

Mengen van schalen

Citation for published version (APA):

Clercx, H. J. H. (2007). *Mengen van schalen: over kleinschalige menging en grote gevolgen*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2007

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

TU/e

technische universiteit eindhoven

Intreerede
14 december 2007

prof.dr. Herman Clercx



mengen van schalen over kleinschalige menging en grote gevolgen

/ faculteit technische natuurkunde

Intreerede

Uitgesproken op 14 december 2007
aan de Technische Universiteit Eindhoven

mengen van schalen over kleinschalige menging en grote gevolgen

prof.dr. Herman Clercx



Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,

De kernactiviteiten van de universiteit zijn onderwijs en onderzoek. Het is dan ook een goede gewoonte bij het uitspreken van de intrede het publiek zowel kennis te laten nemen van het onderzoeksveld waarin de orator actief is, als van een zekere visie op onderwijs aan de universiteit. Mijn visie op onderwijs ga ik echter achterwege laten. De Rector heeft tijdens zijn rede bij de opening van dit academische jaar het ‘rode onderwijsboekje’ van de TU/e opengedaan en de hoofdlijnen van de TU/e onderwijsvisie uiteengezet. Daarbij stelde de Rector streng, een zekere traditie volgend, dat wij het ‘rode onderwijsboekje’ uit ons hoofd moeten leren en dat we er ons allemaal aan zullen moeten houden. Ik kan mij heel goed vinden in de TU/e onderwijsvisie. In het bijzonder het idee van actief participeren van studenten en wetenschappers in de lerende gemeenschap, waar onderwijs en onderzoek verweven zijn en onderwijs op maat een centraal thema is, spreekt mij aan. Ik vind dat ik daar vandaag dan ook niets aan hoeft toe te voegen, op één opmerking na. Zoals ik de TU/e onderwijsvisie interpreteer ligt de nadruk op ontplooiing van de student, het grijpen van kansen en bovendien wordt een zelfstandige en ondernemende houding van de student gestimuleerd. In dit licht is de impliciete verwijzing naar het andere ‘rode boekje’ wellicht wat minder op zijn plaats.

Ik wil u vandaag kennis laten maken met het onderzoeksveld waarin ik actief ben: transport in turbulente stromingen en in het bijzonder de kleinschalige mengingseigenschappen van deze stromingen. Ik zal in het eerste deel van deze rede aan de hand van satellietopnamen grootschalige verspreidingsprocessen van stoffen in de atmosfeer en de oceaan toelichten. Goede voorspelling van verspreiding van stoffen in water en lucht is belangrijk voor mens en economie. Echter, goede voorspellingen vereisen multidisciplinair fundamenteel onderzoek. Voorspellingsalgoritmen vereisen daarnaast het naadloos op elkaar aansluiten van twee strategieën. De eerste strategie betreft de combinatie van satellietwaarnemingen, data van observatiestations en computermodellen met lokale verfijningen van het rekenrooster. Het is gericht op geofysische verschijnselen die

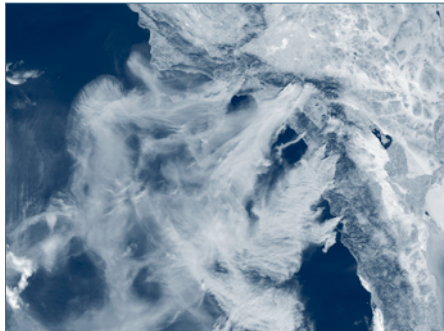
plaatsvinden op schalen die groter zijn dan grofweg 10 km. Data-assimilatie en ijking spelen hierbij een belangrijke rol. Hiermee worden wij voorzien van informatie op globaal en regionaal niveau die de randvoorwaarden vastleggen voor voorspelling van processen die plaatsvinden op wat ik de menselijke schaal zal willen noemen, zeg de schaal van 1 m tot 10 km. Deze strategie zal ik de ‘van-groot-naar-klein’ benadering noemen. Daarnaast staat de tweede strategie, de ‘van-klein-naar-groot’ aanpak. In jargon samen te vatten met het woord ‘sluiting’, ofwel hoe kunnen de effecten van chemische, fysische en biologische processen, die vaak plaatsvinden op schalen kleiner dan 1 cm, op een verantwoorde wijze gemodelleerd worden om daarna opgeschaald toegepast te worden in bovengenoemde rekenmodellen. Dat sluitingsproces kan alleen succesvol plaatsvinden met behulp van gegevens uit fundamentele theorie, fijnmazige rekenmodellen en laboratoriumexperimenten gericht op het begrip van de diverse kleinschalige processen. De maatschappelijke, economische en technische toegevoegde waarde wordt verkregen door integratie van de verkregen multischaalmodellen in computeralgoritmes voor voorspellingsdoeleinden op lokaal niveau. Dit is dan ook het raamwerk van waaruit ik kijk naar fundamentele aspecten van kleinschalige menging en turbulent transport van deeltjes. Op een aantal aspecten daarvan zal ik in het tweede deel van deze rede ingaan.

Mengen bekeken vanuit de ruimte

Twee maanden geleden kwam het Nederlands ruimteonderzoeksinstituut SRON met een persbericht: “De uitstoot en verspreiding van vervuilende stoffen en broeikasgassen in de atmosfeer is nu door iedereen te volgen met Google Earth. SRON en het KNMI stellen de satellietbeelden van de ruimte-instrumenten SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY) en het Ozone Monitoring Instrument OMI beschikbaar via internet.” Satellietbeelden van de aarde spreken altijd al tot de verbeelding en het wordt allemaal nog veel leuker met Google Earth. Althans, bij mij is dat zo en ik denk dat velen een gezonde vorm van nieuwsgierigheid bezitten om met plezier naar deze beelden te kijken. Dat zal zeker zo zijn als het ook nog bewegende beelden gaan worden, zoals de verwachting van SRON is.

Het meest bekend zijn we met satellietbeelden die soms getoond en toegelicht worden door de weerman op de televisie. Satellietbeelden worden door de media ook gebruikt om de omvang van een calamiteit, zoals enorme bosbranden, te illustreren. Een satellietopname van de verspreiding van rook als gevolg van bosbranden in Californië en het noorden

Transport van aerosolen in de atmosfeer als gevolg van bosbranden in Californië, oktober 2003. Bron: Jacques Desclôitres, MODIS Rapid Response Team at NASA GSFC.



figuur 1

van Mexico wordt getoond in figuur 1. Het is een mooie illustratie van het transport van aërosolen als gevolg van heersende luchtstromingen. Deze aërosolen zijn bovendien minuscule kleine deeltjes en blijven daardoor een lange tijd zweven in de atmosfeer.

Andere opnamen betreffen de fytoplankton- of algenconcentraties in oceanen en zeeën. Algen zijn plantaardige, eencellige organismen en bevatten pigment (chlorofyl) waardoor ze het zonlicht kunnen absorberen. Daardoor is observatie van algenconcentraties vanuit de ruimte mogelijk. Algen zijn microscopisch klein, een typische doorsnede is 1-10 micron, maar kleinere en grotere varianten komen ook voor. Ze staan aan de basis van de voedselketen in zee. Ze brengen (een deel van) hun leven vrij zwevend in het water door en kunnen zelfstandig leven, maar kunnen ook groepen van samengeklonterde deeltjes of grote kolonies vormen.

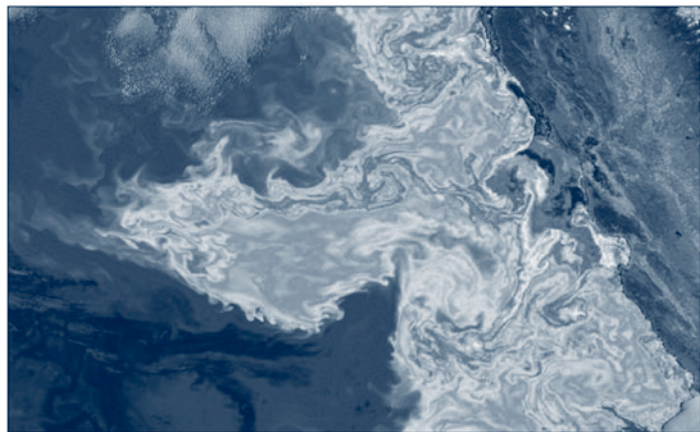
Algen doen in de zee wat planten op het vasteland doen: ze zetten, met zonlicht als energiebron, anorganische stoffen zoals kooldioxide en water om in organische, een proces dat primaire productie wordt genoemd. Het benodigde licht is alleen voldoende aanwezig in de bovenste waterlaag zodat de algen zich bij voorkeur daar ophouden. In de winter is er weinig licht en door het ruwe weer zullen de bovenste waterlagen goed doorgemengd zijn waardoor na de winter voldoende nieuwe voedingsstoffen aanwezig zullen zijn. Deze voedingsstoffen zijn mineralen, vooral stikstof, fosfor en, voor sommige algengroepen belangrijk, ook silicium.

Gedurende het voorjaar neemt de hoeveelheid licht voldoende toe, zodat de fytoplanktonconcentratie dan plotseling en snel zal groeien, een verschijnsel dat bekend staat als de voorjaarsbloei. Bij min of meer rustige meteorologische condities gedurende het voorjaar en de zomer zal vaak een dichtheidsstratificatie ontstaan. De bovenste waterlaag zal relatief warm worden door het ingestraalde zonlicht waardoor de dichtheid van het water afneemt. Door de ongelijke dichtheid onder en boven het scheidingvlak van warm en koud water zal verticale turbulente menging sterk onderdrukt worden. Hierdoor kunnen weinig nieuwe voedingsstoffen worden aangevoerd van de diepe, koude waterlaag naar de bovenste warme(re) waterlaag. Door primaire productie zullen de beschikbare voedingsstoffen in de bovenste waterlaag snel uitgeput raken. Op den duur zal de fytoplanktonpopulatie afsterven door tekort aan voedsel.

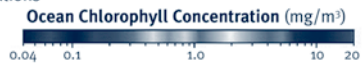
Van kilometers naar microns

Figuur 2 toont een satellietopname van algenconcentraties in de Stille Oceaan nabij San Francisco. De donkere kleur nabij de kust (rechts in de figuur) geeft hoge algenconcentraties weer en de lichtgrijsblauwe tinten geven lage algenconcentraties weer. Ver van de kust zijn algen nagenoeg afwezig. De kleurschakeringen geven goed de langgerekte filamenten en de ronde wervelstructuren weer en visualiseren daarmee mooi de stromingspatronen aan het oceaanooppervlak. De overheersende winden aan de Californische kust, van noord naar zuid, in combinatie met de Corioliskracht als gevolg van de rotatie van de aarde, drijven het oppervlaktewater van de kust af. Massabehoud vereist dat het afgevoerde water wordt aangevuld. Dat water komt uit de diepe oceaan bij de kust omhoog. Het is het koude water dat veel natuurlijke voedingsstoffen bevat die

Algenconcentraties nabij de Californische kust. Bron: SeaWiFS Project, NASA GSFC en ORBIMAGE.



Chlorophyll Concentrations

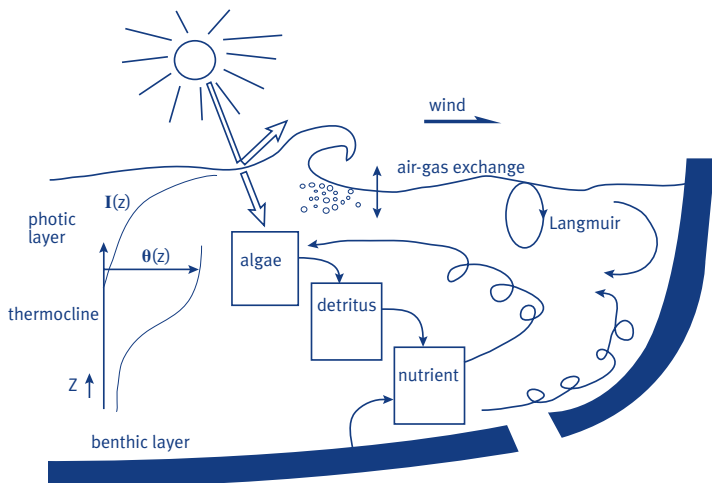


figuur 2

nodig zijn voor primaire productie. Maar er is hier meer aan de hand. Nabij San Francisco monden ook de Sacramento en de San Joaquin rivieren uit in de oceaan en die voeren extra voedingsstoffen aan. De miljoenen mensen die er wonen en hun economische activiteiten zorgen voor een niet-natuurlijke bron van mineralen, vooral stikstof en fosfor. Het effect is overduidelijk zichtbaar op de satellietopname: extreem hoge algenconcentraties ontstaan dan bij riviermondingen en nabij grote bevolkingscentra en worden vervolgens door de grootschalige turbulente stromingen afgevoerd naar de open oceaan.

Er komt ook grootschalige algengroei voor in ondiepe kustwateren zoals de Noordzee, of in binnenwateren. Soms betreft het giftige algensoorten, waarbij de toxines via de voedselketen bij u op het bord kunnen komen. Andere soorten kunnen leiden tot stankoverlast met soms kwalijke gevolgen voor de toerisme-industrie. In kustwateren speelt ook de sterke verticale menging als gevolg van stromingen, geïnduceerd door windaandrijving of het getijde, een rol bij de voorjaarsbloei (zie figuur 3). De sterke

De fysische en biologische processen in kustwateren. Bron: Rob Uittenbogaard, Deltares.



figuur 3

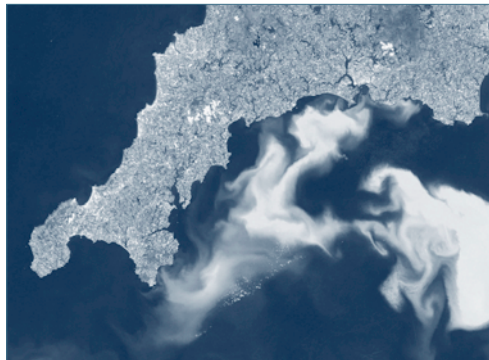
wisselwerking van de stroming met het bodemsediment gaat gepaard met troebelheid van het water, dus met een afname van de hoeveelheid beschikbaar licht in de waterkolom.

Een goed begrip van de in elkaar grijpende mechanismen die een rol spelen bij het ontstaan van de voorjaarsbloei vereist integratie van diverse disciplines zoals mariene biologie, ecologie, natuurkunde (inclusief de stromingsleer) en scheikunde. Naast de wetenschappelijke aspecten, die processen betreffen op lengteschalen in de orde van 1 micron tot wel 1000 km in de open oceaan, is er een direct ecologisch en economisch belang om voorspellingen te kunnen doen van algenbloei. Vooral commerciële visbedrijven, de energiesector en de toerisme-industrie, en in het verlengde daarvan verzekeringsmaatschappijen die de schade moeten dekken, zijn erbij gebaat te anticiperen op mogelijke nadelige effecten van de voorjaarsbloei.

Ehux en kalk

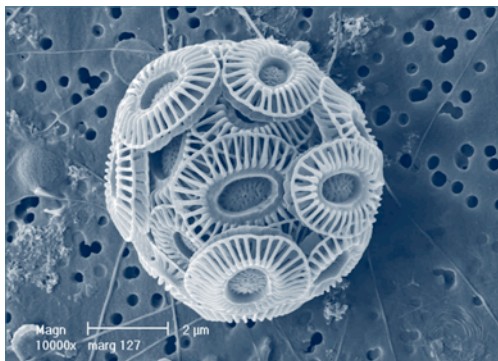
Deze week werd de Nobelprijs voor de Vrede uitgereikt aan het VN Klimaatpanel IPCC die jarenlang met rapportages de basis heeft gelegd voor de bewustwording van klimaatverandering. Algen, in het bijzonder het fytoplankton *Emiliana Huxleyi*, of kortweg Ehux genoemd, uit de groep van coccolithoforen, spelen een belangrijke rol in de biologische koolstofcyclus in de oceaan en daarmee mogelijk ook bij klimaatverandering. Figuur 4 toont een satellietopname van de verspreiding van Ehux in het Kanaal ten zuiden van Cornwall als gevolg van de voorjaarsbloei. Gedurende het voorjaar kan dit op veel plaatsen waargenomen worden. Ehux bestaat uit een cel met daaromheen een pantser bestaande uit kalkplaatjes. Deze kunnen mooi zichtbaar gemaakt worden met een elektronenmicroscop, zie figuur 5. Het fytoplankton Ehux heeft inclusief pantser een doorsnede van 5 micron, de cel wordt omhuld door circa 30 kalkplaatjes en ongeveer 15% van het gewicht bestaat uit koolstof. Voor de productie van deze cellen en de kalkplaatjes is koolstof nodig dat komt van in zeewater opgelost kooldioxide, een broeikasgas. Na afsterven van de fytoplanktoncellen zullen zij naar de bodem van de zee zakken en

LANDSAT satellietopname van de voorjaarsbloei van Ehux. Bron: Andrew Wilson en Steve Groon.



figuur 4

Een elektronenmicroscopische opname van dat fytoplankton. Bron: Jeremy Young.



figuur 5

de kalkplaatjes zullen voor een deel achterblijven op de bodem. Dit proces wordt op geologische tijdschalen zichtbaar in de vorm van krijtrotsen zoals die bij Dover. Een klein deel van het opgenomen koolstof wordt dus uiteindelijk vastgelegd in het sediment en daarmee uit de koolstofcyclus gehaald. Toename van kooldioxide in de atmosfeer zou dus voor een deel gecompenseerd kunnen worden door een toename van het neerslaan en vastleggen van koolstof op de bodem van de oceaan.

Hoewel het mogelijk is om het pigment van algen met satellieten te detecteren, betreffen de opnamen zoals in figuur 4 een verticaal gemiddelde van de algenconcentratie in de oppervlaktelaag van de oceaan. Het zegt niets over de verticale structuur van de algenverdeling. Om daar meer zicht op te krijgen is het nodig om de turbulente menging in de vloeistofkolom te kwantificeren en bovendien de relatie tussen horizontaal transport en verticale menging te begrijpen. Veldmetingen van de verticale structuur van de algenpopulatie zijn hierbij cruciaal. Binnen de gemeenschap van fysische en biologische oceanografen groeit het besef dat een beter begrip van (grootschalige) algenbloei niet alleen komt vanuit een biologische kijk op de problematiek. Inzicht is nodig in de rol van turbulentie op deze processen variërend van de kleine schalen waar de turbulentie als lokaal homogeen en isotroop beschouwd kan worden, tot de wat grotere schalen (variërend van 1 cm tot 100 m) waar effecten van dichtheidsstratificatie op turbulent transport van belang zijn. Studies

naar het ontstaan van giftige algenpopulaties lijken zich te richten op dit door dichtheidsstratificatie gedomineerde regime. Op schalen van 10 tot 500 km zal bovendien, naast dichtheidsstratificatie, de achtergrondrotatie van de aarde het horizontaal turbulent transport beïnvloeden.

De prominente rol van turbulentie, al dan niet beïnvloed door volumekrachten zoals de Coriolis kracht en de zwaartekracht, rechtvaardigt in mijn ogen een belangrijke rol van natuurkundigen om een aantal fundamentele vragen aan te pakken. Zij kunnen bijvoorbeeld, in samenwerking met collega's vanuit verschillende andere disciplines, bijdragen aan het beantwoorden van vragen over verspreiding, samenklonteren en kolonievorming van algen in turbulente stromingen en het transport en de evolutie van grote algenconcentraties in geofysische stromingen.

De toenemende belangstelling vanuit de mariene biologie voor kleinschalige fysische, chemische en biologische processen op fytoplanktongedrag en de dynamica van planktoncellen en groepen van samengeklonterde algen is dus winst. Toonaangevende groepen als die van Kiørboe en Visser (Deens Visserij Instituut, Kopenhagen), Marrasé, Peters en collega's (CSIC, Barcelona), Yamazaki (Universiteit van Tokyo) en Osborn en Jiang (JHU en WHOI, VS) laten zien dat op dit terrein geavanceerde stromingsleer en turbulentieonderzoek steeds meer in samenhang met het onderzoek naar de biologische processen wordt uitgevoerd.

Naast de 'van-groot-naar-klein' benadering waarover ik in de inleiding sprak, is er de 'van-klein-naar-groot' aanpak. In jargon ook wel 'sluiting' genoemd. Vanuit die invalshoek kijk ik naar fundamentele aspecten van kleinschalige menging en turbulent transport van deeltjes. Het wordt nu tijd om wat meer te zeggen over mijn eigen vakgebied: mengen in stromingen. Wat is dan zo bijzonder aan mengen? Welke verrassingen komen we tegen als de verspreiding van deeltjes in een turbulente stroming aan een diepgaand onderzoek onderworpen wordt? Op een aantal aspecten zal ik nu in meer detail ingaan.

Mengen in het dagelijks leven

Velen onder ons zijn al vanaf jonge leeftijd bekend met het fenomeen mengen. Kinderen willen niet alleen de vlaflip als toetje omdat het lekker gevonden wordt, ze kunnen er ook mee experimenteren! Ze zijn verrast door de patronen die ontstaan als de vla, yoghurt en aanmaaklimonade geroerd worden. Dat is vaak de eerste kennismaking met menging in een laminaire stroming. Proefondervindelijk wordt dan vastgesteld dat menging versneld kan worden als er slim geroerd wordt. De meesten onder ons zijn deze fase voorbij, hoop ik, en hebben meer affiniteit met een ander belangrijk mengingsproces uit het dagelijks leven: turbulente menging. In dit geval als gevolg van een scheut melk in de koffie. De wanordelijke stroming die alleen al ontstaat bij het toevoegen van de melk aan de koffie volstaat meestal om snel een homogeen mengsel te krijgen.

Mengen komt op vele schalen voor, van schalen die gebruikelijk zijn in microfluidische lab-on-a-chip toepassingen (10-100 micron) tot en met galactische schalen in ons heelal. Het onderzoek naar menging heeft tot doel industriële processen te optimaliseren, maar ook het verkrijgen van fundamenteel inzicht in mengprocessen. Een indicatie voor het laminaire of turbulente karakter van menging wordt gegeven door het Reynolds getal van de stroming. Het Reynolds getal is typisch voor de stroming. Het geeft de verhouding weer van de diffusietijdschaal, kenmerkend voor transport van impuls door moleculaire processen, en de advectiontijdschaal van de stroming. Turbulente ofwel op het oog wanordelijke stromingen worden gekenmerkt door een groot Reynolds getal en laminaire, dat wil zeggen gladde stromingen, door een klein Reynolds getal.

De studie naar de mengingseigenschappen van stoffen is al bijzonder oud. Een mooi voorbeeld is de alchemie, een oude kunst die vooral in de Middeleeuwen bedreven werd. De alchemisten hadden één of meer van de volgende drie doelen voor ogen: het mengen van gewone metalen om deze te kunnen veranderen in goud of zilver, het maken van het levenselixer die de drinker het eeuwige leven zou kunnen bezorgen en het maken van menselijk leven buiten de gangbare weg om.

Dat alchemie zelfs in de beste wetenschappelijke kringen bedreven werd, blijkt wel uit een tweetal voorbeelden. De Deense astronoom Tycho Brahe (1546-1601), beroemd om zijn ontdekking van, wat later bleek, een supernova explosie in het sterrenbeeld Cassiopeia, hield zich met alchemie bezig. Wellicht pikanter is dat ook Isaac Newton (1642-1727) veel tijd besteedde aan alchemie. Met de opkomst van de moderne scheikunde, met Antoine Lavoisier (1743-1794) aan de basis hiervan, verdween langzaam maar zeker de alchemie. Hoewel alchemie in de klassieke zin tegenwoordig nauwelijks voorkomt, lijkt het me dat de diepere wens om één van de hierboven opgesomde doelen te bereiken nogal menselijk is. Deze doelen bestaan namelijk nog steeds, maar in andere gedaantes. Voorbeelden zijn de drang van sommige topbestuurders om bedrijven samen te voegen met het doel enorme bonussen op te strijken, de cosmetica- en gezondheidsindustrie die ons allemaal mooi en jong willen houden, en wat te denken van de wens van sommigen om de mens te klonen. U kunt dus zelf wel bedenken of er wellicht een alchemist in u schuilt.

Een schilderij van Joseph Wright (1771) waarop Hennig Brand getoond wordt die het lichtgevende fosfor heeft bereid. Museum of Art Gallery, Derby, Verenigd Koninkrijk.



figuur 6

Mengen in laminaire stromingen

Verspreiding van stoffen in een vloeistof of gas kan op diverse manieren plaatsvinden. Het eenvoudigste geval betreft diffusie van een stof in een stilstaand medium. Parfum zal in een doorsnee kamer enige dagen nodig hebben om alleen door diffusie volledig in de kamer verspreid te worden. Luchtstromingen zullen een handje kunnen helpen zodat de verspreiding binnen tientallen seconden plaats zal vinden. Het is deze rol van stromingen op menging die centraal zal staan in het vervolg van deze rede.

Ik beperk me in eerste instantie tot stromingen met een laag Reynolds getal, zogenaamde laminaire stromingen, die bovendien ook nog eens tweedimensionaal zijn. De complexiteit en schoonheid van tweedimensionale menging is twintig jaar geleden door Ottino al beschreven in een artikel in de *Scientific American*. Alle tweedimensionale stromingen worden gekenmerkt door twee basiselementen: hyperbolische punten, ook wel zadelpunten genoemd, en elliptische punten. Ze representeren allebei stagnatiepunten in de stroming: de vloeistof staat daar stil. Een elliptisch punt wordt omsloten door gesloten stroomlijnen. De vloeistof stroomt dus om het elliptisch punt heen. Bij een hyperbolisch punt is de situatie enigszins anders. In één richting stroomt vloeistof naar het hyperbolisch punt toe en in een andere richting stroomt het weg van dat punt. Stationaire, tweedimensionale stromingen zijn niet spannend als het om mengen gaat. Het stroomlijnenpatroon verandert niet en de vloeistofdeeltjes zullen altijd langs dezelfde stroomlijnen bewegen. Omdat stroomlijnen elkaar niet kunnen snijden, zullen verschillende vloeistofdeeltjes elkaar dus niet tegenkomen en is menging afwezig of op zijn best inefficiënt. Dat verandert als de stroming tijdsafhankelijk gemaakt wordt. Een gebiedje met vloeistof zal door het in de tijd veranderende stroomlijnenpatroon steeds in een andere richting vervormd worden. Dit leidt tot continu rekken en vouwen van een materieel element. Omdat het oppervlak van het gebiedje vanwege massabehoud gelijk moet blijven, maar de omtrek exponentieel in lengte zal kunnen toenemen, zal efficiëntere menging kunnen plaatsvinden. Deze vorm van mengen staat bekend als chaotische advection.

In de meeste studies naar chaotische advection is het stromingsveld voorgeschreven door een zekere tijdsonafhankelijke stroomfunctie waaraan een periodieke modulatie is toegevoegd. Het transport van puntdeeltjes in dit voorgeschreven snelheidsveld wordt beschreven door een Hamiltoniaans systeem, met de twee positiecoördinaten als de kanonieke variabelen en de stroomfunctie als de Hamiltoniaan. Dit systeem is integreerbaar als de Hamiltoniaan, ofwel de stroomfunctie, tijdsonafhankelijk is. Chaotische advection is dan afwezig. Echter, als een periodieke modulatie wordt toegevoegd is de Hamiltoniaan tijdsafhankelijk en daardoor normaalgesproken niet integreerbaar, een noodzakelijke voorwaarde voor chaotische advection. Voor de volledigheid dient gezegd te worden dat het geen noodzakelijke en voldoende voorwaarde is, dus een garantie voor chaotische advection of goede globale menging geeft dit niet.

De situatie voor driedimensionale, laminaire stromingen is anders. Chaotische advection kan plaatsvinden voor zowel instationaire als voor een speciale groep stationaire stromingen. Een klassiek voorbeeld is de Arnol'd-Beltrami-Childress (ABC) stroming. Dat is een familie van oplossingen van de driedimensionale, stationaire Euler vergelijkingen die chaotische advection toelaat. De meeste studies naar chaotische advection in driedimensionale, laminaire stromingen zijn gebaseerd op theoretische analyses en numerieke simulaties. Een analyse volgens de theorie van dynamische systemen is zeker niet triviaal en de analogie met een Hamiltoniaans systeem zoals eerder beschreven voor tweedimensionale systemen is niet zonder meer mogelijk. Laboratoriumexperimenten zijn moeilijk uitvoerbaar en om die reden tamelijk schaars. In het bijzonder de groepen van Ottino (Northwestern University, USA) en van Metcalfe (CSIRO, Melbourne) zijn werkzaam op dit gebied. Ottino's groep concentreert zich vooral op de fundamentele aspecten van driedimensionale menging met momenteel de nadruk op scheiding en menging in granulaire media. De groep bij CSIRO legt het zwaartepunt meer op industriële toepassingen. In ons laboratorium wordt al enige jaren door Michel Speetjens, GertJan van Heijst, Slava Meleshko en mijzelf, met steun van FOM, zowel experimenteel als numeriek onderzoek uitgevoerd naar de topologie en mengingseigenschappen van periodiek aangedreven, driedimensionale stromingen in een cilinder.

Goed begrip van chaotische advection in driedimensionale, tijdsafhankelijke, laminaire stromingen is van groot belang voor diverse microfluidische toepassingen. Ik bespreek hier kort twee voorbeelden: microreactoren en biosensoren. In deze toepassingen zijn alleen stromingen mogelijk met een laag Reynolds getal, dus goede menging kan alleen plaatsvinden met chaotische advection. In het geval van microreactoren staan vragen centraal als: hoe kan de aanvoer van reactanten naar het met katalysator bedekte oppervlak van deeltjes geoptimaliseerd worden? Hoe worden reactieproducten zo snel mogelijk afgevoerd? Een mogelijk antwoord is door ervoor te zorgen dat de deeltjes door externe manipulatie zelf voor goede lokale menging zorgen. Driedimensionale menging past dan ook uitstekend binnen het TU/e initiatief MiTS (Micro Transport Systems) dat zich richt op de ontwikkeling en productie van microtransportsystemen. In een biosensor worden bloed-, slijm- of urinemonsters getest op de aanwezigheid van specifieke moleculen die slechts in zeer lage concentraties aanwezig zijn. Goede menging wordt bewerkstelligd door kleine, magnetische deeltjes in het vloeistofmonster te laten bewegen onder invloed van een extern magnetisch veld. Hiermee worden zo efficiënt mogelijk die specifieke moleculen uit het monster gevestigd en gebonden aan de magnetische deeltjes. Na een zekere tijd worden de deeltjes, wederom door magnetische manipulatie, naar een sensor vervoerd voor detectie. Onze groep ontwikkelt momenteel samen met de groepen biosensoren van de faculteit Technische Natuurkunde en polymeertechnologie van de faculteit Werktuigbouwkunde plannen om driedimensionale, chaotische advection in te zetten om diverse processtappen in de biosensor te optimaliseren.

Turbulentie

Hoe zit het nu met mengen in stromingen met een hoog Reynolds getal? Deze stromingen zijn niet laminair maar turbulent. Uit de dagelijkse praktijk is bekend dat turbulentie diffusief is, een eigenschap die gebruikt wordt om twee vloeistoffen te mengen door te roeren. De stoffen worden meegevoerd door de wanordelijke, grotere en kleinere wervelende bewegingen in de stroming. Dit wanordelijke proces laat zich redelijk beschrijven als een diffusieproces. Turbulente diffusie van stoffen gaat echter zeer veel sneller dan moleculaire diffusie van dezelfde stof.

Turbulente stromingen zijn chaotisch, maar als we beter kijken niet totaal wanordelijk. Een fenomenologische schets van turbulentie is de volgende. In de turbulente stroming wordt een zekere structuur in de vorm van wervelingen waargenomen. Er zijn grote wervels met afmetingen die vergelijkbaar zijn met de geometrie van de stroming die weer kleinere wervels transporteren en die op hun beurt nog kleinere. De grootste wervels worden geproduceerd door de gemiddelde stroming en bevatten de meeste turbulente kinetische energie. De wervels kunnen op die schaal als wrijvingsloos beschouwd worden, maar de kinetische energie, geïnjecteerd door de gemiddelde stroming, zal afgevoerd moeten worden. Hoe gaat dat in zijn werk? De grootschalige wervelstructuren zijn niet stabiel en omdat zij voortdurend gekieteld worden door de turbulente omgeving, zullen zij opbreken in kleinere wervelstructuren. De typische tijdschaal waarop deze processen plaatsvinden, is grofweg de tijd die nodig is om een vloeistofdeeltje in de wervel een keer rond te laten gaan. De kleinere wervels die na opbreken ontstaan, kunnen nog steeds als wrijvingsloos beschouwd worden en hetzelfde proces zal zich blijven herhalen, totdat we op zulke kleine schalen terechtkomen waar wrijving voelbaar wordt. De kinetische energie wordt gemiddeld van de grote naar de kleine schalen getransporteerd zonder noemenswaardige energieverliezen. Dat wordt de turbulente cascade genoemd.

Als we nu met een microscoop naar de kleinschalige structuur van turbulentie kijken, zien we een wirwar van wervelbuisjes: spaghetti-achtige



structuren van sneldraaiende vloeistof. Onder invloed van de grotere werfels zullen deze buisjes bij voorkeur gestrekt worden: ze worden langer. Echter, behoud van massa en van impulsmoment leidt ertoe dat de vloeistof in deze virtuele buisjes sneller gaat ronddraaien. Dat geeft lokaal grotere snelheidsgradiënten en als deze gradiënten te groot dreigen te worden, zal verdere toename door wrijving worden belemmerd. De kinetische energie wordt dan omgezet in warmte. De ogenschijnlijk wanordelijke, turbulente stroming zal daar, op de Kolmogorov lengteschaal, overgaan op kleinschalige, laminaire stroming. De typische tijdschaal van de stroming die bij deze overgang thuis hoort, is de Kolmogorov tijdschaal.

Euleriaans versus Lagrangiaans

Numerieke studies van turbulentie zijn grotendeels gebaseerd op een Euleriaanse beschrijving. De aloude Navier-Stokes vergelijkingen, die de stroming beschrijven, worden gediscrètiseerd op een gegeven rekenrooster. Samen met beginvoorwaarden en randcondities kan het stromingsprobleem nagebootst worden. Voor ieder tijdstip wordt de snelheid en de druk op de roosterpunten berekend. Ieder roosterpunt fungeert als het ware als een stationair meetpunt in de stroming om de instantane waarde van snelheid en druk ter plaatse te bepalen.

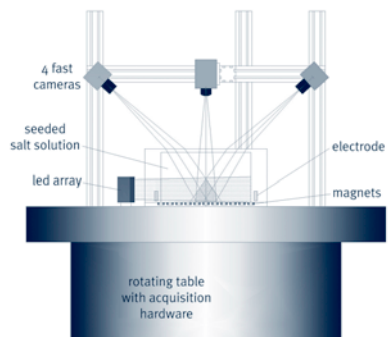
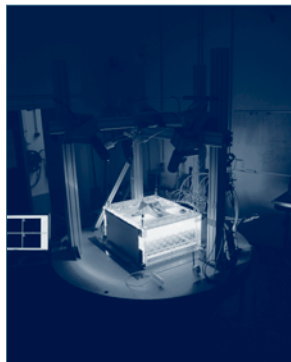
Een fundamenteel andere aanpak is die waarbij de snelheid en druk van een materieel vloeistofdeeltje bepaald wordt terwijl we juist meereizen met dat vloeistofdeeltje op zijn weg door de stroming. Dit is de Lagrangiaanse beschrijving van de stroming. Deze beschrijving heeft evident een aantal voordelen in vergelijking met de Euleriaanse beschrijving. Zo is de vorticeiteit, die de lokale rotatie van het snelheidsveld representeert, in tweedimensionale, niet-viskeuze stromingen behouden in de Lagrangiaanse beschrijving. De Euleriaanse beschrijving van turbulentie zal in veel praktische situaties wel de voorkeur blijven behouden. Echter, de analyse en simulaties van verspreiding van stoffen en deeltjes in stromingen maakt intrinsiek gebruik van de Lagrangiaanse beschrijving, een aanpak die in de jaren twintig al door Richardson werd geïntroduceerd.

Eén van de takken van sport in het moderne turbulentieonderzoek betreft het doen van hoge resolutie Directe Numerieke Simulaties (DNS) van statistisch stationaire homogene, isotrope turbulentie. Hierin wordt dan een zeer groot aantal passieve deeltjes, die op geen enkele wijze de omringende stroming beïnvloeden, losgelaten en gevolgd over een zekere tijdsperiode. Aan de hand van een gigantische berg data met deeltjesposities, -snelheden en -versnellingen kan statistiek bedreven worden vanuit een Lagrangiaanse invalshoek. Mede dankzij collega's van Italiaanse en Franse onderzoeksgroepen zoals Biferale, Boffetta, Toschi en anderen, is hiermee een enorme database beschikbaar gekomen die openbaar is voor wetenschappelijk gebruik. Eén van deze onderzoekers, Federico Toschi, zal binnenkort de groep die zich in Eindhoven bezighoudt met

stromingsleer komen versterken. Hij gaat één van de nieuwe leerstoelen bezetten binnen het 3TU Center of Excellence op het gebied van multi-schaal fenomenen.

Parallel aan deze hedendaagse numerieke studies worden in diverse laboratoria zoals Cornell, MPI Göttingen, ENS Lyon en Risø in Denemarken experimenten uitgevoerd met zeer kleine deeltjes in turbulente stromingen, waarbij zo goed als het kan de deeltjespaden gereconstrueerd worden. Deze experimenten vereisen een substantiële, experimentele infrastructuur, dataopslag en -verwerking, maar bovenal zeer specialistische kennis over (an)isotrope turbulentie, data-acquisitie en optische meettechnieken. In onze groep worden deeltjes in roterende stromingen bestudeerd. Hiervoor is een geavanceerde Roterende Tafel Faciliteit beschikbaar met de benodigde optische meettechnieken. Een studie naar het effect van rotatie op turbulentie is hiermee uitgevoerd door Laurens van Bokhoven die hierop onlangs is gepromoveerd. Het promotieonderzoek van Lorenzo del Castillo spitst zich toe op de verspreiding van deeltjes in roterende turbulentie. Dit onderzoek vindt plaats in samenwerking met diverse buitenlandse groepen waaronder die van Tsinober (Imperial College, London) en Cambon (ENS, Lyon) op het gebied van (roterende) turbulentie en Kinzelbach en Lüthi (ETH, Zürich) op het gebied van geavanceerde meettechnieken zoals 3D-PTV.

De laboratorium-opstelling (links) en een schets van de optiek (rechts) voor metingen aan roterende turbulentie. Bron: Lorenzo Del Castillo.



figuur 7

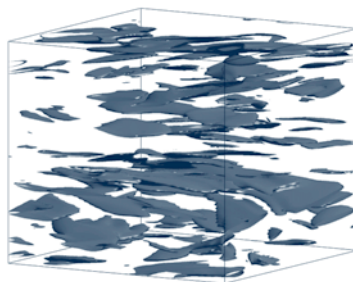
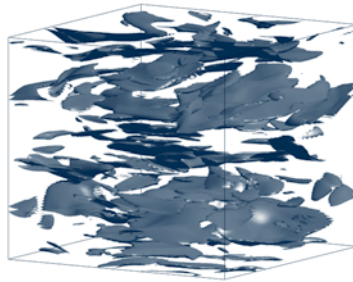
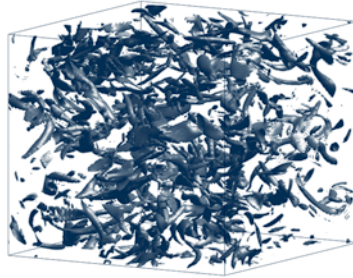
Stabiele dichtheidsstratificatie

In bovenstaande beschouwing werd uitgegaan van passieve, materiële vloeistofdeeltjes. Maar deze deeltjes kunnen ook actief zijn. De vloeistofdeeltjes beïnvloeden dan de stroming terwijl ze erin worden meegevoerd. Ik geef hier als voorbeeld de dichtheid van het vloeistofdeeltje. Veronderstel nu dat de gemiddelde vloeistofdichtheid lineair afneemt met de hoogte, dus de dichtheidsstratificatie is stabiel. Op een vloeistofdeeltje met een zekere dichtheid zal, als het verticaal naar beneden verplaatst wordt, een opwaartse kracht worden uitgeoefend, en andersom, als het omhoog verplaatst wordt zal er een neerwaartse kracht op worden uitgeoefend. Het vloeistofdeeltje zal dus terug willen bewegen naar zijn oorspronkelijke positie en daarmee dus de stroming actief beïnvloeden. De stroming wordt dan gedomineerd door zowel golven als wervelstructuren en een duidelijke anisotropie wordt zichtbaar bij een forse stratificatie van de vloeistof (zie figuur 8).

Dichtheidsstratificatie als gevolg van zout- en temperatuurgradiënten speelt een belangrijke rol in de zeeën en oceanen, daar deze het verticaal transport van voedsel en plankton kan verminderen. In binnenmeren en in de atmosfeer wordt de dichtheidsstratificatie veroorzaakt door temperatuurgradiënten. Dichtheidsstratificaties spelen niet alleen een belangrijke rol in verticale, maar ook in horizontale, turbulente verspreiding. Zo blijkt door middel van DNS uitgevoerd in onze groep, dat de Lagrangiaanse verspreiding van vloeistofdeeltjes in statistisch stationaire, homogeen gestratificeerde turbulentie voor lange tijden superdiffusie vertoont. Dit betekent een snellere horizontale verspreiding van verontreinigingen in gestratificeerde dan in homogene, isotrope turbulentie. Daarnaast wordt gekeken naar de relatieve verspreiding van paren van vloeistofdeeltjes en de deformatie van groepen van deeltjes om te zien hoe de dichtheidsstratificatie deze processen uiteindelijk beïnvloedt. In het kader van mijn VICI-programma bestudeert Marleen van Aartrijk dit soort fenomenen. Alejandro Dominguez en Werner Kramer bestuderen in datzelfde programma diverse aspecten die samenhangen met modellering en opschaling van verspreidingsprocessen en samenklontering van deeltjes in homogene, isotrope en in gestratificeerde turbulentie.

Het doel is deze modellen toe te passen in computerberekeningen waarbij vermeden kan worden de kleinste turbulente stromingsschalen geheel door te rekenen.

Wervelstructuren in gestratificeerde turbulentie. Van boven naar beneden neemt de dichtheidsstratificatie toe. Bron: Marleen van Aartrijk.



figuur 8

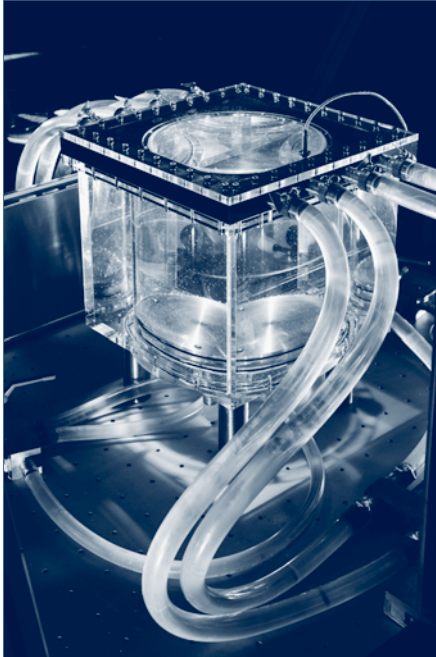
Rayleigh-Bénard convectie

Experimenten aan Rayleigh-Bénard convectie illustreren op mooie wijze de invloed van dichtheidsverschillen op de stroming. Uitgangspunt is een cilinder gevuld met vloeistof. De bodem van de cilinder wordt op constante temperatuur gehouden en het deksel op een lagere temperatuur. De cilindermantel is adiabatisch, dus staat geen warmteverliezen toe. Als het temperatuurverschil voldoende groot is, zal er spontaan stroming gaan ontstaan, doordat opwaartse krachten op warme vloeistofdeeltjes nabij de bodemplaat de overhand gaan krijgen over de afremmende viskeuze krachten. Om dezelfde reden zullen relatief koude vloeistofdeeltjes nabij het deksel dan gaan zakken naar de bodemplaat. Het relatieve belang van zwaartekrachtseffecten enerzijds en viskeuze krachten anderzijds wordt hier altijd uitgedrukt door het Rayleigh getal.

Net als in de eerder besproken stromingen wordt turbulente Rayleigh-Bénard convectie gekenmerkt door een hele reeks van lengte- en snelheidsschalen. Het valt te verwachten dat dichtheidsverschillen alleen merkbaar zijn voor vloeistofdeeltjes die in voldoende grote wervels worden meegevoerd. Experimenten met Stereoscopische Particle Image Velocimetry (SPIV) en numerieke simulaties, allebei uitgevoerd door Rudie Kunnen in het kader van een FOM project, laten mooi zien dat de temperatuur inderdaad de structuur van turbulentie kan aanpassen. De opstelling voor dit doel is getoond in figuur 9 en is zodanig ontworpen dat de stroming optisch toegankelijk blijft en de turbulente structuren gemeten kunnen worden. In een gebied van Rayleigh getallen is het mogelijk tegelijkertijd klassieke Kolmogorov schaling in het energiespectrum waar te nemen voor de kleinere turbulente schalen en juist steilere Bolgiano schaling voor de grotere turbulente schalen die actief beïnvloed worden door lokale temperatuurverschillen. De rode draad in het promotieonderzoek van Rudie Kunnen is overigens de rol van rotatie op stromingsstructuren in turbulente Rayleigh-Bénard convectie. Dit type onderzoek draagt bij aan een beter begrip van convectiegedreven geofysische stromingen in de atmosfeer en in de oceanen. Binnenkort wordt het onderzoek aan roterende Rayleigh-Bénard convectie uitgebreid met een ander FOM project. Het betreft een samenwerking van de groep van

Detlef Lohse (Universiteit Twente) en onze groep en is gericht op warmteoverdracht in roterende Rayleigh-Bénard convectie.

Laboratorium opstelling voor SPIV metingen aan roterende Rayleigh-Bénard convectie. Bron: Bart van Overbeeke.



figuur 9

Deeltjes met traagheid

Veel verspreidingsprocessen betreffen niet alleen het transport van moleculaire verontreinigingen. Vaak is het noodzakelijk de verspreiding van deeltjes in turbulente stromingen te onderzoeken. Dan is juist een Lagrangiaanse beschrijving essentieel om fundamentele aspecten van bijvoorbeeld samenklonteren van deeltjes in turbulente stromingen te begrijpen. Voorbeelden van turbulente verspreiding zijn het sedimenttransport en de ermee samenhangende bodemmorfolgie in kustzeeën, druppels en aerosolen in de turbulente atmosferische grenslaag en het transport van fytoplankton in de oppervlaktelaag van oceanen, zeeën en meren. De eerste voorbeelden betreffen deeltjes met een dichtheid veel groter dan de vloeistofdichtheid en in het laatste voorbeeld is de dichtheid van fytoplanktoncellen van dezelfde orde als die van het water.

Het volgen van echte deeltjes in een turbulente stroming vereist meer dan alleen het volgen van vloeistofdeeltjes zoals eerder geschetst. Twee belangrijke tijdschalen zal ik eerst introduceren. De eerste betreft de eerder genoemde Kolmogorov tijdschaal behorend bij de microstructuur van turbulentie. De tweede tijdschaal representeert de relaxatietijd van het deeltje. Het komt ruwweg overeen met de tijd die een deeltje nodig heeft om zich aan te passen aan lokale veranderingen van de snelheid van de stroming die het deeltje tegenkomt op zijn weg door de vloeistof. Als de relaxatietijd veel groter is dan de Kolmogorov tijd, dan is het deeltje ongevoelig voor de kleinste turbulente schalen. Als de relaxatietijd juist veel kleiner is, dan zal het deeltje gevolgen ondervinden van blootstelling aan het gehele scala van snelheidsschalen van de turbulente stroming en zich gedragen als een passief vloeistofdeeltje (mits de vloeistof- en deeltjesdichtheid gelijk zijn). De verhouding van deze tijdschalen wordt het Stokes getal genoemd.

Afhankelijk van de deeltjeseigenschappen zullen er diverse krachten kunnen werken op de deeltjes als ze hun weg door de vloeistof doorlopen. Deze krachten zijn gegeven in de vergelijking van Maxey en Riley. Ze bevatten onder meer de traagheids- en weerstandskrachten van de deeltjes, de kracht gerelateerd aan de toegevoegde massa (het deeltje

moet namelijk ook vloeistof verplaatsen wanneer het zelf beweegt) en de zwaartekracht. Eén van de meest opvallende effecten van traagheid van deeltjes is de clustering ofwel preferentiële concentratie van deeltjes in speciale gebieden in homogene, isotrope turbulentie. Optimale groepering van deeltjes wordt gevonden als het Stokes getal van de orde één is. De Kolmogorov tijdschaal is dan van dezelfde orde als de relaxatietijd van het deeltje. Laten we weer kijken naar de eerder geïntroduceerde spaghetti-achtige structuren, bestaande uit wervelbuisjes met sneldraaiende vloeistof, die zo kenmerkend zijn voor kleinschalige turbulentie. Als de deeltjes een grotere dichtheid hebben dan de vloeistof (zoals aerosolen of druppels in lucht) worden de deeltjes bij voorkeur uit de wervelbuisjes geslingerd als gevolg van de centrifugale kracht en verzamelen de deeltjes zich in gebieden gedomineerd door strekking. In het geval dat de deeltjesdichtheid veel kleiner is dan die van de vloeistof, zoals voor luchtbellen in water geldt, zullen de deeltjes, als gevolg van de centripetale kracht zich juist bij voorkeur verzamelen in de kernen van de wervelbuisjes. Veelal wordt verondersteld dat de deeltjes, of ze nu een veel lagere of veel hogere dichtheid dan het stromingsmedium hebben, passief zijn. Ze beïnvloeden dus niet de turbulente stroming. Echter, door hun traagheid zullen de deeltjes niet meer uniform over de ruimte verdeeld zijn.

Wat is nu de rol van dichtheidsstratificatie op preferentiële concentratie? Hoe belangrijk is de rol van de zwaartekracht op de deeltjes? In onze groep wordt dit fenomeen bestudeerd door Marleen van Aartrijk. Haar werk laat zien dat de relatieve locatie van de pannenkoekachtige wervelstructuren, zoals getoond in figuur 8, de accumulatie van deeltjes en het verticale transport in hoge mate beïnvloeden.

Een goed begrip van mechanismen die leiden tot preferentiële concentratie van deeltjes is van belang voor diverse processen. De groei van reghdruppels is het gevolg van botsing en samensmelten van kleine druppels. Hoe turbulent transport en preferentiële concentratie, maar ook de rol van turbulentie op condensatie- en verdampingsprocessen, botsingen en druppelgroei mogelijk bevorderen, zijn fundamentele vragen in onderzoek naar wolkenvorming. Gelijksoortige vragen spelen een rol bij de groei en verspreiding van aerosolen, die vaak de luchtkwaliteit negatief beïnvloeden, in een al dan niet gestratificeerde atmosfeer. Daarnaast staan ze ook centraal in onderzoek naar samenklonteren van planktoncellen in mariene systemen en de vorming van 'marine snow', enorme

vlokken van organisch afvalmateriaal in de oceanen. Deze vlokken spelen een essentiële rol in de biologische pomp in de oceanen, waarbij dood materiaal zinkt en wordt omgezet in voedingsstoffen. Deze komen uiteindelijk, zoals ik eerder in mijn rede uiteenzette, via opwelling weer terug aan de oppervlakte van de oceanen waar ze dienen als voedselbron voor fytoplankton.

Deze drie voorbeelden illustreren ook direct de noodzaak van sluitingsprocedures om van klein naar groot te gaan. De effecten van chemische, fysische en biologische processen, die vaak plaatsvinden op schalen kleiner dan 1 cm, dienen op een verantwoorde wijze gemodelleerd te worden. Daarna kunnen ze opgeschaald toegepast worden in rekenmodellen voor wolkenvorming, voorspellingsalgoritmen voor luchtkwaliteit en berekeningen van verticaal transport in de oceaan. De benodigde randvoorwaarden worden, zoals ik in de inleiding al aangaf, geleverd door computermodellen voor berekeningen op globaal en regionaal niveau, data van observatiestations en satellietdata. Op de menselijke schaal kunnen we dus niet zonder de ‘van-klein-naar-groot’ aanpak (waar ikzelf me bijzonder in thuis voel) en ook niet zonder de ‘van-groot-naar-klein’ benadering, die kennis van heel andere disciplines vereist. Deze combinatie van fundamentele fysica en boeiende toepassingsgebieden maakt mijn vakgebied zo interessant en spannend!

Dankwoord

Dat ik vandaag deze intreerede kan uitspreken is onder andere mogelijk gemaakt door de vrijheid die ik van velen gekregen heb mijzelf te ontplooien en door de ondersteuning die ik gevoeld heb bij het tot uitvoering brengen van keuzes die ik gemaakt heb.

Allereerst dank ik het College van Bestuur en het bestuur van de faculteit Technische Natuurkunde voor het in mij gestelde vertrouwen. In het bijzonder wil ik hier Wim de Jonge, voormalig decaan van de faculteit Technische Natuurkunde, bedanken voor de voortvarendheid waarmee hij de benoemingsprocedure in gang heeft gezet voor de Vici-laureaten van de faculteit.

Daarnaast wil ik twee leermeesters bedanken. Ieder hebben ze op hun eigen kenmerkende wijze mijn carrière sterk beïnvloed. Om te beginnen mijn promotor Piet Schram. Beste Piet, jij hebt mij wetenschappelijk zelfvertrouwen gegeven. Dat deed jij vooral door veel tijd te besteden aan luisteren en zo nu en dan kritische kanttekeningen te plaatsen bij mijn werk. Om eerlijk te zijn, in het eerste jaar werd ik daar soms wel wat nerveus van, je sprak echt weinig. Maar als je dan iets zei, had je wel iets te melden! Veel dank voor de wijze waarop jij mijn eerste wetenschappelijke jaren begeleid hebt.

En dan GertJan van Heijst. Beste GertJan, onder jouw leiding kon ik mij wetenschappelijk verder ontwikkelen. Jij liet mij zelfstandig onderzoeklijnen opbouwen en gaf me het vertrouwen dat ik daartoe in staat zou zijn. Jouw omgang met studenten en promovendi, jouw manier van onderwijs geven en de toegankelijkheid van jouw voordrachten op conferenties hebben mij ook beïnvloed. Maar misschien wel het allerbelangrijkste voor mij persoonlijk is de vanzelfsprekendheid waarmee jij toestond dat jouw groep uiteindelijk onze groep geworden is. Dat kan ik bijzonder waarderen!

Wetenschappelijk onderzoek verrichten en onderwijs verzorgen doe je niet alleen. Hiervoor heb je de kennis, hulp en inzet van veel collega's nodig. Deze mensen wil ik vanaf deze plaats bedanken. Ik wil graag een aantal collega's in het bijzonder bedanken: Bob Mattheij, Anton van Steenhoven, Harry Hoeijmakers en Ruben Trieling. Zij zijn allen op hun

manier sterk betrokken geweest bij mijn werk aan de TU/e, variërend van samenwerking in onderzoeksprojecten, het geven van goede adviezen, of de weg wijzend in specifieke vakgebieden.

Studenten, promovendi en postdocs, het is fantastisch om met jullie te mogen werken en het is mede dankzij jullie dat ik hier mag staan. Het onderwijs staat centraal binnen de universiteit en het is uitermate plezierig om kennis over te mogen dragen aan studenten: een intelligente, eigenzinnige en leergierige deelverzameling van jong volwassenen. De band met promovendi is vanzelfsprekend hechter. Ze zijn sterk betrokken bij het wel en wee van de groep en zij zijn het die het onderzoek doen. Jullie enthousiasme, werklust, doelgerichtheid en frisse ideeën bezorgen mij veel plezier in mijn werk.

Onderzoek kan niet gedaan worden zonder gedegen, technische ondersteuning van vakmensen in het laboratorium. Bedankt voor jullie toemeloze inzet bij het in de lucht brengen en houden van diverse experimentele opstellingen. Jullie zijn een onmisbare schakel in de keten! Voor het ontvangen van bezoekers, het op reis gaan voor conferenties of werkbezoeken, het maken van onderzoeksrapportages en voor veel ander werk is kundige administratieve ondersteuning noodzakelijk. Ook jullie maken het mogelijk dat we goed onderzoek kunnen verrichten.

Veel van het onderzoek is extern gefinancierd. Ik ben dan ook FOM, STW en NWO erkentelijk voor de financiële steun.

Sinds 1 januari 2005 ben ik deeltijdhoogleraar aan de Universiteit Twente in de groep Numerical Analysis and Computational Mechanics van Jaap van der Vegt. Vanaf deze plaats wil ik Jaap bedanken voor het gestelde vertrouwen in mij. Daarnaast ben ik mijn Twentse collega's Brenny van Groesen en Detlef Lohse zeer erkentelijk voor hun inzet om deze benoeming in Twente te realiseren en te continueren voor wederom drie jaar.

Deze benoeming is onderdeel van een uitwisseling waarbij Bernard Geurts is benoemd tot deeltijdhoogleraar in Eindhoven. Beste Bernard, deze uitwisseling is een schot in de roos. Het heeft al geleid tot een gezamenlijk FOM-project op het gebied van roterende Rayleigh-Bénard convectorie, gezamenlijke publicaties en de organisatie van workshops zoals het succesvolle EuroMech Colloquium in Twente. Bovendien worden de



nodige plannetjes gesmeed. Het loopt gesmeerd en ik kijk dan ook uit naar onze verdere samenwerking.

Vanaf deze plaats wil ik ook Anita en Gijs Ornée bedanken voor hun geweldige gastvrijheid. Jullie dragen er enorm aan bij dat ik met plezier iedere keer de reis naar Enschede maak. Er staat altijd eten op tafel, natuurlijk ook een drankje en ik kan blijven overnachten, iedere keer weer.

Familie en vrienden bedank ik voor hun belangstelling en hun aanwezigheid hier. In het bijzonder wil ik mijn moeder en schoonouders bedanken voor hun steun en interesse in al die jaren.

Mijn echtgenote Adriek en onze kinderen Hannah, Maarten en Stefan. Adriek vindt het niet geweldig om in het openbaar toegesproken te worden. Dat zal ik ook niet doen. Hannah, Maarten en Stefan, jullie hebben een geweldige moeder die jullie vader veel ruimte heeft gegeven om dit te kunnen bereiken en dan te bedenken dat ze zelf ook een volledige baan heeft. En dan jullie, Hannah, Maarten en Stefan, jullie zijn een verrijking voor ons leven. Zo sprankelend! Ik ben me ervan bewust dat ik nog vaak jullie geduld op de proef zal moeten stellen als ik me weer eens afzonder om te gaan werken. Ik beloof ook niet dat het anders zal gaan worden, deze belofte heb ik één keer aan Adriek gedaan tijdens het schrijven van mijn proefschrift. Dat bleek jeugdige onbezonnenheid.

Mijnheer de Rector, dames en heren, met het overzicht dat ik u gegeven heb over kleinschalige menging en grote gevolgen hoop ik dat ik wat van mijn enthousiasme over dit bijzondere vak aan u heb kunnen overbrengen. Daarmee wil ik afsluiten en u bedanken voor uw aanwezigheid en uw aandacht.

Ik heb gezegd.

Met dank aan Adriek de Man en Gijs Ornée voor waardevolle tekstuele suggesties.

Curriculum Vitae

Prof.dr. H.J.H. Clercx is per 1 januari 2006 benoemd tot voltijds hoogleraar op het gebied van transport in turbulente stromingen aan de faculteit Technische Natuurkunde van de Technische Universiteit Eindhoven (TU/e).

Herman Clercx (1961) is afgestudeerd in de theoretische natuurkunde aan de toenmalige Katholieke Universiteit Nijmegen. Zijn promotie-onderzoek heeft hij verricht bij de faculteit Technische Natuurkunde aan de TU/e en betrof de hydrodynamische wisselwerking tussen mesoscopische deeltjes in een suspensie. Na zijn promotie in 1991 is hij naar Nice gegaan om daar als postdoc onderzoek te verrichten aan elektro-reologische vloeistoffen. In 1993 werd hij aan de TU/e aangesteld als universitair docent en later als hoofddocent. Zijn onderzoeksactiviteiten richtten zich op quasi-tweedimensionale turbulentie en haar mengings-eigenschappen. In 2003 ontving hij een Vici-beurs voor onderzoek naar het transport van deeltjes in geofysische turbulentie. Sinds begin 2005 is hij deeltijdhoogleraar aan de Universiteit Twente. Het huidige onderzoek betreft de multischaal modellering van transport in stromingen.

Colofon

Productie:
Communicatie Service
Centrum TU/e
Communicatiebureau
Corine Legdeur

Fotografie cover:
Rob Stork, Eindhoven

Ontwerp:
Grefo Prepress,
Sint-Oedenrode

Druk:
Drukkerij van Santvoort,
Eindhoven

ISBN 978-90-386-1190-7
NUR 926

Digitale versie:
www.tue.nl/bib/

Postbus 513
5600 MB Eindhoven
Telefoon (040) 247 91 11

Bezoekadres:
Den Dolech 2
5612 AZ Eindhoven

