

Bijna twintig jaar meet het NIOZ temperatuur en zoutgehalte van het water in het uiterste noorden van de Noord-Atlantische Oceaan. De waarnemingen tonen sterke variaties door de tijd heen, die niet overeenkomen met de computersimulaties. Hoe betrouwbaar zijn de klimaatmodellen eigenlijk?



FOTO: HENDRIK VAN AKEN

Een ijsberg bij Groenland, aan het westelijke eind van de ARO7E-waarnemingssectie.

# De toestand van de noordelijke Noord-Atlantische Oceaan

Als de oceaan opwarmt door antropogene klimaatverandering, smelten niet alleen de ijskappen, maar zal het water ook uitzetten en stijgt de waterspiegel. De computermodellen voor het voorspellen van die stijging suggereren volgens het IPCC-rapport dat de stijging tot 2100 al snel 43 (plus of min 23) cm kan bedragen, waarvan 31 cm als gevolg van thermische expansie.

Begin september berichtten de kranten over de drastische dijkverhogingen die de Deltacommissie noodzakelijk acht om een zeespiegelstijging van 2 tot 4 m in de komende 200 jaar op te vangen. Maar wordt de verwachte zeespiegelrijzing inderdaad door opwarming van de oceaan veroorzaakt? Of zijn hiervoor andere oorzaken aan te wijzen? Hoe goed zijn die klimaatmodellen eigenlijk; kloppen ze met de werkelijkheid, ook in zee? Zonder de regelmatige beschikbaarheid van waarnemingen van de oceaan kunnen we hierop geen antwoord geven. Daarvoor is een waarnemings- of monitoringprogramma noodzakelijk. Voor de atmosfeer bestaat al zoiets: het meteorologische meetnet voor de weersverwachtingen.

Van 1990 tot 1997 werden de wereldzeëen zorgvuldig doorgemeten tijdens het World Ocean Research Circulation Program (WOCE), een onderdeel van het World Climate Research Program (WCRP). Met schepen uit vele landen bepaalden onderzoekers de temperatuur en het zoutgehalte van het zeeoppervlak tot aan de bodem, en de oceaan van continent tot continent. Het NIOZ voerde waarnemingen uit in de noordelijke Noord-Atlantische Oceaan, min of meer langs een lijn tussen Groenland en Ierland (de ARO7E-sectie, figuur 1). Een van de uitkomsten van het WOCE was dat de eigenschappen van het water in de oceanen (temperatuur, zoutgehalte, dichtheid) en de oceaancirculatie veel veranderlijker zijn dan we aanvankelijk veronderstelden. Daarom is een nieuw

waarnemingsprogramma inzake klimaatvariabiliteit (CLIVAR) opgestart, dat de monitoring van de oceaan continueert. Het NIOZ zorgt samen met instituten uit Duitsland en Engeland voor de jaarlijkse waarnemingen langs de bovengenoemde lijn.

Opwarming  
Als we de temperatuur op een diepte van bijvoorbeeld 300 m of 1250 m vergelijken voor 1991 en 2007 (figuur 2), zien we dat de temperatuur van de oceaan niet constant is maar verandert op een termijn van tien tot twintig jaar. Op 300 m diepte is het oceaanooppervlak tussen 1991 en 2007 circa 1,5°C warmer

geworden, ongeveer tien maal de atmosferische opwarming. Maar dit is niet direct een gevolg van het broeikas effect. Meteorologische waarnemingen hebben aangegeven dat in die periode de wind en de daardoor aangedreven zeestromen zijn veranderd. Hierdoor ligt het warme water in de Noord-Atlantische Oceaan op een andere positie dan vroeger; het is naar het noordwesten verschoven. Deze theorie wordt bevestigd door satellietwaarnemingen van de hoogte van het zeeoppervlak en door computersimulaties.

## Opwarming

Op een diepte van 1250 m is het beeld anders. In de Irmingerzee bij Groenland is het water op deze diepte warmer geworden; verder naar het oosten, in het IJslandbekken en de Rockalltrog, is het kouder geworden. Dit heeft te maken met het circuleren van koud water op 1250 m diepte, dat in de extra koude winters van 1988 tot 1994 in de Labradorzee ten westen van Groenland is afgekoeld tot een diepte van ongeveer 2000 m. In de Labradorzee en de Irmingerzee is dat water, met z'n kern tussen 1000 and 2000 m, sindsdien alweer opgewarmd. In het IJslandbekken en de Rockalltrog zorgt de oostwaartse verspreiding van dit koude water nog voor een lokale afkoeling.

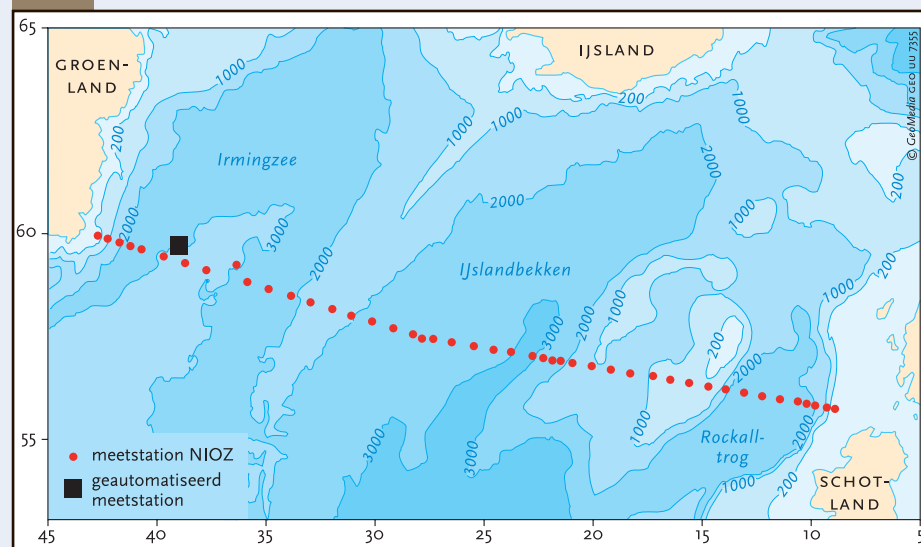
Temperatuur en zoutgehalte van het water in de Noord-Atlantische Oceaan zijn veel veranderlijker dan we dachten.

**Van jaar tot jaar**  
Wat er precies is gebeurd met de oceaancirculatie tussen 1991 en 2007 valt alleen te zeggen als ook in de tussenliggende jaren metingen zijn uitgevoerd – eens in de zestien jaar is niet voldoende. Daarom wordt bij monitoringprogramma's geprobeerd ten minste jaarlijks waarnemingen uit te voeren. Dat is vanaf 1990 ook nagenoeg gelukt met de ARO7E-sectie. Als we op basis van de aldus verkregen waarnemingen tijd-diepte-secties tekenen van de temperatuur en het zoutgehalte in de centrale Irmingerzee (bij het zwarte blokje in figuur 1), zien we het hiervoor beschreven proces aan de gang (figuur 3). Het koude water op 1000 tot 2000 m diepte, gevormd tussen 1988 en 1994 in de Labradorzee, stroomt de Irmingerzee in, waar het zijn maximale verticale uitbreidbaarheid heeft in de zomer van 1995, ongeveer 1,5 jaar later dan in de Labradorzee. Dit water is ook minder zout. Na 1995 stroomt het water weg naar

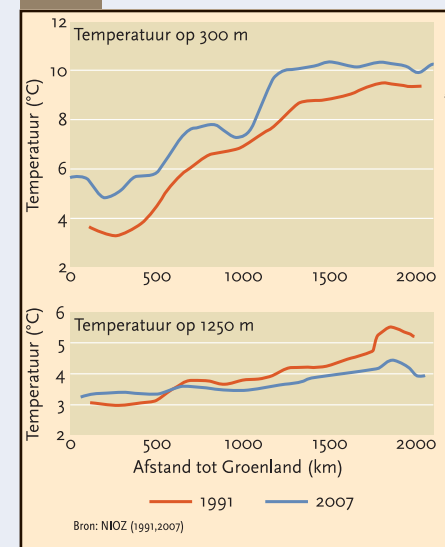
## Van jaar tot jaar

Temperatuur en zoutgehalte van het water in de Noord-Atlantische Oceaan zijn veel veranderlijker dan we dachten.

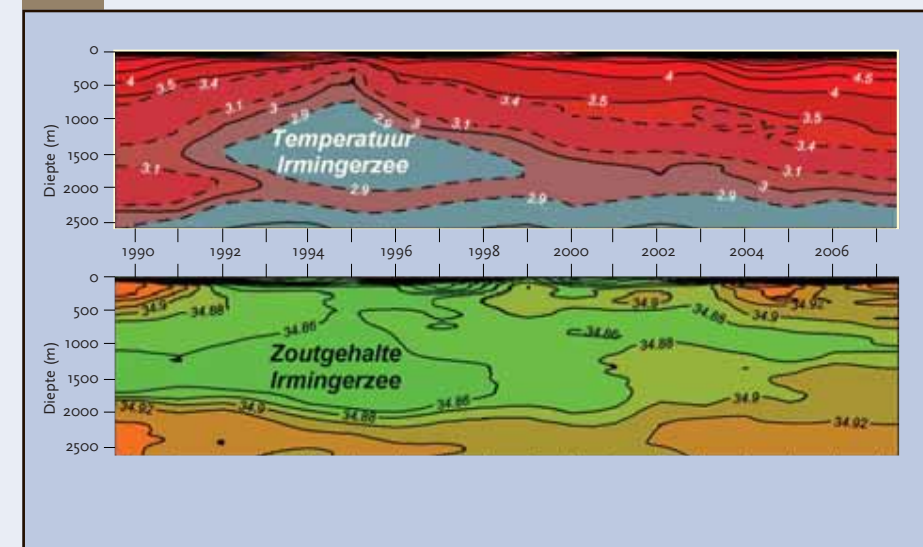
**Figuur 1:** De noordelijke Noord-Atlantische Oceaan met posities (stations) langs de ARO7E-sectie, waar het NIOZ in 1990 temperatuur- en zoutgehaltewaarnemingen heeft uitgevoerd van het zeeoppervlak tot aan de bodem. Sinds 1990 worden langs deze sectie bijna jaarlijks zulke waarnemingen uitgevoerd. Het zwarte blokje in de Irmingerzee geeft aan waar een profiler dagelijks automatisch waarnemingen verricht.



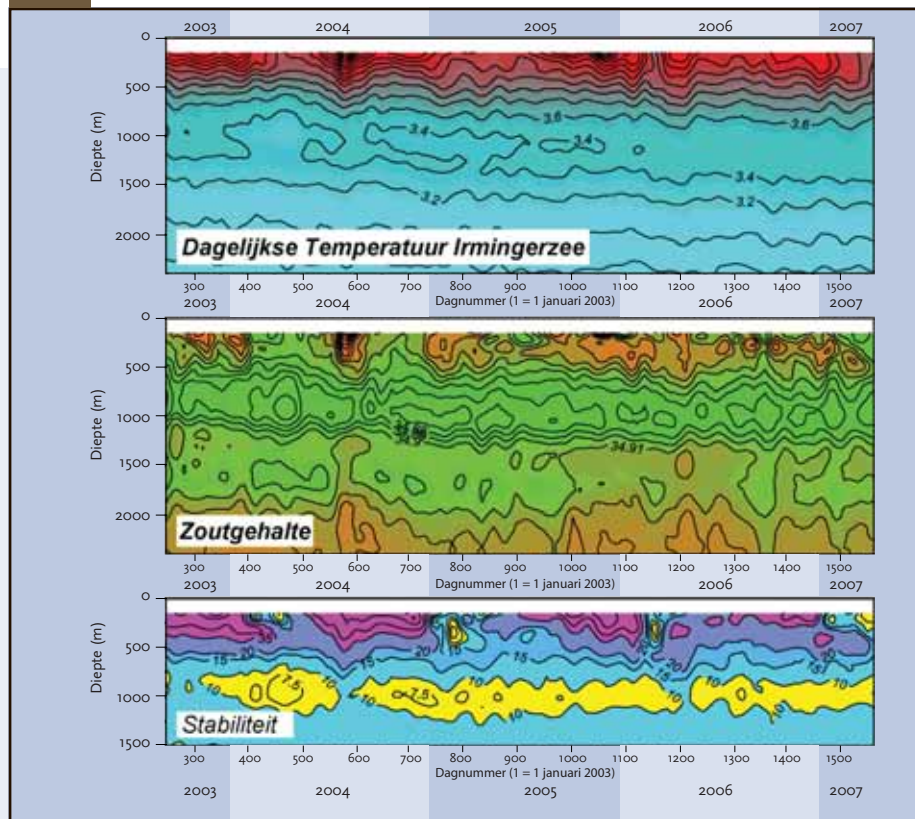
**Figuur 2:** De temperatuurverdeling langs de ARO7E-lijn tussen Groenland en Ierland op 300 en 1250 m diepte.



**Figuur 3:** Diepte-tijd-secties van de temperatuur en het zoutgehalte in de centrale Irmingerzee, gebaseerd op waarnemingen vanaf onderzoeksschepen. De markeringen op de horizontale as geven de zomers van de opeenvolgende jaren aan.



**Figuur 4:** Diepte-tijd-sectie van temperatuur, zoutgehalte en stabiliteit in de centrale Irmingerzee, vanaf oktober 2003 tot april 2007. Deze gegevens zijn gebaseerd op waarnemingen met een profiler die dagelijks zo'n 2300 m op en neer beweegt langs een verticale, strakgespannen kabel.



naburige zeegebieden zoals het IJslandbekken, zodat het pakket koud water dunner wordt. Tegelijkertijd warmt het op en wordt het zouter door menging met warmer en zouter water dat langs de randen van de oceaanbekkens stroomt. Na 2000 ontstaat er een zoutgehalteminimum rond de 800 m, dat langzaam in diepte toeneemt. In de volgende jaren, van 2003 tot 2005, wordt hier ook een lokaal temperatuurminimum waargenomen. Dit komt door de toevloed van een nieuwe laag koud water, die rond 2000 in de Labradorzee is gevormd tijdens een extra koude winter. Maar die laag is zouter en veel minder koud dan het eerdere temperatuurminimum uit 1994 en ligt daarom minder diep. Ook dit minimum verdwijnt weer met de stroming naar de naburige oceaanbekkens en mengt met de warmere omgeving.

In figuur 3 suggereert de temperatuur in de oppervlaktelaag dat het altijd zomer is. We missen de afkoeling in de winters. Dit komt doordat waarnemingstochten met onderzoeksschepen meestal 's zomers uitgevoerd worden. De weersomstandigheden op de Noord-Atlantische oceaan zijn dan doorgaans beter, met minder wind en minder golven dan in de winter. Bovendien ligt er in de nazomer geen pakjes voor de Groenlandse kust, alleen wat verspreide ijsbergen.

#### Dagelijkse waarnemingen

Het eenzijdige beeld dat we krijgen als we alleen oceaanwaarnemingen uitvoeren in de zomer, hebben we genuanceerd door naast

de waarnemingen vanaf onderzoeksschepen ook waarnemingen te doen met apparaten die autonoom zijn en het hele jaar door kunnen meten. Hiervoor bestaan vrij drijvende meetboeien die iedere tien dagen 2000 m op en neer bewegen. Nadeel is dat ze met de stroming meegaan en niet altijd daar zijn waar je wilt meten. Het NIOZ gebruikt daarom sinds oktober 2003 een autonome profiler die dagelijks langs een strak gespannen kabel op en neer beweegt tussen 150 en 2450 m diepte. Die kabel zit bij de bodem vast aan een gewicht van ruim een ton. Aan de bovenkant, op ongeveer 100 m diepte, wordt de kabel

strak getrokken met twee boeien, met een gezamenlijk drijfvermogen van zo'n 800 kg. Jaarlijks moeten we deze verankering ophalen om de batterijen te vervangen en de waarnemingen uit het computergeheugen te lezen. De meetresultaten sinds 2003 zijn weergegeven in figuur 4. Wat het eerst opvalt is de snelle variabiliteit met een gemiddelde van ongeveer vijftig dagen, karakteristiek voor mesoschaal-wervels. Dat zijn de oceanische tegenhangers van depressies en hogedrukgebieden. Die mis je altijd als je maar eens per jaar meet. Figuur 4 bevat ook een maat voor de stabiliteit (kader Stabiliteit). De stabiliteit is bij het zeeoppervlak aan het eind van de winter (maart-april) het laagst als gevolg van de menging van de zee door de koude winterse atmosfeer. De stabiliteit toont aan dat de winterse menging van 2005 en 2006 wel tot dieper dan 500 m doordringt. We zien ook dat de stabiliteit laag is rond 1000 m, waar een temperatuur- en zoutgehalteminimum te vinden is. Dat is het pakket koud water uit de Labradorzee, dat in 2000 is gevormd. Dit water heeft ook een lage stabiliteit, kenmerkend voor afkoeling en menging in de winter. Na de winter van 2005 (om en nabij dag 1000) begint dit koude pakket weer te verdwijnen, het water wordt warmer, zouter en stabiel rond de 1000 m.

#### Variaties zeeniveau

Om de hoogte van het zeeniveau in open zee te meten, bewegen er satellieten om de aarde

die zijn uitgerust met een fijne radar. Deze techniek, satellietaltimetrie, streeft naar een nauwkeurigheid van circa 3 cm. Anders dan met onderzoeksschepen komen hierbij het hele jaar door gegevens uit de hele oceaan beschikbaar. Vergelijkingen van het zo gemeten zeeniveau met het zeeniveau berekend op grond van de waarnemingen van temperatuur en zoutgehalte uit figuur 3 hebben aangetoond dat de zeeniveauperanderingen in de Irmingerzee merendeels samenhangen met variaties in de temperatuur en het zoutgehalte, zowel van jaar tot jaar, als van seizoen tot seizoen. Een goede prognose van deze variabelen is dus belangrijk om het zeeniveau te kunnen voorspellen. Een nadeel van satellietaltimetrie is dat je niet weet op welke diepte welke variaties in temperatuur en zoutgehalte verantwoordelijk zijn voor de waargenomen veranderingen in de hoogte van het zeeoppervlak.

#### Kwaliteit klimaatmodellen

Om de moderne klimaatmodellen op waarde te schatten moet je ze vergelijken met de waarnemingen verkregen via monitoringprogramma's. We hebben onze waarnemingen van temperatuur en zoutgehalte van de centrale Irmingerzee gelegd naast de uitkomsten van simulaties voor het eind van de 20ste eeuw, gebruikt voor het IPCC-rapport uit 2007. Elk klimaatmodel blijkt sterke en zwakke punten te hebben. Sommige resultaten in een veel te warme oceaan, bij andere valt dit mee. De gemiddelde modelfout (verschil tussen model en waarnemingen) in de temperatuur van de zee varieert tussen de 0,7 en 2,5°C. Om een samenvattende vergelijking te krijgen hebben we de gemiddelde temperatuur- en zoutgehalteprofielen van de – in onze ogen – beste acht modellen (zwarte lijnen in figuur 5) vergeleken met het gemiddelde van de waarnemingen sinds 1990 (rode lijnen). Wat opvalt is dat de modellen

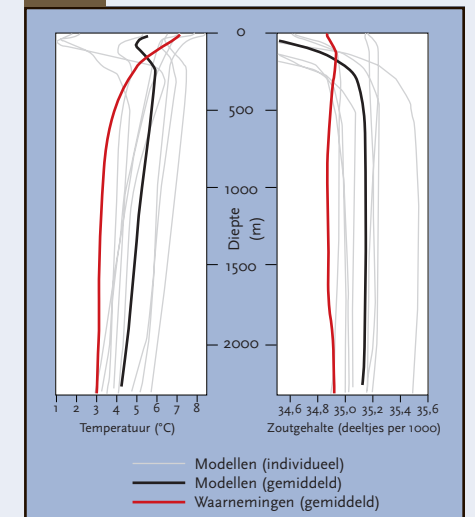
beneden de 150 m diepte een temperatuurprofiel in de Irmingerzee simuleren dat gemiddeld 1 à 2°C te warm is. Bij het zeeoppervlak zijn de modellen gemiddeld zo'n 1,5°C te koud. Dat alle modellen gemiddeld een te laag zoutgehalte bij het zeeoppervlak, en een te zoute waterkolom beneden de 150 m simuleren, hangt hier waarschijnlijk mee samen. Deze verschillen zijn onrealistisch groot; blijkbaar is er nog iets grondig mis met de klimaatmodellen waarin de oceaan en de atmosfeer gekoppeld worden gesimuleerd. En hoe hard we ook hebben gezocht, we kunnen de oorzaak niet vinden.

#### Monitoring

Het regelmatig monitoren van de fysische staat van de oceaan kost tussen de 10.000 en 50.000 euro per dag. Daarom wordt dit voornamelijk gedaan door landen die sterk afhankelijk zijn van de visserij, zoals Noorwegen en IJsland. Daar brengt het tenminste nog wat op en steunt het de economie. Monitoring van de oceaan ten behoeve van het klimaatonderzoek gebeurt minder. Terwijl het wel degelijk loont. Dat illustreert het waarnemingsnet in de Stille Oceaan gericht op het voorspellen van El Niño. Economen van de Amerikaanse Rekenkamer hebben vastgesteld dat een operationele organisatie voor klimaatvoorspellingen zichzelf terugverdient. Dat laatste moet voor de Noord-Atlantische Oceaan nog worden aangetoond. Feit is echter dat het hier beschreven monitoringprogramma in stand wordt gehouden door onderzoekinstellingen met onderzoeksgeld, en niet door operationele organisaties als het KNMI. Het werk van het NIOZ op dit gebied werd tot nu toe gefinancierd door het NIOZ zelf, door NWO, door BSIK en binnenkort door de EU. De tot nu toe verkregen resultaten zijn uniek. Er ligt een reeks 'jaarlijkse' waarnemingen langs de ARO7E-sectie van bijna twintig jaar. We hebben vijf jaar waarnemingen met de profilerende sensoren, een interpretatie van de waargenomen variabiliteit in termen van atmosfeer-zee-interactie, oceaancirculatie en menging, en gegevens die een zinnige regionale evaluatie van de uitkomst van simulaties met klimaatmodellen mogelijk maken. We hopen dat dit werk de basis legt voor een permanente Nederlandse bijdrage aan het Global Ocean Observing System (GOOS), gestart met een internationaal verdrag dat ook Nederland ondertekend heeft.

De huidige klimaatmodellen zijn nog niet betrouwbaar genoeg voor de beslissing tot drastische versterking van de kusten.

**Figuur 5:** Vergelijking van de gemiddelde profielen van temperatuur en zoutgehalte in de centrale Irmingerzee, verkregen in de centrale Irmingerzee, verkregen met het monitoringprogramma (rode lijnen) en met de klimaatmodellen, gebruikt voor het in 2007 verschenen IPCC-rapport (zwarte en grijze lijnen).



#### Consequenties

Wat voor gevolg heeft de geconstateerde temperatuurafwijking in de klimaatmodellen voor het zeeniveau? De gemiddeld te hoge modeltemperatuur leidt tot een extra verhoging van het zeeniveau van 60 cm, heel wat meer dan de verwachte 31 cm thermische expansie in 2100 volgens het IPCC. Die temperatuurafwijking wordt flink gecompenseerd door de fout ingeschatte zoutgehaltes, die de waterkolom weer laten krimpen, maar er blijft nog een modelfout over van een ongeveer 10 cm te hoog ingeschat zeeniveau. Je vraagt je natuurlijk af hoe dit soort modelfouten zich ontwikkelen in de klimaatsimulaties voor de komende 100 à 200 jaar. Dat is onbekend omdat voor de beantwoording ook waarnemingen uit de toekomst nodig zijn.

Onze vergelijking van modellen en waarnemingen maakt duidelijk dat er nog heel wat te verbeteren valt aan de huidige generatie klimaatmodellen voordat ze resultaten geven die echt bruikbaar zijn op regionaal niveau, bijvoorbeeld voor de beslissing tot drastische versterking van de kusten. En dan nog: de zeespiegelstijging die de Deltacommissie voorspelt voor 2200 komt voor minder dan een derde door opwarming van de zee. Dit in tegenstelling tot de 21ste eeuw, wanneer thermische uitzetting verantwoordelijk wordt geacht voor meer dan 70 procent van de te verwachten stijging. Volgens de commissie zijn het voornamelijk de in de 22ste eeuw smeltende Arctische en Antarctische ijskappen die op termijn de Nederlandse kust bedreigen. En die zijn nog moeilijker te modelleren dan de oceaan. •