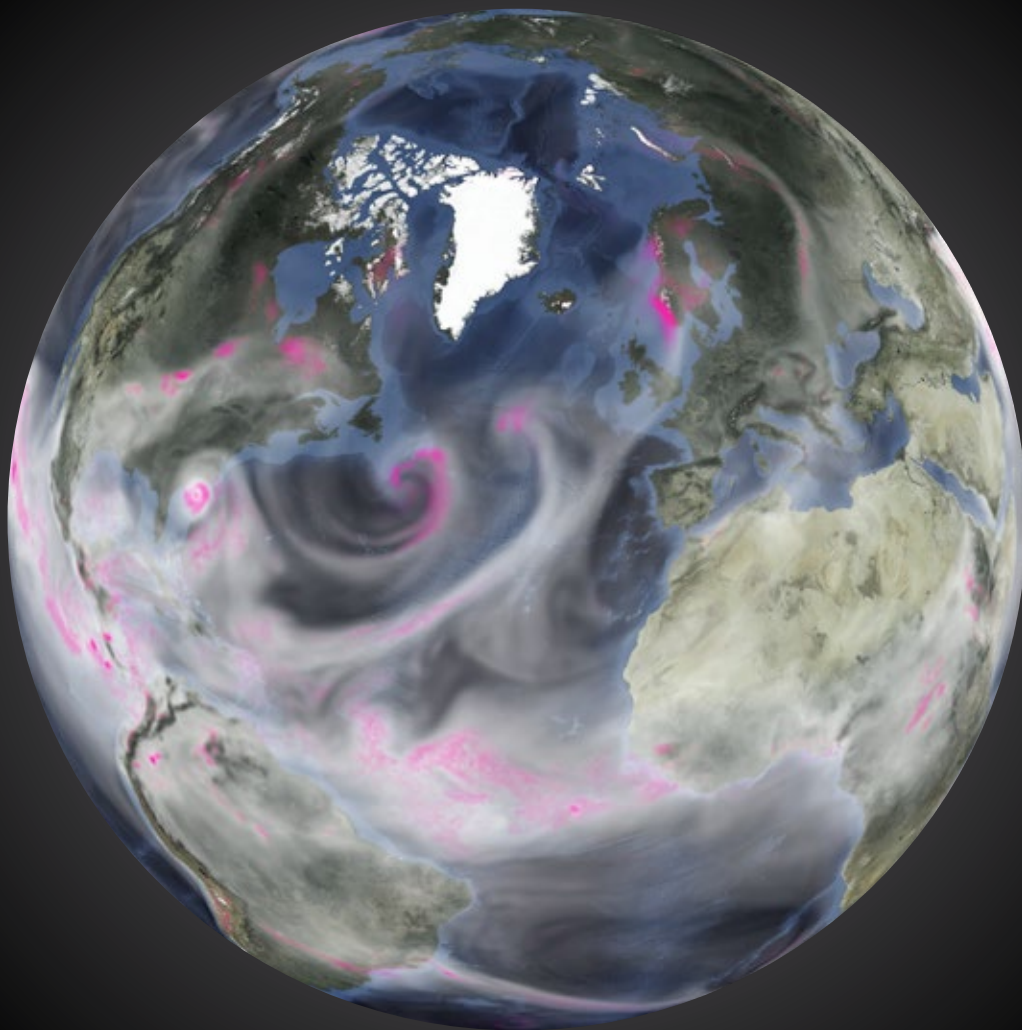


---

# EarthClim 2011 — 2014

*An Integrated Earth System Approach to Explore  
Natural Variability and Climate Sensitivity*



NorESM  
- Ryggraden i norsk klimaforskning

---

# Nøkkeldata EarthClim

## Prosjekttittel

An Integrated Earth System Approach to Explore Natural Variability and Climate Sensitivity (EarthClim)

## Varighet

2011-2014

## Prosjektpartnere

Uni Research AS, Bergen – administrativt ansvarlig  
Bjerknessenteret for klimaforskning, Bergen  
Universitetet i Bergen  
CICERO senter for klimaforskning, Oslo  
Meteorologisk institutt, Oslo  
Universitetet i Oslo  
Norsk regnesentral, Oslo  
Norsk institutt for luftforskning, Kjeller  
Norsk Polarinstitutt, Tromsø

## EarthClim prosjektwebseite

<http://folk.uib.no/ngfhd/EarthClim/>

## EVA prosjektwebseite

<http://www.uib.no/EVA>

## Bidragstere

**MATS BENTSEN** forsker, Uni Research og Bjerknessenteret  
**HELGE DRANGE** professor, UiB og Bjerknessenteret  
**CHRISTOPH HEINZE** professor, UiB, Uni Research og Bjerknessenteret  
**TROND IVERSEN** professor, Meteorologisk institutt  
**JÓN EGILL KRISTJÁNSSON** professor, UiO  
**MARIA SAND** forsker, CICERO  
**ERIK SANDQUIST** forskningskoordinator, Uni Research og Bjerknessenteret  
**IVAR SEIERSTAD** forsker, Meteorologisk institutt  
**ASGEIR SORTEBERG** professor ved UiB og Bjerknessenteret  
**GUÐRÚN SYLTE** kommunikasjonsleder, Bjerknessenteret

## Layout

HALTENBANKEN

## Print

BODONI AS [bodoni.no](http://bodoni.no)

## Forsideillustrasjon

MATS BENTSEN

# INNHold

4	Laboratoriet
7	Atmosfæren
8	Aerosoler
10	Havet
12	Biogeokjemiske kretsløp
14	NorESM i den store sammenhengen
15	Framtiden

## NorESM

NorESM – Norwegian Earth System Model – er navnet på den norske jordsystemmodellen. NorESM er en global modell, den beregner blant annet vind, temperatur, nedbør og skydekke i atmosfæren; strøm, temperatur og saltholdighet i havet; vegetasjon på land og fuktighet og temperatur i jordsmonnet; karbonkretsløp i hav og land-biosfæren; utstrekning og tykkelse til snø og is på land og på havet.

Modellen er utviklet av et bredt samarbeid mellom alle de største klimamodelleringsmiljøene i Norge. Hovedansvarlig for NorESM er Bjerknessenteret og Meteorologisk institutt. Utviklingen av NorESM er siden 2007 finansiert av Norges Forskningsråd i tre store forskningsprosjekt.

## EarthClim

EarthClim er et nasjonalt koordinert klimaforskningsprosjekt finansiert av Norges Forskningsråds program NORKLIMA for perioden 2011-2014.

EarthClims hovedmål er å forbedre og teste klimaprosesser i den norske jordsystemmodellen NorESM som er særlig viktige for polare områder og følgelig for polart klima. Transport av varme og fuktighet fra tropene påvirker polare områder i betydelig grad. Samtidig er tropene viktig for naturlig klimavariabilitet, derfor er en viktig del av prosjektet knyttet til analyse av tilbakekoplingsmekanismer, klimarespons og -følsomhet med opprinnelse nærmere ekvator.

Resultater fra NorESM bidro til den femte hovedrapporten til FNs klimapanel (IPCC AR5).



# LABORATORIET

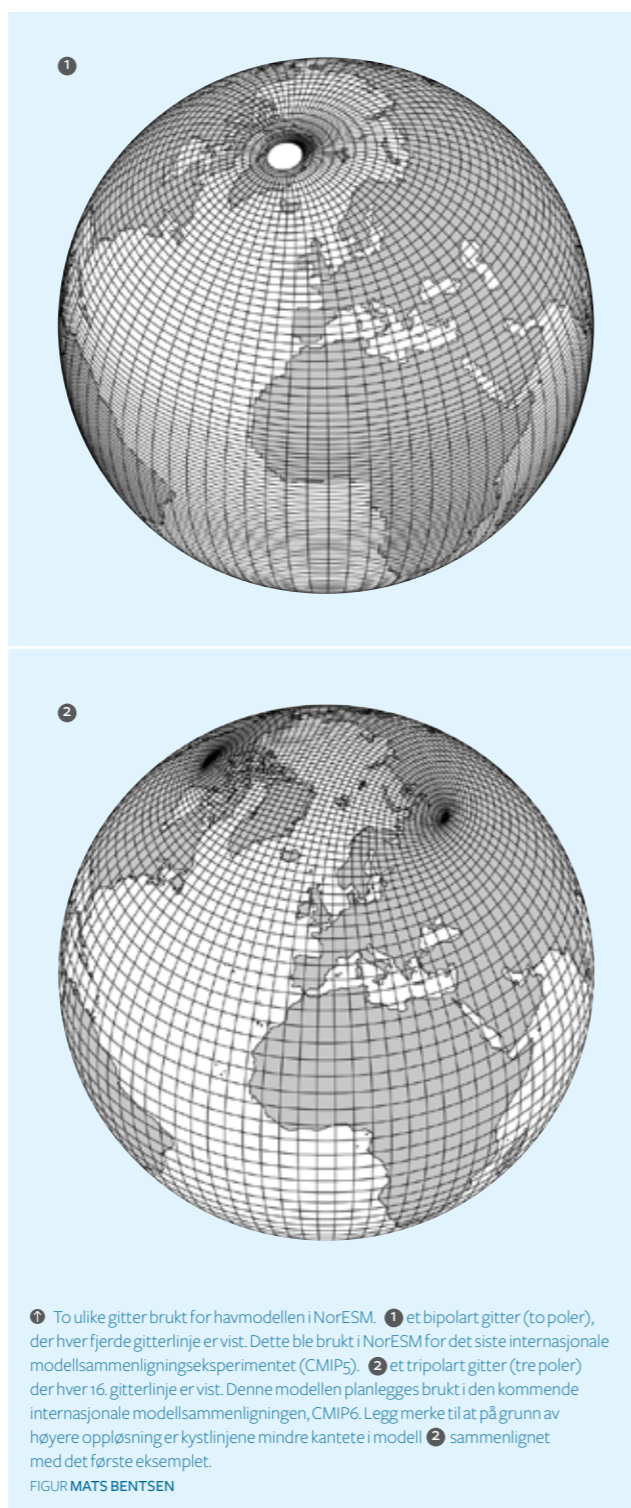
## Jorden i et rutenett

En klimamodell er et laboratorium bygd i ruter og formler i kraftige datamaskiner.

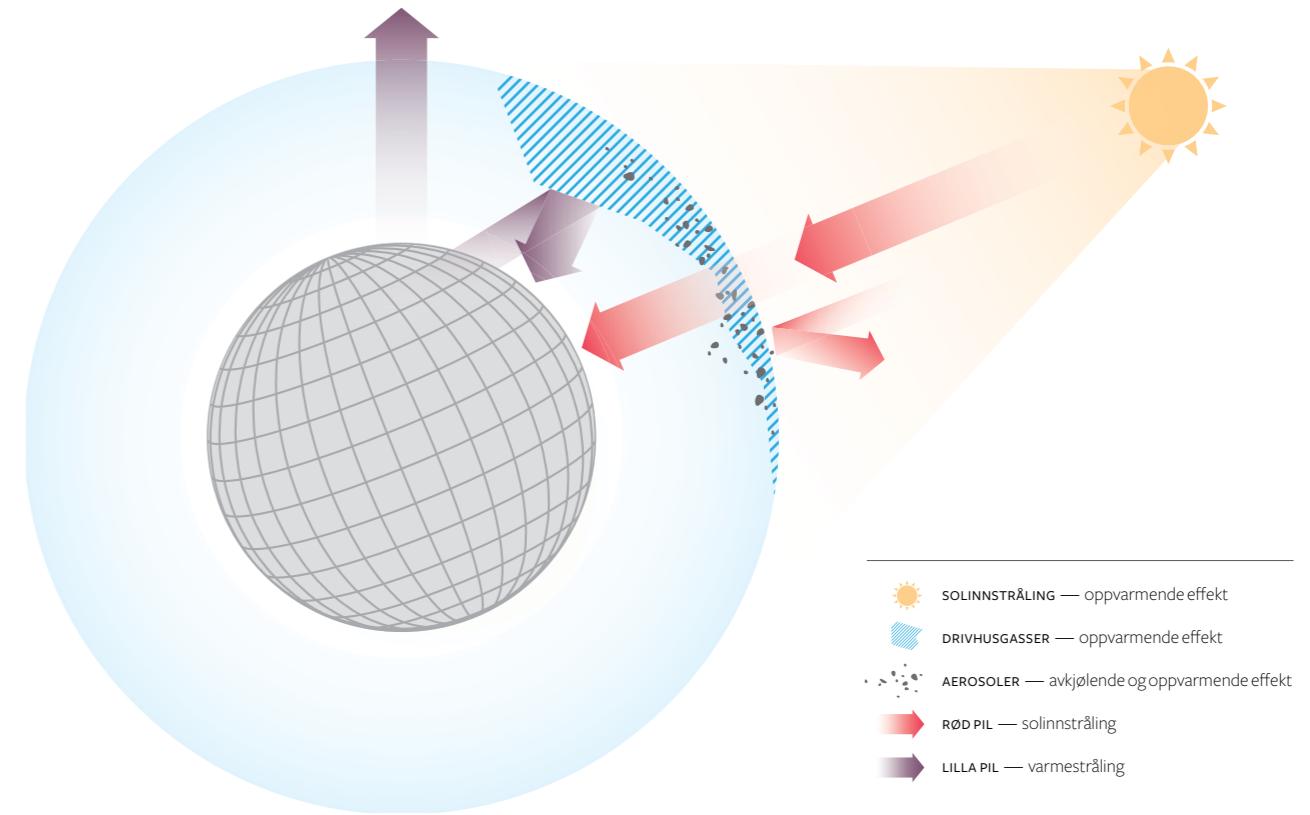
En jordsystemmodell prøver å etterligne naturen ved hjelp av et rutenett av små bokser. Naturlover blir formulert matematisk ved at jorda deles opp i biter der de utvalgte fysiske, kjemiske og biologiske prosesser er representert. Slik kan egenskaper forplante seg med vinder, strømmer, stråling og diffusjon over alle de delene av jorda som antas viktig for bestemmelsen av jordas klima. Man ønsker at rutene skal være så små som mulig, samtidig som flest mulig prosesser i jordsystemet er representert. Med mindre og flere bokser øker oppløsningen, mens flere prosesser øker kompleksiteten. Begrenset regnekraft gjør at man må avveie disse hensynene, blant annet ved å forenkle hvordan prosessene representeres.

I modellen deles jordsystemet opp i komponenter som vekselvirker gjennom overføring av energi, bevegelse, fuktighet og kjemiske substanser. Vekselvirkningene styres av et programsystem som kalles en kopler, og er den sentrale «hjernen» i modellen. Komponentene i NorESM er atmosfæren, havet, havis og landjorda med vegetasjon. I en jordsystemmodell er det sentralt at det biogeokjemiske kretsløp er representert, med særlig vekt på beregning av karbonets syklus. Videre er ferskvannets kretsløp svært viktig, og i den sammenheng aerosolpartikler, skyer, nedbør, is- og snødekke, og ferskvann på land.

«Ved å inkludere biogeokjemiske prosesser i klimamodeller endrer man disse til å bli jordsystemmodeller, altså mer komplette modeller over klimaprosesser på Jorden.»



1 To ulike gitter brukt for havmodellen i NorESM. 1 et bipolart gitter (to poler), der hver fjerde gitterlinje er vist. Dette ble brukt i NorESM for det siste internasjonale modellsammenligningseksperimentet (CMIP5). 2 et tripolart gitter (tre poler) der hver 16. gitterlinje er vist. Denne modellen planlegges brukt i den kommende internasjonale modellsammenligningen, CMIP6. Legg merke til at på grunn av høyere oppløsning er kystlinjene mindre kantete i modell 2 sammenlignet med det første eksemplet.  
FIGUR MATS BENTSEN



1 Overflatetemperaturen på jorden justerer seg etter påvirkning fra de tre faktorene. Mens solinnstråling og drivhusgasser har en oppvarmende effekt på atmosfæren kan aerosoler ha både en oppvarmende og en avkjølede effekt, avhengig av type. Absorpsjon og spredning av solstråling i atmosfæren påvirkes vesentlig av aerosolpartikler og skyer, og til en viss grad av vanndamp og ozon. Ved siste årtusenskifte bidro vanndamp til rundt regnet halvparten (48%) av drivhuseffekten mens CO<sub>2</sub> og skyer bidro med ca. 20% hver. De resterende ca. 12% domineres av bidrag fra ozon, metan og N<sub>2</sub>O. Likevel gir menneskeskapte utslipp av CO<sub>2</sub> fra fossilt brensel en økning av drivhuseffekten. Når CO<sub>2</sub> øker er det en rekke tilbakekoplinger som setter inn. En slik tilbakekopling er en ytterligere økt drivhuseffekt som skyldes mer vanndamp i atmosfæren.

## Pådriv for klima på jorden

Jordsystemmodellene regner ut sitt eget klima. Man begynner med beregninger for et klima i energibalans, ved en gitt sammensetning av atmosfæren. Det kan for eksempel være førindustrielle forhold med utgangspunkt i observasjoner for de ulike komponentene i jordsystemet. Deretter gjøres beregninger for perioden opp til vår tid ved å starte fra en tilfeldig tilstand fra den førindustrielle beregningen og ta hensyn til det man vet om solstråling, drivhusgasser og aerosoler i historisk tid. Framskrivninger for framtidig klimautvikling tar utgangspunkt i antatte scenarier for prosesser som kan skape pådriv i framtiden. Ofte lages flere mulige beregninger for slike mulige klimaendringer ved å starte fra forskjellige tilstander i den førindustrielle beregningen. Slik blir det mulig å sammenlikne systematiske endringer med tilfeldige variasjoner.

De ulike komponentene i klimasystemet endrer seg hele tiden. Endringer i temperatur påvirker andre variabler i klimasystemet, slik som fordampning, luftfuktighet, nedbør, vindstyrke og retning, styrke på havstrømmer og smeltende sjøis.

Mens endringer og bevegelser i atmosfæren er raske og flyktige, er de mye langsommere i havet. Varmekapasiteten i havet er langt høyere

enn atmosfærens. Havet har blant annet tatt opp omtrent en tredjedel av de globale klimautslippene siden den industrielle revolusjonen, og lagrer det aller meste av varmeoverskuddet som skyldes økt drivhuseffekt siden førindustriell tid. Havet fungerer altså som en buffer mot global oppvarming over en viss tid. Men en endring i havets temperatur vil vedvare lenge og vil igjen påvirke atmosfæren.

Kjemiske substanser som karbondioksid (CO<sub>2</sub>), aerosolpartikler og ozon (O<sub>3</sub>) påvirker klimasystemet direkte gjennom å påvirke hvordan solstråling og varmestråling absorberes og reflekteres, og hvordan jordas egen varmestråling tas opp og slippes ut. I jordsystemet er fysiske, kjemiske og biologiske klimaprosesser nær knyttet til hverandre. Dette gjelder særlig for karbonkretsløpet i klimasystemet og for atmosfærekjemi.

Siden CO<sub>2</sub>, nitrogenforbindelser og O<sub>3</sub> sammen med nedbør og fuktighet påvirker plantenes vekst og deres opptak av CO<sub>2</sub>, kan gassene dermed indirekte endre konsentrasjonen av drivhusgasser i atmosfæren. Både havet og landjorden kan til en viss grad ta opp karbondioksid, som er den viktigste faktoren for menneskeskapte klimaendringer.



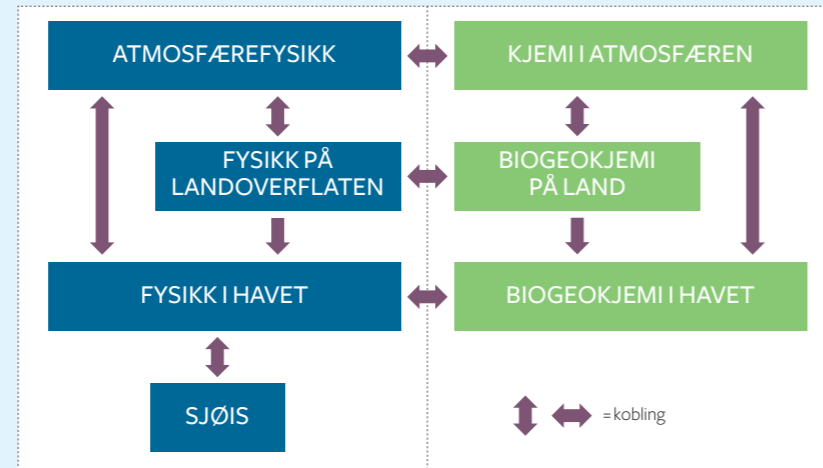
## Hva som skiller NorESM fra andre klimamodeller

NorESM er bygget på en global klimamodell utviklet ved National Center for Atmospheric Research i Boulder, USA. Dette er en modell som brukes av flere klimamodelleringsgrupper i verden.

NorESM skiller seg fra overnevnte modell ved at den bruker en havmodell som i stor grad er utviklet ved Bjerknessenteret. Dette er en av de mest avanserte havmodellene som brukes i global klimamodellering. Denne modellen har også en avansert modul for beregning av biogeokjemiske prosesser i havet som er viktig for karbonets kretsloop. Denne modulen er basert på den tyske HAMOCC modellen fra Max Planck Institutt for Meteorologi.

NorESM bruker også en egenutviklet modul for avansert og detaljert beskrivelse av naturlige forekommende og menneskeskapt partikler i luft, såkalte aerosoler. Dette arbeidet utføres i hovedsak ved Meteorologisk institutt og ved Universitetet i Oslo. Aerosolene består av havsalt, støv, svovel, sot og organisk materiale, og det beregnes hvordan partiklene påvirker solstråling, skyer og nedbør. En betydelig grad av usikkerheten i klimafremskrivningene er knyttet til effekten av aerosoler på solstråling og skyer.

## Jordsystemmodell



## En klimamodell er et laboratorium

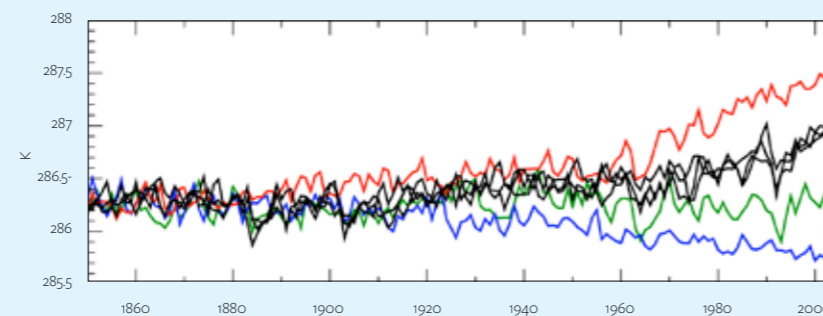
I motsetning til vår jord kan en klimamodell, eller en jordsystemmodell, simulere jordens klima dersom vi isolerer effekten av menneskeskapt klimagassutslipp, menneskeskapt partikkelutslipp, eller effekten av vulkanutbrudd og variasjoner i solinnstrålingen.

Dette er vist i figuren. Nettoeffekten av alle bidrag er vist med sort. Betrakter vi bare bidraget fra økende innhold av drivhusgasser, får vi den røde kurven, med en oppvarming på rundt 1,6 grader siden 1850. Betrakter vi bare bidraget fra partikkelutslipp, viser den blå kurven at jordens temperatur skulle ha falt med rundt 0,5 grader. Langtidsvirkningen av vulkaner og variasjoner i solinnstrålingen (grønn kurve) er liten.

Figuren viser at det bare er mulig å forklare oppvarmingen de siste 50 år ved å inkludere effekten av økende klimagassinnhold i atmosfæren. Nedkjølede bidrag fra partikkelutslippene er stor og har begrenset jordens temperaturutvikling fra tidlig på 1900-tallet.

Dette betyr at rensing av partikkelutslipp fra for eksempel ikke-renset kullkraftverk medfører at partikkelens skyggeeffekt blir redusert mens drivhusgassenes oppvarmende effekt forblir den samme. Nettoeffekten blir da forsterket oppvarming.

HELGE DRANGE



Endring av global overflatetemperatur i NorESM. De svarte kurvene er fra tre ulike standardkjøringer med NorESM; eneste forskjell mellom disse kjøringene er noe forskjellig startbetingelse. I tillegg er det vist hvilken temperaturendring NorESM gir dersom en bare ser på effekten av (1) økende innhold av klimagasser i atmosfæren (rød linje), (2) økende innhold av partikler (aerosoler; blå linje) og (3) klimaeffekten av vulkanutbrudd og variasjoner i solinnstrålingen (grønn linje). Klimagassene virker oppvarmende, partiklene virker nedkjølede, mens vulkaner og solvariasjoner ikke har så stort bidrag, i alle fall for noen tiår og mer.

# ATMOSFÆREN

## Atmosfærisk blokking

Klimaet i Norge påvirkes i stor grad av utstrekningen, intensiteten og banene til lavtrykk og høytrykk. For at globale klimamodeller slik som NorESM også skal kunne brukes til regionale fremskrivninger for våre områder er det derfor avgjørende at de kan simulere godt sirkulasjonsmønstrene i Nord-Atlanteren og over Europa. En særlig utfordring i så måte er å simulere fenomenet atmosfærisk blokking.

Atmosfærisk blokking knyttes ofte til et høytrykk som vedvarer i mange dager og kan bli liggende over samme område i inntil flere uker i strekk. Dette kan føre til tørke og hetebølger slik som for eksempel over Russland i 2010. Et blokkerende høytrykk fører også til at vandrende lavtrykk rundt høytrykket kan bli styrt til andre områder som kan få store mengder nedbør og flom.

Hva kan vi si om hyppigheten av atmosfærisk blokking i fremtiden? I den siste rapporten til FNs klimapanel konkluderes det med *medium confidence* at hyppigheten ikke vil øke i den nordlige halvkule sett under ett, mens vi ikke kan konkludere noe om intensiteten eller varigheten. Mye av usikkerheten skyldes at denne generasjonen med globale klimamodeller i stor grad underestimerer hyppigheten av atmosfærisk blokking.

Med økt regnekraft kan den neste generasjonen av NorESM gi en kraftig forbedret simulering av atmosfærisk blokking, og hvordan dette fenomenet kan opptre i et framtidig klima.

IVAR SEIERSTAD

Atmosfærens tilstand er betydningsfull i vår hverdag. Mens værmeldinger forsøker å forutsi den aktuelle værutviklingen, vil projeksjoner for klimaendringer forsøke å si mest mulig om endringer i værrets statistikk. Klima er vær sett over tid.

Atmosfæren blir dels oppvarmet av solinnstråling, men blir hovedsaklig tilført varme når vanddamp kondenserer i skyer, og i kontakt med varme områder på landjorden og i havet. Atmosfæren blir avkjølt ved å stråle ut varme til verdensrommet og i kontakt med kald overflate. Globalt fører temperaturforskjeller til at vindsystemer kontinuerlig bringer varme fra tropene mot polene. Vertikale bevegelser i atmosfæren fører samtidig til at luften blir avkjølt slik at luftfuktigheten kondenserer og skaper skyer og nedbør.

Drivhuseffekten oppstår i atmosfæren fordi lufta i høy grad slipper solstråling gjennom, mens varmestråling fra bakken og fra ulike lag i atmosfæren blir absorbert av drivhusgassene og i skyer. Når mengden klimagasser øker, blir utgående varmestråling mindre enn innkommende solstråling. Da stiger temperaturen i jordsystemet inntil man oppnår ny likevekt.

Denne oppvarmingen forsterkes ved en rekke prosesser:

- Varmere luftmasser kan inneholde mer vanddamp enn kalde luftmasser. Vanddamp er atmosfærens viktigste naturlige klimagass, og en oppvarming kan forsterkes ved at atmosfæren dermed kan holde mer vanddamp.
- Oppvarming av atmosfæren kan forsterkes ved en endring av hvor mye bakken reflekterer solinnstrålingen. Når hvit havis smelter, blir den erstattet med mørk havoverflate. En hvit snødekt overflate på land reflekterer mer stråling enn en jordoverflate uten snø. Også endring i vegetasjon kan endre bakkens evne til å reflektere solstrålingen.

En hovedutfordring i jordsystemmodeller og klimamodeller, er riktig simulering av skydannelse. I denne sammenhengen er det også viktig å simulere aerosolpartikler, og i NorESM er det en betydelig egenutvikling knyttet til dette.

## Nedbørøkningen i Norge – naturlige variasjoner eller menneskeskapt forandring?

Basert på de meteorologiske stasjonene som har målt siden 1900, har det i Norge vært en nedbørøkning på +17% per 100 år. Forandringen har vært spesielt kraftige de siste 40 årene og økningen ses over hele landet. På samme tid har temperaturtrenden i Norge vært +0.8°C per 100 år.

Mens de globale klimamodellene som brukes i FNs klimapanel 5. hovedrapport klarer å simulere den historiske temperaturforandringen (+0.9°C per 100 år), klarer de bare å simulere en femtedel av de observerte forandringene i nedbør (+3.4% per 100 år).

Det er flere mulige forklaringer på dette:

Enten at de globale modellene er for konservative i sin beregning av hvor følsom nedbør er til forandring i naturlige og menneskeskapt forandring, eller at en stor del av de observerte forandringene ikke er knyttet til menneskeskapt utslipp eller solinnstråling, men skyldes tilfældige langtidsvarende variasjoner i klimasystemet som modellene ikke klarer å reprodusere.

Resultater fra EarthClim viser at mange av de globale klimamodellene NorESM inkludert, har systematiske feil i stormbanene inn mot Europa, noe som gir systematiske feil i nedbør. Tester av NorESM-systemet viser at de systematiske feilene kan reduseres ved økt detaljeringsgrad i modellen. Dette vil kreve større beregningskapasitet enn det som i dag er tilgjengelig i Norge, men kan være med på å gi bedre estimering av framtidig nedbør i våre områder.

ASGEIR SORTEBERG

# AEROSOLER

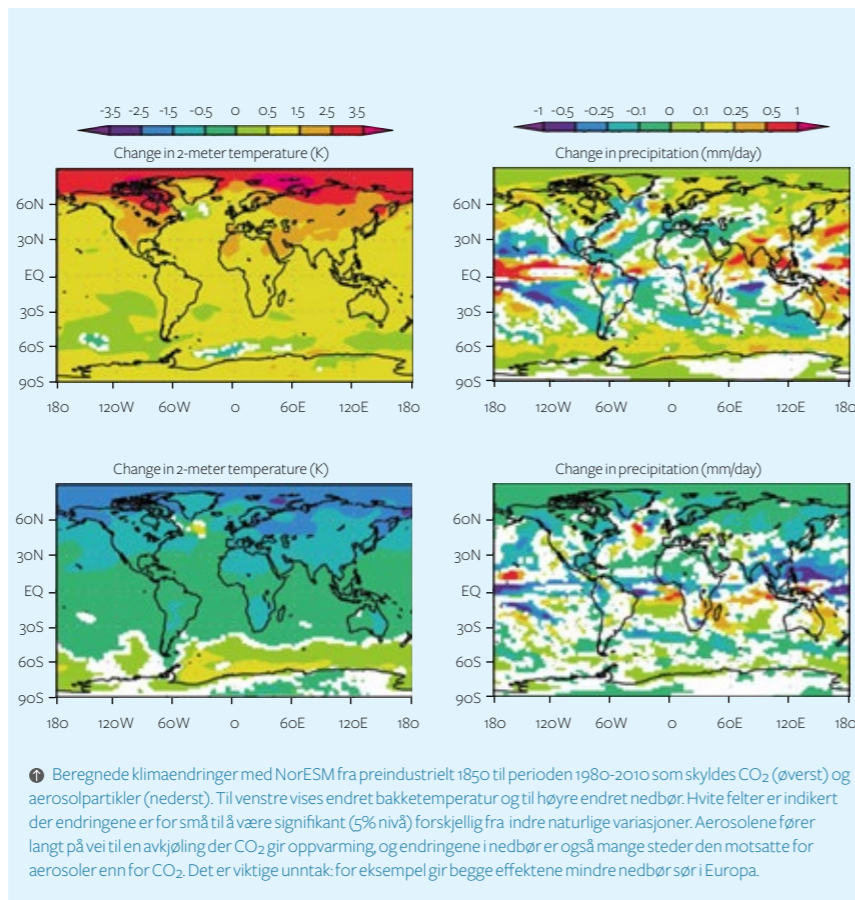
## Aerosolpartikler i NorESM

Aerosoler består av faste og flytende partikler i luft, med unntak av skydråper og is.

Partiklene er små nok til holde seg svevende i lufta opptil noen få uker. Det er mange ulike partikkeltyper som varierer med størrelse og sammensetning. Siden ulike typer partikler påvirker solstråling og skydannelse vidt forskjellig, må slik informasjon inkluderes for å kunne beregne klimaeffektene av dem. Disse egenskapene er den viktigste grunnen til å inkludere aerosolpartikler i klima- og jord-systemmodeller. Menneskeskapt aerosoler kommer fra en rekke prosesser som også produserer CO<sub>2</sub>, og fra prosessindustri. En rekke naturlige prosesser fører til aerosolpartikler som sjøsalt, jordstøv, organiske partikler fra vegetasjon, biologiske partikler, partikler fra skogbranner osv.

For å kunne beregne menneskeskapt endringer i aerosolenes evne til å påvirke solstråling, skydannelse og nedbørtløsning, er det nødvendig også å beregne egenskapene til naturlige aerosoler. I NorESM er det utviklet en egen modul for nettopp dette. På denne bakgrunn kan modellen både beregne de direkte effektene av menneskeskapt aerosoler gjennom endret spredning og absorpsjon av solstråling i skyfri luft, og de indirekte effektene på rene vannskyer som dels skyldes at skyene blir hvitere med økt aerosolinnhold, og dels at skyene lever lenger når nedbørtløsningen blir mindre effektiv. Figuren viser et eksempel på hvordan NorESM beregner klimaeffekter av endrede aerosoler sammenliknet med CO<sub>2</sub>, alt i forhold til de beregnede preindustrielle forholdene i 1850. NorESM har hittil inkludert beregninger av 20 kjemiske aerosolkomponenter for å få til dette. Det arbeides med videre utvikling av denne modulen. Et eksempel som allerede er vitenskapelig publisert, gjelder nydannelse av partikler.

TROND IVERSEN



## Arktis er spesielt følsomt for lokale utslipp av sotpartikler

Sotpartikler dannes ved ufullstendig forbrenning av olje, kull og biomasse. Den mørke fargen på partiklene gjør at de absorberer solstråling og varmer opp atmosfæren. Når partiklene legger seg på snø og sjøis vil den mørke overflaten absorbere mer sollys og sette fart i snøsmeltingen. Siden Arktis har store arealer som er dekket av snø og sjøis, er det sannsynlig at Arktis er spesielt følsomt for sot.

Modellberegninger med NorESM viser at utslipp av sot i Arktis kan gi en fem ganger større oppvarming i Arktis sammenliknet med sotpartikler som slippes ut lenger sør. Dette kan ha konsekvenser for regulering av framtidig aktivitet i nordområdene, da sot slippes ut fra

fakling fra oljeutvinning og fra skipsfart. Partikler som slippes ut i nord legger seg lettere på snø og havis og den direkte oppvarmingen av lufta skjer nærmere bakken. Partikler som transporteres inn i Arktis fra kilder lenger sør befinner seg derimot høyere oppe i atmosfæren og har derfor ikke like stor påvirkning nede på bakken.

Sot har ulike klimaeffekter som kan motvirke hverandre og det er derfor viktig å bruke avanserte klimamodeller som NorESM for å se på den totale klimaresponsen. Dette studiet i EarthClim er det første som bruker en fullt koblet klimamodell for å se på effekten av utslipp av sot i Arktis.

MARIA SAND

## Ny kunnskap om små partikler

Takket være nye avanserte måleinstrumenter kan vi nå måle både dannelse og vekst av ørsmå partikler i atmosfæren. Dette har ført til ny kunnskap og bedre beregninger i NorESM.

AV JÓN EGILL KRISTJÁNSSON OG RISTO MAKKONEN

Avanserte målinger av gasser og ørsmå partikler i de finske skoger har bidratt til en ny forståelse av dannelse og vekst av nye atmosfærepartikler, såkalte aerosoler. Målingene viser at på en fin sommerdag dannes de første partiklene ved titiden om morgenen med en diameter rundt 2 nanometer (1 nanometer=10<sup>-9</sup> meter). Deretter vokser de raskt de første timene, men mye langsommere etter kl.15 lokal tid. Da er diameteren vokst til ca. 30 nanometer.

Partiklene som dannes i skogfeltet i Finland illustrerer noen av de nye funnene som er gjort de siste årene. De nydannede partiklene er såpass små at de har inntil nylig vært umulige å måle. Derfor har også kunnskapen om slike sekundærpartikler vært svært mangelfull. De siste ti årene har det skjedd et gjennombrudd når det gjelder instrumentering, slik at det nå foreligger både laboratoriemålinger og feltmålinger av dannelse og videre vekst av sekundærpartikler.

### Naturlige og menneskelige kilder

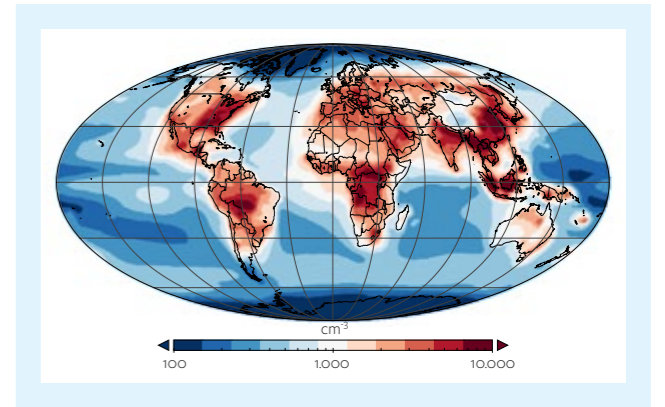
Atmosfæren består i hovedsak av en gassblanding, der nitrogen (N<sub>2</sub>) og oksygen (O<sub>2</sub>) til sammen utgjør over 95%, og andre viktige gasser er blant annet vanddamp (H<sub>2</sub>O), karbondioksid (CO<sub>2</sub>) og ozon (O<sub>3</sub>). Men atmosfæren inneholder også enorme mengder ørsmå partikler (millioner partikler i hver liter luft), som har stor betydning både for vær og klima.

En del av partiklene har naturlige kilder, for eksempel sjøsalt, mens andre skyldes menneskelig aktivitet, for eksempel sotpartikler fra menneskelig forbrenning. I motsetning til drivhusgassene virker partiklene i hovedsak avkjølede på klimaet. For å kunne simulere klimautviklingen må våre klimamodeller beregne størrelser, egenskaper og konsentrasjoner av partiklene på realistisk vis.

Vi kan dele opp atmosfæriske partikler i to klasser: primærpartikler som tilføres atmosfæren direkte som partikler og sekundærpartikler som blir til i atmosfæren ved omdannelse fra forløpgergasser gjennom kjemiske reaksjoner.

Eksempler på primærpartikler er sjøsaltpartikler som blir tilført atmosfæren når sjøsprøyt fordamper og støvpartikler som oppstår når vind blåser over tørre landområder og virvler opp sand. Primærpartiklene har typisk diameter et sted mellom 0,1 og 100 mikrometer.

Eksempler på sekundærpartikler er sulfatpartikler og visse typer organiske partikler. Fordi de er så små og vanskelige å måle, har kunnskapen



1 Figuren viser bakkenære partikkelkonsentrasjoner simulert med de nye modellformuleringene i NorESM. Konsentrasjonene er høyest i områder med store menneskeskapt utslipp, f.eks. Kina, østlige USA, India, men også i områder med store naturlige utslipp som f.eks. Amazonas og sentral-Afrika (i rødt). Her er partikkelkonsentrasjonene ca. 1000 ganger så store som i polområdene (i blått). Figuren viser simulert årsmidlet konsentrasjon av partikler nær bakken. Enhet: antall per kubikkcentimeter (cm<sup>-3</sup>). Fra Makkonen og medarbeidere (2014).

om dannelsen av partiklene og hvordan de vokser vært mangelfull. Partiklene vokser ved at gasser kondenserer på dem. Den nye kunnskapen om hvordan partiklene dannes og vokser er i ferd med å bli implementert i klimamodellen NorESM.

### Nye formler beskriver ny viten

I NorESM er det blitt utviklet en ny beregningsmodul for partikkeldannelse og -vekst. Denne modulen består av tre komponenter:

#### Dannelse av nye partikler

Både laboratoriestudier og feltmålinger tyder på at svovelsyre-gass (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) spiller en avgjørende rolle i denne fasen. Derfor blir nå konsentrasjonen av denne gassen beregnet på en mer nøyaktig måte enn før ut fra kilder, sluk og transport.

#### Dannelse av sekundære organiske partikler

Den nye beregningsmetoden tar spesielt hensyn til naturlige utslipp av forløpgergasser fra planter. Disse utslippene er i sin tur beregnet ved hjelp av vegetasjonsmodulen i NorESM.

#### Videre vekst av nydannede partikler ved kondensasjon

Mens svovelsyre-gassen er av avgjørende betydning for dannelsen av nye 2 nanometer partikler er det kondensasjon av diverse organiske gasser som bidrar mest til den videre veksten opp til 5-50 nanometer i diameter. Når vi tar hensyn til dette i våre beregninger får vi vekstrater av de små partiklene som stemmer godt overens med målinger.

I figuren som viser utregningene fra den nye modulen i NorESM, ser vi store geografiske variasjoner som bl.a. henger sammen med variasjoner i menneskeskapt og naturlige utslipp. Men hvor realistiske er disse modellresultatene, og hvordan varierer partikkelkonsentrasjonen med høyden? Og, hva er de relative bidragene fra forskjellige partikkeltyper? Disse spørsmålene er grundig behandlet i en artikkel av Risto Makkonen og medarbeidere (2014). Her vises omfattende sammenligninger mellom modellresultater og bakkemålinger samt flymålinger under forskjellige himmelstrøk. Et hovedresultat er at de nye modell-simuleringene gir forbedret overensstemmelse med observasjoner.

Kilde: Makkonen, R., Ø. Seland, A. Kirkevåg, T. Iversen, og J. E. Kristjánsson, 2014: Evaluation of aerosol number concentrations in NorESM with improved nucleation parameterization. Atmos. Chem. Phys., 14, 5127-5152.



# HAVET

## Havsirkulasjon og det store karbonlageret

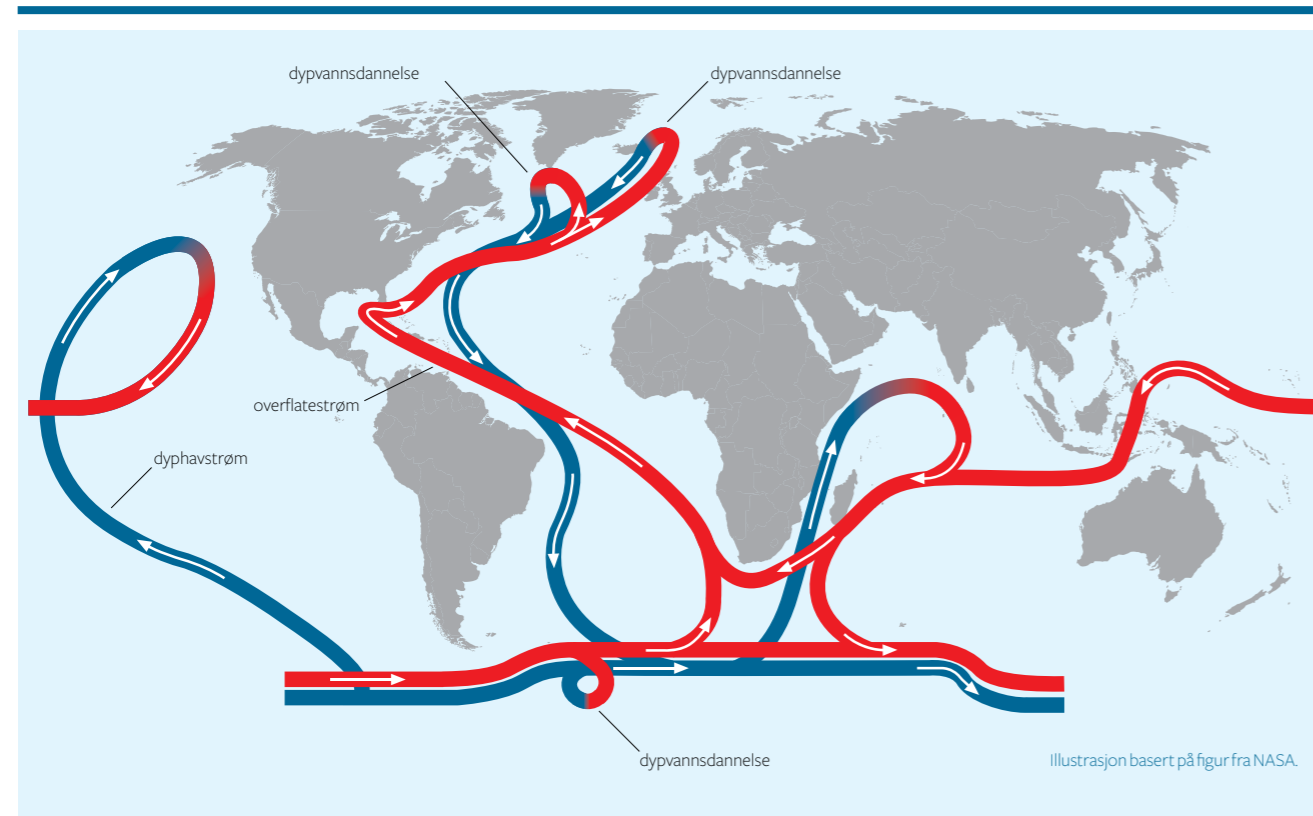
Havets bevegelser gjennom strømmer og blanding av vannmasser har mye lengre tidsskalaer enn atmosfæren. Tidsskalaen for den storstilte omveltningen i havet er rundt 1500 år.

Havet er for det meste lagdelt, der havstrømmer drives av vind og tetthetsvariasjoner på grunn av endringer og ulikheter i sjøtemperatur og saltholdighet. Kun på et fåtall steder finner det sted prosesser der vann på årlig basis forflytter seg fra overflaten og ned til flere kilometers dyp. Dette ser vi i områder der det blir produsert dypt vann, noen steder i det nordlige Nord-Atlanteren og noen steder i Sørishavet.

Sjøvann har en mye større varmekapasitet enn luft. Derfor tar varmeopptaket i havet lang tid, men varmen blir også værende over lang tid. Det som da er menneskeskapt endringer i havets klima kan derfor ikke enkelt endres tilbake. Havets varmetransport fra tropene til høye

breddegrader er stor, og når det produseres dypt vann ved høye breddegrader, blir varme frigitt til atmosfæren og havet nedkjølt. Eventuelle endringer i varmetransporten mot polene vil ha store konsekvenser også for lufttemperaturen ved overflaten, særlig i det nordlige Europa.

Det er forventet at havsirkulasjonen vil bli noe mer varierende under en global oppvarming. Det forventes en avtagning i produksjonen av dypt vann, i tillegg til oppvelling av gammelt vann. Når gammelt vann flyter opp til overflaten, bringer det med seg store mengder nærings-salter. Dermed vil endringer i havsirkulasjonen også gi endringer i økosystem og fiskeri.



## Dybde eller tetthet

Havkomponenten i NorESM tilhører «state of the art» innen globale havklimamodeller.

Et fundamentalt valg i havmodellering er hvilken vertikal koordinat man skal benytte. Innen global havklimamodellering har det mest vanlige valget vært å benytte dybde som vertikal koordinat. Havmodellen i NorESM benytter derimot potensiell tetthet som vertikal koordinat. En av fordelene med dette valget har vi sett i EarthClim der de første steg i å tilpasse havmodellen til å håndtere vekselvirkning med iskapper har blitt gjort til slutt. Dette er et ledd i utviklingen mot at NorESM skal kunne simulere massebalansen i iskapper som er viktig for å forbedre framskrivning av havnivå og for bruk av modellen i fortidsstudier.

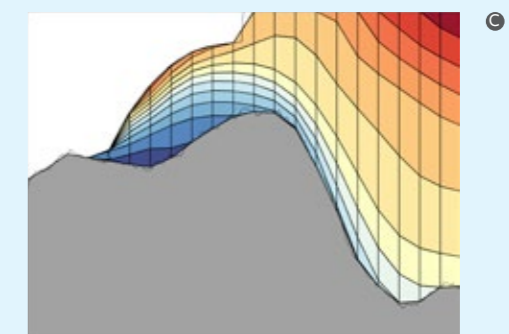
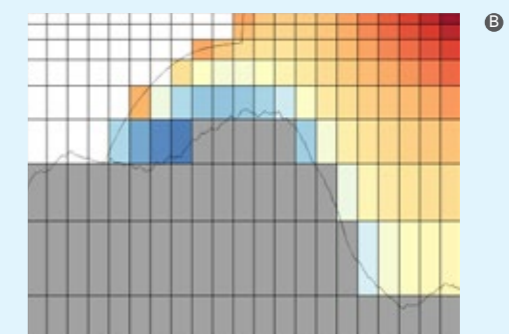
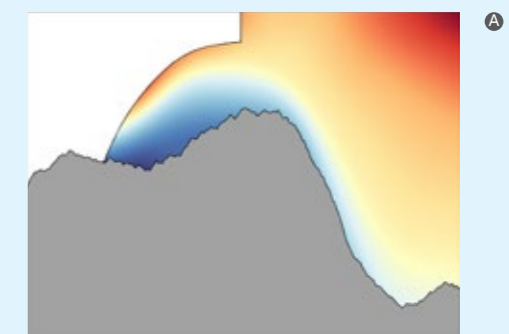
I Figur A ser vi et vertikalt snitt som viser en typisk situasjon hvor en iskappe møter havet. Figur B og C viser hvordan denne situasjonen er representert med henholdsvis dybde- og tetthetskoordinat. I denne situasjonen mener vi at en modell med tetthetskoordinat er svært velegnet siden beskrivelsen av en kompleks geometri kan gjøres relativt nøyaktig og at en bevegelig grense mellom isbrem og hav er forholdsvis enkel å håndtere. Figuren viser også en annen fordel med tetthetskoordinat over dybdekoordinat, nemlig i beskrivelsen av tungt vann som renner over terskler for deretter bli akselerert mot det dypet der vannmassen har nøytral oppdrift. I EarthClim har vi oppnådd at havmodellen kan akseptere tilstedeværelsen av en isbrem og realistisk simulere sirkulasjonen under en statisk isbrem.

Med en gitteroppløsning som er benyttet i dagens jordsystemmodeller, vil en rekke viktige prosesser ikke bli tilfredstillende beskrevet med de grunnligningene for væskedynamikk og termodynamikk. Slike prosesser blir håndtert i modellen med såkalte parameteriseringer. Dette er metoder som ikke baserer seg på de grunnligningene, men hvor en kombinasjon av fysisk forståelse av prosessen og observerte egenskaper inngår. Ofte introduseres parametere som man ikke kjenner nøyaktig verdi på og som gjerne er problemavhengige, som for eksempel gitteroppløsning. Disse parameterene justeres for å skape en mest mulig realistisk simulering og er en tidkrevende prosess i jordsystemmodellering.

Dersom vi tenker at vannmassene i havet er lagdelt som i Figur C, så blandes vannmassene mer langs lagene enn på tvers av dem. Den svake, men meget viktige, vertikale blandingen på tvers av lagene er spesielt utfordrende å modellere. Vi ser at modeller med tetthetskoordinater er spesielt velegnet til å beskrive den enorme kontrasten mellom blandingsprosesser på langs og på tvers av lag. I EarthClim har vi arbeidet med å forbedre parameteriseringen av sistnevnte ved å inkludere en mer avansert turbulensmodell og å endre bakgrunnsblanding på høyre breddegrader.

I CMIP5 var NorESM kun en av tre modeller som benyttet tetthet som vertikal koordinat. Noen fordeler med dette valget er nevnt over, men det er også utfordringer som det jobbes kontinuerlig med. De siste årene har havmodeller med tetthetskoordinat modnet betraktelig og nyere modellsammenligninger viser at havkomponenten i NorESM tilhører «state of the art» innen globale havklimamodeller.

MATS BENTSEN



Figuren viser et vertikalt snitt av en typisk situasjon der en iskappe møter havet. Iskappen er i hvitt, mens havet er i blå og rød farge for henholdsvis tunge og lette vannmasser. I A vises en kontinuerlig fremstilling, mens B viser hvordan dette kommer fram i en modell med dybdekoordinat og C i en modell med tetthetskoordinat.

# BIOGEOKJEMISKE KRETSLØP

Lenge var beregnede klimavariasjoner i modeller stort sett forbundet med endringer i fysiske variabler som solinnstråling, temperatur, nedbør og isdannelse og ismelting. Klimaforskning de siste tre tiårene har vist at det er essensielt å inkludere også biologiske, kjemiske og økosystemprosesser når man skal kvantifisere Jordens klima og klimavariasjoner.

Biogeokjemi er vitenskapen rundt prosessene som styrer de kjemiske forholdene og sammensetning av det naturlige miljøet i jordens overflatereservoarer og utveksling mellom disse. Biogeokjemi studerer spesielt kretsløpet for kjemiske element som omfatter vekselvirkninger med levende organismer. Typiske eksempler er kretsløpet til karbon, nitrogen, fosfor og oksygen. Disse kretsløpene er koblet til hverandre og er gjensidig avhengige av hverandre. *Ved å inkludere biogeokjemiske prosesser i klimamodeller endrer man disse til å bli jordsystemmodeller, altså mer komplette modeller for klimaprosesser på jorden.*

## Havets karbonkretsløp

Menneskeskapt utslipp av karbondioksid fra forbrenning av fossilt materiale, endringer i bruk av land, samt sementproduksjon er de viktigste bidrag til pågående og mulige framtidige klimaendringer. Mens CO<sub>2</sub> i atmosfæren er kjemisk stabilt, er CO<sub>2</sub> i havet via gassutveksling svært reaktivt. Dette gjelder også for biosfæren på land, der fotosyntesen i planter og jordsmonn får karbondioksid til å reagere raskt. I havet er CO<sub>2</sub> i høy grad uorganisk oppløst i karbonat og bikarbonat, noe som forklarer den store kapasiteten som sjøvann har til å ta opp karbon fra atmosfæren.

Marine organismer kontrollerer karbonkretsløpet gjennom produksjon og oppløsning

av biologisk generert materiale, slik som næringsstoffer som nitrogen og fosfor, samt oksygen. Havets sirkulasjon transporterer biogeokjemiske komponenter til dyphavet på høye breddegrader i områder med produksjon av dypt vann. Det dype vannet sirkulerer fra Nord-Atlanteren og Sørishavet til Stillehavet og Det indiske hav. I Stillehavet, Det indiske hav, samt Atlanterhavet ved ekvator, begynner vannet sakte å stige oppover igjen mot overflaten. Når vannet har steget til overflaten, flyter det igjen som varm overflatestrøm tilbake til områdene i Nord-Atlanteren og Sørishavet der det igjen blir produsert dypt vann. Karbonet som blir tilført fra menneskelige kilder, akkumuleres i havoverflaten. Transporten til dypere lag følger mønsteret som vist i figuren på side 10.

## Biosfæren på land

Karbonkretsløpet på land er dominert av biologisk produksjon gjennom fotosyntesen, og ved oppløsning av organisk materiale som blader, tre og røtter. Organisk karbon i jordsmonnet er sensitivt til endringer i temperatur og nedbør. Smelteprosesser i områder med permafrost kan potensielt medføre store utslipp av drivhusgasser. Moduler for landoverflaten i jordsystemmodeller tilføyer prosesser som simulerer samtidig for varme, vann og kjemisk massebudsjett.

## Vekselvirkninger mellom klima og karbonkretsløpet

Ved å inkludere biogeokjemiske prosesser i jordsystemmodeller, kan man også simulere vekselvirkninger mellom klima og biogeokjemi. Endringer i temperatur og endringer i utvekslingen av drivhusgasser mellom atmosfæren og havet og mellom atmosfæren og landbiosfæren, kan øke atmosfærens temperatur ytterligere.

Økende mengde CO<sub>2</sub> og endringer i det globale nitrogen- og fosforbudsjettet (for eksempel ved bruk av kunstgjødse) påvirker videre kjemiske endringer i mengden drivhusgasser og videre tilbakekoblinger i det fysiske

klimaet. Endringer i vegetasjon kan føre til endring i temperatur og luftfuktighet og som igjen påvirker det fysiske klimaet.

## Påvirkning og stressfaktorer

Opptak av menneskeskapt CO<sub>2</sub> i havet har en negativ bivirkning ved havforsuring. Gjennom havforsuring blir sjøvannet mindre alkalisk, det vil si at pH-verdien synker, samt at metningen av karbonat synker. Koraller og marine organismer med kalkholdige skjellmaterialer lider under havforsuring, dersom de ikke klarer å tilpasse seg. På landjorden kan endringer i temperatur og nedbør påvirke endringer i vegetasjon og regionale forandringer av arter. Slike påvirkninger kan til en viss grad beregnes med biogeokjemiske komponenter i en jordsystemmodell.

De samlede effektene av flere stressfaktorer for miljø og klima er vanskelige å tallfeste ut fra isolerte studier. Globale modeller tillater til en viss grad noe eksperimentering rundt mulige utviklingsbaner for parallelle påvirkende faktorer. Ambisiøse mål for utslippsreduksjon av drivhusgasser må på plass dersom uheldige effekter av oppvarming, havforsuring, vegetasjonsendringer og endringer for matvaresikkerhet skal unngås.

*Biogeokjemiske moduler i jordsystemmodeller gir derfor nyttige retningslinjer for beslutningstakere ettersom de involverer endringer i økosystemet og kjemiske interaksjoner ved tallfesting av klimaendringer, og de gir mulighet for å koble til klimatiltak og muligheter for utslipp.*

NorESM bruker en havmodul for biogeokjemi som opprinnelig ble utviklet ved Max Planck Institut for meteorologi, i Tyskland, i tillegg til en modell for biosfæren på land utviklet ved NCAR, USA.



Isfjell ved Eqip Sermia, øst-Grønland, august 2014.  
FOTO ISELIN MEDHAUG



# NorESM I EN STØRRE SAMMENHENG

Sentralt for internasjonale klimaevalueringer er CMIP-studiene, «Climate Model Intercomparison Project». CMIP5, den femte CMIP-studien i rekken, var det viktigste grunnlaget for den femte hovedrapporten fra FN's klimapanel (IPCC AR5) som kom i 2013. Resultater fra NorESM var med i CMIP5, og norske forskere utvikler nå resultater for CMIP6.

I noen typer modelleksperimenter baserer man seg på en beskrevet utvikling av årlige utslippsmengder av klimagasser og aerosoler, mens man i andre i stedet beskriver en utvikling av klimagassenes konsentrasjoner i atmosfæren. Framskrivninger av forskjellige framtidsscenarier inkluderer idealiserte studier av fysiske og biogeokjemiske vekselvirkninger i jordsystemet. Samtidig kjører man også scenarier basert på spesifikk framskrivning av sosioøkonomisk utvikling i verden. Resultatene fra modelleksperimentene lagres systematisk i dedikerte databaser.

## Beregne klimafølsomhet

Etter at eksperimentene er kjørt, blir modellresultatene analysert. Fra databasene kan man velge ut resultater, slik som eksempelvis gjennomsnittlig (global) endring, regionale avvik og statistikk over ekstreme hendelser. Siden klimamodellene starter fra førindustriell tid, kan man sammenligne resultatene fra modellene med instrumentelle målinger av ulike klimavariabler som for eksempel temperatur, nedbør og vindfelt.

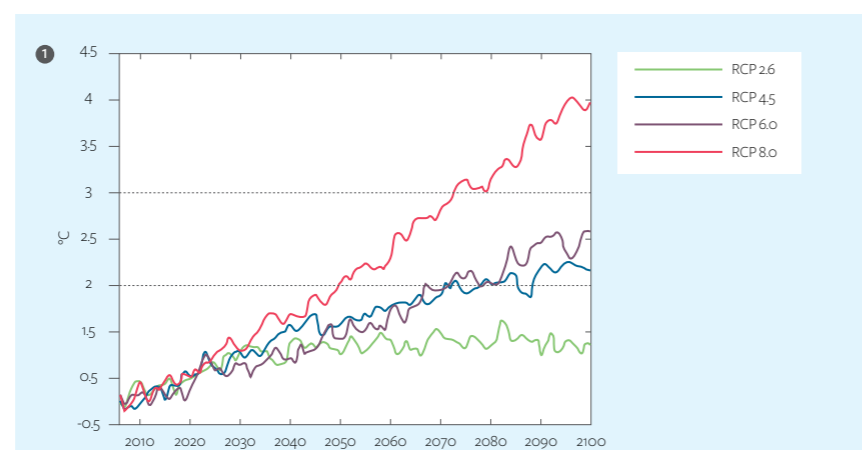
Den samlede klimaresponsen beregnes som følge av en gitt mengde drivhusgasser, inklusive alle forsterkende og dempende tilbakekoblingsmekanismer, brukes til å beregne jordens «klimafølsomhet» – altså endringen i global middeltemperatur fra førindustriell tid som en konsekvens av spesifikke drivhusgassutslipp.

## Ulike utslippsscenarioer

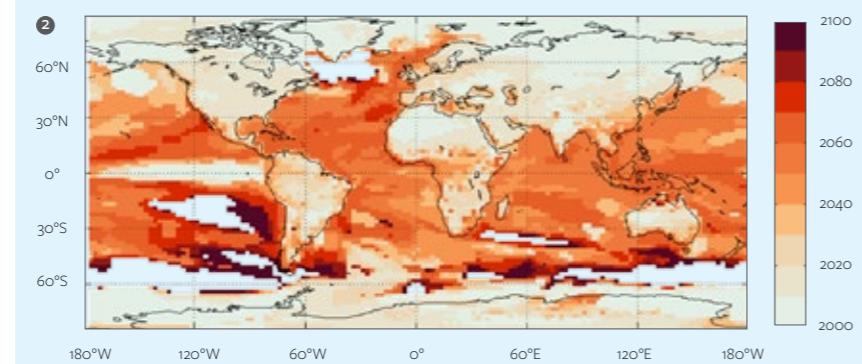
I internasjonale klimamodeller benytter man seg av fire ulike utslippbaner: Et scenario med høye utslipp RCP8.5, et med lave utslipp RCP2.6 og to med middels utslipp RCP4.5 og RCP6.0. Her står RCP for «Representative concentration pathways» og tallene viser hvor mye varme i Watt per kvadratmeter, som skyldes menneskeskapt endring av atmosfærens sammensetning av drivhusgasser og partikler i år 2100.

Beregninger med en versjon av NorESM uten kobling til karbonkretsløpet, vises i figur 1. Kun ett scenario (RCP2.6), som antar betydelige reduksjoner i drivhusgassutslipp, gir en mindre oppvarming enn maksimalt 2° i forhold til førindustrielt nivå. Dagens mest realistiske utvikling er scenariet med de største utslipp av drivhusgasser (RCP8.5), også kalt «business as usual», er nærmest dagens utvikling. I dette scenariet (rød linje i figuren) er 2°C allerede overskredet i nordlige polarområdene (se figur 2).

*Klimafølsomheten beregnet med NorESM er forholdsvis moderat sammenliknet med andre klimamodeller. I modellkjøringer som også inneholder tilbakekoblingen med karbonkretsløpet, vil temperaturøkningen i scenariene bli større.*



Figur 1 Estimerte år for oppvarming av overflatetemperatur, regnet i forhold til gjennomsnittet i førindustriell tid (1850-1900). De fire fargene viser ulike scenarier. Vi ser at vi kun holder oss under to grader oppvarming i det grønne scenariet, et scenario med betydelig mindre drivhusgassutslipp enn vi har i dag. Med dagens utslipp har vi en oppvarming tilsvarende den røde kurven, som er beregnet til å passere to grader rundt midten av århundret. Kilde: I. Medhaug et al, personlig kommentar.



Figur 2 Estimerte år for når ulike områder på jorden overstiger to grader oppvarming, basert på en utslippsmengde av drivhusgasser som ligner dagens nivå (RCP8.5-scenariet). Vi ser at i de nordlige områdene har vi allerede oversteget to grader i forhold til førindustriell tid. Kilde: I. Medhaug et al, personlig kommentar.

## Framtidig utvikling av NorESM

Vitenskapen om det fysiske jordsystemet og klima på jorden utvikler seg hurtig. Jordsystemmodeller som NorESM, trenger kontinuerlig utvikling og vedlikehold. Ny kunnskap og nye prosesser blir jevnlig publisert i faglitteraturen og dette må vurderes inkludert i modellene. Samtidig må modellenes romlige oppløsning økes for å ta bedre hensyn til ulikheter i overflatens og havbunnens topografi – innenfor definerte geografiske områder, samt beskrivelsen av de relevante dynamiske prosessene i atmosfæren og havet. Underliggende numeriske metoder for å løse de matematiske ligningene som NorESM er basert på må stadig utvikles, og metoder for å akselerere og optimalisere beregningene på tilgjengelige supercomputerne må eksperimenteres med.

Videre er det nødvendig å utvikle konseptuelle studier for å øke forståelsen av koblingene som knytter de forskjellige prosessene i klimasystemet sammen. Basert på resultater fra EarthClim utvikler nå norske forskere den neste generasjonen av NorESM i prosjektet EVA – finansiert av Norges forskningsråd. Denne nye generasjonen av NorESM vil bli testet og evaluert mot observasjonsdata som beskriver klimatiske trender, men også variasjoner fra år-til-år og mellom sesonger. Resultatene vil bli gjort tilgjengelige i åpne databaser.

Klimaservice er en tjeneste som er i hurtig utvikling og som forventes å gi støtte og råd til beslutningstakere, samfunnsaktører og andre interesserte som alene ikke besitter ekspertise til å hente og analysere relevant informasjon fra de enorme mengdene data som modeller av typen NorESM produserer. Norske forskeres arbeid er en integrert del av et internasjonalt nettverk av eksperter som deler, ideer, data og modellkomponenter.



Det norske jordsystemmiljøet er takknemlig for finansieringen fra Forskningsrådet og andre finansieringskilder slik som EUs rammeprogram for forskning og NordForsk.

Vi ønsker at så vel eksperter, samfunnsaktører som offentligheten vil ha nytte av kunnskapen NorESM har utviklet.

---