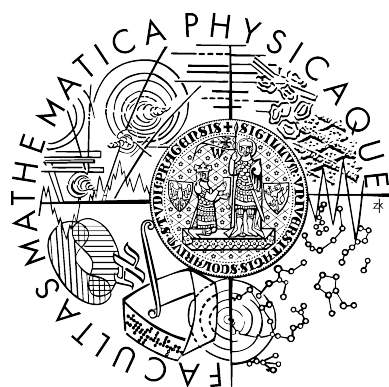


# **Kinematický model subdukující desky s teplotně a tlakově závislou tepelnou vodivostí**

Petra Maierová,  
Gerd Steinle-Neumann,  
Hana Čížková, Ondřej Čadek,  
Thomas Chust

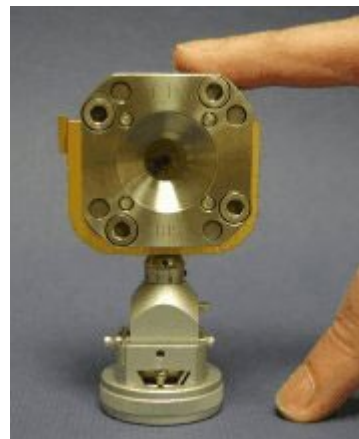


- Motivace
- Mineralogický model pláště a subdukující desky
- Tepelná vodivost plášťových hornin
- Numerický model
- Výsledky
- Shrnutí

# Motivace I

BGI = Bayerisches Geoinstitut

- <http://www.bgi.uni-bayreuth.de/>



- mnoho měření tepelné vodivosti pro různé minerály a horniny, za různých tlaků a teplot

radioactivity (Carslaw and Jaeger, 1959). The specific forms and values of  $k(T)$ , or  $D(T)$ , strongly influence the temperature distribution obtained in conductive cooling models due to the nonlinear nature of eqn [3]. Examples include warming of subducting slabs, stability of olivine near the transition zone, occurrence of deep earthquakes (Hauck *et al.*, 1999; Branlund *et al.*, 2000), buckling of the lithosphere (Gerbault, 2000), the geotherm (Hofmeister, 1999), and lithospheric cooling (Honda and Yuen, 2001, 2004).

*Hofmeister, Branlund (2007)*

- většina numerických modelů subdukce používá konstantní vodivost

➡ sestavit model subdukující desky s vodivostí podle dostupných měření

# Mineralogický model

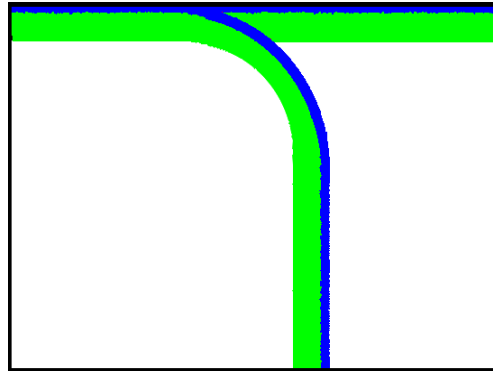
## Modelové horniny

- tři modelové horniny:

pyrolit

bazalt

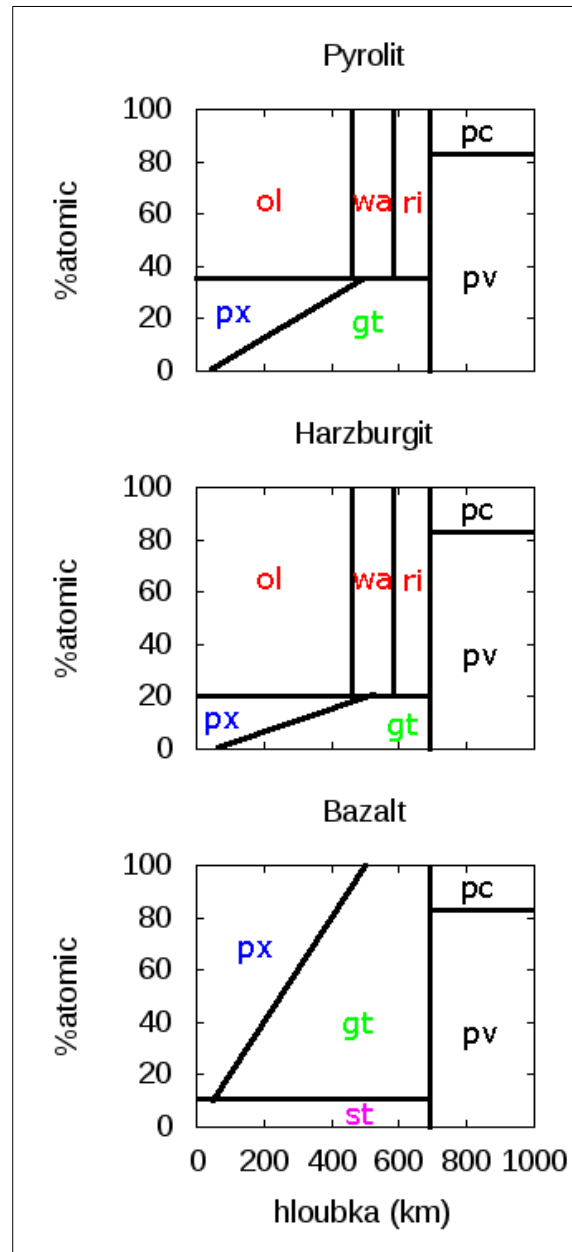
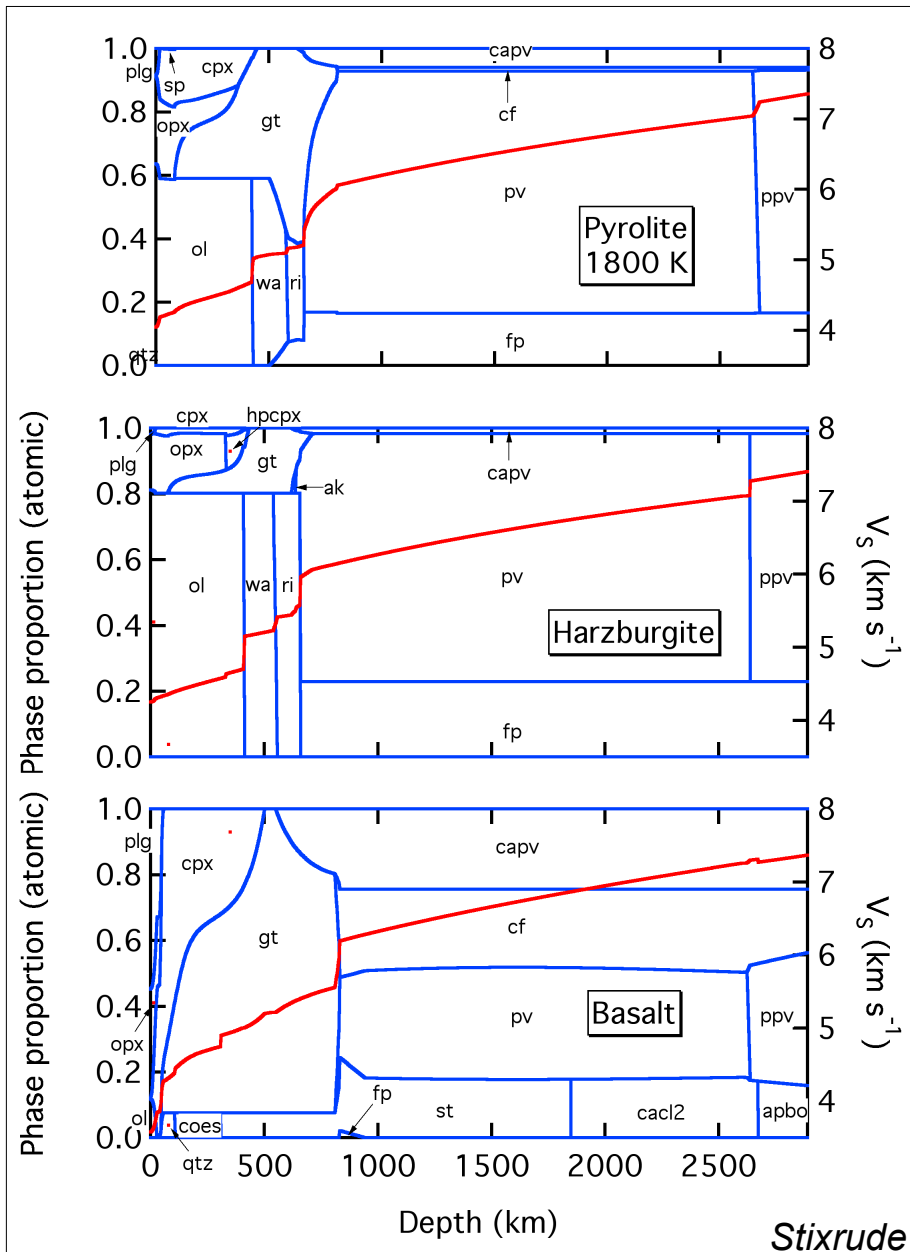
harzburgit



# Mineralogický model

## Modelové horniny

- zjednodušení, jen Mg-Si-O:



- minerály:
  - ol...olivín
  - wa...wadsleyit
  - ri...ringwoodit
  - gt...granát
  - (mj...majorit)
  - st...stišovit
  - px...pyroxen
  - (di...diopsid,
  - aug...augit)
  - pv...perovskit
  - pc(fp)...periklas
- fázové přechody  
*Katsura, Ito (1989),*  
*Akaogi et al. (1989),*  
*Bina, Helffrich (1994)*

# Tepelná difuzivita a vodivost

## Měření

- pro běžné tlaky a teploty:
  - jak pro minerály, tak pro horniny
  - v laboratoři, ve vrtech
- pro vysoké tlaky:
  - jen pro minerály (malé vzorky)
- obvykle zvlášť měření závislosti na teplotě a zvlášť na tlaku

# Tepelná difuzivita a vodivost

## Tlaková a teplotní závislost

- měření difuzivity  $D = \frac{k}{\rho c_p}$ , výpočty vodivosti

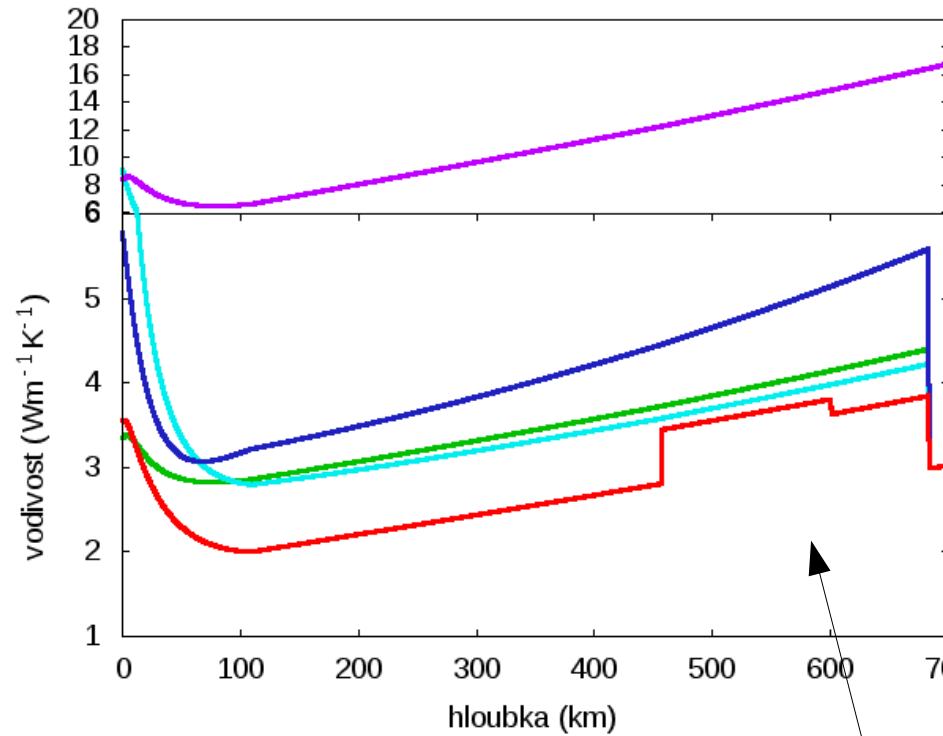
	tepelná vodivost nebo difuzivita	parametry	
olivín	$D = D_{298} \left(\frac{298}{T}\right)^n (1 + aP)$	$D_{298} = 1.31 \text{ mm}^2/\text{s}, n = 0.68, a = 0.036 \text{ GPa}^{-1}$	<i>Xu et al. (2004)</i>
wadsleyit		$D_{298} = 2.55 \text{ mm}^2/\text{s}, n = 0.72, a = 0.023 \text{ GPa}^{-1*}$	
ringwoodit		$D_{298} = 3.09 \text{ mm}^2/\text{s}, n = 0.79, a = 0.022 \text{ GPa}^{-1*}$	
granát (majorit)	$D = D_0 \left(\frac{D_1}{T}\right) (1 + aP)$	$D_0 = 0.62 \text{ mm}^2/\text{s}, D_1 = 300 \text{ K mm}^2/\text{s}, a = 0.022 \text{ GPa}^{-1*}$	<i>Dobson et al. (2010)</i>
stišovit		$D_0 = 0.49 \text{ mm}^2/\text{s}, D_1 = 690 \text{ K mm}^2/\text{s}, a = 0.1 \text{ GPa}^{-1}$	<i>Yukutake, Shimada (1978) Osako, Kobayashi (1978)</i>
pyroxeny	$D = (D_0 + D_1T + D_2T^2)^{-1} (1 + aP)$		<i>Hofmeister, Pertermann (2008)</i>
perovskit	$k = k_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^g \left(\frac{T_0}{T}\right)$	$k_0 = 0.7 \text{ W/m/K}, \rho_0 = 3870 \text{ kg/m}^3, T_0 = 2000 \text{ K}$ $g = g(\rho), \rho = \rho(P, T)$	<i>de Koker (2010)</i>
periclas		$k_0 = 7.01 \text{ W/m/K}, \rho_0 = 3300 \text{ kg/m}^3, T_0 = 2000 \text{ K}$ $g = g(\rho), \rho = \rho(P, T)$	



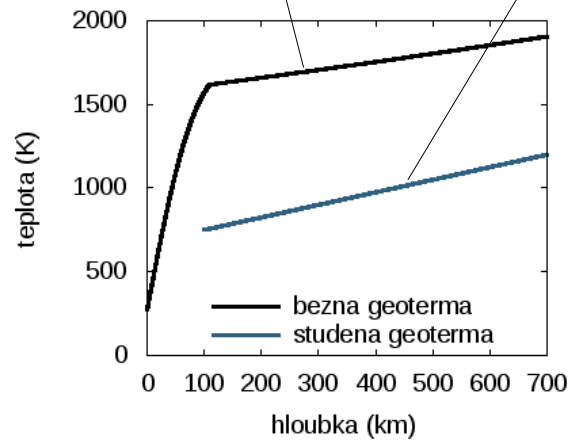
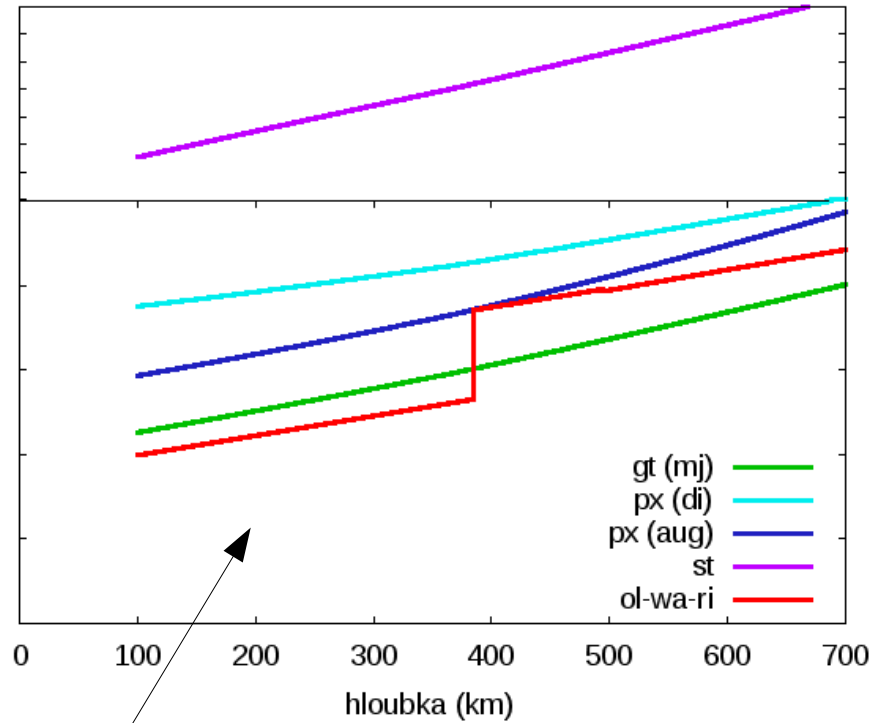
# Tepelná vodivost

## Minerály pláště a subdukující desky

vodivost podél běžné geotermny



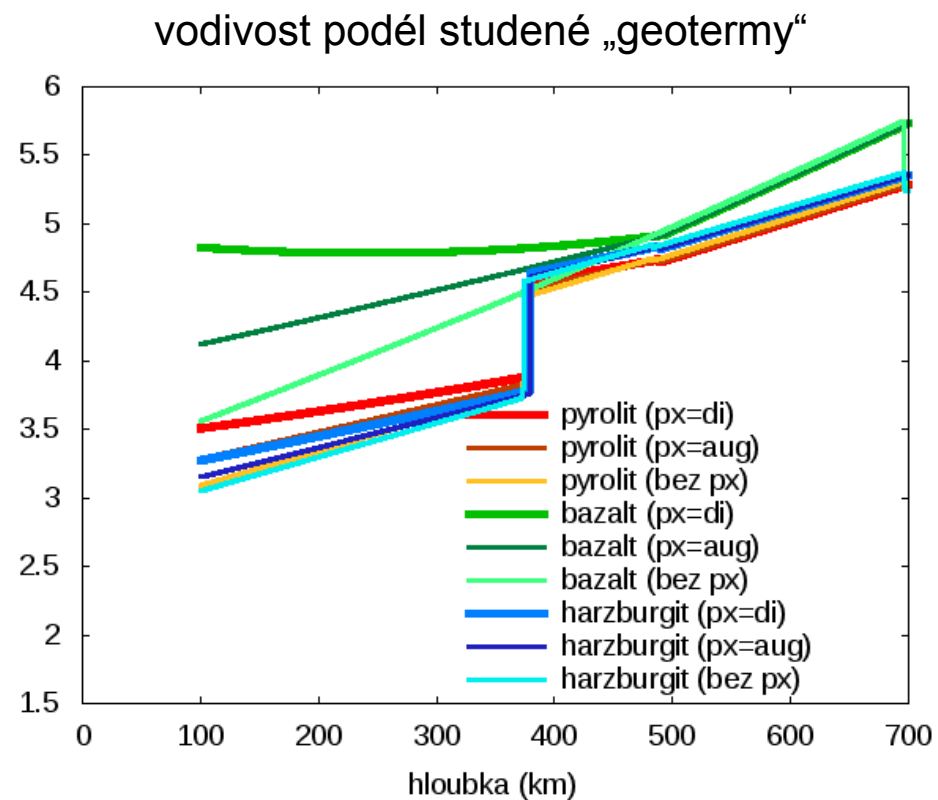
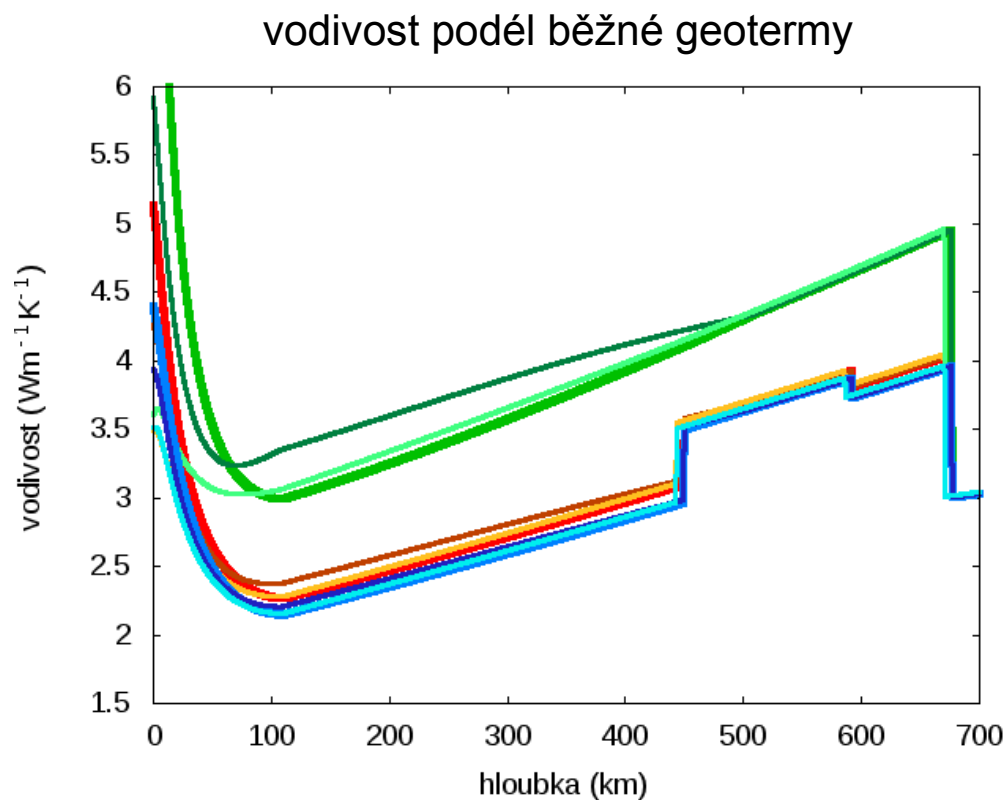
vodivost podél studené „geotermny“



# Tepelná vodivost

## Horniny pláště a subdukující desky

- průměrování pomocí Hashinových-Shtrikmanových mezí



- nejasnosti:

- jaký pyroxen zvolit?
- vodivost při povrchu známá a výrazně nižší – vliv porozity?

- rovnice přenosu tepla s disipačním a adiabatickým zahříváním

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} - \nabla \cdot k \nabla T = \boldsymbol{\sigma} : \dot{\boldsymbol{\epsilon}} - \alpha \rho v_z T g$$
$$k, \rho, c_p, \alpha = f(P, T)$$

- rovnice kontinuity pro nestlačitelný materiál, pohybová rovnice bez objemových sil

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \nabla p - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0$$

- viskózní kompozitní reologie

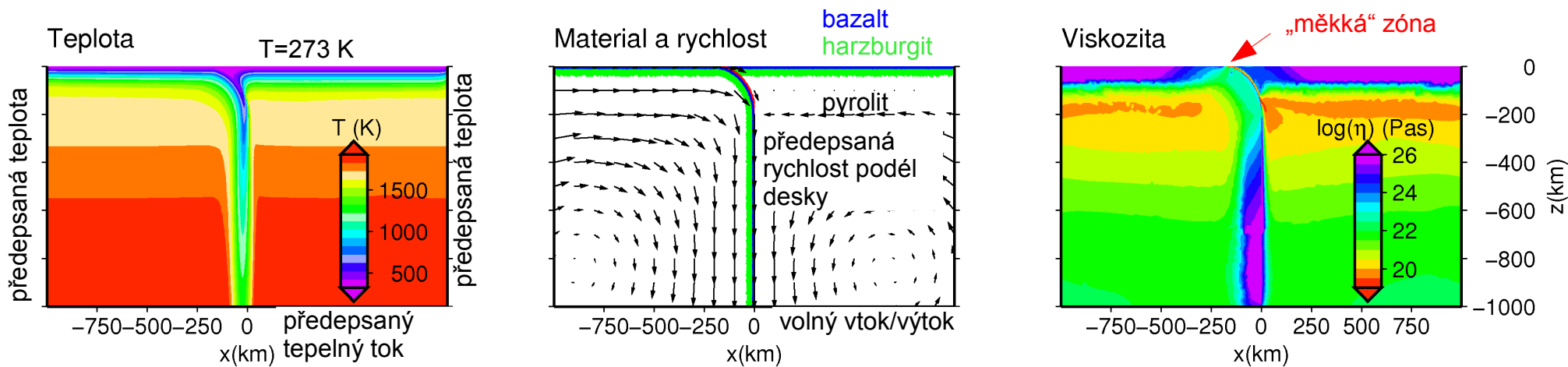
$$\boldsymbol{\sigma} = 2\eta_{\text{eff}} \dot{\boldsymbol{\epsilon}}, \quad \eta_{\text{eff}} = \left( \frac{1}{\eta_{\text{diffusion}}} + \frac{1}{\eta_{\text{dislocation}}} + \frac{1}{\eta_{\text{stress limiter}}} \right)^{-1}$$

- hustota, tepelná kapacita a teplotní roztažnost: *Xu et al. (2008), Fabrichnaya et al. (2004)*
- viskozita: *Běhounková, Čížková (2008)*

# Model

## Modelovaná oblast, hraniční a počáteční podmínky

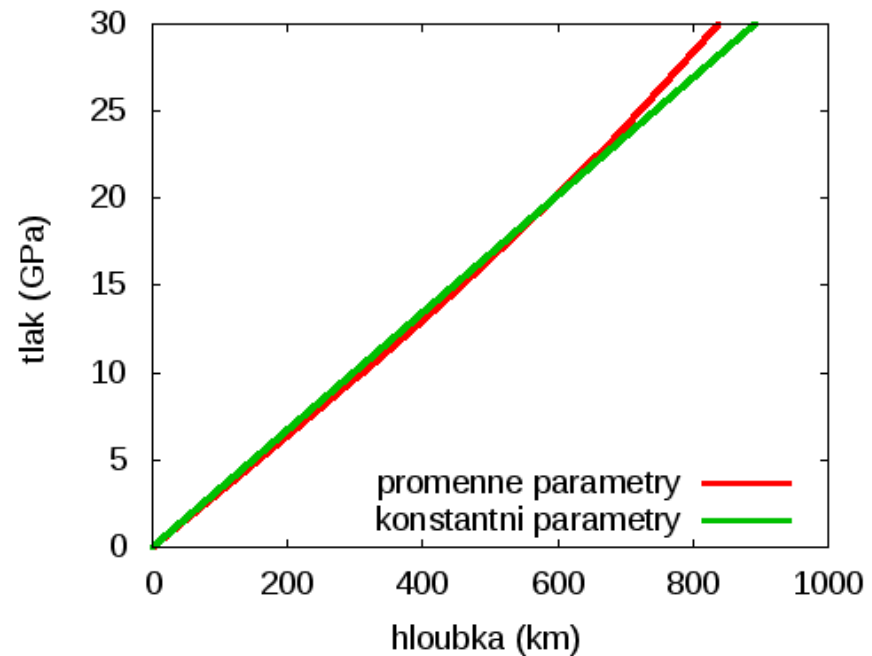
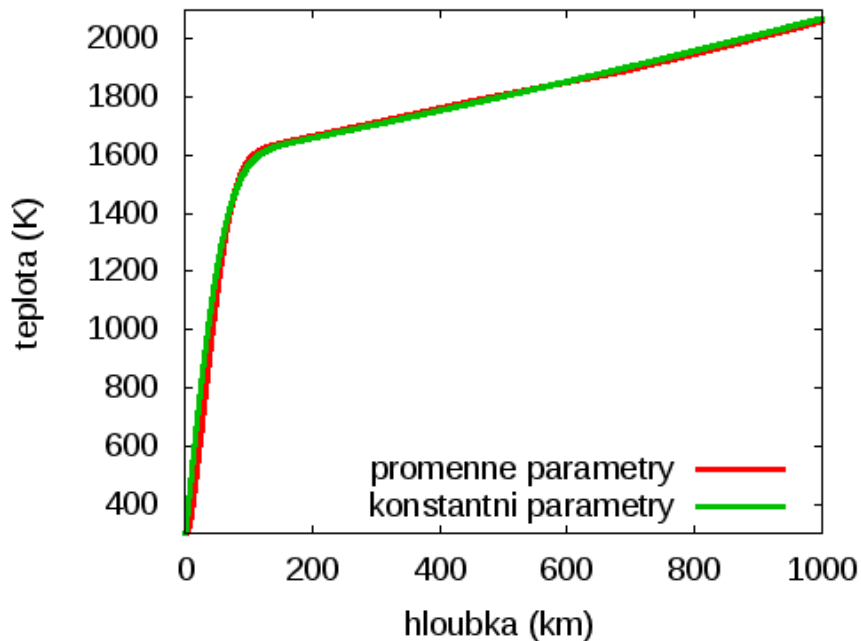
- Elmer – Open Source FE Software for Multiphysical Problems (<http://www.csc.fi/english/pages/elmer>)
- evoluční kinematický model
- trojúhelníková síť zahuštěná podél subdukce



# Model

## Geoterma a hydrostatický tlak

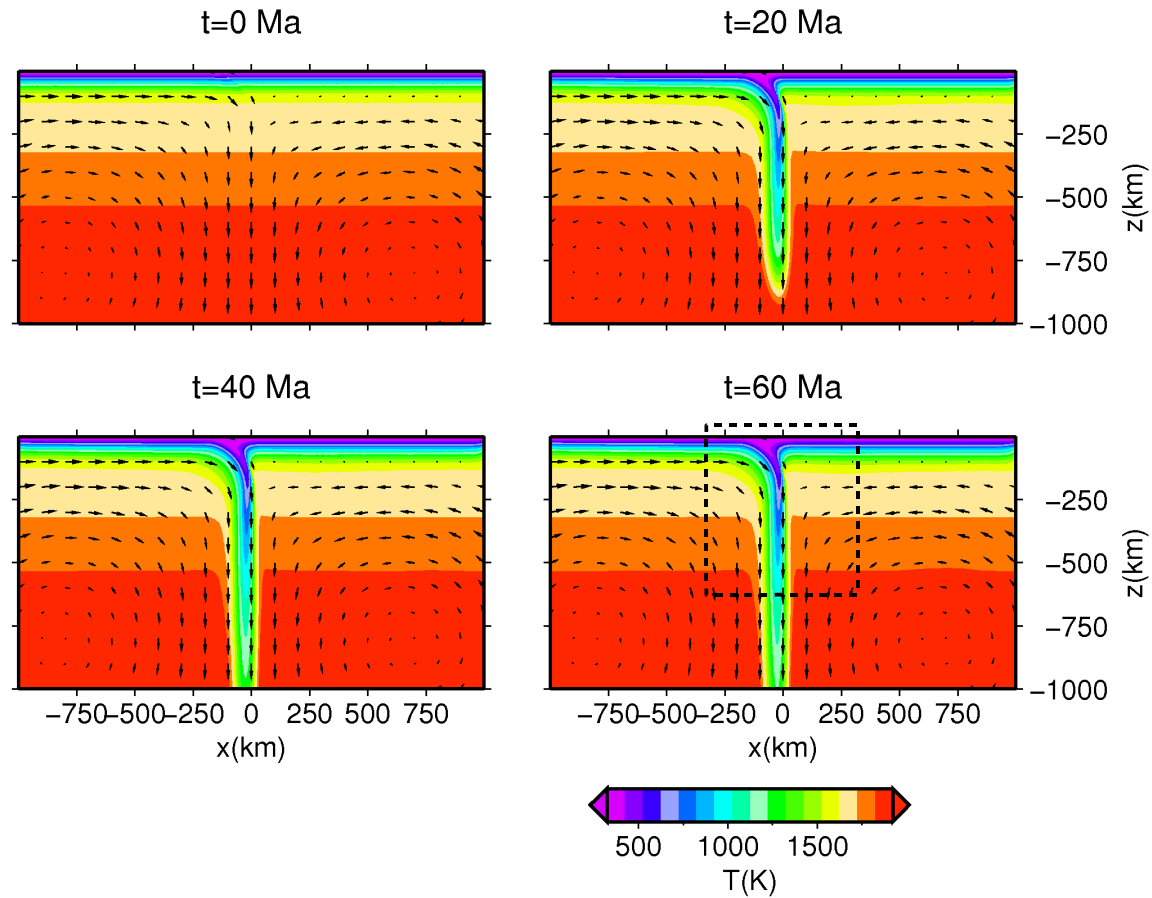
- počáteční a hraniční geoterma je kombinace adiabaty a chladnutí svrchní vrstvy
  - adiabata – numericky integrovaný adiabatický gradient, od tzv. potenciální teploty na povrchu (1570 K), iterativní výpočet
  - numericky vypočítané chladnutí svrchních 300 km adiabaty po určitou dobu (= „stáří desky“)
- geoterma závisí na parametrech  $k, \rho, c_p, \alpha$



- konstantní parametry:  $k = 3 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $c_p = 1250 \text{ JK}^{-1}\text{kg}^{-1}$ ,  $\rho = 3400 \text{ kgm}^{-3}$ ,  $\alpha = 3.5 \cdot 10^{-5}$

# Výsledky

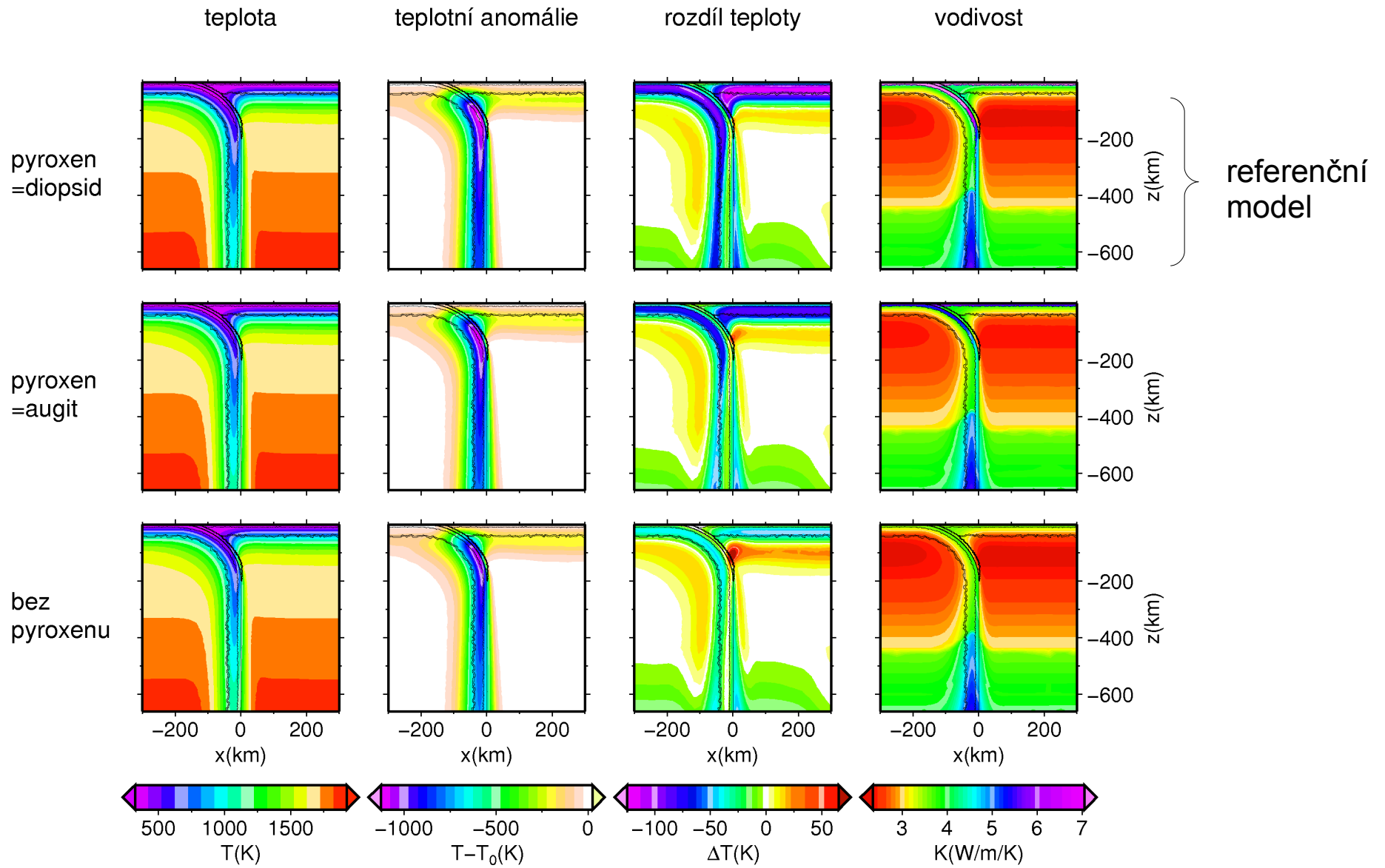
## Vývoj teploty



- stáří desky 100 Ma, rychlost 5 cm/a – referenční hodnoty

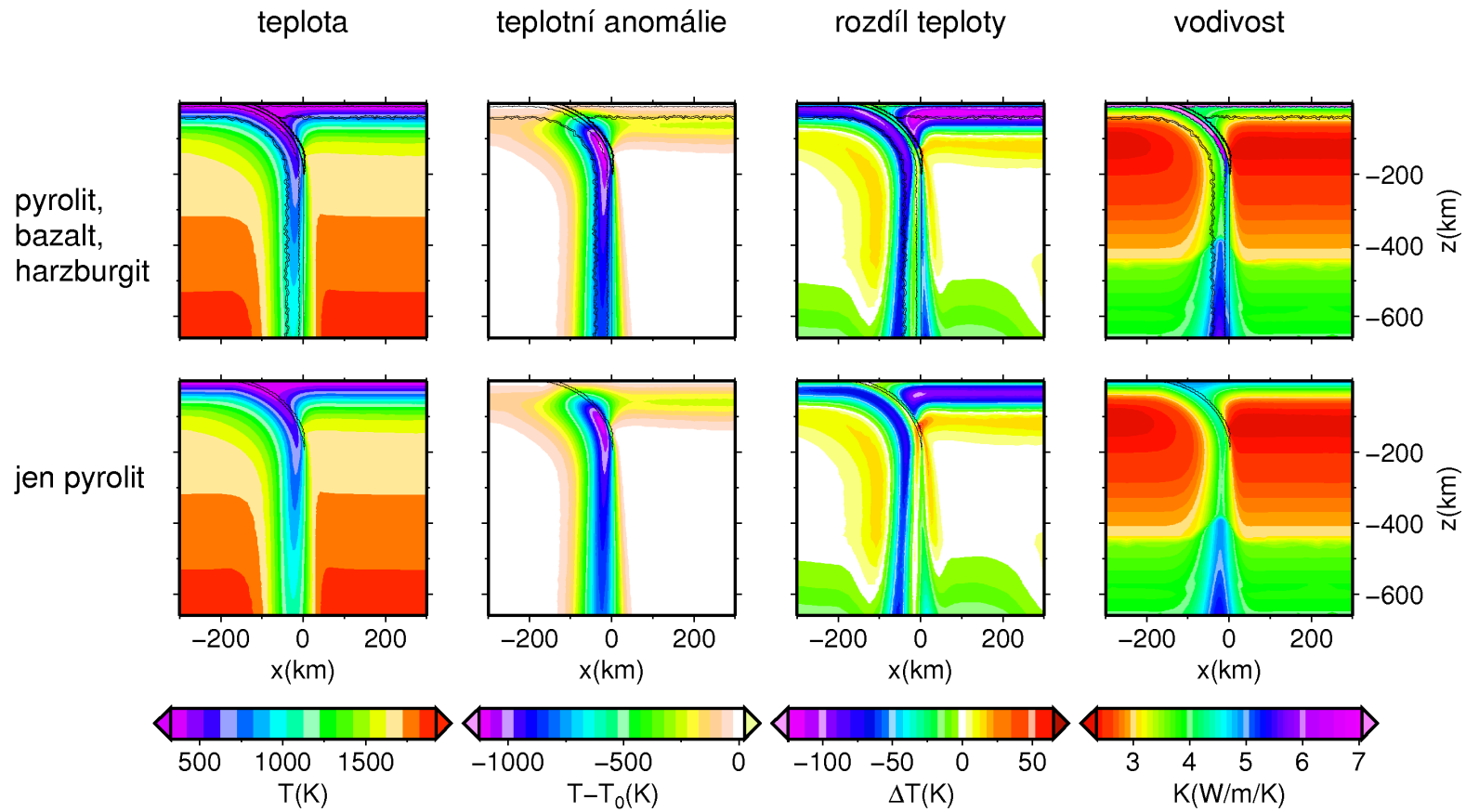
- zkoumám stav v době, kdy by deska „dorazila“ k CMB (pro rychlost subdukující desky 5 cm/a je to 60 Ma), v této době se pole teploty téměř nemění (kromě chladnutí nadložní desky)
- srovnávám model s proměnnými parametry a model s konstantními parametry
- vykreslované veličiny:
  - teplota
  - teplotní anomálie
  - rozdíl teplot pro model s proměnnými a konstantními parametry
  - tepelná vodivost
- počáteční stav a hraniční podmínky předepisují stejné – napočítané pro model s proměnnými parametry

# Výsledky

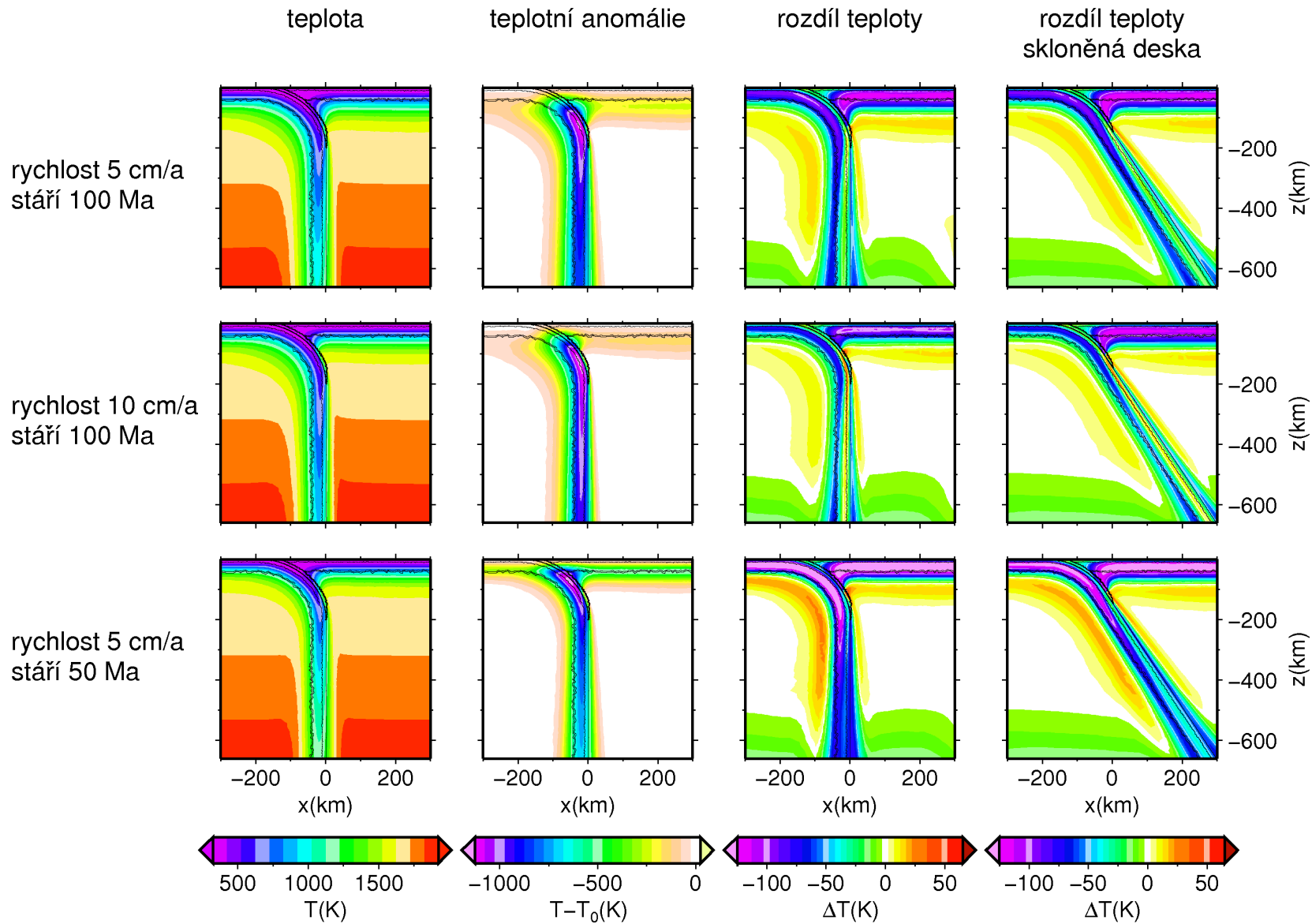




# Výsledky



# Výsledky



- efekt proměnné vodivosti na teplotu ve subdukující desce není velký (alespoň ve svrchním plášti a přechodové zóně)
- uvažujeme-li pyroxen s vysokou vodivostí, jsou některé vrstvy subdukující desky až o 100 K chladnější než v modelu s konstantní vodivostí
- rozdíl v teplotě je významnější pro mladou desku a malou rychlost subdukce
- stávající model je kinematický – není velká zpětná vazba mezi teplotou a pohybem materiálu
- v dynamickém modelu s objemovou silou se projeví teplota nejen v reologii, ale také ve vztlaku

➔ sestavit dynamický model subdukce s proměnnou vodivostí

- potíže:
  - vysoké rozlišení (bazaltická vrstva jen 10 km silná)
  - různé složení vrstev (bazalt, harzburgit, pyrolit)
  - nutné zvětšení oblasti nebo úprava hraničních podmínek