

Klimaforandringer set gennem FN's klimapanel

5. hovedrapport

Af Jens Hesselbjerg Christensen, Danmarks Meteorologiske Institut

“Klimasystemets opvarmning er utvetydig, og siden 1950'erne er mange af de observerede ændringer uden fortilfælde over årtier og helt op til årtusinder. Atmosfæren og havene er blevet varmere, mængderne af is og sne er reduceret, havniveauet er steget, og koncentrationen af drivhusgasser er øget. Menneskets indflydelse på klimasystemet er tydelig. Dette fremgår klart af de stigende koncentrationer af drivhusgasser i atmosfæren, den positive strålingspåvirkning, den observerede opvarmning og forståelsen af klimasystemet. Kumulative udledninger af CO₂ er i høj grad bestemmende for den gennemsnitlige globale overfladeopvarmning i det sene 21. århundrede og derefter. De fleste aspekter af klimaforandringerne vil være ved i mange århundreder, selvom udledningen af CO₂ standses. Dette medfører betydelige, uundgåelige klimaforandringer over flere århundreder, skabt af tidligere, nuværende og fremtidige udledninger af CO₂.” [FN's klimapanel 2013]

FN's klimapanel (IPCC¹) er et mellemstatsligt organ, der blev oprettet af FN's særorganisationer for meteorologi (WMO) og miljø (UNEP) i 1988 med det formål at forsyne verden med en klar videnskabelig vurdering af aktuel viden om klimaforandringer og deres potentielle miljømæssige og samfundsøkonomiske konsekvenser. Hovedaktiviteten er med regelmæssige mellemrum at udgive vurderingsrapporter om den naturvidenskabelige viden om klimaforandringer, om klimatilpasning og om modvirkning af klimaforandringerne. Klimapanelet udfører ikke selv forskning, men vurderer den eksisterende viden og litteratur. Panelets rapporter understøtter arbejdet under FN's Klimakonvention (UNFCCC²). Arbejdet er således politisk relevant som information for beslutningstagere, men IPCC kommer ikke selv med politiske anbefalinger. Rapporterne gennemgår en omfattende og transparent høringsproces blandt faglige eksperter fra hele verden for at sikre en høj videnskabelig standard. I den afsluttende godkendelsesproces anerkender regeringsrepræsentanter i overensstemmelse med rapporternes hovedforfattere det videnskabelige indholds autoritet og sikrer, at rapporten er relevant, balanceret og forståelig for beslutningstagere. Denne arbejdsproces skal sikre IPCC's status som en unik og autoritativ kilde til omfattende, afbalanceret videnskabelig information til beslutningstagere.

Det er nu 27 år siden IPCC blev oprettet. Siden da er det blevet til fem store vurderingsrapporter i hhv. 1990, 1995, 2001, 2007 og senest i 2014. I slutningen af september 2013 udkom den første af klimapanelets i alt tre hovedværker i den 5. runde af vurderingsrapporter. Det drejede sig om bidraget, som omhandler den fysiske side af forståelsen af klimasystemet. Den var første skridt på vejen, der gør status over alt, hvad vi ved om Jordens klima, effekterne af klimaforandringer og om mekanismer til modvirkning af og tilpasning til klimaændringer. Sidste, afsluttende syntese udkom efter et møde i København i oktober 2014.

Hele processen startede med en “scoping”-runde, hvor IPCC-medlemslandenes embedsmænd fremsender en slags bestillingsliste over det indhold, man gerne ser vurderet i den kommende rapport. Det sker efter nationale konsultationer med regeringer og i dialog med fagfolk i medlemslandene. Herefter arbejder det tekniske støttebureau og arbejdsgruppernes co-chairs på at få så lang en liste som muligt med forfattere at vælge fra. Dette sker ved, at de nationale focal points (i Danmark er dette ved DMI) inviterer forskere fra de respektive lande til at byde ind med deres CV med henblik på at blive nomineret. Det kræver altså, at man kan dokumentere en vis faglig indsigt indenfor området, for at komme i betragtning. Co-chairs får så en opgave med at vælge forfattere, som ud over den faglige kompetence tager hensyn til geografisk spredning og et ønske om at have en fair balance mellem mandlige og kvindelige forfattere repræsenteret. Ligeledes er der et stærkt ønske om at have en betydelig andel af forfattere, som ikke er gengangere fra tidligere rapporter. Dog er der behov for en hvis form for procesforståelse, hvorfor hele forfattergruppen ikke skiftes ud hver gang. Herefter kan arbejdet med at skrive gå i gang. De enkelte kapitler har mellem ti og tyve forfattere med komplementerende kompetencer. Hvert kapitel skrives selvstændigt, men med en masse koordination, som typisk finder sted på et af de programsatte forfattermøder. Her drøftes også hvordan man håndterer de forskellige review kommentarer, som kommer ind. Der er to formelle review runder, første gang med faglige eksperter, i anden runde er også regeringernes embedsmænd eller udvalgte eksperter med som reviewere. Alle review kommentarer besvares detaljeret, og det betyder for mange kapitler en næsten lige så lang responsliste, som kapitlet selv. Der kan rask væk være 1500-2000 kommentarer, som skal behandles. Alle kommentarer og besvarelser kan tilgås via IPCC og er altså fuldt tilgængelige³. Undervejs i kapitelskrivningen, påbegyndes resuméet for beslutningstagere. Det er vigtigt

¹Intergovernmental Panel on Climate Change, www.ipcc.ch

²United Nations Framework Convention on Climate Change, <http://newsroom.unfccc.int>

³Climate Change 2013: The Physical Science Basis, <http://www.climatechange2013.org/report/drafts-and-review-materials/>

at de enkelte kapitler er leveringsdygtige i vurderingsudsagn, der kan sammenfattes i dokumentet "Summary for policy makers", som resuméet udgør. Til at skrive resuméet deltager typisk to eller tre af de enkelte kapitlers forfattere. Resuméet skal jo bygge på den underliggende rapport. Resuméet har videre sin egen review proces og kommer to gange forbi regeringsapparatet. Den endelige version bliver til ved, at den kladde, som har været i review på en plenarforsamling fremlægges i en revideret udgave, som tager hensyn til de indkomne review kommentarer. Dette møde sker for lukkede døre, da dokumentet gennemskrives, så regeringernes embedsmænd kan acceptere den ordlyd, forfatterne kommer med. Der er ikke egentlig vetoret, men der kan blive forhandlet længe om enkelte formuleringer. Langt de fleste omskrivninger gør sproget lettere forståeligt for ikke-eksperter. Men en sjælden gang er der tekst, som ikke er præcist nok formuleret eller, hvor der hersker begrundet usikkerhed om det udsagn forfatterne har lagt op til. Så bliver den underliggende tekst gransket igen og en passende formulering fundet. Hidtil er man altid nået til enighed – vel at mærke så også forfatterne kan sige god for ordlyden. Det er altså ikke embedsmændene, som skriver resuméet. Skulle de ønske at få en tekst igennem, så skal forfatterne kunne sige god for det, og materialet i den underliggende rapport skal naturligvis kunne bakke op om udsagnet.

Når hele resuméet har været en tur igennem denne linje for linje gennemgang, siger man, at resuméet er godkendt. Samtidig accepteres den underliggende rapport, som jo egentlig er den videnskabelige del af affæren. Jeg har personligt været med til tre af disse godkendelsesmøder, og det er min erfaring, at tekstforhandlingerne virkelig er nyttige i forhold til formuleringerne. Hvis man læser godt efter, kan man godt se, hvor der har været større ønsker om andre formuleringer. Her er der typisk forskellige modsat rettede forslag fra enkelte lande. Det kunne være England på den ene side og Saudi Arabien på den anden. Den forhandlede kompromistekst er så ikke altid så skøn og letlæselig. Men ordlyden står alligevel frem, så man ikke kan give forskellige fortolkninger af teksten. Alt i alt er jeg ret imponeret over den respekt, der er for forfatternes arbejde i samtlige IPCC-medlemslande. Det er derfor jeg selv tror, at IPCC-rapporterne i langt de fleste lande er meget centrale dokumenter ved klimaforhandlinger og i forbindelse med klimatilpasningsarbejdet.

I det følgende gives et sammendrag af de væsentlige pointer fra den 1. delrapport [1], hver med en underbygning bestående af den information, som fører til den pågældende pointe. Det kan af pladshensyn kun blive for nogle udvalgte områder, at dette kan gøres i nogen egentlig dybde. Jeg har valgt at koncentrere mig om den del af rapporten, som leder frem til de stærke udsagn om, at "Menneskets indflydelse på klimasystemet er tydelig". Men hovedbudskaberne kan læses flere steder og hele argumentationen findes naturligvis i den fulde rapport på over 1500 sider [1]; (en dansk oversættelse af resumé for beslutningstagere findes på DMI's hjemmeside⁴).

Angivelsen af usikkerheden for centrale resultater er naturligvis centrale i vurderingsarbejdet og er baseret på forfatternes vurdering af den underliggende videnskabelige forståelse og udtrykkes kvalitativt som et konfidensniveau (fra *meget lavt* til *meget højt*) og, når det er muligt, med en sandsynlighedsangivelse (fra *exceptionelt usandsynligt* til *i realiteten sikkert*). Tilliden til et resultats validitet er baseret på typen, mængden, kvaliteten og pålideligheden af den viden, der ligger til grund (fx data, mekanistisk forståelse, teori, modeller, ekspertvurdering) og graden af enighed, de forskellige metoder imellem. Jeg har valgt ikke at angive usikkerheder og i stedet angivet centrale værdier, men henviser i øvrigt til selve IPCC-rapporten.

Observerede ændringer i klimasystemet

"Klimasystemets opvarmning er utvetydig, og siden 1950'erne er mange af de observerede ændringer uden fortilfælde over årtier og helt op til årtusinder. Atmosfæren og havene er blevet varmere, mængderne af is og sne er reduceret, havniveauet er steget, og koncentrationen af drivhusgasser er øget." [1].

Disse udsagn er alle baseret på observationer baseret på direkte målinger og telemålinger fra satellitter og andre platforme som fly og skibe. De meteorologiske tjenester har samlet set været i stand til at levere et nogenlunde verdensomspændende netværk af instrumentale målinger siden midten af 1800-tallet for primært temperatur, men også andre meteorologiske parametre. Fra omkring 1950 og fremefter er mere omfattende sæt af observationer blevet tilgængelige. Hertil kommer, at en række palæoklimatiske rekonstruktioner udvider datagrundlaget med fra hundrede til millioner af år bagud i tiden. Tilsammen giver disse data et omfattende indblik i variabiliteten af de langsigtede ændringer i atmosfæren, havene, kryosfæren (is og sne på land, under overfladen og på hav) og ved jordoverfladen.

Atmosfæren nær jordoverfladen

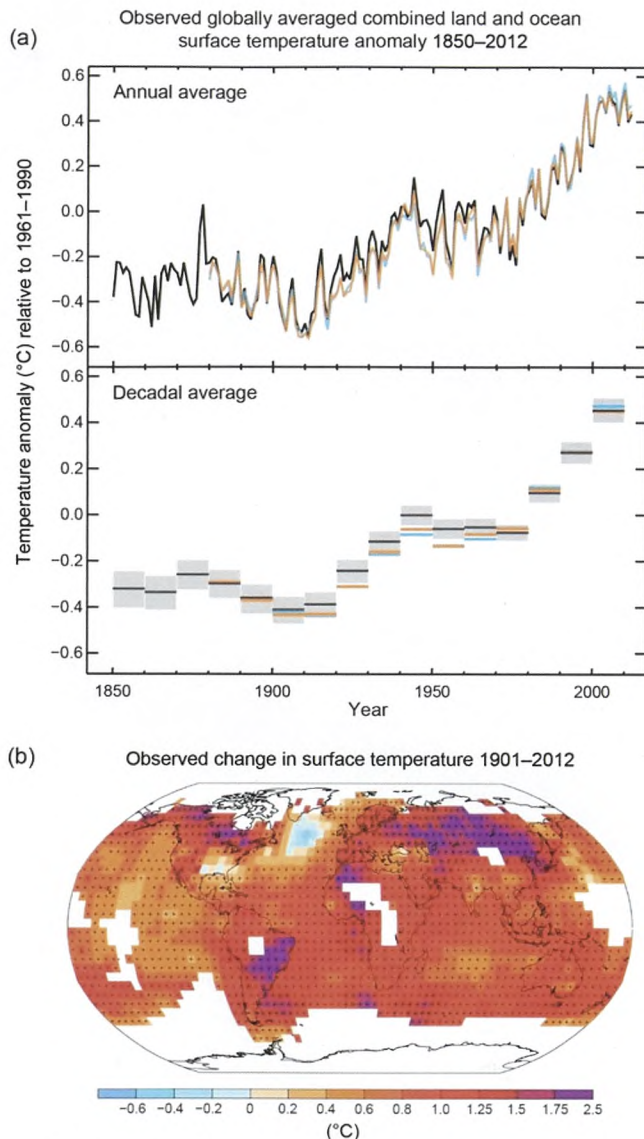
Den centrale figur, når det handler om global opvarmning, er gengivet i figur 1. De dataserier, som ligger til grund, er sammenstykket af forskellige forskergrupper. Selv om de i høj grad bygger på de samme grundlæggende observationer, indeholder datasættene ikke helt de samme oplysninger. Hertil kommer, at processen med at lave en årsmiddelværdi benytter lidt forskellige metodikker, især til at håndtere områder uden data (de hvide områder på figur 1b).

De tre datasæt stammer fra hhv. Hadley Centret i England [2] og NCDC og GISS [3] og [4], begge i USA. Det fremgår, at forskellene imellem de tre datasæt er væsentlig mindre end både udsvingene fra år til år og trenden over perioden.

Foruden tydelig opvarmning over flere årtier udviser den globale middelloverfladetemperatur store variationer mellem årtier og fra år til år. På grund af den naturlige variabilitet er tendenser baseret på korte dataserier meget følsomme over for start- og sluttidspunkter, og afspejler generelt ikke langsigtede klimatendenser. Som

⁴http://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/DKC/Klimaforandringer_2013__dansk.pdf

eksempel var opvarmningshastigheden $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ pr. årti over perioden 1998-2012, som indledtes med en kraftig El Niño. Dette er mindre end hastigheden for 1951-2012, som var $0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ pr. årti. Med et ti-års tidsfilter hen over temperaturkurven, så står det seneste årti derimod i stærk kontrast til de forgående tre årtier ved at være markant varmere, og samtidig viser denne figur, at hvert af de foregående tre årtier har været varmere end det foregående.



Figur 1. (a) Den observerede globale middelværdi af temperaturanomali for land og havoverfladen for perioden 1850-2012 fra tre datasæt. Øverste diagram: årlige middelværdier. Nederste diagram: middelværdier over ti år inklusive usikkerhedsintervallet for ét datasæt (sort). Afvigelser er i forhold til middel for 1961-1990. (b) Kort over observerede ændringer i overfladetemperatur fra 1901 til 2012 baseret på temperaturtendenser bestemt ved lineær regression fra ét datasæt (orange kurve i diagram a). Tendenser er beregnede, hvor datatilgængelighed tillader et solidt skøn (dvs. kun for gitterbokse med over 70 % komplette registreringer og mere end 20 % datatilgængelighed i de første og sidste 10 % af tidsperioden). Andre områder er hvide. Gitterbokse, hvor tendensen er signifikant ved 10 %-niveauet, er angivet med et +. Fra [1].

En lang række palæoklimatiske rekonstruktioner af overfladetemperaturer på kontinentalt plan (IPCC-rapporten sammenstiller og vurderer materiale fra mere

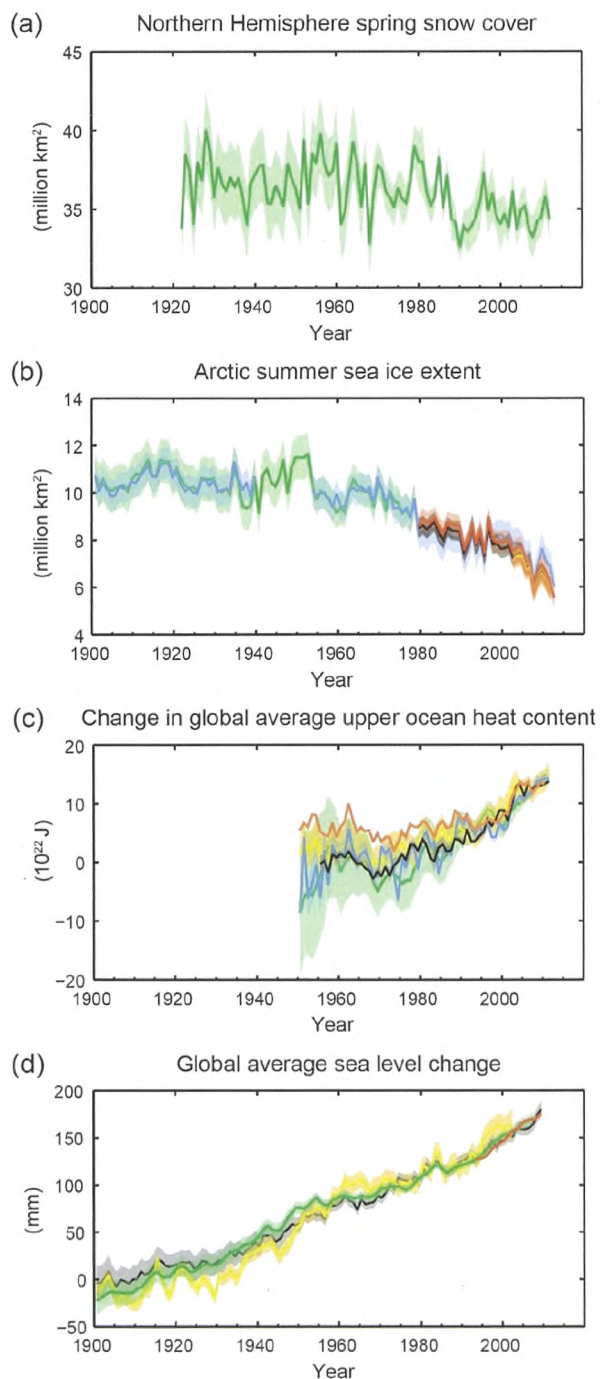
end ti forskellige analyser) viser med *stor sikkerhed* perioder på flere tiår i middelalderen (her perioden 950-1250), hvor nogle områder var lige så varme som i de sidste årtier. Men disse regionale varmeperioder optrådte ikke så sammenhængende på tværs af regioner som opvarmningen igennem de sidste årtier. Dermed kan man udvide udsagnet om det varmeste årti ovenfor til at række længere tilbage. På den nordlige halvkugle var 1983-2012 *sandsynligvis* den varmeste 30-års periode i de sidste 1400 år (*middel sikkerhed*).

Ændringer i havene og kryosfæren

Opvarmning af havene dominerer forøgelsen af energi ophobet i klimasystemet og står for over 90 % af den energi, der er akkumuleret mellem 1971 og 2010 (*stor sikkerhed*). Det er i realiteten sikkert, at den øverste del af havene (0-700 m) blev varmere fra 1971 til 2010, og *sandsynligvis* blev varmere mellem 1870'erne og 1971. Et væsentligt bidrag til at kunne sige dette med *stor sikkerhed* kommer fra, at en række systematiske fejl i registreringer af temperaturen i den øverste del af havene er fundet og siden reduceret.

En væsentlig konsekvens af opvarmning af havene er havniveaustigninger. Dette er en velforstået fysisk proces, som skyldes den volumenforøgelse af vand, som resulterer af en opvarmning. Regnestykket er ikke helt ligetil, da udvidelsen bl.a. afhænger af temperatur, saltholdighed og trykforhold af den givne vandmasse. Men forestiller man sig, at hvis al indlandsisen på Grønland smelter, er der her vand nok til, at havene i middel vil stige med omkring 7 meter. Tilsvarende er der til omkring 70 meter gemt på Antarktis. Da mængden af is og sne samtidig er indikatorer for temperaturen lokalt set, er ændringer i kryosfæren meget vigtige at følge for at forstå klimaændringerne.

Udbredelsen af sne og havis er over tid indikatorer på temperaturen i Arktis. Siden 1979 er der pålidelige satellitmålinger, som kan give detaljeret information om udbredelsen af sne og is globalt. Baseret på disse data og *in situ*-baserede datasæt samt historiske overleveringer finder man, at den årlige middeludbredelse af den arktiske havis aftog i perioden 1979-2012 med en hastighed, som *meget sandsynligt* lå i størrelsesordenen 3,5 til 4,1 % pr. årti (et område på 0,45 til 0,51 millioner km^2 pr. årti) og *meget sandsynligt* i størrelsesordenen 9,4 til 13,6 % pr. årti (et område på 0,73 til 1,07 millioner km^2 pr. årti) for havsminimum om sommeren (flerårig havis). Det gennemsnitlige fald i tiårs midler af den arktiske havisudbredelse har været størst om sommeren (*stor sikkerhed*); den geografiske udbredelse er aftaget på alle årstider og i hvert årti siden 1979 (*stor sikkerhed*), hvilket er vist på figur 2. Hvad angår snedække, så er der *meget stor sikkerhed* for, at udbredelsen af snedækket på den nordlige halvkugle aftog med 1,6 % pr. årti for marts og april (maksimum udbredelse) og med 12 % per årti for juni (typisk sidste måned med betydeligt snedække) i perioden 1967-2012. I denne periode viste snedækkets udbredelse på den nordlige halvkugle ikke en statistisk signifikant forøgelse i nogen måned.



Figur 2. Forskellige observerede indikatorer for globale klimaforandringer: (a) den gennemsnitlige udbredelse af (forårs-) snedækket på den nordlige halvkugle i marts-april, (b) den gennemsnitlige udbredelse af den arktiske havis i juli-august-september (sommer), (c) ændring i det globale gennemsnitlige varmeindhold i den øverste del af havene (0-700 m) afstemt til 2006-2010 og i forhold til gennemsnittet for alle datasæt for 1970, (d) globalt middelhavniveau i forhold til 1900-1905-gennemsnittet i det længstvarende datasæt og med alle datasæt afstemt til den samme værdi i 1993, det første år med satellitaltimetridata. Alle tidsrækker (farvede linjer angiver forskellige datasæt) viser årlige middelværdier, og hvor de er vurderet, angives usikkerheder med farvet skyggelegning. Fra [1]

Viden om massetabene fra de store iskapper stammer i det væsentlige fra satellitbaserede målinger. Det er muligt både at måle massen af iskapperne såvel som at bestemme overfladens højde over havet ganske nøjagtigt på baggrund af data fra forskellige satellit-

sensorer. Baseret på flere forskellige analyser af disse data er det vurderet, at den gennemsnitlige tabsrate fra Grønlands iskappe *meget sandsynligt* er øget betydeligt fra omkring 35 Gt/år i perioden 1992-2001 til 215 Gt/år i perioden 2002-2011. Den gennemsnitlige tabsrate fra Antarktis' iskappe er *sandsynligvis* øget fra 30 Gt/år i perioden 1992-2001 til omkring 150 Gt/år i perioden 2002-2011. Der er *meget stor sikkerhed* for, at disse tab overvejende er fra den nordlige Antarktiske Halvø og Amundsenhavet-sektoren af Vestantarktis.

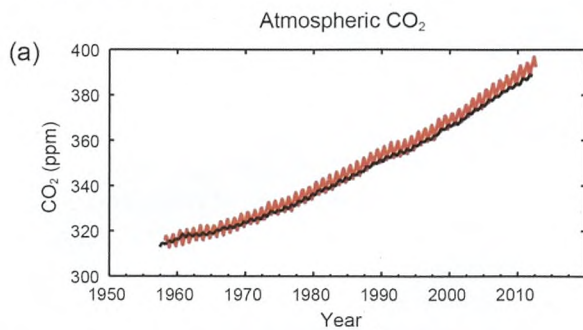
Med informationen fra den termiske vandudvidelse, massetabet fra iskapperne og tilsvarende tab fra andre gletsjere kan den samlede ændring i havniveauet beregnes til et givet tidspunkt. Som tilfældet med temperaturen, så findes der også gode indikatorer (proxyer) for vandstand fra før egentlige målinger. Proxydata og måledata for havniveauet viser et skifte fra relativt lave gennemsnitlige stigningsrater gennem de to forudgående årtusinder til højere stigningsrater omkring skiftet mellem det 19. og 20. århundrede (*stor sikkerhed*). Det er *sandsynligt*, at stigningsraten for middelhavniveauet på globalt plan til stadighed er øget siden begyndelsen af 1900-tallet. Hastigheden af stigningen i havniveauet siden midten af det 19. århundrede har været større end den gennemsnitlige hastighed i de to foregående årtusinder (*stor sikkerhed*). I perioden 1901-2010 steg middelniveauet på globalt plan med ca. 0,19 m.

Baseret på proxydata er det videre muligt at vurdere havniveauet i den sidste mellemistid (for 129.000 til 116.000 år siden). Der er *meget stor sikkerhed* for, at det maksimale middelhavniveau var 5 meter højere end nu gennem adskillige tusind år, og *stor sikkerhed* for, at det ikke nåede højere end 10 m over det nuværende niveau. Det er *meget sandsynligt* at Grønlands Indlandsis bidrog med mellem 1,4 og 4,3 m til det højere globale middelhavniveau, hvilket indikerer et ekstra bidrag fra Antarktis (*middel sikkerhed*). Denne ændring af havniveauet skete på et tidspunkt, hvor Jordens bane og position i forhold til Solen var anderledes, og hvor overfladetemperaturen på høje breddegrader midlet over flere tusinde år, var mindst 2 grader varmere end præ-industrielt (*stor sikkerhed*).

Kulstof-kredsløbet

Målinger af luftens indhold af forskellige drivhusgasser, som er repræsentative for den frie atmosfære, har været foretaget med stor nøjagtighed siden midten af sidste århundrede. Iskerner, som er udtaget fra Antarktis og analyseret for indholdet af en række atmosfæriske luftarter ved at undersøge små indesluttede luftbobler giver med god tidsopløsning information om atmosfærens sammensætning tilbage i tiden. Ved at undersøge den isotopiske sammensætning af de luftarter, som måles, er det muligt at fastslå oprindelsen af de indgående molekyler. Baseret på disse data kan man sige, at de atmosfæriske koncentrationer af kuldioxid (CO₂), metan og lattergas er steget til niveauer, der er uden fortilfælde gennem de seneste 800.000 år eller mere. CO₂-koncentrationen er steget med 40 % siden industrialiseringens begyndelse, primært pga. udledninger fra fossile brændstoffer. Havene har absorberet ca. 30 % af den menneskeskabte kuldioxidudledning.

Figur 3 sammenfatter ændringerne i atmosfærens CO₂-koncentration fra moderne målinger. Det nuværende niveau skal sammenholdes med niveauet igennem de foregående 800.000 år, typisk mellem 200 og 280 parts per million (ppm; eller antallet af CO₂-molekyler per million luftmolekyler), som er den enhed man benytter til at angive koncentrationen.



Figur 3. Forskellige observerede indikatorer for ændringer i det globale kulstofkredsløb: (a) atmosfæriske koncentrationer af kuldioxid (CO₂) fra Mauna Loa (19°32'N, 155°34'V – rød) og Sydpolen (89°59'S, 24°48'V – sort) siden 1958. Fra [1]

Påvirkningsfaktorer, der leder til klimaforandringer

Naturlige og menneskeskabte stoffer og processer, som ændrer Jordens energibudget, er påvirkningsfaktorer, der leder til klimaforandringer. Strålingspåvirkning (radiative forcing; RF) kvantificerer ændringen i energifluxen forårsaget af ændringer i forskellige påvirkningsfaktorer. Positiv RF leder til overfladeopvarmning, negativ RF leder til overfladeafkøling. RF vurderes på basis af *in-situ*- og telemålinger, drivhusgasser og aerosolers egenskaber samt beregninger ved hjælp af numeriske metoder, som repræsenterer observerede processer. Nogle udledte kemiske forbindelser påvirker den atmosfæriske koncentration af andre stoffer. RF kan angives på basis af koncentrationsændringerne for hvert enkelt stof.

Det er med andre ord et ret komplekst samspil imellem naturligt forekommende processer, som kan lede til klimaforandringer og de påvirkninger, som oprinder af menneskelig aktivitet. Men baseret på en vurdering af de enkelte bidrag til strålingspåvirkningen finder man, at den totale strålingspåvirkning er positiv og har ført til en optagelse af energi i klimasystemet. Det største bidrag til den totale strålingspåvirkning skyldes stigningen i atmosfærens koncentration af CO₂ siden 1750. De enkelte bidrag er vurderet og fremgår af figur SPM.5 i resuméet for beslutningstagere [1].

Forståelsen af klimasystemet og dets seneste ændringer

Forståelsen af de nylige ændringer i klimasystemet beror på en kombination af observationer, studier af feedbackmekanismer og modelsimuleringer. Vurderingen af klimamodellers evne til at simulere nylige ændringer kræver overvejelser om tilstanden af alle modellerede dele af klimasystemet ved simuleringens start og de naturlige og menneskeskabte påvirkninger, der anvendes til at drive modellerne igennem forløbet siden den industrielle revolution. Detaljerede og lange observationsserier sammen med forbedrede klimamodeller gør det nu muligt at tilskrive et menneskeligt bidrag til

påviste ændringer i flere af klimasystemets komponenter og ikke blot tale om global temperatur. Baseret på denne type af sammenbragt information kan man nu sige, at menneskets indflydelse på klimasystemet er tydelig. Dette fremgår af de stigende koncentrationer af drivhusgasser i atmosfæren, den positive strålingspåvirkning, den observerede opvarmning og forståelsen af klimasystemet. Det er naturligvis vigtigt at have en forståelse for kvaliteten af de enkelte bidrag, som leder til en sådan vurdering. Her udgør ikke mindst kvaliteten af klimamodeller, som anvendes intenst i klimaforskningen, en vigtig grundsten. Jeg vil derfor koncentrere mig om at belyse nogle af de styrker og svagheder, man finder ved en nærmere analyse af klimamodellers formåen i forhold til at gengive det observerede klimasystem. Andre har forholdt sig mere personligt til emnet i KVANT [5], [6]. Her vil jeg blot først fremhæve, at de klimamodeller, der ligger til grund for IPCC-vurderingerne er meget avancerede og ikke lader sig beskrive i nogen væsentlig detalje her. Disse modeller er resultatet af større eller mindre bidrag fra ofte flere hundreder af videnskabsfolk med ekspertiser indenfor mange forskellige fysik-, kemi- og biokemidiscipliner. Det er i denne kontekst afsnittet skal læses.

Vurdering af klimamodeller

På verdensplan findes i dag omkring 40 forskellige såkaldte generelle cirkulationsmodeller (GCM'er). De er ikke fuldstændigt uafhængige af hinanden, og forskellige forskningscentre anvender flere af modellerne. Totalt set er der omkring 20 større grupper på verdensplan, som til stadighed arbejder med at forbedre modellernes kvalitet, både på procesniveau og ved valg af numeriske metoder. Begyndelsesbetingelser til modelkørsler tages fra observerede forhold og modellerne udregner fra denne tilstand sit eget modelklima ud. Det er ikke en del af modeludvikling at arbejde med at fodre observationer ind i modellerne – en pointe er netop, at modellerne er fysisk baseret og derfor udregner alle forhold ud selv, både i historisk perspektiv og når der skal laves scenarier for fremtiden. De bliver derfor ikke fittet mod observationer; en styrke fordi man så kan vurdere kvaliteten af modellerne ud fra performance, en svaghed fordi der altid vil være afvigelser fra det observerede klima, der så skal gøres rede for på et fysisk grundlag.

Modellerne reproducerer nu observerede overfladetemperaturmønstre og -tendenser på kontinentalt plan over mange årtier, herunder den hurtigere opvarmning siden midten af det 20. århundrede og afkølingen, der følger umiddelbart efter store vulkanudbrud (*meget stor sikkerhed*). De langsigtede klimamodellsimuleringer viser en tendens for den gennemsnitlige globale overfladetemperatur fra 1951 til 2012, som stemmer overens med den observerede tendens (*meget stor sikkerhed*). Der er dog forskelle mellem simulerede og observerede tendenser over perioder så korte som 10 til 15 år (fx 1998 til 2012). Den observerede reduktion i tendensen af overfladeopvarmningen i perioden 1998-2012 sammenlignet med perioden 1951-2012 skyldes i stort set lige høj grad en reduceret tendens i strålingspåvirkningen og et afkølede bidrag fra intern variabilitet,

som inkluderer en mulig omfordeling af varme i have-⁵ (*middel sikkerhed*). Der er *middel sikkerhed* for, at forskellene mellem observationer og simuleringer for en stor dels vedkommende skyldes intern dekadisk variabilitet, idet simuleringer ikke må forventes at reproducere den rigtige timing af denne i form af varme- eller kuldeperioder. Der kan også være et bidrag fra mangelfuld beskrivelse af påvirkninger og, i nogle modeller, en overvurdering af reaktionen på øgningen af drivhusgasser og anden menneskeskabt påvirkning (domineret af effekten af aerosoler). Sikkerheden i modellernes evne til at simulere overfladetemperaturer er mindre på regionalt plan, end når der er tale om større skala. Tilsvarende gengiver en række modeller nu nogle vigtige klimafænomener bedre. Der er *stor sikkerhed* for, at statistikkerne for monsunen og El Niño – Sydlige Oscillation (ENSO) er forbedret i dagens modeller. Disse fænomener er vigtige at repræsentere realistisk, fordi de påvirker klimaet over store geografiske områder. Der er ligeledes solidt bevis for, at den nedadgående tendens af udbredelsen af arktisk sommerhavis siden 1979 nu gengives af flere modeller. Der har været væsentlige fremskridt med hensyn til vurderingen af ekstreme vejr- og klimahændelser. Simulerede tendenser af den globale middel af hyppigheden af ekstremt varme og kolde dage og nætter, i sidste halvdel af 1900-tallet, stemmer generelt overens med observationerne. Der er også sket en vis forbedring af simuleringen af nedbørsmønstre på kontinentalt plan. På regionalt plan simuleres nedbør ikke lige så godt, men vurderingen hæmmes af usikkerhederne i observationerne. I modsætning til temperaturer, som for punktmålinger ofte er repræsentative for tusinder af kvadratkilometer, varierer nedbørsintensitet ganske meget lokalt, så mange steder er den observerede nedbør faktisk ikke særlig godt bestemt.

Kvantificering af klimasystemets respons

Observations- og modelbaserede studier af temperaturændringer, klima-feedbackmekanismer og ændringer i Jordens energibudget giver tilsammen sikkerhed mht. størrelsesordenen af den globale opvarmning som reaktion på tidligere og fremtidig påvirkning. Som før nævnt er såvel mængden som kvaliteten af målinger, der nu er til rådighed betydelig bedre end for et årti siden. Baseret på disse forbedrede data kan det siges, at nettoresponsen på den kombinerede effekt af ændringer i vanddampindholdet og forskelle mellem opvarmningen af atmosfæren og overfladen er *ekstremt sandsynligt* positiv og forstærker derfor ændringer i klimaet. Det er *sandsynligt*, at nettostrålingsresponsen som følge af kombination af alle skytyper er positiv. Usikkerhed med hensyn til fortegnet og størrelsen af feedback fra skyerne skyldes primært usikkerhed om opvarmningsindflydelse på lave skyer. Skyers meget ujævne geografiske fordeling i atmosfæren vanskeliggør beregningen af den fulde effekt.

For at vurdere, hvordan klimaet over tid responderer på en ændret strålingspåvirkning har man defineret en størrelse kaldet ligevægtsklimafølsomheden. Den

kvantificerer klimasystemets respons på en konstant strålingspåvirkning på en tidsskala på flere århundreder. Den defineres som ændringen i den gennemsnitlige globale ligevægtstemperatur ved overfladen forårsaget af en fordobling af CO₂-koncentrationen i atmosfæren. Det er *sandsynligt*, at ligevægtsklimafølsomheden ligger i området 1,5 °C til 4,5 °C (*stor sikkerhed*), *ekstremt usandsynligt*, at den er under 1 °C (*stor sikkerhed*) og *meget usandsynligt*, at den er over 6 °C (*middel sikkerhed*). Ligevægtsklimafølsomheden kan estimeres ud fra forskellige analyser. Navnlige: i) direkte fra klimamodeller, ii) udledes af feedbackmekanismer i klimamodeller, iii) mønstre af gennemsnitligt klima og variabilitet, iv) rekonstruering fra palæoklimatiske arkiver, v) vulkanudbrud og vi) observerede temperaturtendenser siden præ-industrieltid. Estimererne baseret på disse metoder varierer så meget, at det i dag ikke er muligt at indskrænke det sandsynlige interval for ligevægtsklimafølsomheden yderligere. Men hastigheden og omfanget af globale klimaforandringer bestemmes af strålingspåvirkning, klima-feedbackmekanismer og energiindholdet i klimasystemet. Beregninger af disse størrelser for de seneste årtier stemmer overens med det vurderede *sandsynlige* interval for ligevægtsklimafølsomheden inden for de vurderede usikkerheder og giver dermed et stærkt vidnesbyrd om vores forståelse af menneskeskabte klimaforandringer.

Påvisning af og årsager til klimaforandringer

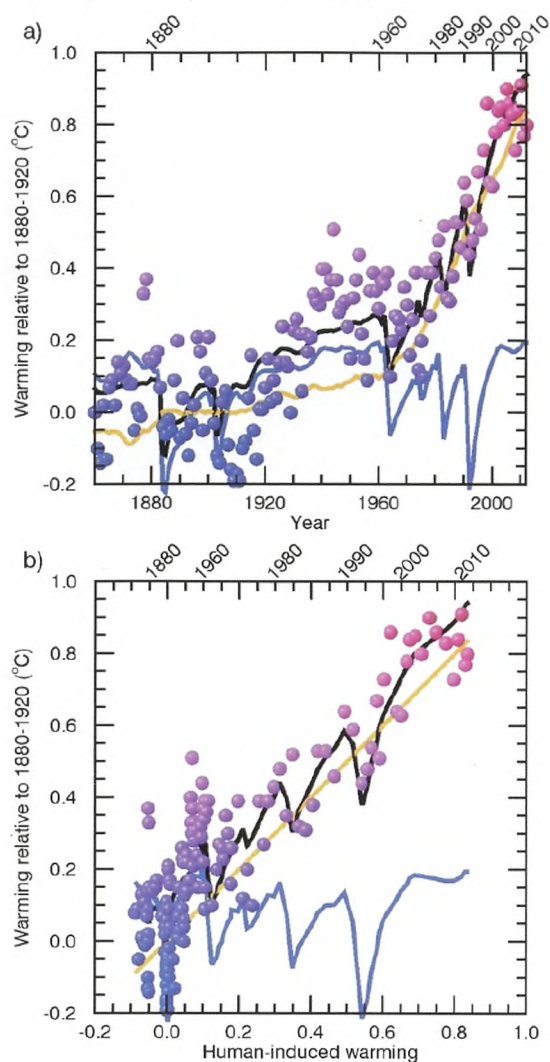
“Menneskelig påvirkning er nu påvist i opvarmningen af atmosfæren og havene, ændringer i det globale vandkredsløb, reduktionerne af sne og is, stigningen i det globale middelhavniveau og ændringer i nogle klimaekstremer. Disse vidnesbyrd om menneskets påvirkning er støt øget over det sidste årti. Det er ekstremt sandsynligt, at menneskelig påvirkning har været den dominerende årsag til den observerede opvarmning siden midten af det 20. århundrede.” [1]

For at give et indtryk af, hvad der indgår i en formel “detection and attribution” (påvisning og forklaring) analyse, som ligger til grund for den ovenstående paragraf, skal jeg her give et eksempel på, hvordan anvendelsen af observationer og data sammenstilles for at vurdere i hvor høj grad der er forståelse for årsagssammenhængen. For yderligere detaljer henvises til [7].

Her gives en idealiseret demonstration af de begreber, der ligger til grund for de fleste eksisterende studier af ‘detection and attribution’, og hvordan disse relaterer til konventionel lineær regression. De farvede prikker i figur 4 viser observerede årlige globale middeltemperaturer for perioden 1861-2012, med varmere år farvet røde og koldere år farvet blå. Observationer alene indikerer, utvetydigt, at Jorden er varmet op, men at kvantificere, hvordan forskellige eksterne faktorer har bidraget til denne opvarmning, kræver en sammenligning af sådanne observationer med de forventede reaktioner på de eksterne faktorer. Den orange kurve viser et modelbaseret estimat over den globale middeltemperaturs respons på en påtvunget menneske-

⁵Udsving, som skyldes internt koblede processer i klimasystemet, især knyttet til de lange tidsskalaer i oceanerne.

skabt strålingspåvirkning (drivhusgasser og aerosoler), mens andre strålingspåvirkninger er holdt konstante. Den blå linje viser omvendt responset udelukkende på naturlige, eksterne påtrykte variationer (Solen og vulkaner). I statistiske termer, vil 'attribution' involvere at finde kombinationen af disse menneskeskabte og naturlige reaktioner, der bedst passer det observerede temperaturforløb, hvilket er vist med den sorte linje i panel (a). For at vise, hvordan dette opnås i ikke-tekniske termer, er de samme data, plottet mod den modelsimulerede menneskeskabte opvarmning, i stedet for tid, i panel (b). Der er en stærk sammenhæng mellem observerede temperaturer og modelsimuleret menneskeskabt opvarmning, men på grund af tilstedeværelsen af naturlige faktorer og intern variabilitet, er korrelation alene ikke nok til en formel påvisning (attribution). Det er nu muligt med statistiske metoder at kvantificere, hvor store bidrag til opvarmningen der skyldes hhv. naturlige og menneskeskabte påvirkninger. Analyser som den her skitserede ligger bag ovenstående citat fra IPCC-rapporten. Men det er vigtigt også at forholde sig til alternative forklaringer.



Figur 4. Eksempel på en forenklet påvisning og forklarings (detection and attribution) undersøgelse. (a) Observerede årlige globale middeltemperaturer i forhold til 1880-1920 (farvede prikker) sammenlignet med klimamodellers respons på menneskeskabte påvirkninger (orange), naturlige strålingspåvirkninger (blå) og best-fit lineær kombination (sort). (b) som (a), men alle data, plottet mod modelsimuleret menneskeskabt opvarmning i stedet for tid. Udvalgte år er angivet på den øverste akse. Fra [1]

Som mange af KVANTs læsere er bekendt med, så eksisterer der – baseret på arbejde af den danske fysiker Henrik Svensmark – en hypotese om, at kosmiske stråler kan fungere som en forstærkende mekanisme af Solens påvirkning af Jordens klima. Men i ovenstående 'detection and attribution' metodik, fremgår det, at det ikke er muligt at begrunde de observerede temperaturændringer ud fra de naturlige strålingspåvirkninger alene, ja faktisk forklarer ovenstående øvelse, at mellem 0,6 og 0,9 grader af opvarmningen siden 1950 kan tilskrives menneskeskabt strålingspåvirkning, hvorfor der ikke levnes megen plads til betydningen af Solen – ej heller gennem en forstærket effekt via kosmiske stråler. Andre studier, der udelukkende analyserer de globale temperaturserier, uden at gå vejen omkring klimamodeller, kommer til lignende resultater; Solen kan ikke forklare mere end maksimalt 0,2 grader af den observerede opvarmning. Hertil kommer så hele det fysiske grundlag for hypotesen, som jo må forudsætte en vis trend i intensiteten af kosmiske stråler, hvis der skal forklares en trend i temperaturen. Men en sådan trend kan slet ikke påvises for perioden 1960-2005 [8]. Derved bliver det vanskeligt at skrue op for andelen af naturlige strålingspåvirkninger i forhold til de menneskeskabte.

Litteratur

- [1] IPCC (2013), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F. et al. (eds.)]. Cambridge University Press 2013.
- [2] Morice, C.P., J.J. Kennedy, N.A. Rayner, and P.D. Jones (2012), Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **117**, 22.
- [3] Vose, R.S., et al. (2012), NOAA's Merged Land-Ocean Surface Temperature Analysis. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **93**, 1677-1685.
- [4] Hansen, J., R. Ruedy, M. Sato, and K. Lo (2010), Global surface temperature change. *Rev. Geophys.*, **48**, RG4004.
- [5] Andersen, J.U. (2010), Om klimamodeller og satellitmålinger, *KVANT* nr. 2.
- [6] Pedersen, J.O.P. (2011), Solaktivitet og klimaændringer, *KVANT* nr. 4.
- [7] Bindoff, N.L. et al. (2013): Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F. et al. (eds.)]. Cambridge University Press 2013.
- [8] McCracken, K.G., and J. Beer (2007), Long-term changes in the cosmic ray intensity at Earth, 1428-2005. *J. Geophys. Res. Space Physics*, **112**, A10101.

Jens Hesselbjerg Christensen er forskningsleder ved Danmarks Meteorologiske Institut og adjungeret professor i klimafysik ved Niels Bohr Institutet. Han har været hovedforfatter på kapitler om regionalt klima i flere af bidragene fra arbejdsgruppe 1 til IPCC's vurderingsrapporter. Han arbejder med at forstå og beskrive klimaforandringer i fortid, nutid og fremtid ved at anvende avancerede globale og regionale koblede klimamodeller. Senest med et fokus på Arktis og forståelsen af rollen af havis i forhold til ændringer i Grønlands Indlandsis.

