

Klimamodeller: Grundprincipper, opbygning og anvendelse

Hans von Storch

Klimamodeller er centrale redskaber til at forstå, hvordan Jordens klima fungerer, og hvordan det kan udvikle sig i fremtiden. Artiklen introducerer de grundlæggende idéer bag klimamodellering – fra simple energibalancemodeller til komplekse, koblede modeller, der beskriver samspillet mellem atmosfære, oceaner, land og is. Vi ser på, hvordan modellerne bygger på fysiske principper, hvordan småskala-processer håndteres gennem parameteriseringer, og hvorfor intern variabilitet spiller en vigtig rolle for usikkerheden i klimafremskrivninger. Endelig forklares, hvordan modeller bruges til at forstå menneskeskabte klimaændringer og til at udvikle scenarier for fremtidens klima. Artiklen bygger især på [1], men også [2] og [3] er centrale introduktioner til emnet.

Modelbegrebet

Før vi forklarer logikken bag, opbygningen af og anvendelsen af klimamodeller, er det nødvendigt først at diskutere nogle grundlæggende principper om modeller.

Ordet *model* kan betyde mange ting. I klimaforskning forstås en model som *en analogi til et virkeligt system*, enten i forskerens tanker eller i en computer. Vi skelner grundlæggende mellem to typer:

- **Kognitive modeller**, som er enkle og bruges til at skabe forståelse og indsigt. De er kendetegnet ved minimal kompleksitet.
- **Computermodeller**, som er kvasi-realistiske og bruges til at skabe virtuelle laboratorier eller erstatningsvirkeligheder. De har maksimal kompleksitet inden for det, nutidens computere kan håndtere, og omtales i dag ofte som “digitale tvillinger” af et fysisk system.

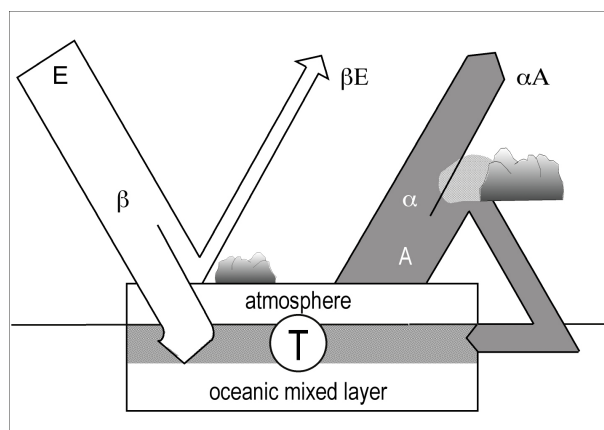
Kvasi-realistiske modeller er ikke resultatet af ad hoc-idéer fra enkelte forskere, men systematisk opbygget af et bredt videnskabeligt fællesskab. De bygger på teoretiske principper kombineret med fænomenologisk indsigt. Det kræver nøje overvejelser at repræsentere variable, tilnærme ligninger, parameterisere processer i naturen og diskretisere ligningerne. Disse modeller er ikke en “stor teori om klimaet”, men fungerer som laboratorier til at udvikle og teste hypoteser samt til at lave forudsigelser.

Minimumskompleksitet: Energibalancemodellen

Et klassisk eksempel på en enkel klimamodel er den endimensionale energibalancemodell, hvor den eneste tilstandsvariabel er atmosfærens temperatur. Modellen beskriver balancen mellem indkommende kortbølget solstråling og udgående langbølget varmestråling.

Solens stråling E rammer jordsystemet, og en del (βE) reflekteres med det samme tilbage til rummet af skyer eller lyse overflader (albedo). Den resterende del opvarmer systemet, der – ligesom sorte legemer – udsender langbølget stråling proportional med fjerde potens af temperaturen. En del af denne langbølgede

stråling fanges af atmosfæren og sendes tilbage mod overfladen, hvilket øger temperaturen yderligere. Når udgående og indkommende stråling er i balance, er systemet i ligevægt.



Figur 1. Skitse af den endimensionale energibalancemodell. Fra [2].

Energibalancemodellen forklarer den gennemsnitlige temperatur ved jordoverfladen og mekanismen bag den antropogene drivhuseffekt, nemlig en forstærket absorption af udgående langbølget stråling, hvilket resulterer i, at temperaturen ved overfladen stiger. Til gengæld kan modellen ikke beskrive regionale detaljer, ocean-atmosfære-interaktioner eller intern variabilitet. Til sådanne formål kræves modeller med langt større kompleksitet.

De primitive ligninger

Kernen i klimamodeller med høj opløsning er de såkaldte *primitive ligninger*, som beskriver atmosfærens hydro- og termodynamik. De er ikke i sig selv klimamodeller, men danner grundlaget for dem.

Ligningerne udledes fra fundamentale dynamiske love med en række tilnærmelser, herunder især den hydrostatiske tilnærmelse, som ser bort fra vertikale accelerationsled.

Tilstandsvariableerne er:

$\mathbf{v}_h = (u, v)$	horisontale vindkomponenter
w	vertikal vindkomponent
ρ	densitet
q	specifik fugtighed
S	saltholdighed i oceanet
T	temperatur
p	tryk

Ligningerne skrives normalt i sfæriske koordinater med længdegrad θ , breddegrad ϕ og højde z .

For **atmosfæren** er et sådant sæt af primitive ligninger:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{Du}{Dt} - \frac{uv}{a} \tan \phi - fv \right) &= -\frac{1}{a \cos \phi} \partial_{\theta} p + \mathcal{F}_u \\ \rho \left(\frac{Dv}{Dt} + \frac{u^2}{a} \tan \phi + fu \right) &= -\frac{1}{a} \partial_{\phi} p + \mathcal{F}_v \\ 0 &= -\partial_p z - g\rho \\ \frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \mathbf{v}) &= 0 \\ \rho \frac{Dq}{Dt} &= \mathcal{G}_q \\ \rho c_p \frac{DT}{Dt} &= \mathcal{G}_T + \alpha \frac{Dp}{Dt} \\ p &= R_m(q)\rho T \end{aligned}$$

med

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

hvor f er Coriolis-parametere, a Jordens radius, c_p den specifikke varmekapacitet, α den termiske ekspansionskoefficient, og R_m gaskonstanten.

De første to ligninger beskriver de horisontale komponenter af bevægelsesligningen for væsken, mens den tredje udtrykker den vertikale komponent, tilnærmet ved den hydrostatiske ligning. Den følgende ligning er kontinuitetsligningen, der udtrykker bevarelse af masse, efterfulgt af bevaarelseligninger for vanddamp og intern energi. Den sidste ligning er tilstandsligningen.

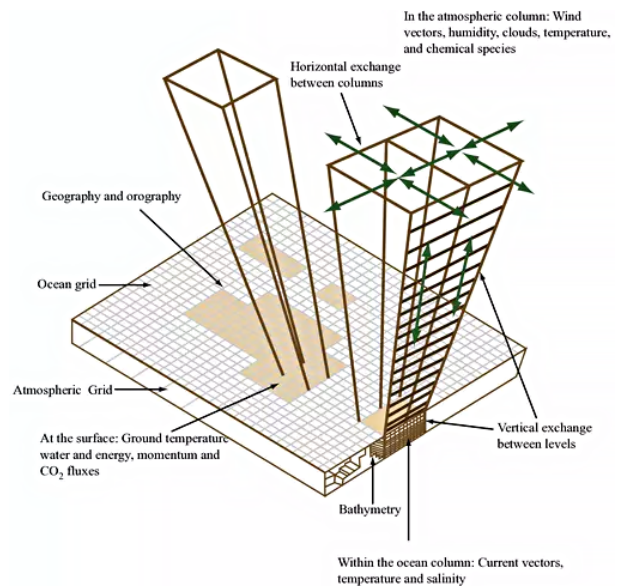
Ved numerisk løsning af de primitive ligninger opstår der hurtige trykbølger (lydbølger), som matematisk er indlejret i kontinuitetsligningen. Disse bølger bevæger sig med lydets hastighed og har ingen væsentlig betydning for klimaets langsomme storskala-dynamik, men de sætter en kraftig begrænsning på modellernes tidsintegration. Hvis man skal beskrive lydbølger eksplicit, bliver tidsskridtene meget små, og beregningerne derfor både tunge og langsomme. For at undgå dette benytter man den *anelastiske tilnærmelse*, hvor variationer i tætheden antages at være små omkring en kendt baggrundstilstand. Denne antagelse fjerner lydbølgerne fra ligningssystemet, uden at det går ud over modellens evne til at beskrive de meteorologisk og klimatiske relevante processer.

Når den anelastiske tilnærmelse anvendes, ændres kontinuitetsligningen fra en *prognostisk* til en *diagnostisk ligning*. Det betyder, at den ikke længere bruges til at integrere en variabel frem i tiden, men i stedet til at udlede en sammenhæng mellem de øvrige feltvariable.

Dermed reduceres antallet af *prognostiske variable* – dvs. variable, der udvikles i tid ved integration af differentilligninger – til fire: de horisontale vindkomponenter u og v , den specifikke fugtighed q og temperaturen T . De resterende variable, herunder trykket p og den vertikale hastighed w , bliver *diagnostiske variable*, som bestemmes ud fra de prognostiske størrelser på hvert tidsskridt.

Denne opdeling har stor praktisk betydning. Prognostiske variable er beregningstunge, fordi de kræver numerisk integration over lange tidsperioder, mens diagnostiske variable kan beregnes direkte og hurtigt. Ved at filtrere lyd ud og reducere antallet af prognostiske variable opnår man derfor både en betydelig effektivisering og en numerisk mere stabil model, samtidig med at den fanger de relevante atmosfæriske processer. Den anelastiske tilnærmelse er derfor en central forenkling i mange moderne atmosfæriske og klimatiske modeller (se fx [1]).

Den reelle udfordring er termerne \mathcal{F}_u , \mathcal{F}_v , \mathcal{G}_q og \mathcal{G}_T , som repræsenterer effekterne af uopløste processer, såsom subgrid-skala-hvirvler, friktionsprocesser samt frigivelse og optagelse af latent varme ved faseovergange. Disse processer bliver “parametriseret” (se nedenfor).



Figur 2. Rumlig struktur i en klimamodel. Atmosfæren og havet opdeles i tredimensionelle gitterbokse (gridceller), hvor de fysiske ligninger løses numerisk. Atmosfæriske variable som vind, fugtighed, temperatur og kemiske komponenter beregnes i de lodrette søjler, mens havstrømme, temperatur og saltholdighed beregnes i oceanets lag. Energi-, masse- og impulsudveksling sker både vertikalt (mellem lag) og horisontalt (mellem kolonner).

For storskala-dynamik i havet gælder meget lignende ligninger, som går under betegnelsen Boussinesq-approximationen. En væsentlig forskel er, at det antages, at havet er inkompressibelt, og at der i stedet for fugtighed q som tilstandsvariabel bruges saltindholdet S .

Parameteriseringer

Numerisk integration af ligningerne sker på et gitter med endelig opløsning. Skalaer under $4-10 \Delta$, hvor

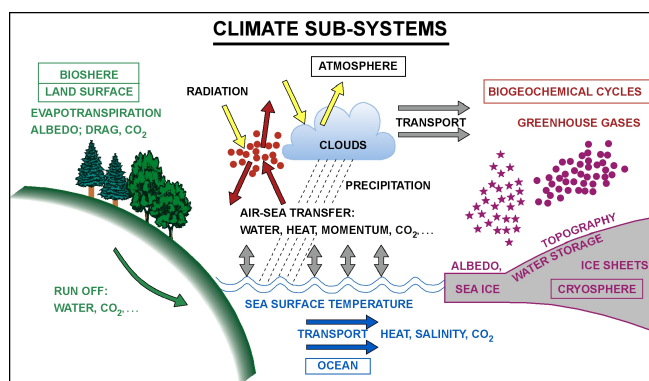
Δ er længden af gitterboksene, kan ikke beskrives pålideligt, og i klimamodeller foregår mange fysiske processer netop på skalaer, der er mindre end modellens gitteropløsning. De kan derfor ikke beskrives direkte.

Hvad der er mere signifikant, er termerne \mathcal{F}_u , \mathcal{F}_v , \mathcal{G}_q og \mathcal{G}_T , som ikke kan beskrives alene ved hjælp af grundlæggende fysiske principper. Det vil sige, at disse termer specificeres ad hoc, og det er derfor ikke muligt at bestemme, hvad der sker, når den rumlige opløsning Δ øges.

For at repræsentere deres effekt anvender man *parameteriseringer* – formler eller algoritmer, der estimerer den uopløste dynamiks virkning ud fra den tilstand, modellen beskriver på de store skalaer.

Tilgangen er i praksis stokastisk: for en given storskala-konfiguration kan små-skala-processer variere inden for bestemte grænser. Denne variation kan beskrives som en stokastisk fordeling, hvis generelle form bestemmes ud fra fysisk indsigt og observationer. I de fleste tilfælde angives effekten som forventningsværdien (den betingede gennemsnitsværdi) af denne stokastiske variabel, men i nogle tilfælde benytter man også en tilfældig udvælgelse fra fordelingen for at indfange naturlig variabilitet [2, 3].

Parameteriseringer er en af de vigtigste årsager til, at klimamodeller kan give forskellige resultater. De afhænger af modellens rumlige opløsning og af, hvordan udviklerne vælger at beskrive de fysiske processer under gitterstørrelsen. I fagsproget omtales parameteriseringer ofte som “fysik”, fordi de repræsenterer uopløste fysiske processer, men det er egentlig en pragmatisk og teknisk løsning snarere end “ren fysik”. Dette fagudtryk kan derfor virke misvisende for ikke-specialister.



Figur 3. Komponenter af en fuld klimamodel [4].

Maksimalt komplekse klimamodeller

For at konstruere en rumligt detaljeret klimamodel, skal man koble en ocean- og en atmosfærisk model, hvilket er en stor udfordring. Desuden er lange integrationer nødvendige, og andre faktorer bliver derfor også vigtige, såsom emissioner, transport og aflejring af stoffer, eller ændringer i vegetationer, som skitseret i figur 3.

I takt med at computerkraften er vokset, er klimamodeller blevet stadig mere avancerede – både med hensyn til rumlig opløsning og i antallet af processer og komponenter i klimasystemet, som modellerne kan beskrive. Hvor tidlige modeller kun omfattede få variable og simple tilnærmelser, kan nutidens modeller håndtere

komplekse vekselvirkninger mellem atmosfære, oceaner, havis, biosfære og andre systemkomponenter.

En central egenskab ved sådanne modeller er, at de *genererer intern variabilitet*: naturlige svingninger på mange forskellige tidsskalaer og rumlige skalaer, som ikke kan tilskrives nogen specifik ekstern påvirkning. Denne variabilitet omtales ofte som “støj”. Støjen kan gøre det vanskeligere at identificere klimatiske signaler forårsaget af konkrete påvirkninger (som drivhusgasser eller solvariationer), men den er samtidig en uundgåelig og fysisk vigtig del af klimasystemets dynamik. Den sætter grænser for, hvor præcise klimaprogner kan blive, og spiller en væsentlig rolle i fremkomsten af ikke-lineære fænomener som *tipping points*.

For at forstå og håndtere denne interne variabilitet anvendes en *ensembletilgang*, hvor mange modelkørsler med næsten identiske betingelser udføres. Ved at sammenligne og analysere disse kørsler kan man skelne mellem signal og støj og vurdere usikkerheden i modellens resultater. Klaus Hasselmann var den første til systematisk at beskrive denne støjs fundamentale rolle: hvordan hurtige, kortsigtede fluktuationer (“hvid støj”) kan integreres til langsigtede variationer (“rød støj”) og dermed forme klimaets naturlige baggrundsvariabilitet. Denne indsigt blev afgørende for udviklingen af metoder til *detektion og attribution* af menneskeskabte klimaændringer og blev anerkendt med tildelingen af Nobelprisen i fysik til Hasselmann i 2021 [5].

Anvendelse af klimamodeller og deres merværdi

I det følgende fokuserer vi på klimamodeller med høj, såkaldt *maksimal kompleksitet*. Som nævnt tidligere skaber sådanne modeller ikke i sig selv ny teoretisk viden om klimasystemets dynamik. Deres styrke ligger derimod i, at de kan *generere omfattende datasæt*, som gør det muligt at teste og videreudvikle eksisterende teorier, hypoteser og modeller med lavere kompleksitet. Ved at sammenholde modellens output med forenkede fysiske beskrivelser eller observerede mønstre kan forskere formulere og afprøve nye ideer om processer og sammenhænge i klimasystemet.

En anden vigtig anvendelse er brugen af klimamodeller som *interpolatorer*: modellerne kan rekonstruere og estimere det fulde fire-dimensionelle tilstandsbillede af atmosfæren og havet, selv når observationerne kun dækker en begrænset del af tid og rum. Dette sker gennem såkaldt *dataassimilering*, hvor observationer kombineres med modeldynamik for at skabe et konsistent billede af klimasystemet. Denne metode spiller en central rolle i både vejrprognoser og klimaforskning, men vi vil ikke gå i detaljer med den her.

Konsolidering af viden om klimasystemet

Som tidligere nævnt kan klimamodeller med maksimal kompleksitet betragtes som *numeriske laboratorier*, hvor forskere både kan teste eksisterende hypoteser og udvikle nye. De udgør et centralt redskab til at udforske den komplekse dynamik i Jordens klimasystem, fordi de simulerer de fysiske og kemiske vekselvirkninger mellem centrale komponenter som atmosfæren, ocea-

nerne, landoverfladen og kryosfæren. Selvom modellerne ikke kan gengive alle processer og detaljer fuldstændigt realistisk, giver de et konsistent og fysisk baseret billede af klimasystemets samlede opførsel.

Ved hjælp af sådanne modeller kan forskere blandt andet:

- undersøge den naturlige klimavariabilitet på forskellige tidsskalaer,
- analysere klimasystemets respons på eksterne påvirkninger såsom ændrede paleogeografiske konfigurationer, udledning af drivhusgasser, vulkanudbrud og variationer i solindstråling,
- studere centrale feedbackmekanismer, herunder dem der involverer skyer, vanddamp og is-albedo-effekter.

Klimamodeller fungerer dermed som et integreret værktøj til at samle og konsolidere viden om klimasystemets tilstand, dynamik og følsomhed over for både naturlige og menneskeskabte påvirkninger.

Merværdi af klimamodeller

Når man undersøger et komplekst system videnskabeligt, opstår altid spørgsmålet: Hvilken *merværdi* giver modellen? En model deler typisk nogle egenskaber med den virkelige verden – disse kaldes *positive analoger*. Andre egenskaber findes kun i modellen og ikke i virkeligheden (som fx de lydbølger, der blev filtreret væk i den anelastiske tilnærmelse) og kaldes *negative analoger*. Endelig findes der egenskaber, hvor man endnu ikke ved, om de er realistiske; disse betegnes *neutrale analoger*.

Validering handler i høj grad om at identificere positive og negative analoger. Den egentlige *videnskabelige værdi* af modeller ligger dog i de neutrale analoger: de egenskaber, der endnu ikke er bekræftet eller afkræftet, og som kan føre til ny indsigt, hvis de viser sig at være realistiske. Det er her, modeller bidrager til at udvide vores forståelse af klimasystemet.

Modeller er altså mest interessante på grund af det, de potentielt kan afsløre – ikke kun det, vi allerede ved. Validering er vigtig og uundgåelig, men det er modellens rolle i udforskningen af det ukendte, der gør den til et centralt forskningsværktøj.

Blandt de vigtigste neutrale analoger og anvendelsesområder kan nævnes:

- Klimamodeller samler en bred vifte af fysiske, kemiske og biologiske processer i én konsistent ramme og giver dermed et *holistisk billede* af klimasystemet.
- De giver mulighed for detaljerede analyser af rumlige mønstre og regionale påvirkninger, fx ændringer i vejr-mønstre eller hydrologi.
- Ved at køre mange simuleringer kan man kvantificere usikkerhed og intern variabilitet.
- Modeller muliggør *detektion og attribution*: Først estimeres den interne variabilitet i systemet, hvorefter observerede ændringer sammenlignes

med modelreaktioner for at identificere de mest plausible eksterne påvirkninger.

- Klimamodeller bruges til at teste hypoteser, der er udviklet ud fra teori eller minimumskompleksitetsmodeller, og til at undersøge, om de holder i en kompleks, højdimensionel dynamik. Dette gælder fx analyser af tipping points, tidlig detektion af klimaændringer samt sammenligninger med empiriske nedskaleringer.

Klimamodeller og menneskeskabte klimaændringer

Allerede i 1896 foreslog Arrhenius [6], at en forhøjet koncentration af drivhusgasser i atmosfæren ville føre til stigende lufttemperaturer. Hypotesen var baseret på en enkel energibalances-model, men blev i mange år ikke anerkendt som videnskabeligt underbygget. Først i den sidste tredjedel af det 20. århundrede blev den taget alvorligt – i takt med, at målingerne af CO₂-koncentrationerne ved Mauna Loa på Hawaii tydeligt viste en kontinuerlig stigning i atmosfærens CO₂-indhold. Dette skabte et presserende behov for både robuste beviser for sammenhængen mellem CO₂ og temperaturstigninger samt for scenarier over fremtidige klimaændringer.

I 1990'erne var klimamodellerne blevet tilstrækkeligt avancerede – med både atmosfære- og oceankomponenter – til at kunne simulere klimaets respons på ændrede CO₂-koncentrationer. Ensemblekørsler med stigende CO₂-niveauer viste konsekvent, at dette førte til global opvarmning, hvis styrke afhang af, hvor hurtigt drivhusgasserne akkumuleredes. Et robust resultat var, at opvarmningen var kraftigst over land og svagere over havet, hvilket stadig er en af klimaforskningens mest stabile forudsigelser.

Denne udvikling muliggjorde en mere systematisk tilgang til *detektion* af klimaforandringer. Ved at projicere observerede temperaturændringer på mønstre, som modellerne forudsiger, reduceres det komplekse signal i et højdimensionelt rum til et lavdimensionelt statistisk problem. Hvis denne projicerede ændring overstiger, hvad man kan forvente fra den interne naturlige variabilitet, kan man med statistisk sikkerhed konkludere, at en ekstern påvirkning er aktiv – dvs. at mindst en del af den observerede opvarmning er menneskeskabt. Modellerne fungerer her som et analytisk filter, der hjælper forskeren med at "finde nålen i høstakken".

Det er vigtigt at understrege, at argumentet **ikke** er: "Fordi modeller viser opvarmning ved stigende CO₂, er den observerede opvarmning antropogen." Argumentet er derimod: "Fordi den observerede ændring er større end den forventede interne variabilitet, må mindst en del af ændringen skyldes menneskelig påvirkning." Modellerne bruges dermed til at strukturere og kvantificere den statistiske test, ikke til at "bevise" årsagssammenhængen i sig selv.

Det næste trin er *attribution* (tilskrivning), hvor målet er at bestemme den mest sandsynlige kombination af årsager til den observerede ændring. Her testes en nulhypotese mod forskellige kombinationer af påvirkninger – fx drivhusgasser, aerosoler,

solpåvirkning og vulkansk aktivitet – repræsenteret gennem mønstre fra klimamodeller. Formålet er ikke at forkaste nulhypotesen, men at finde den kombination af påvirkninger, der bedst forklarer observationerne.

Attribution har været en central del af klimaforskningen siden 1990'erne, især for lufttemperatur. Et nyere eksempel er [7], som viste, at ændringer i forårsregn i det nordlige Sydamerika ikke kun kunne forklares med stigende CO₂-niveauer, men også med ændringer i landanvendelse. Dermed spiller klimamodeller en endnu vigtigere rolle i attribution end i detektion: de gør det muligt at adskille og kvantificere de forskellige påvirkningsfaktorer bag observerede klimaændringer

Klimascenarier

Klimamodellers evne til at beskrive og analysere igangværende klimaforandringer giver et stærkt *plausibilitetsargument* for, at de også kan anvendes til at *estimere fremtidige udviklinger* – givet forskellige antagelser om drivhusgasudledninger. Den centrale udfordring ligger naturligvis ikke i selve modelleringen, men i at *forudsige fremtidige udledningsforløb*.

Tidligere blev klimascenarier udarbejdet på baggrund af vurderinger af samfundsmæssige og især økonomiske udviklingsbaner. Disse scenarier beskrev plausible og konsistente fremtidige udledninger og blev derefter indarbejdet i klimamodeller. Denne tilgang var dog tidskrævende, og processen med at opdatere scenarierne og få dem integreret i modellerne viste sig at være for langsom til at følge IPCC's rapportcyklus.

Som svar på dette udviklede man de såkaldte *Representative Concentration Pathways* (RCP'er), som er defineret ud fra *strålingspåvirkning* (radiative forcing) i slutningen af det 21. århundrede, snarere end ud fra socioøkonomiske forløb. RCP'erne repræsenterer således forskellige mulige udviklingsbaner for atmosfærens samlede drivhusgaspåvirkning:

- RCP2.6: Strålingspåvirkningen topper omkring 3 W/m² midt i århundredet og falder derefter til 2,6 W/m² i 2100.
- RCP4.5 og RCP6.0: Stabilisering på hhv. 4,5 W/m² og 6,0 W/m² efter 2100.
- RCP8.5: En fortsat stigning til 8,5 W/m² i 2100.

RCP4.5 anses i dag for at være et realistisk referencescenarie, mens en udvikling svarende til RCP2.6 ville forudsætte omfattende og hurtige globale reduktioner i drivhusgasudledninger.

Interessant nok har senere analyser vist, at det høje scenarie RCP8.5 kun kan realiseres under meget ekstreme og urealistiske forudsætninger – såsom en atmosfærisk CO₂-koncentration på omkring 1400 ppm i 2100, hvilket ville kræve en kontinuerlig og dramatisk stigning i de globale udledninger og en massiv udbygning af kulkraft svarende til etablering af et nyt kulkraftværk næsten dagligt. Selvom sådanne scenarier fortsat har værdi i forskningssammenhæng, fx til at undersøge følsomheden i modelsystemerne, er de ubrugelige til praktisk politisk vejledning. Men dette urealistiske scenarie blev "solgt" som en "business as usual"-prognose, dvs. som en udvikling, der

med sikkerhed forventes, hvis der ikke implementeres væsentlige begrænsninger af udledninger. Således gennemgik scenariet en metamorfose fra en videnskabeligt interessant, men meget usandsynlig udvikling, til en meget sandsynlig prognose, som kun kan undgås, hvis der implementeres strenge klimabeskyttelsesforanstaltninger.

Hvilket scenarie der i sidste ende viser sig mest realistisk, afhænger i høj grad af *afbødningstiltag* – dvs. timingen og styrken af den globale reduktion af CO₂- og andre drivhusgasudledninger. De forskellige scenarier giver et spænd af mulige klimaforløb og dermed et beslutningsgrundlag for planlægning.

Klimascenarier gør det muligt – inden for de usikkerheder, der skyldes naturlig variabilitet – at skitsere regionale konsekvenser og klimarisici. Det gælder fx forekomsten af hedeølger, ekstremnedbør, storme og tørke. Disse oplysninger er afgørende for at kunne udvikle tilpasningsstrategier på områder som landbrug, vandforsyning, kystsikring og byplanlægning.

Litteratur

- [1] P. Müller and H. von Storch. *Computer Modelling in Atmospheric and Oceanic Sciences - Building Knowledge*. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 2004.
- [2] H. von Storch, S. Güss, and M. Heimann. *Das Klimasystem und seine Modellierung. Eine Einführung*. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 1999.
- [3] W.M. Washington and C. Parkinson. *Introduction to Three-Dimensional Climate Modeling*. University Science Books, 2005.
- [4] H. von Storch and K. Hasselmann. Climate variability and change. In G. Hempel, editor, *The Ocean and the Poles. Grand Challenges for European Cooperation*, pages 33–58. Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart, New York, 1996.
- [5] H. von Storch. Nobelprisen 2021 i Fysik tildelt klimaforskeren Klaus Hasselmann. *Vejret*, 170:8–11, 2022.
- [6] S.A. Arrhenius. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, 41(251):237–276, 1896.
- [7] A. Barkhordarian, H. von Storch, A. Behrangi, P. C. Loikith, C. R. Mechoso, and J. Detzer. Simultaneous regional detection of land-use changes and elevated GHG levels: The case of spring precipitation in tropical south america. *Geophysical Research Letters*, 45(12):6262–6271, 2018.



Hans von Storch har læst matematik, fysik og dansk på universitetet i Hamborg. Han har ledet gruppen for statistisk analyse og modellering ved Max Planck-Instituttet for Meteorologi i Hamborg, hvor han arbejdede sammen med den senere nobelpristager Klaus Hasselmann. Fra 1996 til 2015 var han direktør for Institut for Kystforskning i Geesthacht nær Hamborg.