

Globální oteplování a ledovcové štíty Antarktidy a Grónska: jaký nárůst hladiny moře způsobí a jak rychle?

Martin Margold,
Katedra fyzické geografie a geoekologie

Tato prezentace shrnuje současné poznatky o budoucím nárůstu hladiny světového oceánu v důsledku ztráty hmoty ledovcových štítů v Antarktidě a Grónsku. Tání a částečný kolaps ledovcových štítů, a s tím spojený nárůst hladiny oceánu v následujících dekádách a staletích, už je nezvratný proces, který je reakcí na člověkem vyvolané globální oteplování. Otázkou zůstává o kolik cm nebo m hladina světového oceánu stoupne, a jak rychle. Předpověď nárůstu hladiny oceánu je zatížena extrémní nejistotou. Předpověď závisí na klimatických scénářích následujících desetiletí a staletí, a také na našem porozumění procesům, které se v ledovcových štítech odehrávají. Tyto procesy a jejich vliv na hladinu světového oceánu v závislosti na jednotlivých klimatických scénářích se pokusí přiblížit předkládaná prezentace.

Prezentace má 22 slidů výkladu a měla by se vejít do jedné vyučovací hodiny. Je vhodná pro středoškolský stupeň. Nezdáhejte se mě kontaktovat pro případnou konzultaci.

Prezentace může být upravována (krácena), prosím však o zachování úvodního slidu s autorstvím.

S pozdravem,
Martin Margold
margold@natur.cuni.cz
Katedra fyzické geografie a geoekologie, PŘF UK

Slide 2 (Úvod)

Ledovcové štíty se v současnosti nacházejí v Grónsku a v Antarktidě.

Mapka na pravé straně slidu ukazuje ledovcové štíty v Grónsku a v Antarktidě v šedofialovém odstínu (tmavší u okrajů).

Po kliknutí naskočí tabulka

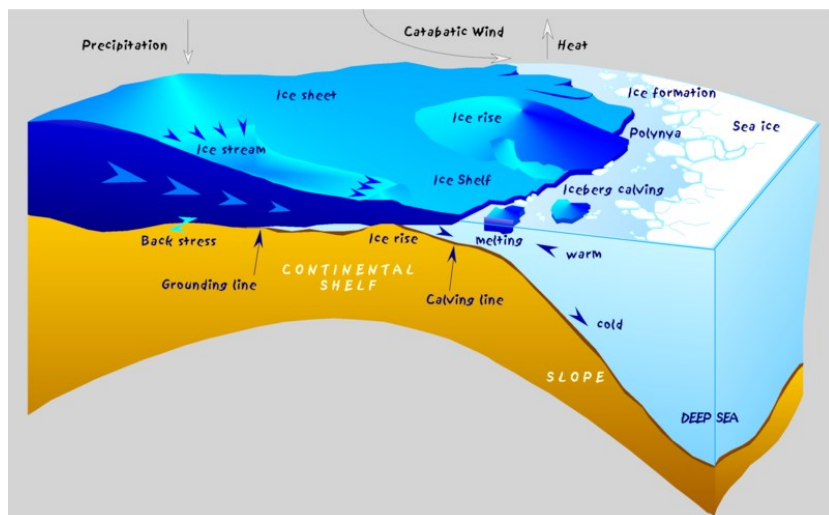
Tabulka ukazuje objem ledovcových štítů v Grónsku a v Antarktidě v přepočtu na jejich potenciál zvýšit hladinu světového oceánu (tzn. pokud např. roztaje celý Grónský ledovcový štít, hladina moře stoupne o něco přes 7 metrů).

Pro srovnání jsou uvedeny také objemy ledovcových štítů z vrcholu poslední doby ledové před ca 20 tis. lety. Tyto ledovcové štíty jsou v mapce vyznačeny bílou barvou. Nejdůležitější z nich byl Severoamerický ledovcový komplex (v mapce C a L pro jeho hlavní části, Kordillerský a Laurentinský ledovcový štít). Skandinávský ledovcový štít (v mapce S), součást Eurasijského ledovcového komplexu, dosahoval během poslední doby ledové svým jižním okrajem přibližně na linii Berlín-Varšava. Také ledovcové štíty Antarktidy a Grónska byly větší než dnes. Dohromady byla na vrcholu poslední doby ledové, díky vodě vázané v ledovcových štítech, hladina světového oceánu o 120 m níže než dnes. Nárůst k dnešní hladině moře proběhl mezi 20 a ca 8 tisíci lety před přítomností a od té doby se hladina oceánu měnila výrazně méně.

Slide 3 (Současné ledovcové štíty)

Slide zobrazuje současné ledovcové štíty Antarktidy a Grónska (ve stejném měřítku).

Barevná škála vyjadřuje rychlost toku ledu (tmavší = rychlejší) a jsou tak vidět ledovcové proudy, které odvádí led z akumulačních oblastí ledovcových štítů směrem k jejich okraji. Rozsáhlé tmavé plochy v Antarktidě jsou plovoucí ledovcové šelfy, tj. oblasti kde stovky metrů mocný led plave na povrchu oceánu. Oranžová čára při okraji Antarktického ledovcového štítu zobrazuje tzv. „grounding line“, linii, kde se ledovec odděluje od podloží a přechází do ledovcového šelfu. Viz obrázek:



Slide 4 (Antarktida)

Slide obsahuje sérii tří map Antarktidy:

Zobrazená data jsou z kompilace „Bedmap2“, jsou získaná geofyzikálními metodami

<https://www.bas.ac.uk/project/bedmap-2/>

1. zobrazuje výšku podloží Antarktického ledovcového štítu.

Vypíchnout: - značná část západní Antarktidy leží hluboko pod hladinou moře

- centrální části východní Antarktidy skrývají Gamburcevovo pohoří – pohoří rozlohou srovnatelné s evropskými Alpami, celé skryté v ledovcovém štítu.

https://cs.wikipedia.org/wiki/Gamburcevovo_poho%C5%99%C3%AD

https://en.wikipedia.org/wiki/Gamburtsev_Mountain_Range

Oproti tomu další hlavní pohoří Antarktidy (např. Transantarktické pohoří) vystupují nad povrch ledovcového štítu jako nunataky.

https://en.wikipedia.org/wiki/Transantarctic_Mountains

2. zobrazuje nadmořskou výšku povrchu ledovcového štítu. Centrální oblasti východní Antarktidy dosahují výšek okolo 4000 m n.m., centrální oblasti západní Antarktidy výšek okolo 2000 m n.m.

3. zobrazuje mocnost ledovcového štítu. Rámečkem zvýrazněné údaje v tabulce napravo udávají průměrnou mocnost ledovcového štítu (s ledovcovými šelfy 1937 m, bez nich 2126 m), maximální mocnost 4897 m.

Po kliknutí naskočí tabulka

Antarktida má potenciál zvýšit hladinu oceánu o 58 m, z toho západní Antarktida o 4 m, východní Antarktida o 53 m a Antarktický poloostrov 0,2 m.

Protože oblasti ledovcového štítu z podloží pod úrovní hladiny světového oceánu jsou obzvláště rizikové (co se týče jejich případného kolapsu a nárůstu hladiny moře), jsou pro ně zobrazeny údaje v dolním řádku tabulky.

Slide 5 (Grónsko)

Slide obsahuje sérii tří map Grónska, stejně jako u Antarktidy:

Zobrazená data jsou z kompilace „BedMachine“, jsou získána geofyzikálními metodami

<https://sites.uci.edu/morlighem/dataproducts/bedmachine-greenland/>

1. zobrazuje výšku podloží Grónského ledovcového štítu.

Vypíchnout: - okrajové oblasti tvoří vysočiny a horské celky, centrální oblast leží pod hladinou moře.

2. zobrazuje nadmořskou výšku povrchu ledovcového štítu. Centrální oblasti dosahují výšek okolo 3000 m n.m. (max 3290 m).

3. zobrazuje mocnost ledovcového štítu. Ta dosahuje okolo 3 km v centrálních oblastech (max ~3200 m)

Slide 6 (Mechanismy ztráty ledovcové hmoty)

Ledovcové štíty ztrácí hmotu dvěma hlavními způsoby:

1. Táním na povrchu.

Intenzita tání na povrchu závisí na teplotě (a vlhkosti) vzduchu a na odrazivosti povrchu ledovcového štítu (tzv. albedo). Změny albeda mají charakter pozitivní zpětné vazby: s táním povrch ledovce tmavne, jak na něm vytávají nečistoty a rostou řasy, a povrch tak absorbuje více slunečního záření, což zvyšuje intenzitu tání.

Ilustrace: fotografie z ablační oblasti Grónského ledovcového štítu, zobrazující jezero tavné vody (tyto jezera mají sezónní charakter, některé se náhle vyprazdňují do nitra ledovcového štítu) a řeku tavné vody, která ústí v tzv. „moulin“ – vertikální šachtu, která se voda dostává na podloží ledovcového štítu.

Slide 7 (Mechanismy ztráty ledovcové hmoty)

Tání na povrchu je důležitější pro Grónský ledovcový štít, pro nějž je to dominantní způsob ztráty hmoty. Obrázek vpravo ukazuje počty dnů s povrchovým táním pro letní sezónu 2020. Vidíme, že centrální části štítu buď nejsou zasaženy táním vůbec, nebo pouze v řádu jednotlivých dnů, naopak zejména při JZ okraji je rozsáhlá ablační oblast, kde k tání dochází po většinu letní sezóny.

V Antarktidě je povrchové tání podstatné pouze v oblasti Antarktického poloostrova (obrázek vlevo zobrazuje počty dnů povrchového tání v sezóně 2018-2019). Ostatní části Antarktidy jsou pro povrchové tání příliš chladné. Oblasti, kde ve V Antarktidě kde k nějakému tání podle obrázku docházelo, jsou nunataky (vyčnívající horské vrcholy/skupiny vrcholů), které se místně ohřívají kvůli nižšímu albedu (odrazivosti).

Slide 8 (Mechanismy ztráty ledovcové hmoty)

Druhým hlavním mechanismem ztráty hmoty je u ledovcových štítů odtok ledu do oceánu. Led odtéká ledovcovými proudy („ice streams“) a buď se přímo telí (odlamuje v blocích) do moře nebo vyživuje plovoucí ledovcové šelfy. Ledovcové šelfy samotné pak odtávají jak na povrchu, tak odspodu, působením teplé mořské vody. Jejich tání nepřispívá přímo k nárůstu hladiny světového oceánu, ale má na ní vliv zprostředkovaně: šelfy zadržují tok ledovcových proudů, pokud šelfy zmizí (intenzivní tání může vést k jejich náhlému rozpadu:

https://en.wikipedia.org/wiki/Larsen_Ice_Shelf#Breakup) tok ledovcových proudů výrazně zrychlí, a ty tak transportují více ledu do oceánu.

Slide 9 (Mechanismy ztráty ledovcové hmoty)

Ilustrace ledovcových proudů a šelfů – viz Slide 3, tzn. data rychlost toku ledu (tmavší = rychlejší)

Slide 10 (Mechanismy ztráty ledovcové hmoty)

Data zobrazující rychlost toku ledu (tzn. obrázek z předchozího slidu) vynásobená daty pro mocnost ledovcového štítu. Zobrazený výsledek ukazuje množství ledu transportovaného jednotlivými ledovcovými proudy. V Antarktidě vidíme dva hlavní ledovcové proudy v Západní Antarktidě (Pine Island and Thwaites glaciers), v Grónsku je nejvýraznější Jakobshavn Isbrae na západním pobřeží.

Slide 11 (Mechanismy ztráty ledovcové hmoty)

Obrázek ukazuje změny nadmořské výšky povrchu ledovcových štítů (z čehož je vidět, kde přibývá resp. ubývá jejich hmota). Oblasti, pro které jsou vidět nejvýraznější změny jsou ty, zmíněné v předchozím slidu, tzn. Jakobshavn Isbrae na západním pobřeží v Grónsku a ledovcové proudy v oblasti Amundsenova moře v Antarktidě. V těchto oblastech dochází k významnému úbytku hmoty ledovců.

Nejvýraznější oblastí, kde je vidět nárůst nadmořské výšky ledovcového povrchu, tzn. přírůstek hmoty (modré odstíny v obrázku) je oblast v Západní Antarktidě (těsně pod nápisem „WAIS = West Antarctic Ice Sheet“), kde před ca 150 lety přestal téci jeden z ledovcových proudů, které ústí do Rossova ledovcového šelfu (šedá plocha v střední spodní části mapky) a v jeho bývalé akumulaci oblasti se nyní hromadí hmota.

<https://www.cambridge.org/core/journals/annals-of-glaciology/article/kamb-ice-stream-flow-history-and-surge-potential/6E58E7E387E575AA5B17027096F82BC4/core-reader>

Významným faktorem ovlivňujícím, zejména v delším časovém horizontu, ztrátu hmoty ledovcových štítů jsou pozitivní zpětné vazby znásobující výše zmíněné mechanismy ztráty ledovcové hmoty (tzn. povrchové tání a odtok do oceánu).

Přehled současné situace a výhled do budoucna pro jednotlivé ledovcové štíty

Grónsko

Slide 12 (Přehled situace)

V Grónsku se za posledních 25 let oteplilo přibližně o 5 stupňů C. V důsledku toho se zvýšila intenzita povrchového tání a ledovcový štít ztrácí čím dál rychleji svoji hmotu. Pro roky 2012-2016 způsobovala ztráta hmoty nárůst hladiny světového oceánu o přibližně 0.7 mm za rok.

Podíl povrchového tání na ztrátě hmoty narostl mezi lety 2000 a 2012 z 42% na 68%. Nárůst intenzity povrchového tání je způsoben globálním oteplováním, které je ve vysokých zeměpisných šířkách několikanásobně znatelnější než v globálním průměru (globálně se od normálu 1961-1990 oteplilo o něco přes 1 stupeň, u nás v Česku, tzn. ve středních zeměpisných šířkách, přibližně o 2 stupně, a ve vysoké Arktidě o 5 a více stupňů).

Kromě celkového oteplení přispívají k nárůstu intenzity tání také změny atmosférické cirkulace, díky kterým se na nad ledovcový štít častěji dostávají teplé vzduchové masy.

Slide 13

Graf k vysvětlení terminologie (klimatické scénáře pod zkratkou RCP) používané v dalších slidech.

Graf předpokládaného globálního nárůstu teploty podle poslední zprávy mezivládního panelu pro klimatickou změnu IPCC. Jednotlivé klimatické scénáře podle úrovně koncentrací skleníkových plynů „Representative concentration pathways“ – RCP. Zde je dobré podotknout, že scénář RCP2.6 je, co se týče snižování emisí, příliš optimistický a zjevně se jej nepodaří dodržet. Scénář RCP8.5 je často též nazývaný „business as usual“, tzv. pokračující nárůst emisí skleníkových plynů.

Slide 14 (Výhled do budoucna)

Nejoptimističtější klimatický scénář (který už je asi pasé) počítá s úbytkem hmoty Grónského ledovcového štítu a nárůstem hladiny světového oceánu o 2 až 8 cm k roku 2100.

Problémem je, že pouze mírně výše nad nejoptimističtějším klimatickým scénářem se pro Grónsko nachází zlomový bod, po jehož překročení dojde k nezvratné, výrazné redukci Grónského ledovcového štítu v důsledku souhry násobících se zpětných vazeb. Pro Grónsko je nejdůležitější ta mezi táním a snižováním nadmořské výšky povrchu ledovce, která tak bude mít mírnější klima a tání se zintenzivní, čímž bude nadmořská výška povrchu ledovcového štítu dále klesat.

Nejvíce ohrožen je SZ sektor ledovcového štítu.

Grónský ledovcový štít byl výrazně menší během posledního interglaciálu (ca 130 tis. let dozpátku) a roztál téměř celý během jednoho z předcházejících interglaciálů.

Antarktida

Slide 15 (Přehled situace)

- Ztrácí hmotu od poloviny 90. let
 - V průměru 0.15-0.46 mm sle/rok 1992-2017

- 0.49-.073 mm sle/rok 2012-2017

sle = Sea level equivalent, tj. hmota ledu přepočtená na přírstek k úrovni hladiny světového oceánu.

- Kladná povrchová hmotová bilance díky vyšším srážkám
Tzn. nasněží více než roztaje, ale to nepokryje ztráty odtokem ledu do oceánu.
- Výrazný nárůst dynamického odtoku ledu do oceánu
V důsledků čehož je celková hmotová bilance záporná

Na nárůst odtoku ledu do oceánu má vliv úbytek ledovcových šelfů, které „brzdí“ ledovcové proudy – viz Slide 8.

Obrázek ukazuje hmotovou bilanci Antarktidy (rozdělenou na oblasti 1. Antarktického poloostrova, 2. Západní Antarktidy, a 3. Východní Antarktidy) pro jednotlivé roky, pro které máme pozorování (tato studie dává dohromady pozorování různými metodami, viz legenda na vrchu obrázku, a jejich celkový průměr). Svislá osa vpravo uvádí roční hmotové bilance přepočtené na „sle“.

Vidíme:

- mírně negativní hmotové bilance pro Ant. poloostrov posledních ca 20 let, ale objem ledovců v této části je malý, takže celkově nehrají moc roli.
- Výrazně záporné bilance v Záp. Antarktidě. Co se týče celkových čísel, toto je nyní nejdůležitější
- V posledních letech negativní bilance i ve V Antarktidě. V. Antarktida je největší, ale zatím je celkem „v klidu“.

Slide 16 (Přehled situace)

Obrázek pro množství ledu, který už jsme viděli, pro lokalizaci ledovcových proudů v oblasti Amundsenova moře a graf ukazující pozorovaný nárůst průtoku ledu v dvou hlavních ledovcových proudech této oblasti: Pine Island and Thwaites glaciers.

Slide 17 (Výhled do budoucna)

Hlavním rizikem v Antarktidě, kde povrchové tání nehraje větší roli, je tzv. „marine ice sheet instability“ efekt. Ten funguje následovně:

Když se ledovce telí (odlamují) do oceánu, tak telení je tím snazší, čím vyšší je kolmá stěna, z které se ledové bloky (icebergy) odlamují. Pokud podloží ledovce/ledovcového štítu klesá směrem do jeho nitra, tak s ústupem telící stěny vzrůstá její výška – viz obrázek – což vede k pozitivní zpětné vazbě.

Podloží Západoantarktického ledovcového štítu výrazně klesá směrem do jeho centrálních oblastí a je tu tedy značný potenciál pro marine ice sheet instability efekt. Ve spojitosti se zvýšeným průtokem ledu v ledovcových proudech v oblasti Amundsenova moře, mluví někteří kolegové o tom, že marine ice sheet instability efekt již začal a není ho možné zastavit.

Slide 18 (Výhled do budoucna)

Tento slide ukazuje výsledky studie, která používala numerické modelování k simulaci budoucího vývoje v Západní Antarktidě v závislosti na míře oteplení oblasti (výsledky jsou zobrazeny zvlášť pro simulace, při kterých bylo zohledněno pouze oteplení oceánu a simulace, kdy bylo zohledněno jak oteplení oceánu, tak atmosféry). Vidíme, že pokud se zohlední oteplení oceánu i tak atmosféry, tak razantní oteplení vede ke kolapsu větší části Západoantarktického ledovcového štítu v horizontu několika stovek let.

Slide 19 (Výhled do budoucna)

- Ztráta objemu o 0.1-0.2 m sle k roku 2100, podle RCP2.6
- Dlouhodobý příspěvek k nárůstu hladiny světového oceánu závisí na chování jednotlivých plovoucích šelfů a ledovcových proudů (jestli u nich dojde k aktivaci MISI efektu nebo ne)
- Hranice přetrvání plovoucích šelfů okolo 1.5-2 °C nárůstu průměrné roční teploty
- Oteplení o 2-2.7 °C aktivuje větší plovoucí šelfy, jako Ronne-Filchner, vedoucí k výrazně většímu příspěvu k nárůstu hladiny světového oceánu

Kliknutím se zobrazí mapa, na které jde velké ledovcové šelfy ukázat (dvě hlavní tmavě modré oblasti)

Slide 20 (Celkový výhled do budoucna s ohledem na nárůst hladiny světového oceánu)

Tento slide využívá výsledky studie, která s použitím numerického modelování simuluje vývoj hladiny světového oceánu pro 21. století a zohledňuje ledovcové štíty jak v Grónsku, tak v Antarktidě. Simulace jsou dělány pro dva klimatické scénáře RCP4.5 a RCP8.5 (tj. jeden realistický, pokud bude snaha omezit emise skleníkových plynů, a „business as usual“ pokud snaha nebude). Pro zjednodušení se podíváme pouze na pravou stranu, na panely c a d, ve kterých model zohledňuje zpětné vazby vnášené do systému produkcí tavné vody.

Osa x zobrazuje čas a osa y, po levé straně, zobrazuje nárůst hladiny moře v porovnání s rokem 2000 (osa y po levé straně zobrazuje roční nárůsty hladiny moře v mm).

V mírnějším klimatickém scénáři (RCP4.5) způsobuje většinu nárůstu hladiny světového oceánu Grónský ledovcový štít. Ve scénáři RCP8.5 přispívají ledovcové štíty Grónska a Antarktidy podobným dílem. Pro 21. století nejsou scénáře diametrálně odlišné, co se týče nárůstu hladiny světového oceánu, pro mírnější klimatický scénář model předpovídá nárůst hladiny moře o ca 15 cm, pro „business as usual“ ca 25 cm.

Slide 21 (Celkový výhled do budoucna s ohledem na nárůst hladiny světového oceánu)

Nárůst hladiny světového oceánu v důsledku ztráty hmoty ledovcových štítů není po celém světě stejný. Ledovcové štíty k sobě svojí hmotností působením gravitačních sil přitahují vody světového oceánu. Pokud jejich hmota ubude, gravitační působení se zmenší a dojde ke změnám hladiny moře, nejvíce v oblasti poblíž ledovcového štítu – hladina moře zde poklesne – viz obrázek panel c, který zobrazuje pohled na Antarktidu v polární projekci. Použité měřítko zobrazuje minimální změny hladiny moře k roku 2100 v tmavě modré a podstatnější změny ve světlejších odstínech přecházejících do šedé.

Změny hladiny moře, které jsou, jak jsme ukázali, způsobené nejen uvolněním hmoty z ledovcových štítů do oceánu, ale i změnou gravitačního působení ledovcových štítů na vody oceánu, jsou dále komplikované změnami teploty mořské vody. Tento vliv zobrazuje panel d, který ve stejné polární projekci pro Antarktidu zobrazuje změny hladiny moře po započtení jak gravitačních sil, tak změn teploty vody.

Kliknout pro změnu obrázku

Panely d a h nyní zobrazují to samé co předchozí polární projekce pro region Antarktidy, tzn. změny hladiny moře (k roku 2100) působením změny gravitačních sil (panel d) a se započtením vlivu změn teploty mořské vody (panel h). Vidíme, že k nejvýraznějšímu nárůstu hladiny moře dochází v nízkých

zeměpisných šířkách, které jsou nejvíce vzdálené ledovcových štítům. Ve vyšších zeměpisných šířkách, které jsou blíže ledovcových štítům, je nárůst hladiny moře mírnější.

Slide 22 (Celkový výhled do budoucna s ohledem na nárůst hladiny světového oceánu)

Zatímco pro 21. století predikují modely i při klimatické scénáři „business as usual“ (RCP8.5) nárůsty hladiny moře v prvních desítkách cm (přičemž už to je pro obydlené oblasti při pobřeží zásadní problém), v delším časovém horizontu bude nárůst hladiny moře mnohem výraznější. Obrázek ukazuje nárůst hladiny světového oceánu v závislosti na hodnotách globálního oteplení (opět se jedná o výsledky numerického modelu). Na ose x jsou hodnoty globálního oteplení, na ose y pak výsledný nárůst hladiny oceánu. Časové měřítko je zobrazené barevnými křivkami. Pro časové horizonty stovek a zejména pak tisíců let vidíme nárůsty hladiny oceánu v řádu metrů i pro hodnoty oteplení okolo dvou stupňů, což je v současnosti asi nejvíce ambiciózní klimatický scénář. V delším časovém měřítku bude tedy nárůst hladiny oceánu pro lidstvo zásadní problém.

Uvedené čísla jak v tomto, tak v předchozích slidech, jsou výsledky komplexních numerických modelů. Tyto předpovědi jsou zatíženy poměrně značnou nejistotou.

Abychom tuto nejistotu snížili, potřebujeme lépe porozumět zejména:

- Oceánickému proudění v Antarktidě
 - Ovlivňuje přístup teplé vody k plovoucím ledovcovým šelfům a může tedy zapříčinit jejich rozpad. V místech, kde je v kontaktu přímo s telíci se čely ledovcových proudů pak má teplota vody zásadní vliv na rychlost tání.
 - Oceánické proudění tedy ovlivňuje rychlost toku ledu do oceánu, což je hlavní mechanismus ztráty hmoty v Antarktidě
- Atmosférické cirkulaci v Grónsku
 - Atmosférická cirkulace má vliv na přísun teplých vzduchových mas nad Grónský ledovcový štít. Je tak zásadním faktorem ovlivňujícím intenzitu povrchového tání.

Seznam zdrojů grafického materiálu a informací použitých v prezentaci

- Bamber, J.L., Westaway, R.M., Marzeion, B. and Wouters, B. (2018): The land ice contribution to sea level during the satellite era. *Environmental Research Letters* 13, 063008.
- Carlson, A.E., Clark, P.U. (2012): Ice sheet sources of sea level rise and freshwater discharge during the last deglaciation. *Reviews of Geophysics* 50.
- Clark, P.U., Mix, A.C. (2002): Ice sheets and sea level of the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews* 21, 1-7.
- Fretwell, P., Pritchard, H.D., Vaughan, D.G., Bamber, J.L., Barrand, N.E., Bell, R., Bianchi, C., Bingham, R.G., Blankenship, D.D., Casassa, G., Catania, G. et al. (2013): Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *The Cryosphere* 7, 375-393.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 pp.
- Golledge, N.R., Keller, E.D., Gomez, N., Naughten, K.A., Bernales, J., Trusel, L.D., Edwards, T.L. (2019): Global environmental consequences of twenty-first-century ice-sheet melt. *Nature* 566, 65-72.
- Margold, M., Stokes, C.R., Clark, C.D. (2015): Ice streams in the Laurentide Ice Sheet: Identification, characteristics and comparison to modern ice sheets. *Earth-Science Reviews* 143, 117-146.
- Margold, M., Stokes, C.R., Clark, C.D. (2018): Reconciling records of ice streaming and ice margin retreat to produce a palaeogeographic reconstruction of the deglaciation of the Laurentide Ice Sheet. *Quaternary Science Reviews* 189, 1-30.
- Morlighem, M., Williams, C.N., Rignot, E., An, L., Arndt, J.E., Bamber, J.L., Catania, G., Chauché, N., Dowdeswell, J.A., Dorschel, B. and Fenty, I. (2017): BedMachine v3: Complete bed topography and ocean bathymetry mapping of Greenland from multibeam echo sounding combined with mass conservation. *Geophysical Research Letters* 44, 11-051.
- Pattyn, F., Ritz, C., Hanna, E., Asay-Davis, X., DeConto, R., Durand, G., Favier, L., Fettweis, X., Goelzer, H., Golledge, N.R., Munneke, P.K. (2018): The Greenland and Antarctic ice sheets under 1.5 C global warming. *Nature Climate Change* 8), 1053-1061.
- Picard, G., Fily, M. (2006): Surface melting observations in Antarctica by microwave radiometers: Correcting 26-year time series from changes in acquisition hours. *Remote Sensing of Environment* 104, 325-336.
- Picard, G., Fily, M., Gallée, H. (2007): Surface melting derived from microwave radiometers: a climatic indicator in Antarctica. *Annals of Glaciology* 46, 29-34.
- National Snow and Ice Data Center (<https://nsidc.org/greenland-today/>)
- Scambos, T.A., Bell, R.E., Alley, R.B., Anandakrishnan, S., Bromwich, D.H., Brunt, K., Christianson, K., Creyts, T., Das, S.B., DeConto, R., Dutrieux, P. (2017): How much, how fast?: A science review and outlook for research on the instability of Antarctica's Thwaites Glacier in the 21st century. *Global and Planetary Change* 153, 16-34.
- Shepherd, A., Ivins, E., Rignot, E., Smith, B., Van Den Broeke, M., Velicogna, I., Whitehouse, P., Briggs, K., Joughin, I., Krinner, G., Nowicki, S. (2018): Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature* 558, 219-222.
- Stokes, C.R., Margold, M., Clark, C.D., Tarasov, L. (2016): Ice stream activity scaled to ice sheet volume during Laurentide Ice Sheet deglaciation. *Nature* 530, 322-326.

Vaughan, D.G., J.C. Comiso, I. Allison, J. Carrasco, G. Kaser, R. Kwok, P. Mote, T. Murray, F. Paul, J. Ren, E. Rignot, O. Solomina, K. Steffen and T. Zhang (2013): Observations: Cryosphere. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.