

James E. Hansen

Storms of my Grandchildren

Bloomsbury Publishing 2009

Sannheten om den kommende klimakatastrofen
og vår siste sjanse til å redde menneskeheten



Utvalgte kapitler

oversatt av Sigbjørn Grønås
prof. em. i meteorologi, Univ. i Bergen

Utgitt av Besteforeldrenes Klimaaksjon
med vennlig tillatelse fra forfatteren og forlaget

Innhold

1. Ulike drivkrefter som kan endre klima - klimapådriv.....	5
2. Istider og mellomistider	9
3. Klimasensitivitet.....	12
4. Endringer i jordbanen og klima.....	18
5. Litt mer strålingsfysikk	21
6. Dagens klimasituasjon i lys av istider/mellomistider.....	25
7. Hvor mye kan havet stige?	28
8. Hvor lenge utsetter aerosoler den globale oppvarmingen?	33
9. Solas innflytelse – klimaendringer de nærmeste årene	37
10. Karbonkretsløpet.....	42
11. Hva er farlige klimaendringer?	49
12. Klimavariasjoner siste 60 millioner år	58
13. Grensen 350 ppm	67
14. Venussyndromet.....	73
15. Stormene til våre barnebarn	84
16. Etterord.....	92
Noen klimauttrykk.....	94

Kunnskap om klimaendringer - etter James Hansen

Høsten 2009 ga James Hansen ut boka ”Storms of my Grandchildren” med undertittel ”The truth about the coming climate catastrophe and our last chance to save humanity” (303 sider). Forlaget er Bloomsbury USA, New York. Boka kan kjøpes på nett og hos bokhandlere.

Hansen er en av verdens mest framstående klimaforskere og har i mange år ledet klimaforskningen ved NASA, USA. Boka skrev han da han nærmet seg 70 år. Den inneholder i hovedsak tre typer stoff: kunnskap om klimaendringer basert både på egen og andres forskning, hans ideer om hvordan verden kan få kontroll med de menneskeskapte klimaendringene og fortellinger fra sitt forskerliv, spesielt vansker han har hatt med amerikanske myndigheter som har forsøkt å dempe konklusjonene han har tatt i formidling av vitenskapelige resultater.

Med tillatelse fra James Hansen har jeg oversatt det han skriver om klimaendringer i denne boken. Til sammen gir stoffet en grei innføring i fysikken om hvordan klima kan endres, observerte klimaendringer og endringer gjennom klimahistorien basert på ulike rekonstruksjoner. Jeg har ikke med hans tanker om hvordan klimaproblemet kan løses.

Forskningen til Hansen er uvanlig allsidig. Den dekker målinger og analyser av dagens klimaendringer, analyser av fortidens klimaendringer og klimamodeller. Allsidigheten, sammen med grundig bakgrunn i fysikk og dynamikk, gjør han trolig til klimaforskningens største autoritet.

Han legger mest vekt på klimahistorien, der naturlige, langsiktige endringer i atmosfærens karbondioksid har gitt enorme endringer, fra en ”snøballjord” med mye is helt til ekvator, til varme perioder med tropisk vegetasjon og fauna på Svalbard. Den stabile klimatilstanden siste 7000 år, en ytterst sjelden episode i klimahistorien, ødelegges nå ved våre utslipp av drivhusgasser. Holder vi fram med utslipp som nå, etter det scenario som FNs klimapanel kaller business-as-usual, der alle reserver av fossilt drivstoff vil bli brukt, går planeten undergangen i møte.

Dersom man vil vite hva verdens klimaforskere mener om klimasituasjonen, anbefales det å lese rapportene til FNs klimapanel, IPCC. Men denne kunnskapen kan være vanskelig å tilegne seg for andre enn klimaforskere og fysikere. Det blir sagt at dersom man vil vite hva IPCC vil mene om ti år, les James Hansen. ”Kunnskap om klimaendringer” gir nettopp en oppdatert oversikt over hvordan Hansen vurderer klimasituasjonen. Det vil alltid være noe krevende å sette seg inn i slik kunnskap. Men det er mye enklere å lese Hansen enn rapportene til IPCC.

Det kan noen ganger være skremmende å være vitne til hvor lite klimakunnskap som er til stede i norsk klimadebatt. For eksempel mangler ofte journalister bakgrunn for å stille kritiske spørsmål til politikere, som alt for lett får ”grønnvaske” klimapolitikken. Skal klimakampen vinnes, er det en forutsetning at kunnskapen om klimaendringer økes overalt. Ikke minst gjelder dette politikere, planleggere, økonomer og journalister. Jeg

mener slike grupper har plikt på seg til å lese Hansen, enten i originalutgave eller her i norsk oversettelse.

Jeg har delt stoffet opp i kapitler som ikke er de samme som i boka. Hvert kapittel henviser til sidetallet i boka der oversettingen starter. Jeg har også med en egen liste med definisjoner av klimauttrykk som det henvises til i teksten (kursiv første gangen de opptrer). Figurene er i farger, mens de i boka er i svart-hvitt. Figurnumrene er de samme som i boka, men merk at ikke alle figurene i boka er med (stort sett er det fotografier som er utelatt). Noen få steder er det med enkelte setninger skrevet av meg, disse er markert med understrekning. Halfdan Wiik har hjulpet meg med språket.

Os, juni 2010

Sigbjørn Grønås

Kunnskap om klimaendringer

Av James Hansen

Utvalgte deler av "Storms of my grandchildren, the truth about the coming climate catastrophe and our last chance to save humanity", Bloomsbury USA, New York (303 sider). Oversatt av Sigbjørn Grønås.

1. Ulike drivkrefter som kan endre klima - klimapådriv (fra side 5)

Et klimapådriv defineres som en påført forstyrrelse i vår planets energibalanse. Den måles i watt per kvadratmeter. For eksempel, dersom sola skulle bli en prosent sterkere, utgjør det omtrent 2 watt (for enkelhets skyld vil jeg noen ganger sløyfe "per kvadratmeter" når jeg diskuterer pådriv), fordi jorda absorberer 240 watt solstråling i gjennomsnitt over dag og natt.

Et stort klimapådriv som vi kjenner til, skyldes vulkanutbrudd som fører svoveldioksidgass opp i *stratosfærens* lavere lag (i høyde 16 til 30 km). Svoveldioksid kombineres med oksygen og vann for å danne ørsmå svovelholdige syredråper (*aerosoler*) som sprer sollyset tilbake til verdensrommet. På den måten reduseres solas oppvarming av jordoverflaten. Aerosoler dannet ved utbruddet fra Mount Pinatubo på Filippinene i 1991 reduserte soloppvarmingen av jorda med nesten to prosent, et negativt pådriv på omtrent 5 watt. Dette store pådrivet varte bare en kort tid - etter to år hadde mesteparten av aerosolene falt ut av *atmosfæren*. Den korte varigheten reduserer sterkt effekten av vulkanutbrudd på langsiktige klimatrender (*klima*). Men en effekt på klimatrenden kan påvises dersom det opptrer en uvanlig konsentrasjon av vulkanutbrudd innen et århundre.

Det største menneskeskapte klimapådrivet skyldes *drivhusgasser*. Dette er gasser som absorberer infrarød varmestråling (*infrarød termalstråling*), slik at en økt gasmengde gjør atmosfæren mindre gjennomtrengelig for stråling på infrarøde bølgelengder. Denne reduksjonen i gjennomtrengelighet (eller økning i opasitet) gjør at varmen som stråles til verdensrommet finner sted i et høyere lag av atmosfæren der det er kaldere. Derfor reduseres varmestrålingen til verdensrommet, noe som resulterer i en planetær energiubalanse. Jorda stråler på den måten ut mindre energi enn den absorberer, noe som varmer opp planeten.

Hvor mye *klimasystemet* responderer på et spesifisert pådriv – spesielt hvor mye *global overflatetemperatur* vil endres – kalles *klimasensitivitet*. Denne sensitiviteten er rimelig godt forstått på grunnlag av jordas klimahistorie. Paleoklimatiske (*paleoklima*) serier viser nøyaktig hvordan jorda har svart på klimapådriv over de siste hundretusener av år.

Det finnes mange ulike klimapådriv, figur 1 viser et estimat av alle kjente pådriv i år 2000 sammenlignet med begynnelsen av den industrielle revolusjon. De vertikale strekene på hver søyle angir estimat for *usikkerheten* i hvert pådriv. Endringer i solstrålingen (*irradians, total solar irradians*) gir et potensielt pådriv på tidsskaler fra tiår til hundreår. Nøyaktige målinger av solstrålingen ble dessverre først mulig med satellittmålinger fra sent på 1970-tallet. Slike data viser en syklisk variasjon på 0,1 prosent over solas magnetiske syklus på 10 til 12 år (*solar 11-årssyklus*) og gir slik et syklisk pådriv på 0,2 watt over perioder på 10 til 12 år.

Den direkte effekten av en endring i styrken på solstrålingen blir forsterket ved minst én indirekte effekt. Den solare variasjonen er mye større for ultrafiolette bølgelengder enn for synlige bølgelengder. Ultrafiolett stråling bryter opp oksygenmolekyler i jordas atmosfære og danner *ozon*, noe som øker drivhuseffekten. Dette indirekte klimapådrivet forsterker det direkte pådrivet med kanskje så mye som en tredel, noe som gir et totalt syklisk pådriv på 0,3 watt.

Noen sier at sola spiller en større rolle i klimasammenheng enn *karbondioksid* og andre drivhusgasser; det settes fram hypoteser om at det eksisterer andre indirekte effekter som forsterker de små variasjonene i målt solstråling. Den mest kjente hypotesen er denne: sola endrer *kosmisk stråling*, som så endrer kondensasjonskjernene for skydråper (*kondensasjon, skykondensasjonskjerne*), som endrer skydekket, som endrer observert solstråling, som endrer klima (*klimaendring*). Men det eksisterer ikke belegg som støtter en stor indirekte forsterkning. Den vesle sykliske komponenten i global temperatur som kommer fram i statistiske analyser av observert global temperatur, er konsistent med et solart pådriv på 0,2 til 0,3 watt. Mulige feil i bestemmelsen av den sykliske temperaturresponsen gir høyst en forsterkning av solare pådriv med en faktor to. Selv med en slik forsterkning er det sykliske solare pådriv mye mindre enn pådriv fra økt drivhuseffekt.

Det gjenstår et større spørsmål om sola: hvor store er de solare variasjonene på en hundreårsskala? Det solare pådrivet i figur 1 fra år 1750 til 2000 er basert på forskning av soleksperter, spesielt Judith Lean og Claus Fröhlich, som brukte indirekte indikatorer (*proksi*) for *solaraktivitet*, slik som *solflekker*. De antar at sammenhengen mellom solaktivitet og solstråling som er observert gjennom de siste få tiårene, er den samme som den var for noen få hundre år tilbake. Dette leder til konklusjonen at nyere solarpådriv er noen få tideler av en watt større enn det var på 1700-tallet. Usikkerheten er stor, som indikert i figur 1.

Den andre kjente naturlige mekanismen for klimapådriv, vulkanutbrudd, virket trolig på samme måte som sola over intervallet fra midt på 1700-tallet til midt på 1900-tallet. Det er fordi tilgjengelige data, magre som de er, tyder på at vulkanaktiviteten var større på 1700-tallet enn på 1900-tallet. Rett nok hadde vi tre store utbrudd mellom 1963 og 1991 (Mount Agung, El Chichón og Mount Pinatubo), en aktivitet som minst ville være sammenlignbar med den på 1700-

tallet. Likevel, når folk sammenligner klimaet på 1700-tallet med det på 1900-tallet for å undersøke effektene av naturlige klimapådriv, ekskluderes vanligvis de siste tiårene av 1900-tallet, fordi på den tiden var det menneskeskapte pådrivet fra drivhusgasser så stort at det var større enn effektene av selv tre store vulkanutbrudd; mens opp til midten av 1900-tallet var netto menneskeskapte klimapådriv ganske små.

Økningen i klimapådrivet på grunn av vulkanutbrudd ved midten av 1900-tallet relativt til 1700-tallet er estimert til 0,15 watt, med en usikkerhet på 0,1 watt. Slik var endringen i naturlige klimapådriv over de to hundre årene kanskje så stort som 0,5 watt. Dette er minst like stort som menneskeskapte klimapådriv over samme periode. Naturlige pådriv kan dermed forklare mye av de observerte klimaendringer fram til midten av 1900-tallet. Klimaendringen mellom 1700-tallet og 1900-tallet var betydelig. Det 18. århundret falt innenfor *den lille istid*, som noen ganger blir sagt fant sted mellom 1600 og 1850 og noen ganger fra 1250 til 1850. Klimaet fluktuerte fra år til år og fra tiår til tiår, men forandringen mellom 1700-tallet og 1900-tallet var signifikant. For eksempel, i 1780-årene kunne soldater i den amerikanske revolusjon dra kanoner over den tilfrosne havna i New York fra Manhattan til Staten Island, og folk holdt isfester på sjøisen. Tilsvarende ville aldri vært mulig i det 20 århundret.

Hvor mye varmere var det så på 1900-tallet sammenlignet med den lille istid? Avkjølingen i den lille istid, som et gjennomsnitt over hele kloden over alle årstider, var sannsynligvis mindre enn en halv grad. Vår kunnskap, både om klimapådrivet over siste 1000 år og klimaendringene i denne perioden, er for unøyaktige og for små for å tillate en empirisk evaluering av klimasensitiviteten.

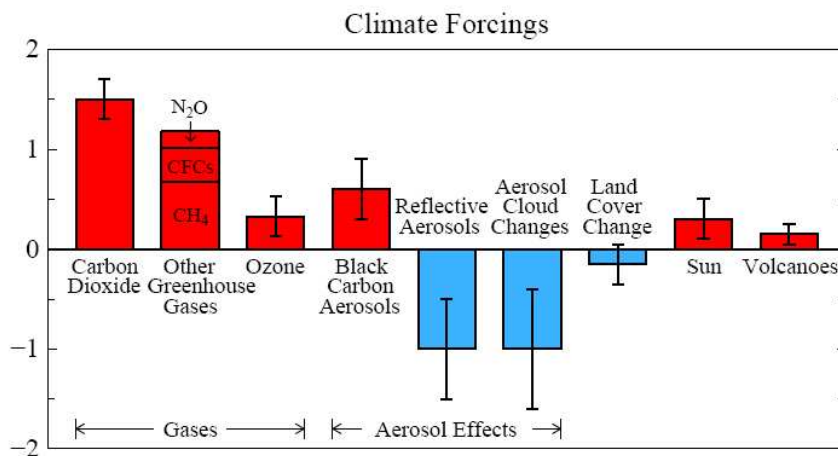
Derimot var temperaturendringene mellom siste del av dagens *mellomistid* (*interglacial*) og den siste store *istid*, for tjue tusen år siden, en *størrelsesorden* (ti ganger) større enn endringene over de siste hundreårene. En *innlandsis* mer enn 1500 m tykk dekket den gang dagens Canada og store deler av USA, inkludert Seattle, Minneapolis og New York City. En annen *innlandsis* dekket Nord-Europa. Den gjennomsnittlige globale overflatetemperatur var 5 grader kaldere enn i dag. Klimapådrivene som ga temperaturendringen var også en *størrelsesorden* større enn pådrivene i de to siste hundreårene forårsaket av sola og vulkanutbrudd. Pådrivsmekanismene fra istid til mellomistid er tilstrekkelig godt kjente til å bestemme klimasensitiviteten nøyaktig (mer om det senere).

Hva som er helt klart, er at de menneskeskapte pådrivene, selv bare de tilført gjennom de siste tiårene, gjør de naturlige pådrivene knyttet til den lille istid til småtter. Karbondioksid økte fra 280 ppm (parts per million; dvs. 0,028 prosent av atmosfærens molekyler) fra 1750 til 370 ppm i 2000 (og til 387 ppm i 2009). Virkningen av denne økningen i CO₂ på jordas energibalanse kan beregnes nøyaktig med en usikkerhet på mindre enn 15 prosent. Klimapådrivet på grunn av økningen i CO₂ fra 1750 til 2000 er omtrent 1,5 watt. Andre menneskeskapte

endringer, som tilførsel av metan, lystgass, klorfluorkarboner (KFK-er) og ozon til atmosfæren, bidrar til et totalt drivhuspådriv på omtrent 3 watt.

Figur 1 illustrerer også en stor usikkerhet i netto menneskeskapt klimapådriv. Usikkerheten skyldes aerosoler, små partikler i lufta som for det meste er produsert ved å brenne fossilt drivstoff. Aerosoler sprer og absorberer sollys og reduserer den mengden som når jordoverflaten. Noen ganger blir dette kalt *global dimming*. Den har en avkjølingseffekt som delvis oppveier drivhusoppvarmingen, men omfanget er usikkert fordi aerosoldata er unøyaktige. Dersom de estimerte pådrivene i figur 1 godtas som dagens kunnskap, var netto klimapådriv i 2000 relativt til førindustriell tid mellom 1,5 og 2 watt, men med en usikkerhet på minst 1 watt.

Som en illustrasjon pleier jeg under mine foredrag noen ganger å ta fram en liten lyspære på 1-watt brukt på juletre, for å illustrere. Jeg forklarer at nettoeffekten av menneskeskapt pådriv er som å ha to av disse pærene brennende dag og natt på hver kvadratmeter av jordas overflate. Jeg forklarer at på den ene side er pådrivet fra to slike 1-wattspærer lite – det kan ikke stoppe vinden eller forandre pågående værforandringer. På den annen side, dersom de får lyse i flere tiår og hundreår, lenge nok til at temperaturen i havet vil respondere, er det et svært pådriv.



Figur 1. Endringer i klimapådriv, i watt per kvadratmeter, mellom 1750 og 2000. De vertikale linjene viser estimat av usikkerhet. Usikkerhet for de "andre drivhusgassene" er lignende som for karbondioksid. (Data fra Hansen m. fl., *Efficacy of Climate Forcings*).

Kilder

Frölich, Claus, "Solar Irradiance Variability Since 1978," *Space Science Reviews* 125 (8. desember 2006): 53-65.

Hansen, James, Makiko Sato, og Reto Ruedy, "Radiative Forcing and Climate Response," *Journal of Geophysical Research* 102 (27. mars 1997): 6831-64.

Hansen, James, Makiko Sato, Reto Ruedy, Andrev Lacis, og Valdar Oinas. "Global Warming in the Twenty-First Century: An Alternative Scenario," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97 (29. August 2000): <http://www.pnas.org/content/97/18/9875.full>.

Hansen, James, Makiko Sati, Reto Ruedy, Larissa Nazarenko et al. "Efficacy of Climate Forcings," *Journal of Geophysical Research* 110 (28 september 2005) D18104 (45 sider).

Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Edited by John T. Houghton, Yihui Ding, David J. Griggs, Maria Noguer et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

_____. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Edited by Susan Solomon, Dahe Qin, Martin Manning, Melinda Marquis et al. New York: Cambridge University Press, 2007.

2. Istider og mellomistider (fra side 37)

Innlandsisene har kontinuerlig vokst eller trukket seg tilbake i millioner av år. Mens de rykket fram, skjøv de framfor seg svære mengder jord og stein – mesteparten av matjorda i Iowa kom med isen fra Minnesota og Canada med isen. Husene på gården der jeg ble født sto på jord så dyp at jeg tenkte den rakk helt til Kina. Byen jeg vokste opp i, Denison, Iowa, ligger på en ås som danner en endemorene, en grushaug etterlatt ved enden av en bre før den smeltet.

En innlandsis på kontinentsskala har en enorm størrelse. Selv om den var tynnere mot kantene, tårnet isen over New York flere ganger høyere enn Empire State building – tykk nok til å smadre alt i dagens New York. Det er likevel ingen grunn til å engste seg – selv om vi noen ganger hører geologer snakke som om en istid vil komme tilbake, vil det ikke skje – om da ikke menneskene utryddes. Krefter som forårsaker istider, er som vi skal se, så små og så langsomme at en eneste fabrikk for klorfluorkarbon ville være mer enn tilstrekkelig til å oppveie alle naturlige tendenser mot en istid. En ny innlandsis vil ikke danne seg over Nord-Amerika og Europa så lenge vi er her for å stoppe den.

La oss se på klimasvingningene over de siste 425000 år. Temperaturen i Antarktis er vist på toppen av figur 3. Forskere fikk fram denne temperaturserien ved å borre ut en kjerne (sylinder) av is fra innlandsisen i Antarktis (*iskjerne*), en kjerne som strekker seg fra overflaten helt til bunnen av det 3 km tykke isdekket. Innlandsisen ble dannet av snø som ble akkumulert år for år og komprimert til is, og visse egenskaper i denne isen uttrykker temperaturen da snøflakene la seg.

Temperaturer for mange steder rundt om på jorda er hentet fram på lignende måte. Havsediment som samler seg over mange år inneholder skall fra mikroskopiske dyr, som viser temperaturen i havet da skjellene ble dannet. Mineralegenskaper i *stalagmitter*, dannet ved dryppende vannoppløsninger i en grotte, gjengir også serier med temperaturendringer over hundretusenvis av år.

Data fra mange steder rundt om i verden viser et viktig poeng at de store klimavariasjonene er globale i utstrekning. Temperaturendringer ved ekvator er typisk en tredel så store som polare endringer. Gjennomsnittlige globale endringer er omtrent halvparten så store som endringene ved polene.

De samme iskjernene som gir temperaturen i Antarktis, tillater oss også å få fram sammensetningen av atmosfæren fra bobler av luft som ble fanget inne etter som snøen ble komprimert til is. Mengden av karbondioksid, vist på den mellomste kurva i figur 3, er større gjennom de varme periodene. Dette er som ventet fordi et varmere hav utløser karbondioksid til lufta. Utløsningen skyldes delvis mindre oppløselighet etter som temperaturen i havet øker (akkurat som varm brus mister sitt piff), og delvis andre mekanismer, inkludert redusert lagring av biologisk karbon i dyphavet etter som havsirkulasjonen øker i mellomistider.

Nøyere undersøkelser viser at temperaturendringene kommer flere hundre år i forkant av endringene i CO₂. Endringer i karbondioksid som en respons av en klimaendring er en viktig tilbakekoplingsprosess (*klimatilbakekopling*) som påvirker klimasensitiviteten, som jeg vil diskutere senere. Men legg merke til at rekkefølgen (endringer i karbondioksid etter endringer i temperatur) og forsinkelsen (flere hundre år) er som forventet for disse naturlige klimaendringene. Tiden på forsinkelsen i karbondioksids respons på en temperaturendring er knyttet til havets gjennomstrømningstid (*levetid*), som er flere hundre år.

Når isen smelter, stiger havnivået (*havnivåendring*). Kurva på bunnen i figur 3 viser at endringene i havnivået er store. For tjue tusen år siden var havnivået 110 meter lavere enn i dag, dvs. om lag samme nivå som dagens kontinentalsokler. Takten i økningen av havnivået kan være rask så snart innlandsisene begynner å miste masse (disintegrere). For 14000 år siden økte havnivået 4 til 5 meter per hundreår gjennom flere sammenhengende århundrer – en gjennomsnittlig økning på en meter hvert 20. eller 25. år.

Disse klimaendringene har helt sikkert påvirket menneskenes utvikling. De eldste bevis for det anatomisk moderne mennesket er fra Afrika for 130000 år siden, selv om arten *Homo sapiens* trolig oppsto for 200000 år siden. Det betyr at de første menneskene levde gjennom den forrige mellomistid, *eem* (eller *eemien*). Som vist i figur 3, var *eem* litt varmere enn *holosen*, den mellomistid vi lever i, med en global gjennomsnittstemperatur på litt under en grad varmere enn nå. Som vi vil se, er dette viktig informasjon når man skal vurdere hvor farlig den *globale oppvarmingen* kan bli.

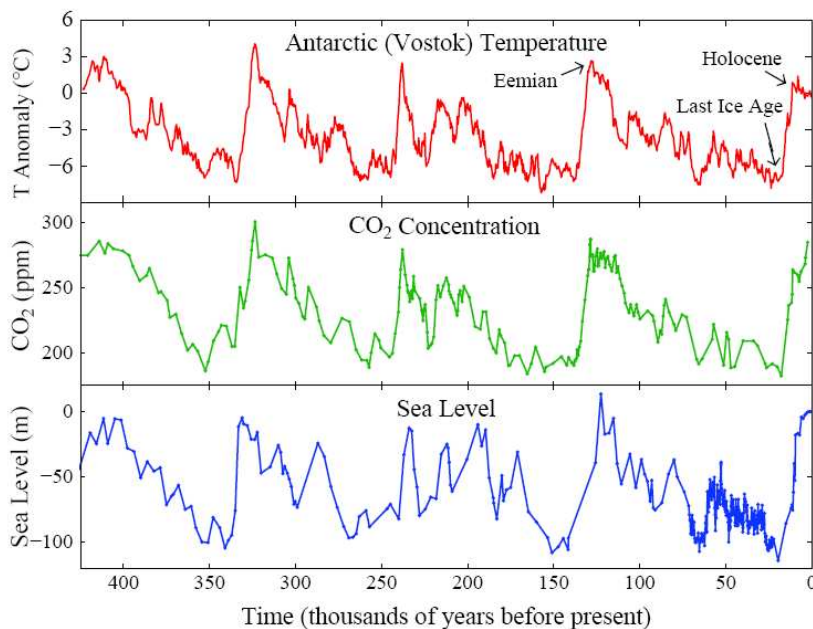
Overgangen fra varmen i eem til forholdene under istiden må ha vært stressende for menneskene, selv om det tok tusenvis av år. Den endelige overgangen til full istid for 70000 år siden skjedde raskt og falt sammen med en nestenutryddelse av mennesket som art; det er estimert at så få som ett tusen kjønnsmodne par overlevde gjennom denne flaskehalsen for menneskeheten. En populær teori for årsaken til både den raske avkjølingen og populasjonsnedgangen er det kolossale utbruddet fra supervulkanen Toba på denne tiden. Geologiske data indikerer at Toba utløste minst åtte hundre kubikkilometer med materiale, mot fire kubikkilometer i utbruddet fra Pinatubo i 1991, det største utbruddet i forrige århundret. Uansett betydningen av Tobateorien, er det sannsynlig at den raske globale avkjølingen på den tiden spilte en rolle for populasjonsnedgangen.

Den enorme nedgangen i havnivået, illustrert i den nedre kurva i figur 3, har spilt en viktig rolle i utviklingen av menneskers samfunn. Lavt havnivå gjennom siste istid gav en landbro over Beringstredet som knyttet sammen Sibir og Alaska. Dette steppeområdet, noen ganger kalt Berengia, var opp til 1500 km vidt fra nord til sør. Folk fra Asia som hadde migrert inn til Berengia, ble isolert fra sine forfedre i Asia. Men innlandsis som hadde blokkert veien sørover, begynte å smelte for 16000 – 17000 år siden, noe som gjorde videre migrasjon til Amerika mulig.

Bortfallet av endringer i havnivået bidro til utvikling av komplekse samfunn. Det sosiale hierarki i komplekse samfunn krever matforråd store nok til å opprettholde en befolkningskomponent som ikke produserer mat. Det er påfallende at nesten alle de første kjente populasjonssentra, på flere kontinenter, dateres til omkring 6000 til 7000 år siden, da økningen i havnivået avtok markant. Inntil da, som vist av figur 3, hadde havnivået steget hele tiden med gjennomsnittlig mer enn en meter per århundre gjennom flere tusen år. De fleste bosetningene var ved kyster eller ved elvebredder, ofte i deltaområder. Biologisk produksjon og forekomst av fisk holdes på lavt nivå så lenge havnivået endrer seg, men kan øke en størrelsesorden med stabilt havnivå. Det er derfor stilt en hypotese om at proteinrik fiskekost, som ble tilgjengelig ved stabilt havnivå, har stor betydning for den nesten samtidige utvikling av komplekse samfunn over hele verden. Det faktum at tidligere samfunn simpelt hen ble oversvømt eller vasket bort av et stigende hav, forsterket den samtidige utviklingen. Det er i alle fall liten tvil om at vår sivilisasjon ville hatt mye større vansker med å komme i gang, og trolig være mindre utviklet i dag, om ikke havnivået var blitt stabilisert. Men som vi skal se, perioden med omtrent stabilt havnivå er i ferd med å ta slutt.

Den sterke korrelasjonen mellom temperatur, karbondioksid og havnivå er innlysende i figur 3. Men hva er det som ligger til grunn for denne effekten? Hva forårsaker de svære klimaendringene? Det er jo slik at Central Park i New York i dag ikke er dekket av en kilometer med is. Som vi skal se kan små endringer i jordas bane rundt sola og *skråningen på jordaksen*, ha overraskende stor

virksomhet om du ikke er kjent med dette emnet fra tidligere. Men først må jeg klargjøre emnet klimasensitivitet.



Figur 3. Temperaturendringer, mengden av karbondioksid i atmosfæren og havnivå som en funksjon av tid fra 425000 år siden. Den horisontale akselen viser tid i tusenår før nåtid. Tid null (nåtid) referer seg til år 1750, like før den industrielle revolusjon. (Figur fra Hansen m. f., "Target Atmospheric CO₂.")

For kilder, se kapittel 4

3. Klimasensitivitet (fra side 40)

Klimasensitivitet ble undersøkt grundig første gang i 1979 ved et arbeid satt i gang av President Jimmy Carter. Det endte opp i rapporten Global-2000, en tykk samling av et enormt antall bekymringer for framtiden. Og når vi vet at Carter godkjente prosjekter med et mål om å ta ut olje og gass fra kull, å "koke" Rocky Mountains for å presse ut olje fra oljesand, var det god grunn til bekymring. Dette er prosjekter, som om de hadde blitt gjennomført fullt ut og spredd til andre nasjoner, hadde et potensial til å utrydde alt liv på jorda.

Carters store bidrag til klimaforskningen var hans anmodning til Vitenskapsakademiet om å lage en rapport om den potensielle klimatrusselen som følge av økende karbondioksid i atmosfæren. Akademiet ble opprettet av President Abraham Lincoln i 1863 for å gi råd til nasjonen om viktige saker som krevde den beste vitenskapelige ekspertise. Og akademiet gjorde det helt riktige valg da det satte professor Jule Charney ved Massachusetts Institute of Technology til å lede studiegruppen.

En mindre anerkjent forsker kunne ha skrevet en rapport som i detalj gikk inn i komplekse klimaspørsmål, om hvordan karbondioksid endres år for år, estimat

for hvordan ting kunne fortsette å endre seg i framtiden, alt med en stor usikkerhet (jeg kritiserer ikke rapportene fra FNs klimapanel – de detaljerte rapportene har også sin nødvendige plass). Men Charney valgte en annen vei. Han bestemte seg for å definere et enkelt idealisert problem – et tankeeksperiment – med fokus på viktige fysiske mekanismer. Tretti år senere har Charneys tankeeksperiment blitt enda mer kraftfullt, og et essensielt element i analysen av klimaendringer.

Charneys tankeeksperiment var dette: Anta at mengden av karbondioksid i atmosfæren plutselig ble doblet. Hvor mye ville da den globale temperaturen øke? Han forutsatte, i alle fall indirekte, at mange egenskaper på jorda skulle holdes uendret, for eksempel skulle innlandsis og vegetasjon være som i dag og havnivået ikke endres. Bare havet og atmosfæren kunne tillates å endre seg som en respons på en dobling av karbondioksid.

Han forsto naturligvis at noen av disse faste størrelsene kunne begynne å variere på tidsskalaer av praktisk betydning. Men menneskene hadde begynt å brenne fossilt drivstoff så raskt at en dobling av karbondioksid kunne ventes innen mindre enn hundre år, som nesten bare er et øyeblikk på geologisk tidsskala. Man tok for gitt at innlandsis stort sett ville endre seg på en tusenårsskala. Uansett holdbarheten i slike forutsetninger, Charneys idealiserte problem fokuserte på visse klimaprosesser som utvilsomt er viktige. Ha bare i mente at en rekke andre prosesser kan settes i gang over mange tidsskalaer.

Charney søkte etter global oppvarming ved likevekt, det vil si oppvarmingen etter at atmosfæren og havet har oppnådd en ny, endelig temperatur som respons på økt karbondioksid. Den øyeblikkelige effekt av å doble karbondioksid, om alt annet holdes konstant, ville være en reduksjon på omtrent 4 watt (per kvadratmeter) i varmestrålingen fra jorda til verdensrommet. Dette er enkel fysikk slik tidligere forklart: Den tilførte økningen i karbondioksid minker gjennomtrengeligheten (øker opasiteten) i atmosfæren for varmestråling, slik at stråling til verdensrommet løftes til et høyere nivå der det er kaldere, og slik reduseres strålingen til verdensrommet.

Enhver skikkelig fysiker kan med en gang gi deg svaret på Charneys problem dersom alt unntatt temperaturen holdes konstant. Et hvert legeme stråler ut (emitterer) varmestråling basert på dets temperatur – om det blir varmere, emitterer det mer energi. Det fins en velkjent ligning i termodynamikken, Plancks lov, som definerer strålingsmengden for et legeme som en funksjon av temperaturen. Den gjennomsnittlige temperaturen i jordas atmosfære – omtrent -18 grader – får atmosfæren til å emittere omtrent 240 watt med varmeenergi til verdensrommet, etter beregninger fra Plancks lov. Dersom mengden av karbondioksid dobles - som i Charneys tankeeksperiment – reduseres strålingen til verdensrommet med 4 watt, fordi tilført karbondioksid fanger opp akkurat så mye energi. Vi kan bruke Plancks lov til å beregne hvor mye jorda må varmes opp for å stråle ut 4 flere watt og gjenvinne planetens energibalanse. Svaret vi

finner er 1,2 grader. Så klimasensitiviteten i dette enkle tilfellet av Planckstråling, er 0,3 grader for hver watt klimapådriv.

Denne enkle Plancks lov for klimasensitivitet, 0,3 grader for hver watt pådriv, gjelder klimasensitiviteten uten klimatilbakekopling. Tilbakekoplinger skjer som følge av endringer i temperaturen og kan endre global temperatur ytterligere, enten forsterke eller dempe den første responsen. Det er tilbakekopling som gjør det store utslaget i klimaproblemet. Pådriv driver klimaendringer. Tilbakekopling bestemmer størrelsen på dem.

Interessant nok, alle de viktigste klimatilbakekoplingene har med vann å gjøre, i fast, væske- eller gassform. For eksempel, når jorda blir varmere, vil is og snø ha en tendens til å smelte. Is og snø har stor refleksjonsevne, eller *albedo* (ordet betyr hvithet), og reflekterer tilbake til verdensrommet mesteparten av solstrålingen som mottas. Så dersom is og snø smelter, absorberer jorda mer solstråling, som en forsterkende positiv tilbakekopling.

Vanndamp gir den største klimatilbakekoplingen. Når lufta blir varmere, kan den holde på mer fuktighet. Luft holder på mer fuktighet om sommeren enn om vinteren. Selv når det snør, noe som betyr at *relativ fuktighet* er nær 100 prosent, og om lufta slippes inn i et rom og varmes opp til romtemperatur, vil du finne at lufta er ganske tørr. Og luft over Sahara inneholder store mengder vanndamp selv om den relative fuktigheten er lav. Årsaken er at mengden vanndamp lufta kan inneholde før den blir mettet, slik at vann og eller is kan kondenseres ut, er en sterk funksjon av temperaturen.

Vanndamp gir derfor en positiv tilbakekopling, fordi vanndamp er en effektiv drivhusgass. Omtrent en gang hver uke får jeg sinte e-poster fra folk som knytter neven mot meg og sier omtrent som så: "For noe tull å si at karbondioksid er viktig. Vanndamp er en mye viktigere drivhusgass, og den opptrer naturlig!" Ja, det er så, men mengden vanndamp i lufta avhenger av temperaturen. Gjennomsnittlig relativ fuktighet er omtrent 60 prosent. Vanndampen blir hele tiden tilført ved *fordampning* fra vannlegemer, og den tas ut av lufta på steder og tider der fuktigheten når 100 prosent. Altså, når klimapådriv fører til endring i global temperatur, forårsaker vanndamp en forsterkende effekt.

Dette begynner å bli kjedelig og for komplisert? Men hold ut! Snart vil du forstå hvordan hele tilbakekoplingsproblemet kan belyses i et eneste sveip. Men det er nødvendig at du er klar over de andre viktigste tilbakekoplingene – siden det er dette som bestemmer størrelsen på klimaendringer, og fordi klimaskeptikerne som får i stand høringer i kongressen, prøver å skape forvirring om dette.

Her er to eksempler i korte trekk. Først skyer. I tretti år har vitenskapen forsøkt å modellere skyer for å forstå hvordan de mange skytyper vil endre seg når klimaet endres. Vil det bli mer eller mindre skyer? Vil skyhøyden øke eller avta? Vi vet ikke en gang om skyenes tilbakekopling gir en økning eller en demping.

Så har vi aerosoler (fine partikler i lufta). Støv i atmosfæren endrer seg dersom klimaet endres. Paleoklimatiske serier (iskjerner) viser at kaldere klima vanligvis er mer støvfullt. Men klimapådriv fra støv er usikkert, fordi det avhenger følsomt av hvor mye solstråling aerosolene absorberer og deres høyde over bakken. Og støv er bare en av mange aerosoler. Ta dimetylsulfid, en gass som produseres av marine alger og som danner ulike aerosoler. Alger endrer seg også når klimaet endres, slik endres dimetylsulfid og dens aerosoler, og slik gis det opphav til en ny tilbakekopling. Og for å gjøre det enda vanskeligere: Endringer i aerosoler endrer skyene på svært kompliserte måter, fordi aerosoler er kondensasjonskjerner ved dannelse av skydråper.

Det kan se ut som om jeg er skeptisk til *klimamodeller*, når jeg setter deres betydning etter paleoklimatiske studier og pågående klimaobservasjoner. Men slik er det i grunnen ikke: jeg har arbeidet med klimamodeller i mer enn tretti år. Jeg innser at de er nødvendige for å hjelpe oss å definere de prosesser som er mest viktige, og de som er mindre viktige; hva slags observasjoner som er nødvendige; og også for hvordan vi kan ekstrapolere inn i framtiden.

Globale klimamodeller gjør en respektabel jobb ved å demonstrere visse tilbakekoplinger, slik som vanndamp og *sjøis*, selv om de ikke forutså den seneste raske reduksjonen av sjøis i Arktis. Likevel, da Jule Charney brukte eksisterende modeller til å estimere klimasensitiviteten for dobling av karbondioksid, kunne han bare si at den sannsynligvis var mellom 1,5 og 4,5 grader. Og med "sannsynligvis" mente han at det bare var 65 prosent sjanse for at den ligger innenfor disse rammene.

Tretti år senere kan ikke modeller alene gjøre jobben stort bedre. Problemet er at selv om vår forståelse for noen tilbakekoplinger blir bedre, vet vi ikke hva vi ikke vet – det kan finnes andre tilbakekoplinger. Klimasensitivitet vil mao. aldri kunne bli definert nøyaktig i klimamodeller.

Men heldigvis, jordas historie gir oss likevel muligheten for en presis vurdering av klimasensitiviteten, uten å bruke klimamodeller. Denne tilnærmingen tar utgangspunkt i det faktum at noen tilbakekoplingsprosesser opptrer mye raskere enn andre.

For eksempel utgjør vanndamp en rask tilbakekopling fordi kondensasjon eller fordampning skjer raskt etter temperaturforandringer. Innlandsis, derimot, gir en mye langsommere respons. Det er vanligvis antatt at innlandsis trenger tusenår, i det minste hundreår, for å komme til en ny likevektsstørrelse etter en klimaendring. Slik kan Charneys idealiserte problem, med uforandret innlandsis, fordeling av vegetasjon og havnivå, sees på som et forsøk på å vurdere klimasensitiviteten for raske tilbakekoplinger.

Charneys sensitivitet for raske tilbakekoplinger er ved definisjon oppvarmingen av jordoverflaten etter at atmosfæren og havet har oppnådd likevekt etter en dobling av karbondioksid. I virkeligheten kan noen langsomme tilbakekoplinger, som Charney ikke tok hensyn til, begynne å få innflytelse før atmosfæren og havet har oppnådd en ny likevekt. I prinsippet kan disse langsomme tilbakekoplingene være enten positive (økende) eller negative (dempende). Den mest markerte framgang i nyere forståelse av klimaendringer, involverer det faktum at de dominerende langsomme tilbakekoplingene ikke bare forsterker, de er ikke på langt nær så langsomme som vi en gang trodde.

Ved å bruke jordas historie kan vi evaluere Charneys sensitivitet for raske tilbakekoplinger ved å sammenligne den siste istid, for 20000 år siden (*siste istids maksimum*), med nåværende mellomistid, siste delen av holosen. Vi vet at jorda, i gjennomsnitt over noe slikt som tusen år, var i energibalanse gjennom begge periodene. Dette kan vi bevise ved å se på det motsatte: En planetær energiubalanse på 1 watt gir nok energi til å smelte is som øker havnivået mer enn hundre meter over tusen år – men vi vet at havnivået var stabilt i begge periodene. Det eneste andre stedet (i tillegg til smelting av innlandsis) der en slik energiubalanse kunne tas opp, er i havet – men havtemperaturen var stabil i begge periodene.

Så jorda var i en energibalanse innenfor en liten del av 1 watt i begge periodene. Nå kan vi sammenligne de to periodene – to svært forskjellige klima, begge i likevekt med ethvert virksomt pådriv. Global overflatetemperatur var 5 grader varmere i holosen enn under siste istid, med en usikkerhet på 1 grad.

Hvilke faktorer fikk jorda til å bli varmere i holosen? Det fins tre muligheter: (1) en endring i energien jorda mottok, dvs. en endring i solstråling; (2) endringer innen atmosfæren; eller (3) endringer i jordas overflate. Vi kan eliminere den første muligheten, siden sola er en vanlig ung stjerne som fremdeles brenner hydrogen for å danne helium ved radioaktiv fusjon. I løpet av 20000 år var økningen i solstrålingen neglisjerbar, $-0,0001$ prosent, eller omtrent $0,0002$ watt. Men både den andre og den tredje faktoren er viktige, og de er nøyaktig kjent.

Vi har prøver av atmosfæren som eksisterte for 20000 år siden fra bobler fanget i iskjerner. Disse boblene viser at det var mer av alle de tre viktigste og godt blandede drivhusgassene, karbondioksid, metan og lystgass i holosen enn under istiden. Klimapådrivet fra disse gassene utgjorde 3 watt med en usikkerhet på $0,5$ watt. Vi kjenner også til endringene i jordoverflaten fra geologiske data. Den største endringen var representert ved de store innlandsisene som under istiden dekte Canada, deler av USA og mindre deler av Eurasia. Endringer i vegetasjon og effekter av endrede kystområder ga også mindre effekter. Nettoeffekten av disse overflateendringene, på grunn av en reduksjon i absorbert solstråling gjennom istiden, var et pådriv på omtrent $3,5$ watt.

Om vi legger disse to sammen, ser vi at det totale pådrivet på 6,5 watt opprettholdt en temperaturendring ved likevekt på omtrent 5 grader. Dette gir en klimasensitivitet på omtrent 0,75 grader for et pådriv på én watt. Dette svarer til 3 grader for et pådriv på 4 watt ved en dobling av karbondioksid. Sensitiviteten er altså i midten av det området Charney estimerte, 1,5 til 4,5 grader.

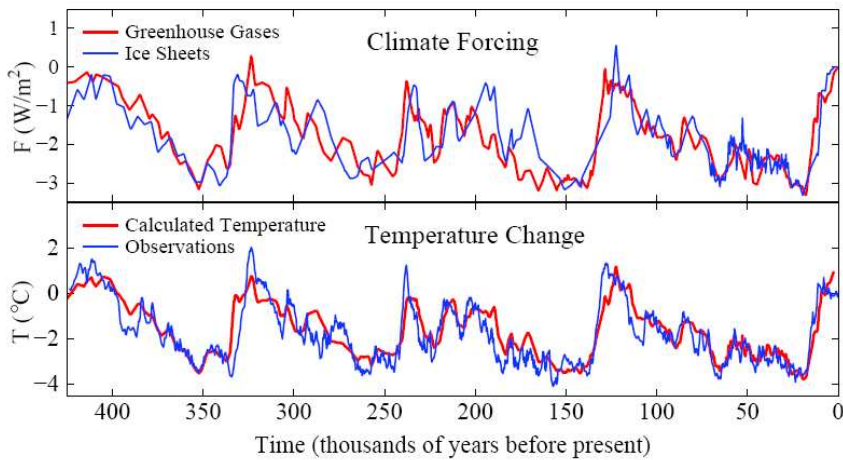
Nå kommer høydepunktet. Charneys problembeist blir overvunnet ved å vurdere den fullstendige iskjerneserien. Den gir en kontinuerlig serie av atmosfærens sammensetning, mens serier for havnivå gir den foranderlige størrelsen på de kontinentale innlandsisene. Slik kan klimapådrivene fra atmosfæren og fra overflaten beregnes på en grei måte gjennom hele serien, som vist i figur 4. Summen av disse to kurvene, multiplisert med 0,75 grader per watt, gir den kalkulerede temperaturkurva (vist i nedre del av figur 4), som stemmer forbausende godt med observasjoner.

Den viktigste egenskapen ved klimasensitiviteten, utledet ved vår empiriske metode, er dette: Alle fysiske mekanismer som eksisterer i den reelle verden er inkludert – og mer, de er inkludert på en korrekt måte; fysikken er eksakt. Den resulterende usikkerhet eller feilmargin for klimasensitiviteten for raske tilbakekoplinger er liten, omkring 0,5 grader for dobling av karbondioksid.

Her må jeg komme med en advarsel. Klimasensitiviteten vi har utledet her gjelder for dagens klima og for klimatilstander innen en viss ramme. Men sensitiviteten varierer med klimatilstanden. Klimasensitivitet fremstilt som en funksjon av global temperatur gir en fordeling som en U. Dagens globale temperatur er på bunn av kurva, og bunnen er ganske flat. Men dersom planeten blir mye kaldere eller mye varmere, vil klimasensitiviteten øke; vi vil møte ustabilitet som enten gir en kald "snøballjord" eller en *galopperende drivhuseffekt* som øker temperaturen radikalt. Mer om dette senere.

Han skriver videre side 54:

Jeg forsto at forskningen om klimasensitivitet var i en prosess der den ble spikret nøyaktig fast fra paleoklimatiske data slik som diskutert over. Men også i dag er det mulig å finne forskere som publiserer arbeid som konkluderer at klimasensitiviteten er svært usikker. En vanlig fremgangsmåte er å beregne den forventede oppvarming i forrige hundreår basert på antakelser om klimapådriv. På grunn av usikkerhet i de aktuelle pådrivene, er en slik klimasensitivitet tvunget til å ligge innenfor en vid ramme, slik som mellom 2 og 8 grader for en dobling av karbondioksid. Dette er et eksempel på at en ikke ser skogen for bare trær. Vår kunnskap er ikke basert på bruk av det sløveste instrumentet i verktøykassa. Den er snarere basert på den mest nøyaktige informasjon vi kan oppdrive.



Figur 4. Klimapådriv på grunn av drivhusgasser og endringer i innlandsis (øverst). Multiplikasjon av summen av disse to pådrivene med 0,75 grader per watt gir den beregnede temperatur gjennom istidene (nederst). Estimater for observert temperatur er temperatur i Antarktis dividert med to. (Figur fra Hansen m. fl., "Target Atmospheric CO₂."

For kilder, se kapittel 4

4. Endringer i jordbanen og klima (fra side 46)

Nå er vi rede til å diskutere drivkraften bak klimaendringer fra istider til mellomistider. Husk at endringene er enorme – de resulterer enten i blomster i Central Park, New York eller et lag med is en kilometer tykt. Mekanismene ansvarlige for hele denne klimaendringen er, som vi har sett, endringer i mengden av drivhusgasser og jordoverflatens refleksjonsevne. Men begge disse mekanismene er langsomme tilbakekoplinger, ikke pådrivet som startet det hele. De fundamentale mekanismene som setter i gang slike endringer, har vært foreslått i mer enn hundre år, og ble bekreftet i 1970-årene, men de dypereliggende implikasjonene er bare i starten av å bli anerkjente.

Det begynner med små endringer i jordas helning og dens bane rundt sola. Slike endringer oppstår fordi planetene, spesielt de store, Jupiter og Saturn, trekker på jorda etter som de beveger seg nærmere eller lengre bort. Disse endringene har nesten ingen effekt på den totale solstrålingen som jorda i gjennomsnitt mottar i løpet av et år. Men de påvirker den geografiske og sesongmessige fordeling av innstrålingen, og de påvirker klimaet på to vesentlige måter.

Den enkleste effekten skyldes endringer i jordas helning, det vi kaller inklinasjon eller tilt (skråvinkelen) mellom jordas spinnakse i forhold til jordbanens plan. I dag er tilten omtrent 23,5 grader og blir langsomt mindre. Minimum tilt, 22,1 grader, vil inntre om cirka 8000 år. Det tar omtrent 41000 år å gå rundt en hel syklus fra minimum tilt til maksimum tilt (24,5 grader) og tilbake igjen til minimum tilt.

Effekten av en økende tilt er enkel: polare områder på hver halvkule utsettes for større innstråling, mens lavere bredder mottar mindre innstråling. Økende tilt får også mengden av innstråling til å øke om sommeren og til å avta om vinteren. Både de breddemessige og sesongmessige strålingsendringene virker på den måten at innlandsisene på høye bredder smelter når tilten øker. Avtakende tilt virker på motsatt måte: Varmere vintrer gir mer snø, og kaldere somrer øker sjansen for at snø kan overleve den varme årstiden og slik bidra til at innlandsis vokser. Så dersom tilten var den eneste faktor, ville vi forvente at jorda nå går mot en vekst i innlandsisene på høye bredder, kanskje mot en ny istid, fordi spinnaksen er i ferd med å rette seg opp.

Den andre innstrålingseffekten er litt mer komplisert. Jordas bane er svakt elliptisk, dvs. jordbanen rundt sola har en form av en ellipse. Jorda er for tiden nærmest sola i januar og lengst borte i juli. Men dagen i året da sola er nærmest sola beveger seg gjennom hele kalenderen over en periode på omtrent 20000 år (dette skyldes at jordas spinnakse gjennomgår såkalte presesjonsbevegelser som en snurrebass; *presesjon*). Å være nærmest sola i januar er gunstig for å øke innlandsis fordi det bidrar til å gjøre vintrene varmere og somrene kaldere. Denne andre innstrålingseffekten virker motsatt på de to halvkulene – så dagens situasjon tenderer til å smelte is på sørlige halvkule.

Den andre innstrålingseffekten er mer komplisert enn den første fordi den avhenger av *eksentrisiteten* i jordbanen (forholdet mellom aksene i jordbanens ellipse) – en effekt som helt forsvinner om banen blir sirkulær. Jordas eksentrisitet varierer fra null til nesten 6 prosent. Det blir ofte sagt at eksentrisiteten varierer med en periode på 100000 år, men den har ingen enkel periodisitet. For tiden er eksentrisiteten ganske liten, omkring 1,7 prosent, så denne andre innstrålingseffekten er ganske svak.

Begge innstrålingseffektene påvirker for tiden jorda til å danne innlandsis på nordlige halvkule, slik at den beveger seg mot den neste naturlige istid. Uten mennesker er det ikke sikkert om dagens mellomistid holosen ville ende om noen få tusen år eller om den ville overleve gjennom en ny presesjonsperiode, på samme måte som mellomistiden for 400000 år siden, en tid som varte i omtrent 40000 år. En grunn til å anta at jorda vil unngå en nær istid er at de to innstrålingseffektene er ute av fase de neste 10000 år. Videre vil den andre effekten være svært svak fordi den orbitale eksentrisiteten er liten.

Likevel, på tross av alle de vitenskapelige publikasjonene denne saken har generert, spørsmålet om når, uten mennesker, jorda ville gå inn i en ny istid, er like relevant som å spørre hvor mange engler som kan danse på en nålespiss. Selv om begge innstrålingseffektene favoriserer innlandsis på den nordlige halvkule, smelter faktisk isen for tiden ganske raskt. Menneskeskapte klimapådriv er nå totalt dominerende over de naturlige pådrivene.

Naturlige pådriv på grunn av innstrålingsvariasjoner knyttet til jordbanen er, i gjennomsnitt over planeten, en liten del av 1 watt. Dette svært langsomme pådrivet er effektivt bare fordi det virker over lange perioder, det oppnår å sette i sving to kraftfulle, langsomme tilbakekoplinger: endringer i overflatens refleksjonsevne og endringer i drivhusgasser. Pådrivsmekanismen er sesongmessige og geografiske anomalier i innstrålingen, som får arealet av snø og is i en region eller halvkule til å vokse eller å avta. Selv om dette klimapådrivet er lite, setter denne isolert sett lille effekten på global temperatur i gang tilbakekoplinger fra overflatealbedo og karbondioksid. Metan og lystgass virker på samme måte, mengden i atmosfæren øker etter som planeten varmes opp og avtar etter som den kjøles av. Som karbondioksid utgjør de forsterkende tilbakekoplinger, men med mindre effekt. Som vist i figur 4, er det endringene i den globale overflatealbedo og drivhusgasser som står for praktisk talt hele den globale klimaendringen.

Både den globale overflatealbedo og mengden av drivhusgasser er nå underlagt menneskenes kontroll. De langsomme tilbakekoplingsprosessene er fortsatt virksomme, selvsagt, de reagerer, som de alltid har gjort på global temperatur. Den globale avkjølingstrenden som trengs for å sette i gang de langsomme tilbakekoplingene, som igjen trengs for å føre jorda over i en ny istid, eksisterer ikke lenger. Derfor er enhver tanke på at naturlige effekter på en eller annen måte kan føre oss over i en ny istid absolutt nonsens. Ved raskt å brenne store mengder fossilt drivstoff har menneskene forårsaket en global oppvarming som langt oppveier den naturlige tendensen mot den neste istid. Global temperatur fluktuerer alltid på korte tidsskalaer, på grunn av dynamiske påvirkninger diskutert tidligere (*dynamisk system*). Men menneskeskapte klimapådriv er nå så store at gjennomsnittstemperaturen over flere tiår vil fortsette å øke, i det minste for de neste tiårene. På grunn av langsomme tilbakekoplinger, er det faktisk slik at global temperatur vil fortsette å stige i tusener av år om vi ikke reduserer menneskeskapte klimapådriv. Dette kommer vi tilbake til senere.

De naturlige klimavariasjonene vist i figur 3 har mye mer å fortelle oss om framtiden. Legg merke til at oppvarming kan skje ganske raskt, fordi nedsmelting av innlandsis er en våt fysisk prosess som intensiveres av positive tilbakekoplinger. Etter som isen begynner å smelte, blir den mørkere slik at den absorberer mer solstråling. Etter som isens tykkelse avtar, kommer overflaten i et lavere nivå der det er varmere. Det fins andre tilbakekoplinger, som både øker og demper, som vi vil se senere. Overalt viser data at smelting av innlandsis kan skje raskt, tilsvarende flere meter i havnivået over hundre år. Havnivået minker vanligvis langsommere, begrenset av snøfall over kalde områder. Men det har likevel vært tilfeller da havnivået falt ganske raskt – for eksempel fordi meteorologiske forhold var slik at lavtrykksbaner førte fuktig varm luft inn over områder der innlandsis ble dannet.

De siste sju tusen år med stabilt havnivå utgjør en sjelden hendelse i klimahistorien. Havstabiliteten oppsto fordi jorda var varm nok til å hindre

dannelse av innlandsis over Nord-Amerika og Eurasia, men kald nok til å opprettholde stabil innlandsis i Antarktis og på Grønland. Hemmeligheten som stoppet smeltingen for 7000 år siden og som har holdt havnivået nesten stabilt, var den svake avkjølingen fra den varmeste perioden tidlig i holosen. I dag derimot, har en global oppvarming på 0,8 grader de siste hundre år og 0,6 grader de siste 30 år, ført global temperatur i det minste tilbake til topptemperaturene i tidlig holosen, og økningen i havnivået har begynt å akselerere. Havnivået øker nå med mer enn 3 centimeter per tiår – det doble av økningen over siste hundre år.

Kilder

Charney, Jule G, Akio Arakawa, D. James Baker, Bert Bolin et al. *Carbon Dioxide and Climate; A Scientific Assessment*. Washington, D.C.: National Academy of Sciences, 1979.

<http://www.atmos.ucla.edu/~brianpm/charneyreport.html>.

Hansen, James. "Can We Defuse the Global Warming Time Bomb?" *naturalSCIENCE* (1. August 2003), http://naturalscience.com/ns/articles/01-16/ns_jeh.html.

Hansen, James, Makiko Sato, Pushker Kharecha, David Beerling et al. "Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim?" *Open Atmospheric Science Journal* 2 (2008): 217-31, <http://www.bentham.org/open/toascj/openaccess2.htm>.

Petit, J.R., J. Jouzel, D. Raynaud, I. Barkov et al. "Climate and Atmospheric History of the past 420,000 Years from Vostok Ice Core, Antarctica," *Nature* 399 (3. juni 1999): 429-36.

Siddall, M., E.J. Rohling, A. Almogi-Laban, Ch. Hemleben et al. "Sea-Level Fluctuations During the Last Glacial Cycle," *Nature* 423 (19 juni 2003): 853-58.

Vimeux, Françoise, Kurt M. Cuffey, og Jean Jouzel. "New Insights into Southern Hemisphere Temperature Changes from Vostok Ice Cores Using Deuterium Excess Correction," *Earth and Planetary Science Letters* 2003 (2002): 829-43.

5. Litt mer strålingsfysikk (side 61)

Om du er i en satellitt og ser dagsida av jorda, er det den reflekterte solstrålingen du ser. Varmestrålingen fra jorda må måles med et instrument. Du burde faktisk bruke instrumenter til å måle både den reflekterte solstrålingen og den planetariske varmemestrålingen dersom du ønsker å oppnå detaljert informasjon om planeten.

Figur 5 viser hvordan strålingsintensiteten ser ut for en fysiker. Dette er en kurve av strålingsintensiteten som en funksjon av bølgelengden for strålingen på en planet som for oss har spesiell interesse: jorda.

Panelet til venstre viser to taggete kurver. Kurva på toppen er solstrålingen som når jorda i de ytre lag av atmosfæren, og den nederste kurva er solstrålingen som når jordoverflaten på en skyfri dag. Ikke all solstråling som treffer planeten, når ned til overflaten – noe blir absorbert av gasser som vanddamp og ozon, og noe blir reflektert tilbake til verdensrommet av aerosoler og luftpartikler.

Den taggete kurva i høyre panel representerer varmen (varmestrålingen, eller terrestrisk stråling) emittert av jorda til verdensrommet. Denne målingen ble gjort med et instrument kalt IRIS (infrared interferometer spectrometer) som ble utviklet av Rudy Hanel, en forsker ved NASA for planetære studier. Målingene vist i figur 5 ble gjort i 1970 over ørkenen i Sahara, med måleinstrumentet plassert på en satellitt i bane rundt jorda.

Solstrålingen og jordas varmestråling har mange likheter. De er begge termalstrålling. Det er bare det at solstråling kommer fra et mye varmere legeme. Temperaturen på solas overflate er nesten 6000 grader Kelvin (omtrent 5700 grader Celsius). Gjennomsnittlig temperatur ved jordas overflate er 288 grader Kelvin (15 grader C), noe som betyr at det er kaldere enn på sola med en faktor på omtrent 20.

En grad Kelvin er det samme som en grad Celsius, bortsett fra at null grader er definert som en temperatur der all molekylær virksomhet stanser. Det er virkelig steinkaldt. Null grader Kelvin er ved omtrent -273 grader Celsius. Det er den laveste temperatur noen ting kan ha, null grader Kelvin er absolutt null, og temperatur i Kelvin kunne vært valgt fra begynnelsen om dette hadde vært forstått på den tid. Men det er greit å holde på Celsius, som er nesten det samme som Kelvin bare med en konstant differanse, for hvem vil ønske å si, "temperaturen i dag vil bli 288 grader". Det er bedre å ha små tall å hankses med.

Mengden stråling emittert fra et legeme er, sånn omtrent, en enkel funksjon av dets temperatur. Vi har et navn på ligningen som beskriver strålingen som en funksjon av temperaturen og bølgelengden: Plancks lov. Den beskriver nøyaktig stråling fra et legeme som absorberer perfekt, det vi kaller et svart legeme, et material som fullstendig absorberer alle bølgelengder av strålingen den mottar, det vil si all energi som stråler på det. *Svart karbon* (sot) er et godt eksempel på et legeme som absorberer perfekt.

De strekede, mer jevne linjene i figur 5 representerer strålingen som ville emitteres av svarte legemer med temperatur som solas overflate (kurva til venstre) og jordas overflate (høyre kurve). De taggete kurvene for målt stråling er forskjellige fra de ideelle kurvene for svarte legemer på grunn av gassers absorpsjon av strålingen, enten i solas øvre atmosfære eller i jordas atmosfære.

Absorpsjon i gasser skjer ved spesielle bølgelengder som avhenger av gasstypen – slik tjener absorpsjonslinjene som spektrale fingeravtrykk som

spesifiserer de ulike gassene. For eksempel skyldes den brede dumpen ved bølgelengder omkring 15 mikroner (en mikron er en mikrometer, en milliondel av en meter) i jordas varmemisjon absorpsjon i karbondioksid. Det smalere absorpsjonsbåndet nær 10 mikroner er absorpsjon i ozon.

Energien absorbert i disse gassene blir øyeblikkelig emittert tilbake i alle retninger, men mengden og spektralfordelingen i den emitterte strålingen avhenger av temperaturen på stedet for de absorberende molekylene. Ettersom jordas temperatur blir kaldere jo høyere vi går i den lavere atmosfære, reduserer absorpsjon i drivhusgasser mengden varmestråling til verdensrommet. Altså, dersom mengden av disse gassene øker, reduseres terrestrisk stråling til verdensrommet. Den endringen gir en midlertidig planetær energiubalanse, med en jord som emitterer mindre energi til verdensrommet enn den absorberer fra sola. Slik varmes jorda opp inntil en ny energibalanse er gjenvunnet. På den måten gir figur 5 et realistisk bilde av drivhuseffekten.

Det som er interessant for oss her er den informasjon om jordas atmosfære som vi kan hente fra planetens spektrum av varmestråling og reflektert solstråling. Termalspekteret forteller oss helt tydelig hva slags gasser som fins i planetens atmosfære, fordi hver gass har sin egen spektralsignatur, på samme måte som vi har merket oss for karbondioksid og ozon. I tillegg kan vi bruke dette spekteret til å måle det vertikale temperaturprofilen i atmosfæren – hvordan temperaturen varierer i forskjellige høyder i atmosfæren. Nøyaktige målinger av linjer i termalspekteret viser mange smale absorpsjonslinjer. Dybden til en absorpsjonslinje avhenger av temperaturprofilen i atmosfæren. Dersom vi måler dybden av mange linjer svært nøyaktig og sammenligner dem, kan vi avdekke atmosfærens temperaturprofil.

Hvor mye og hvor nøyaktig informasjon som kan dras ut fra termalspekteret, avhenger primært av hvor nøyaktig strålingsintensiteten måles ved en bølgelengde (relativt til intensiteten ved andre bølgelengder). Dette er grunnen til at det trengs en interferometermåling, slik som de tatt ved IRIS-instrumentet og vist i figur 5, for de mest presise resultatene. I slike instrument blir en vid ramme av bølgelengder registrert med den samme detektor, noe som gir en større presisjon enn det som er mulig med et instrument som bruker separate detektorer ved ulike bølgelengder. Grunnen er at detektorer må kalibreres mot hverandre – og kalibreringer er aldri helt perfekte.

La oss nå se nærmere på solstrålingen vist i venstre panel av figur 5. Termalstråling emittert enten av sola eller jorda er praktisk talt upolarisert. Hva betyr det? La oss gå tilbake et stykke – helt til Isaac Newton i hans bok *Opticks* fra 1704. Newton skrev: "Vil ikke alle legemer, når de varmes opp over en viss terskel, emittere lys og stråle; og er ikke denne emisjonen utført av de vibrerende bevegelsene i hver del?"

Newton hadde for seg et grunnleggende riktig bilde, selv om han levde lenge før det fantes kunnskap om strukturen til atomer eller naturen til elektromagnetisk stråling. Svingende ladde partikler i et hvert molekyl emitterer en pakke med elektromagnetisk stråling – kalt så fordi det stråles fra elektrisk ladde partikler. Strålingen skjer i form av bølger som forplanter seg selv med elektriske og magnetiske komponenter som svinger normalt på retningen energien forplanter seg langs. Dette er tilfelle for solstråling og for all termalstråling.

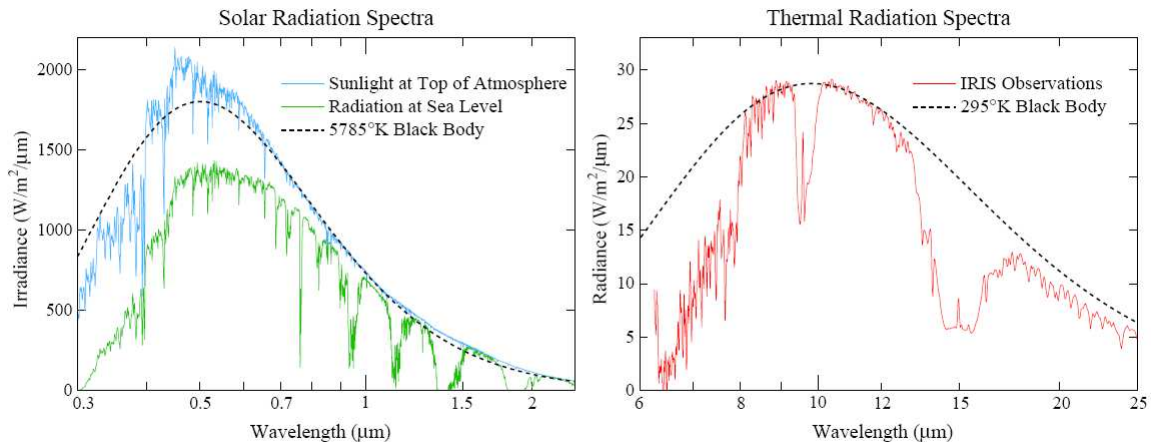
Dersom man ser sola gjennom polariserte linser, som transmitterer lys som vibrerer i en foretrukket retning, og man roterer linsen, endres ikke intensiteten i strålingen. Lyset blir upolarisert fordi termalstrålingen, i dette tilfellet fra sola, inkluderer mange ”pakker” med stråling som vibrerer i tilfeldige retninger i planet normalt på forplantningsretningen.

Derimot, når sollys reflekteres fra en flate eller blir spredd av en partikkel, kan det bli polarisert. Dette er grunnen for å ha på polariserende solbriller – refleksjon fra vann- og veioverflater blir polarisert. Vannet eller veien reflekterer mest den strålingen som vibrerer horisontalt. Så de polariserende linsene i solbriller er vertikalt orientert for å redusere glitringen.

Polarisering av lys spredd av små partikler – aerosoler eller skydråper – inneholder en enorm mengde informasjon om naturen til partiklene som sprer lys, dersom polariseringen er målt med høy nøyaktighet. I 1969 studerte jeg som forsker ved Universitetet ved Leidenobservatoriet i Nederland, finansiert av National Science Foundation, under verdens ledende ekspert på spredning av lys, professor Henk van de Hulst, og arbeidet også med hans øverste protégé, Joop Hovenier. Vi viste at polarisering får fram mengden av aerosoler, størrelsen og formen, og til og med deres refraksjonsindeks. Denne siste størrelsen – et mål på vinkelen en lysstråle blir bøyd når den treffer en partikkel – hjelper til å identifisere aerosolsammensetningen.

En grunnforståelse av informasjonen om reflektert solar og emittert termalstråling, illustrert i figur 5, forteller oss hva vi trenger for å bestemme aerosolenes klimapådriv. De nødvendige observasjonene er (1) polarisering av reflektert sollys med en nøyaktighet på en tidels prosent, der et gitt punkt på jorda blir sett på fra flere ulike retninger etter som satellitten passerer over; og med målinger gjort ved flere bølgelengder spredd over hele solspekteret; og (2) infrarød emisjon målt ved et høypresisjons interferometer, det er med et instrument som gir den beste presisjon fra bølgelengde til bølgelengde.

I boken skriver Hansen om sine forsøk på å overtale myndighetene å få slike instrument opp i satellitter for å gi data som kunne brukes til å kvantifisere klimapådriv fra aerosoler. I dag, 20 år etter Hansens forslag kjenner vi fremdeles ikke aerosolenes klimapådriv tilstrekkelig nøyaktig.



Figur 5. Solstråling som når jorda og som når overflaten ved typiske forhold med klar himmel (til venstre) og termalstråling (varmestråling) emittert av jorda til verdensrommet (til høyre). (Data fra Hansen et al., "Long-Term Monitoring of Global Climate Forcings and Feedbacks.")

Kilde

Hansen, James, William Rossow, og Inez Fung, ed. *Long-Term Monitoring of Global Climate Forcings and Feedbacks*. New York. NASA Conference Publication 3234, 3. og 4. februar 1992 (90 sider).

6. Dagens klimasituasjon i lys av istider/mellomistider (fra side 71)

Klimaendringen mellom den nåværende mellomistid og istiden for 20000 år siden ble forårsaket av et klimapådriv på bare omtrent 6,5 watt – likevel produserte dette pådrivet en annerledes verden med Canada og deler av USA under en tykk innlandsis, og et havnivå 110 meter lavere enn i dag. Dessuten, pådrivene som utgjorde de 6,5 wattene – 3,5 watt fra endring i overflatens refleksjonsevne og 3 watt fra en endring i drivhusgassene i atmosfæren – var faktisk langsomme tilbakekoblinger satt i gang ved et mye svakere pådriv, som var mye mindre enn 1 watt som et globalt gjennomsnitt: forstyrrelser i innstråling på jordas overflate på grunn av små endringer i jordbanen.

"OK", kan du si, "men dersom det tar tjue tusen år for at store endringer skal skje, hvorfor skal jeg bry meg? Mine barn, barnebarn og jeg vil være død lenge før det, og hvem vet hva annet som vil skje i mellomtiden." Grunnen er denne: Klimaendringer som respons på menneskeskapte pådriv vil være mye raskere enn de naturlige endringene. Hastigheten i endringer mellom istider og mellomistider er diktert ved tidsskalaer på 20000, 40000 og 100000 år for endringer i jordas bane – men dette betyr slett ikke at klimasystemet alltid reagerer like langsomt.

Tvert om. Menneskeskapte klimapådriv er store sammenlignet med paleoklimatologisk standard, og de endrer seg over noen tiår, ikke ti tusenvis av år. Det er viktig å bestemme responstiden for pådriv via analyse og fysisk

forståelse av klimasystemet. Paleodata gir dessverre ingen kjente empiriske data for responstiden for et stort, raskt, positivt pådriv (oppvarming) som varer ved. Vulkanutbrudd og virkning av asteroider gir raske og store klimapådriv, men disse pådrivene (avkjøling) er negative og kortvarige. Den sagtannformede klimaresponen (vist i figur 3) for symmetriske orbitale pådriv gir likevel et hint. Oppvarming går forttere fram enn avkjøling, trolig fordi vekst av en innlandsis er avgrenset ved små snømengder på et kaldt sted, mens flere forsterkende tilbakekoplinger kan sette fart i de våte fysiske prosessene i innlandsis, som mister masse så snart disse for alvor er i gang.

Jeg forsto tidlig i dette århundret at det er en økende fare for å drive klimasystemet til et punkt slik at framtidige katastrofer kan komme ut av kontroll. Konseptene er ikke vanskelige. En betraktning av bare to fenomener, treghet og tilbakekoplinger, er nok for å gi oss konklusjonen: Vi har faktisk en planet i fare.

Tre store treghetskilder påvirker global oppvarming og konsekvensene av den: havet, innlandsis og verdens energisystem. Havet er, i gjennomsnitt, omtrent 4 kilometer dypt. Det tar havet lang tid – århundrer – å bli varmet opp som respons på menneskeskapt drivhusgasser. Så selv om vi stabiliserer sammensetningen i atmosfæren på dagens nivå, vil planeten fremdeles fortsette å varmes opp, fordi havets oppvarming vil fortsette. Dersom havet var den eneste kilde for treghet, ville tilleggsoppvarmingen over dette århundret – med ingen flere nye utslipp av gasser – bli noen få tideler av en grad.

Innlandsis, den andre treghetskilden, har nøkkelegenskaper som nesten er omvendt av dem i havet. For til tross for at det kan skje visse endringer i havsirkulasjonen, virker dets termale treghet for en stor del langs en rett linje. Havets overflatetemperatur, den størrelsen som påvirker klimaet mest, oppnår halvparten av sin langsiktige likevektsrespons i løpet av noen få tiår. Det tar mange flere tiår, selv århundrer, for å oppnå full respons, men havet har allerede oppnådd omtrent halvparten eller mer av full respons for drivhusgasser som er tilført lufta det siste hundreåret.

Responsen til innlandsis er helt motsatt. Størrelsen forandrer seg lite til å begynne med, og derfor endrer havnivået seg bare langsomt. Etter som planeten blir varmere, øker det området på en innlandsis som smelter om sommeren. Og etter som havet varmes opp, begynner også *isbremmer* – tunger av innlandsisen som når ut i havet og som er fundert på havbunn – å smelte. Etter som isbremmer forsvinner og isen myknes opp av oppvarmingen i overflaten og smeltevann, og etter som bevegelse i isen og kalving av gigantiske isfjell blir raskere ved at *isstrømmen* blir raskere, leder dette til en mulighet for at store deler av innlandsisen kan kollapse.

Dersom vi fortsetter å brenne fossilt drivstoff i dagens tempo, er kollaps av innlandsis og økning i havnivået på flere meter, så sikkert som døden. Vi vet dette fra paleoklimatiske serier som viser hvordan størrelsen av innlandsis har

vært en funksjon av global temperatur. Spørsmålet er bare hvor raskt disintegrasjon av innlandis vil skje.

Så snart innlandsis begynner å kollapse, vil havet stige raskt. For omtrent 14000 år siden, da jorda holdt på å gå ut av siste istid og ble varmere, steg for eksempel havnivået med en gjennomsnittlig hastighet på en meter hvert 20. eller 25. år, en rate som fortsatte i flere hundre år. Faren i dag er at vi kan tillate havet å bli varmet opp og innlandsis til å mykne opp til den når et punkt der de dynamiske kollapskreftene tar over. Og da vil det være for sent – vi kan ikke binde et tau eller bygge en vegg rundt en innlandsis som er mer enn en kilometer tykk.

Den tredje kilde for treghet er våre energisystem for bruk av fossilt brensel. Overganger fra tre til kull, til olje og gass krevde flere tiår hver – og nylig, etter som forrådene av olje og gass er blitt knappere, har vi igjen begynt å bruke mer kull, som i dag er den største kilden for utslipp av karbondioksid.

Følgen av treghet i energisystemet er dette: Menneskeheten er i dag tungt avhengig av fossilt drivstoff – kull, olje og gass – for det meste av vår energiforsyning. Når vi forstår at det er nødvendig å fase ut fossilt drivstoff, vil ikke en slik overgang kunne bli rask – det vil i det minste ta flere tiår å erstatte den enorme infrastrukturen som er bygd opp. I mellomtiden vil det slippes ut mer drivhusgasser, og det blir større klimaendringer.

Klimatilbakekopling vekselvirker med treghet. Tilbakekoplinger (som diskutert tidligere) er respons på en klimaendring som enten kan forsterke eller svekke klimaendringen. Det er ikke gitt at klimaet vårt skal domineres av forsterkende tilbakekopling. På en svært lang tidsskala kommer faktisk viktige dempende tilbakekoplinger i sving.

Det viser seg likevel at forsterkende tilbakekopling er dominerende på tidsskaler fra tiår til hundrevis av tusenår. Vann (inkludert vanndamp, is og snø) spiller en stor rolle. En kaldere planet har en lysere overflate og absorberer mindre solstråling, mest på grunn av den høye refleksiviteten til overflater med is og snø. En varmere planet har mer drivhusgasser i lufta, spesielt vanndamp, så vel som mørkere landområder med vegetasjon. Dominansen av disse to forsterkende tilbakekoplingene, planetens overflaterefleksjon og mengden av drivhusgasser i lufta, er grunnen til vekslingen mellom tilstander med istid og mellomistid, som en respons på små endringer i innstrålingen på grunn av små forstyrrelser i jordbanen.

Forsterkende tilbakekoplingseffekter som var ventet å bare kunne inntre langsomt, har begynt å gjøre seg gjeldende de siste få årene. Disse tilbakekoplingene inkluderer signifikant reduksjon i innlandsis, utløsning av drivhusgasser fra permatrost og kontinentalsokler i Arktis, samt bevegelse av klimasoner med resulterende endringer i fordeling av vegetasjon. Disse

tilbakekoplingene har ikke vært inkorporert i de fleste klimasimuleringene, slik som de brukt av Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Likevel har disse langsomme tilbakekoplingene allerede startet i den virkelige verden.

Klimatregnet er årsak til at det er mer oppvarming i vente. Tilbakekopling vil forsterke dette. Derfor er treghet en trojansk hest – den bare så ut som en venn. Den lullet oss i søvn, og vi så ikke hva som var i ferd med å skje. Nå har vi en situasjon med store konsekvenser i horisonten – trolig inkludert kollaps av innlandsis, kollaps i *økosystemer* og masseutryddelse av arter, farer som vi vil komme tilbake til.

Så hva gjør vi? Dersom vi løper rundt som om håret brenner og veiver med armene, vil ikke folk ta oss alvorlig. Dessuten er vi ikke i en håpløs situasjon. Rasjonelle, mulige tiltak kan fortsatt hindre ødeleggende konsekvenser dersom tiltakene kommer raskt og er strategiske. Husk at tilbakekopling virker i begge retninger – dersom pådrivet er negativt vil forsterkende tilbakekopling øke avkjølingseffekten.

Dersom vi ønsker å stabilisere jordas klima, trenger vi ikke å vende tilbake til den atmosfæriske sammensetningen før den industrielle revolusjon. Det vi i første omgang må gjøre, er å redusere planetens energiubalanse til omtrent null. Da vil klimaet stabiliseres på dagens, ikke den preindustrielle tilstand. Det kan tenkes at klimaet må bli en smule kaldere enn i dag dersom vi for eksempel ønsker en stabil innlandsis. Dette kan kreve en liten tilleggsjustering av det menneskeskapte klimapådrivet.

For kilder, se kapittel 7.

7. Hvor mye kan havet stige? (fra side 81)

I publikasjonen "Slippery slope" prøvde jeg å finne ut hvorfor havnivået i estimatene fra IPCC bare stiger med mellom 40 og 45 centimeter på hundre år selv med utslipp som business-as-usual. En slik heving av havnivået kan skape problem, men neppe noen katastrofal global forandring av kystlinjene. Billedet til IPCC gir oss tilsynelatende massevis av tid til å studere emnet mer inngående, og kanskje til å bli enige om måter å tilpasse oss en slik endring. Hevingen av havnivået vil i følge IPCC skyldes smelting av *isbreer* (utenom innlandsis) og utvidelse av vann i havet etter som det blir varmere (*termal ekspansjon*).

Men estimatene fra IPCC om havnivået inkluderte ikke noe bidrag fra Grønland eller Antarktis. Grunnen var: global oppvarming kan gi økende smelting på kanten av innlandsisene, men en varmere atmosfære vil også øke snømengdene om vinteren, noe som ville gjøre de sentrale områdene av isen tykkere. Da jeg skrev artikkelen "Slippery Slope" i 2003, ble de nyeste resultatene med klimamodeller – fra en av de beste modellene i verden, den med høyest oppløsning – publisert i *Journal of Geophysical Research*. De konkluderte at

innlandsisene ville vokse etter som verden blir varmere, dvs. gi en tendens til fallende havnivå.

Noe må være galt i dette bildet. Blir det mer innlandsis etter som planeten blir varmere? Ja, dette er faktisk mulig for en kortere periode. Rask oppvarming av atmosfæren kan gi en rask økning i snøfall, som overgår tapet av is i utkanten av innlandsisen, dersom endringer i innlandsisens bevegelse begynner langsomt. Problemet er at de fleste klimamodellene stort sett behandler innlandsis som en gigantisk fast klump med is, som bare smelter langsomt. På sitt beste produserer modeller resultater i samsvar med forutsetningene som legges til grunn.

Et diagram jeg hadde med i artikkelen (omtrent som figur 7), var ment å forenkle diskusjonen om prosesser som ikke er representert i klimamodeller. Figuren illustrerer en annen måte å tenke på om problemet havnivåøkning. Den fokuserer på planetens energiubalanse – hva den energien som er til overs, brukes til og hvorfor den er viktig for innlandsis.

Jordas energiubalanse er svært liten. I 2003 estimerte jeg at den var mellom 0,5 og 1,0 watt, i gjennomsnitt over flere år og over hele planeten. Denne vesle energiubalansen er den viktigste størrelsen for å karakterisere tilstanden til vårt klima. Den definerer hvor mye global oppvarming som vi kan vente oss uten en fortsatt endring i menneskeskapte klimapådriv, og den forteller oss hvor mye vi må endre de menneskeskapte klimapådrivene dersom vi ønsker å gjenopprette planetens energibalans og slik, grovt sett, stabilisere klimaet – emner vi vil se nærmere på senere.

Nå må en merke seg at klimamodellene for tiden har det tøft når det gjelder å estimere klodens energiubalanse, fordi den avhenger av netto strålingspådriv, og det store aerosolpådrivet har vi ikke målinger for. Det beste estimatet for energiubalansen oppnås derfor ved å estimere energiendringer i jordas reservoarer – havet, atmosfæren, land og is. Det viser seg at storparten av overskuddet i innkommende energi, omkring 90 prosent, blir tatt opp av havet.

La oss først gjøre beregninger langs de linjer IPCC antar, nemlig ved at innlandsisen smelter som om den var en gigantisk kubeformet isklump. Hvor mye av isen ville smelte i dette tilfellet på grunn av menneskeskapt oppvarming, om vi setter den til – la oss si – 1 watt per kvadratmeter? Den er en enkel beregning – det meste av energien går til faseforandringen fra is til flytende vann. Det kreves 80 kalorier med varme for hvert gram is (dersom du er en ung fysikkstudent, i motsetning til en gammel mann som meg, ville du si at det trengs 335 joules med energi – begge enheter er OK). Dersom den gjennomsnittlige smeltesesongen er fire måneder og dekker en tredel av Grønland, vil ekstra smelting på grunn av 1 watts oppvarming bli omtrent 20 kubikkilometer med vann – nok til å heve havnivået med 0,05 millimeter (5 millimeter på hundre år) – ikke særlig mye, altså. I tillegg viser klimamodellene at global oppvarming gir et økende snøfall

om vinteren, slik at nettoeffekten blir en minking i havnivået når jorda blir varmere.

Hvordan vet vi at dette bildet er galt? Fordi den paleoklimatiske historien viser oss det motsatte: Etter som jorda blir varmere, blir det mindre innlandsis og havnivået stiger. Havnivået stiger faktisk så mye som flere meter per hundre år. Hvor kommer energien fra som trengs for å smelte is så raskt? Forklaringen må helt sikkert involvere det enorme reservoaret med energi som havet utgjør, og den må inkludere bevegelsene i innlandsis.

La oss se på energien som blir tatt opp av havet. Som et rundt tall, som vi senere kan skalere opp og ned med den vekten vi ønsker, kan vi si at jordas energiubalanse er 1 watt per kvadratmeter, og at 90 prosent av energien går til havet. Dersom all denne energien til havet ble brukt til å smelte is, ville havnivået stige 10 cm per år (10 meter per hundre år). For en energiubalanse på 0,5 watt ville disse tallene være halvparten så store.

En stigning på 1 til 2 meter ville være katastrofal for hundrevis av millioner av mennesker. Så selv om bare en del av dette energioverskuddet som går til havet, finner sin vei til innlandsisene, er vi i vanskeligheter. Jeg argumenterer med at jordas klimahistorie demonstrerer at der fins effektive måter å overføre energi fra havet til isen. I tillegg viser observasjoner at disse mekanismene nå begynner å komme i gang.

En mekanisme er smelting av innlandsis ved et varmere hav. Isbremmer – tunger av innlandis som strekker seg ut i havet, vanligvis i det minste delvis grunnfestet på havbunnen – støtter opp innlandsisen, og avgrenser hastigheten for hvor raskt is blir avgitt til havet. Denne støtten motvirker den naturlige "plastiske" strøm av is drevet av vekten til innlandsis etter som snøfall akkumuleres i indre områder. Dersom et hav i oppvarming smelter isbremmer, vil strømmen av is fra det indre av innlandisen, som gir fra seg gigantiske isfjell til havet, begynne å bevege seg raskere, og flere isfjell vil bli avgitt. Det er som å dra ut korken av en flaske – å fjerne det som stenger, tillater en rask strøm.

Innlandsisen i Vest-Antarktis er spesielt sårbar for smelting av isbremmene, fordi mye av denne innlandsisen hviler på bunn av stein flere hundre meter under havnivået. Tap av hele innlandsisen i Vest-Antarktis ville øke havnivået med 6 til 7 meter, og etter hvert åpne for en vei til havet for deler av den mye større innlandsisen i Øst-Antarktis. Så snart innlandsisen begynner å kollapse, vil kystkatastrofer globalt og deres økonomiske omskakninger gjøre det vanskelig for menneskeheten å sette i gang tiltak raskt nok til å reversere klimapådrivene. Dersom vi utløser en kollaps av innlandsisen i Vest-Antarktis, kan havnivået derfor fortsette å stige til mye større høyder ved bidrag fra innlandsisene på Grønland og Øst-Antarktis.

Det meste av innlandsisen på Grønland sitter på en overflate av stein over havets nivå, men noen av Grønlands store isstrømmer er i fjorder med bunn godt under havnivå. Endene på disse istrømmene trekker seg inn mot innlandsisen etter som et hav i oppvarming smelter isfronten. Dersom oppvarmingen fortsetter og endene blir skubbet lengre tilbake inn i innlandsisen, vil vegger av innlandsis på begge sider av fjorden kunne begynne å kollapse, noe som vil gi et rush av gigantiske isfjell til havet.

Forsvinning av isbremmer, isdynamikk og smelting av isfjell er ikke inkludert i klimamodeller brukt i IPCC sine studier. Denne feilen, å ikke ta med i beregningen den økende mengden isfjell til havet, hvor de smelter mye raskere enn de ville om de hadde blitt igjen i isblokken over land, forklarer sannsynligvis modellenes manglende evne til å prediktere endringer i havnivået. Det er ikke nødvendig å flytte overskuddsvarme fra havet til innlandsis for å få innlandsis til å minke. Fjellet kommer heller til Muhammed: Mengder av isfjell spres over et stort område der de kan smelte ved å dra varme fra havet.

Smelting av isbremmer er den kritiske mekanisme for å sette i gang en kollaps av innlandsis. Men det er også andre faktorer som bidrar, og tilbakekoplinger øker tempoet på disintegrasjonen av innlandsis. Etter som atmosfæren blir varmere, vil snøen fortere bli gammel – det er en prosess der snøkrystallene fordamper på en mikroskopisk skala og omdannes til større, mørkere krystaller som absorberer mer solstråling. I tillegg begynner snøsmeltingen tidligere om våren, noe som får innlandsisen til å bli mørkere og absorbere mer solstråling. Menneskeskapt aerosoler som svart karbon (sot), som nå finnes i målbare mengder på innlandsisen på Grønland, bidrar også til denne prosessen. Og etter som massetapet av innlandsis blir betydelig, synker overflaten av innlandsisen til lavere nivåer der temperaturen er høyere, noe som er en annen forsterkende tilbakekopling.

Gitt disse forsterkende tilbakekoplingene, er det ikke rart at klimasykler vist i figur 3 mellom istider og mellomistider er asymmetriske, der de våte prosessene knyttet til ismelting går mye fortere enn vekst av innlandsis. Stigning av havnivået med flere meter per århundre er ikke uvanlig i paleoklimatiske dataserier. I stedet er det stabiliteten til havnivået i de siste 7000 år som er uvanlig. I de siste tusenårene har jorda vært varm nok til å hindre at en innlandsis dannet seg over Canada, men kald nok til å holde innlandsis over Grønland og i Antarktis stabile. En hver tendens til et fortsatt massetap, etter at den store Laurentideisen i Canada var borte, ble motarbeidet av en svak global avkjølingstrend siden maksimum i temperatur i tidlig i holosen (6000 til 10000 år siden).

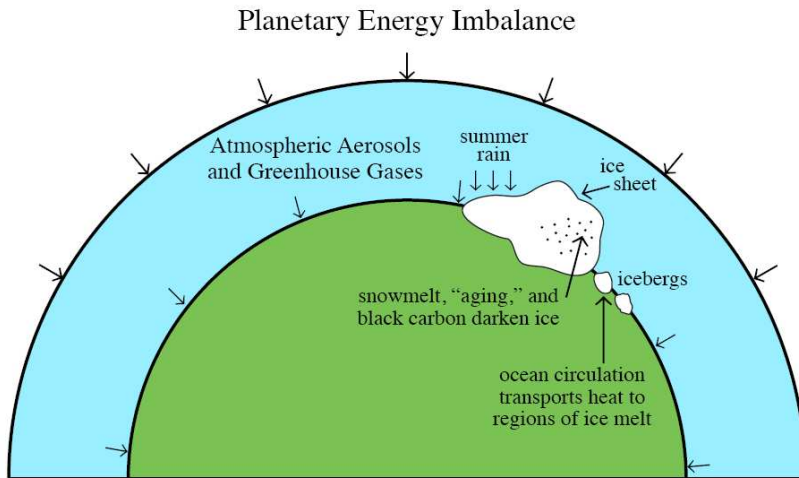
Som nevnt bidro stabiliteten i havnivået over de siste 7000 år sannsynligvis til utviklingen av sivilisasjonen, fordi et stabilt havnivå ledet til høy biologisk produktivitet med store mengder fisk i kystområder. Når en ser bort fra Jeriko, var de første byene som ble dannet på flere kontinenter for mellom 5000 og 7000 år

siden, alle kystbyer. Selv i dag er en god del av verdens byer plassert langs kyster, mer enn en milliard mennesker bor innen en høyde på 25 meter over havet.

Dersom innlandsis begynner å disintegre, vil det ikke bli et nytt stabilt havnivå i overskuelig framtid. I stedet har vi skapt en situasjon med stadig endring, med katastrofer for tusenvis av byer rundt om i verden. Fordi hav og innlandsis har responstider på i det minste århundrer, vil endringene fortsette for så mange generasjoner som vi kan tenke oss å bry oss om. Endringene vil ikke bli jevne og uniforme. I stedet vil lokale katastrofer oppstå i forbindelse med regionale stormer. Gitt den enorme infrastruktur og de historiske skattene i våre kystbyer, vil det nærme seg galskap å foreslå at folk skal arbeide for å tilpasse seg klimaendringer i stedet for å sette inn nødvendige tiltak for å stabilisere klimaet.

Vil kystbyer bli bygd opp igjen etter lokale katastrofer, dersom en vet at havnivået vil fortsette å stige? Bill Thompson ved Woods Hole oceanographic Institute sluttet, fra høyder av eldgammelt korallrev på eroderte kystlinjer, at havnivået fluktuerte flere meter gjennom siste mellomistid for omtrent 120000 år siden. Geologen Paul Hearty brukte en annen indikator for havnivå i fortid, bølgeformede strandlinjeterrasser, til å dra lignende konklusjoner. Nylig presenterte Paul Blanchon og kolleger ved Universitetet i Mexico, belegg for en 2 til 3 meter endring i havnivået som trolig fant sted over en periode på 50 år eller mindre gjennom denne mellomistiden. Slike raske endringer vil bety en kollaps av innlandsis, mest sannsynlig i Vest-Antarktis.

Endringer i havnivået, til høyder minst flere meter høyere enn dagens, skjedde i mellomistider som toppen var 1 til 2 grader varmere enn i dag. Etter som denne kunnskapen ble mer overbevisende for meg, har jeg argumentert for at vi må holde den globale oppvarmingen innenfor 1 grad fra nå, godt under det "farlige" nivå som IPCC foreslo med deres velkjente diagram med "glødende kull" – brukt for å indikere sannsynligheten for fare som en funksjon av global oppvarming. Den begynner å lyse rødt for fare bare om den globale oppvarmingen overstiger 2 til 3 grader. Det var dette som fikk meg til å argumentere for et maksimalt nivå for CO₂ på 450 ppm, slik som diskutert i "Time Bomb" og andre publikasjoner. Som vi skal se, har Hansen senere kommet fram til at dette nivået på 450 ppm er for høyt.



Figur 7. Jordas energiubalanse blir nesten fullstendig tatt opp av havet, der den bidrar til å smelte isfjell og isbremmer. Etter at disintegrasjon av innlandsis starter, kan en betydelig del av energiubalansen gå med til å smelte is. (Figur fra Hansen, "A Slippery Slope.")

Kilder

Hansen, James. "A Slippery Slope: How Much Global Warming Constitutes 'Dangerous Anthropogenic Interference'?" *Climate Change* 68 (2005): 269-79.

_____. "Defusing the Global Warming Time Bomb," *Scientific American* (mars 2004): 68-77.

_____. "Scientific Reticence and Sea Level Rise," *Environmental Research Letters* 2 (24. mai 2007): 024002 (6 sider), http://www.iop.org/EJ/article/1748-9326/2/2/024002/erl7_2_024002.html.

8. Hvor lenge utsetter aerosoler den globale oppvarmingen? (fra side 99)

Bruk av fossilt drivstoff gir både global oppvarming og aerosoler i atmosfæren som bidrar til avkjøling. I hvor stor grad oppveier eller utsetter avkjølingen fra aerosoler den globale oppvarmingen? I en artikkel i *Nature* i 1990 skrev Andy Lacis og jeg om dette, og pekte på at aerosolavkjølingen bare kan fortsette å utsette en stor del av den globale oppvarmingen dersom luftforurensingen øker raskt. Men på noen områder vil det etter hvert bli slutt på fossilt drivstoff, eller folk vil bli lei av økende luftforurensing og bestemme seg for å rense opp. Siden drivhusgasser forblir i atmosfæren for århundrer, mens aerosoler faller ut innen dager etter at aerosolutslippene stopper, kommer regninga – i form av en rask økning i den globale oppvarmingen – i etterkant.

Jeg bruker ofte foto av mine to første barnebarn for å kvantifisere diskusjonen. Sophie forklarer til hennes yngre bror Connor at netto klimapådriv er omtrent 2 watt – hun holder to små 1-watts lyspærer. To watt er omtrent summen av endringen av alle klimapådriv som er estimert mellom preindustriell tid og det første tiår av dette århundret. Connor har bare en lyspære og synes å mene at 1 watt er nok.

Connor kan ha rett. Problemet er at vi ikke har målinger for klimapådrivet fra menneskeskapt aerosoler, dvs. fine partikler i lufta. Derimot blir drivhusgasser målt svært nøyaktig. Som et resultat vet vi at pådrivet fra drivhusgasser er nær 3 watt som vist i figur 10. Men pådriv fra aerosoler kan være alle steder innenfor en ramme på -3 watt og opp mot null, som representert ved den strekede kurva, som gir et grovt estimat for sannsynligheten for et gitt aerosolpådriv (*tetthetsfunksjon for sannsynlighet*).

Fordelingen av sannsynlig netto menneskeskapt klimapådriv – oppvarming på grunn av drivhusgasser, demping ved en usikker aerosolavkjøling – er representert ved den tykke kurva i figur 10. Det beste estimatet er tett til Sophies 2 watt. Men det er en betydelig sjanse for at Connors 1 watt kan være nærmere sannheten. Betyr det noe hvem av dem som har rett? Ja, det betyr mye!

Dersom netto pådriv er 2 watt, har aerosoler skjult omtrent en tredel av drivhuspådrivet. Så dersom menneskeheten gjør en stor innsats med å rense opp luftforurensing (for eksempel reduserer utslippene til det halve), vil netto pådriv bare øke med en firedel, fra 2 til 2,5 watt. Den globale oppvarmingen i tillegg ville ikke være velkommen, men den trenger ikke å ryste jorda.

På den annen side, dersom netto pådriv bare er 1 watt, altså at aerosolpådrivet er -2 watt, betyr dette at aerosoler har skjult det meste av den globale oppvarmingen. Dersom menneskeheten reduserer luftforurensing til det halve, ville netto klimapådriv i dette tilfellet doubles. Et slikt økt pådriv, kombinert med en kontinuerlig økning av drivhusgasser, kan føre planeten forbi vippepunkt for katastrofale konsekvenser. Dagens netto klimapådriv gir allerede betydelig tilbakegang for isbreer rundt om i verden, påvirker tilgang på ferskvann, forflytter klimasoner, øker branner og *flom*, påvirker tap av sjøis i Arktis og av sårbart korallrev, akselererer massetapet fra innlandsisene på Grønland og i Antarktis med økende havnivå og setter press på mange arter, noe som leder til fare for tap av biologisk mangfold.

Betydningen av å kjenne det aktuelle aerosolpådrivet er altså selvnlysende. Å få gjort noe med de manglende aerosolmålingene var hovedformålet med satellittoktet Climsat, som jeg foreslo i møter med Gore-Mikulski i 1989 og 1990. Målinger av aerosolpådriv omfatter bestemmelse av effekten av aerosoler på skyer via presise samtidige polarimetridata for reflekterende solstråler og nødvendige data for emittert termalstråling (som diskutert tidligere).

Satellitten kom aldri opp med de nødvendige instrumentene, men lite er vunnet ved å gråte over spilt melk. I fravær av adekvate aerosolmålinger kan vi i stedet se på målbare signaturer i netto klimapådriv. Den mest fundamentale effekt av netto klimapådriv er jordas energibalanse. Dersom netto klimapådriv er positivt, må jorda motta mer energi (som absorbert solstråling) enn den taper (som emittert varmestråling). Dersom klimapådrivet stabiliseres, må energiubalansen gradvis avta etter som planeten varmes opp i respons på pådrivet og øker sin varmestråling til verdensrommet. Den energiubalansen som er igjen, avslører til en hver tid den delen av netto klimapådriv som klimasystemet ennå ikke har respondert på.

Så dersom vi måler jordas aktuelle energiubalanse, kan vi bestemme den delen av global oppvarming som fremdeles ligger på "samlebåndet" (*bundne klimaendringer*). Direkte måling av ubalansen ville kreve kontinuerlig overvåking med flere satellitter som måler utgående stråling i alle retninger med en absolutt nøyaktighet på en tidels av én watt. Det er upraktisk. Men et presist mål kan framskaffes indirekte - fra den hastighet som varme blir lagret med i tilgjengelige reservoarer. Det dominerende reservoaret er havet. Av den grunn har jeg derfor i to tiår argumentert for at den viktigste geofysiske enkeltmålingen er endring i havets varmeinnhold. Dersom vi kan måle hvor mye havet blir varmet opp, vil vi ikke bare vite hvor mye global tilleggsoppvarming det er på samlebåndet, men også hvor mye vi må redusere det menneskeskapte klimapådrivet om vi vil stabilisere klima.

I 1997 publiserte jeg sammen med en rekke kollegaer et arbeid ("Forcings and Chaos in Interannual to Decadal Climate Change") som konkluderte med at jorda var ute av en energibalanse med +0,5 watt. Vår konklusjon var basert på en sammenligning av simuleringer i klimamodeller med en analyse av globale havtemperaturer av Sydney Levitus ved National Oceanic and Atmospheric Administration. Resultatet var tentativt fordi det er få havmålinger, spesielt i dyphavet og ved høye breddegrader, og fordi det var usikkert om temperaturdataene var tilstrekkelig nøyaktige. Analysert varmeinnhold i havet, av Levitus, viste store, sannsynligvis urealistiske fluktuasjoner over tid. Dette antydte muligheten for feil på grunn av endringer i instrumentene eller utilstrekkelig med data for havet.

Senere viste en ny analyse av Josh Willis og kolleger en rate for varmelagring på 0,6 watt i de øverste 750 meter av havet gjennom 1993-2003. Mens dette resultatet stemte godt med energiubalansen i våre klimasimuleringer, viste Catia Domingues og kollegaer senere at endringer i instrumenter påvirket analysene til Levitus og Willis. Inntil saken med instrumentene er løst, og gode data for varmelagring er oppnådd for hele havet, er det ikke mulig å finne netto klimapådriv som virker på jorda.

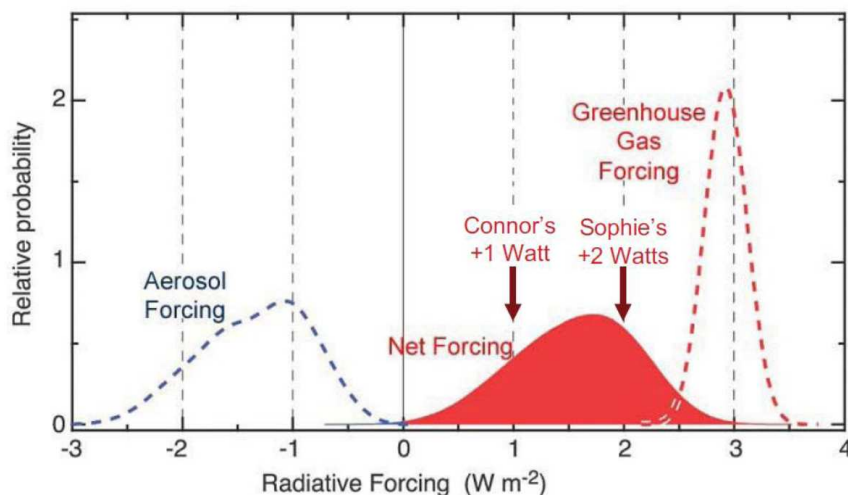
Vansken med å bestemme den nøyaktige verdi for jordas varmeubalanse ut fra eksisterende målinger, minsker ikke dens betydning. Jordas energiubalanse er

vår beste indikasjon på kursen global oppvarming tar, og hvor mye globale pådriv må endres for å stabilisere klima. Vi vet sikkert at havet blir varmere, og at planeten er ute av energibalanse om en tar gjennomsnitt over siste en eller to tiår (dette minimaliserer effekten av den sykliske solvariasjonen og kaotisk variasjon i atmosfæren og i havet). Men gitt unøyaktigheten i målingene, er en ubalanse et sted mellom 0,25 og 0,75 watt det nærmeste vi kommer. Dette inkluderer omtrent 0,1 watt for endringer i andre varmereservoar enn havet, dvs. varme som går med til å varme lufta, innsjøer og kontinenter og til å smelte sjøis, is på land og innlandsis.

Den aktuelle planetariske energiubalansen er trolig mindre enn energiubalansen som vi kalkulerte i klimasimuleringene vi gjorde i 2004 og 2005 – som var modellresultatene vi sendte til IPCCs vurderinger som ble publiserte i 2007. Disse modellresultatene viste en planetær energiubalanse i de første årene i dette århundret, i gjennomsnitt over en serie med modellkjøringer, på 0,75 watt. Hva kan vi lære fra denne uoverensstemmelsen, om en antar at den ikke er en observasjonsfeil eller bare en variasjon i klimasystemet? Vi vet at uoverensstemmelsen ikke kan skyldes en feil i modellens sensitivitet, fordi paleoklimadata bekrefter en klimasensitivitet på tre grader for en dobling av karbondioksid.

Våre klimasimuleringer antok at mengden av aerosol i atmosfæren har vært konstant siden 1990, ut fra håpet om at reduksjon av aerosoler i USA og Europa, på grunn av reguleringer for rein luft, kunne gjøre opp for økningen i aerosol i utviklingsland som Kina og India. Men regulering av rein luft i vesten og reduserte utslipp i Russland på grunn av økonomisk kollaps, skjedde for en stor del før 1993. Luftforurensing i utviklingsland har økt gjennom de to siste tiårene, en konklusjon som blir støttet av de mange meteorologiske målinger av sikten ved overflaten. Derfor er en økning i aerosoler i perioden 1990 - 2009 en kandidat til en sannsynlig forklaring på observert planetær energiubalanse.

Greenhouse Gas, Aerosol & Net Climate Forcing



Figur 10. Klimapådriv for menneskeskapt drivhusgasser, aerosoler og deres netto effekt. Drivhusgasspådrivet er 3 watt (per kvadratmeter) med bare en liten usikkerhet, men aerosolpådriv er svært usikkert, som representert ved med den brede sannsynlighetsfunksjonen. Slik er enten Sophies 2 watt eller Connors 1 watt innenfor området for sannsynlig netto pådriv. (Tilpasset fra IPCC, "Climate 2007: The Physical Science Basis.")

For kilder, se kapittel 9

9. Solas innflytelse – klimaendringer de nærmeste årene (fra side 103)

Drivhusgasser og aerosoler er de to største menneskeskapt klimapådrivene. Men det fins et tredje betydelig klimapådriv som vi må se på, om vi bruker planetens energiubalanse til å sjekke status for netto klimapådriv, og om vi prøver å vurdere sannsynlig klimaendring de neste få årene: solarvariasjon. Så la oss se nærmere på solas betydning for klimaendringer.

Det er mange, inkludert forskere, som tror at sola er den viktigste faktor for klimaendringer, og at det dominerende klimapådrivet kommer fra sola. Det er lett å forstå hvorfor. Jorda får sin varme fra sola. Sola er variabel. Korrelasjoner mellom variasjon på sola og klimaendringer er velkjente. Men det vi trenger er en objektiv, kvantitativ sammenligning mellom solare og andre klimapådriv.

Presis overvåking av solar irradians, mengden solstråling som når jorda, startet sent på 1970-tallet. Dataene, som er vist i figur 11, viser at sola var svakere i 2009 enn på noe annet tidspunkt i perioden med nøyaktige data. I tillegg har det solare minimum vart lengre enn tidligere minima i satellittiden. Denne solare variasjonen påvirker jordas energibalans og global temperatur. Den kan også gi en klimatest som kan hjelpe oss å forbedre vår forståelse for klimaendringer i de nærmeste årene og tiårene.

Solar irradians varierer med omtrent en tidel av en prosent over solsyklusen på 10 til 12 år i gjennomsnitt, som vist i figur 11. Jorda absorberer 240 watt solstråling per kvadratmeter av sin overflate. (Den absorberte energien er mye mindre enn solas irradians, som treffer jorda vinkelrett på retningen sol-jord, fordi det sirkulære tverrsnittet av jorda mot solstrålene er en firedel av jordas overflate og fordi 30 prosent av solstrålingen blir reflektert til verdensrommet uten at den blir absorbert.) Derfor utgjør solarminimumet et pådriv på omtrent -0,2 watt, relativt til pådrivet ved solarmaksimum, eller omtrent halvparten så mye relativt til gjennomsnittlig solstråling.

Et strålingspådriv på -0,2 watt er signifikant, men ikke et dominerende pådriv. Til sammenligning er pådrivet fra karbondioksid i dag, relativt til preindustriell tid, omkring 1,5 watt. Likevel, mye av pådrivet fra karbondioksid har allerede blitt "brukt opp" ved å ha ført til oppvarmingen i forrige hundreår. Det er mer relevant å sammenligne solar pådriv med planetens energiubalanse, som vi estimerte til omtrent 0,5 watt i gjennomsnitt over de to siste tiårene. Men før vi vurderer solas

betydning, bør vi legge merke til at det fins mekanismer som både kan forsterke og dempe solas effekt.

I en av publikasjonene som jeg arbeidet med i 2004, "Efficacy og Climate Forcings", tok jeg opp dette problemet. Vi viste at det ikke er tilstrekkelig å kjenne størrelsen på et pådriv i watt, fordi noen pådrivsmekanismer har en større *pådrivseffektivitet* enn andre. For eksempel viste vi at effekten av et pådriv i solar irradians blir redusert med ti prosent, relativt til vanlig karbondioksidpådriv, fordi solart pådriv er størst på lave bredder hvor det er liten tilbakekopling fra is og snø. Men solart pådriv blir økt med 20 prosent ved en indirekte effekt – den store solare variasjon ved ultrafiolette bølgelengder som endrer ozon. Disse kjente effektene gir en netto effektivitet på 110 prosent for solare pådriv relativt til en like stort pådriv fra karbondioksid – en forsterkning som er for liten til å endre vesentlig vår vurdering av solas rolle for klimaendringer.

Så dersom solar variasjon skal gi et mer signifikant klimapådriv, må det finnes en annen, større indirekte effekt av sola. Favoritten mellom solarentusiastene er en nesten Rube Goldberg effekt av *galaktisk kosmisk stråling* (Galactic cosmic rays; GCR) som går som dette: Ved solarminimum trenger GCR lengre ned i jordas atmosfære og øker atmosfærisk ionisering, ionene tjener som kondensasjonskjerner for skyer, skydekket øker, og skyene reflekterer solstrålingen og gir en global avkjøling. Det er faktisk sant at solarsyklus har en effekt på atmosfærisk ionisering, men vitenskapen omkring dette tillater ennå ikke en kvantitativ evaluering.

Heldigvis har vi en måte å omgå slike vanskelige problem. Vi kan gå rett til empiriske data for å evaluere effekten av solare pådriv, til og med indirekte effekter. Alt vi trenger, er målingene av solar variasjon fra de siste tiårene og observert global temperatur.

Den observerte temperaturkurva (figur 12) viser ingen tydelig samvariasjon med solar variasjon over solarsyklusen. Men statistiske analyser viser en klar korrelasjon. Ka Kit Tung og Charles Camp utførte den mest sofistikerte og nøyaktige sammenligning av solar irradians og global temperatur og fant en global oppvarming på 0,16 grader for en endring i irradians på 0,2 watt, eller 3,2 grader for en et pådriv på 4 watt ved en dobling av CO₂. I første omgang stemmer klimasensitiviteten til Tung og Camp med klimasensitiviteten på 0,75 grader per watt, eller 3 grader for en dobling av CO₂, som vi kom fram til fra paleoklimatiske data. Men det paleoklimatiske resultatet refererer til klimarespons over lang tid, det vil si, etter at havet har hatt tilstrekkelig med tid til å tilpasse seg endret klimapådriv. Gjennom solarsyklusen på ti til tolv år, vil temperaturen i overflaten bare oppnå 50 prosent av responsen fram til ny likevekt, med en usikkerhet på ti prosent. Derfor betyr resultatene til Tung og Camp at det fins et indirekte pådriv som doubler effekten av det direkte pådrivet – en pådrivseffektivitet på 200 prosent. Så kanskje solentusiastene har delvis rett –

solas effekt er større enn gitt ved endring i irradians alene, med en forsterkning som enten er galaktisk kosmisk stråling eller en annen ukjent mekanisme.

Men før vi haster til den konklusjon at det fins mekanismer som forsterker solpådriv med en faktor to, må vi se litt nærmere på analysen til Tung og Camp. For å unngå innflytelse av vulkaner i tidsserien, fjerner de temperaturdata for to år etter tre store utbrudd. På den måten neglisjerer de den mer langsiktige effekten av store vulkanutbrudd. Samtidig bidro alle de tre store utbruddene i studiet, Agung, El Chichon og Pinatubo, til å forsterke avkjølingen gjennom solare minima. For det andre brukte ikke Tung og Camp observert global temperatur i figur 12, men i stedet brukte de en temperaturserie generert av en datamaskinmodell i den prosessen vi kaller *reanalyser*. Disse analysene bruker en global simulering av atmosfæren de siste tiårene ved å ta inn tilgjengelige observasjoner, som temperatur i troposfæren målt ved satellitt. Den globale overflatetemperaturen som resulterer fra reanalyse, er kvalitativt lik den vist i figur 12, men solare signal er omtrent en tredel sterkere når en måler på denne måten. Tung og Camp foreslår at variasjoner i global temperatur brukt i konvensjonelle analyser, slik som i figur 12, som er basert på observasjoner på meteorologiske stasjoner, er mindre dekkende fordi de mangler observeringsstasjoner på steder slik som i Arktis og Sahara, områder med størst variasjon i temperaturen. Deres antakelse er plausibel, men det er mulig at deres modell for reanalyse i stedet forsterker temperaturendringer.

Konklusjonen er at det eneste vi kan si med sikkerhet, er at det effektive klimapådrivet på grunn av solarsyklus på ti til tolv år har en amplitude mellom 0,2 og 0,4 watt. Med andre ord har solarpådrivet på 0,2 watt en effektivitet mellom 100 og 200 prosent.

Nå som vi har disse tallene, kan vi sammenligne naturlig solart klimapådriv og menneskeskapt pådriv fra karbondioksid. Den årlige økningen i karbondioksid er i dag omtrent 2 ppm, noe som gir en årlig økning på 0,03 watt, med en effektivitet på 100 prosent. Så selv om effektiviteten til solart pådriv er 200 prosent, og solstrålingen skulle holde seg på minimumsverdien i 2009 for en lang periode, vil avkjølingseffekten relativt til midlere solar irradians bli oppveid av sju år med kontinuerlig økning i karbondioksid. Så det er ingen sjanse i det hele tatt for at sola kan få jorda til å gå inn i en ny lille istid – tallene over viser at det menneskeskapte pådrivet er større enn det naturlige klimapådrivet.

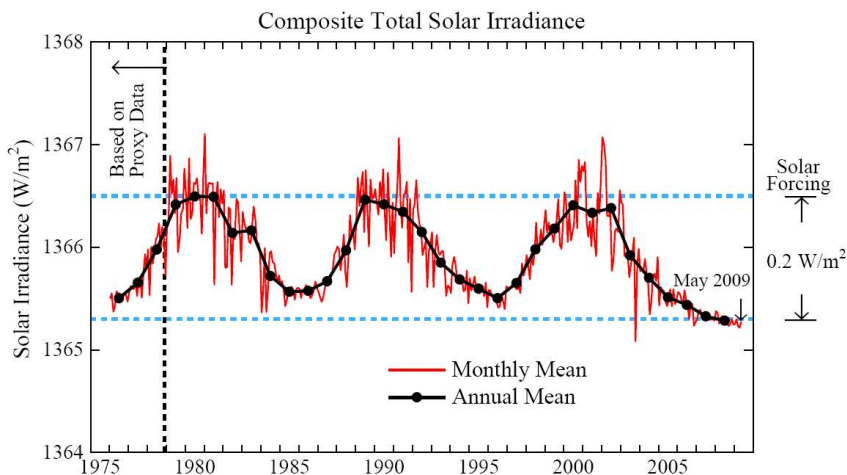
Hvorfor blir jeg da bombardert av krav om å innrømme at global oppvarming er en bløff? Jeg har mottatt en skare med meldinger som gjør krav på at mennesket ikke er ansvarlig for klimaendringer og at jorda går mot kaldere tilstander. Vanligvis blir det hevdet at sola kontrollerer klima og at sola beveger seg inn i en periode med mindre stråling. Som "bevis" har disse meldingene ofte med seg en kurve som viser global temperatur de siste årene og en forsikring om at "halvparten av oppvarmingen det siste hundreåret" er borte. Det er en

forbausende likhet mellom meldingene, og de fleste ender med å forlange at jeg avgår fra min statlige stilling.

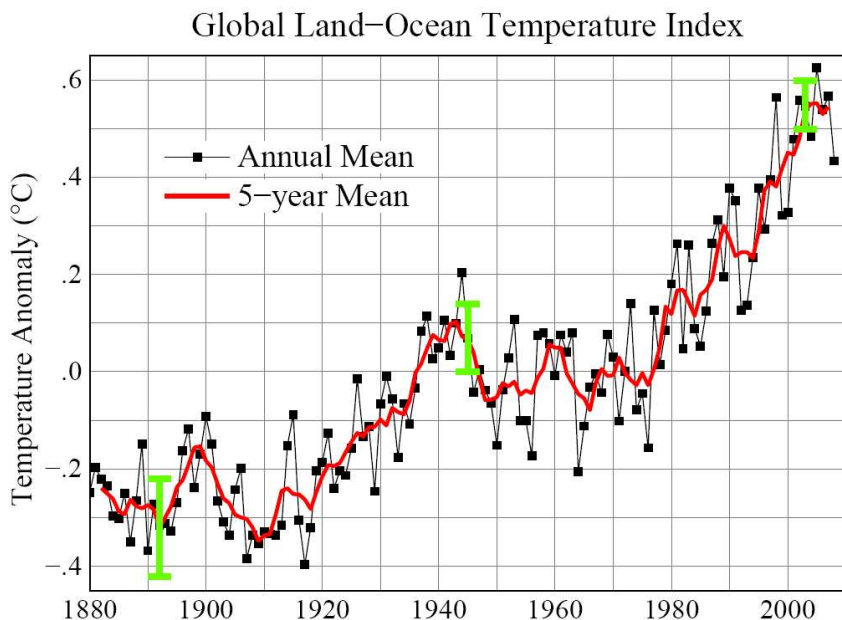
Disse folka ser ut til å ha blitt oppmuntret av det faktum at 2008 var et kaldt år, det kaldeste siden 2000. Noe innsikt i avkjølingen i 2008 får en ved en sammenligning mellom månedlige gjennomsnitt for global overflatetemperatur (land og hav), global havtemperatur og havindeksen for *El Niño* (figur 13). Denne indeksen er positiv gjennom episoder med *El Niño* og negativ gjennom den kalde fasen, *La Niña*. Denne naturlige dynamiske svingningen i havtemperaturer i Stillehavet har stor innflytelse på globale temperaturer. Det kalde 2008 assosieres med en sterk *La Niña*.

Etter som Stillehavet beveget seg over i en fase med *El Niño* i 2009, venter jeg at global temperatur går tilbake til rekord- eller nesten rekordnivåer. Det er en forskyvning på noen få måneder mellom indeksen og global temperatur, så 2010 skulle bli et år som er tilbake til temperaturer opp mot rekorder, og driver bort tanken om at vi går mot en ny istid. Vi er likevel fremdeles ved solart minimum i solarsyklus, noe som drar ned temperaturene. Derfor får vi trolig bare en nestenrekord i global temperatur.

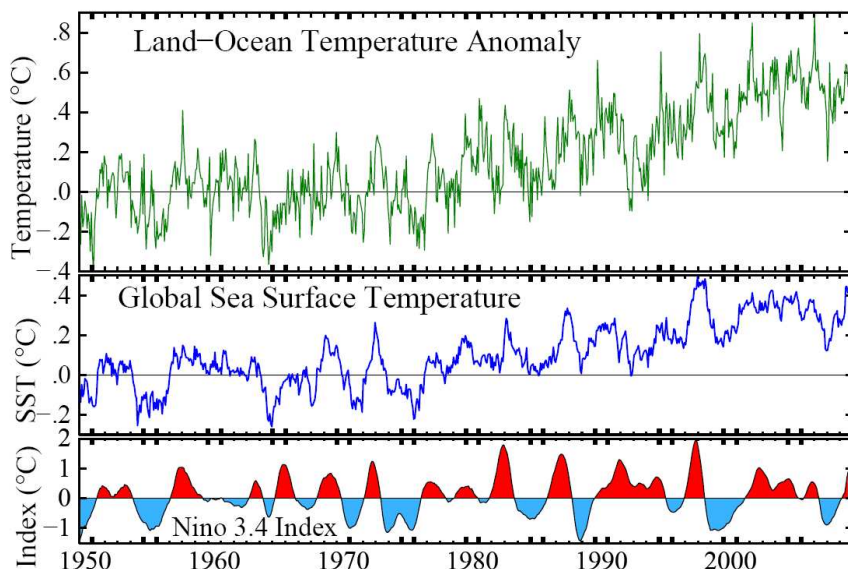
Viktigere de neste årene er å få målt innholdet av varme i havet. Det fins et stadig bedre globalt nettverk av flytende bøyer med regulære målinger for de øverste 750 meter i havet, sammen med et begrenset antall målinger dypere ned. Disse gir oss et bedre mål for havets varmeopptak og derigjennom planetens energiubalanse. Dersom solar irradians begynner å ta seg opp, slik de fleste solfysikere antar, venter jeg at opptaket i havet vil vise denne endringen. Målinger av varmelagring over neste solarsyklus, spesielt dersom målinger av aerosoler blir tilgjengelig globalt, kan bidra til å bedre vår forståelse av planetens tilstand, årsakene til klimaendringer og den endring i globalt pådriv som er nødvendig for å gjenopprette planetens energibalanse og stabilisere klimaet.



Figur 11. Solar irradians fram til mai 2009, basert på utnyttelse av data fra flere satellitter ved Claus Frölich og Judith Lean. (Data fra Frölich, "Solar Irradiance Variability Since 1978.")



Figur 12. Årlig global overflatetemperatur relativt til gjennomsnitt for 1951-1980. Vertikale streker flere steder viser estimert 95 prosent konfidensintervall. (Oppdatert fra Hansen m. fl., "GISS Analysis of Surface Temperature Change.")



Figur 13. Månedlig global (land og hav) og global overflatetemperatur for havet relativt til gjennomsnittet for 1951-1980. Kurva for land og hav er ujevn på grunn av variasjon i været. Kurva helt nede er indeksen Niño 3.4 for temperatur i tropisk Stillehav. (Figuren på toppen er fra Hansen m. fl., "GISS Analysis of Surface

Temperature Change". Kurva i midten er fra Hansen m. fl. "Target Atmospheric CO₂".)

Kilder

Camp, Charles D, og Ka Kit Tung. "Surface Warming by the Solar Cycle as Revealed by the Composite Mean Difference Projection," *Geophysical Research Letters* 34 (18. juli 2007): L14703 (5 sider).

Hansen, James. "Dangerous Anthropogenic Interference: A Discussion of Humanity's Faustian Climate Bargain and the Payments Coming Due," presentation at the Distinguished Public Lecture Series at the Department of Physics and Astronomy, University of Iowa (26. oktober 2004), http://www.columbia.edu/~jeh/2004/dai_complete_20041026.pdf.

Hansen, James, Reto Ruedy, Jay Glascoe, og Makkiko Sato. "GISS Analysis of Surface Temperature Change," *Journal of Geophysical Research* 1004 (27. desember 1999): 20,997-21,002.

Hansen, James, Makiko Sato, Reto Ruedy, Andrew Lacis et al. "Forcing and Chaos in Interannual to Decadal Climate Change," *Journal of Geophysical Research* 1002 (27. November 1997), 25, 679-720.

10. Karbonkretsløpet (fra side 116)

Charles David Keeling utviklet en teknikk som i stor grad reduserte gjennomsnittlige feil i målinger av karbondioksid i atmosfæren. Han forsto at endringene han målte i mengdene av karbondioksid var reelle og systematiske og ikke skyldtes observasjonsfeil. Keeling forberedte da målinger med et fokus og en hengivelse som en forsker som forstår at han har funnet et viktig problem, og at han har redskapen som skal til for å gå i gang. Selv om han var en kjærlig familiefar, gikk han glipp av fødselen til sitt første barn fordi han nærmest fanatisk gikk ut hver fjerde time for å måle karbondioksid.

Keelings målinger i nærheten av hans hjem og laboratorium i California viste at mengden av karbondioksid i luften minket gjennom dagen etter som trær og annen vegetasjon assimilerte karbondioksid ved prosessen *fotosyntese*. Om natta økte karbondioksid i atmosfæren etter som planter respirerte. Menneskeskapte kilder for karbondioksid, for det meste fra brenning av fossilt drivstoff, påvirket også observasjonene, avhengig av hvor nær kildene var.

Keeling trengte å måle luften på øde steder for å undersøke endringer i global karbondioksid. Derfor satte han opp utstyr for daglige luftmålinger på Mauna Loa på Hawaii, deretter på Sydpolen. Lufta Keeling målte i på Mauna Loa kom perfekt inn fra Stillehavet høyt opp i atmosfæren, ført inn til Hawaii av vestlige vinder som ikke var forurenset av menneskers kilder.

Den nå berømte Keelingkurva viser årlige svingninger og en gjennomsnittlig mengde karbondioksid som øker for hvert år. Svingningene kan greit forstås ut fra vegetasjonens dominans på nordlige halvkule, som drar ned atmosfærisk karbondioksid gjennom vekstsesongen på nordlige halvkule og reduserer den etter som planter dør og råtner gjennom høst og vinter. Som oppsummert av Mark Bowen i boka *Thin Ice*: planter tar en pust i døgnet, mens hele jorda tar en pust i året.

Keelingkurva fikk stor betydning fordi den bekreftet at karbondioksid økte år for år. Dette resultatet var ikke overraskende, men presisjonen i dataene gav økende aktsomhet for karbondioksid og engstelse for mulige klimaendringer. Og etter som Keelingsrekke ble lengre, ble det klart at den årlige økningen av karbondioksid ble større og større. I Keelingkurva i figur 14 kan det se ut som om at den øker langs en nesten rett linje, men det er langt fra tilfelle. Den årlige økningen i karbondioksid er nå nesten tre ganger større enn den var da Keeling begynte sine målinger i 1957.

Den årlige økningen i gjennomsnittlig global karbondioksid er en av nøkkelstørrelsene som vi må holde øye med for å forstå klimatilstanden og utsiktene for planetens framtid. Jeg nevner disse nøkkelstørrelsene i etterordet og vil holde dem oppdatert på websiden som jeg gir der.

Tolkning av Keelings målinger krever kunnskap om *karbonkretsløpet*, flyten av karbon mellom atmosfæren, *biosfæren*, jord og havreservoar. Karbonkretsløpet er summert opp i figur 15. Enheten i målingene er milliarder metriske tonn karbon, også kalt gigatonn karbon, forkortet som GtC; 1 ppm karbondioksid i atmosfæren svarer til 2,12 GtC.

I dag inneholder atmosfæren 800 GtC karbondioksid. Planter inneholder omtrent 600 GtC, det meste i veden i trær. Jord inneholder omtrent 1500 GtC, som for det meste er i humus, nedkompostert organisk stoff. Det fins nesten 40000 GtC oppløst i havet.

Store, naturlige mengder flyter fram og tilbake mellom disse reservoarene. Planter tar opp karbondioksid i fotosyntesen, men planter og jord respirerer en lignende mengde karbondioksid tilbake til atmosfæren. Karbondioksid løses opp i kalde havområder, men en lignende mengde avgis til atmosfæren andre steder. Opptak og tap balanserer hverandre nesten over et år. Men små ubalanser finner sted og sørger for viktige klimatilbakekoplinger. For eksempel, i klimaendringer fra mellomistid til istid, etter som havet blir kaldere, tar det opp mer karbondioksid, noe som fører til at atmosfæren og planter vil inneholde mindre karbondioksid, noe som driver en videre avkjøling. Omvendt, når jordbanen eller helningen til spinnaksen fører til smelting av snø og is, øker dette absorpsjon av solstråling, og varmere hav og jord utløser karbondioksid og metan. Denne økende drivhusgasstilbakekoplingen, som jeg viste tidligere, står for nesten halvparten av temperaturendringen mellom istid og mellomistid.

Menneskene endrer dette naturlige karbonkretsløpet på to hovedmåter: ved å brenne fossilt drivstoff og ved *avskoging*. Utslipp år for år av karbondioksid fra fossilt drivstoff til atmosfæren er kjent med rimelig høy nøyaktighet, fordi olje, gass og kull er internasjonale varer som følges nøye. Unøyaktigheten i tall for bruk av fossilt drivstoff er trolig mindre enn 10 prosent, selv om noen regjeringer ikke rapporterer nøyaktig sitt interne bruk eller salg av kull.

Den heltrukne linja i figur 16 viser utslipp av karbondioksid globalt fra bruk av fossilt drivstoff. Utslippene økte fra mindre enn 2 GtC i 1950 til mer enn 8 GtC per år i de siste få år. Veksten i utslippene var omtrent 4,5 prosent per år fra 1950 til 1973. Den minket til 1,5 prosent per år mellom 1973 og 2003, men mellom 2003 og 2008 var gjennomsnittlig økning 3 prosent per år etter som bruk av kull økte raskt, spesielt i Kina. Men på grunn av lang levetid i atmosfæren for karbondioksid, er USA ansvarlig for omtrent tre ganger mer menneskeskapt karbondioksid i dagens luft enn Kina.

Avskoging er den andre viktige menneskeskapte kilde for karbondioksid i atmosfæren. Men størrelsen på den årlige avskogingen er ikke kjent nøyaktig. Verdifull innsyn i karbonkretsløpet får en ved det enkle forholdet mellom to størrelser som er godt kjent: den årlige økning i atmosfærens innhold av karbondioksid dividert med utslippene fra fossilt drivstoff i det samme år. Denne luftbårne fraksjonen er den strekede kurva i figur 16, vist i prosent på skalaen til høyre.

Merkelig nok har denne luftbårne fraksjonen, midlet over flere år, holdt seg nesten konstant i 50 år på en gjennomsnittsverdi på bare 56 prosent. Med andre ord, selv om vi antar at det ikke er noen netto avskoging, forsvinner 44 prosent av karbondioksid fra fossilt drivstoff til ulike sluk. Sluk er steder - slik som hav, skog og jord - som kan ta opp noe av overskuddet av karbon som mennesker slipper opp i lufta. Det er heldig at sluk har gjort det mulig å flytte en stor del av de menneskeskapte utslippene fra atmosfæren - hvis ikke ville klimaendringene være større. På basis av modeller og observasjoner er det nylig estimert at opptaket til havet er omtrent 3 GtC per år. Gitt at kilden for fossilt brennstoff er 8,5 GtC per år og gjennomsnittlig økning i atmosfæren er 4,5 GtC, betyr dette at det totale sluket må være 4 GtC per år. Gitt estimatet på 3 GtC per år for sluket til havet, må alle andre faktorer - for det meste vegetasjon og jord - til sammen utgjøre et netto sluk på 1 GtC per år.

Det faktum at landmasser på jorda fortsetter å utgjøre et netto sluk av karbondioksid, gir et glimt av håp for jobben med å stabilisere klimaet. Dette karbonsluket skjer på tross av en storstilt avskoging i mange deler av verden, i tillegg til jordbrukspraksis som har en tendens til å utløse karbon til atmosfæren. Forbedret praksis innen jord- og skogbruk vil kunne øke opptaket av karbondioksid signifikant, som vi skal se senere.

En hver optimisme er likevel avhengig av antakelsen om at utslippene av fossilt drivstoff vil avta. Dersom utslippene i stedet fortsetter å øke, kan det terrestriske systemet bli et mindre effektivt sluk, eller til og med bli en kilde for drivhusgasser. Noen klimamodeller predikerer for eksempel at en fortsatt global oppvarming vil gi tørke og skogbranner i Amazonas og forvandle regionen til en stor kilde for karbondioksid.

Av dette følger det at verden, menneskeheten, står ved et veiskille. Vi står overfor et valg mellom to mulige veier for framtiden. En vei leder mot en reduksjon av fossilt drivstoff globalt, med rater som er diktert av hva vitenskapen forteller oss, dvs. en vei som demper forsterkende tilbakekoplinger og stabiliserer klimaet. Den andre veien er mer eller mindre business-as-usual, der de forsterkende tilbakekoplingene vil gjøre seg gjeldende, og der klimaendringer med stor sannsynlighet vil komme ut av kontroll.

Hvordan kan vi da evaluere så presist som mulig den veien menneskeheten har slått inn på i denne kritiske tiden? En måte er å holde våre øyne festet på to nøkkeltall med hensyn til karbonkretsløpet.

Det første nøkkeltallet er takten som karbondioksid blir pumpet inn i lufta ved å brenne fossilt drivstoff. Dette tallet er vist ved den heltrukne linja i figur 16.

Det trengs et annet tall for å karakterisere tilstanden til karbonkretsløpet, fordi endringen i atmosfærisk karbondioksid vil helt sikkert ikke fortsette med et gjennomsnitt på 56 prosent hele tiden; prosenten kan enten øke eller minke. Det andre nøkkeltallet som definerer status for karbonkretsløpet, er den årlige vekst av karbondioksid i lufta som vist i figur 17. Denne størrelsen reflekterer den kombinerte effekten av enhver endring i slukene for karbondioksid og netto avskoging som en kilde for karbondioksid.

Det andre nøkkeltallet er nøyaktig kjent på grunn av overvåkingen som Keeling satte i gang. Jeg må likevel advare deg om at verdien av denne størrelsen fluktuerer mye fra år til år, som vist i figur 17, så ta ikke observasjonene fra et enkelt år som basis for verken alarm eller jubel. En årsak til fluktuasjonene er svingningene i overflatetemperaturen i havet knyttet til svingningene El Niño-La Niña, som påvirker havets evne til å absorbere karbondioksid. Tørke reduserer også evnen vegetasjonen har til å ta opp karbondioksid, og skogbranner uløser karbondioksid.

Et gjennomsnitt over fem år er også vist i figur 17 for å minimalisere effekten av fluktuasjonene, men selv dette gjennomsnittet er ganske varierende. Den største fluktuasjonen er den langsomme veksten i atmosfærisk karbondioksid tidlig i 1990-årene, noe som trolig er en effekt av det massive utbruddet fra vulkanen Mount Pinatubo i 1991. Pinatubo kjølte av havet for noen få år, dermed økte dets evne til å løse opp karbondioksid. Vulkanske aerosoler spredte også solstrålingen slik at innkommende lys ble mer diffust (noe som fikk himmelen til å

se litt melkete ut midt på dagen). Planter vokser da bedre. Slik tar de til seg mer karbon når sollyset er diffust (*diffus stråling*) enn når strålene slår ned fra samme retning.

Etter som tiden går, vil det bli mer og mer nyttig å sammenligne vekst i observert karbondioksid med *scenarier* for framtiden, som er inkludert i figur 17 (*utslippsscenario*). Alle scenarier definert av IPCC gir en økende vekst av karbondioksid. Vi skal se at alle disse scenariene snart fører til klimakatastrofe. Likevel er disse scenariene konsistent med projeksjonene til ulike energibyråder, som alle antar, som om det var en gudegitt sannhet, at fossilt drivstoff vil bli brent med en stadig raskere takt. I motsetning til dette antar vårt alternative *scenario*, også vist i figur 17, at menneskeheten er i stand til å bruke sin frie vilje til å bestemme over energikildene.

Både IPCC-scenariene og det alternative scenariet ble definert på slutten av 1990-årene og publisert i henholdsvis 2001 og 2000. Så nå er data fra den virkelige verden tilgjengelig for nesten et tiår for sammenligning med disse scenariene. Det er tydelig at til nå har verden fortsatt på veien business-as-usual. Slik har veksten i karbondioksid i den virkelige verden overgått den i vårt alternative scenario. Likevel er det, som vi skal se, fremdeles mulig å oppnå en mengde karbondioksid som til og med er mindre enn i det alternative scenariet. En slik vei vil kreve restriksjoner på utslipp fra kull og ukonvensjonelle fossile drivstoff, slik som oljesand.

Jeg håper at nøkkelstørrelsene som definerer klimaendringer og deres årsaker og konsekvenser, som summert opp på slutten og oppdatert hver måned på min webside, vil hjelpe folk til å forstå klimaendringer etter som de kommer og skille realitet fra propaganda og overdrivelser. I så måte er vekstratene for atmosfærisk karbondioksid i figur 17 et godt eksempel. Det er tydelig at til tross for fluktuasjoner fra år til år, øker karbondioksid med en takt som er i godt samsvar med scenariene business-as-usual til IPCC, men raskere enn i det alternative scenariet.

Denne realiteten skiller seg markert fra det inntrykket som er skapt i media. En leser til stadighet at drivhusgasser, inkludert karbondioksid, øker raskere enn forventet, utslippene overgår det som er forventet, sluket i havet har avtatt, jord har begynt å bli en kilde for karbondioksid eller at avskogingen har økt. Slike historier kan ha en viss basis i virkeligheten, men nettoresultatet er et feilinntrykk, som figurene 16 og 17 klart viser.

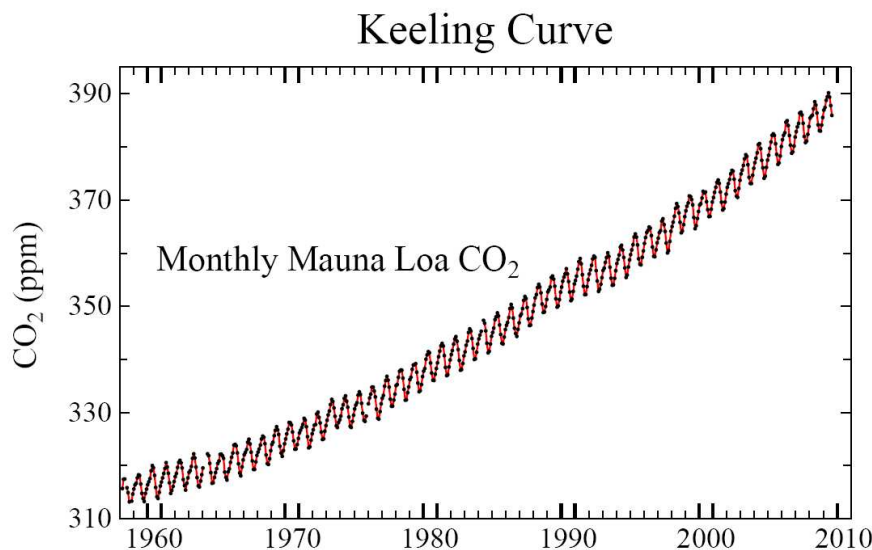
Noen ganger kommer disse historiene fram fordi media har et ønske å finne interessante nyheter å rapportere. Albert Einstein hadde skrupler med hvordan forskere beskriver forskningsframgang i media, spesielt foreløpige resultater, fordi uunngåelig, sa han, skaper dette "et inntrykk at hvert femte minutt er det en revolusjon i vitenskapen, omtrent som et militærkupp i små ustabile republikker."

I tillegg er klimaendringer blitt en politisk sak som kan sette farge på hvordan nye observasjoner rapporteres.

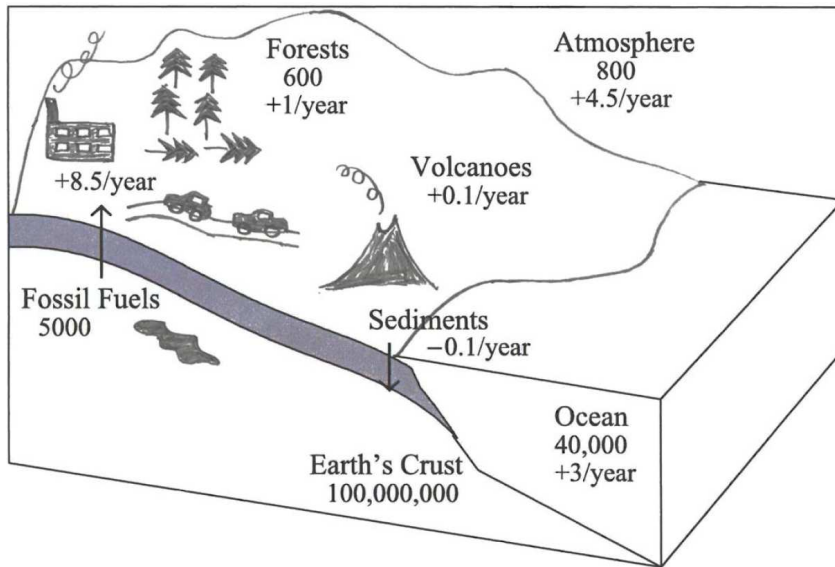
Dersom jeg gjør en god jobb i å velge ut og forklare størrelsene som trengs for å definere og forstå klimaendringer, kan det hjelpe deg etter som du prøver å vurdere gangen i jordas klima, kreftene som driver klimaendringer og virkningen av klimaendringer. Størrelsene som velges må ikke bare være sentrale sammenlignet med fysikken i problemet, men også være målbare med en rimelig liten usikkerhet.

Summert opp, de to nøkkelstørrelsene for karbonkretsløpet er de årlige utslippene av karbondioksid til atmosfæren og den årlige økningen i karbondioksid i atmosfæren. Med hensyn til den første størrelsen, legg merke til i figur 16 at *Kyotoprotokollen*, som ble inngått i 1997 og trådte i kraft i 2005 med "legalt bindende forpliktelser" å redusere utslipp av drivhusgasser, ikke har ført til en reduksjon i de globale utslippene – utslippene har bare fortsatt å øke. Den andre størrelsen, den årlige økningen i karbondioksid i lufta (figur 17) følger nå tett scenariene for business-as-usual som bygger på en antakelse om at alt fossilt drivstoff vil bli brent. Til sist, forholdet mellom disse to nøkkelstørrelsene, den strekede kurva i figur 16, gir en viktig tilleggskonklusjon: Netto sluk for menneskeskapt karbondioksid avtar ikke; det er heller et økende sluk, etter som det fortsetter på omtrent 44 prosent av utslippene, som også øker.

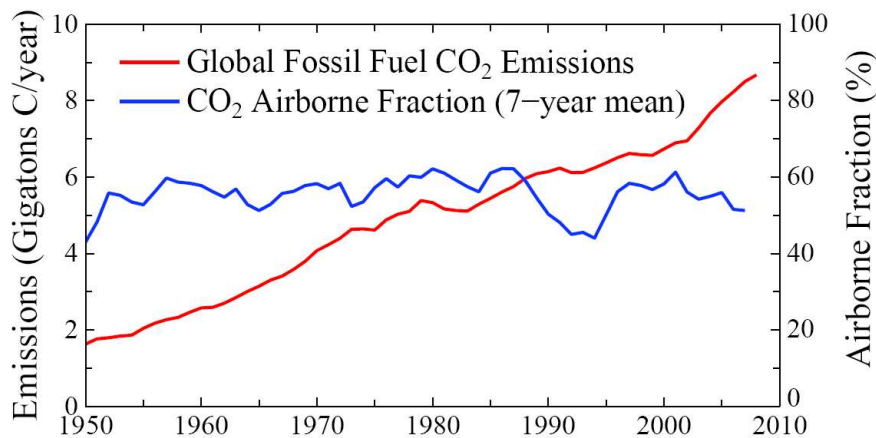
Det er vanskelig å overvurdere betydningen av å følge med i disse størrelsene. En fortsettelse av livet på denne planeten krever en rask endring i forløpet mellom dem.



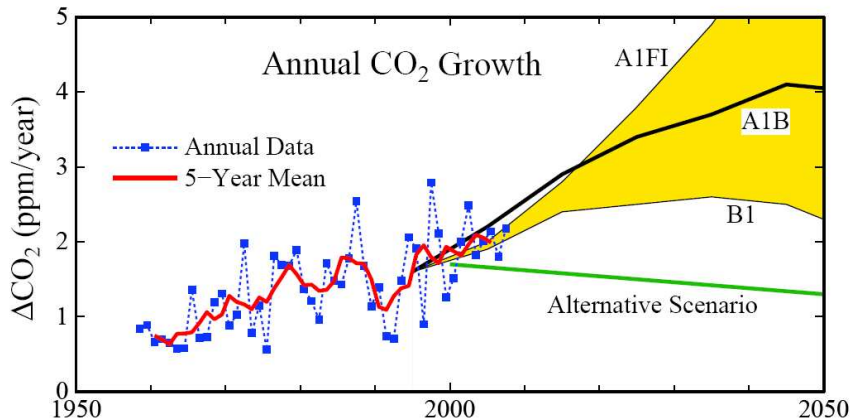
Figur 14. Atmosfærisk karbondioksid i deler per million deler luft (ppm) ved Mauna Loa, Hawaii. (Data fra Tans m. fl. NOAA/ESRL Web site: <http://www.esrl.noaa.gov/ccgg/trends/>.)



Figur 15. Globalt karbonkretsløp (enheter er gigatonn, lik en milliard metriske tonn).



Figur 16. Utslipp fra fossilt drivstoff og delen i prosent som blir igjen i atmosfæren. (Utslipp fra Boden m. fl., ORNL/CDIACs Web site, http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html. Data om delen som blir igjen er oppdatert fra Hansen og Sato, "Greenhouse Gas Growth Rates.")



Figur 17. Årlig vekst i karbondioksid i atmosfæren som observert fram til 2008, i scenarier fra IPCC (2001) og i det alternative scenario fra Hansen m. fl. (2000). Observasjonene er oppdatert fra Hansen og Sato, "Greenhouse Gas Growth Rates", med originale data fra NOAA/ESRL. Web site, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>.

Kilder

Hansen, James, "Is There Still Time to Avoid 'Dangerous Anthropogenic Interference' with Global Climate? A Tribute to Charles Keeling," presentation at the American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, Desember 6, 2005, http://www.columbia.edu/~jeh/2005/Keeling_20051206.pdf.

Hansen, James and Makiko Sato. "Greenhouse Gas Growth Rates," *Proceedings of the National Academy of Science* 101 (16 november 2004): <http://www.pnas.org/content/101/46/16109.full>.

Hansen, James, Makiko Sato, Reto Ruedy, Pushker Kharecha et al. "Dangerous Human-made Interference with Climate: A GISS ModelE Study," *Atmospheric Chemistry and Physics* 7 (7. mai 2007): 2287-312, <http://www.atmos-chem-phys.net/7/2287/2007/acp-7-2287-2007.html>.

11. Hva er farlige klimaendringer? (fra side 140)

Spørsmålet om hva som er det "farlige" nivået for drivhusgasser har vært diskutert i lang tid. Tilbake i 1981 konkluderte mine medforfattere og jeg (i et arbeid "Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide", publisert i *Science*) at alvorlige effekter av klimaendringer kunne gjøre det nødvendig å la store deler av kullreservene ligge igjen i jorda. Og i 1992 undertegnet de fleste land i verden, inkludert USA, *FNs rammekonvensjon for klimaendringer*, med formål å stabilisere drivhusgasser i atmosfæren på et nivå som ville unngå "farlige" klimaendringer.

Sent i 1990 begynte jeg å arbeide eksplisitt med spørsmålet om hva det farlige nivået kunne være. Jeg ønsket også bedre innsikt i spørsmålet om pådriv fra karbondioksid blir oppveid eller utsatt av andre menneskeskapte pådriv.

Resultatet av denne forskningen var vårt arbeid med et alternativt scenario, publisert i 2000. Vi konkluderte at karbondioksidnivået i atmosfæren helst måtte holdes lavere enn omtrent 450 ppm. Og det kunne tillates at det ble så høyt bare dersom andre gasser, spesielt metan og troposfærisk ozon, ble redusert under dagens nivå, en oppgave som vi mente var mulig, men ikke enkel. Et mål på 450 ppm ville bety en tilleggsoppvarming på 1 grad.

Hvor kom denne grensen på 450 ppm fra? Ikke fra klimamodeller, selv om det er enkelt å forstå hvorfor folk tror det – de hører det igjen og igjen, fra mennesker med en betydelig interesse i å tildekke realiteten i trusselen om klimaendringer og hvorfor det haster med å gjøre noe. De vet, akkurat som nazistenes propagandaminister Joseph Goebbels visste, at dersom du repeterer noe tilstrekkelig ofte, vil mange begynne å tro det. Og de vet det er lett å finne feil i klimamodeller, som fremdeles er uperfekte bilder av den reelle verden. Grensen på 450 ppm kom i virkeligheten ved å se på det vi vet om jordas historie – forbausende detaljerte data som viser hvordan jorda reagerte i fortiden på endringer i klimapådriv, inkludert endringer i atmosfærens sammensetning.

Sivilisasjonen utviklet seg i og tilpasset seg til klimaet i holosen, den stabile, relativt varme perioden som har eksistert i omtrent 11000 år. Det har vært tidligere mellomistider – de varme intervallene mellom istider – gjennom de siste flere hundretusen år som var varmere enn holosen; så mye som noen få grader varmere ved polene, men bare omtrent 1 grad varmere i globalt gjennomsnitt.

Min tese var at jorda gjennom disse mellomistidene var rimelig lik jorda i dag. På den annen side, dersom vi går tilbake til forrige gang jorda var 2 til 3 grader varmere enn i dag, noe som betyr midt i pliosen, omtrent for tre millioner år siden, var det en annerledes planet. Havnivået var omtrent 25 meter høyere enn i dag. Florida lå under vann. Omtrent en milliard mennesker lever nå i slike områder. Det kan ta lang tid før en så stor stigning i havnivået er fullført – men dersom vi er dumme nok til føre planeten videre i denne retning, vil disintegrasjon av innlandsis trolig fortsette ut av kontroll.

Målet om 1 grads oppvarming som vi kom fram til, er relativt til temperaturen i 2000. Jorda ble oppvarmet med omtrent 0,7 grader mellom 1800-tallet og 2000, noe som fikk global temperatur i 2000 opp på høyden med det varmeste nivået i holosen. Så grensen for oppvarming, som vi foreslo, var 1,7 grader fra det preindustrielle klima, like før oppvarmingen startet på slutten av 1880-tallet. Vårt forslag for grensen for global oppvarming var bare noen få tideler grader strengere enn målet på to grader som EU har foreslått de siste få årene, og som de fortsetter å anbefale i dag.

Uheldigvis, hva som siden er blitt klart, er at en oppvarming på 2 grader, eller til og med 1,7 grader, er et katastrofescenario. For å klargjøre hvorfor jeg kan si

dette med overbevisning, må du vite mer om hva som har foregått innen klimaforskningen de siste årene.

Selv da jeg først foreslo en grense på 1 grad for oppvarming, og i tillegg en grense for karbondioksid på 450 ppm, var jeg klar over en irriterende viktig detalj – men som jeg sopte under teppet. Detaljen var belegg for at havnivået i forrige mellomistid, for omtrent 125000 år siden, trolig hadde nådd et nivå omtrent 4 til 6 meter høyere enn i dag. En stigning i havnivået på 5 meter ville oversvømme det meste av Florida, Bangladesh, flate kystnære områder i Europa og talløse kystbyer rundt omkring i verden.

Min grunn for å feie bekymringene om havnivået under teppet, var troen på at innlandsis, og dermed havnivået, bare kan endre seg svært langsomt. Om det er tilfelle, kan menneskeheten ha tusen år på seg til å finne ut hvordan en kan få den atmosfæriske sammensetningen tilbake til trygge nivåer eller tilpasse seg et havnivå i endring. Denne tanken syntes å være støttet av modeller for innlandsis og ved paleoklimatiske dataserier for havnivå.

Over de siste årene har beleggene for dette smuldret bort. Dessverre for oss trenger innlandsis likevel ikke tusenvis av år for å disintegre.

For det første, som argumentert i mitt arbeid "Slippery Slope" fra 2005 og diskutert senere, ble det klart at modeller for innlandsis ikke har med de fysiske komponentene som er kritiske gjennom et kollapsscenario. Denne svakheten har blitt bekreftet ved modellenes mangel på evne til å simulere raske endringer observert på Grønland og i Antarktis gjennom de siste få årene.

For det andre, troen på at innlandsis endrer seg langsomt er stort sett basert på gjennomsnittlige rater da de vokste og avtok gjennom jordas historie. Totalstørrelsen til innlandsis vokste og minket over titalls tusen år. Men innlandsis reagerte så sakte fordi dette er tidskalaen for endringer i jordas bane - tidskalaen for pådrivene som fikk innlandsisen til å vokse eller smelte. Disse langsomme orbitale endringene sier ingen ting om hvor raskt innlandsis vil respondere på et raskt pådriv. På den annen side, som jeg og fem medforfattere viste i et arbeid publisert i *Philosophical Transactions of the Royal Society* i 2007, var det intet markert etterslep mellom tiden for maksimum solart pådriv på innlandsisen og maksimum rate for smelting (maksimum rate for heving av havnivå). Med andre ord indikerer de paleoklimatiske data at innlandsis er i stand til å reagere raskt, med store endringer innen et hundreår. Havnivået mellom 13000 og 14000 år siden steg med en takt på 3 til 5 meter per hundre år gjennom flere hundre år.

For det tredje har belegg samlet seg opp gjennom de siste årene for at det ikke er uvanlig at havnivået fluktuerer med flere meter innen en mellomistid. Den mest fullstendige studie for den forrige mellomistiden ble publisert av geologen Paul Hearty og flere kolleger i 2007. De viste, fra belegg fra sediment og fossiler fra

strandlinje i Australia, Bermuda, Bahamas og andre steder, at havnivået var omtrent 2 meter over nåværende nivå mesteparten av tiden i denne mellomistiden, men nær slutten økte det til mellom 6 og 9 meter høyere enn i dag. Vannet må ha komt fra enten Antarktis, Grønland eller en kombinasjon av de to.

Heartystudien og andre viser at stabiliteten av havnivået i slutten på holosen ikke kan bli tatt for gitt. Det stabile havnivået i holosen kan relateres til det faktum at temperaturen toppet seg tidlig i holosen, og på et litt kaldere nivå enn i de fleste andre mellomistider – og denne varmetoppen ble etterfulgt av en liten avkjølingstrend.

Uansett hva som kan være grunnen til stabiliteten i havnivået, betydde den mye for utviklingen av sivilisasjonen, som før nevnt. Ikke bare ga det menneskene et matforråd med proteinrik mat fra havet, men den gjorde det også mulig å dyrke korn i estuarer og flate økosystem ved kysten. Under slike forhold kunne mat for menneskene bli dyrket av en del av befolkningen; slik kunne det skje en overgang fra en neolitisk livsform til urbant sosialt liv og utvikling av komplekse samfunn styrt av en stat.

Perioden med stabilt havnivå er nesten sikkert forbi. Men hvor vidt menneskeskapt økning i havnivået vil bli en sakte utvikling som når en hump av et maksimum på bare en meter eller så, eller hvor vidt det vil bli 10 meter på lengre sikt, med disintegrasjon av innlandsis, konstant trussel for kystbyer med stadig ny tegning av kystlinjer globalt, avhenger av den politikken som føres på kort sikt. Jeg tror det er mulig å holde stigningen i havnivået på en liten hump, men det vil kreve at mengden av karbondioksid snart når en topp for deretter i det minste begynner en moderat nedgang.

Havnivået er en av de to konsekvensene av klimaendring som jeg tror bør toppe lista over hva som er "farlig", fordi effektene er så store og fordi det ville være irreversibelt på en hver tidsskala som menneskeheten kan tenke seg. Det tar tusenvis av år å bygge en innlandsis fra snøfall. Fornuftig tilpasning til en stor stigning i havnivået er nesten umulig, for så snart en rask disintegrasjon starter, vil havnivået endre seg kontinuerlig i hundrevis av år. Det ville bli praktisk vanskelig å opprettholde kystbyer.

Den andre konsekvensen av klimaendring på toppen av "farlig"-lista er utryddelser av arter (tap av biologisk mangfold). Menneskelig aktivitet har allerede økt takten for utryddelse av arter langt over det naturlige nivået. Utryddelse skjer etter som mennesker mer og mer tar over habitat for dyre- og plantearter. Vi avskoger store områder, erstatter stepper med rikt biologisk mangfold og skoger med avlinger med monokultur, og innfører fremmede dyre- og plantearter som noen ganger fortrenger de innfødte artene.

De menneskeskapt klimaendringene, med et unaturlig raskt skifte i klimasonene, kan bli et nytt overveldende stress som kan drive en stor del av artene på planeten mot utryddelse. Vår forståelse av denne trusselen, som i tilfellet med innlandsis og havnivå, avhenger spesielt av informasjon som vi får fra jordas historie og i tillegg observasjoner om hva som hender i dag. Det er også en annen analogi mellom endring i havnivå og utryddelse av arter: Smelting av innlandsis og utryddelse av arter presenterer begge ikkelineære problem (*ikkelinearitet*) – det er en fare for å passere visse vippepunkt, der dynamikken i systemet tar over med raske endringer som er ute av kontroll for mennesker.

Dyr flytter seg faktisk. Planter migrerer også. Jordas skapninger, unntatt en art, har ikke en termostat i stua som de kan justere for optimale omgivelser. Dyr og planter har tilpasset seg spesifikke klimasoner, og de kan bare overleve dersom de er innenfor disse sonene. Forskere definerer faktisk ofte klimasoner ved den vegetasjon og det dyrelivet som finnes der. Gartnere og fuglekikkere vet godt om dette, og deres håndbøker inneholder kart over soner der et tre eller en blomst kan overleve og området for hver fugleart.

Slike kart blir allerede tegnet på nytt. Folk flest, som for det meste er opptatt av de mye større fluktusjonene i været fra dag til dag, legger knapt merke til at klima, det gjennomsnittlige været, forandrer seg. I 1980-årene brukte jeg en farget sekskantet terning som jeg håpte ville få folk til å forstå global oppvarming i sin tidligste fase. Bare to sider av terningen var rød, eller varm, de representerte sannsynligheten for å få en uvanlig varm årstid i perioden 1951 - 1980; og en side var blå, uvanlig kaldt. Den faktiske endring i frekvensene er allerede raskere enn dette – tallet på uvanlig varme årstider er nå omtrent 60 prosent, men den trenger å nå 67 prosent for at det skal bli fire røde sider på terningen.

Etter som klimaendringene fortsetter, må arter migrere for å overleve. Jeg ville ikke bekymre meg for mye for beltedyrene. Selv om deres intelligens er begrenset ettersom de finner måter å krysse elver på og motorveier med mange kjørefelt, er de tøffe, mobile krek som har overlevd klimaendringer i mer enn 50 millioner år. Sammenligne det med de ørsmå 200000 år som Homo sapiens har eksistert, eller selv 2 million år for våre forfedre, Homo erectus.

Problemet er større for andre arter. Økosystem er basert på vekselavhengighet – mellom for eksempel blomster og pollenbærere, jeger og bytte, gressetere og planteliv – så de mindre mobile artene påvirker overlevelsen for de andre. Selvsagt, arter tilpasset seg gjennom tidlige tiders klimaendringer. Men det som skjer nå, er at takten på klimaendringene drevet av menneskelig aktivitet når et nivå som langt overgår naturlige endringer. Og barrierer skapt av mennesker, slik som utbredelse av byer og homogene jordbruksområder, blokkerer mange migrasjonsruter. Dersom klimaendringene blir for store, vil naturlige barrierer, slik som kystlinjer, bety en undergang for noen arter.

Studier av mer enn tusen arter av planter, dyr og insekter (inkludert områder for sommerfugler kartlagt av lekfolk) har påvist en gjennomsnittlig migrasjon mot nord- og sydpolen på vel 6 km per tiår i siste del av det 20. århundret. Det er ikke tilstrekkelig raskt. Gjennom de siste 30 år har linjene som markerer regioner der en gitt gjennomsnittlig temperatur er fremherskende ("isotermer"), beveget seg mot polene med en rate på omtrent 30 km per tiår. Det er omtrent bredden på et fylke i staten Iowa. En gitt art kan derfor bevege seg opp til en rad med fylker tvers over USA per tiår.

Så lenge som den totale bevegelse av isotermene mot polene er mye mindre enn utstrekningen av habitatet, eller områdene der dyr lever, er effekten på artene begrenset. Men nå er bevegelsen ubønnhørlig mot polene og utgjør mer enn 150 km over de siste tiårene. Dersom drivhusgasser fortsetter å øke med takter som business-as-usual, vil bevegelsestakten for isotermer mer enn dobles i dette århundret til minst 100 km per tiår.

Arter med størst øyeblikkelig risiko er de i polart klima og biologisk mangfold i alpine regioner. Polare dyr vil i realiteten forsvinne fra planeten. Alpine arter vil bli fortrent høyere opp til mindre, steinrike områder med tynnere luft; slik vil også de i realiteten fjernes fra planeten. Noen få slike arter, som isbjørn, vil uten tvil bli reddet av mennesker, men overlevelse i dyrehager eller dyrereservat vil være til liten trøst både for bjørner og naturelskere.

Jordas historie gir et uvurderlig perspektiv om hva som kan skje. Fossiler i geologiske dataserier forteller oss at det har vært fem masseutryddelser de siste fem hundre millioner år – geologisk korte perioder da omtrent halvparten eller mer av alle arter på jorda forsvant for alltid. I hvert tilfelle overlevde livet, og nye arter utviklet seg over hundrevis av tusener eller millioner år. Alle disse masseutryddelsene hadde sammenheng med store og relativt raske endringer i atmosfærens sammensetning og klima. I den mest ekstreme utryddelsen, perm-triasutryddelsen, som deler periodene perm og trias for 251 million år siden, ble nesten alt liv på jorda tilintetgjort – mer enn 90 prosent av terrestriske og marine arter.

Ingen av disse hendene med utryddelse er forstått i detalj. Forskingen pågår etter som bedre metoder for å "lese stein" blir utviklet. Likevel vet vi tilstrekkelig for å gi et uvurderlig perspektiv på hva som allerede er blitt kalt den sjette masseutryddelsen, den menneskeskapte utryddelse av arter. Kunnskap om tidligere utryddelser kan informere oss om potensielle veier for fremtiden og kanskje gi oss anvisninger for våre handlinger, etter som den eneste art med makt og myndighet nå truer alle andre, og også seg selv.

Vi kjenner ikke til hvor mange dyr, planter, insekter og mikrober som eksisterer i dag. Vi vet heller ikke hvor raskt vi driver arter til tilintetgjørelse. Omkring to millioner arter – halvparten av dem er insekter, inkludert sommerfugler – er blitt katalogisert, men det oppdages flere hvert eneste år. Kanskje snakker vi om ti

millioner. Noen biologer estimerer at når alle mikrober, sopper og parasitter er talte, kan der være hundre millioner arter.

Fugler er bedre dokumentert enn de fleste. Alle har hørt om dronten, vandredua, elfenbensnebb – alle er borte – og trompetternen som til nå bare så vidt er reddet. Vi mister fremdeles en eller to fuglearter hvert år. Totalt har omtrent en prosent av fugleartene forsvunnet over de siste århundrene. Dersom tap av fugler er representativt for andre arter, vil flere tusen arter forsvinne hvert år.

Utryddelsestakten er for tiden minst ett hundre ganger større enn den gjennomsnittlige naturlige rate. Så frykten for at menneskene kan ha startet en sjette masseutryddelse er lett å forstå. Hvordan det vil gå er likevel fremdeles mye i det blå, og menneskeskapte klimaendringer vil trolig bli den bestemmende faktoren. Jeg vil argumentere for at dersom vi fortsetter på veien business-as-usual, med en global oppvarming på flere grader, da vil vi drive en stor del av artene, muligens alle arter, mot utryddelse. På den annen side, akkurat som for stabilitet av innlandsis, dersom vi får atmosfærens sammensetning under kontroll i nær framtid, er det fremdeles mulig å holde menneskeskapt utryddelse på et moderat nivå.

Det er viktig å beskrive de spesifikke hendelsene med utryddelse gjennom verdens historie, men vi bør først se på hvordan informasjon er samlet inn fra serier med fossiler. Fossiler er levninger, avleiringer eller spor av liv bevart i stein eller sedimenter. Døde organismer fra mikroskopiske størrelser til dinosaurer, hele eller biter, og vanligvis avsatt på havets bunn, innsjøer, myrer og sand fra bekker og elver, er bevart i sediment og steiner som har vært formet etter disse avleiringene ble gravlagt under tilstrekkelig trykk. En rekke metoder er nå tilgjengelige for å tidfeste disse avtrykkene, noe som gjør det mulig å katalogisere historien til arter på mange steder. Utryddelse er definert ved at en gitt art ikke lengre blir funnet noen steder i hele verden.

Årsakene til utryddelsen i slutten på perm, da livet nesten døde ut, er fremdeles debattert, men noen fakta er rimelig klare. Utryddelsen fant sted på en tid med massive vulkanutbrudd i Sibir, som spredde basaltlava over et område på størrelse med Europa i et lag som var opptil 3 kilometer tykt. Dette skjedde over en periode på omtrent en million år. En slik utstrømming av lava kan alene ha vært årsaken til utryddelsene – men det har vært andre og like store lavautbrudd i jordas historie uten et slikt ekstremt tap av liv. En faktor kan ha vært nitroøse gasser fra utbruddene inkludert sur nedbør produsert ved vulkansk svoveldioksid, som førte til stress på livsformene sent i perm.

Likevel, det største stresset på livsformene kan ha vært den sterke globale oppvarmingen som skjedde på denne tida, omkring 6 grader på lave bredder og sannsynligvis mer på høye bredder. Denne oppvarmingen var lenge en gåte for forskerne, fordi størrelsen og den langsomme takten i basaltutbruddene skulle ikke produsere tilstrekkelig karbondioksid til å gi en slik stor økning i

temperaturen. Det var bare ved hjelp av studier av *isotoper* av karbon i sediment fra slutten av perm at man fant fram til det som kan være en forklaring på størrelsen til den globale oppvarmingen.

Karbonisotoper er ekstremt viktige i klimastudier. Egenskapene til et element avhenger for det meste av tallet på protoner i dets kjerne. Noen elementer eksisterer i mer enn en form (forskjellige isotoper), avhengig av tallet på nøytroner i kjernen. Tallet på nøytroner har bare en liten effekt på elementets egenskaper, men denne lille effekten viser seg å være nyttig for klimastudier. Den mest vanlige for karbon, karbon-12, har 6 protoner og 6 nøytroner. Omtrent 99 prosent av karbonatomene i karbondioksid er karbon-12, og omtrent 1 prosent er karbon-13 som har sju nøytroner i kjernen.

Planter foretrekker karbon-12, det lette karbonet. Med andre ord, etter som planter vokser ved å ta karbondioksid ut av lufta, tar det mer karbondioksid som har karbon-12 enn hva en skulle vente fra dets innhold i lufta. Derfor har avleiringer i sediment fra biologisk materiale, slik som kull, en uvanlig stor del av lett karbon.

En av karakteristikkene til stein som ble dannet gjennom perm-trias, var en enda større del av lett karbon. Det betydde at atmosfæren på den tiden hadde en overveldende mengde lett karbon. Hvordan kan det ha seg? En mulighet var at en stor mengde kull ble brent gjennom denne perioden – det lå i overflaten og oksiderte. Men det ville kreve at nesten alt kull på planeten ble brent for å nå slike nivåer av lett karbon, og hvordan kunne kullet komme ut fra jorda? Det synes ikke plausibelt.

Den sannsynlige kilden til det lette karbonet er blitt klart i den siste tiåret eller så, etter som forskere begynte å fokusere på metanis, også kalt metanhydrat (eller *klarat*). Dette er essensielt frossen metan, med hvert metanmolekyl lukket i et "bur", eller krystall, av is. Store mengder metanis finnes i dag i arktisk tundra og spesielt under sediment på bunnen av havet i Arktis. Metanet er produsert ved bakteriell degradering av organisk materiale i en omgivelse med lite oksygen – med andre ord forråtnelse og oppløsning av restene av planter og dyr – som gir en enda høyere konsentrasjon av karbon-12 enn hva kull gir. Dette er det eneste oppbevaringsstedet på jorda med nok lett karbon for en sannsynlig forklaring på dataene fra perm-trias.

Mysteriet, med all det lette karbonet i lufta gjennom utryddelsene i perm-trias, ble altså løst til sist, men uklare detaljer gjenstår. De store lavastrømmene fra tundraen i Sibir kan ha vært årsaken til smeltingen og utløsningen av metanis fra tundraen og havbunnen. Det kan også ha vært global oppvarming på grunn av karbondioksid fra utbruddene av basalt i Sibir som smeltet metanisen. Dette forsterket den globale oppvarmingen, og ledet til den store oppvarmingen på 6 grader eller mer.

Det er fremdeles mange spørsmål og teorier om hva som eksakt skjedde gjennom utryddelsen i perm-trias og hvorfor den var så ødeleggende. Noen forskere tror at en asteroide kolliderte med jorda på den tiden, kanskje den hjalp til å utløse utbruddene av basalt i Sibir eller utløsningen av metanhydrat eller begge. Men det er ikke gitt noe overbevisende belegg for en asteroidekollisjon. De fleste geologer er enige om at metanhydrat spilte en rolle, sannsynligvis en stor rolle. Det fins simpelt hen ingen annen kjent kilde for slike store mengder med lett karbon. Det synes også trolig at den store globale oppvarmingen var en viktig faktor i denne krisa for livet på planeten.

Det som er sikkert er størrelsen på ødeleggelsene, og at det tok 50 millioner år før liv igjen utviklet seg til det mangfoldet som det hadde før denne hendelsen.

Andre mindre ødeleggende utryddelser har funnet sted senere og kan bli studert i mer detalj. Den berømte utryddelsen i kritt-tertiær, som utslettet omtrent halvparten av artene på planeten, inkludert dinosaurene, fant sted for 65 millioner år siden da en asteroide traff jorda og laget et over 150 km vidt krater på halvøya Yucatan i Mexico. En tror utryddelsen skyldes, i alle fall delvis, en massiv injeksjon av gass og støv inn i atmosfæren. Aerosoler i stratosfæren blokkerte for sollys i noen få år, noe som reduserte fotosyntesen og ga en midlertidige global avkjøling.

En litt mindre nyere utryddelseshendelse, for omtrent 55 millioner år siden, fortjener en nærmere undersøkelse, fordi den er mest relevant for menneskelig aktivitet. Termalmaksimumet i paleosen-eosen (Paleocene-Eocene Thermal Maximum, PETM) blir klassifisert som en mindre utryddelseshending – nesten halvparten av *foraminiferene* (mikroskopiske dyr med skjell) forsvant, men det var lite utryddelse av planter på land og dyr. Området for noe flora utvidet seg mot polene med hundrevis og til og med tusenvis av kilometer. Og mangfoldet, utbredelsen og kroppsstørrelsene til pattedyr forandret seg raskt.

Det skjedde en global oppvarming på omtrent 5 til 9 grader i PETM, nesten så mye som i perm-trias og sammenlignbar med oppvaringen som kan skje i det neste hundreåret eller så dersom utslipp av drivhusgasser forstetter som nå etter business-as-usual. Men det faktum at de fleste terrestriske artene overlevde PETM, betyr ikke at vi ikke trenger å være bekymret for effekten av framtidig global oppvarming, av to hovedårsaker. For det første skjedde PETM over tusener av år, ikke over hundreår. Det betyr at styrken i menneskenes trykk er ti ganger større. Klimasoner beveger seg nå ti ganger raskere mot polene enn i PETM. For det andre volder menneskene samtidig andre former for stress på dyr og planter, ved overhøsting, avskoging og ved å ganske enkelt å ta over store deler av planeten.

Vi trenger å grave dypere for å forstå PETM bedre, før vi trekker konklusjoner. PETM kan heller ikke tolkes isolert på en troverdig måte. Den trenger å bli satt inn i en bredere kontekst i jordas klimahistorie, som har mye å lære oss.

For kilder, se kapittel 13

12. Klimavariasjoner siste 60 millioner år (fra side 152)

Kjerner fra havbunn sørger for et lengre tidsperspektiv enn iskjerner. Det har eksistert innlandsis på planeten i millioner av år tilbake, men den har smeltet for lenge siden, deres informasjonsskatt er borte. Derimot har vi hatt et sakte dryss av materiale som har sunket ned til havbunnen, der det er blitt akkumulert i sediment gjennom millioner av år. Den viktigste informasjon i sediment for en klimatolog er skall fra mikroskopiske dyr kalt foraminiferer, eller i kortform foramer. Den viktigste klimakarakteristikk i foramer er forholdet de viser mellom oksygenisotoper.

Heng på! Dette er ikke vanskelig. Du vet allerede at elementer har forskjellige isotoper, avhengig av hvor mange nøytroner det er i atomkjernene. Nesten 99,8 prosent av oksygen er oksygen-16 med åtte protoner og åtte nøytroner. Men omkring to tideler av en prosent er tyngre oksygen-18 med 10 nøytroner.

Det fine med oksygen-18 er at den gir oss et termometer som vi kan bruke til å måle jordas temperatur over flere hundre millioner år. Alt vi trenger å gjøre er å måle andelen oksygen-18 i døde krittlegemer som levde i fortiden.

Det flotte med forskningen i våre dager er at vi kan lagre enorme mengder data virtuelt på et knappenålshode, og vi kan overføre data verden rundt på et sekund via internett. I juli 2007, da jeg bestemte meg for å studere oksygen-18 for perioden kenozoikum (eller jorda sin nytid, de siste 65 millioner år, fra tiden da dinosaurene døde ut til i dag), sendte jeg e-post til Jim Zachos, kanskje den mest profilerte ekspert på klima i kenozoikum. Makiko Sato og jeg lagde den endelige formen på figur 18, der oksygen-18 er konvertert til temperatur for hele perioden, men Zachos fortjener all kreditt for dataene og figurformatet. Jeg må nevne et triks, eller en forenkling som vi brukte, slik at ikke andre forskere slår meg i hodet. Men først må jeg beskrive dataene.

Kjerner av havsediment har blitt tatt ut mange steder omkring i verden. En får fram en kjerne ved å skyve et langt hult rør ned, låse røret i enden og dra det ut. Sedimentene som tas opp ble avsatt i tiden som strekker seg fra i dag (toppen) til millioner av år ned til bunnen av en lang kjerne. Det spesielle datasettet jeg brukte, ble hentet fra analyser av kjernens foramer, de mikroskopiske små skjellene som har levd nær havets bunn.

Skjell av foramer er laget av kalsiumkarbonat (CaCO_3). Disse ørsmå kalkdyrene vokser ved å ta kalsium og karbondioksid fra vannet, tilført et oksygenatom fra et vannmolekyl. Vannmolekylene i havet beveger seg omkring og støter mot hverandre med en hastighet som avhenger av vanntemperaturen. De lette

vannmolekylene, de til oksygen-16, beveger seg hurtigere enn de tyngre, og slik blir de lettere inkorporert i skjellene. Dersom vannet blir varmere, oppnår oksygen-16 enda større hastighet relativt til oksygen-18 og blir da inkorporert i skallet i enda større grad. Laboratorieeksperiment viser oss akkurat hvor raskt delen av oksygen-16 øker (eller oksygen-18 avtar) etter som temperaturen øker. Bingo – vi har et termometer.

Bortsett fra en ting. Det fins også en annen faktor som endrer forholdet mellom oksygen-16 og oksygen-18 i foramer. Fordi molekyler med oksygen-16 er lettere og beveger seg raskere, lykkes de bedre i å trenge gjennom overflatehinnen i havet og slippe unna til lufta – de fordamper lettere med andre ord. Dersom vannmolekylene som slapp unna kondenserer ut som regn, går de tilbake til havet, slik at delen av lett oksygen i havet forblir uforandret. Men dersom vannmolekylene blir snø som bygger innlandsis, har innlandsis lite oksygen-18. Etter som en innlandsisen blir større og større, blir delen av oksygen-18 som er igjen i havet større og større. Derfor avhenger mengden av oksygen-16 og oksygen-18 i foramskjell på så vel størrelsen av global innlandsis og temperatur. Denne tvetydigheten ødelegger termometeret, noe som skaper forvirring blant paleoklimatologer. Jeg gjorde en enkel antakelse for å omgå tvetydigheten. Geologiske data viser at fra begynnelsen av kenozoikum og inntil 34 millioner år siden, fantes det ingen stor innlandsis på jorda, slik virker foramtermometeret uten korreksjon i tidlig kenozoikum. Fra tiden like før Antarktis frøs til, til de tidligste istidene, var den totale endringen i oksygen-18 dobbelt så stor som den ville vært på grunn av kjente temperaturendringer mellom disse to endepunktene. Så min enkle antakelse var at gjennom denne perioden på 34 millioner år, vil variasjon i oksygen-18 alltid kunne bestemmes med lik vekt på endringer i temperatur og isvolum.

Men nå vil jeg ikke kjede dere mer. Du kan finne detaljer i "Target Atmosphere CO₂: Where should humanity aim?", fritt tilgjengelig i *Open American Sciences Journal* (2008). I dette arbeidet viste vi, fra uavhengige data for havnivå, at det å fordele endringer i oksygen-18 mellom temperatur og isvolum (havnivå) fungerte bra i begge periodene der dette kunne sjekkes: den raske klimaendringen da Antarktis frøs til og svingningene mellom istider og mellomistider i de siste flere hundretusen år. Dette var tidsrommene da antakelsen var mest tvilsom, noe som indikerer at det er en fornuftig tilnærming for hele perioden.

Selv den mest innbitte, antivitenskapelige klimaskeptiker må, når han forstår figur 18, innrømme at det er en av de mest interessante i hele verden. Den inneholder en enorm mengde interessant informasjon om jordas historie. Den forteller bemerkelsesverdige historier både om langsiktige klimavariasjoner over 65 millioner år og raske klimafluktuasjoner.

Legg først merke til at temperaturen for 50 millioner år siden, i tidlig kenozoikum, økte til 13 grader. Deretter, over de siste 50 millioner år, har kloden blitt kaldere. I de siste få millioner år, den kaldeste perioden, ble svingninger mellom istider og

mellomistider stadig større. Disse temperaturene ble målt i dyphavet ved foramer, men de forteller oss om overflatetemperaturen på høye bredder om vinteren, fordi det er årstiden og stedet der havets overflatevann blir tette og synker til bunns.

Tretten grader om vinteren i polare områder! Ja, jorda var mye varmere for 50 millioner år siden. Alaska hadde tropisk vegetasjon og krokodiller. Sammenlign det med de seneste istidene, i noen av dem dekket innlandsis Canada og nådde så langt sør som Kansas. Dette var svære klimaendringer, og mennesker hadde ingen ting med dem å gjøre. Homo sapiens eksisterte ikke før de siste to eller tre svingningene på høyre side av figur 18.

Figur 18 forteller flere historier. Det fins informasjon om de langsomme variasjonene i kurva, men også om de raske svingningene. La oss først se på den brede buen, den store oppvarmingen som kulminerte for 50 millioner år siden, fulgt av en avkjølede trend. Hva kan ha vært årsaken til slike enorme endringer i jordas overflatetemperatur? Det fins tre muligheter: endringer i energien som kommer inn til planeten, endringer i overflaten, og endringer i atmosfæren.

La oss først se på energien som kommer inn. Astronomer vet at vår sol er en normal stjerne med normal utvikling. Dette refererer seg til et diagram som viser hvordan en stjerne endrer seg etter som den blir eldre. Vår sol er en relativt ung stjerne, omtrent 4,6 milliarder år gammel. Den er fremdeles i en fase der den brenner hydrogen i sin kjerne, ved fusjon, for å danne helium. I denne fasen blir sola langsomt lysere. Over siste 65 millioner år har solas lysstyrke økt 0,4 prosent. Jorda absorberer 240 watt (per kvadratmeter i gjennomsnitt over planeten) av solenergien slik at solpådrivet over hele kenozoikum har vært en lineær økning på omtrent en watt. I seg selv skulle dette gi en langsom oppvarming i størrelsesorden en grad på 65 millioner år. Men planeten har faktisk blitt mye kaldere, så sola er ikke den største bidragsyter til klimaendringene vist i figur 18.

For det andre, la oss se på hvordan jordas overflate endret seg over 65 millioner år. Vi vet hvordan kontinentene bevegde seg, dels fra orienteringen av jordas magnetfelt som er fryst fast i magnetisert stein hardnet til på forskjellige steder til forskjellige tider. Figur 19 sammenligner den kontinentale fordeling ved begynnelsen av kenozoikum og i dag. Amerika var nærmere Europa og Afrika i tidlig kenozoikum og havnivået høyere fordi det ikke fantes innlandsis, men kontinentene lå tett opp til dagens bredder. Plasseringen av kontinentene påvirker klimaet, mest fordi refleksjon av solstråling er forskjellig mellom landområder og havområder som er mørkere. Likevel, klimapådrivet på grunn av endringer i posisjonen til kontinentene gjennom kenozoikum er bare i størrelsesorden 1 watt i gjennomsnitt over planeten.

For det tredje, la oss se på endringer i atmosfæren. Mengden karbondioksid i atmosfæren varierte fra så lite som 170 ppm i de seneste istidene til mellom 1000 og 2000 ppm i tidlig kenozoikum. Slik var de største mengdene med karbondioksid trolig tett opp til en tredobling av den minste mengden (170-340-680-1360). Store endringer i karbondioksid er vanligvis uttrykt i antall doblinger, fordi de infrarøde absorpsjonsbåndene (illustrert i figur 5) blir mettet etter som karbondioksid øker. I tillegg skjer absorpsjon i svake bånd og i kanten av sterke absorpsjonsbånd, men det trengs mer og mer karbondioksid for å produsere en bestemt økning i klimapådrivet. Resultatet er at pådrivet øker med omtrent 4 watt for hver dobling.

Altså, endringer i karbondioksid i kenozoikum ga et pådriv på rundt 12 watt – minst ti ganger større enn klimapådrivet fra endringer i tilført solenergi eller jordas overflate. Av dette følger at endringer i karbondioksid er den direkte årsak til de store klimasvingningene over de siste 65 millioner år.

Før vi ser på årsaken til denne endringen i karbondioksid, er det viktig å sjekke om dette pådrivet fra en drivhusgass har en størrelsesorden som svarer til de målte endringene i jordas temperatur. Dersom emnet klimasensitivitet virker for mystisk for din smak, så bare hopp over de neste tre avsnittene. Men om du tåler stoffet, vil det hjelpe deg å forstå noen av de viktigste spørsmål mht. global klimaendring, det som klimaforskerne er mest opptatt av for tida.

Jordas temperatur endret seg omkring 14 grader mellom 50 millioner år siden og de siste istidene (figur 18). Mellom 50 og 34 millioner år siden, en periode da det ikke var innlandsis på jorda, regner vi med at klimasensitiviteten var 3 grader for en dobling av karbondioksid (den empiriske klimasensitiviteten vi bestemte tidligere fra endringer mellom istider og mellomistider). Det betyr at det trengs et pådriv på fire tredeler ($4/3$) av en watt for en temperaturendring på 1 grad. Derfor krever en 8 graders temperaturendring mellom 50 og 34 millioner år siden et nesten 11 watts pådriv. Mellom 34 millioner år siden og siste istids maksimum ble klimasensitiviteten omtrent doblet på grunn av endringer i refleksjon av solstråling i jordoverflaten. Slik krevde en endring på 6 grader i denne perioden et pådriv fra drivhusgasser på 4 watt. Pådrivet fra drivhusgasser for den totale endringen i kenozoikum er omkring 15 watt om en antar at klimasensitiviteten er 3 grader for en dobling av karbondioksid uten innlandsis.

Slik er det estimerte drivhuspådrivet på 12 watt i seg selv tett innpå det som kreves for å forklare den målte temperaturendringen. Andre drivhusgasser med lang levetid, spesielt metan og lystgass, er ventet å forsterke pådrivet fra karbondioksid, det betyr at deres mengde i atmosfæren er ventet å være stor når planeten er varmere. I tillegg er det på tide å minne om at klimasensitiviteten på tre grader for en dobling av karbondioksid var utledet empirisk fra klimaendringer sent i kenozoikum. Ved de varmeste temperaturene i tidlig kenozoikum er det grunn til å mene at klimaresponsen bevegde seg inn i et forskjellig, vitalt viktig

klimaregime med høyere klimasensitivitet, som jeg vil diskutere med data fra temperaturmaksimum i paleosen-eosen.

Vi må også merke oss at temperaturendringer i dyphavet ikke er det samme som endring i gjennomsnittlig global overflatetemperatur. Differansen mellom dem må bli stor etter som temperaturen i dyphavet nærmer seg frysepunktet. Grunnen er at selv om overflaten fortsetter å avkjøles, vil temperaturen i dyphavet ikke nå frysepunktet. Likevel, selv gjennom de kaldeste periodene i hele kurva for kenozoikum (figur 18) – tiden mellom nåværende mellomistid og den siste istiden, da global overflatetemperatur endret seg 5 grader – var det en betydelig temperaturendring i dyphavet (3 grader). Men mens endring i global temperatur oversteg temperaturendringen i dyphavet sent i kenozoikum, er det omvendte sannsynlig gjennom den varme delen av temperaturkurva i kenozoikum. Hvorfor? Fordi endringene i overflatetemperaturen på høye bredder (som bestemmer temperaturen i dyphavet) overstiger endring i global gjennomsnittstemperatur. Og siden havtemperaturen i tidlig kenozoikum var langt borte fra begrensningene knyttet til frysepunktet, ble forsterkede endringer på høye bredder overført til dyphavet. Så alt i alt, selv om det nødvendigvis er usikkerhet i forbindelsen mellom endring i temperatur i dyphavet og endring av global gjennomsnittstemperatur, ser det ut som om de totale endringene i temperatur i overflaten er sammenlignbare med dem i dyphavet.

La oss nå vende oss til spørsmålet om hvorfor karbondioksid endret seg gjennom disse 65 millioner år. Merk først at karbondioksidet som ga de store temperaturendringene i kenozoikum, nødvendigvis kom fra reservoarer i den faste jord (fra bergarter eller fossile karbonlagre; se figur 15). Alternativet – overføring av karbon mellom reservoarene i overflaten (atmosfære, hav og biosfære) – er viktig for endringer mellom istider og mellomistider som en klimatilbakekopling, men dette forandrer atmosfærens karbondioksid bare med omtrent 100 ppm, ikke 1000 ppm.

Den faste jord er både en karbondioksidkilde og et sluk for reservoarer i overflaten. Kilden for karbondioksid finner en ved kanten av kontinentale plater i bevegelse, der hvor jordskorpen under havbunnen dykker ned. Hva betyr det? Kontinentene består av relativt lett materiale, typisk granitt. Skorpen under havbunnen består av tyngre bergarter, typisk basalt. Både kontinenter og jordskorpen under havet er lettere enn massene dypere nede, og disse er litt mobile på grunn av konveksjon dypere ned i jorda (se *konveksjon* i atmosfæren). Energien som driver bevegelsen av jordskorpa kommer fra mindre mengder varme utløst ved radioaktive stoffer i jordas indre. Etter som kontinenter beveger seg, vanligvis med en hastighet på flere centimeter per år, kan de komme over jordskorpen under hav. Intens varme og trykk på grunn av kontinentet som beveger seg, forårsaker smelting og metamorfose av havets jordskorpe, noe som produserer karbondioksid og metan fra kalsiumkarbonat og organiske sediment på havbunnen. Gassene kommer til overflaten i vulkanutbrudd og i kilder med

karbonholdig vann og gass. Dette er hovedkilden for karbondioksid fra den faste jord til reservoarer i overflaten.

Det viktigste sluket for karbon - dvs. returflyt av karbon til den faste jord – skjer via forvitring av stein. Kjemiske reaksjoner kombinerer karbondioksid og mineraler, ingredienser som føres av sted med bekker og elver til havet og som synker ned til havets bunn som karbonsediment. Et mindre, men fremdeles viktig karbonsluk er sedimentering av organisk materiale i havet, innsjøer og sumpområder. Noe av dette organiske materialet vil etter hvert danne fossile karbonlagre og metanhydrater.

Et nøkkelpunkt er at kilden og sluket i den faste jord ikke er likt til enhver tid. En slik ubalanse får karbondioksid i atmosfæren til å variere. For eksempel er flyten av karbondioksid til atmosfæren større når kontinentaldriften skjer over en region med en jordskorpe under havet rik på karbon.

En kvalitativ forklaring på de store klimaendringene i kenozoikum og et bilde på den faste jords rolle i karbonkretsløpet i denne perioden, lekker nesten ut av figurene 18 og 19. Gjennom perioden fra 60 til 50 millioner år siden, bevegde India seg omtrent 20 centimeter i året, som er uvanlig raskt for kontinentaldrift. India var på vei mot nord gjennom en havregion som nå kalles Det indiske hav, og som lenge hadde vært et område der de viktigste elvene i verden hadde lagt fra seg karbonsediment. Uten tvil hadde de karbonrike sedimentene på havbunnen dykket under den indiske kontinentplaten. Da for 50 millioner år siden, krasjet India mot Asia med den indiske platen under den asiatiske platen. Kollisjonen mellom de kontinentale platene skjøv opp fjell i Himalaya og Det tibetanske platået, slik at store mengder nydannet fjell ble utsatt for forvitring. Da Indias ferd over det karbonrike havet var over, minket utslippene av karbondioksid og planeten begynte en langsiktig avkjølingstrend.

En kvantitativ analyse av historien for karbondioksid i atmosfæren er utført i vårt arbeid "Target CO₂" nevnt tidligere. Vi beregnet en mengde ulike mulige utviklinger for karbondioksid som kan passe med den observerte temperaturkurven (figur 18), historier som tar hensyn til usikkerhet i forholdet mellom temperaturen i dyphavet og overflaten. Vi estimerte maksimum mengde karbondioksid for 50 millioner år siden til 1400 ppm, med en usikkerhet på omtrent 500 ppm. Mengden av karbondioksid for 34 millioner år siden, da Antarktis ble kald nok til å kunne bære store innlandsis, ble funnet å være 450 ppm med en usikkerhet på 100 ppm. Beregnede verdier for karbondioksid faller innenfor en bred rekke av estimat basert på flere indirekte måter for å måle nivåer for karbondioksid i fortiden, som beskrevet i arbeidet "Target CO₂".

En slående konklusjon fra denne analysen er verdien for karbondioksid – bare 450 ppm, med estimert usikkerhet på 100 ppm – der overgangen skjer fra ingen innlandsis til is over Antarktis. Dette er en klar, sterk implikasjon for hva som utgjør et farlig nivå for karbondioksid i atmosfæren. Dersom vi brenner opp det

meste av fossilt brensel, dobler eller tredobler det førindustrielle nivået for karbondioksid, vil jorda helt sikkert ta en kurs mot isfrie forhold med et havnivå 75 m høyere enn i dag. Det er vanskelig å si hvor lang tid det vil ta for en fullstendig smelting, men så snart smeltingen av innlandsis er godt i gang, vil det være umulig å stoppe den.

Med karbondioksid som det dominerende klimapådriv, slik det er i dag, vil det med andre ord være ekstremt dumt og farlig å la karbondioksidnivået nærme seg 450 ppm.

Vi vet helt sikkert at naturen endrer mengden av atmosfærisk karbondioksid og klima med svære utslag. Men vi må se på tidskalaer. Kilden for utslipp av karbondioksid fra den faste jord til reservoarer i overflaten er noen få titusendeler av én ppm per år. Det naturlige sluket, forvitring, har en lignende størrelsesorden. De naturlige kilder og sluk kan være ute av balanse, slik som da India krysset over Det indiske hav, med typisk en titusendel av én ppm per år. På en million år kan en slik ubalanse forandre karbondioksid i atmosfæren med 100 ppm, en svær endring.

Men menneskene øker nå, ved å brenne fossilt drivstoff, karbondioksid i atmosfæren med 2 ppm hvert år. Med andre ord, det menneskeskapt klimapådrivet er fire størrelsesordner – ti tusen ganger – kraftigere enn naturlige pådriv. Menneskene kontrollerer nå framtidens klima, selv om jeg her bruker ordet "kontrollere" på en måte som kan misforstås.

OK, jeg vet dette blir langt, men for dine barn og barnebarns skyld, la oss se litt nærmere på en annen historie i figur 18, en som er vitalt viktig. Jeg referer til PETM, paleosen-eosen termalt maksimum, den raske oppvarmingen på minst 5 grader som fant sted for omtrent 55 millioner år siden og som forårsaket en mindre katastrofe med utslettelse av liv, mest marine arter.

PETM ser ut som en eksplosjon i figur 18, og for paleoklimatiske standarder er den eksplosiv. Karbonisotoper i sediment avsatt gjennom PETM, viser at det skjedde et svært utslipp av lett karbon til atmosfæren – omkring 3000 gigatonn karbon, nesten like mye som all karbon i dagens reserver av olje, gass og kull. Den ble injisert i to omganger, som hver ikke varte mer enn tusen år.

Den mest sannsynlige kilde for en slik rask injeksjon er metanhydrater i polare områder. Det fins mer enn nok metanis på kontinentalsokler i dag for en slik mengde lett karbon. Forklaringen ved metanhydrater er bredt akseptert, men den levner et vitalt spørsmål åpent: Hva satte i gang utløsningen av dette metanet? Var det en ekstern årsak eller en klimatilbakekopling? Svaret bærer i seg enorme konsekvenser for menneskeheten.

Dersom utløseren for metanhydratet var ekstern, slik som et utbrudd av varm magma nedenfra eller en asteroide som krasjet i havet i Arktis, da har ikke

menneskene noen innflytelse på om en slik prosess vil skje igjen. Og sjansene er små for at en slik ekstern hendelse vil skje igjen innenfor en tidsramme som de fleste mennesker vil bry seg om. Det har vært flere lignende hendelser med rask oppvarming i de siste 200 millioner år. Med den frekvens slike hendelser har hatt de siste 200 millioner år, er sjansen for at det skal skje igjen de neste hundre år mindre enn 0,00001 prosent.

På den annen side, dersom PETM og lignende utløsninger av metanhydrat var tilbakekoplinger, det betyr, om et klima i oppvarming fikk frossen metan til å smelte, da er dette en totalt forskjellig sak. I det tilfellet er det praktisk talt helt sikkert at utvinning etter prinsippet business-as-usual av alt fossilt drivstoff vil få dagens frosne metan til å smelte – det er bare et spørsmål om hvor snart det vil skje.

Dessverre peker nå paleoklimatiske data utvetydig på metanutløsning som en tilbakekopling. Dersom PETM var et isolert tilfelle, ville den tolkningen være mindre sikker. Men det er blitt funnet flere lignende tilfeller i epokene jura og paleosen. De ble, slik som PETM, utløst "astronomisk". Det betyr at toppene med global oppvarming, og sediment av lett karbon, skjedde samtidig med en varm fase i klimasvingninger forårsaket av endringer i jordas bane. Med andre ord, metanutløsning skjedde i tider med naturlig oppvarming.

Hvorfor produserer så metanhydrater en svær forsterkende tilbakekopling i et lite antall tilfeller, mens de fleste "astronomiske" oppvarminger gir lite eller intet belegg for en forsterkning ved metanhydrater? Denne merkelige oppførsel er faktisk akkurat hva som er ventet for metanhydrater.

Det største volumet av metanhydrater fins i kontinentale sokler i havet på toppen av sediment som går flere hundre meter ned i havbunnen, selv om en mindre del også fins i tundra. Det marine metanhydratet dannes i kystområder med høy biologisk produksjon. Et tilstrekkelig dryss av organisk materiale til havets bunn gir omgivelser med lite oksygen i sedimentene, noe som gjør at nedbrytning ved bakterier av organisk materiale gir metan. Dersom temperaturen er riktig, fryser metanet til hydrater.

Dersom det skjer en oppvarming som er stor nok til å smelte metanhydrat, vil hver liter med smeltet hydrat utvide seg til 160 liter metangass. En liten metanutløsning kan løse seg opp i havet, men et stort utbrudd kan boble opp til overflaten. Metan er en kraftig drivhusgass, og på en tidsskala på omtrent et tiår, oksiderer den til karbondioksid som vil fortsette å gi oppvarming i århundrer. Dersom oppvarmingen er tilstrekkelig stor, vil det meste av metanhydratet på kontinentalsokler smelte, slik som synes å ha vært tilfelle i PETM.

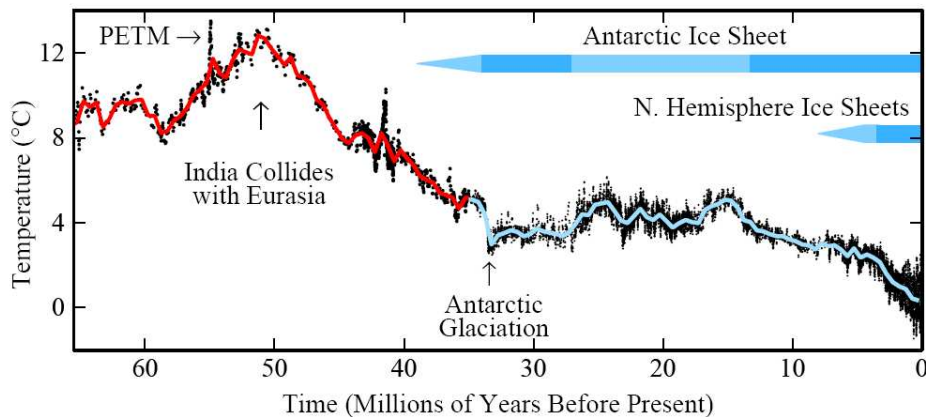
Dersom jordas lager av metanhydrat plutselig blir løst ut, slik som gjennom episoden PETM, trengs det flere millioner år for helt ut å gjenlade planetens arsenal av metanhydrat. Derfor hadde den neste hendelsen med metanhydrat,

omtrent 2 millioner år etter PETM, bare halvparten av styrken til PETM. Denne halve PETM ble etterfulgt av hyppigere og enda svakere oppvarminger med lett karbon. Episodene fant sted i forbindelse med topper i astronomiske oppvarminger gjennom en tid da jorda var på vei mot maksimal varme for 50 millioner år siden. Dette tyder på at en varmere jord gjorde smelting av metanhydrater lettere, men varmen tillot ikke reservoaret for hydrater å komme tilbake til størrelsen før PETM.

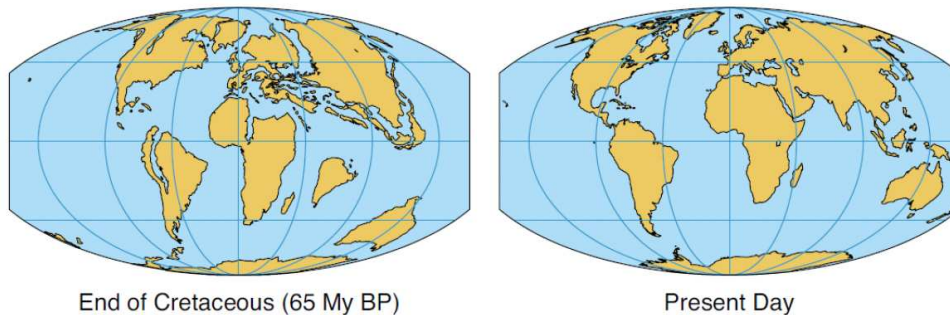
I dag, etter global avkjøling over titalls millioner år, er reservoaret for metanhydrat igjen ladet opp for fullt. Det er vanskelig å bestemme størrelsen fra noen få data. Men modeller for metanhydrat, som er konsistente med disse få dataene, indikerer et lager på omtrent 5000 gigatonn karbon i form av metanis og metanbobler. Derfor er dessverre ikke bare metankanonen ladet fullt ut, men mengdene er større enn det vi hadde før utbruddet ved PETM.

La oss likevel ikke haste til konklusjoner. Vi må se nærmere på PETM før vi diskuterer den sannsynlige skjebne til dagens frosne metan. Sammenligning av tiden for endringer i karbon og temperatur på flere steder i havet, viser at det skjedde en dramatisk endring i havsirkulasjonen ved tiden for den hurtige økningen av lett karbon og temperatur i PETM. Endringen i havsirkulasjonen tyder på at det viktigste stedet der tett overflatevann sank mot havbunnen, flyttet seg fra områdene rundt Antarktis til midlere bredder på den nordlige halvkule. Synkende vann på det nye stedet var også tett, men varmere og saltere. Det er sannsynlig at dette varmere vannet satte i gang smeltingen av metanhydrater. Metanet og karbondioksidet som ble dannet etter som metanet oksiderte, sørget for en forsterkende tilbakekopling som resulterte i en stor økning i global temperatur. Når havsirkulasjonen endret seg er usikkert, men den var trolig knyttet til en global oppvarming på 2 til 3 grader som fant sted like før hendelsen PETM (figur 18).

En siste ordinær, men oppklarende slutning fra PETM: Tiden for å gjenvinne ny likevekt fra overflod av karbon i atmosfæren og havet, og fra toppen i den globale oppvarmingen i PETM, var omtrent 100000 tusen år. Dette er tiden forutsagt i modeller for karbonkretsløpet. Det økte karbondioksidet i lufta øker forvitringen og karbonopptaket, som er en negativ tilbakekopling. Bekreftelse på denne gjenvinningstiden gir en brukbar test av modellene. Den er også en påminnelse om at dersom menneskene er så dumme at de brenner alt fossilt drivstoff, vil planetens klima ikke bli gjenopprettet på noen tidsskala som menneskene kan forestille seg.



Figur 18. Temperatur i dyphavet gjennom kenozoikum. (Se tekst. Originale data fra Zachos m. fl., "Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present.")



Figur 19. Plassering av kontinentene for 65 millioner år siden og i dag. (Data fra Hansen m. fl., "Target Atmospheric CO₂," basert på originale data fra Ron Blakey ved Northern Arizona University.)

For kilder, se kapittel 13

13. Grensen 350 ppm (fra side 164)

Slik var status for forskning om PETM, i det minste mitt perspektiv på den i midten av 2007, men den mest overraskende avsløring hadde vi til gode. Hansen satte på den tid en grense på 450 ppm for karbondioksid i atmosfæren for å unngå farlige klimaendringer. I en tale i desember 2007 satte han dette tallet lavere, til 350 ppm. Han skriver:

I den talen (på årsmøtet til American Geophysical Union, desember 2007) vektla jeg karbondioksid alene, og ikke ekvivalenter av karbondioksid for alle menneskeskapt gasser. Det forstyrrede karbonkretsløpet vil ikke ta seg opp igjen på titusenvis av år, og det er karbondioksid som bestemmer størrelsen på

forstyrrelsen. Andre pådriv er viktige og må minimaliseres, og noen kan være lettere å hanske med enn karbondioksid. Men politikere må forstå at de ikke kan unngå innskrenkninger i karbondioksid ved å kutte i andre kompenserende komponenter.

I tillegg til paleoklimatiske data dekket talen min pågående observasjoner av fem fenomen, som alle innebærer et mål om å holde atmosfærens innhold av CO₂ på maksimum 350 ppm. Her er de fem observasjonene i korte trekk.

(1) Arealet av sjøis i Arktis har minket raskere enn hva modeller har forutsett. Arealet på slutten av sommersesongen i 2007 var 40 prosent mindre enn sent på 1970-tallet da nøyaktige satellittmålinger startet. Fortsatt vekst av karbondioksid i atmosfæren vil ganske sikkert resultere i et isfritt Arktis på slutten av sommeren innen noen tiår, med negative effekter for urbefolkning og dyreliv. Det er vanskelig å tenke seg hvordan innlandsisen på Grønland kan overleve dersom isen i Arktis blir fullstendig borte om sommeren. Opprettholdelse av sjøis gjennom sommersesongen vil antakelig kreve en gjenoppretting av planetens energibalanse. For tiden er vårt beste estimat at det kommer omtrent 0,5 watt per kvadratmeter mer energi inn til planeten enn hva som blir emittert tilbake til verdensrommet som varmestråling. En reduksjon av mengden karbondioksid fra dagens 387 til 350 ppm, ville når alt annet holdes uforandret, øke den utgående strålingen med 0,5 watt, og slik gjenopprette planetær energibalanse.

(2) Isbreer i fjell minker over hele verden. Dersom utslippene øker som nå, vil det meste av breene være borte innen 50 år. Elver fra områder med isbreer sørger for ferskvann til milliarder av mennesker. Dersom breene forsvinner, vil det bli mye smeltevann og flom om våren, men mange tørre elver sent om sommeren og om høsten. Smelting av isbreene fortsetter raskt med dagens sammensetning av atmosfæren. Det beste vi kan håpe på er at en gjenoppretting av planetens energibalanse vil hindre en fortsatt smelting.

(3) Innlandsisene på Grønland og i Vest-Antarktis mister mer enn 100 kubikkilometer masse hvert år, og havnivået stiger mer enn 3 centimeter per tiår. Tydeligvis er innlandsisene ustabile med dagens klimapådriv. Isbremmer rundt Antarktis smelter raskt. Det er vanskelig å si hvor mye karbondioksid må reduseres for å stabilisere innlandsisene, men det er tydelig at 387 ppm er for mye.

(4) Data viser at subtropiske områder har utvidet seg mot polene med 4 breddegrader i gjennomsnitt. En slik utvidelse er en forventet effekt av global oppvarming, men den har gått raskere enn forutsagt. Tørre områder dekker større områder av USA, Middelhavslandene og i Australia. Hyppighet av skogbranner har økt med 300 prosent i vestre del av USA over de siste tiårene, og brannene dekker større områder. Innsjøene Lake Powell og Lake Mead er nå bare halvfulle. Klimaendringer er en hovedårsak for disse regionale

forflytningene, selv om dagens praksis for skogskødsel og mer bruk av ferskvann forsterker problemet.

(5) Korallrev, der en fjerdedel av alt marint biologisk mangfold befinner seg, lider under flere former for stress, der to av de mest alvorlige er forsurening av havet (*havets forsurening*) og varmere overflatevann, begge forårsaket av økende karbondioksid. Etter som karbondioksid i lufta øker, oppløser havet noe av dette og blir surere. Dette gjør det vanskeligere for dyr med karbonskjell eller skjellett å overleve – ja, tilstrekkelig surt vann oppløser karbonat. Pågående studier tyder på at korallrev vil ha en bedre sjanse for å overleve andre moderne stressfaktorer om karbondioksid ble redusert til mindre enn 350 ppm.

Jeg blir ofte spurt: Dersom vi vil opprettholde et klima som i holosen, hvorfor skal ikke da målet for karbondioksid være tett opp til det førindustrielle nivået på 300 eller 280 ppm? Grunnen er delvis at det fins andre klimapådriv utenom karbondioksid, og vi venter ikke at disse skal vende tilbake til førindustrielle verdier. Vi kan ikke fjerne alle veier, bygninger og andre menneskeskapt inngrep på jordas overflate. Vi vil heller ikke hindre alle aktiviteter som produserer aerosoler. Før vi kjenner til alle pådriv og forstår deres nettoeffekter, er det forhastet å være mer spesifikk enn "mindre enn 350 ppm", og det er unødvendig for politiske formål. Det vil ta tid å snu trenden i karbondioksid og begynne å få nivået ned mot 350 ppm. Ved det tidspunktet vil også kunnskapen, dersom vi kan utføre formålstjenelige målinger, være økt, og vi vil ha utstrakt empirisk erfaring om endringer i den virkelige verden. Vårt beste estimat i dag for planetens energibalanse, i gjennomsnitt over et tiår, er 0,5 watt per kvadratmeter. Å redusere karbondioksid til 350 ppm ville øke emisjon til verdensrommet med 0,5 watt per kvadratmeter og gjenvinne planetens energibalanse som en første tilnærming.

Det fins en lengre historie og flere grenser for usikkerhet for hvert av de fem fenomenene diskutert over. Etter den måten vitenskapen arbeider, må vi la advarslene bli utsatt for kritikk med et åpent sinn – hvis ikke vil vi ikke lykkes på lang sikt. Jeg vet at du ikke ønsker en lang historie, så jeg vil bare gi et eksempel. Eksempelet viser også hvordan de som arbeider for å diskreditere trusselen om menneskeskapt klimaendringer – jeg kaller dem kranglefanter (*contrarians*), andre kaller dem klimafornektende – bruker usikkerhet på en ukorrekt måte for å så tvil om alle konklusjoner, også slike som ligger rimelig fast. Ingen har funnet en god metode til å hankses med dette problemet, men vi kan ikke forandre måten vi driver vitenskap på, så vi må bare presentere dataene så godt vi kan.

Eksemplet er fra sjøisen i Arktis. Figur 20 viser arealet for sjøis som er igjen på slutten av sommersesongen (september på den nordlige halvkule). Skjebnen til sjøisen er viktig. Tap av isen vil påvirke stabiliteten til innlandsisen på Grønland, stabiliteten til metanhydrater i havsediment og tundra og biologisk mangfold. Legg merke til at isarealet i grafen fluktuierer fra år til år – det er som forventet;

atmosfæren og havet har signifikant "værstøy"; det vil si kaotisk variasjon som ikke er forutsigbar og ikke skyldes pådriv.

Helt til 2006 fulgte isen i Arktis nesten skriptet forutsagt av klimamodeller. Sjøisen var begynt å minke, bare litt hurtigere enn i klimamodellene. Da i 2007, skjedde en omfattende smelting som overrasket alle. Isarealet ved slutten av sommeren var bare omkring 4 millioner kvadratkilometer; tre tiår tidligere da nøyaktige satellittmålinger kom i gang, var den 7 til 8 millioner kvadratkilometer. Klimamodeller hadde ikke varslet et slikt tap før i midten av dette århundret.

Noen få (svært få) forskere antydte da at sommerisen kunne bli fullstendig borte på fem eller seks år. De politikerne som forstår farer og tror at forskere er forsiktige og beskjedne, hoppet på spekulasjonen som om det var fakta. Men som du kan se i figur 20, tok arealet av sjøis seg opp igjen i 2008 og 2009. Klimaskeptikere tok selvfølgelig denne nye meldingen som bevis på at det ikke fins grunnlag for uro. De triumferte også med at også sjøisen i Antarktis øker raskt. Det er faktisk grunn til å vente liten endring i sjøisen i Antarktis i den nærmeste tiden – kaldt vann fra kalving av isfjell fra en innlandsis som minker, gir en tendens til å øke dekket av sjøis. Kurva for Antarktis i figur 20 viser at det ennå ikke fins noen meningsfull trend.

Det er Arktis som er saken. Det er en utstrakt enighet blant forskerne at vi står over for en klar, overhengende trussel mot fortsatt eksistens av sommeris i Arktis. Jeg har ikke funnet en eneste forsker som tror at sjøisen vil overleve om verden fortsetter sin bruk av fossilt drivstoff etter business-as-usual. Det eneste spørsmålet synes å være hvor raskt isen vil bli borte og hvor stor tilbakekoplingen fra tundra, metanhydrater og Grønland vil bli.

Eksemplet med sjøis demonstrer hvor vanskelig det er å kommunisere vitenskapelige fakta. Klimaskeptikerne fyrer av sine fortolkninger, noen ganger ved å gå på akkord med sannheten. De demonstrerer vanligvis sin mangel på innsikt om hva som er viktig, men lykkes ofte i å forvirre folk. De blir lyttet til, ofte helt ute av proporsjon med deres vitenskapelige ståsted, delvis på grunn av støtte fra særinteresser og politikere influert av særinteresser, og ofte hjulpet av media, som liker å presentere to sider av en hver sak for å skape et inntrykk av at alle oppfatninger er like mye verd. Hva kan vi vente at folk skal tenke når en sammenligner en forsker som tar med betimelige advarsler, med en motstander som hopper på konklusjoner uten å nøle? Det kan jo ligne på en debatt mellom ulike teoretikere, og ofte er motstanderne mediavante. Ikke rart at det blir et økende gap mellom det som er forstått om global oppvarming av relevante forskere - og det som er kjent om global oppvarming av folk flest og politikere.

Hva kan en gjøre med denne situasjonen? Det fins ingen enkle gode svar, da hadde de alt vært funnet. Et forslag som jeg har kommet med flere ganger, er at President Obama ber Vitenskapsakademiet om en rapport om status for klimaforskningen og de følgene den bør ha for politiske beslutninger. Akademiet

som ble etablert av Abraham Lincoln for akkurat å gi slike råd, er blant de mest respekterte grupper forskere i verden. Gitt kakafonien om global oppvarming i media, er en slik autoritativ rådgiving nødvendig for å hjelpe oss å finne en hensiktsmessig politikk, også for å informere folket – men uten at en slik rapport uttrykkelig blir bestilt av presidenten, vil den ikke få mye betydning.

Kan forskerne selv hjelpe til med å forbedre kommunikasjonen slik at folk bedre kan bedømme disse sakene? Det er sagt at folk har mistet interessen for vitenskap, og det kan være sant. Men vi må fremdeles forsøke å kommunisere, bruke et mer forståelig språk, noe som krever en gjensidig innsats. Jeg håper på at flere vil være villige til å se på enkle vitenskapelige grafer med data. Grafer gir den mest kompakte, ærlige måte for presentasjon av informasjon, de gir innsikt om hva dataene viser og hjelper oss å skille mellom hva som er signifikant og hva som er mindre viktig. De kan hjelpe oss å vurdere hvilken vei klimaendringene tar, og hvordan drivfaktorene endrer seg. Fortsetter menneskeskapte klimapådriv på en kurs preget av business-as-usual, eller begynner de å snu mot en kurs som kan stabilisere klimaet? Fins det belegg for at forsterkende tilbakekoplinger beveger jorda mot en galopperende selvforsterkende drivhuseffekt, eller er disse tilbakekoplingene minkende? Det trengs innsats for å skaffe data, fordi noen av de viktigste størrelsene enten ikke blir målt eller blir målt med liten nøyaktighet. Vi har også å gjøre med en vitenskap i utvikling – nye viktige faktorer kan komme til som resulterer i flere grafer. Disse og grafer inkludert i denne boka vil bli regelmessig oppdatert på min webside slik at folk kan se hvordan ting endrer seg.

Global temperatur er en av diagnosestørrelsene for klima, men den er et produkt av mange drivfaktorer og inneholder en god del variasjon som ikke har noe å gjøre med klimapådriv. Ved å se på temperaturdata kan vi unngå den vanlige feil å blande lokale fluktuasjoner med globale klimaendringer. For eksempel var sommeren 2009 uvanlig kald over store deler av USA, noe som ga en ønskesituasjon for kranglefantene i deres forsøk på å forvirre folk. La oss se på dataene.

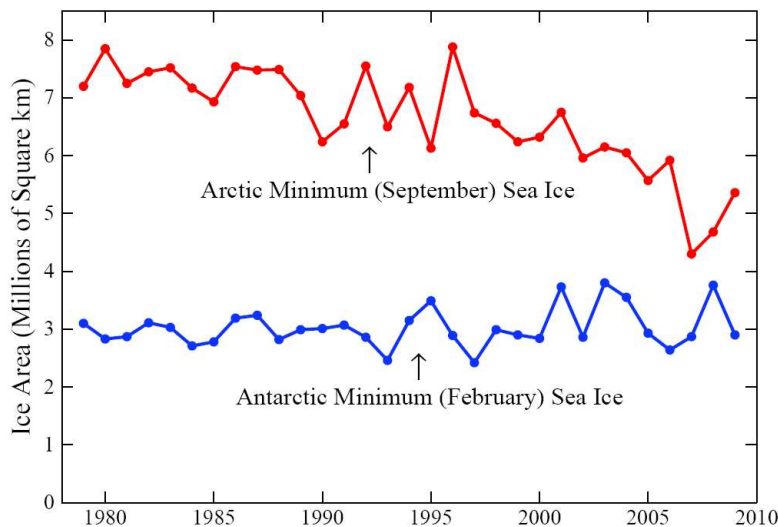
Figur 21 viser et globalt kart av avvik i overflatetemperatur for juni til ut august 2009. Temperaturavviket er differansen mellom den aktuelle temperaturen i juni-august i 2009 og gjennomsnittstemperatur i juni-august mellom 1951 og 1980. Denne perioden over 30 år synes passende for klimatologi som et referansepunkt da global oppvarming først ble en sak i 1980-årene, og det synes best å fortsette å bruke den som en fast referanse, heller enn å bruke en periode som hele tiden forandres. Den gir også referanseperioden for tiden da etterkrigstidens babyboom vokste opp, og er en tid som mange voksne kan huske.

Figur 21 viser at regionen med lav temperatur i USA og Canada var et unntak, ikke regelen gjennom sommeren 2009. Det globale gjennomsnittsavviket for juni-august 2009 var 0,6 grader, noe som gjorde den til den nest varmeste i perioden

med instrumentelle målinger (1880-2009). Året kan ha vært kaldt i USA, men uvanlig kulde på ett sted betyr ikke at global oppvarming er borte. Folk i USA må dessuten huske at alle 48 statene representerer bare 1,5 prosent av jordas overflate.

En må altså ikke blande vær og klima, som er det gjennomsnittlige været. Tre måneder er for kort tid til å jevne ut effekten av værsystem som beveger seg langsomt. Derfor inneholder gjennomsnitt over tre måneder fremdeles mye værstøy (*kaos*). Dette er grunnen til flekker med negative og positive temperaturavvik i figur 21. (Mine slektninger i Midtvesten bor tilfeldigvis på et sted med det kaldeste avviket i verden gjennom sommeren 2009.) Jeg har brukt en farget terning for å vise effekten av global oppvarming på frekvensen av varme sesonger. En side av terningen for inneværende tiår er fremdeles blå – for alle gitte lokasjoner forventer vi en sjanse ut av seks for en uvanlig kald sesong sammenlignet med klimatologi for 1951-1980.

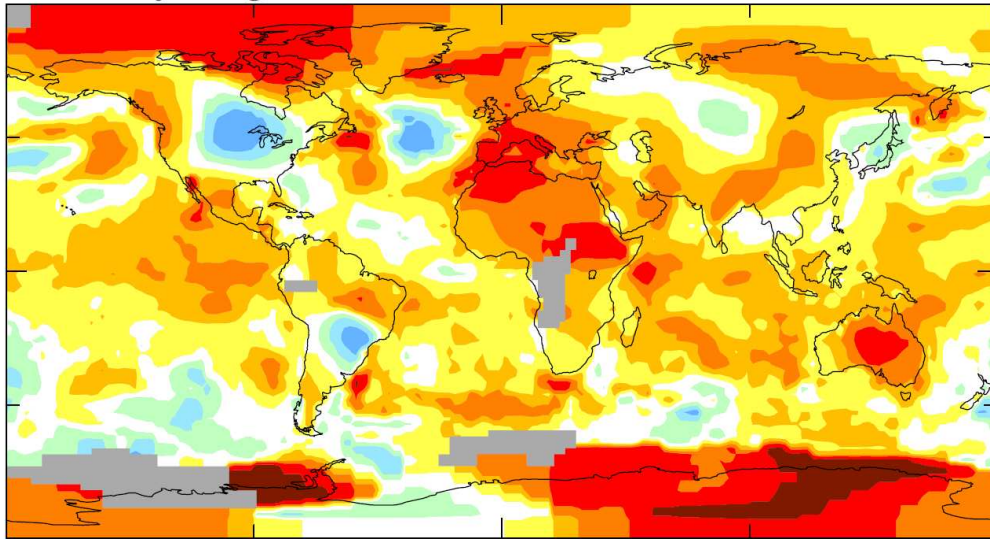
Gapet mellom folks forståelse og de vitenskapelige realiteter er nå enorm. Mens noen så vidt er blitt klar over eksistensen av global oppvarming, er de relevante forskerne – de som vet hva de snakker om – begynt å forstå at klimasystemet allerede er på kanten av vippepunkt. Dersom verden ikke endrer energipolitikken dramatisk over de neste få årene, kan vi godt passere punktet der det ikke er noen vei tilbake.



Figur 20. Areal av sjøis i Arktis og Antarktis i den varme årstiden. (Data fra National Snow and Ice Data Center, web site, http://nsidc.org/data/seaice_index/daily.html.)

June-July-August 2009

Global Mean = 0.59



-3 -2.5 -1.5 -1 -0.6 -0.2 .2 .6 1 1.5 2.5 3.8

Figur 21. Avvik i temperatur sommeren på nordlige halvkule 2009 relativt til 1951-1980. Det var den nest varmeste sommeren på 130 år, men det kaldeste avviket kom over USA. (Data oppdatert fra Hansen m. fl., "GIS Analysis of Surface Temperature Change.")

Kilder

Hansen, James, Makiko Sato, Reto Ruedy, Pushker Kharecha et al. "Dangerous Human-made Interference with Climate: A Giss ModelE Study," *Atmospheric Chemistry and Physics* 7 (7. mai 2007): 2287-312, <http://www.atmos-chem-phys.net/7/2287/2007/acp-7-2287-2007.html>.

Hansen, James, Makiko Sato, Pushker Kharecha, David Beerling et al. "Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim?" *Open Atmospheric Science Journal* 2 (2008): 217-31, <http://www.bentham.org/open/toascj/openaccess2.htm>.

Hearty, Paul, John T. Hollin, A. Conrad Neumann, Michael J. O'Leary, og Malcolm McCulloch. "Global Sea-Level Fluctuations During the Last Interglaciation (MIS 5e), *Quaternary Science Reviews* 26 (2007): 2090-112.

Zachos, James, Mark Pagani, Lisa Sloan, Ellen Thomas, og Katharina Billups. "Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present," *Science* 292 (27. april 2001): 686-93.

14. Venussyndromet (fra side 224)

Figur 29 viser bilder av jorda sammen med Mars og Venus. Jorda er den eneste av de tre planetene som er akkurat riktig plassert i forhold til sola for at liv skal kunne eksistere. Mars er for kald, Venus for varm. Temperaturene på disse planetene er påvirket av deres avstand fra sola og planetenes albedo, den delen av strålingen som reflekteres til verdensrommet. Men deres overflatetemperatur er også sterkt influert av mengden av drivhusgasser.

Mars har så lite gass i sin atmosfære at drivhuseffekten er neglisjerbar, og overflatetemperaturen er minus 50 grader. Drivhusgasser varmer jordas atmosfære med omtrent 33 grader slik at gjennomsnitt overflatetemperatur er omtrent 15 grader. Venus har så mye karbondioksid i sin atmosfære at den har en drivhusoppvarming på flere hundre grader. Overflatetemperaturen er 450 grader, varmt nok til å smelte bly.

Venus har en diameter omtrent 95 prosent av jordas. Venus og jorda, som en gang ble kondensert fra den samme blanding av gass og støv da solsystemet ble dannet, må ha startet med sammenlignbare atmosfæriske forhold. Derfor inneholdt den tidlige atmosfære på Venus store mengder vanndamp. Sola var 30 prosent mindre lyssterk på den tiden, derfor var Venus sannsynligvis kald nok til å ha hav på sin overflate. Men det varte ikke lenge. Etter som sola lyste sterkere og overflaten på Venus ble varmere, fordampet vannet, og en sterk drivhuseffekt fra vanndamp forsterket oppvarmingen. Etter hvert framsto det en *galopperende drivhuseffekt* med et kokende hav som fordampet til atmosfæren. Overflaten ble så varm at alt karbondioksid i planetens indre ble ført ut i atmosfæren. Det fantes så store mengder karbon i dypet at mesteparten av atmosfæren etter hvert besto av karbondioksid. I dag består atmosfæren på Venus av 97 prosent karbondioksid, og overflatetrykket er 90 bar, dvs. 90 ganger mer enn overflatetrykket på jorda, så stort at det ville trykke et menneske flatt, om det ikke først var blitt stekt.

Etter hvert forsvant vanndampen på Venus til verdensrommet. Ultrafiolett sollys bryter opp atmosfærens vannmolekyler til hydrogen og oksygen. Molekylene og atomene er i kontinuerlig bevegelse i atmosfæren. Noen av de lette hydrogenatomene ble etter oppbrytingen i stand til å unnsnippe planetens gravitasjonsfelt. Gjenværende oksygen kombinerte med annet materiale, for eksempel med karbon, for å danne karbondioksid. På denne måten forsvant vann fra Venus.

Kan vi finne bekreftelser på denne forklaringen på hvorfor Venus ikke har vann i dag, og at den må ha hatt vann da planten ble dannet? Ja, vi har målt isotoper av hydrogen i atmosfæren på Venus. Deuterium, som er tung hydrogen med en kjerne som inneholder en nøytron, forekommer ti ganger hyppigere i forhold til vanlig hydrogen på Venus enn på jorda og sola. Dette på tross av at sola, jorda og Venus er dannet fra den samme stjerneåke. Mengden av tung hydrogen på Venus gir et signal om at den har mistet hydrogen, fordi det lette hydrogenet, normalhydrogenet, lettere kan unnsnippe planetens gravitasjonsfelt enn det

tyngre deuterium. Dataene samsvarer med antakelsen om at Venus hadde hav i begynnelsen.

Venus gjennomgikk altså en galopperende drivhuseffekt. Kan det samme skje med jorda? Selvsagt, vi vet at så kan skje. Spørsmålet er heller hvor mye karbondioksid må øke (eller et annet klimapådriv) før den galopperende effekten slår inn.

En kan nærme seg spørsmålet ved å eksperimentere med klimamodeller. Jeg har nevnt at en må betrakte slike modeller med stor skepsis, men dersom vi er klar over deres begrensninger, og finner måter å teste dem mot virkeligheten, kan de hjelpe vår analyse. Jeg viser figur 30 fra arbeidet "Efficacy of climate forcings" som jeg publiserte med sju medforfattere i 2005. Grafen viser den beregnede globale temperaturendring etter simulering i hundre år dividert med klimapådrivet. Med andre ord viser den hvordan klimaet reagerer på enten et negativt (venstre del) eller et positivt (høyre del) pådriv. Men den viser bare en delvis respons på grunn av enkle simuleringer og fordi langsomme tilbakekoplinger, slik som tilbakekopling fra innlandsis, ikke er med. Figur 30 illustrerer resultat fra eksperiment med to forskjellige klimapådriv: endring i atmosfærens karbondioksid og endringer i solstrålingen.

Modellens klimasensitivitet viser en rask temperaturøkning enten ved store negative pådriv eller ved store positive pådriv. Kvalitativt er dette det vi vet må skje: Et tilstrekkelig stort negativt pådriv gir en galopperende snøballjord med frysetemperatur over hele kloden, mens et tilstrekkelig stort positivt pådriv gir en galopperende drivhuseffekt. Vi vet at denne U-formede kurva er korrekt – spørsmålet er, hva slags pådriv gir de skarpe økningene som gir galopperende tilstander?

Det kan ha vært svakheter ved modellen, dvs. unøyaktighet i representasjon av klimaprosesser, som kan ha gitt de bratte delene av grafen ved for små klimapådriv. Men de største usikkerhetene som vi kan identifisere, kan også arbeide i motsatt retning. Modellen brukt for å lage figur 30, hadde faste områder med innlandsis. Dersom innlandsis hadde blitt tillatt å vokse med et negativt pådriv og smelte med et positivt pådriv, og dersom tilstrekkelig med tid var blitt gitt for at smeltingen kunne skje, kunne de bratte delene av grafen ha funnet sted ved mindre pådriv. Begrenset empirisk belegg tyder også på at dersom planeten blir varmere, vil også andre drivhusgasser, i tillegg til karbondioksid og vanddamp, ha en tendens til å øke.

Disse betraktningene og modellresultatene tyder på at pådrivet som trengs for å nå en snøballjord, eller en tilstand med galopperende drivhuseffekt, ikke er mer enn 10 til 20 watt per kvadratmeter enten karbondioksid eller solstråling er definert som pådrivet. Endringen som trengs for en snøballjord er naturligvis et negativt pådriv.

Vi kan illustrere resultatet på en annen måte som kan være lettere å forstå. Det er bare for begrensede avstander fra en stjerne at en planet kan ha overflatetemperaturer for liv med flytende vann. Dersom planeten er nærmere sola, vil drivhuseffekten føre til at alt vann fordampes til atmosfæren. Dersom planeten er for langt fra sola, vil hav fryse hele veien til ekvator.

Denne begrensede, beboelige sonen var i flere tiår en kilde til frustrasjon for planetforskere. Problemet ble kalt paradokset "blek, tidlig sol". Hvordan hadde vår jord unngått å komme i en permanent snøballsituasjon i sin tidligste historie, da vi vet at sola strålte mye svakere? Og hvordan har livet overlevd en snøballjord? Den første enkle modell for jordas energibalanse, introdusert av den russiske klimatologen Mikhail Buydyko i 1960-årene, fant at dersom grensene for sjøis nærmet seg tropene, ville den forsterkende tilbakekopling fra økt albedo føre isen helt ned til ekvator. Den isdekte jordoverflaten ville reflektere det meste av solstrålingen. Slik kunne klima holde seg stabilt i denne snøballtilstanden selv om solas styrke skulle øke med så mye som flere prosent.

En løsning på paradokset ble klart i 1990-årene da en oppnådde mer detaljert geologisk belegg for jordas historie. Jorda har faktisk vært i en snøballtilstand flere ganger med is hele veien ned til ekvator. Feilen i tenkningen fra 1960-tallet var antakelsen om at jorda ikke kunne komme ut av en snøballtilstand. Forklaringen, foreslått av Joseph Kirschvink i 1992 og undersøkt i mer detalj av Paul Hoffman og Daniel Schrag, var at forvitningsprosesser, som tar karbondioksid ut av lufta, opphører i en snøballtilstand. Men kontinental drift og vulkanutbrudd vil fortsette. Derfor kan karbondioksid bygge seg opp i atmosfæren inntil den er sterk nok til å smelte isen på ekvator. Ved en slik tilstand ga den forsterkende tilbakekoplingen fra et mørkere hav som fortrenger is, en raskere smelting av is og en videre global oppvarming.

En annen feil i tenkningen på 1960-tallet skrev seg fra forenklingene i Budykos beregning av energibalansen. Det viste seg at en realistisk tredimensjonal klimamodell, som inkluderte havets dynamikk og årlige og daglige variasjoner i solstrålingen, ikke gir en hard snøball der havet overalt er dekket av et tykt isdekke. Snøballjorda var mer lik en ball med is og vann. Områder med åpent hav gjorde det lettere å forstå hvordan liv kunne overleve en snøballtilstand.

Livet synes å ha vært særlig dypt influert av en hendelse med snøballjord for omtrent 600 million år siden. Før denne tiden var de mest kompliserte organismene på jorda encellede protozoa (urdyr) og alger som bakterier – med andre ord, det eneste livet på jorda var grønt skum. Denne siste snøballtilstanden ble etterfulgt av en eksplosjon av liv i kambrium. Eukaryoter, celler med en membranformet kjerne, utviklet seg raskt inn i elleve forskjellige substansrekker. Disse elleve rekkene omfatter fremdeles alle dyr som noen gang har bodd på jorda.

Ved utgangen av snøballjorda var solstrålingen seks prosent svakere enn i dag. Det vil aldri igjen bli en snøballjord, fordi sola fortsetter å bli lysere. Med mennesker på jorda vil det faktisk heller ikke bli en ny istid. Jeg beklager at jeg tar et lite sidesprang, men jeg trenger å klargjøre et punkt som er relevant i denne diskusjonen.

Noen få geologer fortsetter å snakke som om de forventer at jorda vil gå inn i en ny istid, slik som den ville gjort om verden var uten mennesker. En istid ville begynne med at det utviklet seg en innlandsis over nordre Canada. Men hvorfor skulle vi tillate en slik is å vokse og utvide seg og etter hvert knuse store byer, når vi kunne hindre dette med drivhusgasser fra en eneste fabrikk for klorfluorkarbon? Mennesker er nå sjef for framtidens klima. Det er en triviell sak å unngå det negative netto klimapådriv som ville skyve planeten inn i en istid (og bevege tilstanden mot venstre i figur 30). Derimot er det ingen enkel sak å finne en måte å stoppe økningen av atmosfærens drivhusgasser på, spesielt karbondioksid (som beveger tilstanden mot høyre i figur 30), slik vi har diskutert.

Hvordan vil solas kontinuerlige evolusjon endre jordas klima på en lang tidsskala? Vår sol er en helt vanlig stjerne med middels størrelse. Den er 4,6 milliarder år gammel, den brenner fremdeles hydrogen og produserer helium ved radioaktiv kjernefusjon i solas kjerne, noe som utløser energi i prosessen. Den blir langsomt lysere. Etter som hydrogendrivstoff blir brukt opp og inert helium blir igjen i kjernen, vil sola utvide seg enormt til en rød gigantfase etter som den brenner hydrogen i sitt ytre skall. Sola som utvider seg, vil etter hvert "svelge" jorda omtrent 5 milliarder år fra nå. Dette er ingenting å bekymre seg over for deg og dine barnebarn. På den tid, dersom menneskeheten fortsatt eksisterer, vil vi over 200 millioner generasjoner ha utviklet teknologi til å slippe unna til et annet solsystem.

Menneskeheten vil måtte finne opp klimakontroll lenge før vår sol nærmer seg sin røde gigantfase. Om en milliard år vil sola være ti prosent lysere enn i dag. Klimapådrivet av dette, omtrent 25 watt per kvadratmeter, er helt sikkert nok til å føre jorda inn i en galopperende drivhuseffekt, som fordamper havet og utsletter alt liv på kloden. Men du og dine barnebarn trenger heller ikke å bry dere om den langsiktige endring i solas stråling, fordi den trenden er neglisjerbar sammenlignet med den som menneskene har satt i gang ved å tilføre drivhusgasser til lufta. I tillegg, lenge før sola blir 10 prosent lysere, vil menneskene vite hva som må gjøres for å skygge litt for sola, dersom de ønsker at liv, slik vi kjenner det, skal fortsette. Den nødvendige georingeniøroppgaven som kreves, ville være av en enkel, direkte type, som reflekterer en del av innfallende sollys tilbake til verdensrommet, en oppgave som sikkert vil bli enkel for en sivilisasjon som eksisterer i kommende tusenår, om den eksisterer da.

Denne kommentaren om georingeniøroppgaven krever en annen digresjon for å svare på et opplagt spørsmål: Hvorfor ikke bruke et slikt ingeniørtreks for å løse vårt nåværende problem med global oppvarming, og slik unngå nødvendigheten

av å få ned karbondioksid til mindre enn 350 ppm? Først, fordi karbondioksid må være mindre enn 350 ppm for å unngå problemet med forsurening av havet. For det andre er det å skygge for sola i dag, mye mer kostbart og vanskelige å implementere enn rasjonelle alternativer slik som energieffektivisering, fornybar energi og atomkraft. For det tredje er det generelt en dårlig ide å dekke over en effekt av forurensing med å innføre en ny; en slik framgangsmåte vil trolig ha mange uventede effekter. Det er vanskelig å holde tritt med naturen. Det er bedre å holde atmosfærens sammensetning og solstråling på det nivå som menneskeheten og naturen har tilpasset seg. Hensikten med å skygge for sola en gang i en fjern framtid, vil være å holde solstrålingen på et nivå som livet har tilpasset seg til.

Tillat meg å diskutere nærmere den andre av disse grunnene, hvorfor innføring av et slikt ingeniørtriks ikke er fornuftig nå. Geometodene koster penger, i motsetning til noen av de attraktive alternativene som mer enn betaler seg selv. Dette er i hvert fall tilfelle for energieffektivisering og atomkraft, i det minste for den måten atomkraft vil bli brukt på i land som India og Kina, land som kan forventes å ville velge modulære konstruksjoner og som kan begrense protester og byråkratisk sendrektighet som forsinker byggingen og driver opp kostnadene. De første tredje eller fjerdegenerasjons atomkraftverk vil være kostbare sammenlignet med kull uten karbonfangst, men nasjoner som makter å begrense byggeforsinkelser, skulle være i stand til å produsere nesten karbonfri, kostnadseffektiv atomkraft. Noe fornybar energi er kostbar relativt til fossilt drivstoff. Men det fins eksempler på at fornybar energi allerede er kostnadseffektiv, og utbygging av slik energi burde økes etter som økonomien forbedres. Likevel: Selv om førsteprioriteten må være energieffektivisering, fornybar energi og atomkraft, er det fornuftig å utføre forskning i geometoder for å finne ut hvilke valgmuligheter vi har i det tilfellet at fortsatt politikk etter prinsippet business-as-usual gir en planetarisk nødssituasjon som krever raske endringer.

Nå er vi klar for den viktige delen – å prøve å finne ut hvor nær vi er et klimapådriv som vil gi oss en galopperende drivhuseffekt. Inntil nylig brydde jeg meg ikke så mye om dette. Hvorfor? Fordi jeg visste at noen ganger i fortiden har det vært mye mer karbondioksid i lufta enn i dag, trolig noen få tusen deler per en million deler luft (ppm). Selv det å brenne opp alt fossilt drivstoff vil ikke gi slike mengder. Så da skulle vi vel kunne føle oss trygge?

Dessverre er det ikke slik. Det viser seg at det er tre faktorer eller forhold som endrer dette bildet, og hver av dem virker i ugunstig retning.

Den første faktoren er ikke den største, men jeg begynner med den fordi den er betydelig og fordi vi forstår den nøyaktig. I tidligere tider da det var mer karbondioksid, strålte sola svakere. For eksempel, for 250 millioner år siden strålte sola omtrent to prosent svakere enn nå. En endring på to prosent i solar irradians tilsvarer en dobling av innholdet av karbondioksid i atmosfæren. Så

dersom estimert mengde karbondioksid for 250 år siden var 2000 ppm, ville det bare trenge omtrent 1000 ppm karbondioksid for å skape et klima tilsvarende varmt, om en antar at andre faktorer er like. Med andre ord, det faktum at noen forskere har estimert at CO₂ var mye høyere tidligere i jordas historie, til og med noen få tusen ppm, betyr ikke at vi kan tolerere like mye karbondioksid nå uten å nå en galopperende tilstand, fordi sola lyser sterkere.

Faktor 2 gjelder målinger eller estimat av tidligere tiders karbondioksid. Vi har faktisk bare direkte målinger av karbondioksid for de seneste klimaendringene gjennom istider og mellomistider, dvs. perioden med data fra iskjerner – stort sett de siste en million år. Maksimum mengde karbondioksid i denne perioden var omtrent 300 ppm, inntil mennesker startet å bruke fossilt drivstoff. Estimater for tider før dette er basert på indirekte målinger (proksi), men slike indirekte sammenhenger har stor usikkerhet. Resultater fra mange forskjellige metoder er sammenlignet i vårt arbeid fra 2008, "Target atmospheric CO₂" (i det supplerende stoffet). Noen metoder gir mengder av karbondioksid i tidlig kenozoikum, mellom 65 og 50 millioner år siden, på 2000 ppm, mens andre metoder tyder på maksimumsmengder mindre enn 1000 ppm.

Visse metoder for å estimere tidlige tiders nivå av karbondioksid avhenger av antakelser om hvor høyt karbondioksid må ha vært for å gi tilsvarende temperaturendringer. Med andre ord avhenger disse av en antatt klimasensitivitet. For eksempel, med standard antakelse om klimasensitivitet, ble det estimert at å smelte en hard snøballjord – en jord der havet er tilfrosset til dyp på en kilometer eller mer – ville kreve enorme mengder karbondioksid. Nå har vi likevel lagt merke til at en hard snøballjord gir et urealistisk bilde på hva som virkelig har vært snøballforhold på jorda. Den transiente fasen i smeltingen av en snøballjord er heller ikke direkte relevant for å finne hva slags klimapådriv som trengs for en galopperende drivhuseffekt. Med andre ord, selv om mengden av karbondioksid i luften kan ha vært stor akkurat før og under planetens smelting, ville atmosfærens karbondioksid minke dramatisk gjennom tineprosessen, lenge før planeten kunne nå forhold for en galopperende drivhuseffekt.

Perioden kenozoikum er den beste perioden for å oppnå en empirisk evaluering av hvor nær jorda kan ha vært en tilstand med galopperende drivhuseffekt. Den gir mer nøyaktige data enn for tidligere tider, og den hadde mye varmere klima enn i dag, inkludert en isfri planet. I tillegg inkluderer perioden paleosen-eosen termalt maksimum (PETM), den raske oppvarmingen som er spesielt relevant for vår planets framtid. En ny analyse av PETM av Richard Zeebe, James Zachos og Gerald Kickens, publisert i *Nature Geoscience* midt i 2009, viser, tror jeg, virkelig dype implikasjoner for planeten.

For å forstå betydningen av den nye analysen av PETM og dens relevans for galopperende drivhuseffekt, må vi gå tilbake til figur 18, som viser temperaturen i dyphavet over de siste 65 millioner år, under en svært enkel antakelse om klimasensitivitet. Spesielt antok vi (i "Target Atmospheric CO₂") at den raske

tilbakekoplingen var 3 grader (for en dobling av karbondioksid) over hele perioden på 65 millioner år. Total klimasensitivitet var mye større gjennom de siste 34 millioner år på grunn av langsomme tilbakekoplinger, spesielt endringer i områdene for innlandsis. For å forsvare antakelsen om en sensitivitet på tre grader for en isfri planet, pekte vi på det faktum at dagens klima synes å ligge i midten av den flateste delen av kurva for klimasensitivitet (for rask tilbakekopling) vist i figur 30. Vi følte også at det var best å bruke den enkleste antakelsen før bedre informasjon blir tilgjengelig. Under antakelse av en klimasensitivitet på 3 grader, sluttet vi at maksimum karbondioksid sannsynligvis var mellom 1000 og 2000 ppm.

Figur 30 tyder på at et varmere klima kan ha en større klimasensitivitet, hvilket skulle bety at dagens klima ikke er svært langt borte fra en galopperende situasjon. Men dette er modellresultat – andre modeller kan vise noen annet. Empiriske resultat er mer meningsfulle. Studien til Zeebe-Zachos-Dickens gir et godt eksempel. De viser, basert på havdybden for forsurening og oppløsning av sediment av karbon, at karbonøkningen som ga oppvarmingen PETM, i høyden utgjorde 3000 gigatonn med karbon. De kommer fram til at mengden av karbondioksid i atmosfæren økte med omtrent 700 ppm fra et nivå på omtrent 1000 ppm til omtrent 1700 ppm. En slik økning av karbondioksid, mindre enn en dobling, ville øke den globale temperaturen med to grader, dersom en dobling av karbondioksid gir en sensitivitet på 3 grader. Zeebe-Zachos-Dickens konkluderer, "Våre resultat innebærer et grunnleggende hull i vår forståelse av hvor store utslag i global oppvarming som kan knyttes til store og bråe klimaforstyrrelser."

Fra et vitenskapelig ståsted er deres konklusjon formålstjenlig. Jeg tror vi kan føre den et skritt videre og foreslå at deres analyse gir belegg for at klimasensitiviteten i det varmere klimaet i tidlig kenozoikum var større enn 3 grader for en dobling av karbondioksid. Den favoriserer også en mindre verdi for forrådet av karbon i tidlig kenozoikum. Begge slutninger (at nivået for karbondioksid i tidlig kenozoikum kan ha vært mindre enn det som vanligvis antas, og at klimasensitiviteten var større enn i dag) gir grunn til økt engstelse for langtidseffekter ved å brenne fossilt drivstoff. Resultatene omkring PETM ville være lettere å forstå dersom nivået for karbondioksid før oppvarmingen i PETM var nærmere 500 ppm. Men selv da innebærer størrelsen på oppvarmingen PETM en klimasensitivitet større enn 3 grader for en dobling av karbondioksid.

Min konklusjon når det gjelder forhold 2, er at nye data tyder på at tidligere tiders forråd av karbondioksid ikke har vært så stort som en har trodd. Disse empiriske paleodataene tyder også på at klimasensitiviteten var større da planeten var varmere. Dette samsvarer med at verden har vært nærmere en tilstand med galopperende drivhuseffekt i tider da mengden med karbondioksid var større.

Faktor 3 gjelder tidsskalaen for klimapådriv og responsen. Karbondioksid som ga klimaendringer gjennom jordas historie, ble tilført atmosfæren mye langsommere enn menneskeskapte forstyrrelser. Langsommere tilførsel tillater at negative

tilbakekoplinger i kretsløpet for karbon kommer i spill. Selv reservoaret i den faste jord tar opp karbon på en skala på tusen år. De negative tilbakekoplingene er grunnen til, etter en rask injeksjon av metan (som raskt oksiderer for å danne karbondioksid) gjennom PETM, at mengden av karbondioksid og global temperatur ble gjenopprettet på en ganske kort geologisk tidsskala (figur 18).

Dersom vi velger å brenne alt fossilt drivstoff som finnes, vil injeksjonen av karbon til atmosfæren skje så raskt, på en tidsskala på et hundreår eller to, at kretsløpet for karbondioksid ikke vil få tid til å sette i gang dempende tilbakekoplinger. Pådrivet vil være sammenlignbart med det i PETM, men det vil bli tilført minst ti ganger raskere. Tiden havet trenger for å svare på et slikt pådriv er bare noen hundre år. Derfor vil ikke karbonkretsløpet, som gir dempende tilbakekoplinger, redusere oppvarmingen av havet nevneverdig. Et varmere hav kan ventes å påvirke stabiliteten til metanhydrat i en takt som kan overgå den i PETM, da endringene ble drevet av takten i klimatilbakekoplingen fra metanhydrat, og ikke ved en nesten øyeblikkelig injeksjon av alt fossilt drivstoff.

Tillat meg å kort oppsummere noen få fakta om PETM. Mange studier tyder på at oppvarmingen i PETM på 5 til 9 grader var forårsaket av injeksjoner estimert til 3000 gigatonn karbon, selv om noen estimat for karboninjeksjonen bare er halvparten så store. Studiet til Zeebe, Zachos-Dickens styrker overbevisningen om at injeksjonen av karbon i PETM ikke oversteg 3000 gigatonn. Dersom klimasensitiviteten den gang bare var 3 grader for en dobling av karbondioksid, peker studiet også på det inkonsistente i en slik (moderat!) injeksjon av karbon med en oppvarming på 5 til 9 grader. Tre tusen gigatonn er omtrent karbonmengden inneholdt i summen av olje, gass og kull i dagens fossile reserver. Men karbon i PETM kunne ikke komme fra fossilt drivstoff, siden det ikke fantes plausible mekanismer for å løse ut og brenne alt fossilt drivstoff den gang. Tvert om, det kan vises fra isotopsignaturer i karbon, som forklart tidligere, at injeksjonene i PETM var forårsaket ved å smelte metanhydrater. Det skjedde dramatiske endringer i havsirkulasjonen i tiden ved PETM, ved at dannelse av *dypvann* flyttet seg fra sørlige halvkule rundt Antarktis til nordlige halvkule. Det synes trolig at det varmere dyphavet som fulgte med endringen i sirkulasjonen, satte i gang en destabilisering av metanhydrat.

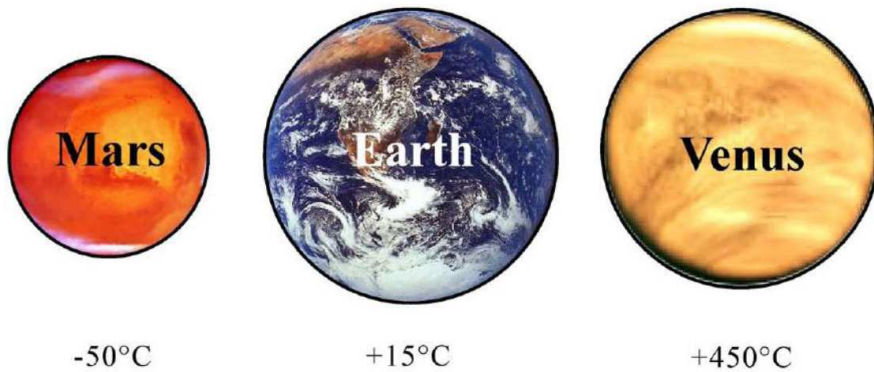
Tidsskalaen for havtemperaturen for å svare på mesteparten av et klimapådriv, er i seg selv bare hundreår. Men dersom menneskene brenner alt fossilt drivstoff, vil innlandsisen begynne å miste masse og for en tid kjøle av havet på høye bredder og forsinke full klimarespons til pådrivet. Avkjølingen på høye bredder vil ha viktige konsekvenser i disse områdene i det 21. århundret, noe vi diskuterer senere. Men avkjølingseffekten av isfjell vil ikke i nevneverdig grad øke tiden som trengs for det globale havet å bli varmet opp, som respons på å brenne alt fossilt drivstoff. Det trengs mindre enn 10 wattår med energi, i gjennomsnitt over hele planeten, for å smelte nok innlandsis til å heve havnivået en meter og å øke smeltevatnstemperaturen til gjennomsnittlig havtemperatur. Så snart som innlandsis starter å avgi masse raskt, vil den planetære energiubalansen trolig nå

flere watt. Så selv om hele volumet av is på planeten ble "kastet på" i havet, tilsvarende omtrent 75 meter i havets nivå, ville den planetære energiubalansen sørge for nok energi til å smelte all denne isen innen et hundreår eller så.

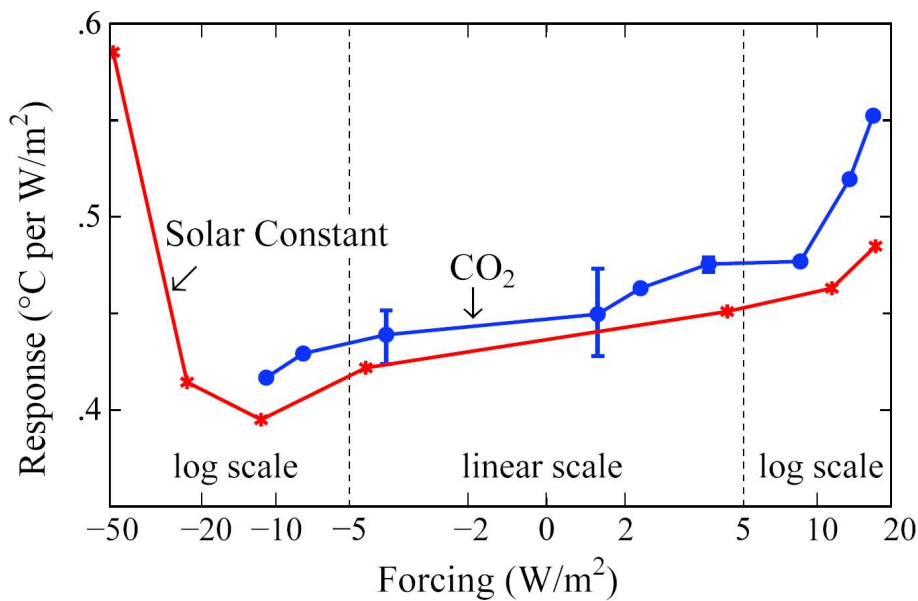
Min konklusjon med hensyn til forhold 3, tidsskalaene, er at de i stor utstrekning virker mot oss om vi brenner alt fossilt drivstoff. Dempene tilbakekopling fra karbonkretsløpet var viktig for å holde jorda borte fra en galopperende tilstand gjennom paleoklimatiske hendelser med global oppvarming. Slik demping vil ventelig ikke ha den samme effekt for å dra ned nivået for karbondioksid gjennom menneskehetens raske forbrenning av fossilt drivstoff. Havets termale treghet demper den globale oppvarmingen, og tillater at mer drivhusgasser akkumuleres før folk blir tvunget til å bry som om klimaendringer. Men det meste av klimaresponsen på utslipp fra fossilt drivstoff vil skje innen århundrer, mye av dette innen levetiden til våre barn og barnebarn.

De paleoklimatiske dataseriene har ingen parallell til klimapådriv av den størrelse og hastighet som vil skje om alt fossilt drivstoff blir brent. Modeller er ikke i nærheten av det stadiet at de kan forutsi nøyaktig når betydelig tap av is fra innlandsisene vil starte. Vi kan heller ikke si hvor nær vi er en instabilitet med metanhydrat. Men dette er spørsmål om når, og ikke om det vil skje. Om vi brenner alt fossilt drivstoff, vil innlandsis nesten helt sikkert smelte fullstendig, med en påfølgende økning i havnivået på omtrent 75 meter, det meste av dette trolig innen en tidsskala på noen hundreår. Metanhydrat vil ventelig bli mer omfattende og sårbart nå enn i tidlig kenozoum. Det er vanskelig å tenke seg hvordan metanhydrater kan overleve om havet har fått tid på seg til å bli varmet opp. I så fall kan en oppvarming som PETM legges på toppen av oppvarmingen fra fossilt brensel.

Vil jorda fortsette mot Venussyndromet når isen er borte, vil en galopperende drivhuseffekt ødelegge alt liv på planeten, kanskje permanent? Dette er vanskelig å si basert på nåværende informasjon, men jeg vil likevel konkludere at dersom vi brenner alle reserver av olje, gass og kull, er det en betydelig sjanse for at vi vil sette i gang en slik galopperende prosess i gang. Om vi i tillegg brenner alt oljesand og skiferolje, tror jeg Venussyndromet er sikkert som døden.



Figur 29. Jorda er "Goldilocks" planet, ikke for varm, heller ikke for kald, akkurat passelig for at liv skal eksistere.



Figur 30. Global temperaturendring i en klimamodell per enhet pådriv. (Data fra Hansen m. fl., "Efficacy og Climate Forcings.")

Kilder

Hansen, James, Makiko Sati, Reto Ruedy, Larissa Nazarenko en al. "Efficacy of Climate Forcings," *Journal of Geophysical Research* 110 (28 september 2005) D18104 (45 sider).

Hansen, James, "Climate Threat to the Planet: Implications for Energy Policy and Intergenerational Justice," Bjerknes Lecture, American Geophysical Union, San

Francisco, December 17, 2008,
http://www.columbia.edu/~jeh/2008/AGUBjerknes_20081217.pdf.

Zeebe, Richard E., James C. Zachos, og Gerald R. Dickens. "Carbon Dioxide Forcing Alone Insufficient to Explain Paleocene-Eocene Thermal Maximum Warming," *Nature Geoscience* 2 (13 juli 2009): 576-80.

15. Stormene til våre barnebarn (fra side 250)

Stormer. Dette er ordet som best vil karakterisere klima i det 21. århundret, dersom politikere forsetter på sin velkjente kurs med mye snakk uten en fundamental endring i retningen. Våre barnebarn går tøffe tider i møte.

Billedet av en dynamisk, kaotisk klimaovergang etter som innlandsis begynner å avgi masse, må tegnes med litt assistanse fra klimamodeller, selv om de første klimamodellene faktisk ga et helt galt bilde av hva som vil skje.

Enkle globale klimamodeller behandler havet på en enkel måte og har ikke bevegelse i innlandsis med i det hele tatt. Konsekvensen er at disse tidlige modellene gir en omfattende stor oppvarming på polare bredder, mindre oppvarming på lave bredder og en resulterende reduksjon i temperaturdifferansene (*gradientene* i temperatur) mellom ekvator og polene. Konklusjonen fra studier med disse modellene var derfor at stormer drevet av den storstilte temperaturgradienten mellom nord og sør, ville avta.

De reelle temperaturgradientene i dette århundret vil tragisk nok ikke bli så enkle. I det første tiåret i dette århundret, mens de store innlandsisene bare har begynt å bløtes opp, har vi sett en signifikant økende oppvarming på høye bredder på nordlige halvkule, spesielt over Sentral-Asia og Arktis. Men så snart som desintegrasjon av innlandsis setter inn for alvor, vil våre barnebarn leve resten av sine liv i en kaotisk overgangsperiode. Overgangsperioden vil minst vare i flere tiår, selv om metanhydrater slår inn og øker de eksplosive endringene. Grunnen er de store ismengdene som er involvert.

Disintegrasjon av innlandsis vil ikke skje over natten. Men konseptene om responstiden for innlandsis, som paleoklimatologer har utviklet basert på jordas historie, er misvisende. Disse endringene i innlandsis skjedde som respons på pådriv som endret seg langsomt, over tusenvis av år. Respons i innlandsis i fortiden skjedde ofte i raske pulser, men disintegrasjon på full kontinental skala trengte mer enn tusen år.

Menneskene har begynt å hamre på klimasystemet med et pådriv som er mer enn ti ganger kraftigere enn de pådrivene som naturen har påført. Det vil ikke kreve tusenvis av år for en innlandsis å svare på det menneskeskapte pådrivet, men de samme treghetskreftene som dempet den naturlige responsen, vil være i virksomhet også nå. For det kreves store energimengder for å smelte is.

Anta at is i begynnelsen har en temperatur på minus 10 grader. Å smelte ett gram av denne isen og bringe vannet opp til en gjennomsnittstemperatur for jordoverflaten (15 grader), krever omtrent 100 kalorier med energi. La oss omgjøre det til enheter relevant for planeten: å smelte nok is for å heve havnivået en meter, krever 9 wattår med energi over hele planeten. Med andre ord, dersom planeten er i en energiubalanse på 1 watt per kvadratmeter, vil det ta planeten ni år å oppnå tilstrekkelig med energi for å smelte nok is for å heve havnivået 1 meter, forutsatt at all denne energivinsten gikk med til å smelte is.

For tiden er jorda, i gjennomsnitt over et tiår, ute av energibalanse, den vinner litt mer energi ved å absorbere solstråling, enn den stråler tilbake til verdensrommet ved varmestråling. Den positive energibalansen skyldes et økende drivhuspådriv, for det meste karbondioksid, som er det dominerende klimapådrivet. Men ubalansen er redusert ved menneskeskapt aerosoler som reflekterer solstråling tilbake til verdensrommet. Og gjennom de siste seks årene, siden 2003, har jordas energiubalanse vært liten, i det minste delvis på grunn av mindre solar irradians, etter som sola har gått inn i det dypeste og lengste solminimum i perioden med nøyaktige målinger.

I gjennomsnitt over siste tiår er jordas ubalanse trolig omtrent en halv watt per kvadratmeter – men vi måler ikke havtemperaturene nøye nok til å definere ubalansen presist. Likevel er bare en liten del av denne energiubalansen til nå blitt brukt til å smelte is – det meste av ubalansen varmer opp havet. Denne oppdelingen av overskuddsenergien mellom smelting av is og oppvarming av havet, vil forskyve seg mer mot å smelte is etter som innlandsis blir myknet opp ved global oppvarming og raskere begynner å avgi is til havet.

En effekt av økt smelting av innlands vil bli å avkjøle havet i nærheten. Til nå er avkjølingseffekten av isfjell relativt liten, selv om en utstrakt smelting av isbrekkene rundt Antarktis allerede har en målbar innflytelse på havets overflatetemperatur. Etter som mengden av drivhusgasser øker under utslipp som business-as-usual, er det uunngåelig at innlandsis vil begynne å avgi is raskere og gi en større avkjølingseffekt på hav i nærheten.

Vest-Antarktis, den mest sårbare innlandsisen, vil begynne å avgi is i en betydelig takt etter som klimaendringen fortsetter. Is fra Vest-Antarktis vil sannsynligvis bli den største bidragsyter til et økende havnivå i det 21. århundret, og vil samtidig holde overflatetemperaturen i havet nært frysepunktet, likt som dagens temperaturer.

Innlandsisen på Grønland hviler for det meste på land over havnivå, så den er ikke like sårbar for en rask kollaps som Vest-Antarktis, men den kan miste masse raskt nok til å influere overflatetemperaturene i Nord-Atlanteren. Grønland kan ikke bidra så mye til heving av havnivået som Vest-Antarktis, men ferskvann fra smelting av Grønlandsisen kan få en stor innflytelse på regionene rundt Nord-Atlanteren via dens effekt på havets tilbringingsirkulasjon (*havets transportbånd*).

Havmasser i Nord-Atlanteren er mer saltholdige sammenlignet med Stillehavet i nord (*saltholdighet*), delvis på grunn av bidrag fra svært salt vann fra Middelhavet som strømmer gjennom Gibraltar og beveger seg inn i Nord-Atlanteren. Kombinasjonen av høy saltholdighet og avkjøling om vinteren, får overflatevannet i Nord-Atlanteren til å bli tett nok for å synke til havets bunn. Etter som dette dypvannet beveger seg sørover, strømmer varmere vann på mindre dyp nordover for å erstatte det.

Denne havsirkulasjonen kan forstyrres ved å tilføre betydelige mengder smeltevann, fordi resultatet av mindre salt overflatevann er at det ikke blir tett nok til å synke. Mange dokumenterte tilfeller i de paleoklimatiske datarekkene indikerer at smeltevann fra innlandsis kan stanse tilbringersirkulasjonen i regionen omkring Nord-Atlanteren. Dette fenomenet var basis for den svært uvitenskapelige filmen *The Day after Tomorrow*, med en utrolig, nesten øyeblikkelig avkjøling over den nordlige halvkule. I virkeligheten, dersom det blir en stans i dannelsen av dypvann som en respons på smelting av is under global oppvarming, ville avkjølingen bare bli noen få grader og begrenset for det meste til havet i Nord-Atlanteren, med en liten effekt inn over Europa som delvis balanserer drivhusoppvarmingen der.

I alle tilfeller, når Grønland engang begynner å avgi is med en betydelig rate, vil isen holde temperaturen i deler av Nord-Atlanteren relativt kjøling. Dersom dannelse av dypvann blir mindre, vil den regionale avkjølingen i Nord-Atlanteren bli forsterket.

I mellomtiden vil atmosfæren og havoverflaten på lavere bredder bli varmere gjennom det 21. århundret. Effekten av økt global oppvarming vil forsterke trender som allerede er tydelige, inkludert smelting av isbreer i fjell, utvidelse av den tørre subtropiske regionen, mer intense skogbranner og konkurranse om et minkende forråd av ferskvann. En varmere atmosfære vil her gi mer tørke, men andre steder og til andre tider kan den gi kraftigere regn og større flommer.

Oppvarmingens største påvirkning på stormer vil skje gjennom endring i vanndamp i atmosfæren. Mengden vanndamp som atmosfæren kan holde på, er en sterk funksjon av temperaturen. Det faktum at atmosfærens vanndamp øker raskt med bare en liten stigning i temperaturen, er grunnlaget for den galopperende drivhuseffekten.

Selv uten det kaoset som desintegrerende innlandsis vil gi, vil de sterkeste stormene bli kraftigere dette hundreåret. Det gjelder særlig for stormtyper som drives av latent varme. Og det er en stor del, fordi stormer som får energi fra latent varme inkluderer tordenstormer, tornadoer og tropiske stormer slik som orkaner eller tyfoner.

Latent varme er energien som vanndamp får, når den fordampes fra væskeform eller sublimerer fra is. For å fordampe vann trengs det mye energi – mer enn 500 kalorier per gram vann ved normalt trykk i atmosfæren – som er nødvendig for å bryte de sterke tiltrekningskreftene mellom vannmolekyler. Når vanndampen kondenserer, blir den latente energien frigjort som varme som potensielt er til stede som drivstoff for stormer.

Etter som verden blir varmere, vil ikke hver enkelt storm som får energi fra latent varme bli sterkere. Det at det fins mer drivstoff tilgjengelig, sikrer ikke i seg selv at den vil bli brukt; i stedet vil styrken på hver storm avhenge av spesielle meteorologiske forhold. Likevel, de sterkeste stormene i framtiden vil ha sterkere vindhastigheter. Det er viktig fordi skade på grunn av vind er en sterkt økende funksjon av vindhastigheten. Bare 10 prosent økning i vindhastigheten øker det destruktive potensialet av vind med omtrent en tredel.

Fordi en varmere atmosfære holder på mer vanndamp og slik har mer latent varme, vil styrken på de sterkeste stormene øke etter som global oppvarming øker. Større fuktighetsinnhold i lufta øker også nedbørsmengdene og størrelsen på flom. Som vi har sett, har mange steder rundt om i verden allerede opplevd unaturlig økning i hundreårsflommer, som opptrer oftere enn deres navn tilsier. Noen steder er effekten av økte nedbørsmengder forsterket ved avskoging og andre menneskelige aktiviteter som reduserer overflatens evne til å holde på vann.

De sterkeste orkanene og andre tropiske stormer vil bli sterkere på grunn av den økte tilgjengelige energien for stormer. Virkningen av oppvarmingen på frekvensen av tropiske stormer er det mer vanskelig å forutsi, fordi dannelse av orkaner avhenger av forskjellige meteorologiske faktorer som kan endres etter som klima endrer seg. Men en av forutsetningene for orkaner er tilstrekkelig varm havoverflate. Slik vil området der tropiske orkaner kan dannes nesten sikkert bli større. En delvis bekreftelse på denne forventningen ble gitt av syklonen Catarina, som utviklet seg med vindhastigheter på mer enn 150 kilometer i timen i Sør-Atlanteren i mars 2004, før den gikk på land i sørøstre Brasil. Dette var den første tropiske storm i Sør-Atlanteren.

Selv tordenstormer kan gjøre stor skade. Tordenstormer utvikler seg der varm, fuktig luft kolliderer med en kaldfront. Etter som den varme, fuktige lufta stiger innen omgivelser med kaldere luft, kondenserer vann, latent varme frigjøres og gir drivstoff til økt hastighet i oppstigningen. Det er den kompensierende nedsynkningen som volder vindskader ved overflaten. Ustabile *luftmasser* langs en kaldfront kan gi alvorlige tordenstormer, inkludert store supercellestormer med vindhastigheter på 120 kilometer i timen eller mer. Slike superceller er et område for tornadoer. I tillegg til direkte vindskade, kan disse supercellestormene gi kraftig hagl og styrtregn.

Men økningen i maksimum styrke på stormene og en utvidelse av områdene for farlige stormer – tordenstormer, tornadoer og tropiske stormer – er bare begynnelsen på stormhistorien. Etter som global oppvarming fortsetter, vil stormeffektene oppskaleres på tre hovedmåter.

En av disse vil være utvikling av kraftigere, destruktive frontsykloner på midlere bredder. Frontstormer vil bli kraftigere fordi de avhenger av temperaturdifferansen mellom varme og kalde luftmasser, så vel som mengden av fuktighet i atmosfæren bak varmfronten. Intensiveringen av frontsykloner vil bli en effekt av smeltingen av innlandsis, så snart innlandsis begynner å disintegre raskt nok til å hindre regional havtemperatur i å øke like mye som kontinental temperatur og temperatur på lave bredder. Det viktigste punktet er at det vil oppstå situasjoner da varme luftmasser vil være ladet med mye mer vanndamp enn det som er tilfelle i en kaldere verden.

En smak på de framtidige konsekvenser av denne oppskaleringen ble gitt av en bombe av et lavtrykk, superstormen, som traff Nord-Amerika i midten av mars 1993. Denne stormen, i noen regioner referert til som århundrets storm, ble dannet ved kollisjon mellom kalde arktiske luftmasser og fuktighetsladet lavtrykksluft fra Mexicogolfen. En bygelinje, en linje med farlige tordenstormer, ble dannet langs frontgrensen, som bevegde seg fra Mexicogolfen over Cuba og Florida og opp til østkysten av Nova Scotia, Canada. Vinder langs rette linjer nådde over 150 km per time over Cuba. Bygelinjen ga torden og snøstorm fra Texas til Pennsylvania. Birmingham, Alabama, fikk nesten en halvmeter snø og deler av Pennsylvania opp i mot en meter. Ti millioner mennesker mistet elektrisk strøm, og tre hundre mennesker ble drept.

Likevel vil superstormen i 1993 lett bli overgått av stormer i det 21. århundret, etter som innholdet av fuktighet på lave og midlere bredder øker og eksisterer sammen med iskalde polare luftmasser. Den første oppskaleringen vil blekne i sammenligning med effekten av en annen: når rask disintegrasjon av innlandsis gir en stigning i havnivået målt i meter.

Forbausende nøyaktige målinger av jordas gravitasjonsfelt ved Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) viser at innlandsisen på Grønland i løpet av de siste årene har mistet masse med en hastighet på omtrent 100 kubikkilometer i året. Vest-Antarktis har mistet en sammenlignbar masse, men med noe mindre takt. Disse nøyaktige gravitasjonsdataene fra satellitt går bare tilbake til 2002, mens andre, mindre nøyaktige data indikerer at selv så sent som i 1990-årene var disse innlandsisene mye tettere en massebalanse, det vil si at de verken vant eller tapte masse med en betydelig rate.

Derfor ser det ut som om disintegrasjonen av innlandsis har begynt, men til nå er effekten på havnivået moderat. Takten i hevingen av havnivået i det siste tiåret, inkludert effekter av det som skyldes smelting av isbreer i fjell og termal utvidelse av et varmere hav, har vært 3,4 centimeter per tiår, det vil si 34 centimeter på

hundre år. Denne takten i stigningen av havnivået vil øke etter som den globale oppvarmingen øker. Isbremmer fra innlandsisen i Vest-Antarktis og noen deler av innlandsisen på Grønland smelter. Etter som disse isbreemmene forsvinner, er det forventet at det vil bli avgitt flere isfjell til havet. Jeg har alt pekt ut en annen prosess som kan påskynde starten av en rask disintegrasjon av innlandsis: mer regn om sommeren, som kan skje over deler av innlandsisene på grunn av større forekomst av varmere, mer fuktighetsladet luft.

Selv med den lagsomme takten som naturlige klimapådriv endrer seg med, begynner innlandsis etter hvert å disintegre med en hastighet på flere meter i havnivået per hundreår. Men å forutsi når tapet fra innlandsisene vil akselerere i det 21. århundret, er et notorisk vanskelig ikkelineært problem. Vi kan være på vei mot en katastrofal stigning i havnivået svært snart, det betyr, skape forhold som garanterer at det vil skje, men det vil trolig ta flere tiår før en rask heving av havnivået begynner. På den annen side har vi blitt overrasket over hvor raskt noen andre klimaendringer har funnet sted – slik som smelting av sjøis i Arktis, utvidelse av området for tropisk klima og smelting av isbreer i fjell. Dersom metanhydrater utløst fra havet og tundra begynner å bidra betydelig til metan i atmosfæren, dersom menneskeskapte sulfataerosoler minker raskt fordi vi renser luftforurensing, dersom solar irrandians går tilbake fra sitt nåværende lavnivå ... kan slike faktorer akselerere klimaendringen. Det beste estimat jeg for øyeblikket kan gi for når en stor endring i havnivået vil starte, er en gang i levetiden til mine barnebarn – eller kanskje dine barn.

Med en kombinasjon av et høyere havnivå, selv bare en meter eller så, og økt stormstyrke, vil konsekvensene av stormene i framtiden bli fryktelige å tenke på. Problemene vil ikke begrense seg til de stedene som vanligvis er utsatt for tropiske stormer. Andre stormer med sammenlignbar kraft vil påvirke folkemengder som er mellom ti og hundre ganger større enn tallet på mennesker som ble forflyttet i orkanen Katrina, som traff New Orleans og den amerikanske golfkysten i 2005.

Se på en storm slik som nordøststormen, halloween 1991. Den startet som et lavtrykksområde over Indiana, som bevegede seg mot nordøst til Atlanteren utenfor Canada. Der ble lavtrykket dypere og bevegede seg mot øst-sørøst. Men, influert av et blokkerende høytrykk over nordlige Atlanterhavet, kurvet det mot vest, hvor det møtte orkanen Grace som bevegede seg mot nord. Orkanen, ført til værs av kaldfronten og slått sammen med sirkulasjonen i det dype lavtrykket, tilførte ny energi til den sykloniske stormen. Minimumstrykket falt til 972 millibar (millibar er en gammel enhet for atmosfærisk lufttrykk som fremdeles brukes i værvarsling – det globale gjennomsnittet er 1011 millibar), med vind over ti minutter på over 100 km i timen, noe som ga dette utenomtropiske lavtrykket en styrke tilsvarende en tropisk orkan i kategori 1. En kanadisk bøye vel 300 km fra kysten av Nova Scotia, rapporterte bølgehøyder så store som 31 meter. Heldigvis holdt de sterkeste kreftene seg utenfor kysten, selv om nordøstre del

av USA ble utsatt for en rekordstor springflo på 4 meter med en ekstra *stormflo* på 1,5 meter fra lavtrykket.

La oss tenke oss situasjonen om havnivået er en eller to meter høyere, stormer sterkere og atmosfærens fuktighetsinnhold større. Kraftigere nordøststormer og orkaner vil treffe byene på østkysten av USA med høyere havnivå – det er ikke et spørsmål om de vil komme, bare om når. Sosiale og økonomiske problemer kan bli større enn noensinne. Det er ikke nødvendig å sette hele øya Manhattan under vann for å sette bydelen ut av funksjon. Gitt utsiktene til en fortsatt stigning av havnivået, kan det bli umulig å gjenreise slike områder.

Andre deler av verden er like sårbar, om ikke mer. Se på stormfloen i Nordsjøen i 1953 som traff kysten av Nederland og England og i noen grad Belgia, Tyskland, Danmark og Frankrike. Oversvømmelsene var forårsaket av en kombinasjon av høy springflo og en stormflo på grunn av et kraftig lavtrykk. Den kombinerte stormfloen oversteg det gjennomsnittlige havnivå med 5 meter. Omtrent 1400 kvadratkilometer ble oversvømt i Nederland og 1000 kvadratkilometer i England. Etter dette har nederlendere bygget et ambisiøst sikringsssystem for stormflo. Britene har også bygd et forbedret forsvarssystem, inkludert Thames Barrier for å sikre sentrale London mot en storm i framtiden.

Når stigningen i havnivået når en meter – og noter at det her ikke står ”dersom”, men bare ”når”, under antakelse av at politikere får fortsette sin vei langs business-as-usual – vil disse barrierene etter hvert vise seg verdiløse. Når barrierene revner, vil området for og størrelsen på ødeleggelsene overgå alt som har hendt tidligere. Heving av havnivået vil latterliggjøre nederlendernes planer om flytende hus – hvis de ikke planlegger å leve på åpent hav. De laveliggende områdene i nordlige Europa vil ikke lengre bli beboelige.

Hva med effekten av stigende hav på utviklingsland? Konsekvensene for land som Bangladesh, med 100 millioner mennesker som lever noen få meter over havoverflaten, er så forferdelige at jeg overlater det til din egen forestillingsevne. Du har uten tvil sett bilder av effekten av tropiske stormer på Bangladesh med dagens havnivå og dagens stormer. Du kan tenke deg konsekvensene for nasjoner som består av flate øyer. Vi kan bare håpe at nasjoner med ansvaret for endret atmosfære og klima vil gi immigrasjonsrett og midler til folk som blir fordrevne av det resulterende kaos.

Tidspunktet for den tredje oppskaleringseffekten av global oppvarming, smelting av metanhydrater, er like uforutsigbar som de andre. Truende signaler har allerede begynt å komme til syne med bobling av metan fra smeltende tundra og fra havbunn på kontinentalsokler. Til nå er mengden metan utløst på denne måten liten. Det metanhydratet som bekymrer mest er det som finnes i sediment på havbunn, på grunn av det enorme volumet. Selv om dagens estimat for mengdene varierer mye, så har avkjølingstrenden over siste 50 millioner år helt sikkert resultert i en akkumulasjon som overgår den som drev den plutselige

globale oppvarmingen på 5 – 9 grader som skjedde gjennom PETM for omtrent 54 millioner år siden.

Global havsirkulasjon ble reorganisert gjennom PETM, med dannelse av dypvann i Stillehavet heller enn i Nord-Atlanteren, der det skjer i dag. En overstrømming av havbunnen i Stillehavet med varmere vann kan ha vært en nøkkelfaktor for å smelte metanhydrat gjennom PETM. Kan en endring i havsirkulasjonen skje igjen i nær framtid? Globale klimamodeller har i dag det problem at de sporadisk danner dypvann i Stillehavet som ikke skal være der, noe som tyder på at det ikke skal store forandringer til i tettheten av havets overflatevann for å forandre områdene for dannelse av dypvann. En utløsningsmekanisme for en slik forandring kunne være en tilføring av ferskvann både til Nord-Atlanteren og havet ved Antarktis, etter at disintegrasjon av innlandsis har nådd høye verdier i begge hemisfærer. Dette ferskvannet, fordi det er mindre tett enn saltere havvann, vil virke til å stanse den vanlige nedsynkning av overflatevann både i Nord-Atlanteren og i områdene rundt Antarktis. Det betyr at dannelsen av både nordatlantisk dypvann og bunnvann i Antarktis kan stoppe opp.

Om dannelse av dypvann starter i Stillehavet, vil tregheten til klimasystemet, spesielt havsirkulasjonen, være alt for stor for at menneskene kan stoppe den, selv med sosiale system intakt. Så snart som heving av havnivå begynner å ødelegge kystbyer rundt om i verden, og skape hundrevis av millioner flyktninger, kan det bli et sammenbrudd i regjeringers styringsevne over hele verden. Men om vi ser bort fra dette, dersom havsirkulasjonen endrer seg, slik at varmere vann fra Stillehavet starter å synke til havbotnen og smelter metanhydrater, vil det ikke være noen plausibel vei for menneskene å reversere endringen i havsirkulasjonen.

Selv om vi ikke i detalj kan forutsi det som vil skje, kan vi med sikkerhet si at endringene vil bli skjebnesvangre. Kina, på tross av sin voksende økonomiske makt, vil få store problem etter som hundrevis av millioner kinesere tvinges til å flytte fra et hav som hever seg. Oversvømmelse av Florida og kystbyer i USA kan bli like stressende. Andre nasjoner vil stå over for større eller mindre virkninger. Gitt den globale avhengighet mellom land, kan det bli en kollaps i økonomiske og sosiale system.

Fysisk vitenskap er lettere å hankses med. Selv om tidspunktet for de tre oppskaleringseffektene er vanskelig å forutsi, gjelder ikke dette deres effekter. Med utslipp av metanhydrater på toppen av dem fra konvensjonelt og ikkekonvensjonelt fossilt drivstoff, er fremtiden klar. Dempende tilbakekoplinger hjelper til å holde størrelsen på naturlige langsiktige klimaendringer innenfor visse grenser, slik begrenser det langsiktige karbonkretsløpet karbondioksid i atmosfæren. Men slike negative tilbakekoplinger vil ikke ha nok tid for å dempe de positive tilbakekoplingene. Den svære planetære energiubalansen skapt ved

de høye nivåene på atmosfærisk karbondioksid og metan, vil ta knekken på all gjenværende is i en fei. Planeten vil raskt komme på Venusekspressen.

Kilder

Pritchard, Hamish D., Robert J. Arthern, David G. Vaughan, og Laura A. Edwards. "Extensive Dynamic Thinning on the Margins of the Greenland and Antarctic Ice Sheets," *Nature* 461 (15 oktober 2009): 971-75.

16. Etterord (fra side 274)

Stormene til mine barnebarn – når vil de komme i full styrke? Lufta inneholder allerede mer vanndamp enn den gjorde for noen få tiår siden. De sterkeste stormene som tar energi fra vanndamp – inkludert tordenstormer, tornadoer og tropiske stormer – er blitt sterkere og de tilhørende vindene og flommene begynner å bli mer ekstreme.

Men kvalitativt forskjellige stormer vil opptre når disintegrasjon av innlandsis blir stor nok til å dempe oppvarming av havet på høye bredder, og kanskje gi avkjøling av havet regionalt, mens lave bredder fortsetter å bli varmet opp. Globalt kaos vil inntreffe etter hvert som en økende voldsom stormfullhet blir kombinert med en heving i havnivået med en meter eller mer. Selv om treghet i innlandsis kan hindre en stor heving av havnivå i første halvdel av århundret, vil en fortsatt vekst i drivhusgasser i nær framtid gjøre et økende havnivå praktisk talt uunngåelig, ute av kontroll for våre barn og barnebarn.

Flere usikkerheter vil påvirke hvor raskt de mest opplagte klimaendringene vil tre fram. En usikkerhetsfaktor er hvorvidt eller hvordan solar irradians vil endre seg gjennom de neste få årene og de neste tiårene. Nå i oktober 2009 holder sola seg fremdeles i sitt dypeste minimum i den perioden det fins nøyaktige satellittdata, som startet i 1970-årene. Det er mulig at solas energiutstråling vil holde seg på et lavt nivå i tiår, som den tilsynelatende gjorde for noen få hundre år siden, noe som kan ha gitt det største bidraget til den lille istid. Men i motsetning til påstandene fra de glødende, høyrøstede (meningene til) solarentusiaster, vil en slik fortsettelse av lav irradians ikke gi global avkjøling og den vil ikke stoppe den kontinuerlige progresjon av global oppvarming. Dette betyr ikke at solare effekter er neglisjerbare. Dersom sola snart går ut av sitt minimum, og gjenopptar en typisk solarsyklus, kan det bli en akselerasjon i global oppvarming gjennom de neste seks eller åtte årene. Men samme hva som skjer med solar irradians, vil verden bli varmere gjennom det neste tiår på samme måte som siste tiår var varmere enn i 1990-årene.

Den andre store usikkerheten som vil influere på hvor raskt effekter av klimaendring blir tydelige, er mengden med menneskeskapte aerosoler og planetens energiubalanse. Aerosoler er den største kilde til usikkerhet når det gjelder netto pådriv som menneskene påfører klimasystemet. Planetens energiubalanse er vårt beste enkeltmål på tilstanden til systemet. Den hjelper oss

å definere hvor stor endring i atmosfærens sammensetning som er nødvendig for å gjenvinne klimastabilitet. Begge størrelser krever bedre data.

Men vår ufullstendige kunnskap om disse størrelsene betyr ikke usikkerhet om retningen som det globale klimaet går mot – verden blir varmere og den vil fortsette å gjøre så gjennom de neste tiårene. På den annen side vil bedre kunnskap om disse størrelsene hjelpe oss til å gi et bedre mål for den atmosfæriske sammensetningen som vi må sikte mot. Vi vet allerede at vi burde redusere atmosfærisk karbondioksid til 350 ppm eller mindre.

Nøkkelstørrelser vi må overvåke for å vurdere status for potensielle vippepunkt er (1) massebalansen til innlandsisene på Grønland og i Vest-Antarktis, inkludert isbremmer og breer som utgjør hovedutløp for innlandsisen, (2) prosentdelen av karbondioksid fra fossilt drivstoff som forblir i lufta, og (3) endringer i atmosfærisk metan. Jeg vil sørge for organisering, diskusjon og oppdatering av disse og andre nøkkelstørrelser på min hjemmeside, www.columbia.edu/~jeh1.

Noen klimauttrykk (definisjoner ved SG)

Aerosoler En samling partikler – i fast form og som dråper - som holdes oppe og beveger seg i luft. Typisk størrelse er fra 0,01 til 10 μm . Aerosoler kan enten ha en naturlig eller en *antropogen* opprinnelse. Aerosoler kan påvirke klimaet på flere måter, direkte gjennom spredning og absorpsjon av stråling, og indirekte ved å virke som *kondensasjonsskjerner* for skydannelse, noe som også kan føre til endringer i skyenes strålingsmessige egenskaper og levetid. Se *indirekte aerosoleffekt*.

Albedo Den delen av *solstrålingen* som reflekteres av en flate eller et objekt, ofte gitt i prosent. Jordoverflatens albedo varierer mye. Hav og vegetasjon over land gir lav albedo, mens snødekte flater har høy albedo. Planetarisk albedo for jordkloden varierer med skydekke, dekke av snø og is og graden av vegetasjon over land.

Albedotilbakekopling En *klimatilbakekopling* som skyldes endring i jordklodens *albedo*. Slike endringer skyldes vanligvis endringer i *kryosfæren*, som har en større gjennomsnittlig albedo (~0,8) enn den gjennomsnittlige planetariske albedo (~0,3). I et klima som blir varmere, antar en at kryosfæren vil bli mindre og at jordas gjennomsnittlige albedo vil avta. Dette gir mer absorpsjon av *solstråling*. Denne positive albedotilbakekoplingen fører til større oppvarming av kloden.

Atmosfære Gassene som omslutter jorda. Tørr atmosfære består nesten bare av nitrogen (78,1 % i *blandingsforhold*) og oksygen (20,9 %), sammen med et visst antall *sporgasser* slik som argon (0,93 %), helium og strålingsaktive *drivhusgasser* slik som *karbondioksid* (0,038 %) og *ozon*. I tillegg inneholder atmosfæren drivhusgassen vanndamp. Mengden av vanndamp varierer mye, men et typisk innhold er et blandingsforhold rundt 1 %.

Avskoging Hogging av skog som gir en overgang fra områder med skog til områder uten skog. For å diskutere uttrykket skog og relaterte termer knyttet til avskoging og dyrking av skog, se IPCC Special Report on Land Use, Land-Use Change and Forestry (IPCC, 2000).

Biosfære (terrestrisk og marin) Den delen av jordsystemet som omfatter alle *økosystem* og levende organismer på land (terrestrisk biosfære), i havet (marin biosfære) eller i atmosfæren. Dødt organisk materiale inkluderes, slik som avfall, organisk materiale i jordskorpen og avfall i havet.

Blandingsforhold (Molfraksjon) Forholdet mellom antall moler (mol er SI-enhet for substansmengde) av en substans i et gitt volum og det totale antall moler av alle substanser i dette volumet. For atmosfæren er dette forholdet som regel gitt for

tørr luft. Typiske enheter for *drivhusgasser* med lang *levetid* er μmol per mol (parts per million: ppm), nmol per mol (parts per billion: ppb) og fmol per mol (parts per trillion: ppt). Blandingsforholdet kan være forskjellig fra volumblandingsforholdet, ofte uttrykt som ppmv etc., som uttrykker korreksjoner om gassene ikke er ideelle. Slik korreksjon er signifikant i forhold til nøyaktigheten i målinger av flere drivhusgasser.

Bundne klimaendringer (Climate change commitment) Selv om atmosfærens sammensetning holdes konstant på dagens nivå, vil klimaet fortsette å forandre seg som følge av endringer i atmosfærens sammensetning fram til nå. Dette skyldes den termiske tregheten i havet og langsomme prosesser i *biosfæren*, *kryosfæren* og landoverflaten. Tidligere endringer i atmosfærens sammensetning leder til klimaendringer som fortsetter så lenge det er strålingsmessig ubalanse (se *energibalanse*) og inntil alle komponenter i klimasystemet har innstilt seg på en ny tilstand. Den videre endring i temperaturen etter at sammensetningen i atmosfæren blir holdt konstant, refereres til som temperatur ved bestemt konstant sammensetning. Bundne klimaendringer inkluderer andre framtidige endringer, slik som i *det hydrologiske kretsløp*, i ekstremvær og *havnivåendringer*.

^{12}C (C-12) Stabil karbonisotop med atomvekt på omtrent 12. Utgjør 98,9 % av vanlig karbon.

^{13}C (C-13) Stabil karbonisotop med atomvekt på omtrent 13. Målinger av forholdet $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ i karbondioksidmolekyler blir brukt til å bestemme betydningen av visse prosesser i *karbonkretsløpet* og størrelsen på det terrestriske karbonreservoaret.

^{14}C (C-14) Stabil karbonisotop med atomvekt på omtrent 14 og med en halveringstid på omtrent 5700 år. Isotopen blir blant annet brukt for datering så langt tilbake som 40000 år. Variasjonen over tid påvirkes av magnetfeltene til jorda og sola. Derfor indikerer tidsvariasjonen også variasjon i *kosmisk stråling*. Se *radiometrisk datering*.

Den lille istid (Little Ice Age; LIA) En periode mellom omtrent år 1400 og 1900 da temperaturene på den nordlige halvkule var kaldere enn i dagens klima, særlig over Europa.

Den varme middelalderperioden (Medieval Warm Period; MWP) En periode mellom år 1000 og 1300 da noen regioner på nordlige halvkule var varmere enn gjennom *Den lille istid*, en kaldere periode som fulgte etter.

Det hydrologiske kretsløp Kretsløpet der vann som fordampes fra hav og landoverflate blir transportert i atmosfærens *sirkulasjon* som vanndamp og blir felt ut som nedbør (regn og snø). Nedbør over hav tar del i havets *sirkulasjon* og vil omsider igjen fordampe. Noe av nedbøren over land blir tatt opp av jordbunnen, trær og vegetasjon. Noe av dette gir avrenning til hav og innsjøer

hvor vannet igjen vil fordampe. Det som infiltrerer jordbunnen (infiltrering) danner grunnvann som kan bli avgitt til elver og ført til havet.

Diffus stråling Den del av *solstrålingen* som blir spredt eller reflektert i atmosfærens ulike komponenter, slik som skyer. Diffus stråling og direkte solstråling utgjør til sammen *globalstråling*. På en overskyet dag har vi ved jordoverflaten bare diffus stråling.

Drivhuseffekt *Drivhusgasser* i atmosfæren absorberer *infrarød termalstråling* effektivt, dvs. stråling som emitteres fra jordas overflate, fra selve atmosfæren av de samme gassene og fra skyer. Atmosfærisk stråling emitteres i alle retninger, inkludert de som går nedover til jordas overflate. På den måten fanger drivhusgassene varme innen *troposfæren* og fra overflaten. Dette er drivhuseffekten. Infrarød termalstråling i troposfæren er sterkt knyttet til temperaturen i den høyde der den emitteres. I troposfæren avtar temperaturen vanligvis med høyden. Innstråling fra sola balanseres med en effektiv infrarød stråling til verdensrommet fra en høyde der temperaturen (*effektiv strålingstemperatur*), i gjennomsnitt, er $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$, mens jordoverflaten har en mye høyere temperatur, i middel $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$. En økning i konsentrasjonen til drivhusgasser leder til mindre gjennomtrengelighet for infrarød stråling i atmosfæren og derfor til en effektiv stråling til verdensrommet fra et høyere nivå ved en lavere temperatur. Dette gir et *strålingspådriv* som leder til en økt *drivhuseffekt*.

Drivhusgass (greenhouse gas; GHG) Drivhusgasser er de gassene i atmosfæren, både naturlige og *antropogene*, som absorberer og emitterer stråling ved spesifikke bølgelengder innenfor spekteret til *infrarød termalstråling* emittert av jordas overflate, atmosfæren selv og skyer. Disse egenskapene gir *drivhuseffekten*. Vanndamp (H_2O), *karbondioksid* (CO_2), metan (CH_4), lystgass (N_2O) og ozon (O_3) er de viktigste drivhusgassene i atmosfæren. I tillegg fins det et antall drivhusgasser som er fullstendig antropogene, slik som *halokarboner* og substanser som inneholder klor, brom og som i tillegg til gassene over er med under Montrealprotokollen. *Kyotoprotokollen* omhandler CO_2 , CH_4 , N_2O og gassene svovelheksafluorid (SF_6), hydrofluorkarboner (HFC-er) og perfluorokarboner (PFC-er).

Dynamisk system En prosess eller et sett av prosesser der utviklingen over tid styres ved et sett av deterministiske fysiske lover som uttrykkes i matematiske ligninger (bevegelsesligninger som uttrykker bevaring av masse, energi og bevegelsesmengde). *Klimasystemet* er et dynamisk system. Se *ikkelinearitet*.

Dypvann *Vannmasser* i havet som dannes ved at tungt (salt) overflatevann synker ned til dyp på 2000–4000 m. Nordatlantisk dypvann (NADW) dannes i Labradorhavet og Norskehavet. NADW strømmer sørover ved kysten av Nord-Amerika og fortsetter over til Sør-Atlanteren.

Eem Den forrige *interglasial* (mellomistid) som varte fra 129000 til 116000 år siden.

Effektiv strålingstemperatur I troposfæren avtar temperaturen vanligvis med høyden. Innstråling fra sola balanseres med en effektiv *infrarød termalstråling* til verdensrommet fra en høyde der temperaturen, i gjennomsnitt, er $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$. Denne temperaturen kalles *effektiv strålingstemperatur*. En økning i konsentrasjonen av *drivhusgasser* leder til mindre gjennomtrengelighet for infrarød stråling i atmosfæren og derfor til en effektiv stråling til verdensrommet fra et høyere nivå ved en lavere temperatur. Se *drivhuseffekt*.

Eksentrisitet (eller orbital eksentrisitet) Jordas bane rundt sola er en ellipse. Eksentrisiteten er et mål for hvor mye ellipsen avviker fra en sirkel. Jordbanen varierer fra å være nær en sirkel til å være mest elliptisk over en hovedperiode på 413000 år.

Ekvivalent konsentrasjon av karbondioksid (CO_2) Den konsentrasjon av *karbondioksid* som ville gi det samme *strålingspådriv* som en blanding av karbondioksid og andre *drivhusgasser* av en viss mengde.

Ekvivalent utslipp av karbondioksid (CO_2) Den utslippsmengden av *karbondioksid* som ville gi det same integrerte *strålingspådriv* over et tidsrom som en utslippsmengde av en godt blandet *drivhusgass* eller en blanding av slike gasser. Det ekvivalente utslipp av karbondioksid oppnår en ved å multiplisere utslippet av en godt blandet drivhusgass med dens *potensial for global oppvarming* for et gitt tidsrom. For en blanding av godt blandede drivhusgasser oppnås dette ved å summere det ekvivalente utslippet av karbondioksid for hver gass. Ekvivalent utslipp av karbondioksid er et standardisert og nyttig mål for å sammenligne utslipp av ulike drivhusgasser, men gir ikke en eksakt ekvivalens for tilsvarende klimarespons.

El Niño-Sørlige Oscillasjon (ENSO) Utrykket *El Niño* ble opprinnelig brukt til å beskrive en hendelse som gir en varm havstrøm langs kysten av Ekvador og Peru, en strøm som forstyrret det lokale fisket. El Niño er senere blitt identifisert som en oppvarming over det tropiske Stillehavet øst for datolinjen. Denne hendelsen henger sammen med et avvik i lufttrykket med et mønster på global skala over tropene og subtropene. Dette trykkmønsteret kalles Den sørlige oscillasjon (Southern Oscillation). Dette koplede fenomenet mellom hav og atmosfære, som har fortrukne tidsskalaer mellom to og sju år, kalles El Niño-Southern Oscillation (ENSO). Fenomenet måles ofte ved differansen i avvik (fra normale forhold) i lufttrykket mellom Darwin og Tahiti og ved avvik i sjøtemperaturen (SST) i sentrale og østlige deler av Stillehavet ved ekvator. Gjennom en varm fase av ENSO svekkes passatvindene, noe som svekker oppvellingen av vann ved ekvator og ved kysten av Ekvador og Peru. Dette endrer havstrømmene slik at sjøtemperaturen øker, noe som igjen svekker passatvindene. En slik hendelse har stor innflytelse på vind, sjøtemperatur og nedbørsmønstre i det tropiske Stillehavet. Den har også påvirkning på klimaet

over hele Stillehavet og i store deler av verden gjennom såkalte teleforbindelser. Den kalde fasen kaller *La Niña*.

Energibalanse (eller energiubalanse) Differanse mellom den totalt innkommende og totalt utgående energi i *klimasystemet*. Dersom denne balansen er positiv, skjer det en oppvarming. Om den er negativ, skjer det en avkjøling. I gjennomsnitt over hele kloden og over lange tidsperioder må denne balansen være lik null i et klima som ikke endrer seg. Fordi klimasystemet får all sin energi fra sola, medfører nullbalanse at den globale sum av innkommende *solstråling* i gjennomsnitt må være lik summen av utgående reflektert solstråling og utgående *infrarød varmestråling* emittert fra klimasystemet. Et avvik i denne globale energibalanse over tid, antropogent eller naturlig, kalles et *strålingspådriv*.

Fakkel Lyse områder på sola. I perioder med høy *solaktivitet* er området som dekkes av fakler større enn vanlig. Se *solflekker*.

Flom En overflømming eller akkumulering av vannmasser over et landområde. Forekommer særlig ved stor vannføring i vassdrag som følge av kraftig nedbør og/eller snøsmelting. På engelske ordet for flom (flood) omfatter også *stormflo*.

FNs rammekonvensjon for klimaendringer (United Nations Framework Convention on Climate Change; UNFCCC) Konvensjonen ble vedtatt 9. mai 1992 i New York og signert i 1992 på toppmøte i Rio de Janeiro av mer enn 150 land og av EU. Målet for konvensjonen er stabilisering av konsentrasjonene av *drivhusgasser* i atmosfæren på et nivå som kan hindre farlig *antropogen* innvirkning på *klimasystemet*. Konvensjonen inneholder forpliktelser for alle parter. Alle parter med i vedlegg I (alle land i OECD og land med økonomi i vekst) har et mål om å redusere utslippene av *drivhusgasser*, som ikke er kontrollert av Montrealprotokollen, til nivåer i 1990 innen år 2000. Konvensjonen ble gyldig i mars 1994. Se *Kyotoprotokollen*.

Foraminiferer En stor gruppe små, encellede amøber. Typisk har de et kalkskall med ett eller flere kammer. Det fins en stor mengde ulike arter, de fleste mindre enn en millimeter i størrelse. Noen er mye større, de største opp til 19 cm. Forekomst av kalkskall i sedimentkjerner brukes som *proksi* i *rekonstruksjon* av temperatur i hav.

Fordamping (evaporasjon) En prosess som fører et stoff i væskeform over til gassform. Prosessen krever tilstrekkelig energi. Under fordampning er det de molekylene som beveger seg raskest (har høyest temperatur) som unnslipper. Gjennomsnittshastigheten for de resterende molekylene går ned og væsken kjøles av. Jo mer varme som er tilgjengelig desto hurtigere går fordampingen. Gassen, slik som vandamp, inneholder energi latent som frigjøres ved *kondensasjon*.

Fotosyntesen Prosessen der planter tar *karbondioksid* fra lufta (eller bikarbonat i havet) for å bygge karbohydrater. I prosessen frigjøres oksygen. Det er flere

former for fotosyntese med ulik respons på atmosfærens innhold av karbondioksid.

Galaktisk kosmisk stråling Kosmisk stråling er partikler (for det meste protoner, men også heliumkjerner og elektroner) med opprinnelse i verdensrommet som treffer jordas atmosfære. Uttrykket stråling er misvisende siden partiklene ankommer en for en og ikke i form av en stråle med partikler. Galaktisk kosmisk stråling er stråling fra verdensrommet som treffer solsystemet.

Galopperende drivhuseffekt En selvforsterkende økning i drivhuseffekten ved at positive *klimatilbakekoplinger* fører til frigjøring av drivhusgasser lagret i overflaten av en planet. En slik prosess stopper ikke før alle drivhusgasser er ført til atmosfæren. En mener at en galopperende drivhuseffekt som involverer *karbondioksid* og vanndamp, har funnet sted på Venus.

Global dimming Uttrykket refererer seg til en omfattende reduksjon i *solstråling* til jordas overflate fra omtrent 1961 til 1990.

Global oppvarming Økning i *global overflatetemperatur* siden *Den lille istid*, en oppvarming som har økt de siste tiårene. IPCC anga i sine rapporter fra 2007 at det er svært *sannsynlig* at oppvarmingen de siste tiårene for et stor del er *antropogen*.

Global overflatetemperatur Denne temperaturen er et estimat av den globale gjennomsnittstemperaturen ved jordoverflaten. For forandringer over tid brukes som regel bare anomalier (avvik) fra en klimatologisk gjennomsnittsverdi. For anomaliene beregnes det gjennomsnitt, veid over et areal, for *sjøtemperatur i overflaten* (SST) og temperatur for landoverflaten. Tre klimasentra i verden beregner global overflatetemperatur fortløpende.

Globalstråling Summen av direkte *solstråling* og *diffus stråling*. Måles mange steder ved jordas overflate.

Gradient I matematikk er gradienten til et skalarfelt (slik som temperatur) et vektorfelt (slik som fordeling av vind) der vektoren i hvert punkt peker i retningen til den største økningen i skalarfeltet. Lengden av vektoren uttrykker endringen til skalarfeltet i retning av vektoren. Uttrykket gradient brukes også for en komponent langs en retning, ofte langs horisontal- og vertikal retning (horisontal gradient; vertikal gradient).

Havets forsurening En minking i *pH* i sjøvann på grunn av *opptak* av *antropogent karbondioksid*.

Havets transportbånd Hovedsirkulasjonen over alle hav som resirkulerer vannmassene og bidrar til jordas klima. Se *termohalin sirkulasjon* og *meridional omveltningssirkulasjon*.

Havnivåendring Havnivået kan endre seg både globalt og lokalt på grunn av (i) endringer i formen på havbassengene, (ii) endringer i total *vannmasse* og (iii) endringer i havets tetthet. Havnivåendring på grunn av endring i tetthet kaller sterisk endring. Tetthetsendringer som bare skyldes temperaturen kalles termosterisk, mens tettheten på grunn av endring i *saltholdighet* kalles halosterisk. Se *termal ekspansjon*.

Holosen Den geologiske epoken holosen er den siste av de to *kvartære* epokene og varer fra omtrent 11600 år siden og fram til nå. Holosen er dagens mellomistid (*interglasial*) etter siste *istid* (*glasial*).

Hydrosfæren Den komponenten av *klimasystemet* som omfatter vann i flytende form ved jordoverflaten og under jordoverflaten, slik som verdenshavene, sjøer, elver, innsjøer, grunnvann etc.

Ikkelinearitet En prosess kalles ikkelineær når det ikke er en enkel lineær relasjon mellom årsak og virkning. *Klimasystemet* inneholder mange slike ikkelineære prosesser. Dette betyr at systemet potensielt kan ha en kompleks variasjon som for eksempel kan lede til raske *klimaendringer*. Se *kaos*.

Indirekte aerosoleffekt *Aerosoler* kan gi et indirekte *strålingspådriv* på *klimasystemet* ved å tjene som *skykondensasjonskjerner* for dannelse av skydråper, noe som kan modifisere de strålingsmessige egenskapene til skyer, deres fordeling og *levetid*. Det skjelles mellom to indirekte effekter: en effekt av endret skyalbedo og en effekt av endret levetid for skyer. Albedoeffekten gir et negativt strålingspådriv fordi en økning i antropogene aerosoler fører til en økende dråpekonsentrasjon i skyer, dvs. til mindre dråper for en et visst vanninnhold. Dette gir hvitere skyer og høyere *albedo*. Effekten er kjent som den første indirekte effekt eller Twomeyeffekten. Levetidseffekten er et pådriv som skyldes at mindre dråpestørrelser reduserer effektiviteten i skyenes nedbørsutløsning. Dette påvirker vanninnholdet, skyenes tykkelse og deres levetid. Denne effekten er kjent som den andre indirekte effekten eller Albrechteffekten. Også denne effekten gir et negativt pådriv for en økning i *antropogene aerosoler*. I tillegg til disse effektene kan aerosoler gi en *semidirekte effekt*. Den referer seg til absorpsjon av *solstråling* i aerosoler som absorberer. Dette bidrar til oppvarming av atmosfæren og til høyere *statisk stabilitet* i laget under. Effekten kan også føre til fordampning av skydråper.

Infrarød termalstråling Termalstråling er elektromagnetisk stråling emittert fra overflaten av et legeme, stråling som skyldes legemets temperatur. Infrarød termalstråling er termalstråling med bølgelengder mellom 0,7 og 300 mikrometer. Stråling fra *klimasystemet* er infrarød termalstråling. Noe av *solstrålingen* er også infrarød.

Innlandsis En ismasse over land som er tilstrekkelig dyp til å dekke det meste av topografien. Formen er bestemt ved massens dynamikk (strøm av is etter som den deformeres internt og glir mot underlaget). Innlandsis strømmer ut fra de

høyeste sentrale viddene med liten helning av overflaten. Ytterkantene heller mye mer, og isen flyter her gjennom hurtige *isstrømmer* eller utløpsbreer. Det er bare tre store innlandsiser i den moderne verden, en på Grønland og to i Antarktis, den østlige og den vestlige innlandsisen, delt av De transantarktiske fjell. Under *istider* er det flere. Se *isbre*; *isbrem*.

Interglasialer De varme periodene mellom *istider* (*glasialer*), også kalt *mellomistider*. Den forrige interglasial varte fra 129000 til 116000 år siden og kalles *Eem*.

Irradians Et uttrykk for styrken per flateenhet av elektromagnetisk stråling på en flate. Måles i watt per kvadratmeter (W/m^2).

Isbre En masse med is over land som flyter nedover ved gravitasjon under påvirkning av indre stress og friksjon i bunnen og ved sidene. En isbre opprettholdes ved akkumulasjon av snø i høyden og balanseres ved smelting i lave høyder og eventuelt kalving til havet. Det finnes isbreer på alle bredder.

Isbrem Et flytende lag med is som har betydelig tykkelse og som strekker seg ut fra kysten (vanligvis med stor horisontal utstrekning med en overflate som er horisontal eller svakt hellende). Bremsen fyller ofte ujevnheter i kystlinjen for *innlandsis*. Nesten alle isbreer fins i Antarktis, der det meste av isflyten mot havet ender inn i isbreer.

Iskjerne En borekjerne gjennom en *isbre* der snø og is er akkumulert over mange år, is som er rekrystallisert og som inneholder luftbobler fra tidligere tider. Sammensetningen av isen, spesielt innhold av *isotoper* av hydrogen og oksygen, gir *proksi* for fortidens klima.

Isotoper Ulike typer atomer i samme kjemiske element, atomer som hver har et forskjellig antall nøytroner. Se ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C .

Isstrøm En strøm av is som flyter hurtigere enn *innlandsisen* omkring. Mens en *isbre* flyter mellom vegger av stein, flyter en isstrøm mellom vegger av is som flyter med mindre hastighet.

Istid En istid eller *glasial* er karakterisert ved en langsiktig temperaturreduksjon i jordas klima med det resultat at kontinental *innlandsis* og *isbreer* vokser fram.

Kaos (i fysikk) Et *dynamisk system*, slik som *klimasystemet*, som beskrives ved ikkelineære deterministiske bevegelsesligninger (se *ikkelinearitet*), kan gjennomgå uregelmessige, kaotiske bevegelser. Dette skjer på den måten at små endringer i en starttilstand over tid vil lede til store og tilsynelatende uforutsigbare endringer. Slike kaotiske variasjoner vil begrense forutsigbarheten til systemet.

Karbonkretsløpet Kretsløpet som beskriver flyt av karbon (i forskjellige former, for eksempel som *karbondioksid*) gjennom atmosfæren, havet, terrestrisk *biosfære* og *litosfære* og mellom disse komponentene i *klimasystemet*.

Karbondioksid (CO₂) En gass som fins naturlig i atmosfæren, men også som et biprodukt ved bruk av fossilt drivstoff som olje, gass og kull, ved brenning av biomasse og endringer i bruk av land og visse industrielle prosesser som produksjon av sement. CO₂ er den viktigste *antropogene drivhusgassen* som påvirker klodens *strålingsbalanse*. Den er en referansegass som andre drivhusgasser blir vurdert mot og har et *potensial for global oppvarming* på 1.

Klatrat (metanhydrat) En frossen eller delvis frossen blanding av metangass og is, vanligvis funnet i sedimenter.

Klima Vanligvis definert som gjennomsnittlig vær, eller mer presist, som den statistiske beskrivelse av været i termer som gjennomsnitt og avvik i relevante størrelser over en periode som kan variere fra måneder til millioner av år. Den klassiske periode for beregning av gjennomsnitt for aktuelle værparametre er 30 år, slik dette er definert av World Meteorological Organization. De vanligste størrelsene er temperatur, nedbør, vind og trykk. I et videre perspektiv kan klima defineres som statistisk beskrivelse av tilstanden til *klimasystemet*.

Klimaendring Uttrykket refererer til en endring i *klimasystemets* tilstand, en endring som kan identifiseres ved gjennomsnitt og/eller variasjon i aktuelle størrelser (deteksjon). Endringen varer for en utvidet periode, typisk tiår eller lengre. Klimaendringer kan skyldes naturlige indre prosesser i klimasystemet (interne *klimaendringer*), naturlige *strålingspådriv*, eller varige *antropogene* endringer i atmosfærens sammensetning eller i bruk av jordoverflaten. *Framework Convention on Climate Change* definerer *antropogene klimaendringer* som en endring i klimaet som tilskrives direkte eller indirekte menneskelig aktivitet som forandrer sammensetningen av den globale atmosfæren. I tillegg kommer *naturlige klimavariasjoner* som observeres over tilsvarende perioder.

Klimamodell En numerisk representasjon av *klimasystemet* og dets variasjoner basert på fysiske, kjemiske og biologiske egenskaper i de ulike komponentene i systemet, prosesser for vekselvirkningen mellom disse komponentene og prosesser for ulike *klimatilbakekoplinger*. Klimasystemet kan representeres i modeller for bare en av komponentene, slik som atmosfæren, eller for en kombinasjon av komponenter, slik som atmosfære og hav. Modellene kan formuleres i et spekter med varierende kompleksitet etter romlig oppløsning, etter hvor mange fysiske, kjemiske og biologiske prosesser som er inkludert eller etter graden i bruk av empiriske parameteriseringer. De mest kompliserte versjonene utvikles i koplede modeller for atmosfære og hav (AOGCM-er). Det foregår en kontinuerlig utvikling mot mer komplekse modeller som i større grad tar med

vekselvirkning mellom kjemi og biologi, for eksempel modeller som inkluderer *karbonkretsløpet*.

Klimaprojeksjon En projeksjon er et estimat for klimasystemets respons på *utslippsscenarioer* eller scenarier for konsentrasjoner av *drivhusgasser* og *aerosoler* eller scenarier for strålingspådriv. En klimaprojeksjon er som regel basert på simuleringer med *klimamodeller*. En skiller mellom klimaprojeksjoner og klimaprediksjoner for å vektlegge at klimaprojeksjoner avhenger på et gitt scenario for utslipp/konsentrasjon/strålingspådriv. Slike scenarier baserer seg på antakelser om for eksempel en framtidig sosioøkonomisk og teknisk utvikling som enten kan eller ikke kan bli realisert. Slik er *usikkerhet* involvert.

Klimapådriv Et strålingspådriv er endringen i netto irradians nedover minus irradians oppover i atmosfæren (uttrykt i W/m^2) ved *tropopausen* på grunn av en endring i et ytre pådriv for *klimaendringer*, slik som for eksempel en endring i konsentrasjonen av *karbondioksid* eller i stråling fra sola. Et strålingspådriv beregnes med alle troposfæriske egenskaper holdt konstant på sine uforstyrrede nivå. En tillater at temperaturen i stratosfæren, om den påvirkes, tilpasses en strålingslikevekt. I IPCCs rapporter er strålingspådriv vanligvis definert som en endring i forhold til året 1750, og som globale, årlige verdier. Strålingspådriv må ikke forveksles med strålingspådriv fra skyer, et lignende uttrykk brukt for å beskrive effekten av skyer på irradians på toppen av atmosfæren.

Klimasensitivitet I rapportene fra IPCC refererer *sensitivitet ved likevektsklima* seg til likevektsendringen i årlig *global overflatetemperatur* som følge av en dobling i den *ekvivalente konsentrasjonen av karbondioksid* i atmosfæren. Denne sensitiviteten i en *klimamodell* blir, på grunn av begrensning i beregningskapasitet, vanligvis estimert ved å kjøre en modell for atmosfæren koplet til et blandingslag for havet (klimamodell med blandingslag for havet; slab-ocean model). Dette kan gjøres fordi sensitiviteten for det meste bestemmes av prosesser i atmosfæren. Effektive modeller med et dynamisk hav kan også kjøres til likevekt. Den effektive klimasensitiviteten er et lignende mål som omgår kravet om likevekt. Den blir vurdert fra modellresultater under skiftende strålingsforhold uten likevekt og er et mål for styrken i *klimatilbakekoplingene* ved et bestemt tidspunkt. Denne sensitiviteten kan variere med pådrivshistorien og klimatilstanden. Størrelsen for klimasensitivitet (enhet $^{\circ}C/(W/m^2)$) refererer seg til likevektsendringen i *global overflatetemperatur* for en enhet *strålingspådriv*. Transient klimarespons er endringen i global overflatetemperatur, midlet over en periode på 20 år, sentrert om tiden da karbondioksid i atmosfæren dobles. Om konsentrasjonen økes med 1 % i året skjer dette etter 70 år. Denne endringen er et mål på styrken og tempoet i responsen til overflatetemperaturen for et pådriv fra *økt drivhuseffekt*. Klimasensitivitet estimeres ikke bare i klimamodeller, men også ut fra observasjoner av *klimaendringer*, spesielt mellom *istider* og *mellomistider*.

Klimasystemet Et svært komplekst system med fem hovedkomponenter: *atmosfæren*, *hydrosfæren*, *kryosfæren*, *landoverflaten* og *biosfæren* og vekselvirkningen mellom dem. Klimasystemet endrer seg over tid på grunn av

systemets egen dynamikk og på grunn av eksterne *klimapådriv* slik som fra vulkanutbrudd, endringer i *solstrålingen* og *antropogene* pådriv slik som endringer i atmosfærens sammensetning og endringer i bruk av jordoverflaten.

Klimatilbakekopling Et resultat av en første prosess i *klimasystemet* kan utløse andre prosesser som påvirker resultatet av den første prosessen. En mekanisme som gir en slik vekselvirkning mellom prosesser i klimasystemet kalles en klimatilbakekopling, eller bare tilbakekopling. En positiv tilbakekopling forsterker den opprinnelige prosessen, en negativ tilbakekopling reduserer den. Ulike tilbakekoplingsmekanismer ventes å forsterke effekten av økt antropogen *drivhuseffekt*. Se *albedotilbakekopling*; *klimasensitivitet*.

Kondensasjon Den fysiske prosessen som bringer vanndamp over til vann eller vann i fast form. Den motsatte prosessen er *fordampning* (evaporasjon). På mikroskala vil begge prosessene alltid opptre samtidig. Kondensasjon frigjør latent varme i fuktighet. Se *skykondensasjonskjerne*.

Konveksjon Vertikal bevegelse drevet av oppdriftskrefter som oppstår ved statisk instabilitet. For havet oppstår denne instabiliteten ved avkjøling og økende *saltholdighet* i overflaten og for atmosfæren ved oppvarming ved overflaten. Ved konveksjon er den vertikale skala omtrent like stor som den horisontale skala. Netto vertikal massetransport er vanligvis mye mindre enn utvekslingen opp- og nedover hver for seg.

Kosmisk stråling Se *galaktisk kosmisk stråling*.

Kryosfæren Den komponenten av *klimasystemet* som består av alt snø, is og frossen jordoverflate (*permafrost* medregnet) på og under jordas overflate og i havet. Se *isbreer* og *innlandsis*.

Kyotoprotokollen Denne protokollen til *FNs rammekonvensjon for klimaendringer (United Nations Framework Convention on Climate Change; UNHCCC)* ble adoptert i 1997 i Kyoto, Japan. Den inneholder bindende avtaler om å redusere utslipp av antropogene *drivhusgasser* med fem prosent under utslippene i 1990 for perioden 2008-2012.

La Niña Se *El Niño-Sørlige Oscillasjon (ENSO)*.

Levetid Et generelt uttrykk for ulike tidsskalaer som karakteriserer endring over tid i prosesser som bestemmer konsentrasjonen til *sporgasser* (inkludert *drivhusgasser*). Det kan skjelles mellom ulike tider.

Oppholdstid (T) (også kalt global atmosfærisk levetid) er forholdet mellom massen *M* til et reservoar (for eksempel for en gass i atmosfæren) og den totale takten for fjerning av masse fra reservoaret, *S*: $T = M/S$. For hver prosess som fjerner masse kan det defineres egne oppholdstider. I karbonbiologi for skog er oppholdstid referert til som midlere oppholdstid.

Tilpassningstid eller *responstid* (T_a) er den tidsskalaen som karakteriserer hvor raskt en øyeblikkelig impuls til et reservoar avtar. Tilpassningstid brukes også for å karakterisere tilpasningen i et reservoar etter en endring i kildestyrken. *Halveringstid* er brukt for å kvantifisere en eksponensiell reduksjon. Termen levetid er noen ganger for enkelhets skyld brukt som erstatning for tilpassningstid.

I enkle tilfeller, der global fjerning av en komponent er direkte proporsjonal med den totale massen til reservoaret, er tilpassningstiden lik oppholdstiden: $T = T_a$. Et eksempel er KFK-11 (CFC-11) som bare fjernes fra atmosfæren ved fotokjemiske prosesser i *stratosfæren*. I mer kompliserte tilfeller der flere reservoarer er involvert og fjerning ikke er proporsjonal med den totale massen, holder ikke dette. *Karbondioksid* (CO_2) er et ekstremt tilfelle. Dets oppholdstid er bare fire år på grunn av en hurtig utveksling mellom atmosfæren og havet og biosfæren over land. Likevel, en stor del av denne CO_2 returneres til atmosfæren innen noen få år. Derfor er tilpassningstiden for CO_2 i atmosfæren bestemt av raten for fjerning av karbon fra grenselaget i havet og nedover i havets dypere lag. Selv om en passende verdi på 100 år blir gitt, er den aktuelle tilpassningstiden hurtigere i starten og senere langsommere. For metan (CH_4) er tilpassningstiden forskjellig fra oppholdstiden fordi fjerningen for det meste skjer gjennom kjemiske reaksjoner med radikale OH fra hydroxyl, som har en konsentrasjon som avhenger av konsentrasjonen til CH_4 . Derfor er ikke fjerningsraten S proporsjonal med total masse M .

Litosfæren Det øverste laget av den faste jord, både over kontinent og hav, bestående av alle bergarter i overflaten og den kalde, for det meste elastiske del av den øverste mantelen. Vulkansk aktivitet, selv om den er en del av litosfæren, er vanligvis ikke regnet som en del av klimasystemet, men virker som en faktor for eksterne *klimapådriv*.

Luftmasse Et geografisk område med luft med omtrent like (homogene) egenskaper, for eksempel når det gjelder vertikal fordeling av temperatur og fuktighet. Egenskapene kan dannes mens lufta tilpasser seg visse forhold over et område (for eksempel maritime, kontinentale, tropiske og arktiske områder), eller ved typiske forandringer ved bevegelse fra et område til et annet.

Maunder minimum En periode med liten *solaktivitet* - et minimum for *solflekker* - på slutten av 1600-tallet. Vanligste tidsangivelse er fra 1645 til 1715.

Meridional omveltningssirkulasjon (Meridional Overturning Circulation; MOC) Meridional (sør-nord) sirkulasjon i havet som kvantifiserer omveltningen i havet ved sonale summer (øst-vest) av massetransport gjennom hele dypet. MOC blir oftest beregnet for Nord-Atlanteren der varmt vann strømmer nordover i lagene nær overflaten og kaldt vann i dypet strømmer sørover. I Nord-Atlanteren, borte fra subpolare regioner, er MOC ofte identifisert ved *Termohalin sirkulasjon* (*THC*), som er en konseptuell tolkning av strømmene. MOC inkluderer imidlertid vanligvis også grunne strømmer nær overflaten satt opp av vinden.

Midtholosen En periode i *holosen*, mellom 5000 og 8000 år siden, da klimaet var varmere enn i dag. Perioden er også blitt kalt optimum holosen eller midtholosen.

Naturlige klimaendringer Endringer i klima som ikke har sin årsak i *antropogen* virksomhet. De kan ha sin årsak i naturlige *strålingspådriv*, slik som fra endringer i *solaktivitet* og partikler fra vulkanutbrudd. Naturlige endringer omfatter også *interne klimavariasjoner* som oppstår i klimasystemet uten ytre pådriv.

Oppholdstid Se *levetid*.

Overflatetemperatur Se *global overflatetemperatur*, *overflatetemperatur over land*, *sjøtemperatur (SST)*.

Overflatetemperatur over land Lufttemperaturen slik den måles i ventilerte små hytter 1,5 meter over bakken.

Ozon Ozon er en gass i atmosfæren, en form av oksygen med tre atomer (O_3). I *troposfæren* blir den dannet både naturlig og ved fotokjemiske reaksjoner som omfatter gasser som resultat fra menneskers aktivitet (smog). Troposfærisk ozon virker som en *drivhusgass*. I *stratosfæren* dannes ozon ved vekselvirkning mellom ultrafiolett *solstråling* og molekylær oksygen (O_2). Stratosfærisk ozon spiller en dominerende del i stratosfærens strålingsbalanse. Konsentrasjonen er høyest i ozonlaget.

Paleoklima Klimaet i perioder før måleinstrumenter ble utviklet, inkludert historisk og geologisk tid. For paleoklima er bare *proksidata* tilgjengelige.

Paleeoklimatologi Studiet av *paleoklima*.

Parameter for klimatilbakekopling En parameter som uttrykker en strålingsmessig respons i *klimasystemet* som følge av en endring i *global overflatetemperatur* forårsaket av et første *strålingspådriv* (enhet $Wm^{-2}/^{\circ}C$). Denne størrelsen varierer som den inverse av *klimasensitiviteten* (enhet $^{\circ}C/Wm^{-2}$). Formelt defineres parameteren som $\Lambda = (\Delta Q - \Delta F) / \Delta T$, der Q er gjennomsnittlig globalt strålingspådriv, T er gjennomsnittlig *global overflatetemperatur*, F er varmekraften til havet og Δ representerer en endring i forhold til et uforstyrret klima.

Permafrost Jordoverflate (jord eller stein) med temperatur som forblir ved $0^{\circ}C$ eller lavere i minst to påfølgende år. Tundra er et samisk ord som også omfatter *økosystemet* i permafrost.

pH pH er et dimensjonsløst mål på surheten i vann eller en oppløsning og gitt ved konsentrasjonen av hydrogenjoner (H^+). pH måles på en logaritmisk skala der $pH = -\log_{10}(H^+)$. På den måten svarer en økning i pH på en enhet til en tidobling i konsentrasjonen av H^+ , eller surhet.

Planetær skala Romlig skala i atmosfæren og havet som er så stor at den dekker store deler av vår planet.

Potensial for global oppvarming (Global warming potential; GWP) En indeks basert på de strålingsmessige egenskapene til godt blandede *drivhusgasser*. Indeksen måler *strålingspådrivet* til en masse av en gitt godt blandet drivhusgass, integrert over en valgt tidshorisont, relativt til pådrivet fra *karbondioksid*. GWP representerer en kombinert effekt av forskjellig *levetid* i atmosfæren for de ulike gassene og deres relative evne til å absorbere utgående *infrarød termalstråling*. *Kyotoprotokollen* er basert på GWP-er fra utslipp over en tidsramme på 100 år.

Presesjon Langsom endring i retningen til jordas rotasjonsakse i forhold til verdensrommet (stjernene). Den viktigste perioden er omtrent 26000 år. Denne gyroskopiske bevegelsen av jorda skyldes tidekrefter fra sol og måne på den faste jord, krefter som henger sammen med at jorda ikke er en perfekt kule. Se *eksentrisitet; skråning av jordaksen*.

Proksi En proksi klimaindikator er en lokal registrering som tolkes, ved å bruke fysiske og biologiske prinsipp, for å representere klimarelaterte variasjoner tilbake i tid (vanligvis lengre tilbake enn den tiden det foreligger meteorologiske målinger). Klimarelaterte data som fremkommer på denne måten kalles *proksidata*. Eksempler på proksidata inkluderer data fra pollenanalyse, data fra *treringer*, karakteristiske trekk i koraller og ulike data fra iskjerner.

Proksidata Se *proksi*.

Pådrivseffektivitet (efficacy) Et mål for hvor effektivt et *strålingspådriv* fra en antropogen eller naturlig mekanisme er til å endre *global overflatetemperatur* sammenlignet med et tilsvarende strålingspådriv fra *karbondioksid*. En økning i karbondioksid har ved definisjon en "efficacy" på 1.0.

Radiometrisk datering Metoder til å bestemme alderen på ulikt materiale (slik som bergarter, fossiler og mange slags gjenstander, både naturlige og lagd av mennesker) gjennom å måle reduksjon i radioaktiv aktivitet i ulike isotoper ut fra deres kjente halveringstider. En mye brukt metode er C14-metoden som brukes til å datere organisk materiale som ble dødt for inntil omtrent 40000 år siden (halveringstid cirka 5700 år).

Reanalyse Analyser for påfølgende tilstander i atmosfæren (vind, temperatur, fuktighet og andre variable; kan også gjelde havet), som regel for hver 6. time over flere av de siste tiårene. Tilstandene bestemmes ut fra tilgjengelige observasjoner og ved bruk av en bestemt metode for dataassimilasjon som veier informasjonen i observasjonene og korte prognoser fra forrige tilstand. I motsetning til analyser av tilstander i operasjonell værvarsling, der metodene til stadighet videreutvikles, er reanalyser beregnet med samme metode for

dataassimilasjon. Fra tid til annen oppdateres reanalyser med oppdaterte metoder for dataassimilasjon.

Rekonstruksjon Bruk av klimaindikatorer for å bestemme fortidens klima.

Relativ fuktighet Forholdet mellom partialtrykket til vanndamp i en gassblanding av luft og vann og vanndampens metningstrykk (til vann) ved blandingens temperatur. Kan også defineres ved forholdet mellom vanndampens blandingsforhold og blandingsforholdet ved metning. Uttrykkes i prosent.

Respirasjon En prosess der levende organismer utløser energi ved å omgjøre organisk materiale til *karbondioksid* ved bruk av molekylær oksygen.

Romlig og temporær skala Klima kan variere på en rekke skalaer i rom og tid. Romlig skala kan variere fra lokal skala (mindre enn 100 000 km²), regional skala (100 000 til 10 millioner km²) til kontinental skala (10 til 100 millioner km²). Tidsskalaer (temporære skalaer) kan variere fra sesongskala til geologisk skala (opp til hundrevis millioner år).

Saltholdighet Et mål på oppløst salt i sjøvann. Angis formelt i vektdeler per tusen vektdeler sjø. Saltholdighet inngår som en tilstandsvariabel for vannmasser.

Scenario En mulig og ofte forenklet beskrivelse av hvordan framtiden kan utvikle seg, basert på et konsistent sett av forutsetninger om drivkreftene og nøkkelrelasjonene. Scenarier kan utvikles fra *klimaprojeksjoner*, men er ofte basert på tilleggsinformasjon fra andre kilder, noen ganger kombinert med en historieutvikling.

Scenario for strålingspådriv En mulig representasjon av framtidig utvikling av strålingspådriv, for eksempel knyttet til endringer i atmosfærens sammensetning eller bruk av jordoverflaten, eller til ytre faktorer slik som endringer i *solaktivitet*. Scenario for strålingspådriv kan brukes som inngangsdata i *klimamodeller* for å beregne *klimaprojeksjoner*.

Sirkulasjon Generelt betyr sirkulasjon en væskes bevegelse i eller gjennom et gitt areal eller volum. Sirkulasjon er også et matematisk presist mål for gjennomsnittlig strøm langs en lukket kurve.

Siste interglasial (Last Interglacial; LIG) Se *interglasial*.

Siste istids maksimum (Last glacial max.; LGM) Dette er tiden under siste *istid* da utbredelsen av *innlandsis* nådde sitt maksimum, omtrent for 21000 år siden. Denne perioden er blitt mye studert fordi *strålingspådrivene* og overflatebetingelsene er relativt godt kjent og fordi avkjølingen ved denne tiden er av samme størrelsesorden som oppvarmingen som er projisert for neste hundre år.

Sjøis Alle former for is på sjøen som skyldes frysing av sjøvann. Sjøis kan være isflak som beveger seg på havoverflaten ved vind og strøm (pakkis), eller et fast dekke som ikke beveger seg, men er festet til en kyst (landfast is). Is med varighet mindre enn ett år kalles førsteårsis. Flerårsis er sjøis som minst har overlevd siste sommers smeltesesong.

Sjøtemperatur i overflaten (sea surface temperature; SST) Sjøtemperaturen i overflaten er temperaturen i de øverste få meter av havet målt fra skip, faste og drivende bøyer. For målinger fra skip skjedde det i 1940-årene en overgang fra å måle temperaturen i en bøtte med sjøvann til å måle i vann tatt inn fra motorinntaket. Satellittmålinger av temperaturen i overflatehinnen (tykkelse deler av mm) brukes også, men må justeres for å bli sammenlignbare med de andre målingene.

Skråningen på jordaksen (aksetilten; obliquity) Vinkelen mellom planet for jordas bane og planet til jordas ekvator (eller mellom jordaksen og normalen til ekliptikken). Vinkelen varierer mellom 22,0 og 24,5 grader over 40000 år, og er for tiden 23,44 grader og minkende.

Skykondensasjonskjerne (cloud condensation nuclei; CCN) Partikler i lufta hvor fuktighet kan kondensere til vann i flytende form. Kondensasjonen leder som regel til dannelse av skydråper. Se *aerosoler*.

Solaraktivitet I perioder viser sola stor aktivitet som observeres ved et stort antall *solflekker*, men også ved forhøyet stråling (*fakler*), magnetisk aktivitet og utslipp av partikler med høy energi (solvind). Disse variasjonene foregår på en rekke tidsskalaer fra millioner av år til minutter. Se *solar 11-års syklus*.

Solar 11-årssyklus En nesten regulær modulering av *solaktiviteten* med varierende amplitude og med en periode mellom 9 og 13 år.

Solflekker Små mørke områder på sola. Antall solflekker er høyere gjennom perioder med høy *solaktivitet*. Antall solflekker varierer spesielt mye innen en *solar 11-års syklus*. Se *fakler*.

Solstråling (solarstråling) Elektromagnetisk stråling emittert fra sola. Strålingen refereres til som kortbølget stråling. Solstråling skjer i et bestemt intervall med bølgelengder (spektrum) bestemt av solas temperatur, med størst utslag ved synlige bølgelengder. Se *termal infrarød stråling*.

Sot Partikler formet gjennom brenning av gasser ved den ytre kanten av flammer av organisk damp. Består vesentlig av karbon, med mindre mengder oksygen og hydrogen til stede som karboksyl og fenolgrupper. Se *svart karbon*.

Stalagmitt Et type dryppstein som vokser opp fra gulvet i enkelte kalksteinsgrotter. Stalagmitt blir ofte forvekslet med stalakitt, som vokser ned fra taket. Dryppstein vokser ved drypp av mineralholdige oppløsninger. Studier av

tilveksten per år kan noen ganger brukes som *proksi* for klimavariabler som nedbør.

Stormflo Høy vannstand knyttet til *sykloner* - tropiske og utenomtropiske sykloner. Stormflo skyldes primært sterk vind som skyver på havets overflate mot land. Lavt trykk har også en effekt, men den er mindre. Grunt hav kan forsterke utslagene. Kombinasjonen av lavtrykk med vedvarende vind mot land over grunt hav er vanligvis hovedårsak til skader ved stormflo, for eksempel inn over kyster i sørlige del av Nordsjøen. Stormflo blir mest alvorlig når den kommer samtidig med høyt tidevann (springflo).

Statisk stabilitet (vertikalstabilitet) Mål for statisk stabilitet i atmosfæren angir luftens evne til å blande seg vertikalt ved turbulens på grunn av oppdriftskrefter. Lufta er statisk ustabil om den blir eller forblir å være turbulent og statisk stabil om den blir eller forblir å være uten turbulens (laminær). Tilstanden mellom disse to tilstandene kalles nøytral. Meteorologer vurderer statisk stabilitet fra vertikalprofil (sondering) av temperatur og fuktighet. Se *Konveksjon*.

Stratosfære Sjiktet av atmosfæren over *troposfæren* fra omtrent 10 km over jordoverflaten (16 km i tropene ned til 9 km ved polene) til en høyde på omtrent 50 km. Stratosfæren karakteriseres med stor *statisk stabilitet* for vertikale forstyrrelser.

Størrelsesorden. Uttrykk brukt for å karakterisere omtrentlig størrelse på en variabel, gjerne en differanse. Størrelsen skaleres med en potens av 10, dvs. 10, 100, 1000 etc. En størrelsesorden større betyr omtrent ti ganger større. To størrelsesordner betyr omtrent hundre ganger større etc.

Svart karbon (BC) Består av sot og kullpartikler og/eller annet strålingsabsorberende organisk materiale. Kan defineres som en aerosol som absorberer stråling. Evnen til absorpsjon kan måles direkte eller ved kjemisk reaksjonsevne og/eller termisk stabilitet.

Sykloner Alle slags lavtrykksområder i atmosfæren. Vinden viser et spiralmønster innover mot sentrum av sykloner, mot klokka på nordlige halvkule og med klokka på sørlige halvkule.

Temporær skala Se *Romlig og temporær skala*.

Termal ekspansjon For havet referer dette til økningen i volum (og minking i tetthet) som følge av varmere *vannmasser*. En oppvarming i havet leder til en ekspansjon av havets volum og derfor til en økning i havnivået. Se *Endring i havnivå*.

Termal infrarød stråling Stråling emittert fra jordas overflate, atmosfæren og skyene. Den er også kjent som terrestrisk stråling eller langbølget stråling, men må skjelnes fra nær infrarød stråling som er en del av solspekteret. Generelt har

infrarød stråling et område med bølgelengder (spektrum) som er lengre enn bølgelengdene i de røde fargene i den synlige delen av spekteret. Spekteret for termal infrarød stråling er i praksis forskjellig fra kortbølget *solstråling* pga. den store forskjellen mellom temperaturene på sola og i klimasystemet.

Termohalin sirkulasjon (THC) En storstilt sirkulasjon i havet som transformerer vannmasser i øvre lag av havet med lav tetthet til vannmasser med høyere tetthet i havets midtre og dype lag og som returnerer disse vannmassene tilbake til havets øvre lag. Sirkulasjonen er asymmetrisk med overgang til vannmasser med stor tetthet i bestemte regioner på høye bredder og retur til overflaten som involverer sakte oppvelling og diffusive prosesser over mye større geografiske områder. THC drives ved stor tetthet ved eller nær overflaten pga. lav temperatur og/eller høy *saltholdighet*, men på tross av navnet er sirkulasjonen også drevet ved mekaniske krefter knyttet til vind og tidevann. Uttrykket THC har ofte blitt brukt synonymt med *Meridional omveltningssirkulasjon* (MOC).

Tetthetsfunksjon for sannsynlighet (probability density function; PDF) En funksjon som indikerer den relative sannsynlighet for at ulike verdier for en variabel kan inntreffe. Funksjonen integreres til tallet en over hele området der variabelen er definert og har den egenskapen at integralet over et delområde er lik sannsynlighet for at variabelen skal ha verdier mellom grensene for dette delområdet. For eksempel kan en finne sannsynligheten for at en temperaturanomali, definert på en spesiell måte, er større enn null ved å integrere anomaliens PDF over alle mulige anomalier større enn null. Tetthetsfunksjoner som beskriver to eller flere variable samtidig, kan defineres på samme måte.

Tilbakekopling Se *Klimatilbakekopling*.

Tilpasningstid Se *Levetid*.

Total solar irradians (TSI) Mengden *solstråling* mottatt utenfor jordas atmosfære på en flate normalt på strålene og for jordas gjennomsnittlige avstand fra sola. Pålitelige målinger av slik solstråling kan bare utføres fra verdensrommet, og nøyaktige målinger eksisterer bare fra 1978. Den generelt aksepterte verdi (*solarkonstanten*) er 1368 W/m^2 med en nøyaktighet på omtrent 0,2 %. Variasjoner på noen få tidendedeler av en prosent er vanlig, vanligvis knyttet til passasje av *solflekker* på solas overflate. Variasjon av TSI over *solar 11-årssyklus* er i størrelsesorden 0,1 %. Se *solstråling*.

Transient klimarespons Se *klimasensitivitet*.

Transpirasjon *Fordampning* av vann fra planter og blader på trær.

Troposfære Nederste del av atmosfæren, fra overflaten til omtrent en høyde på 10 km (i gjennomsnitt fra 9 km ved polene til 16 km ved ekvator). Her opptrer

skyer og ulike værphenomen. Vanligvis avtar temperaturen med høyden i troposfæren. Se *vertikal gradient*.

Usikkerhet En term som uttrykker i hvor stor grad en verdi (for eksempel en framtidig tilstand for *klimasystemet*) er ukjent. Usikkerhet kan være et resultat av mangel på informasjon eller uenighet om hva som er kjent eller hva som er mulig å kjenne. Usikkerhet kan ha mange ulike kilder, fra feil som kan kvantifiseres i data til konsept definert på ulike måter, eller usikre projeksjoner for menneskers adferd. Usikkerhet kan representeres med kvantitative mål, for eksempel et intervall av verdier beregnet ved forskjellige modeller, eller ved kvalitative utsagn, for eksempel uttrykt ved eksperters meninger.

Utslippsscenario En mulig framstilling av framtidig utvikling i *antropogene* utslipp av substanser som potensielt er strålingsmessig aktive (for eksempel *drivhusgasser*, *aerosoler*). Et slikt scenario bygger på et konsistent sett av forutsetninger om drivkreftene (slik som demografisk, sosioøkonomisk og tekniske utvikling) og de viktigste sammenhengene mellom dem. Konsentrasjonsscenarioer basert på ulike utslippsscenarioer, blir brukt som inngangsdata i *klimamodeller* for å beregne *klimaprojeksjoner*. I IPCC ble det i 1992 presentert en samling utslippsscenarioer som er blitt brukt for klimaprojeksjoner. Disse scenariene refereres til som IS92. IPCC publiserte nye utslippsscenarioer i år 2000 som kalles *SRES-scenarioer*. Noen av disse er blitt brukt sammen med andre projeksjoner presentert i IPCCs rapporter fra 2001 og 2007.

Watt En avledet SI-enhet for måling av effekt. Symbolet for watt er **W**. En watt svarer til 1 joule per sekund (1 J/s) eller i elektriske enheter 1 volt-ampere (1 V·A). Enheten *watt* beskriver raten i joule per sekund som energi konverteres, brukes eller spredes med.

Økosystem Et system der levende organismer samhandler med hverandre og med deres fysiske omgivelser. Grensene for hva som kan kalles et økosystem er noe tilfeldig alt etter interesseområde. Slik kan utstrekningen av et økosystem variere fra små lokale skalaer til hele kloden sett under ett.