

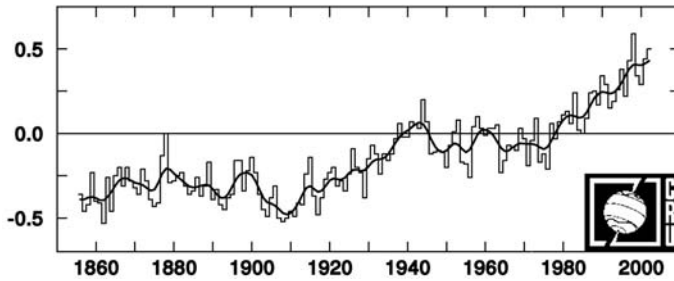
DEN GLOBALE OPVARMNING

- et resultat af drivhuseffekten og variationer på solen

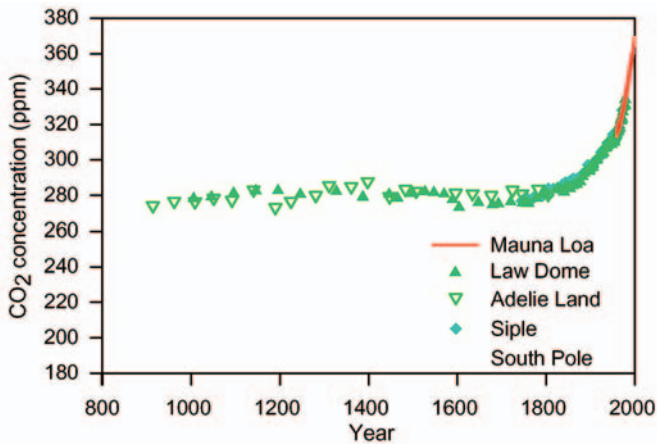
Bennert Machenhauer og Eigil Kaas
Danmarks Meteorologiske Institut

1. Indledning

I mere end hundrede år er der på basis af et verdensomspændt net af meteorologiske målinger konstateret en globale opvarmning lige over jordoverfladen (omfattende både land- og havområder) på i alt 0,6-0,7 grader C, som vist i Figur 1. En ekstrapolation tilbage i tiden på basis af »proxydata« antyder at den globale temperatur ikke har været højere de sidste 2000 år. Samtidig er de atmosfæriske koncentrationer af de vigtigste drivhusgasser steget betydeligt. Fx er koncentrationen af den vigtigste, kuldioxid (CO_2), tiltaget med 32 % (fra 280 ppmv til 370 ppmv) siden forindustriel tid (Figur 2), og det er på basis af geologiske undersøgelser sandsynligt at den nuværende koncentration er den største i de sidste 20 millioner år. Siden 1860 er de næstvigtigste drivhusgasser, metan (NH_4) og lattergas (N_2O), steget med henholdsvis 151 % og 17 %. Denne vækst af drivhusgasser må ifølge basale fysiske love have bidraget til den globale opvarmning. Opvarmningen er dog blevet reduceret en del på grund af stigende udslip af forureningspartikler (aerosoler) i atmosfæren, der generelt virker afkølede. Der har også i samme periode været variationer i Solens aktivitet. Figur 3 (stiplet kurve) viser et eksempel på en rekonstruktion af variationer i solens energiudstråling fra 1870 til 2000. Der er i de senere år kommet stadig flere undersøgelser som peger på, at i hvert fald 11-års variationerne i solens aktivitet svinger i takt med adskillige parametre i Jordens nedre atmosfære, som fx temperatur og lavt skydække. Der er derfor også en mulighed for, at de mere langperiodiske variationer i solaktivitetsniveauet (som vist fx i Figur 3) i visse perioder kan have bidraget til den globale opvarmning. En kvantitativ vurdering af årsagerne til den globale opvarmning kan opnås ved hjælp af eksperimenter med klimamodeller, såfremt de indgående fysiske/kemiske processer kan simuleres realistisk i modellerne. De seneste modelsimuleringer tyder på, at modellerne nu er kommet tæt på et sådant stade. Som det fremgår af Figur 1 er temperaturstigningen ved jordoverfladen foregået i to perioder i det 20. århundrede. Første stigning var fra begyndelsen af århundredet til 1940'erne og den anden, stadig igangværende, stigning fra sent i 1960'erne til slutningen af århundredet. Som vi, ud fra eksperimenter med klimamodeller skal argumentere for, kan den sidste kraftige opvarmning hovedsagelig tilskrives den samtidige kraftige forøgelse af drivhusgasserne, medens en betydelig del af den første stigning i det 20. århundrede kan tilskrives en samtidig stigning i solstrålingens intensitet. En forståelse af den hidtidige udvikling er en forudsætning for at kunne fremskrive udviklingen. Vi kan kun fæste lid til disse modellers fremskrivninger for resten af indeværende århundrede, såfremt modellerne på basis af fysiske/kemiske love er i stand til realistisk at simulere i udviklingen i det 20. århundrede. Dette synes at være lykkedes i de nyeste modelsimuleringer. Der er således kun en meget ringe mulighed for, at modellerne simulerer den korrekte udvikling »af den forkerte årsag«, om end det stadig ikke fuldstændig kan udelukkes.



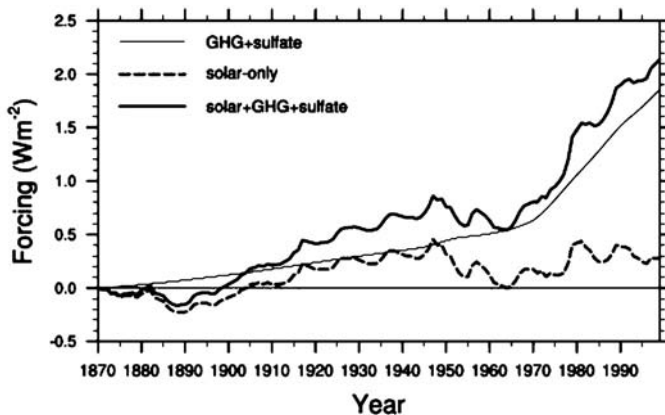
Figur 1. Den globale temperaturudvikling (i forhold til gennemsnittet 1961-1990) nær ved Jordens overflade beregnet ud fra målinger af temperaturen over land og hav i perioden 1855-2002. Enhed: $\times C$. Kilde: CRU, Univ. of East Anglia, UK.



Figur 2. Udviklingen i atmosfærens indhold af kuldioxid siden førindustriell tid. x-aksen viser året og y-aksen koncentrationen i ppmv, dvs. and molekyler CO_2 per million luftmolekyler. De grønne og blå punkter er målinger fra luftbobler i Antarktis' indlandsis og den røde kurve er atmosfæriske målinger fra Mauna Loa observatoriet på Hawaii. Kilde: IPCC.

2. Drivhuseffekten

Drivhuseffekten bygger på velkendte fysiske love: Omkring 50% af den solstråling, der når vores planet ender med at blive absorberet i jordoverfladen og i oceanerne, der derved opvarmes. Ca. 30% af solstrålingen reflekteres til verdens-



Figur 3. Rekonstruktioner af ændringen i forskellige klimapåvirkninger (force-ringer) i perioden 1870-2000. Enhed W/m^2 . Den fuldt optrukne tynde kurve viser drivhusgasser og den direkte effekt fra menneskeskabte sulfataerosoler. Kilde: Dai et al. (2001). Den stiplede kurve beskriver et estimat af variationer i solens energiidstråling ved toppen af Jordens atmosfære. Kilde: Hoyt and Schatten (1993) (opdateret). Den tykke fuldt optrukne kurve er summen af to.

rummet af især skyerne, og denne del medvirker derfor ikke til at opvarme Jorden. De resterende knapt 20% af solstrålingen bliver absorberet i atmosfæren og medvirker således til at opvarme denne. Jordoverfladen og oceanerne slipper af med den modtagne solenergi ved at udstråle infrarød stråling opad og ved at der fordampes vand (fordampningen afkøler overfladen kraftigt) samt ved turbulent varmeledning fra overfladen. Den infrarøde stråling kan kun i meget begrænset omfang slippe direkte igennem atmosfæren og ud til verdensrummet, fordi skyerne og drivhusgasserne, absorberer langt det meste. Atmosfæren opvarmes derved. Den opvarmes dog også ved at vanddamp fortættes til sne og regn (når fortætning og frysning foregår frigives der store mængder latent varme). Atmosfæren afgiver den modtagne varme ved at drivhusgasserne og skyerne udsender infrarød stråling både opad og nedad. Det betyder altså, at man ved Jordoverfladen ikke kun modtager strålingen fra solen, men også en betydelig opvarmende infrarød (tilbage)stråling ovenfra. Drivhuseffekten, dvs. drivhusgassernes og skyernes absorption og tilbagestråling af infrarød stråling betyder at temperaturen ved overfladen og i hele den nedre del af Jordens atmosfære er markant højere – faktisk ca. 30 grader C – end den ellers ville være. Isoleret set må den ovennævnte forøgelse af drivhusgassernes koncentration i atmosfæren således næsten uundgåeligt have bidraget til en global opvarmning. Mængden af drivhusgasser har i Jordens udviklingshistorie formentlig altid været en afgørende medspiller i forbindelse med klimavariationer.

De 3 vigtigste naturlige drivhusgasser i det nuværende klima er vanddamp, kuldiioxid og metan. Kuldiioxid og metan har en lang levetid i atmosfæren og er derfor velblandede. Vanddampkoncentrationen varierer derimod kolossalt fra

meget høje koncentrationer nær ved overfladen i troperne til meget små koncentrationer i de arktiske egne samt i den øverste del af troposfæren og i stratosfæren. Dette er især fordi det maksimale vanddampindhold, der kan være i atmosfæren (inden der dannes skyer og nedbør) vokser eksponentielt med temperaturen.

3. Samtidige ændringer i aerosoler

Stigningen i drivhusgassernes koncentration er imidlertid ikke den eneste påvirkning af klimaet, der har ændret sig i de sidste ca. 100 år. Først og fremmest er der sket en samtidig forøgelse af små menneskeskabte forureningspartikler (såkaldte aerosoler, navnlig bestående af sulfater) i atmosfæren. Disse partikler har en afkølede effekt, i form af både en direkte effekt og to såkaldte indirekte effekter relateret til skyer. Den *direkte* effekt er en delvis refleksion af solstrålingen fra partiklerne til verdensrummet, hvilket naturligvis har virket reducerende på den globale opvarmning. Den *første indirekte* effekt hænger sammen med, at især lavtliggende skyer, der består af meget små dråber er mere hvide end skyer, der består af lidt større dråber. Dannelse af skydråber forudsætter nemlig tilstedeværelse af såkaldte kondensationskerner, dvs. små partikler, fx i form af sulfat- eller saltaerosoler. Da forureningen medfører, at der kommer mange flere kondensationskerner, kommer skyerne således til at bestå af flere mindre dråber i stedet for færre større dråber. De bliver hermed mere hvide, så de reflekterer mere solstråling tilbage til verdensrummet. Den *anden indirekte* effekt af forureningen er, at levetiden og vandindholdet i de lave skyer forøges. Dette skyldes at nedbørsudløsnings i vandskyer er desto mere effektiv jo større skydråber, der er i en sky. Da forureningen medfører at der dannes relativt flere små og færre store dråber reduceres nedbørseffektiviteten hvormed de afkølede hvide vandskyer lever længere og skydækket generelt tiltager.

På. gr. af en meget kort levetid i atmosfæren, modsat drivhusgasser, er aerosoler ikke velblandede op igennem atmosfæren. Koncentrationen varierer derfor stærkt fra sted til sted afhængig af placeringen af forureningskilderne og transporten i atmosfæren.

4. Samtidige ændringer i ozon

En yderligere ændring af betydning er den menneskeskabte reduktion af ozon (O_3) oppe i stratosfæren. Dette har samlet set virket som et svagt afkølede bidrag. I troposfæren, dvs. under ca. 10-15 km er der modsat sket en menneskeskabt stigning i koncentrationerne af ozon, og det har bidraget noget til global opvarmning.

P. gr. af en kort levetid i atmosfæren, modsat kuldioxid og metan, er ozon ikke en velblandet drivhusgas i atmosfæren. Koncentrationen varierer fra sted til sted afhængig af placeringen af dens kilder og dens transport i atmosfæren.

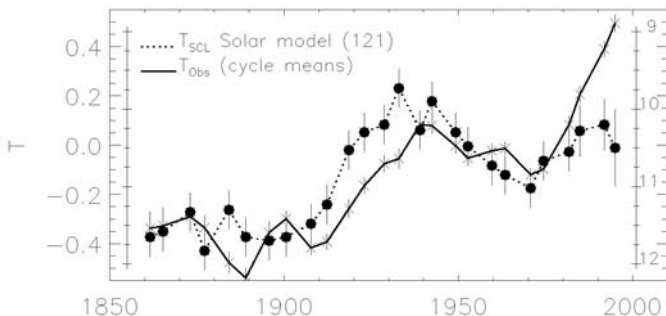
5. Samtidige Vulkanudbrud

Modsat ændringerne i ozonlaget har voldsomme vulkanudbrud, som kaster store mængder af vulkansk støv og gasser op i stratosfæren, virket afkølede. Her spredes især sulfataerosoler efterhånden over det meste af Jorden, og op til flere år efter et sådant udbrud svækker dette solindstrålingen til troposfæren og overfladen på grund af refleksion til verdensrummet. Vulkanudbrud virker således dæm-

pende på den globale opvarmning. De væsentlige vulkanudbrud siden forindustriell tid er kendt, og man har til brug for modelsimuleringer estimeret hver enkelt refleksion til verdensrummet.

6. Samtidige Variationer på Solen

Direkte målinger fra satellitter har vist, at intensiteten af solstrålingen udenfor Jordens atmosfære har varieret med ca. 1 promille de seneste to årtier. Man har forsøgt at ekstrapolere denne variation tilbage til forindustriell tid ved hjælp af flere forskellige solparametre, fx solpletal, som har været observeret i mange år. Dette er dog forbundet med stor usikkerhed. Den stiplede kurve i Figur 3 er et eksempel på en sådan rekonstruktion. Resultatet af en anden ekstrapolation baseret alene på den 11-årige solplet- cyklus-længde, viser en voksende intensitet af solstrålingen frem til ca. 1940, derpå et fald til omkring 1960-1970, hvorpå der følger en yderligere stigning, som imidlertid i 1990'erne er vendt til et fald. Frem til dette sidste fald kunne man få denne rekonstruerede variation af solstrålingen (eller rettere solplet-cyklus- længden) til at passe ganske godt med en udglattet variation af temperaturen ved jordoverfladen over den nordlige halvkugles kontinenter. Denne sammenhæng, ført frem til omkring ca. 1985, blev beskrevet af to danske forskere Friis-Christensen og Lassen (1991), der tolkede dette som en indikation af at solen havde haft en afgørende indflydelse på variationer i Jordens temperatur. Senere viste Thejll og Lassen (2000), at når de nyeste data, som da var til rådighed, blev benyttet, sås en voksende afvigelse mellem kurverne for solplet-cyklus-længden og temperaturen, som især blev betydelig i løbet af 1980'erne og 90'erne, hvor temperaturen er steget kraftigt; se Figur 4. Dette blev så tolket som, at variationer på Solen måske nok kunne forklare variationerne i den nordlige halvkugles middeltemperatur i begyndelsen af det 20. århundrede, men næppe alene kunne forklare stigningen i slutningen af århundredet. Andre forhold måtte altså have været af betydning, ikke mindst i 1990'erne.



Figur 4. Den fuldt optrukne kurve viser den observerede temperatur nær jordoverfladen på den nordlige halvkugle. Den stiplede kurve med sorte prikker viser forløbet af solpletcykluslængden. Kilde Thejll og Lassen (2000).

En tilsyneladende vanskelighed for Sol-Klima teorien var, at estimater af solens energiidstråling i det 20. århundrede kun udviste variationer på omkring 2

promille af den totale energiudstråling. Dette skønnes umiddelbart for småt til at have en væsentlig effekt på jordoverfladens temperatur i sammenligning med de kendte energipåvirkninger, der er fra fx den tiltagende drivhuseffekt.

7. Tilbagekoblinger

En opvarmning af jordoverfladen, hvad enten den skyldes den ene eller anden påvirkning, medfører også såkaldte »tilbagekoblinger« (feed backs), positive (dvs. forstærkende) og negative (d. v. s. svækkende). Lad os se på de vigtigste af disse tilbagekoblinger.

1. Vanddamp-tilbagekobling: En varmere jordoverflade medfører en forøget fordampning, som fører til en større koncentration af vanddamp i atmosfæren. Vanddamp er som nævnt en drivhusgas, så et forøget vanddampindhold især højt oppe i atmosfæren fører generelt til en yderligere opvarmning. Altså er dette en positiv tilbagekobling.
2. Sne/is-tilbagekobling: En generel opvarmning vil medføre en reduktion (ved smeltning) af sne-dækket over kontinenterne og havisdækket over oceanerne, først og fremmest om vinteren. Da sne og is har en høj refleksionssevne medfører dette en formindskelse af refleksionen til verdensrummet af solstrålingen ved jordoverfladen. Altså også en positiv tilbagekobling.
3. Dynamisk sky-tilbagekobling: Et forøget skydække kan have både en positiv og en negativ effekt, afhængig af skyernes højde over jordoverfladen. Højtliggende tynde skyer (Cirrus) er generelt ret gennemskinnelige, så de reflekterer kun lidt solstråling, men de bidrager væsentligt til drivhuseffekten. Derfor fører en forøgelse af mængden af høje skyer generelt til en forøget opvarmning af jordoverfladen. Hvis dette sker i forbindelse med global opvarmning, er der tale om en positiv tilbagekobling. Lave, tætte (hvide) skyer reflekterer meget solstråling, og svækkelsen af solstrålingen dominerer over drivhuseffekten fra disse skyer. Hvis mængden af lave skyer øges i forbindelse med global opvarmning, er der derfor generelt tale om en negativ tilbagekobling. Hvorvidt der dannes flere eller færre skyer af forskellige typer i et varmere klima, altså om de repræsenterer en positiv eller negativ tilbagekobling, er et af de store usikkerhedsmomenter i klimaforskningen. Der er ikke generelt observationsgrundlag til at afgøre om sky-tilbagekoblingen har været positiv eller negativ i forbindelse med den hidtidige globale opvarmning. Det kan dog bemærkes, at nye satellitbaserede undersøgelser peger på en formindskelse skydækket i løbet af sidste 10-15 år – altså måske en positiv tilbagekobling. Vi skal desuden se, at der nye modelsimuleringer af den første globale opvarmning i begyndelsen af det 20. århundrede er konstateret en positiv dynamisk sky-tilbagekobling i forbindelse med sol-påvirkninger klimaet. Der er foreslået andre tilbagekoblinger, heraf enkelte negative. Generelt gælder det, at Jordens klima er ganske stabilt, fordi en opvarmning/afkøling fører til, at planeten taber mere/mindre energi i form af infrarød stråling til verdensrummet. Tilbagekoblingerne er blot med til forstærke eller formindske den nye ligevægtstilstand, fx en større eller mindre opvarmning som følge af en forøget udstråling fra solen.

8. Teorier for forstærkende sol-mekanismer

Siden det har været skønnet, at variationer i solstrålingens intensitet er for små til direkte at kunne påvirke jordoverfladens temperatur nævneværdigt, har der

været fremsat forskellige teorier for, hvordan indvirkninger af variationerne på solen skulle kunne forstærkes i Jordens atmosfære. Vi skal beskrive de to mest seriøse teorier nedenfor. Hertil kommer den ovenfor nævnte positive dynamiske sky-tilbagekobling, som har vist sig at virke forstærkende i et nyligt offentliggjort klimamodeleksperiment. Dette beskrives nærmere i afsnit 7.

- **Store variationer i UV strålingen**

Den første teori bygger på den kendsgerning, at intensiteten i de korteste bølgelængder af solstrålingen, den ultraviolette (UV) stråling, varierer langt mere end intensiteten af det synlige lys. Over en 11-års solcyklus skønmæssigt 3,5 % -7 %, hvilket er langt mere end de ca. 2 promille for samtlige bølgelængder, som er nævnt ovenfor. UV strålingen absorberes i stratosfæren hvor den resulterer i ozondannelse og opvarmning. Det er i denne opvarmning, som bl.a. medfører ændringer i den vertikale stabilitet i stratosfæren, hvilket igen kan indvirke på vejsystemer længere nede i atmosfæren. Modellforsøg, hvor realistiske variationer i UV strålingen blev indført i en klimamodel (Haigh (1999) med detaljeret vertikal opløsning i den øvre atmosfære, har faktisk vist, at disse variationer kan have en ikke ubetydelig indvirkning på det simulerede klima. De simulerede ændringer er størst i stratosfæren, men kan også ses nede i troposfæren, hvor bl.a. de subtropiske vind og trykssystemer påvirkes – også helt nede ved Jordens overflade. De nyeste studier af observerede atmosfæriske variationer i forbindelse med solens 11-års cyklus (fx Gleisner og Thejll, 2003) har visse fælles træk med modeleksperimenterne, hvilket kan tolkes således, at variationerne i UV-strålingen er en ganske stærk kandidat til en mekanisme, der kan forstærke signalet i forbindelse i forbindelse med solens 11-års cyklus.

- **Skydækket, kosmisk stråling og solstrålingens intensitet**

En anden teori er fremført af to danskere, Svensmark og Friis-Christensen (1997) (S&F-C). Deres teori går ud på, at skymængden påvirkes af atmosfærisk ionisering som følge af varierende mængder af energirig galaktisk kosmisk stråling. Det er en kendsgerning, at den kosmiske stråling i høj grad er styret af aktiviteten på solen, således at når denne aktivitet er høj, er den kosmiske stråling ringe. S&F-C fandt, ved at benytte satellitbaserede skydata fra perioden mellem 1984 og 1991, at når den kosmiske stråling aftog, aftog også middelskydækket over store dele af Jorden. De så dengang kun på det totale skydækket over oceanerne mellem 60N og 60S, hvor de fandt, at skydækket tiltog med 3-4 % fra sol(plet)maksimum til sol(plet)minimum, og de foreslog, at dette kunne skyldes den kosmiske stråling, samt at det forøgede skydække måtte medføre en global afkøling. Den bagvedliggende fysisk/kemiske mekanisme som S&F-C foreslog er analog til de indirekte effekter af forureningspartikler (aerosoler), refereret ovenfor i afsnit 3. I dette tilfælde antoges imidlertid, at en forøgelse af antallet af kondensationskerner kunne forårsages af en forøget kosmisk stråling.

På basis af den opnåede korrelation konkluderede Marsh og Svensmark (2000a), at den estimerede reduktion af den kosmiske stråling i det 20. århundrede kunne have været ansvarlig for en stor del af den globale opvarmning. Som vist af Kristjansson og Kristiansen (2000) forsvandt imidlertid korrelationen mellem det totale skydække og kosmisk stråling efter 1989, og når

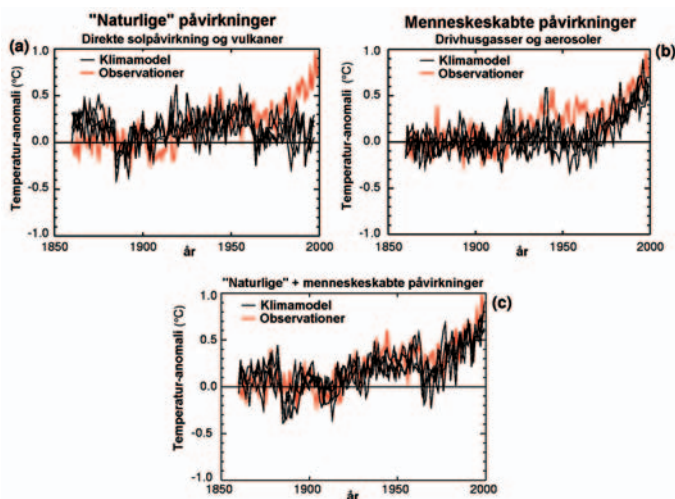
analysen blev udstrakt til 1999 blev korrelationen ligefrem negativ. Dette skyldes, at den kosmiske stråling og det totale skydække (skydækket af skyer i alle højder) i den sidste halvdel af den udvidede periode varierer helt ude af takt med hinanden. For nylig demonstrerede Marsh and Svensmark (2000b), ved anvendelse af data fra perioden: juli 1983 til juni 1994, at mængden af mellemhøje og høje skyer ikke korrelerede med den kosmiske stråling, men at en høj korrelation fandtes mellem kosmisk stråling og skydækket af lave skyer (korrelationskoefficient: 0,92). Kristjansson et al. (2002, 2003) viste imidlertid ved anvendelse af data gældende frem til år 2000 at også denne korrelation formindskedes med opdaterede data (korrelationskoefficient: 0,456). De viste endvidere (Kristjansson et al. 2003, med data frem til september 2001), at en mere tydelig sammenhæng (korrelationskoefficient: - 0,563) blev opnået mellem skydækket af lave skyer og solens samlede energiidstråling. Det skal dog nævnes, at der potentielt set kan være problemer både med observationer af solens energiidstråling og med satellitobservationer af skydækket af lave skyer. Dette gør, at man ikke med sikkerhed kan konkludere, at det lave skydække varierer mere i overensstemmelse med solens energiidstråling, end det gør med kosmisk stråling.

9. Simuleringer med klimamodeller

For at undersøge hvorvidt den observerede variation af den globale middeltemperatur ved jordoverfladen kan forklares kvantitativt ved de ovenfor beskrevne naturlige og menneskeskabte påvirkninger af klimaet, er der verden over foretaget en række klimamodelforsøg. Formålet med disse eksperimenter har også været at estimere hvilke påvirkninger, der har været hovedansvarlige for de forskellige faser af den globale opvarmning. Det hidtil mest omfattende eksperiment, bestående af en serie af modelsimuleringer, som inkluderer både naturlige og menneskeskabte påvirkninger, blev foretaget af »The Hadley Centre for Climate Prediction« ved det Britiske Meteorologiske Institut, og dens resultater blev offentliggjort i Stott et al. (2000). Med en avanceret koblet atmosfære-oceanlandoverflademodel udførtes tre sæt af simuleringer. De startede alle i førindustriell tid og kørtes frem til år 2000. I det første sæt af simuleringer medtoges kun de kendte naturlige påvirkninger: rekonstruerede variationer i solstrålingens intensitet og i refleksionen fra vulkanskstøv i stratosfæren. I det næste sæt medtoges kun de menneskeskabte påvirkninger: Variationer i rekonstruerede drivhusgas-, ozon- og aerosolkoncentrationer. Endelig i det tredje sæt medtoges alle de nævnte påvirkninger, både de naturlige og de menneskeskabte. Hvert sæt af modelsimuleringer består af fire individuelle simuleringer, som er startet med lidt forskellig begyndelsesbetingelse i det første år. I alle tre sæt er der udsving i den globale middeltemperatur ved jordoverfladen, T_s , som skyldes uforudsigelige (kaotiske) tilfældige interne svingninger i modelklimasystemet. Udsvingene i disse interne svingninger er i reglen ude af fase med hinanden og mindre end de udsving som skyldes væsentlige eksterne påvirkninger. Man laver netop flere simuleringer for at have mulighed for at skelne betydelige udsving forårsaget af eksterne påvirkninger fra de mindre interne udsving.

I det første sæt af simuleringer lod man som sagt solstrålingens intensitet og indholdet af vulkansk støv i stratosfæren variere som observeret – eller rettere, som rekonstrueret. Alle andre parametre, så som koncentrationer af drivhusgasserne (undtagen vanddamp), holdes konstant. Vi skal kun se på T_s som funktion af tiden. I de først ca. hundrede år følger simuleringerne i dette sæt i store træk

de observerede udsving i T_s , bortset fra de tilfældige interne udsving (Figur 5a). Efter ca. 1970 begynder den observerede T_s at stige, især kraftigt i 1990'erne, udover de mindre interne udsving, medens modelsimuleringerne varierer omkring en uændret T_s . Dette viser, at de naturlige eksterne påvirkninger, som medtaget i denne klimamodel, kan forklare de store udsving i den observerede T_s op til ca. 1970, i særdeleshed det første betydelige positive udsving (på ca. 0,3-0,4 grader C) i det 20. århundrede, med maksimum omkring 1940. Det andet sæt af simuleringer udviser kun de små interne svingninger i T_s de første ca. hundrede år (Figur 5b). Herefter stiger den simulerede temperatur og fluktuerer pænt omkring den observerede T_s . Dette viser, at de medtagne menneskeskabte, eksterne påvirkninger, kan forklare den anden globale opvarmning i det 20. århundrede, d.v.s. stigningerne i den observerede T_s efter ca. 1970, og især de store stigninger i 1990'erne. I det tredje sæt af Hadley Centrets simuleringer fluktuerer simuleringerne som ventet pænt omkring den observerede T_s over hele perioden fra 1860 til 2000 (Figur 5c).



Figur 5. Den globale temperatur nær ved jordens overflade vist som afvigelse fra gennemsnittet i perioden 1961-90. De grå kurver viser de observerede temperaturer. Hver af de sorte kurver viser fire individuelle beregninger, som er koblet atmosfære-ocean klimamodel fra Hadley Centeret i England. I del a er modellen blevet påvirket med den estimerede direkte effekt fra ændringer i solaktivitet samt med effekten fra vulkansk aktivitet. Tilsvarende viser del b simuleringer, hvor modellen er påvirket med menneskeskabte stigninger i koncentrationer af drivhusgasser samt med den menneskeskabte afkølede effekt af aerosoler. Del c viser simuleringer, hvor både menneskeskabte og naturlige påvirkninger er inkluderet. Kilde: Stott et al. (2000)

Vi kan konkludere, at simuleringer, som er påbegyndt i føridustriell tid med en moderne computermodel af Jordens klimasystem viser, at når drivhusgasserne og forureningspartiklernes estimerede påvirkning inkluderes fås simuleringer, som kvantitativt stemmer fint overens med den observerede stigning i T_g over de seneste årtier. Det er således yderst sandsynligt, at årsagen til denne del af den globale opvarmning er disse menneskeskabte påvirkninger. Den første globale opvarmning i det 20. århundrede synes derimod i det væsentlige at kunne forklares ved de medtagne naturlige påvirkninger.

Det er vigtigt, at bemærke, at de nævnte simuleringer ikke er noget endegyldigt bevis for årsagerne til global opvarmning. Hvis modellen fx har for stor følsomhed (dvs. for store positive tilbagekoblinger) i forhold til naturen, vil den faktisk overdrive den globale opvarmning som følge af de medtagne påvirkninger. Hvis dette er tilfældet, ville der i en mere realistisk model være behov for en yderligere positiv påvirkning fra fx solen for at forklare opvarmningen. Modsat er det for nylig blevet foreslået, at de beregnede afkølede indirekte aerosolpåvirkninger fra forurening er alt for små i simuleringerne i forhold til virkeligheden. Hvis dette er rigtigt, har modellen godt nok været i stand til at beskrive den korrekte globale opvarmning, men den har gjort dette ved hjælp af urealistisk stor positiv påvirkning (den tiltagende drivhuseffekt er ikke i tilstrækkelig grad blevet mindsket af effekten fra aerosoler); og dermed er det virkelige klimasystem mere følsomt end modellen.

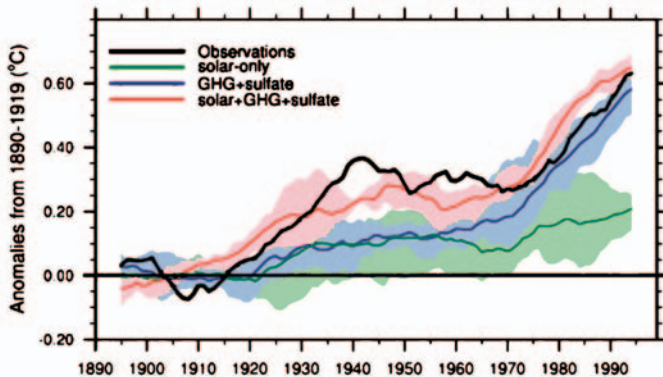
Det er bemærkningsværdigt, at der i Hadley Centerets beregninger ikke er »behov« for de forstærkende sol-mekanismer som blev nævnt i Afsnit 6 for at simulere den globale opvarmning i de seneste årtier:

- For det første er det selve solstrålingens intensitet, integreret over alle bølgelængder, som indgår i modeleksperimentet. Der er således ingen bølgelængde-afhængighed af solens påvirkning og ozonkoncentrationer er foreskrevet uden variationer i takt med UV-strålingen.
- For det andet påvirkes skydannelsen ikke af den kosmiske stråling, der slet ikke indgår i modeleksperimentet.

Efter Hadley Centerets eksperiment kræves dog stadig svar på hvordan de relativt svage naturlige påvirkninger kan være den primære årsag til den første store globale opvarmning i det 20. århundrede. Som vi skal se tyder analyser af yderligere et modeleksperiment (Meehl et al., 2003), foretaget af forskere ved National Center for Atmospheric Research (NCAR) i USA på, at en hidtil ukendt forstærkende mekanisme, en dynamisk sky-tilbagekobling, rent faktisk var virksom under denne opvarmning.

Det pågældende NCAR eksperiment er, med nogle få undtagelser, identisk med Hadley Center eksperimentet. Tre sæt simuleringer, hvert sæt bestående af fem eller fire enkeltsimuleringer, blev foretaget med en koblet atmosfære-ocanlandoverflademodel. Simuleringerne startedes alle i 1870 og kortes frem til år 2000. I det første sæt af simuleringer medtoges kun rekonstruerede variationer i solstrålingens intensitet, men man undlod at medtage vulkansk støv i Stratosfæren, som man havde gjort i Hadley Center simuleringerne. I det næste sæt simuleringer medtoges kun de menneskeskabte påvirkninger: Variationer i rekonstruerede drivhusgas- og ozon- og aerosolkoncentrationer (modsat Hadley Centerets simuleringer er kun den direkte effekt medtaget og sod er ikke inkluderet). Endelig i det tredje sæt medtoges alle de nævnte påvirkninger, både de menneskeskabte og en varierende solstrålingsintensitet. I Figur 3 er vist tidsserier af den samlede klimapåvirkning, den såkaldte »forcing«, ved atmosfærens top i de tre sæt af simuleringer. Ved f. eks. solstrålingens (»solar-only«) forcing forstås æn-

dringen siden 1870 i netto indstrålingen til Jorden. Ved drivhusgas + aerosol (GHG + sulfater) forcing forstå tilsvarende ændringen i drivhusgassernes udstråling og aerosolernes refleksion til verdensrummet. I Figur 6 er vist den globale årlige middeltemperatur simuleret i de tre sæt eksperimenter. For at fokusere på langtidsændringerne, som vi her er interesseret i, er alle indgående tidsserier midlet ved anvendelse af et løbende 11-års-middel. Spredningen omkring midlet af hvert eksperimentset er vist i Figur 6 ved skygger med forskellig farve.



Figur 6. Observeret (sort kurve) simulerede (farvede kurver) temperaturer nær ved jordoverfladen. Hver farve repræsenterer simuleringer med forskellige klimapåvirkninger i NCAR's klimamodel (se tekst for flere detaljer). Kilde: Meehl et al. (2003)

Hovedresultaterne af modeleksperimentet svarer til Hadley Centrets resultater. For det første viser tidsserien for »GHG + sulfater + solar« en relativ god overensstemmelse med den observerede temperaturudvikling. Dog er den tidlige i modsætning til den sene opvarmning i århundredet ikke simuleret kraftigt nok, hvilket kan skyldes at vulkanske aerosoler ikke er inkluderet og måske også at de indirekte aerosoleffekter er udeladt. Det har heller ikke været formålet med NCAR eksperimentet at opnå den bedst mulige overensstemmelse med observationer, men snarere at fokusere på processen bag solens indvirkning i den tidlige globale opvarmningsperiode i det 20. århundrede. Denne opvarmningsperiode defineres her som 35 års perioden fra 1905 til 1940, og den sene opvarmningsperiode defineres som 30 års perioden fra 1965 til 1995. For den første periode ses solens indvirkning at være hovedansvarlig for opvarmningen, idet »GHG + sulfater« -midlet kun viser en opvarmning på 0,08 grader C medens tilføjelsen af solens indvirkning i »GHG + sulfater + solar« producerer en opvarmning på 0,24 grader C, tættere på den observerede. Tilsvarende ses drivhusgas og aerosolforcingen at dominere i den sene opvarmningsperiode idet »solar-only« -midlet kun viser en opvarmning på 0,1 grad C medens en simulering af den kraftige observerede opvarmning kræver at »GHG + sulfater« -forcingen tilføjes (ca. 0,4 grader C).

Det er bemærkelsesværdigt at det lykkedes NCAR forskerne, ved en detaljeret analyse af ændringer over den tidlige 35-års opvarmingsperiode at vise, at Solens direkte påvirkning forstærkes ved følgende nyopdagede tilbagekoblings løkke:

1. Aftagende skydække over de subtropiske oceaniske kildeområder for vanddamp fører til forøget solindstråling i disse områder (det er i høj grad disse kildeområder, der leverer vandamp til de tropiske regnområder, især i de intertropiske konvergenzoner over oceanerne og monsunregn-områderne over land).
2. Den forøgede solopvarmning i kildeområderne er blevet anvendt til en forøget fordampning fra havoverfladen.
3. Den forøgede fordampning i kildeområderne forklarer en forøget nedbør i de tropiske regnområder.
4. Forøgelsen af nedbøren i regnområderne indebærer en forøget frigivelse af latent varme, hvilket indebærer kraftigere atmosfæriske cirkulationer (såkaldte Hadley- og Walker-cirkulationer) og dermed kraftigere nedsynkning over kildeområderne.
5. Den forøgede nedsynkning over kildeområderne fører til en relativ udtørring der forklarer reduktionen af skydækket, som vi startede med i punkt 1.

NCAR forskernes analyse af deres modeleksperiment viser ikke en tilsvarende tilbagekobling for den sene 30-års opvarmingsperiode (fra 1965 til 1995), som er helt domineret af påvirkningen (forcing) fra den tiltagende drivhuseffekt, skønt solpåvirkningen også er steget i årene ca. 1960 til 1980 (se Figur 1). De begrundes forskellen i tilbagekobling med, at der er store geografiske forskelle i påvirkningen i forbindelse med tiltagende solindstråling, mens påvirkningen er mere jævnt fordelt overalt i forbindelse med den tiltagende drivhuseffekt. Det er netop forskelle i påvirkning, som er med til at igangsætte de cirkulationer, som er en kernen i den beskrevne tilbagekoblingsmekanisme.

10. Konkluderende betragtninger

Flere nyere undersøgelser peger på, at variationer i solens aktivitet har haft en indflydelse på de klimavariationer, der har været i det 20. århundrede. Det er således sandsynligt, at den generelle globale temperaturstigning i første halvdel af århundredet tildels skyldes tiltagende solaktivitet. Dette resultat er blandt andet opnået ved at sammenligne den observerede klimatiske udvikling med forskellige mål for solens varierende aktivitet. Forsøg på at rekonstruere solens energidstråling før man kunne måle den fra satellitter, er usikre, men de har dog peget på, at energipåvirkningen af Jordens klima herfra højest har varieret med nogle få tiendedele af en Watt per kvadratmeter, hvilket umiddelbart er for småt til at forklare opvarmningen. Derfor må man spørge sig selv, hvilken fysisk mekanisme, der eventuelt har kunnet forstærke solens indflydelse på klimavariationerne. Vi har her gennemgået tre muligheder:

- 1) Den ultraviolette del af solstrålingen varierer relativt set langt mere end totalstrålingen. Dette kan have haft en betydelig opvarmende og afkølede effekt i stratosfæren, som via atmosfærens dynamik kan forplante sig ned i troposfæren.
- 2) Variationer i solens aktivitet medfører variationer i den mængde galaktisk kosmisk stråling, vi modtager. Det er foreslået, at disse variationer kan påvirke produktionen af sky-kondensationskerner, og dermed mængden af især

lave skyer. Dette vil på grund af lave skyers store betydning for Jordens energibalance kunne forstærke solens betydning for klimavariationer.

- 3) En såkaldt tilbagekoblingsmekanisme i Jordens klimasystem, der involverer ændringer i fordampning, nedbør og cirkulationer især i de tropiske og subtropiske områder.

Det er – også for os – stadig et åbent spørgsmål, hvilken eller hvilke af disse, der er af størst betydning. Den første har været eftervist og analyseret i flere klimamodel eksperimenter af solens 11-års cykel, men det er usikkert hvorvidt mekanismen også er virksom over længere perioder. Den anden kunne potentielt set være meget kraftig, men den involverer en hel kæde af processer, hvoraf nogle endnu er genstand for betydelig faglig kontrovers. Den tredje er opdaget ved at analysere klimamodel eksperimenter, men det er stadig åbent hvor vigtig, den er i den virkelige verden. Dog er det vores opfattelse, at de bagvedliggende fysiske processer er særdeles rimelige og godt kunne være en hovedårsag til mange af de variationer, man observerer. Dette gælder i øvrigt også de mere kortvarige variationer i forbindelse med solens 11-års cyklus som fx observerede variationer i lavt skydække og i troposfærens temperatur-, fugtigheds- og trykforhold.

I anden halvdel af det 20. århundrede – og specielt i de sidste 2-3 årtier – har der udover solens 11-års cyklus tilsyneladende kun været små variationer i solens aktivitet, næsten uanset hvilket parameter for solens aktivitet, man ser på. Dette gælder også kosmisk stråling og estimater af styrken af solens magnetfelt mm. Derfor er det overvejende sandsynligt, som model eksperimenterne viser, at opvarmningen i denne periode er menneskeskabt og primært skyldes tiltagende drivhuseffekt.

Referencer.

- Friss-Christensen, E. and K. Lassen, 1991: »Length of the Solar Cycle: An Indicator of Solar Activity Closely Associated with Climate«. **Science**, **254**, 698-700.
- Gleisner, H. and P. Thejll, 2003: Patterns of tropospheric response to solar variability. *Geoph. Res. Lett.*, Vol **30**, no. 13, 1711-1714.
- Haigh, J. D., 1999: A GCM study of climate change in response to the 11-year solar cycle. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 871-892
- Kristjánsson, J. E., and J. Kristiansen, 2000: Is there a cosmic ray signal in recent variations in global cloudiness and cloud radiative forcing?, *J. Geophys. Res.*, **105**, 11,851– 11,863.
- Kristjánsson, J.E., A. Staple, J. Kristiansen and E. Kaas, 2002: A new look at possible connections between solar activity, clouds and climate, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. **29**, No. 23, 2107.
- Kristjánsson, J.E., J. Kristiansen, and E. Kaas, 2003: "Solar activity, cosmic rays, clouds and climate - an update". Accepted for publication in *Adv. Space Res.*
- Marsh, N.D. and H. Svensmark (2000a): Cosmic Rays, Clouds, and Climate. *Space Science Review*, 94, 215-230.
- Marsh, N.D. and H. Svensmark (2000b): Low Cloud Properties influenced by Cosmic Rays. *Physical Review Letters*, bind **85**(23), side 5004-5007.
- Meehl, G. A., W. M. Washington, T. M. L. Wigley, J. M. Arblaster and A. Dai: Solar and Greenhouse Gas Forcing and Climate Response in the Twentieth Century. *J. Climate*, **16**, 426-444
- Stott, P.A., SFB. Tett, G.S. Jones, M.R. Allen, J.F.B. Mitchell and G.J. Jenkins (2000) *Science*. bind **290**, side 2133-2137.

- Svensmark, H. and E. Friss-Christensen (1997). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, bind **59**, side 1225-1232.
- Thejll, P. and K. Lassen, 2000: Solar forcing of the Northern hemisphere land air temperature: New data, *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, **62**, pp. 1207-1213, 2000.