

# DEN DYNAMISKE ISTID

Svante Björck

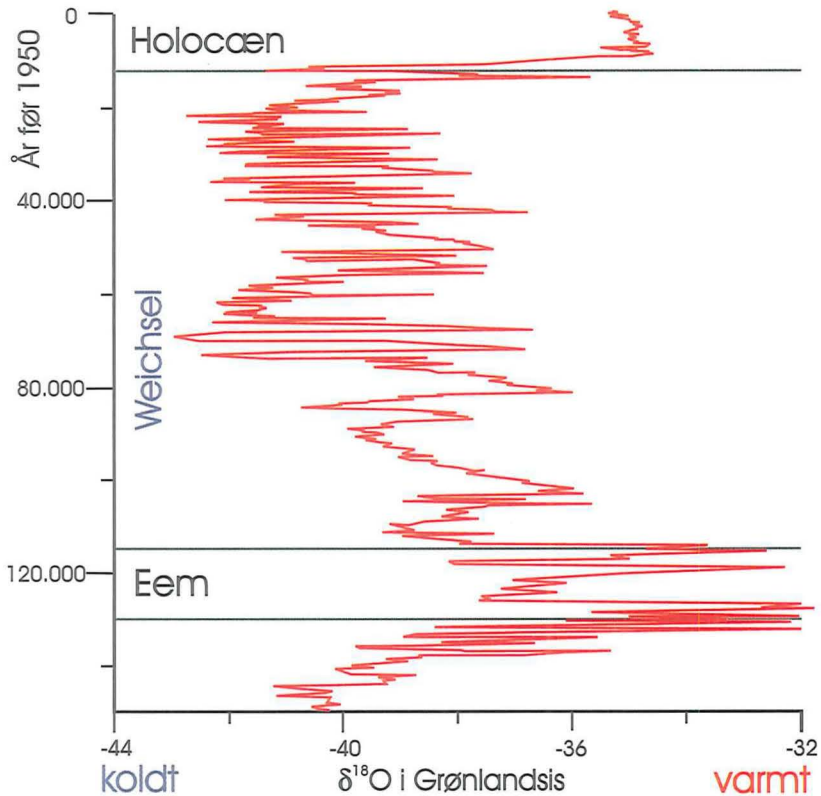
## Kernenyt fra 90'erne

1990'ernes palæoklimatiske forskning har vist, at istidens klima var betydelig mere dynamisk og dramatisk, end vi forestillede os (figur 1). Vi har længe vidst, at der har været flere istider (glaciale) adskilt af varme mellemistider (interglaciale). Sidste mellemistid (Eem tiden) varede fra 130.000 til 115.000 år før nu, og sidste istid, Weichsel, varede fra 115.000 til ca. 11.500 år før nu. Den havde sit maksimum kort efter 20.000 år før nu, og der var da bundet så meget vand i ismasserne, at havets overflade lå 120 meter lavere end det gør i dag.

Under istiderne optrådte der kortvarige varmetider (interstadialer). I løbet af sidste istid indtraf der mellem 70.000 og 11.500 år før nu omkring 25 kortvarige klimaforbedringer; nogle varede kun få hundrede år, andre tusinder af år. Mindst 6 af disse interstadialer var så intense, at bræerne og isdækkerne omkring Nordatlanten sendte armadaer af isbjerge ud i havet. Når isbjergene smeltede, fordi de drev sydpå, aflejredes det medførte materiale som gruslag på havbunden.

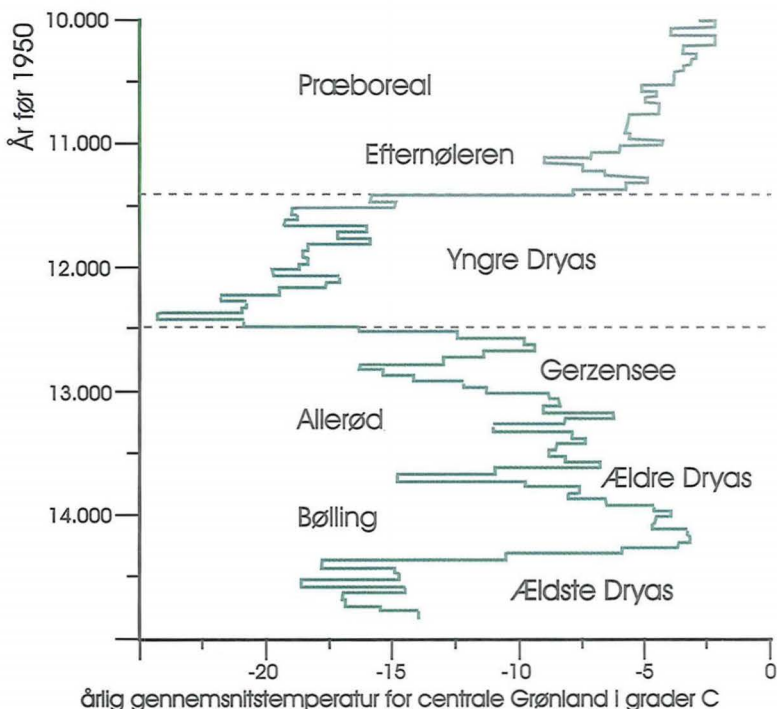
I 1990'erne er det lykkedes at fremskaffe mere præcise oplysninger om, hvor hurtigt klimaet i virkeligheden ændrede sig, og om disse ændringer indtraf samtidigt eller tidsforskudt fra region til region. Denne information er udtaget af forskellige typer borekerner: iskerner hentet op fra den grønlandske indlandsis, sedimentkerner fra de kvartære aflejringer på bunden af Nordatlanten og kerner fra moser og ferskvandssøer, samt 'trækerner' boret ud af gamle og ældgamle træstammer.

I alle disse kerner optræder der en form for lagdeling, og ændringer i disse 'lag' er et udtryk for klimaforandringerne; den forskellige tykkelse af isens årslag, sedimenternes beskaffenhed, f.eks. gruslag i havaflejringer, sedimenternes indhold af mikro- og makrofossiler af planter og dyr, den skiftende tykkelse af årringene i træerne, samt målinger af de stabile isotoper i disse materialer.



Figur 1: Den grønlandske GRIP iskernes indhold af den tunge iltisotop  $^{18}\text{O}$  igennem de sidste 160.000 år, d.v.s. fra slutningen af næstsidste istid, Eem mellemistiden, sidste istid (Weichsel) og den nuværende mellemistid (Holocæn). De mest negative  $^{18}\text{O}$ -værdier angiver det koldeste klima. Bemærk de store og omdiskuterede variationer i Eem.

I denne artikel fortælles om dateringen af flere af disse klimaudsving, og der opstilles en dynamisk model til at forklare, hvorledes en forholdsvis jævn stigning i solindstrålingen mellem 15.000 og 11.000 år før nu gav sig udslag i voldsomme klimasvingninger i stedet for at fremkalde en gradvis afsmeltning af isdækkerne (figur 2).



Figur 2: Beregnede temperaturer (årgennemsnit ved havets overflade) for det centrale Grønland mellem 15.000 og 11.000 år før nutid (1950). Tidsskalaen er den ny reviderede, omtalt i artiklen. Navne for varmetider står til venstre for kurven, mens navne for kuldebølgerne står til højre.

## Vi starter med dateringerne

### Fra omtrentlige til mere præcise aldre

Nu da iskernestudier har afsløret, at store og verdensomspændende klimaændringer kan ske i løbet af nogle få tital år, er det ikke længere nok at kunne opgive aldre som 'så og så mange årtusinder før nu', som ovenfor. Vi må datere så præcist, at vi kan skelne mellem årtier. Ellers bliver vi ikke i stand til at udrede, hvordan ændringerne er forløbet, og hvordan de gav sig udtryk i de forskellige miljøer: i indlandsisen, i

havet og i søer på fastlandet. Uden detaljeret viden herom kan vi ikke finde frem til de processer og mekanismer, de såkaldte tilbagekoblingsmekanismer, der forårsagede ændringerne. Og det er dét, der er palæoklimaforskernes job.

Kravet om præcise tidsbestemmelser er dog ikke altid lige let at opfylde, eftersom der må benyttes forskellige dateringsmetoder til at datere de forskellige typer kerneprøver. I iskerner tælles isår og i trækerner årringe, og det giver præcise kalenderårs-aldre, forudsat at der tælles rigtigt, at alle årslag i iskernerne er bevaret, og at der ikke er 'huller' i årringekronologien.

Sedimentkernernes lag, organiske materiale og fossiler dateres derimod ved hjælp af radiometriske aldersbestemmelser. Benyttes f.eks. kulstof-14 metoden hertil, angives aldrene som så og så mange kulstof-14 år. Som vi skal se, svarer kulstof-14 aldre dog ikke altid præcis til kalenderårs-aldre.

Vi vælger først at se på de store klimaændringer, som indtraf omkring slutningen af sidste istid i landene på begge sider af Nordatlanten. Valget af denne region skyldes ikke blot det traditionelt høje forskningsniveau i disse lande, men også at Nordatlantens varme og kolde havstrømme har meget stor indflydelse på hele Jordens klima.

På denne baggrund er det naturligt at spørge, om den generelle klimaforbedring, som indtraf for 15.000-11.000 år siden og gjorde en ende på sidste istid, skyldtes variationer i den varme, som solindstrålingen tilfører Jorden, eller i mængden af drivhusgasser i atmosfæren, eller om den skyldtes ændringer i havstrømmene i Nordatlanten ?

### **Brok i kalenderen!**

Tilbage til den grønlandske indlandsis. Ved at tælle sommer- og vinterlag har iskerneforskere kunnet vise, at klimaet kunne skifte i løbet af kun to årtier. Klimaændringen, som kan aflæses i det indbyrdes forhold mellem iltisotoperne  $^{16}\text{O}$  og  $^{18}\text{O}$  i luftboblerne i isen, medførte, at den gennemsnitlige årstemperatur i Grønland steg 15-20° C for ca. 11.500 år siden (figur 2). I Europa regner vi med, at den tilsvarende temperaturstigning var på 7-10° C. Denne hurtige



klimaforbedring, som indledte den nuværende mellemistid (Holocæn), svarer i figur 2 til grænsen mellem Yngre Dryas og Præboreal tid.

Iskernekronologien benytter isår (=kalenderår) som tidsenhed, og denne kronologi kan ikke direkte jævnføres med kulstof-14 kronologien. Iskernernes kalenderår 11.500 (før nu) var ikke samtidigt med kulstof-14 år 11.500 (før nu). Det hænger sammen med, at atmosfærens indhold af kulstof-14, og dermed også kulstof-14 aktiviteten ( $\Delta^{14}\text{C}$ ), ikke altid har været konstant.

Der nydannes hele tiden radioaktivt kulstof-14 ( $^{14}\text{C}$ ), når kosmiske partikler rammer kvælstof-14 atomer ( $^{14}\text{N}$ ) i den ydre atmosfære. Men styrken af den kosmiske stråling har varieret, og oceanerne har ikke altid optaget lige meget af det nydannede kulstof-14.

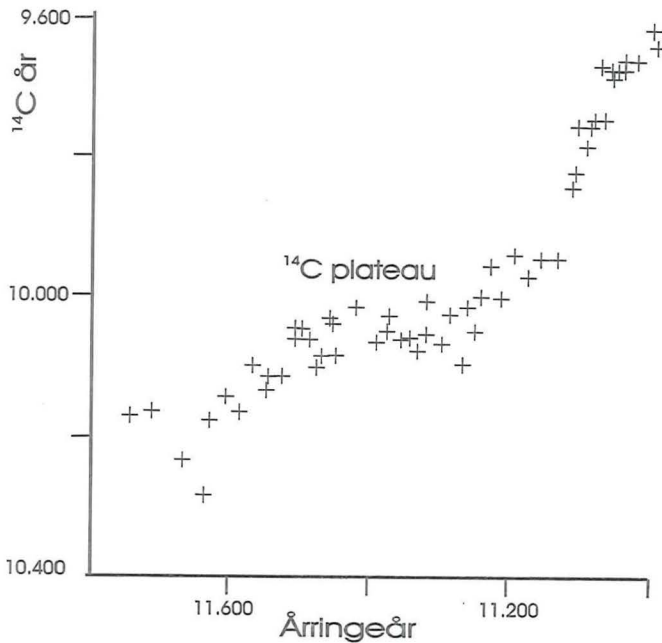
Ifølge resultaterne fra GRIP og GISP2 iskerneboringerne i Grønland, som udførtes 1990-1992 af henholdsvis en europæisk og en amerikansk forskergruppe, indtraf der en stor klimaforandring for 11.600-11.510 isår siden. (Bemærk, at isår, ligesom kulstof-14 år, tælles baglæns, og at jeg refererer fra nutidsår 1950, hvor den første kulstof-14 datering udførtes). GISP2 gav den ældste alder - 11.600 isår - men havde samtidig den største usikkerhed  $\pm 250$  isår. GRIP kernen viste, at klimaforbedringen satte ind for 11.510 isår siden. Usikkerheden er her kun  $\pm 70$  isår.

Disse nye aldre vakte betydelig forundring, da de afveg fra ældre dateringer af Yngre Dryas - Præboreal grænsen. To tyske dendrokronologer, Becker og Kromer, var tidligere ved at tælle årringe nået frem til, at det 'kun' var 11.000 år siden, at der indtraf en tydelig klimaforbedring i Sydtykland. De havde talt de årlige tilvækstringe i egetræer tilbage til 10.000 årringeår og var ved hjælp af årringe i fyrretræer nået helt tilbage til ca. 11.700 årringeår (før 1950).

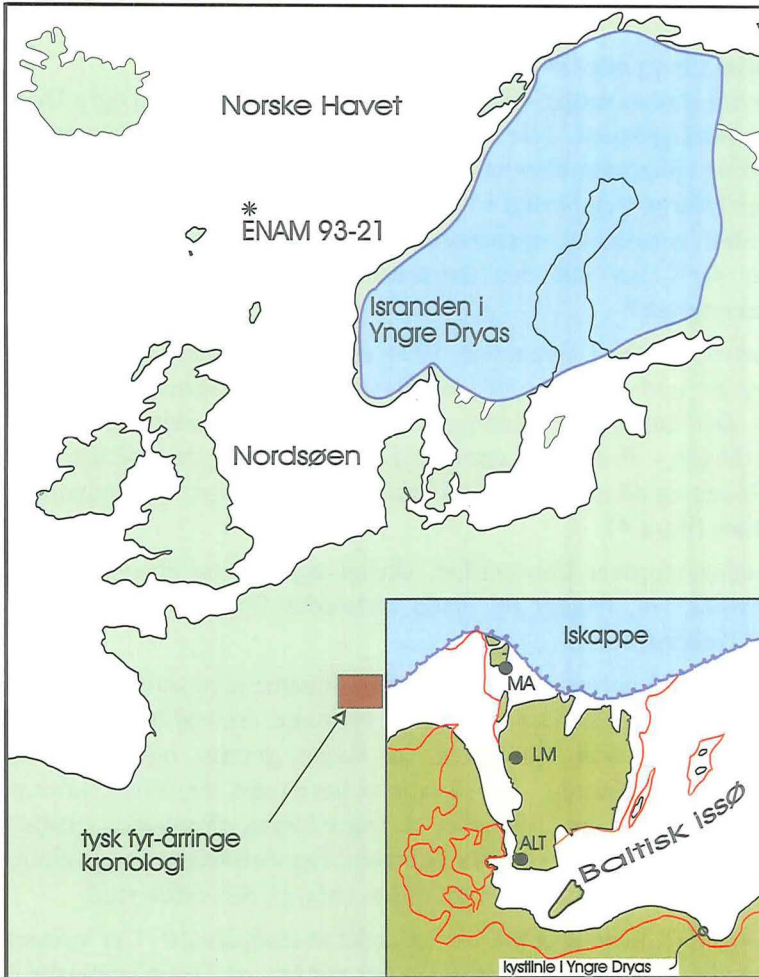
Da det var vanskeligt at sammenligne tykkelsen af egetræers årringe med fyrretræers, havde Becker og Kromer hængt deres egetræs- og fyrretræskronologier sammen ved hjælp af kulstof-14 dateringer af de enkelte årringe i formodede jævnaldrende eksemplarer af de to træsorter. Der udførtes desuden analyser af de enkelte årringes indhold af isotoperne  $^2\text{H}$  og  $^{13}\text{C}$ , og de viste, at klimaet for ca. 11.000 årringeår siden begyndte at blive tørt, og at det ikke længere var særlig påvirket

af kulde. Men kulstof-14 dateringer af de årringe, hvor klimaet skiftede fra fugtigt til tørt, gav en alder på ca. 10.000 kulstof-14 år. Becker og Kromer anså dog, at Yngre Dryas sluttede, og Præboreal begyndte, ved årringeår 11.000.

Der vankede én overraskelse til, da årringe, som var optalt til at være indtil flere hundrede år ældre end klimaskiftet, blev dateret; deres aldre kom nemlig alle ud som 10.000 kulstof-14 år (figur 3). Forskerne var helt uforvarende stødt på det, vi nu kalder for et kulstof-14 plateau, d.v.s. et tidsafsnit, hvorfra alle kulstof-14 dateringer af organisk materiale giver én og samme kulstof-14 alder. Det plateau-problem vender vi tilbage til flere gange i det følgende.



Figur 3: Kulstof-14 dateringer (+) af tyske årringe viser et kulstof-14 plateau ved slutningen af sidste istid (Yngre Dryas - Præboreal grænsen). Selvom årringene bliver 400 år yngre mellem årringeår 11.600 og 11.200, ændres kulstof-14 aldrene ikke ret meget; de danner et plateau. Årringekronologien er den nye reviderede.



Figur 4. Hovedkortet: rødbrunt felt viser regionen for den sydtyske årringekronologi; \* ENAM 93-21 boringen, som er bearbejdet af Tine Rasmussen (jfr. figur 11). I kortudsnittet er vist de tre undersøgte, sydsvenske sølokaliteter og israndens beliggenhed for ca. 11.500 år siden. Bemærk, at dele af det nuværende land da var havdækket, og at Østersø-området opfyldtes af den Baltiske Issø, som ved slutningen af Yngre Dryas blev tappet 25 m via et afløb nord om Småland (v. Billingen).

MA: Madtjärn, LM: Mjällsjön, ALT: Torreberga.

## Et projekt begynder at tage form

Vi var fra starten meget optaget af problemerne omkring Yngre Dryas - Præboreal grænsen. Når  $^{18}\text{O}$  indholdet i indlandsisen afslørede, at atmosfæren pludselig blev varmere, og når de marine sedimenter viste, at temperaturen steg hurtigt i Nordatlanten, så måtte Sydskandinaviens lavvandede søbassiner, ræsonnerede vi, da også være blevet opvarmet, selvom de lå tæt ved den daværende isrand. Kunne vi ikke løse problemerne her?

Vi startede derfor i sommeren 1994 et projekt i Sydsverige for ved detaljerede undersøgelser af søsedimenter at efterprøve denne mulighed. Der indsamledes tætliggende prøver af sedimenterne omkring Yngre Dryas - Præboreal grænsen i tre søbassiner, hvoraf det nordligste lå tæt op ad israndsdannelserne fra Yngre Dryas, og det sydligste lå i Skåne (figur 4).

Alle sedimentprøver blev vasket, skyllet og siet, og de udslemmede planterester, frø, frugter og blade sorteredes fra og sendtes til kulstof-14 datering.

Hvis hypotesen nu var rigtig, burde dateringerne give samme alder for sedimentgrænsen på de tre lokaliteter, og kunne det ved hjælp af andre undersøgelsesmetoder godtgøres, at denne grænse registrerede en kraftig klimaforbedring, ...ja, så ville vi have taget det første skridt på den lange vej til at kunne 'bevise', at Yngre Dryas - Præboreal grænsen i søbassinerne og iskernerne fra Grønland repræsenterede én og samme store klimaforbedring: den der gjorde en ende på den sidste istid.

Ét er dog at planlægge et projekt, et andet at realisere det. Det krævede omfattende felt- og laboratorieundersøgelser og nært samarbejde mellem forskere med forskellig specialisering. Der gennemførtes først et omfattende borearbejde i de tre sydsvenske søer, og samtidig tog to specialestuderende, Niels Hansen og Mikkel Sander, prøver fra tre danske søer. Borekernerne fra Yngre Dryas - Præboreal grænsen havde en diameter på 7,5-10 cm for at sikre tilstrækkeligt materiale til kulstof-14 datering (v. Göran Possnert i Uppsala og Jan Heinemeier i Århus) og en lang række andre undersøgelser. Plantemakrofossiler bearbejdedes af Ole Bennike (København), insekter af Geoffrey Lemdal (Lund), fisk af Leif Jonsson (Kungsbacka), kulstof- og



iltisotoper analyseredes af Dan Hammarlund (Lund), og Barbara Wohlfart (Lund) udførte kemisk-fysiske analyser, mens forfatteren undersøgte prøvernes sedimentologi og pollenindhold.

Nu er de første resultater godt på vej.  $^{18}\text{O}$  analyser af små krebsdyr, ostrakoder, fra søen i Skåne viser, at den årlige gennemsnitstemperatur steg mindst 6-8°C i løbet af knapt 30 år. Nordligere, i søen ved den tidligere isrand, angiver fossile biller, at sommertemperaturen steg mindst 5°C på mindre end 50 år. Pollenanalyser viser, at nogle af planterne i Yngre Dryas vegetationen straks udnyttede klimaforbedringen; således bredte revling og ene sig hurtigt på de mindre urters bekostning.

Disse og mange andre resultater gjorde det snart indlysende, at der selv i prøver, som var taget umiddelbart over sedimentgrænsen, kunne konstateres en særdeles markant klimaforbedring. Så nu gjaldt det om at checke, om klimaændringen var indtruffet samtidigt i alle tre søer, eller om varmen var rykket gradvist nordpå.

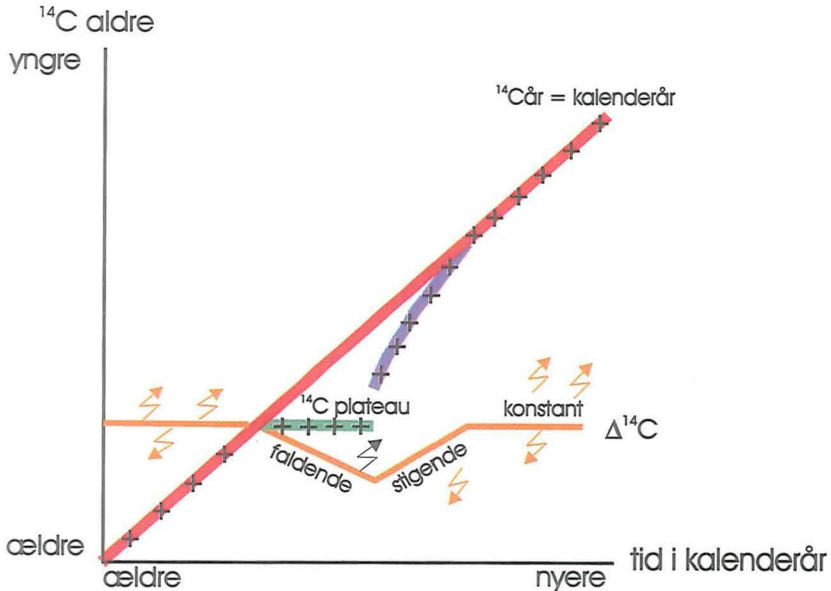
### **Kulstof-14 dateringer af Yngre Dryas - Præboreal grænsen**

Variationer i atmosfærens indhold af kulstof-14 isotopen ( $^{14}\text{C}$ ) kan opstå på to måder. Produktionen og indholdet af  $^{14}\text{C}$  vil falde, når en særlig kraftig solvind beskytter Jorden mod den kosmiske stråling. Men en aftagende  $^{14}\text{C}$  aktivitet kan også skyldes forstærket stofudveksling ( $^{14}\text{C}$  diffusion) mellem atmosfæren og oceanerne, hvorved nydannet, aktiv  $^{14}\text{C}$  optages i havvandet og synker ned i dybhavet, mens havets ældre og mindre aktive  $^{14}\text{C}$  sendes retur til atmosfæren. Taget under ét bevirker de to processer, at kulstof-14 dateringer af f.eks. årringe fra en sådan periode ikke vil give forskellige aldre, men identiske kulstof-14 aldre: de danner et kulstof-14 plateau - ligesom kulstof-14 dateringerne af de tyske årringe (figur 5).

På baggrund af denne plateau-problematik stillede vi os selv følgende spørgsmål: 'Hvis vi daterer grænsen i de sydsvenske søsedimenter meget omhyggeligt med tætliggende prøver, vil der så også dukke et kulstof-14 plateau op her?'

Der er nu udført et meget stort antal kulstof-14 dateringer på makrofossiler fra de tre sydsvenske søer, og de viser klart, at plateauet

kan genfindes i alle tre søer. Det kan følges indtil 30 cm over klimagrænsen i den skånske sø, og til 8-10 cm over grænsen i de to andre søer. Denne forskel på ca. 20 cm er ikke svær at forklare, for sedimentationshastigheden i den skånske sø var forholdsvis stor, 1 mm/år, mens den i de to andre søer kun beløb sig til 0,3 mm/år.



Figur 5: Principskitse, som viser sammenhængen mellem 1) fald og stigninger i  $^{14}\text{C}$ -aktiviteten i atmosfæren og 2) kulstof-14 aldre af fossilt organisk materiale. Ved konstant  $^{14}\text{C}$ -aktivitet vil kulstof-14 aldre (krydses) ideelt falde på den røde linie, ved faldende aktivitet danner de et kulstof-14 plateau (grønt), og ved stigende aktivitet bliver de hurtigt yngre og yngre (blå kurve).

### E-mail fra Tyskland

Statistisk set gav alle kulstof-14 dateringer af Yngre Dryas - Præboreal grænsen i de sydsvenske søer 'samme alder', som omregnet til årringear (kalenderår) svarer til 11.300-11.250 år før nu. Dét gav stof til eftertanke, for det er svært at forestille sig, at klimaforbedringen i Sydsverige skulle være sket 250-300 år tidligere end i Sydtyskland,

hvor den efter Beckers og Kromers dateringer indtraf for ca. 11.000 årringeår siden.

Vi kontaktede derfor fysikeren Bernd Kromer i Heidelberg og spurgte, om der i årringekronologien skulle være nogen tegn på, at der også længere sydpå havde været en klimaforandring for 11.300-11.250 år siden? Bernd Kromer svarede ved som e-mail at sende alle tilgængelige årringedata - også hidtil upublicerede statistiske data om tykkelsen af de enkelte års årringe.

Og dét gav bingo! - De statistiske beregninger viste klart, at årringenes tykkelse virkelig havde ændret sig for 11.300-11.250 år siden; de blev mere end dobbelt så tykke i løbet af nogle få årtier! Da dette sydtyske klimasignal indtraf præcis samtidig med ændringen i de svenske søer, jublede vi - overbeviste om, at vi nu var nået frem til det rigtige årstal for afslutningen på sidste istid i Europa.

#### **Jublen blev dog kort.**

For hvorfor, spurgte vi os, var signalet i GRIP iskernen 210-260 år ældre end den alder, vi nu havde fundet frem til for klimaomslaget i Europa? Begge aldre var jo udregnet i kalenderår. For at opklare dét spørgsmål, udvidedes det tværvideenskabelige samarbejde, og to iskemeforskere, Sigfus Johnsen og Claus Hammer ved Niels Bohr Institutet i København, blev inddraget i projektet.

Ved en detaljeret gennemgang af den tyske egetræskronologi viste det sig, at der var 'tabt 41 år på gulvet' under sammenføringen af to delkronologier for årringe i egetræer. Dertil kom, at den ældre fyrretræskronologi også måtte ændres. Nye supplerende kulstof-14 dateringer af ege- og fyrretræer fra tiden, hvor de to træsorters kronologi overlapper hinanden, viste, at fyrretræskronologien måtte gøres ca. 120 ( $\pm$  80) år ældre. Ellers kunne ændringerne i  $^{14}\text{C}$  aktiviteten i dette tidsrum ikke bringes i overensstemmelse med lang-periodiske forandringer i Jordens magnetfelt. Der skulle altså lægges i alt 161 år til den sydtyske alder for Yngre Dryas - Præboreal grænsen. Det er gjort i figur 3.

I betragtning af den usikkerhed, som årringekronologien og isårskronologien i øvrigt er behæftet med, var der nu opnået en næsten perfekt korrelation mellem de to kronologier.

## **Men det blev ikke ved det!**

Variationerne i årringenes tykkelse og iskernernes temperaturbetingede  $^{18}\text{O}$  signaler blev også analyseret i stor detalje og resultaterne sammenholdtes. Og tro det eller ej, den bedste tilpasning opnåedes, hvis der blev lagt 75 år til årringenes alder, eller blev trukket 75 år fra isaldrene. Vi valgte at gøre det sidste og at fastholde årringekronologien (med den ovennævnte korrektion på +161 år). Det var den mest praktiske løsning, for is kan ikke kulstof-14 dateres.

Nu kunne vi endelig slå fast, at den store klimaforbedring på overgangen mellem Yngre Dryas og Præboreal begyndte 11.450 år før 1950. Vi havde stærke argumenter for, at den var blevet registreret samtidigt i søsedimenterne, indlandsisen og årringene (figur 6 og 7) - og formodentlig også i de marine sedimenter. Dette sidste fremgår af data fra ENAM 93-21 boringen (figur 4 og 11).

## **Oceanernes indblanding**

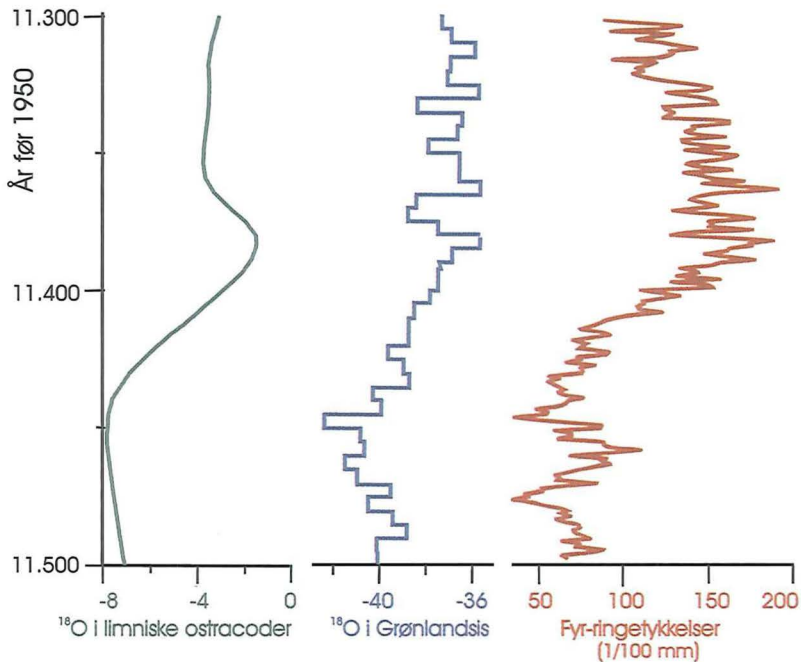
Da det var lykkedes os at nå frem til det magiske årstal 11.450 (før 1950), begyndte andre brikker i puslespillet også at falde på plads.

Nu kunne vi se, at to klimasignaler i begyndelsen af Holocæn også lod sig korrelere. Det var 1) en kraftig stigning i  $^{14}\text{C}$ -aktiviteten (1,5% på 60 år), som var påvist ved kulstof-14 datering af årringe, og 2) en temperatursænkning på 3-5°C i iskernerne, som indtraf 250-400 år efter den store klimaforbedring (figur 7). Hertil kommer nu, at norske forskere også har rapporteret om 3) en kortvarig, men tydelig koldtvands-puls i Norske Havet 300 år efter den store klimaforbedring.

Tidssammenfaldet mellem 1), 2) og 3) taler stærkt for, at det var nedsat cirkulation i Nordatlantens vandmasser, der var den vigtigste årsag til denne kortvarige klimaforværring i tidligste Præboreal tid. Da denne kuldebølge endnu ikke har fået et formelt navn, vil vi her foreløbigt kalde den 'Eftermøleren' (figur 2).

Cirkulationen i Nordatlanten spiller også en afgørende rolle for nutidens klima. Overfladenære havstrømme fører varmt og relativt salt vand mod nord og nordøst, og Golfstrømmens varme vand mildner klimaet i Nordvest-Europa, så lufttemperaturen her er 4°C højere end på tilsvarende breddegrader i Nordamerika.



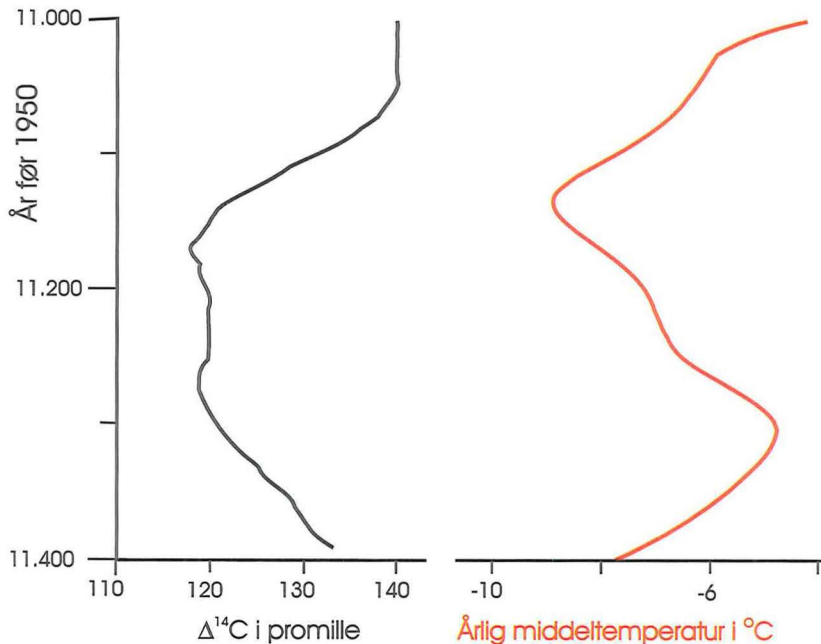


Figur 6: Sammenligning mellem  $^{18}\text{O}$ -værdierne i ostrakoderne i den skånske sø,  $^{18}\text{O}$ -værdierne i den grønlandske GRIP iskerne og tykkelsen af årringe i sydtyske fyrretræer omkring Yngre Dryas - Præboreal grænsen. Mindre negative  $^{18}\text{O}$ -værdier og tiltagende årringetykkelse angiver stigende lufttemperaturer.

Efterhånden som vandet føres nordpå, afkøles det, og fordampning og udbredt dannelse af havis medfører, at de øvre vandlag bliver ekstra saltholdige. Dette kolde og salte vand bliver yderligere tungt, når det afkøles om vinteren, og det synker da med et indhold af ungt  $^{14}\text{C}$  ned mod bunden. Herfra spredes det, som vist i figur 8, af dybe havstrømme langsomt ud i andre oceanbassiner, inden det igen kommer op til havoverfladen. Når det endelig sker, har det medførte  $^{14}\text{C}$  mistet en del af sin aktivitet. De vandmasser, der indgår i denne globale cirkulation, overstiger næsten 100 gange Amazonflodens vandføring.

Hvad ville der egentlig ske, hvis Nordatlanten pludselig tilførtes så store mængder ferskvand? Ikke fra imaginære Amazonfloder, men

fersk smeltevand frigjort ved smeltning af is! Så ville havvandet i de nordlige have blive mindre salt og ikke synke så let ned mod bunden, og det ville selvsagt få klimatiske følger, da det effektivt ville forstyrre det globale havstrømssystem.



Figur 7: Variationerne i atmosfærisk  $^{14}\text{C}$ -aktivitet (i promille) og årsmiddeltemperaturen i det centrale Grønland (ved havets overflade) mellem 11.400 og 11.000 år før nutid, efter danske forskeres beregninger ud fra GRIP iskernen.

Var det en sådan mekanisme - tilbagekoblingsmekanisme - der fremkaldte 'Efternøleren', 250-400 år efter den store klimaforbedring? Det lyder besnærende, og som vi skal se, er der meget der tyder på, at denne kortvarige klimaforværring ca. 300 år ind i Præboreal tid virkelig havde regional, måske endda global, udbredelse.

Europæiske mosegeologer og palæobotanikere påviste allerede for flere årtier siden ved studier af søsedimenter i Central- og Nordvest-Europa, at der var sket en mindre klimaforværring ca. 300 år efter Yngre Dryas - Præboreal grænsen - svarende til vores 'Efternøler'.

Ved starten af Præboreal tid for 11.450 år siden begyndte skoven at brede sig nordpå, men det tog sin tid, og Sydsandinavien prægedes endnu i nogle århundreder af en åben og hårdfør vegetation, som ikke var nær så følsom over for 'Efternølerens' kuldebølge som skovsamfundene længere mod syd. Det har gjort det vanskeligt at spore virkningen af 'Efternøleren' her i Skandinavien.

Men vi fandt dog sporene, da vi 'finkæmmede' alle pollenanalyser og kemiske data fra vore tre søer! Her, netop hvor kulstof-14 plateauet ophørte 8-30 cm over grænsen med farveskiftet, var der tydelige spor efter en kortvarig klimaforværring. Således opmuntret begyndte vi også at granske resultaterne fra de maringeologiske undersøgelser i Nordatlanten og registreringerne af gletscherfremstød i Skandinavien, Canada og Island. Dette gjorde det klart, at der i hele den nordatlantiske region var indtruffet en kortvarig, men markant klimaforværring 300 år efter starten på Præboreal tid. Vi blev også klar over, at det var klimaforbedringen ved slutningen af 'Efternøleren', der havde fremkaldt det omslag til tørt klima, som er registreret i de sydtyske årringes isotopforhold.

'Efternøleren' havde virkelig haft regional udbredelse og var højst sandsynligt forårsaget af nedsat cirkulation i Nordatlanten og oceanerne. For at teste om denne dynamiske model også kunne anvendes til at forklare de ældre og mere udtalte klimaforandringer, satte vi nu fokus på den ca. 12.600 år gamle grænse mellem Allerød interstadialet og den meget kolde Yngre Dryas tid.

### **Sidste istids sidste kuldebølge**

Da sidste istid havde passeret sit maksimum for knapt 20.000 år siden, begyndte de store iskapper og mange gletschere at smelte og 'skrumpe' i areal. Det havde til følge, at sommersonen fik mere magt på den nordlige halvkugle. Den nøgne jord varmedes lettere op end de is- og snedækkede landskaber.

Men selv om varmetilførslen fra solen øgedes gradvist, udviklede klimaet sig nærmest kaotisk, fordi varmetilskuddet startede andre dynamiske processer. Disse tilbagekoblingsmekanismer bevirkede, at klimaforbedringen ikke forløb jævnt. Perioder med forstærket varme blev afbrudt af drastiske tilbageslag.

Nordatlanten påvirkedes af den første store varmebølge for ca. 15.000-14.500 år siden. Den skandinaviske indlandsis var da for længst smeltet tilbage fra Danmark, og store dele af Sydsverige var også isfri. I de følgende 2000 år, hvor Bølling og Allerød interstadialernes varmebølger gjorde sig gældende, var klimaet omkring Nordatlanten, og formodentlig også globalt, ganske 'gunstigt', bortset fra 2-3 kolde tidsafsnit af 100-200 års varighed (bl.a. Ældre Dryas og Gerzensee kuldetiderne, figur 2).

Indlandsisens rand smeltede dog stadig nordpå, og flere og flere planter indvandrede, efterfulgt af dyr og mennesket. Det virkede, som om næste mellemistid var ved at starte.

Men for ca. 12.600 år siden blev klimaet i løbet af få årtier igen 'istidskoldt'. Den gennemsnitlige årstemperatur i Grønland sank 15°C, til -25°C, på 150 år. Den bitterlig kolde Yngre Dryas tid var begyndt.

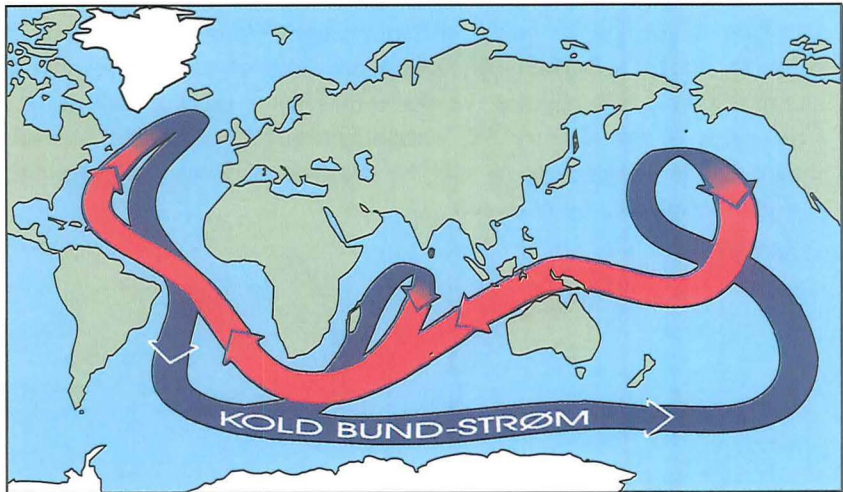
I Sydskandinavien blev birkeskoven, som ellers var ved at vokse sig tæt, afløst af en tundravegetation, og selv de mest hårdføre dyr måtte søge længere sydpå i Europa. Denne klimaforværring i Yngre Dryas har, siden den blev erkendt, altid fascineret istids- og klimaforskere. Nu fristes vi til at spørge, om den blev forårsaget af de samme dynamiske processer og koblede mekanismer som 'Eftemølerens' kuldebølge.

Da tidligere undersøgelser har vist, at klimaforværringen i Yngre Dryas er registreret i den nordligste af vore tre søer, startede vi meget detaljerede undersøgelser her, og det var ikke svært at lokalisere Allerød - Yngre Dryas grænsen.

Inden for 1 cm sediment, svarende til 30 år, fandt vi en markant ændring i floraen og insektfaunaen. Miljøet skiftede brat fra et mildt 'Allerød klima' til Yngre Dryas' barske, højarktiske kulde. Sedimentationshastigheden så imidlertid ikke ud til at have ændret sig, og selv tynde prøveskiver indeholdt så mange makrofossiler fra



landplanter, at vi blev i stand til at opstille en meget detaljeret kronologi for søens Yngre Dryas aflejringer.

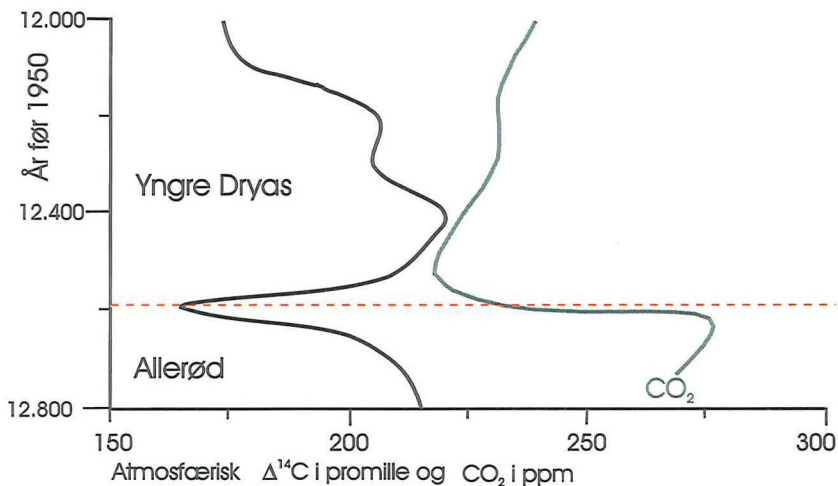


*Figur 8: De store marine havstrømmes vand- og varmetransport fra lave breddegrader forbi Island til de nordiske have. Det kolde vand, som synker ind i de nordlige områder, breder sig sydpå som en dybhavsstrøm til Sydatlanten, det Indiske Ocean og Stillehavet. Når det opvarmes her og når frem til overfladen, føres det af varme overfladestrømme den lange vej tilbage til Nordatlanten for senere igen at synke ind som koldt bundvand.*

Vi kunne umiddelbart se, hvor tykke aflejringerne var, og at sedimentationen var foregået jævnt, og da vi på forhånd vidste, hvornår Yngre Dryas tid begyndte og sluttede, kunne vi beregne den årlige sedimentation. Ved at tælle 'sedimentationsår' fik vi en tilnærmet kalenderårs-alder for de tætliggende niveauer, hvor vi havde samlet de prøver, vi sendte til kulstof-14 datering. Makrofossilemes kalenderårs-alde

var kendt næsten ligeså godt, som hvis vi havde kunnet tælle årringe. Derfor kunne vi ud fra kulstof-14 dateringerne af de tætliggende prøver udlæse, hvordan  $^{14}\text{C}$  aktiviteten havde ændret sig omkring Allerød - Yngre Dryas grænsen.

Og vi fandt, hvad vi søgte! - Et kulstof-14 plateau lige under Allerød - Yngre Dryas grænsen. Ved starten af Yngre Dryas steg  $^{14}\text{C}$  aktiviteten også markant (figur 9). Alderen af den første prøve fra Yngre Dryas var flere hundrede år yngre end plateauet.  $^{14}\text{C}$  aktiviteten steg 50 promille i løbet af 50-70 år. Det lyder ikke af så meget, men til sammenligning kan nævnes, at der i nutiden, i løbet af 80 år, kun produceres 10 promille nyt  $^{14}\text{C}$  i atmosfæren. Der måtte ved Allerød - Yngre Dryas grænsen være sket en drastisk ændring i udvekslingen mellem atmosfæren og dybhavet.



Figur 9: Ændringer i  $^{14}\text{C}$ -aktiviteten og  $\text{CO}_2$ -indholdet i atmosfæren omkring Allerød - Yngre Dryas grænsen, beregnet efter analyser af planterester i svenske og norske søsedimenter. Usikkerheden er ca. 10%.

Denne konklusion understøttes af en netop offentliggjort afhandling fra Norge, hvor det påvises, at  $\text{CO}_2$ -indholdet i atmosfæren også ændredes kraftigt lige før starten af Yngre Dryas tid; det faldt med 0,08 promille

(=80 ppm) (figur 9). Størrelsen af denne ændring svarer næsten til den stigning i atmosfærens CO<sub>2</sub>-indhold, som menneskets afbrænding af fossilt brændsel har medført. Faldet kort før starten af Yngre Dryas tid skyldtes blandt andet, at havvandet var blevet så koldt, at det kunne 'stjæle' mere af atmosfærens CO<sub>2</sub>.

### Sporet bliver varmt

For yderligere at teste hypotesen om, at det var ændringer i cirkulationen i oceanerne, der fremkaldte klimaforandringerne og udsvinget i <sup>14</sup>C aktiviteten, rettede vi vores Sherlock Holmes lup mod to lidt ældre klimaforværringer. Det var den 100-150 år lange Ældre Dryas kuldebølge for ca. 13.700 år siden og den 200 år lange 'Gerzensee-oscillation', som indtraf for ca. 12.900 år siden (figur 2). Det viste sig, at disse kuldebølger i deres udvikling fulgte det samme generelle mønster som Yngre Dryas og 'Eftermøleren'; de mindede på sin vis mest om Yngre Dryas, men klimaforværringen i Yngre Dryas var både længere og startede mere brat.

Der var altså både ligheder og forskelle mellem klimaudsvingene i tiden mellem 15.000 og 11.000 år før nu. Kunne begge dele forklares ved hjælp af vores enkle ocean-cirkulations-model? Kunne vi, som vi havde gjort det indtil nu, blive ved med at se bort fra astronomisk betingede ændringer og solvindens indvirkning på <sup>14</sup>C-aktiviteten?

Vi prøvede at modellere konsekvensen af vores enkle hypotese for det bratte klimaomslag fra Allerød til Yngre Dryas. For at opnå den observerede stigning i <sup>14</sup>C-aktiviteten måtte vi antage, at udvekslingen (diffusionen) mellem atmosfæren og dybhavet var blevet halveret i løbet af 200 år, men det virkede ikke urimeligt, da der hurtigt blev lagt et 'is-låg' over det meste af Nordatlanten. Vi gik også ud fra, at der efter 200 år igen begyndte at komme cirkulation i havvandet, og at havstrømmene øgedes gradvist igennem resten af Yngre Dryas tid.

Med disse forudsætninger kunne vi nu teoretisk modellere Yngre Dryas' velbekendte, men usædvanligt langvarige kulstof-14 plateau. Modelberegningerne stemte også med, hvad norske og franske forskere er nået frem til; der var større forskel på Nordatlantens og atmosfærens kulstof-14 aktivitet i Yngre Dryas end i nutiden.

Det var altså muligt at forklare både de generelle og de særegne træk i klimaudviklingen i Yngre Dryas - uden at ty til unormale ændringer i solaktiviteten. Derfor var vi med vores enkle ocean-cirkulations-model, med mindre drastiske forudsætninger, i stand til at forklare de øvrige, mere gradvise klimaændringer mod slutningen af sidste istid.

### Årsagen bag 'årsagerne'

Hvad nytter det at kunne forklare noget uforståeligt med en enkel model, hvis man ikke rigtig forstår modellens indre dynamik! - Hvorfor ændredes cirkulationen i oceanerne?

Den første rigtig store opvarmning efter sidste istids maksimum blev ud fra iskernerne registreret til at have fundet sted for ca. 14.700 isår siden. Da steg den årlige gennemsnitstemperatur i Grønland i løbet af 100 år ikke mindre end 10-15°C (figur 2). Dette medførte opvarmning af Atlanterhavets vand; det begyndte at strømme mod nord og nordøst for at brede sig ud i den nordlige del af Nordatlanten.

Men hvad var det, der fik det til at strømme nordpå? Forklaringen er på sin vis enkel. Der var i en forudgående næsten 1000 år lang kuldeperiode blevet dannet så meget koldt bundvand i de nordlige havområder, at der efterhånden var opstået en sydgående kold og dyb havstrøm, og det var den, der helt naturmødvendigt startede en modsatrettet overfladestrøm. Så da klimaforbedringen satte ind, 'havstrømmede' varmen nordpå.

I sidste instans var det Jordens tyngdefelt, gravitationen, som drev dette system af modsatrettede strømme; havet fungerede som en konvektionscelle - i lighed med stueluften, når radiatoren er tændt.

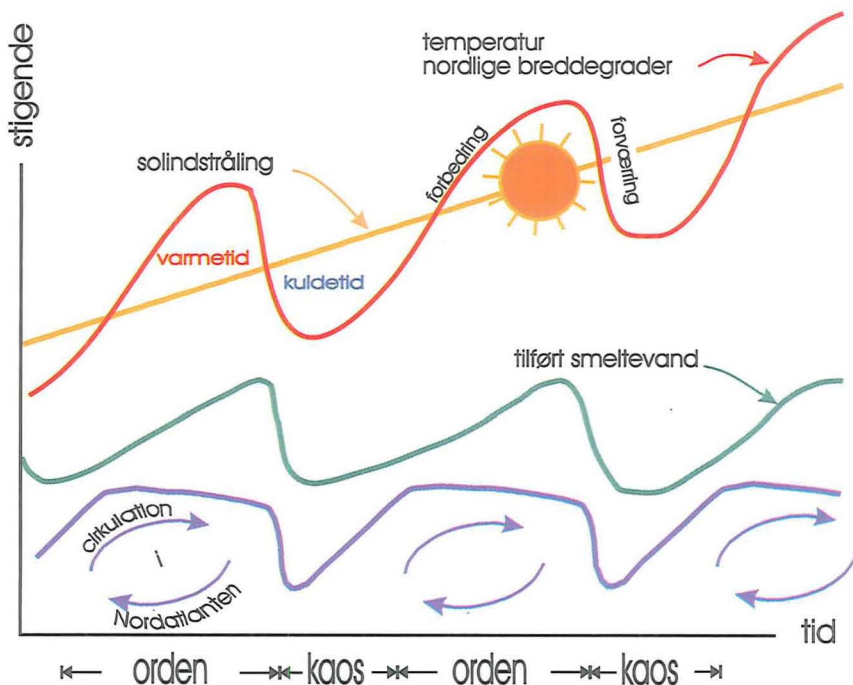
Det er ikke svært at forestille sig, at denne 'rigtig store opvarmning' fik stor indflydelse på Nordatlanten og de omkringliggende store isdækker. Atmosfæren varmedes op af havstrømmen sydfra, indlandsisen og den kælvende shelf-is begyndte at smelte, og isbjerge og havisen smeltede. Det silede med smeltevand.

Resultatet var en kraftig smeltevandspuls, som spædede det kolde og salte vand i de nordlige havområder op med så store mængder ferskvand, at indsynkningen af koldt, tungt vand ophørte, og strøm-



cirkulationen bremsedes. Det udløste for omkring 13.700 år siden en kuldebølge i Ældre Dryas.

Det kan virke paradoksalt, men mekanismen, hvor koldt bundvand strømmer sydpå, og varmt overfladevand føres nordpå, kan ikke undgå at ødelægge sig selv. Når der transporteres mere og mere varme op mod de nordlige isdækkede områder, dannes der mindre og mindre koldt bundvand. Konvektionen bremses. Klimaet bliver automatisk koldere og indlandsisens indhold af tunge iltisotoper,  $^{18}\text{O}$ , aftager. Den nedsatte cirkulation i oceanet medfører stigende  $^{14}\text{C}$ -aktivitet i atmosfæren, som vi kan se det i vore data fra begyndelsen af de koldere perioder (figur 7 og 9).



Figur 10: Principskitse af tilbagekoblingsmekanismen i Nordatlanten. Den vandrette tidsakse viser, hvordan 'orden' og 'kaos' skifter i takt med, at konvektionen i Nordatlanten tiltager og aftager, og mængden af tilført smeltevand ændres. Dette resulterer i drastiske temperaturudsving, selvom solindstrålingen stiger jævnt. Sml. med figur 11.

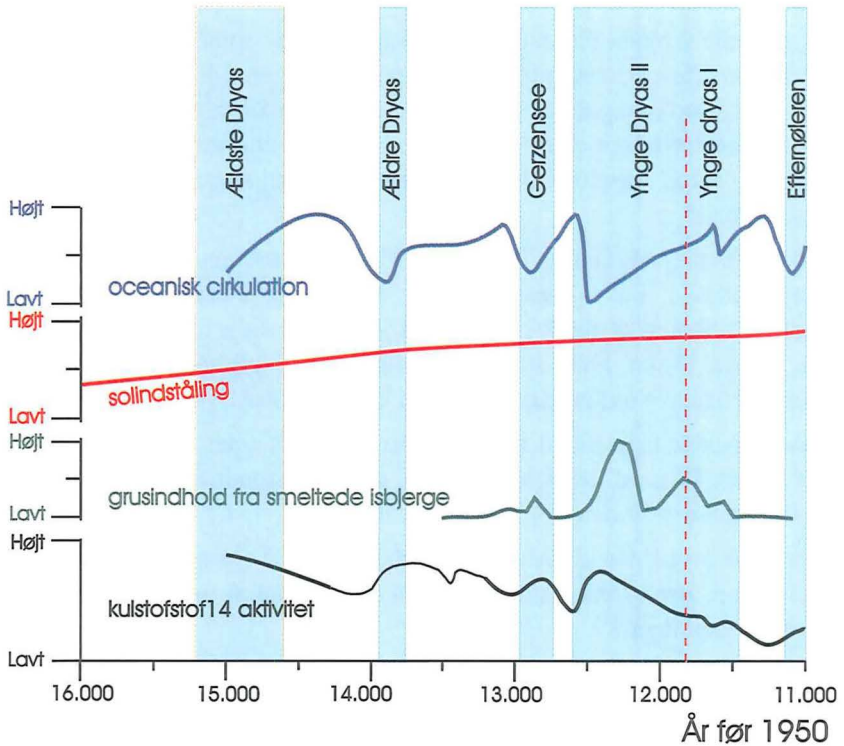
Det koldere klima medfører formindsket tilførsel af smeltevand, og dermed stiger saltindholdet i det allerede afkølede hav. Derfor varer det ikke længe, før koldt, salt og tungt vand igen synker ned i dybhavet og begynder at strømme sydpå, så der igen startes en modsatrettet varm overfladestrøm. Denne får  $^{18}\text{O}$  indholdet i indlandsisen til at stige, og den øgede 'omrøring' i hele ocean-atmosfære systemet bevirker faldende  $^{14}\text{C}$ -aktivitet i atmosfæren. Dette sidste kan skabe kortere eller længere kulstof-14 plateauer.

Konvektionsmekanismens indbyggede 'selvmordstrang' får klimaet til at skifte mellem 'orden' og 'kaos' (figur 10). 'Kaos'-situationen indtræffer, når alt for meget fersk smeltevand ødelægger 'de ordnede forhold' med nordgående varmetransport i havet. Den overordnede klimaudvikling, som skyldes langsom stigning i solindstrålingen, genskaber dog snart 'orden', når havvandet på ny er blevet tungt nok til at synke ned i dybhavet, så cirkulationen kommer i gang igen. Derfor bliver 'perioder med kaos' mere kortvarige end de varmere perioder med 'ordnede forhold', ....hvis der da ikke indtræffer noget exceptionelt!

### **Katastrofe eller ej ?**

Som allerede nævnt adskiller Yngre Dryas sig fra de andre kuldeperioder. Både omfanget af klimaforværringen og den hastighed, hvormed den satte ind, var større. Yngre Dryas indledtes også kun få hundrede år efter en forudgående kuldeperiode (Gerzensee-kuldebølgen), så der var dårligt nok tid til at reetablere 'ordnede forhold' i ocean-atmosfære-systemet. Yngre Dryas' spontane klimatiske 'kaos' var exceptionelt.

Om det er spontane 'katastrofer' eller vedvarende processer, der har størst indflydelse på den geologiske udvikling, kan tit være svært at afgøre. Men der er ingen tvivl om, at meteornedslag, voldsomme vulkanudbrud, jordskælv, tsunamis og pludselig tapning af opstemmede issøer alle kan have særdeles stor betydning. Til samme kategori hører sikkert også de meget hurtige og store klimaforandringer.



Figur 11. Klimaudviklingen fra Ældste Dryas til 'Efternøleren' illustreret ved data fra ENAM 93-21 borekernen fra 1000 meters dybde ud for Færøerne. Solindstrålingen er steget jævnt siden 20.000 år før nutid. Indholdet af grus fra smeltede isbjerge varierer, og  $^{14}\text{C}$ -aktiviteten i atmosfæren følger næsten samme trend, men aftager og stiger modsat den oceaniske cirkulation. Nederst er vist de kolde perioders længde og navne. Yngre Dryas omfattede en første meget kold del (I) og en senere lidt varmere del (II).

Var Yngre Dryas 'en katastrofe i sig selv', eller blev kuldebølgen udløst af en anden katastrofe?

Under den 'rigtig store opvarmning' før Yngre Dryas havde der midt på det nordamerikanske kontinent, først og fremmest sydvest for Hudson Bay i Minnesota, North Dakota, Manitoba og Saskatchewans prærieområder, dannet sig et stort issø-kompleks (Lake Agassiz) foran

den vigende isrand. Så længe Lake Superior var spærret af en islobe, var alt smeltevand tvunget til at søge sydpå via Mississippi-floden. Men netop ved overgangen fra Allerød til Yngre Dryas tid var isloben i Lake Superior-bassinet formindsket så meget, at smeltevandet kunne strømme østpå gennem de Store Søer til St. Lawrence Bugten og Atlanterhavet.

Det medførte en hurtig tapning af det opstemmede smeltevand. Vandstanden i Lake Agassiz faldt 40 m, og Nordatlanten fik et pludseligt tilskud af fersk og let vand. Det nye afløb fortsatte igennem hele Yngre Dryas med at føre alt smeltevand og regnvand fra den nordamerikanske indlandsis østpå ud i Nordatlanten.

Der er desuden tegn på, at der samtidig med tapningen af Lake Agassiz blev tappet 10 m af den Baltiske Issø, som var stemmet op i Østersøen øst for 'resterne' af den skandinaviske indlandsis.

Kunne det være denne pludselige tilstrømning af store mængder fersk smeltevand, der skabte 'utidigt kaos' i Nordatlanten og udløste Yngre Dryas kuldebølgen?

Modelberegninger viser, at tilførsel af selv relativt begrænsede mængder ferskvand fører til nedsat indsunkning af koldt bundvand. Da tapningen af de store issøer i Nordamerika og Skandinavien førte årtiers, måske århundreders, 'opsparede' smeltevand ud i Nordatlanten i løbet af nogle få år, er det nærliggende at give denne 'katastrofe' skylden for Yngre Dryas' kuldebølge. At Yngre Dryas blev så lang, forklares ved, at fortsat tilførsel af alt smeltevand fra den nordamerikanske is forsinkede dannelsen af koldt bundvand.

Selvom vi ikke har kontante beviser, kan vi nu logisk forklare, hvorfor Yngre Dryas tiden kom, da den kom, og hvorfor den varede så længe. Det tog lang tid, før der igen var opbygget et koldt bundvandsreservoir i de nordlige havområder. Vore data viser, at der nogle hundrede år ind i Yngre Dryas tid optrådte en øget ventilation i det overfladenære havvand, men de første tegn på, at virkelig konvektion var ved at komme i gang, dukker først op 300 år før Yngre Dryas' slutning.



## Ind i Varmetiden

Da vandet i de nordlige havområder endelig, for 11.450 år siden, var blevet tilstrækkelig tungt til at synke ned på stor dybde og strømme bort her, startedes også en stor nordgående havstrøm, der transporterede varme op mod vore breddegrader. Samstemmende data viser, at denne omlægning fandt sted indenfor nogle årtier. Reaktionen på den pludselige opvarmning var om muligt kraftigere end ved den 'rigtige store klimaforbedring' for 14.700 år siden.

Sommersolens indstrålingsvarme havde nået sit maksimum, og de to frysebokse, den nordamerikanske og den skandinaviske indlandsis, havde mistet omfang og kapacitet. Enorme mængder smeltevand frigjordes, og den Baltiske Issø, som havde været blokeret af Yngre Dryas fremstødet, blev tappet 25 m (figur 4).

Disse store smeltevandmængder, istidens 'sidste suk', var 300 år senere lige ved at bremse havstrømmene i Nordatlanten. Men 'Efternøleren' skabte kun kaotiske tilstande i 100-150 år. Ca. 11.000 år før nu var der igen kommet 'orden' i systemet, og den er stort set blevet opretholdt siden da. Der har været mindre klimaudsving i Holocæn, vores nuværende mellemistid, men...'**lad det nu være**'.

**Nu presser det afsluttende spørgsmål sig på.**

## Hvornår kommer næste istid?

Hvis den her præsenterede forklaringsmodel for klimaudsvingene for 15.000 -11.000 år siden er rigtig, kan den formodentlig også anvendes til at forklare de klimaforandringer, som var årsag til de gentagne isfremstød under sidste istid (figur 1). Istidens pulserende forløb med skiftende 'orden' og 'kaos' og isfremstød og tilbagesmeltning udgør sandsynligvis en ligeså naturlig komponent i klimasystemet som de mere langsomme variationer i solindstrålingen, der styrer det overordnede skifte mellem istider og mellemistider. Det afspejler sig også i de marine sedimenter (figur 11).

Forskelligt udførte modelberegninger tyder alle på, at vi kan vente den næste store nedisning om ca. 60.000 år... og én til om ca. 100.000 år. Vi ved imidlertid også, at CO<sub>2</sub>-produktion ved menneskets afbrænding af fossile brændsler sammen med andre former for luftforurening har

en klar drivhuseffekt. Den har de sidste årtier medført jævnt stigende globale temperaturer. Vi ved også, at klimasystemet i vores nuværende mellemistid (Holocæn) er ekstra følsomt overfor forstyrrelser, da den astronomisk betingede solindstråling på de mest kritiske breddegrader vil være svag og jævn de næste 50.000 år. Det betyder, at andre kræfter let kan få klimaet til at miste 'balancen'.



*Vinter på søisen. Isen (>5 cm tyk) udgør et perfekt underlag fra hvilket boringer i kvartære søsedimenter kan udføres. Udrustningen kan også nemt transporteres på sne og is. Denne type feltarbejde anbefales varmt.*

Vi kan jo prøve at forestille os, hvad der vil ske, når drivhuseffektens temperaturstigning slår rigtigt igennem om 50-100 år. Det vil resultere i øget afsmeltning af isdækkerne omkring Nord- og Sydpolen og stigende vandstand i verdenshavene. Denne proces er selvforstærkende, d.v.s. at den har en positiv tilbagekobling, da der vil smelte mere is, når havet breder sig. Da saltindholdet i Nordatlanten allerede i dag er aftagende, vil den fulde virkning af drivhuseffekten medføre en betydeligt kraftigere opspædning med smeltevand, og der vil ikke længere blive dannet nyt koldt og salt bundvand, som kan opretholde den kolde

bundstrøm. Det vil standse varmetransporten mod nord - mod vore breddegrader.

Stigende globale temperaturer kan altså, paradoksalt nok, føre til kraftigt faldende temperaturer omkring Nordatlanten.

Det er dog endnu svært at afgøre, om et sådant temperaturfald vil føre os ind i næste istid eller ej. Dertil kræves øget indsigt i, hvordan de forskellige koblinger indenfor klimasystemet fungerer, og bedre forståelse af, hvordan eventuelle advarselssignaler i atmosfæren, havet, ismasserne og geo- og biosfæren skal tydes. Det kan kun opnås ved fortsat og intensiveret tværvideenskabelig klimaforskning.

Men måske kan klimaudviklingen i sidste mellemistid, Eem tiden, allerede nu give os et fingerpeg om, at der er håb forude for mennesket. Eem tidens varme klima blev afbrudt af mange hurtige og kraftige klimaforværringer, og de var måske netop årsag til, at mammutten og det uldhårede næsehorn ikke uddøde i Eem. Uden disse tilbagevendende kuldebølger, hævder flere forskere, ville de to store pattedyrs 'spisekammer', de højarktiske steppeområder omkring Polarhavet, være helt forsvundet.

Mammutten uddøde derimod næsten totalt, undtagen på nogle få nordsibiriske øer, for 10.000 år siden, da det jævnt varme holocæne klima endelig gjorde kål på 'mammutstepperne'.

Om nutidens civilisation og menneskesamfund vil være i stand til at tilpasse sig og klare den kommende klimaforværring er nok tvivlsomt, især hvis den kommer hurtigt og uventet. Men mennesket vil sikkert kunne overleve som art og race. Det er næppe en tilfældighed, at den eksplosive og springvise udvikling af **det tænkende menneske** er sket i Kvartærtiden, hvor voldsomme klimaforandringer har budt på den ene store udfordring efter den anden.

(Artiklen er oversat af Asger Berthelsen, som også har konciperet figur 5 og 10).