



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Nela Dvořáková

**Slapové zahřívání ledových těles
sluneční soustavy**

Katedra geofyziky

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Ondřej Čadek, CSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2016

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

Název práce: Slapové zahřívání ledových těles sluneční soustavy

Autor: Nela Dvořáková

Katedra: Katedra geofyziky

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Ondřej Čadek, CSc., Katedra geofyziky

Abstrakt: Práce se zabývá ledovými měsíci a výpočtem tepelného výkonu, který je generován vlivem slapových sil. Text se zprvu soustředí na chování viskozity ledové slupky měsíce pro různě silnou ledovou vrstvu. Viskozita klesá exponenciálně s rostoucí teplotou. Také studujeme závislost viskozity a výkonu na velikosti ledového zrna v rozmezí 10^{-5} m – 10^{-1} m či napětí napětí v rozmezí 10^3 Pa – 10^7 Pa. Výpočet tepelného výkonu je proveden v poskytnutém programu a výsledkem jsou výkonostní mapy pro jednotlivé modely a jejich další rozbor. Především je diskutována tepelná bilance Evropy a Enceladu.

Klíčová slova: ledové měsíce, slapová disipace, maxwellovská reologie, andradovská reologie, viskoelastické těleso

Title: Tidal heating in icy bodies of the Solar System

Author: Nela Dvořáková

Department: Departement of Geophysics

Supervisor: prof. RNDr. Ondřej Čadek, CSc., Department of Geophysics

Abstract: The thesis concerns with icy moons and the computation of the heat production which is generated by the effect of tidal forces. The text primarily focuses on the behaviour of viscosity in the ice shell for variable ice shell thickness. Viscosity decreases exponentially as the temperature of ice increases. We also study the viscosity and heat dependence on the size of an ice grain in range of 10^{-5} m – 10^{-1} m and the amount of stress in range of 10^3 Pa – 10^7 Pa. Computation was realized using a provided program and the results of all models are represented in form of a heat map and further studied. Primarily we discuss the heat balance of the moon Europa and Enceladus.

Keywords: icy moons, tidal disipace, maxwell rheology, andrade rheology, visco-elastic body

Ráda bych poděkovala především mému vedoucímu práce profesoru Ondřeji Čadkovi nejen za zapůjčený program, ale hlavně za investovaný čas a trpělivé vedení při jejím vypracování.

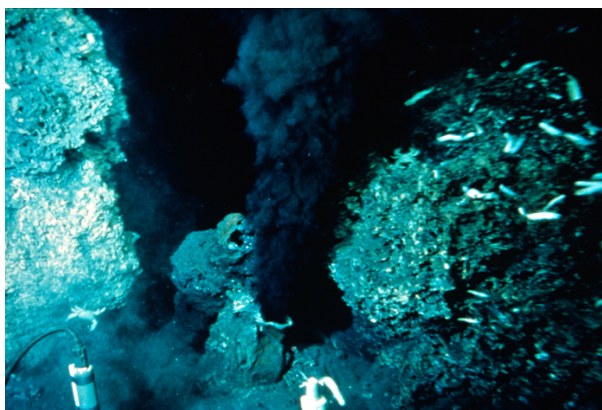
Obsah

Úvod	2
1 Ledové měsíce Jupiteru a Saturnu	6
1.1 Charakteristika ledových měsíců	6
1.2 Europa	7
1.3 Enceladus	9
1.4 Další významné ledové měsíce	10
2 Anelastické chování ledu	13
2.1 Modely popisující anelastickou deformaci	13
2.2 Průběh viskozity v ledové slupce	14
3 Průběh teploty v ledových slupkách měsíců	18
3.1 Rovnice vedení tepla	18
4 Rovnice popisující slapové zahřívání ledových těles	21
4.1 Rovnice popisující uvažovaný model	21
4.2 Hranicní podmínky	21
4.3 Výpočet slapové disipace	22
5 Slapová disipace Enceladu a Europy	23
5.1 Program na výpočet disipace	23
5.2 Výsledky jednotlivých modelů	23
5.3 Tepelná bilance Enceladu a Europy	33
6 Diskuze výsledků	37
7 Závěr	39
Literatura	40
Seznam obrázků	42
Seznam tabulek	44

Úvod

Jednou z výjimečných otázek, kterou se současná věda snaží zodpovědět je, zda může existovat život i mimo naši planetu.

Nedávné výzkumy naznačují (Lipps a kol., 2004), že podmínky vhodné pro vznik života by mohly existovat v nitrech ledových měsíců ve vnější sluneční soustavě. Některé měsíce Jupiteru a Saturnu pod svým ledovým povrchem pravděpodobně ukrývají rozsáhlé rezervoáry slané vody (Spohn a Schubert, 2003), které by v principu mohly hostit jednoduché formy života (Drobyshevski, 2003). Velkou motivací pro hledání života v těchto tělesech se stal výzkum extrémofilních organismů na Zemi (Rotschild a kol., 2001), zejména pak termofilních organismů žijících v oceánech v okolí tzv. černých kuřáků (Martin a kol., 2005) a to až v hloubkách zhruba 2000 m (obr. 1). Jedná se o druh hydrotermální aktivity spojené s podmořským vulkanismem. Podobné útvary lze očekávat i na dně oceánu na Europě a možná i na Enceladu (Schulze–Makuch a Irwin, 2001).



Obrázek 1: Černí kuřáci na mořském dně v blízkosti východopacifického hřbetu (převzato z <https://www.nasa.gov>)

Detailní informace o ledových měsících jsme získali především díky vesmírných misím Galileo a Cassini (Throop a kol., 2004). Tyto sondy navázaly na úspěšné mise Voyager 1 a Voyager 2 (obr. 2), které odstartovaly v 70. letech a poskytly první podrobnější snímky těchto těles.

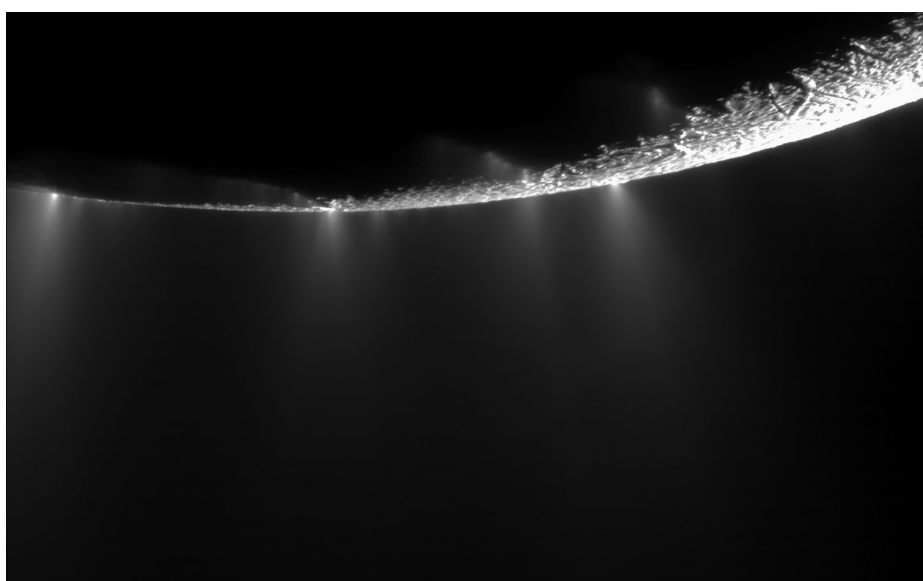
V roce 1995 dorazila k Jupiteru sonda Galileo, která se zaměřila zprvu na studium Jupiterovy magnetosféry a později uskutečnila bližší průlety kolem velkých galileovských měsíců, během nichž provedla měření, která s vysokou pravděpodobností naznačovala, že pod povrchem některých z nich se ukrývají vodní oceány. Konkrétně proletěla blízko měsíce Europa a Io a jeho nejbližší průlet byl ve vzdálenosti 180 km. Později v roce 1997 byla k Saturnu vyslána sonda Cassini, která dosáhla planety v roce 2004. Cílem této mise bylo mimo jiné studium složení povrchů měsíců jejich geologie.

Jedním z významných poznatků, které přinesla mise Cassini byl objev kryovulkánů na jižním pólu Enceladu (Porco a kol., 2006). Při dalších průletech kolem tohoto měsíce se podařilo odebrat vzorky ledových částic vyvržených z Enceladových gejzírů, jejichž chemický rozbor potvrdil existenci vodního rezervoáru pod povrchem měsíce (Waite Jr a kol., 2009). Dalším významným objevem sondy



Obrázek 2: Významné mise, které přispěly k výzkumu ledových měsíců. Voyager 1 (nahore vlevo), Galileo (nahore vpravo) a Cassini (dole). Umělecké ztvárnění podle JPL/NASA

Cassini byly silikátové nanočástice rozptýlené v disku E Saturnu. Jejich analýza naznačuje, že vznikly v důsledku hydrotermální cirkulace na dně podpovrchového oceánu při teplotách až 90°C a byly pak rychle transportovány do ledových gejzírů (Matson a kol., 2007).



Obrázek 3: Kryovulkány na Enceladu, zdroj: JPL/NASA

Kryovulkanismus podobného typu jako na Enceladu (obr.3) byl Hubbleovým teleskopem pozorován také na Europě i když interpretace teleskopických snímků není zcela jednoznačná.

Mezi ledovými měsíci najdeme jak plně diferencovaná tělesa, k nimž patří například Jupiterovy měsíce Europa a Ganymed nebo Saturnovy měsíce Enceladus a Titan, tak tělesa diferencovaná pravděpodobně jen z části jako například Jupiterův měsíc Callisto. Diferencované ledové měsíce se skládají z pevného silikátového jádra, případně s vnitřním kovovým jádrem, a pláště tvořeného vodním ledem. Povrch je pokryt zmrzlou vodou. Vědecké poznatky nasvědčují, že pod tuhou ledovou kůrou může existovat vrstva vody v kapalném skupenství (Tobie a kol., 2008). Velkou otázkou však zůstává zda a případně pomocí jakého mechanismu je možné tyto rozsáhlé vodní rezervoáry udržet v kapalném stavu. Povrchová teplota ledových měsíců je totiž hluboko pod bodem mrazu a čím dále od Slunce se ledová tělesa nacházejí, tím nižší jsou jejich povrchové teploty. Například na Europě se střední povrchová teplota pohybuje jen okolo 100 K a na Enceladu je povrchová teplota ještě o 25 K nižší. V důsledku toho měsíce ztrácejí svým povrchem velké množství tepla, a proto aby si měsíce mohly udržet podpovrchový oceán, potřebují vydatný zdroj tepla. Takovým zdrojem tepla je zřejmě v řadě případů slapové zahřívání. Díky tomu, že satelity mají vázanou rotaci a obíhají okolo planet po excentrické dráze, se mění velikost gravitační odstředivé síly na satelit, v závislosti na tom, zda se nachází v pericentru či apocentru. Toto slapové působení vyvolává deformaci ledového pláště a část deformační energie se při tom přeměňuje (disipuje) v teplo.

Jakým způsobem bude disipace probíhat, závisí na viskozitě. Abychom byli schopni posoudit tepelnou bilanci měsíce, budeme se v prvním kroku zabývat právě touto veličinou. V ledu tvořícím vnější slupku měsíce dochází k několika druhům pomalého tečení (tzv. creepu), z nichž každý je charakterizován vlastní viskozitou. Existuje několik typů creepových mechanismů, přičemž viskozita závisí na různých parametrech (Goldsby a Kohlstedt, 1997). V této práci se budeme zabývat dvěma hlavními mechanismy, které určují deformaci ledu: creepem difúzním a dislokačním. Difúzní creep silně závisí na velikosti zrna a na teplotě. Velikost zrna neznáme a proto budeme testovat různé hodnoty v rozsahu od 0,1 do 100 mm, pro které spočteme creepové mapy. U dislokačního creepu zase budeme sledovat vliv napětí. V závislosti na parametrech pak vykreslíme creepové mapy, s jejichž pomocí pak odhadneme hloubkový průběh viskozity v ledových slupkách.

Zatímco závislost viskozity na velikosti zrna a na napětí je mocninná, na teplotě závisí viskozita exponenciálně a je to tedy především teplota, která určuje hloubkové variace viskozity. Hodnoty teploty získáme z řešení rovnice vedení tepla pro sféricky symetrickou kulovou slupku, kde jako okrajové podmínky zadáme teploty na hranicích. Na horní hranici použijeme povrchovou teplotu, kterou u většiny ledových měsíců alespoň přibližně známe. Na spodní hranici díky předpokladu tekutého oceánu předepíšeme teplotu tání ledu, tedy 273 K.

Podrobně se zaměříme na Jupiterův měsíc Europu a Saturnův měsíc Enceladus, které se dnes považují za hlavní astrobiologické objekty ve sluneční soustavě. Hlavní částí práce budou výpočty slapové disipace pro oba měsíce. Využijeme zde poznatků a hodnot týkajících se viskozity, spočteme tepelný výkon slapové deformovaného tělesa a výsledek porovnáme s očekávanými tepelnými ztrátami. Na

základě tohoto výpočtu posoudíme, zda slapová disipace dostatečně vysvětluje pozorovanou tepelnou bilanci Enceladu a jaká tloušťka ledové vrstvy je termálně stabilní v případě Europy. V této práci bychom se chtěli alespoň pokusit dosáhnout lepšího pochopení toho, jakým způsobem ledové měsíce generují dostatek tepla k udržení podpovrchových oceánů v kapalném stavu. Práce je strukturovaná tak, aby nejprve seznámila čtenáře se zvláštnostmi skupiny ledových měsíců, načež se blíže zaměřuje na konkrétní tělesa jako je Europa a Enceladus. Po této úvodní kapitole následuje krátký popis použitých modelů a jejich analogových reprezentací. Ve stejné části se také podrobněji zabýváme důležitou veličinou, viskozitou, která je pro výpočet disipace tepla zásadní. K výpočtu viskozity bylo třeba zjistit průběh teploty v ledové slupce a tak se v další kapitole soustředíme na rovnici vedení tepla. Dále následují formulace důležitých zákonů a předepsání hraničních podmínek. Výsledky samotného výpočtu jsou shrnuty v kapitole o slapové disipaci pro Europu a Enceladus a za nimi následuje diskuze získaných výsledků a závěr celé práce.

1. Ledové měsíce Jupiteru a Saturnu

1.1 Charakteristika ledových měsíců

V úvodu jsme se pokusili objasnit proč ledové měsíce lákají zájem vědecké i laické veřejnosti. Jde o skupinu objektů s vysokým habitabilním potenciálem, a to díky svému složení, ve kterém převládá přítomnost vodního ledu. Řadíme mezi ně například galileovské měsíce Europa, Ganymed a Callisto, nebo také některé ze Saturnových měsíců jako například Mimas, Enceladus a Titan. I přes malé rozměry některých z nich (například Mimas a Enceladu viz tabulka 1) jejich téměř kulový tvar, který vznikl působením vlastní gravitace, nasvědčuje tomu, že se nacházejí v hydrostatické rovnováze. I přesto ale nalezneme nepravidelnosti na povrchu některých z nich a příkladem by mohl být třeba Mimas se svým téměř 140 km širokým kráterem Herschel. Ledové měsíce jsou navíc deformované slapovými silami planet, okolo kterých obíhají a tedy jejich tvar odpovídá spíše rotačnímu elipsoidu. Přibližné parametry vybraných ledových těles jsou v tabulce 1.1.

Měsíc	Hmotnost [kg]	Střední poloměr [km]	Střední hustota [kg/m ³]
EUROPA	$4,8 \times 10^{22}$	1560,8	3010
GANYMED	$1,48 \times 10^{23}$	2631,2	1940
CALLISTO	$1,08 \times 10^{23}$	2410,3	1830
MIMAS	$3,79 \times 10^{19}$	198,7	1150
ENCELADUS	$1,08 \times 10^{20}$	252	1610
TITAN	$1,35 \times 10^{23}$	2575	1880

Tabulka 1.1: Parametry ledových měsíců (zdroj: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov>)

Povrch ledového tělesa může být pokryt bohatou sítí kráterů, starých více než 4 miliardy let, jako je to v případě měsíce Callisto nebo Mimas. Na povrchu měsíce Ganymede zase najdeme rozpraskané terény, jejichž vznik není ještě kompletně vysvětlen. Na fotografiích povrchu Europy ze sondy Galileo si můžeme prohlédnout komplexní chaotické terény a také podlouhlé linie křížující její povrch. V neposlední řadě jsou pro nás ledové měsíce zajímavé díky pozorovanému kryovulkanismu na některých z nich. Enceladus svými gejzíry na jižním pólu zásobuje ledovým materiálem Saturnův vzdálený prstenec E. Důležité je zmínit také Saturnův měsíc Titan, jež má ve sluneční soustavě jako jediný měsíc hustou atmosféru a zároveň vyjímaje Země byla jen u něj prokázána přítomnost stabilních kapalných rezervoárů přímo na povrchu.

Ledové měsíce obíhají po drahách, které leží za tzv. sněžnou čarou, což je hranice nacházející se mezi oběžnými drahami Marsu a Jupitera. V současné době máme informace o těchto tělesech poskytnuté zmíněnými sondami Galileo a Cassini, ale do budoucna plánuje Evropská kosmická agentura misi k ledovým měsícům s názvem JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer, Grasset a kol., 2013),

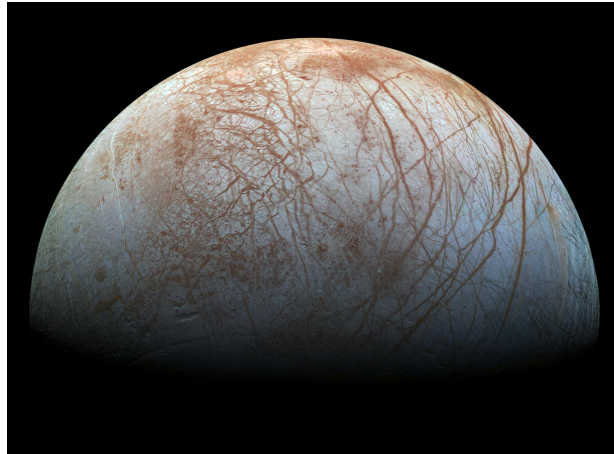
Měsíc	Excentricita	Perioda oběhu [den]
EUROPA	0,0101	3,55
GANYMED	0,0015	7,15
CALLISTO	0,007	16,69
MIMAS	0,0202	0,94
ENCELADUS	0,0045	1,37
TITAN	0,0292	15,95

Tabulka 1.2: Parametry dráhy

která by mohla mnoho nezodpovězených otázek pomoci objasnit.

1.2 Europa

Jupiterův měsíc Europa je nejmenším ze čtyř galileovských měsíců. Byl objeven v roce 1610 Galileem Galilei a své jméno dostal od Keplera, který ji pojmenoval po fénické princezně, dceři krále Agenory z Tyru. Její střední poloměr je 1560 km má poměrně vysokou hustotu 3010 kg/m^3 . Obíhá Jupiter ve vzdálenosti zhruba 670 900 km a excentricita její dráhy je 0,0101. Rovina její dráhy je mírně skloněná vůči rovině Jupiterova rovníku.



Obrázek 1.1: Galileův měsíc Europa: zdroj: JPL/NASA

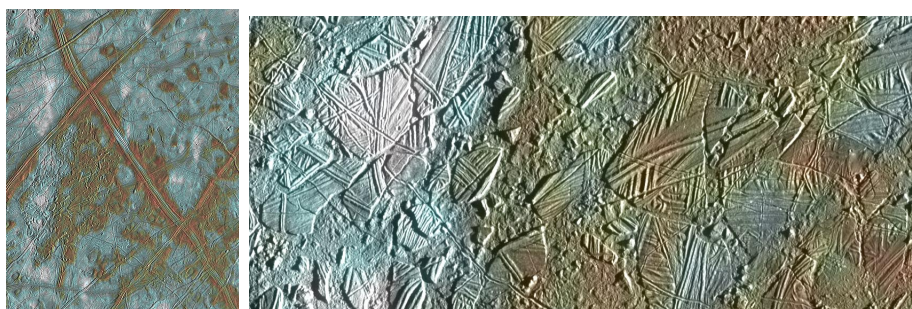
Europa je diferencované těleso, v jehož nitru se nachází kovové jádro, obklopené silikátovým pláštěm. Jádro se pravděpodobně z velké části skládá ze železa. Stálé magnetické pole Europy ovšem vzniká interakcí s magnetickým polem Jupitera. Možným způsobem jak toto pozorování vysvětlit je uvážení vodivé vrstvy pod zmrzlým povrchem, která je pravděpodobně tvořena slaným oceánem. Tloušťka svrchní vrstvy Europy se odhaduje na desítky kilometrů, avšak není jasné, jaká část této vrstvy je tvořena zmrzlým ledem a jakou část tvoří oceán pod povrchem. Na Europu působí slapové síly Jupitera, které způsobují periodické změny v jejím tvaru. Takové slapové namáhání by mohlo vést ke vzniku vulkanismu na

povrchu pláště a ten by umožnil průnik vody na povrch. Je to jedna z možností, jak vysvětlit geologickou aktivitu na tomto ledovém měsíci (Sotin a kol., 2002).

Na povrchu Europy pozorujeme některé útvary, které mohly vzniknout důsledkem tektonické aktivity. Jde především o fakt, že na celém povrchu Europy pozorujeme je málo impaktních kráterů a nepozorujeme například vysoká pohoří, jako na některých jiných tělesech sluneční soustavy.

Výraznými útvary jsou podlouhlé linie (obr. 1.1 vlevo), které se táhnou na obrovské vzdálenosti přes celý povrch. Linie se navzájem setkávají a křížují, čímž dotvářejí pro Europu tak charakteristický vzhled. Pravděpodobnou teorií vzniku jsou série erupcí, díky kterým se k povrchu dostal teplý led a narušil tak studenější led v kůře nad sebou. V ledové kůře tak mohly vzniknout praskliny, jež vytvořily pozorované lineární útvary. Některé mladší linie jsou k Jupiteru orientované způsobem, který by odpovídal tomu, jak Jupiter deformuje tento měsíc svým slapovým působením. Orientaci starších takových útvarů však vázaná rotace Europy kolem Jupitera příliš neodpovídá, což si vysvětlujeme tím, že povrch Europy rotuje nepatrně rychleji než její vnitřní část.

Na Europě nalezneme i další mnohem komplikovanější útvary, kterým říkáme chaotické terény. Svým vzhledem nám na poskytnutých snímcích připomínají popraskané ledové kry plovoucí na hladině oceánu (obr. 1.2 vpravo). Jde o další projevy tektonické aktivity na velmi mladém povrchu tohoto ledového měsíce.



Obrázek 1.2: Europa a ukázka chaotických terénů a liniových útvarů: zdroj: JPL/NASA

Zajímavou součástí povrchu jsou také tzv. lentikuly kruhového či eliptického tvaru, které jsou buď vystouplé nad povrch jako dómy nebo zahřezlé do povrchu připomínající jamky či tvoří jen tmavé ploché skvrny, ať už s hladkým povrchem nebo pokryté prasklinami.

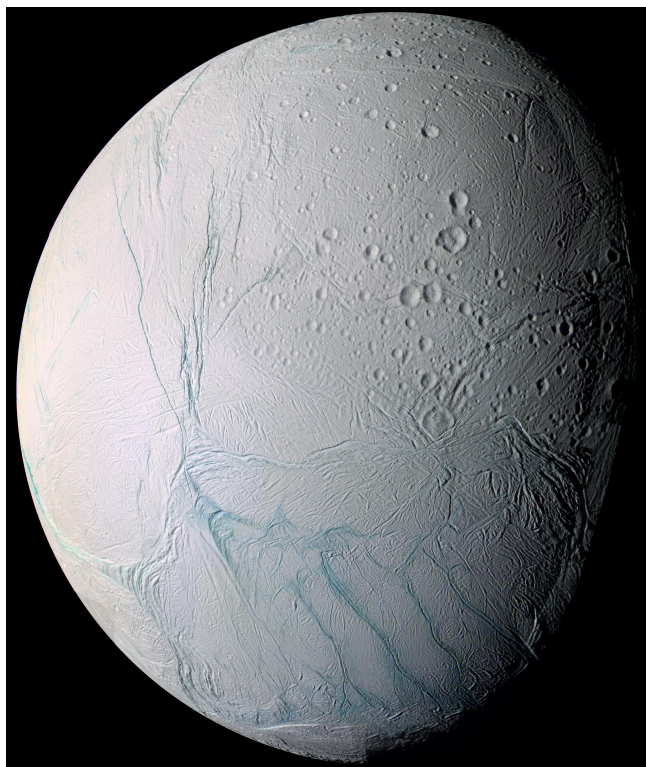
O existenci podpovrchového rezervoáru slané vody na Europě je většina vědecké společnosti přesvědčena. K jeho udržení je zapotřebí určité množství tepla. Teplo je generováno mnoha různými způsoby jako například během vzniku tělesa, chemickými reakcemi probíhajícími uvnitř tělesa, slunečním zářením dopadajícím na povrch nebo také radioaktivním rozpadem prvků s dlouhým poločasem rozpadu, který hraje velkou roli v případě Europy. Na udržení podpovrchového oceánu v kapalném stavu však nestačí. Na Europě a jiných ledových měsících tedy vysvětlujeme množství generovaného tepla a přítomnost tekutých vodních rezervoárů pomocí slapového zahřívání. Na deformaci Europy při oběhu kolem Jupitera má velký vliv laplaceova rezonance s ostatními galileovskými měsíci. Například měsíc Io, který je k Jupiteru blíže zhruba o třetinu vzdálenosti Europy od Jupitera, stihne během jednoho oběhu Europy oběhnout okolo planety

dvakrát a ovlivňuje tak její pohyb po oběžné dráze a její excentricitu. Jedním modelem je například takový, který předpokládá tenkou ledovou slupku a pod ní přítomnost tekuté vody, která se díky slapovým silám místy dostává k povrchu a tam ho narušuje.

V roce 1995 byla pomocí spektrografu na Hubbleově vesmírném dalekohledu zjištěno, že na Europě se vyskytuje slabá atmosféra. V jejím složení převládá molekulární kyslík, avšak způsob jeho doplňování do atmosféry se silně liší od toho, který funguje na Zemi. Na povrch Europy dopadá silná radiace, které způsobuje štěpení molekul vody z ledové vrstvy na vodík a kyslík. Dopadající záření, kterým je především UV záření ze Slunce a nabitě částice z Jupiterovy magnetosféry (Hall a kol., 1995), zároveň způsobuje vyvržení obou produktů pryč z povrchu. Molekuly vodíku jsou příliš lehké, než aby je gravitace Europy udržela v atmosféře a molekuly kyslíku tedy tvoří většinu slabé atmosféry. Tlak v takové atmosféře je minimálně desetkrát menší než na Zemi. Některá pozorování povrchu odhalila možnost, že ne všechny molekuly kyslíku v atmosféře pocházejí z povrchu, ale z oceánu pod ní. To podporuje myšlenku o existenci primitivních organismů srovnatelných s některými druhy v hlubokých oceánech na Zemi (Chyba, 2000).

1.3 Enceladus

Měsíc Enceladus objevil německý astronom William Herschel v roce 1789 a po jednom z Titánů z řecké mytologie ho pojmenoval jeho syn John Herschel. Enceladus je jedním z nejmenších Saturnových měsíců, které se nacházejí v hydrostatické rovnováze (dalšími jsou například Mimas, Iapetus a Rhea).



Obrázek 1.3: Saturnův měsíc Enceladus: zdroj: JPL/NASA

Jeho střední poloměr činí 252 km a jeho hustota se pohybuje okolo 1610 kg/m³.

Jeho oběžná dráha má excentricitu 0,0045, která je způsobena jeho orbitální resonancí s měsícem Dione, během jehož jednoho oběhu okolo Saturnu stihne Enceladus oběhy dva. Jeho průměrná vzdálenost od středu Saturnu je 238 000 km a jeden oběh dokončí za necelých 33 hodin. Jeho pohyb je tedy zaznamenatelný i během jediné pozorovací noci.

Průlety sondy Cassini poblíž tohoto ledového měsíce přinesli mnoho nových informací o jeho vnitřní struktuře a pomohli zpřesnit údaje o hmotnosti a tvaru tělesa. Stejně tak přispěli v oblasti studia Enceladova povrchu. Dřívější odhady týkající se složení měsíce nás směřovaly k závěrům, že měsíc je převážně tvořen zmrzlým ledem. Gravimetrická měření sondy Cassini však vedla k úpravám dosavadních závěrů. Prokázalo se, že hustota je výrazně vyšší, než s jakou se předtím počítalo a to vedlo k názoru, že Enceladus obsahuje výrazné množství silikátů a v jeho stavbě se vyskytuje také železo. Měsíc je plně diferencovaný s ledovým pláštěm a silikátovým jádrem. Díky teplu získanému z rozpadu radioaktivních prvků s krátkým poločasem rozpadu a díky slapovému zahřívání se mohlo jádro zahřát na teplotu 1000 K a roztavit vnitřní část svého pláště. K vysvětlení jeho geologické aktivity je však nutno ještě uvažovat natavené jádro, které by mohlo dát vzniknout oblastem s magmatem a ta pak udržovala Enceladus geologicky aktivní.

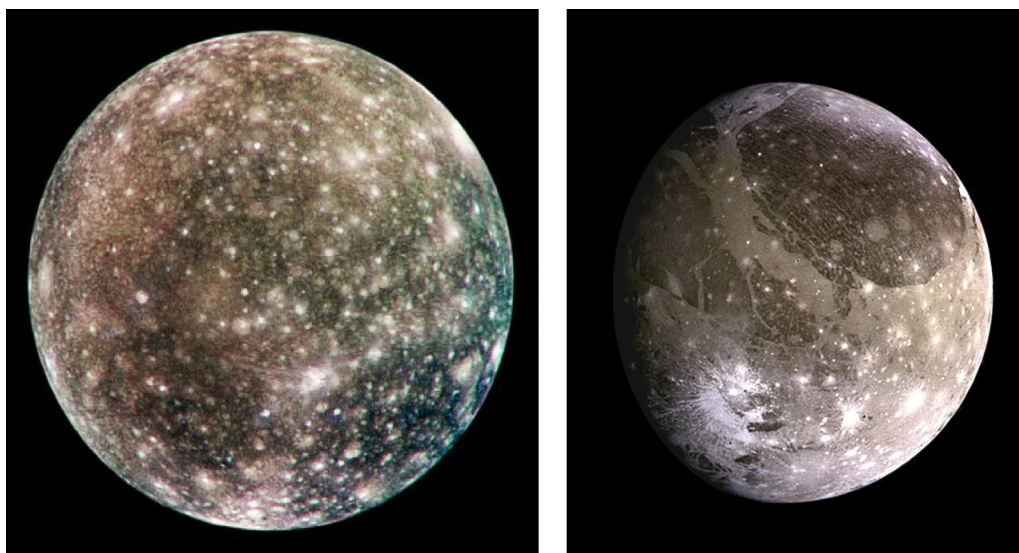
Povrch Enceladu pozoruhodný a to zejména v oblasti svého jižního pólu, na kterém najdeme aktivní kryovulkány rozmístěné v podlouhlých liniích, kterým díky svému charakteristickému uskupení říkáme Tygří drápy (Porco a kol., 2006). Celá tato oblast není příliš bohatá na impaktní krátery narozdíl od severního pólu, který je jimi hustě posetý. Kromě impaktních kráterů lze na povrchu tohoto ledového tělesa rozeznat spoustu dalších typů terénu jako různé praskliny prohlubně či prolákliny. Mnoho kráterů na Enceladu zaniká díky plastickému přetváření povrchových vrstev.

Co vzbuzuje na Enceladu velký zájem je činnost kryovulkánů, které byly na jižním pólu objeveny díky misi Cassini. Zjistilo se, že výtrysky s sebou do prostoru odnášejí ledové částičky se stopami molekulárního dusíku metanu a oxidu uhličitého (Waite a kol., 2006). Takto materiál tryskající z Enceladových gejzírů analyzovali přístroje na palubě sondy, mezi kterými byli mimo jiné hmotnostní spektrograf a analyzátor kosmického prachu (CDA - Cosmic dust analyzer) na palubě sondy Cassini. Data z přístroje CDA také prokázala vzrůstající počet částic v blízkosti měsíce, což potvrdilo hypotézu týkající se Enceladových gejzírů jakožto hlavních zdrojů materiálu v Sturnově prstenci E.

Některé studie naznačují, že se pod povrchem vyskytuje materiál s nízkou viskozitou (Tobie a kol., 2008), který by mohl pomoci vysvětlit přítomnost gejzírů na jižním pólu. Podle výzkumu by takovým materiálem mohla být slaná voda, která by tvořila podpovrchový oceán. V článku (Roberts a Nimmo, 2008) je naznačeno, že Enceladus mohl v minulosti mít větší excentricitu, což zvýšilo disipaci tepla v ledové slupce a zamezilo zamrznutí podpovrchového oceánu. V dnešní době ovšem pozorovaný tepelný tok nestačí k udržení stabilních podmínek pro existenci globálního rezervoáru vody pod povrchem Enceladu.

1.4 Další významné ledové měsíce

Mezi měsíci Jupitera stojí za zmínku některé další Galileovy měsíce jako Ganymed a Callisto.



Obrázek 1.4: Callisto a Ganymed: zdroj: JPL/NASA

Calliso a Ganymed

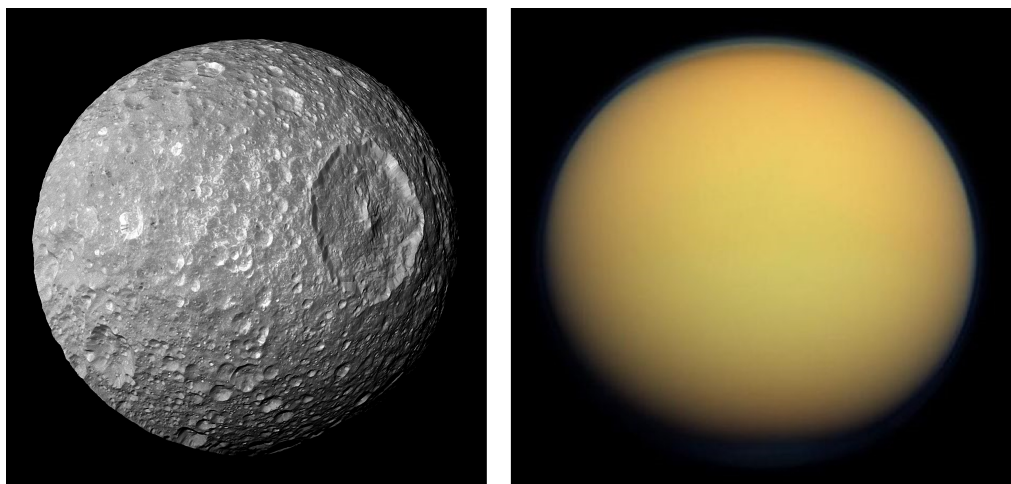
Oba byly spolu s Europou objeveny v roce 1610 Galileem. Ganymed obíhá Saturn ve vzdálenosti 1 070 400 km a Callisto, který je z galileovských měsíců nejvzálenější, je od Saturnu 1 882 700 km daleko (obr.1.4). Jejich povrchy jsou znatelně poznamenány impakty kráterů a Callisto dokonce jedno z nejhustěji posetých povrchů ve sluneční soustavě. Data ze sondy Galileo indikují, že by Callisto mohlo mít malé kamenné jádro a ledový plášť, pod nímž se pravděpodobně ve hloubce okolo 100 km nachází globální oceán. Takovou hypotézu v případě měsíce Callisto podporují měření magnetického pole v okolí tělesa. Magnetické pole, i když slabší, je jako u Europy indukované magnetickým polem Jupitera a jeho studium také vede k teoriím, jež navrhují přítomnost vodivé vrstvy pod povrchem. Vzhledem ke své vzdálenosti od Saturnu, není slapové zahřívání tak silným zdrojem tepla a ani teplo z dopadlého slunečního záření není dostatečným zdrojem tepla.

Na Ganymedu pozorujeme při hrubším pohledu v zásadě dva odlišné typy povrchu. Tmavší oblasti, jež jsou plné impaktních kráterů, jsou velmi staré a zabírají zhruba třetinu celého povrchu. Naopak mladší jsou světlé oblasti hřebenu a prasklin. Mechanismus, kterým by mohli takové praskliny vzniknout, není zatím zcela vysvětlen. Ganymed je diferencovaný a pod jeho povrchem se rovněž podle všeho nachází oceán. V tomto případě se ovšem pod povrchovou slupkou ledu vyskytuje více vrstev kapalné vody oddělených ledovými vrstvami o různých fázích. Soudě podle detekovaného magnetického pole, které je u Ganymeda nezávislé na Jupiterově magnetosféře, se v nitru měsíce nachází kovové jádro, díky kterému si udržuje stabilní magnetické pole.

Mimas

Mezi Saturnovými ledovými měsíci rozhodně poutá svým povrchem pozornost i Mimas (obr.1.5 vlevo), který obíhá ve vzdálenosti okolo 186 tisíc km. Jeho hustota je poměrně nízká, činí zhruba 1150 kg/m^3 . Jeho povrch je pokryt krátery

o rozměrech desítek kilometrů, nejvýraznějším z nich je kráter Herschel, jemuž se velikostí drtivá většina ostatních kráterů zdaleka ani neblíží.



Obrázek 1.5: Mimas s kráterem Herschel a Titan se svou hustou atmosférou, zdroj: JPL/NASA

Mimas na své dráze pravděpodobně vyčistil prostor mezi prstenci A a B, dvěma největšími prstenci Saturnu. Mezera je dnes známá jako Cassiniho dělení.

Titan

Titan je unikátní svou hustou a neprůhlednou atmosférou (obr. 1.5 vpravo). Objevil ho holandský astronom Christiaan Huygens v roce 1655 a jeho jméno je stejně jako Enceladus a Mimas vzato ze staré řecké mytologie. Střední vzdálenost Titanu od Saturnu je 1 221 870 km.

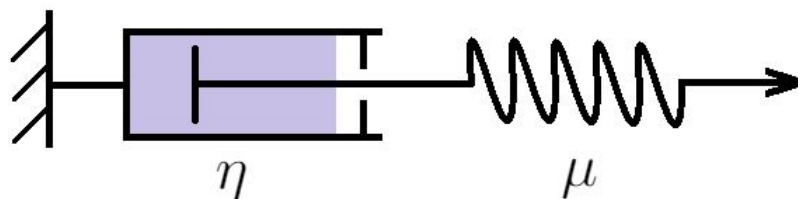
V atmosféře převládá dusík, ale obsahuje také množství jiných prvků, které vytvářejí metan-etanová oblaka. V místních podmínkách pozorujeme klima a tedy meteorologické úkazy jako déšť nebo vítr. Na povrch však místo kapalné vody dopadá tekutý metan a navíc na Titanu funguje metanový cyklus (Atreya a kol., 2006), který je v principu podobný cyklu vody na Zemi. Po získání dat z Hubbleova vesmírného teleskopu se objevily spekulace o přítomnosti povrchových rezervoárů kapalného metanu na Titanu a během mise Cassini v roce 2004 byla potvrzena uhlovodíková jezera. Povrchová teplota dosahuje 94 K, jelikož zhruba 90% světla ze Slunce je absorbováno v atmosféře. Skleníkový efekt, probíhající nad povrchem díky přítomnosti atmosféry, je oslaben odrazem světla od oblak v atmosféře. Existence podpovrchového oceánu na Titanu byla s vysokou pravděpodobností předpovězena pomocí měření gravitace získaných sondou Cassini (Rappaport a kol., 2008).

2. Anelastické chování ledu

2.1 Modely popisující anelastickou deformaci

Slapové působení na tělesa s vázanou rotací má za následek jeho deformaci. Pro dokonale elastické těleso je deformace reversibilní a nedochází při ní k dissipaci mechanické energie. V případě ledových měsíců ještě hraje důležitou roli vliv vlastní gravitace. Aby měsíc zůstal v hydrodynamické rovnováze, tak se po deformaci způsobené slapy navrácí do původního tvaru. Jelikož tato deformace není dokonale elastická, dochází při ní k přeměně mechanické energie na teplo čili tzv. slapové dissipaci.

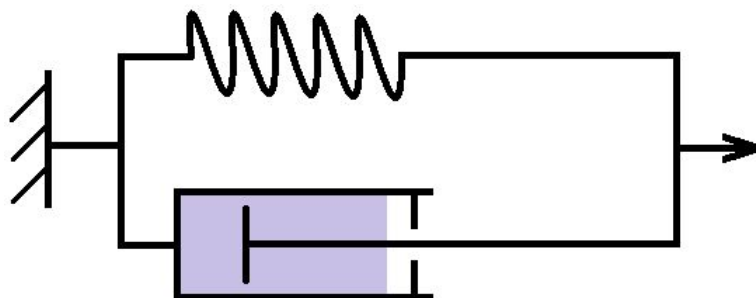
Ledová tělesa při deformaci vykazují jak elastické, tak viskózní chování a to můžeme popsat reologickými vztahy, které odpovídají maxwellovskému materiálu. Maxwellovu reologii reprezentujeme pomocí mechanického analogu, kterému říkáme Maxwellův visko-elastický model (obr. 2.1).



Obrázek 2.1: Maxwellův visko-elastický model

Tento model je poskládán z válce s viskózní kapalinou, v němž je umístěn pohyblivý píst. Tento píst je nadále spojen s pružinou vně válce. Zatáhneme-li za tuto pružinu, pružina se natáhne a s jistým zpožděním se posune i píst, který je ve válci brzděn viskózní kapalinou. Bude tedy záležet jak na viskozitě kapaliny η , tak na tuhosti pružiny μ , jakou silou budeme muset na pružinu působit, abychom rozpohybovali píst. Podíl těchto dvou charakteristických veličin nazýváme relaxační čas $\tau = \eta/\mu$.

Existuje další analog, který se používá k modelování anelastické deformace ledových těles, a tím je paralelní poskládání stejných komponent (pístu a pružiny). Takto popisujeme Kelvinův-Voigtův model (obr. 2.2).



Obrázek 2.2: Kelvinův-Voigtův model

Ke studiu anelastické deformace ledového tělesa využijeme Maxwellův nebo přesnější Andradeův model. Ten vznikne poskládáním nekonečna Maxwellových prvků za sebe. V případě všech tří modelů dochází k energetickým ztrátám.

Předpokládáme, že deformace jsou malé, což znamená, že determinant gradientu vektoru posunutí \vec{u} je mnohem menší než jedna. Zároveň probíhá deformace v prostředí, které považujeme za nestlačitelné, tedy platí pro deformovaný materiál zjednodušená rovnice kontinuity

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.1)$$

Za splnění těchto předpokladů tedy pro Maxwellův model platí vztah:

$$\overset{\leftrightarrow}{\sigma}{}^D - \mu(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T) = -\frac{\mu}{\eta} \int_0^t \overset{\leftrightarrow}{\sigma}{}^D(t') dt' \quad (2.2)$$

kde $\overset{\leftrightarrow}{\sigma}{}^D$ je deviatorická tenzoru napětí, \vec{u} je vektor posunutí a t' čas.

Složitější případ nastává pro Andradeův reologický model.

$$\overset{\leftrightarrow}{\sigma}{}^D - \mu(\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T) = -\frac{\mu}{\eta} \int_0^t \overset{\leftrightarrow}{\sigma}{}^D(t') dt' - \int_0^t \mu^{(\alpha-1)} \frac{(t-t')^\alpha}{(\xi\eta)^\alpha} \overset{\leftrightarrow}{\sigma}{}^D(t') dt' \quad (2.3)$$

kde α je parametr, pro který platí $\alpha \in (0,2; 0,5)$, a ξ je zpravidla rovno jedné. V tomto modelu musíme znát všechna předchozí napětí, kde každé bereme s jinou vahou díky výrazu $(t-t')^\alpha$. Pro výpočet pro Andradeův model zadáváme hodnotu $\alpha = 0,25$.

2.2 Průběh viskozity v ledové slupce

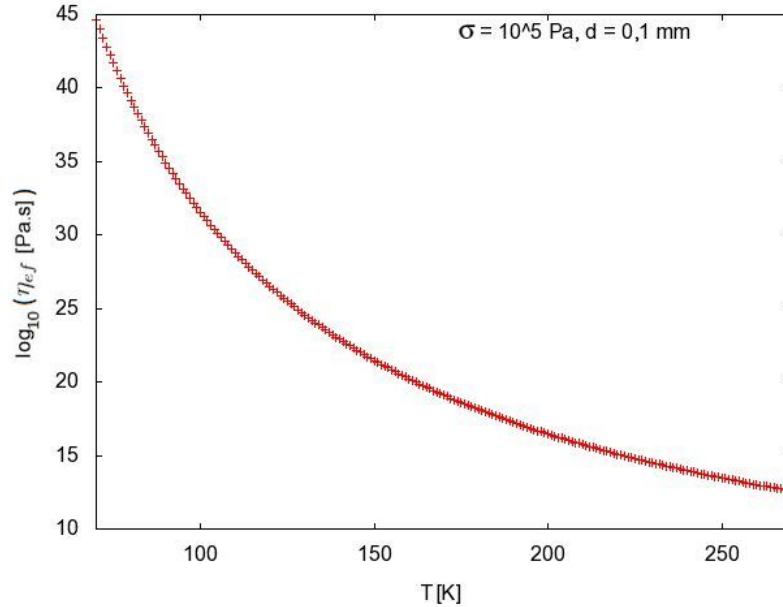
V úvodu jsme zmínili dva mechanismy, jimiž se led viskózně deformuje. Prvním z nich je difúzní creep, který je charakterizován difúzí na okrajích či vnitřkem ledových částic. Závisí na velikosti zrna a s jeho růstem roste i viskozita. Dislokační creep je proces, při kterém se pohybuje porucha, neboli dislokace v prostředí, aniž by došlo v materiálu ke zlomu. Pro viskozitu dislokačního creepu má klíčový význam hodnota druhého invariantu napětí. V případě obou mechanismů klesá viskozita exponenciálně s rostoucí teplotou

$$\eta_i(T) = \frac{T^l d^m}{2A\sigma_{II}^{n-1}} \exp\left(\frac{E}{RT}\right), \quad (2.4)$$

kde R je univerzální plynová konstanta, d je velikost zrna a σ_{II} je druhý invariant tenzoru napětí. Index v (2.4) označuje konkrétní creepový mechanismus a koreponduje s tabulkou 1. Konkrétní tvar této funkce v závislosti na parametrech l, m, n, A a aktivační energii E závisí na tom, jaký v ledu uvažujeme creepový mechanismus. Hodnoty těchto parametrů jsou v tabulce 2.1 (Goldsby a Kohlstedt, 2001). Existují i jiné typy mechanismů jako například takový, v případě kterého dochází ke skluzům mezi zrny a závisí tedy jak na velikosti zrna, tak na velikosti napětí. Dalším je ještě například Peierlsův creep. Tyto typy však nebudeme při výpočtu viskozity uvažovat. Převrácená hodnota výsledné efektivní viskozity se potom spočte jako součet převrácených hodnot dílčích viskozit.

η_i	$A[\text{Pa}^{-n}\text{K}^l\text{m}^m\text{s}^{-1}]$	l	n	m	$E[\text{kJ/mol}]$
η_{diff}	$9,0 \times 10^{-8}$	1	1,0	2,0	59
η_{disl}	$4,0 \times 10^{-19}$	0	4,0	0,0	60

Tabulka 2.1: Tabulka hodnot A, l, n, m a E pro výpočet viskozity



Obrázek 2.3: Průběh efektivní viskozity

$$\frac{1}{\eta_{ef}} = \frac{1}{\eta_{diff}} + \frac{1}{\eta_{disl}} \quad (2.5)$$

Parametry v tabulce 2.1 pro difúzní creep jsou ještě odlišné pro studený či teplý led. V našich výpočtech používáme hodnoty pro studený led ($T \leq 258$ K). Pro teplý led ($T \geq 258$ K) se liší konstanta A a aktivační energie E .

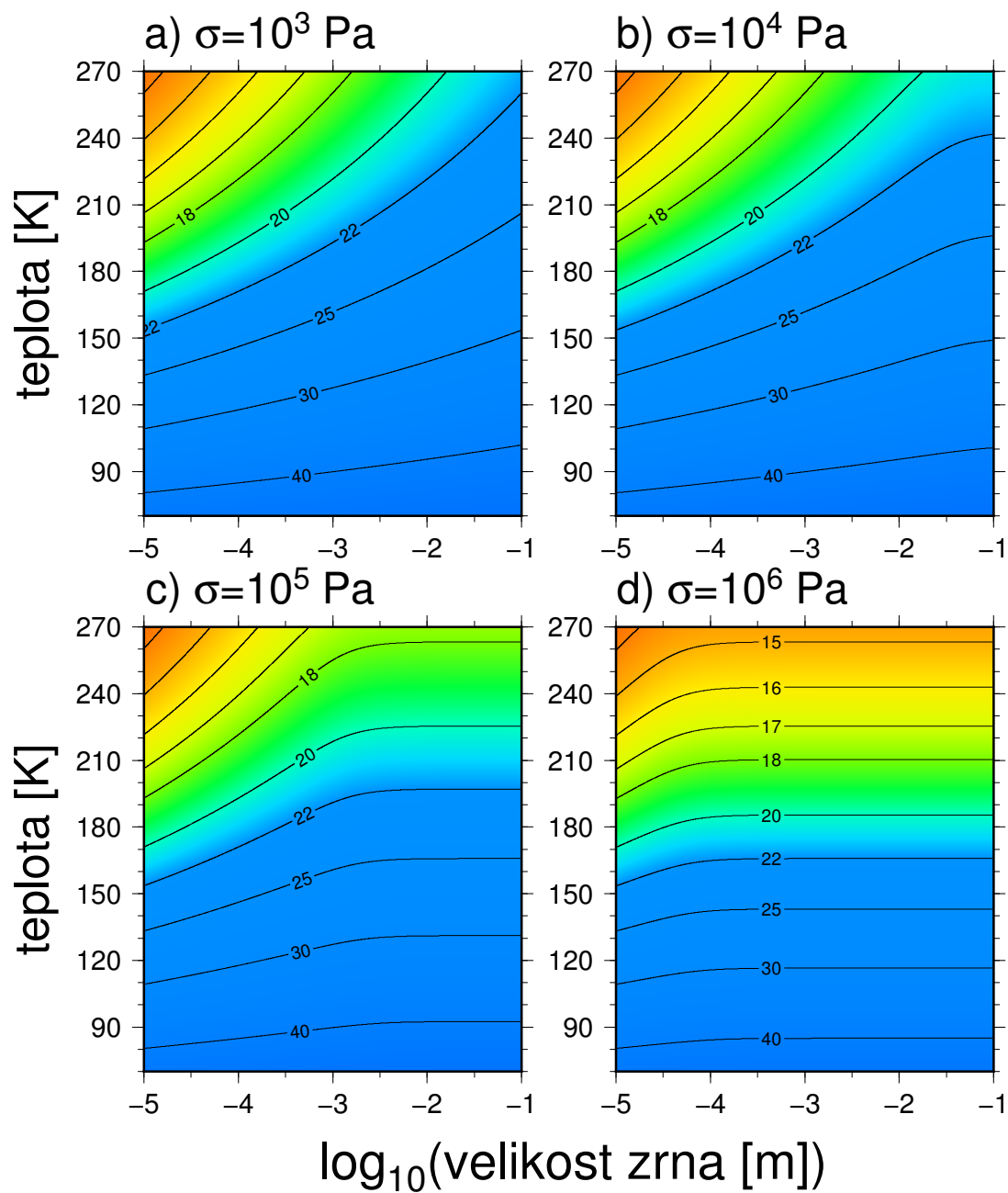
$$A = 6.0 \times \text{Pa}^{-n}\text{K}^l\text{m}^m\text{s}^{-1}$$

$$E = 180\text{kJ/mol}$$

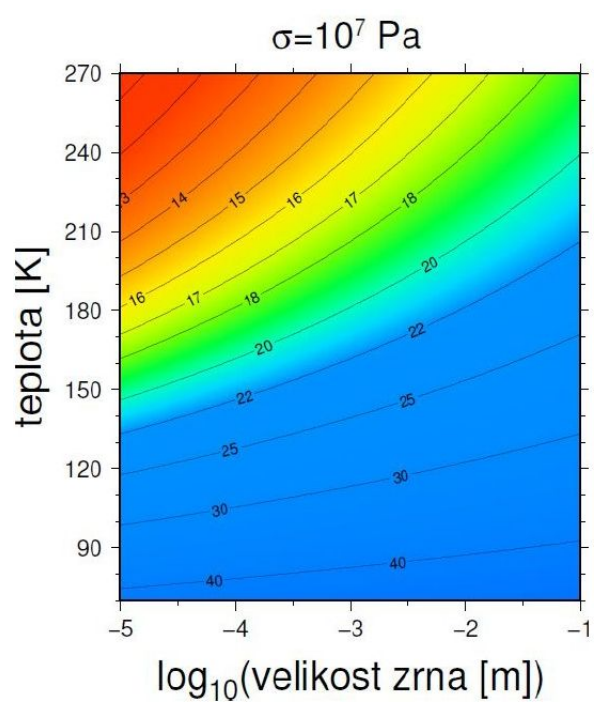
V následujícím grafu je vynesena exponenciální závislost efektivní viskozity na teplotě. Pro ukázkou jsme zvolili velikost napětí $\sigma = 10^5 \text{Pa}$ a velikost zrna $d = 0,1$ mm.

S využitím vztahů (2.4) a (2.5) jsme vytvořili creepové mapy, kde je ukázána závislost viskozity pro fixní hodnotu napětí na teplotě a velikosti zrna. Výsledky jsou v obrázku 2.3. Pro větší přehlednost jsou hodnoty viskozity $\eta[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ a velikosti zrna $d[\text{m}]$ vyneseny v logaritmické škále.

Do nejnižších hodnot viskozity zacházíme v případě vyšších tlaků, tedy například v případě tlaku 10^7 Pa klesá viskozita až na hodnotu 10^{11} Pa (viz obr 2.5).



Obrázek 2.4: Creepové mapy pro napětí 10^3 až 10^6 Pa



Obrázek 2.5: Creepová mapa pro napětí 10^7 Pa

3. Průběh teploty v ledových slupkách měsíců

3.1 Rovnice vedení tepla

Zprvu se zaměříme na výpočet disipace bez uvážení konvekce. K tomu potřebujeme znát teplotní profil ledové slupky. Budeme řešit stacionární případ, kdy se teplota nemění s časem. Vycházíme z rovnice vedení tepla.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T - \rho c_p \vec{v} \nabla T \quad (3.1)$$

kde T je absolutní teplota, t je čas a \vec{v} je rychlost, ρ je hustota, c_p je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku a k tepelná vodivost. Člen na levé straně rovnice (3.1) vyjadřuje změnu teploty v daném bodě, první člen na pravé straně je kondukční člen a poslední člen v rovnici je konvekční člen. Předpokládáme-li, že teplota se na povrchu sféry o poloměru r nemění s časem a zanedbáme-li konvekci v ledové vrstvě, rovnice (3.1) se zjednoduší na

$$\nabla \cdot k \nabla T = 0 \quad (3.2)$$

Vodivostní konstanta může mírně záviset na teplotě, ale pro jednoduchost tuto závislost zanedbáme, abychom mohli psát

$$\nabla^2 T = 0 \quad (3.3)$$

Rovnici řešíme pro sféricky symetrické těleso a přejdeme tedy do výhodné souřadné soustavy, kde teplota bude funkcí sférických souřadnic $T = T(r, \theta, \varphi)$. Použijeme Laplaceův operátor ve sférických souřadnicích. Zároveň předpokládáme, že pro sféru danou poloměrem r se nebude teplota měnit s úhlovými souřadnicemi θ a φ . Rovnice (3.3) tedy nabyde tvar

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (3.4)$$

Řešení získáme ve tvaru

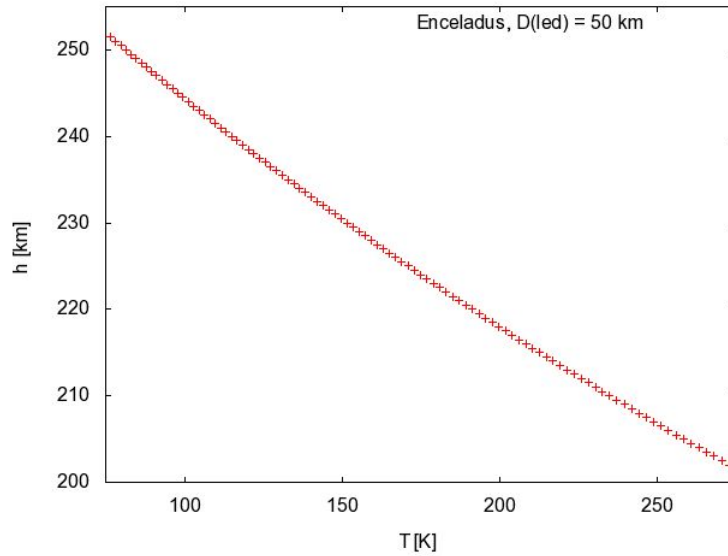
$$T = \frac{A}{r} + B, \quad (3.5)$$

kde konstanty A, B získáme dosazením teplot na povrchu a teploty na spodní hranici ledové slupky. Teplotu na povrchu $T_{surface}$ dosadíme z tabulky 3.1 a za teplotu na spodní hranici T_{bottom} dosadíme teplotu tání ledu, tedy $T_{bottom} = 273,15\text{K}$. Závislost teploty na hloubce v materiálu je hyperbolická (viz rovnice (3.5)), ale v prvním přiblížení je průběh lineární (obr. 3.1).

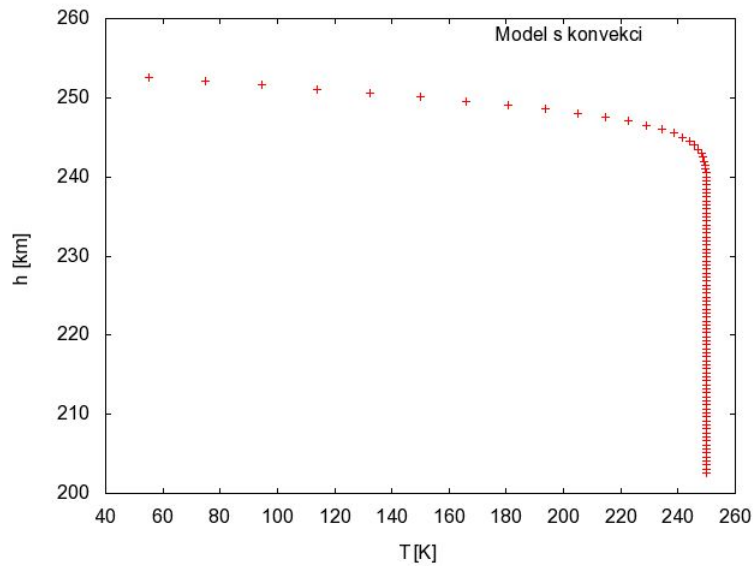
Podíváme se také na teplotní profil v případě konvekce v ledové slupce. V takovém případě bude ze začátku teplota s rostoucí hloubkou růst lineárně (konduktivní zóna), dokud nedosáhne jisté hodnoty (v našem modelu 250 K), po které se už téměř nezmění. Jde o konvektivní zónu. Ve spodní části ledové slupky už konduktivní vrstvu neuvažujeme (obr. 3.2).

Měsíc	$T_{surface}$ [K]
Europa	102
Enceladus	75

Tabulka 3.1: Povrchová teplota Europy a Enceladu



Obrázek 3.1: Teplotní profil ledové slupky Enceladu o tloušťce 50 km



Obrázek 3.2: Teplotní profil s uvažováním konvekce

Teplotní profil pro model s konvekci byl získán z rovnice

$$T = T_{surface} + (250 - T_{surface}) \cdot \operatorname{erf}(x), \quad (3.6)$$

kde $T_{surface}$ je povrchová teplota měsíce a x je souřadnice v radiálním směru.

Díky takovému profilu budeme moci určit tepelný výkon vyzářený tělesem přes jeho povrch.

$$P_{out} = 4\pi R^2 k \frac{dT}{dr}, \quad (3.7)$$

kde R je poloměr tělesa, $\frac{dT}{dr}$ určuje sklon konduktivní části teplotního profilu na obrázku 3.2 (konkrétní hodnoty viz tabulka 3.2) a k je konstanta tepelné vodivosti. Pro led o teplotě 0°C je rovna $2,18 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Měsíc	D [km]	R [km]	$\frac{dT}{dr}$ [K m ⁻¹]	P_{out} [GW]
Enceladus	25	252,1	-0,017	28,95
Enceladus	50	252,1	-0,023	41,09
Europa	30	1560,8	-0,033	2220,04
Europa	80	1560,8	-0,063	4180,35

Tabulka 3.2: Tepelné ztráty studovaných těles

4. Rovnice popisující slapové zahřívání ledových těles

4.1 Rovnice popisující uvažovaný model

Pro ledová tělesa v této práci zavedeme některé předpoklady, které umožní jednodušší výpočet disipačního výkonu. Například uvažujeme jen malé deformace viskoelastického tělesa. Deformovaný materiál zároveň považujeme za nestlačitelný.

Za těchto předpokladů bude mít rovnice kontinuity tvar

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (4.1)$$

kde \vec{u} je vektor posunutí.

Dále potřebujeme rovnici, kterou vyjádříme ze zákona zachování hybnosti ve tvaru

$$\nabla \cdot \overset{\leftrightarrow}{\sigma} + \vec{f} = 0 \quad (4.2)$$

kde $\overset{\leftrightarrow}{\sigma}$ je symetrický Cauchyův tenzor

$$\overset{\leftrightarrow}{\sigma}^T = \overset{\leftrightarrow}{\sigma} \quad (4.3)$$

a objemová síla \vec{f} , která působí na každý element objemu tělesa, se dá vyjádřit jako gradient slapového potenciálu V

$$\vec{f} = \rho_{ice} \nabla V \quad (4.4)$$

kde ρ_{ice} je hustota ledu a V slapový potenciál

$$V(r, \theta, \varphi, t) = r^2 \omega^2 e \times \left(-\frac{2}{3} P_2^0(\cos\theta) \cos\omega t + \frac{1}{4} P_2^2(\cos\theta) [\cos\omega t \cos 2\varphi + 4 \sin\omega t \sin 2\varphi] \right),$$

kde r , θ , φ jsou sférické souřadnice, ω je úhlová frekvence, e excentricita tělesa a P_2^0 a P_2^2 jsou přidružené Legendrovky funkce.

Aby soustava použitých rovnic byla úplná, musíme doplnit konstitutivní vztah, jež jsme popisovali ve druhé kapitole

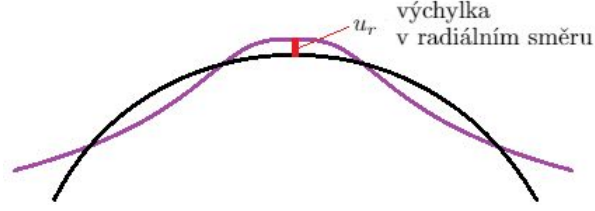
$$\overset{\leftrightarrow}{\sigma}^D - \mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T) = -\frac{\mu}{\eta} \int_0^t \overset{\leftrightarrow}{\sigma}^D(t') dt' \quad (4.5)$$

4.2 Hraniční podmínky

Na hranici tělesa musíme předepsat hraniční podmínky a použijeme podmínky volného povrchu.

$$\overset{\leftrightarrow}{\sigma} \cdot \vec{\nu} = 0 \quad (4.6)$$

Vektor $\vec{\nu}$ je jednotkový vektor kolmý v daném místě k povrchu tělesa. Na obrázku 4.1 zavádíme odchylku u_r od ideálně kulového tvaru tělesa.



Obrázek 4.1: Volný povrch

Tlak hmoty na kulovou slupkou danou poloměrem r je roven průmětu tenzoru napětí do radiálního směru

$$\overset{\leftrightarrow}{\sigma} \cdot \vec{e}_r = u_r \rho_{ice} \vec{g} \quad (4.7)$$

kde vektor \vec{v} jsme nahradili jednotkovým vektorem \vec{e}_r mířícím v radiálním směru. Gravitační zrychlení má kladnou hodnotu a také ho vyjádříme pomocí vektoru \vec{e}_r .

$$\overset{\leftrightarrow}{\sigma} \cdot \vec{e}_r = -u_r \rho_{ice} g_0 \vec{e}_r \quad (4.8)$$

kde g_0 je střední hodnota gravitačního zrychlení.

Hustota ale není uvnitř tělesa všude stejná, protože uvažujeme jednotlivé vrstvy, mezi kterými vniká hustotní skok. Hustota ledové slupky ρ_{ice} se pohybuje okolo 920 kg m^{-3} a vrstva vody má hustotu ρ_w v rozmezí $1000 - 1030 \text{ kg m}^{-3}$. Tlak způsobený tímto skokem je následující

$$\overset{\leftrightarrow}{\sigma} \cdot \vec{e}_r = (\rho_w - \rho_{ice}) g_0 u_r \vec{e}_r \quad (4.9)$$

Přidáme navíc do rovnice tlak způsobený přítomností vodní vrstvy, ve kterém figuruje zmíněný slapový potenciál.

$$\overset{\leftrightarrow}{\sigma} \cdot \vec{e}_r = (\rho_w - \rho_{ice}) g_0 u_r \vec{e}_r + \rho_w V \vec{e}_r \quad (4.10)$$

4.3 Výpočet slapové disipace

Cílem této kapitoly je získání vztahu pro výpočet slapové disipace. Pro disipační výkon v bodě určeném pohybovým vektorem \vec{r} platí tehdy vztah

$$P(\vec{r}) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \overset{\leftrightarrow}{\sigma}^D(\vec{r}, t') : \dot{\vec{\epsilon}}(\vec{r}, t') dt' = \frac{1}{2\eta T} \int_t^{t+T} \overset{\leftrightarrow}{\sigma}^D(\vec{r}, t') : \overset{\leftrightarrow}{\sigma}^D(\vec{r}, t') dt' \quad (4.11)$$

kde dále t je perioda oběhu, t je čas, $\dot{\vec{\epsilon}}$ časová změna deformace a η značí viskozitu. Tímto způsobem tedy získáme velikost tepelného výkonu v daném místě za daný časový úsek t . Abychom získali celkový tepelný výkon P_{total} , který je vlivem slapového zahřívání generovaný v tělesa, zintegrujeme vztah (4.10) přes celý objem Ω ledové slupky.

$$P_{total} = \int_{\Omega} P d\Omega \quad (4.12)$$

5. Slapová disipace Enceladu a Europy

5.1 Program na výpočet disipace

K výpočtu tepelné disipace nám byl k dispozici program vyvinutý školitelem. Program nám dává možnost počítat tepelnou disipaci jak pro Maxwellův model, tak pro Andradeův. Jako vstup do programu zadáváme následující parametry: střední poloměr ledového měsíce (R_T), poloměr ke spodní hranici ledové slupky (R_B), hodnotu gravitačního zrychlení pro oba poloměry (g_T , g_B), excentricitu (e), periodu oběhu měsíce okolo planety (T). Všechny tyto parametry najdeme v tabulce 5.1.

Parametr	Značení [jednotka]	Enceladus	Europa
gravitační zrychlení	g_T/g_B [ms^{-2}]	0,11/0,13	1,31/1,40
excentricita	e [-]	0,0045	0,0101
perioda	T [den]	3,551181	1,370218
vnější poloměr	R_T [km]	252,1	1560,8
uvažované vnitřní poloměry	R_B [km]	227,1/202,1	1530,8/1480,8
hustota vody	ρ_w [kg m^{-3}]	1000	1000
hustota ledu	ρ_{ice} [kg m^{-3}]	920	920

Tabulka 5.1: Parametry pro Europu a Enceladus

Program zpracovává hodnoty viskozit spočtené pro každou ze 100 vrstev ledové slupky podle kapitoly (2.2). Pro každou sadu viskozit získáme výsledný tepelný výkon. V druhé kapitole jsme se zabývali právě viskozitou a při jejím výpočtu jsme se zaměřovali na dva důležité parametry: velikost ledového zrna a působící napětí. V následující části se podíváme na to, jak vychází tepelná disipace pro vybraná ledová tělesa. Prozkoumáme též vliv těchto dvou parametrů.

Výpočet provedený v uvedeném programu budeme vizualizovat ve dvou typech diagramů. Nejprve si vykreslíme tepelné mapy pro parametry velikosti zrna a napětí a potom se podíváme na profily tepelného výkonu pro jednu hodnotu napětí a porovnáme výsledky s hodnotami výkonu v případě chladnutí tělesa. Rozbory provedeme jak pro případ započtení kondukce tak pro případ započtení konvekčního způsobu přenosu tepla v ledové slupce.

5.2 Výsledky jednotlivých modelů

Při výpočtech jsme použili modely specifikované v tabulce 5.2, kde první číslice v názvu modelu udává typ visko-elastického modelu zvoleného v programu, tedy 0 pro Maxwellův visko-elastický model nebo 1 pro Andradeův. Zato písmeno A/B indikuje, že se jedná o konduktivní/konvektivní model. Poslední číslo v názvu

určuje tloušťku ledové vrstvy, se kterou se v programu počítá a tím je také rozlišeno, o jaké ze dvou vybraných ledových těles se jedná.

Měsíc	D [km]	Modely
Enceladus	25	A0-25/A1-25, B0-25/B1-25
Enceladus	50	A0-50/A1-50, B0-50/B1-50
Europa	30	A0-30/A1-30, B0-30/B1-30
Europa	80	A0-80/A1-80, B0-80/B1-80

Tabulka 5.2: Specifikace vytvořených modelů

Při výpočtu výkonu jsme se zaměřovali na různé hodnoty parametrů d (velikosti zrna) a σ (napětí). Výsledkem jsou výkonostní mapy pro jednotlivé modely. V tabulce 5.3 jsou zaznamenané hodnoty pro velikost zrna 1 mm a pro napětí o velikosti 10^5 Pa.

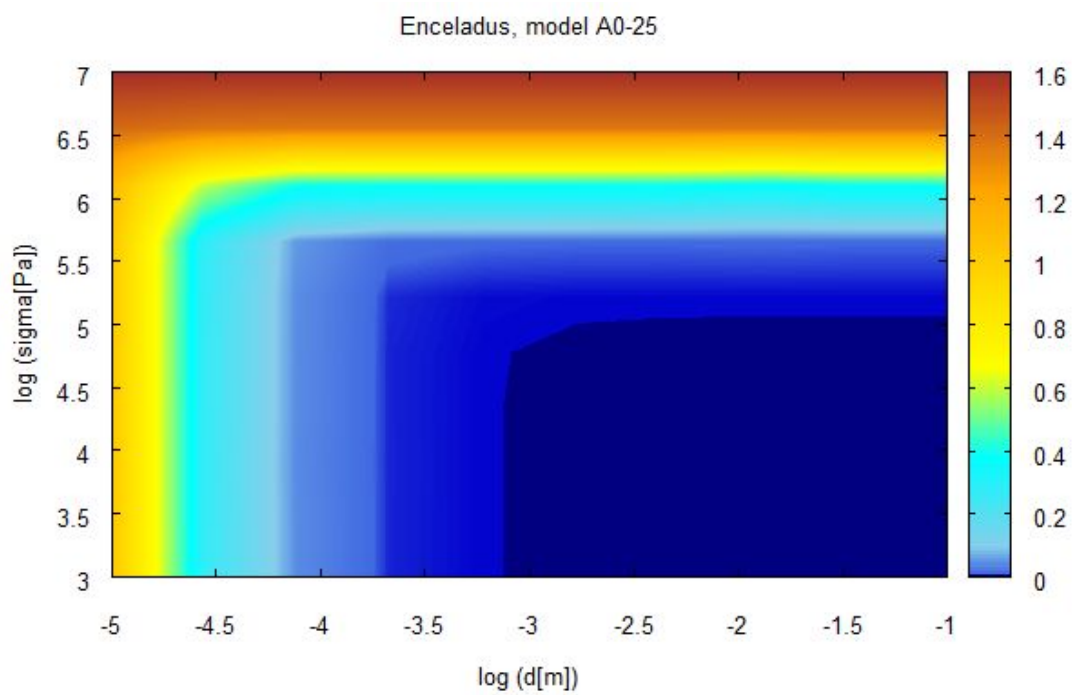
Enceladus	P [GW]	Europa	P [GW]
A0-25	$4,79 \cdot 10^{-4}$	A0-30	0,80
A1-25	0,13	A1-30	106,04
A0-50	$2,16 \cdot 10^{-4}$	A0-80	1,63
A1-50	$6,12 \cdot 10^{-2}$	A1-80	218,06
B0-25	$7,70 \cdot 10^{-4}$	B0-30	1,10
B1-25	0,45	B1-30	273,57
B0-50	$3,38 \cdot 10^{-4}$	B0-80	2,26
B1-50	0,20	B1-80	573,71

Tabulka 5.3: Tepelový výkon pro velikost zrna 1 mm a napětí 10^5 Pa

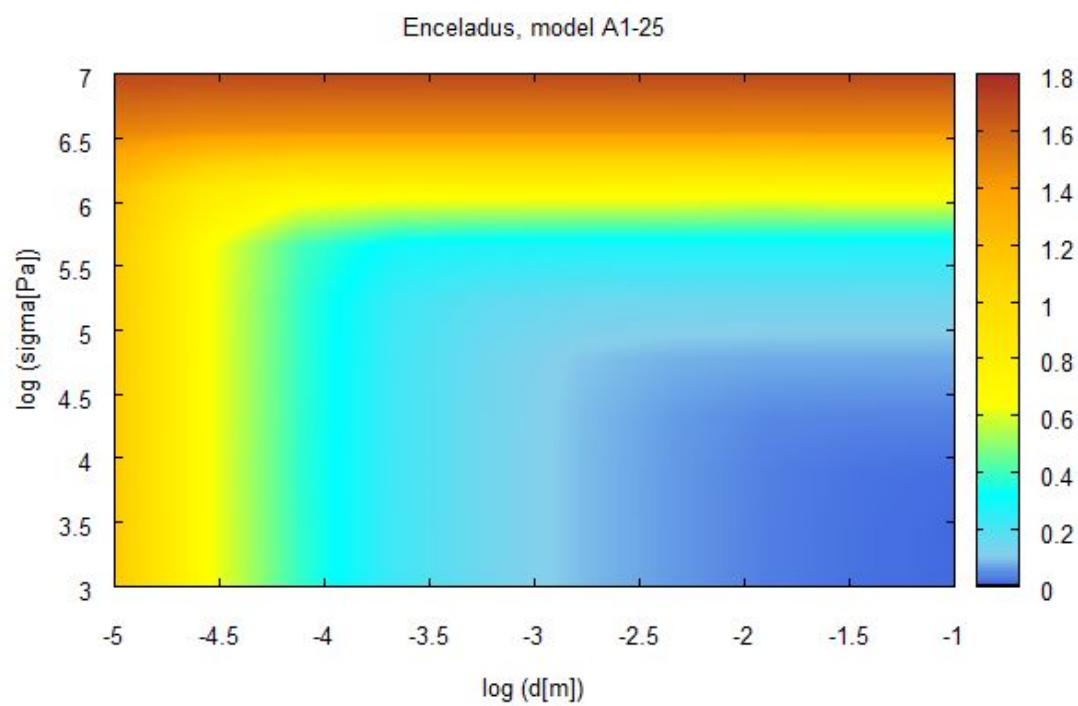
Obrázky 5.1-5.16 reprezentují výsledky pro modely z tabulky 5.2. Každá výkonostní mapa je tvořena sítí 30×30 hodnot. Měnili jsme velikost napětí od 10^3 Pa do 10^7 Pa a velikost zrna od 10^{-5} m do 10^{-1} m. Tato rozmezí zahrnují realistické hodnoty, které bychom si mohli na Europě nebo na Enceladu představit.

Hodnoty výkonu jsou uvedeny v jednotkách GW a jejich minimální a maximální hodnoty jsou znázorněny na barevné škále. Celkem jsme vytvořili 16 výkonostních map z dat, které jsme ještě následně dále zpracovali. Lze si povšimnout rozdílu při uvážení konvektivního typu přenosu tepla v ledové slupce oproti konduktivnímu typu přenosu. Například pro Enceladus dosahuje tepelný výkon v případě konvekce podstatně vyšších hodnot než u konduktivních modelů. I u Europy se tento vliv projevil. Maximální výkon ovšem většinou vychází pro napětí 10^7 Pa, což například v případě Enceladu není příliš pravděpodobná hodnota.

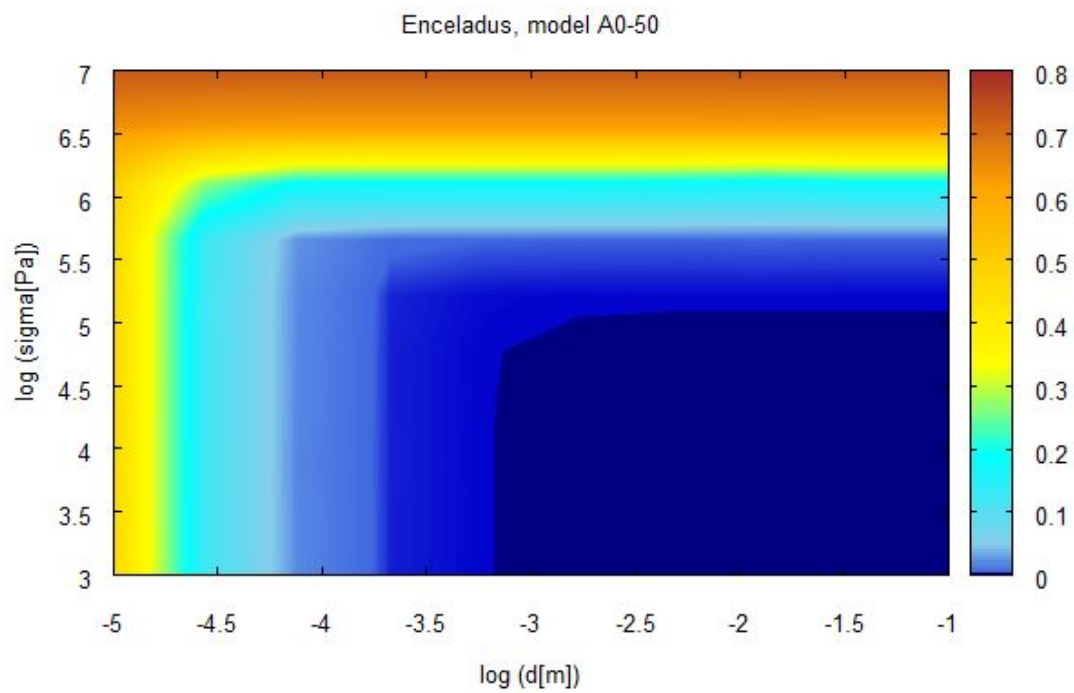
V případě Europy si můžeme všimnout oblasti maximálního výkonu, která odpovídá nižšímu napětí než je tomu u Enceladu. Hodnota výkonu se liší i v případě, že uvažujeme jinou tloušťku ledové slupky. Toto pozorování by mělo být patrnější pro tělesa s nižším poloměrem, tedy v našem případě Enceladus.



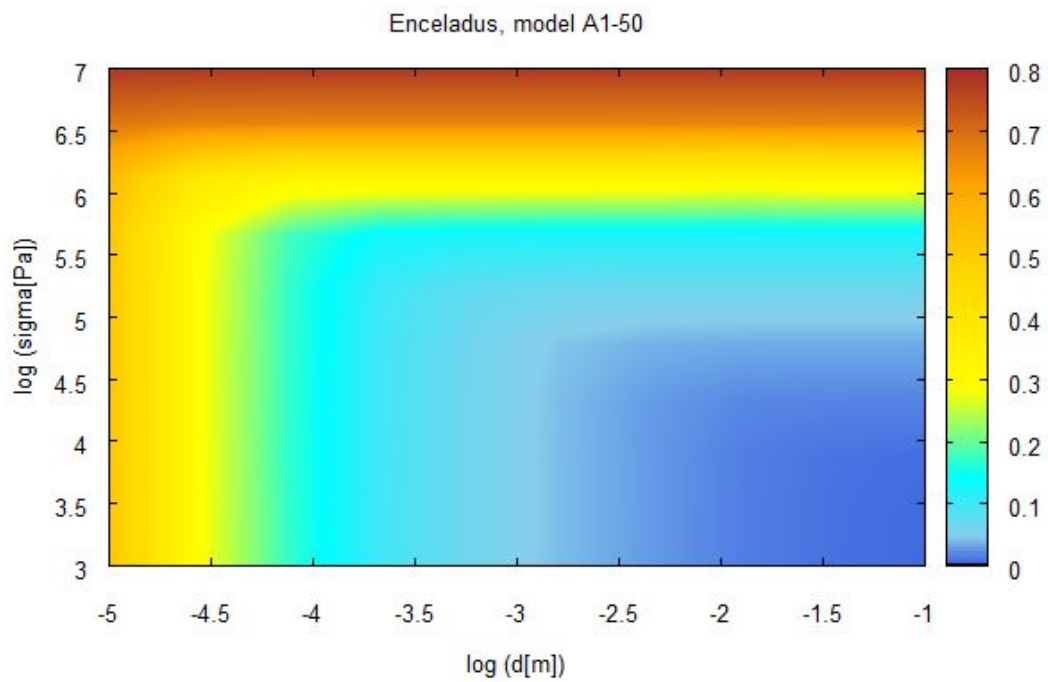
Obrázek 5.1:



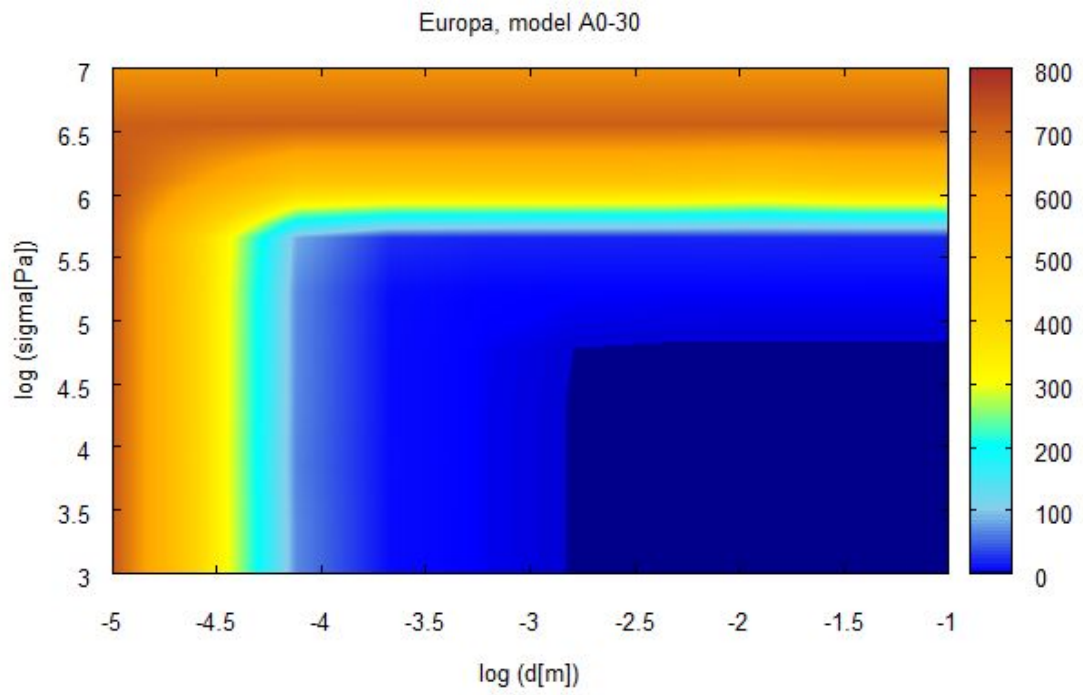
Obrázek 5.2:



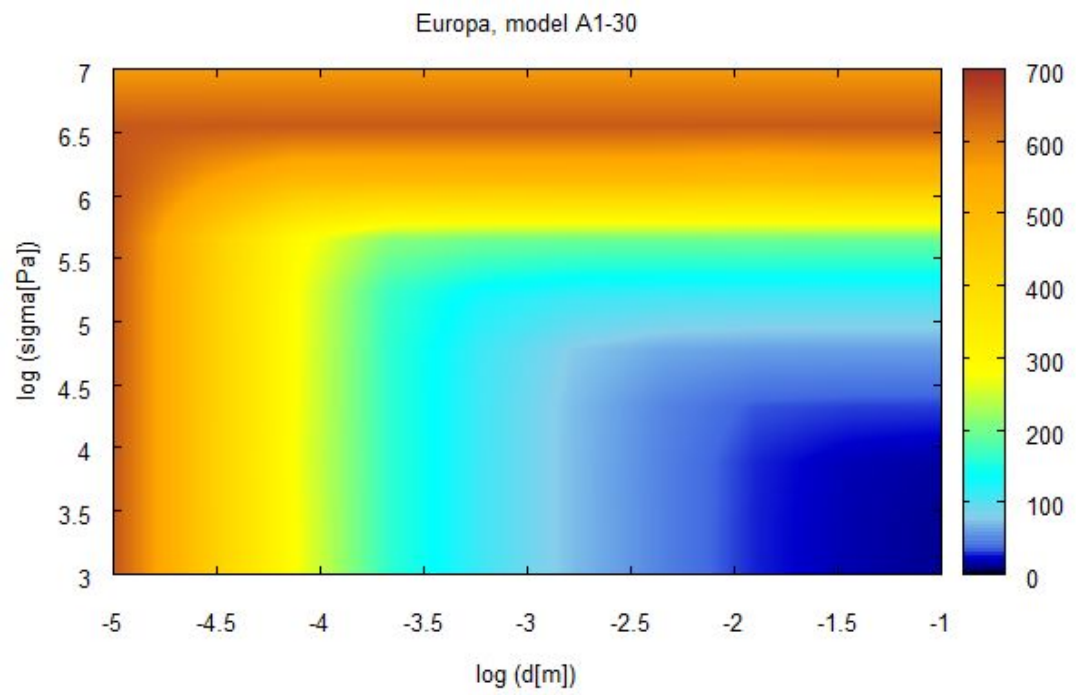
Obrázek 5.3:



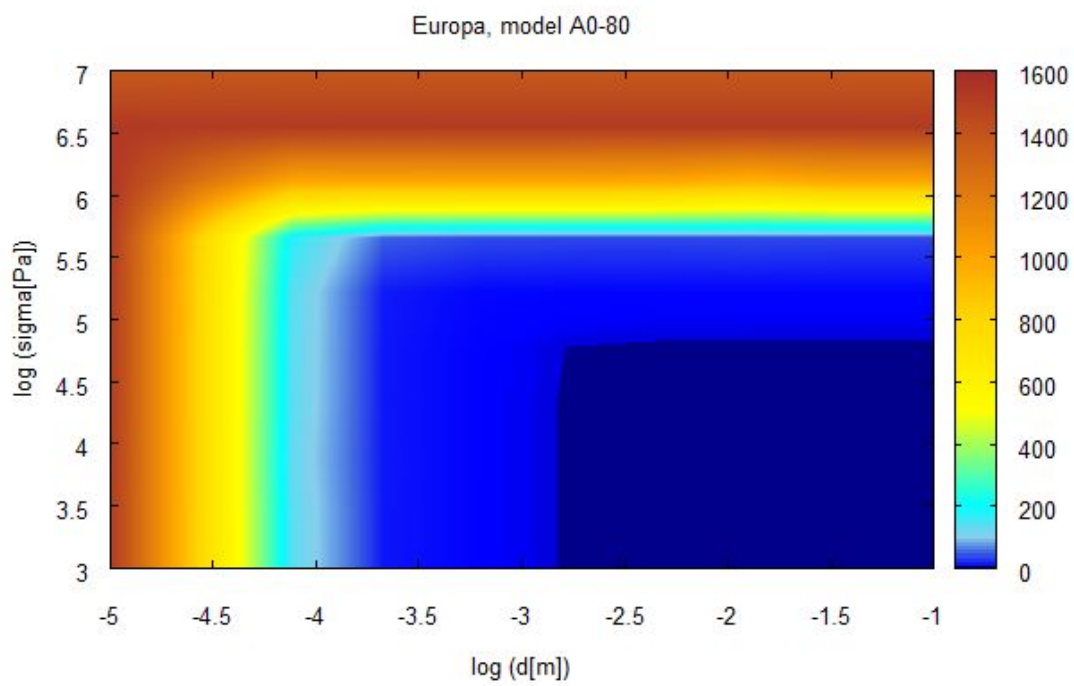
Obrázek 5.4:



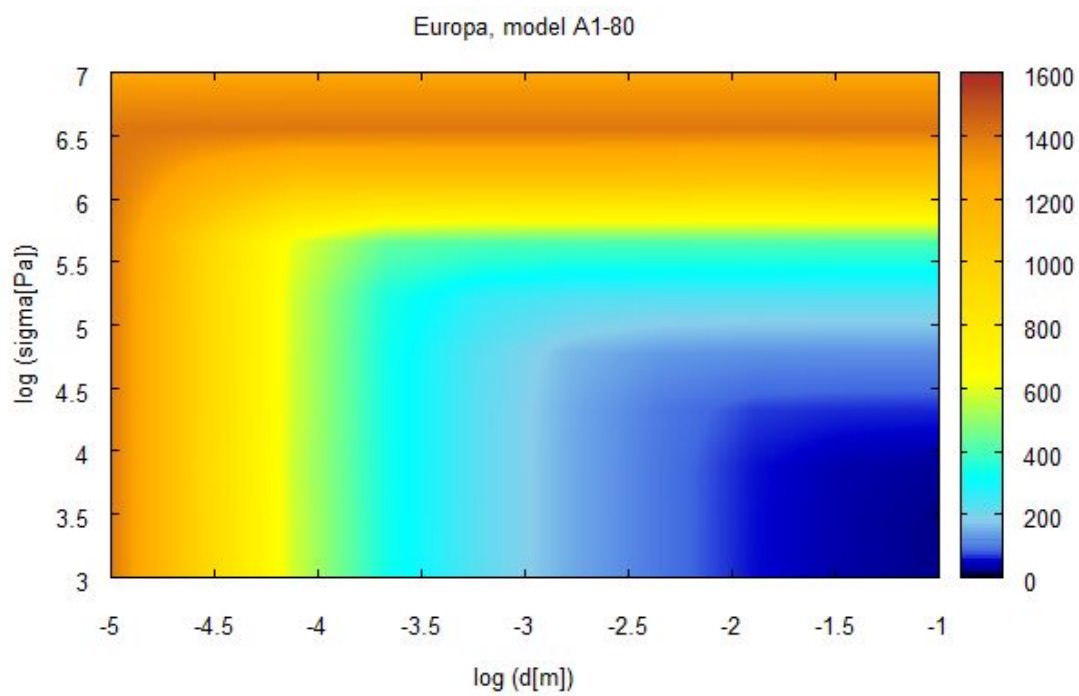
Obrázek 5.5:



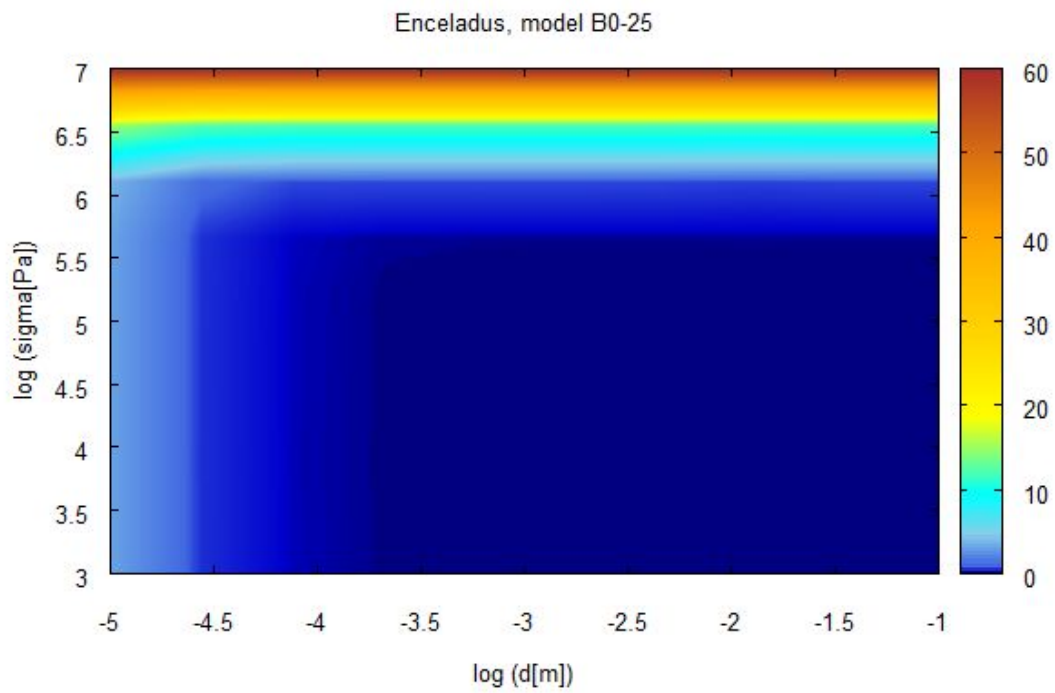
Obrázek 5.6:



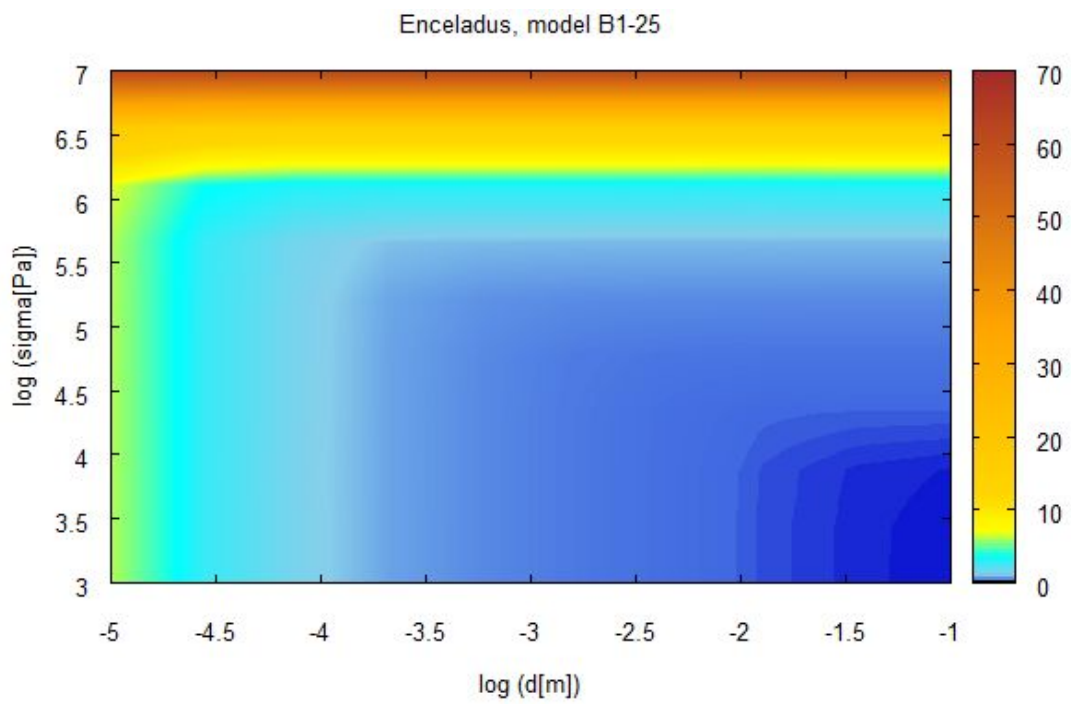
Obrázek 5.7:



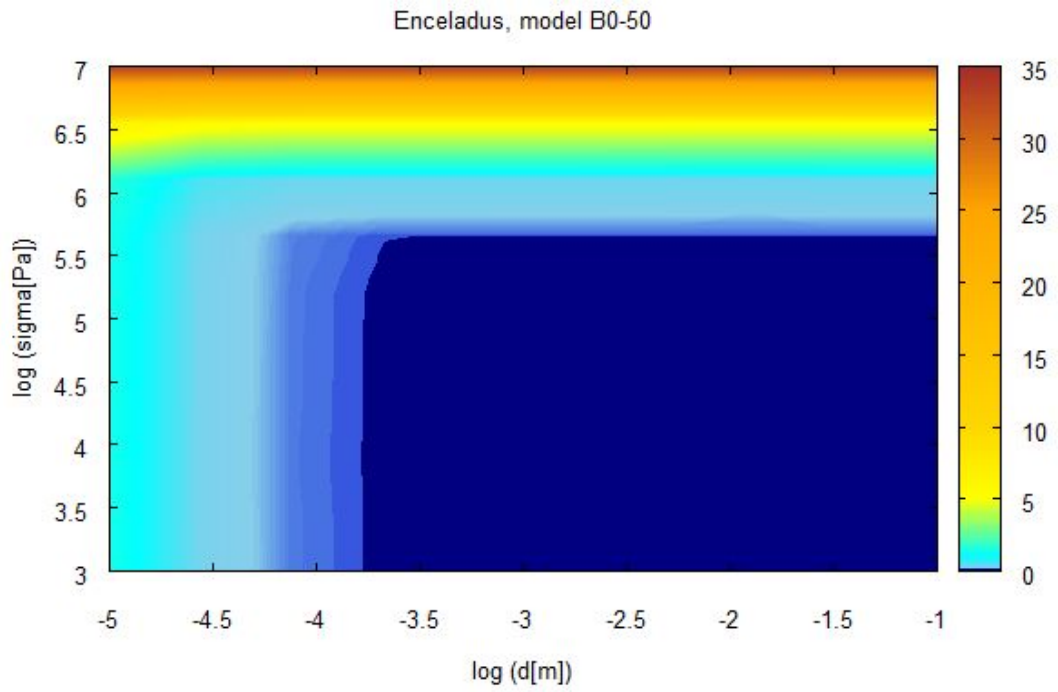
Obrázek 5.8:



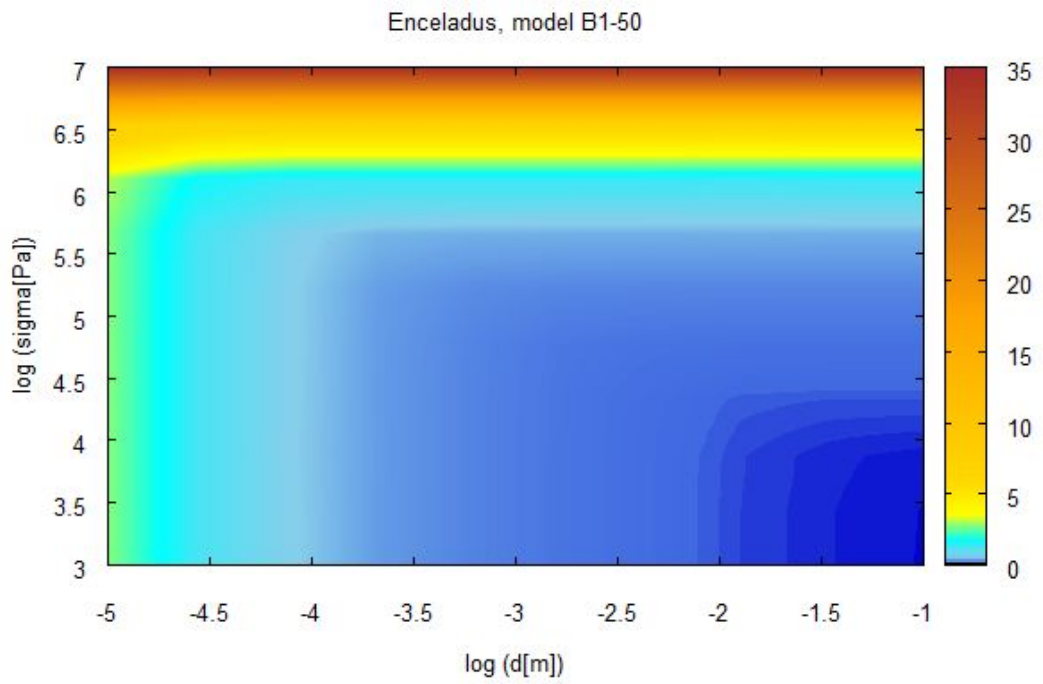
Obrázek 5.9:



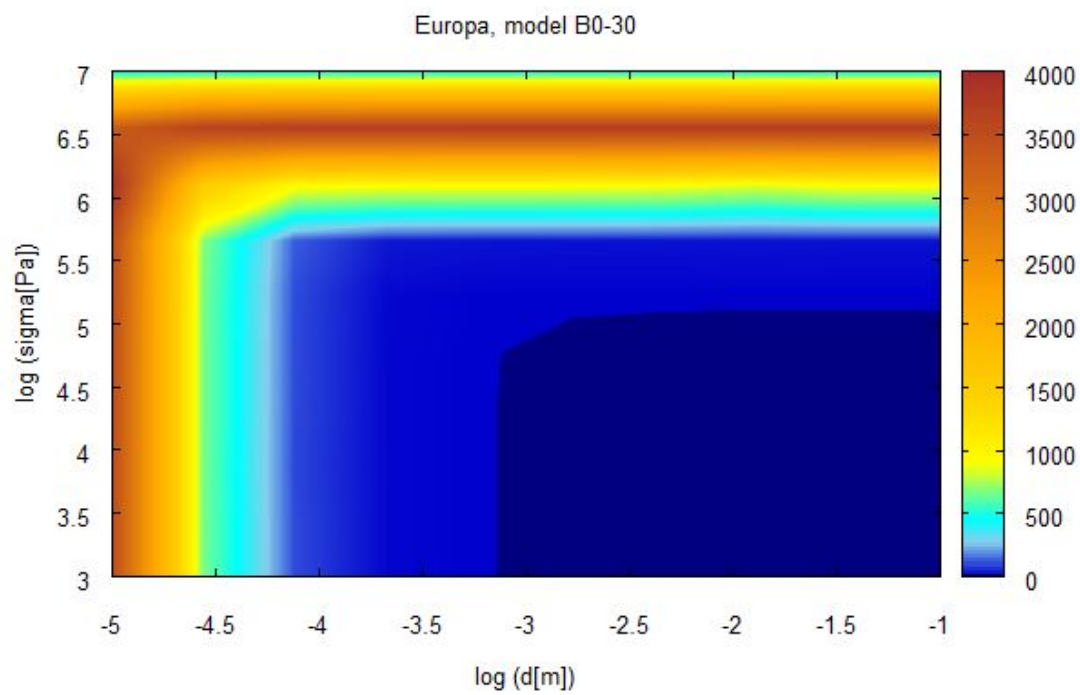
Obrázek 5.10:



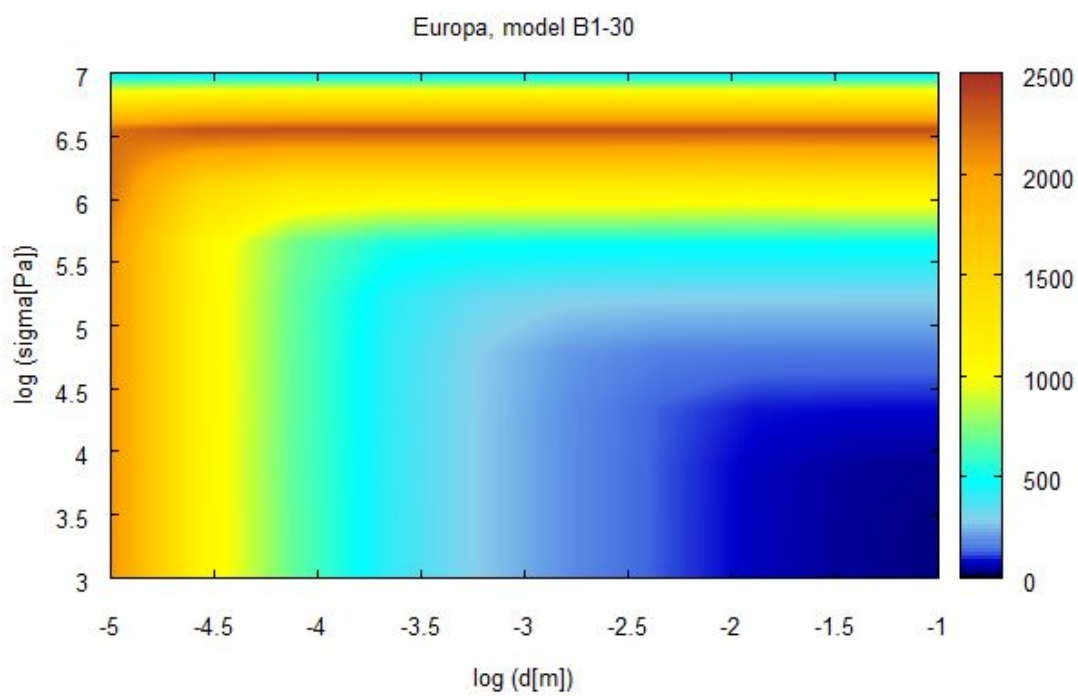
Obrázek 5.11:



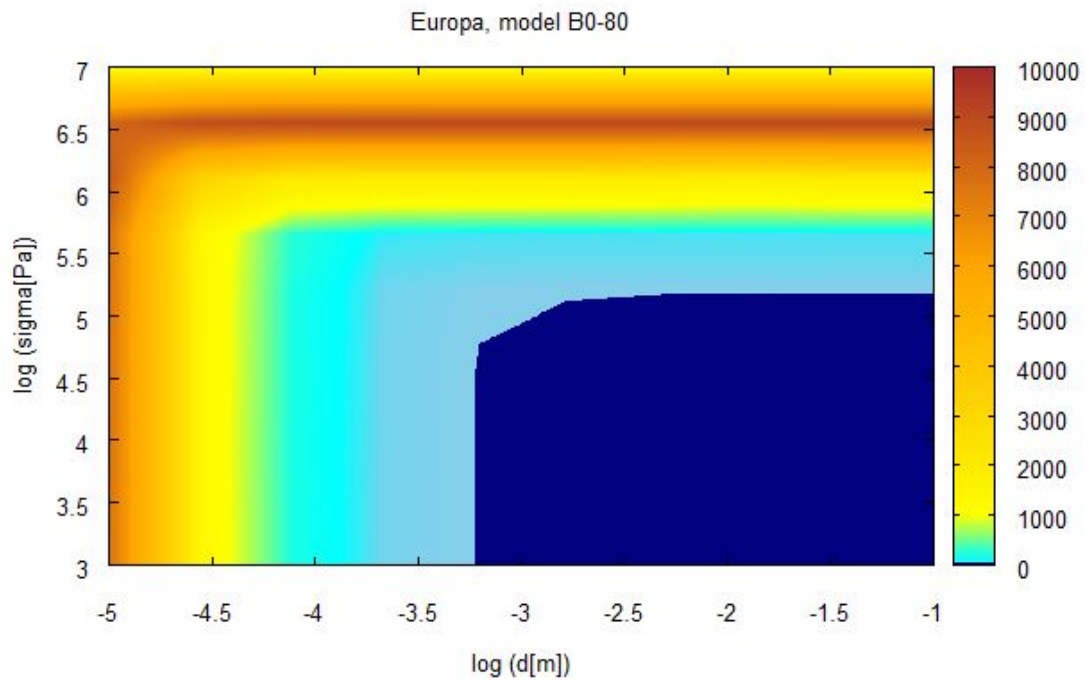
Obrázek 5.12:



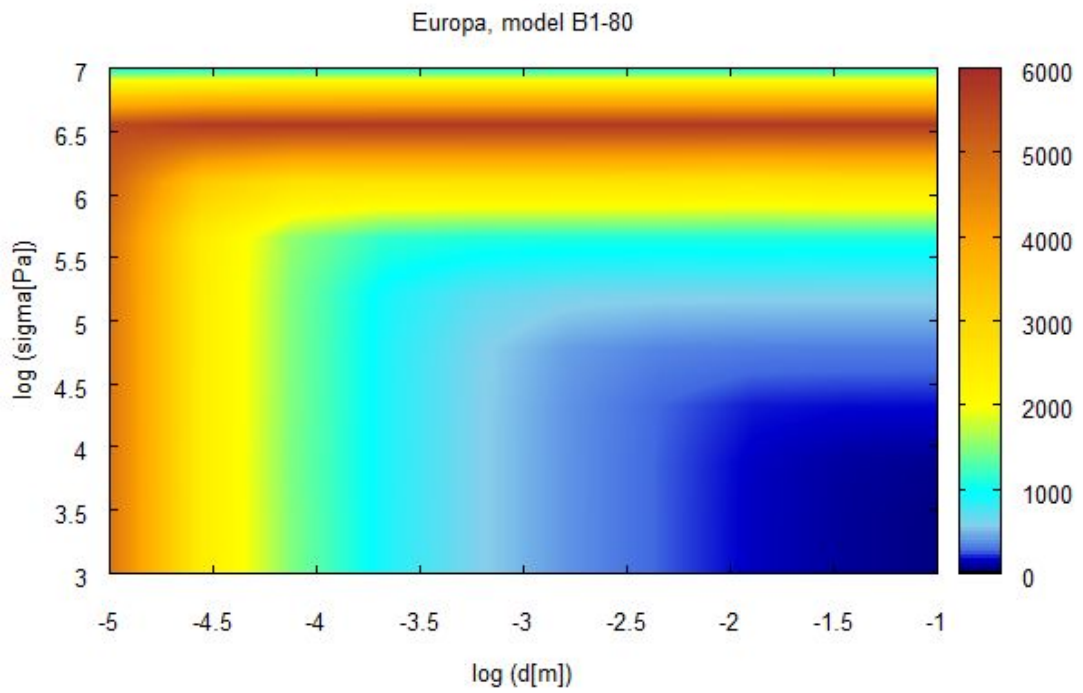
Obrázek 5.13:



Obrázek 5.14:



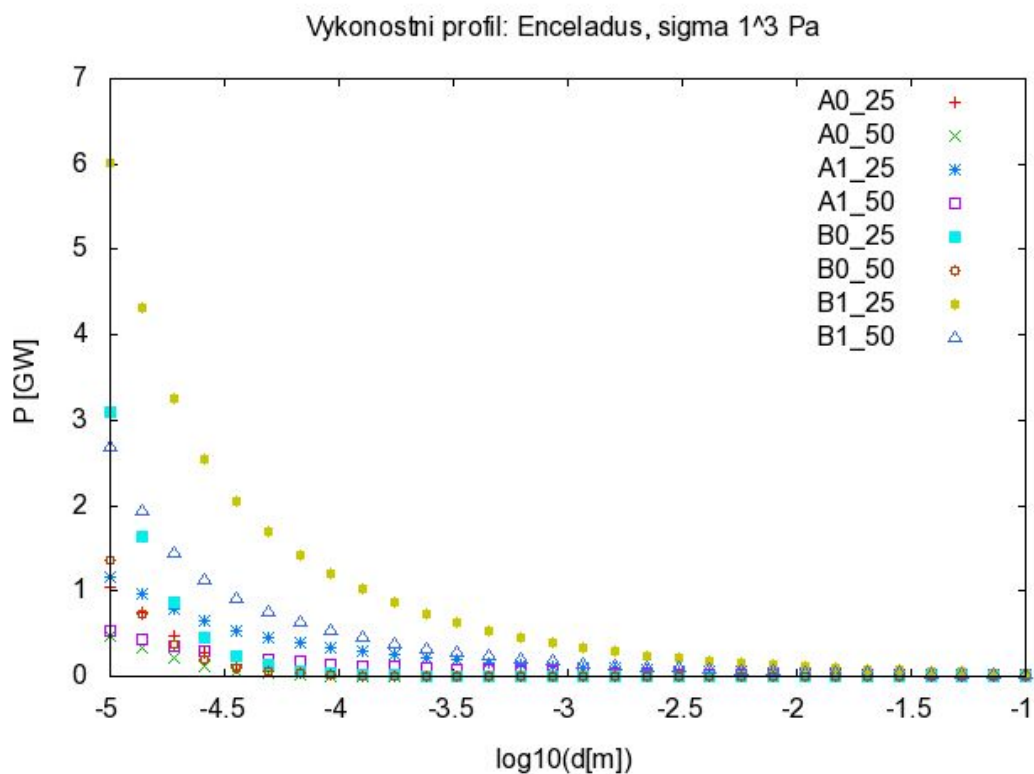
Obrázek 5.15:



Obrázek 5.16:

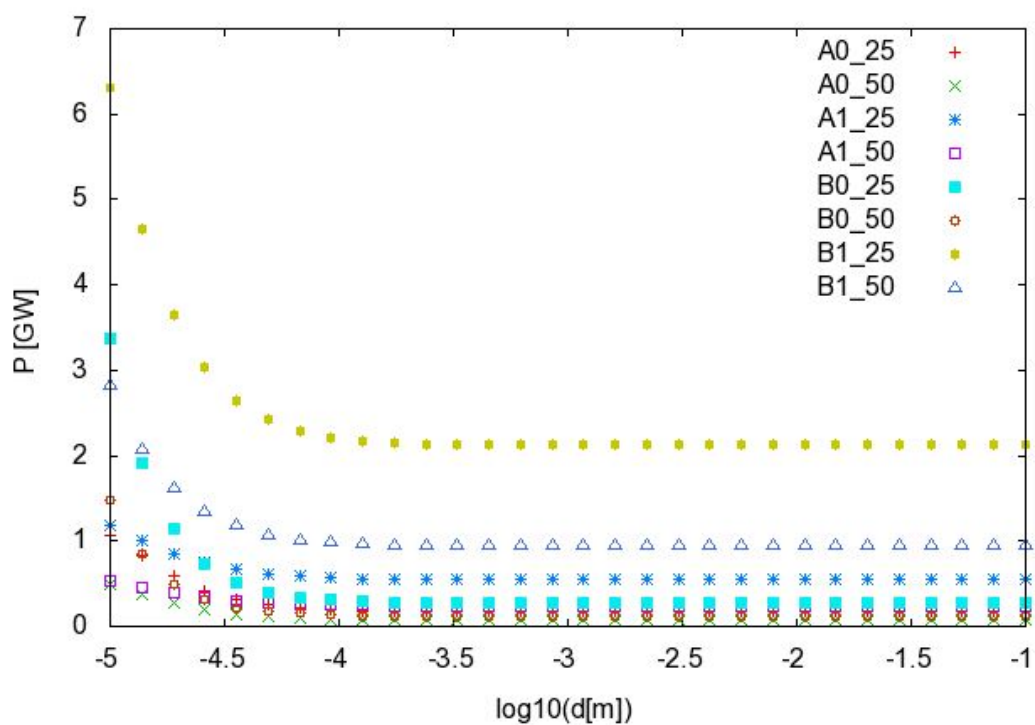
5.3 Tepelná bilance Enceladu a Europy

Výsledky z předchozích stránek představují tepelný výkon generovaný v ledovém tělese působením slapových sil. Každé těleso ovšem zároveň vyzařuje tepelné záření do okolního prostoru skrze svůj povrch. Podle vztahu (3.7) ze třetí kapitoly jsme spočítali tepelný výkon daný vyzařováním tělesa. S těmito hodnotami porovnáme slapový tepelný výkon v závislosti na velikosti zrna při fixní hodnotě napětí. Na obrázcích 5.9 - 5.12 jsou výsledky výpočtu tepelného výkonu za daného napětí pro Enceladus a Europu. Nejdříve jsme vybrali napětí o velikosti 10^3 Pa, kterým jsme zespoda odhadli realistické hodnoty na Europě a Enceladu. Naším horním odhadem je napětí 10^6 Pa.



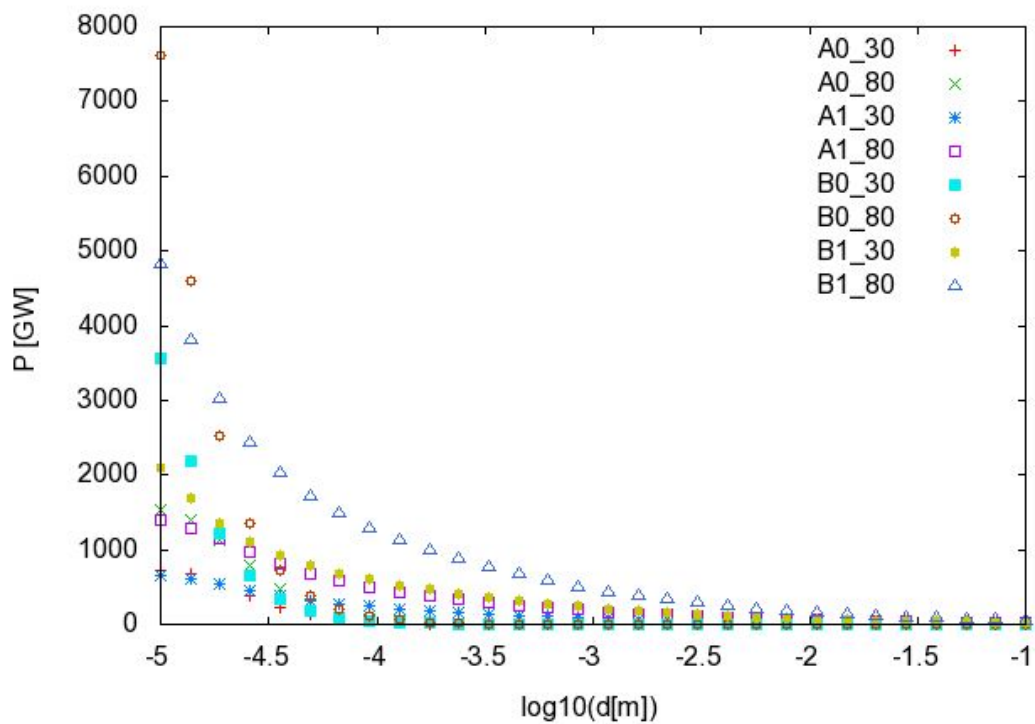
Obrázek 5.17: Enceladus: výkonostní profil pro napětí $\sigma 10^3$ Pa

Výkonostní profil: Enceladus, sigma 1⁶ Pa

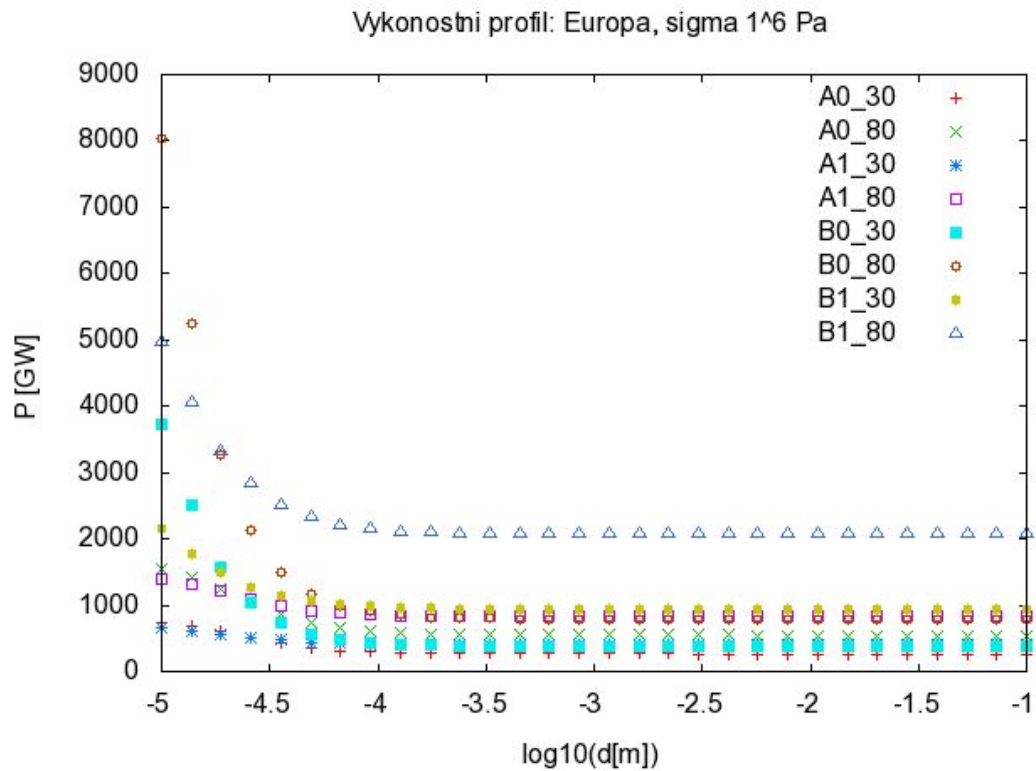


Obrázek 5.18: Enceladus: výkonostní profil pro napětí $\sigma 10^6$ Pa

Výkonostní profil: Europa, sigma 1³ Pa

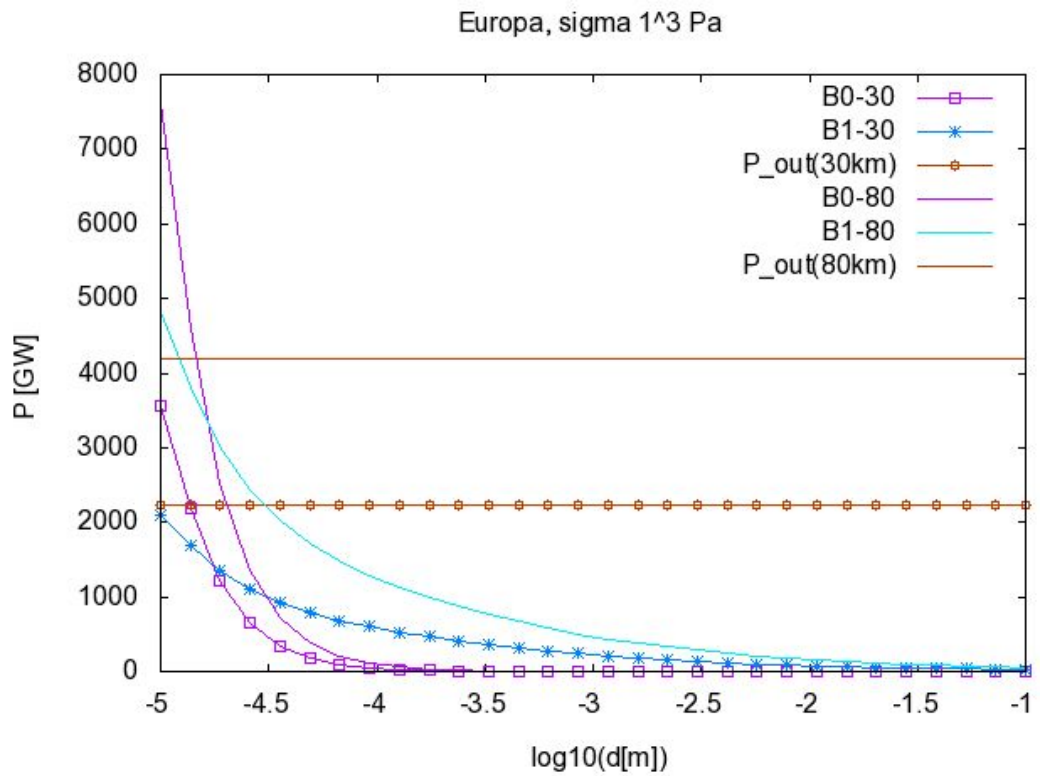


Obrázek 5.19: Europa: výkonostní profil pro napětí $\sigma 10^3$ Pa

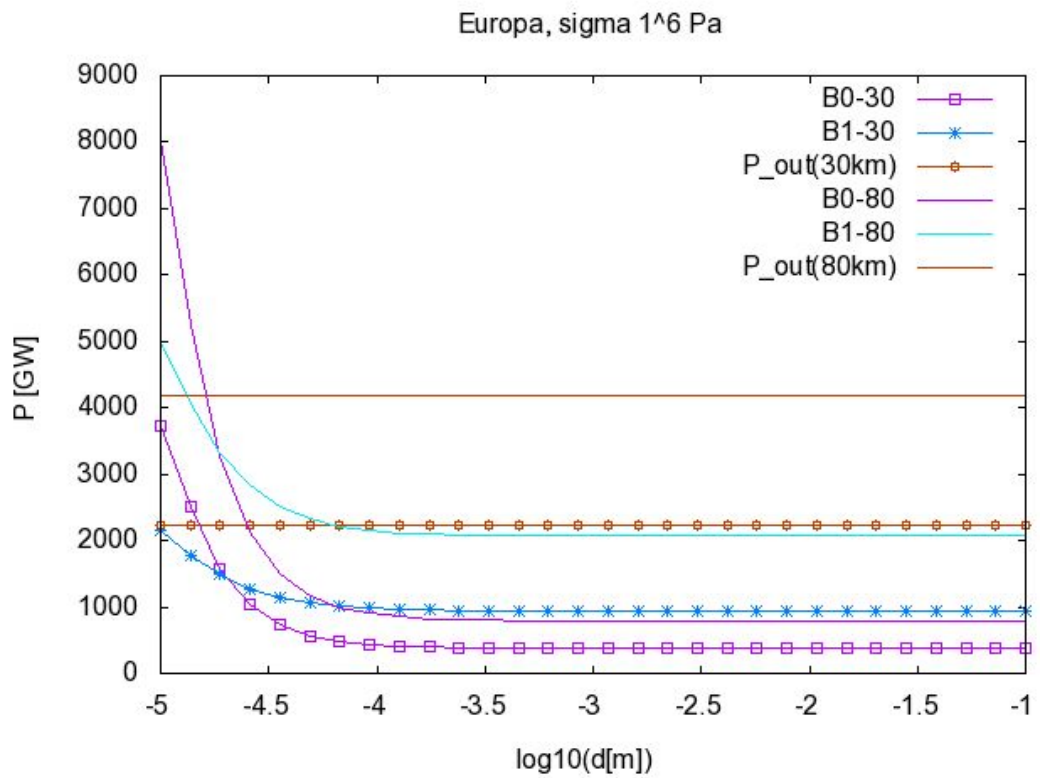


Obrázek 5.20: Europa: výkonostní profil pro napětí $\sigma = 10^6$ Pa

Obrázky 5.21 a 5.22 ukazují, pro jaké parametry přesahuje vygenerovaný výkon ten vyzářený. Tento rozbor jsme v podobě diagramů provedli jen pro měsíc Europa vzhledem k tomu, že u Enceladu je hodnota chladnutí řádově mnohem vyšší (například pro tloušťku ledu 25 km je $P_{out}=28,95$ GW ve srovnání s hodnotami výkonu okolo 1GW). U Europy pozorujeme o něco příznivější tepelnou bilanci. Europa je převážně silikátové těleso a ledová vrstva není příliš silná v porovnání s jejím poloměrem (1560,8 km). Je tedy rozumné se domnívat, že velkou roli při uvolňování tepelné energie tu hraje radioaktivita.



Obrázek 5.21: Europa: tepelná bilance pro hodnotu napětí $\sigma 10^3$ Pa



Obrázek 5.22: Europa: tepelná bilance pro hodnotu napětí $\sigma 10^6$ Pa

6. Diskuze výsledků

Vytvořili jsme sérii modelů, pro které jsme provedli výpočet tepelného výkonu. Výsledky shrnuté v kapitole č.5 reprezentované výkonostními mapami a profily ukazují poměrně nízké hodnoty jak pro Enceladus, tak pro Europu, když je srovnáme s tepelným výkonem, který tělesa vyzařují během svého chladnutí. V případě Saturnova měsíce Enceladus vychází predikovaný tepelný výkon zhruba desetkrát menší než vyzářený výkon. Pokud se podíváme na výsledky pro napětí, která by mohla odpovídat skutečnosti, pak hodnoty ani zdaleka nedosahují spočtených hodnot chladnutí 28,95 GW pro model s ledovou slupkou o tloušťce 25 km či 41,09 GW pro model s ledovou slupkou o tloušťce 50 km. Za přípustná napětí považujeme v případě měsíce Enceladus taková, která se nacházejí v intervalu 10^3 až 10^6 Pa. Zároveň všechny vytvořené modely zahrnují realistické hodnoty velikosti zrna, které se pohybuji od 0.1 do 10 mm.

Například při započítání konvekce v ledové vrstvě se s tepelným výkonem dostáváme pro napětí blízká se 10^7 Pa k hodnotám, které vyzářený výkon přesahují, ovšem pravděpodobně pravděpodobně nejsou příliš reálné. Stejný efekt pozorujeme i u modelů spočtených pro Europu, kde ovšem můžeme počítat i s takovým extrémním napětím.

Nejdříve se ale zaměříme na výsledné modely pro Enceladus. Jak už bylo zmíněno, většina modelů nevykazuje dostatečně vysoký výkon, který by umožnil existenci udržitelného podpovrchového oceánu. Možností jak vysvětlit přítomnost kapalné vody pod Enceladovým povrchem jsou další zdroje tepla. Pokud bychom jako jediný zdroj tepla uvažovali slapové zavřívání měsíce, pak by bylo otázkou, zda je v pořádku reologie, se kterou v modelech počítáme. V ledové slupce totiž zanedbáváme možné nehomogenity či dokonce pukliny a praskliny v ledu a místo toho počítáme s ledem v laboratorních podmínkách a v podobě malých kousků. V takovém případě by případný oceán pod povrchem nemohl zůstat v kapalném skupenství.

Na druhé straně, kdyby použité reologické vztahy nebyly v pořádku, mohli bychom pozorované hodnoty vysvětlit také tak, že bychom se podívali na hodnoty viskozity, které nám pro daná napětí vycházeli. Podíváme-li se na creepové mapy v druhé kapitole, v části, ve které se zabýváme chováním viskozity v ledu v závislosti na teplotě, všimneme si, jak v extrémně studených oblastech sledu stoupá viskozita až k velmi vysokým hodnotám. Jde tedy o podmínky, u kterých už nevíme jistě, jak by se led choval.

Přikláníme se spíše k variantě, která připouští příspěvek od jiných energetických zdrojů. Hlavním zdrojem samozřejmě zůstává slapové deformování celého tělesa působením planety jako je Jupiter či Saturn. Můžeme uvažovat slapové působení v překpokládaném oceánu, kde díky přítomnosti této nízkoviskózní vrstvy může být deformace způsobená slapy podstatně významnější. Slapové působení by mohlo způsobovat disipaci energie i v jádře, čemuž odpovídá představa, že je jádro složené z malých částecek a úlomků, mezi kterými se nachází voda případně led. Dalším zdrojem mohou na Enceladu být také chemické procesy probíhající v měsíčním jádře. Není však jasné jak velký podíl získaného tepla můžeme tomuto zdroji přisuzovat.

Nedomníváme se, že na Enceladu by měl velký velký význam radioaktivní

rozpad prvků v jádře, neboť jádro tohoto měsíce tvoří jen malou část celkového objemu a podle současných poznatků vytváří tento typ tepelné produkce jen asi 10% celkového výkonu.

Měsíc Europa patří mezi ledová tělesa, ale z velké části je tvořen silikáty. Jak bylo zmíněno v kapitole č.5. radioaktivním rozpadem je generována výrazná část celkového výkonu. Avšak samotný rozpad radioaktivních prvků k vysvětlení existence oceánu na Europě nestačí. K úplnému vysvětlení její tepelné produkce tedy musíme zahrnout ještě další zdroje. V naší práci se zabýváme primárně slapovým zahříváním, které je díky velké excentricitě dráhy Europy okolo Jupitera a spin-orbitální rezonanci s ostatními galileovskými souputníky silným zdrojem tepelné energie. Také naše výpočty ukazují vysokou tepelnou produkci Europy v případě konvektivního i konduktivního přenosu tepla. Naše výsledky se týkají především slapové disipace umožněné v ledové slupce díky přítomnosti podpovrchového oceánu, ale nejspíše dochází k nezanedbatelné slapové disipaci i v jádře Europy.

Výkonostní profily, které jsme vytvořili pro Europu a kde se pokoušíme porovnat tepelnou produkci Europa s mírou ochlazování ukazují příznivější výsledek než u Enceladu, jelikož se v tomto případě jsme při výpočtu získali poměrně vysoké hodnoty. Pro konvektivní modely jsme dosáhli až na výkon téměř 10 000 GW pro napětí mezi 10^6 a 10^7 Pa. Pro některé krajní hodnoty velikosti zrna pozorujeme přesah nad hodnotu chladnutí, ale větší část profilu ukazuje, že disipativní výkon nedosahuje této hranice. Vzhledem k získaným výsledkům a uvážení jiných významných tepelných zdrojů, můžeme existenci kapalného rezervoáru považovat, za poměrně dobře vysvětlitelnou.

7. Závěr

V této práci jsme se pokusili osvětlit problematiku výskytu podpovrchových oceánů u ledových těles Sluneční soustavy. Ohlédli jsme se za některými stávajícími teoriemi, které se snaží vysvětlit udržitelnost kapalného rezervoáru pod povrchem ledových těles. Zaměřili jsme se na měsíce Europu a Enceladus a provedli sérii výpočtů pro dva různé viskoelastické modely. Zkoumali jsme průběh viskozity v závislosti na teplotě ledu a zjistili, že v oblastech blízko spodní hranice ledové slupky klesá na hodnotu 10^{11} Pa s. Ze získaných viskózních profilů jsme vytvořili modely pro výpočet tepelného výkonu. Porovnali jsme tepelné výkony, které by jsme získali při uvážení konvektivního či kondiktivního typu tepelného přenosu v různě silných vrstvách ledu. Výstupem těchto výpočtů jsou výkonostní mapy a výkonostní profily pro pevnou velikost napětí. Pro studium závislosti generovaného výkonu jsme zvolili napětí 10^3 a 10^6 Pa, kterými ohraničujeme oblast přípustných napětí na vybraných tělesech.

Spočítali jsme, kolik tepla Europa i Enceladus ztrácí, a to pro tloušťky ledové slupky 25 a 50 km pro Enceladus a 30 a 80 km pro Europu. Výsledné hodnoty jsme porovnali se spočteným disipačním výkonem a na jejich základě diskutovali, zda jsou tyto ledové měsíce schopni udržet si podpovrchový oceán. Zjistili jsme, že pro Enceladus by za nastavených parametrů korespondujících modelů nebylo možné bez dalších zdrojů tepelné energie udržet podpovrchový oceán v kapalném stavu. V případě Europy se pro většinu modelu podařilo vyzářený výkon přesáhnout, i když jen pro nejmenší uvažované velikosti zrna. Avšak pro napětí 10^6 Pa dosahujeme s výpočty podstatně blíže k hodnotě odpovídající chladnutí. Europa získává významnou část energie z radioaktivního rozpadu prvků v plášti. Tedy pravděpodobně kombinace slapového zahřívání s radioaktivním rozpadem mohou pomoci vysvětlit pozorovaný výkon Europy.

Literatura

ATREYA, S. K., ADAMS, E. Y., NIEMANN, H. B., DEMICK-MONTELARA, J. E., OWEN, T. C., FULCHIGNONI, M., ... & WILSON, E. H. (2006). Titan's methane cycle. *Planetary and Space Science*, 54(12), 1177-1187.

DROBYSHEVSKI, E. M. (2003). Galilean satellites as sites for incipient life, and the Earth as its shelter. *arXiv preprint* q-bio/0312031.

GOLDSBY, D. L., & KOHLSTEDT, D. L. (1997). Grain boundary sliding in fine-grained ice I. *Scripta Materialia*, 37(9), 1399-1406.

GRASSET, O., DOUGHERTY, M. K., COUSTENIS, A., BUNCE, E. J., ERD, C., TITOV, D., ... & HUSSMANN, H. (2013). JUperiter ICy moons Explorer (JUICE): An ESA mission to orbit Ganymede and to characterise the Jupiter system. *Planetary and Space Science*, 78, 1-21.

HALL, D. T., STROBEL, D. F., FELDMAN, P. D., MCGRATH, M. A., & WEAVER, H. A. (1995). Detection of an oxygen atmosphere on Jupiter's moon Europa. *Nature*, 373(6516), 677-681.

CHYBA, C. F. (2000). Energy for microbial life on Europa. *Nature*, 403(6768), 381-382.

LIPPS, J. H., DELORY, G., PITMAN, J. T., & RIEBOLDT, S. (2004, November). Astrobiology of Jupiter's icy moons. *International Society for Optics and Photonics* 78-92.

LUCCHITTA, B. K., & SODERBLOM, L. A. (1982). The geology of Europa. *In Satellites of Jupiter*, vol. 1, 521-555.

MARTIN, W., BAROSS, J., KELLEY, D., & RUSSELL, M. J. (2008). Hydrothermal vents and the origin of life. *Nature Reviews Microbiology*, 6(11), 805-814.

MATSON, D. L., CASTILLO, J. C., LUNINE, J., & JOHNSON, T. V. (2007). Enceladus' plume: Compositional evidence for a hot interior. *Icarus*, 187(2), 569-573.

PORCO, C.C., HELFENSTEIN, P., THOMAS, P.C., INGERSOLL, A.P., WISDOM, J., WEST, R., ... KIEFFER, S. (2006). Cassini observes the active south pole of Enceladus. *Science*, vol. 311, 1393-1401.

RAPPAPORT, N. J., IESS, L., WAHR, J., LUNINE, J. I., ARMSTRONG, J. W., ASMAR, S. W., ... & RACIOPPA, P. (2008). Can Cassini detect a subsurface ocean in Titan from gravity measurements?. *Icarus*, 194(2), 711-720.

ROBERTS, J. H., & NIMMO, F. (2008). Tidal heating and the long-term stability of a subsurface ocean on Enceladus. *Icarus*, 194(2), 675-689.

ROTHSCHILD, L. J., & MANCINELLI, R. L. (2001). Life in extreme environments. *Nature*, 409(6823), 1092-1101.

SCHULZE-MAKUCH, D., & IRWIN, L. N. (2001). Alternative energy sources could support life on Europa. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 82(13), 150-150.

SOTIN, C., HEAD, J. W., & TOBIE, G. (2002). Europa: Tidal heating of upwelling thermal plumes and the origin of lenticulae and chaos melting. *Geophysical Research Letters*, 29(8).

SPOHN, T., & SCHUBERT, G. (2003). Oceans in the icy Galilean satellites of Jupiter?. *Icarus*, 161(2), 456-467.

THROOP, H. B., PORCO C. C., WEST, R. A., BURNS, J. A., SHOWALTER, M. R., & Nicholson, P. D. (2004). The jovian rings: new results derived from Cassini, Galileo, Voyager, and Earth-based observations. *Icarus*, 172(1), 59-77.

TOBIE, G., ČADEK, O., SOTIN, C. (2008). Solid tidal friction above a liquid water reservoir as the origin of the south pole hotspot. *Icarus*, vol. 196, 642-652.

WAITE, J. H., COMBI, M. R., Ip, W. H., CRAVENS, T. E., MCNUTT, R. L., KASPRZAK, W., ... & MAGEE, B. (2006). Cassini ion and neutral mass spectrometer: Enceladus plume composition and structure. *Science*, 311(5766), 1419-1422. ISO 690

WAITE Jr, J. H., LEWIS, W. S., MAGEE, B. A., LUNINE, J. I., MCKINNON, W. B., GLEIN, C. R., ... & NGUYEN, M. J. (2009). Liquid water on Enceladus from observations of ammonia and ^{40}Ar in the plume. *Nature*, 460(7254), 487-490.

http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html

<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/saturniansatfact.html>

<https://www.wikipedia.org/>

Seznam obrázků

1	Černí kuřáci na mořském dně v blízkosti východopacifického hřbetu (převzato z https: JPL/NASA)	2
2	Významné mise, které přispěly k výzkumu ledových měsíců. Voyager 1 (nahore vlevo), Galileo (nahore vpravo) a Cassini (dole). Umělecké ztvárnění podle JPL/NASA	3
3	Kryovulkány na Enceladu, zdroj: JPL/NASA	3
1.1	Galileův měsíc Europa: zdroj: JPL/NASA	7
1.2	Europa a ukázka chaotických terénů a liniových útvarů: zdroj: JPL/NASA	8
1.3	Saturnův měsíc Enceladus: zdroj: JPL/NASA	9
1.4	Callisto a Ganymed: zdroj: JPL/NASA	11
1.5	Mimas s kráterem Herschel a Titan se svou hustou atmosférou, zdroj: JPL/NASA	12
2.1	Maxwellův visko-elastický model	13
2.2	Kelvinův-Voigtův model	13
2.3	Průběh efektivní viskozity	15
2.4	Creepové mapy pro napětí 10^3 až 10^6 Pa	16
2.5	Creepová mapa pro napětí 10^7 Pa	17
3.1	Teplotní profil ledové slupky Enceladu o tloušťce 50 km	19
3.2	Teplotní profil s uvážením konvekce	19
4.1	Volný povrch	22
5.1	. . . . .	25
5.2	. . . . .	25
5.3	. . . . .	26
5.4	. . . . .	26
5.5	. . . . .	27
5.6	. . . . .	27
5.7	. . . . .	28
5.8	. . . . .	28
5.9	. . . . .	29
5.10	. . . . .	29
5.11	. . . . .	30
5.12	. . . . .	30
5.13	. . . . .	31
5.14	. . . . .	31
5.15	. . . . .	32
5.16	. . . . .	32
5.17	Enceladus: výkonostní profil pro napětí $\sigma 10^3$ Pa	33
5.18	Enceladus: výkonostní profil pro napětí $\sigma 10^6$ Pa	34
5.19	Europa: výkonostní profil pro napětí $\sigma 10^3$ Pa	34
5.20	Europa: výkonostní profil pro napětí $\sigma 10^6$ Pa	35
5.21	Europa: tepelná bilance pro hodnotu napětí $\sigma 10^3$ Pa	36

5.22	Europa: tepelná bilance pro hodnotu napětí σ 10^6 Pa	36
------	---	----

Seznam tabulek

1.1	Parametry ledových měsíců (zdroj: http://nssdc.gsfc.nasa.gov) . . .	6
1.2	Parametry dráhy	7
2.1	Tabulka hodnot A, l, n, m a E pro výpočet viskozity	15
3.1	Povrchová teplota Europy a Enceladu	19
3.2	Tepelné ztráty studovaných těles	20
5.1	Parametry pro Europu a Enceladus	23
5.2	Specifikace vytvořených modelů	24
5.3	Tepelový výkon pro velikost zrna 1 mm a napětí 10^5 Pa	24