

# Turbulente ondiepe stromingen

Het water in onze natuurlijke omgeving stroomt veelal turbulent door de complex samengestelde geometrieën van rivieren, zearmen en kusten. De combinatie van de relatieve ondiepte en de vele obstakels die het water daar tegenkomt, geeft aanleiding tot de vorming van grootschalige wervelstructuren met quasi-tweedimensionale eigenschappen. De interactie van deze wervels met de 3D-turbulentie die in de bodemgrenslaag gegeneerd wordt, laat zich niet eenvoudig met standaard turbulentiemodellen beschrijven. Met behulp van gedetailleerde metingen in het laboratorium en in het veld kan meer inzicht in de verschijnselen verkregen worden en daarmee een betere beschrijving van de stromingspatronen en bijbehorende transporten. Wim Uijttewaal

4

De stroming van vloeistoffen houdt onderzoekers al eeuwenlang bezig. De complexiteit van turbulentie en de beperkingen van experimentele toegankelijkheid hebben ertoe geleid dat de stromingsleer het vooral moest hebben van empirische kennis. Met name in de

ingenieurswetenschappen zoals de civiele techniek, waar met beperkte kennis toch werkende ontwerpen gemaakt moesten worden, is vanuit de empirie veel kennis opgebouwd. Een startpunt voor het vastleggen van de waterbouwkundige kennis op schrift is voor Nederland het boek van Andries Vierlingh *Tractaet van Dyckagie* uit 1575 geweest [1]. Onder andere Simon Stevin, Christiaan Huygens, Isaac Newton en Daniel Bernoulli hebben zich in de 16<sup>e</sup>, 17<sup>e</sup> en 18<sup>e</sup> eeuw beziggehouden met de theorievorming rond (water)beweging op basis van waarnemingen en differentiaalrekening. Ondanks de vele inspanningen die geleverd zijn in de afgelopen eeuwen, laten veel stromingsverschijnselen zich nog maar in beperkte mate voorspellen, vanwege met name de effecten van turbulentie. In het vakgebied van de waterbouwkunde is experimenteel onderzoek aan fysische (schaal)modellen daarom een essentiële methodiek voor enerzijds het valideren van aannames in re-

kenmodellen en anderzijds het testen van constructies en ingrepen die de waterbeweging moeten sturen, zoals golfbrekers, kribben, dijken en dammen (figuur 1). Door de langdurige historie in de strijd met het water is er in Nederland een schat aan ervaring en kennis verworven die voor een belangrijk deel in kennisinstituten en universiteiten gekoesterd, uitgebreid en doorgegeven wordt.

## Effecten van ondiepte

Ondiepe stromingen treffen we aan in rivieren en kustgebieden omdat daar de horizontale lengteschalen vele malen groter zijn dan de waterdiepte. Dit beperkt de waterbeweging in de verticaal veel meer dan die in de horizontaal waardoor er grootschalige, voornamelijk in het horizontale vlak bewegende wervels kunnen ontstaan. Dit heeft consequenties voor de invloed van bodemwrijving en de horizontale uitwisseling van impuls. Als we kijken naar een versimpelde doorsnede van een Nederlandse rivier (figuur 2), dan zien we dat het water binnen de dijken al-

Wim Uijttewaal studeerde technische natuurkunde aan de Universiteit Twente en promoveerde aan de Universiteit Utrecht op stromingsverschijnselen in bloed. Vanaf 1993 is hij verbonden aan de TU Delft, eerst als postdoc bij de faculteit Werktuigbouwkunde, daarna als vaste medewerker bij de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen waarbij hij zijn onderzoeks aandacht verlegd heeft naar het gebied van ondiepe, turbulente stromingen zoals die voorkomen in rivieren en kustgebieden. Op dit moment bekleedt hij daar de leerstoel Experimentele hydraulica.

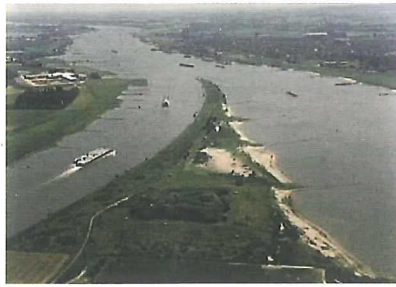


W.S.J.Uijttewaal@tudelft.nl

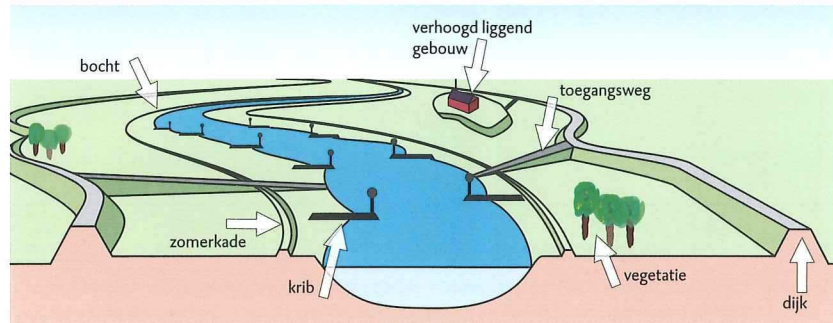


lerlei obstakels tegenkomt. Een deel van die obstakels, zoals kribben en dijken, is geconstrueerd met de bedoeling om de rivier zowel bij hoog als bij laag water te geleiden, maar er zijn ook obstakels die met het gebruik van de uiterwaard te maken hebben, zoals verhoogd liggende toegangswegen, vegetatie, bodemruwheid et cetera. Om nu te kunnen voorspellen wat de invloed van deze obstakels is op de afvoercapaciteit van de rivier is het van belang de waterbeweging te begrijpen in de interactie met deze obstakels. Immers bij een hoge afvoer stroomt het water ook in de uiterwaarden.

Hiertoe zijn er in het laboratorium experimenten uitgevoerd aan elementaire stromingsconfiguraties zoals ondiepe menglagen, ondiepe roosterturbulentie, abrupte verwijdingen, geschematiseerde kribvakken en haveningen. In deze gevallen spelen grote wervelstructuren een rol zoals gevisualiseerd in figuur 3. De beperkte vrijheid die deze wervels hebben in verticale richting gecombineerd met een grote lengteschaal, maakt ze belangrijk voor transportprocessen maar tegelijkertijd moeilijk te modelleren met de gebruikelijke technieken voor de beschrijving van turbulentie. In figuur 4 is de spectrale verdeling van de dichtheid van turbulent kinetische energie weergegeven zoals die gemeten is op verschillende posities benedenstrooms van het begin van de ondiepe menglaag van figuur 3b. Wat hier opvalt zijn de pieken die in de spectra gevonden worden. Deze corresponderen met de grote wervelstructuren en vertonen aan de hoogfrequente zijde een karakteristieke  $-3$ -helling. Verder stroomafwaarts worden de wervels groter en verschuift de piek naar steeds lagere frequenties en kunnen we hier karakteristieke wervelafmetingen uit afleiden van meer dan 1 m terwijl de waterdiepte minder dan 0,1 m bedraagt. Deze grote wervelstructuren worden gevoed door het snelheidsverschil over de menglaag en raken hun energie kwijt aan bodemwrijving. Dit energieverlies wordt dan ook bepaald door de 3D-turbulentie in de bodemgrenslaag. Aan de rechterzijde in figuur 4 is bij de hogere frequenties ( $>10$  Hz) de energieafname zichtbaar die in een turbulente grenslaag verwacht mag worden als gevolg van de energieoverdracht naar steeds kleinere wer-



**Figuur 1** a) Blik op de Pannerdse kop waar de Rijn overgaat in de Waal en het Pannerdens kanaal. b) Overstroomde uiterwaarden met bebouwing.



**Figuur 2** Schematische weergave van een rivier met de verschillende onderdelen die bijdragen aan de stromingsweerstand

## De eerste NTvN-prijsvraag

In maart wordt de uitslag van de twintigste editie van de NTvN-prijsvraag bekend gemaakt. Wim Uijtewaai won de eerste editie en we vroegen hem een artikel te schrijven over zijn huidige werk en kort terug te blikken:

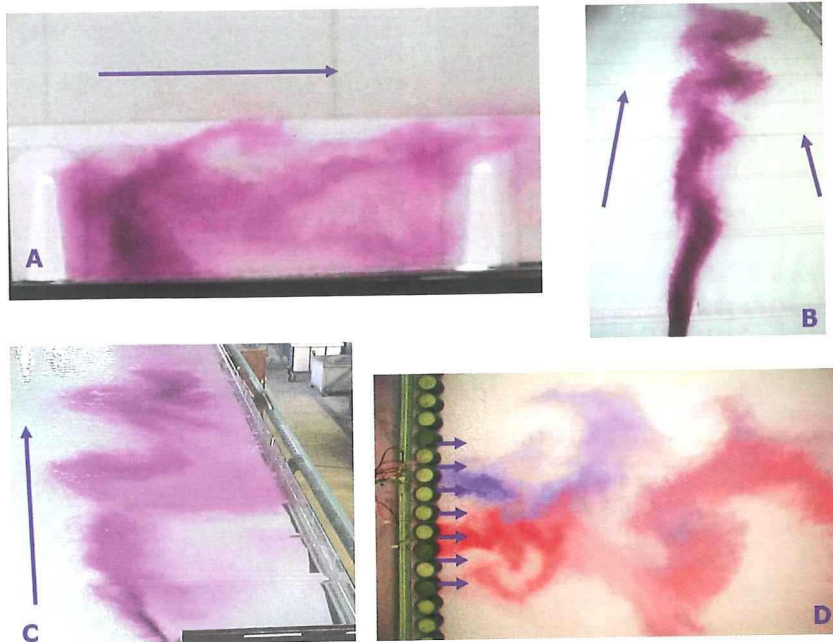
“Toen ik in 1994 het manuscript voor de eerste NTvN-prijsvraag indiende getiteld *Over deeltjes en bloedstroming* [2], beschouwde ik dit als een aanleiding de resultaten van mijn promotieonderzoek voor een breder publiek toegankelijk te maken. Dat het vervolgens het winnende artikel zou worden, was een prettige meevaller. De belangrijke les die ik zelf hieruit geleerd heb, is dat je als onderzoeker steeds de aansluiting met het bredere publiek moet proberen na te streven, vanuit een maatschappelijke verantwoordelijkheid maar ook als een middel tot zelfreflectie. Dit hoeft beslist niet altijd op het niveau van verjaardagfeestjes te gebeuren, maar veeleer in de richting van leerlingen op middelbare scholen die zich oriënteren op hun studiekeuze, of eerstejaarsstudenten die zich voorbereiden op specialisatie, de toekomstige arbeidsmarkt of simpelweg ten behoeve van de belastingbetaler die het onderzoek mogelijk maakt. Voor mij als natuurkundig ingenieur heeft maatschappelijke relevantie steeds een belangrijke rol gespeeld bij de keuzes die ik gemaakt heb. Met een nieuwsgierige en verwonderende houding valt er voor een onderzoeker immers in ieder vakgebied veel moois te vinden.”

vels. Bij voldoende hoge getallen van Reynolds zou de 3D-turbulentie hier een  $-5/3$ -helling te zien moeten geven. Echter door de relatief geringe diepte en snelheid is deze zogenaamde Kolmogorov-energiecascade nauwelijks zichtbaar. De extra energieoverdracht vanuit de grote naar de kleine wervels is rechts in de figuur te herkennen aan de lichte verhoging van de energieniveau bij de hoge frequenties. Deze

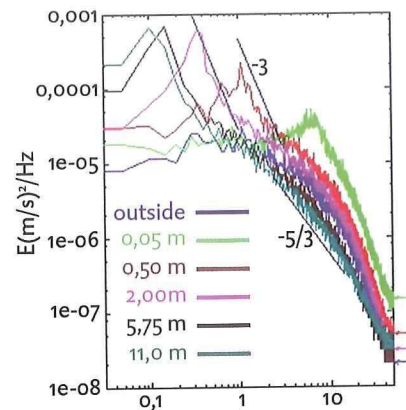
verhoging is het sterkst bij het begin van de menglaag.

Wanneer we de dynamica van deze turbulente stromingen goed in een numeriek model willen weergeven is het van belang de energiehuishouding van de turbulente bewegingen in het model gerepresenteerd te hebben. Dit vereist een mate van detailering, die met de huidige capaciteit slechts beperkt kan worden





**Figuur 3** Grootschalige wervelstructuren in ondiepe stromingen gevisualiseerd met kleurstof in schematische schaalmodellen en van boven gezien. De blauwe pijlen geven de dominante richting van de stroming aan. a) Kribvakstroming, een caviteit wordt gevormd door de twee dammen onder in beeld en wisselt uit met hoofdstroming, b) ondiepe menglaag, twee stromingen met verschillende snelheden mengen, c) loslating van de stroming bij een zijwaartse verbreding en d) ondiepe roosterturbulentie, de stroming tussen de cilinders door vormt een patroon van wervels van steeds grotere afmetingen.



**Figuur 4** Spectra van energiedichtheden voor de frequenties van turbulente fluctuaties zoals gemeten op verschillende benedenstroomse locaties in een menglaag [3].

6

gerealiseerd. Het best haalbare is dat we de grootschalige wervels, die sterk anisotroop zijn, op het rekenrooster weergeven en de voornamelijk dissipatieve effecten van kleinschalige, energiearme, isotrope turbulentie in een versimpelde vorm modelleren, zie ook het voorbeeld verderop in dit verhaal.

### Gekromde stroming

Een natuurlijke rivier is zelden recht. Op plaatsen waar de stroming ruimte krijgt en het rivierbed en de oevers kunnen eroderen, zal de bodemligging zich aanpassen aan de stroming. Dit leidt vaak tot imposant meanderende rivieren die eenvoudig met behulp van Google Earth op alle continenten te vinden zijn (zie figuur 5). De stromingspatronen die ervoor zorgen dat oevers eroderen en rivieren meanderen zijn in grote lijnen bekend. Het water dat door een bocht stroomt ondervindt een centripetale versnelling die leidt tot een verhoogde schuifspanning aan de buitenoever met oevererosie als gevolg. Aan de binnenoever zijn de schuifspanningen verlaagd en vindt aanzanding plaats met als uiteindelijk resultaat dat de bocht zich verlegt. Dit proces leidt tot een steeds sterkere meandering (grotere sinuositeit) waarbij extreme bochten vervolgens

afgesneden kunnen worden en het proces weer van voor af aan begint. In het landschap zijn de restanten van deze processen vaak duidelijk terug te vinden, zie figuur 5. In dichtbevolkte gebieden worden de rivieren in toom gehouden door de aanleg van kribben en dijken en zijn veel bochten afgesneden om scheepvaart te faciliteren. Ondanks deze betuigeling vindt er nog wel transport van sediment plaats en ligt de bodem en daarmee de waterdiepte niet overal vast. Als gevolg van het programma Ruimte voor de Rivieren, dat wordt uitgevoerd om in Nederland meer dynamiek in de rivieren terug te brengen, zal er meer sediment in beweging komen en is het van belang de gevolgen hiervan voor bijvoorbeeld de scheepvaart goed in te schatten. Dit vraagt om kennis van de waterbeweging en de daarmee gepaard gaande sedimenttransporten. Zoals eerder aangegeven is het onmogelijk om alle details van een rivierstroming in een rekenmodel te representeren. Het onderzoek richt zich dan ook op gedetailleerde studies van deelprocessen die vervolgens in geparametriseerde vorm in de grootschalige rekenmodellen ingebouwd worden. Een voorbeeld van een gedetailleerde berekening is in figuur 6 weergegeven. Van een deel van een natuurlijke rivier

is de bodemligging in kaart gebracht. Met inachtneming van de boven- en benedenstroomse randvoorwaarden is stroming berekend tot op lengteschalen van enkele centimeters. Hiertoe is de zogenaamde Large Eddy Simulation-techniek toegepast. Met deze techniek worden alleen de grootschalige turbulente wervels op het rekenrooster opgelost en worden de kleine schalen gemodelleerd met een simpele benadering voor de energie-dissipatie. Voor de spectra zoals weergegeven in figuur 4 betekent dit dat alleen de energierijke wervels met frequenties kleiner dan circa 10 Hz kunnen worden opgelost. De verkregen resultaten sluiten zo goed aan op de metingen dat we de rekenresultaten kunnen gebruiken alsof het metingen zijn. Dit biedt interessante mogelijkheden om complementair aan laboratorium- en veldmetingen, simulaties te doen die zich veel beter laten interpreteren en betrekkelijk goedkoop een uitbreiding geven van de parameterruimte van te onderzoeken gevallen. De opgedane kennis kan vervolgens in geparametriseerde vorm geaggregeerd worden in rekenmodellen die meer geschikt zijn voor praktijktoepassingen.

Zowel voor de laboratoriumexperimenten als voor de numerieke simulaties geldt dat we ten behoeve van de toepassingen op de prototypeschaal van de werkelijke rivier zinvolle uitspraken moeten doen. We moeten ons daarbij realiseren dat het onmogelijk is de fysica in een schaalmodel volledig weer te geven omdat de dimensieloze grootheden die het relatieve belang van de fysische processen weergeven zoals de getallen van Reynolds (traagheid versus viskeuze



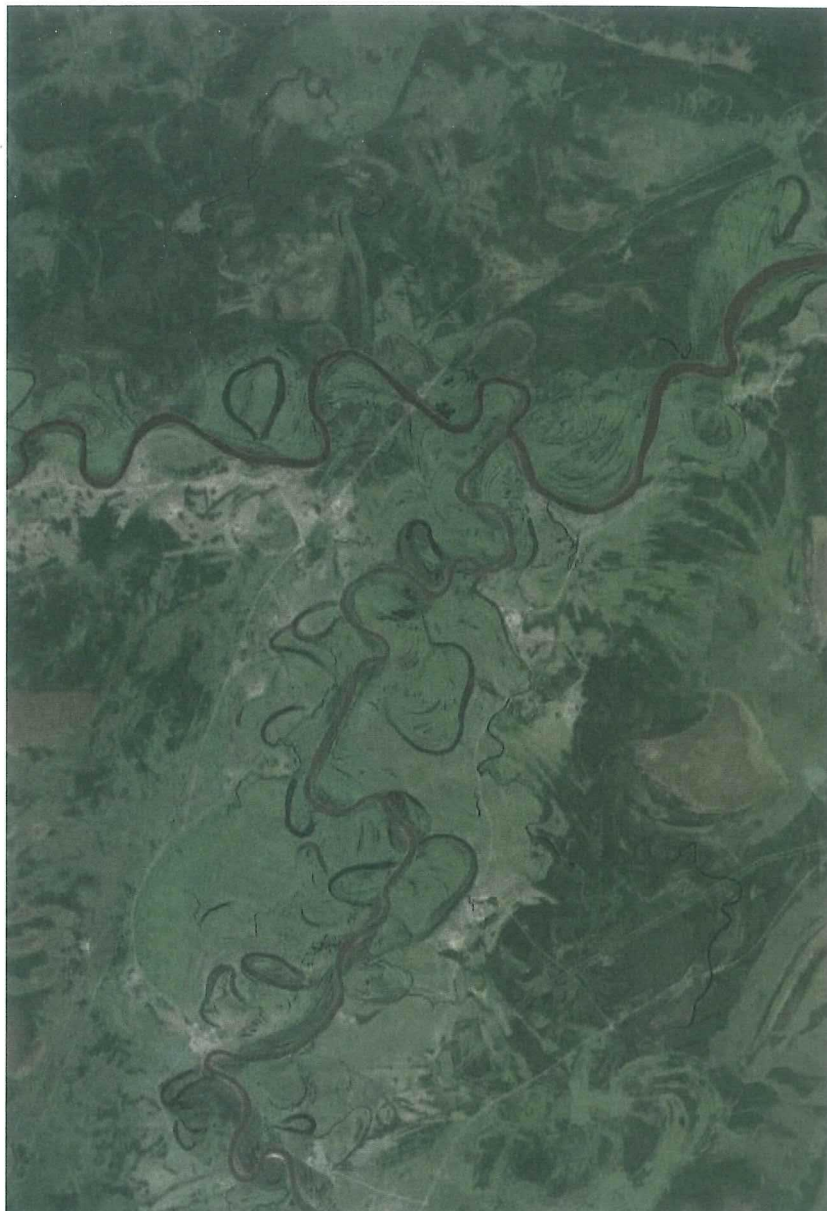
effecten) en Froude (traagheid versus zwaartekrachtseffecten) niet gelijktijdig gerespecteerd kunnen worden. Een uiteindelijke validatie van numerieke en fysische modellen zal dan ook in het veld moeten plaatsvinden.

### Rekenen maar vooral meten

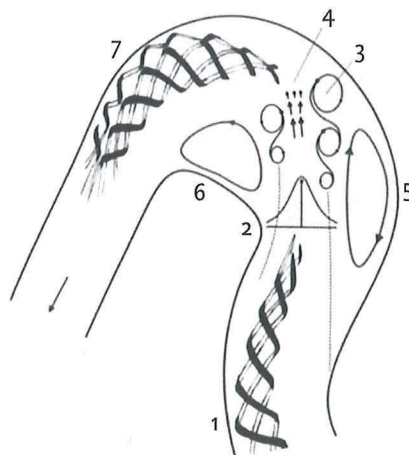
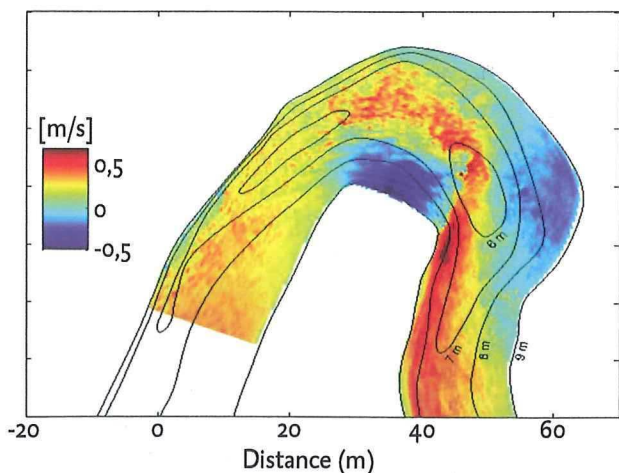
Bovenstaand overzicht van lopend onderzoek laat zien dat experimentele waarnemingen essentieel zijn in het vakgebied van de vloeistofmechanica. Juist omdat rekenmodellen steeds beter en gedetailleerder de fysische processen kunnen weergeven, is het van belang dat de validatie van de modellen gebeurt met behulp van experimentele data die dezelfde mate van detaillering bevatten. Met de steeds toenemende reken capaciteit vraagt dit om een voortdurende investering in het verder ontwikkelen van meettechnieken. Dit betreft enerzijds meettechnieken om de fysische processen op laboratoriumschaal in detail te onderzoeken, anderzijds meettechnieken die in het veld kunnen worden ingezet voor onderzoek en monitoring op prototypeschaal.

### Referenties

- 1 Andries Vierlingh, *Tractaet van Dyckagie* (1575), heruitgave Martinus Nijhoff 's Gravenhage (1920).
- 2 W. Uijttewaal NTVN 60 (1994) 232.
- 3 B.C. van Prooijen en W.S.J. Uijttewaal *Physics of Fluids*, 14 (12), (2002) 4105-411.
- 4 Google Earth: 57°45'31.73" N 67°14'20.95" O.
- 5 W. Ottevanger, *Modelling and parameterizing the hydro- and morphodynamics of curved open channels*, proefschrift TUDelft (2013).



**Figuur 5** Plaatje van Google Earth met daarin de meanderpatronen van de rivier de Tobol in het zuiden van Rusland bij Kazachstan. In het landschap zijn de restanten van afgesneden meanders zichtbaar. De diagonaal van de figuur beslaat 50 km [4].



**Figuur 6** Voorbeeld van een gedetailleerde *Large Eddy Simulation* van een bocht in de rivier Tollense in Duitsland. Links geeft in kleuren de instantane snelheids grootte nabij het vrije oppervlak weer. De contourlijnen geven de bodemligging ten opzichte van een referentieniveau weer. Aan de rechterkant is een karakterisering van de stromingspatronen gegeven: heliceiteit van stroomlijnen als gevolg van de kromming (1 en 7), loslating aan de binnenbocht (2), menglaag wervels (3) tussen de hoofdstroom (4) en het loslaat gebied waarin recirculatie optreedt (5 en 6) [5].