
Bezinken van zand in hopperzuigers

Invloed van turbulentie en korrelverdeling

I. Tekst

TCB-Rapport 2a - 98

Opgesteld voor de Vereniging van waterbouwers in Bagger-,
Kust en Oeverwerken (VBKO)

A. de Klerk
J.M. Meulepas
Ir. C. van Rhee
Dr. ir. C. Kranenburg

Bezinken van zand in hopperzuigers

Invloed van turbulentie en korrelverdeling

I. Tekst

TCB-Rapport 2a

Opgesteld voor de Vereniging van waterbouwers in Bagger-,
Kust en Oeverwerken (VBKO)

1998

A. de Klerk
J.M. Meulepas
Ir. C. van Rhee
Dr. ir. C. Kranenburg

Technische Universiteit Delft
Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Vloeistofmechanica

SAMENVATTING

Voor het optimaal beladen van sleepopperzuigers is het belangrijk om inzicht te hebben in de processen die plaats hebben in het beun van een sleepopperzuiger. Een van de deel-processen is het bezinken van zand in een hoog geconcentreerd zandwater mengsel onder invloed van turbulentie.

Het doel van dit rapport is om dit bezinkproces in kaart te brengen. Om dit doel te bereiken zijn er proeven uitgevoerd in een proefopstelling waarin bezinkproeven zijn uit te voeren. Gedurende de proeven is de mate van turbulentie in de kolom, de beginconcentratie van het mengsel en gradatie van het zand gevarieerd. Hierdoor is inzicht verkregen in de invloed van beide parameters op het bezinkgedrag van verschillende zandsoorten.

Tijdens de proeven worden de concentraties op 12 punten over de hoogte gemeten. Uit deze data is vervolgens een concentratieprofiel over de hoogte bepaald. Tenslotte is er gekeken in hoeverre deze data overeenkomen met het gemaakte computermodel dat dit proces kan simuleren.

Uit de proeven in water die dienden om het turbulentieniveau in kaart te brengen kwamen de volgende zaken naar voren:

- Uit de proefresultaten is gebleken dat de turbulentie die in de kolom wordt opgewekt redelijk homogeen over de hoogte verdeeld is en in de x- en z-richting van dezelfde orde grootte is.

De belangrijkste conclusies, die uit de proeven met de uniforme zandfracties volgen, zijn:

- De werkelijke karakteristieke korreldiameter verschilt aanzienlijk van de volgens de leverancier opgegeven karakteristieke korreldiameter.
- De verticale turbulente snelheidsintensiteit ($V_{z,rms}$) blijkt onafhankelijk van de concentratie te zijn en afhankelijk van het turbulentieinstellingen.
- De gemeten valsnelheden verschillen duidelijk van de volgens theorieën berekende valsnelheden. De gecombineerde theorie van Ruby en Al-Dibouni geeft de beste benadering van de meetresultaten.
- De turbulente diffusiecoëfficiënt ϵ is niet eenvoudig uit de meetdata te berekenen.
- Uit het door ons gemaakte model volgt dat de beginconcentratie, de zandsoort en het turbulentieniveau van invloed zijn op de grootte van de turbulente diffusiecoëfficiënt.

De proeven met de min of meer natuurlijke zandverdeling maakten het volgende duidelijk:

- De valsnelheid van de karakteristieke korrels van het mengsel is ongeveer gelijk aan die van de karakteristieke korrels van een uniforme zandfractie met gelijke karakteristieke korrelgrootte.
- Een relatief hoog turbulentieniveau in de kolom heeft tot gevolg dat de ontmenging minder groot zal zijn. Ook leidt een hoger turbulentieniveau tot een tragere ontmenging.
- De beginconcentratie is niet van invloed op de mate van ontmenging. Wel leidt een hogere beginconcentratie tot een verlaging van de snelheid waarmee de ontmenging plaatsvindt.

De conclusie is dat het beschrijven van het bezinkgedrag van korrels in een hooggeconcentreerd zand-watermengsel wel mogelijk is. Er is echter verdere analyse van de data nodig en er zijn eventueel meer proeven nodig om het verband tussen het turbulentieniveau (uitgedrukt in bijvoorbeeld V_{rms}) en de turbulente diffusiecoëfficiënt (ε) beter te kunnen beschrijven. Het model kan verder verbeterd worden door ε niet constant over de hoogte te veronderstellen zoals dat bij het huidige model het geval is.

SYMBOLENLIJST

Grootheden

Symbol	Grootheid	Eenheid
δ	Dikte van grenslaag	m
φ	Hoek	rad
α	Hoek	$^{\circ}$
ε	Turbulente diffusiecoëfficiënt	m^2 / s
Ψ	Vormfactor	-
Δt	Tijdstap	s
Δz	Stapgrootte	m
a	Versnelling	m / s^2
A	Oppervlakte	m^2
B	Breedte	m
C	Concentratie	-
C_d	Sleepfactor	-
D	Diameter	m
$d\alpha$	Hoek van uitslag	$^{\circ}$
D_{50}	Karakteristieke korreldiameter	m
E	Energie	$\text{J} = \text{N m}$
E_{dis}	Gedissipeerde energie per m^3 per s	$\text{J} / \text{m}^3 / \text{s}$
F	Kracht	N
H	Energiehoogte	m
H, h, z	Hoogte	m
l	Karakteristieke lengteschaal	m
M	Moment	N m
n	Poriënvolume	-
n	Schaalfactor (prototype / model)	-
P	Vermogen	J / s
Q	Debiet	m^3 / s
R	Straal van de kolom	m
Re	Reynoldsgetal	-
t	Tijd	s
T	Temperatuur	$^{\circ}\text{C}$
u, v	Snelheid	m / s
V	Inhoud	m^3
V	Voltage	Volt
v_{rms}	Root Mean Square – waarde van snelheid	m / s
w	Valsnelheid	m / s
W	Arbeid	N m
w_0	Ongestoorde valsnelheid	m / s
w_s	Gestoorde valsnelheid	m / s
T	Periode	s
φ	Hoek	rad
ν	Kinematische viscositeit	m^2 / s
ρ	Dichtheid	kg / m^3

Constanten:

Symbol	Constante	Waarde
Δ	Relatieve dichtheid = $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$	1,65
ρ_s	Dichtheid zand (gemiddeld)	2650 kg / m ³
ρ_w	Dichtheid water (gemiddeld)	1000 kg / m ³
Ψ_{zand}	Vormfactor voor zand	$\approx 0,7$
g	Valversnelling (gemiddeld in Nederland)	9,81 m / s ²
π	Getal pi	3,14159

INHOUDSOPGAVE

SAMENVATTING	I
SYMBOLENLIJST	III
INHOUDSOPGAVE	V
1. INLEIDING	1
1.1. PROBLEEMSTELLING	1
1.2. DOELSTELLING	1
1.3. STRUCTUURBESCHRIJVING	1
2. ONDERZOEK B.S. RUIJG EN A.C. RUNGE	3
2.1. INLEIDING	3
2.2. SAMENVATTING VAN HET RAPPORT VAN B.S. RUIJG EN A.C. RUNGE	3
3. MODELFORMING	5
3.1. INLEIDING	5
3.2. DISCRETISEREN CONVECTIE DIFFUSIEVERGELIJKING	5
3.3. RANDVOORWAARDEN	7
3.4. STABILITEIT VAN HET MODEL	7
3.5. OPBOUW COMPUTERMODEL	8
4. LITERATUURONDERZOEK	11
4.1. INLEIDING	11
4.2. TURBULENTIE	11
4.2.1. <i>Kenmerken van turbulentie</i>	11
4.2.2. <i>Soorten turbulentie</i>	12
4.2.3. <i>Meetbare grootheden</i>	14
4.2.4. <i>Schaalregels turbulentie</i>	15
4.2.5. <i>Turbulentie in het beun</i>	17
4.2.6. <i>Turbulentie in de proefopstelling</i>	20
4.3. UNIFORME EN NIET UNIFORME ZAND ZANDFRACTIES	23
4.3.1. <i>Ongestoorde valsnelheid individuele korrel</i>	23
4.3.2. <i>Invloed concentratie op de bezinking</i>	27
4.3.3. <i>Invloed korrelverdeling op bezinking</i>	30
4.3.4. <i>Invloed van turbulentie op het bezinkproces</i>	39
4.4. AFTAPPEN VAN MONSTERS UIT DE KOLOM	40
4.4.1. <i>Monstergrootte</i>	41
4.4.2. <i>Uitstroomsnelheid</i>	42
4.4.3. <i>Bemonsteringsfouten</i>	43
5. BESCHRIJVING PROEFOPSTELLING	45
5.1. BESCHRIJVING OUDE PROEFOPSTELLING	45
5.1.1. <i>Algemene omschrijving van de proefopstelling</i>	45
5.1.2. <i>Meetapparatuur</i>	46
5.1.3. <i>Mengvat en mixer</i>	49
5.1.4. <i>Leidingstelsel</i>	49
5.1.5. <i>Centrifugaalpomp</i>	50
5.1.6. <i>Kolom</i>	50
5.1.7. <i>Rooster</i>	50
5.1.8. <i>Aandrijving kolom</i>	50
5.2. AANPASSINGEN PROEFOPSTELLING	50
5.2.1. <i>Aanpassing aandrijving</i>	51
5.2.2. <i>Aanpassing rooster</i>	55
5.2.3. <i>Aanbrengen aftappunten</i>	55

6. PROEFUITVOERING	57
6.1. INLEIDING	57
6.2. PROEFUITVOERING TURBULENTIE	57
6.2.1. <i>Proefuitvoering zonder rooster</i>	57
6.2.2. <i>Proefuitvoering met het oude rooster</i>	58
6.2.3. <i>Proefuitvoering met het nieuwe rooster</i>	59
6.3. PROEFUITVOERING UNIFORME ZANDFRACTIE	59
6.3.1. <i>Praktische uitvoering van de proeven</i>	60
6.3.2. <i>Meetplan</i>	60
6.3.3. <i>Bepaling beginconcentratie</i>	61
6.3.4. <i>Bepaling poriënvolume</i>	62
6.3.5. <i>Bepaling korrelverdeling</i>	64
6.4. PROEFUITVOERING VERSCHILLENDE ZANDFRACTIES	65
6.4.1. <i>Niet uniforme zandfractie</i>	65
6.4.2. <i>Aftappen van monsters</i>	65
7. ANALYSE VAN METINGEN EN MODEL	67
7.1. ANALYSE PROEVEN TURBULENTIE	67
7.1.1. <i>Analyse proeven zonder rooster</i>	67
7.1.2. <i>Analyse proeven met het oude rooster</i>	69
7.1.3. <i>Analyse proeven met het nieuwe rooster</i>	71
7.2. ANALYSE PROEVEN UNIFORM ZAND	72
7.2.1. <i>Zeefkrommen controleren</i>	72
7.2.2. <i>Werkelijke D_{50}</i>	72
7.2.3. $V_{z,rms}$	73
7.2.4. <i>Concentratieverloop in de tijd</i>	75
7.2.5. <i>Valsnelheid</i>	77
7.2.6. <i>Bepaling van epsilon</i>	78
7.2.7. <i>Controle door model</i>	80
7.3. ANALYSE PROEVEN NIET UNIFORM ZAND	81
7.3.1. <i>Zeefkromme van het niet uniforme mengsel</i>	81
7.3.2. <i>Werkelijke D_{50}</i>	81
7.3.3. $V_{z,rms}$	81
7.3.4. <i>Concentratieverloop in de tijd</i>	82
7.3.5. <i>Valsnelheid</i>	82
7.3.6. <i>Bepaling van epsilon</i>	82
7.3.7. <i>Analyse van de afgetapte monsters</i>	82
7.3.8. <i>D_{50} van de monsters</i>	84
8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	89
8.1. CONCLUSIES	89
8.1.1. <i>Conclusies met betrekking tot watermetingen</i>	89
8.1.2. <i>Conclusies met betrekking tot uniform zand</i>	89
8.1.3. <i>Conclusies met betrekking tot verschillende zandfracties</i>	90
8.2. AANBEVELINGEN	91
8.2.1. <i>Aanbevelingen ten aanzien van de proefopstelling</i>	91
8.2.2. <i>Aanbevelingen ten aanzien van een vervolgonderzoek</i>	96
LITERATUUR	99

1. INLEIDING

1.1. Probleemstelling

In december 1996 is door een van de auteurs, ir. C. van Rhee, een promotieonderzoek gestart in opdracht van de VBKO (Vereniging van waterbouwers in Bagger-, Kust- en Oeverwerken). Dit onderzoek bestaat uit een experimenteel deel met de titel 'Experimenteel onderzoek naar sedimentatie in beunen' en een theoretisch deel met de titel 'Optimale belading van sleephopperzuigers'. Het doel van dit onderzoek is het streven naar een zo laag mogelijk overvloeiverlies bij het beladen van sleephopperzuigers. Naar verwachting zal dit promotie-onderzoek in december 2000 zijn afgerond.

Als onderdeel van dit onderzoek zijn in maart 1997 de heren B.S. Ruijg en A.C. Runge gestart met een afstudeerwerk dat als doel had het ontwerpen van een proefopstelling waarin het eendimensionale bezinkgedrag van hooggeconcentreerde zandwatermengsels onder turbulente omstandigheden gemodelleerd kan worden. Ook zijn er door hen een beperkt aantal proeven uitgevoerd met deze opstelling.

Voor het trekken van duidelijke conclusies was het noodzakelijk dat er meer meetdata beschikbaar kwamen. Dit resulteerde in het vervolgonderzoek dat startte in oktober 1997 en duurde tot mei 1998. Het rapport dat voor u ligt, is een verslag van dit vervolgonderzoek.

1.2. Doelstelling

Het doel van dit onderzoek is het bestuderen van het bezinkgedrag van zand in een hopperzuiger bij hoge concentraties onder invloed van turbulentie en bij verschillende korrelverdelingen.

Hiervoor zijn eerst de turbulente eigenschappen in de proefopstelling bekeken. Vervolgens zijn 3 verschillende uniforme zandfracties bestudeerd bij 4 concentraties en 5 turbulentieniveaus. Tenslotte is er een mengsel gemaakt van deze afzonderlijke fracties en dit mengsel is beproefd bij 3 concentraties en 5 turbulentieniveaus. Om bij deze laatste serie verschijnselen van ontmenging in kaart te kunnen brengen zijn er op verschillende hoogtes en verschillende tijdstippen monsters afgetapt.

1.3. Structuurbeschrijving

De opbouw van dit rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 is een samenvatting opgenomen van het rapport van B.S. Ruijg en A.C. Runge. Dit is gedaan om de lezer inzicht te geven in hun onderzoek.

In hoofdstuk 3 wordt er gebruikmakend van het programma 'MATLAB' een verbeterde versie van het simulatiemodel van de heren B.S. Ruijg en A.C. Runge gepresenteerd.

De literatuur, die nodig is om de verschijnselen die zich in de kolom afspelen goed te begrijpen, is verzameld in hoofdstuk 4. Een beschrijving van de proefopstelling is terug te vinden in hoofdstuk 5, waarna in hoofdstuk 6 de proefuitvoering aan bod komt. Een analyse van de meetresultaten volgt hierna in hoofdstuk 7. Hoofdstuk 8 bevat conclusies over het bezinken van zand in een hooggeconcentreerd zand-watermengsel onder turbulente omstandigheden, tevens staan in dit hoofdstuk aanbevelingen voor een vervolgstudie en aanbevelingen om de proefopstelling te verbeteren.

Omdat de verzamelde meetdata een zeer grootte omvang heeft is het opnemen van de data in dit rapport ondoenlijk. Er is daarom besloten om de data op een cd-rom op te nemen. De cd-rom heeft de naam "Meetdata, Bezinken van zand in hopperzuigers". Ook het aantal grafieken, dat uit de meetdata volgde, is te groot om in het rapport zelf op te nemen. Een aantal belangrijke grafieken is opgenomen in deel II van dit rapport, Bijlagen. Een volledig overzicht van alle grafieken is te vinden in de grafiekenbundel "Grafieken-bundel, Bezinken van zand in hopperzuigers".

2. ONDERZOEK B.S. RUIJG EN A.C. RUNGE

2.1. Inleiding

In dit hoofdstuk vindt u een samenvatting van het afstudeerwerk van B.S. Ruijg en A.C. Runge (R&R). Deze scriptie heeft de titel 'Eén-dimensionale beschouwing van de bezinking van hooggeconcentreerde zandwatermengsels onder turbulente omstandigheden' [lit. 23].

Dit onderzoek is gestart in maart 1997 en heeft onder andere geresulteerd in de door ons gebruikte proefopstelling. Vooral van de uitgebreide literatuurstudie die door R&R is verricht is door ons dankbaar gebruik gemaakt. Verder danken wij R&R voor het helpen oplossen van praktische problemen met de proefopstelling.

De samenvatting (paragraaf 2.2) is rechtstreeks overgenomen uit de conceptversie van hun rapport.

2.2. Samenvatting van het rapport van B.S. Ruijg en A.C. Runge

De concentratie van het opgezogen zandwatermengsel en de mate van turbulentie in een beun van een sleepopperzuiger zijn van grote invloed op de snelheid van bezinken van het zandwatermengsel in het beun. Om de kennis van deze invloedsfactoren op de snelheid van bezinken te vergroten is een proefopstelling gebouwd waarin de bezinking van zandwatermengsels onder turbulente omstandigheden is bestudeerd. De proefopstelling bestaat uit een kolom waarin een vast rooster is geplaatst. Via een speciaal ontworpen leidingstelsel kunnen hooggeconcentreerde zandwatermengsels in de kolom gepompt worden. Door de kolom in zijn geheel heen en weer te draaien wordt in de kolom turbulentie opgewekt. In deze kolom zijn bij verschillende concentraties proeven gedaan, waarbij ook de mate van turbulentie is gevarieerd. Er zijn proeven gedaan met twee zandfracties, één met $D_{50}=80\mu\text{m}$ en één met $D_{50}=270\mu\text{m}$.

Na uitvoering van de proeven is bekeken of de theorie voor de bezinking van hooggeconcentreerde zandwatermengsels (hindered settling) en de theorie voor bezinking onder invloed van turbulentie (gradiënt-type transport) gecombineerd konden worden om de bezinking in de kolom te beschrijven. Dit is gedaan door deze theorieën in een discreet model om te schrijven en de resultaten uit het model te vergelijken met de proefresultaten. Hierbij is eerst een constante turbulente diffusiecoëfficiënt verondersteld. Later is de turbulente diffusiecoëfficiënt als functie van de concentratiegradiënt verondersteld. Hiervoor is aan de hand van de proeven een verband bepaald.

Uit de vergelijking tussen de numerieke modellen en de proefresultaten kan geconcludeerd worden dat een combinatie van de theorie voor de bezinking van hooggeconcentreerde zandwatermengsels en de theorie voor bezinking onder invloed van turbulentie een goede beschrijving van de bezinking in de kolom geeft. Tevens is gebleken dat vooral bij hoge concentraties betere resultaten worden verkregen wanneer een turbulente diffusiecoëfficiënt als functie van de concentratiegradiënt wordt verondersteld.

3. MODELVORMING

3.1. Inleiding

In hoofdstuk 3 is beschreven hoe door middel van een discretisatie van het convectie diffusiemodel een simulatieprogramma is geschreven in MATLAB [lit. 4]. Dit programma is geschreven om later in deze studie een vergelijking te kunnen maken tussen de proefresultaten en de resultaten zoals die volgen uit het simulatieprogramma.

Dit model is gebaseerd op het model zoals dat door R&R is gemaakt [lit. 23].

3.2. Discretiseren convectie diffusievergelijking

Het model is gebaseerd op de convectie diffusie vergelijking. Deze vergelijking ziet er als volgt uit:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(w(C) \cdot C)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (3.1)$$

De z-richting is hierin positief naar beneden, de valsnelheid 'w' is een functie van de concentratie en de turbulente diffusie coëfficiënt 'ε' wordt constant verondersteld.

Bij het discretiseren van deze vergelijking is gebruik gemaakt van de numerieke aanpak zoals die wordt uiteengezet in het collegedictaat B84 [lit. 28].

De eerste term in deze vergelijking wordt gebruik makend van 'Euler expliciet' gediscetiseerd. Hieruit volgt de term:

$$\frac{C_j^{n+1} - C_j^n}{\Delta t} \dots\dots\dots (3.2)$$

Ook voor de discretisatie in de ruimte is gebruik gemaakt van 'Euler expliciet'. De tweede term ziet er nu als volgt uit:

$$\frac{w_{j+1}^n \cdot C_{j+1}^n - w_{j-1}^n \cdot C_{j-1}^n}{2\Delta z} \dots\dots\dots (3.3)$$

Voor de discretisatie van de diffusie term wordt de turbulente diffusie-coëfficiënt constant verondersteld over de hoogte. Dit leidt tot de volgende term:

$$\varepsilon \frac{C_{j-1}^n - 2 \cdot C_j^n + C_{j+1}^n}{\Delta z^2} \dots\dots\dots (3.4)$$

De totale convectie diffusie vergelijking is nu gediscetiseerd en ziet er als volgt uit:

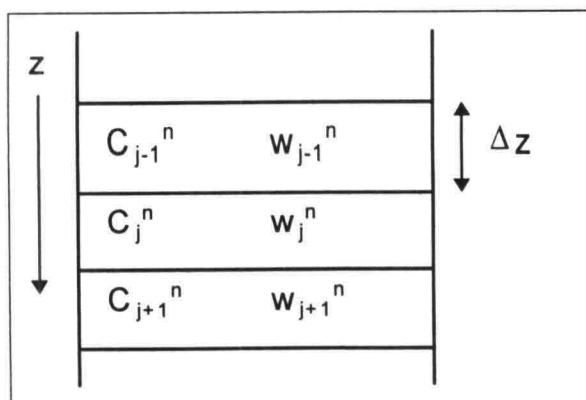
$$\frac{C_j^{n+1} - C_j^n}{\Delta t} + \frac{w_{j+1}^n \cdot C_{j+1}^n - w_{j-1}^n \cdot C_{j-1}^n}{2\Delta z} = \varepsilon \frac{C_{j-1}^n - 2 \cdot C_j^n + C_{j+1}^n}{\Delta z^2} \dots\dots\dots (3.5)$$

Hierin geldt:

- Δt = Tijdstap [s]
- Δz = Stapje in de hoogte [m]
- C_j^n = Concentratie van een cel op tijdstip 't', positie 'z' [-]
- C_j^{n+1} = Concentratie van een cel op tijdstip 't+ Δt ', positie 'z' [-]
- C_{j+1}^n = Concentratie van een cel op tijdstip 't', positie 'z+ Δz ' [-]
- C_{j-1}^n = Concentratie van een cel op tijdstip 't', positie 'z- Δz ' [-]
- w_{j+1}^n = Valsnelheid van de korrels op tijdstip 't', positie 'z+ Δz ' [m/s]
- w_{j-1}^n = Valsnelheid van de korrels op tijdstip 't', positie 'z- Δz ' [m/s]

De valsnelheden zijn bepaald met behulp van de empirische benadering van Ruby [lit.22] (paragraaf 4.3.1).

De volgende figuur (3.1) geeft een schema van de cellen met de daarin geldende concentraties en valsnelheden.



Figuur 3.1
 Schema cellen

3.3. Randvoorwaarden

Het model wordt aan de bovenkant en aan de onderkant begrensd door randvoorwaarden. Ook gelden er eisen met betrekking tot het inzanden van het model.

Voor de bovenrand geldt dat er geen transport naar boven kan plaatsvinden. R&R hebben deze randvoorwaarde uitgewerkt in de bijlage van hun rapport [lit.23]. Het schema van de bovenste cel ziet er als volgt uit:

$$\frac{C_j^{n+1} - C_j^n}{\Delta t} + \frac{w_j^n \cdot C_j^n + w_{j+1}^n \cdot C_{j+1}^n}{2\Delta z} = \varepsilon \frac{C_{j+1}^n - C_j^n}{\Delta z^2} \dots\dots\dots (3.6)$$

Voor de onderste cel geldt dat er geen transport naar beneden zal plaatsvinden. Voor de onderste cel geldt het volgende schema:

$$\frac{C_j^{n+1} - C_j^n}{\Delta t} + \frac{w_{j-1}^n \cdot C_{j-1}^n + w_j^n \cdot C_j^n}{2\Delta z} = \varepsilon \frac{C_{j-1}^n - C_j^n}{\Delta z^2} \dots\dots\dots (3.7)$$

Voor de exacte afleiding van deze formules verwijzen wij u graag door naar het afstudeerwerk van R&R [lit. 23].

Om het model te laten inzanden zijn de volgende voorwaarden opgesteld:

- Als $C_n > C_{\max}$, dan geldt : $C_n = C_{\max}$
- Als $C_{n+1} \geq C_{\max}$, dan is er geen transport meer naar beneden, dus geldt vgl. 3.7

C_{\max} = De maximaal optredende concentratie in een cel [-]

3.4. Stabiliteit van het model

Om de stabiliteit van dit model te controleren is het van belang dat we formule 3.5 omschrijven tot:

$$C_j^{n+1} = C_{j-1}^n \left\{ \frac{\Delta t \cdot w_{j-1}^n}{2 \cdot \Delta z} + \frac{\Delta t \cdot \varepsilon}{\Delta z^2} \right\} + C_j^n \left\{ 1 - \frac{2 \cdot \Delta t \cdot \varepsilon}{\Delta z^2} \right\} + C_{j+1}^n \left\{ \frac{-\Delta t \cdot w_{j-1}^n}{2 \cdot \Delta z} + \frac{\Delta t \cdot \varepsilon}{\Delta z^2} \right\} \quad (3.8)$$

Alle drie de termen in formule 3.8 moeten positief zijn om een stabiel model te hebben.

De eerste term is een optelling van allemaal positieve elementen en levert dus altijd een positief resultaat op.

De laatste term leidt tot de eerste stabiliteitseis:

$$\Delta z \leq \frac{2 \cdot \varepsilon}{w_{j-1}^n} \dots\dots\dots (3.9)$$

ε = Turbulente diffusiecoëfficiënt (constant) [m²/s]
 w_{j-1}^n = Valsnelheid van de korrels op tijdstip 't', positie 'z+Δz' [m/s]

Deze valsnelheid zal maximaal gelijk zijn aan de ongestoorde valsnelheid van één korrel bij de geldende temperatuur.
 Uit de middelste term is nog een tweede eis ten aanzien van de stabiliteit af te leiden.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta z^2}{2 \cdot \varepsilon} \dots\dots\dots (3.10)$$

3.5. Opbouw computermodel

Het geschreven simulatiemodel in 'MATLAB' is als volgt opgebouwd. Een volledige listing van het programma is te vinden op de cd-rom (directory D.1, Algemene bestanden).

Eerst worden de constanten gedefinieerd.

- Kolom hoogte = 1,50 [m]
- Valversnelling = 9.81 [m/s²]
- Relatieve dichtheid = 1.65 [-]

Vervolgens vraagt het programma om een aantal variabelen.

- T = Temperatuur [°C]
 met de temperatuur wordt de viscositeit berekend.
- D₅₀ = Korreldiameter [μm]
 met de korreldiameter (en viscositeit) wordt de ongestoorde valsnelheid (w₀), het Reynoldsgetal en de factor 'n' (Hindered Settling) uitgerekend.
- C_{max} = Maximale concentratie [%]
 bij deze concentratie moet het model gaan inzanden.
- C₀ = Beginconcentratie [%]
 deze concentratie moet groter zijn dan '0' en kleiner dan C_{max}.
- ε = Turbulente diffusiecoëfficiënt [m²/s]
 de waarde mag liggen tussen de '0' en '0.0001' m²/s.

- Δz = Stapgrootte [m]
deze waarde moet met het oog op formule (3.9) kleiner zijn dan $2\varepsilon / w_0$ in verband met de stabiliteit.
- Δt = Tijdstap [s]
deze waarde moet kleiner zijn dan $\Delta z^2 / 2\varepsilon$ (zie formule 3.10).
De hoogste nauwkeurigheid wordt verkregen bij een waarde van $\Delta z^2 / 6\varepsilon$.
- T_{\max} = Eindtijd simulatie [s]
dit is het tijdstip waarop de simulatie moet eindigen.

Het programma zal na iedere vraag kijken of de ingevoerde parameters tussen de geldende grenzen ligt. Zo niet dan wordt de vraag herhaald. Na het invoeren van alle parameters toont het programma alle waarden en vraagt of deze juist zijn. Zo niet dan start de invoerroutine opnieuw.

Nu start het eigenlijke programma. Dit programma werkt met een matrix waarin in de kolommen telkens de verschillende concentraties over de hoogte staan bij een bepaald tijdstip. De volgende kolom geeft concentraties op het volgende tijdstip (Δt later in de tijd) weer.

- Het programma zal om te beginnen in de eerste kolom over de hoogte de beginconcentratie (C_0) neerzetten.
- Voor de bovenste cel in de tweede kolom wordt nu vergelijking 3.6 gebruikt.
- Hierna wordt voor de volgende cellen in deze kolom (tot de laatste) vergelijking 3.5 gebruikt.
- Mocht voor een van deze cellen gelden dat in de cel eronder een concentratie heerst van C_{\max} of meer, dan wordt er gebruik gemaakt van vergelijking 3.7.
- De laatste cel in deze kolom wordt berekend met vergelijking 3.7.
- Op deze wijze is de tweede kolom gevuld, dit principe wordt herhaald tot de eindtijd van de simulatie is bereikt.

Na dit rekenwerk zal het programma de gegevens grafisch weergeven in een figuur. In deze figuur zal de concentratie als functie van de tijd worden weergegeven. Dit gebeurt op de hoogtes waarop in de proefopstelling ook daadwerkelijk gemeten is. Op deze wijze is het goed mogelijk een vergelijking te maken tussen de resultaten van het simulatieprogramma en de meetresultaten.

Afsluitend vraagt het programma of de gebruiker misschien alleen met ' ε ' wil variëren. Als dit het geval is dan kan de gebruiker een nieuwe waarde voor ' ε ' invoeren, gevolgd door een nieuwe tijdstap en staphoogte. Deze laatste twee zullen ervoor moeten zorgen dat het model stabiel blijft.

4. LITERATUURONDERZOEK

4.1. Inleiding

In hoofdstuk 4 zijn samenvattingen gemaakt van het door ons uitgevoerde literatuuronderzoek. Er is gebruik gemaakt van een grote hoeveelheid literatuur waarnaar regelmatig is verwezen en het onderzoek van R & R.

In de paragrafen 4.2, 4.3 en 4.4 is achtereenvolgens de theorie over turbulentie, uniform en niet uniform zand en aftappen behandeld. In deze paragrafen zijn koppelingen gemaakt naar de uitgevoerde proeven maar zijn geen proefresultaten aan de hand van de theorie geanalyseerd. Een uitgebreide analyse is te vinden in hoofdstuk 7.

Vooraf in paragraaf 4.3 zijn grote stukken tekst overgenomen uit het rapport van R & R, hiertoe is besloten omdat de beschreven theorie onmisbaar is in ons totale verhaal en de door hen verrichte literatuurstudie reeds zeer volledig was.

4.2. Turbulentie

De stroming in het beun van een hopperzuiger is in de meeste gevallen een turbulente stroming. De turbulentie heeft invloed op het bezinkgedrag van de baggerspecie en is hier daarom van belang. In deze paragraaf volgt een samenvatting van de voor dit onderwerp relevante literatuur.

4.2.1. Kenmerken van turbulentie

Het is niet eenvoudig om een precieze definitie van turbulentie te geven. Wel zijn de belangrijkste kenmerken goed te omschrijven. Hieronder volgt een lijst met kenmerken volgens Tennekes-Lumley [lit. 5] :

- Onregelmatigheid, of toevalligheid. Dit is karakteristiek voor turbulente stromingen.
- Diffusiviteit. Een groot transport van impuls, warmte en stof treedt steeds op in turbulente stromingen.
- Grote getallen van Reynolds. Turbulente stroming treedt op bij waarden hoger dan orde 1000.
- Driedimensionale wervelsterktefluctuaties. Turbulentie is driedimensionaal en wordt gekenmerkt door zijn hoge niveau van fluctuerende wervelsterkte.
- Dissipatie. De energiedissipatie op kleine schalen is bij turbulente stromingen veel groter dan bij laminaire stromingen.
- Continuüm. De stroming is te beschrijven met een continuümbenadering.
- Turbulente stromen zijn stromen. Turbulentie is een eigenschap van stroming, niet van de vloeistof.

4.2.2. Soorten turbulentie

Er zijn twee soorten turbulentie:

- Wandturbulentie.
- Vrije turbulentie.

Beide soorten zullen ontstaan in stromingen, waar vanuit de hoofdbeweging energie aan de turbulente stromingen wordt overgedragen. Voor deze overdracht is de aanwezigheid van snelheidsgradiënten noodzakelijk. Bij wandturbulentie is de snelheidsgradiënt het gevolg van de kleeftconditie aan de wand, zoals b.v. de stroming van baggerspecie door het beun langs de bodem en wanden.

Vrije turbulentie ontstaat daar waar twee stromingen elkaar raken en een verschillende snelheid hebben, b.v. de straal baggerspecie die in het beun gestort wordt.

4.2.2.1. Wandturbulentie

De stroming langs de wanden van een kolom, zoals die voor de proeven is gebruikt (par 5.1.6), kan beschreven worden met behulp van een grenslaagbenadering. Een dergelijke benadering kan enkel toegepast worden bij stromingen die gekenmerkt worden door een hoofdbeweging die slechts langzaam varieert in de stroomrichting maar veel sterker varieert loodrecht op deze richting.

Bij de stroming langs de kolomwand ontstaat de snelheidsgradiënt loodrecht op de stroomrichting, en dus ook loodrecht op de wand door afremming aan de wand. De stroming langs de wand kan in verschillende gebieden worden opgesplitst die elk op verschillende wijze beschreven kunnen worden. Deze gebieden zijn:

- Het wandgebied, waar de stroming wordt bepaald door de wandcondities.
- Het turbulente buitengebied, waar de stroming door de hele configuratie van het probleem bepaald wordt.

Deze gebieden vormen samen de grenslaag. De dikte van de grenslaag kan gedefinieerd worden als de afstand van de wand tot de plek waar geldt:

$$U = 0,99 U_0.$$

Een goede benadering voor de dikte van een zich ontwikkelende laminaire grenslaag [lit. 5] geeft formule 4.1.

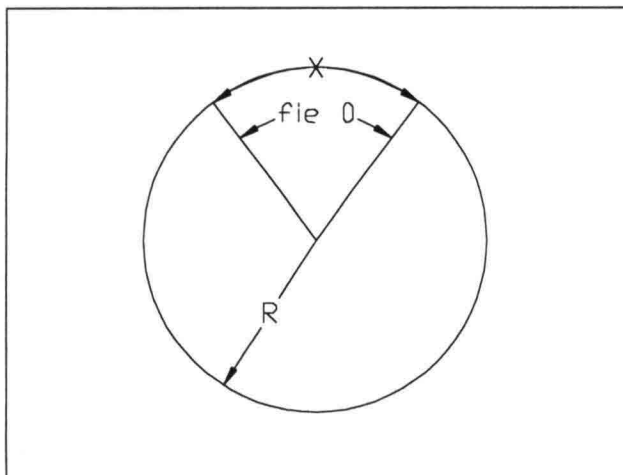
$$\delta \cong \sqrt{10 \cdot \frac{\nu \cdot x}{u_0}} \dots\dots\dots (4.1)$$

Hierbij is 'x' de lengte waarover de grenslaag zich aan het uitbreiden is. Aangezien de snelheid 'u' variabel is in de tijd wordt u_0 (de maximale snelheid) gebruikt. Op deze wijze wordt een maximale dikte van de grenslaag berekend.

In het geval van roterende kolom geldt:

$$x = \pi \cdot R \cdot \frac{2 \cdot \varphi_0}{2 \cdot \pi} \dots\dots\dots (4.2)$$

Dit wordt in Figuur 4.1 verduidelijkt.



Figuur 4.1
 Ontwikkeling grenslaag

Hierin is voor de afstand van de grenslaag tot het midden van de kolom de straal (R) van de kolom aangenomen (0,14 m).

De grenslaag zal turbulent worden bij $Re > 1000$, waarin:

$$Re = \frac{u_0 \cdot \delta}{\nu} \dots\dots\dots (4.3)$$

In dit geval zal de maximale waarde van φ_0 ongeveer $0,4 \cdot \pi$ rad bedragen, uit (4.1) volgt dat $x_{max} \cong 0,17$ m.

Bij een frequentie van 1 Hz zou dit neerkomen op een gemiddelde snelheid van 0,34 m/s.

Invullen van $u_0 = 0,34$ m/s in (4.3) geeft $\delta \cong 2,2$ mm.

Uit (4.2) volgt $Re \cong 750$. Dit is kleiner dan 1000, er zal dus laminaire stroming optreden in de grenslaag.

Alle punten die verder dan 2,2 mm. uit de wand liggen zullen dus niet of nauwelijks beïnvloed worden door de wandwrijving.

In dit geval zal de turbulentie dus geheel door de in de proefopstelling gebruikte rooster worden opgewekt.

4.2.2.2. Vrije turbulentie

Achter het rooster ontstaat turbulentie als gevolg van snelheidsverschillen tussen het water en het rooster. De stroming direct rond het rooster zal versnellen door de kleinere doorsnede die naast de staven beschikbaar is. Het water direct naast de staven zal nu een snelheid hebben die groter is als die van het water in aangrenzende lagen. Hierdoor ontstaan schuifspanningen, die op hun beurt weer turbulentie tot gevolg hebben.

Aan de achterkant van het rooster zal de stroming vertragen en zal er een zogstroming ontstaan. Deze zogstroming is een instabiel verschijnsel. Er ontstaat een wervelstraat van von Karman (turbulentie). De hoogte van de turbulente zone zal toenemen met de afstand achter het rooster; het is dus zaak om grote slagen te maken zodat de turbulente structuur zich over de gehele hoogte van de kolom kan ontwikkelen.

De stroming rond het rooster kan vergeleken worden met de stroming rond een serie cilinders die op een rij in de stroming zijn geplaatst. De stroming rond een cilinder in een stationaire stroming is wiskundig goed te beschrijven. In de kolom is echter sprake van sterk in de tijd fluctuerende snelheden, zelfs in twee richtingen en een serie 'cilinders'. Dit is niet eenvoudig te beschrijven zodat volstaan zal worden met het meten van de snelheidsfluctuaties in de z-richting (verticale richting) die van invloed zijn op het bezinkgedrag van zand en slib.

4.2.3. Meetbare grootheden

Er is geen grootheid die in één getal alle eigenschappen van een turbulente stroming beschrijft. Wel zijn er meetbare grootheden die turbulentie kunnen karakteriseren:

- **Energiedissipatie.**
Met deze parameter wordt aangegeven hoeveel energie er per tijdseenheid en per volume-eenheid in warmte wordt omgezet (dissipatie). In paragraaf 4.2.5.1 en in paragraaf 4.2.6.1 worden respectievelijk de gedissipeerde energie in het beun en in de proefopstelling besproken.
- **Wervelgrootte.**
Hiermee wordt de schaal van de grootste wervels bedoeld. Deze lengtemaat is bepalend voor de turbulente diffusie en zal zowel in het beun (4.2.5.2) als in de opstelling (4.2.6.2) moeten worden afgeschat.

Bovengenoemde grootheden zijn tijdens het uitvoeren van proeven niet of hooguit globaal te bepalen. Wel nauwkeurig zijn de snelheden te meten, hieruit is met behulp van formule (4.4) een karakteristieke waarde V_{rms} te berekenen.

Dit kan zowel in x-, y- als z-richting gebeuren. Met deze grootheden kan ook de turbulente energie bepaald worden en uit het spectrum zijn de lengteschalen af te leiden.

$$V_{y,rms} = \sqrt{\frac{\sum_0^n (\bar{V}_y - V_y)^2}{n}} \dots\dots\dots (4.4)$$

V_z	=snelheid in de z-richting	[m/s]
\bar{V}_z	=gemiddelde snelheid in de z-richting	[m/s]
n	=aantal metingen	[-]

4.2.4. Schaalregels turbulentie

Om het optreden van schaaffecten bij het verscalen van de situatie in het beun naar de situatie zoals die in de kolom heerst te voorkomen, zal er aan schaalvoorwaarden moeten worden voldaan.

Een eerste schaalvoorwaarde is te vinden door te kijken naar twee termen in de TKE-vergelijking [lit. 6] (zie Bijlage B8, vergelijking (B.1)).

Deze twee termen (4.5) (4.6) zijn:

Energiedissipatie [$m^{-2} s^{-3}$]:

$$E \approx \frac{V_{rms}^3}{l} \dots\dots\dots (4.5)$$

Afbraak TKE door buoyancy transport [$m^2 s^{-3}$]:

$$P_{buoyancy} = g \cdot \Delta \cdot C \cdot w_s \dots\dots\dots (4.6)$$

Op deze twee termen zal een zelfde schaalfactor moet worden toegepast. In feite zal de verhouding tussen deze twee termen in de kolom en in het beun het zelfde moeten zijn. Deze verhouding is:

$$\frac{1}{C} \cdot \frac{V_{rms}^3}{g \cdot \Delta \cdot l \cdot w_s} \dots\dots\dots (4.7)$$

Hierin is:

C	=Concentratie mengsel	[-]
V_{rms}	=RMS van de verticale snelheid	[m/s]
Δ	=Relatieve dichtheid ($\{ \rho_s - \rho_w \} / \rho_w$)	[-]
l	=Lengteschaal van de grote wervels in de turbulentie	[m]
w_s	=Valsnelheid (afhankelijk van c en korreldiameter)	[m/s]

Er wordt vanuit gegaan dat er in het beun en in de kolom een zelfde materiaal wordt gebruikt, namelijk zand. Om het verschijnsel 'Hindered Settling' goed te beschrijven is het verder noodzakelijk dat de concentratie niet verschaald wordt(zie paragraaf 4.3.2 , formules 4.60 en 4.61).

Er geldt dus:

$$n_c = n_{\Delta} = 1 \dots\dots\dots (4.8)$$

De eerste schaalvoorwaarde ziet er nu als volgt uit:

$$\left\{ \frac{V_{k,rms}^3}{I_k \cdot W_{s;k}} \right\} = \left\{ \frac{V_{b,rms}^3}{I_b \cdot W_{s;b}} \right\} \dots\dots\dots (4.9)$$

Voor de lengteschaal in het beun geldt:

$I_b \sim H_b$ Lengteschaal evenredig met hoogte.

Voor de lengteschaal in de kolom geldt:

$I_k \sim D_k$ Lengteschaal evenredig met diameter of de kleinste afstand tussen de staven van het rooster.

Dus geldt als we dit combineren met (formule 4.9):

$$n_{v,rms} = n_l^{1/3} \cdot n_{w_s}^{1/3} = \left\{ \frac{H_b}{D_k} \right\}^{1/3} \cdot \left\{ \frac{W_{s;b}}{W_{s;k}} \right\}^{1/3} \dots\dots\dots (4.10)$$

Een tweede dimensieloze parameter die in het beun en in de kolom dezelfde waarde moeten hebben, is volgens Galland [lit 9] (zie Bijlage B8, formule B.7):

$$n_{v,rms} = n_{w_s} \dots\dots\dots (4.11)$$

In bijlage B8 zijn beide dimensieloze parameters gecombineerd. Hieruit volgt een vertaling van de gebruikte zandsorten in de kolom naar zandsorten in het beun.

Korrelgrootte in kolom [μm]	Valsnelheid in kolom $w_{0;k}$ [m/s]	Valsnelheid in beun $w_{0;b}$ [m/s]	Korrelgrootte in beun [μm]
96,56	0,0073	0,0409	278
156,71	0,0175	0,0961	741
263,50	0,0376	0,2067	2729

Tabel 4.4
 Verscalen korrelgrootten

Hieruit blijkt, dat de zandsorten die in de kolom zijn getest, te koppelen zijn aan zandsorten die in de praktijk ook opgebaggerd zullen worden.

4.2.5. Turbulentie in het beun

Over de turbulentie die in het beun van een hopperzuiger aanwezig is, is nog weinig bekend. Er zal dan ook een vrij eenvoudige schatting worden gemaakt van de toegevoerde hoeveelheid energie per m² per s¹. De wervelgrootte zal worden geschat aan de hand van de bekende afmetingen van het beun.

4.2.5.1. Energiedissipatie in het beun

Voor het schatten van de gedissipeerde hoeveelheid energie in het beun wordt aangenomen dat alle energie die het beun instroomt (E_{in}) minus de energie die het beun via de overlaat verlaat (E_{uit}), omgezet wordt in turbulente energie in het beun en uiteindelijk is een evenwichtssituatie wordt omgezet in warmte (E_b). Formule (4.12) geeft de balans voor de hoofdbeweging. De bijdrage van het turbulente deel zal gering zijn.

$$E_b = E_{in} - E_{uit} \dots\dots\dots (4.12)$$

E_{in} kan worden bepaald uit de energiehogte in de leiding voor het mengsel in het beun wordt gestort. Voor het bepalen van de energiehogte wordt de hoogte van de overloop als referentiehoogte gebruikt. De leidingsnelheid (u_l) volgt uit bijlage B1.

$$H_{in} = h_{in} + \frac{u_l^2}{2 \cdot g} \dots\dots\dots (4.13)$$

De hoeveelheid energie die nu per seconde in het beun wordt ingebracht kan worden bepaald met formule (4.14). Het debiet dat het beun instroomt (Q_{in}) wordt ontleend aan bijlage B1. De dichtheid van het mengsel dat het beun instroomt zal worden aangenomen op $\rho_{in}=1400 \text{ kg / m}^3$

$$E_{in} = \rho_{in} \cdot g \cdot H_{in} \cdot Q_{in} \dots\dots\dots (4.14)$$

Voor de bepaling van de hoeveelheid energie die het beun per seconde verlaat wordt gebruik gemaakt van de formule voor een volkomen overlaat.

$$Q_{uit} = m \cdot B_{uit} \cdot \frac{2}{3} \cdot H_{uit} \cdot \sqrt{g \cdot \frac{2}{3} \cdot H_{uit}} \dots\dots\dots (4.15)$$

Als er van uit wordt gegaan dat het uitstroomdebiet gelijk is aan het instroomdebiet en als de vormfactor 'm' op 0,9 wordt geschat dan is H_{uit} bekend. Hiervoor wordt ervan uitgegaan dat de overloop een breedte B_{uit} heeft die gelijk is aan de breedte van het beun.

De nu gevonden energiehogte kan met behulp van formule (4.16) omgerekend worden tot de energie die per seconde het beun verlaat (E_{uit}).

$$E_{uit} = \rho_{uit} \cdot g \cdot H_{uit} \cdot Q_{uit} \dots\dots\dots (4.16)$$

Als nu het verschil tussen E_{in} en E_{uit} gedeeld wordt door het volume van het deel van het beun dat nog niet is gevuld met bezonken materiaal, dan is de hoeveel energie die per seconde aan iedere kubieke meter beuninhoud wordt toegevoegd gedefinieerd. Zie formule (4.17)

$$E_{dis} = \frac{E_b}{V_b} = \frac{E_{in} - E_{uit}}{V_b} \dots\dots\dots (4.17)$$

Uit de gegevens over de hopperzuigers uit bijlage B1 wordt als schip de 'Volvox Delta' genomen met als karakteristieke eigenschappen:

V_b	=Beunvolume	=8143	[m ³]
B_{uit}	=Breedte overlaat	=14,0	[m]
Q	=Debiet ($Q_{in} = Q_{uit}$)	=9,4	[m ³ / s]
u_l	=Leidingsnelheid	=6,0	[m / s]
H_{in}	=Energiehoogte in (4.13)	=3,335	[m]
E_{in}	=Energie in (4.14)	=430,55	[kJ / s]
H_{uit}	=Energiehoogte uit (4.15)	=0,576	[m]

Het energieniveau ter plaatse van de overloop is afhankelijk van de dichtheid van het mengsel dat het beun verlaat (ρ_{uit}). Deze dichtheid is weer afhankelijk van het overloopverlies (OV). Tabel 4.1 laat de resultaten zien voor een situatie waarin er nog geen vaste vulling (VV) in het beun aanwezig is, in Tabel 4.2 zijn de resultaten te zien met een deels vaste vulling.

	ρ_{uit} [kg / m ³]	E_{uit} [kJ / s]	E_b [kJ / s]	E_{dis} [J / s] / m ³
0 % OV	1000	53,11	377,44	46,35
25% OV	1100	58,43	372,12	45,70
50% OV	1200	63,74	366,81	45,05
75% OV	1300	69,05	361,50	44,40
100% OV	1400	74,36	356,19	43,74

Tabel 4.1
 Relatie Overloopverlies - Energiedissipatie

De energiedissipatie in Tabel 4.2 heeft de eenheid: $[J / s] / m^3$

	0% VV	25% VV	50% VV	75% VV
0% OV	46,35	61,80	92,70	185,40
25% OV	45,70	60,93	91,40	182,80
50% OV	45,05	60,07	90,10	180,20
75% OV	44,40	59,20	88,80	177,60
100% OV	43,74	58,32	87,48	174,96

Tabel 4.2

Energiedissipatie Overloeverlies – Hoeveelheid Vaste Vulling

Als uitgangspunt wordt de situatie genomen waarin het beun van de 'Volvox Delta' voor 25% gevuld is met bezonken materiaal en er een overloopverlies is van 50%. De richtwaarde waar in de kolom naar zal worden gestreefd wordt $60 J / s / m^3$

Deze waarde vertegenwoordigt min of meer een gemiddelde waarde voor de dissipatie in het beun. In de praktijk zal er over het beun een grote spreiding zijn van deze waarde. Ter plaatse van de instroom zal deze waarde waarschijnlijk zeer veel groter zijn. En naar mate het mengsel dichter bij de overlaat komt neemt deze waarde sterk af. Om deze reden zal er in de kolom ook een scala aan turbulentieniveaus bekeken worden, uiteraard wel in de buurt van de $60 J / s / m^3$.

Ter vergelijking is ook voor een drietal andere schepen de energiedissipatie per m^3 per s bekeken bij 25% VV en 50% OV. Voor de grote schepen als de 'Fairway' ($V_b = 23490 m^3$) en de 'Amsterdam' ($V_b = 18000 m^3$) werden energieniveaus van respectievelijk ongeveer $34 J / s / m^3$ en $47 J / s / m^3$ bepaald. Voor kleinere schepen zoals de 'HAM 311' ($V_b = 3522 m^3$) lopen de waarden op tot ongeveer $65 J / s / m^3$.

Als men rekening wil houden met diffusors dan zal de richtwaarde lager uitvallen. Deze diffusors verlagen namelijk de potentiële energie die in het systeem wordt ingebracht door middel van energievernietiging in de diffusor. Op deze wijze blijft er ook minder energie over om in het beun te worden omgezet in turbulente energie.

4.2.5.2. Wervelgrootte in het beun

Voor het afschatten van de wervelgrootte in het beun wordt gebruik gemaakt van de vuistregel die zegt dat deze wervelgrootte ongeveer gelijk is aan de helft van de waterdiepte.

In het geval dat deze vuistregel toegepast wordt op de 'Volvox Delta' is dit de helft van maximaal 10 meter waterdiepte. Dit leidt dus tot een wervelgrootte van ongeveer 5 meter. Indien er een sterke dichtheidsgradiënt in het beun aanwezig is dan zal deze de wervelgrootte nog enigszins reduceren.

4.2.6. Turbulentie in de proefopstelling

De turbulentie die in de kolom heerst zal alleen uit vrije turbulentie bestaan. Dit is reeds aangetoond in paragraaf 4.2.2

De vrije turbulentie zal ontstaan achter het rooster en zal het grootste aandeel hebben bij het ontwikkelen van turbulentie energie. In paragraaf 4.2.6.1 wordt de energiedissipatie in de opstelling behandeld en de wervelgrootte in de opstelling zal worden bekeken in paragraaf 4.2.6.2. Deze beide paragrafen zullen worden afgesloten met een vergelijking tussen de situatie in het beun en die in de opstelling.

4.2.6.1. Energiedissipatie in de opstelling

De weerstand die een staaf ondervindt als deze door een vloeistof wordt getrokken kan berekend worden met de volgende formule (4.18)

$$F_v = C_D \cdot A_v \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_m \cdot v^2 \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

Voor de berekening van de hoeveelheid energie die per tijdseenheid in de kolom wordt gedissipeerd, zal slechts een mootje van de kolom worden bekeken. Dit mootje heeft een hoogte gelijk aan die van de hart op hart afstand tussen twee horizontale staven.

Voor de volgende berekeningen geldt:

- A = Oppervlak loodrecht op stroomrichting [m²]
- b = Halve lengte van een verticale staaf in het rooster [m]
- d = Ribbe van een staaf in het rooster [m]
- e = Afstand van het draaipunt tot verticale staven [m]
- h = Verticale afstand tussen twee horizontale staven [m]
- φ = Hoek van uitslag t.o.v. middenstand [rad]
- φ₀ = Maximale hoek van uitslag t.o.v. middenstand [rad]

Voor de verticale staven van het rooster geldt dan de volgende berekening: Oppervlak loodrecht op stroomrichting:

$$A_v = 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2} \cdot d \cdot (h - d) \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

De snelheid daar ter plaatse is:

$$v = \frac{\partial \varphi}{\partial t} \cdot e \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

Dit leidt tot een kracht van:

$$F_v = \sqrt{2} \cdot C_D \cdot d \cdot (h-d) \cdot \rho_m \cdot e^2 \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)^2 \dots\dots\dots (4.21)$$

Het moment dat hiervoor geleverd moet worden bij de arm 'e' is:

$$M_v = \sqrt{2} \cdot C_D \cdot d \cdot (h-d) \cdot \rho_m \cdot e^3 \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)^2 \dots\dots\dots (4.22)$$

De arbeid die per tijdstapje geleverd moet worden is:

$$W_v = M_v \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \sqrt{2} \cdot C_D \cdot d \cdot (h-d) \cdot \rho_m \cdot e^3 \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)^3 \dots\dots\dots (4.23)$$

Als de hoek wordt gedefinieerd als:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \dots\dots\dots (4.24)$$

De afgeleide hiervan is:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \varphi_0 \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \dots\dots\dots (4.25)$$

Als formule (4.25) nu ingevuld wordt in formule (4.23) volgt:

$$W_v = \sqrt{2} \cdot C_D \cdot d \cdot (h-d) \cdot \rho_m \cdot e^3 \cdot \varphi_0^3 \cdot \frac{8\pi^3}{T^3} \cdot \cos^3\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \dots\dots\dots (4.26)$$

Door het nemen van een gemiddelde van een integraal van '0' tot '1/4 T' over de cosinus-term kan worden becijferd dat de gemiddelde absolute waarde hiervan gelijk is aan 4/(3π).

De uiteindelijke hoeveelheid energie die door de verticale staven in het water wordt gebracht per A_k · h kubieke meter water is gelijk aan:

$$W_v = \frac{32\pi^2 \sqrt{2}}{3} \cdot C_D \cdot d \cdot (h-d) \cdot \rho_m \cdot e^3 \cdot \varphi_0^3 \cdot \frac{1}{T^3} \dots\dots\dots (4.27)$$

Voor de horizontale staven van het rooster kan een soortgelijke berekening worden uitgevoerd. Het oppervlak loodrecht op de stroomrichting is nu echter: 4 · d · b · √2

Vervolgens wordt door middel van integratie van de snelheid over de halve breedte van het rooster de kracht verkregen :

$$F_H = \frac{2}{3} \sqrt{2} \cdot C_D \cdot d \cdot b^3 \cdot \rho_m \cdot \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)^2 \dots\dots\dots (4.28)$$

De arm waarover deze kracht werkt is gelijk aan $0,7937 \cdot b$

Uiteindelijk levert dit na dezelfde berekening als bij de verticale staven een hoeveelheid energie die door de horizontale staven in het water wordt gebracht per $V_k = A_k \cdot h$ [m³] water.

$$W_H = \frac{32\pi^2 \cdot 0,7483}{3} \cdot C_D \cdot d \cdot b^4 \cdot \rho_m \cdot \varphi_0^3 \cdot \frac{1}{T^3} \dots\dots\dots (4.29)$$

Als nu voor zowel het bestaande (label 1) als het nieuwe rooster (label 2) de volgende waarden worden ingevuld :

T	= Bij een frequentie van 1 Hz	=1	[s]
φ_0	= Een totale hoek van uitwijking van $2 \cdot 50^\circ$	=0,87	[rad]
C_D	= Weerstandscoëfficiënt	=1,0	[-]
A_k	= Dwarsoppervlak van kolom ($\pi \cdot 0,14^2$)	=0,062	[m ²]
ρ_0	= Dichtheid water	=1000	[kg/m ³]
ρ_m	= Dichtheid mengsel	=1400	[kg/m ³]
e	= Afstand verticale staven t.o.v. middelpunt	=0,07	[m]
b	= Straal van kolom	=0,14	[m]
d_1	= Dikte staven rooster bestaand	=0,018	[m]
d_2	= Dikte staven rooster nieuw	=0,018	[m]
h_1	= H.o.h. afstand horizontale staven oude rooster	=0,15	[m]
h_2	= H.o.h. afstand horizontale staven nieuwe rooster	=0,10	[m]

Rooster	Dichtheid [kg / m ³]	W_v [J / s]	W_H [J / s]	$V_k = A_k \cdot h$ [m ³]	E_{dis} [J/s]/m ³
Bestaand	1000	0,079899	0,358713	0,0092363	47,49
	1400	0,111859	0,502198		66,48
Nieuw	1000	0,049634	0,358713	0,0061575	66,31
	1400	0,069488	0,502198		92,83

Tabel 4.3
 Relatie Rooster - Energiedissipatie

Conclusie:

Op grond van deze resultaten mag worden geconcludeerd dat het zowel met het huidige als met het nieuwe rooster goed mogelijk is om een realistisch energieniveau te simuleren. Maar gezien het hogere energieniveau bij het tweede rooster zal deze de voorkeur hebben. Door kleine wijzigingen van de maximale hoek en de frequentie wordt een forse wijziging van het energieniveau gerealiseerd omdat beide tot de derde macht voorkomen in formule 4.29.

4.2.6.2. Wervelgrootte in de opstelling

De wervels die in de proefopstelling zullen voorkomen zullen in grootte worden beperkt door de afmetingen van het rooster en de kolom. Gezien deze afmetingen kunnen de wervels in horizontale richting nooit groter worden dan 28 cm, de diameter van de kolom. De wervelgrootte in verticale richting is naar verwachting niet groter dan de afstand tussen twee horizontale staven.

Dit wordt gecontroleerd in paragraaf 7.2.3 met behulp van een analyse van het energiedichtheids-spectrum.

4.3. Uniforme en niet uniforme zand fracties

De bezinking van zand in een zand-water mengsel wordt beïnvloed door een aantal factoren. In deze paragraaf worden de volgende factoren behandeld:

- Ongestoorte valsnelheid individuele korrel
- Concentratie van het mengsel (hindered settling)
- Korrelgradatie
- Het turbulentieniveau

De bezinking wordt stap voor stap bekeken. Eerst wordt aandacht besteed aan de valsnelheid van een individuele korrel. Vervolgens wordt de invloed van meerdere korrels in een uniform mengsel beschouwd. Daarna wordt een gegradeerd mengsel met een discrete korrelverdeling bekeken. En uiteindelijk wordt de invloed van turbulentie op de bezinking behandeld.

Bij het schrijven van de paragrafen 4.3.1, 4.3.2 en 4.3.3 is veelvuldig gebruik gemaakt van de door Ruig en Runge verrichte literatuurstudie [lit. 23]. Waar nodig is deze studie uitgebreid of aangepast.

4.3.1. Ongestoorte valsnelheid individuele korrel

De ongestoorte valsnelheid van een individuele korrel in water kan bepaald worden door het krachterevenwicht tussen de zwaartekracht, de oprijvende kracht en de weerstandskracht te beschouwen. Dit evenwicht kan als volgt worden geformuleerd:

$$\frac{\pi}{6} D^3 g \rho_s - \frac{\pi}{6} D^3 g \rho_w - \frac{\frac{\pi}{4} D^2 C_D \frac{1}{2} \rho_w W_0^2}{\Psi} = 0 \dots\dots\dots (4.30)$$

waarin:

- | | | |
|----------|-----------------------------|----------------------|
| ρ_s | = Dichtheid korrel | [kg/m ³] |
| ρ_w | = Dichtheid water | [kg/m ³] |
| g | = Zwaartekracht versnelling | [m/s ²] |

D	= Diameter korrel	[m]
C_D	= Sleepcoëfficiënt	[-]
w_0	= Ongestoorde valsnelheid	[m/s]
ψ	= Vormfactor (zand, $\psi \approx 0.7$)	[-]

Ψ is de verhouding tussen het oppervlak van een bol met hetzelfde volume als de betreffende korrel en het oppervlak van de korrel zelf.
 We definiëren nu de relatieve dichtheid als volgt:

$$\Delta = \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_s}, \dots\dots\dots (4.31)$$

De ongestoorde valsnelheid kan nu geschreven worden als:

$$w_0 = \sqrt{\frac{4g\Delta D^3 \Psi}{3C_D}} \dots\dots\dots (4.32)$$

De sleepcoëfficiënt C_D hangt af van het Reynoldsgetal. Dit Reynoldsgetal is gedefinieerd als:

$$Re = \frac{w_0 \cdot D}{\nu} \dots\dots\dots (4.33)$$

waarin:

ν	= Kinematische viscositeit	[m ² /s]
w_0	= Valsnelheid korrels	[m/s]

De kinematische viscositeit is afhankelijk van de temperatuur. Dit verband is als volgt te beschrijven:

$$\nu = \frac{40 \cdot 10^{-6}}{20 + T} \dots\dots\dots (4.34)$$

waarin:

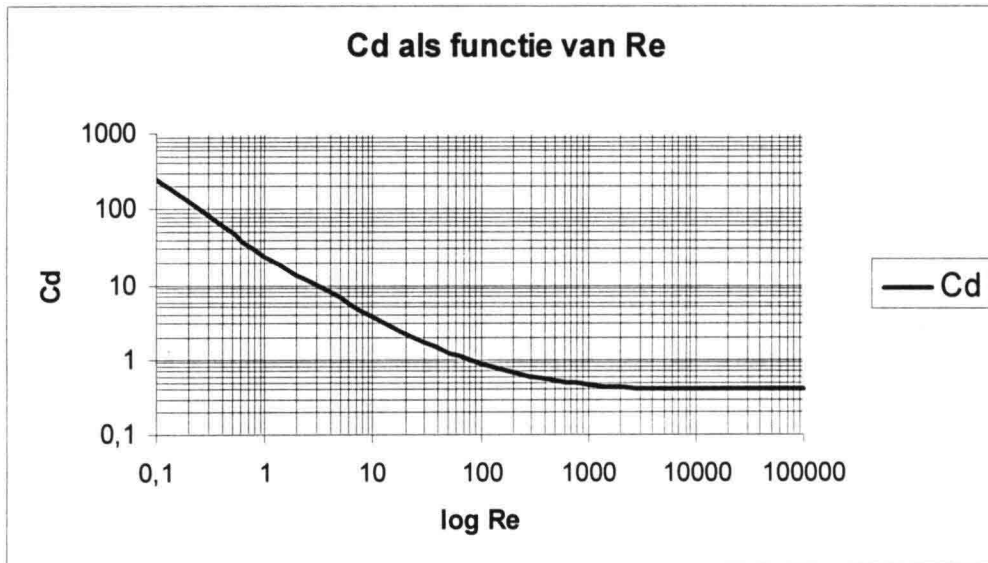
T	= Temperatuur	[°C]
---	---------------	------

De bezinking is op te delen in drie gebieden:

- Laminair gebied
- Overgangsgebied
- Turbulent gebied

In het laminaire gebied is de bezinksnelheid evenredig met de diameter van de korrel in het kwadraat. In het turbulente gebied is de bezinksnelheid evenredig met de wortel van de korreldiameter. Zoals blijkt uit figuur 4.2

worden deze gebieden begrensd door $Re = 1$ ($D = 0,1$ mm voor zand in water), respectievelijk door $Re = 2000$ ($D = 4$ mm ook voor zand in water). Hiertussen bevindt zich het overgangsgebied.



Figuur 4.2
 C_D als functie van Re voor een bol

Tot Re waarden van 20000 à 30000 zijn de Re waarden voor ruwe bollen gelijk aan die van gladde [lit.3]. Boven deze waarden is de weerstand die een ruwe bol ondervindt kleiner dan de weerstand die een gladde bol ondervindt.

Voor elk afzonderlijk gebied geldt in een zand-watermengsel voor de sleepcoëfficiënt C_D [lit.14]:

1. $D < 0.1 \cdot 10^{-3}$ m, laminair gebied:

Voor kleine Reynoldsgetallen geldt:

$$C_D = \frac{24}{Re} \dots\dots\dots (4.45)$$

Zodat de ongestoorde valsnelheid geschreven kan worden als:

$$W_0 = \frac{\Delta g D^2 \Psi}{18\nu} \dots\dots\dots (4.46)$$

2. $0.1 \cdot 10^{-3} \text{ m} < D < 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, overgangsgebied:

Voor tussenliggende Reynoldsgetallen geldt:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{3}{\sqrt{\text{Re}}} + 0.34 \dots\dots\dots (4.47)$$

3. $D > 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, turbulent gebied:

Voor grote Reynoldsgetallen geldt:

$$C_D = 0.4$$

Zodat de ongestoorde valsnelheid geschreven kan worden als:

$$w_0 = 1.8 \sqrt{\Delta g D \Psi} \dots\dots\dots (4.48)$$

Hieronder worden empirische formules gegeven waarmee direct de ongestoorde valsnelheid berekend kan worden wanneer de grootte en de dichtheid van de korrels zijn gegeven. De valsnelheid wordt in m/s uitgedrukt en voor de vormfactor ψ wordt een waarde van 0.7 aangehouden [lit. 30]:

1) $D < 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, laminair gebied:

$$w_0 = 424 (\rho_s - \rho_w) D^2 \dots\dots\dots (4.49)$$

2) $0.1 \cdot 10^{-3} \text{ m} < D < 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, overgangsgebied (Budryck):

$$w_0 = 8.925 \frac{\sqrt{[1 - 95(\rho_s - \rho_w) D^3] - 1}}{D} \dots\dots\dots (4.50)$$

3) $D > 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, turbulent gebied (Rittinger):

$$w_0 = 87 \sqrt{(\rho_s - \rho_w) D} \dots\dots\dots (4.51)$$

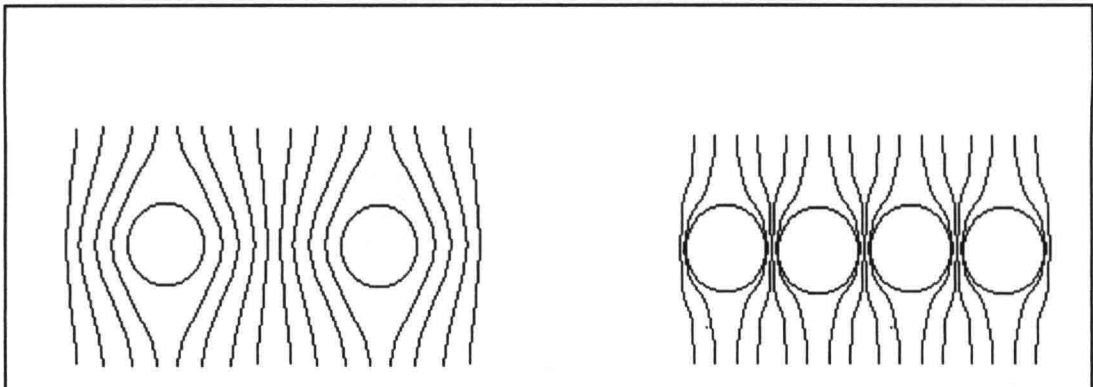
Daarnaast is er nog een empirische relatie voor de ongestoorde valsnelheid afgeleid. Zo heeft Ruby een interpolatie formule opgesteld, die indertijd is verbeterd door Zanke [lit. 22]. Deze formule is geldig voor $0.1 \cdot 10^{-3} \text{ m} < D < 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ en drukt w_0 uit in m/s.

$$w_0 = \frac{10v}{D} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{\Delta g D^3}{100v^2}} \right] \dots\dots\dots (4.52)$$

4.3.2. Invloed concentratie op de bezinking

Wanneer een korrel zich in een suspensie bevindt, heeft de concentratie invloed op de bezinking welke daardoor wordt vertraagd. Dit verschijnsel wordt 'hindered settling' genoemd. De volgende oorzaken zijn hiervoor aan te wijzen:

- De bezinkende korrels veroorzaken een opwaartse stroming van het verplaatste volume water. Hierdoor neemt de stroming van het water langs de korrel toe. Dit zorgt voor een grotere weerstand.
- Door de toename van de dichtheid van het mengsel neemt de verticale drukgradiënt toe, waardoor de opwaartse kracht op de korrel toeneemt.
- Het opwaarts stromende water zal bij een toenemende concentratie door een steeds kleiner oppervlak moet stromen. Hierdoor nemen de snelheidsgradiënten toe. Dit leidt vervolgens weer tot een toename van de schuifspanningen en de weerstand. Dit verschijnsel wordt verduidelijkt in figuur 4.3



Figuur 4.3
 Hindered Settling

De eerste twee fenomenen kunnen worden opgenomen in de evenwichtsvergelijking.

De evenwichtsvergelijking (vgl. 4.30) wordt hiermee:

$$\frac{\pi}{6} D^3 g \rho_s \Psi - \frac{\pi}{6} D^3 g \rho_m \Psi - \frac{\pi}{4} D^2 C_D \frac{1}{2} \rho_w v_s^2 = 0 \dots\dots\dots (4.53)$$

waarin:

- ρ_m = dichtheid van het mengsel
- v_s = bezinksnelheid korrel t.o.v. water

De dichtheid van het mengsel ρ_m kan geschreven worden als:

$$\rho_m = C\rho_s + (1-C)\rho_w \dots\dots\dots (4.54)$$

waarin:

C = volume-concentratie korrels in het mengsel ($C > 4$ à 5%)

Door vgl. 4.52 en 4.53 te combineren kan voor de bezinksnelheid van de korrel t.o.v. water geschreven worden als:

$$V_s^2 = \frac{4gD\Psi\Delta}{3C_D}(1-C) \dots\dots\dots (4.55)$$

Oftewel, met vgl. 4.50 kan deze geschreven worden als:

$$v_s^2 = w_0^2(1-C) \dots\dots\dots (4.56)$$

De opwaartse snelheid van het water is het verschil tussen de snelheid van de korrel t.o.v. het water en de snelheid van de korrel t.o.v. een vast punt. Tevens moet volgens continuïteit gelden:

$$u_w(1-C) = w_s C \dots\dots\dots (4.57)$$

waarin:

u_w	= snelheid van het water t.o.v. vast punt	[m/s]
w_s	= snelheid van de korrel t.o.v. vast punt	[m/s]

De snelheid van de korrel t.o.v. water (v_s), opwaartse snelheid van het water (u_w) en de snelheid van de korrel t.o.v. vast punt (w_s) zijn op de volgende wijze aan elkaar gerelateerd:

$$v_s = u_w + w_s \dots\dots\dots (4.58)$$

Het verband tussen de snelheid van de korrel t.o.v. een vast punt en de snelheid van de korrel t.o.v. het water kan geschreven worden als:

$$w_s = v_s(1-C) \dots\dots\dots (4.59)$$

Door vgl. 4.56 en 4.59 te combineren wordt de bezinksnelheid van een korrel onder invloed van hindered settling verkregen (vgl. 4.60).

$$w_s = w_0 (1 - C)^{1.5} \dots\dots\dots (4.60)$$

Uit experimenteel onderzoek volgt een soortgelijk verband. Alleen wordt een hogere macht voor de invloed van de concentratie gevonden. Dit is te verklaren door de snelheidsgradiënten die ontstaan doordat het water door een klein oppervlak moet stromen (het stromingsoppervlak waar het water door omhoog stroomt, wordt verkleind door de aanwezigheid van de korrels). Dit fenomeen is niet meegenomen in de beschouwing. Hierdoor zijn de schuifspanningen op de korrels in werkelijkheid groter en de bezinksnelheden van de korrels kleiner.

Hieronder worden twee empirische verbanden beschreven tussen de gereduceerde valsnelheid en de concentratie die beter overeenkomen met de werkelijkheid.

1) 'Richardson and Zaki' [lit.21] vonden een soortgelijke relatie tussen de gereduceerde valsnelheid en de concentratie, geldig voor $0.05 < C < 0.65$ en $0.000185 < Re < 7150$:

$$w_s = w_0 (1 - C)^n \dots\dots\dots (4.61)$$

en, wanneer het mengsel uit één fractie bestaat:

$$v_s = w_0 (1 - C)^{n-1} \dots\dots\dots (4.62)$$

Zij vonden dat n afhankelijk is van het Reynoldsgetal (vgl. 4.33) en vonden het volgende verband tussen n en het Reynoldsgetal:

Re < 0.2, D < 0.06 mm:	n = 4.65	
0.2 < Re < 1, 0.06 mm < D < 0.1 mm:	n = 4.35 Re ^{-0.03}	(4.63)
1 < Re < 200, 0.1 m < D < 1 mm:	n = 4.45 Re ^{-0.1}	
Re > 200, D > 1 mm:	n = 2.39	

Al-Dibouni [lit. 10] vond hetzelfde verband als Richardson en Zaki (zie vgl.4.61 en 4.62). Hij kwam via zijn experimenten uit op de volgende relatie tussen n en het Reynoldsgetal, geldig voor : $0.001 < Re < 30000$ en $0.04 < C < 0.55$

$$n = \frac{5.1 + 0.27 Re^{0.9}}{1 + 0.1 Re^{0.9}} \dots\dots\dots (4.64)$$

2) Door J. Happel [lit. 11] is ook een relatie gevonden voor de gereduceerde valsnelheid. Hij beschouwt de valsnelheid van een korrel (v_s) t.o.v. een pakketje mengsel waarin het zich bevindt (vgl 4.65).

$$v_s = w_0 \left[\frac{3 - \frac{9}{2}C^{1/3} - \frac{9}{2}C^{5/3} - 3C^2}{3 + 2C^{5/3}} \right] \dots\dots\dots (4.65)$$

Hierin is het gedeelte tussen haakjes afkomstig van de permeabiliteits-coëfficiënt uit de wet van Darcy. Deze relatie is daarmee afgeleid van de consolidatie theorie en geldt voor hoge concentraties ($C > 0.6$) en lage Reynoldsgetallen ($Re < 0.2$), waarbij het zand zich als het ware in een los gepakte laag bevindt. Bij lagere concentraties worden te lage valsnelheden verkregen.

4.3.3. Invloed korrelverdeling op bezinking

Wanneer een zand-water mengsel bestaat uit zand met twee of meer korrelgroottes treedt tijdens het bezinken ontmenging op door de verschillen in bezinksnelheden van de kleine en de grote korrels. Bij lage concentraties kan ervan uitgegaan worden dat er geen interactie tussen de korrels met verschillende afmetingen plaatsvindt. Bij hogere concentraties (volume concentratie-zand $C_v > 0.4$) moet echter wel rekening gehouden worden met interacties tussen de korrels met verschillende groottes. De grote korrels vallen sneller en botsen tijdens het bezinken op de tragere kleinere korrels. Fundamentele onderzoeken op dit gebied zijn gedaan door Smith, Lockett and Al Habbooby, Mirza en Richardson en door Selim, Kothari en Turian. Ook zal de empirische relatie volgens Mirza en Richardson, volgend uit het model van Lockett en Al Habbooby worden beschouwd. Vervolgens wordt het theoretische model volgens Selim, Kothari en Turian gepresenteerd dat de interacties tussen de korrels in rekening brengt door een correctie op de ongestoorde valsnelheid. Deze modellen zullen ter verduidelijking worden beschreven voor een mengsel met twee verschillende korrelgroottes. Hierbij wordt opgemerkt dat ze natuurlijk ook van toepassing zijn op een mengsel met meerdere korrelgroottes.

Nadat deze modellen met elkaar zijn vergeleken, wordt getracht uit deze modellen een basis te vinden voor de proeven die zullen worden uitgevoerd.

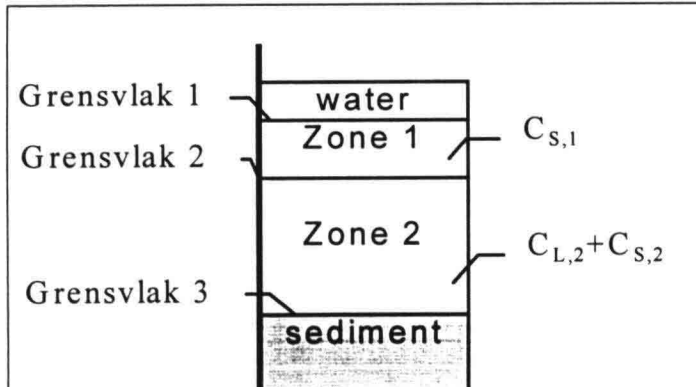
4.3.3.1. Algemene beschouwing

Wanneer een uniforme suspensie van een zand-water mengsel, bestaand uit zand met twee verschillende korrelgroottes bezinkt, zullen vier zones ontstaan. Twee zones in het midden waarin bezinking plaatsvindt, een zone bovenin met alleen water en een gesedimenteerde zone op de bodem. De twee zones waarin bezinking plaatsvindt zullen bestaan uit:

- Suspensie van alleen kleine korrels bovenin

- Suspensie van kleine en grote korrels in concentraties gelijk aan de initiële onderin

Tevens ontstaan twee grensvlakken die tijdens het bezinken zijn waar te nemen.



Figuur 4.4
 Grensvlakken

In deze paragraaf zullen 3 soorten snelheden worden gebruikt :

- u = Snelheid van het water t.o.v. kolom [m/s]
- v = Valsnelheid t.o.v. water [m/s]
- w = Valsnelheid t.o.v. kolom [m/s]

Verder worden er diverse indices gebruikt met de volgende betekenissen:

- 1,2 = zone waarin de snelheid / concentratie geldt
- S,L = respectievelijk betrekking op kleine of grote fractie
- o,s = respectievelijk de ongestoorde en de gestoorde snelheid

Voor een mengsel met twee fracties wordt de continuïteitsvergelijking (4.57) die opgesteld kan worden voor zone 2:

$$u_w(1 - C_2) = w_{s,L,2}C_{L,2} + w_{s,S,2}C_{S,2} \dots\dots\dots (4.66)$$

waarin:

$$C_2 = C_{L,2} + C_{S,2} \dots\dots\dots (4.67)$$

Hiermee wordt vgl.4.58 voor de grote en kleine fractie in zone 2:

$$\begin{aligned} w_{s,L,2} &= v_{s,L,2}(1 - C_{L,2}) - v_{s,S,2}C_{S,2} \\ w_{s,S,2} &= v_{s,S,2}(1 - C_{S,2}) - v_{s,L,2}C_{L,2} \end{aligned} \dots\dots\dots (4.68)$$

Het verband tussen de gereduceerde valsnelheid t.o.v. water en de concentratie wordt beschreven als vgl. 4.56, zodat voor de fracties apart geschreven kan worden:

$$\begin{aligned} v_{s,L,2} &= w_{0,L,2} (1-C)^{0.5} \\ v_{s,S,2} &= w_{0,S,2} (1-C)^{0.5} \end{aligned} \dots\dots\dots (4.69)$$

Door vgl.4.68 en 4.69 te combineren kan vgl.4.60 worden herschreven voor de bezinking van een mengsel met twee fracties in zone 2. Hiermee wordt voor de gereduceerde valsnelheden van beide fracties verkregen:

$$\begin{aligned} w_{s,L,2} &= w_{0,L,2} (1-C_2)^{0.5} (1-C_{L,2}) - w_{0,S,2} (1-C_2)^{0.5} C_{S,2} \\ w_{s,S,2} &= w_{0,S,2} (1-C_2)^{0.5} (1-C_{S,2}) - w_{0,L,2} (1-C_2)^{0.5} C_{L,2} \end{aligned} \dots\dots\dots (4.70)$$

De snelheden van de te observeren grensvlakken 1 en 2 ($u_{g,1}$ en $u_{g,2}$) zijn gelijk aan de gereduceerde valsnelheid van de grootste fractie in de zone onder het betreffende grensvlak, zodat:

$$\begin{aligned} u_{g,1} &= w_{s,S,1} \\ u_{g,2} &= w_{s,L,2} \end{aligned} \dots\dots\dots (4.71)$$

De concentratie in zone 1 wordt gegeven door het aantal korrels dat grenslaag 1 passeert te beschouwen over het toenemende volume van zone 1 (het volume van zone 1 is in de initiële fase nul). Het aantal korrels dat grenslaag 1 passeert per eenheid van oppervlak is $(w_{s,L,2} - w_{s,S,2})C_{S,2}$. De volume toename van zone 1 per eenheid van oppervlakte is het verschil in snelheid van de grenslagen 1 en 2, oftewel: $(w_{s,L,2} - w_{s,S,1})$. Zodat voor de concentratie van de kleine fractie in zone 1 (de enige aanwezige fractie in die zone) geldt:

$$C_{S,1} = \frac{(w_{s,L,2} - w_{s,S,2})C_{S,2}}{(w_{s,L,2} - w_{s,S,1})} \dots\dots\dots (4.72)$$

waarin:

- $C_{S,1}$ = concentratie kleine fractie in zone 1
- $C_{S,2}$ = concentratie kleine fractie in zone 2

Zoals blijkt uit de paragraaf over 'hindered settling'(paragraaf 4.3.2), is de gereduceerde valsnelheid van de korrels afhankelijk van de concentratie. De concentraties in zone 2 blijven gelijk aan de initiële. In deze zone zijn de gereduceerde valsnelheden van beide fracties dus eenvoudig te berekenen m.b.v. vgl.4.70 en daarmee is de snelheid van grensvlak 2 bekend. De concentratie van de kleine fractie in zone 1 is niet bekend en de gereduceerde valsnelheid van deze fractie in zone 1 dus ook niet.

De concentratie grote korrels in zone 1 is nul, daarmee kan voor de gereduceerde valsnelheid van de kleine fractie in zone 1 geschreven worden.

$$w_{s,S,1} = w_{0,S,1} (1-C_{S,1})^{1.5} \dots\dots\dots (4.73)$$

Er zijn 2 onbekenden ($C_{s,1}$ en $w_{s,1}$) en 2 vergelijkingen (4.72 en 4.73), dit is dus op te lossen, waarmee de parameters bekend zijn.

4.3.3.2. Model volgens Smith

Het model van Smith is gebaseerd op de gereduceerde valsnelheid zoals voorgesteld door Happel (vgl. 4.65). Smith werkt met kleine korreldiameters ($D < 0.1\text{mm}$) die bolvormig zijn ($\Psi=1$). De gereduceerde valsnelheid t.o.v. een pakketje water waarin het zich bevindt, wordt hiermee voor de grote en kleine fractie:

$$w_{s,L} = A \frac{\Delta g D_L^2}{18\nu} \dots\dots\dots (4.74)$$

$$w_{s,S} = A \frac{\Delta g D_S^2}{18\nu}$$

waarin:

$$A = \left[\frac{3 - \frac{9}{2} C^{1/3} - \frac{9}{2} C^{5/3} - 3C^2}{3 + 2C^{5/3}} \right]$$

- C = Totale concentratie alle fracties [-]
- D_L = Diameter grote korrels [mm]
- D_S = Diameter kleine korrels [mm]

De gereduceerde valsnelheden t.o.v. de vloeistof kunnen eenvoudig worden omgerekend naar de gereduceerde valsnelheden t.o.v. een vast punt m.b.v. vgl.4.68.

Voor de verdere modellering van de bezinking, gebruikte Smith het model zoals beschreven in de vorige paragraaf (4.3.2).

Omdat Smith werkt met de gereduceerde valsnelheid volgens Happel (vgl. 4.65), worden voor lage concentraties te lage snelheden verkregen. Uit experimenten is dan ook gebleken dat met het model volgens Smith te lage valsnelheden worden gevonden voor volume-concentraties < 0.6 .

4.3.3.3. Model volgens Lockett en Al Habbooby

Het model van Lockett en Al Habbooby is gebaseerd op de gereduceerde valsnelheid zoals voorgesteld door Richardson en Zaki. Dit model houdt geen rekening met interacties tussen de korrels. Wanneer m.b.v. Richardson en Zaki (vgl.4.69) wordt herschreven, wordt voor de gereduceerde valsnelheden t.o.v. het water in zone 2 voor een mengsel met twee fracties verkregen:

$$\begin{aligned} V_{s,L,2} &= w_{0,L,2}(1-C)^{n-1} \\ V_{s,S,2} &= w_{0,S,2}(1-C)^{n-1} \end{aligned} \quad (4.75)$$

Hiermee kan m.b.v. vgl. 4.68 voor de gereduceerde valsnelheden t.o.v. de wand van beide fracties in zone 2 worden geschreven:

$$\begin{aligned} w_{s,L,2} &= w_{0,L,2}(1-C_2)^{n-1}(1-C_{L,2}) - w_{0,S,2}(1-C_2)^{n-1}C_{S,2} \\ w_{s,S,2} &= w_{0,S,2}(1-C_2)^{n-1}(1-C_{S,2}) - w_{0,L,2}(1-C_2)^{n-1}C_{L,2} \end{aligned} \quad (4.76)$$

Voor de gereduceerde valsnelheid van de kleine fractie in zone 1 wordt geschreven:

$$w_{s,S,1} = w_{0,S,1}(1-C_{S,1})^n \quad (4.77)$$

Deze, gecombineerd met vgl.4.72 geeft de concentratie en bezinksnelheid in zone 1, analoog aan de algemene beschouwing.

Uit experimenten is gebleken dat volgens dit model te hoge valsnelheden worden verkregen. Vooral bij hogere concentraties ($C > 0.4$). Dit is te verklaren omdat er geen rekening wordt gehouden met interacties tussen de korrels. Immers hoe hoger de concentratie, des meer de kleine, trage korrels de grotere gaan hinderen.

4.3.3.4. Empirische relatie volgens Mirza en Richardson

Mirza en Richardson hebben geprobeerd via een empirische relatie de bezinking van een gegradeerd mengsel te beschrijven. Zij gaan uit van het model van Lockett en Al Habbooby.

Omdat is gebleken dat het model van Lockett en Al Habbooby bij hoge concentraties ($C > 0.4$) te hoge valsnelheden voorspelt, stellen Mirza en Richardson voor een extra correctie factor van 0.4 op de gereduceerde valsnelheid volgens Richardson en Zaki toe te passen:

$$w_c = w_0(1-C)^{n+0.4} \quad (4.78)$$

Uit experimenten is gebleken dat met deze correctie een vrij goede beschrijving van het proces wordt gegeven, ook bij hoge concentraties.

4.3.3.5. Model volgens Turian, Kothari en Selim

Turian, Kothari en Selim hebben het model van Lockett en Al Habbooby uitgebreid door de interacties tussen de korrels in rekening te brengen. Dit hebben zij gedaan door de ongestoorde valsnelheid van elke fractie te berekenen aan de hand van de dichtheid van een suspensie van alle fracties met een kleinere korreldiameter dan de betreffende. Zij maken gebruik van de eerder genoemde Stokes formule ($D < 0.1\text{mm}$). De gereduceerde valsnelheden zijn volgens Al Dibouni (vgl. 4.61, 4.62 & 4.64).

De Stokes formule voor de berekening van de ongestoorde valsnelheid van grote korrels in een suspensie van kleine korrels is:

$$w_{0,L,2} = \frac{D_s^2 (\rho_s - \rho_m) g}{18 \mu_w} \dots\dots\dots (4.79)$$

waarin:

$$\rho_s = \frac{(1 - C_2) \rho_w + C_{S,2} \rho_k}{(1 - C_{L,2})}$$

Voor de kleine korrels wordt de ongestoorde valsnelheid gewoon geschreven als:

$$w_{0,S,2} = \frac{D_s^2 (\rho_k - \rho_w) g}{18 \mu_w} \dots\dots\dots (4.80)$$

Selim, Kothari en Turian beschrijven de bezinking van het mengsel vervolgens door deze w_0 in te vullen in de gereduceerde valsnelheden zoals door Lockett en Al Habbooby voorgesteld en volgen dezelfde procedure.

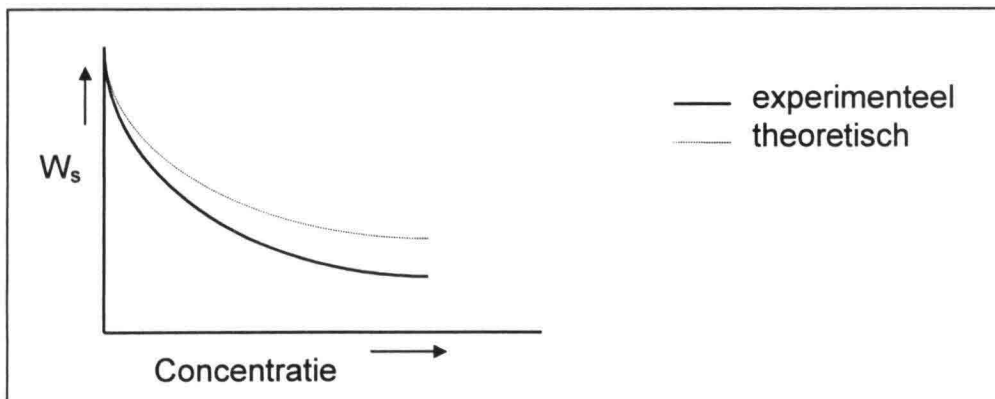
4.3.3.6. Bespreking van de modellen

De algemene beschouwing (paragraaf 4.3.3.1) houdt rekening met hindered settling door de opwaartse stroming van het water en de toegenomen dichtheid (toename opwaartse kracht) mee te nemen. De snelheidsgradiënten die ontstaan bij hindered settling doordat het water door een kleiner oppervlak (tussen de korrels door) omhoog stroomt, worden niet meegenomen in het model. Hierdoor worden gereduceerde valsnelheden van de verschillende zandmengsels verkregen die te groot zijn. De modellering van de gereduceerde valsnelheden van de fracties en de concentraties in de verschillende zones gebeurt keurig volgens continuïteit.

Echter met de interacties (botsingen) tussen de korrels doordat de grotere korrels sneller bewegen en botsen tegen de langzamere, kleine korrels wordt geen rekening gehouden. Geconcludeerd kan dus worden dat de valsnelheden die volgen uit dit model te groot zullen zijn.

De overige modellen zijn gebaseerd op experimenteel onderzoek en onderschrijven bovengenoemde tekortkomingen aan de theoretische benadering. Omdat de gevolgde strategieën om de experimentele uitkomsten te kunnen beschrijven volkomen empirisch zijn en niet theoretisch onderbouwd, zullen deze modellen alleen gebruikt worden om iets in kwalitatieve zin te zeggen over de te verwachte bezinksnelheden.

In figuur 4.5 wordt de gereduceerde bezinksnelheid in een mengsel met uniforme korrelverdeling t.g.v. hindered settling uitgezet tegen de concentratie. De snelheidsgradiënten van het opwaarts stromende water nemen toe met de concentratie. Daardoor is de weerstand op de korrels groter en de bezinksnelheid bij hogere concentraties in werkelijkheid kleiner dan volgens het theoretisch model. Daarmee is de fout in het theoretische model groter bij hoge concentraties ($C > 0.4$).

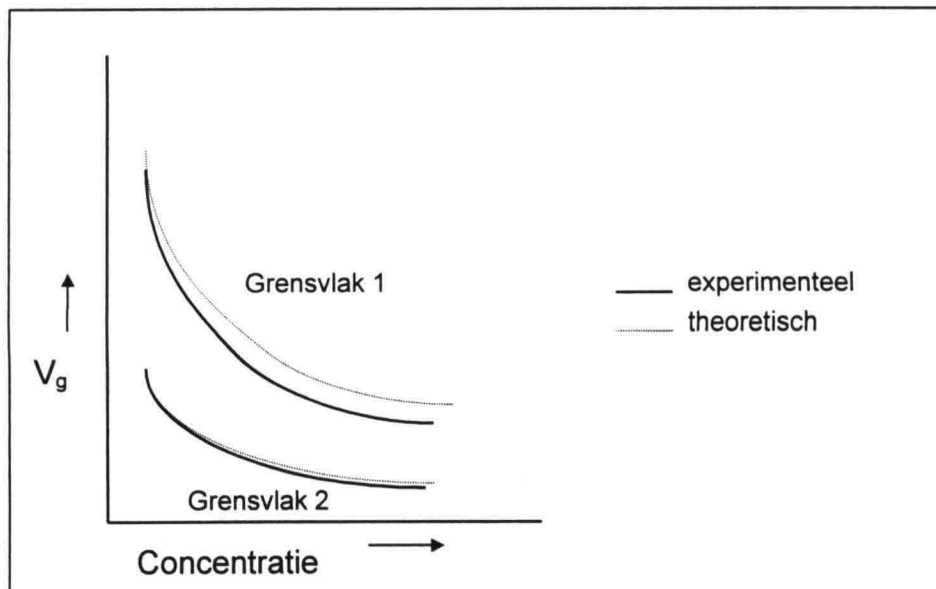


Figuur 4.5
 W_s tegen Concentratie

In figuur 4.6 worden de voortplantingsnelheden van de twee grensvlakken (figuur 4.4) die ontstaan tijdens de bezinking van een mengsel met twee fracties uitgezet tegen de concentratie. De snelheid van het onderste grensvlak is gelijk aan de gereduceerde valsnelheid van de grove fractie in zone 2. De snelheid van het bovenste grensvlak is gelijk aan de gereduceerde valsnelheid van de fijnere fractie in zone 1. (zie figuur 4.4) Bij hoge concentraties zijn de snelheidsgradiënten t.g.v. het opwaarts stromende water groot (hindered settling). Bovendien nemen bij hogere concentraties de botsingen tussen de korrels uit de grote en de kleine fractie toe.

Voor de grote fractie versterken deze twee mechanismen elkaar, beide zorgen voor lagere snelheden. Deze twee mechanismen worden echter niet in de theorie meegenomen. Hierdoor neemt de fout in de theorie voor de onderste grenslaag toe bij toenemende concentratie. De theorie voorspelt te hoge voortplantingssnelheden voor de onderste grenslaag bij hoge concentraties.

Bij de kleine fractie geldt het tegenovergestelde omdat de fijne fractie omhoog spoelt ten opzichte van de grove fractie. De bovengenoemde mechanismen dempen elkaar juist. Het eerste mechanisme (hindered settling) heeft een vertragend effect, terwijl het tweede mechanisme (interacties tussen de korrels) juist een versnellend effect heeft. Hierdoor blijft de fout beperkt voor de voortplantingssnelheden van het bovenste grensvlak bij hoge concentraties.

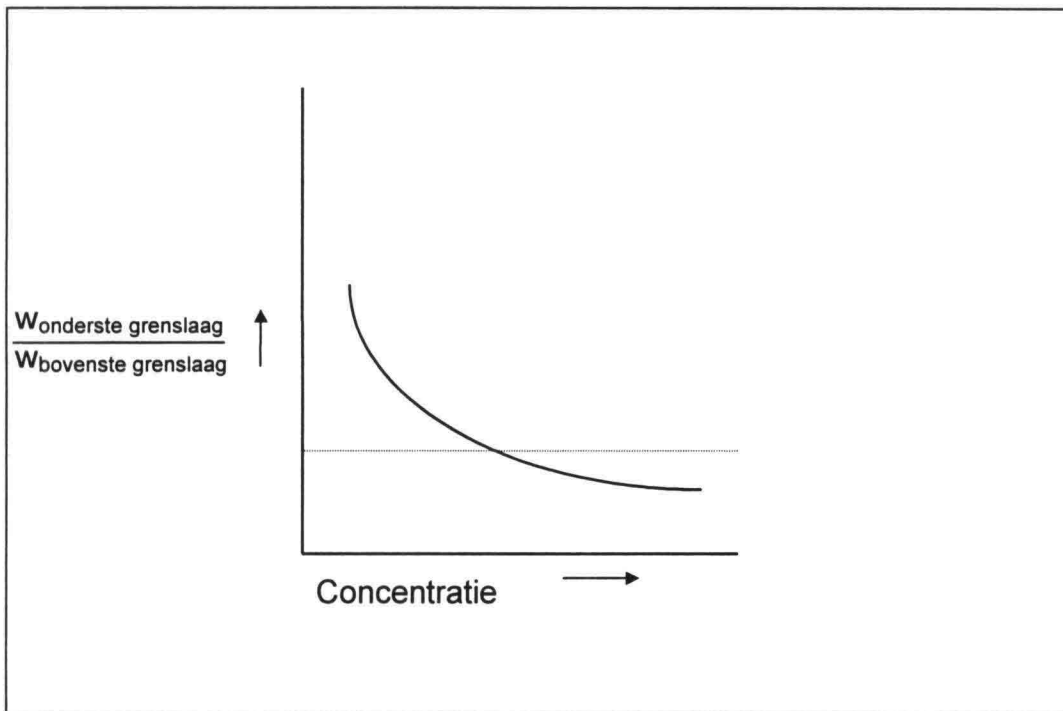


Figuur 4.6
 V_g tegen Concentratie

Het hierboven besproken effect van de twee mechanismen die de grootte van de fout bepalen wordt niet alleen bepaald door de concentratie, maar ook door het verschil in diameter tussen de grote en kleine fractie. De botsingen tussen de grote en de kleine fractie nemen toe wanneer dit verschil groter wordt, immers dan is tegelijkertijd het verschil in de bezinksnelheden van de korrels ook groter.

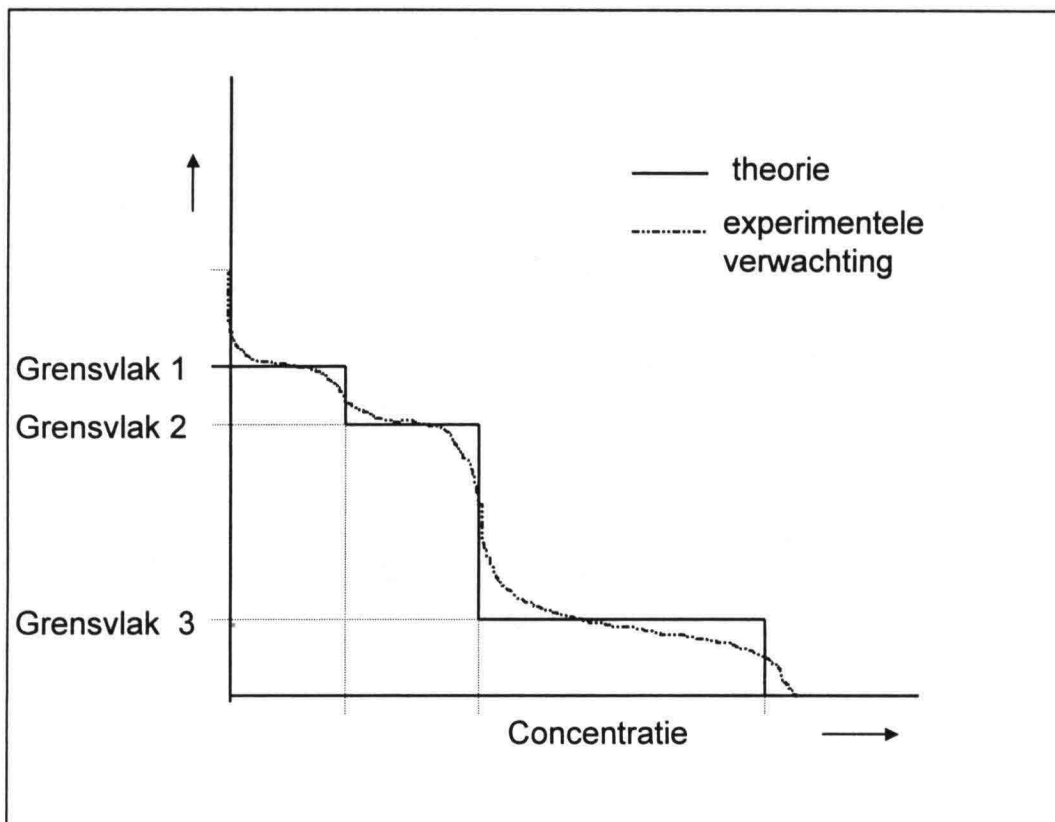
Dus hoe groter het verschil in diameter tussen de beide fracties, des te kleiner wordt de fout voor de voortplantingssnelheid van de bovenste grenslaag en des te groter wordt de fout voor de voortplantingssnelheid van de onderste grenslaag. Dit is het gevolg van een toename van de botsingen bij een toenemend verschil tussen de diameters van de fracties.

Bij hoge concentraties komen de voortplantingssnelheden van beide grensvlakken dicht bij elkaar te liggen. De ontmenging, die bepaald wordt door de grootte van de zone tussen de twee grenslagen, neemt daarmee ook af bij toenemende concentratie. Om dit te verduidelijken is in figuur 4.7 de verhouding van de voortplantingssnelheden van beide grensvlakken uitgezet tegen de concentratie:



Figuur 4.7
 $W_{\text{onderste}} / W_{\text{bovenste}}$ tegen Concentratie

Het concentratieprofiel uit de theorie gaat er vanuit dat in de zones zelf geen verloop in de concentratie bestaat. Dit is vermoedelijk echter wel het geval. In figuur 4.8 wordt het concentratieprofiel tijdens de bezinking van een mengsel dat uit twee fracties bestaat zoals deze bij de theorie gebruikt wordt vergeleken met het concentratieprofiel dat tijdens experimenten te verwachten zou zijn.



Figuur 4.8
 Concentratieprofiel

4.3.4. Invloed van turbulentie op het bezinkproces

Ook de aanwezige turbulentie is van invloed op de bezinking. Formules die een gereduceerde valsnelheid geven zoals in voorgaande paragrafen voor de invloed van hindered settling en korrelgradatie zijn er niet. Met behulp van onze proefresultaten zijn in hoofdstuk 7 relaties opgesteld tussen het turbulentieniveau en de bezinking.

Wel kan met formule 4.81 het concentratieprofiel over de hoogte als functie van de tijd berekend worden. Hierbij is epsilon de turbulente diffusiecoëfficiënt, epsilon is afhankelijk van de korrelgrootte, de korrelgradatie, de concentratie en de mate van turbulentie. Epsilon is constant gedurende een proef. In paragraaf 7.2.6 is getracht relaties te vinden tussen epsilon, V_{rms} , de concentratie en de korrelgrootte.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(w(C) \cdot C)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial C}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (4.81)$$

Na verloop van tijd zal zich een situatie voordoen waarbij bezinking en opwerveling door turbulentie gelijk zijn. Er is dan sprake van een evenwichtsprofiel en $\partial C / \partial t$ is gelijk aan 0.

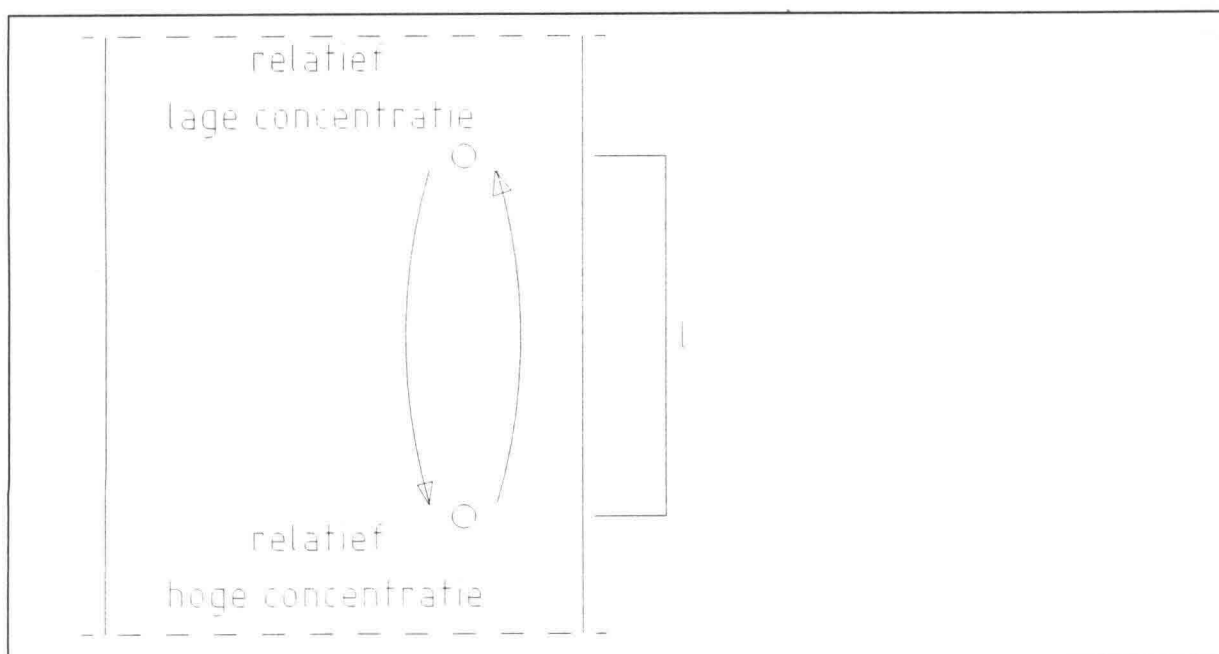
Formule 4.81 is in deze situatie te vereenvoudigen tot formule 4.82 .

$$w(C) \cdot C = \varepsilon \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \dots\dots\dots (4.82)$$

waarin:

$\varepsilon =$ turbulente diffusie coëfficiënt (variabel) [m²/s]

De opwerveling door turbulentie is het gevolg van een concentratiegradiënt over de hoogte. Door de concentratiegradiënt zal de concentratie onder in de kolom hoger zijn dan die boven in de kolom. Door de turbulentie zullen er kleine pakketjes mengsel met een relatief hoge concentratie van beneden naar boven verplaatst worden en andersom zullen er pakketjes mengsel met een relatief lage concentratie van boven naar beneden worden verplaatst.



Figuur 4.9
 Invloed turbulentie

In figuur 4.9 is dit proces getekend voor twee pakketjes, in werkelijkheid gaat het om honderden pakketjes en zal de lengte l voor elk pakketje weer anders zijn. De grootte van l is evenredig met de wervelgrootte (paragraaf 4.2.6.2) en is dus onder andere afhankelijk van de afmetingen van het rooster.

4.4. Aftappen van monsters uit de kolom

Voor de in paragraaf 6.4 beschreven proeven zijn monsters afgetapt. Over de methode waarmee de monsters zijn afgetapt is overlegd met de heer Johan C. Winterwerp, manager 'morphology and sediment transport' bij het Waterloopkundig Laboratorium.

In de paragrafen 4.4.1 tot en met 4.4.3 is de theorie behandeld die betrekking heeft op de toegepaste aftapmethode. Theorie over andere aftapmethoden, zoals aftappen bij onderdruk is niet behandeld, hiervoor verwijzen we naar [lit. 13 en 18].

4.4.1. Monstergrootte

De grootte van een monster dat afgetapt wordt moet zowel voldoende groot zijn om een zeefkromme te kunnen bepalen als voldoende klein om de proef niet te veel te beïnvloeden. De minimale hoeveelheid zand (M_{\min}) die nodig is voor het bepalen van een zeefkromme is gelijk aan 2 gram. De minimale benodigde concentratie is te berekenen met formule 4.83

$$C_{\min} = \frac{M_{\min}}{\rho_{\text{zand}} \cdot V_{\text{mon}}} \dots\dots\dots (4.83)$$

waarin:

- C_{\min} = Minimaal benodigde concentratie [-]
- V_{mon} = Monstergrootte [m^3]
- M_{\min} = Minimale massa zand [kg]

Hieruit volgt dat er van monsters met een volume van 100 ml (V_{mon}) die getapt worden bij een concentratie hoger dan 1 % een zeefkromme is te bepalen.

Het aftappen van een monster zal een niveaudaling in de kolom tot gevolg hebben, indien deze niveaudaling groot is zal dit de proef ernstig verstoren. De niveaudaling van de kolom is met formule 4.84 te berekenen.

$$\Delta h = \frac{V}{A_{\text{kolom}}} \dots\dots\dots (4.84)$$

$$A_{\text{kolom}} = \pi \cdot r^2$$

- Δh = Niveaudaling in de kolom [cm]
- V = Monstergrootte [ml]
- A_{kolom} = Oppervlakte van de kolom [cm^2]
- r = Straal van de kolom [cm]

De kolom heeft een straal van 14 cm, hieruit volgt dat een monster van 100 ml een niveaudaling van 0,16 cm tot gevolg heeft. Een totaal van 20 monsters leidt dus tot een daling van 3,20 cm op een totale hoogte van ruim 150 cm (2%). Dit heeft geen verdere gevolgen voor de berekeningen.

Een monster van 100 ml voldoet aan beide eisen en is dan ook toegepast bij de in paragraaf 6.4 beschreven proeven.

4.4.2. Uitstroomsnelheid

Door het drukverschil tussen de binnenzijde van de gevulde kolom en de buitenzijde zijn er monsters af te tappen zonder onderdruk op de slangen aan te brengen. De uitstroomsnelheid zal toenemen met het drukverschil volgens formule 4.85

$$u = \sqrt{2g \cdot \Delta h} \dots\dots\dots (4.85)$$

u = Uitstroomsnelheid [m/s]
 Δh = Hoogteverschil bovenzijde vloeistof en aftappunt [m]

De aftappunten zijn op de hoogtes 30, 60, 90 en 120 cm boven de bodem van de kolom aangebracht (figuur 5.7). De kolom werd tot een hoogte van ongeveer 150 cm gevuld. In tabel 4.5 zijn zowel Δh als de uitstroomsnelheid u berekend, hierbij is geen rekening gehouden met wrijvingsverliezen zodat de werkelijke uitstroomsnelheid iets lager zal zijn.

aftaphoogte (m)	Δh (m)	uitstroomsnelheid [m/s]
0,3	1,2	4,9
0,6	0,9	4,2
0,9	0,6	3,4
1,2	0,3	2,4

Tabel 4.5
 Uitstroomsnelheden

Bij toepassing van slangen en kranen met een binnendiameter van 10 mm is de tijd waarin een monster afgetapt kan worden eenvoudig te berekenen met de formules 4.85 tot en met 4.87. Dit hebben we gedaan voor alle vier de hoogtes en een monster van 100 ml, de resultaten zijn te vinden in tabel 4.6.

$$T = \frac{V}{A \cdot u} \dots\dots\dots (4.86)$$

$$A = \pi \cdot r^2 \dots\dots\dots (4.87)$$

V = Monstervolume [m³]
 A = Doorstroom oppervak [m²]
 r = Straal binnenzijde slang [m]
 T = Tijd waarin een monster afgetapt kan worden [s]
 u = Uitstroomsnelheid [m/s]

aftaphoogte (m)	uitstroomsnelheid (m/s)	aftaptijd (s)
0,3	4,9	0,26
0,6	4,2	0,30
0,9	3,4	0,37
1,2	2,4	0,52

Tabel 4.6
 Aftaptijden

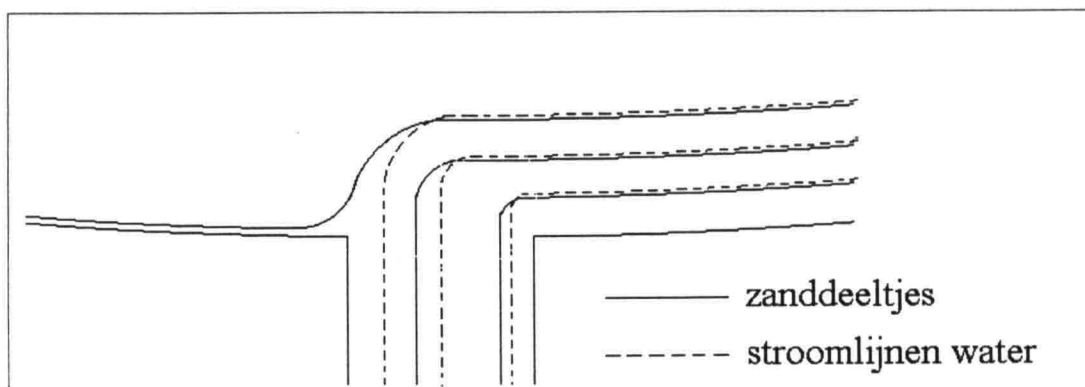
De benodigde aftaptijden zijn zeer kort en lijken in de praktijk met handbediening niet realiseerbaar. Het is echter eenvoudig mogelijk om de aftaptijd te vergroten door het kraantje niet geheel maar slechts gedeeltelijk open te draaien. Hierdoor wordt het doorstroom oppervlak verkleind.

4.4.3. Bemonsteringsfouten

Het verschil in grootte en richting van uitstroom snelheid en lokale stroomsnelheid resulteert in bemonsteringsfouten. De richting waarin afgetapt wordt staat altijd loodrecht op de lokale stroomsnelheid die langs de kolomwand gericht is zodat bij elke aftapsnelheid een fout gemaakt wordt.

Omdat de stroomlijnen van water makkelijker afbuigen dan die van de zanddeeltjes (figuur 4.10) ontstaan er fouten. De gemeten concentratie zal lager zijn dan de werkelijk aanwezige concentratie omdat er te weinig korrels meegezogen worden in te veel water. Naarmate de korreldiameters groter zijn, zijn de korrels moeilijker van richting te veranderen en worden ook de fouten groter.

De fout zal nog enigszins vergroot worden omdat de deeltjes in de meeste situaties bezinken en een snelheid naar beneden hebben. Omdat de valsnelheid veel kleiner is als de stroomsnelheid langs de kolomwand is deze component verwaarloosbaar.



Figuur 4.10
 Bovenaanzicht van de stroomlijnen van het water en de zanddeeltjes ter plaatse van een aftappunt.

Laboratoriumtesten van Nelson en Benedict [lit. 18] hebben aangetoond dat de fout bij aftappen loodrecht op de stroomrichting voor zanddeeltjes van 60

μm -15% is (werkelijke concentratie hoger dan gemeten concentratie), voor zanddeeltjes van 110 μm en 270 μm -25% en voor deeltjes van 500 μm -33%.

In paragraaf 7.3.7 is beschreven hoe de afgetapte monsters gecorrigeerd zijn zodat er ondanks de gemaakte fouten toch goede zeefkrommen bepaald konden worden.

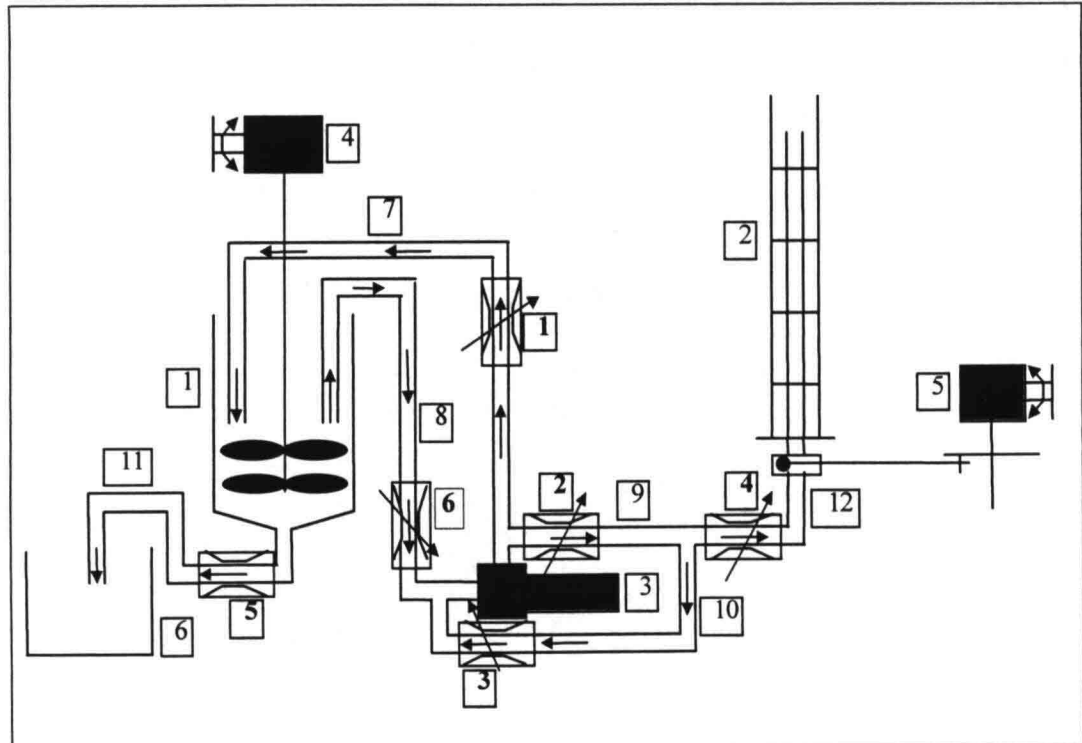
5. BESCHRIJVING PROEFOPSTELLING

5.1. Beschrijving oude proefopstelling

De door ons gebruikte proefopstelling bevindt zich in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft en is mede ontworpen door R & R, in hun rapport is dan ook een uitvoerige beschrijving van de proefopstelling te vinden. In paragraaf 5.1 hebben we ons beperkt tot een beknopte beschrijving van alle onderdelen van de proefopstelling die reeds aanwezig waren. Voor een meer gedetailleerde beschrijving verwijzen we naar het rapport van R & R [lit. 23].

5.1.1. Algemene omschrijving van de proefopstelling

De proefopstelling bestaat uit een mengvat en een roterende kolom, beide onderdelen zijn door een leidingstelsel met elkaar verbonden. In het mengvat kan een homogeen zandwatermengsel worden gemaakt, dit kan vervolgens via het leidingstelsel de kolom ingeperst worden. Het benodigde drukverschil wordt verkregen door gebruik te maken van een centrifugaalpomp.



Figuur 5.1
Proefopstelling geschematiseerd

De kolom oscilleert rond zijn as en wordt aangedreven door een elektromotor. In de kolom is een rooster geklemd, het water gaat door het roteren van de kolom en het daaraan verbonden rooster langs de staven stromen. Hierdoor ontstaat er turbulentie in de kolom.

Alle onderdelen van de proefopstelling zijn geschematiseerd weergegeven in figuur 5.1 en zichtbaar op de foto op de voorpagina. Een beschrijving van alle onderdelen is te vinden in de paragrafen 5.1.2 tot en met 5.1.8.

5.1.2. Meetapparatuur

Om de resultaten van de proeven goed te kunnen interpreteren is gebruik gemaakt van een computer, concentratiemeters, een snelheidsmeter, een potmeter en een digitale thermometer. Deze zijn in de paragrafen 5.1.2.1 tot en met 5.1.2.5 beschreven.

5.1.2.1. Computer en meetkast

Voor het opslaan van de datareeksen was een PC (486 DX 66 mHz) beschikbaar. Op deze computer was het programma DASYLAB geïnstalleerd. Dit programma wordt veel gebruikt in het laboratorium voor vloeistofmechanica en kan de data van meerdere opnemers gelijktijdig verwerken.

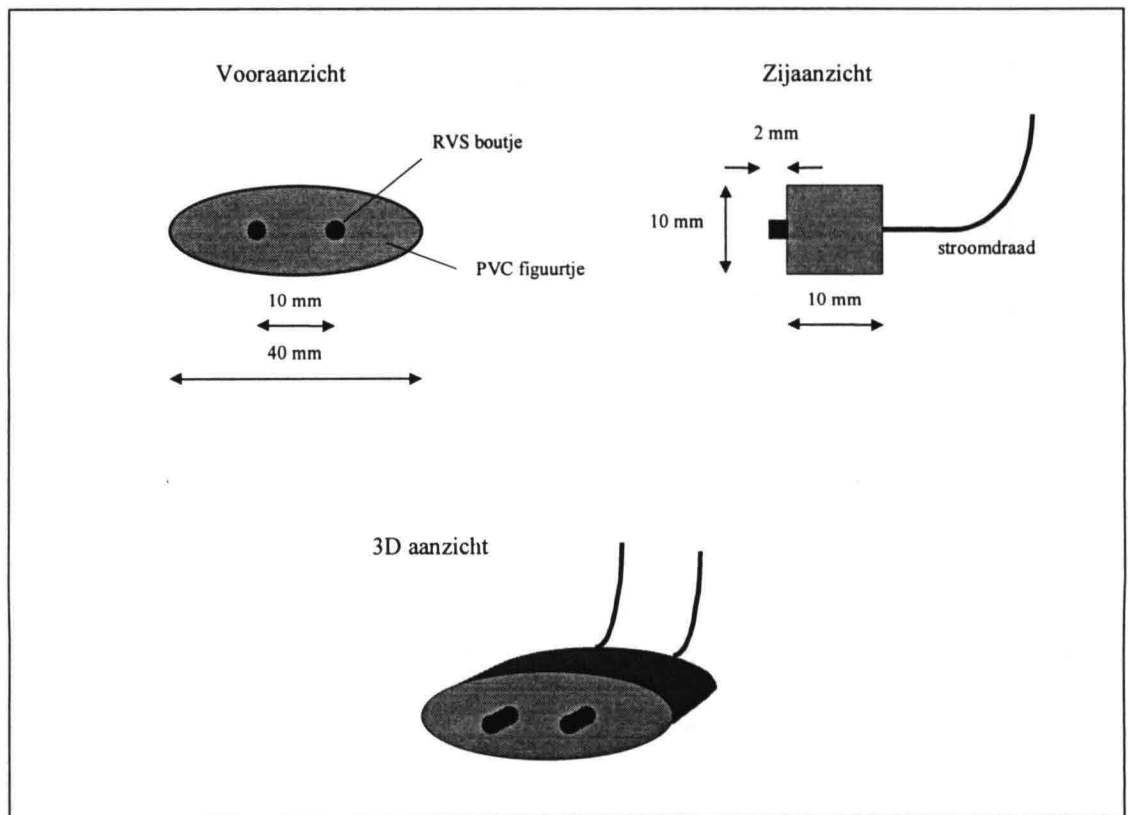
Om de data in de computer in te kunnen lezen zijn er twee meetkasten aanwezig. Een meetkast van het Waterloopkundig Laboratorium zorgt er voor dat de verschillende signalen van de concentratiemeters (paragraaf 5.1.2.2) elkaar niet beïnvloeden. Een meetkast van de TU zet de analoge signalen om in digitale signalen die in DASYLAB gelezen kunnen worden.

5.1.2.2. Concentratiemeters

Aan het rooster (paragraaf 5.1.7) waren 11 2-punts geleidendheid concentratiemeters gemonteerd. Dit type concentratiemeter is ontwikkeld door het Waterloopkundig Laboratorium en voor het gebruik in deze proefopstelling enigszins aangepast.

De meters (figuur 5.2) bestaan uit een klein gestroomlijnd kunststof lichaam met daarin twee verzonken roestvrij stalen boutjes. Aan de achterzijde lopen dunne stroomdraadjes via een waterdichte afsluiting naar de meetkast die weer is verbonden met de computer. Aan de voorzijde steken de boutjes twee millimeter uit, zodat de weerstand precies tussen de twee puntjes gemeten kan worden. De meters zijn ingeklemd tussen twee dunne roestvrij stalen staven, de locaties van de concentratiemeters zijn weergegeven in bijlage B2.

De meters zijn verbonden met de meetkast van het Waterloopkundig Laboratorium. De meetkast is gebruikt om de geleidendheid van het mengsel tussen de twee puntjes van de concentratiemeters te bepalen.

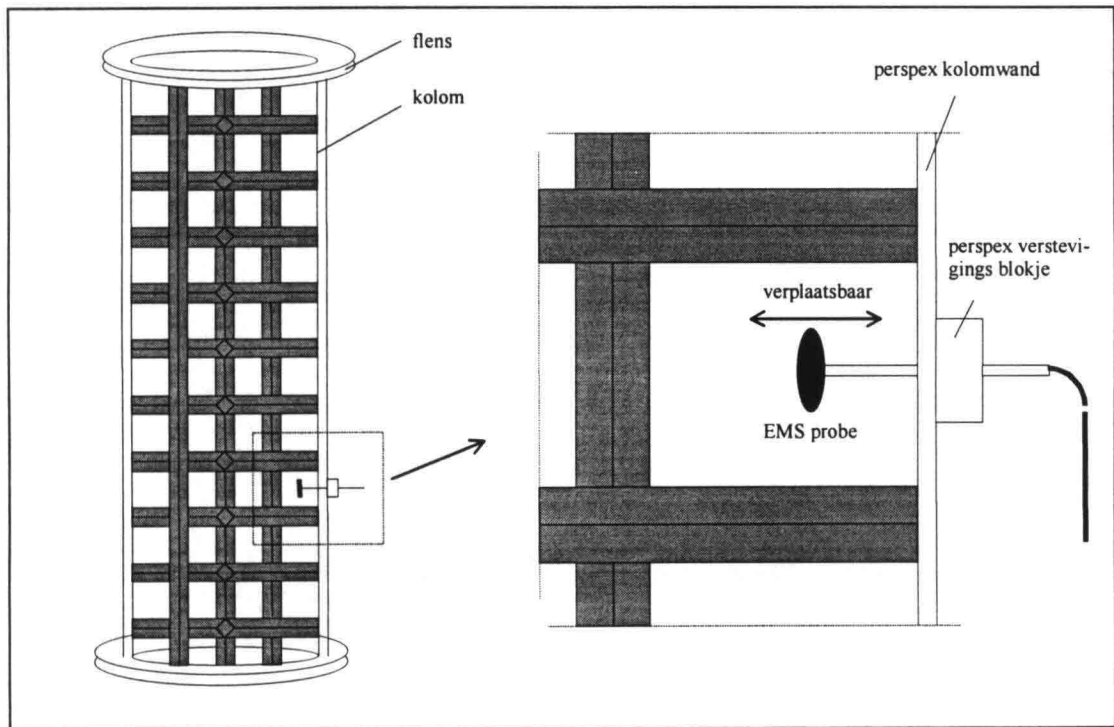


Figuur 5.2
Concentratiemeters

5.1.2.3. Snelheidsmeter

Om de snelheden en snelheidsfluctuaties te meten was er in de kolom een elektromagnetische stromingsmeter EMS "E" type aanwezig. Deze meter is speciaal voor deze opstelling gemaakt en bestaat uit een staafje en een meetprobe. In de meetprobe bevindt zich een spoeltje om elektromagnetische velden op te wekken, aan de buitenkant bevinden zich vier sensoren.

De staaf die aan de probe is bevestigd is door de kolomwand gestoken zodat de positie van de meetprobe in radiale richting versteld kan worden. Twee rubber ringetjes in het perspex verstevigingsblokje vormen een waterdichte afsluiting (figuur 5.3). De EMS is geplaatst midden tussen de derde en vierde horizontale staaf van het rooster.

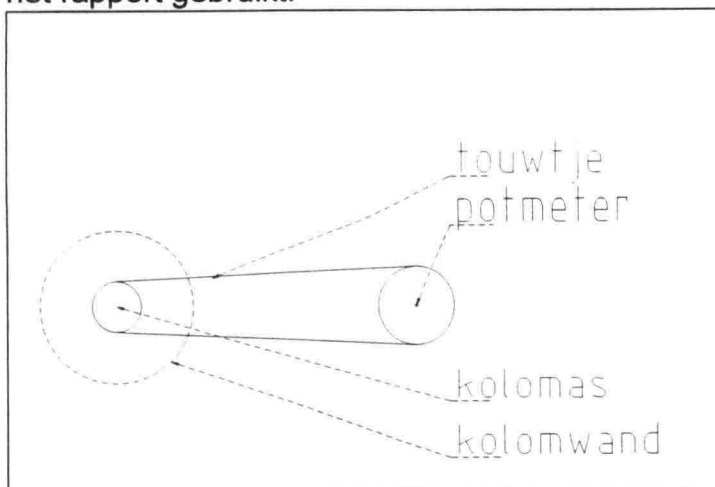


Figuur 5.3
 Positie EMS

5.1.2.4. Potmeter

Om de rotatie van de kolom gedurende de proeven bij te kunnen houden is de kolomas door een touwtje verbonden met een potmeter. Deze meter bestaat uit een schijfje waaraan een schuifweerstand is verbonden zodat de hoekverdraaiing nauwkeurig kan worden gemeten (figuur 5.4).

De juiste naam voor dit soort meters is eigenlijk potentiometer, maar omdat er in het laboratorium altijd over potmeter wordt gesproken is deze naam in het rapport gebruikt.



Figuur 5.4
 Potmeter

5.1.2.5. *Thermometer*

Gedurende de proeven is er gebruik gemaakt van een digitale thermometer, deze kan zowel in het mengvat als in de kolom worden geplaatst. De thermometer is niet op de computer aangesloten. Waarden moeten gedurende de proeven handmatig afgelezen worden en kunnen later toegevoegd worden aan de meetgegevens.

5.1.3. **Mengvat en mixer**

Om het zandwatermengsel te mengen is er een groot mengvat met daarin een grote mixer aanwezig. Het vat heeft een diameter van 1,20 m, een hoogte van 1,40 m en een inhoud van ongeveer 1600 liter. De inhoud van het mengvat is dan ook groot ten opzichte van die van de kolom (5.1.6), het vullen van de kolom zal dan ook slechts een niveaudaling van 7 cm tot gevolg hebben.

De mixer wordt aangedreven door een elektromotor, het toerental is traploos in te stellen. De zes schoepen van de mixer bevinden zich in de onderste helft van het mengvat. Door het hoge toerental ontstaat er echter ook bij een geheel gevuld vat een homogeen mengsel.

Aan de onderzijde van het mengvat is een afvoerleiding aangesloten. Door deze leiding kan het vat leeg gemaakt worden, dit werkt echter niet bij zandwatermengsels omdat het zand in de leiding bezinkt en de leidingen verstopt raken. De mixer is niet in staat om het zand uit de leidingen op te wervelen.

5.1.4. **Leidingstelsel**

Het leidingstelsel vormt de verbinding tussen het mengvat en de kolom. In figuur 5.1 is het leidingstelsel geschematiseerd weergegeven.

5.1.4.1. *Leidingen*

De leidingen bestaan uit metalen buizen met doorsneden van 80 mm en 55 mm en enkele slangen met een doorsnede van 65 mm. Leidingen 8 en 10 (figuur 5.1) zijn beide zuigleidingen, leidingen 7 en 9 zijn beide persleidingen en leiding 12 kan als pers- en zuigleiding worden gebruikt. De benodigde druk en onderdruk wordt geleverd door de centrifugaalpomp 3 (par. 5.1.5).

5.1.4.2. *Afsluiters*

Op de leidingen zijn enkele afsluiters geplaatst die het mogelijk maken om het zandwatermengsel de gewenste kant op te laten stromen. Alle afsluiters kunnen zowel geheel als gedeeltelijk afgesloten worden. De afsluiters die snel geopend en gesloten moeten worden zijn voorzien van een zwengel, dit zijn de kranen 4 en 1. De overige kranen zijn voorzien van een wiel dat dichtgedraaid moet worden, dit vergt iets meer tijd.

5.1.5. Centrifugaalpomp

De centrifugaalpomp zorgt voor de benodigde drukverschillen in het leidingstelsel. Voor de aandrijving wordt gebruik gemaakt van een elektromotor. Het drukverschil tussen voor en achterzijde van de pomp wordt veroorzaakt door het naar buiten slingeren (centrifugereren) van het mengsel. De pomp heeft een opvoerhoogte van 36 meter. Voor een goede beschrijving van de werking van een centrifugaalpomp wordt verwezen naar [lit 25].

5.1.6. Kolom

De kolom is gemaakt van doorzichtig kunststof, de hoogte van de kolom is 1,80 m, de binnendiameter is 28,2 cm en de wanddikte is 8 mm. Aan de boven en onderzijde is een flens bevestigd, hiermee wordt de kolom aan de onderzijde op een draaiplateau vastgezet. Aan de bovenzijde geeft de flens wat extra versteviging.

5.1.7. Rooster

In de kolom is een rooster geplaatst, het rooster is zo gemaakt dat deze klem zit in de kolom. Tijdens de proeven verplaatst het rooster dus niet ten opzichte van de kolom. Het rooster is gemaakt van vierkante kunststof staven van 18 bij 18 mm. Het rooster is tijdens de proeven van R & R enkele malen gebroken en weer in elkaar gelijmd, hierdoor is het rooster ernstig verzwakt maar in ieder geval voor metingen in water nog wel bruikbaar. In bijlage B6. is een 3-D tekening van het oude rooster opgenomen.

5.1.8. Aandrijving kolom

De rotatie van kolom en rooster wordt verzorgd door een elektromotor, een aandrijf wiel en een aandrijf stang (figuur 5.5). Al deze onderdelen zijn afkomstig van een oude golfmachine. Het toerental van het aandrijf wiel is traploos regelbaar en ook het aangrijpingspunt van de aandrijf stang aan het aandrijf wiel is traploos over de straal instelbaar.

5.2. Aanpassingen proefopstelling

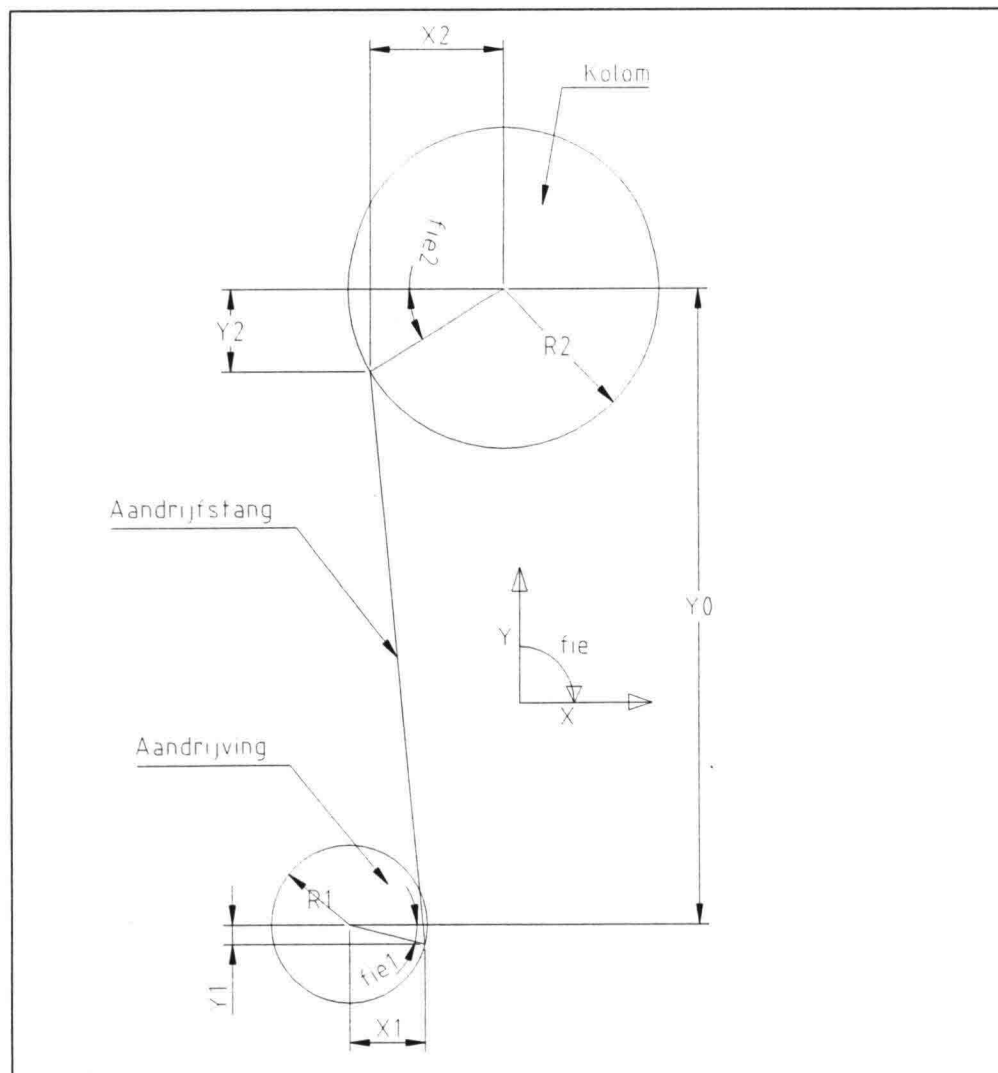
De door R & R gebruikte opstelling bleek nog niet helemaal aan alle wensen te voldoen. Voor het uitvoeren van de proeven werd de proefopstelling dan ook eerst op een aantal punten aangepast. In paragraaf 5.2.1 wordt beschreven hoe we de aandrijving hebben aangepast, in paragraaf 5.2.2 volgt de aanpassing van het rooster en in paragraaf 5.2.3 de toevoeging van aftappunten.

5.2.1 Aanpassing aandrijving

Gedurende de proeven van R & R functioneerde het aandrijfmechanisme van de proefopstelling niet geheel naar wens. We hebben dan ook besloten om dit eerst aan te passen voordat we proeven uit gaan voeren. In deze paragraaf wordt eerst beschreven wat de problemen waren en vervolgens hoe deze opgelost zijn. Uiteindelijk worden de te verwachten resultaten wiskundig beschreven.

5.2.1.1. Probleembeschrijving

Bij de aandrijving die door R & R gebruikt werd waren er twee problemen, ten eerste was de beweging nogal schokkerig (zaagtandbeweging) en ten tweede was de maximale hoek waarover de kolom uit kon slaan slechts zo'n 100° .



Figuur 5.5
Aandrijving

Dat de kolom slechts over een hoek van 100° uit kan slaan is het gevolg van een te lange aandrijfstang. Een grotere hoek van uitslag zou de opwekking van turbulentie bevorderen en is daarom gewenst.

Indien de stang zich in de onderste positie op het aandrijf wiel bevindt ($y_1 = -r_1$) (zie figuur 5.5) is de hoek φ_2 ongeveer -20° , een verdere uitslag van de kolom tegen de wijzers van de klok in is niet mogelijk.

De schokkerige beweging treedt op als de uitslag van de kolom ongeveer 60° is. Dit is gemakkelijk te verklaren, in deze positie is er voor een kleine verandering van de waarde y_2 een grote verandering van de waarde x_2 noodzakelijk, de kracht zal echter altijd in de richting van de aandrijf stang zijn die bij benadering overeenkomt met de y-richting. Kracht en verplaatsing zijn dus ongeveer loodrecht op elkaar gericht.

Verkorting van de aandrijf stang of het vergroten van de afstand tussen kolom en aandrijf wiel (Y_0) lijken de aangewezen oplossingen voor beide problemen. De kolom kan dan uitslaan over een hoek van ongeveer 140° en maakt bij een hoek van 120° bewegingen van $+60^\circ$ tot -60° hetgeen zal leiden tot minder schokkerige bewegingen. De optimale waarde van l volgt uit onderstaande formule, hierbij is l zo gekozen dat geldt $\varphi_2 = 0^\circ$ bij $\varphi_1 = 0^\circ/180^\circ$.

$$l = \sqrt{(y_0^2 + r_1^2)} \dots\dots\dots (5.1)$$

Omdat er voor de aandrijving van onze opstelling gebruik wordt gemaakt van een oude golfmachine is er gekozen voor een verlenging van y_0 in plaats van een verkorting van l . De lengte van de aandrijf stang l blijft dus 89,8 cm, de straal is instelbaar en gemiddeld 14 cm. Hieruit volgt de optimale waarde van 88,7 cm voor y_0 , in de oude situatie was dit gelijk aan 87,3 cm.

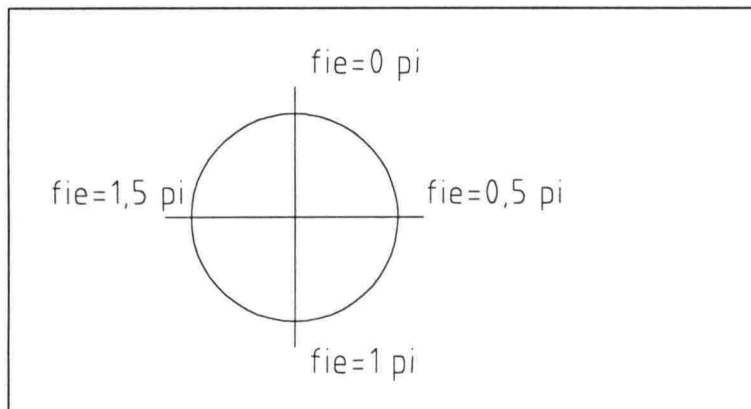
De lengte y_0 moet dus met 1,4 cm vergroot worden, dit is gedaan door de motor met het aandrijf wiel verder van het wiel te plaatsen. Dit was relatief eenvoudig, er waren enkel vier metalen plaatjes van 1,4 cm dikte en langere boutjes voor nodig.

5.2.1.2. Tweede orde afwijking

Omdat de lengte van de staaf niet oneindig lang is ten opzichte van de straal van het aandrijf wiel (r_1) zal de verplaatsing in de x-richting van invloed zijn op de verplaatsing in de y-richting, en dus de hoek φ_2 . Wanneer de hoek van uitslag (φ_2) groot is zal een kleine verandering in y-richting een relatief grote verandering van φ_2 tot gevolg hebben.

Gedurende een slag zijn er vier trajecten te onderscheiden (figuur 5.6):

- $0 < \varphi_1 < 0,5 \pi$ traject 1
- $0,5 < \varphi_1 < 1 \pi$ traject 2
- $1 < \varphi_1 < 1,5 \pi$ traject 3
- $1,5 < \varphi_1 < 2 \pi$ traject 4



Figuur 5.6
Trajecten

Voor elk traject zijn de bewegingen in x- en y-richting van invloed op de hoek φ_2 . Tijdens het eerste traject, van 0 tot $0,5 \pi$ heeft de verandering in y-richting een verkleining van hoek φ_2 tot gevolg. De verandering in x-richting heeft eveneens een verkleining van φ_2 tot gevolg. Beide werken dus gelijktijdig in dezelfde richting. Voor het vierde traject geldt hetzelfde, alleen gaat het hier om een vergroting van φ_2 . Tijdens het tweede en derde traject werken x- en y-richting echter tegengesteld.

Ook de rotatie van de kolom zelf heeft invloed op de x-coördinaat van de positie van het aangrijpingspunt van de aandrijfstang aan de kolom. De invloed zal niet overheersen maar toch ook meespelen. Tijdens het eerste traject zal het aangrijpingspunt zich naar links verplaatsen wat een extra verkleining van φ_2 tot gevolg heeft. Tijdens het tweede traject zal het aangrijpingspunt zich naar rechts verplaatsen wat eveneens een extra verkleining van φ_2 tot gevolg heeft. Op dezelfde wijze is af te leiden dat voor de trajecten 3 en 4 geldt dat dit tot extra vergrotingen van φ_2 leidt.

Omdat alle trajecten in dezelfde tijd ($0,25 T$) worden doorlopen zal de hoeksnelheid van de kolom op de trajecten 1 en 4 groter zijn dan die op de trajecten 2 en 3. Ook zal de totale hoekverdraaiing van de kolom groter zijn tijdens de trajecten 1 en 4. Naarmate de hoek van uitslag (φ_2) groter wordt zullen de verschillen t.o.v. de trajecten 2 en 3 groter worden.

5.2.1.3. Wiskundige beschrijving van het aandrijfmechanisme.

Het model van aandrijving en verplaatsing van de kolom is wiskundig goed te beschrijven. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van de volgende parameters, zie ook figuur 5.5:

φ_1	Rotatie aandrijf wiel
r_1	Afstand tussen draaipunt aandrijf wiel tot bevestiging aandrijf stang
x_1	Uitwijking in de x-richting van de aandrijf stang t.o.v. het draaipunt van het aandrijf wiel
y_1	Uitwijking in de y-richting van de aandrijf stang t.o.v. het draaipunt van het aandrijf wiel
y_0	Y-component van de afstand tussen het draaipunt het aandrijf wiel en het aangrijpingspunt van de aandrijf stang aan de kolom
l	Lengte van de aandrijf stang
φ_2	Rotatie kolom
r_2	Afstand tussen draaipunt kolom tot bevestiging aandrijf stang
x_2	Uitwijking in de x-richting van de aandrijf stang t.o.v. het draaipunt van de kolom
y_2	Uitwijking in de y-richting van de aandrijf stang t.o.v. het draaipunt van de kolom

Indien r_1, y_0, l en r_2 bekend zijn kunnen x_1, y_1, φ_2, x_2 en y_2 als functie van φ_1 worden berekend. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van de volgende formules:

$$x_1 = (\cos \varphi_1) \cdot r_1 \quad \dots \dots \dots (5.2)$$

$$y_1 = (\sin \varphi_1) \cdot r_1 \quad \dots \dots \dots (5.3)$$

$$x_2 = (\cos \varphi_2) \cdot r_2 \quad \dots \dots \dots (5.4)$$

$$y_2 = (\sin \varphi_2) \cdot r_2 \quad \dots \dots \dots (5.5)$$

$$l = \sqrt{(x_2 - x_1 + r_2)^2 + (y_0 - y_1 + y_2)^2} \quad \dots \dots \dots (5.6)$$

Door φ_1 met kleine stapjes toe te laten nemen kunnen x_1 en y_1 uit formules (5.2) en (5.3) worden berekend als functie van φ_1 en dus ook als functie van t . Door x_2 en y_2 met (5.4) en (5.5) uit te drukken als functie van φ_2 en samen met de bekende waarden l en y_0 in (5.6) in te vullen ontstaat een vergelijking waaruit φ_2 volgt.

In Excel zijn berekeningen gemaakt voor zowel de oude waarden van y_0 en l als de nieuwe waarde van y_0 . In de grafieken in bijlagen B3 tot en met B5 zijn de resultaten uitgezet, met φ_2 als functie van φ_1 , en de verschillen in graden ten opzichte van een zuivere sinus met gelijke amplitude. Hieruit volgt dat de beweging van de kolom in de nieuwe situatie de sinusvorm veel beter benadert dan in de oude situatie. Ook is de beweging minder zaagtandvormig.

Om de sinusvorm nog beter te benaderen moet de verhouding tussen r_1/y_0 verder worden verkleind, pas als deze verhouding tot nul nadert zal het tweede orde effect verdwijnen. Om dit te bereiken zijn er vergaande aanpassingen aan de opstelling vereist, hiervan hebben wij gezien de kosten, de beschikbare tijd en de kleine resterende fout afgezien.

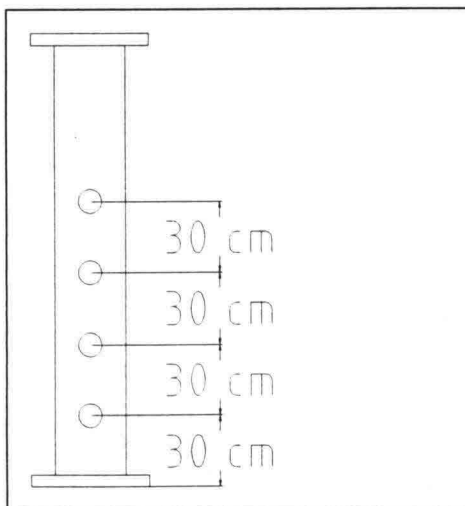
5.2.2. Aanpassing rooster

Bij toepassing van het huidige rooster in combinatie met de beperkte maximale uitslaghoek resulteert de opwekking van turbulentie in een laag rond de horizontale staven van het rooster. De afstand tussen de horizontale staven is nu echter zo groot dat er tussen de horizontale staven een zone ontstaat waar de snelheidsfluctuaties en dus de turbulentie duidelijk minder is als dicht bij de staven.

Om de zone met beperkte turbulentie te verkleinen hebben we een rooster toegepast waar de afstand tussen de horizontale staven 10 cm is (15 cm bij het oude rooster). Tekeningen van zowel het oude als het nieuwe rooster zijn opgenomen in de bijlagen B6 en B7.

5.2.3. Aanbrengen aftappunten

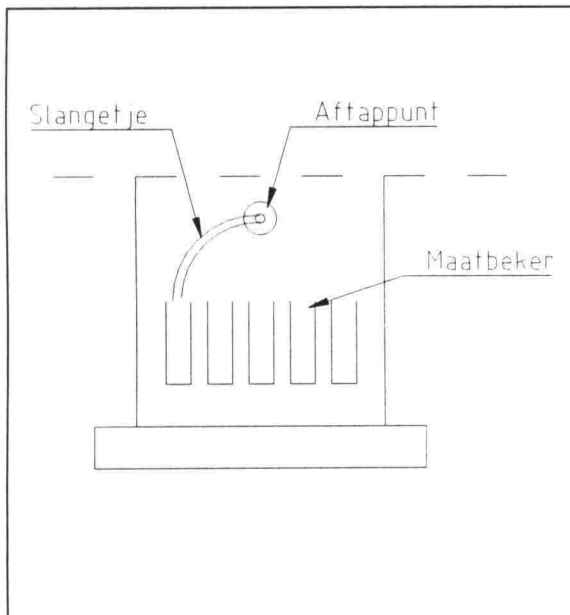
Om bij het doen van proeven met verschillende zandfracties inzicht te krijgen in de korrelverdeling op een bepaalde hoogte op een bepaald tijdstip zijn er op de hoogten 30, 60, 90 en 120 cm aftappunten aangebracht. Dit is weergegeven in figuur 5.7.



Figuur 5.7
Aftaphoogten

Op de kolom zijn op de genoemde hoogten kraantjes aangebracht met een inwendige diameter van 11 mm. In paragraaf 4.4.2 is berekend dat er bij deze diameter ten gevolge van het drukhoogteverschil een voldoende hoog uitstroomdebiet is. Op deze wijze is snel een mengsel van 100 ml af te tappen, waaruit later een zeefkromme is te bepalen.

De kraantjes zijn te openen door een kwartslag aan het sluitertje te draaien. Om de fouten bij het aftappen te beperken dient het volume zandwater mengsel in het slangetje zo klein mogelijk te zijn. Daarom zijn de kraantjes zo dicht mogelijk bij de wand geplaatst.



Figuur 5.8
Detail aftappunt - maatbekers

Door een zo kort mogelijk slangetje komt het mengsel vervolgens in een van de vijf maatbekertjes (figuur 5.8). De maatbekertjes (100 ml) zijn onder het kraantje in een houder tegen de kolomwand geplaatst. Na het nemen van een monster wordt het slangetje verhangen in het volgende maatbekertje. Op deze wijze kunnen er op vijf verschillende tijdstippen monsters afgetapt worden.

Er is gekozen voor deze eenvoudige aftapconstructie gezien het feit dat tijdens de proeven de kolom constant om zijn lengteas roteert. Om deze reden zijn constructies als aftappen met behulp van een vacuümpomp en het aftappen vanaf de bovenzijde van de kolom afgevalen.

6. PROEFUITVOERING

6.1. Inleiding

In dit hoofdstuk zullen alle proeven die wij hebben uitgevoerd uitvoerig worden beschreven. Op de resultaten zal enkel ingegaan worden indien deze bepalend zijn voor een volgende serie proeven. De rest van de resultaten zijn geanalyseerd in hoofdstuk 7.

Bij bijna alle proeven is gebruik gemaakt van de in hoofdstuk 5 beschreven proefopstelling. Enige kennis van dit hoofdstuk achten wij noodzakelijk om dit hoofdstuk te begrijpen.

6.2. Proefuitvoering turbulentie

De eerste serie proeven is uitgevoerd in water zonder zand, het doel van deze serie proeven is het in kaart brengen van de opgewekte turbulentie. In paragraaf 6.2.1 is beschreven hoe de proeven zonder rooster uitgevoerd zijn. In de paragrafen 6.2.2 en 6.2.3 zijn achtereenvolgens de proeven met het oude en met het nieuwe rooster beschreven.

De proeven zijn uitgevoerd in de in hoofdstuk 5 beschreven proefopstelling. De turbulentie zal worden opgewekt door de stroming van het water langs een in de kolom geplaatst rooster. Om het water te laten stromen ten opzichte van de kolom zal de kolom om de lengteas heen en weer worden gedraaid. Hierdoor wordt het met de kolom verbonden rooster door het water getrokken.

6.2.1. Proefuitvoering zonder rooster

De proeven zonder rooster zijn uitgevoerd om te controleren of de aanname dat het water stil blijft staan in een draaiende kolom juist is. Volgens de in paragraaf 4.2 behandelde theorie zou de wandwrijving verwaarloosbaar klein zijn en zou het water dus zo goed als stil blijven staan.

Om te controleren of de aanname juist is zijn er met de EMS (par. 5.1.2.3) snelheidsmetingen in de kolom gedaan. De richtingen waarin gemeten is zijn horizontaal en loodrecht op de straal (x-richting) en in de hoogte (y-richting). Hierbij is de positie van de EMS over de diameter van de kolom gevarieerd. De posities waarop gemeten is zijn respectievelijk 21, 61 en 101 mm van de kolomwand. Over de hoogte is niet gevarieerd omdat er enkel bij de bodem en het wateroppervlak afwijkingen zijn te verwachten.

De frequenties en hoeken van uitslag werden tijdens de proeven gevarieerd. De frequentie was eenvoudig te variëren door het toerental van het aandrijf wiel te variëren. De hoek van uitslag is te variëren door de positie van het aangrijpingspunt van de aandrijf stang op het aandrijf wiel verder van of dichterbij de as te plaatsen.

Uiteindelijk is gekozen voor frequenties van 1.02 s, 1.66 s en 2.55 s en de hoeken (α) van 58.09 °, 87.23 ° en 113.30 °. Gecombineerd met de drie posities van de EMS heeft dit geleid tot $3 \times 3 \times 3 = 27$ proeven.

Probleem bij de metingen is de invloed van de EMS meter zelf. Omdat de EMS aan de kolomwand is verbonden is de snelheid van de EMS ten opzichte van het water evenredig met die van de hoeksnelheid van de kolom. Omdat het oppervlak van de EMS in de stroomrichting niet verwaarloosbaar klein is zal de EMS de waterbeweging verstoren.

Om de werkelijke snelheden van het water te krijgen moeten van de gemeten waarden in de x-richting nog de snelheden van de EMS ten opzichte van een stilstaande kolom water worden afgetrokken. De rotatie van de kolom is met behulp van een potmeter bijgehouden, uit deze rotatie zijn de snelheden van de EMS ten opzichte van een stilstaande kolom water af te leiden. De berekeningen zijn in Excel gemaakt en de resultaten hiervan zijn opgenomen in bijlage C2.

6.2.2. Proefuitvoering met het oude rooster

Voor de metingen die we uitvoeren met het oude rooster (paragraaf 5.1.7) geldt een zelfde werkwijze als voor de proeven zonder rooster. Ook hier zijn de snelheidsfluctuaties gemeten als functie van de tijd voor dezelfde frequenties, hoeken (α_0) en posities van de EMS. Het doel van deze proeven is echter geheel verschillend. Deze proeven dienen de mate van turbulentie die door het rooster wordt opgewekt in kaart te brengen.

De EMS meter (par. 5.1.2.3) werd ook hier gebruikt worden om snelheidsmetingen uit te voeren in zowel de x-richting als de y-richting. De positie werd net als in de vorige serie proeven over de diameter van de kolom worden gevarieerd, er werd op 21, 61 en 101 mm van de wand gemeten. Tenslotte werd er ook bij dezelfde frequenties en hoeken gemeten.

De ingebrachte energie is niet in alle gevallen van dezelfde orde grootte zijn als die in het beun van een hopperzuiger. Toch hebben we gekozen voor een ruime spreiding omdat het bij deze serie proeven vooral gaat om het in kaart brengen van het turbulentieniveau.

Omdat in dit geval niet te verwachten is dat de mate van turbulentie constant over de hoogte zal zijn zullen er metingen op verschillende hoogtes t.o.v. het rooster uitgevoerd worden. De EMS meter is vast verbonden aan de kolom en niet eenvoudig in de hoogte te verstellen. Het rooster kan echter in de hoogte worden verschoven zodat er toch eenvoudig gemeten kan worden op iedere gewenste hoogte.

Het is te verwachten dat de snelheidsfluctuaties achter de horizontale staven van het rooster gelijk zijn en op de halve afstand daartussen een minimum of een maximum hebben. Tussen twee horizontale staven van het rooster is het dus zeer waarschijnlijk dat de snelheidsfluctuaties onder en boven het punt midden tussen twee horizontale staven gelijk zullen zijn. Indien dit het geval is kan met half zo veel metingen worden volstaan, omdat het turbulentie patroon dan symmetrisch is in de hoogte. De resultaten van deze controlemetingen zijn terug te vinden in bijlage C6.

Omdat uit de resultaten van de voorgaande proef bleek dat er inderdaad sprake is van symmetrie kan er volstaan worden met snelheidsmetingen achter de horizontale staven van het rooster, 37.5 mm daarboven en 75 mm daarboven. Dit laatste is dus exact tussen twee horizontale staven.

Uit de resultaten van de metingen is voor alle proeven afzonderlijk een waarde $V_{z,rms}$ (par. 4.2.3) bepaald. Deze waarde is een maat voor het turbulentieniveau. De waarden van $V_{z,rms}$ zijn in grafieken geplot waarbij $V_{z,rms}$ varieert over de hoogte voor vaste waarden van frequentie en hoek van uitslag (bijlage C7).

6.2.3. Proefuitvoering met het nieuwe rooster

De proeven met het nieuwe rooster zijn op geheel identieke wijze als die met het oude rooster uitgevoerd. Omdat de onderlinge afstand tussen de horizontale staven van het rooster nu 100 mm. in plaats van 150 mm. is er op hoogtes van 0, 25 en 50 mm. gemeten.

Het doel van de proeven met het nieuwe rooster is naast het in kaart brengen van de turbulentie ook het bepalen van de verschillen t.o.v. het oude rooster. We hopen met het nieuwe rooster minder variatie van de turbulentie over de hoogte te vinden.

6.3. Proefuitvoering uniforme zandfractie

Met de uniforme zandmengsels zijn proeven gedaan waarbij op verschillende hoogtes in de kolom het concentratieverloop is gemeten. Uit de concentratieprofielen die hieruit volgen kunnen parameters die het bezinkproces beschrijven, zoals de valsnelheid en de (turbulente) diffusiecoëfficiënt, worden berekend.

Gedurende de proeven zijn ook de rotatie van de kolom en de snelheden in de kolom gemeten met behulp van een potmeter en een EMS meter (paragrafen 5.1.2.4 en 5.1.2.3).

6.3.1. Praktische uitvoering van de proeven

In het mengvat (paragraaf 5.1.3) is voor aanvang van de proeven het gewenste zand geschept, hier is vervolgens water aan toegevoegd. Vervolgens is de pomp aangezet en is het water door de leidingen 7 en 8 (figuur 5.1) rondgepompt. Door de persleiding (7) langzaam in het zand te laten zakken wordt dit enigszins losgewoeld. Na verloop van tijd is dan de mixer (paragraaf 5.1.3) op gang te brengen. Het is noodzakelijk om eerst de persleiding te laten zakken omdat de mixer het ingeklonken zandpakket anders niet losgewoeld krijgt.

Nadat de mixer op volle snelheid is gezet kunnen de kranen 2 en 3 (figuur 5.1) geopend worden. Het zand-watermengsel stroomt nu ook door de leidingen 9 en 10. Nadat de kolom op het gewenste turbulentieniveau is ingesteld kan de kolom aangezet worden en kan het programma "DASYLAB" gestart worden.

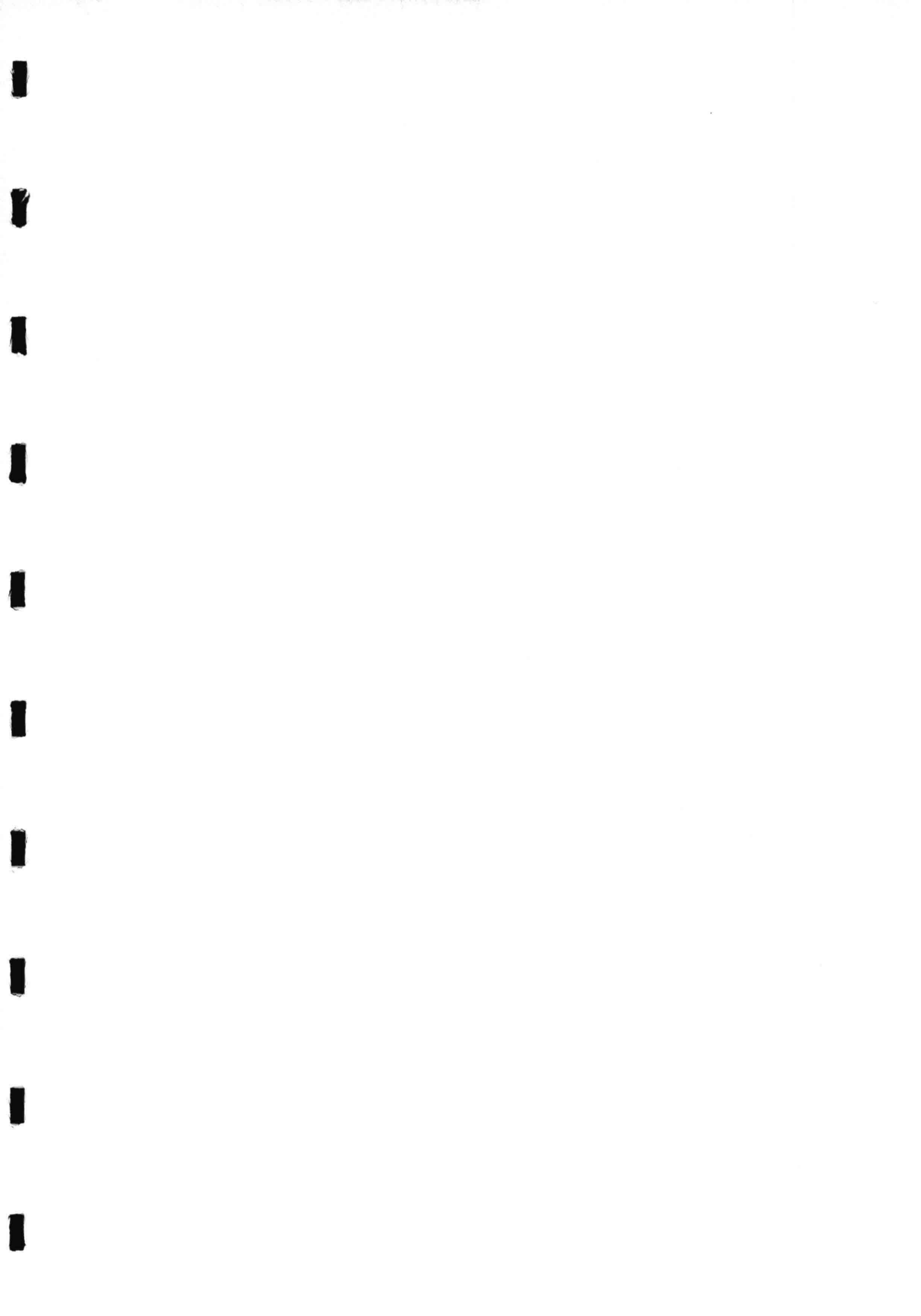
Vervolgens wordt eerst kraan 3 gesloten, daarna worden gelijktijdig kraan 1 dicht en kraan 4 opengedraaid. Er ontstaat nu maximale druk in de leidingen 9 en 12, de kolom kan dan ook in korte tijd gevuld worden. Als het peil in de kolom tot de bovenzijde van het rooster gestegen is wordt kraan 4 zo snel mogelijk dichtgedraaid en kunnen de kranen 1 en 3 weer geopend worden.

Het zand dat zich nu in de kolom bevindt zal nu afhankelijk van de korrelgrootte, de concentratie en het turbulentieniveau snel, langzaam of helemaal niet bezinken. Afhankelijk van de bezinksnelheid worden de concentraties nu gedurende 2 tot 30 minuten gemeten.

Na deze periode is er in alle gevallen een evenwichtstoestand bereikt, dat wil zeggen dat de concentratie over de hoogte niet meer verandert. De kolom kan nu leeg gemaakt worden, in de meeste gevallen kan dit gebeuren door het gedeeltelijk dichtdraaien van kraan 6 en het openen van kraan 4. Hierdoor ontstaat er onderdruk in de leiding 12, soms is het zandpakket echter zo dicht dat het door de onderdruk niet uit de kolom gezogen wordt. In deze gevallen moet de kolom via de bovenzijde geleegd worden.

6.3.2. Meetplan

Om een goed inzicht te krijgen in de invloed van het turbulentieniveau, de concentratie en de korrelgrootte zijn deze parameters gedurende de proeven gevarieerd. Het turbulentieniveau wordt gevarieerd door frequentie en hoek van uitslag te veranderen. De korrelgrootte en concentratie zijn gevarieerd



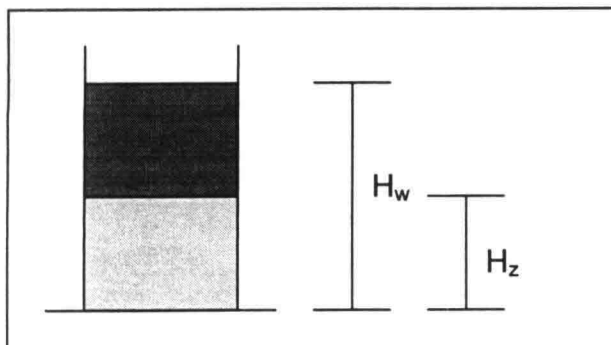
door metingen te verrichten met drie verschillende zandsoorten bij verschillende concentraties.

Omdat er in het laboratorium reeds drie zandsoorten aanwezig waren met een D50 van respectievelijk 80, 160 en 270 μm is er voor gekozen om met deze zandsoorten proeven uit te voeren. Het turbulentieniveau is voor zover dit mogelijk was zo gekozen dat er bij een gedeelte van de proeven een deel van het zand, of al het zand in suspensie blijft. De concentraties zijn gevarieerd van laag (ongeveer 10 %) tot zo hoog mogelijk (ongeveer 45 %). Een hogere concentratie is met deze opstelling niet verpompbaar.

Uit deze waarden is een meetplan gevormd, dit meetplan is opgenomen in bijlage D7. In het meetplan zijn naast de al eerder genoemde proeven ook een aantal proeven opgenomen waarbij gebruik gemaakt wordt van de meters a tot en met h. Deze proeven moeten aantonen hoe de concentratie verdeeld is over de diameter van de kolom. Als laatste zijn er in het meetplan een tweetal proeven opgenomen om te controleren hoe nauwkeurig de metingen zijn, deze proeven zijn herhalingen van eerdere proeven.

6.3.3. Bepaling beginconcentratie

Om de exacte concentratie te bepalen van een mengsel dat voor een willekeurige proef in de kolom gepompt wordt zal aan het einde van elke proef gemeten worden hoe hoog het waterniveau H_w en hoe hoog het bezonken zand H_z staat (Figuur 6.1). Beide niveaus kunnen worden afgelezen op de transparante kolomwand na het uitvoeren van een proef, er moet dan wel gewacht worden tot al het zand bezonken is.



Figuur 6.1
Bepaling beginconcentratie

Om te berekenen welk volume zand en welk volume water er aanwezig is, is eerst het poriënvolume van het bezonken zand bepaald. Het poriënvolume is afhankelijk van de korrelgrootte van het zand, de gradering en de wijze van bezinken. In paragraaf 6.3.4 wordt besproken hoe het poriënvolume is bepaald voor de verschillende zandfracties en bezinkwijzen.

Indien het poriënvolume bekend is, kan de beginconcentratie met behulp van formule (6.1) worden berekend.

$$C = (1 - n) \cdot \left(\frac{H_z}{H_w} \right) \dots\dots\dots (6.1)$$

Hierin is:

H_w	= Hoogte waterniveau	[m]
H_z	= Hoogte zandpakket (bezonken)	[m]
n	= Poriënvolume	[-]

6.3.4. Bepaling poriënvolume

Het poriënvolume van het bezonken zand is afhankelijk van de korrelgrootte, de gradering en de wijze van bezinken. Om de beginconcentraties te kunnen berekenen is het noodzakelijk het poriënvolume te kennen.

Het poriënvolume kan bepaald worden door een doorzichtige maatbeker te vullen met water en het niveau af te lezen (H_o), vervolgens een hoeveelheid droog zand toe te voegen aan het water en opnieuw het waterniveau af te lezen (H_n). De toename van het volume is dan gelijk aan het volume van het ingebrachte zand.

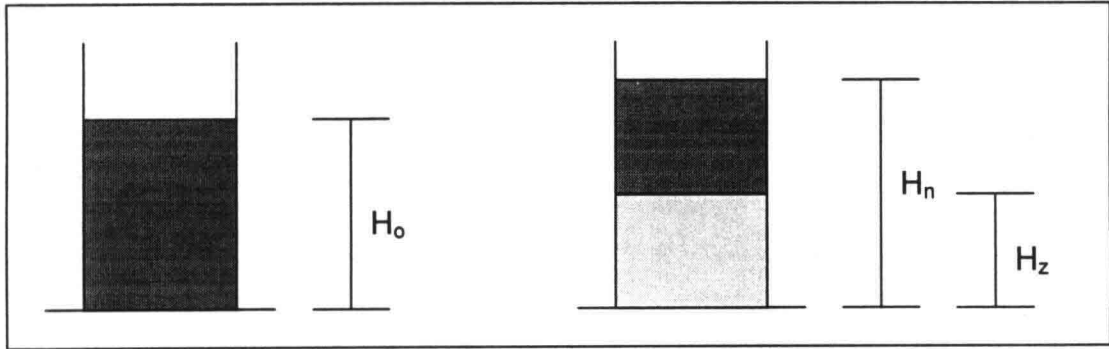
$$V_z = (H_n - H_o) \cdot A \dots\dots\dots (6.2)$$

Hierin is:

H_o	= waterniveau voor inbrengen zand
H_n	= waterniveau na inbrengen zand
V_z	= volume zand
A	= oppervlakte kolom

Na het bezinken van het zand zal er een situatie ontstaan waarin er onder in de kolom een mengsel van bezonken zand en water aanwezig is en daarboven een laag met water.

In de laag met het bezonken zand is het poriënvolume te bepalen door de hoogte van zand-watermengsel af te lezen (H_z). In Figuur 6.2 op de volgende pagina is het een en ander verduidelijkt.



Figuur 6.2
 Bepaling poriënvolume

Het poriënvolume is nu te berekenen met behulp van formule(6.3)

$$n = 1 - \left(\frac{H_n - H_o}{H_z} \right) \dots\dots\dots (6.3)$$

- n = Poriënvolume [-]
- H_z = Hoogte zand-watermengsel [m]
- H_o = Waterniveau voor inbrengen zand [m]
- H_n = Waterniveau na inbrengen zand [m]

Om nu de verschillen tussen de verschillende zandfracties vast te stellen zal de proef met elke zandfractie vijf maal in een maatbeker uitgevoerd worden. Door de vijf resultaten te middelen wordt het poriënvolume berekend, dit wordt gelijk gesteld aan dat in de kolom waar het zand in rust ($T=0$) bezinkt.

Door nu een mengsel in de kolom te pompen en te laten bezinken wordt een bezonken zand verkregen met een bekend poriënvolume. Door de kolom te laten roteren zal dit mengsel verdicht worden. Het poriënvolume dat nu ontstaat kan berekend worden uit het verschil in hoogte H_z .

$$n = n_0 \cdot \left(\frac{H_z}{H_{z0}} \right) \dots\dots\dots (6.4)$$

- n = Poriënvolume na verdichten [-]
- n_0 = Poriënvolume van niet verdicht mengsel [-]
- H_{z0} = Hoogte zand-watermengsel voor verdichten [m]

Het zand is verdicht door de kolom, na het in rust te laten bezinken, vijf minuten bij een periode van 1,30 seconde te laten draaien, vervolgens het zand weer te laten bezinken en H_z af te lezen. Ditzelfde is nogmaals gedaan bij een periode van 1,03 seconde.

In onderstaande tabel zijn de concentraties van het bezonken zand-watermengsel in procenten weergegeven voor de tellerstanden 0, 10 en 12 en voor de zandfracties $D=80 \mu\text{m}$, $D=160 \mu\text{m}$ en $D=270 \mu\text{m}$. De berekeningen zijn opgenomen in de bijlagen D1, D2 en D3.

	$D=80 \mu\text{m}$	$D=160 \mu\text{m}$	$D=270 \mu\text{m}$
T=0 s	51,87	51,86	55,52
T=1,30 s	54,81	59,40	60,38
T=1,03 s	55,86	59,92	60,54

Tabel 6.1

Zandconcentraties

Bovenstaande resultaten moeten met enige voorzichtigheid toegepast worden. Het fijne zand dat bij een periode van 1,03 seconde in suspensie blijft zal pas bezinken nadat de kolom tot stilstand is gekomen. Hier moet dus worden gerekend met de waarde behorende bij een periode van 0 seconde.

6.3.5. Bepaling korrelverdeling

Om de resultaten goed te kunnen interpreteren is het belangrijk om de korrelverdeling van het zand te kennen. Er zijn diverse methoden om de korrelverdeling van zand te bepalen, wij hebben gebruik gemaakt van zeefkrommes.

Zeefkrommes kunnen verkregen worden door een kleine hoeveelheid (2 tot 5 gram) zand te drogen en vervolgens te zeven. Hierbij worden 6 of 7 zeven op elkaar gestapeld, boven de grofste zeef en onder de fijnste zeef. Het monster wordt nu op de bovenste zeef gegoten en vervolgens worden de zeven 16 minuten in een trilmachine geplaatst. Op elke zeef blijft nu een deel van de korrels liggen door deze te wegen kan de zeefkromme bepaald worden. In de bijlagen D1, D2 en D3 zijn de zeefkrommes voor de verschillende zandfracties getekend.

Om tot goede resultaten te komen is het noodzakelijk om van elke zandfractie meerdere zeefkrommes te maken en de resultaten te vergelijken. Indien de verschillen klein zijn kan er gemiddeld worden. Als er echter afwijkende resultaten zijn mogen deze niet meegenomen worden in de bepaling van de zeefkromme. In dat geval dient er een vierde en eventueel een vijfde monster gezeefd te worden.

De aanwezigheid van bijvoorbeeld een klein steentje in het zand kan gezien de beperkte monstergrootte aanzienlijke fouten tot gevolg hebben bij de bepaling van een zeefkromme. Ook kunnen er bij het wegen gemakkelijk fouten worden gemaakt.

6.4. Proefuitvoering verschillende zandfracties

De proeven met verschillende zandfracties zijn op dezelfde wijze uitgevoerd als de proeven met uniform zand. Uiteraard is er wel gebruik gemaakt van samengesteld zand en zijn er gedurende de proeven monsters afgetapt. In deze paragraaf zullen dan ook alleen het niet uniforme zand en de aftapmethode beschreven worden.

Omdat de concentraties die gemeten zijn bij de proeven met uniform zand zo goed overeenkomen met de waarden, berekend uit het waterniveau en het zandniveau na afloop van de proeven, is besloten om bij deze serie proeven de beginconcentratie uit de metingen te bepalen. Dit is gedaan door de concentraties gemeten met de concentratiemeters 1 tot en met 12 direct na het volpompen van de kolom te middelen.

Om het aantal te analyseren monsters enigszins te beperken is er voor gekozen om de metingen te verrichten bij drie verschillende concentraties, en vijf verschillende turbulentieniveaus. Ook voor deze serie proeven is een meetplan gemaakt, dit is te vinden in bijlage E2.

6.4.1. Niet uniforme zandfractie

Het zand dat voor de proeven met niet uniform zand is gebruikt is een mengsel van de drie zandsoorten (D80, D160 en D270 μm) die in paragraaf 6.3 zijn beschreven. De zeefkrommen van de drie zandsoorten zijn opgenomen in de bijlagen D4, D5 en D6.

Door van alle drie de zandsoorten een gelijk deel te nemen ontstaat een mengsel met een redelijk gelijkmatig verlopende zeefkromme. Wij hebben het mengsel aangemaakt door van elke zandsoort 18 emmers droog zand met een gewicht van 20 kg in het mengvat te gooien. De zeefkromme van het mengsel is eenvoudig te bepalen uit de zeefkrommen van de drie afzonderlijke zandsoorten en is te vinden in bijlage E1.

6.4.2. Aftappen van monsters

Bij de proeven met niet uniform zand is het wenselijk inzicht te krijgen in het gedrag van de verschillende korrelgrootten. Uit enkel de concentratiemetingen is dit niet af te leiden, daarom is er besloten om gedurende de proeven monsters op verschillende hoogtes af te tappen.

Er zijn monsters afgetapt op de hoogtes 30 cm, 60 cm, 90 cm en 120 cm t.o.v. de bodem van de kolom. Om inzicht te krijgen in het verloop van de korrelverdeling over de hoogte van de kolom als functie van de tijd zijn er monsters afgetapt op de tijdstippen $t=0:30$, $t=2:00$, $t=5:00$, $t=10:00$ en $t=25:00$. Bij de nulmeting en de meting met het laagste turbulentieniveau zijn er alleen op de eerste vier tijdstippen monsters afgetapt omdat na 10 minuten al het zand bezonken is en de concentratie boven het zandpakket tot 0 nadert. Van alle 276 monsters is een zeefkromme bepaald volgens de in paragraaf 6.3.5 beschreven methode.

7. ANALYSE VAN METINGEN EN MODEL

Door de vele metingen die verricht zijn, is er een zeer grote hoeveelheid data verzameld. Deze datareeksen zullen in dit hoofdstuk uitvoerig worden geanalyseerd. De data zelf zijn vanwege de grote omvang niet in dit hoofdstuk opgenomen maar zijn wel te vinden op de cd-rom.

De analyses zijn uitgesplitst in analyses per proevenserie (hoofdstuk 6). In paragraaf 7.1 zijn als eerste de turbulentie proeven in water met en zonder rooster geanalyseerd. Vervolgens zijn in de paragrafen 7.2 en 7.3 de proeven met het uniforme en het niet uniforme zand geanalyseerd.

7.1. Analyse proeven turbulentie

De analyse van de turbulentie proeven in water is beschreven in de paragrafen 7.1.1, 7.1.2 en 7.1.3. In deze paragrafen zijn achtereenvolgens de resultaten van de metingen zonder rooster, met het oude rooster en met het nieuwe rooster geanalyseerd.

7.1.1. Analyse proeven zonder rooster

Uit de in paragraaf 6.2.1 beschreven proeven kunnen nu enkele conclusies worden getrokken. In bijlage C2 zijn voor drie willekeurige proeven de snelheden gemeten met de EMS en die berekend uit de metingen met de potmeter tegen de tijd uitgezet.

In de grafieken (Bijlage C2) valt direct op dat beide lijnen ongeveer gelijkvormig zijn maar niet geheel samenvallen, terwijl dit wel zo zou moeten zijn als de waterkolom geheel in stilstand bleef. Er is zowel een duidelijk verschil in amplitude als in fase.

7.1.1.1. Amplitudeverschil

Het verschil in amplitude is te verklaren door de berekening van de snelheid uit de gegevens van de potmeter te analyseren. De potmeter geeft een voltage door dat rechtstreeks om te zetten is in een hoek. Uit deze hoek is de hoeksnelheid af te leiden, door deze vervolgens te vermenigvuldigen met de afstand van de EMS tot het hart van de kolom wordt de snelheid van de EMS berekend.

Dat de amplitude kleiner is bij de meting met EMS is als volgt te verklaren. De snelheden die gemeten worden met de EMS worden gemeten door de weerstand te meten tussen twee metalen puntjes (paragraaf 5.1) die op de kop van de EMS bevestigd zitten. De stroom tussen beide puntjes loopt niet alleen tussen de puntjes maar ook iets daarvoor. Gemiddeld zal er dus gemeten worden op enige afstand voor de EMS.

De snelheden gemeten met de EMS zijn dus eigenlijk gemeten op een andere positie dan die van de EMS zelf.

Volgens de leverancier van de EMS, het Waterloopkundig Laboratorium, ligt de afstand waarop de EMS meet 1,5 mm voor de kop. Dit verklaart grotendeels het amplitudeverschil.

Een tweede oorzaak van de kleinere amplitude is de berekeningsmethode van de snelheden uit het signaal van de EMS. De snelheden worden berekend door de hoeksnelheid te vermenigvuldigen met de straal. De hoeksnelheden worden berekend als de afgeleiden van de hoek. Rondom het nulpunt (van de hoek van uitslag) zijn deze waarden maximaal en zullen door de relatief grote stappen van 0,2 seconden altijd iets kleiner zijn dan de werkelijke hoeksnelheden.

7.1.1.2. Faseverschuiving

Tussen de snelheden gemeten met de EMS en die berekend met behulp van de potmeter zit een faseverschuiving. Deze faseverschuiving is niet bij alle proeven constant. In Excel is berekend hoe groot de nulpuntverschuivingen zijn, er is onderscheid gemaakt tussen de opgaande lijn, van negatieve naar positieve snelheden en de neergaande lijn, van positieve naar negatieve snelheden.

De resultaten zijn grafisch weergegeven in bijlagen C2, C3 en C4. Hierbij zijn de snelheidswisselingen van negatief naar positief in oplopende volgorde gezet omdat die de meeste variatie vertoonden. Duidelijk is te zien dat de nulpuntverschuivingen van positief naar negatief veel constanter zijn. Ook zijn de resultaten geordend naar constante periode (bijlage C4), constante hoek van uitslag (bijlage C2) en constante positie van de EMS (bijlage C3).

Uit de grafieken voor constante periode (bijlage C4) blijkt dat in alle gevallen de grootste nulpuntverschuivingen optreden voor de kleinste waarden van d , dat wil zeggen dat de EMS zich zo dicht mogelijk bij de wand bevindt. Ook in de grafieken met constante E (bijlage C2), dit is direct gekoppeld aan de hoek van uitslag waarbij een kleine E een grote hoek van uitslag geeft, is te zien dat de grootste nulpuntverschuivingen optreden bij $d=21$ mm. De periode en de hoek van uitslag lijken minder invloed op de nulpuntverschuiving te hebben.

Dat de nulpuntverschuiving het grootst is voor kleine waarden van d is het gevolg van de weerstand die de EMS ondervindt bij de beweging door het water. Indien de EMS zich aan de buitenzijde van de kolom bevindt is de afstand die hij aflegt groter als wanneer hij zich dicht bij de as van de kolom bevindt. De weerstand zal toenemen met de snelheid en dus groter zijn naarmate de EMS zich dicht bij de wand bevindt. Hierdoor zal de beweging van het water groter zijn en dus ook de nulpuntverschuiving.

Het verschil tussen de opgaande en de neergaande lijn is het gevolg van de schokkerige beweging die veroorzaakt wordt door de tweede orde afwijking van de aandrijving (paragraaf 5.2.1.2).

Tenslotte werkt de EMS met een bepaalde demping. Deze wordt veroorzaakt doordat de doorlaatfrequentie van de EMS lager is dan de meetfrequentie. Hierdoor worden de meetdata ongeveer een 'sample' later geregistreerd dan ze feitelijk optreden. De vertraging hierdoor is ongeveer 0,1 s.

7.1.1.3. Snelheidsfluctuaties

De snelheidsfluctuaties in de x-richting zijn na deze serie proeven niet eenvoudig te bepalen. Deze snelheidsfluctuaties zijn nodig om de turbulentie in x- en z-richting met elkaar te kunnen vergelijken.

Om van beide richtingen toch de root mean square waarden te kunnen vergelijken zijn er enkele willekeurige korte reeksen met meetwaarden geselecteerd. Van deze waarden is de snelheid, gemeten met de EMS, tegen de tijd uitgezet, en is een grafiek getekend in Excel. Indien de grafiek niet langer is dan ongeveer een periode is deze goed te benaderen door een vijfde of zesde graads polynoom. Door nu de functie van deze polynoom te gebruiken voor het berekenen van de snelheden kunnen de snelheidsfluctuaties ten opzichte van een vloeiende lijn berekend worden.

In bijlage C5 is dit gedaan voor een viertal korte reeksen met meetwaarden. Vervolgens is de root mean square waarde berekend voor de x-richting ($V_{x,rms}$). De root mean square waarden voor de z-richting zijn bij alle proeven al eerder berekend uit alle meetwaarden van de reeksen en zijn opgenomen op de werkbladen van de proeven die allemaal op de cd-rom zijn terug te vinden. Beide kunnen nu eenvoudig worden vergeleken en blijken van dezelfde orde grootte te zijn.

7.1.2. Analyse proeven met het oude rooster

Met het oude rooster is een aantal proeven gedaan waarbij er gedurende de proeven snelheden in x en z-richting zijn gemeten. Uit deze gegevens zijn de root mean square waarden van de snelheden in x en z-richting te berekenen. Deze snelheden zijn een maat voor de mate van turbulentie die er in de kolom aanwezig is.

7.1.2.1. Symmetrie

Om het aantal metingen te beperken is eerst bekeken of er symmetrie van de root mean square waarden is rond de horizontale staven. Gezien de regelmatige vorm van het rooster was dit te verwachten. Uit de resultaten van enkele proeven blijkt dan ook dat de verschillen tussen $h=3,75$ cm en $h=11,25$ cm net als tussen $h=0$ cm en $h=15$ cm verwaarloosbaar klein zijn.

Hierbij is h de hoogte van de EMS boven een horizontale staaf van het rooster. In bijlage C6 zijn de resultaten van enkele metingen in een tabel samengevat.

Uit deze resultaten kan geconcludeerd worden dat er sprake is van symmetrie. Bij de overige proeven zijn er enkel nog snelheden gemeten op de hoogten $h=0$ cm, $h=3,75$ cm en $h=7,5$ cm. De waarden gemeten bij $h=3,75$ cm zijn gelijk gesteld aan die van $h=11,25$ cm, op dezelfde wijze zijn $h=0$ cm en $h=15$ cm gelijkgesteld.

7.1.2.2. Root Mean Square waarden

Voor 27 combinaties van verschillende hoek van uitslag, periode en positie van de EMS zijn er snelheidsmetingen in de x en y -richting gedaan. Uit de snelheidsmetingen in de y -richting is eenvoudig de root mean square waarde te berekenen (paragraaf 4.2.3). Voor de x -richting is dit minder eenvoudig omdat de snelheidsverschillen berekend moeten worden ten opzichte van een sinus-vormige lijn (paragraaf 7.1.1.3).

In bijlage C7 zijn de resultaten van de proevenserie weergegeven, hier is $V_{z,rms}$ getekend als functie van de hoogte van het rooster, voor constante waarde van periode, hoek van uitslag en positie van de EMS.

Uit de resultaten valt eenvoudig af te leiden dat de root mean square waarden groter worden naarmate de hoek van uitslag groter wordt, de periode kleiner wordt of de EMS zich dichterbij de kolomwand bevindt. Ook valt uit de resultaten af te leiden dat de root mean square waarden het grootst zijn direct achter de horizontale staven van het rooster en in het algemeen het kleinst precies tussen deze staven.

De verdeling over de hoogte is redelijk homogeen, er zijn in elk geval geen plekken waar er nauwelijks snelheidsfluctuaties zijn. Vooral voor de wat kleinere perioden, en grotere hoeken van uitslag lijkt de turbulentie behoorlijk homogeen. Achter de horizontale staven zijn er wel pieken in het turbulentieniveau.

Bovengenoemde resultaten zijn enkel gegeven voor $V_{z,rms}$ en niet voor $V_{x,rms}$ omdat deze waarden niet eenvoudig te berekenen zijn. Om toch enig inzicht te krijgen in de grote van deze waarden zijn in bijlage C5 voor enkele willekeurige opeenvolgende meetwaarden enkele waarden van V_x als functie van de tijd getekend.

Om het snelheidsverschil in een willekeurig punt ten opzichte van de gemiddelde snelheid te kunnen berekenen zal eerst een tweede lijn in de grafiek geplott moeten worden die de gemiddelde snelheid voorstelt. Dit is te realiseren door Excel een trendline op te laten stellen.

Omdat dit enkel mogelijk is voor polynomen tot de zesde graad is er voor gekozen om slechts een kleine periode meetgegevens te analyseren.

De gevonden trendline wordt weergegeven als functie van de tijd. Nu zijn de waarden van V_x volgens de trendline voor elk tijdstip te berekenen, en hiermee ook de waarde van $V_{x,rms}$. Omdat de periode waarover geanalyseerd wordt zeer kort is, zijn de resultaten enkel bruikbaar om een orde grootte af te schatten. Zo is de benadering d.m.v. een trendline al van grote invloed op de resultaten. Indien de berekening wordt uitgevoerd met behulp van een zesde graads polynoom zijn de gevonden waarden van $V_{x,rms}$ al aanzienlijk kleiner als wanneer diezelfde berekening wordt uitgevoerd met behulp van een vijfde graads polynoom.

Uit de in bijlage C5 gemaakte berekeningen volgt dat de $V_{x,rms}$ voor vier verschillende series meetgegevens redelijk constant is. Indien het gemiddelde van deze vier series wordt vergeleken met de waarde $V_{z,rms}$ dan blijkt er tussen beide waarden een factor 3 verschil te zitten.

Geconcludeerd kan worden dat de waarden $V_{x,rms}$ enkele malen kleiner zijn als die van $V_{z,rms}$. Hierbij dient in acht te worden genomen dat de berekeningen voor $V_{x,rms}$ niet erg betrouwbaar zijn. Omdat we in ons onderzoek vooral geïnteresseerd zijn in de verticale transporten en we niet verwachten dat de waarde van $V_{x,rms}$ hier van grote invloed op zal zijn, zullen we in dit rapport niet verder ingegaan op de berekening van $V_{x,rms}$.

7.1.3. Analyse proeven met het nieuwe rooster

Met het nieuwe rooster zijn dezelfde soort proeven uitgevoerd als die met het oude rooster. Verschillen in de proefuitvoering zaten in het aantal proeven en de hoogtes van de EMS.

Omdat er duidelijk sprake van symmetrie bleek te zijn rond de horizontale staven van het oude rooster, viel er te verwachten dat dit voor het nieuwe rooster ook zo zou zijn. Er zijn daarom slechts drie metingen uitgevoerd met het nieuwe rooster om de symmetrie aan te tonen. Uit de resultaten die weergegeven zijn in bijlage C6 bleek ook bij het nieuwe rooster sprake te zijn van symmetrie rond de horizontale staven.

De root mean square waarden zijn voor het nieuwe rooster op hoogtes van 0 cm, 2,5 cm en 5 cm uitgevoerd. De resultaten van deze metingen zijn op dezelfde wijze als die voor het oude rooster weergegeven in bijlage C8. Uit de resultaten volgt dat de snelheidsfluctuaties gemiddeld ongeveer even groot zijn als die met het oude rooster maar dat de verschillen over de hoogte iets kleiner zijn.

Vooraf voor grote hoeken van uitslag en korte perioden zijn de waarden van $V_{z,rms}$ iets gelijkmatiger over de hoogte verdeeld. Omdat de energieinbreng bij deze hoeken en perioden het best overeenkomt met die in een beun (paragraaf 4.2.5 en 4.2.6) lijkt het nieuwe rooster iets beter geschikt voor het opwekken van homogene turbulentie.

7.2. Analyse proeven uniform zand

In deze paragraaf zullen de resultaten van de in paragraaf 6.3 beschreven proeven worden geanalyseerd. Een meetplan van deze proeven is opgenomen in bijlage D7. Achtereenvolgens zullen besproken worden, de zeefkrommen, de D_{50} , de V_{rms} , het verloop van de concentratie in de tijd, de valsnelheden, de bepaling van epsilon en de controle met behulp van het model.

7.2.1. Zeefkrommen controleren

In paragraaf 6.3.5 is beschreven hoe er van een zandmonster een zeefkromme te bepalen is. Voor de verschillende zandsoorten is dit dan ook gedaan, de resultaten zijn te vinden in de bijlagen D4, D5 en D6.

Ook werd reeds vermeld dat er meerdere metingen nodig zijn om een zeefkromme goed te bepalen. Er zijn dan ook voor elke zandsoort drie verschillende monsters geanalyseerd. In de bijlagen D4, D5 en D6 zijn voor elke zandsoort drie zeefkrommen in een grafiek getekend. Duidelijk is te zien dat de lijnen zo goed als over elkaar heen liggen. Uit deze resultaten is af te leiden dat de zeefkrommen met een grote nauwkeurigheid vast te stellen zijn.

7.2.2. Werkelijke D_{50}

De door ons gebruikte zandsoorten zouden volgens de leverancier een D_{50} hebben van 80, 160 en 270 μm . Om de resultaten goed te kunnen analyseren is het belangrijk om te weten of dit voor elke zandsoort ook overeenkomt met de werkelijke D_{50} .

In de bijlagen D4, D5 en D6 zijn de zeefkrommen van respectievelijk de D80, D160 en D270 gegeven. Uit deze zeefkrommen is de D_{50} van elke fractie te bepalen door lineaire interpolatie tussen de waarden van de zeefgrootte waar cumulatief meer en waar cumulatief minder dan 50% op blijft liggen. Deze berekeningen zijn uitgevoerd op de bij de bijlagen behorende werkbladen. De werkbladen zijn op de cd-rom terug te vinden in de directory 'D1 – Algemene bestanden'.

In tabel 7.1 zijn de uitkomsten van de berekeningen samengevat. Uit de berekeningen volgt dat de werkelijke D_{50} afwijkt van de door de leverancier gegeven waarden.

Korrel diameter volgens leverancier (μm)	Werkelijke korrel diameter (μm)
80	96,56
160	156,71
270	263,50

Tabel 7.1
Korrel diameters

7.2.3. $V_{z,rms}$

Uit een geschikte reeks snelheidsmetingen is met behulp van formule 4.4 de waarde van $V_{z,rms}$ te berekenen. De reeks snelheidsmetingen moet hiervoor voldoende lang, nauwkeurig en representatief zijn.

- **Voldoende lang.**
Om het gemiddelde goed te kunnen bepalen moeten er snelheidsmetingen over minimaal enkele perioden beschikbaar zijn. Dit is in vrijwel alle gevallen het geval. Bij een aantal proeven zijn er door storingen in de apparatuur helemaal geen metingen.
- **Voldoende nauwkeurig.**
De meetwaarden moeten voldoende nauwkeurig zijn, hiervoor moet in ieder geval met een hoge frequentie worden gemeten. Over iedere periode moeten minimaal 5 tot 10 metingen plaatsvinden, indien dit niet het geval is, is het mogelijk dat er alleen pieken of dalen worden gemeten. In bijlage D8 is een snelheidsmetingen over een korte periode weergegeven, duidelijk is te zien dat het aantal metingen per periode ruim voldoende is.
Een tweede eis waaraan voldaan moet worden is dat het aantal sterk afwijkende punten zeer klein moet zijn ten opzichte van het aantal goede meetpunten. Afwijkende punten kunnen het gevolg zijn van meetfouten en komen vooral bij hoge concentraties regelmatig voor. In bijlage D9 zijn de snelheden gemeten bij een proef als functie van de tijd weergegeven. Duidelijk is te zien dat er tussen de metingen 7500 en 8000 een regelmatig verlopende snelheid wordt gemeten en dat er tussen de metingen 6600 en 7500 grote uitschieters naar onder en boven zijn. Indien $V_{z,rms}$ berekend wordt uit de metingen 6600 tot en met 7500 resulteert dit in een waarde die ruim twee maal zo groot is als wanneer $V_{z,rms}$ berekend wordt uit de metingen 7500 tot en met 8000.
- **Representatief.**
In een reeks snelheidsmetingen zoals weergegeven in bijlage D10 zijn vier trajecten te onderscheiden. Gedurende het eerste traject (meetwaarden 0 tot 400) is de meetapparatuur reeds aangezet maar is de kolom nog niet gevuld, met de EMS worden snelheden in lucht gemeten.

Berekenen van $V_{z,rms}$ gedurende dit traject leidt tot niet relevante waarden.

Tijdens het tweede traject (meetwaarden 400 tot 500) wordt de kolom gevuld en stroomt het mengsel langs de EMS omhoog, het is uiteraard onjuist om uit deze waarden de $V_{z,rms}$ te berekenen.

Het derde traject (meetwaarden 700 tot 2000) is de periode waarin de EMS zich in het mengsel bevindt. Tijdens deze periode kunnen er relevante waarden van $V_{z,rms}$ berekend worden indien de metingen ook voldoende lang en nauwkeurig zijn.

Het laatste traject (meetwaarden 3000 tot 4000) komt alleen voor bij proeven met hoge concentraties. Gedurende dit traject is er een grote hoeveelheid zand bezonken, de EMS is ingezand en berekening van $V_{z,rms}$ gedurende dit traject zou dan ook tot niet representatieve waarden leiden.

Voor alle proeven waar aan deze drie voorwaarden werd voldaan is $V_{z,rms}$ berekend. In bijlage D11 is een overzicht van de resultaten gegeven. Dit is zowel in een tabel als in een grafiek gedaan.

In de grafiek zijn de waarden van $V_{z,rms}$ voor constante instellingen van de kolom uitgezet tegen de concentratie. Ondanks het beperkte aantal metingen is duidelijk te zien dat $V_{z,rms}$ onafhankelijk is van de concentratie en varieert met de instellingen van de kolom.

Indien de waarden van $V_{z,rms}$ worden vergeleken met de waarden berekend uit de watermetingen (paragraaf 7.1.2.2 en bijlage C8) blijkt dat ook deze goed overeen komen.

Om verdere berekeningen te vereenvoudigen is er voor gekozen om de berekende waarden voor een turbulentieniveau te middelen en deze waarde aan te houden voor alle proeven die bij een gelijke hoek en frequentie zijn uitgevoerd. In tabel 7.2 is een overzicht gegeven van deze waarden.

$d\alpha(^{\circ})$	Periode (s)	$V_{z,rms}$ (m/s)
85,3	1,66	0,018
99,5	1,30	0,026
110,3	1,30	0,029
99,5	1,03	0,032
110,3	1,03	0,043

Tabel 7.2

$V_{z,rms}$ als functie van het turbulentieniveau

Gezien het feit dat er op het EMS-signaal relatief veel storende signalen zaten zijn wij er niet in geslaagd om uit deze data een energiedichtheids-spectrum te bepalen.

7.2.4. Concentratieverloop in de tijd

Gedurende alle proeven zijn de concentraties met behulp van concentratiemeters (paragraaf 5.1.2.2) op verschillende hoogtes in de kolom gemeten. De spanning die door de concentratiemeters doorgegeven wordt is afhankelijk van de temperatuur en de concentratie.

Om de voltages om te kunnen rekenen naar concentraties zijn de meters elk afzonderlijk geijkt. In paragraaf 7.2.4.1 is beschreven hoe de ijking van de meters uitgevoerd is. In paragraaf 7.2.4.2 is beschreven hoe er uit de datareeks grafieken gevormd zijn die het concentratieverloop als functie van de tijd weergeven. En in paragraaf 7.2.4.3 zijn de concentratieprofielen als functie van de hoogte behandeld.

7.2.4.1. Ijken van de concentratiemeters

Om de voltages die de concentratiemeters meten om te kunnen rekenen naar concentraties zijn de meters geijkt. Omdat de gemeten voltages afhankelijk zijn van zowel de temperatuur als de concentratie zullen beide parameters moeten voorkomen in de ijkformules.

Bij de ijking van onze meters hebben we gebruik gemaakt van het door R&R aangetoonde lineaire verband tussen weerstand en concentratie. Met deze vereenvoudiging is het voldoende om de weerstand van een concentratiemeter bij een concentratie van bijvoorbeeld 0 % en 55,68 % te kennen. Beide natuurlijk als functie van de temperatuur.

Er zijn dan twee lijnen te tekenen met een constante concentratie waarbij het gemeten voltage tegen de temperatuur uitgezet kan worden. Dit is in bijlage D13 gedaan voor concentratiemeter 1. Als deze twee lijnen bekend zijn is de relatie tussen het gemeten voltage en de concentratie eenvoudig af te leiden omdat er een lineair verband tussen beide bestaat.

$$C(V, T) = (0,194T + 1,701 - V) / ((0,194T + 1,7015) - (0,064T - 2,0609)) \cdot 55,68$$

De overige meters zijn op identieke wijze geijkt, alle ijkformules zijn te vinden in bijlage D12.

Om te controleren of het lineaire verband tussen concentratie en weerstand juist is hebben we nog enkele metingen uitgevoerd bij concentraties tussen de 0 en 60 % in. De gewenste concentratie werd bereikt door droog zand te wegen en aan een bekende hoeveelheid water toe te voegen. Dit zand-watermengsel hebben we met behulp van een mixer in suspensie gebracht zodat een homogeen mengsel ontstond. De resultaten kwamen overeen met het lineaire verband zodat hier verder mee gerekend is.

7.2.4.2. Grafieken van het concentratieverloop in de tijd.

Met de geijkte concentratiemeters zijn de voltages om te rekenen tot concentraties. Deze berekeningen zijn voor alle proeven in Excel gemaakt, zodat er 8 of 12 kolommen ontstaan met daarin het concentratieverloop in de tijd. Hiervan is een grafiek te tekenen, dit is voor alle 86 proeven gedaan en is terug te vinden op het blad "ruwe grafiek" in de Excel bestanden op de cd-rom. In bijlage D14 is als voorbeeld een grafiek opgenomen.

In de grafiek zijn 12 lijnen geplot, al deze lijnen stellen het verloop van de concentratie in de tijd voor. Elke lijn geeft het verloop van de concentratie op een bepaalde hoogte weer, waarbij concentratie 1 de concentratie voorstelt gemeten met concentratiemeter 1. Concentratiemeter 1 bevindt zich op 0.2 m boven de onderzijde van de kolom. De positie van de overige concentratiemeters is terug te vinden in bijlage B2.

Gedurende de proef is in figuur D.9 in bijlage D14 te zien dat de concentratie gemeten met meter 1 relatief snel toeneemt en die gemeten met meter 12 relatief snel afneemt. Dit wil zeggen dat de concentratie onder in de kolom toeneemt en boven in de kolom afneemt. Na verloop van tijd ontstaat er een evenwichtssituatie, de concentraties veranderen niet meer in de tijd. Het evenwichtsprofiel is te herkennen aan de horizontaal lopende lijnen in figuur D.9. Deze situatie ontstaat in dit geval na ongeveer 480 seconden.

In bijlage D15 zijn drie grafieken opgenomen waarbij de zandsoort en de concentratie ongeveer gelijk zijn. In de eerste grafiek is het concentratieverloop in de tijd weergegeven voor een proef zonder turbulentie. In de tweede grafiek is hetzelfde gedaan voor een proef met een laag turbulentieniveau en in de derde grafiek is het concentratieverloop weergegeven voor een proef met een hoog turbulentieniveau.

Indien de grafieken onderling worden vergeleken is te zien dat de bezinking sneller gaat naarmate het turbulentieniveau lager is. Ook is te zien dat er bij een hoger turbulentieniveau een deel van het mengsel in suspensie blijft.

In bijlage D14 is in figuur D.9 te zien dat de signalen nogal schokkerig zijn. Er is daarom besloten om een drijvend gemiddelde te berekenen uit 11 omliggende waarden. Uit deze waarden zijn opnieuw grafieken getekend die het concentratieverloop als functie van de tijd weergeven. De grafieken zijn veel vloeiender als de voorgaande, in bijlage D14 is van dezelfde proef ook een "gedempte" grafiek getekend. De gedempte grafieken zijn voor alle proeven berekend en getekend, in de Excel bestanden zijn ze terug te vinden op het blad "bewerkte grafiek". Deze "gedempte" grafieken zijn ook allemaal in de grafiekenbundel opgenomen.

7.2.4.3. Concentratieprofielen als functie van de hoogte.

Uit de “gedempte” datareeksen kunnen voor een bepaald tijdstip, bijvoorbeeld het tijdstip $t=0:30$ (0minuten, 30 seconden) de concentraties op de verschillende concentratiemeters worden afgelezen. Met deze waarden kan het concentratieverloop over de hoogte getekend worden.

Voor alle proeven is dit waar mogelijk gedaan op 30 verschillende tijdstippen. In deze grafieken is duidelijk te zien hoe het concentratieverloop over de hoogte in de tijd verandert. In bijlage D14 is als voorbeeld een grafiek opgenomen. Ook deze grafieken zijn voor alle proeven gemaakt, de grafieken zijn op de Excel sheets terug te vinden op de bladen “hoogte”. De grafieken zijn ook in de grafiekenbundel opgenomen.

7.2.5. Valsnelheid

De valsnelheid van de korrels met een korrelgrootte gelijk aan die van de D_{50} is bij de proeven zonder turbulentie gelijk aan die van de verplaatsing van een front van gelijke concentratie. De helft van de korrels zal sneller vallen en de helft minder snel. De juiste concentratie om de snelheid van het front te meten is een concentratie midden tussen de beginconcentratie en 0.

Uit de diverse nulmetingen is dus eenvoudig w_s te berekenen. Door deze berekening uit te voeren bij proeven met verschillende concentraties kan het verband tussen w_s en de concentratie bepaald worden. In bijlage D16 is dit voor de verschillende zandsoorten gedaan.

De resultaten kunnen vergeleken worden met de theorieën van Richardson and Zaki (formules 4.61 en 4.63) en een gecombineerde theorie waarbij w_0 berekend is volgens de empirische relatie van Ruby (formule 4.52) en ‘n’ (formule 4.61) berekend is volgens de theorie van Al-Dibouni (formule 4.64).

Door nu de resultaten van beide theorieën te vergelijken met de valsnelheden zoals deze gemeten zijn in de kolom, kan bekeken worden welke theorie het beste overeenkomt met de proefresultaten. In bijlage D16 zijn de valsnelheden uitgezet tegen de concentraties voor de drie uniforme zandmengsels.

Uit de resultaten van deze vergelijking volgt dat de verschillen tussen beide theorieën en de gemeten waarden niet te verwaarlozen zijn. De gecombineerde theorie van Ruby en Al-Dibouni benadert de meetwaarde het beste. Bij verdere berekeningen van w_s is gebruik gemaakt van bovengenoemde theorie.

7.2.6. Bepaling van epsilon

Omdat er voldoende proeven zijn gedaan waarbij er lang genoeg gemeten is om tot een evenwichtsprofiel te komen is er besloten om ε alleen te bepalen voor proeven waarbij een evenwichtsprofiel bereikt is. Dit is aanzienlijk eenvoudiger dan de berekening van ε uit profielen die zich niet in een evenwichtssituatie omdat formule 4.81 in dat geval te vereenvoudigen is.

In een evenwichtsprofiel geldt:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (7.1)$$

Met deze voorwaarde volgt uit formule 4.81

$$\varepsilon = \frac{w_s(C) \cdot C}{\frac{\partial C}{\partial z}} \dots\dots\dots (7.2)$$

Uit de meetdata zijn de concentraties als functie van de hoogte af te lezen. Met deze waarden is dC/dz (bijlage D17) te bepalen. Met de formules 4.52, 4.61 en 4.62 is $w_s(C)$ volgens de theorieën van Ruby en Al-Dibouni te berekenen. Uit deze waarden volgt ε als functie van de hoogte. In bijlage D17 is deze berekening uitgevoerd voor een willekeurig evenwichtsprofiel.

Het resultaat is een zeer onregelmatig verlopende waarde van ε , dit heeft de volgende oorzaken:

- Te grote stapgrootte.
 De stappen van 0,1 meter zijn gelijk aan de afstand tussen twee concentratiemeters en zijn dan ook niet eenvoudig te verkleinen. Door de stapgrootte van 0,1 meter is het moeilijk om dC/dz nauwkeurig te berekenen.
- Beperkte nauwkeurigheid van de concentratiemeters.
 De concentraties die gemeten worden met de concentratiemeters zijn op enkele procenten nauwkeurig te bepalen. Hierdoor kan het voorkomen dat er positieve concentratiegradiënten (concentratie onder in de kolom lager dan boven in de kolom) gemeten worden. Dit gebeurt op posities in de kolom waar de concentratie in werkelijkheid zo goed als constant is. Bijvoorbeeld boven in de kolom als al het zand bezonken is. Indien dC/dz negatief is volgt dat ook ε negatief is (w_s is naar beneden gericht en dus altijd negatief). Negatieve waarden van epsilon kunnen theoretisch niet voorkomen en zijn dus onjuist. Dit wordt verduidelijkt in bijlage D18 waar voor een proef dC/dz en $w_s \cdot C$ als functie van C in een evenwichtssituatie getekend zijn.

Een betere benadering van ε is te krijgen indien het bekende concentratieverloop over de hoogte benaderd wordt met een polynoom. In bijlage D17 is dit voor een concentratieprofiel gedaan. Met behulp van de functie van de polynoom zijn de concentraties volgens de polynoom te berekenen. Door de polynoom te differentieren naar de hoogte (z) is dC/dz nauwkeurig te berekenen. Hieruit is ε op dezelfde wijze als boven beschreven te berekenen. Ook deze berekening is in bijlage D17 opgenomen.

Met een polynoom is het deel van het concentratieprofiel waar $dC/dz = 0$ is moeilijk te beschrijven. De polynoom gaat dan om de constante waarde slingeren en geeft positieve en negatieve waarden van dC/dz . In situaties waar dit voorkwam is de polynoom enkel voor het gebied opgesteld waar dC/dz duidelijk kleiner als 0 was. In die gevallen is ε uiteraard ook alleen voor dat gebied berekend.

Een andere manier om het concentratieverloop als functie van de hoogte te benaderen is door middel van twee e-machten. Het voordeel van deze benadering is dat een functie van een e-macht niet slingert zodat dC/dz altijd negatief is. In bijlage D17 is een concentratieprofiel benaderd door twee e-macht, dC/dz is vervolgens uit de afgeleide functie bepaald en $w(C) \cdot C$ is bepaald volgens de gecombineerde theorie van Richardson and Zaki en Ruby. Uit deze gegevens is ε vervolgens berekend.

Aan de onderzijde waar het mengsel is bezonken en de concentratie ongeveer 60 % is zal dC/dz tot 0 naderen en zal $w(C) \cdot C$ nog wel een waarde hebben. Hieruit volgt dat ε hier erg groot zal worden. Aan de bovenzijde naderen zowel dC/dz als $w(C) \cdot C$ tot nul zodat het onduidelijk is wat een juiste waarde voor ε is.

Dit volgt ook uit de twee benaderingsmethoden waar bij beide benaderingsmethoden ε zeer groot wordt voor hoge concentraties. Voor lage concentraties ($h > 0,9$) zijn er wisselende resultaten tussen beide methoden. De uitkomsten volgens de methode van een polynoom lijken op dit domein van h onjuist omdat er negatieve waarden worden berekend. Dit is het gevolg van de positieve waarden van dC/dz die uit het polynoom berekend zijn terwijl deze in werkelijkheid negatief zouden moeten zijn.

Bij alle proeven, waarvan een evenwichtsprofiel bekend is, is ε voor verschillende waarden in de hoogte berekend zonder gebruik te maken van polynomen. Voor zes proeven, twee van elke zandsoort is ε ook berekend met behulp van een polynoom die het concentratieverloop over de hoogte beschrijft. Voor één proef is er gebruik gemaakt van de methode met een benadering door een e-macht.

De resultaten van alle drie de berekeningsmethoden geven matige resultaten voor de berekening van ε voor het gedeelte van de kolom dat in suspensie is en onrealistische waarden voor de delen waar $C \approx 60\%$ is en de delen waar $C \approx 0\%$. Wel is het mogelijk om aan de hand van de resultaten de orde grootte van ε te bepalen zodat deze waarde als startwaarde kan dienen in het model (hoofdstuk 3).

Ook volgt uit de resultaten dat ε niet constant is over de hoogte van de kolom en een minimum heeft in het gebied waar de concentratie ongeveer half zo groot is als C_{\max} . In het gebied met hoge concentraties wordt ε zeer groot en in het gebied met lage concentraties is het verloop van ε onduidelijk.

Met het model kan ε benaderd worden door ε te variëren totdat een concentratieverloop gevonden wordt wat het beste overeenkomt met dat van de metingen. Zie hiervoor ook paragraaf 7.2.7.

7.2.7. Controle door model

Met behulp van het in hoofdstuk 3 beschreven model is een aantal proeven gesimuleerd. De resultaten van de metingen en de simulatie kunnen met elkaar worden vergeleken. In het model kunnen enkele parameters veranderd worden zodat de invloed van deze parameters goed geanalyseerd worden. De parameters die gevarieerd kunnen worden zijn de temperatuur, de beginconcentratie, de korrelgrootte en epsilon.

Ook is het mogelijk een van deze parameters te benaderen indien de overige parameters bekend zijn. Dit is voor 12 proeven uit de serie met het fijnste en 16 proeven met het grofste zand gedaan om epsilon te bepalen. De resultaten van deze benadering zijn opgenomen in bijlage D19. In deze bijlage zijn ook voor een willekeurige proef de benadering van het verloop door het model en het gemeten verloop van de concentraties op verschillende hoogtes in de tijd in twee grafieken opgenomen.

Uit de resultaten blijkt dat zowel de zandsoort, de beginconcentraties als het turbulentieniveau in de kolom van invloed zijn op de waarde van ε . Bij de proeven met de fijne fractie ($D_{50}=96,56 \mu\text{m}$) zijn de verschillen tussen de benaderde waarden van ε groter dan bij de proeven met de grovere fractie ($D_{50}=263,50 \mu\text{m}$).

Bij beide zandsoorten neemt ε toe bij een toenemend turbulentieniveau en een toenemende beginconcentratie. De beginconcentratie lijkt de grootste invloed te hebben op de grootte van ε . Dit is te verklaren omdat er bij hoge concentraties grote dichtheidsverschillen in de kolom zijn. Deze verschillen veroorzaken uitwisseling van delen met hoge concentraties en delen met lage concentraties. Dit verschijnsel heet 'Settling Convection'.

Een beperking van het model is dat ε constant over de hoogte van de kolom wordt verondersteld. Uit de analyse in paragraaf 7.3.6 blijkt dat dit niet juist is en dat ε in werkelijkheid groter is aan de boven en onderzijde van de kolom.

De met het model benaderde resultaten kunnen dan ook enkel gebruikt worden om een ordegrrootte van ε aan te geven en verbanden vast te stellen zoals in bovenstaande alinea is gedaan.

7.3. Analyse proeven niet uniform zand

De analyse komt in grote mate overeen met de in paragraaf 7.2 uitgevoerde analyse van de proeven met uniform zand. De uitvoering van de proeven met het niet uniforme mengsel is in paragraaf 6.4 beschreven. Waar de analyse overeenkomt is volstaan met verwijzingen en samenvattingen van de resultaten. Nieuwe elementen zoals het verloop van de D_{50} over de hoogte van de kolom zijn uitvoeriger geanalyseerd.

7.3.1. Zeefkromme van het niet uniforme mengsel

Het niet uniforme mengsel is samengesteld uit de drie zandsoorten (paragraaf 6.4.1). De zeefkromme van het mengsel is eenvoudig te berekenen uit de afzonderlijke zeefkrommen van de verschillende fracties en is opgenomen in bijlage E1.

Omdat de zeefkrommen van de afzonderlijke fracties nauwkeurig zijn bepaald en het niet eenvoudig is om een representatief monster uit het mengvat af te tappen is besloten om de berekende zeefkromme niet te controleren.

7.3.2. Werkelijke D_{50}

Ook van het mengsel is de D_{50} bepaald door lineaire interpolatie tussen de waarden van de zeefgrootte waar cumulatief meer en waar cumulatief minder dan 50% op blijft liggen.

De D_{50} bleek 159,44 μm te zijn.

7.3.3. $V_{z,rms}$

Uit de analyse van de proeven met uniform zand bleek reeds dat de waarde van $V_{z,rms}$ onafhankelijk is van de concentratie. De waarden van $V_{z,rms}$ zijn voor de proeven met het mengsel dan ook niet opnieuw geanalyseerd. Het verband tussen $V_{z,rms}$ en de verschillende turbulentiëniveaus is in tabel 7.2 terug te vinden.

7.3.4. Concentratieverloop in de tijd

Ook het concentratieverloop in de tijd is bij deze serie proeven op dezelfde wijze bijgehouden als bij de proeven met de uniforme fracties. Ook zijn er van alle proeven “gedempte” grafieken en concentratieprofielen als functie van de hoogte getekend. Deze grafieken zijn terug te vinden in de grafiekenbundel en op de cd-rom, ook zijn er in bijlage E4 van een willekeurige proef enkele grafieken als voorbeeld opgenomen.

De grafieken vertonen hetzelfde verloop als die van de uniforme mengsels. Uiteraard zijn de snelheden waarmee de bezinking plaatsvindt afhankelijk van de korrelgrootte, de concentratie en de watertemperatuur.

7.3.5. Valsnelheid

De valsnelheden voor het niet uniforme mengsel zijn net als de valsnelheden van het uniforme mengsel berekend uit de meetresultaten. Ook is op identieke wijze de valsnelheid te berekenen volgens de theorieën van Richardson and Zaki en Ruby. Dit is voor alle proeven gedaan, de resultaten zijn opgenomen in bijlage E3. In deze bijlage zijn ter vergelijking ook de gemeten valsnelheden van de uniforme fractie ($D_{50}=160 \mu\text{m}$) opgenomen. In de grafiek is te zien dat de gemeten valsnelheden van het uniforme en het niet uniforme zand met gelijke D_{50} ongeveer even groot zijn.

7.3.6. Bepaling van epsilon

Net als bij de uniforme mengsels kan epsilon berekend worden uit de proefresultaten. Dit is voor alle proeven gedaan en de resultaten zijn op de cd-rom terug te vinden. Omdat ook hier de resultaten matig tot slecht waren is het concentratieverloop in de evenwichtsprofielen niet meer benaderd door polynomen en e-machten om daar epsilon uit te berekenen. Ook is ε niet meer benaderd door het model.

7.3.7. Analyse van de afgetapte monsters

In paragraaf 6.4.2 is beschreven dat er gedurende de proeven 276 monsters afgetapt zijn en dat van al deze monsters een zeefkromme bepaald is. In paragraaf 6.3.5 is beschreven hoe een zeefkromme bepaald kan worden, hierin wordt ook vermeld dat er 16 minuten getrild moet worden en dat er meerdere zeefkrommen van één monster bepaald moeten worden.

Omdat het bepalen van één zeefkromme al minstens 16 minuten trillen plus 4 minuten zeven kost is de totale benodigde tijd voor het analyseren van alle monsters al minimaal 5520 minuten. Indien er ook nog eens van elk monster ter controle drie zeefkrommen bepaald zouden worden dan zou hiermee de totale benodigde tijd op 16560 minuten oftewel 276 uur komen.

Deze tijd hadden wij niet meer ter beschikking zodat er in overleg met dhr A.M. den Toom, medewerker van het laboratorium en hoofd van de analyseruimte besloten is om een tweede serie zeefanalyses te maken en geen 16 maar 8 minuten te zeven. Hierdoor kan gedurende het trillen van het ene monster het tweede gezeefd worden zodat er ongeveer elke 10 minuten een monster geanalyseerd wordt.

Er is besloten om slechts 8 minuten te trillen omdat er volgens A.M. den Toom tussen 8 minuten en 16 minuten trillen nauwelijks korrels door de zeven naar beneden vallen. De resultaten na 8 minuten trillen zullen dus slechts zeer weinig verschillen van die na 16 minuten trillen.

Bij het aftappen van de monsters worden er bemonsteringsfouten gemaakt, in paragraaf 4.4.3 is beschreven hoe dit komt en hoe groot de fouten zijn voor korrels van 60, 110, 270 en 500 μm . Bij de analyse van de monsters dienen de resultaten gecorrigeerd te worden.

Voor tussenliggende korrelgroottes is een lineair verband aangenomen zodat de resultaten van het zeven volgens onderstaand tabel gecorrigeerd kunnen worden. Hierbij is de werkelijke fractiegrootte te berekenen door de gemeten fractiegrootte te delen door de correctiefactor.

$$f_w = \frac{f_m}{c} \dots\dots\dots (7.3)$$

Hierin is:

- f_w = Werkelijke fractiegrootte [kg]
- f_m = Gemeten fractiegrootte [kg]
- c = Correctiefactor [-]

In de onderstaande tabel zijn de toegepaste correctiefactoren van de gebruikte zeven gegeven.

Zeefgrootte (μm)	Correctiefactor
53	0,85
75	0,82
106	0,75
150	0,75
212	0,75
300	0,73
425	0,69

Tabel 7.3
 Correctiefactoren

7.3.8. D_{50} van de monsters

Nadat de correctiefactoren (paragraaf 7.3.7) zijn toegepast is de zeefkromme van een monster bepaald en hieruit is vervolgens de D_{50} van een monster bepaald. Dit is voor alle monsters gedaan, de resultaten zijn terug te vinden op de cd-rom.

Het verloop van de D_{50} in de tijd kan nu voor elke proef als functie van de tijd geplot worden. Dit is voor alle proeven gedaan en de grafieken zijn in de grafiekenbundel opgenomen, de concentraties op het moment van aftappen zijn bij de lijnen geplot. In bijlage E5 zijn enkele grafieken opgenomen.

Uit de grafieken is duidelijk af te leiden dat er ontmenging optreedt en dat de mate van ontmenging per proef verschilt. Bij alle proeven zakken de grove korrels het snelst naar beneden zodat de D_{50} onder in de kolom toeneemt en de D_{50} boven in de kolom afneemt. De snelheid waarmee dit gebeurt en de uiteindelijke verschillen in de grootte van de D_{50} zijn afhankelijk van het turbulentieniveau en de beginconcentratie.

7.3.8.1. Invloed van het turbulentieniveau op het verloop van de D_{50}

In bijlage E5 zijn de waarden van de D_{50} voor drie verschillende concentraties bij een relatief hoog en een relatief laag turbulentieniveau geplot. De bovenste lijn in de figuren stelt de D_{50} op een hoogte van 30 cm boven de bodem van de kolom voor, de onderste lijn stelt de D_{50} op een hoogte van 120 cm boven de bodem van de kolom voor.

De waarden van de D_{50} blijven na verloop van tijd constant, er is dan een evenwichtsprofiel bereikt en ook de dC/dt nadert tot 0. Bij de proeven in bijlage E5 wordt deze situatie in alle gevallen na 10 tot 20 minuten bereikt.

De waarden van D_{50} in de evenwichtssituatie zijn voor de onderste en de bovenste lijn zo goed mogelijk uit de grafiek afgelezen en in de onderstaande tabel weergegeven. 'Δ' staat voor de spreiding in de karakteristieke korreldiameter (D_{50}).

Turbulentieniveau	$C \approx 12.5\%$	$C \approx 25\%$	$C \approx 12.5\%$
relatief hoog	70-130 μm $\Delta = 60 \mu\text{m}$	75-160 μm $\Delta = 85 \mu\text{m}$	75-170 μm $\Delta = 95 \mu\text{m}$
relatief laag	65-90 μm $\Delta = 25 \mu\text{m}$	65-165 μm $\Delta = 100 \mu\text{m}$	65-175 μm $\Delta = 110 \mu\text{m}$

Tabel 7.4
 D_{50} bij verschillende turbulentieniveaus en concentraties

De grafieken uit bijlage E5 zijn in bijlage E6 gecombineerd tot 5 grafieken. In de eerste twee grafieken zijn de waarden van de D_{50} bij de drie verschillende concentraties geplot voor de beide turbulentiëniveaus. In de andere grafieken is juist de concentratie constant gehouden en zijn voor de verschillende concentraties de hoge en lage turbulentiëniveaus samen in één grafiek getekend.

Uit de grafieken uit de bijlagen E5 en E6 en de tabel valt af te leiden dat de grofste korrels zich onder in de kolom bevinden en de fijnste korrels zich boven in de kolom bevinden. Ook is te zien dat het verschil tussen de waarden (Δ) groter is bij het relatief lage turbulentiëniveau.

Uitzondering hierop is de proef met een concentratie van ongeveer 12,5 %, $\Delta=25 \mu\text{m}$. De waarde van $130 \mu\text{m}$ is ten opzichte van de waarde van $90 \mu\text{m}$ heel hoog. Indien beide concentraties met elkaar worden vergeleken (bijlage E5) is te zien dat ook de concentratie duidelijk hoger is. Het verschil verklaren we dan ook door het concentratieverschil.

Bij het relatief lage turbulentiëniveau is het mengsel ter plaatse van het onderste aftappunt al zo goed als bezonken terwijl er bij het relatief hoog turbulentiëniveau nog meer zand en dus ook grovere korrels in suspensie zijn. Indien de D_{50} op een hoogte van 40 cm boven de bodem vergeleken zou worden dan verwachten we dat de D_{50} bij een relatief hoog turbulentiëniveau lager zal zijn als de D_{50} bij een relatief laag turbulentiëniveau.

7.3.8.2. Invloed van de beginconcentratie

Indien opnieuw tabel 7.4 en bijlage E6 bekeken worden is te zien dat de waarden boven in de kolom vrij constant zijn voor de verschillende concentraties. Onder in de kolom is dit echter niet het geval, dit is te verklaren door het verschillende niveau van inzanden. Bij hogere concentraties zandt het onderste aftappunt geheel in, uiteraard zal er dan een mengsel met grovere korrels afgetapt worden dan wanneer dit punt niet inzandt.

Het evenwichtsprofiel dat ontstaat in het gebied met concentraties tussen ongeveer 5 en 55 % lijkt onafhankelijk van de beginconcentratie. De beginconcentratie bepaalt wel de gradiënt van de D_{50} over de hoogte. Naarmate de beginconcentratie hoger is, is ook het niveau van het ingezande pakket in de kolom hoger en de hoogte waarover de D_{50} verloopt kleiner en dus de gradiënt van de D_{50} groter.

7.3.8.3. Snelheid van de ontmenging

De snelheid waarmee de ontmenging plaatsvindt kan vergeleken worden. Ook hier kan geanalyseerd worden of het turbulentieniveau en de concentratie van invloed zijn op de snelheid van de ontmenging.

De invloed van de beginconcentratie op de snelheid van de ontmenging kan het eenvoudigst geanalyseerd worden door de lijnen in de eerste twee figuren van bijlage E6 met elkaar te vergelijken. In de grafiek met een relatief laag turbulentieniveau is duidelijk te zien dat de ontmenging sneller gaat naarmate de beginconcentratie lager is. De tweede figuur voor relatief hoge turbulentieniveaus geeft hetzelfde beeld. De snellere ontmenging is waarschijnlijk het gevolg van de afnemende valsnelheden bij hogere concentraties als gevolg van hindered settling.

De invloed van het turbulentieniveau is te analyseren door lijnen in de derde, vierde en vijfde grafiek van bijlage E6 met elkaar te vergelijken. De verschillen in snelheid van ontmenging zijn zeer klein, de mate van turbulentie lijkt dan ook niet van invloed op de snelheid van ontmenging.

Indien de resultaten echter worden vergeleken met die van de meting zonder turbulentie is in de grafieken in de grafiekenbundel te zien dat er wel verschillen zijn. De ontmenging gaat sneller indien er geen turbulentie aanwezig is, vooral bij hoge concentraties is dit duidelijk te zien.

7.3.8.4. Grootte van de D_{50} in het bovenste deel van de kolom

De waarden van de D_{50} boven in de kolom worden beïnvloed door de beginconcentratie en het turbulentieniveau. Hoge beginconcentraties hebben tot gevolg dat bij het bezinken van de grove korrels veel fijne korrels meegenomen worden en ook bezinken. Hierdoor is de D_{50} in de evenwichtssituatie bij de proeven met een hoge beginconcentratie boven in de kolom iets groter dan bij lage concentraties. Dit is terug te vinden in de grafieken "verloop van de D_{50} " in de grafiekenbundel.

Naarmate het turbulentieniveau toeneemt is de waarde van de D_{50} boven in de kolom iets toe. Dit is te verklaren door de evenwichtsprofielen van de proeven met uniforme zandfracties te bestuderen.

Hier is duidelijk te zien dat bij toenemende turbulentiegraad meer zand en dus ook grover zand in suspensie gehouden kan worden. Het lijkt dus logisch dat de D_{50} bij hogere turbulentieniveaus iets hoger is.

7.3.8.5. Overige optredende effecten

Indien alle grafieken van het verloop van de D_{50} in de tijd worden bekeken (grafiekenbundel) is er een opvallend verschijnsel te zien. Bij de hoogste concentraties en de wat hogere turbulentieniveaus zijn er pieken te zien in de lijnen op de hoogtes 0,3 en 0,6 meter. De pieken treden op tussen de 0 en 5 minuten en de D_{50} is duidelijk hoger als de D_{50} in de evenwichtssituatie.

Er zijn twee oorzaken die dit resultaat kunnen verklaren, de eerste heeft te maken met de hoogte van de aftappunten. Het is mogelijk dat de grove korrels bezinken en de D_{50} onder in de kolom toeneemt totdat de korrels beneden het onderste aftappunt komen. De iets minder grove korrels bezinken minder snel en zullen zich ten tijde van het inzanden van het onderste aftappunt op de hoogte van het aftappunt bevinden. Dit zou de pieken in het verloop van de D_{50} kunnen verklaren.

Een tweede verklaring van het verschijnsel zou de hindered settling kunnen zijn. Door het bezinken van de grove korrels ontstaat een retourstroom die de fijne korrels mee omhoog neemt. Hierdoor worden de fijne deeltjes onder in de kolom tussen de grote uitgespoeld en neemt de D_{50} daar toe. Na verloop van tijd zullen bij lagere concentraties ook de wat fijnere korrels bezinken.

8. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

8.1. Conclusies

In de paragrafen 8.1.1, 8.1.2 en 8.1.3 zijn de belangrijkste resultaten uit de analyse samengevat. In paragraaf 8.1.1 worden de conclusies uit de serie metingen in water beschreven. Paragraaf 8.1.2 bevat de conclusies van de proeven waarbij gebruik gemaakt is van zand met een uniforme korrelverdeling. In paragraaf 8.1.3 zijn de conclusies beschreven van de serie proeven waarbij een niet uniforme zandfractie gebruikt is.

8.1.1. Conclusies met betrekking tot watermetingen

Na een uitgebreide analyse van de proefresultaten (paragraaf 7.1) zijn er enkele conclusies te trekken. De belangrijkste conclusies voor de serie proeven in water waarbij de snelheden zijn gemeten in het water zijn hieronder opgesomd:

- Uit de proefresultaten is gebleken dat het turbulentieniveau dat in de kolom wordt opgewekt in de x-richting van dezelfde orde grootte is als dat in de z-richting.
- De turbulentie is redelijk homogeen over de hoogte verdeeld bij zowel het oude als het nieuwe rooster.
- Het nieuwe rooster geeft een iets beter resultaat als het gaat om de homogeniteit van de turbulentie maar de grootte van de gemiddelde snelheidsfluctuaties verschilt nauwelijks van die van het oude rooster.

8.1.2. Conclusies met betrekking tot uniform zand

Uit de analyse (paragraaf 7.2) van de proeven met uniform zand (paragraaf 6.3) zijn enkele belangrijke conclusies te trekken. Bij deze serie proeven zijn er concentraties en snelheden gemeten terwijl een uniform zand-water mengsel bezonk in een kolom waarin turbulentie opgewekt is. De belangrijkste conclusies zijn de volgende:

- De zeefkrommen van het uniforme zand zijn nauwkeurig vast te stellen door gebruik te maken van zeven en een trilmachine.
- De werkelijke karakteristieke korreldiameter verschilt aanzienlijk van de volgens de leverancier opgegeven karakteristieke korreldiameter.
- $V_{z,rms}$ blijkt onafhankelijk van de concentratie te zijn en afhankelijk de instelling van de kolom.

- De toegepaste concentratiemeters geven een voltage weer, het voltage dat gemeten wordt is afhankelijk van de temperatuur en de concentratie. Met ijkformules is een relatie te vinden tussen het voltage, de concentratie en de temperatuur.
- Uit de meetresultaten zijn op eenvoudige wijze grafieken te tekenen die het verloop van de concentratie in de tijd en over de hoogte weergeven.
- De gemeten valsnelheden verschillen duidelijk van de volgens theorieën berekende valsnelheden. De gecombineerde theorie van Ruby en Al-Dibouni geeft de beste benadering van de meetresultaten.
- De turbulente diffusiecoëfficiënt ε is met behulp van de door ons gebruikte methodes niet voldoende nauwkeurig te berekenen uit de meetdata.
- Met het computermodel is aan te tonen dat ε toeneemt bij hogere turbulentieniveaus en dat er verschillen zijn tussen de verschillende zandsorten.

8.1.3. Conclusies met betrekking tot verschillende zandfracties

Bij de serie proeven met verschillende zandfracties is er gebruik gemaakt van zand dat bestaat uit een mengsel van de drie uniforme fracties, hierdoor ontstaat een niet uniform mengsel. Gedurende de proeven zijn de concentraties en de snelheden gemeten en zijn er monsters afgetapt. Deze monsters zijn geanalyseerd (paragraaf 7.3.7) en er is van ieder monster een karakteristieke korreldiameter bepaald. De belangrijkste conclusies die uit deze serie proeven volgen zijn:

- De zeefkromme van het mengsel is eenvoudig vast te stellen met behulp van de zeefkrommen van de afzonderlijke fracties.
- De waarde van $V_{z,rms}$ is gelijk aan die bij uniform zand.
- De valsnelheid van de karakteristieke korrels van het mengsel is ongeveer gelijk aan die van de karakteristieke korrels van een uniforme zandfractie met gelijke karakteristieke korrelgrootte (D_{50}).
- Een relatief hoog turbulentieniveau in de kolom heeft tot gevolg dat de ontmenging minder groot zal zijn.
- De beginconcentratie is niet van invloed op de uiteindelijke mate van ontmenging.
- De ontmenging vindt sneller plaats naarmate het turbulentieniveau lager is.
- Een hogere beginconcentratie verlaagt de snelheid van de ontmenging.

8.2. Aanbevelingen

Dit hoofdstuk bestaat uit twee paragrafen, in de eerste paragraaf zijn de aanbevelingen ten aanzien van de proefopstelling gegeven en in de tweede paragraaf die ten aanzien van een vervolgonderzoek. De aanbevelingen ten aanzien van de proefopstelling hebben betrekking op de problemen die wij hebben gehad met de opstelling en de mogelijke verbeteringen waarmee de proefopstelling verbeterd zou kunnen worden. In paragraaf 8.2.1 worden enkele aanbevelingen gedaan die bij een vervolgonderzoek van pas zouden kunnen komen.

8.2.1. Aanbevelingen ten aanzien van de proefopstelling

Bij het doen van de proeven hebben we door problemen met de opstelling wat vertraging opgelopen. Deze problemen zijn voor een groot deel toe te schrijven aan het hoge 'ad hoc' gehalte waarmee de opstelling uit de beschikbare materialen gemaakt is. Voor de aanvang van een eventueel vervolgonderzoek zouden enkele van deze problemen opgelost kunnen worden door eenvoudige en minder eenvoudige aanpassingen van de opstelling. In de paragrafen 8.2.1.1 tot en met 8.2.1.4 beschrijven we welke problemen we hebben ondervonden bij het uitvoeren van de proeven en hoe deze bij een eventueel vervolgonderzoek vermeden zouden kunnen worden.

8.2.1.1. Verstopping van de leidingen

Tijdens het uitvoeren van de proeven is het leidingstelsel vele malen verstopt geraakt. Vooral wanneer er gewerkt werd met hoge concentraties gebeurde dit zeer vaak. De redenen van dit verstopt raken zijn:

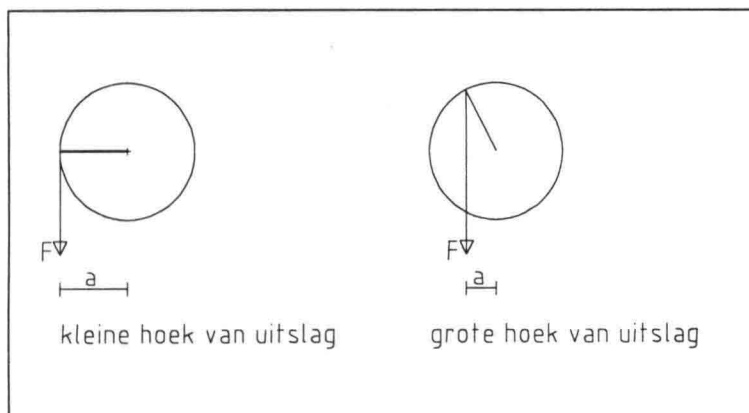
- Onvoldoende capaciteit van de pomp.
De capaciteit van de pomp is gedurende de proeven afgenomen. Dit heeft uiteraard tot gevolg dat leidingen sneller verstoppingen en dat verstopte leidingen moeilijker weer op gang zijn te krijgen. De afname van de pompcapaciteit is waarschijnlijk het gevolg van slijtage. Door het verpompen van de zandmengsels is het denkbaar dat de waaier van de pomp versleten is en vervangen moet worden. Onze aanbeveling luidt in dit geval dan ook dat de pomp moet worden nagekeken en dat de waaier mogelijk vervangen moet worden.
- Verschillen in diameters van leidingen en slangen.
De diameter van de leidingen is niet overal hetzelfde. Verstoppingen traden vaak op in de leidingen en slangen met een kleine diameter. Ook onregelmatigheden zoals bochten en afsluiters verhogen de kans op verstoppingen. Wij raden aan om nog eens goed te onderzoeken welke leidingdiameters het meest geschikt zijn voor de opstelling en eventueel de leidingen met een kleine diameter te vervangen door exemplaren met een grotere diameter of omgekeerd.

- Te lange leidingen.
De leidingen 9 en 10 (figuur 5.1) zijn onnodig lang, hetgeen uiteraard de kans op verstoppingen vergroot. In geval van verstoppingen bemoeilijkt dit het weer op gang brengen van de stroming door het leidingstelsel. De leidingen 9 en 10 lopen parallel en kunnen beide eenvoudig met ongeveer 1 meter ingekort worden. Hierdoor zal ook de weerstand die het mengsel ondervindt bij het stromen door de leidingen kleiner worden zodat de kolom sneller gevuld kan worden. De aanbeveling luidt dan ook om de leidingen 9 en 10 te verkorten.
- Lekkages
Tijdens het rondpompen wordt er regelmatig lucht aangezogen. Dit heeft tot gevolg dat de pomp capaciteit verliest en in sommige gevallen warm loopt, waarna deze geheel stilvalt. De lucht kan aangezogen worden door de zuigbuis indien het mengsel in het mengvat (figuur 5.1) lager komt te staan dan de opening van de zuigleiding. Dit kan ook gebeuren wanneer het mengsel in het mengvat hevig kolkte. Verlengen van de zuigleiding is niet mogelijk omdat de zuigleiding dan in kan zanden en het systeem dan niet meer op gang is te brengen. Een verstelbare zuigleiding zou wel uitkomst kunnen bieden.
Maar ook als de zuigbuis ruimschoots onder water stond kwam het voor dat de pomp lucht aanzoog. Dit kunnen wij alleen verklaren door lekkages bij afsluiters en verbindingen van leidingen onderling. We bevelen daarom aan om alle verbindingen te controleren en om een verstelbare zuigleiding te maken. Ook bevelen wij aan om de huidige afsluiters te vervangen door vacuümafsluiters; dit zorgt ervoor dat er in ieder geval bij de afsluiters geen lucht meer wordt aangezogen.

8.2.1.2. Aandrijving van de kolom

Ook met de aandrijving van de kolom hebben we problemen ondervonden. De problemen zijn grotendeels het gevolg van de hoge belasting van het aandrijfmechanisme. Deze hoge belasting heeft er toe geleid dat tijdens onze proeven de verbinding tussen de aandrijfstang en de kolom is gebroken. Ook moet de verbinding tussen de aandrijfstang en het aandrijf wiel met behulp van een houten blokje in positie worden gehouden en is de slag waarover de kolom uit kan slaan nog steeds beperkt (hoofdstuk 5). Verder werkt het klokje dat het toerental van het aandrijf wiel weergeeft niet meer.

- Hoge belasting van het aandrijfmechanisme.
Omdat het bij het uitvoeren van de proeven wenselijk is dat de hoek van uitslag zo groot mogelijk is, zijn de krachten die op de verbindingen werken zeer groot. Dit komt omdat de kracht altijd in de richting van de aandrijfstang is gericht. In figuur 8.1 is te zien dat bij een grote hoek van uitslag de arm waarover de kracht werkt aanzienlijk kleiner wordt. Om toch een groot moment te kunnen leveren zijn grote krachten nodig.

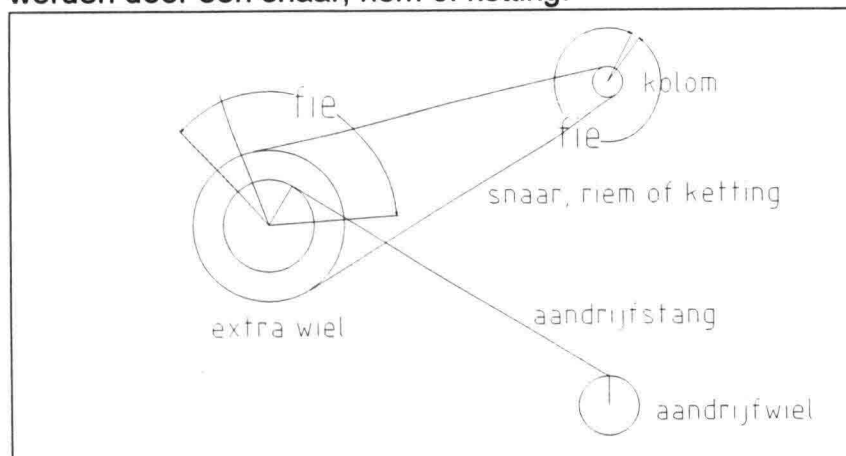


Figuur 8.1
Arm waarover de kracht werkt

Door de massa van de gevulde kolom in combinatie met de hoge frequentie en de grote hoek van uitslag ontstaan er grote momenten. Hier is niets aan te doen, omdat er nu eenmaal naar een hoog turbulentieniveau wordt gestreefd.

De oplossing van dit probleem is niet eenvoudig, er zou gedacht kunnen worden aan een totaal nieuw aandrijfmechanisme.

- **Beperkte hoek van uitslag.**
Met het huidige aandrijfmechanisme is de maximale hoek van uitslag ($d\alpha$) zo'n 110° . Door verdere veranderingen zou de huidige aandrijving nog iets te verbeteren zijn en zou de hoek theoretisch tot 180° kunnen naderen. In de praktijk zal dit echter zeker niet meer dan 130° zijn. Indien het gewenst is om volgende proeven uit te voeren bij hogere turbulentieniveaus, lijkt het raadzaam om de aandrijving ingrijpend te veranderen. Een derde wiel zou uitkomst kunnen brengen. Dit wiel zou dan enerzijds met het aandrijf wiel verbonden moeten worden en anderzijds met de kolom. De verbinding tussen het aandrijf wiel en het extra wiel zou kunnen zijn zoals die nu tussen de kolom en het aandrijf wiel is, met behulp van een aandrijf stang (figuur 8.2). De verbinding tussen het extra wiel en de kolom zou gevormd kunnen worden door een snaar, riem of ketting.



Figuur 8.2
Aandrijving d.m.v. een extra wiel

Hierdoor is het theoretisch gezien mogelijk om $d\alpha$ tot oneindig te laten naderen, in de praktijk zal dit afhankelijk van de frequentie waarschijnlijk gemakkelijk 360° kunnen zijn. Ook zullen hierdoor de krachten bij een gelijke hoek van uitslag en frequentie kleiner zijn en zal de tweede-orde afwijking (paragraaf 5.2.1.2) kleiner zijn. We raden dan ook aan om het aandrijfmechanisme aan te passen, indien er proeven uitgevoerd moeten worden met een hoger turbulentieniveau.

8.2.1.3. Aftappunten.

- Toevoegen extra aftappunten.
Uit de metingen met vier aftappunten zijn weliswaar goede resultaten gekomen, maar voor een nog beter resultaat zou het wenselijk kunnen zijn om nog een aantal aftappunten toe te voegen. Vooral bij metingen met lage concentraties gebeurt er veel in de onderste 30 centimeter van de kolom. Met de huidige aftappunten is hier geen inzicht in te krijgen. Het lijkt ons dan ook raadzaam om afhankelijk van het soort proeven één of meerdere extra aftappunten aan te brengen.
- Glazen buisjes.
De glazen buisjes die wij hebben gebruikt voor het opvangen van de monsters hebben prima afmetingen en lijken in eerste instantie dan ook zeer geschikt. Het verwisselen van de slangetjes en buisjes is bij de hogere turbulentieniveaus door de grote en snelle bewegingen van de kolom nog net mogelijk maar niet eenvoudig. Omdat de buisjes van glas zijn is het echter niet ondenkbaar dat er bij het verwisselen een buisje breekt. Dit zou dan gebeuren op een moment dat je het buisje stevig vast hebt en zou behoorlijke verwondingen tot gevolg kunnen hebben. Tijdens onze proeven zijn er bijna 300 buisjes verwisseld en is er geen enkele gebroken. Toch adviseren we voor een vervolgonderzoek het toepassen van plastic buisjes.
- Hogere turbulentieniveaus
Bij de hoogste turbulentieniveaus waarbij wij monsters hebben afgetapt is het verwisselen van buisjes en slangetjes evenals de bediening van de kraantjes nog net mogelijk. Indien het turbulentieniveau bij volgende proeven verder verhoogd wordt en de bewegingen van de kolom groter en sneller worden, lijkt het ons niet meer mogelijk om op deze wijze monsters te tappen. We raden in dat geval aan om onderzoek te doen naar andere aftapmechanismen. Gedacht kan worden aan op afstand bedienbare kraantjes of langere slangen met buisjes die niet aan de kolomwand zijn bevestigd.

8.2.1.4. Overige.

- Vastzetten rooster.
Het rooster is tijdens het uitvoeren van de proeven en bij het leegmaken van de kolom meerdere malen omhoog geschoven of verdraaid, hierbij is

het rooster ook gebroken.

Inmiddels is het rooster weer gelijmd en zijn de horizontale staven allemaal voorzien van een rubbertje dat met tape op de kop is vastgeplakt. Hierdoor klemt het rooster nu behoorlijk en blijft het goed op zijn plek, als het turbulentioniveau verder verhoogd wordt of wanneer het zandpakket op druk van onderaf gezet wordt, zal het rooster hoogstwaarschijnlijk in beweging komen.

Mocht besloten worden om een volgende reeks proeven uit te voeren, waarbij enkel het nieuwe rooster gebruikt zal worden, dan raden wij aan om het rooster met kleine schroefjes aan de kolomwand te bevestigen. Indien er metingen met verschillende roosters uitgevoerd gaan worden, dan zullen er op de uiteinden van de horizontale staven kunststof plaatjes gelijmd moeten worden om het rooster beter te laten klemmen.

- Zwengels op kranen.

Tijdens het uitvoeren van de proeven moeten de kranen 1,2,3,4 en 6 (figuur 5.1) regelmatig open en dicht gedraaid worden. De kranen 1 en 4 zijn voorzien van een zwengel zodat ze in zeer korte tijd open en dicht te draaien zijn. De kranen 2,3 en 6 zijn niet van een zwengel voorzien en kunnen dan ook niet snel geopend of gesloten worden.

Het bedieningsgemak van de opstelling zou eenvoudig te vergroten zijn door de overige kranen ook van zwengels te voorzien.

- Aparte pomp voor leegtrekken kolom.

Tijdens het uitvoeren van de proeven met een hoge concentratie bezinkt het zand in de kolom en vormt zich een zandpakket met een hoge concentratie met hoogtes tot meer dan 1 meter. Het is in zo'n geval niet eenvoudig of zelfs onmogelijk om de kolom via de onderzijde weer leeg te maken.

Wij hebben in deze gevallen een slang aangesloten op de kraan die aan de zuigleiding is bevestigd. Hiermee kan water en zand vanaf de bovenzijde uit de kolom worden gezogen. Er kan echter slechts gezogen worden totdat het waterniveau in de kolom tot op het zandpakket is gedaald. De slang moet hierna weer op de kraan aangesloten worden om leidingwater bij te vullen, en vervolgens weer op de zuigleiding van de pomp. Dit kost onnodig veel tijd.

Om voldoende onderdruk op de slang te krijgen moeten de afsluiters 2 en 3 gesloten worden. Dit heeft echter tot gevolg dat de leidingen 9 en 10 vaak verstopten.

Wij raden aan om in ieder geval gebruik te maken van een tweede lange slang, zodat er gelijktijdig water afgezogen en bijgevuld kan worden.

Voor een nog eenvoudigere bediening zou een losse pomp kunnen zorgen, die het water van boven uit de kolom zuigt en in het mengvat pompt. Op deze manier kan het water in het leidingstelsel blijven stromen, hetgeen de kans op verstoppingen verkleint.

8.2.2. Aanbevelingen ten aanzien van een vervolgonderzoek

Gedurende onze afstudeerperiode zijn we op problemen gestuit die tijdens een vervolgonderzoek vermeden zouden kunnen worden. Ook zijn er zaken geweest die erg goed hebben gewerkt en die tijdens een vervolgonderzoek opnieuw toegepast zouden kunnen worden. In de paragrafen 8.2.2.1 tot en met 8.2.2.8 hebben we onze aanbevelingen voor een vervolgonderzoek punt voor punt beschreven.

Een groot deel van de door ons verzamelde data is nog niet volledig geanalyseerd. Wellicht kan het verder analyseren van deze data onderdeel vormen van een nog uit te voeren afstudeerwerk.

8.2.2.1. Goed en tijdig doorlezen van dit rapport en dat van R & R [lit. 23]

Van de fouten die wij gemaakt hebben en de problemen die wij hebben gehad kan geleerd worden. Indien de aanbevelingen opgevolgd worden kan er veel tijd bespaard worden.

Wellicht kan een deel van de proefresultaten gebruikt worden bij een vervolgonderzoek, of kunnen door ons gevonden verbanden tussen parameters aangenomen worden zodat deze niet opnieuw gemeten hoeven te worden.

8.2.2.2. Tijdig aanpassen van de opstelling

Werkzaamheden aan de proefopstelling in het laboratorium zijn gedurende de periode dat wij in het laboratorium werkzaam zijn geweest altijd goed en nauwkeurig uitgevoerd. Gezien de drukte in het laboratorium en de omvang van de aanpassingen, is het raadzaam deze werkzaamheden tijdig door te geven. Op deze wijze kan een klus goed worden ingepland in de planning van het laboratorium.

Wij hebben dit voor grote klussen altijd gedaan en hebben dan ook weinig vertraging opgelopen door het wachten op aanpassingen. Kleine klussen kunnen meestal tussendoor gedaan worden of na overleg zelf uitgevoerd worden.

8.2.2.3. Snelle computers

De omvang van de door ons verzamelde en bewerkte data had op het laatst een omvang van ruim 500 Mb. De grootte van één proef was soms meer dan 10 Mb. Omdat de data regelmatig bewerkt moest worden, voor bijvoorbeeld de bepaling van V_{rms} , epsilon, bepaling van valsnelheden en het tekenen van grafieken wordt elk bestand vele malen geopend en gesloten.

Wij hebben de data bewerkt op een Pentium 200 computer met 32 Mb intern geheugen. Met deze computer zijn meerdere bestanden gelijktijdig te openen en is de data redelijk snel te bewerken. Wij raden aan om bij een vervolgonderzoek te werken met een gelijkwaardige of snellere computer. In

het laboratorium konden wij niet direct beschikken over zo'n computer. Het lijkt ons dan ook raadzaam om tijdig naar mogelijkheden te informeren, indien men zelf niet over een snelle computer beschikt.

8.2.2.4. *Regelmatig schoonmaken van de EMS*

De resultaten van de metingen met de EMS (paragraaf 5.1.2.3) vertoonden in veel gevallen grote pieken in het meetsignaal; ook is een aantal metingen geheel onbruikbaar. Wellicht kan dit tijdens een volgende serie proeven verbeterd worden door de EMS vaker schoon te maken.

8.2.2.5. *Beperkt aantal proeven*

Het uitvoeren van de proeven en het bewerken van de meetdata is tijdrovend. Het lijkt ons daarom raadzaam om ook tijdens een vervolgonderzoek goed na te denken over de resultaten die uit de uit te voeren proeven moeten volgen, zodat een selectie gemaakt kan worden van de noodzakelijke proeven.

Hierdoor kan het totale aantal proeven worden beperkt worden, waardoor er veel tijd bespaard worden bij de proefuitvoering en dataverwerking. Deze tijd kan dan weer ten goede komen aan de analyse van de proefresultaten en het schrijven van het rapport. De hiervoor benodigde tijd moet zeker niet onderschat worden.

Ook raden we aan om rekening te houden met vertraging. Onze ervaring is dat het uitvoeren van een proef meestal slechts een half uur in beslag neemt maar dat er ook veel dagen zijn waarop je meer dan tien uur in het laboratorium doorbrengt en slechts één proef uitvoert. Dit was dan meestal het gevolg van defecten aan de opstelling.

8.2.2.6. *Extra concentratiemeters op de juiste hoogtes*

Voor de bepaling van ε bleken we in veel gevallen over te weinig concentratiemeters te beschikken, waardoor de stapgrootte te groot was. Met een stapgrootte van 0,1 meter is het ons niet gelukt om dC/dz voldoende nauwkeurig te bepalen.

Indien het verband tussen epsilon, het turbulentieniveau en de concentratie tijdens een volgende serie proeven opnieuw onderzocht moet worden, raden wij aan om in elk geval in het gebied waar de concentratie verloopt van ongeveer 2% tot ongeveer 55% meer concentratiemeters aan te brengen.

Indien het totale aantal meters vergroot wordt zal een tweede meetkast van het Waterloopkundig Laboratorium gehuurd moeten worden. Ook zal er gebruik gemaakt moeten worden van een tweede computer. Het lijkt ons raadzaam om hierover tijdig te overleggen met de mensen in het laboratorium die meer weten over de beschikbare computers en de mogelijkheden.

8.2.2.7. Constant houden van de temperatuur tijdens de proeven.

De viscositeit is afhankelijk van de temperatuur van het mengsel (formule 4.3.4). En omdat de bezinksnelheid weer afhankelijk is van de viscositeit, is ook de bezinksnelheid afhankelijk van de temperatuur.

Om de resultaten van de proeven beter te kunnen vergelijken is het makkelijker als de temperatuur constant gehouden wordt gedurende de proeven. Er kan dus gedacht worden aan een soort koeling om dit warmlopen tegen te gaan. De bezinksnelheden zijn dan alleen nog afhankelijk van het turbulentieniveau, de concentratie en de korrelgrootte.

8.2.2.8. Invloed van slib

Wegens tijdgebrek zijn we niet meer toegekomen aan een serie proeven waarbij er slib aan het zand-watermengsel toegevoegd is. Omdat er in de praktijk wel vaak sprake is van een mengsel van zand, water en slib, is het mogelijk interessant om bij een volgende serie proeven de invloed van slib op de bezinking van het zand te onderzoeken. Dit veroorzaakt echter waarschijnlijk wel extra veel verstoppingen.

8.2.2.9. Verbetering van het model

In het model wordt gerekend met een ε die constant is over de hoogte van de kolom. Volgens de meetresultaten van paragraaf 7.2.6 is dit niet juist en zou ε groter moeten zijn aan de boven- en onderzijde van de kolom. Wellicht is het model te verbeteren door ε niet constant over de hoogte te veronderstellen, maar een meer realistisch verloop voor ε aan te nemen.

8.2.2.10. Wervels achter de verticale staven

Wellicht zijn er meer processen die het bezinkgedrag van het zand in de kolom beïnvloeden. Hierbij kan nog onderzocht worden of er achter de verticale staven van het rooster geen zog ontstaan waarbinnen het zand een hogere valsnelheid heeft. Dit proces, ook wel aangeduid als settling convection, is niet met de door ons gebruikte theorieën te beschrijven, wellicht is hierover meer te vinden in de literatuur.

LITERATUUR

1. *Ansley, R.W. and Smith, T.N.*, Motion of spherical particles in a Bingham plastic: *AIChE Journal*, Vol. 13, no. 6, 1967 page 1193-1196.
2. *Baily, C., Cross, M. and Edwards, D.* Numerical Modelling of multiphase particulate flow and its application to sedimentation: *Particulate Science and Technology*, Vol. 5, no. 4, 1987 page 357-370.
3. *Battjes, J.A.*, Dictaat vloeistofmechanica, Delft, 1990, blz. 156
4. *Biran, B. and Breiner, M.*, *Matlab for Engineers*, Cambridge, 1995.
5. *Booij, R.*, Dictaat Turbulentie in de waterloopkunde, Delft, 1992, blz 6.
6. *Bradshaw, P.e.a.*, *Turbulence*, Second edition, 1978, page 26-27
7. *Coussot, P and Piau, J.M.*, The effects of an addition of force-free particles on the rheological properties of fine suspensions: *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, 1995 page 263-270.
8. *Dedegil, M. Y.*, Drag coefficient and settling velocity of particles in non-Newtonian suspensions: *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 109 page 339-323.
9. *Galland, J.C. e.a.*, *Cohesive Sediments 4th Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference*, 1994.
10. *Garside, J. and Al-Dibouni, M.R.*, Velocity-voidage relationship for fluidisation and sedimentation in solid-liquid systems: *Industrial Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 16, no. 2, 1977, page 206.
11. *Happel, J.* Viscous flow in multiparticle systems: slow motion of fluids relative to beds of spherical particles: *AIChE. Journal*, Vol. 4, no 2, 1958 page 197-205.
12. *Huisman, L. e.a.*, *Sedimentation and flotation and mechanical filtration*, Delft, 1996, TU Delft.
13. *Hulsbergen, C.H.*, *Determination of Sand Concentration by Pump Sampling normal to the Flow*, 1981
14. *J.M. Groot*, *Interim rapport beunbezinking*, TU Delft, Civiele Techniek, Waterbouwkunde, 1981
15. *Lamb, H.*, *Hydrodynamics*, Sixth edition, 1932, page 76-80, page 120-1244
16. *Lockett, M. J. and Al-Habbooby, H.M.*, Differential settling by size of two particle species in a liquid: *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, Vol. 51, 1973, page 281-291.
17. *Mirza, S. and Richardson, F.*, Sedimentation of suspensions of particles of two or more sizes: *Chemical Engineering Science*, Vol.34, 1979 page 447-454.
18. *Nelson, M.E. and Benedict, P.C.*, *Measurement and Analysis of suspended Sediment Loads in Streams*, Volume 76, 1950.
19. *O'Brien, J.S. and Julien, P.Y.*, Laboratory analysis of mudflow properties: *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, no. 8, 1988 page 877-887
20. *Plessis du, M. P., Ansley, R.P.*, Settling parameter in solids pipelining: *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, vol. 93, no. pl2, 1967 page 5340-5356.

21. *Richardson, J.F. and Zaki, W.N.*, Sedimentation and Fluidisation: Part I, Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Vol.32, 1954 page 35-53.
22. *Rijn van, L.C.*, Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport, 1987, Delft Hydraulics Communication no. 382.
23. *Ruijg, B.S. en A.C. Runge A.C.*, Ééndimensionale beschouwing van de bezinking van hooggeconcentreerde zandwatermengsels onder turbulente omstandigheden, Delft, mei 1998.
24. *Saha, G., Purohit, N.K., Mitra, A.K.*, Spherical particle settling velocity and drag in Bingham liquids, International Journal of Mining Processing, Vol. 36, 1992, page 273-281.
25. *Schrieck, G.L.M. van der*, Dictaat Baggerotechniek. Delft, 1996.
26. *Selim, M.S. , Kothari, A.C, and Turian, R.M.*, Sedimentation of multisized particles in concentrated suspensions: AIChE Journal, Vol. 29, no.6, 1983 page 1029-1038
27. *Smith, T.N.*, The sedimentation of particles having a dispersion of sizes: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Vol.44, 1966 page 153-157
28. *Stelling, G.S. and Booij, N.*, Computational modelling in open channel hydraulics, Delft, 1996
29. *Valentik, L. and Whithmore, R. L.*, The terminal velocity of spheres in Bingham plastics: British Journal of Applied Physics, Vol. 16, 1965 page 1197-1203
30. *Vlasblom, W.J. and Miedema, S.A.*, A theory for determining sedimentation and overflow losses in hoppers.
31. *Vries, M. de*, Dictaat Waterloopkundig Onderzoek, Delft, 1977.
32. *Zhaohui, W.*, Bed material movement in hyperconcentrated flow: Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 111, no. 6, 1985, page 987-1001.

