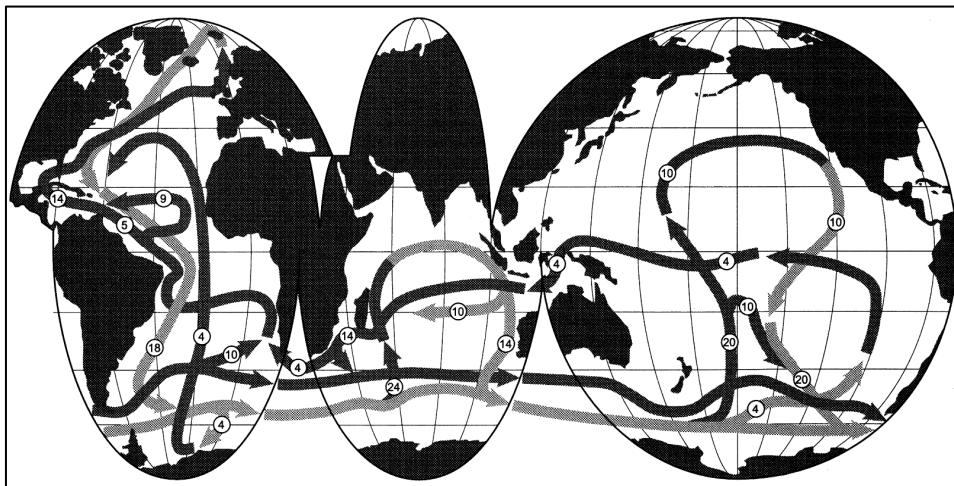


## De oceaan als bron van klimaatschommelingen

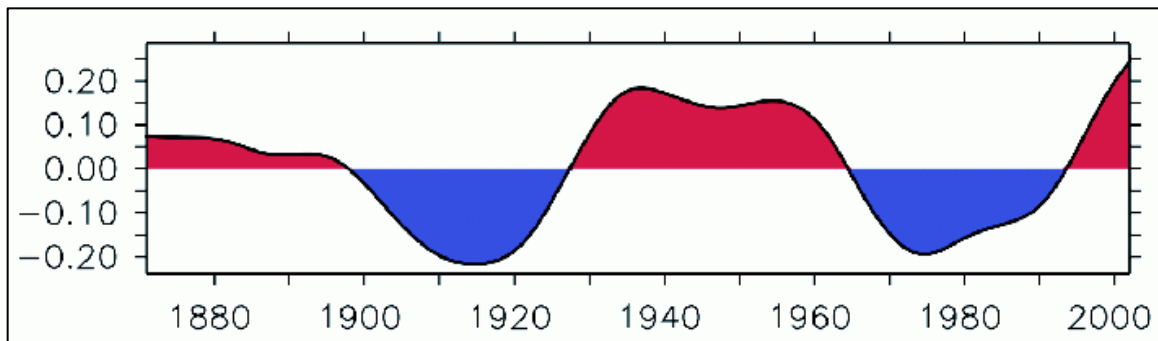
Lianke te Raa (IMAU)

In de circulatie van de oceanen bestaan natuurlijke variaties en daarmee samenhangende klimaatschommelingen. Een voorbeeld is de Atlantische Multidecadale Oscillatie, een verschijnsel dat gekenmerkt wordt door langzame veranderingen in zeevatertemperatuur en oceaanstromingen in de Noord-Atlantische Oceaan. Bij het Instituut voor Marien en Atmosferisch Onderzoek Utrecht zijn we op zoek gegaan naar de oorzaak van deze oscillatie.

Het gemiddelde beeld van de oceaanstromingen is vrij goed bekend (zie Kader en figuur 1). De werkelijke stromingen kunnen echter sterk variëren, met als gevolg dat ook het warmtetransport verandert, evenals de afgifte van warmte aan en opname van warmte vanuit de atmosfeer. Ook de plaatsen waar opname of afgifte van warmte optreedt zijn aan dit soort veranderingen onderhevig. Een van deze variaties in de oceaancirculatie is de zogenaamde Atlantische Multidecadale Oscillatie (ook wel AMO genoemd). Deze oscillatie kenmerkt zich door periodes van ongeveer twintig tot dertig jaar waarin het oppervlaktewater in de Noord-Atlantische Oceaan relatief warm is, en soortgelijke periodes waarin het zeewater relatief koud is (figuur 2). De periode van deze oscillatie lijkt zo'n 60 jaar te bedragen. Om dit verschijnsel te beschrijven heeft men een index ingevoerd, de zogenaamde AMO-index. Deze is gedefinieerd als de afwijking van de jaargemiddelde oppervlaktetemperatuur van het zeewater over de periode 1871-2003, gemiddeld over de hele Noord-Atlantische Oceaan. De opwarming tijdens warme periodes (positieve AMO-index) treedt op in het overgrote deel van de Noord-Atlantische Oceaan, met maximale opwarming van ongeveer een halve graad. Alleen een gebied ten oosten van Noord-Amerika is dan juist wat kouder dan normaal. Tijdens periodes van negatieve AMO-index is dat omgekeerd.

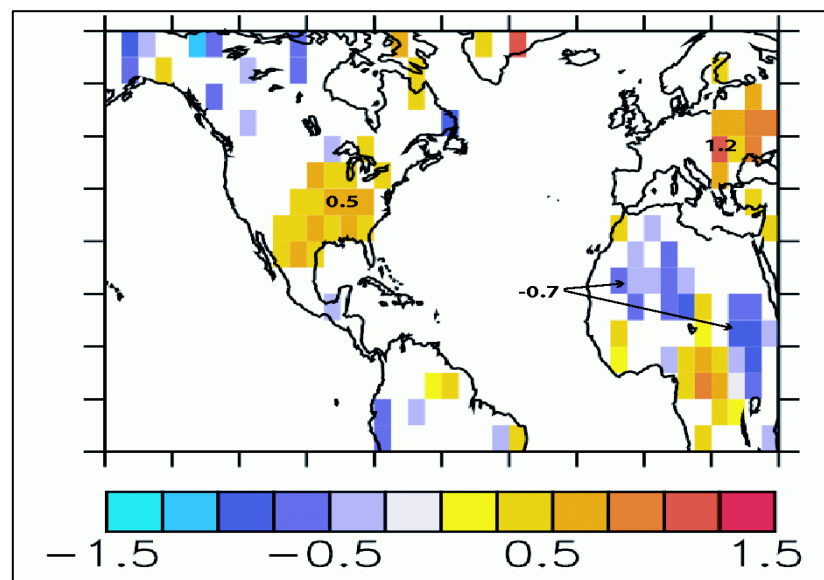


**Figuur 1.** Schematische weergave van de oppervlakte- en diepzeestromingen in de oceaan (uit Bradley, 1999, gebaseerd op een schets van Schmitz, 1995). De oppervlaktestromingen zijn in donkergrijs, de diepzeestromingen in lichtgrijs weergegeven. De getallen geven het volume-transport in miljoenen kubieke meter per seconde.



**Figuur 2.** Afwijking van de gemiddelde oppervlaktetemperatuur van het zeewater (in °C) over de periode 1871-2003, gemiddeld over de hele Noord-Atlantische Oceaan (uit Sutton en Hodson, 2005).

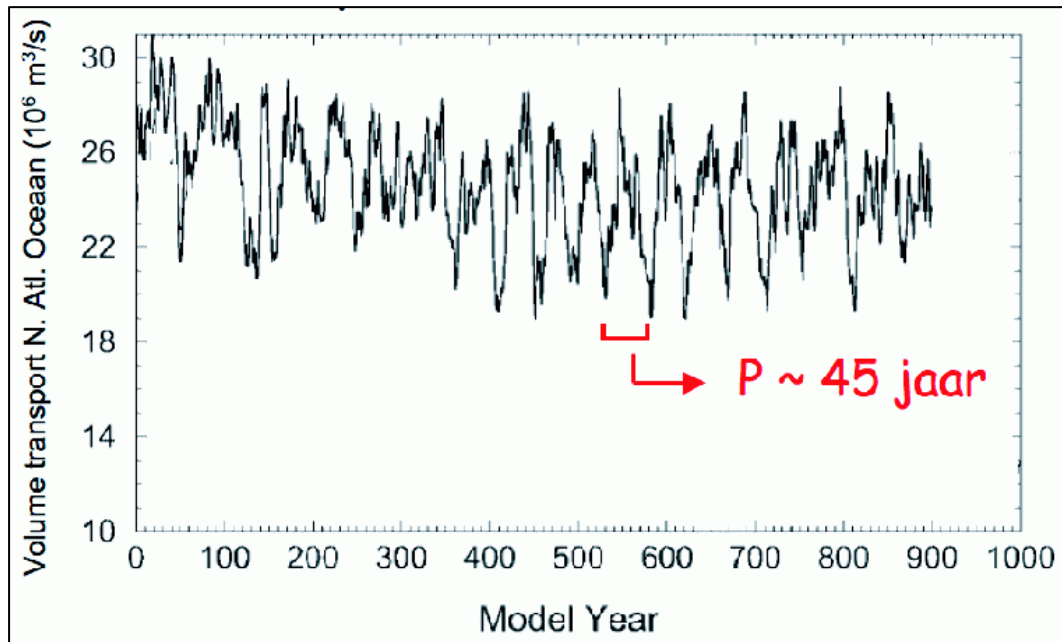
In steeds meer recent onderzoek worden aanwijzingen gevonden dat deze Atlantische Multidecadale Oscillatie allerlei effecten op het klimaat heeft in diverse gebieden die grenzen aan de Noord-Atlantische Oceaan. Zo is een verband gevonden tussen de AMO-index en de oppervlaktetemperatuur gemiddeld over de maanden juni, juli en augustus in de VS en Oost-Europa: tijdens periodes van positieve AMO-index kan het tot wel een graad warmer zijn dan tijdens periodes van negatieve AMO-index (figuur 3) zie ook Sutton and Hodson (2005). Ook tussen de AMO en de regenval in de Verenigde Staten werd een duidelijke (negatieve) correlatie gevonden: minder regen tijdens periodes van positieve AMO-index (Enfield et al, 2001). Dit effect komt ook tot uitdrukking in de correlatie van de AMO met de uitstroom van de Mississippi rivier. Deze uitstroom neemt met ongeveer 5% af tijdens periodes van positieve AMO-index (Enfield et al, 2001). Ook de intensiteit van orkanen, de regenval in de Sahel, en neerslag in West-Europa worden beïnvloed door de Atlantische Multidecadale Oscillatie.



**Figuur 3.** Waargenomen verschillen in oppervlaktetemperatuur (in °C) in de zomer (juni, juli, augustus) over de periode 1931-1960 (warme fase AMO) en de periode 1961-1990 (koude fase AMO). Figuur is aangepast, uit Sutton en Hodson (2005).

### Onderzoek naar oorzaken

Dit roept natuurlijk talloze vragen op, maar we concentreren ons op één basisvraag: wat veroorzaakt deze Atlantische Multidecadale Oscillatie? Eerder onderzoek heeft uitgewezen dat veranderingen in de atmosfeer waarschijnlijk niet de oorzaak zijn van de AMO, maar het gevolg. Onze hypothese was dan ook dat dit verschijnsel het gevolg is van interne wisselwerkingen in de oceaan. Om dit te onderzoeken hebben we gebruik gemaakt van een serie computersimulaties. We hebben een simulatie van een zo realistisch mogelijk klimaatmodel geanalyseerd om te zien of we de AMO inderdaad goed kunnen weergeven in zo'n model. Daarnaast zijn we met sterk vereenvoudigde oceaanmodellen gaan kijken naar de precieze oorzaak van deze oscillatie.



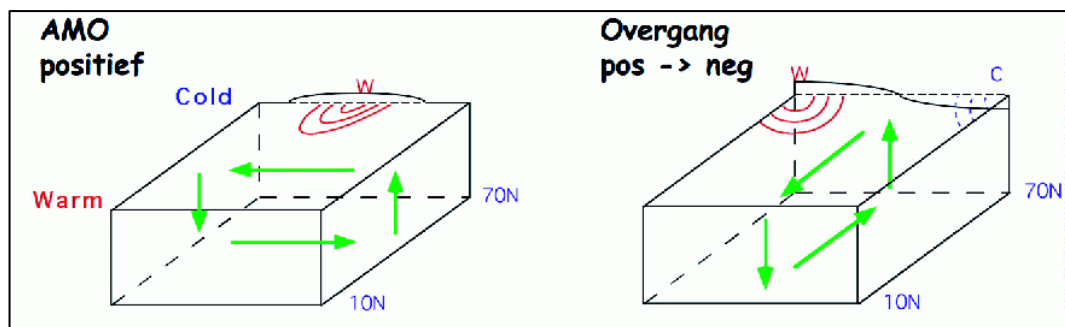
**Figuur 4.** Volumetransport in de Noord-Atlantische Oceaan in miljoenen kubieke meter per seconde (aangepast, uit Delworth et al, 2002).

In het klimaatmodel is de evolutie van de atmosfeer, de oceaan en het zee-ijs gedurende een periode van 1000 jaar gesimuleerd (Delworth et al, 2002, Dijkstra et al, 2006). Het model geeft inderdaad een AMO, met een periode van ongeveer 45 jaar. Dit is niet alleen te zien aan de zeewatertemperatuur, maar ook aan het noord-zuid volumetransport in de Noord-Atlantische Oceaan in het model (figuur 4). Dit fluctueert met een periode van zo'n 45 jaar rond z'n gemiddelde waarde. Deze schommelingen in volumetransport kun je opvatten als het afwisselend sneller en langzamer gaan stromen van de circulatie zoals die geschetst is in figuur 1 (met alle gevolgen voor veranderingen van warmtetransport van dien). De gemodelleerde patronen van opwarming/afkoeling aan het oppervlak komen redelijk overeen met de waargenomen patronen. De periode van 45 jaar lijkt wat kort, maar aangezien de eerder genoemde 60 jaar alleen een schatting is gebaseerd op 'slechts' 173 jaar aan waarnemingen, komt ook dit redelijk goed overeen. Wanneer we dieper in de oceaan kijken, blijkt dat gedurende één oscillatieperiode van de AMO een gebied van relatief warm water westwaarts beweegt vanuit het midden van de Noord-Atlantische Oceaan tot aan de oostkust van de Verenigde Staten, gevolgd door een gebied met relatief koud water. De variaties in het transport van oceaanstromingen in de Noord-Atlantische Oceaan en de westwaarts bewegende gebieden van afwisselend relatief warm en koud water zijn de twee belangrijkste resultaten uit de realistische klimaat simulatie.

Vervolgens hebben we de stroming in de Noord-Atlantische Oceaan gesimuleerd in een oceaanmodel van alleen de Noord-Atlantische Oceaan zonder atmosfeer en zonder zee-ijs. De warmte- en zoetwater fluxen aan het zeeoppervlak worden in deze simulatie voorgeschreven. Deze fluxen hebben we constant gehouden in de tijd. Als de simulatie toch een AMO geeft, betekent dit dat (in elk geval in dit model) de oorzaak inderdaad in de oceaan gezocht moet worden. Dit blijkt ook het geval: ook in deze simulatie wordt een AMO gevonden, en ook hier wordt deze gekenmerkt door variaties in het noord-zuid transport, en temperatuuranomalieën die westwaarts bewegen. Ook de vorm van de continenten blijkt niet essentieel te zijn: in een derde simulatie wordt de Noord-Atlantische Oceaan vereenvoudigd tot een 'bak' met rechte wanden, en nog steeds vinden we een AMO met dezelfde soort kenmerken als in de meer realistische simulaties. In deze laatste simulatie is ook te zien dat de variaties in het noord-zuid transport verband houden met variaties in het oost-west transport: deze zijn ongeveer een kwart periode uit fase met elkaar.

### Oorzaken van de AMO

Kunnen we aan de hand van deze simulaties een verklaring geven voor de Atlantische Multidecadale Oscillatie? Ik denk van wel. In figuur 5 zijn de belangrijkste processen in de Noord-Atlantische Oceaan tijdens twee fases van de AMO schematisch weergegeven. Alleen de veranderingen ten opzichte van de tijdsgemiddelde situatie zijn getekend.



**Figuur 5.** Schematische weergave van de Noord-Atlantische Oceaan tijdens twee fases van de AMO. Alleen afwijkingen ten opzichte van de tijdsgemiddelde situatie zijn getekend. Afwijkingen van de tijdsgemiddelde oppervlaktetemperatuur zijn weergegeven met contourlijnen en de letters 'W' (warm) en 'C' (cold), afwijkingen van het tijdsgemiddelde transport met pijlen. Een verdere toelichting wordt gegeven in de tekst (aangepast, uit Te Raa en Dijkstra, 2002).

Gemiddeld genomen is het zeewater in het noorden kouder dan in het zuiden, waardoor het zeeoppervlak in het noorden iets lager staat dan in het zuiden. De oppervlaktestroming is dan ook noordoostwaarts, terwijl de diepzeestroming vooral zuidwaarts is (zie ook figuur 1). Tijdens de fase waarin de AMO-index positief is, is de temperatuur in het noorden van de Noord-Atlantische Oceaan wat hoger dan gemiddeld. Hierdoor zet de waterkolom wat meer uit, en staat het zeeoppervlak wat minder laag dan gewoonlijk. Als we het verschil met de tijdsgemiddelde situatie bekijken, is er in het noorden dus een hogedrukgebied in de oceaan ontstaan, met een anticyclonale (afwijking van de gemiddelde) stroming als gevolg. De oost-west component van de stroming aan het oppervlak is minder sterk dan gewoonlijk: de afwijking van de tijdsgemiddelde oppervlaktestroming is westwaarts (figuur 5, linker schema).

Er gebeurt echter ook nog wat anders: omdat het zeewater, afgezien van de warme afwijking in het noorden, gemiddeld genomen steeds kouder wordt naar het noorden toe, zal de anticyclonale stromingsanomalie die ontstaat zorgen voor zuidwaarts

transport van koud water in het noordoosten. In het noordwesten wordt juist warm water naar het noorden gebracht. Hierdoor schuift het gebied waarin het water abnormaal warm is, naar het westen toe. Dit is precies de westwaartse verplaatsing die we zagen in de computersimulaties.

Dit brengt ons een kwart periode verder (rechter schema in figuur 5), in de fase waarin de AMO-index overgaat van positief naar negatief. Nu is er met name een zeehoogteverschil in oost-west richting, en aan het oppervlak is er (gemiddeld over de oost-westrichting) een zuidwaartse stromingsanomalie. Omdat de gemiddelde stroming aan het oppervlak noordwaarts is, betekent dit dus een verzwakking van de noordwaartse stroming. Het uit fase zijn van de stroming in noord-zuid en oost-westrichting klopt ook met wat we in de computersimulaties gezien hebben. Weer een kwart periode later is de situatie precies omgekeerd als in het linker schema van figuur 5, met abnormaal koud water, en een cyclonale stromingsanomalie. Ook dit koude water beweegt zicht naar het westen voort, want de cyclonale stroming brengt dan koud water zuidwaarts in de noord-westhoek van het oceanbekken. Zo kan dit proces blijven doorgaan. De periode van de Atlantische Multidecadale Oscillatie wordt dus bepaald door de snelheid waarmee de koude en warme gebieden in de oceaan westwaarts bewegen. Deze snelheid hangt op zijn beurt weer af van de sterkte van het noord-zuid temperatuurverschil, en van de tijdsgemiddelde stroming.

## Conclusies

In ons onderzoek hebben we laten zien dat de Atlantische Multidecadale Oscillatie in elk geval kwalitatief goed kan worden gesimuleerd. Door zowel realistische simulaties als sterk vereenvoudigde modellen te gebruiken, hebben we aangetoond dat de oorzaak van dit verschijnsel een wisselwerking is tussen de temperatuur (dichtheid) van het zeewater en de stroming in de Noord-Atlantische Oceaan.

## Literatuur

- Bradley, R. S., 1999: *Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary*. Academic Press, New York.
- Delworth, T. L., R.J. Stouffer, K.W. Dixon, M.J. Spelman, T.R. Knutson, A.J. Broccoli, P.J. Kushner and R.T. Wetherald, 2002: Review of simulations of climate variability and change with the GFDL R30 coupled climate model. *Clim. Dyn.*, 19, 555-574.
- Dijkstra, H. A., L.A. Te Raa, M. Schmeits and J. Gerrits, 2006: On the physics of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Ocean Dyn.*, DOI 10.1007/s10236-005-0043-0.
- Enfield, D. B., A.M. Mestas-Nuñe and P. Trimble, 2001: The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental US. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 2077-2080.
- Schmitz, W. J., 1995: On the interbasin-scale thermohaline circulation. *Rev. Geophys.*, 33, 151-173.
- Sutton, R. T. and D.L.R. Hodson, 2005: Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. *Science*, 309, 115-118.
- Te Raa, L. A. and H.A. Dijkstra, 2002: Instability of the thermohaline ocean circulation on interdecadal time scales. *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 138-160.

### **Stromingen in de oceaan**

De oceanen spelen een belangrijke rol in het klimaat. Door de grote warmtecapaciteit van water kunnen de oceanen enorme hoeveelheden warmte opslaan. Deze warmte wordt vervolgens over de hele aarde getransporteerd door de oceaanstromingen. Op andere plaatsen op aarde kan de warmte dan weer worden afgegeven aan de atmosfeer. Een voorbeeld is de Golfstroom, die voor de kust van Florida loopt en dan de Noord-Atlantische Oceaan oversteeft als de Noord-Atlantische Strooming. Het relatief warme water dat door deze stromingen richting West-Europa wordt gevoerd wordt gezien als een belangrijke oorzaak voor het relatief milde klimaat van Noordwest-Europa.

Ook in de diepzee (dieper dan ongeveer 1500 meter) stroomt het water, al zijn de snelheden daar extreem laag: een typische stroomsnelheid in de diepzee bedraagt enkele centimeters per seconde (tegen enkele tientallen centimeters per seconde tot maximaal 1 meter per seconde voor oppervlaktestromingen). Omdat het echter om zoveel water gaat, is dit transport wel degelijk van belang. Een schematische weergave van de oppervlakte- en diepzeestromingen in alle oceanen (figuur 1) laat zien dat in het noorden van de Noord-Atlantische Oceaan een bijzonder proces optreedt: de oppervlaktestrooming 'verandert' hier in een diepzeestrooming. Door de sterke afkoeling aan het oppervlak van het relatief zoute water dat door de Golfstroom wordt aangevoerd, treedt hier diepe convectie op. Hierbij wordt de hele waterkolom doorgemengd en ontstaat water met een hoge dichtheid, dat vervolgens aan een reis door de diepzee begint. Het koude, zware water stroomt in de diepzee naar de Zuid-Atlantische Oceaan en komt voor een groot deel in de Indische en Stille Oceaan terecht. In tegenstelling tot de atmosfeer komt zulke diepe convectie in de oceaan maar op enkele plaatsen ter wereld voor: naast de Labrador Zee en ten zuiden van Groenland zijn er nog slechts enkele belangrijke gebieden van zogenoemde diepwaterformatie rondom Antarctica.

Globale oceaanstromingen zoals geschetst in figuur 1 worden aangedreven door de wind aan het oppervlak en door verschillen in dichtheid van het zeewater. De dichtheid van zeewater wordt bepaald door de temperatuur en het zoutgehalte van het water. Over het algemeen is het (oppervlakte)water op lage breedtegraden warm en zout, terwijl het op hoge breedtegraden koud en zoet is. Temperatuur en zoutgehalte hebben een tegengesteld effect op de dichtheid: hoe warmer, hoe lichter en hoe zouter, hoe zwaarder. Meestal wint het effect van de temperatuur: het zeewater rondom de evenaar is lichter dan dat op hoge breedtegraden. Dit soort dichtheidsverschillen in de oceaan zorgen voor drukverschillen, die op hun beurt stromingen aandrijven. Terwijl het effect van de wind op de oceaancirculatie zich beperkt tot ongeveer de bovenste kilometer (van de gemiddeld zo'n vier kilometer diepe oceaan), spelen stromingen als gevolg van dichtheidsverschillen zich af zowel aan het oppervlak als in de diepzee. Het hier geschetste beeld van de oceaanstromingen is een gemiddelde. De werkelijke stromingen kunnen sterk variëren, met als gevolg dat ook het warmtetransport verandert, evenals de afgifte van warmte aan en opname van warmte vanuit de atmosfeer. Ook de plaatsen waar opname of afgifte van warmte optreedt zijn aan dit soort veranderingen onderhevig.