

# Oceaan en Klimaat

Arie Kattenberg (KNMI)

De afgelopen honderd jaar is de mondiaal gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de aarde zo'n halve graad Celsius gestegen (zie figuur 1). De vraag of dat nu een gevolg is van het door toedoen van de mens verhoogde broeikas effect laat zich niet zo makkelijk beantwoorden: het klimaat zou ook 'uit zichzelf' aan het veranderen kunnen zijn, door natuurlijke oorzaken.

We kennen dit soort natuurlijke variabiliteit van het klimaat bijvoorbeeld in de vorm van ijstijden, die samenhangen met variaties in de zonne-instraling door veranderingen in de baan en stand van de aarde ten opzichte van de zon en met de vorming en afsmelting van grote ijskappen. Deze processen hebben tijdschalen van vele tientallen duizenden jaren. De klimaatveranderingen die in figuur 1 te zien zijn duren tientallen tot honderden jaren. De mogelijke processen waar we in geïnteresseerd zijn moeten dus ook zulke tijdschalen hebben.

Daarmee komen we terecht bij de oceanen: natuurlijke veranderingen in de oceanen, op grote schaal, duren tientallen tot honderden jaren of langer. Bovendien is de warmtecapaciteit van de oceanen ruwweg duizend keer zo groot als die van de atmosfeer. Op de tijdschalen waar we op dit moment in geïnteresseerd zijn, zijn de oceanen de belangrijkste onderdelen

van het klimaatsysteem.

Die rol van de oceanen is het onderwerp van dit artikel. In het onderstaande schetsen we de werking van de oceanen en de wisselwerking met de atmosfeer bij (schommelingen in) de warmtehuishouding van de planeet aarde.

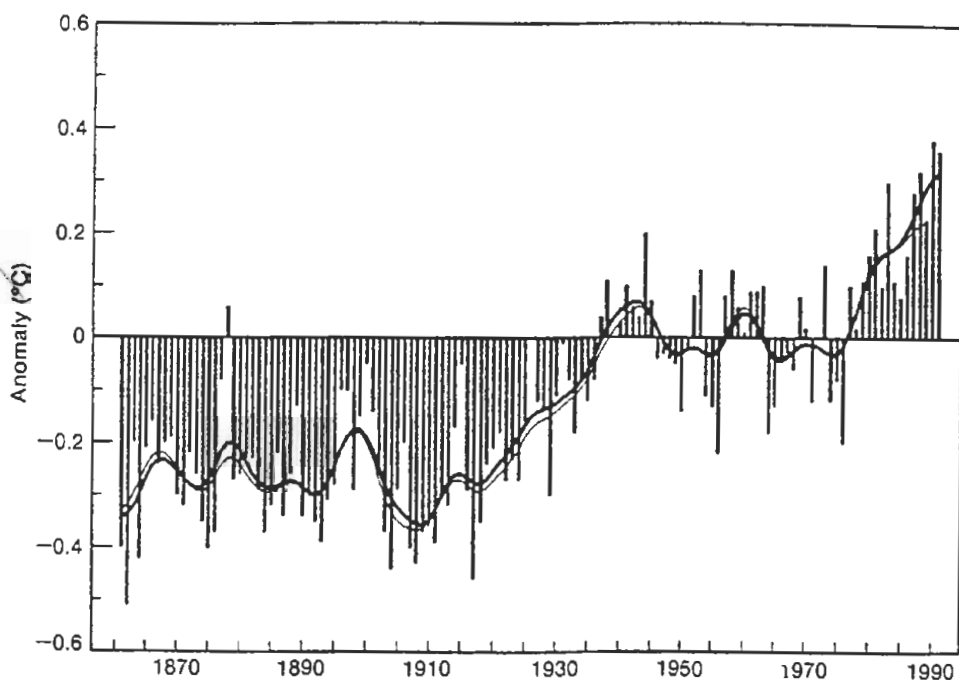
## EEN WARME PLEK IN DE OCEAAN

Figuur 2 laat de jaarlijks gemiddelde oppervlaktetemperatuur van de oceanen zien. We zien bekende en voor de hand liggende aspecten, zoals bijvoorbeeld het feit dat het op hogere breedtes kouder is dan in de tropen, en dat de westkant van de tropische oceanen warmer is dan de oostkant, omdat de passaatwind het steeds verwarmde oppervlaktewater daarheen blaast. Waar we hier speciaal op willen wijzen is het verschil tussen de noordelijke Stille Oceaan en het noordelijke deel van de Atlantische Oceaan. Het laatstgenoemde

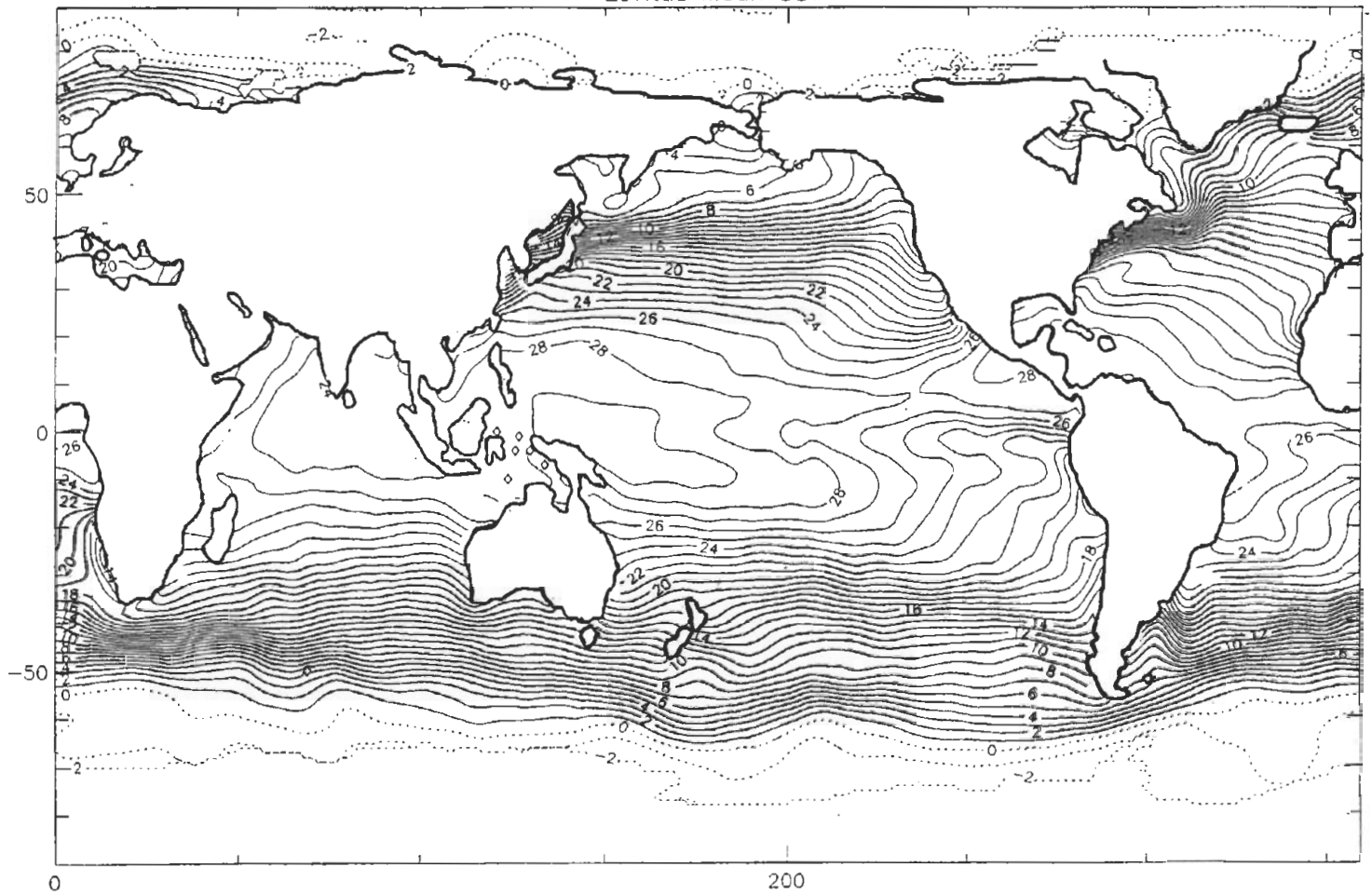
gebied is, op dezelfde breedte, enkele graden warmer dan het eerstgenoemde. Met betrekking tot het gehele patroon van de oppervlaktetemperaturen is de noordelijke Atlantische Oceaan een bijzonder warme plek! We hebben zo iets vroeger ook allemaal op school geleerd: 'ons' klimaat wordt bepaald door de Golfstroom die warm water tot 'voor onze deur' (en verder naar het noorden) brengt. Waarom loopt dat warme water zo ver naar het noorden door in de Atlantische Oceaan? Het antwoord op deze vraag luidt: "door de diepe convectie (sterke dalende stromingen) die plaatsvindt in de Groenland-IJsland-Noorse zee (GIN zee)". Figuur 3 laat metingen zien van (sporen van) diepe convectie in de oceaan. Patronen van andere temperatuur en zoutgehalte (dus dichtheid) laten een smalle (ca. 10 km) slurf zien waar koud en zout (zwaar) oppervlaktewater naar beneden is 'gedropen'. Zulke schoorstenen, zoals deze kleine en kort levende (enkele maanden, dus moeilijk te vinden) oceaansstructuren genoemd worden, zijn in zekere zin vergelijkbaar met de 'torens' van diepe convectie die we in de atmosfeer in de tropen zien. In de atmosfeer betreft het opstijgen van warme lucht, versterkt door de aanwezigheid van vocht, waardoor de convectie de hele dikte van de troposfeer kan beslaan; in de oceaan betreft het zinken van koud water, versterkt door de aanwezigheid van zout, waardoor de convectie de bodem van de oceaan kan bereiken.

Er zijn maar een paar plaatsen in de wereldoceaan waar zulke diepe convectie optreedt. Toch zijn het deze processen die de eigenschappen van de oceanen in de diepte bepalen en oceanografen beschrijven die eigenschappen dan ook in termen van herkenbare "watermassa's", genoemd naar het brongebied van diepe convectie (zie figuur 4).

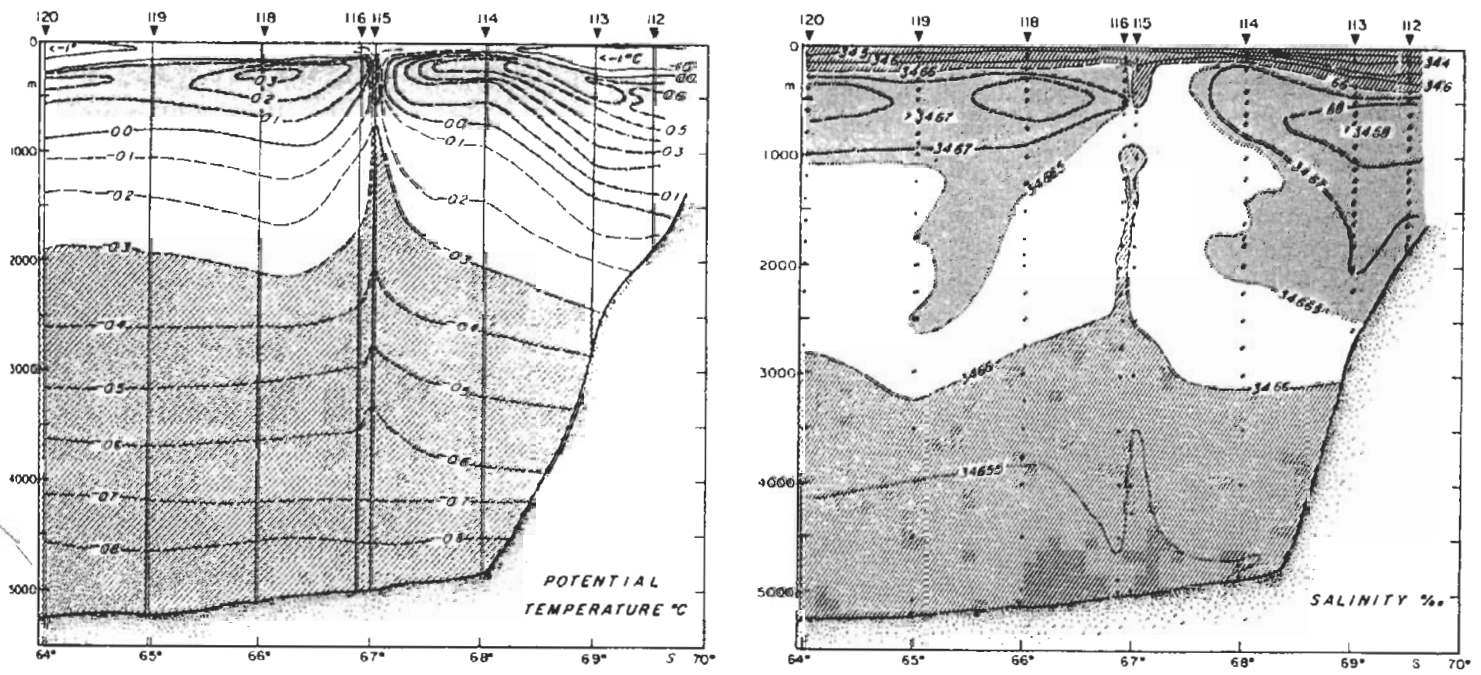
Zeewater kan zwaar worden door afkoeling, maar ook door gedeeltelijke bevroering. Zee-ijs is minder zout dan het water waaruit het ontstaat: het 'overtollige' zout blijft in de buurt van het nieuw ontstane zee-ijs achter. In de buurt van Antarctica vindt diepe convectie plaats ten gevolge van extreme afkoeling en zoutuitstoting uit bevroerend zeewater. Het naar beneden geconvecteerde Antarctische koude, zoute water stroomt van het continentale plat de



Figuur 1. Waargenomen mondiale temperatuurstijging, zoals weergegeven in het IPCC WGI rapport van 1990.



Figuur 2. Klimatologische oppervlakte-zeevatertemperatuur uit de oceanklimaatatlas van Levitus.

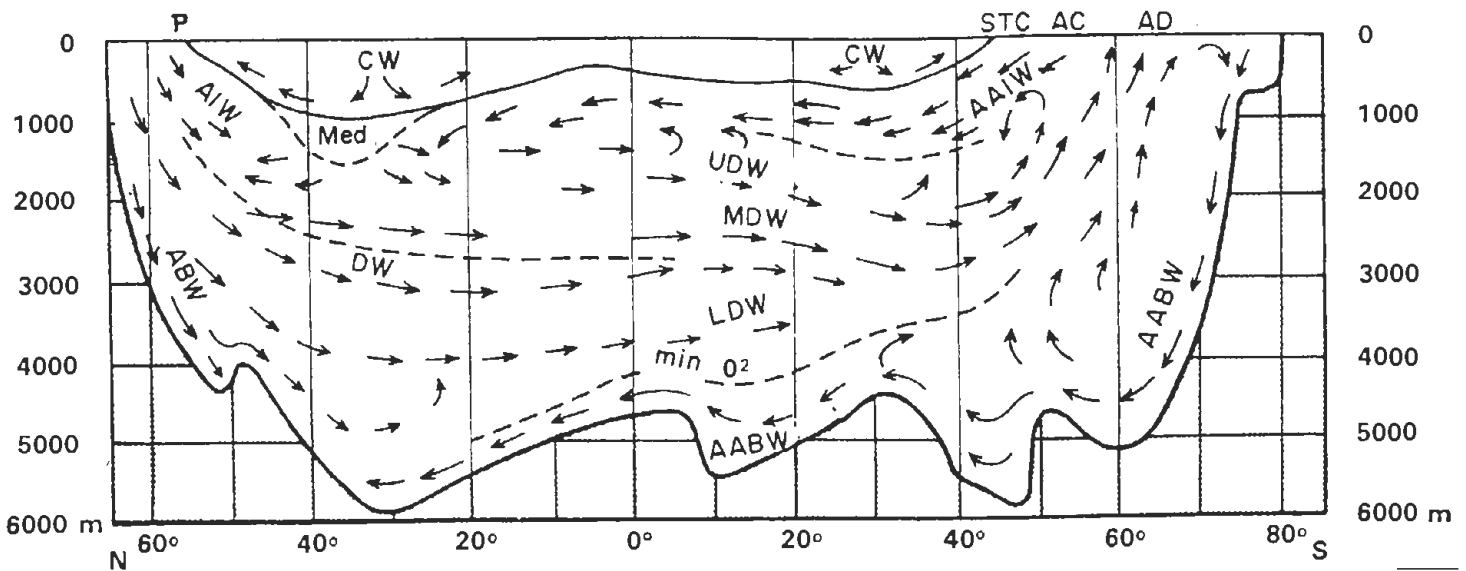


Figuur 3. Waarnemingen van (de resten van) een convectieve "schoorsteen" in de oceaan.

diepte in en verspreidt zich over de oceaانبodem. Dit is het zogenaamde Antarctische Bodemwater (AABW), dat bijvoorbeeld in de noordelijke Atlantische Oceaan tot ver ten noorden van de evenaar gevonden kan worden. De Middellandse Zee, waar door sterke verdamping het zoutge-

halte van het water zo kan toenemen dat schoorstenen ontstaan, is ook een plaats van diep water vorming. Dit zogenaamde Mediterrane water (Med) stroomt bij Gibraltar de noordelijke Atlantische Oceaan in, waar het zinkt en zich vermengt met omgevingswater totdat het een even-

wicht vindt op ongeveer 2 km diepte. Het meeste en zwaarste diepe water wordt echter gevormd in de noordelijke GIN zee. De GIN zee is vanaf Schotland via IJsland tot Groenland door een ondiepe drempel afgesloten van de noordelijke Atlantische Oceaan. Het zware water vult de GIN zee

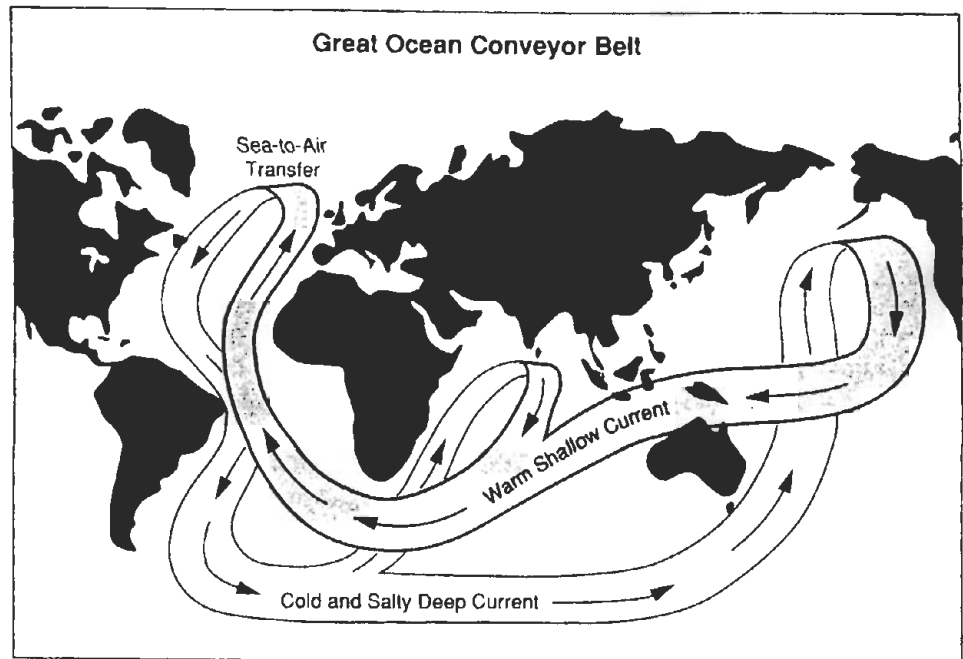


Figuur 4. Watermassa's in de Atlantische Oceaan. De afkortingen worden in de tekst besproken.

achter de drempel en loopt over de drempel, zowel ten oosten als ten westen van IJsland. In het Noordatlantisch bekken zinkt het dieper terwijl het zich vermengt met al aanwezig water, waarna het zich op dieptes tussen 2 en 4 km verspreidt als zogenaamd Diep Water (DW).

### DE TRANSPORTBAND

Net als bij de atmosferische diepe convectie, die in de tropen de 'motor' vormt van de (meridionale) Hadley circulatie, wordt door de diepe convectie in de GIN zee meridionale circulatie in de oceanen aangedreven, de zogenaamde "thermohaline circulatie" (warmte en zout gedreven circulatie). Uit het noordelijk deel van de Atlantische Oceaan verdampt meer water dan dat er door neerslag en afvloeiing van de continenten in komt. De warme Golfstroom gaat ver naar het noorden door en wordt onderweg, door die verdamping, steeds zouter. In de GIN zee koelt het Golfstroom water af en wordt nog zouter door gedeeltelijke bevrozing. Afhankelijk van de strengheid van de winters en extra afkoeling door de wind worden soms schoorstenen gevormd, waardoor een deel van het water in de diepte verdwijnt, waar het via de drempel bij IJsland, zuidwaarts uit het gebied wegstroomt. Het diepe water en het bodemwater vindt zijn weg, via de zuidelijke Atlantische Oceaan en de Antarctische Circumpolaire Stroming (ACC), naar de Indische en Stille Oceaan. Langs deze weg en in deze oceanen welt het zoute koude water langzaam omhoog waarbij warmte van de zon en zoet water van neerslag uit de atmosfeer het langzaam van karakter laten veranderen. De Stille Oceaan bijvoorbeeld heeft een netto neerslag overschot. Opnieuw bij de oppervlakte gekomen kan het water via de Antarctische



Figuur 5. De grote oceaan-transportband; schets van de thermohaline (dichtheids-gedreven) circulatie door de werelddoceanen.

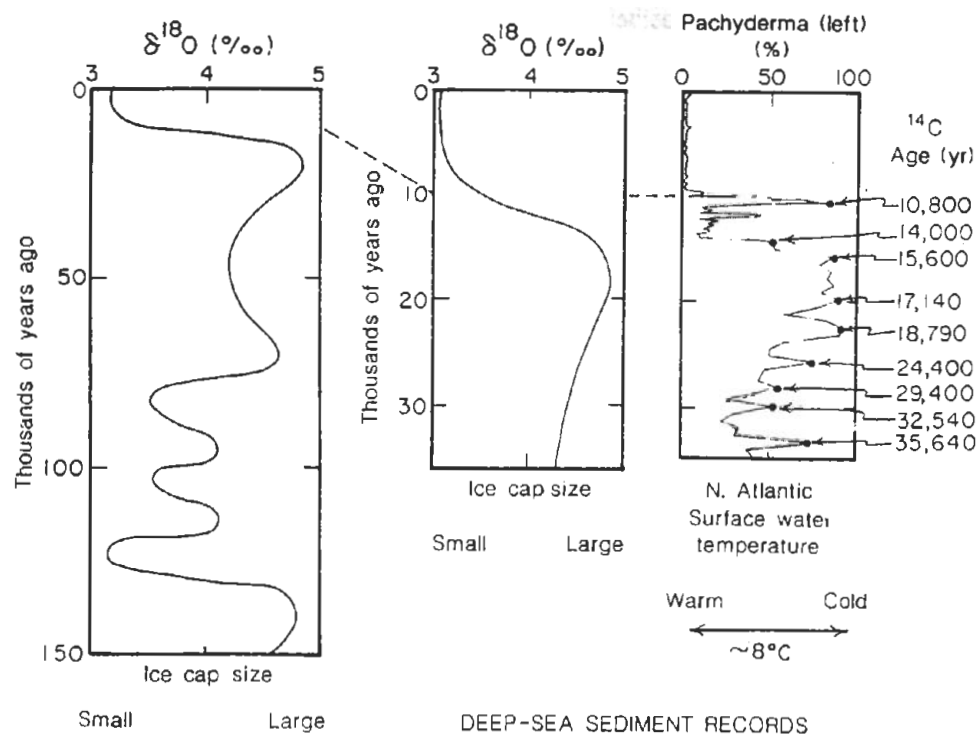
Circumpolaire Stroming weer in de zuidelijke Atlantische Oceaan komen en naar de noordelijke GIN zee terugstromen. Schematisch en schetsmatig wordt deze grote trage stroming in het verticale vlak in de oceanen vaak weergegeven zoals in figuur 5 en wordt het 'de transportband' (conveyorbel) genoemd. De aanvoerkant van deze transportband wordt dus gevormd door oppervlaktewater, met name door het warme Golfstroomwater dat 'voor onze deur' naar het noorden stroomt. De afvoerkant bestaat voornamelijk uit het diepe water dat over de drempel bij IJsland stroomt. Theoretische berekeningen laten zien dat zo'n diepe, equatorwaartse stroming zich zal concentreren aan de westkant van de oceanenbekkens. Waarnemingen laten zien dat aan de oostkust

van Groenland inderdaad een gigantische 'waterval' van diep water tegen de steile rand van de continentale korst 'kleeft'. Dit is verreweg de grootste waterval op aarde, als watervallen onder water bij een vergelijking mee zouden mogen tellen. Deze diepe stroming begeeft zich als een grote 'onderwaterrivier' langs de Noord Amerikaanse kust naar het zuiden. Niet alleen diepe convectie en het diepe water maken deel uit van deze transportband, maar ook zogenaamd tussenwater (intermediate water, zie figuur 4) en zogenaamd "modewater", welke ook door lucht-zee wisselwerking hun eigenschappen krijgen en die door respectievelijk 'subductie' (naar beneden geleiden) en menging door wind naar beneden gebracht worden. De grote transportband door de oceanen

transporteert van alles. In de eerste plaats wordt er natuurlijk warmte getransporteerd: het water dat aan de oppervlakte naar de GIN zee toestroomt is gemiddeld meer dan 10° C warmer dan het koude diepe water dat er uit stroomt. Die warmte wordt afgegeven aan de atmosfeer en zorgt in West-Europa voor een mild klimaat. Die warmte komt van de oppervlaktewateren van oceanen op lagere breedtes. Vanuit de atmosfeer boven de GIN zee en West-Europa wordt die warmte eventueel verder poolwaarts getransporteerd en uiteindelijk de ruimte in gestraald. De transportband helpt dus om de mondiale evenaar-pool contrasten in temperatuur te matigen. Daarnaast wordt er zoet water getransporteerd: zoals we al vermeldten komt bijvoorbeeld in de Stille Oceaan meer zoet water door neerslag dan eruit verdampt. In het gebied van de (Noord) Atlantische Oceaan is juist meer verdamping dan neerslag, waardoor het zoete water weer van de transportband 'afgenomen' wordt. De atmosfeer sluit deze kringloop van water. Het warmte-transport vormt geen gesloten kringloop op aarde! Koolzuur is een derde grootheid die door de transportband getransporteerd wordt. Naarmate het water afkoelt en naar de convectie gebieden in de GIN zee stroomt, kan het steeds beter koolzuurgas vasthouden. Met de transportband verdwijnt het daar in de diepte. Er zijn nog grote onzekerheden in de mondiale koolstofhuishouding, maar de transportband draagt waarschijnlijk de belangrijkste flux van koolzuurgas over de evenaar die er is, want zoals bekend zijn atmosferische transporten over de evenaar niet erg sterk. Ook bij de huishouding van andere (broeikas)gassen die met de oceaan in wisselwerking staan, kan de transportband een belangrijke rol spelen.

## VARIABILITEIT EN GEVOELIGHEID

De grote transportband heeft een merkwaardig aspect. Er is een duidelijke verbreking van de symmetrie in het spel. De noordelijke Atlantische Oceaan is warm en zout, kent een verdampingsoverschot en diepe convectie. De noordelijke Stille Oceaan is koeler, minder zout, kent een neerslagoverschot en geen diepe convectie. Onderzoekers hebben zich afgevraagd of dit misschien ook anders zou kunnen zijn. Theoretische berekeningen en simulaties met modellen suggereren steeds duidelijker dat dit inderdaad zou kunnen: de transportband zou ook 'andersom' kunnen lopen of helemaal afwezig kunnen zijn. Beide alternatieven



Figuur 6. Het "Jongste Dryas", te zien aan fossiele planktonresten in bodemonsters van de Atlantische Oceaan.

zouden natuurlijk grote gevolgen voor de warmtetransporten en temperatuurverdeling in de oceanen hebben als ze zouden optreden. Er zijn aanwijzingen gevonden dat zulke klimaatveranderingen, in samenwerking met veranderingen in de grote oceaan-transportband, zich inderdaad hebben voorgedaan.

Het beroemdste voorbeeld is de zogeheten 'Jongste Dryastijd' (JD). De JD is een periode van een paar honderd jaar, zo'n elf en een half duizend jaar geleden, toen de vorige ijstijd net was afgelopen. In de paleoklimatologie werkt men onder andere met boorkernen uit ijskappen of uit sedimenten op de oceaanbodem. In het ijs kunnen isotopenverhoudingen van bijvoorbeeld zuurstof, de aanwezigheid van stof, of de onderlinge concentraties van gassen in ingesloten luchtbelletjes suggesties leveren omtrent het klimaat van vroeger. In sedimenten geven aanwezige stuifmeelkorrels, fossiele planktonresten enzovoorts aanwijzingen over het paleoklimaat. Figuur 6 is een voorbeeld, waarbij te zien is hoe de temperatuur in het Noordatlantische gebied na de ijstijd langzaam weer toeneemt, zich herstelt naar huidige waarden, totdat plotseling, tijdens de JD de temperatuur weer afneemt tot ijstijd-waarden. Even plotseling lijkt de JD ook weer afgelopen te zijn. Recente boorkernen van de Groenlandse ijskap lijken te suggereren dat in de nadagen van de voorlaatste ijstijd (het Eemien) dergelijke plotselinge afkoelingen veel vaker zijn voorgekomen. Soms lijkt de temperaturomslag binnen enkele

tientallen jaren te hebben plaatsgevonden. Een van de meest veelbelovende verklaringen voor de JD heeft te maken met de transportband. Een ijskap die op het vaste land van Noord-Amerika en Canada lag (de Laurens-ijskap) voerde zijn smeltwater af naar het zuiden, via wat nu de Mississippi rivier heet. Het zoete water kwam terecht in de Golf van Mexico. Op een zeker moment werd die afvoer geblokkeerd en ontstond een afvoer via de Laurensbaai en de Hudsonbaai. Daardoor stroomde er smeltwater uit over de noordelijke Atlantische Oceaan die daardoor bovenin zoeter werd waardoor de diepe convectie en dus de transportband stopte. Berekeningen met oceaanmodellen, reconstructies van zeespiegelstijging enzovoorts geven allemaal aan dat dit een mogelijk scenario is.

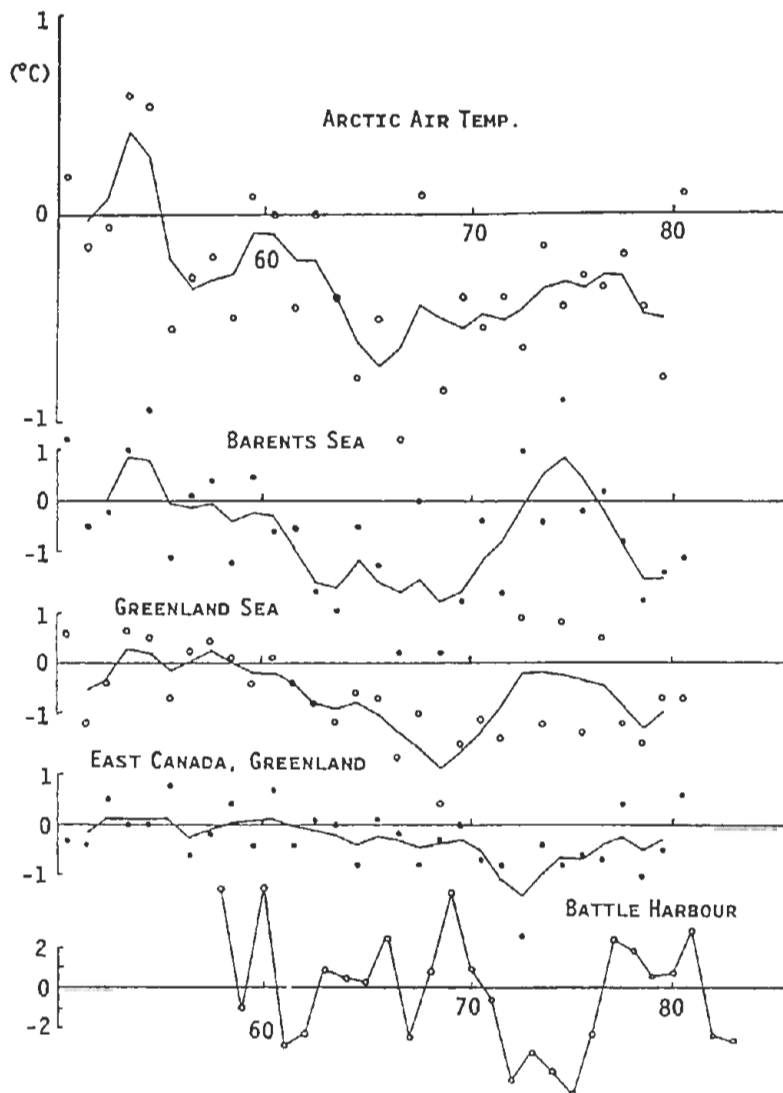
Nu hoeft de transportband niet echt helemaal stopgezet te worden om klimaat-schommelingen te krijgen. Omdat de transportband primair warmte transporteert naar de noordelijke Atlantische Oceaan en de GIN zee, kan ook een kleine verandering in de sterkte van de diepe convectie temperatuurschommelingen teweeg brengen. Experimenten met Oceaan-circulatiemodellen (OGCM's) laten zien dat drastische schommelingen in de (warmte)transporten van de oceanen ontstaan op tijdschalen van tientallen, honderden en duizenden jaren, als je ze enkel met 'ruis', dat wil zeggen weersfluctuaties, aandrijft. Er zijn aanwijzingen dat in het noordelijke Atlantische gebied grootheden als opper-

vlaktetemperatuur, zeeijshoeveelheid, zoutgehalte enzovoorts schommelingen op decade-tijdschaal vertonen (figuur 7). In het midden van de jaren 70 blijkt zich ook een verstoring in het zoutgehalte en de temperatuur van de GIN zee te hebben voorgedaan. Waarschijnlijk afkomstig uit de Labrador zee, kon deze 'mid-seventies anomaly' of 'great salinity anomaly' jarenlang gevolgd worden. Zoals dat vaak gaat begreep men pas achteraf wat er gaande was. Het karakter van deze verstoring lijkt sprekend op sommige verstoringen die in bovengenoemde OGCM experimenten voorkomen.

## BESLUIT

De oceanen beïnvloeden het klimaat. We hebben ons gericht op de noordelijke Atlantische Oceaan, waar de 'motor' van de grote transportband zit. Dat is een plaats waar veel variabiliteit verwacht en gezien wordt, maar de experimenten met modellen suggereren dat de fluctuaties in de transportband ook op andere plaatsen merkbaar moeten zijn. Deze natuurlijke schommelingen van het klimaatsysteem kunnen het verhoogde broeikaseffect (tijdelijk) verbergen of sterker of juist minder sterk doen lijken. Er zou ook een wisselwerking kunnen ontstaan. Stel dat een mondiale temperatuurverhoging de hydrologische cyclus zo beïnvloedt dat netto meer neerslag op het Noordatlantische gebied gaat vallen, met als gevolg een minder zoute Noordatlantische Oceaan ... dan zou het water wel eens kunnen gaan afkoelen door een minder sterke transportband.

We kunnen het klimaat voor de komende honderd jaar nog lang niet zo goed voorspellen als het weer voor de komende dagen. Het is ook maar de vraag of dat ooit zal lukken. In elk geval zal het bij klimaat-



Figuur 7. Aanwijzingen voor schommelingen in de luchttemperatuur in het noordelijke Atlantische gebied, op decadale tijdschalen.

verwachtingen hoofdzakelijk gaan om een voorspelling van het gedrag van de oceanen. Kennis en modellering van de oceanen staan bij lange na nog niet op het peil van die van de atmosfeer. Een van de

belangrijkste taken voor de klimaatonderzoekers van vandaag is het gedrag van de oceanen beter te onderzoeken en beter te gaan begrijpen.