

FYSISCHE MODELSTUDIES : EEN SCHAKEL IN DE “VEILIGHEIDS”-KETTING

Ir. Marc Huygens¹

1 INLEIDING

Ondanks de zeer grote moeilijkheden om een fysisch schaalmodel met beweegbare bodem goed te ontwerpen, te valideren en te analyseren blijft de noodzaak bestaan om dergelijk onderzoek uit te voeren. Immers, beide alternatieve benaderingen (zowel de numerieke berekeningen als de in-situ meetcampagnes) kampen met hun eigen problemen en tekortkomingen. Ondanks de recente ontwikkeling van computercapaciteiten en software-instrumenten blijft het zeer moeilijk om de complexe fenomenen, geassocieerd met de fysische interacties tussen waterbewegingen en sedimenttransport, in éénduidige mathematische uitdrukkingen te gieten. Anderzijds zijn terreinmetingen tegelijk zeer arbeidsintensief en uiterst duur. Daarenboven geldt nog dat voor een fundamenteel onderzoek de bepalende parameters niet controleerbaar of manipuleerbaar zijn. Daarom blijven fysische modelexperimenten nog steeds hun plaats behouden als derde, evenwaardig alternatief in een globale onderzoeksbenadering.



Figuur 1. Fysisch schaalmodel met beweegbare bodem.

Ook bij een fysisch model met beweegbare bodem zijn zeker een aantal problemen en tekortkomingen te detecteren. Om een goed verkleind schaalmodel te ontwerpen is een fundamenteel begrip van de in werkelijkheid optredende fysische processen strikt noodzakelijk. Vooral de identificatie van de dominante krachten die werken in het beschouwde model is noodzakelijk voor de ontwikkeling van een werkbaar en betrouwbaar fysisch schaalmodel. Immers, een volledige simulatie van alle relevante fysische processen (met hun relatief belang en specifieke impact) is onmogelijk in een schaalmodel met beweegbare bodem. Een duidelijke omschrijving van zowel de dominante hydrodynamische krachten als de responsmechanismen van de sedimenten vormt de basis voor een onderbouwd ontwerp. Zo kan een goed ontworpen schaalmodel voor de strandzone een totaal verkeerd beeld opleveren voor de ontwikkeling buiten de brekerszone, in diep water. De verdere ontplooiing en validatie van het fysisch schaalmodel dienen te gebeuren met behulp van veldmetingen (effectief calibreren) of aan de hand van modelproeven op ware grootte (schaaleffecten identificeren). Het operationele fysisch model vormt aldus een volwaardig onderzoeksinstrument met enkele significante voordelen:

- Geen mathematische vertolking van fysische processen nodig. De fysische fenomenen worden in het model zelf gegenereerd.
- Complexe configuraties kunnen (in meerdere alternatieven) worden onderzocht.
- Aangepaste meettechnieken en visualisatiemethode verzekeren een preciese interpretatie van de fysische processen en hun impact op het sedimentbed in het model.
- Gecontroleerde parameterstudies voor bepalende fenomenen kunnen uitgewerkt worden.

¹ Universiteit Gent, TW15V, Laboratorium voor Hydraulica – Sint-Pietersnieuwstraat 41 – 9000 Gent
Marc.Huygens@rug.ac.be

2 HYDRODYNAMISCHE VERSCHALING

De verschaling van de hydrodynamische krachten gebeurt bij de meeste kustmodellen met behulp van de Froude-benadering aangezien meestal een stroming-/golfimpact bij vrij wateroppervlak optreedt in het model. Net als bij de riviermodellering worden door deze keuze à priori viskeuze schaaffecten uitgeschakeld. De Reynolds-gelijkvormigheid wordt niet gerealiseerd in het kustmodel, wat betekent dat in de grenslaag nabij de (beweegbare) bodem een turbulente stroming wordt verondersteld. In de meeste kustmodellen (zeker in de brekerszone) is deze aanname realistisch en blijft bijgevolg ook de voorwaarde van overeenkomstige bodemruwheid minder belangrijk zolang de grenslaag zich in de turbulente zone situeert.

Een correcte hydrodynamische verschaling volgens Froude steunt op geometrische, *niet* gedistorteerde verschaling van de modelafmetingen in drie dimensies. Principieel kunnen de schaalwetten voor de hydrodynamica uit het Froudemodel geschreven worden als :

$$\alpha_s = \alpha_{hor} = \alpha_{vert} = \frac{l_{werk}}{l_{model}} = \frac{b_{werk}}{b_{model}} = \frac{d_{werk}}{d_{model}} \Rightarrow \text{geen distortie}$$

$$\alpha_{tijd} = \sqrt{\alpha_s} = \text{hydrodynamische tijdschaal}$$

$$\alpha_v = \sqrt{\alpha_s} = \text{stroomsnelheidsschaal}$$

$$\alpha_H = \alpha_L = \alpha_{hor} = \text{golfkarakteristieken (hoogte, lengte)}$$

$$\alpha_T = \alpha_{tijd} = \text{golfperiode - schaal}$$

Door deze geometrische niet-gedistorteerde verschaling voor de invallende golven aan te houden worden ook gelijkvormige golven in het model gegenereerd. Aldus gebeuren fenomenen als shoaling, refractie en breking op geometrische gelijkvormige locaties en tijdsmomenten in het model, waardoor het golfbeeld in het fysisch schaalmodel perfect overeenstemt met de werkelijkheid. Fundamenteel wordt de verschaling in een kustmodel steeds benaderd vanuit een (korte) golfmodellering waarin gebeurlijk een (langse) getijstroming wordt toegevoegd.

3 SEDIMENTTRANSPORTMODELLEN

3.1 Algemene beschouwingen

Naast de hydrodynamische parameters moeten in een fysisch schaalmodel met beweegbare bodem ook de bewegingen van de sedimenten "gelijkvormig" worden vertaald vanuit de werkelijkheid. Voor de morfologische verschaling worden, vertrekkend van de bepalende, fysische parameters ter karakterisering van de sedimenten en hun interactie met de hydrodynamica, vijf dimensieloze grootheden aangeduid om de sediment-gelijkvormigheid weer te geven.

1. Het korrel-Reynoldsgetal $Re_* = \frac{u_* D}{\nu}$

2. Het densimetrisch Froudegetal $Fr_* = \frac{\rho u_*^2}{\gamma_s D}$

met $u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$ = schuifspanningssnelheid ("shear velocity")

D = karakteristieke korreldiameter

ν = kinematische viscositeit van vloeistof

ρ = vloeistof dichtheid

γ_s = specifieke dichtheid van sedimenten

Deze beide dimensieloze grootheden vormen de coördinaten van het klassieke Shields-diagramma waarbij het bodemtransport onder schuifspanningsactie wordt beschouwd.

3. De relatieve densiteit $\frac{\rho_s}{\rho}$

4. De relatieve lengte H/D (voor korte golf) of h/D (voor lange golf)

5. Het Dean-getal $\frac{H}{wT}$

Met H = golfhoogte
 w = sediment-bezinkingssnelheid
 T = golfperiode

Voor het eerst ingevoerd door Dalrymple om het suspensietransport, als tweede sedimenttransporttype, toe te voegen bij de traditionele bodemtransportvorm waarbij het transport aangedreven is door de schuifspanningen in de bodemgrenslaag.

Dit dimensieloos getal drukt precies de verhouding uit tussen het bezinkingsproces van de sedimenten (tegenactie voor gesuspendeerd transport) en de turbulente schuifspanningen vooral geïnduceerd door golfbreking (initiatie van suspensie van de sedimenten).

Wanneer bovenstaande vijf dimensieloze grootheden constant worden gehouden tussen model en werkelijkheid, wordt het sedimenttransport (zowel het bodem- als het suspensietransport) perfect gesimuleerd in het schaalmodel. Enkele rudimentaire beschouwingen maken evenwel al snel duidelijk dat een perfecte verschaling in een schaalmodel onmogelijk is. Immers, de praktische ontwerpkeuze voor een fysisch schaalmodel wordt door externe factoren sterk gelimiteerd :

- Door de grote hoeveelheid benodigde vloeistof is er weinig alternatief voor 'gewoon water' als modelvloeistof.
- Niet-cohesieve sedimenten (zand, grind, ...) uit de realiteit dienen ook als niet-cohesief materiaal in het model gebracht te worden om de fundamentele sedimenttransportfenomenen in het model te behouden. Hierdoor kan geen onbeperkte verschaling (in relatie tot de geometrische verschaling) van de korreldiameter gebeuren.
- Gelimiteerde beschikbaarheid van sedimentsoorten (korreldiameter, densiteit, vorm, ...) samen met de beperkte toepasbaarheid van 'lichte' sedimenten als alternatieve benadering
- Ten slotte dient nogmaals opgemerkt dat er in een fysisch kustmodel twee verschillende types sedimenttransport (bodem- versus suspensietransport) kunnen optreden in verschillende zones van het schaalmodel. Geen enkel model slaagt erin om beide transportfenomenen tegelijk volledig dynamisch en morfologisch gelijkvormig te simuleren in één enkele benadering. Daarom dient een optimale keuze gemaakt, om de meest pertinente sedimenttransportfenomenen in het schaalmodel te brengen en de impact door het negeren van de 'andere' transportwijze te minimaliseren.

3.2 Morfologische verschaling bij dominantie van bodemtransport als sedimenttransporttype

Zoals reeds eerder aangegeven bepaalt bij deze wijze van sedimenttransport vooral de schuifspanningsactie op de sedimentbodem het initiëren en het ontwikkelen van bodemtransport. In kustmodellen komt dergelijke situatie voornamelijk voor buiten de brandingszone, waar de rechtstreekse golfimpact eerder beperkt is en de invloed van (getij)stromingen belangrijk is. Van de eerder aangeduide dimensieloze grootheden wordt hier het Deangetal buiten beschouwing gelaten, precies omdat het suspensietransport als niet-significant wordt gesteld.

Vertrekkend van de vier overgebleven dimensieloze grootheden wordt de sedimentgelijkvormigheid benaderd in vier verschillende modellen

	Re*	Fr*	ρ_s/ρ	H/D
Best-model		X	X	X
Lichtgewicht-model	X	X		
Froude-model		X		
Zand-model			X	

Tabel 1. Overzicht sedimentmodellen, bodemtransportdominantie

In het 'Best-model' wordt de verschaling in het schaalmodel het meest gelijkvormig uitgewerkt : enkel de viskeuze schaafeffecten en de ruwheidsfactoren zijn niet geometrisch verschaald in het model. Maar de beperkte ontwerpvrijheid (slechts één parameter vrij te kiezen) en de dwingende eis tot geometrische verschaling van de korreldiameter limiteren de praktische toepasbaarheid van dit model. Het 'Lichtgewicht-model' simuleert perfect het begin van beweging doordat de verschaling in het Shields-diagram geplaatst wordt. Het gebruik van lichtgewicht-materialen houdt evenwel nogal wat praktische problemen in zoals de porositeit, het verschillend gedrag onder of boven water (bijvoorbeeld bij golfoploop) of de bodemruwheid. Voor kustmodellen wordt nog zelden met lichtgewicht-sedimenten gewerkt. Bij het Froude-model komt het viskeuze schaafeffect van het 'Best-model' bovenop de hierboven geformuleerde beperkingen van het 'Lichtgewicht-model'.

3.3 Morfologische verschaling bij dominantie van suspensietransport als sedimenttransporttype

Suspensietransport is als transporttype natuurlijk totaal verschillend van bodemtransport : zowel de aandrijvende hydrodynamische krachten als de interactie met de sedimentdeeltjes verloopt heel anders. Het zwevend sedimenttransport is dominant wanneer de transportfenomenen geïnduceerd worden door de sterk turbulente waterbewegingen in de betreffende kuststrook. Deze turbulentie tilt de sedimentkorrels van de bodem op in de waterkolom waar de deeltjes in suspensie worden getransporteerd. Deze processen zijn zeer belangrijk in de kustzone daar precies de turbulentiëfenomenen verantwoordelijk zijn voor strand- en duinafslag, lokale afzettingen of erosie, vooral bij storm. Onmiddellijk dient hier gesteld dat de (gebeurlijke) strandopbouw onder lange golven (bij kalm weer) zeker niet morfologisch gelijkvormig gemodelleerd wordt daar hier vooral de schuifspanningen langs de bodem voor het strandwaartse transport verantwoordelijk zijn (bodemtransport-dominantie). Men kan hier dus a priori stellen dat dergelijk fysisch schaalmodel vooral de erosieve impact van verschillende golven simuleert, maar dat een gebeurlijke (her-) opbouw van het strand onder normale golfimpact (lange golven) niet gelijkvormig gemodelleerd wordt.

De gelijkvormigheidscriteria voor een schaalmodel met beweegbare bodem waarbij een geometrisch gelijkvormige verschaling en geen distortie wordt verondersteld, kunnen als volgende schaalwetten worden neergeschreven :

1. Korrel Reynoldsgetal :
$$\frac{\sqrt{\alpha_g \alpha_L} \alpha_D}{\alpha_v} = 1$$
2. Froude Mobiliteitsgetal :
$$\frac{\alpha_p \alpha_g \alpha_L}{\alpha_{\gamma_s} \alpha_D} = 1$$
3. Relatieve densiteit :
$$\frac{\alpha_{\rho_s}}{\alpha_p} = 1$$
4. Relatieve lengte :
$$\frac{\alpha_L}{\alpha_D} = 1$$
5. Relatieve bezinkingsnelheid :
$$\frac{\alpha_w}{\sqrt{\alpha_g \alpha_L}} = 1$$

Bovenstaande vijf schaalwetten kunnen onmogelijk allemaal terzelfdertijd worden vervuld, behalve in een model op ware grootte. Daarom ook dienen bij de verschaling van suspensie-gedomineerde sedimenttransportfenomenen een reeks veronderstellingen en/of beperkingen vastgelegd te worden. Vroegere benaderingen (Goda, Ito en Tsuchiya of Hallermeier) zijn ontstaan, niet uit bovenstaande theoretische schaalwetten, maar eerder uit

zogenaamde gelijkvormigheidscondities zoals daar zijn gelijkvormige strandhellingen, bezinkingstrajecten of morfologische bedvormen (zoals brekersbanken op de vooroever). Later, op het moment dat de bezinkingsnelheid van de sedimenten als belangrijke parameter was geïdentificeerd, zijn verdere theorieën ontwikkeld.

Tegenwoordig wordt de morfologische verscaling voornamelijk uitgewerkt op basis van het Dean-getal. Door een constant verondersteld Dean-getal in prototype én schaalmodel en een niet gedistorteerde Froude-verscaling van de hydrodynamica kan men in het verkleind schaalmodel een morfologisch gelijkvormige simulatie van de golfontwikkeling, de bezinkingspatronen van de sedimenten, de door de invallende golven geïnduceerde stroomsnelheden en de brekingsfenomenen (met bijhorende turbulentie-ontwikkeling) bekomen. In deze benadering is geen exacte verscaling van de bodemschuifspanning voorzien, zodat hier nog eens expliciet gesteld wordt dat enkel het suspensietransport gelijkvormig wordt verschaald maar fenomenen geassocieerd met bodemtransport (bodengrenslaag, schuifspanningen en bedvormen) significante schaaffecten vertonen. Typische fenomenen, die duidelijk onder bovenstaande hydrodynamische belastingen vallen, zijn:

- Strand- en duinprofielontwikkeling onder (singuliere) stormgebeurtenissen
- (Initiële) ontwikkeling van suppleties onder (zware) golfimpact
- Stabiliteit van suppleties onder stormcondities
- Korte-termijn-erosie rond bepaalde structuren onder zware golfimpact.

Principieel is de introductie van het Dean-getal als bepalende verschalingsparameter gegroeid uit de beschouwing van het evenwichtsprofiel. Het Dean-getal kan fysisch worden omschreven als de verhouding tussen de bezinkingstijd (= tijd nodig voor een zanddeeltje om over een afstand van één golfhoogte te bezinken) H/w en de golfperiode T (= agitatie van deeltjes). Meer zelfs, men kan stellen dat indien $H/w \gg T$, het deeltje in suspensie blijft door de golfimpact, terwijl als $H/w \approx T$ de sedimenten bezinken en eerder als bodemtransport verplaatst worden.

Door het gebruik van het Dean-getal worden in de fysische schaalmodellen - waar suspensietransport het dominante proces uitmaakt - de belangrijkste schaaffecten geassocieerd met de niet-geometrische verscaling van de korreldiameter geëlimineerd. In een niet-gedistort schaalmodel - waar de hydrodynamica (golven + stroming) volgens de Froude-wet worden verschaald - leidt een constant Dean-getal tot volgende schaalwet:

$$\frac{H}{wT} = cte \Rightarrow \frac{\alpha_H}{\alpha_w \alpha_T} = 1$$

$$\Rightarrow \alpha_{vert} = \alpha_w \alpha_t$$

$$\Rightarrow \alpha_s = \alpha_w \sqrt{\alpha_s}$$

$$\text{of } \alpha_w = \sqrt{\alpha_s}$$

Zo leggen in een niet-gedistort schaalmodel de sedimentdeeltjes een geometrisch gelijkvormige (bezinkings)weg af in een proportionele tijd. Door deze gelijkvormigheid wordt de morfologische tijdschaal automatisch ook gelijk aan de hydrodynamische tijdschaal.

Ten slotte dient gesteld dat een verificatie absoluut noodzakelijk is om tot een goed fysisch schaalmodel te komen. Indien betrouwbare veldmetingen beschikbaar zijn, vormen dergelijke (hydrodynamische, sedimentologische en morfologische) gegevens de ideale referentie om de modelresultaten te toetsen en te calibreren. Bij gebrek aan in-situ registraties voor het onderzoeksgebied kan een zogenaamde schaalreeks een mogelijk alternatief zijn. Identieke condities worden voor verschillende (lineaire) schalen uitgewerkt. De serie modelresultaten vormt aldus tegelijk een referentie en toetsing van de toegepaste verscaling. Ondanks uitgebreide verificatie moet steeds de nodige zorg besteed worden bij de extrapolatie van de modelresultaten naar prototype-waarden. De analyse en interpretatie van fysische schaalmodelresultaten blijven nog steeds, naast een ingenieursbezigheid, een stukje "kunst van de meesters".

3.4 Bepaling van de bezinkingssnelheid

Theoretisch kan de bezinkingssnelheid van sedimentdeeltjes enkel afgeleid worden vanuit de Navier-Stokes vergelijkingen voor een singulier, sferisch deeltje in een stilstaande, viskeuze vloeistof. Voor natuurlijke (hoekige) zandkorrels is geen algemene, theoretische oplossing beschikbaar. Daarom wordt meestal een semi-empirische benadering uitgewerkt waarbij de bezinkingssnelheid w van individuele sedimentdeeltjes in stilstaand water proefondervindelijk wordt bepaald. Zodoende wordt de (complexe) invloed van stromend water en interactieve respons van meerdere sedimentdeeltjes buiten beschouwing gelaten. Hallermeier (1981) bepaalde een semi-empirische relatie tussen de bezinkingssnelheid w en enkele sediment-karakteristieken :

$$\frac{w D_{50}}{\nu} = \frac{A}{18} \quad \text{voor } A < 39$$

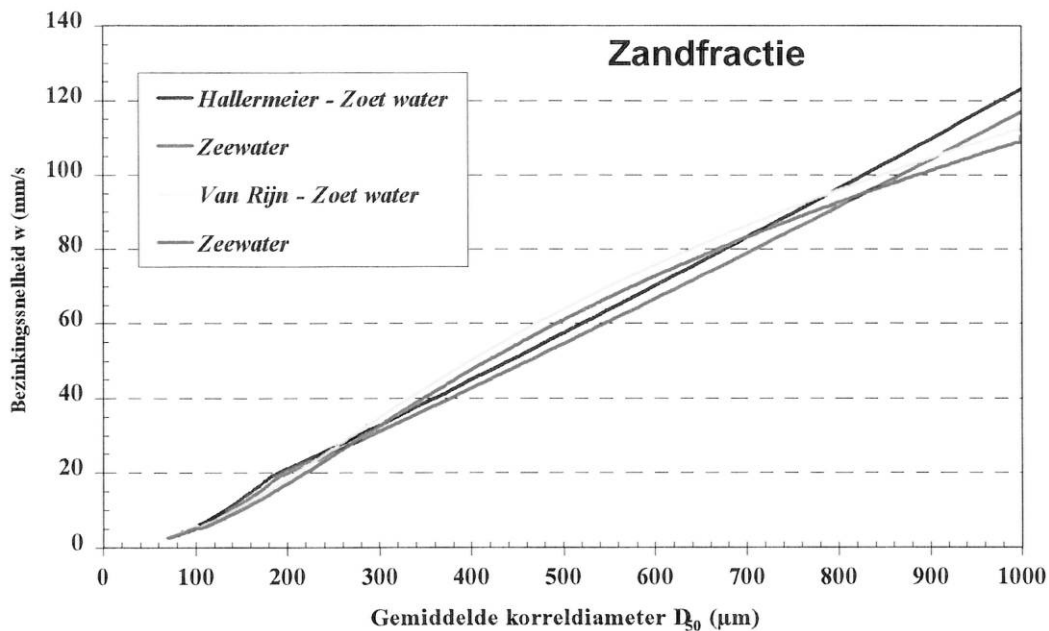
$$\frac{w D_{50}}{\nu} = \frac{A^{7/10}}{6} \quad \text{voor } 39 < A < 10^4$$

$$\frac{w D_{50}}{\nu} = 1.05 A^{1/2} \quad \text{voor } 10^4 < A < 3 \times 10^6$$

waarbij A = ondergedompeld sedimentdrijfvermogen

$$= \frac{\rho' g (D_{50})^3}{\nu^2} \quad \text{waarbij } \rho' = \text{relatieve dichtheid en } \nu = \text{kinematische viscositeit}$$

$$\frac{w D_{50}}{\nu} = \text{bezinkings Reynoldsgetal}$$



Figuur 2. Bezinkingssnelheid van zanddeeltjes

Figuur 2 toont de aldus berekende bezinkingssnelheid w voor een reeks korreldiameters (kwartszand) in respectievelijk rivierwater en zeewater. Een alternatieve benadering voor de bezinkingssnelheid is weergegeven door Van Rijn en bestrijkt in theorie een groter bereik in korreldiameters, doch de veronderstelling van individuele korrels beperkt de gedefinieerde reeks praktisch tot niet-cohesieve sedimenten. Onderstaande formules worden ter vergelijking ook in figuur 2 weergegeven.

$$w = \frac{(s-1)g D_{50}^2}{18\nu} \quad (= \text{Stokes vergelijking}) \quad \text{voor } 1 < D_{50} < 100 \mu\text{m}$$

$$w = \frac{10\nu}{D_{50}} \left[\left(1 + \frac{0.01(s-1)g D_{50}^3}{\nu^2} \right)^{0.50} - 1 \right] \quad \text{voor } 100 < D_{50} < 1000 \mu\text{m}$$

$$w = 1.10 \sqrt{(s-1)g D_{50}} \quad \text{waarbij } s = \frac{\rho_s}{\rho} = \text{relatieve dichtheid}$$

Ten slotte worden hier kort de mogelijkheden, maar vooral de beperkingen, aangeduid door inbouw van verticale distortie. Algemeen kan men stellen dat distortie in een fysisch schaalmodel zo veel mogelijk vermeden dient te worden. Indien, om praktische redenen, toch naar distortie wordt teruggesproken, hebben Vellinga (1986) en Hughes (1993), op basis van een belangrijke reeks experimenten, hun respectievelijke schaalwetten ontwikkeld. Vellinga vertrok van twee dimensieloze grootheden en een uitgebreide schaalreeks om volgende schaalrelaties te bekomen :

$$\frac{\alpha_{hor}}{\alpha_{vert}} = \left[\frac{\alpha_{vert}}{\alpha_w^2} \right]^{0.28} = \text{distortie van het model}$$

$$\alpha_{tijd,morf} = \alpha_{tijd,hydr} = \sqrt{\alpha_{vert}}$$

waarbij de hydrodynamica volgens het niet-gedistorteerde Froude criterium is verschaald.

Hughes paste de hydrodynamische tijdschaal aan, om aldus een aangepast constant Froude-getal (geassocieerd met een verticale afstand en een horizontale snelheid) te bekomen in zijn fysisch schaalmodel :

$$\alpha_{tijd,hydr} = \frac{\alpha_{hor}}{\alpha_{vert}} \sqrt{\alpha_{vert}} = \frac{\alpha_{hor}}{\sqrt{\alpha_{vert}}} = \alpha_{tijd,morf}$$

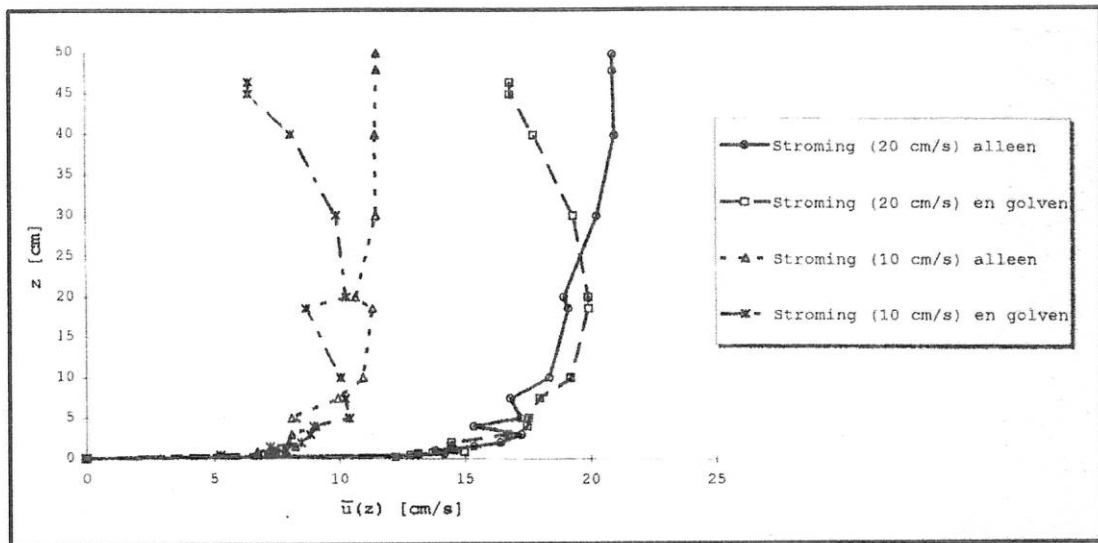
Door deze keuze wordt in het gedistorteerde schaalmodel het getal van Iribarren ξ_0 (of de surfparameter) constant gehouden en wordt ook het door Dean geformuleerde evenwichtsprofiel gelijkvormig verschaald. Door inbouw van een constant Deangetal in de verdere ontwikkeling van de schaalwetten vindt Hughes een licht aangepaste distortiewet terug :

$$\frac{\alpha_{vert}}{\alpha_{hor}} = \left[\frac{\alpha_{vert}}{\alpha_w^2} \right]^{0.50}$$

4 ILLUSTRATIEVE MODELLEN-VERHAALTJES

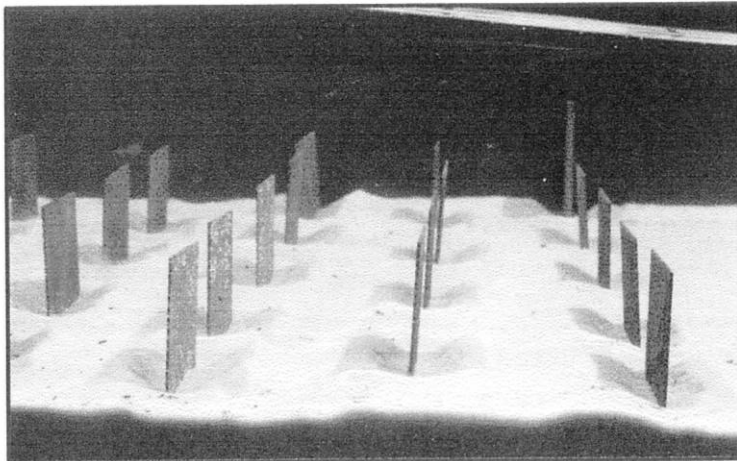
Hieronder staan een reeks losse voorbeelden verzameld waarbij fysische modelstudies op één of andere manier bijdroegen tot de verdere projectontwikkeling. Zonder echt in detail te gaan is telkens getracht de eigenheid en de specifieke kracht van het schaalmodel te duiden. Een eerste voorbeeld illustreert de mogelijkheid om via fysische modellering een beter inzicht in de complexe sedimenttransportfenomenen voor de kust te verwerven. Een serie fundamentele proeven in de 2D-golfgoot van het Waterbouwkundig Laboratorium van Borgerhout, waarbij het resulterend stroombeeld onder de gecombineerde impact van invallende golven en parallelle stroming met behulp van een Laser Doppler snelheidsmeter is geregistreerd, maken duidelijk dat de Shields-curve een vrij betrouwbaar criterium vormt voor het begin van beweging, ook onder niet permanente stroming.

Gedetailleerde opnames van de ogenblikkelijke snelheidsprofielen leiden tot een evaluatie van de (bodem) schuifspanning als drijvende kracht voor sedimenttransport.



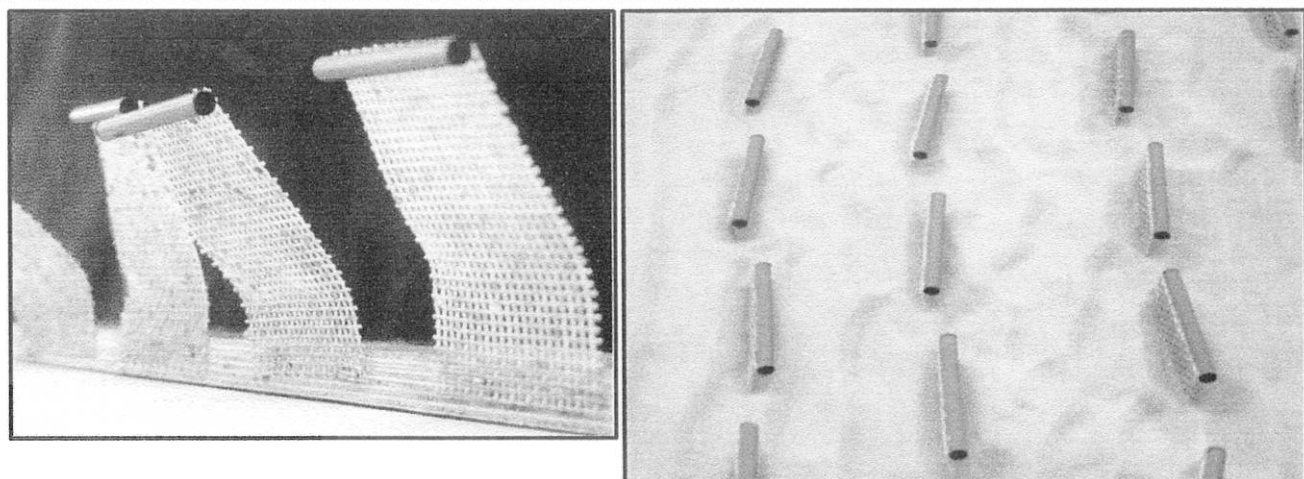
Figuur 3. Snelheidsprofiel onder stroming en golfimpact

De uitgebreide proefreeks met het zogenaamde GESEP-systeem illustreren de enorme mogelijkheden van het fysisch modelleren. Deze vlottende onderwaterschermen, aanvankelijk voorgesteld als een volwaardig alternatief voor de stabilisatie van het onderwaterstrand, bleken enkel bij een zeer specifieke inplanting in de kustzone effectief te werken. Het experimentele programma bepaalde, vertrekkend van een zuiver stroomtechnische benadering in een schaalmodel met vaste bodem, een optimale configuratie voor het veld van onderwatergolfdokken, alvorens de morfologische impact onder gecombineerde werking van golfval en langse tijdstroming verder in detail te analyseren in een 3D-schaalmodel met beweegbare bodem. Het bleek duidelijk dat de GESEP-onderwaterschermen inderdaad voornamelijk een golfstabilisatie genereren.



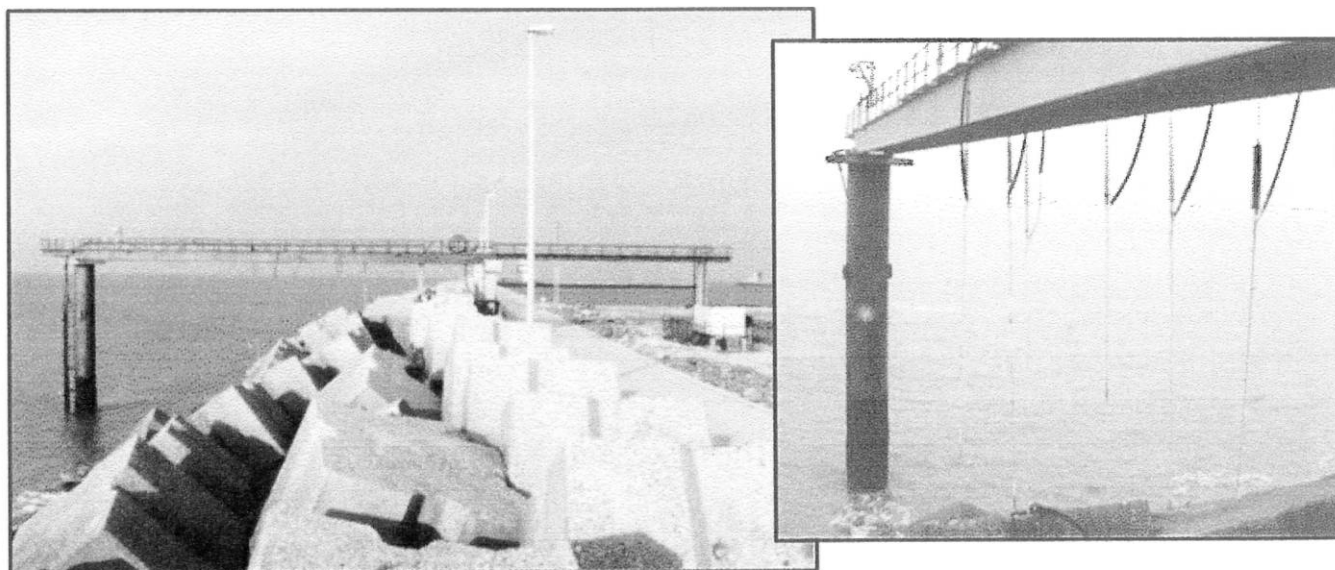
Figuur 4. GESEP-velde onder loodrecht golfval

Enkel de opstelling waarbij het schermenveld samen met de strandhoofden een gesloten zandbox vormt beschermt het tussengelegen strand bij normale en stormcondities, de inplanting in open zee daarentegen induceert als singulier obstakel eerder extra sedimenttransport. Bovenstaand voorbeeld illustreert treffend de kracht van een laboratoriumonderzoek in de ontwerpfasen. Er kan dan ook geen twijfel over bestaan dat de actuele kosten voor de ontwikkeling van een fysische schaalmodelstudie ruimschoots worden gecompenseerd door de latere graad van optimalisatie van het prototype in het uiteindelijke project.



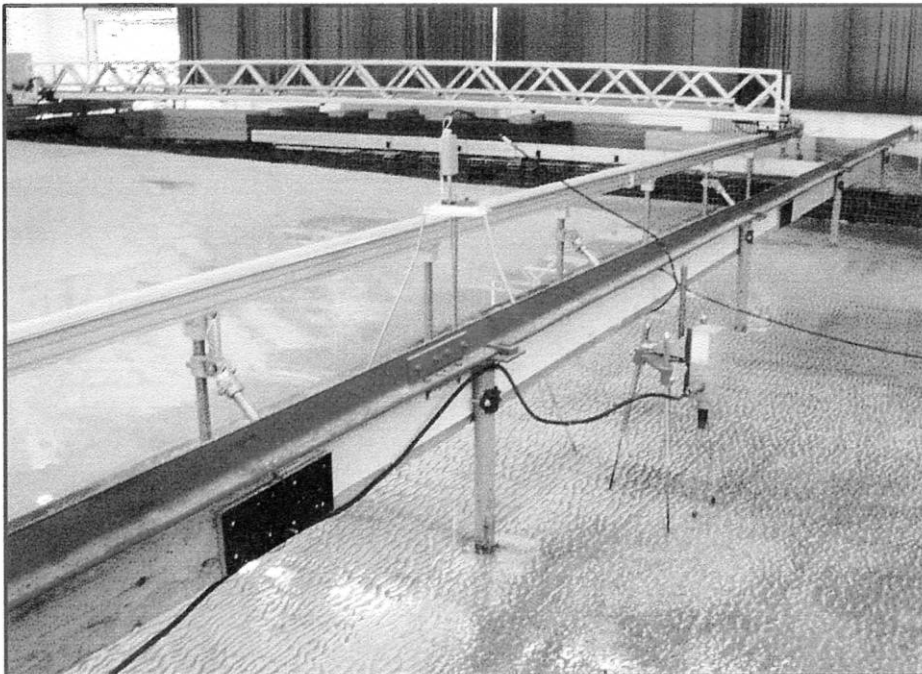
Figuur 5. 3D-schaalmodel van de GESEP-onderwaterschermen

Met de recente uitbouw van de haven van Zeebrugge is zeker ook een belangrijke reeks fysische schaalmodellen ontwikkeld en effectief gebruikt als ontwerpmiddel. Een uitgebreide studie van het stroom- en golfbeeld rond de golfbrekerarmen en hun morfologische impact op de nabije toeristische strandzones leidde rechtstreeks tot het ontwerp en de uitvoering van belangrijke strandsuppleties langs de kust van Knokke in 1979 en 1986. Het stabiliteitsonderzoek van de stortsteengolbrekers met de ontwikkeling van het HARO-blok als nieuw deklaagelement illustreren treffend de immense bijdrage van het laboratoriumonderzoek tot het welslagen van dit grootse waterbouwkundig project. Nu nog worden in het kielzog van deze realisatie talrijke onderzoeksonderwerpen verder uitgewerkt; mede door de beschikbaarheid van effectieve terreinmetingen en de feedback. Zo zoekt bijvoorbeeld een Europees studieproject ("Opticrest") naar optimale ontwerpregels voor stortsteengolbrekers, met inbegrip van golfoploop en -overtopping, door een volledige integratie van numerieke modellering, fysische schaalmodellen en prototype-metingen op het terrein. De meetinstallatie aan de NW-dam in Zeebrugge vormt een uniek referentie- en calibratiemiddel in Europa voor dergelijke fenomenen. Dit project illustreert de strikte noodzaak van een geïntegreerde onderzoeksaanpak om kwalitatief hoogstaande resultaten te verzamelen enerzijds en de enorme meerwaarde van in-situ waarnemingen als referentie voor modelleringsontwikkelingen.



Figuur 6. Prototype-metingen aan de stortsteengolbreker in Zeebrugge.

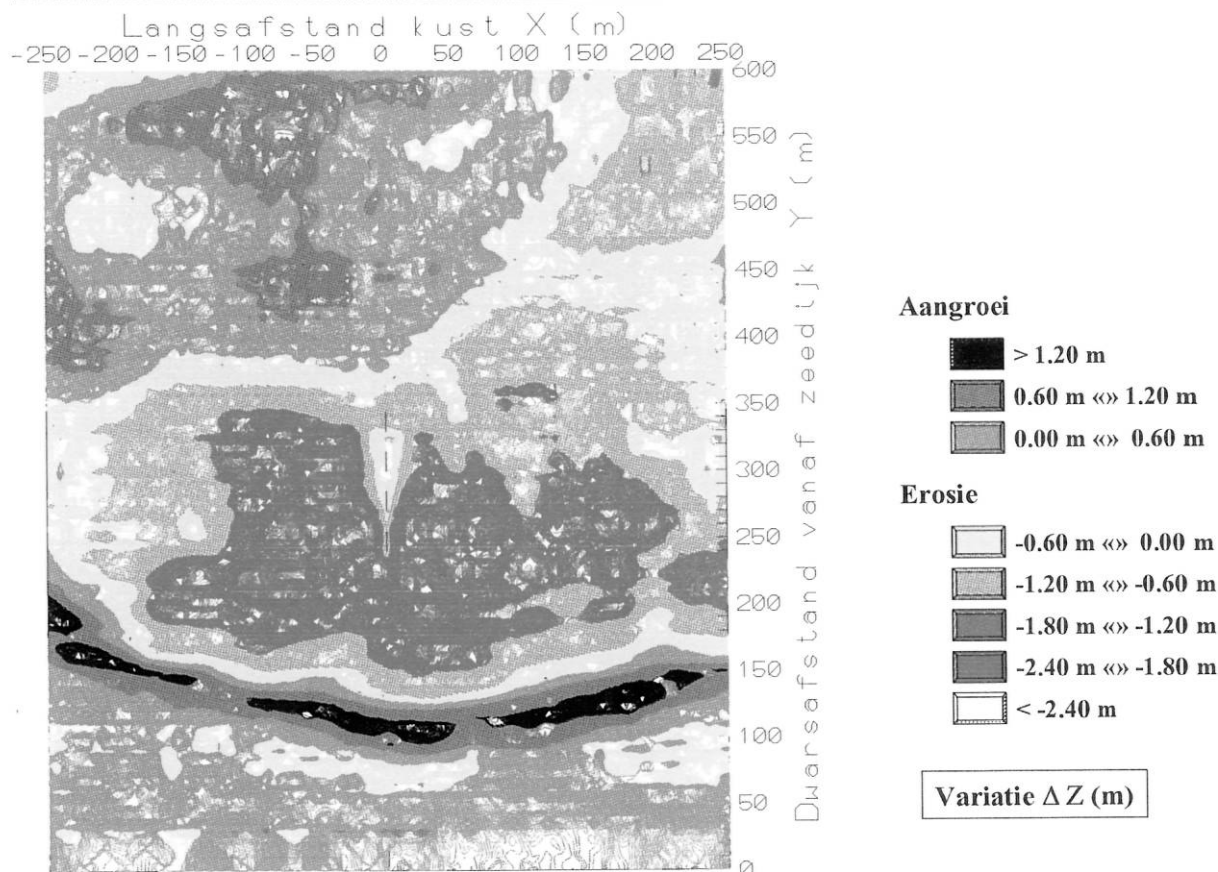
Actueel loopt een uitgebreide modelstudie betreffende de optimale kustverdedigingsvorm voor de kuststrook ter hoogte van Knokke-Zoute. De eerste fase van het onderzoek beschouwt in een 2D-golfgoot de stabiliteit van de alternatieve suppletievormen op zich onder loodrechte golfimpact. Uit de reeks mogelijke modelbenaderingen wordt voor een fysisch schaalmodel gekozen waarin het suspensietransport als dominante factor wordt geïdentificeerd. Inderdaad, veldobservaties en in-situ metingen tonen aan dat de grootste fractie van het dwarse sedimenttransport in de brekerszone gebeurt door de turbulentie van de brekende golven die het bodemmateriaal in suspensie brengen. Men veronderstelt - door deze verschalingsprocedure voor de morfologische fenomenen - stilzwijgend dat het sedimenttransport langs de bodem van secundair belang is voor de ontwikkeling van het dwarsprofiel onder de beschouwde hydrodynamische impact. Bij de storm- en springtijsimulaties is deze veronderstelling zeker realistisch maar onder normale golf- en tijcondities kon de landwaartse migratie van de vooroever (langsheen de bodem) zeker niet volmaakt gereproduceerd worden. Hierdoor blijft het, ondanks de hierboven ontwikkelde theoretische benadering, aangewezen de hier verzamelde modelresultaten voornamelijk kwalitatief te interpreteren. Een absolute morfologische tijds- en volumeverscaling moet steeds met de nodige voorzichtigheid worden behandeld en dient zeker getoetst te worden aan de beschikbare terreinmetingen voor de referentietoestand.



*Figuur 7.
3D-schaalmodel golftank WLB
Profiel-suppletie Knokke-Zoute*

De verdere ontwikkeling van de experimenten beschouwt de morfologische evolutie van het kustgebied in een 3D-schaalmodel waarbij de eerder vastgestelde "optimale" suppletievorm als basis voor een algemene kustverdediging wordt gebruikt. De validering en calibratie van het fysische schaalmodel gebeurt op basis van beschikbare terreinmetingen van de in het gebied uitgevoerde suppletie in 1986, die effectief in het proefprogramma is opgenomen als referentie.

Tegelijk is ook een mathematische simulatie van de sedimenttransportfenomenen in de beschouwde kustzone uitgewerkt, waardoor drie onderzoekscomponenten simultaan en interactief ontwikkeld worden. De zandsuppleties voor de Belgische Oostkust vormen hiertoe een handig werkinstrument, gezien de rijkdom aan hoogkwalitatieve terreininformatie (zowel in ruimtelijk opzicht als in een tijds kader) enerzijds en de kritieke ontwerpcondities voor dit complexe kustverdedigingsprobleem anderzijds. De complete synergie in de onderzoeksmethodologie kan aldus een bijdrage leveren tot een beter begrip van de complexe kusthydraulische processen voor de Belgische kust, als basis voor een gefundeerd "veilig" kustbeheer.



Figuur 8. Morfologische evolutiekaart 3D-Schaalmodel Knokke-Zoute

5 NAAR EEN GEÏNTEGREERD ONDERZOEK.....

In een tijd waar geïntegreerd waterbeheer een actueel onderwerp vormt kan bij deze ook een pleidooi voor geïntegreerd research geformuleerd worden. Inderdaad de drievoudige geïntegreerde benadering waarbij fysische schaalmodellen tezamen met computersimulaties en terreinmetingen worden ontwikkeld, is actueel nog vrij uitzonderlijk; maar de afzonderlijke componenten zijn reeds lang de basisinstrumenten om de ingewikkelde stromings- en transportfenomenen in kustgebieden te onderzoeken. Alleen door een complete synergie van de drie benaderingen kan de "veiligheids"-uitdaging in het toekomstige kustbeheer succesvol getrotseerd worden. De veldregistraties zijn op zich zeker de meest realistische data omtrent het werkelijke fysische proces maar deze metingen blijven zeer duur en moeilijk uit te voeren. Daarenboven bevatten deze in situ-gegevens alle natuurlijke grillen en variaties, waardoor een analytische of synthetiserende interpretatie soms heel moeilijk en onbetrouwbaar wordt. De tweede benadering voorziet in het gebruik van fysische schaalmodellen als werkinstrument. Dergelijke modellen zijn kleiner, goedkoper en makkelijker hanteerbaar, maar vormen steeds min of meer een simplificatie van de werkelijkheid. Voor de "routinestudies" worden deze fysische modellen vandaag meestal verdrongen door numerieke ontwerp simulaties via computer. Complexe problemen zoals golfbreking, dwarstransportontwikkeling of golfturbulentie dienen, bij gebrek aan mathematische vertolking, nog steeds in een fysisch laboratoriummodel onderzocht te worden. Zowel een fysische als een mathematische modellering laten, in tegenstelling tot de terreinmetingen, een perfecte controle en herhaalbaarheid toe waardoor calibratie en verificatie makkelijk en precies kunnen uitgevoerd worden. De recente, groeiende impact van de numerieke modellering als ontwerp instrument in de kusthydraulica is grotendeels te wijten aan de sterk verruimde mogelijkheden van computers, tezamen met de groeiende inzichten in de fysische processen, nieuwe numerieke oplossings technieken en uitgebreide mathematische vertolkings mogelijkheden. De beschrijving van het resulterende stromingsveld of het golfpatroon in een mathematisch model levert zeer realistische en betrouwbare resultaten op. De complexe interactie van bovenstaande hydrodynamische impact met de mobiele

zeebodem en de hieruit resulterende sedimenttransportfenomenen kunnen voorlopig slechts grotendeels kwalitatief numeriek vertaald worden. Ondanks de recente explosie aan software-benaderingen blijft in deze toepassing zeker verificatie en/of calibratie meer dan noodzakelijk.

Zo is het ook meteen duidelijk dat de numerieke modellen niet zomaar en absoluut de fysische schaalmodellen als werkinstrument hebben verdrongen. Meer zelfs, de fysische laboratoriumstudies evolueren of beter specialiseren mee met de ontwikkeling van de mathematische simulaties, niet enkel op zich maar ook en vooral als interactieve ondersteuning in de zogenaamde hybride modellering van kustverdedigingsprojecten. Hierbij worden bijvoorbeeld resultaten uit een fysisch schaalmodel van een complexe zone gebruikte als input of randvoorwaarde van een meer algemeen numeriek model dat een groter gebied bestrijkt. Omgekeerd kan een mathematische simulatie de nodige basisgegevens voor de sturing van een fysisch schaalmodel van een detailgebied genereren. Tenslotte dient expliciet gesteld dat feedback een absolute must vormt bij de verdere ontwikkeling van alle onderzoeksinstrumenten. Te vaak blijft de toetsing aan de werkelijkheid achteraf achterwege waardoor belangrijke informatie, correcties en verbeteringen in de research-middelen niet ten volle worden benut om de kwaliteit van de modellering in de toekomst verder te verhogen en aldus een "veilig" kustbeheer optimaal te ondersteunen.

6 REFERENTIES

- Bijker E.W. (1982). Physical models for coastal morphology and harbour models. In : *Terra et Aqua* No. 23/24, p. 24, IADC-Elsevier Advanced Technology Publications (Oxford).
- Dette H.H., Larson M., Murphy J., Newe J., Peters K., Reniers A. and Steetzel H. (1996). *Application of prototype flume tests for beach nourishment assessment*. EC Mast-Safe project.
- Fredsoe J. and Deigaard R. (1992). Mechanics of coastal sediment transport. In : *Advanced Series on Ocean Engineering*, Volume 3, World Scientific Publishing Co. Singapore.
- Hicks D.M. and Green M.O. (1997), The "fall speed"-parameter as an index of cross-shore sand transport : verification from measurements on the shoreface. In : *Proceedings Australian Coastal and Ocean Engineering Conference*, p. 1089, Christchurch (Nieuw-Zeeland).
- Hughes S.A. (1993). Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. In : *Advanced Series on Ocean Engineering*, Volume 7, World Scientific Publishing Co. Singapore.
- Ito M. en Tsuchiya Y. (1988). Reproduction models of beach change by storm waves. In : *Proceedings ICCE 21*, p. 1544, Malaga (Spanje).
- Kamphuis J.W. (1995). A comparison of 2-D and 3-D beach profiles. In : *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 121, No. 3, p. 155, ASCE.
- Kraus N.C. and Smith J.M. (1994). Supertank Laboratory Data Collection Project - Volume 1 : Main Text, Technical Report CERC-94-3, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers.
- Kriebel D.L., Dally W.R. and Dean R.G. (1986). Undistorted Froude Model for surf zone sediment transport. In *Proceedings ICCE 20*, p. 1296, Taipei (Taiwan).
- Le Méhauté B. (1976). Similitude in coastal engineering. In : *Journal of Waterways, Harbours and Coastal Engineering Division* Vol. 102, WW3, p. 317, ASCE.
- Lundgren H. (1978). Struggle of physics and mathematics in coastal engineering. In : *Proceedings ICCE 16*, Hamburg (Duitsland).
- Trouw K., Monbaliu J. en Berlamont J. (1996). Study of the scale effects, the possibilities and the constraints to translate lab results to field situations when solving wave-induced sediment transport processes. In : *Proceedings Conference "Physics of Estuaries and Coastal Seas"*, p. 165, Den Haag (Nederland).
- Van De Graaff J. (1977). Dune erosion during a storm surge. In : *Coastal Engineering*, Vol. 1, p. 99-134, Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam.
- Vellinga P. (1986). *Beach and dune erosion during storm surges*, Delft Hydraulics Communication No. 372.
- Wang X., Lin L. en Wang H. (1994). Scaling effects on beach response physical model. In : *Proceedings ICCE 24*, p. 154, Kobe (Japan).
- Work P.A. & Roger W.E. (1998). Laboratory study of beach nourishment behaviour. In : *Journal of Water, Port, Coastal & Ocean Engineering*, Vol. 124, No. 5, p. 229, September/October 1998, ASCE.