

KLIMAÆNDRINGER DE SIDSTE 100.000 ÅR

I dag tales der meget om hvorvidt klimaet er ved at ændre sig, men én ting ligger fast: verden har oplevet en opvarmning på omkring 0,6 °C i løbet af de sidste hundrede år. Det specielle ved denne klimaændring er at den muligvis er menneskeskabt, men ellers er klimaændringer som sådan et helt naturligt fænomen.

Inden for kvartærperioden, de sidste to mio. år, har klodens klima gennemgået svingninger mellem istider af omkring 100.000 års varighed og varme perioder af omkring 10.000 års varighed. En kilde til informationer om disse svingninger er det klimaarkiv som ligger gemt i de store iskapper på Grønland og Antarktis. Ved at bore iskerner tværs gennem de kilometertykke iskapper har man opnået stor viden om de seneste store klimavariationer. På Grønland dækker de lange iskerner de sidste 100-150.000 år, og på Antarktis mener man ved en igangværende boring at være nået 820.000 år tilbage i tiden.

DEN SENGLACIALE TEMPERATUROSCILLATION

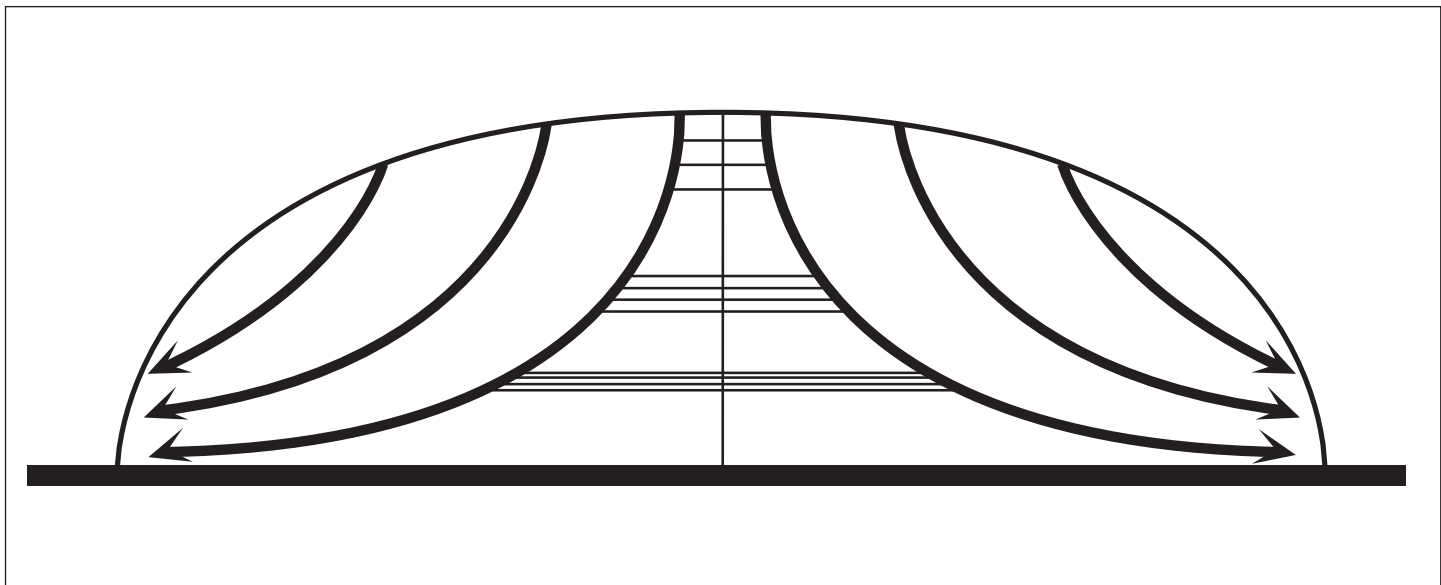
De første sikre beviser på at Danmark havde oplevet drastiske klimaændringer blev fundet for godt og vel 100 år siden. På dette tidspunkt var kortlægningen af Danmarks undergrund og dannelseshistorie i fuld gang.

Af Sune Olander Rasmussen,
Anders Svensson &
Katrine Krogh Andersen

Under istiden var Danmark delvis dækket af iskapper der kom fra nord og øst. Isen skurede over underlaget og medbragte sedimenter der blev frigjort da isen smeltede. De finkornede partikler i sedimentet kunne nemt udvaskes og dannede efterfølgende lerlag i søer og fordybninger. Disse lerlag findes mange steder i Danmark, og i det nittende århundrede skød teglværker op de steder hvor man kunne grave sig ned til leret. Ved teglværket i Allerød havde man gravet 15 meter dybe grave for at nå ned til det glacielle ler, og det var derfor relativt let her at kortlægge undergrundens lagvise opbygning. De to geologer Hartz og Milthers fandt to lerlag adskilt af et lag af delvist omsat organisk materiale. I lerlagene fandt de pollen fra blomsten kirtelfeldsimmer, *Dryas octopetala*, der i dag vokser i f.eks. Island. De konkluderede i en artikel fra 1901 at en relativ varm periode midlertidigt måtte have afbrudt istidskulden og givet anledning til laget med organisk materiale.

På et møde i Dansk Geologisk Forening i 1906 blev *den sen-glacielle temperaturoscillation* diskuteret. Man konkluderede at Danmark havde oplevet en dobbelt klimasvingning: fra istiden steg temperaturen til et niveau der var omkring 2 °C koldere end i dag, herefter faldt temperaturen kortvarigt til omtrent istidsniveau, før den nuværende varmeperiode, Holocæn, begyndte.

I løbet af 1900-tallets første årtier blev der sat navne på disse omskiftelige, klimatiske perioder. De korte, varme perioder blev opkaldt efter Allerød hvor Hartz og Milthers havde foretaget deres undersøgelser, og efter Bølling Sø ved Skjern i Jylland hvor man havde fundet lignende spor efter en varm periode. De kolde perioder blev navngivet med inspiration fra den fundne pollen, og fik navnene Ældste, Ældre og Yngre Dryas. I dag bruges internationalt betegnelsen Bølling-Allerød om perioden fra omtrent 14.500 til 12.500 år før nu, mens den kolde periode fra omtrent 12.500 til 11.500 år før kendes som Younger Dryas. Betegnelserne Ældre Dryas som dækker over den kortvarige afkøling mellem Bølling og Allerød for knap 14.000 år siden, og Ældste Dryas som er perioden lige inden opvarmningen for 14.500 år siden, er ikke lige så udbredte, men bruges især i Danmark.



1. Et skematisk tværsnit af Indlandsisen som illustrerer isens flydning. Dimensionerne er fortegnede idet isen på det højeste sted er omkring 3 km tyk, mens iskappen er omkring 1.000 km bred på det bredeste sted. Hvert år falder der ny sne på toppen af isen. Denne presses med tiden sammen og synker ned i iskappen som årlag af is. Modellen viser hvordan årlagene i iskappen udtyndes med dybden på grund af den strækning af isen der sker fordi isen kontinuerligt flyder ud mod randen hvor den smelter eller brækker af som isbjerge. Det mest favorable sted at bore en iskerne på Indlandsisen er på højderyggen, den såkaldte isdeler, idet isen her kun flyder vertikalt. Ude mod randen vil de dybe årlag ofte være forstyrrede på grund af horisontal flydning over en ujævn undergrund.

PALEOKLIMA FRA ISKERNER

Selvom man således havde nogenlunde styr på temperaturens overordnede opførsel ved istidens afslutning, vidste man ikke meget om hvornår eller hvor hurtigt omslagene skete.

Det afgørende gennembrud på denne front blev, da blandt andre den danske fysiker Willi Dansgaard i 1950'erne indså at informationer om tidligere tiders klima, *paleoklimaet*, kunne hentes fra de store iskapper på Grønland og Antarktis. Da det amerikanske militær i 1966 fuldførte en gennemboring af Indlandsisen ved Camp Century basen i Nordvestgrønland, fik Willi Dansgaard mulighed for at teste sin hypotese på den udborede iskerne. Undersøgelsen af iskernen fra Camp Century gjorde

de det for første gang muligt at udtale sig mere kvantitativt om temperaturændringerne og foretage en omtrentlig datering af omslagene. Dette blev startskuddet for en række dybdeboringer på Indlandsisen (*boks 1*), og iskernerne fra disse boringer udgør i dag en af de vigtigste kilder til vores viden om klimaet i de sidste 100.000 år. Willi Dansgaards bog *Grønland i istid og nutid* (Rhodos, 2000) kan varmt anbefales til de læsere der vil læse mere om den historiske baggrund for de grønlandske iskerneboringer.

Den sne der falder på de indre dele af Indlandsisen, smelter ikke om sommeren. Det store "overskud" af nedbør fra de indre dele bevæger sig i stedet ud til isranden hvor afsmeltning og afbrækkende isbjerge skiller Indlands-

isen af med en tilsvarende mængde is. Hele iskappen flyder som en gigantisk lagkage hvor der hvert år lægges et lag på toppen. Dette trykker de underliggende lag sammen, så de gradvis udtyndes (*fig. 1*). På midten af Indlandsisen, ved borestedet GRIP (*fig. 2*) falder der omkring 70 cm sne om året. Ved omkring 100 m dybde er sneen blevet presset sammen til is, og et års nedbør fylder nu i snit kun 23 cm. Sneen der faldt Julenat år 1, ligger i 428 m dybde hvor årlagene har en tykkelse på 20 cm. Ned gennem iskappen udtyndes årlagene yderligere, og vi skal ned i omkring 2.800 m dybde for at finde den ca. 113.000 år gamle is der stammer fra begyndelsen af sidste istid. Her er årlagstykkelsen kun et par mm, hvilket både skyldes udtyn-



A. Sådan så NordGRIP-lejren ud i 1996, da den lige var bygget færdig. Telte og bygninger er placeret på forhøjninger af sne, så de ikke bliver dækket så hurtigt af sne. Hvert år falder der nemlig mere end ½ m sne ved NordGRIP, så i løbet af 10-15 år vil lejren være helt dækket af sne.



B. Hovedbygningen som indeholder generator, kommunikationsudstyr, køkken og indkvartering. Lejrens øvrige bygninger rummer værksteder, lager og indkvartering som også foregår i telte.

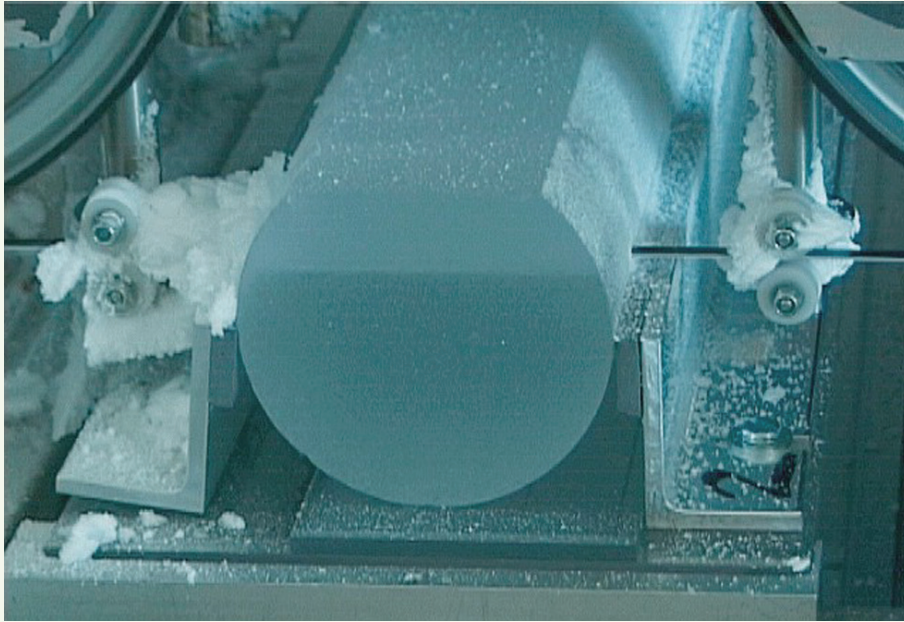


Den første dybe iskerneboring i Grønland blev gennemført af amerikanerne i tresserne ved Camp Century i nærheden af Thule (fig. 2). Senere fulgte boringer til bunden af isen ved Dye-3 radarstationen i Sydgrønland 1979-81, og i perioden 1988-93 blev to iskerner, GRIP- og GISP2-kernerne, boret nær toppen af Indlandsisen af henholdsvis europæere og amerikanere (omtalt i Naturens Verden nr. 10, 1992 og nr. 9, 1994). Forkortelserne GRIP og GISP står for henholdsvis GRenland Ice core Project og GRenland Ice Sheet Project. GRIP- og GISP2-iskernerne er begge lidt over 3 km lange og den ældste is i kernerne (fra bunden af Indlandsisen) er mere end 150.000 år gammel. Disse iskerner indeholder dermed nedbør fra hele den forrige istid som varede fra for ca. 113.000 år siden frem til for ca. 11.500 år siden hvor vores nuværende mellemistid, Holocæn, begyndte.

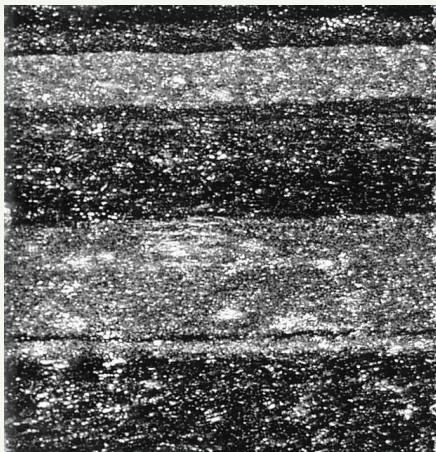
I disse år gennemføres en ny iskerneboring ved NordGRIP som ligger i det nordlige Centralgrønland. Dette boreprojekt ledes, ligesom flere af de tidligere grønlandske boreprojekter, af glaciologigruppen ved Københavns Universitet, men flere europæiske lande samt Japan og USA deltager også i projektet. Ved NordGRIP er der en relativt høj jordvarme som gør at der på et tidspunkt har været smeltning ved bunden af isen, sådan at den ældste is nu er smeltet bort. Derfor forventes den dybeste is fra NordGRIP-iskernen kun at være omkring 120.000 år gammel. Til gengæld for den yngre is opnår man en iskerne, som har en højere tidslig opløsning end de eksisterende kerner. Da NordGRIP-kernen indeholder færre årlag, er de enkelte årlag nemlig tykkere end i iskerner som ikke har haft bundsmeltning. Det gør NordGRIP-iskernen særligt velegnet, når man vil foretage en nøjagtig datering ved optælling af årlag og til studiet af hurtige klimatiske begivenheder under istiden.

NordGRIP-projektet kan følges på www.glaciology.gfy.ku.dk/ngrip/

C. Under sneoverfladen er der udgravet et system af gange og snehuler hvor boring, prøvetagning og pakning af iskernen foregår. Iskernen har nemlig ikke godt af at komme op i sollys, da solen kan smelte isen og forstyrre dens kemiske sammensætning. Her ses borehallen.

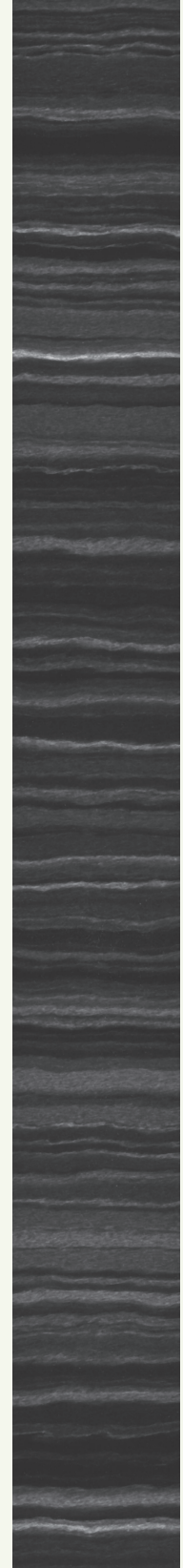


D. Nede i de underjordiske huler skæres iskernen op i mindre stykker, som sendes til analyse forskellige steder i Europa. Her skæres et længdesnit af iskernen. Prover til $\delta^{18}\text{O}$ -målingerne tages i høj opløsning på 5 cm hele vejen ned gennem den 3 km lange iskerne. Der skæres altså i alt 60.000 $\delta^{18}\text{O}$ -prøver.



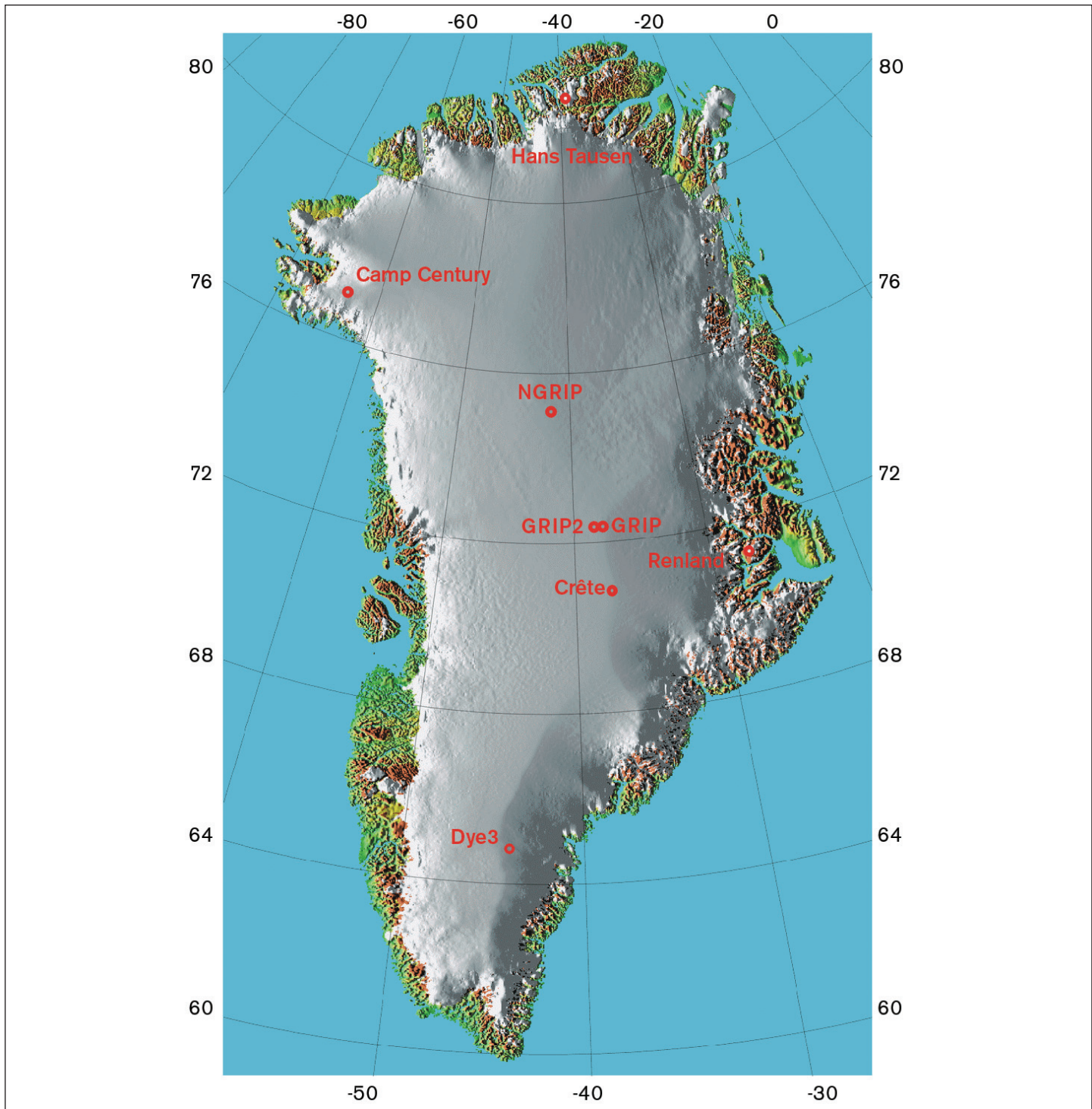
E. Til venstre ses en $10 \times 10 \text{ cm}^2$ stor prøve fra GRIP-kernen fra 2.020 m dybde. Ligesom i fig. F ses horisontale lag med hvide bobler hvor isen har højt indhold af urenheder og støv. Til højre ses den samme prøve, men her placeret mellem to krydsede polarisatorer hvorved de enkelte iskrystaller i prøven fremtræder med forskellig farve. Hvert farvet område er én krystal og krystallernes forskellige farver skyldes krystalplanernes forskellige orientering i prøven. Der er en sammenhæng mellem indholdet af urenheder og krystalstørrelsen i isen, idet flere urenheder medfører at krystallerne bliver mindre. Klimaet afspejles således i isens krystalstruktur, og faktisk kan både årstidsvariationen og klimaændringer registreres i isens krystalstørrelse, som dog også afhænger stærkt af både temperatur og af isens alder.

F. Synlige lag i Nord-GRIP iskernen fra 2.500 m dybde hvor isen har en alder på omkring 70.000 år. Det viste isstykke er 1 m langt, 10 cm bredt og 3 cm tykt. Billedet er optaget ved indirekte belysning af iskernen. De sorte områder er klar is, mens de hvide lag skyldes små luftbobler i isen som dannes omkring urenheder, især støvpartikler. Disse stammer fortrinsvis fra ørkener i Centralasien, og de deponeres hovedsageligt på isen i forårsmånedene. De synlige lag i isen udgør derfor en slags årlag der kan følges hele vejen gennem istiden.



BOKS 1 FORTSAT





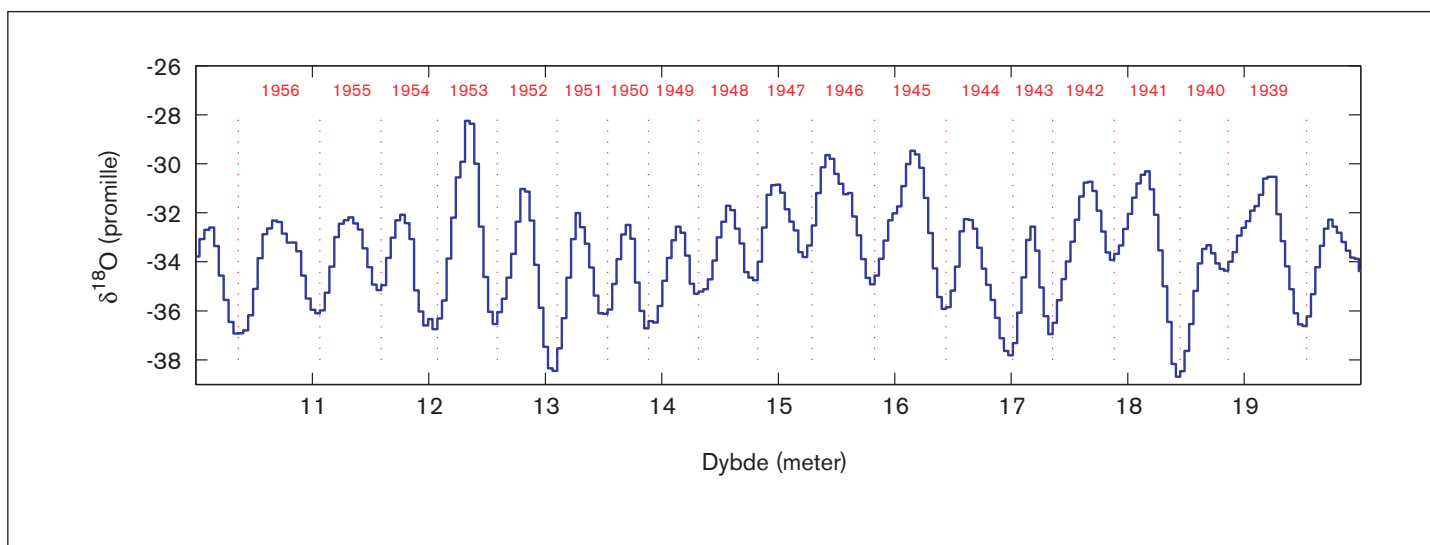
2. Placeringen af de borelokalteter på Indlandsisen hvor der er boret iskerner ned til bunden, de såkaldte dybe iskerner. NordGRIP er markeret som NGRIP på kortet. (Kilde: Kort- & Matrikelstyrelsen)

dingen og en nedbørsmængde under istiden på kun omkring det halve af hvad den er i dag.

Iskernen fra GRIP indeholder således små prøver af nedbør for hvert eneste år helt tilbage til starten af istiden, og

det er faktisk muligt at genfinde de enkelte års snefald ved målinger. Årlagene kan identificeres, fordi der er forskel på





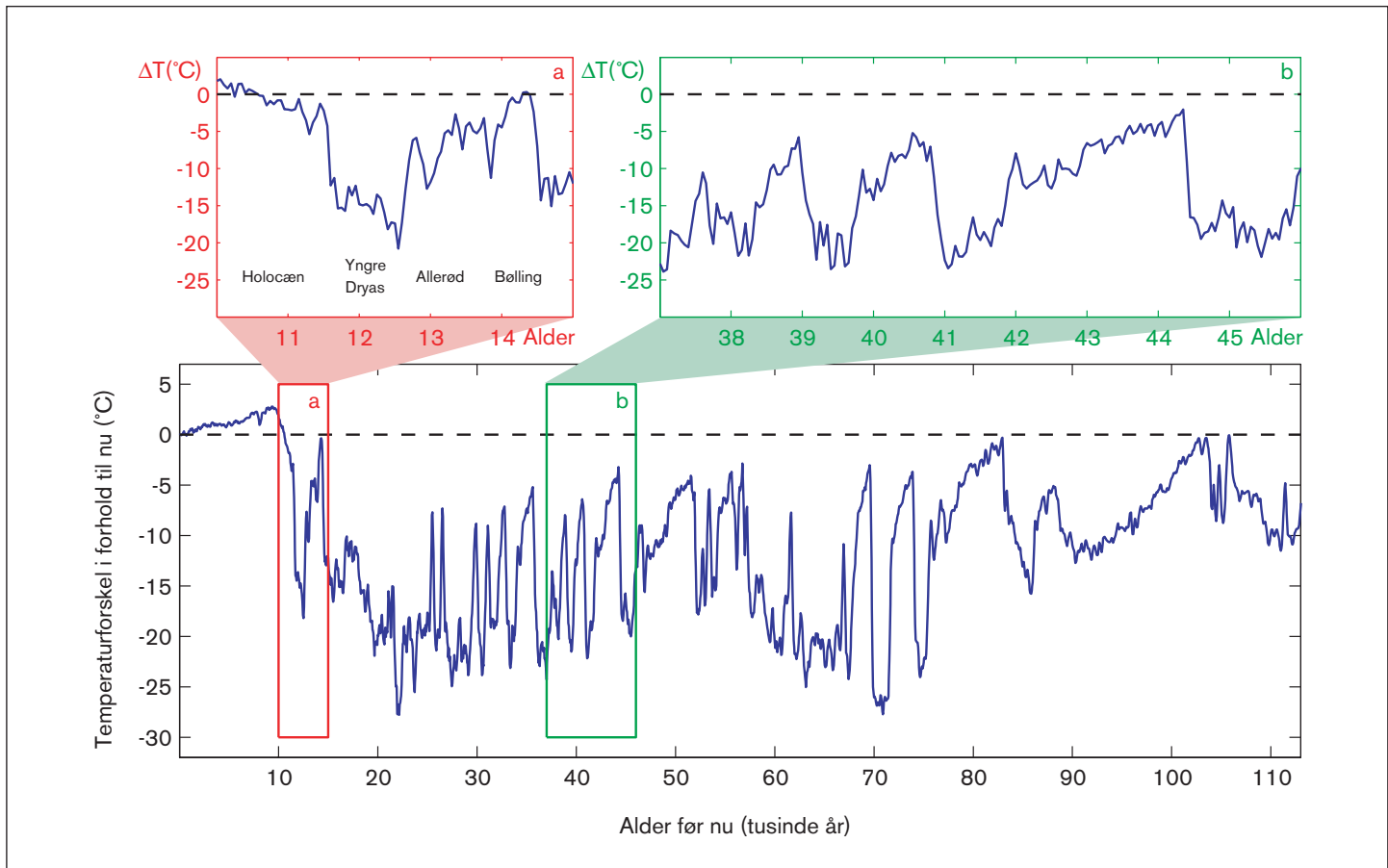
3. Den årlige temperaturvariation afspejles i isens isotopsammensætning, således at der er en større andel af de tunge isotoper, når der er varmt end når der er koldt (boks 2). Her ses isotopvariationen i 10 m iskerne fra Crête borestedet (fig. 2). Stykket indeholder omtrent 20 årlag, og en optælling af disse kan bruges til at datere isen med stor præcision.

sommersne og vintersne. Der er forskel på den isotopiske sammensætning af vintersne og sommersne, fordi sneens isotopiske sammensætning afhænger af temperaturen på dannelsesstedet (se boks 2). Man kan genfinde den årlige temperatursvingning ved at måle isotopsammensætningen af en masse små isprøver (fig. 3). Den anden forskel på sommersne og vintersne er at sneen indeholder forskellige urenheder på forskellige årstider. Der er f.eks. mest havsalt i nedbøren om vinteren, fordi det barskere vintervejr pisker større mængder salt op i atmosfæren. På tilsvarende måde er der mest støv i isen om foråret hvor støvstorme i Centralasien løsriver store mængder støv og løfter det tilstrækkelig højt op i atmosfæren til at støvet kan transporteres hele vejen til Grønland, inden det deponeres. Andre urenheder som f.eks. sulfat-ioner (SO_4^{2-}) stammer dels fra vulkansk aktivitet og dels fra biologisk

aktivitet i havene og har størst koncentration i den tidlige sommernedbør. Selvom isen er mange gange renere end almindeligt postevand, kan variationer i koncentrationen af urenheder i isen måles og bruges til identifikation af årlag. På denne måde kan man konstruere en meget præcis tidsskala for en iskerne.

Klimainformationen i iskerner kan også fortælle om klimaændringer på længere tidsskalaer. Ved at måle isotopsammensætningen i 60.000 små prøver fra GRIP-iskernen har man kortlagt hvordan temperaturen har udviklet sig i Grønland de sidste 113.000 år. Meget tyder på at Vesteuropa og Nordamerika har oplevet tilsvarende temperaturændringer, om end nok med noget mindre udsving. Temperaturrekonstruktionen er vist på fig. 4 hvor temperaturforskellen i forhold til nutidens klima er vist for de sidste 113.000 år. Der er flere markante træk ved denne

kurve. For det første har klimaet kun været stabilt under vores nuværende varmeperiode, Holocæn, mens istiden var præget af stor variation. Ser vi på den senglaciale temperaturoscillation (forstørret i den røde ramme på figuren), bekræftes det overordnede billede af klimaet i denne periode som allerede blev tegnet i 1906, men ved hjælp af iskernedata er det muligt at studere omslaget i langt større detalje. Det ses at opvarmningerne fra Ældste Dryas til Bølling og fra Yngre Dryas til Holocæn var på mellem 10° og 15°C hvilket er langt mere end først antaget. Desuden ses det at omslagene foregik meget hurtigt, nemlig på omtrent 50 år. Det er imponerende at forestille sig hvor voldsomme konsekvenser disse omslag har haft for det nordatlantiske område. En forskel i middeltemperatur på 10°C svarer til forskellen i temperatur mellem Danmark og Nuuk i Grønland i dag, og der er således ikke tale om en



4. Rekonstruktion af temperaturen ved GRIP-borestedet i de sidste 113.000 år, svarende til vores nuværende mellemistid Holocæn samt den seneste istid. Bemærk hvordan temperaturen flere gange under istiden steg med op til 20 °C på meget kort tid, efterfulgt af en gradvis nedkøling. I modsætning hertil ses hvor stabil temperaturen har været i Holocæn.

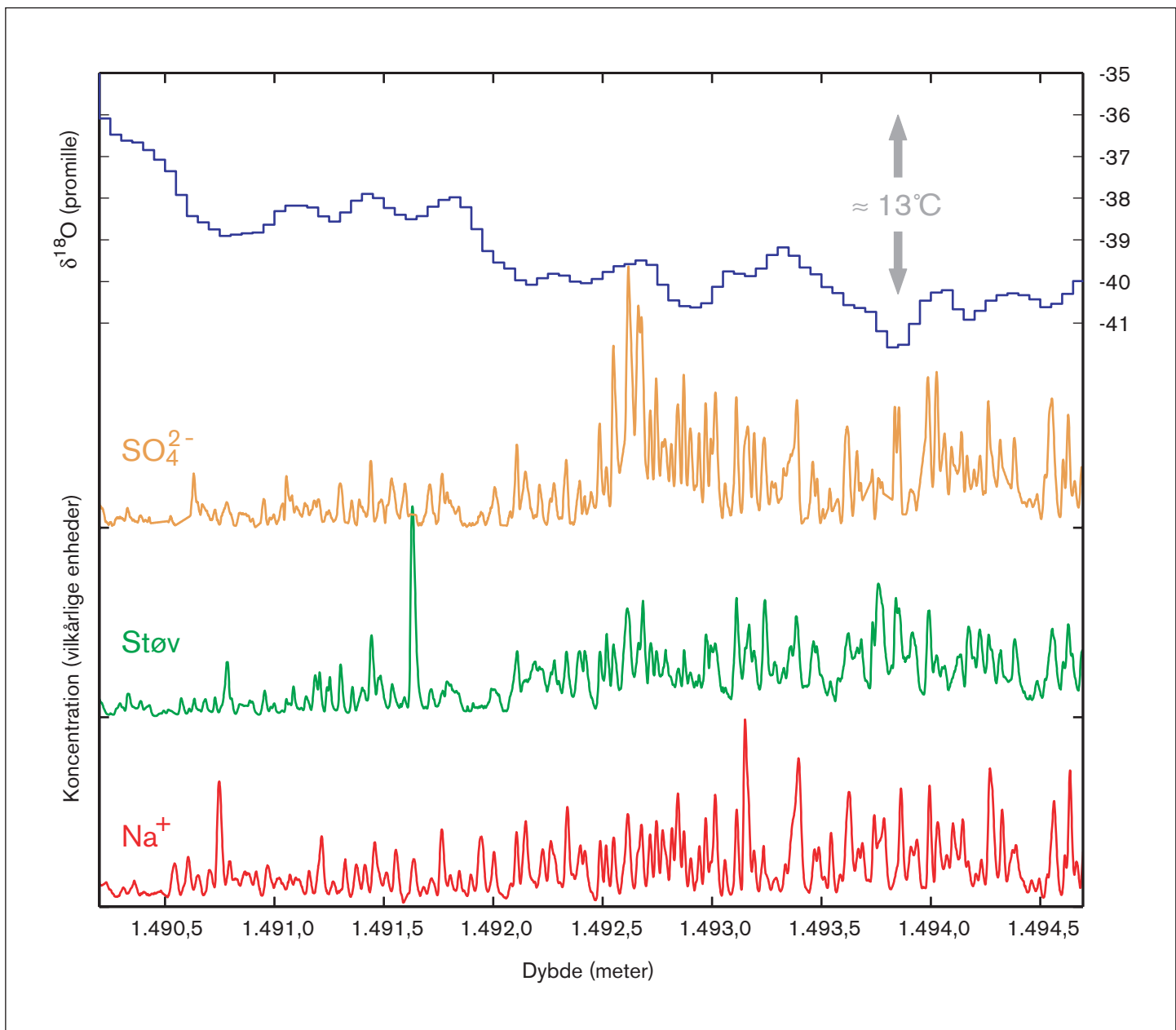
langsom og gradvis forandring af klimaet, men om en næsten øjeblikkelig ændring med stor indflydelse på levevilkårene for planter og dyr.

NordGRIP-iskernen er den nyeste dybe iskerne fra Grønland og giver os endnu mere detaljeret viden om disse pludselige klimaændringer under istiden. Ved hjælp af en nyudviklet målemetode er det blevet muligt at bestemme isens indhold af urenheder med hidtil uset detaljeringsgrad. Således kan ændringer følges på årlig skala meget længere tilbage i tiden end hvad der tidligere var muligt. På *fig. 5* er isens indhold af støv, natrium-ioner og sul-

fat-ioner vist i et dybdeinterval der svarer til en periode på godt og vel 100 år hen over omslaget fra Yngre Dryas til Holocæn, der er istidens afslutning. I den højre halvdel (som er den dybeste og derfor ældste del af perioden) er de årlige toppe højere og smallere end toppene i venstre halvdel. At de er smallere skyldes at der generelt er mindre nedbør i kolde perioder end i varme, men ændringen af højden af toppene viser at der er flere urenheder i isen under kolde perioder. Dette skyldes formentlig at klimaet generelt er tørrere i kolde perioder, og at urenhederne derfor vaskes langsommere ud af

atmosfæren og derfor i højere grad når at blive transporteret til Grønland. Desuden kan vinden – der var kraftigere i kolde perioder – lettere løsrive støv og andre urenheder fra en tør overflade end fra en fugtig. Bemærk at ændringen fra smalle og høje toppe til lavere og bredere toppe sker på ganske få år. Tolkningen af dette er at der over en periode på få år må være sket en afgørende ændring i den måde urenhederne frigøres eller transporteres til Grønland på.

Øverst på samme figur er isens isotopsammensætning vist. Det ses her at mens isens indhold af urenheder skifter fra høj til lav på ganske få år, ændres



5. NordGRIP-iskernens indhold af Na^+ -ioner, SO_4^{2-} -ioner og støv samt isens isotopsammensætning (boks 2). Højre del af figuren er Yngre Dryas' afslutning, og venstre er Holocæns begyndelse. Årlagstykkelsen og indholdet af urenheder ændres ganske brat, mens isotopsammensætningen – og dermed temperaturen – ændres mere gradvis.

isotopsammensætningen – og dermed temperaturen – langt mere gradvis over en periode på næsten 100 år. Dette er en interessant observation der måske kan give et fingerpeg om hvad disse bratte klimaændringer skyldes. En mulig udlægning er at det hurtige omslag i

indholdet af urenheder skyldes en meget pludselig ændring i klimasystemets grundlæggende cirkulationsmønstre, og at temperaturen derefter ændres gradvis som en konsekvens heraf. Men det skal understreges at dette blot er en af flere mulige tolkninger.

KLIMAET UNDER SIDSTE ISTID

Vi ved i dag at den senglaciale temperaturoscillation kun var den seneste i en lang række af pludselige klimaændringer under sidste istid. På *fig. 4* ses at istiden langt fra var en ensartet kold

periode. Den første del af istiden indtil for omkring 60.000 år siden var kendetegnet ved en generel og relativt langsom afkøling, og det var i begyndelsen af denne periode at de store iskapper i Nordamerika og Skandinavien blev opbygget. Den koldeste del af istiden, fra omkring 60.000 til 20.000 år før nu, er derimod kendetegnet ved mange bratte opvarmninger på 15-20 °C

og efterfølgende langsommere afkølinger. Disse pludselige begivenheder, hvor klimaet blev relativt mildt, kaldes Dansgaard-Oeschger (D-O) begivenheder og blev opdaget i slutningen af 1960'erne, da man fik de første resultater fra Camp Century iskernen. Man var i starten meget skeptisk over for rigtigheden af disse data, men da de samme bratte klimaovergange senere

også blev fundet i andre iskerner og i havsediment-kerner fra Nordatlanten kunne der ikke længere herske nogen tvivl om deres eksistens. Under istiden kan man identificere over tyve D-O begivenheder, hvor temperaturen på Grønland stiger med over 10 °C i løbet af nogle få årtier til århundreder.

I den rigtigt kolde del af istiden var mængden af kuldioxid i atmosfæren

I naturen findes de tre ilt-isotoper: ^{16}O , ^{17}O og ^{18}O . Den første er langt den hyppigst forekommende, ^{18}O udgør ca. 2 promille af det samlede antal, og ^{17}O forekommer endnu sjældnere. Vand består som bekendt af to brintatomer og et iltatom, og afhængig af hvilken ilt-isotop der indgår, bliver massen 18, 19 eller 20 atommasseenheder, idet vi her nøjes med at betragte den situation hvor brintatomerne er almindelig ^1H . Fra en vandoverflade vil den lette variant H_2^{16}O i kraft af sin lidt mindre masse have lidt nemmere ved at fordampe end den tungere H_2^{18}O , og tilsvarende vil den tunge variant have lidt nemmere ved at kondensere fra damp til flydende form end den lette variant.

I halvtredserne opdagede man at mængden af H_2^{18}O i nedbør afhænger af kondensationstemperaturen, således at der er mindre H_2^{18}O i nedbør dannet under kolde forhold end i nedbør dannet under varme forhold. Da iskapper indeholder lag af gammel nedbør, kan man aflede tidligere tiders temperaturer ved at måle isens indhold af H_2^{18}O .

En vandprøves isotopsammensætning kan måles på et massespektrometer. Man måler forholdet mellem forekomsten af ^{18}O og ^{16}O , og dette forhold kaldes $R_{\text{prøve}}$. Da R -værdier er meget små, og variationen fra prøve til prøve er meget lille, angiver man normalt resultatet af målingen som den relative afvigelse i promille af $R_{\text{prøve}}$ fra en standardværdi R_{standard} . Denne afvigelse kaldes delta-værdien og er defineret som:

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{R_{\text{prøve}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \cdot 1.000\text{‰}$$

For nutidens klima gælder det at 1 promilles ændring i $\delta^{18}\text{O}$ svarer til en ændring i temperatur på ca. 1,6 °C, men når vi går tilbage i tiden, kender vi ikke med samme sikkerhed sammenhængen mellem $\delta^{18}\text{O}$ og temperaturen. Meget tyder på at 1 promilles ændring i $\delta^{18}\text{O}$ snarere svarer til en temperaturændring på omkring 3 °C, når vi sammenligner vores nuværende klima med klimaet i istiden, og de godt 4 promilles ændring i $\delta^{18}\text{O}$ der ses på *fig. 5*, svarer derfor til en opvarmning på omtrent 13 °C.

BOKS 2: $\delta^{18}\text{O}$ OG ISENS ISOTOPSAMMENSÆTNING



kun cirka halvt så stor som i dag og samtidig var solindstrålingen på de høje breddegrader noget lavere på grund af periodiske variationer i Jordens bane om Solen. Is og gletchere dækkede store dele af Nordamerika, Skandinavien og Sibirien, og bjerggletschere bredte sig i Alperne og andre bjergkæder. De store ismasser på land betød at vandstanden i verdenshavene var op til 130 m lavere end i dag.

Hvis man betragter temperaturfordelingen på klodens overflade i dag, vil man se at det nordlige Europa er væsentligt varmere end landområder i for eksempel Canada og Rusland som ligger på samme breddegrad. Dette skyldes blandt andet de store havstrømme i Atlanterhavet som transporterer varme fra troperne og subtropene til Nordeuropa. Disse havstrømme er en del af en række havstrømme der samlet kan betragtes som en global varmepumpe. Solen varmer mest ved lave breddegrader, og varmen fordeles herefter rundt på kloden med havstrømmene. En væsentlig drivkraft for disse havstrømme er den såkaldte dybvandsdannelse der foregår nord for Island. Her synker koldt og saltholdigt vand ned til store dybder og strømmer derefter mod Centralamerika og videre mod Antarktis. Det kolde, nedsynkende vand i Nordatlanten erstattes ved at varmt vand samtidig transporteres nordpå i de øvre lag af Atlanterhavet. Det er denne varme overfladestrøm der er årsagen til de relativt høje temperaturer i Nordeuropa.

Man finder i dag tegn fra D-O begivenhederne mange steder på kloden, men signalet er uden tvivl kraftigst i det nordatlantiske område og på Grønland. Temperaturændringerne på Antarktis er derimod ikke i fase med ændringerne på

Grønland under istiden. Antarktiske iskerner viser en langsom opvarmning der begynder nogle århundreder inden den pludselige opvarmning sker på Grønland, og når opvarmningen starter på Grønland begynder en langsom afkøling af Antarktis. I de grønlandske iskerner efterfølges den bratte opvarmning af en langsom afkøling der varer nogle århundreder, hvorefter der sker en brat afkøling tilbage til istidens kolde temperaturer.

I dag mener man at de voldsomme klimaændringer under sidste istid er tæt knyttet til ændringer i de globale havstrømme, specielt til dybvandsdannelsen i Nordatlanten. Man kan forestille sig, at dybvandsdannelsen under de varme dele af D-O begivenhederne foregik nord for Island, som det er tilfældet i dag. Det varme klima fik dog store mængder is til at smelte i det nordatlantiske område, og havet fik dermed tilført en masse relativt let ferskvand. Dette medvirkede til at bremse dybvandsdannelsen som i de kolde perioder flyttede syd for Island. Dermed blev den nordligste gren af varmepumpen stoppet, og det varme Atlanterhavsvand blev ikke længere transporteret til høje nordlige breddegrader. Ved begyndelsen af en D-O begivenhed flyttede dybvandsdannelsen pludseligt nordpå igen, og varmepumpen kunne igen fungere for fuld kraft. Denne forklaringsmodel kan forklare hvorfor temperaturudsvingene under D-O begivenhederne er noget større på Grønland end hvad der ses i data fra resten af verden, og den kan også forklare temperaturændringerne på Antarktis, idet en mindsket varmetransport til de høje nordlige breddegrader vil opvarme de sydlige breddegrader og vice versa.

Selvom modellen ser ud til at give en god forklaring på istidens klimaændringer er der stadig mange ubesvarede spørgsmål. De voldsomme klimaændringer skete med nogenlunde regelmæssige tidsintervaller, og klimaet ændredes ikke gradvis, men skiftede brat mellem to meget forskellige tilstande. Dette tyder på at klimaet opfører sig som et kaotisk system, i hvert tilfælde under den koldeste del af istiden. Et karakteristisk træk ved et kaotisk system er at pludselige og voldsomme overgange kan udløses af små, tilsyneladende ubetydelige påvirkninger hvilket gør det meget svært – hvis ikke umuligt – at forudsige systemets opførsel. Klimaet i vores nuværende varmeperiode, Holocæn, er meget forskelligt fra den situation, der herskede under istiden, men ikke desto mindre ved vi faktisk ikke om et varmt mellemistidsklima også kan opføre sig ustabil. Nogle data kunne tyde på det, og konsekvenserne heraf bør overvejes, ikke mindst i lyset af den aktuelle debat om menneskeskabte klimaændringer. Hvis vores nuværende klimas opførsel har kaotiske træk, påvirker det nemlig på afgørende vis vores muligheder for at forudsige klimaændringer.

For at opnå den størst mulige viden om Jordens klima og dermed også om mulige klimaændringer i fremtiden er det vigtigt at vi forstår mekanismerne bag de voldsomme omvæltninger der skete under sidste istid. Med Nord-GRIP iskernen vil det formodentlig være muligt at analysere ændringer i klimaet under D-O begivenhederne år for år, og vi håber dermed at komme et stort skridt nærmere på forståelsen af de processer der styrer klimaets overordnede dynamik, og dermed på at forklare disse voldsomme svingninger.

