

VARV

NR 4 BLADET MED DE ÆLDSTE NYHEDER 1996



TEMAHÆFTE KLIMA II

I DE FØRSTE 2 MILLIONER ÅR AF KVARTÆRTIDEN VAR KLIMAET FORSKELLIGT FRA DET, VI KENDER I DEN SIDSTE DEL AF ISTIDEN. DETTE FREMGÅR AF UNDERSØGELSER FRA KAP KØBENHAVN NÆR GRØNLANDS NORDSPIDS.

UDOVER ARTIKLEN FRA KAP KØBENHAVN, BRINGER VI ARTIKLER OM $\delta^{18}\text{O}$ -VÆRDIER OG OM DE OPLYSNINGER HAVBUNDSSSEDIMENTER GIVER OM KLIMAET.

Forsidebillede: Kap København Formationens sandlag i det nordligste Grønland har givet overraskende oplysninger om klimaet for ca. 2,5 millioner år siden - ved Kvartærtidens begyndelse.

Forfatterne til artiklerne i dette nummer kan kontaktes på følgende adresser: Svend Funder, Geologisk Museum, Øster Voldgade 5-7, 1350-København K
Carsten Israelson og Torben Fronval, Geologisk Institut, Øster Voldgade 10, 1350 København K

-----VARV-----

VARV er udgivet med støtte fra Kulturministeriets bevilling til almen kulturelle tidsskrifter.

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

Telefon: 35 32 24 00, Geologisk Institut, København

Redaktion: Asger Berthelsen, Bjørn Buchardt, Henrik Fougt, Bjørn Hageskov, Jens Konnerup-Madsen, Steen Mølgaard, Mikael Pedersen og Svend Pedersen (ansvarshavende)

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

Lay-out: Bjørn Hageskov og Svend Pedersen

Tryk og repro: Levison+Johnsen+Johnsen a/s, København

VARV udkommer fire gange årligt. Prisen er 120 DKR i abonnement for 1997. Abonnement kan tegnes ved at indsende beløbet til VARV, postgiro 9 06 88 80, eller 130 SEK til VARV's svenske postgirokonto: 4388-5, eller 130 NOK til VARV's norske postgiro: 0806 1923234.

Adresseændringer bedes meddelt VARV!

©1996 VARV. Eftertryk af tekst og billeder kan kun ske efter aftale.

ET ANDERLEDES KLIMA

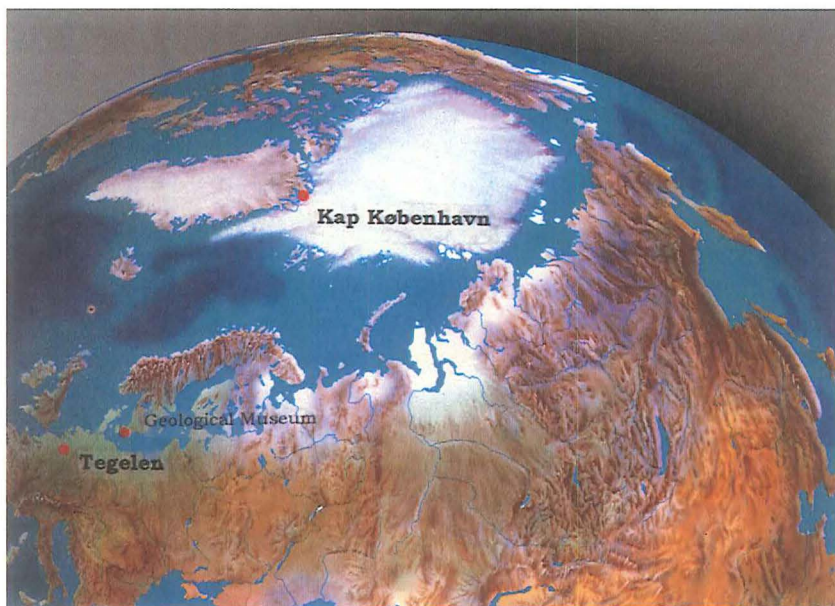
Svend Funder

Ved slutningen af Tertiærtiden, for 2,5 millioner år siden, rammes den nordlige halvkugle for første gang i Jordens nyere historie af en stor istid, og hermed indledes den lange række af istider og mellemistider, der har præget klimaet lige siden.

Men i de første to millioner år var klimaet forskelligt fra det, vi kender fra de seneste istider. Der var kortere mellem istiderne, og sandsynligvis havde perioderne imellem dem mere stabile naturforhold, end tilfældet er i nutiden. Klimaet i disse to millioner år var derfor på én gang mere stabilt og mere ustabil, end det har været i den senere del af Kvartærtiden. Det er ikke usandsynligt, at det var disse klimaforhold, der kom til at skabe de nutidige naturforhold, men desværre hører dette kapitel til de mest dunkle i den geologiske historiebog. Her på vore breddegrader, hvor de mest dybtgående ændringer fandt sted, fjernede isen nemlig under hver ny istid aflejringer fra de foregående perioder.

Der er dog nogle få steder, hvor man kan hente oplysninger. Et af de mærkeligste er nok Kap København Formationen nær Grønlands nordspids, der stammer fra tiden lige efter den første istid (figur 1). Denne geologiske lagserie var en af de helt store overraskelser, der viste sig under Grønlands geologiske Undersøgelses store geologiske kortlægningsarbejde i Nordgrønland i slutningen af 1970'erne. Lagserien stammer fra tiden umiddelbart efter den første store nedisning, og sand- og lerlagenes indhold af velbevarede rester af smådyr og planter har givet et enestående detaljeret billede af naturforholdene, som de var her i egnene nær Nordpolen på et tidspunkt, hvor den arktiske natur var i sin skabelse.

Det er imidlertid først nu, at det store palæontologiske arbejde under 'Kap København Projektet, Peary Land' er ved at være afsluttet, og tiden er inde til at danne sig et overblik over, hvad forekomsten fortæller om naturforholdene ikke bare i Nordgrønland, men også andre steder. I denne artikel skal vi se på klimaet som det var i Nordgrønland og på vore egne breddegrader - for herved at få et indtryk af klimamønsteret over et bredt udsnit af den nordlige halvkugle. I Danmark har vi ingen aflejringer fra dette tidsinterval, men de findes i det nederrhinske område på grænsen mellem Tyskland og det sydligste Holland (figur 1). Som det vil fremgå, adskilte klimaforholdene sig en del fra de nuværende.



Figur 1: Kap København på 82°30'N bredde og Tegelen på 52°00'N bredde ligger 3000 km fra hinanden, men begge steder er der aflejringer fra istidernes begyndelse. Den store hvide flade, der består af Grønlands indlandsis og Polbassinets havis, spiller en rolle for vort nuværende klima, fordi den reflekterer en betydelig mængde af sommerens sollys. Den eksisterede ikke ved istidernes begyndelse.



Figur 2: Kap København Formationen dækker et område som Møn. Landskabet består af strandsandsbakker fra den varme mellemistid. Bakkerne rejser sig fra en lerflade fra slutningen af Prætiglian-istiden. 1983-ekspeditionens lejr står på denne lerslette.



Figur 3: I Öbel grusgraven i Westphalen ses overgangen fra Tertiær til Kvartær i skiftet mellem det mørke flodslette-ler fornedden - det såkaldte Reuver ler - og de mere sandede aflejringer fra Tiglian-varmetiden ovenpå.

Kap København og Tegelen

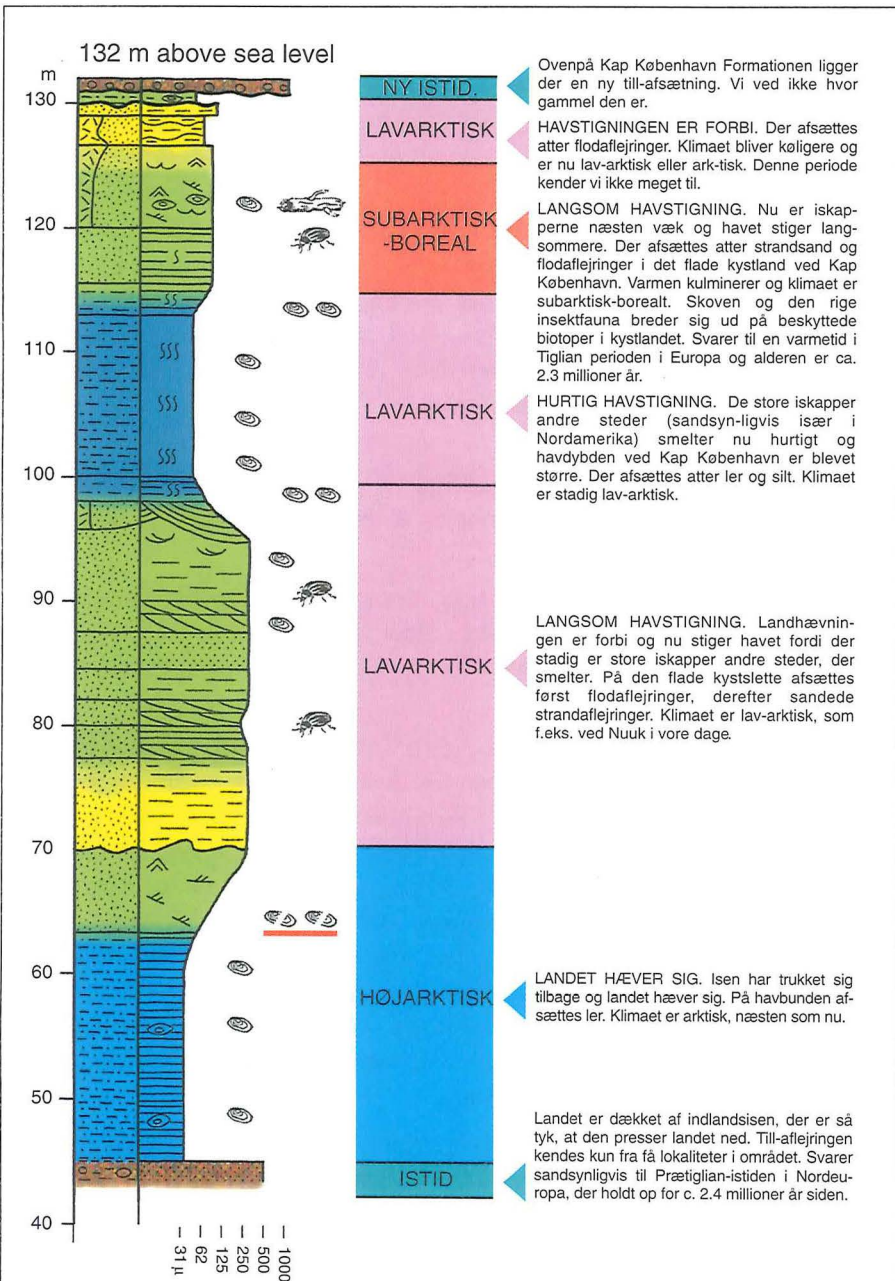
Kap København Formationen er opbygget af marine kystnære sedimenter og flodaflejringer afsat ved mundingen af den nuværende Børglum Elv, der dræner et stort område i det centrale Peary Land (figur 2). Sedimenterne dækker et landområde på størrelse med Møn langs kysten af Peary Lands sydøstlige hjørne.

Lagserien er vist skematisk i boks 1, og den historie man kan udlæse af lagene, minder meget om den, der er registreret fra andre mellemistider herhjemme: Da isen smeltede tilbage, begyndte det nedpressede land at hæve sig, og der afsattes dybvandsaflejringer, svarende til de ler-aflejringer, der afsattes ved slutningen af sidste istid i store dele af Vendsyssel.

Efter at nedpresningen var udlignet, afløstes landhævningen af havstigning. Denne startede langsomt og tog derefter fart, for til sidst atter at klinge af. Dette kunne svare til Stenalderhavets tid efter den sidste istid. Lagene ved Kap København ser altså ud til at afspejle en mellemistid, og det understøttes af den klimahistorie, man kan udlede af plante- og dyreresterne. De viser, at klimaet først var arktisk og derefter blev varmere. Varmen kulminerede, da skoven indvandrede til Nordgrønland på det tidspunkt, hvor havstigningen begyndte at aftage. Herefter blev det atter køligere.

Tegelen Formationen i det sydlige Holland består også af sand og ler (figur 3), ligeledes afsat ved mundingen af et større flodsystem, 'Protorhinen', forgængeren for den nuværende Rhinen og Meuse. Den synlige del af lagserien dækker et område af nogenlunde samme størrelse som Kap København Formationen og har nogenlunde samme tykkelse, men her er der ikke tale om, at der har været ismasser i nærheden.

I Tegelen Formationen ses klimaændringerne mellem istider og mellemistider som et skift mellem varme perioder med løvskov og køligere perioder, hvor bevoksningen blev mere steppepræget uden træer, men domineret af græsser og gråbynke.



Boks 1 Lagserien ved Kap København.

I søjlen til venstre er brun moræneaflejring, blå havaflejring fra dybt vand, grøn havaflejring fra lavt vand, gul flodaflejring.

Leret har været anvendt langt tilbage i tiden, og den videnskabelige udforskning går 100 år tilbage. Det, der først tiltrak sig videnskabelig opmærksomhed, var knogler af store pattedyr, der dukkede op under lergravningen. Pollenanalyse, foretaget af den hollandske geolog Waldo Zagwijn, har senere givet et billede af naturforholdene under de forskellige aflejningsperioder. Området er det 'klassiske' område for Sen Tertiær/Tidlig Kvartær i Nordeuropa, og de navne, vi bruger for de forskellige tidsperioder, stammer herfra. Således stammer både navnet Prætiglian for den første store istid og navnet Tiglian for den lange varmeperiode, der fulgte efter dette første kuldechok, fra stednavnet på den lille by Tegelen i Limburg.

Alderen

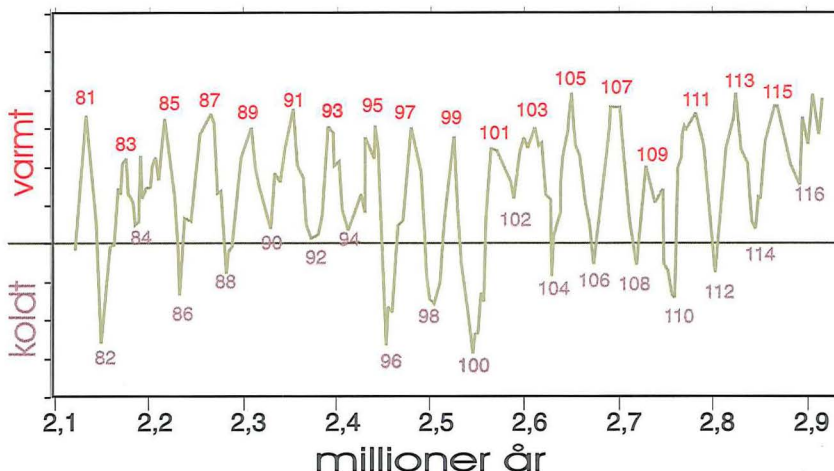
Hvis man skal foretage en sammenligning mellem to så forskellige miljøer som Tegelen og Kap København, er det helt afgørende, at disse er af samme alder.

Der er ikke nogen arktiske forekomster, der svarer til Kap København Formationen, og at finde frem til dens alder har været et problem, der har krævet mange forskellige metoder, megen tid og mange diskussioner.

Det var Rolff Feyling-Hanssen fra Århus Universitet, der i midten af 1980'erne ud fra foraminifer-faunaerne kunne vise, at sedimenterne måtte stamme fra perioden omkring Plio-Pleistocæn grænsen. Desværre er der ikke enighed om, hvor grænsen mellem Pliocæn og Pleistocæn - d.v.s. grænsen mellem Kvartær- og Tertiærtiden - bør placeres. Nogle lægger den ved den første indtrængen af koldt subarktisk vand i Middelhavet, for 1,8 millioner år siden. Det gælder f.eks. i Amerika. Andre, især her i Nordeuropa, lægger den ved begyndelsen af den første store istid på den nordlige halvkugle, Prætiglian istiden, for 2,5 millioner år siden. Kap København Formationen er altså Pliocæn i Amerika, men Pleistocæn i Nordeuropa.

Ved Kap København blev alderen kort efter Feyling-Hanssens undersøgelser understøttet af Niels Abrahamsens og Christian Marcussens analyser af de finkornede lags magnetisme. De mange palæontologiske undersøgelser, der siden er foretaget, har bekræftet dette og vist, at lagene må have en alder på ca. 2,5 millioner år.

Endnu større nøjagtighed i aldersbestemmelserne får man ved at vende blikket mod dybhavet. I de dybe oceaner registreredes opbygningen af de store iskapper gennem de kemiske ændringer, der skete med havvandet på grund af den store fordampning. Ændringerne indbyggedes i skallerne på havbundens mikroorganismer og kan aflæses i deres kemiske sammensætning i borekerner (figur 4).



Figur 4: Klimasvingninger set i dybhavets foraminiferskaller. Numrene viser 'isotopstadier' svarende til istider (lige numre) og varmetider (ulige numre). Den første store istid på den nordlige halvkugle er stadijerne 100-96, og herefter følger Tiglian varmetiden. Kap København Formationens varmetid svarer til én eller flere af varmetiderne mellem stadium 96 og stadium 82 (fra Raymo og Ruddiman).

Som nævnt viser Kap København Formationens sedimenter, at en istid holdt op og fulgtes af en varmetid. Hvis vi går ud fra, at begebenhederne i Peary Land svarer til den globale udvikling, kan forløbet kun passe, hvis man antager at istiden var den, der i dybhavskernen hedder 'isotopstadium 96', som netop er afslutningen af Præ-tiglian-istiden for 2,4 millioner år siden. Efter denne istid fulgte

den lange Tiglian varmeperiode, og først 300.000 år senere - for 2,1 millioner år siden - kom den næste større istid.

Ved at kombinere de forskellige metoder og oplysninger kan man derfor antage, at Kap København Formationen er samtidig med afslutningen af Prætiglian istiden og en eller flere af de varmetider, der fulgte efter i løbet af Tiglian perioden for ca. 2,3 millioner år siden.

I Holland kendes der to forskellige varmeperioder fra dette tidsrum, og selvom det er mest sandsynligt, at varmetiden ved Kap København svarer til den første af dem, kan vi ikke være sikre på det. Det betyder heller ikke så meget, da de enkelte varmetider ser ud til at have lignet hinanden meget. Det vigtigste er, at vi både i Holland og Nordgrønland har at gøre med kulminationen af en varmetid og ikke to tilfældige punkter på en udvikling.

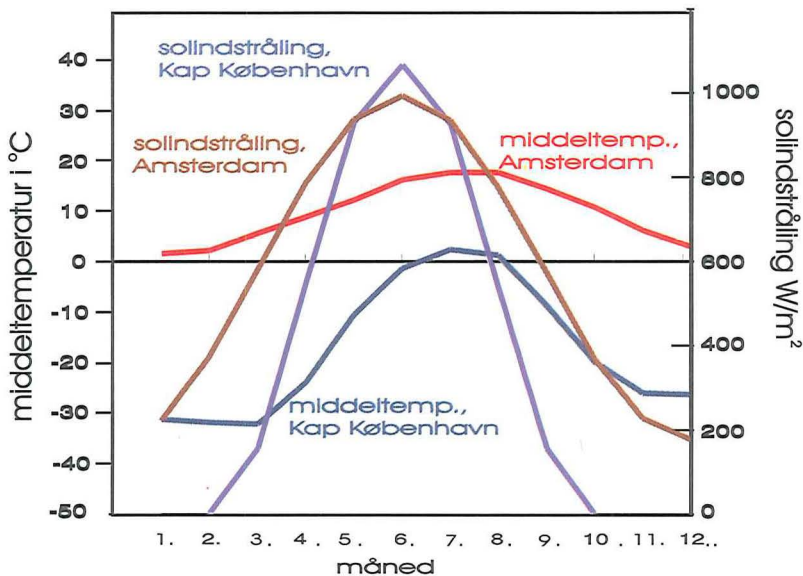
Klimaet dengang og nu

Figur 5 viser nuværende temperaturer og insolationen - dvs. mængden af solenergi pr m^2 - ved Station Nord, 100 km syd for Kap København, og i Amsterdam. Det er ikke overraskende, at det er koldere i Grønland end i Holland, men det bør alligevel bemærkes, at solindstrålingen faktisk er større i Nordgrønland i de tre sommer måneder. Den årlige indstråling i Nordgrønland udgør alligevel ikke mere end 62% af den hollandske.

Rekonstruktionen af fortidens klima bygger på plante- og dyrefossilerne i de to aflejringer. Langt de fleste af Kap København Formationens arter lever stadigvæk rundt om på Jorden og klimarekonstruktionerne bygger på deres nuværende udbredelse. Nogle vil måske indvende, at man ikke kan regne med, at en dyreart stiller de samme krav til klimaet gennem millioner af år. Der er dog meget der tyder på, at de fleste arter er meget konservative, og at de reagerer på ændrede klimabetingelser ved at udvikle nye arter snarere end at ændre deres krav til miljøet.

Heldigvis er der flere uafhængige kilder til klimaplysningerne: landjordens vegetation, som Ole Bennike har beskrevet; de marine muslingekrebsfaunaer, som er beskrevet i to afhandlinger af Elizabeth Brouwers, Niels Oluf Jørgensen og Thomas Cronin og af David Penney; insektfaunaerne, som for nylig har givet den mest detaljerede

redegørelse om klimaet, beskrevet af Jens Böcher; og endelig molluskfaunaerne, beskrevet i et manuskript af Leifur Símonarsson, Kaj Strand Petersen og forfatteren. Der er således et meget varieret materiale både fra land og hav til at give et indtryk af klimaforholdene i Nordgrønland på dette tidspunkt.



Figur 5: Månedlige middeltemperaturer og solindstråling på atmosfærens yderside ved Kap København (blå kurver) og Amsterdam (røde kurver) - solindstrålingsdata fra Berger og Loutre.

I begyndelsen - mens landet hævede sig - var klimaet koldt og arktisk, måske noget i retning af det nuværende. Det fremgår af den sparsomme fauna af muslingekrebs og muslinger. Der er ingen plante- og insekter i dette afsnit, de kommer derimod i havstigningsfasen. Her blev landet dækket af fjeldheder af dværgbirk, mosebølle, revling og andre af de hedebuske, vi kender så godt fra vore dages grønlandske fjeldheder. Insektfaunaen har tilsvarende vist, at klimaet var lavarktisk med temperaturer for varmeste måned på mellem 5°C og 10°C, svarende til forholdene ved Godthåbsfjorden i vore dage. Denne

udvikling mod et varmere klima fortsætter og kulminerer på det tidspunkt, da havstigningen begynder at aftage, og hvor træerne indfinder sig. Men det blev aldrig til nogen tæt skov (figur 6). Træerne dannede sandsynligvis gallerier langs vandløb og smålunde på beskyttede steder, mens de omgivende områder stadig var dækket af fjeldhede. Området lå på grænsen for trævækst, der overalt i verden ligger hvor temperaturen for varmeste måned er under 10°C.



*Figur 6: Skovens største træ. Skoven i Peary Land blev aldrig en skov i vor forstand. Træerne blev højst 3-4 m høje og havde en meget langsom vækst. Træet på billedet var et lærketræ af den uddøde art *Larix groenlandica* (foto J. Böcher).*

Vintertemperaturen er i almindelighed ikke særlig vigtig for de arktiske dyr og planter, der jo har indrettet sig på hviletilstand i denne årstid. Der er dog nogle træer, der ikke tåler meget strenge vintre. Det gælder de stedsegrønne taks og tuja (figur 7), som begge voksede ved Kap København. Ole Bennike sluttede ud fra dette, at den koldeste måned næppe har været koldere end -17°C i middeltemperatur. På den anden side: plante- og dyreresternes gode bevaringstilstand må forklares ved, at de blev indefrosset på grund af permafrost umiddelbart efter indlejringen. Permafrost eksisterer kun, hvor årsmiddeltemperaturen er lavere end ca. -5°C . Vintertemperaturen må derfor have været lav for at opveje den ret høje sommertemperatur og må have ligget på ca. -15°C - -17°C . Fundet af en rig insektfauna understøtter dette (figur 7). Endelig peger både floraen og insektfaunaen på, at klimaet dengang var mere nedbørsrigt. Mange insekter stammer fra våde biotoper, og fra undersøgelser af træerne er det påvist, at der var et snelag på ca. 1 m om vinteren (figur 8).

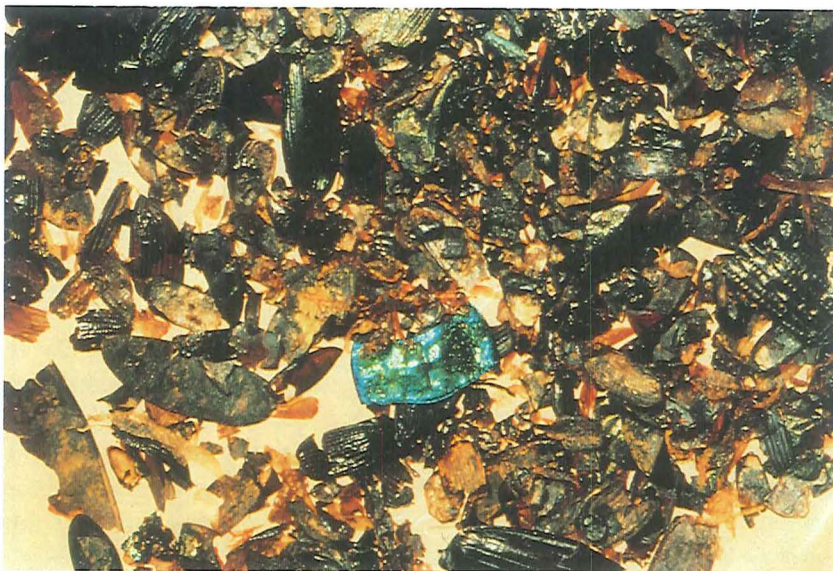
I havet var forholdene mærkeligt nok ikke så gode; ganske vist viser muslinger og snegle, at også havtemperaturene kulminerede. Denne kulmination var dog ikke så forskellig fra nutidens forhold som forholdene på landjorden: ud af de halvtreds arter lever 70% stadig i området, mens de resterende 30% forekommer i andre områder i Grønland. Klimaet under varmekulminationen kan måske derfor nærmest sammenlignes med det, vi i dag finder ved skovgrænsen i det nordlige Labrador, hvor havtemperaturene ud for kysten også er lave.

Den øverste del af lagserien er oftest eroderet, men nogle få steder viser planteresterne, at klimaet nu atter var blevet køligere.

I Tegelen fulgtes Prætiglian istiden, som nævnt ovenfor, af flere varmere perioder adskilt af køligere perioder. Varmetiderne var dog ikke nær så forskellige fra nutidens, som de var i Nordgrønland. Perioden er først og fremmest kendetegnet ved, at en lang række af Tertiærtidens planter og dyr nu var forsvundet fra Europa. Men i den varmeste periode var der dog flere arter, der i dag ikke findes så langt mod nord. Det gælder f.eks. ægte kastanje, steneg og *Eucommia*-træet, der i dag kun vokser i Kina. Ud fra bevoksningen har Waldo Zaquwijn anslået, at klimaet ikke var væsentligt forskelligt fra nutidens: middeltemperaturen

for varmeste måned var ca. 20°C - ca. 2°C varmere end nu, mens koldeste måned var 2°C - som i dag. Ligesom i Grønland var klimaet ret nedbørsrigt.

Sammenligningen viser altså, at mens det højarktiske område var meget varmere end nu, var forskellen på vore breddegrader ikke ret stor. I det følgende skal vi se nærmere på denne ejendommelige klimasituation.



Figur 7: Insektrester fra et moslag i Kap København Formationens sand. Insektfaunaerne tyder på, at klimaet var varmere end det, planterne viser, med sommertemperaturer næsten som i Danmark i vore dage. Forskellen kan muligvis skyldes, at insekter er i stand til at reagere på kortvarige ændringer og derfor registrerer maksimumtemperaturer (foto J. Böcher).

Det varme Arktis

Umiddelbart kan man tænke sig tre forklaringer på, at Nordgrønland var så meget varmere end i dag: 1) større varmetilførsel sydfra, 2) ændringer i solindstrålingen på de nordligste breddegrader, 3) eller 'lokale forhold'.

Figur 8: Vintrene i Nordgrønland var også dengang kolde og blæsende, og det kunne være en fordel at benytte sig af snedækkets beskyttelse. Det lille tuja-træ (Thuja occidentalis) fra Kap København Formationen nåede aldrig at blive højere end vintersnedækket, d.v.s. ca. 1 m (foto O. Bennike).



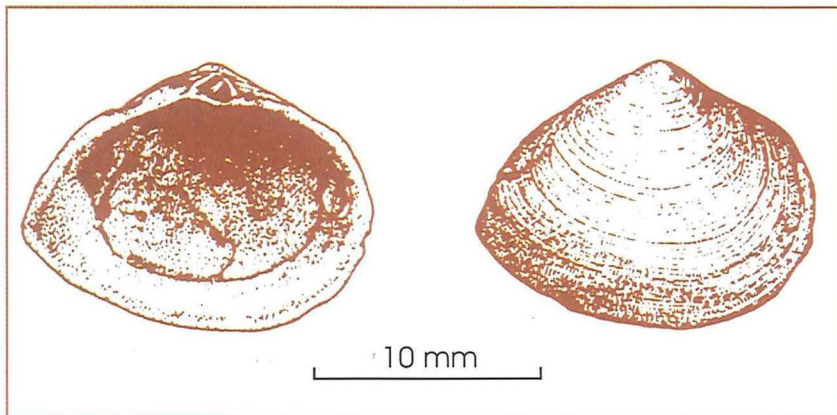
I vore dage er områder som f.eks. Nordnorge meget varmere end de burde være takket være varme, der er tilført gennem hav- og luftstrømme fra sydlige breddegrader. Kunne man tænke sig, at der dengang førtes endnu mere varme nordpå, således at også det nordligste Grønland fik glæde af dette?

Muslinge- og sneglefaunaerne har vist sig at være følsomme indikatorer for indstrømningen af varmt Atlanterhavsvand i Arktis, og dermed også for mængden af 'importeret' varme. Men som omtalt ovenfor er disse faunaer overraskende nok meget lig de nuværende, og de arter, der er karakteristiske for det varme vand, er kun sparsomt til stede (figur 9). Selvom tilførslen af varme altså nok var lidt større end nu, er det altså næppe her, forklaringen på det varme klima ligger.

Jordaksehældningen

Lad os derfor se på den næste forklaring: ændring i solindstrålingen på de høje breddegrader.

Vi ved, at solindstrålingen på Jorden ændrer sig som følge af ændringer i formen på Jordens bane om solen og i jordaksens hældning i forhold til banen - de såkaldte 'orbitale kræfter' eller 'Milankovich effekten'. Ændringerne i Jordens bane, dens orbit, betyder først og fremmest ændringer i fordelingen af indstrålingen på Jordens overflade.



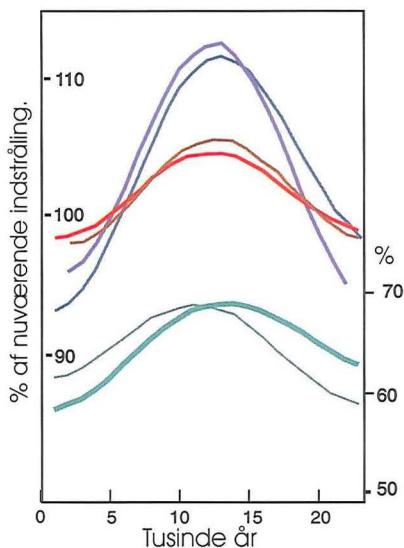
Figur 9: Skaller af østersømusling (*Macoma baltica*) fra Kap København Formationen. Østersømuslingen lever i dag langs Grønlands vestkyst op til egnene ved Nuussuaq. Blandt muslingerne og sneglene er den en af de få, der viser, at havtemperaturerne i Nordgrønland dengang var noget højere end nu. Mærkeligt nok ser det ud til at forekomsten ved Kap København er blandt de ældste for denne musling, der i dag er en af de mest almindelige langs vore kyster (tegning C.K. Rasmussen).

For de arktiske områder er især ændringerne i jordaksens hældning vigtig. Jordaksens hældning i forhold til banen betyder, at solen står højere på himlen om sommeren end om vinteren. Ændringer i aksehældningen er især mærkbar på de høje breddegrader, hvor den årlige solindstråling i perioder med høj aksehældning er næsten 20% højere end i perioder med lav hældning. Den samtidige variation på vore breddegrader er mindre end det halve. Det vil sige, at ændringen i aksehældning ikke alene betyder, at klimasvingningerne forstærkes i Arktis, men også at temperaturforskellen på nordlige og sydlige breddegrader udjævnes i varmeperioderne. Sandsynligvis lå Kap København Formationens varmetid i en af perioderne med maksimal jordaksehældning og lav temperaturforskel.

Jordaksehældningen gennemløber imidlertid en cyklus i løbet af 41.000 år, og det vil sige, at der har været talrige situationer med maksimal hældning, uden at der har vokset træer i Nordgrønland. Hvis man også ser på de øvrige orbitale kræfter, er der ganske vist færre situationer med optimale forhold, men der var dog en næsten lignende situation under den sidste mellemistid, for 125.000 år siden. På den tid var solindstrålingen kun en anelse lavere end i Tiglian-perioden, og nord-syd forskellen ved mellemistidens begyndelse var næsten den samme (figur 10). Også i denne periode oplevede de arktiske områder en usædvanlig varme, men skoven nåede aldrig op på de høje nordlige breddegrader og indlandsisen smeltede ikke væk som under Tiglian-perioden.

Ændringer i solindstrålingen har altså givetvis spillet en rolle for det varme klima i Nordgrønland, men også andre faktorer må have spillet ind.

Figur 10: To mellemistider. Årlig solindstråling på 80°N bredde (blå) og 50°N bredde (rød). Under en Tiglian-varmetid for 2,3 millioner år siden (fuldt optrukket) og Eem mellemistiden for 125.000 år siden, angivet i procent af den nuværende indstråling (venstre akse).



Kurverne forneden (grønne) angiver solindstrålingen på 80°N bredde udtrykt i procent af indstrålingen på 50°N bredde (højre akse) - et mål for temperaturudjævningen mellem arktis og mellem-breddegraderne. Aksen forneden angiver tid i årtusinder fra mellemistidernes begyndelse til deres slutning. Kurverne viser, at solindstrålingen varierer betydeligt mere på de høje breddegrader end på mellem-breddegraderne (data fra Berger og Loutre).

Indlandsisen var væk

Lad os derfor se på den sidste mulighed - de 'lokale forhold'. Naturligvis kan klimaet ikke udvikle sig lokalt, uden at det har indflydelse på andre steder. Men der er en faktor, der bevirker, at Grønlands klima er anderledes end tilsvarende områder andre steder i Arktis: indlandsisen. Var den der også dengang?

Ud fra de temperaturforhold, der herskede under Kap København Formationens dannelse, og den beregnede temperaturforskel mellem Holland og Grønland kan man nogenlunde slutte sig til, hvordan forholdene må have været i resten af Grønland, og det kan siges med sikkerhed, at indlandsisen ikke kan have eksisteret under Kap København Formationens varmetid.

Hvordan Grønland kunne have set ud på det tidspunkt ses i boks 2. Den store hvide isflade var erstattet af en grøn overflade af skov og hede. Samtidig kan man også ud fra både aflejringerne og det marine dyreliv slutte, at der ikke som nu kan have været permanent havis langs kysterne. Dette har givetvis betydet, at klimaet overalt i Grønland var anderledes end nu. Men kan det forklare, at træer kunne vokse ca. 1000 km nordligere end noget sted på Jorden i dag?

I moderne klimamodeller har man prøvet at beregne, hvordan klimaet ville være, hvis man fjernede de store hvide flader, og modellerne synes faktisk at fortælle, at netop de arktiske områder ville blive varmere - uden at det ville have nogen stor effekt på mere sydlige breddegrader.

En væsentlig del af forklaringen på det varme grønlandske klima ligger således måske i, at indlandsisen var væk. Men der er stadig et problem: hvorfor var den væk? Klimamodellerne fortæller nemlig også, at det ville kræve et betydeligt varmere klima end det nuværende at fjerne isen, så det må have været varmt allerede før indlandsisen smeltede

'Den mellem-Pleistocæne revolution'

Det blev nævnt ovenfor, at iskapperne i den sidste del af Kvartærtiden under de seneste istider har haft en tendens til at blive større og større. Udviklingen af de store 'super-iskapper' begyndte for knap en million år siden. Indtil da var iskapperne mindre. Under den første store istid,

Prætiglian istiden, nåede den totale mængde af is på landjorden således kun op på 60-75% af mængden under den sidste istid. Dette skift i de overordnede klimaforhold kaldes af nogle for 'den mellem-Pleistocæne Revolution'. De fleste anser dog udviklingen for at være langsom og gradvis. Uanset om den foregik hurtigt eller langsomt har 'den mellem-Pleistocæne Revolution' haft stor betydning for klimaet. Blandt andet er den tendens til abrupte klimændringer, der har været diskuteret meget i den senere tid, tilsyneladende knyttet til den nye klimatype, der kom efter 'revolutionen'.

For mellemistiderne kom de store mængder is på landjorden til at betyde, at når varmen indfandt sig ved istidens slutning, måtte en stor del af den bruges på at smelte is, samtidig med at iskappernes indvirkning på klimaet - især ved tilbagestråling af sollys og deres indflydelse på de globale atmosfæriske og oceaniske transportsystemer - holdt sig langt ind i det, der burde være en mellemistid. I den mellemistid, vi lever i nu, kulminerede solindstrålingen her på vore breddegrader for ca. 11.000 år siden. På dette tidspunkt var der endnu store iskapper både i Skandinavien og Nordamerika, og Danmark var dækket af kølige lyse birke- og fyrreskove. Det var først nogle tusinde år senere, da iskapperne var helt væk, at varmen kulminerede, og landet blev dækket af tæt linde-urskov. Solindstrålingen var da på vej ned igen.

Da iskapperne i den tidlige del af Kvartærtiden var mindre, kom mellemistiderne ikke til at opleve denne forsinkelse og solindstrålingen kunne mere ubeskåret komme landjordens plante- og dyreverden her på de nordlige breddegrader til gode. På denne måde kom istidernes rytme til at spille en rolle for mellemistidernes plante- og dyreliv.

Et anderledes klima

Forklaringen på, at det ved istidernes begyndelse for 2,3 millioner år siden var varmt i de nordlige arktiske egne, mens det forholdsvis ikke var nær så varmt i Nordeuropa - at den grønlandske indlandsis var væk - at træer kunne vokse i verdens allernordligste egne, 1000 km nord for de nordligste træer i vore dage - at rige og diverse økosystemer kunne udvikle sig på land, mens havets dyreliv meget lignede det nuværende - ligger altså sandsynligvis i de overordnede klimaforhold, der herskede i

den to millioner år lange periode på overgangen mellem Tertiær- og Kvartærtiden.

Det, der kendetegnede klimaet dengang, var ikke så meget, at det var varmere eller koldere, men at det fulgte en anden rytme, der tilsyneladende ikke tillod istidernes iskapper at vokse sig så store, som dem vi kender fra de senere istider. Hvad var så grunden til, at klimaet skiftede rytme midt i Kvartærtiden? Dette spørgsmål har været diskuteret indgående gennem en del år, men den diskussion skal vi ikke komme ind på her.

Boks 2 Grønland for 2,3 mill. år siden - set fra satellit.

Grønland er et skovland. Overalt i lavlandet, og ikke mindst i de brede flodbække-ner i Nord- og Sydgrønland vokser skoven tæt. Det er overvejende nåleskov som den tajga, der i vore dage dækker store dele af det nordlige Eurasien og Nordamerika. Men i det milde nedbørsrige Sydgrønland trives løvskoven, som i vore dages norske fjordlandskaber. Den vokser på fjeldsiderne langs vestkystens fjorde og i det udstrakte lavland omkring Grønlands største flod, 'Jakobshavn-floden'.

I fjeldområderne afløses skoven af fjeldheder - brune fordi sneen lige er smeltet. Fjeldheden er hovedsageligt sammensat af de dværgbuskarter, der også i dag opbygger den grønlandske 'tundra'. I Sydgrønland ligger skovgrænsen i en højde af ca. 1000 m, men mod nord er den meget lavere. Helt mod nord, ved kysten af det Arktiske Ocean, når fjeldheden helt ned til kysten.

Langs Grønlands ryggrad, fjeldkæden der strækker sig langs østkysten, er nedbøren stor, og her er der iskapper med kælvende gletschere, der strækker sig ned ad de stejle fjeldsider.

Det grønlandske fjordlandskab eksisterer åbenbart også her ved slutningen af Tertiærtiden. Det er lidt overraskende, fordi fjordene har været betragtet som kortlivede gletscher-erosionsformer, der i deres nuværende form især var dannet under de senere istider. Men Kap København Formationens placering på hjørnet af Grønlandshavet og Independence fjorden viser, at denne kyst lå på næsten samme sted som nu. Desuden tyder foreløbige resultater på, at lignende forekomster findes flere steder langs med denne fjord. Også i Scoresby Sund findes der sen-Tertiære havaflejringer inde i fjordsystemet. Så i hvert fald de større grønlandske fjorde eksisterer allerede her ved Tertiærtidens afslutning. Der må altså have været indlandsis og gletschere i Grønland længe før afslutningen af Tertiærtiden.

Landskabets højdeforhold er baseret på en modelberegning af Letréguilly, Reeh og Huybrechts. Bevoksning, skovgrænser og gletschere er beregnet ved intrapolation af temperaturdata fra Kap København og Holland sammenlignet med nutidens - og tilsat en stor dosis fri fantasi.



Anvendelse af iltisotoper i klimaforskning

Carsten Israelson

Hvad er isotoper?

Atomkerner består af positivt ladede **protoner** (Z) og neutrale **neutroner** (N). Atomkernerne er omringet af en sky af negativt ladede **elektroner**. Atommassen (A) er defineret som summen af protoner og neutroner:

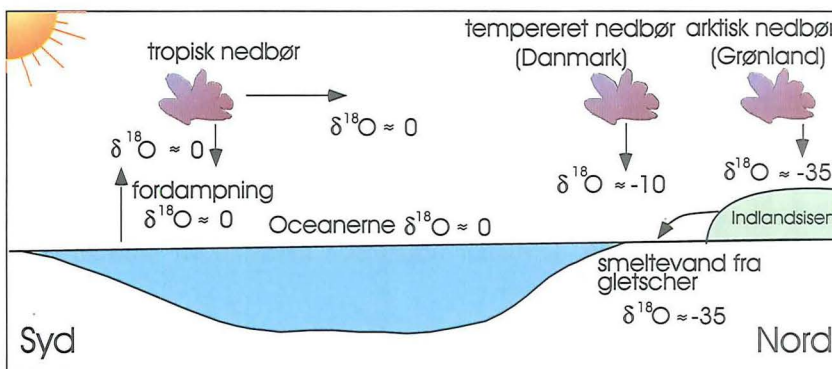
$$A = Z + N$$

Et grundstof er karakteristisk ved antallet af protoner, som definerer dets plads i det periodiske system. Antallet af neutroner kan imidlertid variere og grundstoffer med samme antal protoner, men forskelligt antal neutroner, kaldes **isotoper**. Studiet af isotoper har stor betydning i geologi, fordi der i naturen forekommer **fraktionering** af forskellige isotoper af det samme grundstof. Fraktionering mellem forskellige mineral-, gas- og vandfaser skyldes, at visse - termodynamiske - processer er afhængige af massen af atomerne. Fraktionering er derfor først og fremmest temperaturafhængig, og forholdet mellem forskellige isotoper i et mineral, en gas- eller vandfase kan således fortælle noget om oprindelsen og dannelsesstemperaturen.

Da Harold C. Urey i 1934 fik Nobelprisen for opdagelsen af brintisotopen deuterium, var det starten på en udvikling, der senere skulle få stor betydning for geologien. Urey og kollegaer identificerede i 40'erne iltisotoperne og foreslog for første gang, at der kunne være fraktionering af isotoper ved udfældning af kalciumkarbonat fra en vandfase. **Isotopgeologi** er nu en gren af den mere traditionelle geologi og et vigtigt værktøj i tolkningen af geologiske processer. Massespektrometre til måling af isotopforhold i grundstoffer er blevet bedre og billigere i løbet af de sidste 25 år, og dette har betydet en rivende udvikling indenfor isotopgeologien. Især indenfor klimaforskning og hydrologi har anvendelsen af iltisotoper, som denne artikel handler om, betydet et gennembrud.

Ilt (eller oxygen) er nok det grundstof, som er bedst studeret med hensyn til dets isotopiske sammensætning. Den indlysende grund er, at

det er det mest almindelige grundstof på jorden, og at det indgår i vand og mange vigtige mineraler. Grundstoffet ilt (O) har plads nummer 8 i det periodiske system, hvilket betyder, at det har 8 protoner i sin atomkerne. Der findes 3 naturligt forekommende iltisotoper med atommasserne 16, 17 og 18, hvilket vil sige, at deres atomkerne indeholder henholdsvis 8, 9 og 10 neutroner. Af disse udgør ^{16}O 99,63% medens ^{17}O og ^{18}O kun udgør henholdsvis 0,0375% og 0,1995%.



Skematisk syd-nord profil af det hydrologiske kredsløb og iltisotopsammensætning.

Iltisotoper i det hydrologiske system

Ilt findes i mange naturligt forekommende forbindelser, hvoraf vand (H_2O) er den mest almindelige. Fraktionering af iltisotoper i vand sker gennem fordampning og ved kondensation af vanddamp.

Medens iltisotopsammensætning af havvand stort set er den samme overalt, udtrykt som $\delta^{18}\text{O} = 0$, er $\delta^{18}\text{O}$ værdierne i nedbør negative (se indsat boks). Fraktionering af iltisotoper i nedbør sker gennem fordampning og kondensation. De tre vigtigste faktorer der påvirker iltisotopsammensætningen af nedbør er **temperatur-, højde- og breddegradseffekten.**

Iltisotopforholdet beskrives ofte som en såkaldt delta-funktion (δ). Delta defineres som en promille - ‰ - forskel i forholdet $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ af en standard:

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{prøve}} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}} \right] / \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}} \times 1000$$

For vand udtrykkes den isotopiske sammensætning som promille af standarden **SMOW** som står for 'Standard Mean Ocean Water'. SMOW standarden har et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ forhold tæt på havvand, og en havvandsprøve vil derfor have en $\delta^{18}\text{O}$ værdi tæt på 0. En prøve som er relativt beriget i ^{16}O i forhold til havvand, som f.eks. en regnvandsprøve, vil have negative $\delta^{18}\text{O}$ værdier.

Iltisotopsammensætningen af karbonater beskrives som promille af standarden **PDB** (Pee Dee Belemnite). Den kretassiske belemnit, der var den oprindelige standard, er forlængst brugt op, men alle karbonatanalyser refereres stadig i forhold til den. En kalkskallet organisme eller anden karbonat udfældet i havvand vil normalt have $\delta^{18}\text{O}$ værdier mellem 0 og +4.

Højde- og breddegradseffekten er begge et resultat af den såkaldte 'rain-out effekt'. Nedbør, der kondenserer fra en vanddamp, vil nemlig være beriget i den tunge ^{18}O isotop (positive $\delta^{18}\text{O}$ værdier), hvilket igen betyder, at $\delta^{18}\text{O}$ værdien i den resterende vanddamp vil være mere negativ (beriget i ^{16}O). Nedbøren bliver derfor mere ^{18}O fattig (mere $\delta^{18}\text{O}$ negativ) jo længere væk fra dens oprindelsessted den falder. Eftersom det meste vanddamp dannes i troperne, hvor temperaturen og dermed fordampningen er størst, får nedbøren mere negative $\delta^{18}\text{O}$ værdier, jo længere nordpå den falder. Det samme gør sig gældende, når regnskyer driver ind over en bjergkæde eller en anden topografisk forhøjning og tvinges til at afgive sit vand. Det sidste vand i regnskyen, som falder højst oppe i bjergene, vil have mest negative $\delta^{18}\text{O}$ værdier.

I praksis betyder højde- og breddegradseffekten, at nedbøren i troperne har $\delta^{18}\text{O}$ værdier omkring 0, mens nedbøren i Danmark har $\delta^{18}\text{O}$ værdier omkring -10. Nedbør med de mest negative $\delta^{18}\text{O}$ værdier findes højst mod nord. Sne med $\delta^{18}\text{O}$ værdier helt ned til -50 er målt på toppen af den grønlandske indlandsis, hvor både breddegradseffekten og

højdeeffekten virker optimalt. Smeltning af sne og is fra store gletschere som den grønlandske indlandsis kan have stor betydning for den isotopiske sammensætning af overfladevandet i de nordlige havområder. Overfladevandet i Norskehavet og Grønlandshavet har således $\delta^{18}\text{O}$ værdier mellem 0 og -4.

Temperatureffekten betyder, at forskellen i isotopisk sammensætning mellem nedbør og vanddamp er afhængig af temperatur, således at fraktioneringen er mindre jo højere temperaturen er. Nedbør, som falder det samme sted og som er påvirket af den samme højde- og breddegradseffekt, vil have forskellige $\delta^{18}\text{O}$ værdier afhængig af lufttemperaturen. Nedbøren vil være mest negativ om vinteren, hvor lufttemperaturen er lavest og mindre negativ om sommeren, hvor lufttemperaturen er højest. Opdagelsen af temperatureffekten har betydet et gennembrud for studiet af klimaet gennem den sidste mellemistid-istid-mellemistids cyklus. Den meste berømte lokalitet for disse studier er den grønlandske indlandsis. Sneen, som senere er blevet til indlandsisen, er et 'lager' af nedbør fra de sidste 250.000 år. Eftersom højdeeffekten og breddegradseffekten stort set har været den samme for perioden, er variationer i sneens iltisotopforhold først og fremmest et udtryk for variationer i lufttemperaturen, da sneen faldt.

Iltisotoper i karbonat

Et andet vigtigt system, hvor iltisotoper har fundet anvendelse, er udfældning af kalciumkarbonat (CaCO_3) fra en vandfase. Dette er især vigtigt, når man studerer fossiler med karbonatskal. To faktorer styrer den isotopiske sammensætning af kalkskallede organismer: 1) $\delta^{18}\text{O}$ værdien i vandet som dyrene har levet i og 2) temperaturen. Forholdet mellem temperatur og isotopværdierne i vand og karbonat kan beskrives i palæotemperaturrelationen:

$$t (^{\circ}\text{C}) = 16,9 - 4,2(\delta^{18}\text{O}_{\text{karbonat}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{vand}}) + 0,13(\delta^{18}\text{O}_{\text{karbonat}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{vand}})^2,$$

hvor t er dannelsesstemperaturen for karbonaten. Dette betyder, at man kan bestemme palæovandtemperaturer ved at måle $\delta^{18}\text{O}$ værdien i fossiler, forudsat at man kender vandets $\delta^{18}\text{O}$ værdi (d.v.s. det vand dyret har levet i). Kender man derimod vandets temperatur eller kan

man antage, at den har været konstant gennem tiden, kan man bruge $\delta^{18}\text{O}$ værdien af karbonat til at bestemme variationer i vandets $\delta^{18}\text{O}$ værdi. Den sidste metode har fundet stor anvendelse ved studier af bentoniske (bundlevende) foraminiferer (mikrofossiler). I de tropiske oceaner kan man tilnærmelsesvis antage, at temperaturen ved havbunden har været den samme gennem Kvartærtiden. Variationen i $\delta^{18}\text{O}$ værdien af bentoniske foraminiferer er derfor udelukkende et resultat af variationer i oceanernes $\delta^{18}\text{O}$ værdi, som er direkte relateret til mængden af ^{16}O 'oplagret' i de polare iskapper. Variationen i den isotopiske sammensætning af bentoniske foraminiferer gennem tiden er derfor et udtryk for volumen af de polare iskapper. Volumen af ismasserne er styret af klimaet, og studierne af den isotopiske sammensætning af foraminiferer er derfor særdeles vigtig i klimastudier.



Figur 1: Det franske boreskib 'Marion Dufresne II' under det første IMAGE togt i GIN-havet i sommeren 1995. Skibet er udstyret med en moderne 'Piston'-prøvetager, der gør det muligt at tage uforstyrrede sedimentkerner af op til 50-60 meters længde.

Hurtige klimavariationer

Dybhavets klimaarkiv

Torben Fronval

Dybhavssedimenternes plads i klimaforskningen

Dybhavssedimenter har længe været anvendt med stor succes ved rekonstruktioner af fortidens klimavariationer. Dette skyldes, at sedimentationen på oceanbunden oftest foregår uden afbrydelser gennem millioner af år og at man kan bestemme sedimenternes alder med temmelig stor sikkerhed. Dette er en væsentlig forskel fra klimaarkiver fra land, idet disse med undtagelse af iskerner ofte er fragmentariske og uden en sikker aldersbestemmelse. Sedimentationshastigheden på oceanbunden varierer fra nogle få mm pr. 1000 år i dybe bassiner til ti-tals cm pr. 1000 år på højereliggende plateauer og 'sea-mounts', hvilket samtidig muliggør studier af klimavariationer på tidsskalaer fra millioner af år til ti-tals år.

Det største problem ved dybhavskerner er utilgængeligheden. Optagning af kerner er forbundet med store omkostninger og både boreskib (figur 1) og avanceret bore-udstyr kræves. De fleste togter foregår derfor i regie af store internationale videnskabelige konsortier som ODP (Ocean Drilling Program) og IMAGE (International Marine Past Global Change Study). IMAGE er et nyt stort europæisk ledet boreprogram, hvis hovedintention er at studere hurtige klimasvingninger indenfor de sidste 2-3 istider og mellemistider. Det første togt indenfor dette program løb af stabelen sidste sommer og foregik i det klimatiske set meget vigtige nordatlantiske område.

GIN-havet og Nordatlantens rolle i klimaudviklingen

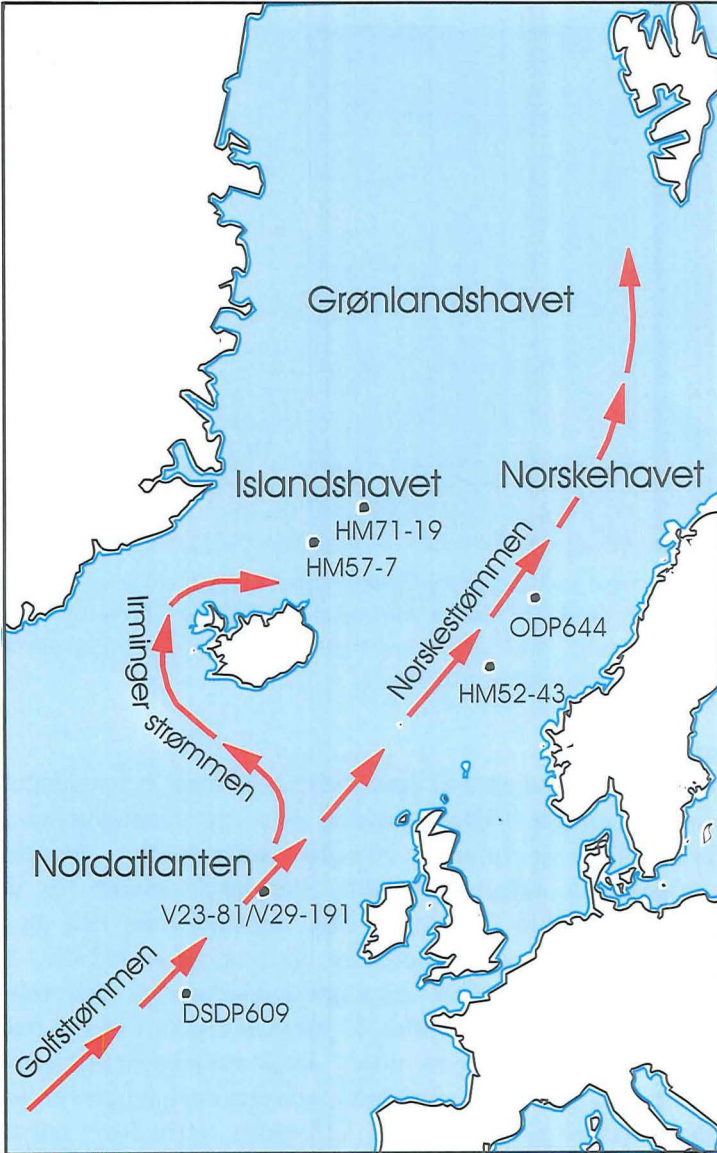
GIN-havet (Grønlands-, Islands- og Norskehavet) spiller en meget vigtig rolle for naturlige klimasvingninger på tidsskalaer fra millioner af år til mindre end århundreder (figur 2). Studier af klimaets reaktion på variation i indstråling viser, at de høje nordlige breddegrader er de første til at reagere på de periodiske variationer i den geografiske

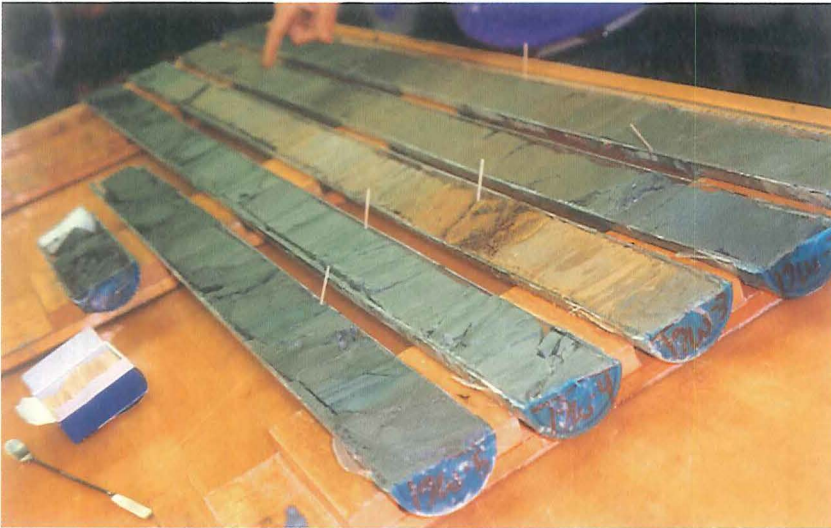
udbredelse af solindstrålingen - de såkaldte 'Milankovitch cykler' med frekvenser på henholdsvis 20.000, 41.000 og 100.000 år. Da størstedelen af verdenshavenes ventilerede dybvand dannes i GIN-havet, vil den tidlige reaktion og dermed klimaforandringen via dette dybvand kunne videreføres til resten af kloden.

Nyere studier af hurtige klimasvingninger samt computermodel forsøg indikerer samtidig, at processer på de høje nordlige breddegrader, inkl. GIN-havet, også igangsætter klimavariationer på tidsskalaer fra få tusinder af år og nedefter, dvs. variationer med højere frekvens end 'Milankovitch cykler'. Rollen som igangsætter af klimasvingninger medfører, at de fleste klimatiske variationer vil have størst udsving i dette område. Dette betyder, at landområderne omkring GIN-havet, inkl. Skandinavien, er meget sårbare overfor selv relativt små klimavariationer og at klimaforskningen derfor er specielt relevant for os 'nordboere'.

GIN-havet ligger i dag i den allemordligste del af Golfstrømmens udbredelsesområde og er karakteriseret ved store gradienter mellem varme atlantiske vandmasser og kolde polare vandmasser. I relativt varme perioder, som den nuværende mellemistid og den forrige mellemistid for ~120.000 år siden, vil klimaændringer, der skyldes ændringer i styrken eller placeringen af Golfstrømmen, derfor blive registreret i sedimenterne på GIN-havets bund (figur 3). Under sidste istid svækkedes Golfstrømmen, og polarfronten (grænsen mellem varme atlantiske og kolde polare vandmasser) vandrede sydpå til det nordlige Atlanterhav, hvorfor variationer i havcirkulationen i kolde perioder bedst registreres i dybhavssedimenter fra Nordatlanten. Til gengæld er istidssedimenterne fra GIN-havet ideelle til at studere fremrykning og tilbagesmeltning af de omkringliggende iskapper og dermed give vigtige oplysninger om klimaforholdene i Nordvesteuropa, Grønland, Svalbard og Island.

Figur 2 (s. 133): Kort over GIN-havet og Nordatlanten med angivelse af kernelokaliteter og varme havstrømme.





Figur 3. Farverige borekerner fra Grønlandshavet taget op under ODP togt 151 i sommeren 1993. De mange voldsomme ændringer i farve og struktur repræsenterer hurtige ændringer i sedimentationsmiljøet, der igen afspejler variationer i havcirkulation og klima.

Klimaparametre

En af de vigtigste parametre til beskrivelse af klimaet er temperaturen. Arts-sammensætningen indenfor marine dyre- og plantegrupper som f.eks. foraminiferer og diatomeer afspejler temperaturen i vandmassen på det pågældende tidspunkt. Kalk- eller kiselskallerne fra disse organismer afsættes på havbunden efter organismernes død og kan derfor anvendes som udgangspunkt for beregninger af fortidens havtemperatur. En af de bedste temperaturindikatorer er den relative optræden af den polare foraminifer *N. pachyderma* (s.) kontra mængden af mere varmekrævende arter. Iltisotopsammensætningen af kalkskaller fra foraminiferer giver også indirekte oplysninger om vandtemperaturen på et givet tidspunkt i fortiden, men dette signal er samtidig påvirket af ændringer i det globale isvolumen samt af variationer i tilstrømningen af let-isotopisk smeltevand fra de omkringliggende kontinenter.

Til bestemmelse af de omkringliggende iskappers størrelse analyseres sedimentets indhold af isdroppet materiale (IRD), dvs. mængden af materiale der er drysset ned på havbunden fra forbigående, smeltende isbjerge. Mængden af isdroppet materiale på et givet sted vil variere afhængigt af mængden af isbjerge, isbjergenes indhold af minerogent materiale (sten, grus og sand) samt temperaturen. Den vigtigste parameter er mængden af isbjerge, en faktor som primært er bestemt af størrelsen af iskapperne, idet produktionen af isbjerge vil stige efterhånden som iskapperne vokser og større partier af iskapperne får kontakt med havet. Stort indhold af IRD i sedimentet indikerer derfor store iskapper på de omkringliggende landområder.

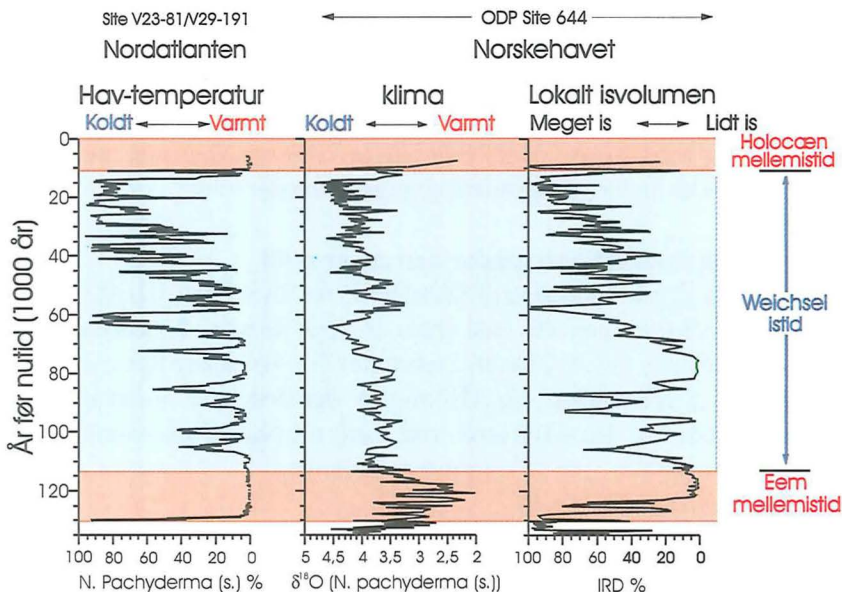
Hurtige klimavariationer under den sidste istid

Oprindeligt var den sidste istid (Weichsel, fra 115.000 - 10.000 år før nu) regnet som en periode med ensartet koldt klima i Nordeuropa og konstant isdække af GIN-havet. Resultater fra en række nye dybhavskerner fra Nordatlanten og GIN-havet demonstrerer imidlertid, at denne periode var karakteriseret ved store og pludselige variationer i både havtemperatur, havcirkulation og størrelsen af iskapperne på den nordlige halvkugle (figur 4).

De hurtigste svingninger, som har en varighed på 1000 år eller mindre, udgør dele af større klimatiske cykler af 5.000-10.000 års varighed. Hver af disse cykler begynder med en brat opvarmning, efterfulgt af en trinvis tilbagevenden til kolde forhold. Parallelt med temperaturfaldet sker en stigning i mængden af isdroppet materiale, reflekterende en udbygning af iskapperne på de omkringliggende kontinenter. Hver cyklus kulminerer med et minimum i temperatur og en maksimal tilførsel af isdroppet materiale.

Umiddelbart før overgangen til den næste varme periode sker en nedbrydning af de ustabile dele af de store iskapper, resulterende i en voldsom produktion af isbjerge og et voldsomt input af IRD til det Nordatlantiske område (de såkaldte 'Heinrich events'). Sammenligning af datasæt fra Norskehavet, Nordatlanten og den Grønlandske indlandsis viser at lufttemperaturen, havtemperaturen og størrelsen af de nordamerikanske og skandinaviske isskjolde (sandsynligvis også de

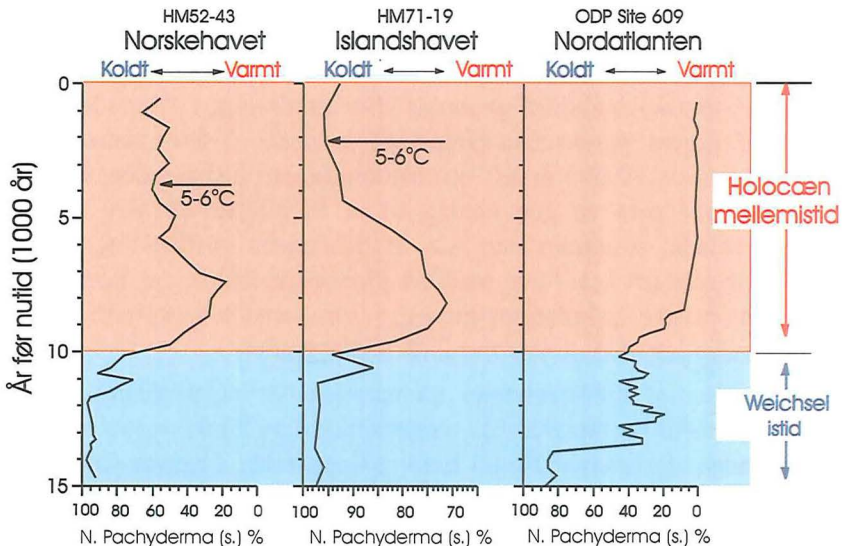
øvrige iskapper på den nordlige halvkugle) varierede i fase med hverandre. Dette demonstrerer, at de hurtige klimavariationer under sidste istid påvirkede hele den nordlige halvkugle og sandsynligvis også resten af kloden via bl.a. den globale havcirkulation.



Figur 4: Detaljerede marine klimadata omfattende de sidste 135.000 år. De meget urolige kurver dokumenterer, at den sidste istid (Weichsel) var en periode karakteriseret ved markante variationer i både havtemperatur og størrelse af de omkringliggende iskapper.

Et af de store spørgsmål indenfor klimaforskningen de sidste år har været, hvad der forårsagede de såkaldte 'Heinrich events', og hvordan disse kunne lede til den efterfølgende bratte opvarmning. Den tilsyneladende samtidighed af fluktuationer i forskellige isskjolde samt i luft- og havtemperatur indikerer, at udløsermekanismen må være ekstern til iskapperne eller at signalet bliver transporteret hurtigt fra et isskjold til resten af regionen. Den mest åbenbare udløser-mekanisme ville være øget varmetransport til de nordlige breddegrader, men der findes ingen evidens for øget varmetransport før de såkaldte 'Heinrich events' i

hverken Nordatlanten eller GIN-havet. I stedet kan man forestille sig et scenari, hvor kollaps og smeltning af ustabile dele af et iskjold leder til udskiftning af udstrømmende ferskvand fra nord med varmere vand fra syd (den såkaldte 'Superfjord varmepumpe'), f.eks. i GIN-havet. Den øgede varmestrøm mod nord vil så hurtigt betyde stigende temperatur (både i havet og på land), gøre de øvrige iskapper på den nordlige halvkugle mere ustabile og derved igangsætte i en ny klimacyklus.



Figur 5: Variationer i havtemperatur under den nuværende mellemistid (Holocæn). Norskehavet og Islandshavet er karakteriseret ved et gradvist temperaturfald af størrelsesordenen 5-6°C, mens temperaturen har været uændret eller svagt stigende længere sydpå i Nordatlanten.

Klimastabilitet og -variation i mellemistider

Den nuværende mellemistid (Holocæn) regnes som en periode med relativt stabile klimaforhold uden pludselige svingninger i temperatur, nedbør og isdække. I GIN-havet er der dog registreret et gradvist fald i

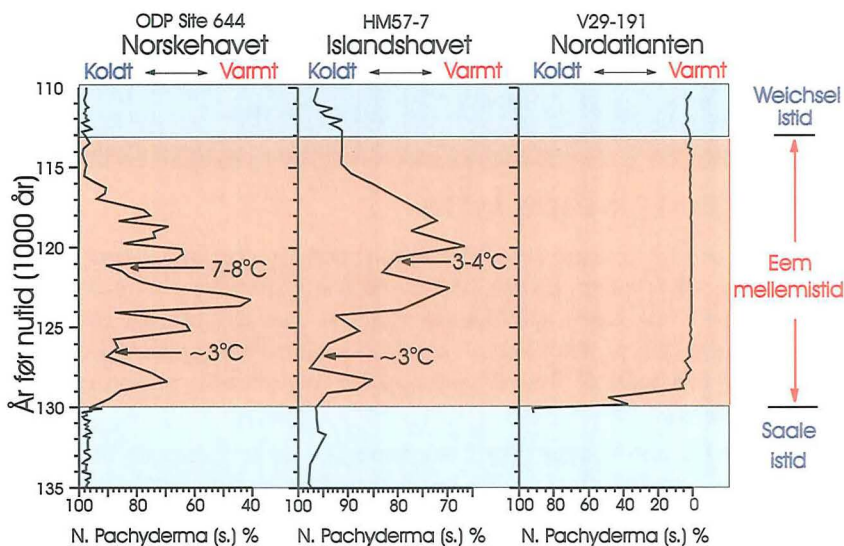
havvandstemperatur af størrelsesordenen 5-6°C fra tidlig Holocæn (9000-6000 år før nu) og frem til i dag (figur 5). Indenfor den samme periode er temperaturen i Østgrønland, Skandinavien og højtliggende dele af Europa, som f.eks. Alperne, faldet med 2-3°C, mens man i Sydeuropa og centralt i Nordatlanten har registreret uændrede eller svagt stigende temperaturer. Med andre ord er denne 'klimaforværring', modsat variationerne under sidste istid, begrænset til hav- og landområder på de højere nordlige breddegrader.

I lys af mulighederne for global opvarmning er et af de store spørgsmål indenfor klimaforskningen i dag, hvorvidt relativt stabile klimaforhold er typiske for mellemistider, eller om stabiliteten i Holocæn er atypisk, og om klimatisk ustabilitet er mulig eller sandsynlig i fremtiden. På grund af højere gennemsnitstemperaturer under sidste mellemistid (Eem, 115.000-130.000 år før nu) sammenlignet med nutiden, regnes denne periode som en god analog til et fremtidigt varmere klima. Computermodel resultater har vist, at den øgede opvarmning under Eem-mellemistiden kan have medført pludselige skift i det bestående hav - atmosfære cirkulations-mønster, resulterende i en periodevis kraftig nedkøling af de højere nordlige breddegrader.

Undersøgelser af dybhavskerner, pollensekvenser og grønlandske iskerner har indtil nu mundet ud i meget forskellige konklusioner vedrørende graden af klimavariation i Eem-mellemistiden. Nye resultater fra en række dybhavskerner fra GIN-havet (figur 6) og Labradorhavet viser imidlertid et entydigt billede af Eem som en periode karakteriseret af større og markant hurtigere klimasvingninger end den nuværende mellemistid.

To store og meget pludselige nedkølinger af størrelsesordenen 6-8°C samt en række mindre nedkølingsfaser kan erkendes i disse sedimentkerner (figur 6). Temperaturkurverne fra Norskehavet, Islandshavet og Labradorhavet har et nogenlunde ensartet forløb, hvilket indikerer at variationerne i forskellige grene af Golfstrømmen (Norskestrømmen og Irmingerstrømmen) er synkrone. Er dette tilfældet, er det sandsynligt at disse klimasvingninger har påvirket store dele af den nordlige halvkugle, inkl. både Skandinavien og Grønland. Hvis vi antager, at disse klimavariationer havde en geografisk udbredelse nogenlunde lig med

klimaforandringen fra tidlig Holocæn frem til i dag, så må temperaturvariationerne under sidste mellemistid have været af størrelsesordenen 3-4°C i Skandinavien og Grønland. Længere mod syd må variationerne i så fald have været langt mindre, hvilket stemmer godt overens med faktiske temperaturrekonstruktioner fra Nordatlanten (figur 6) og Sydeuropa, der generelt indikerer små variationer i temperatur under sidste mellemistid. Vores resultater understøtter også delvis resultaterne fra GRIP-iskernen, idet de dokumenterer, at klimaet på høje nordlige breddegrader var langt mindre stabilt under Eem-mellemistiden end under den nuværende mellemistid. Det er dog vigtigt at understrege, at de marine data antyder langt mere moderate temperatursvingninger end iskernen.



Figur 6: Variationer i havtemperatur under den forrige mellemistid (Eem). Norskehavet og Islandshavet er karakteriseret ved en række hurtige temperatursvingninger med amplituder på op til 7-8°C, mens temperaturen er stor set uændret i Nordatlanten.



Den første store istid

Spor efter den første store istid (Prætiglian istiden) blev først fundet i Holland for ca. 40 år siden. Denne istid sluttede for omkring 2,4 millioner år siden. Ganske vist nåede isen ikke til Holland, men der blev fundet frostkiler og andre spor af koldt klima i det gule sand over de mørke leraflejringer fra den forudgående Reuver varmetid (se foto ovenfor; personerne står på Reuver-leret).

Aflejringer fra isen kendes ikke i Nordeuropa - de er fjernet under senere istider. Ved Kap København i det nordligste Grønland var indlandsisen på dette tidspunkt ved at smelte tilbage, og der blev afsat store mængder af ler i det kolde hav, der fulgte den viggende isrand.

Kun ganske få steder i verden finder man aflejringer fra Prætiglian istiden. Alligevel kan man ud fra ændringer i oceanerne beregne, at isdækket nåede 60-75% af sidste isstids udbredelse. Drivende isfjelde i Atlanterhavet nåede så langt mod syd som ud for Spaniens kyster. Store mængder af isfjeldtransporterede sten på den norske sokkel viser, at skandinavisk indlandsis må have eksisteret, selvom den næppe nåede så langt sydpå som til Danmark.