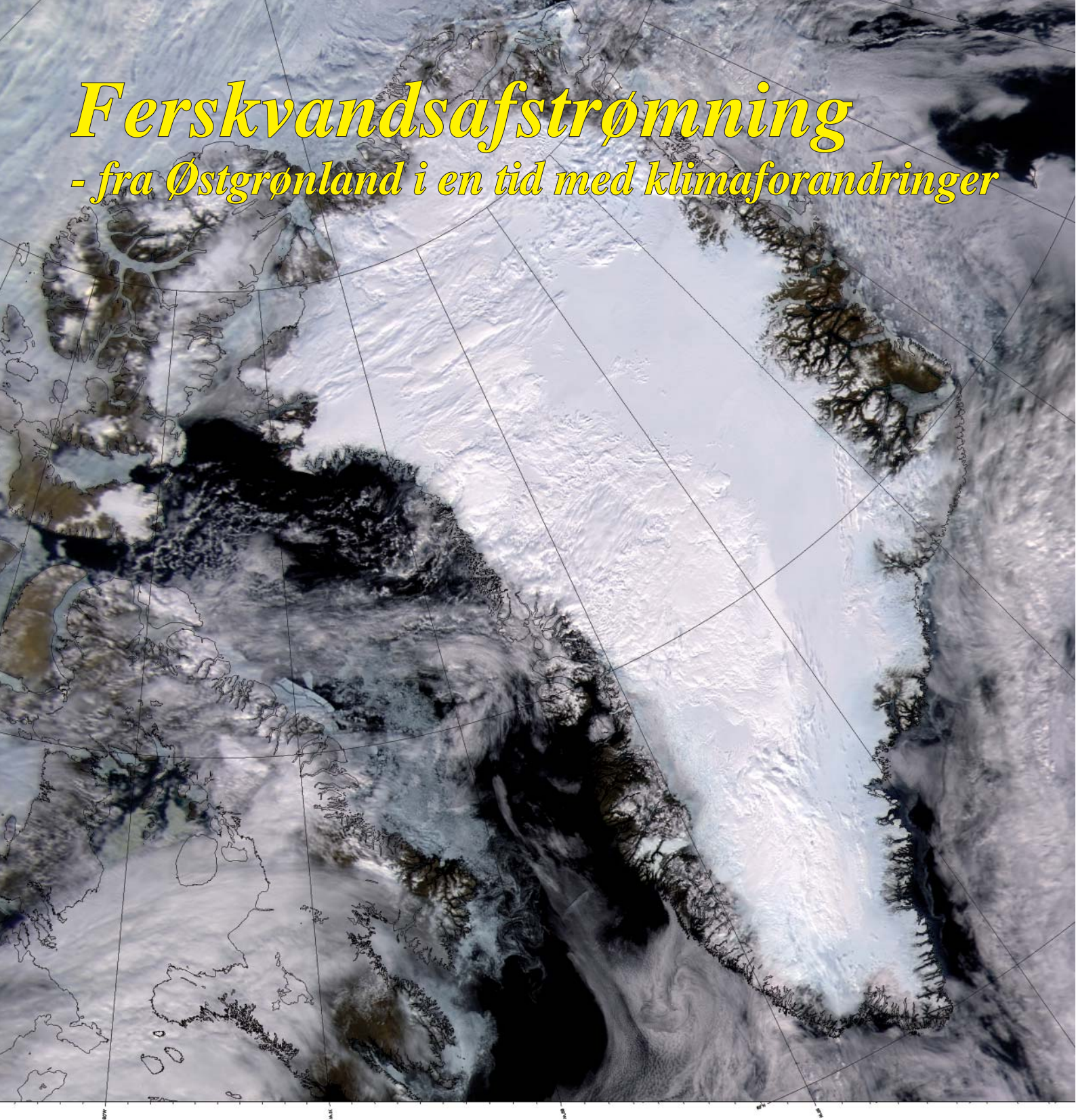


Ferskvandsafstrømning

- fra Østgrønland i en tid med klimaforandringer



Indlandsisen i Grønland set fra satellit 15. juli 2000. (Copyright: SeaWiFS Project, NASA/Goddard Space Flight Center, and ORBIMAGE)

Af ph.d. og postdoc Sebastian H. Mernild, International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks, USA og lektor Bent Hasholt, Institut for Geografi og Geologi, Københavns Universitet.

Danske forskningsstationer i Østgrønland bidrager med nyttig viden til bestemmelsen af klimaets effekt på ferskvandsafstrømningen fra

Østgrønland inklusive Indlandsisen. En ferskvandsmængde, der samlet set forventes at stige med 50 % i fremtiden (2071–2100).

“Ice on the Run, Seas on the Rise” – sådan er effekten af klimaforandringerne. I en tid, hvor klimaforandringer i stigende grad fylder i vores bevidsthed og dagligdag, er behovet for en bredere og bedre forståelse

af klimaets variationer, indvirkning på og samspil med den arktiske cryosfære (sne, is og permafrost) og hydrologi steget betydeligt. Ændringer i cryosfærens elementer og i hydrologiske processer er et resultat af klimaforandringerne. Inden for de sidste fire til fem årtier er der observeret en markant temperaturstigning i Arktis med iøjnefaldende ændringer til følge – blandt andet i sne- og isudbredelsen samt i afsmeltningen og afstrømningen fra lokale gletschere og

fra Indlandsisen. En forståelse af de nutidige og tidligere tiders cryosfæriske og hydrologiske processer og variationer er nødvendig for modellering af fremtidige klimaændringers effekt på ferskvandsbidraget fra Østgrønland.

Observationer fra forskningsstationer

I Østgrønland findes meget få observationer af cryosfæriske og hydrologiske ændringer over lang tid.

Sermilik Stationen, som er beliggende ved Mittivakkat-gletscheren nær byen Tasiilaq (Ammassalik) i det lavarktiske Sydøstgrønland (65°N), er én af to fungerende kystnære forskningsstationer på den cirka 3.000 km lange østkyst, hvor der i de sidste 15 år er forsket intensivt i klimaets effekt, og hvor der samtidig findes meteorologiske observationer tilbage til 1895 foretaget af Danmarks Meteorologiske Institut (DMI).

Den anden forskningsstation er Zackenberg beliggende i det højarktiske Nordøstgrønland (74°N) nær stationen Daneborg. Ved Mittivakkat-gletscheren blev der i 1933 for første gang udført videnskabelig forskning i cryosfæriske processer i form af målinger af gletscherens udbredelse og afsmeltning. Feltnålinger, som i 1958 og med jævne mellemrum derefter er blevet gentaget med den hensigt at belyse den direkte cryosfæriske og hydrologiske effekt af



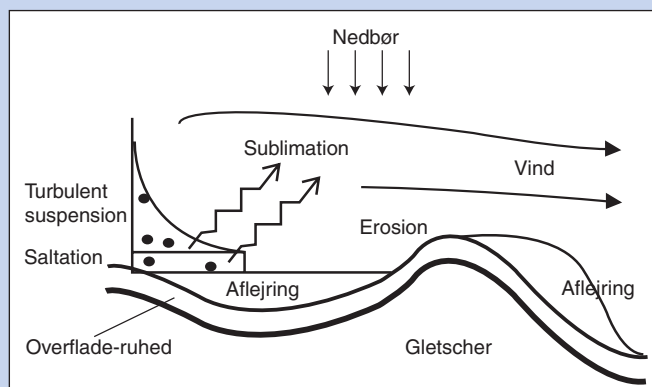
Mittivakkat-gletscheren (31 km²) ved forskningsstationen Sermilik på øen Ammassalik, Sydøstgrønland. Mittivakkat-gletscherens massebalance har været målt kontinuerligt siden 1994 og er den eneste opmålte gletscher i Østgrønland med en sammenhængende tidsserie. Siden de første observationer for godt 75 år siden, i 1933, har gletscherfronten trukket sig i gennemsnit 1,3 km tilbage (= en gennemsnitlig afsmeltning på 18 meter pr. år). Modelberegninger fra 1898 til 2005 bekræfter denne ablations-tendens, da negativ massebalance, altså tab, og forøget afstrømning til havet forekom i 89 ud af de 107 år. Det er et tegn på, at gletscheren er ude af balance med nutidens klimatiske forhold som følge af klimaforandringer, hvilket er generelt for langt de fleste lokale gletschere i det arktiske område. (Foto: Danish Journal of Geography)

SnowModel

SnowModel er et modelværktøj, som udover at simulere snefordeling og -udvikling er i stand til at beregne overfladeafsmeltningen og afstrømningen fra sne og gletscheris (figur). SnowModel har været afprøvet og testet geografisk bredt – i forskellige klimatiske og fysiske miljøer i både Arktis og Antarktis samt i det vestlige USA. Modellen er anvendt med en opløsning fra 5×5 meter til 5×5 km, og tidsmæssigt fra 10 minutters interval til årligt interval. SnowModel er en overflademodel. Rutiner til beregning af gletscherdynamiske processer er ikke inkluderet i modellen endnu, hvilket er et af de langsigtede mål for udviklingen af modellen.

SnowModel består af fire sub-modeller, der: 1) beregner den rumlige variation af meteorologiske parametre (fx lufttemperatur, nedbør, vindretning, vindhastighed, solarindstråling, skydække m.m.); 2) beregner energibalancen for terrænoverfladen, inklusiv energibidraget til smeltning af sne og is, fordampning og sublimation fra bl.a. fygesne; 3) simulerer fordelingen og transporten af sne rundt i landskabet og 4) simulerer

Principskitse af SnowModel's hovedprocesser omkring sneaflejring og -fordeling. Når sneen smelter bort, beregnes smeltebidraget fra gletscherisens overflade automatisk i det omfang, et energipotentialer er til rådighed.

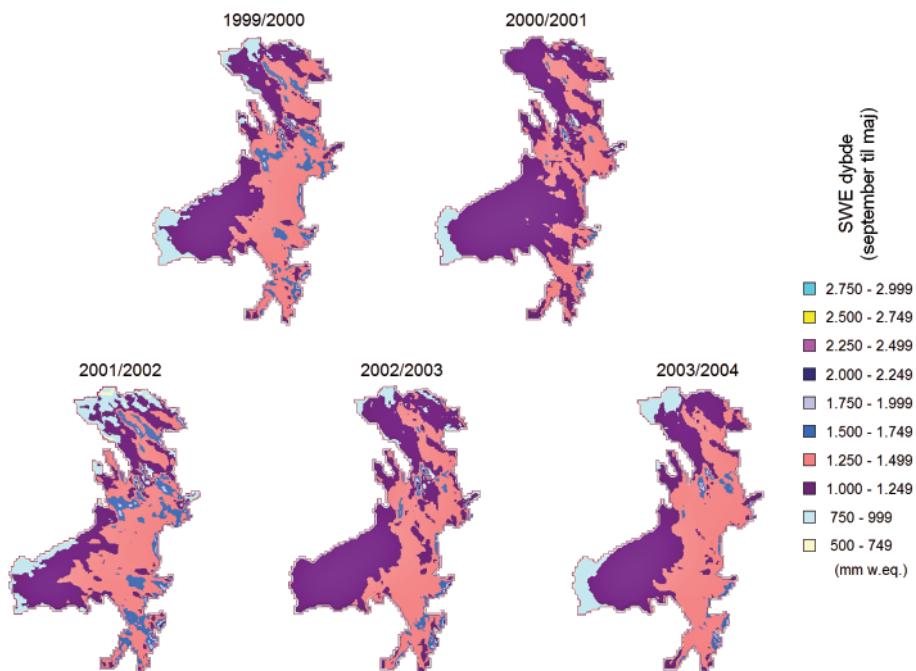


densitets-, temperatur- og snedybdeudviklingen over tid. I arbejdet med at simulere indlandsisen er meteorologiske data (lufttemperatur, relativ fugtighed, vindhastighed, vindretning og nedbør) fra 25 meteorologiske stationer fordelt på såvel Indlandsisen som i randområdet mellem iskapen og oceanet anvendt som input i modellen. Modellering af Indlandsisen er gennemført med en opløselighed på 5×5 km. SnowModel er i stand til, for perioden 1995 til 2007, at simulere Indlandsisens smelteareal med en gennemsnitlig afvigelse på 4 % fra det

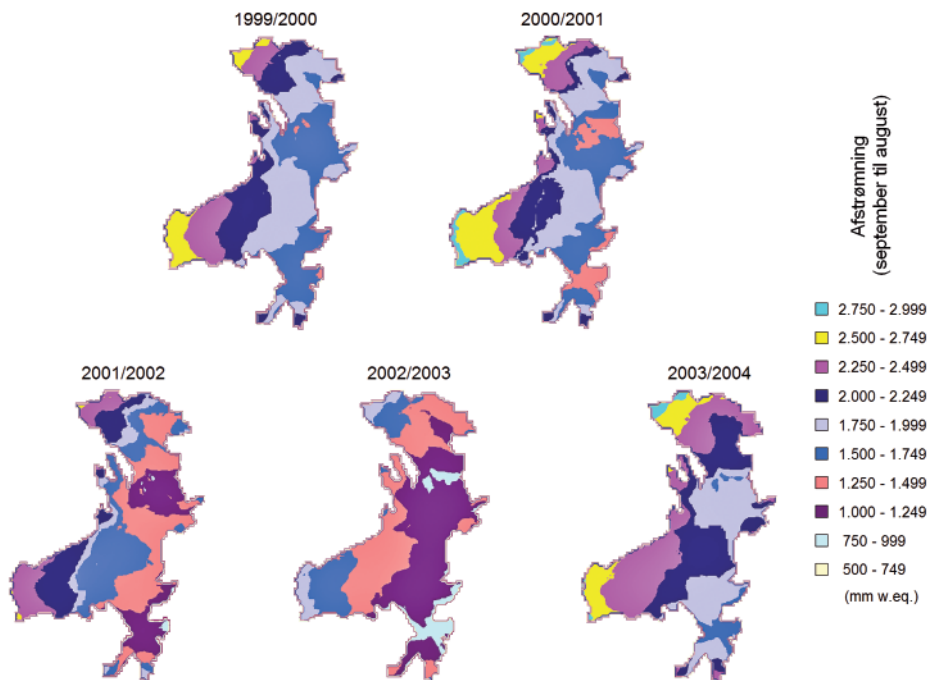
satellitobserverede areal. Desuden er den rumlige variation i det simulerede smelteareal overordnet identisk med det observerede areal for to udvalgte år 1996 (året med det mindste smelteareal) og 2007 (året med det største smelteareal). Ved at anvende SnowModel på Indlandsisen er vi kommet skridtet videre i forståelsen af de processer, der i større eller mindre grad øver indflydelse på Indlandsisens overflademassebalance.

(Denne tekst har været bragt i *Aktuel Naturvidenskab* nr. 2-2008).

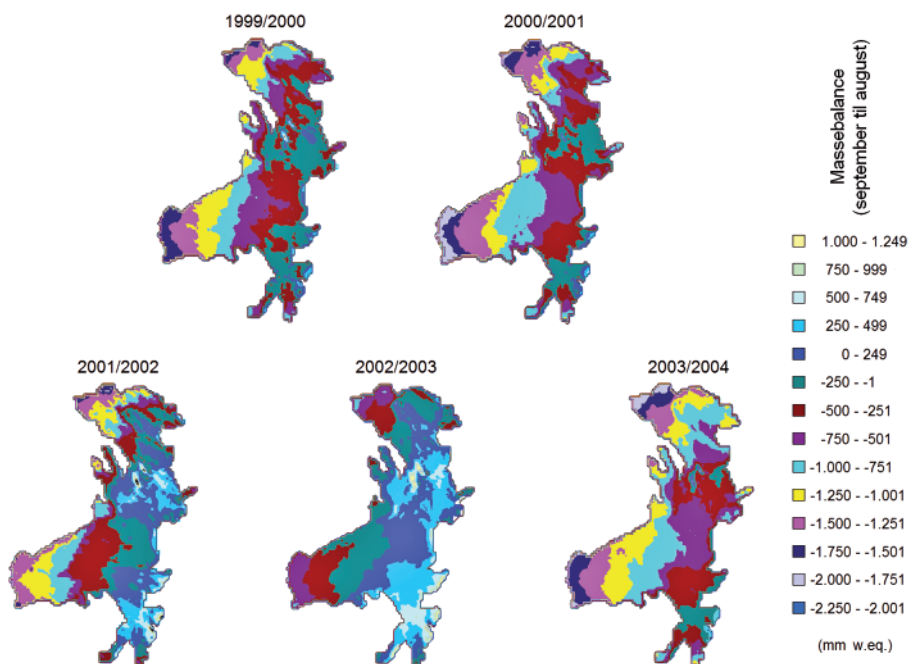
Et eksempel på modellering af snedybden ved Mittivakkat gletscheren, Sermilik, for perioden 1999 til 2004. SWE betyder snow water equivalent og er et udtryk for snedybden i sum milimeter vandsøjle (= mm water equivalent (mm w.eq)). (Grafik: Sebastian H.Mernild)



Et eksempel på modellering af afstrømningen ved Mittivakkat-gletscheren, Sermilik, for perioden 1999 til 2004. (Grafik: Sebastian H.Mernild)



Et eksempel på modellering af massebalancen ved Mittivakkat-gletscheren, Sermilik, for perioden 1999 til 2004. (Grafik: Sebastian H.Mernild)





Zackenbergdalen i juni måned. Dalen er beliggende ved udløbet af Zackenbergoplandet (512 km²) i Nordøstgrønland. (Foto: Charlotte Sigsgaard)

klimaforandringerne samt de såkaldte feedback-processer, som er processer, der styres af klimaet, men som i sig selv også påvirker klimaet.

Studier af de cryosfæriske og hydrologiske forhold og deres indbyrdes relationer ved Sermilik har gjort det muligt at efterligne processerne i fysisk baserede computermodeller som for eksempel SnowModel. SnowModel er efterfølgende blevet afprøvet og testet på sne-, gletscher- og afstrømningsforhold ved Sermilik og Zackenberg med tilfredsstillende resultat, hvorefter en regional opskalering til hele Østgrønland blev foretaget. Formålet er at beregne den regionale ferskvandsafstrømning til det Nordatlantiske ocean. Et regionalt stu-

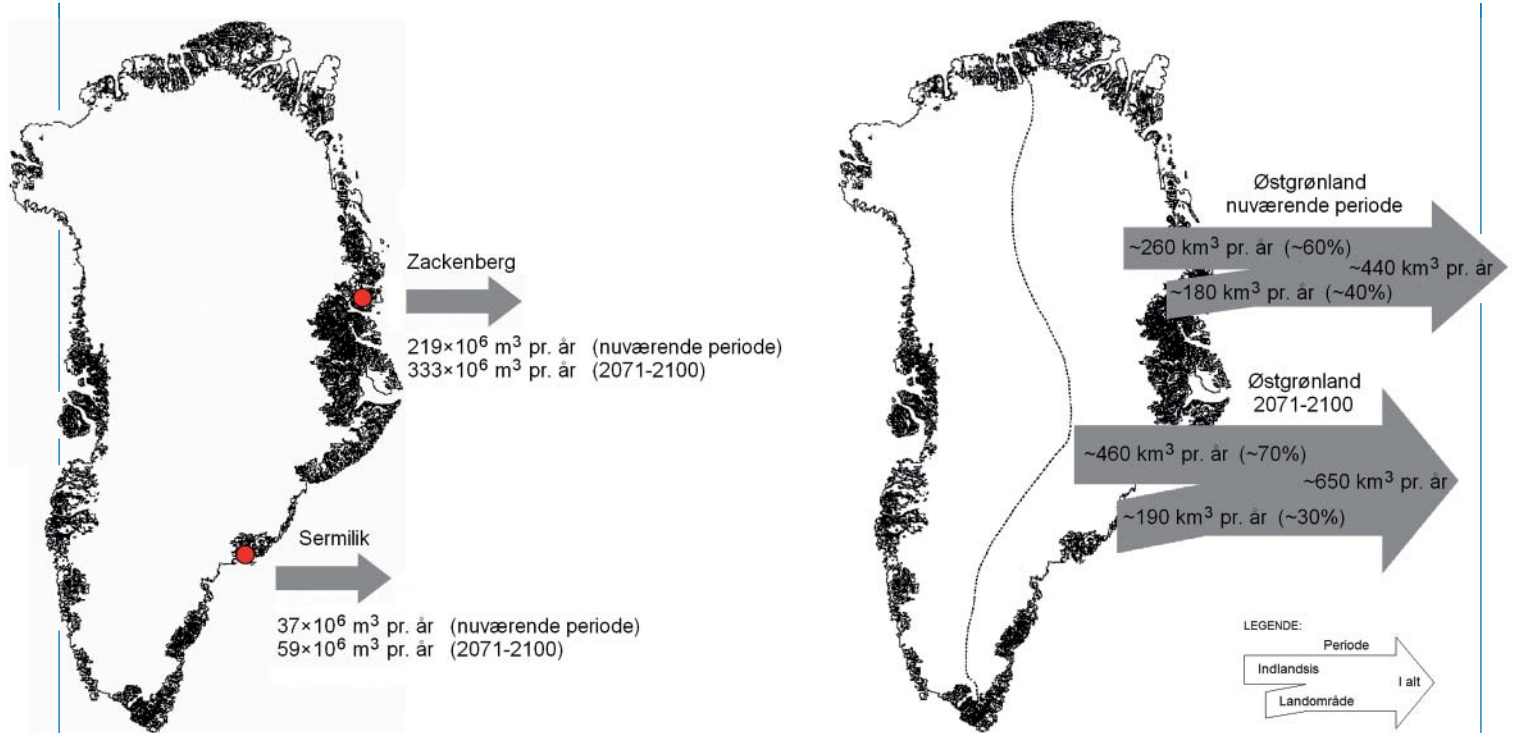
die baseret på observerede klimadata fra henholdsvis DMI's kystnære stationer og Greenland Climate Network's stationer på Indlandsisen (tilhørende University of Colorado at Boulder). Modellering af den fremtidige afstrømning (2071–2100) er gennemført ved at anvende modellerede klimadata fra DMI's regionale klimamodel HIRHAM baseret på FN's klimapanel's fremskrivninger af scenarierne A2 og B2.

For områderne Sermilik og Zackenberg er tendensen i afsmeltningen og afstrømningen den samme. I den nuværende periode ses en tilbagesmeltning af lokale gletschere og dermed en øget afstrømning til havet. Disse tendenser vil fortsætte i fremtiden baseret på modellerne og FN's klimafrem-

skrivninger. Den modellerede afstrømning fra såvel Sermilik som Zackenberg vil være omkring 60 % større i 2071-2100 end i dag, hvor afstrømningen fra de to områder henholdsvis er $37 \times 106 \text{ m}^3$ og $219 \times 106 \text{ m}^3$ pr. år. På regionalt niveau – fra Østgrønland – er det samlede ferskvandsbidrag til Nordatlanten i den nuværende periode beregnet til i gennemsnit $\sim 440 \text{ km}^3$ pr. år. Heraf kommer omkring 60 % fra Indlandsisafsmeltning og -afstrømning samt fra kælvnings af isbjerge (bidraget fra kælvnings er baseret på tidligere studier af Indlandsisen). De resterende cirka 40 % kommer fra landområdet beliggende mellem Indlandsisens rand og oceanet i form af snesmeltning, lokal gletscherafsmeltning og -afstrømning samt



Zackenbergdalen i august måned. (Foto: Charlotte Sigsgaard)



Ferskvandsbidrag fra henholdsvis Sermilik og Zackenberg og fra Østgrønland – fra Indlandsisen og landområdet beliggende mellem Indlandsisens rand og oceanet – til det Nordatlantiske ocean for perioderne 1999–2004 og 2071–2100. De fremtidige klimaestimer er baseret på FN's scenarier A2 og B2 beregnet af DMI's klimamodel HIRHAM. Beliggenheden af Sermilik- og Zackenberg-oplandene er markeret på kortet med rød cirkel. Den stiplede linje indikerer Indlandsisens topografiske vandskel, der adskiller ferskvandsafstrømningen henholdsvis mod øst og vest. (Grafik: Sebastian H.Mernild)

fra regnvand. Det samlede ferskvandsbidrag svarer til en global havniveaustigning på omkring 1,1 mm pr. år. Heraf bidrager Østgrønland alene til en nettotilvækst i havniveaustigningen på 0,3 mm pr. år.

Førøget afsmeltning

For Østgrønland viser de fremtidige beregninger (2071–2100), at det samlede ferskvandsbidrag til Nordatlanten i gennemsnit vil stige med omkring 50 % fra de nuværende ~440 km³ til cirka ~650 km³ pr. år svarende til en havniveaustigning på omkring 1,6 mm pr. år. Det fremtidige bidrag alene fra Indlandsisen vil blive omtrent fordoblet fra cirka 260 km³ til 460 km³ pr. år. Derfor

vil omkring 70 % af det samlede fremtidige bidrag alene komme fra Indlandsisen og de resterende cirka 30 % fra landområdet mellem Indlandsisen og oceanet. Tendensen er klar. Mere og mere af lokale gletschere og af Indlandsisen smelter, og mere og mere ferskvand tilføres havet.

Den forøgede grønlandske afsmeltning og det stigende ferskvandsbidrag indikerer, at indlandsisen er på vej til at blive en væsentlig bidragsyder til stigningen af det globale havniveau. Effekten af klimaforandringer kan vise sig at hæve det globale havniveau yderligere. Da havvandet samtidig vil blive varmere, kan vandstandsstigningen blive endnu større, idet vand udvider

sig i takt med, at det bliver varmere. FN's Klimapanel udkom i 2007 med fire rappor-

Vandbalanceligningen

For et afgrænset område kan man opstille en vandbalanceligning, der balancerer de faktorer, der henholdsvis tilfører eller fjerner vand fra et område. Vandbalanceligningen kan beskrives på følgende måde:

$$P - (ET+SU) - R \pm \Delta S = 0 \pm \eta,$$

hvor P er nedbør fra sne og regn (og bidrag fra kondensation), ET er for-dampning, SU er sublimation fra sne- og isoverfladen samt snefygning (sublimation er et skift i fase direkte fra fast form til dampform), R er afstrømning, ΔS er reservoirændringer (fx overfladevand, gletscheris, eller sneudbredelsen) og η er usikkerhedsparameteren.

Usikkerhedsparameteren er 0 (eller lille), såfremt alle større vandbalancekomponenter (P, ET, SU, R og ΔS) er bestemt nøjagtigt. Den sæsonmæssige akkumulation (pålejring) beregnes ud fra P og ablationen (dvs. fjernelse af materiale) ud fra ET, SU og R. Nettobalancen er den sæsonmæssige forskel mellem akkumulation og ablation.

	Sermilik (65°N)	Zackenberg (74°N)
Ændringer i årlig lufttemperatur mellem nuværende periode og FN's fremtidige klimaperiode 2071-2100 (°C)	+1,4	+3,7
Årlig modelleret middeltemperatur for perioden 2071-2100 (°C)	-0,2	-5,4
Modellerede ændringer i årlig nedbør (P) mellem nuværende periode og FN's fremtidige klimaperiode 2071-2100 (mm pr. år)	~+200	~+30
Modelleret årlig nedbør (P) for FN's fremtidige klimaperiode 2071-2100 (mm pr. år)	~1.700	~250
Modelleret gletscheris-reservoirændringer (ΔS) for nuværende periode (mm pr. år)	-600	~-1.350
Modelleret gletscheris-reservoirændringer (ΔS) for perioden 2071-2100 (mm pr. år)	~-2.000	~-2.600
Modelleret afstrømning (R) for nuværende periode (mm pr. år og m ³ pr. år)	~2.000 37 x 10 ⁶	~430 219 x 10 ⁶
Modelleret afstrømning (R) for perioden 2071-2100 (mm pr. år og m ³ pr. år)	~3.200 59 x 10 ⁶	~650 333 x 10 ⁶

Årlig middeltemperatur, nedbør og ferskvandsafstrømning for nuværende periode for Sermilik (1999-2004) og Zackenberg (1997-2005) og for FN's fremtidige klimaperiode 2071-2100 baseret på klimascenarier A2 og B2. Det topografiske opland for Sermilik og Zackenberg er henholdsvis 18 km² og 512 km².

Indlandsisen

Indlandsisens areal er på omkring $1,83 \times 10^6$ km² svarende til næsten 43 gange Danmarks størrelse. Isens længde fra nord til syd er ca. 2.400 km svarende omtrent til afstanden fra Danmark til det nordlige Afrika. Den maksimale bredde på Indlandsisen er cirka 950 km svarende omtrent til afstanden fra København til Bruxelles. På det tykkeste sted er Indlandsisen over 3.200 m høj. Isen har et volumen på omkring 3.000.000 km³, som svarer til omkring 8 % af Jordens samlede ferskvandsmængde. Smelter Indlandsisen helt, vil det medføre en global stigning af havoverfladen på ca. 7 til 8 m.

ter om klimaets tilstand, hvor de forudså en stigning i det globale havniveau på mellem 18 og 59 cm i løbet af dette århundrede, heri er bidraget fra Indlandsisen dog ikke medtaget. Meget tyder på, at det kan gå endnu hurtigere, og at vandstanden globalt allerede inden år 2100 kan være steget med op til 1,9 meter.

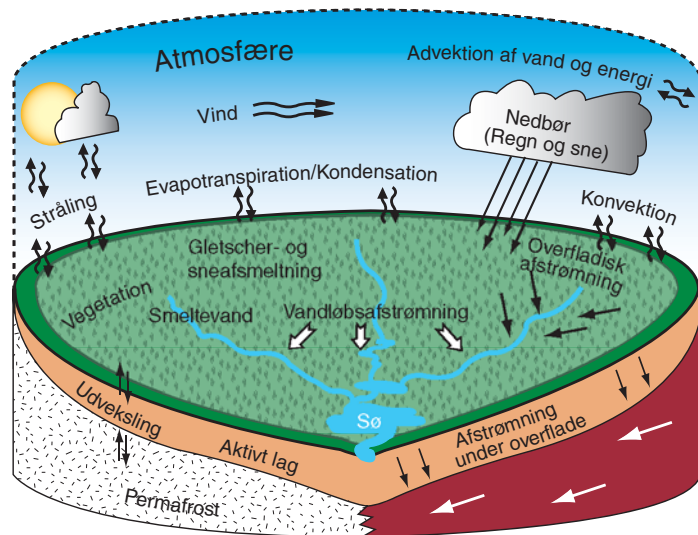
Ferskvandsbidraget fra Østgrønland til havet er ikke kun væsentlig i relation til ændringer i det globale havniveau, men også i relation til: 1) de globale havstrømme, herunder energitransporten fra troperne til Nordeuropa via den Nordatlantiske strøm; 2) salinitetsforholdene og dybvandsdannelsen (den termohaline cirkulation) mellem Østgrønland og Vestnorge (den termohaline cirkulation beskriver den globale masse-drevne cirkulation i havene. Ordet stammer fra en sammensætning af termo- for varme og -haline for salt); 3) havis-dynamikken; og 4) næringsstof- og sedimenttilføjeisen til havet.

Vi lever i en tid, hvor klimaforandringerne i Østgrønland sætter sig tydelige spor i cryosfæren og i hydrologien, dels på lokalt og regionalt niveau, dels på globalt niveau i form af stigende havniveau. Uden de lokale modelstudier ved Sermilik og Zackenberg havde det ikke været muligt at bestemme klimaets effekt på den regionale ferskvandsafstrømning fra Østgrønland. Men ikke

	Nuværende periode	FN's klimaperiode 2071 - 2100
Ferskvandsbidrag fra den østlige del af Indlandsisen i form af afstrømning og isbjerger-kælvning (km ³ pr. år)	~260 (~60 %)	~460 (~70 %)
Ferskvandsbidrag fra landområdet beliggende mellem Indlandsisens rand og oceanet (km ³ pr. år)	~180 (~40 %)	~190 (~30 %)
Ferskvandsbidrag fra Østgrønland (km ³ pr. år)	~440	~650

Ferskvandsbidraget fra Østgrønland til Nordatlanten for nuværende periode (1999-2004) og for FN's fremtidige klimaperiode 2071-2100 baseret på FN's klimascenarier A2 og B2.

Principskitse af de klimatiske, cryosfæriske og hydrologiske processer i et opland som Sermilik og Zackenberg, beliggende mellem Indlandsisen og oceanet (Grafik: UVH modificeret efter Douglas L. Kane og Daqing Yang).



alle cryosfæriske og hydrologiske sammenhænge er endnu helt afklaret. Jo bedre styr vi i modelsammenhænge har på Indlandsisens dynamiske processerne, jo mere nøjagtigt vil vi for fremtiden kunne beregne ændringer og tendenser i ferskvandsbidraget inklusive andelen fra kælvning af isbjerger. De store udløbsgletschere fra Indlandsisen er derfor kommet under lup for at klarlægge koblingen mellem Indlandsisens overfladeprocesser og dens interne dynamiske og bundnære processer.

Ekstra litteratur:

Mernild, S. H., Liston, G. E., Hasholt, B. og Knudsen, N. T. 2006. Snow distribution and melt modeling for Mittivakkat Glacier, Ammassalik Island, SE Greenland. *Journal of Hydrometeorology*, 7: 808–824.

Mernild, S. H., Liston, G. E., og Hasholt, B. 2007. Snow-distribution and melt modeling

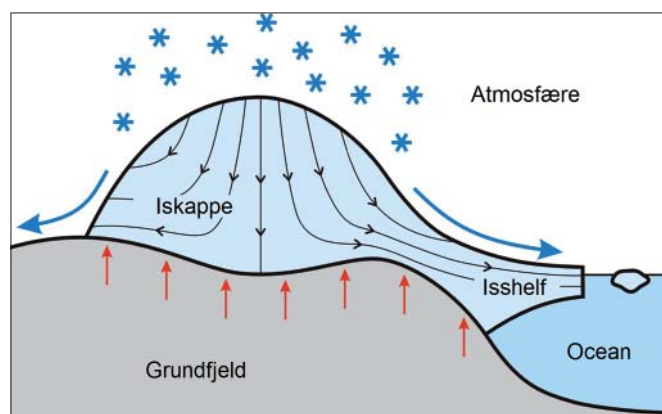
for glaciers in Zackenberg River drainage basin, NE Greenland. *Hydrological Processes*. 21: 3249–3263. DOI: 10.1002/hyp.6500.

Mernild, S. H., Liston, G. E., og Hasholt, B. 2008. East Greenland freshwater runoff to the North Atlantic Ocean 1999–2004 and 2071–2100. *Hydrological Processes* 22: 4571–4586. DOI: 10.1002/hyp.7061.

Mernild, S. H., Liston, G. E., Hiemstra, C. A., og Steffen, K. 2008. Surface Melt Area and Water Balance Modeling on the Greenland Ice Sheet 1995–2005. *Journal of Hydrometeorology*, 9(6): 1191–1211.

Link til de fire rapporter fra FN's klimapanel: www.ipcc.ch

Jubilæumsudgave af Danish Journal of Geography: 75 years of research at the Sermilik Station, 1933–2008: <http://rdgs.dk/djg/pdfs/108/1/01.pdf>



Simplificeret principskitse af Indlandsisen og dens dynamiske flydestrukturer når isen dels flyder på grundfjeld, dels ud i oceanet. På den centrale del af Indlandsisen forekommer der en netto-pålejrning af sne, hvorimod der langs isranden sker et netto-tab af is og sne pga. fordampning, sublimation og afsmelting (ferskvandsafstrømning) samt dannelsen af isbjerger. Ved bunden af Indlandsisen forekommer ligeledes et netto-tab af is pga. bundsmeltingen som følge af geotermal varme (jordvarme). (Grafik: Sebastian H. Mernild)