

Havsirkulasjonen - Golfstrømmen

Havet med sin store varmekapasitet og havsirkulasjonen regulerer jordas klima. Omtrent 90 prosent av en aktuell strålingsubalanse blir tatt opp av havet. I denne delen ser vi nærmere på havsirkulasjonen og dens endringer.

Det hører til barnelærdommen at vårt milde vinterklima skyldes Golfstrømmen¹. En av de første som skrev om dette var Matthew Fontaine Maury², en amerikansk marineoffiser som publiserte boka *The Physical Geography of the Sea* i 1855. Her skriver han om hvordan Golfstrømmen påvirker klimaet, for eksempel: *En av oppgavene til Golfstrømmen er å bringe varme fra Mexicogulften, hvor det ellers ville blitt for mye varme, og fordele den på områder bortenfor Atlanterhavet for å mildne klimaet på De britiske øyene og i hele Vest-Europa.*

Moderne forskere uttrykker seg ofte på liknende måte. Den kjente klimaforskeren Wallace S. Broecker³ skriver⁴: *Et av de viktigste elementene i dagens havsystem er en transportbåndliknende sirkulasjon som avgir enorme mengder tropisk varme til Nord-Atlanteren. Om vinteren avgis denne varmen til de østgående luftmassene over havet, og derigjennom mildnes vintertemperaturene over nordlige Europa.*

Vi har tidligere gitt en svært kort innføring i oseanografi. Det er et langt sprang derfra til å forstå havsirkulasjonen og dens betydning for klimaet. Hvordan varierer havsirkulasjonen, og hva slags følger har variasjonene for klimaendringer i våre områder? Vil den globale oppvarmingen påvirke havsirkulasjonen, og spesielt, vil sirkulasjonen vi i daglig tale kaller Golfstrømmen avta i styrke og bidra til kaldere vintre? Slike spørsmål dukker opp i media, ikke minst har to filmer skaket oss: den helt urealistiske *The day after tomorrow*⁵ og Al Gores opplysningsfilm *An inconvenient truth*⁶. Avisene skriver til stadighet om faren for kaldere vintre, for eksempel en artikkel i *Sunday Times* 8. mai 2005 med tittel: *Storbritannia står over for betydelig avkjøling ettersom havstrømmene minker i styrke*; eller i *Aftenposten* 10. desember 2007: *Golfstrømmen kan kjøle ned Norge*. Avisoppslagene refererer til forskning som viser tegn til at havstrømmene er i ferd med å svekkes.

Muligheten for at Golfstrømmen skal stoppe opp, har festet seg hos mange. Den kjente professoren Carl Wunsch ved MIT, Boston⁷, beroliger oss. I et kort tilsvarende til artikler i *Science* om ulike mulige tilstander for havstrømmene i Atlanterhavet, slår han fast at *så lenge vi har vestlig vind og en klode som roterer, vil ikke Golfstrømmen stoppe opp*⁸. Vi har også fått forskning som stiller spørsmål om hvor stor betydning Golfstrømmen egentlig har for vårt klima. Hvor riktig er vår barnelærdom om Golfstrømmen?

I dette kapitlet gir vi en videre oversikt over havsirkulasjonen med vekt på Atlanterhavet, teori for at Golfstrømmen kan ha ulike tilstander og stoppe opp, forskning om hvorfor det er usannsynlig at Golfstrømmen stopper opp som følge av den globale oppvarmingen. Vi har også med tanker om den relative betydningen av Golfstrømmen og sirkulasjoner i atmosfæren for vårt milde klima. Til sist kommer et forsøk på en oppsummering om dagens forståelse for hvordan endringer i sirkulasjonen i Nord-Atlanteren kan påvirke vårt klima. Det er slett ingen enkel oppgave.

Strøm i Nord-Atlanteren

I norsk dagligtale betegner Golfstrømmen strømmen av overflatevann i Nord-Atlanteren fra Den meksikanske Golf, over Atlanterhavet med en grein inn i Norskehavet langs kysten av Norge. På fagspråket heter denne varme strømmen i Norskehavet *Den norske atlantehavsstrøm*. Golfstrømmen er egentlig den varme strømmen fra Den meksikanske golf

og opp langs kysten av USA, der den forlater kontinentet ved Cape Hatteras ved 35 °N (Fig. 1). Herfra krysser en del av vannmassene Atlanterhavet under navnet *Den nordatlantiske drift*. En del sirkulerer med klokken (antisyklonalt) tvers over Atlanterhavet og ned i Saragossahavet (subtropisk *gyre*). Disse strømmene i havets overflatelag drives fra dag til dag av vinden. Strømmene kan påvirke totalsirkulasjonen, som i store basseng omfatter dyphavet, dvs. enorme vannmasser der variasjoner i sirkulasjonen kan skje over mye lengre tidsskala enn for overflatestrømmene, gjerne flere dekader eller lengre. Golfstrømmen, Den nordatlantiske drift og Den norske atlantehavsstrøm utgjør en del av en tredimensjonal sirkulasjon i hele Atlanterhavet (Fig. 2). Den vertikale sirkulasjonen i retning sør-nord er knyttet til nedsynkning i nord og oppstigning nær ekvator. På fagspråket blir den kalt *Meredional omveltningssirkulasjon* (meridional overturning circulation, MOC). I et tidsperspektiv lengre enn en dekade skyldes variasjonene i Den norske atlantehavsstrøm i betydelig grad variasjoner i denne vertikale sirkulasjonen. Den vertikale omveltningen er igjen en viktig del i en storstilt global sirkulasjon som omfatter alle verdenshav (se nedenfor).

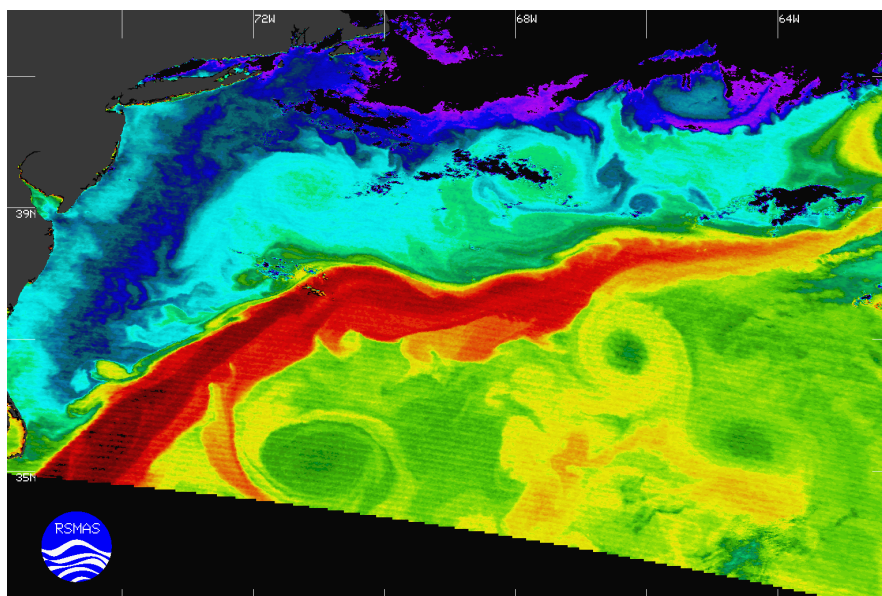


Fig. 1: Golfstrømmen. Sjøtemperatur (May 8, 2000, at 11:45 a.m. EDT) fra infrarødt satellitbilde (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) på en klar dag ut fra østkysten av USA. Temperaturvariasjonen er mellom 7 og 22 grader. Temperaturen stiger fra lilla, blå, grønn, gul med rødt som det varmeste. http://visibleearth.nasa.gov/view_rec.php?id=215

Den vertikale omveltningen i Atlanterhavet bringer varmt overflatevann nordover i Norskehavet mot Barentshavet og Svalbard der vannet avkjøles, synker ned og strømmer sørover som dyp- og bunnvann. Nedsynkningen skyldes økende tetthet på vannmassene ved at de avgir flukser av varme til atmosfæren - følbar og latent - og dannelse av sjøis. Tilsvarende avkjøling skjer også i Labradorhavet og i Weddelhavet ved Antarktis. Den vertikale omveltningen bidrar til at det varme vannet når lengre nord i Atlanterhavet enn i Stillehavet, der det ikke finnes en tilsvarende vertikal omveltning. Slik er det i dagens klima isfritt i store deler av Barentshavet og lite is på vestsiden av Svalbard.

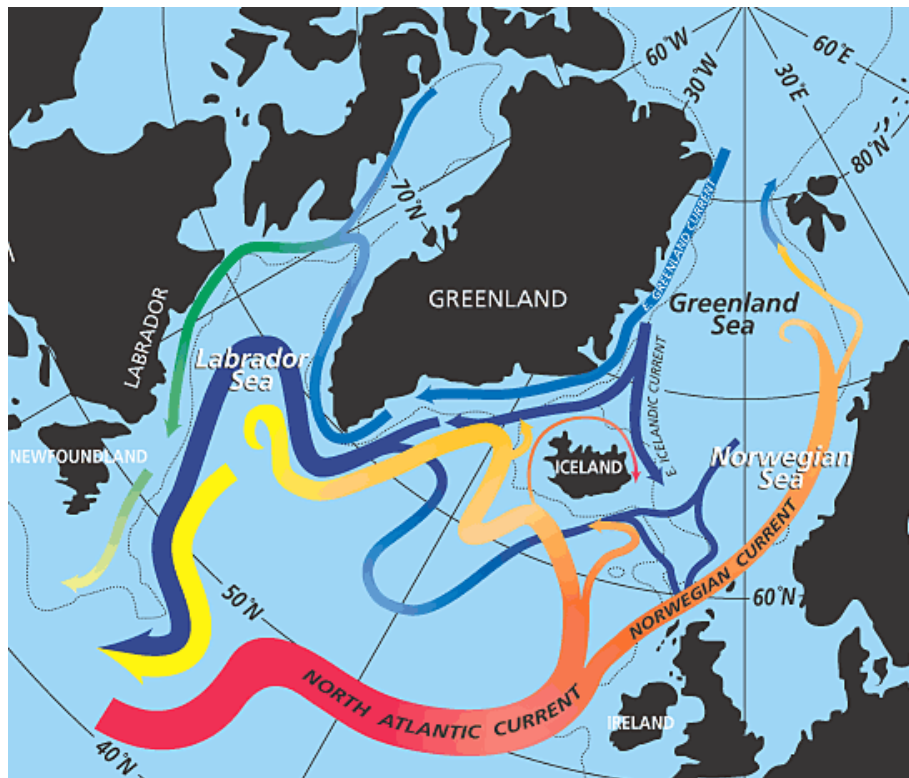


Fig. 2: Havstrømmer i nordre del av Nord-Atlanteren. Fargen avgir temperaturen med stigende temperatur fra mørkeblått mot rødt. Mørkeblå strømmer er strømmer i dyphavet. Røde, gule, grønne og lyseblå strømmer ved Grønland er strømmer i øverste lag. Geofysisk

En grunn til at vannmasser i Nord-Atlanteren er mer saltholdige sammenlignet med Stillehavet i nord er bidrag fra svært salt vann fra Middelhavet som strømmer gjennom Gibraltar. Geofysisk institutt, UiB.

Den atlantiske meredionale omveltning

I tillegg til draget fra vinden på havet i overflaten drives havstrømmene ved horisontale forskjeller i vannets tetthet. Vi har pekt på at tettheten i havet er avhengig av temperatur saltholdighet og trykk. Kjenner en disse tre parametrene er tettheten entydig bestemt. Sirkulasjon satt opp av tetthetsforskjeller blir gjerne kalt *Termohalin sirkulasjon* (*termo* for varme, *halin* for salt). Sirkulasjon i havet er modifisert av jordens rotasjon slik at vannmassene har en tendens til å bøye av mot høyre (på den nordlige halvkule). I tillegg vil kontinentenes utforming og havbassengenes topografi, spesielt skråningene opp mot kontinentene, være med å styre sirkulasjonen.

En tenker seg altså Den norske atlanterhavsstrøm som en del av en global sirkulasjon som bringer varme vannmasser fra sør mot nord i overflaten i Nord-Atlanteren, og som returnerer kaldere vann sørover både i overflaten og i dypet. Benevnelsen MOC eller bare omveltningen er av nyere dato⁹. Ved 24 °N er varmestrømmen mot nord anslått til $1,23 \cdot 10^{15}$ W¹⁰. Omveltningen i Atlanterhavet kalles AMOC (Atlantic MOC). Vannmengdene som veltes om er anslått til rundt 20 Sv (1 Sv = 1 million kubikkmeter i sekundet, enheten kalles *Sverdrup*)¹¹. En Sverdrup er ganske mye vann, vannføringen i Amazonas varierer til

sammenligning mellom 0,075 og 0,220 Sv gjennom året. Vannføringen i alle verdens elver er i overkant av 1 Sv.

Som nevnt finner vi i Stillehavet ingen tilsvarende omvelting lik den i Atlanterhavet. Men det er likevel noen grunnleggende likhetstrekk i sirkulasjonen i Atlanterhavet og Stillehavet. Blant annet er den i begge hav i store trekk styrt av dominerende vindretninger. Men i Atlanterhavet trenger altså det varme, tropiske overflatevannet mye lenger mot nord, delvis på grunn av omveltingen. Omveltingen er igjen knyttet til havets form og topografi og sirkulasjonene i atmosfæren, inkludert ferskvannets kretsløp.

I Atlanterhavet strømmer det varmt overflatevann nordover fra Brasil, vann som blir presset opp mot kysten av det amerikanske kontinent som Golfstrømmen til like nord for Florida. Golfstrømmen har en gjennomsnittsvannføring på 32 Sv utenfor Florida¹². Etter at den forlater det amerikanske kontinent ved Cape Hatteras ved 35°N, strømmer det varme overflatevannet nordøstover før det splittes opp i flere greiner. Den nordatlantiske drift bringer varmt vann mot området sør for Island og Færøyene (Fig. 2). Mens Golfstrømmen lengre sør utgjør en intens jet, er Den nordatlantiske drift et mer storstilt og mindre intenst strømsystem. En gren bøyer av i en bred overflatestrøm, cirka 1 km dyp, mot sør som Den subtropiske gyre. En tredje gren går inn i Labradorhavet.

Lengre nord deler den Den nordatlantiske drift seg i flere mindre greiner. En av disse greinene går inn i Norskehavet mellom Skottland og Færøyene og fortsetter langs kysten av Norge før den ender i Barentshavet og i Arktis (Den norske atlantehavsstrøm). Etersom det atlantiske vannet strømmer nordover, frigjøres varme og fuktighet fra havet til kaldere luftmasser. Denne varmen bidrar til mildt klima over det nordlige Europa¹³. Men som vi skal se, er strømmen av varme fra sør i havet ikke den eneste årsak til vårt milde klima.

På Geofysisk institutt, Universitetet i Bergen, har Kjell Arild Orvik gjort kontinuerlige målinger i vel 15 år av Den norske atlantehavsstrømmen i et snitt fra Svinøy like nord for Stad og nordvestover på tvers av strømmen¹⁴. Han finner at strømmen har to greiner; en langs eggakanten og en lengre ute der det er store temperaturgradienter mellom den varme strømmen og kaldere vannmasser i nordvest. Konsentrasjonen av strømmen ved eggakanten skyldes heving av vannmassene inn mot land (som gir *geostrofisk strøm*), mens den ytre strømmen er et resultat av temperaturgradientene på samme måten som temperaturgradienter i atmosfæren gir en jet på toppen av troposfæren.

Det er et problem å sette gode ord på havsirkulasjoner slik at de blir husket av folk flest. *Den norske atlantehavsstrøm* er et begrep som vanligvis bare fagfolk bruker. Noe annet er det med uttrykket "Golfstrømmen", som er spikret fast fra barnelærdommen. Det er ikke godt å vite hvorfor det er slik. Årsaken kan ligge i at det ligger varmt vann i første delen av ordet, dvs. varmt vann fra Den meksikanske golf. Jeg har spurt oseanografer om de ikke kan finne på et bedre navn på den varme strømmen opp langs vår kyst. Men det er vanskelig å finne et bedre navn enn *Den norske atlantehavsstrøm* eller *Atlantehavsstrømmen* som kortversjon. Siden vi som regel tenker at Atlanterhavet er sørvest for oss, assosierer vi begrepet med varme vannmasser, men uttrykket fenger likevel ikke.

Oseanografene har i flere tiår prøvd å innføre begrepet termohaline sirkulasjon når de formidler om omveltningen AMOC. Men også denne betegnelsen er lite kjent. Siden sirkulasjonen det siktes til ikke bare er termohalin, men også drevet av vinden, kan det være misvisende å bruke *termohaline sirkulasjon* for Atlanterhavet uten å spesifisere at det er den termohaline del av sirkulasjonen en mener. Meredional omveltning (MOC) blir nå mest brukt i faglitteraturen. Omveltningen i Nord-Atlanteren er et enkelt begrep på norsk. Noen ganger kan en forenkle ytterligere og bare bruke uttrykket sirkulasjonen i Nord-Atlanteren som da inkluderer omveltningen med varme vannmasser mot nord. Likevel, enkle uttrykk som den vertikale omveltningen og sirkulasjonen i Nord-Atlanteren, vil nok ikke danke ut Golfstrømmen som uttrykk for varme vannmasser mot nord langs norskekysten.

Dypvannsdannelse og returstrøm

Overflatevannet i Atlanterhavet blir altså tyngre ettersom det strømmer mot nord og blir kaldere og saltere. Endringen i saltinnholdet betyr mye for tettheten og regnes som en joker når det gjelder styrken på omveltningen. Vi har nevnt at fordamping bidrar til at overflatevannets saltholdighet og tetthet øker. Når sjøis fryser, blir mesteparten av saltet skilt ut fra isen. Også denne prosessen øker vannets saltholdighet. Samtidig gir tilførsel av ferskvann en effekt i motsatt retning. Slik vil ferskvann fra nedbør på havet, avrenning fra land, og smelting av havis og *isbreer* over land redusere saltholdigheten og dermed redusere vannets tetthet. Prosessene som gir større tetthet, gir i disse områdene større effekt enn dem som bidrar til mindre tetthet. Slik er overflatevannet i De nordiske hav tyngre enn tilsvarende vann i tropene og subtropene (4-6 kg per kubikkmeter tyngre).

I Grønlandshavet og i Labradorhavet kan det om vinteren bli dannet så tungt vann at det synker og blandes fra overflaten og ned til dyp på 1000-3000 m. Dette skjer ved at vannmassene blir ustabile for vertikale forflytninger, dvs. ved en omrøring som har visse paralleller til *konveksjon* i atmosfæren. Ved målinger og teoretiske betraktninger finner en at det oppstår hva oseanografene kaller skorsteiner som blander vannmassene¹⁵. Disse konvektive skorsteinene finner sted ved intens avkjøling av overflaten ved utbrudd av kald luft ettersom lavtrykkssystem passerer. De normalt stabile vannmassene blir ustabile og tettere vann blandes til relativt dype nivå. Grønlandshavet og deler av Norskehavet er et av få steder i verden hvor slike prosesser foregår ved konveksjon ned til mellom 2000 og 3000 meters dyp. Til sammen fører prosessen til *dypvannsdannelse*. På fagspråket betegnes slike vannmasser for *Nordatlantisk dypvann* (North Atlantic deep water; NADW)¹⁶. Sammen med tilsvarende blandingsprosesser i Labradorhavet og sør for ryggen mellom Island og Færøyene, dannes det en returstrøm i dyp fra 2 til 5 km drevet av termohaline krefter. Slik er dypvannsdannelse med på å opprettholde Den nordatlantiske drift. Dypvannet som dannes på denne måten eksporteres ut av området i dype strømmer og utgjør NADW.

Forskjellen i tetthet mellom overflatevann i nord og i tropene/subtropene er altså en viktig drivkraft for sirkulasjonen i Atlanterhavet. Det er vanlig å illustrere dette ved å tenke seg at vannet i et badekar består av ferskvann til venstre og sjøvann til høyre, skilt ved en plate. Dersom en lager en åpning oppe og en åpning nede i platen, vil det lette vannet til venstre strømme til høyre gjennom det øverste hullet og det tunge vannet på høyre side til venstre gjennom det nederste hullet. Slik oppstår det en sirkulasjon som er drevet ved forskjellig tetthet i de to vannmassene. For Atlanterhavets del representerer vannet til venstre den

varme Golfstrømmen og vannet til høyre det kalde dypvannet dannet i Grønlandshavet og Labradorhavet. Blir vannet til høyre gjort lettere ved for eksempel å blande inn ferskvann, vil tetthetsdifferansen mellom vannmassene reduseres. Dette reduserer styrken på sirkulasjonen. I tillegg kommer effekten av vind. Den relative betydning av vinden og tetthetsforskjeller for omveltningen er ennå ikke så godt kjent.

Det er vanlig å anta at nedsynkning av overflatevannmasser virker som en pumpe i Atlanterhavet som trekker nytt varmt overflatevann til høye breddegrader. Dersom dypvannsdannelse er selve motoren i havets varmetransport nordover i Atlanterhavet, vil en endring i dannelsen av dypvann i Grønlandshavet og Labradorhavet endre varmetransporten nordover. To prosesser kan hindre vannmasser på høye bredder å synke: oppvarming ved overflaten og minkende saltholdighet ved økende tilførsel av ferskvann fra land. Dersom vannmassene i sør holder seg uforandret, vil dette bidra til å redusere MOC.

Observerte endringer i AMOC

Hva vet vi om variasjoner i sirkulasjonen i Atlanterhavet fra målinger? De instrumentelle observasjonene av Atlanterhavets havklima har vært svært mangelfulle helt opp til de siste årene. Slik har det vært vanskelig å estimere styrken på omveltningen fra observasjoner. Lange måleserier fra havet er svært få. Egentlig har vi bare en noenlunde lang måleserie fra verdens dyphav. Den kommer fra målinger fra værskipet *Polarfront* siden 1948 utført av Geofysisk institutt, Universitetet i Bergen¹⁷. Dette skipet, som drives av Meteorologisk institutt for meteorologiske målinger, har en fast posisjon i Norskehavet og har målt profiler av salt og temperatur en gang i uka ned til store dyp. En prøver å bruke dataene sammen med kortere måleserier andre steder til å få fram endringer av vannmassene i havet omkring. Måleserien viser at dypvannsdannelsen i Grønlandshavet er blitt svekket eller har vært fraværende over de siste 20 år. Det ble funnet indikasjoner på at utstrømningen av tungt og kaldt vann gjennom Færøybankkanalen har blitt redusert med cirka 25 % over de siste 50 år¹⁸. Dette er blitt oppfattet som et tegn på at styrken på AMOC er i ferd med å bli svekket. Senere resultater fra samme forskningsgruppe, basert på lignende målinger sammen med modellresultater, konkluderer imidlertid med at ingen endringer har funnet sted over dette tidsrommet¹⁹.

Det fins andre indikasjoner på at omveltningen er svekket. Blant annet viser observasjoner at det har funnet sted en endring mot lettere og ferskere vann i Nord-Atlanteren²⁰. En annen undersøkelse, som bygger på analyser av det meste som fins av målinger gjennom de siste 50 år, anslår at MOC er blitt redusert med så mye som 30 % på denne tiden (Bryden m.fl. 2005)²¹. Samme undersøkelse anslår at varmetransporten mot nord tilsvarende har minket med 20 %. Dette er mye mer enn hva klimamodellene viser for samme periode. Er det slik at havsirkulasjonen i modellene ikke reagerer raskt nok på den globale oppvarmingen, eller er overslagene om redusert strøm basert på utilstrekkelige målinger?

I et internasjonalt prosjekt kalt RAPID, har en startet målinger for å beregne og overvåke MOC. Dette gjøres med det som kalles hydrografiske målinger av temperatur, saltholdighet, trykk og strøm fra overflaten til bunns på en rekke forskjellige steder i et snitt tvers over Nord-Atlanteren ved 26,5 °N, dvs. fra Florida til Vest-Afrika. Målingene startet i 2004 og de

første resultatene, som omfatter et år, ble publisert i *Science* sommeren 2007^{22 23}. Ulike komponenter ble beregnet, slik som styrken i Golfstrømmen, Ekmantransport og strøm i dypet. På en tidsskala på 15 dager og lengre, fant de at summen av de ulike komponentene summerte seg omtrent til null som antatt. Det ble funnet en MOC med gjennomsnittlig styrke på 18,7 SV med standardavvik pluss/minus 5,6 SV. Men den totale variasjonsbredden gjennom dette året var svært stor: fra 4,4 til 35,3 SV. Dette betyr at omveltningen har store variasjoner på kort tidsskala, som blant annet skyldes variasjoner i draget fra atmosfæren og virvler i strømmen som dannes der det er store horisontale variasjoner i strømstyrken.

Nøyaktigheten i estimatene for MOC blir oppgitt til 1,5 SV. Beregningene til Bryden m.fl. ble gjort for tilfeller med nærmest øyeblikkelige målinger. Resultatene for målingene i RAPID antyder at trenden som ble beregnet i MOC, kan være sterkt influert av variasjoner på kort tidsskala og slik være urealistisk. Således ligger trenden godt innenfor variasjonsbredden målt over et år i RAPID.

Vi vet ikke ennå hvor mye MOC varierer fra år til år og på dekadeskala. For å kunne avgjøre om det er trend i MOC trengs det målinger over flere tiår. Dette kan bety at på kort sikt kan trender i MOC bare beregnes i numeriske modeller for havet. Det gjelder nå å utvikle modeller som stemmer med de målinger som fins og spesielt med de nye målingene i RAPID.

Havets globale transportbånd

Havsirkulasjonen i Atlanterhavet med den vertikale omveltningen henger sammen med sirkulasjonene i Stillehavet og Det indiske hav. Til sammen danner disse sirkulasjonene en global omveltning av vannmassene i havet, en langsom utveksling som lufter vannmassene. Den globale omveltningen blir på engelsk kalt *havets transportbånd* (the ocean conveyor belt) som på kort tid er blitt en populær vitenskapelig metafor flittig brukt langt utenom klimaforskeres og havforskeres sfære (Fig. 3). På norsk vil vi kalle sirkulasjonen som *havets globale transportbånd*. Begrepet ble innført av den kjente forskeren Wallace Broecker i 1991 på grunnlag en rekke vitenskapelige arbeider om havets globale sirkulasjon^{24 25 26 27}. Broeckers berømte tegning av transportbåndet illustrerer hvordan havstrømmene i de ulike verdenshavene bindes sammen i en sammenhengende global omveltning, med belter eller bånd av strøm i overflaten og i dyphavet som farges røde eller blå alt etter om de transporterer varme eller kalde vannmasser. Spesielt forbinder tegningen havstrømmer i Stillehavet med strømmer i Atlanterhavet gjennom Sørishavet. Broeckers tegning og mange nyere varianter er blitt publisert i mange vitenskapelige publikasjoner, populærvitenskapelige tidsskrift og aviser. Tegningene representerer nærmest en allmenn sannhet om havstrømmene, i det minste en gjeldende konseptuell forståelse for hvordan vannmassene i verdenshavet sirkulerer og veltes om.

Thermohaline Circulation

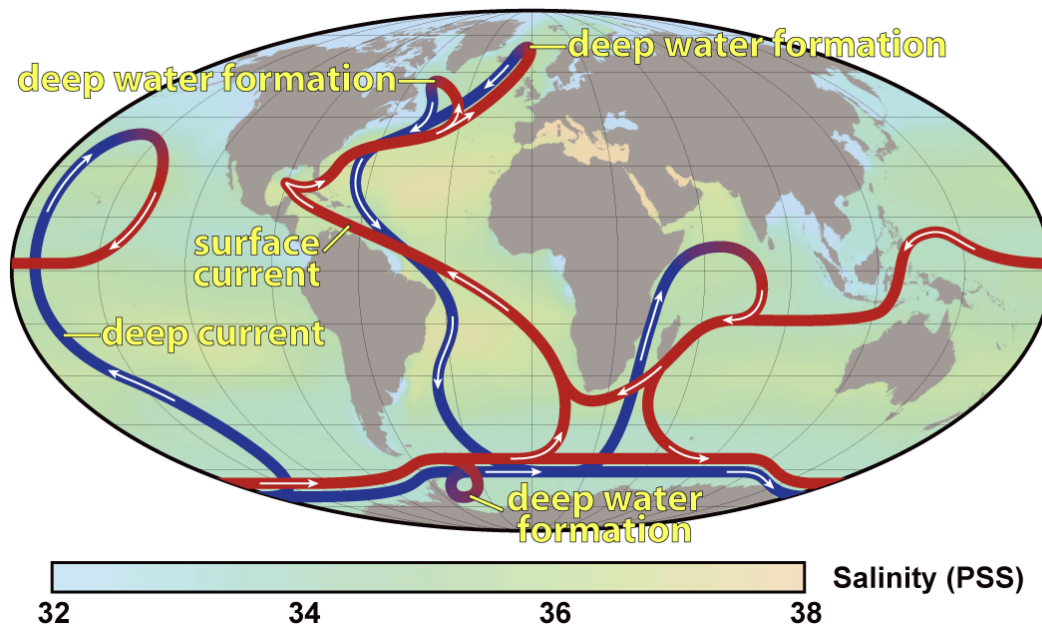


Fig. 3: Den storstilte havsirkulasjonen, her kalt termohalin sirkulasjon, men som til vanlig går under navnet . Blå belter representerer strømmer i dyphavet og røde belter overflatestrømmer. http://en.wikipedia.org/wiki/Thermohaline_circulation

Den konseptuelle modellen representerer selvsagt en overforenkling av virkeligheten. Noen av strømmene er mye smalere og mer jetliknende enn hva disse visualiseringene viser. Dette gjelder for eksempel meridionale strømmer i dyphavet på skråningen øst for kontinentene, gjerne kalt vestgrensestrømmer, og en mer intens sonal strøm i Sørishavet. Det fins også oppvelling mange steder (se Del II, kap. 6) som ikke kommer fram i figurene. Dypvannsdannelse i De nordiske hav og Labradorhavet kommer heller ikke godt med. Likevel, forskere mener at konseptualisering av det globale tilbringerbeltet gir en tilfredsstillende forenklet framstilling av de storstilte globale havstrømmene^{28 29}.

En merker seg spesielt forskjellen på sirkulasjonen i Stillehavet og Atlanterhavet. En kald strøm i Stillehavet mot nord i dypet langs skråningen mot Asia i vest stiger mot overflaten og returnerer mot sør som en varm overflatestrøm. I Atlanterhavet har vi Golfstrømmen som en varm overflatestrøm mot nord langs kontinentalskråningen i vest og en kald returstrøm i dypet mot sør. Mye av denne forskjellen synes å ha sin årsak i forskjeller i saltholdigheten mellom disse verdenshavene. Slik er overflatevannet saltene i Atlanterhavet enn i Stillehavet, spesielt på nordlige halvkule. Forskjellen skriver seg fra forskjeller mellom disse to hav i ferskvannets kretsløp. Denne forskjellen er igjen knyttet til sirkulasjoner i atmosfæren som i betydelig grad er styrt av topografi og geografisk fordeling av kontinenter og hav³⁰.

Det er forskjellige meninger om tilbringerbeltet når det gjelder hvordan det fungerer³¹. Drivkreftene bak denne globale sirkulasjonen vurderes gjerne på to måter. Den ene legger vekt på drivkreftene bak tilbakestrømmene i dyphavet. Den andre legger vekt på forskjellene i saltholdighet i overflaten som drivkraft og en kontrollerende faktor for den meridionale

omveltningen. Den siste tilnærmingen er blitt populær de siste tiårene³². Spesielt er den undersøkt i numeriske modeller^{33 34 35 36}. Det er verdt å merke seg at begge metodene å vurdere tilbringerbeltet på legger stor vekt på betydningen av produksjon av dypvann noen få steder på høye bredder³⁷. Andre vanskelige tema er hvordan oppstrømningen ved ekvator drives og hvordan også vann drives nedover i dypet i disse områdene.

Det kan se ut som at kontrasten i saltinnhold mellom vannmassene i overflaten av Stillehavet og Atlanterhavet er en kritisk parameter for styrken på tilbringerbeltet. Dersom den ikke er tilstrekkelig stor, kan ikke tilbringerbeltet utvikle seg²⁹. Det er rapportert at overflaten av Nord-Atlanteren er blitt ferskere³⁸, dvs. at kontrasten er blitt mindre. Dette kan derfor på sikt få betydning for tilbringerbeltet. Kontrasten mellom salt vann på midlere bredder i Nord-Atlanteren og ferskere vann på høye bredder spiller også en rolle for sirkulasjonene innen hvert hav.

Teori om klimastabilitet

Vår mellomistid holosen har vært karakterisert av et nokså stabilt, varmt klima gunstig for liv mot høyere bredder. Paleoklimatologene har funnet at klimaet under istider (glasiale perioder) ikke var stabilt på samme måte, men stadig avbrutt av raske endringer, der temperaturen, spesielt på høye nordlige bredder, steg brått i løpet av noen få tiår, for så gradvis, i løpet av noen hundre år å synke tilbake til "normale" forhold. Hvorfor er det så stor forskjell på stabiliteten i klimaet i glasiale og interglasiale perioder? Paleoklimatologene prøver gjerne å forklare forskjellen med endringer i havsirkulasjonen, spesielt endringer i omveltningen i Nord-Atlanteren.

Simuleringer med en forenklet klimamodell som kopler atmosfære og hav, får fram fundamentale forskjeller i klimastabiliteten mellom glasiale og interglasiale perioder, det vi har kalt istider og mellomistider^{39 40}. I dagens interglasiale klima finnes det to mulige tilstander for havsirkulasjonen i Nord-Atlanteren, to forskjellige *moder*. Den ene moden er varm og karakteriseres ved at AMOC er aktiv. Det dannes dypvann i nord (NADW), dvs. nord for ryggen mellom Grønland-Skottland og i Labradorhavet. Den andre mulige moden i en mellomistid er karakterisert ved at omveltningen ikke er aktiv, men "av" (ingen AMOC). Siden det transporteres mindre varme i havet mot nord, blir det polare klimaet kaldere. Den inaktive moden er teoretisk mulig ved svært stor ferskvannstilførsel til havet på nordlige områder. Som vi har sett bidrar dette til mindre tetthet i overflatelaget og manglende produksjon av bunnvann.

Situasjonen karakteriseres som meget stabil fordi en overgang til en inaktiv AMOC krever svære mengder ferskvann. Det fins ingen undersøkelser som tilsier at det noen gang har funnet sted en slik overgang i en mellomistid. Dette understreker at AMOC er stabil gjennom mellomistider. For 8200 år siden skjedde det at svære mengder smeltevann, magasinert i store innsjøer over Nord-Amerika demmet opp av is, på kort tid flommet ut i havet ved at isdemningene brast. AMOC avtok i styrke og det ble kaldere over store deler av nordlige halvkule over en periode på 200 år. AMOC stoppet ikke opp, men økte etter hvert til normal styrke. Den hendelsen kommer vi tilbake til senere.

I et glasialt klima viser teorien også en varm og en kald mode, men noe forskjellige fra modene i et varmt klima. Den varmeste moden er nokså lik den varme moden i et varmt klima, men mye is begrenser utstrekningen nordover. I den kalde moden stopper ikke omveltningen helt opp, men sirkulasjonen er grunnere og bare aktiv sør for området 40-60 °N. Fortsatt omvelting er mulig fordi temperaturen er lav nok for å danne NADW ved disse breddene. I glasiale perioder er den kalde moden mest stabil på tilsvarende måte som den varme moden, med større utstrekning mot nord, gir stabilt klima i interglasiale perioder. Forskjellen består i at i et glasialt klima foregår det en veksling mellom de to modene.

Med utgangspunkt i et stabilt glasialt klima - kald mode - tenker en seg at det påtvinges endringer i havsirkulasjonen ved å tilføre ferskvann i overflaten i nordområdene. Slik har en studert hvordan endret ferskvannsfluks i stabile glasiale perioder påvirker dannelse av NADW og havsirkulasjonen. Videre har en beregnet effekten av endringene i havsirkulasjonen på lufttemperaturen. En tid etter en periode med en topp i ferskvannstilførselen, øker dannelsen av NADW radikalt. Dette kan gi en overgang til den varme glasiale moden. Temperaturen over nordområdene øker raskt over noen få tiår, mens effekten på høye bredder på den sørlige halvkule er liten.

I løpet av noen hundre år stabiliserer imidlertid *klimasystemet* seg igjen; temperaturen i atmosfæren og dannelse av NADW synker til "normalt" glasialt nivå og det skjer en overgang til den kalde, mer stabile moden. Tidsforløpet med en brå oppvarming over noen tiår, fulgt med avkjøling over noen hundre år passer med et typisk tidsforløp under istiden kalt *D-O-hendelser*, en klimavariasjon over cirka 1000 år som vi kommer tilbake til. Sensitivitetstester viser at jo kaldere den kalde moden er, jo vanskeligere blir det å skifte til den varme moden.

The day after tomorrow

Teorien om de forskjellige modene og deres stabilitet bygger til dels på eksperimenter med forenklete klimamodeller. Så spør det hvor stabil havsirkulasjonen er for en global oppvarming. Slik har en spurt om en global oppvarming vil få Golfstrømmen til å "stoppe opp" og gi kaldere klima over Nord-Europa. Noen har sett filmen "The day after tomorrow" som tegner skrekkszenarier – svært urealistiske – om følgene en slik klimaendring kan gi.

Tanken om at den varme innstrømningen av varmt overflatevann til våre områder kan stoppe opp, er knyttet til spørsmålet om den meridionale omveltningen (AMOC) stopper opp, noe som er mulig i følge teorien over. Dette blir gjort til et spørsmål om den globale oppvarmingen fører til så mye ferskvann til nordområdene at nedsynkningen av dypvann (NADW) kan stoppe opp. Dette kan så medføre en stopp i omveltningen og mindre transport av varmt vann mot nord. Slik mener en at sirkulasjonen i Atlanterhavet kan gå over i sin kalde mode.

Vi har pekt på at overflatevannet blir avkjølt og saltere på sin vei nordover og at dette gjør vannet tyngre. Både lavere temperatur og saltere vann bidrar til å øke tettheten. På grunn av høy SST og høy fordampning ved ekvator er vannmassene nær overflaten her forholdsvis varme og salte. La oss anta at på nordlige breddegrader vil økende ferskvannstilførsel i tiltagende grad dominere over fordampningen. På sin vei nordover dras tettheten til det

overflatenære vannet da i to retninger. Avkjølingen søker å gjøre vannmassene tyngre, mens ferskvannstilførselen gjør vannmassene lettere. Hvis den første effekten dominerer, vil vannet bli så tungt at det synker ned i dypet i nordområdene for så å returnere mot sør i dypet (positiv omveltning). Denne omveltningen sluttes ved at det tunge vannet etter hvert blir lettere. Hvis effekten av ferskvannstilførselen dominerer, vil det overflatenære vannet ikke bli tungt nok til å synke ned i dypet. Vannet nær overflaten kan da tenkes å stoppe opp eller returnere som *lettere* vann i overflaten i stedet for *tyngre* vann i dypet (ingen omveltning).

I et globalt oppvarmet fremtidsklima vil nedbør (i nordområdene) og avsmeltning av isbreene sannsynligvis øke. Tankerekken for skrekks scenariene er at en kraftig økning i ferskvannsmengden nær overflaten vil føre til full stopp i nedsynkningen. Dermed kortsluttes den positive omveltningen med påfølgende reduksjon i innstrømmingen av varmt vann mot Nord-Europa og inn i Norskehavet.

Hva er galt i dette resonnementet?

Teorien vi presenterte viste at dannelse av dypvann er lite påvirket av ferskvann i et varmt klima. Carl Wunsch sier det sterkere i et brev til *Nature* etter et nyhetsinnlegg med tanker om kaldere klima i våre områder⁸: *Sir – Deres News story "Gulf stream probed for early warmings of system failure"(Nature 4127, 769; 2004) diskuterer hvordan klimaet sør i England vil bli "uten Golfstrømmen". Trist nok, denne frasen er blitt sett alt for ofte, vanligvis i aviser opptatt av en usannsynlig mulighet for en ny istid i Storbritannia utløst ved bortfallet av Golfstrømmen. Europeiske lesere bør bli gjenforsikret om at Golfstrømmens eksistens er en konsekvens av det storstilte vindsystemet over Nord-Atlanteren, og av grunnleggende egenskaper ved væskers bevegelse på en roterende planet. Den eneste måte å få fram en havsirkulasjon uten en Golfstrøm, er enten å slå av vindsystemet, eller å stoppe jordas rotasjon, eller begge deler. Reelle spørsmål eksisterer om mulige endringer i havsirkulasjonen og dets klimakonsekvenser. Likevel, slike diskusjoner blir ikke hjulpet av overdrivelser eller alarmister. Forekomst av en klimatilstand uten Golfstrømmen en gang med det første – innen titalls millioner år – har en sannsynlighet så vidt større enn null.*

Tankene til Wunsch er underbygd av solid forskning⁴¹. Kaldt, lett overflatevann i nord kan for eksempel returneres mot sør i overflaten. Ved Øst-Grønland transporteres lett overflatevann sørover gjennom Danskestredet mellom Island og Grønland. Slike returstrømmer i overflaten kan øke og bli viktigere under global oppvarming.

Carl Wunsch og andre forskere setter imidlertid først og fremst spørsmålsteget ved om det virkelig er slik at nedsynkningen i nordområdene er drivkraften - hovedbryteren - bak omveltningen. En oversikt for lekfolk om disse tankene er gitt av Røed m.fl., oseanografer ved Meteorologisk institutt⁴². De forklarer at for å slutte sirkulasjonen i AMOC med oppstigende vann til overflaten, må de tunge vannmassene i dypet på en eller annen måte gjøres lettere. Dette vil kreve tilført energi, men hvor skal den komme fra? Når det tunge vannet sprer seg i dypet, fortrenses noe av det vannet som ligger der. Røed m.fl. skriver: *Denne situasjonen kan sammenliknes med å helle konsentrert saft forsiktig ned i et glass med vann. Det tunge saftkonsentratet legger seg på bunnen som et eget lag. For å få en drikkbar saft,*

må vi i tillegg tilføre ekstra energi ved å røre om. Ved røringen tilføres energi, det gjøres et stykke arbeid. På samme måte blir det hevdet at den viktigste drivkraften for omveltningen er omrøringen i havet.

Det fins flere energikilder som kan stå for omrøring for å slutte sirkulasjonen, vinden er igjen viktig. Vi har sett på hvordan vinden påvirker de øvre lag av havet og lager skilleflater ned mot dyphavet. På disse flatene dannes det bølger som kan bryte når de når kontinentskråningene. Slik skaffes noe energi til omrøring. I tillegg gir tidevann, som går gjennom hele havets dyp, energi til omrøring. Følger vi nå hovedtankene til Carl Wunsch om at så lenge vinden ikke stopper opp og jorda roterer, vil det slik alltid bli gitt energi til omrøringen av havet. Blandingen stopper heller ikke opp om nedsynkningen av en eller annen grunn skulle stoppe opp.

Resonnementet for skrekkscenariene tar utgangspunkt i en økt ferskvannstilførsel til vannmassene i overflaten i nordområdene, forårsaket av økt nedbør og nedsmelting av breer. Spørsmålet er om dette kan føre til mer dannelse av sjøis, for eksempel i Barentshavet. Dette avhenger av hvorvidt det ferske vannet blir tilstrekkelig rørt om og blandet med det varme vannet som AMOC i dagens klima transporterer inn i Norskehavet og Barentshavet. Hvor jeg bor ved sjøen sør for Bergen ser jeg ut mot et trangt farvann med skogkledde øyer og holmer. Vinden kommer ikke mye til og bølgene blir lite utviklet. I tillegg er tidevannsstrømmene relativt svake. Dersom temperaturen går så vidt under null om høsten, fryser det som regel til is på sjøen. Slik kommer det fortære is på disse sjøflatene enn på noe vann eller tjern i nærheten. Det viser seg at nedbør og avrenning fra land gir en hinne med ferskvann i overflaten, og at omrøringen er for svak til å blande ferskvannet med saltvannet under. Men på denne årstiden synker overflatevannet i vann og tjern når det blir avkjølt. Slik blandes vannmassene i et relativt tykt lag som kan nå helt til bunns. Det legger seg is først når hele blandingslaget er tilstrekkelig avkjølt.

Røed m.fl. peker på at dersom avrenning fra land gir et cirka 10 meter tykt brakkvannslag over åpent hav, har vinden ingen problemer med å blande dette laget med den varme, salte strømmen under. Gjennom våren og sommeren vil avrenning fra kontinentet fra snøsmelting gi et brakkvannslag over Norskehavet og Barentshavet. Når høststormene setter inn, blandes dette laget med de varme vannmassene i Den norske atlantehavsstrømmen. Slik blir det ikke dannet sjøis før vannmassene når høye bredder i Arktis. Men dersom et slikt lag med brakkvann skulle bli mye dypere, for eksempel 100 meter dypt - noe som er svært usannsynlig - vil høststormene få store vansker med å blande brakkvannet med det varme vannet. Da vil det varme vannet bli liggende under brakkvannet. I så fall kan Norskehavet bli islagt om vinteren, noe som ville gi mye kaldere klima over Skandinavia. Lengre nord i Arktis er situasjonen i dag slik at varmt Atlanterhavsvann strømmer inn på 200-500 meters dyp, for dypt til at isforholdene normalt påvirkes.

Forskerne peker også på at nedbøren i nord vil ha sitt motstykke i økt fordampning i tropene og subtropene og skriver: *Samtidig som avrenningen fra elvene i Sibir og kanskje fra isen på Grønland tiltar, vil det varme vannet som strømmer nordover mot Norskehavet bli saltere. Dette betyr at tettheten i det varme vannet vil øke, samtidig som det kalde vannets tetthet avtar. Det er ikke opplagt hvordan slike endringer vil påvirke omveltningen. Det er mulig at*

omveltningen reduseres midlertidig eller øker i styrke som følge av en forstyrrelse. Men det er usannsynlig at den stopper opp. En spekulasjon om at en økt avrenning i nord vil stoppe omveltningen og gi oss en ny istid i løpet av de neste 50 årene kan derfor ikke sies å være særlig vitenskapelig begrunnet. På grunnlag av IPCCs siste rapport⁴³ kan vi legge til at perioden på 50 år kan forlenges betraktelig.

Skyldees vårt milde vinterklima "Golfstrømmen"?

La oss se nærmere på om det virkelig er slik at "Golfstrømmen" gir oss de milde vintrene, med den følge at for eksempel våre havner stort sett ikke fryser til om vinteren. Det viser seg at dette er en sannhet med modifikasjoner, riktig svar avhenger av hvordan spørsmålet om "Golfstrømmen" blir stilt. I simuleringer med klimamodeller har en klart å stoppe opp AMOC ved å tilføre urealistisk mye ferskvann. Modellene viser at klimaet da vil bli kaldere over store områder, ikke minst i våre områder. Men dersom spørsmålet gjelder årsaken til at vintrene i dagens klima er mildere hos oss enn andre steder på andre tilsvarende bredder, spiller sirkulasjoner i atmosfæren en større rolle enn AMOC.

Vi har sett at den nordlige halvkule har et underskudd på strålingsvarme om vinteren. Hadde det ikke vært for at varme tilføres fra sør, ville klimaet vært mye kaldere, minst like kaldt som på tilsvarende bredder over indre Canada og Sibir. Strålingsavkjøling i polområdene om vinteren blir altså i stor grad kompensert ved varmetransport fra sør. Basert på tidligere undersøkelser har mange som en tommelfingerregel lært at transporten er like stor i hav som i luft.

Nye beregninger av varmetransport fra ekvator til polene (målt i Watt) er blitt utført basert på målinger og såkalte daglige *reanalyser* for atmosfæren, dvs. analyser av atmosfærens tilstand for de siste tiårene foretatt på nytt med dagens metoder. Resultatet er midlet over hver breddegrad fra pol til pol, som et årlig gjennomsnitt over de siste tiårene da datadekningen har vært best. Beregningene gir maksimum transport i atmosfæren på omkring 5 petawatt (en petawatt = tusen milliarder kilowatt) ved omkring 40 °N og maksimum transport i havet på noe under 3 petawatt ved omkring 15 °N. Lenger nord, på midlere og høyere bredder, gir resultatene en transport i atmosfæren som er fire til seks ganger større enn i havet (Fig. 4). Det er artig at de nye beregningene stemmer bra med de tidlige anslagene som den norske oseanografen Harald Ulrik Sverdrup gjorde i 1957⁴⁴.

La oss bruke AMOC som et samlebegrep for varme havstrømmer i Nord-Atlanteren mot nord og nordøst. Betyr resultatene at AMOC bare spiller en underordnet rolle for vårt vinterklima? Og dersom det er slik, hvorfor er det da varmere hos oss, ikke bare i forhold til innlandsklimaet på tilsvarende bredder nær den amerikanske Atlanterhavskysten, men også sammenlignet med det maritime klima langs Stillehavskysten? Slike spørsmål er stilt av amerikanske forskere (Seager m.fl. 2002)⁴⁵, og i det følgende følger vi tankegang og resultater de kom fram til.

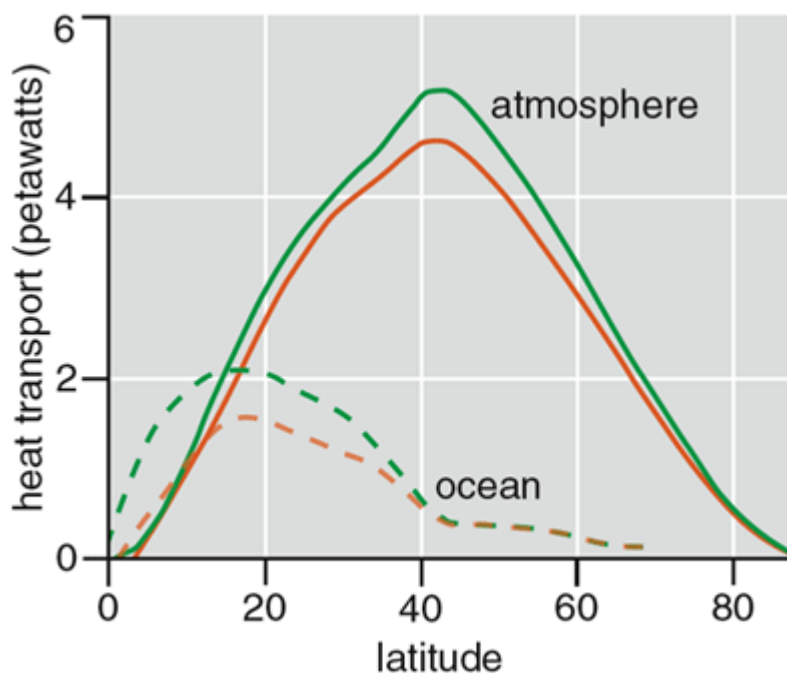


Fig. 4: Transport av varme (petawatt) mot nord for hver breddegrad. Heltrukne linjer: transport i atmosfæren, stiplede linjer: transport i havet. Det vises resultat fra to ulike estimat. Fra Seager m.fl.

Som pekt på tidligere mottar polområdene mye varme fra sola om sommeren, for skyfrie forhold faktisk like mye ved atmosfærens yttergrense gjennom et døgn som i tropiske områder. De øverste vannmassene varmes opp, og den store varmekapasiteten gjør at varmen holder seg lenge utover høsten og forvinteren. Således er lokal oppvarming om sommeren en stor varmekilde for havet i tillegg til varme transportert i AMOC. Varmen som tilføres og transporteres i havet må etter hvert bli ført tilbake til atmosfæren, ved langbølget stråling, direkte som varmeoverføring ved kontakt luft/hav eller som latent varme ved fordampning, som frigjøres når vanddampen kondenseres til skydråper.

En har lenge hatt anslag for hvor mye varme atmosfæren totalt mottar fra havet om vinteren, og en har forsøkt å beregne hvor mye av dette som skyldes AMOC. Nye data, blant annet reanalysene, har gjort det mulig å gjøre mer nøyaktige beregninger. Resultatene viser varmeoverføring (Watt per kvadratmeter) til atmosfæren midlet over vintermånedene desember til februar for de siste tiårene. Ved å trekke et anslag for det som skyldes AMOC fra den totale varmeoverføringen, får en et anslag for hvor mye varme som avgis til atmosfæren på grunn av varme i havet tilført ved solstråling om sommeren. Bidraget fra AMOC regnes slik ut som en gjennomsnittlig årlig varmeoverføring. Når denne er positiv, betyr dette at havstrømmene har avgitt varme til atmosfæren.

To områder skiller seg ut. Sør for New Foundland avgis det totalt mer enn 400 W/m^2 , av dette skyldes omkring halvparten transport i AMOC. I Barentshavet er maksimum avgitt varme cirka 260 W/m^2 . Også her skyldes omkring halvparten AMOC. Utenfor disse områdene betyr varmetransport i havet mindre, og mesteparten skyldes magasinert varme

fra sommeren. Dette tyder på at AMOC spiller en sekundær rolle for store deler av Nord-Atlanteren i forhold til magasinert varme fra sommeren.

I de siste 20 årene har det vært mulig å gjøre eksperimenter med globale klimamodeller for å studere klimavariasjoner og relativ betydning av ulike klimaeffekter. Flere har på denne måten studert betydningen av AMOC. Flere har gjort eksperimenter med en global atmosfæremodell og et forenklet hav. I et kontroll eksperiment hos Seager m. fl. var innflytelsen av AMOC tatt med. I et annet eksperiment fjernet de den komponenten av varmeutvekslingen som skyldtes AMOC, og hadde bare med effekten av oppvarming om sommeren. Med AMOC inkludert blir resultatet omtrent som observert med de største positive avvikene (i forhold til et gjennomsnitt over en breddegrad) nettopp i våre områder og tilsvarende store negative avvik over kontinentene. Således finner en et positivt avvik på hele 25-27 °C som maksimum i januar over havet utenfor Nord-Norge. Uten AMOC blir det kaldere over alt i våre områder, med mer enn 6 °C oppover langs Norskekysten, og mer is i Barentshavet. Likevel, de store kontrastene mellom våre områder og kontinentene, spesielt østlige Nord-Amerika, forandrer seg heller lite. Selv uten AMOC er våre områder mye varmere enn på tilsvarende bredder over østre Nord-Amerika. Det er også varmere hos oss enn på tilsvarende bredder langs den amerikanske Stillehavskysten.

Resultatene tyder altså på at når det er mildt klima hos oss om vinteren, ligger ikke hovedårsaken i AMOC eller "Golfstrømmen" om en vil. Den har riktignok stor betydning, men vårt klima ville vært relativt mildt i forhold til andre områder på samme bredder selv uten den varmetransporten som havstrømmene representerer. Det ser derfor ut som om magasinert varme fra sommeren sammen med sirkulasjonen i atmosfæren er viktigst for å opprettholde vårt milde vinterklima. En forutsetning for disse beregningene er at grensene for havisen i Arktis ikke endrer seg vesentlig.

Fjellkjedenes betydning for luftstrømmene

Det har lenge vært kjent at de store fjellkjedene, først og fremst Rocky Mountains, for en stor del er årsak til Islandslavtrykket og de overveiende sørvestlige luftstrømmene over våre områder. Eksperimenter med atmosfæremodell med og uten topografi bekrefter at uten fjell blir luftstrømmene i hovedsak langs breddesirkelene og Islandslavtrykket lite tydelig. På grunnlag av slike eksperimenter finner en at Rocky Mountains på denne måten gir 9° C kaldere vintertemperatur over Nord-Amerika og 3 ° C varmere over Vest-Europa.

Liknende eksperimenter med en klimamodell med bedre oppløsning har i tillegg studert betydningen av AMOC i relasjon til fjellkjedene⁴⁵. Følgende enkle eksperimenter ble utført: 1) realistisk topografi og AMOC inkludert i modellen, 2) med realistisk topografi, men ingen AMOC og 3) et eksperiment uten topografi og ingen AMOC. Med topografi og AMOC får en fram Islandslavtrykket og luftstrømmene omtrent slik som observert. Uten topografi blir Islandslavtrykket nærmest borte, og luftstrømmene følger i større grad breddesirkelene. Transporten av varme mot nord avtar i atmosfæren, og klimaet blir kaldere i våre områder og varmere på tilsvarende bredder over Nord-Amerika. AMOC har en viss innflytelse på Islandslavtrykket og varmetransporten i luft gjennom overflatetemperaturene, men innflytelsen er mye mindre enn den de store fjellkjedene har. Resultatene indikerer at halvparten av kontrasten i vintertemperatur mellom Vest-Europa og østre Nord-Amerika

skyldes de storstilte luftstrømmene som de store fjellkjedene setter opp. Resten kan forklares med at vinder knyttet til lavtrykkene fører varme, maritime luftmasser innover våre områder.

Resultatene viser at AMOC ikke betyr så mye for å forklare at den atlantiske kyst av Europa er varmere enn for tilsvarende bredder av Stillehavskysten. Også mye av denne kontrasten kan forklares ut fra sirkulasjonen i atmosfæren og det faktum at nordlige vinder på Stillehavskysten kommer fra et kaldt kontinent om vinteren.

Det varme vinterklimaet i våre områder skyldes altså hovedsakelig de fremherskende luftstrømmene omkring sørvest som fører med seg varme, maritime luftmasser som representerer magasinert varme i havet fra sommeren. Den store overvekt av sørvestlige vinder hos oss i forhold til andre steder på samme bredder, skyldes Islandslavtrykket, som har sin hovedårsak i innflytelsen av Rocky Mountains. At det er varmere hos oss enn langs den nordamerikanske Stillehavskysten henger sammen med at Atlanterhavet går lengre mot nord enn Stillehavet. Varme transportert i AMOC kommer i tillegg og gir et ytterligere bidrag til vårt milde vinterklima. Spesielt gjelder dette Barentshavet.

Resultatene betyr selvsagt ikke at "Golfstrømmen" har liten betydning for vårt klima. Uten "Golfstrømmen" har flere anslått 3-10 °C kaldere klima over Vest-Europa om vinteren, minst i sør og mest i nord, og dette er store tall i klimasammenheng. Resultatene betyr heller at vi ikke ukritisk kan hevde at vårt milde klima utelukkende skyldes "Golfstrømmen", slik det ofte blir gjort både av klimaforskere og legfolk. Fjellkjedene og geografisk fordeling av kontinenter, fjell og hav synes å bety mer. Disse forholdene legger til rette for store mengder strålingsvarme til havet mot nord opp mot isen og sirkulasjon i atmosfæren som transporterer mye varme mot nord i de samme områdene.

Oppsummering

Det er svært viktig å oppnå bedre kunnskap om hvordan naturlige endringer i havsirkulasjonen, spesielt i Nord-Atlanteren, påvirker klimaendringer. Det er også fortsatt svært viktig å vurdere hvordan global oppvarming vil påvirke sirkulasjonen i Nord-Atlanteren og vårt regionale klima.

I mangel på lange måleserier må mye av kunnskapen om hvordan havet regulerer klimaet, bygge på resultat av simuleringer i globale klimamodeller. Helt til nå har klimamodellene gitt forskjellige svar på hvor mye AMOC har variert de siste 50 år og hvordan den vil endre seg framover i tid⁴³. En kan tenke seg at noe av denne spredningen i resultatene kan skyldes at de er sensitive til forskjeller i begynnelsestilstanden. Men spredningen er nok heller et resultat av at modellene ennå er mangelfullt utviklet.

Først og fremst er oppløsningen som regel alt for grov. Oseanografene bruker en spesiell parameter, en lengde kalt *Rosbyradius*⁴⁶, for å angi typisk lengdeskala for småskala sirkulasjoner i havet, sirkulasjoner vi ikke har omtalt i det foregående. For typiske verdier på midlere bredde er Rosbyradius 1000 km for atmosfæren og 20 km for havet. I atmosfæren har vi lavtrykk med typisk bredde på 1000 km eller mer, i havet har vi tilsvarende småvirlver knyttet til de sterkeste strømmene, med typisk bredde på 20 km eller mer. I klimamodellene har avstanden mellom gitterpunktene vært omtrent som for atmosfæren, dvs. mer enn

hundre kilometer. I beste fall har gitteravstanden vært halvparten av den i atmosfæren. Oseanografer har gjort et nummer av at oppløsningen i både atmosfære og hav bør stå i forhold til respektive Rossbyradier. For å få en gitteravstand i havet tilsvarende 100 km i atmosfæren, må vi da ned i 2 km. Nå betyr nok ikke små virvler i havet like mye for den generelle sirkulasjonen som lavtrykkene i atmosfæren, men det er ingen tvil om at havdelen har for grov oppløsning i klimamodeller.

Om en bruker reanalyser for atmosfæren de siste 50 år til å drive numeriske modeller for bare havet, gir modellversjoner med god oppløsning – ned til noen få km mellom gitterpunktene – godt samsvar med målinger som fins for samme periode, for eksempel fra De nordiske hav og Barentshavet⁴⁷. Dette tyder på at klimamodellene vil bli bedre for havet om oppløsningen økes.

Når dette er sagt, er det forbausende hvor godt dagens klimamodeller kan reprodusere de viktigste delene av havsirkulasjonen, slik som omveltningen i Atlanterhavet. Vi har tidligere definert kontrollkjøringer med klimamodeller som lange kjøring, ofte mer enn 1000 år, med konstant solstråling og konstant innhold av *drivhusgasser* utenom vanndamp. Resultatene i slike kjøring er svært interessante og indikerer hvor store *interne klimaendringer* som fins i klimasystemet.

Undersøkelser av slike kontrollkjøringer viser ganske store naturlige variasjoner i styrken på AMOC, variasjoner som kan vare fra noen dekadere til flere hundre år. Det er ingen tvil om at slike variasjoner gir temperaturvariasjoner i atmosfæren i de samme områdene. Forskere finner slik klar sammenheng mellom styrken på AMOC og gjennomsnittstemperatur i havoverflaten (SST) for havområdene knyttet til selve omveltningen⁴⁸. En har nå simulert klimamodeller for siste tusen år for blant annet å vurdere om endringer i AMOC har spilt noen rolle for hendelser som den varme middelalderperioden og den lille istid. En finner at styrken på AMOC ble redusert med cirka 10 % fra år 1200 til 1850 da middeltemperatur på nordlige del av nordlige halvkule trolig ble redusert med så mye som en grad⁴⁹. Det er mulig at en reduksjon på cirka 10 % er et uttrykk for hvor store de naturlige variasjonene kan være. Noen forskere, som den kjente tyske oseanografen Mojib Latif, mener at mye av klimavariasjonene siste 1000 år kan forklares med tilfeldige variasjoner i AMOC. Etter hvert som klimamodellene utvikles, vil vi få større sikkerhet om slike utsagn.

Hva slags resultat gir siste generasjon av klimamodeller når det gjelder stabiliteten til den nordatlantiske havsirkulasjonen? Ser en på endringer i styrken av AMOC for dagens klima og de neste 100 år, viser de fleste modellene en gradvis reduksjon i styrken på AMOC. Typiske verdier er 30 % reduksjon over de neste 100 år, en reduksjon som starter litt før nåtid. Grunnen til denne reduksjonen er dels økt nedbør og dels oppvarming av overflatevannet over høye nordlige breddegrader, inkludert i De nordiske hav, som følge av den globale temperaturøkningen. Dette fører til en redusert termohalin drivkraft i modellene.

Noen modeller er spesielt interessante fordi de ikke viser noen særlig endring av styrken på omveltningen⁵⁰. Grunnen til dette er at økende fordampning ved lavere breddegrader fører til gradvis saltere overflatevann i tropene. Deler av dette salte overflatevannet blir så

transportert mot nord med Golfstrømmen og Den nordatlantiske drift. Dette kompenserer dermed for reduksjonen i tetthet som skyldes økt nedbør og oppvarming i nord. På den måten opprettholdes den termohaline drivkraften i disse modellene på grunn av transport av salt vann fra sør mot nord. Det blir argumentert med at en mulig grunn til forskjellene mellom disse modellene og de andre klimamodellene, kan ligge i høyere romlig oppløsning i tropene.

Det er fremdeles ubesvarte spørsmål når det gjelder hvordan havsirkulasjonen i Atlanterhavet påvirker klimaet i våre områder og hvordan den vil svare på den globale oppvarmingen. Det ser ut som om AMOC har visse naturlige variasjoner i et interglasialt klima, variasjoner som påvirker atmosfæren. Men AMOC er alltid aktiv i slike perioder. Det er mulig at AMOC er blitt svekket i våre områder over de siste 50 år. Om dette i så fall skyldes naturlig variasjon i klimasystemet eller global klimaendring er usikkert. Når det gjelder framtidige klimasimuleringer, viser de fleste modellene en reduksjon av sirkulasjonen i Atlanterhavet, men som vi har sett, noen av de antatt beste modellene viser nærmest uforandret sirkulasjon over de neste 100 år. Ingen av modellene viser tegn til at AMOC skal stanse opp.

Som konklusjon sier IPCC at det er sannsynlig at sirkulasjonen i Atlanterhavet vil svekkes ettersom drivhuseffekten forsterkes, men at denne svekkelsen ikke oppveier global oppvarming over Vest- og Nord-Europa. Også hos oss kan vi vente oss oppvarming i tiden som kommer. Når det gjelder utviklingen på lengre sikt, er IPCC mer usikker. *Bare rekonstruksjoner av høy kvalitet og observasjoner av klimasystemet, analyse av rekonstruerte og observerte klimaparametre og utstrakt bruk av numeriske klimamodeller kan avdekke Atlanterhavets gåte*, skriver Helge Drange, professor i oseanografi ved Geofysisk institutt, UiB⁵¹. I denne forskningen ønsker norske klimaforskere å spille en betydelig rolle.

- ¹ http://en.wikipedia.org/wiki/Gulf_Stream
- ² http://en.wikipedia.org/wiki/Matthew_Fontaine_Maury
- ³ http://en.wikipedia.org/wiki/Wallace_S._Broecker
- ⁴ <http://www.americanscientist.org/issues/feature/the-source-of-europes-mild-climate/>
- ⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/The_Day_After_Tomorrow
- ⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/An_Inconvenient_Truth
- ⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Carl_Wunsch
- ⁸ Wunsch, C. 2004. Gulf stream safe if wind blows and earth turns. *Nature* 428, 8. April 2004, 601.
- ⁹ Dickson, R.R. et al. 1997. Long-term co-ordinated changes in the convective activity of the North Atlantic. *Prog. Oceanogr.* **38**, 241-295.
- ¹⁰ Ganachaud, A., C. Wunsch 2003. Large-Scale Ocean Heat and Freshwater Transports during the World Ocean Circulation Experiment. *J. Clim.* 16, 696-705.
- ¹¹ http://no.wikipedia.org/wiki/Harald_Ulrik_Sverdrup
- ¹² Baringer, M.O., J. C. Larsen 2001. Sixteen years of Florida Current transport at 27° N. *Geophys. Res. Lett.* 28, 3179-3182.
- ¹³ F. eks. Rahmstorf, S. 1995. Bifurcations of the Atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle. *Nature* 378, 145-149.
- ¹⁴ Orvik, K.A., P. Niiler 2002. Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and Nordic Seas toward Arctic. *Geophys. Res. Lett.*, 29(19), 1896, doi:10.1029/2002GL015002.
- ¹⁵ Killworth, P.D. 1979. On chimney formation in the ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 9, 531-554.
- ¹⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/North_Atlantic_Deep_Water
- ¹⁷ http://en.wikipedia.org/wiki/Weather_ship
- ¹⁸ Hansen, B., Turrell, W. R., S. Østerhus 2001. S. Decreasing overflow from the Nordic seas into the Atlantic Ocean through the Faroe Bank channel since 1950. *Nature* 411, 927-930.
- ¹⁹ Olsen, S.M. et al. 2008. Observed and modelled stability of overflow across the Greenland-Scotland ridge. *Nature*, 455, 519-522.
- ²⁰ Curry, R., C. Mauritzen 2005. Dilution of the northern North Atlantic Ocean in recent decades. *Science* 308, 1772-1774.
- ²¹ Bryden, H.L., H. R. Longworth, S. A. Cunningham 2005. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N. *Nature* 438, 655-657.
- ²² Cunningham, S.A. et al. 2007. Temporal Variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26.5°N. *Science*, 317, 935-948.
- ²³ Kanzow, T. et al. 2007. Observed Flow Compensation Associated with the MOC at 26.5°N in the Atlantic. *Science*, 317, 938-941.
- ²⁴ Stommel, H. 1958. The abyssal circulation, *Deep Sea Res.*, 5, 80- 82.
- ²⁵ Stommel, H., and A. B. Arons 1960. On the abyssal circulation of the world ocean, I, Stationary planetary flow patterns on a sphere, *Deep Sea Res.*, 6, 140- 154.
- ²⁶ Gordon, A. L. 1986. Interocean exchange of thermocline water, *J. Geophys. Res.*, 91, 5037- 5046.

- ²⁷ Broecker, W. S., G. H. Denton 1989. The role of ocean atmospheric reorganizations in glacial cycles, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53, 2465–2501.
- ²⁸ Dan Seidov, D., B.J. Haupt 2005. How to run a minimalist's global ocean conveyor. *Geoph. Res. Lett.* VOL. 32, L07610, doi:10.1029/2005GL022559.
- ²⁹ Haupt, B.J., D. Seidov 2007. Strengths and weaknesses of the global ocean conveyor: Inter-basin freshwater disparities as the major control. *Progr. In Oceanography*. 73, 358-369.
- ³⁰ Warren, B.A. 1983. Why is no deep water formed in the North Pacific? *J. of Marine Res.* 327-347.
- ³¹ Wunsch, C., 2002. What is the thermohaline circulation? *Science* 298, 1179–1181.
- ³² Gordon, A. L. 2001. Interocean exchange, in *Ocean Circulation and Climate: Observing and Modelling the Global Ocean*, edited by G. Siedler, J. Church, and J. Gould, pp. 303– 314, Elsevier, New York.
- ³³ Manabe, S., R. J. Stouffer 1988. Two stable equilibria of a coupled ocean-atmosphere model, *J. Clim.*, 1, 841–866.
- ³⁴ Rahmstorf, S. 1995. Multiple convection patterns and thermohaline flow in an idealized OGCM, *J. Clim.*, 8, 3027–3039.
- ³⁵ Clark, P.U. et al. 2002. The role of thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature* 415, 863–869,
- ³⁶ Saenko, O.A., Schmittner, A., Weaver, A.J., 2004. The Atlantic-Pacific seesaw. *Journal of Climate* 17, 2033–2038.
- ³⁷ Nilsson, J., G. Walin 2001. Freshwater forcing as a booster of thermohaline circulation, *Tellus A*, 53, 628–641.
- ³⁸ Curry, R., Dickson, B., Yashayaev, I., 2003. A change in the freshwater balance of the Atlantic Ocean over the past four decades. *Nature* 426, 826–829.
- ³⁹ Rahmstorf, S., 1996. On the freshwater forcing and transport of the Atlantic thermohaline circulation. *Climate Dynamics* 12, 799–811.
- ⁴⁰ Rahmstorf, S., 2002. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419, 207–214.
- ⁴¹ Wunsch, C., og R. Ferrari 2004. Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 36, 281-314.
- ⁴² Røed, L.P. et al. 2004. Ny istid under global oppvarming? *Cicerone* 2/2004.
- ⁴³ Climate Change 2007. *The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press. <http://www.ipcc.ch/>
- ⁴⁴ Sverdrup, H.U. 1957. Transport of heat by the currents of the North Atlantic and Pacific Oceans. Festschrift til Prof. B. Helland-Hansen. *Naturen*, Bergen, Norway, 226-236.
- ⁴⁵ Seager, R. et al. 2002. Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters? *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 128, 2563-2586.
- ⁴⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/Rossby_radius_of_deformation
- ⁴⁷ Drange, H. et al. 2005. Ocean general circulation modelling of The Nordic Seas. In *The Nordic Seas: An Integrated Perspective* H. Drange, T. Dokken, T. Furevik, R. Gerdes and W. Berger (Eds.) AGU Monograph 158, American Geophysical Union, Washington DC, 199-220.
- ⁴⁸ Latif, M. et al. 2004. Reconstructing, Monitoring, and Predicting Multidecadal-Scale Changes in the North Atlantic Thermohaline Circulation with Sea Surface Temperature. *J. of Climate*, 17, 1605-1614.

⁴⁹ Lund D. C., J. Lynch-Stieglitz and W. B. Curry, 2006: Gulf Stream density structure and transport during the past millennium. *Nature*, 444, 601-604.

⁵⁰ Latif m.fl . 2000. Tropical Stabilization of the Thermohaline Circulation in a Greenhouse Warming Simulation. *J. Climate*, 13, 1809-1813.

⁵¹ Drange, H., 2001. Golfstrømmen stopper neppe. *Cicerone*, 2/2001, 22-24.

