

Glaciologie – fyzika pro otužilce

Ondřej Souček

katedra geofyziky
MFF UK

27.11.2007

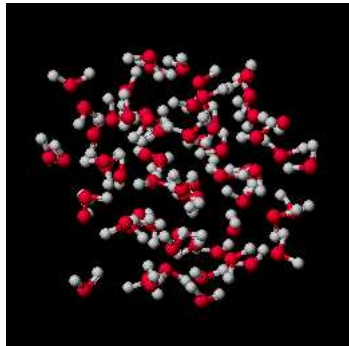
glacées = led, logos = slovo

Příběh ledovce z pohledu fyzika

- Vznik
- Morfologie
- Fyzikální model
- Pozorování

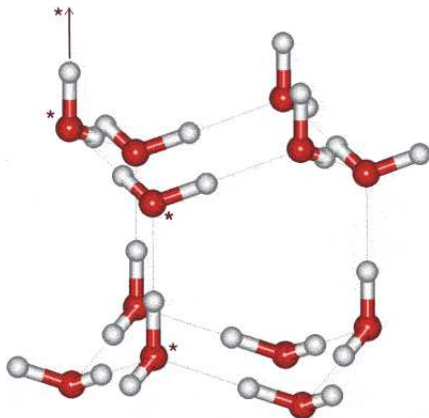
Příběh začíná

- Sněhový mrak – shluk přechlazených vodních kapiček, vzniklých vysrážením vodních par na mikroskopických prachových částech



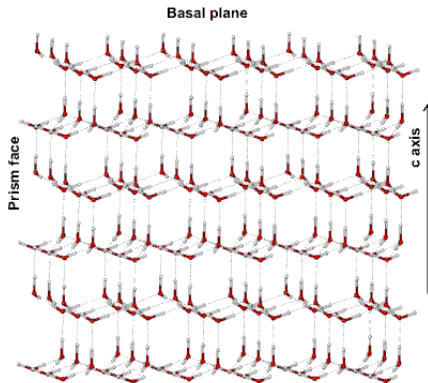
Příběh začíná

- Kolem -10°C začínají kapičky mrznout vzniká jádro (nukleus) budoucí vločky
- Přirozená symetrie mikrokrytalů ledu za normálních podmínek: hexagonální symetrie I_h , (kubická I_c)



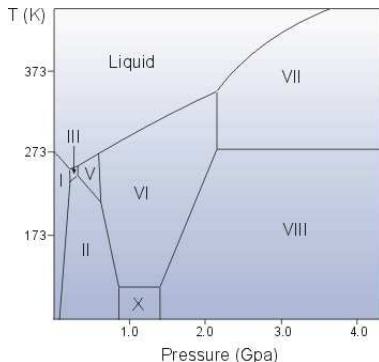
Příběh začíná

- Kolem -10°C začínají kapičky mrznout vzniká jádro (nukleus) budoucí vločky
- Přirozená symetrie mikrokryсталů ledu za normálních podmínek: hexagonální symetrie I_h , (kubická I_c)



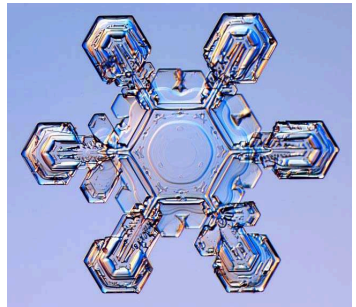
Příběh začíná

- Kolem -10°C začínají kapičky mrznout vzniká jádro (nukleus) budoucí vločky
- Přirozená symetrie mikrokystalů ledu za normálních podmínek: hexagonální symetrie I_h, (kubická I_c)
- Led má celkem 11 různých fází



Příběh začíná

- Na nukleus postupně namrzají okolní kapičky podchlazené vody



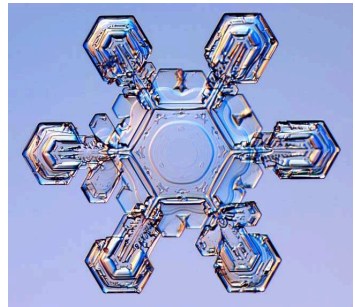
Příběh začíná

- Na nukleus postupně namrzají okolní kapičky podchlazené vody
- Konkrétní tvar faset a průběh jejich růstu určen velkým množstvím parametrů - teplota, koncentrace vodních par a kapiček, přítomnost chemických nečistot a dalších nehomogenit



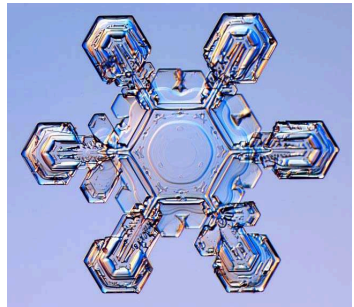
Příběh začíná

- Na nukleus postupně namrzají okolní kapičky podchlazené vody
- Konkrétní tvar faset a průběh jejich růstu určen velkým množstvím parametrů - teplota, koncentrace vodních par a kapiček, přítomnost chemických nečistot a dalších nehomogenit
- Během růstu vločky se podmínky sice mění, ale víceméně pro celou vločku najednou → symetrie zůstává často zachována i pro komplexní makrokrytal



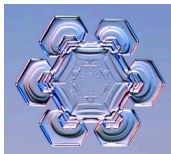
Příběh začíná

- Na nukleus postupně namrzají okolní kapičky podchlazené vody
- Konkrétní tvar faset a průběh jejich růstu určen velkým množstvím parametrů - teplota, koncentrace vodních par a kapiček, přítomnost chemických nečistot a dalších nehomogenit
- Během růstu vločky se podmínky sice mění, ale víceméně pro celou vločku najednou → symetrie zůstává často zachována i pro komplexní makrokrytal
- Žádné dvě vločky nejsou stejné?

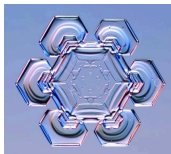




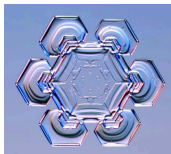
Obrázek: Drífa: snowdrift, snowfall



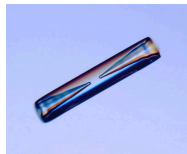
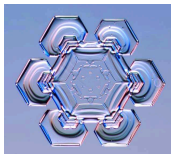
Obrázek: Drífa: snowdrift, snowfall , Drifhvít: white as snow



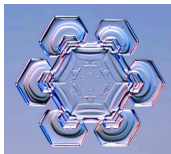
Obrázek: Drífa: snowdrift, snowfall , Drifhvíť: white as snow , Drift: energy, powder snow



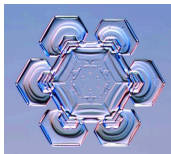
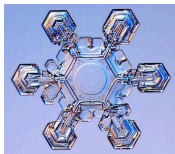
Obrázek: Drífa: snowdrift, snowfall , Drífhvít: white as snow , Drift: energy, powder snow , Fannhvít: white as snow



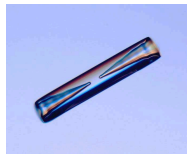
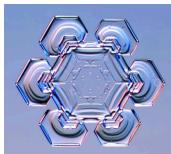
Obrázek: Drífa: snowdrift, snowfall , Drifhvít: white as snow , Drift: energy, powder snow , Fannhvít: white as snow Fönn: snow, snow-drift,



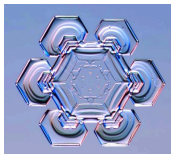
Obrázek: Drífa: snowdrift, snowfall , Drifhvít: white as snow , Drift: energy, powder snow , Fannhvít: white as snow Fönn: snow, snow-drift, Geyfa: snowfall,



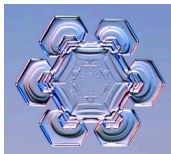
Obrázek: Drífa: snowdrift, snowfall , Drifhvít: white as snow , Drift: energy, powder snow , Fannhvít: white as snow Fönn: snow, snow-drift, Geyfa: snowfall, Hreða: snow storm,



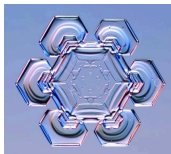
Obrázek: Drífa: snowdrift, snowfall , Drifhvít: white as snow , Drift: energy, powder snow , Fannhvít: white as snow Fönn: snow, snow-drift, Geyfa: snowfall, Hreða: snow storm, Hrina: snowfall, gust,



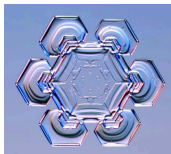
Obrázek: Drífa: snowdrift, snowfall, Drífhvít: white as snow, Drift: energy, powder snow, Fannhvít: white as snow Fönn: snow, snow-drift, Geýfa: snowfall, Hreða: snow storm, Hrina: snowfall, gust, Mjallhvít: snowwhite,



Obrázek: Drífa: snowdrift, snowfall, Drifhvít: white as snow, Drift: energy, powder snow, Fannhvít: white as snow, Fönn: snow, snow-drift, Geyfa: snowfall, Hreða: snow storm, Hrina: snowfall, gust, Mjallhvít: snowwhite, Mjöll: newly fallen snow,

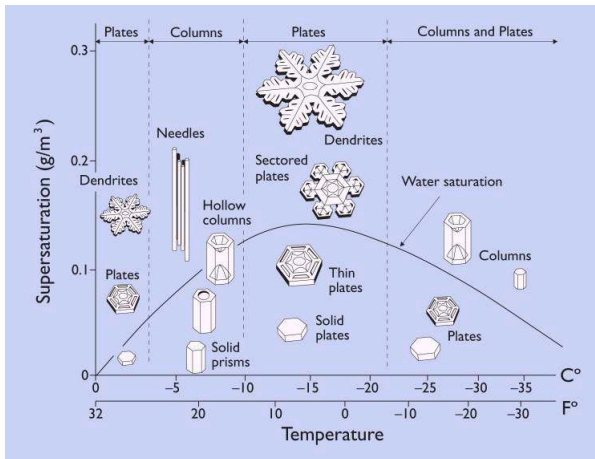


Obrázek: Drífa: snowdrift, snowfall , Drifhvít: white as snow , Drift: energy, powder snow , Fannhvít: white as snow Fönn: snow, snow-drift, Geyfa: snowfall, Hreða: snow storm, Hrina: snowfall, gust, Mjallhvít: snowwhite, Mjöll: newly fallen snow, Skorpa: cold snow storm,



Obrázek: Drífa: snowdrift, snowfall , Drifhvít: white as snow , Drift: energy, powder snow , Fannhvít: white as snow Fönn: snow, snow-drift, Geyfa: snowfall, Hreða: snow storm, Hrina: snowfall, gust, Mjallhvít: snowwhite, Mjöll: newly fallen snow, Skorpa: cold snow storm, Snjóhvít: white as snow

"Jednoduchá" morfologie vloček



Vznik ledovců a jejich výskyt

- V oblastech s vhodnými podmínkami nestačí během léta všechen naakumulovaný led roztát – vzniká ledovec

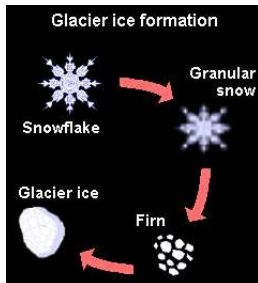
Vznik ledovců a jejich výskyt

- V oblastech s vhodnými podmínkami nestačí během léta všechen naakumulovaný led roztát – vzniká ledovec
- Vhodné podmínky? teplota, srážky, sklon povrchu, povětrnostní podmínky...Výskyt? Prakticky na všech zeměpisných šířkách včetně rovníkových oblastí



Vznik ledovců a jejich výskyt

- V oblastech s vhodnými podmínkami nestačí během léta všechen naakumulovaný led roztát – vzniká ledovec
- Vhodné podmínky? teplota, srážky, sklon povrchu, povětrnostní podmínky... Výskyt? Prakticky na všech zeměpisných šířkách včetně rovníkových oblastí
- Napadaný sníh prochází mnoha proměnami, kompaktifikací, částečným natáváním a opět mrznutím, změnou tvaru krystalů v důsledku interakcí se "sousedy"



Základní dělení podle velikosti

- alpské (horské)
ledovce
- velké ledovce,
ledovcové
pokrývky (ice
sheets)

Základní dělení podle velikosti

- **alpínské (horské) ledovce**
- velké ledovce, ledovcové pokrývky (ice sheets)

Menší, v důsledku intenzivního letního tání často obsahují až na přívrchovou vrstvu po celý rok kapalnou vodu v ledové matrici; velmi citlivé na změnu teplot, indikátory změn klimatu, v Evropě, Jižní Americe na ústupu

Základní dělení podle velikosti

- alpské (horské) ledovce
- velké ledovce, ledovcové pokrývky (ice sheets)



Základní dělení podle velikosti

- alpské (horské) ledovce
- velké ledovce, ledovcové pokrývky (ice sheets)

Největší pozemské rezervoáry pitné vody, tloušťka až několik kilometrů, odhady změn v bilanci hmoty zde komplikovanější a méně jednoznačné

Základní dělení podle velikosti

- alpínské (horské) ledovce
- velké ledovce, ledovcové pokrývky (ice sheets)

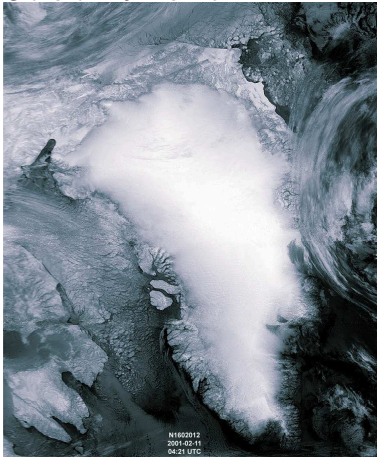
Antarktida ~ 65 m s.w.e.



Základní dělení podle velikosti

- alpínské (horské) ledovce
- velké ledovce, ledovcové pokrývky (ice sheets)

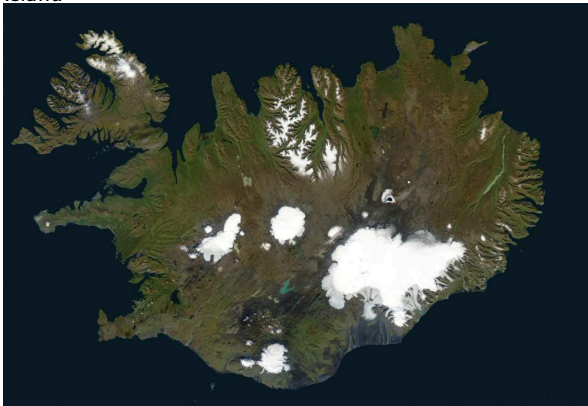
Grónsko ~ 6 m s.w.e.



Základní dělení podle velikosti

- alpínské (horské) ledovce
- velké ledovce, ledovcové pokrývky (ice sheets)

Island



Další dělení. . .



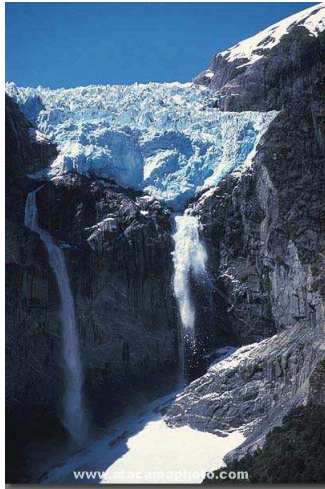
Plovoucí led (Ice shelves)

Další dělení. . .

Údolní ledovce (Valley glaciers)

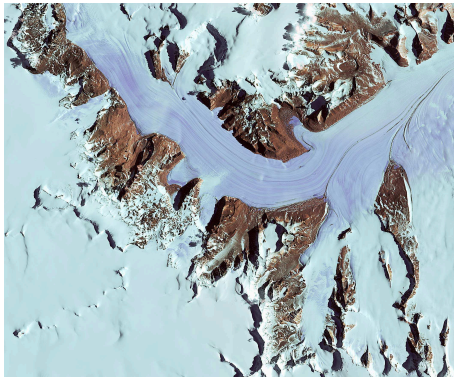


Další dělení. . .



Visící ledovce (Hanging glaciers)

Další dělení. . .



Ledovcové proudy (Ice streams)

Další dělení. . .

Kamenné ledovce (Rocky glaciers)



Pohyb ledovce

- Na běžné časové škále se jeví led jako pevná krystalická látka.

Pohyb ledovce

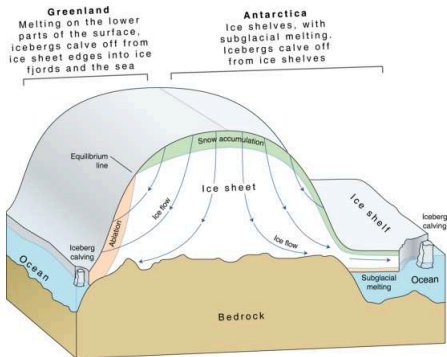
- Na běžné časové škále se jeví led jako pevná krystalická látka.
- Za dostatečných tlaků se atomové vrstvy začnou pohybovat vůči sobě – ledovec začíná téci.

Pohyb ledovce

- Na běžné časové škále se jeví led jako pevná krystalická látka.
- Za dostatečných tlaků se atomové vrstvy začnou pohybovat vůči sobě – ledovec začíná téci.
- Hybnou silou gravitace

Pohyb ledovce

- Na běžné časové škále se jeví led jako pevná krystalická látka.
- Za dostatečných tlaků se atomové vrstvy začnou pohybovat vůči sobě – ledovec začíná téci.
- Hybnou silou gravitace



Pohyb ledovce

- Deformační tok \sim povrchové rychlosti desítky až stovky metrů za rok

Pohyb ledovce

- Deformační tok \sim povrchové rychlosti desítky až stovky metrů za rok
- Prokluz: pokud je rozhraní podloží – ledovec na teplotě tání, přestaně být ledovec přimrzlý k podloží a začíná prokluzovat, rychlostní příspěvek od prokluzu k celkovému pohybu ledovce může být stejného řádu jako deformační rychlosti, ale též řádově vyšší – až desítky metrů za den!

Pohyb ledovce

- Deformační tok \sim povrchové rychlosti desítky až stovky metrů za rok
- Prokluz: pokud je rozhraní podloží – ledovec na teplotě tání, přestane být ledovec přimrzlý k podloží a začíná prokluzovat, rychlostní příspěvek od prokluzu k celkovému pohybu ledovce může být stejného řádu jako deformační rychlosti, ale též řádově vyšší – až desítky metrů za den!
- Změna režimu toku z deformačního na prokluz může být způsobena náhlými změnami v hydrologii ledovce, které ovlivní "namazání" podloží

Odbočka - pár slov o hydrologii ledovce

- Z hlediska hydrologie je ledovec extrémně dynamickým systémem



Odbočka - pár slov o hydrologii ledovce

- Z hlediska hydrologie je ledovec extrémně dynamickým systémem
- V průběhu léta dochází k intenzivnímu tání, geneze vodních toků na povrchu ledovce, otevírají se zánory do nitra, vznik rozsáhlé sítě kanálů, ta dosahuje často až na dno ledovce a zde ovlivňuje zásadně mechanické vlastnosti kontaktu ledovec – podloží



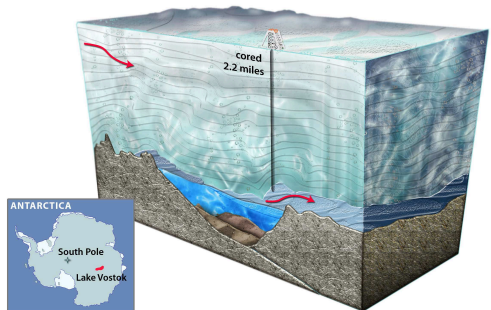
Odbočka - pár slov o hydrologii ledovce

- Z hlediska hydrologie je ledovec extrémně dynamickým systémem
- V průběhu léta dochází k intenzivnímu tání, geneze vodních toků na povrchu ledovce, otevírají se zánory do nitra, vznik rozsáhlé sítě kanálů, ta dosahuje často až na dno ledovce a zde ovlivňuje zásadně mechanické vlastnosti kontaktu ledovec – podloží
- Během zimy se zase síť kanálů uzavírá a vnitřní říční systém ledovce dočasně zaniká



Odbočka - pár slov o hydrologii ledovce

- Subglaciální jezera (v oblastech s anomálním tepelným výnosem z nitra Země): Antarktida – Vostok, Island – Grimsvotn
- Schopnost fyziků modelovat evoluci hydrologické sítě může být klíčová pro odhad ekologických rizik (kontaminace jezera Vostok - vrt 3,6 km), ohrožení obyvatel – Island, Grimsvotn, Jokuhlaups



Odbočka - pár slov o hydrologii ledovce

- Subglaciální jezera (v oblastech s anomálním tepelným výnosem z nitra Země): Antarktida – Vostok, Island – Grimsvotn
- Schopnost fyziků modelovat evoluci hydrologické sítě může být klíčová pro odhad ekologických rizik (kontaminace jezera Vostok - vrt 3,6 km), ohrožení obyvatel – Island, Grimsvotn, Jokuhlaups



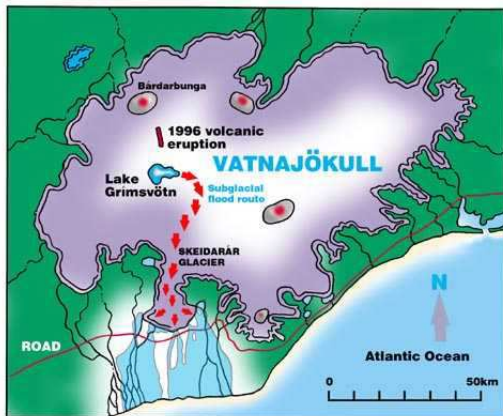
Odbočka - pár slov o hydrologii ledovce

- Subglaciální jezera (v oblastech s anomálním tepelným výnosem z nitra Země): Antarktida – Vostok, Island – Grimsvotn
- Schopnost fyziků modelovat evoluci hydrologické sítě může být klíčová pro odhad ekologických rizik (kontaminace jezera Vostok - vrt 3,6 km), ohrožení obyvatel – Island, Grimsvotn, Jokuhlaups



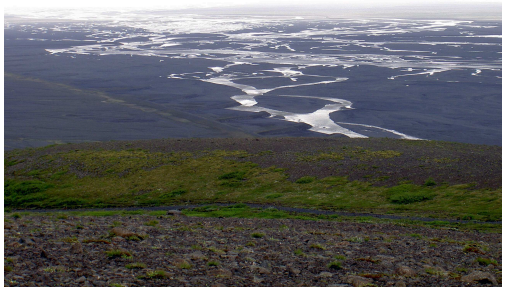
Odbočka - pár slov o hydrologii ledovce

- Subglaciální jezera (v oblastech s anomálním tepelným výnosem z nitra Země): Antarktida – Vostok, Island – Grimsvotn
- Schopnost fyziků modelovat evoluci hydrologické sítě může být klíčová pro odhad ekologických rizik (kontaminace jezera Vostok - vrt 3,6 km), ohrožení obyvatel – Island, Grimsvotn, Jokuhlaups



Odbočka - pár slov o hydrologii ledovce

- Subglaciální jezera (v oblastech s anomálním tepelným výnosem z nitra Země): Antarktida – Vostok, Island – Grimsvotn
- Schopnost fyziků modelovat evoluci hydrologické sítě může být klíčová pro odhad ekologických rizik (kontaminace jezera Vostok - vrt 3,6 km), ohrožení obyvatel – Island, Grimsvotn, Jokuhlaups

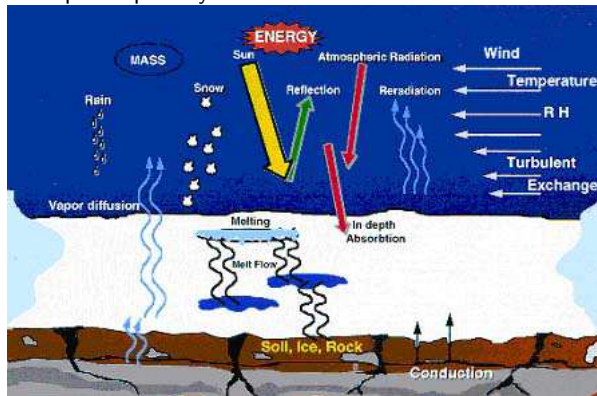


Modelování pohybu ledovců – glaciolog teoretik



Matematický popis ledovce

Transportní procesy v ledovci



Matematický popis ledovce

Ústředním matematickým aparátem je mechanika a termodynamika kontinua

- matematická abstrakce umožňující popsat chování látek na škálách, na nichž se jeví jako spojité, prostorově vystředované fyzikální vlastnosti připsány jednotlivým bodům kontinua, analogie z klasické mechaniky - hmotný bod
- Formulace základních bilančních zákonů (zákonů zachování)
 - Bilance hmoty
 - Bilance hybnosti - pohybová rovnice
 - Bilance energie - rovnice vedení tepla
- Výsledný popis ve tvaru soustavy parciálních diferenciálních rovnic

Ukázka formulace úlohy - studený led $T < T_M$

Bilanční rovnice

- Rovnice kontinuity

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad \sim \quad m = \text{konst.}$$

- Pohybová rovnice

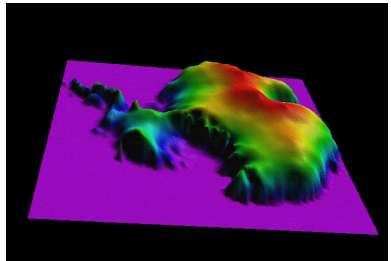
$$\rho \dot{\vec{v}} = -\operatorname{grad} p + \operatorname{div} \overset{\circ}{\mathbf{T}} + \rho \vec{g}_a \quad \sim \quad m \vec{a} = \vec{F}$$

- Bilance energie

$$\rho \dot{\epsilon} = \mathbf{T} : \mathbf{D} - \operatorname{div} \vec{q} \quad \sim \quad \Delta U = -P \Delta V + \Delta Q$$

Numerické řešení

- Diskretizace geometrie



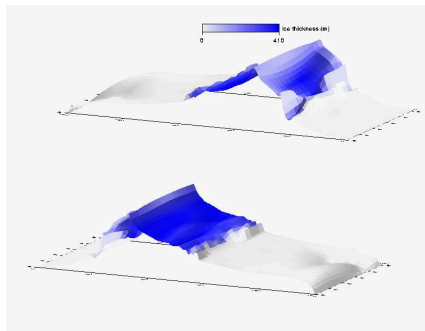
Numerické řešení

- Diskretizace geometrie



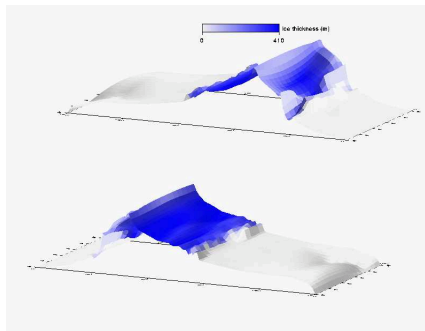
Numerické řešení

- Diskretizace geometrie



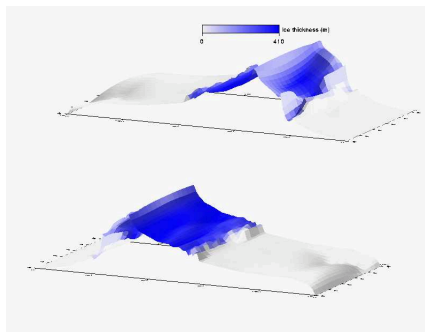
Numerické řešení

- Diskretizace geometrie
- Diskretizace diferenciálních rovnic
– derivace \sim diference, integrály
 \sim součty



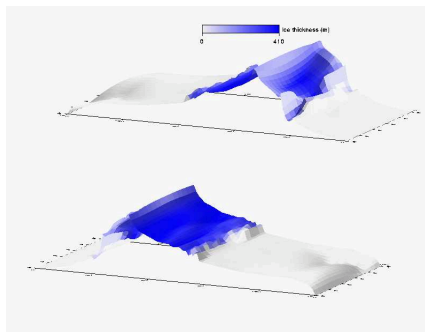
Numerické řešení

- Diskretizace geometrie
- Diskretizace diferenciálních rovnic – derivace \sim diference, integrály \sim součty
- Řešení velkého počtu lineárních (nelineárních) rovnic (10^5 , 10^6 proměnných)



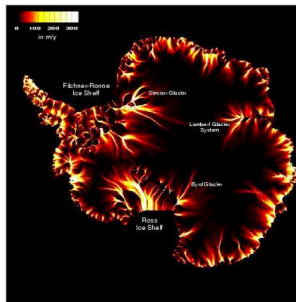
Numerické řešení

- Diskretizace geometrie
- Diskretizace diferenciálních rovnic – derivace \sim difference, integrály \sim součty
- Řešení velkého počtu lineárních (nelineárních) rovnic (10^5 , 10^6 proměnných)
- Sofistikované výpočetní metody (paralelizace), superpočítače



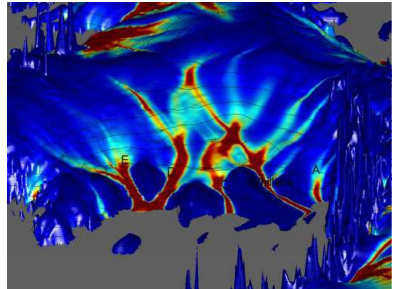
Výstupy numerických modelů

- 3-D (2-D) pole rychlostí



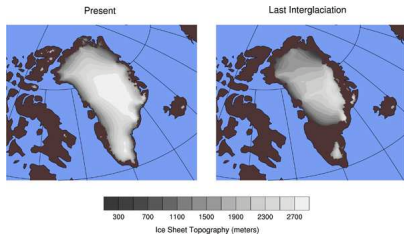
Výstupy numerických modelů

- 3-D (2-D) pole rychlostí
- Evoluce povrchu – mocnost zalednění v závislosti na hlavních vstupních parametrech modelu (klimatických vstupech = srážkách, teplotách, interakci oceán–ledovec ...)



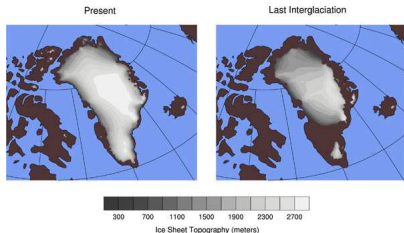
Výstupy numerických modelů

- 3-D (2-D) pole rychlostí
- Evoluce povrchu – mocnost zalednění v závislosti na hlavních vstupních parametrech modelu (klimatických vstupech = srážkách, teplotách, interakci oceán–ledovec ...)



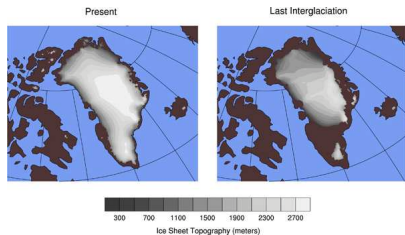
Výstupy numerických modelů

- 3-D (2-D) pole rychlostí
- Evoluce povrchu – mocnost zalednění v závislosti na hlavních vstupních parametrech modelu (klimatických vstupech = srážkách, teplotách, interakci oceán–ledovec ...)
- Význam?



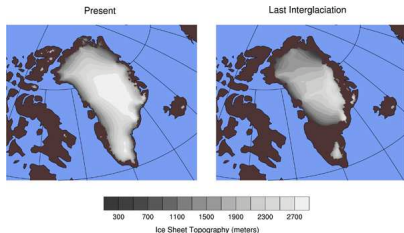
Výstupy numerických modelů

- 3-D (2-D) pole rychlostí
- Evoluce povrchu – mocnost zalednění v závislosti na hlavních vstupních parametrech modelu (klimatických vstupech = srážkách, teplotách, interakci oceán–ledovec ...)
- Význam?
 - Prognostické modely zalednění - změny v zalednění Země v závislosti na různých modelových scénářích budoucích klimatických změn



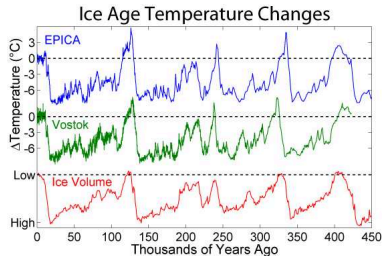
Výstupy numerických modelů

- 3-D (2-D) pole rychlostí
- Evoluce povrchu – mocnost zalednění v závislosti na hlavních vstupních parametrech modelu (klimatických vstupech = srážkách, teplotách, interakci oceán–ledovec ...)
- Význam?
 - Prognostické modely zalednění
 - Rekonstrukce glaciální historie - studium a interpretace postglaciálního výzdvihu



Rekonstrukce zalednění během poslední doby ledové - postglaciální výzdvih

- Poslední doba ledová - období cca 100 000 let, nejprve pozvolná akumulace ledu v polárních oblastech následovaná "rychlou" (10 000 let) deglaciací



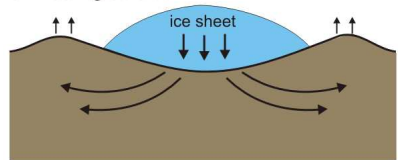
Rekonstrukce zalednění během poslední doby ledové - postglaciální výzdvih

- Během období zalednění
přeskupení značného množství
vodních hmot do polárních oblastí

Rekonstrukce zalednění během poslední doby ledové - postglaciální výzdvih

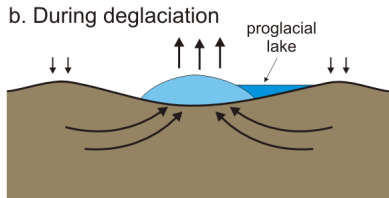
- Během období zalednění přeskupení značného množství vodních hmot do polárních oblastí
- Povrch Země touto zátěží deformován

a. Peak glaciation



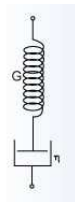
Rekonstrukce zalednění během poslední doby ledové - postglaciální výzdvih

- Během období zalednění přeskupení značného množství vodních hmot do polárních oblastí
- Povrch Země touto zátěží deformován
- Následovalo rychlé odlednění = materiál zemského pláště na této časové škále reaguje visko-elasticky



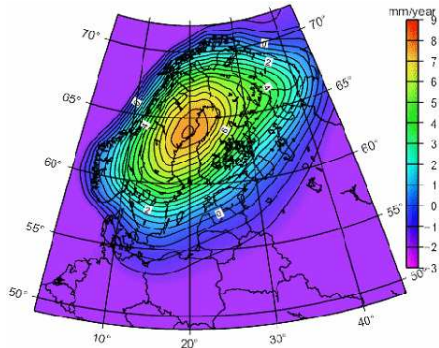
Rekonstrukce zalednění během poslední doby ledové - postglaciální výzdvih

- Během období zalednění přeskupení značného množství vodních hmot do polárních oblastí
- Povrch Země touto zátěží deformován
- Následovalo rychlé odlednění = materiál zemského pláště na této časové škále reaguje visko-elasticky



Rekonstrukce zalednění během poslední doby ledové - postglaciální výzdvih

- Během období zalednění přeskupení značného množství vodních hmot do polárních oblastí
- Povrch Země touto zátěží deformován
- Následovalo rychlé odlednění = materiál zemského pláště na této časové škále reaguje visko-elasticky
- Dosud pokračující isostatická kompenzace posledního zalednění Skandinávie, Severní Amerika, Antarktida



Rekonstrukce zalednění během poslední doby ledové - postglaciální výzdvih

- Budeme-li mít realistický model zalednění, můžeme z měřených současných pohybů povrchu určit některé důležité parametry zemského nitra (3-D viskozita pláště) ...

Rekonstrukce zalednění během poslední doby ledové - postglaciální výzdvih

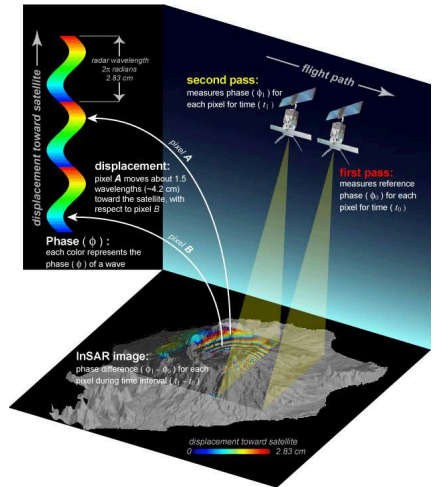
- Budeme-li mít realistický model zalednění, můžeme z měřených současných pohybů povrchu určit některé důležité parametry zemského nitra (3-D viskozita pláště) ...
- ... a zároveň správně interpretovat pozorované současné změny v zalednění Země (klíčové pro prognostické klimatologické modely)

Jak se co měří?

- Nejpřesnějšími technikami pro měření pohybů a změn v bilanci hmoty velkých ledovcových štítů jsou satelitní měření

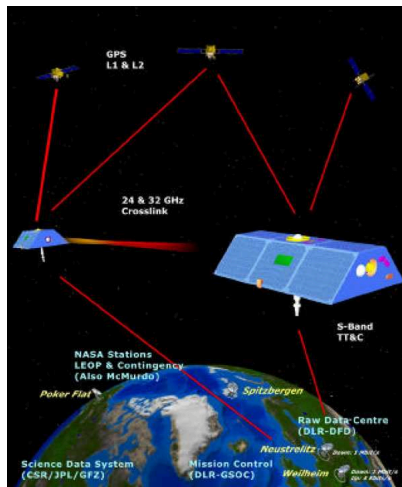
Jak se co měří?

- Nejpřesnějšími technikami pro měření pohybů a změn v bilanci hmoty velkých ledovcových štítů jsou satelitní měření
- Radarová satelitní altimetrie - mise CryoSat (InSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar) – měření změny topografie polárních oblastí



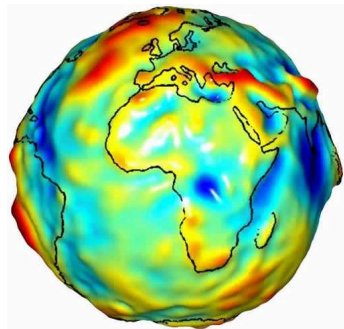
Jak se co měří?

- Nejpřesnějšími technikami pro měření pohybů a změn v bilanci hmoty velkých ledovcových štítů jsou satelitní měření
- Radarová satelitní altimetrie - mise CryoSat (InSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar) – měření změny topografie polárních oblastí
- Gravimetrická satelitní měření - mise GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) – měření změn gravitačního pole Země – informace o současných změnách v zalednění plus signál od postglaciálního výzdvihu



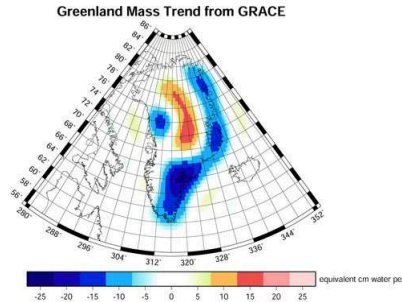
Jak se co měří?

- Nejpřesnějšími technikami pro měření pohybů a změn v bilanci hmoty velkých ledovcových štítů jsou satelitní měření
- Radarová satelitní altimetrie - mise CryoSat (InSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar) – měření změny topografie polárních oblastí
- Gravimetrická satelitní měření - mise GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) – měření změn gravitačního pole Země – informace o současných změnách v zalednění plus signál od postglaciálního výzdvihu



Jak se co měří?

- Nejpřesnějšími technikami pro měření pohybů a změn v bilanci hmoty velkých ledovcových štítů jsou satelitní měření
- Radarová satelitní altimetrie - mise CryoSat (InSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar) – měření změny topografie polárních oblastí
- Gravimetrická satelitní měření - mise GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) – měření změn gravitačního pole Země – informace o současných změnách v zalednění plus signál od postglaciálního výzdvihu



Cíle a trendy v glaciologii

- Tvorba numerických modelů s lepším rozlišením

Cíle a trendy v glaciologii

- Tvorba numerických modelů s lepším rozlišením
- Další sběr dat a jejich interpretace

Cíle a trendy v glaciologii

- Tvorba numerických modelů s lepším rozlišením
- Další sběr dat a jejich interpretace
- Propojení glaciologických, klimatologických a oceanografických modelů

Děkuji za pozornost