

Centre for Regional change in the Earth System (CRES)

Centre for Regional change in the Earth System (CRES) / Center for regionale klimaforandringer er en strategisk forskningsplatform for klima og klimatilpasning. CRES er et bredt, multi-disciplinært samarbejde mellem en række førende danske klimaforskere og inddrager direkte interessenter fra nøglesektorer såsom vand, landbrug, forsikring og kommuner. Målet med CRES er at levere forskning i verdensklasse med høj relevans for samfundets tilpasning til et ændret klima.

JENS HESSELBJERG CHRISTENSEN

CRES

CRES er resultatet af en strategisk satsning støttet gennem det Strategiske Forskningsråd igennem de sidste 5 år.

CRES' vision har været for første gang i Danmark at etablere en multi-disciplinær fælles videnskabelig platform som giver en sammenhængende forståelse for usikkerheder og regionale detaljer i scenarier for fremtidens klima og dertil relaterede effekter. Tilpasning til kommende ændringer afføder et stort behov for en mere præcis forståelse af, hvordan menneskelig aktivitet vekselvirker med naturlige processer, hvorfor CRES samtidig har involveret interessenter med klimatilpasningsbehov i sine aktiviteter.

CRES' mission har været at skabe et bredt og åbent samarbejde også udenfor kernegruppen, skabe nye synergier og minimere overlapning mellem forskningsaktiviteter (nationale såvel som internationale) inden for dette og beslægtede forskningsområder. Herigennem er der blevet etableret en relevant koordineret indsats af hensyn til både det samfundsmæssige beredskab og for Danmarks position i international forskning.

Forskerne i CRES, hvoraf flere har eller har haft aktive roller i FNs klimapanel IPCC, er gået sammen om at formidle IPCCs arbejder,

men har også leveret en sammenhængende dansk dimension af klimaproblematikkerne. CRES har herigennem været med til at bidrage til den underliggende videnskabelige dokumentation for mange af de tiltag, som nu er ved at finde vej til det praktiske arbejde med klimatilpasningen i Danmark. Ved direkte at involvere interessenter med klimatilpasningsbehov i forskellige aktiviteter har CRES bidraget aktivt til at styrke videngrundlaget i aktørernes tilpasningsarbejde. Tilsvarende er en række andre danske forskningsinitiativer og grupper inddraget gennem både projektmøder og workshops for at sprede og dele erfaringer på området.

Synergier

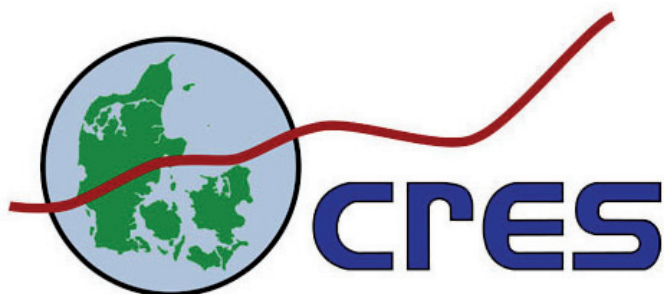
Et vigtigt element i CRES' aktiviteter har været et bredt og åbent samarbejde også udenfor kernegruppen bestående af forskere fra DMI, GEUS, DHI, Københavns Universitet, Aarhus Universitet og DTU. Det er sket med henblik på at skabe nye synergier og minimere overlap mellem forskningsaktiviteter (nationale såvel som internationale) inden for dette og beslægtede forskningsområder. De vigtigste aktører i Danmark med en forskningsindsats indenfor klimaområdet har været og er stadig i dialog eller egentligt samarbejde med CRES partnere, hvilket medvirker til en styrkelse både af det samfundsmæssige beredskab og Danmarks position i international forskning.

Viden og innovation

CRES' partnere repræsenterer danske forskningsmiljøer af stor forskningshøjde. Resultaterne fra aktiviteterne i CRES har gennem fokus på innovative og operationelle løsninger bidraget til kvantificering af usikkerheder relateret til klimaændringer og mere fuldstændige beskrivelser af effekterne på hydrologi, biologi og samfund for danske forhold. Ny viden er genereret om effekterne af ekstreme hændelser og overskridelse af såkaldte 'tipping points' og deres indbyrdes vekselvirkning. Hensigten hermed har været at give et langt bedre beslutningsgrundlag for revision af danske (og internationale) tilpasningsstrategier til at imødegå klimaforandringer.

Konferencer

CRES har videre stået for at organisere og bidrage til konferencer, workshops, brugermøder og uddannelse, hvor den allernyeste viden om klima, klimaeffekter og tilpasning er præsenteret og diskuteret til aktører, der arbejder med strategisk og operationel klimatilpasning i både den private og offentlige sektor foruden klimaforskere, studerende og andre eksperter. Risikoen for en 'klimakatastrofe' med fokus på, hvad der kunne være det fremtidige Danmark, hvis alle gode kræfter var spildte og den globale opvarmning fik frit spil, blev iscenesat ved stor international conference i 2012 afholdt i København. Konferencen afdækkede, at der ikke er nogen

The logo for the Centre for Regional Change in the Earth System (CRES) features a stylized globe with a red line passing through it, and the acronym CRES in blue.

Centre for Regional Change in the Earth System

viden om, hvad den øvre grænse for den globale opvarmning i dette århundrede kan blive eller hvor hurtigt det kan gå? Efterfølgende er temaet forsøgt belyst lidt bredere i en række videnskabelige arbejder, som forventes offentliggjort samlet i løbet af dette år i en specialudgave af tidskriftet Climatic Research og hvoraf flere af artiklerne i dette særnummer har hentet inspiration fra. Området kalder dog decideret på mere forskning, hvilket også afspejles bl.a. i de seneste af EU's rammeprogrammer. Ligeledes har CRES organiseret en bredere international conference om udfordringerne for klimatilpasningen i Norden også med deltagelse fra mange private og offentlige aktører (se artikel længere inde i dette nummer).

Forskningsinformation

På den videnskabelige front har CRES' for-

skere bidraget med solide resultater, som er med til at levere fundamentet for forbedrede forståelser af de værktøjer, der i dag anvendes til forskning i virkningen af klimaforandringer og deres anvendelse til klimatilpasning, herunder modeller og metoder til at få informationer om klimaforandringer på en lille skala, som eksempelvis byer eller danske vandoplande. Med dette nummer af Vand & Jord, fremhæves mange af de aktiviteter, som CRES har drejet sig om og forklares i en noget lettere tilgængelig udgave end dokumenteret i de videnskabelige tidsskrifter. Dette er i tråd med hvad, CRES' forskere over en bred kam løbende informerer ved dialogmøder med offentlige instanser i Danmark, private aktører og ikke mindst kommuner med behov for at udforme og iværksætte tilpasningsplaner.

Ved DHI har et undervisningsprojekt om klimaforandringerne ført til et samarbejde

med AlphaFilm om netop klimaforandringerne og nødvendigheden af klimatilpasninger. CRES har haft mulighed for at hjælpe til med at filmen kunne udgives i en engelsk version. Titlen på filmen er "Det fremtidige klima"

Filmen er rettet mod et bredt publikum, herunder til undervisningsbrug, og CRES muliggør, at filmen kommer på engelsk, og dermed også kan komme bredere ud, end tilfældet ellers havde været. Filmen blev i august lanceret på den omtalte nordiske klimatilpasnings-konference.

JENS HESSELBERG CHRISTENSEN (jhc@dmu.dk) er centerleder for CRES, adjungeret professor ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og forskningsleder ved Danmarks Meteorologiske Institut (DMI)



IPCCs SRES udslipsscenarier og de nye RCP scenarier

Mennesker påvirker opvarmningen af atmosfæren og havene, ændringer i det globale vandkredsløb, reduktionerne af sne og is, stigningen i det globale gennemsnitlige havniveau og ændringer i nogle klimaekstremer, som fx tørke og voldsomme regnvejr. Disse vidnesbyrd om menneskets påvirkning er øget siden IPCC's 4. hovedrapport (AR4) /1/. IPCC vurderer i sin seneste 5. hovedrapport (AR5) /2/ at det er ekstremt sandsynligt, at menneskelig påvirkning har været den dominerende årsag til den observerede opvarmning siden midten af det 20. århundrede. Klimaændringer indebærer en risiko for menneskelige og naturlige systemer. Forudsigelser af klimaforandringer kræver oplysninger om fremtidige udledninger eller koncentrationer af drivhusgasser, aerosoler og andre faktorer, der påvirker klimaet. Disse oplysninger udtrykkes ofte i form af scenarier af menneskelige aktiviteter og deres konsekvenser.

JENS HESSELBJERG CHRISTENSEN

Indledning

Forudsigelser af klimaforandringer kræver oplysninger om fremtidige udledninger eller koncentrationer af drivhusgasser, aerosoler og andre faktorer, der påvirker klimaet. Disse oplysninger udtrykkes ofte som scenarier af menneskelige aktiviteter og deres konsekvenser. IPCC scenarier har fokuseret på menneskeskabte udledninger og omfatter ikke ændringer i naturlige påvirkningsfaktorer såsom påvirkning fra solen eller vulkaner eller naturlige udledninger af fx metan (CH_4) og lattergas (N_2O).

Graden af menneskeskabt global opvarmning på længere sigt afgøres primært af de samlede udledninger over tid. De er derfor afhængige af både, hvornår udledningerne toppe, på hvilket niveau de toppe, og hvor hurtigt de derefter aftager. Forud for arbejdet med IPCC's 5. hovedrapport er defineret en række repræsentative scenarier for den fremtidige klimapåvirkning, RCP-scenarierne (Representative Concentration Pathways /3/), som er-

statte de hidtidige SRES standardscenarier (Special Report on Emissions Scenarios /4/).

Hvad er SRES?

SRES scenarierne, som stammer fra 2001, er baseret på fremtidsvisioner for de menneskelige aktiviteter og samfund, som generelt er mere velstående end i dag. Scenarierne omfatter en lang række fremtidige niveauer for økonomisk aktivitet med det samlede globale bruttonationalprodukt stigende til 10 gange de nuværende værdier i år 2100 i de laveste og til 26 gange i de højeste scenarier. Mange af SRES-scenarierne forudsætter en indsnævring i indkomstforskelle blandt de globale regioner.

Teknologi er mindst lige så vigtig en drivkraft som demografisk forandring og økonomisk udvikling, og SRES-scenarierne omfatter et større antal forskellige energistrukturer. Dette forhold afspejler usikkerheder om fremtidige fossile ressourcer og teknologisk forandring. Scenarierne omfatter stort set alle de mulige ændringer, fra lav til høj økonomisk vækst, og fra høje andele af fossile brændstoffer, olie og gas eller kul, til høje andele af ikke-fossile brændstoffer.

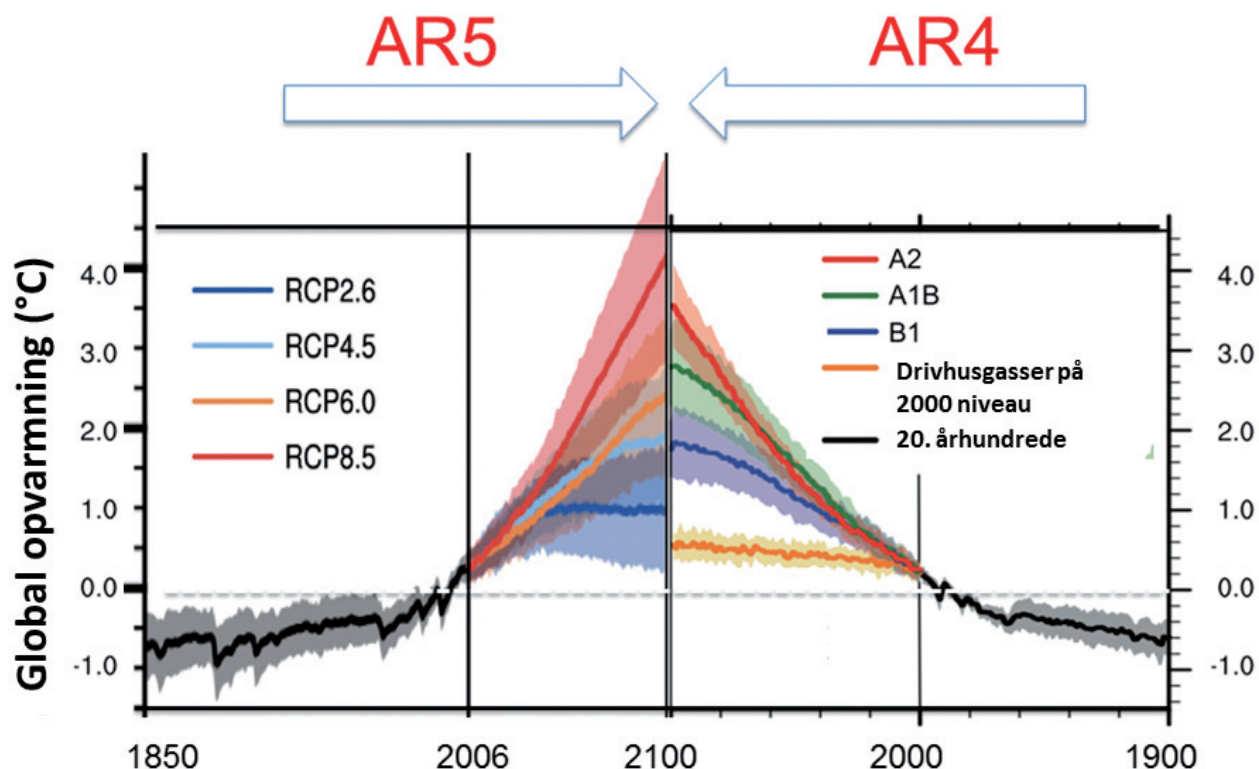
I de fleste scenarier fortsætter reduktionen

af det globale skovområde i nogle årtier, hovedsageligt på grund af øget befolkning og indkomstilvækst, men i de fleste scenarier vendes denne tendens, så vi ender med en stigning i skovareal i år 2100 sammenlignet med 1990. Ændringer i forbindelse med udnyttelse af landbrugsjord sker hovedsageligt ved ændringer i fødevarerefterspørgsel forårsaget af demografiske skift og kostændringer koblet til velstandsudviklingen.

Hvad er RCP?

Ingen af SRES scenarierne er formulerede så de tager hensyn til eventuelle globale klimapolitiske beslutninger, som sigter på at afbøde klimaforandringerne. Her adskiller RCP scenarierne sig væsentligt, idet flere af de nye scenarier specifikt er formulerede som stabiliseringsscenarier.

Formålet med de nye scenarier er at give beslutningstagerne bedre muligheder for at kunne vurdere konsekvenserne af de forventede klimaændringer under forskellige niveauer af global opvarmning. Dermed kan beslutningstagerne bedre vurdere passende tiltag for klimatilpasning og reduktion af drivhusgasudledningen. En lang række sammenlignende modelstudier - Coupled Model Inter-



Figur 1. Sammenligning mellem IPCCs vurderinger af den fremtidige globale temperaturudvikling fra de anvendte scenarier i den 4. (AR4; højre) og 5. hovedrapport (AR5; venstre). Det fremgår at AR5 opererer med fire scenarier, mens AR4 kun anvender 3. Sidstnævnte har resulteret i den fejlagtige opfattelse at der er tale om et scenarie, som er mere sandsynligt end andre (det midterste – A1B). Med fire scenarier i AR5, er det gjort mere tydeligt, at ingen af scenarierne kan anses for mere sandsynlige end andre.

comparison Project Phase 5 (CMIP5) - baseret på de nye scenarier med de mest opdaterede klimamodeller danner baggrund for vurderingerne om fremtidens klima i store dele af IPCC's 5. hovedrapport.

Tabel 1 viser 4 RCP-scenarier og hvordan de udvikler sig. Scenarierne er navngivet efter den beregnede netto strålingpåvirkning ved tropopausen (toppen af vejrsystemerne i 8-12 kms højde), som mængden af drivhusgasser giver anledning til. Denne påvirkning er den egentlige drivhuseffekt og udtrykkes i W/m^2 . Strålingspåvirkningen er defineret som ændringen i den nedadrettede strålingsfluks ved tropopausen, som skyldes ændringer i atmos-

færens indhold af drivhusgasser og aerosoler. Ændringer ses i forhold til en atmosfære, hvor mængden af drivhusgasser holdes uforandret, men tager hensyn til at den øvre atmosfære (stratosfæren) er i såkaldt strålingsbalance. For at gøre sammenligninger mellem scenarier så enkle som muligt vælger man ofte at udtrykke alle drivhusgasser og aerosoler ved hjælp af begrebet ækvivalent CO_2 . Det skal forstås sådan, at den samlede strålingspåvirkning kunne udtrykkes udelukkende ved at atmosfæren havde ændret på CO_2 indholdet, mens de øvrige drivhusgasser og aerosoler var holdt konstant. Scenarierne er her globale scenarier, men der kan formuleres en række socio-

økonomiske regionale scenarier, som vil være konsistent med disse overordnede scenarier. Temperaturudviklingen fra CMIP5 modelkørslerne i slutningen af det 21. århundrede giver som anvist på figur 1 en vis spredning over den mulige fremtidige globale temperaturudvikling for hvert scenarie. Det centrale estimat for den globale opvarmning i 2100 angives her som en slags bedste bud for det pågældende scenarie.

Fremtidens klima under SRES og RCP scenarier

RCP'erne er kendetegnede ved deres anslåede samlede strålingspåvirkning i år 2100 i forhold

Tabel 1. Oversigt over fire RCP-scenarier, og hvordan de udvikler sig fra i dag frem til 2100.

Betegnelse	Strålingsforcing	Drivhusgaskoncentration	Temperaturstigning i 2100 (centrale estimat) ift. 1980 -1999	Udvikling i drivhusgasudslip
RCP8.5	Over $8,5 W/m^2$ i 2100	Over 1370 ppm CO_2 -ækvivalent i 2100	Ca. $4,5 ^\circ C$	Stigende
RCP6.0	Ca. $6 W/m^2$ ved stabilisering efter 2100	Ca. 850 ppm CO_2 -ækvivalent ved stabilisering efter 2100	Ca. $2,6 ^\circ C$	Stabilisering
RCP4.5	Ca. $4,5 W/m^2$ ved stabilisering efter 2100	Ca. 650 ppm CO_2 -ækvivalent ved stabilisering efter 2100	Ca. $1,7 ^\circ C$	Stabilisering
RCP2.6 / RCP3-PD	Topper ved ca. $3 W/m^2$ før 2100 og aftager derefter	Topper ved ca. 490 ppm CO_2 -ækvivalent før 2100 og aftager derefter	Ca. $0,8 ^\circ C$	Topper og aftager derefter

til år 1750: 2,6 W/m² for RCP2.6, 4,5 W/m² for RCP4.5, 6,0 W/m² for RCP6.0 og 8,5 W/m² for RCP8.5. Hvad resultaterne fra CMIP5 angår, skal disse værdier kun opfattes som vejledende, eftersom klimapåvirkningen som følge af alle påvirkningsfaktorer varierer modellerne imellem på grund af specifikke modelkarakteristika og behandlingen af kortlivede klimakomponenter, som eksempelvis aerosoler. Disse fire RCP'er omfatter et modvirkningsscenarie, der leder til et meget lavt påvirkningsniveau (RCP2.6), to stabiliseringsscenarier (RCP4.5 og RCP6.0) og et scenarie med meget store drivhusgasudledninger (RCP8.5). Dermed kan RCP'erne repræsentere en række klimapolitikker i det 21. århundrede. I RCP6.0 og RCP8.5 topper strålingspåvirkningen ikke i år 2100; i RCP2.6 topper den og bliver mindre og i RCP4.5 stabiliseres den i 2100. Alle RCP'er giver geografisk opløste datasæt vedrørende ændring i arealudnyttelsen og sektorbaserede udledninger af luftforurenende stoffer, og de specificerer årlige koncentrationer af drivhusgasser og menneskeskabte udledninger frem til år 2100. Selvom RCP'erne spænder over et bredt interval af totale påvirkningsværdier, dækker de ikke det fulde spektrum af udledninger i litteraturen, især ikke for aerosolers

vedkommende.

De fleste CMIP5-simuleringerne er foretaget med fastsatte udviklinger af CO₂-koncentrationer frem mod værdier i år 2100 på hhv. 421 ppm (RCP2.6), 538 ppm (RCP4.5), 670 ppm (RCP6.0) og 936 ppm (RCP 8.5). I alle RCP'er er der foretaget yderligere beregninger med opdaterede data og modeller for atmosfærisk kemi (herunder CMIP5-komponenten atmosfærisk kemi og klima) under anvendelse af de RCP-fastsatte udledninger af de kemisk reaktive gasser (CH₄, N₂O, HFC'er, NO_x, CO, NMVOC). Disse simuleringer muliggør undersøgelser af usikkerheder i forbindelse med tilbagekoblinger i kulstofkredsløbet og atmosfærisk kemi.

Figur 1 sammenligner udviklingen i global middeltemperatur for SRES og RCP scenarierne og viser, at de i 2100 har omtrent samme variation i den mulige globale temperaturstigning.

Referencer

/1/ IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press,

Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

/2/ 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., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

/3/ van VuurenDP, J Edmonds, M Kainuma, K Riahi, A Thomson, K Hibbard, GC Hurtt, T Kram, V Krey, J-F Lamarque, T Masui, M Meinshausen, N Nakicenovic, SJ Smith, and SK Rose, 2011: The representative concentration pathways: an overview, *Clim. Dyn.*, 31, DOI 10.1007/s10584-011-0148-z

/4/ Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, H.J.M. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grubler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Papper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor, and Z. Dadi. 2000: IPCC special report on emissions scenarios, 570 pp., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000.

JENS HESSELBERG CHRISTENSEN (jhc@dmu.dk) er centerleder for CRES, adjungeret professor ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og forskningsleder ved Danmarks Meteorologiske Institut (DMI)



Usikkerhed på fremtidsscenarioer

Scenarier for fremtidens klima er ikke – som tilfældet er med vejrudsigter – konkrete forudsigelser af den forventede udvikling. Den vigtigste årsag hertil er, at vi mennesker sidder med nøglen til fremtidens klima i vores hænder: Om det vil lykkes at begrænse klimaforandringerne og dermed gøre tilpasningen lettere til de uundgåelige ændringer, som under alle omstændigheder vil finde sted? Eller om vi skal indstille os på en verden, der vil se markante klimaskift grundet et fortsat massivt udslip af drivhusgasser til atmosfæren i mange årtier endnu? Denne væsentlige usikkerhed omfatter andre usikkerheder relateret til, hvordan vi er i stand til at beregne klimaudviklingen og dens påvirkning af menneskelige og naturlige systemer, og hvad vi evt. kan gøre for at tilpasse os ændringerne.

JENS HESSELBJERG CHRISTENSEN,
FREDRIK BOBERG, OLE BØSSING
CHRISTENSEN, MARTIN OLESEN &
MARTIN DREWS

Indledning

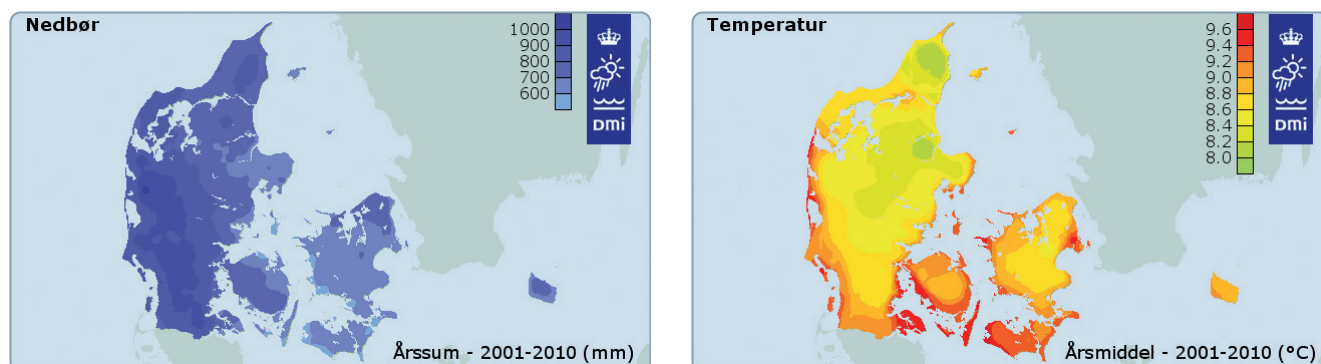
For overhovedet at kunne forstå hvad de forventede klimaændringer indebærer, kræves der en grundlæggende forståelse for vores nuværende klima, der jo karakteriserer tilstanden i udgangspunktet. I et land som Danmark synes dette forholdsvis enkelt, da vi har glimrende målinger af en række vejrparametre, som for nogles vedkommende f.eks. nedbør og temperatur går 150 år eller længere tilbage. Men så enkelt er det ikke alligevel. Mange moderne overvågningssystemer som f.eks. registreringer af nedbørintensitet går kun ca. 30 år tilbage i tiden. Praktikerne må derfor ofte ty til statistiske metoder for på baggrund af data at kunne oparbejde et vidensgrundlag, som tillader os at sætte tal på sjældnere forekommende hændelser, såsom en 50- eller 100-års returværdi. Eller de endnu mere ekstreme begivenheder som betegnes 500- eller 1000-årshændelser. En sådan databehandling antager typisk, at dataserierne

– og dermed klimaet – er tilnærmelsesvist stationære og altså ikke under stadig forandring. Dette er dog reelt vanskeligt at efterprøve og bevise for en konkret måleserie. Af samme grund så definerer WMO (Verdens Meteorologiske Organisation under FN) en analyseperiode på 30 år som værende en robust periode, hvorunder det kan forventes, at klimaet er stort set uforanderligt. Eller sagt på en anden måde: ved at analysere data samlet for en periode på 30 år, så kan man med rimelighed antage, at udsvingene i det observerede klima er tilstrækkeligt små til, at de som udgangspunkt primært kan tilskrives naturlig variabilitet. Dette syntes at være i overensstemmelse med det målte tilbage i midten af sidste århundrede, hvor man traf beslutningen om at definere en klimanormal baseret på målinger for perioden 1931-60. På samme måde blev den næste normalperiode – den vi i dag refererer til – defineret til 1961-90. Inden for de seneste år er det imidlertid begyndt at stå klart, at klimaet er under så markant forandring, at den normalperiode vi fremover vil referere til (1991-2020) næppe vil være stationær. Interessen er derfor steget for at bruge andre perioder, som reference – bare de er lange nok til at karakterisere det klima, som er bestemmende for vejret og de systemer, som er påvirkede og afhængige af

vejret. Det vil sige, at en referenceperiode skal være lang nok til at undgå påvirkning af naturlig variabilitet. Som vi skal se, passer det godt med mange typer af målinger, vi benytter i dag, til at holde øje med udviklingen af naturlige og forvaltede systemer.

Usikkerhedskaskaden del I

Selv om det til at begynde med synes, som om vi har nogenlunde styr på den klimatologiske reference, så er der også en række andre aspekter, som omgærdet scenarier for fremtidens klima og deres virkninger på natur og mennesker. Helt overordnet ved vi ikke hvilken verden, der folder sig ud foran os. Ét af de store spørgsmål her er, om vi mennesker fortsætter med at øge vores energiforbrug baseret på fossile brændstoffer og dermed fortsætter med at øge atmosfærens indhold af drivhusgasser. Eller om vi tværtimod sadler om og kommer bort fra denne afhængighed i løbet af de næste årtier. Lige så vigtigt for at kunne lave et godt bud på klimaudviklingen er mere detaljeret viden om, hvor hurtigt dette vil ske, og den nøjagtige mængde af drivhusgasser, som slippes ud. Stigningen i den globale temperatur kan i indværende århundrede blive mellem ca. 1 °C og op til 6 °C, hvilket på regional skala – og altså for Danmark – kan give andre mærkbare



Figur 1: Årsnedbør (venstre) og årsmiddeltemperatur (højre) for Danmark i perioden 2001-2010, som illustrerer de nuværende klimatiske forhold. Kilde: DMI

klimaforandringer ud over dette spænd på 5 °C, som i Danmark svarer nogenlunde til temperaturforskellen mellem april og maj.

Men lad os opstille det tankeeksperiment at vi faktisk ved, hvilke udslip der ligger i kortene fremover. Hvor godt kan vi så bestemme klimaudviklingen? Til at regne på klimaudviklingen anvendes avancerede globale klimamodeller, som i dag udvikles og anvendes ved forskningsinstitutioner verden rundt. Der er samlet set omkring 40 sådanne modeller. Ved at fodre modellerne med kvantitativ information om udslip af drivhusgasser og aerosoler kan man regne på den forventede klimaudvikling. I artiklen om scenarier /1/ vises den globale temperaturudvikling baseret på de eksisterende klimamodeller. Det fremgår tydeligt her, at modellerne repræsenterer fremtiden med en vis spredning. Spredningen skyldes til dels, at modellerne ikke er ens i deres formuleringer af de forskellige nøgleprocesser i klimasystemet, ligesom ingen af modellerne naturligvis kan siges at være "perfekte" i forhold til virkeligheden. Således resulterer beregninger for eksempelvis scenariet RCP4.5 i en opvarmning på mellem 1,1 og 2,6 °C med en middelværdi på 1,7 °C ved udgangen af det 21. århundrede.

Regionalt og altså også i Danmark, er der også betydelig spredning mellem resultaterne.

Danmarks klima

Det danske vejr er foranderligt, og variationerne fra landsdel til landsdel kan være betydelige på den enkelte dag og fra den ene dag til den anden. Tilsvarende er der trods Danmarks relativt lille udstrækning tydelige forskelle i de klimatiske karaktertræk, også selv om det danske klima i de fleste sammenhænge forstås som værende nogenlunde det samme for hele landet. At der er regionale forskelle fremgår tydeligst, når årsmiddelned-

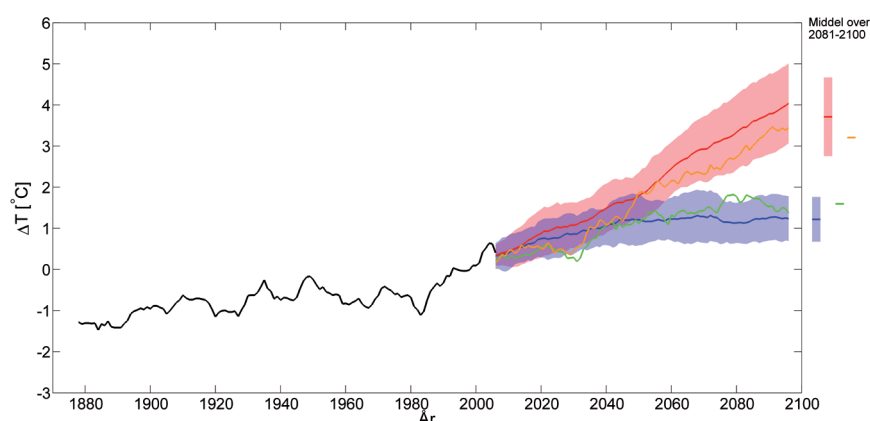
børen opgøres. Men også temperaturene udviser en vis geografisk variation. Figur 1 viser fordelingen af årsnedbøren og årsmiddeltemperaturen for perioden 2001-2010 over Danmark. Perioden 2001-2010 er valgt for at give et mere tidsaktuelt billede af det danske klima end den sidste klimanormal (1961-90), da denne reelt ligger udenfor de flestes erindring af forholdene, hvilket af og til kan være et andet argument for ikke at relatere til klimanormalperioden. De vådeste områder modtog over 1000 mm (op til et maksimum på 1021 mm ved Grønberg mellem Skjern og Holstebro), mens områder omkring Storebælt fik under 600 mm (ned til et minimum på 518 mm ved Frederiksdal lidt nord for Nakskov). Det vådeste sted modtager altså tæt ved den dobbelte mængde nedbør af, hvad der falder på det tørreste. Temperaturfordelingen

udviser udsving på et par grader, hvor det er varmest mod syd og koldest i det nordlige og indre af Jylland.

Variationerne over tid for hele landet er således ikke altid udtryk for et helt og aldeles dækkende billede lokalt. Udviklingen i temperaturforhold er dog generelt gældende på en noget større geografisk skala end tilfældet er med nedbøren.

Fremtidens klima

Fremtidige ændringer i temperatur og nedbør over Danmark beregnes som nævnt ovenfor med avancerede klimamodeller. Selv om dagens globale klimamodeller er i stand at repræsentere regionale ændringer i langt højere grad end tidligere, så er Danmark imidlertid i praksis kun repræsenteret som en lille del af en meget større Europæisk region

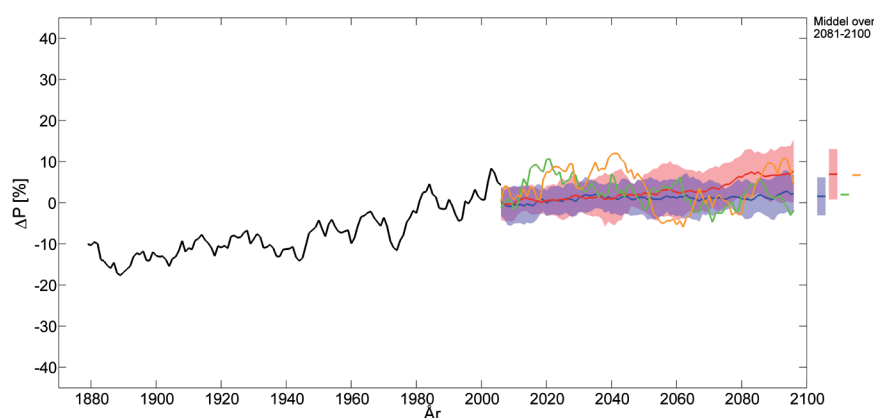


Figur 2: Ændring i årlig middeltemperatur i Danmark i forhold til perioden 1886-2005. Observationer fra 1874 til 2005 er angivet med sort kurve og modelsimuleringer for perioden 2005-2100 for RCP2.6-scenariet og RCP8.5-scenariet er angivet med henholdsvis blå og rød kurve. De skraverede områder angiver estimerede usikkerheder på værdierne (+/- en 1 standardafvigelse af modelensemblet). For de samme scenarier er med hhv. grøn (RCP2.6) og orange (RCP8.5) angivet resultater baseret på CRES's detaljerede koblede klimamodel for Danmark. Der er anvendt et glidende 10-års middel. Værdierne yderst til højre angiver middelværdien for de sidste 20 år af simuleringen. Kilde: Observationsdata: DMI; Modelsimuleringer: CMIP5 og CRES.

(Atlantehavsregionen), som går fra det nordvestlige Spanien via Vestfrankrig, de Britiske Øer, Benelux-landene, og det vestlige Tyskland til Danmark. DMI har derfor foretaget evalueringer af globale modeller og udført tilsvarende beregninger med regionale klimamodeller med henblik på at karakterisere fremtidens klima i Danmark mere specifikt. De bagved liggende scenarier for udslip af drivhusgasser har indtil for nylig været de såkaldte SRES-scenarier (se scenarieartiklen /1/). Disse analyser har været anvendt i mange hidtidige beregninger af klimapåvirkninger i Danmark. Med anvendelse af de nye RCP-scenarier er opdateringer af de hidtidige anvendte regionale fremskrivninger for Danmark og nyudviklinger undervejs, nogle af disse stammer fra arbejdet i CRES og skal her fremhæves, da de samtidig indgår i flere af analyserne præsenteret i de andre artikler i dette nummer af Vand & Jord.

Figur 2 og 3 viser den observerede variation såvel som forskellige scenarier for ændringen i årsmiddeltemperatur og årsmiddelnedbør i Danmark i forhold til referenceperioden 1986-2005. Denne periode adskiller sig også fra den almindeligvis anvendte klimanormalperiode (1961 – 1990), fordi samme periode er anvendt i den seneste IPCC-rapport /2/. Den er anvendt af IPCC for at kunne angive de fremtidige ændringer i forhold til en periode, som er så aktuel som mulig. Man bemærker at denne periode ikke matcher andre lignende valg (som fx ovenfor i tilfældet med det danske klima), men for at være sammenlignelig med IPCC-rapporten er denne periode også anvendt her. Sorte kurver viser de observationsbaserede landstal, røde og blå er baseret på de globale klimamodeller, som bl.a. indgår i IPCC's vurderingsrapporter med angivelse af estimerede usikkerheder i lys rød og lys blå for hhv. det nye scenarie RCP8.5 (et ret radikalt "business-as-usual"-scenarie) og RCP2.6 (et afbødningsscenarie, som opfylder FN's "2-graders mål").

Det fremgår, at under det kraftige RCP8.5 scenarie vil årsmiddeltemperaturen i Danmark i 2100 stige med $3,8^{\circ}\text{C} \pm 1,0^{\circ}\text{C}$. Den årlige nedbør vil øges med $7\% \pm 6\%$. For RCP2.6, hvor den globale udvikling holdes under 2°C i forhold til før industrialiseringen, er tallene hhv. $1,3^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ og $2\% \pm 4\%$. Videre fremgår det, at scenarieberegninger foretaget med DMI's regionale klimamodel falder indenfor det forventede, når de sammenholdes med de globale modeller, som indgår i IPCC's vurderinger. Trods det anvendte glidende middel bemærkes betydelige år-til-år variationer, som udgør en vigtig usikkerhedsfaktor på regional skala, og som udstiller den



Figur 3: Procentvis ændring i årlig nedbør i Danmark i forhold til perioden 1986-2005. Observationer fra 1874 til 2005 er angivet med sort kurve og modellsimuleringer for perioden 2005-2100 for RCP2.6-scenariet og RCP8.5-scenariet er angivet med henholdsvis blå og rød kurve. De skraverede områder angiver estimerede usikkerheder på værdierne (+/- en 1 standardafvigelse af modelensemblet). For de samme scenarier er med hhv. grøn (RCP2.6) og orange (RCP8.5) angivet resultater baseret på CRES's detaljerede koblede klimamodel for Danmark. Der er anvendt et glidende 10-års middel. Værdierne yderst til højre angiver middelværdien for de sidste 20 år af simuleringen. Kilde: Observationsdata: DMI; Modelsimuleringer: CMIP5 og CRES.

naturlige variabilitet. Her vises kun årsmiddelværdier for at fremhæve netop variabilitetsaspektet. Man kan fornemme af kurverne, at en 10-årsperiode er kort i forhold til den overordnede udvikling. Selv for landsgennemsnittet er der derfor grund til at understrege, at en given 10-årsperiode i høj grad kan påvirkes af langtidsvariationer, hvis årsag ikke nødvendigvis kendes.

Usikkerhedskaskaden del II

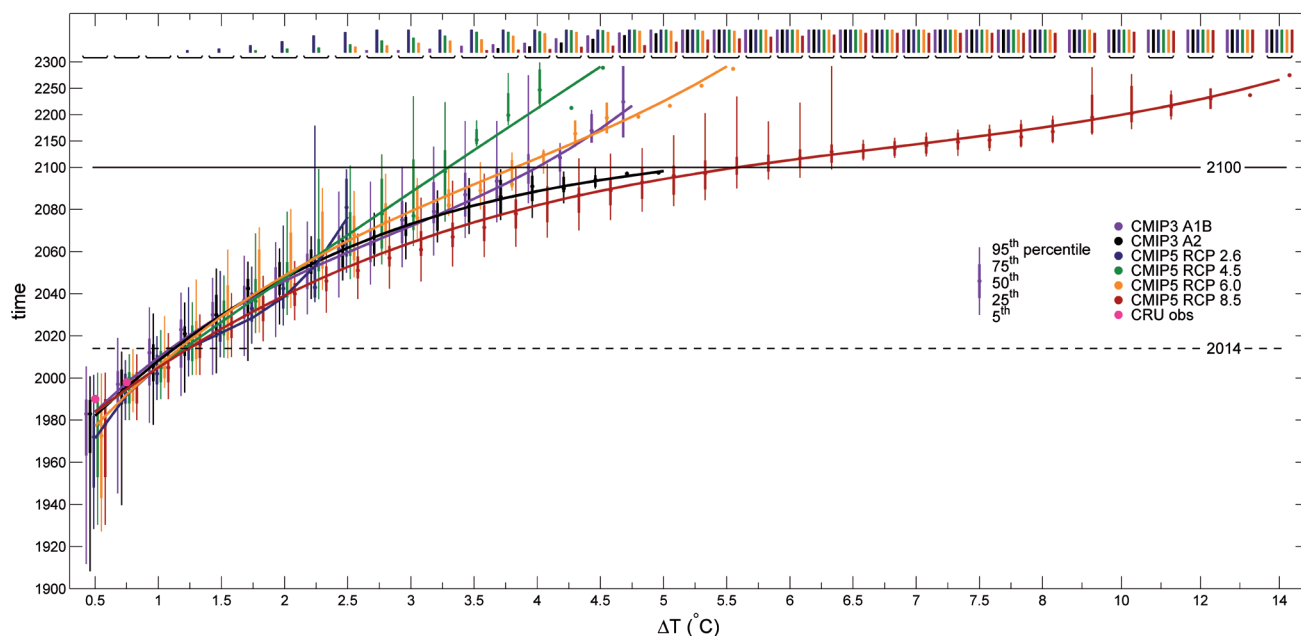
For at regne på konsekvenserne af den mulige fremtidige klimaudvikling, er det nødvendigt at tage udgangspunkt i realistiske udviklinger lokalt og at anvende flere forskellige scenarier. Det gælder såvel scenarier, hvor der er skruet fuldt op for brugen af fossilbrændsler, og for dem, hvor der bremses markant op. Det er også nødvendigt at betragte klimascenarier fra både globale og regionale modeller, som afspejler den spredning i udviklingen, som findes mellem de mange klimamodeller. Det betyder eksempelvis, at en hydrologisk model skal drives med en række forskellige klimamodeller og scenarier for at beregningerne kan udspænde en passende vifte af mulige fremtidige effekter. Man kan med andre ord sige, at spredningen på de endelige resultater nødvendigvis må være stor, da der er mange usikkerheder, som skal igennem den tekniske mølle. Hvis resultatet er, at det i forhold til scenarierne ikke med sikkerhed kan siges, om der er større eller mindre afstrømning fra et opland, så er der med andre ord en god grund til det. Det afgørende er, om der er nogle bud på fremtiden i beregningerne, som kan siges at falde i en absolut

"ikke ønsket kategori". Er det tilfældet, skal det naturligvis vurderes hvilke tiltag, som er de rette til at reducere sårbarheden overfor sådanne begivenheder eller på at imødegå dem.

Sikkerhed i modsætning til usikkerhed

Selv om det nu er demonstreret, at der er mange led i informationskæden fra udledningsscenarier til tilpasningsstrategi, så er der alligevel en række aspekter i forhold til fremtidens klima, som er ganske sikre.

Figur 4 viser, hvornår en given global temperaturøgning i forhold til perioden 1861-1880 indtræffer – dels bestemt ud fra den store samling af klimamodelberegninger, som indgår i vurderingerne fra de sidste to IPCC hovedrapporter /2,3,4/ dels ud fra observerede forhold (CRU; /5/). Igen en ny periode at forholde sig til; hvilket skyldes at klimaforhandlingerne i FN regi forholder sig til den præindustrielle temperatur, hvilket for modelberegninger er besluttet at være denne periode. Det står klart, at for de forskellige scenarier, som her er benyttet, så er der stor konsistens mellem modellerne og virkeligheden selv om der er en hvis spredning. Men det fremgår også, at der er stor sandsynlighed for, at den globale middeltemperatur allerede inden, vi skriver 2050, er blevet 2 grader højere end i midten af 1800-tallet. Hvis ikke udledningerne begrænses voldsomt som beskrevet ved f.eks. RCP2.6-scenariet bliver 3 graders opvarmning passeret i anden halvdel af århundredet, og 4 grader i slutningen af århundredet. Det er endda tænkeligt, at 6 grader passerer i starten



Figur 4: Årstal for den sandsynlige passage af en given global temperatur i forhold til perioden 1861-1880. Der er modelresultater for seks af de scenarier, IPCC har forholdt sig til i sine 2 sidste vurderingsrapporter. Ingen af de forskellige scenarier er vurderet til at være mere eller mindre sandsynlige end andre. Baseret på mellem 30 og 40 modeller vises for hvert scenarie 5%, 25%, 50%, 75% og 95% percentiler for, hvornår den globale temperatur første gang passerer en given tærskel. Der er vist data for hver 0,25 grader. Den vandrette stiplede linje indikerer, hvor vi er i dag. Der er lavet et kurvefit til hvert af scenarierne for at indikere forskelle. Den øverste række af bjælker indikerer, hvor stor en andel af modellerne, som ikke kommer over den givne tærskel inden år 2300. Da ingen model for RCP2.6 scenariet når over 2,5 grader, er den blå bjælke i fuld længde fra 2,75 grader og opad. Bemærk at både den vandrette og lodrette akse ikke er lineære i hele forløbet – dog for hhv. 0 – 8 grader og 1900 – 2100.

af det 22. århundrede. Det er altså ikke et spørgsmål om, hvorvidt det bliver varmere, det er et spørgsmål om, hvornår vi passerer de forskellige globale temperatur-pejlemærker og det er der faktisk gode estimater for, hvornår det vil indtræffe. Der ligger således nogle meget store udfordringer i at tænke over, at klimaet ikke er på vej til et andet stationært klima, men at det vil være under konstant forandring resten af århundredet. Og at det i værste fald reelt set er ude af kontrol. For ser vi lidt længere ud i fremtiden, kan vi teoretisk risikere at passere 10-graders mærket inden år 2300, hvis modelberegningerne stadig kan siges at gælde for en så ekstremt forandret klode, som der i så fald vil være tale om. Det er dog nok usandsynligt, at en sådan ekstrapolation vil være realistisk.

Referencer

- /1/ Christensen, JH: IPCCs SRES udslipsscenarier og de nye RCP scenarier, dette nummer af Vand & Jord
- /2/ IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Sci-

ence Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

- /3/ IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,

- /4/ IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J.

Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,

- /5/ 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.

JENS HESSELBERG CHRISTENSEN (jhc@dmu.dk) er centerleder for CRES, adjungeret professor ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og forskningsleder ved Danmarks Meteorologiske Institut (DMI); OLE BØSSING CHRISTENSEN er seniorforsker; MARTIN OLESEN og FREDRIK BOBERG klimaforskere ved DMI; MARTIN DREWS er seniorforsker ved Institut for Systemer, Produktion og Ledelse, Danmarks Tekniske Universitet