

TURBULENTIE IN DE DIEPE MIDDELLANDSE ZEE



Leven in de diepzee vergt turbulente menging van zeewater voor aanvoer van voedingsstoffen. Door de lastige omstandigheden van hoge druk en zoute omgeving zijn metingen van turbulentie in de diepzee en dus inzicht in de relevante turbulente processen schaars. Recente precisieingen van de temperatuur van het water op grote diepte, met variaties van slechts tienduizendsten van graden, laten zien dat het water in de diepe Middellandse Zee bepaald niet stagnant is.

De Middellandse Zee kan beschouwd worden als een groot laboratorium, ook voor natuurkundigen. In haar diepe wateren bouwen astrofysici een neutrino telescoop ter grootte van een kubieke kilometer voor de studie van ver weg gelegen sterrenstelsels [1]. Hydrodynamici bestuderen er turbulente geofysische stromingen met hoge Reynoldsgetallen (tussen 10^4 en 10^7) die elders lastig te vinden zijn. Oceanografen zien de Middellandse Zee als een proeftuin voor de grotere oceanen op gebieden van klimaatonderzoek [2] en transport van materiaal, omdat nagenoeg alle relevante vloeistofdynamische en bio-geochemische processen er voorkomen. Waar de waterdiepte in de Middellandse Zee met gemiddeld 1500 m vergelijkbaar is met de 3700 m in de open oceaan, is de invloed van op afstand passerende atmosferische stormen en dus de vorming van deining er geringer, zodat het werk vanaf schepen iets eenvoudiger is. Bovendien is de kust relatief dichtbij, zodat grote hoeveelheden data van in zee geplaatste instrumenten naar computers aan land gestuurd kunnen worden via optische-vezelkabels. Door de nabijheid van de kust komen processen voor waarin specifieke hydrodynamische turbulentie wordt gegenereerd die ook van belang is voor het leven in de diepzee.

Wind brengt water in beweging waarbij in samenhang met de draaiing van de aarde, 'interne golven' onder het wateroppervlak worden opgewekt die tot in de diepzee kunnen doordringen [3]. Interne golven kunnen amplituden van meer dan 100 m bereiken en zijn als ze breken een belangrijke bron van turbulentie in de diepzee. Dit gebeurt vaak via golfvorming door schering van verschillende stromingen boven elkaar. Een andere mogelijke bron van turbulentie is natuurlijke convectie, die optreedt wanneer kouder boven warmer (dus minder dicht)

water wordt geschoven en relatief dunne wervels naast elkaar ontstaan van omlaag en omhoog gaand water. Buiten de polaire zeegebieden is de Middellandse Zee een van de weinige plekken waar dit convectieproces op grote diepte voorkomt, aangedreven door nagenoeg verticale interne golven die het hele jaar optreden of door bergwinden over het zeeoppervlak in de late winter (zie kader *Fysisch-oceanografische processen in de Middellandse Zee*). Convectie levert aanvoer van verse voedingsstoffen voor het diepzeeleven. Metingen van temperatuur, zoutgehalte, stroming en druk aan dit soort processen zijn zeldzaam en zijn enkel mogelijk met instrumenten met hoge precisie, zoals ik in dit artikel zal laten zien voor temperatuurmetingen.

Meten van thermische turbulentie in de diepe Middellandse Zee

Op het NIOZ (Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee) zijn de afgelopen tien jaar gevoelige thermometers ontwikkeld om onder statische drukken tot 1100 atmosfeer (zoals bereikt op de bodem van Challenger Deep in de Marianentrog in de Stille Oceaan) turbulente watertemperatuurvariaties te meten met een precisie beter dan 0,5 mK, een ruisniveau van minder dan 0,1 mK en een resolutie van 0,005 mK (zie verder kader *Detail temperatuurmeting*). Het corrosieve zeewater wordt weggehouden van de micro-elektronica met behulp van glasbuisjes, titanium behuizingen en rubberen O-ring-afdichting. Een honderdtal temperatuursensoren worden in zee geplaatst aan een verticale kabel gespannen tussen een onderwaterboei en een ankergewicht op de bodem. In deze verankering op vaste positie meten de sensoren de temperatuur van het langsstromend water iedere twee seconden gedurende vele maanden, terwijl om de vier uur hun klokken worden



Hans van Haren is senior fysisch oceanografisch onderzoeker aan het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ) op Texel. Zijn hoofdonderwerpen zijn getijbeweging, interne golven en turbulente uitwisseling in zee via metingen met behulp van specifiek ontworpen instrumentatie.
Hans.van.Haren@nioz.nl

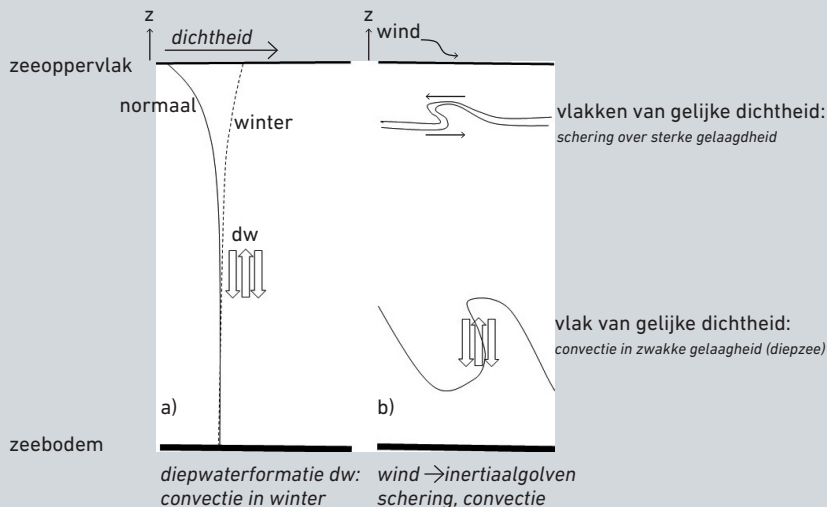
FYSISCH-OCEANOGRAPHISCHE PROCESSEN IN DE MIDDELLANDSE ZEE

De nabijheid van de kust zorgt voor een snelle respons van stromingsaandrijving in de Middellandse Zee door winden zoals de Meltemi (Griekenland), Tramontane (Pyreneeën), Mistral (Alpen), Sirocco (Sahara) die 'aan' of 'uit' staan. De respons in zee op het 'aanslaan' van de wind is de aandrijving van inertiaalgolven, die worden gekenmerkt door een voornamelijk horizontale beweging die steeds verticaler wordt naarmate dichtheidsverschillen van het water kleiner worden [5]. De golven worden gegenereerd via de corioliskracht die loodrecht staat op de richting van de waterstroming als gevolg van de draaiing van de aarde. Bij gebrek aan getijden in de Middellandse Zee is dit proces de belangrijkste bron van onderwatergolven (interne golven) die zich kunnen voortplanten naar het binnenste van een zee. Inertiaalgolven zijn de laagstfrequente lopende interne golven.

Door zonne-instraling aan het oppervlak van een waterbekken blijft het minder dichte warme water stabiel gelaagd boven op het diepere koude water. Aangezien moleculaire diffusie van warmte een langzaam uitwisselingsproces is, is voor deze omgeving met een hoog Reynoldsgetal turbulente diffusie nagenoeg overal in zee dominant. Twee processen worden onderscheiden [6], zoals te zien in figuur 1. Ten eerste (figuur 1a) kan turbulentie in het water ontstaan uit natuurlijke (vrije) 'convectie' door afkoeling (levert koud water dat dichter is dan warm water) en verdamping (levert zout water dat dichter is dan zoet water) aan het oppervlak. Dichter boven minder dicht water brengt namelijk verticale beweging op gang onder zwaartekracht. Dit turbulentieproces vindt vooral 's nachts plaats met uitwisseling in tientallen meters smalle wervels tot zo'n 50 m diepte. Natuurlijke convectie laat zich makkelijk zien in een koekenpan met olie die van onderaf wordt verhit. Men ziet kolomstructuren van alternerende omhooggaande beweging

door de zwaartekracht gedreven, en omlaaggaande beweging ter compensatie. De kolomstructuren worden onregelmatig door schering en convectie op kleinere schalen. Onder schering van stromingen verstaan we de wrijving tussen verticale verschillen van horizontale stroming. Er zijn slechts weinig zeelocaties waar diepere convectie dan 50 m van het oppervlak plaatsvindt, met grotere wervels. Alleen aan het eind van de winter nabij de polen (koud) en in de Middellandse Zee (zout) vindt convectie plaats tot diepten van meer dan 2000 m. In de Middellandse Zee gebeurt dit met name in het Liguro-Provencal-bekken ten zuiden van Frankrijk onder invloed van de Mistral en de Tramontane. Er is niet eerder onderzocht of nagenoeg verticale interne golven convectie kunnen gegenereën. Ten tweede (figuur 1b) wordt de stabiele gelaagdheid van het water gedestabiliseerd door het oprollen van vlakken van gelijke dichtheid ten gevolge van turbulentie door schering van stromingen, die (hier) gegenereerd wordt door inertiaalgolven. Deze vorm van turbulentie-opwekking komt veel voor waar oceanen voldoende stabiel gelaagd zijn en de stroming meest horizontaal is.

De nabijheid van de kust en vooral steile continentale hellingen drijven ook stromingen aan die vergelijkbaar zijn met de Golfstroom en Kuroshio, wind- en dichtheidsgedreven stromingen die worden versterkt door natuurlijke convectie aan het eind van de winter [7] en die belangrijk zijn voor het transport van gesuspendeerde (voedings)stoffen. De (in)stabiliteit van deze grenslaagstromingen en bijbehorende meanderingen van tientallen kilometers doorsnee draagt onder andere bij aan relatief snel (binnen een dag) werveldynamisch transport van vers biologisch materiaal vanaf het oppervlak tot op de zeebodem [8] en zorgt daarnaast ook voor horizontale verplaatsing.



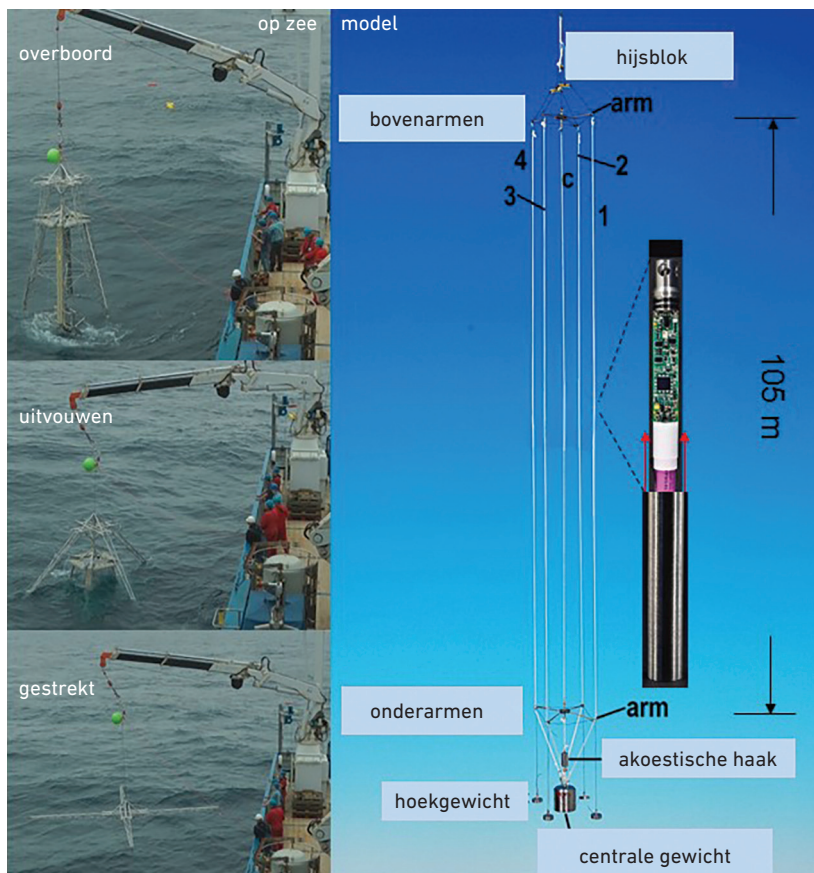
Figuur 1. Schets van enkele hydrodynamische processen in de Middellandse Zee nabij een bergachtige kust, bijvoorbeeld nabij Zuid-Frankrijk [1]. Zonneinstraling zorgt normaal voor opwarming nabij het oppervlak en stabiele dichtheidsgradiënt (curve in volle lijn van het zeeoppervlak naar de zeebodem). Aan het eind van de winter zorgt koude droge wind voor een instabiele verticale dichtheid (curve in streepjeslijn van oppervlak naar bodem) door afkoeling en verzilting nabij het oppervlak, zodat de waterlaag aan het oppervlak een hogere dichtheid krijgt dan dieper gelegen water. Dit leidt tot diepe dichtwaterformatie (dw) door natuurlijke convectie in wervels met op- en neergaande onregelmatige bewegingen – schematisch weergegeven met pijlen [2]. Plotselinge windverandering leidt tot opstuwing van water en, door aardrotatie, tot horizontale deeltjesbeweging van inertiaalgolven. Inertiaalschering vervormt interne vlakken van gelijke dichtheid door verticale stromingsverschillen (tegengestelde pijlen). De deeltjesbeweging van inertiaalgolven wordt verticaler op grotere diepten waar verticale dichtheidsgradiënten (gelaagdheid) klein zijn. Dit levert interne golfamplituden >100 m en mogelijk convectie. De horizontale as stelt een ruimtelijke coördinaat voor.

gesynchroniseerd. De sensoren zitten op een afstand van ongeveer een meter van elkaar op de verticale kabel. Deze afstand werkt niet voor de kleinste turbulente wervels (want die zijn honderd tot duizend maal kleiner), maar wel voor de turbulente wervels van zo'n vijf tot tien meter (waar de meest energetische turbulentie optreedt in gelaagde zeeën) en gedeeltelijk voor de meer dan honderd meter grote wervel- en interne golfschalen. In tijd variëren turbulentie en interne golfperiodes van minuten tot uren.

De metingen leveren diepte en tijd, oftewel (z, t) -informatie. Echter, veel waterbeweging is ruimtelijk twee- of driedimensionaal, terwijl 3D-verankeringen schaars zijn in de oceanografie. Daarom is recent op het NIOZ een methode ontwikkeld om een kleine opvouwbare 3D-verankering bestaande uit vijf parallelle lijnen van 105 m lang, op horizontale afstanden van 4 m (en 5,6 m) van elkaar, met in totaal 550 temperatuursensoren in zee te plaatsen (figuur 2). De 3D-verankering van NIOZ is tussen november 2017 en september 2018 geplaatst op een vlakke bodem in 2480 m diep water, 30 km uit de kust van Toulon (Zuid-Frankrijk) op de locatie van een neutrino telescoop [4]. De 3D-verankering moest aantonen dat de techniek werkt en temperatuurgegevens van voldoende kwaliteit levert voor de studie van interne golven in de diepzee, voordat een grootschalige 3D-verankering ontwikkeld wordt. De locatie vormt een ultieme uitdaging voor de meettechniek, omdat bijna alle relevante temperatuurvariaties in het water kleiner zijn dan 1 mK, zoals onderstaande twee voorbeelden van turbulente convectieve waterbeweging laten zien.

Plotselinge opwarming van boven

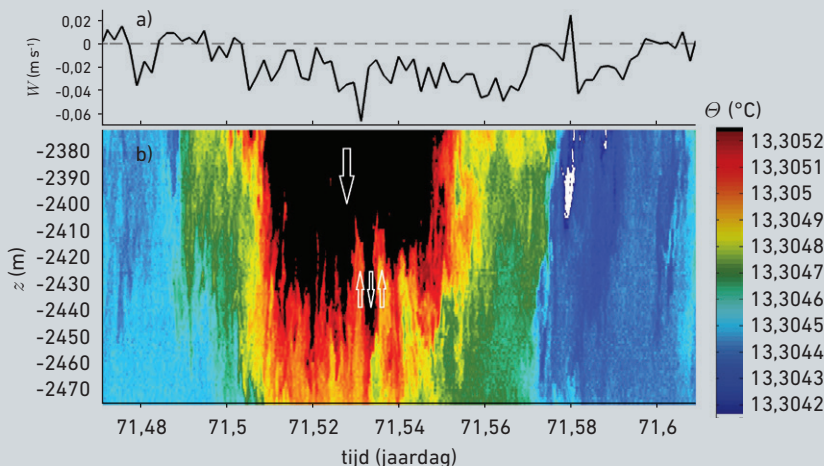
Aan het eind van de winter, als het wateroppervlak maximaal is afgekoeld, nemen turbulente processen in de diepe Middellandse Zee toe die verder door het jaar heen voornamelijk door inertiaalgolven worden aangedreven (zie kader Fysisch-oceanografische processen in de Middellandse Zee). De turbulente



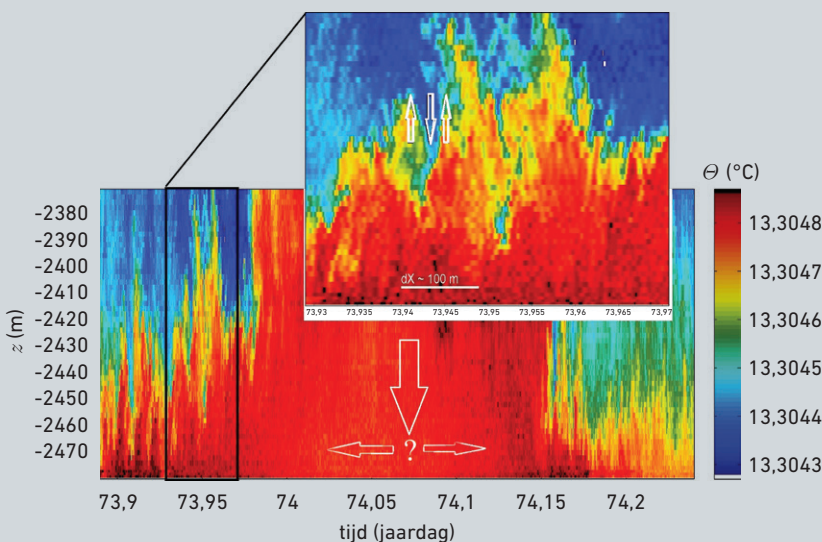
Figuur 2. Driedimensionale en opvouwbare vijflijnenverankering waaraan 550 temperatuursensoren bevestigd kunnen worden. Het model is op schaal, met lijnen van 105 m lang waarvan de vier hoeklijnen zich op 4 m afstand van de centrale lijn bevinden. De temperatuursensor (niet op schaal) is 0,18 m lang met een 0,001 m groot meetpunt.

DETAIL TEMPERATUURMETING

Een ruisniveau van minder dan 0,1 mK in water wordt gerealiseerd met behulp van twee NTC-weerstanden (negatieve temperatuurcoëfficiënt) in een dunwandig glazen buisje en elektrisch opgenomen in een 8 MHz Wienbrug RC-oscillator. Een verandering van temperatuur levert een verandering in de weerstanden. De responstijd van de sensoren is ongeveer 0,5 s en de typische meetfrequentie 0,5 Hz, hetgeen een factor honderd tot tienduizend sneller is dan interne golfperiodes en voldoende om alle energieke turbulente schalen te meten. In een thermos-tatisch bad worden de sensoren geijkt tegen een platina thermometer met een nauwkeurigheid van 0,1 mK. Echter, de elektronische drift van de NTC-schakeling is circa 1 mK per maand. De metingen worden achteraf gecorrigeerd voor drift in relatieve zin. Dit gebeurt door een gladde polynoomfit op een verticaal profiel van meetwaarden gemiddeld over een korte termijn (een tot vier dagen). De middelingstermijn is altijd langer dan de grootste turbulente wervelschaal zodat de verticale profielen statisch stabiel (moeten) zijn. Om de geringe temperatuurvariaties (<1 mK) zichtbaar te maken die turbulente processen beschrijven, worden de meetwaarden omgerekend naar 'potentiële temperatuur' θ , waarmee gecorrigeerd wordt voor drukcompressibiliteit die circa 0,1 mK per meter diepte bedraagt.



Figuur 3. Ruim drie uur van waarnemingen tijdens wervelpassage van warm water aan het eind van de winter. a) Tijdreeks (tijd uitgezet op de horizontale as) van verticale snelheid (w , uitgezet op de verticale as) gemeten op diepte $z = -2310$ m. b) Gecorrigeerde potentiële temperatuur θ , uitgedrukt in een kleurschaal (rechts), als functie van tijd (horizontale as) en diepte onder het wateroppervlak (verticale as), gemeten door de 101 temperatuursensoren op de centrale lijn van de 3D-verankering. De zeebodem is op de horizontale as, de onderste sensor is op 5 m boven de bodem voor deze lijn. De pijlen, die de verticale snelheid van het water weergeven (zie deel (a) van de figuur), zijn slechts richtingsindicatoren zonder kwantitatieve waarde.



Figuur 4. Zoals figuur 3b inclusief de horizontale as op de zeebodem, maar voor circa 8,5 uur metingen ruim twee dagen later. Hoeklijn-1-temperatuurmetingen zijn weergegeven die tot op 0,5 m van de zeebodem reiken (figuur 2). Detail met horizontale lengtemarkering 'dX' geschat uit de snelheid waarmee de wervelstructuren de verankering passeren.

variaties passeren de meetinstrumenten plotseling en hebben een verticale uitgebreidheid van 100 m of meer. Dit wordt in het diepte-tijddiagram van figuur 3b geïllustreerd, waar we een variatie van ruim +1 mK zien passeren in circa twee uur. De structuurkern van >0,5 mK boven de omgevings-temperatuur (passerend tussen dag

71,505 en 71,555) heeft een geschatte horizontale lengte van 700 m, uitgaand van een gemiddelde horizontale passagesnelheid van 0,16 m/s. De snelheid wordt bepaald uit de aankomsttijden van structuren op de verschillende lijnen van de verankering. De passage in figuur 3b kan worden geassocieerd met een neerwaartse stroming met een

gemiddelde snelheid van 0,03 m/s (figuur 3a); als we veronderstellen dat de snelheid van de neerwaartse stroming over de hele waterdiepte uniform is, betekent dit dat deze temperatuurvariatie, die ontstaan is aan het wateroppervlak, in één dag de bodem op een diepte van 2480 m bereikt. Overal in het relatief warmere water worden

meerdere dunne (~30 m doorsnee) rafelige kolommen waargenomen – enkele tientallen meters hoog – van iets warmer (bewegend van bovenaf) en kouder (bewegend van onderaf) water. Dit lijkt typische convectie, maar wordt niet door temperatuur-instabiliteit gedreven omdat warm water zich boven koud water bevindt en de gelaagdheid dus stabiel is. Twee interpretaties zijn mogelijk, maar niet van elkaar te onderscheiden. Het zou kunnen dat het relatief warmere water ook relatief zouter is. Het geheel wordt dan toch statisch instabiel door een grotere bijdrage van zout aan de dichtheidsvariaties en er kan natuurlijke convectie ontstaan. Het zou anderzijds ook kunnen dat nagenoeg verticale interne golven overslaan en instabiliteit genereren door middel van gedwongen convectie.

Plotselinge opwarming van beneden

Enkele dagen later passeert een grote kolom van nagenoeg homogeen water, met minder dan 0,1 mK variatie over 100 m, op dag 74,05 van de metingen (figuur 4). Dit water is relatief warm ten opzichte van de omgeving en lijkt zich te hebben verspreid over de zeebodem rond de kolom. Indien zoutvariaties hier niet bijdragen aan de dichtheidsvariaties zou dit een observatie van natuurlijke convectie kunnen zijn, onder de hypothese dat na groot-schalige homogenisatie relatief warm water naar beneden wordt gepompt. Het is nog onduidelijk of geothermie hier ook een rol in speelt, waarbij de opwarming van het water van onderaf door de aardkorst vanuit de aardkern plaatsvindt en natuurlijke turbulente convectie kan worden gegenereerd. Het is dan wel vreemd dat deze opwarming slechts sporadisch lokaal in de tijd gemeten wordt, waar een continue geothermische verwarming verwacht wordt. Overigens kan deze alleen opgemerkt worden indien de temperatuur in het bovenstaande water homogeen is: een zeldzaamheid. Evident in figuur 4 zijn de smalle convectieve rafelige kolommen, nu van onderaf alsof de zeebodem in brand staat: een schoolvoorbeeld van natuurlijke

“De precieze temperatuurmetingen met de 3D-verankering laten zien dat de Middellandse Zee op grote diepten diverse hydrodynamische processen herbergt die tot nu toe amper zijn waargenomen.”

convectie. Zie ook de uitvergroting die kleinere structuren boven op de grote structuren laat zien.

Voortgang

De precieze temperatuurmetingen met de 3D-verankering laten zien dat de Middellandse Zee op grote diepten diverse hydrodynamische processen herbergt die tot nu toe amper zijn waargenomen. Sterke natuurlijke en gedwongen convectie, naast stroomscherping, kunnen alleen worden waargenomen met gevoelige specialistische apparatuur. De vijflijnen-3D-verankering met in totaal 550 temperatuursensoren laat de richting van wervelstructuurpassages zien (naast statistische informatie over twee- en driedimensionale turbulentie, is hier niet vermeld). Hiermee is aangetoond dat de techniek van 3D-verankering met temperatuursensoren werkt. De verankering is echter te klein om diepte-turbulentie op alle schalen op te lossen. Op het NIOZ wordt nu gewerkt aan een grotere unieke 3D-verankering met 45 lijnen en 3000 temperatuursensoren die ongeveer een kubieke hectometer water gaat vullen om preciezer inzicht in de ontwikkeling van diepte-turbulentie te krijgen. Met deze opstelling, die in een spectaculaire zee-operatie te water zal worden gelaten, kan de gehele overgang van grote naar kleine energieke turbulenties bestudeerd worden. Hiermee hopen we niet alleen

een beter begrip te krijgen van het turbulente transport van stoffen in de diepzee, maar ook meer algemeen van de onderliggende hydrodynamica.

Dankwoord

Ik dank met name Martin Laan en Louis Gostiaux voor de plezierige samenwerking tijdens de ontwikkeling van NIOZ-temperatuursensoren met hoge resolutie. Johan van Heerwaarden, Roel Bakker en Yvo Witte hebben diverse mechanische verankeringsstructuren ontwikkeld en gebouwd. De meetinstrumenten zijn deels gefinancierd door investeringsbudgetten van NWO.

REFERENTIES

- 1 S. Adrián-Martínez et al., *KM3MeT 2.0 Letter of intent for ARCA and ORCA*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **43**, 084001 (2016).
- 2 C. Garrett, *The Mediterranean Sea as a climate test basin*, in: P. Malanotte-Rizzoli en A. R. Robinson (eds.), *Ocean Processes in Climate Dynamics: Global and Mediterranean examples*, Kluwer, 227-237 (1994).
- 3 P.H. LeBlond en L.A. Mysak, *Waves in the Ocean*, Elsevier (1978).
- 4 Voor een video van de tewaterlating zie: www.youtube.com/watch?v=PYrK1XLbrgo&t=93s.
- 5 H. van Haren en C. Millot, *Rectilinear and circular inertial motions in the Western Mediterranean Sea*, *Deep-Sea Res.* **1** **51**, 1441-1455 (2004).
- 6 H. Tennekes en J.L. Lumley, *A first course in Turbulence*, MIT Press (1972).
- 7 M. Crépon, M. Boukhtir, B. Barnier en F. Aikman III, *Horizontal ocean circulation forced by deep-water formation. I: an analytical study*, J. Phys. Oceanogr. **19**, 1781-1792 (1989).
- 8 H. van Haren et al., *Acoustic and optical variations during rapid downward motion episodes in the deep north-western Mediterranean Sea*, *Deep-Sea Res.* **1** **58**, 875-884 (2011).