

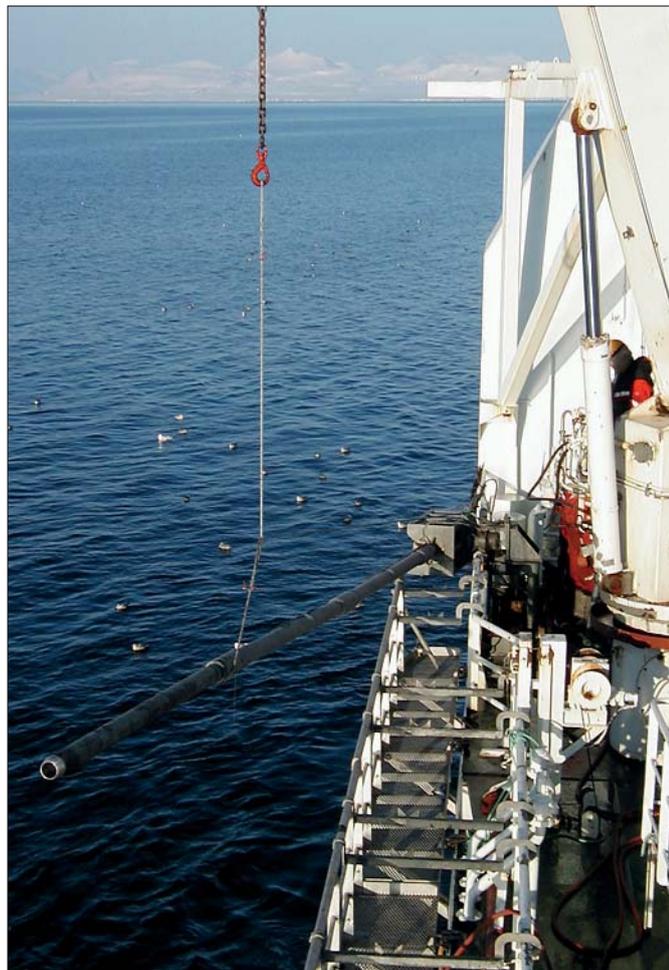
Istidens gådefulde klimaspring

Under sidste istid blev det nordatlantiske område ramt af ca. 25 abrupte temperaturspring med stigninger på op til 15 °C. Men hver gang vendte kulden tilbage. Forklaringen på springene synes at være, at efterhånden som luften og havoverfladen blev koldere og koldere, blev dybhavet varmere og varmere.

Af Tine L. Rasmussen og Erik Thomsen

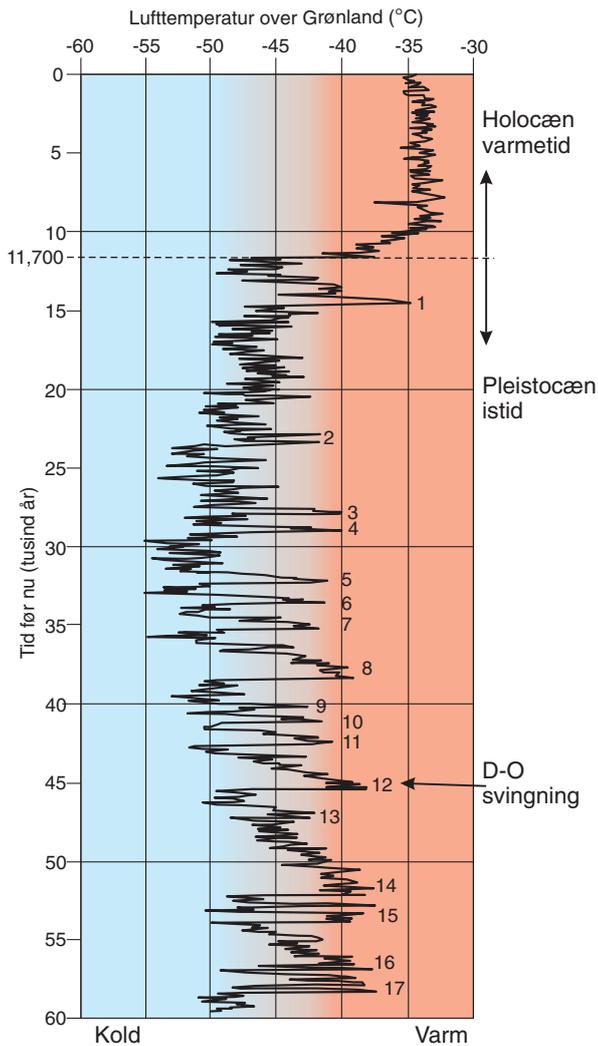
■ Jordens klima har altid været stærkt vekslende, men i de sidste ca. 1 mio. år har udsvingene været særligt kraftige med det resultat, at store iskapper for hver ca. 100.000 år har bredt sig over de nordlige kontinenter. De gentagne skift mellem istider og mellemistider skyldes små variationer i den mængde solindstråling, som Jorden modtager som følge af cykliske variationer i Jordens bane omkring solen; en sammenhæng, der efterhånden er velbelyst.

Det kom derfor som en stor overraskelse, da man for ca. 20 år siden fastslog, at nogle uregelmæssige klimaudsving, der tidligere var sporet i iskerner fra Grønland, var reelle. De nye iskernerestater viste, at under sidste istid for mellem ca. 100.000 og 15.000 år siden blev klimaet over Grønland ca. 25 gange ramt af abrupte temperatursvingninger (figur



Sedimentkerner fra havbunden er et af de vigtigste redskaber til undersøgelse af fortidens klima. Her gøres en 12 m lang piston-kernetager klar på det norske forskningskib Jan Mayen. Bunden af den ca. 12 meter lange sedimentsojle vil typisk have en alder på mellem 10.000 og 100.000 år, afhængig af sedimentationsraten på stedet.

1). På 10 år eller mindre kunne temperaturen stige med op til 15 °C. Opvarmningerne var dog altid kortvarige, og efter få årtiers varme faldt temperaturerne gradvist tilbage til de kolde forhold fra før opvarmningerne. Tidsrummet mellem opvarmningerne varierede gennemsnitlig fra ca. 800 år til 3000 år. Denne uregelmæssighed betød, at svingningerne næppe kunne være forårsaget af variationer i solindstrålingen, da disse variationer normalt er mere regelmæssige. Årsagen måtte søges i interne forhold på Jorden. Svingningerne, der fik navn navnet Dansgaard-Oeschger svingninger efter de forskere, der første gang beskrev dem, har været et centralt emne i de sidste 20 års klimaforskning. Hvad var årsagen til dem, og kan noget lignende ske i dag? Der har været flere forskellige svar på spørgsmålet. Anledning-



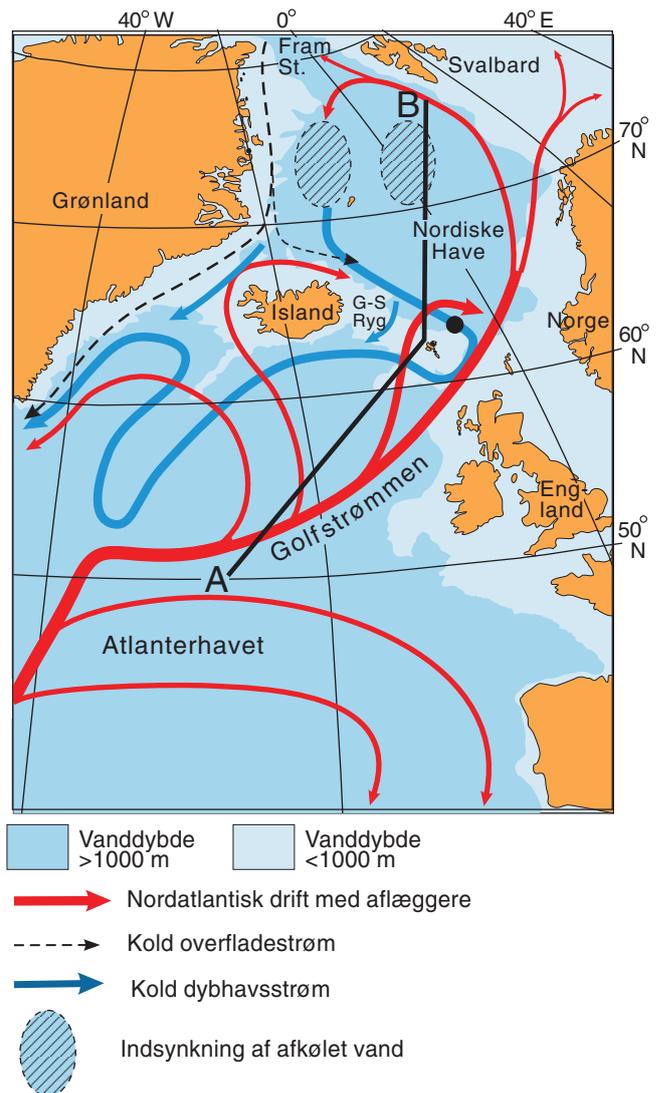
Figur 1. Temperaturudviklingen på toppen af Grønlands iskjold gennem de sidste 60.000 år, beregnet på grundlag af GRIP iskerener. Bemærk kontrasten mellem de store abrupte klimaspring under sidste istid (60.000 - 12.000 før nu) og de minimale sving efter istiden. Udsvingene under istiden kaldes Dansgaard-Oeschger svingninger. De varme perioder benævnes interstadialer, mens de kolde perioder benævnes stadialer. Under istiden indtraf i alt ca. 25 temperaturspring. Sytten af disse falder inden for perioden mellem 60.000-12.000 år før nu.

gen til, at vi tager problemet op igen, er nogle nye forskningsresultater, der netop er publiceret i det anerkendte amerikanske tidsskrift PNAS.

En "tænd-sluk"-mekanisme for Golfstrømmen

Kort tid efter opdagelsen af de voldsomme klimasvingninger blev det påvist, at havets overfladetemperaturer varierede synkront med atmosfæren med udsving helt op til 6-8 grader. Det blev også vist, at de største

udsving lå i det Nordatlantiske område og de nordiske have (Norskehavet og Grønlandshavet). Uden for dette område var svingningerne mere afdæmpede og gradvise. Disse opdagelser medførte en intens forskningsaktivitet baseret på marine dybhavskerner. Resultaterne af disse undersøgelser viste højst overraskende, at dybhavscirkulationen blev påvirket lige så hurtigt som overfladen, og forskerne er i dag nogenlunde enige om, at de voldsomme klimaudsving

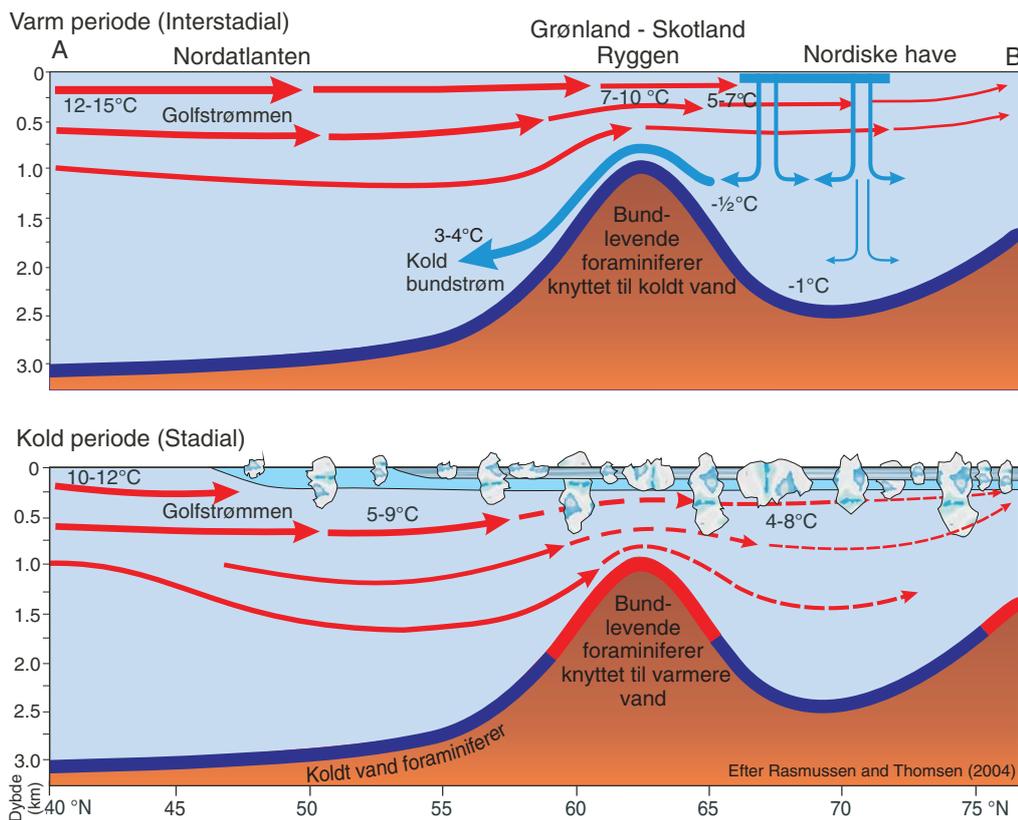


Figur 2. Kort over Nordatlanten og de nordiske have (Norskehavet og Grønlandshavet) med angivelse af de vigtigste strømsystemer. I de nordiske have afkøles en del af det varme atlantiske vand fra Golfstrømmen. Det synker til bunds og løber tilbage til Atlanterhavet i dybe render i højderyggen mellem Skotland over Island til Grønland. I Atlanterhavet indgår det kolde returvand i et globalt system af kolde dybhavsstrømme. Nedsynkningen i de nordiske have og tilbageløbet er sammen med den kraftige sydvestenvind i hele området med til at gøre Golfstrømmen til en af de mest vandførende havstrømme på Jorden.

må have sammenhæng med det specielle havcirkulationssystem, der findes i Nordatlanten og de nordiske have.

I dag løber Golfstrømmen tværs over Atlanten og ind i de nordiske have, hvor det varme og salte vand er afgørende for Nordvesteuropas milde klima (figur 2). Det varme vand afkøles om vinteren i visse områder af de nordiske have og bliver så koldt og tungt, at det synker til bunds, hvorefter det flyder tilbage i Atlanterhavet som en

dybhavsstrøm. Tilbageløbet sker fortrinsvis i nogle dybe render hen over Skotland-Grønland Højderyggen, der strækker sig som en undersøisk vulkanryg tværs over Atlanterhavet (figur 2 og 3). Uden nedsynkning og tilbageløb ville indløbet af varmt atlantisk vand til de nordiske have svækkes og klamret på den nordlige halvkugle ville kølnes betragteligt. Der kan ikke være tvivl om, at de voldsomme klimaudsving under istiden må have sammenhæng i dette cirku-



Figur 3, Øverst: I de varme perioder under istiden var havcirkulationen i det nordatlantiske område nogenlunde som i dag (øverste profil, se også figur 1). Golfstrømmen løb i havoverfladen ned til ca. 1 km dybde. I de nordiske have nedkøledes vandet om vinteren, sank til bunds og flød tilbage til Atlanten som koldt bundvand.

Nederst: I de kolde perioder var havoverfladen dækket af havis og et tykt lag smeltevand fra smeltende isbjerger. Det lette overfladevand forhindrede dybvandsdannelse. Da der ikke flød koldt bundvand ud i Atlanten, kunne det varme vand fra Golfstrømmen trænge ind i de nordiske have under det kolde overfladevand. Her blev de dybere vandmasser langsomt varmere og lettere, indtil det brød igennem det kolde overfladevand, og klimaet skiftede fra koldt til varmt. Profilinien fra A til B er vist på kortet i figur 2.

lationssystem. Hastigheden på temperatursvingene under istiden kunne tyde på eksistensen af en slags "tænd-sluk" mekanisme for Golfstrømmen.

Isbjergeteorien

Forskerne er generelt enige om, at dybvandsdannelsen i de korte varmeperioder under istiden foregik som i dag, og at de nordiske have må have været stort set isfrie i det mindste om sommeren (figur 3A). Der er også enighed om, at de nordiske have og Nordatlanten i de kolde perioder må have været helt eller delvis isdækket og fyldt med isbjerger, og at dybvandsdannelsen i de nordiske have var stærkt svækket eller helt standset. Årsagen til den manglende dybvandsdannelse er sandsynlig-

vis, at smeltevand fra smeltende isbjerger sænkede saltindholdet i overfladevandet og hindrede det i at blive tilstrækkelig tungt til at synke til bunds.

Vi har således efterhånden god viden om forholdene i både de kolde og varme episoder under istiden. Det store problem er at forklare, hvorfor systemet hele tiden skiftede fra en tilstand til en anden – og især at forklare overgang fra de kolde perioder til de varme, og hvorfor denne overgang var så brat.

Ifølge en udbredt teori skyldes skiftene primært variationer i produktion af isbjerger. I den periode, hvor disse klimasvingninger fandt sted var den nordlige del af Nordamerika og Grønland dækket af et sammen-

hængende isskjold. Det samme var Skandinavien og dele af det nordlige Rusland. Teorien er, at disse isskjolde var kraftigt ustabile og periodisk sendte store mængder af isbjerger ud i havet, hvor de så gennem deres smeltevand for en tid skabte et låg at let overfladevand, der hindrede dybvandsdannelse og svækkede Golfstrømmen. Når produktionen af isbjerger så senere faldt, formindskedes laget af let overfladevand med det resultat, at dybvandsdannelsen gik i gang igen, og Golfstrømmen atter tiltog i styrke.

En temperaturmæssig bundvending

Ikke alle forskere er enige i den hypotese, og en alternativ forklaring på de styrende meka-

nismer blev foreslået i 1996 af denne artikels forfattere på grundlag af mikrofossiler og sedimenter fra en kerne taget i det sydlige Norskehav. Dette arbejde blev fulgt op af studier af adskillige dybhavskerner fra Norskehavet og hele det Nordatlantiske område, og i 2004 publicerede vi en mere sammenhængende forklaring på svingningerne. Den vigtigste konklusion kan synes paradoks, nemlig at i de kolde perioder, mens luften blev koldere og koldere, blev dybhavet mellem 400 og 2000 meters dybde varmere og varmere. Resultatet var baseret på undersøgelser af udbredelsen af nogle kalkskallede mikrofossiler kaldet foraminiferer samt af iltisotoper målt på foraminifereskaller (se figur 4). Foraminiferer lever både ved havoverfladen og ved bunden og kan derfor give besked om begge miljøer. I de klimatiske varme perioder var havbunden i dybhavet optaget af koldvandsarter knyttet til det kolde nedsynkende dybvand, der blev dannet i Norskehavet og løb sydpå ind i Atlanterhavet (figur 4A). Faunaen lignede den moderne fauna i området, og strømsystemet må have været som i nutid.

I de klimatiske kolde perioder, hvor overfladen var fyldt med havis og isbjerger, blev bundfaunaen invaderet af mere varme-krævende arter, samtidig med at iltisotop-værdierne i vandet faldt. Vi tolkede disse resultater til, at temperaturerne i dybvandet i disse perioder steg fra -1 grad til +4 grader eller mere. Det pegede på, at Golfstrømmen i virkeligheden fortsatte med at strømme ind i Norskehavet, men nu langs bunden under det lette, kolde isfyldte overfladevand (Figur 3b). Til sidst blev opvarmningen under overfladen i Norskehavet så stor, at det varme bundvand blev lettere end det kolde overfladelag. Og vips: Det varme vand brød igennem til overfladen og kunne afgive sin varme til atmosfæren. Dette kan forklare den meget store og abrupte opvarmning efter hver kuldeperiode. Det er også værd at notere sig, at varmen i både havoverfladen

og atmosfæren var kortvarig, og at både hav- og atmosfæresystemerne begynder at køle ned igen efter bare 50-100 år. Det er jo istid, og der var iskjolde på alle kontinenter på den nordlige halvkugle. Som følge af opvarmningen begyndte samtidig store mængder af ferskvand at strømme ud i havet. Under den gradvise afkøling vokser isen sig større, havis og isbjerger spredes gradvist, og Golfstrømmen svækkes på ny og processen gentages.

Nye resultater støtter "bundvendingsteorien"

Ikke alle forskere har været enige i denne fortolkning. Flere forskere mener, at de lave isotopværdier i bundvandet i de kolde perioder kunne skyldes, at det lavsalte overfladevand blev trukket til bunden ved forskellige processer, og at bundvandet i virkeligheden forblev koldt. Disse forskere ignorerede dog at forklare tilstedeværelsen af de varmekrævende mikrofosser.

Anledningen til at genåbne denne diskussion er to undersøgelser, der for nylig er publiceret. I den ene undersøgelse har Marcott og kolleger fra USA målt forholdet mellem magnesium og calcium i skaller af bundlevende foraminiferer fra sidste istid. Denne metode tillader at beregne temperaturerne, mens foraminifererne levede. Resultaterne viser, at hver gang havoverfladen blev kold, og isbjerger spredte sig over Nordatlanten og de nordiske have, varmede bundvandet (ca. 1,2 km vanddybde) op. Den beregnede opvarmning er på mere end 4-6 °C i både Nordatlanten og Norskehavet og i samme størrelsesorden, som vi foreslog i 2004. Resultaterne bekræfter således vores tolkning. Derudover bruger Marcott og kolleger de beregnede bundvandstemperaturer i en modelsimulering af en aktiv flydende isshelv (dvs. en gletscher, der flyder på vand over kontinentalsocklen) i møde med varmt vand. Modelleringen forudsiger en 6 gange øgning i smeltningshastigheden af isen, og at denne smeltning foregår nedfra. Dette resultat viser, at



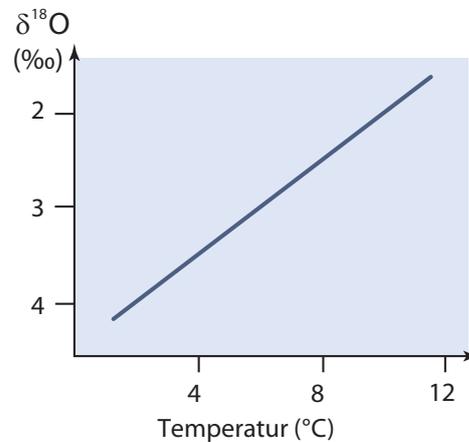
Foto: Erik Thomsen

Eksempler på mikrofosser. Billedet til højre viser en planktonisk foraminifer, der lever nær havoverfladen. Billedet til venstre viser en bundlevende foraminifer, der lever i de øverste dele af havbunden.

Iltisotoper i undersøgelser af fortidens klima

Forholdet mellem de stabile isotoper ^{16}O og ^{18}O er en af de mest anvendte parametre til rekonstruktion af fortidens klimaforhold. Den lette isotop ^{16}O udgør i gennemsnit 99,8 % af alle iltatomer. Foraminiferer optager de to isotoper i deres kalkskaller, men i et forhold, der afhænger af temperaturen i de omgivende vandmasser. Andelen af ^{18}O falder jo højere temperatur i vandet er (se figuren).

Ud fra isotopforholdet i skaller af fossile foraminiferer kan man derfor beregne temperaturerne dengang dyrene levede. Udregningerne kompliceres dog af, at isotopforholdet i skallerne også påvirkes af isotopforholdet i det omgivende vand, og dette forhold kan variere lidt fra sted til sted ligesom det har varieret gennem tiderne. Ferskvand og brakvand indeholder således færre ^{18}O isotoper i forhold til ^{16}O end havvand. Dette skyldes, at den lette isotop ^{16}O fordampes lettere fra havet end den tunge ^{18}O isotop. Vanddamp, nedbør, ferskvand og gletschere bliver derfor forholdsvis rige på ^{16}O og fattige på ^{18}O . Klimaet spiller også en rolle her, idet vanddamp, der dannes i kølige områder og i kolde tidsperioder er fattigere på ^{18}O end vand-

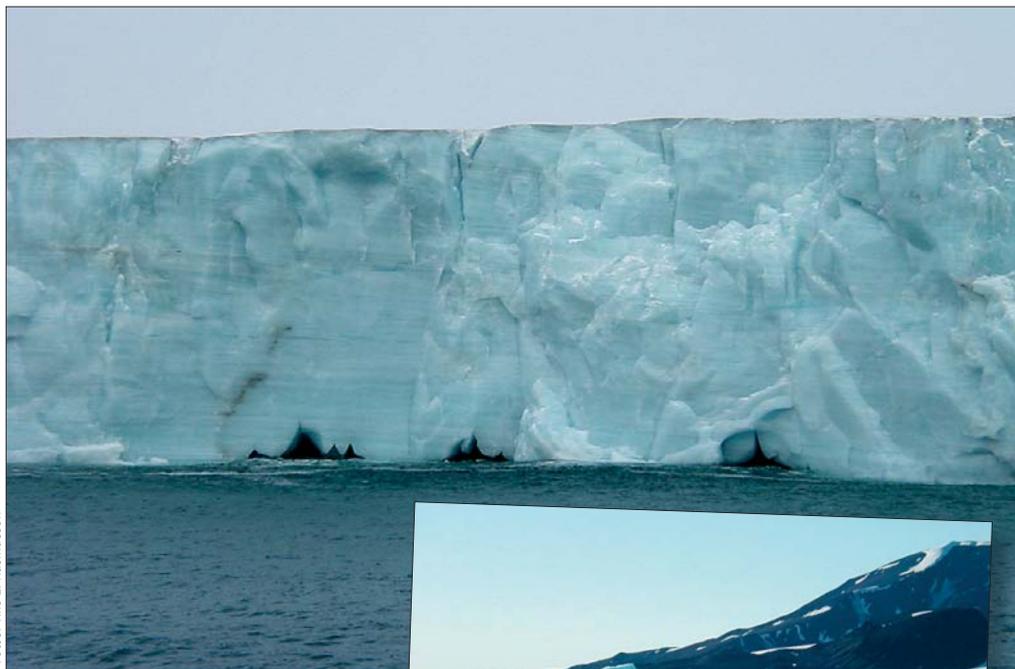


Sammenhængen mellem temperaturen og andelen af ^{18}O i forhold til ^{16}O i foraminiferskaller målt under ensartede laboratorieforhold. Andelen af ^{18}O angives som $\delta^{18}\text{O}$ og måles i promille afvigelse fra det globale gennemsnit.

damp, der dannes i varme områder og i varme tidsperioder. Dette har afgørende betydning for variationerne i isotopforholdene i Grønlands iskerner (se figur 1).

Når kloden går ind i en istid bindes der store mængder ferskvand på land i form af inlandsis. Havet bliver derfor generelt rigere på ^{18}O under en istid. Når isen smelter igen føres de

lette ^{16}O isotoper tilbage i havet. Dette signal, som kaldes isvolumeneffekten, kan også ses i foraminiferernes kalkskaller i tillæg til temperatursignalerne. Men da skiftet mellem istider og mellemistider foregår langsomt over lange tidsintervaller, vil isvolumeneffekten ikke påvirke isotopværdierne under de hurtige klimaændringer, som vi beskriver her i denne artikel.



Fotos: Tine L. Rasmussen

↑ Bråsvellbreen er med sin 20-50 m høje front Svalbards største flydende gletscher. I mange arktiske områder er de flydende gletschere udsat for kraftig smeltning nedefra, når varmt havvand trænger ind under dem.

Isbjerg ved Svalbard. →



tilstedeværelsen af varmt vand under overfladen kan udløse sammenbrud af isen og øge mængden af isbjerge.

Golfstrømmen og nutidens globale opvarmning

Disse resultater stemmer overens med de moderne observationer fra Grønland og Antarktis. I flere Grønlandske fjorde har man påvist, at den accelererende afsmeltning af gletschere "trækker" varmere vand ind i fjordene under det kolde smeltvand. Det menes, at tilstedeværelsen af det varme vand fremskynder isafsmeltningen, og altså udgør en positiv feedback effekt. Det kolde, ferskere smeltvand på overfladen er -1,5 grad, mens det underliggende saltere vand er 4,5 grader varmt. Det varme vand ved Grønland stammer fra Irminger Strømmen, der er en del af Golfstrømsystemet. Denne situation med polart smeltvand over varmere atlantisk vand er nok det nærmeste, vi kommer

en moderne analog til de begivenheder, der forekom under istiden i de kolde perioder med isbjerge på havoverfladen over hele det Nordatlantiske havområde.

I de sidste 11.700 år har nedsynkningen af koldt bundvand i de nordiske have været stabil. Golfstrømmen har været tilsvarende stabil og givet Nordvesteuropa et varigt mildt klima. Kan det tænkes, at den menneskeskabte globale opvarmning kan bremse nedsynkningen, så Golfstrømmen svækkes og de nordiske have igen dækkes af is? Tanken har været fremført. Det har bl.a. været foreslået, at den øgede afsmeltning fra Grønland kunne føre til en sænkning af saltholdigheden i overfladevandet i de nordiske have. Det ville så svække nedsynkningen og nedsætte farten på Golfstrømmen, således som det gentagne gange skete under sidste istid. Der er imidlertid en afgørende forskel på forholdene i nutiden og forholdene under istiden.

Under istiden var solindstrålingen på nordlige breddegrader reduceret og klimaet koldt. De nordiske have og Nordatlanten var på alle sider omgivet af kilometerdykke isskjolde. Hver gang det lokale klima omkring de nordiske have mildnedes som følge af opstigningen af varmt vand fra neden (figur 3B), blev det presset tilbage igen, dels af smeltvand fra de mange isskjolde og dels af den generelle kulde, der herskede. I dag er kun isskjoldet over Grønland tilbage og de smeltvandsmønder, det kan levere, synes helt utilstrækkelige til at kunne sætte indsynkningen i stå. Men det kolde vand vil dog kunne give mindre lokale ændringer nær land. Dansgaard-Oeschger begivenhederne under sidste istid var fundamentalt set opvarmninger i en kold tid, hvorimod et temperaturspring i dag vil være en afkøling i en varm tid. De to situationer kan derfor ikke umiddelbart sammenlignes. ■

Om forfatterne



Tine L. Rasmussen er professor ved Institut for Geologi, Universitetet i Tromsø, Norge
tine.rasmussen@uit.no



Erik Thomsen er lektor ved Institut for Geoscience, Aarhus Universitet
erik.thomsen@geo.au.dk

Videre læsning:

Marcott, S.A., Clark, P.U., Padman L., et al., 2011, Ice-shelf collapse from subsurface warming as a trigger for Heinrich events. *PNAS* 108, 13415-13419, DOI: 10.1073/pnas.1104772108.

Rasmussen, T.L., Thomsen, E., 2004. The role of the North Atlantic Drift in the millennial timescale glacial climate fluctuations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 210, 101-116.

Straneo, F., Hamilton, G.S.; Sutherland D.A., et al., 2010, Rapid circulation of warm subtropical waters in a major glacial fjord in East Greenland. *Nature Geoscience* 3, 182-186. DOI: 10.1038/NGEO764.