

Deltaprogramma | Signaalgroep

Oplegpagina voor onderliggend document [Advies Signaalgroep Deltaprogramma 2024](#)

Titel:

Kantelpunten (algemeen en AMOC)

Korte samenvatting:

Wat zijn vanuit de wetenschap visies op mogelijke kantelpunten (*tipping points*) in het klimaatstelsel en hoe weten we wanneer we een kantelpunt naderen? Hoe definiëren we een kantelpunt, onomkeerbaarheid en niet-lineair gedrag? Hoe karakteriseren we onzekerheden bij kantelpunten? Naast een algemene beschouwing van mogelijke kantelpunten in het klimaatstelsel wordt als voorbeeld mogelijke sterke veranderingen in de Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) uitgewerkt. Dit onderwerp staat momenteel in de belangstelling naar aanleiding van enkele spraakmakende publicaties. Het is van belang dat kantelpunten, die doorgaans gekarakteriseerd worden als “low probability high impact” scenario’s (‘voorstellingen’), standaard onderdeel vormen van de risicoanalyses bij het adaptatiebeleid. Dit geldt zeker voor de mogelijke ineenstorting van de AMOC, aangezien recente studies aangeven dat aan de overschrijding van dit kantelpunt een hogere waarschijnlijkheid moet worden toegekend dan “low probability”. Cruciaal is het intensiever en permanent monitoren van signalen die wijzen op het naderen van kantelpunten.

Doel advies (doorhalen wat niet van toepassing is):

ontwikkeling nieuwe kennis / formuleren van beleid / ~~inzetten bestaande kennis en beleid anders, namelijk:~~

Relatie met doelen Deltaprogramma (doorhalen wat niet van toepassing is):

~~aanpassen / versnellen / vertragen VKS of DB / evt. overige doelen anders, namelijk: meenemen in adaptief deltamanagement en monitoren~~

Sterkte van signaal (doorhalen wat niet van toepassing is):

~~zwak (early warnings van wat mogelijk kan gebeuren) / sterk (relatief zeker/betrouwbaar)~~

Soort ontwikkeling (doorhalen wat niet van toepassing is):

~~fysieke en sociaal-economische omstandigheden / kennis en techniek / politiek en maatschappelijke voorkeuren~~

Auteur(s): Rob van Dorland (KNMI)

Gereviewd door: Arthur Petersen (UCL)

Signaal Kantelpunten algemeen en AMOC als voorbeeld

Rob van Dorland (KNMI), 20 november 2024

Inleiding kantelpunten

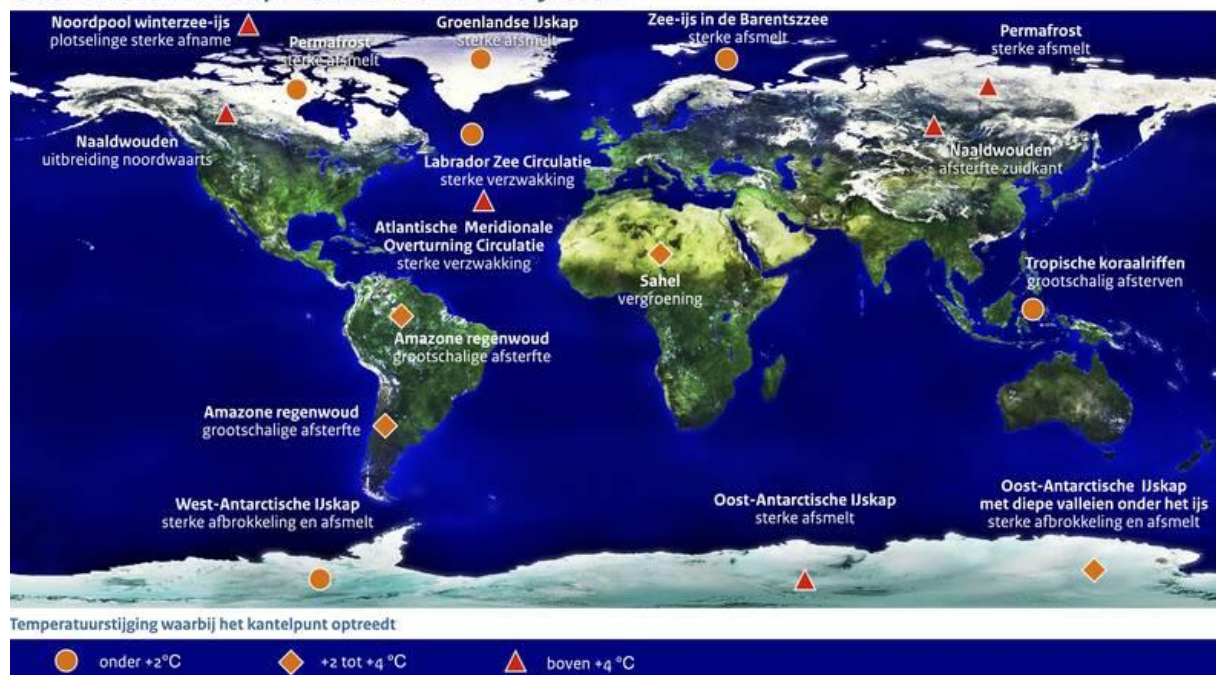
Klimaatveranderingen als gevolg van de toename van broeikasgassen in de atmosfeer (en oceanen) verlopen tot nu toe lineair. Dat wil zeggen dat de effecten, zoals de verandering van temperatuur, neerslag en droogte, proportioneel toenemen met de oorzaak, de toename van broeikasgassen. Het klimaatsysteem omvat echter vele niet-lineaire processen, hetgeen kan resulteren in complex gedrag met mogelijk abrupte klimaatverandering en het optreden van kantelpunten (*tipping points*).

Het IPCC definieert een abrupte klimaatverandering als een verandering die substantieel sneller verloopt dan de typische snelheid zoals waargenomen in het verleden. Een kantelpunt is het moment of punt, waarop het klimaatsysteem zich in een andere staat begint te reorganiseren als gevolg van het overschrijden van een drempelwaarde (bijvoorbeeld de mondiale temperatuurverandering) en is dus per definitie abrupt en mogelijk ook irreversibel. Meestal is irreversibiliteit gerelateerd aan een tijdschaal, waarbij een eventueel herstel van een eerdere staat substantieel langer duurt dan de omslag naar de nieuwe staat.

Voorbeelden van mogelijke kantelpunten zijn een versnelling van het massaverlies van de Antarctische ijskap, het op grote schaal afsterven van vegetatie in het Amazonegebied en het stilvallen van de Warme Golfstroom, d.w.z. de ineenstorting van de Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) met gevolgen voor de mondiale oceaanstromingen. In onderstaande figuur 1 geven we een overzicht van elementen die tot mogelijke kantelpunten kunnen leiden.

Figuur 1 (Bron: McKay et al., 2022¹)

Overzicht van kantelpunten in het klimaatsysteem

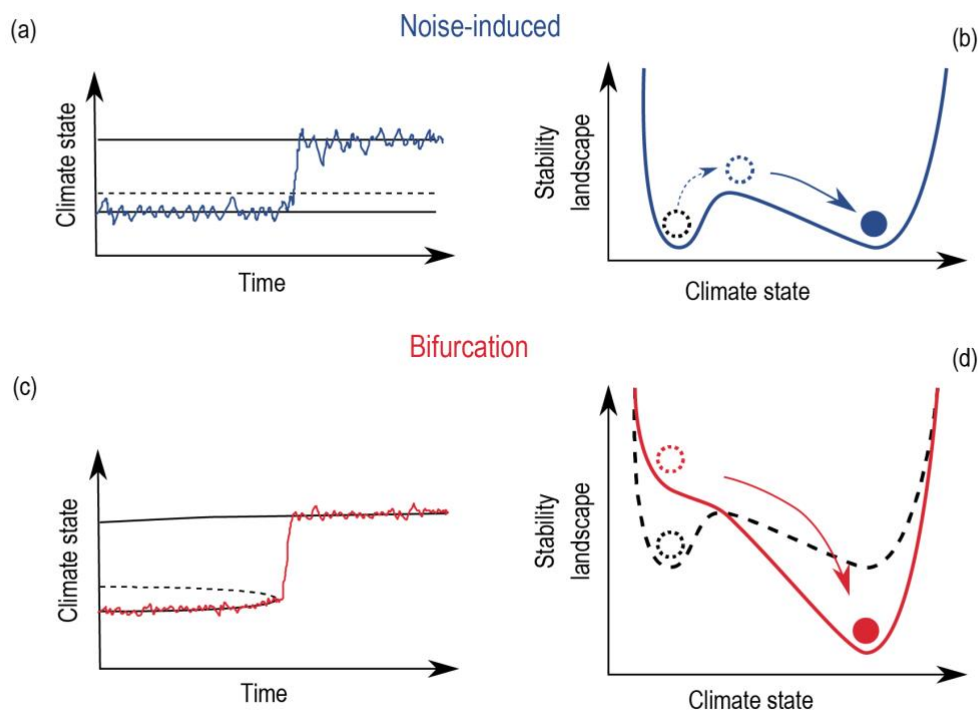


¹ De drempelwaarde voor de ineenstorting van de Atlantische Meridionale Overturing Circulatie (AMOC), namelijk 4°C, is in recent onderzoek naar beneden bijgesteld.

Wanneer een drempelwaarde voor een kantelpunt overschreden wordt, kan dit resulteren in zowel regionale als mondiale klimaatveranderingen met potentieel grote socio-economische en/of ecologische impact. Bij welke drempelwaarden kantelpunten optreden is inherent onzeker. Ook is het denkbaar dat momenteel al kantelpunten zijn bereikt. Zeker is dat hoe groter de mondiale temperatuurstijging en daarmee de veranderingen in extremen, zoals hitte, neerslag en droogte, des te groter de kans op het optreden van kantelpunten.

Onomkeerbaar massaverlies van de ijskappen van Groenland en Antarctica kan mogelijk al plaatsvinden bij een mondiale temperatuurstijging tussen de 1,5 en 2 graden (IPCC, 2018). Ongeacht het emissiescenario op basis van het brede palet aan shared socio-economic pathways (SSP's), die door het IPCC zijn beschouwd, stevenen we in de komende decennia af op een mondiale temperatuurstijging van meer dan 1,5 graden. Hoeveel meer hangt af van met name de mitigatiemaatregelen die in de nabije toekomst worden ingevoerd. Deze zogeheten *overshoot* verhoogt dus ook de kans op het overschrijden van drempelwaarden, waarbij kantelpunten kunnen worden bereikt. Wanneer door bijvoorbeeld het (grootschalig) afvangen en opslaan van CO₂ in de bodem de atmosferische concentraties in de tweede helft van deze eeuw dalen, zoals nodig in de emissiescenario's om het temperatuurdoel in 2100 van het Parijs Klimaatakkoord te halen, valt het klimaatsysteem niet (onmiddellijk) terug in de oude staat, als er sprake is van bifurcatie (figuur 2 c en d).

Figuur 2 Illustratie van twee typen kantelpunten: gedreven door toename in natuurlijke variabiliteit (a, b) en bifurcatie (c, d). (bron: IPCC AR6 WGI, fig. 1.17).



Ondanks de voortschrijdende inzichten over de substantiële risico's van het overschrijden van drempelwaarden, die resulteren in het bereiken van kantelpunten, wordt de classificatie van lage waarschijnlijkheid vaak geframed als een hoge waarschijnlijkheid dat kantelpunten niet zullen optreden en daarmee buiten beschouwing blijven bij klimaatbeleid. Het is van belang dat deze "low probability high impact" scenario's ('voorstellingen') standaard onderdeel vormen van de risicoanalyses bij het adaptatiebeleid. Cruciaal is het intensiever en permanent monitoren van signalen die wijzen op het naderen van kantelpunten.

Mogelijk naderend kantelpunt: veranderingen in de Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)

Ingrijpende veranderingen in de Warme Golfstroom kunnen optreden als de aarde verder opwarmt. Maar wanneer is nog onzeker. Volgens Deens onderzoek dat in 2023 verscheen, zal dit mogelijk eerder gebeuren dan gedacht, nog voor het eind van deze eeuw. Nieuw onderzoek van Universiteit Utrecht en lopend onderzoek op het KNMI bevestigen deze conclusie. Een plotselinge verzwakking van de Golfstroom is een voorbeeld van een kantelpunt: een snelle, praktisch onomkeerbare verandering die optreedt als een bepaalde kritieke grens wordt overschreden. Als de Golfstroom sterk verzwakt, wordt het klimaat in Europa in korte tijd flink kouder en droger.

Sterkte Golfstroom hangt samen met temperatuur en zoutgehalte oceaan

De temperatuur in Noordwest-Europa is hoger dan in het zuiden van Canada, ondanks het feit dat deze gebieden op dezelfde breedtegraad liggen. Dit komt mede door de Warme Golfstroom, die warm water van de Golf van Mexico naar onze regio en zelfs tot voorbij de Noordkaap brengt. De stroming is deel van een wereldwijde 'transportband' van oceaanwater (Figuur 3, linker afbeelding), die wordt gedreven door zout- en temperatuurverschillen. De Golfstroom wordt daarnaast ook door de wind aangedreven.

Het water in de Warme Golfstroom koelt af terwijl het zich naar de Noord-Atlantische Oceaan verplaatst en befrist in de winter gedeeltelijk tot zeeijs. Omdat zout niet mee befrist, wordt het omringende zeewater zouter. Zout, koud water is zwaarder dan zoet, warm water. Ten zuidwesten van Groenland en ten noorden van IJsland zinkt het water 2 tot 3 kilometer naar beneden en stroomt hierna weer terug naar het zuiden. Zo stroomt aan het oppervlak relatief licht, warm water noordwaarts en stroomt zwaarder, koud water op diepte naar het zuiden. Deze stroming heet de Atlantische Meridionale 'Overtuning' Circulatie (**AMOC**) en bepaalt mede de sterkte van de Golfstroom. Als de AMOC verzwakt, verzwakt daardoor ook de Golfstroom (Figuur 3, rechter afbeelding).

Smeltend ijs zwakt oceaanstroming in Atlantische Oceaan af

Door het smelten van steeds meer ijs op Groenland en van drijvend ijs in het Noordpoolgebied en door een toename van de neerslag wordt het water rond Groenland steeds zoeter en daarmee lichter. Het gevolg is dat minder water afzinkt en de AMOC verzwakt. Klimaatwetenschappers vermoedden al in de jaren '80 (Broecker, 1987) dat dit een mogelijk gevolg zou zijn van de wereldwijde opwarming. Er is sindsdien een enorme inspanning geleverd om de sterkte van de AMOC te meten. Recentelijk heeft Rahmstorf (2024) hierover een overzichtsartikel geschreven, waarin ook de mechanismen behandeld worden. Een combinatie van alle beschikbare gegevens laat zien dat de AMOC sinds het midden van de vorige eeuw met zo'n 15 procent vertraagd is. Ook laten waarnemingen zien dat de zeewatertemperatuur afneemt in het gebied waar het water naar beneden zinkt ten zuidoosten van Groenland, precies zoals voorspeld bij een afzwakking van de AMOC. Indirecte metingen aan bijvoorbeeld sediment en ijsboorkernen wijzen uit dat de AMOC in de afgelopen duizend jaar niet zo zwak is geweest als nu. Deze afzwakking zet door naarmate de aarde verder opwarmt.

Figuur 3 mogelijke veranderingen in de Warme Golfstroom t.g.v. opwarming (bron: IPCC, 2021)



Er zijn signalen dat de oceaancirculatie een kantelpunt nadert

Je weet eigenlijk pas zeker dat een kantelpunt bereikt is als het voorbij is, maar dan is het natuurlijk te laat om te beginnen met het treffen van voorbereidingen voor adaptatie. Daarom zijn wetenschappers druk op zoek naar signalen die aangeven dat we een kantelpunt naderen. Een aantal recente studies naar dergelijke signalen concluderen dat de AMOC inderdaad een kantelpunt nadert. Voorbij dit kantelpunt is een plotselinge snelle verzwakking van de AMOC mogelijk, met grote gevolgen voor met name het klimaat in Europa.

Vaak zijn de gevonden signalen gebaseerd op statistiek, zoals in een recente Deense studie (Ditlevsen & Ditlevsen, 2023). Zij concludeerden dat de AMOC waarschijnlijk deze eeuw zal kantelen. Onderzoekers van de Universiteit Utrecht kozen een andere benadering in hun veelbesproken artikel (Van Westen et al., 2024a): zij gebruikten een klimaatmodel om de signalen te verkennen die optreden als de AMOC dicht bij het kantelpunt komt. Een van die signalen is de hoeveelheid zout die de Noord-Atlantische oceaan binnenstroomt vanuit de zuidelijke oceanen. Op basis van waarnemingen hiervan concluderen ze dat de AMOC op weg is richting het kantelpunt. Wanneer het kantelpunt bereikt zal worden, is nog onduidelijk. Deze studie neemt overigens geen klimaatverandering mee: de modelexperimenten zijn uitgevoerd voor een constant pre-industrieel klimaat geforceerd met een instroom van zoet smeltwater van de Groenlandse ijskap. Er verschijnen steeds meer signalen dat het ineenstorten van de AMOC mogelijk al voor 2100 het geval zal zijn.

Volgens het laatste IPCC rapport (IPCC, 2021) zal de AMOC deze eeuw verder verzwakken, maar is er enig/redelijke vertrouwen (*medium confidence*) dat dit niet gepaard zal gaan met een abrupte ineenstorting (dat wil zeggen, een kantelpunt) voor 2100. Deze conclusies waren gebaseerd op studies met klimaatmodellen die het smelten van de Groenlandse ijskap niet meenemen en volgens diverse studies de stabiliteit van de AMOC niet goed simuleren. Bovendien simuleren klimaatmodellen de instroom van relatief zoet water op 34 graden noordbreedte niet goed: in de waarnemingen neemt deze instroom af, terwijl klimaatmodellen een toename laten zien, waarschijnlijk als gevolg van een (te) lage resolutie (Van Westen & Dijkstra, 2024). Nu er meer studies met klimaatmodellen verschijnen die ook vaker tot 2300 doorgaan lijken de IPCC-conclusies te optimistisch. Volgens de nieuwste onderzoeksresulta-

ten is het heel goed mogelijk dat het kantelpunt dichterbij is dan het IPCC verwacht en zelfs al mogelijk in een scenario waarin de doelen van het Parijsakkoord worden gehaald.

De grote vraag blijft wanneer het kantelpunt voor de AMOC bereikt wordt. De studie van Ditlevsen en Ditlevsen (2023) gaf aan dat het mogelijk kan gebeuren binnen deze eeuw, ergens tussen 2025 en 2095 en met als middenverwachting 2057. Hoewel er flinke kritiek op deze studie is binnen de AMOC-community, geeft het aan dat in de studies die beschikbaar waren voor het zesde IPCC rapport, de kans op een AMOC-ineenstorting is onderschat.

Nieuw onderzoek van Smolders et al. (2024 en momenteel onder review), waarbij oceaanaarnemingen (heranalyses) op door hoge resolutie klimaat/oceaanmodellen aangegeven gevoelige locaties beschouwd zijn, geeft een kans van 60% op een AMOC-ineenstorting voor 2050, mits de emissies niet sterk afnemen. Het 10 tot 90% confidence interval is hierbij geschat op 2037–2064.

In de recente studie (Van Westen et al., 2024b) zijn simulaties met een klimaatmodel uitgevoerd, die wel rekening houden met verdergaande mondiale opwarming op basis van de Shared Socioeconomic Pathways, zoals die ook door het IPCC worden meegenomen. In deze studie wordt geconcludeerd dat een ineensstorting van de AMOC substantieel is (kans van 50%) bij een mondiale opwarming van 3 graden Celsius. Wanneer deze opwarming bereikt wordt, is afhankelijk van het uitstootscenario: 2065 onder SSP5-8.5 (zeer hoge emissiescenario) en 2090 onder SSP2-4.5 (middle-of-the-road scenario²). Vanaf deze jaartallen duurt het volledig instorten zo'n 100 jaar. Ook bij een opwarming van 2,2 graden Celsius is de kans 10% op een ineensstorting van de AMOC. De klimaateffecten van het stilvallen van de AMOC in een warmer klimaat, zoals gegeven in de diverse emissiescenario's verschillen wel van de modelsimulaties gebaseerd op een pre-industriële wereld, zoals de uitbreiding van het arctisch zeeijs, hetgeen weer gevolgen heeft voor de regionale temperatuurveranderingen in Europa.

Drijfhout et al. (2024) analyseerden de set van klimaatmodellen (CMIP6), zoals ook gebruikt in het IPCC zesde assessment rapport, maar dan uitgebreid met simulaties tot ver na 2100. Hierbij is gebruik gemaakt van de standaard set aan emissiescenario's (SSP's). Doel was om bij een volledige ineensstorting van de AMOC de early warning signalen te onderzoeken en het moment te bepalen waarop het kantelpunt bereikt wordt. In alle modellen, die met het hoge emissiescenario (SSP5-8.5) gedraaid zijn, stortte de circulatie ineen. Zelfs bij een aantal modellen gevoed met middelmatige en lage emissiescenario's was sprake van een volledige ineensstorting van de AMOC. In alle simulaties is de toename van smeltwater van de Groenlandse ijskap niet meegenomen. Het zoeter worden van oceaanaanwater door de toename in neerslag was voldoende om de circulatie te laten omslaan. In de meeste gevallen werd de ineensstorting geïnitieerd door het stoppen van de diepe convectie in de eerste helft van deze eeuw. Conclusie is dat de ineensstorting van de AMOC een hoge waarschijnlijkheid heeft voor het hoge emissiescenario en een middelmatige waarschijnlijkheid voor matige emissiescenario's. En zelfs voor de lage emissiescenario's, die de mondiaal gemiddelde temperatuur limiteren beneden de 2 graden Celsius bestaat het risico van ineensstorting. De verwachting is dat wanneer de toename van smeltwater wel meegenomen zou worden de kans op het kantelpunt nog verder toeneemt. Een van de belangrijke aanbevelingen van deze studie is dan ook het systematisch monitoren van de diepe convectie in de relevante gebieden.

² De mondiale temperatuurstijging in 2100 ten opzichte van het pre-industriële tijdperk in het SSP2-4.5 bedraagt ongeveer 3 graden Celsius. Dit is grofweg het effect van de meest recente beloftes die landen hebben ingediend voor mitigerende maatregelen (exclusief de conditionele maatregelen) in het kader van het Parijs Klimaatakkoord.

Oceaancirculatie is al vaker gekanteld

Dat de AMOC kan kantelen weten we uit het aardse verleden. Het is dus niet slechts een theoretisch concept. Zo kwam er aan het einde van de laatste ijstijd zo'n 12.000 jaar geleden in korte tijd een reusachtige hoeveelheid smeltwater in de Atlantische Oceaan terecht, afkomstig van de smeltende IJskap op Noord-Amerika. Dit zoete water was te licht om af te zinken naar de diepzee. De motor van de AMOC haperde en de AMOC kwam nagenoeg tot stilstand doordat het kantelpunt werd overschreden. Een sterke afkoeling van het klimaat op het noordelijk halfrond voor een paar duizend jaar was het gevolg. Dit is in het verleden, met name in de periode tussen honderd en tienduizend jaar geleden meer dan tien keer gebeurd. Deze abrupte veranderingen vertonen dan ook geen enkele correlatie met veranderingen in de hoeveelheid zonnestraling die het Noordelijk Halfrond toen ontving of met variaties in de baan van de aarde om de zon, van belang voor de wisseling van ijstijden en interglacialen.

Als de oceaancirculatie kantelt, is het effect op het klimaat groot

Het stilvallen van de AMOC heeft grote gevolgen voor het klimaat wereldwijd. Zo neemt de kans op overstromingen in Noord-Amerika toe door een snelle zeespiegelstijging en verschuiven regengebieden in de tropen door de verandering in zeewatertemperaturen. Ook voor de Nederlandse kust kan de zeespiegel met 0,5 tot 1 meter extra stijgen na het geheel stilvallen van de AMOC in de orde van een eeuw na het passeren van het kantelpunt. Deze extra stijging wordt veroorzaakt door de verandering in dichtheid van het zeewater ten zuiden van Groenland, waarbij de huidige depressie in het zeeoppervlak zwakker wordt.

In de Sahel bijvoorbeeld valt er dan minder regen, maar ook West Europa krijgt te maken met drogere zomers en ruigere winters. Een Engelse studie spreekt van een verlies van landbouwopbrengsten tot mogelijk 30% voor onze regio wanneer de AMOC geheel tot stilstand is gekomen. In het algemeen leidt het stilvallen van de AMOC tot afkoeling van het Noordelijk halfrond en opwarming van het zuidelijk halfrond.

Aangezien de Warme Golfstroom warmte van het Caribisch gebied naar Europa brengt, leidt het stilvallen van dit transport juist bij ons tot forse en snelle afkoeling. En met "snel" wordt dan bedoeld in de orde van een halve graad afkoeling per 10 jaar! Dit wordt deels gecompenseerd door de opwarming, waarmee de afkoeling ten opzichte van de huidige temperatuur dus afhankelijk is van de verdere stijging van de hoeveelheid broeikasgassen in de atmosfeer. De opwarming in Nederland en grote delen van Europa bedraagt de laatste 40 jaar zo'n 0,4 graden Celsius per tien jaar. Bij een laag emissiescenario, zoals afgesproken in het Parijs klimaatakkoord, vakt de snelheid van opwarming af. Vanaf het bereiken van het kantelpunt duurt het in de orde van 100 jaar tot het volledig stilvallen van de Warme Golfstroom. Het uiteindelijke effect in Nederland is een absolute afkoeling ten opzichte van de huidige temperatuur bij een laag emissiescenario en een getemperde opwarming bij een hoog emissiescenario. Voor Noord Europa is de afkoelend effect van het volledig stilvallen van de AMOC veel groter dan in Nederland, zodat ook bij een hoog emissiescenario er sprake zal zijn van een absolute afkoeling. Wintertemperaturen zullen overigens zo'n anderhalf keer zo snel dalen dan de jaargemiddelde temperaturen. Dit heeft te maken met oprukkend zeeijs vanuit het arctisch gebied. Naarmate de mondiale opwarming verder gaat door de uitstoot van broeikasgassen neemt dit effect van uitbreidend zeeijs wel af. Een ander effect van het ineensinken van de AMOC is een dalende trend in neerslag in de zomer.

Het zal duidelijk zijn dat de komende jaren uitgebreid onderzoek op stapel staat naar de kans op en de drempelwaarde voor het ineensinken van de AMOC. Voor Nederland en Europa zouden de effecten van het ineensinken van de AMOC substantieel afwijken van de huidige KNMI'23 klimaatscenario's.

Literatuur

- Broecker, W.S., 1987. Unpleasant surprises in the greenhouse. *Nature* **328**, 123–126.
- Ditlevsen, P. & S. Ditlevsen, 2023. Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation. *Nat Commun* **14**, 4254. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>.
- Drijfhout, S., J. Angevaere, J. Mecking & S. Rahmstorf, 2024. Atlantic overturning collapse in global warming projections after 2100. Submitted to Physical sciences, DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5077014/v1>
- IPCC, 2018. Special Report on 1.5 Degree on Global Warming.
- IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- KNMI, 2023. Klimaatberichten over tipping points.
- McKay et al., 2022, Science.
- Rahmstorf, S., 2024. Is the Atlantic overturning circulation approaching a tipping point?, Early online release, Oceanography.
- Smolders, E.J.V., R.M. van Westen & H.A. Dijkstra, 2024. Probability Estimates of a 21st Century AMOC Collapse, submitted to ArXiv, 17 juni 2024.
- Van Westen, R.M., M. Kliphuis & H.A. Dijkstra, 2024a. Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course. *Science Advances*, 10(6), DOI: 10.1126/sciadv.adk1189.
- Van Westen, R.M. & H.A. Dijkstra, 2024. Persistent climate model biases in the Atlantic Ocean's freshwater transport, *Ocean Sci.*, 20, 549–567, <https://doi.org/10.5194/os-20-549-2024>.
- Van Westen, R.M., E.Y.P. Vanderborght, M. Kliphuis, & H.A. Dijkstra, 2024b. Substantial Risk of 21st Century AMOC Tipping even under Moderate Climate Change, submitted to ArXiv, 29 juli 2024.