

Det "kolde hul", "Golfstrømmen" og Danmarks klima

Af Bogi Hansen og Steffen M. Olsen

Bogi Hansen er fra Færøernes Havforskningsinstitut og Steffen Malskær Olsen fra Danmarks Meteorologiske Institut.

Sidste efterår (2015) var der en del medieomtale af det såkaldte "kolde hul" sydøst for Grønland og dets indvirkning på den såkaldte "Golfstrøm" og det danske klima. Man kunne let få den opfattelse, at denne strøm allerede er svækket med store konsekvenser for Skandinavien og Danmark. Sammenhængen mellem det "kolde hul" og "Golfstrømmen" er dog ikke så direkte, og vi vil her præsentere måleresultater og modelkørsler, der viser, at den strøm, man i Danmark sædvanligvis kalder Golfstrømmen, ikke er svækket de seneste 60 år. Tværtimod er der tegn på, at dens transport af varme mod Skandinavien og Arktis er øget de seneste tyve år.

Indledning

Det "kolde hul" er et havområde sydøst for Grønland, hvor overfladetemperaturen de første måneder af 2015 var koldere end normalt i modsætning til næsten alle andre områder på Jorden (Figur 1a). I medierne blev dette knyttet sammen med en svækkelse af den såkaldte termohaline cirkulation (THC) i Atlanterhavet. Dette strømsy-

stem indbefatter bl.a. en varm overfladestrøm, som populært kaldes «Golfstrømmen», og som transporterer varme mod nord forbi Skandinavien's kyster og bidrager til Danmarks relativt milde klima. En svækkelse af THC kunne derfor tænkes at mindske denne varmetransport og derved lede til lokal afkøling. Sammenhængen mellem det "kolde hul" og Danmarks klima er derfor nærliggende; men der er dog en del aspekter, der komplicerer denne sammenhæng.

Den første komplikation er, at der faktisk er tale om to forskellige «kolde huller». Det ene, som især blev omtalt i medierne, viser temperaturanomalier nogle få måneder af 2015. En version af dette er vist i Figur 1a. Det andet «kolde hul» er vist i Figur 1b, og det viser temperaturændring over mere end et århundrede. De to figurer ligner hinanden meget især i området sydøst for Grønland; men derfor kan de godt have forskellige årsager. En anomali, der varer nogle måneder, kan have mange naturlige årsager; f.eks. unormalt kolde vinde, der ikke nødvendigvis behøver at have indvirkning på det mangeårige klima. Når vi taler om klimatiske ændringer, er det derfor Figur 1b, vi bør fokusere på, ikke Figur 1a.

Kortet i Figur 1b er taget fra den seneste IPCC rapport og viser, at området sydøst for Grønland ikke har deltaget i den globale opvarmning siden

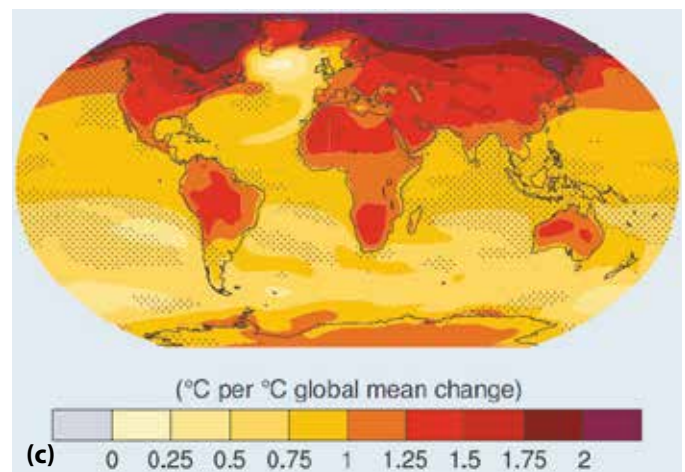
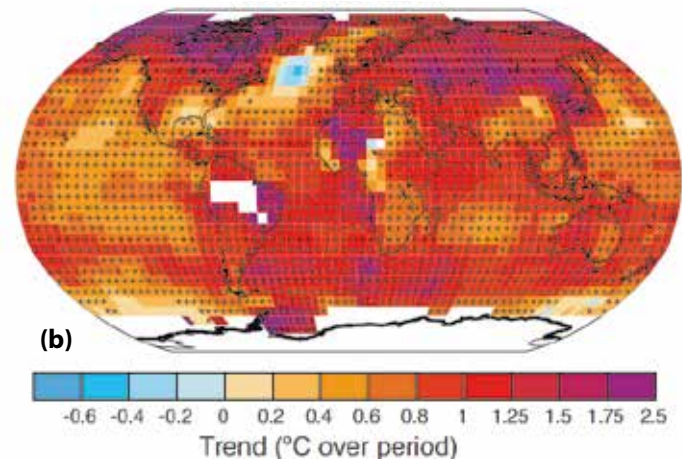
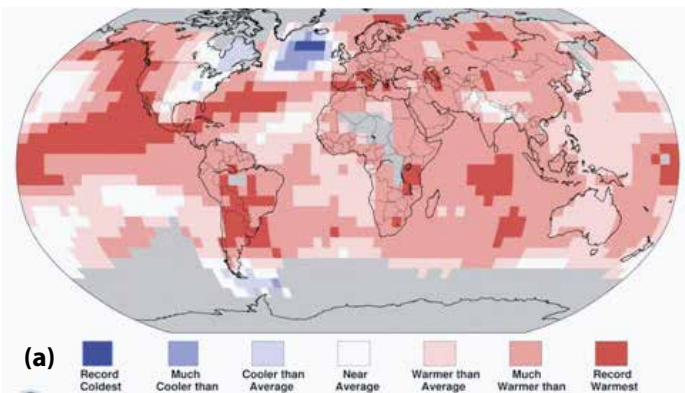
1900. Et lignende mønster ses i de prognoser, som klimamodeller typisk spår for slutningen af dette århundrede (Figur 1c), og det sættes gerne i sammenhæng med en svækket THC (Stouffer et al., 2006), som nærmere redegjort for i figurteksten.

Den termohaline cirkulation

De fleste af havets store strømsystemer udgøres af horisontale strømme, der er drevet af vind, men der er også strømme, der drives af forskelle i massefylde. Havvands massefylde afhænger af temperatur og saltholdighed. Heraf navnet termohalin strøm (termo=varme, halin=salt). Her ser vi især på den Nordatlantiske THC, som kan siges at begynde i de kolde arktiske havområder, hvor overfladevand afkøles af den kolde luft, og hvor saltholdigheden kan øges ved isdannelse. Derved øges massefylden, hvilket leder til, at overfladevandet synker ned mod større dybder.

Dette kolde dybe vand har større massefylde end vand på samme dybde længere mod syd i Atlanterhavet, og det trænger sig derfor mod syd nede i dybet. Det vand, der synker fra overfladen må dog erstattes, og derfor suges nyt overfladevand ind fra mere sydlige og dermed også varmere områder. Den termohaline cirkulation omfatter således både en sydgående kold bundstrøm og en nordgående varm kompensationsstrøm, der

Figur 1. (a) Temperatur fra januar til august 2015 i forhold til normalen 1981-2010. Kilde: NOAA. (b) Ændring i overfladetemperatur 1901-2012 i form af lineær trend for GISS datasættet. Kilde: IPCC AR5 WG1 Technical Summary Figure TS.2. (c) Temperaturændring 2081-2099 i forhold til 1986-2005, skaleret med global middeltemperatur som gennemsnit af CMIP5 modeller. Kilde: IPCC AR5 WG1 Technical Summary Box TS.6, Figure 1. Det "kolde hul" sydøst for Grønland, som ses tydeligt både i (a) og i (b), mens det i (c) viser sig som et område, der næsten ikke følger den globale opvarmning.

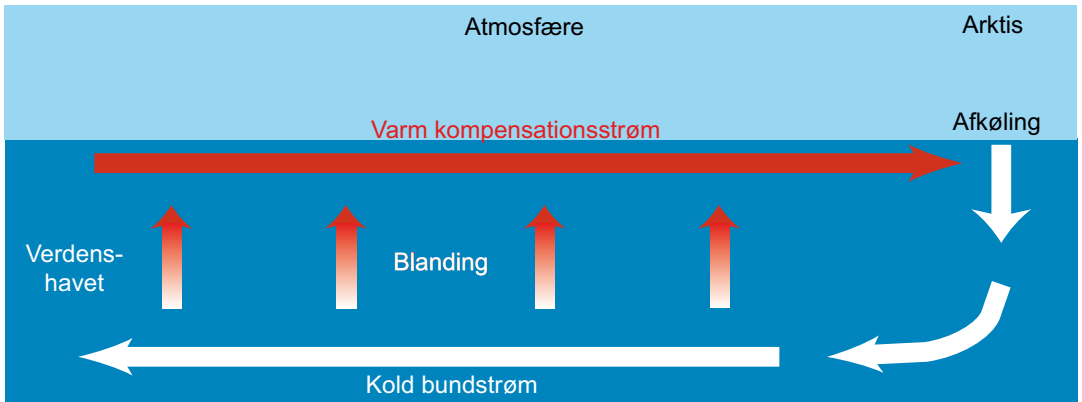


løber i overfladen (Figur 2). Cirkulationssystemet lukkes ved, at det dybe vand langsomt opvarmes ved blanding med overliggende vandmasser og stiger op mod overfladen. Denne opstigning sker over store dele af verdenshavet, men særlig ved Antarktis sker tillige en direkte vinddrevede "upwelling" af dybvand.

Den kolde bundstrøm transporterer vand, der er sunket fra overfladen, hvor det var i kontakt med atmosfæren og kunne optage gasser fra den. En af disse er ilt, som er nødvendig for at fisk og andre dyr i havet kan ånde. Ilt i dybhavet fornyes kun via nedsynkning af kolde, iltmættede vandmasser. En anden vigtig gas er kuldioxid, og THC er den vigtigste proces, der transporterer kuldioxid fra atmosfæren til dybhavet, hvor det meste af klimasystemets kuldioxid hører hjemme, når systemet er i ligevægt. THC-systemernes lange cirkulationstid (århundreder) er dermed også hovedårsagen til, at der vil gå mange århundreder, førend havets optag af varme og kuldioxid igen vil komme i ligevægt med atmosfæren, selv hvis

det snart lykkes at stoppe udledning af antropogen kuldioxid. THC-systemet er tillige kritisk for at opretholde et koldt dybhav

over det meste af kloden, og ændringer vil gennem thermal udvidelse påvirke den globale vandstand.



Figur 2. Forenklet skitse af termohalin cirkulation i Nordatlanten. Afkøling øger overfladevandets massefylde så meget, at det synker, hvilket driver både en kold bundstrøm og en kompenserende varm overfladestrøm. Afkølingens centrale rolle medfører samtidig, at THC er følsom over for global opvarmning, især opvarmning af Arktis. Øget tilførsel af ferskvand kan også svække THC ved at reducere overfladens saltholdighed og massefylde.

Den dybe gren af THC har således stor klimatisk betydning, og det har overfladegrenen også. Det varme vand, som den bringer mod nord, opvarmer luften og de omgivende landområder. En

svækkelse af THC betyder derfor en svækkelse af den oceane varmetransport. Dette er det, der knytter det «kolde hul» sydøst for Grønland sammen med THC, fordi dette område ligger netop

langs den rute, som en gren af den varme overfladestrøm følger (Figur 3).

Dette fik tidligt i 2015 den tyske klimaforsker Stefan Rahmstorf og andre til at foreslå, at



Figur 3. De to vigtigste THC-systemer i Nordatlanten. Termohalin nedsynkning af vand foregår i Labradorhavet og i de Nordiske Have. Fra disse områder spreder kolde bundstrømme sig ud i verdenshavet (hvide pile), medens varme kompensationsstrømme (røde pile) løber mod nedsynkningsområderne. Baggrundskortet har Jack Cook fra Woods Hole Oceanographic Institution lavet.

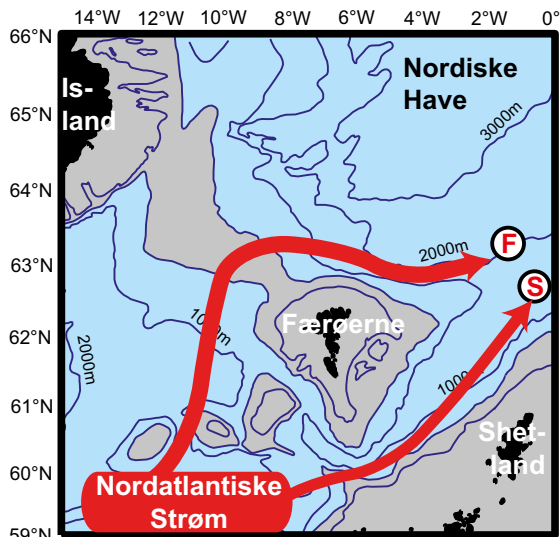
THC i Nordatlanten er blevet svækket (Rahmstorf et al., 2015). I Nordatlanten er der mere end ét sådant THC-system, og vinden påvirker også strømmene. For den samlede vertikale cirkulation i Nordatlanten benytter man derfor gerne betegnelsen «AMOC» (Atlantic Meridional Overturning Circulation). Ved brug af en klimamodel fandt Rahmstorf et al. (2015) en tydelig sammenhæng mellem styrken af AMOC og overfladetemperaturen i området for det «kolde hul», og dette benyttede de til at argumentere for en svækkelse gennem det 20. århundrede, specielt efter 1970. Rahmstorfs gruppe mente at se en delvis «recovery» efter 1990; men andre har argumenteret for en svækkelse af THC over de seneste 10 år (Robson et al., 2014).

To THC-systemer i Nordatlanten

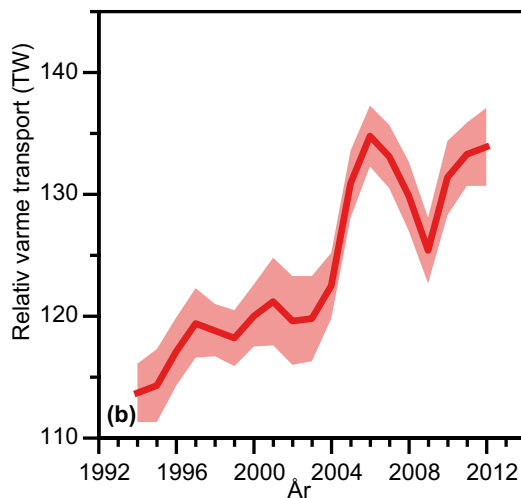
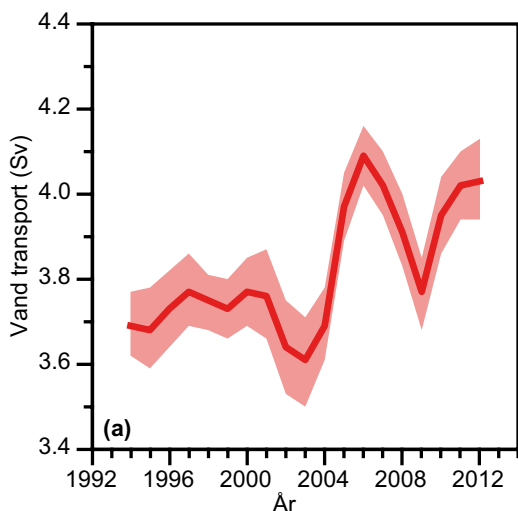
Disse resultater har stimuleret en livlig diskussion blandt eksperter, om AMOC allerede er begyndt at

svækkes, og der er ikke enighed. Men selv om det skulle vise sig, at Rahmstorf og andre har ret i, at AMOC og THC er svækket, så betyder det ikke nødvendigvis, at det vi kalder "Golfstrømmen" er svækket. Der findes nemlig to

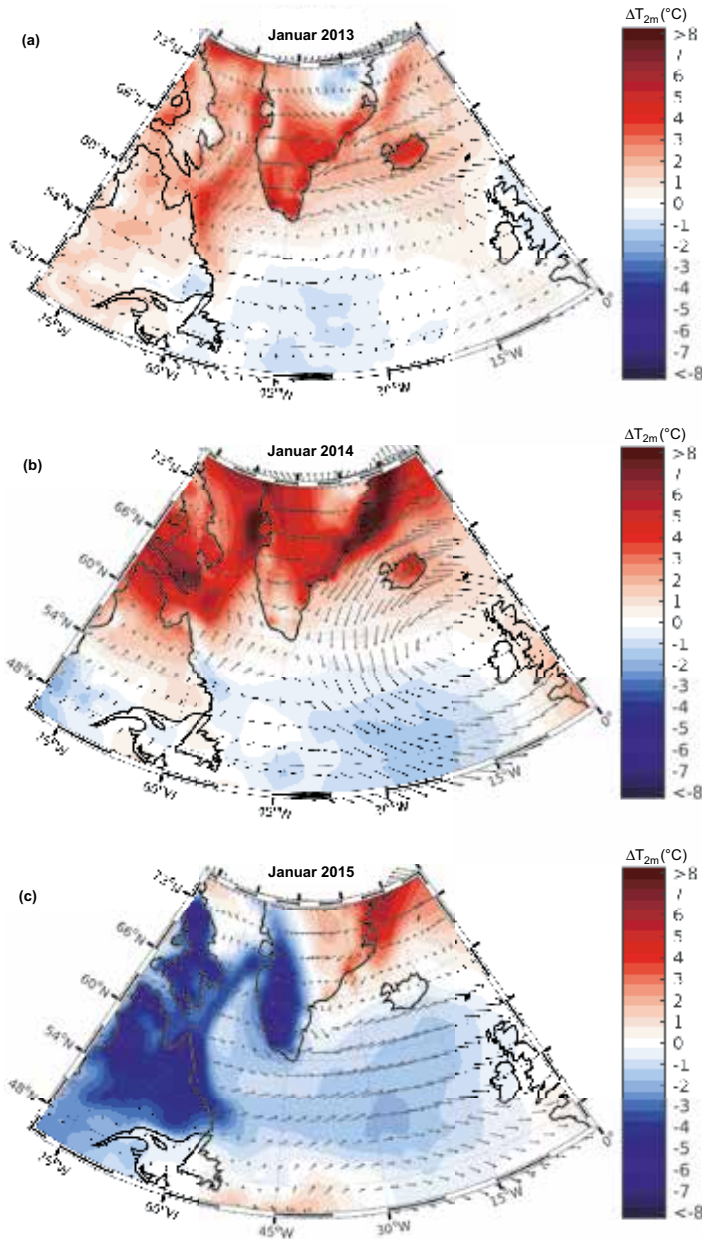
forskellige THC-systemer i Nordatlanten. Det ene af disse "begynder" i Labradorhavet (Figur 3), hvor vand kan synke ned på 1000-2000 m dybde og bidrage til den dybe gren af THC. Den varme kompensationsstrøm,



Figur 4. På vej ind i de Nordiske Have deler den Nordatlantiske Strøm sig i to grene: Færøgrenen (F) og Shetland grenen (S). Pilenes tykkelse indikerer relativ styrke i form af vandtransport.



Figur 5. Transport af vand (volumen, masse) (a) og varme (b) i Færøgrenen (F i Figur 4) fra 1994 til 2012. De tykke røde linier er 3-års løbende middelværdier, medens de røde arealer er \pm en standard error. Enhederne er Sverdrup ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) og Terawatt ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$). Varme transporten er relativ til 0°C , hvilket er omkring den temperatur, som vandet har, når det strømmer tilbage fra Arktis til Nordatlanten.



Figur 6. Afvigelsen i 2-meter temperatur og overflade vindfelt (10-meter vind anomalier) for januar 2013, 2014 og 2015. Data er fra ERA-Interim (Dee et al., 2011), og hele re-analyse perioden 1979-2015 er brugt som reference.

der skal erstatte det forsvundne overfladevand i Labradorhavet, kaldes Irmingerstrømmen efter en dansk admiral. Denne strøm løber gennem området for det "kolde hul", og kolde tilstande i

dette område kan derfor skyldes en svækkelse af det vestlige THC-system.

Det andet THC-system - det østlige - "begynder" i de Nordiske Have nord for Færøerne og

Island. Ved en række forskellige processer dannes der koldt vand med stor massefylde, der synker og strømmer ud i Atlanterhavet gennem dybe kanaler i den undersøiske ryg mellem Grønland og Skotland. Over længere tidskala er dette det stærkeste af de to THC-systemer, og den varme kompensationsstrøm i dette system er den, der opvarmer vore kystområder.

Denne varme strøm er oprindeligt løbet forbi Nordamerika som en del af den stærke Golfstrøm (Figur 3). Herfra stammer navnet, men det er kun en lille del af den oprindelige amerikanske Golfstrøm, som når at krydse Atlanterhavet og nærme sig Skandinavien kyster. Blandt oceanografer benævnes denne strøm sædvanligvis "den Nordatlantiske Strøm"; men betegnelsen "Golfstrøm" også for denne aflægger har været benyttet i mere end 100 år (bl.a. af Fritjof Nansen) og er indgroet i medier og folkemunde.

Er "Golfstrømmen" svækket ?

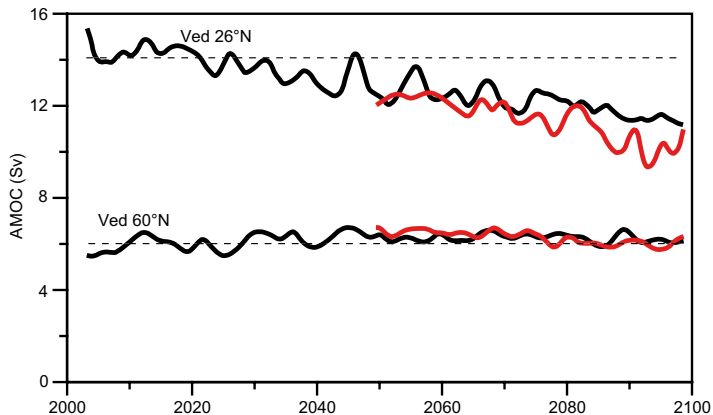
Hvad end vi benævner denne strøm, så er den i alle tilfælde en del af det østlige THC-system. Hverken det århundredlange "kolde hul" (Figur 1b) eller det mere kortvarige i 2015 (Figur 1a) behøver således at have medført nogen svækkelse af den varme strøm, som bidrager til Skandinavien milde klima. Men der findes også mere konkrete beviser for, at denne strøm ikke er svækket, nemlig fra direkte målinger og fra modelkørsler.

Når den Nordatlantiske Strøm nærmer sig det arktiske område, deler den sig i to grene, som strømmer henholdsvis nord for

og syd for Færøerne (Figur 4). Siden midten af 1990'erne har begge grene været med i et koordineret monitoringsprogram, der har omfattet målinger af temperatur og saltholdighed såvel som strømstyrke. Fra disse kan man beregne transportværdier for vand (volumen, masse), varme og salt, og ingen af grenene viser noget tegn på svækkelse over de sidste tyve år (Bex et al., 2013; Hansen et al., 2015).

Tværtimod er der tegn på, at varmetransporten i disse to grene kan være øget. Dette ses mest tydeligt i Færørgrenen, der strømmer mellem Island og Færøerne (F i Figur 4). Dette er den stærkeste gren, og analyser har vist, at den primært drives af termohaline processer (Hansen et al., 2010). Ved at kombinere in situ målinger med data fra satellit-altimetri er det muligt at beregne transportværdier for denne gren fra 1993, og disse viser klart, at transporterne er øget (Figur 5). Specielt er varmetransporten af Færørgrenen øget med $18 \pm 9\%$ i denne 20-års periode (Hansen et al., 2015).

Længere tidsserier kan opnås ved at benytte havmodeller drevet med atmosfæriske reanalyse data. En ensemble hindcast modelkørsel på DMI viste således ikke nogen systematisk ændring i intensiteten af det østlige THC-system fra 1948 til 2005 (Olsen et al., 2008). Denne modelkørsel viste særdeles god overensstemmelse med en række forskellige in situ målinger, der på forskellig vis er relateret til THC. Alt tyder derfor på, at der siden 1948 ikke har været nogen svækkelse af den varme strøm, der løber langs Skandinavien kystområder mod



Figur 7. Modelleret styrke af AMOC (volumentransport) ved to forskellige breddegrader (sorte kurver) i EC-Earth klimamodellen. Modellen er drevet med RCP8.5 scenariet frem til år 2100 (Swingedouw et al., 2014). De røde kurver, der starter i 2050, viser følsomheden til intensiveret afsmeltning fra Grønlands indlandsis med $10^5 \text{ m}^3/\text{s}$ frem til 2100.

Arktis, som vi populært kalder «Golfstrømmen».

Her kunne nogen måske fristes til at påpege, at de citerede måleserier stopper i 2013. Kunne det «kolde hul» i 2015 (Figur 1a) da måske skyldes en pludselig kraftig reduktion i det østlige THC-system, der er startet efter målingernes ophør? Men her er svaret klart nej. Havområderne i Arktis har oplagret en vældig mængde koldt og tungt vand, der vil holde strømsystemerne kørende i nogle tiår, selv om der ikke sker nogen fornyelse. Det østlige THC-system har derfor – i modsætning til det vestlige – en lang tidsskala. Dette betyder samtidig, at skrækscenariet fra «The Day after Tomorrow» med et pludseligt stop i Nordatlantens THC er urealistisk.

Det "kolde hul" i 2015

Hvis vi vender tilbage til vinteren 2015, finder vi, at den var præget af et udbrud af særdeles kold kontinental luft fra vest over Labradorhavet (Figur 6), som har

medført en kraftig nedkøling af havet. Typisk sker en markant uddybning af havets øverste blandingslag i netop sådanne situationer, hvormed havet mister en stor mængde varme. Selv uden andre faktorer i spil vil dette kunne påvirke overflade temperaturen ind i sommeren og forklare det "kolde hul" i Figur 1a. Det er derfor ikke oplagt at forklare det "kolde hul" netop i 2015 med en svækkelse af Irmingerstrømmen eller THC. Er de rette betingelser til stede, vil dette vinter-blandingslag opnå en massefylde, hvor det lokalt gennembryder den øvre lagdeling (dybvandsdannelse) og føder ind i den dybe gren af THC. Vi har endnu ikke et fuldt videnskabeligt overblik over den mulige dybvandsdannelse i 2015; men der er indikationer på, at disse processer har været aktive. En af de kritiske faktorer er netop, i hvilken udstrækning havområdet er påvirket af ferskvand fra Arktis eller afsmeltning fra Grønland (Rahmstorf et al., 2015; Yang et al., 2016).

Konklusion og fremtidsperspektiver

Den kolde tilstand sydøst for Grønland i 2015 (Figur 1a) er utvivlsomt til dels en følge af de kolde vinde fra den foregående vinter (Figur 6c). Derudover kan der være et bidrag, der skyldes en reduktion i Nordatlantens THC og som muligvis også kan have bidraget til den observerede århundredlange afkøling (Figur 1b). Dette betyder dog ikke, at den varme strøm, der løber forbi Skandinaviens kyster - populært kaldet Golfstrømmen - er svækket. Tværtimod viser direkte målinger, at dens varmetransport er øget de sidste 20 år. Hvis der har været en svækkelse af Nordatlantens THC siden 1950, så har den mest sandsynligt været i det vestlige THC-system, som ikke har så stor direkte indflydelse på Danmarks klima.

Hvad fremtiden vil bringe er lidt mere usikkert. Moderne klimamodeller (CMIP5) er stort set enige om, at AMOC som helhed vil svækkes i løbet af dette århundrede (IPCC AR5 WGI Technical Summary, 2013). Men igen behøver dette ikke at medføre en svækkelse af det østlige THC-system og den oceane varmetransport mod Skandinavien. Dette er illustreret i Figur 7, som viser en prognose for AMOC simuleret med EC-Earth klimamodellen drevet med RCP8.5 scenariet, som forudsætter fortsat kraftig udledning af drivhusgasser. Ved 26°N inkluderer AMOC bidrag fra begge THC-systemer og er stærkest. Her viser prognosen en markant svækkelse. Ved 60°N er der stort set kun det østlige THC-

system igen, og her ser vi ingen svækkelse. Selv med stærkt øget afsmeltning fra Grønland (røde kurver) er der ikke tegn på en markant reduktion af det østlige THC-system.

Dette kunne tyde på at «vor» del af AMOC og THC også i fremtiden kunne ventes at være ret stabil, men det må erkendes, at der er stor forskel mellem prognoserne for AMOC fra forskellige klimamodeller (IPCC AR5 WGI Technical Summary, 2013), og det nedsætter tilliden til prognoserne. Vi må derfor være indstillet på, at der kan komme overraskelser.

Litteratur

Berx, B., Hansen, B., Østerhus, S., Larsen, K. M., Sherwin, T., and Jochumsen, K., 2013. Combining in situ measurements and altimetry to estimate volume, heat and salt transport variability through the Faroe-Shetland Channel, *Ocean Sci.*, 9, 4, 639-654.

Dee, D. P. et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137: 553-597.

Hansen, B., Hátún, H., Kristiansen, R., Olsen, S. M., and Østerhus, S., 2010. Stability and forcing of the Iceland-Faroe inflow of water, heat, and salt to the Arctic, *Ocean Sci.*, 6, 4, 1013-1026.

Hansen, B., Larsen, K. M. H., Hátún, H., Kristiansen, R., Mortensen, E., and Østerhus, S., 2015. Transport of volume, heat, and salt towards the Arctic in the FaroeCurrent 1993-2013, *Ocean*

Sci., 11, 743-757.

Olsen, S. M., Hansen, B., Quadfasel, D., and Østerhus, S., 2008. Observed and modelled stability of overflow across the Greenland-Scotland ridge, *Nature*, 455, 519-522.

Rahmstorf, S., Box, J. E., Feulner, G., Mann, M. E., Robinson, A., Rutherford, S., and Schaffernicht, E. J., 2015. Exceptional twentieth-century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation, *Nat. Clim. Change*, doi:10.1038/nclimate2554.

Robson, J., Hodson, D., Hawkins, E., and Sutton, R., 2014. Atlantic overturning in decline?, *Nat. Geosci.*, 7, 1, 2-3.

Stouffer, R. et al., 2006. Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes. *J. Clim.* 19, 1365-1387.

Swingedouw, D., Rodehacke, C.B., Olsen, S.M., Menary, M., Gao, Y., Mikolajewicz, U., Mignot, J., 2014. On the reduced sensitivity of the Atlantic overturning to Greenland ice sheet melting in projections: a multi-model assessment. *Clim. Dyn.* DOI 10.1007/s00382-014-2270-x.

Yang, Q., Dixon, T. H., Myers, P. G., Bonin, J., Chambers, D., van den Broeke, M. R., 2011. Recent increases in Arctic freshwater flux affects Labrador Sea convection and Atlantic overturning circulation. *Nat Commun*, doi:10.1038/ncomms10525