

ACHTERGROND

In de Noord-Atlantische Oceaan stroomt warm en zout water van de tropen naar het noorden, koelt af, wordt zwaarder en keert uiteindelijk terug in een zuidwaartse terugstroming van op enkele kilometers diepte. Dit circulatiepatroon, de Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), transporteert enorme hoeveelheden warmte en is van cruciaal belang voor het klimaat van West-Europa. De sterkte van de AMOC wordt bepaald door noord-zuidgradiënten in de temperatuur en het zoutgehalte van het oceaanwater, die een tegengesteld effect hebben op de circulatie. In het huidige klimaat domineert de temperatuurgradiënt: op hoge breedtegraden wordt water zwaarder door afkoeling en zinkt daar. Voor het zoutgehalte geldt het omgekeerde: op hoge breedtegraden wint de neerslag het van de verdamping, waardoor relatief zoet en licht oppervlaktewater ontstaat. Op lage breedtegraden overheerst juist de verdamping, wat leidt tot relatief zout en zwaar oppervlaktewater. Als de invloed van het zoutgehalte sterker worden dan die van de temperatuur, dan verandert de AMOC-circulatie van richting. Dit staat bekend als het stilvallen van de AMOC, omdat het noordwaartse warmtetransport heel sterk afneemt. Het bestaan van een temperatuur-gedomineerde en een zoutgehalte-gedomineerde toestand betekent dat de AMOC een klimaat-kantelpunt kent: de circulatie zal onvermijdelijk overgaan van de ene naar de andere toestand als een drempelwaarde in de temperatuur- zoutverdeling wordt overschreden.

In een warmer klimaat zal de AMOC verzwakken, als gevolg van een grotere warmteopname door de oceaan op hoge breedtegraden, en door verzoeting van de oceaan in die regio door smeltend zee-ijs, extra neerslag en de toevoer van smeltwater van de Groenlandse ijskap. Deze veranderingen verkleinen de temperatuurgradiënt en vergroten de gradiënt in zoutgehalte. Als gevolg daarvan verzwakt de AMOC, en komt dichterbij het kantelpunt. Kennis over het wel of niet passeren van het kantelpunt is zeer relevant vanwege de onvermijdelijkheid van de gevolgen: de overgang naar een stilgevallen toestand wordt dan volledig bepaald door terugkoppelingen binnen het klimaatsysteem zelf. Zolang het kantelpunt nog niet gepasseerd is kan AMOC verzwakking worden verminderd of tegengegaan door de klimaatopwarming te beperken of teniet te doen, na het passeren ervan is dat niet langer het geval.

Een verzwakking van de AMOC heeft invloed op ons klimaat:

- [Zeespiegelstijging](#): Als de AMOC verzwakt, kantelt het zeeniveau in het Noord-Atlantisch gebied omhoog; dit draagt rechtstreeks bij aan zeespiegelstijging in onze regio.
- [Temperatuur en neerslag](#): Als de AMOC verzwakt, vermindert het noordwaartse warmtetransport, en koelt de oceaan af in de buurt van Groenland. De atmosfeer daar “voelt” daardoor andere oceaancondities, wat o.a. leidt tot veranderende drukpatronen en windcondities boven de Noordoost Atlantische Oceaan. Wat de uiteindelijke verandering in atmosfeercondities boven Nederland wordt hangt af van de combinatie van veranderingen boven de Noordoost Atlantische Oceaan, boven Zuid-Europa en boven Noord-Europa.

Wat zijn de meest recente conclusies over het verzwakken van de AMOC?

Klimaatmodellen simuleren een afname van de sterkte van de AMOC met 35-45% gedurende de 21e eeuw. Echter, recente studies suggereren dat deze klimaatmodellen de verzwakking onderschatten, en daarmee ook het risico op het passeren van het kantelpunt in een opwarmend klimaat. De baanbrekende observaties in de regio rondom Groenland waarmee voor het eerst de AMOC-sterkte continu wordt gemonitord (sinds 2014) zijn cruciaal gebleken: ze bieden de mogelijkheid om klimaatmodellen kritisch te evalueren. Hieruit is gebleken dat ze maar beperkt in staat zijn de huidige toestand van de AMOC te simuleren. Dit roept twijfels op over de waarde van de toekomstprojecties die gedaan worden met diezelfde klimaatmodellen.

Recente studies die concluderen dat het AMOC kantelpunt mogelijk al in de 21^e eeuw wordt gepasseerd zijn niet noodzakelijk in tegenspraak met de uitkomsten van de klimaatmodellen. Het is mogelijk dat het kantelpunt gepasseerd wordt in de loop van de 21^e eeuw én dat de AMOC pas compleet stilvalt in de 22^e eeuw, omdat de overgang van de ene naar de andere AMOC toestand naar verwachting 50-100 jaar vergt.

Wat zijn de mogelijke gevolgen van de versnelde verzwakking van de AMOC voor Nederland?

De effecten van de verzwakking van de AMOC die de huidige generatie klimaatmodellen laat zien (afname met 35-45% in 21e eeuw) zijn verdisconteerd in de KNMI'23 klimaatscenario's voor Nederland. Voor zeespiegelstijging is het effect van deze AMOC-verzwakking expliciet te kwantificeren: voor het jaar 2100 leidt de verwachte verzwakking van de AMOC tot enkele decimeters zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Voor de atmosfeer-variabelen is het niet mogelijk om expliciet aan te geven welk deel van de verwachte klimaatverandering toe te schrijven is aan een verzwakking van de AMOC, omdat ook andere processen dan een verzwakking van de AMOC bijdragen aan de atmosferische veranderingen in onze regio.

Over de effecten van het versneld stilvallen van de AMOC is op dit moment slechts zeer beperkte informatie beschikbaar. Voor zeespiegelstijging bestaat een robuuste schatting dat het compleet stilvallen van de AMOC resulteert in ± 60 cm stijging¹. Voor het kwantificeren van de netto respons van de atmosfeer boven West-Europa op het stilvallen van de AMOC speelt de timing en het tempo ervan een cruciale rol. In het geval dat de AMOC vroeg en snel stilvalt -op een moment dat de aarde matig is opgewarmd- zal de temperatuur in West-Europa dalen, terwijl een trager stilvallen van de AMOC in een al opgewarmde wereld eerder leidt tot een tempering van de opwarming.

In hoeverre is Nederland voorbereid op het versneld verzwakken van de AMOC?

Voor de effecten van het stilvallen op de AMOC bestaan nog geen gedetailleerde scenario's. Het ontwikkelen hiervan vergt aanvullend onderzoek en zorgvuldige weging van nieuwe informatie uit deze recente onderzoeken, en de robuustheid en beperkingen ervan. Een generiek aandachtspunt bij het meenemen van de effecten van het stilvallen van de AMOC in een klimaatscenario is dat het kennis (of, bij het ontbreken van die kennis, aannames) vereist over de timing en het tempo: wanneer wordt het kantelpunt gepasseerd, en hoe snel verloopt de transitie naar een stilgeval AMOC?

In hoeverre wordt er rekening gehouden met de versnelde verzwakking van de AMOC door overheidsinstanties?

Vanuit verschillende overheidsorganisaties bestaat grote behoefte aan duiding van de nieuwste wetenschappelijke inzichten en lopend onderzoek. Kennisinstellingen voorzien hierin zo goed mogelijk en informeren tevens over internationale initiatieven, waaronder de door de EU geïnitieerde wetenschappelijke assessment *AMOC in Focus*, waaraan KNMI, NIOZ en Deltares actief bijdragen. De noodzaak om de gevolgen van een versnelde verzwakking van de AMOC te vertalen naar gedetailleerde klimaatscenario's voor Nederland wordt breed erkend. Hoewel de eerste verkenningen zijn gestart, bevindt dit onderzoek zich nog in een vroeg stadium. De modelsimulaties van de Universiteit Utrecht van een warmer klimaat met en zonder stilgeval AMOC kunnen hiervoor een belangrijke basis vormen. Zorgvuldigheid blijft echter geboden: net als veel andere klimaatmodellen zijn deze simulaties uitgevoerd op een grof rekenrooster (2°, circa 135 km in onze regio), dat bij constructie extreme gebeurtenissen (m.a.w. de omstandigheden die de meeste impact hebben) slechts beperkt kunnen worden gerepresenteerd.

TOT SLOT

Naast de acute behoefte aan een eerste inschatting van de gevolgen van een mogelijke stilvallen van de AMOC voor het Nederlandse klimaat, speelt ook een fundamentele vraagstuk. Dankzij nieuwe, continue metingen beschikken we als oceanwetenschappers sinds 2014 voor het eerst over directe waarnemingen van de sterkte en variabiliteit van de AMOC op hoge breedtegraden. Deze leveren essentiële nieuwe inzichten op, en roepen tegelijkertijd vragen op over de huidige generatie klimaatmodellen: als deze de AMOC van vandaag niet goed reproduceren, staat ook de betrouwbaarheid van hun toekomstprojecties onder druk. De Nederlandse oceanografische onderzoeksgemeenschap beschikt over de expertise om substantieel bij te dragen aan beter begrip van de AMOC, betrouwbaardere projecties van verzwakking en stilval, en het in kaart brengen van de gevolgen voor klimaat en zeespiegel. Een geïntegreerde aanpak in de vorm van een nationaal kennisprogramma kan hierin belangrijke vooruitgang mogelijk maken.

¹ Het deel daarvan dat de respons op de door klimaatmodellen gesimuleerde verzwakking representeert is al verdisconteerd in de KNMI-scenario's.