

Indlandsisen sveder

Afsmeltningen af den grønlandske indlandsis var i år 2007 større end på noget andet tidspunkt gennem de sidste 10 år. Det viser nye modelberegninger. En øget afstrømning af ferskvand i arktis kan få en række konsekvenser – bl.a. for de globale havstrømme.

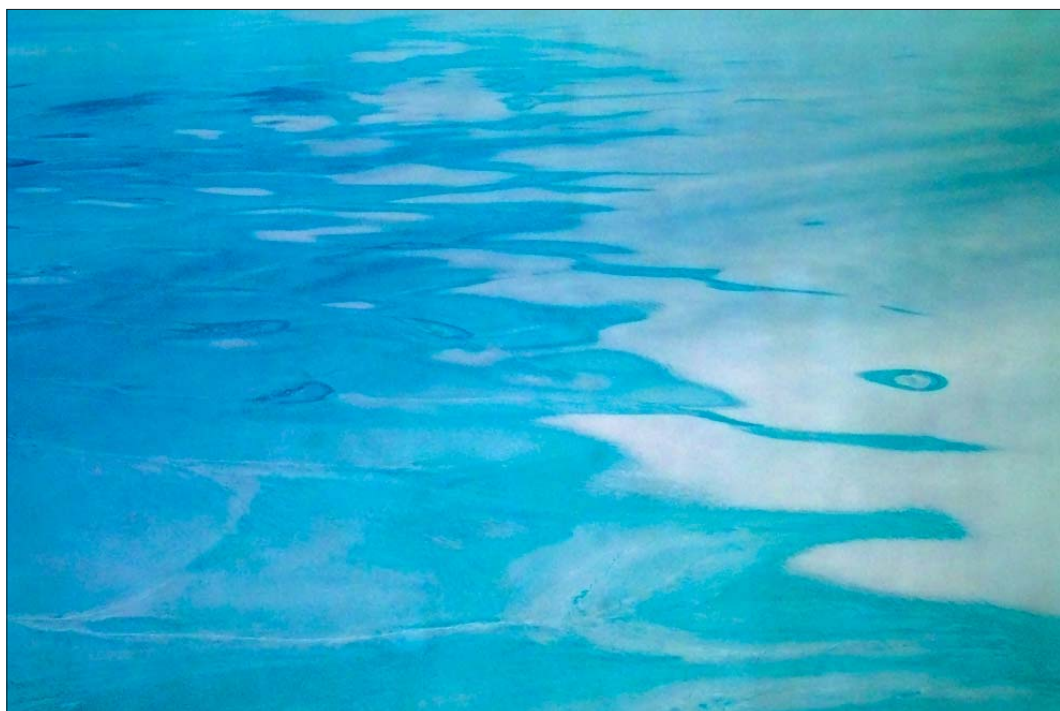
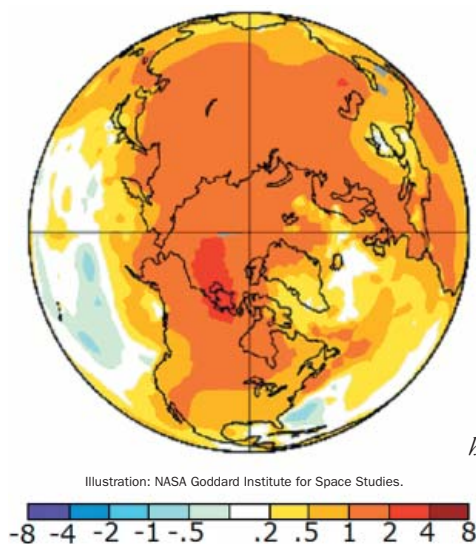


Foto: Douglas L. Kane, University of Alaska Fairbanks.

Flyfoto af kanten mellem den smeltende isoverflade og den ikke smeltende is. Der ses store søer af smeltevand på Indlandsisen.

Af Sebastian H. Mernild

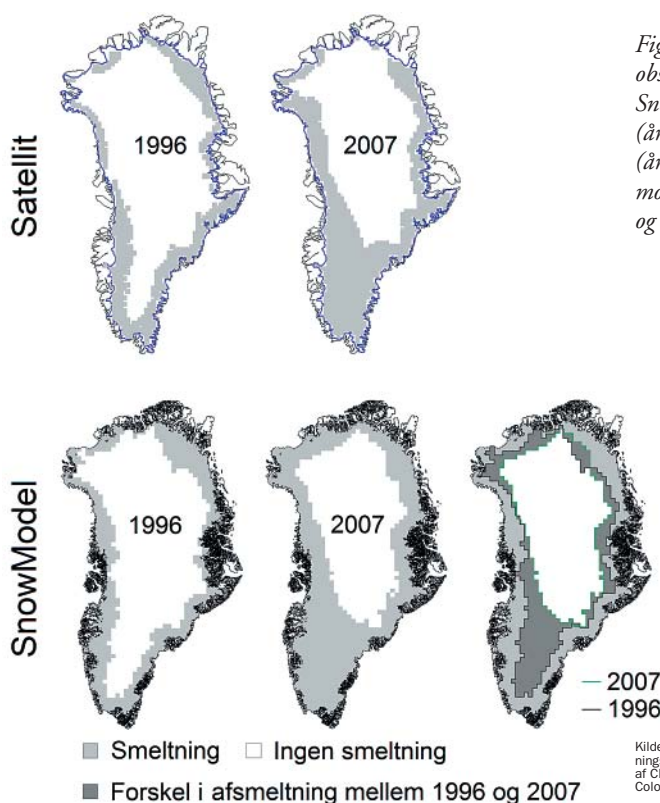
■ Indlandsisen – den største permanente iskappe på den nordlige halvkugle – er under forandring i udbredelse og omfang som følge af ændrede klimatiske forhold. Siden afslutningen af “den lille istid” omkring år 1920 er lufttemperaturen i det arktiske område steget. Observationer siden 1957 viser, at temperaturen er steget med 2–4°C i visse områder af det nordlige Canada, men hovedsagelig ligger stigningen i det arktiske område på 1–2°C (figur 1). De sidste 10 år har været det varmeste årti på Grønland siden varmeperioden i 1930’erne og 1940’erne,



Figur 1: Ændring i overfladelufttemperatur på den nordlige halvkugle siden 1957. Skalaen er i grader celsius.

med temperaturer på omtrent samme niveau som dengang. De stigende temperaturer i Arktis er blevet efterfulgt af en generel stigende nedbør på omkring 1 procent pr. årti, og stigende relativ luftfugtighed på cirka 2 procent i løbet af de sidste 30 år.

Konsekvenserne af disse klimaforandringer er tydelige. I udbredelse og omfang har Indlandsisen, specielt inden for de sidste 10–15 år gennemgået en række forandringer på såvel regionalt som lokalt niveau. Her er tale om forandringer, som påvirker den arktiske hydrologiske cyklus og vandbalance, da Indlandsisen i et hydrologisk perspektiv kan



Figur 3: Smeltningens areal på Indlandsisen observeret fra satellit og simuleret med SnowModel for henholdsvis år 1996 (året med det mindste areal) og 2007 (året med det største areal). Forskellen i modelleret smeltningens areal mellem 1996 og 2007 er ligeledes illustreret.

Kilde: Observeret smeltningens areal er indsamlet af CIRES, University of Colorado at Boulder, USA

betragtes som et reservoir af sne og is, hvor vand fra kredsløbet kan opmagasinere i kortere eller længere tid.

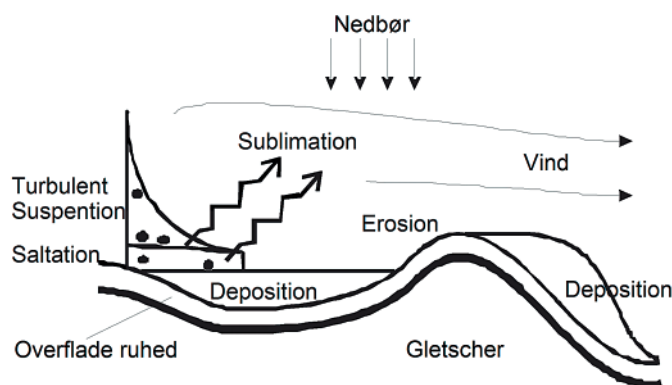
At indsamle information om Indlandsisens tilstand er vanskeligt. Det barske klima, det uforenelige terræn, de logistiske udfordringer og Indlandsisens størrelse gør, at forskerne i stadig højere grad bruger satellitbilleder og modelberegninger til at beskrive og analysere iskappens overflademassebalance som helhed. I mit arbejde har jeg videreudviklet og brugt et state-of-the-art modelværktøj kaldet SnowModel i samspil med satellitbilleder til at bestemme ændringer i Indlandsisen i perioden 1995 til 2007. Konkret har formålet været at bestemme ændringerne i Indlandsisens rumlige og arealmæssige overfladeafsmeltning; og ændringerne i dens overflademassebalance, inklusiv afstrømningen af ferskvand fra iskappen til oceanet.

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 2). 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 submodeller, der: 1) beregner den rumlige variation af meteorologiske parametre (f.eks. 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 densitet, temperatur og snedtykkelighedsudviklingen over tid.



Figur 2: Principskitse af SnowModel's hovedprocesser omkring sneaflejring og -fordeling. Når sneen smelter bort, beregnes smeltebidraget fra gletscherisens overflade automatisk i det omfang et energipotential er til rådighed.

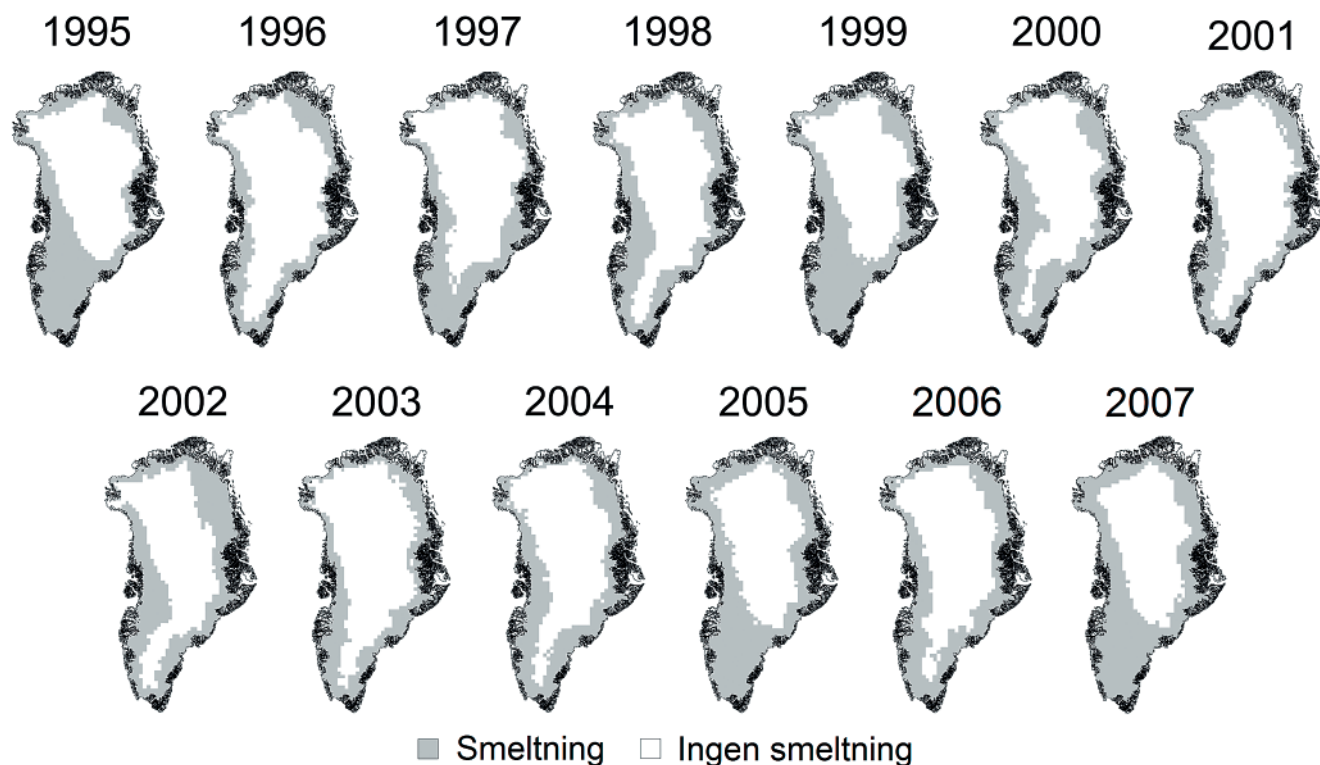
I arbejdet med at simulere indlandsisen er meteorologiske data (lufttemperatur, relativ fugtighed, vindhastighed, vindretning og nedbør) fra 25 meteorologiske stationer fordelt på såvel Indlandsisen som i randområdet mellem iskappen og oceanet anvendt som input i modellen. Modelleret af Indlandsisen 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) (figur 3). 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.

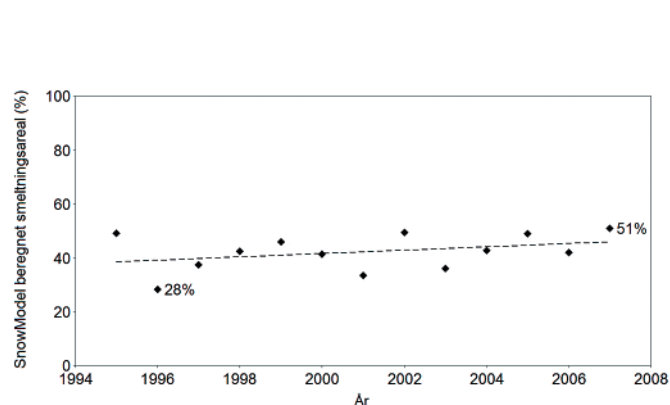
Resultaterne i artiklen er fremkommet i samarbejde med sne- og indlandsisforskere ved henholdsvis CIRA - Colorado State University, og CIRES - University of Colorado at Boulder, USA.

Afsmeltning og afstrømning

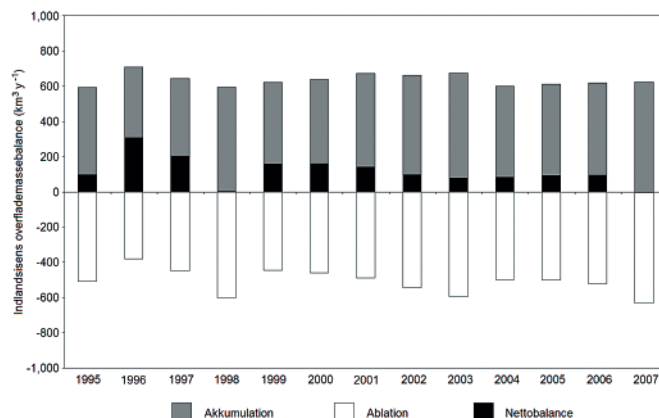
Modelresultaterne viser, at smeltesæsonen 2007 har sat ny rekord i afsmeltningen af Indlandsisen (figur 4). Indlandsisen var udsat for en afsmeltning i et niveau op til 2.980 meter over havoverfladen. Det samlede smelteareal for 2007 svarede til omkring 51 % af Indlandsisens samlede areal eller til 22 gange Danmarks størrelse (ca. 954.000 km²). I gennemsnit var smeltearealeret for 2007 omkring 20 % større end det gennemsnitlige areal for perioden 1995–2006. Udviklingen i smeltearealets udbredelse siden 1995 har i gennemsnit været stigende, med en forøgelse på 8%. Den gennemsnitlige stigning dækker over en årlig variation i smeltearealets størrelse, fra maksimum 51 % i 2007 til en minimumsværdi i 1996 på 28 %. I 1996 svarede det smeltede areal til cirka 519.000 km², eller 12 gange Danmarks størrelse. De største ændringer i arealafsmeltningen ses i den sydlige del af Indlandsisen. Afsmeltningen sker primært i randområdet af iskappen med værdier op til 300 cm pr. år i den sydlige del, hvor-



Figur 4: Resultater fra SnowModel: Den rumlige variation i modelleret smeltningsareal på Indlandsisen for perioden 1995 til 2007.



Figur 5: Modelleret smeltningsareal på Indlandsisen for perioden 1995 til 2007, inklusiv procentvise værdier for afsmeltningsarealet for 1996 (året med det mindste areal) og 2007 (året med det største areal). Trendlinjen viser en gennemsnitlig stigning i smeltningsareal.



Figur 6: Modelleret akkumulation (nedbør, P), ablation (fordampning, ET ; sublimation, SU ; og afstrømning, R) og nettobalance (reservoirændringer, ΔS) for Indlandsisen for perioden 1995 til 2007. Akkumulationen viser en aftagende tendens, ablationen en stigende negativ tendens og nettobalancen ligeledes en aftagende tendens.

imod pålejringen af sne finder sted på den indre centrale del af Indlandsisen. En pålejring, der varierer fra omkring 5 til 40 cm om året.

År 2007 var første gang i perioden, at Indlandsisens overflademassebalance var negativ, idet iskappens overflade mistede volumen svarende til 3 km^3 . Den gennemsnitlige nettobalance for Indlandsisoverfladen er 124 km^3 pr. år, dækkende over en gennemsnitlig aftagende tendens i massebalancen på 10 km^3 pr. år for perioden 1995 til

2007 (figur 6). Den aftagende tendens er betinget af en aftagende akkumulation og en tiltagende ablation (fordampning, sublimation og afstrømning).

Indlandsisens overflade smelter hastigt – hurtigere end tidligere antaget – da iskappen er ude af balance med nutidens klimaforhold. Indlandsisen kan dermed være på vej til at blive en væsentlig bidragsyder til stigningen i det globale havniveau. Alene ferskvandafstrømningen fra Indlandsisens overflade i 2007 var cirka 35 % eller cirka

Vandbalanceligningen

For et afgrænset område kan man opstille en vandbalanceligning, der balancerer de faktorer, der hhv. 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 fordampning, SU er sublimation fra sne- og isoverfladen samt snefygning (sublimering er et skift i fase direkte fra fast form til dampform), R er afstrømning, ΔS er reservoirændringer (f.eks. 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.



Store strømme af smeltevand på Indlandsisen. Vandet løber typisk til en gletscherbrønd (moulin) og finder vej ned til bunden af gletscheren.

134 km³ større end det gennemsnitlige bidrag på 389 km³ pr. år for perioden 1995–2006. Afstrømningsbidraget simuleret af SnowModel er såvel i størrelse som i årlig variation analog med tidligere Indlandsisstudier. For perioden 1995 til 2007 svarer ferskvandstilførelsen fra isoverfladen til oceanet i gennemsnit til en global havniveaustigning på omkring 1,1 mm pr. år (heri er ikke medregnet bidraget fra isbjerge, der brækker af Indlandsisens rand og geotermal smeltning af Indlandsisens bund). Effekten af klimaforandringer kan vise sig at forøge det globale havniveau yderligere. Da havvandet samtidig bliver varmere, kan vandstandsstigningen blive endnu større, idet vand udvider sig i takt med, at det bliver varmere.

Globale og lokale konsekvenser

Den forøgede afstrømning af ferskvand fra Indlandsisen kan ikke blot give anledning til en stigning i det globale havniveau. Det kan også få indflydelse på de globale havstrømme herunder energitransporten fra troperne til Nordeuropa via den Nordatlantiske strøm, på salinitetsforholdene og dybvandsdannelsen (den termohaline cirkulation), dynamikken af havis samt sediment- og næringsstoftilførelsen til oceanet. Mere lokalt bestemmer smeltvandsproduktionen potentialet for at etablere vandkraftværker i randområdet mellem Indlandsisen og oceanet.

En række ubesvarede spørgsmål presser sig imidlertid på i forhold til at bestemme det samlede bidrag af ferskvand fra

Indlandsisen til oceanet. Det gælder bl.a. bestemmelsen af ferskvandsbidraget fra afbrækningen af isbjerge fra et ukendt tusindtal af udløbsgletschere langs den Grønlandske kyst samt bidraget fra geotermisk smeltning ved Indlandsisens bund. Tre af de store udløbsgletschere fra Indlandsisen: gletscheren ved Jakobshavn (Vestgrønland), Helmeim og Kangerdlugssuaq (Sydøstgrønland) er under lup for bedre at forstå koblingen mellem det ændrede klima, den stigende overfladeafsmeltning, Indlandsisens dynamiske processer og den ændrede beliggenhed af Indlandsisens rand. En modellering af Indlandsisens dynamiske processer herunder at beregne lokaliseringen og udviklingen af dræningssystemer i isen, samt Indlandsisens randbetingelser må anses som nogle af fremtidens kommende modeludfordringer.

Med dette for øje har jeg iværksat et studie af Indlandsisens overfladesmeltning med SnowModel for perioden 1950 til 2080 ved brug af klimadata fra DMI's regionale klimamodel (kaldet HIRHAM4). Formålet er at opnå ny viden om Indlandsisens overfladerespons på ændrede fremtidige klimaforhold. Viden, som kan indgå i kommende studier af Indlandsisens dynamiske processer. ■

Om forfatteren



Sebastian H. Mernild er ph.d. og post doc. ved International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks, USA.

I perioden april til juli 2008 gæsteforsker ved Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan.
Skype tlf.: +45 36 99 27 03,

E-mail: fxsm@uaf.edu
www.uaf.edu

Videre læsning:

Abdalati, W. and K. Steffen 1997a. The apparent effects of the Mt. Pinatubo eruption on the Greenland ice sheet melt extent. *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1795–1797.

Box, J. E. et. al. 2006. Greenland ice sheet surface mass balance variability (1988–2004) from calibrated Polar MM5 output. *Jour. of Climate*, 19, 2783–2800.

Hanna, E. et. al. 2008. Increased Runoff from Melt from the Greenland Ice Sheet: A response to Global Warming. *Jour. of Climate*, 21, 331–341.

Liston, G. E., and K. Elder, 2006. A distributed snow-evolution modeling system (Snow-Model). *Jour. of Hydrometeorology*, 7: 1259–1276.

Hjemmeside:
Melting Glaciers and Ice Sheets Contribute to Global Sea-Level Rise, University of Colorado at Boulder:
<http://cires.colorado.edu/science/groups/steffen/>

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 kilometer svarende omtrent til afstanden fra Danmark til det nordlige Afrika. Den maksimale bredde på Indlandsisen er cirka 950 kilometer svarende omtrent til afstanden fra København til Bruxelles. På det tykkeste sted er Indlandsisen over 3.200 meter høj. Isen har et volumen på omkring 3.000.000 km³, som svarer til omkring otte procent af Jordens samlede ferskvandsmængde. Smelter Indlandsisen helt, vil det medføre en global stigning af havoverfladen på ca. syv til otte meter.