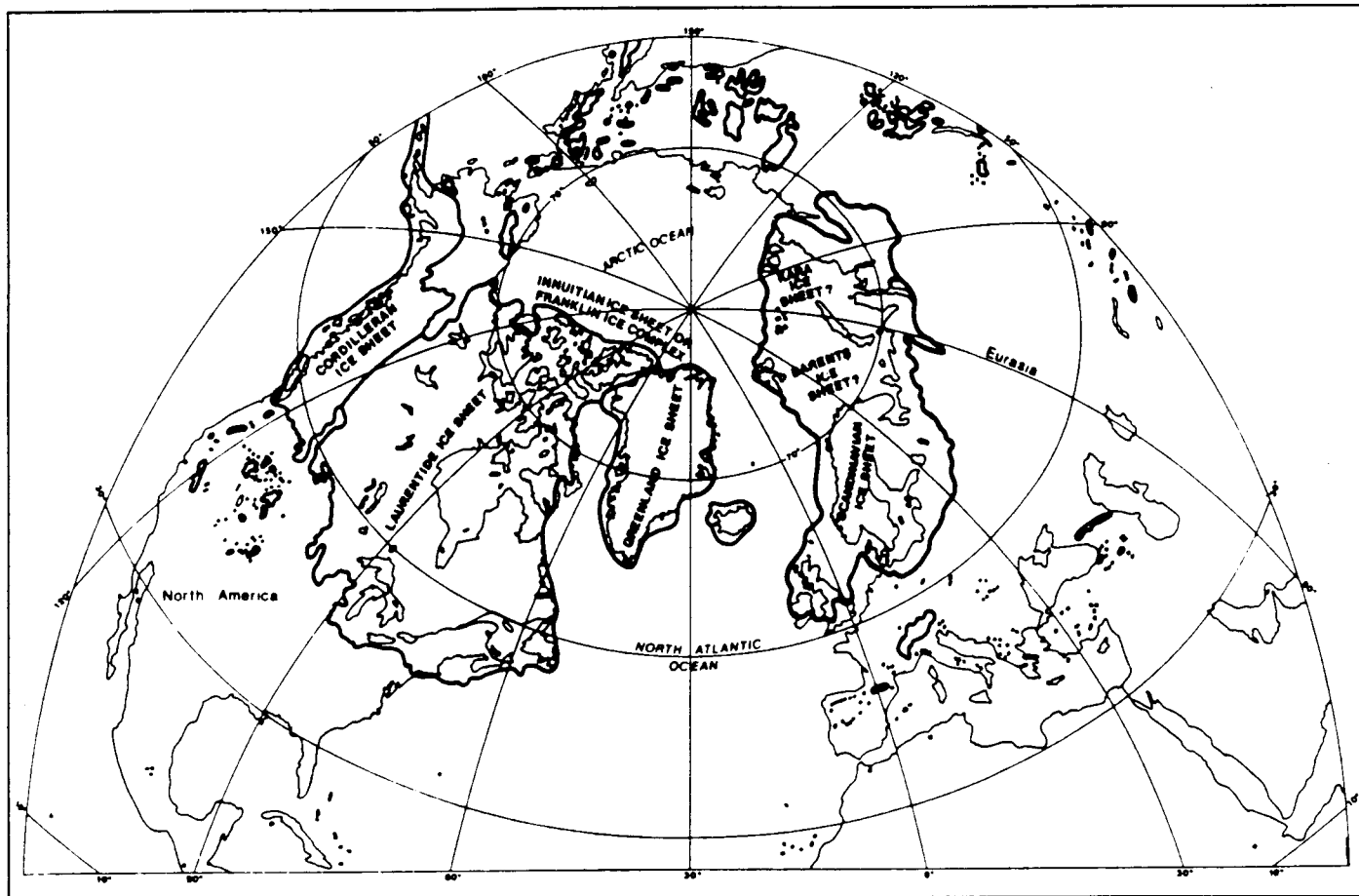


Astronomiske klimavariasjoner



Jan Mangerud

Årsakene til de svære klimavariasjonene som med jevne mellomrom gir istider på jorda, har vært et brennende spørsmål helt fra istidene ble oppdaget for over 100 år siden. Første de siste ti år har det skjedd et gjennombrudd, slik at vi nå kan avgjøre hvilken teori som er riktig. Vekslingen mellom istider og mellomistider skyldes tre nesten periodiske variasjoner i jordens bane og akse. Teorien har fått navn etter Milankovitsch, en jugoslavisk astronom som gjorde sine beregninger i første halvdel av vårt århundre.

Figur 1. De tykke strekene på kartet viser utbredelsen av isbreer på den nordlige halvkule over siste istids maksimum for 18 000 år siden. Vi ser at det var en stor innlandsis over Storbritannia-Skandinavia-Polen-Russland, og denne var trolig sammenhengende med breene over Barentshavet og Svalbard. Legg merke til at de to største breene – over Nord-Amerika og Europa – nå er helt borte, mens den over Grønland ikke er særlig mindre i dag enn under istiden.

Den ytre, astronomiske drivkraften bak klimavariasjonene som Milankovitsch-teorien beskriver, er overraskende liten. Men indre forsterkelsesmekanismer i klimasystemet forstørker de små signalene til svære klimaforandringer. Allerede her ligger et varsko om ikke å forstyrre klimasystemet, men mer om det siden.

Naturlige klimavariasjoner

Det varmeste klima vi har hatt på jorda de siste 500 000 år var under siste mellomistid, for 125 000 år siden. Forholdene lignet da vår egen mellomistid, men det globale klimaet var et par grader varmere enn i dag.

Kartleggingen av forholdene under mellomistiden skulle derfor kunne gi oss en god rettleiding om resultatet av fortsatt utslipp av klimagasser. Ved

Bergen er det en avsetning fra denne tiden som viser at sjøtemperaturen var omlag som i den Engelske kanal i dag, og lufttemperaturen som i sydlige Danmark. Ikke dårlige utsikter for hutrende nordmenn, men det er skremmende at det globale havnivå var 5-6 m høyere enn i dag.

Kaldest hadde vi det for 18 000 år siden, da siste istid var på sitt største, se figur 1. Den gangen svingte Golfstrømmen fra Florida over mot Portugal. Svære breer dekket Svalbard-Barentshavet og Nord-Europa helt til Hamburg og Manchester. På den andre siden av Atlanteren var Canada og USA isdekket ned til New York og Minneapolis.

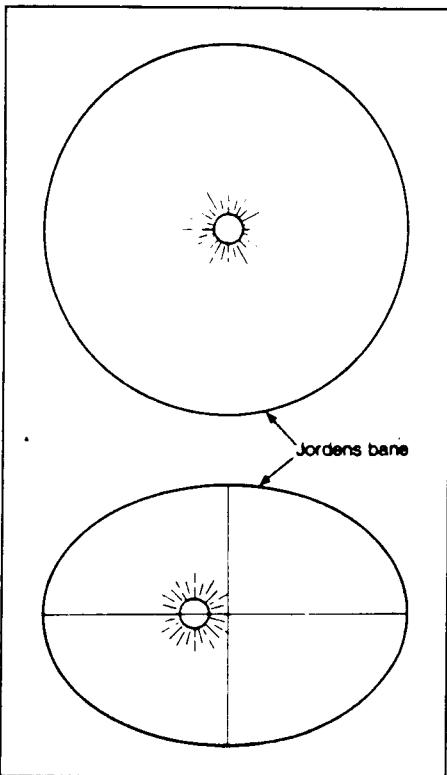
Milankovitsch viste at tre astronomiske periodiske variasjoner kunne forklare store deler av klimasvingningene. Vi skal se nærmere på hver av disse.

Jordbanens form

Som kjent er jordbanen en ellipse, men denne formen varierer over tid fra nesten en sirkel til en noe mer flatklemt ellipse, se figur 2. Variasjonen følger sykler på 100 000 år og 400 000 år, se figur 6. Det er i denne forbindelse to viktige forhold:

1. Disse variasjonene gir en forskjell i solinnstrålingen til jorda på mindre enn 0.1 %, noe som nærmest er neglisjerbart. Likevel er dette den eneste forskjell i totalinnstrålingen til atmosfæren. Resten av drivkraften til istider/mellomistider er bare en omfordeling av innstrålingen mellom årstider og mellom breddegrader.

2. Mellomistidene, som vår egen tid, følger denne 100 000 års rytmen, men det er ikke forstått hvorfor.

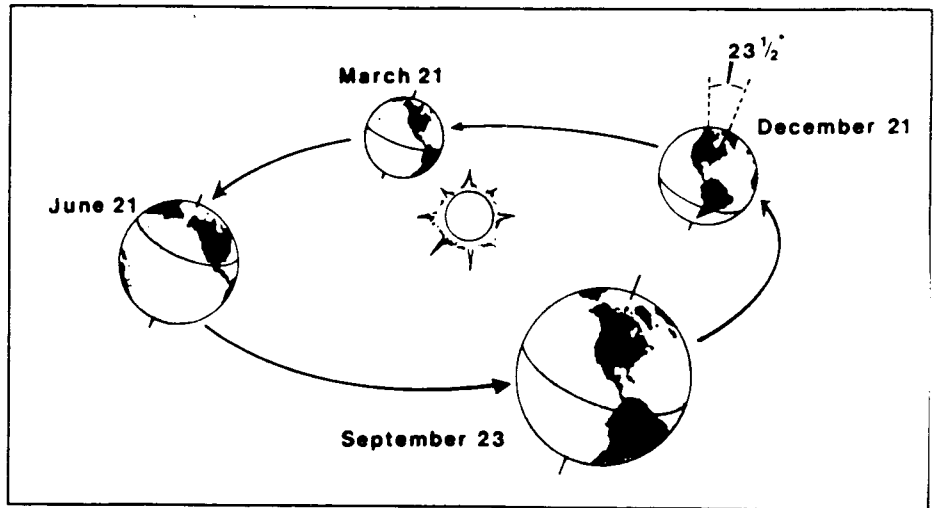


Figur 2. Jordens bane varierer mellom å være nesten en sirkel og en mer flatklemt ellipse (forskjellen er langt mindre enn på tegningen)

Jordaksens helning

Jordas akse står på skrå i forhold til jordbanen, se figur 3. Dette er velkjent for oss nordmenn. Ved vintersolhverv (21. desember) peker nordpolen mest bort fra sola og vi får vinter med mørke og korte dager. Vi ser fram til juni, da nordpolen peker mot sola og gir oss sommervarme og lyse netter. Hadde jordaksen stått rett, ville vi ikke hatt årstider, og det ville vært kaldt året rundt på høye breddegrader.

Skråningen på akse er imidlertid ikke konstant, den forandrer seg med en periodisitet på 41 000 år. I dag er den

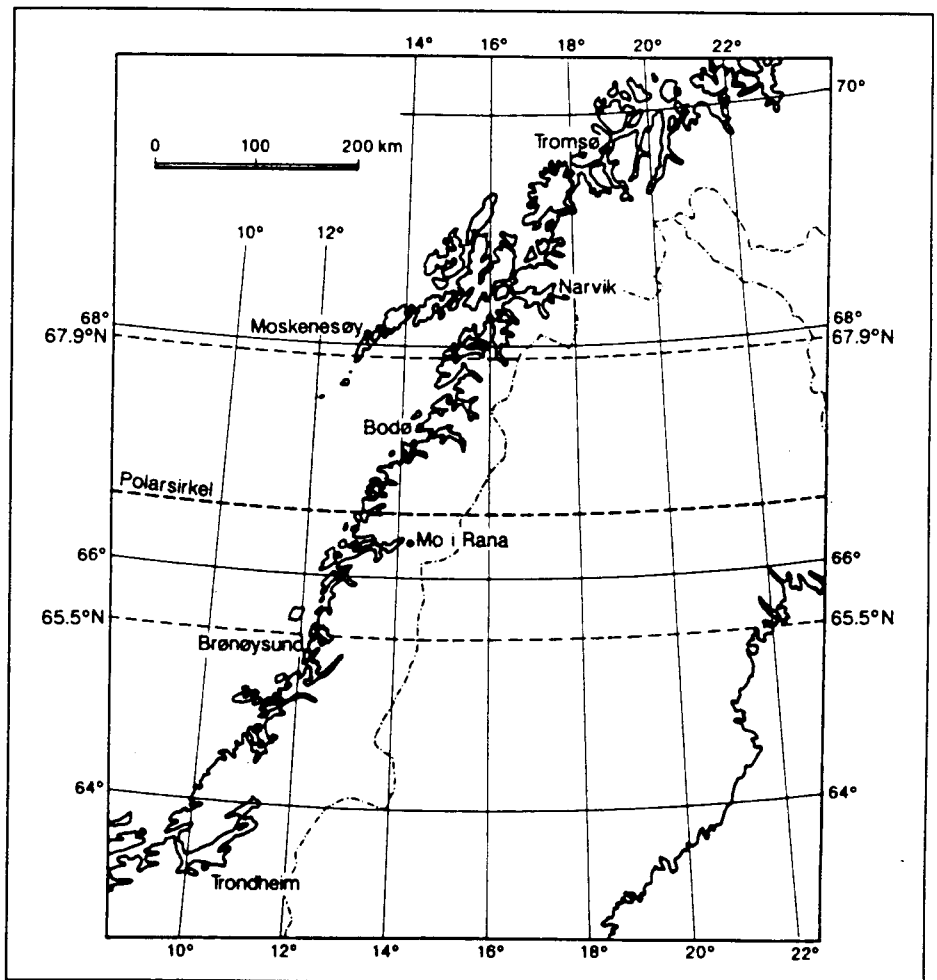


Figur 3. En skisse av jordbanen som viser betydningen av at akse står på skrå (23.5°): Nordpolen peker bort fra sola mellom høstjevndøgn 23. september og vårjevndøgn 21. mars, noe som fører til vinter på den nordlige halvkule. Resten av året er dagene på den nordlige halvkule lengre enn nettene. Lengst er de ved sommersolhverv 21. juni, og dette gir oss sommer. Med en vertikal jordakse ville årstidene forsvinne.

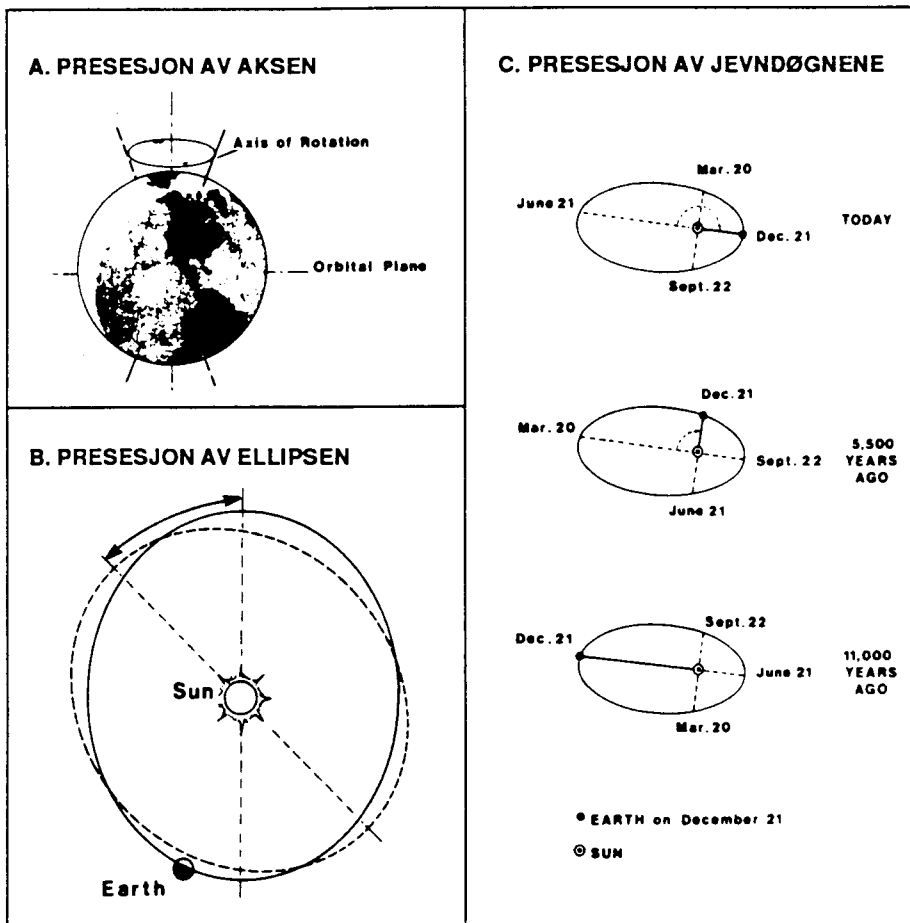
23.5° , og gir derved en sydgrense for midnattsol – polarsirkelen – på 66.5°N . Vinkelen varierer mellom 22.1 og 24.5° . Hva dette betyr for polarsirkelen i Nordland, er forklart på figur 4.

Rent kvantitativt er det lett å forstå betydningen for klimaet: Større skråning på akse gir større forskjell mellom sommer og vinter, særlig på høye

forts. neste side



Figur 4. Kartet viser hvordan polarsirkelen vil forflytte seg med jordaksens skråning. Når akse står så rett som mulig, ligger polarsirkelen ved den stiplede linjen ved Moskenesøy, ved maksimalskråning ved Brønnøysund. I steinalderen, for 5000 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 $14,4\text{ m i året}$. Om 6000 år må en nord for Bodø for å se midnattsola.



Figur 5. De tre tegningene av jordbanen oppe til høyre (C) viser hvordan årstidene vandrer rundt jordbanen. I dag 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 fig. 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 fig. A og B. Figur A viser at jordaksen svinger rundt, slik at Nordpolen i løpet av 27 000 år beskriver en full sirkel i rommet. Det fremgår imidlertid av figur C at årstidene går helt rundt jordbanen på bare 22 000 år. Dette skyldes at også hele ellipsen dreier rundt (fig. B), slik at årstidene ikke behøver å gå 360° for å være tilbake i samme punkt.

breddegrader. Utslaget er likt på nordlige og sydlige halvkule: Større skråning gir varme somre og kalde vintre på begge halvkuler. Det øker også den totale innstråling på høye i forhold til lave breddegrader.

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 aksens står ganske stille. Etter hvert som farten avtar, begynner imidlertid aksens å svinge rundt og peker mot forskjellige steder i taket, før snurrebassen til slutt faller.

Også jordaksen svinger sakte rundt på denne måten, og den vil derfor ikke alltid peke mot Polstjernen slik den gjør i dag. Dette fører til at vintersolhverv (21. desember) vil forflytte seg rundt jordbanen. Figur 5 viser at jorda i dag er nær sola ved vintersolhverv; aller nærmest er vi 3. januar. Dette gir oss for-

holdsvis milde vintre og kjølige somre, mens de på den sydlige halvkule får varme somre, de har jo sommer i januar. For 11 000 år siden var det motsatt. Da kom 21. desember mens jorda var lengst unna sola, og man fikk kalde vintre og varme somre på vår halvkule. Ikke å forakte, hvis jeg skal si min mening.

Denne faktor varierer med frekvenser på 19 000 og 24 000 år, og vi har allerede sett at virkningen er motsatt på de to halvkuler. Effekten er størst på lavere breddegrader. Det er lett å innse at den klimatiske betydning avhenger av den første faktor jeg omtalte: Hvis jordbanen er en sirkel, har jorda samme avstand til sola hele året, mens jo mer elliptisk banen er, desto mer betyr presesjonen.

Andre klimavariasjoner

Kjenner vi nå årsaken til alle naturlige klimavariasjoner? Nei, så enkelt er det ikke. En av de største og raskeste klima-

forverringer vi kjenner er en periode vi kaller Yngre Dryas. Denne inntraff ved slutten av siste istid, for 11 000 år siden. På Vestlandet falt f.eks. sommertemperaturen 5-6° på 100 år. På denne tiden hadde vi i følge Milankovitsch-teorien maksimal solinnstråling på våre breddegrader. Årsaken er livlig diskutert, men ikke klarlagt. Det synes imidlertid klart at vi må lete etter årsaken på jorda. Uvanlig mye is fra nordområdene som drev gjennom Fram-stredet og ut i Atlanteren, er én teori.

Neste istid

Har istiden betydning for klimaprogno- ser for våre barn og barnebarn? Nei, ikke hvis en spør om vi får istid om hundre år. Starten på neste istid ligger et par tusen år frem i tiden, og foreløpig har vi vel mer nærliggende bekymringer. Likevel, klimasvingningene mellom istider og mellomistider inneholder en meget viktig nøkkel til å varsle hvilket klima vi skaper med CO₂ og andre klimagasser, eller andre påvirkninger på klimasystemet.

Klimamodeller

Jeg har ovenfor omtalt de parametre i jordbanen som er den ytre årsak til vekslingene mellom istider og mellomistider. Hva dette betyr i variasjon i solinnstråling til atmosfæren, er presist og kvantitativt beskrevet av astronomer. Den endelige virkning, i form av klimavariasjoner på jordoverflaten, kjenner vi noenlunde, men den bør kartlegges mye bedre.

Vi kjenner altså drivkraften til klimaendringene meget presist og vi kjenner faciten, riktignok ikke så preist. Hvis vi har tilstrekkelig innsikt i hvordan klimasystemet fungerer (se figur 7), skulle vi kunne beregne klimaendringene og få facitsvaret. Men slik er det ikke. Selv de beste klimamodellene kan ikke produsere istider fra de små drivkreftene. Dette fører til følgende konklusjoner:

1. Hvis klimamodeller skal gi riktige prognoser om klimaendringer pga. økning av drivhusgasser i atmosfæren, så må modellene beskrive prosessene riktig. Siden modellene i dag ikke kan simulere istider/mellomistider, er dagens modeller åpenbart ufullstendige, og prognosene om hva som vil skje ved økende innhold av klimagasser usikre, bortsett fra at det blir varmere.

2. Siste istid-mellomistid vil være den beste test på modellenens kapasitet til å forutsi langsiktige klimaendringer, fordi drivkraften er kjent og faciten kan finnes.

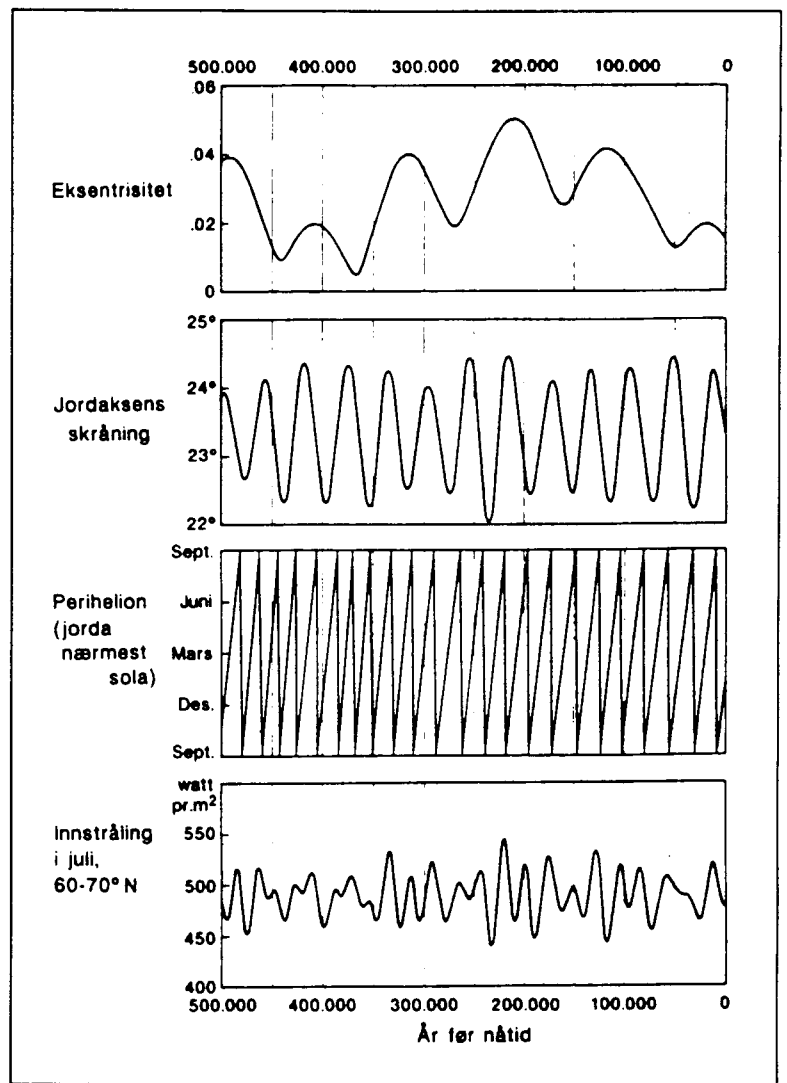
3. Et hovedproblem med istidene er at klimavariasjonene er så mye større enn "prognosene" tilsier. Dette betyr at det internt i klimasystemet finnes tilbake-

koplingsmekanismer som forsterker de små astronomiske påvirkningene til svære klimaforandringer. På figur 7 har jeg kalt dette for "indre respons". Det er viktig å finne og beskrive de mekanismer som er involvert, slik at de kan bygges inn i prognoser for framtiden.

Et enkelt eksempel på forsterkningsmekanismer er snødekket: Er det kaldt om høsten og våren, ligger snøen lenger. Derved reflekteres mer av solstrålingen og det blir enda kaldere. Tilsvarende effekt har isen i Polhavet, så la oss ikke smelte den. Viktige tilbakekoplingsmekanismer ligger i grensen til havet: Under Yngre Dryas svingte Golfstrømmen mot Frankrike i stedet for opp til oss. Så store utslag venter ingen nå, men betydelig mindre endringer vil være katastrofale, og vi kjenner altså ikke til hvorfor og hvordan dette skjer. De senere år er det gjennom borer i Antarktis vist at CO₂ også spiller en viktig rolle i naturlige klimavariasjoner.

3. Omfordelingen av solinnstrålingen som gir istider/mellomistider, skjer jevnt og sakte, men klimaet reagerer noen ganger med raske og store forandringer. Det ser altså ut som om det finnes visse terskler hvor klimasystemet raskt svinger fra en type sirkulasjon til en helt annen. Er det noen som vet om vi nærmer oss en slik terskel hvis vi fortsetter å slippe ut klimagasser?

Jan Mangerud er professor i kvartærgeologi ved Universitetet i Bergen. Artikkelen er basert på et innlegg på den internasjonale klimakonferansen "Hva skjer med klimaet i polarområdene?" 25-26. april 1989, arrangert av Norsk Polarinstitutt på initiativ av Miljøverndepartementet.



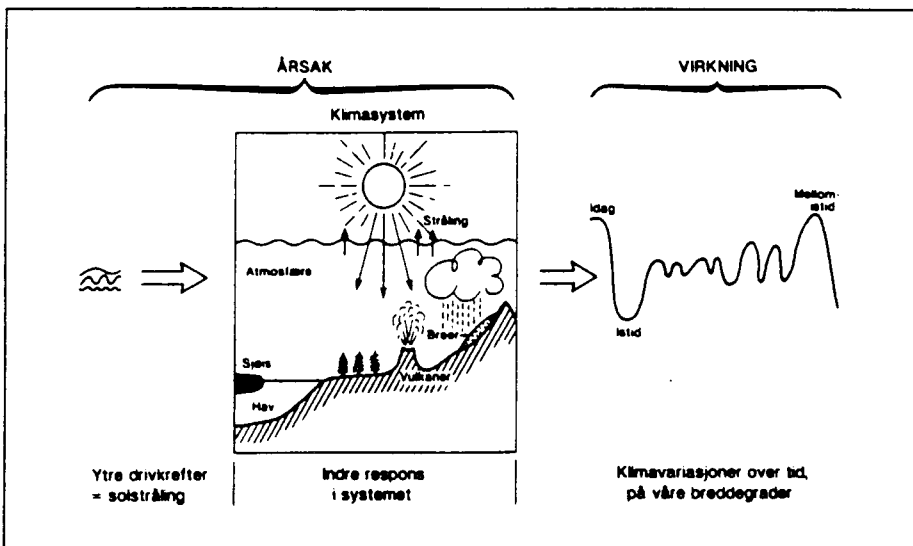
Figur 6 (over). Diagrammet viser hvordan de omtalte faktorer har variert bakover i tid. Horisontalskalaen har vår tid til høyre og går 500 000 år bakover i tid.

Det øverste diagrammet viser jordenes form: Eksentrisitet = 0 er en sirkel, og ved økte verdi blir det en mer flatklemt ellipse. Vi ser at det er en topp for hvert 100 000 år.

Jordaksens skråning er gitt som vinkelen mellom akse og en vertikal linje. Vi ser at vinkelen i dag 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 hvor jordbanen som er nærmest sola. I dag er perihelion 3. januar. Følger en kurven bakover i tid, ser vi at perihelion har forflyttet seg bakover gjennom året, slik at den falt i desember, november, oktober, osv. Sammenlign med figur 5.

Den nederste figuren 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 prosent.



Figur 7. Vi kan betrakte klimasystemet som en komplisert maskin. Kraften som driver maskinen er solstrålingen. Kraften varierer noe; 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 systemet – har forsterket variasjonene til svære amplituder på våre breddegrader. Ved ekvator er svingningene små. Klimasystemet reagerer heller ikke spontant. Hvis vi sammenligner klimakurven som kommer ut, så det er faseforskyvninger (forsinkelser) i forhold til "kurvene som går inn".

For istider/mellomistider kjenner vi presist variasjonene i solinnstrålingen, vi kjenner hovedtrekkene av virkningen og er i stand til å kartlegge denne bedre. Dette gir en nestående mulighet til å studere hvordan klimasystemet reagerer på ytre påvirkninger, og dermed mulighet til å forbedre modellene som skal gi prognoser for virkningen av f.eks. klimagasser.