



En lille vulkan dannet i 1995 på flanken af vulkanen Pico de Cano beliggende på øen Fogo i Kap Verde øgruppen. Pico de Cano hæver sig 2800 meter over havet.

Læs om denne og Kap Verde vulkanismen i næste VARV.



TEMAHÆFTE KLIMA III

JORDENS CYCLISKE BEVÆGELSER OMKRING SOLEN HAR EN KLIMATISK INDFLYDELSE, DER KAN SPORES SOM MILANKOVITCH RYTME I MANGE MILLIONER ÅR GAMLE AFLEJRINGER. VARV UDDYBER DETTE EMNE.

INDLANDSISEN RUMMER FANTASTISKE OPLYSNINGER OM KLIMAVARIATIONERNE INDENFOR DE SIDSTE 200.000 ÅR. VI SER NÆRMERE PÅ OPLYSNINGERNE FRA DE UDBOREDE GRØNLANDSKE ISKERNER.

Forsidebillede: Stevns Kint syd for Højerup Kirke

Forfatterne til artiklerne i dette nummer kan kontaktes på adresserne:

Hans Jørgen Hansen: Geologisk Institut, Øster Voldgade 10,
1350 København K.

Claus Uffe Hammer: Niels Bohr Institutet, Geofysik afdeling,
Juliane Maries Vej 30, 2100 København Ø.

-----VARV-----

VARV er udgivet med støtte fra Kulturministeriets bevilling til almenkulturelle tidsskrifter.

Adresse: Tidsskriftet VARV, Geologisk Institut, Øster Voldgade 10,
1350-København K

Telefon: 35 32 24 00, Geologisk Institut, København

Redaktion: Asger Berthelsen, Bjørn Buchardt, Henrik Foug, Bjørn Hageskov, Steen Mølgaard, Michael Pedersen og Svend Pedersen (ansvarshavende)

Bestyrelse: Asger Berthelsen, Valdemar Poulsen, Bjørn Hageskov og Svend Pedersen.

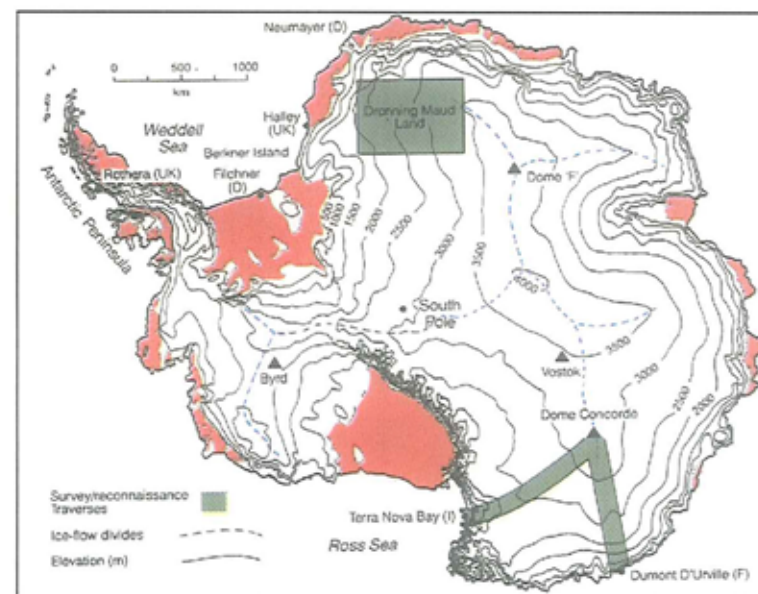
Lay-out: Bjørn Hageskov og Svend Pedersen

Repro og tryk: Levison+Johnsen+Johnsen a/s, København

VARV udkommer fire gange årligt. Prisen er 120 kr i abonnement for 1997. Abonnement kan tegnes ved at indsende beløbet til VARV, postgiro 9 06 88 80, eller 140 SEK til VARV's svenske postgirokonto: 4388-5, eller 140 NOK til VARV's norske postgiro: 0806 1923234.

Adresseændringer bedes meddelt VARV!

© 1997 VARV. Eftertryk af tekst og billeder kan kun ske efter aftale.



Figur 8. Kort over Antarktis hvor EPICA's boresteder er vist (sort trekant). Borestedet i Dronning Maud Land er dog endnu ikke udvalgt.

Forkortelser brugt i teksten:

ISTUK: Betyder isbor på grønlandsk.

GRIP: GReenland Ice core Project.

DYE: De amerikanske radarstationer er opkaldt af Cap Dyer og derefter nummeret. Stationerne var led i den såkaldte DEW One kæde, d.v.s. Distant Early Warning (en 'duft' fra den kolde krigs tid!).

GISP: Greenland Ice Sheet Program. GISP II blev afsluttet med DYE 3 boringen. GISP II var genbrug af SISP, men nu vedrørende årene 1990-1993.

NORTH GRIP: Dansk boring på Indlandsisen som opfølgning af resultaterne fra GRIP og derfor kaldt NORTH GRIP, da boringen foregår (1996-1999?) 315km nordvest for GRIP borestedet.

EPICA: EuroPeen Ice Core project in Antarctica.

MSA: Methylsulfonsyre: produkt af dimethylsulfid som dannes af planter i havet. Et parallelt produkt er svovlsyre (H_2SO_4).

NORTH GRIP og EPICA

Boreprojektet NORTH GRIP startede i 1995 med opsendelse af det første gods til Grønland. I 1996 blev selve borelejren oprettet, og samme sommer blev der boret til 351 meters dybde. Projektet har som et af de væsentligste formål at udbore en iskerne, som dækker Eemtiden samt en del af Saaleistiden i kronologisk velordnede lag, uden at flydningen over klippebunden har forstyrret lagfølgen.

Radio-ekkomålinger blev benyttet til at identificere et muligt boreområde, hvor bunden var relativt flad; endvidere skulle den årlige nedbør være passende repræsentativ, og isflydningen ikke for hurtig. Disse krav indskrænkede mulighederne væsentligt. Hertil kom, at isflydningen under glacialtiden har været noget forskellig fra nutidens. Det var derfor også nødvendigt at vælge et borested, hvor ændringerne i flydemønstret kunne formodes at være minimale. Borestedet blev endeligt valgt kort før felt sæsonen i 1996 på positionen 75,1° N, 42,3° W, 2930 meter over havet. Indlandsisen er på dette sted ca. 3 km tyk.

Under NORTH GRIP felt sæsonen 1996 blev et nyt bor, EPICA-boret, testet, og en række europæiske kollegaer trænet i brugen af det.

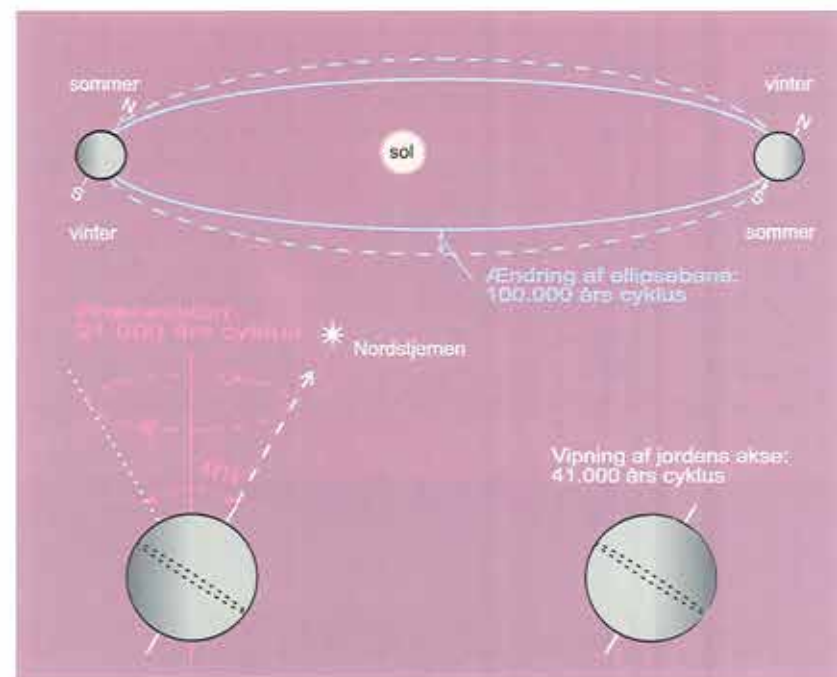
EPICA er et europæisk dybdeboringsprojekt i Østantarktis under EU's og ESF's (European Science Foundation) auspicer. Formålet er at udbore to dybdeiskerner til bunden, henholdsvis ved Dome C og i Dronning Maud Land (figur 8). Den videnskabelige begrundelse er forskellig for de to borer. Ved Dome C drejer det sig om, at så mange istider som muligt er indeholdt i iskernen, mens det i Dronning Maud Land er forbindelsen mellem klimavariationer i Arktis og Antarktis, som er i søgelyset. Herunder især Eemtiden.

EPICA-projektet er logistisk set langt vanskeligere og økonomisk belastende end NORTH GRIP, men Danmark er med på gunstige betingelser i kraft af den danske ekspertise inden for isboreteteknik.

Selv om det er belastende at være med i to store dybdeboringer på samme tid, er glaciologigruppen på Niels Bohr Institutet ved godt mod. Det er jo trods alt spændende at være med i projekter, som i de næste 5-10 år til stadighed vil bringe nye opdagelser og sammenhænge inden for klimaforskningen for dagens lys.

RYTMISKE AFLEJRINGER

Hans Jørgen Hansen



Figur 1. Jordens bevægelser i verdensrummet; se nedenstående tekst.

Variationer i mængden af energi (i form af lys), der ankommer til jordoverfladen som følge af ændringer i Jordens bane om solen, blev beskrevet af Milankovitch i fyrrerne.

Ændringerne i Jordens bane er sammensat af tre grundkomponenter (figur 1).

1) Ca. hvert 100.000 år udøver de øvrige planeter et særligt træk i Jorden, som får den til at beskrive et mere elliptisk omløb om solen end normalt. I en ellipse er der to brændpunkter; i jordbanens ellipse vil det ene brændpunkt være tomt, mens solen befinder sig i det an-

det. Det betyder for den nordlige halvkugle (idet solen befinder sig i det af ellipsens brændpunkter, som er nærmest Jorden i vores sommerhalvår), at i ellipse-situationen vil sommeren være kortere end normalt, men til gengæld vil der være større indstråling på grund af Jordens større nærhed til solen. Klimatisk betyder det, at vi får kortere, men varmere somre og længere, men koldere vintre.

2) Jorden drejer om sin egen akse, der for øjeblikket peger mod Nordstjernen. Aksen foretager imidlertid også en cirkelbevægelse - som en snurretop - i forhold til verdensrummet. Om 2.000 år er Nordstjernen ikke længere Nordstjerne. Den nye 'Nordstjerne' vil befinde sig i stjernebilledet Vega! Denne snurretops-bevægelse, som Jorden udfører, kaldes præcessionen. En hel rundtur af 'snurretoppen' tager i gennemsnit 21.000 år. Det maksimale vinkeludslag i præcessionen er ca. $47\frac{1}{2}$ grad. Jordens klimatiske ækvator (og ikke den geografiske) er bestemt af den korteste afstand mellem solen og Jorden. Konsekvensen af præcessionen er således, at Jorden bevæger sig i forhold til sit eget klimasystem med $47\frac{1}{2}$ grad. Da 1 grad på jordoverfladen svarer til 111 km, vipper Jorden altså over 5.000 km i forhold til den klimatiske ækvator!



Figur 2. Rytmiske landaflejninger med kullag fra Palaeocæn-tiden. Russel Basin, østlige Montana, USA.



Iskerner på 'loggebordet'.



¹⁸O prøver udskåret af kernen og klar til pakning.



I thermostaterede skabe måles kontinuerligt visse kemiske komponenter langs iskernen (Ca^{++} , NH_4^+ , NO_3^- m.m.). Temperaturen i tunnelen er ca. -20°C .



Boremester Sigfus Johnsen erklærer GRIP-boringen for afsluttet og fremviser den sidste iskerne, som er fuld af bundmateriale.

nævnt altid et fortolkningsproblem ved stratigrafisk datering. Enhver tvivl bidrager til usikkerheden, og slutresultatet er, at både datering via modellering og stratigrafi må inddrages.

Situationen netop nu er, at det er muligt at datere GRIP-kernen med meget høj præcision tilbage til afslutningen af Yngre Dryas. De sidste informationer om den tyske egetræskronologi tyder på, at GRIP-iskernens datering af Yngre Dryas til 11.550 år før 1989 stemmer overens med egetræringene inden for ± 20 år!

Hvis dette holder, er der ingen grund til at ændre GRIP-iskernens datering, selv om vi for et år siden var villige hertil. Dette viser, hvor forsigtig man skal være, når usikkerheden om dateringen diskuteres. Alligevel synes det nu, at vi mere og mere nærmer os den situation, at vi om få år har styr på kronologien tilbage til ca. 60.000 år, dvs. med måske kun nogle få hundrede års usikkerhed.

Det er utroligt vigtigt, fordi vi så har muligheden for at sammenligne palæoklimatiske data fra mange forskellige kilder uden større kronologiske problemer.



Prøver til kemiske analyser udskæres og renses.

3) Selv om Jorden præcesserer, kan man godt opfatte den, som om den havde en fast akse, der står stille. Den hypotetiske akse viser en vipning på $3 \frac{1}{2}$ grad med en tidsfase på ca. 41.000 år. Denne vipning svarer til en bevægelse på knap 400 km i forhold til den klimatiske ækvator. Den klimatiske effekt af vipningen viser sig klart omkring Jordens pol-områder, hvor nord- og sydpol er i modfase; altså vil mere varme på den nordlige del modsvares af større kulde på den sydlige. Ved lavere breddegrader ses 41.000 års bevægelsen kun svagt.

Alle sedimenter udviser en eller anden form for rytmik. Det gælder endog for så ensartet en bjergart som skrivekridt (se forside; bemærk bænknings af kridtet markeret ved tynde lerhorisonter). Går man til landaflejringer, viser de ligeledes en form for rytmik (figur 2). For at studere disse rytmiske mønstre har man over en årrække gennemført opmålinger af tykkelsen af lagene og underkastet måleserierne forskellige matematiske og statistiske behandlinger. Herved har man, i mange tilfælde, kunnet sandsynliggøre, at der er tale om formodede Milankovitch rytmer.



Figur 3. Havaflejringer fra Yngre Kridt i Negev, Israel. Bemærk den gradvise overgang mellem lerrige og lerbandede bånd.

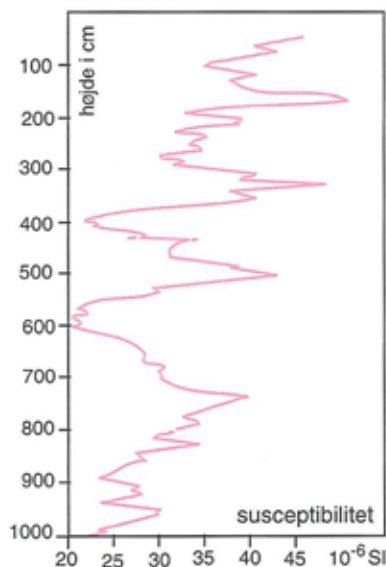
Det har imidlertid ikke haft mange anvendelser, idet det alene har kunnet bruges til at anslå sedimentationshastighed. Der er ligeledes et rent praktisk problem ved selve opmålingen, idet det er vanskeligt at stedfæste selve grænsen mellem f. eks. et mørkt og et lyst lag (figur 3). Når man kommer tæt nok på, bliver mange farveovergange glidende. Det svarer til at skulle trække en grænse mellem en stor og en lille hund! Altså har der manglet en objektiv registrering af rytmi-ken.

En sådan metode er nu udviklet og har demonstreret, at den kan bruges til korrelation med en tidsmæssig nøjagtighed, vi hidtil næppe har turdet drømme om.

Metoden går i al sin enkelhed ud på at indsamle tætte serier af 20-30 gram sedimentprøver og måle deres magnetiske susceptibilitet (evne til at blive magnetiseret).

Når disse værdier afsættes i forhold til deres højde i lagene, fremkommer der et mønster (figur 4).

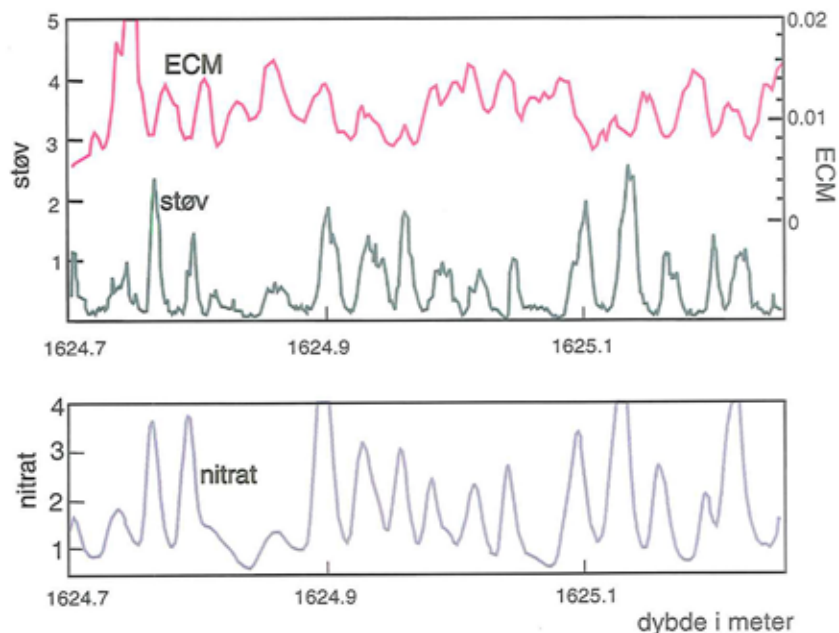
Figur 4. Detalje af det magnetiske susceptibilitets-mønster fra North Horn Formationen, Utah, USA.



I stedet for at udføre statistiske hundekunster på et sådant kurveforløb har vi benyttet en nok så direkte metode til at undersøge, hvad de fundne pulser repræsenterer. Grænsen mellem Kridt og Tertiær tiderne befinder sig 2/3 'oppe' i et magnetisk modsat/omvendt ('revert') interval i Jordens historie. Det reverse interval har en varighed på 865.000 år. Dette betyder, at den reverse del, under Kridt-Tertiær grænsen, er på ca. 570.000 år. Dette tidsinterval med tilhørende magnetiske susceptibilitets-værdier er vist i figur 5. Man behøver hverken være Albert Einstein eller Georg Gearløs for at konstatere, at kurve-

at referencehorisonterne højst kan bruges som en slags 'check på at vi ikke er helt galt afmarcheret'.

Metode 1 er langt bedre, end den umiddelbart synes (den hviler delvist på indirekte data og en omdiskuteret datering af Eemtidens afslutning). Fordelen ved metoden er, at den f.eks. giver en ganske god relativ datering for den sidste istid; men den 'hænger' unægtelig på, at Yngre Dryas er veldateret ad anden vej, og at afslutningen af Eemtiden ligeledes er korrekt. Det sidste er noget tvivlsomt, men alligevel er dateringen lige så god som den stratigrafiske. Årsagen til dette skyldes, at selv om det er muligt at følge sæsonvariationer i f.eks. støv- og nitratkoncentrationen over hundredetusinde år, så er fortolkningen problematisk.



Figur 7. Sæsonvariationer af støv- og nitratkoncentrationer over 55 cm af GRIP-kernen i 1625 meters dybde; ECM er et udtryk for isens elektriske ledningsevne (relative enheder).

I figur 7 er vist et eksempel på sæsonvariationer dybt nede i isen. Det er ganske klart, at der er kraftige sæsonvariationer; men der er som

deboring på Grønland - NORTH GRIP - ca. 315 km nordvest for GRIP-boringen.

Vi er også involveret i en ny europæisk dybdeboring, EPICA, i Øst-antarktis, men formålet er i denne forbindelse først og fremmest iskerneanalyser af flere glacialtider samt evt. 'teleconnections' mellem klimaændringer på Grønland og Antarktis.

Datering af GRIP-kernen

Svante Bjørk har allerede i VARV 1996, 3 omtalt den spændende historie i forbindelse med dateringen af Yngre Dryas' afslutning, og jeg vil derfor kun kort gøre rede for, hvorledes dateringen af den mere end 11.000 år gamle is i GRIP-kernen er grebet an.

Der er principielt tre forskellige metoder, som står til rådighed for dateringen af istidsisen i GRIP-kernen:

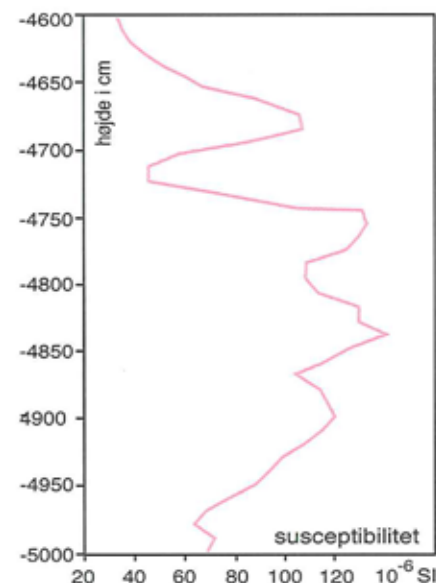
1) Datering baseret på isflydningslove kombineret med fastlåsning af visse tidshorisonter f.eks. Yngre Dryas' afslutning og Eemtidens afslutning. Denne metode er ganske god, hvis isflydningsmodellen er god, og hvis man kan stole på de øvrige oplysninger. Det er f.eks. nødvendigt at kende nedbørsvariationerne på GRIP under istiden.

2) Stratigrafisk datering ved hjælp af komponenter i iskernen, som varierer med årstiden. Selv om denne form for datering kan minde om tælling af træringe og derfor principielt kan være meget præcis, er den behæftet med en række usikkerheder. For det første er der et teknisk problem med at måle de relevante komponenter (f.eks. støvkonzentrationen), men dertil kommer, at det er nødvendigt at have en fysisk forklaring på, at den udvalgte parameter faktisk varierer sæsonmæssigt. Det sidste er ikke let at opfylde, bl.a. fordi glacialtidens klima var forskelligt fra nutidens. Det øger dateringsusikkerheden.

3) Brug af referencehorisonter som er daterede ved hjælp af andre sedimenter og dateringsmetoder. Det kan f.eks. være toppe af isotope ^{10}Be i havsedimenter eller vulkanske horisonter i havkerner, moser etc.

I tilfælde 3 er der ikke meget at holde sig til. Selv om nogle få referencehorisonter er brugelige, er sådanne ikke særligt veldaterede, dvs.

billedet består af kraftigere og svagere pulser. Man kan endvidere konstatere, at der er 5 intervaller adskilt af større pulser, samt at de større pulser er opdelt i mindre pulser. Vi har en situation, hvor vi direkte kan observere 100.000 års og 21.000 års pulserne - eller med andre ord den elliptiske situation interfererende med præcessionen.

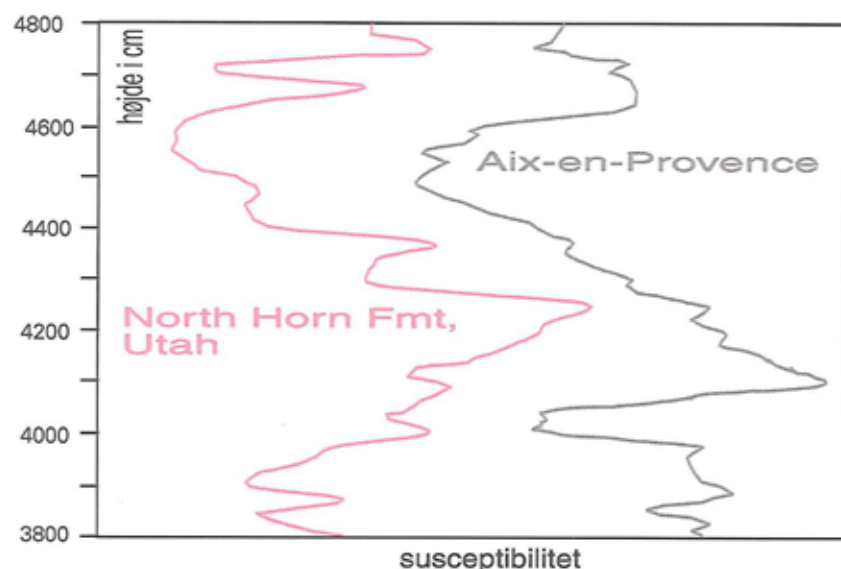


Figur 5. Magnetisk susceptibilitetsmønster fra marine Kridt-aflejringer fra Nasilow, Polen. Det viste interval er den reverse del af det yngste Kridt.

Den vel nok største overraskelse var fundet af identiske mønstre i tilsvarende intervaller i landaflejringer. Aldersbestemmelse af ældre landaflejringer har været et af de helt store problemer indenfor geologien i mange år. Det har vist sig, at korrelationerne kan foretages med stor sikkerhed over meget store afstande. Således er vi i dag i stand til at korrelere fra Utah til Sydkina via Canada, Frankrig, Polen, Tunesien, Israel og Indien med en afstikker til tropisk Brasilien.

Ved at sammenholde karakteristiske pulser og interferenser kan vi trække tidslinier mellem præcessions-pulser og derved konstatere, at den halve afstand mellem to pulser (der jo må være vores højeste nøjagtighed) er på 10.000 år. Og dette for mere end 65 millioner år siden! (figur 6).

Det næste problem er da: Hvad repræsenterer svingningerne i susceptibiliteten? I nogle tilfælde svarer de til variationen i f. eks. jernindholdet. I andre tilfælde til en fortynding af et lerholdigt sediment med kalk eller af et lerholdigt sediment med kvartssand. Der kan ikke siges noget entydigt om det. Imidlertid må de karakteristiske mønstre, som optræder både på land og i havaflejringer, have en fælles grundliggende årsag, der må være klimabetinget. Det bedste gæt er, at de skyldes variationer i nedbøren, der primært påvirker landjorden og sekundært, via transport gennem vandløb, påvirker sedimentationen i havet.



Figur 6. Karakteristisk interferens-figur omkring 400.000 år før Kridt-Tertiær grænsen i dinosaur-førende aflejringer fra henholdsvis North Horn Formationen, Utah, USA og Aix-en-Provence, Sydfrankrig.

Magnetisk susceptibilitet er et udtryk for materialers (bjergarters) evne til at blive magnetiseret af et ydre magnetfelt. En lav susceptibilitet betyder at bjergarten vanskeligt lader sig magnetisere, og omvendt betyder en høj susceptibilitet, at bjergarten nemt lader sig magnetisere

At varmetiden 'Eem' kunne opføre sig ustabil og med voldsomme tilbagefald til istidslignende klima var komplet uventet og ikke uden undertoner af politisk karakter: f.eks. drivhuseffektens betydning i det 21. århundrede osv. Emnet er stadig kontroversielt, men i stedet for at indgå i en længere teknisk diskussion, som alligevel ikke kan afgøre sagen, er det mere på sin plads kort at give en sammenfatning af problemerne samt deres mulige løsning.

- Fortidens klimaændringer som afspejlet i Indlandsisen behøver ikke nødvendigvis at være globale; men hvis de er kraftige og voldsomme, må de nødvendigvis være forbundet med klimaændringer på resten af Jorden. Kvartærtidens glacialtider er uden tvivl for en stor del et globalt fænomen, når talen er om titusinder af år, men mere 'speget' når det drejer sig om hundrede til nogle tusinde år. Er de voldsomme klimavariationer afspejlet i Eemtidens Grønlands regionale eller simpelthen artefakter?
- Det, at GRIP- og GISP2-kernernes klimadata ikke stemmer overens for data ældre end ca. 90.000 år, betyder ikke nødvendigvis, at begge iskernes information er fejlagtig. GRIP-kernen er boret på 'toppen' af Indlandsisen, hvilket sikrer minimal indflydelse fra isens bevægelse over klippebunden, dvs. at man på forhånd ville forvente, at de ældre lag i den amerikanske iskerne var mere udsat for opblanding af de gamle bundnære islag end tilfældet er for GRIP-kernen. Analyser af de to iskernes kemi, krystalorientering m.m. bekræfter dette; men alligevel er det uhyre svært at få de mange oplysninger til at hænge logisk sammen. Problemet er ikke trivielt, for hvis blot hovedtrækkene af Eem-klimaprofilen over GRIP-kernen er korrekte, så har det alvorlige konsekvenser for vores opfattelse af, hvorledes klimaet kan forandres. Vi bør simpelthen vide, om et globalt klima, som er nogle få grader varmere end i dag, faktisk kan være meget mere ustabil end vort nuværende klima. Alene af den grund er det vigtigt at få et svar på, om GRIP-kernens Eemprofil er korrekt eller ej!

Den glaciologiske gruppe på Niels Bohr Institutet mener, at dette problem kun kan løses ved at bore endnu en dybdekerne på Grønland, og det er hovedårsagen til, at gruppen i dag er involveret i en ny dyb-

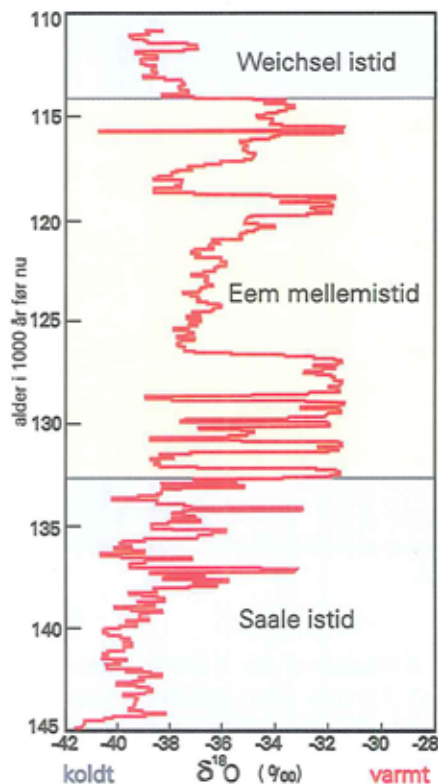
Camp Century-kernen viser i virkeligheden det samme som de langt senere udborede kerner, men selv om forskerne også dengang tænkte på de drastiske klimavariationer, var baggrunden for fortolkning langt ringere, end den blev 20 år senere. I løbet af 1970'erne blev Camp Century-kernens data diskuteret internationalt, og blandt kritikerne blev det påpeget, at istidsisen var tæt på bunden (de dybeste 200 m), og at isflydningen gennem de titusinder af år formodentlig havde blandet isen, især nær klippebunden.

Der skulle dog endnu to dybdeboringer til, før de sidste kritikere accepterede, at de observerede kraftige variationer er udtryk for reelle klimasvingninger. GRIP- og GISP2-resultaterne, publiceret i henholdsvis 1992 og 1993, satte fart i megen palæoklimatisk forskning, hvilket også kan ses i VARV-artiklerne af **Svante Bjørk** og **Torben Frønvall** (VARV 1996, 3 og 1996, 4).

Eemtiden

GRIP-isotopprofilen som dækkede Eemtiden (figur 6), blev et kapitel for sig selv: For det første var den uventet variabel med korte 'istidslignende' tilbagefald i klimaet (GRIP Members, artikel i NATURE); men da den amerikanske GISP2-kerne blev målt et år senere, blev GRIP- resultaterne betvivlet.

Figur 6. ^{18}O profil af Eem-tiden i GRIP-kernen; bemærk bl.a. det kraftige dyk for omkring 116.000 år siden. Hvis dette er reelt, svarer det til ca. 70 års tilbagefald til istidslignende klima.



Isboringer i Central Grønland

GRIP og NORTH-GRIP

Claus Uffe Hammer

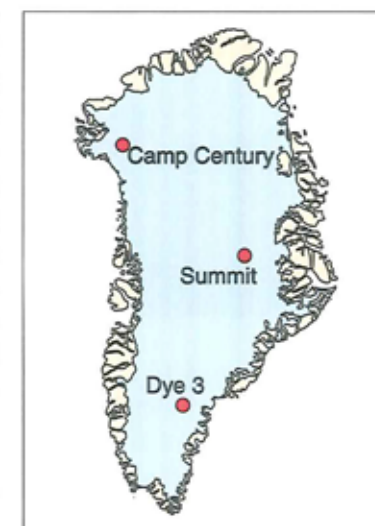
Den 12. juli 1992 nåede det danske ISTUK*-bor bunden af Indlandsisen efter afslutningen af GRIP-boringen. Gennem 4 års somre - 1989-1992 - havde otte europæiske lande under European Science Foundations auspicer arbejdet i felten for at fremskaffe den 3.028 m lange sammenhængende iskerne.

Kernen viste sig at indeholde nedbør for de sidste ca. 250.000 år og dermed også informationer om klimavariationer og globale miljøforhold gennem samme tidsrum. Det var ikke første gang, Indlandsisen blev gennemboret fra overfladen til bunden, det var sket to gange før; men det var første gang, forskerne havde fået mulighed for at bestemme borestedet.

(* se forkortelser side 59)

De to første gennemboringer af Indlandsisen

Indlandsisen blev første gang gennemboret ved Camp Century, 210 km øst for Thule, af amerikanerne (1963-1966) som et led i en større undersøgelse af Indlandsisens militære muligheder under den 'kolde krig' mellem øst og vest. Ganske vist var den 1.390 m lange iskerne ikke af direkte militær betydning; og borestedet var mere valgt ud fra praktiske logistiske betragtninger end ud fra grundforskningsmæssige overvejelser (figur 1).



Figur 1. 3 vigtige dybdeboringssteder på Indlandsisen.

Heldigvis blev iskernen genstand for en lang række videnskabelige undersøgelser. Da den danske glaciolog professor Willi Dansgaard og den amerikanske forsker Dr. Chester C. Langway Jr. indledte et samarbejde om udforskningen af kernen, blev det snart klart, at Indlands-isen rummede fantastiske oplysninger om fortidens klima. Camp Century iskernen åbnede en hel ny verden af viden om fortidige klimavariationer, og i isen var også indskrevet oplysninger, som sladrede om begivenheder og tilstande på Jordens overflade, der via atmosfæren blev indefrosset i Indlands isen.



Gangene under isen, Camp Century (1963).

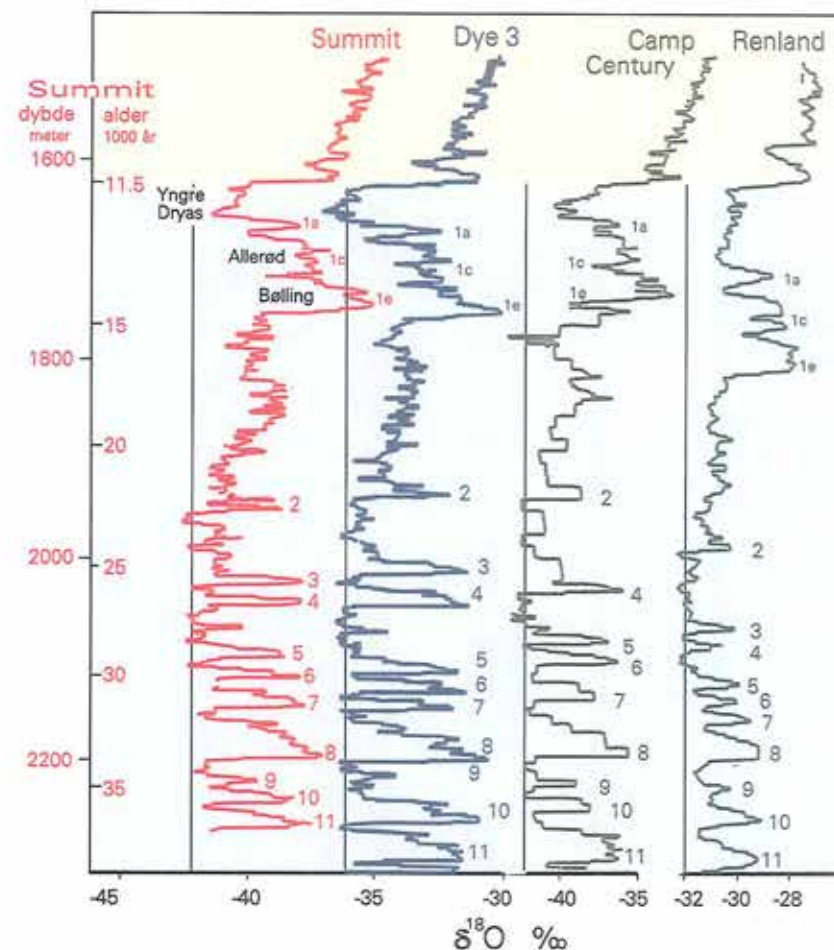


Borehuset med radar stationen Dye 3 i baggrunden (1980).

Der skulle dog gå 14 år, før den næste dybdeboring - nogle få hundrede meter fra den amerikanske radarstation Dye 3 i Sydgrønland - blev gennemført. I de 14 år var der sket store fremskridt i den tekniske udvikling, og betydningen af menneskenes indflydelse på det globale klima og miljø var så småt ved at blive taget alvorligt. Isforskningen

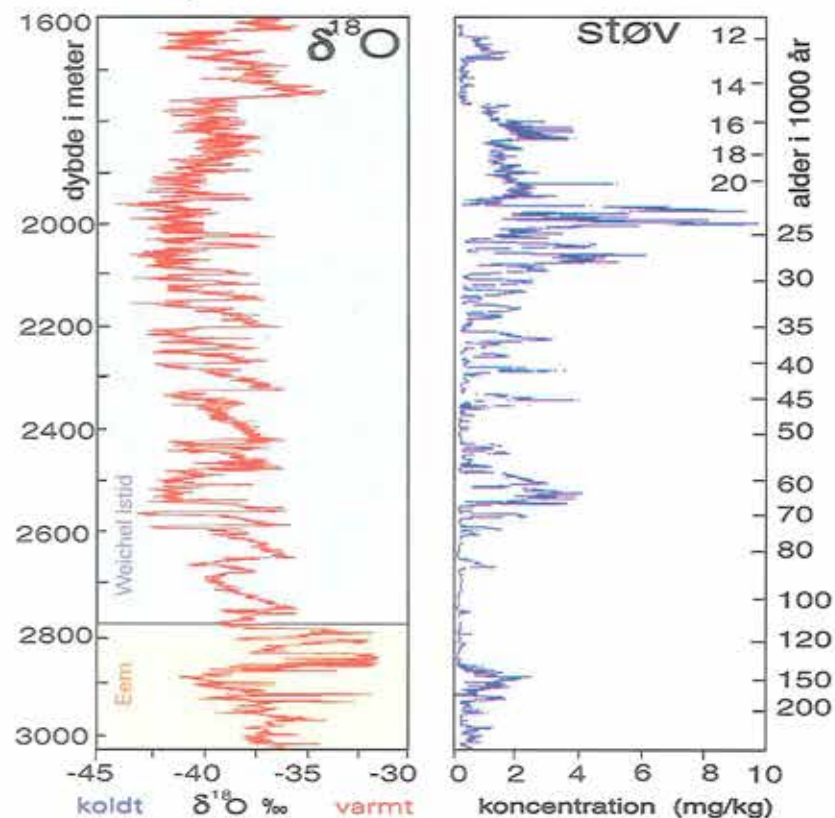
Hurtige og drastiske klimaændringer

I figur 5 er vist nogle udsnit af den sidste glacialtids hurtige og drastiske klimavariationer, således som de afspejles i isens isotopiske sammensætning i flere grønlandske borekerner.



Figur 5. Klimakurver fra 3 dybdekerner over tidsrummet 10-35 tusinde år før vor tid. Profilen yderst til højre stammer fra en lokal gletscher på Renland (Grønlands østkyst). Tallene ved kurverne er en nummerering af interstadiale perioder.

deboringer NORTH GRIP og EPICA, samt hvilken betydning resultater fra disse kan få for klimaforskningen. Punkt 4 dækker måske mere end 50% af resultaterne fra GRIP-boringen; men det vil føre for vidt også at omtale disse i denne artikel. Dog bør det nævnes, at forhold som skovbrande, drivhusgasser versus klima-feedback, fortidig vulkanisme, arktiske nedbørsforhold, havsalte, MSA etc. hører under denne forskning.



Figur 4. GRIP-kernens klimaprofil udtrykt ved $\delta^{18}O$. Jo højere $\delta^{18}O$ desto varmere klima! Til højre ses støvindhold (overvejende fint støv fra Asien). Bemærk den voldsomme øgning i støvindholdet under Weichel-istiden samt at variationen i støvindhold modsvarer variationen i $\delta^{18}O$. Således resulterer et højt atmosfærisk støvindhold i en reduktion af $\delta^{18}O$ (=koldere klima).

eller den glaciologiske forskning, som det hedder i fagsproget, havde også udviklet sig i denne periode, og forskerne forsøgte derfor under Dye 3 boringen at få så mange oplysninger fra iskernen som muligt.



Borehallen ved Dye 3.



2 meter iskerne tages ud af det danske konstruerede bor ISTUK.



Skæring af tresindstyvetusinde is-prøver til bestemmelse af ^{18}O .

Forskerne var bl.a. opmærksomme på betydningen af at studere mange aspekter af iskernens informationer direkte i felten, d.v.s. mens boringen skete: Laboratoriet flyttede ned i gange og tunneller under Indlandsisens overflade, og der blev udviklet metoder til bedre analyser af kernen. Formålet var at få så mange og så detaljerede oplys-

ninger ud af iskernen som muligt samtidig med, at arbejdet med iskernen senere kunne reduceres rent tidsmæssigt. Faktisk betød fremgangsmåden under Dye 3 boringen, at 'hvad der tog en sommer på Indlandsisen ville have taget 10 år at gennemføre i laboratoriet'.



Dye 3 boringen blev gennemført af USA, Schweiz og Danmark. Projektet blev en succes, men økonomiske forhold bevirkede, at borestedet ikke var helt velvalgt. (Læsere, som er interesseret i yderligere oplysninger om baggrunden for boringerne Camp Century, Dye 3 og GRIP kan f.eks. se i Naturens Verden nr. 9, 1994).

Laboratoriet under isen.

Iskerneboringer i et større perspektiv

Dybdeiskerner fra Indlandsisens centrale dele kan sammenlignes med et flere km langt arkiv, som er tidsligt velordnet helt ned til 100-200 meter over klippebunden; tæt på klippebunden stiger risikoen for uorden og er afhængig af isens flydningshistorie over undergrundens uregelmæssige relief.

Det særlige ved dette isarkiv kan sammenfattes ved følgende forhold:

- Det består af atmosfærens eget sediment: frossen nedbør og inde lukket luft fra atmosfæren.
- For Indlandsisens vedkommende er den tidslige opløsning meget høj, og kernen kan dateres med stor nøjagtighed. Nøjagtigheden afhænger af islagets alder, men er typisk ± 1 år for 500 år gammel, ± 50 år for 10.000 år gammel og ca. ± 1.000 år for 80.000 år gammel is.
- Isen indeholder oplysninger om fortidens temperaturforhold, nedbør, den atmosfæriske aerosol (d.v.s. de små partikler, der findes i atmosfæren) og atmosfærens gassammensætning.

GRIP iskernen - Hvad nyt?

Kort tid efter at GRIP-boringen var tilendebragt, fik forskerne et overblik over de vigtigste nye informationer, som kunne uddrages af de første data fra iskernen. Ganske vist var kernen langt fra gennemanalyseret, og bl.a. data om fortidens atmosfæriske indhold af f.eks. CO_2 og CH_4 var endnu ikke færdigmålte; men allerede i 1992 og 1993 var det muligt at opsummere en række hovedresultater, som skulle vise sig at få stor betydning for den globale klima- og miljøforskning (figur 4):

- 1) De drastiske og hurtige klimaændringer, som allerede var observeret i Camp Century- og Dye 3-kernerne, blev endeligt verificeret. Med GRIP-boringen og den lidt yngre amerikanske GISP2-boring kunne der ikke længere være tvivl om, at disse variationer var reelle.
- Eemts-is var klart til stede i GRIP-kernen, Eemtiden lignede ikke den Eemtid, som tidligere palæodata havde vist. Først og fremmest så denne varmetid ud til at være ustabil og med drastiske tilbagefald til istidslignende klima. Disse nye oplysninger er i dag kontroversielle og er i høj grad årsagen til, at to nye dybdeboringer gennem de polare iskapper er påbegyndt: NORTH GRIP i Grønland og EPICA i Antarktis (se herom nedenfor).
- Ved hjælp af nye højopløselige målemetoder blev det muligt at datere Yngre Dryas' afslutning med stor præcision, dvs. 11.550 ± 70 år; nye træeringsdata fra Tyskland (ikke publicerede) antyder, at denne alder muligvis stemmer overens med den tyske egetræskronologi inden for ± 20 år! Endvidere er GRIP-kernen stratigrafisk dateret tilbage til 60.000 år (herom senere).
- På baggrund af erfaringer fra Dye3-boringen (1979-1981) blev antallet af analyser og metoder stærkt udvidet, og boringen medførte et udstrakt samarbejde mellem europæiske laboratorier. Mange af disse data, som bl.a. omhandler gasanalyser, ionkoncentrationer m.m., havde betydning både i palæoklimatisk regi og inden for 'Global Change' forskningen.

I det følgende vil jeg forsøge at redegøre mere detaljeret for de første tre punkter og til sidst vil jeg skitsere baggrunden for de nye dyb-

For Holocæn og Senglacialtiden spiller de alle en rolle enten som oceaniske eller terrestiske informationer, og uden disse kilder ville det næppe være muligt at placere iskernestudierne i en global sammenhæng. Det særlige ved iskappeinformationen om fortiden er den tidlige kontinuitet og de 'indbyggede' oplysninger om klimatiske forhold som temperatur, nedbør, fugtighedsgrad og en lang række andre oplysninger om fortidens miljø (pollen, insekter, askelag etc.).

På den ene side er dette væld af informationer studeret ved hjælp af en lang række forskellige teknikker og instrumenter, et udtryk for den tværvideenskabelige baggrund, som er nødvendig for fuldt at forstå fortiden, på den anden side kan det være vanskeligt at orientere sig i et så bredt forskningsområde. Til gengæld er det fascinerende at arbejde indenfor et forskningsområde, hvor Jordens klimatiske og miljømæssige sider væves sammen til en helhedsopfattelse af Jordens kvartære historie. Men nu tilbage til iskernerne!



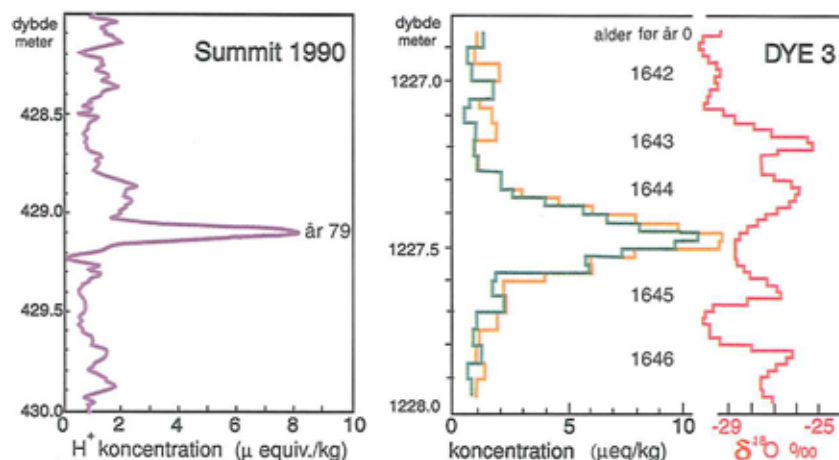
GRIP-lejren. Den forreste "dome" rummer bl.a. borehallen. De to andre indeholder køkken og opholdsrum samt værksted.

Disse tre forhold er hovedårsagen til, at iskerner er kommet i fokus, når det drejer sig om palæoklimatiske og palæoatmosfæriske undersøgelser. Det er især den direkte forbindelse mellem atmosfærens klimatisk/kemiske tilstand og det afledte sediment, som åbner for en lang række forskningsmuligheder. Informationerne fra iskernerne oplyser især om forhold, som knytter sig til fortidige klimavariationer, d.v.s. forløb, årsag og global indflydelse på atmosfærens sammensætning og ændringer af Jordens overfladeforhold (skove, ørken, tundra, havis etc.), det der kaldes 'Global Change'.

'Global Change' aspektet er hovedårsagen til den nuværende store interesse for iskerneboringer gennem Indlandsisen, Antarktis og en række mindre iskapper og gletschere; men iskerneinformationerne spænder langt videre, f.eks. er forskningsområder som Mellemøstens tidlige historie, mikrometeoritter, skovbrande, vulkanisme og genetiske ændringer i fugle knyttet til denne forskning. Figur 2 og nedenstående foto giver henholdsvis eksempler på historisk interessante signaler i isen, og på eksotisk information om fuglelivet i fortidens Grønland.



En 2000 år gammel sangsvane er ved at smelte fri 10 km inde på Indlandsisen øst for Søndre Strømfjord. Svanen er kulstof 14 dateret. Sangsvaner lever ikke i dag i området.



Figur 2. (tv.) Vesuvius udbrud i år 79 e.Kr. afspejles i Indlandsisen som en kraftig stigning i svovlsyrekoncentrationen (H^+). Såfremt dateringen af isen havde været korrekt, burde det ses året efter, dvs. 80 e.Kr. Med andre ord er dateringsnøjagtigheden over 2000 år ca. ± 1 år.

(th.) Det historisk interessante udbrud på Thera (nutidens græske ø Santorini) menes at have sat spor af forhøjede syrekoncentrationer i Indlandsisen i året 1645-44 f.Kr. Det er stadig et kontroversielt emne, og et samarbejde er indledt med Naturhistorisches Museum i Wien i et forsøg på at bevise sammenhængen. Syreindholdet er vist med orange, sulfat-indholdet med grøn streg.

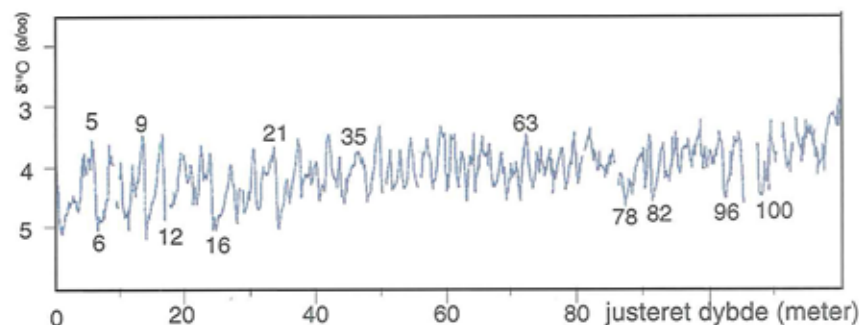
Hovedindsatsen for den glaciologiske gruppe ved Københavns Universitet er imidlertid 'Global Change' aspektet, men gruppen må nødvendigvis se egne iskerneeresultater i et større perspektiv. Selv om Grønland er stor, og Indlandsisen virker enorm, når man flyver over den eller 'turer' rundt på den så dækker den geografisk set kun et **regionalt** område på Jorden; det samme gælder Antarktis.

Et andet forhold, som begrænser iskerneinformation, skyldes isens flydning, bundsmeltning og det faktum, at store iskapper ikke bevares som lagdelte sedimenter gennem hundreder af millioner af år; de smelter bort, når Istiden er forbi, eller når de er nær ved klippebunden

Indlandsisen har formodentlig eksisteret gennem det meste af Kvar-tærtiden, mens Antarktis' is opstod midt i Tertiærtiden. Det betyder dog ikke, at den antarktiske iskappe indeholder is, som er mange millioner år gammel, hertil er bundsmeltningen for stor på grund af høj temperatur ved klippebunden. For begge iskapper gælder i øvrigt, at islagene tæt på bunden (100-300 meter fra bunden) er i uorden på grund af den nævnte isflydning. Groft set indeholder Antarktis' iskappe (især den østlige) velordnede årlag, som repræsenterer de sidste ca. 500.000 år, mens Indlandsisen næppe når 200.000 velordnede år tilbage. Til gengæld indeholder Indlandsisen formodentlig uordnede islag, som går tilbage til Kvar-tærtidens begyndelse, idet visse centrale dele ikke har været udsat for smeltning ved bunden.

Som nævnt ovenfor er ikke alle informationer fra islagene af global betydning, og de må derfor sammenholdes med palæodata opnået fra andre kilder. I de senere år er teknikken til studiet af palæosedimenter blevet stærkt forbedret, og 'Global Change' aspektet har medført en øget geografisk dækning af Jordens overflade.

Blandt de vigtigste kilder til velordnede data om fortidens (især Kvar-tærtidens) klimatiske og miljømæssige forhold kan f.eks. nævnes havsedimenter, søsedimenter (herunder varv), koraller, træringe og moser. På hver deres måde bidrager disse kilder til en mere omfattende geografisk dækkende information om fortidens klima og miljø. Se f.eks. figur 3, hvor klimatiske oplysninger fra havsedimenter dækkende ca. 2 millioner år er vist.



Figur 3. Havsedimentkerne (efter N. Shackleton) som viser hovedlinier i klimaudviklingen gennem mere end 2 millioner år.