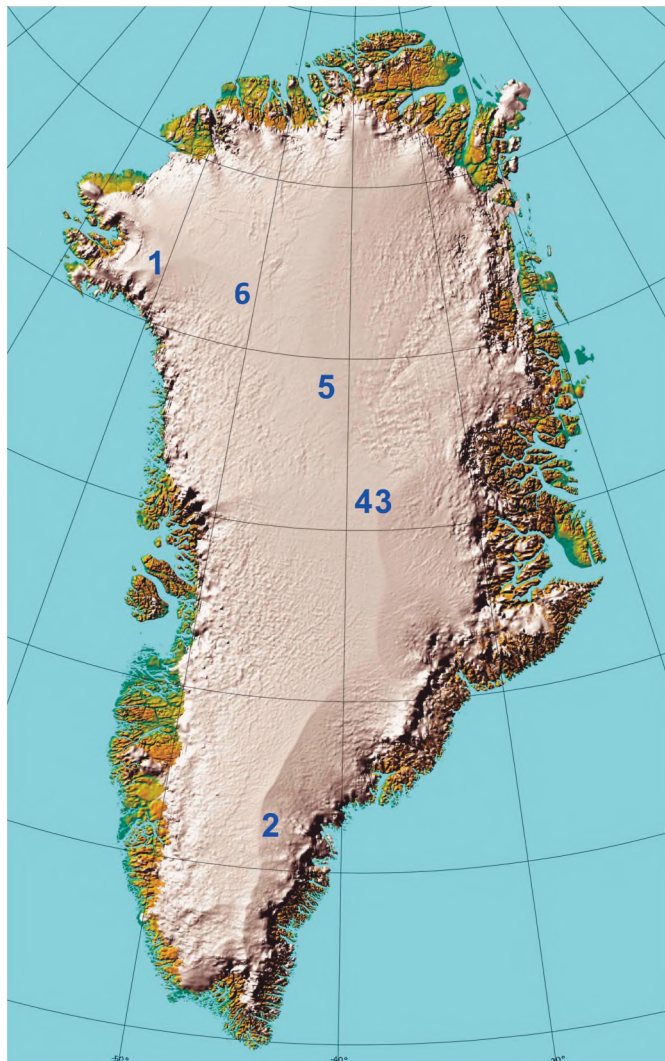




FIGUR 1. Boring af en iskerne ved NEEM-lejren. Foto: Tim Burton.



FIGUR 2. Kort over Grønlands Indlandsis. Kortet er sammensat af kortmateriale og satellitobservationer. Positionerne for de dybe iskerneboringer er angivet:
 1. Camp Century
 2. Dye 3
 3. GRIP
 4. GISP 2
 5. NorthGRIP
 6. NEEM
 (kortet er gengivet med tilladelse fra Simon Ekholm, Kort- og Matrikelstyrelsen, Danmark).

Indlandsisen på Grønland

- et levende fjeld fortæller klimahistorie

AF DORTHE DAHL-JENSEN OG JØRGEN PEDER STEFFENSEN

Det levende fjeld

Indlandsisen på Grønland er verdens næststørste iskappe, kun isen i Antarktis er større. Den er omkring 2500 km lang og 1000 km på det bredeste sted og dækker langt størsteparten af Grønland. Isen er mere end 3 km tyk på det tykkeste sted, og den når op i en højde på 3240 m over havet (figur 2).

Vægten af isen har trykket det grønlandske fjeld under isen ca. 1 km ned (se nærmere s. 39-53 i dette festskrift). Det betyder, at bunden under isen i store områder i midten af Grønland er trykket ned under havoverfladen. Hvis isen smeltede bort, ville havet verden over stige med 6-8 meter, og midten af Grønland ville hæve sig 1 km op i løbet af de næste 20.000 år. Den landhævning, som man i århundreder har observeret i Norden, især omkring den Botniske Bugt, skyldes, at landskabet (og havbunden) er på vej op, efter at den kilometertykke iskappe, som lå over Skandinavien under istiden, pludselig smeltede bort for 10.000 år siden.

Indlandsisen eksisterer i dag på grund af, at der over det indre af isen hvert år falder sne, som aldrig smelter bort. Temperaturerne når meget sjældent over nulpunktet. Det vil sige, at der i det indre hele tiden tilføres sne på toppen, typisk mellem 30 cm og 1,5 m om året. Denne sne bliver liggende og bliver året efter begravet af et nyt lag sne. Efterhånden som sneen synker dybere og dybere ned, bliver den presset sammen til is af vægten af de ovenliggende snelag. Samtidig med, at der hvert år pålejres et nyt lag sne i det indre, trykkes isen sammen, og den flyder ud mod randen.

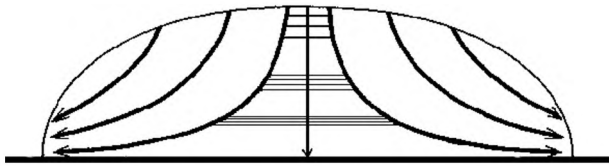
Hvis der hvert år tilføres samme antal kubikmeter is inde på en iskappe, som der afgives ved randen, så siges iskappen at være i massebalance. Hvis smeltning og kælvning af isbjerge overstiger tilførslen, skrumpes iskappen, og iskappen vokser, hvis tilførslen er størst. Grønlands Indlandsis har i de sidste mange hundrede år stort set været i massebalance. Med moderne måleteknik, bl.a. med satellitobservationer, har man i de sidste 30 år intensiveret undersøgelserne af, om Indlandsisen vokser eller skrumpes. Den opvarmning, Grønlands Indlandsis har oplevet de sidste to årtier, har medført, at Indlandsisen mister mere og



FIGUR 3. Hvor smeltevandstrømme skærer dybe kløfter i isen, ses lagstrukturen af gamle årlag tydeligt i væggen. Foto: J.P. Steffensen.

mere masse hvert år, således at der nu mistes over 200 km³ is hvert år af de ca. 2.000.000 km³, som Indlandsisen består af. Massetabet er stigende, og prognoserne forudsiger, at der i år 2100 kan være en havvandsstigning på op til en meter, hvoraf is fra Grønlands Indlandsis kan bidrage med 10-30 cm.

Isens flydning under sin egen vægt kan ligestilles med et transportbånd. Is fra midten transporteres ud til kysten, hvilket man især får en fornemmelse af, når man besøger Jakobshavn Isbræ ved Ilulissat. Denne 7 km brede og flere hundrede meter tykke bræ bevæger sig ud i fjorden med en fart på omkring 2 meter i ti-



FIGUR 4. Skitse af Indlandsisen i tværsnit. Isen er ca. 3 km tyk og 1000 km bred fra vest til øst. De store pile viser isens konstante bevægelse. Fra isens højeste punkt (isdeleren) bevæger isen sig langs de store pile mod vest og øst. De vandrette linjer illustrerer årlagenes gradvise nedsynkning og udtynding.

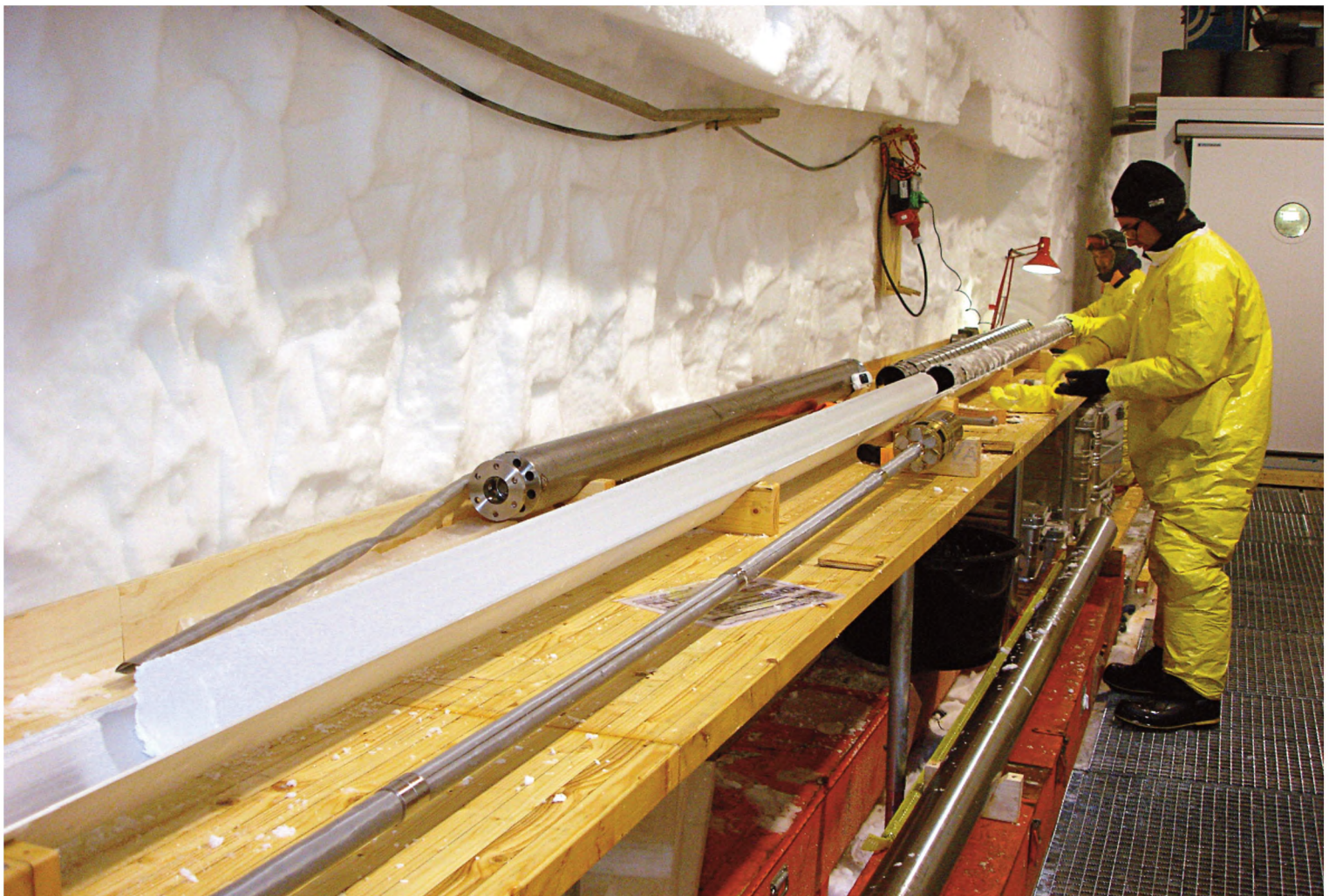
men (15 km/år). Vi har som glaciologer efterhånden en ganske god forståelse af, hvorledes isen bevæger sig. Moderne computerberegninger af isbevægelsen har vist sig at være et effektivt værktøj til beskrivelse af isbevægelserne.

Figur 4 er en simpel skitse af Indlandsisen i tværsnit. Isen bevæger sig fra midten ud mod randen langs de store pile. En snepartikel, som falder ned tæt ved midten af isen, kommer langt ned i isen, før den til sidst kommer ud til overfladen igen tæt ved randen.

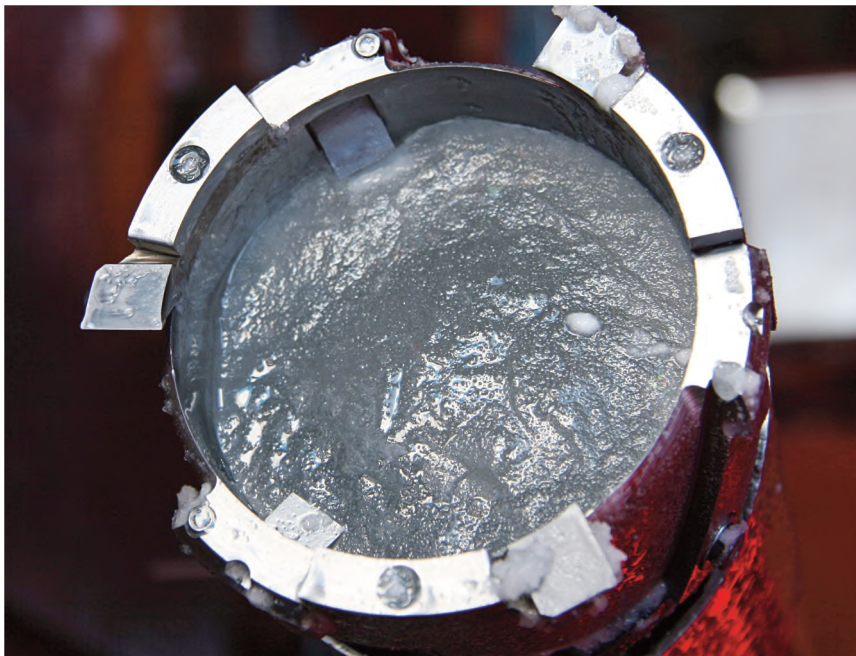
Isens højeste punkt, dvs. præcis midt på isen, kaldes isdeleren. Sne, som falder øst herfor, flyder mod øst, og sne, som falder vest herfor, flyder mod vest. På kortet (figur 2) kan isdeleren anes som en slags ryg. Sne, som falder præcis på isdeleren, flyder hverken mod øst eller vest, men synker lige ned. Samtidig med, at snelagene synker ned, bliver de strakt af bevægelsen mod isens rand og bliver derfor tyndere. Dette er skitseret i figuren med lag, som bliver tyndere med dybden. Hvis vi derfor borer en iskerne op på selve isdeleren, får vi is op, der faldt som sne på netop dette sted før i tiden. Jo dybere vi borer, jo ældre er isen. De enkelte årlag ligger i en uforstyrret sekvens ned gennem iskernen. Den ældste is er tæt på bunden, derfor er det vigtigt at bore helt ned.

Iskerneboringer og undersøgelser

En iskerne er en lang cylindrisk stang af is. Kernestykkerne, som bores op, har en diameter på ca. 10 cm og er 2,5 m lange (figur 5). Boret består af et rør med tre



FIGUR 5. En iskerne fra 1,5 km dybde trækkes ud af boret ved NEEM i 2009. Foto: NEEM arkiv.



FIGUR 6. Nærbillede af borehovedet. På borehovedet sidder tre knive, som skærer en ring bort omkring iskernen. I borerøret ses bunden af et iskernestykke. Foto: NEEM arkiv.

meget skarpe knive på enden. Når røret roteres i borehullet, skærer knivene en ring bort (figur 6). Efterhånden som boret skærer sig nedefter, bliver røret fyldt op. Når borerøret er helt fyldt med is, trækker man det op. Tre modhager i bunden af borerøret klipper isstykket over og holder stykket fast, indtil boret er hejst op til overfladen. Ved overfladen trækkes iskernestykket forsigtigt ud og lægges i forlængelse af stykket fra den foregående borerunde. Brudfladerne på de to stykker skal passe sammen, da man må sikre sig, at der ikke er gået islag tabt under boringen. Derefter opmåles isstykkerne, de mærkes med numre og en pil, som viser op og ned. Nu kan iskernestykkerne skæres op i mindre stykker til analyse i laboratorierne på stedet.

Camp Century-iskernen var den første iskerne, som blev boret. Boringen foregik i perioden 1964 til 1966 i den amerikanske underjordiske militærbase Camp Century. Basen blev bygget i 1959-1960 under den kolde krig for at undersøge mulighederne for at oprette militære installationer under overfladen på Grønlands Indlandsis. »Camp Century« betyder 'Lejr 100'. Navnet kommer af, at basen lå 100 miles inde på Indlandsisen målt fra iskanten øst for Thulebasen. Heldigvis blev det aldrig aktuelt at anbringe militære våben på Indlandsisen. Den amerikanske hærs arktiske ingeniører under CRREL (Cold Regions Research and Engineering Laboratory) udførte den første isboring gennem Indlandsisen og borede til 1370 m dybde,

hvor man fik sten og grus med op. Iskernen tog amerikanerne med sig hjem til opbevaring i frysehuse. Der var meget få synlige træk i iskernen. Man havde ganske vist kunnet påvise, at koncentrationen af mikroskopiske støvpartikler varierede skiftevis fra højt til lavt ned gennem iskernen; man mente, at denne variation skyldtes årstidsvariationer af støvindholdet i sneen i Grønland, og at der derfor var tale om årlag, men sikre var man ikke. I 1967-1968 fik professor Chester Langway (dengang CRREL) etableret kontakt til professor Willi Dansgaard i København. Der opstod snart et samarbejde: Professor Langway havde isen, og professor Dansgaard havde nøglen til at låse op for isens hemmeligheder. Dette samarbejde blev startskuddet til hele den moderne iskerneforskning.

Dansgaards stabile isotoper

Vands kemiske formel er H_2O , dvs. hvert vandmolekyle består af to brintatomer og et iltatom. Det er forholdsvis enkelt, og kemisk set er alle vandmolekyler ens. Naturen er imidlertid mere kompliceret, idet hvert grundstof, f.eks. kulstof eller ilt, findes i flere udgaver, som kemisk set er ens, men har forskellig vægt. Man siger, at grundstofferne har flere isotoper. Ilt har i naturen bl.a. de to stabile isotoper ^{16}O og ^{18}O . Derfor består naturligt vand af både $H_2^{16}O$ og $H_2^{18}O$, hvor $H_2^{16}O$ er den mest almindelige. Der er ingen kemisk forskel; men man kan bestemme den relative mængde af de to isotoper i et massespektrometer, som sorterer de to typer molekyler efter vægt.

Willi Dansgaard var fysiker med speciale i massespektrometri. I 1952 gjorde han en afgørende opdagelse. Under et regnvejr i København samlede han regnvand op i flasker. Regnvejret skyldtes passagen af en koldfront, dvs. kold luft blæser ind og erstatter varm luft. Da han senere analyserede vandprøverne, viste det sig, at indholdet af $H_2^{18}O$ i regnvandet faldt, efterhånden som luften blev koldere. Indholdet af ^{18}O i regn eller sne var altså bestemt af temperaturen i skyerne.

I de følgende 15 år arbejdede Dansgaard videre med sin opdagelse og publicerede sine videnskabelige resultater. Da Chester Langway så i 1968 stillede iskerne materiale fra Camp Century til rådighed for Willi Dansgaard og hans gruppe, var nøglen til at låse op for isens hemmeligheder klar. Med massespektrometret kunne man se det usynlige: Ned gennem lagene i iskernen observerede man skiftevis højere og lavere ^{18}O -isotopværdier. Dette var skiftende lag af sommersne og vintersne, altså årlag. Man kunne nu tælle sig

ned gennem lagene år for år tilbage i tiden. Tog man så et gennemsnit af 100 års isotopværdier og sammenlignede dem med isotopværdierne fra et andet århundrede, fik man et billede af ændringerne i skyernes (dvs. luftens) gennemsnitstemperatur. Iskerner kunne bruges til klimastudier!

Dybt nede i Camp Century-iskernen skiftede isotopværdierne brat. De meget lave isotopværdier viste, at temperaturen havde været meget lav, da denne is faldt som sne på overfladen. Man var kommet ned i is fra sidste istid. I 1970-1972 publicerede Dansgaards gruppe den første klimakurve fra iskerner. Siden er der blevet boret en hel del, i Grønland, i Antarktis og gennem gletschere forskellige steder i verden. Samtidig er måleteknikken blevet forbedret. Man kan nu måle en mængde forskellige urenheder i isen, som sammen med isotoperne fortæller om tidligere tiders støvstorme, vulkanudbud, klimaændringer osv.

Iskerne har vist sig at indeholde endnu en skat. Indlandsis er nemlig ikke frosset vand. Det er sammenpresset sne, og under sammenpresningen bliver noget af luften mellem snefnuggene spærret inde i bobler i isen. En iskerne er fuld af små prikker. Det er bobler med indespærret luft. Willi Dansgaards schweiziske kollega professor Hans Oeschger og hans gruppe blev pionerer i at undersøge luften i disse bobler. Det viste sig at være gammel atmosfærisk luft, og man var i stand til at måle indholdet af bl.a. drivhusgasserne CO_2 og metan tilbage i tiden - og tilbage gennem klimaændringer.

Under den nuværende debat om mulige menneskeskabte klimaændringer som følge af forstærket drivhuseffekt fra udledningen af bl.a. CO_2 og metan er det nok så vigtigt at nævne, at uden iskerner ville man ikke have tal for, hvorledes atmosfæren var sammensat, før industrialiseringen begyndte for mere end 100 år siden. Derfor indgår målingerne fra Indlandsisen og Antarktis som et væsentligt element i dagens klimadebat.

Hvad iskernerne indeholder

Nedbøren i Grønland er den reneste på den nordlige halvkugle. Det indre af Indlandsisen ligger langt fra både naturlige og menneskelige forureningskilder. Derfor fremstår en iskerne også som et klart isstykke med luftbobler i uden ret mange synlige lag. Ikke desto mindre kan vi med moderne måleteknik måle ikke blot de ovenfor omtalte isotoper og gammel luft, men også en stribe urenheder i isen, som findes i ganske små koncentrationer. Når man betænker, at man i

Sverige og Norge nu i mange år har haft et problem med, at svovlsyre fra Europas afbrænding af olie og kul har givet sur regn og dermed har medført forsurening af søerne, at man i svenske og norske moser har fundet aske fra islandske vulkanudbrud, og at man i Lapland har haft et alvorligt problem med radioaktivt nedfald fra Tjernobyl, så forstår man, at også sneen på Indlandsisen kan indeholde urenheder. I tabellen (modstående side) er angivet nogle af de ting, som vi for tiden undersøger i iskerner.

Det er en spændende detektivopgave at knytte indholdet af et givet stof i isen til en bestemt årsag. Først bliver stofferne tilført atmosfæren ved en kilde, dernæst sker der både en opblanding og kemiske reaktioner i luften. Så bliver stofferne med luften transporteret af vindsystemerne, og dernæst kommer de til at indgå i sky- og nedbørsprocesser for til sidst sammen med sneen at lande på Indlandsisen. Men selv om vi ikke har fuld klarhed over, hvorledes disse processer foregår, er det klart, at hvis vi i iskernerne observerer en stor forandring af isens sammensætning, så må det være, fordi noget væsentligt er forandret et eller andet sted i atmosfærens system.

Vulkanudbrud

Store eksplosive vulkanudbrud spreder svovlsyre, der breder sig i atmosfæren. I iskernen vil vi derfor måle is, som har langt større surhedsgrad end normalt på grund af svovlsyre fra vulkanudbrud (figur 7). Når vi har en iskerne, der er dateret ved optælling af skiftende lag af sommer- og vintersne bestemt ved ^{16}O - og ^{18}O -isotoperne, kan vi tidsbestemme vulkanudbruddene.



FIGUR 7. Synligt lag af aske fra et islandsk vulkanudbrud i 10.280 år gammel is. Asken blev først fundet i Saksunarvatn mose på Færøerne. Siden er asken fundet i sedimenter i Sverige, Storbritannien og Irland. Fundet af dette lag i Grønland »låser« iskerne til europæiske sedimenter i tid.

Stof	Hvor kommer det fra?	Hvad fortæller det om?
^{16}O -, ^{17}O - og ^{18}O -isotoper i isen	Havet via skyer til sne	Temperaturen i luften
Uopløselige mikropartikler (støv)	Vindblæst støv fra kontinenterne (hovedsagelig fra Asien), mikrometeoritter fra rummet, vulkansk aske og biologisk materiale	Vindaktiviteten, vindretninger, størrelsen af ørkenområder, solsystemets oprindelse, hvilke vulkaner der har været i udbrud, dyre- og planteliv
Salt	Havsalt fra havet	Storme over havet, udbredelse af havis, vindsystemer
Salpetersyre og ammonium	Biologiske processer ved varmere breddegrader, lynudladninger, industri og landbrug	Den biologiske aktivitet, skovbrande og forureningen fra bilkørsel, industri og landbrug
Svovlsyre, saltsyre, flussyre	Biologiske processer, vulkanudbrud, olie- og kulafbrænding	Den biologiske aktivitet, vulkanudbrud og moderne forurening
Calcium- og magnesiumkarbonater	Opløst kontinentalt støv	Vindaktivitet, vindretninger og ørkenområder
Drivhusgasserne kuldioxid og metan	Biologiske processer i havet og på kontinenterne, afbrænding af fossilt brændstof, moderne landbrug	Graden af biologisk aktivitet, vekselvirkningen mellem drivhusgasserne og klimaet
Kunstige gasser	Freon fra køleanlæg og industri	Graden af forurening med gasser, som ødelægger atmosfærens ozonlag
Tungmetaller, f.eks. bly	Blyudvinding og afbrænding, minedrift og industri	Graden af blyforurening, belastningen af det arktiske miljø fra tungmetaller
Kulstof-14, beryllium-10 og klor-36	Naturlige radioaktive stoffer	Kosmisk stråling, Solens stråleintensitet og Jordens magnetfelt; alder
Cæsium-137 og strontium-90	Menneskeskabte radioaktive stoffer	Atombombesprængninger og A-kraftværksulykker
DNA	Biologisk arvemateriale	Tidligere tiders plante- og dyreliv

Ved at undersøge, hvorledes syren fra et givet udbrud fordeler sig i årlagene, kan vi desuden bestemme, om udbruddet er sket langt fra Grønland, f.eks. i Indonesien eller i Middelhavet, tættere på, f.eks. i Alaska, eller helt tæt på, i Island.

Vesuvus udbrud i år 79 efter Kristi fødsel er det ældste udbrud, vi har historiske kilder om. Det var dette udbrud, som begravede de romerske byer Pompeji og Herculaneum uden for Napoli. Det forhold, at vi finder spor af udbruddet netop i det rigtige år, bekræfter, at vi tæller rigtigt i vores bestemmelser af årlag.

Tidspunktet for udbruddet, eller rettere eksplosionen af øen Santorini (Thera) i det Ægæiske Hav har stor arkæologisk betydning. Udbruddet skete i den minoiske periode, og både selve eksplosionen og den efterfølgende flodbølge ødelagde mange havnebyer i Middelhavet. Ved at datere arkæologiske fund bl.a. med kulstof 14-metoden mente arkæologerne, at udbruddet skete 1400-1500 år f.Kr. Der har dog været stor usikkerhed om tidspunktet. Iskernerne viser et lag med svovlsyre i år 1643 f.Kr. Imidlertid kan man ikke ud fra svovlsyren alene bestemme, om dette lag virkelig stammer fra Santorini. Svovlsyre er svovlsyre,

så det kunne komme fra en anden vulkan. Men ved at tage prøver ud fra iskernen i netop dette lag har man fundet mikroskopiske askepartikler. Og disse askepartiklers kemiske sammensætning har Santorinis kemiske »fingeraftryk«. Vi er derfor overbevist om, at Santorini i Grækenland eksploderede mellem år 1636 og år 1646 f.Kr. Vi regner nemlig med, at vi højst har talt 10 år forkert i denne dybde af iskernen.

Aldersbestemmelse dybt nede i isen

Efterhånden som lagene synker dybere ned i isen, bliver de tyndere, og samtidig diffunderer ^{16}O - og ^{18}O -isotoperne i isen så forskellene mellem sommer- og vintersne langsomt bliver udvisket. Vi kan derfor ikke tælle årlag med isotoper hele vejen ned. Det viser sig, at mange andre af de målte stoffer også har sæsonmæssige udsving, og de overtager rollen som årlagsindikatorer. Særligt isens indhold af uopløselige mikropartikler viser sig at være en god dateringsparameter. De store forårsstorme bringer nemlig store mængder støv ind over isen, således at vi kan se forhøjede koncentrationer af uopløselige mikropartikler i forårs-

gene i iskernerne. Nye metoder, hvor vi løbende smelter og måler stænger af iskernerne fra top til bund, gør, at vi kan måle støvet og andre urenheder med høj opløsning og genkende årlag, der kun er 1 cm tykke. Vi kan derfor måle årlag mere end 100.000 år tilbage i tiden, og det giver helt fantastiske muligheder for at forstå vores klima tilbage i tiden.

Hvad isen kan fortælle om klimahistorien

I Jordens 4,5 milliarder års levetid har der været perioder, hvor der har været store ismasser på kontinenterne, og der har været perioder, hvor der stort set ikke har været is. For ca. 270 millioner år siden, i den geologiske periode Perm, var der store iskapper på flere kontinenter. Aflejringerne fra denne periode giver os et billede af et tørt klima med udstrakte ørkener og med lav vandstand i oceanerne. Den lave vandstand skyldes, at vand fra oceanerne har været låst fast i store iskapper på kontinenterne. Ligeledes findes der aflejringer, som viser, at bræer har skuret hen over kontinenterne. Derefter er ismasserne gradvist forsvundet, og i perioderne Jura, Kridt og begyndelsen af Tertiær var der næsten ingen is.

Vi mener, at dette skyldes, at Jordens kontinenter bevæger sig (se nærmere s. 39 f i dette festskrift). Over perioder på mange millioner år glider kontinenterne rundt mellem hinanden på Jordens overflade. Når kontinenterne kommer til at ligge tæt ved polerne, er der mulighed for, at der kan opstå store ismasser. For ca. 170 millioner år siden var alle kontinenter samlet i to superkontinenter: Gondwanaland og Laurasion. Laurasion bestod af Nordamerika og Europa/Asien. Gondwanaland bestod af Sydamerika, Afrika, Antarktis, Indien og Australien (figur 8). Atlanterhavet eksisterede ikke. I denne periode var der ikke ismasser på Jorden i nævneværdig grad. Det var i denne tid, dinosaurerne huserede.

De to superkontinenter brød derefter op i de kontinenter, vi kender i dag. Det var en langsom og gradvis proces. Atlanterhavet åbnede sig og adskilte dels



FIGUR 8. Skitse af superkontinentet Gondwanaland for 160 mill. år siden. Kontinentet bestod af Sydamerika, Afrika, Indien, Antarktis og Australien.

Nordamerika og Europa/Asien, dels Sydamerika og Afrika. Samtidig rykkede Afrika, Indien, Sydamerika og Australien nordpå og efterlod Antarktis alene på Sydpolen.

I forbindelse med dinosaurernes uddøen for 65 millioner år siden observerer vi ikke nogen nævneværdig klimaændring. Klimaet forblev varmt, f.eks. beholdt Skandinavien sit tropiske klima.

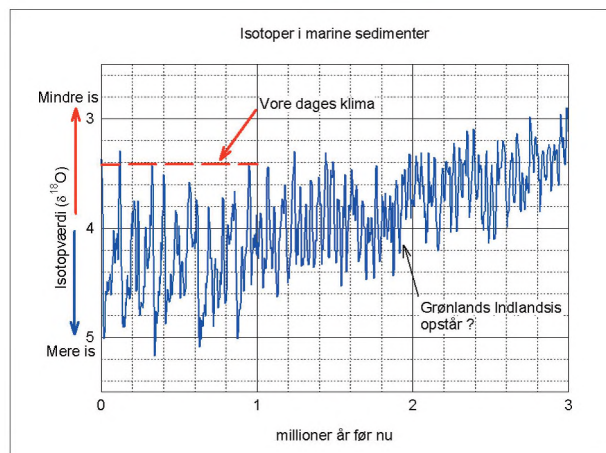
Men for 40 millioner år siden indtraf der en afkøling. Vi mener, at dette skyldes, at havet omkring Antarktis nu var blevet så stort, at havstrømmene kunne gå rundt om kontinentet. Dermed forhindrede varmt ækvatorvand i at nå Antarktis. Der blev så at sige »lukket for varmen«. Antarktis blev kold, og iskappen opstod. Dette førte til en global afkøling, bl.a. fordi det hvide, snedækkede Antarktis reflekterer Solens varmestråling tilbage til rummet i stedet for at opsuge den, hvilket giver Jorden et varmeunderskud.

Kontinenterne har fortsat deres vandring: Atlanterhavet bliver bredere, og havet omkring Antarktis gør det samme. Indien rejser alene tværs gennem det Indiske Ocean for til slut at støde sammen med Asien. Himalayabjergene er »bulerne« fra dette sammenstød. Undervejs har Indien efterladt Madagaskar ved den afrikanske kyst. Endnu er der dog ikke opstået ismasser på den nordlige halvkugle.

Nu nærmer vi os vor tid, og mængden af vidnesbyrd om klimaet og deres detaljerighed vokser. Vi mener, at der opstod iskapper på den nordlige halvkugle, bl.a. Indlandsisen på Grønland, for ca. 2 millioner år siden. Dermed når vi ind i den periode, som geologer kalder Kvartær.

Af figur 9 fremgår det, at der i de sidste 1 million år har været 10 istider af 100.000 års varighed, og at der mellem hver istid har været en mellemistid på ca. 10.000 år. Istid er således statistisk set det normale: Der har været istid i 90% af tiden, afbrudt af kortere mellemistider. Vi er i en sådan mellemistid i dag, og vores varmeperiode har været 11.500 år. Derfor er det nærliggende at spørge sig, hvornår den næste istid kommer.

Variationerne mellem istider og mellemistider skyldes Jordens banebevægelse om Solen. Teorien om, at Jordens bane påvirker klimaet, hedder Milankowich-teorien, og den tager udgangspunkt i, at vort solsystem består af mange legemer, der er i omløb om Solen. Planeterne og deres måner trækker alle i hinanden med tyngdekraft, og det medfører, at planeternes baner om Solen er langt fra cirkulære. Størsteparten af landområder på Jorden befinder sig på den nordlige halvkugle, og Jordens istider og mellemistider er i høj



FIGUR 9. Isotopværdier i marine sedimenter angiver mængden af is på kontinenterne. Når mængden har været stor (kurveværdierne nedad på grafen), har der været istid. Man ser, at de sidste 11.000 års lille ismængde er en sjælden situation i de sidste 1 million år. Kurven er sammensat af flere havbundskerner, bl.a. ODP 677 (Shackleton & Hall 1990).

grad bestemt af temperaturen på den nordlige halvkugle om sommeren.

Planeternes bevægelser i Solsystemet forløber som et urværk. Det er derfor muligt at beregne Jordens bane både tilbage og frem i tiden. En sammenligning af beregningerne tilbage i tiden med målingerne fra både iskerner og dybhavssedimentkerner, der kan række mange millioner år tilbage i tiden, viser, at vores forståelse af istidernes kommen og gåen i store træk kan forklares ved Milankowich-teorien.

Der er imidlertid mange komplicerede aspekter. Der er et ganske betydeligt samspil mellem klima, istider og mængden af drivhusgasser i atmosfæren. Sammen med mange europæiske nationer har vi gennem programmet EPICA udført en iskerneboring ved Dome C i Antarktis. Denne iskerne rummer sne fra mindst ni istider og når 800.000 år tilbage i tiden. Drivhusgasser fra denne iskerne viser, at der er et

stærkt samspil mellem temperaturen og koncentrationerne af drivhusgasserne kuldioxid, metan og lattergas i fortidens atmosfære. Når Jorden opvarmes fra en istid til en mellemistid, stiger indholdet af drivgasser også, fordi havet opvarmes og mængden af grønne og våde områder på Jorden vokser. Milankowich-beregningerne viser, at vores nuværende »varmepæriode« vil blive meget lang, således at den næste istid ikke vil komme før om 10.000 år. Med den nuværende menneskeskabte forøgelse af atmosfærens indhold af drivhusgasser og den deraf følgende globale opvarmning er al snak om en kommende istid forstummet, og den aktuelle debat omhandler, hvor hurtigt og hvor meget Jorden vil opvarmes i fremtiden.

De grønlandske iskerner dækker klimaudviklingen i de sidste 125.000 år, og for den periode har de en enestående rolle for vores forståelse af Jordens klimasystem.

Feltarbejdet – boring og analyse af iskerner

Fra Indlandsisen er der i dag udboret fem iskerner, som er mere end 1 km lange. Borestederne er vist i tabellen nedenfor.

Arbejdet i felten med boring af iskerner er en nødvendig forudsætning for vore studier af iskernerne. Med den nuværende boreteknik tager det tre år at udbore en 3 km iskerne. På grund af de barske vejrforhold på Indlandsisen (gennemsnitstemperaturen ved NorthGRIP er -31°C), den tynde luft og det lange arktiske vintermørke er det ikke praktisk (og meget dyrt) at bore om vinteren, hvor temperaturen kan nå ned på -70°C . Feltarbejdet foregår derfor typisk fra midt i maj til midt i august, og den korte sæson er medvirkende til, at det tager tre år at færdiggøre en boring - hvis alt går vel.

At bore iskerner er faktisk noget af en kunst. Boret

Borested	Position	Højde over havet	Årstal for boring	Deltagere
Camp Century	77 N 61 V	1885 m	1964-1966	U.S. Army
Dye 3	65 N 44 V	2480 m	1979-1981	USA, Schweiz og Danmark
GRIP	72,5 N 37,5 V	3232 m	1989-1992	Danmark, Schweiz, Frankrig, Tyskland, Storbritannien, Italien, Belgien og EU
GISP 2	72,5 N 38,5 V	3200 m	1989-1993	USA
NorthGRIP	75 N 42 V	2918 m	1996-2004	Danmark, Tyskland, Sverige, Japan, USA, Frankrig, Schweiz, Island og Belgien
NEEM	77,5 N 51 V	2538 m	2007-2012	Danmark, USA, Japan, Sverige, Tyskland, Frankrig, Holland, Belgien, Kina, Sydkorea, Schweiz, Island, England og Canada



FIGUR 10. Hendes Majestæt Dronning Margrethe II og Hans Kongelige Højhed Prins Henrik får isboret fremvist af chefborer Steffen Bo Hansen ved NEEM i 2011. Foto: NEEM arkiv.

må ikke knuse noget af iskernen, idet et knust stykke vil repræsentere flere år af klimahistorien, som så kommer til at mangle. Derfor bliver de vigtigste dele af boret, f.eks. borehovedet, konstrueret med en præcision på under $1/10$ mm. For øjeblikket besidder Danmark, Japan, Rusland, Frankrig, Tyskland og Australien den nødvendige teknologi. Dog er de bor, som Frankrig, Tyskland og Australien anvender, stort set kopier af det danske.

I det følgende vil vi beskrive, hvorledes feltarbejdet forløb under den seneste boring ved NEEM. Selve boringen varede tre år fra 2008 til 2010. I 2011 og 2012 har vi fokuseret på at bore ned i klipperne under isen for at lære mere om, hvordan is flyder over klippeunderlaget. Vi har fået flere iskerner op med kraftige lag af bundsedimenter, der er blevet skrabet op fra bunden og er indlejret i isen.

Selve NEEM-lejren består af en permanent bygning, som indeholder vandforsyning, køkken, opholdsstue, radiatorum, kontor og sovesal. Bygningen, der er lavet af træ og gummi, er isoleret og kuppelformet (som en igloo) for at holde snedriver borte fra ydersiden. Her er alle fornødenheder for at gøre livet behageligt: Varme, rindende vand, komfur, opvaskemaskine, vaske-

maskine og bad. Alle andre bygninger, dvs. garage, lager, værksted og indkvartering er telte, som kan pakkes ned, når projektet er slut. I 2011 lykkedes det os at montere ski under hovedbygningen, således at vi har forberedt den til en fremtidig flytning til en kommende ny borelejr (figur 11). Alt det øvrige udstyr og telte vil i 2012 blive pakket sammen på store slæder, således at det også er klart til at blive trukket hen til en ny lejr. Når vi forlader lejren endeligt, vil vi kun efterlade et borerør, der vil stikke op over sneens overflade. Vi vil med jævne mellemrum måle, hvorledes borehullet ændrer form med isens bevægelse for at lære, hvordan Indlandsisen flyder. Lejren vil i øvrigt blive tømt for miljøskadelig kemi og genstande.

Lige uden for lejren er der anlagt en 4 km lang og 100 m bred landingsbane til de amerikanske Herculesfly på ski, som bringer folk og forsyninger til lejren. Sommeren igennem vedligeholdes landingsbanen med bæltebiler med en særlig snehøvl, som fjerner snedriver og gør sneen fast og hård. Selve iskerneboringen og undersøgelserne foregår i store udgravede snehuler under overfladen. Snehulerne er forbundet med tunneler. På denne måde kan alt arbejde med iskernerne foregå uafhængigt af vejret og ved en konstant temperatur på ca. -25° .



FIGUR 11. NEEM lejrens hovedbygning blev sat på ski i 2011, således at den kunne trækkes til en ny kommende is-lejr. Foto: NEEM arkiv.

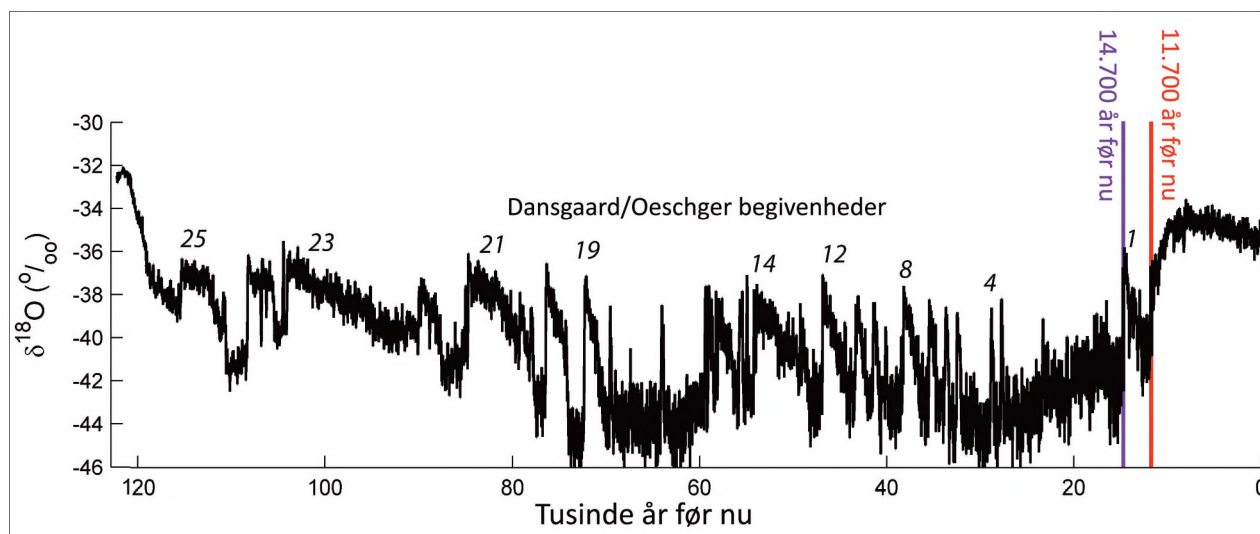
Hverdagen i lejren er enkel: Arbejde, spise og sove. Typisk arbejder man 10-12 timer om dagen. Der serveres tre retter mad to gange om dagen, og man skal sørge for et stort kalorie- og væskeindtag for at kunne fungere i den kolde, tørre og tynde luft. Når boringen går godt, bores der 24 timer i døgnet på treholdsskift. Om lørdagen indtræffer en begivenhed, som alle i lejren ser frem til. Klokkerne 16 stopper alt arbejde. Alle tager brusebad og tager pænt tøj på, dvs. herrerne ifører sig skorte og slips og damerne kjole eller nederdel. Klokkerne 19 er der fest. En gruppe frivillige har lavet festmiddag (kokken har fri), og efter middagen er der dans og musik. Det er en fantastisk aften af rigtigt multikulturelt tilsnit. Der bliver sunget, råbt og diskuteret på otte forskellige sprog, og mange deltagere har fået sig venner for livet i adskillige lande. Lørdag aften er så populær, at deltagerne har opfundet et ordsprog: »Ved NEEM har ugen bare to dage, hverdag og lørdag«. Klokkerne 10 søndag morgen begynder arbejdet igen.

I borehallen, som jo er en snehule, står boretårnet og det spil, der hejser boret op og ned. Boret er 11 meter langt og hænger i et stålkabel med el-ledninger. Boret fjernstyres gennem kablet fra en computer på over-

fladen. Under boringen fyldes borerøret med iskerne. Borets tilstand kan hele tiden aflæses på computeren ved overfladen. Når boret er fyldt, hejses det op i boretårnet. Boretårnet med boret lægges så ned i vandret stilling, hvorefter borerøret med iskernen kan tages ud og lægges på et bord. Iskernen kan nu stødes ud og bliver derefter båret ind i laboratorierne til analyse. Boret renses og efterses, og dernæst rejses boretårnet atter til lodret for en ny borerunde. Når man er dybt nede, kan en borerunde vare op til to timer. Det tager kun ca. 15 minutter at bore, men det tager ca. 45 minutter at sænke boret tre km ned og 45 minutter at hejse det op igen.

Når man borer i is til stor dybde, er det nødvendigt at fylde hullet op med en væske af stort set samme vægt som isen. Væsken gør det muligt at holde det samme tryk i borehullet som i den omgivende is. Hvis væsken ikke var der, ville isen simpelthen flyde sammen, lukke borehullet og knuse boret. Den miljøvenlige borevæske er baseret på vegetabiliske olier.

Inde i laboratorierne arbejder 10-15 mand. Her registreres iskernen. Den mærkes op og underkastes forskellige analyser. Samtidig skæres den op på langs, så der kan udtages prøver. I forbindelse med NEEM-projektet blev der udtaget 50.000 isotoprøver. Alle



FIGUR 12. Isotopværdierne fra NorthGRIP-iskernen fra de sidste 123.000 år. Istidens kulde (lave isotopværdier) ses tydeligt. Forskellen mellem vore dages klima og sidste istids maksimum (for 25.000 år siden) er i gennemsnit 26°C. Tallene angiver numrene på de mange hurtige klimaskift under istiden, de såkaldte Dansgaard/Oeschger-begivenheder, som vi har registreret. To bratte klimaskift er markeret.

prøver blev pakket i nummererede poser. Der blev skåret 20.000 prøver til kemiske analyser og drivhusgasanalyser, og stænger fra hele iskernen blev smeltet mm for mm til kemisk og isotopisk analyse i et medbragt laboratorium. For første gang nogensinde blev metanindholdet i den gamle luft i boblerne også målt i felten ved brug af nye, laserbaserede instrumenter. Resten af iskernen blev skåret op i 55 cm lange stykker, pakket og sendt til frysehuset ved Københavns Universitet i isolerede kasser. Disse kasser ligger i dag sammen med andre iskerner i iskernearkivet i København.

Det er klart, at en sådan aktivitet indebærer, at en iskerneboring er en større operation. 7-10 gange hver sæson flyves der forsyninger ind med Herkulesfly. Hvert fly kan medbringe 15 ton passagerer og gods. Der skal organiseres og transporteres mad, brændstof, tøj, udstyr, reservedele, personale og iskerner.

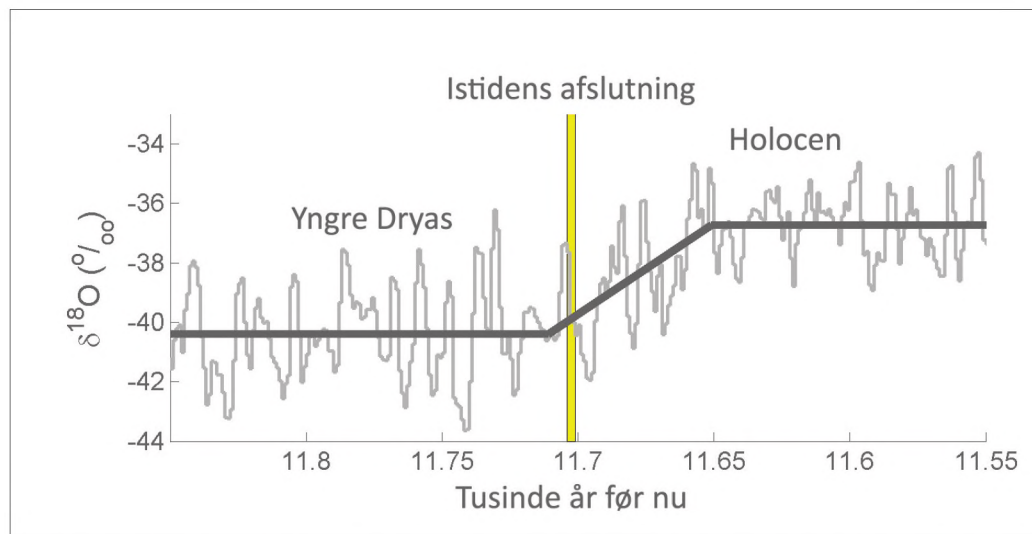
Klimahistorien fra iskerne

Iskerne fra Grønland fortæller en meget dramatisk historie. I figur 12 ses isotopforholdene i NorthGRIP-iskernen over de sidste 123.000 år. Man ser istidens ophør for 11.700 år siden som et brat skift i isotopværdierne. Imidlertid kan man også se en række meget bratte klimaforandringer i løbet af den sidste istid. Der optræder perioder af få tusind års varighed, hvor klimaet tydeligvis har været mildere end den rigtigt kolde istid. Vi har registreret 25 af disse såkaldte interstadialer i istiden. Inden for isforskningen bliver disse

kaldt Dansgaard/Oeschger-begivenheder, da iskerne fra Grønland var de første, der afslørede dem. Fundet af disse begivenheder kom som et chok for klimaforskerne. Deres eksistens beviste, at klimasystemet under istiden var ganske ustabil, og at klimaforandringer kan opstå med en hidtil ukendt pludselighed. Efter deres opdagelse opstod straks spørgsmålet om, hvorvidt en grønlandsk iskerne repræsenterer den globale klimaudvikling. Det er trods alt bare et lille punkt på kloden. Men siden deres opdagelse har man fundet tegn på denne variation i havsedimenter, landsedimenter og drypsten, så der er tale om et globalt fænomen.

Mekanismen bag Dansgaard/Oeschger-begivenhederne er en anden end den, der styrer istiderne, og som Milankowich har forklaret. De forekommer nemlig med en tidsperiode, der er for kort, og som ikke er genkendelig i Milankowich-teorien. Det blev ganske klart, da det viste sig, at mens Antarktis og Grønland glider ind i og ud af istiderne på samme tid, så optræder D/O-begivenhederne ikke samtidigt ved begge poler.

Det har vist sig, at når Grønland var »kold«, varmedes Antarktis op, og når Grønland blev »varm«, afkøledes Antarktis. D/O-begivenhederne er altså et globalt fænomen, men det har forskelligt udtryk forskellige steder på Jorden. Man taler på engelsk om 'the bi-polar see-saw', den bipolare vippe. Det lader til, at når Grønland er i de varme faser i løbet af istiden, vil havstrømmene i Atlanterhavet, heriblandt Golfstrømmen, føre varme fra den sydlige til den



FIGUR 13. Isotopværdierne fra NorthGRIP-iskernen fra omkring istidens afslutning. Istiden sluttede endeligt for 11.700 år siden, og opvarmningen skete på 50 år.

nordlige halvkugle. Norden »stjæler« varme fra syd. Men i de kolde faser bremses havstrømmene – måske er de helt stoppet – og varmen bliver i syd, således at der sker en opvarmning sydpå og en afkøling nordpå.

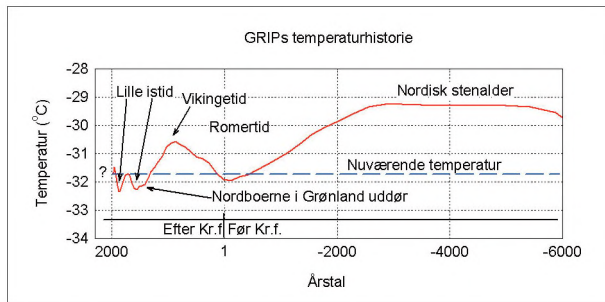
Golfstrømmen har i dag afgørende betydning for vort klima, især i Norden. Verdens fire nordligste hovedstæder er Reykjavik, Oslo, Stockholm og Helsingfors. Der lever isbjørne i Canada på samme breddegrad som København. Under istiden gik Golfstrømmen ikke mod nordøst, men mod øst og ramte således Afrikas vestkyst. Havisen strakte sig tværs over Atlanten fra New York til Lissabon. Man mener, at havstrømmens styrke hænger nøje sammen med transporten af salt, og at nedsynkningen af varmt og salt vand højt mod nord er vigtig for at opretholde havstrømmen. Under den kolde istid har de store iskapler afgivet store mængder af isbjerge, der har gjort overfladevandet mere fersk. Dette har bremset – måske endda helt stoppet – havstrømmene og har givet anledning til de meget kolde perioder mellem interstadialerne, kaldet stadialer. Efter en periode med ekstremt kolde forhold mod nord sker der meget pludselige opvarmninger på 10-16°C i det nordlige, og klimaet hopper op i de varmere interstadiale forhold. Havstrømmene starter igen, og der går et par tusinde år, før klimaet atter dykker ned i de kolde stadiale forhold. De tidligt meget højtopløste klimaserier fra de grønlandske iskerner viser, at de meget pludselige opvarmninger sker på ganske få årtier.

I forbindelse med studiet af D/O-begivenhederne har iskernerne vist, at under den nordlige halvkugles

opvarmninger og afkølinger vokser og aftager atmosfærens indhold af drivhusgassen metan. I disse naturlige klimaudviklinger er ændringerne af drivhusgasindholdet i atmosfæren altså en konsekvens af klimaændringerne – og ikke omvendt. De bratte stigninger af metan samtidig med opvarmningen viser klart, at D/O-begivenhederne er et fænomen, der involverer en stor del af den nordlige halvkugle, idet en metanstigning forudsætter varmere forhold i de områder, hvor der er vegetation og sump.

For at komme tættere på en forståelse af de bratte klimaændringer er det nødvendigt at studere dynamikken, dvs. at undersøge, hvor hurtigt ændringer kan forekomme. I figur 13 er istidens sidste del vist. I figuren er der sat navne på perioder, som også er fundet i sedimenter i hele det nordatlantiske område. Istiden sluttede for 11.700 år siden. I forhold til dens voldsomme og bratte klimaskift, som omfatter ændringer i gennemsnitstemperaturen i Europa og Nordamerika på 10-20°C, har vores nuværende mellemistid været præget af ro. I den forbindelse er det tankevækkende, at hele den menneskelige civilisations historie, dvs. alt, hvad der har med agerbrug og bysamfund at gøre, er foregået i de sidste 8000 år. Derfor har vi en kollektiv hukommelse, der siger os, at sådan, som klimaet er nu, har det altid været.

Figur 14 viser temperaturen i vores nuværende mellemistid. Vi er for øjeblikket i gang med at studere iskernerne fra denne tid ganske nøje. Gennem målinger af isens kemiske sammensætning er vi i stand til at studere hvert enkelt år under istidens afslutning. Der



FIGUR 14. Temperaturerne ved GRIP i Grønland i de sidste 8000 år, som isen »husker« dem (Dahl-Jensen et al. 1998). Kurven er fremkommet ved at rekonstruere temperaturhistorien ud fra temperaturmålinger i GRIP-borehullet efter iskerneboringen.

er tegn på, at den atmosfæriske cirkulation har skiftet tilstand fra det ene år til det næste, således at gennemsnitstemperaturen i Grønland og Europa er steget med 10-15° inden for 50 år, godt og vel en menneskealder. Meget tyder på, at alle D/O-begivenhederne er opstået med samme fart. Dette er vigtig viden for vor forståelse af klimasystemets dynamik.

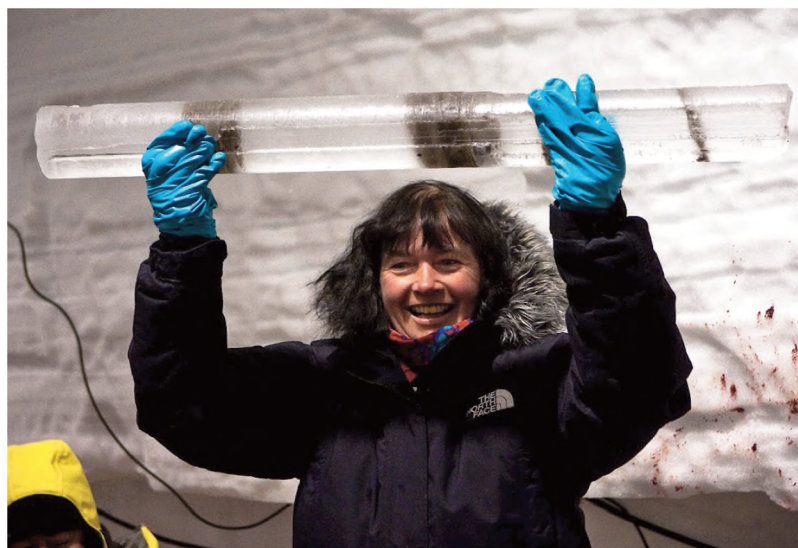
Klimaet i vores nuværende mellemistid

Klimaet i de sidste 11.700 år har været varmt og ikke nær så dramatisk, som det var under istiden. Perioden fra 8000 til 5000 år før nu var den varmeste tid, kaldet det holocene klimatiske optimum. Temperaturen i den periode menes at være sammenlignelig med den, vi nu har opnået med den globale opvarmning. Hvis man opsummerer temperaturens historie gennem de sidste 8000 år, må man konstatere, at klimaet i gen-

nemsnit bestandigt er blevet køligere – når man ser bort fra små variationer. Den koldeste periode siden istiden lå fra år 1600 til år 1875, den lille istid, som vi kalder den. Dette er et vigtigt perspektiv at holde sig for øje i vore dages debat om globale klimaændringer. De moderne meteorologiske observationer begyndte nemlig netop i 1875. De tidlige fotografier, malerier og observationer af gletschere stammer altså fra den kuldeperiode, hvor gletscherne havde den største udstrækning siden istiden. Derfor er det forkert at antage, at gletschernes størrelse i 1800-tallet var den »normale«.

Bunden er nået

I løbet af sommeren 2010 borede vi ned til bunden ved NEEM. De sidste iskerner, vi fik op, indeholdt kraftige lag med en meget høj koncentration af sort materiale fra bunden under isen. Det er en stor og meget glad dag i en islejr, når bunden er nået. Det er kulminationen af mange års arbejde for hundredvis af forskere, ph.d.-studerende og teknikere. Figur 15 viser en iskerne med meget bundmateriale indlejret. Disse dybe iskerner indeholder ikke længere is, der er aflejret stratigrafisk, lagvist, fra overfladen, men nok nærmere is og genfrosset vand, der er skrabet op fra bunden. Der er en overvældende interesse for denne is, fordi den indeholder biologisk materiale. Vil vi finde biologisk materiale fra før isen dækkede dette område af Grønland? Og hvornår mon det var – for 100.000 eller 1.000.000 år siden? Vi glæder os meget til at besvare disse spørgsmål i de kommende år.



FIGUR 15. Bunden er nået i løbet af sommeren 2010 ved NEEM. Dorte Dahl-Jensen holder den sidste iskerne med synlige lag med bundsedimenter over hovedet. Foto: NEEM arkiv.

Litteraturliste

- Dahl-Jensen D., K. Mosegaard, *et al.*: »Past temperatures directly from the Greenland ice sheet«. *Science* 282: 268-271 (1998).
- Dahl-Jensen D., *et al.*: The Greenland Ice Sheet in a Changing Climate; Snow Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) (2012).
- Dansgaard, W., S. J. Johnsen, *et al.*: »Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record«. *Nature* 364(6434): 218-220 (1993).
- Dansgaard, W.: *GRØNLAND - i istid og nutid*. København: Forlaget Rhodos. 259 pp. (2000).
- Jakobsen, B.H. *et al.* (eds): *Topografisk Atlas Grønland. Atlas over Danmark Serie II 6: 112-115*. København: Det Kongelige Danske Geografiske Selskab / Kort & Matrikelstyrelsen (2000).
- NorthGRIP Community: »High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period«. *Nature*. 431: 147-151 (2004).
- Shackleton, N.J. & M.A. Hall: »Stable isotope history of the Pleistocene at ODP Site 677«. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results 111* (edited by K.Becker & H. Sakai), College Station, Texas (Ocean Drilling Program): 296-316 (1990).
- Steffensen, J.P., *et al.*: »High-resolution Greenland Ice Core data show abrupt climate change happens in few years«. *Science* 321: 680-684 (2008).
- Svensson, A., *et al.*: »A 60 000 year Greenland stratigraphic ice core chronology«. *Climate of the Past* 4, 1: 47-57 (2008).
- Svensson, *et al.*: »Annual layering in the NGRIP ice core during the Eemian«. *Climate of the Past* 7: 1427-1437 (2011).

Internetressourcer

Iskerne hjemmesiden i København: www.isogklima.dk og NEEM-hjemmesiden www.NEEM.dk har mange nyttige links til iskernes verden.