

758A

CONCENTRATIE- EN DIFFUSIECOEFFICIENTEN-  
VERDELING ONDER ONREGELMATIGE EN BREKENDE  
GOLVEN

Een onderzoek naar aanleiding van metingen  
in de Deltagoot

Deel 1: Tekst

S.L. Ras  
J.A. Amesz  
maart 1989

TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT  
FACULTEIT DER CIVIELE TECHNIEK  
VAKGROEP WATERBOUWKUNDE

CONCENTRATIE- EN DIFFUSIECOEFFICIENTEN-  
VERDELING ONDER ONREGELMATIGE EN BREKENDE  
GOLVEN.

Een onderzoek naar aanleiding van metingen  
in de Deltagoot.

Afstudeerverslag van Saskia Ras en Jack Amesz.

Hoogleraar : Prof.Dr.Ir. E.W. Bijker  
Begeleiders: Dr.Ir. J. van de Graaff  
Ir. H.J. Steetzel (WL)

TECHNISCHE UNIVERSITEIT DELFT  
FACULTEIT DER CIVIELE TECHNIEK  
VAKGROEP WATERBOUWKUNDE

Een stormwind zwelt van rondom aan.  
De zee, die plots'ling hijgend kreunt,  
Braakt brekers, waaruit vlammen slaan,  
Neer op het strand, dat gloeit en dreunt.

Voor een kroegje ergens in een hoek van  
het Leidse Plein onder de bomen,  
beraadslaagden wij in de koesterende  
herfstzon, wat ons thans stond te doen.

Leonhard Huizinga

## VOORWOORD

Een deel van de inspanningen van de Vakgroep Waterbouwkunde is gericht op het verkrijgen van meer inzicht in morfologische processen aan zandige kusten. Dit rapport is een verslag van ons afstudeerwerk dat in dit kader is verricht.

Met de diffusie- (of mengings-) vergelijking is een diffusiecoëfficiëntenverdeling berekend, die de sedimentconcentratieverdeling over de waterdiepte beschrijft. Geprobeerd is om een afhankelijkheid te vinden tussen diffusiecoëfficiënten en parameters die kenmerkend zijn voor de waterbeweging.

Het rapport bestaat uit 2 delen. Dit deel bevat de tekst en in het andere deel staan de bijlagen, waarin het merendeel van de figuren en tabellen.

Vanaf mei 1988 tot maart 1989 hebben wij, met een onderbreking van 2 maanden in de zomer van 1988, met veel plezier aan het onderzoek gewerkt. Namens de Vakgroep Waterbouwkunde is het werk begeleid door Jan van de Graaff en namens het Waterloopkundig Laboratorium door Henk Steetzel.

Op deze plaats willen wij iedereen bedanken die ons tijdens de afsluitende werkzaamheden van onze studie in Delft heeft gesteund, of bereid was naar de vorderingen te luisteren.

Saskia Ras  
Jack Amesz

Delft, maart 1989

## INHOUDSOPGAVE

<u>Voorwoord</u>	5
<u>Samenvatting</u>	8
<u>HOOFDSTUK 1 : INLEIDING</u>	
1.1 Algemeen	11
1.2 Doel van het onderzoek	11
1.3 Opzet van het onderzoek	12
<u>HOOFDSTUK 2 : THEORETISCHE ACHTERGRONDEN</u>	
2.1 Sedimenttransport	15
2.2 Opbouw van de concentratieverdeling	19
2.2.1 Niet brekende golven boven een bodem met ribbels	19
2.2.2 De invloed van brekende golven	21
2.3 Afleiding diffusiemodel	23
2.4 Procedure Van de Graaff	27
2.4.1 Concentratie-fit procedure	28
2.4.2 Bepaling van de diffusiecoëfficiëntenverdeling	29
<u>HOOFDSTUK 3 : ONDERZOEK</u>	
3.1 Deltagoot en meetapparatuur	31
3.2 Meetserie I	34
3.2.1 Gecreëerde situatie	34
3.2.2 Beschrijving gegevens	34
3.3 Meetserie II	36
3.3.1 Gecreëerde situatie	36
3.3.2 Beschrijving gegevens	37
<u>HOOFDSTUK 4 : RESULTATEN</u>	
4.1 Selectie testen	39
4.2 Modelresultaten	42
4.2.1 Verwachting modelresultaten	42
4.2.2 Presentatie modelresultaten	42
4.3 Bespreking concentratie fits	44
4.4 Vorm van de $\epsilon$ verdeling	45

4.5	Afhankelijkheid $\epsilon$ waarden van randvoorwaarden	49
4.5.1	Verwachting	49
4.5.2	Resultaten	51
4.5.3	Bespreking	53
4.6	Controle D50 suspensiemateriaal	58
4.6.1	Procedure	58
4.6.2	Bespreking	61
4.7	Gevoeligheidsanalyse	63
4.7.1	Variatie in de programma-invoer	63
4.7.2	Resultaten	64
	<b><u>HOOFDSTUK 5 : CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</u></b>	<b>67</b>
	<u>Overzicht gebruikte symbolen</u>	70
	<u>Lijst van figuren en tabellen in de tekst</u>	73
	<u>Inhoudsopgave bijlagen</u>	74
	<u>Literatuur</u>	77

## SAMENVATTING

Een belangrijk aspect van het gecompliceerde proces van sedimenttransport aan zandige kusten, is de concentratieverdeling over de waterdiepte onder golfwerking. Voor de beschrijving van de concentratieverdeling wordt er vanuit gegaan dat een relatief eenvoudig diffusie- of mengingsmodel kan worden toegepast. Uit de gemeten concentratieverdeling is met de fit procedure van Van de Graaff een continue concentratieverdeling bepaald. Hiermee is de bijbehorende diffusie- of mengingscoëfficiëntenverdeling over de waterdiepte te bepalen. Hierbij wordt, voor het aandeel van de valsnelheid van sedimentdeeltjes in het diffusiemodel, rekening gehouden met de gradering van het aanwezige bodemmateriaal door de D10-D50-D90 waarden te gebruiken. Tevens wordt, met deze waarden en met de berekende diffusiecoëfficiëntenverdeling, de D10-D50-D90 verdeling over de waterdiepte berekend.

De meetgegevens voor dit onderzoek zijn ontleend aan twee onderzoeken welke verricht zijn in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium De Voorst. Dit betreft onderzoeken onder de volgende omstandigheden:

- proeven op grote schaal.
- onregelmatige golven.
- natuurlijke zandige bodem.
- branding: - brekende golven.  
- bodemhelling.

De fit procedure van Van de Graaff geeft zowel in situaties met onregelmatige, niet brekende golven als onder onregelmatige brekende golven boven een "natuurlijke" zandige bodem goede resultaten.

Bij een horizontale bodem en niet brekende, onregelmatige golven wordt een olijf- (half hol, half bol) vormige diffusiecoëfficiëntenverdeling gevonden. De vorm komt overeen met hetgeen in eerder onderzoek is gevonden.

In situaties waarin breken van golven optreedt, worden verschillende diffusiecoëfficiëntenverdelingen gevonden. Het is niet gelukt om de verschillende diffusiecoëfficiëntenverdelingen te relateren aan karakteristieken van het brekingsproces, zoals bijvoorbeeld het brekertype.

Voor bepaalde karakteristieke waarden van de diffusiecoëfficiënten is nagegaan of er een afhankelijkheid van bepaalde kenmerkende randvoorwaarden voor de waterbeweging kan worden aangetoond.

Onder de genoemde omstandigheden vertonen de diffusie-coëfficiënten een stijgende tendens bij toenemende waarden van parameters, kenmerkend voor de waterbeweging:  $U_{sig}$ ,  $U_{sig}T_p/2\pi$ ,  $H_{sig}/h_{gem}$  en  $U_{sig}T_p/h_{gem}$ .

In de gevonden tendens blijkt, met name door het breken van golven, aanzienlijke spreiding op te treden.

De berekende D50 verdeling over de waterdiepte is gecontroleerd met over de waterdiepte gemiddelde, gemeten D50 waarden. De overeenkomst is teleurstellend.

Het gebruiken van een onjuiste korrelgradering van het bodemmateriaal als invoer voor de berekening kan hiervoor als een belangrijke oorzaak worden aangemerkt. Het optreden van uitzeving in het bodemmateriaal tijdens de proeven maakte het moeilijk een juiste korrelgradering te kiezen.

Ten slotte is in een gevoeligheidsanalyse de invloed bekeken van variatie in de invoer van de berekening van de diffusiecoëfficiëntenverdeling. Hiertoe is de diameter invoer (D10-D50-D90 waarden bodemmateriaal) gevarieerd, en is een formule voor de valsnelheid van sedimentdeeltjes bij een andere temperatuur gebruikt.

De resultaten zijn bemoedigend en geven aanleiding tot nader onderzoek, waarvoor dit onderzoek goede aanknopingspunten biedt.

Voordat met dit concept concentratieverdelingen voorspeld kunnen worden zal echter nog een aanzienlijke onderzoeksinspanning geleverd moeten worden.



## HOOFDSTUK 1 : INLEIDING

### § 1.1 Algemeen

Voor het begrijpen en voorspellen van morfologische processen aan zandige kusten, zoals kustlijnontwikkeling in de tijd of erosie tijdens een storm, is inzicht nodig in het zandtransport, de motor van deze processen. Zand- of sedimenttransport kan beschreven worden als het produkt van een snelheid en een sedimentconcentratie; een transportprofiel, over de waterdiepte, als een snelheidsprofiel maal een concentratieprofiel.

Een snelheidsprofiel is (momentaan) goed te meten en redelijk nauwkeurig te berekenen. Instantane concentraties zijn niet gemakkelijk te meten, en nog niet goed te verwerken in mathematische beschrijvingen. Dit heeft tot gevolg dat op bovenstaande manier alleen een tijdsgemiddeld zandtransport bepaald kan worden.

Bovendien is het nog niet goed mogelijk om een concentratieprofiel te voorspellen op grond van randvoorwaarden.

Een concentratieprofiel laat zich beschrijven door de bodemconcentratie en de vorm van de concentratieverdeling over de waterdiepte.

Voor de beschrijving van de concentratieverdeling wordt er vanuit gegaan dat een relatief eenvoudig diffusie- of mengingsmodel kan worden toegepast. Uit de gemeten concentratieverdeling is dan de bijbehorende diffusie- of mengingscoëfficiëntenverdeling over de waterdiepte te bepalen. Deze diffusiecoëfficiëntenverdeling is hier onderwerp van onderzoek.

Voor dit onderzoek is uitgegaan van meetgegevens, beschikbaar uit onderzoeken welke uitgevoerd zijn in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium De Voorst, door J.A. Roelvink en H.J. Steetzel in de periode oktober 1986 tot juni 1987.

### § 1.2 Doel van het onderzoek

Bovengenoemd diffusiemodel voor de beschrijving van de concentratieverdeling is eerder toegepast in onderzoek van Van de Graaff (1988). Daarin wordt uitgegaan van concentratiemetingen, gedaan bij proeven op kleine schaal met regelmatige golven en een horizontale bodem met kunstmatige bodemribbels. Voor deze omstandigheden geeft Van de Graaff een eerste aanzet voor onderzoek naar de afhankelijkheid tussen waarden voor de diffusiecoëfficiënten en randvoorwaarden voor de waterbeweging.

De meetgegevens uit de beide onderzoeken in de Deltagoot bieden de mogelijkheid om het diffusiemodel onder meer "natuurlijke" omstandigheden toe te passen.

Deze omstandigheden zijn:

- proeven op grote schaal
- onregelmatige golven
- natuurlijke zandige bodem
- branding: - brekende golven  
- bodemhelling

De doelstelling van dit onderzoek is nu om, onder de genoemde meer "natuurlijke" omstandigheden, inzicht te verkrijgen in optredende diffusiecoëfficiëntenverdelingen en in de afhankelijkheid tussen waarden van de diffusiecoëfficiënten en randvoorwaarden die kenmerkend zijn voor de waterbeweging.

### § 1.3 Opzet van het onderzoek

#### Gevolgde procedure

Door de gemeten concentraties wordt met de "fit" methode van Van de Graaff (1984) een continue concentratie verdeling over de waterdiepte bepaald. Hiermee kan met behulp van het diffusiemodel een continue diffusiecoëfficiëntenverdeling berekend worden. Hierbij wordt, voor het aandeel van de valsnelheid van sedimentdeeltjes in het diffusiemodel, rekening gehouden met de gradering van het aanwezige bodemmateriaal, door uit te gaan van een lognormale korreldiameterverdeling die vastgelegd wordt door de D10-D50-D90 waarden. Tevens wordt met deze waarden en de berekende diffusiecoëfficiëntenverdeling, de D10-D50-D90 verdeling over de waterdiepte berekend.

Vervolgens is de aandacht gericht op de vorm van de gevonden diffusiecoëfficiëntenverdelingen onder de verschillende omstandigheden (wel/niet brekende golven, bodemhelling). Daarnaast is voor bepaalde karakteristieke waarden van de diffusiecoëfficiënten nagegaan of een afhankelijkheid van bepaalde randvoorwaarden voor de waterbeweging (zoals golfhoogte, vloeistofsnelheid) kan worden geconstateerd.

De nauwkeurigheid van de resultaten van het diffusiemodel (de diffusiecoëfficiëntenverdeling en de D10-D50-D90 verdeling) is getoetst door gemeten, over de waterdiepte gemiddelde, D50 waarden van het sediment in suspensie te vergelijken met de berekende D50 waarden.

Tenslotte is in een gevoeligheidsanalyse de invloed van variatie in invoer van het model (met name in de diametergradering van het bodemmateriaal) nagegaan.

### Gebruik van meetgegevens uit literatuur

Voor dit onderzoek is gebruik gemaakt van meetgegevens uit onderzoek in de Deltagoot van het WL De Voorst, uitgevoerd door derden. Dit heeft een aantal voor- en nadelen.

Voordelen:- metingen op grote schaal in de Deltagoot zijn een dure aangelegenheid, en op deze manier is het mogelijk op een relatief goedkope wijze dit onderzoek te verrichten.

- daarnaast kan tijdwinst geboekt worden doordat (veelal tijdrovende concentratie-) metingen reeds verricht en geanalyseerd zijn.

Nadelen: - de aard van de metingen en de meetgegevens zijn een gegeven, en zijn daarmee tevens een beperking.  
- voor de kennis van het verrichte onderzoek is men afhankelijk van schriftelijke rapportage, en men heeft geen directe betrokkenheid bij het verrichte onderzoek. Voor studenten zonder ervaring met dergelijk onderzoek is dit een groot nadeel. Voor een deel is dit ondervangen door goede contacten met H.J. Steetzel en J.A. Roelvink.

## HOOFDSTUK 2: THEORETISCHE ACHTERGRONDEN

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het proces van sedimenttransport en op de concentratieverdeling van sediment in suspensie, die in het sedimenttransport een belangrijke rol speelt.

Voor de beschrijving van de concentratieverdeling wordt vervolgens een diffusie- (of mengings-) vergelijking afgeleid. Tenslotte komt aan de orde hoe, uitgaande van concentratiemetingen en de korrelgradering van het bodemmateriaal, een diffusiecoëfficiëntenverdeling kan worden berekend.

### § 2.1 Sedimenttransport

Een van de fundamentele problemen in de kustwaterbouwkunde is de wisselwerking tussen golven en stroming, en de kust. Golven en stroming bepalen, tesamen met de fysische eigenschappen van het bodemmateriaal en de vloeistof, de grootte en richting van het sedimenttransport in de kustzone. De variaties in de hoeveelheid transport en de daaruit resulterende bodemveranderingen zijn belangrijk voor het voorspellen van de natuurlijke kustlijnontwikkeling en de invloed van kunstmatige constructies op de kustzone. Zo kan men te maken krijgen met plaatselijke erosie of met aanzanding in een scheepvaartgeul.

Het sedimenttransportproces kan in principe verdeeld worden in 3 stappen:

1. Het opwoelen van bodemmateriaal (zodat het in suspensie komt of om het los te maken van de bodem)
2. Horizontale verplaatsing van de deeltjes door het water.
3. Sedimentatie van de deeltjes op een later tijdstip.

Het is mogelijk om het continuïteitsprincipe toe te passen op een volume dat zich uitstrekt vanaf een gegeven bodemoppervlakje tot aan het wateroppervlak (fig. 2.1.1, ontleend aan Massie (1987)).

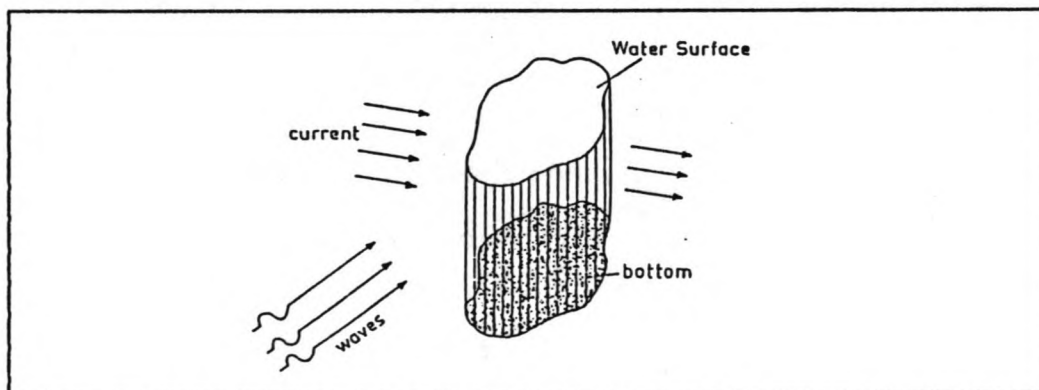


fig. 2.1.1 : Principeschets continuïteit

De resulterende erosie of aanzanding in het beschouwde volume kan worden bepaald als het resulterend sedimenttransport door de verticale begrenzing van het volume bekend is. Het aandachtspunt is dus stap 2, de horizontale verplaatsing van individuele materiaaldeeltes door een gegeven dwarsdoorsnede gedurende een gegeven periode. Dit is aangegeven in fig. 2.1.2 (ontleend aan Massie (1987)). (In het algemeen hoeft noch de golf- noch de stromingsrichting samen te vallen met de gegeven assen.)

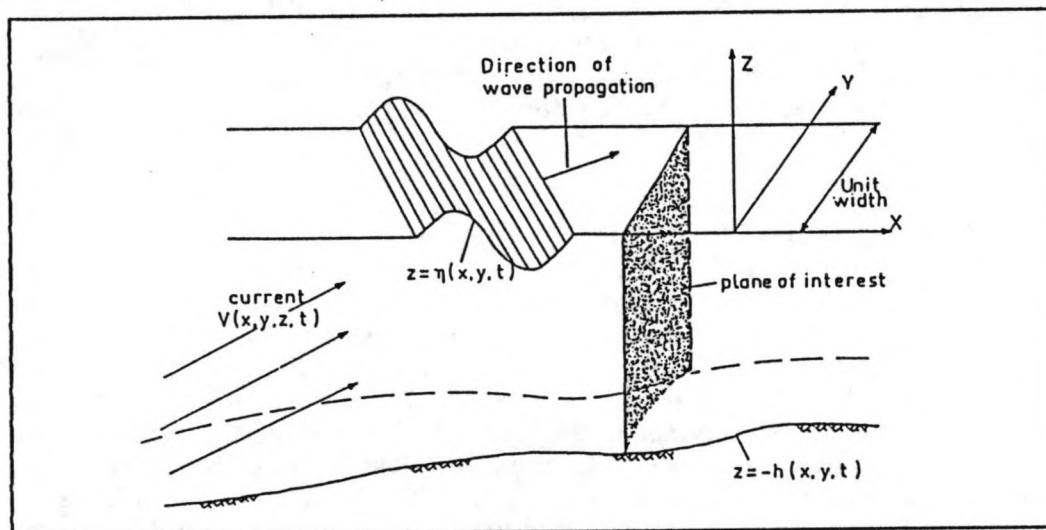


fig. 2.1.2 : Principeschets sedimenttransport

Het sedimenttransport door een eenheid van breedte van het y-z-vlak dat zich uitstrekt van de bodem ( $z = -h$ ) tot aan het wateroppervlak ( $z = \eta$ ) kan uitgedrukt worden als het product van een instantane concentratie en een instantane vloeistofsnelheid, geïntegreerd over de instantane waterdiepte en gemiddeld over een zekere tijdsduur:

$$S_x = \frac{1}{t' - t} \int_{t'}^{t} \left[ \int_{-h}^{\eta} c(z, t) \cdot u(z, t) dz \right] dt \quad (2.1-1)$$

waarin  $c(z, t)$  de instantane concentratie van materiaal in suspensie, uitgedrukt in eenheden van volume van afgezet bodemmateriaal per eenheid van volume van water  
 Golfwerking veroorzaakt snelle variaties in  $c(z, t)$ ; veranderingen in bodemligging beïnvloeden  $c(z, t)$  langzamer  
 $h$  de lokale waterdiepte

$S_x$	het sedimenttransport, uitgedrukt in eenheden van volume per eenheid van breedte en tijd
$t$	de tijd
$t'$	de periode waarover gemiddeld is; deze tijdsduur moet lang genoeg zijn om de effecten van onregelmatigheid van de golven uit te middelen, en is zodoende veel langer dan een enkele golfperiode
$u(z,t)$	de instantane x-component van de snelheid van de sedimentdeeltjes die passeren door het vlak; deze snelheid is samengesteld uit golf- en stromingsinvloeden
$\eta(t)$	de instantane ligging van het wateroppervlak

Instantane snelheden zijn nauwkeurig te meten en bij een bekend golfspectrum redelijk goed te berekenen.

Het meten van instantane concentraties is echter niet gemakkelijk. Fig. 2.1 toont gemiddelde en standaardafwijking van 99 verschillende concentratiemetingen onder regelmatige golven, gedurende 1 golfperiode en op een vaste hoogte boven de bodem. Het is duidelijk dat de concentratie zeer sterk varieert. Over het gedrag van  $c(z,t)$  onder onregelmatige en brekende golven, welke normaal zijn langs kusten, is nauwelijks iets bekend. Met name het ontbreken van betrouwbare meetapparatuur is hier een oorzaak van.

Geconcludeerd kan worden dat het praktisch niet uitvoerbaar is om instantane concentraties aan instantane vloeistofsnelheden te relateren.

Bij sedimenttransport in een richting parallel aan de kust zal de voortplantingsrichting van de golven min of meer loodrecht op de stromingsrichting staan. Dan veroorzaken de golven relatief slechts kleine variaties in de stroomsnelheid in die richting en kan men aannemen dat deze nagenoeg constant is gedurende een bepaalde periode in de tijd.

Gecombineerd met een tijdsgemiddelde concentratie, welke wèl goed te meten is, geeft dit een vereenvoudigde relatie voor het transport:

$$S_x = \int_{-h}^{\eta} \bar{u}(z) \cdot \bar{c}(z) dz \quad (2.1-2)$$

## § 2.2 Opbouw van de concentratieverdeling

De concentratieverdeling over de waterdiepte wordt beïnvloed door een groot aantal factoren zoals:

- golfhoogte en golfperiode, golfspectrum; het al dan niet breken van de golven
- stroomsnelheid
- waterdiepte
- eigenschappen van het water en van het bodemmateriaal
- bodemhelling

Vanwege onderlinge beïnvloeding van deze factoren en door het optreden van complexe mechanismen is het nog niet mogelijk om het concentratieverloop onder een willekeurige combinatie van de diverse randvoorwaarden te voorspellen.

Tijdens de proeven in de Deltagoot doen zich twee situaties voor:

1. onregelmatige niet brekende golven die zich voortplanten boven een horizontale bodem
2. onregelmatige brekende golven

Hierbij treden verschillende mechanismen op die van invloed zijn op de opbouw van de concentratieverticaal.

### § 2.2.1 Niet brekende golven boven een bodem met ribbels

De waterbeweging onder golven uit zich vlak bij de bodem als een horizontale oscillerende beweging (fig. 2.2.1.1).

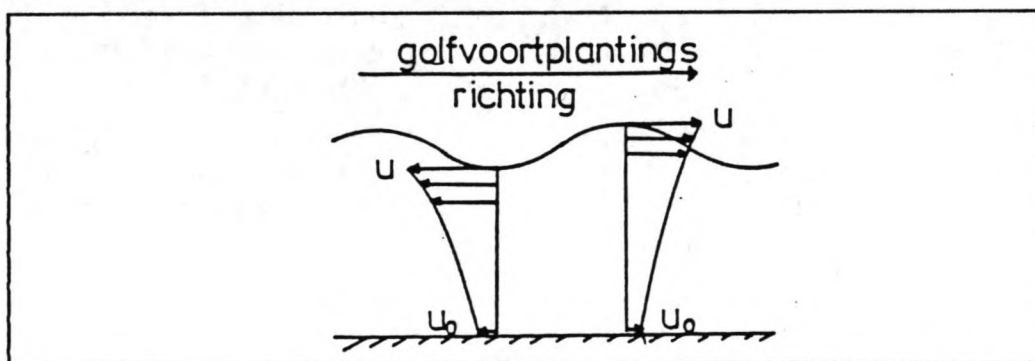
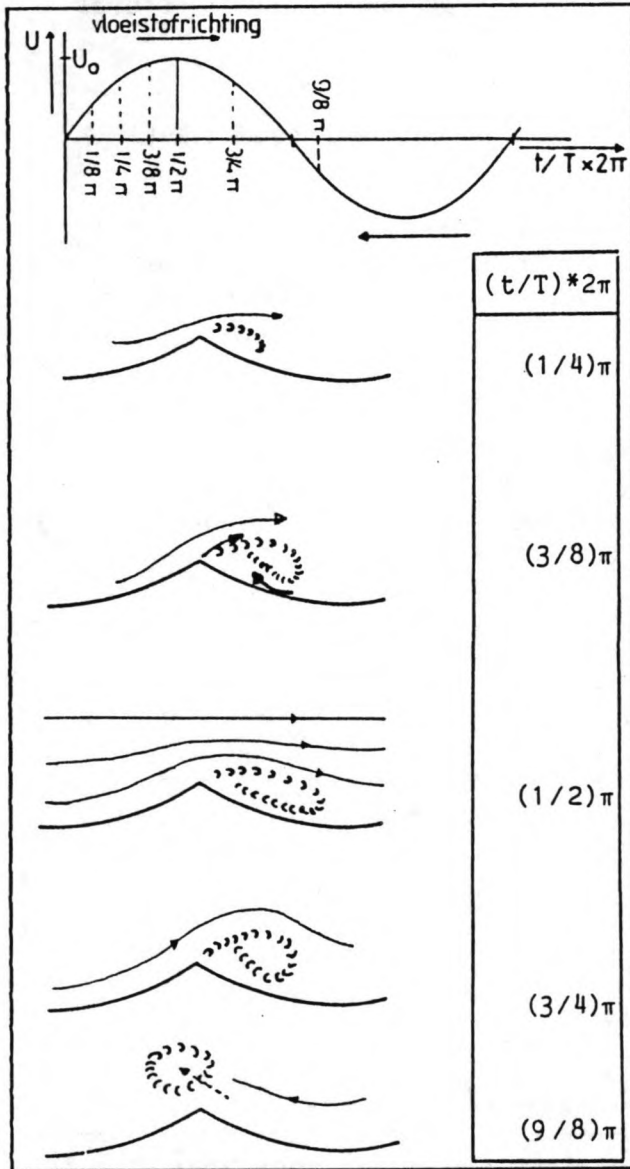


fig. 2.2.1.1 : Horizontale snelheid waterdeeltjes onder een golfdal en een golftop.

Afhankelijk van orbitaalsnelheid, golfperiode, zanddiameters e.d. kan zich in plaats van een vlak zandbed, een geribbeld bodemprofiel voordoen. Hierdoor wordt het stromingspatroon nabij de bodem verstoord, wat aanleiding geeft tot een zandtransportmechanisme dat in twee stappen verdeeld kan worden:

1. Het in suspensie brengen van sediment door wervels die achter de ribbeltoppen ontstaan.
2. Transport van dat sediment, nadat de vloeistofrichting is omgekeerd.



Als de golftop passeert ontstaat er een wervel achter de ribbel. De met deze wervel gepaard gaande hoge lokale snelheden veroorzaken erosie.

Het losgekomen zand blijft in suspensie in de wervel. Als de snelheid afneemt wordt de wervel ronder en gaat langzamer draaien.

Wanneer de stroming omkeert schiet de wervel de vloeistof in en het zand wordt getransporteerd in opwaartse richting.

Een deel van het zand valt weer terug op de bodem, aan de voorkant van de ribbel. Aan die kant van de ribbel ontstaat een nieuwe wervel die daar zand erodeert, etc.

fig. 2.2.1.2 : Stroombeeld boven een ribbel (ontleend aan V.d. Velden (1987)). *— Eijndijk moet je naar de originele publicatie verwijzen!*

De opbouw van de concentratieverticaal wordt dus sterk beïnvloed door de wervels (hoe groot ze zijn, hoe hoog ze de stroom in schieten en hoe lang ze in stand blijven). De hoedanigheid van de wervels wordt weer bepaald door de ribbels, die op hun beurt wat betreft hun vorm afhankelijk zijn van de golfbeweging en het sediment.

*en bijvoorbeeld  
Niet naar - slechts in  
bepaalde kring bekende  
colleges dicteren -*



§ 2.2.2 De invloed van brekende golven

Het breken van golven veroorzaakt extra turbulentie die de menging sterk beïnvloedt. Verschillende typen brekende golven veroorzaken vermoedelijk menging van zeer verschillend karakter en sterkte.

Een golf die overslaat (zgn. plunging breaker, zie bijlage D) op een smalle zandbank of aan de voet van een steil strand, zal een straal vormen die tot aan de bodem doordringt en zeer sterke externe turbulentie inbrengt. Zo'n straal kan ook een grote hoeveelheid lucht met zich mee brengen, en wanneer deze lucht weer omhoog stijgt veroorzaakt dat grote locale verticale snelheden die, zeer efficiënt, zand in suspensie omhoog kunnen voeren. De grootte van de verticale snelheden die op deze manier gegenereerd worden kan ca. honderd maal de valsnelheid van een sedimentdeeltje bedragen.

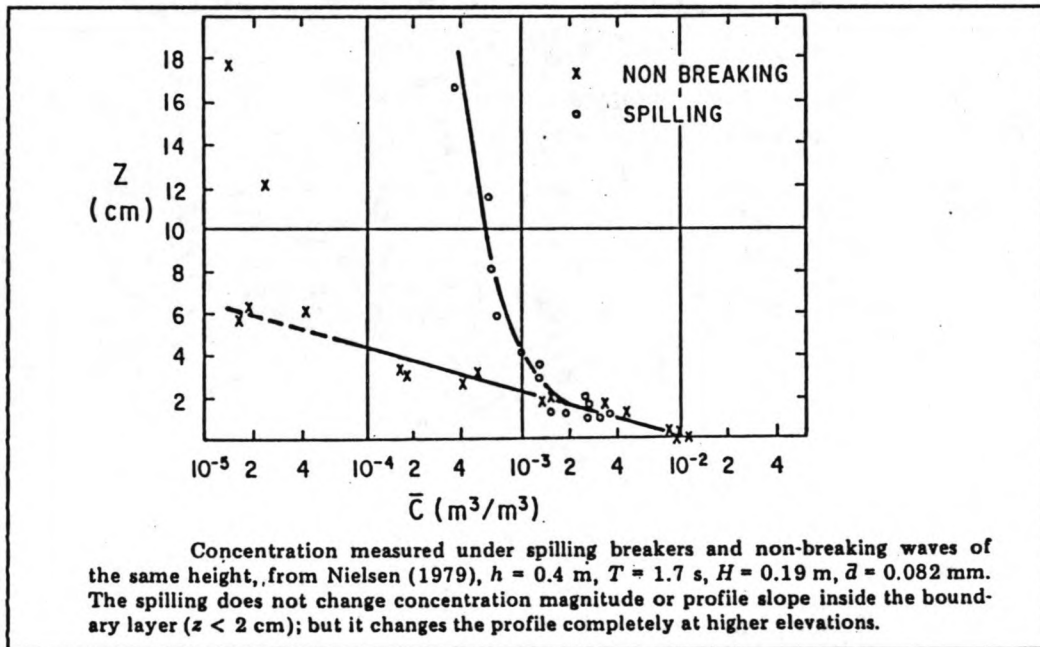


fig. 2.2.2.1 : Concentratie onder spilling breakers en niet-brekende golven.

Golven die niet overslaan (zgn. spilling breakers, zie bijlage D) veranderen het bovenste deel van het concentratieprofiel drastisch, maar het onderste deel blijft onveranderd (zie fig. 2.2.2.1, ontleend aan Nielsen (1984)) zodat de concentratie en de gradiënt in de concentratie nabij de bodem dezelfde zijn als onder niet brekende golven.

De twee genoemde brekertypen (plunging en spilling) zijn de uitersten met betrekking op menging door het breken van golven. Hun effect op de sedimentverdeling is zeer verschillend.

Een gedetailleerde beschrijving van de verdeling van de concentratie over de hoogte als gevolg van het breken van golven is momenteel nog niet mogelijk.

### § 2.3 Afleiding diffusiemodel

Voor de hoeveelheid sediment in een controle-volume in water kan een balansvergelijking worden opgesteld (zie Booij (1986)). Deze vergelijking heeft het karakter van een diffusievergelijking, waarin zowel een moleculaire als een turbulente diffusie-term voorkomt. Deze beide termen worden beschreven als 'gradiënt-type transporten'. Tevens treedt een extra transportterm op door de valsnelheid van een sedimentdeeltje.

Voor een stationaire situatie ontstaat uiteindelijk de diffusie vergelijking, die de verdeling van de sedimentconcentratie over de diepte,  $C(z)$ , beschrijft (echter alleen onder de aanname dat de opbouw van de concentratieverdeling lokaal bepaald is).

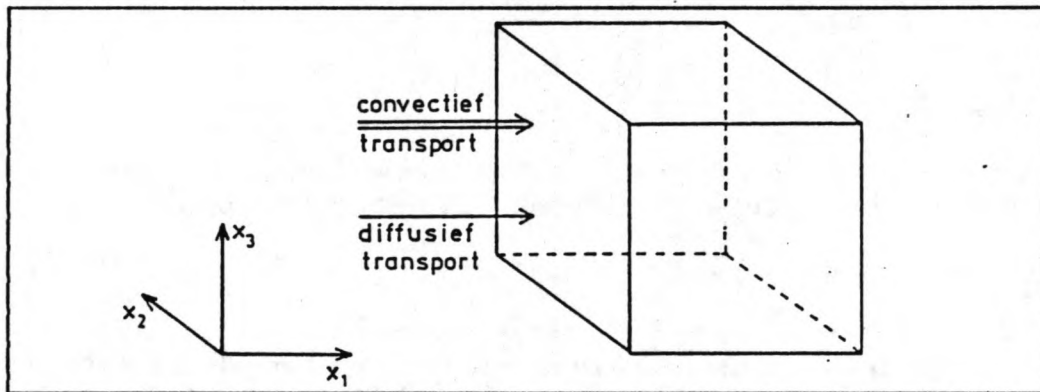


fig. 2.3.1 : Controlevolume

In algemene vorm luidt de balansvergelijking: de toename van de hoeveelheid sediment in het controle volume is gelijk aan de netto instroom van sediment (fig.2.3.1). In formule:

$$\frac{\delta c}{\delta t} + V_1(v_1c) + V_1T_1 = 0 \quad (2.3-1)$$

1                      2                      3

- 1: verandering van de sediment concentratie in de tijd.
- 2: gradiënt in convectief transport van sediment; dit is transport met de vloeistof mee.
- 3: gradiënt in diffusief transport van sediment; dit is transport t.o.v. de vloeistof.

Voorlopig wordt de transportterm door de valsnelheid, die alleen in z-richting werkt, niet in de vergelijking opgenomen.

Het diffusieve transport T vindt plaats door moleculaire diffusie. Dit transport is evenredig met de gradiënt van de te transporteren grootte, de sediment concentratie (c).

In formule:

$$T_i = - D_m \nabla_i c \quad (2.3-2)$$

waarin  $D_m$  de moleculaire diffusie coëfficiënt is. Hiermee ontstaat de moleculaire diffusievergelijking:

$$\frac{\delta c}{\delta t} + \nabla_i (v_i c) - D_m \nabla_i^2 c = 0 \quad (2.3-3)$$

Om de invloed van turbulentie weer te geven worden de grootheden gesplitst in een ensemble gemiddelde waarde (aangegeven d.m.v. overstreping), en een erratische component (accent).

$$c = \bar{c} + c'$$

$$v = \bar{v} + v'$$

Na invulling in de moleculaire diffusievergelijking en ensemble middeling levert dit de turbulente diffusievergelijking.

$$\frac{\delta \bar{c}}{\delta t} + \nabla_i (\bar{v}_i \bar{c}) + \overline{\nabla_i (v_i' c_i')} - D_m \nabla_i^2 \bar{c} = 0 \quad (2.3-4)$$

Aangenomen wordt dat ook transport door de turbulente diffusie evenredig is met de gradiënt van de sediment concentratie.

Dit geeft:

$$\overline{\nabla_i (v_i' c_i')} = - D_{ij} \nabla_j \bar{c} \quad (2.3-5)$$

$D_{ij}$  is de turbulente diffusie coëfficiënt.

Tevens wordt verondersteld dat de hoofdassen van de tensor  $D_{ij}$  overeenkomen met de coördinaatassen, x-y-z. Dat wil zeggen dat afname van de concentratiegradiënt in een hoofdrichting als gevolg van turbulente diffusie, alleen in die hoofdrichting transport oplevert.  $D_{ij}$  kan dan vervangen worden door  $D_H$ .

Het 'gradiënt-type transport' (fig. 2.3.2) kan als volgt nader worden uitgelegd. Beschouw een richting waarin de gemiddelde vloeistofbeweging nul is, zodat ook sedimenttransport door de gemiddelde beweging nul is. Er vindt wel een vloeistofbeweging plaats door het turbulente (erratische) deel van de vloeistofbeweging. Er treedt nu sedimenttransport op, indien in de richting van de turbulente beweging sprake is van een verschil in sedimentconcentratie. De turbulente beweging transporteert dan, gemiddeld, sediment van plaatsen met hogere sedimentconcentraties naar plaatsen met lagere.

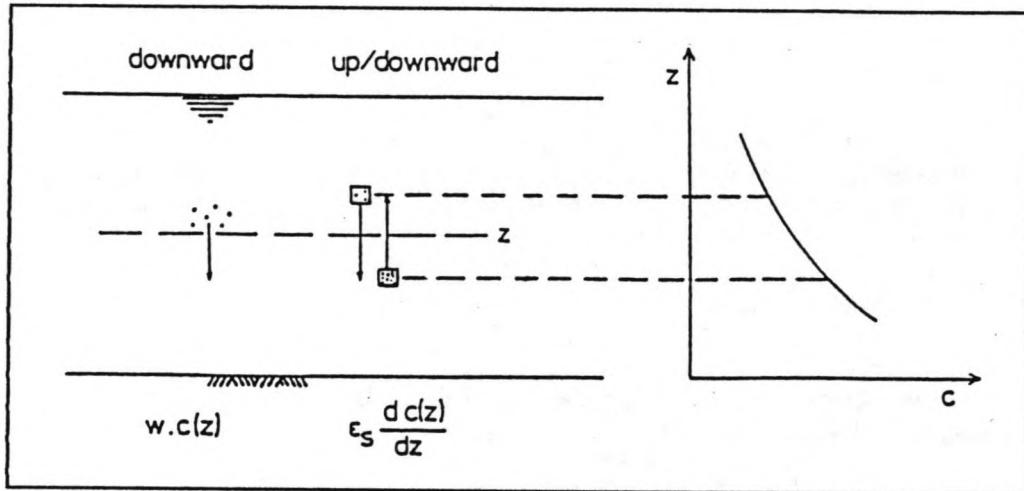


fig. 2.3.2 : Principe gradiënt-type transport

Vervolgens wordt aangenomen dat de moleculaire diffusie verwaarloosbaar is t.o.v. de turbulente diffusie,  $D_m \ll D_{tt}$ . Dan ontstaat de volgende vergelijking:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{v}_i (\bar{v}_i \bar{c}) - \bar{v}_i D_{ii} \bar{v}_i \bar{c} = 0 \quad (2.3-6)$$

Wanneer ook wordt aangenomen dat de concentratieverdeling lokaal bepaald is, en er dus geen rekening gehouden wordt met de invloed van gradiënten in x- en y-richting, ontstaat er een vergelijking in alleen de z-richting.

Hierin wordt geen rekening gehouden met de term:

$$\frac{\partial}{\partial z} (\bar{v}_z \bar{c}) = \bar{c} \frac{\partial \bar{v}_z}{\partial z} + \bar{v}_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \quad (2.3-7)$$

Daarmee wordt de invloed van een verticale snelheid op het verticale sedimenttransport verwaarloosd.

Hier wordt de extra transportterm, door de valsnelheid van een sediment deeltje, in de vergelijking opgenomen. Uit de gradiënt in z-richting van omlaag gericht transport door de valsnelheid,

$$\frac{\partial}{\partial z} (w \bar{c}) = w \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} + \bar{c} \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.3-8)$$

volgt bij een constante valsnelheid voor 1 deeltjesgrootte de term  $w \frac{\partial \bar{c}}{\partial z}$ .

De vergelijking wordt hiermee:

$$\frac{\delta \bar{c}}{\delta t} - w \frac{\delta \bar{c}}{\delta z} - \frac{\delta}{\delta z} \left[ D_{zz} \frac{\delta \bar{c}}{\delta z} \right] = 0 \quad (2.3-9)$$

Indien de c-verticaal stationair is verdwijnt de eerste term en is integratie over z mogelijk. Als randvoorwaarde is hierbij gebruikt dat het sedimenttransport door het wateroppervlak nul is, waarmee de vergelijking wordt:

$$w \cdot \bar{c}(z) + D_{zz}(z) \frac{d\bar{c}(z)}{dz} = 0 \quad (2.3-10)$$

Schrijf nu voor  $\bar{c}=C$ , en voor  $D_{zz}=\epsilon_s$ , zodat de diffusievergelijking wordt:

$$w \cdot C(z) + \epsilon_s(z) \frac{dC(z)}{dz} = 0$$

(2.3-11)

De vergelijking kan verder worden vereenvoudigd door gebruik te maken van de volgende relatie:

$$\frac{d \ln(C)}{dz} = \frac{1}{C} \frac{dC}{dz} \quad \text{of} \quad \frac{dC}{dz} = C \frac{d \ln(C)}{dz} \quad (2.3-12)$$

zodat voor de diffusievergelijking wordt gevonden:

$$w + \epsilon_s(z) \frac{d \ln(C(z))}{dz} = 0 \quad (2.3-13)$$

Men dient zich te realiseren dat de aanname van "gradient type transport", zoals gebruikt voor het beschrijven van moleculaire en turbulente diffusie, alleen geldig is voor kleinschalige vloeistof-bewegingen, en alleen dan is er sprake van diffusie. Voor de turbulente diffusie, waarin we hier geïnteresseerd zijn, gaat deze voorwaarde niet op.

Onder lopende, en brekende, golven is geen sprake van kleinschalige vloeistofbewegingen. De turbulente diffusie coëfficiënt moet dan niet als diffusie coëfficiënt worden gezien, maar als een verspreidingsmaat of een mengingscoëfficiënt.

*Maar dan kan je toch nog wel met dit model werken?*

## § 2.4 Procedure Van de Graaff

Voor het bepalen van de diffusiecoëfficiënt,  $\epsilon_s$ , is gebruik gemaakt van een computerprogramma (voor een listing, zie Heijboer (1988)).

Het programma berekent (zie fig. 2.4.1) met de methode der kleinste kwadraten een continue concentratieverdeling over de hoogte. Uitgaande van deze concentratieverdeling wordt de turbulente diffusiecoëfficiënten-verdeling,  $\epsilon_s(z)$ , berekend en tevens de D10, D50 en D90 verdeling over de hoogte.

Het programma heeft als invoer: gemeten sedimentconcentraties op verschillende hoogten  $z$ , de waterdiepte en de kenmerkende diameters D10, D50 en D90 van het bodemmateriaal.

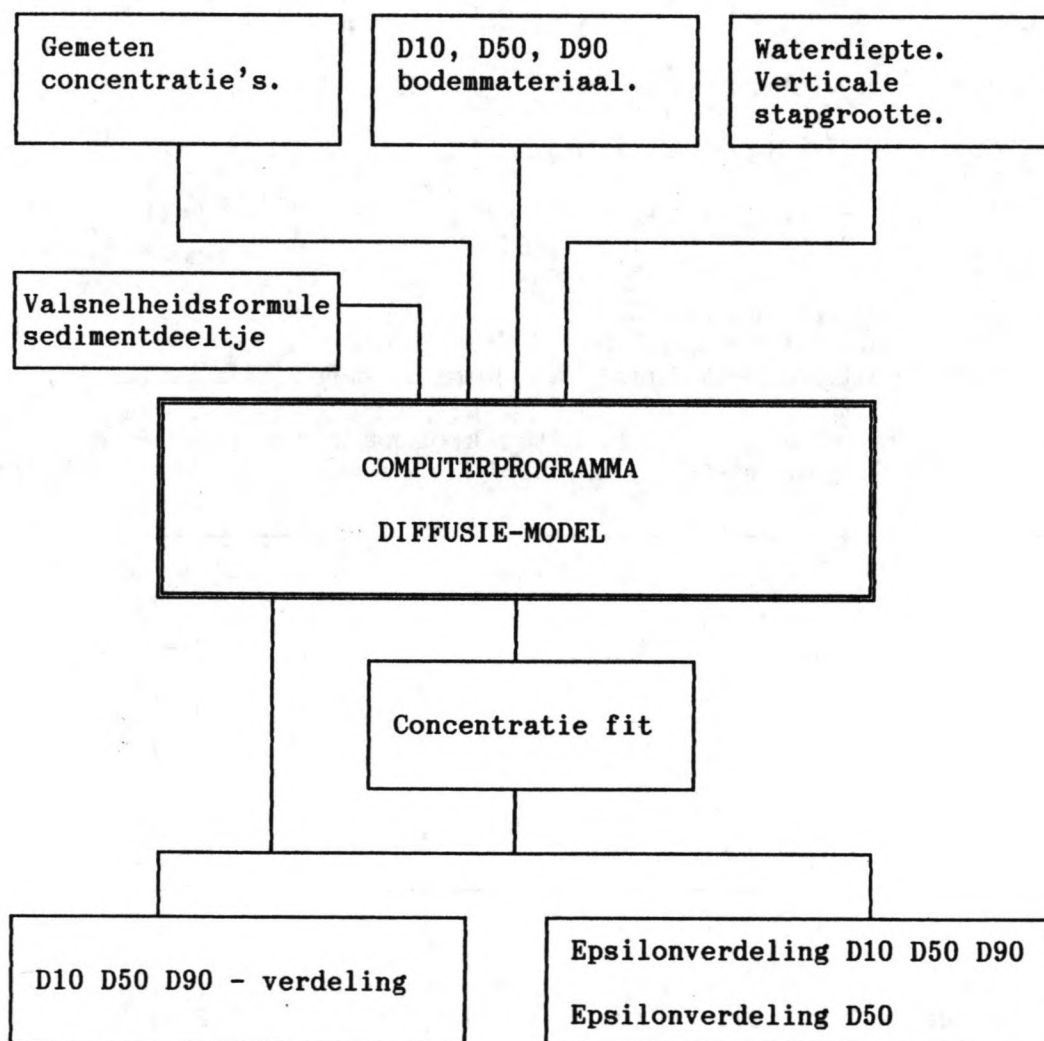


fig. 2.4.1 : Schematisch overzicht Procedure Van de Graaff.

### § 2.4.1 Concentratie-fit procedure

Uit een aantal meetpunten op verschillende hoogten wordt een analytische uitdrukking voor de concentratieverdeling over de hoogte  $C(z)$  bepaald.

Deze moet aan enige eisen voldoen:

- de bodemconcentratie mag niet extreem groot worden
- naarmate men hoger in de verticaal komt, mag de sedimentconcentratie niet toenemen.

Van de Graaff (1984) geeft hiervoor een vergelijking met vier vrijheidsgraden:

$$\frac{d(\ln(C))}{dz^*} = PA2 \left[ PA3 z^* + (1-PA3) \left[ \frac{AG-z^*}{AG} \right]^{EX} \right] \quad (2.4.1-1)$$

Hierin is  $z^*$  de relatieve hoogte  $z/h$  boven de bodem.

Na integratie wordt de vergelijking

$$\ln(C) = PA2 \left[ PA3 z^* - \frac{(1-PA3)(AG-z^*)}{EX+1} \left[ \frac{AG-z^*}{AG} \right]^{EX} + PA1 \right] \quad (2.4.1-2)$$

- PA1: integratieconstante
- PA2: negatieve schaalfactor ( $d(\ln(c))/dz^*$  bij de bodem)
- PA3: horizontale ordinaat van punt A, met  $.025 \leq PA3 \leq 1$
- AG : verticale ordinaat van punt A, met  $AG=1, 0.9, 0.8, 0.7$
- EX : exponent van de te fitten kromme in het standaardvierkant met  $EX = 2,4,6$  of  $8$

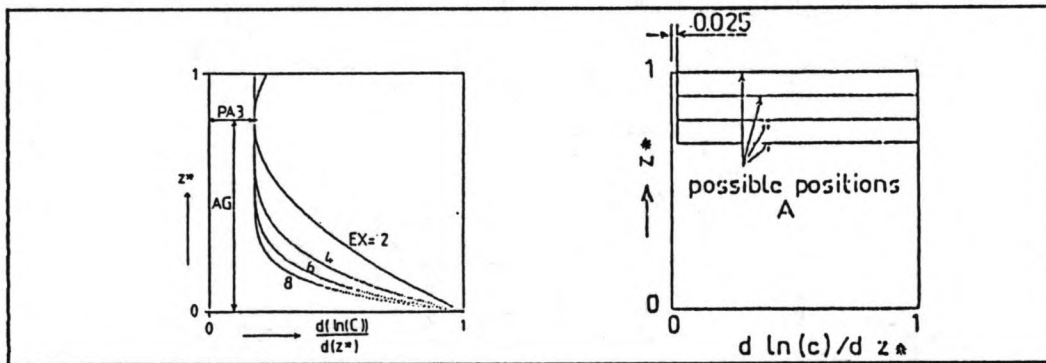


fig. 2.4.1.1 : Standaardvierkant

Ter verduidelijking van deze methode is in fig. 2.2 de invloed weergegeven van variatie van respectievelijk PA1, PA2, PA3, AG, EX en de waterdiepte  $h$ .

*verlygeseed vind ik die figuren niet zo duidelijk, om niet te zeggen dat ik er niets van heb*



Bij verschillende combinaties van AG en EX worden met behulp van de methode der kleinste kwadraten de waarden van PA1, PA2 en PA3 bepaald.

Tevens wordt de gemiddelde procentuele afwijking van de gemeten concentraties ten opzichte van de met de fit berekende concentraties bepaald, als kwaliteitsindicatie van de fit.

#### § 2.4.2 Bepaling van de diffusiecoëfficiëntenverdeling

Er wordt uitgegaan van de diffusievergelijking

$$w \cdot C(z) + \epsilon_s(z) \cdot \frac{dC(z)}{dz} = 0 \quad (2.4.2-1)$$

De algemene oplossing van de diffusievergelijking luidt

$$C(z) = C(a) \cdot \exp \left[ -w \cdot \int_a^z \frac{1}{\epsilon_s} dz \right] \quad (2.4.2-2)$$

met  $C(a)$  de concentratie op hoogte  $z=a$ .

Indien zowel de concentratieverdeling  $C(z)$  als de valsnelheid  $w$  van het sediment bekend zijn, kan de turbulente coëfficiëntenverdeling  $\epsilon_s(z)$  berekend worden. Voor de valsnelheid  $w$  wordt in eerste instantie de valsnelheid van het bodemmateriaal genomen.

Uitgaande van uniform bodemmateriaal wordt de oplossing van de diffusievergelijking bij een numerieke oplosmethode:

$$C(z+dz) = C(z) \cdot \exp \left[ \frac{-w \cdot dz}{\epsilon_s(z+\frac{1}{2}dz)} \right] \quad (2.4.2-3)$$

Bij gegradeerd bodemmateriaal wordt als volgt te werk gegaan: Verondersteld wordt, dat zanddeeltjes in suspensie vlak boven het bed dezelfde diameterverdeling hebben als het originele bodemmateriaal. Daarvan zijn de D10, D50 en D90 bekend. Tussen D10 en D50, respectievelijk D50 en D90, wordt een lognormale verdeling aangenomen. Door middel van interpolatie zijn de tussenliggende diameters te bepalen.

De bodemconcentratie wordt verdeeld gedacht in  $k$  fracties welke alle evenveel wegen. Elke fractie bevat korrels waarvan de diameters tussen nauwe grenzen liggen, in overeenstemming met de zeefkromme.

Bij voldoende kleine fracties kan de diameterverdeling binnen elke fractie constant worden verondersteld. Bij aanname van 20 fracties is de karakteristieke diameter van de korrels in de  $i$ -de fractie:

$$D(i) = D(2.5 + (i-1).5) \quad i = 1 \dots 20 \quad (2.4.2-4)$$

De waarde van  $D(i)$  kan bepaald worden uit de aangenomen lognormale D10-D50-D90 verdeling van het bodemmateriaal. Met behulp van de experimentele relatie

$$w(D) = \frac{1}{10^{(a \cdot \log^2(D) + b \cdot \log(D) + c)}} \quad (2.4.2-5)$$

is de valsnelheid  $w_i$  voor een zandkorrel met diameter  $D(i)$  te bepalen. De coëfficiënten  $a$ ,  $b$  en  $c$  zijn afhankelijk van de temperatuur en de dichtheid van het water.

water	temperatuur	a	b	c
zoet	10°C	0.476	2.180	3.190
zoet	18°C	0.495	2.410	3.740
zout	5°C	0.476	2.180	3.226

tabel 2.4.2.1 : Coëfficiënten in de valsnelheidsformule.

Op hoogte  $z+dz$  is de totale concentratie de som van de deelconcentraties van de fracties

$$C(z+dz) = \sum_{i=1}^k C(z,i) \cdot \exp\left[\frac{-w_i \cdot dz}{\epsilon_s(z+\frac{1}{2}dz)}\right] \quad (2.4.2-6)$$

Per hoogtestap wordt op iteratieve wijze een zodanige  $\epsilon_s(z)$  bepaald dat de totale  $C(z)$  overeenkomt met de waarde van  $C(z)$  die volgt uit de berekende concentratieverdeling. Zo wordt voor elke fractie, met valsnelheid  $w_i$ , eenzelfde gemiddelde waarde van  $\epsilon_s(z)$  berekend.

Tenslotte worden per hoogtestap de D10, D50 en D90 van het daar aanwezige zand in suspensie berekend: Beginnend bij de kleinste diameters  $D(i)$  worden de fractieconcentraties gesommeerd tot 10% respectievelijk 50% en 90% van de totale  $C(z)$ . De diameter van de laatst toegevoegde fractie is dan de gezochte  $D10(z)$ ,  $D50(z)$  of  $D90(z)$ .

## HOOFDSTUK 3 : ONDERZOEK

De onderzoeken waaruit de gegevens voor meetserie I en II zijn voortgekomen zijn beide verricht in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium De Voorst in de Noordoostpolder. Onderzoek I is verricht door J.A. Roelvink in het kader van een onderzoek naar dwarstransport. Onderzoek II is verricht door H.J. Steetzel en dit betreft een onderzoek naar de werking van duinvoetverdedigingen.

Eerst wordt in dit hoofdstuk de Deltagoot, de gebruikte meetapparatuur en de wijze van meten besproken. Dit gedeelte is voor onderzoek I en onderzoek II gelijk. Vervolgens komen de beide onderzoeken apart aan de orde, waarbij uit de onderzoeken I en II alleen datgene beschreven is wat voor meetserie I en II relevant is.

### § 3.1 Deltagoot en meetapparatuur

#### Deltagoot

De Deltagoot is een grote golfgoot, 240m lang, 5m breed en 7m diep. Een bovenaanzicht en een dwarsdoorsnede van de Deltagoot zijn gegeven in fig. 3.1.

Golven worden gegenereerd met behulp van een translatie golfschot met een maximale uitwijking van 5m. Op de besturing van het golfschot is een golfschotcompensatie systeem aanwezig (een feedback systeem dat de golf, die op het golfschot wordt geregistreerd, vergelijkt met de gewenste golfcondities; verschillen worden gecompenseerd door een actief golfabsorptiesignaal dat aan het besturingssignaal wordt toegevoegd). Hierdoor worden lange golven, welke in de golfgoot door reflecties ontstaan, niet opnieuw via het golfschot teruggekaatst. Er kunnen onregelmatige golven met een maximale significante golfhoogte van 1.9m worden gegenereerd, en de golfperioden kunnen variëren van 1 tot 12 seconden. In beide onderzoeken is een onregelmatig golveld (Pierson-Moskowitz spectrum) opgewekt.

In de goot is met 2100m<sup>3</sup> zand, afkomstig uit een winput uit de Waddenzee, een "natuurlijke" zandige bodem aangelegd. In tabel 3.1.1 staat een overzicht van de korrelkarakteristieken van de scheepsladingen zand die achtereenvolgens in lagen van 0.5m in de goot zijn aangebracht, en de gemiddelde korrelkarakteristiek van het zand in de goot.

scheeps- lading	D10 ( $\mu\text{m}$ )	D50 ( $\mu\text{m}$ )	D90 ( $\mu\text{m}$ )
schip nr.1	168	218	271
schip nr.2	160	204	265
schip nr.3	160	208	270
schip nr.4	156	200	255
gemiddeld	161	208	265

tabel 3.1.1 : Overzicht zandmonsters scheepsladingen.

Voor het uitvoeren van de verschillende metingen is een drietal meetwagens gebruikt, die in lengterichting verplaatsbaar zijn over de gootrand:

- twee kleine meetwagens, die uitsluitend gebruikt zijn voor golfhoogte metingen.
- een grote meetwagen (ca.7 meter lang), waaraan verticaal beweegbare concentratie- en snelheidsmeters bevestigd zijn.

### Meetapparatuur

#### Snelheden

Voor het bepalen van het snelheidsveld is gebruik gemaakt van boven elkaar geplaatste electromagnetische snelheidsmeters. Het principe hiervan is als volgt: bij beweging van een geleidende stof (in dit geval water) loodrecht op een magneetveld ontstaat een elektrische spanning. De grootte hiervan is een maat voor de snelheid van het water.

Aan een van de meetpalen aan de grote meetkar zijn vier snelheidsmeters boven elkaar geplaatst, op respectievelijk 0.20, 0.40 en 0.70 m boven de laagst gemonteerde. Per snelheidsmeter zijn er twee signalen: één in horizontale richting en één in verticale richting. De horizontale (x-)componenten zijn verwerkt met behulp van speciale programmatuur waarmee het snelheidspectrum en, onder andere, de volgende parameters bepaald zijn:

- het spectrumoppervlak  $M0$  ( $U_{sig} = 2\sqrt{M0}$ )
- de tijdsgemiddelde snelheid  $U_{gem}$  (retourstroom)

Het signaal in verticale richting is nog niet verwerkt.

#### Concentraties

De tijdsgemiddelde concentraties zijn bepaald met behulp van het systeem van afzuiging, dwars op de golfvoortplantingsrichting (Bosman et al.(1987)).

Aan een van de meetpalen op de grote meetwagen is een afzuigkam

(fig. 3.2) bevestigd, met op tien verschillende niveaus gemonteerde afzuigbuisjes met een inwendige diameter van 0.003m. (Het onderste meetpunt bevindt zich een paar centimeter van de bodem waarbij men zich dient te realiseren dat, gedurende een test, de bodemligging kan variëren door erosie en/of aanzanding of zich verplaatsende bodemribbels).

Met pompjes is op elk niveau gedurende ca. 15 minuten 10 liter zand/water mengsel afgezogen en vervolgens zijn de opgevangen hoeveelheden zand bepaald. De meetwagen staat tijdens de meting stil op een positie.

#### Profielontwikkeling

De bodemligging is gepeild met behulp van een op de grote meetwagen gemonteerd peilsysteem, bestaande uit een vijftal peilstokken welke elk in een breedtesectie van een meter geplaatst zijn, zodat bij een redelijk tweedimensionaal zandbed de gemiddelde waarde overeen komt met de gemiddelde profielligging.

#### Waterstand

De waterstand wordt bepaald als het gefilterde gemiddelde signaal van een waterstandsmeter die op het golfschot bevestigd is. Uit de bodemligging en de gemiddelde waterstand is de lokale gemiddelde waterdiepte te bepalen.

#### Golfhoogten

De golfhoogten zijn gemeten met behulp van twee op meetkarren gemonteerde capacitatieve golfhoogte meters (een capacitatieve draad met een gewicht aan de onderzijde. Het traject waarover de draad nat wordt beïnvloedt de geleidbaarheid welke daardoor een indicatie is voor het niveau van de waterspiegel).

Met behulp van het rekenmodel Endec zijn, uitgaande van de ingestelde golfhoogte op  $x=0$  bij het golfschot en zonder rekening te houden met reflectie, golfhoogten op andere posities in de goot berekend. (In Endec wordt, in de berekening van golfhoogten, naast shoaling, energieverlies als gevolg van bodemwrijving en het breken van golven meegenomen.)

#### Korrelgrootte en valsnelheid

De korrelkarakteristiek van het bodemmateriaal is bepaald door zeefanalyse en door een analyse van zandmonsters in een valkolom. In een valkolom worden valsnelheden van sedimentdeeltjes in water gemeten, waaruit de korrelkarakteristiek kan worden berekend. Tevens zijn afgezogen suspensie monsters in een valkolom geanalyseerd.

### § 3.2 Meetserie I

De gegevens voor meetserie I zijn afkomstig uit een onderzoek naar dwarstransport (H 596), verricht door J.A. Roelvink tussen maart en juni 1987.

Doel van dit onderzoek is:

- verificatie van het CROSTRAN dwarstransport model
- meten van verschillende (dwars-)transportcomponenten
- toepassen van het CROSTRAN computermodel voor het voorspellen van het gedrag van offshore suppleties en van de ontwikkeling van het profiel dwars op de kust.

#### § 3.2.1 Gecreëerde situatie

In fig. 3.3a is het uitgangsprofiel te zien, waarin te onderscheiden zijn:

- een onderwaterdam met onnatuurlijk steile taluds in diep water waar het transport gedomineerd wordt door bodemhelling effecten. ( $x=65\text{m}$ )
- een horizontaal gedeelte van ca. 60m ( $x=90\text{m}$  tot  $x=150\text{m}$ ), buiten de brekerzone, waar geen helling effecten zijn en waar de retourstroom door golfbreking verwaarloosbaar is zodat optredend transport veroorzaakt wordt door golfasymmetrie.  
Op dit gedeelte is met twee in de bodem geplaatste constructies (positie  $x=100\text{m}$  en  $x=124\text{m}$ ) sedimenttransport gemeten. Aangenomen is, dat deze constructies geen invloed hebben op de concentratie- en snelheidsmetingen.
- een kort gedeelte met een bodemhelling van 1:10 ( $x=160\text{m}$ ), en een strand met een helling van 1:50; dit is het gebied van net buiten tot in de brekerzone, waar het transport gedomineerd wordt door de retourstroom door golfbreking.

#### § 3.2.2 Beschrijving gegevens

De metingen zijn in twee series te verdelen:

- test 1A t/m 8B, waarbij het accent lag op het meten van transporten, snelheden en concentraties onder verschillende ingestelde golfomstandigheden op een aantal vaste locaties. (De ingestelde  $H_{sig}$  varieert van 0.56m tot 0.74m,  $T_p$  varieert van 4.1s tot 6.1s).
- test 9B t/m 9L, waarbij het accent lag op het meten van bovengenoemde grootheden op verschillende locaties, onder gelijke ingestelde golfomstandigheden. ( $H_{sig}=0.64\text{m}$ ,  $T_p=5.12$ )

In tabel 3.1, met een overzicht van de meetgegevens van meetserie I, zijn een aantal testen niet opgenomen. De reden hiervoor komt in § 4.1 aan de orde.

#### Snelheden

In tabel 3.1 staan in de laatste 4 kolommen de gebruikte resultaten uit het horizontale snelheidssignaal. Hier staan per test, voor  $z=0.2\text{m}$  en  $z=0.4\text{m}$  boven de bodem, het spectrum-oppervlak  $M_0$  en de waarden voor  $U_{\text{sig}}$  en  $U_{\text{gem}}$  (retourstroom, positief in de golfvoortplantingsrichting).

De hoogte  $z=0.2\text{m}$  is het laagste punt waarop snelheden zijn gemeten

#### Concentraties

In tabel 3.2 zijn voor elke test de resultaten van de concentratie metingen weergegeven. Hier staan naast elkaar de code van de test, de positie in de goot, de 10 gemeten concentratie's met de bijbehorende afzuighoogten boven de bodem, en de gemiddelde waterdiepte.

#### Profielontwikkeling

Uit de peilingen blijkt dat zich tijdens de proef op  $x=165\text{m}$  een brekerbank ontwikkelt (fig.3.3b). De onderwaterdam vervormt enigszins gedurende de metingen.

De bodemligging van het horizontale gedeelte is nauwelijks aan veranderingen onderhevig.

#### Golfhoogten

Uitgaande van de ingestelde golfhoogte is voor verschillende posities in de goot de significante golfhoogte berekend.

De resultaten staan in de 4<sup>e</sup> kolom van tabel 3.1.

In dezelfde tabel staan in de 5<sup>e</sup> kolom de waarden voor de piekperiode  $T_p$ , van het ingestelde golfspectrum.

#### Korrelgrootte en valsnelheid

In de goot zijn om de vijf meter bodemmonsters genomen, welke zijn geanalyseerd in een valkolom. Dit levert een  $w_{50}$  voor het bodemmateriaal, welke te vinden is in tabel 3.1.

Op vier locaties zijn door middel van zeefanalyse de  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  en  $D_{90}$  van het bodemmateriaal bepaald (tabel 3.1).

Tevens is van een aantal testen het afgezogen suspensiemateriaal in de valkolom onderzocht (tabellen 4.6.1.1 en 4.6.1.2 in hoofdstuk 4, blz. 59 en 60). Hierbij is de totale hoeveelheid sediment per test bijeen gevoegd, zodat een over de waterdiepte gemiddelde  $w_{50}$  wordt gemeten.

#### Watertemperatuur

Tijdens de proef is een watertemperatuur gemeten van  $5^\circ\text{C}$ .

*Ik heb sterke de mening dat alle fraais  
praktijk op een rekening zijn gemaakt. Is dat  
zo en Raad dan?*

### § 3.3 Meetserie II

De gegevens voor meetserie II zijn afkomstig uit een model-  
onderzoek naar de werking van betonnen duinvoetverdedigingen  
(H 298), verricht door H.J. Steetzel van eind oktober tot half  
december 1986.

Doel van dit onderzoek is:

- het nader onderzoeken van het proces van teenerosie, voor  
de duinvoetverdediging.
- het bestuderen van het proces van toperosie (boven de  
bovenbegrenzing van de duinvoetverdediging) en het  
effect ervan op de teenerosie.

#### § 3.3.1 Gecreëerde situatie

In fig. 3.4 is het uitgangsprofiel te zien, waarin een vooroever  
gedeelte ( $x \leq 160\text{m}$ ) en een strand/duin gedeelte ( $x > 160\text{m}$ ) te  
onderscheiden zijn. In dezelfde figuur is een detail te zien van  
het strand/duin gedeelte met de betonnen duinvoetverdediging.

Het onderzoek bestaat uit vijf proeven:

- T1 : met een volledig doorgetrokken verdedigingsconstructie  
(tot +6.2m boven de gootbodem) en onder constante  
hydraulische condities (ingesteld golfveld met  
 $H_{sig} = 1.52\text{m}$  en  $T_p = 5.37\text{s}$ )
- T2 : met een verdedigingsconstructie tot +5.4m (tot onder het  
niveau van de maximaal te verwachten golfoploop), en  
eenzelfde ingesteld golfveld als bij T1.
- T3 : een verdedigingsconstructie tot +4.8m en eenzelfde  
ingesteld golfveld als bij T1.
- T4 : met hetzelfde verdedigingsniveau als proef T3, maar met  
variërende hydraulische condities (in fig. 3.5 is het golf-  
hoogte- en waterstandsverloop gegeven).
- T5 : referentieproef zonder verdedigingsconstructie en eenzelfde  
ingesteld golfveld als bij T1.

Voor de verdedigingsconstructie ontstaat een ontgrondingskuil,  
waar van tijd tot tijd afgeslagen zand, van boven de  
verdedigingsconstructie, in terecht komt. Vanuit de  
ontgrondingskuil vindt een continu zandtransport in "zeewaartse"  
richting plaats, wat tot gevolg heeft dat een deel van het  
bodemprofiel opgehoogd wordt (zie bijvoorbeeld fig.3.6).

Dit met afgeslagen zand opgehoogde gedeelte wordt verder  
gemakshalve "de zandbank" genoemd.

Het variëren van het niveau tot waar de verdedigingsconstructie  
is doorgetrokken, betekent voor de verschillende proeven een  
aanzienlijk verschillende hoeveelheid afgeslagen zand, en daarmee



een verschillende vorm van het bodemprofiel dat voor de constructie ontstaat.

Na elke proef is het uitgangsprofiel bij de verdediging opnieuw aangebracht. Op het voorover gedeelte is dit achterwege gelaten, omdat op dit gedeelte van het profiel de veranderingen in bodemligging gering zijn.

### § 3.3.2 Beschrijving gegevens

In tabel 3.3 staan de meetgegevens van meetserie II. Ook hierin zijn een aantal metingen niet opgenomen. De reden hiervoor wordt in § 4.1 besproken.

#### Snelheden

In tabel 3.3 staan in de laatste 4 kolommen de gebruikte resultaten uit het horizontale snelheidssignaal. Hier staan per test, voor z-waarden rond de 0.05m en 0.25m, het spectrumoppervlak  $M_0$  en de waarden voor  $U_{sig}$  en  $U_{gem}$  (retourstroom). Van proef T5 zijn geen snelheidsgegevens bekend.

#### Concentraties

In tabel 3.4 zijn voor elke test uit onderzoek II de resultaten van de concentratiemetingen weergegeven. De presentatie is gelijk aan die voor meetserie I. In de laatste kolom is de hoogte boven de bodem van het onderste meetpunt weergegeven. De hoogte boven de bodem van de overige 9 meetpunten is te bepalen uit de hoogte boven het onderste meetpunt (fig. 3.2).

#### Profielontwikkeling

In de figuren 3.6 en 3.7 is per proef (behalve voor T4), voor een aantal opeenvolgende tijdstippen, de profielontwikkeling weergegeven.

In de figuren 3.8 en 3.9 is de profielontwikkeling tussen  $x=150m$  en  $x=210m$  van de proeven T1, T2, T3 en T5 op 4 tijdstippen gegeven.

#### Golfhoogten

Uitgaande van de ingestelde golfhoogte is de significante golfhoogte berekend op verschillende posities in de goot. Hierbij is rekening gehouden met de ontwikkeling van de bodemligging gedurende de proef. De resultaten staan in de 5<sup>e</sup> kolom van tabel 3.3. (In fig. 3.10 is het berekende verloop van  $H_{sig}$  over de goot weergegeven, samen met een aantal gemeten waarden. De overeenkomst is met name voor de proeven T1 en T2 minder goed. Bij deze proeven treedt aanzienlijke golfreflectie op door de betonnen verdedigingsconstructie; dit is in de

*Walishgem*

golfhoogteberekening niet meegenomen).

Tevens staan in tabel 3.3 in de 6<sup>e</sup> kolom de waarden voor  $T_p$  van het gemeten snelheidsspectrum. Voor  $T_p$  zijn waarden genomen die overeenstemmen met de ingestelde  $T_p$  van het golfveld. Daarbij wordt geen rekening gehouden met een laagfrequente tweede piekwaarde, zoals die onder andere voorkomt in het snelheidsspectrum van T2E2.

(Zie fig. 3.11; hier staan 3 typen snelheidsspectra welke qua vorm kenmerkend zijn voor verschillende posities in de goot.

Type a: "zeewaarts" van de zandbank; hier treedt ook een laagfrequente  $T_p$  waarde op;

type b: in de ontgrondingskuil;

type c: op de zandbank.)

#### Korrelgrootte en valsnelheid

Door zeefanalyse zijn de gemiddelde D10, D50 en D90 van het bodemmateriaal in de goot bepaald. Deze bedragen respectievelijk 161, 208, en 265  $\mu\text{m}$ .

Na afloop van de proeven T1, T2 en T3 zijn op verschillende posities (ongelijk aan de posities van de concentratiemetingen) bodemmonsters genomen. In tabel 3.5 staat een overzicht van de gemeten D50 waarden.

Tevens is van een aantal testen het afgezogen suspensiemateriaal in een valkolom onderzocht. In tabel 3.6 staat voor een aantal testen de over de waterdiepte gemiddelde, gemeten (gem.)  $w_{50}$  van het suspensiemateriaal.

#### Watertemperatuur

Gedurende het onderzoek is elke dag de watertemperatuur gemeten. Deze varieert tussen 8°C en 10°C.

## HOOFDSTUK 4: RESULTATEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten gepresenteerd van het toepassen van de procedure Van de Graaff (bepalen van continue concentratie verdeling,  $\epsilon$  verdeling en diameter verdeling) op de 94 concentratiemetingen uit onderzoek in de Deltagoot van het Waterloopkundig Laboratorium.

De 94 testen worden, per meetserie, ingedeeld naar overeenkomstige hydraulische en morfologische omstandigheden en beoordeeld op de kwaliteit van de "gefitte" concentratie verdeling.

De concentratie verdelingen en bijbehorende  $\epsilon$  verdelingen worden volgens de gemaakte indeling gepresenteerd en vervolgens wordt nagegaan of er tussen  $\epsilon$  waarden en bepaalde randvoorwaarden een afhankelijkheid kan worden aangetoond.

De in de procedure Van de Graaff bepaalde D50 verdeling wordt vergeleken met de gemiddelde gemeten D50 van het zand in suspensie om een indicatie te verkrijgen voor de nauwkeurigheid van de modelresultaten.

Tenslotte wordt in een gevoeligheidsanalyse de invloed nagegaan van variaties in de invoer van de Van de Graaff procedure.

### § 4.1 Selectie testen

De in totaal 94 testen zijn op basis van de volgende overwegingen nader in groepen verdeeld:

- meetserie I of meetserie II.
- kwaliteit van de concentratie fit.
- omstandigheden tijdens de metingen

De gevolgde procedure wordt hier voor de beide meetserie's beschreven.

#### a) Meetserie I

De gemiddelde procentuele fout van de concentratie fit t.o.v. de meetpunten varieert bij deze 26 testen van 4.7% tot 65.2%.

Van de 26 concentratie verdelingen zijn er 14 met een fout van 20% à 30%, en 6 met een fout groter dan 30%.

Er is voor gekozen om deze 6 testen buiten beschouwing te laten. De overige 20 metingen zijn naar omstandigheden ingedeeld (zie fig. 3.3 voor het uitgangsprofiel in de goot):

- geen bodemhelling, geen brekende golven en een constante waterdiepte.
- geen brekende golven, wel een bodemhelling.
- brekende golven, bodemhelling en variërende bodemligging.

b) Meetserie II

De gemiddelde procentuele fout varieert bij deze 68 testen van 0% tot 5%. Op grond van de kwaliteit van de concentratie fit zijn dan ook geen testen buiten beschouwing gelaten.

Ook hier zijn de testen naar omstandigheden ingedeeld (fig. 3.4):

- kleine kans op brekende golven, geringe bodemhelling.  
Vooroever.
- grote kans op brekende golven, grote bodemhelling en variërende bodemligging. Talud zandbank.
- brekende golven, bodemhelling en variërende bodemligging.  
Zandbank
- in de buurt van de ontgrondingskuil en het talud van de betonnen verdediging.

Deze laatste situatie wordt gekenmerkt door een zeer chaotische waterbeweging, waarbij bovendien van tijd tot tijd afgeslagen zand langs het talud naar beneden komt. De 26 testen die onder deze omstandigheden zijn gedaan, zijn verder buiten beschouwing gelaten.

Tevens zijn de resterende 4 testen uit proef T4 niet meegenomen, omdat ze gedaan zijn terwijl de waterstand aanzienlijk steeg. Tenslotte zijn de metingen T5B1,B2,B3 en T3C buiten beschouwing gelaten omdat, vanwege het vroege tijdstip in de proef, bij deze metingen grote zandtransporten optreden.

Zie voor een overzicht van de indeling de figuur op de volgende pagina en tabel 4.1 waarin tevens de procentuele fouten in de verschillende testen zijn opgenomen.

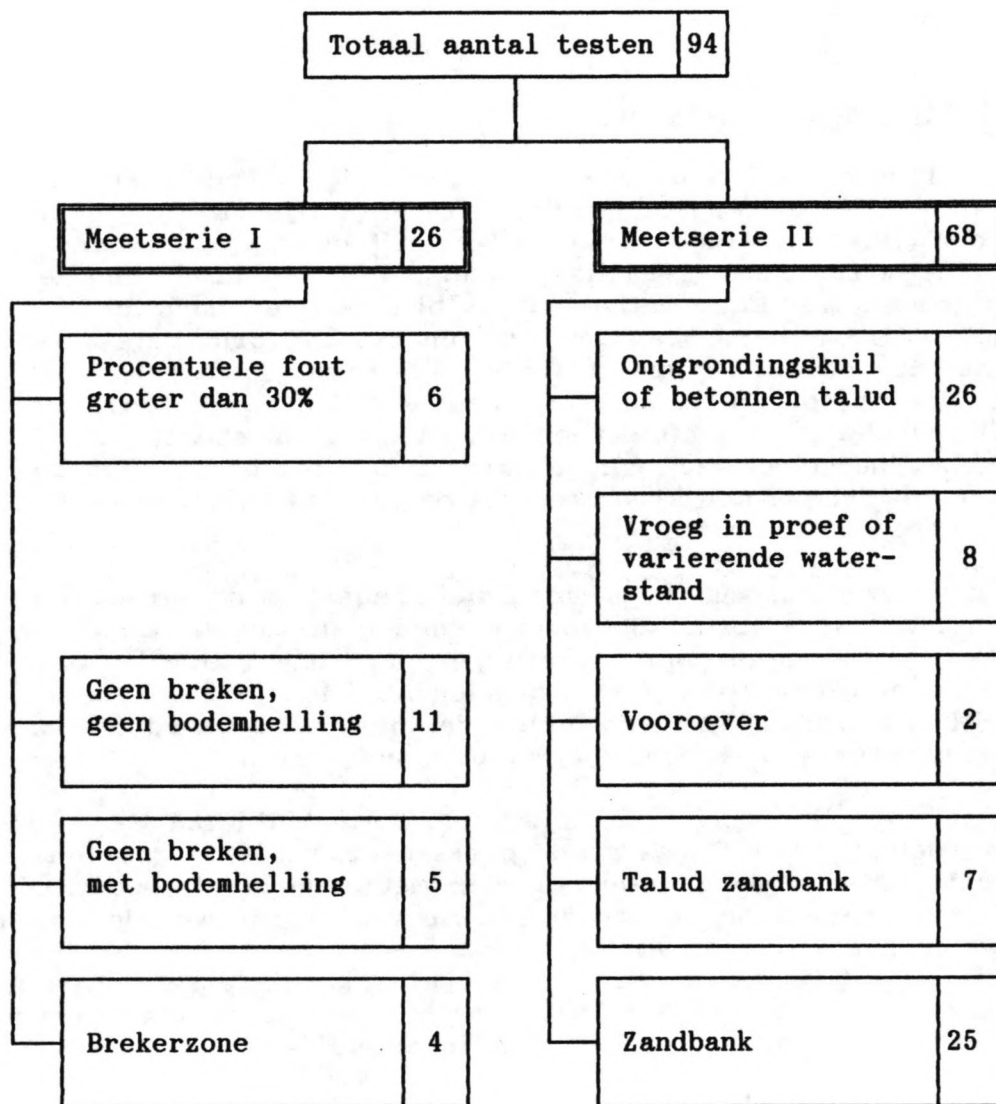


fig. 4.1.1 : Selectieboom

## § 4.2 Modelresultaten

### § 4.2.1 Verwachting modelresultaten

De in dit onderzoek gebruikte concentratie fit methode (Van de Graaff, 1984) is toegepast in onderzoek van Steijn (1986), Heijboer (1988) en Van de Graaff (1988). Dit betreft onderzoeken op kleine schaal met regelmatige golven, al of niet in combinatie met stroming, met kunstmatige bodemribbels en een horizontale bodem. De fit methode heeft in deze onderzoeken bruikbare resultaten gegeven. Tevens geeft Van de Graaff (1988) een toepassing op concentratie metingen uit een onderzoek van Dette & Uliczka (1986). Dit betreft een onderzoek op grote schaal met onregelmatige golven een een natuurlijke zandige bodem. Dus qua omstandigheden vergelijkbaar met dit onderzoek. Ook hier geeft de fit methode goede resultaten.

Gezien de overeenkomst in meetomstandigheden wordt verwacht dat de vorm van de  $\epsilon$  verdeling, zoals gevonden in Van de Graaff (1988) naar aanleiding van de metingen van Dette & Uliczka, ook in dit onderzoek gevonden zal worden (fig. 4.1). Ook lijkt het redelijk te verwachten dat numerieke waarden voor  $\epsilon(z)$  van vergelijkbare orde van grootte zullen zijn.

De naar aanleiding van de metingen van Dette & Uliczka berekende D50 verdeling vertoont een goede overeenkomst met de gemeten waarden. Alhoewel de gemeten waarden met name bij de bodem grillig verlopen, is de berekende afname van de D50 waarden, naar het wateroppervlak toe, juist. Ook Heijboer (1988) vindt een goede overeenkomst tussen berekende en gemeten D50 verdelingen (met name bij metingen waarbij, naast regelmatige golven, geen stroming is ingesteld).

De gebruikte methode voor het bepalen van een continue concentratie- en  $\epsilon$  verdeling, is nog niet eerder toegepast op metingen die gedaan zijn onder omstandigheden waarbij breken van golven optreedt. Over de te verwachten concentratie fit, de vorm van de  $\epsilon$  verdeling en de D50 benadering kan dan ook geen uitspraak worden gedaan.

### § 4.2.2 Presentatie modelresultaten

In het programma wordt uitgegaan van een lognormale korreldiameterverdeling (in twee takken) van het bodemmateriaal. Met de bekende D10, D50 en D90 waarden ligt de verdeling vervolgens vast. De vijf gebruikte verdelingen staan in tabel

4.2 (meetserie I in kolommen 2,3,4 en 5 en meetserie II in kolom 1).

In de figuren 4.2 t/m 4.15 staan voor alle testen de resultaten van de concentratie fit. Langs de horizontale as is de sedimentconcentratie op logaritmische schaal uitgezet en op de verticale as is de hoogte boven de bodem aangegeven.

In bijlage C is de numerieke uitvoer van het computerprogramma gegeven, voor alleen de geselecteerde testen.

Per test zijn achtereenvolgend de in het programma berekende bodemconcentratie, de som van de kwadraten van de afwijkingen tussen de gemeten en "gefitte" concentratie waarde en de gemiddelde procentuele fout per meetpunt vermeld.

Tevens staan in deze bijlage, voor de verschillende meetpunten in een concentratie verticaal, de gemeten en "gefitte" concentratie en de procentuele fout.

Vervolgens wordt per test een numeriek overzicht van de  $\epsilon$  verdeling gegeven, uitgaande van alleen de D50 (uniform bodemmateriaal, deze  $\epsilon$  verdeling wordt verder niet besproken) en uitgaand van de D10-D50-D90 verdeling van het bodemmateriaal. In de laatste drie kolommen staan de berekende D10-D50-D90 verdelingen over de waterdiepte.

Tabel 4.3 geeft een overzicht van de coëfficiënten van de fit procedure. De testen zijn ingedeeld volgens de selectie zoals die in § 4.1 is aangegeven, en naar overeenkomst in de vorm van de gefitte C verdeling en de berekende  $\epsilon$  verdeling.

In de figuren 4.16 tot en met 4.32 staan de C en  $\epsilon$  verdelingen volgens dezelfde indeling.

De concentratie is op logaritmische schaal uitgezet en de  $\epsilon$  verdeling op lineaire schaal. De  $\epsilon$  verdeling wordt weergegeven vanaf  $z=0.025\text{m}$  (het laagste punt waar  $\epsilon$  berekend is) tot aan het hoogste concentratie meetpunt; dat is de hoogte tot waar de  $\epsilon$  verdeling berekend is.

Daar waar het mogelijk is, is in de figuren de waterspiegel aangegeven.

### § 4.3 Bespreking concentratie fits

Uit de resultaten van de fitmethode blijkt dat deze goed voldoet, zowel in situaties met onregelmatige, niet brekende golven als in situaties waarbij breken van golven optreedt. Met name in meetserie II geeft de fitprocedure continue concentratie verdelingen met een kleine procentuele fout. In meetserie I wordt voor een aantal testen een grote procentuele fout gevonden. In deze meetserie komen veelal kleine concentraties voor, welke moeilijker nauwkeurig te meten zijn. Dit kan wellicht een verklaring zijn voor de grote procentuele fouten.

Bij een aantal testen (T1F3 (fig. 4.6), T1G2 (fig. 4.7), T2I1 (fig. 4.9), T3E1 (fig. 4.11)) is op het onderste meetpunt een concentratie gemeten welke lager is dan die op het tweede en derde meetpunt boven de bodem. Een oorzaak hiervan kan zijn dat het onderste afzuigbuisje verstopt is geraakt tijdens het meten.

Bij de testen T1A (fig. 4.6), T3A (fig. 4.11), T3G1 (fig. 4.12) en T4C6 (fig. 4.14) zou de concentratie fit een nagenoeg rechte lijn moeten zijn. Uit de fitprocedure resulteert echter een curve met veel te hoge waarden voor  $\ln(C)$  bij de bodem. Bij de testen T3B, T3F2 (fig. 4.11), T4C4 (fig. 4.14) en T5D3 (fig. 4.15) daarentegen, geeft de fitprocedure wel een vrijwel rechte lijn door de meetpunten.

Bij T3B, T3F2, T4C4 en T5D3 bedraagt het verschil tussen  $\ln(C)$  van het onderste en  $\ln(C)$  van het bovenste meetpunt 0.8 à 1.2. Dat verschil is bij T1A, T3A, T3G1 en T4C6 0.4 à 0.5, dus de bij deze testen gemeten verdelingen van  $\ln(C)$  zijn aanzienlijk steiler. De bij T1A, T3A, T3G1 en T4C6 gemaakte fout in de gefitte bodemconcentratie lijkt verband te houden met de steilheid van de gemeten  $\ln(C)$  verdeling.

De testen T1A, T3A, T3G1 en T4C6 met slechte fits zijn echter alle gemeten boven het betonnen talud van de duinvoetverdediging of in de ongrondingskuil ervoor, en zijn verder buiten beschouwing gelaten.

In het algemeen kan geconcludeerd worden dat de fitmethode onder "natuurlijke brandingsomstandigheden", (onregelmatige golven, bodemhelling, breken) goede resultaten geeft.

*Oh, maar hoe dan?*



#### § 4.4 Vorm van de $\epsilon$ verdeling

In deze paragraaf worden de gevonden  $\epsilon$  verdelingen besproken. Voor een goed begrip van deze paragraaf wordt hier verwezen naar:

- Selectieboom in § 4.4.1.
- Tabel 3.1 en 3.3 met de posities van de testen; bij meetserie II zijn tevens de tijdstippen van de testen vermeld.
- Figuren 3.3, 3.8 en 3.9 met profielen in langsrichting van de Deltagoot.

Voor de bespreking van de  $\epsilon$  verdelingen is de indeling volgens de selectieboom aangehouden.

Van alle geselecteerde testen zijn in fig. 4.16 t/m 4.32 de C en  $\epsilon$  verdeling weergegeven. Testen die, volgens de in § 4.1 aangegeven selectie, onder vergelijkbare omstandigheden zijn gedaan en bovendien op elkaar lijkende  $\epsilon$  verdelingen hebben, staan bij elkaar in één figuur.

Bij onregelmatige golven is de verhouding  $H_{sig}/h_{gem}$  een indicatie voor de kans op breken van een individuele golf, waarbij bij een grotere verhouding  $H_{sig}/h_{gem}$  de kans op breken toeneemt. In de bespreking wordt voor de verschillende testen aangegeven van welke orde van grootte  $H_{sig}/h_{gem}$  en karakteristieke  $\epsilon$  waarden zijn, en welke vorm de gevonden  $\epsilon$  verdelingen hebben.

##### Niet brekende golven

Onder omstandigheden met een horizontale bodem en zonder brekende golven ( $H_{sig}/h_{gem} \approx 0.3$ ), wordt een ojief-vormige (half holle, half bolle)  $\epsilon$  verdeling gevonden (fig.4.17 en 4.18, meetserie I). Deze wordt gekenmerkt door lage  $\epsilon$  waarden aan de bodem (grote gradiënt in de concentratie, slechte menging) en hoge  $\epsilon$  waarden aan het oppervlak (kleine gradiënt in de concentratie, goede menging).

De  $\epsilon$  waarden aan de bodem variëren van 0.13 tot  $0.31 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s, en de  $\epsilon$  waarden aan het oppervlak van 2 tot  $5 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

Deze variatie in  $\epsilon$  waarden aan het oppervlak is vooralsnog niet te verklaren uit de variatie in randvoorwaarden zoals  $H_{sig}$ ,  $T_p$  of de waterdiepte.

In meetserie II wordt bij een geringe bodemhelling (1:90) en enige kans op breken ( $H_{sig}/h_{gem} \approx 0.57$ ) een overeenkomstige ojief-vormige  $\epsilon$  verdeling gevonden (fig. 4.21, vooroever).

De optredende ojief-vormige  $\epsilon$  verdeling komt overeen met de uit metingen van Dette & Uliczka (Van de Graaff, 1988) gevonden  $\epsilon$  verdeling (fig. 4.1). De  $\epsilon$  waarden hogerop zijn echter lager dan bij Dette & Uliczka.

Tevens vertoont de gevonden  $\epsilon$  verdeling overeenkomst met een geschematiseerde mengingscoëfficiëntenverdeling onder golven door Van Rijn en Meijer (1986). De met de formules van Van Rijn en Meijer berekende  $\epsilon$  waarden (zie Appendix 2) zijn dichtbij de bodem een factor 2 à 3 kleiner dan de in dit onderzoek gevonden waarden. De maximale  $\epsilon$  waarden volgens Van Rijn en Meijer vertonen slechte overeenkomst met de in dit onderzoek optredende waarden.

Bij metingen onder niet brekende golven ( $H_{sig}/h_{gem} \approx 0.3$ ), boven een bodem met helling 1:60 tot 1:10 (fig. 4.16 en 4.19, meetserie II) vertonen de  $\epsilon$  verdelingen in de buurt van de bodem overeenkomst met de ojief-vormige  $\epsilon$  verdeling in fig. 4.17 en 4.18. Hogerop zijn de  $\epsilon$  waarden echter duidelijk lager, namelijk 1 à  $2 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s. Dit doet vreemd aan; het is nog niet gelukt hier een verklaring voor te vinden.

### Brekende golven

Men dient zich te realiseren dat spreiding optreedt in de  $H_{sig}/h_{gem}$  waarden waarbij golven breken. Dit betekent dat er geen harde grens aan te geven is tussen een situatie met wel en niet brekende golven. Daarom is een indeling van de verschillende metingen naar vergelijkbare omstandigheden hier minder eenvoudig. Dit geldt met name voor meetserie II, waar de meetomstandigheden variëren doordat verschillen in duinafslag van invloed zijn op vorm en grootte van de zandbank, en de mate van golfreflectie niet constant is (zie § 3.3.1).

Bij de testen T1E1, T2E1, T3E1 (fig. 4.22, talud zandbank) is sprake van een bodemhelling van 1:35 en een  $H_{sig}/h_{gem}$  van ca. 0.6, met daardoor een grotere kans op brekende golven. De positie van deze drie testen is juist "zeewaarts" van het steile talud naar de zandbank

Bij test T2E1 vindt men een ojief-vormige  $\epsilon$  verdeling welke lijkt op de gevonden verdelingen bij niet brekende golven. Bij de testen T1E1 en T3E1 is deze ojief-vorm minder duidelijk aanwezig. Test T2E1 valt op door een grote  $\epsilon$  waarde hogerop,  $15.6 \cdot 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s.

Test T3E1 heeft juist een grotere  $\epsilon$  waarde aan de bodem.

Test 9G heeft bij een vergelijkbare  $H_{sig}/h_{gem}$  van 0.6, maar een bodemhelling van 1:8, eveneens een ojief-vormige  $\epsilon$  verdeling (fig. 4.20).

De testen T1E2, T2E2, T2I5, T3I5 (fig. 4.23) liggen op overeenkomstige posities juist bovenaan het steile talud naar de zandbank, en hebben een  $H_{sig}/h_{gem}$  van 0.8 à 0.9. De  $\epsilon$  verdelingen lijken sterk op elkaar en de  $\epsilon$  waarden bij de bodem zijn nagenoeg gelijk.

25 Testen zijn gedaan op de zandbank, "landwaarts" van het steile talud (fig. 4.24 t/m 4.31).

De  $\epsilon$  waarden bij de bodem liggen tussen 0.2 en  $0.8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  en zijn in het algemeen groter dan bij niet brekende golven.

De  $\epsilon$  waarden hogerop liggen tussen 1 en  $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  en zijn daarmee in het algemeen kleiner dan de  $\epsilon$  waarden bij niet brekende golven. Een uitzondering hierop is test 9H met een  $\epsilon$  waarde hogerop van  $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  (fig. 4.20).

Testen bij een kleinere waterdiepte hebben grotere  $\epsilon$  waarden aan de bodem en lagere  $\epsilon$  waarden hogerop.

De testen T1G4, T1H4, T2H4 en T2I3 (fig. 4.32, meetserie II) liggen alle op een positie dichtbij de ontgrondingskuil, met een negatieve bodemhelling en een wat grotere waterdiepte. Ook hier wordt de ojief-vormige  $\epsilon$  verdeling aangetroffen, echter met grotere  $\epsilon$  waarden, zowel bij de bodem als hogerop, dan de verdelingen bij weinig of geen brekende golven. (De  $\epsilon$  verdeling van metingen T1G4 en T2H4 eindigt op  $z=0.675\text{m}$  omdat dit de hoogte is van het hoogste ingevoerde concentratie meetpunt).

#### Conclusies

Bij kleine waarden van  $H_{sig}/h_{gem}$  ( $\leq$  ca. 0.6), welke duiden op weinig of geen brekende golven, worden ojief-vormige (hol-bolle)  $\epsilon$  verdelingen gevonden welke gekenmerkt worden door lage  $\epsilon$  waarden dichtbij de bodem (ca.  $0.1$  à  $0.3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ) en hoge  $\epsilon$  waarden aan het oppervlak ( $2$  à  $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ). (Een uitzondering hierop vormen de testen 9B, 9C, 9D, 9J en 9F). Dit betekent dat de menging vlakbij de bodem gering is, en hogerop beter.

Bij grote waarden van  $H_{sig}/h_{gem}$  (ca. 0.6 tot 1), welke duiden op brekende golven, worden verdelingen gevonden met een kleiner verschil tussen  $\epsilon$  waarden nabij de bodem en  $\epsilon$  waarden hogerop. De  $\epsilon$  waarden dichtbij de bodem variëren van 0.2 tot  $0.8 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  en zijn in het algemeen groter dan bij niet brekende golven. De  $\epsilon$  waarden hogerop variëren van 1 tot  $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  en zijn daarmee in het algemeen kleiner dan bij niet brekende golven. De menging nabij de bodem is blijkbaar beter dan bij niet brekende golven, terwijl de menging hogerop juist minder goed blijkt te zijn. Waarom onder brekende golven hogerop een geringere menging wordt gevonden is onduidelijk.

In de figuren 4.33 t/m 4.38 zijn voor de beide meetseries langsprofielen van de Deltagoot gegeven met hierin de op de verschillende locaties optredende  $\epsilon$  verdelingen.

Voor meetserie I is hiervoor het uitgangsprofiel gebruikt en voor meetserie II de profielen van de proeven T1, T2 en T3 na 3:50 en 12:50 uur.

De verwachting over verschillende mengingseffecten van plunging en spilling brekers kan aan de hand van de  $\epsilon$  verdelingen niet duidelijk worden bevestigd

Wellicht is de  $\epsilon$  verdeling van 9K (fig. 4.20) het gevolg van voornamelijk plunging brekers, en de  $\epsilon$  verdeling van test 9H (fig. 4.20) het gevolg van voornamelijk spilling brekers.

*Kan ik mij voorstellen.*

Het brekingsproces blijkt te complex en de deelprocessen te gevarieerd om de optredende  $\epsilon$  verdelingen te kunnen verklaren. De gevonden  $\epsilon$  verdelingen kunnen echter een goed aanknopingspunt vormen voor nader onderzoek.

## § 4.5 Afhankelijkheid $\epsilon$ waarden van randvoorwaarden

Over de relaties tussen  $\epsilon$  waarden en randvoorwaarden is op dit moment weinig bekend.

In dit onderzoek is alleen gekeken of zich, tussen  $\epsilon$  waarden en bepaalde randvoorwaarden, trends voordoen die logisch lijken. Van de Graaff (1988) geeft hiervoor een eerste aanzet, waarop dit onderzoek een vervolg is.

Verwacht wordt dat de volgende randvoorwaarden voor een groot deel het proces bepalen:

- bodem:
  - korreldiameters zand
  - korrelgradering zand
  - bodemvormen \*
  - bodemhelling
  - bodemgeometrie
- water:
  - diepte
  - temperatuur
  - stroming
- golven:
  - golfhoogte
  - golfperiode
  - golflengte \*

Over de met een \* gemerkte randvoorwaarden is uit de beschikbare meetgegevens onvoldoende bekend.

Omdat, zoals zal blijken, erg weinig "vat" op de zaak gekregen kan worden heeft het weinig zin alle aspecten van de koppeling  $\epsilon$ -karakteristieken - randvoorwaarden in de beschouwingen te betrekken. Daarom is voornamelijk naar  $\epsilon$  waarden in de buurt van de bodem gekeken. Ook is aandacht besteed aan delta  $\epsilon$  waarden ( $\Delta \epsilon = \epsilon(z=0.125\text{m}) - \epsilon(z=0.025\text{m})$ ) nabij de bodem.

### § 4.5.1 Verwachting

In het algemeen wordt een  $\epsilon$  parameter [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] uitgedrukt als het produkt van een karakteristieke mengweglengte  $l_\epsilon$  en een karakteristieke snelheid  $U_\epsilon$ :

$$\epsilon_s = l_\epsilon * U_\epsilon \quad (4.5.1-1)$$

Voor de karakteristieke snelheid  $U_\epsilon$  lijkt  $U_{\text{sig}}$  een geschikte snelheid.

De karakteristieke mengweglengte  $l_\epsilon$  zou evenredig kunnen zijn met de slaglengte, (of excursie), van de orbitaal beweging.

$$l\epsilon \sim \frac{U_{sig} T_p}{2\pi} \quad (4.5.1-2)$$

$U_{sig}$ : significante snelheid  
 $T_p$  : piekperiode snelheidsspectrum

Het lijkt derhalve zinvol  $U_{sig}$  waarden, of waarden voor de slaglengte te koppelen aan  $\epsilon$  waarden, waarbij het logisch lijkt te veronderstellen dat bij grotere  $U_{sig}$  waarden grotere  $\epsilon$  waarden optreden.

Daarnaast zou de waterdiepte  $h_{gem}$  van invloed kunnen zijn op het mengingsproces, dus op de mengingscoëfficiënt  $\epsilon_s$ . Als men veronderstelt dat zowel een kleinere  $h_{gem}$  als een grotere waarde van de slaglengte de menging bevorderen, lijkt het zinvol om een gecombineerde parameter  $U_{sig} T_p/h_{gem}$  te beschouwen. Deze parameter is dimensieloos.

Verwacht wordt dat het breken van golven extra menging veroorzaakt, en derhalve aanleiding geeft tot grotere  $\epsilon$  waarden. Battjes (1988) geeft een relatie waarin de turbulentie intensiteit door breken wordt gerelateerd aan de dissipatie van golfenergie. Een belangrijke term hierin is de verhouding  $H/h_{gem}$ . De waarde hiervan geeft aan dat een golf met een bepaalde hoogte bij een bepaalde waterdiepte zal breken. Breken treedt op voor waarden van  $H/h_{gem} > 0.6$  à  $0.8$ .

Dit betekent voor een onregelmatig golfveld, waar  $H_{sig}$  een karakteristieke maat is voor de golfhoogte, dat bij grotere  $H_{sig}/h_{gem}$  een grotere kans op breken van een individuele golf bestaat.

Er zal geen breken optreden op een horizontale bodem na een breekpunt, of op een negatieve helling. Deze laatste situatie wordt in het algemeen aangetroffen in een brekerzone waar een brekerbank ontstaat. In gevallen waar niet of nauwelijks breken op zal treden kan de verhouding  $H/h_{gem}$  gezien worden als een indicatie voor de menging door de orbitaal beweging en bodeminvloeden.

Omdat de verhouding  $H_{sig}/h_{gem}$  geen harde grens voor breken geeft (variatie voor  $H_{sig}/h_{gem}$  van 0.6 tot 0.8 is normaal, waarbij waarden groter dan 0.8 geen uitzondering zijn), zal zeker spreiding optreden in de  $\epsilon$  waarden als functie van  $H_{sig}/h_{gem}$ .

Bovendien wordt het brekingsproces beïnvloed door de golfsteilheid, de golflengte en de bodemhelling. Afhankelijk van de omstandigheden treden verschillende brekertypen op, met een

verschillende invloed op het mengingsproces (zie hoofdstuk 2). Bij grote waarden voor  $H_{sig}/h_{gem}$  en een steile bodemhelling treden plunging brekers op. Bij kleinere  $H_{sig}/h_{gem}$  waarden (echter wel groter dan 0.6) en een minder steile bodemhelling treden spilling brekers op. Ook reflectie van golven heeft, via de golfsteilheid, invloed op het brekingsproces.

Een ander verschijnsel dat de menging door breken beïnvloedt is "breakertravel". De turbulentie, opgewekt door een brekende golf, heeft een bepaalde tijd en lengte nodig om zich over de volledige waterdiepte te verspreiden. Daardoor is de plaats van breken, en de plaats van door breken optredende turbulentie niet gelijk. Dit is afhankelijk van het type breker wat optreedt. Ten slotte treden in een brekerzone nog andere verschijnselen op, zoals een retourstroom en "surfbeat" (laag frequente golfcomponenten met een periode van enige minuten) die een onduidelijke invloed op het mengingsproces hebben.

Het mengingsproces door breken is een complex verschijnsel wat door alleen de verhouding  $H_{sig}/h_{gem}$  waarschijnlijk onvoldoende wordt beschreven. In dit stadium van onderzoek lijkt het echter gerechtvaardigd  $\epsilon$  waarden te relateren aan de verhouding  $H_{sig}/h_{gem}$ , waarbij bij een grotere  $H_{sig}/h_{gem}$  grotere  $\epsilon$  waarden worden verwacht.

Dit is alleen zinvol voor proeven met een  $H_{sig}$  (of  $h_{gem}$ ) van dezelfde orde van grootte.

#### § 4.5.2 Resultaten

Naar aanleiding van de bespreking in de vorige paragraaf is nagegaan of er afhankelijkheden bestaan tussen  $\epsilon$  waarden en de volgende randvoorwaarden.

Op de hoogte  $z=0.2m$  boven de bodem:

- $U_{sig}$  -  $\epsilon 0.2$  (fig. 4.39)
- $U_{sig}T_p/2\pi$  -  $\epsilon 0.2$  (fig. 4.39)
- $H_{sig}/h_{gem}$  -  $\epsilon 0.2$  (fig. 4.40)
- $U_{sig}T_p/h_{gem}$  -  $\epsilon 0.2$  (fig. 4.41)

De hoogte  $z=0.2m$  is gekozen, omdat dit in meetserie I het laagste punt is waar snelheidsmetingen zijn gedaan.

Voor zover de snelheid niet op  $z=0.2m$  is gemeten, is deze bepaald m.b.v. lineaire inter- of extrapolatie uit snelheidsmetingen op andere hoogten.

De piekperiode volgt direct uit de meetgegevens, of is (voor meetserie II) bepaald uit de snelheidsspectra.

$H_{sig}$  volgt direct uit de beschikbare gegevens.

Voor de verhouding  $H_{sig}/h_{gem}$  is ook naar  $\epsilon$  waarden dichterbij de bodem gekeken ( $\epsilon=0.025$ ):

•  $H_{sig}/h_{gem} - \epsilon=0.025$  (fig. 4.40)

Tevens is voor alle testen de toename van  $\epsilon$  bepaald tussen 2.5cm en 12.5cm boven de bodem:

$\Delta \epsilon = \epsilon(z=0.125m) - \epsilon(z=0.025m)$

en ook deze  $\Delta \epsilon$  waarden zijn tegen bovenstaande parameters uitgezet (fig. 4.42 en fig. 4.43).

In tabel 4.4 staat een overzicht per test van de  $\epsilon$  waarden en randvoorwaarden op de hoogte  $z=0.2m$  boven de bodem.

De waterdiepten tijdens de verschillende testen variëren sterk (van 0.47 tot 2.72 m). Zodoende is de vaste hoogte  $z=0.20m$  bij de ene test bijna gelijk aan  $h_{gem}/2$  en bij een andere aan bijvoorbeeld  $h_{gem}/10$ .

Omdat de invloed hiervan op gezochte relaties tussen  $\epsilon$  en randvoorwaarden niet bekend is, zijn tenslotte de waarden van  $\epsilon$  op een tiende van de waterdiepte uitgezet tegen een aantal parameterwaarden op  $h_{gem}/10$ :

- $U_{sig} - \epsilon h_{gem}/10$  (fig. 4.44)
- $U_{sig} T_p / 2\pi - \epsilon h_{gem}/10$  (fig. 4.44)
- $H_{sig}/h_{gem} - \epsilon h_{gem}/10$  (fig. 4.45)

( $h_{gem}/10$  varieert dus van 4.7 tot 27.2 cm).

De meeste  $U_{sig}$  waarden zijn hier bepaald door lineaire extrapolatie.

In tabel 4.5 staat een overzicht per test van de  $\epsilon$  waarden en randvoorwaarden op de hoogte  $z=h_{gem}/10$ .

In de figuren zijn de testen, welke onder verschillende omstandigheden zijn gedaan (volgens de selectie in § 4.1), als volgt weergegeven:

+	geen breken, geen bodemhelling
□	geen breken, met bodemhelling
◇	brekerzone
△	vooroever
X	talud zandbank
▽	zandbank



### § 4.5.3 Bespreking

In de figuren 4.39 t/m 4.45 zijn de resultaten weergegeven van combinaties van  $\epsilon$  waarden en randvoorwaarden. In fig. 4.39 t/m 4.43 is dit weergegeven op twintig centimeter boven de bodem ( $z=0.2m$ ) en in fig. 4.44 en 4.45 op een tiende van de waterdiepte ( $z=h_{gem}/10$ ).

Globaal worden voor grotere waarden van  $U_{sig}$ ,  $U_{sig}T_p/2\pi$ ,  $H_{sig}/h_{gem}$  en  $U_{sig}T_p/h_{gem}$ , grotere  $\epsilon$  waarden gevonden. Dit komt overeen met hetgeen verwacht werd. In de gevonden  $\epsilon$  waarden blijkt, met name als gevolg van het breken van golven, aanzienlijke spreiding op te treden. Het is niet gelukt hierin meer inzicht te verkrijgen; wellicht kan een nadere analyse van het brekingsproces hierin verbetering brengen.

De resultaten moeten gezien worden als een eerste aanzet. Duidelijke conclusies zijn in dit stadium van onderzoek niet te trekken.

Wanneer men voor de hoogte  $z=0.2m$   $U_{sig}$  of  $U_{sig}T_p/2\pi$  tegen  $\epsilon$  uitzet (fig. 4.39), wordt een stijgende tendens gevonden. De invloed van  $T_p$  is beperkt. Ook blijkt bij brekende golven aanzienlijke spreiding in de  $\epsilon$  waarden op te treden.

Wanneer men de invloed van de diepte meeneemt door  $U_{sig}T_p/h_{gem}$  (fig. 4.41) of de verhouding  $H_{sig}/h_{gem}$  tegen  $\epsilon$  uit te zetten (in fig. 4.40 met  $\epsilon$  waarden op  $z=0.025m$  en  $z=0.2m$ ), wordt ook een stijgende trend gevonden.

In fig. 4.42 en 4.43 zijn bovengenoemde parameters uitgezet tegen  $\Delta\epsilon$  ( $= \epsilon_{0.125m} - \epsilon_{0.025m}$ ) in plaats van tegen  $\epsilon_{0.2m}$ . Ook hier vindt men een stijgend verband, waarbij de spreiding in de  $\Delta\epsilon$  waarden het grootst is bij brekende golven.

Op de relatieve hoogte  $z=h_{gem}/10$  is de gevonden stijgende tendens in de relatie tussen  $\epsilon$  waarden en randvoorwaarden minder sterk.

In fig. 4.39 ( $U_{sig} - \epsilon$ ) is uit de gevonden trend op te maken dat, voor  $U_{sig} \approx 0.15$  m/s, de  $\epsilon$  waarde gelijk aan nul wordt. Het lijkt logisch dat voor snelheden, kleiner dan de kritische snelheid (de snelheid waarbij sedimentdeeltjes beginnen te bewegen) geen menging optreedt. Voor de kritische snelheid is 0.15 m/s een aannemelijke waarde.

#### Bespreking testen met afwijkende $\epsilon$ waarden

Voor de figuren 4.39 t/m 4.45 is nagegaan welke testen buiten de gevonden trend liggen. Deze testen zijn in de figuren aangegeven en blijken alle gedaan te zijn onder brekende golven.

Met name 9H, 9L en T3E1 wijken duidelijk af van de gevonden trend.

Op hoogte  $z=0.2\text{m}$  (fig. 4.39 t/m 4.41) heeft test 9H relatief grote waarden van  $\epsilon$  en  $\Delta\epsilon$  (fig. 4.42 en 4.43). Op  $z=h_{\text{gem}}/10$  (bij 9H is dit  $0.097\text{m}$ ) worden bij deze test daarentegen geen afwijkende waarden gevonden (fig. 4.44 en 4.45). Ook bij T3E1 wordt een relatief grote  $\epsilon$  gevonden. Bij deze test is met name op  $z=h_{\text{gem}}/10$  ( $=0.14\text{m}$ ) de afwijking groot (fig. 4.44 en 4.45). De  $\Delta\epsilon$  waarde van T3E1 valt binnen de trend. Wanneer  $\epsilon$  en  $\Delta\epsilon$  tegen  $U_{\text{sig}}$  en  $U_{\text{sig}}T_p/2\pi$  worden uitgezet (fig. 4.39 en 4.42) blijkt 9L een relatief grote  $\epsilon$  te hebben.

De testen 9H en 9L zijn "landwaarts" van het steile talud (1:10) en de brekerbank gedaan. Ter plaatse van deze brekerbank ( $x=165\text{m}$ ) treden plunging brekers op die, door "breaker travel", op de locaties van 9H ( $x=170\text{m}$ ) en 9L ( $x=180\text{m}$ ) extra menging veroorzaken en zo de grotere  $\epsilon$  waarden kunnen verklaren.

In fig. 4.40 (onderste gedeelte:  $\epsilon$  tegen  $H_{\text{sig}}/h_{\text{gem}}$  op  $z=0.025$ ) heeft 9L een relatief kleine  $\epsilon$  waarde. Ook in de figuren 4.44 en 4.45 (op  $z=h_{\text{gem}}/10 = 0.071\text{m}$ ) ligt 9L onder de gevonden trend. Waarom test 9L nabij de bodem juist een lagere  $\epsilon$  waarde heeft is onduidelijk.

Test T3E1 is juist "zeewaarts" van het talud naar de zandbank gedaan. Bij deze test is (zie § 4.3), wellicht door een verstopt afzuigbuisje, op het onderste meetpunt een te lage concentratie gemeten. Hierdoor ontstaat nabij de bodem een steilere, gefitte, concentratieverdeling en daardoor treden grotere  $\epsilon$  waarden op. Zoals in § 4.3 is opgemerkt, is hiervan ook bij een aantal andere testen sprake; deze liggen echter niet buiten de gevonden trend.

In de figuren 4.40 en 4.43 (onderste deel), waarin  $\epsilon$  en  $\Delta\epsilon$  waarden zijn uitgezet tegen  $H_{\text{sig}}/h_{\text{gem}}$  liggen de testen T5D2 en T5D3 onder de gevonden trend. De gemiddelde waterdiepte,  $h_{\text{gem}}$ , is bij deze twee testen kleiner dan bij andere testen, wat wellicht deze afwijking kan verklaren.

Voor andere afwijkende testen is het niet mogelijk gebleken een bevredigende verklaring te vinden.

In paragraaf 4.6 zal blijken dat bij een aantal testen een slechte overeenkomst wordt gevonden tussen berekende en gemeten waarden voor  $D_{50}$  van het sediment in suspensie (fig. 4.47). Dit geldt voor de testen 9L en T3E1 (met  $\epsilon$  waarden buiten de gevonden trend), maar ook voor een aantal testen (9B, 9C, 9D, 9J, 9F, 9I, T1E1 en T3E1) die binnen de gevonden trend liggen. De slechte overeenkomst tussen berekende en gemeten  $D_{50}$  waarden lijkt geen verklaring te zijn voor het afwijken van  $\epsilon$  bij bepaalde testen; het betekent echter wel een afname van de betrouwbaarheid van de gevonden trend.

*zie fig. 61*  
*de snijvlak bodemstijping met holoenaal*  
*of*  
*hm!*

### Bespreking aannamen in diffusiemodel

Uitgangspunt van het gebruikte diffusie- of mengingsmodel (§ 2.3) is, dat een stationaire concentratieverdeling wordt beschreven. Ook wordt er in dit model van uitgegaan dat alleen termen in verticale richting de opbouw van de concentratieverdeling bepalen. Het is zeer de vraag in hoeverre deze uitgangspunten geoorloofd zijn onder brandingsomstandigheden en bij het optreden van aanzienlijke veranderingen in bodemligging. Het eventueel niet-stationair zijn van de concentratieverdeling, of het niet verwaarloosbaar zijn van termen in horizontale richting, kan van invloed zijn op de te berekenen  $\epsilon$  waarden. Daarnaast is in het model geen rekening gehouden met de invloed van verticale vloeistofsnelheden op de opbouw van de concentratieverdeling. Onder brandingsomstandigheden, waarbij golven breken en er een retourstroom optreedt, kunnen verticale snelheden van belang zijn. Omdat in dit onderzoek geen gegevens beschikbaar zijn over verticale snelheden, kan over het effect ervan geen uitspraak gedaan worden.

Uit bovenstaande bespreking van het gebruikte model blijkt dat de gevonden  $\epsilon$  waarden en de gevonden trend met voorzichtigheid bekeken moeten worden.

### Invloed bodemvormen

Zoals besproken is in § 2.2.1, hebben bodemvormen een sterke invloed op de opbouw van de concentratieverdeling. Afhankelijk van de waterbeweging en eigenschappen van het sediment, kunnen verschillende ribbelvormen ontstaan.

(Bij grote vloeistofsnelheden kan "sheet flow" optreden: door de grote snelheid worden de bodemribbels afgevlakt zodat weer een vlakkere bodem ontstaat. De invloed op het mengingsproces is onbekend.)

Wellicht heeft het optreden van verschillende bodemvormen afwijkende  $\epsilon$  waarden veroorzaakt. Door het ontbreken van voldoende gegevens over bodemvormen kan hierover geen uitspraak worden gedaan.

Het verdient aanbeveling om de invloed van verschillende bodemvormen op het mengingsproces in nader onderzoek te betrekken.

### Vergelijking met $\epsilon$ waarden uit voorgaand onderzoek

Van een aantal testen zijn de  $\epsilon$  waarden en de bijbehorende  $U_{slg}$  waarden vergeleken met resultaten uit eerder onderzoek.

In fig. 4.46 (bovenste deel) is dit gedaan op  $z=0.2m$ , voor de testen uit meetserie I met niet brekende golven en zonder bodemhelling, de twee testen op de vooroever uit meetserie II en twee testen van Dette & Uliczka (Van de Graaff, 1988).

*De rivier  
een van  
meest  
verbanden*

In fig. 4.46 (onderste deel), op  $z=h_{gem}/20$ , zijn een aantal testresultaten van Van de Graaff (1988) toegevoegd. (Dit betreft proeven op kleine schaal, met kunstmatige bodemribbels en onder regelmatige golven. Voor deze proeven is de maximale orbitaalsnelheid gebruikt in plaats van  $U_{sig}$ .) Wat betreft orden van grootte geven deze figuren een bevredigend beeld en vormen een bevestiging van de in fig. 4.39 (bovenste deel) gevonden trend.

Vergelijking met  $\epsilon$  waarden bij een uniforme stroming

Een uniforme stroming kan gezien worden als een oscillerende waterbeweging met een oneindig grote periode. Voor kleinere perioden ontstaat de oscillerende waterbeweging zoals die onder golven optreedt. Voor een aantal testen zijn de gevonden  $\epsilon$  waarden (onder golfwerking) vergeleken met  $\epsilon$  waarden die gelden bij uniforme stroming met een logaritmische snelheidsverdeling. Er is voor de stroming gebruik gemaakt van een parabolische  $\epsilon$  verdeling volgens Rouse:

$$\epsilon(z) = 4 \epsilon_{max} \frac{z}{h} \frac{(h-z)}{h} \quad \text{met} \quad \epsilon_{max} = 0.25 \kappa h v^* c$$

$$v^* c = \sqrt{g} \frac{v}{C}$$

waarin  $\kappa = 0.4$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$C = 40 \text{ m}^{3/2}/\text{s}, \text{ keuze voor Chézy coëfficiënt}$$

$v$  is de gemiddelde snelheid van de uniforme stroming.

Er is nagegaan welke stroomsnelheid  $v$  nodig is om dezelfde  $\epsilon$  waarden te bereiken welke gevonden zijn onder omstandigheden met onregelmatige en ook brekende golven. Deze waarde voor  $v$  is vergeleken met een afgeronde waarde van  $U_{sig}$  (tabel 4.5.3.1).

test	$\epsilon_{0.025}$	$U_{sig}$	$v$	$v/U_{sig}$	$\epsilon_{0.2}$	$v$	$v/U_{sig}$
4B	0.0013	0.5	1.7	3.4	0.0030	0.5	1.0
5A	0.0021	0.7	2.7	3.9	0.0048	0.8	1.1
T2I6	0.0021	1.2	2.7	2.3	0.0069	1.3	1.1
T3I6	0.0031	1.1	4.0	3.6	0.0098	1.8	1.6
9K	0.0036	1.0	4.7	4.7	0.0064	1.3	1.3
T2I5	0.0027	1.4	3.5	2.5	0.0108	2.1	1.5

Tabel 4.5.3.1 : Vergelijking  $\epsilon$  waarden bij stroming.

Om bij een uniforme stroming dezelfde  $\epsilon$  waarde te bereiken als onder onregelmatige en ook brekende golven is, op  $z=0.025m$  boven de bodem, een gemiddelde stroomsnelheid  $v$  nodig die 3 à 4 maal groter is dan de significante orbitaalsnelheid.  
Voor  $z=0.2m$  ligt deze factor tussen de 1 en 2.  
Hieruit blijkt dat, dicht bij de bodem, golven een goede menging veroorzaken.

## § 4.6 Controle D50 suspensiemateriaal

In beide Deltagoot-onderzoeken is, door middel van een valkolom analyse, van afgezogen monsters de gemiddelde valsnelheid  $w_{50}$  bepaald. Omdat voor onderzoek in de valkolom een bepaalde minimale hoeveelheid sediment benodigd is, is steeds al het zand dat tijdens een test op verschillende hoogten is afgezogen samengevoegd.

Uit deze  $w_{50}$  waarden kan met behulp van de valsnelheidsformule de kenmerkende diameter D50 van de monsters bepaald worden ( $D_{50_{gem}}$ ). Die gemeten D50 waarden zijn vergeleken met een gewogen gemiddelde van de (m.b.v. het computerprogramma) berekende D50 verdeling ( $D_{50_{ber}}$ ).

Tevens heeft Roelvink bodemmonsters in de valkolom onderzocht. De hieruit volgende D50 waarden zijn vergeleken met de D50 waarden van het bodemmateriaal welke door middel van zeefanalyse op enkele locaties zijn bepaald en, met de D10 en de D90 waarden, gebruikt als invoer voor het computerprogramma.

### § 4.6.1 Procedure

De in het computerprogramma gebruikte valsnelheidsformule is die voor zoet water met een temperatuur van  $10^{\circ}\text{C}$ :

$$\log \frac{1}{w_{50}} = 0.47584 (\log D50)^2 + 2.1795 (\log D50) + 3.1915 \quad (4.6.1-1)$$

Inverteren geeft:

$$\log (D_{50_{gem}}) = -2.2901606 - \frac{\sqrt{(-1.3243531 + 1.90336 \log (1/w_{50}))}}{0.95168} \quad (4.6.1-2)$$

De proeven van Meetserie I (Roelvink) zijn gedaan bij een watertemperatuur van  $5^{\circ}\text{C}$ . Bij Meetserie II (Steetzel) is  $9^{\circ}\text{C}$  gemeten. (In het computer programma is de valsnelheidsformule voor  $T=18^{\circ}\text{C}$  gebruikt, wat een fout tot gevolg heeft. Hierop zal worden teruggekomen in de gevoeligheidsanalyse.)

De  $D_{50_{ber}}$  is bepaald uit de D50 verdeling die het programma berekent.

De waarden zijn genomen op de hoogten waarop concentraties zijn gemeten. Vervolgens is van deze D50 waarden een gewogen gemiddelde berekend aan de hand van de respectievelijke gemeten  $C(z)$  waarden:

$$D50_{ber} = \sum_{i=1}^n D50(z_i) \cdot \frac{C(z_i)}{C_{tot}} \quad \text{met } C_{tot} = \sum_{i=1}^n C(z_i) \quad (4.6.1-3)$$

waarbij n het aantal hoogten is waarop zand is afgezogen.  
 Het vergelijken van  $D50_{ber}$  en  $D50_{gem}$  geeft een indicatie over de nauwkeurigheid van de door het programma bepaalde D50 verdeling (en daarmee van de  $\epsilon$  verdeling).

Een overzicht van de gemeten en berekende waarden van D50 voor de verschillende testen is te vinden in de tabellen 4.6.1.1 en 4.6.1.2. Ook is de kleinste optredende D50 in de berekende D50-verdeling vermeld (in het algemeen nabij het wateroppervlak).

test	gem. w50	gem. D50	ber. D50	min. D50
2A	0.0210	188	201	182
2B	0.0200	181	200	175
3A	0.0200	181	201	176
3B	0.0200	181	201	174
4B	0.0200	181	201	174
5A	0.0230	200	203	184
5B	0.0208	186	202	178
6A	0.0208	186	202	183
6B	0.0208	186	202	182
8B	0.0230	200	201	178
9I	0.0178	167	221	183
9B	0.0165	158	214	166
9C	0.0185	171	208	156
9D	0.0158	153	209	153
9F	0.0177	166	224	184
9J	0.0139	141	222	176
T3I6	0.0201	182	199	189

tabel 4.6.1.1 : D50 suspensiemateriaal,  
 metingen onder niet brekende golven.

test	gem. w50	gem. D50	ber. D50	min. D50
9G	0.0288	199	218	201
9H	0.0215	191	208	203
9K	0.0247	212	211	197
9L	0.0199	180	206	197
T1E1	0.0183	170	200	191
T1E2	0.0205	184	200	192
T2E1	0.0180	168	201	196
T2E2	0.0211	188	200	192
T3E1	0.0189	174	203	197
T3I5	0.0233	203	199	192
T1F1	0.0222	196	200	193
T2F1	0.0219	194	201	194
T3F1	0.0230	200	203	198
T3F2	0.0241	208	204	199
T3I2	0.0208	186	203	195
T3I3	0.0244	210	201	194
T3I4	0.0237	205	199	191

tabel 4.6.1.2 : D50 suspensiemateriaal,  
metingen onder brekende golven.

test	gem. w50	gem. D50	gebruikt voor $\epsilon$ berekening D10 D50 D90 uit zeefanalyse		
2A-8B	0.0241	208	165	215	270
9B	0.0223	196	160	230	250
9C	0.0245	210		"	
9D	0.0230	200		"	
9F	0.0241	208	180	240	310
9G	0.0262	222		"	
9H, 9L	0.0263	222	170	220	285
9I	0.0239	207	180	240	310
9J	0.0275	230		"	
9K	0.0266	224	170	220	285

tabel 4.6.1.3 : Diameters bodemmateriaal meetserie I.



## § 4.6.2 Bespreking

Voor een aantal testen blijkt er een groot verschil te zijn tussen  $D50_{gem}$  en  $D50_{ber}$  van het suspensiemateriaal. In het algemeen liggen de gemeten waarden lager dan de berekende waarden (fig. 4.47b).

Een mogelijke oorzaak hiervoor is dat in het computerprogramma de ingevoerde D10-D50-D90 verdeling van het bodemmateriaal niet juist is geweest.

### Meetserie I

In onderzoek I is op 4 plaatsen in het profiel de korrelgradering (D10, D50 en D90) van het bodemmateriaal door zeefanalyse bepaald. Deze korrelgradering is voor testen op een ander tijdstip en een andere positie als representatief beschouwd, en in het computerprogramma gebruikt.

Tevens is, door middel van een valkolomanalyse, de  $w_{50}$  van het bodemmateriaal op verschillende posities in de goot gemeten (tabel 4.6.1.3). In fig. 4.48 zijn de gemeten D50 waarden van het bodemmateriaal op de verschillende locaties aangegeven, samen met de gezeefde D10-D50-D90 verdelingen. Uit de tabel en de figuur blijkt dat beide waarden voor D50 niet overal even goed overeenkomen.

### Meetserie II

Bij de proeven T1 t/m T3 zijn de valsnelheden van het bodemmateriaal gemeten na afloop van elke proef, op posities die niet overeen komen met de posities van de concentratiemetingen. Het is daarom niet mogelijk om per test een vergelijking te maken tussen de gemeten D50 en de in het computerprogramma gebruikte D50. Uit de gemeten waarden blijkt wel dat er op de verschillende posities uitzeving plaatsvindt.

In fig. 4.47a is het verschil tussen de in het computerprogramma ingevoerde D50 (zeefanalyse) en de (met behulp van de valkolom) gemeten D50 waarde van het bodemmateriaal, uitgezet tegen het verschil tussen de berekende en de (met behulp van de valkolom) gemeten D50 waarde van het suspensiemateriaal. Hoe groter de afwijking in gemiddelde korreldiameter van het bodemmateriaal is, hoe groter de afwijking bij het suspensiemateriaal.

Geconcludeerd kan worden, dat het gebruiken van een onjuiste korrelgradering voor een bepaalde test als een belangrijke oorzaak aangemerkt kan worden voor verschillen tussen gemeten en berekende (dieptegemiddelde) D50 waarden van het materiaal in suspensie. Door uitzeving van het bodemmateriaal over het profiel en door de beperking in beschikbare meetgegevens is het echter niet mogelijk om per test een beter passende korrel-

gradering te kiezen. (Tevens is het mogelijk dat de concentratieverdeling, en daarmee de D50 verdeling van suspensiemateriaal onder brandingsomstandigheden, niet geheel lokaal bepaald is; zie hoofdstuk 2, halverwege blz. 25).

De consequentie is dat, door onjuistheden in de keuze van de korrelgradering voor het bodemmateriaal, de betrouwbaarheid van de berekende  $\epsilon$  verdeling afneemt. (In de volgende paragraaf komt de invloed van variatie in D waarden op  $\epsilon$  verdelingen aan de orde.)

Verder zijn mogelijke foutenbronnen in het gebruikte programma:

1. De aanname van een log-normale verdeling tussen de bekende waarden van D10, D50 en D90 van het bodemmateriaal.
2. Het gebruik van dezelfde  $\epsilon(z)$  voor elke fractie.
3. Slechte kwaliteit van de concentratie-fit.
4. Het gebruik van een valsnelheidsformule behorend bij een andere watertemperatuur dan die welke tijdens de proeven gemeten is.

En in de gedane metingen:

5. Afronding in D10-D50-D90 waarden.
6. Meet-onnauwkeurigheden in concentraties en/of valsnelheden.

Een aantal van deze foutenbronnen (1,2,4,5,6) is van toepassing bij alle testen.

ad 3) De procentuele fout van de concentratiefit blijkt bij de testen met een slechte overeenkomst tussen de gemeten en de berekende D50 niet groter te zijn dan bij testen die beter voldoen. Twee gevallen met een slechte D50 overeenkomst, 9F en 9L, hebben zelfs een relatief kleine procentuele fout.

ad 4) De invloed kan kwantitatief worden weergegeven. Het gebruik van de valsnelheidsformule voor 10°C i.p.v. 18°C in het programma leidt tot lagere  $\epsilon$  waarden ( $\epsilon_0$  wordt 5% lager en  $\epsilon_{\max}$  10%, zie tabel 4.7.2.3 op blz. 66). De D50 waarden worden nauwelijks beïnvloed.

## § 4.7 Gevoeligheidsanalyse

Naar aanleiding van de gevonden  $\epsilon$  verdelingen, en om de invloed te bekijken van variatie in de invoer van het programma, is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

Hiertoe is:

1. voor de concentratie verdeling een negental vormen opgelegd aan het programma.
2. de diameter-invoer gevarieerd.
3. in het programma een formule voor de valsnelheid voor 10°C gebruikt .

(De gefitte C verdeling en de  $\epsilon$  verdeling en de D verdeling, die in het programma worden berekend, zijn voornamelijk kwalitatief bekeken.)

### § 4.7.1 Variatie in de programma-invoer

#### a) De vorm van de concentratie verdeling

Er zijn drie typen C verdelingen gebruikt (zie fig.4.48):

- grote concentratie afname bij de bodem, vervolgens relatief steil naar het wateroppervlak (type I)
- $d(\ln(C))/dz$  constant vanaf de bodem tot aan het wateroppervlak (type III)
- een C verdeling die qua vorm hier tussenin ligt (type II)

waarbij voor elk type dezelfde bodem- ( $C_b$ ) en oppervlakteconcentratie ( $C_{opp}$ ) zijn aangehouden. Tevens is de oppervlakteconcentratie gevarieerd over een drietal waarden, zodat in totaal negen concentratie verdelingen zijn ingevoerd. Dat laatste is gebeurd door op 10 hoogten de concentratie op te geven (om zo de concentratie fit in de gewenste vorm te dwingen).

#### b) De diameter graderingen

In het gedane onderzoek vertonen de diameter graderingen spreiding door uitzeving gedurende een proef, waardoor de optredende diameter graderingen van het bodemmateriaal bij de verschillende metingen niet precies bekend zijn. Het invoeren van onjuiste waarden van D10, D50 en D90 van het bodemmateriaal is van invloed op de te berekenen  $\epsilon$  verdeling. Om enig idee te krijgen over de invloed hiervan zijn voor één C verdeling een vijftal diameter graderingen ingevoerd, te weten (tabel 4.7.1):

	D10	D50	D90	D10/D90	
1.	165	215	270	0.61	
2.	140	215	295	0.47	(D1)
3.	190	215	235	0.81	(D2)
4.	140	190	245	0.57	(D3)
5.	190	240	295	0.64	(D4)

tabel 4.7.1 : Ingevoerde diameter graderingen

(2) en (3) hebben een diameter gradering met dezelfde D50 als (1), maar met een grotere respectievelijk een kleinere spreiding. (4) en (5) hebben een kleinere respectievelijk een grotere D50 waarde dan (1), bij een ongeveer gelijke verhouding tussen D10 en D90.

- c) De coëfficiënten in de valsnelheidsformule  
Tenslotte is de valsnelheidsformule die het rekenprogramma gebruikt (voor zoet water, 18°C) vervangen door de valsnelheidsformule voor zoet water, 10°C. Dit is gedaan bij drie concentratie verdelingen.

#### § 4.7.2 Resultaten

- a) De vorm van de concentratie verdeling  
Het blijkt goed mogelijk om het programma een C verdeling van de gewenste vorm te laten "fitten", door tien meetpunten voor de concentratie in te voeren. Bij invoer van slechts vijf meetpunten lukte dit minder goed. De verschillende typen C verdelingen geven duidelijke bijbehorende  $\epsilon$  verdelingen. Het zijn voornamelijk de gradiënten in de C verdeling die de vorm van de  $\epsilon$  verdeling bepalen.

In fig. 4.49 t/m 4.52 zijn de verschillende typen C en  $\epsilon$  verdelingen (typen I, II en III) aangegeven bij een gelijke sedimentconcentratie aan de bodem en aan het oppervlak.

Bij gelijke typen C en  $\epsilon$  verdeling, maar met een afnemend verschil tussen bodem- en oppervlakteconcentratie (d.w.z. steilere C verdelingen met kleinere gradiënten) vindt men over de volledige hoogte grotere  $\epsilon$  waarden. Procentueel gezien is de toename voor alle typen van de zelfde orde van grootte. Voor de D50 verdeling geldt bij een kleiner verschil tussen bodem- en oppervlakteconcentratie ook een geringere afname van de D50.

(Zie tabel 4.7.2.1. Met de aanduiding "I2.25" wordt een concentratieverdeling van type I bedoeld, met  $(\ln C_b - \ln C_{opp}) = 2.25$ . Ook C verdelingen met  $(\ln C_b - \ln C_{opp}) = 1.5$  en  $(\ln C_b - \ln C_{opp}) = 1.0$  zijn ingevoerd.)

	$\ln C_b - \ln C_{opp}$	$\epsilon_{.025}$ [E-2]	$\Delta\%$	$\epsilon_{max}$ [E-2]	$\Delta\%$	afname D50
I2.25	2.25	0.2	--	6.3	--	20
I1.5	1.5	0.3	50%	9.7	54%	14
I1.0	1.0	0.45	125%	14.4	129%	10
II2.25	2.25	0.7	--	1.9	--	23
II1.5	1.5	1.1	57%	2.9	53%	15
II1.0	1.0	1.6	128%	4.7	147%	10
III2.25	2.25	1.5	--	1.5	--	22
III1.5	1.5	2.2	47%	2.3	53%	15
III1.0	1.0	3.6	140%	3.6	140%	10

tabel 4.7.2.1 : Resultaat van variëren van de C verdeling

Binnen één type nemen de  $\epsilon$  waarden toe naarmate  $(C_b - C_{opp})$  kleiner wordt en de C verdeling steiler. Deze toename is procentueel voor de verschillende typen gelijk.

De afname van de D50, naar het wateroppervlak toe, is gelijk bij gelijke  $(C_b - C_{opp})$ , ongeacht het type (fig. 4.53).

b) Korrel diameter variaties bij gelijke C verdeling

Verschillende korrel diameters zijn ingevoerd met een C verdeling van type I en met  $(C_b - C_{opp}) = 2.25$  (tabel 4.7.2.2).

Variatie in D waarden en gradering heeft geen invloed op het type van de  $\epsilon$  verdeling, wel variëren de  $\epsilon$  waarden over de gehele waterdiepte in geringe mate (fig. 4.52).

Variatie in gradering beïnvloedt de vorm van de D verdeling, de D50 waarde beïnvloedt de ligging ervan (fig. 4.54).

Een grotere D90/D10 verhouding, bij gelijke D50, geeft kleinere  $\epsilon$  waarden en een grotere afname van D50 naar het wateroppervlak toe.

Een kleinere D50 bij een ongeveer gelijke gradering leidt tot lagere  $\epsilon$  waarden (fig. 4.52), terwijl de afname van D50 naar het oppervlak toe vergelijkbaar is met I2.25 (fig. 4.54).

Een kleinere  $w_{50}$  op een bepaalde hoogte, bij gelijke  $dC/dz$ , leidt tot kleinere  $\epsilon$  waarden.

	$\epsilon_{0.25}$	$\Delta\%$	$\epsilon_{max}$	$\Delta\%$	afname D50
I2.25	0.21	--	6.3	--	20
I2.25 (D1)	0.20	- 5%	5.5	-13%	46
I2.25 (D2)	0.21	0	6.7	+ 6%	4
I2.25 (D3)	0.18	-14%	5.2	-18%	24
I2.25 (D4)	0.24	+14%	7.4	+18%	17

tabel 4.7.2.2 : Resultaat van variëren van korreldiameters

De veranderingen in de  $\epsilon$  waarden zijn gering, terwijl de verschillen in D50 verdeling groter zijn.

c) Valsnelheidsformule, afhankelijk van T [°C]

Het computerprogramma gebruikt een formule voor de valsnelheid van sedimentdeeltjes in water, met daarin de coëfficiënten die van toepassing zijn bij zoet water, 18°C.

Bij de in dit onderzoek gebruikte proeven is een gemiddelde watertemperatuur gemeten van 5°C (meetserie I) en 9°C (meetserie II). Om de invloed hiervan vast te stellen is een aantal  $\epsilon$  verdelingen berekend met de valsnelheidsformule voor zoet water, 10°C (tabel 4.7.2.3).

Met de formule voor 10°C worden lagere valsnelheden gevonden, wat bij een gelijke C verdeling tot lagere  $\epsilon$  waarden leidt (fig. 4.52). De D50 verdelingen veranderen nauwelijks.

	T °C	$\epsilon_0$	$\Delta\%$	$\epsilon_{max}$	$\Delta\%$
I2.25	18	0.2	--	6.3	--
I2.25*	10	0.19	-5%	5.7	-10%
II2.25	18	0.7	--	1.9	--
II2.25*	10	0.66	-6%	1.7	-11%
I2.25 (D1)	18	0.2	--	5.5	--
I2.25 (D1)*	10	0.19	-5%	4.9	-11%

tabel 4.7.2.3 : Resultaat van variëren van coëfficiënten in valsnelheidsformule

## HOOFDSTUK 5 : CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In dit hoofdstuk worden de conclusies uit dit onderzoek samengebracht. Tevens worden enkele aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek om beter inzicht te verkrijgen in de zandconcentratieverdeling over de waterdiepte, afhankelijk van randvoorwaarden.

### De concentratie fit procedure

Zowel in situaties met onregelmatige, niet brekende golven als onder onregelmatige brekende golven boven een "natuurlijke" zandige bodem geeft de fit procedure van Van de Graaff (1984) goede resultaten (bij driekwart van de metingen bedraagt de fout 2 à 4%). Voor 6 van de 94 concentratiemetingen geeft de procedure een fout groter dan 30%.

### De vorm van de $\epsilon$ verdeling

Bij een horizontale bodem en niet brekende, onregelmatige golven wordt een olijf-vormige (half holle, half bolle)  $\epsilon$  verdeling gevonden, met relatief hoge  $\epsilon$  waarden nabij het wateroppervlak. In deze waarden treedt variatie op, waarvoor geen verklaring is gevonden.

De vorm van deze  $\epsilon$  verdeling komt overeen met hetgeen in eerder onderzoek is gevonden (Van de Graaff (1988) n.a.v. metingen door Dette & Uliczka). Er is nog geen inzicht verkregen in het fysische proces, dat deze vorm veroorzaakt.

In situaties, waarin breken van golven optreedt, worden verschillende  $\epsilon$  verdelingen gevonden.

Voor een aantal overeenkomstige omstandigheden worden overeenkomstige vormen van de  $\epsilon$  verdeling gevonden, echter ook een aantal duidelijke uitzonderingen.

Het is niet gelukt om de verschillende  $\epsilon$  verdelingen te relateren aan karakteristieken van het brekingsproces, zoals bijvoorbeeld het brekertype.

De gevonden  $\epsilon$  verdelingen kunnen echter een goed aanknopingspunt vormen voor verder onderzoek.

### De afhankelijkheid van $\epsilon$ waarden van randvoorwaarden

De diffusiecoëfficiënten ( $\epsilon$  waarden) in de buurt van de bodem vertonen een stijgende tendens bij toenemende waarden van  $U_{sig}$ ,  $U_{sig}T_p/2\pi$ ,  $U_{sig}T_p/h_{gem}$  en  $H_{sig}/h_{gem}$  (welke als kenmerkende randvoorwaarden voor het onregelmatige golfveld beschouwd zijn). In de gevonden  $\epsilon$  waarden blijkt, met name door het breken van

Beste  
verbod  
lijkt mij  
nog met  
U<sub>sig</sub>

golven, aanzienlijke spreiding op te treden. Het is niet gelukt om hierin duidelijk inzicht te verkrijgen.

De gevonden afhankelijkheden tussen  $\epsilon$  waarden en randvoorwaarden moeten worden gezien als een aanzet voor verder onderzoek. De fase, waarin het onderzoek naar het voorspellen van zandconcentratie verdelingen zich bevindt, maakt het nog niet mogelijk om duidelijke conclusies te trekken.

De resultaten zijn bemoedigend en geven aanleiding tot nader onderzoek van de gevonden trends. Dit betekent:

- verdere variatie van randvoorwaarden ( $U_{sig}$ ,  $T_p$ ,  $H_{sig}$ ); enerzijds binnen hetzelfde bereik als in dit onderzoek, om te zien of de resultaten overeenkomen; anderzijds buiten het bovengenoemde bereik.
- nadere analyse van het brekingsproces (brekertypen) en de invloed hiervan op de gevonden trends.
- het betrekken van bodemvormen en de invloed van verschillende korrelgraderingen van het bodemmateriaal in de analyse.

#### Controle van de D50 van het sediment in suspensie

De overeenkomst tussen berekende en gemeten, over de diepte gemiddelde, D50 waarden van het sediment in suspensie is teleurstellend. De berekende waarden zijn over het algemeen te groot. (De consequentie is dat de betrouwbaarheid van de berekende  $\epsilon$  verdeling afneemt).

Het gebruiken van een onjuiste korrelgradering van het bodemmateriaal als invoer voor de berekening kan hiervoor als een belangrijke oorzaak worden aangemerkt. Het optreden van uitzeying van het bodemmateriaal tijdens de proeven maakte het moeilijk, een juiste korrelgradering te kiezen.

Het verdient aanbeveling om hieraan, bij een volgend onderzoek onder vergelijkbare omstandigheden met een "natuurlijke" zandige bodem, extra aandacht te besteden.

#### Het gebruik van meetgegevens uit de literatuur

Het gebruik van meetgegevens uit onderzoek, reeds door anderen verricht, is goed mogelijk en levert een besparing in tijd en geld op.

De geringe betrokkenheid met het verrichte onderzoek doet een deel van de tijdwinst teniet. (Dit geldt vooral voor studenten zonder ervaring met een dergelijk onderzoek.)



Het verdient zeker aanbeveling om, wanneer bij een volgend onderzoek gebruik kan worden gemaakt van meetgegevens die reeds uit onderzoek verkregen zijn, ook zelf enige ervaring op te doen in het verrichten van proeven.

## OVERZICHT GEBRUIKTE SYMBOLEN

<u>symbool</u>	<u>omschrijving</u>	<u>eenheid</u>
a, b, c	coëfficiënten in valsnelheidsformule	-
c(z,t)	instantane sedimentconcentratie op hoogte z boven de bodem	[g/l]
$\bar{c}(z)$	tijdsgemiddelde concentratie op hoogte z	[g/l]
C(z)	tijdsgemiddelde concentratie op hoogte z	[g/l]
$\bar{c}$	ensemblegemiddelde waarde concentratie	[g/l]
c'	erratische component concentratie	[g/l]
C <sub>b</sub>	bodem concentratie	[g/l]
C <sub>opp</sub>	oppervlakte concentratie	[g/l]
C	Chézy coëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]
D	korreldiameter	[μm]
D10	karacteristieke korreldiameter, 10 massa % is fijner	[μm]
D50	karacteristieke korreldiameter, 50 massa % is fijner	[μm]
D90	karacteristieke korreldiameter, 90 massa % is fijner	[μm]
D(i)	karacteristieke diameter van de korrels in de i-de fractie.	[μm]
D10(z)	karacteristieke korreldiameter op hoogte z	[μm]
D50(z)	karacteristieke korreldiameter op hoogte z	[μm]
D90(z)	karacteristieke korreldiameter op hoogte z	[μm]
D50 <sub>gem</sub>	D50 uit gemeten w50 (valkolom)	[μm]
D50 <sub>ber</sub>	gewogen gemiddelde uit de berekende D50 verdeling	[μm]
D <sub>m</sub>	moleculaire diffusiecoëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]
D <sub>ij</sub>	turbulente diffusiecoëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]
D <sub>ii</sub>	turbulente diffusiecoëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]
D <sub>zz</sub>	turbulente diffusiecoëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]
g	valversnelling	[m/s <sup>2</sup> ]
h, h <sub>gem</sub>	waterdiepte, gemiddelde waterdiepte	[m]
H	golfhoogte	[m]
H <sub>sig</sub>	significante golfhoogte (gemiddelde van hoogste 1/3 deel)	[m]
l <sub>e</sub>	karacteristieke mengweglengte	[m]
MO	oppervlak snelheidsspectrum	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
S <sub>x</sub>	sedimenttransport	[m <sup>2</sup> /s]

t	tijd	[s]
t'	tijdsduur waarover gemiddeld wordt	[s]
T	temperatuur	[°C]
T <sub>i</sub>	component diffusief transport	[kg/m <sup>2</sup> s]
T <sub>p</sub>	piekperiode	[s]
u(z,t)	instantane vloeistofsnelheid op hoogte z boven de bodem	[m/s]
$\bar{u}(z)$	tijdsgemiddelde snelheid op hoogte z	[m/s]
U <sub>gem</sub>	tijdsgemiddelde snelheid (retourstroom)	[m/s]
U <sub>sig</sub>	significante snelheid	[m/s]
U <sub>ε</sub>	karacteristieke snelheid	[m/s]
v <sub>i</sub>	snelheidscomponent	[m/s]
$\bar{v}$	ensemblegemiddelde waarde snelheid	[m/s]
$\bar{v}_z$	ensemblegemiddelde waarde snelheid in z richting	[m/s]
v'	erratische component snelheid	[m/s]
w	valsnelheid sedimentdeeltje	[m/s]
w(D)	valsnelheid van deeltje met diameter D	[m/s]
w <sub>50</sub>	valsnelheid van deeltje met diameter D <sub>50</sub>	[m/s]
w <sub>i</sub>	valsnelheid van deeltje met diameter D <sub>i</sub>	[m/s]
x	coördinaatrichting in lengte Deltagoot	[m]
x, y, z	coördinaten	[m]
Procedure van de Graaff, parabolische concentratie fit		
AG	verticale ordinaat	-
EX	exponent	-
PA1	integratieconstante	-
PA2	negatieve schaalfactor	-
PA3	horizontale ordinaat van top benaderingsparabool	-
C(a)	concentratie op z=a	[g/l]
z*	relatieve hoogte z/h boven bodem	[-]
Gevoeligheidsanalyse		
CI, CII, CIII	typen concentratie verdeling	-
εI, εII, εIII	typen diffusiecoëfficiënt verdeling	-
I <sub>2.25</sub>	type CI, met lnC <sub>b</sub> -lnC <sub>opp</sub> = 2.25	-
I <sub>1.5</sub>	type CI, met lnC <sub>b</sub> -lnC <sub>opp</sub> = 1.5	-
I <sub>1.5</sub>	type CI, met lnC <sub>b</sub> -lnC <sub>opp</sub> = 1.0 (idem voor CII en CIII)	-

I <sub>2.25</sub> (D1)	type CI, met korreldiameterverdeling D1 (idem met D2, D3, D4)	-
I <sub>2.25</sub> *	bepaald type, met valsnelheidsformule voor T=10°	-
I <sub>2.25</sub> (D1)*	bepaald type, met valsnelheidsformule voor T=10°	-
△	verschil of fout	
ε	diffusiecoëfficiënt	[m <sup>2</sup> /s]
ε <sub>s</sub> (z)	diffusiecoëfficiënt voor sediment op hoogte z	[m <sup>2</sup> /s]
ε <sub>0.025</sub>	diffusiecoëfficiënt voor z=0.025	[m <sup>2</sup> /s]
ε <sub>0.2</sub>	diffusiecoëfficiënt voor z=0.2	[m <sup>2</sup> /s]
ε <sub>h<sub>gem</sub>/10</sub>	diffusiecoëfficiënt voor z=h <sub>gem</sub> /10	[m <sup>2</sup> /s]
ε <sub>max</sub>	hoogste waarde die ε bereikt in een verdeling	[m <sup>2</sup> /s]
delta ε	(ε <sub>0.025</sub> - ε <sub>0.2</sub> )	[m <sup>2</sup> /s]
κ	constante van Von Karman	-
η(t)	instantane ligging van het wateroppervlak	[m]
V <sub>i</sub>	δ <sub>..</sub> /δx <sub>i</sub>	[1/m]

## LIJST VAN FIGUREN EN TABELLEN IN DE TEKST

### Figuren

- 2.1.1 Principeschets continuïteit.
- 2.1.2 Principeschets sedimenttransport.
- 2.2.1.1 Horizontale snelheid waterdeeltjes onder een golfdal en een golftop.
- 2.2.1.2 Stroombeeld boven een ribbel.
- 2.2.2.1 Concentratie onder spilling breakers en niet brekende golven.
- 2.3.1 Controlevolume.
- 2.3.2 Principe gradiënt-type transport.
- 2.4.1 Schematisch overzicht Procedure Van de Graaff.
- 2.4.1.1 Standaardvierkant.
- 4.1.1 Selectieboom.

### Tabellen

- 2.4.2.1 Coëfficiënten in de valsnelheidsformule.
- 3.1.1 Korrelkarakteristieken van de scheepsladingen zand.
- 4.6.1.1 D50 suspensiemateriaal, metingen onder niet brekende golven.
- 4.6.1.2 D50 suspensiemateriaal, metingen onder brekende golven.
- 4.6.1.3 Diameters bodemmateriaal meetserie I.
- 4.7.1 Ingevoerde diameter graderingen.
- 4.7.2.1 Resultaat van variëren van de C verdeling.
- 4.7.2.2 Resultaat van variëren van korreldiameters.
- 4.7.2.3 Resultaat van variëren van coëfficiënten in de valsnelheidsformule.

## INHOUDSOPGAVE BIJLAGEN

### Deel A : Figuren

- 2.1 Gemiddelde en standaardafwijking van 99 verschillende concentratiemetingen (Bosman 1986)
- 2.2 Invloed coëfficiënten in fitmethode.
- 3.1 Deltagoot.
- 3.2 Afzuigkam concentratiemeter.
- 3.3 a. Langsdoorsnede van de Deltagoot met locaties meetapparatuur (meetserie I).  
b. Detail brekerzone (meetserie I).
- 3.4 a. Uitgangsprofiel in Deltagoot (meetserie II).  
b. Detail profiel met verdediging (meetserie II).
- 3.5 Waterstands- en golfhoogteverloop in proef T4 (meetserie II).
- 3.6 Overzicht profielontwikkeling, a. Proef 1 (meetserie II)  
b. Proef 2
- 3.7 Overzicht profielontwikkeling, a. Proef 3 (meetserie II)  
b. Proef 5
- 3.8 Vergelijking profielen, a. na 0:36 uur (meetserie II)  
b. na 3:30 uur
- 3.9 Vergelijking profielen, a. na 9:30 uur (meetserie II)  
b. na 16:00 uur
- 3.10 Golfhoogteverloop, vergelijking metingen en berekende waarden (meetserie II).
- 3.11 Verschillende typen energiedichtheidsspectra (meetserie II).
- 4.1 Proeven door Dette & Uliczka (Van de Graaff, 1988)
  
- 4.2 Concentratie fits, test 1A t/m 5A.
- 4.3 idem, test 5B t/m 8B.
- 4.4 idem, test 9B t/m 9I.
- 4.5 idem, test 9J t/m 9L.
- 4.6 idem, test T1A t/m T1F3.
- 4.7 idem, test T1G1 t/m T1H5.
- 4.8 idem, test T2A t/m T2F3.
- 4.9 idem, test T2G1 t/m T2I1.
- 4.10 idem, test T2I2 t/m T2I6.
- 4.11 idem, test T3A t/m T3F3.
- 4.12 idem, test T3G1 t/m T3I1.
- 4.13 idem, test T3I2 t/m T3I6.
- 4.14 idem, test T4C1 t/m T4C6.
- 4.15 idem, test T5B1 t/m T5D3.

- 4.16 C en  $\epsilon$  verdeling over de diepte, test 9B, 9C, 9D.  
 4.17 idem, test 2A, 2B, 4B, 6A, 6B, 8B.  
 4.18 idem, test 3A, 3B, 5A, 5B, 9I.  
 4.19 idem, test 9F, 9J.  
 4.20 idem, test 9G, 9H, 9K, 9L.  
 4.21 idem, test T2I6, T3I6.  
 4.22 idem, test T1E1, T2E1, T3E1.  
 4.23 idem, test T1E2, T2E2, T2I5, T3I5.  
 4.24 idem, test T1H3, T3H4, T3I3.  
 4.25 idem, test T2H3, T2I4, T3H5.  
 4.26 idem, test T2F1, T2G4, T3H3, T3I4.  
 4.27 idem, test T1C, T1F1.  
 4.28 idem, test T3G4.  
 4.29 idem, test T3F1, T3G3, T5D2.  
 4.30 idem, test T2C, T3E2, T3I2.  
 4.31 idem, test T3F2, T5D3.  
 4.32 idem, test T1G4, T1H4, T2H4, T2I3.
- 4.33  $\epsilon$  verdelingen in langspoor Deltagoot (meetserie I).  
 4.34 idem, (meetserie II, proef T1).  
 4.35 idem, (meetserie II, proef T2).  
 4.36 idem, (meetserie II, proef T2).  
 4.37 idem, (meetserie II, proef T3).  
 4.38 idem, (meetserie II, proef T3).
- 4.39 Afhankelijkheid  $\epsilon$  waarden,  $U_{sig}$  -  $\epsilon$ ;  $z=0.2$ .  
 $U_{sig}T_p/2\pi$  -  $\epsilon$ ;  $z=0.2$ .  
 4.40 Afhankelijkheid  $\epsilon$  waarden,  $H_{sig}/h_{gem}$  -  $\epsilon$ ;  $z=0.2$ .  
 $H_{sig}/h_{gem}$  -  $\epsilon$ ;  $z=0.025$ .  
 4.41 Afhankelijkheid  $\epsilon$  waarden,  $U_{sig}T_p/h_{gem}$  -  $\epsilon$ ;  $z=0.2$ .  
 4.42 Afhankelijkheid delta  $\epsilon$  waarden,  $U_{sig}$  - delta  $\epsilon$ .  
 $U_{sig}T_p/2\pi$  - delta  $\epsilon$ .  
 4.43 Afhankelijkheid delta  $\epsilon$  waarden,  $U_{sig}T_p/h_{gem}$  - delta  $\epsilon$ .  
 $H_{sig}/h_{gem}$  - delta  $\epsilon$ .
- 4.44 Afhankelijkheid  $\epsilon$  waarden  $U_{sig}$  -  $\epsilon$ ;  $z=h_{gem}/10$ .  
 $U_{sig}T_p/2\pi$  -  $\epsilon$ ;  $z=h_{gem}/10$ .  
 4.45 Afhankelijkheid  $\epsilon$  waarden  $H_{sig}/h_{gem}$  -  $\epsilon$ ;  $z=h_{gem}/10$ .  
 4.46 Afhankelijkheid  $\epsilon$  waarden  $U_{sig}$  -  $\epsilon$ ;  $z=0.2$ .  
 (met metingen Dette & Uliczka).  
 Afhankelijkheid  $\epsilon$  waarden  $U_{sig}$  -  $\epsilon$ ;  $z=h_{gem}/20$ .  
 (met metingen Dette & Uliczka en Van de Graaff).
- 4.47 Controle D50 suspensiemateriaal.  
 4.48 Gezeefde D10-D50-D90 verdelingen en gemeten D50 waarden bodemmateriaal (meetserie I)

- 4.49 C en  $\epsilon$  verdeling, gevoeligheidsanalyse,  
I2.25, II2.25, III2.25
- 4.50 idem, I2.25, I1.5, I1.0.
- 4.51 idem, II2.25, II1.5, II1.0.
- 4.52 idem, III2.25, III1.5, III1.0.
- 4.53 a.  $\epsilon$  verdelingen, gevoeligheidsanalyse,  
I2.25 en I2.25(D1, D2, D3, D4).  
b. idem, I2.25 en II2.25 en I2.25(D1) bij 10°C en 18°C.
- 4.54 a. D50 verdelingen over de waterdiepte,  
gevoeligheidsanalyse, I2.25, II2.25, III2.25  
b. idem, I2.25, I1.5, I1.0.
- 4.55 idem, I2.25 en I2.25(D1, D2, D3, D4).

#### Deel B : tabellen

- 3.1 Overzicht meetgegevens van meetserie I.
- 3.2 Gemeten concentraties (meetserie I).
- 3.3 Overzicht meetgegevens van meetserie II.
- 3.4 Gemeten concentraties (meetserie II).
- 3.5 Overzicht D50 zandmonsters (meetserie II).
- 3.6 Overzicht w50 suspensie monsters (meetserie II).
- 4.1 Indeling metingen, en procentuele fouten.
- 4.2 Berekende lognormale diameter verdelingen.
- 4.3 Overzicht van de coëfficiënten van de fit procedure.
- 4.4 Overzicht  $\epsilon$  waarden en randvoorwaarden op  $z=0.2m$  en  $z=0.025m$ .
- 4.5 Overzicht  $\epsilon$  waarden en randvoorwaarden op  $z=h_{gem}/10$ .

#### Deel C : Uitvoer computerprogramma

Per test staan achtereenvolgens vermeld:

- berekende bodemconcentratie.
- som van de kwadraten van de afwijkingen tussen gemeten en berekende concentraties.
- gemiddelde procentuele fout per punt.
- gemeten en berekende concentratie en procentuele fout op de hoogten van de meetpunten.
- berekende  $\epsilon$  verdeling, uitgaande van uniform materiaal (D50)
- berekende  $\epsilon$  verdeling, uitgaande van D10-D50-D90.
- D10-D50-D90 verdeling over de waterdiepte.

#### Deel D : Appendices

App. 1 : Brekertypen.

App. 2 : Vergelijking  $\epsilon$  waarden met model Van Rijn en Meijer.



## LITERATUUR

- Battjes, J.A. (1988): Surf-Zone Dynamics, Ann. Rev. Fluid Mech. 20: pp. 257-93.
- Booij, R. (1986): Turbulentie in de waterloopkunde, Collegedictaat b82, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
- Bosman, J.J. ; Velden, E.T.J.M. van der ; Hulsbergen, C.H. (1987): Sediment Concentration Measurement by Transverse Suction, Coastal Engineering, Vol. 11, No. 4; Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Graaff, J. van de (1984): Concentratieverdeling over de hoogte, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
- Graaff, J. van de (1988): Sediment concentration due to wave action, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
- Heijboer, D. (1988): Zandconcentratie- en strommsnelheidsverdelingen onder golven en stroom, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
- Massie, W.W. (1986): Coastal Engineering Volume I and II, Collegedictaat f11A, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.
- Nielsen, P. (1984): Field measurements of time-averaged suspended sediment concentrations under waves, Coastal Engineering, Vol. 8, No. 1; Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Roelvink, J.A. (1988): Large scale cross-shore transport tests, Delft Hydraulics Laboratory, Report H596.
- Rijn, L.C. van ; Meijer, K. (1986): Three-dimensional modelling of suspended sediment transport for currents and waves, Delft Hydraulics Laboratory, Report H461/Q250/Q422.
- Steetzel, H.J. (1987): Modelonderzoek duinvoetverdedigingen, systematisch onderzoek naar de werking van duinvoetverdedigingen; modelonderzoek op grote schaal in de Deltagoot, Waterloopkundig Laboratorium Delft, rapport H298.

Steijn, R.C. (1986): Het voorspellen van zandconcentraties onder lopende golven en stroming, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.

Velden, E.T.J.M. van der (1987): Sedimentsuspensie in een oscillerende waterbeweging vlak boven een zandbed, Faculteit der Civiele Techniek, Technische Universiteit Delft.

