

Usikkerhed på fremtidsscenerier

Scenerier 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

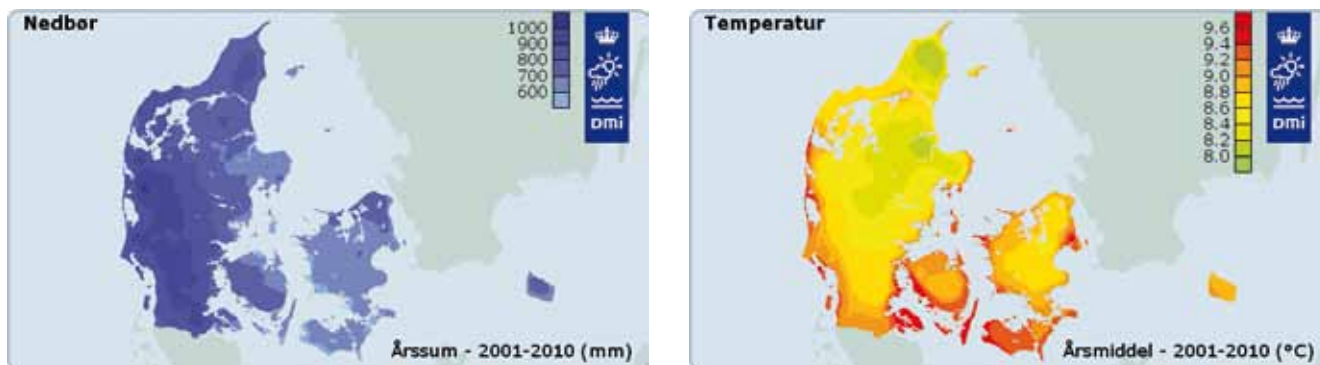
For overhovedet at kunne forstå hvad de forventede klimaændringer indebærer, kræves der en grundlæggende forståelse for vores nuværende klima, der jo karakteriserer tilstanden i udgangspunktet. I et land som Danmark synes dette forholdsvis enkelt, da vi har glimrende målinger af en række vejrparametre, 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. registreringen 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 data-behandling 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 scenerier 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-

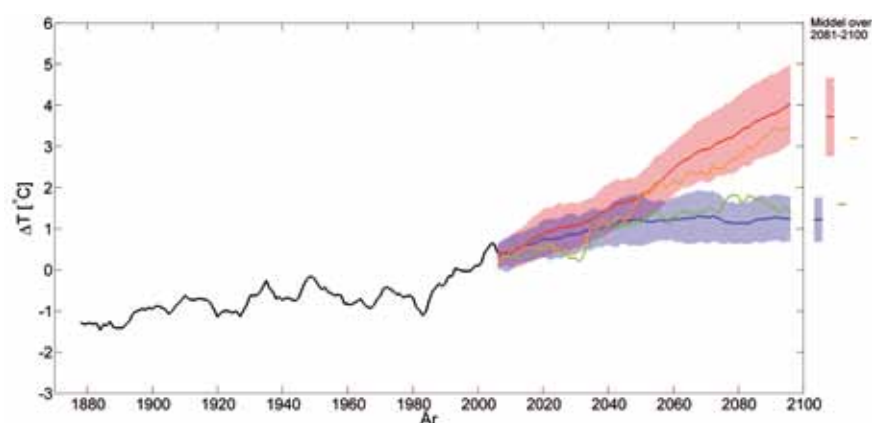
børen opgøres. Men også temperaturerne udviser en vis geografisk variation. Figur 1 viser fordelingen af årsnedbøren og årsmiddeltemperaturen for perioden 2001-2010 over Danmark. Perioden 2001-2010 er valgt for at give et mere tidsaktuelt billede af det danske klima end den sidste klimanormal (1961-90), 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 Grønbjerg 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 koldtest 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

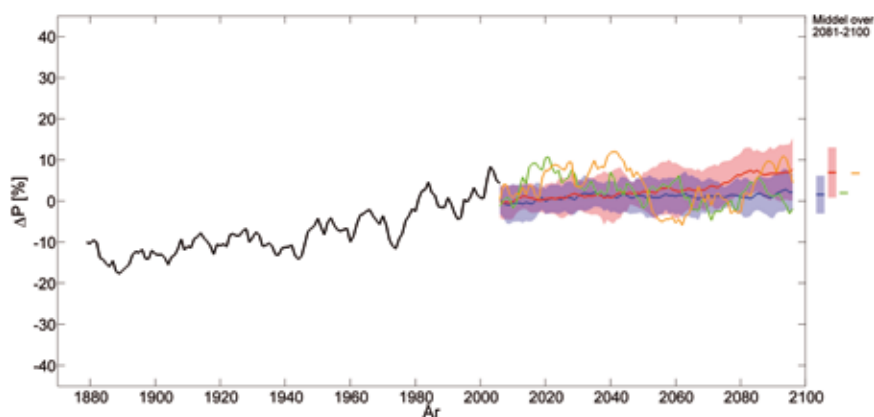


Figur 2: Ændring i årlig middeltemperatur i Danmark i forhold til perioden 1886-2005. Observationer fra 1874 til 2005 er angivet med sort kurve og modelsimuleringer for perioden 2005-2100 for RCP2.6-scenariet og RCP8.5-scenariet er angivet med henholdsvis blå og rød kurve. De skraverede områder angiver 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 CPRES 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 afbødnings-scenarie, som opfylder FN's "2-graders mål").

Det fremgår, at under det kraftige RCP8.5 scenarie vil årsmiddeltemperaturen i Danmark i 2100 stige med $3,8\text{ °C} \pm 1,0\text{ °C}$. 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. $1,3\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$ 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 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 (± 1 standardafvigelse af modelensemblet). For de samme scenarier er med hhv. grøn (RCP2.6) og orange (RCP8.5) angivet resultater baseret på CPRES'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 CPRES.

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

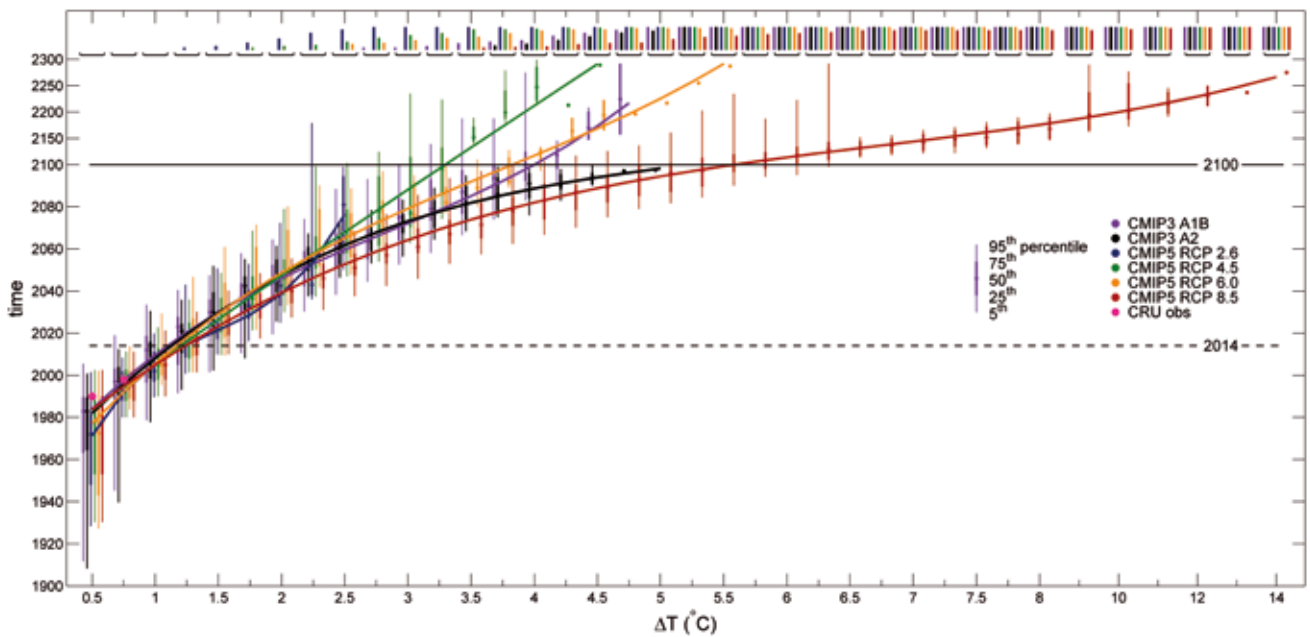
For at regne på konsekvenserne af den mulige fremtidige klimaudvikling, er det nødvendigt at tage udgangspunkt i realistiske udviklinger lokalt og at anvende flere forskellige scenarier. Det gælder såvel scenarier, hvor der er skruet fuldt op for brugen af fossilbrændsler, og for dem, hvor der bremses 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 udledningsscenarioer 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 udslipscenarier 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@dmi.dk) er centerleder for CPRES, adjungeret professor ved Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet og forskningsleder ved Danmarks Meteorologiske Institut (DMI); OLE BOSSING 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