

i statistiske sammenhenger mellom storstilte klimamønstre og regionalt/lokalt vær. Slik nedskalering av et større sett av globale scenarier har understreket nødvendigheten av å inkludere et bredt utvalg (ensemble) av klimascenarier for å dekke bredden i de naturlige regionale klimavariasjonene. Både dynamiske og empiriske metoder skal brukes og kombineres i den nye fasen av RegClim. Usikkerheten i vår kunnskap vil tallfestes ved å nedskalere beregninger fra ulike globale modeller.

Ensemblet av nedskalerte scenarier skal kompletteres ytterligere med globale studier der 1) havstrømmene i Nord-Atlanteren og 2) aerosolpartiklers påvirkning settes i fokus. På disse områdene har RegClim spesiell

kompetanse, og det kan forventes at RegClims resultater vil være bedre på disse feltene enn de fleste andres. Ved også å nedskalere disse vil vår viten om klimaendringer i vår region bli vesentlig styrket.

#### Nyutvikling

Helt nytt i RegClim vil bli nedskalering i de øverste vannlagene i våre nære havområder. Dette har som mål å forberede for virkningsstudier for livet i havet, og inkluderer mulige endringer i forholdene for våre fiskerier. Mye av de samme typer nedskaleringer som planlegges i atmosfæren vil også bli gjort for disse havområdene.

RegClim har begynt å utvikle en regional klimamodell som kobler

atmosfæren, havis og de øverste lagene i havet. Formålet er å bedre de globale scenariene med særlig vekt på Arktis. Klimaendringer i og nær Arktis er nært knyttet til endringer i isdekket. I de aller fleste globale klimamodeller er havis modellert med store feil. Dette skyldes ikke nødvendigvis modellering av is i seg selv, men hvordan de koplede modellene oppfører seg som en enhet. Dårlig romlig oppløsning, særlig i havet, er trolig en medvirkende årsak, som en koplet regional klimamodell kan forbedre.

#### Trond Iversen

er professor i meteorologi ved Institutt for Geofysikk, UiO og prosjektleder for RegClim (trond.iversen@geofysikk.uio.no).

# Risiko for bråe klimaendringer

Kan en global oppvarming destabilisere klimasystemet på en lignende måte som ved slutten av siste istid? Bråe klimaendringer er antakelig mulige i årene som kommer, men utslagene kan neppe bli så store som den gangen.

**Sigbjørn Grønås,**  
**RegClim**

Klimaet under siste istid var ustabil og gjennomgikk store variasjoner, kalt *Dansgaard-Oeschgersvingninger* (DO-svingninger), med perioder på ca 1000 – 1500 år (se artikkel av Grønås og Nesje i *Cicerone* 2/2001). Mesteparten av variasjonene skjedde som plutselige klimaendringer (8 til 16 °C på Grønland) over kanskje bare et tiår eller to. Til sammenligning har klimaet i vår mellomistid *holosen* (siste 10 000 år) vært mye mer stabilt, men med mindre klimavariasjoner som f.eks. *den lille istid* (ca 1400 – 1850 AD) og ørkendannelsen i Sahara (ca 5000 år siden). Forholdene er illustrert i figur 1 (og figur 1 side 26), som blant annet viser temperaturvariasjoner basert på oksygenisotoper i iskjerner

fra Grønlands innlandsis. Vi merker oss spesielt den siste DO-svingningen under *ynge dryas*, ved utgangen av istiden.

#### Klimamekanismer

I våre dager er som kjent en menneskeskapt global oppvarming på gang, forårsaket av økt drivhuseffekt. Betydelige klimaendringer er ventet for kommende hundre år med store mulige konsekvenser for natur og samfunnsliv. Et stort spørsmål er om den globale oppvarmingen kan gjøre klimaet mer ustabil med raskere endringer enn vi har hatt i holosen inntil nå. I så fall har vi mye større grunn til bekymring for framtidens klima enn med en stabil og jevn endring.

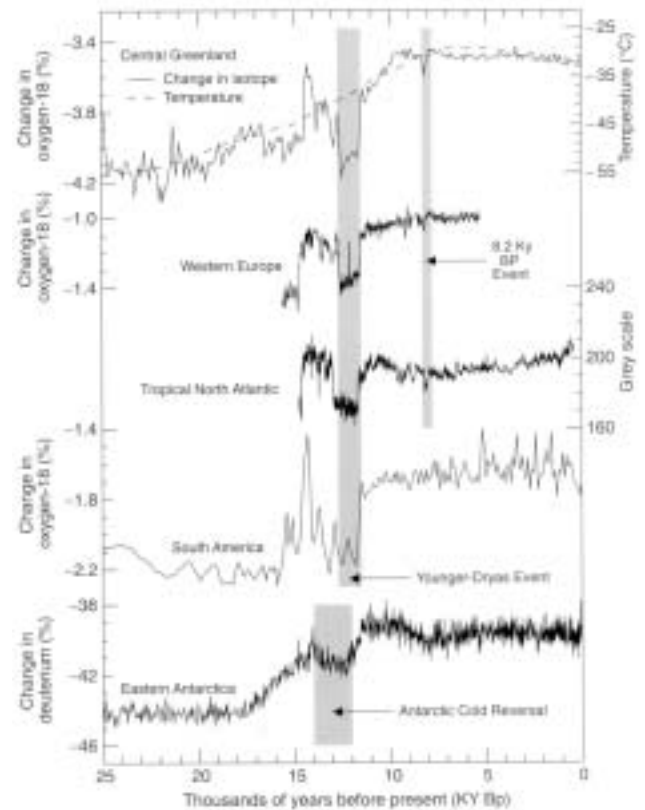
En tenker seg at bråe klimaendringer skjer når klimasystemet tvinges til å overstige visse terskler. Utløsningen skjer gjerne ved en ytre påvirkning av klimasystemet, slik som endring i solak-

tiviteten eller økt drivhuseffekt. Overstigning av en terskel starter en overgang til en ny klimatilstand med en hastighet bestemt av klimasystemets indre prosesser. Overgangen skjer hurtigere enn endringene i de ytre pådriv som forårsaket utløsningen. Selv et svakt pådriv over lang tid forårsaket av endringer i jordas baneparametre (se artikkel i *Cicerone* 2/2003 av Mangerud), kan for eksempel utløse bråe endringer. Når terskler overskrides og endringer settes i gang, settes mekanismer i gang som kan forsterke disse endringene. Et eksempel er klimaendringen i Sahara, som hadde sin årsak i at solstrålingen om sommeren langsomt ble svakere, noe som svekket den afrikanske monsunen. Tørken førte til at vegetasjonen døde. Det førte til redusert fordampning - noe som igjen forsterket tørken. Andre klimaprosesser bidrar til å spre endringene globalt. Forutsigbarheten for endringer når kli-



Foto: NOAA

Issmelting som følge av global oppvarming vil trolig skje mer jevnt over tid i forhold til tidligere perioder. Bildet er av ishylla Ross i Antarktis.



Figur 1. Klimavariasjoer fra siste istid gjennom holosen. De ulike skalene antas å variere i takt med lokal temperatur. De grå områdene viser hendelsen for 8200 år siden, yngre dryas og perioden kalt *Antarctic Cold Reversal*. Figur 2.24 i IPCC (2001).

masystemet nærmer seg terskler, er langt mindre enn for jevnere klimaendringer.

#### Bråe klimaendringer ved utgangen av istiden

De bråe klimaendringene ved utgangen av istiden hadde en slik langsom utløser, nemlig en forsterkning av solstrålingen om sommeren ved polene. De store ismassene begynte å smelte. Havsirkulasjonen ble radikalt endret på kort tid når pulser med smeltevann til havet overskred visse terskler; store og bråe klimaendringer fant sted.

Med havsirkulasjonen mener vi *den termohaline sirkulasjon*, som har sin viktigste utbredelse i Atlanterhavet. I dagligtale blir den noe feilaktig referert til som "Golfstrømmen". Sirkulasjonen har to stabile tilstander, den vi har i dag, med en kraftig sirkulasjon som fører store varmemengder mot polene i overflaten, og en tilstand uten en slik sirkulasjon, som medfører betydelig kaldere klima på våre bredder (se artikkel av Hjøllø i *Cicerone* 2/2002 og artikkel side 26). Store pulser med ferskvann kan gi en overgang mellom de to stabile fasene og

således store klimaendringer på kort tid.

Smeltevannet dannet ofte store innsjøer, gjerne demt opp av isen selv. Slike demninger kunne bryte, og de raskeste klimavariasjonene hadde trolig sammenheng med slike hendelser, da uvanlig store vannmasser ble tilført havet over kortere perioder. En kjent slik hendelse under yngre dryas var *Smeltevannspuls 1A*, som for ca 14600 år siden fikk havet til å stige 20 m på mindre enn 500 år (40 mm per år, se artikkel side 26). Mens en tidligere har knyttet pulsen til Nord-Amerika, mener en nå at den kan ha vært knyttet til Antarktis. En brå endring med mye varmere klima (se figur 1) fant sted på våre breddegrader da pulsen førte til en igangsetting av den termohaline sirkulasjonen til dagens tilstand. En mye kortere hendelse skjedde i holosen for ca 8200 år siden, da en mener at svære oppdemte innsjøer over Nord-Amerika, som var rester av vann fra istiden demt opp av isen selv, på kort tid - kanskje et år - rant ut i Labradorhavet (se artikkel av Grønås og Nesje i *Cicerone* 1/2000). Klimaet ble kaldere over store deler av kloden for en

periode på ca 200 år, men utslagene var ikke så store som under yngre dryas. Modellberegninger tyder på at klimaendringen skyldtes en svekkelse av den termohaline sirkulasjonen, men uten at sirkulasjonen opphørte.

#### Ferskvann til havet under global oppvarming

Pådrivet fra økt drivhuseffekt skapt av mennesker er mye større og bygger seg opp mye raskere enn de langsomme pådrivene skapt av endringer i jordas bane rundt sola. Mulige endringer av dagens klimastabilitet kan være knyttet til flere klimaprosesser, hvor trolig ikke alle er identifiserte. Mye av forskningen til nå har vært knyttet til om den termohaline sirkulasjonen kan endres radikalt, slik som under istiden.

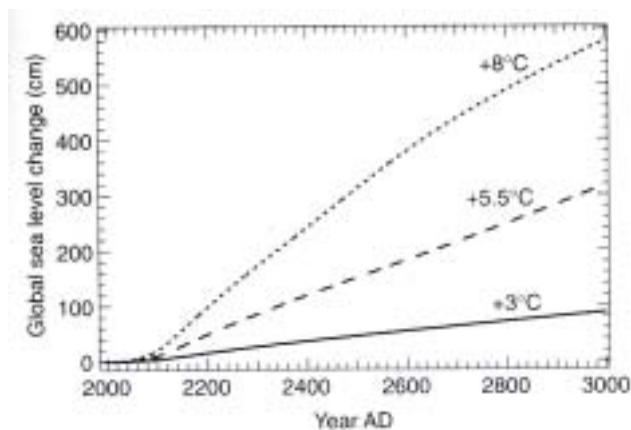
Det fins fortsatt is som kan smelte og renne ut i havet. For eksempel inneholder Grønlandsisen vann tilsvarende 6 meters økning i havnivået. I Antarktis er potensialet langt større, men en mener at bare mindre deler kan smelte som følge av global oppvarming. Til sammen fins det kanskje vann tilsvarende 10 m

i havet som kan smelte innen de første tusenårene. Smelting i dag vil trolig skje mer jevnt over tid og uten lignende pulser som under yngre dryas. En eventuell tidsskala for smeltingen er minst 2 000 år (figur 2 fra IPCC-rapporten *Climate Change 2001 - The scientific basis*, www.ipcc.ch, kapittel 11). Dette utgjør en heving av havnivået på mindre enn 3 mm per år. Under yngre dryas skjedde det ingen dramatiske klimaendringer ved så små endringer i mengden smeltevann. Smelting av is i dagens klima kan etter alt å dømme ikke endre havsirkulasjonen radikalt. Klimasystemets tilstand i dag er således langt fra den en hadde under yngre dryas. Derfor kan en ikke trekke analogier fra den gang for å vurdere stabiliteten i dagens klimasystem. I Norge har professor emeritus Kåre Pedersen, ved Institutt for Geofysikk, UiO, lenge hevdet dette.

Det er mer nærliggende å undersøke om økt nedbør og fordampning kan gi økt tilførsel av vann til havet. Klimamodellene viser en økning i global nedbør med ca 25 mm per år ved en dobling av CO<sub>2</sub>-innholdet i atmosfæren (IPCC 2001). Dette er en del, men balanseres av økt fordampning. Globalt vil det derfor ikke bli tilført havet mer enn det lille som smelter. Men endringene i nedbør og fordampning vil variere mye regionalt, for eksempel ventes nedbøren å øke mest i tropene og på høye breddegrader. Dette kan føre til økt avrenning til havet i visse regioner. For eksempel vil mer nedbør over Sibir føre mer vann til havet i Arktis. Det er også ført argumenter for at havet i tropene kan bli mer salt på tross av økningen av nedbøren. Siden det gjerne er endringer i tetthet mellom pol og ekvator som teller for sirkulasjonen, anser en det som mulig at den termohaline sirkulasjonen kan svekkes. Noen resultater med enkle klimamodeller antyder at den termohaline sirkulasjonen kan bli mer ustabil, men uten at den blir slått av. I så fall kan vi få bråe klimaendringer, men uten de store utslag som under siste istid.

#### Havsirkulasjonen trolig stabil

Det er altså lite som tyder på at "Golfstrømmen" vil gjennomgå så store variasjoner at den kan nå sitt andre stabile leie, med liten transport av varme mot nord. Hvordan stemmer dette med den reduserte havsirkulasjonen som klimamodellene viser under global oppvarming, og reduksjonen en mener har funnet sted i Nord-Atlanteren gjennom de siste 50 år? Modellene gir ulike svar, de fleste viser en reduksjon på ca 25 % fram mot år 2100 (IPCC 2001). Målinger fra Norskehavet på værskipet Mike antyder en reduksjon



Figur 2. Beregnet smelting av Grønlandsisen – uttrykt ved endring i havets nivå – for neste 1000 år for tre ulike oppvarmings-scenarier. Tallene som markerer hver av de tre kurvene er oppvarming (årlig middeltemperatur) ved år 3000. De tre scenariene er beregnet i enkle kopled klimamodeller hvor drivhusgassene holdes konstant fra år 2130. Figur 11.16 i IPCC 2001.

på 20 % over de siste 50 år (Hanssen, Turrell & Østerhus i *Nature*, 411, 21. juni 2001). Det er vanskelig å vite om de observerte variasjonene representerer naturlige variasjoner eller om de er et resultat av global oppvarming. Videre er det vanskelig å vite hvor representative de er for den termohaline sirkulasjonen. Modellresultatene er også vanskelige å vurdere, fordi de enda ikke har god oppløsning av havet og dets prosesser. Bergen Climate Model har en relativt velutviklet havmodul. Et nytt ensemble av kjøringer med denne modellen til en dobling av CO<sub>2</sub>, gjennomført innenfor RegClim-prosjektet, viser i motsetning til de fleste modellene bare små endringer i havsirkulasjonen (ennå upubliserte resultater).

Resultatene fra Bergen styrker RegClims konklusjoner slik de er uttrykt i vår siste brosjyre (www.regclim.met.no), om at havsirkulasjonen ikke påvirkes så mye under global oppvarming, og at drivhusoppvarming vil oppveie effekten av en eventuell reduksjon av THC i våre områder. Selv om vi utelukker slike voldsomme utslag en hadde under yngre dryas, kan vi likevel ikke utelukke mindre, men alvorlige nok endringer knyttet til den termohaline sirkulasjonen og vekselvirkning mellom atmosfære og hav, f.eks gjennom El Niño/Den sørlige svingning eller dannelsen av store avvik i havets saltinnhold mellom Island og sørspissen av Grønland (se artikkel av Grønås og Hjøllø i *Cicerone* 4/2002). I tillegg fins det andre mekanismer som kan gi lignende bråe endringer. Enhver slik klimaendring i framtiden kan få store og uforutsette virkninger.

#### Bedre modeller nødvendig

Beregninger av klimascenarier for de neste hundre år med kompliserte klimamodeller indikerer en global oppvarming med mange alvorlige regionale endringer, men uten at klimasystemets stabilitet synes å bli endret radikalt. Dette kan virke beroligende, men en må huske at modellene ennå har betydelige svakheter. For eksempel har de som regel kunstige korreksjoner for å balansere vekselvirkning mellom hav og atmosfære, korreksjoner som stabiliserer klimavariasjonene.

Det er viktig å intensivere forskningen knyttet til klimasystemets stabilitet og bråe klimaendringer. Trolig er det bare forskning med kompliserte klimamodeller som kan gi oss de svarene vi trenger. Den viktigste delen av denne forskningen vil bestå i å forbedre klimamodellene slik at de får fram bråe endringer med større nøyaktighet. Da kan modellene i større grad brukes for å anslå risiko for bråe framtidige endringer både regionalt og globalt. Det er mange forskere som eksperimenterer med dagens klimamodeller og som skaffer indirekte målinger om fortidens bråe klimavariasjoner, men alt for få tar på seg den møysommelige jobben med å forbedre modellene. Denne delen av forskningen bør få større prioritet.

#### Sigbjørn Grønås

(sigbjorn@gfi.uib.no) er professor ved Geofysisk institutt, UiB, tilknyttet Bjerknessenteret for klimaforskning og med i ledergruppen for RegClim.