

Hav og klima

- Atlantens rolle i klimasystemet

Oceanerne har en stor rolle i klimaets udvikling. Men beskrivelsen af vandmassernes bevægelser i oceanerne har hidtil ikke været så detaljeret i klimamodellerne. Derfor bidrager oceanerne betydeligt til usikkerheden i forudsigelser af fremtidens klima.

Isflager i havet

Foto: Ingvar S. Parmann

Af Steffen Malskær Olsen, Erik Buch og Mads Hvid Ribergaard

■ Hvor meget vil den globale temperatur stige igennem det 21. århundrede som følge af menneskeskabte påvirkninger? Det er et spørgsmål, som optager sindene både i forskerkredse og i det øvrige samfund. De hidtidige vurderinger fra FNs klimapanel IPCC fra år 2001 forudsiger temperaturstigninger på 1,4–5,8 grader – med størst opvarmning over de polare egne. Om det ene eller

det andet yderpunkt i denne vurdering kommer til at holde, er bestemt ikke ligegyldigt. For intervallet spænder fra en relativt uproblematisk opvarmning til en opvarmning som vil have store konsekvenser for menneskeheden og livet på jorden generelt.

Vurderingen af temperaturudviklingen bygger på et specifikt scenario for menneskets udledning af drivhusgasser og

aerosoler, og er baseret på resultater fra en række forskellige klimamodeller. Oceanerne har igennem en række mekanismer betydning for klimaudviklingen og bidrager betydeligt til usikkerheden i forudsigelserne af fremtidens klima, blandt andet fordi beskrivelsen af "oceanets vejr" i klimamodellerne hidtil ikke har været ligeså detaljerede som modeller for atmosfærens vejr.

Oceanerne og klimaet

Betydningen af oceancirkulationen for Europas milde klima var allerede et diskussionsemne blandt naturforskere i den sidste del af det 19. århundrede. Selv ud fra datidens begrænsede observationer af oceanet, var det muligt at skitsere vigtige dele af Atlantens cirkulation. Man havde en klar forståelse af, at der i Nordatlanten eksisterer en unik strøm, som bringer

Den termohaline cirkulation (boks 1)

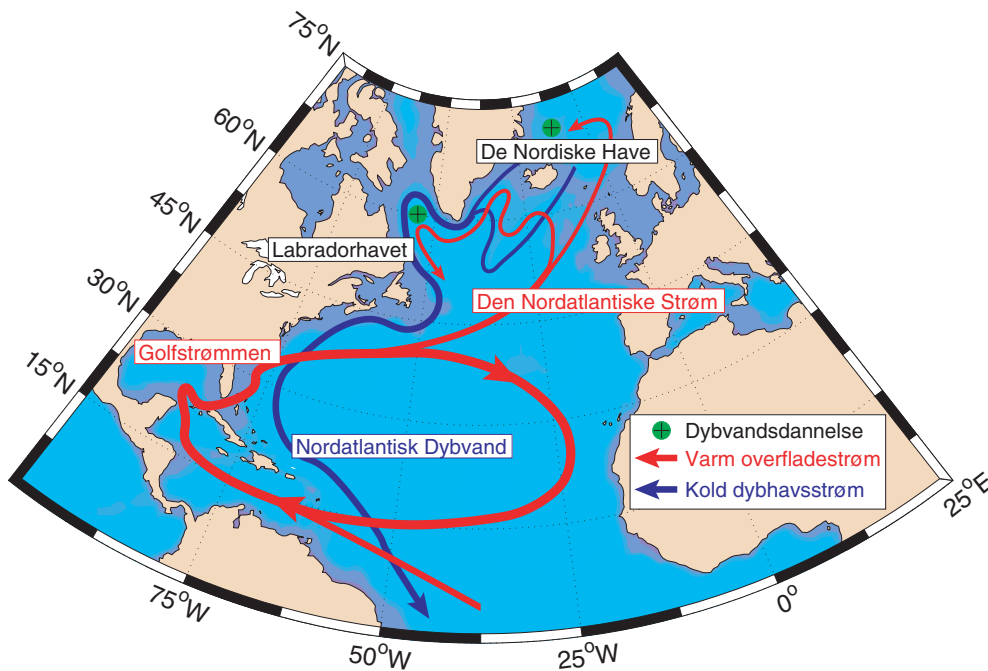
Både i Atlanten og i Stillehavet eksisterer enorme subtropiske hvirvler drevet af vestenvinde på mellembreddegrader og de østlige passatvinde nær ækvator. På den nordlige halvkugle er de mest kendte komponenter Golfstrømmen i Atlanten og Kuroshiostrømmen i Stillehavet. Når Golfstrømmen afbøjes væk fra det Nordamerikanske kontinent og driver mod øst, skifter den navn. Den gren, der fortsætter mod Nord kaldes den Nordatlantiske Strøm. Denne nordgående gren er et af de unikke træk ved Atlantens overfladecirkulation. I

forbindelse med den Nordatlantiske Strøm transporteres ikke blot varme, men også vand med høj saltholdighed fra troperne mod de polare havområder. Her er saltet en af hovedårsagerne til, at der om vinteren sker ned-synkning til stor dybde af afkølet og dermed tungt overfladevand. Denne dybvandsdannelsesproces i det åbne ocean er kun observeret i Nordatlanten og de Nordiske Have. At de tropiske og subtropiske have og dermed den Nordatlantiske Strøm er meget salt skyldes atmosfærens hydrologiske cyklus, hvori ferskvand transpor-

teres fra troperne mod polerne i form af atmosfærisk vanddamp. Dette efterlader troperne salte, mens den overskydende nedbør ved polerne bevirker, at oceanets overfladevand gradvist bliver ferskere.

I det nordlige Stillehav og i Sydhavet bevirker denne for-forskning og manglen på en "Nordatlantisk Strøm", at overfladevandet i det åbne ocean er for let til at synke mod dybhavet ved vinterafkøling.

Dybvatnet fra de Nordiske Have spredes via snævre stræder igennem Grønland-Skotland Ryg-



gen, en undersøisk bjergkæde, hvorefter det drives mod vest og siden sydover langs kontinentalskråningen. Dybvandet suppleres i Labradorhavet og fortsætter sydover som Nordatlantisk Dybvand, hvilket er Atlantens dominerende vandmasse (se boks 3). Drivkraften for den sydgående strømning er trykforskelle relateret til forskelle i vandmassernes massefylde. Vandmassen finder ikke blot vej over ækvator, men via Sydhavet videre til det Indiske Ocean og ind i Stillehavet.

Selvom den Nordatlantiske Strøm i sin oprindelse er genereret af vinden, betragtes den ofte som en kompensation for denne dybe sydgående transport. I dette syn er dybvandsdannelsen derfor en nødvendig betingelse for eksistensen af den Nordatlantiske Strøm og dermed for Vesteuropas og Skandinaviens milde klima.

Hvor nedsynkningen sker intenst i enkelte havområder og på meget lille horisontal skala, er dybvandets vej mod overfladen en proces, som finder sted spredt over alle oceanbassiner. Vores kendskab til denne del af cirkulationen er meget begrænset, da opstigningen af dybvandet sker meget langsommere end vi kan observere. En meget vigtig del af den oceanografiske forskning er rettet mod at beskrive og vægte de mulige energikilder og processer, der driver det tunge vand mod overfladen.

For det Sydlige Ocean mener vi, at vinden leverer den nødvendige energi, ved at de kraftige cirkumpolare vinde presser overfladevandet væk og trækker dybvandet mod overfladen. Den anden betydelige proces er forbundet med opblanding i oceanets indre. Blandingen medfører, at det kolde dyb-

vand varmes op og derved bliver lettere og langsomt kan stige mod overfladen. Denne opblanding sker som følge af tidekræfterne, dvs. kræfter fra Månen og Solens relative bevægelser til jorden, som sætter vandet i bevægelse og selv på stor dybde også med energi fra vinden.

Samlet benævnes denne cirkulationscelle den Termohaline Cirkulation, da temperatur og salt i samspil bestemmer massefylden for havvand og giver anledning til bevægelse. Det er dog klart, at denne historiske betegnelse ikke er dækkende for vores moderne syn på de drivende mekanismer. Trods en stor forskningsindsats er det endnu uklart, hvilken proces der er den begrænsende for styrken af cirkulationen. Er det intensiteten af dybvandsdannelsen eller blandingen i oceanets indre eller vinden over Sydhavet?

varme vandmasser op langs de nordvesteuropæiske kyster. Alle-rede inden det 20. århundredes begyndelse var det en udbredt opfattelse, at samspillet mellem disse varme vandmasser og den dominerende vestenvind giver et mildt, maritimt klima – mildere end breddegraden ellers ville diktere. Ved sammenligning med oceancirkulationen i det Nordlige Stillehav og klimaet i Nordamerika, var det endda kendt, at oceancirkulationen kan operere på andre måder end i Atlanten og med store klimatiske konsekvenser. Denne kendsgerning har siden været med til at motivere udforskningen af oceanet.

Vores forståelse er gradvist blevet udbygget gennem en stadig mere detaljeret kortlægning af oceanernes dominerende strømme, temperatur og saltfordeling gennem det 20. århundrede. Sideløbende er udtænkt stadig mere forfinede teorier for oceanets dynamik. Det er disse teorier, som de seneste årtiers matematiske computermodeller af oceanet og det koblede ocean-atmosfære system har bygget på. Netop modellerne har kunnet eftergive Atlantens vigtige rolle i klimasystemet forbundet med det såkaldte termohaline cirkulationssystem, der har sit udspring i Nordatlanten (se boks 1). Dette system bringer koldt vand mod syd ved stor dybde og i overfladen returnerer varmt, salt vand mod nord. Systemet er med til at omfordele varme på global skala.

Oceanets varmetransport

Ved at kombinere satellitmålinger med modeller er det i dag muligt at bestemme klimasystemets varmetransport fra lave til høje breddegrader, som sørger for at omfordele den ulige solindstråling (se boks 2).

På højde med Sydeuropa transporteres i oceanet samlet omkring 1PW varme mod nord ($1PW = 10^{15}W$) eller omkring 1/5 del af den totale nordlige transport af varme (se boks 2, figur a). Resten transporteres af atmosfæren og er forbundet med de for os velkendte lav-

tryk, der udvikles i vestenvindsbæltet. En stor del af oceanets varmetransport er derimod forbundet med den termohaline cirkulation i Atlanten (se boks 2, figur b).

Selvom oceanets bidrag til den totale varmetransport er relativt beskedent, er det af afgørende betydning for klimaet ved høje breddegrader af tre årsager:

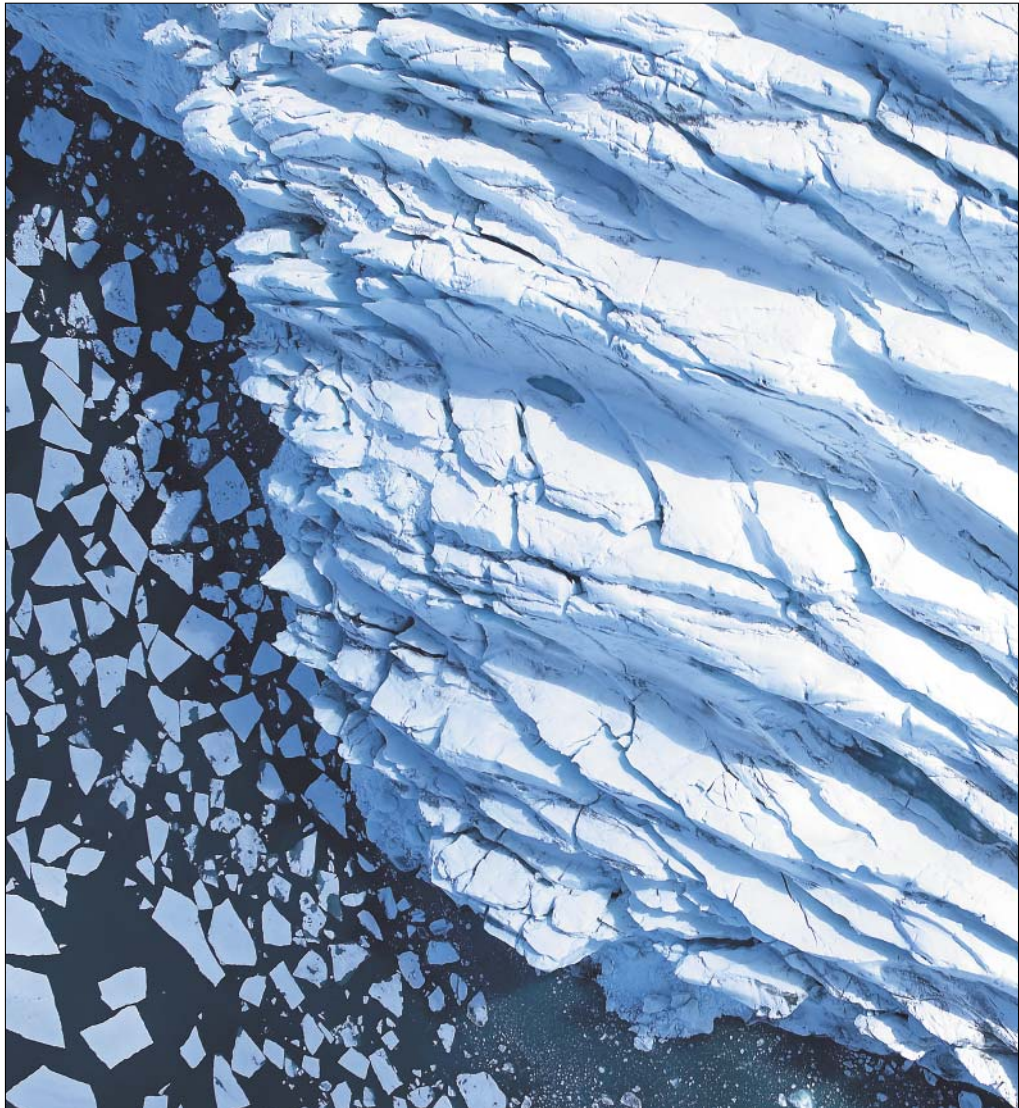
- Effekten forstærkes i Atlanten grundet den ulige fordeling mellem oceanerne
- Varmefrigivelsen til atmosfæren sker mest intenst om vinteren
- Der sker en betydelig varmegrigivelse i umiddelbar nærhed af havisgrænsen

Sidstnævnte træk medfører, at selv en relativt begrænset varmegrigivelse har stor klimatisk effekt, da den effektivt begrænser havisens udbredelse. Havisen indvirker nemlig på jordens strålingsbalance, da is reflekterer solens stråler. Dermed er havis en af de vigtigste parametre i klimasammenhæng på linie med sne og is på land.

Havets lagring af CO₂

Dybvandens dannelse i forbindelse med den termohaline cirkulation, hvor overfladevandmasser synker mod dybhavet, spiller også en central rolle for drivhusgasserne i atmosfæren. Ved dybvandens dannelse på høje breddegrader sker der et optag af CO₂ fra atmosfæren, idet overfladevandet på sin vej mod nord bliver undermættet med CO₂ som følge af afkøling. Mekanismen kaldes oceanets opløselighedspumpe.

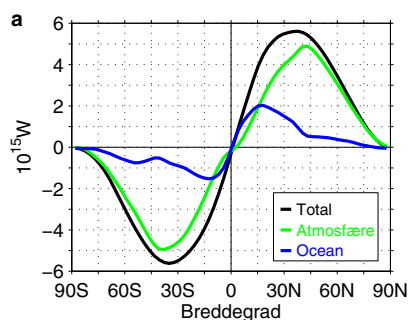
Der eksisterer også en organisk pumpe: Fotosyntese og biologisk aktivitet betyder, at der konstant "regner" dødt organisk stof fra overfladen mod bunden. Da produktionen dræner CO₂ fra overfladevandet bevirker dette en undermætning af overfladevandet som, isoleret set, fører til et optag af CO₂ fra atmosfæren – en "organisk CO₂-pumpe". I vandsøjlen og på selve oceanbunden omsætter bakterier det



En gletscherfront set fra oven.

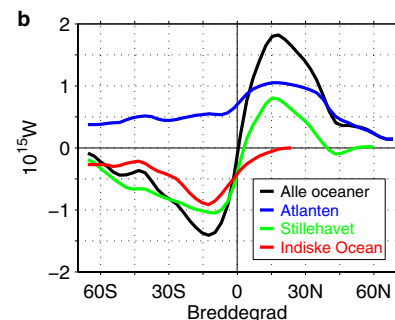
Foto: Ingvar S. Parmann

Atlantens "varmepirateri" (boks 2)



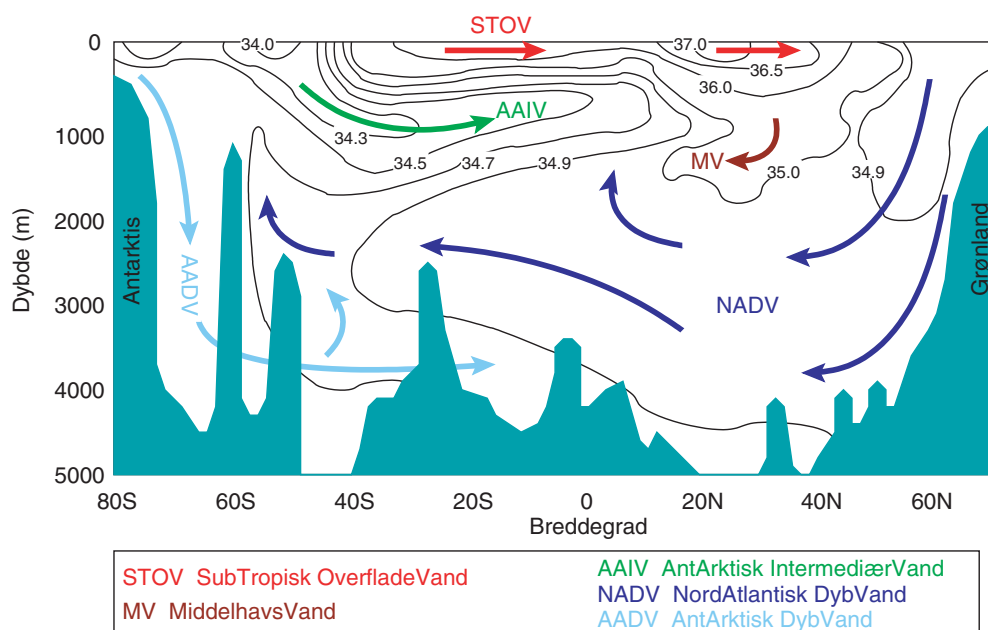
Breddegradsvariationen af varmetransporten forbundet med atmosfærens og oceanets cirkulation. Positive værdier svarer til en nordlig transport. I a sammenlignes atmosfærens og oceanets andel i den totale varmetransport og i b illustreres den ulige fordeling af oceanets transport imellem de forskellige oceanbassiner.

I Stillehavet er varmetransporten styret af den subtropiske hvirvel (se boks) og er derfor maksimal ved ca. 15°N, men ubetydelig nord for 35°N. I Nordatlanten er transporten derimod ca. 0,7 PW (1PW = 10¹⁵W) ved samme breddegrad. Atlanterhavet er tillige det eneste ocean, hvor varme transporteres på tværs af ækvator.



Begge karakteristika er en effekt af den termohaline cirkulation. Generelt øges Atlantens varmetransport gradvist fra Sydhavet mod Nordatlanten, hvilket vil sige at cirkulationen henter energi på den sydlige halvkugle og frigiver den på den nordlige halvkugle. Fænomenet er populært benævnt "Atlantens varmepirateri".

Atlantens vandmasser (boks 3)



Atlantens indre saltfordeling i et nord-syd snit fra Antarktis til Grønland afslører de dominerende vandmasser. Vandmasser er et centralt oceanografisk begreb, som bygger på, at dybvandets salt- og temperaturfordeling kan føres tilbage til de geografiske områder, hvor vandet sidst har været i kontakt med atmosfæren. Eksempelvis ses det Nordatlantiske Dybvand som en vandmasse med en salt-holdighed mellem 34,9 og 35,0 promille. Fra fordelingen af vandmasserne er det muligt at følge middelstrømningen i oceanets indre, hvilket er vist ved hjælp af pile i figuren. Vi ser her aftrykket af den termohaline cirkulation (boks 1), som bringer koldt vand mod syd ved stor dybde og ved

overfladen returnerer varmt, salt vand mod nord.

Der dannes andre vandmasser end Nordatlantisk Dybvand i Atlanten. De vigtigste er Antarktisk Dybvand og Antarktisk IntermediærVand. Det Antarktiske Dybvand dannes rundt om Antarktis i forbindelse med havisdannelse. Ved frysning af havis frastødes havsaltet, og det underliggende vand bliver beriget i salt og dermed tungt. Ved Antarktis er forholdene så specielle, at der fra det lave vand langs kysten flyder en kold, saltholdig tunge af vand ud over kontinentalskråningen og ned i dybhavet. Dette vand kiler sig ind under det Nordatlantiske Dybvand, som er noget varmere og derfor lettere, selvom det er

en anelse mere salt.

Den intermediære vandmassebetegnelse dækker over det relativt kolde vand, som findes mellem dybvand og overfladevandet. Dets dannelse sker i et samspil mellem vindpåvirkning og vinterafkøling udenfor de polare oceanområder. Processen er kraftigst på den sydlige halvkugle, hvor vandmassen dog ikke er salt nok til at nå stor dybde. Antarktisk IntermediærVand indlejrer sig derfor mellem det varme, lette Subtropiske Overfladevand og det kolde Nordatlantiske Dybvand. Selvom snittet ligger centralt i Atlanten ses også spor af salt Middelhavsvand, som strømmer ud ved Gibraltarstrædet og spredes i Nordatlanten.

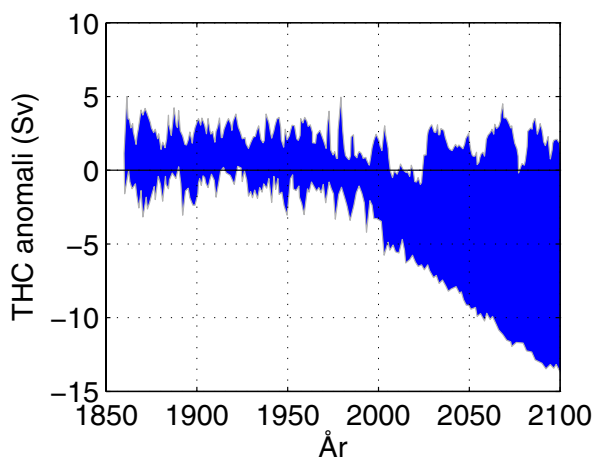
organiske stof og bringer dermed kulstoffet tilbage til uorganisk CO_2 . Herved bliver dybvandet kraftigt beriget i CO_2 . Over havområder, hvor dybvandet bringes mod overfladen, finder vi derfor ofte, at vandet er overmættet og derfor afgiver CO_2 til atmosfæren. I et uforstyrret klimasystem i balance vil denne CO_2 -afgivelse modsvare optaget af CO_2 i andre oceanområder.

En betydelig del af den menneskeskabte udledning af CO_2 optages gennem "opløseligheds-pumpen" ved dannelsen af dybvand og de såkaldte intermediære vandmasser (boks 3). Det er imidlertid vigtigt at skelne mellem disse to optag, da de to vandmassers recirkuleringstid – dvs. den tid, vandmassen i gennemsnit er uden kontakt med atmosfæren – er vidt forskellig. Hvor den intermediære vandmasse recirkuleres på mindre end 100 år, tager det op mod 1000 år inden dybvandet atter kommer til overfladen. Dybhavet vil derfor være ude af balance med det menneskeskabte niveau af atmosfærisk CO_2 i de næste mange hundrede år. Dermed vil dybhavet fortsat kunne medvirke til at begrænse atmosfærens indhold af CO_2 gennem dybvandsdannelse mange århundreder frem – forudsat, at nedsynkningen fortsætter.

Den intermediære vandmasse vil derimod nærme sig en balance allerede inden for det 21. århundrede, og dermed vil dannelsen af denne vandmasse gradvist ophøre med at dræne atmosfæren for menneskeskabt CO_2 .

Stor spredning på modelresultater

Gennem de nævnte mekanismer er den videnskabelige udfordring inden for den oceanografiske klimaforskning tæt forbundet med det altdominerende spørgsmål: Hvor meget vil temperaturen stige som konsekvens af menneskets påvirkning af klimasystemet? Der har været nogen fokus på oceanets bidrag til usikkerheden i IPCC's estimat, og det er blevet påvist,



Figur 1. Usikkerheden i simuleret styrke af den atlantiske termohaline cirkulation frem til det 21. århundrede imellem en række klimamodeller. Modellerne er drevet med samme historiske data og fremtidige scenarier for drivhusgasser i atmosfæren, men giver en meget forskellig udvikling, her vist som en anomali relativt til nutidsstyrken ($1 \text{ Sv} = 1 \text{ mio m}^3/\text{s}$).

“Oceanets vejr” kræver høj opløsning

Vejret i atmosfæren er noget vi alle har en klar fornemmelse af. Det er tæt relateret til hvirveldannelse som f.eks. lavtryk, hvilket er den dominerende og mest energirige skala. Oceanet opfører sig på mange måder tilsvarende, men de rumlige skalaer i havet er mange gange mindre end i atmosfæren. Hvor lavtryk typisk har en rumlig skala på 500–1000 km, så er de tilsvarende hvirvler i oceanet kun af størrelsesorden 10–100 km eller mindre. Dette skyldes, at den vertikale lagdeling i oceanet er meget større end i atmosfæren. Det er en af grundene til, at en dynamisk model for “oceanets vejr” kræver op mod en million gange flere beregninger end en atmosfærisk vejrmudel.

Oceankomponenterne i klimamodeller har derfor hidtil kun beskrevet dynamikken af middelstrømningen, og været afhængige af såkaldte parameteriseringer af effekten af hvirvler på middelstrømningen. Disse parameteriseringer, der beskriver processer på rumlige skalaer mindre end det er muligt at opløse i modellens beregningsnet, bygger ikke alle på sund fysik. Da det er middelstrømningen, som er relevant i et klimatisk perspektiv, kan denne mangel i nogen grad forsvares, men det anses for at være det mest kritiske område inden for klimatisk oceanmodellering.

Til trods for den beregningsmæssige udfordring, vil der i den næste klimaevneringsrapport fra IPCC indgå modelsimuleringer, hvor oceankomponenterne anvender en så høj rumlig opløsning, at de er i stand til at opløse hvirvler.

at der i modellerne er en ganske nøje sammenhæng mellem havisens karakteristika og graden af opvarmning.

Modeller, der som udgangspunkt har et relativt tyndt havisdække, viser sig som de mest følsomme og giver det største bud på den globale opvarmning. Den uforholdsmæssigt store klimatiske effekt af oceanets energitransport er netop forbundet med havisens udstrækning. Det er derfor rimeligt at antage, at selv mindre usikkerheder i modelleringen af den fremtidige oceancirkulation fortsat vil medføre stor usikkerhed i vurderingen af den globale opvarmning.

I relation til den termohaline cirkulation var resultaterne fra IPCCs klimavurderingsrapport i 2001 mere problematiske end spredningen i estimatet af den globale opvarmning umiddelbart antyder. Ser man på udviklingen i den Atlantiske termohaline cirkulation i rækken af anvendte klimamodeller er der store forskelle mellem de forskellige modellerne imellem. Forskellen i volumentransporten mellem den mest optimistiske og mest pessimistiske modelsimulering er op mod 15 mio. m³/s – hvilket stort set er identisk med styrken af cirkulationen (figur

1). I rækken af klimamodeller var der altså enkelte modeller, som gav noget nær et nedbrud af dybvandsdannelsen og den termohaline cirkulation imod slutningen af det 21. århundrede, mens andre modeller viste stort set uændret eller endda en svagt intensiveret cirkulation. Det er klart, at CO₂-optaget vil være vidt forskelligt imellem disse modelekstremer.

Vejen mod bedre ocean- og klimaforudsigelser

En af hovedmekanismerne bag den gradvise reduktion i Atlantens termohaline cirkulation er forbundet med en øget hydrologisk cyklus i atmosfæren (se boks 1), som fører til begrænset dybvandsdannelse i Nordatlanten. Den store spredning er til dels dikteret af meget forskellige ændringer i den atmosfæriske hydrologiske cyklus blandt modellerne og kan derfor føres tilbage til vores forståelse af atmosfæren. Dog er der en række problemstillinger forbundet med beskrivelsen af oceanet i modellerne, som gør, at vi ikke har fuld tillid til resultaterne. Det er f.eks. graden af den rumlige detalje i modellerne og brugen af såkaldte parameteriseringer – dvs. vurderinger af bidraget

fra de processer, der foregår på rumlige skalaer, der er for små til at blive beskrevet i modellerne beregningsnet.

Generelt vil en bedre dynamisk beskrivelse af oceanet i klimamodeller betyde, at man mindsker brugen af sådanne parametriseringer, som uundgåeligt inkluderer en række subjektive valg forbundet med en begrænset fysisk forståelse af processen.

Dermed kan det med nogen rimelighed forventes at spredningen imellem modelresultaterne løbende mindskes. I modsat fald vil det skabe grundlag for eftertanke i oceanografiske kredse – i hvert fald hvis det kan vises, at spredningen stadig beror på beskrivelsen af oceanet og ikke kan relateres til forskelle i den atmosfæriske udvikling blandt modellerne.

Der er altså begrundet håb for, at den fjerde klimavurderingsrapport fra IPCC, som efter planen skal udsendes i 2007, vil levere et mere entydigt svar på udviklingen i Atlantens Termohaline Cirkulation. Afledt heraf vil estimatet af oceanets optag af menneskeskabt CO₂ forbedres – en effekt, som via tilbagekoblingen til klimaet, er en af forudsætningerne for mere præcise klimaforudsigelser. ■

Om forfatterne



Steffen Malskær Olsen, ph.d.
E-mail: smo@DMI.dk



Erik Buch, lic. scient., sektionsleder
E-mail: ebu@DMI.dk



Mads Hvid Ribergaard, ph.d.
E-mail: mhri@DMI.dk

Alle er ved
Center for Marin Forecasting,
Danmarks Meteorologiske
Institut