

NATURLIGE KLIMAVARIASJONER (II)

Årsakene til istider og mellomistider

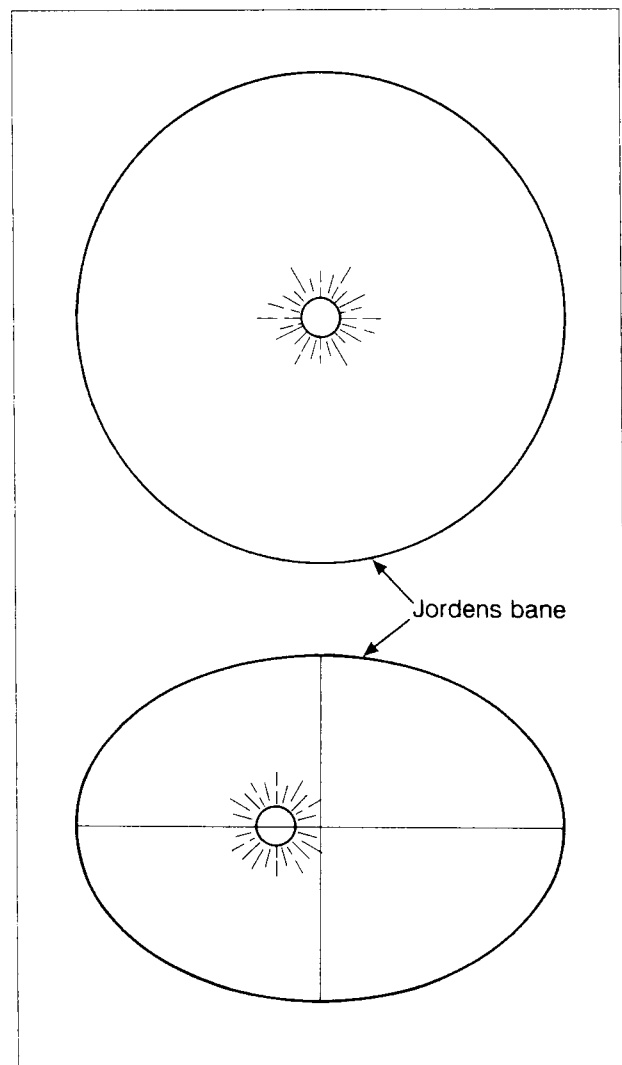
JAN MANGERUD

Årsakene til de svære klimavekslingene mellom istider og mellomistider har vært et brennende spørsmål helt fra teorien om istidene ble lansert for over 150 år siden, og hypotesene har vært mange. Først de siste ti-år har det skjedd et gjennombrudd i forskningen, slik at årsakene nå kan sies å være kjent. De ytre drivkreftene er overraskende små, men indre forsterkningsmekanismer i klimasystemet forstørker de små signaler til svære klimaforandringer.

Klimavariasjonene som gir istider og mellomistider skyldes tre kvasiperiodiske variasjoner i jordas bane og akse, som vi her skal beskrive. Disse variasjonene skyldes igjen virkningen av tyngdekraften mellom de forskjellige planeter og måner i solsystemet. Teorien om at disse variasjonene forårsaker periodiske istider oppkalles ofte etter Mil-

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.

Figur 1. Jordens bane varierer mellom å være nesten en sirkel og en mer flatklemt ellipse. Flatklemmingen er her sterkt overdrevet, egentlig er avviket fra en sirkel svært lite.



utin Milankovitch, en jugoslavisk astronom som beregnet disse variasjonene i årene 1910–40, og hevdet at de var årsaken til istidene. Deler av teorien er imidlertid mye eldre enn Milankovitch selv, og den omtales like ofte som den astronomiske teori for klimaendringer. Allerede midt i forrige århundre ble dette foreslått som årsak til istidene. Mer presise beregninger av jordbane variasjonene er de senere år utført på store datamaskiner, og de tall og kurver som refereres her er beregnet av den belgiske forsker André Berger.

JORDBANENS FORM

Som kjent er jordbanen en ellipse, men denne formen varierer over tid fra nesten sirkel til en noe mer flatklemt ellipse, se figur 1. Variasjoner følger sykler på 100 000 år og 400 000 år, se figur 5. Dette gir en forskjell i solinnstrålingen til jorda på mindre enn 0,1 %, noe som nærmest er neglisjerbart. Det er verdt å merke seg at dette er den

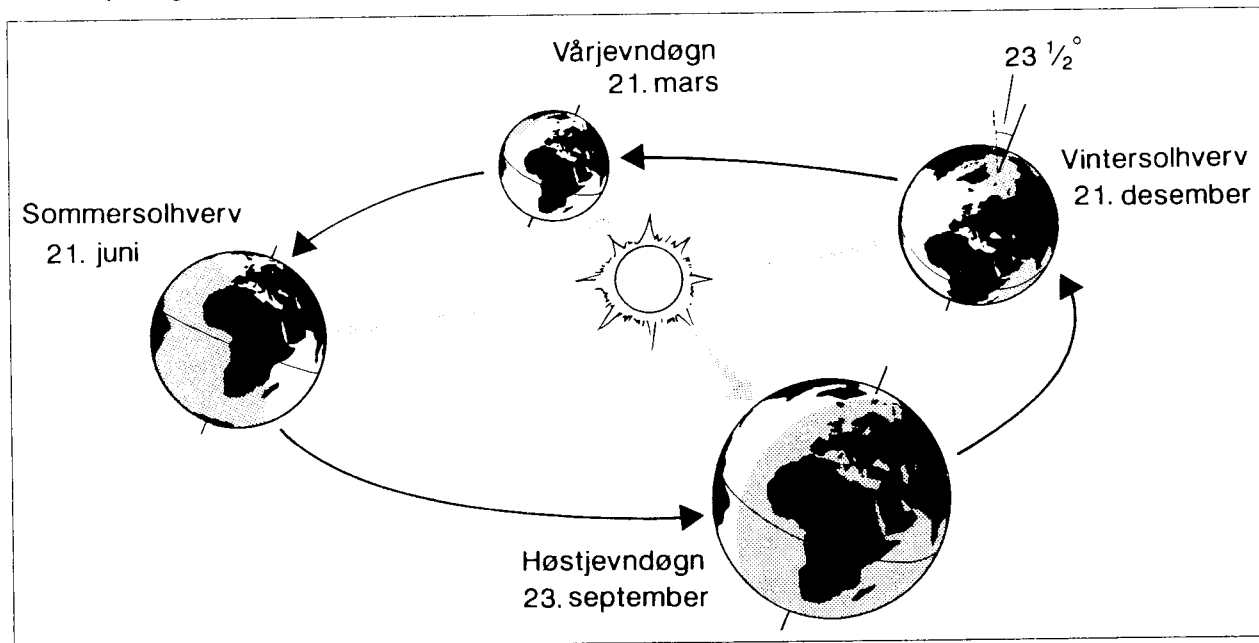
eneste forskjell i totalinnstrålingen til atmosfæren. Den virkelige drivkraften til istider/mellomistider er derfor bare en omfordeling av innstrålingen mellom årstider og mellom breddegrader, som omtales under. De dramatiske klimaendringer mellom istider og mellomistider skjer altså på tross av at den årlige varmeinnstrålingen til jordas atmosfære er nær konstant.

Mellomistidene, som vår egen tid, følger denne 100 000 års rytmen (Se figur 2 i første del), men det er fremdeles et mysterium hvorfor, da denne syklus gir meget små variasjoner i innstråling.

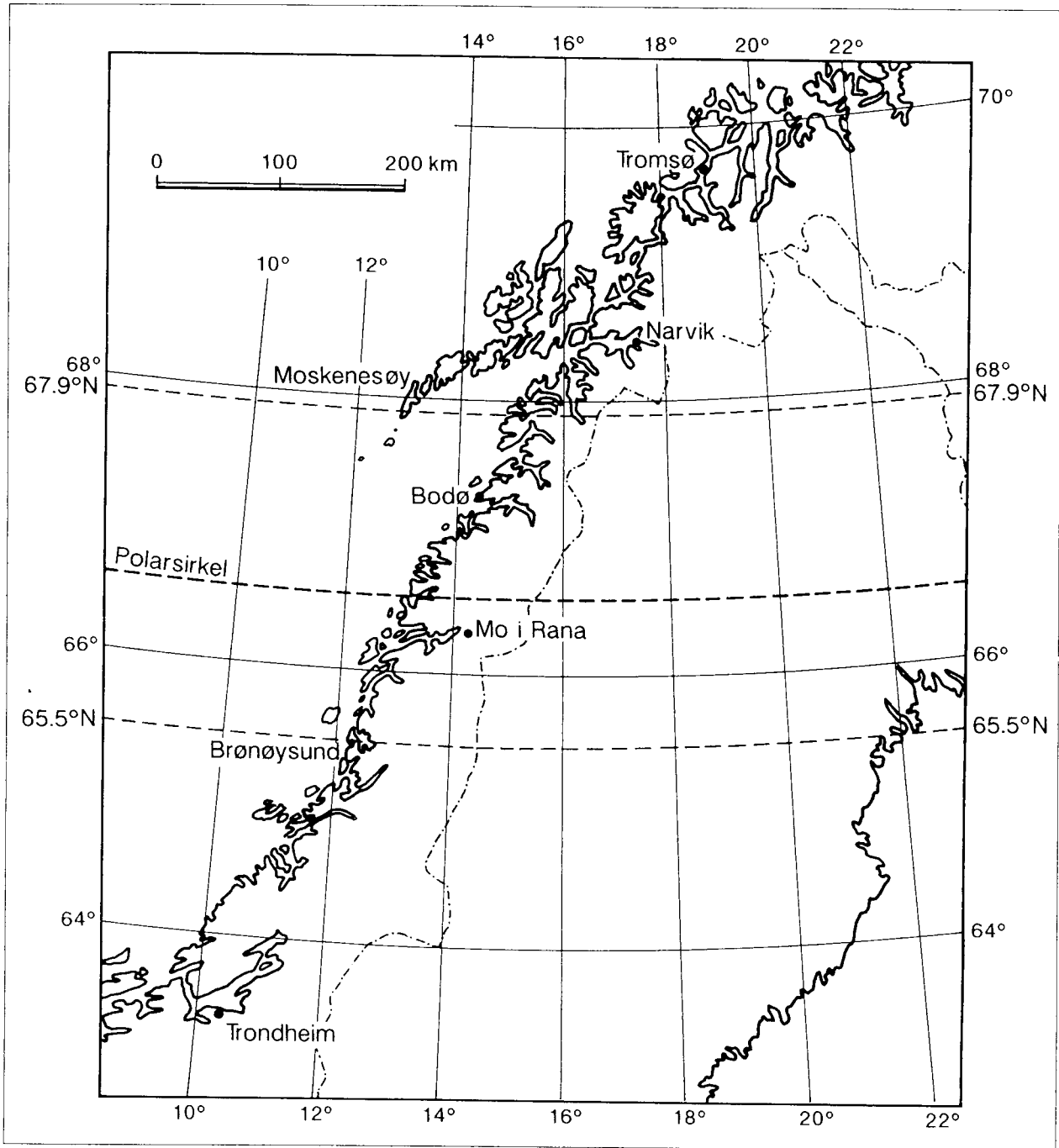
JORDAKSENS HELNING

Jordas akse står på skrå i forhold til jordbanen, se figur 2. Dette er velkjent for oss nordmenn: Ved vintersolhverv (21. desember) peker nordpolen mest bort fra sola og vi får mørke og korte dager. Den lave solinnstrålingen gir oss også kalde vintre. Vi ser fram til juni, da nordpolen peker mot

Figur 2. En skisse av jordbanen som viser betydningen av at aksen står på skrå ($23,5^\circ$): Nordpolen peker bort fra sola mellom høstjevndøgn 23. september og vårjevndøgn 21. mars, noe som fører til vinter på den nordlige halvkule. Fra 21. mars til 23. september peker nordpolen mot sola og dagene på den nordlige halvkule er lengre enn nettene, lengst er de ved sommersolhverv 21. juni, og dette gir oss sommer. Med en vertikal jordakse ville årstidene forsvinne.



NATURLIGE KLIMAVARIASJONER II



Figur 3. Et kart som viser hvordan polarsirkelen vil forflytte seg med jordaksens skråning. Når aksen står mest rett ligger polarsirkelen ved den stiplede linje ved Moskenesøy (67,9°N), ved maksimalskråning ligger den ved Brønnøysund (65,5°N). I steinalderen, for 5 000 år siden lå polarsirkelen ved 66°, ved Kristi fødsel var den fremdeles sør for Mo i Rana, mens den nå ligger over Saltfjellet og beveger seg nordover med en hastighet på 14,4 m i året. Polarsirkelstøtta på Saltfjellet burde stå på skinner og skyves sakte nordover! Om 6 000 år må en nord for Bodø for å se midnattsola. Etter Mangerud (1989).

sola og gir oss sommervarme og lyse netter. Hvis jordaksen hadde stått rett, ville det ikke vært årstider, og det ville vært kaldt året rundt på høye breddegrader.

Skråningen på aksen er imidlertid ikke konstant, den forandrer seg med en periodisitet på 41 000 år (figur 5). Idag er den 23,5°, og gir derved en sydgrense for midnattssol,

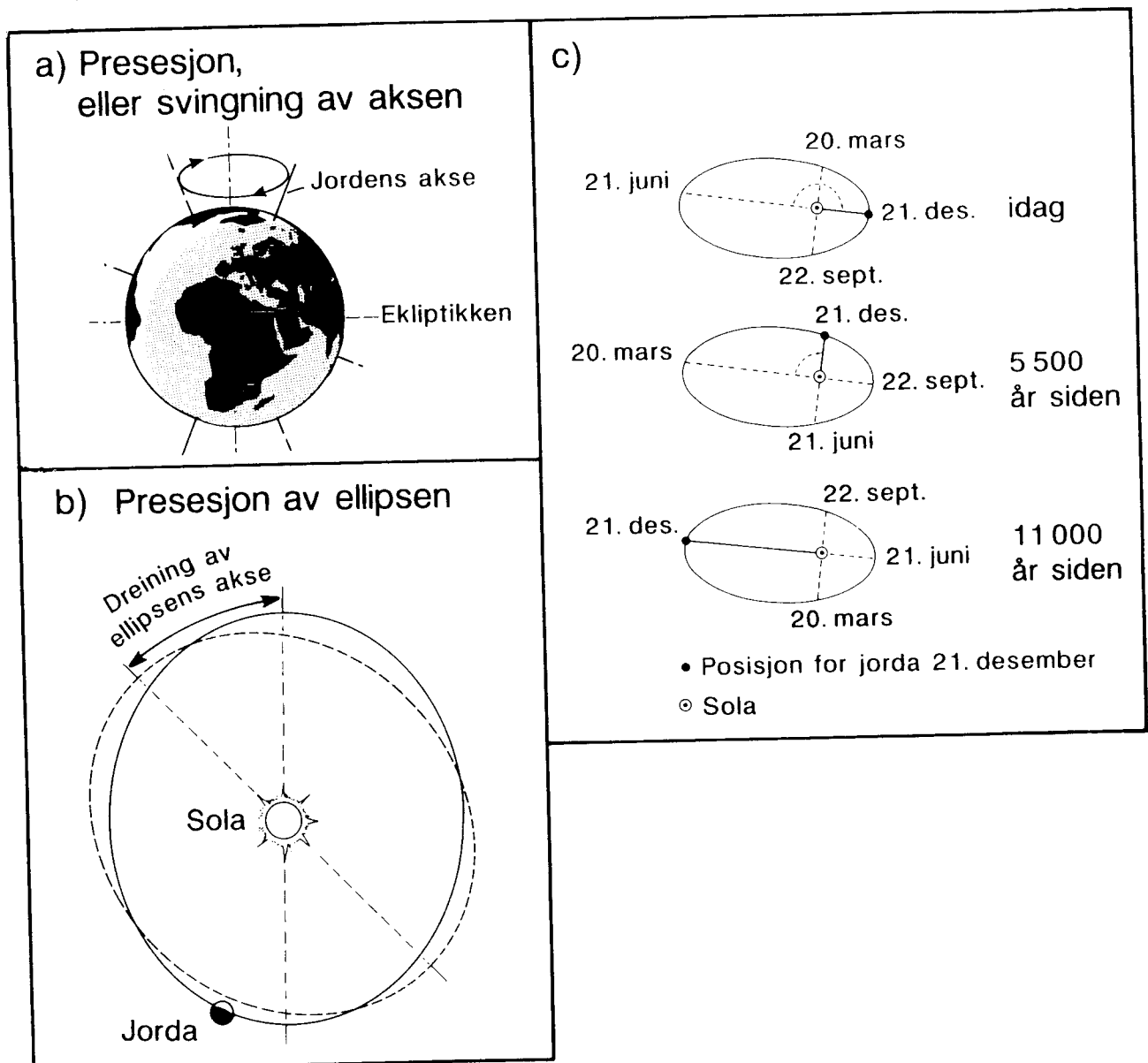
polarsirkelen, på $66,5^{\circ}\text{N}$. Vinkelen varierer mellom $22,1$ og $24,5^{\circ}$. Hva dette betyr for polarsirkelen i Nordland er forklart på figur 3.

Rent kvalitativt er det lett å forstå betyd-

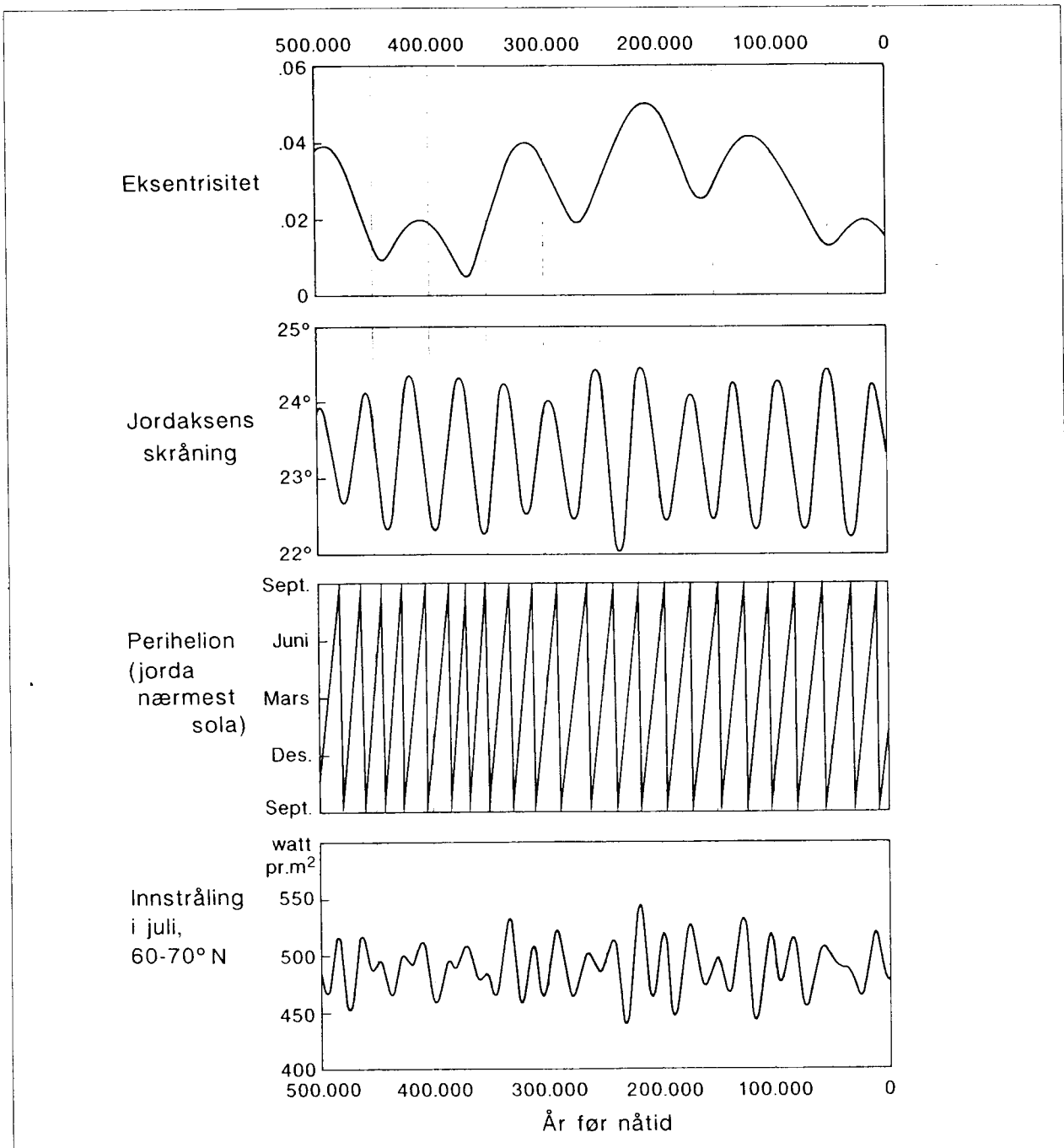
ningen for klimaet når jordaksen forandrer skråningsvinkel: Større skråning på akse gjør at sola på våre breddegrader står enda høyere på himmelen om sommeren, og sommeren blir varmere. Samtidig blir vintere-

Figur 4. Figur c viser hvordan årstidene vandrer rundt jordbanen. Idag er vi nærmest sola 3. januar, altså like etter vintersolhverv 21. desember, mens vi har vinter på den nordlige og sommer på den sydlige halvkule. Den nederste jordbanen i figur c viser at jorda for 11 000 år siden var nærmest sola i juni, noe som ga varme somre på den nordlige halvkule.

Årsakene til at årstidene forflytter seg rundt jordbanen er vist i figurene a og b. Figur a viser at jordaksen i tillegg til å rotere rundt seg selv, også svinger rundt i store sirkler, slik at forlengelsen av akse i løpet av 27 000 år beskriver en full sirkel i himmelrommet. Det fremgår imidlertid av figur c at årstidene går helt rundt jordbanen på bare ca. 23 000 år. Dette skyldes at hele jordbane-ellipsen dreier rundt (figur b) i motsatt retning av aksens svingning, og kommer «jorda i møte». Derved behøver ikke årstidene å gå 360° for å være tilbake i samme punkt i jordbanen. Basert på Imbrie og Imbrie (1979).



NATURLIGE KLIMAVARIASJONER II



Figur 5. Diagrammer som viser hvordan de omtalte faktorer har variert bakover i tid. Oversatt fra Covey (1984). Horizontalskalaen har vår tid til høyre og går 500 000 år bakover i tid.

Det øverste diagrammet viser jordbanens form: Eksentrisitet = 0 er en sirkel, og ved økende verdi blir det en mer flatklemt ellipse. Vi ser at det er en topp for hvert 100 000 år. Siste 400 000 års syklus sees som en lang bølge.

Jordaksens skråning er gitt som vinkelen mellom akse og en vertikal linje. Vi ser at vinkelen idag er 23,5°, og at den for tiden avtar: Jorden er i ferd med å «rette seg opp». Det er 41 000 år mellom hver topp.

Perihelion er betegnelsen på det punkt på jordbanen som er nærmest sola. Idag er perihelion 3. januar, og følger vi kurven bakover i tid ser vi at perihelion har forflyttet seg bakover gjennom året, slik at den har falt i desember, november, oktober, osv. Sammenlign med figur 4.

Den nederste kurven viser hvordan solinnstrålingen i juli har variert på våre breddegrader som en følge av alle faktorene. Vi ser at maksimalutslagene er ca. 100 watt pr. m², eller ca. 20 %.

ren mørkere og kaldere. Det blir altså større forskjell mellom årstidene, særlig på høye breddegrader. Utslaget er likt på nordlige og sydlige halvkule: Større skråning gir varme somre og kalde vintre på begge halvkuler.

En større skråning på akse øker også den totale innstråling på høye i forhold til lave breddegrader. Dette er enkelt å se hvis en teoretisk tenker seg en vertikal akse: Da ville sola alltid stå rett over ekvator, og polene ikke få noe innstråling.

PRESESJON

Den tredje og siste variable kalles presesjon, og er vanskeligst å se for seg geometrisk. Hvis en får god fart på en snurrebass ser en at akse står ganske stille og peker på et punkt i taket. Etter hvert som farten avtar, begynner imidlertid akse å svinge i store sirkler, og peker mot forskjellige steder i taket, før snurrebassen til slutt faller.

Jorda er som en snurrebass som roterer om sin egen akse i løpet av et døgn. Samtidig svinger akse sakte rundt på samme måte som omtalt for snurrebassen. Akse vil derfor ikke alltid peke mot Polstjernen i «himmeltaket», slik den gjør idag. Dette fører til at vintersolhverv (21. desember) vil forflytte seg rundt jordbanen. Tilsvarende gjelder selvfølgelig også for sommersolhverv og vår- og høstjevndøgn. Kort sagt vil årstidene forflytte seg sakte rundt jordbanen. Figur 4 viser at jorda idag er nær sola ved vintersolhverv; aller nærmest er vi 3. januar. Dette gir oss forholdsvis milde vintre og kjølige somre. På den sydlige halvkule er det motsatt; de har sommer i januar når jorda er nærmest sola.

Som omtalt over er det skråningen på akse som gir årstider. Virkningen av presesjonen kan beskrives som en modifisering av årstidene: Idag forsterkes årstidene på den sydlige halvkule, fordi jorda er nærmest

sola under deres sommer, og lengst unna under deres vinter. På den nordlige halvkule svekkes årstidene idag, fordi vi er nærmest sola om vinteren. For 11 000 år siden var det motsatt (figur 4c), da kom vintersolhverv (21. desember) mens jorda var lengst unna sola, vi fikk kalde vintre og varme somre på vår halvkule.

Presesjonen varierer med frekvenser på 19 000 og 24 000 år, og vi har allerede sett at virkningen er motsatt på de to halvkuler. Denne faktor har størst direkte betydning på lavere breddegrader. Det er også lett å innse at dens klimatiske betydning avhenger av den første faktor som ble beskrevet: Når jordbanen nesten er en sirkel har jorda omtrent samme avstand til sola hele året, og det spiller ingen rolle hvor på jordbanen vinter og sommer faller. Jo mer elliptisk banen er, jo mer betyr presesjonen.

ARGUMENTER FOR DEN ASTRO- NOMISKE (MILANKOVITCH) TEORIEN

Den astronomiske teorien ble forkastet eller ignorert av det store flertall av forskere i flere tiår etter at den ble forbedret av Milankovitch. Meteorologer og teoretikere hevdet at drivkraften var altfor liten i forhold til utslagene, – dette er faktisk enda delvis uløst. Geologer fant ikke så mange istider som teorien forutsa. Hovedproblemet var likevel at en ikke hadde noe verktøy til å teste teorien med geologiske observasjoner. Dette skyldes både at avsetningene på kontinentene er så fragmentariske at det var vanskelig å utlede tidsserier, og at en manglet metoder til å datere avsetninger i det relevante tidsintervall.

Flere, til dels uavhengige, forskningsresultater la grunnlaget for et gjennombrudd for testingen av Milankovitch teorien fra midten av 1970-årene. Det viktigste er teknikker for å ta lange borkjerner gjennom avsetningene på bunnen av dyphavene,

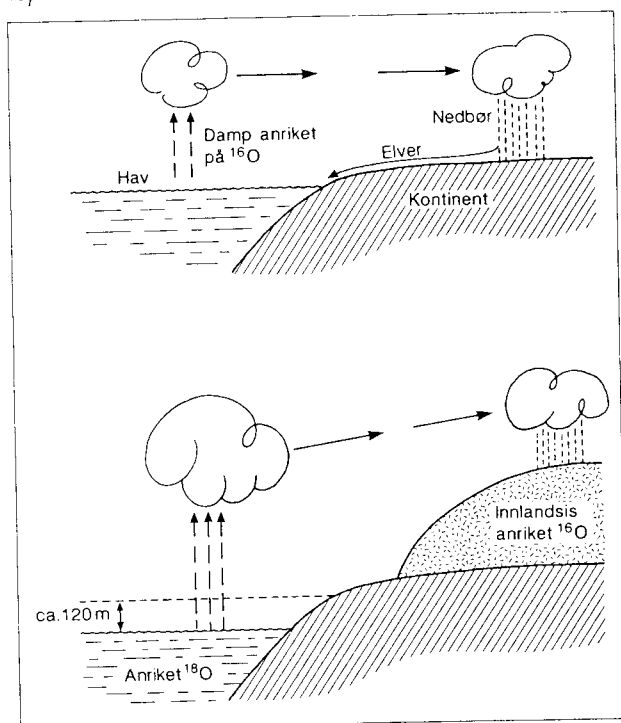
NATURLIGE KLIMAVARIASJONER II

hvor det avsettes partikler meget sakte og med nær konstant hastighet. Disse borkjernerene gir derfor mulighet til å beskrive klimaparametre i lange kontinuerlige tidsreier. I kjernen kan en datere særskilte nivåer og derved etablere en absolutt tidsskala. Den viktigste klimaparameteren for Milankovitch teorien er sammensetningen av oksygen isotoper i kalkskallene på mikroskopiske dyr (foraminiferer), fordi isotopsammensetningen tilnærmet simulerer volumet av bre-is på jorda (figur 6 og 7). Vi skal derfor kort omtale denne prosessen.

Vann består som kjent av grunnstoffene hydrogen og oksygen. Alle oksygenatomene

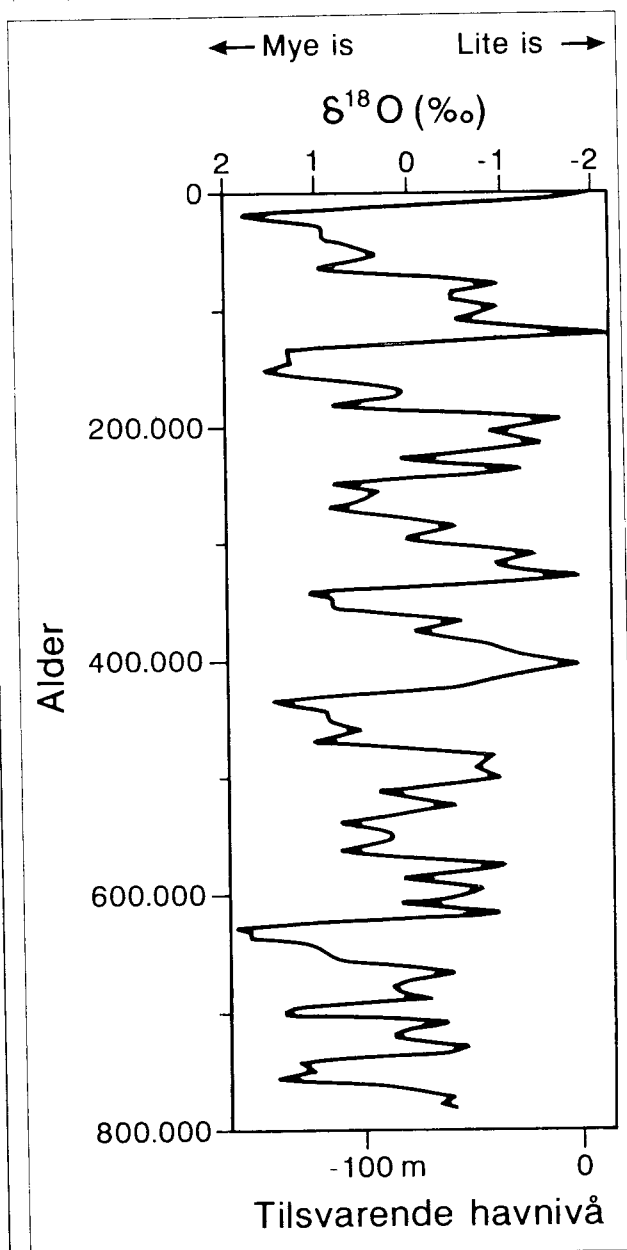
Figur 6. Øverste figur viser forenklet dagens hydrologiske kretsløp. Vann som fordampet fra havet anrikes på O-16 og driver som skyer innover kontinentene, hvor regnet faller ned. Dette lettisotop vannet renner tilbake med elvene, og isotop-sammensetningen i havet blir derved konstant.

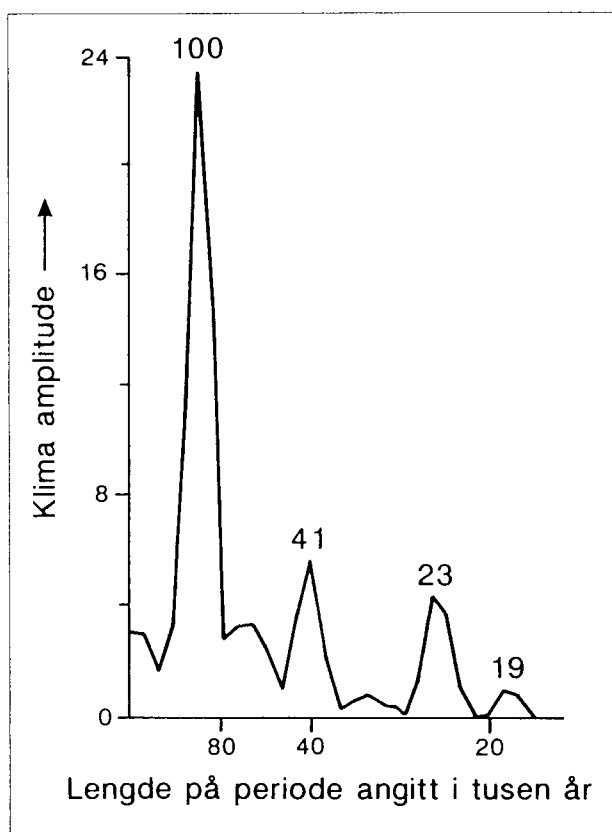
Nederste figur viser at kretsløpet brytes under oppbygging av isdekker, ved at alt vannet da ikke renner tilbake til havet. Under siste istid var 120 m av havet «øst opp på land». Nedbøren over breene er anrikt på O-16, og det gjenværende havvann blir tilsvarende anrikt på den tunge isotopen O-18 under istidene.



er imidlertid ikke helt like, de har litt forskjellig masse i kjernene og kalles da isotoper. Den vanligste isotopen er O-16 (riktig

Figur 7. Variasjoner i oksygenisotoper i havet de siste 800 000 år. Dette er gjennomsnittsverdier for fem borkjerner fra forskjellige steder i verdenshavene. Skalaen er i standard avvik fra middel. På skalaen under er det vist omtrent hva variasjonene tilsvarer i havnivå, og derved is på kontinentene. En mer detaljert kurve for den yngste del er vist på figur 2 i første artikkel. Den siste toppen med lite is er vår egen tid, mens siste istids maksimum er representert ved den siste smale toppen med mye is. Etter Imbrie med flere (1984).





Figur 8. En spektralkurve som er fremkommet ved analyse av kurven i figur 7. Toppene viser perioder som finnes i kurven på figur 7, og lengden på periodene er angitt i tusen år for hver topp. Høyden på hver gitte periode av amplitudene som utgjøres av den gitte periode. Kurven viser således at de største klimautslagene har en periodisitet på 100 000 år, og at det er store svingninger med perioder på 41 000 og 23 000 år og noe mindre på 19 000 år. Etter Imbrie (1985).

skrivemåte er ^{16}O) og den utgjør 99,8 % av alt oksygen. Likevel kan vi utnytte forholdet mellom denne og den tyngre isotopen O-18. Når vann fordampes så fordampes det mer O-16 enn O-18, og den lette isotopen anrikes derfor i skyer (figur 6). Når det begynner å regne fra skyen, er det første regnet anrikt på O-18, og derved øker konsentrasjonen av O-16 i skyen ytterligere. Nedbør som faller langt inne på kontinentene, eller høyt oppe på isbreene, har derfor betydelig mer O-16 i forhold til O-18 enn havvannet. Så lenge det er et sluttet kretsløp, slik som i dag, renner

vannet tilbake med elvene, og det blir en likevekt hvor havvannet får et konstant forhold mellom oksygenisotopene (figur 6, øverst). Under istidene ble imidlertid mye av vannet bundet i store breer på land. Under siste istid ble så mye is liggende på land at havet sank 120–130 m. Det viktige i denne sammenheng er at det vannet som ble liggende på land var anrikt av O-16, og derved ble det gjenværende havvannet anrikt på O-18. Foraminiferer som lever i havet tar oksygen til sine skall fra vannet, og skalene registrerer derved isotopsammensetningen i havet. Når dyrene dør, synker skalene til bunns og blir en del av sedimentene. Dette fører til at vi kan studere sammensetningen av oksygenisotoper nedover i boringer fra dyphavet, og fra dette utlede hvor mye is det lå på kontinentene til ulike tider (figur 7)!

Når en ser kurver som figur 7 er det ikke lett å se noe mønster. Ved hjelp av en matematisk metode som kalles Fourier analyse, kan imidlertid slike kompliserte kurver løses opp i flere enkle svingende kurver (sinuskurver) med forskjellig lengde på periodene. Slik analyse er gjort med kurven i figur 7 og resultatet er vist på figur 8 som en spektralkurve. Denne viser at isotopkurven i figur 7 kan løses opp i flere kurver, hvorav en nedperiodisitet på 100 000 år forårsaker de største utslag i isvolum. Andre toppe er forårsaket av kurver med perioder på 41 000, 23 000 og 19 000 år.

Ved å sammenligne disse periodisitetene for svingning i volum av jordas breer med periodisitetene for variasjonene i jordbanen (figur 5), finner en at disse er identiske. Dette ansees som det viktigste «bevis» for at klimasvingningene som gir istider/mellomistider i hovedsak drives av endringene i jordbanen, og altså at den astronomiske teori for klimaendringer er riktig. Det finnes flere, til dels enda mer rigorøse tester som

viser den beskrevne samvariasjon, og det er idag knapt noen forsker som ikke aksepterer den astronomiske teori. Vi vil imidlertid fremheve at det bare er demonstrert at antatt årsak og virkning varierer med de samme frekvenser. Det ligger i dette ingen forståelse av de prosesser som gjør at årsak leder til virkning. Tvert imot er dette til dels uløst, men mer om det i neste artikkel.

HVORFOR IKKE ALLTID ISTIDER/MELLOMISTIDER?

Astronomisk teori viser at de beskrevne variasjoner i jordbanen har foregått «uendelig» langt bakover i tid, men de har ikke alltid gitt vekslinger mellom istider og mellomistider. Geologiske observasjoner i lag fra den meget varme kritt-tiden for vel 100 millioner år siden, som vi kort omtalte i første del, viser vekslinger i «Milankovitch-rytmer», men da var det veksling mellom tropiske og subtropiske klimatyper, og ikke istider.

Det er tre forutsetninger for de hyppige vekslinger mellom istider og mellomistider som skjer under dagens forhold. For det første må det generelle «klima-nivået» på jorda være kaldt nok til at breer dannes under de kaldeste utslag. For det annet må det være fjell på mildere breddegrader. For det tredje må hele klimasystemet, slik som havstrømmer, vindsystemer, CO₂-kretsløp, snøforhold, osv., være sensitivt for ytre påvirkninger, og det må finnes forsterkningsmekanismer som utløses ved disse påvirkninger. At vi idag har et så følsomt klimasystem bør være et varsko om ikke å påvirke det for mye.