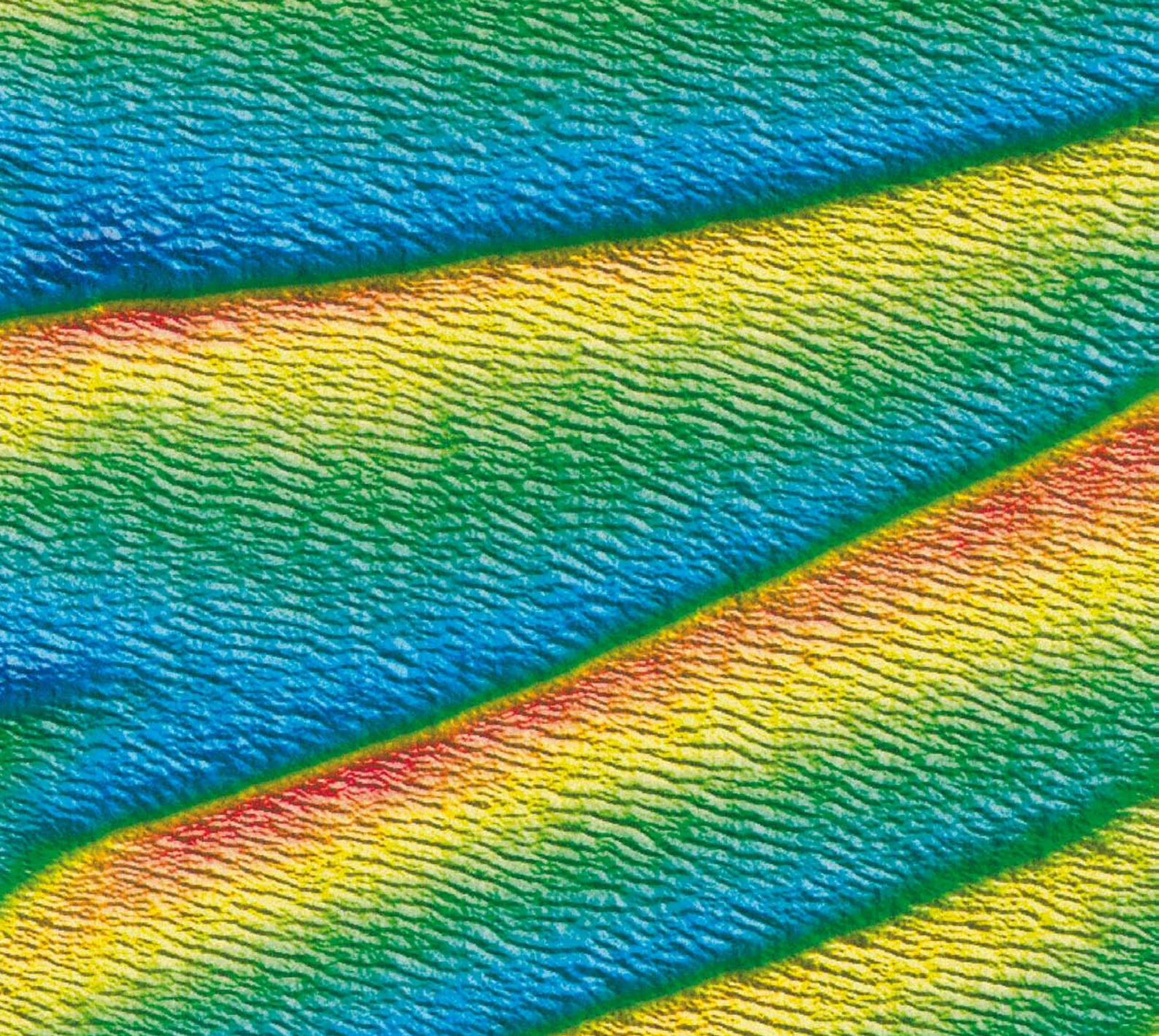




Wandelende duinen onder water

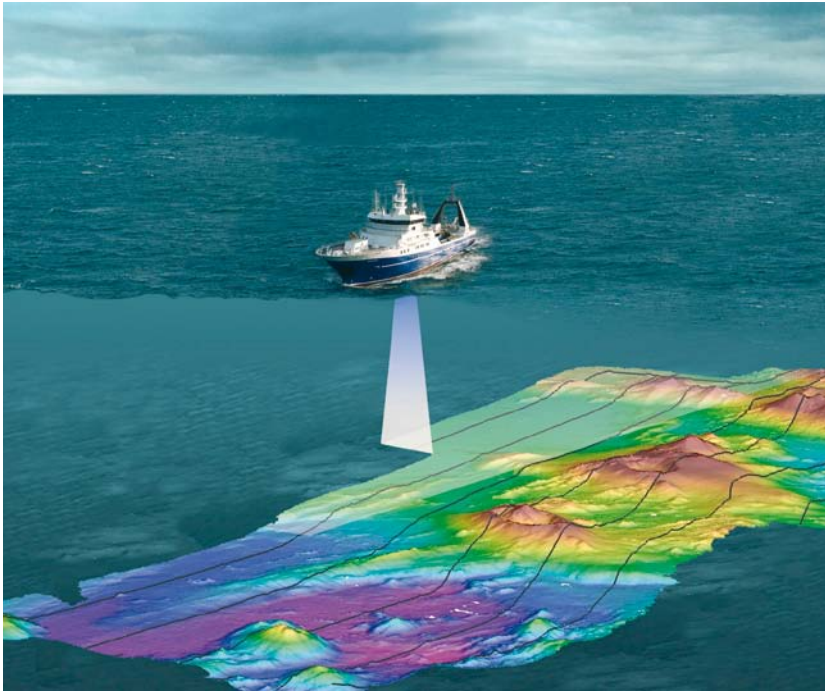
CEES LABAN
CEES.LABAN@MARINEGEOLOGICALADVICE.NL

Water is een van de belangrijkste mechanismen voor de opbouw van het landoppervlak. Rivieren transporteren de afbraakproducten van de gebirgen naar de lagere delen van de aardkorst en naar zee. Hierdoor zorgen ze voor onder meer de uitbouw van delta's en de opvulling van bekkens. Daarnaast ontstaan er tal van vormen onder invloed van stromend water, zowel in de rivieren als in zee. In rivieren en ook in zee ontstaan onder invloed van ondermeer de stroming duinen op de bodem.



AFBEELDING 7 LINKERPAGINA. | (zie ook de tekst op p.165)

Een padloderopname over zandgolven ten westen van de kust van Noord-Holland. De kammen van de zandgolven (rood) verlopen min of meer loodrecht op de dominante stroomrichting. De loefzijde (groenachtig en geel) loopt op van het diepe (blauwe) deel. De megaribbels lopen schuin over de loefzijde van de zandgolf naar de kam. Als ze bovenop de kam zijn aangekomen, rolt de megaribbel naar beneden naar het diepe deel tussen de zandgolven, de trog (blauw), en bouwen zich aan de voet van de zandgolf weer op om vervolgens de volgende zandgolf op te "wandelen". (Opname: Rijkswaterstaat Zee en Delta).



AFBEELDING 1. | Een onderzoeksvaartuig met een padloder (multibeam) brengt de diepte van de rivier- of zeebodem nauwkeurig in beeld door een serie geluidsignalen naar de zeebodem te zenden. (Tekening: Erica Mackay; National Institute of Water and Atmospheric Research, NIWA).

Van al het water dat als regen of sneeuw op het aardoppervlak terecht komt, wordt ca. 25% door rivieren afgevoerd naar zee. Het grootste deel van de neerslag verdwijnt in de bodem en verdampt daar ten dele om weer deel te nemen aan de grote kringloop van het water.

Het water dat door rivieren wordt afgevoerd zorgt voor het verplaatsen van het meeste sediment in de vorm van grind, zand en slib, dat voor een deel in de lagere delen tot afzetting komt en voor de uitbouw van delta's en opvulling van bekkens zorgt. De afgelopen ca. 2,5 miljoen jaar bijvoorbeeld, hebben de Elbe, Wezer en Eridanos vanuit het Oosten en Noorden, en de Rijn en Maas vanuit het Zuiden in Nederland en de aangrenzende Noordzee vele honderden meters dikke sedimentpakketten afgezet. Onder het noorden van Noord-Holland bereikt

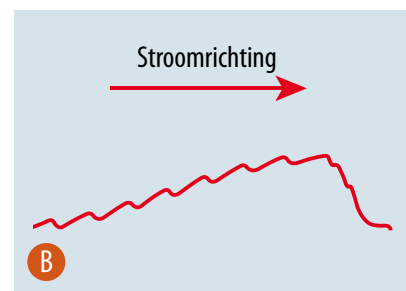
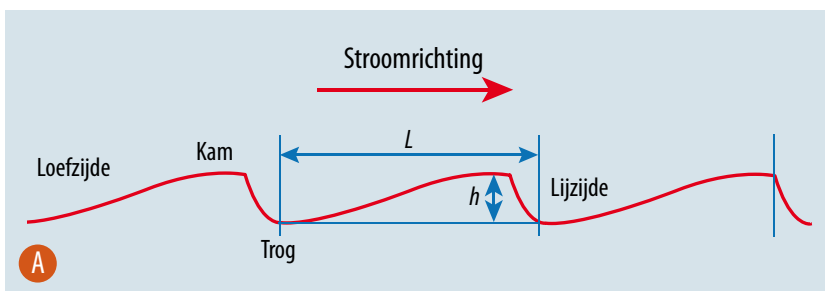
dit pakket al een dikte van 400 m en 200 km verder noordwaarts in de Noordzee bedraagt de dikte van het aangevoerde sediment een kilometer!

Het transport van het zand in de rivier en in zee vindt voor een deel plaats door onder water gevormde duinen, zandgolven genoemd, en kunnen met speciale apparatuur in beeld worden gebracht.

Metten onder water

Het waarnemen van bodemvormen onder water wordt gedaan met een meerkanaalsecholood, ook wel *padloder* of *multibeam* genoemd. Om de waterdiepte te meten wordt met een echolood een geluidssignaal naar de bodem gestuurd, dat door de bodem wordt teruggekaatst. Door het echolood wordt het teruggekaatste signaal weer opgevangen en de tijd die het er over heeft gedaan wordt geregistreerd. Uit deze tijd kan de diepte worden berekend. De geluidssnelheid in water is ongeveer 1500 meter per seconde. Daarbij wordt nog rekening gehouden met de temperatuur en het zoutgehalte van het water, waardoor er kleine correcties in de geluidssnelheid kunnen worden aangebracht.

Met een *padloder* wordt niet één signaal, maar meerdere signalen als een soort waaijer tegelijkertijd uitgezonden (Afb. 1). Op deze wijze kan de bodem in een breed gebied onder het schip worden gemeten en ontstaat er, na verwerking door een computer een goed beeld van het oppervlak van de bodem. Deze beelden worden onder meer gebruikt om de diepte in vaargeulen en scheepvaartroutes op zee te bepalen, maar geven daarnaast een goed beeld van de vormen die zich op de bodem bevinden en die kunnen worden gebruikt bij studies naar de richtingen en hoeveelheden van het getransporteerde sediment.



AFBEELDING 2. | A: Een doorsnede door zandgolven (naar Van Dijk, 2002).
B: Op de loefzijde "wandelen" de megaribbels over de zandgolf. (naar Van Dijk, 2002).



Duinen op de rivierbodem

Op de bodem van de rivier kunnen, als er voldoende zand aanwezig is, door de stroming zandgolven ontstaan. Dit zijn onderwaterduinen die zich meestal in de richting van de stroom voortbewegen en op deze wijze zorgdragen voor het transport van sediment over de bodem van de rivier. Hun kammen liggen min of meer loodrecht op de richting van de stroom en hun hoogte is afhankelijk van de waterdiepte en varieert van enkele decimeters tot soms meer dan een meter, maar bedraagt nooit meer dan ca. 20% van de waterdiepte (Hulscher, 2001). De golflengte (de afstand tussen de toppen van twee duinen) varieert meestal van tientallen tot meer dan honderd meter.

In gebieden waar de duinen zich bewegen hebben ze aan de stroomopwaartse zijde, de loefzijde, een flauw oplopende helling en aan de stroomafwaartse zijde, de lijzijde, een steile helling (Afb. 2A). Dit wijst er op dat het duin zich stroomafwaarts verplaatst en zo voor het transport van het sediment in die richting zorgdraagt. De opbouw van de zandgolf gaat door zogenoemde stroomribbels die over de zandgolf “lopen”, aan de steile zijde naar beneden rollen en zich op

de loefzijde weer opbouwen. In feite zijn het deze ribbels die voor het transport van het zand zorgen (Afb. 2B). Metingen met een *padloder* door Rijkswaterstaat bij de splitsing van de Boven-Merwede in de Nieuwe Merwede en de Beneden-Merwede bij Werkendam laten zien dat de bodem hier bedekt is met zandgolven waarvan de lijzijde stroomafwaarts is gericht (Afb. 3). Een opname in de Lek bij Streefkerk laat echter zien dat de lijzijden van de zandgolven hier stroomopwaarts zijn gericht. Mogelijk is hier sprake van “antiduinen”. Deze kunnen ontstaan als de



AFBEELDING 3. | Een mooi voorbeeld van een rivierbodem bedekt met zandgolven bij de splitsing van de Boven-Merwede in de Nieuwe Merwede en de Beneden-Merwede. Hardinxveld ligt aan de noordkant, Werkendam aan de zuidkant. De blauwgekleurde gebieden zijn ontgravingen die achter de kribben ontstaan. (Opname: Rijkswaterstaat).



AFBEELDING 4. | Zandgolven op de bodem van de Lek bij Streefkerk. De stroom van de Lek gaat van rechts naar links, maar de zandgolven zijn met de lijzijde stroomopwaarts gericht. De blauwgekleurde gebieden zijn ontgravingen die achter de kribben ontstaan. (Opname: Rijkswaterstaat).



stroomsterkte toeneemt en een bepaalde kritische waarde overschrijdt. Dan kunnen de zandgolven zich stroomopwaarts keren (Afb. 4) (Andreotti *et al.*, 2012).

Op het land zorgt de wind voor vergelijkbare vormen. Op het strand zien we de ribbels na hoogwater prachtig de richting van de zee lopen. Ook hieraan is te zien of het eb- of vloedribbels zijn aan de flauwe helling en de steile helling die bij eb naar de zeezijde gericht is (Afb. 6).



AFBEELDING 5. | Het voorkomen van zandgolven in de zuidelijke Noordzee. In het rode gebied komen zandgolven voor (naar: Morelissen *et al.*, 2003)

Onderzeese duinen

Op de zeebodem ontstaan onder bepaalde omstandigheden eveneens zandgolven, net als op de bodem van de rivier.

In de zuidelijke Noordzee met waterdiepten tot ca. 40 m, bevindt zich een enorm gebied met zandgolven. In het zuidelijk deel daarvan zijn plaatselijk hoogten tot meer dan 10 m boven de zeebodem gemeten en in noordelijke richting neemt de hoogte geleidelijk af. Ten westen van Den Helder zijn de zandgolven nog maar vier meter hoog en zelfs minder. Boven de Waddeneilanden komen nog een paar gebieden met zandgolven voor, maar ten noorden ervan wordt de zeebodem nagenoeg vlak (Afb. 5). De gemiddelde hoogte van de zandgolven in dit deel van de Noordzee is ca. 5 m.

De zandgolven komen in het Nederlandse deel van de Noordzee, ten westen van de ca. 20 m dieptelijn voor. In het gebied ondieper dan –20 m is de golfwerking te sterk, waardoor er geen zandgolven ontstaan.

De vloedstroom is in dit deel van de Noordzee noordwaarts gericht en is sterker dan de ebstroom, waardoor de zandgolven zich in noordelijke richting verplaatsen. De zwak hellende loefzijde is naar het zuiden gericht en de steile lijzijde naar het noorden. De kammen van de zandgolven lopen, net als in een rivier, loodrecht op de richting van de stroming. Over de loefzijde van de zandgolven lopen de megaribbels min of meer noordoostwaarts over de zandgolven (Afb. 7).

De zandgolven en ribbels op de zeebodem worden in drie typen ingedeeld (Morelissen *et al.*, 2003; Dorst, 2009):

- *stroomribbels* die in het getij over de zeebodem bewegen met een gemiddelde snelheid van ca. 1 m per uur; hun hoogte varieert tot 10 cm;
- *megaribbels* bewegen zich met een snelheid van ca. 100 m per jaar en hebben hoogten van 10 cm tot 1 m;
- *zandgolven* met hoogten tot 13 m (maar gemiddeld 5 m), golflengte 200 tot 800 m,

verplaatsen zich met een gemiddelde snelheid van ca. 10 m per jaar.

Het zandtransport verloopt door megaribbels en het over de zandgolf “wandelen”. Als de megaribbel de top van de zandgolf heeft bereikt, duikt hij als het ware naar beneden, naar het dal tussen twee zandgolven in. Daar bouwt de megaribbel zich weer op. Op deze manier verplaatsen de zandgolven zich ten westen van de Nederlandse kust langzaam in noord-oostelijke richting. In gebieden waar de eb- en vloedstroming met elkaar in evenwicht zijn, ontstaan “symmetrische” zandgolven.

Dagelijkse metingen

Aan boord van de veerboot *Dr. Wagenmaker van de Texelse Eigen Stoomboot Onderneming*, die tussen Den Helder en Texel heen en weer vaart, heeft het Koninklijk Instituut voor Zeeonderzoek (NIOZ) apparatuur geplaatst die van 06.00 tot 22.00 uur, met een interval van 30 minuten, onder meer de temperatuur van het water en de waterdiepte onder de veerboot meet. Zo is ontdekt dat er 2 tot 7 meter hoge zandgolven met golflengten van 100 tot 200 meter door het Marsdiep de Waddenzee in “wandelen”. De gegevens kunnen aan boord op een



AFBEELDING 6. | Langs de laagwaterlijn op het strand zijn de ribbels vaak mooi te zien. Deze ribbels laten zien dat ze veroorzaakt zijn tijdens de ebstroom. De lijzijde is naar de zeezijde gericht. (Foto: Lia Laban-van Loon)

groot scherm door de reizigers worden bekeken en worden daarnaast direct naar het NIOZ op Texel gestuurd waar ze worden verwerkt.



Toepassing van de kennis

Kennis van het gedrag van de zandgolven in de zuidelijke Noordzee is voor veel activiteiten op zee van groot belang. Sinds het begin van de jaren negentig van de vorige eeuw kan gebruik worden gemaakt van nauwkeurige plaatsbepaling met behulp van satellieten. Daarmee kan de zeebodem met dieptepeilingen gedetailleerd in kaart worden gebracht. De *Dienst der Hydrografie* van de Koninklijke Marine voert met haar onderzoeksschepen voortdurend zeer nauwkeurige dieptelodgingen uit waarmee de waterdiepte en het voorkomen van obstakels zoals scheepswrakken nauwkeurig op de zeekaarten wordt weergegeven. Doordat deze Dienst de lodgingen regelmatig herhaalt, kunnen de gegevens met een interval van bijvoorbeeld vijf of tien jaar met elkaar worden vergeleken en kan de verplaatsing van zandgolven in deze periode worden vastgesteld. Door studies van onderzoekers van de onderzoeksinstituten TNO, Deltares en de Universiteit van Twente is met behulp van deze ge-

gevens een inzicht verkregen in de verplaatsingssnelheid van de zandgolven in het Nederlandse deel van de Noordzee (Hulscher & Van den Brink, 2001; Van Dijk & Kleinbans, 2005). Deze bleek sterk te variëren. Ten westen van Hoek van Holland is de verplaatsing van de zandgolven bij voorbeeld ca. 3 m per jaar, ten westen van IJmuiden ca. 10 m per jaar en ten westen van Texel ca. 18 m per jaar.

Dit soort kennis is belangrijk voor de scheepvaartroutes naar de Nederlandse havens. De Euro-Maasgeul, de aanlooproute naar de havens van Rotterdam, loopt dwars door het gebied met zandgolven. Deze ruim 45 km lange geul wordt door Rijkswaterstaat voortdurend op diepte gehouden, zodat diepstekende schepen met een diepgang van 22,55 m de havens kunnen bereiken. Schepen met een dergelijke diepgang kunnen echter alleen met hoogwater door deze geul varen (Rijkswaterstaat, 2007). Het vaststellen van de verplaatsingssnelheid van de zandgolven langs deze geul is van groot belang voor de veiligheid van de scheepvaart doordat ze een verontdieping van de geul kunnen veroorzaken.

Een andere, meer recente, ontwikkeling op de Noordzee is de aanleg van windmolenparken. De windmolens worden met lange palen in de zeebodem gefundeerd. Het is daarom van belang om bij het ontwerp van de palen en het berekenen van de fundatiediepte het gedrag van de zandgolven in het gebied te kennen. Bij een zandgolfhoogte van bijvoorbeeld vier meter kan tijdens het passeren van een zandgolf de bodemdiepte vier meter meer of minder bedragen.

Op de bodem van de Noordzee ligt ook een groot aantal pijpleidingen van verschillende diameter, die voor het transport van in de diepe ondergrond van de Noordzee gewonnen gas naar de kust fungeren. De pijpleidingen liggen soms op de zeebodem of zijn ingegraven tot een diepte van één of twee meter. Daarnaast liggen er al vele tientallen jaren telefoonkabels op de zeebodem en



AFBEELDING 8A EN OP RECHTERPAGINA 8B. | Kolkaten (potholes) in de Blyde River Canyon (Zuid-Afrika).





sinds kort elektriciteitskabels die de windmolenparken op zee verbinden met de kust. Doordat het gebied waarin de pijpleidingen en kabels liggen bedekt is met zandgolven, kunnen de begraven leidingen bloot komen te liggen door het verplaatsen van de zandgolven. Zelfs kunnen de leidingen, in het dal tussen twee zandgolven in, gaan “hangen” (Morelissen *et al.*, 2003).

Langs de ca. -20 m dieptelijn wordt zand gewonnen dat wordt gebruikt voor de versterking van de kust. De winning vindt meestal tot een diepte van 2 m beneden de zeebodem plaats, maar soms tot grotere diepte van bijvoorbeeld 5 meter of zelfs meer. Door de verplaatsing van de zandgolven wordt het win-gebied langs natuurlijke weg weer opgevuld.

Kolkgraten

De vorming van de duinen onder water vindt plaats als er voldoende zand op de rivierbodem aanwezig is. In gebieden met een harde bodem zoals kalksteen, kunnen ook bijzondere vormen ontstaan. In snelstromende rivieren kunnen draaikolken holten in de bodem gaan vormen. Als een steen in zo’n holte terecht komt, wordt deze door de stroming rondgedraaid en kan er op den duur een diep, rond gat in de rivierbodem worden gevormd. In dit gat worden vaak meerdere stenen “gevangen” en zorgen voor een verdere uitholling. Een beroemd voorbeeld is te zien in de Blyde River Canyon in de Zuid-Afrikaanse provincie Mpumalanga. Hier komen de Blyde-rivier en Treur-rivier bij elkaar en in de kalksteen zijn tal van ronde kolkgraten ontstaan die *Bourke’s Luck* zijn genoemd naar de goudzoeker die hen vond (Afb. 8A,B).

LITERATUUR

Andreotti, B., Claudin, P., Devauchelle, O., Durán, O. & Fourrière, A., 2012.

Bedforms in a turbulent stream: ripples, chevrons and antidunes. *Journal Fluid Mech.*, vol. 690: pp. 94- 128.

Dijk, T.A.G P. van, 2002.

Powerpoint presentatie “Dynamiek zeebodem”, TNO.

Dijk, T.A.G.P. van & Kleinhans, M. G., 2005.

Processes controlling the dynamics of compound sand waves in the North Sea, Netherlands. *Journal Geophysical Research*, Vol. 110, F04S10, doi:10.1029/2004JF000173: pp. 1-15.

Dorst, L. L., 2009.

Estimating Sea Floor Dynamics in the Southern North Sea to Improve Bathymetric Survey Planning, Publications on Geodesy 69, ISBN: 978 90 6132 311 2: 220 pp.

Hulscher, S.J.M. H. & Brink, M. van den, 2001.

Comparison between predicted and observed sand waves and sand banks in the North Sea. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. C5: pp. 9327-9338.

Morelissen, R., Hulscher, S.J.M.H., Knaapen, M.A.F., Ne’meth, A.A. & Bijker, R., 2003.

Mathematical modelling of sand wave migration and the interaction with pipelines. *Water Engineering and Management*, Faculty of Engineering Technology, University of Twente, P.O. Box 217, 7500 AE Enschede, The Netherlands, pp. 128 – 133.

Rijkswaterstaat Noordzee, 2007.

Het “Groene boekje 2007”

Tijpoort Regeling Euro-Maasgeul. Versienr. 2007-3

