

GOLFSTRØMMEN og Europas fremtidige klima



Hvis Golfstrømmen stopper, vil temperaturerne i Nordvesteuropa falde 6-10 °C. Visse oceanografiske modeller foreslår, at dette vil kunne ske indenfor ganske få år. I denne artikel argumenterer vi for, at en sådan udvikling er højest usandsynlig.

Om forfatterne



Tine Rasmussen er professor ved Norges Arktiske Universitet, Tromsø, Norge



Erik Thomsen er lektor emeritus, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet. erik.thomsen@geo.au.dk

Golfstrømmen er en del af et større system af havstrømme, der kaldes AMOC – *Atlantic Meridional Overturning Circulation*. Det er dette system, der bringer varmt vand fra subtropenerne op til Europas kyster og holder klimaet i for eksempel Danmark mildt og relativt varmt. Uden Golfstrømmen ville vintertemperaturerne i Vesteuropa falde 6–10 °C. Golfstrømmen er altså afgørende for det klima, vi kender i dag.

AMOC fungerer som et kredsløb i havet:

- Varmt vand strømmer fra tropenerne mod nord i overfladen.
- I de nordligste dele af Nordatlanten afkøles det varme vand om vinteren og bliver koldere og tungere.
- Det tunge vand synker mod havbunden og strømmer tilbage mod syd som en kold bundstrøm.
- Dette driver hele strømcyklussen frem, idet det udstømmende bundvand giver plads til, at varmt overfladevand fortsat kan strømme mod nord.

- AMOC hjælpes dog også på vej af coriolis-kraften fra jordens rotation og af de vedholdende sydvestlige vinde, der dominerer Nordatlanten.

Nedsynkning af koldt vand foregår især i de nordiske have (Grønlandshavet, Islandshavet og sporadisk i Norskehavet) mellem Grønland og Norge. Her sker afkølingen, og nedsynkningen er meget stabil og foregår i stor skala. I mindre grad forekommer der også nedsynkning i Labradorhavet og Irmingerhavet men i disse områder er nedsynkningen forholdsvis ustabil, og den sker ikke hvert år og heller ikke samme sted eller i samme mængde.

Truer smeltevand Golfstrømmen?

I de senere år er der i flere forskerkredse opstået bekymring om, at AMOC i den nære fremtid kan blive svækket eller endda kollapse. Denne hypotese er blandt andet fremført af Stefan Rahmstorf fra Universität Potsdam og af en forskergruppe ved Universiteit Utrecht,

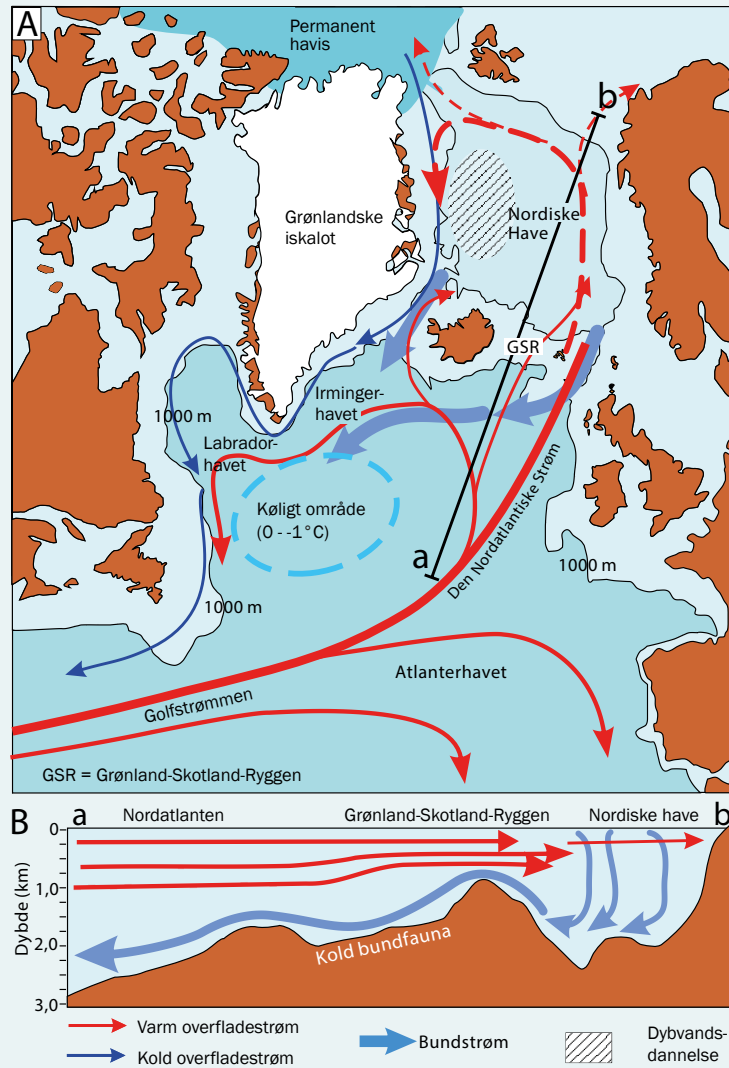
Holland, men danske forskere, blandt andet Peter Ditlevsen og Susanne Ditlevsen fra Københavns Universitet har også spillet en betragtelig rolle. Beregningerne, der bygger på moderne klimamodeller, advarer om, at der kan ske et kraftigt fald i AMOC's styrke indenfor få årtier – måske allerede indenfor 10 år. Klimamodellerne i dag er uhyre komplekse systemer, hvori man over tid kan ændre en lang række faktorer, der kan have betydning for forudsigelsen af klimaets udvikling i fremtiden. Modellerne kan også anvendes til vurdering af mulige ændringer i oceanerne og i deres strømsystemer. Det kan eksempelvis være ændringer i AMOC i en fremtid med stigende temperaturer.

Centralt for de beregninger, der blev omtalt i verdenspressen 2022–2025, er nedsynkningsområderne i Labradorhavet og Irmingerhavet uden at inddrage hovedområdet lokaliseret i de nordiske have. Udgangspunktet for undersøgelserne er, at temperaturerne i overfladevandet i et område sydøst for Grøn-

Det nordlige Atlanterhav i nutiden

A. Det nordlige Atlanterhav med generaliseret oversigt over de vigtigste strømsystemer i nutiden (mellemistid). Strømmene udgør den nordlige del af det strømsystem, vi kalder AMOC. Varmt subtropisk vand (Golfstrømmen og Den Nordatlantiske Strøm) strømmer nordpå ind i de nordiske have (røde pile), hvor det afkøles om vinteren og synker til bunds og flyder tilbage langs havbunden (lyseblå pile). Linjen a-b viser placeringen af nord-syd-profilet i figur B.

B. Varmt overfladevand strømmer over Grønland-Skotland-Ryggen (GSR) og afkøles i de nordiske have, og synker mod havbunden. Det kolde dybvand strømmer tilbage til Nordatlanten og giver plads til, at nyt varmt overfladevand kan strømme ind i de nordiske have. Afkølingen og nedsynkningen af varmt atlantisk vand i de nordiske have er den vigtigste pumpe i AMOC-systemet. Tilpasset efter Rasmussen og Thomsen (2004).



land indenfor de senere år er faldet med 0,5-1 °C sammenlignet med de omgivende havområder. Faldet kunne være forårsaget af en øget mængde smeltevand fra Grønlands indlandsis som følge af den menneskeskabte globale opvarmning. Det ferske smeltevand skulle gøre overfladevandet i Labrador- og Irminger-havene lettere, og dermed forhindre nedsynkning. Hvis tilførslen af ferskvand fortsætter med at stige, kan det medføre en alvorlig svækkelse eller stop af AMOC.

Mange forskere, heriblandt Steffen M. Olsen fra DMI, er dog skeptiske for disse teoretiske beregninger. De peger blandt andet på, at nedsynkningen i de berørte områder altid har været ustabil, og at den er sekundær i forhold til de vigtige

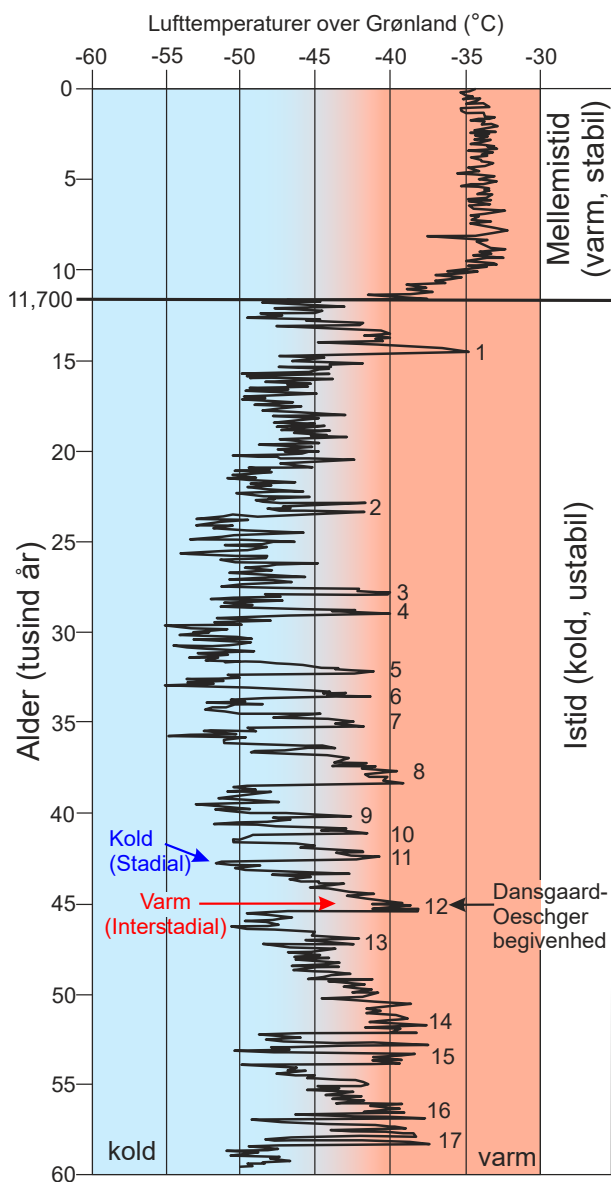
nedsynkningsområder i de nordiske have. Bogi Hanssen fra Faroe Marine Research Institute og mange andre forskere fremhæver desuden, at man indtil videre ikke har set tegn på en svækkelse af ind- og udstrømning af vandmasser fra de nordiske Have, lige som der ikke er stærke indikationer på en svækkelse af Golfstrømmen, hvor denne forlader den Mexicanske Golf. De nyeste målinger antyder faktisk, at strømningerne i begge områder er øget. Det må betyde, at nedsynkningen i Nordatlanten og i de nordiske have ikke er svækket.

AMOC under istiden

De moderne matematiske klimamodeler er udviklet til at estimere fremtidens udvikling indenfor en lang række områder. Det vil øge tro-

værdigheden af modellernes forudsigelser om mulige ændringer i en ukendt fremtid, hvis man kan vise, at modellerne korrekt kan beskrive kendte ændringer i fortiden. Eksempelvis vil det styrke modellernes forudsigelse om en fremtidig nedlukning af AMOC, hvis man kan påvise, at AMOC tidligere har været lukket ned under omstændigheder, der kan sammenlignes med nutidens. Her henviser flere af disse forskere til forholdene under sidste istid, da AMOC lukkede ned eller svækkedes kraftigt mindst 25 gange.

Det nuværende strømsystem i Atlanterhavet har været stabilt siden slutningen af seneste istid for cirka 11.700 år siden. Disse stabile klimatiske forhold står i modsætning til forholdene under istiden, der var



Modificeret efter McNeall et al. (2011), Climate Change 2, 663-686

Temperaturudviklingen over Grønland gennem de seneste 60.000 år baseret på forholdet mellem oxygenisotoperne ^{18}O og ^{16}O målt i de grønlandske iskerner. Bemærk de store forskelle mellem de varme stabile forhold gennem de seneste cirka 11.700 år og ustabiliteten under den forudgående istid, hvor kulden utallige gange blev brudt af kortvarige opvarmninger kaldet Dansgaard-Oeschger-begivenheder.

stærkt ustabile. Resultater fra de grønlandske iskerner viser, at i perioden fra cirka 115.000 år til cirka 15.000 år siden kunne temperaturerne over Grønland stige og falde med op til 10-16 °C på få årtier. Iskernerne dokumenterer, at dette skete mindst 25 gange siden sidste stabile varmeperiode Eem, der varede i cirka 10.000 år. Udsvingene kaldes Dansgaard-Oeschger-begivenheder, og de skyldes givetvis ændringer i luftmasserne omkring Grønland. Den egentlige årsag til fluktuationerne er sandsynligvis ændringer i AMOC, og de forskere, som mener at AMOC i dag pludselig

kan standse, henviser da til istidens temperaturspring som eksempler på, at sådanne nedlukninger faktisk er sket i fortiden. Men som vi vil påvise i det følgende, er årsagen til istidens fluktuationer usammenlignelige med de ændringer, de matematiske modeller siger, kan ske i fremtiden.

AMOC i dag sammenlignet med istiden

Som følge af svingninger i jordaksens hældning og i jordens bane omkring solen svinger jordens klima mellem relativt varme perioder, der varer i cirka 10.000-15.000 år,

og kolde perioder, der varer i cirka 100.000 år. De varme perioder kaldes mellemstider; de kolde perioder kaldes istider. De seneste cirka 11.700 år har forholdene været varme. Før den tid var forholdene koldere og mellem 80.000 og cirka 15.000 år siden var klimaet så koldt, at Skandinavien, inklusive Danmark, i lange perioder var dækket af en mere end 2 km tyk iskalot. Gennemsnitstemperaturen på den nordlige halvkugle var cirka 7-10 °C lavere end i dag.

Det nordlige Atlanterhav blev dækket af havis som det Arktiske Ocean i dag. Isen nåede ned til en linje ud for Portugal. På samme måde som i det Arktiske Ocean var saliniteten i overfladevandet under isen reduceret. Isdækket og den nedsatte salinitet umuliggjorde nedsynkning, og AMOC var stærkt reduceret. Disse forhold burde have været permanente og ubrydelige gennem hele den kolde del af istiden. Når dette ikke var tilfældet, således som Dansgaard-Oeschger-begivenhederne og de pludselige opvarmninger viser, skyldes det en række specielle forhold knyttet til den Nordatlantiske geografi. Området udgør således ikke et sammenhængende bassin, men er delt i to af en højderyg fra Grønland til Skotland, Grønland-Skotland-Ryggen. Over denne er vanddybden bare 500-800 meter sammenlignet med 2 til mere end 3,5 kilometer i de nordiske have nord for ryggen og 4-5 kilometer i det centrale Atlanterhav syd for ryggen.

De specielle forhold betød for det første, at AMOC ikke var helt slukket, idet coriolis-kraften og nordøstenvinden fortsat pressede på; dog skete indstrømningen af atlantisk vand til de nordiske have meget langsommere end i nutiden. For det andet skete indstrømningen i dybet under det lette overfladevand. I de nordiske have blev det dybere hav gradvist opvarmet. Opvarmningen kan ses i bunddyrsfaunaen, der afspejler de stadig højere temperaturer, og ved hjælp af geokemiske målinger, der viser 3-6 grader højere temperaturer

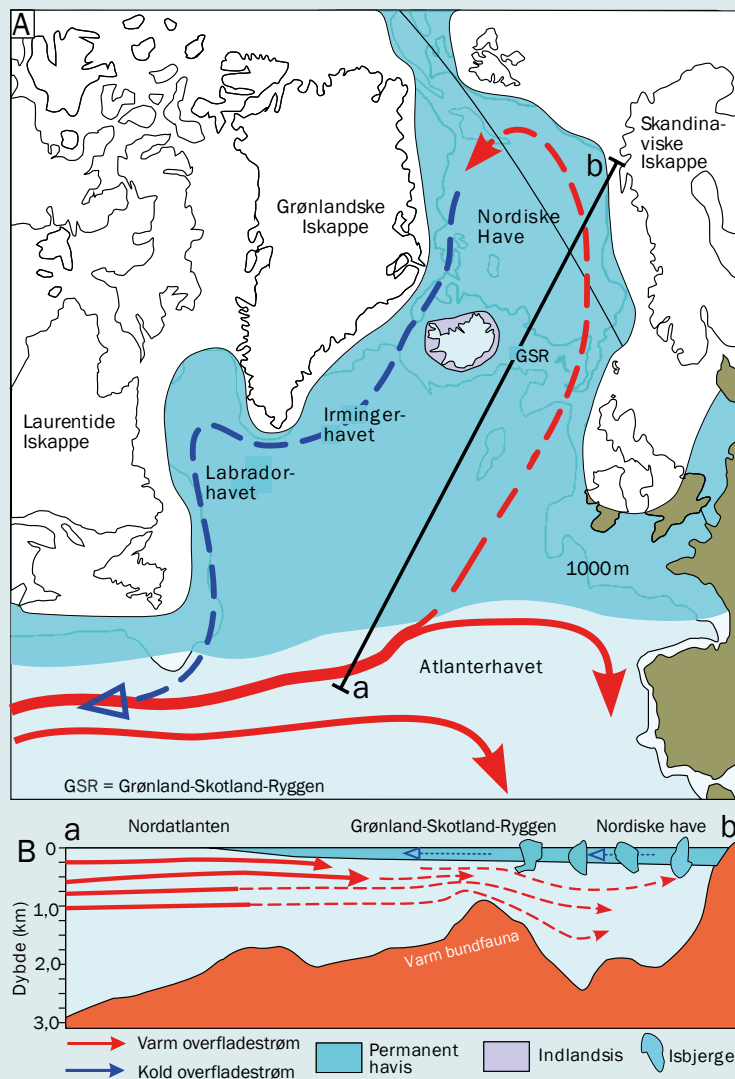


Hvis Den Nordatlantiske Strøm standser, vil der ske et temperaturfald på 6 °C og 10 °C. Ved et årsgennemsnit på 3,3 °C (som Harstad i Norge ved foden af Lofoten) vil skoven være åben og hovedsagelig bestå af birk, pil og nåletræer. Den naturlige pattedyrsfauna består af rensdyr, elg, ulv, polarræv, los, jærv og bjørn. Landbrug med kornavl er ikke mulig. Foto: Colourbox.

Det nordlige Atlanterhav under istiden

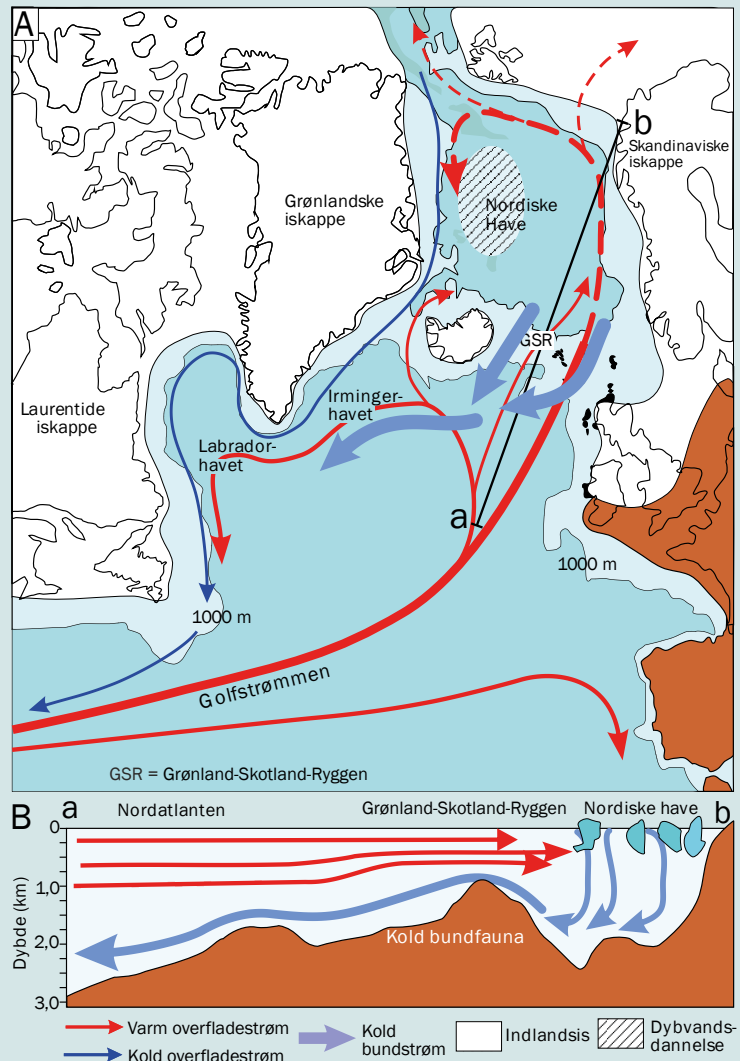
A. Udbredelsen af indlandsis og havis i det Nordatlantiske område under de koldeste perioder af sidste istid. Nordatlanten var i lange perioder under sidste istid omgivet af kæmpemæssige iskapper (markeret med hvidt på figuren). De vigtigste var den skandinaviske iskappe, de islandske og grønlandske iskapper samt den nordamerikanske Laurentide-iskappe. I de koldeste faser af Dansgaard-Oeschger-begivenhederne nåede havisen ned til den iberiske halvø.

B. Golfstrømmen og den Nordatlantiske Strøm var stærkt svækkede, og løb ikke længere i overfladen, men under havisen. I de nordiske have varmedes de dybere vandmasser langsomt op (baseret på Rasmussen og Thomsen, 2004).



Det nordlige Atlanterhav under istiden – varm fase / interstadial

Udbredelsen af indlandsis efter, at de opvarmede dybe vandmasser har brudt igennem havisen i de nordiske have. AMOC genetableres, og temperaturerne i det nordatlantiske område stiger. Vi er i Dansgaard-Oeschger-begivenhedernes varmeste fase (se figuren med temperaturudviklingen over Grønland). Dog kun for en kort stund, for de højere temperaturer udløser en øget tilførsel af smeltvand fra de omgivende iskalotter. Smeltvandet sænker overfladevandets temperatur og massefylde, og nedsynkningen går langsomt i stå. Iskalotterne vokser igen og sender flere og flere isbjerge ud, og til sidst kollapser AMOC. Vi er på vej ind i Dansgaard-Oeschger-begivenhedernes kolde fase. Tilpasset efter Rasmussen og Thomsen (2004)



end i dag. Det vil sige, at fra cirka 300 meters og ned til næsten 2 kilometers dybde kunne temperaturerne stige med op til 6 °C. For det tredje dannede Grønland-Skotland-Ryggen en dyb spærre mellem de nordiske have og det nordlige Atlanterhav. Det varme vand ophobede sig nord for ryggen, hvor vandet blev varmere og varmere. Til sidst blev opvarmningen så stor, at det varme (og salte) bundvand blev lettere end det kolde isede overfladevand. Det trængte igennem til havoverfladen og kunne nu afgive sin varme til atmosfæren. Den opbrudte havis i de nordiske have og det nordlige Atlanterhav forsvandt, nedsynkningen gik i gang på ny, og AMOC blev genoprettet. Over det nærliggende Grønland steg temperaturerne med op til 16 °C. Opvarmningen var uhyre brat og tog

måske mindre end 10-20 år. Fasen med maksimum-temperaturer var dog kortvarig, for med varmen steg tilførslen af smeltvand fra de omgivende iskalotter, og gradvist blev overfladevandet igen lettere end det dybe vand, havisen bredte sig, og gradvist gik AMOC i stå igen. Næste nedfrysning kunne begynde.

Betydningen af ferskvandstilførsel

Klimaspringene, der udgør Dansgaard-Oeschger-svingningerne, består altså af to dele: en brat opvarmning efterfulgt af en langsom nedkøling. Opvarmningen skyldes opstigende varmt vand fra neden. Tilsvarende processer kendes kun i beskedent omfang fra det marine miljø i nutiden. Årsagen til den følgende nedkøling er udledning af

let smeltvand, der lægger sig som et koldt låg ovenpå det varmere bundvand. Denne del af Dansgaard-Oeschger ligner de processer, som de fleste modelforskere arbejder med, når de beregner, om tilførsel af ferskvand kan standse AMOC i nutiden.

Det betyder dog ikke, at nutidens og istidens nedkølingsfaser kan sammenlignes. De geografiske forhold var nemlig voldsomt forskellige. I dag dækker indlandsis på den nordlige halvkugle cirka 1,8 millioner kvadratkilometer, hvoraf den grønlandske indlandsis udgør mere end 95%. Under istidens koldeste fase for 30.000-22.000 år siden, hvor Dansgaard-Oeschger-begivenhederne var hyppige, dækkede de nordlige iskalotter mindst 30 mil-

lioni kvadratkilometer eller cirka 15 gange mere end i dag (se figur). Til sammenligning dækker isen på Antarktis 14,2 millioner kvadratkilometer med kun små forskelle mellem istid og nutid. Det er også vigtigt at notere sig, at under istiden stod isranden omkring det nordlige Atlanterhav langs kontinentalranden og var i direkte kontakt med oceanerne. I nutiden har isranden de fleste steder på den nordlige halvkugle trukket sig tilbage fra kysten og for det meste langt ind i fjordene.

Hver gang temperaturerne steg i forbindelse med Dansgaard-Oeschger-begivenhederne må enorme mængder af ferskvand have strømmet ud i det nordatlantiske område. De sparsomme data tillader dog ikke en direkte kvantitativ sammenligning mellem tilførslen i nutid og tilførslen under Dansgaard-Oeschger-begivenhederne.

8200-års begivenheden

Den Grønlandske Indlandsis er i dag næsten den eneste kilde til smeltevand og isbjerger til Atlanterhavet. Siden slutningen af istiden for cirka 12.000-10.000 år siden har AMOC været relativt stabil. Der indtraf dog for cirka 8200 år siden et temperaturfald, som yderligere kan belyse ferskvands betydning for temperaturerne på den nordlige halvkugle. Faldet varede cirka 150 år. I de grønlandske iskerner har man registreret et temperaturfald på cirka 2 °C. Årsagen til denne begivenhed var et kollaps af den sidste rest af Laurentide-iskappen på det nordamerikanske kontinent, samt en tømning af de søer, som isen havde holdt opdæmmet. Ifølge de nyeste estimater strømmede der på få år cirka 500 billioner tons is og koldt ferskvand ud i det nordvestlige Atlanterhav. Det skal sammenlignes med, at den samlede mængde smeltevand fra den grønlandske indlandsis gennem de seneste 20 år er estimeret til cirka 5 billioner tons eller 100 gange mindre end udledningen under 8200-års begivenheden. Alligevel medførte denne episode kun et

forholdsvist beskedent temperaturfald i Europa på 1-1,5 °C. Det er her vigtigt at påpege, at på trods af de enorme mængder af koldt ferskvand, der blev udløst for 8200 år siden, så kollapsede AMOC ikke, selv ikke på kort sigt.

Nye perspektiver

En af de faktorer, der påvirkes af den globale temperaturstigning, og som har stor betydning for stabiliteten af AMOC, er massefylden af overfladevandet i Nordatlanten. Når massefylden falder, vil nedsynkningen blive vanskeligere. Da nedsynkningen er den største pumpe for AMOC, vil denne blive langsommere og måske helt kollapse.

Indenfor det seneste år er der sket et betydeligt skifte i en hollandsk forskergruppes vurdering af årsagerne til mulige ændringer i massefylden i disse nordlige farvande. I en artikel fra 2025 af Sybren Drijfhout og kolleger fra Universiteit Utrecht bliver smeltevand fra Grønland tillagt langt mindre betydning end hidtil.

Disse forskeres udgangspunkt er, at saliniteten og massefylden i Nordatlanten og i de nordiske have i dag er forholdsvis høj. Det skyldes, at Golfstrømmen og den nordatlantiske strøm tilfører højsalinitet overfladevand fra det varmere subtropiske og tropiske Atlanterhav. Ved en svækkelse af AMOC vil denne transport af saltrigt vand formindskes med det resultat, at massefylden i Nordatlanten og i de nordiske have falder. Det betyder, at AMOC svækkes yderligere. Der er således opstået et selvforstærkende feed-back system mellem det nordlige og sydlige Atlanterhav, hvorved saliniteten og massefylden i nord bliver stadig lavere. På basis af deres modeleksperimenter mener disse forskere, at det afgørende skæringspunkt, hvorefter et kollaps er uundgåeligt, sandsynligvis vil passeres indenfor de næste 10-20 år. Men det egentlige sammenbrud af AMOC vil dog først indtræffe 50-100 år senere, altså en meget langsommere proces end den, som

de mest alarmistiske forskere fremfører. Hvad der til en begyndelse sætter feed-back-processen i gang er uklart. En mulig forklaring kunne være den globale opvarmning.

Som det fremgår af denne artikel, er modelforskerne for tiden langt fra enige om betydningen af helt centrale punkter i deres modeller som effekten af Grønlands smeltevand. Ifølge nogle modeller har den en afgørende betydning; ifølge andre er den uden betydning. Mange modelforskere synes at mangle overvejelser om, hvorvidt de opstillede scenarier overhovedet er realistiske. Der er dog undtagelser. Således påpeger Sybren Drijfhout og kolleger i deres artikel fra 2025, at et abrupt kollaps (det vil sige på mindre end 30 år) af AMOC vil kræve massive, ikke-realistiske tilførsler af ferskvand til Nordatlanten.

Alt i alt må vi konstatere, at hypoteserne om et snarligt kollaps af AMOC er kontroversielle, og at datagrundlaget for modellerne er tyndt. Der mangler tydeligvis brugbare data, ikke mindst om oceanernes udvikling i de seneste cirka 100 år.

Afslutningsvis, vil vi påpege, at flere forskere (for eksempel omtalte Drijfhout og kolleger) giver udtryk for, at de katastrofale temperaturfald, der teoretisk set vil ramme Nordvesteuropa, hvis AMOC kollapse, måske slet ikke vil indtræffe, men blive kompenseret for af den generelle globale opvarmning, der følger af udledningen af drivhusgasser. Det betyder ikke, at nedsynkningen i de nordlige farvande nødvendigvis vil være uden betydning. Måske flytter den bare nordpå ind i det Arktiske Ocean.

Selvom vi anser en katastrofal kollaps af AMOC som følge af menneskeskabt opvarmning for usandsynlig, er andre konsekvenser af den fortsatte udledning af drivhusgasser dog uundgåelige og potentielt lige så alvorlige som et stop af Golfstrømmen. Det kan for eksempel være stigninger i havniveauet og forskydninger i klimabælterne. ■

Videre læsning

Ditlevsen, P., Ditlevsen, S. (2023). Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nature Communications* 14:4254.

Drijfhout, S., et al (2025). Shutdown of northern Atlantic overturning after 2100 following deep mixing collapse in CMIP6 projections. *Environmental Research Letters* 20, 094062.

Hansen, B., Larsen, K. M. H., Hátún, H., Olsen, S. M., Gierisch, A. M. U., Østerhus, S., Ólafsdóttir, S. R. (2023). The Iceland-Faroe warm-water flow towards the arctic estimated from satellite altimetry and in situ observations. *Ocean Science* 2023, 1-42.

Rahmstorf, S. (2024). Is the Atlantic overturning approaching a tipping point? *Oceanography*.

Rasmussen, T. L., Thomsen, E., (2004). The role of the North Atlantic Drift in the millennial timescale glacial climate fluctuations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 210, 101-116.