

# Atlantische Oceaancirculatie stevent af op stilvallen

Superstormen, abrupte klimaatveranderingen en New York bevroren in ijs. Zo beeldde de Hollywoodfilm *The Day After Tomorrow* (2004) een abrupte ineenstorting van de Atlantische oceaancirculatie af. Hoewel de visie van Hollywood overdreven is, stelt de film een serieuze vraag: als de opwarming van de aarde de *Atlantic meridional overturning circulation* (AMOC) stillegt, hoe abrupt en ernstig zijn de gevolgen dan?



**T**wintig jaar na het uitkomen van de film weten we veel meer over de Atlantische oceaancirculatie.

Directe oceaanobservaties die vanaf 2004 zijn gedaan, tonen aan dat de sterkte van de Atlantische oceaancirculatie veel varieert. Over langere tijdschalen lijkt de AMOC te vertragen en ze is mogelijk in de zwakste toestand van het afgelopen millennium. Klimaatreconstructies uit de Groenlandse Ijskap laten zien dat de AMOC vaker abrupte transitie heeft ondergaan in het verre verleden. Deze transitie zijn ook mogelijk naarmate de planeet verder opwarmt en gletsjers en ijskappen in rap tempo smelten.

In onze studie [1] simuleren we hoe de AMOC een kantelpunt bereikt en volledig instort. Waarschuwingindicatoren afgeleid uit de modelsimulaties tonen aan dat de huidige AMOC zich richting het kantelpunt beweegt. Een potentiële instorting van de AMOC heeft desastreuze gevolgen.

## De transportband van de Atlantische Oceaan

Oceaanstromingen worden aangedreven door wind, getijden en dichtheidsverschillen. De windgedreven stroming, de zogenoemde subtropische gyre (of wervel), transporteert relatief warm en zout water nabij het oppervlak door de Atlantische Oceaan (figuur 1). De westelijke tak van deze gyre is onder het brede publiek bekend als de Golfstroom. De Atlantische subtropische gyre is niet uniek: er bestaan soortgelijke gyres in de Stille en Indische Oceaan. Maar in de Atlantische Oceaan is er ook een groot-schalige circulatie die wordt beïnvloed door dichtheidsverschillen.

Temperatuur en zoutgehalte bepalen de dichtheid van water. Relatief warm en zoet water is lichter dan relatief koud en zout water. Het water rondom de evenaar is relatief warm en zout en op de hogere breedtegraden is het water relatief koud en zoet. Omdat de dichtheidsverschillen groter zijn door temperatuur dan door zout, is water op hoge breedtegraden zwaarder dan rondom de evenaar. Het relatief zware zeewater zinkt nabij Groenland naar grote diepte en stroomt dan als koude onderstroom richting het zuiden.

Het zinken van water bij Groenland trekt water aan van elders in de Atlantische Oceaan. Het water van de evenaar stroomt noordwaarts en geeft onderweg veel warmte af aan de atmosfeer. West-Europa ontvangt relatief veel warmte van deze warme stroming. Dit verklaart ook waarom het Nederlandse klimaat een stuk zachter is dan het (Zuid-)Canadese, terwijl beide landen rond dezelfde breedtegraad liggen. Uiteindelijk is de watermassa flink afgekoeld wanneer deze bij Groenland aankomt en daar weg begint te zinken. Hierdoor ontstaat er een circulatie waarbij water vanuit de tropische gebieden richting het noorden stroomt, wegzakt en op grote diepte weer naar het zuiden stroomt. Het is als het ware een transportband van warmte én zout (figuur 1). De AMOC is het meridionale (noord-zuidrichting) volumetransport door zowel de wind- als de dichtheidsgedreven oceaanstromingen.

Een overschot aan zoet water, afkomstig van smeltende gletsjers en de ijskap van Groenland, kan het zoutgehalte van het water verminderen. Hierdoor zinkt het minder goed weg rondom Groenland, wat de AMOC verzwakt. Een zwakkere AMOC voert minder warmte en zout naar het noorden en hierdoor kan ook minder zwaar water Groenland bereiken, wat de sterkte van de AMOC nog verder afzwakt: een positief feedbackmechanisme. Wanneer deze feedback begint te domineren, is het kantelpunt bereikt en stort de circulatie volledig in. Uit de nieuwe simulatie [1] volgt dat het instorten van de circulatie gebeurt over een tijdspanne van zo'n honderd jaar. Dit is vrij abrupt voor typische klimaattijdschalen.

## Hoe wordt het kantelpunt bereikt?

Het destabiliserende AMOC-mechanisme werd voor het eerst opgemerkt in de jaren zestig van de vorige eeuw [2]. Met een vrij eenvoudig model kan worden aangetoond dat de circulatie twee mogelijke evenwichten heeft. De huidige situatie van de AMOC is een van de evenwichtssituaties, het andere evenwicht is een toestand waarin de circulatie volledig omgedraaid is. De circulatie kan van evenwichtstoestand veranderen door de zoutverschillen aan te passen binnen het model. Dit boost het effect van het smelten van landijs na.



**René van Westen** is postdoctoraal onderzoeker aan de UU, waar hij in 2021 promoveerde, en verricht onderzoek naar het instorten van de AMOC onder klimaatverandering. [r.m.vanwesten@uu.nl](mailto:r.m.vanwesten@uu.nl)



**Michael Kliphuis** werkt aan de UU en is specialist in het gebruik van klimaatmodellen, die hij draait op grote computersystemen zoals onze nationale supercomputer Snellius in Amsterdam.



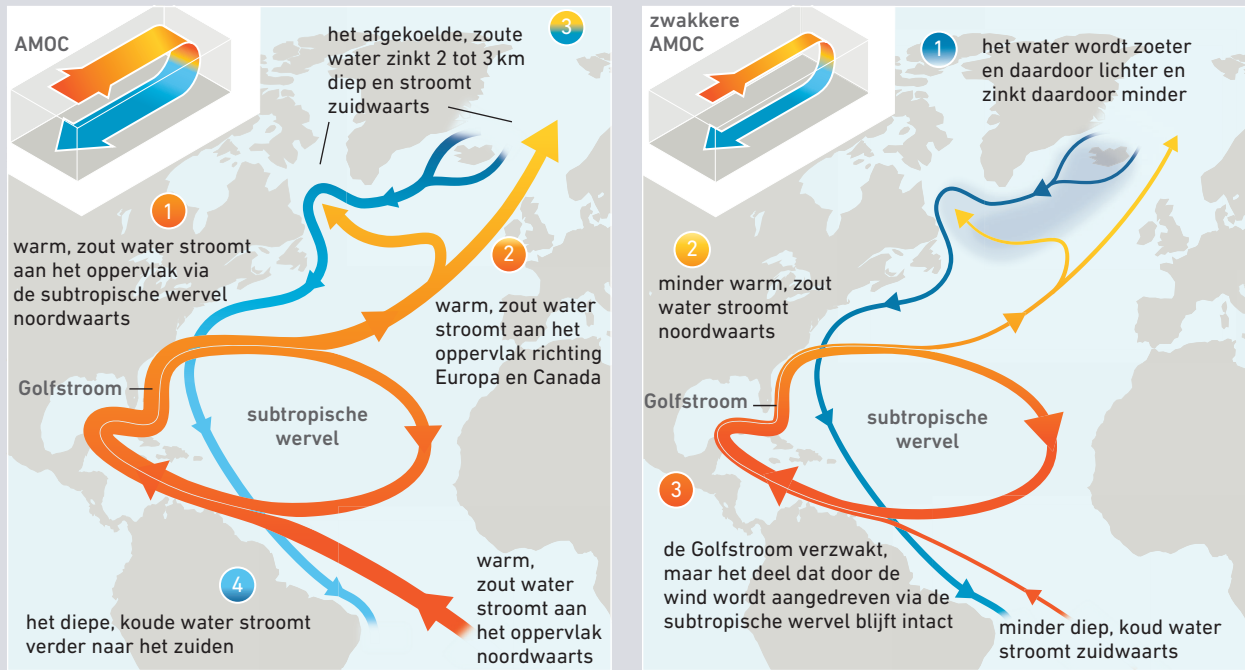
**Henk Dijkstra** is hoogle- raar Dynamische Oceano- grafie aan de UU. Het huidige AMOC-onderzoek van zijn groep wordt ge- daan binnen het ERC-AdG project TAOC (*Tip- ping of the Atlantic Ocean Circulation, 2022-2027*).

NU

De Golfstroom is deel van de subtropische wervel en de verticale, Atlantische meridionale overtuering circulatie (AMOC)

IN EEN WARMERE WERELD

Klimaatverandering verzwakt de AMOC, waardoor de Golfstroom vertraagt



Figuur 1. Schematische weergave van de huidige (links) Atlantische Oceaancirculatie en in de toekomst (rechts) als de circulatie sterk verzwakt. De rode pijlen representeren de stroming nabij het oppervlak en de blauwe pijlen op grote diepte [5].

Een beperking van het eenvoudige model is dat het geen rekening houdt met de talloze interacties binnen het klimaatstelsel, zoals atmosfeer-oceaan-zee-ijs-interacties en veranderingen in circulatiepatronen. De laatste generatie klimaatmodellen houdt hier wel rekening mee. Deze klimaatmodellen kijken veel beter naar de relevante interacties binnen het klimaatstelsel en de effecten die een abrupte AMOC-instorting teweegbrengt.

Voorgaande klimaatmodelstudies brachten de AMOC tot stilstand door enorme hoeveelheden zoet water toe te voegen aan de Noord-Atlantische Oceaan. Deze zoetwaterflux wordt voor enkele decennia aangehouden totdat de AMOC stilvalt. Het voordeel van deze simulaties is dat ze relatief weinig rekentijd vergen, waarna onderzoekers de effecten van het stilvallen van de AMOC kunnen analyseren. Maar de sterke zoetwaterflux overschaduw het destabiliserende

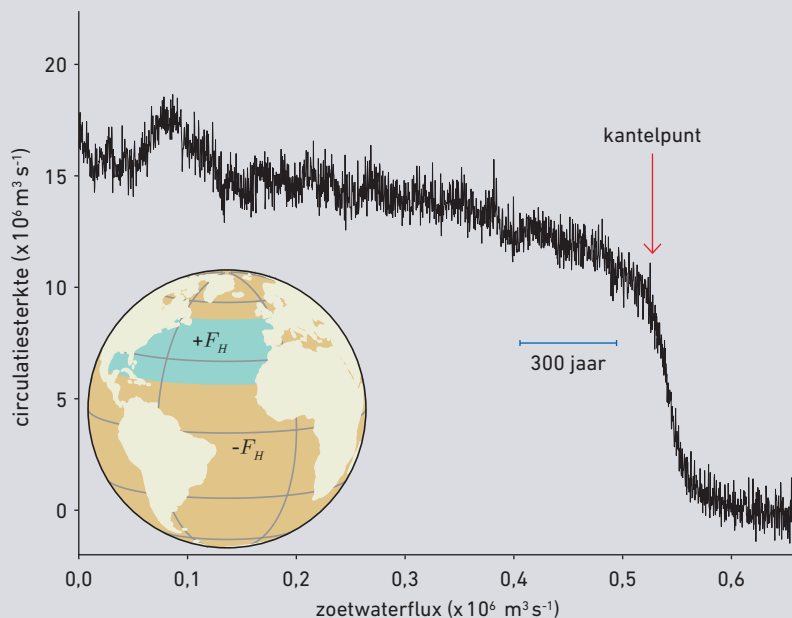
feedbackmechanisme. Deze modelconfiguratie is vrij effectief om de AMOC sterk af te zwakken, maar niet heel realistisch omdat de zoetwaterflux zo groot en abrupt is.

In onze recente studie verhogen we de zoetwaterflux langzaam en lineair gedurende een periode van 2200 jaar. Dit vergt substantieel meer rekentijd en computerkracht. Het voordeel hiervan is dat voornamelijk het destabiliserende feedbackmechanisme de AMOC-veranderingen aandrijft en niet een sterke en abrupte zoetwaterflux die het feedbackmechanisme overschaduw. De AMOC verzwakt langzaam onder de toenemende zoetwaterflux tot het kantelpunt, daarna neemt de AMOC-sterkte veel sneller af (figuur 2). Na het bereiken van het kantelpunt duurt het zo'n honderd jaar totdat de AMOC volledig tot stilstand is gekomen. Over dezelfde periode treden er verscheidene veranderingen op binnen het klimaat.

**Hoe verandert het klimaat nadat de AMOC instort?**

De AMOC verplaatst op een efficiënte wijze warmte van het zuidelijk halfrond naar het noordelijk halfrond. Door het stilvallen van de AMOC koelt het noordelijk halfrond af, terwijl het zuidelijk halfrond opwarmt. De AMOC heeft een grote invloed op het Europese klimaat. In onze simulatie koelen delen van het Europese continent met meer dan 1°C per decennium af wanneer de AMOC stilvalt. Dit is vele malen sneller dan de huidige opwarming van de aarde met zo'n 0,2°C per decennium. De afkoeling is het sterkst in delen van Noorwegen en in februari neemt de temperatuur daar af met zo'n 3,5°C per decennium (figuur 3). Deze veranderingen zijn ongekend.

Wat betekent het stilvallen van de AMOC voor Nederland? Naast de 5 à 10°C afkoeling in de jaarlijkse gemiddelde temperatuur, kunnen we ook minder neerslag verwachten.



Figuur 2. Verandering van de AMOC-sterkte onder invloed van de toenemende zoetwaterflux in de Noord-Atlantische Oceaan. De inzet laat de gebieden zien waar zoet water wordt toegevoegd (+ $F_H$ ) en dit wordt elders gecompenseerd (- $F_H$ ) om de zoutbalans van de oceaan constant te houden.

De lagere temperaturen veroorzaken minder verdamping en een koelere atmosfeer houdt minder vocht vast. De zeespiegel voor de kust van Nederland stijgt met zo'n tachtig

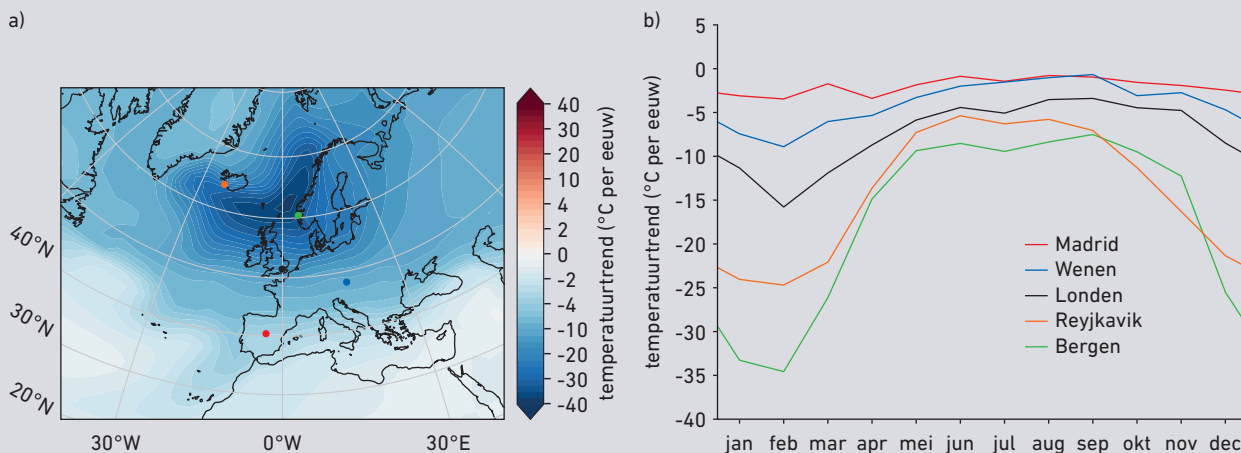
centimeter. Oceaanstromingen zorgen voor glooiingen in de (regionale) zeespiegel. Het stilvallen van de AMOC zorgt ervoor dat de glooiing anders gaat lopen waardoor de

zeespiegel omhoogkomt voor de kust van Nederland. Het Arctische zee-ijis ligt tot aan de Nederlandse kustlijn wanneer de AMOC tot stilstand komt. Het is duidelijk, aan het Nederlandse zachte zeeklimaat komt een drastisch einde.

De veranderingen van de temperatuurgradiënt tussen het noordelijke en het zuidelijke halfrond veroorzaken ook een verschuiving van de tropische regenbanden. Het Amazoneregenwoud is afhankelijk van deze tropische regenbanden. Uit de simulatie blijkt dat het natte seizoen in het droge seizoen verandert en omgekeerd. Het Amazoneregenwoud is al een kwetsbaar ecosysteem en zo'n grootschalige neerslagverandering kan dit ecosysteem verder verzwakken. Het regenwoud kan een transitie ondergaan van een bosrijk ecosysteem tot een savanne-ecosysteem. Dit heeft grote ecologische gevolgen voor het gebied, en ook voor de rest van de wereld. De bovengenoemde veranderingen vinden plaats over een relatief korte periode van zo'n honderd jaar. In sommige Europese regio's zijn de veranderingen zo groot dat klimaatadaptatie nagenoeg onmogelijk is.

### Wanneer zullen we het kantelpunt zien?

De grote vraag – wanneer zal de AMOC een kantelpunt bereiken –



Figuur 3. De februari-temperatuurtrend tijdens het instorten van de AMOC (a). De stippen zijn vijf steden en voor deze steden is de temperatuurtrend voor elke maand weergegeven in de grafiek ernaast (b).

blijft voorlopig onbeantwoord. Waarnemingen gaan niet ver genoeg terug om een duidelijk resultaat te geven. Hoewel een andere recente studie [3] suggereerde dat de AMOC snel het kantelpunt nadert, mogelijk binnen enkele jaren, maakten deze statistische analyses verschillende aannames die grote onzekerheden met zich meebrengen.

In plaats daarvan analyseren wij de fysica achter het destabiliserende feedbackmechanisme in onze simulatie. De sterkte van dit mechanisme wordt gemeten aan de hand van de hoeveelheid zout die de AMOC transporteert, en dan specifiek aan de zuidelijke grens van de Atlantische Oceaan. Hoe meer zout de AMOC in de Atlantische Oceaan importeert, des te instabiel de circulatie wordt. Beschikbare observaties geven aan dat de AMOC steeds meer zout importeert en dus dat de huidige circulatie zich in de

richting van het kantelpunt beweegt. Zodra een drempelwaarde is bereikt, zal de AMOC-transitie waarschijnlijk binnen één tot vier decennia volgen. Een beperking van onze modelsimulaties is dat mondiale klimaatverandering niet is meegenomen. Op dit moment worden extra simulaties uitgevoerd die wel rekening houden met klimaatverandering door de concentratie broeikasgassen te verhogen. Deze nieuwe simulaties laten zien dat de AMOC ook instort onder klimaatverandering, maar verder onderzoek is nodig voor de precieze details. De klimaateffecten van onze studie benadrukken de ernst van zo'n plotse instorting van de AMOC. De temperatuur-, zeespiegel- en neerslagveranderingen zullen de mondiale samenleving ernstig beïnvloeden. Wanneer de AMOC volledig tot stilstand komt, is het omkeren van dit proces onmogelijk binnen meerdere generaties

[4]. Het is daarom belangrijk om een potentiële instorting van de AMOC uit te sluiten in de nabije toekomst en dit kan alleen door de menselijke invloeden op het klimaatsysteem sterk te beperken.

### REFERENTIES

- 1 R.M. van Westen et al., *Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course*, *Science Advances* **10-6** (2024), <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk1189>.
- 2 H. Stommel, *Thermohaline Convection with Two Stable Regimes of Flow*, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* **13-2** (1961), <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1961.tb00079.x>.
- 3 P. Ditlevsen en S. Ditlevsen, *Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation*, *Nature Communications* **14** (2023), <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>.
- 4 R.M. van Westen en H.A. Dijkstra, *Asymmetry of AMOC Hysteresis in a State-Of-The-Art Global Climate Model*, *Geophysical Research Letters* **50-22** (2023), <https://doi.org/10.1029/2023GL106088>.
- 5 Originele figuur uit IPCC-rapport *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Vertaling door KNMI: [www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/is-het-mogelijk-dat-de-golfstroom-plotseling-sterk-verzwakt](http://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/is-het-mogelijk-dat-de-golfstroom-plotseling-sterk-verzwakt).

advertentie

## Stichting Physica zoekt nieuwe bestuursleden

De Stichting Physica is in 1948 opgericht om de belangen van de natuurkunde te bevorderen. Zij doet dat door het vermogen van de stichting te beheren. De stichting geeft jaarlijks een grote subsidie aan de Nederlandse Natuurkundige Vereniging. Met deze subsidie en met eigen subsidies ondersteunt de stichting allerlei initiatieven in natuurkundig Nederland, zoals activiteiten op scholen, natuurkundecompetities, symposia, congressen, boeken en de uitreiking van de jaarlijkse Physicaprijs.

Het bestuur van de stichting beslist over de toekenning van deze subsidies. Het bestaat uit een dagelijks bestuur (voorzitter, penningmeester en secretaris) en een groter algemeen bestuur. De bestuursfuncties zijn onbezoldigd.

We zijn op zoek naar nieuwe leden voor het algemeen bestuur van de stichting. We willen daarbij de diversiteit van fysica en fysici in Nederland graag beter representeren. We zoeken ook een nieuwe voorzitter. Op onze website ([www.physica.nl](http://www.physica.nl)) staat een profielschets voor deze functie. Op die website kun je ook recente jaarverslagen van de stichting inzien.

Wanneer je belangstelling hebt voor dit belangrijke bestuurswerk, of wanneer je onze aandacht wilt vestigen op mogelijke kandidaten voor deze functies, dan verzoeken we je contact met ons op te nemen via [info@physica.nl](mailto:info@physica.nl).