

## Atlantens rolle i klimasystemet

Steffen Malskær Olsen, Erik Buch og Mads Hvid Ribergaard

DMI 18/4 2005

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 FN's 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 varme vandmasser op langs de nordvesteuropæiske kyster. Allerede 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 eftervise Atlantens vigtige rolle i klimasystemet forbundet med det såkaldte thermohaline cirkulationssystem, der har sit udspring i Nordatlanten (se boks 1) og bringer koldt vand mod syd ved stor dybde og i overfladen returnerer varmt, salt vand mod nord. Dette system 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 (Figur 1). 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 figur 1a). Resten transporteres af atmosfæren og er forbundet med de for os velkendte lavtryk, der udvikles i vestenvindsbæltet. En stor del af oceanets varmetransport er derimod forbundet med den thermohaline cirkulation i Atlanten (Figur 1b).

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 varmfriqvelse i umiddelbar nærhed af havisgrænsen

Sidstnævnte træk medfører, at selv en relativt begrænset varmfriqvelse 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 CO<sub>2</sub>

Dybvandsdannelsen i forbindelse med den thermohaline cirkulation, hvor overfladevandmasser synker mod dybhavet, spiller også en central rolle for drivhusgasserne i atmosfæren. Ved dybvandsdannelsen på høje breddegrader sker der et optag af CO<sub>2</sub> fra atmosfæren, idet overfladevandet på sin vej mod nord bliver undermættet med CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> fra overfladevandet bevirker dette en undermætning af overfladevandet som, isoleret set, fører til et optag af CO<sub>2</sub> fra atmosfæren – en "organisk CO<sub>2</sub>-pumpe". I vandsøjlen og på selve oceanbunden omsætter bakterier det organiske stof og bringer dermed kulstoffet tilbage til uorganisk CO<sub>2</sub>. Herved bliver dybvandet kraftigt beriget i CO<sub>2</sub>. Over havområder, hvor dybvandet bringes mod overfladen, finder vi derfor ofte, at vandet er overmættet og derfor afgiver CO<sub>2</sub> til atmosfæren. I et uforstyrret klimasystem i balance vil denne CO<sub>2</sub>-afgivelse modsvare optaget af CO<sub>2</sub> i andre oceanområder.

En betydelig del af den menneskeskabte udledning af CO<sub>2</sub> optages gennem "opløseligheds-pumpen" ved dannelsen af dybvand og de såkaldte intermediære vandmasser (se boks 2). Det er imidlertid vigtigt at skelne mellem disse to optag, da de to vandmassers recirkulationstid – 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<sub>2</sub> i de næste mange hundrede år. Dermed vil dybhavet fortsat kunne medvirke til at begrænse atmosfærens indhold af CO<sub>2</sub> gennem dybvandsdannelse mange århundrede 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<sub>2</sub>.

### **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, 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 thermohaline 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 thermohaline cirkulation i rækken af anvendte klimamodeller er der store forskelle mellem modellerne imellem. Forskellen i volumentransporten mellem den mest optimistiske og mest pessimistiske modelsimulering er op mod 15 mio. m<sup>3</sup>/s – hvilket stort set er identisk med styrken af cirkulationen (Figur 2). I rækken af klimamodeller var der altså enkelte modeller, som gav noget nær et nedbrud af dybvandsdannelsen og den thermohaline cirkulation imod slutningen af det 21. århundrede, mens andre modeller viste stort set uændret eller endda en svagt intensiveret cirkulation. Det er klart, at CO<sub>2</sub>-optaget vil være vidt forskelligt imellem disse modelekstremer.

### **Vejen mod bedre ocean- og klimaforudsigelser.**

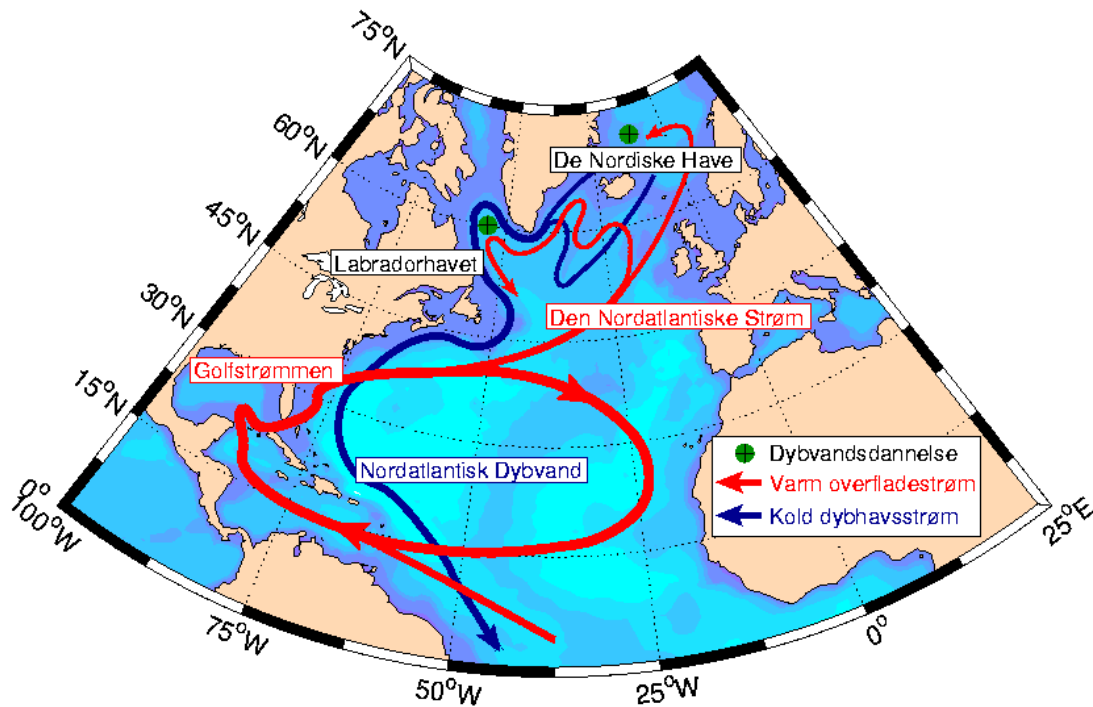
En af hovedmekanismerne bag den gradvise reduktion i Atlantens thermohaline cirkulation er forbundet med en øget hydrologisk cyklus i atmosfæren (se boks 1), som fører til begrænset dybvandsdannelse i Nordatlanten. Den store spredning er til dels dikteret af meget forskellige ændringer i den atmosfæriske 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 modellernes beregningsnet (se boks 3).

Generelt vil en bedre dynamisk beskrivelse af oceanet i klimamodeller betyde, at man mindsker brugen af sådanne parameteriseringer, 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 Thermohaline Cirkulation. Afledt heraf vil estimatet af oceanets optag af menneskeskabt CO<sub>2</sub> forbedres – en effekt, som via tilbagekoblingen til klimaet, er en af forudsætningerne for mere præcise klimaforudsigelser.

## Faktaboks 1: Den thermohaline cirkulation



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 nedsynkning 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 transporteres 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 forferskning og manglen på en "Nordatlantisk Strøm", at overfladevandet i det åbne ocean er for let til at synke mod dybhavet ved vinterafkøling.

Dybvandet fra de Nordiske Have spredes via snævre stræder igennem Grønland-Skotland Ryggen, 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 (boks 2). 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.

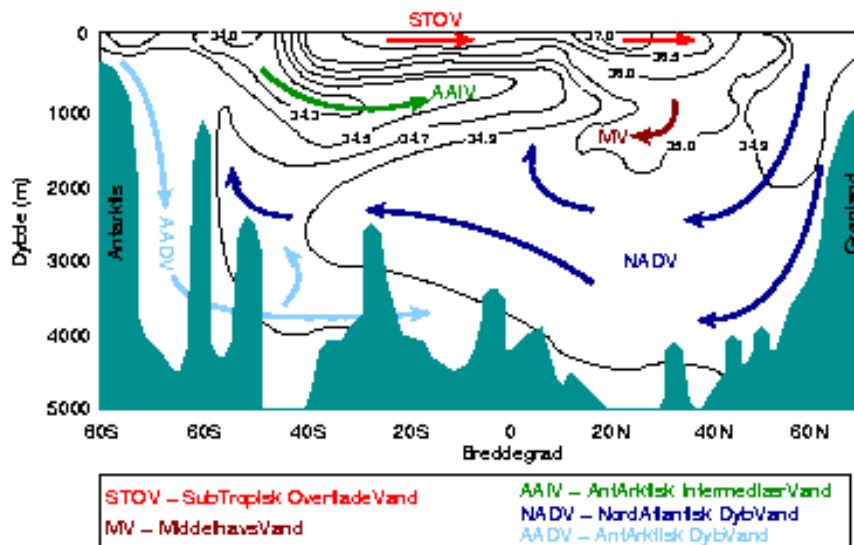
Selvom den Nordatlantiske Strøm i sin oprindelse er genereret af vinden, betragtes den ofte som en kompensation for denne dybe sydgående transport. I dette syn er dybvandsdannelsen derfor en nødvendig betingelse for eksistensen af den Nordatlantiske Strøm og dermed for Vesteuropas og Skandinaviens milde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

## Faktaboks 2 : Atlantens vandmasser



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 saltholdighed 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 thermohaline cirkulation (boks 1), som bringer koldt vand mod syd ved stor dybde og ved overfladen returnerer varmt, salt vand mod nord.

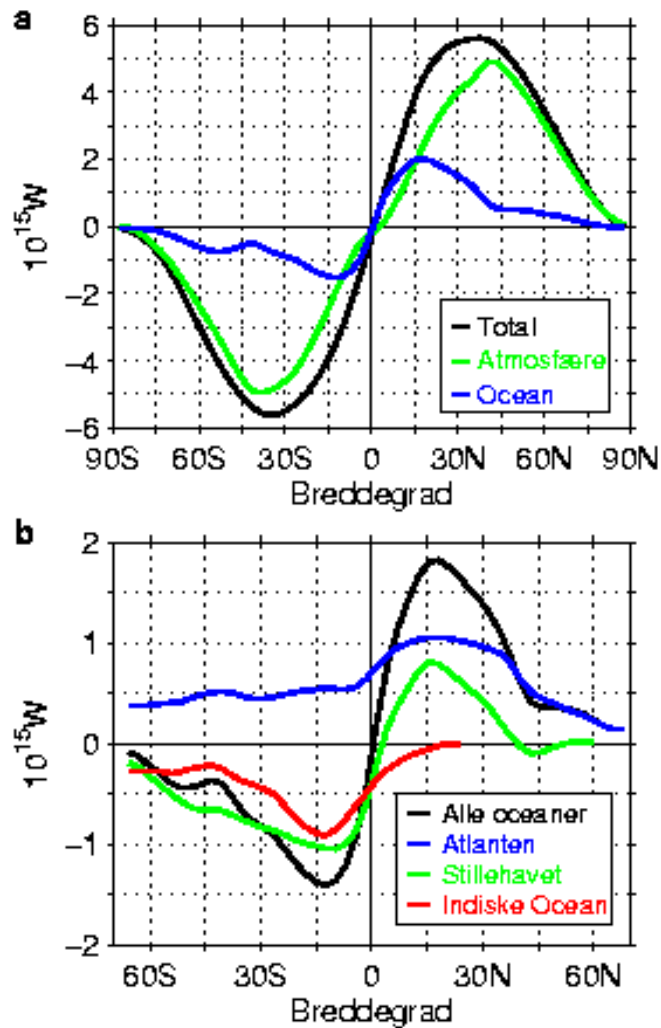
Der dannes andre vandmasser end Nordatlantisk Dybvand i Atlanten. De vigtigste er *Antarktisk Dybvand* og *Antarktisk IntermediærVand*. Det Antarktiske Dybvand dannes rundt om Antarktis i forbindelse med havisdannelse. Ved frysning af havis frastødes havsaltet og det underliggende vand bliver beriget 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 dybvandet 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.

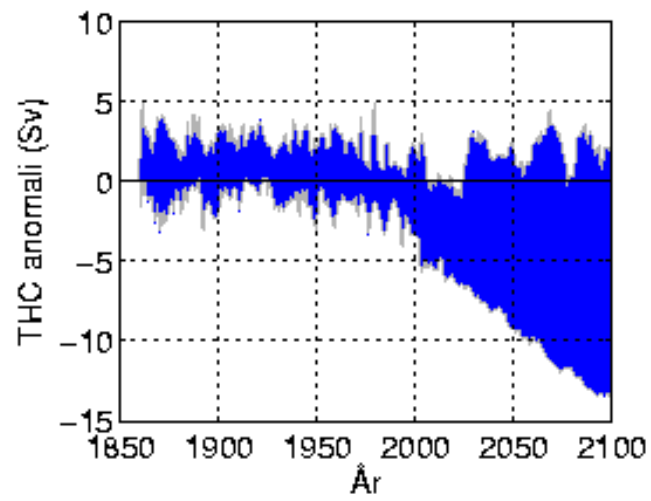
### **Faktaboks 3: Vigtigheden af ”oceanets vejr”**

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 i havet 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 vejrmodel. 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 klimaevalueringssrapport fra IPCC indgå modelsimuleringer, hvor oceankomponenterne anvender en så høj rumlig opløsning, at de er i stand til at opløse hvirvler. Parameteriseringer vil dog stadig blive anvendt for en række andre effekter og processer. Et vigtigt eksempel er den proces, hvorved dybvandsdannelsen foregår. I processen bringes overfladevand via intens atmosfærisk afkøling ned til stor dybde. At parameterisere denne proces samt at beskrive den præcise opblanding undervejs og dermed de detaljerede egenskaber af dybvandet er uhyre vanskeligt. Det er ofte blevet vist, at ikke blot temperatur- og salt-sammensætningen af dybvandet, men også intensiteten hvormed dannelsen foregår, afhænger af de valgte parameteriseringer for konvektion og hvirvelaktivitet. At anvende et mere fintmasket beregningsnet vil derfor have en række afledte effekter, som sandsynligvis vil påvirke oceankomponenternes følsomhed overfor eksempelvis en intensiveret atmosfærisk hydrologisk cyklus i et varmere klima. Dette vil i modellerne virke tilbage på klimaet og måske give et mere entydigt svar på udviklingen.





Figur 1. 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 1) og er derfor maksimal ved ca. 15°N, men ubetydelig nord for 35°N. I Nordatlanten er transporten derimod ca. 0,7 PW (1PW =  $10^{15} \text{ W}$ ) ved samme breddegrad. Atlanterhavet er tillige det eneste ocean, hvor varme transporteres på tværs af ækvator. Begge karakteristika er en effekt af den thermohaline cirkulation. Generelt øges Atlanten's 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".



Figur 2. Usikkerheden af simuleret styrke af den atlantiske thermohaline cirkulation frem til det 21. århundrede imellem en række klimamodeller. Modellerne er drevet med samme historiske data og fremtidige scenario for drivhusgasser i atmosfæren, men giver en meget forskellig udvikling, her vist som en anomali relativt til nutidsstyrken (1 Sv = 1 mio m<sup>3</sup>/s).