

NATURLIGE KLIMAVARIASJONER (III)

Dynamisk forståelse av klimaendringene

JAN MANGERUD

Forrige artikkel omtalte små forandringer i jordas bane og stilling som gir en omfordeling av solinnstrålingen mellom årstider og mellom breddegrader. Dette gir store regionale variasjoner over tid, f.eks. varierer sommer-innstrålingen på våre breddegrader med opp til 20%.

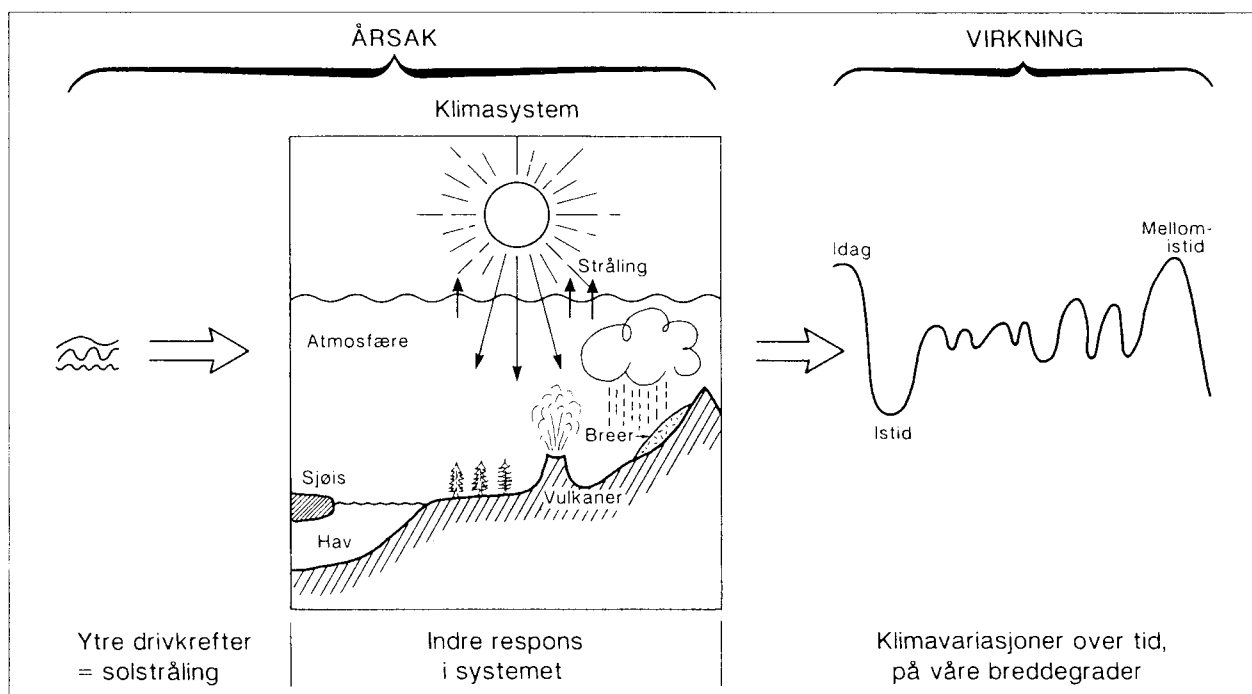
Likevel er den årlige middelinnstråling til hele jorda nesten konstant, den varierer med mindre enn 0,1%. En skulle derfor forvente at årsmiddeltemperaturen for hele jorda også var konstant. Slik er det imidlertid ikke. For siste istids maksimum viser de nyeste beregninger at den globale årsmiddeltemperatur var 3,5 til 5°C kaldere enn idag. Dette betyr at det finnes interne forsterkningsmekanismer i klimasystemet som utløses av årstidsvariasjoner (figur 1). En kan gjerne si at liten tue velter et stort lass.

Jan Mangerud er født i 1937 og er professor i kvartærgeologi ved Universitetet i Bergen. Han har vært gjesteforsker ved universitetene i Stockholm, Minnesota og Colorado, og er innvalgt som medlem i Det europeiske vitenskapsakademi. Hans viktigste forskningsfelt er forløpet av istidene i Norge, Svalbard og Grønland.

Vi kjenner idag årsaken til de store klimaendringene, og vi kjenner virkningen på jorda, om enn ufullstendig. Dette gir en helt unik mulighet til å identifisere og kvantifisere de prosesser som virker ved langsiktige klimaendringer. Dette er vi imidlertid ikke i stand til å gjøre tilfredsstillende idag, først og fremst fordi vi ikke kan beskrive utviklingen på jorda presist nok. I praksis er det den siste interglasiale / glasiale syklus (de siste 150 000 år) som gir best mulighet for å løse problemene, ganske enkelt fordi denne kan undersøkes i størst detalj. Mye forskning konsentreres også nå for å beskrive denne syklus over hele jorda, men det er langt fram. Dette er tidkrevende forskning, og vi mangler til dels dateringsmetoder for sediment i mange avsetningsmiljøer.

Vi skal i det følgende gi noen eksempler på involverte prosesser og tidsserier av parametre som kan si noe om hvordan klimasystemet reagerer.

DRIVHUSGASSENE GJENNOM SISTE ISTID
Snø akkumuleres hvert år på de øvre deler av breene. Når snøen blir tykk nok, omdannes den til is. Ved bunnen av snølaget skjer det altså en kontinuerlig omdannelse av snø til is. I snøen kan luft sirkulere i porene mellom snøkornene, mens isen er helt luft-tett. Ved omdannelse av snø til is fanges derfor



Figur 1. En illustrasjon av hva som skjer ved klimaendringer p.g.a. forandringer i innstråling. Vi kan betrakte klimasystemet som en komplisert maskin. Kraften som driver maskinen er solstrålingen, og på hver breddegrad varierer denne noe over tid; dette er her antydnet med de små kurver til venstre. Produktet som kommer ut av maskinen er klimavariasjoner over tid. Maskinen – den indre respons i klimasystemet – har forsterket variasjonene til svære amplituder på våre breddegrader.

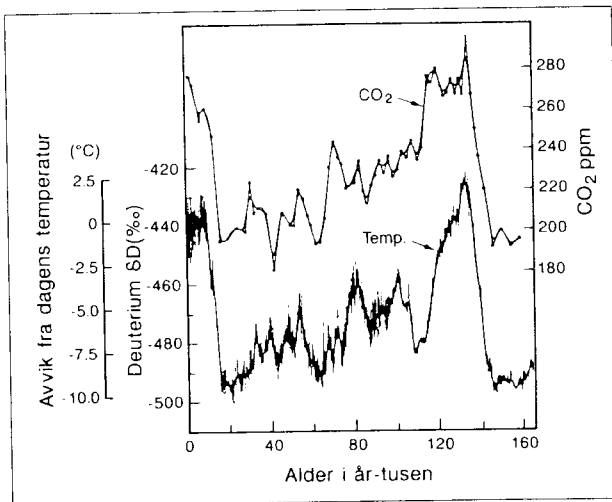
luft i små blærer i isen. Dette blir derved en naturlig prøvetaking og oppbevaring av luft fra atmosfæren. Ved Vostok-stasjonen i Antarktis har sovjetiske forskere boret gjennom mer enn 2000 m is, og derved fått en prøveserie av is og luftblærer som representerer de siste ca. 150 000.

I figur 2 er variasjonene i CO₂ i atmosfæren vist i øverste kurve. Vi ser at i siste mellomistid og i etteristiden er verdiene oppe i 280 ppm, altså vanlige preindustrielle verdier, mens det i siste istid var mye lavere CO₂ innhold i atmosfæren, helt nede i 180 ppm. Nedre kurve på figur 2 viser en temperaturkurve for Vostokstasjonen, beregnet fra hydrogen-isotopen deuterium.

Alderen på den eldste isen er dårlig kjent fordi isen ikke kan dateres og alderen er derfor beregnet fra modeller av akkumulasjon og isbevegelse. De fleste forskere mener at estimatene gir litt for høye aldre. Kurven viser at CO₂ svinger synkront med tempera-

turen: Når det er varmt er det mye CO₂, når det er kaldt er det lite, og svingningene er i hovedsak parallell med variasjonene av is på jorda. Det meste av CO₂-fluktuasjonene skyldes trolig prosesser i havet, eller utvekslingen av CO₂ mellom atmosfæren og havet. Noe av variasjonene skyldes at det var mye mindre skog under istiden.

Det viktige punktet i første omgang er at det må finnes prosesser på jorda som reagerer på årstidsvariasjonene («Milankovitch») og endrer CO₂-kretsløpet på en slik måte at CO₂ blir en forsterknings-mekanisme for klimaendringene. Ved bruk av generelle sirkulasjonsmodeller for atmosfæren (GCM) er det beregnet at forskjellen i CO₂ kan forklare 1,2°C av amplituden mellom istid og mellomistid. Hvis de samme prosesser virker ved en fremtidig temperatur-stigning på grunn av våre utslipp av drivhusgasser, kan vi forvente at drivhuseffekten også blir en selvforsterkende effekt. I forhold til pre-



Figur 2. Noen resultater fra boringene gjennom isen på Vostok stasjon i Antarktis. På horisontalskalaen er nåtiden til venstre, og siste varme mellomistid plottet omkring 120 000 til 130 000 år. Øverste kurve viser variasjonene i CO₂, med skala gitt på høyre side. For nederste kurve gjelder skalaene på venstre side. Denne viser egentlig innholdet av deuterium, men dette gjenspeiler luft-temperaturen på stedet, og viser at det på det kaldeste under siste istid var 10°C kaldere enn idag. Etter Barnola med flere (1987).

industrielle forhold, vil mer CO₂ avgis fra havet til atmosfæren, og derved vedlikeholde et høyere nivå i atmosfæren.

En annen klimagass som er påvist i luftblærene fra Vostok er metan. Den varierer parallelt med CO₂, og utgjør derved en annen forsterkningsmekanisme for klimændringer. Årsaken til svingningene i metan ligger imidlertid på kontinentene, særlig i myrer og permafrostområder. I amplituden mellom istid og mellomistid utgjør metan antagelig mindre enn en grad.

BREVARIASJONER

Isbreene reagerer primært på klimavariasjoner. Breene er jo i seg selv et resultat av kaldt klima, nemlig at det snør mer om vinteren enn det smelter om sommeren. Brevariasjonene virker imidlertid tilbake på klimaet, så mellom breer og atmosfæren er det flere vekselvirkninger.

Hvite flater reflekterer mer varmestraler

enn mørke flater; de har høyere albedo. I år med kalde somre (eller med mye snø om vinteren) vil snøen ligge lenger enn i et varmt år. Derved øker albedoen; mer varmestraler reflekteres til verdensrommet, og sommeren blir enda kaldere. Dette er en viktig forsterkningsmekanisme, og Milankovitch antok at det var denne som forårsaket de store amplituder i istidene. Så enkelt er det åpenbart ikke, men effekten er likevel meget viktig.

De store snø- og isdekte flatene reflekterte mye av innstrålingen på høye breddegrader på den nordlige halvkule under siste istids maksimum (se figur 3 i første artikkel). Dette bidro til senkningen av den globale årsmiddel-temperatur. Beregninger med generelle sirkulasjonsmodeller har imidlertid vist at dette vil influere lite på den sydlige halvkule. Hvis økning av albedo var eneste mekanisme, skulle derfor den sydlige halvkule ikke vært særlig nedkjølt, fordi isarealet ikke økte tilsvarende der. Klimavariasjonene var imidlertid overraskende parallele på begge halvkuler.

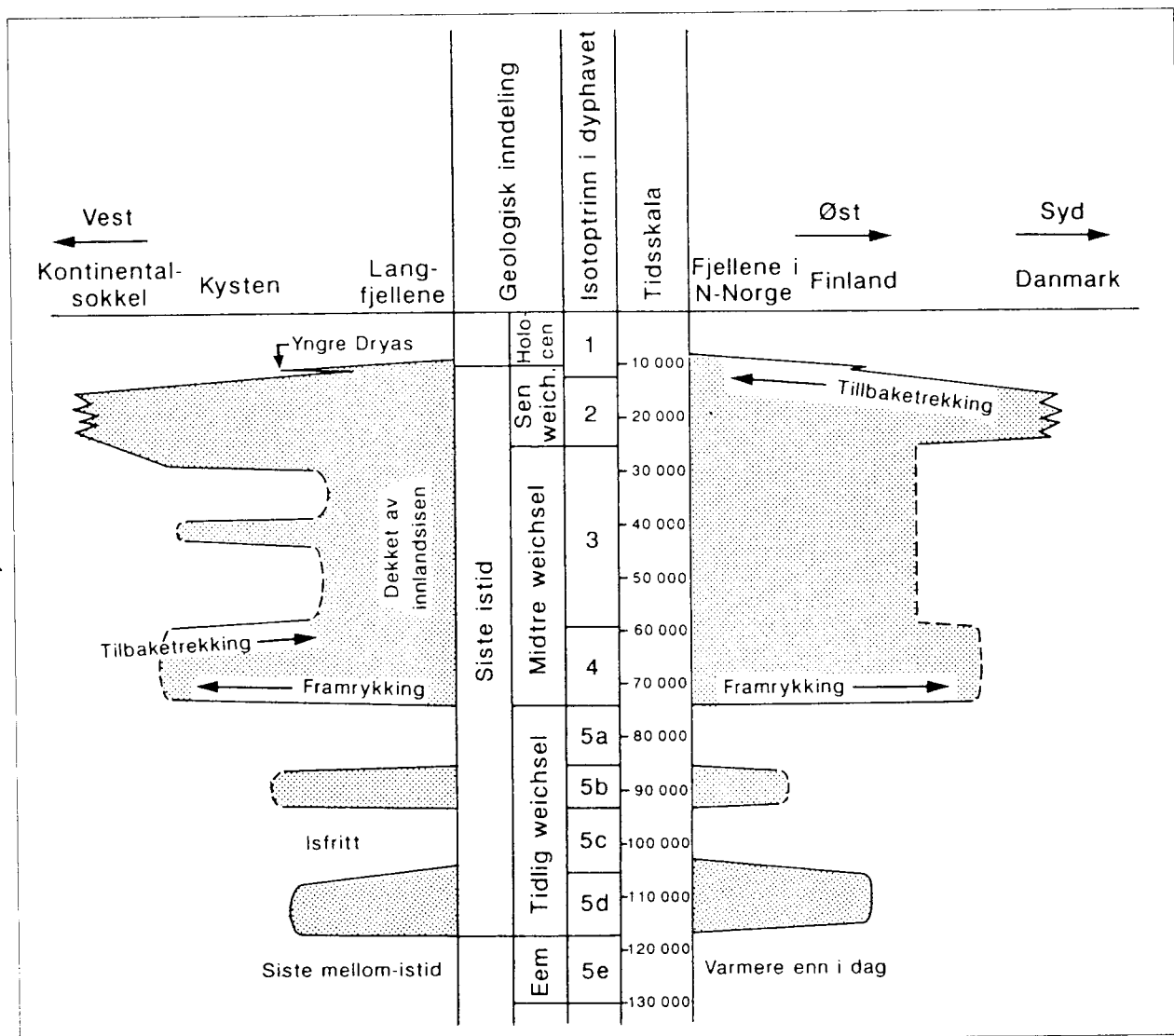
Innlandsiser, som på Grønland idag, påvirker de store sirkulasjonsmønstre i atmosfæren ved at det dannes nesten permanente høytrykk over breene. Ved sin store høyde gjør de også at det meste av nedbøren kommer som snø. Modellberegninger viser at hvis innlandsisen på Grønland først smeltet bort, så ville den ikke dannes igjen i det klimaet vi har idag. Dens eksistens skyldes altså at den påvirker klimaet til fordel for seg selv. Store breer er også topografiske barrierer hvor vind presses over eller rundt, på samme måte som ved fjell.

Brevariasjoner må kartlegges i tid og rom hvis en i framtiden skal modellere klimautviklingen gjennom siste istid på en tilfredsstillende måte. Et kardinalproblem for geologene er at breene under siste istids maksimum, for ca. 18 000 år siden, eroderte (fjernet) det meste av eldre avsetninger. For

størstedelen av siste istid, nemlig de 100 000 år som ligger før det siste is-maksimum, må en altså lete med lys og lykte for å finne avsetninger som overlevde erosjonen, og som derved kan gi informasjon om utviklingen før siste ismaksimum.

Vi skal her omtale Skandinavia som eksempel, delvis fordi dette er en naturlig arbeidsmark for norske forskere. Figur 3 gir

en kurve som viser status av vår kunnskap. En rekke av de observasjoner som kurven bygger på lar seg imidlertid ikke datere idag. De gitte aldre er derfor til dels utledet fra usikre korrelasjoner med dyphavet, eller Sentral-Europa. Kurven viser derfor en foreløpig syntese, og nye dateringer vil kunne endre tolkningene. Nye observasjoner vil helt sikkert gi et langt mer nyansert bilde av



Figur 3. Et diagram som viser hvordan fronten av innlandsisen over Skandinavia fluktuerte under siste istid. Vertikalskalaen er en tidsskala med 130 000 år nederst. Det er på denne skalaen også gitt navn på noen geologiske perioder: Eem er siste mellomistid, Weichsel er siste istid og Holoocen er etteristiden.

Horisontalskalaen er avstand fra fjellkjeden mot vest til venstre side av diagrammet, og mot øst på høyre del. Kurven til venstre viser hvordan brefronten rykket fram og tilbake mellom Langfjellene og kysten. Det skraverte viser altså perioder da området var dekket av is. Tilsvarende viser kurven til høyre hvordan breen vokste ut fra fjellene og dekket Sverige og Finland, og for ca. 20 000 år siden nådde helt ned til Danmark. Forenklet etter Mangerud (1990).

glasiasjonsforløpet enn den enkle rekonstruksjon vi kan gjøre idag.

Figur 3 viser at det var en rekke store breframstøt gjennom siste istid. Lokaliteter i Gudbrandsdalen og N-Sverige viser at sentrale deler av Skandinavia var nesten helt isfrie mellom de første breframstøtene, men klimaet var likevel kjøligere enn idag. Vestlandskysten var også isfri flere ganger senere, men vi vet ikke hvor langt inn i landet brefronten trakk seg, eller hvor langt utenfor kysten de enkelte breframstøt rakk.

HAVET

Havet utgjør et av de viktigste elementer i klimasystemet, og skal vi forstå klimaendringer må vi forstå samspillet mellom atmosfæren og havet. I borkjerner fra havbunnen kan en oppnå lengre kontinuerlige tidsserier av paleoklimatiske data enn fra de fleste miljøer på land. Tidsoppløsningen er imidlertid dårligere fordi avsetningen er langsom, og gravende dyr blander lag av forskjellig alder.

Sammensetningen av levende plankton avhenger av overflatevannets temperatur og saltholdighet, og denne korrelasjon er matematisk beskrevet. Sammensetningen av fossile plankton nedover i borkjernene kan dermed «oversettes» til temperaturer og saltholdighet ved hjelp av de nevnte formler. Vi har i første artikkel (figur 5) vist et temperaturskart for Atlanteren under siste istids maksimum konstruert ved slike teknikker. Her skal vi gi et eksempel på tidsserier.

På figur 4 er det øverst et kart som viser lokaliseringen av en del kjerner fra Nord-Atlanteren. På nedre del av figuren er kjernene plassert etter hverandre fra nord til syd. Kurvene viser hvordan havvannets overflate-temperatur om vinteren har variert gjennom de siste 250 000 år. Vi ser at i den nordligste kjernen (V23-42) er temperaturen idag 7–8°C. På dette stedet var det omtrent samme temperatur i siste mellomistid for ca.

120 000 år siden, men her var dette en kort varm periode. I det meste av den mellomliggende tiden (altså siste istid) var temperaturen bare 1–2°C. Går vi sydover til kjerne K708-7 holdt vannet seg varmt lenge etter mellomistiden, og avkjølingen skjedde langsommere. Hvis vi ser enda lenger syd, til kjerne K708-1, så var det nesten «mellomistids-temperaturer» helt til for 70 000 år siden.

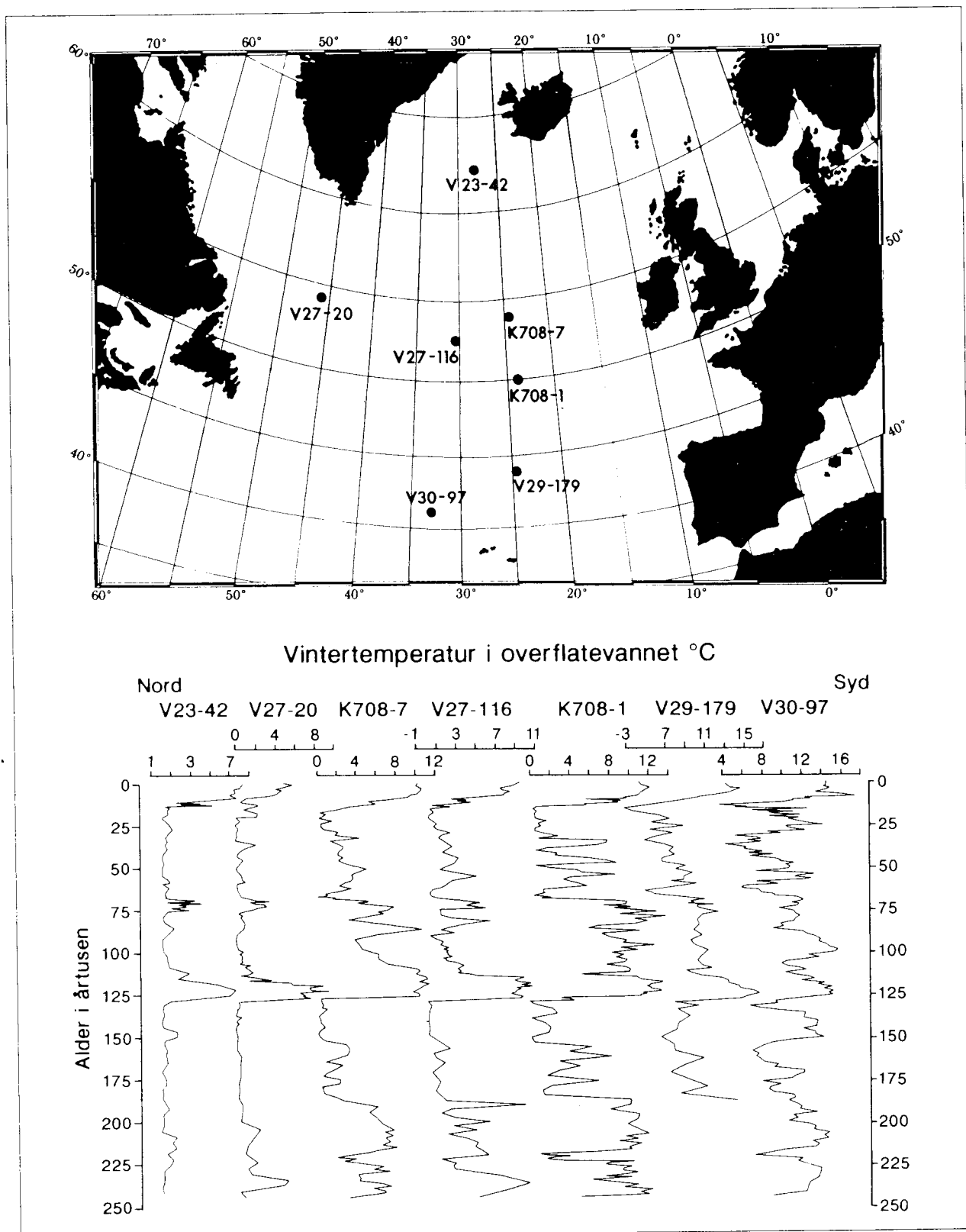
Dette viser at klimaendringer ikke skjer som en enkel temperaturendring i havet. Hele sirkulasjonsmønsteret, både overflatestrømmer og dypvannsdannelsen endres, og derved hele varmeomsetningen, biokjemiske prosesser, osv.

SKJER DET TRINNVIS REORGANISERING AV KLIMASYSTEMET?

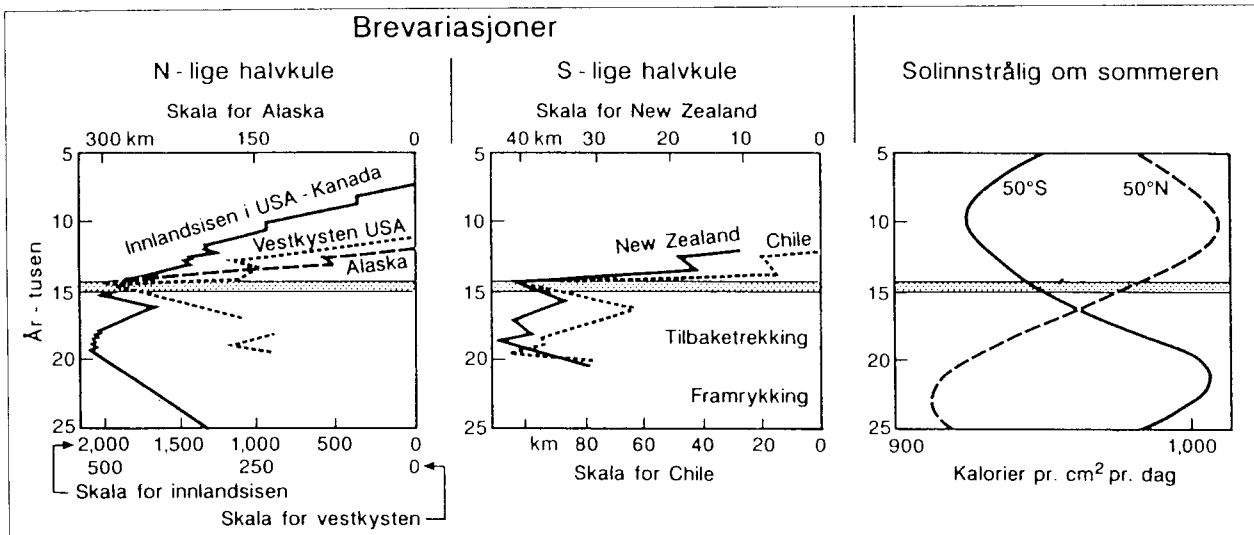
Flere klimaendringer har skjedd så raskt at de må skyldes at når visse terskelverdier passerer, så «hopper klimaet» fra et nivå til et annet. Her skal vi kort omtale slutten av siste istid, og diskutere årsaken, helt vesentlig etter de amerikanske forskerne Broecker og Denton (1989, 1990). Vi skal først fremheve 4 viktige observasjoner.

1. Klimaendringen skjer meget raskt, nærmest som et sprang, på tross av at innstrålingen endrer seg jevnt. Sommerinnstrålingen på den N-lige halvkule økte jevnt fra 22 000 år til 10 000 år før nåtid (figur 5, til høyre). De mindre breene i Alaska og på Vestkysten av USA (figur 5, til venstre) reagerte imidlertid ikke før for 14 000 år siden, da de plutselig smeltet raskt tilbake. Tilsvarende ser vi at innlandsisen i N-Amerika beholdt sin maksimale størrelse i perioden fra 20 000 til 14 000 år siden. Denne trakk seg langsommere tilbake, men dette skyldes det svære isvolumet som måtte smelte. Nøyaktig det samme skjedde i N-Europa (figur 3).

2. Klimaendringen skjer tilsynelatende samtidig på begge halvkuler. Midterste figur 5 viser at små breer på den sydlige halvkule



Figur 4. Øverst et kart som viser lokaliseringen av en del borkjerner fra Atlanteren. I nedre figur er resultater fra de forskjellige borkjernene vist mot en tidsakse. Det som er fremstilt er temperaturen (°C) i overflatevannet om vinteren, slik denne er beregnet fra sammensetningen av plankton. Kurvene viser altså hvordan temperaturen har variert de siste 250 000 år. Etter Ruddiman 1987.



Figur 5. Figuren til høyre viser at på den N-lige halvkle økte innstrålingen om sommeren i perioden fra 22 000 år til 10 000 år før nåtid, mens sommer-innstrålingen på den S-lige halvkle minket.

I diagrammene i midten og til venstre er det kurver som viser hvordan brefronten rykket framover når breene vokste, og trakk seg tilbake når breene avtok. Diagrammet til venstre viser at breene på den N-lige halvkle startet tilbaketrekkingen forsinket i forhold til økningen i innstråling.

Diagrammet i midten viser at breene på den S-lige halvkle reagerte i fase med de på den N-lige, og altså motsatt av innstrålingen på den S-lige halvkle. På begge halvklene skjedde tilbaketrekkingen, altså den globale klimaendring, nesten som et sprang like etter 14 000. Denne alderen er vist ved en dobbeltlinje gjennom alle diagrammer. Etter Broecker og Denton (1989 og 1990).

også trakk seg raskt tilbake like etter 14 000 år, på tross av at sommerinnstrålingen på den S-lige halvkle avtok i dette tidsrommet (figur 5, til høyre) (p.g.a. presesjonen som er beskrevet i artikkel 2). Det er altså ikke bare den direkte innstrålingen som påvirker smeltingen av breene. Det må være en mekanisme som gjør at oppvarmingen blir global, og som på den S-lige halvkle «overdøver» den avtagende sommer-innstråling.

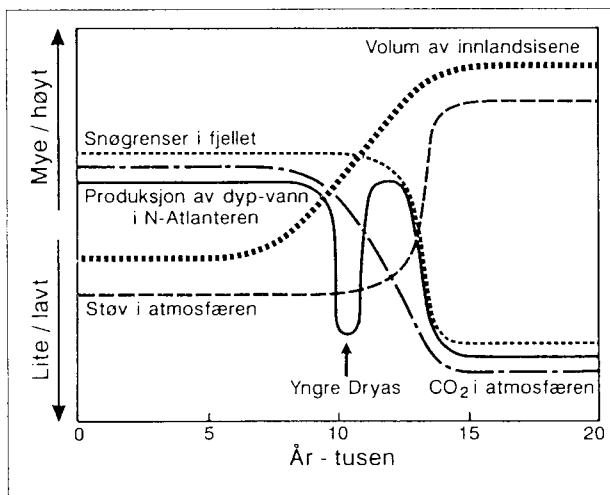
3. Det skjer dramatiske endringer i mange miljøer samtidig. Figur 2 viser at både CO₂-innholdet i atmosfæren og luft-temperaturen i Antarktis gjør «et hopp» for omkring 14 000 år siden, og figur 4 viser lignende endringer for overflatetemperaturen i N-Atlanteren. Dette er sammenfattet i figur 6.

4. Amplituden i dette «hoppet» er for stort i forhold til den ytre drivkraften (figur 1).

Broecker har argumentert for en mekanisme som kopler atmosfære og hav, og som kan forklare i alle fall deler av de gitte

observasjoner. Det skjer idag en netto transport av vanddamp gjennom atmosfæren fra Atlanterhavet til Stillehavet, delvis over Mellom-Amerika, og delvis over Eurasia. Det betyr at salt «legges igjen» i Atlanterhavet. Siden Atlanteren ikke er vesentlig saltere enn Stillehavet, må denne ubalanse kompenseres ved havstrømmer.

I N-Atlanteren dannes det tungt havvann ved nevnte fordampning og i tillegg nedkjøling. Som en følge av disse prosesser avgir havet en varmemengde som tilsvarer 30 % av total innstråling til N-Atlanteren. Det meste av denne varmen transporteres østover med vind, og dette forklarer de milde vintrene hos oss og i resten av V-Europa idag. Det tunge, salte vannet synker ned og danner en dyp havstrøm fra Atlanteren til Stillehavet og Det indiske hav (figur 7). Denne strømmen fungerer som et «transportbånd» for salt. Overflatestrømmen som returnerer til Atlanteren er mindre salt, og



Figur 6. Et idemessig diagram som viser variasjon av endel egenskaper over tid. Legg merke til at noen egenskaper reagerer spontant og med full amplitude ved 14 000, mens det for andre tar noe tid å fullføre endringen, selv om de starter samtidig. Etter Broecker og Denton (1990).

derved kompenseres den ubalansen i salt som blir omtalt over.

Undersøkelser av kjerner fra dyphavet viser at dette transportbåndet var mye sva-

kere under istiden, kanskje var det helt slått av under glasiasjonsmaksimum for 18 000 år siden. Denne mekanismen blir derved en ikke-lineær kopling mellom atmosfære og hav: Det blir som å skru av og på en svær maskin med en liten bryter. Broecker og Denton forklarer den plutselige klimaforbedringen for 14 000 år siden ved at transportbåndet ble skrudd på igjen.

Havsirkulasjonen er meget viktig for jordas varmebudsjett, som vist ved eksemplet om N-Atlanteren. Havsirkulasjonen er også viktig for CO₂-innholdet i atmosfæren. Den omtalte mekanisme kan derfor forklare mye av de beskrevne endringer i klimasystemet, men ikke alle. Det er heller ikke klart hva som utløser omleggingen, altså hva som er «bryteren til maskinen».

Broecker stiller spørsmålet om en fremtidig jevn økning i CO₂ i atmosfæren vil utløse et nytt sprang i denne koplingen, til en stabil situasjon som ikke kan forutsies.

Figur 7. Kart som viser dyphavstrøm («transportbånd») av salt vann, og de mindre salte returstrømmene i overflaten. Etter Broecker og Denton (1989).

