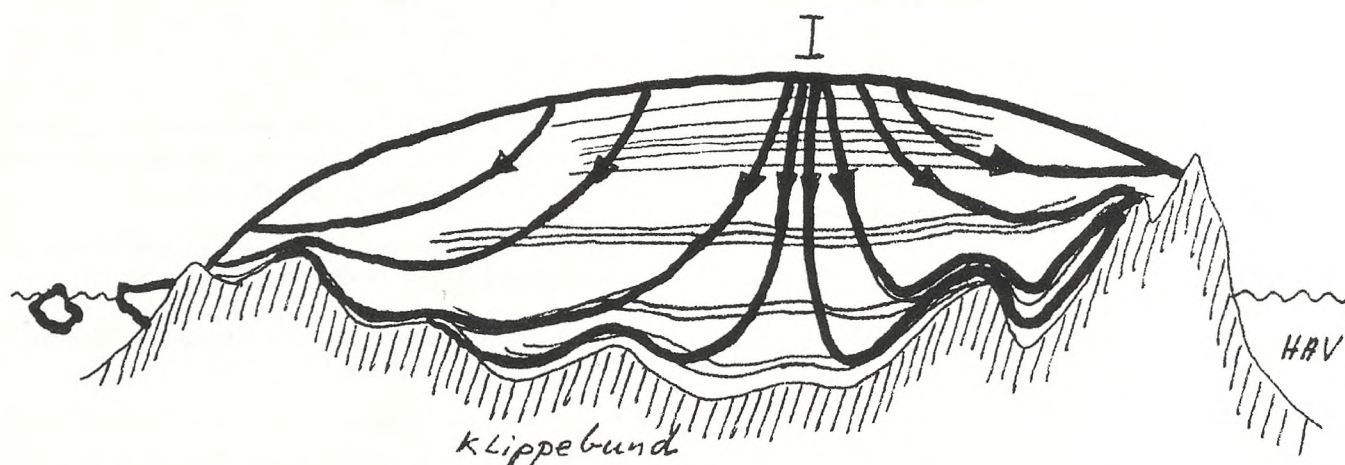


Iskerner fortæller klimahistorie

Claus Uffe Hammer, Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik



Figur 1. Schematisk vest-øst snit gennem Indlandsisen. I betegner isdeleren; sne som falder øst for denne flyder mod østkysten og vise versa. Bemærk, at kun ved en isboring tæt på I kan det antages, at isen i en borekerne oprindelig faldt som sne tæt ved borestedet. Isens bevægelse er antydnet ved flydelinier (med pil); de tynde linier indikerer is af samme alder (kronologiske lag).

For at forstå nutiden må fortiden kendes! Selvfølgelig er der noget rigtigt i den sætning; men den er jo temmelig upræcis og lægger ingen begrænsninger på, hvad der menes med fortiden, lige som der heller ikke nævnes, hvad det er, der skal forstås, og hvad det er, vi skal kende.

Så lad mig springe alle de filosofiske muligheder over og udvælge temaet klimaændringer, som det vi gerne vil kende, og indskrænke fortiden til de sidste par millioner år. Begrænsningen i tid skyldes ønsket om at koncentrere forståelsen til den geologiske periode, som er kendetegnet ved den sidste istid (med flere nedisninger og varmeperioder) til forskel fra de mange millioner eller milliarder år før den sidste istid. Perioden kaldes af geologerne kvartærtiden, og vores nuværende klima tilhører denne periode.

Nogle ville måske undre sig over, hvorfor netop disse sidste par millioner år skulle være noget særligt; men det spørgsmål kan faktisk besvares ved at se på fordelingen af hav og land på Jorden! Denne fordeling er helt afgørende for, hvordan Jordens klima er. Det er ikke det eneste forhold, som bestemmer Jordens klima, men fordelingen bestemmer de vigtigste spilleregler for både klimaet og de ændringer, som kan forekomme. Den fysiske forklaring på dette er også relativt simpel: Land og hav reflekterer/absorberer solstrålingen forskelligt, og atmosfærens strålingsenergi balance er derfor bestemt af hav- og landfordelingen. Hertil kommer, at områder med stor absorption af strålingsenergi fra

solen skaber forhold, som forsøger at overføre energien til de områder, hvor energiabsorptionen er lille, f.eks. overførsel af energi fra ækvatoregnene mod polerne. Måden dette foregår på afhænger af den geografiske fordeling mellem hav og land: Golfstrømmen kan f.eks. kun eksistere, hvis der faktisk findes et Atlanterhav, hvilket ikke var tilfældet for 35 millioner år siden.

Det særlige ved de sidste par millioner års klima er, at fordelingen mellem hav og land åbnede muligheden for, at klimaet blev relativt koldt samtidig med, at det blev særdeles ustabil og begyndte at veksle mellem det, vi i dag kalder nedisningstider og varmetider. Under nedisningstiderne blev ca. 50 millioner km³ af havet overført til Indlandsis på land som f.eks. den skandinaviske iskappe; og under varmetiderne smeltede isdækket bort, og havvandstanden steg 120-140 meter.

I dag lever vi i en varmetid, som begyndte da den sidste nedisning fik sit dødsstød for 11.550 år siden, dvs. at stort set hele menneskets hurtige udviklingshistorie knytter sig til den sidste varmeperiode ud af mange gennem de sidste par millioner år. Det er derfor ikke så mærkeligt, at vi som mennesker gerne vil forstå både hvorfor klimaet ændrer sig, og hvilken indflydelse dette kan have på de samfund og kulturer, vi lever i.

For at forsøge et svar på dette spørgsmål, må vi have viden om, hvad der bestemmer klimaet; og da disse årsager til klimaets ændringer ikke kan findes kun ved at studere nutidens meteorologiske forhold, må vi se tilbage i tiden. På en måde kan

man sige, at fortidens klimaændringer og de dermed følgende virkninger på det globale miljø (ørken, vindforhold, nedbør, temperatur osv.) er klimaforskningens "laboratorieforsøg": Laboratoriet var Jorden selv og virkningerne af ændringerne påvirkede Jordens temperatur, nedbørsfordeling, skovfordeling, havstrømme, trykforhold i atmosfæren etc. Ændringerne, som skete inden for de sidste par millioner år, er derfor vigtige, men de sidste par hundrede tusinde års ændringer er af særlig vigtighed, fordi det endnu er muligt at studere dem i detaljer ved hjælp af de spor, de har efterladt.

Det er i denne sammenhæng at iskerner fra Grønland og Antarktis kan læses som et særligt detaljeret leksikon over, hvad der skete, og til dels hvorfor det skete.

Derfor er iskerner så vigtige

Det særlige ved iskerner fra Grønland og Antarktis er, at de består af, hvad man kunne kalde atmosfærens eget bundfald gennem tiderne. Bundfaldet sedimenterer i form af sne, som omdannes til gletscheris og deltager i iskappens flydning (Figur 1). Sneen der f.eks. faldt for 1.000 år siden virkede også som en slags rensmiddel, som fjernede urenheder fra atmosfæren: En sådan proces foregår til stadighed, når det regner eller sneer. Hvis sne og regn ikke havde denne virkning, ville atmosfæren, vi færdes i og indånder, være mere snavset end den værste byforureningsluft, vi i dag kan finde på kloden.

Også atmosfærens gassammensætning (ilt, kvælstof, kuldioxid og methan m.m.) indelukkes, når sneen omdannes til gletscheris: Med andre ord indeholder fortidens snefald på f.eks. Indlandsisen information om atmosfærens sammensætning. En vigtig oplysning om fortidens temperaturforhold indeholdes i sneen selv: Den isotopiske sammensætning af sneen fortæller om temperaturen på det sted, hvor sneen faldt. En anden vigtig information, som også kommer fra sneen selv, skyldes at det er muligt i en iskerne at få oplysninger om, hvor meget sne, der faldt.

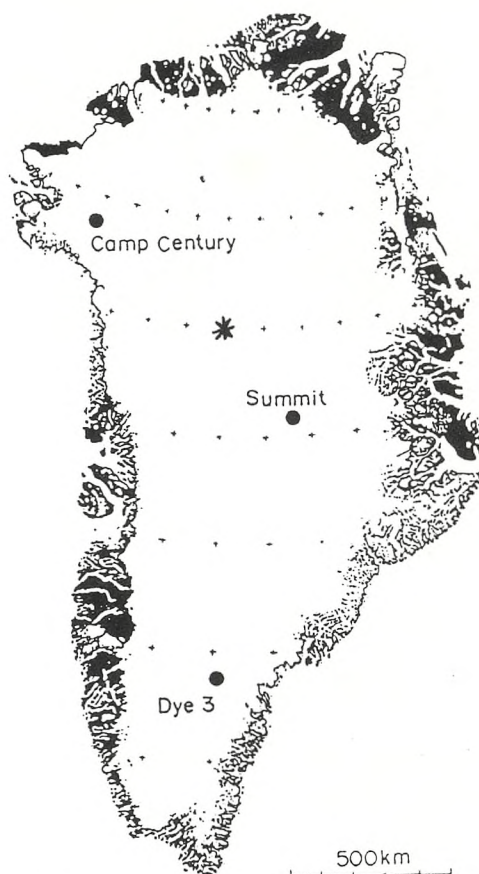
Denne direkte forbindelse mellem fortidens atmosfæriske forhold og lag i en iskerne er meget speciel i forhold til de fleste andre kilder til oplysning om fortidens klima (f.eks. havsedimenter, moselag, træringe m.m.). Der er endnu en særlig fordel ved iskerner, idet de muliggør en høj tidsopløsning tilbage i tiden, f.eks. er det muligt i nogle iskerner at studere fortidens atmosfæriske forhold næsten måned for måned flere tusinde år tilbage i tiden.

Nogle forudsætninger for at læse iskernebiblioteket

Nu er det ikke helt så let at "læse" klimainformationer f.eks. i Indlandsisen: For det første må en iskerne udbores på et passende sted (se Figur 5); for det andet må de målinger, som udføres på iskernen, være udtryk for en klimatisk information og/eller en oplysning knyttet til de årsager, som kan forårsage klimaændringer; endelig er sådanne oplysninger kun af værdi, hvis de kan

placeres i tid, dvs. iskernen skal dateres.

Ved dybdeboringer gennem Indlandsisen er det særligt vigtigt, at boringen foregår på en lokalitet, hvor ændringer af iskappens form gennem tiden får så lille indflydelse på resultaterne som muligt (se også teksten til Figur 1); det er ikke altid muligt, idet omkostningerne kan være for store. Det sidste var f.eks. tilfældet ved Dye 3 dybdeboringen (1979-1981) i sydgrønland. I øjeblikket dybdebøres der på lokaliteten NORTH GRIP (Figur 2), hvor udvælgelsen af borestedet først og fremmest skyldes ønsket om, at den nederste og ældste is er så gammel som mulig, uden at lagdelingen er forstyrret af en ujævn klippebund.



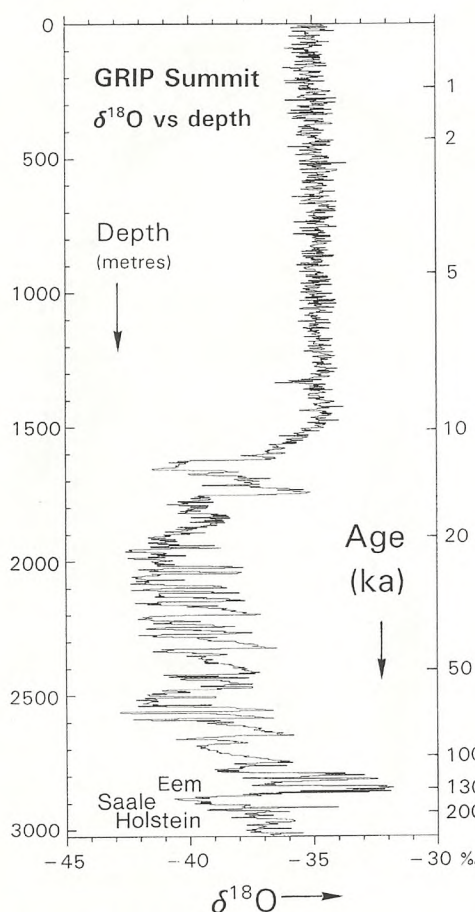
Figur 2. Tre steder hvor en iskerne er udboret gennem hele Indlandsisen. Det nuværende borested NORTH GRIP er markeret med en stjerne. NORTH GRIP-borestedet anses for det optimale sted på Indlandsisen for en udboring af meget gamle og velordnede islag; måske vil bundisen indeholde is tilbage til tiden for Grønlands nedisning for et par millioner år siden.

Tre udvalgte typer målinger på iskerner

Jeg har nedenfor valgt at beskrive tre forskellige typer målinger, som har interesse for klimaforskningen: De er isotopmålinger på isen, detektion af fortidig vulkanisme og drivhusgasserne CO₂ og CH₄ (kuldioxid og methan). Iskernerne indeholder langt flere oplysninger, men disse tre er direkte tilknyttet klimaændringer/klimaårsager.

Isotopsammensætning af isen

Vand er sammensat af to brintatomer og et iltatom; men i naturen forekommer vand i flere isotopiske former. Kemisk set er disse former stort set ens, men fysisk har de forskellige molekylvægte. På Geofysisk afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik måler vi isens isotopiske sammensætning ved hjælp af et massespektrometer, og vi koncentrerer os om H_2^{18}O og H_2^{16}O . Forholdet mellem disse forskellige former af vand kan udtrykkes ved, hvad vi kalder δ ; hvis δ er høj, er indholdet af tungt vand højt, og hvis δ er lav, er indholdet lille. Denne forskel udtrykkes i promille i forhold til en standardprøve.



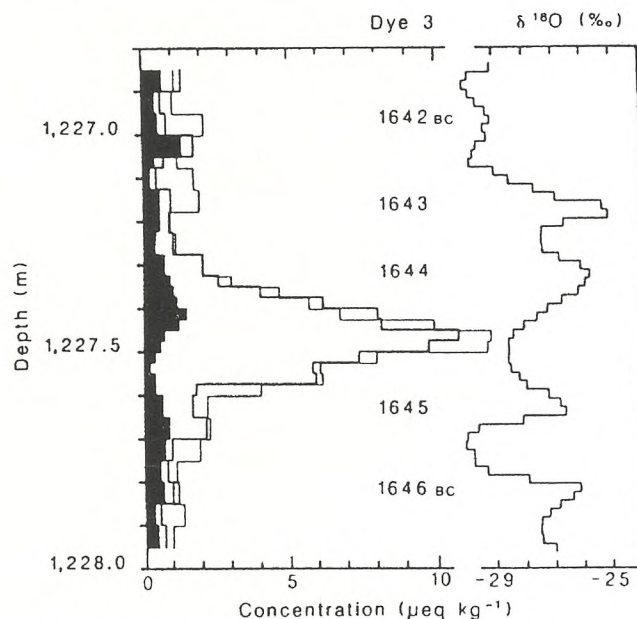
Figur 3. GRIP-klimakurven som funktion af dybden; bemærk aldrene til højre på kurven, som er udtryk for, at årlagene udtyndes med dybden på grund af isflydningen.

I slutningen af 50'erne viste den danske fysiker og senere glaciolog*, Willi Dansgaard, at der for nedbør på Indlandsisen gjaldt følgende sammenhæng:

$$\delta = 0,67 T - 13,7 \text{ (hvor } T \text{ måles i } ^\circ\text{C)}$$

Med andre ord sneen, som falder på Indlandsisen, har en isotopisk sammensætning, som fortæller, hvad temperaturen var på Indlandsisen, da sneen faldt. Helt så enkel er virkeligheden ikke; men ideen danner grundlaget for studiet af fortidens klima ved hjælp af iskerner fra Indlandsisen og Antarktis. I årene 1989-1992 gen-

nemførtes på Indlandsisens top, Summit, i 3.235 meters højde over havet den hidtil mest omfattende dybdeboring gennem Indlandsisen. Dette europæiske projekt blev kaldt GRIP (Greenland Ice core Project) og en 3.028 meter lang iskerne blev udboret af isen. På Figur 3 er vist den information om fortidens klima, som målingerne afslørede. Læg mærke til, at de sidste ca. 11.500 år ikke udviser voldsomme ændringer, mens den sidste istid var kold og samtidig udviste et utroligt uroligt og voldsomt varierende klima.



Figur 4. Et historisk interessant vulkanudbrud på den græske ø Santorini fandt sted 1646 år før Kristi fødsel (BC = Before Christ). Isens surhedsgrad og sulfatindhold steg voldsomt i årene efter udbruddet (tynde kurver; viser at det drejer sig om svovlsyre). Den sortsvartede kurve viser nitratkoncentrationen, som ikke påvirkes af vulkanudbrud.

Fortidig vulkanisme

Blandt de urenheder (støv, havsalt m.m.), som fjernes fra atmosfæren af sne og regn, er også udbrudsprodukter fra vulkaner. Vulkansk aske spiller kun en ringe rolle i klimasammenhæng, fordi askepartiklerne er relativt store og derfor hurtigt fjernes fra atmosfæren ved tyngdekraftens virkning; det gælder også, selvom asken i store mængder kan slynges 20-50 km op i atmosfæren.

Derimod vil en vulkansk produceret gas som SO_2 (svovldioxid) kun langsomt fjernes fra stratosfæren (mere end 10-20 km over havniveau). Gassen omdannes i løbet af nogle måneder til mikroskopiske partikler bestående af svovlsyre, som på grund af friktionskraften (Stokes lov) kan være år om at "falde" ud af stratosfæren. Disse partikler spreder sollyset, og nogle procent af solenergien når aldrig ned til den nederste del af atmosfæren (troposfæren), hvor bl.a. nedbørsprocesserne foregår. Partiklerne spredes derfor

*Viden om is



Figur 5. GRIP-lejren på toppen af Indlandsisen 3.235 meter over havet er her under opbygning i 1989. Bygningen til venstre blev indrettet med køkken, toiletter, opholdsrum og kommunikationscenter. Den hvide bygning blev benyttet til en mindre boring i 1989, mens selve dydboringen foregik i 1990-1992.

Software

- Windows
- Image acquisition
- Image display and data analysis
- Control language

Platforme

- Explorer
- Discover
- Aurora
- Voyager
- Universal

Åben Arkitektur

Elektronik

- ECU
- CPU
- Electrochemistry
- Networking
- Experimenter's tool kit

Hardware

- AFM
- STM
- MFM
- LFM
- EFM
- SNOM



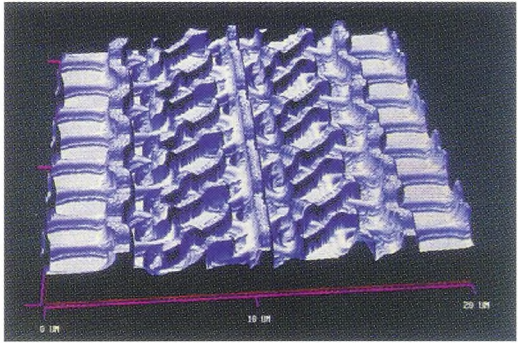
TopoMetrix er en af de førende producenter af **Scanning Probe Microscopes** i Silicon Valley, USA. **TopoMetrix** har været på forkant med udviklingen lige siden starten.

Flexibilitet er nøgleordet blandt ingeniørerne hos **TopoMetrix**. Det modulære design gør det muligt for brugeren at tilpasse software og hardware til egne nutidige og fremtidige behov. Dette indebærer en optimal udnyttelse af investeringen.

Fordele ved SPM: Mulighed for af se prøver ned til atomar størrelse. 3D-forstørrelse. Kan arbejde under vakuum, atmosfærisk tryk og i væsker. Ved SPM kræves der ingen forberedelse af prøverne.

Anvendelses områder: Biologiske undersøgelser under fysiologiske betingelser. Udvikling af mikroelektronik, elektrokemiske undersøgelser af materialer i deres oprindelige miljø. Materialeforskning, hvor der ses på fibre, ultraflade overflader, evaluering af overfladebehandling, etc.

**AFM
billede af
multilags
semi-
conductor
taget
med
TopoMetrix
Voyager.**



E-mail: dkbuchol@ibmmail.com

Buch & Holm A/S

Marielundvej 36 - 2730 Herlev ☎ 42 91 75 11 Fax 44 92 31 00

ud over hele Jorden eller hele halvkuglen og lægger sig som et højtliggende slør i atmosfæren.

Efter nogle år fjernes partiklerne dog via sne og regn: På Indlandsisen bliver sneen derfor ekstra sur. Den surhed kan måles ved en elektrisk målemetode langs iskernen, og "signalets" kemiske sammensætning kan måles ved andre metoder (Figur 4). På denne måde har vi fået kendskab til vulkanismens styrke, hyppighed og til dens geografiske beliggenhed ud fra målinger på iskerner. Herved har det også været muligt at påvise vulkanudbruds indvirkning på klimaet samt, at hyppig og voldsom vulkanisme var hovedårsagen til det kolde klima på f.eks. Christian den Fjerdes tid.

Drivhusgasserne CO₂ og CH₄

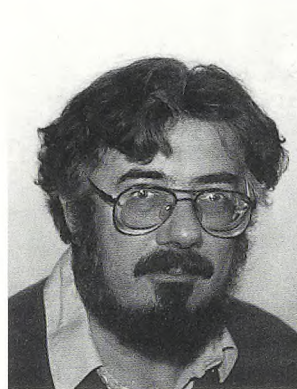
Isen indeholder luftbobler, som er blevet indelukket i isen under sneens omdannelse til is. Denne indelukkelsesproces er skyld i, at alderen på gassen i et stykke iskerne er yngre end den is, gassen er indelukket i; men det kan der korrigeres for. Målinger af boblernes gassammensætning viser ikke overraskende, at atmosfæren gennem 100 tusinder af år har det samme indhold af kvælstof (N₂) og ilt (O₂) som vore dages atmosfære. Derimod ændrer indholdet af drivhusgasserne CO₂ og CH₄ sig voldsomt gennem tiden. Oplysninger om fortidens atmosfæres indhold af drivhusgasser kan benyttes i forbindelse med klimamodeller m.m.

For nylig blev ændringerne i methankoncentrationen under sidste istid brugt til at vise, at klimaændringer på den nordlige og sydlige halvkugle ikke nødvendigvis var samtidige (dette gælder dog ikke istiden som sådan). En sådan oplysning er utrolig vigtig for klimaforskning

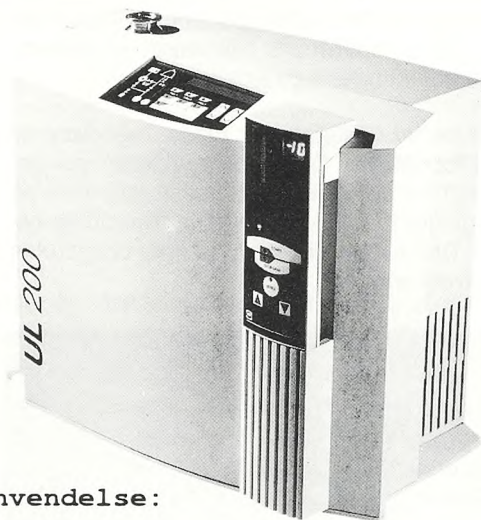
gen, fordi den fortæller noget om, hvordan vort komplicerede klimasystem er koblet geografisk, og dermed antyder de næste forskningsskridt til forståelse af klimaændringernes årsag.

Referencer:

- [1] C. U. Hammer: "Isboringer i Centralgrønland; VARV nr. 2, 1997.
- [2] C. U. Hammer: "Indlandsisen - et langsomt flydende bibliotek"; Naturens Verden: Grønlands fysiske natur, forlaget Rhodos, 1995.
- [3] C. U. Hammer m.fl.: Nature, bind 328, 1987, side 517-519.
- [4] Dansgaard m.fl.: Nature, bind 364, 1993, side 218-220.



Claus Uffe Hammer er professor ved Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik.



Anvendelse:

- * Kvalitetskontrol
- * Forskning og udvikling
- * Analyseudstyr
- * Høj -og ultrahøjvakuum

Læksøger på heliumbasis

Hvilke krav stilles der?

- * Hurtig
- * Nem og entydig betjening
- * Oliefri indsugning
- * Robust
- * Enkelt service
- * Prisbillig

Leybold ApS
Roskildevej 342A
2630 Tåstrup
Tlf.: 43996444
Fax: 43996544

