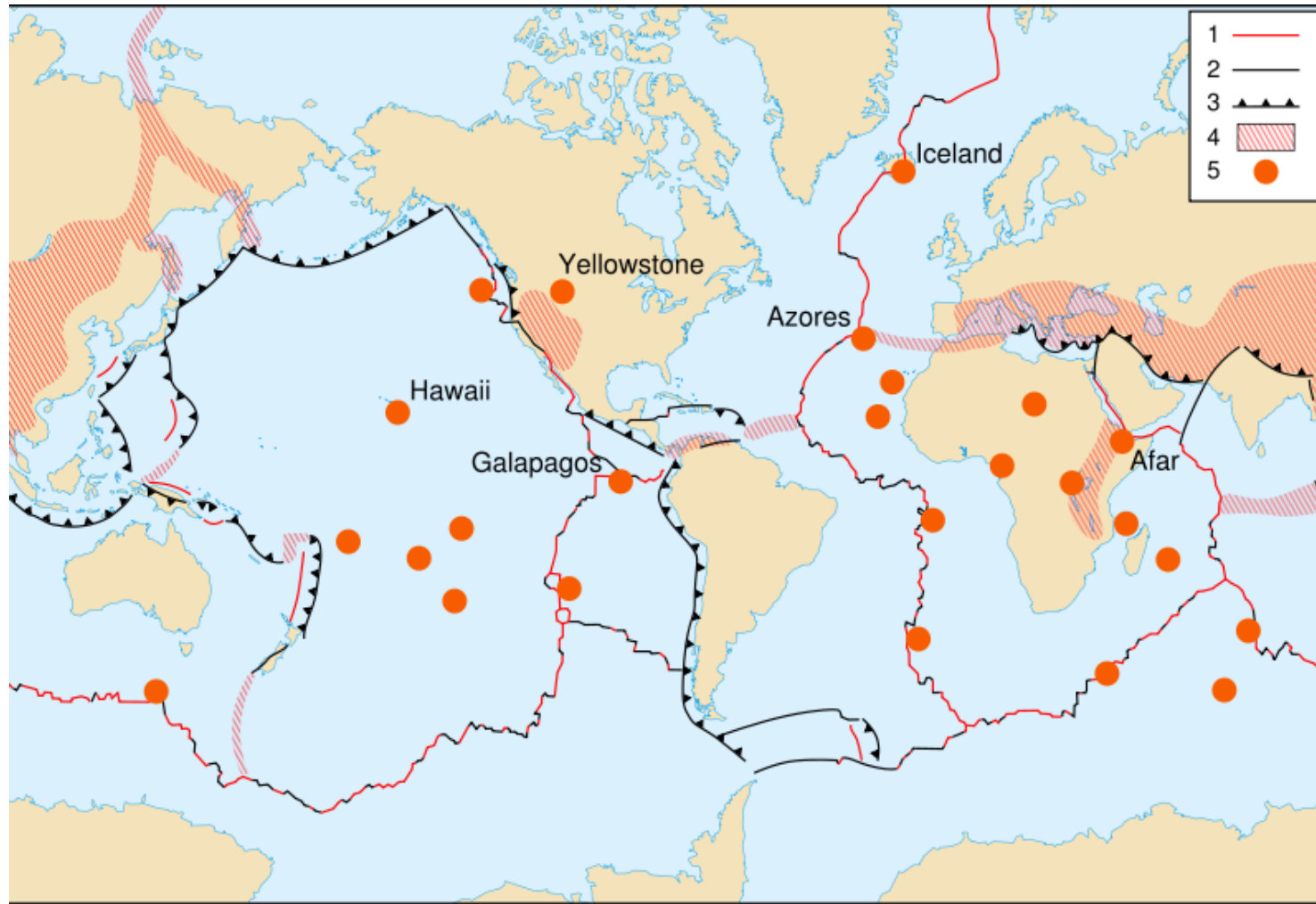


Geotermika

Struktury postihující celý plášť, zdroj se předpokládá na rozhraní pláště a jádra.

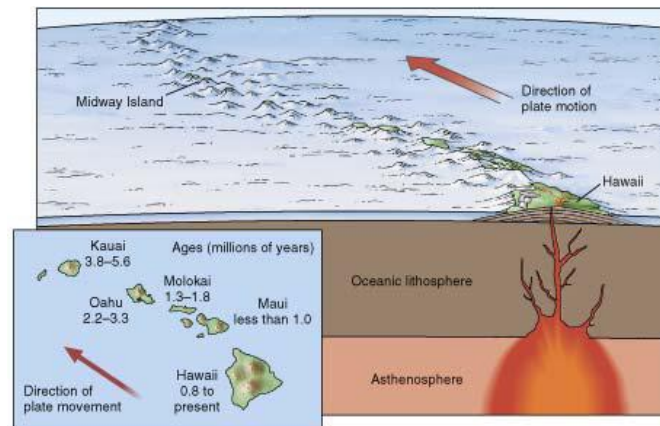
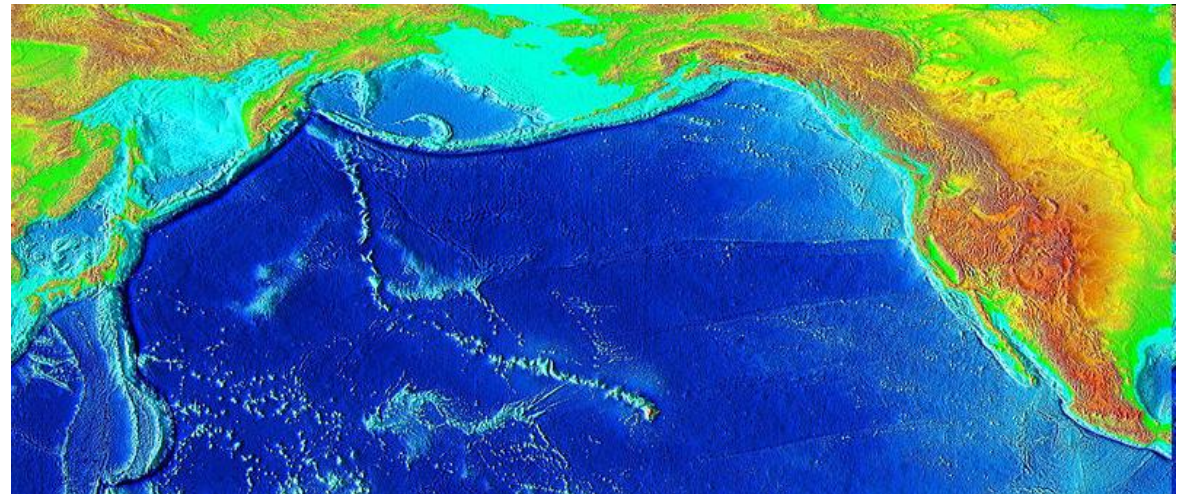
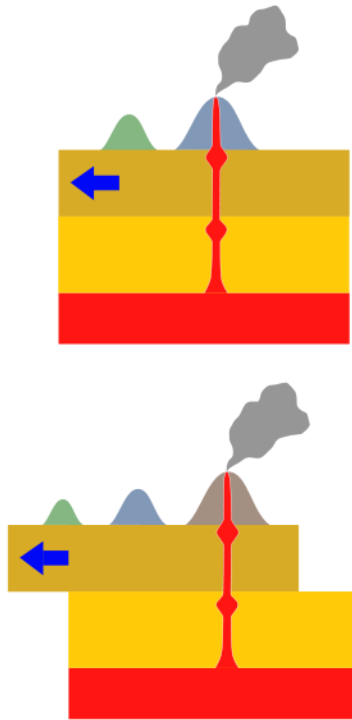


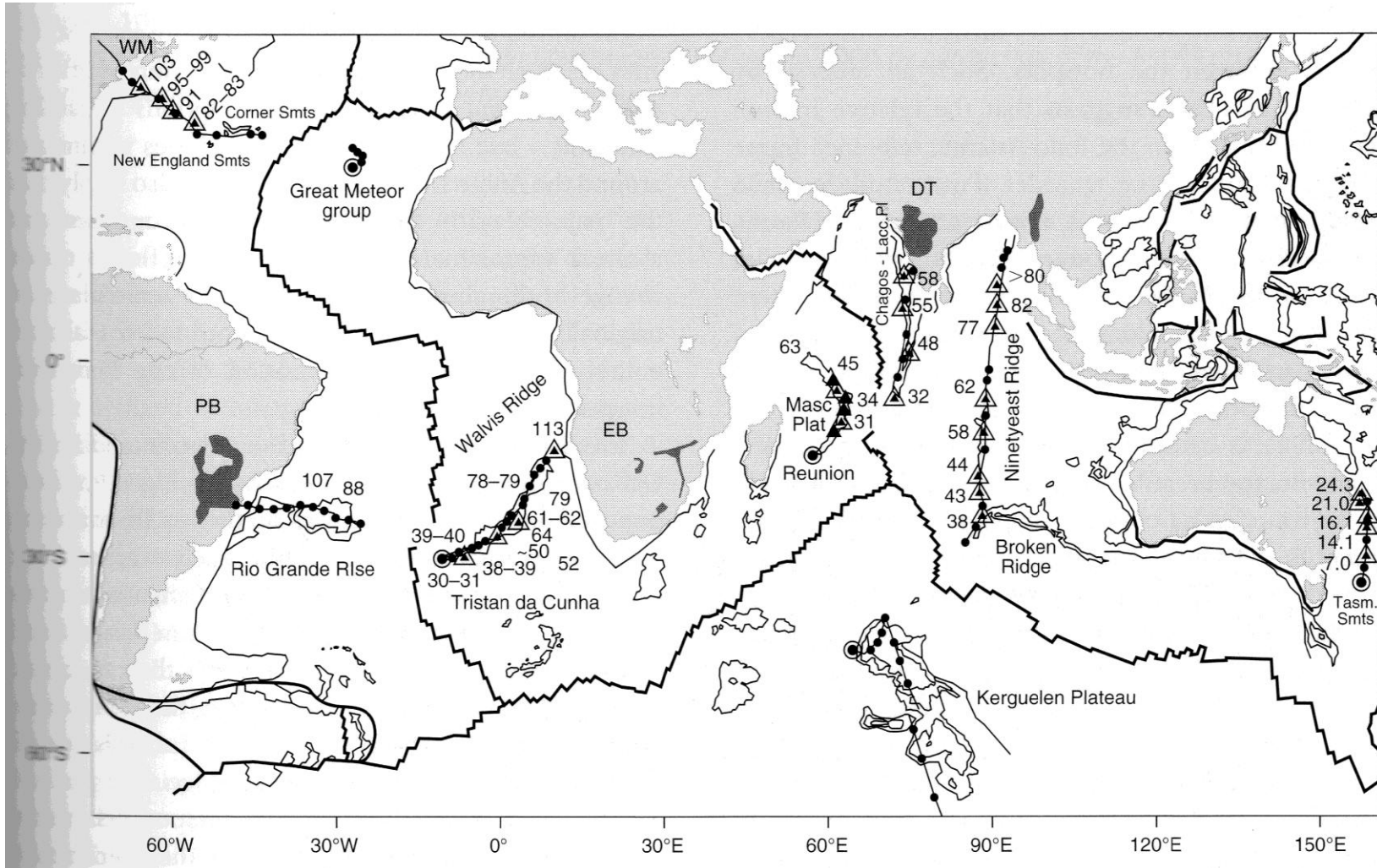
Projevy na povrchu - horké skvrny



Geotermika

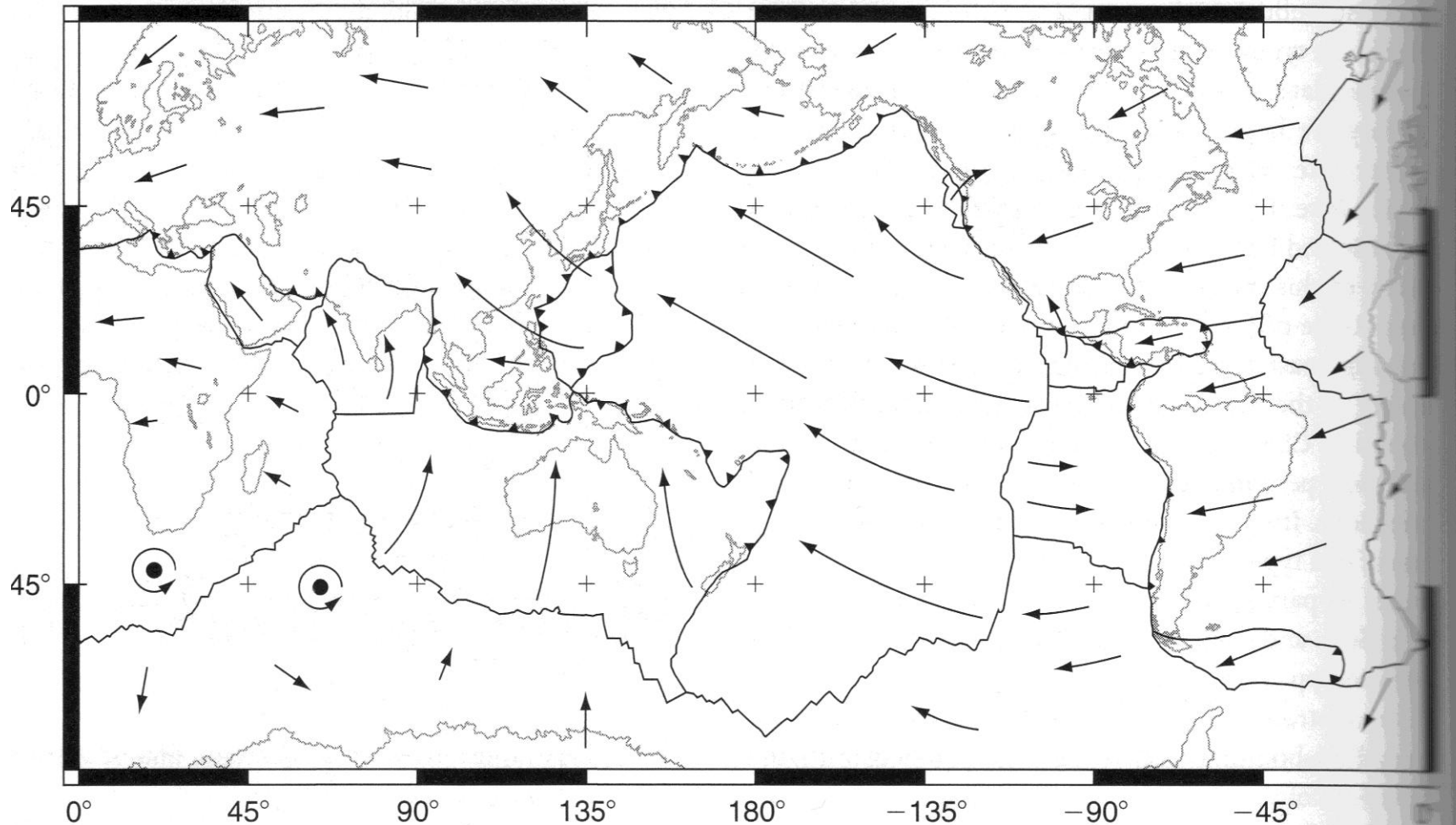
Vlivem relativního pohybu zemské desky vůči plášti vytváří horká skvrna na povrchu lineární struktury.





Stopy horkých skvrn (Kearey et al. 2009)





*Absolutní rychlosti desek vůči horkým skvrnám
2009)*

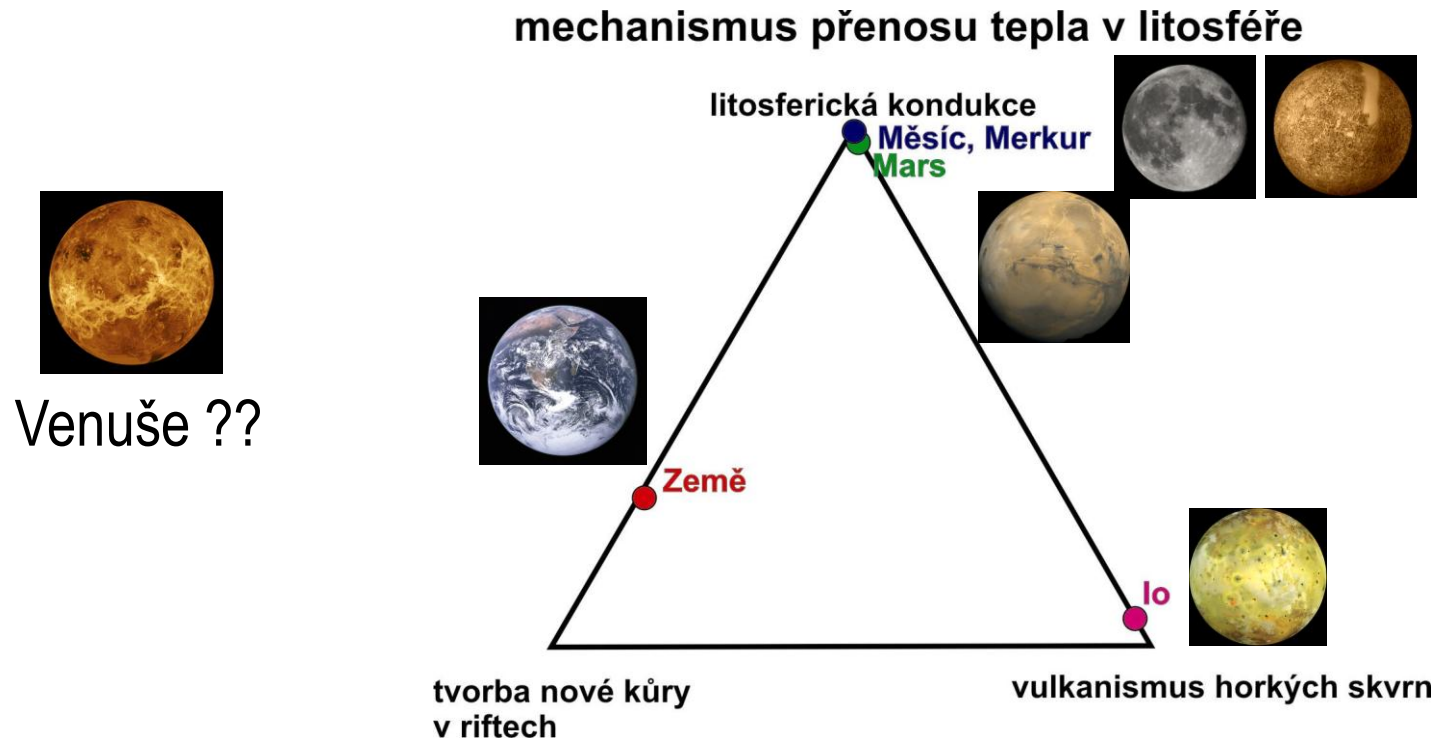
(Kearey et al.



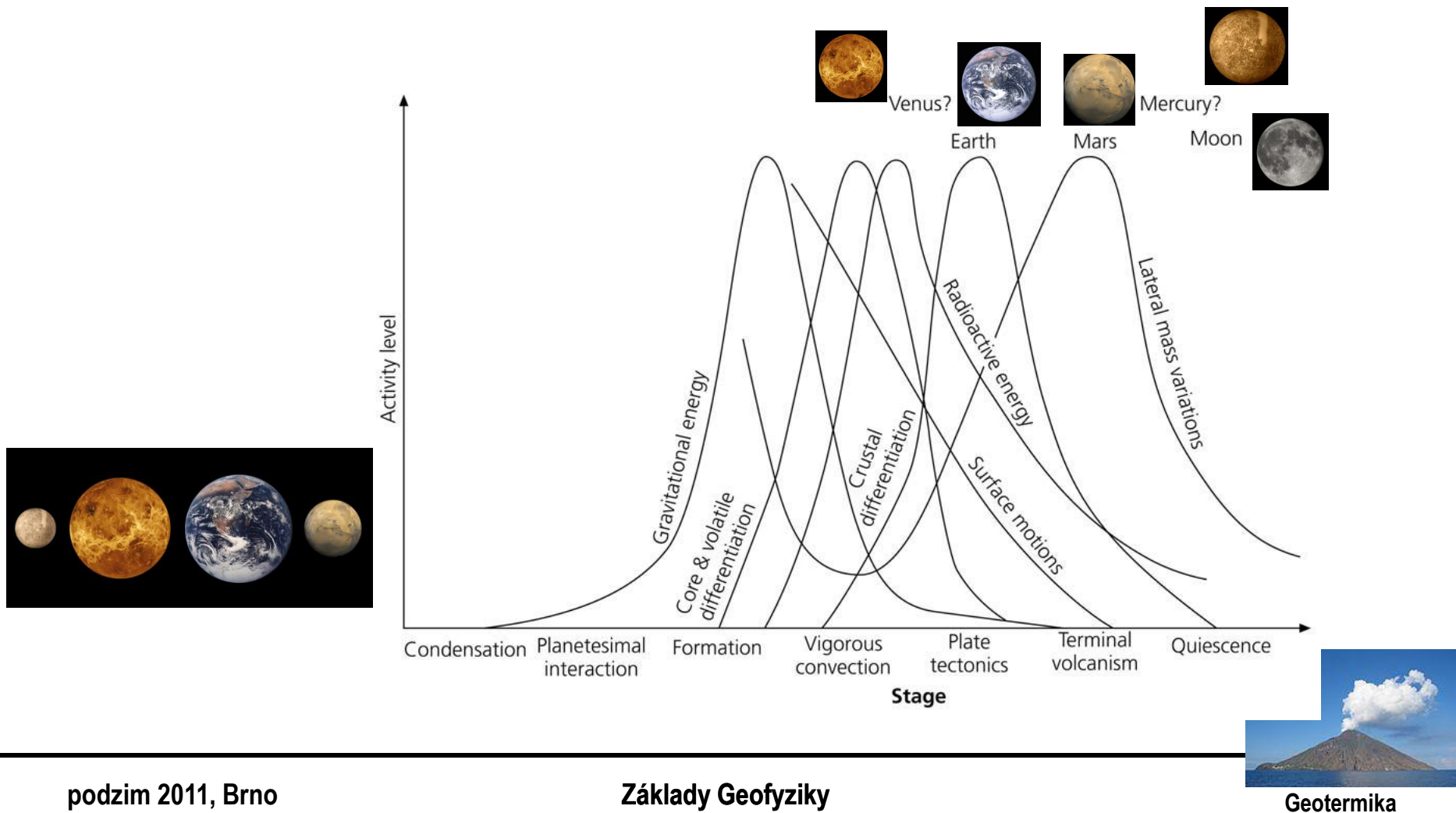
Geotermika

SROVNÁNÍ S DALŠÍMI OBJEKTY SLUNEČNÍ SOUSTAVY

Země se liší od většiny ostatních objektů jak velikostí tepelného toku, tak významem procesů deskové tektoniky.



Relativní rychlost chladnutí závisí na velikosti tělesa.



TEPELNÝ TOK V LITOSFÉŘE

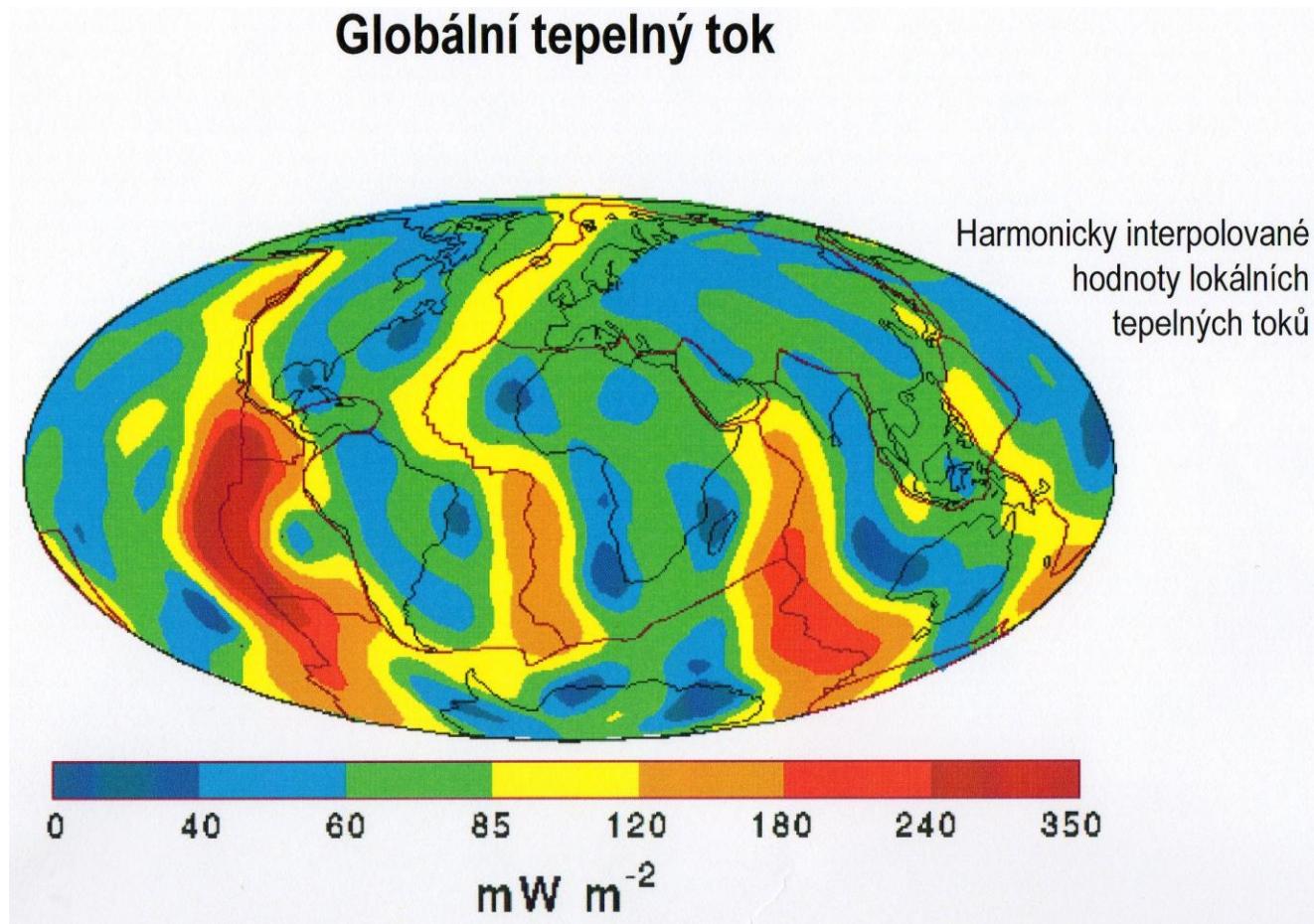
Sledujeme:

- prostorový tepelný tok
- závislost na hloubce (geoterma)

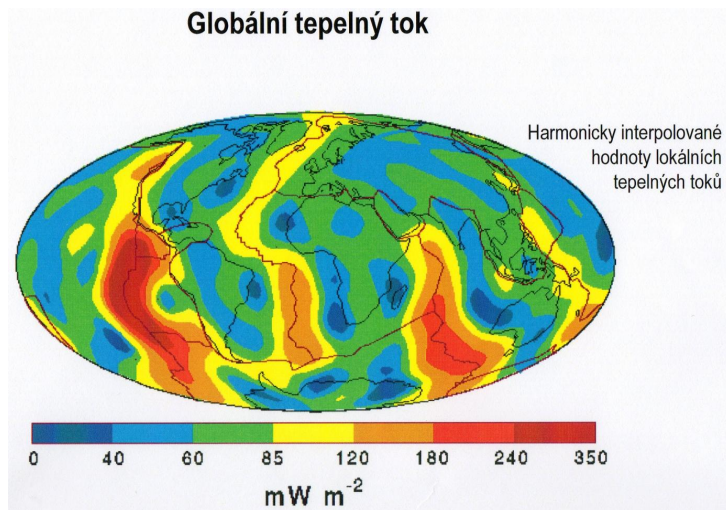
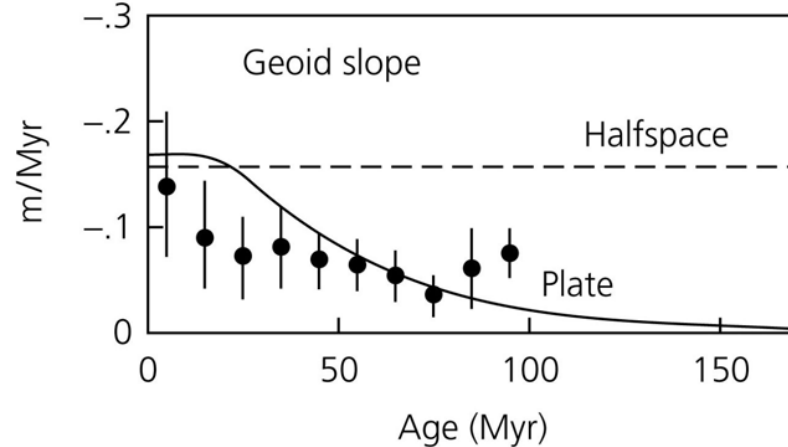
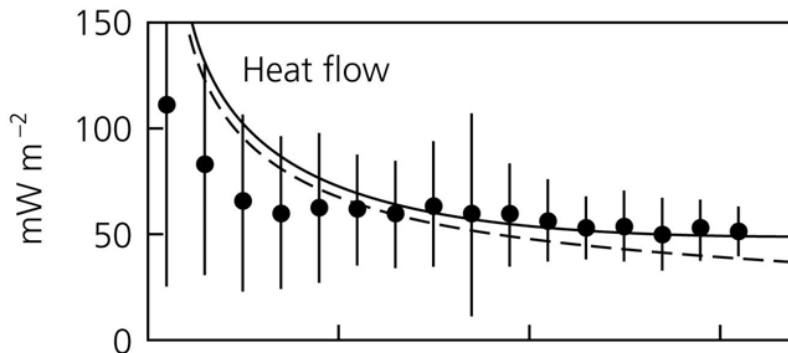
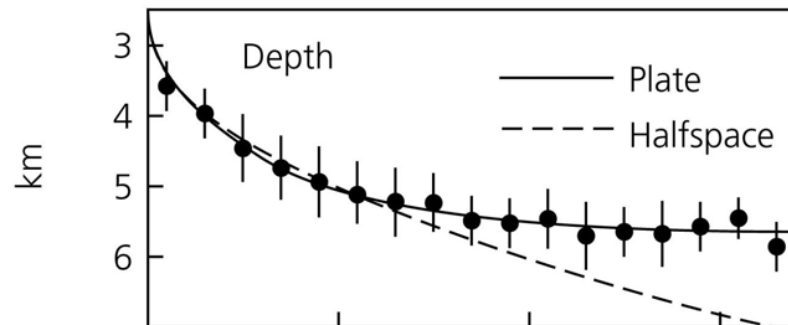


Povrchový tepelný tok

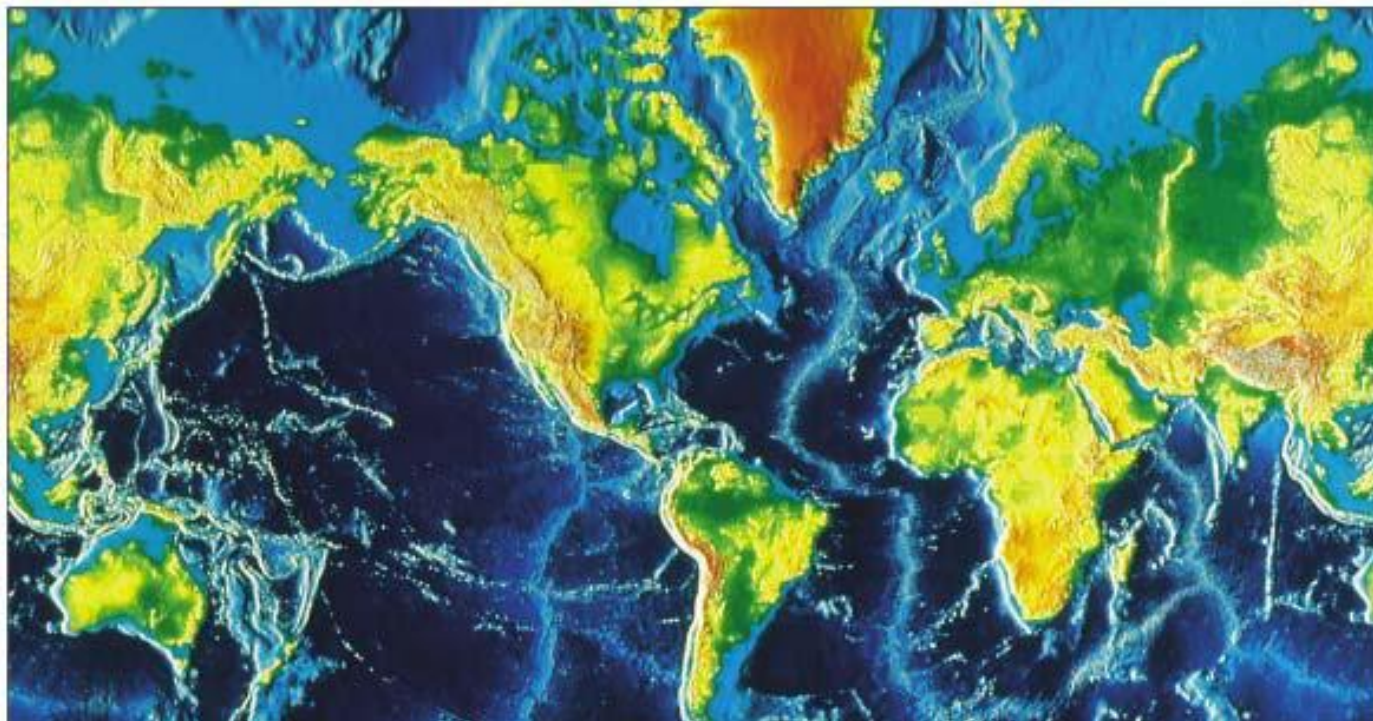
Významná prostorová variabilita.



Oceánská kůra – zřetelný vztah mezi tepelným tokem, stářím a topografií.

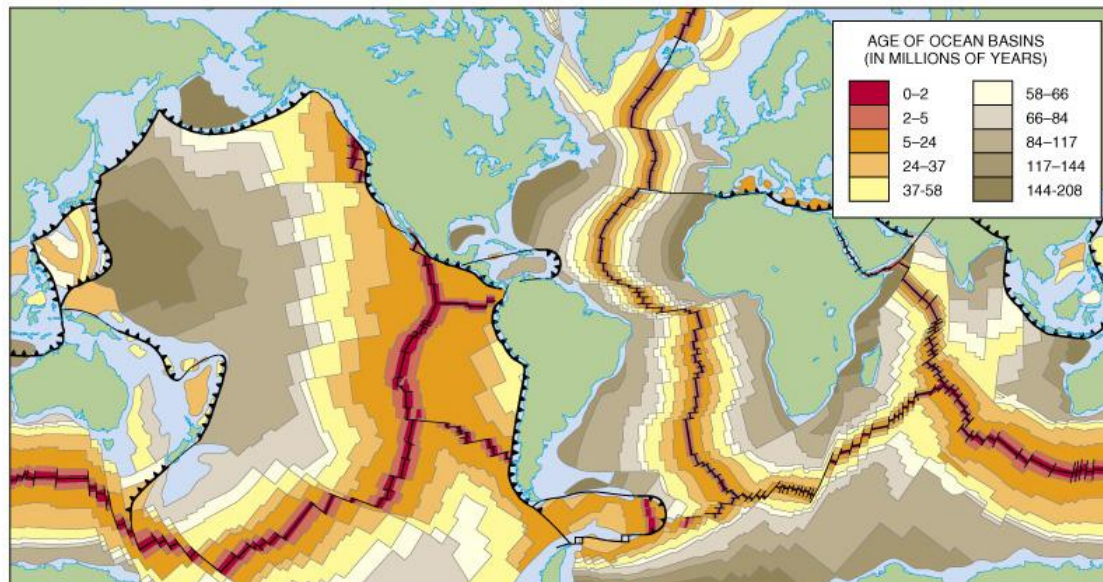
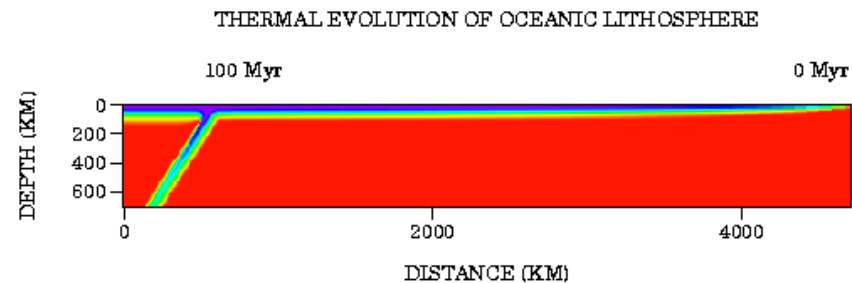


S rostoucí vzdáleností od riftu roste hloubka dna.

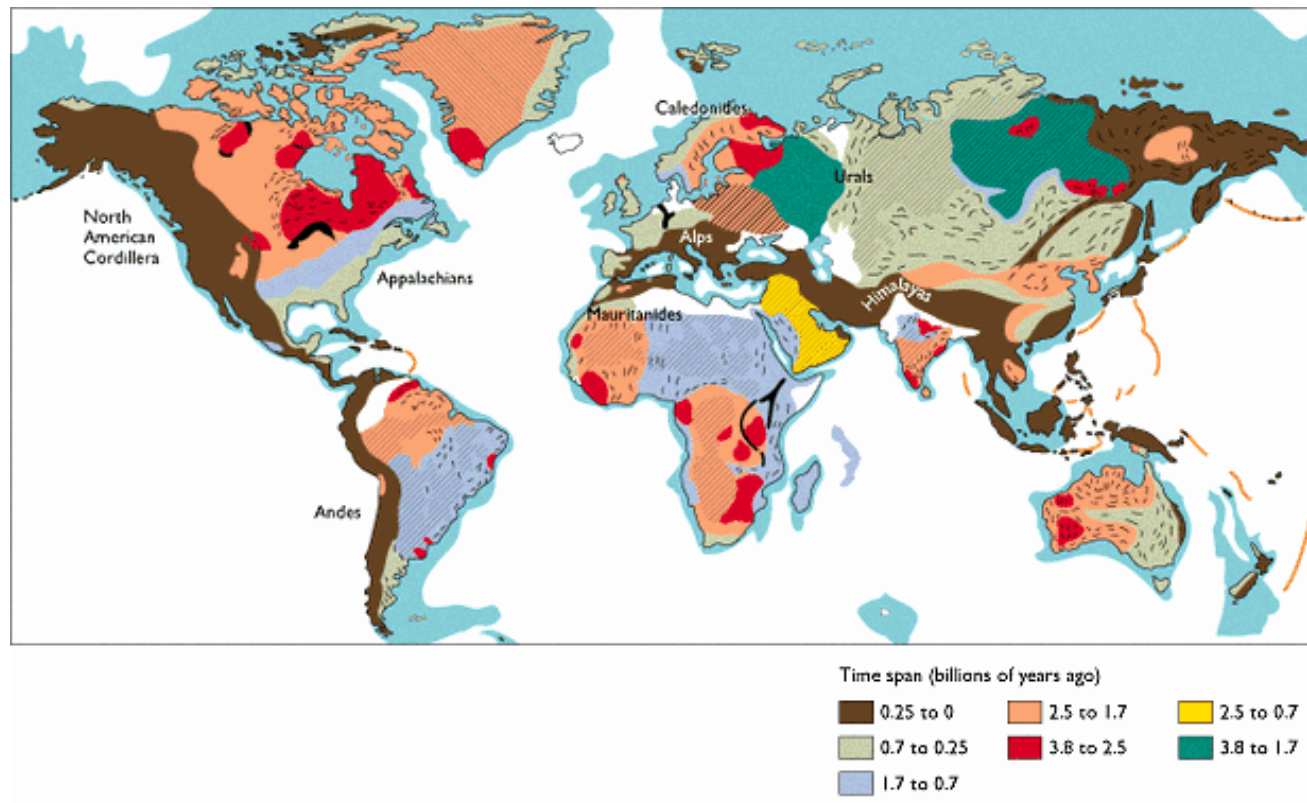


Rifty – mladá kůra, elevace, vysoké teploty

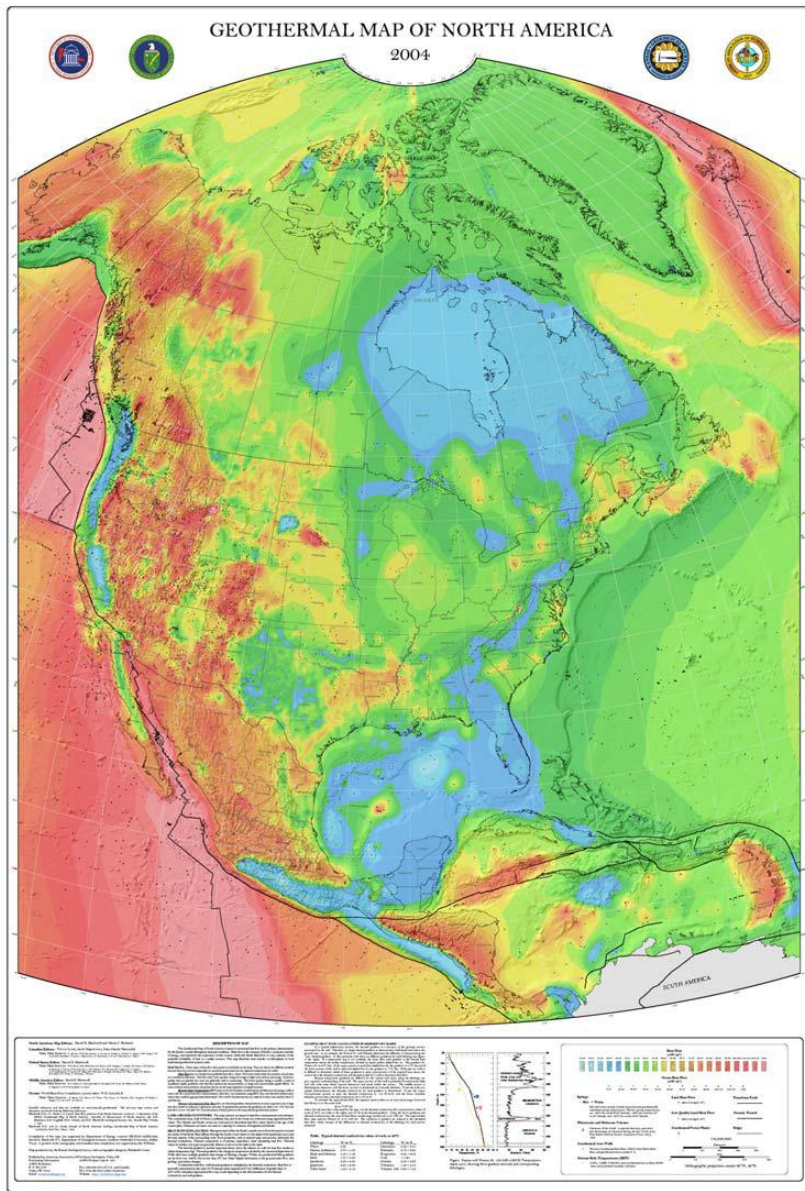
Subdukční zóny – zanikající kůra, deprese, nízké teploty



Kontinentální kůra – lze pozorovat pokles tepelného toku se stářím a s mocností kůry.

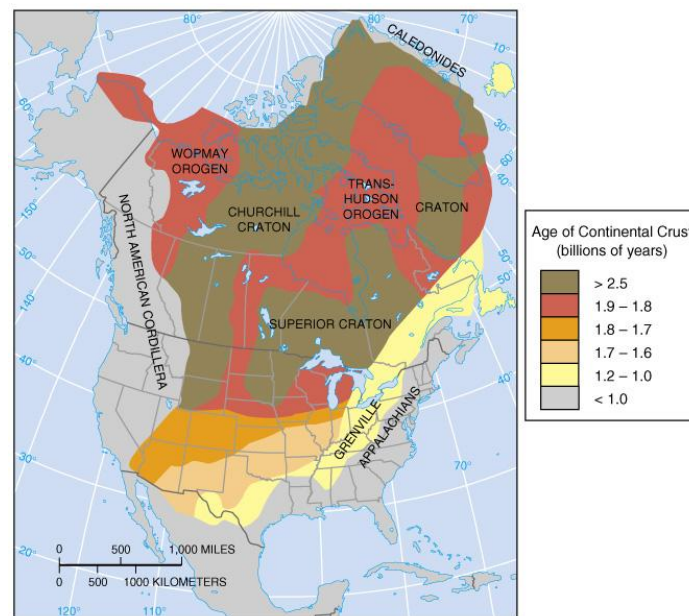


Geotermika



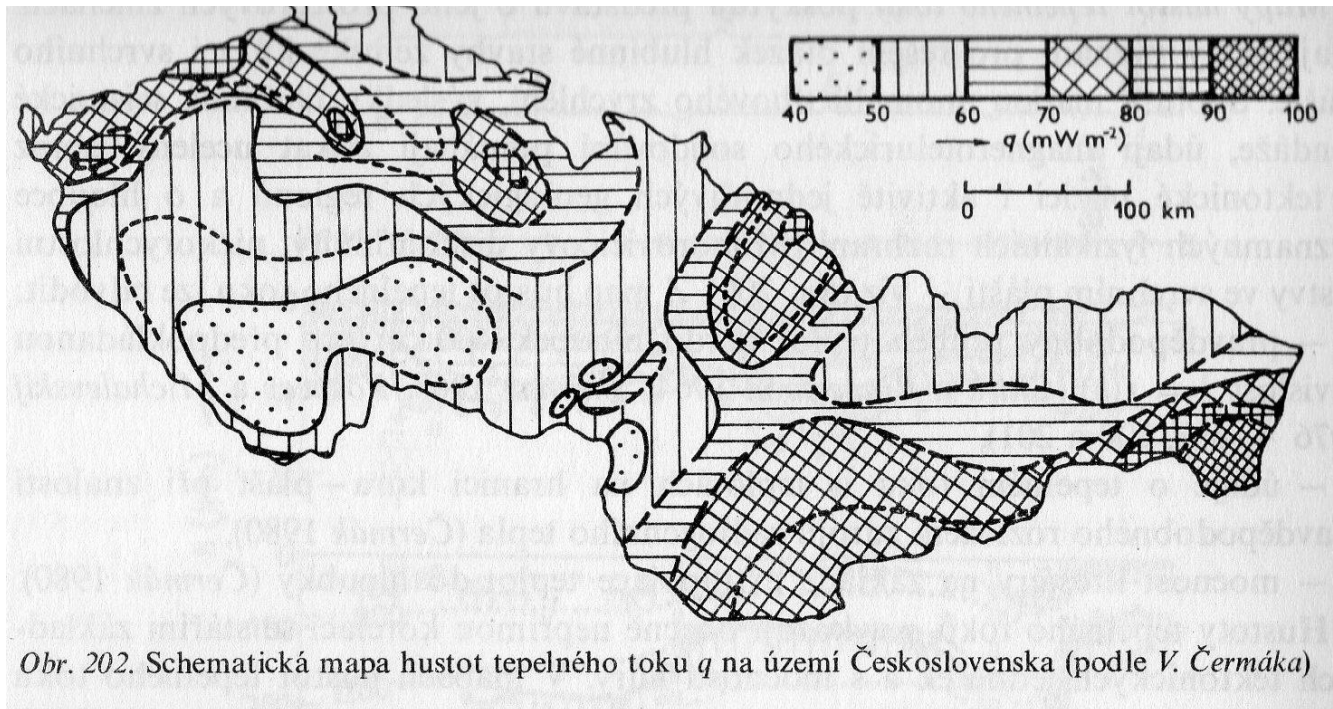
Aktivní regiony – tepelný tok srovnatelný v kontinentální a v oceánské oblasti.

Nejstarší části kontinentální kůry mají nižší tepelný tok, než nejstarší části oceánské kůry.

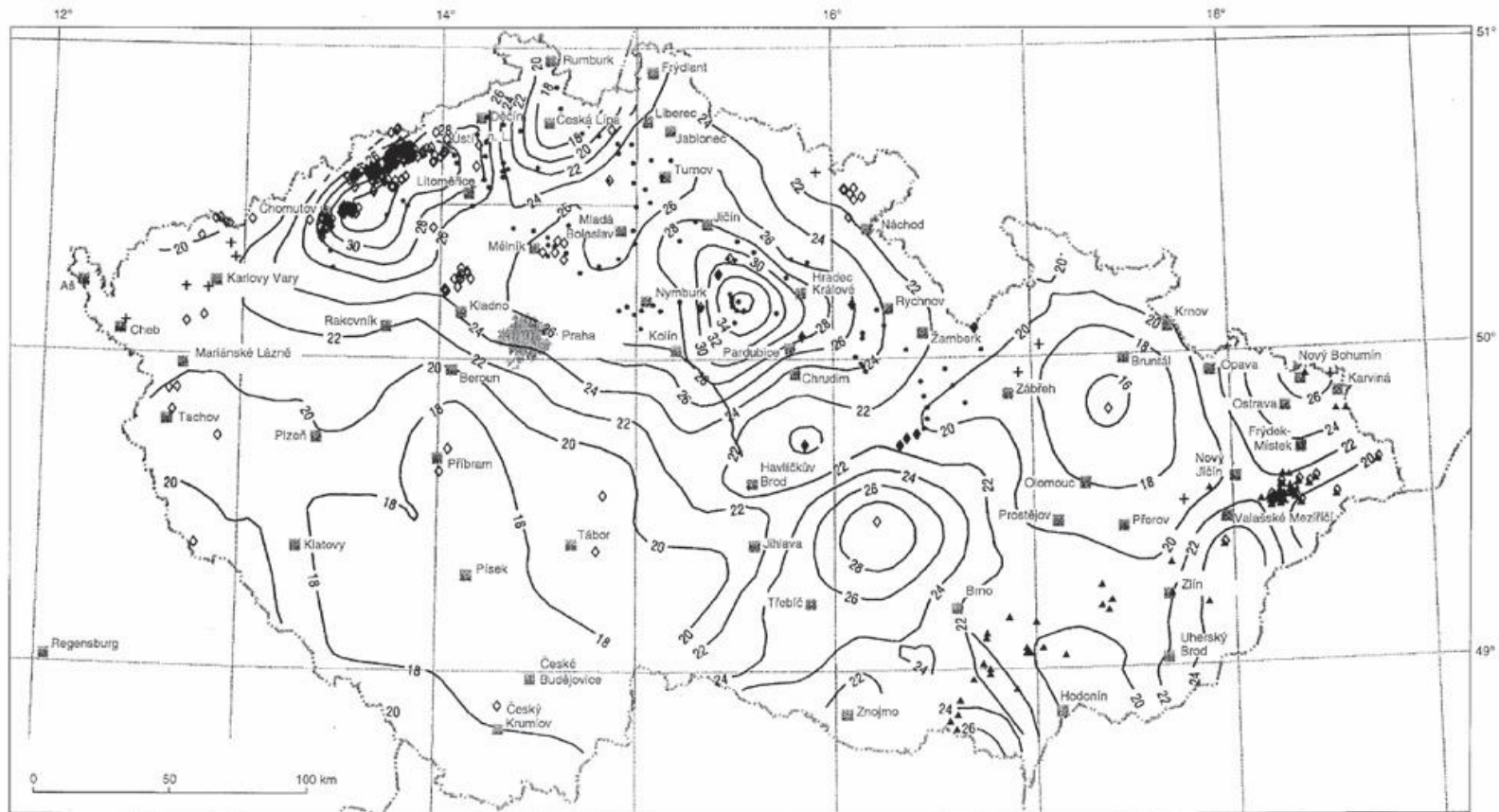


Teplotní pole v prostoru Českého masivu

Prostorová variabilita tepelného toku je zřetelná také v menším měřítku.



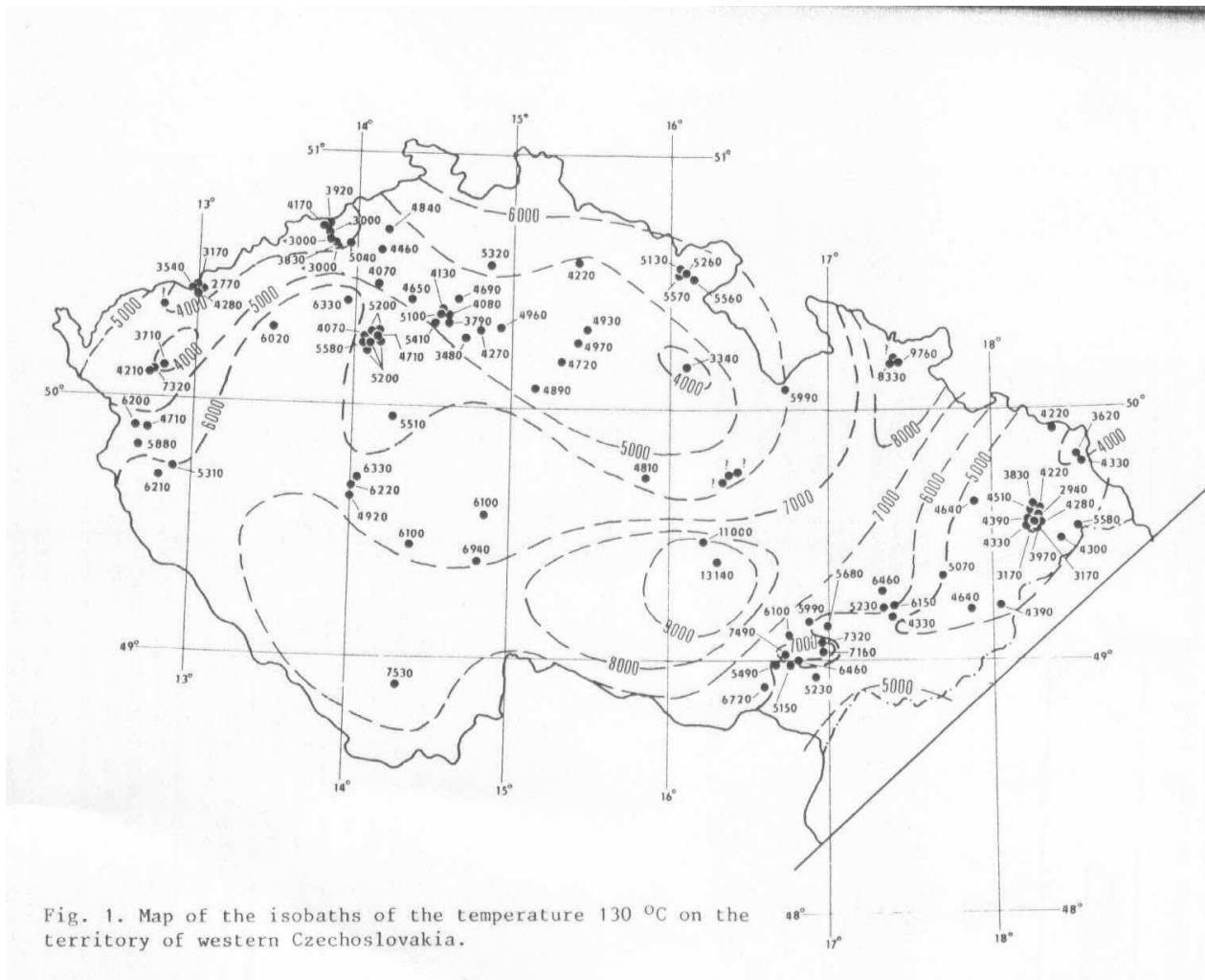
Teploty horninového prostředí v Českém masivu v hloubce 500 m pod povrchem (Burda, Myslíl).



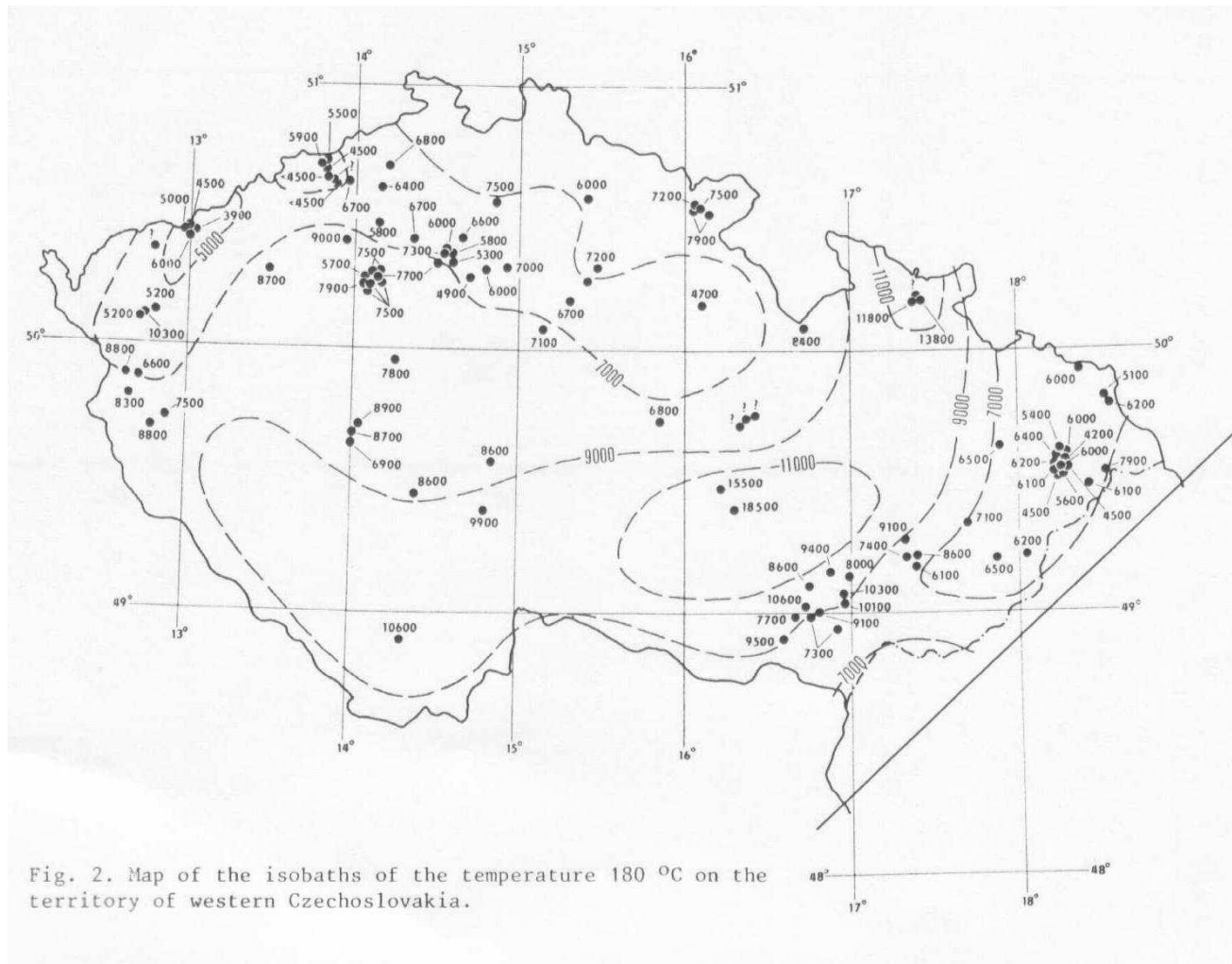
26. Mapa s konturami znázorňujícími teploty horninového prostředí v hloubce 500 m pod povrchem. Ukázka geotermických podmínek horninového prostředí České republiky s většími anomáliemi v oherské riftové zóně a české křídové pánvi. Malé tečky – vrty v české křídové pánvi, plné trojúhelníčky – vrty v Karpatské předhlubni, prázdné kosočtverečky – oherská riftová zóna a síť měření Geofyzikálního ústavu AV ČR, křížky – lázně. Sestavili J. Burda a V. Myslíl pro Geotermální atlas Evropy.



Izohypsy 130 °C v Českém masivu (Čermák 1989).



Izohypsy 180 °C v Českém masivu (Čermák 1989).



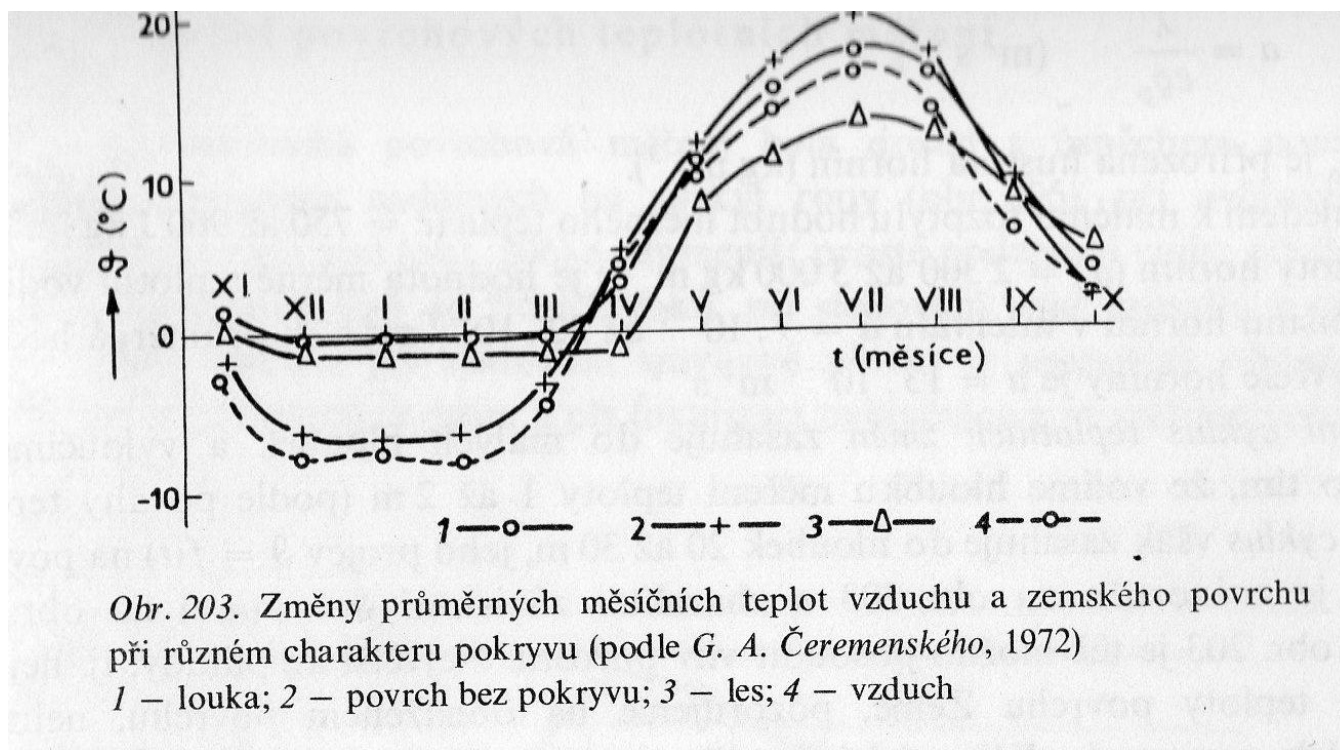
Vyšší tepelný tok v prostoru krušnohorské oblasti, české křídové pánve a karpatské předhlubně.

tepelný tok ve vybraných regionech Českého masivu [10 ⁻³ W/m ²]	minimální	maximální	průměr
moldanubikum	25	72	54
Barrandien	44	92	60
Krušné hory a Podkrušnohoří	59	121	85
česká křídová pánev	59	96	73
Jeseníky	23	55	39
karpatská předhlubeň	45	124	83



Variabilita teplotního pole v čase

Při povrchu je teplotní pole hornin silně ovlivněno klimatem, charakterem porostu a periodickými teplotními změnami (denní a roční cykly).



Charakter připovrchového pole lze popsat vztahem:

$$T = T_0 \cdot e^{-h \sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \cdot \cos \left(\omega t - h \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right)$$

T ... teplota

h ... hloubka pod povrchem

ω ... $2\pi/\tau$ (τ je perioda cyklické změny)

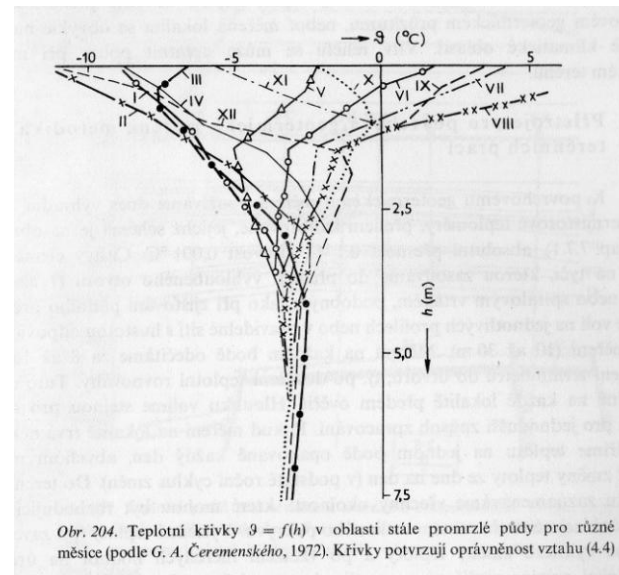
a ... součinitel teplotní vodivosti



$$T = T_0 \cdot e^{-h \sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \cdot \cos \left(\omega t - h \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right)$$

člen $T_0 \cdot e^{-h \sqrt{\frac{\omega}{2a}}}$

popisuje rychlé zmenšení amplitudy s rostoucí hloubkou



$$T = T_0 \cdot e^{-h \sqrt{\frac{\omega}{2a}}} \cdot \cos \left(\omega t - h \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \right)$$

člen $-h \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$ v argumentu funkce cosinus

popisuje zpoždění účinků přívrchových teplotních změn na horninu v hloubce



Závislost teploty na hloubce (geoterma)

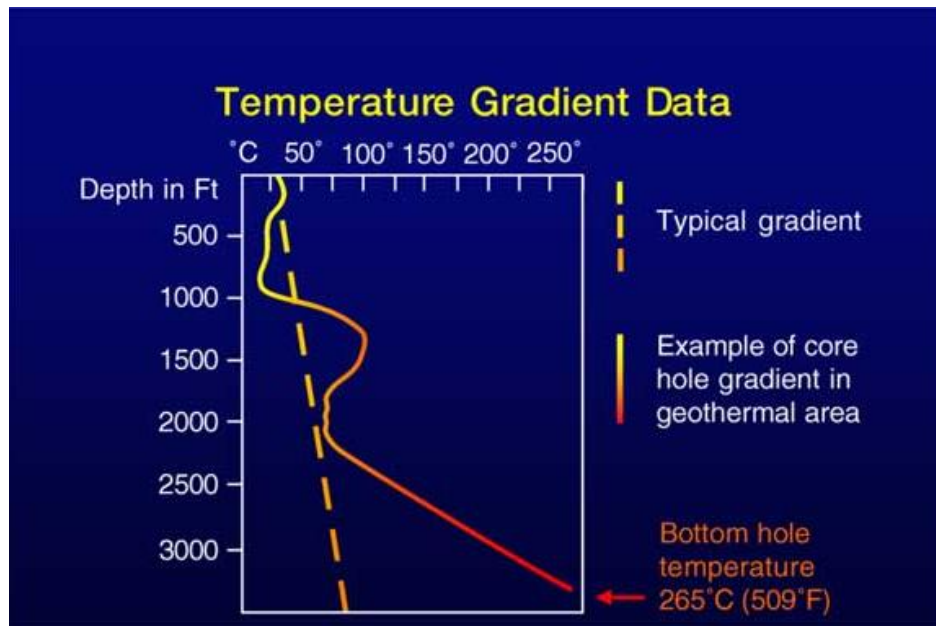
Je popisována tzv. geotermálním gradientem - vzrůst teploty litosféry na jeden kilometr.

Průměrný geotermální gradient ve svrchní kůře (geofyzikální měření) je cca $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Do hloubky se tento gradient mění.



Zjišťování geotermálního gradientu:

- přímé měření (do hloubky 12 km)
- petrologická data (do hloubky cca 250 km)
- geofyzikální data (seismické vlastnosti hlubších partií tělesa Země)
- extrapolace laboratorních experimentů a fyzikálních modelů



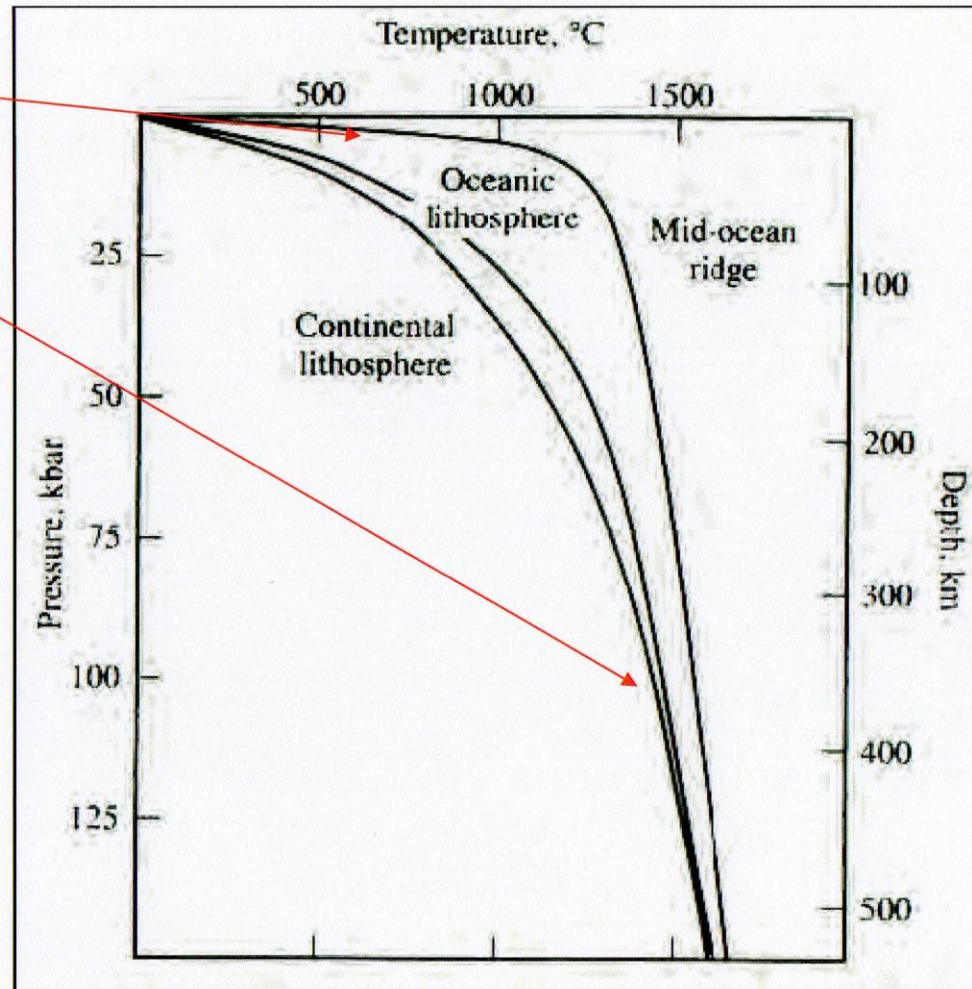
Svrchní část Země - různé geotermy

konduktivní chlazení

konvektivní chlazení

Oceánská geoterma
v průměru teplejší
(prům. $Q \approx 100 \text{ mW/m}^2$)

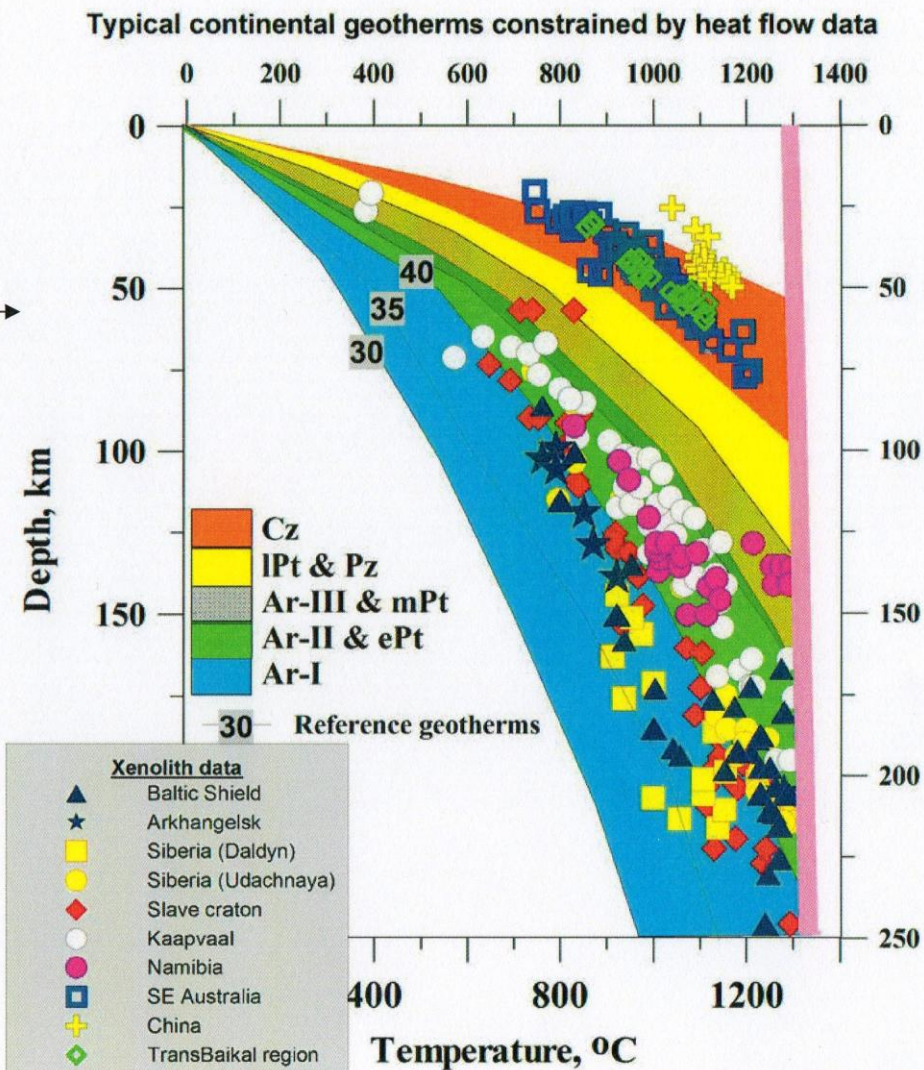
Kontinentální geoterma
v průměru chladnější
(prům. $Q \approx 65 \text{ mW/m}^2$)



Svrchní část Země - různé geotermy

Povrchový tepelný tok
+ termobarometrie xenolitů

- role stáří/tektonického režimu litosféry



Artemieva, 2006

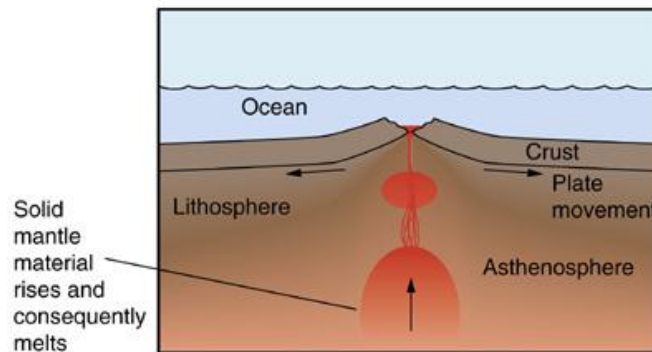
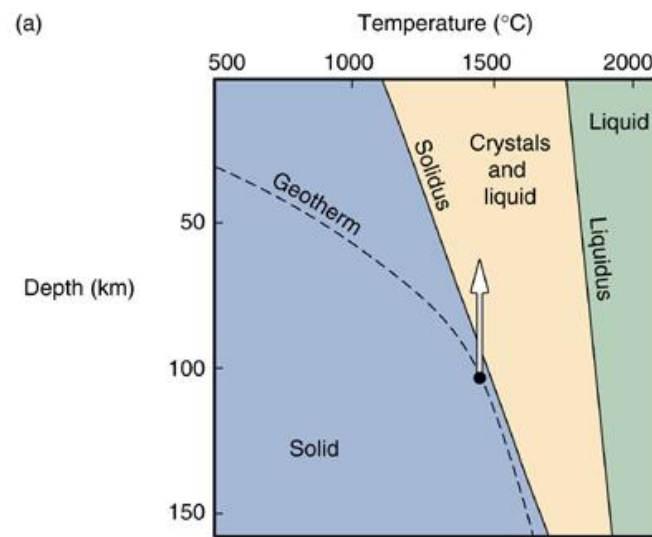


Geotermika

Vztah geotermy a vulkanismu (rifty):

Zvýšený tepelný tok:

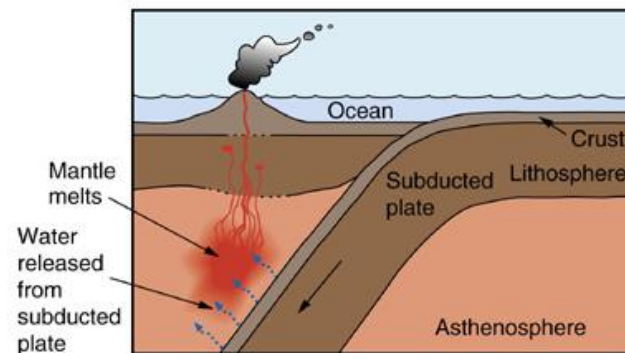
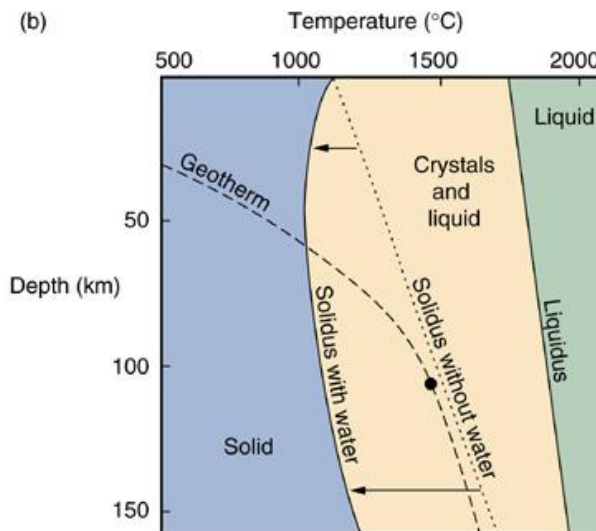
Posun geotermy do menších hloubek
– geoterma protíná oblast tavení.



Vztah geotermie a vulkanismu (subdukční zóny):

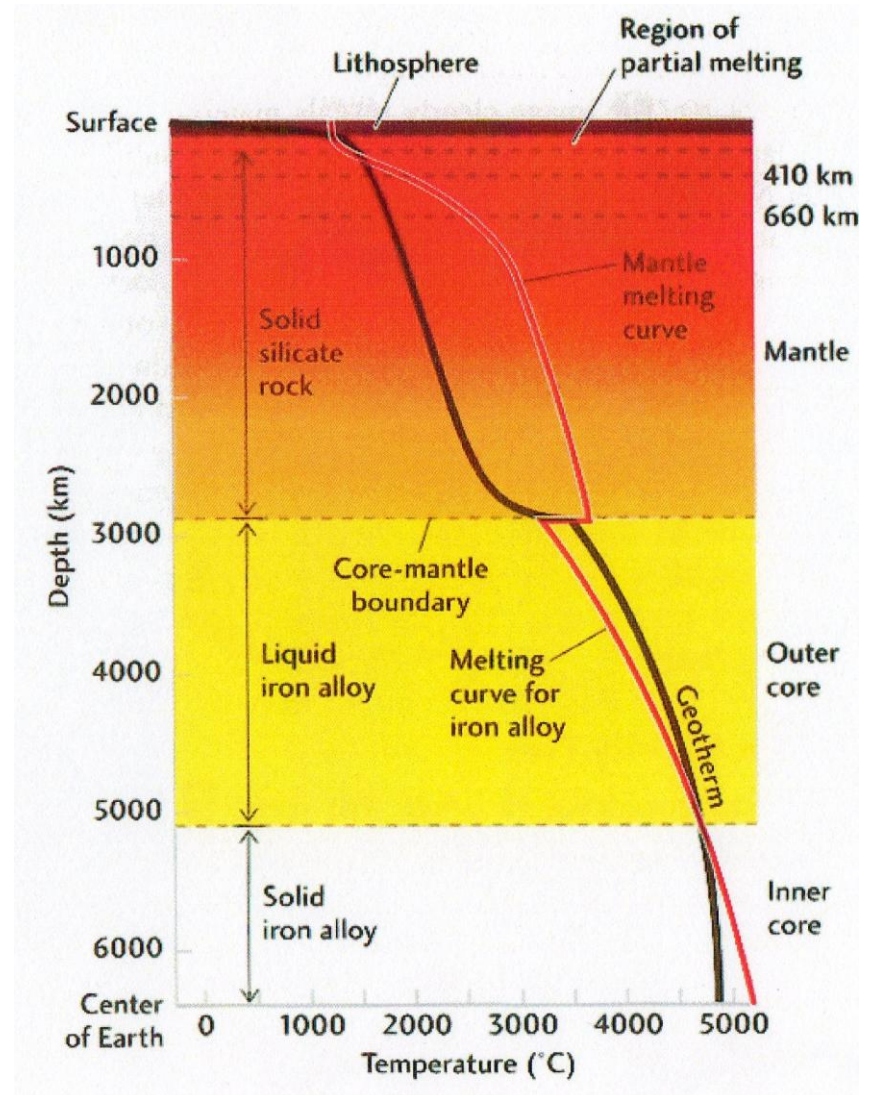
Přítomnost vody:

Posun kritické meze mezi pevnou fází a taveninou – geoterma protíná oblast tavení.



Globální geoterma

- kapalné vnější jádro
- částečné tavení v nejvyšších partiích pláště



Geotermika

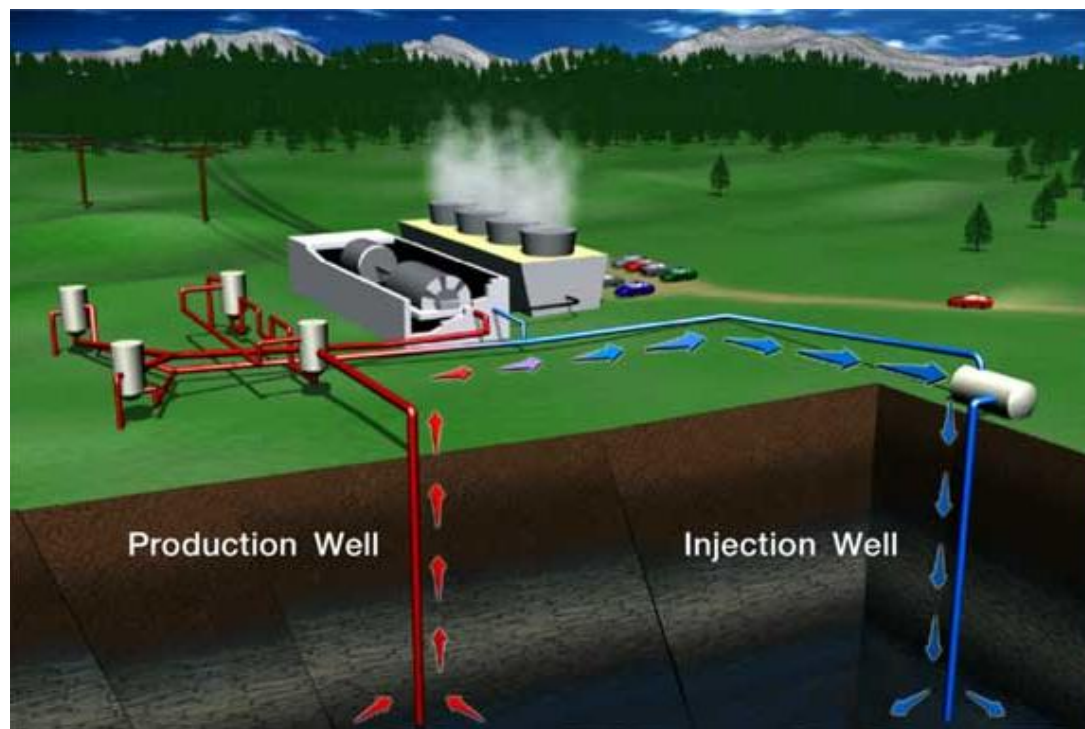
VYUŽITÍ

- geotermální energie
- lékařství (balneologie)



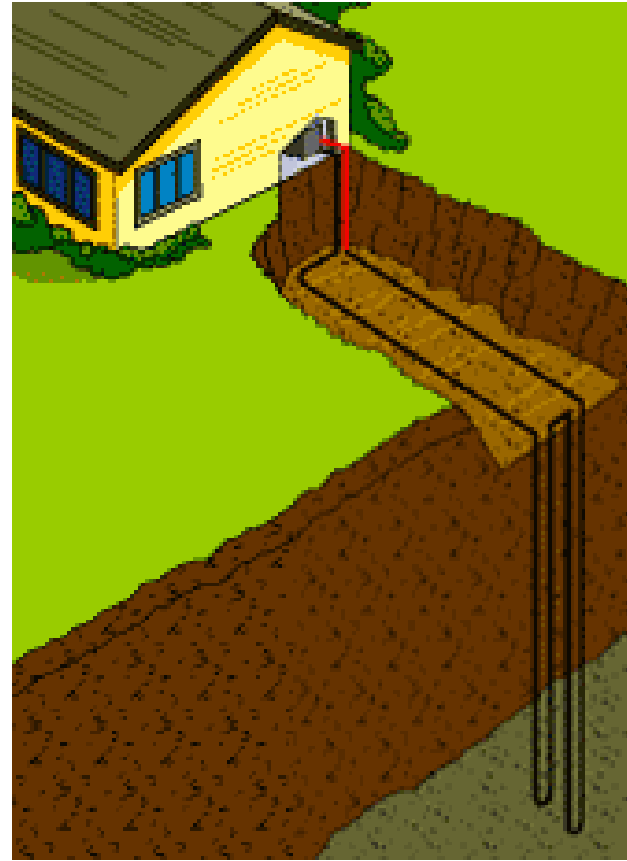
geotermální energie

elektrárny - využívá se geotermálního gradientu k ohřevu vody, takto získaná energie se mění na elektrický proud.



geotermální energie

vytápění



In summer, the fluid removes heat from the building and transfers it to the relatively cooler ground in order to cool the building (select image to enlarge).



Geotermika

lékařství

balneologie - lázně s horkými prameny

