

TEMA: Klimamodeller

Et meget vigtigt værktøj til at beskrive klimavariationer og –ændringer er såkaldte klimamodeller, som simulerer atmosfærens og i mange tilfælde også oceanernes strømninger. Dette tema giver en introduktion til, hvordan modellerne er opbygget, og hvordan de anvendes.

Klimamodeller omfatter - ud fra fysikkens love og konstaterede sammenhænge - matematiske beskrivelser af klimasystemets dele: atmosfære, oceaner, biosfære, is og sne samt den faste jord. Modellerne er i dag meget komplekse, og modelberegningerne udføres på store computeranlæg.

Modellerne er - sammen med alle typer klimadata - vigtige for at forstå de processer, der har betydning for klimaet og klimaændringer, hvad enten de har naturlige årsager eller er menneskeskabte. Tilliden til klimamodellerne er øget i de seneste år. I dag kan man med de bedste modeller simulere de væsentligste egenskaber ved det nuværende klima, bl.a. de geografiske variationer på stor skala. Modellerne kan også reproducere de ændringer i klimaet, som skyldes påvirkning af aerosoler i den mellemste atmosfære på grund af vulkanudbrud, og beregningerne udviser en naturlig klimavariation, som er sammenlignelig med den observerede.



DMI's supercomputer er én af landets største og blev installeret i 2008.

Klimamodellers opbygning

For at forstå de processer, der har betydning for klimaet og dets variationer anvendes komplicerede computermodeller af klimasystemet, der omfatter atmosfære, oceaner, is og sne, landoverflader og biosfære. I computermodellerne, der også kaldes klimamodeller, anvendes klimadata til at beskrive fremtidige klimaændringer.

En klimamodel er i princippet opbygget som de atmosfæremodeller, der benyttes som grundlag for vejrforudsigelser. I en klimamodelberegning starter man således også fra et givet sæt af begyndelsesbetingelser og foretager så en beregning frem i tiden med små tidsskridt på 2 til 30 minutter, afhængigt af modellen.

Den væsentligste forskel mellem vejrprognosemodellen og klimamodellen ligger i den tid, man regner frem. I en prognosemodel beregnes vejret normalt op til 10 dage frem, mens man i klimamodellen regner mange år frem. I en klimamodelberegning er man interesseret i at beskrive statistiske størrelser som det gennemsnitlige vejr og variationer omkring dette gennemsnit, men slet ikke - som i prognosemodellen - det aktuelle vejr på en given dag i fremtiden.

Klimamodeller indeholder ligesom vejrprognosemodeller beskrivelser af forholdene på Jorden og i de øverste jordlag, hvor de vigtigste grundlæggende variable er temperatur, fugtighed og snedække. Der indgår en lang række parametre i klimamodeller, som beskriver overfladens beskaffenhed, som for eksempel vegetationstyper og jordbundsforhold.

Som for vejrprognosemodeller er klimamodellens variable organiseret i et gitternet, og i hver boks i gitternettet beregnes, hvordan temperatur, fugtighed, vind etc. ændres med tiden.

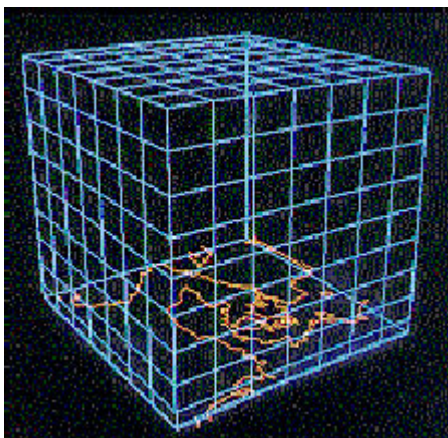


Illustration af gitternet i atmosfæredelen af vejr- og klimamodeller. Modellerne dækker normalt meget større områder end vist her.

Det har vist sig, at modellernes kvalitet og deres evne til at efterligne regionale forhold er tæt knyttet til afstanden mellem punkterne i gitternettet – jo mindre afstand mellem punkterne, jo flere detaljer og jo mere nøjagtige beregninger. For atmosfæren er den vandrette afstand mellem punkterne i gitternettet typisk et par hundrede kilometer, og i lodret retning opdeles atmosfæren i 20-30 lag med forskellig tykkelse, så de tyndeste lag er i den nederste del af atmosfæren, hvor der er behov for flest detaljer i beregningerne. For oceanerne er afstanden mellem gitterpunkterne også et par hundrede kilometer, og der er 10-20 lag.

Mange vigtige processer foregår på mindre skala end modellens gitternet, for eksempel dannelse af skyer og nedbør. For at få disse processer med i modellerne, beskrives deres gennemsnitlige virkning i hver boks i gitternettet ved hjælp af de grundlæggende størrelser som temperatur, tryk og vind.

De første klimamodeller omfattede kun atmosfæren og forenklede beskrivelser af de andre komponenter i klimasystemet. I de fleste af de modeller, der nu benyttes, er atmosfæremodellen koblet til en tilsvarende model for oceanerne samt en havismodel, så man samlet kan beskrive strømningerne og vekselvirkningerne.

For atmosfæren er klimamodellen i princippet samme type model som dem, der anvendes til at beregne de daglige vejrudsigter. Udviklingen af vind, temperatur, lufttryk, luftfugtighed og vand i skyerne beregnes, ligesom der beregnes nedbørmængder. Vejr- og klimamodellerne omfatter desuden beskrivelser af temperatur og fugtighed i de øverste jordlag samt snedække og vegetationstyper. For oceanerne beregnes strømme, temperatur, saltholdighed og tryk samt mængden af havis.

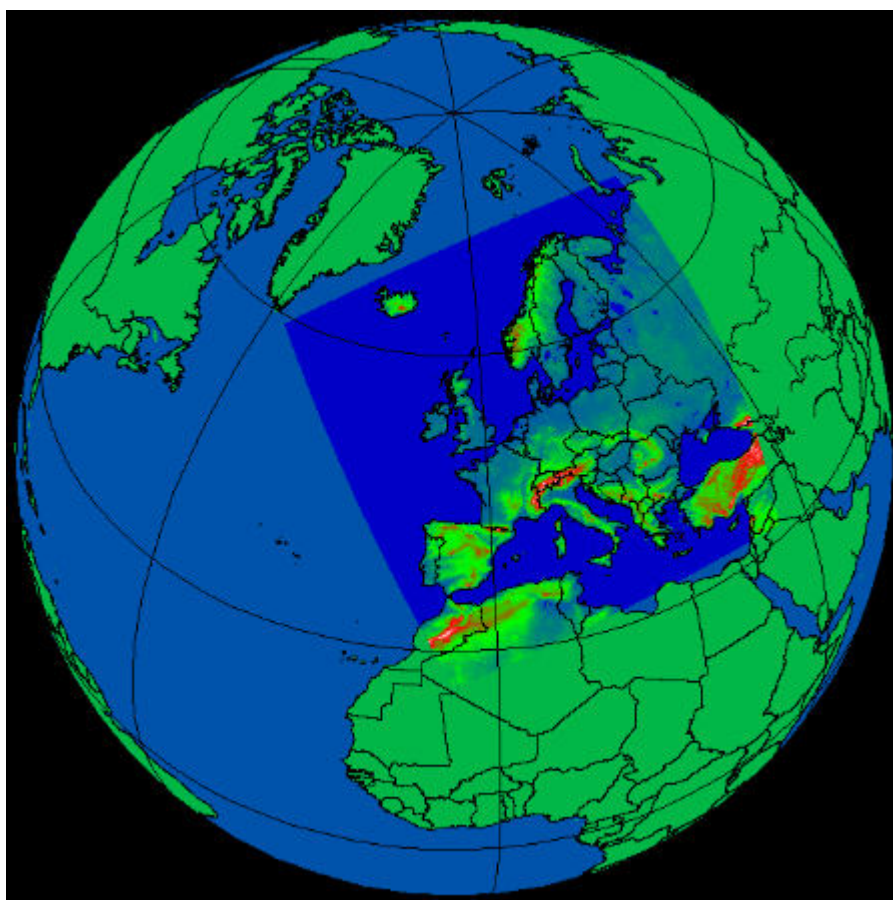
Regionale klimamodeller

Til vurdering af virkninger af klimaændringer på natur og samfund er der behov for detaljerede og nøjagtige beregninger af den sandsynlige klimaudvikling.

Afstanden mellem punkterne i klimamodellernes gitternet, og dermed som nævnt beregningernes detaljeringsgrad, er i praksis bestemt af de computerressourcer, der er til rådighed.

Verdens hurtigste anlæg er endnu alt for langsomme til, at man kan benytte samme afstand mellem gitterpunkterne, som man benytter til de daglige, regionale vejrprognoseberegninger. Derfor benytter man forskellige teknikker til at forfine de globale beregninger, så man får de nødvendige regionale og lokale detaljer i resultaterne. En af metoderne er at koble regionale modeller til de globale modeller. I den regionale klimamodel er der typisk en afstand på 20-30 km mellem punkterne i gitternettet. En anden metode er statistisk, hvor man udnytter beregnede sammenhænge mellem lokale vejrforhold og de generelle forhold i stor skala, som klimamodellen beregner.

For DMI's regionale vejr-/klimamodeller er der fokus på Danmark, Europa og Grønland. Ved hjælp af modellerne bestemmes konsekvenserne af menneskeskabte og naturlige påvirkninger af klimaet, både konsekvenser for det gennemsnitlige klima (temperatur, vind, nedbør, stråling, jordfugtighed, vandstandsstigninger) og for variationer i klimaet, herunder forekomsten af ekstreme begivenheder som storme, ekstreme temperaturer, nedbørhændelser og tørkeperioder.



I de regionale klimamodeller er afstanden mellem gitterpunkterne på ca. 45 km i store områder som Europa og ca. 5 km i området omkring Danmark.

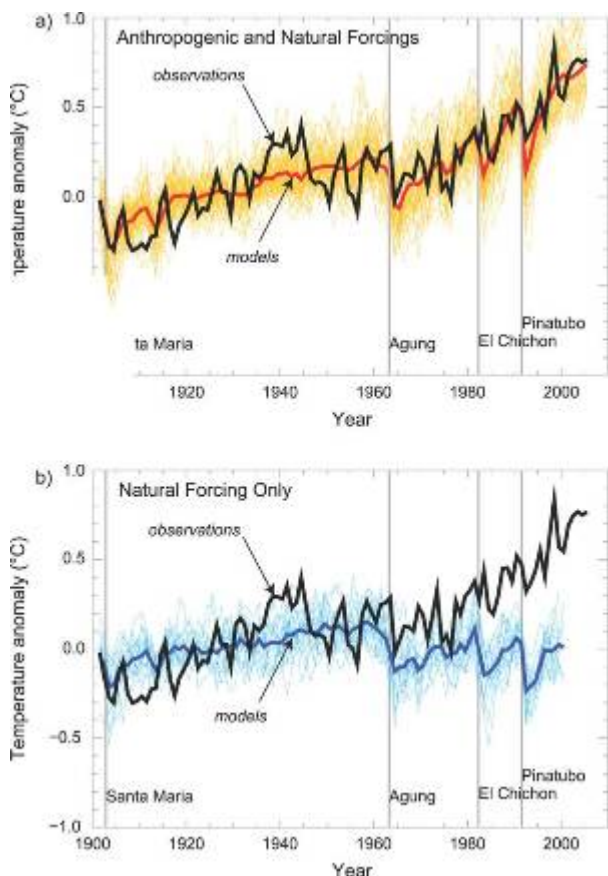
Klimamodellernes resultater

Det er ofte nævnt i debatten, at klimamodeller er usikre og klimaudviklingen uforudsigelig. Det er da også naturligt at spørge, om man faktisk kan beregne fremtidige klimaændringer, når man ved, hvor vanskeligt det kan være at forudsige vejret blot en uge eller to frem. Der er imidlertid tale om helt forskellige forudsigelser.

Vejrudsigtger giver øjebliksbilleder af vejret på et bestemt sted, og til beregning af sådanne øjebliksbilleder er det vigtigt at kende atmosfærens tilstand, når beregningen startes. I klimaberegninger er man derimod interesseret i at beskrive det gennemsnitlige vejr og dets variationer, og her er det nødvendigt at gennemføre beregninger, som dækker mange år.

Klimamodellerne testes bl.a. på deres evne til at beregne de klimaændringer og variationer, der er konstateret indtil nu, og tilliden til modellerne stiger fortsat. I dag kan modellerne eftergøre de væsentligste træk ved det nuværende klima, inkl. årstidsvariationer og geografiske variationer på stor skala. Modellerne kan også vise ændringer i klimaet, som skyldes aerosoler i den mellemste atmosfære efter store vulkanudbrud.

Men modellerne er ikke perfekte, og forskergrupper arbejder hele tiden på at forbedre dem, især beskrivelsen af de processer, der foregår på mindre skala end modelgitteret. Det er vigtigt, at disse beskrivelser så vidt muligt baseres på fysikkens love og i mindre grad på erfaringsbestemte sammenhænge, fordi man så har større sikkerhed for, at beskrivelserne også er korrekte, når klimaet ændrer sig.



Figur 1. Globale middel temperatur-anomalier i forhold til perioden 1961 til 1990. Temperaturen er observeret (sort kurve), simuleret med modeller, der medtager både menneskelig aktivitet og naturlige forceringer (rød kurve) og simuleret alene med naturlige forceringer (blå kurve). Kilde: IPCC 2007

Ensemble-teknik

Klimamodellerne testes på deres evne til at modellere det nuværende klima, både den geografiske fordeling, årstidsvariation og temperaturfordelingen op igennem atmosfæren m.m. Modellerne testes også på deres evne til at modellere klimaudviklingen frem til nu, og generelt gør modellerne det godt.

Modellerne er imidlertid ikke perfekte. Usikkerhed i modelleringen skyldes for eksempel valg af opløsning i modellen og den måde, hvorpå man beskriver processer, som foregår på mindre skala end modellens gitter kan repræsentere. En anden usikkerhedsfaktor i modellering af fremtidens klima er udviklingen i koncentrationen af drivhusgasser og andre stoffer, som påvirker klimaet.

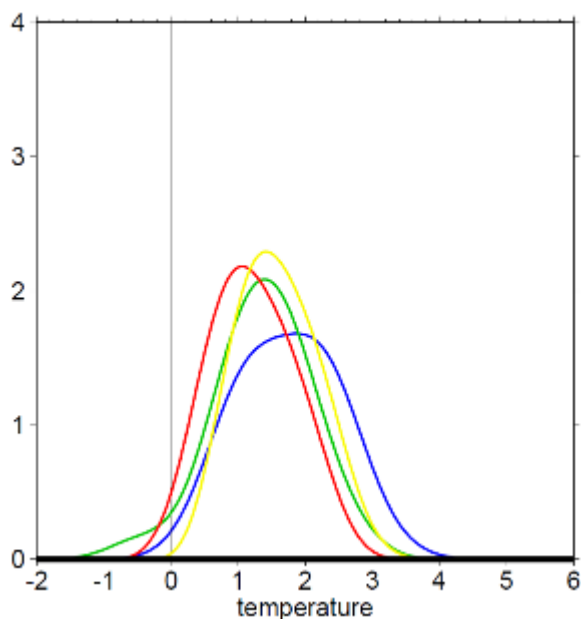
For at adressere usikkerheden i udviklingen af koncentrationen af drivhusgasser benyttes scenarier, se [Fremtidens klima](#).

For at adressere modelusikkerheden bruges enten flere modeller eller modeller, som får lidt forskellige startbetingelser. Dette kaldes "ensemble-teknik". Der er mange forskergrupper, som arbejder med global og regional klimamodellering, og dette er blandt andet udnyttet i det europæiske ENSEMBLES-projekt, som DMI har deltaget i.

I ENSEMBLES-projektet har mere end 70 modelgrupper i Europa gennemført modelberegninger med kombinationer af i alt 7 globale og 15 regionale modeller. Resultaterne er samlet i en database på DMI. Ved at antage at fejlene i de forskellige modelberegninger er uafhængige og sammenholde modelresultaterne, får man basis for at vurdere sandsynligheden af fremskrivningen.

Som eksempel på et resultat fra ENSEMBLES-projektet vises en fordeling af den sandsynlige temperaturstigning i Danmark i perioden 2021 - 2050 i forhold til 1961 - 1990 (Se figur 2). Det fremgår af figuren, at sommertemperaturen eksempelvis med stor sandsynlighed vil stige mellem 0,5 og 2,5 grader.

Outputtet er præsenteret i form af en såkaldt sandsynlighedsfordeling (PDF), som vil blive beskrevet nærmere i en kommende præsentation af øvrige resultater fra ENSEMBLES-projektet.



Figur 1. Sandsynlighedsfordeling af temperaturændringen i København. Toppen af kurven viser den mest sandsynlige temperaturstigning i 2021-2050 i forhold til 1961-1990 for forår (grøn), sommer (rød), efterår (gul) og vinter (blå). Fremskrivningen er foretaget med A1B-scenariet. Kilde: ENSEMBLES 2009.

ENSEMBLES-projektet

ENSEMBLES er et tværvidenskabeligt forskningsprojekt, som blev søsat med det formål at forudsige sandsynlige regionale klimaændringer og medfølgende konsekvenser i Europa.

DMI deltog i projektet, som blev koordineret af The Met Office Hadley Centre i England og blev etableret i 2004 som et forskningsprogram på tværs af klimaforskningens forskellige videnskabelige discipliner. Ensembles har produceret detaljerede fremskrivninger af det europæiske klima frem til år 2050 og 2100 til brug for forskere, beslutningstagere, virksomheder og offentligheden.

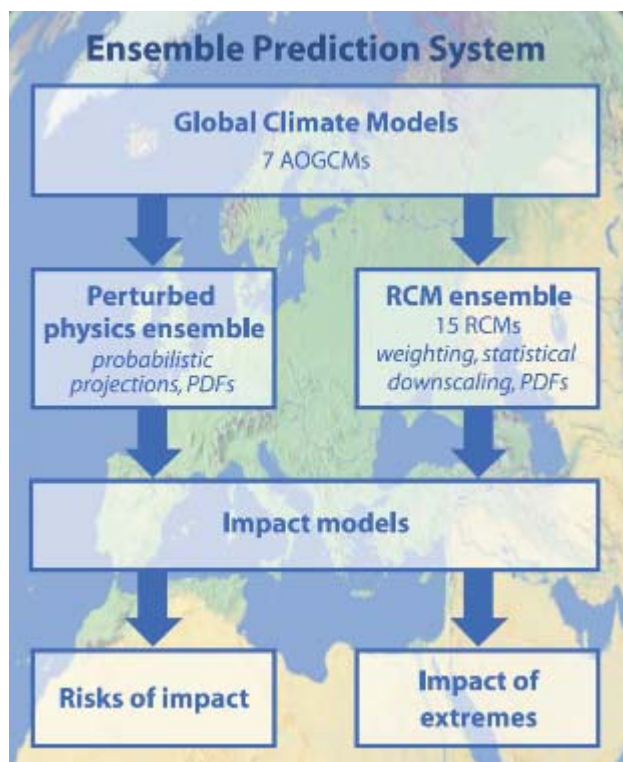
ENSEMBLES har løst denne opgave ved at udvikle et modelsystem bestående af regionale og globale klimamodeller, samt socioøkonomiske og biologiske modeller. Systemet kaldes "ENSEMBLES climate change prediction system" (se figur 1). Målet med ENSEMBLES -systemet er, som navnet antyder, at estimere fremtidige klimaændringer på tidsskalaer fra en enkelt sæson til årtier.

ENSEMBLES-projektet har endvidere til formål at kvantificere og reducere usikkerhederne i forbindelse med modellering af fremtidens klima. Og endelig skal resultaterne fra ENSEMBLES anvendes bredt i klimatilpasningsøjemed og til risikovurderinger. DMI huser databasen for projektets resultater.

ENSEMBLES-systemet

ENSEMBLES-projektet dækker stort set hele spektret af klimaforskningsområder, og man har med projektet opnået en mere detaljeret beskrivelse af de forventede klimaændringer og risikofølger i Europa, end det hidtil har været muligt - både i tidlig og rummelig opløsning.

De forskellige forskningsdiscipliner, som indgår i ENSEMBLES-systemet, er grene indenfor de videnskabelige retninger økonomi, matematik, fysik, kemi og biologi. Opstilling af scenarier er overvejende et socioøkonomisk anliggende og indgår i de globale klimamodeller, som ses øverst på figur 1. Både de regionale og globale klimamodeller består af beregninger med udgangspunkt i fysikkens og kemiens love. Andre modeller beskriver følgevirkningerne og gør blandt andet brug af forskellige biologiske sammenhænge, som udgør det tredje lag i diagrammet. Og endelig er der selve analysen af modellerne, som er en opgave for matematikere og statistikere.



Figur 1. Diagrammet viser forbindelsen mellem modellerne i ensemble-systemet. Grafik: ENSEMBLES 2009.

ENSEMBLES-opsætningen

Efter projektets opstart var første skridt at udvikle det første globale ENSEMBLES-baserede modelsystem til beregning af klimaændringer og følgevirkninger i høj opløsning. På den baggrund blev der udarbejdet klimasimuleringer baseret på flere modeller - simuleringer med et såkaldt multimodel-system. Simuleringerne er nødvendige til den senere validering af hele modelsystemet. Desuden blev der foretaget en række tests - sæsontests og tiårstests til evaluering af modelresultaterne.

Model-systemet bestående af syv globale klimamodeller blev kombineret med regionale klimamodeller fra 15 forskellige institutioner i Europa i en såkaldt model-matrix. De regionale og globale klimamodeller blev kombineret på alle mulige måder. De regionale modeller har en opløsning på 25km og resultaterne for de globale modeller blev anvendt til beregning af grænsen af det regionale område.

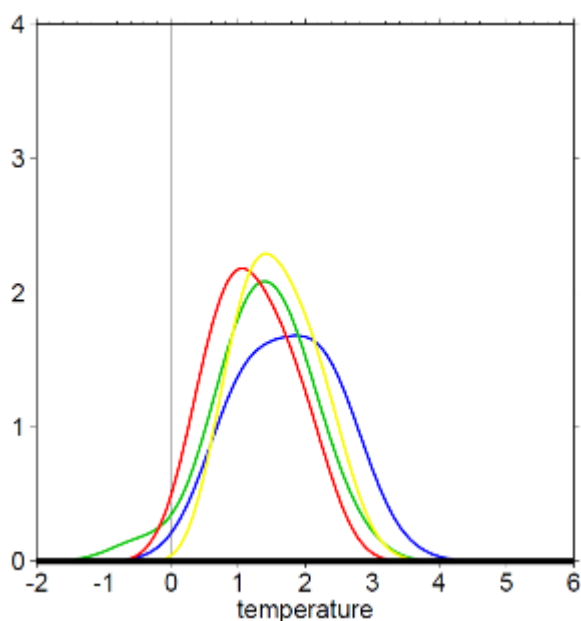
Modellerne for følgerikningerne eller "Impact models", som de benævnes i diagrammet bruger outputtet fra nedskalering af globale og regionale klimamodeller som input.

FN's klimapanel, IPCC opererer med forskellige scenarier for udledning af drivhusgasser som grundlag for estimering af fremtidens klima. Scenarierne er opstillet ud fra sandsynlige fremtidige økonomiske, teknologiske og sociale forhold. I ENSEMBLES fremskrives temperatur og nedbør ud fra det såkaldte A1B-scenarier. Desuden er der gennemført beregninger for et scenarier kaldet E1, som begrænser den globale temperaturstigning til 2 grader.

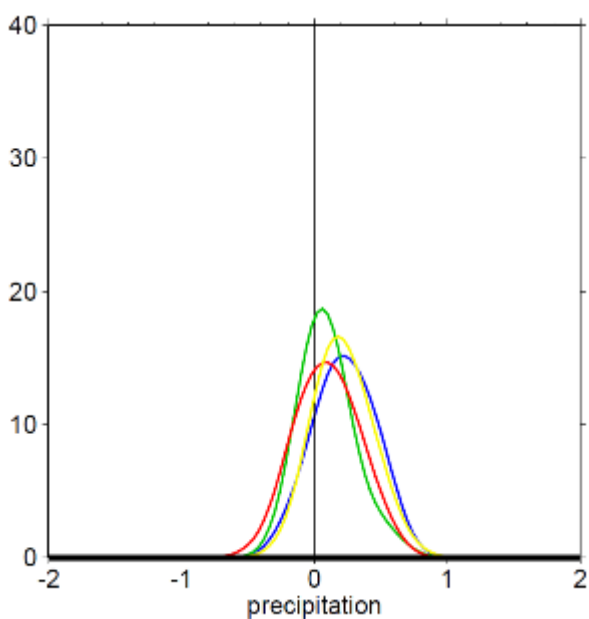
ENSEMBLES-resultaterne

Resultaterne fra Ensembles bekræfter resultaterne fra den øvrige klimaforskning, men det nye ved Ensembles er den høje opløsning.

Outputtet fra Ensembles afspejler modellernes variationer i både opløsning og udformning. De globale klimamodeller nedskaleres efter forskellige principper og det giver samlet set anledning til variation i resultaterne fra de forskellige modeller.



Figur 2. Sandsynlighedsfordeling af temperaturændringer i grader. Toppen af kurven viser den mest sandsynlige temperaturstigning i 2021-2050 i forhold til 1961-1990 for forår (grøn), sommer (rød), efterår (gul) og vinter (blå). Temperaturfremskrivningerne er foretaget med A1B-scenariet. Kilde: ENSEMBLES 2009.



Figur 3. Tilsvarende sandsynlighedsfordeling af nedbørsændringer. Kilde: ENSEMBLES

Som eksempel på et resultat fra ENSEMBLES vises en fordeling af den sandsynlige temperaturstigning og nedbørsændring i Danmark i perioden 2021 - 2050 i forhold til 1961 - 1990 (Se figur 2 og 3). Det fremgår af figur 2, at sommertemperaturen med stor sandsynlighed vil stige mellem 0,5 og 2,5 grader. På figur 3 kan man se, at man forventer mere nedbør hele året, dog med største ændringer i efterår- og vintermånederne.