



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Ivana Štencová

**Model termální konvekce v programu
ASPECT**

Katedra geofyziky

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Hana Čížková, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Praha 2024

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Velký dík patří zejména vedoucí mé práce, Doc. RNDr. Haně Čížkové, Ph.D., za ohromné množství času, trpělivosti, podnětných návrhů a připomínek v průběhu celého vzniku této práce. Dále patří dík i mým blízkým, kteří mi byli v průběhu nejen tvorby této práce, ale i v průběhu celého studia, velkou oporou.

Název práce: Model termální konvekce v programu ASPECT

Autor: Ivana Štencová

Department: Katedra geofyziky

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Hana Čížková, Ph.D., Katedra geofyziky

Abstrakt: Nejsvrchnější vrstva Země, litosféra, je rozlámána na několik částí, kterým říkáme litosférické desky. Ty se vůči sobě pohybují rychlostí několik centimetrů za rok. V oblastech, kde se dvě tektonické desky setkávají může docházet k podsouvání jedné desky pod druhou, tedy k takzvané subdukcii. Jedním z nejdůležitějších nástrojů, který nám umožňuje tento jev studovat, jsou numerické modely termální konvekce. Pro řešení soustavy rovnic popisujících proudění se v mezinárodní geodynamické komunitě používají desítky různých programů. Mezi nimi se v poslední době prosazuje programový balík ASPECT, který pro řešení soustavy používá metodu konečných prvků. ASPECT se vyznačuje zejména implementovaným adaptivním zahušťováním sítě, které je při zkoumání subdukcí litosférických desek velmi praktické, neboť v oblasti kontaktu desek potřebujeme rozlišit velice úzkou deformační zónu. V rámci práce jsme měli tento program porovnat s alternativním programovým balíkem SEPRAN, který je na Katedře geofyziky používán od konce 90. let. Byl vytvořen model subdukcí s mobilní nadložní deskou v ASPECTu a jeho výsledky byly porovnány s ekvivalentním modelem implementovaným v SEPRANu. Základní rysy chování subdukcí jsou konzistentní, srovnání obou programů ale potvrzuje závislost lokálních efektů na rozlišení výpočetní sítě zejména v oblasti kontaktu desek.

Klíčová slova: litosférické desky, subdukcce, numerické modely, software ASPECT, plášťová konvekce

Title: Implementation of thermal convection model in ASPECT

Author: Ivana Štencová

Department: Department of geophysics

Supervisor: doc. RNDr. Hana Čížková, Ph.D., Department of geophysics

Abstract: The outermost layer of the Earth, the lithosphere, is broken into several pieces called lithospheric plates. These plates move relative to each other at a rate of several centimeters per year. In regions where two tectonic plates meet, one plate may be forced beneath the other, a process known as subduction. One of the most important tools enabling us to study this phenomenon is numerical modeling of thermal convection. Dozens of different programs are used within the international geodynamic community to solve the system of equations describing the flow. Among them, a software package called ASPECT has been gaining prominence recently. ASPECT utilizes the finite element method to solve the governing equations and is particularly distinguished by its implemented adaptive mesh refinement. This feature is highly practical when studying subduction of lithospheric plates, as it allows for precise resolution of the narrow deformation zone at the plate boundaries. In the course of our work, we compared this program with the alternative software package SEPRAN, which has been used at the Department of Geophysics since the late 1990s. A subduction model with a mobile overriding plate was created in ASPECT, and its results were compared with an equivalent model implemented in SEPRAN. The fundamental behavior of the subducting plates is consistent; however, the comparison of both programs confirms the dependence of local effects on the resolution of the computational grid, especially in the area of plate contact.

Keywords: lithospheric plates, subduction, numerical models, ASPECT software, mantle convection

Obsah

Úvod	7
1 Matematický popis	8
1.1 Fázové přechody	8
1.2 Reologie	9
1.3 Aproximace základních rovnic	9
2 Modely	11
2.1 Modely v programu ASPECT	12
2.1.1 Adaptivní zahuštění sítě	13
2.2 Referenční model v programu SEPRAN	13
3 Výsledky	15
3.1 Modely v programu ASPECT	15
3.1.1 Model 1	15
3.1.2 Model 2	17
3.1.3 Model 3	19
3.1.4 Model 4	21
3.1.5 Model 5	21
3.1.6 Model 6	22
3.2 Model v programu SEPRAN	25
Závěr	26
Literatura	27
Seznam obrázků	29
Seznam tabulek	30
A Přílohy	31
A.1 Nastavení GWB pro Model 4	31
A.2 Skript v ASPECTu pro inicializační běh Modelu 4	32

Úvod

Plášť planety Země se z hlediska krátkodobých procesů, jako je šíření seismických vln, chová jako elastické prostředí. Chceme-li ale sledovat vývoj Země v řádu milionů let, deformuje se materiál pláště jako tekutina s vysokou viskozitou ($\eta \sim 10^{21}$ Pa s), dochází v něm k tečení rychlostmi v řádu jednotek centimetrů za rok.

V hloubce 2900 km pod povrchem Země se nachází rozhraní mezi zemským jádrem a pláštěm, kde teplota dosahuje 3500 - 4000 K. Země se ochlazuje a teplota tedy směrem k povrchu klesá, její nestabilní rozložení v plášti pak způsobuje pomalé pohyby, jejichž součástí jsou vzájemné pohyby litosférických desek. Ty vznikají na takzvaných středooceánských hřbetech, kde vyvěrá teplý materiál z pláště, ochlazuje se a posouvá se po povrchu směrem od hřbetu. Na místech, kde se setkávají dvě desky, které se pohybují směrem k sobě, může docházet k podsouvání jedné desky pod druhou, tomuto procesu říkáme subdukce. Chladná subdukující deska se pak zanořuje do teplého pláště a klesá jím dolů. Studiu tohoto procesu je věnována velká pozornost, při subdukci se totiž chladné tuhé desky deformují a hromadí se v nich velké napětí. Uvolňování tohoto napětí pak vede ke vzniku zemětřesení.

Díky velkému množství seismických stanic na zemském povrchu můžeme zaznamenávat časové rozdíly v příchodu seismických vln z epicenter zemětřesení na různá místa na povrchu. Analýzou těchto dat můžeme metodou seismické tomografie nahlédnout pod zemský povrch a získat tak poznatky o osudu subdukovaných litosférických desek a následně se pokusit o modelování těchto procesů v plášti pomocí numerických simulací (např. [1, 2, 3]).

Pro toto modelování se v mezinárodní geodynamické komunitě využívají desítky různých programů, založených na různých numerických metodách, které řeší soustavu rovnic popisujících proudění v plášti. Na Katedře geofyziky Univerzity Karlovy se již přes dvacet let pracuje s programovým balíkem SEPRAN [4], založeným na metodě konečných prvků. V poslední době se však mezi programy používanými pro modelování termální konvekce prosazuje také programový balík ASPECT [5, 6, 7], rovněž založený na metodě konečných prvků, který má oproti SEPRANu řadu výhod.

Jednou z nich je relativní přehlednost a uživatelská přístupnost, která ale nebrání velkému množství možností konfigurace a přizpůsobení modelu, které program nabízí. ASPECT je také dobře kompatibilní s dalšími nástroji používanými v oblasti geofyziky a geodynamiky.

Hlavní výhodou ovšem představuje implementované adaptivní zahušťování sítě. Díky tomuto nástroji můžeme v dobrém rozlišení sledovat oblasti zájmu i v případě, že dochází k jejich průběžnému pohybu po modelované oblasti, aniž bychom museli mít vysoké rozlišení pro celou tuto oblast. Toto je při modelování subdukce velmi užitečné, neboť nás zajímá zejména velmi úzká deformační zóna na povrchu desek, která se ale v průběhu času pohybuje.

V této práci se tedy zaměříme na implementaci dvojrozměrného subdukčního modelu v programu ASPECT, jeho otestování a také srovnání dvou modelů se stejnými počátečními parametry, jedním realizovaným v programu ASPECT, druhým v programu SEPRAN.

1 Matematický popis

1.1 Fázové přechody

Zemský plášť tvoří směs minerálů, jejíž většinu (asi 60%) tvoří olivín. Dále se v něm vyskytují také například ortopyroxeny, klinopyroxeny či granáty, pro popis pláště se však často používají pouze vlastnosti olivínu při vysokých tlacích a teplotách. Při rostoucí teplotě a tlaku dochází v olivínu k fázovým přechodům, při kterých se mění krystalová struktura, což vede ke změně hustoty a spotřebování či uvolnění latentního tepla.

V našem modelu jsou zahrnuty fázové přechody, ke kterým dochází v hloubkách 410 km a 660 km. Při prvním z nich se olivín mění na svou vysokotlakou fázi wadsleyit, při druhém pak dochází k přeměně ringwooditu na směs bridgmanitu a feroperiklasu. K přeměně z wadsleyitu na ringwoodit dochází v hloubce 520 km. Při všech třech přechodech dochází ke zvýšení hustoty o 3–10%. Zatímco v hloubkách 410 km a 660 km se jedná o ostrá rozhraní, kde se hustota mění téměř skokově (na intervalu menším, než 15 km), v hloubce 520 km je nárůst hustoty pozvolný a vliv tohoto přechodu na plášťové tečení je zanedbatelný, proto jej nezahrnujeme.

Kromě změny hustoty dochází při fázových přechodech i k uvolnění či spotřebování latentního tepla. Tento děj je charakterizovaný sklonem takzvané Clausius-Clapeyronovy křivky fázové rovnováhy, který značíme γ a který je definovaný jako

$$\gamma = \frac{dP}{dT} = \frac{\Delta S}{\Delta V} = \frac{L}{T\Delta V} \quad (1.1)$$

kde P představuje tlak, T teplotu, S entropii, V objem a L dodané teplo. Při fázovém přechodu v hloubce 410 km dochází k uvolňování latentního tepla, jedná se tedy o exotermní přechod a sklon Clapeyronovy křivky je tedy kladný. Naopak v hloubce 660 km se nachází endotermní přechod, dochází při něm k absorpci tepla a sklon Clapeyronovy křivky je zde záporný.

Fázová funkce Γ popisuje prostorové rozložení objemového zlomku nové fáze pro každý fázový přechod, její hodnota je 0 nad fázovým rozhraním a $\Gamma = 1$ po ukončení fázové přeměny.

$$\Gamma = \frac{1}{2} \left(1 + \tanh \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0} \right) \right) \quad (1.2)$$

kde Δp_0 představuje rozdíl tlaku napříč oblastí fázového přechodu a Δp definujeme jako:

$$\Delta p = p - p_{transition} - \gamma(T - T_{transition}) \quad (1.3)$$

Při kladném γ dochází ve studené subdukující desce k fázovému přechodu při nižším tlaku a tedy i v nižší hloubce, než v okolním plášti. Při záporném γ naopak dochází k přechodu v desce ve větší hloubce. V desce se proto objevují hustotní anomálie – kladná v případě exotermního přechodu v 410 km a záporná v případě endotermního přechodu v 660 km. Díky těmto anomáliím je deska při fázovém přechodu v hloubce 410 km urychlena a naopak v hloubce 660 km se subdukce zpomalí. Může dojít dokonce i k zastavení subdukce či k dočasné oscilaci [8].

1.2 Reologie

Reologie popisuje deformační vlastnosti látek. Materiál pláště můžeme popisovat jako vysokoviskózní tekutinu ($\eta \sim 10^{21}$ Pa s) s viskozitou závislou na teplotě, tlaku a napětí. Na této viskozitě pak závisí vlastnosti tečení.

V našem modelu pracujeme se třemi mechanismy, které mají podíl na deformaci olivínu. První z nich je lineární deformační mechanismus (*angl. diffusion creep*), druhý je mocninný deformační mechanismus (*angl. dislocation creep*) a poslední je mocninný limitor napětí, který aproximuje silně nelineární Peierlsovo tečení. Zatímco ve spodním plášti se uplatňuje pouze první z těchto mechanismů, rychlost deformace ve svrchním plášti se skládá z rychlostí deformace odpovídajících jednotlivým mechanismům:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^{diff} + \dot{\epsilon}_{ij}^{disl} + \dot{\epsilon}_{ij}^y \quad (1.4)$$

Můžeme pak zavést efektivní viskozitu vypočítanou s dílčích viskozit ([9]):

$$\eta_{eff} = \left(\frac{1}{\eta_{diff}} + \frac{1}{\eta_{disl}} + \frac{1}{\eta_y} \right)^{-1} \quad (1.5)$$

kde viskozity jednotlivých mechanismů definujeme následovně:

$$\eta_{diff} = \frac{1}{A_{diff}} \exp\left(\frac{E_{diff} + pV_{diff}}{RT}\right) \quad (1.6)$$

$$\eta_{disl} = \frac{1}{A_{disl}^{\frac{1}{n}}} \dot{\epsilon}_{II}^{\frac{1-n}{n}} \exp\left(\frac{E_{disl} + pV_{disl}}{nRT}\right) \quad (1.7)$$

$$\eta_y = \tau_y \dot{\epsilon}_y^{-\frac{1}{n_y}} \dot{\epsilon}_{II}^{\frac{1}{n_y} - 1} \quad (1.8)$$

kde A_{diff} představuje pre-exponenciální faktor Newtonovského tečení, E_{diff} aktivační energii Newtonovského tečení a V_{diff} aktivační objem Newtonovské tečení. Podobně A_{disl} , E_{disl} a V_{disl} představují tyto parametry pro mocninné tečení. Dále R značí univerzální plynovou konstantu, T teplotu a n napěťový exponent, τ_y představuje limit napětí, $\dot{\epsilon}_y$ referenční rychlost deformace, $\dot{\epsilon}_{II}$ druhý invariant rychlosti deformace a n_y exponent rychlosti deformace.

Kompletní soupis symbolů a modelových parametrů je k nalezení v tabulce 2.1

V našich modelech pracujeme se dvěma možnostmi nastavení limitu napětí. První možností je, že limit napětí lineárně roste až do hloubky 30 km od povrchu a následně má konstantní hodnotu. Při druhé možnosti pak má konstantní hodnotu v celé modelované oblasti. Pracujeme také se dvěma různými hodnotami maximální viskozity, 10^{26} Pa s a 10^{24} Pa s.

1.3 Aproximace základních rovnic

Naše modely jsou založeny na rozšířené Boussinesgově aproximaci. Zde považujeme materiál pláště za nestlačitelnou kapalinu a předpokládáme, že variace v

hustotě jsou tak malé, že je můžeme zanedbat všude s výjimkou vztlakové síly v pohybové rovnici. Rovnice kontinuity má v této aproximaci tvar:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (1.9)$$

kde \vec{v} představuje rychlost. Dále pohybová rovnice má tvar:

$$\nabla \cdot \overset{\leftrightarrow}{\tau} + \Delta\rho\vec{g} = 0 \quad (1.10)$$

kde $\overset{\leftrightarrow}{\tau}$ představuje Cauchyho tenzor napětí, $\Delta\rho$ odchylku hustoty od hustoty odpovídající referenční teplotě, a \vec{g} tíhové zrychlení. Plášť můžeme aproximovat viskózní kapalinou, pro kterou platí:

$$\overset{\leftrightarrow}{\tau} = -p \overset{\leftrightarrow}{I} + 2 \overset{\leftrightarrow}{\epsilon} \eta_{eff} \quad (1.11)$$

kde $\overset{\leftrightarrow}{\epsilon} \eta_{eff}$ je tenzor rychlosti deformace. Pro pohybovou rovnici pak dostáváme:

$$\nabla \cdot \left(\eta_{eff} \overset{\leftrightarrow}{\epsilon} \right) - \nabla p_d + \Delta\rho\vec{g} = 0 \quad (1.12)$$

kde p_d je dynamický tlak. Konečně rovnice pro přenos tepla má v rozšířené Boussinesqově aproximaci tvar

$$\rho_0 c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot (k \nabla T) - \rho_0 \alpha T v_r g + \overset{\leftrightarrow}{\sigma} : \nabla \vec{v} - \sum_l \frac{T \gamma_l \delta \rho_l}{\rho_0} \frac{d\Gamma_l}{dt} \quad (1.13)$$

kde ρ_0 značí referenční hustotu, c_p izobarickou tepelnou kapacitu a T termodynamickou teplotu. Jednotlivé členy na pravé straně odpovídají různým mechanismům, přispívajícím ke změně teploty. První člen odpovídá advekci. Druhý člen, ve kterém k představuje součinitel teplotní vodivosti, odpovídá vedení kondukcí. Ve třetím členu, který popisuje změny teploty vlivem adiabatické komprese a expanze, vystupuje α coby izotermická teplotní roztažnost a v_r coby radiální složka rychlosti. Čtvrtý člen popisuje viskózní zahřívání, $\overset{\leftrightarrow}{\sigma}$ zde představuje deviátor tenzoru napětí. A konečně pátý člen popisuje uvolňování a spotřebovávání latentního tepla v souvislosti s fázovými přechody, $\delta \rho_l$ představuje rozdíl v hustotách před a po přeměně, γ_l sklon Clausius-Clapeyronovy křivky a $\frac{d\Gamma_l}{dt}$ časovou derivaci fázové funkce odpovídající příslušnému fázovému přechodu ($l = 1$ pro přechod ve 410 km, $l = 2$ pro přechod v 660 km).

K tečení v plášti dochází díky vztlakovým silám v pohybové rovnici (12), které závisí na změnách hustoty. Ty jsou způsobené jednak variacemi teploty díky teplotní expanzi a jednak fázovými přechody. V rozšířené Boussinesqově aproximaci uvažujeme lineární stavovou rovnici v následujícím tvaru:

$$\Delta\rho(T, \Gamma_l) = \rho_0 \left(-\alpha(T - T_0) + \sum_l \frac{\delta \rho_l}{\rho_0} \Gamma_l \right) \quad (1.14)$$

kde ρ_0 je referenční hustota odpovídající referenční teplotě T_0 .

Soustavu rovnic (1.9) až (1.14) řešíme pomocí programových balíků ASPECT [5, 6, 7] a SEPRAN [4], které jsou oba založeny na metodě konečných prvků.

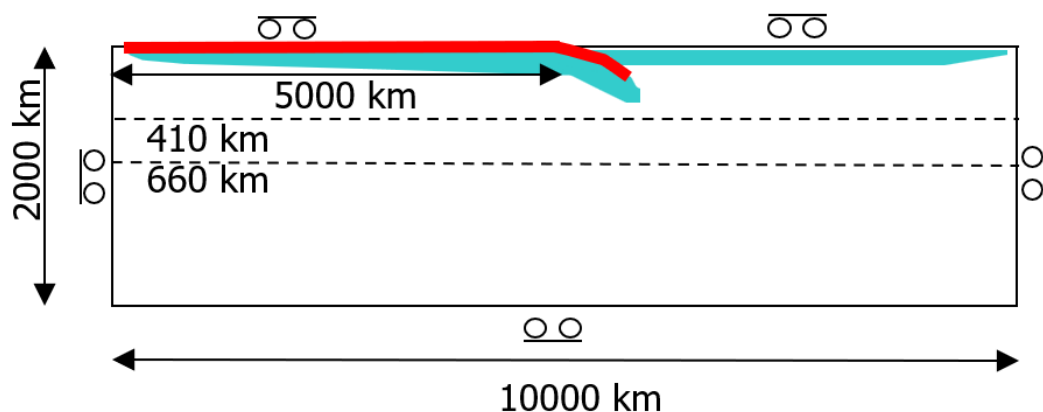
2 Modely

Náš model vychází z předchozích prací geodynamické skupiny na Katedře geofyziky (např. [8, 10]). Modelujeme dvojrozměrnou obdélníkovou oblast, širokou 10000 km a hlubokou 2000 km. Naším cílem bylo vytvořit na levé straně modelu subdukující oceánskou desku, vznikající na oceánském hřbetu v levém horním rohu. Tato deska se pak měla podsouvat pod nadložní desku, vznikající na hřbetu v pravém horním rohu, a dále se zanořovat do pláště. Příkop, tedy kontakt litosférických desek, se na začátku běhu nachází uprostřed šířky modelu, tedy 5000 km od jeho hranic.

Počáteční rozložení teploty v subdukující i nadložní desce odpovídá poloprostorovému modelu chladnutí oceánské litosféry se stářím 100 milionů let v oblasti příkopu. Pod litosférou je předepsán adiabatický profil s potenciální teplotou 1600 K. Teplotní okrajové podmínky udávají na povrchu desek konstantní teplotu 273 K a na spodní hranici celého modelu, tedy v hloubce 2000 km je pak předepsaná teplota 2132 K.

Subdukcii zahajujeme inicializačním během, v průběhu kterého je na povrchu subdukující desky předepsaná rychlost 2,5 cm za rok, zatímco rychlost nadložní desky je nulová. V průběhu inicializačního běhu je na všech hranicích s výjimkou horní předepsaný nepropustný volný prokluz, po skončení inicializačního běhu jej pak předepisujeme na všech okrajích modelu.

Mechanické oddělení dvou tuhých desek umožňuje tenká nízkoviskózní kůra na povrchu subdukující desky, která plní funkci lubrikační vrstvy na kontaktu desek. [2] V našich modelech předepisujeme tloušťku této vrstvy 10 km, 7 km nebo 5 km. V hloubce 150 km, kde již lubrikační efekt kůry není potřebný, je tato vrstva nahrazena materiálem pláště. Subdukcii směřujeme tím, že modelujeme subdukující desku na počátku již částečně zanořenou. Schématický náčrt modelu je zobrazený na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1 Schématický náčrt modelu, červeně je naznačena poloha nízkoviskózní kůry. Přerušované vodorovné linky značí polohy fázových přechodů v 410 km a 660 km. V horních rozích se nacházejí hřbety, na kterých vznikají desky.

Symbol	Význam	Hodnoty	Jednotky
γ_{410}	Sklon Clausius-Clapeyron. křivky - 410 km	$2 - 3 \times 10^6$	MPa K ⁻¹
γ_{660}	Sklon Clausius-Clapeyron. křivky - 660 km	$-1,5 - -2,5 \times 10^6$	MPa K ⁻¹
$\delta\rho_{410}$	Skok v hustotě v 410 km	273	kg m ⁻³
$\delta\rho_{660}$	Skok v hustotě v 660 km	341	kg m ⁻³
$\dot{\epsilon}_{ij}$	Tenzor rychlosti deformace	-	s ⁻¹
$\dot{\epsilon}_y$	Referenční rychlost deformace	10^{-15}	s ⁻¹
$\dot{\epsilon}_{II}$	Druhý invariant tenzoru rychlosti deformace	-	s ⁻¹
η_{min}	Minimální viskozita	1×10^{19}	Pa s
η_{max}	Maximální viskozita	$10^{26} - 10^{26}$	Pa s
η_{crust}	Viskozita kůry	1×10^{20}	Pa s
A_{diff}	Pre-exp. faktor Newton. tečení (svrchní plášť)	1×10^{-9}	Pa ⁻¹ s ⁻¹
A_{diff}	Pre-exp. faktor Newton. tečení (spodní plášť)	$1,3 \times 10^{-16}$	Pa ⁻¹ s ⁻¹
A_{disl}	Pre-exp. faktor mocninného tečení	$3,15 \times 10^{-17}$	Pa ⁻ⁿ s ⁻¹
E_{diff}	Aktiv. energie Newton. tečení (svrchní pl.)	$3,35 \times 10^5$	J mol ⁻¹
E_{diff}	Aktiv. energie Newton. tečení (spodní pl.)	2×10^5	J mol ⁻¹
E_{disl}	Aktiv. energie mocninného tečení	$4,8 \times 10^5$	J mol ⁻¹
V_{diff}	Aktiv. objem Newton. tečení (svrchní plášť)	4×10^{-6}	m ³ mol ⁻¹
V_{diff}	Aktiv. objem Newton. tečení (spodní plášť)	$1,1 \times 10^{-6}$	m ³ mol ⁻¹
V_{disl}	Aktiv. objem mocninného tečení	11×10^{-6}	m ³ mol ⁻¹
n	Exponent mocninného tečení	3,5	-
τ_y	Limit napětí	2×10^8	Pa
n_y	Exponent limitoru napětí	10	-
p	Hydrostatický tlak	-	Pa
R	Plynová konstanta	8,314	J K ⁻¹ mol ⁻¹
T	Termodynamická teplota	-	K
k	Součinitel tepelné vodivosti	10^{-6}	m ² s ⁻¹
g	Gravitační zrychlení	9,81	m s ⁻²
ρ_0	Referenční hustota	3416	kg m ⁻³
c_p	Izobarická tepelná kapacita	1250	J kg ⁻¹ K ⁻¹
α	Izotermická teplotní roztažnost	$2 - 3 \times 10^{-5}$	K ⁻¹

Tabulka 2.1 Symboly a modelové parametry

2.1 Modely v programu ASPECT

Pro modely 1, 2, 3, 4 a 5 byly výpočty provedeny pomocí programu ASPECT ve verzi 2.4.0. Pro vytvoření počátečního rozložení teploty a materiálové kompozice pro modely v ASPECTu byl použit soubor vytvořený pomocí knihovny "The Geodynamic World Builder"(GWB) [11, 12], která umožňuje vytvořit komplikované geometrie geofyzikálních polí pro 2D i 3D geodynamické modely.

Základní nástin počátečního nastavení tohoto nástroje jsme získali od kolegů, kteří vyvíjejí modely subdukce v programech SEPRAN a ASPECT (Pokorný J. a van der Wiel E., osobní sdělení), tento nástin nicméně postrádal některé klíčové rysy, které bylo nutné doplnit, aby model splňoval požadavky uvedené v popisu výše. Jejich zahrnutí popíšeme v části Výsledky. Jednotlivé modely v programu ASPECT se mimo počáteční nastavení teploty a viskozity, které je popsáno v kapitole Výsledky v oddílech příslušejících jednotlivým modelům, liší i hodnotami některých parametrů a nastavením limitu napětí, tyto rozdíly jsou shrnuty v tabulce 2.2.

Model	1	2	3	4	5	6
η_{max} (Pa s)	1×10^{26}	1×10^{26}	1×10^{24}	1×10^{24}	1×10^{24}	1×10^{24}
Model τ_y	nelineární	nelineární	konst.	konst.	konst.	konst.
α (K ⁻¹)	3×10^{-5}	3×10^{-5}	3×10^{-5}	2×10^{-5}	2×10^{-5}	2×10^{-5}
γ_{410} (MPa K ⁻¹)	3×10^6	3×10^6	3×10^6	2×10^6	2×10^6	2×10^6
γ_{660} (MPa K ⁻¹)	$-1,5 \times 10^6$	$-1,5 \times 10^6$	$-1,5 \times 10^6$	$-2,5 \times 10^6$	$-2,5 \times 10^6$	$-2,5 \times 10^6$

Tabulka 2.2 Hodnoty modelových parametrů a možnosti nastavení limitu napětí pro jednotlivé modely v programu ASPECT

2.1.1 Adaptivní zahuštění sítě

Modely jsou rozděleny na čtyři oblasti podle rozlišení, které zde předepisujeme. Nejvyšší rozlišení předepisujeme v tenké vrchní vrstvě do 30 km od horní hranice. Další vrstva se nachází mezi 30 km a 100 km od horní hranice, následující pak od 100 km do 400 km. Poslední vrstva, kde předepisujeme rozlišení nejnižší, pak od 400 km pokračuje až k spodní hranici modelu.

Program ASPECT před spuštěním simulace pokryje model základní sítí vygenerovanou následovně. Každou podoblast rozdělí na základní čtvercové buňky, ty pak opakovaně dělí vždy na čtyři dceřinné buňky. Hustotu této sítě můžeme ovlivnit zadáním množství počátečních globálních zahuštění, tím programu říkáme, kolikrát má existující buňky rozdělít na čtyři menší buňky. Tato základní síť pak je dále adaptivně zahušťována (případně ředěna) během výpočtu podle předepsané strategie v každém integračním časovém kroku. V našich modelech zadáváme strategie tři. První z nich způsobuje zahuštění sítě v místech, kde je velký kontrast viskozity, druhá pak v místech, kde program detekuje výrazné variace ve složení materiálu. Poslední, třetí, strategie zajišťuje zahuštění sítě tam, kde je vysoká rychlost deformace.

Dále pak předepisujeme hodnoty maximálního a minimálního zahuštění pro jednotlivé oblasti popsané výše.

Modely 1 až 5 mají parametry příslušející adaptivnímu zahušťování sítě stejné, pro Model 6 pak požadujeme vyšší rozlišení. Shrnutí použitých parametrů je v tabulce 2.3.

Model	1 až 5	6
Počáteční globální zahuštění	6	7
Minimální zahuštění do hloubky 30 km	8	10
Maximální zahuštění do hloubky 30 km	8	12
Minimální zahuštění do hloubky 100 km	7	8
Maximální zahuštění do hloubky 100 km	8	10
Minimální zahuštění do hloubky 400 km	6	6
Maximální zahuštění do hloubky 400 km	8	8
Minimální zahuštění od hloubky 400 km	4	4
Maximální zahuštění od hloubky 400 km	8	8

Tabulka 2.3 Parametr zahuštění sítě v různých oblastech modelů. Parametr udává, kolikrát je základní buňka dané oblasti rozdělena, vždy na 4 dceřinné buňky.

2.2 Referenční model v programu SEPRAN

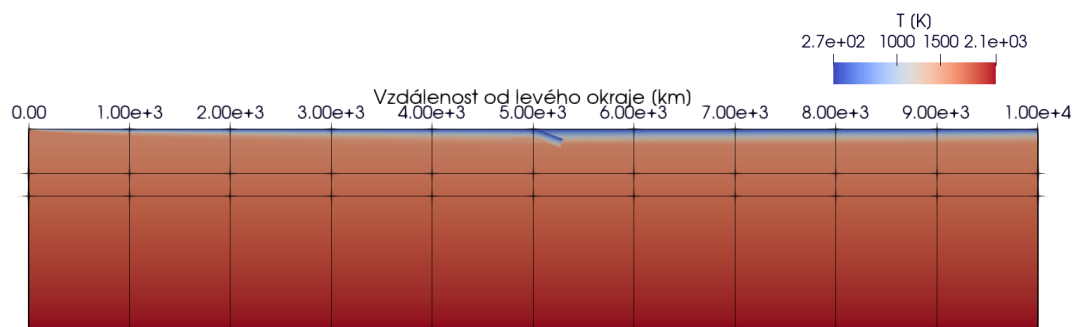
Vedle nově implementovaných modelů v softwaru ASPECT jsme provedli také výpočty v jednom referenčním modelu S1 v programu SEPRAN ([4]). Nastavení

je stejné jako u Modelu 4, liší se rozlišením sítě. SEPRAN neumožňuje adaptivní zahuštění, používáme tedy síť, která má maximální rozlišení 2 km v oblasti kontaktu desek, 6 km v přechodové oblasti svrchního pláště a 15 km ve spodní části spodního pláště.

3 Výsledky

3.1 Modely v programu ASPECT

3.1.1 Model 1



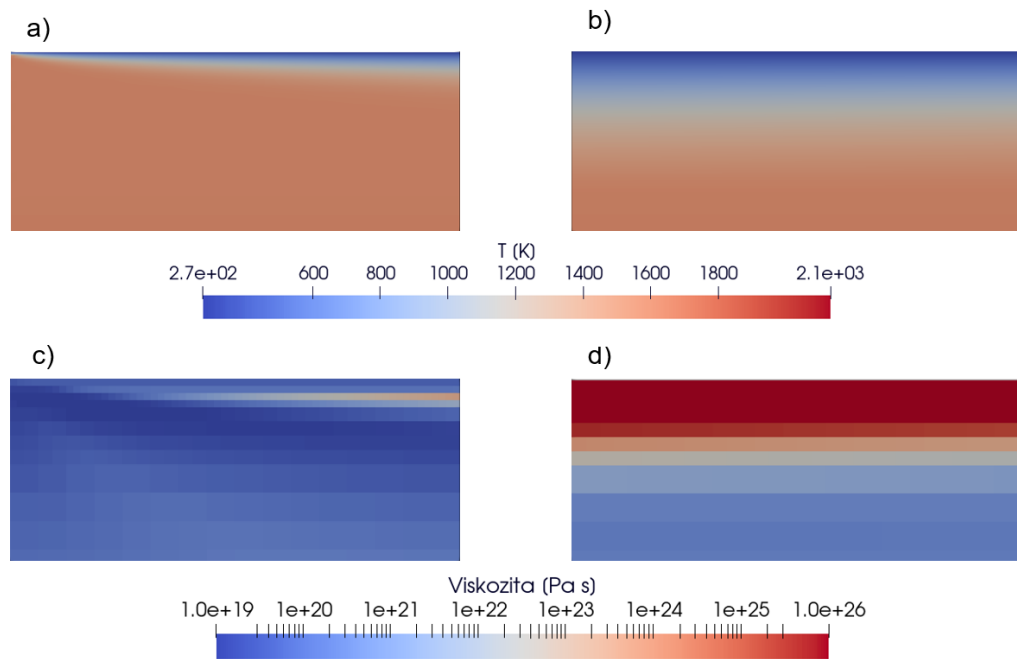
Obrázek 3.1 Počáteční teplotní rozložení pro Model 1. Vodorovné černé linky značí polohy fázových přechodů v hloubce 410 km a 660 km.

Model, jehož nastavení v GWB jsme získali od kolegů, neodpovídá přesně našim požadavkům. Chladná a tedy vysokoviskózní deska konečně tloušťky v pravém horním rohu je díky nepropustnému volnému prokluzu na pravé vertikální hranici pevná, tedy v průběhu celého běhu zůstává na místě a udržuje tak polohu kontaktu obou desek stále stejnou. Na pravé straně modelu není předepsaný hřbet, nadložní deska má po celé své délce stejnou tloušťku (obr. 3.1 a obr. 3.2 b), d)). Hřbet na levé straně se nachází v levém horním rohu modelu, studené desky jsou tedy předepsány podél celé horní hranice modelu. (obr. 3.2 a), c)). Až k levému okraji modelu dosahuje také nízkoviskózní vrstva, která má tloušťku 10 km.

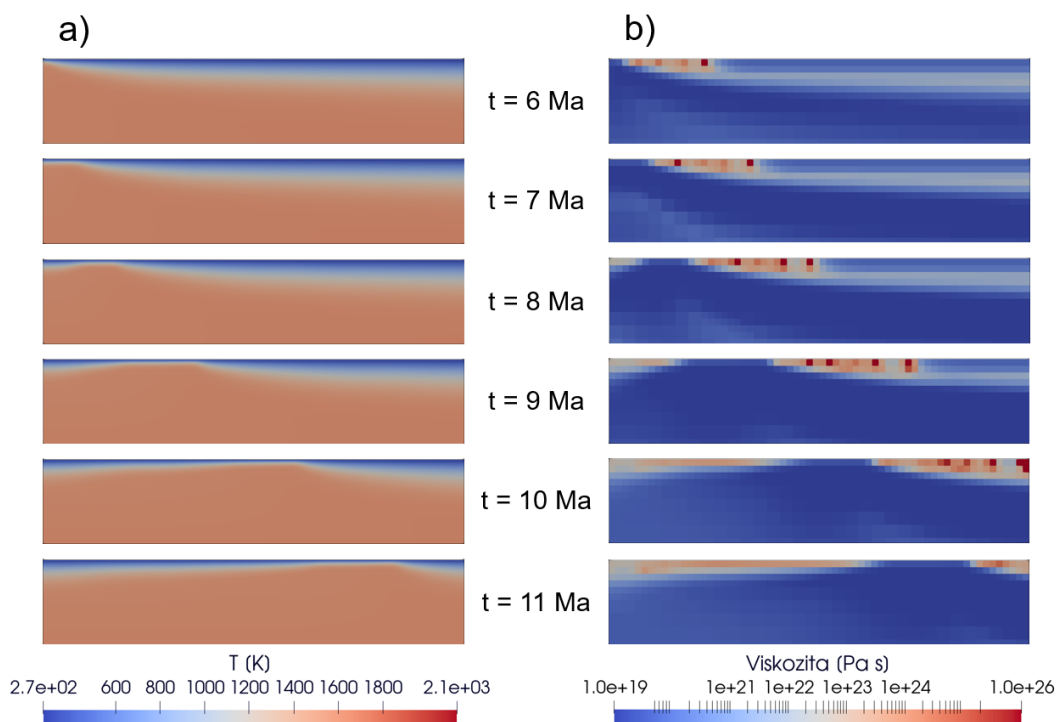
Dříve než přejdeme k našim cílovým modelům s mobilní nadložní deskou, v modelech 1 a 2 ponecháme nadložní desku pevnou a podíváme se, jak funguje zasouvání subdukující desky.

Problém v tomto modelu představují nevhodně nastavené okrajové podmínky pro teplotu v levém horním rohu modelu, kde se mělo tvořit pokračování subdukující desky. Naším cílem bylo, aby na riftu nově vznikající chladná deska tvořila pokračování té původně předepsané, posouvala se doprava k příkopu a zanořovala se tam do pláště, zatímco v levém horním rohu by měl stále zůstat rift. Namísto toho však rift v levém horním rohu záhy zaniká a na jeho místě se vytváří chladnoucí tuhá deska (obr. 3.3).

To je způsobeno tím, že je na celém povrchu modelované oblasti nastavená konstantní teplota 273 K a u levého okraje modelu tak dochází díky kondukcii k postupnému ochlazení materiálu a tedy i ke zvyšování jeho viskozity. Deska nám tak 'přimrzá' k levému okraji modelu a tím zde vzniká situace podobná té na pravé straně modelu - nově vzniklá část desky je tedy pevná. Deska ale dále subdukuje, díky tomu je v horizontální extenzi a v blízkosti levého horního rohu díky nelineárnímu deformačnímu mechanismu (limitoru napětí) dojde k oslabení desky, deska se natahuje a zužuje a vzniká riftová struktura, která se nekontrolovaně posouvá směrem doprava (obr. 3.3 a), $t = 8-11$ Ma).



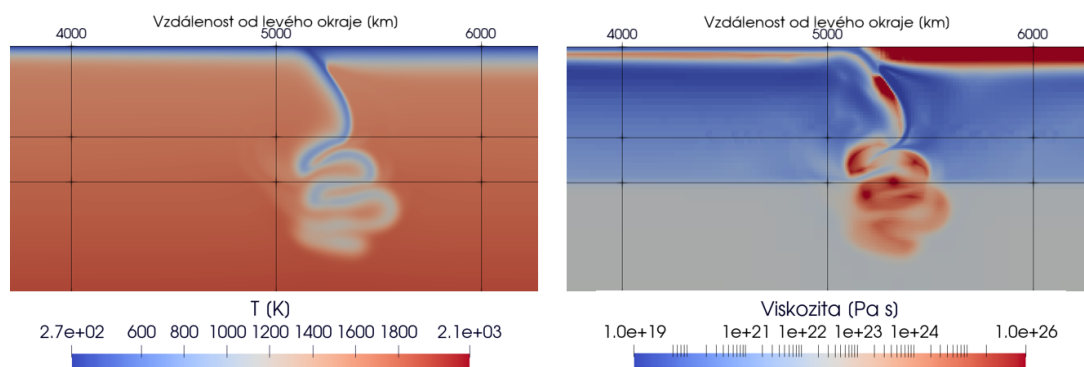
Obrázek 3.2 Počáteční rozložení teploty v a) levém horním rohu, b) pravém horním rohu a počáteční rozložení viskozity v c) levém horním rohu, d) pravém horním rohu pro Model 1. Výřezy jsou 500 km široké a 200 km hluboké.



Obrázek 3.3 Vývoj a) rozložení teploty a b) rozložení viskozity v levém horním rohu modelu (výřez 500 km široký a 100 km hluboký) pro Model 1. t vyjadřuje čas uplynulý od začátku simulace.

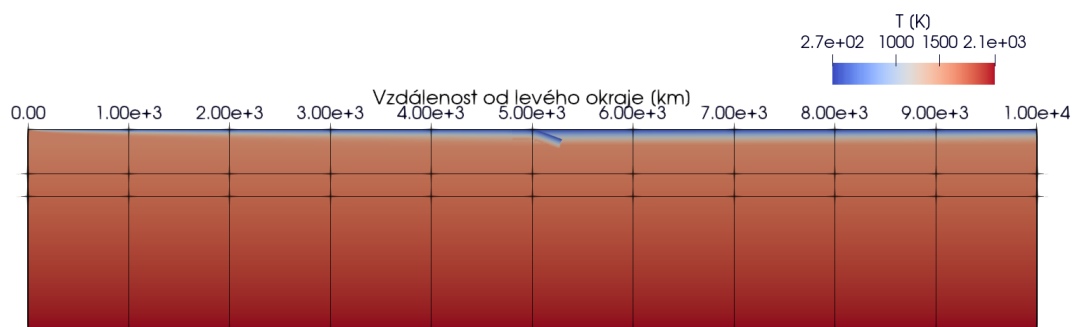
Navzdory tomu, že subdukující deska nevzniká v levém horním rohu, jak

bychom chtěli, rift se nekontrolovaně pohybuje a proměňuje se tak délka subdukující desky, do jisté míry pozorujeme i chování, které jsme očekávali na základě předchozích modelů subdukce s fixní nadložní deskou (např. [8, 2]). Za povšimnutí stojí zejména vertikální skládání subdukované desky pod bodem kontaktu desek. Toto je způsobené fázovými přechody, kdy dochází ke zrychlování desky na přechodu ve 410 km následnému zpomalení klesajícího materiálu na přechodu v hloubce 660 km (obr. 3.4).



Obrázek 3.4 Rozložení teploty a viskozity okolo příkopu 20 milionů let od začátku simulace s vertikálním skládáním subdukované litosférické desky. Černé vodorovné linky značí polohy fázových přechodů v hloubkách 410 km a 660 km.

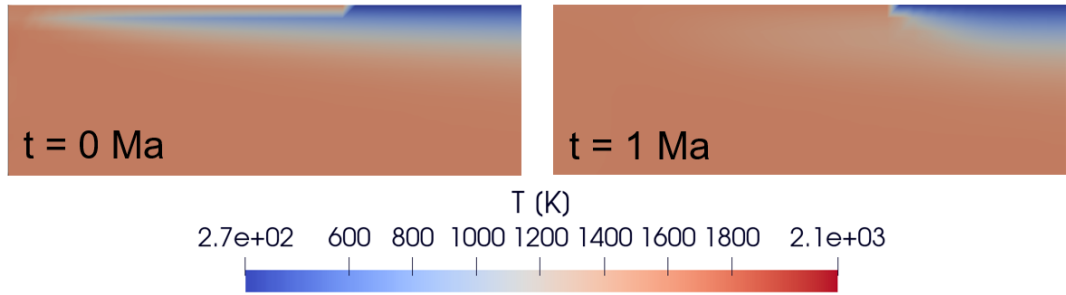
3.1.2 Model 2



Obrázek 3.5 Počáteční teplotní rozložení pro Model 2. Vodorovné černé linky značí polohy fázových přechodů ve hloubce 410 km a 660 km.

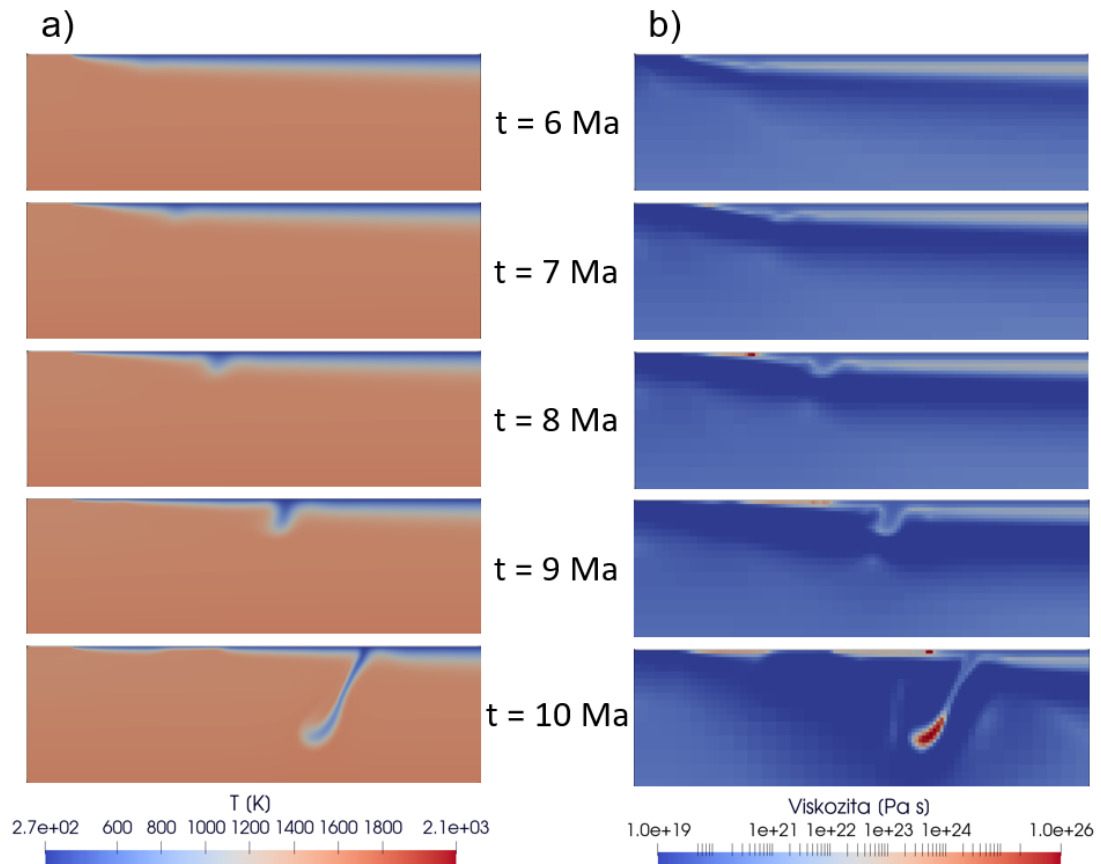
Cílem tohoto modelu bylo odstranit výše popsany problém se špatně nastavenými okrajovými podmínkami u subdukující desky.

V levém rohu modelu 2 jsme proto potřebovali vytvořit dlouhodobě stabilní hřbet, kde materiál nebude konduktivně chladnout. Do vzdálenosti 100 km od okraje modelu jsme proto teplotu na horní hranici nastavili na konstantních 1600 K. Subdukující deska tak nevzniká na levém okraji modelované oblasti, ale 100 km od něj (obr. 3.6). Jinak počáteční podmínky zůstávají stejné jako v Modelu 1, stejná zůstává i tloušťka nízkoviskózní kůry.



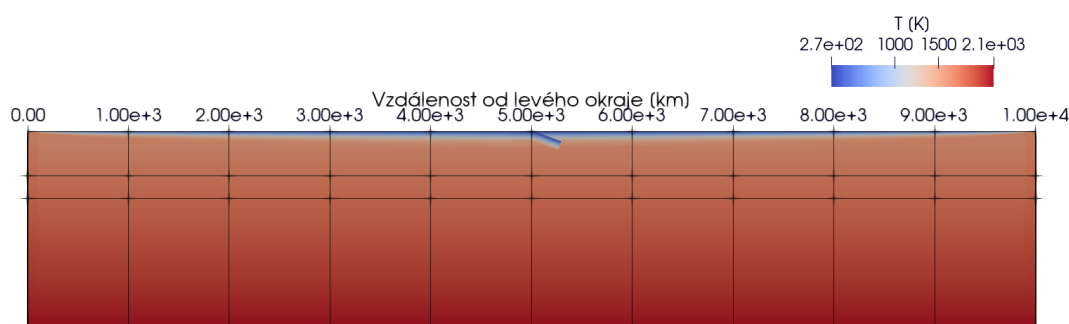
Obrázek 3.6 Teplotní rozložení v levém horním rohu (šířka 150 km, hloubka 50 km) Modelu 2 na začátku a milion let po začátku simulace.

Náš problém se tím ovšem vyřešil pouze částečně. Již nedochází k rozšiřování chladné oblasti směrem k levé hranici a ke vzniku pevné části desky. Problém ovšem představuje nízkoviskózní vrstva na povrchu subdukující desky. V blízkosti riftu, kde je vznikající litosféra mladá, je tloušťka desky srovnatelná s tloušťkou nízkoviskózní korové vrstvy. Dostáváme tak oblast, kde je deska tenká, má nízkou viskozitu a zároveň zde má předepsanou nízkou teplotu. Zde se pak snadno vytvoří lokální chladná anomálie, která začne propadat dolů, až ukápne. Tím mezi deskami vznikne mezera, která následně způsobí vznik dalších ztenčených oblastí s nízkou viskozitou a nízkou teplotou a opakování tohoto nechtěného jevu (obr. 3.7).

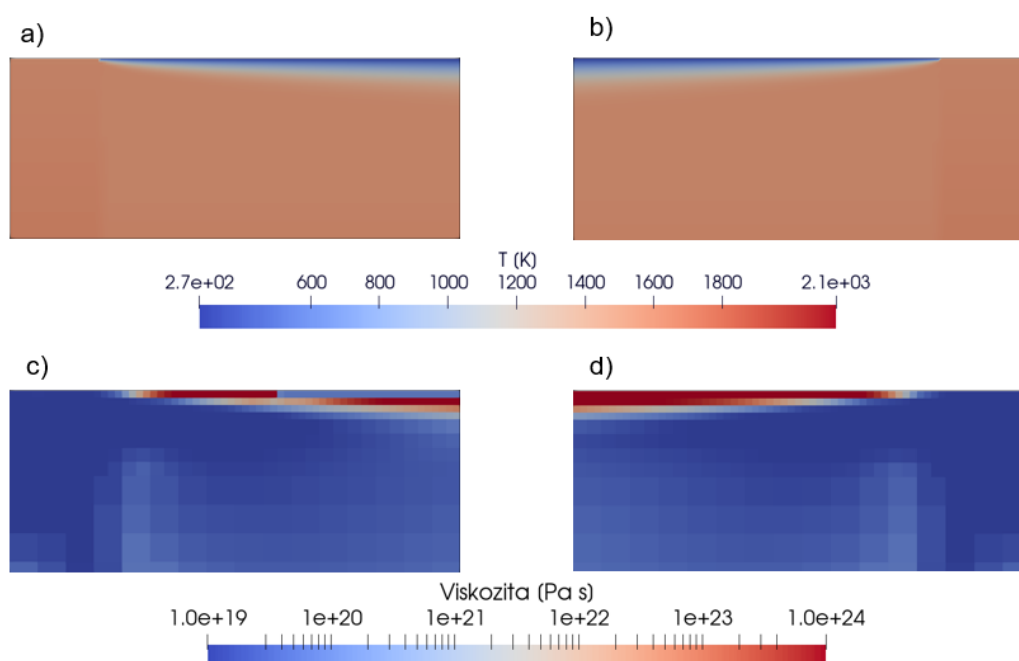


Obrázek 3.7 Rozložení a) teploty a b) viskozity při vzniku kapky v levém horním rohu (šířka 1000 km, hloubka 300 km) Modelu 2.

3.1.3 Model 3



Obrázek 3.8 Počáteční teplotní rozložení pro Modely 3, 4, 5 a 6. Vodorovné černé linky značí polohy fázových přechodů ve hloubce 410 km a 660 km.

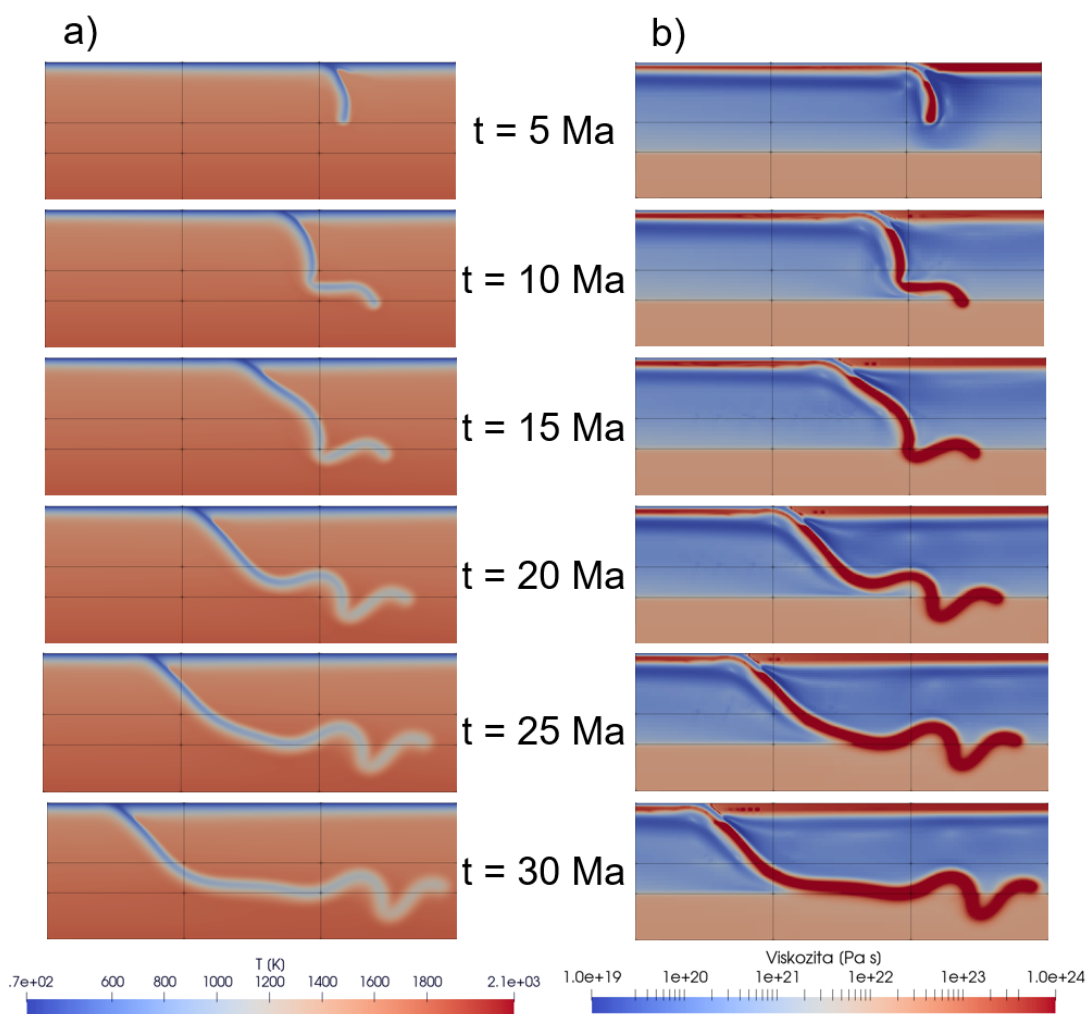


Obrázek 3.9 Počáteční rozložení teploty v a) levém horním rohu, b) pravém horním rohu a počáteční rozložení viskozity v c) levém horním rohu, d) pravém horním rohu pro Model 3. Výřezy jsou 500 km široké a 200 km hluboké.

V tomto modelu jsme vyřešili problém s nízkoviskózní vrstvou na levém okraji subdukující desky popsany výše. Zprv jsme změnili způsob předepisování hřbetu. Ve svislém pruhu do vzdálenosti 100 km od levého okraje modelu je předepsaná teplota 1600 K na horní hranici modelu a 2132 K na spodní hranici. Samotná deska je pak předepsána až za touto oblastí, tedy začíná až 100 km od levého okraje. Je také rozdělena na dvě části. Na povrchu levé části (100 - 300 km od levého okraje) není předepsána nízkoviskózní vrstva. Pravá část s nízkoviskózní vrstvou, silnou v tomto modelu 7 km, začíná 300 km od levého okraje a pokračuje stejně jako v předchozích modelech. Nízkoviskózní vrstva tedy pod sebou má dostatečnou vrstvu s vysokou viskozitou, která je navíc podepřena levou částí

desky, na které tato vrstva chybí 3.9. Nedochozí proto k odkapávání jako v Modelu 2.

Zároveň jsme nastavili do pravého horního rohu stejné teplotní okrajové podmínky jako jsou v levém horním rohu, tedy i zde jsme předešli rift, na kterém dochází k vytváření desky. Nadložní deska je i zde posunutá 100 km od okraje. Tím jsme nadložní desku rozpochovali a umožnili tak posun kontaktu obou desek směrem doleva, tento pohyb se nazývá "rollback". Subdukující deska se tak již neskládá vertikálně, namísto toho pozorujeme vznik horizontálního skládání (obr. 3.10). Tento model již odpovídá našemu cílovému nastavení popsánému v kapitole 2. Stejně počáteční rozložení teploty a stejné či velmi podobné rozložení viskozity tedy používáme i pro všechny následující modely.



Obrázek 3.10 Rozložení a) teploty a b) viskozity při vzniku horizontálního skládání v Modelu 3. Výřezy začínají 3000 km a končí 6000 km od levého okraje, vertikální linky značí 4000 km a 5000 km od levého okraje modelové oblasti. Výřezy jsou 1000 km hluboké, horizontální linky značí polohy fázových přechodů v hloubkách 410 km a 660 km.

3.1.4 Model 4

Tento model používáme jako referenční model při testování jednotlivých parametrů či jejich sad v Modelech 5 a 6. Rovněž jej srovnáváme s modelem vytvořeným pomocí programu SEPRAN, se kterým sdílí počáteční rozložení i hodnoty modelových parametrů.

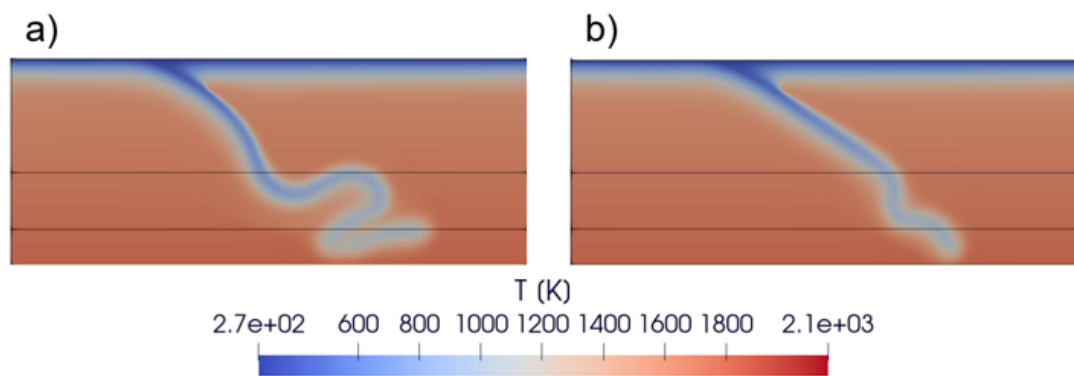
Počáteční rozložení teploty odpovídá počátečnímu teplotnímu rozložení pro Model 3 (obr. 3.8), podobné je i rozložení viskozity, jediným rozdílem je tloušťka nízkoviskózní kůry, která je v tomto modelu 10 km. Soubory potřebné pro spuštění tohoto programu, tedy nastavení v GWB a samotný skript pro ASPECT, jsou uvedeny v přílohách.

Snímek rozložení teploty v čase 18 milionů let v modelu 4 je na obr. 3.11.

3.1.5 Model 5

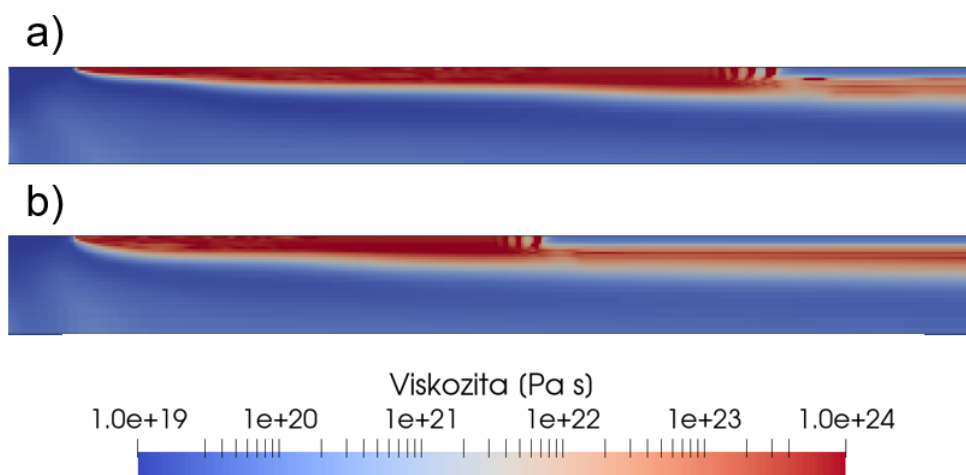
V tomto modelu zkoumáme vliv tloušťky nízkoviskózní kůry na proces subdukce. Počáteční rozložení teploty i modelové parametry jsou shodné s Modelem 4 (obr. 3.8), počáteční rozložení viskozity se liší pouze tloušťkou kůry, která má v tomto modelu 5 km.

Jak je patrné z obrázku (3.11), poloha kontaktu desek se oproti Modelu 4 příliš neliší. Pozorujeme ovšem značný rozdíl v množství a chování (deformaci) subdukovaného materiálu. Nižší tloušťka kůry zvyšuje její rezistanci [10], tedy podíl viskozity kůry a její tloušťky, což vede ke snížení rychlosti desky a redukcí jejího skládání v přechodové oblasti.



Obrázek 3.11 Rozložení teploty v okolí kontaktu desek (zobrazujeme oblast 4000 km až 6000 km od levého okraje desky, hloubka výřezů je 800 km) v čase 18 milionů let pro a) Model 4 a b) Model 5. Vodorovné linky značí polohy fázových přechodů v hloubce 410 km a 660 km.

Následkem ztenčení nízkoviskózní kůry se také zpomalila tvorba nového materiálu na levé straně subdukující desky, jak je vidět na obrázku 3.12.



Obrázek 3.12 Rozložení viskozity u levého okraje a) Modelu 4 a b) Modelu 5 (výřez je 1500 km dlouhý a 150 km hluboký) 18 milionů let od začátku simulace.

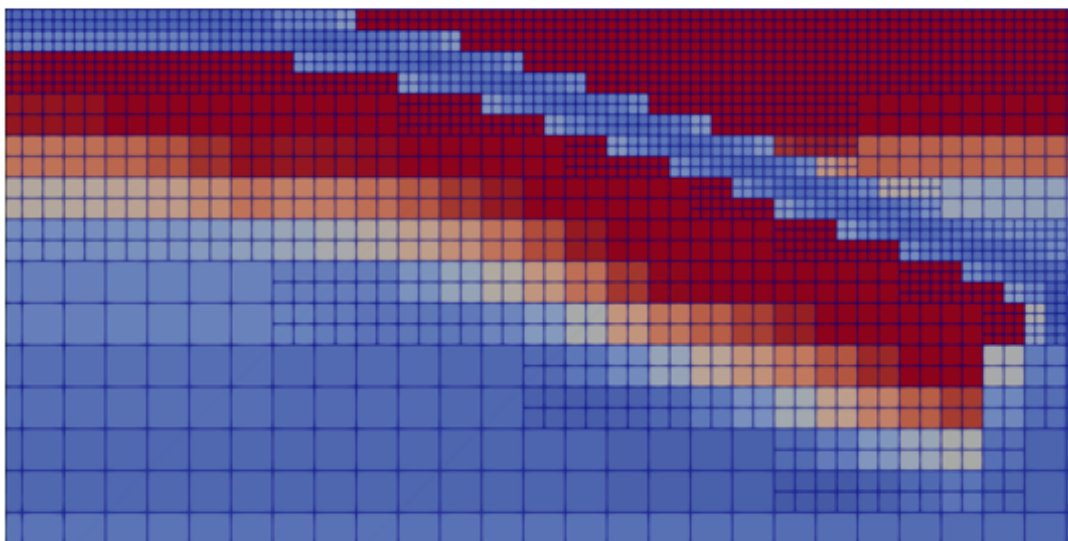
3.1.6 Model 6

V tomto modelu testujeme, jaký vliv má na průběh simulace změna parametrů adaptivního zahušťování sítě. Počáteční rozložení teploty i viskozity je zde tedy shodné s Modelem 4, stejně tak se shodují všechny modelové parametry s výjimkou sady, která popisuje adaptivní zahušťování. Shrnutí rozdílů v této sadě parametrů je k nalezení v tabulce 2.3.

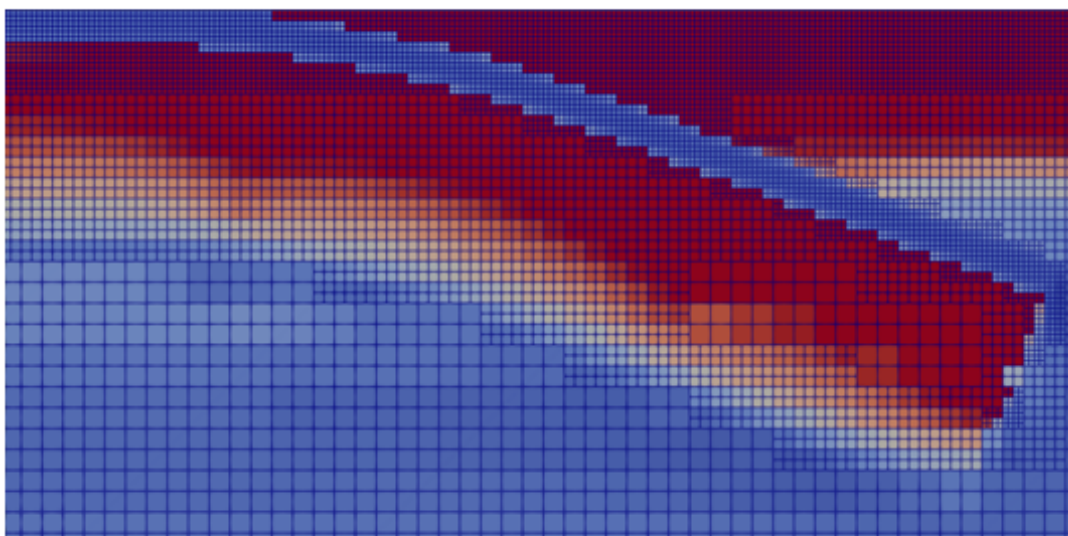
Obrázek 3.13 zobrazuje rozložení viskozity v modelech 4 a 6 před spuštěním simulace se zvýrazněnou sítí diskretizačních buněk. Obrázek 3.14 ukazuje analogické srovnání v čase 7 milionů let. Již po této době vidíme, že se vývoj subdukce značně odlišuje. Obrázek 3.15 pak zobrazuje teplotní snímky obou modelů v čase 20 milionů let od začátku simulace, rozdíl v průběhu subdukce je zde ještě patrnější. Nižší hustota diskretizační sítě modelu 4 nedokáže dostatečně rozlišit ostrou hranici mezi vysokoviskózní litosférickou deskou a nízkoviskózní kůrou a kůra je tak efektivně širší, má menší rezistanci a deska je tedy v tomto modelu rychlejší.

Vidíme tedy, že i pro dva modely se stejnými fyzikálními modelovými parametry můžeme dostat výrazně odlišné výsledky v závislosti na nastavení rozlišení obou modelů.

a)

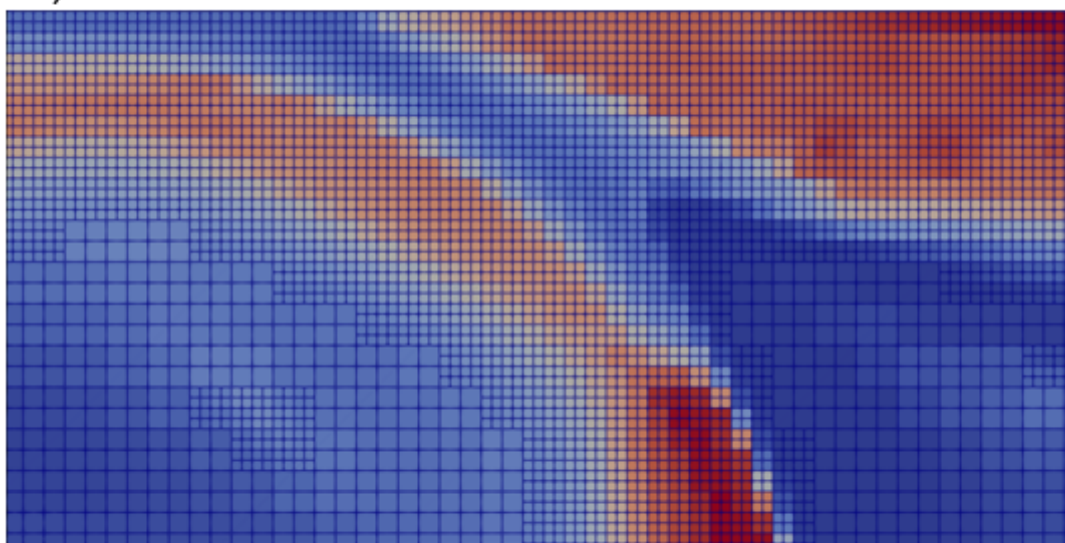


b)

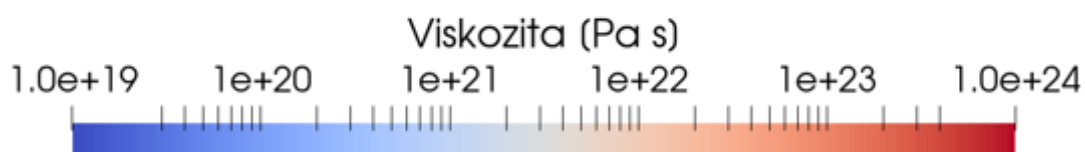
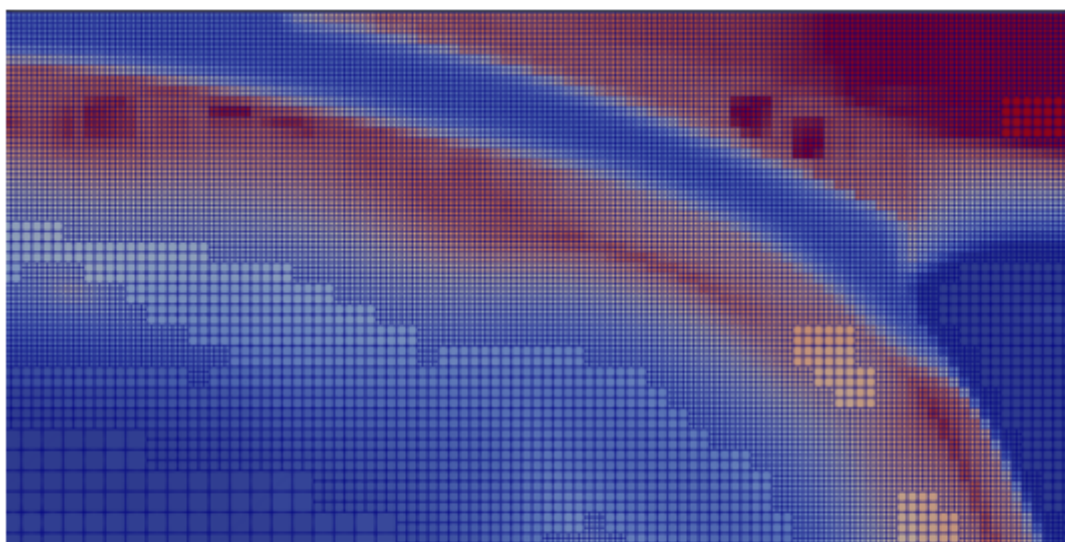


Obrázek 3.13 Rozložení viskozity pro a) Model 4 a b) Model 6 v okolí kontaktu desek (výřez začíná 4900 km a končí 5300 km od levého okraje modelu a je 200 km hluboký.) v okamžiku před začátkem simulace Modrými linkami jsou znázorněny okraje jednotlivých buněk.

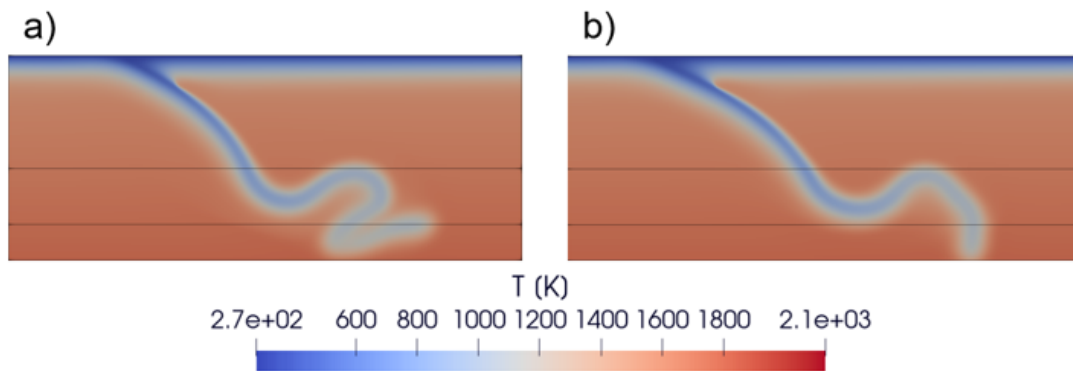
a)



b)



Obrázek 3.14 Rozložení viskozity pro a) Model 4 a b) Model 6 v okolí kontaktu desek (výřez začíná 4900 km a končí 5300 km od levého okraje modelu a je 200 km hluboký.) sedm milionů let po spuštění simulace. Modrými linkami jsou znázorněny okraje jednotlivých buněk.

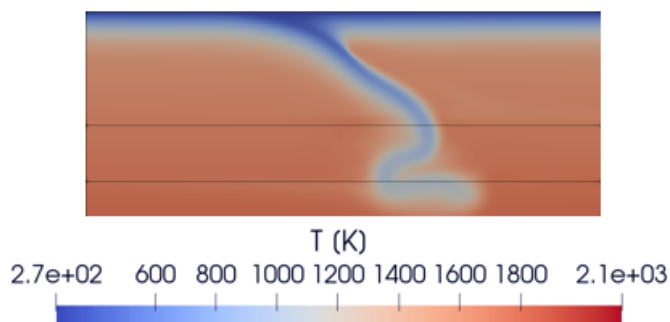


Obrázek 3.15 Rozložení teploty v 800 km hlubokém výřezu od 4000 km do 6000 km od levého okraje modelové oblasti pro a) Model 4 a b) Model 6 dvacet milionů let po začátku simulace. Vodorovné linky značí polohy fázových přechodů v hloubce 410 km a 660 km.

3.2 Model v programu SEPRAN

V programu SEPRAN jsme vytvořili model, jehož počáteční rozložení teploty a viskozity a fyzikální modelové parametry odpovídají Modelům 4 a 6 v programu ASPECT. Tento poslední model, jehož teplotní rozložení v čase 20 milionů let po začátku simulace je na obrázku 3.16, můžeme tedy srovnat hned se dvěma předchozími modely.

I zde se nám potvrzuje, že průběh simulace je ovlivněn nastavením rozlišení modelu. Základní rysy simulace zůstávají i v případě modelu v programu SEPRAN zachovány, jinak jsou ale mezi ním a modely v programu ASPECT patrné rozdíly. Ověřili jsme tedy, že ač jsou pro zkoumání procesů pod zemským povrchem matematické modely velmi užitečným nástrojem, je třeba být opatrný při jejich interpretaci, protože průběh těchto modelů nezávisí pouze na zadaných fyzikálních parametrech, ale také na způsobu, jakým program pracuje s rozlišením modelu.



Obrázek 3.16 Rozložení teploty v 800 km hlubokém výřezu od 4000 km do 6000 km od levého okraje modelové oblasti pro Model v programu SEPRAN dvacet milionů let po začátku simulace. Vodorovné linky značí polohy fázových přechodů v hloubce 410 km a 660 km.

Závěr

V této práci jsme se zabývali modelováním subdukce litosférické desky v programu ASPECT. Tento software je široce používán na geofyzikálních pracovištích celého světa a získává pomalu status 'komunitního programu' v modelování deformace zemského pláště i dalších planetárních těles. Naším úkolem bylo poprvé jej použít pro modelování subdukce na našem pracovišti. Výchozím bodem byl vstupní soubor pro program ASPECT zhruba popisující model subdukce, tento předprogramovaný vstup nicméně nebyl otestovaný a díky několika nedostatkům nebyl funkční.

V rámci práce jsme v programu ASPECT úspěšně implementovali dvourozměrný model subdukce. Abychom dosáhli požadovaného chování modelu, bylo nutné upravit okrajové podmínky pro teplotu na horní hranici modelované oblasti a také počáteční rozložení teploty a materiálové kompozice. Tyto úpravy vedly k úspěšné implementaci a) fungujícího riftu na levém okraji subdukující desky a b) mobilní nadložní desky. Rift na subdukující desce v kombinaci s posunem nízkoviskózní kůry vyřešil problémy s nežádoucím vznikem sekundární subdukce v levém horním rohu. Díky tomu jsme mohli porovnat chování subdukující desky v modelu s pevnou polohou kontaktu s případem, kdy se tento kontakt pohybuje.

Zatímco při zakotvené poloze kontaktu pozorujeme vertikální skládání desky pod bodem kontaktu, v případě pohyblivého kontaktu vzniká horizontální skládání desky. Toto chování se shoduje s chováním podobných modelů realizovaných dříve v programu SEPRAN [8].

V modelu s mobilní nadložní deskou jsme dále provedli dva testy: test vlivu tloušťky kůry na chování subdukující desky a test chování desky při dané tloušťce kůry a různém rozlišení.

V prvním testu jsme snížili tloušťku nízkoviskózní kůry na povrchu subdukující desky z původních 10 km na 5 km. Tím se snížila rychlost subdukce a změnilo se chování subdukované desky v plášti. Ztenčením kůry jsme omezili tvorbu horizontálního skládání v přechodové oblasti a deska postupuje do pláště příměji. Toto je ve shodě s dřívějšími modely realizovanými v programu SEPRAN [10].

Ve druhém testu jsme porovnávali dva modely, které měly identické modelové parametry s výjimkou sady parametrů určujících adaptivní zahušťování sítě. V ideálním případě by výsledky modelu na rozlišení neměly záviset, zde se ale ukázalo, že se výsledky jednotlivých běhů od sebe viditelně odlišují, protože řidší síť není zřejmě schopná dostatečně rozlišit ostré kontrasty viskozity mezi kůrou a plášťovou litosférou. Základní rysy chování subdukované desky jsou tedy zachovány, je ale zřejmé, že parametry rozlišení do značné míry ovlivňují průběh simulace.

Toto se ukazuje i při srovnání modelů v programu ASPECT s modelem v programu SEPRAN. Modelové parametry jsou i zde shodné, v programu SEPRAN je ovšem rozlišení řešeno jinak, než v ASPECTu. Potvrzuje se nám tedy, že výsledky modelů je nutné interpretovat obezřetně, protože pro modely se stejnými fyzikálními parametry můžeme dostat různé výsledky, změníme-li rozlišení, se kterým počítáme. V tomto směru je program ASPECT velmi slibným nástrojem, vzhledem k možnosti adaptivního zahuštění sítě, které v principu umožňuje rozlišení kůry zvýšit, aniž by neúměrně vzrostly celkové požadavky na výpočetní čas.

Literatura

1. CHRISTENSEN, Ulrich R. The influence of trench migration on slab penetration into the lower mantle. *Earth and Planetary Science Letters*. 1996, roč. 140, č. 1, s. 27–39. ISSN 0012-821X. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(96\)00023-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(96)00023-4).
2. BĚHOUNKOVÁ, Marie; ČÍŽKOVÁ, Hana. Long-wavelength character of subducted slabs in the lower mantle. *Earth and Planetary Science Letters*. 2008, roč. 275, č. 1, s. 43–53. ISSN 0012-821X. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.059>.
3. GOES, S.; AGRUSTA, Robert; HUNEN, Jeroen van; GAREL, Fanny. Subduction-transition zone interaction: A review. *Geosphere*. 2017, roč. 13, GES01476.1. Dostupné z DOI: 10.1130/GES01476.1.
4. SEGAL, A.; PRAAGMAN, N. *The Sepran FEM Package*. 2005. Technical Report. Ingenieursbureau Sepra.
5. HEISTER, Timo; DANNBERG, Juliane; GASSMÖLLER, Rene; BANGERTH, Wolfgang. High Accuracy Mantle Convection Simulation through Modern Numerical Methods. II: Realistic Models and Problems. *Geophysical Journal International*. 2017, roč. 210, č. 2, s. 833–851. Dostupné z DOI: 10.1093/gji/ggx195.
6. KRONBICHLER, M.; HEISTER, T.; BANGERTH, W. High Accuracy Mantle Convection Simulation through Modern Numerical Methods. *Geophysical Journal International*. 2012, roč. 191, s. 12–29. Dostupné z DOI: 10.1111/j.1365-246X.2012.05609.x.
7. BANGERTH, Wolfgang; DANNBERG, Juliane; FRATERS, Menno; GASSMÖLLER, Rene; GLERUM, Anne; HEISTER, Timo; MYHILL, Robert; NALIBOFF, John. *ASPECT v2.4.0*. Zenodo, 2022. Ver. v2.4.0. Dostupné z DOI: 10.5281/zenodo.6903424.
8. ČÍŽKOVÁ, Hana; BINA, Craig R. Effects of mantle and subduction-interface rheologies on slab stagnation and trench rollback. *Earth and Planetary Science Letters*. 2013, roč. 379, s. 95–103. ISSN 0012-821X. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.08.011>.
9. BERG, A. van den; KEKEN, P. van; YUEN, D. The effects of a composite non-Newtonian and Newtonian rheology on mantle convection. *Geophysical Journal International*. 1993, roč. 115, č. 1, s. 62–78. Dostupné z DOI: 10.1111/j.1365-246X.1993.tb05588.x.
10. POKORNÝ, Jakub; ČÍŽKOVÁ, Hana; VAN DEN BERG, Arie. Feedbacks between subduction dynamics and slab deformation: Combined effects of nonlinear rheology of a weak decoupling layer and phase transitions. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2021, roč. 313, s. 106679. ISSN 0031-9201. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2021.106679>.
11. FRATERS, M.; THIEULOT, C.; BERG, A. van den; SPAKMAN, W. The Geodynamic World Builder: a solution for complex initial conditions in numerical modeling. *Solid Earth*. 2019, roč. 10, č. 5, s. 1785–1807. Dostupné z DOI: 10.5194/se-10-1785-2019.

12. FRATERS, Menno et al. *The Geodynamic World Builder v0.4.0 [software]*. 2021. Dostupné z DOI: [10.5281/zenodo.5014808](https://doi.org/10.5281/zenodo.5014808).

Seznam obrázků

2.1	Schématický náčrt modelu	11
3.1	Počáteční teplotní rozložení pro Model 1	15
3.2	Detail počátečního rozložení teploty a viskozity v rozích Modelu 1	16
3.3	Vývoj rozložení teploty a viskozity v levém rohu Modelu 1	16
3.4	Vertikální skládání v modelu 1	17
3.5	Počáteční teplotní rozložení pro Model 2	17
3.6	Upravené okrajové podmínky pro teplotu v Modelu 2	18
3.7	Vznik kapky v levém rohu Modelu 2	18
3.8	Počáteční teplotní rozložení pro Modely 3, 4, 5 a 6	19
3.9	Počáteční rozložení teploty a viskozity v rozích Modelu 3	19
3.10	Tvorba horizontálního skládání v Modelu 3	20
3.11	Srovnání subdukce modelů 4 a 5	21
3.12	Srovnání tvorby subdukující desky u modelů 4 a 5	22
3.13	Srovnání rozlišení Modelů 4 a 6 před spuštěním simulace	23
3.14	Srovnání rozlišení Modelů 4 a 6 sedm milionů let po spuštění simulace	24
3.15	Srovnání teplotního rozložení pro Modely 4 a 6	25
3.16	Srovnání teplotního rozložení modelů v ASPECTu a SEPRANu .	25

Seznam tabulek

2.1	Symboly a modelové parametry	12
2.2	Hodnoty modelových parametrů a možnosti nastavení limitu napětí pro jednotlivé modely v programu ASPECT	13
2.3	Parametr zahuštění sítě v různých oblastech modelů v programu ASPECT	13

A Přílohy

A.1 Nastavení GWB pro Model 4

```
{
  "version":"0.4",
  "coordinate system":{"model":"cartesian"},
  "cross section":[[0,0],[10000e3,0]],
  "features":
  [
    // mantle material and temperature
    {"model":"mantle layer", "name":"mantle", "min depth":0e3, "max
      depth":150e3, "coordinates":[[0,-1],[10000e3,-1],[10000e3
        ,1],[0,1]],
      "temperature models":[{"model":"linear", "min depth":0e3, "max
        depth":150e3, "top temperature":273, "bottom temperature"
          :1600}],
      "composition models":[{"model":"uniform", "compositions"
        :[1]}]},
    // subducting plate left corner

    {"model":"oceanic plate","name":"left", "max depth":350e3, "
      coordinates":[[0e3,0],[300e3,0]],
      "temperature models":[{"model":"plate model", "max depth":170e3
        , "bottom temperature":1600,"spreading velocity":0.05, "
          ridge coordinates":[[100e3,-1],[100e3,1]]}],
      "composition models":[{"model":"uniform", "max depth":10e3, "
        compositions":[1]},
        {"model":"uniform", "min depth":10e3, "
          max depth":150e3, "compositions"
            :[1]}]},

    // subducting plate right side

    {"model":"oceanic plate","name":"left", "max depth":350e3, "
      coordinates":[[300e3,0],[5000e3,0]],
      "temperature models":[{"model":"plate model", "max depth":170e3
        , "bottom temperature":1600,"spreading velocity":0.05, "
          ridge coordinates":[[100e3,-1],[100e3,1]]}],
      "composition models":[{"model":"uniform", "max depth":10e3, "
        compositions":[0]},
        {"model":"uniform", "min depth":10e3, "
          max depth":150e3, "compositions"
            :[1]}]},

    // weak (warm) zone at the upper-left corner

    {"model":"oceanic plate","name":"left-weak-ridge", "max depth":2000
      e3, "coordinates":[[0e3,0],[100e3,0]],
      "temperature models":[{"model":"linear", "max depth":2000e3, "
        top temperature":1600, "bottom temperature":2132}],
      "composition models":[{"model":"uniform", "max depth":2000e3, "
        compositions":[1]}]},

    // overriding plate
```

```

{"model":"oceanic plate", "name":"right", "max depth":150e3, "
  coordinates":[[5000e3,0],[10000e3,0]],
  "temperature models":[{"model":"plate model", "max depth":150e3
    , "bottom temperature":1600, "spreading velocity":0.05, "
    ridge coordinates":[[9900e3,-1],[9900e3,1]]}],
  "composition models":[{"model":"uniform", "max depth":25e3, "
    compositions":[1]},
    {"model":"uniform", "min depth":25e3, "
      max depth":150e3, "compositions"
      :[1]}}],

// weak (warm) zone at the upper-right corner

{"model":"oceanic plate","name":"right-weak-ridge", "max depth":2000
e3, "coordinates":[[9900e3,0],[10000e3,0]],
  "temperature models":[{"model":"linear", "max depth":2000e3, "
    top temperature":1600, "bottom temperature":2132}],
  "composition models":[{"model":"uniform", "max depth":2000e3, "
    compositions":[1]}}],

// subducted tip

{"model":"subducting plate", "name":"Subducting plate", "
  coordinates":[[4800e3,-1e3],[4800e3,1e3]], "dip point":[5000
e3,0],
  "segments":[{"length":130e3, "thickness":[150e3], "angle":[0]},
    {"length":200e3, "thickness":[150e3,120e3], "angle"
    :[0,20]},
    {"length":180e3, "thickness":[120e3,120e3], "angle"
    :[20]}],
  "temperature models":[{"model":"linear", "top temperature":275
    , "bottom temperature":1600, "max distance slab top":100e3
    }],
  "composition models":[{"model":"uniform", "compositions":[0], "
    max distance slab top":10e3},
    {"model":"uniform", "compositions":[1], "
    min distance slab top":10e3, "max
    distance slab top":200e3 }]}

]
}

```

A.2 Skript v ASPECTu pro inicializační běh Modelu 4

```

set Dimension = 2
set Use years in output instead of seconds = true
set End time = 6.2e6
set Output directory = output
set World builder file = world_corners.wb
set CFL number = 0.8
set Nonlinear solver scheme = iterated Advection and
  Stokes

```



```

set Max nonlinear iterations      = 50
set Nonlinear solver tolerance   = 1e-4

#set Resume computation = true

subsection Checkpointing
  set Steps between checkpoint = 10
end

subsection Solver parameters
  subsection Stokes solver parameters
    set Number of cheap Stokes solver steps = 0
    set Maximum number of expensive Stokes solver steps = 5000
    set Linear solver tolerance = 1e-6
  end

end

subsection Compositional fields
  set Number of fields = 1
  set Names of fields = 3_continent
end

subsection Material model
  set Material averaging = harmonic average
  set Model name = visco plastic
  subsection Visco Plastic
    set Thermal expansivities = background: 2e-5 | 2e-5 | 2e-5 ,3
      _continent: 2e-5 | 2e-5 | 2e-5 | 2e-5
    set Thermal diffusivities = 1e-6, 1e-6
    set Thermal conductivities = 3.0, 3.0
    set Reference temperature = 1600
    set Minimum viscosity = 1e19
    set Maximum viscosity = 1e24
    set Viscous flow law = composite
    #set Viscosity averaging scheme = maximum composition
    set Minimum strain rate = 1e-22
    set Reference strain rate = 1e-15
    set Heat capacities      = background: 1250, 3_continent:1250

    set Prefactors for dislocation creep      = background:
      31.5e-18 | 31.5e-18 | 6.51e-30 , 3_continent: 1e-20 | 31.5e
      -18 | 31.5e-18 | 6.51e-30
    set Stress exponents for dislocation creep = background:
      3.5 | 3.5 | 1 , 3_continent: 1 | 3.5
      | 3.5 | 1
    set Activation energies for dislocation creep = background:
      480e3 | 480e3 | 530e3 , 3_continent: 0 | 480e3
      | 480e3 | 530e3
    set Activation volumes for dislocation creep = background:
      1.1e-5 | 1.1e-5 | 1.3e-5 , 3_continent: 0 | 11e-6
      | 11e-6 | 1.3e-5
    set Prefactors for diffusion creep          = background: 1
      e-9 | 1e-9 | 1.3e-16 , 3_continent: 1e-9 | 1e-9
      | 1e-9 | 1.3e-16
    set Grain size exponents for diffusion creep = background: 1
      | 1 | 1 , 3_continent: 1 | 1
      | 1 | 1

```

```

set Activation energies for diffusion creep = background:
  335e3 | 335e3 | 200e3 , 3_continent: 335e3 | 335e3
  | 335e3 | 200e3
set Activation volumes for diffusion creep = background: 4
  e-6 | 4e-6 | 1.1e-6 , 3_continent: 4e-6 | 4e-6
  | 4e-6 | 1.1e-6
set Densities = background:
  3300 | 3573 | 3914 , 3_continent: 3300 | 3300
  | 3573 | 3914

set Grain size = 1

set Angles of internal friction =
  11.53695903,11.53695903
set Cohesions = 2e30 , 2e30
set Yield mechanism = limiter #drucker
set Stress limiter exponents = 10
set Maximum yield stress = 200e6

set Phase transition depths = background:
  410000 | 660000, 3_continent: 150000 | 410000 | 660000
set Phase transition temperatures = background:
  1700 | 1900 , 3_continent: 1600 | 1700 | 1900
set Phase transition Clapeyron slopes = background:
  2e6 | -2.5e6, 3_continent: 0 | 2e6 | -2.5e6
set Phase transition widths = background:
  15000 | 15000 , 3_continent: 15000 | 15000 | 15000

set Constant viscosity prefactors = 1,1
end

subsection Latent heat

# The change of density across the phase transition. Together
# with the
# Clapeyron slope, this is what determines the entropy change.
set Phase transition density jumps = 273, 341,
  0, 273, 341
set Corresponding phase for density jump = 0,0, 1,1,1

# If the temperature is equal to the phase transition
# temperature, the
# phase transition will occur at the phase transition depth.
# However,
# if the temperature deviates from this value, the Clapeyron
# slope
# determines how much the pressure (and depth) of the phase
# boundary
# changes. Here, the phase transition will be in the middle of
# the box
# for T=T1.
set Phase transition depths = background:
  410000 | 660000, 3_continent: 150000 | 410000 | 660000
set Phase transition temperatures = background:
  1700 | 1900 , 3_continent: 1600 | 1700 | 1900
set Phase transition Clapeyron slopes = background:

```

```

2e6      | -2.5e6, 3_continent: 0      | 2e6      | -2.5e6

# We set the width of the phase transition to 5 km. You may want
to
# change this parameter to see how latent heating depends on the
width
# of the phase transition.
set Phase transition widths              = background:
    15000 | 15000, 3_continent: 15000 | 15000 | 15000
set Reference specific heat              = 1250
set Thermal conductivity                = 3
set Thermal expansion coefficient        = 3e-5
set Viscosity prefactors                 = 1,1,1,1,1,1
set Density differential for compositional field 1 = 0
set Reference density                   = 3416
end

subsection Composition reaction model
    set Reaction depth = 100e3
end

subsection Compositing
    set Viscosity = visco plastic
    set Density = latent heat
    set Thermal expansion coefficient = latent heat
    set Specific heat = latent heat
    set Thermal conductivity = latent heat
    set Compressibility = latent heat
    set Entropy derivative pressure = latent heat
    set Entropy derivative temperature = latent heat
    set Reaction terms = latent heat
end
end

subsection Initial composition model
    set List of model names = world builder #,function
    subsection Function
        set Variable names = x,y
        set Function constants = pi =3.1415926536
        set Function expression = if(y>2885e3, 1, 0)
    end
end

subsection Geometry model
    set Model name = box

    subsection Box
        set X extent = 10000e3
        set Y extent = 2000e3
        set X repetitions = 5
    end
end

subsection Boundary velocity model
    set Tangential velocity boundary indicators = bottom , left ,
right # , top
    set Prescribed velocity boundary indicators = top:function
    subsection Function

```

```

        set Variable names = x,y
        set Function expression = if(x<5000e3 , 0.025,0);0 if(phi<
            pi/2.,velo,if(phi<pi*0.75,0,if(phi<pi*1.2,-0.04,if(phi
                >1.8*pi,0,velo*2.))))
    end
end

subsection Heating model

    set List of model names = adiabatic heating , constant heating ,
        shear heating
subsection Adiabatic heating
    set Use simplified adiabatic heating = true
end

subsection Constant heating
    set Radiogenic heating rate = 0
end
end

subsection Boundary temperature model
    set Fixed temperature boundary indicators = top, bottom #, left,
        right
    set List of model names = function

    subsection Function
        set Variable names      = x,y
        set Function constants  = x_ridge=100.e3, x_ridge2=9900.e3,
            Tridge=1600, Tsurf=273, Tbot=2132
        set Function expression = ( y>500.e3 ? ( x<x_ridge || x>
            x_ridge2 ? Tridge : Tsurf ) : Tbot )
    end

end

set Adiabatic surface temperature = 1600

subsection Initial temperature model
    set List of model names = world builder #,function, harmonic
        perturbation
    subsection Function
        set Variable names = x,y
        set Function expression = if(y>2800e3, 273 + (( ( (2900e3 - y
            ) / 100e3 )) * 1327), 1600 + (((2800e3 - y ) / 2800e3 ) *
            1100) )

        end
    subsection Harmonic perturbation
        set Magnitude = 9.81
    end
end

subsection Gravity model
    set Model name = vertical
    subsection Vertical
        set Magnitude = 9.81
    end
end

```

```

end

subsection Mesh refinement
  set Initial global refinement      = 6
  set Initial adaptive refinement    = 2
  set Strategy                       = minimum refinement function
    , maximum refinement function, viscosity , composition
    threshold, strain rate
  subsection Minimum refinement function
    set Coordinate system = cartesian
    set Function expression = if( y>1970e3,8,if(y>1900e3, 7, if(y
      >1600e3,6,4)))
    set Variable names = x,y
  end
  subsection Maximum refinement function
    set Variable names = x,y
    set Coordinate system = cartesian
    set Function expression = if( y>1970e3,8,if(y>1750e3, 8, if(y
      >1600e3,8,8)))
  end
  subsection Composition threshold
    set Compositional field thresholds = 0.7
  end
  set Time steps between mesh refinement = 1
end

subsection Postprocess
  set List of postprocessors = velocity statistics, temperature
    statistics, visualization, heat flux statistics, depth average,
    particles
  subsection Depth average
    set Time between graphical output = 1e6
    set Number of zones = 100
  end

  subsection Visualization
    set Number of grouped files      = 1
    set Output format                 = vtu
    set Time between graphical output = 1e6
    set List of output variables = density, viscosity, strain rate,
      stress, temperature anomaly, spherical velocity components,
      adiabatic, heat flux map, heating, vertical heat flux
  end

  subsection Particles
    set Data output format           = vtu
    set List of particle properties  = position, velocity, initial
      composition
    set Number of particles           = 1000
    set Number of grouped files      = 1
    set Update ghost particles       = true
    set Particle generator name      = uniform box
    set Time between data output     = 1e6
    set Allow cells without particles = true
    set Interpolation scheme         = cell average
    set Write in background thread   = true
  subsection Generator

```

```
subsection Uniform box
  set Maximum x = 5000e3
  set Minimum x = 0
  set Maximum y = 2000e3
  set Minimum y = 1750e3
end
end
end
end
```