

## Om gletsjerne i Ice Frontiers

De udvalgte gletsjere i Ice Frontiers er blandt de mest dynamiske marine udløbsgletsjere, som udspringer fra Indlandsisen, og de har derfor en stor indflydelse på den samlede massebalance. Deres spredte geografiske placering bidrager med en rumlig forståelse for de forskellige miljøer der findes langs Indlandsisen, hvilket belyser Indlandsisens kompleksitet, da de faktorer som styrer gletsjerne er vidt forskellige.

Petermann Gletsjer og Storstrømmen Gletsjer er de nordligste af gletsjerne i Ice Frontiers og ligger beskyttet af havis det meste af året. Kangerlussuaq Gletsjer og Helheim Gletsjer ligger i den øst-sydøstlige del af Grønland, som er påvirket af Irminger Strømmen, en varm havstrøm fra den Nordatlantiske Strøm, som er Golfstrømmens nordlige forlængelse. De to sidste gletsjere, Sermeq Kujalleq og Upernavik Isstrøm, ligger på vestkysten op mod den nordvestlige del af Grønland. Alle seks gletsjere har det tilfælles, at deres udløbsområder ligger under havniveau (Morlighem, Rignot, Mougnot, Seroussi, & Larour, 2014).

Omkring årtusindskiftet blev der mange steder observeret massetab og acceleration fra Indlandsisens udløbsgletsjere. Det samme gjorde sig gældende for mange af de gletsjere, som er med i Ice Frontiers. Sermeq Kujalleq, Helheim Gletsjer og Kangerlussuaq Gletsjer, som er nogle af Indlandsisens største marine udløbsgletsjere, accelererede stort set samtidigt og mistede både masse fra smeltning på overfladen og i form af kælvinger ved fronten (Luckman, Murray, de Lange, & Hanna, 2006). Upernavik Isstrøm var egentligt den første af de seks gletsjere, som oplevede et massetab, hvor gletsjerfronten trak sig tilbage. Dette skete mellem 1985-1993 og så senere igen mellem 2005-2010, hvor isstrømmen viste et markant tegn på massetab (Khan et al., 2013; Kjær et al., 2012).

I perioden 2000-2012 udgjorde gletsjerkælvinger fra Kangerlussuaq Gletsjer, Helheim Gletsjer, Petermann Gletsjer og Sermeq Kujalleq 42 % af det samlede kælvingstab fra Indlandsisen, hvilket er meget set i forhold til de hundredevis af gletsjere, som udspringer fra Indlandsisen. Hvis man derudover ser på hvilke områder der oplever flest gletsjerkælvinger, er det den nordvestlige og sydøstlige del, som tilsammen udgør 80 % af alle kælvinger (Enderlin et al., 2014).

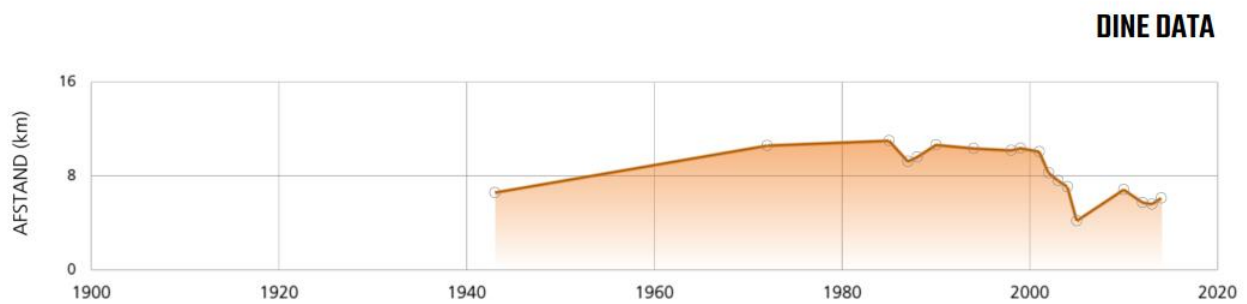
## Helheim Gletsjer



Helheim Gletsjer ligger i Sydøstgrønland og er den sydligste gletsjer, der er med i Ice Frontiers. Den har udløb i Sermilik Fjord, som er 90 km lang og med en bredde der varierer 5-12 km og en dybde på ned til 920 m. Helheim Gletsjer er blandt indlandsisens fem største marine udløbsgletsjere. Den deler opland med Kangerlussuaq Gletsjer, som også er med i Ice Frontiers, og ligger 400 km længere mod nord. Deres samlede massetab udgør over halvdelen af det totale massetab i Sydøstgrønland (Khan et al., 2007).

Siden 1933 har der været observeret gletsjerfrontsbevægelser på op til 8 km. Fra 1933-1972 rykkede gletsjerfronten sig stødt frem, hvorefter der fulgte 20 år med en masse udsving på op til 4 km. I slutningen af 1990'erne begyndte der pludselig at ske store kælvninger, som fik gletsjerfronten til at trække sig markant tilbage. Samtidigt blev gletsjerhastigheden øget, hvilket bidrog til at gletsjerfronten blev væsentligt tyndere og dermed mere ustabil (Andresen et al., 2011). I perioden 2001-2005 steg kælvningerne til 65 % og i 2006 nåede kulminerede det med et massetab på 12 Gt/år (Howat et al., 2011). Efterfølgende vendte massebalancen og kælvningsraten tilbage til et stadie man så i 2000. Gletsjerhastigheden var forsat høj, og indtil 2011 rykkede gletsjerfronten sig stødt frem, selvom der stadig forekom kælvninger. Dataindsamlinger fra satellitmålinger har vist, at selvom der skete et forhøjet massetab fra gletsjerfronten i perioden 2000-2010, blev der længere inde på gletsjeren målt en markant massetilførsel grundet forhøjet nedbør i form af sne (Khan, Kjeldsen, et al., 2014).

Baseret på forskning af Helheim Gletsjer de sidste årtier, har det vist sig, at kælvninger næsten synkront følger ændringer i de lokale sommertemperaturer og havtemperaturer i Atlanterhavet. Kælvningsraten øges når havtemperaturerne stiger, og når eksporten af polarvandet er lavt (Andresen et al., 2011). Forhøjede sommertemperaturer kan også udløse store kælvninger, mens kolde perioder får gletsjerfronten til at rykke sig frem. Dette viser, at Helheim Gletsjer er yderst følsom over for temperaturudsving, da det samme skete i 1930'ernes varmeperiode.



*Eksempel på data fra en elevs opmåling af Helheim Gletsjer i Ice Frontiers.*

## Sermeq Kujalleq

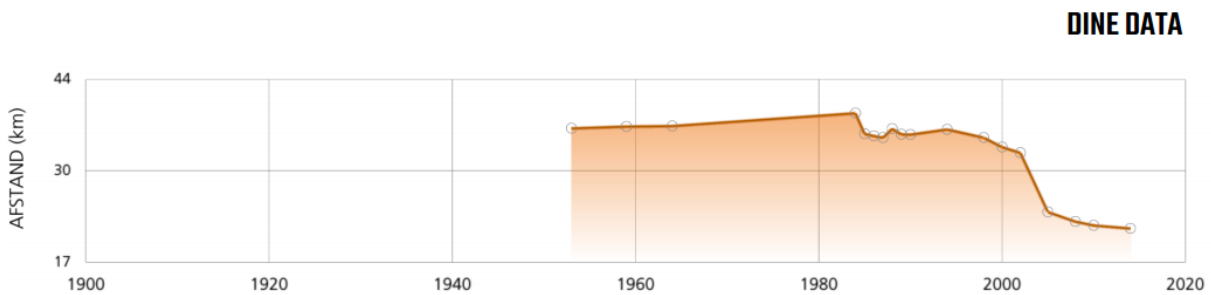


På Grønlands vestkyst finder man Sermeq Kujalleq (på dansk kendt som Jakobshavns Isbræ), der har udløb i Disko Bugten. Den er verdens hurtigste gletsjer med hastigheder på op til 50 m om dagen og dens opland udgør ca. 7 % af indlandsisen svarende til ca. 110.000 km<sup>2</sup>. Selve gletsjeren og området omkring er spektakulært, hvilket gjorde at den i juni 2004 blev en del af UNESCOs verdensarvsliste. Hvert år udleder den mellem 35-50 km<sup>3</sup> is, som svarer til mere end 10 % af den totale produktion af isbjerger fra indlandsisen. Siden 1850 har gletsjerfronten rykket sig omkring 35 km tilbage, men det var først i 1998 det markante massetab af fronten begyndte (Weidick & Bennike, 2007). I perioden 2000-2010 havde gletsjeren mistet 321±12 Gt, hvor 2/3 skete før 2005

(Howat et al., 2011). Hastigheden på Sermeq Kujalleq gik fra 5,7 km/år i 1992 til 12,6 km/år i 2003 (Joughin, Abdalati, & Fahnestock, 2004). I 2012 var hastigheden stort set tredoblet, hvilket gjorde det til den hurtigst flydende gletsjer i både Grønland og Antarktisk (Joughin, Smith, Shean, & Floricioiu, 2014).

Årsagerne til den hurtige retræte menes dels at være de dybe varme havstrømme og dels en svækkelse af is-melangen. Is-melangen er den matrix af afbrækket is der ligger som en massiv barriere foran gletsjeren, og som kan have en beskyttende effekt på gletsjerfronten. Sermeq Kujalleq er nået til et trug i fjorden på omkring 1300 m, hvor gletsjerfronten ikke længere er landfast,

hvilket tillader dybe varme havstrømme ( $<4^{\circ}\text{C}$ ) at nå dybt ind under isen. Det giver smeltning af gletsjeren nedefra, hvormed gletsjerfronten fortyndes og bliver ustabil (Joughin et al., 2014). Laserskanninger med fly har hjulpet forskere med at kortlægge bunden af fjorden under isen. Her fremgår det, at truget har en længde på 50 km, så det vil vare noget tid, før gletsjerfronten igen bliver landfast og derved kan stabiliseres (Morlighem et al., 2014).



Eksempel på data fra en elevs opmåling af Sermeq Kujalleq i Ice Frontiers.

## Petermann Gletsjer

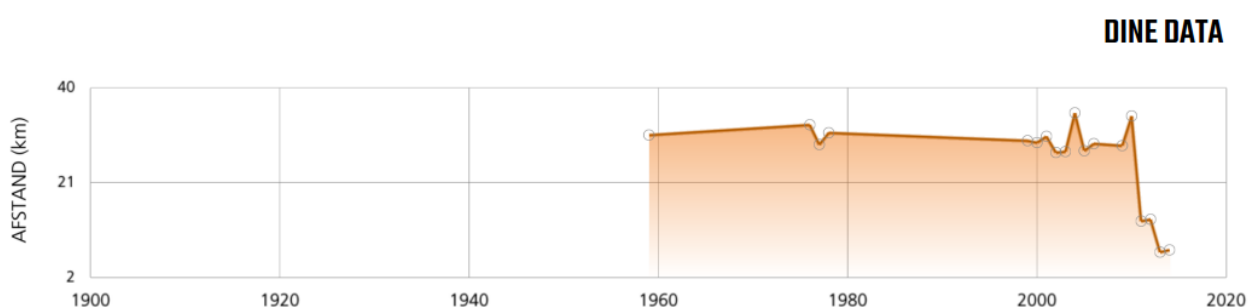


Petermann Gletsjeren er en af de mest bemærkelsesværdige gletsjere i Nordgrønland med et opland, som udgør  $\sim 4\%$  af Indlandsisen. I forhold til mange af de andre gletsjere i Grønland, har Petermann Gletsjer en positiv overflademassebalance, dvs. der årligt bliver tilført masse til isen i form af sne, og tilmed har den en stabil kælvningsrate (Khan, Kjær, et al., 2014). Det største massetab fra denne gletsjer er usynlig for det blotte øje, da det forekommer under isen. Petermann Gletsjer ligger for enden af en 750 km lang og 800 m dyb dal, som strækker sig helt ind til det inderste af indlandsisen. Denne dal menes at stabilisere indlandsisen, da den fjerner vand fra bunden, som mindsker isens bevægelser. Smeltevandet løber langs undersiden af

Petermann Gletsjer og smelter langsomt gletsjertungen nedefra (Bamber, Siegert, Griggs, Marshall, & Spada, 2013). Optil 80 % af massetabet fra denne gletsjer bliver således ført bort på denne måde. Gletsjeren er altså ikke domineret af overfladesmeltning og kælvninger, som størstedelen af de andre marine udløbsgletsjere langs indlandsisens kanter. Sammenlignet med Sermeq Kujalleq er

overfladesmeltningen fire gange mindre på Petermann Gletsjer (Motyka et al., 2011). Smeltningen af gletsjeren nedefra er 20 gange større end dens overfladesmeltning og 18 gange større end kælvningsabet. Faconen på Petermann Gletsjer er derfor bemærkelsesværdig, men det ses ikke på overfladen. Laver man et tværsnit, vil man se en 80 km lang tynd istunge, som strækker sig ud fra hvor gletsjeren er landfast, hvilket gør den til den længste flydende gletsjer på den nordlige halvkugle (Rignot & Steffen, 2008).

Sommeren bidrager til en øget hastighed dels på grund af manglende havis og dels smeltevand som smører gletsjersålen, men den gennemsnitlige hastighed ligger på ca. 1 km/år (Nick et al., 2012). På intervaller af 5-10 år eller mere løsriver store isflager sig fra fronten. I 2010 tiltrak Petermann Gletsjeren derved folks opmærksomhed, da et stykke på 200 km<sup>2</sup>, svarende til 25 % af gletsjertungen, løsrev sig og flød ned langs østkysten af Nordamerika (Falkner et al., 2011). I 2012 skete der en ny kælvning, men denne gang var den kun på 120 km<sup>2</sup>. Disse to kælvnings reducerede tungenes længde fra 81 km til 46 km, som var dens største tilbagetrækning siden 1876 (Münchow, Padman, & Fricker, 2014). Forskere begyndte derfor at observere Petermann Gletsjer mere nøje, fordi yderligere retræte ville give havstrømme indpas langt inde under isen, da gletsjersålen ligger langt under havniveau. Men der skete ingenting, hverken øgning i massetab eller gletsjerhastighed, hvilket fik forskere til at konkludere, at det var en del af en naturlig cyklus (Nick et al., 2012).



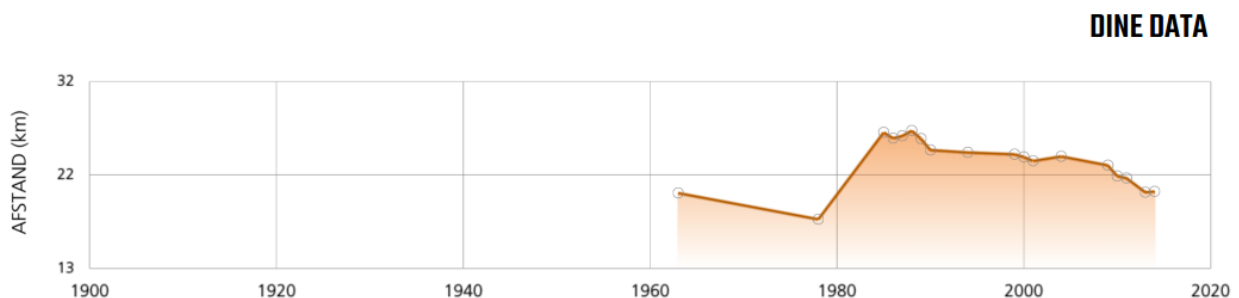
*Eksempel på data fra en elevs opmåling af Petermann Gletsjer i Ice Frontiers.*

## Storstrømmen Gletsjer



Storstrømmen Gletsjer er en stor marin udløbsgletsjer, der udmunder i Borgfjorden ved Dove Bugt i Nordøstgrønland. Gletsjeren er 15-25 km bred og op til 60 km lang. Storstrømmen Gletsjer er en galoperende gletsjer (surge glacier), hvilket gør den ret speciel. Der kan gå flere år hvor gletsjerfronten stort set ikke rykker sig og hvor gletsjeren bare opbygger masse, hvorefter den pludselig går i udbrud og galoperer af sted. Den havde udbrud i slut-1970'erne – start-1980'erne. Udbruddene på galopperende gletsjere er et cyklisk fænomen, som ikke umiddelbart er udløst af afsmeltning, men af sneopbygning og ustabilitet ved gletsjersålen. Her vil der ske en ophobning af smeltevand, som kan blive dannet enten via overfladesmeltning eller ved at gletsjerens vægt har

nået tryk/smeltepunktet. Inden et udbrud vil gletsjerfronten blive tyndere og hastigheden vil stagnere, mens gletsjeren længere inde vil have mere masse end normalt (Reeh, Bøggild, & Oerter, 1994).



*Eksempel på data fra en elevs opmåling af Storstrømmen Gletsjer i Ice Frontiers.*

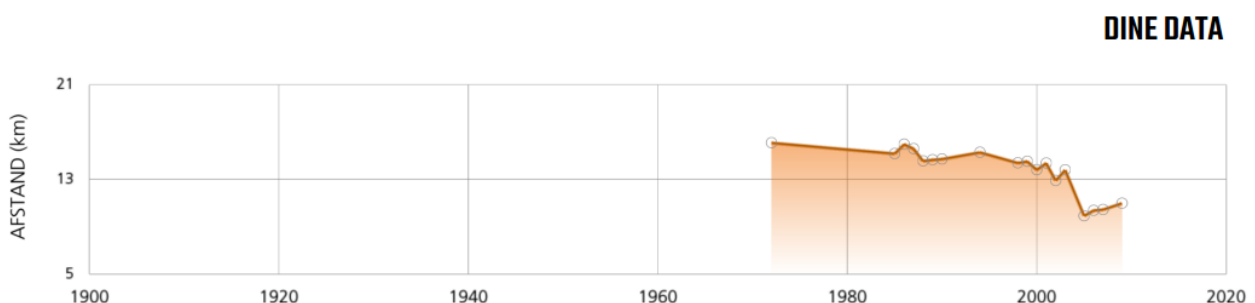
## Kangerlussuaq Gletsjer



Kangerlussuaq Gletsjer flyder ud i Kangerlussuaq Fjord, som udmunder i Danmarksstrædet på østkysten. Navnet Kangerlussuaq skal ikke forveksles med den, for de fleste mere kendte, by, fjord og lufthavn i Vestgrønland. Det er den største gletsjer i Østgrønland og én af de hurtigste gletsjere, der udspringer fra indlandsisen, samt den anden største i forhold til kælvningsevents (Enderlin et al., 2014). Fra 2000-2005 trak Kangerlussuaq Gletsjer sig markant tilbage og samtidig steg gletsjerens hastighed bemærkelsesværdigt frem til 2005. I 2010 begyndte gletsjeren at accelerere på ny.

Fra 2000-2011 havde Kangerlussuaq Gletsjer oplevet et massetab på  $152 \pm 10$  Gt, hvor den største andel blev udledt i perioden 2004 til 2008 (Howat et al., 2011). Selvom gletsjerfronten i denne periode ikke rykkede sig bemærkelsesværdigt, skete der alligevel et stort massetab af gletsjeren efter 2005. Denne gang var det dog på grund af en stigning i overfladesmeltingen.

Både Kangerlussuaq Gletsjer og Helheim Gletsjer viser tydelige tegn på at være følsomme over for de klimaændringer, der er observeret i deres region. Den markante acceleration, som skete for begge gletsjere i starten af det 21. århundrede, menes at være udløst af varmere temperaturer i både atmosfæren og havet (Khan, Kjeldsen, et al., 2014). Den pludselige øgning i kælvninger kan være udløst af det markante massetab fra overfladen, som leder smeltevand til gletsjersålen og får isen til at flyde hurtigere over underlaget. Det samme tænkes at være sandsynligt for Sermeq Kujalleq (Luckman et al., 2006).



Eksempel på data fra en elevs opmåling af Kangerlussuaq Gletsjer i Ice Frontiers.

## Upernavik Isstrøm



Upernavik Isstrøm ligger i den nordvestlige del af Grønland, omkring 300 km nord for Disko Bugten. I denne region er indlandsisen næsten i direkte kontakt med havet, da der ikke er meget isfrit land.

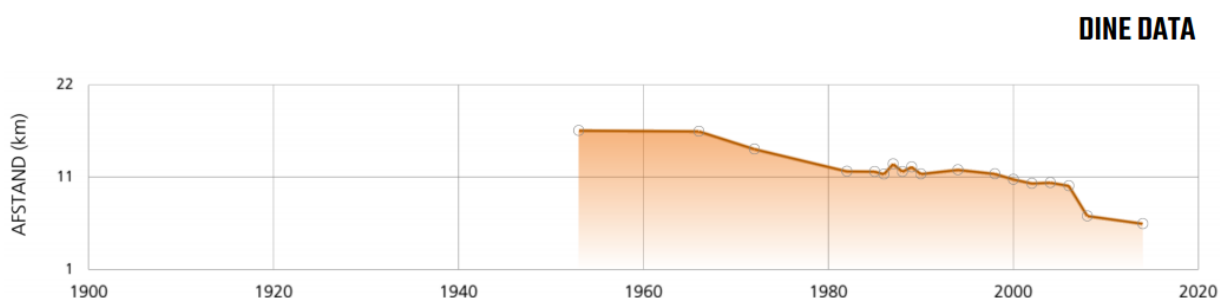
Den 40 km brede isstrøm, som er bestående af fire marine udløbsgletsjere, udmunder i Upernavik Fjord, som er omkring 80 km lang og over 900 m dyb. Tidligere delte gletsjerne samme isfront, men isstrømmens retræte og den underliggende topografi har med tiden skilt dem fra hinanden. Hver gang gletsjerne har rykket sig tilbage er der blevet målt en øget hastighed, hvor gletsjerfronterne er blevet tyndere.

Ved hjælp af flybilleder er der yderligere fundet beviser på, at der siden 1930'erne har været tre større events, hvor gletsjerfronterne trak sig tilbage. Først fra 1931-1946, derefter fra 1985-1993 og igen fra 2005-2010 (Kjær et al., 2012). Fra 1985-2010 er der estimeret et massetab på omkring 92 Gt, hvor ca. 79 % skyldes tab af ismassen forårsaget af kælvning (Khan et al., 2013).

Umiddelbart burde de have samme bevægelsesgrundlag, da de bliver påvirket af samme klimatiske faktorer, men sådan forholder det sig ikke. Hemmeligheden ligger gemt dybt nede i fjorden, hvilket forskere blev opmærksomme på i 2014. Fjordens bund er nemlig ret ujævn, hvilket medfører at gletsjerfronterne hviler på forskellige dybder mellem 600-800 m. Det kan delvist forklare deres bevægelsesmønster, da det giver forskellige hydrografiske påvirkninger ved gletsjersålens tærskel. Under deres målinger fandt forskerne nemlig frem til, at der var en laginddeling i fjordvandet som udgjorde tre niveauer. De første 50 m af overfladevandet i fjorden bestod af fortyndet saltvand på 2°C og under dette lag, ned til 150 m, var der lidt køligere polarvand på 0,5 – 1,5°C. Nederst var vandet varmere og mere saltholdigt på grund af dybhavsstrømme på temperaturer fra 1 – 3°C. Derfor spiller topografien under gletsjerne en vigtig faktor. Er der meget dybt ved gletsjerfronten, kan det lede til stor og hurtig tilbagetrækning, hvorimod der er større sandsynlighed for at gletsjeren stabiliseres på lavere vand. De tre nordligste gletsjere i Upernavik Isstrøm har dybder på 400-700 m, hvorimod den sydligste gletsjer kun når ned til 100 m. Det vil sige, at det på nuværende tidspunkt kun er gletsjer 1-3, som er i kontakt med de varme dybhavsstrømme. Det kan være en af grundene



til at Upernavik Isstrøm reagerer asynkront til klimaændringer (Andresen, Kjeldsen, Harden, Nørgaard-Pedersen, & Kjær, 2014).



Eksempel på data fra en elevs opmåling af Upernavik Isstrøm i Ice Frontiers.

”Om gletsjerne i Ice Frontiers” er skrevet af Lisbeth Rykov, cand.scient. i Geografi og Geoinformatik fra Københavns Universitet, med udgangspunkt i specialet ”Ice Frontiers - A didactical method to convey scientific research of the Greenland Ice Sheet to Earth Science in Danish high schools” 2015.

## Litteraturliste

- Andresen, C. S., Kjeldsen, K. K., Harden, B., Nørgaard-Pedersen, N., & Kjær, K. H. (2014). Outlet glacier dynamics and bathymetry at Upernavik Isstrøm and Upernavik Isfjord, North-West Greenland. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 31, 79–82.
- Andresen, C. S., Straneo, F., Ribergaard, M. H., Bjørk, A. A., Andersen, T. J., Kuijpers, A., ... Ahlstrøm, A. P. (2011). Rapid response of Helheim Glacier in Greenland to climate variability over the past century. *Nature Geoscience*, 5(June), 37–41. <http://doi.org/10.1038/ngeo1349>
- Bamber, J. L., Siegert, M. J., Griggs, J. a, Marshall, S. J., & Spada, G. (2013). Paleofluvial mega-canyon beneath the central Greenland ice sheet. *Science (New York, N.Y.)*, 341(6149), 997–9. <http://doi.org/10.1126/science.1239794>
- Enderlin, E. M., Howat, I. M., Jeong, S., Noh, M. J., Van Angelen, J. H., & Van Den Broeke, M. R. (2014). An improved mass budget for the Greenland ice sheet. *Geophysical Research Letters*, 41(3), 866–872. <http://doi.org/10.1002/2013GL059010>
- Falkner, K. K., Melling, H., Münchow, A. M., Box, J. E., Wohlleben, T., Johnson, H. L., ... Higgins, A. K. (2011). Context for the Recent Massive Petermann Glacier Calving Event. *EOS*, 92(14), 117–124.
- Howat, I. M., Ahn, Y., Joughin, I., Van Den Broeke, M. R., Lenaerts, J. T. M., & Smith, B. (2011). Mass balance of Greenland’s three largest outlet glaciers, 2000–2010. *Geophysical Research Letters*, 38(12), 1–5. <http://doi.org/10.1029/2011GL047565>
- Joughin, I., Smith, B. E., Shean, D. E., & Floricioiu, D. (2014). Brief communication: Further summer speedup of jakobshavn isbræ. *Cryosphere*, 8(1), 209–214. <http://doi.org/10.5194/tc-8-209-2014>
- Joughin, I., Abdalati, W., & Fahnestock, M. (2004). Large fluctuations in speed on Greenland’s Jakobshavn Isbrae glacier. *Nature*, 432(December), 608–610.

<http://doi.org/10.1038/nature03130>

- Khan, S. A., Kjeldsen, K. K., Kjær, K. H., Bevan, S., Luckman, A., Aschwanden, A., ... Fitzner, A. (2014). Glacier dynamics at Helheim and Kangerdlugssuaq glaciers, southeast Greenland, since the Little Ice Age. *The Cryosphere*, 8(4), 1497–1507. <http://doi.org/10.5194/tc-8-1497-2014>
- Khan, S. A., Kjær, K. H., Bevis, M., Bamber, J. L., Wahr, J., Kjeldsen, K. K., ... Muresan, I. S. (2014). Sustained mass loss of the northeast Greenland ice sheet triggered by regional warming. *Nature Climate Change*, 4(4), 292–299. <http://doi.org/10.1038/nclimate2161>
- Khan, S. A., Kjær, K. H., Korsgaard, N. J., Wahr, J., Joughin, I. R., Timm, L. H., ... Babonis, G. (2013). Recurring dynamically induced thinning during 1985 to 2010 on Upernavik Isstrøm, West Greenland. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118, 111–121. <http://doi.org/10.1029/2012JF002481>
- Khan, S. A., Wahr, J., Stearns, L. a., Hamilton, G. S., van Dam, T., Larson, K. M., & Francis, O. (2007). Elastic uplift in southeast Greenland due to rapid ice mass loss. *Geophysical Research Letters*, 34(21). <http://doi.org/10.1029/2007GL031468>
- Kjær, K. H., Khan, S. A., Korsgaard, N. J., Wahr, J., Bamber, J. L., Hurkmans, R., ... Willerslev, E. (2012). Aerial Photographs Reveal Late-20th-Century Dynamic Ice Loss in Northwestern Greenland. *Science*, 337(6094), 569–573. <http://doi.org/10.1126/science.1220614>
- Luckman, A., Murray, T., de Lange, R., & Hanna, E. (2006). Rapid and synchronous ice-dynamic changes in East Greenland. *Geophysical Research Letters*, 33(3). <http://doi.org/10.1029/2005GL025428>
- Morlighem, M., Rignot, E., Mouginot, J., Seroussi, H., & Larour, E. (2014). Deeply incised submarine glacial valleys beneath the Greenland ice sheet. *Nature Geoscience*, 7(April), 418–422. <http://doi.org/10.1038/ngeo2167>
- Motyka, R. J., Truffer, M., Fahnestock, M., Mortensen, J., Rysgaard, S., & Howat, I. (2011). Submarine melting of the 1985 Jakobshavn Isbræ floating tongue and the triggering of the current retreat. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(1), 1–17. <http://doi.org/10.1029/2009JF001632>
- Münchow, A., Padman, L., & Fricker, H. a. (2014). Interannual changes of the floating ice shelf of Petermann Gletscher, North Greenland, from 2000 to 2012. *Journal of Glaciology*, 60(221), 489–499. <http://doi.org/10.3189/2014JoG13J135>
- Nick, F. M., Luckman, A., Vieli, A., Van Der Veen, C. J., Van As, D., Van De Wal, R. S. W., ... Floricioiu, D. (2012). The response of Petermann Glacier, Greenland, to large calving events, and its future stability in the context of atmospheric and oceanic warming. *Journal of Glaciology*, 58, 229–239. <http://doi.org/10.3189/2012JoG11J242>
- Reeh, N., Bøggild, C. E., & Oerter, H. (1994). Surge of Storstrømmen, a large outlet glacier from the Inland Ice of North-East Greenland, (August 1989).
- Rignot, E., & Steffen, K. (2008). Channelized bottom melting and stability of floating ice shelves. *Geophysical Research Letters*, 35. <http://doi.org/10.1029/2007GL031765>
- Weidick, A., & Bennike, O. (2007). Quaternary glaciation history and glaciology of Jakobshavn Isbræ and the Disko Bugt region , West Greenland : a review. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*.