

Opdrachtgever:

RIKZ

Onderzoek naar zandtransport en  
kustmorfologische verschijnselen  
in het laboratorium

Project: KUST\*2000

Notitie

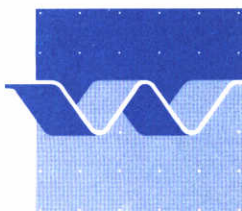
Augustus 1996

Opdrachtgever:

RIKZ

Onderzoek naar zandtransport en  
kustmorfologische verschijnselen  
in het laboratorium

Project: KUST\*2000



**waterloopkundig laboratorium | WL**



## Voorwoord

Het onderzoekprogramma KUST\*2000 is gericht op kustmorfologisch onderzoek ten behoeve van de beheersproblemen die zich voordoen aan de Nederlandse kust. De KUST\*2000-strategie bevat mathematisch-fysische- en veldmethodieken als ook laboratoriummethodieken. De algemene overtuiging is dat kennis van het sedimenttransport in de kustzone belangrijk is voor het oplossen van vele praktische vragen van de beheerder. De kennis van sedimenttransport en kustmorfologische verschijnselen verkeert nog in een verkennende fase. Deze verkenning is doeltreffend als er, naast veld- en modelonderzoek, ruimte is voor onderzoek onder gecontroleerde hydraulische en sedimentologische omstandigheden.

Het is een taak van KUST\*2000 om ervoor te zorgen dat proceskennis wordt toegepast bij het beantwoorden van praktische beheersvraagstukken. Het laboratoriumonderzoek dat hiervoor nodig is, kan op verschillende manieren worden opgezet. Mogelijke strategieën zijn:

- i Het analyseren (uitwerken) van bestaande data gecombineerd met het toetsen van beschikbare transportformuleringen. De deltagoot experimenten, die in LIP kader zijn uitgevoerd, kunnen daarbij uitstekend worden ingezet.
- ii Het uitvoeren van een groot aantal laboratoriumexperimenten waarbij veel parameters (m.b.t. golf- en stroomcondities, sediment-samenstelling, en dergelijke) worden gevarieerd. De meetresultaten worden in een tabel tegen de gevarieerde parameters uitgezet.
- iii Het voortzetten van onderzoek naar processen. In het laboratorium wordt onder andere onderzoek verricht naar de processen die dominant zijn bij sedimenttransport. Het vertalen van de kennis in praktisch bruikbare modellen is een belangrijke vervolgstap en een wezenlijk onderdeel van deze strategie.
- iv Het omzetten van grootschalige kustproblemen naar de laboratoriumschaal. Hierbij kan gedacht worden aan een proef naar het opvullen en migreren van een zandwinkuil op de vooroever, of een experiment met een lange brekerbank die doorsneden wordt door een muigul.

Het eerste alternatief zou in LIP of MAST kader nader uitgewerkt kunnen worden. Het tweede alternatief wordt hier niet aanbevolen omdat het een korte termijn oplossing is die niet bijdraagt aan de noodzakelijke vermeerdering van de proceskennis. In de voorliggende notitie worden het derde (Hoofdstuk 3) en vierde (Hoofdstuk 4) alternatief uitgewerkt. De keuze voor deze strategie vloeit voort uit het KUSTGENESE programma en wordt gerechtvaardigd door de veelbelovende resultaten.

RIKZ, Den Haag

D.W. Dunsbergen



# Inhoud

	blz.
<b>1 Inleiding</b> .....	1
<b>2 Onderzoeksstrategie</b> .....	2
2.1 Algemeen .....	2
2.2 Mathematische methodieken; proces- en gedragsmodellen .....	2
2.3 Veldmethodieken .....	4
2.4 Laboratoriummethodieken .....	5
2.5 Laboratoriumonderzoek binnen Kustgenese .....	6
2.6 Voortgezet laboratoriumonderzoek .....	7
<b>3 Zandtransport in de kustzone</b> .....	8
3.1 Inleiding .....	8
3.2 Bodemtransport .....	9
3.2.1 Onderzoekslijn Kustgenese .....	9
3.2.2 Resultaten .....	10
3.2.3 Onderzoekslijn .....	11
3.3 Suspensietransport .....	12
3.3.1 Onderzoekslijn Kustgenese .....	12
3.3.2 Resultaten .....	13
3.3.3 Onderzoekslijn .....	14
<b>4 Morfodynamica van plaat/geul/bank systemen in de kustzone</b> .....	15
4.1 Inleiding .....	15
4.2 Brekerbanken en muigeulen .....	15
4.2.1 Onderzoekslijn Kustgenese en resultaten .....	15
4.2.2 Onderzoekslijn .....	16
4.3 Geul en platen zeegatsystemen .....	17
4.3.1 Onderzoekslijn Kustgenese en resultaten .....	17
4.3.2 Onderzoekslijn KUST*2000 .....	18

## Referenties

# 1 Inleiding

Ter voorbereiding van laboratoriumonderzoek in het onderzoeksprogramma KUST\*2000 is aan het Waterloopkundig Laboratorium gevraagd (offerteaanvraag RIKZ/966200, d.d. 12/6/1996; offerte HK3480/H2482/JR, dd. 14/6/1996) een notitie te schrijven waarin een te volgen onderzoeksstrategie wordt uiteengezet.

De notitie gaat in op laboratoriumonderzoek naar:

- Bodem- en suspensietransport,
- Morfodynamica van geul/plaat/bank systemen in de kustzone.

De onderzoekslijnen, die met betrekking tot deze onderwerpen in KUSTGENESE zijn gevolgd, worden beschreven en er wordt een overzicht gegeven van de daarbij bereikte onderzoeksresultaten. Vervolgens wordt een beschrijving gegeven van de in KUST\*2000 voor te stellen onderzoekslijnen.

De notitie bestaat uit drie hoofdstukken, waarbij:

- Hoofdstuk 2 in algemene zin ingaat op laboratoriumonderzoek als onderdeel van een onderzoeksstrategie, waarin ook veldonderzoek en mathematisch-fysisch onderzoek is opgenomen.
- Hoofdstuk 3 ingaat op het laboratoriumonderzoek naar zandtransport en de daarbij gevolgde en te volgen onderzoekslijnen, en
- Hoofdstuk 4 de strategie voor het onderzoek naar morfodynamica van geul/plaat/bank systemen beschrijft.

De notitie is geschreven door prof.dr.ir. L.C. van Rijn (WL) en dr.ir. J.S. Ribberink (WL) en werd begeleid door dr. D.W. Dunsbergen (RIKZ).

## 2 Onderzoeksstrategie

### 2.1 Algemeen

In het onderzoeksplan KUST\*2000 (RIKZ, 1996) is als kerntaak geformuleerd: het toepasbaar maken van kustmorfologische kennis voor de beleidsuitvoering door middel van het uitvoeren van generiek en specifiek onderzoek. Het generieke onderzoek omvat het verzamelen van kennis van de sturende processen in de kustzone en het bundelen van deze kennis in breed toepasbare kennisdragers (gedragsmodellen).

Een goede onderzoeksstrategie voor het generieke kustmorfologisch onderzoek kenmerkt zich door de integratie van de sterke punten van de verschillende bestaande onderzoeks- methodieken, zoals aangegeven in het KUST\*2000 plan: mathematisch-fysische methodieken, veld- methodieken en laboratoriummethodieken.

De gekozen onderzoeksstrategie kan als volgt worden omschreven:

- simuleren en voorspellen met behulp van mathematisch-fysische proces- en gedragsmodellen, met als doel het identificeren van kennislacunes,
- uitvoeren van veldmetingen voor het genereren van randvoorwaarden, het verzamelen van proceskennis en het verkrijgen van validatiegegevens met als doel het verbeteren/ontwikkelen van proces- en gedragsmodellen,
- uitvoeren van systematische laboratoriummetingen onder gecontroleerde omstandigheden voor het verzamelen van proceskennis en het verkrijgen van validatiegegevens met als doel het verbeteren/ontwikkelen van procesformuleringen.

Hierna (in de Paragrafen 2.2, 2.3 en 2.4) worden de sterke en zwakke punten van de genoemde onderzoeksmethodieken beknopt beschreven.

In de Paragrafen 2.5 en 2.6 wordt de rol van het laboratoriumonderzoek binnen het projecten Kustgenese en KUST\*2000 geïntroduceerd en verder uitgewerkt in Hoofdstuk 3 en 4.

### 2.2 Mathematische methodieken; proces- en gedragsmodellen

Simulatie en voorspelling van de driedimensionale kustprocessen met een zekere nauwkeurigheid vereist het gebruik van mathematische modellen, systemen waarin onze kennis van de processen in wiskundige formuleringen is opgeslagen.

In de afgelopen jaren is er een reeks van geschikte modelconcepten ontwikkeld, die globaal in twee brede groepen kunnen worden verdeeld: procesmodellen en gedragsmodellen.

De procesmodellen zijn gebaseerd op een gedetailleerde beschrijving van de fysische processen via een reeks aaneengeschaalde submodellen die in een lussysteem worden doorlopen om het transport van water en zand door golven en stromen in wisselwerking met de bodem te kunnen berekenen (morfodynamiek). Bekende voorbeelden zijn: tweedimensionale-vertikale (2DV) raaimodellen, tweedimensionale-horizontale (2DH) en driedimensionale (3D) veldmodellen.



De meeste ervaring is opgedaan met de 2DV-raaimodellen die zijn ontwikkeld voor de simulatie van de kustdwarse processen zoals het vervormen en het breken van golven en de daaraan gekoppelde golfasymmetrie en retourstroming. In principe kunnen dit soort modellen de vorming, groei, verplaatsing en afbraak van brandingsbanken simuleren, mits het subtiële evenwicht van opbouwende en afbrekende processen in voldoende nauwkeurigheid kan worden weergegeven.

De water- en zandstromen en bijbehorende bodemligging in grootschalige kustgebieden worden uitgerekend met veldmodellen, nu nog voornamelijk tweedimensionale-horizontale procesmodellen, maar binnenkort ook met drie-dimensionale modellen.

De 2DH-veldmodellen zijn eigenlijk alleen geschikt voor omstandigheden waarbij de bodemstroming dezelfde richting heeft als de hoofdstroming. In de kustzone is dit eerder een uitzondering dan regel. De complexe 3D-struktuur van kustlangse bovenstromen en kustdwarse onderstromen vereist in essentie een driedimensionale benadering of een quasi-driedimensionale benadering als tussenoplossing.

Driedimensionale procesmodellen (in samenhang met laboratorium en veldonderzoek) zijn van essentieel belang voor het begrijpen van de water- en zandstromen in gekompliceerde morfologische systemen, zoals een zeegat met de achterliggende vloedkom, waarin het zand wordt afgezet dat is geërodeerd van de aangrenzende zeekust en de buitendelta.

Volledige 3D-veldmodellen waarbij de variabelen op een 3D-rekenrooster worden uitgerekend zijn nog maar in het beginstadium van ontwikkeling, maar zullen de komende jaren een hoge vlucht doormaken mede gestimuleerd door de almaar toenemende computerkracht en de opkomst van nieuwe synoptische meettechnieken (remote sensing) voor golven, stroming en zelfs bodemligging, waardoor gedetailleerde modelvalidatie binnen bereik komt.

De complexiteit van de proces-modellen staat echter op gespannen voet met het grootschalige karakter van de meest relevante morfologie. Lange termijn voorspellingen (> 5 jaar) van gekompliceerde morfologische systemen zoals kusten, estuaria en zeegaten met behulp van procesmodellen zullen vaak ontsporen, omdat kleine fouten in de begintoestand of in de randvoorwaarden of in de procesformuleringen gaan groeien. Morfologische voorspellingen op lange termijn moeten voorlopig dan ook niet het hoofddoel van de procesmodellen zijn. De nadruk moet niet liggen op de grootschalige lange termijn bodemligging, maar veel meer op de korte termijn zandstromen (netto getij-effect, stormeffect enz.) als invoer voor de grootschalige gedragsmodellen.

Grootschalige en lange termijn morfologische veranderingen kunnen vaak doeltreffender worden berekend met gedragsmodellen, waarin het gemiddelde gedrag van het morfologische systeem wordt gemodelleerd op de schaal van het beschouwde systeem. In deze in het algemeen conceptuele modellen kunnen meer kleinschalige procesinformatie en empirische informatie worden weergegeven door geparametriseerde relaties. Een absolute noodzaak bij deze aanpak is de kalibratie en validatie van de modellen op basis van lange termijn morfologische tijdreeksen.

Als konklusie kan worden gesteld dat het laboratoriumonderzoek direkt bijdraagt aan de (korte termijn) procesformuleringen.



## 2.3 Veldmethodieken

De essentie van procesgericht veldonderzoek is het vastleggen en begrijpen van de stroming van water en zand en de daarbij behorende bodemveranderingen (vooral rondom stormsituaties).

Onderscheid kan worden gemaakt in:

- procesmetingen: hierbij gaat het om het uitvoeren van metingen van hydrodynamische processen, sedimentologische parameters, sedimentconcentraties en -transporten en kleinschalige morfologische processen met als doel het vergaren van kennis over de fysische processen en het verzamelen van gegevens voor validatie van modellen.
- morfologische proeven: hierbij gaat het om het uitvoeren van een proef in de natuur (bijv. het storten van zand of het graven van een geul), met als doel het verkrijgen van inzicht in de werking van het morfologische systeem op een specifieke lokatie.

De procesmetingen kunnen worden onderverdeeld in: puntmetingen, raaimetingen en gebiedsmetingen (synoptische metingen).

Bij puntmetingen kan worden gedacht aan metingen met behulp van driepoten en meetpalen of vanaf een verankerd vaarttuig of platform. De standaardmethode voor het waarnemen van de momentane waterbeweging in de kustzone is het gebruik van zelfregistrerende instrumenten met gegevensopslag onder water. De ervaring heeft geleerd dat op deze wijze waardevolle en betrouwbare gegevens over een groot deel van de waterkolom kunnen worden verzameld. Een standaardmethode voor het meten van de zandconcentraties en het suspensie-transport nabij de bodem in de kustzone is nog niet beschikbaar. Het meest veelbelovende meetsysteem is de akoestische zandtransportmeter (AZTM), gebaseerd op het principe van verzwakking en verstrooiing van geluidsgolven aan de zanddeeltjes. Recent is er een vijfvoudige AZTM (simultane uitvoering van 5 puntmetingen in de verticaal) gereedgekomen door samenwerking van de Universiteit van Utrecht, Rijkswaterstaat en het Waterloopkundig Laboratorium. Het gebruik van dit instrument stelt hoge eisen aan de verticale positiebepaling van de meetpunten als gevolg van de grote zandconcentratiegradiënten nabij de bodem. Zolang dit probleem niet is opgelost, komt een opstelling van de AZTM in een "stand-alone" driepoot niet in aanmerking voor het doen van veldmetingen. Ook zijn de financiële risico's bij verlies of beschadiging dan te groot (investering AZTM bedraagt ca. 0,5 miljoen). De beste aanpak is vooralsnog het uitvoeren van korte ("on-line") meetseries, waarbij de instrumenten vanaf een vast of mobiel platform op de zeebodem worden gezet. Hiervoor zijn de WESP en de CRIS in ontwikkeling bij Rijkswaterstaat.

Nog veel moeilijker dan het meten van het suspensie-transport, is het meten van het bodemtransport dat optreedt in een dunne laag (sheet flow laag) bij de bodem. De beste aanpak is hierbij de in het laboratorium beproefde CCM-geleidendheidsmethode te proberen toe te passen in het veld. Mechanische technieken (pomp- en vangapparatuur) zou eveneens op geschiktheid kunnen worden onderzocht. Aanvullend laboratoriumonderzoek in de grote golfunnel zal daarbij nodig zijn.

Onder het uitvoeren van synoptische metingen wordt verstaan het simultaan vastleggen van een aantal parameters in een vooraf gedefinieerd gebied met behulp van "remote-sensing" technieken. Veelbelovende technieken zijn: walradar en satelietradar (RWS-BAS) voor opper-



vlakke-uitwijkingen en -stroomsnelheden, maar ook voor globale bodemmorfolgie als resultaat van inverse modelleringstechniek (video/ARGUS); ADCP (acoustiek)-metingen voor stroomsnelheidsvertikalen; radiometrische metingen voor sedimenttransportpatronen; video-camera voor golfbrekingspatronen enz. Synoptische metingen hebben soms als nadeel het verlies van nauwkeurigheid door middelling over relatief grote afstanden (centimeter tot meters), waardoor details verloren gaan.

Komplicerende factoren bij veldmetingen zijn de driedimensionaliteit en de niet-uniformiteit van de vloeistof- en sedimentkarakteristieken in de natuur. Veel van de verschijnselen treden bovendien simultaan op in de tijd en in de ruimte, waardoor een systematische studie van de betrokken parameters bijna onmogelijk is.

## 2.4 Laboratoriummethodieken

Aanvullend op bovengenoemde methodieken zijn er een aantal laboratoriummethodieken (modellen) beschikbaar.

De fysische laboratoriummodellen kunnen worden geklassificeerd als:

- schaalmodellen met als doel het doen van onderzoek (op kleinere schaal dan in de werkelijkheid) naar praktische oplossingen voor hydraulische problemen,
- procesmodellen met als doel het doen van onderzoek naar elementaire fysische verschijnselen op het gebied van stroming, zandtransport en morfologie.

De belangrijkste voordelen van laboratoriummodellen zijn:

- onmiddellijke beschikbaarheid van synoptische informatie, die kan worden opgeschaald naar ware grootte of kan worden gebruikt als validatiemateriaal voor fysisch-mathematische modellen,
- systematische studie van fysische verschijnselen onder gecontroleerde en reproduceerbare omstandigheden,
- relatief eenvoudige en goedkope methode voor procesgericht onderzoek.

Een belangrijk element in het gebruik van fysische schaalmodellen is het kwantitatieve begrip van schaalfouten of schaafeffekten dat wil zeggen de afwijkingen tussen het gedrag van de fysische grootheden in het model en in de natuur (werkelijkheid). Deze afwijkingen hangen veelal samen met een onjuiste weergave (in het schaalmodel) van een aantal kenmerkende fysische parameters zoals Froudegetal, Reynoldsgetal, Shieldsparameter voor sedimentmobiliteit en bodemruwheid. Maar ook eventuele ruimtebeperkingen van het model of vereenvoudigde randvoorwaarden in het model hebben invloed op de vertaling van de modelresultaten naar de natuur. Deze laatstgenoemde effecten kunnen vaak beter worden aangeduid als laboratoriumeffecten dan als schaafeffekten.

Bij schaalonderzoek naar zandtransport en morfologie zijn de karakteristieke kentallen:

- de Shieldsparameter: dimensieloze verhouding tussen de bodemschuifkracht op de korrels en het gewicht onder water van de korrels,
- het Reynoldsgetal betrokken op de korrel: dimensieloze weergave van het type stroming (turbulent of laminair) rondom de korrel,



- het suspensiegetal: dimensieloze weergave van de bijdragen van het bodem- en het suspensietransport in het totaaltransport,
- relatieve diepte; verhouding van de waterdiepte en de korreldiameter,
- relatieve dichtheid: verhouding van de dichtheid van sediment en die van water.

In het ideale geval (zonder schaaleffecten) moeten deze kentallen dezelfde waarden hebben in de natuur en in het model. Vaak kan hier echter niet aan worden voldaan en zijn schaalfouten dus onvermijdelijk. Bij aanwezigheid van relatief fijn sedimentmateriaal is een korrekte weergave van de Shieldsparameter en het suspensiegetal van het grootste belang om een juiste verhouding van het bodem- en suspensietransport te krijgen. Vaak kan de diameter van loskorrelig materiaal niet voldoende omlaag worden geschaald om aan deze eis te voldoen, zonder in problemen te komen met het loskorrelige gedrag (het gedrag van kohesief slib is fundamenteel anders dan dat van zand). Een bijkomend probleem is de schaling van de bodemvormen. De toepassing van fijn sediment in het model resulteert gewoonlijk in de opwekking van ribbels, terwijl in de natuur zandgolven of een vlakke bodem aanwezig kunnen zijn. In het verleden is getracht deze problemen deels op te lossen door het gebruik van lichtgewicht materialen (bakeliet, polystyreen enz.). De verhouding van het bodem- en het suspensietransport kan dan beter worden weergegeven maar de bodemvormen en de bijbehorende effectieve ruwheid wordt echter niet korrekt geschaald.

Alhoewel schaaleffecten vaak onvermijdelijk zijn en deze de interpretatie van de modelresultaten bemoeilijken, kan de toepassing van schaalmodellen in het kustonderzoek nog steeds een waardevolle bijdrage leveren als het gaat om praktijkproblemen met een sterk lokaal driedimensionaal karakter (waterbeweging en morfologie rondom konstrukties enz.). Vooral de waterbeweging kan in een schaalmodel met vaste bodem op uitstekende wijze worden bestudeerd (bijv. scheve stroming over zandbanken en -golven of het breken van golven op een hoge zandbank).

Naast de neergang van het laboratoriummodel als schaalmodel kan er een opgang van het laboratoriummodel als procesmodel worden gesignaleerd, vooral gestimuleerd door de snelle ontwikkeling van de mathematische procesmodellen en de daarmee samenhangende behoefte aan beschrijving en validatie van de relevante fysische verschijnselen. Procesmodellen met vast zowel als beweeglijke bodem komen hiervoor in aanmerking.

In het onderzoeksplan KUST\*2000 zijn voorstellen gedaan voor het uitvoeren van procesgericht onderzoek in laboratoriumfaciliteiten. Dit is verder uitgewerkt in Paragraaf 2.6.

## 2.5 Laboratoriumonderzoek binnen Kustgenese

Binnen het project Kustgenese heeft het laboratoriumonderzoek naar golf-stroominteractie en zandtransport een belangrijke plaats gehad. Dit heeft geresulteerd in een proefschrift (Al-Salem, 1993) en een reeks van publikaties over bodem- en suspensietransport door golven en stroom in de internationale vakpers (zie Appendix I).

Het onderzoek is uitgevoerd langs twee lijnen: de fundamentele lijn (Universiteiten en MAST) en de praktische lijn (WL).

Het fundamentele onderzoek betrof het vergaren van kennis van fysische processen in de kustzone en het modelleren van de verkregen kennis in procesmodellen. Het praktische onderzoek was gericht op het direkt meten van zandtransporten en het verbeteren van de beschikbare modellen op basis van deze laboratoriummetingen.



Als voorbeeld van een resultaat van het praktische laboratoriumonderzoek kan worden genoemd het berekenen van de jaargemiddelde zandtransporten in een aantal raaien langs de gesloten Hollandse kust ten behoeve van het vaststellen van de zandhuishouding in deze kustzone door gebruik te maken van in het laboratorium afgeleide transportformules (Kustnota 1995). Gegeven alle onnauwkeurigheden, bleken de gemeten zandvolumeveranderingen in de balansvakken in redelijke overeenstemming te zijn met de berekende zandtransporten op de vakranden. Dit geeft enig vertrouwen in de gevolgde onderzoeksaanpak (zie Hoofdstuk 3).

## 2.6 Voortgezet laboratoriumonderzoek

Het voorgestelde laboratoriumonderzoek is gericht op:

- procesonderzoek van bodem- en suspensietransport door golven en stroom,
- principeproeven naar geul-plaat en geul-bankgedrag.

Analyse van veldgegevens in de kustzone en in het waddengebied toont aan dat er een aanzienlijke variatie is van de zandsamenstelling langs het dwarsprofiel van de kust (zowel horizontaal als vertikaal). Dit kan leiden tot of zal vaak het gevolg zijn van selectief transport van zand. De huidige procesmodellen geven aan dat de richting en grootte van het netto transport in sterke mate worden bepaald door de verhouding van het bodem- en het zwevend transport, wat weer afhangt van de samenstelling van het lokale bodemmateriaal. Kleine verschillen in de zandsamenstelling kunnen zo leiden tot een omslag in de lokale transportrichting, van kustwaarts naar zeewaarts en omgekeerd. De huidige procesmodellen zijn echter nog onvoldoende betrouwbaar om deze effecten adequaat te kunnen weergeven. Door het uitvoeren van experimenteel onderzoek in een grote golfunnel kan er informatie worden verkregen van de korreldiameterinvloed op het bodemtransport. Vergelijkbaar onderzoek in een golfgoot zal meer kennis opleveren over de korreldiameterinvloed bij het suspensietransport.

Recente metingen in het laboratorium en in de natuur (NOURTEC-onderzoek Terschelling) hebben aangetoond dat het oscillerende of golf-gerelateerde suspensietransport een significante bijdrage levert in het totale zandtransport en dus niet mag worden verwaarloosd, zoals dit gebeurt in de huidige procesmodellen. Verkennend onderzoek in een laboratoriumgoot is nodig om tot een formulering voor dit type transport te komen.

Kennis van het geul-plaat en geul-bankgedrag is nog maar zeer beperkt aanwezig. Om tot modelconcepten te komen, is er verkennend onderzoek nodig (principeproeven) in een golfstroombasin. De aandacht moet zijn gericht op hydrodynamisch en morfologisch onderzoek naar geul-plaat/bankontwikkeling, geul-plaat/bankmigratie, geulverzanding en morfologische stabiliteit in geschematiseerde hydraulische omstandigheden. Tevens kunnen er procesmetingen van de water- en zandbewegingen worden uitgevoerd. Het belang van dit onderzoek ligt in de mogelijkheid om inzicht te verkrijgen in de complexe dynamiek van geulen, banken en platen in gecontroleerde omstandigheden, waarin tevens goed kan worden gemeten. De gegevens kunnen ook worden gebruikt als validatiemateriaal voor de proces- en gedragsmodellen.

Een nadere onderbouwing en uitwerking van deze laborotrium onderzoekstopics wordt gegeven in Hoofdstuk 3 en 4.



## 3 Zandtransport in de kustzone

### 3.1 Inleiding

Zandtransport in de kustzone vindt plaats onder invloed van een reeks van aandrijvende mechanismen, zoals golven, getijstrooming en wind. Vooral zandtransport door golfwerking en onder invloed van golf-stroom interacties is een complex en nog moeilijk te modelleren proces, bijv. in vergelijking met zandtransport onder invloed van strooming alleen (zoals bijv. in rivieren). Voor een deel hangt dit samen met de complexe hydrodynamica in de kustzone, voor een ander deel is dit gerelateerd aan het complexe gedrag van zand o.i.v. dit type stromingen.

De processen dichtbij de zeebodem, die zich in de door golven gegenereerde bodemgrenslaag afspelen (laagdikte van de orde 0-10 cm), spelen een cruciale rol bij het zandtransport. Ze worden sterk beïnvloed door de oscillerende orbitaalbeweging en de interacties met de zeebodem (bijv. bodemribbels) en zijn bepalend voor:

- het sterk tijdsafhankelijke zandtransportproces in deze laag (o.a. bodemtransport), en
- de opwerveling van gesuspendeerd sediment naar hogere niveau's in de waterkolom (suspensietransport).

Bodemtransport wordt hierbij gedefinieerd als het transport in de (golf)bodemgrenslaag van de rollende, glijdende en springende korrels met veel onderling contact en veel contact met de zeebodem. Ook sheet flow, met hoge zandconcentraties ( $> 5-10$  volumepercent), wordt als bodemtransport beschouwd. Het fysische karakter van bodemtransport verschilt sterk van het suspensietransport, dat zich boven de bodemtransportlaag afspeelt en vooral wordt gedomineerd door netto (over de korte golven gemiddelde) stromingen, turbulente mengingsprocessen door snelheidsgradiënten en golfbreking.

In de eerste modelconcepten voor zandtransport in de kustzone (bijv. Bijker, 1967) wordt het zandtransportproces benaderd op een tijdschaal die vele malen groter is dan de periode van de korte golven. Golven fungeren als opwervelingsmechanisme voor het sediment en netto stromen verzorgen het transport van deze sedimentlast. Deze aanpak is aannemelijk te maken voor gesloten-kust situaties met een dominante langsstroming en langstransport en voldoet in de praktische toepassing. Globaal 10 jaar geleden kwam in het project Kustgenese de nadruk van het Nederlandse zandtransportonderzoek meer op dwarstransportprocessen te liggen, onder meer ingegeven door bijv. de ontwikkeling van het Voordelta gebied. Naast onderzoek naar het door Bijker beschreven 'stromingsgerelateerde' transport, werd onderzoek opgezet naar de 'golfgerelateerde' component van het zandtransport. Deze transportcomponent, die met name voor dwarstransportprocessen niet kan worden verwaarloosd, wordt bijv. veroorzaakt door de asymmetrische oscillerende bodemsnelheden in de richting van de golfvoortplanting (bijv. door golfasymmetrie en/of golf-stroom interactie). De grenslaagverschijnselen bij de zeebodem (0-10 cm) zijn voor het golfgerelateerde transport van wezenlijk belang, maar zijn echter relatief onbekend en moeilijk in het veld te meten.

Het zandtransportonderzoek heeft zich in de afgelopen jaren in verschillende onderzoekskaders (Kustgenese, MAST, LIP) en bij verschillende instituten afgespeeld (TUD, UU, KVI).



Een *fundamentele* lijn was vooral gericht op het verkrijgen van:

- fysisch inzicht in de tijdsafhankelijke mechanismen en de verticale structuur van de transportprocessen,
- de analyse van deze processen met behulp van elementaire tijdsafhankelijke modellen voor golf-stroom-sediment interactie.

Een *praktische* lijn (zoals gevolgd binnen het Kustgenese-onderzoek) was gericht op het vertalen van de nieuwe kennis in praktisch bruikbare zandtransportmodellen, die in morfologische modelsystemen (UNIBEST, DELFT2D/3D) zijn ingebouwd.

Laboratoriumonderzoek heeft zich hierbij vooral toegespitst op het vergroten van inzicht en het ontwikkelen van conceptuele modellen voor transportprocessen:

- die in het veld niet of slechts tegen zeer hoge kosten kunnen worden gemeten, en
- waarover nog een zodanig groot gebrek aan kennis bestaat dat systematisch onderzoek in gecontroleerde omstandigheden noodzakelijk is.

In het kader van Kustgenese is laboratoriumonderzoek uitgevoerd in:

- golf-stroom goten (TUD) en in een golf-stroom basin (WL), met name gericht op suspensietransportprocessen.
- de grote golftunnel (WL), vooral gericht op de bodem- en suspensietransportprocessen in en direct boven de golfbodemgrenslaag.

Veldonderzoek heeft zich, in verband met de bovengenoemde meetproblematiek, vooral gericht op de suspensietransportprocessen boven de golfgrenslaag.

Zowel het veldonderzoek als het laboratoriumonderzoek heeft nieuwe inzichten opgeleverd en een reeks van nieuwe meetdata gegenereerd. De data hebben een belangrijke rol vervuld bij de verifikatie van bestaande transportmodelconcepten en bij de ontwikkeling van een praktisch toepasbaar bodem- en suspensietransportmodel voor de kustzone.

## 3.2 Bodemtransport

### 3.2.1 Onderzoekslijn Kustgenese

Bij het onderzoek naar bodemtransport onder invloed van golven en stroming, dat in de afgelopen jaren is uitgevoerd, hebben een aantal hoofdonderzoeksvragen centraal gestaan:

- welke zijn de sturende mechanismen bij het transport van zand in en boven de golf-bodemgrenslaag onder invloed van golven en onder invloed van golven en stroming (golf-stroom interactie) ?
- hoe groot is het belang van niet-stationaire verschijnselen binnen de golfcyclus (zoals naijlingseffecten tgv verticale uitwisselingsmechanismen van turbulentie en sediment) voor het netto tijdgemiddelde zandtransport ?
- hoe groot is de geldigheid van quasi-stationaire modelconcepten (zoals Bailard/Bagnold) en niet-stationaire grenslaagmodellen ?

Er hebben zich hierbij twee onderzoekslijnen ontwikkeld, die binnen verschillende onderzoekskaders (Kustgenese, MAST, LIP) en instituten (WL, TUD) zijn gevolgd, nl:

I Praktische lijn: *Quasi-stationair zandtransportmodel*

Een inductieve lijn, waarbij in sterke mate gebruik gemaakt wordt van directe transportmetingen en die is gericht op de verifikatie en verdere ontwikkeling van eenvoudige 'state of the art' modelconcepten (semi-empirische modellering). Achterliggend doel hierbij is de ontwikkeling van een praktisch toepasbaar transportmodel. Hierbij staan en stonden quasi-stationaire en semi-instationaire modelconcepten centraal (zoals Bailard, Madsen & Grant, Watanabe e.a.).

II Fundamentele lijn: *Niet-stationaire transportmechanismen en verticale structuur*

Een deductieve lijn waarbij meer vanuit de elementaire behoudswetten voor impuls en massa wordt geprobeerd inzicht te verkrijgen in de tijdsafhankelijke grenslaagstroming en transportmechanismen. Eén-dimensionale verticale instationaire grenslaagmodellen voor golfstroomsediment interactie worden hierbij als onderzoeksinstrument ontwikkeld.

Beide onderzoekslijnen zijn parallel aangepakt in de periode 1987-1995 en hebben geleid tot een experimenteel onderzoeksprogramma in de grote golftunnel van WL. Na het TOW-onderzoek in de kleine golftunnel (TOW = Toegepast Onderzoek Waterstaat) werd het van belang geacht experimenteel onderzoek uit te voeren in een grotere tunnel, ten einde de transportverschijnselen in de bodemgrenslaag op volle schaal te kunnen simuleren en onderzoeken.

Tot 1992 heeft de nadruk van het onderzoek in de grote golftunnel gelegen op de invloed van *golfasymmetrie* op de transportverschijnselen. Na 1992, toen de tunnel was voorzien van een netto-stroom circuit, heeft de aandacht zich verlegd naar *golf-stroom interactie*. Zandtransportmetingen zijn hierbij direct toeleverend geweest aan onderzoekslijn I, terwijl meer gedetailleerde grenslaagprocesmetingen vooral zijn uitgevoerd ten behoeve van onderzoekslijn II.

### 3.2.2 Resultaten

De resultaten van het onderzoek en de meetdata zijn beschreven in WL/Kustgenese/MAST/LIP rapporten, afstudeerrapporten, een reeks conferentiebijdragen en tijdschriftpublicaties en in een proefschrift (Al-Salem, 1993). Een tweede promotieonderzoek wordt naar verwachting in 1998 afgerond (STW/TUD, M. Janssen). Voor een volledig overzicht van publicaties wordt verwezen naar Appendix II. De belangrijkste resultaten van het onderzoek kunnen als volgt worden samengevat.

#### **Bodemregime en bodemvormen** (Ribberink and Al-Salem, 1994)

- De transportmechanismen nabij de bodem en met name de golfgerelateerde transportcomponenten interacteren zeer sterk met de bodemvormen en zijn sterk verschillend in het lage snelheidsregime (vortex ribbels) en in het hoge snelheidsregime (sheet flow/vlak bed).
- De afmetingen van vortex ribbels, die bepalend zijn voor de suspensieprocessen, i) blijken sterk afhankelijk te zijn van golfkarakteristieken, ii) worden drastisch gereduceerd door golfasymmetrie en golfonregelmatigheid, en iii) kunnen globaal met de empirische relaties van Nielsen (velddata) worden beschreven.



### Grenslaagtransportprocessen

- Hoewel het nog niet mogelijk is vortex ribbels volledig morfodynamisch vanuit de stromings- en transportprocessen te beschrijven, is belangrijke vooruitgang geboekt bij het beschrijven van het door grote vortices gedomineerde suspensie transportproces rond ribbels. Golftunneldata zijn hierbij als verifikatiemateriaal gebruikt (MASTG8-M kader, zie bijv. Hansen et al., 1994).
- Detailprocesmetingen in de tunnel hebben veel nieuw inzicht verschaft in de verticale structuur en het tijdsafhankelijke karakter van transportprocessen in sheeflow omstandigheden (Ribberink and Al-Salem, 1994, 1995; Katopodi et al., 1994). De metingen geven het grote belang aan van de 'sheet flow' laag voor het netto zandtransport en bevestigen het quasi-stationaire karakter van de processen in de 'sheet flow' laag.
- De huidige 1DV-grenslaagmodellen zijn nog slechts ten dele in staat processen, zoals demping van turbulentie, verticale advektie en diffusie van sediment en met name de 'sheet-flow' processen te beschrijven. Desondanks blijken de modellen met een factor  $\pm 2$  nauwkeurigheid in het laboratorium gemeten transporten voor sediment van 0.2 mm te kunnen weergeven (Davies et al., 1996; Al-Salem, 1993).

### Bodemtransportmodellering

- Als gevolg van het waargenomen quasi-stationaire karakter en de dominantie van de 'sheet-flow' processen blijkt een quasi-stationair transportmodelconcept, waarin het netto transport wordt gerelateerd aan het derde-orde moment van de oscillerende snelheid boven de golfgrenslaag ( $\langle U^3 \rangle$ ), een goede beschrijving te kunnen geven van het netto transport voor een grote range van kondities (Ribberink et al., 1994).
- Op grond van dit resultaat is met behulp van een grote dataset van bodemtransportmetingen een semi-empirische bodemtransportformulering ontwikkeld, waarmee het bodemtransport kan worden beschreven:
  - i) voor een grote range van Shields parameters (van begin van beweging tot ver in het sheet flow regime),
  - ii) voor een reeks van korrelgrootten ( $> 0.2$  mm), en
  - iii) voor zowel stromings- als golfgedomineerde kondities.
- Dit model is geïmplementeerd, o.a. in Kustgenese kader, als 'state of the art' formulering in de huidige operationele morfodynamische modellen van WL (UNIBEST-TC, DELFT2D/3D) en tevens toegepast ten behoeve van zandtransportberekeningen voor de gesloten Hollandse Kust in het kader van het onderbouwende onderzoek ten behoeve van de Kustnota 1995 (zie van Rijn et al., 1994).
- Oriënterende golftunnelproeven met fijner zand (0.13 mm) geven aanwijzingen dat het quasi-stationaire modelconcept ten gevolge van suspensie-naijlingsverschijnselen (instationariteit) niet meer toepasbaar is voor de beschrijving van het netto transport (Ribberink en Chen, 1993; Janssen en Ribberink, 1996).

#### 3.2.3 Onderzoekslijn

Er wordt voorgesteld om de lopende onderzoekslijnen I en II van het grenslaag- en bodemtransportonderzoek in KUST\*2000, maar ook in andere onderzoekskaders (WL, LIP, Universiteiten, STW, ..), voort te zetten. Hierbij kan rond een aantal onderwerpen opnieuw een praktische en fundamentele lijn worden onderscheiden, waarbij KUST\*2000 zich op de praktische lijn zou kunnen richten.

Verder lab-onderzoek zou gericht moeten zijn op de volgende onderwerpen:

- niet-stationaire bodemtransportverschijnselen, door middel van
  - i) golftunnelexperimenten gericht op de invloed van de korrelgrootte, de golfperiode en onregelmatige golven,
  - ii) semi-instationaire modellering en grenslaagmodellen;
- de invloed van niet-uniform sediment op de transportprocessen, door middel van
  - i) golftunnelexperimenten met sedimentmengsels gericht op selectieve transportprocessen en uitwisseling met de bodem,
  - ii) gefractioneerd modelleren van het bodemtransportproces;
- de verticale structuur van de door golven en stroming gegenereerde netto stromingen en transporten, met specifieke aandacht voor de invloed van grenslaag'streaming' voor het bodemtransport door middel van lab-gootmetingen en analyses met behulp van instationaire modellen.

### 3.3 Suspensietransport

#### 3.3.1 Onderzoekslijn Kustgenese

Bij het onderzoek naar suspensietransport onder invloed van golven en stroming hebben de volgende vragen centraal gestaan:

- wat zijn de dominerende processen bij het transport van gesuspendeerd zand onder invloed van niet-brekende golven gecombineerd met stroming (golf-stroominteractie; stromingsgerelateerd versus golfgerelateerd transport)?
- hoe is het transport van gesuspendeerd zand verdeeld over de waterkolom (vertikale structuur)?
- wat is de invloed van de hoek tussen de golf- en stroomrichting op het transport van gesuspendeerd zand?
- wat is de invloed van het breken van golven op het transport?
- wat is de geldigheid van de bestaande quasi-stationaire modelconcepten zoals de Bijker- en Van Rijn-methode (gebaseerd op tijdsgemiddelde zandconcentraties)?

De onderzoekslijnen die daarbij zijn gevolgd, kunnen globaal worden omschreven als:

- fundamentele lijn: het verkrijgen van informatie over de verschillende transportcomponenten door het analyseren van de gemeten momentane stroomsnelheden en zandconcentraties; beide variabelen zijn uitgesplitst naar gemiddelde en fluktuerende bijdragen,
- praktische lijn: het verbeteren/ontwikkelen van een model voor gesuspendeerd zandtransport op basis van de beschikbare gegevens van tijdsgemiddelde stroomsnelheden en zandconcentraties.

Beide onderzoekslijnen zijn tegelijkertijd aangepakt in de periode 1987-1995. De meeste proeven zijn uitgevoerd in de grote spuurwerkgoet van het laboratorium vloeistofmechanica van de TUD (in samenwerking met WL), maar er is ook onderzoek verricht in een golfstroombasin van het WL.



In de golfgoet is systematisch onderzoek gedaan naar de invloed van mee- en tegenstroming bij niet-brekende onregelmatige golven voor twee verschillende zanddiameters (ca. 100 en 200 micron). In 1994 is een begin gemaakt met het bestuderen van het effect van golfbreking op het zandtransport over een vlakke bodem en een bodem met een brekerbank (zie ook Paragraaf 4.2).

In een golf-stroombasin van het WL is systematisch onderzoek verricht naar de grootte en richting van het suspensietransport bij verschillende hoeken van golfval ( $60^\circ$ ,  $90^\circ$  en  $120^\circ$ ).

### 3.3.2 Resultaten

De resultaten van het onderzoek en de meetdata zijn beschreven in WL/Kustgenese/MAST/LIP rapporten, afstudeerrapporten, een reeks conferentiebijdragen en tijdschriftpublicaties. Voor een volledig overzicht van publicaties wordt verwezen naar Appendix II. De belangrijkste resultaten van het onderzoek kunnen als volgt worden samengevat (zie ook Van Rijn et al., 1993; Van Rijn en Havinga, 1995):

#### Bodemvormen

- bij proeven met een relatief kleine waterdiepte (orde 0,5 m) treden er vortex-ribbels op met een sterke interactie tussen het transport en de ribbels via de opwekking, advektie, diffusie en afbraak van met zand gevulde wervels,
- tweedimensionale bijna symmetrische ribbels treden op bij lage golven zonder stroming; de ribbels krijgen een meer driedimensionaal karakter bij toenemende golfhoogte en stroomsnelheid; de ribbels worden asymmetrisch bij relatief hoge stroomsnelheid; kruisvormige ribbel-structuren worden gevormd bij stroming en golven onder een hoek,
- de hydraulische ruwheid van de ribbels in combinatie met de wervelvorming in de bodemgrenslaag kan worden weergegeven als een effectieve ruwheid en is vele malen groter dan de fysische ruwheid van de ribbels.

#### Tijdsgemiddelde zandconcentraties en transporten

- de tijdsgemiddelde zandconcentratievertikalen worden meer uniform bij toenemende golfhoogten (effectieve verticale menging neemt toe); de vorm van de zandconcentratievertikalen wordt nauwelijks beïnvloed door aanwezigheid van een zwakke stroming; een relatief sterke stroming doet de verticale menging aanzienlijk toenemen waardoor er meer zand naar het bovenste deel van de waterkolom wordt getransporteerd, maar ook de grootte van de concentraties nabij de bodem nemen toe door vergroting van de bodemschuifspanning; de vorm van de ribbels is daarbij essentieel; ribbels met afgeronde toppen resulteren in een vermindering van de bodemconcentraties.
- de grootte van het transport van gesuspendeerd zand is maximaal als de golven zich loodrecht (onder  $90^\circ$ ) op de stromingsrichting voortplanten; bij mee- en tegenstroom neemt het transport enigszins af, maar de richting is dan niet van belang ( $0^\circ$  of  $180^\circ$ ),
- de transporten nemen af met een faktor 3 tot 6 bij toename van de korrelgrootte van 100 tot 200 micron,
- (bestaande) voorspellingsmethoden gebaseerd op het berekenen van een bodemconcentratie, concentratievertikaal en stroomsnelheidsvertikaal geven (na kalibratie) een

redelijke overeenstemming tussen de berekende en gemeten tijdsgemiddelde transporten.

### **Tijdsafhankelijke (golferelateerde) zandtransporten**

- bij aanwezigheid van geprononceerde ribbels kan er een transport van zand optreden tegen de heersende golfrichting in als gevolg van faseverschillen tussen de momentane zandconcentraties en watersnelheden; bij ribbels met afgeronde toppen treedt dit niet of nauwelijks op,
- het golferelateerde suspensietransport (opgewekt door de oscillerende waterbeweging) in de stroomrichting mag worden verwaarloosd bij relatief sterke stromen,
- het golferelateerde suspensietransport in de golfrichting mag niet worden verwaarloosd ten opzichte van het stromingsgerelateerde transport in diezelfde richting; de hoog-frequente en laag-frequente transportcomponenten zijn van de dezelfde orde van grootte; de laag-frequente bijdragen hangen samen met gebonden lange golven.

### **3.3.3 Onderzoekslijn**

Verder onderzoek zou gericht moeten zijn op:

- golfgootexperimenten gericht op de invloed van selectief transport bij aanwezigheid van relatief breed-verdeeld (niet uniform) sedimentmateriaal en het geschikt maken van de bestaande zandtransportmodellen voor niet-uniform materiaal (gefractioneerd modelleren) en het uitvoeren van gevoeligheidsonderzoek met deze modellen; proeven met afzonderlijke frakties zijn al eerder uitgevoerd (invloed korreldiameter);
- het modelleren van het golferelateerde suspensietransport op basis van de beschikbare meetgegevens,
- de invloed van het breken van golven op de verdeling van het zandtransport over de waterkolom in relatie tot het percentage brekende golven.



## 4 Morfodynamica van plaat/geul/bank systemen in de kustzone

### 4.1 Inleiding

Platen, banken, geulen, muien en (zandwin)kuilen zijn morfologische elementen op de vooroever van de kustzone, die een wezenlijke rol spelen in het kustmorfodynamische systeem. Op de ondiepe vooroever van gesloten kustsystemen, zoals de Hollandse Kust, vormen *brekerbanken en muigeulen* de morfologische weergave van vooral door golven gedomineerde stromings- en zandtransportcirculaties. Langs- en dwarstransportprocessen spelen in de ontwikkeling van bank-/mui systemen een grote rol. In de afgelopen jaren is een begin gemaakt met onderzoek naar de rol en dynamiek van brekerbanken in het gesloten kustsysteem in relatie tot de haalbaarheid en effectiviteit van zandsuppleties op de vooroever. Mathematische modelontwikkeling was vooral gericht op de kustdwaarsprofielontwikkeling (2DV modellering loodrecht op de kust). Voor een overzicht van de kennisontwikkeling die in Kustgenese heeft plaatsgevonden, zie Van Rijn (1995).

Platen en geulen komen met name voor in getijgedomineerde omstandigheden, zoals in estuaria, maar ook in door golven en getij bepaalde omstandigheden, zoals op de buitendelta's van zeegatsystemen. Met name op buitendelta's vertonen geulen en platen een grote dynamiek, die sterk is gerelateerd aan de grootschalige dynamiek van eilandkoppen (zie definitiestudies KUST\*2000). In de afgelopen jaren is onderzoek uitgevoerd naar de morfologische karakteristieken van zeegatsystemen (vooral in het Waddengebied), de grootschalige en lange-termijn ontwikkelingen van deze systemen (inclusief de aanliggende eilandkusten) en de effecten van menselijke ingrepen zoals de afsluiting van de Lauwerszee. Hierbij zijn zowel gedrags-georiënteerde modellen als procesmodellen (2DH en Q3D) ontwikkeld en toegepast. Voor een overzicht van de kennisontwikkeling die hierbij heeft plaatsgevonden, zie Ribberink en de Vriend (1995).

### 4.2 Brekerbanken en muigeulen

#### 4.2.1 Onderzoekslijn Kustgenese en resultaten

In het project Kustgenese lag de nadruk op onderzoek naar het gedrag van brekerbanken; het gedrag van muigeulen is niet of nauwelijks bestudeerd. De vraagstelling was vooral fenomenologisch van aard en gericht op:

- het beschrijven van het ruimtelijk gedrag van de banken,
- het uitvoeren van verkennende hydrodynamische metingen op de top en op de flanken van de banken (lokatie Egmond, Wolf, 1997; Houwman en Hoekstra, 1994),
- het vastleggen van het morfologische bankgedrag rondom stormen (Wolf, 1997).
- het inventariseren van de transportprocessen die een rol spelen bij de migratie van brekerbanken (Wijnberg, 1995).



Uitgebreide informatie over het fenomenologische gedrag (lokatie, aantal per raai, migratie, afmetingen en onderlinge afstand in de raai) van brekerbanken is gegeven door Houwing (1991), Knoester (1990), Kroon (1994) en Wijnberg (1995).

Brandingsbanken zijn aanwezig langs grote delen van de centrale Hollandse kust en vormen daar de frontlinie van de kustverdediging, maar ze ontbreken in de erosieve kustvakken in de kop van Noord-Holland en in de hoek van Zuid-Holland. Ook is er een duidelijk verschil in morfologisch gedrag van de brandingsbanken aan weerszijden van de havendammen van IJmuiden. Ten noorden hiervan vertonen de brandingsbanken een tamelijk grillig alternerend gedrag, terwijl ten zuiden van IJmuiden de banken zich lijken te gedragen als een groot-schalig tweedimensionaal bankensysteem. Dit opmerkelijke verschil in gedrag heeft waarschijnlijk te maken met de verhouding van het lokale langs- en dwarstransport in de vakken binnen de invloedssfeer van de havendammen.

Kwantitatieve kennis van brandingsstromen en muistromen in samenhang met het gedrag van brandingsbanken ontbreekt bijna volledig. Uit veldwaarnemingen langs de centrale Hollandse kust blijkt dat de brandingsbanken een cyclisch gedrag vertonen, waarbij de banken zich langzaam in zeewaartse richting verplaatsen. De buitenste bank verdwijnt op den duur en er ontstaat een nieuwe bank nabij de kustlijn. Deze zeewaartse verplaatsing van de banken zou op een netto zeewaarts transport van zand kunnen duiden. Dit lijkt echter niet erg aannemelijk, gezien de redelijk stabiele positie van de kustlijn in de centrale kustvakken.

In het Kustgeneseonderzoek is getracht om het gedrag van tweedimensionale brekerbanken (uniform langs de kust) te beschrijven met behulp van 2DV-profielmodellen, die zijn ontwikkeld voor de simulatie van de kustdwarse processen. De vraag is echter of het subtiële evenwicht van opbouwende en afbrekende processen voldoende nauwkeurig kan worden weergegeven. Een belangrijk uitgangspunt van de 2DV-modellen is de lokale compensatie van de kustwaartse massaflux boven het golfdal door een retourstroming bij de bodem. In de natuur wordt deze massaflux voor een belangrijk deel gecompenseerd door de aanwezigheid van horizontale circulatiecellen, die zich langs de kust verplaatsen (meandereffekt). Modelleren van deze verschijnselen vereist in essentie een (quasi) driedimensionale aanpak.

#### 4.2.2 Onderzoekslijn

Een overtuigende fysische verklaring voor het gedrag van de brandingsbanken en de daarmee samenhangende netto zandstromen is er nog niet. Onderzoek hiernaar moet hoge prioriteit krijgen in het komende kustonderzoek, gezien de belangrijke functie van de brandingsbanken als de frontlinie van de natuurlijke kustverdediging. Meer inzicht in de sturende processen is absoluut noodzakelijk om beheersopties als het vastleggen van bestaande brekerbanken of het aanbrengen van kunstmatige banken en geulen te kunnen beoordelen.

De nadruk bij het KUST\*2000 onderzoek ten aanzien van banken en geulen ligt op het uitvoeren van veldonderzoek. De analyse van de meetgegevens zal worden uitgevoerd met behulp van wiskundige modellen om de verschillende fysische processen in hun onderlinge samenhang te kunnen bestuderen (diagnostisch modeleren).

Aanvullend op veld- en wiskundig onderzoek is voorgesteld om het gedrag van brekerbanken en muigeulen op laboratoriumschaal te onderzoeken met als doel het verkrijgen van meer inzicht in de dominerende fysische processen. In het project Kustgenese is reeds een begin gemaakt met laboratoriumonderzoek naar het gedrag van een geschematiseerde tweedimensionale brekerbank van fijn zand in een goot. Op een groot aantal lokaties langs het bankprofiel zijn er golfhoogten, stroomsnelheden, zandconcentraties en zandtransporten gemeten met geavanceerde apparatuur. Ook zijn de morfologische veranderingen langs het



profiel vastgelegd. Deze meetresultaten worden momenteel geanalyseerd en zullen het inzicht in het bankgedrag aanzienlijk verdiepen (Grasmeijer, 1996).

Verder onderzoek zou gericht moeten zijn op:

- analyse van eerdere laboratoriumproef met zandwininput (Havinga, 1992),
- verdere analyse van het experimentele gootonderzoek naar 2D brekerbanken,
- experimenteel onderzoek naar selectief transport van niet-uniform materiaal over een brekerbank in een goot,
- experimenteel onderzoek van een lange brekerbank doorsneden door een muigeul (vaste bodem) in een golf-stroombasin met onregelmatige golven; hierbij gaat het vooral om het vastleggen van de driedimensionale waterbeweging met als doel het verkrijgen van een synoptisch beeld van de dominerende hydrodynamische processen; dit type onderzoek is essentieel voor het valideren van een (quasi) 3D waterbewegingsmodel,
- in een latere fase kan worden overwogen om ook een morfologische proef (met beweeglijke bodem in plaats van vaste bodem) met een lange bank, doorsneden door een muigeul, uit te voeren.

## 4.3 Geulen en platen in zeegatsystemen

### 4.3.1 Onderzoekslijn Kustgenese en resultaten

In het project Kustgenese waren als onderzoeksdoelstellingen geformuleerd:

- het verkrijgen van inzicht in het grootschalige gedrag van het onderbroken kust-systeem en zeegatsystemen (vooral in het Waddengebied) en de sturende mechanismen hierbij,
- de kwantificering van dit grootschalige gedrag onder invloed van zeespiegelstijging, zandsuppleties en menselijke ingrepen (afsluiting Lauwerszee, Eierland dam).

De projecten ISOS EN DYNASTAR waren vooral gericht op de grootschalige ontwikkeling van het Waddengebied (vloedkommen).

In ISOS is veel inzicht verkregen in de morfologische karakteristieken van getijgeulen en zeegaten (bijv. dwarsdoorsnee-oppervlakken) en het niveau van platen in de vloedkommen van het Waddengebied. Op basis van veel veldgegevens zijn hiervoor empirische evenwichtsrelaties ontwikkeld (bijv. Eysink, 1991). De projecten Kustgenese en Dynastar hebben zich vervolgens gericht op het dynamische gedrag van geul-plaatssystemen in vloedkommen (en estuaria) en de beschrijving hiervan met gedrags-georiënteerde modellen, waarin bijv. bovengenoemde empirische relaties zijn gecombineerd met een 1D-netwerk getijmodellering (Van Dongeren en De Vriend, 1994; Karssen en Wang, 1993). De gemeten morfologische ontwikkelingen in de vloedkom van het Friesche Zeegat (voor en na afsluiting van de Lauwerszee) konden met dit type model in zekere mate worden gesimuleerd (tijdschaal: enige decennia). Ook is inzicht verkregen in de invloed van platen en geulen in de vloedkom (relatieve plaatoppervlak) op het zandimporterende of -exporterende karakter van de zeegaten.

De rol van de zeer dynamische geulen en platen op de buitendelta's voor de kustontwikkeling van de Waddeneilanden is vooral duidelijk geworden uit uitgebreide data-analyses van lodingen uitgevoerd in het Friesche Zeegatsysteem en in het Eierlandse Gat systeem (studie Eierland dam).

Met behulp van 2DH procesmodellen (getij/golven/zandtransport) is veel inzicht verkregen in de zandcirculatiepatronen die hierbij optreden en de mechanismen die hieraan ten grondslag liggen (Steyn and Hartsuiker, 1992; Ribberink et al., 1995).

Gemeten geulontwikkelingen en geulmigratieprocessen in het Friesche zeegatsysteem bleken in kwalitatieve zin met behulp van een quasi-3D morfodynamische getijstromingsmodellering (zonder golven) te kunnen worden gesimuleerd (Friesche zeegatsysteem; zie Wang et al., 1995). Eerste ervaringen met een morfodynamisch procesmodel waarin golfgedreven stromingen zijn meegenomen worden beschreven door Negen (1994; zie ook Ribberink et al., 1995).

Hoewel er in Kustgenese belangrijke ervaring is opgedaan met het weergeven en analyseren van morfodynamische verschijnselen in zeegatsystemen met behulp van veldprocesmodellen, is de geldigheid van deze geïntegreerde modelsystemen nog niet voldoende aangetoond.

Er is in kader van Kustgenese geen specifiek laboratoriumonderzoek uitgevoerd, gericht op de processen in zeegatsystemen.

#### 4.3.2 Onderzoekslijn KUST\*2000

In het onderzoeksprogramma KUST\*2000 wordt de kustbeheersproblematiek rond eilandkoppen en zeegaten als één van de hoofdonderzoeksthema's aangemerkt. Hierbij worden de interacties met de geul/plaatontwikkelingen op buitendelta's en mogelijke ingrepen in dit systeem centraal gesteld.

Naast toepassing van bestaande kennis rond een aantal geselecteerde eilandkop/zeegat problemen (specifiek onderzoek Westerschelde, Zuidwest Texel en Ameland-Bornrif), wordt generiek onderzoek voorgesteld dat bestaat uit:

- de ontwikkeling van breed toepasbare morfologische gedragsmodellen voor dit type problemen,
- procesonderzoek naar sturende processen en onderliggende mechanismen.

In het procesonderzoek wordt onderzoek uitgevoerd met 2D/3D veldprocesmodellen - zoals in Kustgenese ontwikkeld en toegepast - en worden deze modelsystemen tevens verder ontwikkeld door middel van verbeterde deelprocesbeschrijvingen en vindt modelvalidatie plaats. Hierbij zal de nadruk worden gelegd op de simulatie van 3D-stromingen en zandtransporten onder invloed van getij, golven, wind, Coriolis en op de rol van deze processen bij het morfodynamisch gedrag van geul/plaat systemen (geul/plaat migratie, geulontwikkeling/verzanding, zand-bypass systeem zeegaten).

Laboratoriumonderzoek in dit kader wordt vooral ingegeven door de ervaringen die in Kustgenese zijn opgedaan met veldprocesmodellen. Er is nog veel onzekerheid over de juiste weergave van de aan de morfodynamica van met name geul/plaat systemen ten grondslag liggende processen. Er bestaat bijv. nog onvoldoende inzicht in de processen die bij geulontwikkeling in een vlakke zandige bodem onder invloed van een stationaire stroming sturend zijn. Dit basisgeval kan met de huidige procesmodellen dan ook nog niet worden gesimuleerd.



De variabiliteit van omstandigheden en samenhang van processen in het veld is groot en er bestaat een zodanig groot gebrek aan goede veldgegevens (vooral synoptische procesgegevens), dat verder onderzoek en modelontwikkeling/validatie op basis van alleen veldmetingen vooralsnog als weinig kansrijk moet worden beoordeeld.

Naast onderzoek in het veld is laboratoriumonderzoek daarom van wezenlijk belang om de complexe morfodynamiek van geul-plaat systemen en de onderliggende processen systematisch te kunnen onderzoeken in geselecteerde en gecontroleerde hydraulische/sedimentologische kondities (principe proeven). Hierbij kunnen deelprocessen zowel geïsoleerd als in samenhang worden onderzocht en zijn metingen, in vergelijking met veldmetingen, relatief eenvoudig en goedkoop uit te voeren. Gezien het 3D karakter van de processen zou dit onderzoek in een golf-stroom basin moeten worden uitgevoerd. Hoewel schaafeffecten bij dit onderzoek de nodige aandacht zullen vragen, worden deze in dit stadium van ondergeschikt belang geacht.

Het is van belang om het laboratorium onderzoek in nauwe samenhang met de procesmodelontwikkeling uit te voeren. Het onderzoeksprogramma zou gericht moeten zijn op:

- de mechanismen van geulontwikkeling en geulmigratie onder invloed van stationaire stroming en getijstroming (bijv. delta-ontwikkeling)
- de sedimentuitwisseling tussen geulen en platen in getijgedomineerde omstandigheden (vloedkomprocessen),
- de mechanismen van geul/plaatontwikkeling en migratie op buitendelta's van zeegat-systemen (getij en golven).

De kennis over geulmorfodynamica op het gebied van rivieren zou als basis voor dit onderzoek moeten fungeren.

## Referenties

- Al-Salem, A.A., 1993. Sediment transport in oscillatory boundary layers under sheet-flow conditions. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.
- Bijker, E.W., 1967. Some considerations about scales for coastal models with movable bed. Doc. Thesis, Delft Univ. of Technology, The Netherlands
- Davies, A.G., J.S. Ribberink, A. Temperville en J.A. Zyserman, 1996. Comparisons between sediment transport models and observations made in wave and current flows above plane beds, submitted to Coastal Engineering.
- Eysink, W.D., 1991. Simple morphological relationships for estuaries and tidal channels; handy tools for engineering, Proc. COPEDEC III, Vol. II, pp. 1003-1014, Mombassa, Kenya.
- Grasmeijer, B. en Sies, R., 1996. Analyse van momentane zandconcentraties en transporten langs een brekerbank, Rapport H2466, Waterloopkundig Laboratorium, Delft
- Hansen, E.A., J. Fredsoe en R. Deigaard, 1994. Distribution of suspended sediment over wave-generated ripples, Journ. of Waterw., Port, Coast. and Ocean Eng., ASCE, Vol. 120, No. 1, pp. 37-55.
- Havinga, F., 1992. Sediment concentrations and transport in case of irregular non-breaking waves with a current. Report H 840, DELFT HYDRAULICS.
- Houwing, E.J., 1991. Analyse van TAW-profielen Egmond aan zee en Katwijk aan zee, Geopro-rapport 1991.019, Fysische Geografie, Univ. van Utrecht
- Houman, K. and Hoekstra, P., 1993. Shoreface hydrodynamics; field measurements near Egmond. Dep. of Phys. Geology, Univ. of Utrecht, The Netherlands.
- Houman, K.T. and Hoekstra, P., 1994. Shoreface sediment dynamics. Dep. of Phys. Geography, Univ. of Utrecht, Utrecht, The Netherlands.
- Janssen, C.M. en J.S. Ribberink, 1996. Grain-size influence on sand transport in oscillatory sheet flow, paper to be presented at the 25th Int. Conf. on Coast. Eng., ASCE, Orlando, 1996.
- Karssen, B. en Z.B. Wang, 1993. A dynamic/empirical model for the long-term morphological development of estuaries; Part I: Physical relations, DELFT HYDRAULICS report Z622, DYNASTAR Project.
- Katopodi, I., J.S. Ribberink, P. Ruol en C. Lodahl, 1994. Sediment transport measurements in combined wave-current flows, Proc. Coastal Dynamics '94, ASCE, Barcelona.
- Knoester, D., 1990. Morfologie van de Hollandse kust, Rapport GWAO-90.010, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Kroon, A., 1994. Sediment transport and morphodynamics of the beach and nearshore zone near Egmond, The Netherlands. Doctoral Thesis, Dep. of Physical Geography, University of Utrecht, The Netherlands.
- Negen, E.H., 1994. Morphological investigations with 2DH numerical area models near Eierland (Texel), M.Sc. thesis Delft University of Technology, DELFT HYDRAULICS, Report H1887/H460, Volume A and B.
- Ribberink, J.S. en Z.W. Chen, 1993. Sediment transport of fine sand under asymmetric oscillatory flow, DELFT HYDRAULICS, Report H840, Part VII.
- Ribberink, J.S. en A.A. Al-Salem, 1994. Sediment transport in oscillatory boundary layers in cases of rippled beds and sheet flow. Journal of Geoph. Res., Vol. 99, No. C6, pp. 12707-12727.
- Ribberink, J.S., I. Katopodi, K.A.H. Ramadan, R. Koelewijn en S. Longo, 1994. Sediment transport under (non)-linear waves and currents, Proc. 24th Int. Conf. on Coast. Eng., ASCE, Kobe, Japan.
- Ribberink, J.S. en A.A. Al-Salem, 1995. Sheet flow and suspension in oscillatory boundary layers, Coastal Engineering, Vol. 25, pp. 205-225.
- Ribberink, J.S. en H.J. de Vriend, 1995. Morphodynamics of a meso-tidal barrier-island coast, DELFT HYDRAULICS Report H2129, opgenomen in: Morfodynamiek van de Nederlandse Kust op verschillende tijd- en ruimteschalen, een samenvatting in 3 rapporten van de kennis verkregen in het project Kustgenese, RIKZ, Juni 1995.
- Ribberink, J.S., E.H. Negen en G. Hartsuiker, 1995. Mathematical modelling of coastal morphodynamics near a tidal inlet system, Proc. Coastal Dynamics'95, ASCE, Gdansk, Polen.
- RIKZ, Rijkswaterstaat, 1996. KUST\*2000 Onderzoeksplan + aanvulling.
- Steijn, R.C. en G. Hartsuiker, , 1992. Morphodynamic response of a tidal inlet after a reduction in basin area, DELFT HYDRAULICS, Report H840, Project Kustgenese.
- Van Dongeren, A.R. en H.J. de Vriend, 1994. A model of morphological behaviour of tidal basins, Coastal Engineering, Vol. 22, pp. 287-310.
- Van Rijn, L.C., Nieuwjaar, M. and Van der Kaaij, T., 1993. Transport of fine sands by currents and waves, part 1. Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 3.
- Van Rijn, L.C., Ribberink, J.C., Reniers, A. and Zitman, T., 1994. Yearly-averaged sand transport at the -20 m and -8 m NAP depth contours of JARKUS-profiles 14, 40, 76 and 103. Report H1887, DELFT HYDRAULICS, Delft, The Netherlands.



## Referenties (continued)

- Van Rijn, L.C. and Hovinga, F., 1995. Transport of fine sands by currents and waves, part 2. *Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, No. 3.
- Van Rijn, L.C., 1995. Dynamics of the closed coastal system of Holland. Report H2129, DELFT HYDRAULICS, Delft, The Netherlands
- Wang, Z.B., T. Louters en H.J. de Vriend, 1995. Morphodynamic modelling for a tidal inlet in the Wadden Sea, *Marine Geology*, Vol. 126, pp. 289-300.
- Wolf, F., 1997. Morphodynamics of inner bar. Doc. Thesis in preparation. Dep. of Phys. Geography, Univ. of Utrecht
- Wijnberg, K., 1995. Morphologic behaviour of a barred coast over a period of decades. Doc.Thesis. Dep. of Phys. Geography, Univ. of Utrecht.



**locatie Delft**  
Rotterdamseweg 185  
postbus 177  
2600 MH Delft  
telefoon 015 2569353  
telefax 015 2619674  
telex 38176 hydnl  
e-mail [info@wldelft.nl](mailto:info@wldelft.nl)

**locatie 'De Voorst'**  
Voorsterweg 28, Marknesse  
postbus 152  
8300 AD Emmeloord  
telefoon 0527 242922  
telefax 0527 243573  
telex 42290 hylvo-nl  
e-mail [info@wldelft.nl](mailto:info@wldelft.nl)

