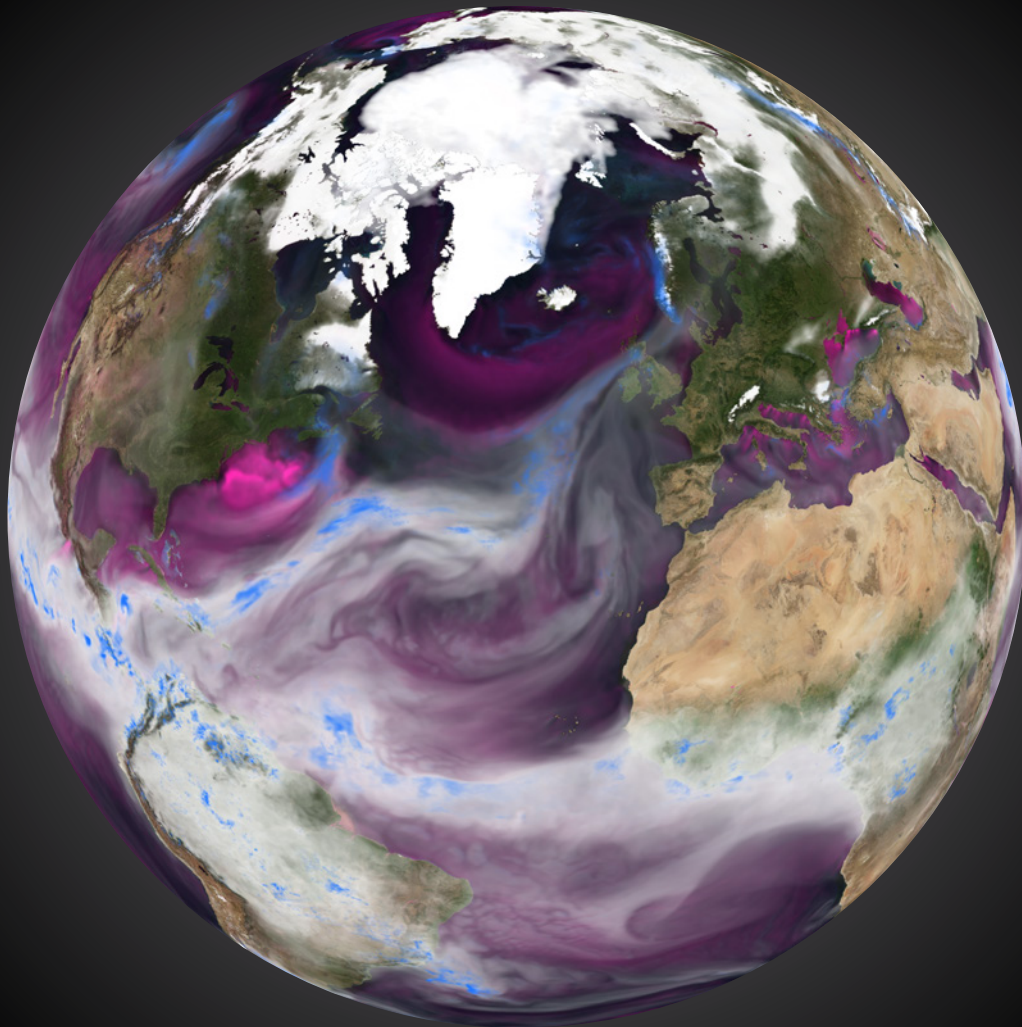

NorESM – Ryggraden i norsk klimaforskning

Oversikt og sammendrag av prosjektresultater støttet av Norges forskningsråd



Forskning og utvikling
støttet av

Forskningsrådet

Denne brosjyren er finansiert av Norges forskningsråd gjennom KLIMAFORSK-prosjektet EVA – Earth system modelling of climate Variations in the Anthropocene (P.nr. 229771).

Varighet

2014–2018

Prosjektpartnere

Universitetet i Bergen – administrativt ansvarlig
Uni Research AS (NORCE), Bergen
Bjerknessenteret for klimaforskning, Bergen
Meteorologisk institutt (MET), Oslo
Universitetet i Oslo
Norsk institutt for luftforskning, Kjeller
CICERO senter for klimaforskning, Oslo
Nansen senter for miljø og fjermmåling, Bergen

Bidragstere til brosjyren

MATS BENTSEN — forsker, NORCE og Bjerknessenteret
JENS BOLDINGH DEBERNARD — forsker, Meteorologisk institutt
MASSIMO CASSIANI — seniorforsker, NILU
HELGE DRANGE — professor ved UiB og Bjerknessenteret
SABINE ECKHARDT — forsker, NILU
LISE SELAND GRAFF — forsker, Meteorologisk institutt
CHRISTOPH HEINZE — professor ved UiB og Bjerknessenteret
TROND IVERSEN — forskningsprofessor, MET og professor II ved UiO
INGER HELENE KARSET — stipendiat, UiO
ALF KIRKEVÅG — forsker, Meteorologisk institutt
OSKAR LANDGREN — forsker, Meteorologisk institutt
CAMILLE LI — professor ved UiB og Bjerknessenteret
DIRK OLIVIÉ — forsker, Meteorologisk institutt
MICHAEL SCHULTZ — forskningsprofessor, MET og professor II ved UiO
JÖRG SCHWINGER — forsker, NORCE og Bjerknessenteret
SVETLANA SOROKINA — stipendiat, UiB og Bjerknessenteret
ANDREAS STOHL — seniorforsker, NILU
JERRY TJIPUTRA — forsker, NORCE og Bjerknessenteret

GUÐRUN SYLTE — kommunikasjonsleder, Bjerknessenteret
ANDREAS OPSVIK — kommunikasjon, Bjerknessenteret
ELLEN VISTE — kommunikasjon, Bjerknessenteret

Layout

HALTENBANKEN

Forsideillustrasjon

MATS BENTSEN

Print

BODONI AS — bodoni.no



INNHold

4	NorESM: Et laboratorium for klimaforskning
7	Atmosfæren
8	Aerosoler i NorESM
14	Havet
15	Biogeokjemiske kretsløp
19	Modellvalidering
20	Framtidig utvikling av NorESM
22	Publikasjonsliste for EVA-prosjektet

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 landbiosfæren; utstrekning og tykkelse til snø og is på land og på havet.

Modellen er utviklet gjennom et bredt samarbeid mellom alle de største klimamodelleringsmiljøene i Norge. Hovedansvarlig for NorESM er Bjerknæssenteret og Meteorologisk institutt.

Prosjektsamarbeid

Utviklingen av den globale jordsystemmodellen NorESM er hovedsakelig basert på forskning og utvikling i en rekke nasjonalt koordinerte prosjekter finansiert av Norges forskningsråd:

RegClim, 1997–2006

NorClim, 2007–2011

EarthClim, 2011–2014

EVA (Earth system modelling of climate Variations in the Anthropocene), 2014–2018

INES – Infrastructure for Norwegian Earth System modelling, 2018–2026

Arbeidet med NorESM1 og NorESM2 har gjort det klart at man trenger langsiktig støtte til kontinuerlig utvikling og vedlikehold av modellsystemet. Dette er nødvendig for at systemet kan brukes som laboratorium for forskning, forskerutdanning og til undervisning.

Forskningsrådets infrastrukturprosjekt INES – Infrastructure for Norwegian Earth System modelling – vil være det sentrale virkemiddel for den videre utvikling av NorESM til disse viktige formålene.

NorESM: Et laboratorium for klimaforskning

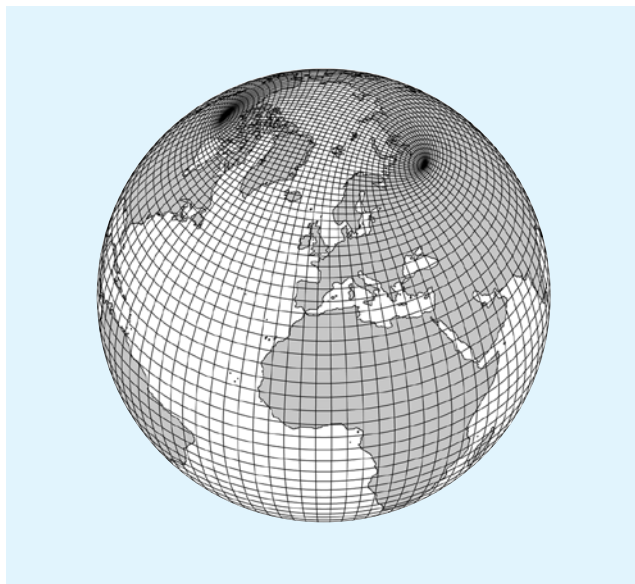
Jorda i et rutenett

En klimamodell er et laboratorium for beregninger med kraftige datamaskiner.

En jordsystemmodell etterligner den virkelige verden i et nettverk bygget opp av bokser. I boksene beskrives fysiske, kjemiske og biologiske egenskaper med tall. Matematiske ligninger beskriver hvordan egenskapene kan forplante seg med vind, havstrømmer, stråling og blanding over alle delene av jorda. Boksene kan sammenlignes med piksler i et digitalt fotografi som man ønsker skal være så små som mulig. Jo flere og mindre bokser man har, jo bedre blir bildet. Samtidig øker både filstørrelser og bruken av regnekraft når det blir mange bokser i modellen.

Figuren til høyre er et «tripolart gitter» som er brukt i havkomponenten i den nye NorESM2. Legg merke til at havområdene i Arktis og like sør beskrives spesielt nøyaktig med dette gitteret.

Kobleren er den sentrale «hjernen» i modellen. Overføring



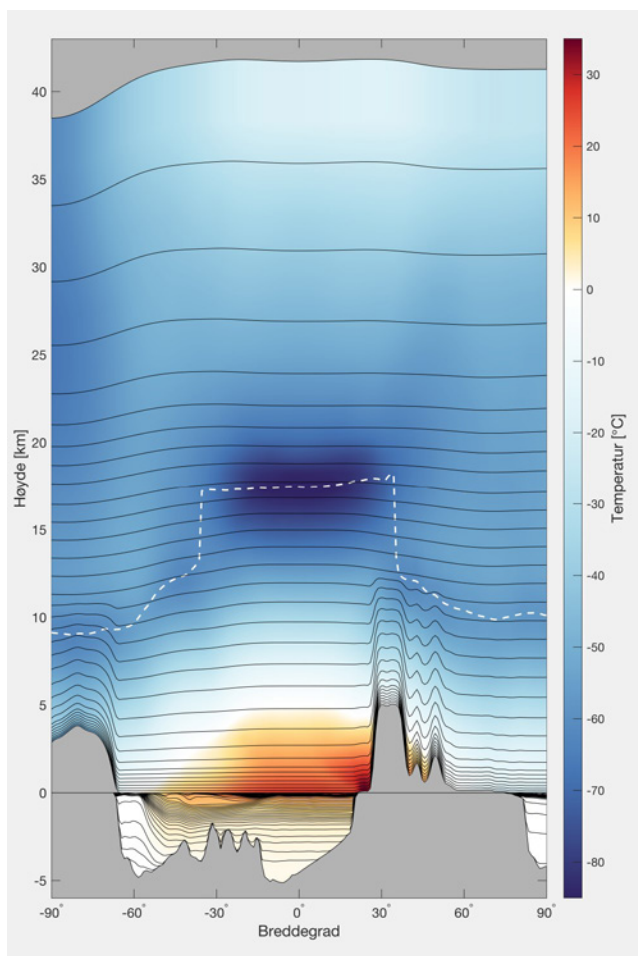
av energi, bevegelse, fuktighet og kjemiske komponenter mellom jordsystemets hoveddeler – atmosfæren, havet, havis og landjorda med vegetasjon – styres i modellen av kobleren. I en jordsystemmodell er det biogeokjemiske kretsløp med beregning av karbonets syklus representert. I alle klimamodeller er ferskvannets kretsløp særdeles viktig, og dermed aerosolpartikler, skyer, nedbør, is- og snødekke, ferskvann på land og avrenning til havet.

Figuren til venstre viser et tverrsnitt gjennom atmosfære og hav i NorESM2 for april i en beregning av førindustrielt klima (1850). Tverrsnittet går fra pol til pol ved lengdegraden 87,5° øst. I sør ser vi Antarktis ruve over havnivået, deretter følger Sørishavet og Det indiske hav mellom 65° sør til 20° nord. Mellom 20° nord og 80° nord ligger det eurasiske kontinent der vi kan se de høye fjellene i Himalaya. Helt i nord er Nordishavet. Fargene viser temperaturen i atmosfære og hav, mens de tynne linjene avgrensner modellens lag.

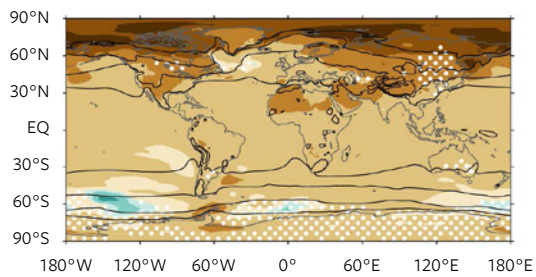
Atmosfæren i modellen strekker seg cirka 40 kilometer over bakken og er delt inn i 32 lag. De nederste lagene følger terrenget, mens skillene mellom lagene høyere oppe avhenger av trykket. Den hvite stiplede linjen viser høyden der temperaturen skifter fra å avta til å stige med høyden. Dette markerer skillet mellom troposfæren og stratosfæren. De fleste lagene i modellen er i troposfæren og nedre del av stratosfæren.

I havmodellen er det 53 lag og den vertikale koordinaten er tetthet. Hvert lag har konstant tetthet som er en fordel siden blanding av havvann hovedsakelig skjer langs flater med konstant tetthet, og at man får høy nøyaktighet der det er store variasjoner i vannets tetthet. De to øverste lagene har variabel tetthet for å lette beskrivelsen av prosesser som bidrar til utveksling med atmosfæren. At man får liten nøyaktighet der tetthetsvariasjonen er liten, sees i Sørishavet og Det arktiske hav. Derfor må lagene velges med omhu.

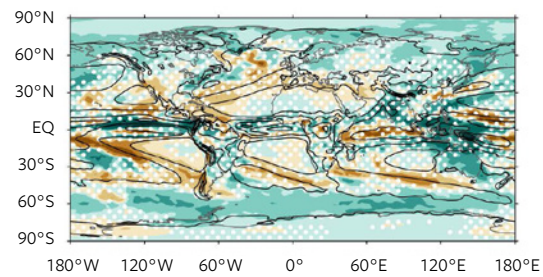
(Mats Bentsen)



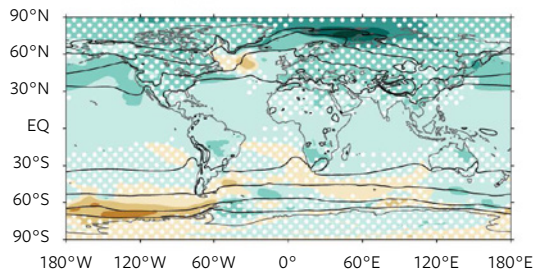
a) Endring i T_{2m} grunnet drivhusgasser



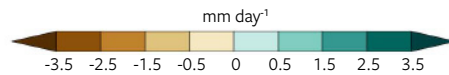
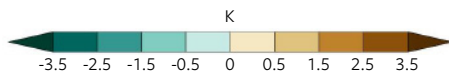
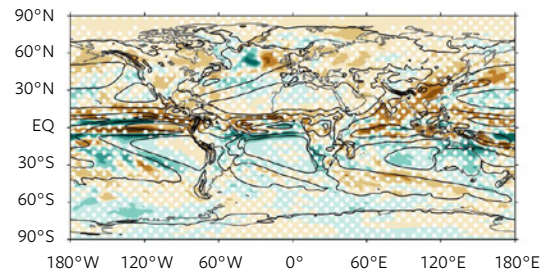
b) Endring i nedbør grunnet drivhusgasser



c) Endring i T_{2m} grunnet aerosoler



d) Endring i nedbør grunnet aerosoler



📌 Klimaendringer fra førindustrielle forhold i 1850 til perioden 1980-2009 som skyldes endringer i drivhusgasser i lufta (øverst) og luftas innhold av aerosolpartikler (nederst), beregnet med NorESM1 med ~ 1 grads gitteravstand. Til venstre vises endret temperatur ($^{\circ}\text{C}$) to meter over bakken, og til høyre endret nedbør (mm/døgn). Felter med hvite prikker viser hvor endringene er for små til å være statistisk signifikant forskjellig fra naturlige variasjoner (5% nivå).

Jordsystemmodell

Ved å inkludere biogeokjemiske prosesser i klimamodeller blir de jordsystemmodeller, som er mer komplette.

Jordsystemmodellene beregner sitt eget klima

Førindustriell beregning. Først beregnes klimaet for en antatt energibalans med utgangspunkt i observasjoner av jordsystemet i tiårene omkring 1850. Modellens klima i denne balanserte tilstanden beregnes over minst 500 år for å beskrive naturlige klimavariasjoner.

Historisk beregning. Dernest beregnes utviklingen over historisk tid fram til vår tid ved å starte fra tilfeldig valgte tilstander i den førindustrielle beregningen, og ta hensyn til det man vet om solstråling, vulkanisme, drivhusgasser og aerosoler fra 1850 til i dag. Beregningene for historisk periode kompletteres med beregninger der naturlige og menneskeskapte pådriv vekselvis holdes konstant. Slike beregninger bidrar til å forklare hva endringene over historisk periode kan skyldes (se figuren).

Projeksjoner for framtidig klimautvikling tar utgangspunkt i antatte scenarioer for prosesser som påvirker framtidens klima. Ofte lages flere beregninger parallelt ved å starte fra forskjellige tilstander i det førindustrielle modellklima. Dette gir grunnlag for å skille trender fra naturlige variasjoner.

Drivhusgasser. Karbondioksid (CO_2), metan (CH_4), lystgass (N_2O), aerosolpartikler og ozon (O_3) påvirker klimaet ved at solstråling reflekteres og absorberes og ved at varmestråling fra jorda absorberes. CO_2 , nitrogenforbindelser og ozon påvirker også veksten av vegetasjon. Direkte inngrep på landjordas beskaffenhet og skogbranner er også faktorer som påvirker jordas klima.

Biogeokjemi. Fysiske, kjemiske og biologiske klimaprosesser er nær knyttet til hverandre. Dette gjelder særlig karbonets kretsløp. Ved å inkludere biogeokjemiske prosesser i klimamodeller blir de jordsystemmodeller, som er mer komplette modeller for jordas klimaprosesser. Havet og landjorda kan ta opp noe CO_2 , som er den viktigste kilden til menneskeskapte klimaendringer.

Tilbakekoblinger. Direkte påvirkninger av jordas energibalans kan forsterkes eller svekkes når klimasystemet endrer seg. Dette er tilbakekoblinger. Vanndamp er en kraftig drivhusgass som beregnes å forsterke påvirkningene. Skyer kan virke i begge retninger og er en viktig kilde til usikkerheter i klimamodellens beregning av det globale klima. Andre kilder til tilbakekoblinger er jordoverflatens beskaffenhet (is, snø, vegetasjon). Noen tilbakekoblinger fryktes å kunne gi opphav til irreversible klimaendringer («vippepunkter»), men deres betydning er ennå usikre.

Klimasystemets treghet. De ulike komponentene i klimasystemet endrer seg hele tiden. Mens endringer og bevegelser i atmosfæren er raske og flyktige, tar endringer i havet mye lengre tid. Havet har tatt opp omtrent en tredel av de globale CO_2 -utslippene siden den industrielle revolusjon, og det aller meste av varmeoverskuddet som skyldes økt drivhuseffekt siden førindustriell tid, er nå lagret i havet. Havet er en buffer mot global oppvarming over noen tiår, men en endring i havets temperatur varer lenge og kan påvirke atmosfærens temperatur på svært lang sikt.

Hva skiller NorESM fra andre klimamodeller?

NorESM er bygget på en global klimamodell (CESM) utviklet ved en rekke forskningsinstitusjoner i USA, ledet av National Center for Atmospheric Research (NCAR) i Boulder. Dette er en modell som brukes av flere klimamodelleringscentre i verden.

Havet og karbonets kretslop. NorESM skiller seg fra CESM ved at den bruker en avansert havmodell som i stor grad er utviklet ved Bjerknessenteret. Modellen beregner havstrømmer og deres transport av vann, varme og salt, og er basert på ideene i MICOM-modellen fra Universitetet i Miami, USA. Havmodellen har også en avansert modul for beregning av biogeokjemiske prosesser i havet. Det er viktig for karbonets kretslop. Denne modulen er basert på den tyske HAMOCC-modellen fra Max Planck institutt for meteorologi.

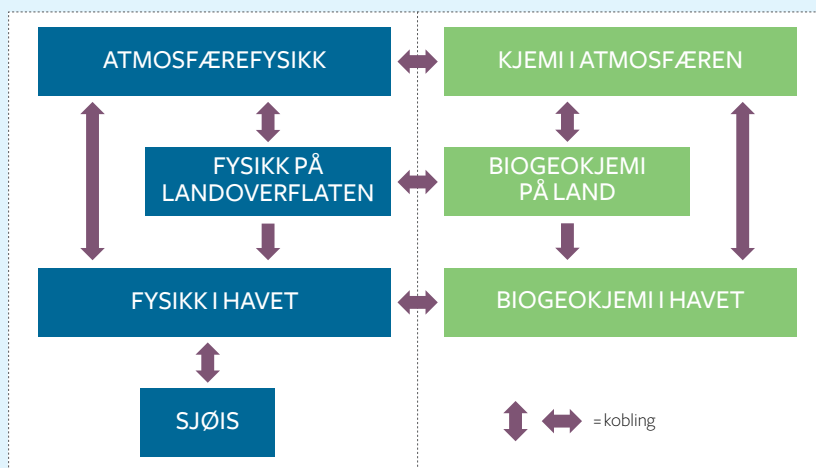
Aerosoler og atmosfærekjemi.

NorESM avviker også fra CESM ved at den bruker en egenutviklet modul for avansert og detaljert beskrivelse av naturlige og menneskeskapt partikler i luft, såkalte aerosoler, og hvordan disse påvirker solstråling, skyer og nedbør. I NorESM2 kan disse beregningene kobles til en modul for avansert atmosfærekjemi som en opsjon. Dette arbeidet utføres i hovedsak ved Meteorologisk institutt og ved Universitetet i Oslo. Aerosolene består av havsalt, støv, svovel, sot og organisk materiale. En betydelig del av usikkerheten i klimaberegninger med alle modeller er knyttet til effekten av aerosoler på solstråling og skyer.

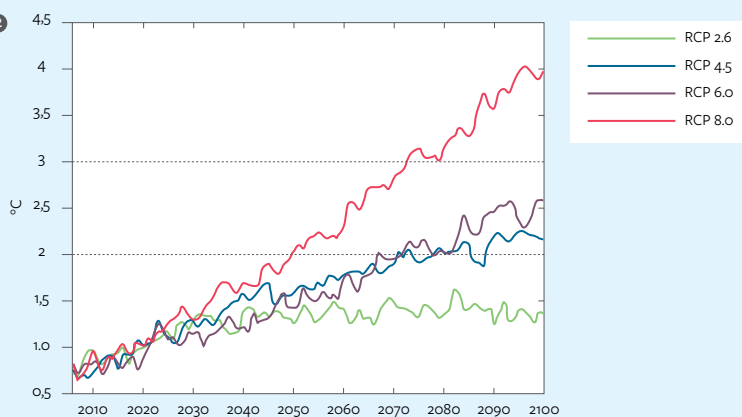
NorESM har også gitt egne bidrag til beregningene av sjøis og hvordan varme transporteres gjennom is når den dekkes av snø. I den siste versjonen, NorESM2, er det gjort endringer i atmosfærekomponenten for å bedre bevarings-egenskapene for global energi og spinn.

NorESM2 skal kjøres som en klassisk klimamodell med foreskrevne konsentrasjoner av drivhusgasser, og som en full jordsystemmodell der konsentrasjonene beregnes fra utslipp og de biogeokjemiske prosessene i havet og på land. Aerosolpartikler beregnes i begge tilfeller fra utslipp, men luftas evne til å produsere ozon og partikler i lufta kan enten foreskrives ved konsentrasjoner eller beregnes atmosfærekjemisk. Utslipp fra flere typer naturlige prosesser kan beregnes i modellen, mens utslipp som skyldes menneskers virksomhet foreskrives.

1

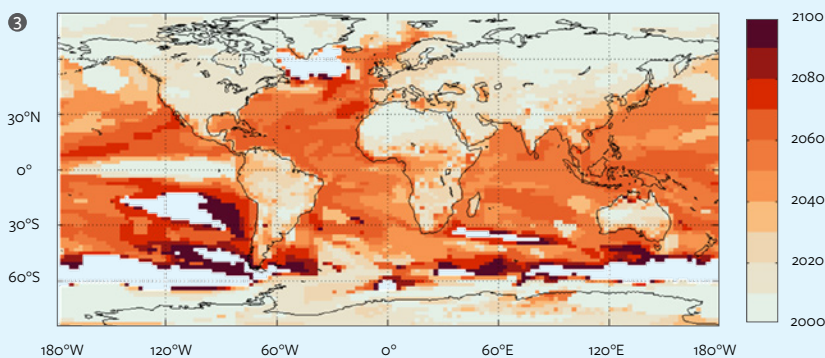


2



1 Figur 2 Beregnet økning i luftens temperatur ved bakken siden gjennomsnitt for perioden 1850–1900. De fire fargene viser ulike utslippsscenarioer. Vi ser at vi kun holder oss under to grader oppvarming i det grønne scenarioet, 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.

3



1 Figur 3 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.

ATMOSFÆREN

Det er i atmosfæren vi opplever vær. Mens været er temperatur, vind, nedbør og skydekke på bestemte steder og tidspunkt, er klima alle mulige værforhold som kan tenkes å oppstå. Klimaet forandres når ytre betingelser eller vulkansk aktivitet i jordsystemet endres. Været varierer ustanselig.

Atmosfæren tilføres varme når vanddamp kondenserer i skyer, og når luft er i kontakt med varme områder på landjorda og havet. Atmosfæren avkjøles ved å stråle ut varme til verdensrommet og når luft strømmer over kalde overflater. I netto varmes atmosfæren opp i tropene og subtropene, mens den avkjøles over polområdene. Dette skaper vindsystemer som jevnlig bringer varme fra tropene mot polene. Vertikale bevegelser i atmosfæren fører samtidig til at vanddampen i lufta skaper skyer og nedbør.

Drivhuseffekten oppstår fordi lufta slipper nesten all 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, da utstrålingen skjer fra litt høyere-liggende luftlag, og dette kan sammenlignes med å bre over seg en litt tykkere dyne.

Denne oppvarmingen forsterkes eller svekkes ved en rekke prosesser (tilbakekoblinger):

- Vanddamp er atmosfærens viktigste naturlige klimagass, og en oppvarming kan forsterkes ved at varmere luft kan inneholde mer vanddamp.
- Den vertikale temperaturfordelingen kan endres slik at utstråling skjer ved en annen temperatur: I tropene dempes oppvarmingen mens den forsterkes over polområdene. Vanddamp vil delvis kompensere for dette.
- Når snø og sjøis smelter, blir den lyse overflaten erstattet med en mørk, og mer stråling kan absorberes. Vegetasjon kan endre bakkens evne til å reflektere solstråling.
- Skyer reflekterer solstråling og sender ut varmestråling. Lave skyer avkjøler mens høye skyer virker oppvarmende. Det er stor usikkerhet knyttet til om skyer forsterker eller demper en økt drivhuseffekt.

Hvordan påvirkes nedbøren når klimaet endres?

Observasjoner viser at den globale nedbørmengden har økt med cirka 2-3 prosent per grad temperaturstigning. Dette er mindre enn de 7 prosent som tilsynelatende er det maksimalt teoretisk mulige (Clausius-Clapeyrons ligning).

Nedbørøkningen balanseres av økt fordampning. Den viktigste kilden til fordampning er fra hav i tropene og subtropene (**se forsidebildet**). Temperaturøkningen er mye mindre over disse kildeområdene enn det globale middelet; den er større over kontinentene enn over hav og større i Arktis enn på lave breddegrader.

Økt vanddamp transporteres med vinden i den fuktige lufta, og en betydelig andel kondenserer og faller ut som nedbør andre steder. De store energimengdene som tas fra havet og bakken ved fordampning, tilføres atmosfæren når vanddampen kondenserer, og dette kommer i tillegg til følbare varme og stråling. Til sammen forklarer dette den tilsynelatende ineffektive økningen i nedbør.

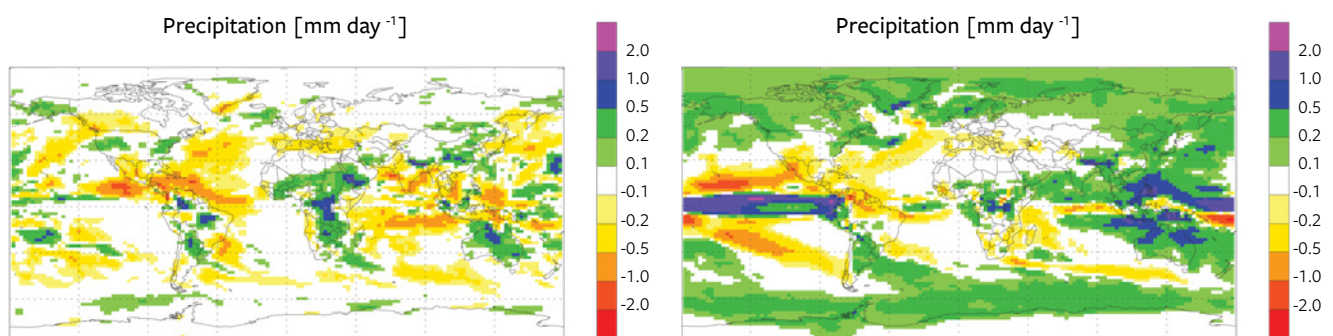
Dette kalles **den langsomme nedbørsresponsen**, siden den er relatert til temperatur som endres langsomt på grunn av havets enorme varmekapasitet. Vi snakker også om en **rask nedbørsrespons** som viser seg allerede etter noen dager til uker etter at utslippene av drivhusgasser eller aerosolpartikler endres. **Se kartene** for endret nedbør ved fordoblet CO₂ i atmosfæren.

Den raske responsen er forbundet med det umiddelbare tillegget i absorpsjon av drivhusgasser eller aerosoler i lufta, mens den langsomme responsen er tilnærmet proporsjonal med endringen i det globale strålingsbudsjettet ved atmosfærens yttergrense.

Sammen med ni andre jordsystemmodeller er NorESM1 brukt til å beregne hvordan nedbør påvirkes av menneskeskapte utslipp av drivhusgasser og aerosoler i det internasjonale samarbeidet PDRMIP (Precipitation Driver and Response Model Intercomparison Project), som er ledet av forskere ved CICERO. Eksperimenter med disse jordsystemmodellene har også blitt brukt til å studere hvordan episoder med ekstremt intens nedbør endres som følge av utslipp av drivhusgasser og aerosoler.

(Dirk Olivié, Trond Iversen og Alf Kirkevåg)

Figurene under viser global nedbørendring ved fordobling av CO₂ i atmosfæren beregnet med NorESM1. Den raske responsen vises til venstre mens den totale (rask + langsom) vises til høyre. Den raske responsen dominerer over lave bredder, der den er negativ over store kilder for vanddamp (over hav) og positiv der det er store sluk (f.eks. tropisk regnskog). Den totale responsen viser et større bidrag med økt nedbør langt vekk fra de store kildene. Til sammen demonstrerer dette at ferskvannets krets-løp beregnes å øke med global oppvarming.



AEROSOLER i NorESM

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

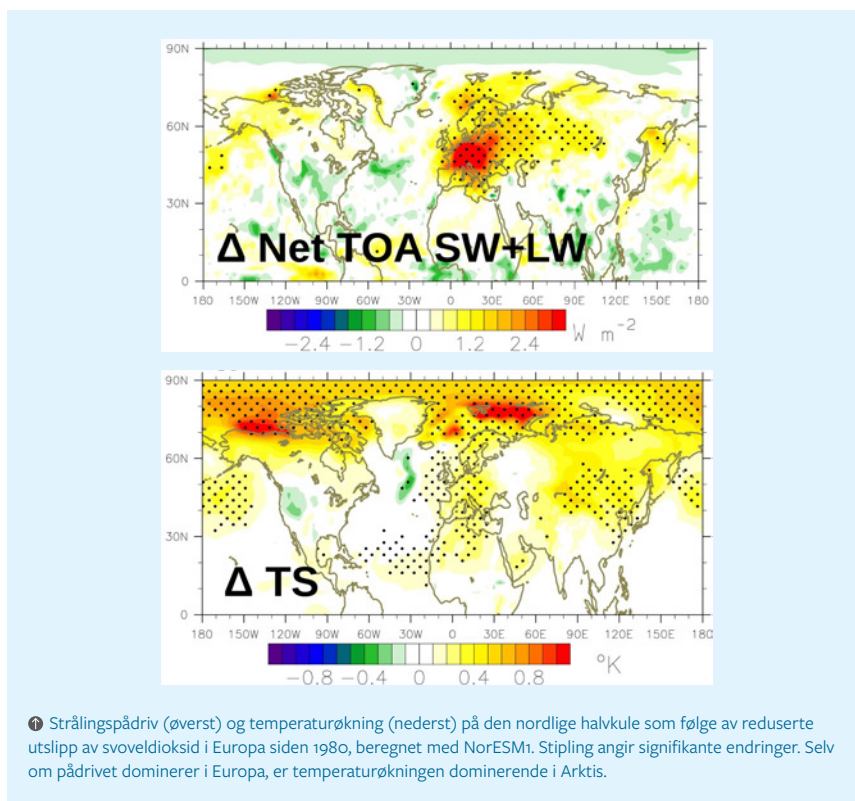
Partiklene er små nok til holde seg svevende i luft opptil noen få uker. Det er mange ulike partikkeltyper som varierer med størrelse og sammensetning og påvirker solstråling og skydannelse vidt forskjellig. Slik informasjon må derfor inkluderes for å kunne beregne klimateffektene av dem, og er den viktigste grunnen til å inkludere aerosolpartikler i klima- og jordsystemmodeller.

Menneskeskapte aerosoler består bl.a. av sulfat, nitrat, sot, og en lang rekke organiske forbindelser og kommer fra prosesser som også produserer CO₂, og fra prosessindustri. Dessuten danner mange naturlige prosesser aerosoler i form av sjøsalt, jordstøv, organiske partikler fra vegetasjon, biologiske partikler, partikler fra skogbranner osv. Mange typer partikler dannes i luft og i skydråper ved oksidasjon av gasser i atmosfæren. Slik produksjon påvirkes vesentlig av kjemiske og fysiske prosesser i luft.

For å kunne beregne menneskeskapte 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.

Slik kan modellen beregne de direkte effektene av menneskeskapte aerosoler gjennom endret spredning og absorpsjon av solstråling i skyfri luft, og de mer usikre indirekte effektene på skyer og nedbørtløsning. For rene vannskyer – varme skyer – gir aerosolene en avkjølende indirekte effekt som dels skyldes at skyene blir hvitere med flere og mindre dråper, og dels at de lever lenger når nedbørtløsningen blir mindre effektiv.

NorESM1 bidro med mange resultater som ble brukt i den femte hovedrapporten fra FNs klimapanel (IPCC AR5). Resultater fra en ny og mer avansert modellversjon NorESM2 er planlagt å bidra til FNs neste rapport i 2021.



Den oppgraderte aerosolmodulen basert på en ny studie av Kirkevåg og medarbeidere fra 2018, har mye større grad av frihet i vekselvirkningen mellom aerosoler, skyer og resten av klimasystemet. Den

er derfor enda bedre egnet til å studere prosesser og effektene av disse på klimaets tilstand og utvikling.

(Trond Iversen og Alf Kirkevåg)

Reduserte svovelutslipp i Europa gir oppvarming i Arktis

Internasjonale avtaler for å redusere sur nedbør i Europa trådte i kraft på 1980-tallet, og førte til store reduksjoner i utslipp av svoveldioksid.

Ved hjelp av NorESM1 publiserte Acosta Navarro, Varma m. fl. en artikkel i Nature Geoscience (mars 2016) der de beregnet at reduksjonen i svovelutslipp i Europa mellom 1980 og 2005 kan forklare halvparten av temperaturøkningen i lufta nær bakken i Arktis over samme periode.

Aerosolers levetid er så kort at utslippskutt raskt reduserer konsentrasjonene i luft. Utslppsreduksjonene i Europa har dermed medført at en betydelig andel av aerosolene avkjølende virkning er blitt fjernet, mens den oppvarmende effekten av klimagasser som CO₂, er blitt tydeligere.

Et meget interessant poeng er at tilsvarende modellert temperaturøkning i Europa som følge av europeiske utslippskutt, bare er en femdel av den totale oppvarmingen (se figuren over). Følsomheten for endringer i utslipp i Europa er med andre ord mye større i Arktis enn i Europa selv. Den økte energitransporten til Arktis over den aktuelle perioden utløser forsterkende tilbakekoplinger («feedbacks») som er spesifikke for Arktis.

Det forventes at oppvarmingen globalt og i Arktis vil fortsette, siden konsentrasjonene av drivhusgasser fortsetter å stige mens konsentrasjonen av aerosolpartikler sannsynligvis vil avta for å bekjempe lokale og regionale luftforurensninger også i andre deler av verden. I lys av dette understrekes viktigheten av å raskt redusere utslipp av drivhusgasser om man ønsker å motvirke ytterligere klimaendringer i Arktis såvel som globalt.

(Alf Kirkevåg og Trond Iversen)

Aerosolenes effekt på skymengde overdrives i modeller

Jordsystemmodeller som laboratorium for jordas klima er avhengig av andre kilder til å forstå prosessene som modelleres, slik som: kontrollerte fysiske laboratoriemålinger og feltobservasjoner i atmosfæren og klimasystemet.

Det store vulkanutbruddet Holuhraun på Island august 2014 til februar 2015 er et eksempel (bildet). Utbruddet slapp ut store mengder svoveldioksid som spredte seg over store deler av Nord-Atlanteren der lufta normalt er lite påvirket av menneskeskapte utslipp og skyene er følsomme for endringer. Utslippene ble raskt oksidert til sulfat som dannet aerosoler i form av av svovelsyre dråper som under gunstige forhold kan øke antallet og redusere størrelsen til skydråper. Da kan også mengden av skyvann øke fordi nedbørutløsningen forsinkes.

Malavelle og medarbeidere publiserte i 2017 en studie av satellittmålinger av skyvannets og skydråpenes egenskaper i områder

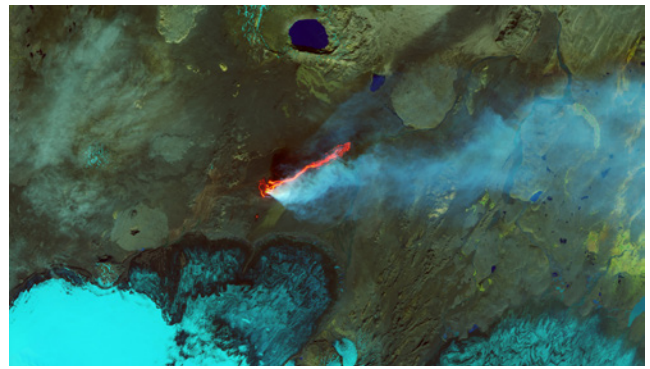
De menneskeskapte aerosolenes virkning på klima avhenger av den førindustrielle tilstand

Usikkerhetene i hvor mye menneskeskapte aerosoler påvirker klima via vekselvirkning med skyer – den indirekte effekten – er blant de viktigste årsakene til at beregninger av klimaendringer er usikre.

Noen modeller beregner en så stor avkjøling på grunn av den indirekte effekten at den utligner oppvarmingen av økte drivhusgassutslipp for dagens klima. Studier med NorESM og andre modeller har vist at antall og størrelse på naturlige aerosoler (som for eksempel sjøsalt), har stor betydning for den indirekte effekten av menneskeskapte aerosoler. Den er ofte overestimert i modeller med for enkel behandling av naturlige aerosoler.

I en fersk studie av Karset m.fl. i 2018 viser vi at korrekt behandling av oksiderende gasser som omgjør utslipp av gasser til partikler, også er viktig når man modellerer den indirekte effekten.

En stor del av aerosolpartiklene dannes i atmosfæren ved at gasser som slippes ut oksideres i luft og skydråper. Det vesentlig nye i studien, er at den viser at det er viktig å ta hensyn til at mengden oksidanter i luft har endret seg siden førindustriell tid.



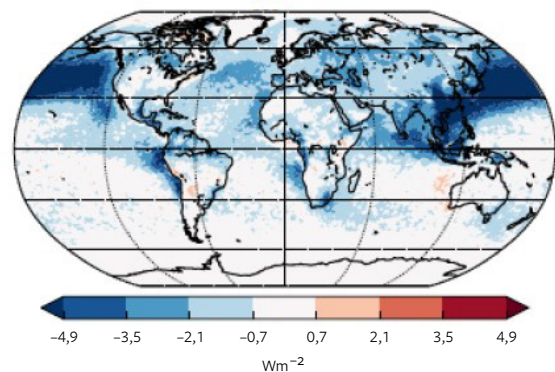
Fra utbruddet i Holuhraun-vulkanen 6. september 2014. Foto: NASA

nedstrøms for utbruddet. Resultatene ble sammenlignet med beregninger fra ulike atmosfæremodeller med aerosoler, inklusive NorESM1.2 som er publisert av Kirkevåg m. fl. i 2018.

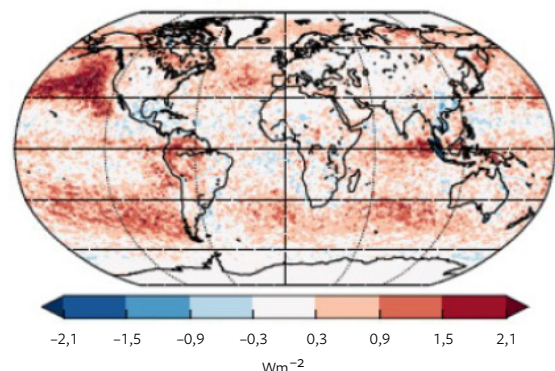
Holuhraunstudien viste at aerosolers påvirkning av skyvannmengde og skyers levetid overdrives i de modellene som ble undersøkt. Modellenes beregnede virkning på skydråpenes størrelse er adskillig mer realistisk. Disse viktige resultatene tas raskt i bruk for å forbedre modellenes beregning av aerosolers påvirkning av skyer og nedbørsutløsning. Dette er også tatt hensyn til aerosolmodulen til NorESM2.

(Alf Kirkevåg og Inger Helene Karset)

Indirekte effekt av aerosoler



Endring i indirekte effekt av aerosoler



Produksjonen av aerosoler i atmosfæren, og dermed også den indirekte effekten påvirkes vesentlig (19% reduksjon globalt).

(Inger Helene Karset og Alf Kirkevåg)

Hva betyr en halv grads forskjell i global oppvarming?

I 2015 vedtok FNs klimakonvensjon å forsøke å begrense global oppvarming til 1,5 grader over 1850. NorESM-miljøet tok utfordringen med prosjektet HappiEVA i juli 2016.

To forutsetninger var til stede for at prosjektet skulle kunne gjennomføres: vi hadde klar en oppgradert versjon av NorESM1-modellen (1), og vi var en del av et internasjonalt samarbeid om en felles tilnærming med flere globale modeller (2): «Half a degree Additional warming, Projections, Prognosis and Impacts (HAPPI)», beskrevet av Mitchell og medarbeidere i 2017 og på www.happimip.org.

Modellen NorESM1-Happi er validert som fullt koplet global klimamodell med dobbelt så høy oppløsning i atmosfæren (~1 grad) som brukt i CMIP5.

I HAPPI-samarbeidet er atmosfære- og landkomponentene kjørt med foreskrevet havtemperatur (AMIP, se skjematisk figur til venstre), der NorESM har levert 125 beregninger for tiårsperioder for dagens klima og for hvert temperaturmål.

Sammen med andre modeller er det 926 uavhengige beregninger for hvert temperaturmål som grunnlag for å studere endringer i klima og ekstremt vær. Versjonene av NorESM med

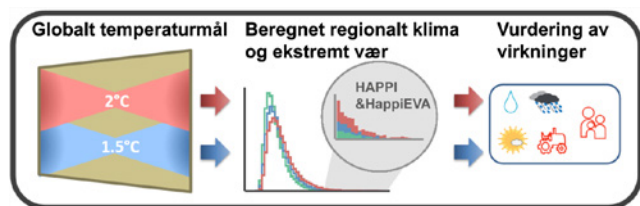
aktive havkomponenter (fullt koblet og med forenklet hav (SO)) er brukt til å undersøke betydningen av tilbakekoplinger (feedbacks) knyttet til havet og til havisen i Arktis. En rekke artikler er publisert med medforfattere fra HappiEVA og inkludert i spesialrapporten til FNs klimapanel. En av studiene er ledet av HappiEVA ved Camille Li ved UiB og Bjerknessenteret, og er publisert i 2018.

En artikkel med resultater fra eksperimenter med fullt koplet NorESM1-Happi er under evaluering (Graff og medarbeidere). Da den fullt koplede modellen er systematisk for kald, brukes modellen med forenklet hav (SO) til å korrigere for dette så langt som mulig.

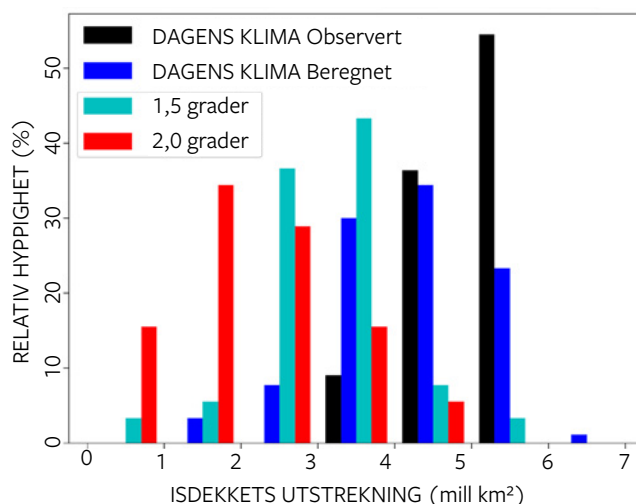
Den arktiske forsterkning av den globale temperaturendring beregnes større med aktivt hav. Sammenlignet med AMIP øker den arktiske forsterkning i den fullt koplede modellversjonen med 54 % for 1,5 gradersmålet og 46 % for tillegget på 0,5 grader. Som følge av dette beregnes forskjellen i temperatur nær bakken mellom tropene og Arktis ved global oppvarming å være mindre når havet inkluderes aktivt.

Nedenfor til høyre vises beregnet økt risiko for isfritt Arktis i versjonen med forenklet hav (SO).

(Trond Iversen, Lise Seland Graff, Camille Li, Jens Boldingh Debernard)



I AMIP-eksperimentene for HAPPI setter man opp betingelsen slik at man så godt som mulig treffer målene for global temperaturendring. Modellene beregner regionalt klima, og dernest vurderes virkninger på natur og samfunn. Tradisjonelt starter man i IPCC-rapportene med scenarier for drivhusgasser, men da gir forskjellige modeller ulik global temperatur. Figur fra Mitchell og medarbeidere (2017), lisensiert under Creative Commons Attribution 3.0 License.



Beregnet utstrekning av havis i september i Arktis for modellen med forenklet hav (SO: slab ocean). Sammenlignes de blå og svarte søylene, ser vi at modellen har en tendens til å beregne litt for liten utstrekning for dagens klima (PD: present day). Med det som forbehold, anslås en betydelig økt risiko for isfritt Arktis om høsten på grunn av den ekstra halve graden i global oppvarming (røde og turkise søyler).

Polare lavtrykk ved klimaendringer

Polare lavtrykk dannes om vinteren i Norskehavet og Barentshavet når temperaturen ved havoverflaten er mye høyere enn i luften.

Polare lavtrykk kalles innimellom for «arktiske orkaner», fordi de ligner på tropiske sykloner. De er en god del mindre enn tropiske sykloner, og vindstyrken blir sjelden sterkere enn liten storm.

Polare lavtrykk kan være farlige fordi den sterke vinden kommer samtidig med tett snøfall, sjøsprøyt som fryser og svært dårlig sikt.

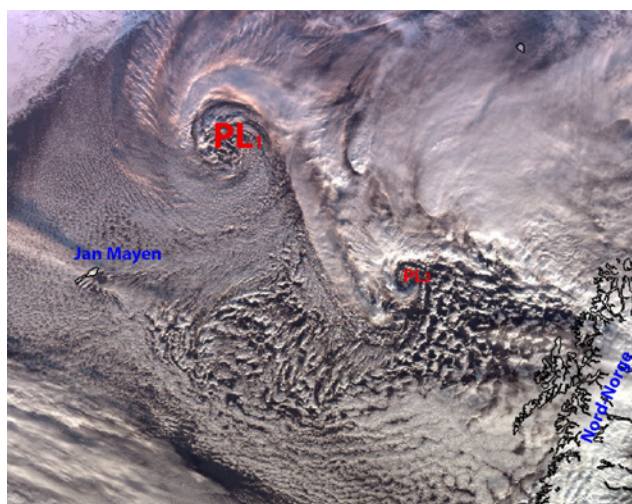
Siden de er små og dannes raskt når kald luft fra det isdekte polhavet strømmer ut over åpent hav, kan de ofte falle mellom nettverket av tradisjonelle observasjoner og dermed blir de vanskelige å varsle i god tid. Slike overraskende lavtrykk utgjør en trussel for skip og mannskap som ferdes på sjøen.

Et viktig spørsmål for Norge som kystnasjon, er hva som kan skje med polare lavtrykk ved global oppvarming. De globale klimamodellene har ennå altfor grov oppløsning til å modellere dem. I stedet brukes regionale modeller med mye høyere oppløsning til å detaljere informasjonen om klimaendringene fra de globale modellene.

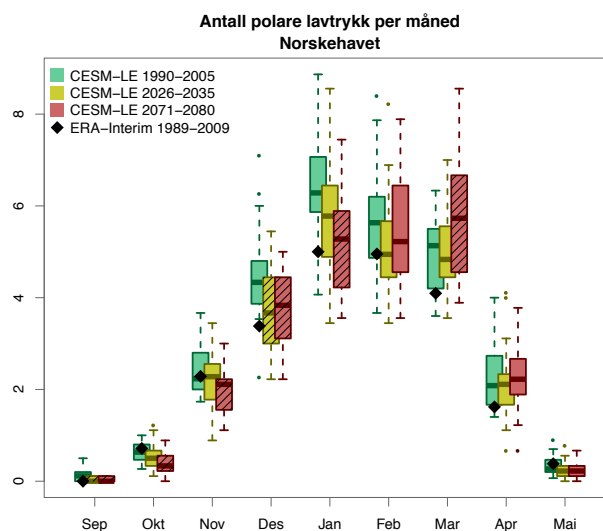
Modellen HCLIMALARO har blitt brukt til å nedskalere beregninger fra 18 globale eksperimenter fra «CESM Large Ensemble». Disse beregningene bruker et rutenett med 12 km maskevidde og dekker Norskehavet og Barentshavet. Resultatene brukes til å studere endret forekomst av polare lavtrykk under et fremtidig scenario med høye utslipp av drivhusgasser, altså en videreføring av dagens situasjon.

Eksempelet i diagrammet til høyre viser at det beregnes en tydelig nedgang i antall polare lavtrykk i Norskehavet i første halvdel av vinterhalvåret, mens vi ser en økning i mars. Dette fører til en netto forskyvning av sesongen for polare lavtrykk i fremtiden. Nedgangen skyldes at de laveste kilometerne av atmosfæren varmes opp raskere enn havet. Økningen i mars kan forklares av at mindre havis gir et større område der polare lavtrykk kan dannes.

(Oskar Landgren, Trond Iversen)



Satellittbildet viser to polare lavtrykk i Norskehavet den 17. februar 2017.



Beregnet antall polare lavtrykk i Norskehavet per måned. Tre tidsperioder er markert med farger: 1990–2005 (grønn), 2026–2035 (oransje) og 2071–2080 (rødt). Nedskalert reanalyse (ERA-Interim) er markert i svart og kan sammenlignes med de grønne markeringene. Skraveringer med skrå streker indikerer statistisk signifikante endringer.

Atmosfæriske elver og kilder til sterk nedbør i Bergen

Bildet på forsiden av brosjyren er et sammensatt satellittbilde med mye nedbør på Vestlandet. Bildet viser hvor mye vanndamp det er i atmosfæren (hvitt), hvor mye vann som fordampes (rosa) og hvor mye det regner (blått) – jo sterkere farger, jo mer. Snø og sjøis er også tatt med.

Bildet er fra 26.–27. oktober 2014, og regnet forårsaket en kraftig flom på Vestlandet. Vi ser det vi kaller en «atmosfærisk elv»: Vanndamp transporteres langs en smal sone over Nord-Atlanterhavet fra tropene og subtropene til Vestlandet. Slike forhold fant sted i oktober 2018.

I EVA har forskere ved Norsk Institutt for Luftforskning brukt en egen metode som følger luftpartiklers bevegelser («Flexpart») til å studere hvordan NorESM beregner hvor fuktigheten kommer fra når det er faller ekstremt mye nedbør i og omkring Bergen.

Fuktighetskildene til nedbør i Bergen beregnet med NorESM bekreftes å være sammenlignbare med beregninger basert på

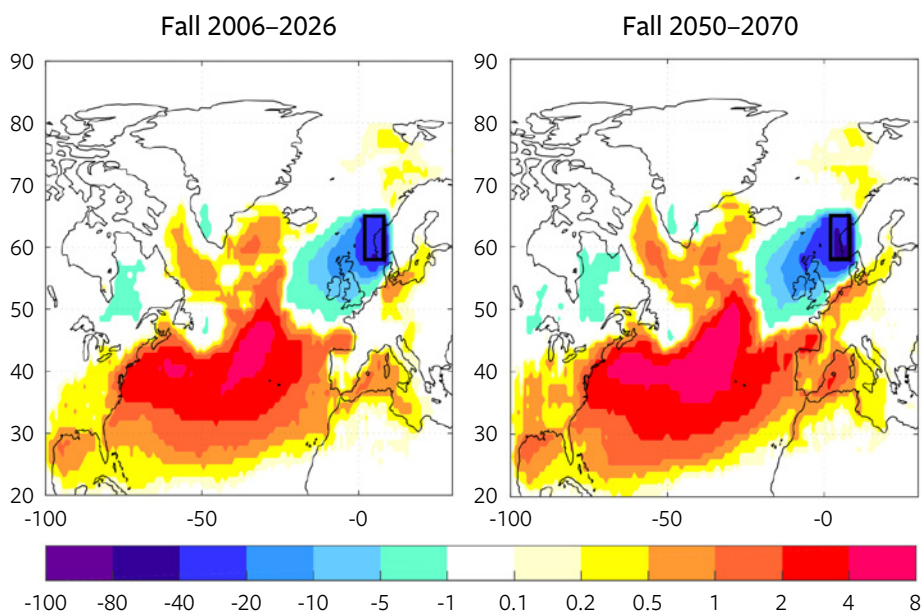
observasjoner (re-analyser). Ved positiv fase av Den nordatlantiske oscillasjon (NAO) forskyves kildene til fuktigheten nordover og det faller mer nedbør i Bergen.

Kildene til luftfuktighet domineres av subtropene i Nord-Atlanteren, men de varierer noe med årstidene. Om sommeren kommer luftfuktigheten også fra landområder i Europa og Nord-Amerika, mens subtropiske områder i Nord-Atlanteren dominerer om vinteren.

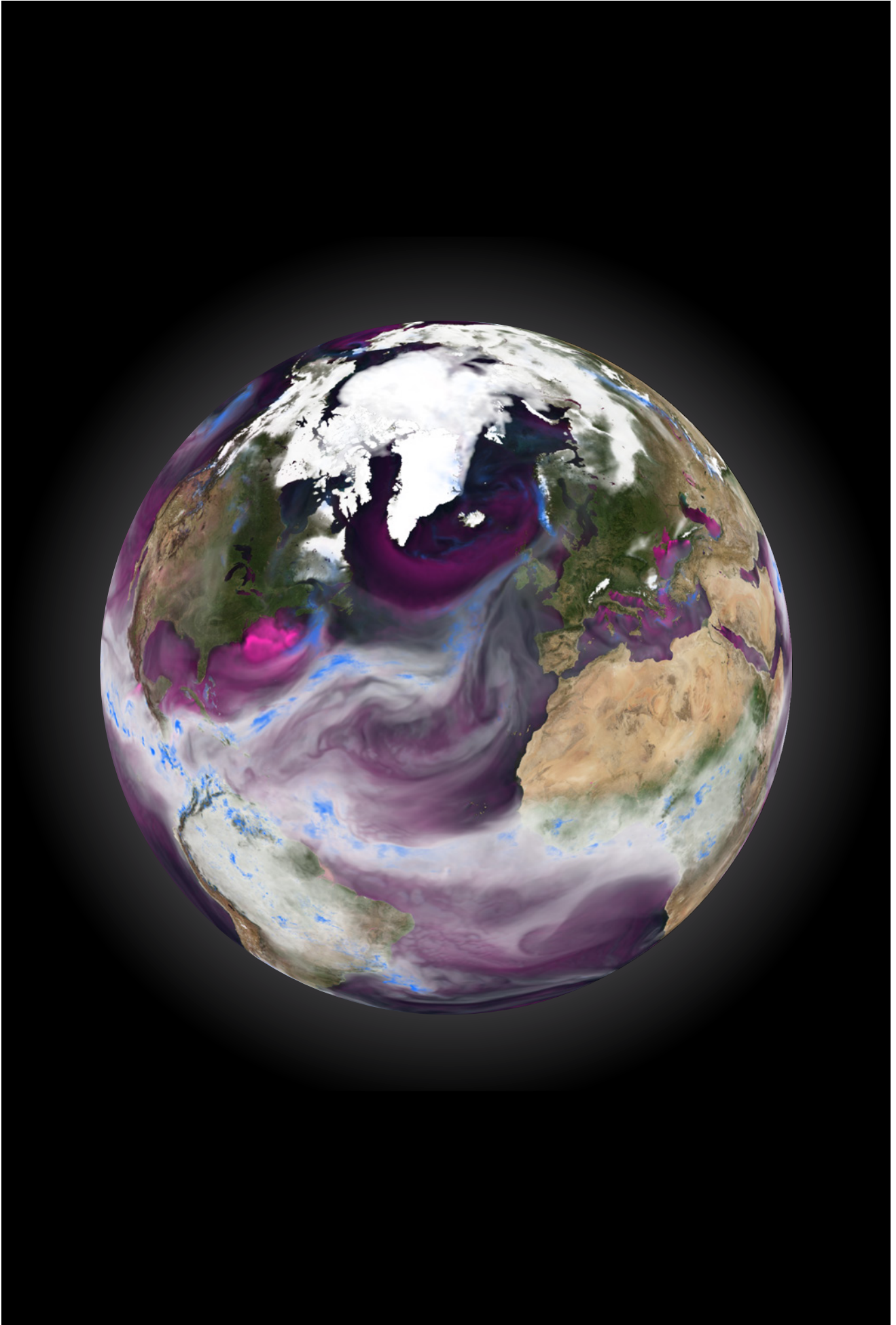
Mer regn om høsten:

Se kartene for framtidig klima: De største økningene av tilfeller med intens nedbør på Vestlandet ved global oppvarming beregnes å komme om høsten. For den årstiden beregnes at fuktighetsbidraget fra Nord-Atlanteren blir enda sterkere, og at bidrag fra landområder i Vest-Europa blir viktigere ved et varmere klima.

(Sabine Eckhardt, Massimo Cassiani, Andreas Stohl)



❶ Områder med netto tilførsel av luftfuktighet ved fordamping (rødlig) og netto tap ved nedbør (blått), for luft som ankommer Bergen med nedbør om høsten. Kartene viser fordamping minus nedbør (mm per måned) om høsten, beregnet med NorESM1-data for 2006-2026 og 2050-2070 ved det moderate utslippsscenariet RCP4.5.



HAVET

Havsirkulasjon og det store karbonlageret

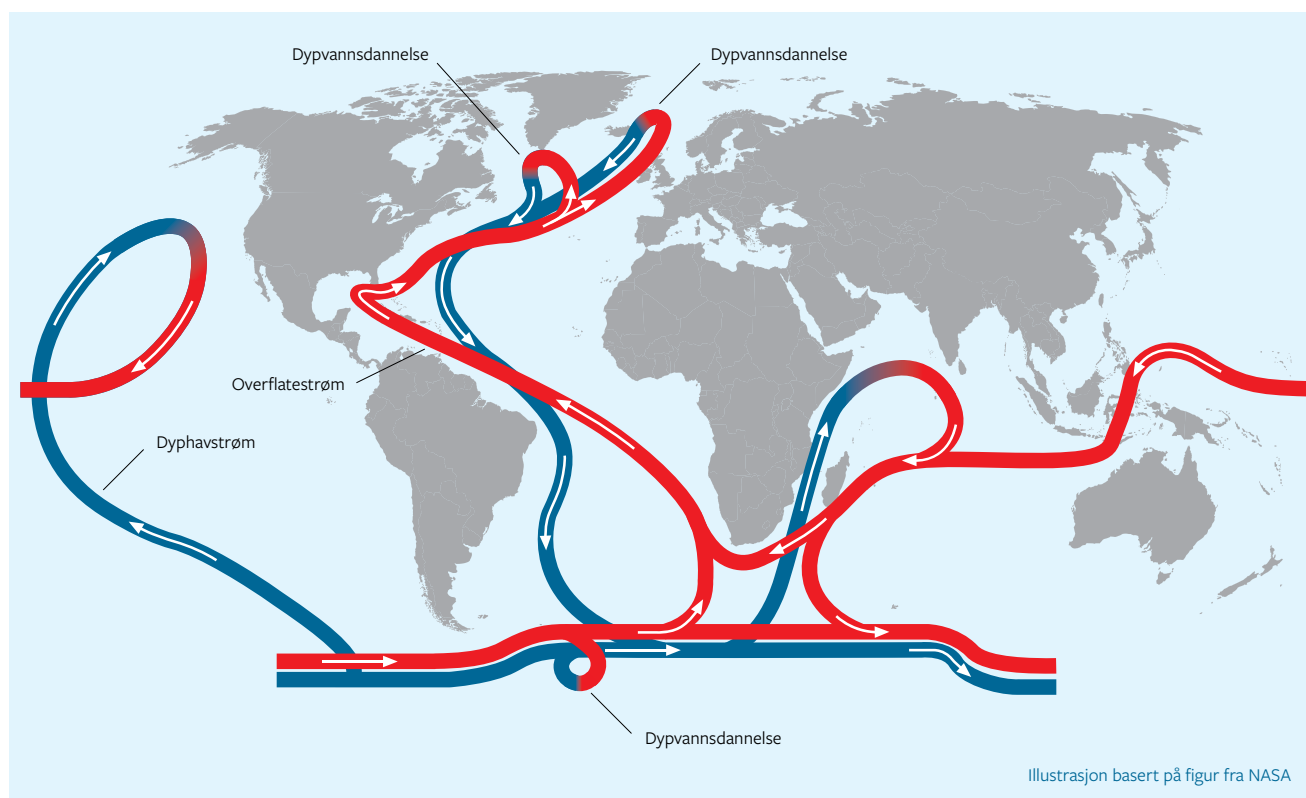
Havets bevegelser gjennom strømmer og blanding av vannmasser har mye lengre tidsskalaer enn atmosfæren. Tidsskalaen for den storstilte omveltningen i havet er rundt 1500 år.

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 finnes det 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 dypvann, 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 dypvann 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 næringsalter. Dermed vil endringer i havsirkulasjonen også gi endringer i økosystem og fiskeri.



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 interaksjonen 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 over klimaprosesser på jorden.

Havets karbonkretsløp

Menneskeskapte 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 CO₂ i atmosfæren er kjemisk stabilt, er CO₂ 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 CO₂ 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 dypvann. Karbonet som blir tilført fra menneskelige kilder følger dette mønsteret, som vist i figuren på side 14.

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 CO₂ og endringer i det globale nitrogen- og fosforbudsjettet (for eksempel ved bruk av kunstgjødsel) 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 CO₂ i havet har en negativ sideeffekt 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.

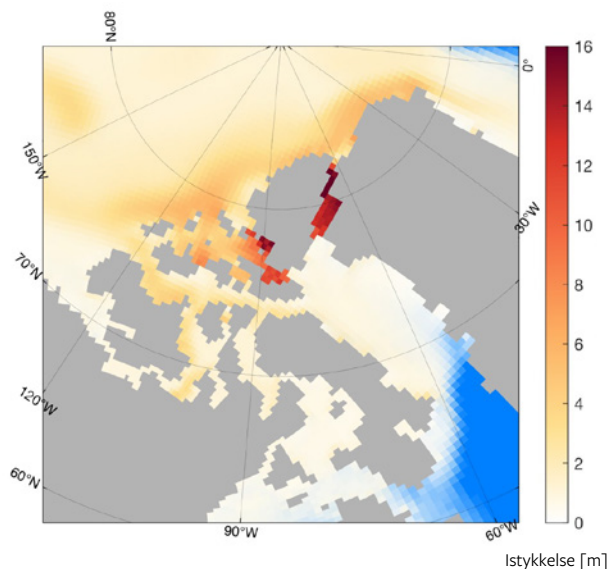
(Christoph Heinze)

Oppstuvning av sjøis i trange havpassasjer

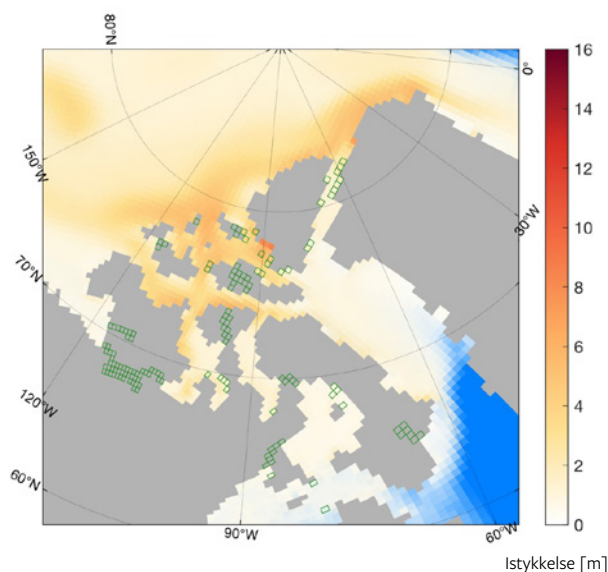
Modellkomponentene har diskrete variable representert i et tredimensjonalt gitter. I NorESM er hastighetskomponenter horisontalt forskjøvet med et halvt gitterintervall i forhold til skalare variable slik som trykk og temperatur. Dette fordi en slik forskyvning gir forbedret bølgedynamikk og redusert støy på den korteste gitterskala. Det finnes flere måter å forskyve variablene i forhold til hverandre på med ulike numeriske fordeler og ulemper. Sjøis- og havmodellen har valgt ulik forskyvning av variable og dette har gitt noen utfordringer. Med valgte forskyvninger tillater havmodellen transport gjennom passasjer som er bare en gittercelle bred, mens sjøismodellen behøver bredde på minst to gitterceller for transport. Spesielt rundt øyene i det kanadiske Arktis med mange

trange passasjer, kan dette føre til urealistisk oppstuvning av sjøis. Dette er vist i figur 1, der sjøistykkelse er vist i en simulering med gitter og fordeling av land og hav som i NorESM1. For å løse dette problemet har vi i EVA beholdt gitteret, men justert land- og havfordelingen slik at i områder hvor sjøis kan forekomme er alle passasjer minst to gitterceller brede. Effekten av dette sees i figur 2, der den reviderte fordelingen mellom land og hav i NorESM2 er eneste forskjell og ingen urealistisk oppstuvning av sjøis er synlig.

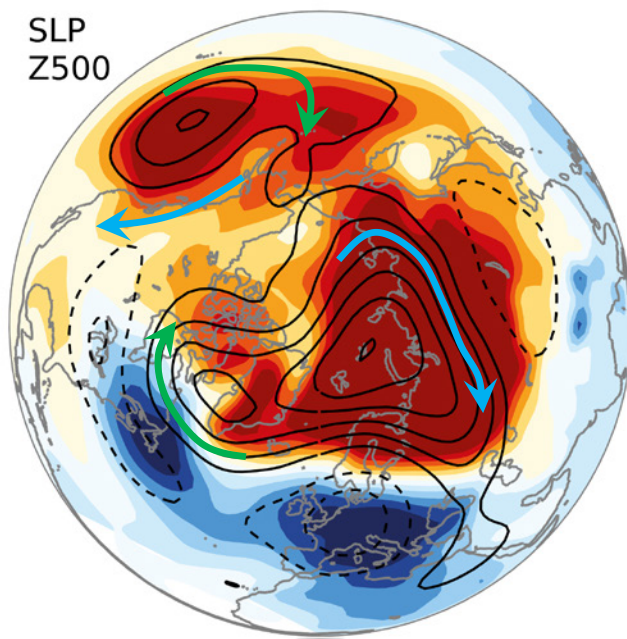
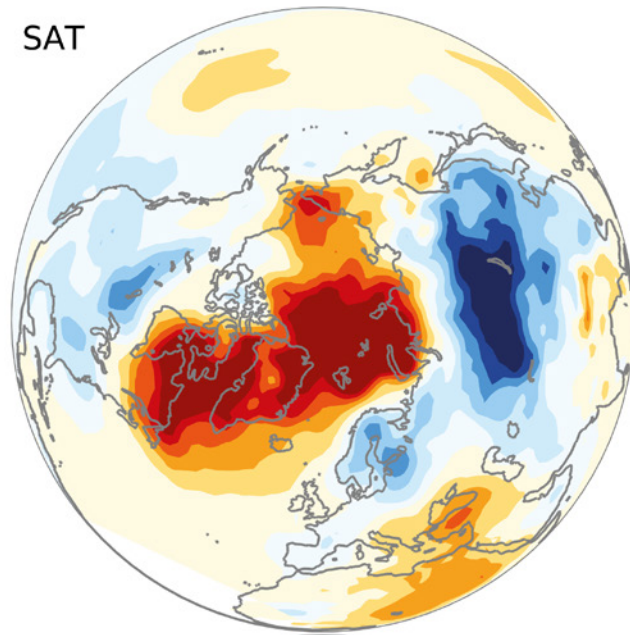
(Mats Bentsen)



Simulert sjøistykkelse i et utsnitt som dekker den Kanadiske arkipelago der det felles sjøis- og havgitteret er av typen benyttet i NorESM1. I grått er gitterceller som er land mens åpent hav er blått.



Identisk simulering som vist i figur 1, bortsett fra at sjøis- og havgitteret er revidert for NorESM2. Gitterceller som er justert i forhold til NorESM1 og NorESM2 er vist med et grønt omriss.



Naturlig vinterkulde i en varmere verden

I løpet av de siste to tiårene har det vært en rekke kalde vintre over store deler av Russland, Europa og Nord-Amerika. I samme periode har global temperatur steget, med klart størst oppvarming i Arktis (se venstre del av figur). Dette paradokset har fått mange til å lure på hva som kan være årsaken til vinterkulden, og ikke minst om slike episoder også kan ventes frem i tid.

Et hovedtrekk for de kalde vintrene er to markante og stabile høytrykk, et med senter nord for Eurasia og et over det nordlige Stillehavet. Disse lavtrykkene leder kald luft fra Arktis inn over kontinentene, mens varm luft fra sør strømmer inn i Arktis, som illustrert med pilene i høyre del av figuren.

I EVA har vi sett nærmere på om naturlig forekommende variasjoner i hav og atmosfære, spesielt i og over Atlanterhavet og Stillehavet, har påvirket utviklingen av de to høytrykkene. Til dette har vi analysert tilgjengelige observasjoner for de siste 100 år, samt 19 globale klimamodeller som inngikk i siste hovedrapport fra FNs klimapanel, NorESM inkludert.

Analysen viser at forholdene i Stillehavet og i Atlanterhavet påvirker de to høytrykkene, men på forskjellig måte. Havtemperaturen i Stillehavet påvirker spesielt høytrykket nord i Stillehavet, som igjen leder til lave vintertemperaturer over Nord-Amerika. Varmere Stillehav bidrar også til et varmere Arktis, via direkte transport av varme i atmosfæren.

Til venstre: Observert endring av vintertemperatur siden 1990. Rød farge viser oppvarming og blå farge viser nedkjøling. Til høyre: Observert endring av overflatetrykk. Rød farge viser høytrykk og blå farge lavtrykk. Pilene illustrerer sirkulasjonen rundt høytrykkene nord for Eurasia og i det nordlige Stillehavet. De blå pilene viser transport av kald luft fra Arktis til det eurasiske og nordamerikanske kontinentet, mens de grønne pilene viser transport av relativt varme luftmasser inn mot Arktis.

For høytrykket nord for Eurasia er situasjonen mer komplisert. Her er naturlig forekommende variasjoner i selve atmosfæren viktigst. Et eksempel på det siste er den nord-atlantiske svingningen (North Atlantic Oscillation, NAO). I tillegg er det et bidrag fra både Stillehavet og Atlanterhavet. Det er kun når disse tre bidragene kombineres at modellene kan reprodusere det eurasiske høytrykket slik vi har observert det siden 1990-tallet.

Siden høytrykket nord for Eurasia synes å være nær koplet med naturlige – og sannsynligvis tilfeldige – variasjoner i atmosfæren, vil det være meget vanskelig å varsle om lave vintertemperaturer på det eurasiske kontinentet kan ventes også i årene som kommer. Bare bedre forståelse av de underliggende prosessene, koplet med videreutvikling av klimamodellene, kan gi sikrere prognoser for framtidig klima og vær i dette området.

(Svetlana Sorokina, Helge Drange)

Sammenheng mellom biologisk produksjon i hav, naturlige aerosoler og temperatur på bakken

Biologisk aktivitet i havet er en viktig kilde til svovelholdige gasser som kan påvirke klimaet ved dannelse av aerosoler som kan forandre egenskapene til stråling og skyer i atmosfæren. På 1980-tallet foreslo Robert Charlson, James Lovelock, Meinrat Andreae og Stephen Warren («CLAW») en hypotese om at jordas klima kunne reguleres av svovel fra havet. Ved et varmere klima kunne økt biologisk produksjon ved havets overflate føre til mer svovelutslipp, mer aerosolpartikler og flere men mindre skydråper. Siden skyene da ville reflektere mer solstråling, kunne resultatet bli avkjølt jord-overflate, altså *en negativ tilbakekopling* i jordsystemet.

Denne «CLAW-hypotesen» har vært mye diskutert siden den ble foreslått. Fra et biogeokjemisk synspunkt er antakelsen om økt biologisk produksjon i et varmere klima den viktigste feilkilden. I dag er det vel etablert at den storskala produktivitet vil avta ved global oppvarming i de fleste havregioner.

I nyere tid har observasjoner vist at svovelutslipp fra hav faktisk kan reduseres som følge av surere havvann når det er mer CO₂. Dette kan da snarere føre til *en positiv tilbakekopling* med forster-

ket oppvarming på grunn av at mindre sollys reflekteres, altså en stikk motsatt effekt av den i CLAW-hypotesen.

Siden NorESM er en av de få eksisterende jordsystemmodeller som inkluderer hele kjeden av prosesser i CLAW-hypotesen, kan modellen brukes som laboratorium for å undersøke mulige konsekvenser av en kraftig nedgang i utslipp av svovel fra hav på grunn av surere havvann. Våre resultater viser at det faktisk vil bli varmere, med et globalt gjennomsnitt på opptil 0,5 grader for svært sterk reduksjon av svoveltilførslene. Regionalt kan det være enda større temperaturøkninger (se figuren). For eksempel gir beregningene nesten en grad ytterligere oppvarming over havområdene på den sørlige halvkule og i Antarktis.

Disse eksperimentene med NorESM er gjort med svært pessimistiske antagelser om CO₂-utslipp, og dermed veldig sterk forsuring av havvann. Skulle CO₂-utslippene gå ned i nær framtid for å begrense global oppvarming, vil vi sannsynligvis ikke se en sterk forandring i naturlige svovelutslipp heller.

(Jörg Schwinger)

MODELLVALIDERING

Hvor godt gjengir resultater fra jordsystemmodeller den virkelige verden med klimaendringer som skjer på ulike tidsskalaer og regionale mønstre?

En rekke angrepsmåter brukes for å validere jordsystemmodeller. Først av alt kan man sammenligne jordsystemmodellenes resultater med observasjoner fra de forskjellige delene av jordsystemet over perioder og på steder der det fins pålitelige målinger. Tilsvarende beregninger med jordsystemmodeller kalles «historiske simuleringer». Man kan også sammenligne modellresultater for tidligere klimaperioder, f.eks. de siste 1000 år eller den siste istiden. For slike perioder der det ikke finnes instrumentelle observasjoner, spiller rekonstruksjoner av klima fra hav- og innsjøsedimenter en viktig rolle. For dagens klima er det identifisert viktige systematiske mønstre for klimavariabilitet fra observasjoner og reanalyser. De som bruker klimamodeller kan teste hvor godt modellene gjengir slike mønstre. Modellers egenskaper kan også evalueres gjennom

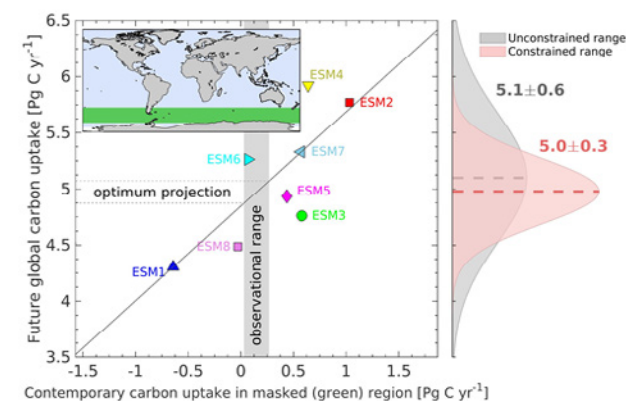
rene modelleksperimenter. En viktig hensikt med modeller er at man kan gjøre eksperimenter som ikke er mulige i den virkelige verden. Man kan for eksempel bytte ut bestemte prosesser og studere hvordan modellen reagerer. For eksempel kan man slå av koblingen mellom det fysiske klimasystemet og karbonsyklusen. Da kan man lære at karbonsyklusen øker den globale oppvarmingen for noen valgte scenarier for klimagasser. Tilbakekoplingen fra karbonsyklusen kan slik tallfestes fra modellene innenfor modellenes verden. Det er også nyttig å sammenligne resultater fra forskjellige jordsystemmodeller med hverandre og med observasjoner fra den virkelige verden. Gjennom slike modellensammenligninger kan man lære hvor stor spredning det er mellom ulike modeller, og identifisere hvordan ulike beskrivelser av prosesser fører til forskjellige resultater. CMIP-programmet (CMIP = coupled model intercomparison project) er verdens viktigste samarbeid for å utvikle de beste prognoser for framtidig klima ved antatte scenarier for utslipp av klimagasser. NorESM er en av modellene som er med i CMIP.

(Christoph Heinze)

En ny metode for å begrense usikkerheten i klimaprojeksjoner med jordsystemmodeller

Stor spredning mellom de forskjellige jordsystemmodellene er vanlig, og det bidrar til usikkerheten i framtidige klimaprognoser. For eksempel kan de beregnede endringene i verdenshavets opptak av karbon over det 21. århundre variere med så mye som 150 gigatonn karbon mellom IPCC-AR5-modellene. Dette tilsvarer en usikkerhet i framtidige atmosfæriske CO₂-konsentrasjoner på rundt 70 ppm. Å redusere slike usikkerheter i jordsystemmodellenes prognoser er ennå av stor betydning, og er høyst relevant for interessehavere og beslutningstakere under deres planlegging.

En «emergent constraint» er en ny metode som bruker dagens observasjonsdata til å redusere spredningen i jordsystemmodellenes projeksjoner. Ved hjelp av denne metoden oppdaget



① Spredning mellom framskrivninger av framtidig opptak av karbon i verdenshavene med jordsystemmodeller (y-aksen) som funksjon av karbonopptaket i de sørlige hav (grønt felt på kartet) ved dagens klima (x-aksen).

Kessler og Tjiputra (2016) en konsistent sammenheng mellom effektiviteten av opptak og lagring av karbon i De sørlige hav i dag, og hvor mye atmosfærisk karbon som vil bli absorbert i verdenshavene mot slutten av dette århundret.

Figuren viser at jordsystemmodeller som simulerer effektive opptak av karbon i de sørlige hav ved dagens klima, også beregner sterke opptak av CO₂ i verdenshavene i framtiden. Det motsatte gjelder for modeller som simulerer mindre effektive opptak av karbon i de sørlige hav. Gjennom anvendelse av «emergent constraint» kan vi halvere usikkerheten i de fremskrevne framtidige opptak av karbon i verdenshavene.

(Jerry Tjiputra)

Framtidig utvikling av NorESM

Vitenskapen om jordsystemet og klimaet på jorden utvikler seg hurtig. Jordsystemmodeller som NorESM trenger kontinuerlig utvikling og vedlikehold for å være et oppdatert instrument for klimaforskning. Ny kunnskap og nye prosesser blir jevnlig publisert i faglitteraturen og dette må vurderes inkludert i modellene. Samtidig må modellenes romlige oppløsning økes, samt beskrivelsen av de relevante dynamiske prosessene i atmosfæren og havet. Man behøver også å akselerere og optimalisere de numeriske beregningene i NorESM for best å utnytte tilgjengelige superdatamaskiner. Vi har derfor vært så heldige å få støtte fra Norges forskningsråd til INES-prosjektet for å bygge en e-vitenskapelig infrastruktur, som kan tilby alle brukere i Norge og Norden en slik moderne jordsystemmodell.

NorESM-miljøet satser fremover på vitenskapen rundt rollen av jordsystemkoblinger for Arktis, store bidrag til internasjonale modellsammenligningsstudier (som CMIP6), en mer systematisk sammenligning mot observasjoner, utvidet tilrettelegging av NorESM-data for klimatjenester, dataassimilasjon for å forbedre klimavarsler, og et økt samarbeid med amerikanske og nordiske partnere.

(Michael Schulz, Mats Bentsen)




Publikasjonsliste for EVA-prosjektet

Peer-reviewed publications

- Cassiani, M., Stohl, A., Olivie, D., Seland, O., Bethke, I., Pissio, I., and Iversen, T.: The offline Lagrangian particle model FLEXPART-NorESM/CAM (v1): model description and comparisons with the online NorESM transport scheme and with the reference FLEXPART model, *Geosci Model Dev*, 9, 4029-4048, 10.5194/gmd-9-4029-2016, 2016.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-4029-2016>
- Ciasto, L. M., Li, C., Wettstein, J. J., and Kvamsto, N. G.: North Atlantic Storm-Track Sensitivity to Projected Sea Surface Temperature: Local versus Remote Influences, *Journal of Climate*, 29, 6973-6991, 10.1175/JCLI-D-15-0860.1, 2016.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0860.1>
- Gharamti, M. E., Tjiputra, J., Bethke, I., Samuelsen, A., Skjelvan, I., Bentsen, M., and Bertino, L.: Ensemble data assimilation for ocean biogeochemical state and parameter estimation at different sites, *Ocean Model*, 112, 65-89, 10.1016/j.ocemod.2017.02.006, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.02.006>
- Goris, N., Tjiputra, J. F., Olsen, A., Schwinger, J., Lauvset, S. K., and Jeansson, E.: Constraining Projection-Based Estimates of the Future North Atlantic Carbon Uptake, *Journal of Climate*, 31, 3959-3978, 10.1175/JCLI-D-17-0564.1, 2018.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0564.1>
- He, Y. C., Drange, H., Gao, Y. Q., and Bentsen, M.: Simulated Atlantic Meridional Overturning Circulation in the 20th century with an ocean model forced by reanalysis-based atmospheric data sets, *Ocean Model*, 100, 31-48, 10.1016/j.ocemod.2015.12.011, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.12.011>
- Heinze, C., Hoogakker, B. A. A., and Winguth, A.: Ocean carbon cycling during the last 130 000 years - a pilot study on inverse palaeoclimate record modelling, *Clim Past*, 12, 1949-1978, 10.5194/cp-12-1949-2016, 2016.
<https://doi.org/10.5194/cp-12-1949-2016>
- Heinze, C., Ilyina, T., and Gehlen, M.: The potential of Th-230 for detection of ocean acidification impacts on pelagic carbonate production, *Biogeosciences*, 15, 3521-3539, 10.5194/bg-15-3521-2018, 2018.
<https://doi.org/10.5194/bg-15-3521-2018>
- Ilicak, M., Drange, H., Wang, Q., Gerdes, R., Aksenov, Y., Bailey, D., Bentsen, M., Biastoch, A., Bozec, A., Boning, C., Cassou, C., Chassignet, E., Coward, A. C., Curry, B., Danabasoglu, G., Danilov, S., Fernandez, E., Fogli, P. G., Fujii, Y., Griffies, S. M., Iovino, D., Jahn, A., Jung, T., Large, W. G., Lee, C., Lique, C., Lu, J. H., Masina, S., Nurser, A. J. G., Roth, C., Melia, D. S. Y., Samuelsen, B. L., Spence, P., Tsujino, H., Valcke, S., Voldoire, A., Wang, X. Z., and Yeager, S. G.: An assessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part III: Hydrography and fluxes, *Ocean Model*, 100, 141-161, 10.1016/j.ocemod.2016.02.004, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.02.004>
- Jiang, L. F., Yan, Y. E., Hararuk, O., Mickle, N., Xia, J. Y., Shi, Z., Tjiputra, J., Wu, T. W., and Luo, Y. Q.: Scale-Dependent Performance of CMIP5 Earth System Models in Simulating Terrestrial Vegetation Carbon, *Journal of Climate*, 28, 5217-5232, 10.1175/JCLI-D-14-00270.1, 2015.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00270.1>
- Karset, I. H. H., Berntsen, T. K., Storelvmo, T., Alterskjær, K., Grini, A., Olivie, D., Kirkevåg, A., Seland, O., Iversen, T., and Schulz, M.: Strong impacts on aerosol indirect effects from historical oxidant changes, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 7669-7690, 10.5194/acp-18-7669-2018, 2018.
<https://doi.org/10.5194/acp-18-7669-2018>
- Kessler, A., and Tjiputra, J.: The Southern Ocean as a constraint to reduce uncertainty in future ocean carbon sinks, *Earth Syst Dynam*, 7, 295-312, 10.5194/esd-7-295-2016, 2016.
<https://doi.org/10.5194/esd-7-295-2016>
- Kipling, Z., Stier, P., Johnson, C. E., Mann, G. W., Bellouin, N., Bauer, S. E., Bergman, T., Chin, M., Diehl, T., Ghan, S. J., Iversen, T., Kirkevåg, A., Kokkola, H., Liu, X. H., Luo, G., van Noije, T., Pringle, K. J., von Salzen, K., Schulz, M., Seland, O., Skeie, R. B., Takemura, T., Tsigaridis, K., and Zhang, K.: What controls the vertical distribution of aerosol? Relationships between process sensitivity in HadGEM3-UKCA and inter-model variation from AeroCom Phase II, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 2221-2241, 10.5194/acp-16-2221-2016, 2016.
<https://doi.org/10.5194/acp-16-2221-2016>
- Kirkevåg, A., Grini, A., Olivie, D., Seland, O., Alterskjær, K., Hummel, M., Karset, I. H. H., Lewinschal, A., Liu, X. H., Makkonen, R., Bethke, I., Griesfeller, J., Schulz, M., and Iversen, T.: A production-tagged aerosol module for Earth system models, OsloAero5.3-extensions and updates for CAM5.3-OSLO, *Geosci Model Dev*, 11, 3945-3982, 10.5194/gmd-11-3945-2018, 2018.
<https://doi.org/10.5194/gmd-11-3945-2018>
- Koffi, B., Schulz, M., Breon, F. M., Dentener, F., Steensen, B. M., Griesfeller, J., Winker, D., Balkanski, Y., Bauer, S. E., Bellouin, N., Berntsen, T., Bian, H. S., Chin, M., Diehl, T., Easter, R., Ghan, S., Hauglustaine, D. A., Iversen, T., Kirkevåg, A., Liu, X. H., Lohmann, U., Myhre, G., Rasch, P., Seland, O., Skeie, R. B., Steenrod, S. D., Stier, P., Tackett, J., Takemura, T., Tsigaridis, K., Vuolo, M. R., Yoon, J., and Zhang, K.: Evaluation of the aerosol vertical distribution in global aerosol models through comparison against CALIOP measurements: AeroCom phase II results, *J Geophys Res-Atmos*, 121, 7254-7283, 10.1002/2015jd024639, 2016.
<https://doi.org/10.1002/2015jd024639>
- Le Quere, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Manning, A. C., Boden, T. A., Tans, P. P., Houghton, R. A., Keeling, R. F., Alin, S., Andrews, O. D., Anthoni, P., Barbero, L., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Currie, K., Delire, C., Doney, S. C., Friedlingstein, P., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Hoppema, M., Goldewijk, K. K., Jain, A. K., Kato, E., Kortzinger, A., Landschutzer, P., Lefevre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozi, D., Melton, J. R., Metz, N., Millero, F., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S., O'Brien, K., Olsen, A., Omar, A. M., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rodenbeck, C., Salisbury, J., Schuster, U., Schwinger, J., Seferian, R., Skjelvan, I., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tian, H. Q., Tilbrook, B., van der Laan-Luijckx, I. T., van der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J., and Zaehle, S.: Global Carbon Budget 2016, *Earth Syst Sci Data*, 8, 605-649, 10.5194/essd-8-605-2016, 2016.
<https://doi.org/10.5194/essd-8-605-2016>
- Le Quere, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, J., Manning, A. C., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Boden, T. A., Tans, P. P., Andrews, O. D., Arora, V. K., Bakker, D. C. E., Barbero, L., Becker, M., Betts, R. A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Cosca, C. E., Cross, J., Currie, K., Gasser, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Houghton, R. A., Hunt, C. W., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Kato, E., Kautz, M., Keeling, R. F., Goldewijk, K. K., Kortzinger, A., Landschutzer, P., Lefevre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lima, I., Lombardozi, D., Metz, N., Millero, F., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S., Nojiri, Y., Padin, X. A., Peregón, A., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Reimer, J., Rodenbeck, C., Schwinger, J., Seferian, R., Skjelvan, I., Stocker, B. D., Tian, H. Q., Tilbrook, B., Tubiello, F. N., van der Laan-Luijckx, I. T., van der Werf, G. R., van Heuven, S., Viovy, N., Vuichard, N., Walker, A. P., Watson, A. J., Wiltshire, A. J., Zaehle, S., and Zhu, D.: Global Carbon Budget 2017, *Earth Syst Sci Data*, 10, 405-448, 10.5194/essd-10-405-2018, 2018.
<https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>
- Li, L. H., Wang, Y. P., Arora, V. K., Eamus, D., Shi, H., Li, J., Cheng, L., Cleverly, J., Hajima, T., Ji, D. Y., Jones, C., Kawamiya, M., Li, W. P., Tjiputra, J., Wiltshire, A., Zhang, L., and Yu, Q.: Evaluating Global Land Surface Models in CMIP5: Analysis of Ecosystem Water- and Light-Use Efficiencies and Rainfall Partitioning, *Journal of Climate*, 31, 2995-3008, 10.1175/JCLI-D-16-0177.1, 2018.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0177.1>
- Liu, L., Shawk, D., Voulgarakis, A., Kasoar, M., Samset, B. H., Myhre, G., Forster, P. M., Hodnebrog, O., Sillmann, J., Aalbergso, S. G., Boucher, O., Faluvegi, G., Iversen, T., Kirkevåg, A., Lamarque, J. F., Olivie, D., Richardson, T., Shindell, D., and Takemura, T.: A PDRMIP Multimodel Study on the Impacts of Regional Aerosol Forcings on Global and Regional Precipitation, *Journal of Climate*, 31, 4429-4447, 10.1175/JCLI-D-17-0439.1, 2018.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0439.1>
- Malavelle, F. F., Haywood, J. M., Jones, A., Gettelman, A., Larisse, L. C., Bauduin, S., Allan, R. P., Karset, I. H. H., Kristjansson, J. E., Oreopoulos, L., Ho, N. Y. C., Lee, D., Bellouin, N., Boucher, O., Grosvenor, D. P., Carslaw, K. S., Dhomse, S., Mann, G. W., Schmidt, A., Coe, H., Hartley, M. E., Dalvi, M., Hill, A. A., Johnson, B. T., Johnson, C. E., Knight, J. R., O'Connor, F. M., Partridge, D. G., Stier, P., Myhre, G., Platnick, S., Stephens, G. L., Takahashi, H., and Thordarson, T.: Strong constraints on aerosol-cloud interactions from volcanic eruptions, *Nature*, 546, 485-491, 10.1038/nature22974, 2017a.
<https://doi.org/10.1038/nature22974>
(Correction: Malavelle, F. F., Haywood, J. M., Jones, A., Gettelman, A., Clarisse, L., Bauduin, S., Allan, R. P., Karset, I. H. H., Kristjansson, J. E., Oreopoulos, L., Cho, N., Lee, D., Bellouin, N., Boucher, O., Grosvenor, D. P., Carslaw, K. S., Dhomse, S., Mann, G. W., Schmidt, A., Coe, H., Hartley, M. E., Dalvi, M., Hill, A. A., Johnson, B. T., Johnson, C. E., Knight, J. R., O'Connor, F. M., Partridge, D. G., Stier, P., Myhre, G., Platnick, S., Stephens, G. L., Takahashi, H., and Thordarson, T.: Strong constraints on aerosol-cloud interactions from volcanic eruptions (vol 546, pg 485, 2017), *Nature*, 551, 256-256, 10.1038/nature24275, 2017b.)
- Medhaug, I., and Drange, H.: Global and regional surface cooling in a warming climate: a multi-model analysis, *Climate Dynamics*, 46, 3899-3920, 10.1007/s00382-015-2811-y, 2016.
<https://doi.org/10.1007/s00382-015-2811-y>
- Myhre, G., Forster, P. M., Samset, B. H., Hodnebrog, O., Sillmann, J., Aalbergso, S. G., Andrews, T., Boucher, O., Faluvegi, G., Flaschner, D., Iversen, T., Kasoar, M., Kharin, V., Kirkevåg, A., Lamarque, J. F., Olivie, D., Richardson, T. B., Shindell, D., Shine, K. P., Stjern, C. W., Takemura, T., Voulgarakis, A., and Zwiers, F.: PDRMIP A Precipitation Driver and Response Model Intercomparison Project-Protocol and Preliminary Results, *B Am Meteorol Soc*, 98, 1185-1198, 10.1175/Bams-D-16-0019.1, 2017.
<https://doi.org/10.1175/Bams-D-16-0019.1>
- Myhre, G., Samset, B. H., Hodnebrog, O., Andrews, T.,

- Boucher, O., Faluvegi, G., Flaschner, D., Forster, P. M., Kasoar, M., Kharin, V., Kirkevåg, A., Lamarque, J. F., Olivie, D., Richardson, T. B., Shawki, D., Shindell, D., Shine, K. P., Stjern, C. W., Takemura, T., and Voulgarakis, A.: Sensible heat has significantly affected the global hydrological cycle over the historical period, *Nat Commun*, 9, ARTN 1922, 10.1038/s41467-018-04307-4, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04307-4>
- Navarro, J. C. A., Varma, V., Riipinen, I., Seland, O., Kirkevåg, A., Struthers, H., Iversen, T., Hansson, H. C., and Ekman, A. M. L.: Amplification of Arctic warming by past air pollution reductions in Europe, *Nat Geosci*, 9, 277–+, 10.1038/Ngeo2673, 2016a. <https://doi.org/10.1038/Ngeo2673>
(Correction: Navarro, J. C. A., Varma, V., Riipinen, I., Seland, O., Kirkevåg, A., Struthers, H., Iversen, T., Hansson, H. C., and Ekman, A. M. L.: Amplification of Arctic warming by past air pollution reductions in Europe (vol 9, pg 277, 2016), *Nat Geosci*, 9, 470–470, 2016b.)
- Navarro, J. C. A., Ekman, A. M. L., Pausata, F. S. R., Lewinschal, A., Varma, V., Seland, O., Gauss, M., Iversen, T., Kirkevåg, A., Riipinen, I., and Hansson, H. C.: Future Response of Temperature and Precipitation to Reduced Aerosol Emissions as Compared with Increased Greenhouse Gas Concentrations, *Journal of Climate*, 30, 939–954, 10.1175/Jcli-D-16-0466.1, 2017. <https://doi.org/10.1175/Jcli-D-16-0466.1>
- Outten, S., Thorne, P., Bethke, I., and Seland, O.: Investigating the recent apparent hiatus in surface temperature increases: 1. Construction of two 30-member Earth System Model ensembles, *J Geophys Res-Atmos*, 120, 8575–8596, 10.1002/2015jd023859, 2015. <https://doi.org/10.1002/2015jd023859>
- Pausata, F. S. R., Grini, A., Caballero, R., Hannachi, A., and Seland, O.: High-latitude volcanic eruptions in the Norwegian Earth System Model: the effect of different initial conditions and of the ensemble size, *Tellus B*, 67, ARTN 26728, 10.3402/tellusb.v67.26728, 2015. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v67.26728>
- Raisanen, P., Makkonen, R., Kirkevåg, A., and Debernard, J. B.: Effects of snow grain shape on climate simulations: sensitivity tests with the Norwegian Earth System Model, *Cryosphere*, 11, 2919–2942, 10.5194/tc-11-2919-2017, 2017. <https://doi.org/10.5194/tc-11-2919-2017>
- Rastak, N., Pajunoja, A., Navarro, J. C. A., Ma, J., Song, M., Partridge, D. G., Kirkevåg, A., Leong, Y., Hu, W. W., Taylor, N. F., Lambe, A., Cerully, K., Bougiatioti, A., Liu, P., Krejci, R., Petaja, T., Percival, C., Davidovits, P., Worsnop, D. R., Ekman, A. M. L., Nenes, A., Martin, S., Jimenez, J. L., Collins, D. R., Topping, D. O., Bertram, A. K., Zuend, A., Virtanen, A., and Riipinen, I.: Microphysical explanation of the RH-dependent water affinity of biogenic organic aerosol and its importance for climate, *Geophys Res Lett*, 44, 5167–5177, 10.1002/2017gl073056, 2017. <https://doi.org/10.1002/2017gl073056>
- Richardson, T. B., Forster, P. M., Andrews, T., Boucher, O., Faluvegi, G., Flaschner, D., Kasoar, M., Kirkevåg, A., Lamarque, J. F., Myhre, G., Olivie, D., Samset, B. H., Shawki, D., Shindell, D., Takemura, T., and Voulgarakis, A.: Carbon Dioxide Physiological Forcing Dominates Projected Eastern Amazonian Drying, *Geophys Res Lett*, 45, 2815–2825, 10.1002/2017gl076520, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017gl076520>
- Salter, M. E., Zieger, P., Navarro, J. C. A., Grythe, H., Kirkevåg, A., Rosati, B., Riipinen, I., and Nilsson, E. D.: An empirically derived inorganic sea spray source function incorporating sea surface temperature, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 11047–11066, 10.5194/acp-15-11047-2015, 2015. <https://doi.org/10.5194/acp-15-11047-2015>
- Samset, B. H., Myhre, G., Forster, P. M., Hodnebrog, O., Andrews, T., Faluvegi, G., Flaschner, D., Kasoar, M., Kharin, V., Kirkevåg, A., Lamarque, J. F., Olivie, D., Richardson, T., Shindell, D., Shine, K. P., Takemura, T., and Voulgarakis, A.: Fast and slow precipitation responses to individual climate forcings: A PDRMP multimodel study, *Geophys Res Lett*, 43, 2782–2791, 10.1002/2016gl068064, 2016. <https://doi.org/10.1002/2016gl068064>
- Samset, B. H., Myhre, G., Forster, P. M., Hodnebrog, Ø., Andrews, T., Boucher, O., Faluvegi, G., Flaschner, D., Kasoar, M., Kharin, V., Kirkevåg, A., Lamarque, J. F., Olivie, D., Richardson, T. B., Shindell, D., Takemura, T., and Voulgarakis, A.: Weak hydrological sensitivity to temperature change over land, independent of climate forcing, *npj Climate and Atmospheric Science*, 1, 20173, 10.1038/s41612-017-0005-5, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41612-017-0005-5>
- Sand, M., Iversen, T., Böhlinger, P., Kirkevåg, A., Seierstad, I., Seland, O., and Sorteberg, A.: A Standardized Global Climate Model Study Showing Unique Properties for the Climate Response to Black Carbon Aerosols, *Journal of Climate*, 28, 2512–2526, 10.1175/Jcli-D-14-00050.1, 2015. <https://doi.org/10.1175/Jcli-D-14-00050.1>
- Sand, M., Samset, B. H., Balkanski, Y., Bauer, S., Bellouin, N., Bernsten, T. K., Bian, H., Chin, M., Diehl, T., Easter, R., Ghan, S. J., Iversen, T., Kirkevåg, A., Lamarque, J. F., Lin, G. X., Liu, X. H., Luo, G., Myhre, G., van Noije, T., Penner, J. E., Schulz, M., Seland, O., Skeie, R. B., Stier, P., Takemura, T., Tsigaridis, K., Yu, F. Q., Zhang, K., and Zhang, H.: Aerosols at the poles: an AeroCom Phase II multi-model evaluation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 12197–12218, 10.5194/acp-17-12197-2017, 2017. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12197-2017>
- Schwinger, J., Goris, N., Tjiputra, J. F., Kriest, I., Bentsen, M., Bethke, I., Ilicak, M., Assmann, K. M., and Heinze, C.: Evaluation of NorESM-OC (versions 1 and 1.2), the ocean carbon-cycle stand-alone configuration of the Norwegian Earth System Model (NorESM1), *Geosci Model Dev*, 9, 2589–2622, 10.5194/gmd-9-2589-2016, 2016. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2589-2016>
- Schwinger, J., Tjiputra, J., Goris, N., Six, K. D., Kirkevåg, A., Seland, O., Heinze, C., and Ilyina, T.: Amplification of global warming through pH dependence of DMS production simulated with a fully coupled Earth system model, *Biogeosciences*, 14, 3633–3648, 10.5194/bg-14-3633-2017, 2017. <https://doi.org/10.5194/bg-14-3633-2017>
- Schwinger, J., and Tjiputra, J.: Ocean Carbon Cycle Feedbacks Under Negative Emissions, *Geophys Res Lett*, 45, 5062–5070, 10.1029/2018gl077790, 2018. <https://doi.org/10.1029/2018gl077790>
- Seferian, R., Gehlen, M., Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J. C., Marti, O., Dunne, J. P., Christian, J. R., Doney, S. C., Ilyina, T., Lindsay, K., Halloran, P. R., Heinze, C., Segschneider, J., Tjiputra, J., Aumont, O., and Romanou, A.: Inconsistent strategies to spin up models in CMIP5: implications for ocean biogeochemical model performance assessment, *Geosci Model Dev*, 9, 1827–1851, 10.5194/gmd-9-1827-2016, 2016. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1827-2016>
- Skeie, R. B., Bernsten, T., Aldrin, M., Holden, M., and Myhre, G.: Climate sensitivity estimates - sensitivity to radiative forcing time series and observational data, *Earth Syst Dynam*, 9, 879–894, 10.5194/esd-9-879-2018, 2018. <https://doi.org/10.5194/esd-9-879-2018>
- Skogen, M. D., Hjøllø, S. S., Sandø, A. B., Tjiputra, J., and Handling editor: Morgane, T.-T.: Future ecosystem changes in the Northeast Atlantic: a comparison between a global and a regional model system, *Ices J Mar Sci*, fsy088-fsy088, 10.1093/icesjms/fsy088, 2018. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy088>
- Sorokina, S. A., Li, C., Wettstein, J. J., and Kvamsto, N. G.: Observed Atmospheric Coupling between Barents Sea Ice and the Warm-Arctic Cold-Siberian Anomaly Pattern, *Journal of Climate*, 29, 495–511, 10.1175/Jcli-D-15-0046.1, 2016. <https://doi.org/10.1175/Jcli-D-15-0046.1>
- Stjern, C. W., Samset, B. H., Myhre, G., Forster, P. M., Hodnebrog, O., Andrews, T., Boucher, O., Faluvegi, G., Iversen, T., Kasoar, M., Kharin, V., Kirkevåg, A., Lamarque, J. F., Olivie, D., Richardson, T., Shawki, D., Shindell, D., Smith, C. J., Takemura, T., and Voulgarakis, A.: Rapid Adjustments Cause Weak Surface Temperature Response to Increased Black Carbon Concentrations, *J Geophys Res-Atmos*, 122, 11462–11481, 10.1002/2017jd027326, 2017. <https://doi.org/10.1002/2017jd027326>
- Tang, T., Shindell, D., Samset, B. H., Boucher, O., Forster, P. M., Hodnebrog, O., Myhre, G., Sillmann, J., Voulgarakis, A., Andrews, T., Faluvegi, G., Flaschner, D., Iversen, T., Kasoar, M., Kharin, V., Kirkevåg, A., Lamarque, J. F., Olivie, D., Richardson, T., Stjern, C. W., and Takemura, T.: Dynamical response of Mediterranean precipitation to greenhouse gases and aerosols, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 8439–8452, 10.5194/acp-18-8439-2018, 2018. <https://doi.org/10.5194/acp-18-8439-2018>
- Thompson, R. L., Sasakawa, M., Machida, T., Aalto, T., Worthy, D., Lavric, J. V., Myhre, C. L., and Stohl, A.: Methane fluxes in the high northern latitudes for 2005–2013 estimated using a Bayesian atmospheric inversion, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 3553–3572, 10.5194/acp-17-3553-2017, 2017. <https://doi.org/10.5194/acp-17-3553-2017>
- Thorne, P., Outten, S., Bethke, I., and Seland, O.: Investigating the recent apparent hiatus in surface temperature increases: 2. Comparison of model ensembles to observational estimates, *J Geophys Res-Atmos*, 120, 8597–8620, 10.1002/2014jd022805, 2015. <https://doi.org/10.1002/2014jd022805>
- Tjiputra, J. F., Goris, N., Lauvset, S. K., Heinze, C., Olsen, A., Schwinger, J., and Steinfeldt, R.: Mechanisms and Early Detections of Multi-decadal Oxygen Changes in the Interior Subpolar North Atlantic, *Geophys Res Lett*, 45, 4218–4229, 10.1029/2018gl077096, 2018. <https://doi.org/10.1029/2018gl077096>
- Zhou, S., Liang, J. Y., Lu, X. J., Li, Q. Y., Jiang, L. F., Zhang, Y., Schwalm, C. R., Fisher, J. B., Tjiputra, J., Stith, S., Ahlstrom, A., Huntzinger, D. N., Huang, Y. F., Wang, G. Q., and Luo, Y. Q.: Sources of Uncertainty in Modeled Land Carbon Storage within and across Three MIPs: Diagnosis with Three New Techniques, *Journal of Climate*, 31, 2833–2851, 10.1175/Jcli-D-17-0357.1, 2018. <https://doi.org/10.1175/Jcli-D-17-0357.1>



Planeten jorden er mer enn en kampestein i verdensrommet. Den har hav og en atmosfære, den har sjøis, iskapper og enorme kontinenter med trær og myrer. Dette er jordsystemet.

Bli med oss på en rundtur i jordens klima!

Nettstedet **expearth.uib.no** er utviklet av EVA-prosjektet og ble lansert høsten 2018. Sidene er på engelsk.

FOTO: NASA



Forskning og utvikling
støttet av

Forskningsrådet