

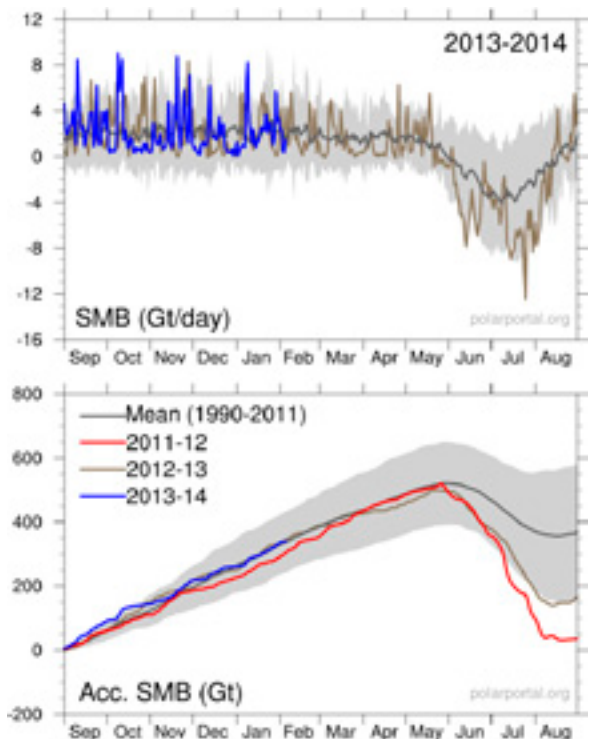
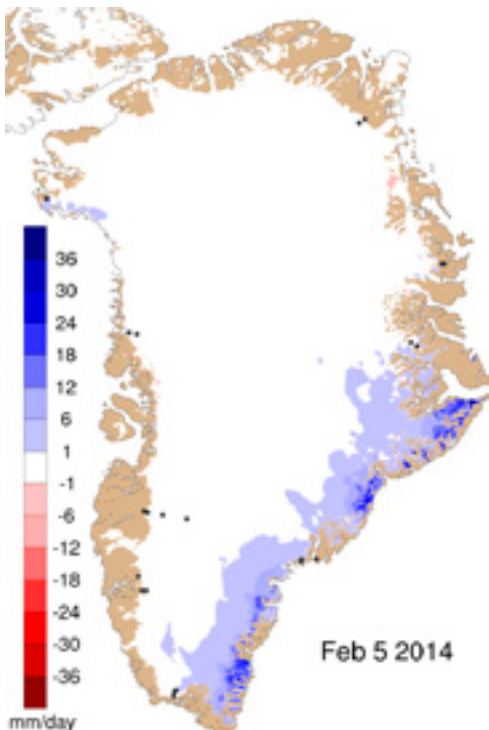
# Overflademassebalance af Grønlands Indlandsis

Af Ruth Mottram,  
Klimaforsker, DMI

Gletsjere og iskapper er store og langsomt bevægelige reservoirer af ferskvand, som 'fodres' ved nedbør, men mister masse ved smeltning og ved kælvning af isbjerge. Hvis der falder mere sne, end der afgives, vil gletsjeren vokse, og hvis der – omvendt – afgives mere sne, end der akkumuleres, vil iskappen eller gletsjeren trække sig tilbage og skrumpede ind. Så langt, så godt.

En vigtig del af vores daglige aktiviteter i forskningsafdelingen på DMI vedrører effekterne af klimaændringer i Arktis, - og især den totale massebalance af Indlandsisen i Grønland. Massebalancen er vigtig, både globalt og regionalt, fordi den er bestemmende for, hvor meget havet vil stige eller falde. Desuden har den indflydelse på den lokale temperatur, og den har konsekvenser for f.eks. areal anvendelse og vandkraft udvikling. Potentielt kan den påvirke det regionale og globale klima gennem ændringer i oceanisk eller atmosfærisk cirkulation.

Den samlede massebalance har to hovedkomponenter. Den ene beskæftiger sig med overfladeprocesser som nedbør, smeltning og afstrømning. Den anden er en dynamisk komponent i forbindelse med bevægelsen af gletsjere, herunder kælvning. Opdeling af massetabet knyttet til hver af disse to komponenter er væsentlig for forståelsen af, hvordan Indlandsisen reagerer på en klimapåvirkning. Eksempelvis i begyndelsen af 2000'erne, hvor en række udløbsgletsjere i det sydøstlige Grønland accelererede under samtidig tilbagetræk-



ning medførte et stort massetab ved dynamiske processer. Dog er denne type hændelser som regel kortvarige, og på længere tidsskala betragtes overfladens massetab som vigtigere for Indlandsisen i Grønland. I Antarktis derimod foregår det meste af massetabet via kælvning af isbjerge, eller smeltning, der finder sted fra undersiden af flydende is-hylder (shelfer) i havet. Den sidstnævnte proces er sandsynligvis også væsentlig i visse dele af Grønland. Den er f.eks. blevet opfattet som en del af forklaringen på den massive acceleration og det tilbagetog, der er iagttaget i Jakobshavn Isbrø i de sidste 10 år, men den er endnu dårligt kvantificeret og modelleret.

Lanceringen i 2013 af hjemmesiden *polarportal.dk* (*polarportal.org* på engelsk, en fælles produktion af DMI, GEUS og DTU-Space) giver nu alle mulighed for at kontrollere den aktuelle tilstand af Indlandsisen i Grønland, herunder positioner af gletsjerfronter for udvalgte udløbsgletsjere, baseret på sa-

tellit billeder og på skøn, baseret på den samlede massebalance ud fra tyngdekraftmålinger fra GRACE satellitterne. Også Indlandsisens daglige overflademassebalance (SMB) bliver præsenteret og sammenlignet med det langsigtede gennemsnit for at vise, hvordan Indlandsisens overflademassebalance-’vejr’ ser ud i dag.

SMB-model systemet på polarportalen tager output fra HIRLAM vejraprognose modellen og kører det gennem en anden SMB-model hver dag. Outputet akkumuleres over et ’hydrologisk år’ (der løber fra 1. september til 31. august) for at opnå et årgennemsnitligt SMB. På sitet sammenlignes SMB også med gennemsnittet af en 24 års klima simulering (1989-2012) ved hjælp af DMI’s regionale klimamodel HIRHAM5. Denne model har en lidt anderledes atmosfærisk forcering, men samme SMB-overflade massebalancemodel, så det giver os mulighed for at vurdere, hvor repræsentativt det aktuelle vejr er i forhold til det nuværende klima (Figur 1).

Overflade-massebalancen i Grønland er domineret af snefald, som figur 1 viser. Akkumulering forekommer i 9 måneder af året, mens ablation oftest forekommer i de 3 sommermåneder juni, juli og august. Vores modelsimuleringer, der med succes er blevet valideret mod iskerneobservationer og nedbørmålinger fra iskappen (PROMICE og GC-NET vejrstationer) og uden for iskappen (DMI automatiske vejrstationer), viser et årgennemsnit for snefald på omkring 664 km<sup>3</sup> over Indlandsisen i dag (1989 - 2012). Disse lag presses

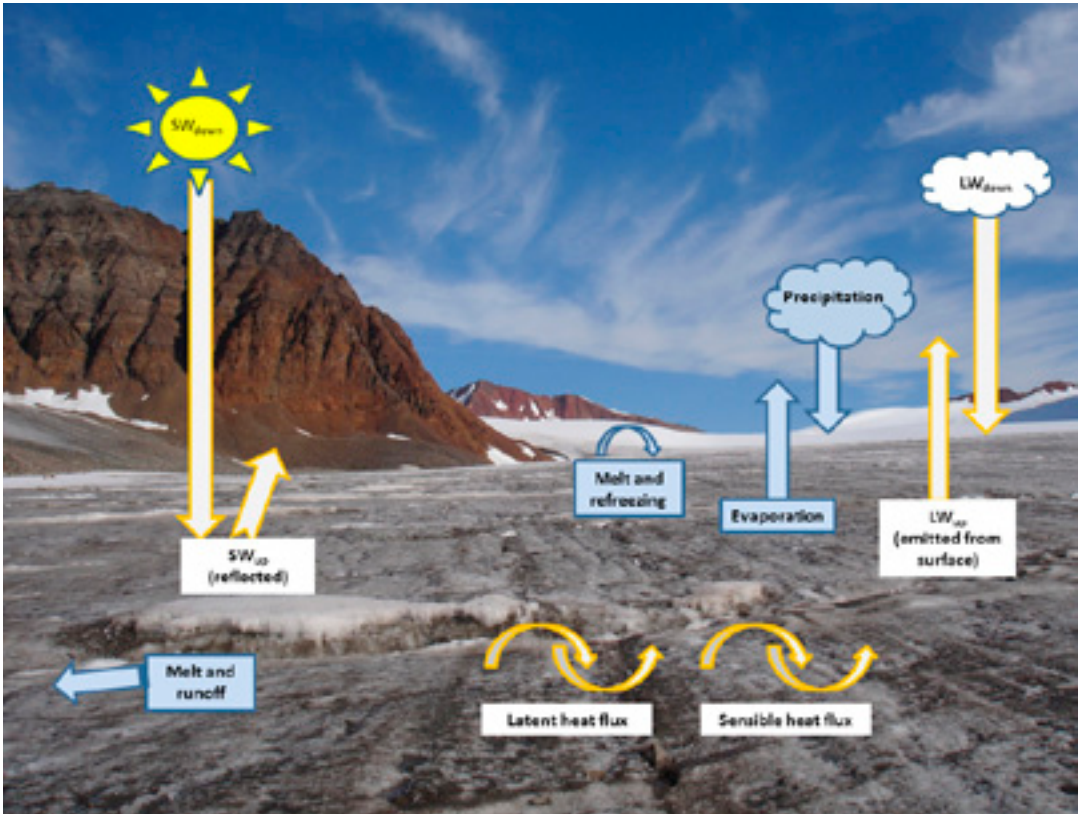
efterhånden sammen til gletsjeris og begynder at flyde nedad som reaktion på de ændringer i overfladehældningen, der er forårsaget af smeltning i lavere højder og akkumulering højere oppe. På den måde driver overflade massebalancen den interne strøm af gletsjere.

Processer for massetab er den anden del af beregningen af overflademassebalancen. Sublimering og fordampning af vanddamp direkte fra overfladen er en vigtig proces i forbindelse med massetab, især om vinteren, mens smelteprocesser dominerer massetabet om sommeren. Smeltning beregnes almindeligvis ved hjælp af en af følgende to metoder: en temperatur indeksmodel (eller ’grad-dag-model’), der tager en funktion af den målte eller modellerede temperatur over smeltepunktet og beregner smeltehastigheden, eller en energibalance-fremgangsmåde, som er mere fysisk repræsentativ for processerne. DMI’s klimamodel bruger den sidstnævnte teknik, som indebærer opsummering af nettostråling og turbulente varmestrålinger med jordens varme-stråling for at finde den samlede energi til rådighed ved overfladen (ligning 1).

$$SW_{\text{net}} + LW_{\text{net}} + QE + QL + GE - ME = 0$$

Modellen beregner solens indkommende kortbølgede stråling, som modregnes med en reflekteret komponent afhængig af overfladens albedo for at få  $SW_{\text{net}}$ . Den indkommende langbølgestråling, som primært udsendes fra atmosfæren og skyerne, modregnes af den udgående langbølgede stråling, beregnet på bag-

Figur 1. Eksempler på overflade massebalance fra *polarportal.dk*. a) daglig overflade massebalance for Grønland i mm/døgn. De sorte prikker viser placeringen af PROMICE automatiske vejrstationer, der anvendes til at validere modellen. b) Akkumuleret overflade massebalance over det hydrologiske år (regnet fra september 2013). Det grå skraverede område viser middelværdi og standardafvigelse for SMB, baseret på HIRHAM5 regionale klimamodel for perioden 1990-2011. Den blå linje er det beregnede SMB for det hydrologiske år (fra september 2013), mens de to foregående år, 2012-2013 og 2011-2012, er vist som hhv. mørkegrå og røde linjer. (Kilde: *polarportal.dk* / *polarportal.org*).



Figur 2. Overfladens energi budget over gletsjere, med komponenterne anført i de gule og hvide bokse. Overfladens massebalance komponenter vist i blå bokse. Baggrundsbilledet er fra Staunings Alper i Østgrønland i sensommeren. Den blottede gletsjeris i den nederste del af billedet har en meget lav albedo på grund af ophobning af støv på overfladen, der virker som en feedback, der yderligere forøger smeltningen. Øverst i billedet, hvor der stadig er sne på gletsjeren, er albedoen høj, således at meget mere SW stråling reflekteres og smeltningen begrænses.

grund af overfladens udstråling, for at få netto langbølget stråling ( $LW_{net}$ ). Netto turbulente fluxer i (1) består af den varmestråling (QE), der beskriver overførsel af energi på grund af forskellen i temperaturen mellem jordoverfladen og atmosfæren (det er i virkeligheden sensibel varmeoverførsel, der giver anledning til for eksempel vindens chillfaktor) og den latente varme (QL, også kendt som enthalpi), som er en konsekvens af ændringer i fasen (smeltning, fordampning, frysning og sublimering) på overfladen. De to sidstnævnte udtryk er stærkt afhængige af lufttempera-

tur, luftfugtighed og vindhastigheder. De atmosfæriske varmeenergier summeres med jorden varme flux (GE), der indeholder energi overførsel til og fra undergrunden, for at nå frem til overfladetemperaturen. På en gletsjer antager vi, at temperaturen ikke kan nå over smeltepunktet, og da vi anvender termodynamikkens første hovedsætning, vil yderligere energi bidrage til smeltning (ME). I vores model kan både sne og gletsjeris smelte og genfryse eller afstrømme.

Smeltning kan forekomme overraskende højt oppe på Indlandsisen. For eksempel har de

automatiske målestationer i PROMICE nettet registreret smeltning i 1800 meters højde nær Kangerlussuaq i 2013, som var en temperaturmæssigt forholdsvis gennemsnitlig (sammenlignet med 1989-2012 gennemsnittet) sommer i Grønland. I 2012 blev der kortvarigt observeret smeltning over hele Indlandsisen, og smeltning blev endda observeret på Summit-stationen. De usædvanlige forhold i sommeren 2012 tiltrak sig megen opmærksomhed, hvad angår Indlandsisen, og virkede som en fremragende test af modellen, idet både HIRLAM og HIRHAM5 var i stand til

at gengive disse ekstreme forhold (se figur 2). Selvom denne begivenhed grafisk viste smeltning, er det ikke ensbetydende med massetab for Indlandsisen.

Når sne på overfladen smelter, eller hvis det regner på snelaget, vil vandet først sive ned i de dybere snelag og genfryse, når disse er kolde nok, og tilføje masse til gletsjeren. Med dannelse af *islinser* og *isfingre*, som man har observeret i de dybere lag, er dette er en meget heterogen proces og derfor yderst kompliceret at modellere. De pågældende is-egenskaber har en betydelig indvirkning på tætheden af snelagene, og de reducerer den lokale albedo, når de befinder sig i overfladen, ligesom deres dannelse frigiver latent varme, som opvarmer den omgivende sne. Dannelse af vidtstrakte islag kan

også forhindre yderligere smeltning i at nedsive til dybere lag, men genfrosset is i overfladen kan stadig smelte igen senere i smeltesæsonen, hvilket dog effektivt forsinker afstrømningen og dermed er en vigtig proces at have i erindring, når SMB beregnes.

Vores beregning af endelig SMB er således (2):

$$\text{SMB} = \text{Nedbør} - \text{Fordampning} - \text{Sublimering} - \text{Afstrømning} \quad (2)$$

$$\text{hvor Afstrømning} = \text{Smeltning} + \text{Regnmængde} - \text{Genfrysning}$$

Den regionale klimamodel HIRHAM5 anslår, at den gennemsnitlige årlige SMB er omkring  $367 \text{ km}^3$  hen over 1989–2012 perioden, hvilket er i overensstemmelse med andre model es-

timater og med beregnede SMB på steder, hvor komponenterne måles præcist. I tiden fremover forudser vores modeller en lille stigning i nedbøren inde midt på isen, men der forventes en markant stigning i smeltning og afstrømning, som vil overstige nedbørsstigningen og føre til accelereret tilbagetrækning og havstigning, selvom omfanget af dette forløb er meget afhængigt af, hvilket emissions scenario, der vælges, og til en vis grad af den globale klimamodel (GCM).

Kombination af SMB-modellen med outputtet fra vejrudsigtsmodellen HIRLAM over Grønland er således en effektiv og realistisk måde at vurdere Indlandsisens aktuelle tilstand på, og for første gang nogensinde har vi nu midlerne til at gøre det næsten i *real time*.

## Ved Østersøen dog...

*Påskeøsten* ramte plet i år. Den gav dels skyer under påvirkning fra et lavtryk over Tyskland (hvor der i øvrigt var både sne, hagl og torden), dels højt solskin fra et højtryk over Skandinavien. Særlig skyfri var påskelørdag. Det betød meget smukke satellitbilleder på dmi.dk. Her vises et infrarødt NOAA-billede fra lørdag aften. Overfladetemperaturen gengives i gråtoner, hvor hvidt er koldt, sort varmt. Friholdt for kolde skyer var det beskrevne temperaturinterval snævert, hvorved der 'blev råd til' en fornem gengivelse af detaljer i havtemperaturen. At der var køligt ved østersøkysterne forstås umiddelbart – det havde været værre, hvis påsken var faldet tidligere.

Bemærk strømhvirvlerne i læ af Bornholm, specielt nær Falster, samt det varme vand i bl.a. Lim-

fjorden og det kolde vand i de store svenske søer.

*Leif Rasmussen*

