

TEMA: Jordens store iskapper

Jordens store iskapper i en varmere verden

En af de største usikkerheder om fremtidens klima er, hvordan iskapperne på Grønland og Antarktis vil reagere på den globale opvarmning. Øget smeltning og kalvning af isbjerge kan føre til stigende vandstand i verdenshavene.

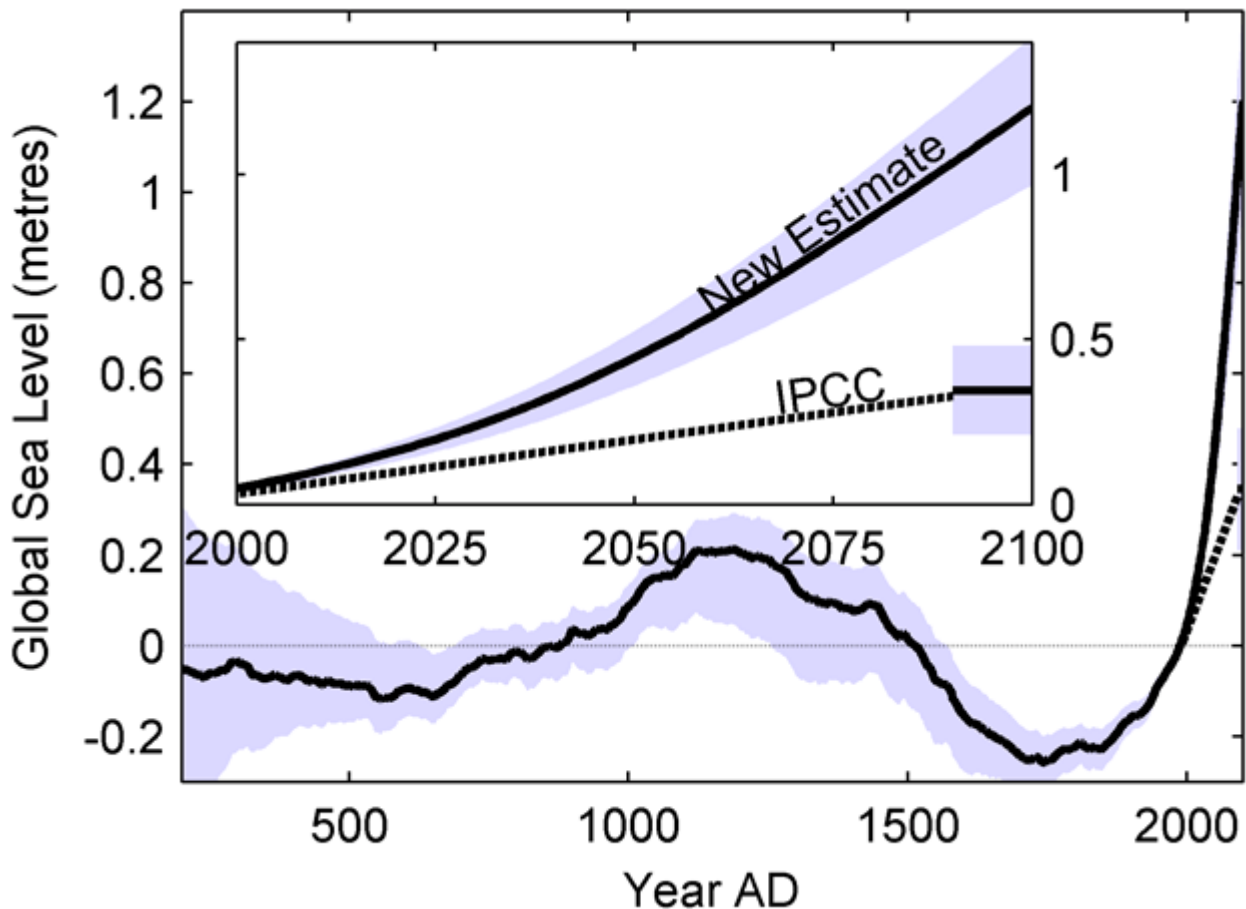
I sidste århundrede steg vandstanden i verdenshavene med 17 centimeter, og vandstanden stiger nu med tre millimeter om året. Millioner af mennesker, der lever ved kysterne, vil få ændret deres livsvilkår radikalt, hvis den globale opvarmning medfører store havvandsstigninger.

I 2007 forudsagde FN's klimapanel, IPCC, at vandstanden i oceanerne vil stige med mellem 18 og 59 centimeter i løbet af århundredet; primært fordi opvarmning af havvandet øger dets volumen. Men panelet erkendte åbent, at det var vanskeligt at forudsige, om smeltning af iskapperne på Grønland og Antarktis vil få havene til at stige yderligere. Dataindsamlingen til IPCC's rapport sluttede i 2004, og på det tidspunkt manglede panelet både gode måledata og modeller, som kunne forudsige, hvordan de store iskapper vil reagere på den globale opvarmning.



Smeltevandssøer på indlandsisen taget fra flyvinduet. Foto Lars Andersen.

Siden har satellitmålinger vist, at iskapperne er på skrupp både i nord og syd. På Grønland svinder indlandsisen ind med mindst 150 milliarder tons om året, hvilket svarer til en vandstandsstigning på 0,35 millimeter, mens det årlige massetab fra iskapperne på Antarktis er på 200 milliarder tons svarende til en vandstandsstigning på 0,4 millimeter. På den baggrund mener mange klimaforskere i dag, at massetabet fra de store iskapper vil få verdenshavene til at stige mere, end IPCC forudsagde i 2007.



Flere nyere modelberegninger peger på globale vandstandsstigninger på omkring 1 meter i år 2100, men der er stadig betydelig usikkerhed om fremtidens havniveau. Den indrammede kurve viser forudsigelserne fra IPCC samt fra nye modelberegninger. Den nederste kurve viser klimaets udvikling gennem de seneste 2000 år samt den forudsagte udvikling frem til år 2100. Grafik udlånt fra <http://www.glaciology.net/Home/PDFs/Announcements/gslprojection/pr-1>, Grinsted et al. 2009.

DMI sætter fokus på indlandsisen

Der er flere grunde til, at det er svært at forudsige iskappernes skæbne i det globale drivhus. Først og fremmest mangler der lange måleserier over den hidtidige udvikling, og det er et problem, fordi iskapperne reagerer langsomt på klimaændringer over århundreder og årtusinder. De sparsomme historiske data gør det svært at modellere iskappernes fremtidige udvikling.

Samtidig står klimaforskerne over for andre store udfordringer. De globale klimamodeller er nemlig slet ikke fintmaskede nok til f.eks. at kunne forudsige, om en udløbsgletscher vil accelerere. Det første krav er derfor udvikling af højtopløste regionale klimamodeller. Den næste udfordring er at udvikle iskappemodeller, som kan give et realistisk bud på, hvordan samspillet mellem nedbør, smeltning og kælving af isbjerge vil påvirke iskapperne i en varmere verden.

DMI sætter nu øget fokus på indlandsisen på Grønland.

"Vi arbejder på at forene højtopløste regionale klimamodeller med dynamiske iskappemodeller. Det første mål er at reproducere indlandsisens hidtidige udvikling. Det næste mål at forudsige iskappens fremtidige skæbne", siger glaciolog Guðfinna Aðalgeirsdóttir fra DMI.

Indlandsisen på Grønland



Grønlands indbyggere bor – så at sige – på randen af istiden. Foto: Peter Siewertsen.

Grønland er verdens største ø med areal på over 2,2 millioner kvadratkilometer – næsten 50 gange Danmarks størrelse. Det nordligste punkt er kun 740 kilometer fra Nordpolen, mens sydspidsen ligger på samme breddegrad som Oslo. Landets nordlige del knytter sig nært til det nordamerikanske kontinent, som kun er skilt fra øen af et smalt og ofte isfyldt hav, mens Sydgrønland indtager en mellemstilling mellem kontinentet i vest og oceanet i Øst.

Den enorme ø er helt domineret af indlandsisen, som dækker 80 procent af Grønland. Den resterende femtedel af øen er hjemsted for landets dyreliv og planteliv, og det er her menneskene bor, især på de kyststrækninger, hvor der er adgang til åbent vand.

Klimaet i Grønland varierer enormt fra nord til syd, men er som helhed arktisk – der kan ikke vokse skov. Som resten af Arktis er indlandsisen, kystområderne og de omgivende have meget følsomme over for klimaændringer, fordi ændringer i temperaturer omkring frysepunktet både påvirker miljøet og livsbetingelserne for planter, dyr og mennesker.

Klimamodellerne peger entydigt på, at temperaturstigningerne som følge af den menneskeskabte drivhuseffekt vil slå stærkest igennem i Arktis frem imod år 2100. I Grønland kan klimaet blive 7-8 grader varmere sidst i århundredet.

På internationalt plan har der været fokus på, om indlandsisen smeltede helt eller delvist i sidste mellemistid, Eemtiden, for 130.000 til for 115.000 år siden. I Eemtiden var der gennem årtusinder fem grader varmere i Grønland end nu, og vandstanden i verdenshavene var fire til seks meter højere end i dag. Eemtiden er derfor en mulig analogi for fremtidens klima.

I 2007 fandt en forskergruppe fra Københavns Universitet under ledelse af professor Eske Willerslev gener fra urgamle træer, urter, græsser og insekter i den mudrede is i bunden af en iskerne, som er udboret ned gennem iskapen i Sydgrønland. Bundisen kan ikke dateres direkte, men ved hjælp af fire uafhængige metoder blev skoven estimeret til at være mellem 450.000 og 800.000 år gammel. Den gode nyhed er, at isdækket i Sydgrønland, som er mest udsat for smeltning, ikke kollapsede i den varme Eemtid. Hvis der havde vokset træer og planter på stedet i den sidste mellemistid, ville alle DNA-spor fra tidligere økosystemer nemlig være gået tabt.

Professor Dorthe Dahl-Jensen fra Københavns Universitet har udført modelberegninger, som peger på, at iskapen i Sydgrønland svandt ind til en kilometers højde i Eemtiden - mod to kilometer i dag - og at afsmeltningen fra indlandsisen bidrog med to meter til vandstandsstigningen i havene.



En isbjørn jager sæler fra isflager i Framstrædet. Hvis opvarmningen af Arktis får havisen til at svinde dramatisk ind, er selve ikonet på det arktiske dyreliv truet på sin eksistens. Foto: Gorm Dybkjær, DMI.

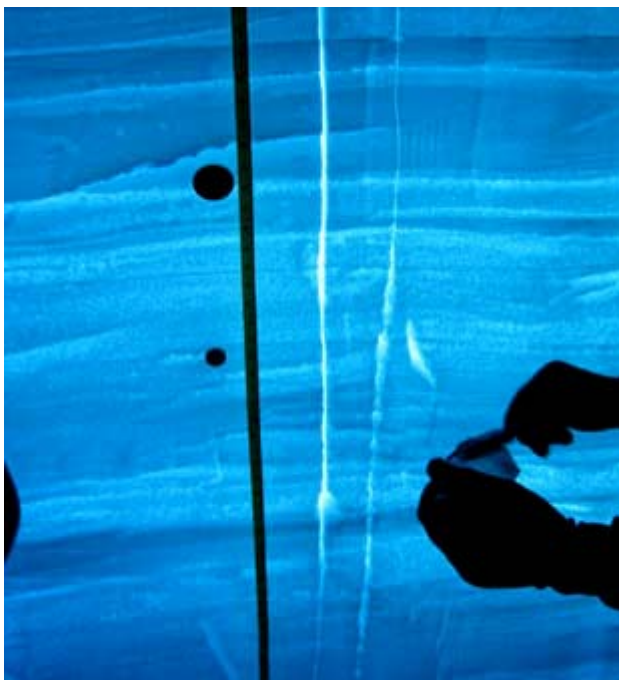
Iskappen i sidste mellemistid

For omkring 2,75 millioner år siden begyndte der at blive dannet iskapper på den nordlige halvkugle, og lige siden har Jordens klima skiftet mellem kolde istider og varme mellemistider som den nuværende varme periode, der begyndte for 11.700 år siden.

På internationalt plan har der været fokus på, om indlandsisen smeltede helt eller delvist i sidste mellemistid, Eemtiden, for 130.000 til for 115.000 år siden. I Eemtiden var der gennem årtusinder fem grader varmere i Grønland end nu, og vandstanden i verdenshavene var fire til seks meter højere end i dag. Eemtiden er derfor en mulig analogi for fremtidens klima.

I 2007 fandt en forskergruppe fra Københavns Universitet under ledelse af professor Eske Willerslev gener fra urgamle træer, urter, græsser og insekter i den mudrede is i bunden af en iskerne, som er udboret ned gennem iskappen i Sydgrønland. Bundisen kan ikke dateres direkte, men ved hjælp af fire uafhængige metoder blev skoven estimeret til at være mellem 450.000 og 800.000 år gammel. Den gode nyhed er, at isdækket i Sydgrønland, som er mest udsat for smeltning, ikke kollapsede i den varme Eemtid. Hvis der havde vokset træer og planter på stedet i den sidste mellemistid, ville alle DNA-spor fra tidligere økosystemer nemlig være gået tabt.

Professor Dorthe Dahl-Jensen fra Københavns Universitet har udført modelberegninger, som peger på, at iskappen i Sydgrønland svandt ind til en kilometers højde i Eemtiden - mod to kilometer i dag - og at afsmeltningen fra indlandsisen bidrog med to meter til vandstandsstigningen i havene.



Også på forskningsstationen Summit på midten af indlandsisen er der tidligere taget to lange iskerner op. I dag foregår der stadig undersøgelser af sne og is. Foto Lars Andersen.

Grønlands nuværende klima

DMI har målt lufttemperaturen i både Vestgrønland og Østgrønland siden 1873, og en lang kombineret temperaturserie fra forskellige målestationer i Sydvestgrønland dækker perioden 1784-2008. Måleserien viser, at de varmeste årtier var 1930'erne og 1940'erne. 1810'erne var det koldeste årti. Det skyldes ikke mindst et stort uidentificeret vulkanudbrud i 1809 og Tamboras voldsomme udbrud i Indonesien i 1815. Store vulkanudbrud sender enorme mængder af svovlpartikler højt op i atmosfæren, hvor svovlet reflekterer sollys ud i rummet, hvilket afkøler klimaet i de følgende år.

Sommertemperaturerne både på vestkysten og østkysten af Grønland afviger kun få grader fra nord til syd, hvilket er ret så forbavsende, når man tænker på, at der er tale om en strækning på 2600 kilometer. Årsagen er midnatssolen i Nordgrønland, som opvarmer landet om sommeren. Omvendt betyder vintermørket og fraværet af varme havstrømme op langs med kysterne, at vinteren er betydeligt koldere i nord end i syd.



Himmel og hav. Storheden i den grønlandske natur ved kysterne er åbenlys. Foto John Cappelen.

Der er stor forskel på temperaturforholdene ved de ydre kyster og inde i fjordene. Om sommeren er der køligt ved kysterne på grund af drivis og koldt havvand, mens det er noget varmere inde i fjordene. Om vinteren betyder tilstedeværelsen af helt eller delvist åbent hav, at kystområderne er varmere end fjordene, som fryser til.

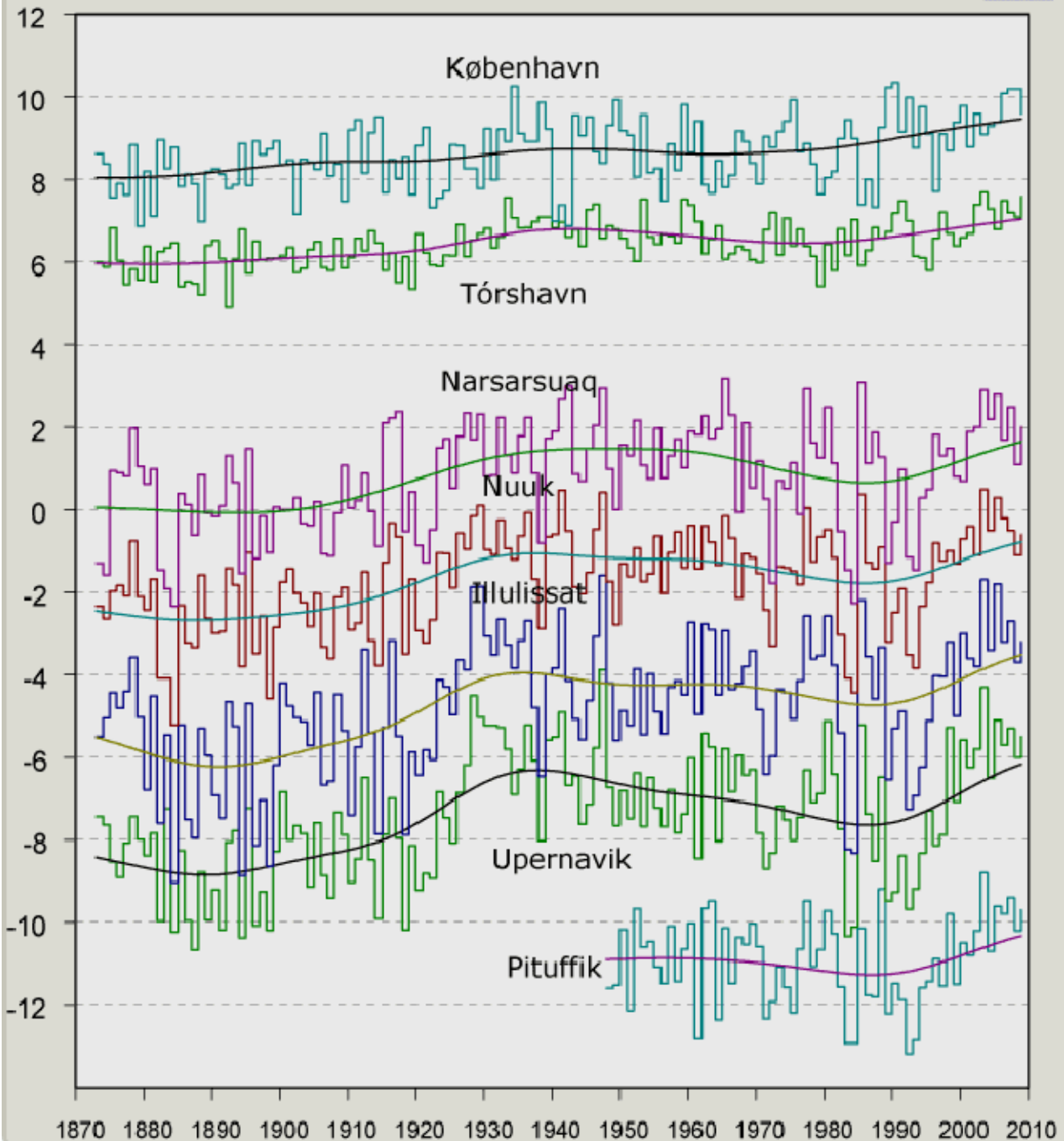
Den højeste temperatur, der er registreret i Grønland siden 1958, er 25,5 °C, som blev målt i juli 1990 i Kangerlussuaq. Det koldeste sted i Grønland er inde på indlandsisen, hvor temperaturen sandsynligvis kan nå ned under -70 °C. En britisk forskningsstation målte i 1950'erne -70 °C, og en DMI-station ved Summit på indlandsisens højeste punkt har målt temperaturer på under -63 °C.

Udover indlandsisen er de koldeste områder i Grønland ubetinget Hall Land og Kap Morris Jesup på nordkysten med årsmiddeltemperaturer på henholdsvis -19,6 °C og -18 °C. I januar 1989 nåede temperaturen på Hall Land ned på -52,1 °C og sikkert endnu lavere, da den anvendte type målestation ikke måler absolutte minimumtemperaturer.

Årsmiddeltemperatur 1873-2009

Stationer fra Danmark, Færøerne og Vestgrønland

°C

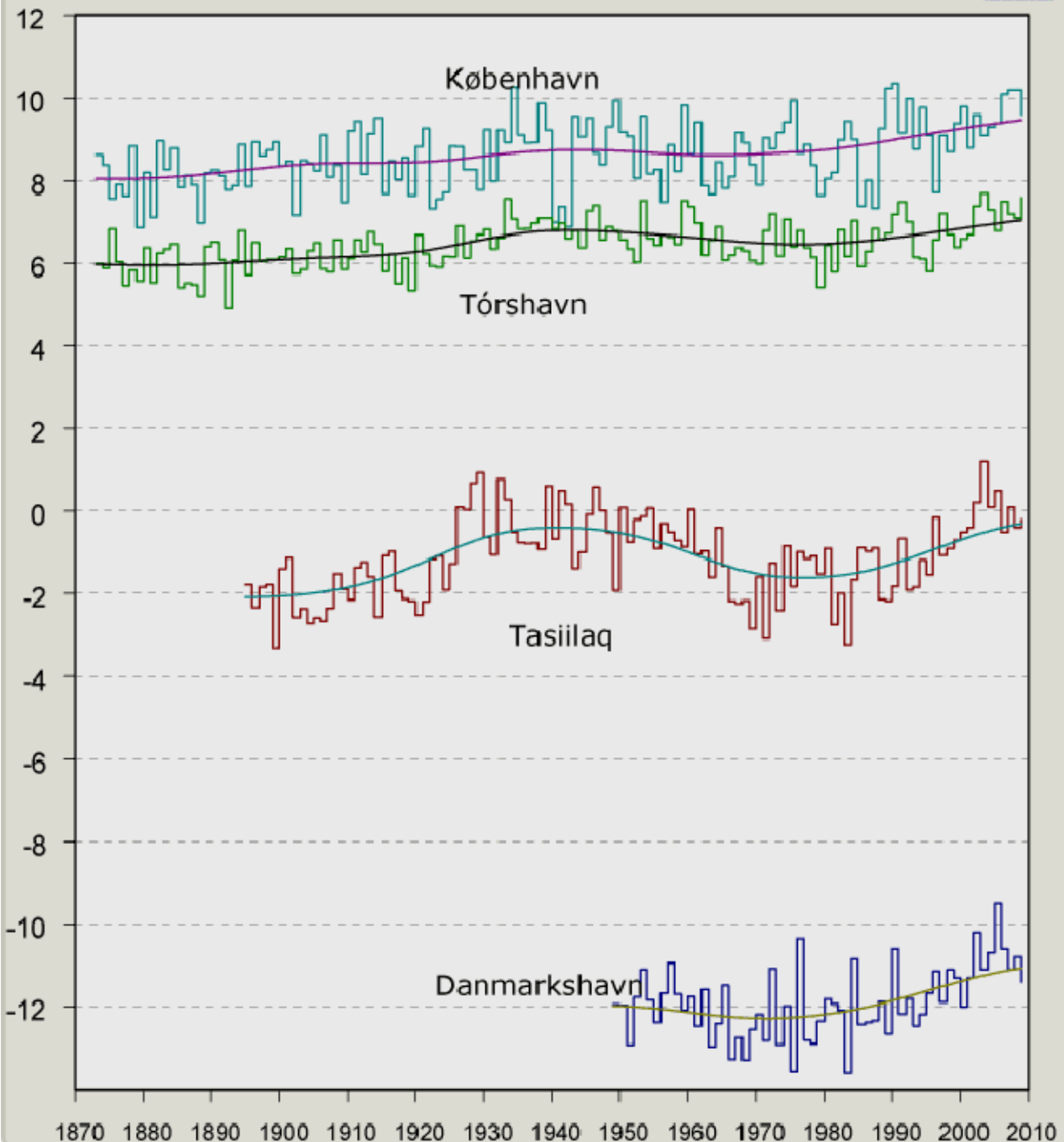


Årsmiddeltemperaturen 1873–2009 for målestationer i Danmark, på Færøerne og i Vestgrønland. Siden 1873 er temperaturen i København og Torshavn steget. I Vestgrønland steg temperaturen ligeledes til ca. 1940. Derefter har der været en faldende tendens indtil de seneste år, hvor temperaturen igen er steget.

Årsmiddeltemperatur 1873-2009

Stationer fra Danmark, Færøerne og Østgrønland

°C



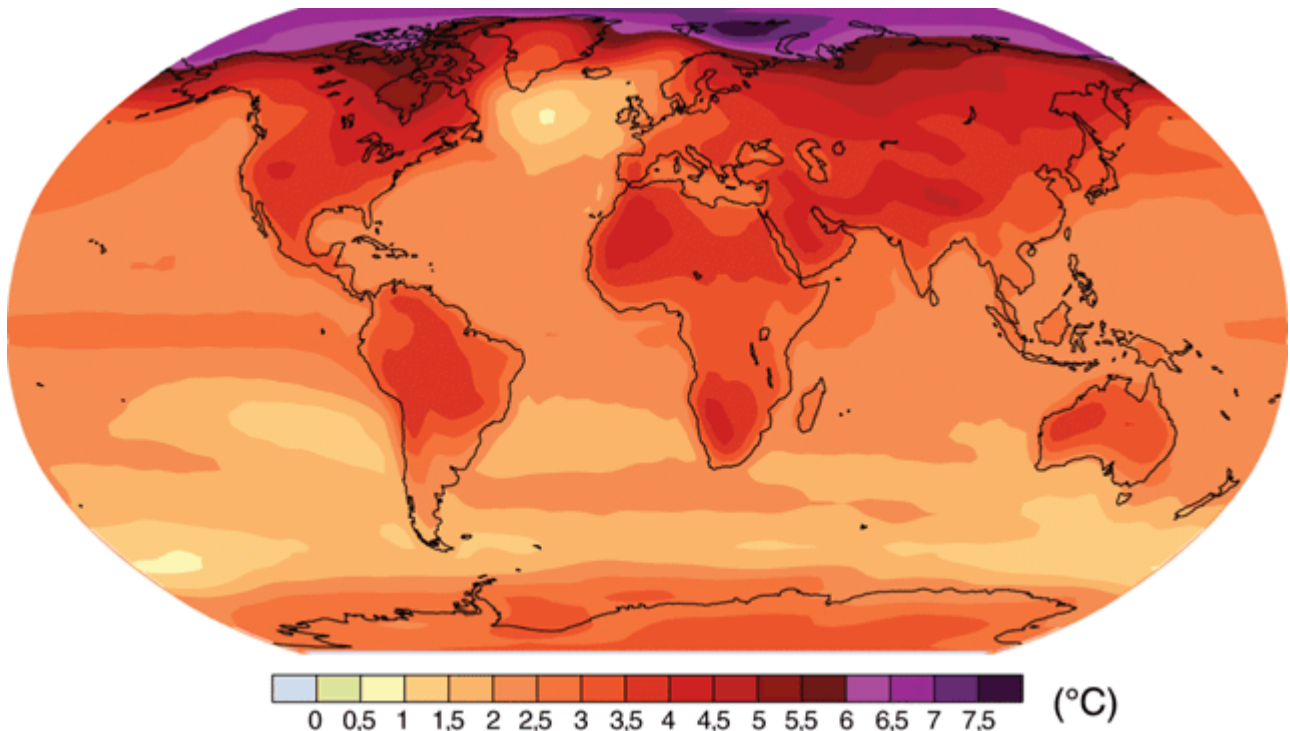
Årsmiddeltemperaturen 1873–2009 for målestationer i Danmark, på Færøerne og i Østgrønland. Siden 1873 er temperaturen i København og Torshavn steget. I Østgrønland er temperaturen ligeledes steget indtil ca. 1940. Derefter har der været en faldende tendens indtil omkring 1970, hvorefter temperaturen igen er steget.

Grønlands fremtidige klima

DMI har udført beregninger med globale og regionale klimamodeller for Grønland frem til 2080. Beregningerne tager udgangspunkt i et af IPCC's udslipsscenarier, som kaldes A1B. Scenariet er baseret på et fremtidsbillede, som er karakteriseret ved høj økonomisk vækst, lav befolkningsvækst og hurtig introduktion af effektive teknologier, der medfører lavt udslip af drivhusgasser.

DMI's beregninger frem til 2080 forudsiger generelle temperaturstigninger i Grønland på 7-8 °C. Opvarmningen er betydeligt større end den gennemsnitlige temperaturstigning på globalt plan.

Ved Grønlands østkyst forudsiger modelberegningerne en temperaturstigning på hele 12 °C sidst i perioden. Opvarmningen er størst om vinteren, og der bliver færre ekstremt kolde dage.



Verdenskortet viser de forventede ændringer i temperaturen sidst i århundredet set i forhold til perioden 1980-1999. Opvarmningen bliver størst i Arktis. Den forudsagte udvikling er baseret på IPCC's A1B scenarium.

Modelberegningerne viser også andre klimaændringer. F.eks. begynder afsmeltningen af sneen tidligere om foråret mod syd.

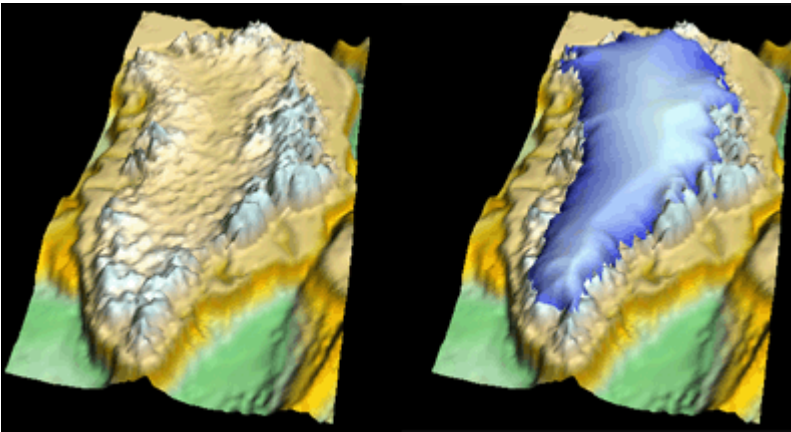
Desuden bliver der generelle stigninger i nedbøren i Grønland på 20-30 procent; i det nordlige Grønland dog lokalt helt op til 250 procent om vinteren i områder, som i øjeblikket er meget tørre.

Konsekvensen af opvarmningen i Grønland frem imod 2080 bliver, at indlandsisen vil svinde ind, og smeltevandet vil bidrage til at øge vandstanden i verdenshavene. Præcist hvor stort det fremtidige bidrag fra indlandsisen bliver, er endnu et åbent spørgsmål.



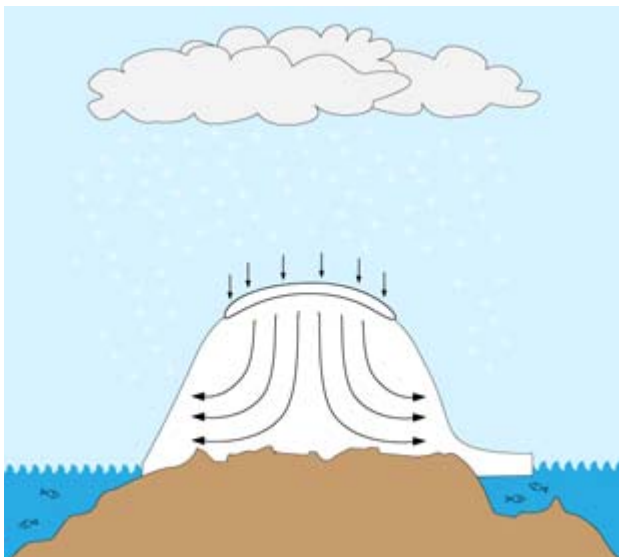
Modelberegninger peger på, at de store temperaturstigninger i Arktis i løbet af århundredet vil få iskappen til at skrumpe ind. Foto: Jesper S. Jørgensen.

Den store iskappe



Indlandsisen ligger i en skålformet fordybning, som er dannet ved isens tunge belastning af jordskorpen. Hvis iskappen forsvandt, ville grundfjeldet hæve sig og forme et landskab, der svarer til, hvordan Grønland så ud, før landet blev nediset. Under sidste istid var iskappen meget større end i dag, og den landhævning, der startede, da indlandsisen svandt ind til sin nuværende størrelse, er stadig i gang.

Indlandsisen er Jordens tredjestørste iskappe, som kun overgås af de to store iskapper på Østantarktis og Vestantarktis. Indlandsisen dækker 1,7 millioner kvadratmeter og er op til 3,2 kilometer høj. Iskappen indeholder 2,9 millioner kubikkilometer is, og hvis al isen smeltede, ville vandstanden i verdenshavene stige med omkring syv meter.



Tre processer afgør, om indlandsisen vokser eller svinder ind. Akkumulation af sne på toppen af iskappen øger massen. Sneen omdannes med tiden til is, som synker ned gennem iskappen og flyder ud imod siderne. Smeltning på de nedre dele af iskappen og kælving af isbjerge fra udløbsgletscherne reducerer mængden af is. Hvis massetabet overstiger nedbørmængden, bliver iskappen mindre. Grafik Diego Winterborg.

Tre processer afgør i forening, om indlandsisen vokser eller svinder ind. Hvert år akkumuleres der sne på toppen af iskappen, men til gengæld mister iskappen masse ved smeltning fra de nedre dele samt ved kælving af isbjerge fra udløbsgletscherne. Indtil for få år siden mente klimaforskerne, at akkumulationen af sne og massetabet modsvarede hinanden, så iskappen var i balance.

Først i de senere år er det muligt at overvåge hele den enorme iskappe med satellitter samt ved målinger fra fly. Observationerne har vist, at indlandsisen nu hvert år mister mellem 150 og 250 kubikkilometer is, hvilket fører til en årlig vandstandsstigning i verdenshavene på mellem 0,35 og 0,5 millimeter.

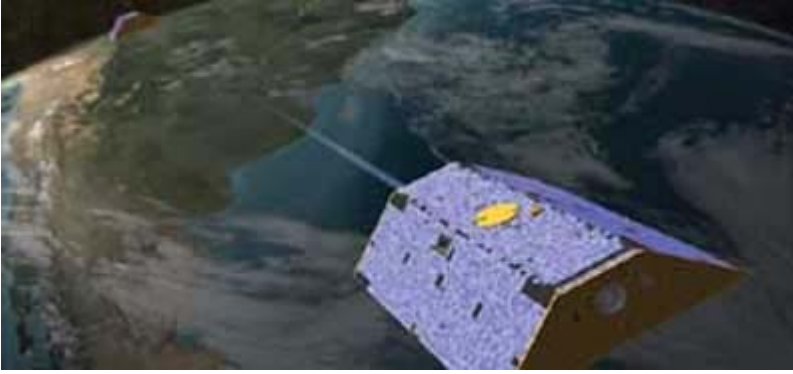
I de seneste årtier er afsmeltningen fra de nedre dele af iskappen ud imod isranden øget, og smeltesæsonen er blevet længere. Målinger af smeltningen er blevet udført siden 1979, og de fem største smelteår ligger alle efter 1998.

Samtidig er mange af de store udløbsgletschere accelereret i de senere år – nogle fordoblede i en periode deres hastighed – og massetabet ved kalvning af isbjerge er steget. Klimaforskerne vurderer, at øget afsmeltning og kalvning af flere isbjerge hver især står for omkring halvdelen af det observerede massetab fra Indlandsisen.

En modelberegning, der bygger på observationsdata tilbage fra 1950 og benytter IPCC's [A1B scenarium](#) som beregningsgrundlag, forudsiger, at vintertemperaturen om 30 år vil være steget med omkring 3 °C, mens sommertemperaturen stiger med 2 °C og lokalt meget mere. Omkring 2080 vil temperaturen være steget med 7-8 °C i vintermånederne og omkring 3 °C om sommeren.

Det varmere klima vil markant øge mængden af sne, der falder på toppen af iskappen, men samtidig vil både afsmeltningen og kalvningen af isbjerge accelerere. DMI arbejder nu med at kombinere højtopløste regionale klimamodeller med iskappemodeller, som kan give et realistisk bud på, hvordan indlandsisen vil reagere på fremtidige klimaændringer.

Observationer af indlandsisens udvikling



NASA's GRACE satellitter måler forandringer i tyngdefeltet og dermed ændringer i iskappens masse, når de flyver hen over indlandsisen.

Ingen enkelte målinger giver et fuldstændigt billede af indlandsisens massebalance, men ved at kombinere forskellige observationsmetoder er det muligt at skabe et overblik.

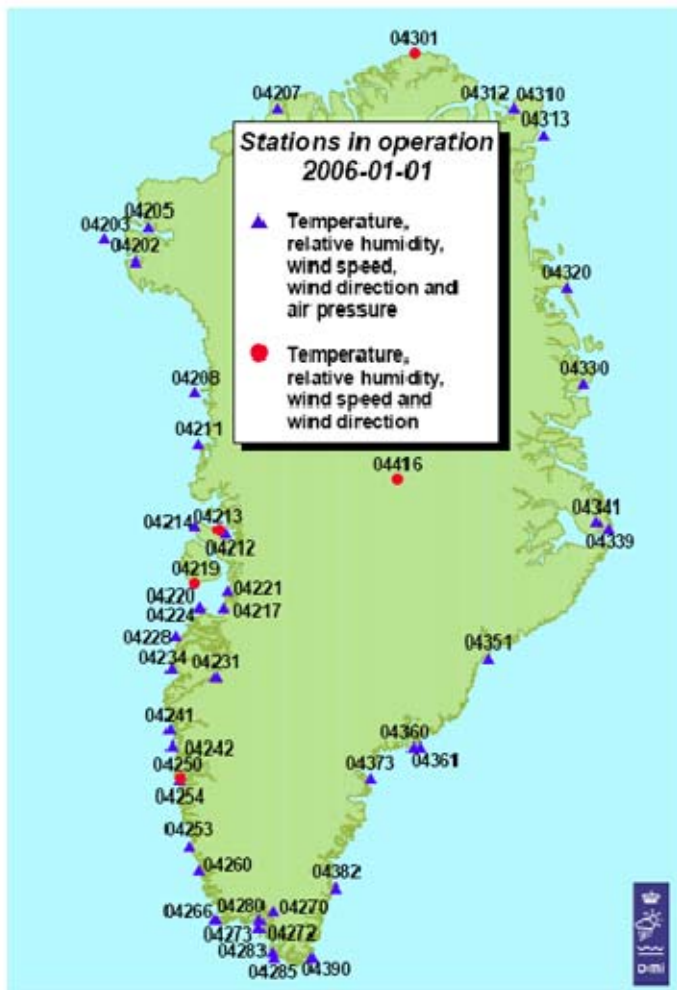
De bedste målinger af hele iskappen er opnået med [GRACE satellitterne](#), som måler tyngdefeltet, når de to satellitter flyver hen over indlandsisen. Hvis tyngdefeltet ændrer sig, fordi isen i et område udtyndes eller vokser, bestemmes masseændringen meget præcist. Svagheden er, at satellitterne ikke kan skelne mellem masseændringer i isen og masseændringer som følge af landhævning. Den igangværende landhævning må derfor modelleres og trækkes fra den samlede masseændring for at bestemme ændringerne i iskappen. Et netværk af [GPS-målestationer](#), som er under opbygning, vil give præcise data om landhævningen.

Tyngdemålinger med GRACE satellitterne fra 2002 og fremefter har vist, at indlandsisens massetab ligger mellem 150 og 250 kubikkilometer om året. Det svarer til årlige stigninger i det globale havniveau på mellem 0,35 og 0,5 millimeter

Højdeændringer i iskappen måles fra satellitter som [ICESat](#) og fra fly. Det sker ved hjælp af laserstråler eller radarbølger, der reflekteres fra indlandsisens overflade. Fordelen ved satellitmålinger er, at de kan dække hele iskappen, men opløsningen er ikke så høj som ved målinger fra fly, der til gengæld dækker mindre geografiske områder. Svagheden ved højdemålinger er, at højdeændringer ikke nødvendigvis er lig med masseændringer. Hvis sne fryser til is, som er mere kompakt, synker overfladen, men massen ændres ikke.

Højdemålinger med satellitterne ERS og ATM i perioden 1992-2002 og med ICESat i årene fra 2003-2007 peger på, at det årlige massetab fra indlandsisen er steget fra 4 millioner kubikkilometer i den første periode til 166 millioner kubikkilometer i den anden periode. Højdemålingerne viser også, at iskappens centrale dele vokser som følge af øget nedbør. Men akkumulationen af sne kan ikke følge med massetabet fra de nedre dele af iskappen, hvor isen udtyndes, især i Sydøstgrønland.

Stigende afsmeltning



DMI's vejrstationer i Grønland indgår i arbejdet med at bestemme afsmeltningen fra indlandsisen.

Øget afsmeltning fra indlandsisen er årsag til omkring halvdelen af det observerede massetab fra iskapen gennem de senere år.

Smeltning i overfladen af indlandsisen bestemmes med punktmålinger fra et netværk af vejrstationer (link til måleboks), hvorpå måleresultaterne generaliseres til større områder ved hjælp af modelberegninger. Desuden observerer satellitter refleksionen fra iskapen, som ændrer sig, når sne og is smelter.

Målinger af smeltningen er blevet udført siden 1979, og de fem største smelteår ligger alle efter 1998. Det hidtidige rekordår var 2007, hvor smeltesæsonen var 25-30 dage længere end i de tidligere år, og hvor afsmeltningen var 30 procent større end ellers. Afsmeltningen var også meget omfattende i 2005.

Smeltevandssøer dræner til iskappens bund



Smeltevandssøer på indlandsisens overflade kan dræne gennem huller og sprækker til bunden af iskappen, hvor smeltevandet virker som et smøremiddel under gletscherne og øger deres hastighed. Foto Lars Andersen.

Om sommeren dannes der tusindvis af smeltevandssøer i områderne nær isranden. Søerne kan dræne til bunden af iskappen gennem spalter i isen, og det har længe været omdiskuteret, om smeltevandet virker som et smøremiddel, der kan sætte ekstra fart i udløbsgletscherne.

I august 2006 observerede en international forskergruppe, hvordan en fire kilometer lang og otte meter dyb smeltevandssø drænedes væk fra iskappen på blot halvanden time – en transport af vand, der kan sammenlignes med Niagara vandfaldet. Søen forsvandt nær ved den isstrøm, som føder den store udløbsgletscher i Ilulissat Isfjord i Vestgrønland. Resultatet var, at isstrømmen accelererede stærkt i nærheden af den forsvundne sø. Men heldigvis var accelerationen beskeden ude ved gletscherens udløb - sandsynligvis fordi undergrunden her i forvejen er velsmurt af flydende vand.

Fortsat forskning skal afklare, hvor meget smøreeffekten generelt betyder for gletscherens hastighed og for kælvningen af isbjerge. Spørgsmålet er vigtigt, fordi antallet af smeltevandssøer nær isranden vil stige i takt med de forudsagte temperaturstigninger.

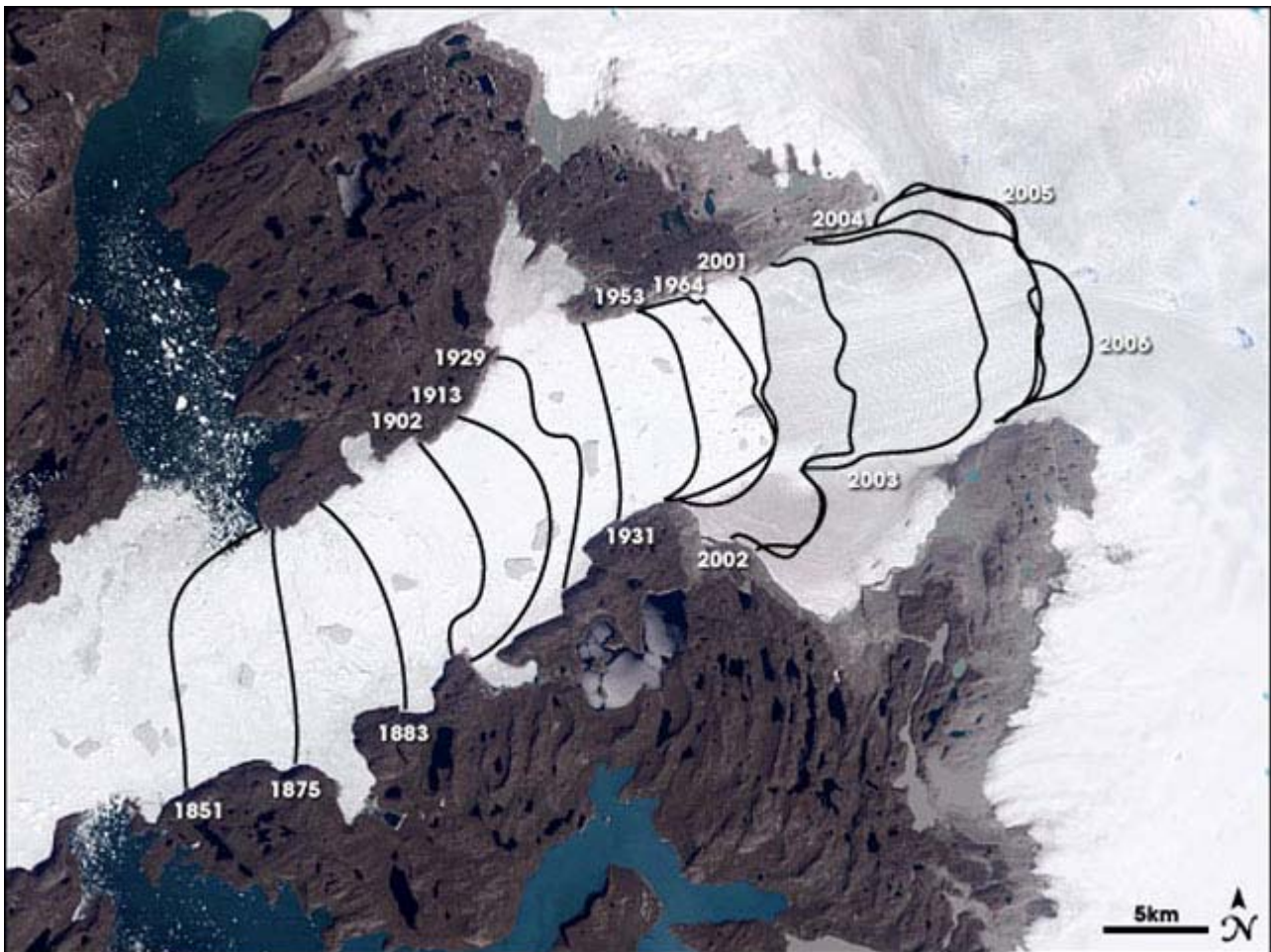
Udløbsgletscherne kælver flere isbjerge

Det var observationer af hurtigt accelererende udløbsgletschere i Grønland, som for alvor gjorde indlandsisens fremtidige skæbne til et centralt emne i debatten om konsekvenserne af de menneskeskabte udslip af drivhusgasser. Omkring halvdelen af indlandsisens massetab i de senere år skyldes øget kælvning af isbjerge fra gletscherne.

I 2006 offentliggjorde en amerikansk forskergruppe resultaterne af radarmålinger fra satellitter, som viste, at indlandsisens tre hovedudløb accelererede gevaldigt i perioden fra 2000 til 2005. Kangerdlugssuag i øst øgede flydehastigheden fra 6 til 13 kilometer om året, hvilket gjorde gletscheren

til den hurtigste i Grønland. Helheim i sydøst accelererede med 60 procent, og den største gletscher af dem alle, Ilulissat Isbræ i vest, fordoblede næsten sin flydehastighed, som i 2003 nåede op på 12,6 kilometer om året.

I 2008 offentliggjorde en anden amerikansk forskergruppe observationer fra Sydøstgrønland, hvor massetabet fra kælvning af isbjerge er størst. Målingerne viste, at de store gletschere, Helheim og Kangerdlugssuag, kun stod for 28 procent af massetabet mellem 2002 og 2005, mens 72 procent af tabet kom fra 11 mindre udløbsgletschere i området. Resultatet understreger betydningen af en komplet dækning af både små og store gletschere.



Gletscherranden på indlandsisens hovedudløb i vest, Ilulissat isbræ, smeltede voldsomt tilbage mellem 2000 og 2005 som følge af kraftig kalvning af isbjerge. I samme periode fordoblede den bagvedliggende isstrøm næsten sin flydehastighed. Foto fra NASA's Earth Observatory.

Siden 2005 har Helheim, Kangerdlugssuag og Ilulissat Isbræ igen sænket flydehastigheden.

Vinde og havstrømme spiller en afgørende rolle

Temperaturstigningerne i Grønland i de senere år er ikke tilstrækkelige til at forklare gletschernes voldsomme acceleration, heller ikke selv om man tager højde for, at smeltevand fra søer på iskappens overflade kan dræne ned gennem spalter i isen og smøre underlaget under isstrømmene. I 2008 påviste en international forskergruppe med deltagelse af Mads Ribergaard fra DMI og Bjarne Lyberth fra Grønlands Naturinstitut imidlertid, at ændringer i de regionale vindsystemer og havstrømme spiller en afgørende rolle.

Gruppen fokuserede på Ilulissat Isbræ, som voksede i tykkelse fra 1991-1997, hvorpå den femten kilometer lange flydende gletschertunge, der rakte ud i isfjorden, pludselig udtyndedes stærkt og gik i stykker i omkring 1997. Befriet for den bremsende effekt af tungen øgede den bagvedliggende isstrøm sin hastighed fra 9,4 kilometer om året i 2000 til 12,6 kilometer om året i 2003.

Der var ingen markant stigning i lufttemperaturen, som kan forklare opbruddet. Men havvandet i Disko Bugten ud for Ilulissat Isfjord og i havet vest for Grønland blev pludselig varmere i 1997. Det fremgår af temperaturmålinger, som Grønlands Naturinstitut gennemførte i årene fra 1991 til 2006 i forbindelse med en kortlægning af rejeforekomsterne, samt årlige målinger fra samme position siden 1980. Målingerne viste, at havvandets middeltemperatur i hele undersøgelsesområdet steg med ca. 1° fra perioden 1980-1990 frem til perioden 1997-2007. Det varmere havvand smeltede gletschertungen nedefra og satte dermed gang i den store gletschers acceleration.

Modeller for indlandsisen i det arktiske drivhus



Indsamling af sne fra midten af indlandsisen. Foto Lars Andersen.

Ingen ved i dag med sikkerhed, hvordan indlandsisen på Grønland vil reagere på de forudsagte temperaturstigninger på 7-8°C i løbet af århundredet. Men det er vigtigt med pålidelige forudsigelser; ikke blot af hensyn til befolkningen på verdens største ø, men også fordi store massetab fra iskapen kan føre til havvandsstigninger, som vil ændre livsbetingelserne for millioner af mennesker, der lever ved kysterne overalt i verden.

Den første udfordring er at udvikle regionale klimamodeller med en høj opløsning. De globale klimamodeller, som IPCC anvender, er baseret på et netværk af firkantede celler med størrelser fra 80-200 kilometer.

"Hvis man f.eks. skal regne på en stor udløbsgletscher som Ilulissat Isbræ, er det nødvendigt at udvikle en regional klimamodel med en netværksstørrelse på omkring 5 kilometer", siger glaciolog Guðfinna Aðalgeirsdóttir fra DMI.

Den udfordring har DMI's klimaforskere taget op. Metoden går ud på at udvikle højt opløste regionale modeller inden for en ramme, som sættes af globale klimamodeller med en lavere opløsning. Den regionale model valideres ved hjælp af måledata fra [vejstationer, fly og satellitter](#) – så langt tilbage i

tiden, som målingerne rækker. Fra de områder, hvor der ikke findes punktmålinger, bruges vejrmødeler til at beregne den historiske udvikling.

Det næste trin er at udvikle en højtopløst model for iskappens overfladebalance, dvs. forholdet mellem mængden af sne, som akkumuleres på toppen af iskappen, og afsmeltningen fra de nedre dele. Modellen skal bl.a. kunne modellere densitetsændringer i sneen og tage højde for ændringer i lufttemperaturen, nedbøren og solindstrålingen.

Så skal der udvikles en model for iskappens dynamik, som beskriver isens flydning i iskappen og kalvningen af isbjerge fra gletscherne. Iskappemodellen skal bl.a. kunne beskrive samspillet mellem atmosfæren, havet og isen. Det er vigtigt, at modellen kan indbygge ny viden, som opnås via observationer, og som kan skabe en øget forståelse af de mekanismer, der driver gletscherne. Fx peger et nyt studie af Helheimgletscheren på, at gletscherfronten rykker frem og tilbage i ryk, som bestemmes af vandets temperatur ved gletscherranden, samt af hvor bundtopografien muliggør, at isen kan fryse fast til undergrunden. Forskerne har også brug for mere viden om, i hvor høj grad nedsvivende smeltevand fra søer på overfladen virker som smøremiddel under gletscherne.

Den afgørende videnskabelige udfordring bliver at sammenkoble den højt opløste regionale klimamodel med modellerne for processerne på isoverfladen og inde i iskappen.

"Vores første mål er at reproducere indlandsisens hidtidige udvikling, hvilket ingen iskappemodeller endnu er i stand til. Hvis det lykkes, er vejen banet for, at vi kan bruge den koblede model til at give et realistisk bud på iskappens fremtidige skæbne i det arktiske drivhus", siger Guðfinna Aðalgeirsdóttir.

Iskapperne på Antarktis



Antarktis er dækket af to iskapper, som er adskilt af den 3300 kilometer lange transantarktiske bjergkæde, der gennemskærer polarkontinentet fra nord til syd. Iskapperne er de ældste og største i verden. De dækker et samlet areal på 12,1 millioner kvadratkilometer, og rummer til sammen 70 procent af alt ferskvand på Jorden – svarende til 29 millioner kubikkilometer is. Hvis iskapperne smeltede helt bort, ville vandstanden i verdenshavene stige med over 70 meter.

Iskappen på Østantarktis er langt den største, og den rummer 25,2 millioner kubikkilometer is. Den vestantarktiske iskappe er meget mindre og indeholder 3,8 millioner kubikkilometer is. Til sammenligning rummer indlandsisen på Grønland 2,9 millioner kubikkilometer is.

Den gigantiske iskappe i øst vil næppe blive berørt i væsentligt omfang af den igangværende opvarmning af kloden, fordi klimaet er så koldt både om sommeren og om vinteren, at afsmeltningen ikke vil ændre sig væsentligt, selv om lufttemperaturen stiger nogle grader. Samtidig ligger iskappen på et grundfjeld over havets overflade, og derfor er kæmpen også godt beskyttet imod opvarmning af det omgivende hav.

Iskappen på Vestantarktis er fra naturens hånd anderledes sårbar over for klimaændringer, fordi de centrale dele af iskappen er frosset fast til klippegrund, som ligger helt ned til 2,5 kilometer under havniveau, hvilket gør iskappen følsom over for temperaturstigninger i Sydhavet. Den bundfrosne is er omgivet af store ishylder, som flyder på havvandet. Hvis ishylderne smelter som følge af den globale opvarmning, vil den faste iskappe få frit løb til at brede sig ud i havet og blive udtyndet. Det kan få havvandet til at trænge ind under iskappen og smelte isen nedefra, så grundingslinien - grænsen mellem bundfrossen og flydende is - rykker indad. Hvor på forløbet kan gentage sig.

Satellitobservationer gennem de senere år har vist, at iskapperne på Antarktis nu svinder ind med omkring 200 millioner tons is om året svarende til en vandstandsstigning i oceanerne på 0,4 millimeter. Hovedparten af massetabet stammer fra Vestantarktis og den Antarktiske Halvø.

Nediset for 35 millioner år siden



Opbruddet af superkontinentet Gondwana og den efterfølgende isolering af Antarktis ved sydpolen førte til dannelsen af de gigantiske iskapper for omkring 35 millioner år siden. Courtesy Australian Antarctic Division © Commonwealth of Australia 2009.

Antarktis var tidligere en del af superkontinentet Gondwana. Efter løsrivelsen bevægede Antarktis sig mod syd, og for omkring 35 millioner år siden opstod der en cirkulær havstrøm omkring polarkontinentet, der isolerede Antarktis fra de varme tropiske vandmasser, som tidligere havde givet et mildt klima. Afkølingen gav startskuddet til opbygningen af de gigantiske iskapper.

Iskappen på Østantarktis har været stabil siden dannelsen, men der har gennem årtier været videnskabelig debat om, hvorvidt den vestantarktiske iskappe har været smeltet i fortiden. I 2009 publicerede en international forskergruppe resultater fra en boring i havbunden under den store ishylde

Ross Ice Shelf, som gav svaret: Iskappen på Vestantarktis kollapsede helt eller delvist 40 gange i perioden for mellem 5 og 3 millioner år siden.



En boring i havbunden under Ross Ice Shelf har vist, at området for 5-3 millioner år siden skiftevis var dækket af en fastfrossen iskappe, flydende ishylder og åbent hav. Ross Ice Shelf er på størrelse med Spanien. En sprække i Ross Ice Shelf undersøges her i 2001. Foto Mila Zinkova. Hentet fra Wikipedia.org og bragt under Creative Commons Attribution ShareAlike 3.0 licens.

Perioden er en mulig analogi til fremtidens klima. Dengang var klimaet nogle få grader varmere end nu, og ud fra analyser af havbunds-kerner er det blevet estimeret, at atmosfærens indhold af CO₂ lå på omkring 400 ppm. Til sammenligning er nutidens koncentration af drivhusgassen på 385 ppm.

Borekernen indeholdt skiftende lag af tre typer sediment. I de kolde istider voksede iskappen på Vestantarktis, så området blev dækket af fast is, og her indeholdt sedimenterne grus og sten, som iskappen havde slæbt med sig. I nogle af mellemistiderne var Rosshavet dækket af en flydende ishylde som nu, og her bestod aflejringerne af finkornet muddersten. Men i de varmeste mellemistider indeholdt sedimenterne fossile diatomer – grønalger, der lever ved fotosyntese i havoverfladen – og det viser, at ishylden var forsvundet og erstattet af åbent hav. Opdagelsen peger på, at den vestantarktiske iskappe var smeltet helt eller delvist.

I følge dateringen af borekernen brød ishylden – og måske hele iskappen - sammen på blot 1000-3000 år i de varmeste mellemistider. Modelberegninger reproducerede forløbet og indikerer, at den vestantarktiske iskappe vil forsvinde fuldstændigt over et par årtusinder, hvis Sydhavet bliver fem grader varmere end i dag.

Boringen blev gennemført under [Andrill programmet](#).

Vandstandsstigninger

Selv om iskapen på Vestantarktis er større end indlandsisen på Grønland, vil en total kollaps føre til mindre havvandsstigninger, fordi store dele af isen ligger under havniveau. Gennem mange år har forskerne regnet med, at en fuldstændig nedsmeltning på Vestantarktis vil få verdenshavene til at stige med 5-6 meter, men nye modelberegninger fra 2009 peger på en mindre vandsstandsstigning på 3,3-3,8 meter. Til sammenligning vil den grønlandske iskappe hæve vandstanden i verdenshavene med omkring 7 meter, hvis den smelter helt bort over nogle årtusinder.

Polarkontinentets klima

Antarktis er det koldeste sted på Jorden.

Om vinteren er gennemsnitstemperaturen på Sydpolen minus 76°C, mens gennemsnitstemperaturen om sommeren er minus 27°C. Den laveste temperatur er målt ved den russiske forskningsstation Vostok på Østantarktis den 21. juli 1983, hvor temperaturen var helt nede på minus 89,2°C.

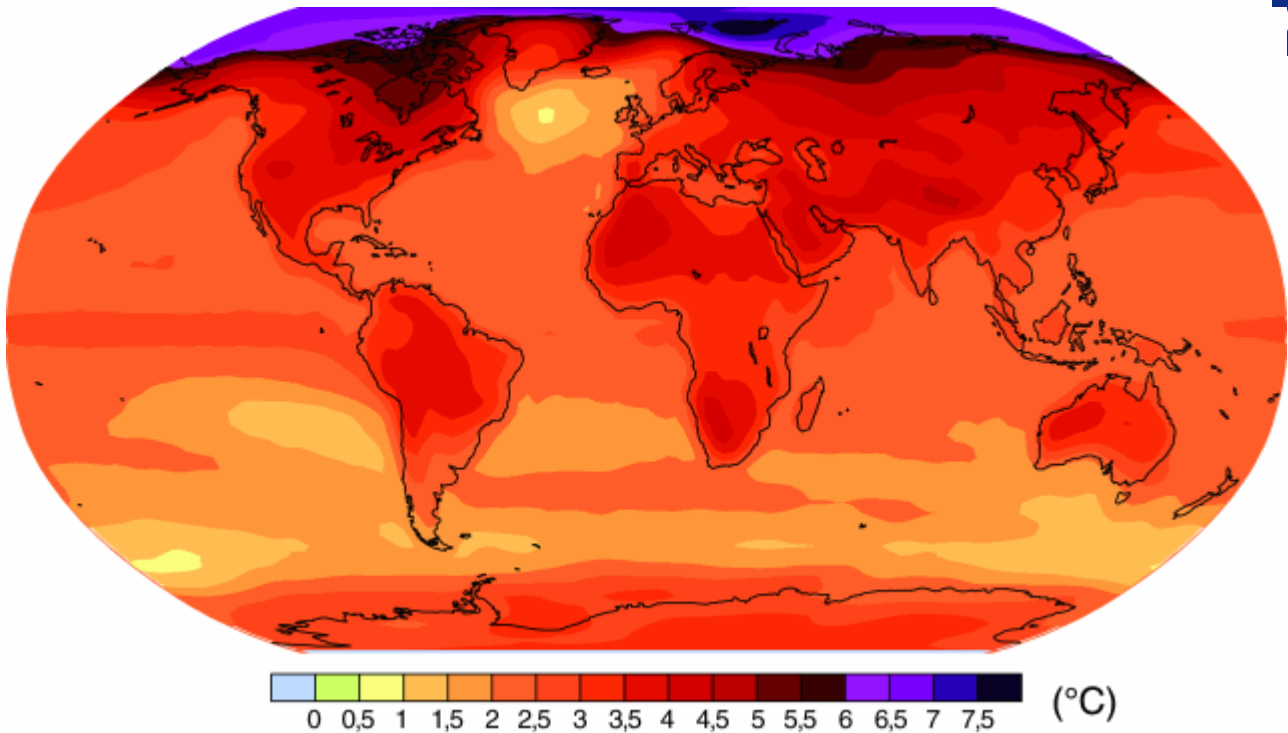
Nedbøren er også minimal.

Over de indre dele af Antarktis falder der kun omkring 50 millimeter nedbør om året, hvilket er mindre end i Sahara. Selv ved kysterne ligger nedbøren under det niveau på 254 millimeter om året, som definerer et område som en ørken. I modsætning til Jordens andre ørkener sker der næsten ingen fordampning på grund af kulden, og det har muliggjort opbygningen af de gigantiske iskapper.



Amundsen-Scott Stationen på Sydpolen. De eneste mennesker på Antarktis er forskere – samt et stigende antal turister. Foto fra National Science Foundation.

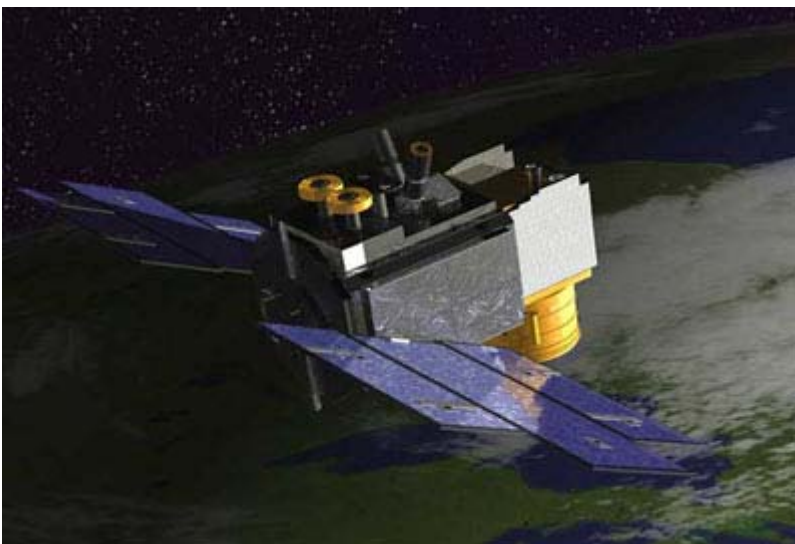
Fremtidens klima



Verdenskortet viser de forventede ændringer i temperaturen sidst i århundredet set i forhold til perioden 1980-1999. Opvarmningen af Antarktis bliver mindre end temperaturstigningerne i Arktis. Kilde: IPCC: "Klimaændringer 2007: Synteserapport". Sammendrag for beslutningstagere af fjerde vurderingsrapport med bidrag fra arbejdsgrupperne I, II og III. Oversættelse DMI 2008.

IPCC's [A1B scenarium](#) i klimarapporten fra 2007 forudsiger temperaturstigninger på Antarktis frem imod år 2100 på 2-3° set i forhold til gennemsnitstemperaturen i perioden 1980-1999.

Iskapperne mister masse



De senest offentliggjorte tal for massetabet fra iskapperne på Antarktis er opnået med satellitten ICESat og stammer fra 2006. Her var massetabet på omkring 200 millioner tons. Grafik fra NASA.

Den enorme udstrækning af iskapperne på Antarktis gør det umuligt at opnå et samlet overblik over iskappernes massebalance via målinger fra fly, og observationer med satellitter er helt nødvendige.

[Tyngdemålinger med GRACE satellitterne](#), som blev offentliggjort i 2006, gav det første overblik. Observationerne viste, at der i årene fra 2002-2005 skete et massetab på omkring 152 millioner kubikmeter is om året, hvor af hovedparten kom fra Vestantarktis.

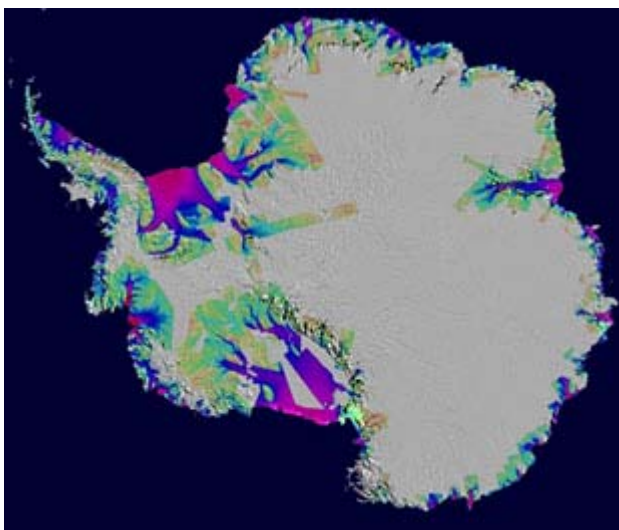
I 2008 offentliggjorde amerikanske og hollandske klimaforskere resultatet af højdemålinger baseret på [laseraltimetri med ICESat](#) i perioden 2003-2006 samt af radarbaserede højdemålinger med satellitterne ERS-1 og ERS-2 fra 1994.

For Østantarktis viste målingerne, at gletscherne i Wilkes Land var udtyndet en smule, mens de gletschere, der har udløb i Filcher-Ronne ishylden og Ross ishylden var blevet lidt tykkere. Til sammen gav det et beskedent massetab på omkring 4 millioner tons om året.

I Vestantarktis var massetabet fra gletscherne med udløb i Bellinghousenhavet og Amundsenhavet på omkring 132 millioner tons i 2006, hvilket repræsenterer en forøgelse på 59 procent i løbet af de foregående ti år.

På den Antarktiske halvø svandt iskappen ind med omkring 60 millioner tons i 2006, hvilket svarer til en forøgelse af massetabet over de seneste ti år på 159 procent. Netop på halvøen har opvarmningen været størst, og middeltemperaturen er steget 2,5 grader gennem de seneste 50 år.

Det samlede massetab fra iskapperne på Antarktis er nu på omkring 200 millioner tons om året, hvilket medfører en årlig vandstandsstigning i verdenshavene på 0,4 millimeter.



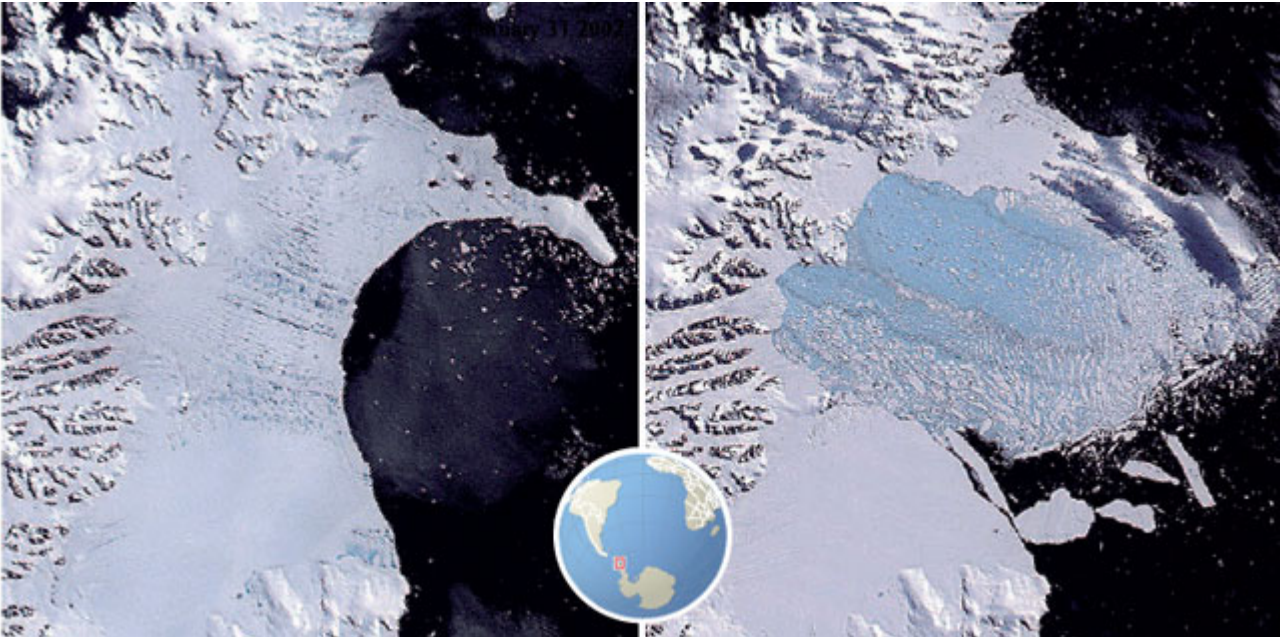
I 2006 mistede iskapperne på Antarktis 200 millioner tons is. Massetabet fra stigende afsmeltning og accelererende gletschere overstiger nu den øgede akkumulation af sne. Her er det massetabet fra 1996 til 2006, der er lagt oven på et MODIS-billede af Antarktis. Farverne indikerer hastigheden af massetabet. Lilla/rød er hurtig, mens grøn er langsom. Grafik NASA.

Ishylder og gletschere

Et af de centrale spørgsmål med hensyn til, hvordan iskappen på Vestantarktis og den Antarktiske Halvø vil reagere på den forventede opvarmning frem imod år 2100, er stabiliteten af de flydende ishylder på havet. Hvis ishylderne bryder sammen som følge af temperaturstigninger i Sydhavet, er der risiko for, at de bagvedliggende isstrømme accelerer dramatisk og øger transporten af is fra iskappens indre dele til havet. Netop det fænomen har man observeret efter sammenbruddet af Larsen B ishylden ved den Antarktiske Halvø i 2002.

Observationer gennem de seneste år har vist, at flere af ishylderne i Amundsenhavet udtyndes. Det har ført til, at gletscherne – især Pine Island gletscheren - er accelereret, hvilket har udtyndet iskappen omkring de bagvedliggende isstrømme. Udtyndingen er sket, selv om nedbøren er øget i området siden

1980. Pine Island gletscheren dræner sammen med Thwaites gletscheren og nogle mindre gletschere en trediedel af iskappen på Vestantarktis, og iskappen er sårbar i dette område, fordi store dele af isen hviler på havbund, som ligger en kilometer eller mere under havniveau.



Satellitbilleder viser det dramatiske opbrud af Larsen B ishylden ved den Antarktiske Halvø i 2002. Ishylden havde en udstrækning på 12.500 kvadratkilometer. De gletschere, der tidligere mandede ud i ishylden, er siden accelereret voldsomt. Foto fra National Snow and Ice Data Center.

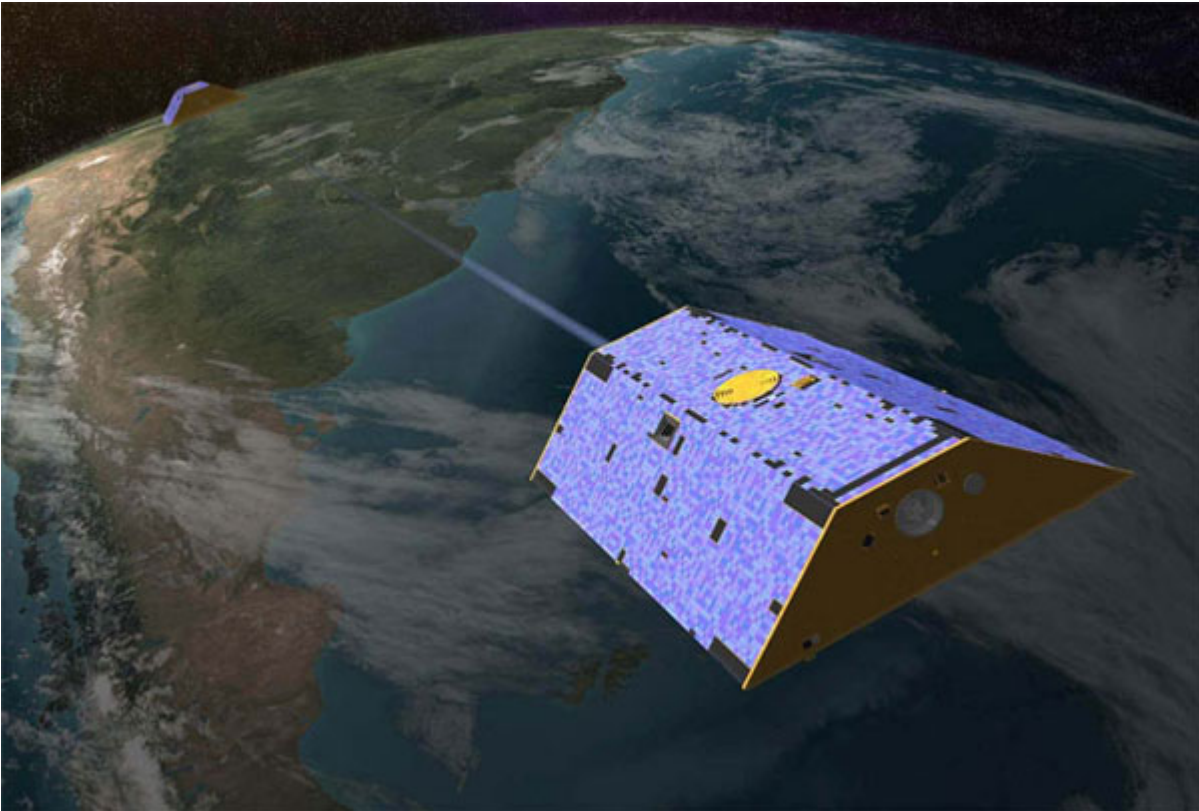
Ingen iskappemodeller kan i dag give pålidelige forudsigelser for, hvordan den følsomme iskappe på Vestantarktis vil reagere, hvis temperaturen fortsætter med at stige i de kommende århundreder.

Temaet er skrevet af videnskabsjournalist Rolf Haugaard Nielsen.

Målinger på Jordens store iskapper

Iskapperne på Grønland og Antarktis er så store og svært tilgængelige, at kun observationer med satellitter har gjort det muligt at vise, at iskapperne nu mister masse som følge af den globale opvarmning. Observationerne fra rummet suppleres regionalt og lokalt med målinger fra fly, med data fra målestationer på isen og i de isfrie kystområder samt via observationer i felten.

Målinger af isens tyngdefelt



De to GRACE satellitter har målt variationer i tyngdefeltet fra Jordens store iskapper siden opsendelsen i 2002. Grafik fra The University of Texas Center for Space Research.

Når vi i dag ved med sikkerhed, at iskapperne mister masse, skyldes det især observationer med de to satellitter i Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), som måler Jordens tyngdefelt. De to satellitter omkredser kloden i en 485 kilometer høj bane med en indbyrdes afstand på 220 kilometer, og de overflyver et givet punkt på jordoverfladen med 30 dages mellemrum.

Når tvillingesatellitterne flyver hen over en stor masse som f.eks. indlandsisen på Grønland, trækker massen først i den forreste satellit og derpå i efterfølgeren. Det skaber små variationer i afstanden mellem de to satellitter, hvilket måles ved hjælp af mikrobølger, som afsendes mellem satellitterne. Ændringerne i den indbyrdes afstand omregnes til tyngdefeltet og dermed til iskappens masse i et givet område. Når en iskappe mister masse på grund af øget smeltning og kælving af isbjerge, registreres det i de gentagne målinger.

Svagheden ved tyngdemålinger er, at satellitterne ikke kan skelne mellem masseændringer i isen og masseændringer som følge af landhævning. Landet har hævet sig omkring iskapperne siden istidens afslutning, fordi undergrunden ved begyndelsen af den nuværende mellemistid blev befriet fra trykket fra istidens meget større iskapper. Den igangværende landhævning må derfor modelleres og trækkes fra den samlede masseændring for at bestemme ændringerne i iskappen.

GPS-målinger viser landhævning og smeltning

Netværk af GPS-stationer opbygges i disse år på grundfjeldet langs med isranden på både Vestantarktis og i Grønland. Stationerne skal måle den igangværende landhævning, og de opnåede data vil gøre det lettere at tolke tyngdemålingerne fra GRACE satellitterne, så iskappernes massetab kan bestemmes med større sikkerhed. Stationerne er så følsomme, at de også kan måle landhævning som følge af nutidig smeltning af isen.

Andre GPS-stationer anbringes på iskapperne, hvor de anvendes til at måle isens flydning og bestemme hastigheden af isens bevægelser på overfladen samt måle højdeændringer som følge af isens flydning.

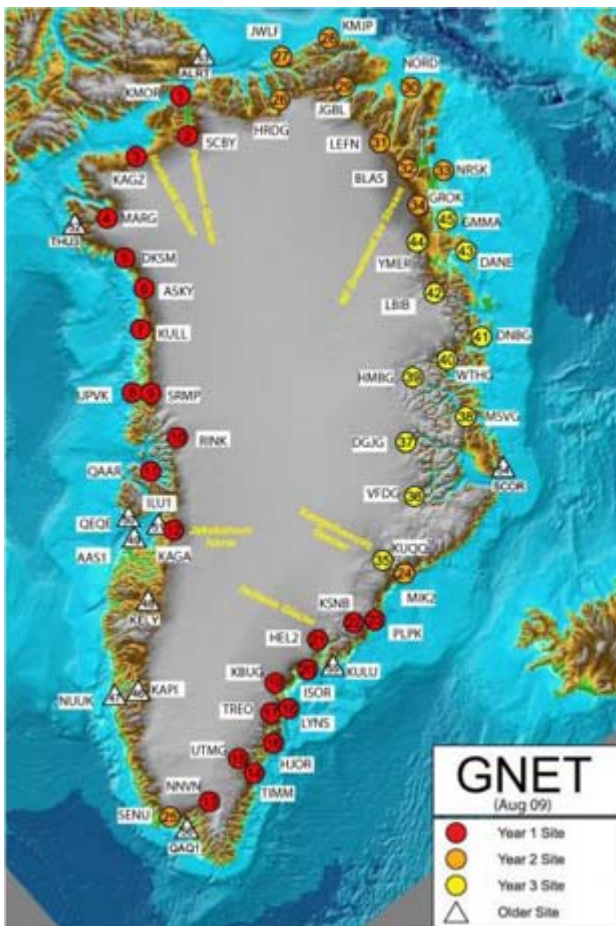
Observationerne koordineres via det internationale program [POLENET](#) med USA som primus motor. Inden udgangen af 2010 skal 54 GPS-stationer være installeret hele vejen rundt omkring indlandsisen på Grønland i delprogrammet GNET, mens 32 stationer vil være sat i drift på Vestantarktis.

Højdemålinger fra satellitter og fly

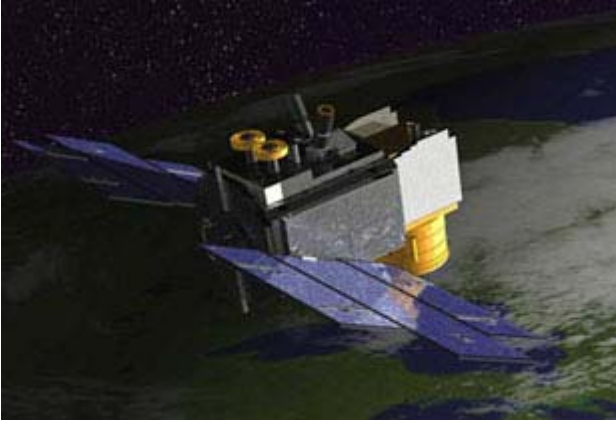
Højdemålinger af iskappernes overflader fra satellitter og fly viser ændringer i isens masse. De mest anvendte metoder er radarmålinger og lasermålinger (LIDAR). Ved radarmålinger sendes radarbølger ned imod isen, hvorfra bølgerne reflekteres af overfladen tilbage til flyet eller satellitten. Ankomsttidspunktet af de reflekterede bølger viser iskappens højde på et givet sted; jo hurtigere bølgerne vender tilbage, jo højere beliggende er overfladen i det område, som overflyves. Lasermålinger fungerer efter samme princip.

En af de bedste satellitter til højdemålinger er [ICESat](#), som kan påvise højdeændringer på blot 1,5 centimeter over arealer på 100 x 100 kilometer. Højdeændringer over mindre geografiske områder kan måles med høj opløsning fra fly, men til gengæld er det praktisk umuligt at dække de gigantiske iskapper i deres helhed.

Svagheden ved højdemålinger er, at højdeændringer ikke nødvendigvis er lig med masseændringer. Hvis sne fryser til is, som er mere kompakt, synker overfladen, men massen ændres ikke.

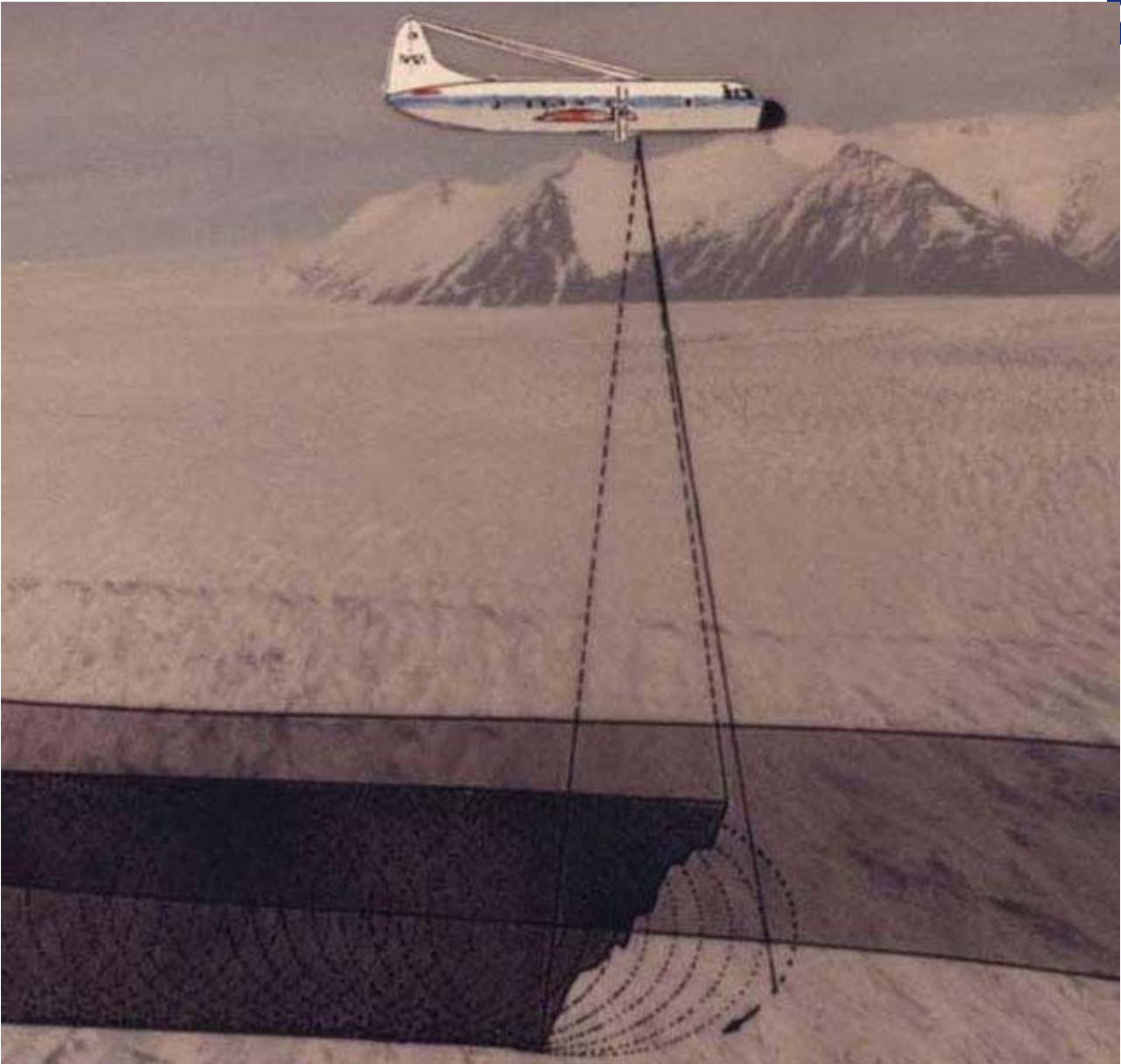


Et netværk med 54 meget robuste GPS-målestationer i Grønland vil være helt udbygget i 2010. Grafik fra [Polenet.org](#)



ICESat måler højdeændringer i Jordens store iskapper. Grafik fra NASA.

Målinger af gletschernes hastighed

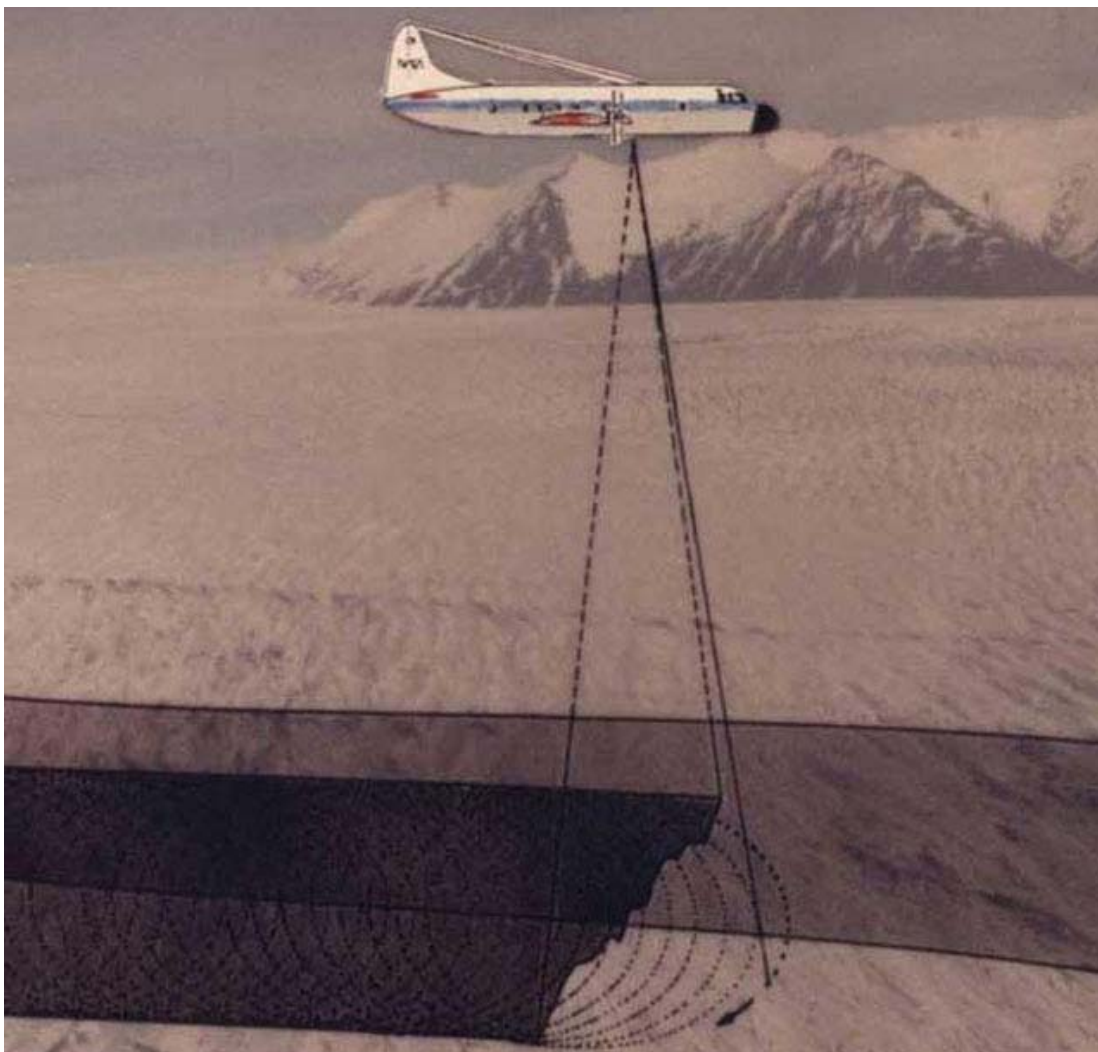


Grafik NASA.

Målinger med radarinterferometri fra satellitter og fly kan bestemme gletscheres flydehastighed med stor præcision. Målingerne giver et topografisk billede af gletscherens overflade, som ændrer sig over tid som følge af isstrømmens bevægelser. Metoden kræver overflyvninger med jævne mellemrum.

Gletscheres flydehastighed kan også måles ved hjælp af GPS modtagere, der anbringes på overfladen af isstrømmen. Metoden giver meget nøjagtige punktmålinger, men dækker ikke lige så store geografiske områder som satellitbillederne.

Målinger af afsmeltning



Grafik NASA.

Afsmeltning fra iskapperne bestemmes ved punktmålinger fra vejrstationer samt via observationer fra satellitter, som måler refleksionen fra iskappen, som ændrer sig, når sne og is smelter.

GEUS opstiller i disse år et netværk af avancerede målestationer i Grønland i programmet [PROMICE](#). Det nye netværk vil medvirke til give bedre data for indlandsisens overflademassebalance, dvs. sige forholdet mellem akkumulation af masse som følge af nedbør og tab af masse som følge af afsmeltning.

Vejrstationerne opstilles på indlandsisen, og de besøges om foråret, inden vintersneen begynder at smelte. Her sænkes et kabel ned i et børehul, som går gennem sneen og ned i isen. Om efteråret, når smeltesæsonen er slut, besøges vejrstationen igen, og man måler, hvor meget isoverfladen er sunket som følge af smeltning om sommeren. Vejrstationerne måler samtidig lufttemperaturer, luftfugtighed, vindretninger og vindhastigheder.

Alle data fra punktmålingerne anvendes til modelberegninger, som giver et bud på afsmeltningen i større geografiske områder.

*Temaet er skrevet af videnskabsjournalist Rolf Haugaard Nielsen.
Redaktion Bjarne Siewertsen, bsi@dmj.dk
© DMI, 11. oktober 2009.*