

# Om klimamodeller og satellitmålinger

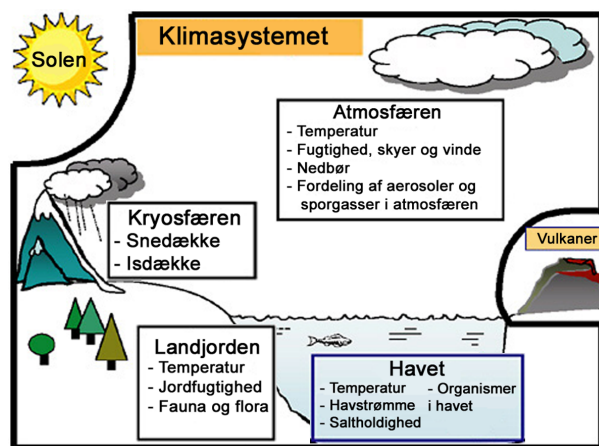
Af Jens Ulrik Andersen, Institut for Fysik og Astronomi, Aarhus Universitet

I diskussionen om den menneskeskabte globale opvarmning spiller klimamodeller en central rolle. Set i lyset af de dramatiske naturlige klimavariationer, især ved afslutningen af sidste istid for ca. 12.000 år siden, men også i den senere veksel mellem varme og kolde perioder, er den globale opvarmning på knap en grad i det sidste århundrede hverken usædvanlig eller foruroligende. Det er klimamodellernes sammenkædning af denne opvarmning med udledningen af drivhusgasser, især CO<sub>2</sub>, og deres fremskrivning af opvarmningen i det kommende århundrede, der vækker bekymring. Det kan forudses at atmosfærens indhold af CO<sub>2</sub> vil blive fordoblet, og FN's klimapanel, IPCC, angiver i den seneste vurdering (AR4 i 2007) omkring 3 °C som det bedste bud på den medfølgende globale temperaturstigning.

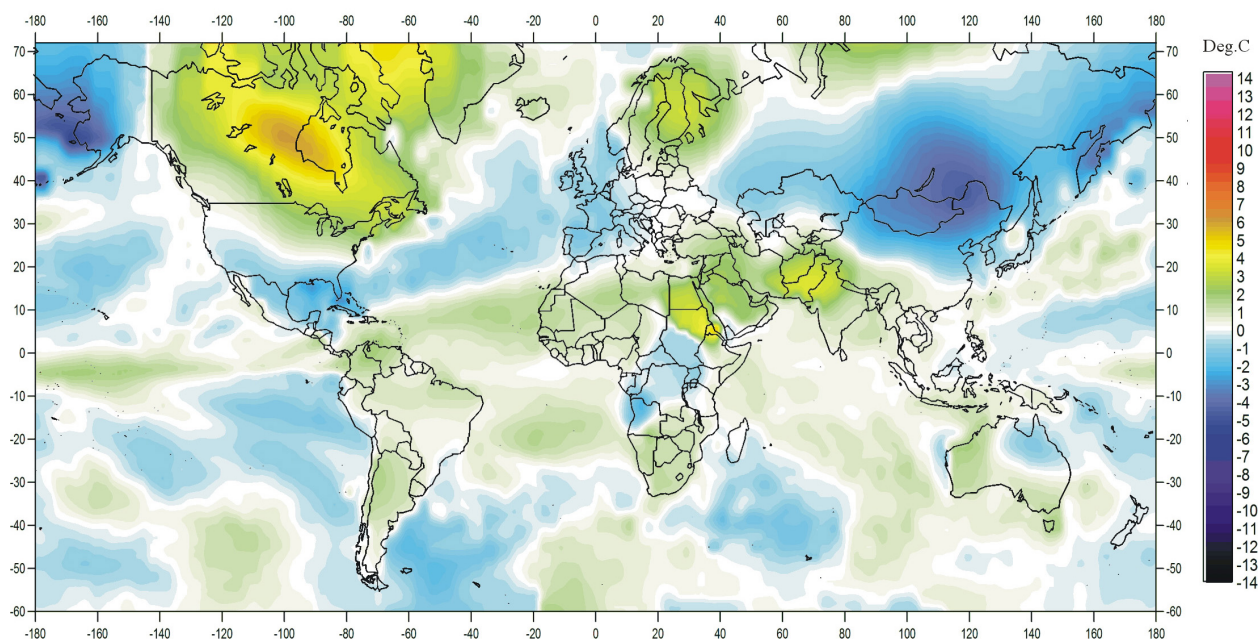
De mest ambitiøse klimamodeller er de globale cirkulationsmodeller, der forsøger at simulere dynamikken af Jordens atmosfære og indvirkningen af den forøgede koncentration af drivhusgasser. Dette er en formidabel udfordring. Klimaets dynamik er et kompliceret samspil mellem en række systemer, som illustreret i figur 1 [1].

Figur 2 viser satellitmålinger af atmosfærens temperatur tæt ved overfladen i marts 2010, plottet som anomalier, dvs. afvigelser fra gennemsnittet i årene 1998-2006 [2]. Som det fremgår af figuren, er disse anomalier op til adskillige grader og meget varierende geografisk. Det kan sammenlignes med størrelsen af de klimaændringer, som man forsøger at beregne. I perioden efter 1970, hvor man mener at den menneskeskabte udledning af drivhusgasser har haft en afgørende indflydelse på klimaet, er Jordens gennemsnitstemperatur kun steget med nogle få tiendedele grader. Det viser at man skal være meget forsigtig med at forbinde observerede

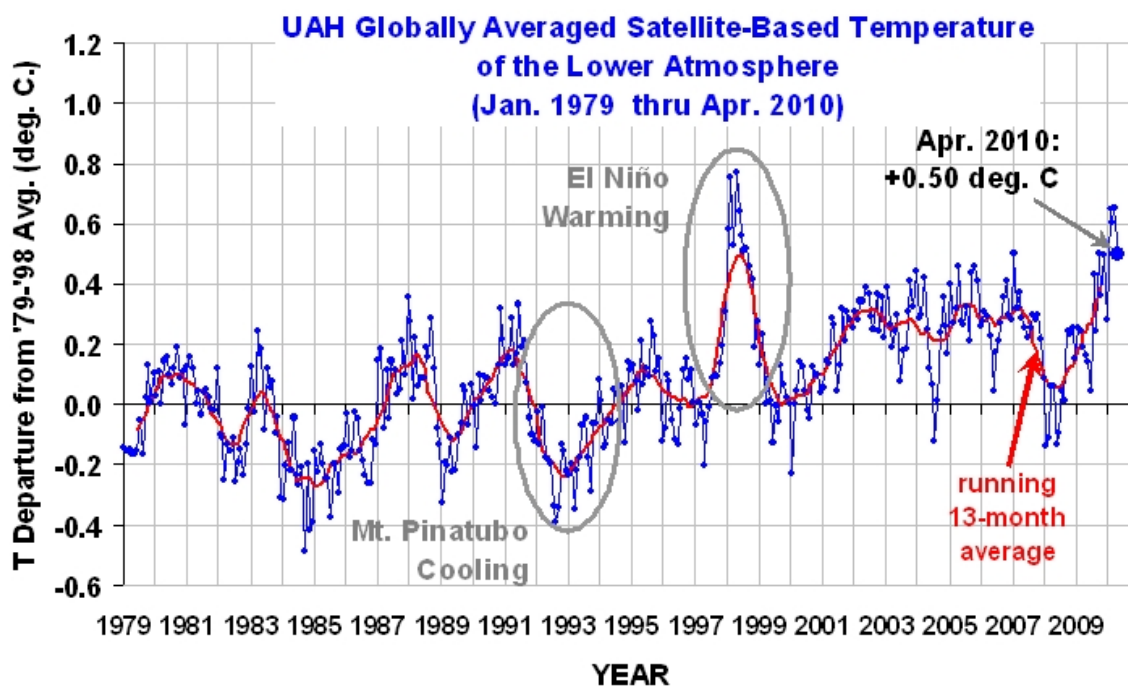
variationer i lokale temperaturer med ændringer i Jordens middeltemperatur.



Figur 1. Klimasystemet fra NRC-rapporten [1].



Figur 2. Illustration af afvigelse i marts 2010 fra de lokale gennemsnitstemperaturer i marts måned 1998-2006.



Figur 3. Den globale middeltemperatur de sidste godt 30 år, bestemt ud fra intensiteten af mikrobølgestråling fra iltmolekyler i den nedre del af atmosfæren.

Det er også en stor udfordring at måle denne middeltemperatur med en nøjagtighed på en tiendedel grad. For målinger på landjorden er der især usikkerhed omkring indflydelsen af målestationernes placering. Mange målinger stammer fra lufthavne, hvor temperaturen er påvirket af asfaltering, biler, fly etc. Først efter 1979 har vi fået satellitmålinger, der giver en geografisk midling uden bias fra menneskelige aktiviteter. Et sæt målinger er vist i figur 3 [3]. Der har været en stigning på 0,3-0,4 grader med store udsving fra bl.a. et vulkanudbrud og fra El-Niño-fænomenet, en forskydning af varmt overfladevand i Stillehavet fra Asien mod Sydamerika. Dette forekommer ofte ved juletid og er derfor blevet opkaldt efter Jesusbarnet. Den modsatte forskydning, der giver et fald i middeltemperaturen, betegnes som La Niña. Tilsammen betegnes disse forskydninger som El Niño Southern Oscillations (ENSO), og de er ansvarlige for de fleste af de store oscillationer i figur 3 på en tidsskala af nogle få år [2].

Når man skal vurdere klimaets følsomhed over for en øget koncentration af drivhusgasser, kan man som alternativ til de komplicerede klimamodeller forsøge sig med en analyse af satellitmålinger, baseret på simple modeller. Et ledende princip er energibevarelse. Atmosfæren og Jordens overflade tilføres energi fra Solen og taber energi ved varmestråling til rummet. Lad os illustrere dette princip med en simpel model. Som fysikeren, der skulle beskrive en ko og som første skridt foreslog: "Lad os antage at koen er sfærisk symmetrisk", vil vi antage, at Jordens atmosfære kan karakteriseres med én temperatur,  $T$ , som vi kan identificere med middeltemperaturen,  $T \approx 288 \text{ K}$  ( $15^\circ \text{C}$ ). Intensiteten af strålingen fra Solen er i Jordens afstand givet ved solarkonstanten,  $S=1,37 \text{ kW/m}^2$ . Den totale effekt af den stråling, der rammer Jorden, finder

vi da som  $\pi R^2 S$ , hvor  $R$  er Jordens radius. For at finde middeleffekten per kvadratmeter af jordoverfladen må vi dividere med Jordens overfladeareal,  $4\pi R^2$ , og resultatet er  $S/4$ . En brøkdel  $a$  (Jordens middelalbbedo,  $a \approx 0,30$ ) reflekteres tilbage til rummet. Den infrarøde udstråling fra Jorden til rummet er, ved temperaturen  $T$ , givet ved  $\varepsilon \sigma T^4$ , hvor  $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{K}^4)$  er Stefan-Boltzmanns konstant, og  $\varepsilon (<1)$  er Jordens middelemis-sivitet, en parameter der angiver den infrarøde stråling fra Jorden i forhold til stråling fra et ideelt sort legeme med samme temperatur. Betingelsen for ligevægt er at  $Q$ , den samlede energioptagelse per arealenhed i Jordens overflade og i atmosfæren, er nul,

$$Q \equiv (1 - a)S/4 - \varepsilon \sigma T^4 = 0. \quad (1)$$

Bemærk at de to led i ligningen refererer til indstråling og udstråling ved toppen af Jordens atmosfære, selv om vi skal benytte værdien af temperaturen ved jordoverfladen. For  $T=288 \text{ K}$  finder vi fra ligningen at  $\varepsilon=0,62$ . Den infrarøde udstråling er reduceret med godt  $100 \text{ W/m}^2$  til ca.  $240 \text{ W/m}^2$ , og det er især på grund af absorption og refleksion i atmosfæren. De vigtigste bidrag kommer fra vanddamp og skyer og fra  $\text{CO}_2$ . For en atmosfære i strålings- og konvektionsligevægt har man beregnet at absorptionen vil øges med  $3,7 \text{ W/m}^2$  ved en fordobling af  $\text{CO}_2$ -koncentrationen.

Hvis udstrålingen mindskes, f.eks. på grund af øget absorption i atmosfæren, må temperaturen øges for at genoprette balancen. For små ændringer,  $\Delta T$ , er ændringen i udstråling proportional med  $\Delta T$ ,

$$\Delta Q \cong -\lambda \Delta T. \quad (2)$$

Antager vi at  $a$  og  $\varepsilon$  er uafhængige af  $T$ , finder vi ved differentiation af ligning (1) en værdi for konstanten  $\lambda$ ,

$$\lambda_0 = 4\varepsilon \sigma T^3 = 3,3 \text{ W/(m}^2 \text{K)}. \quad (3)$$

Ved en fordobling af CO<sub>2</sub>-koncentrationen øges temperaturen da med

$$\Delta T_{2x} = \lambda_0^{-1} \cdot 3,7 \text{ W/m}^2 = 1,1 \text{ K}. \quad (4)$$

Den reciproke værdi af  $\lambda$  betegnes som klimafølsomheden. Lidt forenklet kan man sige, at formålet med klimamodeller er at beregne denne følsomhed. Problemet er at det ikke nødvendigvis er en god approksimation at antage, at  $a$  og  $\varepsilon$  ikke afhænger af temperaturen. Ændringer af  $Q$  på grund af en temperaturfølsomhed af disse parametre betegnes som feedback. Det betegnes som positiv feedback hvis  $a$  eller  $\varepsilon$  aftager med stigende temperatur, så  $\lambda$  bliver mindre end  $\lambda_0$  og  $\Delta T_{2x}$  bliver større end værdien angivet i ligning (3). IPCC's skøn svarer således til at  $\lambda$  er reduceret med ca. en faktor 3 på grund af positiv feedback. Denne tilskrives især en forøget koncentration af vanddamp i atmosfæren ved højere temperaturer og en ændring i skydækket.

Indtil nu har vi kun set på ligevægtssituationer, hvor der er balance mellem indstråling og udstråling ved toppen af atmosfæren,  $Q = 0$ , og temperaturen er konstant. Vi skal nu udlede en ligning for den dynamiske situation, hvor temperaturen ændrer sig fordi  $Q$  er forskellig fra nul. Systemet er ude af ligevægt. En ændring,  $F(t)$ , af  $Q$ , som ikke skyldes en temperaturændring, betegnes som en 'climate forcing'. Et eksempel er den omtalte øgede absorption af den infrarøde stråling på grund af en ændret koncentration af drivhusgasser. Ved en opvarmning gemmes der energi, især i verdenshavene, og vi betegner Jordens gennemsnitlige varmekapacitet per kvadratmeter med  $C$ . For ændringen af Jordens middeltemperatur finder vi da ligningen

$$C \frac{d\Delta T(t)}{dt} = Q(t) = F(t) - \lambda \Delta T(t). \quad (5)$$

Hvis  $F(t)$  ændrer sig fra nul til en ny konstant værdi  $F$ , finder man fra ligningen, at temperaturændringen  $\Delta T(t)$  nærmer sig en konstant værdi givet ved den temperatuafhængige løsning ( $Q = 0$ ),  $\Delta T = \lambda^{-1} F$ . Systemet stræber mod en ny ligevægt, som antaget i diskussionen ovenfor.

### En mere realistisk model

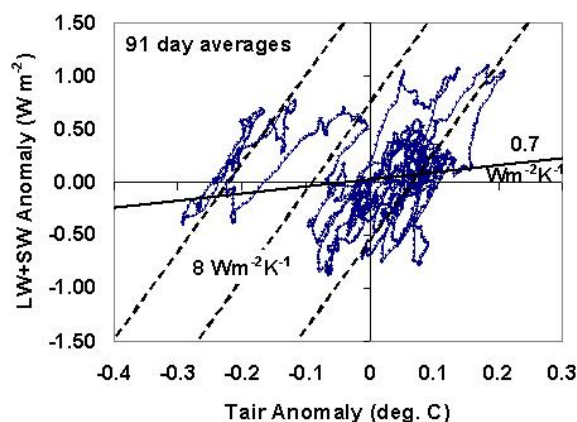
Lad os træde et skridt tilbage og se på hvad vi har gjort. Er beskrivelsen med en middeltemperatur og energibalance givet ved ligning (5) lige så urealistisk som fysikerens model af en sfærisk symmetrisk ko? Måske, men med nogle få ændringer af fortolkningen af størrelserne i ligningen kan vi gøre den mere realistisk. Da Jordens varmekapacitet er koncentreret i verdenshavene, erstatter vi middeltemperaturen over hele Jordens overflade med en middeltemperatur tæt ved havoverfladen. Hvis vi ganger ligningen med arealet af verdenshavene, omkring 71 % af Jordens overflade, udtrykker den bevarelse af den totale energi over havet. For de relativt hurtige temperaturændringer, vi skal diskutere i det følgende, svarer varmekapaciteten til de øverste måske 15-30 m af havet, som opblandes

hurtigt på grund af bølgerne, og vi antager at vandet er i temperaturligevægt med luften lige ovenover. Vi skal måske også ændre lidt på nogle af konstanterne givet ovenfor, f.eks. middeffekten af solstrålingen,  $S/4$ , men det er af mindre betydning.

Vi må derimod se kritisk på fortolkningen af  $F(t)$  i ligningen. Det er for snævert at betragte ændringer af strålingsbalancen som eneste årsag til variationer i temperaturen nær overfladen. Der kan være variationer i udveksling af energi med den højere del af atmosfæren, f.eks. gennem fordampning og konvektion og ved nedbør, og havstrømme kan bringe koldere eller varmere vand op til overfladen. Derimod kan vi se bort fra laterale strømninger af luft og vand, som kun ændrer den lokale temperatur og ikke middelværdien. Energiudveksling med atmosfæren over land spiller også kun en meget lille rolle. I det følgende vil vi skelne mellem to typer bidrag til  $F(t)$ , strålings- og ikke-strålings-perturbationer

### Analyse af satellitdata

Den amerikanske forsker Roy Spencer har forsøgt at vurdere klimafølsomheden gennem en analyse af satellitdata baseret på ligning (5) med denne ændrede fortolkning. Roy Spencer har tidligere været ansat ved NASA og har et indgående kendskab til satellitmålinger. Sammen med John Christy, ved University of Alabama, Huntsville (UAH), er han ansvarlig for beregningen af de globale temperaturer vist i figur 3.



**Figur 4.** Sammenhørende målinger af lufttemperaturen tæt ved havoverfladen og strålingsubalancen ved toppen af atmosfæren i en periode fra marts 2000 til slutningen af august 2007 [3,4].

Figur 4 viser sammenhørende målinger af lufttemperaturen tæt ved havoverfladen og strålingsubalancen ved toppen af atmosfæren i en periode fra marts 2000 til slutningen af august 2007 [3,4]. Lufttemperaturen over oceanerne er målt med en NOAA-satellit, og strålingsubalancen er beregnet som udgående minus indkommende stråling (dvs.  $-Q$ ) på basis af målinger af fluxen af både den langbølgede (LW) og den kortbølgede (SW) stråling med CERES-instrumentet på NASAs Terra-satellit. For at fjerne de hurtigste fluktuationer er målingerne midlet over 91 dage, men punkterne er plottet for hver dag for at illustrere tidsforløbet,

dvs. banen i det todimensionale rum. Denne type plots er velkendt i fysikken, f.eks. faserumsbanen for en endimensionel harmonisk oscillator,  $(x(t), p(t))$ , der med passende enheder på akserne bliver en cirkel svarende til bevarelse af energien,

$$E = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}kx^2. \quad (6)$$

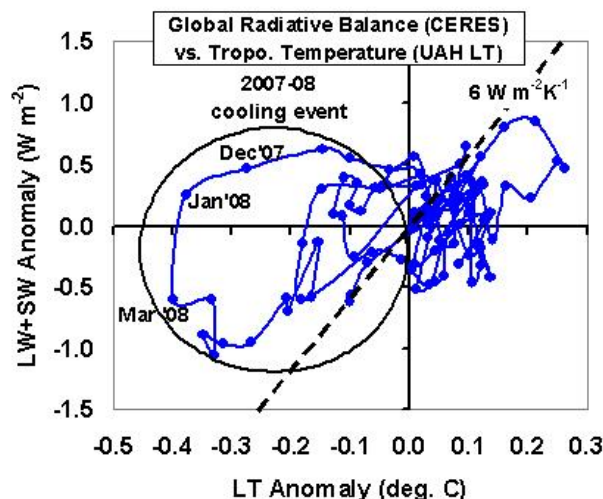
Fortolkningen er som sagt baseret på ligning (5). Spencer fremhæver at man må skelne mellem de to typer perturbationer,  $F(t)$ , strålings- og ikke-strålingsfluktuationer. De simpleste er de sidste. I dette tilfælde måler CERES-instrumentet ændringen i det sidste led i ligning (5), dvs. ændringen i strålingsbalancen på grund af den ændrede temperatur. Årsagssammenhængen mellem  $x$ - og  $y$ -koordinaterne i plottet er da simpel: Ændringerne i  $x$  er årsag til ændringerne i  $y$ . Man vil forvente at plottet bliver en ret linje med hældning  $\lambda$ . Især til venstre i figuren er der sådanne retlinede variationer med omtrent samme hældning, angivet ved de indtegnede stiplede linjer. Spencer kalder disse dele af plottet 'striations', hvilket vi kan oversætte til striber.

Hvis perturbationen,  $F(t)$ , derimod er en ændring i strålingsbalancen er den inkluderet i CERES-instrumentets måling. Ændringer i  $y$ -koordinaten i figur 4 er da en blanding af årsagen til ændringer i  $x$ -koordinaten og virkningen af disse ændringer! Det gør det vanskeligt at uddrage information om parameteren  $\lambda$  fra målingerne. Vi kan få en forestilling om, hvordan mønsteret vil se ud, ved at betragte en harmonisk perturbation,  $F(t) \propto \sin(\omega t + \delta)$ . Alle leddene i ligning (5) vil da variere harmonisk med samme frekvens,  $\omega$ , men med forskellig fase. Differentiationen af  $\Delta T$  på venstre side af ligningen medfører<sup>1</sup> at højre side (CERES-signalet) er faseforskydet med  $\pi/2$  i forhold til  $\Delta T$ . Som for den endimensionale harmoniske oscillator diskuteret ovenfor bliver plottet af sammenhængen mellem strålings- og temperatur-anomalierne derfor en cirkel ved passende valg af enheder på de to akser.

Spencer observerede i nogle situationer tilsvarende mønstre, som han kalder løkker ('loops'). Et eksempel er for perioden 2007-8, hvor der som vist i figur 3 var et betydeligt dyk i den globale temperatur. Et plot analogt til figur 4 er vist i figur 5, hvor løkken i perioden med afkøling, reduceret udstråling og påfølgende opvarmning er indcirklet. Oftest er der en blanding af striber og løkker, og Spencer fremhæver at man må fokusere på striberne for at bestemme konstanten  $\lambda$ . De stiplede linjer i figur 4 svarer til en meget stor værdi,  $\lambda \approx 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , og en tilsvarende lille klimafølsomhed. I de fleste analyser finder han en lidt mindre værdi,  $\lambda \approx 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , der er hældningen af den stiplede linje indtegnet i figur 5. Denne værdi er stadig næsten dobbelt så stor som  $\lambda_0$  og svarer til kraftig negativ feedback.

Kan vi også forstå forskydningen af mønstrene langs  $x$ -aksen? Lad os igen bruge ligning (5), nu med en 'forcing', der er lineær i tiden  $t$ ,  $F(t) = \beta t$ . Den kan

f.eks. hidrøre fra en langsom ændring af skydækket [2]. Det ses let at ligningen da har en lineær løsning,  $\Delta T(t) = \lambda^{-1}\beta(t - \tau)$ , hvor forsinkelsen  $\tau = \lambda^{-1}C$  er 4-8 mdr. for en varmekapacitet svarende til 15-30 m vand. Strålingsubalancen er da konstant,  $Q = \beta\tau$ . En langsom ændring af ind- eller udstrålingen vil således give en vandret drift af punkterne i figurene 4 og 5. Det skal bemærkes, at den absolutte nøjagtighed af CERES-målingerne næppe er tilstrækkelig til at bestemme en lille konstant afvigelse af  $Q$  fra nul.



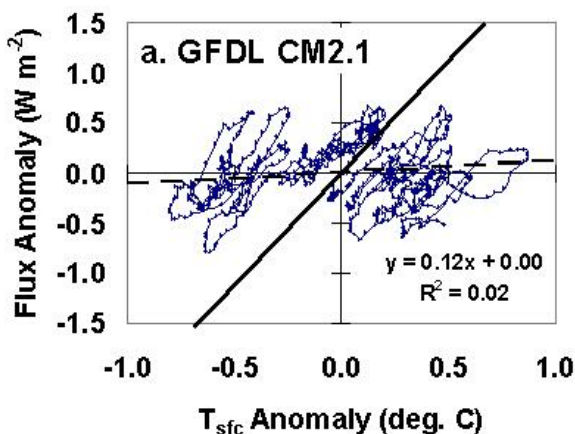
Figur 5. Tilsvarende diagram som figur 4. Perioden med afkøling, reduceret udstråling og påfølgende opvarmning danner en løkke som er markeret med en cirkel.

Den fuldt optrukne linje i figur 4 antyder resultatet af en naiv analyse, der fortolker hele CERES-signalet som resultatet af temperaturændringer, dvs. overser sammenblandingen af årsag og virkning i CERES-signalet for temperaturfluktuationer, der skyldes ændringer i strålingsbalancen. Denne fortolkning giver en meget lille hældning og stor klimafølsomhed. Tilsvarende vil et lineært fit til alle punkterne i figur 5 give en meget lille hældning. Spencer hævder, at denne type fejlanalyse har bidraget til den almindelige forestilling om stærk, positiv feedback i klimasystemet. Specielt for bidraget fra skyerne virker dette urimeligt. Mere varme leder til mere fordampning og mulighed for dannelse af flere skyer ved fortætning af vanddampen. De globale cirkulationsmodeller forudsiger et meget varmere klima i år 2100 med meget få skyer [5].

Spencers analyser giver en meget mindre klimafølsomhed end angivet af IPCC. Det kan indvendes at analysen kun medtager feedback-processer på kort tidsskala, dvs. op til nogle få år. Der findes naturligvis vigtige mekanismer på meget længere tidsskala, såsom ændring af albedoen ved opbygning eller afsmeltning af iskapper i begyndelsen og afslutningen af istider. Men de vigtigste feedback-mekanismer for klimaudviklingen over årtier, især den hydrologiske cyklus med fordampning og fortætning af vand, skydannelse og nedbør, opererer på ganske kort tidsskala. Spencer har undersøgt dette spørgsmål gennem en analyse af plots

<sup>1</sup> Dette kan ses ud fra relationen  $\frac{d \sin(x)}{dx} = \cos(x) = \sin(x + \pi/2)$ .

svarende til figur 4 og 5 for beregninger med globale cirkulationsmodeller. I mange tilfælde finder han også her striber med en fælles hældning i mønstrene. Et eksempel er vist i figur 6. Hældningen af den kraftige skrå linje angiver  $\lambda$ -parameteren svarende til den kendte langtidsfølsomhed af klimaet i modellen, og den ses at passe nogenlunde med stribernes hældning. Overskriften i figuren specificerer den anvendte cirkulationsmodel, og nederst til højre er angivet en formel for det stiplede lineære fit. Inden for usikkerheden er hældningen nul. Dette eksempel kunne tyde på at den lave klimafølsomhed fundet i Spencers analyse af satellitdata også gælder på meget længere tidsskala, men Spencer advarer dog om at sammenhængen i den virkelige verden mellem klimafølsomheden på lang og på kort tidsskala er usikker.



**Figur 6.** Tilsvarende diagram som figur 4 og 5, men baseret på resultater af beregninger med en global cirkulationsmodel.

Resultatet fra analysen af CERES-målinger,  $\lambda \approx 6$  W/(m<sup>2</sup>K), understøttes af en tidligere analyse af korrelationen mellem temperatursvingninger i det tropiske hav og strålingsbudgettet [6]. En mulig mekanisme er foreslået af Richard Lindzen, MIT, USA, der er kendt som skeptiker over for klimatiske katastrofescenarier. Han foreslog i 2001 at Jorden kunne have en adaptiv infrarød linse, der stabiliserer temperaturen [7]. Gennem en analyse af skyer over det tropiske hav fandt han at udstrækningen af de høje, tynde skyer var mindre ved højere temperaturer af havoverfladen. Da de høje, tynde skyer holder på varmen, modvirker denne effekt en temperaturændring. Den giver negativ feedback, som forøger størrelsen af  $\lambda$  og reducerer klimafølsomheden. Sådanne studier af klimaforholdene over det tropiske hav er af stor betydning for vor forståelse af Jordens klima. Ikke alene dækker dette hav en betydelig del af Jordens overflade, det modtager desuden en meget stor del af den indstrålede solenergi, og det tropiske hav er en motor for klodens vejrsystemer.

Jeg har stor sympati over for disse forsøg på at bestemme klimafølsomheden direkte fra observationer

ved sammenligning med simple modeller. De globale cirkulationsmodeller er meget usikre, og deres kompleksitet gør det svært at gennemskue hvilke antagelser, de bygger på. Det hævdes ofte at modellerne beregner klimafølsomheden ud fra basale fysiske love og sammenhænge, men i realiteten er følsomheden bestemt af parametre valgt af programmøren, især for temperaturafhængigheden af luftfugtigheden og af skydækket. Desuden inkluderes i beregningerne et stort og meget usikkert bidrag til 'climate forcing' fra partikler i atmosfæren. Det justeres så udviklingen af den globale temperatur gennem det sidste århundrede bliver nogenlunde reproduceret. Et berømt citat fra den fremragende ungarsk-amerikanske matematiker von Neumann lyder: "Giv mig fire parametre, og jeg kan fitte en elefant; giv mig fem, og jeg kan få den til at svinge med snablen" [8]. Jeg har omtrent samme tillid til fremtidsprojektioner fra disse klimamodeller som til de økonomiske modeller, der fejlede så katastrofalt under den seneste finansielle krise.

### Litteratur

- [1] National Research Council, "NRC-rapport", 2005: "Radiative forcing of climate change: Expanding the concept and addressing uncertainties". Diskuteret på [pielkeclimatesci.wordpress.com](http://pielkeclimatesci.wordpress.com) 28. april 2010.
- [2] [www.climate4you.com](http://www.climate4you.com)
- [3] [www.drroyspencer.com](http://www.drroyspencer.com)
- [4] R.W. Spencer (2010), *J. Geophys. Res.* in print. En kort gennemgang af Spencers analyse af figurene 4-6 kan findes i hans protest til det amerikanske miljøagentur (EPA) i forbindelse med, at CO<sub>2</sub> for nylig blev klassificeret som en forurenende gas [3]. Det gør det muligt for regeringen at indføre restriktioner af udledningen uden yderligere lovgivning.
- [5] K.E. Trenberth og J.T. Fasullo (2009), *Geophys. Res. Lett.* **36**, L07707.
- [6] R.W. Spencer, W.D. Braswell, J.R. Christy og J. Hnilo (2007), *Geophys. Res. Lett.* **34**, L15707.
- [7] R.S. Lindzen, M.-D. Chou og A.Y. Hou (2001), *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **82**, 417.
- [8] Ifølge den israelske fysiker Nir Shaviv blev historien fortalt af Enrico Fermi til Freeman Dyson. ([www.sciencebits.com/FittingElephants](http://www.sciencebits.com/FittingElephants)).



Jens Ulrik Andersen er professor i fysik ved Aarhus Universitet. Han var i perioden 1994-2005 centerleder for Aarhus Center for Atomfysik, finansieret af Danmarks Grundforskningsfond. Har i de senere år bl.a. studeret udsendelse af varmestråling fra højt exciterede atomare klynger og store molekyler, både teoretisk og gennem eksperimenter ved en elektrostatisk lagring.