



# Klimascenarier for Danmark

## Projektrapport

af Anne Mette K. Jørgensen, Ole B. Christensen og Wilhelm May

## Resume

EU-landene vedtog i 1996 en målsætning om, at den globale temperatur højst må stige 2°C efter industrialiseringen. DMI har for Miljøstyrelsen gennemført globale og regionale beregninger, hvor denne målsætning overholdes.

DMI har tidligere gennemført globale og regionale beregninger af fremtidens klima for de såkaldte A2- og B2-scenarier for udslip af drivhusgasser og aerosoler. Disse udslipsscenarioer, som er fra det mellemstatslige klimapanel IPCC, fører til globale temperaturstigninger på 1,9-3,4 °C (B2) og 2,7-4,7 °C (A2) i 2100 i forhold til 1990 ifølge den tredje IPCC-rapport (IPCC, 2001).

For alle tre scenarier er endvidere beregnet en række indikatorer for hvordan klimaekstremer ændres i Danmark.

## Målgruppe/Formidling

Målgruppen er ministerier, styrelser og institutioner, som er involverede i analyser vedr. virkninger af klimaændringer og en mulig dansk strategi for klimatilpasning. Under udredningsarbejdet har data for de tre scenarier været tilgængelige via en adgangskodebeskyttet web-side på DMI, og der er udarbejdet en brugervejledning.

## Projektets organisation

Projektet blev ledet af seniorforsker Ole Bøssing Christensen, DMI. I øvrigt deltog seniorforsker Annette Guldberg og seniorrådgiver Jens Hesselbjerg Christensen, DMI. Der blev etableret en styregruppe af Povl Frich, Miljøstyrelsen og divisionschef Anne Mette K. Jørgensen, DMI.

## Projektperiode

15. november 2005 til 15. maj 2006

## Baggrund og formål

Klimaet ændrer sig, og fremtidige menneskeskabte klimaændringer kan ikke undgås, selv hvis det hurtigt skulle lykkes at stabilisere atmosfærens indhold af drivhusgasser.

DMI har for Miljøstyrelsen beregnet scenarier for fremtidige klimaforandringer i Danmark. Disse scenarier er stillet til rådighed som grundlag for beregning af, hvordan de fremtidige

klimaforandringer vil kunne påvirke en række områder og til vurdering af hvilke tiltag, det med fordel kan overvejes at igangsætte på kort og langt sigt for at imødegå virkninger af disse forandringer.

Det mellemstatslige klimapanel IPCC anbefaler, at man til sådanne analyser benytter flere forskellige scenarier for at belyse spændvidden af mulige klimafremtider. DMI har tidligere gennemført beregninger for IPCC's A2- og B2-scenarier for udslip af drivhusgasser og andre stoffer, som påvirker klimaet. I dette projekt er der gennemført beregninger for et scenarium, der indebærer, at EU-landenes målsætning om, at globale menneskeskabte temperaturstigninger ikke overstiger 2 grader i forhold til før-industriell tid, kan overholdes. Sidsnævnte scenarium beregnes herefter EU2C.

Til arbejdet med IPCC's Fjerde Hovedrapport, som udkommer i 2007, har panelets datadistributionscenter anbefalet, at modelcentrene anvender i alt 10 indikatorer for ekstremklimaet. Disse størrelser (i form af fx oplysninger om hvedebølger, kraftig nedbør, se Frich et al, 2002) er baseret på daglige modeldata. I dette projekt er indikatorerne beregnet for de tilgængelige regionale modeldata for hhv. A2-, B2- og EU2C-scenarierne. Det er så vidt vides første gang for visse af indikatorerne, at de er beregnet for modeldata i høj geografisk opløsning.

## Undersøgelsen

1. Der er gennemført computersimuleringer med DMI's globale klimamodel, som leverer randværdier til den regionale model. Der er foretaget beregninger for flere scenarier, hvor drivhusgaskoncentrationen holdes konstant fra et bestemt årstal, idet der ikke findes udslipsscenarier, som opfylder EU2C-målsætningen.
2. Efterfølgende er foretaget beregninger med DMI's regionale klimamodel, dels for de nuværende koncentrationer af drivhusgasser og aerosoler, dels for EU2C-stabiliseringsscenariet for 2071-2100.
3. Middelfelter for bl.a. temperatur, nedbør og maksimum af vindstyrke er beregnet.
4. 10 indikatorer for ændringer i ekstremklimaet er beregnet for EU2C og for A2- og B2-scenarierne.

## Hovedkonklusioner

Tilpasning til klimaændringer har både et kortsigtet og et langsigtet perspektiv. Der er tale om ændringer over en lang tidshorisont, som både klimamæssigt mv. er præget af stor usikkerhed. Grundlaget for at tilpasse sig til klimaændringer er derfor robuste modeller for mulige ændringer i klimaet. På basis af resultaterne kan man vurdere, hvordan mulige fremtidige klimaforandringer kan påvirke en række områder og hvilke tiltag man med fordel kan overveje at igangsætte på kort og langt sigt.





DMI har gennemført beregninger for tre klimascenarier. Med disse tre scenarier indfanges rimeligt det reelle spænd af usikkerheder om de fremtidige udledninger, som dels skyldes forskellige muligheder for udviklingen i de drivende kræfter, dels skyldes usikkerhed om, hvorvidt det internationale samarbejde vil være i stand til at sikre overholdelse af EU2C-målet. Dog tages der ikke med valget af de tre scenarier højde for den usikkerhed, der er i klimaets følsomhed – det vil sige, hvor meget den globale gennemsnitstemperatur ændrer sig som følge af en fordobling af koncentrationen af drivhusgasser i atmosfæren. DMI's modeller har en klimafølsomhed, som ligger tæt på gennemsnittet af de modeller, som benyttes i den seneste IPCC-rapport og i den videnskabelige litteratur.

Beregninger for Danmark for de tre scenarier viser stigninger i årsmiddelttemperaturen på mellem 0,7 og 4,6 °C i løbet af det 21. århundrede. Der kommer mere nedbør på årsbasis, men mindre om sommeren. Selvom tendensen for den samlede sommernedbør er negativ (fx -7% i B2-scenariet), udviser den maksimale døgnnedbør den modsatte tendens (+20% i B2). Det betyder, at somrene i klimascenarierne bliver mere tørre, men med kraftigere nedbørshændelser. Den maksimale stormstyrke øges over hav, og den maksimale vandstand ved Vestkysten vil stige.

## Projekresultater

### *Den globale modelberegning*

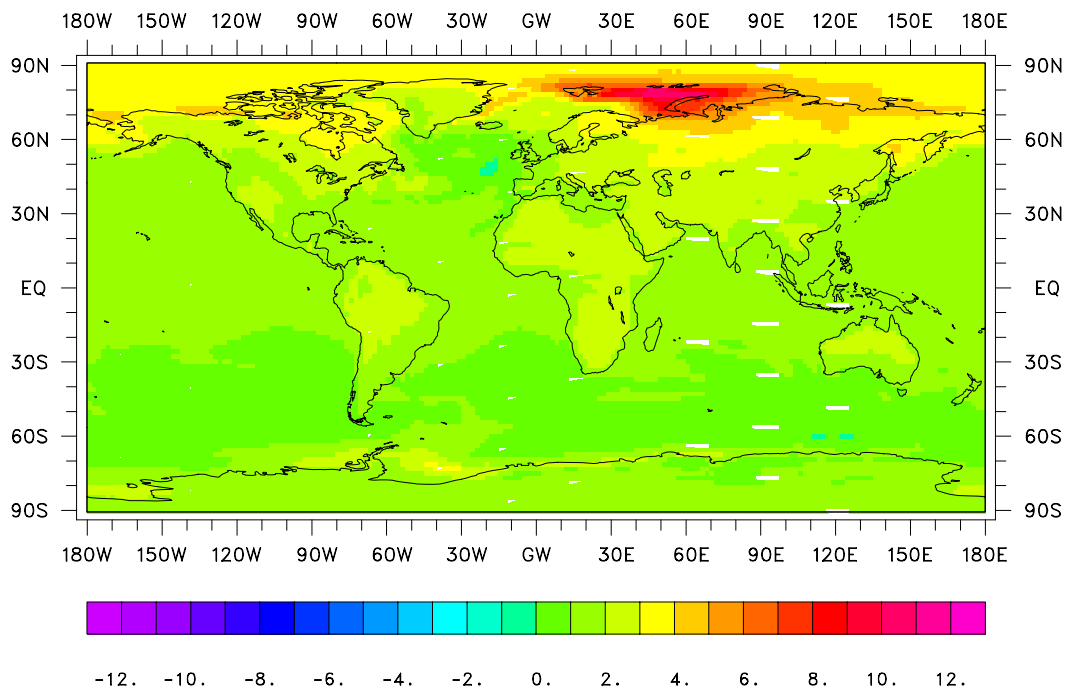
Konstruktion af udslipsscenario, som fører til stabilisering af atmosfærens drivhusgaskoncentrationer på et niveau, som overholder EU2C-målet, er foretaget ved at benytte IPCC's A1B-scenarium for udslip af drivhusgasser og aerosoler frem til 2020 og derefter holde koncentrationen af de velblandede drivhusgasser konstant og formindske aerosoludslippet og ozonkoncentrationen til år-2100-niveauet over en 16-års periode. På grund af klimasystemets inertie vil den globale temperatur fortsætte med at stige i flere hundrede år efter at drivhusgaskoncentrationen er stabiliseret, og derfor er EU2C-beregningerne forlænget ind i det 22. århundrede.

Beregninger med DMI's koblede atmosfære-ocean-klimamodel, hvor koncentrationen blev holdt konstant fra hhv. 2030 og 2025, gav højere temperaturstigninger i 2100 end 2 grader, mens konstant koncentration fra 2020 holder sig under 2°C i 2100 og kun kommer lidt over i løbet af de følgende årtier (May, 2006).

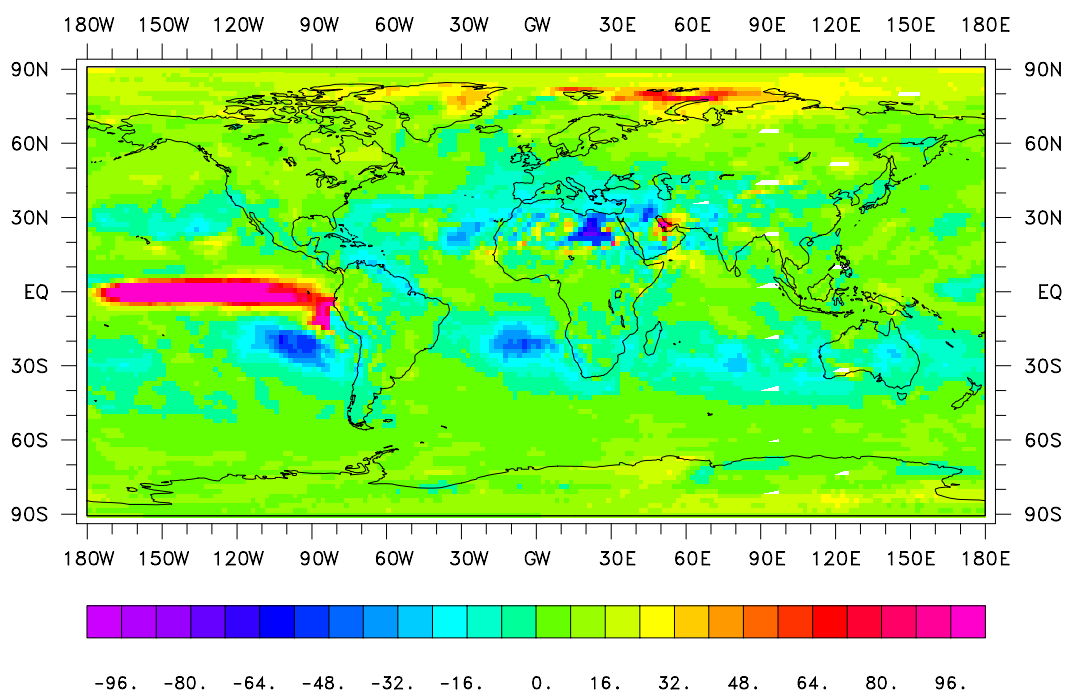
Den beregning, der fører til en global opvarmning lige under 2 grader, viser kraftige temperaturstigninger over kontinenterne, især i Canada og Rusland (> 3 °C) (se figur 1). Nogle af de arktiske områder opvarmes med mere end 8 °C. Den svageste opvarmning (< 1 °C) findes i Nordatlanten og i oceanerne på den sydlige halvkugle. Derfor bliver temperaturstigningen i Vesteuropa under 2 °C, men over 2 °C i resten af Europa.

Denne beregning viser også en kraftig stigning af nedbørsmængden over det tropiske Stillehav (> 100 %) (se figur 2). Nedbørsmængden

stiger generelt i alle de tropiske områder, men også i de høje breddegrader. I subtropenerne, men også i det meste af Europa og Australien, aftager nedbørsmængden.



Figur 1: Ændring af årsmiddeltemperaturen i 2 m mellem 1961-1990 og 2071-2100 i °C.



Figur 2: Ændring af årsnedbør mellem 1961-1990 og 2071-2100, normeret med nedbøren i 1961-1990, i %.

## Den regionale modelberegning

Data er beregnet med DMI's regionale model HIRHAM (se fx Christensen et al, 1996) og med randværdier fra DMI's globale klimamodel som beskrevet ovenfor. I beregningerne er benyttet en afstand mellem modellens gitterpunkter på 50 km, og beregningerne er foretaget dels for de nuværende koncentrationer af drivhusgasser og aerosoler, dels for situationen i 2071-2100 efter samme drivhusgas- og aerosolpåvirkning som for den globale beregning. Resultaterne er vist i tabel 1 sammen med tidligere beregninger for A2- og B2-scenarierne.



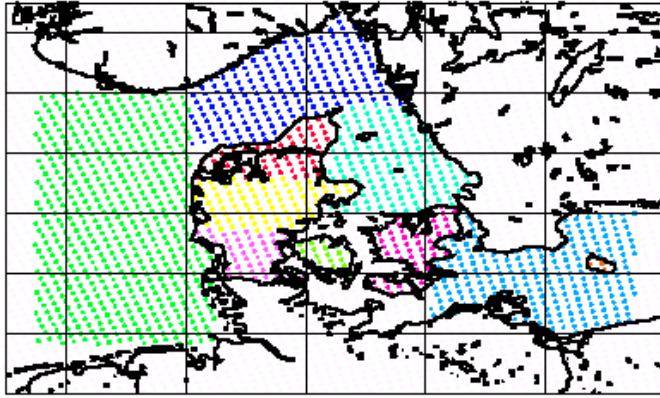
En første analyse af de regionale EU2C-beregninger (Christensen, 2006) viser, at

- 1) Årsmidlerne af klimaændringer er nogenlunde konsistente med, hvad en skalering af et af de andre scenarier ville forudsæ.
- 2) Klimaændringernes gang over året og deres geografiske fordeling er anderledes end forventet. Fx er den sydeuropæiske sommeropvarmning ikke specielt høj. Dette kan antagelig høj grad tilskrives den dekadiske variabilitet. Kontrolperioden har f.eks. en ret høj havtemperatur over integrationsområdet sydvestlige hjørne, og det kan naturligvis ses i de projicerede klimaændringer, der har en lav absolut amplitude.

**Tabel 1.** Beregnet dansk klimaændring frem til perioden 2071-2100, udtrykt som ændring i forhold til perioden 1961-90. JJA står for juni-juli-august, mens DJF står for december-januar-februar. Hav omfatter Vesterhavet, Skagerrak, Kattegat og Vestlige Østersø (figur 3). Scenarierne er resultater af regionale modelkørsler, som vil være behæftet med forskellige former for usikkerhed. Derfor er forholdet mellem klimaændringerne i simuleringerne ikke det samme for alle felter.

<b>Klimaelement</b>	<b>A2</b>	<b>B2</b>	<b>2-graders scenarium</b>
<b>Land</b>			
Årsmiddeltemperatur	+3,1°C±1,5°C	+2,2°C±1,5°C	+1,4°C±0,7°C
Årsnedbør	+9%	+8%	0%
Sommernedbør (JJA)	-15%	-7%	-3%
Maksimum døgnnedbør (JJA)	+21%	+20%	+22%
<b>Hav</b>			
Middelvind (DJF)	+4%	+2%	+1%
Maksimum stormstyrke (DJF)	+10%	+1%	+1%
Maksimum vandstand ved Vestkysten	+0,45-1,05 m <sup>1</sup>	? <sup>1</sup>	? <sup>1</sup>

<sup>1</sup>DMI's B2- og EU2C-scenarier er ikke analyseret i DMI's stormflodsmodel. Skønsmæssigt vil ændringen i den maksimale vandstand være mindre end i A2-scenariet. Den maksimale vandstandsstigning ved Vestkysten i A2-scenariet er summen af en stigning på 0,3 m, som skyldes ændringer i vindretning og stormstyrke, og en global havniveaustigning på 0,15-0,75 m.



**Figur 3** Opdelingen af scenariedata for landsdele og havområder.

Ud fra daglige værdier af de relevante felter i denne simulering er ændringer i de forskellige klimaparametre beregnet på månedsbasis.

### *Ekstremer*

Modelberegningerne viser, at øget drivhuseffekt fører til ændringer i klimaets variabilitet, herunder også ændringer i hyppighed, intensitet og varighed af ekstreme vejrbegebenheder.

Ekstremerne for nedbør, temperatur og vind er anslået direkte ud fra de simulerede værdier. Som 10-års returværdi er benyttet den tredje-højeste dagsværdi i 30-årsperioden, og som 1-års returværdi er benyttet den tredivte-højeste. På grund af den statistiske usikkerhed, som er meget større for ekstremer end for middelfelter, har vi kun beregnet landsgennemsnit på årstidsbasis af ekstremerne.

Ud over tabellerne med måneds- og årstidsværdier, er der adgang til daglige værdier af 19 forskellige meteorologiske felter på gitterpunktsbasis. Disse data kan anvendes i modeller, hvor dag-til-dag variation er væsentlig, fx afgrødemodellering, hydrologisk modellering eller modellering af ekstremregns indflydelse på afløb. De detaljerede data er desuden benyttet til beregning af en række ekstremværdiindices, se tabel 2.

Beregningerne for Danmark og omliggende farvande viser fx flere og længerevarende hedebølger, mindre nedbør om sommeren, men samtidig kraftigere nedbørhændelser og lidt øget vindstyrke for de kraftigste storme.

Generelt går tendensen imod varmere og vådere vejr, hvilket også bekræftes af flere udenlandske undersøgelser. DMI deltager i øjeblikket i flere europæiske forskningsprojekter, som søger at anvende såkaldte ensembler af regionale klimamodelkørsler for at øge grundlaget for beregning af mere robuste statistiske opgørelser over fremtidige ændringer i klimaekstremer.

**Tabel 2.** Udvalgte ekstremindikatorer for de tre klimascenarier, A2, B2 og EU2C. Tabellen viser forskellen mellem 2071-2100 og 1961-1990; sidste kolonne viser modellernes nutidsværdi som gennemsnittet mellem de to nutids-simuleringer, der indgår i denne undersøgelse. Modellens nutidsresultater er ikke fuldstændigt identiske med de målte værdier for perioden 1961-90, men i rimelig overensstemmelse.



Indikator	A2	B2	EU2C	Nutids-værdi
Antal døgn med frost (døgn/år med Tmin under 0°C)	-44	-31	-26	73
Vækstsæsonens længde (døgn i træk over 5°C)	55	39	22	224
Årets længste hedeølge (døgn i træk, Tmax mere end 5°C over normal)	9	4	4	5
Varme sommernætter (% døgn Tmin over normal 90 percentil)	20	13	10	10
Antal døgn med $\geq 10$ mm nedbør (døgn/år)	3	3	-1	13
Årets største 5-døgnssum af nedbør (mm/5-døgn)	4	4	1	47
Middelintensitet af nedbør for døgn med mere end 1mm (mm/døgn)	0,3	0,3	0	4,7
Kraftige nedbørhændelser (% nedbør over normal 95 percentil)	5	6	0	32

#### *Tidsudviklingen af klimaforandringer*

Det er i praksis ikke muligt at beregne ændringer af samtlige relevante klimaparametre for alle tidspunkter i det kommende århundrede for alle scenarier. Derfor antages, at alle klimaforandringer sker i samme takt som forandringen af den globale middeltemperatur. Omsætningsfaktorer kan beregnes fra globale modelkørsler for forskellige tidspunkter, se tabel 3.

**Tabel 3.** Omsætningsfaktorer for klimaforandringer for forskellige tidspunkter i forhold til ændringen for det pågældende scenarium for 2071-2100.

År/Scenarium	A2	B2	EU2C
2020	0,2	0,2	0,5
2050	0,5	0,6	0,8

En sammenligning af de forskellige regionale simuleringer viser, at ændringer i middelfelter nogenlunde sker proportionalt med ændringer i den globale middeltemperatur. Ekstremer er mere variable, og visse indices ændres kraftigere end den globale middeltemperatur. Dette gælder fx længden af vækstsæsonen (Christensen, 2006).

#### *Usikkerheder og deres kilder*

Der findes en række forhold, som giver anledning til usikkerhed på de angivne størrelser (Déqué et al, 2005). De vigtigste er:

- Der er generel mangel på viden om fremtidens udslip af drivhusgasser. Derfor anvendes flere forskellige *scenarier* til studier af effekter af klimaændringer. Manglen på viden kan ikke kvantificeres, da der ikke er defineret sandsynligheder for de forskellige udslipsscenarier.
- Usikkerhed, som skyldes valg af regional klimamodel eller valg af drivende global klimamodel, betegnes *strukturel usikkerhed*.
- Klimaændringssimuleringer er forskellige, selv når de samme modeller og udslipsscenarier benyttes, på grund af klimasystemets kaotiske natur. Der er således en *statistisk relateret usikkerhed*, der skyldes at middelværdier taget over en klimaperiode på 30 år dækker over år-til-år variationer. Derfor vil der ofte skulle en betydelig global opvarmning til, før en simuleret ændring i nedbør er statistisk signifikant.



## Referencer

Christensen, Ole B., 2006: Regional climate change in Denmark according to a global 2-degree-warming scenario. Danish Climate Centre Report 06-02.

Christensen, J. Hesselbjerg, Ole Bøssing Christensen, Philippe Lopez, Erik van Meijgaard, Michael Botzet, 1996: The HIRLAM4 Regional Atmospheric Climate Model. DMI Scientific Report No. 96-4.

Déqué, M., R. G. Jones, M. Wild, F. Giorgi, J. H. Christensen, D. C. Hassell, P.L. Vidale, B. Rockel, D. Jacob, E. Kjellström, M. de Castro, F. Kucharski, and B. van den Hurk, 2005: Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results, *Climate Dynamics* 2005, DOI 10.1007/S00382-005-0052-1.

Frich et al, 2002: Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Clim. Res.*, 19, 193-212.

IPCC, 2001: Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Redigeret af Houghton, J.T. et al.

May, Wilhelm, 2006: Constructing a "2° C stabilization" scenario with the ECHAM5/MPI-OM coupled climate model. Manuskript er sendt til *Climate Dynamics*.