

De Atlantische Oceaan, de Golfstroom en ons klimaat

door Hendrik M. van Aken

NIOZ Koninklijk Nederlands Instituut voor Zeeonderzoek, Texel (aken@nioz.nl)



Afb. 1. De Pelagia, het onderzoekschip van het NIOZ op de Atlantische Oceaan bij Groenland, waar het NIOZ jaarlijks komt ten behoeve van klimaatonderzoek.

Wij hebben het allemaal al op school bij de aardrijkskundesles geleerd: de Golfstroom is belangrijk voor het klimaat in Nederland. De VPRO meldt ons in het programma Noorderlicht: “de invloed van de warme Golfstroom op het klimaat valt moeilijk te overschatten”.

In onze nationale kwaliteitskrant, de NRC, vinden we: “de warme Golfstroom is een stroming in de oceaan die warm water, opgewarmd in de tropen, ... naar de Atlantische Oceaan stroomt (sic) en bij de Golf van Biskaje verder naar het noorden gaat via onder meer de Noordzee tot aan de Noordelijke IJszee”. En zelfs op de weblog van de (voormalige) SP-leider, Jan Marijnissen, wordt de Golfstroom genoemd in verband met het milde klimaat van Europa. Blijkbaar zijn al deze onverdachte bronnen het eens en staan de feiten vast. Maar klopt het ook met de feiten, zoals die in de wetenschappelijke klimatologie bekend zijn? Wat is die Golfstroom, en hoe belangrijk is hij voor het klimaat van de Noord-Atlantische Oceaan en het klimaat van West-Europa? Afb. 1.

Eerst wat klimatologie

De temperatuur van de lucht bij het aardoppervlak wordt door velen beschouwd als het belangrijkste of meest aansprekende element van het klimaat. Hoe komt die temperatuur eigenlijk tot stand? De atmosfeer verliest warmte doordat deze (de wolken en gassen erin) infraroodstraling uitzendt naar het heelal en naar het oppervlak van de zee en het land. De atmosfeer zou dan ook steeds verder afkoelen, ware het niet dat hij voortdurend warmte ontvangt van het aard- of zeeoppervlak. De warmte die de zee levert aan de atmosfeer komt uit de absorptie van zonnestraling door het

Afb. 2. Geschatte bijdrage van de zeestromingen in de Atlantische oceaan aan het noordwaartse warmtetransport tussen 30°ZB en 60°NB (rode lijn met symbolen). De blauwe onderbroken lijn en de dubbele pijlen geven een ruwe tweedeling aan tussen de bijdragen van de subtropische oceaanwervel en van de Thermo-Haliene Circulatie. Hierbij is de bijdrage van de THC waarschijnlijk wat overschat.

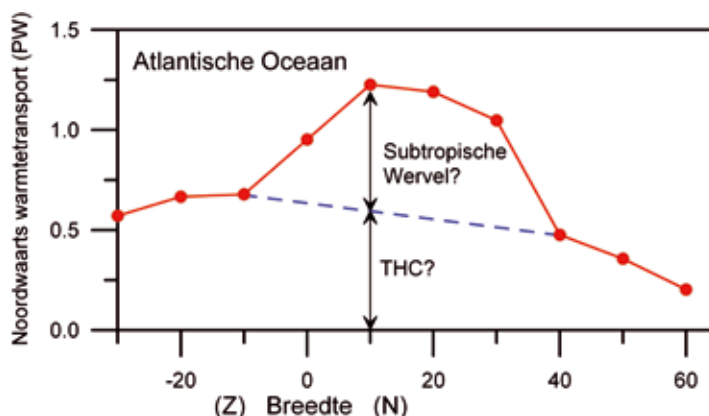
zeewater (waardoor het opwarmt), of is afkomstig van water uit warmere gebieden aangevoerd door zeestromingen. Tussen 30° en 60°NB geeft de Atlantische Oceaan gemiddeld ongeveer 130 W/m² warmte af aan de atmosfeer. Hiervan bestaat maar zo'n 10% uit directe overdracht van (voelbare) warmte.

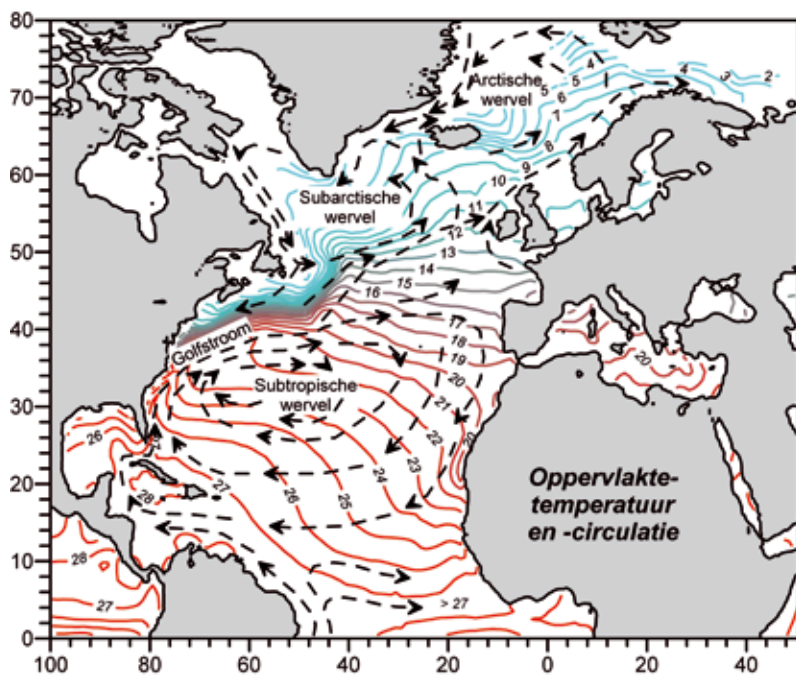
Ongeveer 65% van de warmteoverdracht loopt via de 'latente'-warmteflux. Dat is het fenomeen dat het zeeoppervlak afgekoeld wordt door de verdamping van zeewater, maar dat die warmte pas later vrijkomt als de ontstane waterdamp (hoog) in de atmosfeer weer condenseert tot wolkendruppels. De overblijvende 25% van de warmteoverdracht van oceaan naar atmosfeer loopt via de netto uitzending van infraroodstraling (IR) die hoger in de atmosfeer wordt geabsorbeerd door gas (waterdamp, CO₂) en wolken. Daar leidt dit tot opwarming van de lucht. Het zeeoppervlak zendt in totaal ongeveer twee keer zoveel IR-straling uit als in de atmosfeer 'ingevangen' wordt, de andere helft verdwijnt

direct naar het heelal. Hoe groot de totale warmteflux van het zeeoppervlak naar de atmosfeer op een zeker moment is, hangt af van de meteorologische omstandigheden, zoals de temperatuur van het zeeoppervlak, de temperatuur van de atmosfeer, de luchtvochtigheid, de wolkenbedekking en de windsnelheid.

Warmtetransport door de oceaan

De absorptie van zonnestraling door het zee- en landoppervlak zorgt voor een temperatuur op aarde die een heel eind boven het absolute nulpunt ligt en maakt het leven op aarde mogelijk. Doordat de aarde een bol is en de zon gemiddeld recht boven de evenaar staat, ontvangen de equatoriale gebieden veel meer zonnestraling per vierkante meter dan de polaire gebieden. Het grote temperatuurverschil dat hierdoor in principe zou ontstaan wordt echter gematigd door de 'klimaatmachine' – de stromingen in de atmosfeer (winden) en de oceaan – die warmte van de tropen naar de polaire breedtes brengt. Tussen de 30° en 40°NB is dit totale warmtetransport in het huidige klimaat bijna 6 PW (1 peta-Watt = 10¹⁵ Watt.) (Ter vergelijking, het vermogen van energiecentrales wordt aangeduid in mega-(10⁶) Watt) Op lagere en hogere breedten is het minder: 3 PW op 10°NB en





Afb. 3. De verdeling van de gemiddelde oppervlaktetemperatuur in de Noord-Atlantische Oceaan, aangegeven met isothermen, en het schema van de oppervlaktecirculatie, aangegeven met onderbroken zwarte pijlen. De kleur van de isothermen is een maat voor de temperatuur: rood warm, blauw koud.

2,2 PW op 70°NB. Bij dit netto poolwaartse transport van warmte door de oceaan moeten we niet alleen denken aan warme stromingen zoals de Golfstroom naar de pool, maar ook aan koude stromingen weg van de pool naar de evenaar. Transport van relatief koud water naar de tropen komt warmte-technisch overeen met transport van relatief warm water naar de pool.

De bijdrage van de Noord-Atlantische Oceaan aan dit warmte-transport is afhankelijk van de zeestromingen en de temperatuurverdeling. Een schatting van het noordwaartse warmtetransport in deze oceaan is weergegeven in Afb. 2. We zien dat op 10°NB de stromingen in de Atlantische Oceaan 1,2 PW naar het noorden brengen. Dat is maar liefst 40% van het totale noordwaartse warmtetransport op deze breedte. Bedenk daarbij dat de Atlantische Oceaan op deze geografische breedte maar ongeveer 15% van de aarde omspant en ruim drie maal zo smal is als de Stille Oceaan die daar 25% van het noordwaartse warmtetransport verzorgt (0,8 PW). In de (sub)tropen is de Atlantische Oceaan dus heel belangrijk voor het klimaat van het noordelijke halfrond. Op 40°NB is de Atlantische bijdrage gereduceerd tot 8% van het totale warmtetransport, op 60°NB is dit slechts 6%. Op deze breedten zijn het voornamelijk atmosferische depressies en hogedrukgebieden die dit transport in stand houden. Afbeelding 2 toont een bijzondere Atlantische karakteristiek die je niet vindt in de Stille Oceaan: vanaf de breedte van Kaapstad (ongeveer 30°ZB) tot aan IJsland (64°NB) is het netto warmte-transport in de Atlantische Oceaan positief, dat wil zeggen naar het noorden gericht. Dat betekent dat de zeestromingen in deze oceaan ook warmte transporteren naar onze breedten afkomstig uit de andere oceanen (Indische Oceaan en Stille Oceaan). Deze warmte komt dus niet uit de Atlantische Oceaan. Verandering van de circulatie van de hele wereldzee kan dus waarschijnlijk gevolgen hebben voor het Noord-Atlantische klimaat.

De wind-gedreven Noord-Atlantische Oceaanwervels

De zeestromingen in de Atlantische Oceaan zijn een stuk gecompliceerder dan een simpele Warme Golfstroom die vanuit de Golf van Mexico in noordoostelijke richting de Atlantische Oceaan oversteekt. Afbeelding 3 is een goede hulp om een beeld te krijgen van alle waterbewegingen in dit deel van de Atlantische Oceaan. Een schets van de zeestromingen aan het oppervlak van de Noord-Atlantische Oceaan laat zien dat de oppervlaktestromin-

gen grote wervels vormen (Afb. 3). Het klimaat in de subtropen, het gebied tussen de passaatwinden noord van de evenaar en de gordel van overheersende westenwinden tussen de 40° en 50°NB, wordt gedomineerd door trekkende depressies. Hier stroomt het oceaanwater in een grote wervel met een draaizin met de wijzers van de klok mee. Dit is de subtropische wervel in de afbeelding. Noord van de gordel van westenwinden, waar de winden naar het noorden steeds verder afnemen en uiteindelijk oost worden, is de draaizin van de oppervlaktestromingen juist tegen de wijzers van de klok in. Door de positie van IJsland en de onderzeese bergrug tussen Groenland en Schotland is deze wervel bovendien in tweeën gespleten: de subarctische wervel zuid van IJsland en Groenland, en de arctische wervel meer in het noorden (Afb. 3). De positie van de overheersende westen- of oostenwinden bepalen dus de draaizin en de positie van de oceaantwervels. De stromingen in de wervels zijn het sterkst bij het zeeoppervlak, maar ze reiken tot wel 1500 meter diepte.

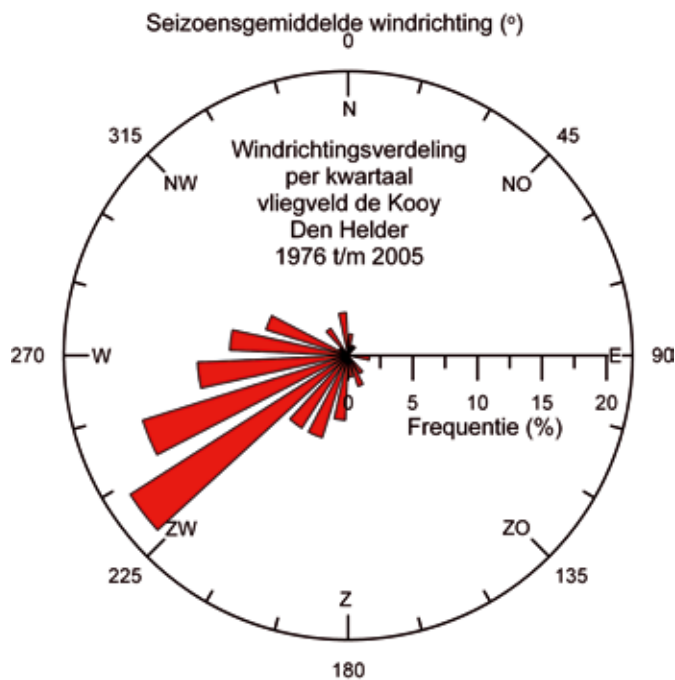
De vorm van de wervels is in de oost-westrichting niet symmetrisch. Aan de westkant van de Atlantische Oceaan is de subtropische wervel smal en stroomt het water snel. Daar vinden we de Golfstroom langs de kust van de VS die vanuit de Golf van Mexico door de Straat Florida (de zee-engte tussen Florida en Cuba) naar het noorden stroomt tot ongeveer Newfoundland. Deze zeestroming heeft een karakteristieke breedte van maar 100 tot 200 km. Naar het noorden buigt een aftakking om Newfoundland heen. Vanaf ongeveer

50°NB steekt deze stroming de oceaan over naar het oosten als de Noord-Atlantische Stroom. Het grootste gedeelte buigt daarna naar het zuiden af als een langzame, brede stroom die meer dan 80% van de breedte van de Atlantische Oceaan omvat. Noord van de evenaar buigt de stroom weer naar het westen af en volmaakt de kringloop door als Noord-Equatoriale Stroom weer aan te sluiten bij de Golfstroom.

De Florida-stroom tussen Florida en Cuba, het begin van de Golfstroom, is ongeveer 30 Sv water groot (1 Sverdrup of Sv is 1.000.000 m³/s). Dit water is voor ongeveer 50% afkomstig van de zeestroming die, van het Zuidelijk Halfrond langs Noord-Brazilië, via de Caribische Zee de Golf van Mexico instroomt. De andere helft van de Florida-stroom bestaat uit de terugstroom van de subtropische wervel die via het zuidelijke gedeelte van de Noord-Equatoriale Stroom de Golf van Mexico inkomt. Als de rest van de Noordequatoriale Stroom er verder naar het noorden ook bij komt, neemt de Golfstroom in sterkte toe tot wel 100 à 150 Sv, zuid van Newfoundland. Tijdens de tocht naar het noorden koelt het water van de Golfstroom af door verlies van warmte aan de atmosfeer dat niet voldoende gecompenseerd wordt door de inkomende zonnestraling.

De subarctische en arctische wervel zijn net als de subtropische wervel ook asymmetrisch: zij zijn smal en snelstromend langs hun westrand (de Labradorstroom langs Canada en de Oost-Groenlandstroom langs Groenland). Maar doordat zij precies de andere kant op draaien (tegen de wijzers van de klok in) stroomt hier juist koud water naar het zuiden in plaats van warm water naar het noorden. Maar, zoals eerder al gesteld, heeft dat hetzelfde effect op het netto warmtetransport door de oceaan.

De verdeling van de oppervlaktetemperatuur van het zeewater (door isothermen weergegeven in Afb. 3) vertoont de te verwachten grote zuid-noord temperatuurgradiënt van ongeveer 27°C bij de evenaar tot ongeveer 5°C bij de Noordkaap. Door de hierboven beschreven ronddraaiende oppervlaktestromingen worden de isothermen echter scheefgetrokken. Langs de Amerikaanse kust, waar de Golfstroom naar het noorden gaat, is het hierdoor warmer dan in de zuidwaartse terugstroom op dezelfde breedte verder naar het oosten, langs de kusten van Afrika en Europa. De combinatie van een warme noordwaartse stroming en een koudere compenserende zuidwaartse circulatie ondersteunt het be-



Afb. 4. Frequentieverdeling van de kwartaalgemiddelde windrichting in Den Helder in klassen van 15°, gebaseerd op 30 jaar waarnemingen van 1976 t/m 2005. Gemiddeld komt de wind uit de richting 240°.

staan van een netto noordwaarts warmtetransport in de Atlantische Oceaan, zoals weergegeven in Afb. 2. Dit geldt ook als er netto geen water naar het noorden stroomt. In de subarctische en arctische wervel (die precies de andere kant op draaien) is de oceaan in het westen (dus meer in het midden van de oceaan) juist kouder dan langs Europa, maar het effect is hetzelfde. Er wordt netto warmte naar het noorden getransporteerd door de zuidwaartse koude Labrador- en Oost-Groenlandstroom en de compenserende warmere noordwaartse terugstroming langs Schotland en Noorwegen. Waarom het in West-Europa warmer is dan aan de oostkust van de VS op dezelfde breedte, want dat is nog steeds zo, wordt verderop uitgelegd.

De Thermo-Haliene Circulatie (THC), een verticale oceaancirculatie

Hierboven werd al aangegeven dat er in de Golfstroom ook zo'n 15 Sv water meestroomt dat afkomstig is van het Zuidelijk Halfrond. Dat is de helft van de Florida-stroom, maar het is maar zo'n 10 tot 15% van de Golfstroom als deze verder naar het noorden bij Newfoundland (op ongeveer 55°WL) naar het oosten afbuigt. Het 'Florida'-water gaat niet mee in de zuidwaartse terugstroom van de subtropische wervel (zie Afb. 4), maar 'lekt' noordwaarts weg naar de (sub)arctische wervel. Met die wervel stroomt het water langs Schotland en Noorwegen naar zeeën op hogere breedten. Daar koelt het in de winter verder af, zowel oost als west van Groenland en noord van Noorwegen. Hierbij neemt de dichtheid van dit zeewater zo sterk toe dat het niet langer aan het zeeoppervlak blijft drijven, maar zinkt naar dieptes van 1000 tot 2000 m. Dit koude water stroomt vandaar af als diepe zeestroming naar het zuiden. Een gedeelte hiervan gaat zelfs om Zuid-Afrika heen en bereikt zo de Indische en de Stille Oceaan. Het grootste deel komt op het Zuidelijk Halfrond uiteindelijk weer aan het oppervlak en stroomt via Noord-Brazilië, de Golf van Mexico en de Golfstroom terug naar de arctische en subarctische wervels, waar het weer kan afkoelen.

De hoeveelheid water in deze verticaal ronddraaiende oceaancirculatie is minder dan 15% van de subtropische wervel met de Golfstroom op zijn sterkst. Maar in de subtropen is het temperatuurverschil tussen de noordwaartse oppervlaktestroming van de THC en de diepe zuidwaartse stroming relatief groot (zo'n 10° tot 20°C). Het temperatuurverschil tussen de westkant en de oostkant van de (horizontaal draaiende) subtropische wervel in de

Atlantische Oceaan is een stuk kleiner, zo'n 4° tot 5°C. Hierdoor kan het noordwaartse warmtetransport verzorgd door de THC best even groot zijn als het warmtetransport verzorgd door de door winden aangedreven horizontale subtropische en (sub)arctische wervels in de bovenste 1500 m van de oceaan. In ieder geval dragen beide systemen bij aan het in Afb. 2 aangegeven warmtetransport. De onderlinge verhouding van deze bijdragen is niet precies bekend. Een intuïtieve schatting, waarbij we de 'bult' in Afb. 2 toekennen aan de daarmee grotendeels samenvallende subtropische wervel, suggereert dat de bijdragen van beide Noord-Atlantische stroomsystemen in de subtropen van dezelfde orde van grootte zijn. Noord van 30°N wordt het warmtetransport waarschijnlijk gedomineerd door de windgedreven wervels vanwege de sterke afkoeling van de noordwaartse oppervlaktetak van de THC in de Golfstroom.

Klimaatverandering en de Golfstroom?

Zowel in de wetenschappelijke vakbladen als in de normale media – denk aan de film 'The Day after Tomorrow' – is de laatste jaren gesuggereerd dat de Golfstroom kan gaan stilvallen ten gevolge van de mondiale klimaatverandering. Daarbij zou het noordwaartse warmtetransport door de oceaan zo sterk afnemen dat Noord-Europa in de greep komt van een nieuwe ijstijd. Maar hierboven is al gesteld dat de subtropische wervel, waarvan de Golfstroom deel uitmaakt, aangedreven wordt door de boven de oceaan heersende noordoostpassaat en de westenwinden. Mondiale opwarming zal hierin geen verandering brengen en de subtropische wervel met Golfstroom zal blijven bestaan. De wervels die door de wind aangedreven worden, blijven hun warmtetransport naar het noorden dus altijd handhaven. Wel is het mogelijk dat, als bijvoorbeeld in 'korte' tijd de ijskap van Groenland afsmelt, de bijdrage van de THC aan de Golfstroom vermindert en in extreme gevallen gedurende zo'n 100 jaar of langer wegvalt. In dat geval komt er minder warmte mee uit de andere oceanen via de THC naar het noorden van de Atlantische Oceaan, wat de temperatuurstijging daar zal beperken. Paleoklimatologen claimen dat iets dergelijks in het verleden ook gebeurd is door het smeltwater van de Noord-Amerikaanse ijskappen. Bij een mondiale opwarming zal naar verwachting het temperatuurverschil tussen de evenaar en de polen ook afnemen en daardoor ook de sterkte van de winden boven de Atlantische Oceaan. Met zwakkere winden zal de sterkte van de subtropische oceaancirculatie, inclusief de door de wind aangedreven Golfstroom, afnemen en dus ook het warmtetransport van de door de wind aangedreven oceaancirculatie. Kortom, het lijkt er op dat deze twee terugkoppelingen via de oceaancirculatie de schade door globale opwarming nog wat kunnen matigen.

Wind van zee

Wij weten nu dat de Golfstroom – als onderdeel van de windgedreven horizontale subtropische wervel en de warme noordwaartse terugstroom van de verticale THC – een bijdrage levert aan een warmere Noord-Atlantische Oceaan. Maar waarom is het klimaat in West-Europa zoveel gematigder dan dat van de oostkust van Noord-Amerika. Komt dat ook door de Golfstroom? In Europa hebben we in het algemeen geen erg hete zomers of erg koude winters. Vergelijk New York maar met Lissabon, of Halifax met Bordeaux. Of vergelijk Amsterdam met het koude Canadese Labrador, en Oslo met Zuid-Groenland. Om hierin meer inzicht te krijgen, moeten we naar twee dingen kijken. Ten eerste: hoe verhoudt de warmteafgifte van de Golfstroom naar de atmosfeer zich tot de warmteafgifte van de rest van de Atlantische Oceaan? En ten tweede: waar komt de lucht vandaan die in West-Europa de temperatuur bepaalt? Komt die van de Golfstroom of van andere delen van de oceaan?

Om te beginnen de windrichting. We zeggen wel dat West-Europa in het gebied van de overheersende westenwinden ligt. Maar als je kijkt naar de windrichting gemeten in bijvoorbeeld Den Helder, dan zie je wat anders (Afb. 4). De frequentieverdeling van de gemiddelde windrichting voor de 120 seizoenen (= kwartalen) van 1976 tot en met 2005 geeft aan dat de wind in Nederland gemiddeld overwegend uit het zuidwesten komt (gemiddelde van

240°). Dit geldt voor heel West-Europa. Dat komt niet door de Golfstroom, maar doordat de hoge Rocky Mountains in het westen van Noord-Amerika de atmosferische circulatie (de straalstroom op 5 km hoogte) zodanig beïnvloeden dat de overheersende (oostwaartse) atmosferische stroming boven Noord-Amerika naar het zuidoosten afbuigt. Boven de Atlantische Oceaan slingert de straalstroom weer terug. We krijgen daardoor boven zee voornamelijk zuidwestenwinden die de kusten van Europa bereiken. En in het zuidwesten liggen de subtropen, waar het warmer is dan pal west van ons. We ontvangen in West-Europa dus lucht die warmer is dan de aan de Amerikaanse oostkust overheersende noordwestenwinden. Hierdoor is Europa op dezelfde breedte warmer dan Noord-Amerika. Ook op de korte termijn van seizoenen heeft verandering van overheersende windrichting effect op het klimaat. Van de 30 Nederlandse winters tussen 1976 en 2005 hadden de vijf koudste winters allemaal een gemiddelde windrichting in Den Helder met een oostelijke component, dus vanaf het land, terwijl gemiddeld de wind in de winter uit het zuidwesten kwam. Wind vanaf de Atlantische Oceaan voorkomt blijkbaar koude winters.

De Golfstroom en de rest van de oceaan

Brengt de zuidwestenwind dan lucht naar Nederland die opgewarmd is door de Golfstroom? Afbeelding 5 toont dat de Golfstroom gekenmerkt wordt door een grote warmteflux van de zee naar de atmosfeer, met jaargemiddelde waarden ver boven de 200 W/m². Deze hoge fluxen vind je echter maar in 2,4% van het oppervlak van de Noord-Atlantische Oceaan. De Golfstroom draagt dus maar beperkt bij aan de totale opwarming van de atmosfeer. Vergeleken met de rest van de oceaan gaat het met een ruwe schatting om minder dan 5%. Als de wind boven Nederland van de Golfstroom afkomstig is, dan komt de meeste opwarming van de lucht toch nog van de meer nabije oceaan-gebieden, waar de atmosfeer minder opgewarmd wordt door de oceaan. Als we de gemiddelde windrichting in Den Helder bekijken, dan is het duidelijk dat de lucht in Nederland gemiddeld niet van de Golfstroom afkomstig is, maar voornamelijk komt uit het centrum van de subtropische oceaanwervel, waar de typische warmteflux op de 125 tot 150 W/m² ligt.

De hoge warmteflux van de Golfstroom naar de atmosfeer komt niet door een exceptioneel hoge temperatuur van het zeeoppervlak, dat nemen we niet waar in Afb. 3. De oorzaak moeten we zoeken in de winterse stormen, waarbij extreem koude en droge continentale lucht vanuit Noord-Canada over de Golfstroom

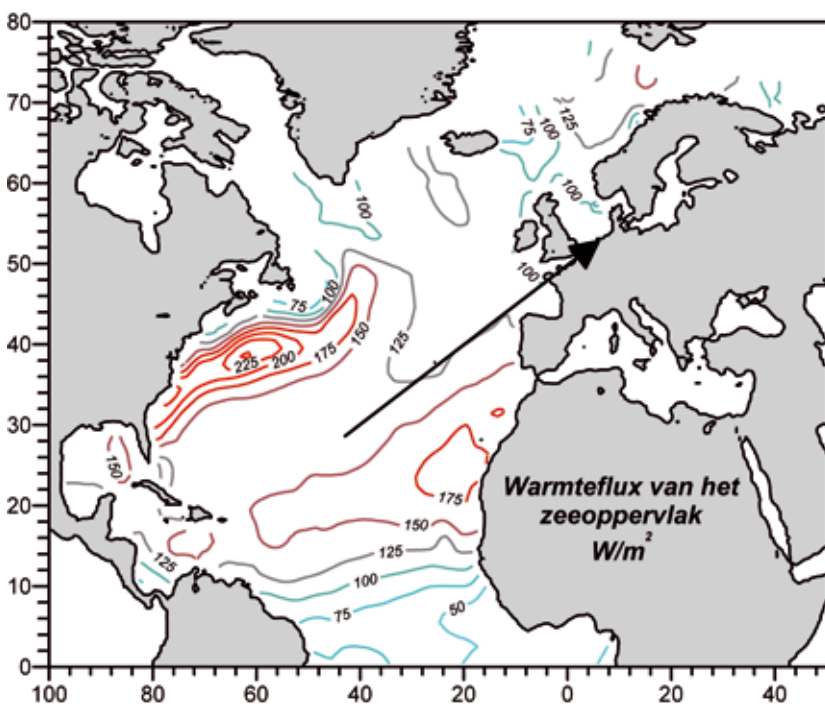
blaast. Dit zorgt voor een toename van de warmtegeleiding naar de atmosfeer, meer verdamping aan het zeeoppervlak en daarmee een groter warmteverlies door de voelbare, zowel als de latente warmteflux. Verder naar het oosten is de atmosfeer boven zee al veel meer aangepast aan de onderliggende oceaan: de lucht is warmer en vochtiger geworden en het warmteverlies neemt daar af. Een voorbeeld: boven de Golfstroom op 40°NB, 60°WL dragen de fluxen van latente en voelbare warmte in december, respectievelijk, 282 en 124 W/m² bij; in dezelfde maand verder naar het oosten, op 40°NB, 20°WL, is dat slechts 103 en 16 W/m², een verschil met een factor 2,7. In de zomer (juni) is het verlies van de latente en de voelbare warmte door de Golfstroom een factor 4 kleiner dan in de winter.

De zonneboiler

Nu moeten we het nog hebben over de gematigdheid van het Europese klimaat en een mogelijke invloed van de Golfstroom. Hoe zit het daarmee? Op school hebben we al geleerd dat het zeeklimaat gematigd is ten opzichte van het landklimaat midden in de grote continenten. De overheersende westenwinden zorgen voor een asymmetrie tussen het zeeklimaat van Europa en Noord-Amerika. In West-Europa wordt het zeeklimaat versterkt door de wind uit zee, terwijl het klimaat van de Noord-Amerikaanse oostkust door die westenwinden juist een meer continentaal karakter krijgt. Hier speelt de warmte-afgifte gedurende het hele jaar door de oceaan bovenwinds van Europa een zeer belangrijke rol, ook wel de jaarlijkse gang genoemd (Afb. 6). Door het jaar heen is er meestal geen balans tussen de zonnestraling geabsorbeerd in zee en de warmteafgifte van de zee naar de atmosfeer en het heelal. De temperatuur van het zeewater neemt toe vanaf het einde van de winter tot het einde van de zomer omdat de absorptie van zonnestraling snel toeneemt, terwijl het warmteverlies afneemt. Dit laatste komt voornamelijk door een lage verdamping en een lage latente warmteflux doordat het in de zomer meestal niet zo hard waait. In die periode neemt de warmteopslag in de oceaan dan ook toe, net zoals bij een zonneboiler. Na de zomer neemt de geabsorbeerde zonnestraling af, terwijl de typische windsnelheid – en daarbij de afgifte van latente warmte – weer toeneemt door de vele winterse stormen. De oceaan zal haar opgeslagen zomerse warmte weer verliezen en zij zal kouder worden. De atmosfeer wordt dus maximaal opgewarmd in najaar en winter, en minimaal in het voorjaar en de zomer. Als de wind gemiddeld van zee komt, zoals in

West-Europa, dan betekent dat relatief koele zomers en warme winters vergeleken met de oostkust van Noord-Amerika. Daar komt de wind gemiddeld ook uit westelijke richtingen, maar dat betekent daar niet van de matigende zee, maar van het centrum van een continent waar de zomers heet zijn en de winters ijskoud. De matigende invloed van de oceaan die we wel in West-Europa voelen, is daar minder aanwezig. De Golfstroom zelf heeft hier niets mee te maken. Computersimulaties hebben aangetoond dat deze matigende invloed van de oceaan ook doorgaat als er helemaal geen oceaanstromingen zouden zijn; het gaat dus puur om het zonneboilereffect.

In Noordwest-Europa, in het bijzonder in Scandinavië, is het klimaat niet alleen gematigder dan aan de Noord-Amerikaanse oostkust, maar ook warmer. Op die breedten loopt langs Canada de koude Labradorstroom van de subarctische wervel naar het zuiden, terwijl langs Noordwest-Europa de warme tak van de arctische wervel voor de kust ligt. Deze extra asymmetrie zorgt ervoor dat het gemiddelde

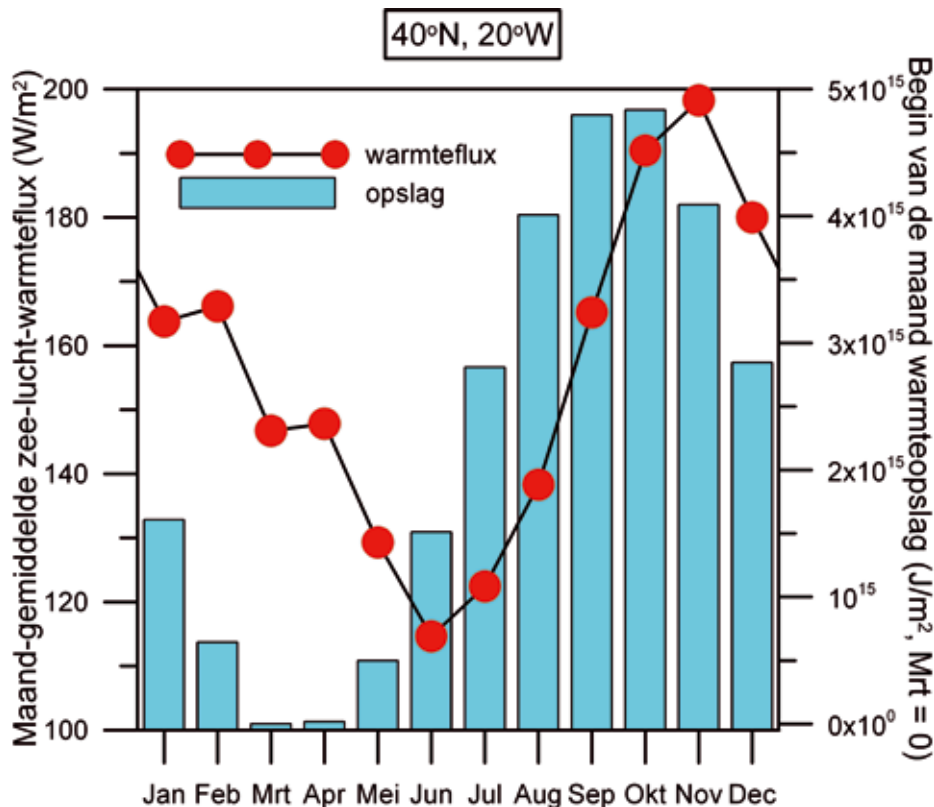


Afb. 5. De verdeling van de warmteflux van de Noord-Atlantische Oceaan naar de bovenliggende atmosfeer, aangegeven met isolijnen. De pijl geeft de gemiddelde windrichting in Den Helder aan.

zeeklimaat in Amsterdam warmer is dan in Labrador en dat het in Oslo warmer is dan op Zuid-Groenland.

Epiloog

Samenvattend kunnen we stellen dat de zeestromingen in de Atlantische Oceaan zeker bijdragen aan de handhaving van een aangenaam en leefbaar klimaat op het Noordelijk Halfrond. De westenwinden zowel als de verdeling van de temperatuur van het zeeoppervlak in de oceaaneanwervels zorgen voor een oost-west-asymmetrie die veel van de klimaatverschillen tussen West-Europa en de Amerikaanse oostkust verklaren. In West-Europa hebben we ons gematigde klimaat te danken aan de overheersende zuidwestenwinden, en aan de zonneboilerfunctie van de oceaan die de lucht die hiernaartoe stroomt extra opwarmt in de winter, als we het nodig hebben. Scandinavië is in tegenstelling tot Groenland wel overwegend bewoonbaar doordat het aan de warme kant van de arctische oceaaneanwervel ligt. Tenslotte zitten er in de circulatie van de Atlantische Oceaan – zowel in de vertikaal ronddraaiende Thermo-Haliene Circulatie (THC), als in de windgedreven horizontale circulatie in de oceaaneanwervels – terugkoppelingen met de atmosfeer die de effecten van een mondiale opwarming weliswaar niet geheel tegeniet doen, maar wel beperken. Zonder deze terugkoppelingen zou het mogelijk sneller uit de hand lopen.



Afb. 6. De jaarlijkse gang van de warmteflux van de oceaan naar de atmosfeer (lijn met rode symbolen) en van de warmteopslag in de oceaan (staafdiagram) door het verschil tussen de absorptie van zonnestraling en warmteverlies op 40°N, 20°W.