

# MENGPROCESSEN IN DE OCEAAN: TOT OP DE BODEM UITGEZOCHT

Om te begrijpen hoe het klimaat de komende decennia zal veranderen, zijn numerieke klimaatmodellen onmisbaar. Er zijn echter nog veel processen die niet expliciet door bestaande klimaatmodellen worden weergegeven. Een voorbeeld is menging van watermassa's in de oceaan, wat invloed heeft op de verdeling van warmte en CO<sub>2</sub> over de aardbol. Menging wordt beïnvloed door verschillende fysische factoren. Één van de factoren waar nog onduidelijkheid over is, is hoe de helling van de oceaانبodem menging beïnvloedt. In dit onderzoek werken we aan theorieën om de effecten van de zeebodem op menging beter te begrijpen én beter te representeren in oceaanmodellen.

## Parametrisaties in klimaatmodellen

De oceaan beweegt op tal van ruimtelijke schalen: van grootschalige processen zoals de Golfstroom op een schaal van duizenden kilometers, tot turbulentie op de schaal van millimeters. Om al deze processen expliciet weer te geven in een klimaatmodel, zou zo'n model dus een heel hoge resolutie moeten hebben. Met de huidige computers is dat niet haalbaar vanwege rekenkracht en werkgeheugen. Een oplossing om globale klimaatmodellen met een realistische resolutie te laten draaien, maar hierbij wel kleinschalige processen mee te kunnen nemen, is het toepassen van parametrisaties: formules die gebruikmaken van de variabelen die wél op de schaal van het model worden weergegeven, om de effecten van processen die op kleinere schaal plaatsvinden uit te rekenen. Met de grootschalige snelheids-, temperatuur- en zoutvelden uit het model kan dan een schatting gemaakt worden van de effecten van kleinschaligere veranderingen in deze velden. Deze effecten kunnen zo toch worden meegenomen in het model.

## Oceaanwervels: lepels van de oceaan

Een voorbeeld van structuren die niet door alle klimaatmodellen worden weergegeven, zijn oceaanwervels (*eddies*, figuur 1): structuren met een grootte van tien tot honderd kilometer die zich horizontaal voortbewegen door de oceaan, waarin het water stroomt rond een verticale as. Oceaanwervels kunnen ontstaan als meanders van grootschalige stromingen worden afgesplitst (figuur 1). De kleinste oceaanwervels zijn kleiner dan de horizontale resolutie van de meeste klimaatmodellen. Oceaanwervels kunnen watermassa's met verschillende eigenschappen, zoals temperatuur, zout of concentratie van CO<sub>2</sub> of voedingsstoffen, door elkaar mengen. We noemen de menging van watermassa's door oceaanwervels in het vervolg 'wervelmenging'. Zonder oceaanwervels zou menging nog steeds geschieden door moleculaire diffusie, maar dit zou op zeer lange tijdschaal gebeuren; de oceaanwervels zorgen voor veel snellere menging. Denk ter vergelij-

king aan een kopje met koffie en melk: als je maar lang genoeg wacht, zal het door moleculaire diffusie mengen tot één homogeen vloeistof, maar dit gaat vele malen sneller als je er met een lepel doorheen roert. Oceaanwervels zijn dus de 'lepels' van de oceaan en spelen daarmee een belangrijke rol in het transport en de verdeling van bijvoorbeeld warmte en CO<sub>2</sub> door de oceaan, wat invloed heeft op het klimaatsysteem.

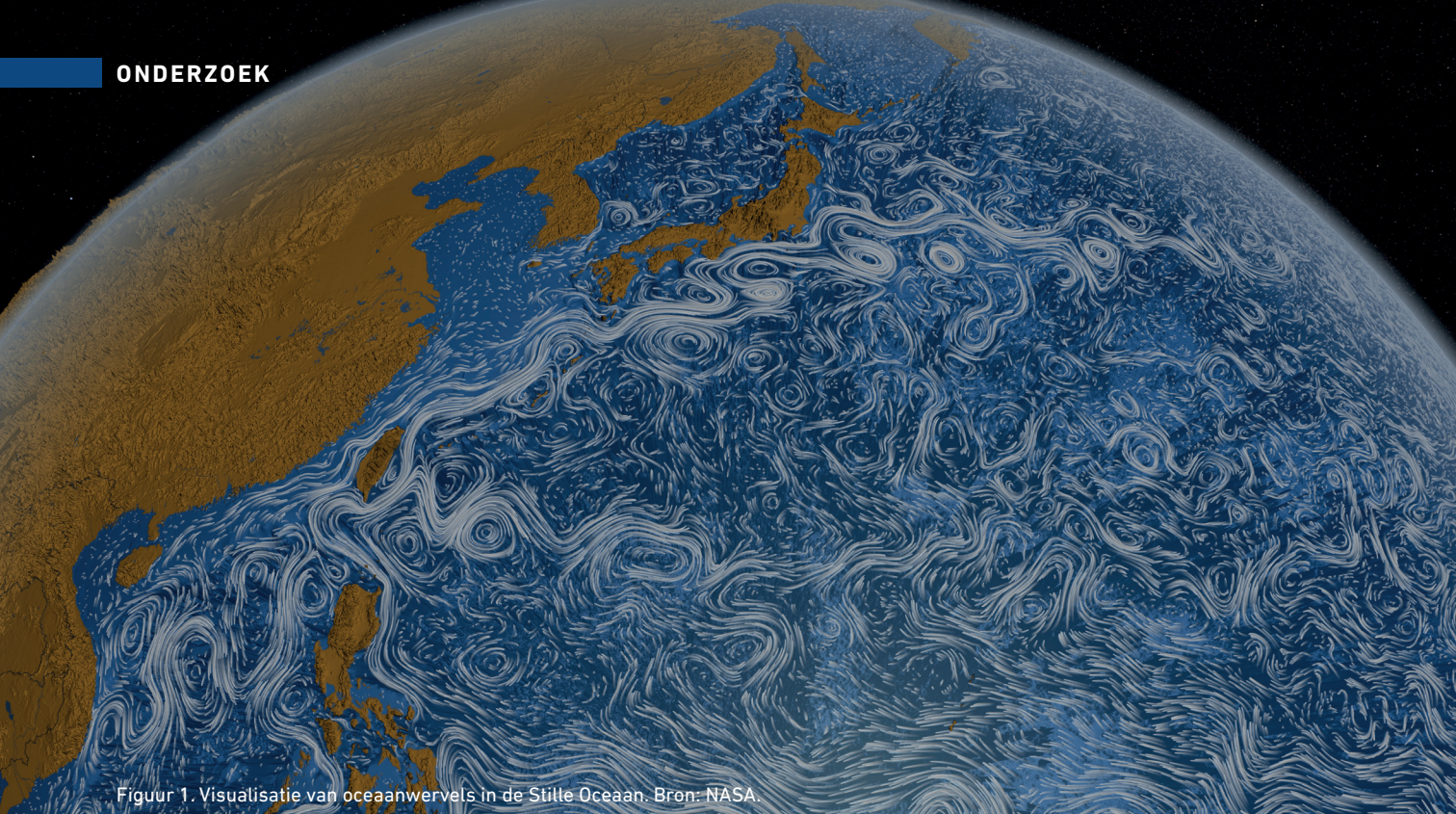
Aangezien oceaanwervels niet altijd kunnen worden weergegeven in globale klimaatmodellen, wordt de wervelmenging die ze veroorzaken vaak geparametriseerd. Een voorbeeld van hoe we die parametrisatie in de praktijk vormgeven is het begrip werveldiffusiviteit (*eddy diffusivity*), die de 'sterkte' van de wervelmenging uitdrukt. Vaak wordt de werveldiffusiviteit berekend als de verhouding van de flux van een eigenschap van een watermassa (zoals temperatuur of CO<sub>2</sub>-concentratie) en de gradiënt van die eigenschap. Wervelmenging kan zo worden geïnterpreteerd als het verplaatsen van watermassa's door wervels, zodanig dat gradiënten tussen de watermassa's kleiner worden. Het is echter zeer moeilijk om fluxen in de oceaan nauwkeurig te meten, en daarom is er nog steeds veel onzekerheid in de waarde van de werveldiffusiviteit en de variaties daarin door de oceaan. De onzekerheid in de werveldiffusiviteit heeft grote gevolgen voor de voorspellende waarde van klimaatmodellen. Zo kunnen voorspellingen van de globale temperatuur aan het einde van deze eeuw 1°C hoger of lager uitvallen, afhankelijk van de gebruikte waarde van de werveldiffusiviteit [1]; een behoorlijk verschil op wereldwijde schaal. Het is daarom van groot belang om te begrijpen waardoor werveldiffusiviteit bepaald wordt en hoe we deze kunnen afschatten.

## Sterke stromingen onderdrukken werveldiffusiviteit

Het is bekend dat de waarde van de werveldiffusiviteit beïnvloed kan worden door sterke oceaanstromingen. Dit heeft ermee te maken dat oceaanwervels met een intrinsieke snelheid voortbewegen, en niet zomaar mee-



Miriam Sterl heeft de bachelor natuur- en sterrenkunde en de master climate physics gevolgd aan de Universiteit Utrecht. Sinds 2021 werkt ze als promovenda bij het NIOZ en de UU, begeleid door Sjoerd Groeskamp (NIOZ) en Michiel Baatsen (UU). Haar werk omvat zowel theoretische en numerieke methodes als zeegaand onderzoek. [miriam.sterl@nioz.nl](mailto:miriam.sterl@nioz.nl)



Figuur 1. Visualisatie van oceaaneiwervels in de Stille Oceaan. Bron: NASA.

bewegen met oceaanstromingen. Als een oceaaneiwervel in een sterke oceaanstroming terechtkomt, zal de wervel dus een achtergrondstroming voelen. Het gevolg is dat de achtergrondstroming deeltjes of watermassa's uit de oceaaneiwervel transporteert, voordat de wervel tijd heeft gehad om de deeltjes of watermassa's goed door te mengen. Het verspreiden van deeltjes in de richting van de achtergrondstroming domineert, en de wervelmenging loodrecht op de stroming wordt onderdrukt (figuur 2a en b). We noemen dit effect in het vervolg 'wervelonderdrukking'. Wervelonderdrukking wordt vaak meegenomen in parametrisaties voor werveldiffusiviteit: de werveldiffusiviteit schaaltdan omgekeerd kwadratisch met het snelheidsverschil tussen de wervels en de achtergrondstroming [2,3].

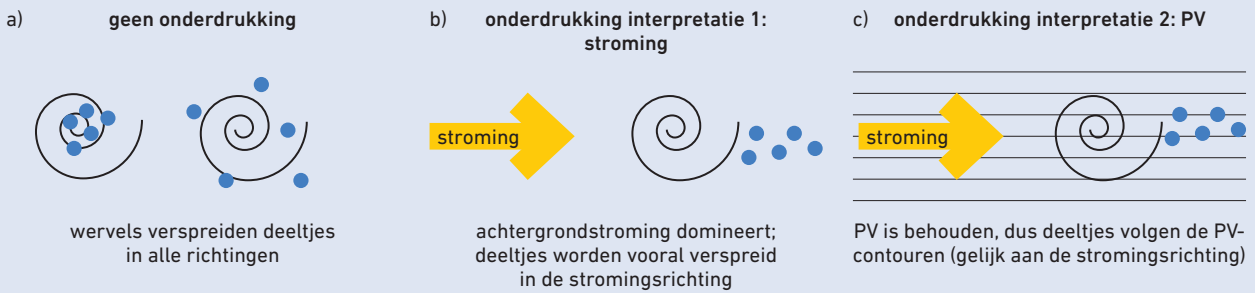
Het fenomeen wervelonderdrukking vormde de inspiratie voor ons onderzoek [4]. We zien in de oceaan namelijk vaak dat stromingen de contouren volgen van het bodemprofiel van de oceaan, ook wel de topografie genoemd. De oceaانبodem is verre van vlak en kan soms zeer steile hellingen hebben, bijvoorbeeld

op de overgangen tussen oceaan en continenten; hier kan het hellingspercentage één of meer zijn. Omdat er stromingen langs de topografie ontstaan valt het dus te verwachten dat boven topografie de werveldiffusiviteit ook onderdrukt wordt. Effecten van de topografie worden echter meestal niet meegenomen in bestaande parametrisaties. Er bestaan enkele recente studies die de invloed van topografie op werveldiffusiviteit bestuderen in een numeriek model, maar hier geen verklaring voor geven die gebaseerd is op natuurkundige wetten (bijvoorbeeld [5]). Ons doel is om een formule af te leiden die de werveldiffusiviteit uitdrukt als functie van de topografie, om zo tot vollediger theorieën over werveldiffusiviteit te komen en uiteindelijk tot betere parametrisaties voor klimaatmodellen.

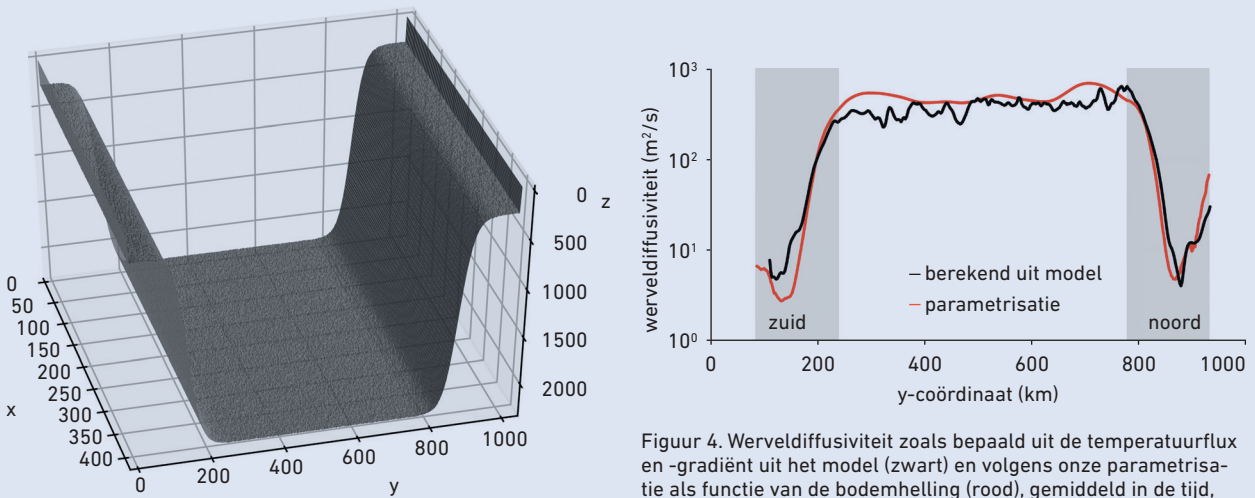
### **De verbindende factor: potentiële vortciteit**

De wervelonderdrukking door achtergrondstromingen en door topografie kunnen we met elkaar samenbrengen dankzij een behoudswet: het behoud van potentiële vortciteit (PV). PV kan worden gezien

als het oceanografische equivalent van het impulsmoment. Behoud van impulsmoment betekent dat iets sneller gaat roteren als het dichterbij de rotatie-as komt te zitten. Volgens hetzelfde principe roteert een smalle waterkolom sneller dan een brede waterkolom. Als een waterkolom in ondieper water terechtkomt, wordt hij als het ware samengeperst en dus platter en breder, waardoor hij langzamer gaat roteren. De PV wordt dus bepaald door de rotatie van een vloeistofkolom (lokale rotatie plus corioliskracht) en de waterdiepte. Behoud van PV voor vloeistoffen betekent dat oceaanstromingen in het algemeen langs contouren van constante PV bewegen. We kunnen wervelonderdrukking dus ook op een andere manier interpreteren: omdat PV wordt behouden, is het lastig voor deeltjes of watermassa's om te bewegen in de richting loodrecht op de PV-contouren, oftewel de richting loodrecht op de stromingsrichting (figuur 2c). Deze interpretatie schrijft wervelonderdrukking niet toe aan snelheidsverschillen tussen wervels en achtergrondstroming, maar aan gradiënten in de PV. Het mooie is dat we beide interpretaties



Figuur 2. Schematische weergave van de onderdrukking van wervelmenging door stroming en potentiële vorticeiteit (PV).



met elkaar kunnen verbinden. Vanuit bestaande theorie weten we dat het snelheidsverschil tussen wervels en achtergrondstroming recht evenredig is met de PV-gradiënt [3]. Dit betekent dat de werveldiffusiviteit omgekeerd kwadratisch schaal met de PV-gradiënt: sterke PV-gradiënten onderdrukken werveldiffusiviteit. De formulering van stromingsonderdrukking met PV heeft verschillende voordelen. Ten eerste geeft deze inzicht in de onderliggende mechanismen die zorgen voor de onderdrukking, namelijk variaties in de rotatie en de waterdiepte. Ten tweede is het eenvoudig om de PV-gradiënt te berekenen uit de gradiënten van de corioliskracht en van de topografie, terwijl het bepalen van de snelheid van wervels een hoop omhanden heeft [5]. Ten derde hebben we hier-

mee een theoretische formule voor de werveldiffusiviteit als functie van de topografie. De PV-gradiënt wordt mede bepaald door de gradiënt in de topografie, oftewel de bodemhelling. Er is dus een omgekeerd kwadratisch verband tussen de werveldiffusiviteit en de bodemhelling. Met andere woorden: hoe sterker de helling, hoe zwakker de werveldiffusiviteit.

### Vergelijken van theorie met modeldata

Nu we een nieuwe parametrisatie voor werveldiffusiviteit boven bodemhellingen hebben afgeleid, willen we natuurlijk testen hoe goed deze parametrisatie werkt. We doen dit met behulp van numerieke simulaties. We voeren simulaties uit met een oceaanmodel in een modeldomein dat lijkt op een kanaal,

met bodemhellingen in de y-richting (noord-zuid). Dit is geïllustreerd in figuur 3. Er wordt een constante wind in de x-richting opgelegd, die een achtergrondstroming en wervels veroorzaakt. Het model heeft een horizontale resolutie van twee kilometer en kan oceanwervels in bijna het hele domein weergeven, met uitzondering van de uiterste noorden en zuidkant, aangezien wervels in ondiep water zeer klein zijn; we laten deze ondiepe gedeeltes dus buiten beschouwing. De corioliskracht varieert niet in onze simulaties, zodat de PV-gradiënt volledig bepaald wordt door de bodemhelling. De PV-contouren zijn dus contouren van constante diepte, in dit geval lijnen in de x-richting. We zijn geïnteresseerd in de werveldiffusiviteit loodrecht op de PV-contouren, oftewel in

# Miriam Sterl wint NTvN-Prijsvraag

Dit jaar was het de 30<sup>e</sup> keer dat het NTvN een prijsvraag organiseerde voor promovendi. Promovendi en pas-gepromoveerden konden een artikel insturen over hun promotieonderzoek, zo geschreven dat het voor de alle lezers van het NTvN begrijpelijk is. Dit promotieonderzoek mag zowel natuurkundig zijn als natuurkundegereleerd. Een jury bestaande uit enkele redactieleden van het NTvN las alle artikelen en bepaalde wie de winnaars zijn. Deze winnaars worden tijdens FYSICA 2024 op 12 april in Eindhoven in het zonnetje gezet. Als prijs ontvangen ze een geldbedrag en hun artikelen worden geplaatst in dit nummer van het NTvN en op de NTvN-website. Twee prijzen werden dit jaar toegekend. Op de tweede plaats is de inzending van Pieter Gunnink

geëindigd (UU, 2023). Hij beschrijft in *Op weg naar een energiezuinige spingolf-computer* hoe vooralsnog theoretisch topologische spingolven in magnetische materialen zouden kunnen worden gegenereerd en gemanipuleerd, met in de heel verre toekomst mogelijk toepassingen in energiezuinige computers waarbij bijvoorbeeld de structuur van de spingolven de informatie bevat.

De winnaar van dit jaar is Miriam Sterl, die nog bezig is met haar onderzoek bij de UU en het NIOZ. In *Mengprocessen in de oceaan: tot op de bodem uitgezocht* beschrijft zij haar onderzoek naar rekenkundig 'lichte' methoden om bestaande klimaatmodellen – die op basis van berekeningen op grote lengteschalen voorspellingen over het toekomstige klimaat doen – uit

te breiden met processen die op veel kleinere schaal spelen door middel van parametrisering van die processen. In haar geval betreft dat de zeebodemvormafhankelijke menging van zeewater door wervels.

De jury vond de onderwerpen van de winnaars erg interessant, één gericht op een wat verdere toekomst, de ander heel actueel en praktisch. De winnaar onderscheidde zich in het toegankelijk maken van haar onderzoek en het beschrijven van haar bijdrage daarin voor de meestal niet-domeinexperts in de brede lezersgroep van het NTvN.

## De jury,

Tom Beumer, Hans Muller,  
Klaas Schonenberg en Carlijn Veldhuis

de y-richting. Omdat het model een voldoende hoge resolutie heeft om wervels en fluxen weer te geven, is de werveldiffusiviteit direct uit de modeldata te berekenen als de verhouding van de temperatuurflux en de temperatuurgradiënt. Deze waarde kunnen we gebruiken om onze parametrisatie voor de werveldiffusiviteit mee te vergelijken. De ingrediënten voor onze parametrisatie zijn de bodemhelling en de kinetische energie van de wervels; de kinetische energie halen we uit het model. De resultaten zijn te zien in figuur 4. De werveldiffusiviteit boven de vlakke bodem in het midden van het domein heeft een waarde in de orde van  $10^2 \text{ m}^2/\text{s}$ , voor zowel de modelberekening als onze parametrisatie. Boven de hellingen is een sterke afname in de werveldiffusiviteit te zien: de werveldiffusiviteit is hier een factor honderd kleiner dan boven de vlakke bodem, zowel aan de zuidkant als aan de noordkant.

De wervelonderdrukking door topografie die we theoretisch hebben beschreven, is dus inderdaad terug te zien in simulaties. Bovendien zien we dat onze parametrisatie goed overeenkomt met de direct uit het model berekende werveldiffusiviteit. Dit geeft vertrouwen in de toepasbaarheid van onze parametrisatie voor klimaatmodellen.

## En nu?

Er zijn nog voldoende zaken die nader onderzocht moeten worden. Een voorbeeld is dat we hier alleen hebben gekeken naar dieptege-middelde waarden van de werveldiffusiviteit, maar niet naar de diepte-afhankelijkheid. Heeft de bodemhelling een onderdrukkend effect in de hele waterkolom, of is dit effect afhankelijk van de afstand tot de bodem? In het volgende deel van ons onderzoek proberen we deze vraag te beantwoorden. Desondanks hebben we hier laten zien dat onze

parametrisatie als functie van de PV-gradiënt een goede representatie geeft van de werveldiffusiviteit boven topografie. Dit resultaat is een stap in de goede richting om de effecten van oceaanwervels beter te representeren in klimaatmodellen, en zo uiteindelijk nauwkeurigere voorspellingen te krijgen van het klimaat in de toekomst.

## REFERENTIES

- 1 M.-A. Pradal en A. Gnanadesikan, How does the Redi parameter for mesoscale mixing impact global climate in an Earth System Model? *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 6 (3), 586-601 (2014).
- 2 R. Ferrari en M. Nikurashin, Suppression of eddy diffusivity across jets in the Southern Ocean, *Journal of Physical Oceanography* 40 (7), 1501-1519 (2010).
- 3 A. Klockner et al., Estimating suppression of eddy mixing by mean flows, *Journal of Physical Oceanography* 42 (9), 1566-1576 (2012).
- 4 M.F. Sterl et al., Suppression of mesoscale eddy mixing by topographic PV gradients, *Journal of Physical Oceanography*, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-23-0142.1>
- 5 H. Wei en Y. Wang, Full-Depth Scalings for Isopycnal Eddy Mixing Across Continental Slopes Under Upwelling-Favorable Winds, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 13 (6), 1-40 (2021).