

# Istiden sluttede ekstremt hurtigt

*Af Dorte Dahl-Jensen*

**Istiden sluttede brat for 11.704 år siden, hvor den atmosfæriske cirkulation på hele den nordlige halvkugle ændrede sig fra det ene år til det næste. Blot 50 år senere var klimaet blevet 10 grader varmere i Grønland. Det viser nye analyser af en iskerne, som er udboret i Indlandsisen.**

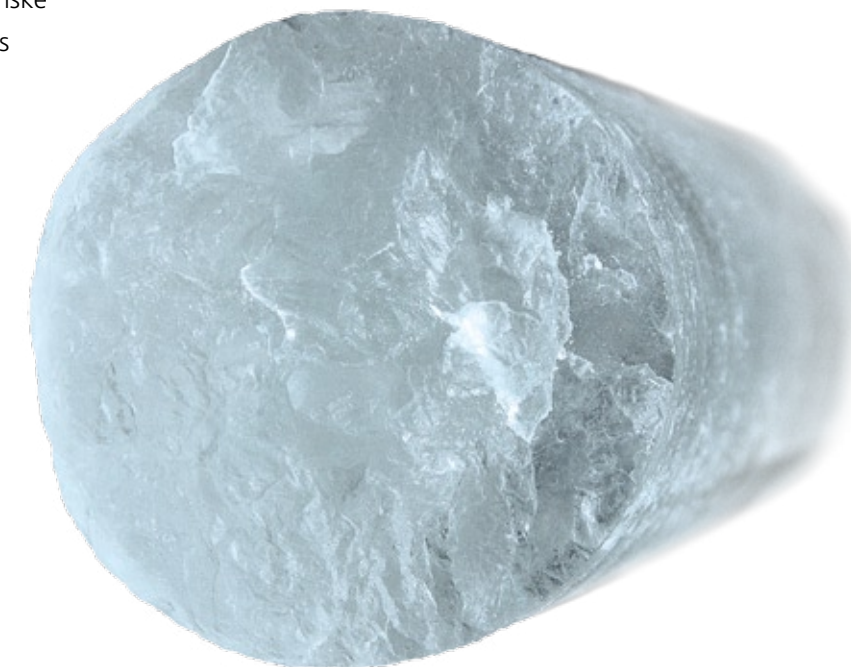
Iskerner, som er udboret ned gennem Indlandsisen på Grønland, er unikke klimaarkiver, der fortæller om fortidens klima og om atmosfærens kemi langt tilbage i tiden. Analyserne af iskernerne øger vor forståelse af Jordens komplekse klimasystem og medvirker således til at skabe bedre muligheder for at kunne forudsige, hvordan klimaet vil udvikle sig i fremtiden.

De oplysninger om fortidens klima, som vi finder i iskernerne, er ofte overraskende og med til at sætte klimamodellerne på svære prøver. Det gælder ikke mindst for en ny analyse af den seneste udborede grønlandske iskerne, NGRIP. Undersøgelsen viser nemlig, at istiden sluttede ekstremt brat for 11.704 år siden - sandsynligvis på et eneste år!

De første tegn på, at noget stort var i gære begyndte et årti tidligere. I årlagene fra istidens kolde perioder er iskernen fyldt med store mængder støv, som blæser til Grønland fra Kina og Tibet. Men i årene op til istidens afslutning begyndte mængden af støv at falde i den sne, som landede på Indlandsisen. En mulig forklaring er, at monsunbæltet rykkede mod nord, og nedbøren steg, så mere støv blev udvasket fra atmosfæren, inden luftmasserne fra Asien nåede til Grønland. Overgangen til mellemistiden startede altså i troperne og subtroperne, mens klimaet i nord stadig var uændret og bidende koldt.

Så pludselig - fra det ene år til det næste - forandrede den atmosfæriske cirkulation på hele den nordlige halvkugle sig radikalt. Vindmønstrets bratte skift kan måles i iskernen. Vore analyser viser nemlig, at vanddampen, der endte som sne på Indlandsisen, pludselig kom fra et koldere havområde, hvilket sandsynligvis skyldtes, at fordampningsområdet flyttede flere hundrede kilometer mod nord på grund af det ændrede vindmønster. De nye vinde udløste det dramatiske klimaskift mellem istiden og vor nuværende mellemistid.

Måske er vinden kommet fra en anden kant og har blæst havisen i Nordatlanten i stumper og stykker? Måske har vinden medvirket til at kick-starte den varme Golfstrøm, som var svækket i istidens kolde perioder? Hvad der præcist skete, ved vi ikke. Men vore analyser af iskernen viser med sikkerhed, at lufttemperaturen i Grønland steg dramatisk i de årtier, som fulgte i kølvandet på den pludselige ændring i den atmosfæriske cirkulation. På blot 50 år blev det 10 grader varmere, og den nuværende mellemistid - hvor den menneskelige civilisation for alvor har foldet sig ud - var begyndt.

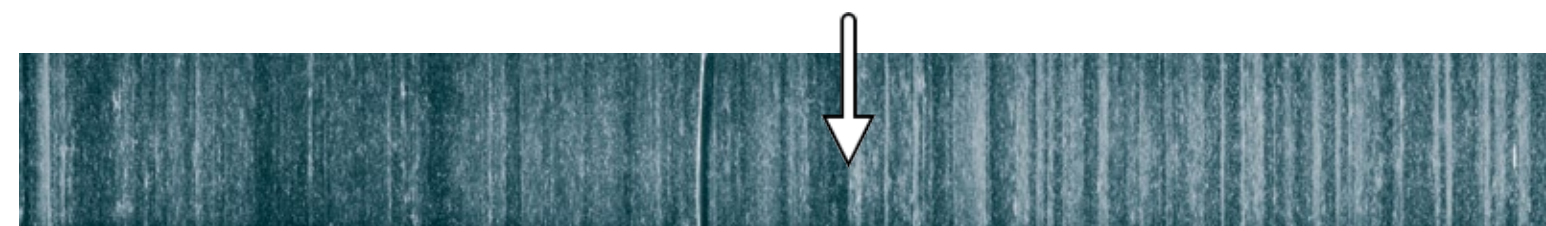


*Iskerne. Foto: Sepp Kipfstuhl*





NGRIP lejren i midnatssolen - artiklens forfatter i borehallen – boret på vej til at blive sænket ned i hullet - og en iskerne fra dybet af den grønlandske iskappe. Boret er ti meter langt og kan hente tre meter iskerne op ad gangen. Iskernen har en diameter på ti centimeter.



11.683 år siden – nuværende mellemistid

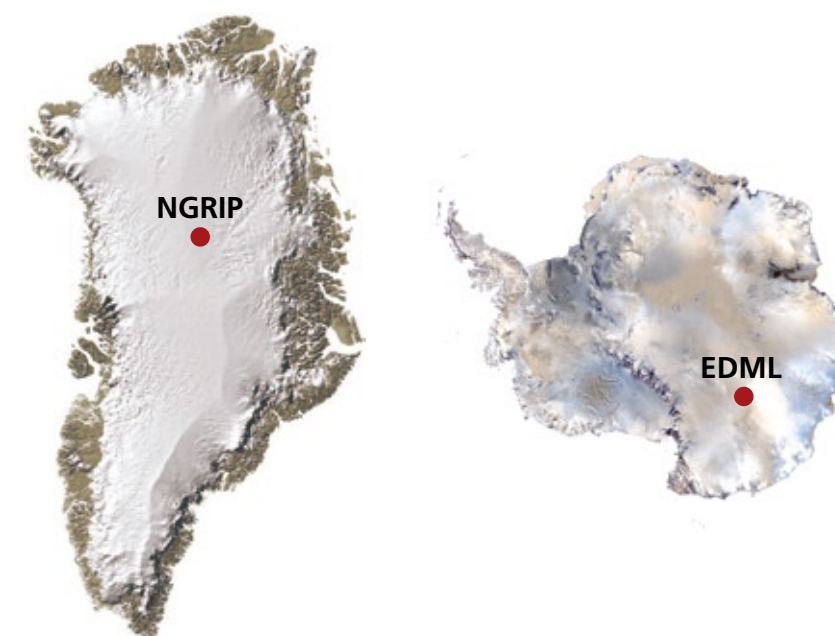
11.704 år siden - istiden slutter

Istid – 11.728 år siden

Lufttemperaturen i Grønland tilbage i tiden kortlægges ved at måle forholdet mellem to stabile iltisotoper ned gennem iskernen. Mængden af støv er størst i istidens kolde perioder, f.eks. i Yngre Dryas, den sidste kolde periode lige før istidens afslutning. Den højre side af den viste del af NGRIP iskernen stammer fra Yngre Dryas, de lyse bånd har et højt indhold af støv, idet der omkring støvkornene dannes mange små luftbobler, der får isen til at se lys ud. Efter overgangen til den nuværende mellemistid (markeret med pilen) falder mængden af støv, og isen bliver mørkere. Isen til venstre for midten er fra begyndelsen af mellemistiden, hvor temperaturen i Grønland steg med 10 grader på fem årtier.

### De store iskapper

Både Grønland og Antarktis er næsten helt dækket af tykke iskapper, og de to gigantiske ismasser udgør tilsammen mere end 99 procent af al den is, der ligger på land. Nogle steder er iskapperne over tre kilometer tykke, og de er dannet gennem tusinder af år. Det er sket ved, at lag efter lag af sne er blevet aflejret oven på hinanden år efter år. Når et snelag bliver begravet under nye lag, bliver det efterhånden presset sammen til is under vægten af den sne, som ophober sig ovenpå. På denne måde dannes der et arkiv af is, hvor den ældste is ligger ved bunden og den yngste ved overfladen af iskappen. Når vi udborer en iskerne fra toppen og helt ned til grundfjeldet, indeholder iskernen lag af is fra hvert eneste år. Analyserne af isen giver meget detaljerede oplysninger om klimaet og atmosfærens kemi tilbage i tiden, og iskernerne er derfor helt unikke klimaarkiver. Den ældste is med uforstyrrede årlag, som vi har udboret fra Grønlands Indlandsis, er 123.000 år gammel og stammer fra NGRIP-borestedet i Nordgrønland.



Iskapperne på Grønland og Antarktis er unikke klimaarkiver. De røde prikker markerer placeringen af to iskerner, som er udboret i de senere år. NGRIP boringen fra Grønland rummer is fra 123.000 år. Iskerner fra Antarktis rækker op til 950.000 år tilbage i tiden, men har ikke en lige så høj tidsopløsning. EPICA iskernen fra Dronning Maud Land på Antarktis har gjort det muligt at sammenholde hurtige klimaskift i nord og syd.





### DATERING AF ISEN – ÅR FOR ÅR

Gennem de senere år har vi dateret NGRIP og de andre grønlandske iskerner med en hidtil uset nøjagtighed – simpelt hen ved at tælle hvert enkelt årlag i isen. Den absolutte kronologi rækker indtil videre 60.000 år tilbage i tiden.

Når det er muligt at tælle årlagene i isen på samme måde som årringe i et træ, skyldes det, at vi kan måle sæsonudsving af en række parametre. I isen fra det meste af den nuværende mellemistid kan man se årtidernes skiftet i selve klimakurven, men efterhånden som årlagene udtynnes ned gennem isen fra istiden, udviskes sæsonudsvingningerne. Men heldigvis er der sæsonvariationer i mængderne af forskellige urenheder i isen, som fortsat gør det muligt at skelne mellem de enkelte årlag.

Mængden af støv, som primært stammer fra Gobiørkenen og det Tibetske plateau, toppe hver forår som følge af øget forvitring, når sne og is smelter. Det samme gælder for mængden af svovlsyre, der kulminerer som følge af mikrobiologisk aktivitet i havoverfladen. Om sommeren toppe mængden af ammonium på grund af generel biologisk aktivitet, og det samme gælder for mængden af nitrat, som kulminerer, når der er mest sollys og mest gang i træers og planters fotosyntese. Mængden af havsalt i isen er derimod størst om vinteren, sandsynligvis fordi nedbøren og dermed udvaskningen fra atmosfæren er mindst, inden skyerne afgiver nedbør på Indlandsisen.

Dateringen af de grønlandske iskerner er så nøjagtig, at den tidsmæssige usikkerhed ved istidens slutning for 11.704 år siden kun er 50 år.

### Iskerner og fortidens temperatur

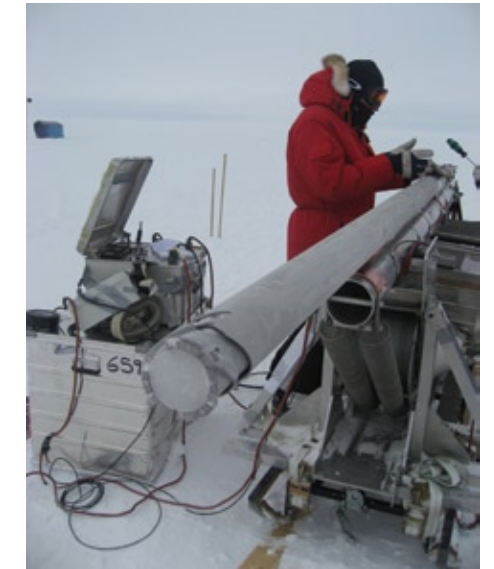
Boret henter iskernerne op i stænger på op til tre meter ad gangen, og fra hvert stykke af iskernen bliver der skåret prøver, som anvendes til at måle mange forskellige klimaparametre på isen. NGRIP projektet er et internationalt samarbejde med deltagelse af ti nationer under dansk ledelse. De mange klimaparametre bliver målt af forskere fra alle de deltagende lande, og resultaterne publiceres som fælles internationale artikler.

NGRIP iskernen har årlag, som er 20 centimeter tykke nær overfladen, mens årlagene er 3 centimeter tykke ved overgangen fra istiden til vores nuværende mellemistid. Årlagene bliver udtyndet med dybden, fordi isen flyder på en måde, så lagene trykkes sammen, samtidig med at isen flyder ud mod iskappens rand. Mange af de klimaparametre, vi måler på iskernen, bestemmes med en nøjagtighed, der gør det muligt at se den årlige variation af klimaparametrene.

En af de vigtigste klimaparametre, vi måler, er forholdet mellem mængden af tung ilt med atomvægten 18 ( $^{18}\text{O}$ ) og almindelig ilt med atomvægten 16 ( $^{16}\text{O}$ ) i selve isen, som jo består af frosset vand ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Den sjældne og tunge iltisotop har to ekstra neutroner i atomkernen. Forholdet mellem de to iltisotoper i iskernen afspejler lufttemperaturen på det tidspunkt, da isen i et givet årlag faldt som sne på iskappens overflade.

Skyerne, der driver ind over Indlandsisen, dannes over havet, hvorfra de optager vanddamp. På vej ind over den kolde iskappe afkøles skyerne og afgiver nedbør, fordi den mængde vand, en sky kan indeholde, formindskes, når den afkøles. Jo koldere luften er, jo mere sne har skyen tabt, inden den kommer ind til midten af iskappen, hvor iskernerne udbores. Når det sner, falder de sjældne vandmolekyler med tung ilt lettere ud af skyen end almindeligt vand; ganske enkelt fordi de er tungere. Så jo mere skyen afkøles på rejsen hen over Indlandsisen, jo mere vand mister den undervejs, og jo mindre tung ilt er der tilbage i den sne, som falder midt inde på iskappen. Derfor fortæller forholdet mellem let og tung ilt i isen om skyens temperatur, da sneen faldt på iskappens top.

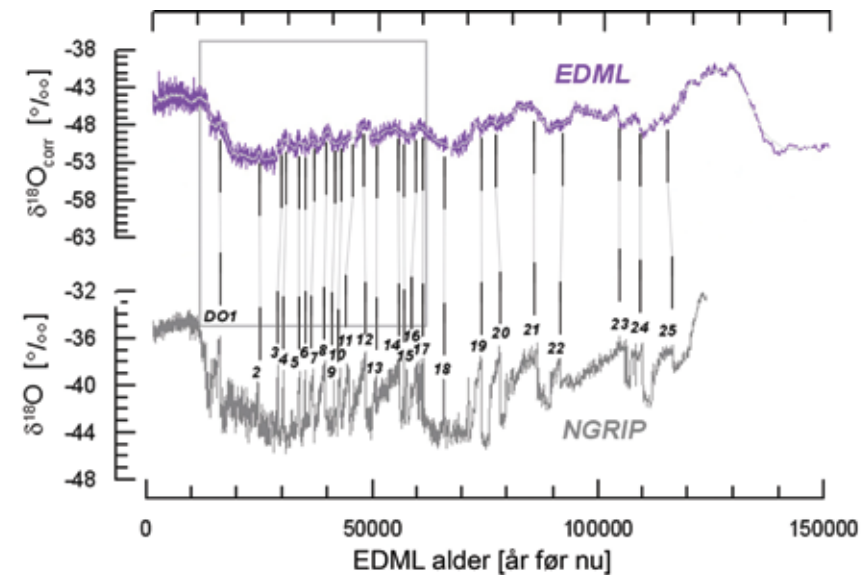
Ved at analysere forholdet mellem de to iltisotoper ned gennem iskernen får vi information om fortidens temperatur og bliver i stand til at beregne den klimakurve, som bl.a. viser, hvordan istiden sluttede, og mellemistiden begyndte. Hele klimakurven ( $\delta^{18}\text{O}$ ) ( $\delta$  =delta) fra NGRIP-iskernen rækker 123.000 år tilbage i tiden, hvilket dækker den nuværende mellemistid, sidste istid og begyndelsen af den forrige mellemistid, som sluttede for 115.000 år siden.



*Boret henter iskernerne op i stænger på op til tre meter ad gangen*



Nederst: Klimakurven fra NGRIP i Grønland for de seneste 123.000 år. Øverst: Klimakurven fra EPICA iskernen fra Dronning Maud Land på Antarktis. Kurverne viser forholdet mellem lette og tunge iltmolekyler i isen gennem tiden. Dette forhold er et mål for temperaturen tilbage i tiden. På figuren er de 25 bratte klimaskift, Dansgaard-Oeschger begivenhederne, nummererede.



Mens klimaet har været varmt og stabilt gennem vores varme mellemistid, viser klimakurven fra NGRIP, at istidens klima var præget af hurtige og voldsomme klimasvingninger. Faktisk finder man spor af 25 af disse hurtige klimaskift, som kaldes Dansgaard-Oeschger begivenheder, i løbet af sidste istid. Temperaturen i Grønland stiger hurtigt indenfor få årtier med 5-10 grader, hvorefter den aftager mere langsomt over 500 til 2000 år.

#### De hurtige klimaskift under istiden

Det har optaget os meget at finde ud af, hvad der kan få klimaet til at skifte så voldsomt og brat, og vi har efterhånden fået en forståelse af, hvordan det kan ske. Først kan man konstatere, at de bratte klimaskift ikke skyldes påvirkninger udefra såsom forandringer i solindstrålingen; hverken på grund af de periodiske variationer i Jordens bane omkring Solen eller på grund af ændringer i selve solstrålingens intensitet. Det er således Jordens eget system, der skaber klimaskiftene.

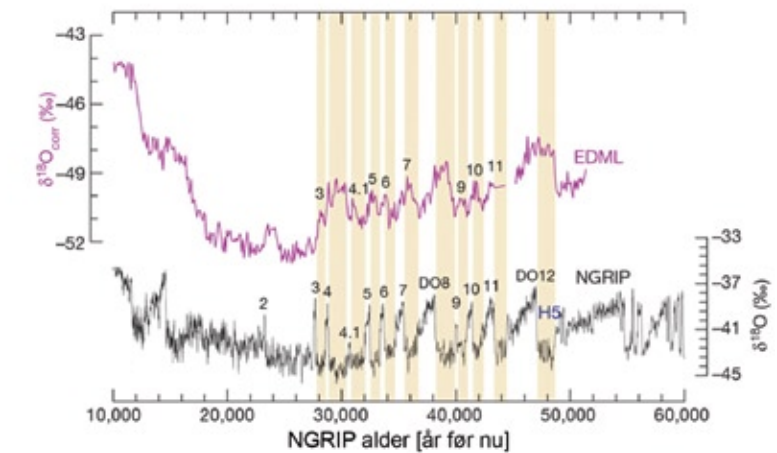
Det har vist sig, at klimakurver fra iskerner fra Antarktis også har klimaskift igennem istiden, men de ser meget anderledes ud end i Grønland. Et eksempel er temperaturkurven fra en iskerne, vi har udboret i forbindelse med det europæiske EPICA program ved Dronning Maud Land på Antarktis. På Antarktis var istidens klimaskift mindre, og de havde hverken bratte stigninger eller fald. Man kan desuden se, at skiftene mellem Nord og Syd ikke sker samtidigt. Mens det er koldt i Grønland, bliver der varmere i Antarktis, og når der i nord sker bratte skift til varmere temperaturer, begynder temperaturen at falde sydpå i Antarktis.

Varmen "skvulper" med andre ord frem og tilbage mellem nord og syd. Her er der to meget vigtige spørgsmål, som trænger sig på: Hvorfor opfører klimasystemet sig på en måde, så varme i nord betyder kulde i syd og omvendt? Og hvordan sker de pludselige opvarmninger på den nordlige halvkugle?

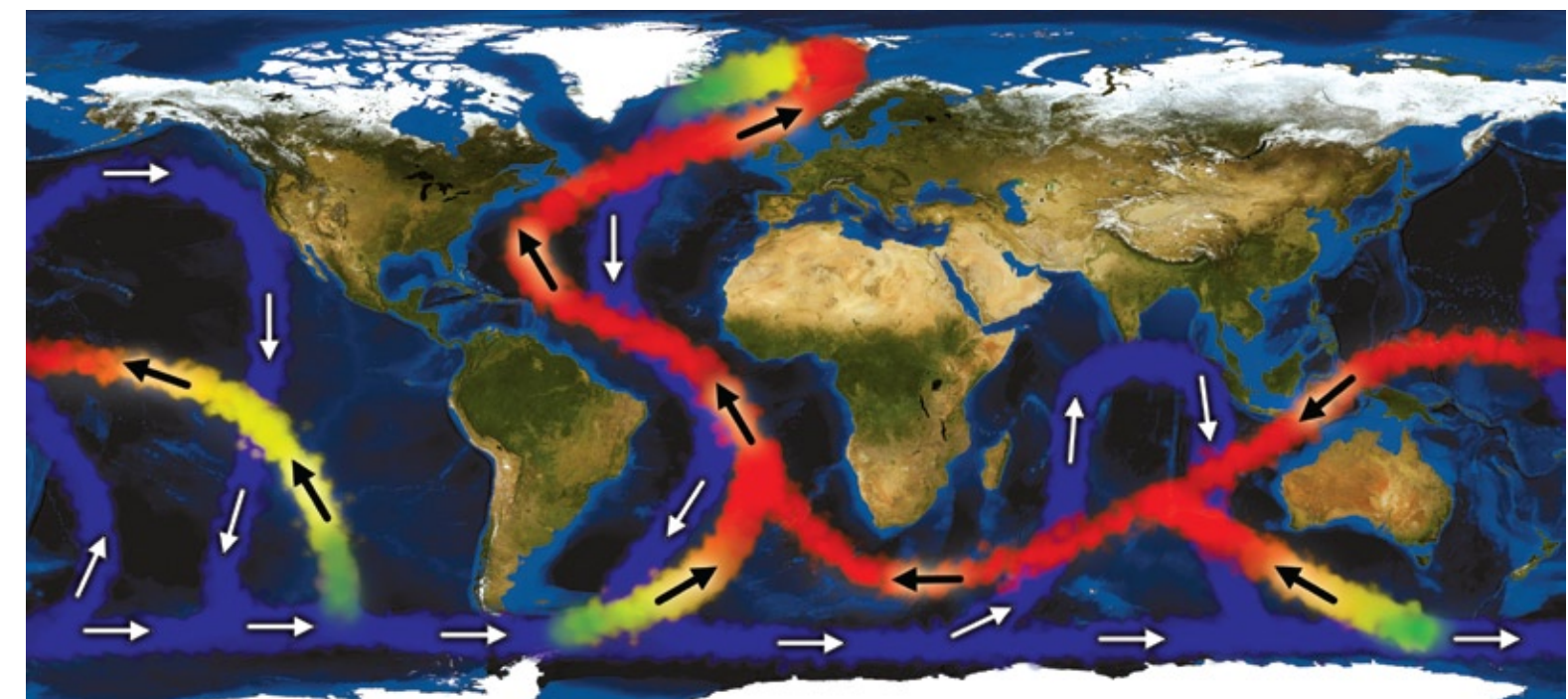
#### Den bipolare temperaturvippe

Jorden modtager mest energi fra Solen på de lave breddegrader nær Ækvator, men heldigvis for os nordboere transporterer vindene i atmosfæren og havstrømmene i oceanerne varme til de høje breddegrader nær polerne. I Atlanterhavet leder en varm overfladestrøm, Golfstrømmen, varmt vand nordpå langs oceanets østlige kant ved Europa og Skandinavien. Danmark nyder godt af denne varme, som medfører, at vort klima er mildere end på samme breddegrad andre steder på Jorden.

De globale havstrømme kaldes den termohaline cirkulation; "termo" står for varme og "halin" for salt. Drivkraften bag strømmene er forskelle i vandets massefylde, som opstår på grund af gradienter i vandtemperaturen og forskelle i vandets saltindhold. Vand bliver tungere jo koldere og jo mere saltholdigt, det er. Når Golfstrømmen flyder mod nord, afkøles vandet gradvist og bliver mere saltholdigt på grund af fordampning. Til sidst bliver overfladevandet så koldt, saltholdigt og tungt, at det synker til bunds nord for Island. Nedsynkningen i Nordatlanten er den vigtigste pumpe i den globale havcirkulation, og pumpen driver en dyb kold havstrøm, som fører vandet sydpå igen.



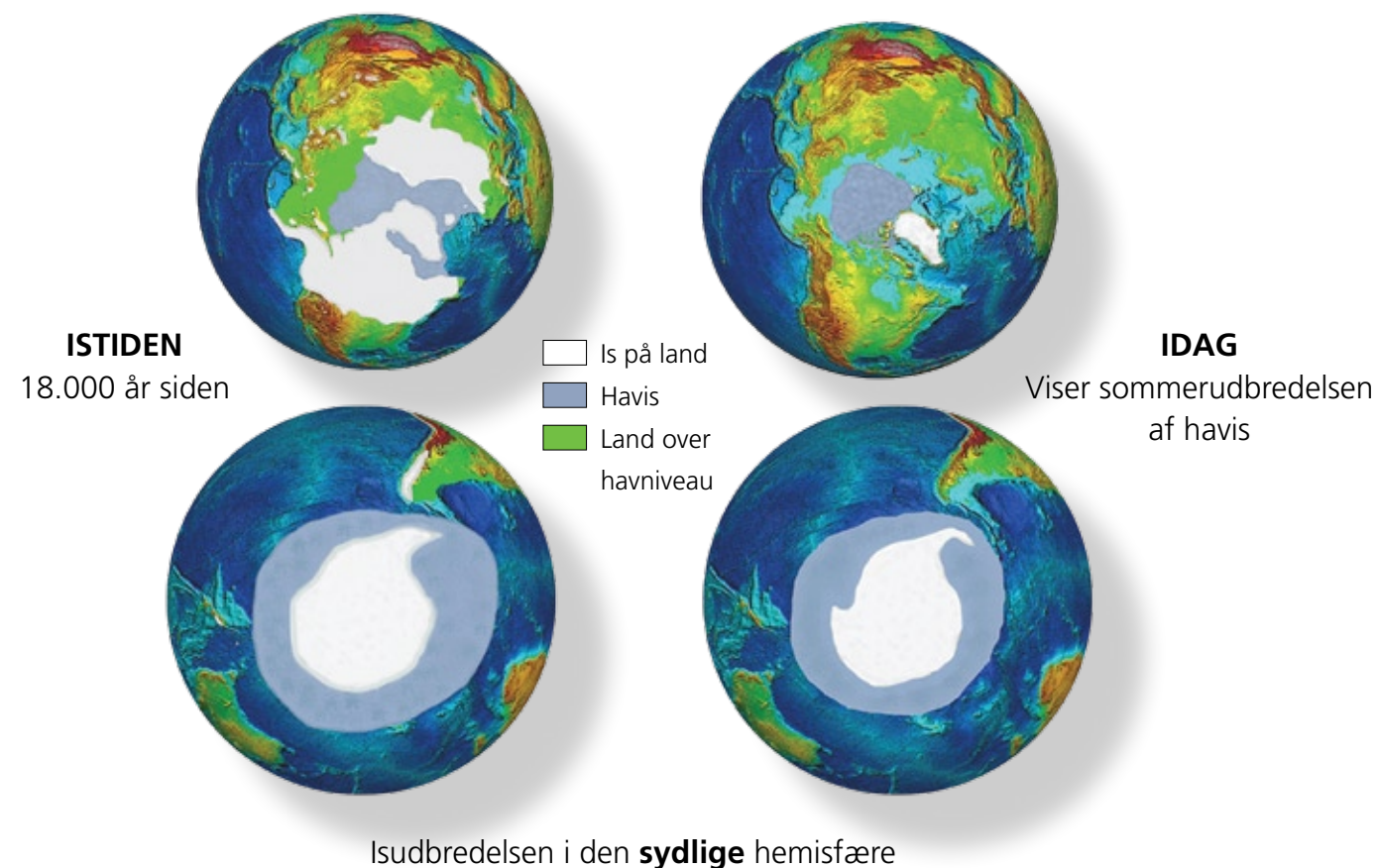
Istidens klimaskift; når det var varmt i nord, var det koldt i syd - og omvendt. Nederst: Klimakurven fra NGRIP i Grønland fra 10.000 til 60.000 år før nu. Øverst: Klimakurven fra EPICA iskernen fra Dronning Maud Land på Antarktis gennem samme periode. Dansgaard-Oeschger begivenhederne er også nummeret her.



Den termohaline havcirkulation. Den vigtigste pumpe i de globale havstrømme er nedsynkningen af koldt og salt overfladevand i Nordatlanten. Grafik: NOAA



### Isudbredelsen i den nordlige hemisfære



Isens udbredelse på hav og land ved kulminationen af sidste istid. Grafik: Mark McCaffrey, Paleoclimate Program/NOAA

I de perioder under istiden, hvor klimaet var relativt mildt i de nordlige egne, har den termohaline cirkulation været stærk, og den har ført varme fra syd til nord. Ved denne proces 'stjæler' den nordlige halvkugle varme fra den sydlige halvkugle, og afkølingen sydpå kan således forklares ved, at havstrømmene flytter varme fra syd til nord. Omvendt var den termohaline cirkulation svækket i de lange perioder under istiden, hvor det var bidende koldt nordpå, og hvor havisen nåede helt ned til Spanien. Her blev afkølingen i nord forstærket ved, at havstrømmene ikke længere 'stjal' varme fra syden, og følgelig blev havene på den sydlige halvkugle opvarmet.

#### De bratte opvarmninger i nord

For at forklare, hvordan episoderne med brat opvarmning kan ske i nord, må man lægge mærke til, at der er væsentlig forskel på fordelingen af landmasser og havområder på den nordlige og den sydlige halvkugle. Mod nord ligger de store kontinenter, hvorpå der kan dannes iskapper i kolde perioder. Ved sydpolen ligger Antarktis, som er omgivet af havet, men ellers er der ikke store landmasser i de sydlige have. Under

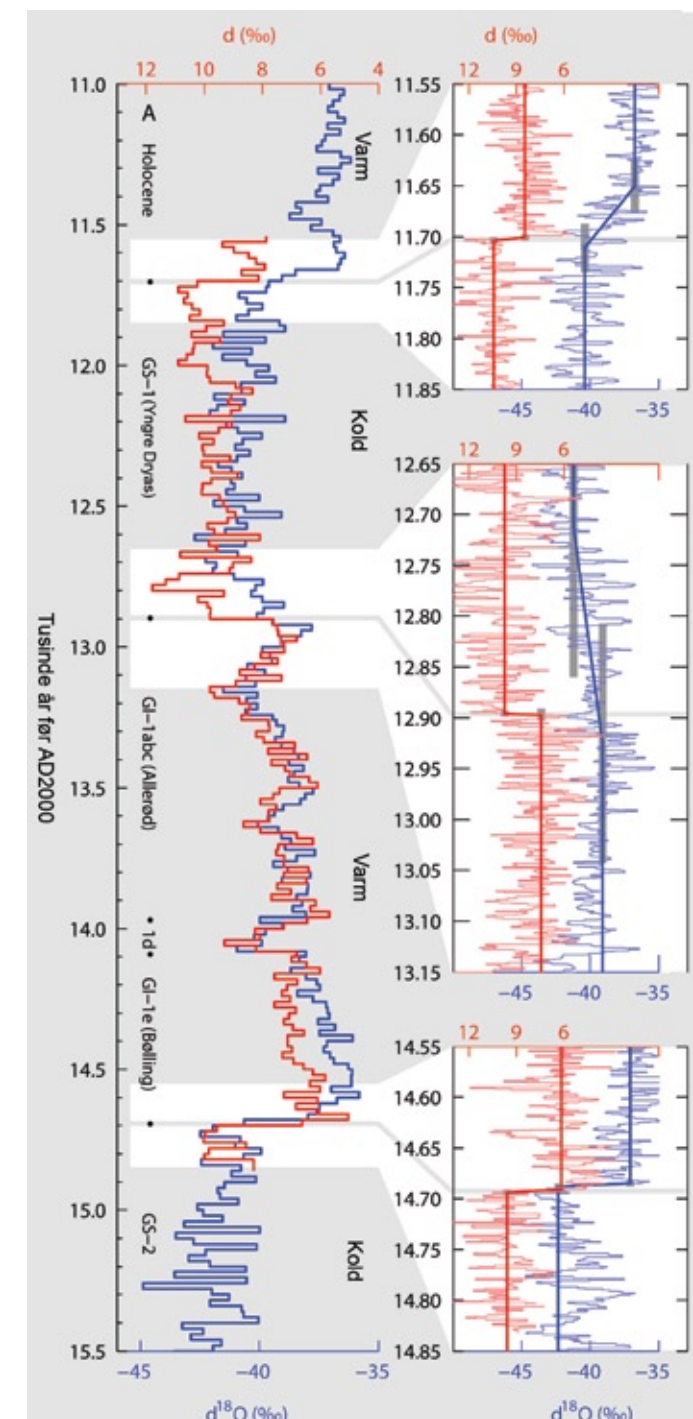
istiden dækkede kæmpemæssige iskapper Nordamerika (Laurentide iskappen) og Nordeuropa (Den Fennoskandiske Iskappe), og muligvis var der også iskapper over Sibirien. Det kolde klima gav samtidig anledning til mere havis og også flydende ishylder, der rakte langt ud i havet, som dem vi ser omkring Antarktis i dag. Mod syd er der ikke landmasser, hvorpå store iskapper kunne bygges op, men ishylderne har været større i istiden og havisen mere udbredt.

I perioderne med koldt klima i nord var iskapperne store og omgivet af fyldende is. Den termohaline cirkulation var svækket. Men i slutningen af de kolde perioder sendte iskapperne enorme mængder af isbjerge ud i havene, hvilket især skete fra Laurentide iskappen. Der er flere teorier fremme til at forklare hvorfor, men den fremherskende ide er, at opvarmningen af sydhavet giver anledning til en havvandsstigning nordpå, hvilket fik iskapperne til at skride ud. Når processen først starter, vil isbjergene hæve havniveauet yderligere og få endnu mere is til at skride ud. Processen stopper først, når iskapperne er "udsultet". Observationer viser, at meget store mængder af is blev sluset ud i havet – nok til at man observerer havvandsstigninger af størrelsesordenen 10 meter. Nu blev det for alvor koldt nordpå, og den store tilførsel af ferskvand slukkede helt for den termohaline cirkulation.

Efter udbringningen af NGRIP iskernen har vi udført meget detaljerede målinger hen over de meget bratte opvarmninger, som afsluttede de kolde perioder i nord. Nye og spændende resultater fra NGRIP iskernen er lige blevet publiceret i det prestigefulde tidsskrift Science, og her lancerer vi en ny forklaring på mekanismerne bag de to seneste opvarmninger i istiden. Den første af dem var den varme Bølling-Allerød periode, som begyndte for 14.694 år siden og sluttede for 12.897 år siden. Derpå kom den kolde periode Yngre Dryas, som varede frem til den dramatiske opvarmning ved begyndelsen af vor nuværende mellemistid.

#### Vinden skifter og fordampningsområdet flytter

Udover den klimaparameter, som bygger på det indbyrdes forhold mellem tung ilt og almindelig ilt i isen, vil jeg nu introducere en anden klimaparameter, som er baseret på vands brinti-



Den blå kurve viser klimaets udvikling gennem de seneste 15.500 år målt ud fra forholdet mellem tung ilt og almindelig ilt i NGRIP iskernen. Denne kurve afspejler lufttemperaturen i Grønland. Den røde kurve viser deuterium overskuddet, som er et indirekte mål for havtemperaturen i det område, vanddampen kom fra.



sotoper ( $\delta D$ ). Her måler vi forholdet mellem tung brint (H) også kaldet deuterium, der har en ekstra neutron i kernen og atomvægten 2, og almindelig brint med atomvægten 1. Forholdet mellem de to brintisotoper ned gennem årlagene i isen giver en klimakurve på samme måde som forholdet mellem iltisotoperne, og de afspejler ligeledes temperaturen i de skyer, der dækkede toppen af Indlandsisen med sne. Der er dog en lille, men vigtig forskel, som vi kalder deuterium overskuddet ( $d = \delta D - 8\delta^{18}O$ ). Deuterium overskuddet er en indirekte parameter for havvandets temperatur i det havområde, hvorfra vanddampen, der giver nedbør over Grønland, blev dannet.

Når det bliver koldere i Grønland, falder mængden af både tung ilt og tung brint i nedbøren og dermed i isen, så både  $\delta D$  og  $\delta^{18}O$  aftager, men deuterium overskuddet vokser typisk, fordi der er varmere i fordampningsområdet, som vides at ligge i subtropene. Fordampningsområdet menes at blive varmere, fordi kulden fra nord skubber fordampningsområdet sydpå. Men ved de bratte opvarmninger nordpå for 14.694 år siden og for 11.704 år siden skete der noget mærkeligt!

Deuterium overskuddet skifter fra varme værdier til koldere værdier på et enkelt år svarende til en afkøling af fordampningsområdet på 2-4 grader. Så hurtigt kan et havområde umuligt nedkøles, så på et enkelt år må fordampningsområdet være flyttet flere hundrede kilometer nordpå. Det kan kun forklares ved, at atmosfærens cirkulation på hele den nordlige halvkugle brat er skiftet, hvilket har medført, at vanddampens kildeområde har ændret sig. Efter det bratte skift i vindmønstret ser vi i iskernen, at lufttemperaturen over Grønland i de følgende årtier steg stærkt i takt med, at havisen forsvandt.

Vi ved ikke, hvorfor eller hvordan den atmosfæriske cirkulation på den nordlige halvkugle skiftede fra år til år ved opvarmin-

gerne 14.500 år siden og for 11.704 år siden. Men en mulig forklaring er, at monsunbæltet blev skubbet nordpå af den opvarmning, som fandt sted i sydhavet sidst i den meget kolde periode mod nord, og det kan have startet det voldsomme og pludselige skift i den atmosfæriske cirkulation, der på blot 50 år opvarmede de arktiske områder med 10 grader.

#### **Bratte skift i mellemistider – og i fremtiden?**

Det er meget bemærkelsesværdigt, at Jordens interne klimasystem kunne skifte så brat i istiden. Som tidligere nævnt var der i alt 25 bratte klimaskift i sidste istid, og de to sidste skift bragte klimaet ind i den nuværende varme mellemistid. I mellemistiden har klimasystemet ikke udvist lignende store udsving. Det er bestemt noget, vi skal sætte pris på, og det stabile klima er sandsynligvis en medvirkende årsag til, at vores civilisation har kunnet udvikle sig så rivende.

Vil bratte klimaskift kunne ske i fremtiden, hvis den globale opvarmning tipper vort klima over i en anden balance? For at svare på det, må man først bemærke at forsøg på at genskabe de bratte istidsskift i beregninger med klimamodeller ikke har været særlig succesfulde. Hvis klimaet bevæger sig ind i en ny tilstand, der muliggør bratte skift, vil vores klimamodeller derfor næppe være i stand til at advare os om risikoen.

Til trods for den intensive klimaforskning gennem de sidste år kan man derfor konstatere, at nok er vi blevet meget klogere, men der er stadig lang vej igen, før vi forstår det meget komplekse klimasystem på Jorden. Undersøgelser af højtopløste klimaserier, som dem iskernerne giver, og udvikling af klimamodeller baseret på den procesforståelse, der fremkommer ud fra data om fortidens klima, er således helt nødvendige for at blive i stand til at kunne forudsige fremtidens klima. Der er stadig meget at forske i!



#### **Om forfatteren:**

Dorthe Dahl-Jensen, f. 1958, professor, modtog Villum Kann Rasmussens Årslegat til Teknisk og Naturvidenskabelig Forskning i 2001 for hendes arbejde inden for isfysik. Hun er professor i Isfysik ved Niels Bohr Institutet ved Københavns Universitet. Hun leder et Grundforskningscenter for Is og Klima med fokus på at bruge iskernedata til at forstå fortidens, nutidens og fremtidens klima. Dorthe Dahl-Jensen leder også det Internationale Polarårs iskerneboringsprogram NEEM på Grønlands Indlandsis med deltagelse af forskere fra 14 nationer. Dorthe Dahl-Jensens forskning omhandler rekonstruktion af klima fra iskernedata og udvikling af isflydemodeller med særlig henblik på iskappens udvikling i fortidens varme klimaperioder. Hun er hovedforfatter på kapitlet om "The Greenland Ice Sheet in a changing climate", en Arktisk Råds AMAP rapport om "Climate Change and the Cryosphere: Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic".