

Near-field verspreiding van het overvloeiverlies van een sleephopperzuiger



M. Boot
29 september 2000
Technische Universiteit Delft

p. 6 + 51

p. 71.

p. 69 % van wat?

probleem \rightarrow voor dichtheidsaan
of zeldzaam?

Near-field verspreiding van het overvloeiverlies van een sleephopperzuiger

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Vloeistofmechanica

theoretische vraag

① p. 6 + p. 51 : theorie van Fay en Boot

praktische vraag:

② op grond van dit onderzoek en gezien de aanname dat er is
het algemeen toe leiden dat de niet in beschouwing genomen
effecten tot meer menging leiden:
Bedenk je dat een dichtheidsaanwinst in de praktijk
bij zandwinning een veel van levent of
een zeldzaam verschijnsel is.

reserve: ③ : invloed diameter p. 71 \rightarrow verschuiving overgangsgeluid
voorschuif diameter \rightarrow meer dichtheidsaanwinst

④ : p. 69 % van materiaal materiaal:
van totale hoeveel sediment (zand + silt)
of silt. alleen

Door: Michiel Boot
Datum: 29 september 2000

Afstudeercommissie:

Prof.dr.ir J.A. Battjes
Dr.ir. J.C. Winterwerp
Dr.ir. J. van de Graaff
Drs. A. Stolk

TU Delft
TU Delft
TU Delft
RWS

Sectie Vloeistofmechanica
Sectie Vloeistofmechanica
Sectie Waterbouwkunde
Directie Noordzee

Voorwoord

Dit rapport is het eindverslag van het afstudeeronderzoek 'Near-field verspreiding van het overvloeiverlies van een sleephopperzuiger'. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat Directie Noordzee.

Door de groeiende belangstelling voor het bouwen in de Noordzee werd aan Directie Noordzee gevraagd hoe schadelijk overvloeiverlies is dat wordt veroorzaakt door sleephopperzuigers bij een grootschalige zandwinning.

In een eerder afstudeerproject is door Rob van der Salm (1998) onderzocht hoe het overvloeiverlies zich verspreidt na het verlaten van de sleephopperzuiger. Hierbij ging het om de far-field verspreiding van het overvloeiverlies. Dit wil zeggen de verspreiding op grote afstand van de sleephopperzuiger, waarbij de omgevingscondities van de Noordzee een belangrijke rol spelen.

Aan mij is gevraagd om de near-field verspreiding van het overvloeiverlies van een sleephopperzuiger te onderzoeken. Hierbij spelen voornamelijk de begincondities een rol. Het onderzoeksgebied beperkt zich dan ook tot het gebied vanaf de uitstroomopening van de overvloed tot ongeveer een scheepslengte achter de sleephopperzuiger.

Aanvankelijk bestond de opdracht uit drie onderdelen, te weten de verspreiding van het overvloeiverlies op zich, de invloed van luchtinsluiting in het overvloeiverlies en de invloed van de aandrijfschroef van de sleephopperzuiger. Uiteindelijk ben alleen aan het eerste onderdeel toe gekomen. Ik hoop dan ook dat de resultaten van dit onderzoek een goed uitgangspunt zullen vormen voor eventuele vervolgonderzoeken naar de invloed van luchtinsluiting en schroefwerking.

Samenvatting

Op de Noordzee wordt zand gewonnen met behulp van sleeppopperzuigers. Een sleeppopperzuiger pompt water met zand van de bodem van de zee. Dit mengsel van zand en water wordt in het beun van het schip geloosd. In het beun bezinkt het zand en het overtollige proceswater gaat met zo min mogelijk sediment weer overboord via de overvloed. Het zand van de Noordzee bestaat voor ongeveer 2% uit slib. Dit zijn sedimentdeeltjes met een diameter kleiner dan $63\text{ }\mu\text{m}$. Deze deeltjes bezinken niet in het beun, maar komen via de overvloed weer in zee terecht. Dit verlies van sediment wordt overvloedverlies genoemd. De wijze waarop het overvloedverlies in de waterkolom terechtkomt heeft invloed op het leven in zee. Bij grote mate van menging en verspreiding wordt de lichtdoorlatendheid van het zeewater kleiner. Wanneer het sediment neerslaat op ongestoorde bodem wordt het daar aanwezige leven verstoord.

In opdracht van Directie Noordzee is onderzoek gedaan naar de verspreiding van het overvloedverlies. Dit onderzoek is gericht op de vraag: wanneer treedt er menging van het overvloedverlies met de waterkolom op en wanneer gedraagt het overvloedverlies zich als een dichtheidsstroom. In geval van een dichtheidsstroom komt slechts een zeer geringe hoeveelheid sediment in de waterkolom terecht.

Tijdens het overvloeien zijn er twee factoren die de vorming van een dichtheidsstroom kunnen verstoren, namelijk luchtinsluiting en schroefwerking. Beide factoren zijn uiteindelijk niet meegenomen in het onderzoek.

Het onderzoek is uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica aan de faculteit Civiele Techniek te Delft. In dit laboratorium is een modelopstelling gebouwd, bestaande uit een stroomgoot waarin een model van een schip (schaal 1:60) is gemonteerd. In deze goot stroomt water langs het schip met snelheden die berekend zijn aan de hand van vaarsnelheden van het prototype. De stroomsnelheden zijn volgens Froude geschaald. In het schip is een overvloed aangebracht. Deze overvloed bestaat uit een pijp die centraal in het voorste gedeelte van het schip verticaal is geplaatst. Deze pijp loopt dwars door de bodem van het schip en is met de bodem gelijkgemaakt. Door deze pijp wordt een mengsel van water met kaolinite geloosd, waarvan de dichtheid groter is dan de dichtheid van het omgevingswater in de goot. De snelheid waarmee het mengsel in de overvloed geloosd wordt is geregeld door middel van een hevel. Deze uitstroomsnelheid is ook door middel van schaling volgens Froude bepaald.

In deze opstelling worden drie parameters gevarieerd: de stroomsnelheid in de goot, de uitstroomsnelheid van het mengsel uit de overvloed en het dichtheidsverschil tussen het mengsel en het omgevingswater in de goot. Voor de stroomsnelheid in de goot zijn de snelheden 0 m/s, 0.065 cm/s, 0.13 cm/s, 0.195 cm/s en 0.26 cm/s. Deze snelheden komen overeen met de vaarsnelheden 0 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s en 2 m/s van het prototype. Aan de hand van het prototype is voor het model een gemiddelde verticale uitstroomsnelheid van 0.1 m/s bepaald. Door deze snelheid te halveren en te verdubbelen zijn voor het onderzoek de uitstroomsnelheden 0.05 m/s en 0.2 m/s daar aan toegevoegd. Tevens zijn er aan de hand van het prototype drie dichtheidsverschillen bepaald tussen het overvloedverlies en het omgevingswater. Deze verschillen bedragen 16, 33 en 49 kg/m^3 .

Voor iedere stroomsnelheid in de goot zijn vervolgens negen experimenten uitgevoerd, waarbij alle combinaties van uitstroomsnelheid en dichtheidsverschil zijn toegepast. Het resultaat van elk van deze experimenten is een pluim die zich na het verlaten van de uitstroomopening van de overvloed in het omgevingswater verspreidt. De wijze waarop deze verspreidt is vastgelegd op video.

Aan de hand van deze videobeelden is een analyse van de verspreiding van het overvloedverlies gedaan. Aanvankelijk is getracht op basis van deze beelden direct te bepalen of een pluim zich als een dichtheidsstroom gedraagt of dat er menging van het overvloedverlies met het omgevingswater

plaatsvond. Vervolgens zijn deze waarnemingen getoetst aan een theorie van Fay. De theorie van Fay is gebaseerd op de veronderstelling dat wanneer de radiale verspreiding van de pluim over de bodem een dichtheidsstroom is, het deel van de pluim tussen de uitstroomopening van de overvloed en de bodem zich ook als een dichtheidsstroom gedraagt. Visueel is vastgesteld dat de verspreiding van de pluim in radiale richting over de bodem in stilstaand water een dichtheidsstroom is. Met behulp van deze vaststelling en de theorie van Fay is een criterium opgesteld voor een dichtheidsstroom, waaraan de verspreiding van de pluimen in stromend water is getoetst.

Na de toepassing van de theorie van Fay kan worden vastgesteld dat het erg moeilijk is om visueel te bepalen of een pluim werkelijk een dichtheidsstroom is of niet. Aan de hand van de theorie van Fay zijn de resultaten van alle experimenten onderverdeeld in de categorie 'dichtheidsstroom', 'menging' of 'overgang'.

De conclusie is samengevat in een grafisch overzicht, waarin de resultaten van alle experimenten zijn weergegeven. In deze grafiek zijn de drie parameters stroomsnelheid (vaarsnelheid), uistroomsnelheid en dichtheidsverschil tegen elkaar uitgezet. Het resultaat is een overzicht van verschillende combinaties van de parameters, waarin duidelijk onderscheid gemaakt kan worden tussen een gebied voor menging, een gebied voor dichtheidsstroom en een overgangsgebied daartussenin. Dit overzicht is vanwege de Froudeschaling die is gebruikt direct toepasbaar in de praktijk. Bij bekende dichtheid van het overvloeiverlies en uitstroomsnelheid (afhankelijk van zuigdebiet en overvloediameter) kan nu bijvoorbeeld de maximale vaarsnelheid waarbij nog een dichtheidsstroom optreedt bepaald worden.

Uiteraard zijn in het onderzoek verschillende aannamen gedaan. Voordat het grafische overzicht van dichtheidsstroom, mening en overgang echt direct in de praktijk toepasbaar is zal er nog onderzoek gedaan moeten worden naar enkele aspecten die in dit onderzoek niet zijn meegenomen. De belangrijkste aspecten zijn luchtinsluiting, schroefwerking, effect van golven op het schip, variatie in diameter van de overvloed en variatie in diepte waarop het zand gewonnen wordt.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	3
SAMENVATTING	5
1. INLEIDING	9
1.1. PROBLEEMOMSCHRIJVING GROOTSCHALIGE ZANDWINNING.....	9
1.2. PROBLEEMBESCHRIJVING ONDERZOEK.....	10
1.3. DOELSTELLING EN BEPERKINGEN VAN HET WERK.....	10
1.4. INDELING RAPPORT	10
2. HET BAGGERPROCES.....	13
2.1. ZANDWINNEN	13
2.2. HET WINGEBIED	14
2.3. HET BAGGERPROCES IN DE SLEEPHOPPERZUIGER	14
2.4. CONSTANT TONNAGE SYSTEEM.....	15
2.5. DE HOPPER VAN DE SLEEPHOPPERZUIGER	16
3. DE OVERVLOEI EN HET NEARFIELD GEDRAG	21
3.1. UITVOERINGEN VAN OVERVLOEISYSTEMEN.....	21
3.2. HET OVERVLOEIVERLIES	23
3.3. DE VERSPREIDING VAN HET OVERVLOEIVERLIES	23
<i>Dichtheidsstroom</i>	24
<i>Menging</i>	25
<i>Menging door schroefwerking</i>	25
<i>Menging door luchtinsluiting in overvloed</i>	26
4. OPZET VAN HET ONDERZOEK.....	29
4.1. HET PROCES.....	29
4.2. GEGEVENS PROTOTYPE.....	30
4.3. AFBAKENING EN AANNAMES.....	31
4.4. MODELPROEVEN	32
4.5. SCHALING.....	33
<i>Geometrische schaling</i>	34
<i>Stroomsnelheid in de goot en uitstroomsnelheid overvloediverlies</i>	34
<i>Dichtheidsverschillen</i>	35
4.6. CHINA CLAY - KAOLINIET.....	35
5. BESCHRIJVING EXPERIMENTELE OPSTELLING	37
5.1. DE STROOMGOOT	37
5.2. DE SLEEPHOPPERZUIGER.....	37
5.3. DE OVERVLOEI.....	37
5.4. MEETINSTRUMENTEN.....	39
6. BESCHRIJVING MEETPROGRAMMA	41
6.1. BEPALING VERSCHILLENDE PARAMETERS	41
<i>Stroomsnelheid in de goot</i>	41
<i>Uitstroomsnelheid overvloed</i>	41
<i>Dichtheidsverschil tussen overvloediverlies en omgevingswater</i>	42
6.2. UIT TE VOEREN EXPERIMENTEN	43
6.3. METINGEN.....	44
7. MEETRESULTATEN.....	45
7.1. INLEIDING.....	45
7.2. BESCHRIJVING VERSCHILLENDE PLUIMVORMEN.....	46

7.3. EXPERIMENTEN STILSTAAND WATER.....	50
7.4. VASTSTELLEN CRITERIUM DICHTHEIDSSSTROOM.....	51
7.5. EXPERIMENTEN IN STROMEND WATER.....	53
<i>Stroming 6,5 cm/s</i>	54
<i>Stroming 13 cm/s</i>	56
<i>Stroming 19.5 cm/s en stroming 26 cm/s</i>	58
7.6. INVLOED SCHROEF.....	58
7.7. INVLOED LUCHTINSLUITING.....	58
8. ANALYSE EN DISCUSSIE	61
8.1. ANALYSE VOLGENS FAY	61
8.2. BESCHRIJVING PLUIM BIJ UITSTROOMOPENING	65
8.3. VERGELIJKING MET PROGRAMMA STRAAL3D	66
9. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	69
10. DANKWOORD	73
11. LITERATUURLIJST	75
BIJLAGEN.....	77
BIJLAGE A: RIJKSWATERSTAAT DIRECTIE NOORDZEE.....	79
BIJLAGE B: TOCHT MET DE HAM317 OP 7 JULI 2000	83

I. Inleiding

1.1. Probleemomschrijving grootschalige zandwinning

Zandwinning in zee wordt steeds meer toegepast. De Noordzee heeft een bijna onuitputtelijke voorraad zand. Nederland, met name de Randstad, kampt met een tekort aan bouwlocaties. De haven van Rotterdam moet blijven groeien om aan de grote stroom van schepen plaats te bieden. Ook Schiphol heeft te maken met capaciteitsproblemen en uitbreiding is hier noodzakelijk om te kunnen groeien.

Een mogelijkheid om deze uitbreidingen te kunnen realiseren is het bouwen in zee. Een Tweede Maasvlakte en een vliegveld in zee zijn voorbeelden hiervan. Voor dergelijke projecten zijn enorme hoeveelheden zand nodig. Alleen al voor de Tweede Maasvlakte wordt de hoeveelheid zand geschat op $500 * 10^6 \text{ m}^3$. De enige mogelijkheid om in deze grote hoeveelheden te voorzien, is zandwinning in de Noordzee.

Momenteel wordt per jaar in het Nederlandse deel van de Noordzee ongeveer $23 * 10^6 \text{ m}^3$ zand gewonnen. Bij zandwinning voor de Tweede Maasvlakte zal er gedurende een aantal jaren continu zand gewonnen worden in een relatief klein wingebed. Er zal met een aantal grote sleephopperzuigers gewerkt worden en het wingebed zal waarschijnlijk binnen een straal van 30 km rond de locatie voor de Tweede Maasvlakte liggen.



Figuur 1.1. Sleephopperzuiger

Het winnen van zand met een sleephopperzuiger gebeurt door middel van het oppompen van een mengsel van water en zand. Het zand bezinkt vervolgens in het ruim van het schip, het beun genaamd, en het water stroomt via de overvloed weer over boord. Het gewonnen zand bevat een kleine hoeveelheid slib, bestaande uit heel fijne sedimentdeeltjes. Het onderscheid tussen zand en slib wordt over het algemeen gelegd bij een diameter van $63 \mu\text{m}$. Deze fijne deeltjes zullen niet allemaal in het beun van het schip bezinken, maar via de overvloed weer over boord stromen. Dit sediment komt dan in het water van de Noordzee terecht en zal na een bepaalde tijd bezinken en zich op de zeebodem afzetten. Bij de eerder genoemde hoeveelheid van ongeveer $23 * 10^6 \text{ m}^3$ zand per jaar kan dit weinig kwaad, er is geen sprake van vervuild materiaal en er worden slechts kleine hoeveelheden

gebaggerd. Bij grote projecten worden er echter zeer grote hoeveelheden zand gebaggerd in een korte periode. Daardoor zal er een grote hoeveelheid slib in het zeewater terechtkomen, dat geruime tijd in het water zal blijven zweven voordat het bezinkt.

Een interessante vraag is nu wat er precies met het mengsel gebeurt zodra het via de overvloed het schip verlaat.

In het ene geval kan het mengsel als een geheel als een dichtheidsstroom naar de bodem zakken, alwaar het zich verspreidt over de bodem en bezinkt. In dat geval komt het slib voornamelijk in het wingebed op de bodem terecht, waar de bodem door het baggeren al verstoord is. De bezinktijd is in dat geval enkele minuten.

In een ander geval verspreidt het slib zich over de gehele waterkolom, wat resulteert in vertroebeling van het zeewater. Dit zorgt voor een vermindering van de lichtdoorlatendheid in de waterkolom, wat primaire productie kan beïnvloeden. Tevens zal het slib op de ongestoorde bodem buiten het wingebed neerslaan, wat een verstoring veroorzaakt voor de in en op de bodem levende organismen. Het gaat hier om een bezinktijd van uren tot eventueel dagen.

In opdracht van Directie Noordzee is onderzoek gedaan naar de verspreiding van het overvloeiverlies. Dit onderzoek is voornamelijk uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen. Hierbij is gebruik gemaakt van een stroomgoot in dit laboratorium en een model van een schip, dat ter beschikking is gesteld door de faculteit Maritieme Techniek. Met deze middelen is onder verschillende omstandigheden de lozing van overvloeiverlies gesimuleerd.

Om een goed beeld te krijgen van het onderzoek is het van groot belang een duidelijke probleemstelling te definiëren en vervolgens een doelstelling voor het onderzoek te omschrijven.

1.2. Probleembeschrijving onderzoek

Bij het winnen van zand op de Noordzee door middel van een sleepopperzuiger zal een deel van het gewonnen materiaal, bestaande uit de allerfijnste deeltjes zand en slib, niet in het beun van het schip bezinken, maar via de overvloed het schip direct weer verlaten. Dit mengsel van water en slib zal in het zeewater terechtkomen, wat negatieve gevolgen kan hebben voor het leven in zee. In het gunstigste geval zal het water met slib zich als een dichtheidsstroom gedragen en vanuit de overvloed vrij snel naar de bodem zakken, waar het slib zich als een laagje over de bodem verspreidt. Echter door allerlei externe invloeden kan deze dichtheidsstroom verstoord worden, waardoor menging optreedt en het slib zich over een veel grotere oppervlakte verspreidt. Er ontstaat dan een grote hoeveelheid troebel water. De in het water aanwezige filtervoeders en zichtjagers kunnen veel last ondervinden van de afname van de lichtdoorlatendheid van het water. Ook zal hierdoor een groter gedeelte van de zeebodem met een laagje slib bedekt worden, wat in en op de bodem levende organismen zal verstoren.

1.3. Doelstelling en beperkingen van het werk

Om een beeld te krijgen hoe het overvloeiverlies zich gedraagt zodra het de overvloed heeft verlaten, zal allereerst beschreven worden wat er precies tijdens het baggerproces rondom de sleepopperzuiger gebeurt. Het gaat hier om processen die zich direct rondom het schip afspelen. Er wordt dan gesproken van de 'near-field' verschijnselen. Hiervan zal een duidelijk beeld geschetst worden, wat vervolgens vertaald zal worden naar een meetprogramma. Dit meetprogramma omvat een beschrijving van principeproeven die gedaan zullen worden in een stroomgoot. Hierbij zal de verspreiding van een in het water geïnjecteerd mengsel, met een vergelijkbare dichtheid en concentratie als het overvloeiverlies, bekeken worden onder verschillende omstandigheden. Het doel is vast te stellen onder welke omstandigheden dit mengsel zich als een dichtheidsstroom gedraagt en welke externe invloeden het optreden van een dichtheidsstroom verhinderen.

1.4. Indeling rapport

In hoofdstuk 2 van dit rapport wordt een beschrijving gegeven van het baggerproces. Hierin komt het winnen van zand in het wingebied op zee aan de orde, maar ook het proces van laden en overvloeien in de sleepopperzuiger.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 dieper ingegaan op de overvloed van het schip en het overvloeiverlies. Er wordt een overzicht geschetst van de mogelijke manieren van near-field verspreiding van het overvloeiverlies.

In hoofdstuk 4 wordt een opzet gemaakt voor het onderzoek dat uitgevoerd is in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica. Hierin wordt het proces beschreven waarop het onderzoek gericht is. Het

gaat daarbij om het gedrag van het overvloeiverlies direct nadat het mengsel de uitstroomopening van de overvloed aan de onderzijde van het schip heeft verlaten. Ook wordt een afbakening gemaakt waarin beschreven wordt welke externe invloeden op de vorming van de slibpluim in het onderzoek meegenomen worden en welke niet.

Tevens wordt in hoofdstuk 4 een omschrijving gegeven van een prototype sleephopperzuiger en standaard Noordzee omstandigheden. Aan de hand van deze gegevens wordt een opzet gemaakt voor een modelopstelling in het laboratorium. Hoewel geen schaalproeven gedaan zullen worden, worden wel enkele schaalregels toegepast om enigszins de werkelijkheid te benaderen.

Hoofdstuk 5 omvat een uitgebreide beschrijving van de experimentele opstelling in het laboratorium.

In hoofdstuk 6 volgt dan het programma van experimenten zoals dat is uitgevoerd. Vervolgens worden in hoofdstuk 7 de resultaten van deze experimenten weergegeven.

Aan de hand van deze meetresultaten wordt een analyse en discussie gegeven in hoofdstuk 8. Daaruit volgen in hoofdstuk 9 enkele conclusies en aanbevelingen.

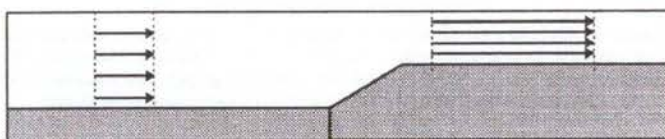
2. Het baggerproces

2.1. Zandwinnen

Het zandwinnen met behulp van een sleephopperzuiger is een cyclisch proces. Deze cyclus begint in het wingebied op zee.

In het wingebied wordt het beun van het schip volgepompt met het zand-watermengsel tot het water in het beun de rand van de overvloed bereikt. De overvloed is meestal een trechtervormige overloop die door de bodem van het schip loopt en in directe verbinding staat met het omgevingswater. Hierna wordt doorgepompt, waardoor water met zo min mogelijk zand (inmiddels bezonken) via de overvloed terug in zee wordt gestort. Dit water bevat nog wel een kleine hoeveelheid sediment, bestaande uit slib en heel fijn zand. Dit sediment bezinkt niet in het beun van het schip tussen de plaats waar het mengsel het beun instroomt en de overvloed.

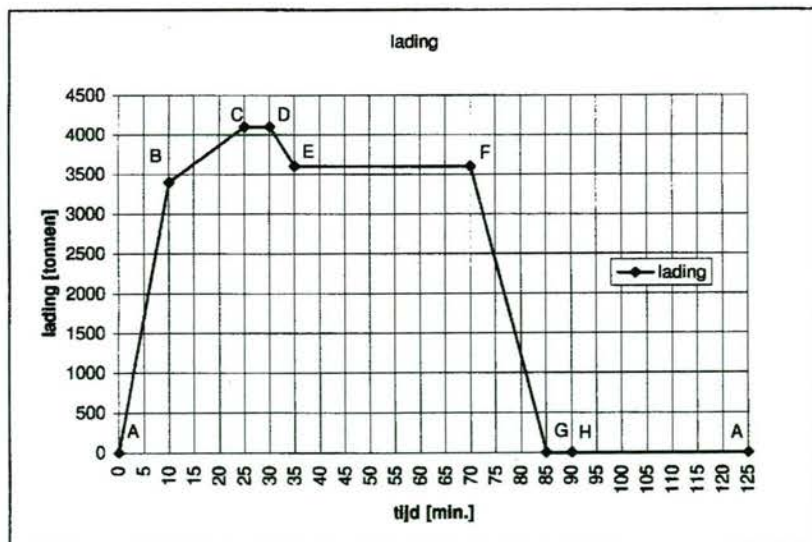
Wanneer de overvloedverliezen te hoog zijn, dus wanneer er een te grote hoeveelheid sediment weer via de overvloed overboord gestort wordt, wordt gestopt met zuigen. De dikte van de waterlaag boven het bezonken zand is dan zo klein dat de grote stroomsnelheid van dit water een groot sedimenttransport veroorzaakt. In figuur 2.1 is deze toename van stroomsnelheid schematisch weergegeven. Bij hetzelfde debiet, maar een dunnere waterlaag, zal het water harder over de bezonken zandlaag stromen. In ieder geval voorkomt het wel verdere sedimentatie zodat er alleen



nog maar gepompt wordt om het overvloedverlies te leveren. Vervolgens wordt het water boven het neergeslagen zandbed weggepompt, om een zo gering mogelijke diepgang te krijgen.

Figuur 2.1. Toename stroomsnelheid door dunnere waterlaag (Badloo, 1998)

Het geladen schip vaart nu naar het stort, de locatie waar het gewonnen zand terecht moet komen.



Figuur 2.2. Beladingkarakteristiek sleephopperzuiger (Badloo, 1998)

Op het stort wordt het zand gedumpt. Dit kan op verschillende manieren. Op de wijze van dumpen zal hier niet verder ingegaan worden. Nadat het beun geheel leeggelopen is en het restwater is weggepompt begeeft het schip zich weer naar het wingebied op zee. Vaak wordt tijdens deze tocht het beun deels volgepompt met alleen water, om de diepgang van het schip iets te vergroten voor betere stabiliteit tijdens het varen. In het wingebied begint de cyclus weer van

voren af aan en wordt het ruim weer volgepompt. De afstand van het wingebied tot het stort bepaalt mede hoe lang er doorgeladen wordt. Bij een lange vaartijd wordt langer doorgeladen dan bij een korte vaartijd.

In figuur 2.2 is een voorbeeld te zien van een beladingkarakteristiek. De beschrijving van het verloop is als volgt:

AB: ruim volpompen met mengsel van zand en water tot overvloed wordt bereikt

BC: bij B wordt begonnen met overvloeien, er wordt doorgedaan met baggeren tot punt C

CD: wanneer de overvloeiverliezen te hoog worden, wordt gestopt met zuigen

DE: om een kleinere diepgang te verkrijgen wordt het water boven het zandbed weggepompt

EF: varen naar het stort

FG: dumpen van zand op het stort

GH: wegpompen van restwater uit het ruim, beginnen met varen naar wingebied

HA: verder varen naar wingebied

AB: ruim volpompen en weer beginnen met cyclus.

2.2. Het wingebied

Het winnen van zand op de Noordzee gebeurt in een van tevoren bepaald gebied. Dit gebied ligt meestal 10 tot 20 kilometer uit de kust. De waterdiepte waarop gewonnen wordt is minimaal 20 meter. Om dit gebied zo efficiënt mogelijk te benutten wordt in heen en weer gaande banen gebaggerd. Tijdens het winnen wordt een laag zand van ongeveer 20 cm van de bodem gezogen. Er wordt ook zand gewonnen in de verschillende vaargeulen voor de kust van Nederland (Euro-Maasgeul en IJgeul).

De vaarrichting van de sleephopperzuiger wordt voornamelijk bepaald door de richting van de stroming op zee. Langs de kust van Nederland komen getijdenstromingen voor. Deze stroming loopt parallel aan de kust en heeft een maximumsnelheid aan het oppervlak van de waterkolom van ca. 1 m/s.

De snelheid van de zuigkop, die tijdens het zandwinnen over de bodem sleept, bedraagt ca. 1 m/s (2 knopen) ten opzichte van de bodem. Dit betekent dat bij stilstaand water de vaarsnelheid ook 1 m/s zal zijn.

Bij een stroming van 1 m/s aan het oppervlak van het water ontstaan nu twee situaties:

1. Als met de stroom meegevaren wordt kan de snelheid van het schip ten opzichte van de bodem gelijk zijn aan de stroomsnelheid van het water. De snelheid van het schip ten opzichte van het water is dus ongeveer gelijk aan nul. De sleephopperzuiger drijft als het ware mee met de stroming. Door de weerstand van de sleepkoppen die over de bodem slepen blijft het schip op koers. Ook zal, om deze weerstand op te heffen, toch een klein beetje voortstuwing nodig zijn, waardoor het schip ook wat beter bestuurbaar blijft.

2. In tegenovergestelde richting zal dus tegen de stroming in gevaren worden. Om nu een snelheid van 1 m/s ten opzichte van de bodem te handhaven zal er, bij een stroomsnelheid van 1 m/s, met een snelheid van 2 m/s ten opzichte van het water gevaren moeten worden.

Tijdens het keren aan het eind van het wingebied wordt niet doorgebaggerd. De zuigbuizen worden dan omhoog gehaald en na het keren opnieuw neergelaten.

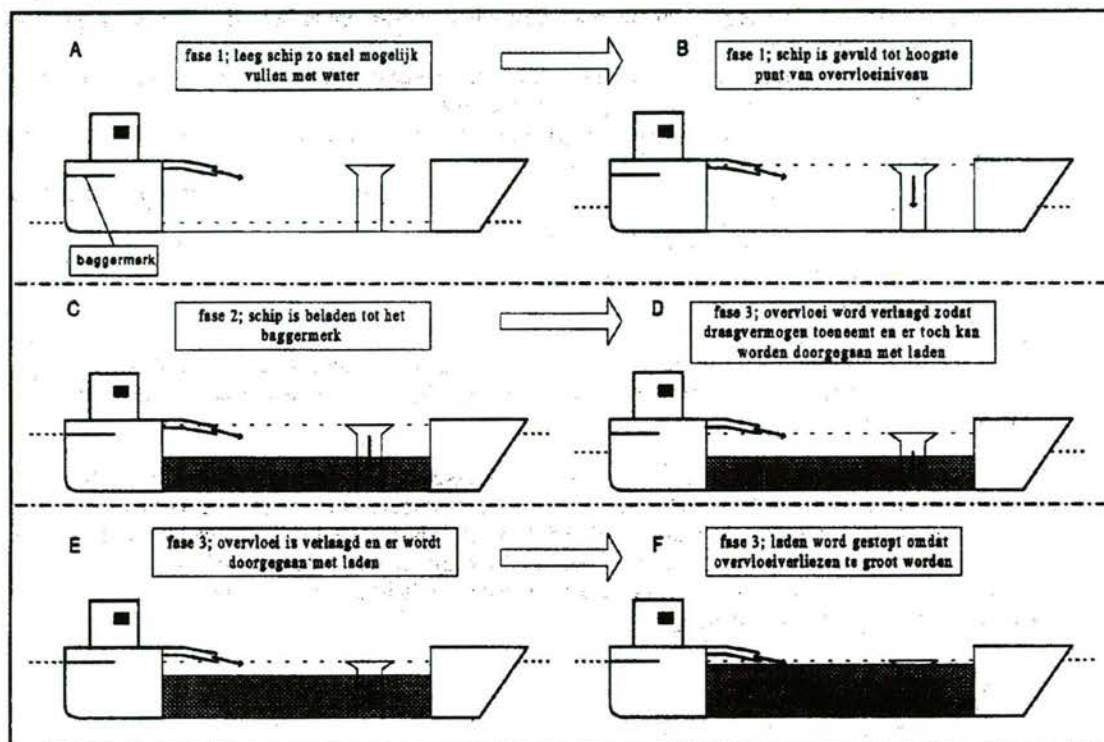
Bij het baggeren van een geul ontkomt men er soms niet aan om ook bij dwarsstroming te moeten baggeren.

2.3. Het baggerproces in de sleephopperzuiger

De sleephopperzuiger is een zeegaand schip dat is uitgerust met een zuigbuisinstallatie en een laadruim met bodemdeuren en een overloop. Aan de zuigbuis is een sleepkop bevestigd die over de

bodem wordt gesleept en daarbij de grond losmaakt en opzuigt. Dit losmaken gebeurt door middel van een erosieproces.

Het erosieproces treedt op bij niet samenhangende grondsoorten (zoals zand) wanneer deze onder invloed komen van waterstralen of zuigstromen. Bij erosie door zuigstromen gaat het om erosie ter plaatse van een vernauwde doorgang tussen zuigopening en waterbodem. Door de onderdruk in de zuigmond treedt er een versnelling op ter plaatse van deze doorgangen waardoor het omgevingswater voldoende snelheid krijgt om de bodem te eroderen.



Figuur 2.3. Het laden van een sleeppopperzuiger (Badloo, 1998)

Het opvoeren van het mengsel gebeurt hydraulisch. Het mengsel wordt naar het beun van het schip gepompt. Aanvankelijk wordt het beun gevuld tot aan het overloeviniveau. Vervolgens wordt doorgepompt, terwijl het water zonder zand (dit is inmiddels bezonken) via de overvloed weer het schip verlaat. De hoeveelheid zand in het beun neemt toe, waardoor de diepgang van het schip ook toeneemt. Bij de maximaal toegestane diepgang zal het niveau van de overvloed verlaagd worden, terwijl de diepgang van het schip gelijk blijft. Hierdoor wordt de waterschijf op de zandvracht snel dunner. De concentratie van het overloeverlies zal snel toenemen en uiteindelijk zal bijna al het zand dat opgezogen wordt via de overvloed de sleeppopperzuiger weer verlaten. De beladingscyclus van de sleeppopperzuiger is weergegeven in figuur 2.3.

De keuze om aan het eind van het proces wel of niet lang door te laden is afhankelijk van de economische aantrekkelijkheid. Bij een lange vaartijd van en naar het stort is het aantrekkelijker om langer door te laden dan bij een korte vaartijd.

2.4. Constant Tonnage Systeem

De meeste sleeppopperzuigers die voor 1970 zijn gebouwd, zijn volgens het Constant Volume Systeem (CVS) gebouwd. Het volume in het beun is dan constant, alleen het sedimentgehalte neemt toe. Voordat het laden begint worden de overloevkleppen opgezet zodat water met een lage concentratie aan deeltjes de beun verlaat. Afhankelijk van het te laden sediment en de maximale

diepgang wordt de overvloed meer of minder opengezet. Tijdens het laden neemt de diepgang toe totdat de maximale diepgang is bereikt, waarna gestopt wordt met laden.

Sinds 1971 worden steeds meer sleepopperzuigers volgens het Constant Tonnage Systeem (CTS) gebouwd. Bij dit systeem wordt de maximale diepgang snel na het begin van het laadproces bereikt. Na het bereiken van de maximale diepgang wordt het overvloedniveau verlaagd, zodat de diepgang constant op het baggermerk blijft.

Tegenwoordig worden alle hoppers voorzien van het CTS, omdat dit systeem veel effectiever werkt dan het CVS. Er wordt nu alleen nog maar gebruik gemaakt van het CTS.

Voor het laden van een sleepopperzuiger wordt met de volgende parameter gewerkt:

$$\rho_h = \frac{T_h}{V_h}$$

ρ_h	ladingdichtheid	[kg/m ³]
T_h	maximale waterverplaatsing	[kg]
V_h	totale hoppervolume	[m ³]

Deze waarde moet optimaal worden gekozen. De meest voorkomende waarden liggen tussen 1,6 kg/m³ en 2,0 kg/m³.

Een sleepopperzuiger met een CTS heeft altijd een in hoogte verstelbare overvloed. Het overvloedniveau wordt automatisch geregeld. Op het moment dat de maximale diepgang (het baggermerk, een merk aan de zijkant van het schip dat de maximaal toegestane diepgang aangeeft) van het schip is bereikt, wordt het overvloedniveau verlaagd, zodat er meer water wegstroomt en de dikte van de waterlaag boven het bezonken zand afneemt. Hierdoor kan er nog meer zand in de beun opgeslagen worden, terwijl de diepgang van het schip gelijk blijft.

Wanneer er zeer fijne deeltjes worden gebaggerd zoals slib, zal het sediment onvoldoende tijd hebben om te bezinken. Zodra in dit geval de overvloed is bereikt wordt gestopt met baggeren, omdat er vanaf dat moment een overvloedverlies van 100% is bereikt.

2.5. De hopper van de sleepopperzuiger

De hopper is het ruim van de sleepopperzuiger en dient als opslagruimte voor het opgezogen sediment tijdens het baggeren en tijdens het transport naar de losplaats. De hopper bestaat uit een inlaatsysteem, het beun en de overvloed.

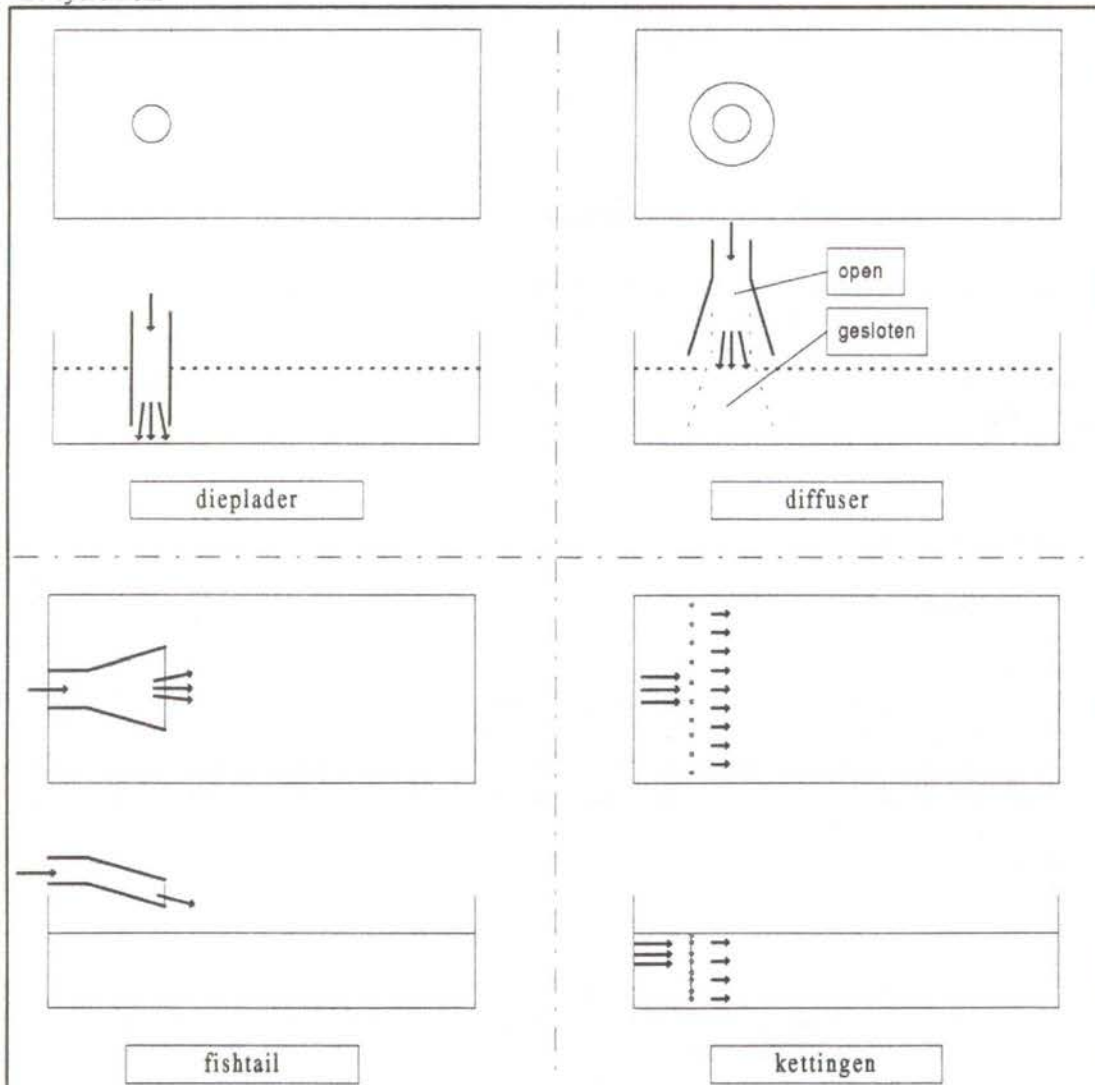
Het inlaatsysteem

Het inlaatsysteem is het gedeelte in de sleepopperzuiger waar het opgezogen mengsel in het beun van het schip terechtkomt. Een belangrijke eis voor deze inlaat is dat het mengsel met een lage snelheid zo goed mogelijk over de breedte van het beun verspreid wordt. Hierdoor wordt een zo rustig mogelijke instroom verkregen en wordt erosie van het zandbed voorkomen. Tevens zal de turbulentie in het beun afnemen en door de lage horizontale stroomsnelheid zal de verblijftijd van het mengsel toenemen, wat gunstig is voor het bezinkproces.

Er komen in de praktijk verschillende inlaatsystemen voor. Enkele systemen zullen hieronder beschreven worden en aan de hand van schetsen in figuur 2.4 toegelicht worden:

- Diffuser

Dit is een inlaat in de vorm van een pijp die aan het uiteinde steeds wijder wordt, als een omgekeerde trechter. Er is een verschil tussen diffusers die boven en onder het wateroppervlak uitmonden. Bij een hoge diffuser vindt luchtinsluiting plaats, doordat deze boven het wateroppervlak in de hopper uitmondt. Hierdoor ontstaat veel turbulentie onder het wateroppervlak, waardoor het zand minder goed bezinkt. Daarom wordt ook wel gebruik gemaakt van lagere diffusers. Hierbij bevindt de monding van de pijp zich continu onder het wateroppervlak.



Figuur 2.4. Inlaten (Badloo, 1998)

- Dieplader

Bij het dieplaadsysteem wordt het materiaal diep in de beun gebracht. Ook hier geldt dat er minder turbulentie opgewekt wordt in het beun omdat het inlaatsysteem onder het wateroppervlak uitmondt. De hoogte waarover het zand nog moet bezinken is ook nog zeer gering. Wel bestaat het gevaar dat de pijp verstopt raakt door afschuiving van het reeds bezonken sediment rondom de pijp. Dit kan worden voorkomen door de pijp omhoog te bewegen tijdens het laden. Dieplaadsystemen worden tegenwoordig nauwelijks nog toegepast.

- Fishtail

De fishtail kan open of gesloten worden toegepast zoals de diffuser. Met dit systeem wordt het mengsel gelijkmatig over de breedte van de hopper verdeeld. De hoek waaronder de fishtail staat kan worden aangepast, ook kan worden gekozen voor bijvoorbeeld een afdekking en geleidingsschotten.

- Kettingen

Om de snelheid van het mengsel lokaal te verminderen en beter over de breedte van het beun te verdelen worden ook wel kettingen toegepast. Het mengsel dat de hopper binnenstroomt zal tegen de kettingen stromen, waardoor het mengsel wordt afgeremd. De stroomsnelheid zal beter verdeeld zijn over de breedte van de hopper. Kettingen worden vaak toegepast in combinatie met de fishtail.

Het beun

Het bassin waarin het opgezogen zand watermengsel terecht komt wordt het beun genoemd. Het bassin dient als opslagruimte en bezinkbassin voor het sediment. Het is de bedoeling om ervoor te zorgen dat er zo veel mogelijk vaste stof en zo min mogelijk water in het bassin overblijft aan het eind van het laadproces. De fijnere deeltjes zullen de hopper verlaten via de overvloed, omdat zij in de beschikbare tijd niet bezinken.

De hoeveelheid zand die het beun verlaat via de overvloed is in grote mate afhankelijk van de verhouding tussen de tijd die een zandkorrel erover doet om de bodem van het beun te bereiken (vertikaal) en de tijd die de korrel erover doet om de afstand af te leggen van de inlaat tot de overvloed (horizontaal). De eerste is afhankelijk van de valsnelheid van het deeltje en de diepte van het beun, de tweede is afhankelijk van de stroomsnelheid (dus het debiet, de breedte en de diepte) in het beun en de lengte van het beun.

Voor een goede bezinking is dus een lang, smal en laag beun gunstig. Het gevaar bestaat dan echter dat er geen gelijkmatige verdeling van de lading over de lengte van het schip ontstaat. Bovendien zijn lange smalle schepen met een geringe beunhoogte zeer duur. Er moet dus naar een goede tussenweg gezocht worden.

In de loop van de tijd zijn er verschillende beunen ontworpen. De verschillende beunen zijn erop gebaseerd een zo lang mogelijke hopperlengte te verkrijgen zodat een lange baan kan worden afgelegd door de deeltjes. Hierdoor krijgen ook de fijnere deeltjes tijd om te bezinken. Natuurlijk moet aan verschillende criteria worden voldaan, zoals:

- Goede toegankelijkheid voor bijvoorbeeld reparaties.
- Zo min mogelijk obstructie om turbulentie te voorkomen.
- Wanden zo recht mogelijk, het liefst iets naar binnen hellend, om het lossen te vergemakkelijken.
- Voldoende sterkte van het beun.
- Zandniveau boven het zeewaterniveau als het schip op zijn maximale diepgang ligt.

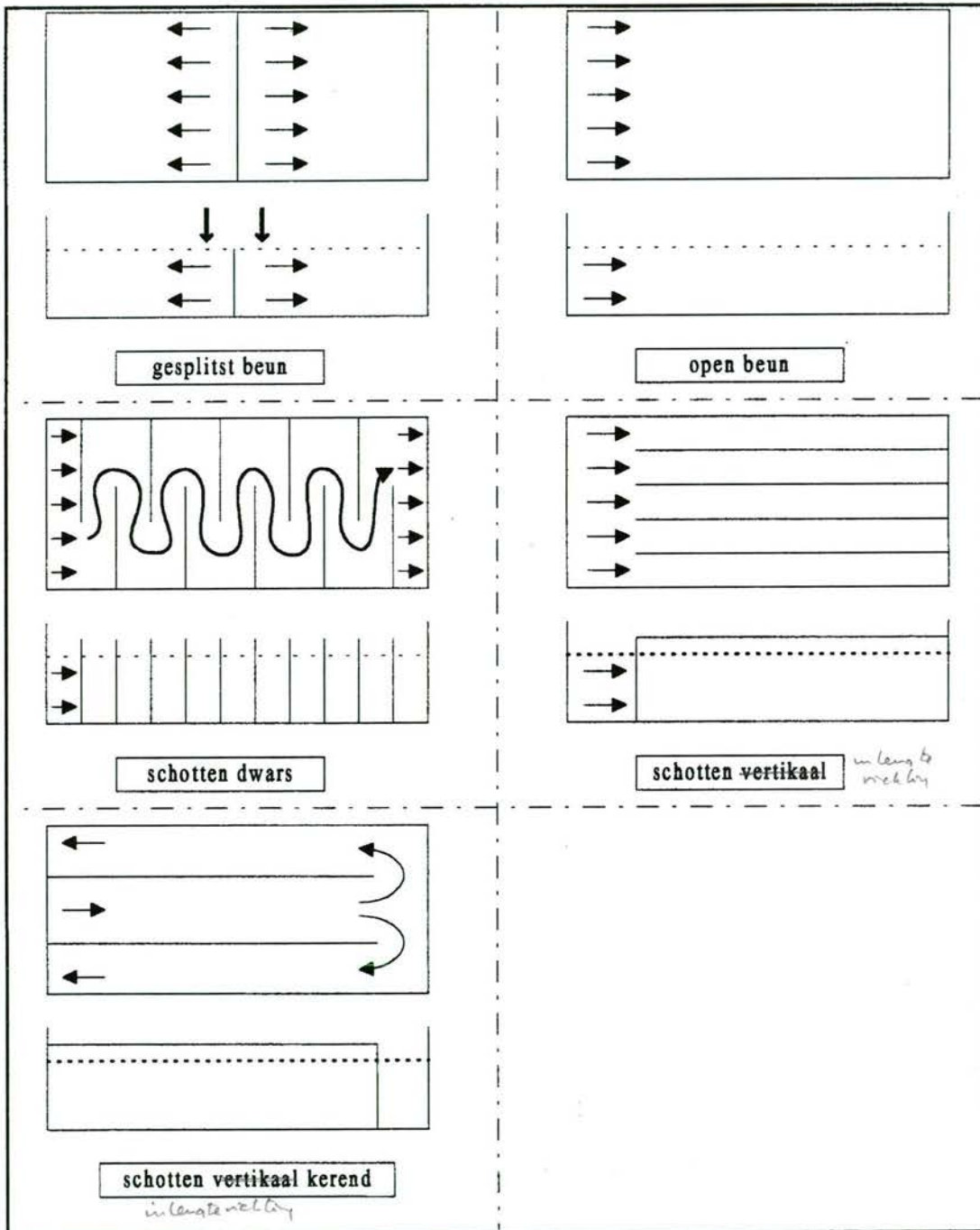
Hieronder volgt een beschrijving van de verschillende soorten beunen. In figuur 2.5 worden deze verschillende beunsystemen toegelicht aan de hand van schetsen.

- Open beun

Dit is het meest eenvoudige systeem. Het beun bestaat uit één geheel en er zijn geen obstakels. In een dergelijk bassin kunnen grote wervels optreden. Deining van het schip heeft veel invloed op de lading van het schip, waardoor ongelijkmatige belading kan ontstaan. De meeste sleephopperzuigers zijn uitgerust met een open beun.

- Gesplitst beun

Er wordt bij dit systeem gebruik gemaakt van twee aparte beunen, welke om en om gevuld worden. In de tijd dat in het ene beun gestort wordt, kan in het andere het sediment bezinken.



Figuur 2.5. Verschillende beunsystemen (Badloo, 1998)

- Schotten dwars

Een vergroting van de weglengte en dus ook van de verblijftijd wordt verkregen door het plaatsen van schotten, in dit geval in de dwarsrichting. Een probleem is dat er veel turbulentie kan ontstaan, wat slecht is voor het bezinkproces.

- Schotten in lengterichting

Nu worden schotten in de lengterichting van het beun geplaatst. Zij dienen vooral als geleiding. Grote wervels kunnen niet ontstaan door de geringe breedte. Ook ontstaat een meer evenwichtige verdeling van de belading over de breedte van het schip.

- Schotten in de lengterichting kerend

De weglengte wordt in dit geval ook vergroot, maar nu door schotten in de lengterichting waardoor de bezinklengte toeneemt. Turbulentie treedt minder op dan bij dwarsschotten. Het kan nu wel voorkomen dat het beun aan een zijde meer wordt beladen, waardoor het schip scheef kan gaan hangen.

De overvloei

De overvloei dient ervoor om het overtollige water uit het beun te laten stromen. Dit wordt het overvloeiverlies genoemd. Het doel is om zo veel mogelijk water uit te laten stromen en zo min mogelijk sediment. Bij grof zand en grind zijn deze overvloeiverliezen klein, maar bij het laden van fijn zand en slib kunnen deze verliezen zeer groot worden.

Wanneer veel sediment samen met het overvloeiwat er de sleepopperzuiger verlaat, ontstaat er vaak een pluim van sediment achter het schip. Vertroebeling van het water hierdoor kan een negatief effect hebben op verschillende levensvormen in dit gebied.

Het overvloeimengsel kan voor verschillende problemen zorgen:

- De sedimentdeeltjes zorgen voor een vermindering van de lichtdoorlatendheid in de waterkolom, wat de primaire productie in de Noordzee kan beïnvloeden.
- De sedimentdeeltjes kunnen als ze neerslaan op de bodem de hier levende organismen zoals larven levend begraven.

Het is dus van belang om zo goed mogelijk te weten hoe het overvloeiverlies zich verspreidt direct nadat het de sleepopperzuiger verlaat via de overvloei. Hierbij kan aan verschillende mechanismen gedacht worden, zoals:

- een wolk met individuele deeltjes, waarbij elk deeltje met zijn eigen valsnelheid naar de bodem zakt
- de vorming van een dichtheidsstroom, waarbij het overvloeiverlies met grotere dichtheid dan het omgevingswater als 'zwaar water' in een pluim naar de bodem stroomt
- pluim met deeltjes die een wolk slib vormen, waarbij de deeltjes wel als afzonderlijke korrels vallen, maar waarbij de deeltjes invloed op elkaar uitoefenen door elkaar mee te trekken waardoor een grotere valsnelheid ontstaat
- situatie waarbij lucht wordt ingesloten in de pluim met slib waardoor een verstoring van de pluim en daardoor menging optreedt
- situatie waarbij de schroefstraal van de aandrijfschroef invloed uitoefent op de verspreiding van het overvloeiverlies

3. De overvloed en het nearfield gedrag

3.1. Uitvoeringen van overvloedsystemen

De overvloed van een sleepopperzuiger kan op verschillende manieren worden uitgevoerd. De meest eenvoudige uitvoering van een overvloed is een verlaagde rand langs de volle lengte van het beun waarover het overtollige water weer terug in zee wordt gestort. Hierdoor ontstaat een grote hoeveelheid menging van het slib met het omgevingswater. Door de steeds strengere milieuwetgeving kan dit systeem steeds minder worden toegepast.

Tegenwoordig bestaat het meest voorkomende overvloedstelsel uit verstelbare overvloedkokers, waarbij de hoogte van de overvloed tijdens het laadproces wordt aangepast. Deze overvloed heeft een trechtervormige bovenkant en de overvloedkoker loopt door de bodem van de sleepopperzuiger heen en staat in directe verbinding met het omgevingswater.

De locatie van de overvloed in het beun van het schip is afhankelijk van waar het zand-water mengsel het schip binnenkomt. De inlaat en de overvloed liggen zo ver mogelijk uiteen om het zand zo lang mogelijk de tijd te geven te bezinken.

Enkele verschillende overvloedsystemen worden hieronder beschreven. In figuur 3.1 worden deze overvloedsystemen aan de hand van schetsen toegelicht.

- Drijvende uitstroom

Hierbij is sprake van een overvloedbak die aan drijvers is bevestigd. Dit is zo gedaan dat de inlaat in de bak altijd onder het wateroppervlak blijft. Tijdens deining zal nu continu water uit de overvloed blijven stromen, waardoor er geen grote hoeveelheid luchtinsluiting kan plaatsvinden. De verticale afstand tussen de overvloed en het wateroppervlak kan worden aangepast door het drijvend vermogen van de overvloedbak aan te passen. Horizontaal blijft de overvloed door middel van kettingen op zijn plaats.

- Flappen doorlaat

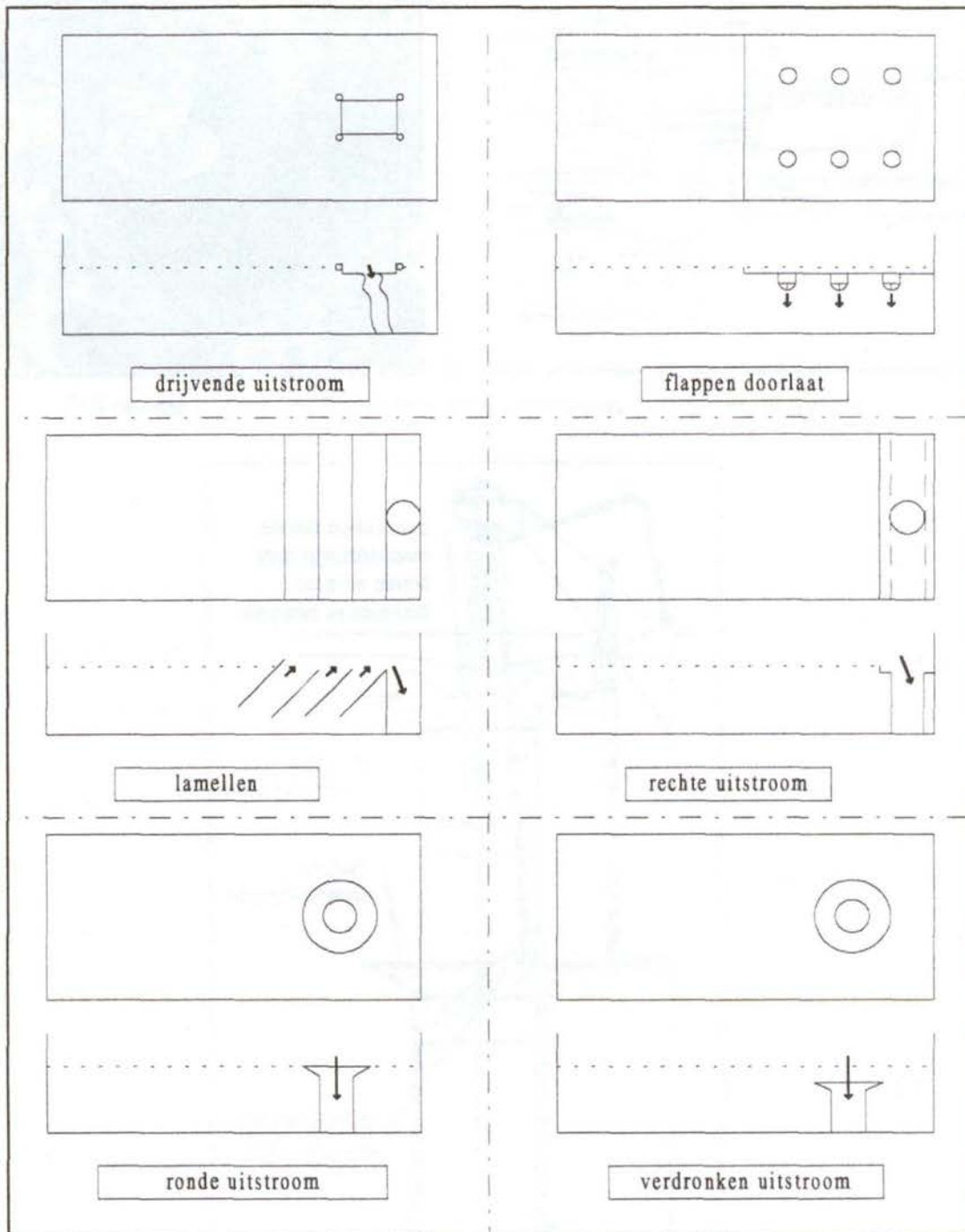
Door dit stelsel wordt het bezinkoppervlak vergroot en tevens neemt de hopperbelasting af, wat goed is voor het bezinkproces. De flappen gaan open zodra er voldoende materiaal in de trechters boven de flappendoorlaat is neergedaald. Dit materiaal zakt dan neer in de hopper, er wordt als het ware gebruik gemaakt van twee bassins, de hopper zelf en de bak met flappen. Uitschuring vindt voornamelijk plaats als de flappen bijna vol zijn waardoor het sediment in de flappen weer in suspensie geraakt.

- Lamellen

Bij dit stelsel zullen de deeltjes op de lamellen neerslaan, naar beneden bewegen en zich hier verzamelen. De fijne deeltjes krijgen dan alsnog de kans om neer te slaan op de lamellen. Er zal dus onder in het lamellensysteem een opeenhoping van deeltjes plaatsvinden, wat zorgt voor een vernauwing van de opening. Deze vernauwing veroorzaakt een snellere stroming en hier zal dan ook uitschuring kunnen optreden.

- Rechte uitstroom

Hierbij wordt een rechthoekige uitstroom gebruikt. Er zal zich een gelijkmatige stroming over de gehele breedte van de beun vormen. Hierdoor treden minder sterke verschillen in stroomsnelheden op, wat beter is voor het bezinkproces. De overvloeibak is tevens in hoogte verstelbaar.



Figuur 3.1. Verschillende overvloeisystemen (Badloo, 1998)

- Ronde uitstroom

Dit systeem wordt bijna overal toegepast en er wordt bijna altijd gebruik gemaakt van een in hoogte verstelbare overvloed. Er kunnen sterke stromingen ontstaan wat voor uitschuring van de zandlaag kan zorgen. Deze overvloed is constructief goed uitvoerbaar.

- Verdrongen uitstroom

Dit is een ronde of een rechte uitstroom die continu onder het wateroppervlak gehouden wordt. Er is nu minder invloed van deining, want er staat altijd een laag water boven de overloei. Ook zal er weinig of geen lucht worden meegenomen, afhankelijk van de waterhoogte boven de pijp. Met name aan het eind van het laadproces zal de waterhoogte boven de overloei minder hoog worden ingesteld, om toch een efficiënte belading te krijgen.

Het meest voorkomende overloei-type is de ronde uitstroom. Dit is een rechtop staande buis in het beun met aan de bovenkant een trechtervormige opening. De overloei is continu in hoogte verstelbaar. Dit is nodig om te voorkomen dat het schip voorbij het baggermerk geladen wordt. Dit betekent dat de diepgang zo groot wordt, dat er een onveilige situatie ontstaat. Door het verlagen van de overloei zal er water wegstromen waardoor er meer zand kan worden geladen.

3.2. Het overloei-verlies

Het overloei-verlies bestaat voornamelijk uit slib. Dit zijn sedimentdeeltjes kleiner dan 63 μm . De grootte van het overloei-verlies wordt door de volgende factoren bepaald:

- Het zuigdebiet. Hoe hoger het debiet, hoe groter de overloei-verliezen.
- De concentratie van het mengsel. Hoe hoger de concentratie, hoe groter de overloei-verliezen.
- De beladingsgraad. Hoe groter de beladingsgraad, hoe groter de overloei-verliezen. De beladingsgraad op een bepaald moment is het gedeelte van het beun dat op dat moment gevuld is met zand, inclusief het nog niet bezonken zand in de beun.
- De mate van turbulentie in de beun.
- De aanwezigheid van luchtbellen in de beun, welke het bezinken van het zand hinderen.
- Verdeling van de deeltjes tijdens de belading. Rustige en gelijkmatige verdeling van de deeltjes over de breedte van de beun levert minder overloei-verlies.
- Afstand tussen belading en overloei. Een grotere afstand geeft een langere bezinktijd, en dus minder overloei-verlies.
- De vorm van het beun.
- Het type inlaatsysteem.
- Het type overloei-systeem.

Het overloei-verlies wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de massa sediment die de hopper via de overloei verlaat en de massa sediment die de hopper binnenstroomt. Het overloei-verlies neemt toe in de tijd. Op een gegeven moment kan het overloei-verlies 100 % worden, de massa sediment die de hopper verlaat is dan gelijk aan de massa die binnenstroomt.

3.3. De verspreiding van het overloei-verlies

Wanneer het overloei-verlies, bestaande uit water fijne zanddeeltjes met slib, de sleephopperzuiger via de overloei verlaat, kan dit mengsel zich op verschillende manieren in de waterkolom verspreiden.

Allereerst zal in alle gevallen het mengsel als een jet uit de uitstroomopening van de overloei in de bodem van het schip in de waterkolom terechtkomen. Dit wil zeggen dat het mengsel met een beginsnelheid in het water terechtkomt. Vervolgens kunnen verschillende scenario's optreden:

- Het mengsel gedraagt zich als een dichtheidsstroom.
- Er treedt menging op, waardoor de omvang van de sedimentwolk snel toeneemt.
- Er treedt verstoring op door de invloed van de schroef van het schip.
- Er treedt luchtinsluiting op in de overloei.

Dichtheidsstroom

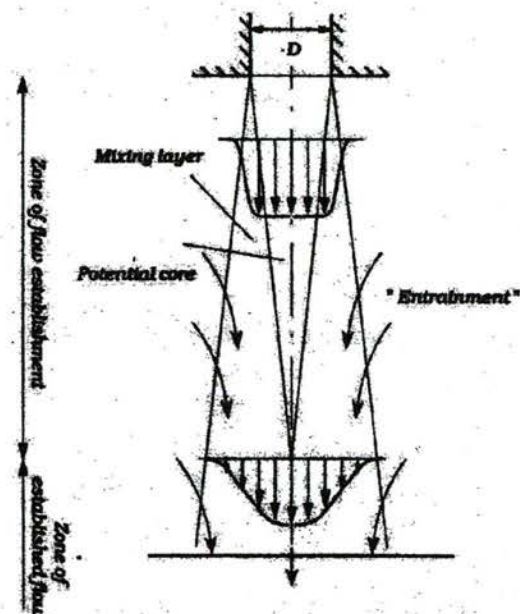
Het mengsel kan zich gedragen als een dichtheidsstroom. Het principe hierbij is dat het mengsel van slib en water een grotere soortelijke massa heeft dan het zeewater waarin het terechtkomt. Door dit dichtheidsverschil zal het mengsel vrij snel als een straal naar de bodem zakken en zich daar verspreiden en bezinken.

De straal kan worden opgedeeld in twee delen (zie fig. 3.2). Het eerste deel is de zogenaamde zone of flow establishment (zfe). Dit is het gebied waarin de vorm en de eigenschappen van de straal nog worden beïnvloed door de uitstroomopening. In de theorie wordt aangenomen dat de verdunning en de verspreiding in de zfe beperkt zijn. De lengte van de zfe wordt als volgt bepaald:

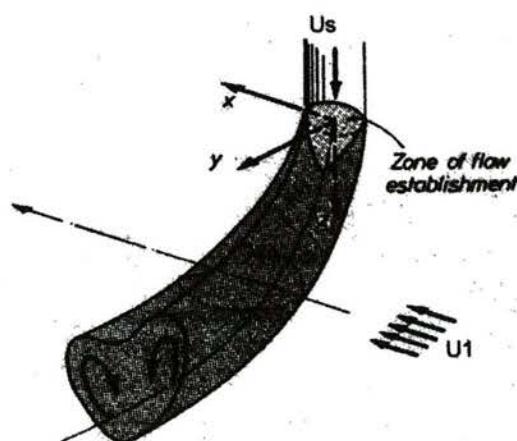
$$Z_{zfe} = 7D \left(1 - \frac{0,86}{0,03 \left(\frac{U_{uitstr}}{U_{zee}} \right)^2 + 1} \right)$$

Z_{zfe}	lengte zfe	[m]
D	diameter uitstroomopening	[m]
U_{uitstr}	uitstroomsnelheid	[m/s]
U_{zee}	snelheid uitstroompunt t.o.v. zeewater	[m/s]

Het tweede deel van de straal naar de bodem wordt de zone of established flow (zef) genoemd. In de zef treedt aanzuiging (entrainment) op. Aanzuiging is de interactie tussen een turbulente vloeistoflaag en de aangrenzende vloeistoflaag. Hierdoor worden pakketjes uit de ene laag ingesloten in de andere laag, met als gevolg een verandering van dichtheid of een afname of toename van de concentratie. In dit geval treedt een afname van dichtheid en concentratie op. De diameter van de straal naar de bodem neemt toe.



Figuur 3.2. Straal verdeling (Fannelöp, 1994)

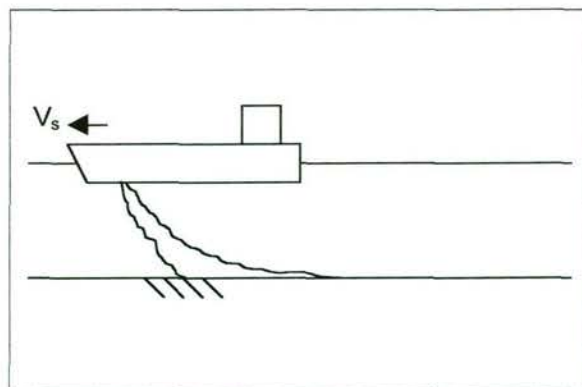


Figuur 3.3. Pluimverloop dichtheidsstroom (Wood et al., 1993)

In figuur 3.3 is te zien dat er op een gegeven moment gesproken kan worden van een bovenkant en een onderkant van de straal. De concentraties in deze straal hebben geen homogene verdeling. Dit komt door wervels die ontstaan doordat de stroming rond de straal buigt. Als het dichtheidsverschil tussen de straal en het omringende water groot is worden er ook wervels aan de bovenkant van de straal gevormd. De wervels lopen dan van de buitenkant van de straal omhoog en dan naar binnen, waar ze weer naar beneden draaien.

Er is nog een secundaire vorm van verspreiden, welke stripping genoemd wordt. Stripping is het afdrijven van een kleine hoeveelheid materiaal uit de straal naar de bodem door de stroming rondom de straal. Voor de hoeveelheid stripping kan 3% tot 5% van het slib in het overvloeimengsel

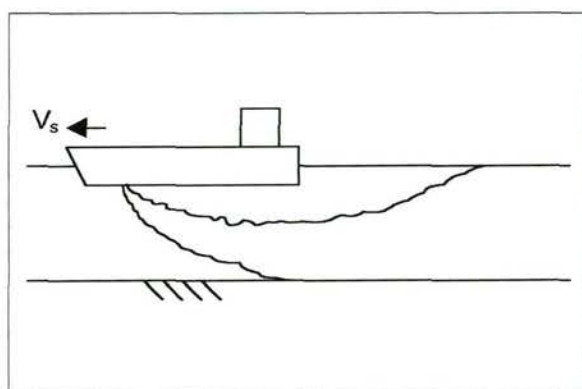
aangehouden worden (Gunter et al, 1964). Deze deeltjes zakken dan naar de bodem met de individuele valsnelheid. Dit deel van het overvloeiverlies blijft veel langer in suspensie dan het deel dat als straal naar de bodem wordt gebracht en zal aan het oppervlak voor de afname van lichtdoordringing kunnen zorgen.



Figuur 3.4. Dichtheidsstroom

Menging

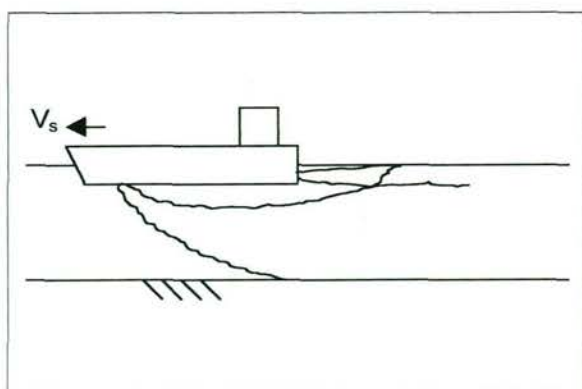
Wanneer het mengsel zich niet als een dichtheidsstroom gedraagt, kan het gebeuren dat het mengsel een pluim vormt die snel in omvang toeneemt en zich tot aan het wateroppervlak verspreidt. Er treedt dan entrainment op, wat betekent dat vloeistofpakketjes uit het omgevingswater ingesloten worden in de pluim, waardoor de concentratie en de dichtheid van de pluim afneemt. Het verschil in dichtheid tussen de pluim en het omgevingswater neemt af en er is op een bepaald moment geen sprake meer van een dichtheidsstroom. De pluim zakt nu naar de bodem met een snelheid gelijk aan de valsnelheid van de afzonderlijke slibdeeltjes. Deze snelheid is door de kleine afmeting van deze deeltjes gering, waardoor de bezinktijd op kan lopen tot enkele uren.



Figuur 3.5. Menging

Menging door schroefwerking

Wanneer de sleephopperzuiger met een bepaalde snelheid ten opzichte van het omringende water beweegt, bestaat de kans dat de pluim, die zich onder het schip ontwikkelt, in aanraking komt met het schroefwater. Hierdoor zal heftige menging van het sediment met het zeewater optreden. Dit heeft tot gevolg dat er extra vertroebeling in de waterkolom zal ontstaan.



Figuur 3.6. Menging door schroefwerking

Menging door luchtinsluiting in overvloei

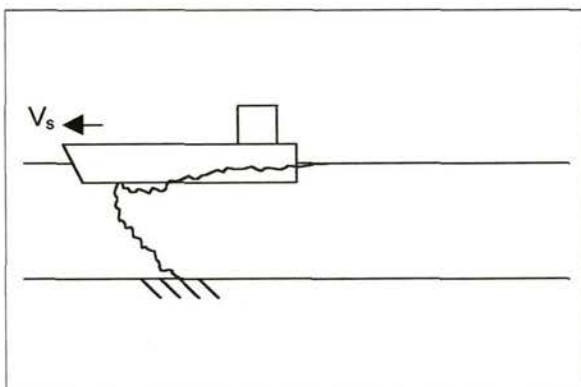
Tijdens het baggerproces zal de sleephopperzuiger door golven enigszins heen en weer rollen. Hierdoor is er geen continue uitstroom van het overvloeiwat.



Figuur 3.7. Onregelmatige overvloei

In figuur 3.7 is het verloop van de afvoer door de overvloei duidelijk te zien. Door het schommelen van het waterniveau in het beun zal eerst bij lage waterstand de rand van de overvloei duidelijk zichtbaar zijn. Vervolgens stijgt het waterniveau en loopt het overtollige proceswater weg door de overvloei. Wanneer het waterniveau nog iets stijgt kan de overvloei het debiet niet meer verwerken en stroomt de overvloei over. Daarna zakt het waterniveau rondom de overvloei weer en begint de cyclus van voren af aan.

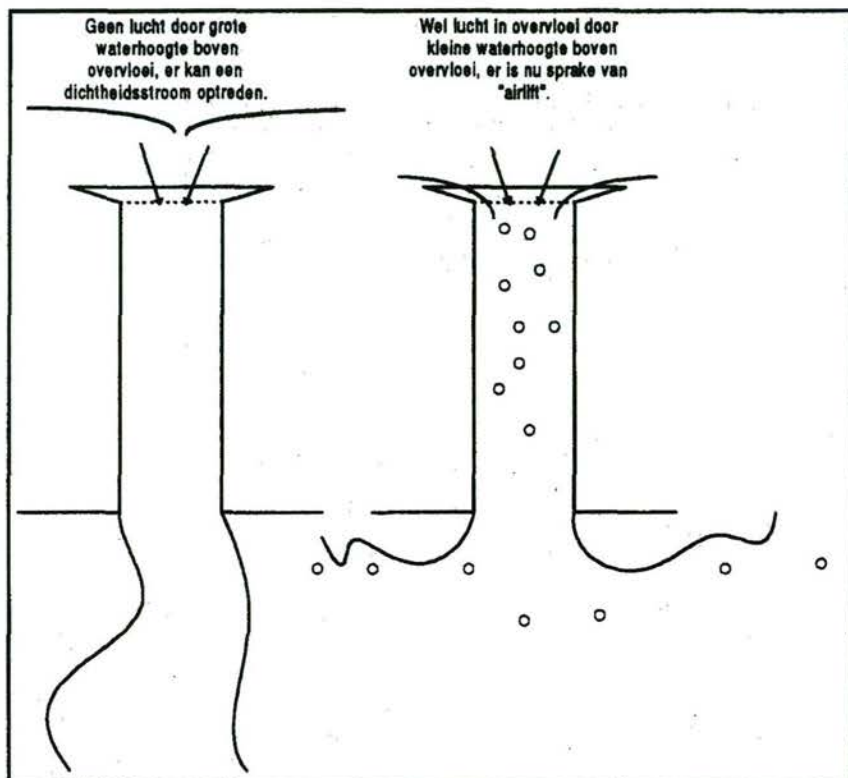
Door het onregelmatige overvloeien van het slibmengsel zal er lucht in de vorm van heel kleine luchtbelletjes ingesloten worden in de overvloeipijp. De ingesloten lucht wordt door het stromende mengsel in de overvloeipijp meegevoerd tot onder de sleephopperzuiger. Buiten de sleephopperzuiger worden de belletjes meegevoerd in de slibpluim totdat ze op een gegeven moment naar de oppervlakte gaan stijgen. Er ontstaat dan een airlift, het naar de oppervlakte stijgen van het sediment door opstijgende luchtbelllen (zie figuur 3.9). Hierdoor wordt de vorming van een compacte pluim verstoord en treedt er menging van het slib met het zeewater op (figuur 3.8). Luchtinsluiting kan worden voorkomen door smoorkleppen in de overvloeipijp aan te brengen. In de praktijk wordt deze mogelijkheid nauwelijks gebruikt, omdat instellen van de smoorkleppen lastig is en door gebruik van smoorkleppen de waterschil boven de zandvracht dikker wordt. Dit heeft tot gevolg dat er meer water in het beun aanwezig is en dus minder zand kan worden geladen.



Figuur 3.8. Menging door luchtinsluiting

De hoeveelheid lucht in het overvloeimengsel wordt nog meer verminderd als er voor wordt gezorgd dat de bovenzijde van de overvloei onder het vloeistofniveau in de hopper blijft. De waterhoogte boven het overvloeiniveau moet zo hoog zijn dat er geen lucht kan worden bijgemengd. Doordat er geen lucht wordt meegenomen ontstaat er ook geen airlift. De pluim die de uitstroomopening van de

overvloed verlaat ondervindt dan geen verstoring door luchtinsluiting en kan dan als een dichtheidsstroom naar de bodem zakken. Het wel of niet optreden van een dichtheidsstroom in die situatie is echter nog wel van een aantal andere factoren. Hierop wordt in het vervolg nog uitgebreid op teruggekomen.



Figuur 3.9. Effect van luchtinsluiting

4. Opzet van het onderzoek

4.1. Het proces

Om het near-field gedrag van het overvloeiverlies van een sleephopperzuiger te analyseren is een experimenteel onderzoek gedaan in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica aan de faculteit Civiele Techniek. Het is een praktisch onderzoek waarbij gebruik wordt gemaakt van een modelopstelling.

Het onderzoek is gericht op het gedrag van het overvloeiverlies onder water vanaf het moment dat het mengsel de uitstroomopening van de overvloed verlaat tot 1 à 2 scheepslengtes achter de sleephopperzuiger. In deze fase kan het overvloeiverlies zich op verschillende manieren gedragen. In alle gevallen van overvloeiverlies zal na het verlaten van de uitstroomopening van de overvloed een straal ontstaan. Dit is in dit geval een hoeveelheid water met een bepaalde concentratie slib welke bij het verlaten van de overvloed reeds een beginsnelheid heeft. Deze straal gaat over in een pluim. Dit is een stroming die op een straal lijkt, maar wordt veroorzaakt en gedreven door dichtheidsverschillen.

In deze dichtheidsstroming treedt entrainment op. Dit is een interactie tussen een turbulente vloeistoflaag en een aangrenzende vloeistoflaag. Hierdoor worden waterpakketjes uit de ene vloeistoflaag (het omgevingswater) ingesloten in de turbulente laag (de pluim) met als gevolg een afname van het verschil in dichtheid tussen de twee vloeistoffen. Tijdens dit proces neemt ook de doorsnede van de pluim toe.

Bij een lage mate van entrainment zal het dichtheidsverschil tussen de pluim en het omgevingswater weinig afnemen, waardoor de pluim zich gedurende een langere tijd als dichtheidsstroom zal gedragen. Er treedt dan weinig menging op, en de pluim zal weinig in diameter toenemen tot hij de bodem van de zee bereikt. Op de bodem zal de pluim zich in radiale richting verspreiden, waarbij de horizontale snelheid zal afnemen bij toename van de straal. Vervolgens zal het slib op de bodem bezinken.

In deze situatie treedt dus een dichtheidsstroom op, waarbij slechts zeer weinig slibdeeltjes buiten de pluim in de waterkolom terechtkomen. Er ontstaat nauwelijks vertroebeling van het zeewater. Het kleine beetje slib dat toch in de waterkolom terechtkomt wordt veroorzaakt door stripping. Dit is een kleine hoeveelheid materiaal die door de stroom van de straal of pluim wordt afgedreven door turbulentie en oppervlaktewrijving en zich door dispersie verspreidt.

Bij hoge mate van entrainment zal in korte tijd een zo grote hoeveelheid omgevingswater opgenomen worden in de pluim dat het dichtheidsverschil tussen de pluim en het omgevingswater snel afneemt. Hierdoor zal op een bepaald moment niet meer sprake zijn van een dichtheidsstroom. De slibdeeltjes vallen nu naar de bodem met de lage valsnelheid van de afzonderlijke deeltjes. Er is nu sprake van een wolk slib, waarvan de omvang door dispersie langzaam zal toenemen. Er ontstaat door deze menging een hoge mate van vertroebeling van de waterkolom.

In het onderzoek is voor verschillende omstandigheden onderzocht wanneer er een dichtheidsstroom tot aan de bodem optreedt, en wanneer er menging van het slib in de waterkolom optreedt. Deze verschillende omstandigheden werden bereikt door het variëren van drie parameters:

- de vaarsnelheid van het schip ten opzicht van het zeewater
- de uitstroomsnelheid van het overvloeiverlies
- het dichtheidsverschil tussen het overvloeiverlies en het omgevingswater

De uitvoering van dit onderzoek is gedaan aan de hand van modelproeven.

4.2. Gegevens prototype

Voor het onderzoek naar de verspreiding van het overvloeiverlies van een sleephopperzuiger is een modelopstelling worden gebruikt van een sleephopperzuiger. Voor de schaling van het model wordt uitgegaan van een standaard prototype schip. Hieronder volgt een beschrijving van dit prototype.

De afmetingen van de standaard sleephopperzuiger waarbij voor het bepalen van de afmetingen voor het model vanuit wordt gegaan, komen voort uit een standaard schip, dat is aangenomen door P. Badloo in zijn afstudeeronderzoek over Milieuvriendelijke Zandwinning. Als student Werktuigbouwkunde heeft hij dit onderzoek ook voor Directie Noordzee gedaan. Badloo ging uit van een beuninhoud van ruim 6000 m³. Aan de hand van schepen met vergelijkbare beuninhoud in zijn de afmetingen voor het standaard prototype schip als volgt aangenomen:

- lengte: 110 m
- breedte: 20 m

In overleg met Directie Noordzee is een diepgang aangenomen van 8 meter, en de waterdiepte waarbij gebaggerd wordt 20 meter. Deze diepte komt overeen met de diepte waarop op de Noordzee zand wordt gewonnen.

Voor de vaarsnelheid van de sleephopperzuiger ten opzichte van het water wordt voor het onderzoek 0 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s en 2 m/s aangehouden. Hierbij wordt uitgegaan van een snelheid van het schip ten opzichte van de bodem van 1 m/s. Tevens zal het voorkomen dat tijdens het baggeren een getijdenstroming plaatsvindt, met een maximale snelheid van 1 m/s aan de oppervlakte. Wanneer het schip tegen de stroming in vaart bedraagt de snelheid van het schip ten opzichte van het water 2 m/s, wanneer het schip met de stroom mee vaart zal de resulterende snelheid ten opzichte van het water 0 m/s bedragen. De tussenliggende snelheden van 0.5 m/s en 1.5 m/s worden ook meegenomen in het onderzoek om uiteindelijk een completer overzicht te verkrijgen van het gedrag van het overvloeiverlies tijdens het baggerproces.

Het debiet waarmee het sediment-watermengsel de sleephopperzuiger via de overvloei verlaat is gedurende het baggerproces gelijk aan het debiet waarmee het zand-watermengsel opgezogen wordt van de bodem. Voor dit debiet wordt 6 m³/s aangehouden. Dit is het debiet waarmee tijdens het onderzoek gerekend zal worden.

De standaard prototype sleephopperzuiger is slechts uitgerust met één overvloei. De diameter hiervan is 3 meter.

Voor de bepaling van de gemiddelde overvloeiverliezen wordt aangenomen dat de sleephopperzuiger continu een volumeconcentratie van 20% zuigt. De hoeveelheid materiaal die bij moderne sleephopperzuigers overvloeit is gemiddeld 10% van de inkomende hoeveelheid materiaal. De soortelijke massa van het materiaal is 2650 kg/m³ en de dichtheid van het zeewater is 1025 kg/m³. De gemiddelde dichtheid van het overvloeimengsel wordt dan:

$$\rho_{uit} = 0,2 \cdot 0,1 \cdot 2650 + (1 - 0,2 \cdot 0,1) \cdot 1025 = 1058 \text{ kg/m}^3$$

Het uitgaand debiet via de overvloei bedraagt dus 6 m³/s. Met een diameter van de overvloei van 3 meter zal bij continue lozing de uitstroomsnelheid ongeveer gelijk zijn aan:

$$u_{uit} = \frac{Q_{uit}}{A_{overvl}} = 0,85 \text{ m/s}$$

Aan de hand van deze waarden zal een modelopstelling voor het onderzoek ontworpen worden.

4.3. Afbakening en aannames

De verspreiding van het overvloeiverlies van een sleephopperzuiger is een zeer complex proces. Er is een afbakening gemaakt binnen dit proces, waarop het onderzoek gericht is. Hieronder volgen de belangrijkste afbakeningen.

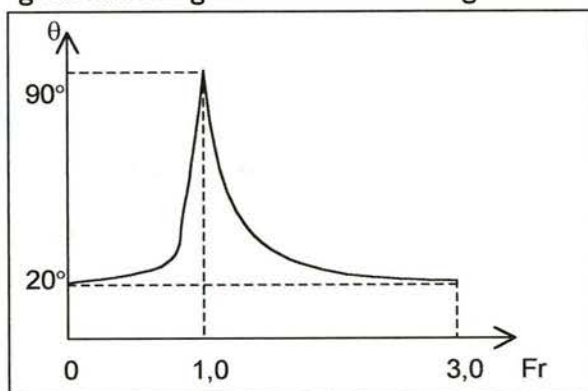
- Het onderzoek is enkel gericht op het near-field gedrag van het overvloeiverlies. Hieronder wordt het gedrag van het overvloeiverlies in de directe omgeving van de sleephopperzuiger verstaan. Deze directe omgeving is beperkt tot de waterkolom tot enkele meters naast het schip aan beide zijden en tot 1 à 2 scheepslengtes achter het schip. In het near-field gedrag spelen de begincondities van de pluim die de uitstroomopening van de overvloed verlaat een grote rol. Tegenover near-field staat far-field. Dit is het gebied tot enkele honderden meters rondom het schip, waarop dit onderzoek dus geen betrekking heeft. Hierbij spelen de omgevingscondities van de Noordzee een belangrijke rol.
- In hoofdstuk 3 is reeds luchtinsluiting besproken. Hierbij wordt bij het overvloeien van het overtollige proceswater in het beun lucht ingesloten in de overvloed. Deze lucht veroorzaakt een aanzienlijke verstoring van de pluim slib die in het overvloeiverlies de sleephopperzuiger verlaat. In het onderzoek naar de verspreiding van het overvloeiverlies is deze luchtinsluiting niet meegenomen.
- In hoofdstuk 3 is ook de invloed van de schroef van het schip besproken. Ook dit is niet meegenomen in het onderzoek. Er kunnen echter wel enige conclusies getrokken worden omtrent de invloed hiervan aan het eind van het onderzoek. Deze zullen behandeld worden in het hoofdstuk Analyse en Discussie (Hoofdstuk 8).
- In het onderzoek is de invloed van golven (windgolven en deining) niet meegenomen.

In het model voor de verspreiding van het overvloeiverlies van een sleephopperzuiger worden tevens verscheidene aannames gedaan. Deze aannames komen voort uit de beperkingen die de modelopstelling met zich meebrengt.

- In het model wordt de snelheid van het omgevingswater ten opzichte van het schip gerealiseerd door het water langs de romp van het schip te laten stromen, terwijl het schip een vaste positie in de opstelling heeft. In werkelijkheid (prototype) ontstaat deze snelheid door het voortbewegen van het schip door het omgevingswater. Het grootste verschil tussen model en prototype is dat in het model het schip in alle gevallen stilstaat ten opzichte van de bodem, terwijl in het prototype de snelheid van het schip ten opzichte van de bodem vrijwel altijd gelijk is aan ongeveer 1 m/s. De snelheid van het schip ten opzichte van het water komt in het model wel overeen met het prototype (na schaling met Froude), maar de snelheid van het water ten opzichte van de bodem komt nooit overeen. De stromingscondities rond de uitstroomopening van het van de overvloed zijn vergelijkbaar in het model en in het prototype, maar de condities bij de bodem niet.
- Tijdens het laden van zand in het beun van de sleephopperzuiger varieert de concentratie van het overvloeiverlies. In het begin van het laadproces is de concentratie nog laag, aan het eind hoog. De concentratie kan zo hoog worden dat de hoeveelheid overgevloed zand gelijk is aan de hoeveelheid opgepompt zand. In het model wordt een constante concentratie voor het overvloeiverlies aangenomen. De bepaling van deze concentratie wordt toegelicht in Gegevens Prototype (paragraaf 4.2).
- Het onderzoek wordt uitgevoerd in een stroomgoot met vaste afmetingen. Het grootste verschil met de werkelijkheid is de beperking in de breedte ten opzichte van het schip.
- De stroming van het zeewater rondom een sleephopperzuiger kan beïnvloed worden door de zuigarmen die aan een kant of aan beide kanten van het schip langs de romp hangen tot aan de bodem. In het model wordt deze invloed niet meegenomen.
- Voor de uitvoering van de overvloed zijn verschillende mogelijkheden. De belangrijkste verschillen zijn het aantal overvloeinstallaties in de breedterichting van het beun en de plaats van de

overvloeinstallatie ten opzichte van de hartlijn van het schip. In dit model wordt gebruikt gemaakt van één overvloe welke zich op de hartlijn van het schip bevindt.

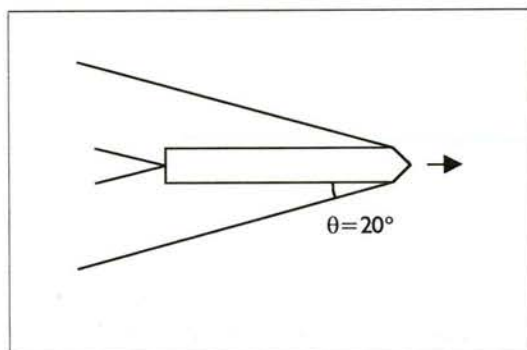
- In het model wordt voor het sediment in het overvloeiverlies gebruik gemaakt van kaoliniet. Dit materiaal heeft een vrij constante korrelgrootte van ongeveer 1-10 μm . In het prototype zal naast het aanwezige slib met vrij constante korrelgrootte ook een fractie sediment aanwezig zijn met een grotere diameter, welke verstoring zou kunnen veroorzaken in het verloop van de slibpluim na het verlaten van de overvloe. In het model is met deze invloed dus geen rekening gehouden.
- Bij het varen van een schip in water wordt er bij het bereiken van een bepaalde snelheid een golfsysteem opgewekt. Dit wordt ook wel de secundaire waterbeweging genoemd. Dit systeem geeft aanleiding tot twee stelsels van golven. Ten eerste een stelsel van divergerende golven, die



Figuur 4.1. Invloed vaarsnelheid en waterdiepte op θ

wijder worden aan beide zijden van de as van de vaarrichting naarmate deze verder achter de boeg van het schip zijn gelegen. Ten tweede een stelsel transversale golven, welke achter het schip ontstaan. Nu bestaat er een kans dat in de goot de divergerende golven, die ontstaan bij de boeg van het schip, bijna volledig zullen reflecteren tegen de verticale wand van de goot, om vervolgens de stroming direct rondom het schip te verstoren. Dit is een effect dat uiteraard niet optreedt bij het prototype, en daarom dus een ongewenst effect is in het model. Om te bepalen of dit effect optreedt wordt gebruik gemaakt van figuur 4.1. Buiten de omhullende die onder een hoek θ

loopt treden er geen verstoringen op (figuur 4.2). Nu geldt er voor het model, dat de grootste



Figuur 4.2. Omhullende divergerende golven

waarde voor het getal van Froude die voor zal komen ongeveer $Fr = 0,15$ bedraagt. Volgens de grafiek geldt dan ongeveer $\theta = 20^\circ$. Het schip zal in de as van de goot geplaatst worden. In dat geval bevindt het drukpunt, de boeg van het schip, zich aan beide zijden 1 meter van de wanden. Met $\theta = 20^\circ$ zal de eerste golfactiviteit aan de wand zich 2,75 meter achter de boeg van het schip bevinden. Met een maximale lengte van een model van 2 meter zal de stroming direct rondom het schip dus geen last ondervinden van gereflecteerde golven. Voor Fr geldt $Fr = v_s / (gd)^{1/2}$. Hierbij is v_s de vaarsnelheid van het schip en d de waterdiepte.

4.4. Modelproeven

De verspreiding van het overvloeiverlies van een sleepopperzuiger tijdens het winnen van zand zal door middel van principetoeven nagebootst worden. Dat wil zeggen dat er geen schaalonderzoek gedaan zal worden, maar dat er een opschaalbaar procesonderzoek gedaan zal worden. Het gaat hier om de verschillende effecten die optreden in de directe nabijheid van het schip, de 'near-field' verschijnselen.

Onderzocht zal worden wanneer het overvloeiverlies zich als een dichtheidsstroom gedraagt. Het sediment blijft dan als een compacte wolk bij elkaar en zakt vrij snel naar de bodem, waar het zich vervolgens ook als een dichtheidsstroom over de bodem verspreidt en neerslaat.

In het onderzoek zal gekeken worden naar het gedrag van het mengsel met een grotere dichtheid dan het omringende water bij een bepaalde vaarsnelheid en diepgang. Dit mengsel zal met een bepaalde snelheid door de bodem van een model van een schip in het water geïnjecteerd worden.

Er worden tijdens de experimenten dus drie verschillende parameters gevarieerd, te weten de stroomsnelheid van het water in de stroomgoot, de uitstroomsnelheid van het overvloeiverlies uit de overvloei en het dichtheidsverschil tussen het overvloeiverlies en het omgevingswater. Om de juiste waarden voor deze parameters in het model te verkrijgen zijn schaalregels gebruikt volgens de volgende paragraaf.

4.5. Schaling

Ondanks dat het hier gaat om principeproeven en niet om een schaalonderzoek zal toch getracht worden om zodanig te modelleren dat de principeproeven wat over de werkelijkheid zeggen.

Dimensies en snelheden voor een model van een schip kunnen bepaald worden aan de hand van twee dimensieloze parameters. Het gaat hier om het Reynolds-getal en het Froude-getal. Deze dimensieloze parameters dienen bij een schaalonderzoek in het model gelijk te zijn aan die van het prototype.

$$Re = \frac{ud}{\nu}$$

$$Fr^2 = \frac{u^2}{gd}$$

Re	Reynolds getal [-]
u	stroomsnelheid [m/s]
d	diepte [m]
ν	kinematische viscositeit [m ² /s]
Fr	Froude getal [-]

De voorwaarde dat het Froude-getal en het Reynolds-getal in het model gelijk zijn aan die in het prototype, garandeert dat de stroming rond het schip gelijkvormig is aan de stroming rond het model.

Wanneer het Froudegetal wordt gehandhaafd bestaat de volgende relatie tussen het model en het prototype:

$$\frac{V_m^2}{gL_m} = \frac{V_p^2}{gL_p}$$

Hierin is V de stroomsnelheidcomponent en L de lengtecomponent. Onderschrift m staat voor model en p voor prototype.

Wanneer het Reynolds-getal wordt gehandhaafd bestaat de volgende relatie tussen het model en het prototype:

$$\frac{V_m L_m}{\nu} = \frac{V_p L_p}{\nu}$$

Wanneer beide relaties voldoen, en $g_m = g_p$ en $v_m = v_p$, resulteert dit in:

$$\frac{L_p^3}{L_m^3} = 1$$

Dit betekent dat alleen dan tegelijk aan beide schalingswetten voldaan kan worden wanneer het model dezelfde afmetingen heeft als het prototype. Aangezien dit niet de bedoeling is van een model test is het onmogelijk om zowel het Reynolds-getal als het Froude-getal te handhaven tijdens modelproeven.

In de praktijk moet dus een keuze gemaakt worden. Wanneer het Reynolds-getal zou worden aangehouden zou in het model een erg grote snelheid aangehouden moeten worden. Zo een snelheid is in een stroomgoot vaak moeilijk te realiseren. In de praktijk wordt het Froude-getal gehandhaafd, waarbij in de gaten gehouden moet worden dat het Reynolds-getal voldoende groot is.

Aan de hand van de bovenstaande schaalregels worden voor het model de stroomsnelheid in de stroomgoot en de uitstroomsnelheid van het overvloeiverlies uit de overvloed bepaald. Verder wordt nog een geometrische schaalgrootte bepaald en de grootte van het dichtheidsverschil tussen het overvloeiverlies en het omgevingswater in het model.

Geometrische schaling

Voor de geometrische schaling in de proefopstelling is schaal 1:60 genomen. Deze schaal is gekozen aan de hand van de waterdiepte waarop gebaggerd wordt op de Noordzee (20 meter) en de maximale waterdiepte die in de stroomgoot van de proefopstelling gerealiseerd kan worden. De hoogte van de wanden van de goot is 40 cm. Wanneer een schaal van 1:60 aangehouden wordt, wordt de waterdiepte in de goot 33.3 cm.

Stroomsnelheid in de goot en uitstroomsnelheid overvloeiverlies

De stroomsnelheid in de goot zal bepaald worden aan de hand van het Froude-getal.

Froude:

$$Fr^2 = \frac{u^2}{gd}$$

Schaling:

$$n_{Fr} = \frac{Fr_p}{Fr_m} = 1$$

Het Froudegetal van het prototype moet gelijk zijn aan dat van het model. Voor de zwaartekracht geldt dat g_p gelijk is aan g_m .

Dus:

$$\frac{u_p}{u_m} = \frac{\sqrt{d_p}}{\sqrt{d_m}}$$

De uitstroomsnelheid in het model kan berekend worden met de volgende formule:

$$u_{uit,m} = u_{uit,p} \frac{\sqrt{D_{uit,m}}}{\sqrt{D_{uit,p}}}$$

u_{uit} = uitstroomsnelheid [m/s]

D_{uit} = diameter uitstroomopening overvloed [m]

Tevens moet gelden dat de verhouding tussen de stroomsnelheid in de goot en de uitstroomsnelheid uit de overvloed in het model gelijk is aan de vaarsnelheid van de sleepopperzuiger en de uitstroomsnelheid van het overvloedieverlies uit de overvloed van de sleepopperzuiger.

Dichtheidsverschillen

De dichtheidsverschillen tussen het overvloedieverlies en het omgevingswater in het model en in het prototype zijn gelijk. Het verschil tussen model en prototype is dat het omgevingswater in het prototype een dichtheid heeft van $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ (zout zeewater) en het omgevingswater in het model een dichtheid heeft van $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$.

4.6. China Clay - Kaoliniet

Voor het overvloedieverlies in het model zal een mengsel van water met China Clay gebruikt worden. China Clay is een droog wit poeder en wordt over het algemeen gebruikt als middel tegen aancoeken en hard worden in de kunstmestindustrie. China Clay bestaat voornamelijk uit kaoliniet (85%) en mica (15%).

De bepaling van de deeltjesgrootte van China Clay is gebaseerd op de wet van Stokes voor bolvormige deeltjes. Een cilinder wordt gevuld met een homogene suspensie (concentratie C_0) van deeltjes in een vloeistof (dichtheid ρ_0 , viscositeit η), vervolgens wordt vanaf $t=0$ de valafstand h gemeten in de tijd. Na een tijdsinterval t heeft een deeltje met diameter D een afstand h afgelegd volgens de wet van Stokes,

$$D = \sqrt{\frac{18\eta h}{(\rho - \rho_0)gt}}$$

waarin ρ de dichtheid van het deeltje is. Na een gegeven tijd t zullen alle deeltjes met een diameter groter dan een bepaalde D een afstand hebben afgelegd groter dan een bepaalde h . Door de concentratie in de cilinder te bepalen als functie van tijd en hoogte kan een verdeling van de deeltjesgrootte gemaakt worden.

Voor de deeltjesgrootte van China Clay kan een diameter van 1-10 μm aangehouden worden. Voor de soortelijke massa wordt $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$ aangehouden. Echter voor het bepalen van de dichtheid van een mengsel van water met kaoliniet is een dichtheidsmeter gebruikt.

5. Beschrijving experimentele opstelling

Het onderzoek naar de verspreiding van het overvloeiverlies van een sleephopperzuiger is uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica aan de faculteit Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. In dit laboratorium zijn verschillende waterbakken en stroomgoten opgesteld waarin waterloopkundige experimenten uitgevoerd kunnen worden.

5.1. De stroomgoot

Alle experimenten zijn uitgevoerd in een stroomgoot met een breedte van 2 meter en een maximale diepte van 40 cm. Vanaf ongeveer 10 meter benedenstrooms van de instroomzijde zijn de wanden van de goot van glas. De bodem van de goot is van beton. De totale lengte van de goot bedraagt ongeveer 25 meter.

Aan de benedenstroomse zijde van de goot is een stuw aangebracht. Door de stuw in hoogte te variëren en de waterdiepte constant te houden wordt de juiste stroomsnelheid in de goot verkregen.

5.2. De sleephopperzuiger

In de goot is een model van een sleephopperzuiger gemonteerd. Dit schip heeft een totale lengte van 172 cm, op de waterlijn van 150 cm en een breedte van 42,5 cm. De diepgang is 13,3 cm, de totale waterdiepte in de goot bedraagt 33,3 cm. Deze waarden zijn afgeleid van de diepgang van het prototype van 8 meter, een waterdiepte van 20 meter en een schaal 1:60. Met deze schaal komen de lengte en breedte van het schip niet geheel overeen met die van het prototype, maar dat is, gezien de aard van de principeproeven, geen bezwaar.

Het schip is door middel van dwarsbalken star gemonteerd aan de wanden van de goot; het kan dus niet verplaatsen ten opzichte van de bodem. Het schip is centraal op de lengteas van de goot gemonteerd. Om het schip door een zo homogeen mogelijke stroming te laten 'varen' dient het schip op minimaal 20 maal de waterdiepte vanaf het instroompunt van de stroomgoot gemonteerd te worden. Deze minimale afstand is dus ongeveer 7 meter. De locatie van het schip bevindt zich tussen glazen wanden om het verloop van de pluim van het overvloeiverlies goed te kunnen waarnemen.

5.3. De overvloei

In het model van het schip is een pijp aangebracht met een binnendiameter van 2.5 cm, welke vertikaal staat en door de bodem van het schip steekt. Het uitstekende deel van de pijp aan de onderzijde van het schip is vervolgens gelijkgemaakt met de bodem van het schip. Aanvankelijk was het schip uitgerust met een kielbalk over de gehele lengte van de bodem, maar deze is weggehaald om verstoring van de stroming rond het uiteinde van de pijp te minimaliseren. De afstand van het midden van de pijp tot de boeg van het schip bedraagt 62 cm. De pijp zit in de breedterichting exact in het midden van het schip. De afstand van de bodem van het schip (en dus ook van de uitstroomopening) tot de bodem van de goot is 20 cm.

De pijp in het schip fungeert als overvloei, vergelijkbaar met de overvloei in een sleephopperzuiger. Door de overvloei stroomt tijdens de experimenten een mengsel van water met kaolinite. Het verschil tussen de dichtheden van het mengsel en het omgevingswater is gelijk aan het dichtheidsverschil tussen water-slib mengsel dat een sleephopperzuiger via de overvloei verlaat en de dichtheid van het zeewater.

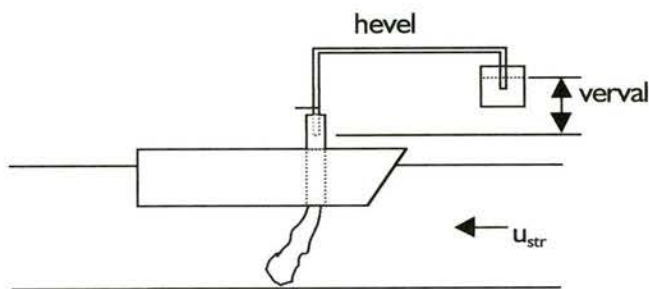
Het uitstroomdebiet wordt geregeld met een hevel. De hevel is van tevoren geijkt voor de debieten met de bijbehorende vervallen.

Het mengsel van water met kaoliniet met de juist dichtheid wordt vanuit een reservoir via de hevel in de overvloeipijp geloosd. Dit reservoir is een bekglas met een maximale inhoud van 5 liter.

In dit reservoir is een roerder aangebracht om te voorkomen dat het kaoliniet gaat bezinken, waardoor de dichtheid niet constant zou blijven.

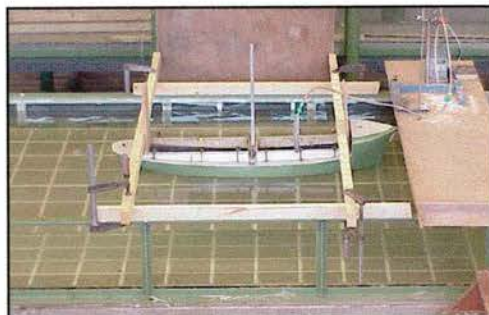
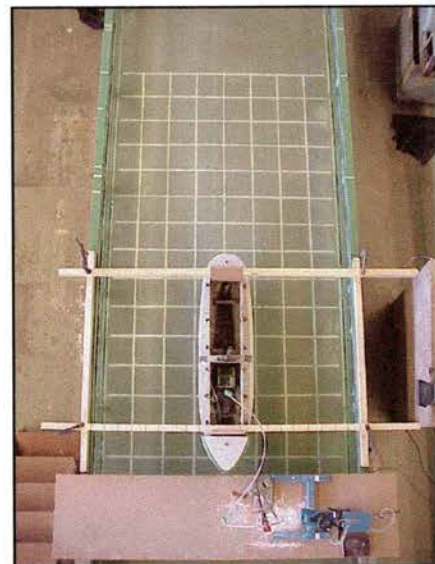
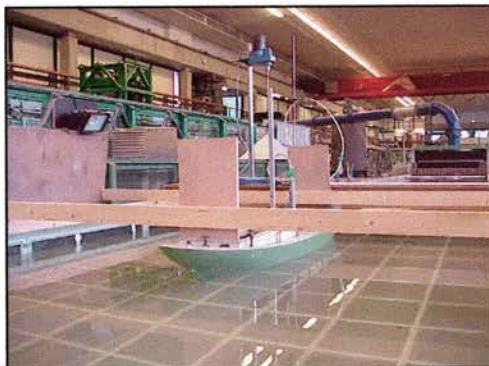
De hevel is aan het einde van de slang voorzien van een kraantje, waardoor op een nette manier een hoeveelheid mengsel in de overvloedig geloosd kan worden. Tijdens het lozen zit het kraantje altijd ter hoogte van de bovenrand van de overvloeipijp. Hierdoor is gedurende alle experimenten de afstand tussen het uiteinde van de hevel en het vrije wateroppervlak in de overvloedig gelijk.

In figuur 5.1 is de bovenbeschreven opstelling geschetst.



Figuur 5.1. Schets modelopstelling

Op de bodem van de goot is ter plaatse van het schip een rooster van lijnen op de bodem aangebracht. Deze lijnen lopen zowel in de lengte- als in de breedterichting en hebben een onderlinge afstand van 25 cm. Recht onder de overvloedig zit een kruising van twee lijnen van het raster. Vanuit dat punt loopt het rooster 1 meter in de bovenstroomse richting en 3 meter in de benedenstroomse richting en zijwaarts tot aan de wand van de goot.



Figuur 5.2. Modelopstelling Laboratorium voor Vloeistofmechanica

Op de foto's van figuur 5.1 is duidelijk te zien hoe het schip aan de goot bevestigd is en op het bovenaanzicht is het lijnenrooster goed zichtbaar.

Om de verspreiding van het overvloeiverlies goed te kunnen analyseren zijn alle experimenten vastgelegd op video. Tijdens de experimenten is zowel het zijaanzicht van de pluimen gefilmd als het bovenaanzicht. Het resultaat hiervan is te zien in Meetresultaten (hoofdstuk 7).

5.4. Meetinstrumenten

Voor voortdurende controle van stroomsnelheden en debieten en voor het waarnemen van concentraties zijn de volgende meetinstrumenten gebruikt:

- Peilnaald voor waterdiepte
- OSLIM voor de meting van concentraties (bereik 0,1 g/l tot 50,0 g/l)
- Foto- en videoapparatuur
- Stopwatch (om stroomsnelheid aan de oppervlakte te meten)
- Dichtheidsmeter (Anton Paar DMA35N Densitymeter)

6. Beschrijving meetprogramma

6.1. Bepaling verschillende parameters

Stroomsnelheid in de goot

Er moeten in de goot vijf verschillende snelheden gerealiseerd kunnen worden, namelijk 0 m/s, 0.065 m/s, 0.13 m/s, 0.195 m/s en 0.26 m/s. Deze snelheden zijn bepaald volgens de schaalregel:

$$\frac{u_p}{u_m} = \frac{\sqrt{d_p}}{\sqrt{d_m}}$$

en komen overeen met de snelheden 0 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s en 2 m/s in het prototype.

Uitstroomsnelheid overvloei

Voor de overvloei in het model zijn de uitstroomsnelheid en het debiet belangrijk. De waarden hiervan moeten bepaald worden uit de debieten en snelheden uit het prototype.

Aangenomen wordt dat er in het prototype een ingaand debiet is van 6 m³/s. Er wordt tevens aangenomen dat de situatie die gesimuleerd wordt in de principeproeven zover na aanvang beladen is dat het ingaand debiet via de zuigbuizen gelijk is aan het uitgaand debiet via de overvloei. Hiervoor wordt dus aangenomen dat het waterniveau in het beun constant is.

Het uitgaand debiet via de overvloei bedraagt dus 6 m³/s. Voor diameter van de overvloei in het prototype wordt 3 meter aangehouden. Bij een continue lozing zal de uitstroomsnelheid dan ongeveer gelijk zijn aan

$$u_{uit} = \frac{Q_{uit}}{A_{overvl}} = 0,85 \text{ m/s}$$

Met een schaal 1:60 wordt de diameter van de overvloei in het model 5 cm. De uitstroomsnelheid in het model kan berekend worden met de volgende formule:

$$u_{uit,m} = u_{uit,p} \frac{\sqrt{D_{uit,m}}}{\sqrt{D_{uit,p}}}$$

Hieruit volgt $u_{uit,m} = 0,11 \text{ m/s}$.

Voor de verspreiding van het overvloeiverlies wordt aangenomen dat de uitstroomsnelheid van groter is belang dan het uitstroomdebiet. Om uitvoeringstechnische redenen zal voor de diameter van de overvloei in het model niet 5 cm maar 2.5 cm aangehouden worden. Voor de uitstroomsnelheid uit de overvloei wordt 0.11 m/s aangehouden.

Om een beeld te krijgen van de invloed van de uitstroomsnelheid van het overvloeimengsel uit de overvloei, zal de uitstroomsnelheid van het overvloeimengsel in het model gevarieerd worden. De uitstroomsnelheid van het prototype wordt als volgt berekend:

$$u_{uit,p} = \frac{Q_{uit,p}}{A_{overvl,p}}$$

De uitstroomsnelheid kan in het prototype gevarieerd worden door de diameter van de overvloeipijp te veranderen. Naast de snelheid bij de standaard diameter van 3 meter zullen ook snelheden bepaald worden aan de hand van diameters van 2, 2.5, 3.5 en 4 meter in het prototype.

De diameter van de overvloei in het model wordt aanvankelijk geometrisch geschaald, dit is de schaal 1:60. Hieronder volgt een overzicht van de verschillende diameters met de bijbehorende uitstroomsnelheid voor prototype en model.

Tabel 6.1. Variatie diameter overvloei model en prototype

diameter prototype (m)	diameter model (cm)	uitstroomsnelheid prototype (m/s)	uitstroomsnelheid model (m/s)
2	3,3	1,91	0,25
2,5	4,2	1,22	0,16
3	5	0,85	0,11
3,5	5,8	0,62	0,08
4	6,6	0,48	0,06

In het model is de uitstroomsnelheid van maatgevend belang in vergelijking met het uitstroomdebiet. Er zal gekozen voor een constante uitstroomdiameter tijdens alle experimenten. Hiervoor zal 2,5 cm aangehouden worden.

Omdat bij deze keuze voor de uitstroomsnelheden in het model de spreiding heel onregelmatig is wordt gekozen voor nieuwe waarden van de uitstroomsnelheid in het model. Uitgegaan wordt van een gemiddelde uitstroomsnelheid van 0.10 m/s. Vervolgens wordt deze uitstroomsnelheid gehalveerd en verdubbeld. Dit levert voor de uitstroomsnelheden in het model: 0.05, 0.10 en 0.20 m/s.

Het vergroten en verkleinen van de uitstroomsnelheid in het model gebeurt door middel van het vergroten of verkleinen van het niveauverschil tussen de uitstroomopening van de hevel en het vrije wateroppervlak in het reservoir.

Dichtheidsverschil tussen overvloeiverlies en omgevingswater

Om een beeld te krijgen van de invloed van het dichtheidsverschil tussen het overvloeimengsel en het omringende water, is de dichtheid van het overvloeimengsel in het model gevarieerd.

De dichtheid van het overvloeimengsel in het prototype is als volgt bepaald:

- sleepopperzuiger zuigt continu een volume concentratie van 20%
- de hoeveelheid materiaal die overvloeit is gemiddeld 10% van het inkomende materiaal
- soortelijke massa sediment is 2650 kg/m³

$$\rho_m = 0.2 \cdot 0.10 \cdot 2650 + (1 - 0.2 \cdot 0.1) \cdot 1025 = 1058 \text{ kg/m}^3$$

Om de dichtheid van het overvloeimengsel in het prototype te variëren moet het percentage van het inkomende materiaal dat overvloeit variëren. Dit kan bewerkstelligd worden door het niveau van de

overvloei in de sleephopperzuiger te veranderen. Hoe hoger de overvloei, hoe lager de dichtheid van het mengsel. In de onderstaande tabel worden verschillende percentages met de daaruit volgende dichtheden getoond.

Tabel 6.2. Variatie dichtheid overvloeimengsel

% materiaal	dichtheid mengsel (kg/m ³)	verschil met zee (kg/m ³)
5	1041	16
7,5	1049	24
10	1058	33
12,5	1066	41
15	1074	49

Het verschil in dichtheid in het model zal gelijk gehouden worden aan het verschil in het prototype. De dichtheid van het omringende water in het model is 1000 kg/m³.

Om het aantal experimenten te beperken zullen aanvankelijk proeven gedaan worden waarbij het dichtheidsverschil 16, 33 en 49 kg/m³ is.

6.2. Uit te voeren experimenten

Hieronder volgt een beschrijving van de serie proeven die gedaan zal worden.

Er zijn drie variabele parameters:

1. vaarsnelheid schip (stroomsnelheid goot)
2. dichtheidsverschil tussen overvloeimengsel en omgevingswater
3. uitstroomsnelheid overvloeimengsel

De snelheden in de goot zijn 0 m/s, 0.065 m/s, 0.13 m/s, 0.195 m/s en 0.26 m/s. Deze waarden zijn volgens de eerder genoemde schalingsregels bepaald, en komen overeen met de snelheden 0 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s en 2 m/s van de sleephopperzuiger ten opzichte van het zeewater.

Allereerst zijn bij stilstaand water (0 m/s) experimenten uitgevoerd. Tijdens deze experimenten zijn het dichtheidsverschil van het overvloeimengsel met het omgevingswater en de snelheid waarmee het overvloeimengsel de uitstroomopening verlaat gevarieerd. De verschillende uitstroomsnelheden van het overvloeiverlies zijn 0.05 m/s, 0.10 m/s en 0.20 m/s. De verschillende dichtheden van het overvloeiverlies zijn 1016 kg/m³, 1033 kg/m³ en 1049 kg/m³. Er zijn bij stilstaand water dus in totaal 9 experimenten uitgevoerd.

De experimenten bestaan uit eenmalige kortdurende lozingen, waarbij de witte pluim die uit de uitstroomopening van de overvloei komt op video is vastgelegd. Het verloop van de pluim in de tijd van de uitstroomopening tot de bodem en de radiale verspreiding van de pluim over de bodem kan vervolgens aan de hand van deze beelden worden geanalyseerd. In het hoofdstuk 'Meetresultaten' wordt beschreven hoe uit de resultaten van de experimenten bij stilstaand water een criterium opgesteld kan worden voor een dichtheidsstroom.

Deze serie experimenten is vervolgens herhaald met een stroomsnelheid in de goot van 0.065 m/s, 0.13 m/s, 0.195 m/s en als laatste met 0.26 m/s. Ook hier zal aan de hand van videobeelden het verloop van de pluim geanalyseerd worden.

6.3. Metingen

Alle experimenten zijn vastgelegd op video. Het verloop van de verschillende pluimen is van opzij vastgelegd en van boven.

Van opzij is goed te zien of de pluim zich wel of niet over de gehele hoogte van de waterkolom verspreidt, of dat hij zich juist onderin of bovenin de waterkolom begeeft. Er kan waargenomen worden of het overvloeiverlies zich direct na het verlaten van de overvloei naar de bodem, de achterzijde van het schip of naar de wateroppervlakte begeeft.

Van boven kan de radiale verspreiding van het sediment over de bodem van de goot goed waargenomen worden. Met behulp van de lijnen op de bodem van de stroomgoot kan de radiale verspreidingssnelheid gemeten worden.

7. Meetresultaten

7.1. Inleiding

Alle experimenten zijn aanvankelijk visueel beoordeeld. Er is getracht om direct vast te stellen of een pluim zich als een dichtheidsstroom gedraagt of dat er menging van het overvloeiverlies met het omgevingswater optreedt.

Wat direct duidelijk was is dat in stilstaand water ($u=0$ m/s) de pluim zich in alle gevallen als een dichtheidsstroom gedraagt. Na het bereiken van de bodem verspreidt de pluim zich in radiale richting over de bodem. Deze radiale verspreiding is visueel beoordeeld als een dichtheidsstroom. Bij een stroomsnelheid van 0.065 m/s in de goot hebben vrijwel alle experimenten als resultaat een pluim die op een dichtheidsstroom lijkt. Verhoging van de snelheid naar 0.13 m/s zorgde in sommige gevallen voor aanzienlijk meer menging. In de gevallen bij een stroomsnelheid in de goot van 0.195 en 0.26 m/s trad vrijwel alleen menging op.

Na zorgvuldig bestuderen van het verloop van de pluimen in de verschillende omstandigheden kon worden geconcludeerd dat het onmogelijk is om visueel vast te stellen of een pluim zich als een dichtheidsstroom gedraagt of niet. Derhalve is besloten om de verspreiding van het overvloeiverlies op een andere manier te analyseren.

Vastgesteld is reeds dat de pluim in stilstaand water zich in alle gevallen als een dichtheidsstroom gedraagt. Met behulp van dit uitgangspunt is een theorie, ontwikkeld door Fay (1980), toegepast op de verspreiding van de pluimen. Door middel van deze theorie is een criterium vastgesteld voor een dichtheidsstroom. Vervolgens worden de resultaten van de experimenten in stromend water getoetst aan dit criterium. Op deze manier wordt bepaald welke gevallen een dichtheidsstroom opleveren en welke menging volgens de theorie van Fay.

In paragraaf 7.2 wordt een beschrijving gegeven van de verschillende pluimvormen. In paragraaf 7.3 wordt de verspreiding van het overvloeiverlies in stilstaand water geanalyseerd. Aan de hand van de resultaten van deze analyse en de theorie van Fay wordt in paragraaf 7.4 een criterium voor een dichtheidsstroom opgesteld. In paragraaf 7.5 wordt de verspreiding van het overvloeiverlies in stromend water aan het criterium getoetst. De classificatie volgens de theorie van Fay of een pluim een dichtheidsstroom is of niet volgt uiteindelijk in hoofdstuk 8.

7.2. Beschrijving verschillende pluimvormen

Wanneer via de overvloei van het model een mengsel water met kaoliniteit geloosd wordt, zal dit mengsel, afhankelijk van de omstandigheden, zich op verschillende manieren in het water verspreiden. Wanneer de overvloei stilstaat ten opzichte van het omgevingswater zal er een dichtheidsstroom ontstaan, waarbij het mengsel zich als 'zwaar water' gedraagt. Er vormt zich een pluim van witte vloeistof, welk vrij snel naar de bodem zakt, waarna de pluim zich radiaal verspreidt over de bodem. In figuur 7.1, 7.2 en 7.3 is dit goed te zien voor drie opeenvolgende tijdstippen.

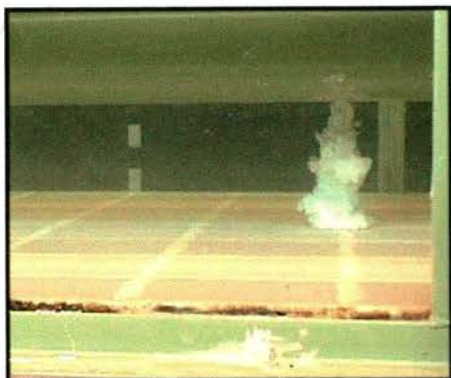


Fig. 7.1. Dichtheidsstroom stilstaand water



Fig. 7.2. Dichtheidsstroom stilstaand water (2)



Fig. 7.3. Dichtheidsstroom stilstaand water (3)

Duidelijk is te zien dat het zware mengsel dicht tegen de bodem blijft en zich als een 'pannenkoek' verspreidt. De snelheid van de kop van de dichtheidsgolf is in alle richtingen (horizontaal) even groot. Van boven gezien levert dit een nagenoeg perfecte cirkelvorm (figuur 7.4 en 7.5).

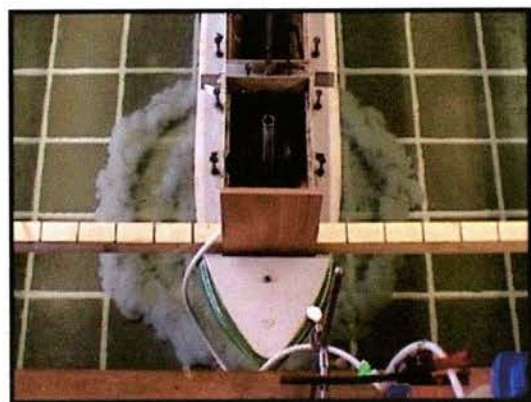


Fig. 7.4. Dichtheidsstroom stilstaand water (4)

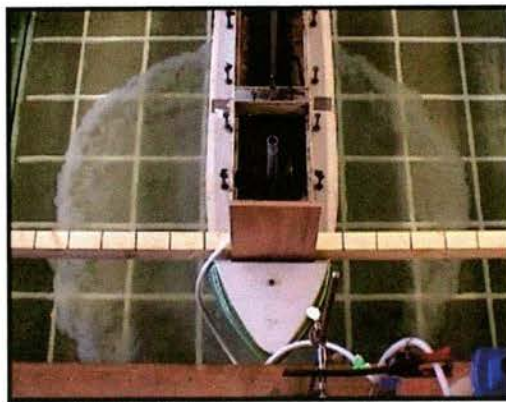


Fig. 7.5. Dichtheidsstroom stilstaand water (5)

Wanneer het omgevingswater met een bepaalde snelheid stroomt ten opzichte van de overvloed, kan het mengsel zich op verschillende manieren gedragen. Bij lage snelheid zal het mengsel, net als bij stilstaand water, als een dichtheidsstroom naar de bodem zakken. Uiteraard zal de pluim door de stroomsnelheid van het water benedenstrooms van de overvloed pas de bodem bereiken. Eenmaal op de bodem verspreidt het mengsel zich op dezelfde wijze als bij stilstaand water. Er ontstaat weer een 'pannenkoek' waarvan de diameter geleidelijk toeneemt, terwijl het middelpunt van de cirkel met de snelheid van het stromende water stroomafwaarts beweegt. Voor een aantal opeenvolgende tijdstippen is dit goed te zien in figuur 7.6, 7.7 en 7.8.



Fig. 7.6. Dichtheidsstroom stromend water



Fig. 7.7. Dichtheidsstroom stromend water (2)



Fig. 7.8. Dichtheidsstroom stromend water (3)

Een maatstaf voor het vormen van een dichtheidsstroom is dat de verspreiding van het mengsel in de richting loodrecht op de stroomrichting in de goot met dezelfde snelheid gaat als de verspreiding van hetzelfde mengsel bij stilstaand water. Hierbij dient ook nog de snelheid waarmee het mengsel de overvloed verlaat gelijk te zijn. De toename van de diameter van de pluim in stromend water is goed van bovenaf waar te nemen.

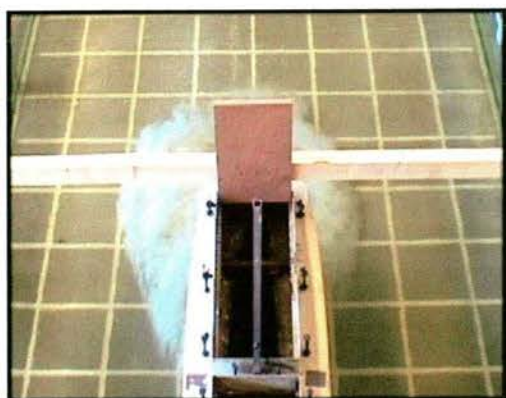


Fig. 7.9. Dichtheidsstroom stromend water (4)

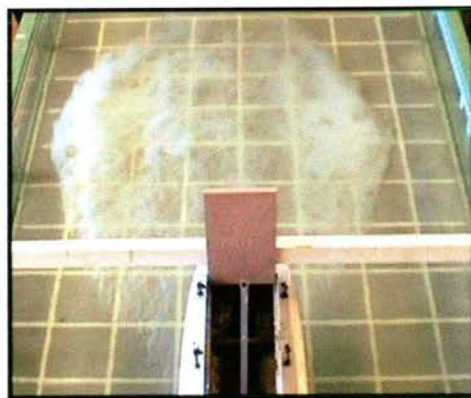


Fig. 7.10. Dichtheidsstroom stromend water (5)

Op grotere afstand benedenstrooms van het schip, wat buiten het onderzoeksgebied valt, treedt vrijwel altijd weer menging op. Dit is het gevolg van de bodemwrijving, waardoor het sediment opgewoeld wordt en zich in de waterkolom verspreidt.

Indien de stroomsnelheid van het omgevingswater ten opzichte van de overvloed nog groter wordt, wordt de kans op de vorming van een dichtheidsstroom steeds kleiner. Er zal dan zoveel water opgenomen worden in de pluim voordat deze de bodem bereikt, dat de dichtheid van het mengsel sterk afneemt. Hierdoor neemt het verschil in dichtheid tussen mengsel en omgevingswater zodanig af, dat het mengsel zich niet meer als een dichtheidsstroom zal gedragen. Er vindt daardoor geen radiale verspreiding over de bodem plaats. De enige reden waarom de pluim zich in de breedte

richting nog uitbreidt is door de toename van de omvang van de pluim (entrainment). Verder wordt het mengsel door de stroming in de goot meegevoerd. In figuur 7.11 en 7.12 is een pluim te zien, welke zich niet meer als een dichtheidsstroom gedraagt, maar wel enigszins in de breedte groeit door entrainment.

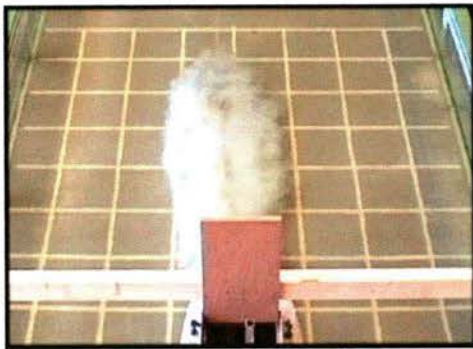


Fig. 7.11. Menging stromend water



Fig. 7.12. Menging stromend water (2)

Wanneer de stroomsnelheid van het omgevingswater nog groter wordt, zal de pluim zich nauwelijks meer in de breedterichting uitbreiden. Dit is te zien in figuur 7.13 en 7.14.

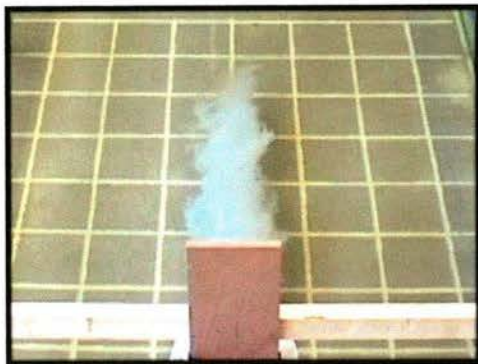


Fig. 7.13. Menging stromend water (3)



Fig. 7.14. Menging stromend water (4)



Fig. 7.15. Menging stromend water (5)



Fig. 7.16. Menging stromend water (6)



Fig. 7.17. Menging stromend water (7)

In de figuren 7.15, 7.16 en 7.17 is goed te zien dat de pluim zich met het omgevingswater mengt voordat hij de bodem raakt.

Voor figuur 7.1 tot en met figuur 7.17 volgt hieronder een overzicht van de condities waarin deze pluimen gevormd zijn.

Tabel 7.1. *Conditie foto's*

Figuur	u_{str} [m/s]	u_{uitstr} [m/s]	ρ [kg/m ³]
7.1 - 7.5	0	0,2	1049
7.6 - 7.10	0,065	0,2	1049
7.11 - 7.12	0,195	0,2	1049
7.13 - 7.26	0,26	0,2	1049

7.3. Experimenten stilstaand water

De eerste serie experimenten zijn proeven in stilstaand water. Hiervoor is aan de benedenstroomse zijde van de goot een waterdicht schot geplaatst met een hoogte van 33,3 cm. Dit levert een waterdiepte van 33,3 cm en een diepgang van 13,3 cm op. Vervolgens is er een serie kortdurende lozingen gedaan. Daarbij zijn voor het mengsel van water met kaoliniet verschillende dichtheden gebruikt. Ook zijn verschillende uitstroomsnelheden uit de overvloei gebruikt. Hieronder volgt in tabel 7.1 een overzicht van de serie proeven die is uitgevoerd in stilstaand water.

Tabel 7.2. Proeven stilstaand water

Proef	Dichtheid [kg/m ³]	Uitstroomsnelheid [m/s]
1	1016	0.2
2	1016	0.1
3	1016	0.05
4	1033	0.2
5	1033	0.1
6	1033	0.05
7	1049	0.2
8	1049	0.1
9	1049	0.05

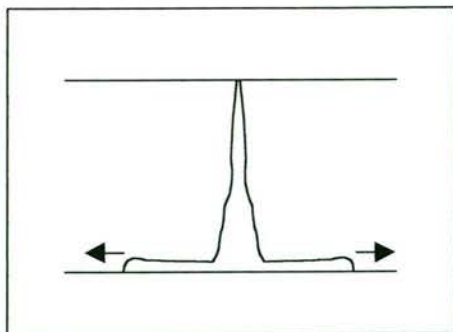
Dit zijn dus 9 verschillende proeven met een kortdurende lozing. Elke lozing duurt ongeveer 10 seconden. Al deze lozingen zijn op video vastgelegd. Aan de hand van deze beelden zijn verschillende tijdsmetingen gedaan.

In stilstaand water gedraagt de pluim zich in alle gevallen als een dichtheidsstroom. De diameter van de pluim ter hoogte van de bodem van de goot is steeds ongeveer 10 cm. Vervolgens verspreidt het mengsel zich in radiale richting over de bodem. Dit is een dichtheidsstroom die zich over de bodem in horizontale richting verplaatst, in alle richtingen even snel. Deze radiale verspreiding is geschetst in figuur 7.18. Tevens is deze goed te zien op de foto's in figuur 7.1 tot en met 7.5.

De tijd die de kop van de dichtheidsgolf erover doet (in radiale richting over de bodem) van $R_0=25$ cm tot $R_1=50$ cm (t_1) is gemeten, evenals de tijd die de dichtheidsgolf erover doet van $R_0=25$ cm tot $R_2=75$ cm (t_2). De resultaten van deze metingen worden in tabel 7.2 getoond.

Tabel 7.3. Duur radiale verspreiding

Uitstroomsnelheid [m/s]	Dichtheid [kg/m ³]					
	1016		1033		1049	
	t_1 [s]	t_2 [s]	t_1 [s]	t_2 [s]	t_1 [s]	t_2 [s]
0.2	14	31.5	10.8	23.3	8.5	19.5
0.1	17	39.5	10.5	28.9	11	26
0.05	18.4	46.4	14.7	35.3	12.7	32.5



Figuur 7.18. Zijaanzicht pluim in stilstaand water

In figuur 7.18 is een zijaanzicht van het verloop van de pluim geschetst. Hierin is aangegeven hoe de pluim zich (radiaal) verspreidt nadat hij de bodem heeft bereikt.

7.4. Vaststellen criterium dichtheidsstroom

Voor de radiale verspreiding van de pluim over de bodem als dichtheidsstroom heeft Fay (1980) een theorie ontwikkeld. De onderstaande analyse volgens de theorie van Fay is gebaseerd op de veronderstelling dat wanneer deze verspreiding over de bodem een dichtheidsstroom is, het deel van de pluim tussen de uitstroomopening van de overvloei en de bodem zich ook als een dichtheidsstroom gedraagt (door entrainment is het dichtheidsverschil tussen de pluim en het omgevingswater op de bodem, waar een dichtheidsstroom optreedt, kleiner dan tussen de uitstroomopening en de bodem, waar dus ook een dichtheidsstroom optreedt). De radiale verspreiding van het mengsel over de bodem na een eenmalige kortdurende lozing wordt door Fay als volgt beschreven:

$$R(t) = R_0 + \sqrt{2\alpha \sqrt{\frac{\varepsilon g V_0}{\pi}}}$$

- $R(t)$ straal van de radiaal verspreide kolom water op tijdstip t [m]
 R_0 straal van de radiaal verspreide kolom water op tijdstip $t=0$ s [m]
 α ≈ 1 voor wrijvingsloze condities [-]
 $\approx 0,5$ bij stroming over een bodem [-]
 V_0 volume mengsel dat van $t=0$ s tot $t=t$ s geloosd wordt [m^3]

Voor ε geldt:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{\text{mengsel}}}{\rho_{\text{water}}} - 1$$

- ρ_{mengsel} dichtheid van het kaolinet-water mengsel [kg/m^3]
 ρ_{water} dichtheid van het omgevingswater [kg/m^3]

Aangezien alle waarden die in de formule voorkomen bekend zijn vanuit de metingen behalve α is het mogelijk om α voor deze omstandigheden te bepalen. In tabel 7.3 is aan de hand van t_1 en t_2 en de formule van Fay bepaald voor welke α de radiale verspreiding nagenoeg gelijk zou zijn aan de verspreiding die is gemeten in de eerste serie experimenten in stilstaand water.

Tabel 7.4. Radiale verspreiding met $\alpha=0.35$

Dichtheid [kg/m ³]	Uitstroomsnel- heid [m/s]	Debiet [10 ⁻⁵ m ³ /s]	t ₁ [s]	t ₂ [s]	Volume1 [m ³]	Volume2 [m ³]	α [-]	R ₀ [m]	R ₁ [m]	R ₂ [m]	R(t ₁) [m]	R(t ₂) [m]
1016	0.2	9.82	14	31.5	0.00138	0.00309	0.35	0.25	0.5	0.75	0.53	0.77
1016	0.1	4.91	17	39.5	0.00084	0.00194	0.35	0.25	0.5	0.75	0.53	0.77
1016	0.05	2.46	18.4	46.4	0.00045	0.00114	0.35	0.25	0.5	0.75	0.5	0.74
1033	0.2	9.82	10.8	23.3	0.00106	0.00229	0.35	0.25	0.5	0.75	0.53	0.75
1033	0.1	4.91	10.5	28.9	0.00052	0.00142	0.35	0.25	0.5	0.75	0.48	0.74
1033	0.05	2.46	14.7	35.3	0.00036	0.00087	0.35	0.25	0.5	0.75	0.5	0.73
1049	0.2	9.82	8.5	19.5	0.00084	0.00192	0.35	0.25	0.5	0.75	0.51	0.73
1049	0.1	4.91	11	26	0.00054	0.00128	0.35	0.25	0.5	0.75	0.51	0.75
1049	0.05	2.46	12.7	32.5	0.00031	0.0008	0.35	0.25	0.5	0.75	0.5	0.75

Het blijkt dat voor $\alpha=0.35$ de formule van Fay voor een eenmalige lozing heel goed toepasbaar is op de resultaten in stilstaand water. Met behulp van deze formule is het mogelijk om een criterium te creëren voor een dichtheidsstroming.

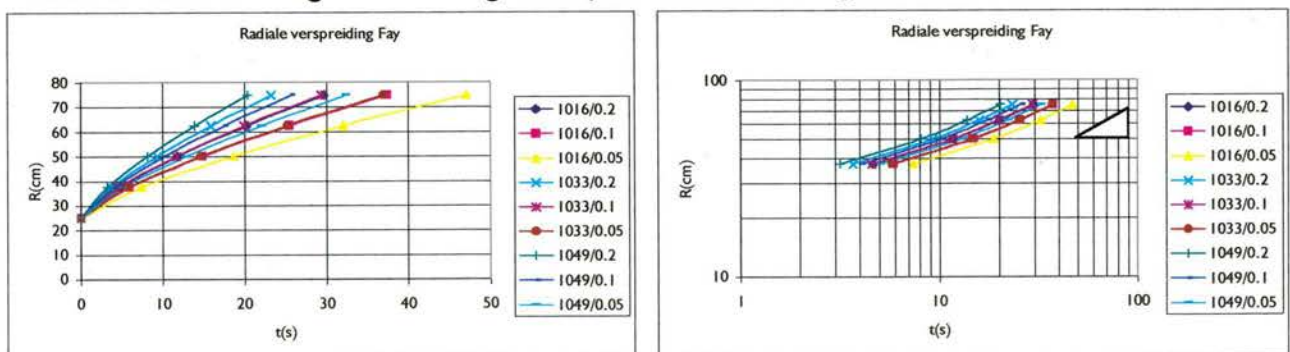
Nu kunnen de tijden voor het afleggen van zekere afstanden in radiale richting berekend worden zoals ze volgens Fay zouden moeten zijn. Dit wil zeggen, dat in de formule van Fay nu de tijden ingevuld worden zodanig dat $R(t_1)=0.5$ m en $R(t_2)=0.75$ m. Ditmaal echter worden vier meetpunten aangehouden, namelijk $R_{1,F}=0.375$ m, $R_{2,F}=0.5$ m, $R_{3,F}=0.625$ m en $R_{4,F}=0.75$ m. De beginstraal op $t=0$ s is weer $R_0=0.25$ m. De bijbehorende tijden $t_{1,F}$, $t_{2,F}$, $t_{3,F}$ en $t_{4,F}$ zijn dan als volgt:

Tabel 7.5. Berekende radiale verspreidingstijden volgens Fay

Dichtheid [kg/m ³]	Uitstroomsnel- heid [m/s]	t _{1,F} [s]	t _{2,F} [s]	t _{3,F} [s]	t _{4,F} [s]
1016	0.2	4.7	11.8	20.9	29.7
1016	0.1	5.9	14.9	25.5	37.4
1016	0.05	7.4	18.7	32.1	47.1
1033	0.2	3.7	9.3	15.9	23.3
1033	0.1	4.6	11.7	20	29.4
1033	0.05	5.8	14.7	25.2	37
1049	0.2	3.2	8.1	13.9	20.4
1049	0.1	4.1	10.2	17.5	25.7
1049	0.05	5.1	12.9	22.1	32.4

De tijden $t_{1,F}$, $t_{2,F}$, $t_{3,F}$ en $t_{4,F}$ kunnen nu als referentie gebruikt worden om te kijken of een pluim zich als een dichtheidsstroom gedraagt of niet.

Wanneer de straal R uitgezet wordt tegen de tijd t ziet dat er als volgt uit:



Figuur 7.19. Berekende radiale verspreiding volgens Fay

In de index van de grafiek in figuur 7.19 staat het getal voor de schuine streep voor de dichtheid van het mengsel dat de overvloed verlaat (in kg/m^3) en het getal achter de schuine streep staat voor de snelheid waarmee het mengsel uit de overvloed stroomt (in m/s).

7.5. Experimenten in stromend water

Wanneer op dezelfde wijze de verspreiding van de slibwolk in de breedterichting wordt gemeten bij stromend water, kan door het vergelijken van de tijden met die van stilstaand water bepaald worden of de pluim zich in stromend water hetzelfde gedraagt (zie figuur 7.9 tot en met 7.14). En er vanuit gaande dat de pluim bij stilstaand water zich als een dichtheidsstroom gedraagt, kan dus bepaald worden wanneer de pluim bij stromend water zich als een dichtheidsstroom gedraagt en wanneer niet.

De experimenten zijn gedaan met vier verschillende stroomsnelheden in de goot, te weten 0.065 m/s , 0.13 m/s , 0.195 m/s en 0.26 m/s . Bij iedere stroomsnelheid is vervolgens de uitstroomsnelheid van het mengsel van kaolinite met water en de dichtheid van dit mengsel gevarieerd. Bij elk van de vier stroomsnelheden zijn 9 experimenten gedaan, waarbij de radiale verspreidingssnelheid van de pluim over de bodem voor alle combinaties van de volgende dichtheden en uitstroomsnelheden gemeten werd:

$\rho = 1016 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 1033 \text{ kg/m}^3$	$\rho = 1049 \text{ kg/m}^3$
$u_{\text{uitstr}} = 0.05 \text{ m/s}$	$u_{\text{uitstr}} = 0.1 \text{ m/s}$	$u_{\text{uitstr}} = 0.2 \text{ m/s}$

De resultaten van deze tijdmetingen zijn in deze paragraaf weergegeven in tabellen en grafieken. Hierbij wordt de radiale verspreidingssnelheid (in termen van R [m] en t [s]) van het betreffende experiment in stromend water vergeleken met de verspreidingssnelheid van de pluim bij gelijke dichtheid en uitstroomsnelheid in stilstaand water. Aan de hand van deze grafische weergave is het mogelijk te analyseren of de pluim zich als een dichtheidsstroom volgens Fay gedraagt, of dat hiervoor te veel menging met het omgevingswater optreedt.

De grafische weergave is op twee manieren uitgevoerd. De eerste grafiek geeft in alle gevallen de radiale verspreidingstijd van de kop van de dichtheidsgolf weer tegen de straal van de pluim op de bodem, beide op lineaire schaal. Dit geeft een indruk van het verloop van de radiale verspreiding van de wolk in de tijd over de bodem. De tweede grafiek geeft hetzelfde weer, maar dan op dubbellogaritmische schaal. De verhouding tussen de straal en de tijd volgens Fay levert op deze schaal een nagenoeg rechte lijn op met helling 1:2. Wanneer deze lijn voor de experimenten in stromend water gelijk is aan die voor de experimenten in stilstaand water, is er sprake van een dichtheidsstroom. Wanneer de lijn niet gelijk loopt, treedt er ook menging op. De afstand tussen de lijn voor stilstaand water en de lijn voor stromend water is een maat voor de hoeveelheid menging die optreedt.

Het verloop van de radiale verspreidingssnelheid op dubbellogaritmische schaal heeft in de beginfase nog niet de helling 1:2. Dit komt door de initiële bodemwrijving, waardoor de radiale verspreidingssnelheid in deze fase nog niet geheel ontwikkeld is. In iedere logaritmische grafiek is een driehoek aangegeven met de helling 1:2 waarmee het verloop van de radiale verspreiding in de tijd mee kan worden vergeleken.

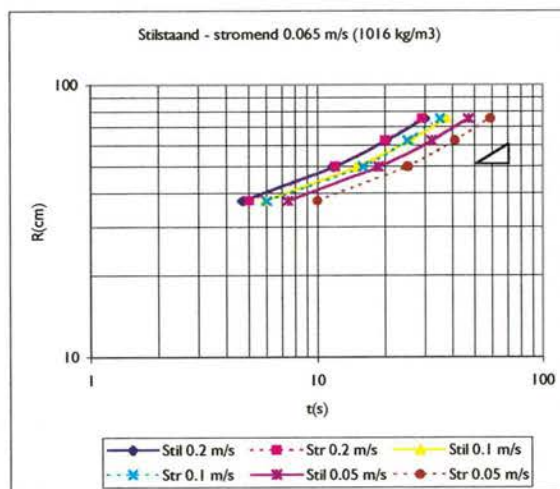
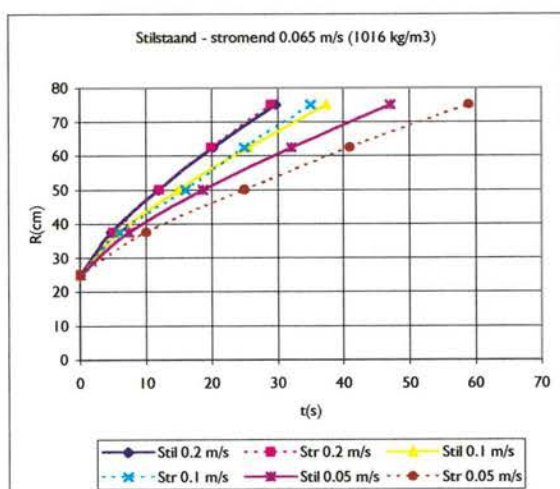
De analyse van de hierna volgende resultaten wordt gegeven in het volgende hoofdstuk 'Analyse en discussie'.

Stroming 6,5 cm/s

- $\rho = 1016 \text{ kg/m}^3$

Tabel 7.6. Radiale verspreidingstijden stromend water (6.5 cm/s)

R [cm]	1016 kg/m ³					
	0.2 m/s		0.1 m/s		0.05 m/s	
	t(stil) [s]	t(str) [s]	t(stil) [s]	t(str) [s]	t(stil) [s]	t(str) [s]
25	0	0	0	0	0	0
37.5	4.7	5	5.9	6	7.4	10
50	11.8	12	14.9	16	18.7	25
62.5	20.2	20	25.5	25	32.1	41
75	29.7	29	37.4	35	47.1	59



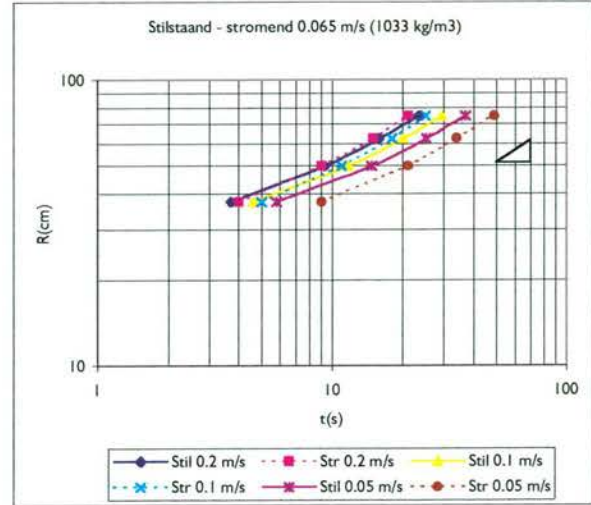
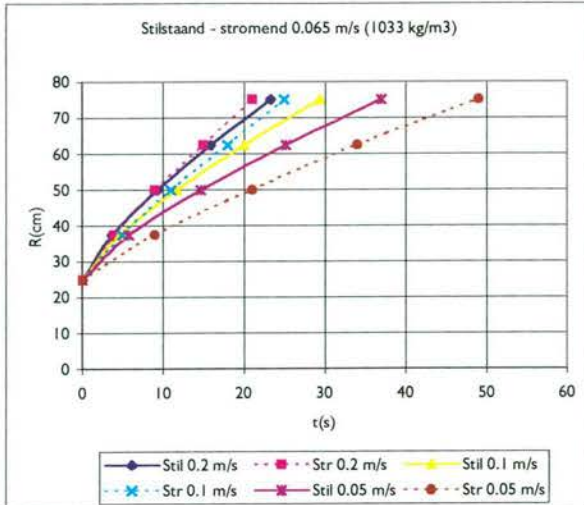
Figuur 7.20. Radiale verspreiding stromend water (6.5 cm/s)

- Stil 0.2 m/s: geeft het verloop van R in de tijd weer in stilstaand water met een uitstroomsnelheid uit de overvloed van 0.2 m/s
- Str 0.2 m/s: geeft het verloop van R in de tijd weer in stromend water (6.5 cm/s) met een uitstroomsnelheid uit de overvloed van 0.2 m/s

- $\rho = 1033 \text{ kg/m}^3$

Tabel 7.7. Radiale verspreidingstijden stromend water (6.5 cm/s)

R [cm]	1033 kg/m ³					
	0.2 m/s		0.1 m/s		0.05 m/s	
	t(stil)	t(stroom)	t(stil)	t(stroom)	t(stil)	t(stroom)
25	0	0	0	0	0	0
37.5	3.7	4	4.6	5	5.8	9
50	9.3	9	11.7	11	14.7	21
62.5	15.9	15	20	18	25.2	34
75	23.3	21	29.4	25	37	49

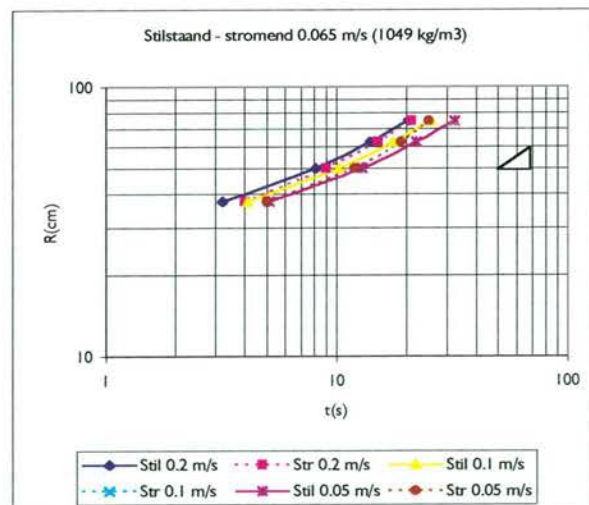
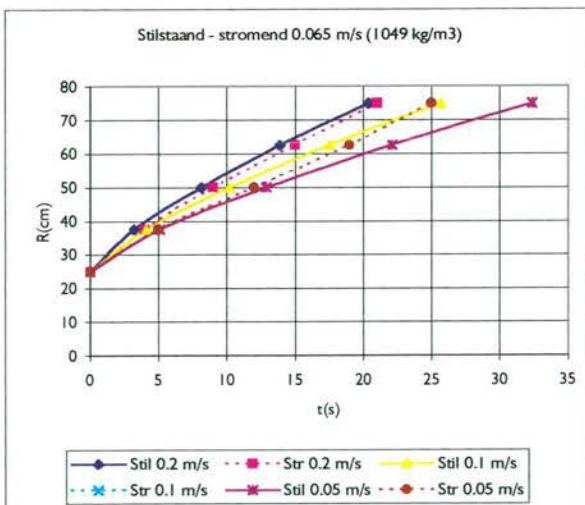


Figuur 7.21. Radiale verspreiding stromend water (6.5 cm/s)

- $\rho = 1049 \text{ kg/m}^3$

Tabel 7.8. Radiale verspreidingstijden stromend water (6.5 cm/s)

R [cm]	1049 kg/m ³					
	0.2 m/s		0.1 m/s		0.05 m/s	
	t(stil)	t(stroom)	t(stil)	t(stroom)	t(stil)	t(stroom)
25	0	0	0	0	0	0
37.5	3.2	4	4.1		5.1	5
50	8.1	9	10.2		12.9	12
62.5	13.9	15	17.5		22.1	19
75	20.4	21	25.7		32.4	25



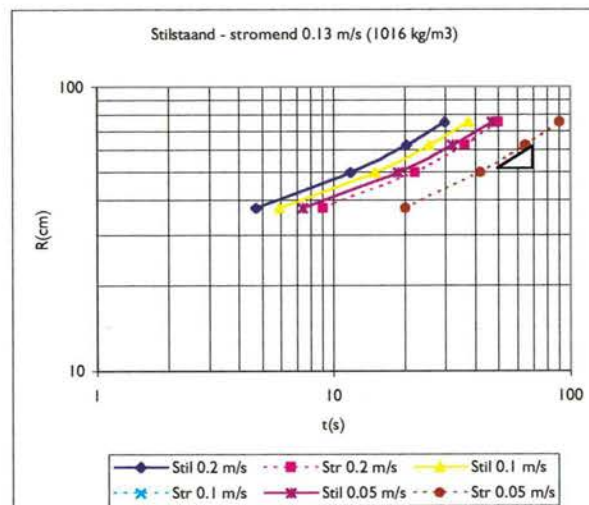
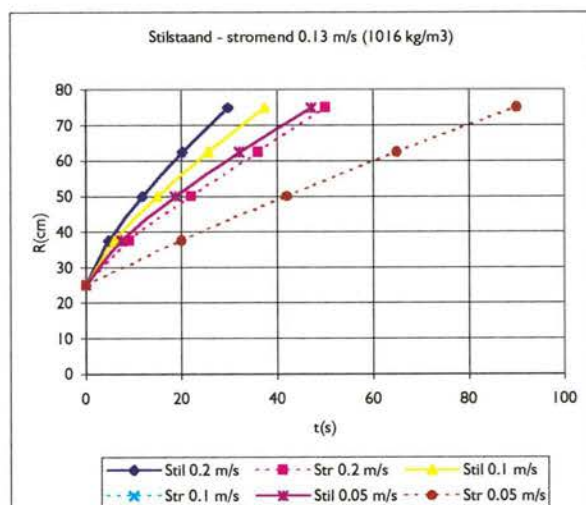
Figuur 7.22. Radiale verspreiding stromend water (6.5 cm/s)

Stroming 13 cm/s

- $\rho = 1016 \text{ kg/m}^3$

Tabel 7.9. Radiale verspreidingstijden stromend water (13 cm/s)

R [cm]	1016 kg/m ³					
	0.2 m/s		0.1 m/s		0.05 m/s	
	t(stil)	t(stroom)	t(stil)	t(stroom)	t(stil)	t(stroom)
25	0	0	0	0	0	0
37.5	4.7	9	5.9		7.4	20
50	11.8	22	14.9		18.7	42
62.5	20.2	36	25.5		32.1	65
75	29.7	50	37.4		47.1	90

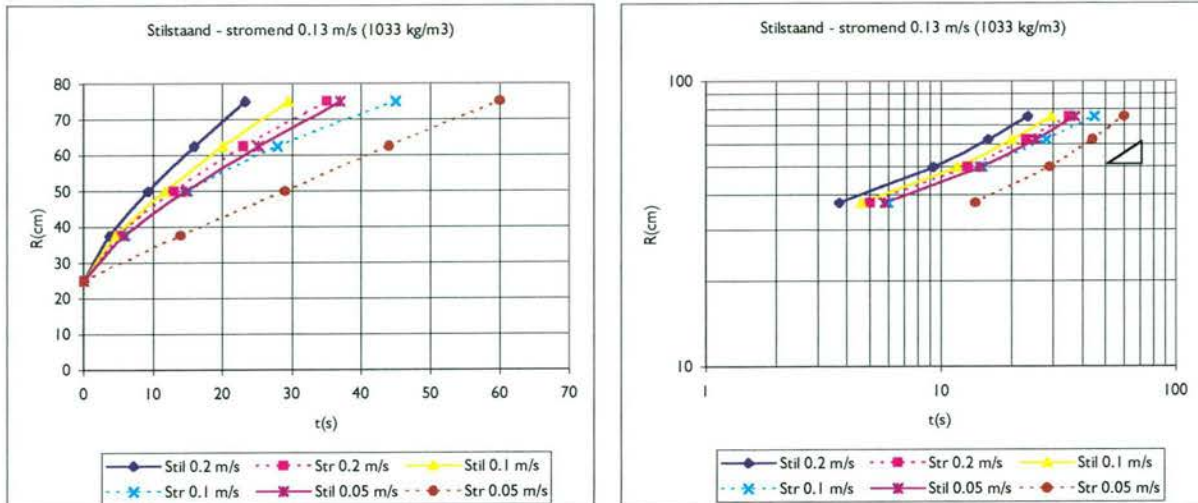


Figuur 7.23. Radiale verspreiding stromend water (13 cm/s)

- $\rho = 1033 \text{ kg/m}^3$

Tabel 7.10. Radiale verspreidingstijden stromend water (13 cm/s)

R [cm]	1033 kg/m ³					
	0.2 m/s		0.1 m/s		0.05 m/s	
	t(stil)	t(stroom)	t(stil)	t(stroom)	t(stil)	t(stroom)
25	0	0	0	0	0	0
37.5	3.7	5	4.6	6	5.8	14
50	9.3	13	11.7	15	14.7	29
62.5	15.9	23	20	28	25.2	44
75	23.3	35	29.4	45	37	60

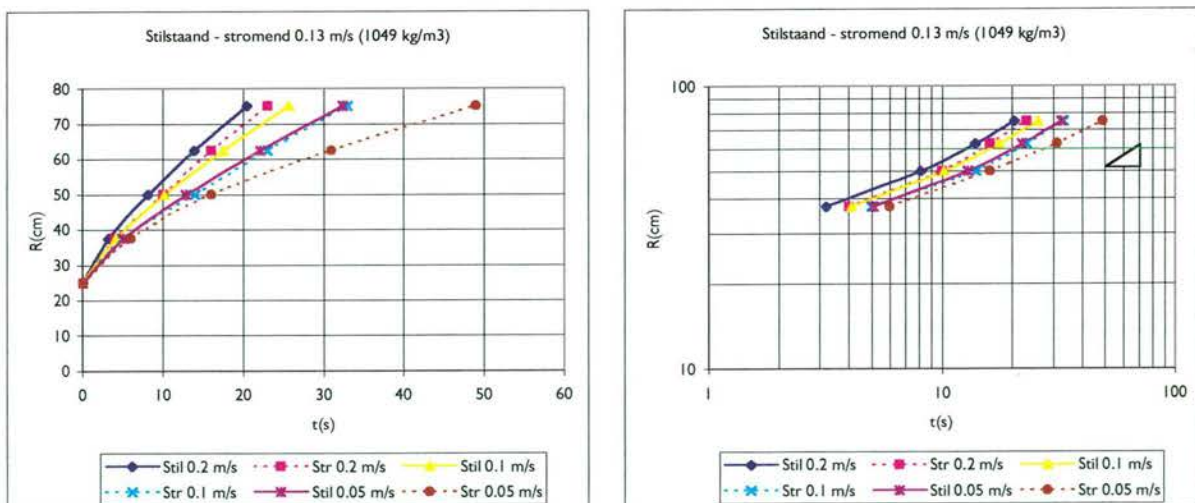


Figuur 7.24. Radiale verspreiding stromend water (13 cm/s)

- $\rho = 1049 \text{ kg/m}^3$

Tabel 7.11. Radiale verspreidingstijden stromend water (13 cm/s)

R [cm]	1049 kg/m ³					
	0.2 m/s		0.1 m/s		0.05 m/s	
	t(stil)	t(stroom)	t(stil)	t(stroom)	t(stil)	t(stroom)
25	0	0	0	0	0	0
37.5	3.2	4	4.1	5	5.1	6
50	8.1	10	10.2	14	12.9	16
62.5	13.9	16	17.5	23	22.1	31
75	20.4	23	25.7	33	32.4	49



Figuur 7.25. Radiale verspreiding stromend water (13 cm/s)

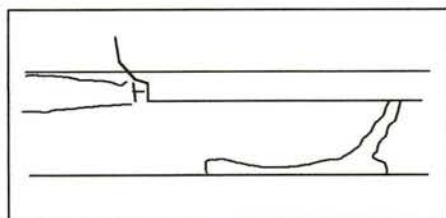
Stroming 19.5 cm/s en stroming 26 cm/s

Wanneer de stroomsnelheid van het water in de goot wordt verhoogd naar 19.5 cm/s en 26 cm/s, treedt er in geen enkel geval meer een dichtheidsstroom op. Alleen bij een stroomsnelheid van 19.5 cm/s, een uitstroomsnelheid uit de overvloed van 0.2 m/s en een dichtheid van het mengsel van 1049 kg/m³ is nog enigszins een verspreiding van de pluim in de breedterichting te zien (zie figuur 7.12). Dit gaat echter met een veel lagere snelheid (ongeveer de helft) dan voor een dichtheidsstroom. In de rest van de situaties haalt de pluim nauwelijks een breedte van 100 cm ($R=0.5$ m) op de bodem en in geen geval haalt het 150 cm ($R=0.75$ m). Dit is te zien in figuur 7.14. Om deze reden is de analyse van Fay niet toegepast op de resultaten van de experimenten bij stroomsnelheden 19.5 en 26 cm/s.

7.6. Invloed schroef

Wanneer de sleeppopperzuiger met een bepaalde snelheid ten opzichte van het omgevingswater beweegt, bestaat de kans dat het mengsel, dat zich als een pluim onder het schip ontwikkelt, in aanraking komt met de schroef van het schip.

De invloed van de schroef op een dichtheidsstroom over de bodem zal echter zeer gering zijn bij deze waterdiepte. Wanneer er namelijk een dichtheidsstroom wordt gevormd, dan komt het mengsel niet eens in de buurt van de schroef. De schroef heeft pas invloed op de verspreiding van het mengsel als er al zo veel menging is opgetreden dat er geen sprake meer is van een dichtheidsstroom.



Figuur 7.26. Invloed schroef op pluim

Ter verduidelijking is in figuur 7.26 een beeld geschetst met de afstand tussen het zog van de schroef en de dichtheidsstroom.

7.7. Invloed luchtinsluiting

Door het rollen en stampen van het schip komt het voor dat het overtollige proceswater uit het beun niet gelijkmatig in de overvloed terecht komt. Hierdoor ontstaat luchtinsluiting in het mengsel. Door deze opstijgende luchtbellens zal het sediment naar de oppervlakte stijgen en zal er dus geen dichtheidsstroom ontstaan naar de bodem.

Om dit verschijnsel te onderzoeken is een poging gedaan om water met lucht te gebruiken. Dit wordt verkregen door carbonatie van water. Dit is gedaan met een apparaat dat spuitwater maakt. Er ontstaan op die manier dermate kleine luchtbellens in het water dat deze tijdens een lozing door de overvloed van het schip niet direct na het verlaten van de overvloed langs de romp van het schip omhoog bewegen, maar een stuk met het mengsel mee naar de bodem zakken. Vanaf daar zal de lucht trachten weer naar de oppervlakte te bewegen, waardoor verstoring van de dichtheidsstroom kan optreden.

Echter tijdens de experimenten werkte dat niet zo eenvoudig. Het water met lucht veroorzaakte in de hevel een luchtbel welke de doorstroom van de hevel belemmerde. Een poging om het water met

lucht met behulp van een pompje door te laten stromen mislukte ook, omdat het pompje een veel te laag maximaal debiet kon leveren.

Er is derhalve besloten om niet verder te gaan met experimenten met luchtinsluiting en alleen onderzoek te verrichten naar gevallen zonder lucht.

8. Analyse en discussie

In dit hoofdstuk worden de meetresultaten uit hoofdstuk 7 geanalyseerd. Deze analyse bestaat uit twee fasen.

Als eerste wordt de radiale verspreiding van de pluim in de tijd over de bodem nader bekeken. Er wordt vastgesteld wanneer er volgens de theorie van Fay sprake is van een dichtheidsstroom. Deze analyse vindt alleen plaats voor de experimenten met stroomsnelheden 6.5 cm/s en 13 cm/s. Bij de twee grotere snelheden treedt, zoals reeds in paragraaf 7.4 is vermeld, alleen menging op. Vervolgens wordt aan de hand van de foto's uit hoofdstuk 7 beschreven wat er onder de verschillende omstandigheden met de pluim gebeurt direct nadat deze de uitstroomopening van de overvloei heeft verlaten. Voornamelijk in het geval van menging, zoals bij de stroomsnelheden 19.5 cm/s en 26 cm/s het geval is, is het zinvol om een beschrijving van het verloop van de pluim te geven.

8.1. Analyse volgens Fay

Zoals in paragraaf 7.3 reeds is beschreven is de analyse volgens Fay is gebaseerd op de veronderstelling dat wanneer de radiale verspreiding van een pluim over de bodem zich als een dichtheidsstroom gedraagt, het deel van de pluim tussen de uitstroomopening van de overvloei en de bodem zich ook als een dichtheidsstroom gedraagt. Daarom is aan de hand van deze radiale verspreiding het criterium voor een dichtheidsstroom opgesteld. Het vaststellen van dit criterium is tevens beschreven in paragraaf 7.3. Aan de hand van de grafieken in paragraaf 7.4 zal nu per stroomsnelheid het al dan niet optreden van een dichtheidsstroom in de verschillende experimenten bepaald worden.

Daarbij zullen drie categorieën worden onderkend: 'dichtheidsstroom', 'menging' en een tussenliggende categorie, welke in het vervolg 'overgang' genoemd zal worden. Per experiment zal aan de hand van de bijbehorende dubbellogaritmische grafiek worden bepaald tot welke van de drie categorieën het resultaat behoort. Wanneer de lijn in die grafiek voor een bepaalde dichtheid en uitstroomsnelheid voor stromend water exact over de lijn voor stilstaand water valt is er sprake van een dichtheidsstroom (figuur 7.6 tot en met 7.10). Wanneer deze twee lijnen ver uiteen liggen is er sprake van menging. Er is dan geen zijdelingse verspreiding van de pluim over de bodem (figuur 7.22 en 7.23). Onder 'overgang' vallen de resultaten in stromend water waarvan de lijn niet exact over de lijn van de resultaten in stilstaand water valt, maar enigszins daarnaast. Dit betekent dat de pluim wel zijdelings verspreidt over de bodem, maar met een lagere snelheid dan de zijdelingse verspreiding onder dezelfde omstandigheden bij stilstaand water.

- Stroming 6,5 cm/s

$$\rho = 1016 \text{ kg/m}^3$$

In figuur 7.20 is te zien dat bij een uitstroomsnelheid van 0.2 m/s en 0.1 m/s het mengsel zich als een dichtheidsstroom blijft gedragen. Het verloop van de straal tegen de tijd is voor stilstaand en stromend water vrijwel identiek. Bij een uitstroomsnelheid van 0.05 m/s is de toename van de straal in de tijd in stromend water duidelijk minder dan in stilstaand water. In deze situatie treedt er, voordat de pluim de bodem bereikt, enige menging op zodat het dichtheidseffect van het mengsel kleiner wordt. Er is hier echter nog geen sprake van volledige menging.

Tabel 8.1.

Stroomsnelheid = 6.5 cm/s				
ρ [kg/m ³]	U_{uitstr} [m/s]	dichth	overg	meng
1016	0.2			
1016	0.1			
1016	0.05			

$\rho = 1033 \text{ kg/m}^3$:

Bij dezelfde stroomsnelheid van 6.5 cm/s, maar nu met een dichtheid van het mengsel van 1033 kg/m^3 , gebeurt vrijwel hetzelfde als bij een mengsel met $\rho = 1016 \text{ kg/m}^3$. Bij een uitstroomsnelheid van 0.2 m/s en 0.1 m/s treedt een dichtheidsstroom op, bij 0.05 m/s treedt enige menging op. De radiale verspreiding van de pluim bij een uitstroomsnelheid van 0.05 m/s gaat in dit geval nog iets langzamer dan bij $\rho = 1016 \text{ kg/m}^3$, maar er is nog steeds geen sprake van volledige menging. Dit is te zien in figuur 7.21.

Tabel 8.2.

Stroomsnelheid = 6.5 cm/s				
$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$U_{\text{uitstr}} \text{ [m/s]}$	dichth	overg	meng
1033	0.2			
1033	0.1			
1033	0.05			

$\rho = 1049 \text{ kg/m}^3$:

Wanneer bij de stroomsnelheid van 6.5 cm/s een mengsel gebruikt wordt met een dichtheid van 1049 kg/m^3 treedt in alle gevallen heel duidelijk een dichtheidsstroom op. Dit was al duidelijk na de extreme situaties met uitstroming van 0.2 m/s en 0.05 m/s. Om die reden is de proef met 0.1 m/s uitstroming niet meer gedaan.

In figuur 7.22 is te zien dat de radiale verspreiding van de pluim over de bodem bij stromend water zelfs sneller gaat dan bij stilstaand water. Er is hiervoor geen verklaring, waarschijnlijk is dit experiment met enige onnauwkeurigheid uitgevoerd. Het blijft echter duidelijk dat bij $\rho = 1049 \text{ kg/m}^3$ in alle gevallen een dichtheidsstroom optreedt.

Tabel 8.3.

Stroomsnelheid = 6.5 cm/s				
$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$U_{\text{uitstr}} \text{ [m/s]}$	dichth	overg	meng
1049	0.2			
1049	0.1			
1049	0.05			

- Stroming 13 cm/s

$\rho = 1016 \text{ kg/m}^3$:

Wanneer de stroomsnelheid in de goot verhoogd wordt naar 13 cm/s, treedt sneller menging op. In figuur 7.23 is te zien dat bij een dichtheid van 1016 kg/m^3 in geen van de gevallen een dichtheidsstroom optreedt. De afstand tussen de lijnen voor stilstaand water en de lijnen voor stromend water liggen erg ver uiteen. Ook hier zijn als eerste de twee extremen getest, met als conclusie dat de proef met uitstroomsnelheid van 0.1 m/s niet meer uitgevoerd hoefde te worden. In alle gevallen treedt volledige menging op.

Tabel 8.4.

Stroomsnelheid = 13 cm/s				
$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$U_{\text{uitstr}} \text{ [m/s]}$	dichth	overg	meng
1016	0.2			
1016	0.1			
1016	0.05			

$\rho = 1033 \text{ kg/m}^3$:

Bij een dichtheid van 1033 kg/m^3 wordt met een uitstroomsnelheid van 0.1 m/s en 0.2 m/s al enigszins iets gevormd wat op een dichtheidsstroom lijkt. Dit is te zien in figuur 7.24. Er treedt echter nog wel veel menging op. Beide resultaten vallen onder de categorie 'overgang'. Bij een uitstroomsnelheid van 0.05 m/s treedt nog volledige menging op.

Tabel 8.5.

Stroomsnelheid = 13 cm/s				
$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$U_{\text{uitstr}} \text{ [m/s]}$	dichth	overg	meng
1033	0.2			
1033	0.1			
1033	0.05			

$\rho = 1049 \text{ kg/m}^3$:

Wanneer de dichtheid nu nog verder verhoogd wordt naar 1049 kg/m^3 treedt bij een uitstroomsnelheid van 0.2 m/s een dichtheidsstroom op. In figuur 7.25 is te zien dat voor deze uitstroomsnelheid de lijn voor stromend water niet geheel samenvalt met de lijn voor stilstaand water, maar wel heel dicht in de buurt komt. Bij uitstroming van 0.1 m/s kan nog niet gesproken worden van een dichtheidsstroom. Bij uitstroming van 0.05 m/s is sprake van een twijfelgeval. Tijdens het experiment was wel degelijk sprake van een radiale verspreiding van de pluim over de bodem, dus het resultaat van dit experiment valt in de categorie 'overgang'.

Tabel 8.6.

Stroomsnelheid = 13 cm/s				
$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$	$U_{\text{uitstr}} \text{ [m/s]}$	dichth	overg	meng
1049	0.2			
1049	0.1			
1049	0.05			

Alle meetwaarden welke het resultaat zijn van de experimenten uitgevoerd voor dit onderzoek kunnen nu grafische worden weergegeven in een totaaloverzicht, waarin het getal van Richardson (Ri) is uitgezet tegen de verhouding tussen de stroomsnelheid van het water langs het schip (u) en de snelheid waarmee het mengsel de uitstroomopening van de overvloed verlaat (w).

$$Ri = \frac{\varepsilon g d}{w^2}$$

d diameter uitstroomopening
 w verticale uitstroomsnelheid

Voor ε geldt:

$$\varepsilon = \frac{\rho_{\text{pluim}} - \rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{water}}}$$

ρ_{pluim} dichtheid van de pluim
 ρ_{water} dichtheid van het omgevingswater

De verhouding tussen de stroomsnelheid en de uitstroomsnelheid wordt uitgedrukt in ζ :

$$\zeta = \frac{u}{w}$$

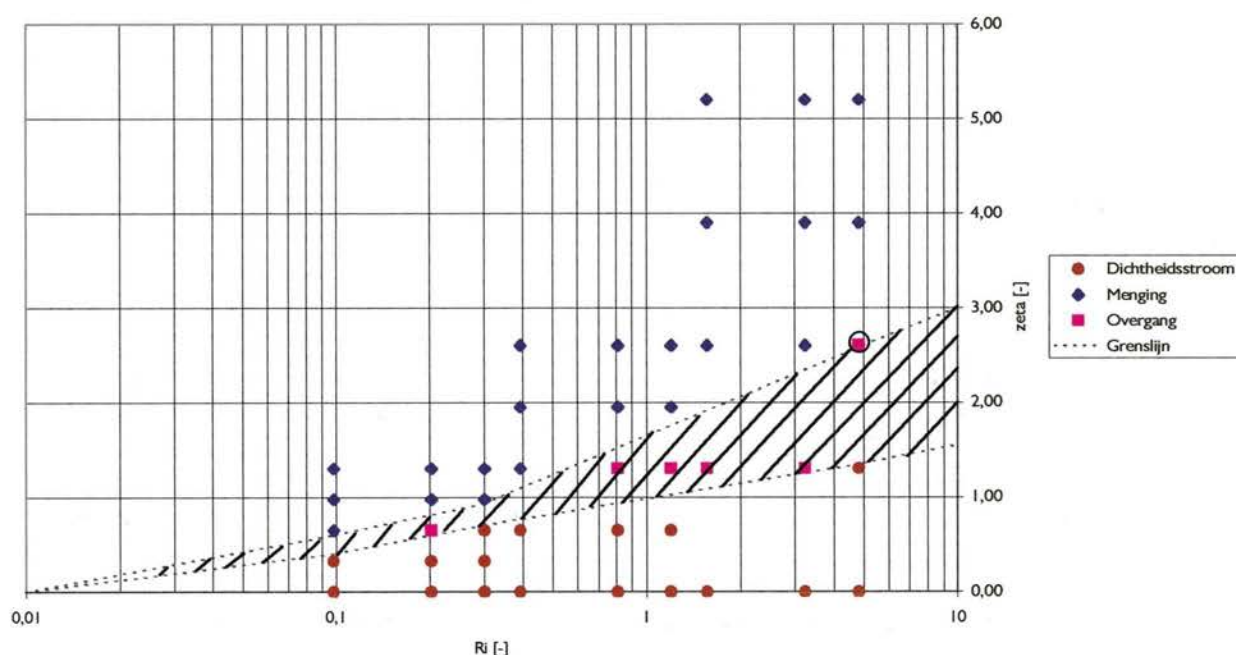
u horizontale stroomsnelheid

w verticale uitstroomsnelheid

Bij schaling volgens Froude hebben Ri en ζ dezelfde waarden in het model en in het prototype. Het overzicht in figuur 8.1, dat is bepaald aan de hand van de resultaten van de experimenten met het model, is derhalve direct toepasbaar op het prototype.

In figuur 8.1 is te zien dat een hoge waarde voor Ri en een lage waarde voor ζ een dichtheidsstroom oplevert, terwijl een hoge waarde voor ζ en een lage waarde voor Ri menging oplevert. In termen van snelheid betekent dit dat wanneer de horizontale stroomsnelheid groot is ten opzichte van de verticale uitstroomsnelheid er menging op zal treden. Daarentegen zal bij een grote verticale uitstroomsnelheid ten opzichte van een kleine horizontale stroomsnelheid een dichtheidsstroom optreden. Voor het dichtheidsverschil tussen de pluim en het omgevingswater geldt dat een klein dichtheidsverschil eerder menging oplevert, en een groot dichtheidsverschil een dichtheidsstroom (ook weer afhankelijk van verticale uitstroomsnelheid en horizontale stroomsnelheid).

Overzicht dichtheidsstroom - menging



Figuur 8.1. Overzicht dichtheidsstroom, menging en overgangsgebied

Tussen het gebied voor menging en het gebied voor dichtheidsstroom bevindt zich een overgangsgebied. Wanneer van dichtheidsstroom wordt overgegaan in menging zal in het overgangsgebied aanvankelijk de radiale verspreidingssnelheid van de pluim over de bodem afnemen. Deze omslag begint bij de onderste grenslijn. Volgens het criterium van Fay gedraagt de pluim zich niet meer als een dichtheidsstroom, maar hij verspreidt zich nog wel in radiale richting over de bodem. Vanaf een bepaald moment is er geen sprake meer van radiale verspreiding. In deze situatie treedt zoveel entrainment op dat het dichtheidsverschil tussen de pluim en het omgevingswater al

sterk is afgenomen voordat de pluim de bodem heeft bereikt. In dit geval is er sprake van menging. Deze omslag vindt plaats bij de bovenste grenslijn.

Het omcirkelde meetpunt in figuur 9.1 geeft een resultaat van een experiment weer waarvan twijfelachtig is of het gaat om menging of een overgangsgeval. Daarom is de bovenste grenslijn dwars door dit meetpunt getrokken.

Bij dit overzicht dienen nog twee opmerking te worden gemaakt:

- In het model is de diameter van de overvloed niet gevarieerd, zoals al eerder is vermeld. Deze diameter is echter van grote invloed op het getal van Richardson. Verandering van de diameter zal dus een verschuiving van het overgangsgebied veroorzaken.
- In het onderzoek is gewerkt met een beperkte waterdiepte. Wanneer de waterdiepte groter zou zijn zou de mate van entrainment met de waterdiepte toenemen. In dat geval kan het voorkomen dat het resultaat van een experiment met een beperkte waterdiepte een dichtheidsstroom is, terwijl een experiment met gelijke omstandigheden maar een grotere waterdiepte uiteindelijk menging zal opleveren.



8.2. Beschrijving pluim bij uitstroomopening

In de vorige paragraaf is slechts gekeken naar de radiale verspreiding van de pluim op de bodem. Aan de hand van deze analyse zijn alle resultaten van de experimenten onderverdeeld in de categorieën dichtheidsstroom, menging of overgang. Er is hier alleen gekeken naar de toename van de straal van de pluim op de bodem in de tijd. Dit is steeds gedaan met een bovenaanzicht van de pluim. Wanneer echter naar het zij aanzicht van de pluim gekeken wordt kan geanalyseerd worden hoe de pluim zich in verticale richting in de waterkolom verspreidt.

In de gevallen waarin een dichtheidsstroom optreedt (zie figuur 7.6 tot 7.8) treedt geen enkele vorm van stripping op. Onder stripping wordt verstaan het proces waardoor kleine hoeveelheden materiaal door de stroom van de straal of de pluim worden afgedreven door turbulentie en oppervlaktewrijving. Deze gevallen veroorzaken dus geen enkele vertroebeling van het omgevingswater.

Wanneer er echter menging optreedt treedt wel vertroebeling op van het omgevingswater. Voordat de pluim de bodem bereikt is reeds zoveel water in de pluim opgenomen dat de omvang sterk toeneemt en de dichtheid in de pluim sterk afneemt. Op een bepaald moment is het verschil tussen de dichtheid in de pluim en de dichtheid van het omgevingswater zo klein dat er geen sprake meer is van een dichtheidsstroom. Vanaf dat moment neemt de wolk slib alleen nog maar in omvang toe en verspreidt deze zich langzaam over de hoogte en breedte van de waterkolom. De hele wolk beweegt zich met de snelheid van het stromende water stroomafwaarts. Er is geen sprake meer van radiale verspreiding van de pluim over de bodem (zie figuur 7.11 tot 7.17).

Of de wolk zich aanvankelijk onder in de waterkolom verspreidt of bovenin bij het wateroppervlak is afhankelijk van de beginsnelheid van de pluim en het dichtheidsverschil tussen de pluim en het omgevingswater in het begin. In geen van de gevallen echter is de wolk slib helemaal tot aan het wateroppervlak gekomen. De wolk bleef in alle gevallen enkele centimeters onder het oppervlak hangen.

In gevallen van menging treedt bij de uitstroomopening van de overvloed ook nooit stripping op. Het mengsel vormt een compacte pluim tot het moment dat het dichtheidsverschil zo klein is dat er menging optreedt. Aan het begin van dit traject ontstaat dus nog geen vertroebeling van het water door stripping.

8.3. Vergelijking met programma Straal3D

Het programma Straal3D, wat ontwikkeld is door Delft Hydraulics, berekent het driedimensionale traject en de vervorming van een ronde straal in stilstaand of stromend water. De dichtheid van de straal kan groter of kleiner zijn dan de omgevingsvloeistof.

De eigenschappen van de straal worden beschreven ten opzichte van de lengte s van de as. Als de lengte langs de as bekend is samen met de hoek waaronder de straal zich bevindt op die plaats, dan kan de x -, y - en z -coördinaat berekend worden. De concentratie in de straal is een functie van de diameter die de straal heeft.

Het programma Straal3D gaat uit van een oneindig grote ruimte waarin geloosd wordt. Er wordt geen rekening gehouden met het wateroppervlak en de bodem. Alleen het traject van de straal van de uitstroomopening tot net boven de bodem zal met dit programma beschreven worden.

In Straal3D zijn enkele berekeningen gemaakt waarbij dezelfde parameters gevarieerd zijn als in de experimenten met het model in de stroomgoot. Deze parameters zijn de stroomsnelheid in de goot, de uitstroomsnelheid van de straal en het dichtheidsverschil tussen de straal en het omgevingswater. De uitkomsten van deze berekening met Straal3D worden vergeleken met de resultaten van de experimenten. Het gaat hier voornamelijk om de vergelijking van het traject van de pluim in Straal3D en in het model. Tevens is aan de hand van Straal3D gekeken welke van de drie parameters de grootste invloed heeft op het verloop van de pluim.

Er is een serie berekeningen is gemaakt met een stroomsnelheid van het omgevingswater van 0.065 m/s. In de grafieken van figuur 8.2 zijn de resultaten van deze berekeningen weergegeven.

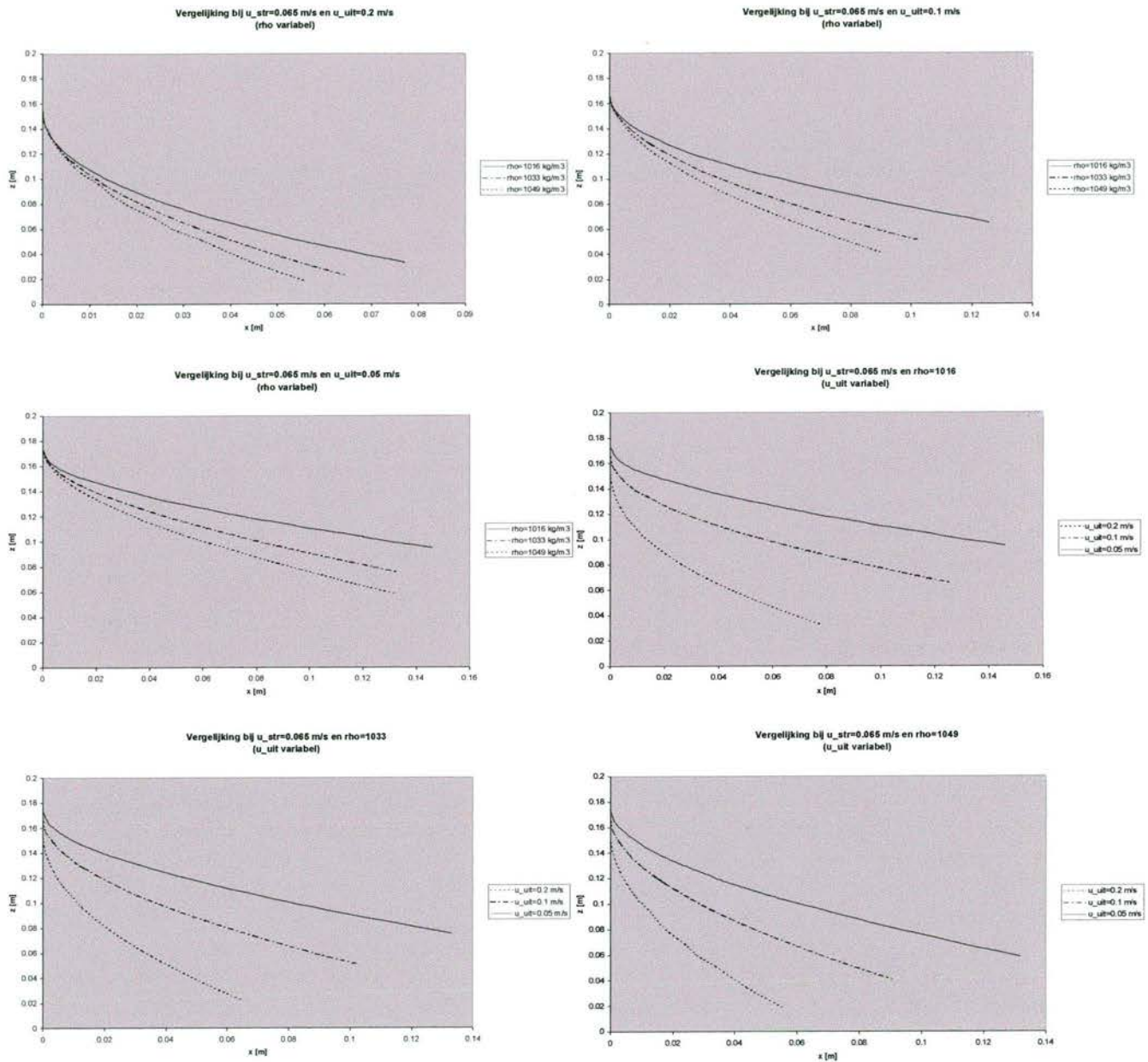
De grafieken geven het verloop van de pluim weer. De uitstroomopening van de pluim is in alle gevallen op $z=0.2$ m. Het eerste traject, waarbij de pluim geen afstand in de x -richting aflegt is de ZFE, zoals beschreven in paragraaf 3.3. Na de ZFE gaat de pluim vervormen in de richting van de stroming van het omgevingswater.

In de eerste grafiek is de uitstroomsnelheid van de pluim uit de overvloed constant gehouden op 0.2 m/s. Vervolgens is drie keer het verloop van de pluim uitgezet, waarbij in elk geval een ander dichtheidsverschil aangenomen wordt. In deze grafiek is dus de invloed van het dichtheidsverschil tussen de pluim en het omgevingswater weergegeven. De tweede en derde grafiek geven hetzelfde weer, maar dan voor de uitstroomsnelheden 0.1 m/s en 0.05 m/s.

In de vierde grafiek is het dichtheidsverschil tussen de pluim en het omgevingswater constant gehouden, en wordt het verloop van de pluim uitgezet bij verschillende uitstroomsnelheden. Hierdoor ontstaat een duidelijk beeld van de invloed van het verschil in uitstroomsnelheid van de het mengsel uit de overvloed. De vijfde en zesde grafiek geven hetzelfde weer, maar dan met andere dichtheidsverschillen.

Bij vergelijking met de resultaten van de experimenten kan geconstateerd worden dat de pluimen berekend door Straal3D iets sneller naar de bodem gaan dan die in de experimenten. Het gaat hier om een verschil op de x -as van enkele centimeters. Het verloop van de pluimen is verder in beide gevallen bijna identiek.

Uit de grafieken is verder te zien dat de invloed van de uitstroomsnelheid van het mengsel op het verloop van de pluim veel groter is dan de invloed van het verschil in dichtheid met het omgevingswater.



Figuur 8.2. Pluimverloop volgens Straal3D

9. Conclusies en aanbevelingen

Het resultaat van het onderzoek is een overzicht van het gedrag van het overvloeiverlies van een sleepopperzuiger onder verschillende uitgangssituaties. Hierbij zijn de stroomsnelheid van het omgevingswater ten opzichte van het schip, de uitstroomsnelheid van het overvloeiverlies uit de overvloed en het dichtheidsverschil tussen het overvloeimengsel en het omgevingswater variabele parameters.

Afgaande op de resultaten van de experimenten kan nu een overzicht gemaakt worden over wanneer het overvloeiverlies zich gedraagt als een dichtheidsstroom en wanneer er menging optreedt. Dit overzicht zal direct uitgedrukt worden in snelheden en dichtheden die betrekking hebben op het prototype. Daarom volgen nu eerst de snelheden en dichtheden van het model met de daarbij behorende snelheden en dichtheden van het prototype, uitgaande van een Froudeschaling en een lengteschaal van 1:60.

Tabel 9.1. Variabele parameters model en prototype

Stroomsnelheid / vaarsnelheid [m/s]		Dichtheid omgevingswater [kg/m ³]		Dichtheid mengsel [kg/m ³]		Uitstroomsnelheid overvloed [m/s]	
Model	Prototype	Model	Prototype	Model	Prototype	Model	Prototype
0	0	1000	1025	1016	1041	0.2	1.55
0.065	0.5	1000	1025	1033	1058	0.1	0.77
0.13	1	1000	1025	1049	1074	0.05	0.39
0.195	1.5						
0.26	2						

Uit de resultaten van de experimenten kan direct geconcludeerd worden dat er altijd menging optreedt wanneer tijdens het zandwinnen met een grotere snelheid (t.o.v. het water) wordt gevaren dan 1 m/s. Bij een snelheid van 0 m/s ten opzicht van het water treedt altijd een dichtheidsstroom op.

Wanneer met 0.5 m/s gevaren wordt ten opzichte van het water zal in geval van een dichtheid van het overvloeimengsel van 1074 kg/m³ (15% van het gewonnen materiaal gaat via overvloed overboord) voor iedere uitstroomsnelheid een dichtheidsstroom ontstaan. Wanneer de dichtheid van het mengsel wordt verlaagd naar 1058 of 1041 kg/m³ (respectievelijk 10% en 5% van het gewonnen materiaal gaat via de overvloed overboord) zal bij een lage uitstroomsnelheid uit de overvloed iets meer menging optreden, waardoor de verspreiding van het mengsel over de bodem in de breedterichting minder snel gaat dan bij een vaarsnelheid van 0 m/s ten opzichte van het water. Bij uitstroomsnelheden van 0.77 m/s en 1.55 m/s vormt zich bij laatstgenoemde dichtheden wel een dichtheidsstroom.

90% van
gewonnen stib
of van
herolt stib?

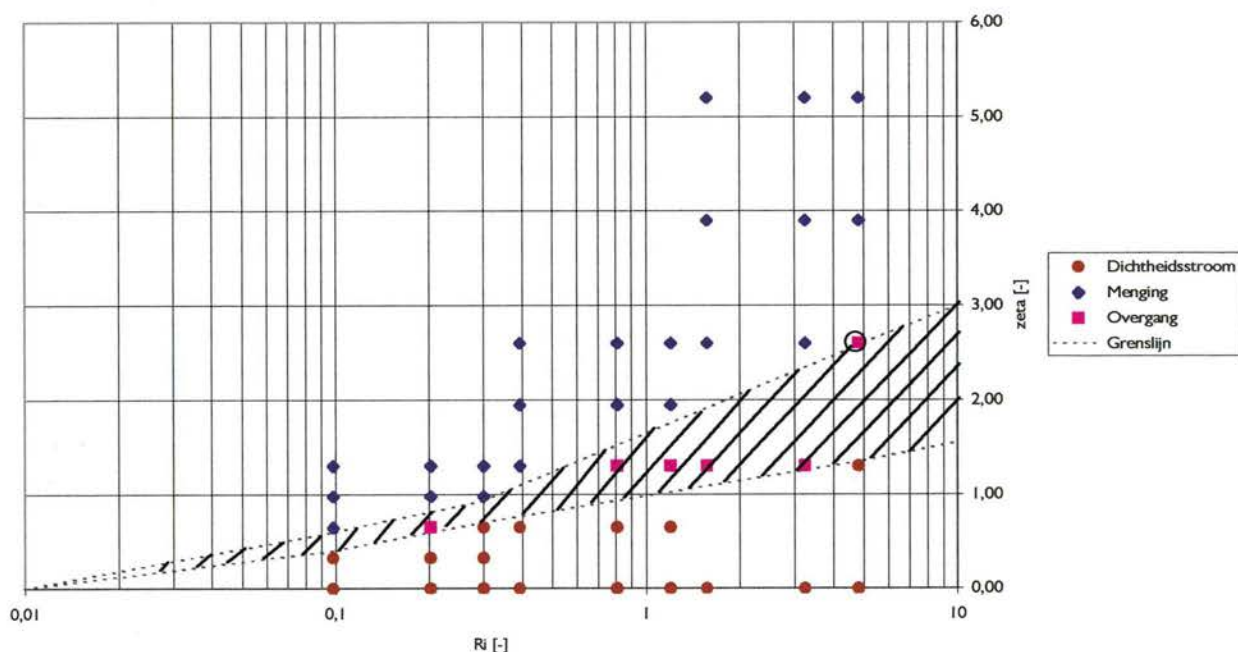
Bij een snelheid van 1 m/s van het schip ten opzichte van het water zal bij een mengseldichtheid van 1041 kg/m³ altijd menging optreden. Bij grotere dichtheden zal in elk geval ook bij een uitstroomsnelheid van 0.39 m/s menging optreden.

Met een combinatie van een dichtheid van 1074 kg/m³ en een uitstroomsnelheid van 1.55 m/s treedt wel een dichtheidsstroom op. De tussenliggende combinaties leveren in geringe mate menging op.

Bij een vaarsnelheid van de sleepopperzuiger van 1.5 m/s en 2 m/s zal bij aangenomen waterdiepte het overvloeimengsel altijd gaan mengen voor het de bodem bereikt en dus nooit een dichtheidsstroom vormen.

De gevallen 'overgang' zoals in hoofdstuk 8 omschreven liggen op de grens tussen dichtheidsstroom en menging. Deze grens is vrij breed. Wanneer in deze gevallen de vaarsnelheid van de sleepopperzuiger groter zou worden, de uitstroomsnelheid van het overvloeiverlies uit de overvloei kleiner zou worden, of het verschil tussen dichtheid van het overvloeiverlies en de dichtheid van het zeewater kleiner zou worden, dan zal er meer menging optreden. In alle tegenovergestelde gevallen zal er meer een dichtheidsstroom vormen.

Overzicht dichtheidsstroom - menging



Figuur 9.1. Overzicht dichtheidsstroom, mening en overgangsgebied

In figuur 9.1 staat nogmaals het overzicht van de resultaten in een grafiek waarin het getal van Richardson is uitgezet tegen ζ . Hiervoor geldt:

$$Ri = \frac{\varepsilon g d}{w^2} \quad \zeta = \frac{u}{w}$$

Op de verticale as staat de verhouding tussen de stroomsnelheid (vaarsnelheid in prototype) u en de uitstroomsnelheid uit de overvloei w uitgezet. Het dichtheidsverschil tussen de pluim en het omgevingswater zit in Ri op de horizontale as verwerkt. Alle drie de parameters die tijdens de experimenten gevarieerd zijn zitten in dit overzicht verwerkt. Het resultaat is een overzicht dat ingedeeld kan worden in de categorieën 'dichtheidsstroom', 'menging' en 'overgang'. Dit overzicht is direct toepasbaar op het prototype.

Aanbevelingen

Om het onderzoek enigszins te vereenvoudigen zijn tijdens het onderzoek enkele aannamen gedaan. Om echter volledig beeld te krijgen van wat er werkelijk gebeurt met het overvloeiverlies van een sleepopperzuiger moeten nog enkele aspecten nader onderzocht worden.

- Luchtinsluiting

Er is tijdens dit onderzoek geen aandacht besteed aan het effect van luchtinsluiting in de overvloed. In de praktijk komt dit echter zeer veel voor. Deze luchtinsluiting heeft grote invloed op het verloop van de pluim met overvloeiverlies. Naar dit effect zal nog nader onderzoek gedaan moeten worden.

- Schroefwerking

De aandrijfschroef van een sleepopperzuiger kan grote invloed hebben op de pluim van slib. In dit verslag is aan de hand van de uitgevoerde experimenten reeds een aanname gedaan over de invloed van de schroef. Het is echter zinvol om dit nog verder te onderzoeken.

- Windgolven en deining

Op de Noordzee is vrijwel altijd sprake van windgolven en deining. Deze golven kunnen verstoring veroorzaken in het overvloeiproces. De bewegingen van de sleepopperzuiger als gevolg van deze golven resulteren in een onregelmatige overvloed van het overtollige proceswater. De richting van de uitstroming van het overvloeiverlies is niet constant. Dit kan invloed hebben op de vorming van een dichtheidsstroom. Naar de invloed van deze beweging kan nog nader onderzoek gedaan worden.

- Diameter overvloed

In het model is om constructie technische redenen gekozen voor een overvloed met een diameter van 2.5 cm. Volgens de geometrische schaling vanuit het prototype zou de diameter in het model echter 5 cm moeten zijn. Door de aanname dat de uitstroomsnelheid van het overvloeiverlies uit de overvloed belangrijker is voor het verloop van de pluim dan het debiet, kan deze diameter van 2.5 cm gekozen worden. Er zou echter ook nog gekeken moeten worden naar de invloed van verschillende diameters bij gelijke uitstroomsnelheden.

val. p. 65
→ d
verander
gevoel
overgangsgolven

- Beperkte waterdiepte

In het onderzoek is gewerkt met een beperkte waterdiepte. Wanneer de waterdiepte groter is neemt de mate van entrainment met de waterdiepte toe, waardoor het dichtheidsverschil tussen de pluim en het omgevingswater verder afneemt. In dat geval kan het voorkomen dat het resultaat van een experiment met een beperkte waterdiepte een dichtheidsstroom is, terwijl een experiment met gelijke omstandigheden maar een grotere waterdiepte uiteindelijk menging zal opleveren. Een aanvulling op het onderzoek dat gedaan is met verschillende waterdieptes geeft een completer beeld van het gedrag van het overvloeiverlies van een sleepopperzuiger.

10. Dankwoord

Tot slot van dit rapport zou ik graag enkele mensen willen bedanken, zonder wiens medewerking het resultaat van dit onderzoek nooit tot stand gekomen zou zijn.

Laboratorium voor Vloeistofmechanica

Het praktische gedeelte van het onderzoek is uitgevoerd in een stroomgoot in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica. Tevens was in dit laboratorium gedurende het onderzoek een werkkamer beschikbaar. Ik wil graag de heer Fontijn bedanken voor het beschikbaar stellen van de stroomgoot in het laboratorium en alle faciliteiten daar omheen. Daarbij wil ik ook de medewerkers van het laboratorium bedanken voor alle hulp en medewerking.

Directie Noordzee

Ik wil graag de heer Stolk van Directie Noordzee bedanken voor de afstudeeropdracht, het leveren van informatie en het lezen en beoordelen van het afstudeerwerk als lid van de afstudeercommissie. Hij heeft ook geregeld dat ik een dag mee kon varen op een sleeophopperzuiger op de Noordzee.

Commissieleden

Ik wil de graag de leden van de afstudeercommissie bedanken. De heer Winterwerp voor alle begeleiding gedurende het onderzoek en het lezen en corrigeren van tussen- en eindrapport. De heer Van de Graaff voor het voorstellen van de afstudeeropdracht en het lezen van het rapport. De heer Battjes voor het voorzitten van de commissie en het lezen van het rapport.

Maritieme techniek

Ik wil graag de heer Poot van de faculteit Maritieme Techniek bedanken voor het beschikbaar stellen van het model van het schip.

Van der Schriek

De heer Van der Schriek van Baggertechniek heeft veel toegelicht over enkele praktische kanten van het baggerproces. Daarvoor wil ik hem graag bedanken.

11. Literatuurlijst

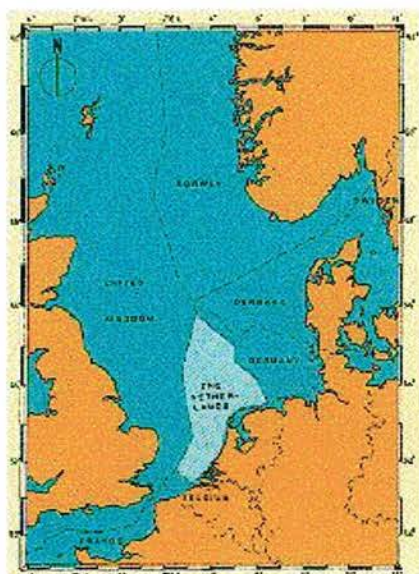
- John S.A., Challinor S.L., Simpson M., Burt T.N., Spearman J. (1999)
Scoping the assessment of sediment plumes arising from dredging
- Wit P.J. de (1995)
Liquefaction and erosion of mud due to waves and current
- Kuiper G. (1997)
Resistance and propulsion of ships
- Salm R. van der (1998)
Milieuvriendelijke zandwinning – De verspreiding van het overvloeiverlies
- Badloo P. (1998)
Milieuvriendelijke zandwinning – Minimaliseren van de pluimvorming tijdens de zandwinning met een sleepopperzuiger
- Battjes J.A. (1999)
Vloeistofmechanica
- Vries M. de (1977)
Waterloopkundig onderzoek
- Schriek G.L.M. van der (1998)
Baggertechniek
- Fischer H.B., List E.J., Koh R.C.Y., Imberger J., Brooks N.H. (1979)
Mixing in inland and coastal waters
- Bouwmeester J. (1992)
Binnenscheepvaart en scheepvaartwegen
- Fannelöp T.K. (1994)
Fluid mechanics for industrial safety and environmental protection
- Wood I.R., Bell R.G., Wilkinson D.L. (1993)
Ocean disposal of wastewater
- Gunter G., Mackin J.G., Ingle R.M. (1964)
A report to the district engineer on the effect of disposal of spoil from the inland waterway

Bijlagen

Bijlage A: Rijkswaterstaat Directie Noordzee

Ontstaan en geografisch gebied

In de laatste 30 jaar is de economische betekenis van de Noordzee aanzienlijk in omvang toegenomen onder invloed van de modernisering van de visserij, de schaalvergroting op scheepvaartgebied en de winning van olie en gas. Tevens is een milieubesef opgekomen, waardoor een 'schone' zee en een gezonde flora en fauna in de zee als belangrijk worden erkend.



De directie Noordzee is opgericht in 1971 als een nieuwe directie van de Rijkswaterstaat om het belang van de Noordzee voor Nederland te benadrukken. De Rijkswaterstaat is een onderdeel van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

De Noordzeelanden hebben met elkaar afspraken gemaakt over een verdeling van de Noordzee over de omringende landen. Deze ruimtelijke indeling is gebaseerd op de lengte van de kust. Het Nederlands deel van de Noordzee, het zogenaamde Nederlands Continentaal Plat (NCP), is ongeveer 1.5 keer de oppervlakte van Nederland zelf.

De directie Noordzee is verantwoordelijk voor het beheer van het Nederlands Continentaal Plat. Hierbij wordt gestreefd naar een duurzame ontwikkeling van het watersysteem Noordzee, rekening houdend met de diverse gebruiksfuncties.

Figuur A.1. Nederlands Continentaal Plat

Missie en doelstellingen

De hoofdtaken van de directie Noordzee zijn:

1. Beheer van water en bodem
2. Beheer en onderhoud van de infrastructuur op zee
3. Inwinning en levering van gegevens en informatie

1. Beheer van water en bodem

De directie Noordzee streeft door een actieve aanpak naar een vermindering van de vervuiling. Bovendien draagt de directie Noordzee bij aan onderzoek naar de invloed van milieuvervuiling op levende organismen in de zee en op de kwaliteit van het water en de bodem. Hiertoe worden de volgende activiteiten ondernomen:

- Opsporing en opruiming van olielozingen en andere mariene verontreinigingen
- Bestrijding van rampen op zee
- Vergunningverlening
- Bijdragen aan onderzoek en beleidsontwikkeling
- Internationaal overleg

Opsporing en opruiming van olielozingen en andere mariene verontreinigingen

In samenwerking met de Nederlandse Kustwacht worden per vliegtuig bijna dagelijks surveillances uitgevoerd over het Nederlands Continentaal Plat om olievlekken en lozingen van schepen en platforms op te sporen. Om olielozingen op te ruimen beschikt de directie Noordzee over speciaal uitgeruste vaartuigen. Tevens heeft de directie Noordzee een vloot van meet- en onderzoeksvaartuigen om gegevens en informatie in te winnen over de bodemgesteldheid, de kwaliteit van het water, flora, fauna en bodemligging van de zee. Een speciaal fenomeen is eutrofiëring, met als gevolg een overdadige algengroei.

Rampenbestrijding op zee

Dit betreft de bestrijding van rampen op zee, die een negatieve invloed kunnen hebben op het milieu of op de scheepvaart. Hierbij kan men denken aan de opsporing van verloren lading, de berging van schepen en/of de opruiming van milieugevaarlijke lading uit aangevaren schepen. Ook kan men denken aan de opruiming van wrakken of obstakels op de zeebodem, die hinder veroorzaken voor de scheepvaart.

Vergunningverlening

Het storten van baggerspecie en het lozen van afvalstoffen zijn gebonden aan een strikte regelgeving. De directie Noordzee draagt bij aan de vorming van deze regelgeving en verleent vergunningen. Een dergelijke procedure geldt eveneens voor de winning van zand, grind en schelpen.

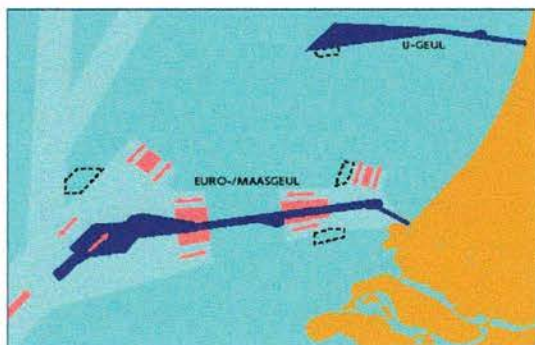
Bijdrage aan onderzoek en beleidsontwikkeling

Om inzicht te krijgen in de mate van vervuiling van de Noordzee en om de kwaliteit in te schatten van de zeebodem, het water, de flora en de fauna van de zee worden gedurende het jaar monsters genomen en metingen uitgevoerd. Daarvoor kan de directie Noordzee een vloot van speciale schepen en instrumenten inzetten. Deze gegevens leveren een bijdrage aan studies naar de effecten van activiteiten, zoals visserij en olie- & gasindustrie. Deze studies worden uitgevoerd door onderzoeksinstituten, bijv. Rijksinstituut voor Kust en Zee. Ook draagt de directie Noordzee bij aan de ontwikkeling van beleidsplannen om het mariene milieu te beschermen en te verbeteren.

Internationaal overleg

De directie Noordzee neemt deel aan een groot aantal internationale overlegorganen en commissies, die zich bezig houden met controle en terugdringing van de vervuiling van de Noordzee.

2. Beheer en onderhoud van de infrastructuur op zee



Figuur A.2. IJgeul en Euro-Maasgeul

Om de scheepvaart te begeleiden is een stelsel van vaarroutes ingericht, die worden gemarkeerd met boeien en bakens. Om de Nederlandse havens toegankelijk te maken voor grote schepen zijn twee vaargeulen aangelegd, namelijk de Euro-Maasgeul naar Rotterdam-Europoort voor schepen met een maximale diepgang van 22.5 meter en de IJgeul naar IJmuiden voor schepen met maximaal 16.5 meter diepgang. De directie Noordzee is verantwoordelijk voor het onderhoud van deze vaargeulen in nauwe

samenwerking met de havenautoriteiten en lokale directies van Rijkswaterstaat. Hiervoor worden hydrografische opname- en baggerwerkzaamheden uitgevoerd. Er is namelijk sprake van een voortdurende afzetting van slib en zand in en voor de havenmond.

De diepte van de vaargeulen wordt gecontroleerd met behulp van meetvaartuigen van de directie Noordzee. In geval van verontdiepingen worden baggerwerkzaamheden uitgevoerd. Het daadwerkelijke baggeren wordt uitbesteed aan baggermaatschappijen, terwijl de directie Noordzee de werkzaamheden coördineert. Daarnaast is de directie Noordzee betrokken bij de opslag van verontreinigde baggerspecie, het ophogen van de stranden (suppleties) en de berging van wrakken en andere obstakels.

3. Inwinning en levering van gegevens en informatie

Ter ondersteuning van de beheer- en onderhoudtaken houdt de directie Noordzee zich actief bezig met inwinning en verzameling van gegevens en informatie van de zee en haar gebruiksfuncties. Hiervoor beheert de directie Noordzee een scala aan apparatuur en platforms om data en informatie in te winnen over de kwaliteit van de zeebodem, het water, de flora en fauna, de bodemligging, fysisch-oceanografische parameters zoals stroming, golven en getijden, meteorologische parameters, olievervuiling etc. Deze middelen en faciliteiten omvatten meet- en onderzoekvaartuigen, een vliegtuig, een real-time monitoring netwerk van vaste meetstations (Meetnet Noordzee) en het Hydro Meteo Centrum Rijnmond

Activiteiten op de Noordzee

De Noordzee grenst in het westen aan de Atlantische Oceaan en in het oosten aan de Oostzee. De gemiddelde waterdiepte is ca. 90 meter en het oppervlak van de Noordzee is ca. 570.000 vierkante kilometer. Het zuidelijk gedeelte van de Noordzee - waarvan het Nederlands Continentaal Plat deel uit maakt - heeft een gemiddelde waterdiepte van slechts 30 meter. Nabij de kust is de zee nog ondieper.

Activiteiten op de Noordzee zijn scheepvaart, visserij, winning van olie en gas, winning van zand en grind, recreatie en militaire oefeningen

Scheepvaart

De Noordzee is een van de drukst bevaren zeeën ter wereld. Elk jaar zijn er meer dan 420.000 scheepsbewegingen. Om dit intensieve scheepvaartverkeer te begeleiden (dat o.a. olie- en ertsschepen omvat met meer dan 500.000 ton dwt) is een stelsel van verkeersscheidingssystemen, bakens, boeien, en vaargeulen voor het aanlopen van havens aangelegd, dat vergelijkbaar is met een wegstelsel op het land.

Visserij

Gunstige milieu-omstandigheden, zoals een ondiepe zee, relatief warm water en de open uitwisseling van de watermassa met de Atlantische Oceaan, maken dat in de Noordzee veel vis voorkomt. Soorten zoals schol, tong en makreel komen in grote hoeveelheden voor. De vangst per hectare is ongeveer 75 keer de gemiddelde vangst in de zeeën op de wereld.

Olie en gas winning

Sedert de zestiger jaren is de winning van olie en gas ook een belangrijke industrie geworden op de Noordzee. Er zijn thans meer dan 450 vaste productieplatforms geïnstalleerd. Deze platforms zijn verbonden met productieputten, verdeelstations en met de kust voor verdere distributie naar raffinaderijen, energiecentrales en tenslotte naar eindgebruikers. Hiervoor zijn en worden steeds

meer pijpleidingen aangelegd. Op dit moment zijn er meer dan 650 pijpleidingen geïnstalleerd met lengten variërend van 100 meter tot 1500 kilometer.

Zand en grind winning

Gewonnen hoeveelheden zand uit zee in miljoenen m³:

Tabel A.1.

Jaar	Uit vaargeulen	Vnaf NCP	Totaal
1990	7.3	6.1	13.4
1991	6.2	6.6	12.8
1992	9.4	5.2	14.6
1993	3.2	9.7	12.9
1994	9.8	4.6	13.5
1995	10.8	6	16.8
1996	14.8	8.4	23.2

De zee als bron en motor

Hoe wordt de Noordzee tussen nu en 2010 gebruikt en beheerd? Meer dan 250 beleidsmakers en gebruikers van de Noordzee bogen zich over deze vraag en kwamen tot een gezamenlijke Beheersvisie Noordzee 2010. De beheersvisie biedt een overzicht van actuele ontwikkelingen, wat wil de overheid met het beheer bereiken en wat moet daarvoor gebeuren?

In de beheersvisie staat het evenwicht tussen bron en motor centraal. Het streven is de ontplooiing van de bron en de motor samen te laten gaan. De Noordzee is een bron van rust, leven en ruimte en een motor van economische activiteiten. De Beheersvisie Noordzee 2010 is gemaakt door een interdepartementale stuurgroep, waarin de ministeries van V&W, VROM, LNV en EZ vertegenwoordigd zijn

Belangen

Uit de Noordzee als bron en motor vloeien soms tegengestelde belangen. Het één kan immers ten koste gaan van het ander. Recreatie, visserij, offshore en milieuaspecten hebben ieder hun eigen belangen, die zorgvuldig afgewogen moeten worden. Het toetsingskader dat bij het beheer van de Noordzee wordt gebruikt, moet in dat geval uitkomst bieden. Het kader geeft de gewenste richtingen van ontplooiing aan die in het beleid van de verschillende departementen zijn omschreven. Het bevat ook procedures die duidelijk maken hoe een afweging tot stand komt.

Het uitgangspunt van het beleid is: veiligheid voor de burgers, voor het watersysteem en voor zijn gebruikers. Maar ook het behouden en versterken van de verscheidenheid in het watersysteem en zijn gebruik, nu en in de toekomst.

Bijlage B: Tocht met de HAM317 op 7 juli 2000

Vanuit Directie Noordzee, de opdrachtgever van dit afstudeerproject, is de mogelijkheid geboden om tijdens het onderzoek een dag mee te varen op een sleephopperzuiger, de HAM317 (figuur B.1). Deze sleephopperzuiger werkt op dat moment aan het project 'Verlegde Havenspoorlijn' bij Barendrecht. Het benodigde zand voor dat project wordt gewonnen op de Noordzee, voor de kust van Hoek van Holland. Het zand wordt voornamelijk gewonnen uit de vaargeul aan de monding van de Nieuwe Waterweg. Er is ook een gebied net iets ten Noorden van de geul waar zand gewonnen mag worden. Vervolgens wordt het zand naar Barendrecht gebracht, waar het in een depot wordt gestort vanwaar het zand naar behoefte wordt verspreid.



Figuur B.1. De HAM317

De HAM317 is 24 uur per dag en 7 dagen per week operationeel. Op het schip werken ongeveer 20 mensen die in twee ploegen werken van steeds 8 uur.

De HAM317 heeft een hoppercapaciteit van 4426 m^3 en een maximale baggerdiepte van 32 meter. De diepte waarop voor dit project zand gewonnen wordt is ongeveer 20 meter. Per keer wordt er ongeveer 3200 m^3 zand geladen.

Hieronder volgt een beknopt verslag van deze dag.

Aankomst

Op vrijdagochtend om 10.00 uur werden wij verwacht in een klein kantoortje van de HAM in Hoek van Holland aan de haven. Wij zijn ik plus nog 7 mensen van Directie Noordzee en RIKZ. Tijdens de koffie met gebak is ons door Pieter, uitvoerder van de HAM op het project, uitgelegd wat er die dag allemaal zou gaan gebeuren. Daarnaast heeft hij wat verteld over het project in Barendrecht en wat zijn taak en de taak van de HAM317 daarin was. Op dat moment was de HAM317 juist vertrokken vanuit Barendrecht richting Hoek van Holland, en moesten we nog even wachten tot de sleephopperzuiger in de buurt zou zijn. Tot die tijd is Pieter bestookt met allerlei vragen en tegen de tijd dat het schip in de buurt van Hoek van Holland was iedereen flink wat kennis rijker over de baggerindustrie.

Aan boord van de HAM317

Om 12.00 uur voer de HAM317 iets stroomopwaarts van Hoek van Holland. Om aan boord van het schip te komen moesten wij met een bootje, de Panther, naar het schip gebracht worden. Op de Nieuwe Waterweg zijn we al varende overgestapt van de Panther op de HAM317. We zijn direct doorgelopen naar de brug, waar op dat moment de stuurman en de pijpenman (hij bedient de zuigarm en de pompen) aanwezig waren. We hebben daar uitgebreide uitleg gekregen over hun taken op de sleephopperzuiger.



Figuur B.2. De pijpenman

Na de rondleiding op de brug werden we uitgenodigd om voor de lunch aan tafel te gaan. Tijdens deze voortreffelijke lunch is de sleephopperzuiger in het zandwingsgebied aangekomen en begonnen met zandwinnen.

Direct na de lunch zijn we weer terug gegaan naar de brug waar we konden zien hoe de pijpenman het zuigproces controleerde en wat de rol van de stuurman is tijdens het baggerproces.

Door de heen en weer gaande baan die de sleephopperzuiger vaart binnen het wingsgebied is het belangrijk dat er een goede communicatie is tussen de stuurman en de pijpenman (figuur B.2). Wanneer de stuurman het schip aan het eind van een baan keert, moet de pijpenman zorgen dat het pompen van zand even onderbroken wordt en de sleepkop los van de bodem komt. Dit om te voorkomen dat de zuigbuis beschadigt bij het keren doordat het schip over de zuigbuis heen geduwd wordt. . Wanneer het schip zijn nieuwe koers heeft aangenomen laat de pijpenman de sleepkop weer op de bodem zakken en wordt verder gegaan met het zandzuigen.

Vervolgens was het tijd om buiten te gaan kijken. Zoals op de foto's van de HAM317 is te zien bevindt de brug zich voor op het schip. Hierachter wordt de meest ruimte van het schip ingenomen door het beun, het reservoir waarin het opgezogen zand via de inlaten gestort wordt.



Figuur B.3. Zuigbuis, inlaat en overvloei

Over het beun is een loopbrug gebouwd, zodat alles goed en van dichtbij bekeken kan worden. Het proces begint bij de zuigbuis (figuur B.3), waardoor het zand van de bodem van de zee opgepompt wordt. Vervolgens komt het via een stelsel van leidingen bij de inlaat terecht (figuur B.3). Deze inlaat zit aan het achterste uiteinde van het beun, en heeft vier inlaatopeningen aan iedere kant van het beun. Aan het andere uiteinde van het beun staat de overvloei (figuur B.3). Dit is een verticale pijp met een trechtervormige opening aan de bovenkant, die dwars door de bodem heen in direct verbinding staat met de zee.

Het mengsel van zand met water stroomt van het achtereinde van het beun naar de voorkant. In die tijd bezinkt het zand en bij de overvloei stroomt het water weer overboord. Het is heel goed te zien dat in dat overvloeiende water nog redelijk veel slib en fijn zand zit. Het water heeft een bruigrijze kleur. Wat echter niet zo goed te zien was was of dit troebel water nou ook een zichtbare pluim achter het schip veroorzaakte. Dit had te maken met het feit dat het redelijk ruw weer was en de kapitein van het schip het niet toestond dat wij aan de achterzijde van het schip gingen kijken. Ik had wel de indruk dat we tijdens het keren van het schip enigszins pluimvorming achter het schip konden zien, maar door de hoge golven was dat niet helemaal duidelijk.

Na ongeveer een uur was het schip bijna vol. Dit was goed te zien aan de stroomsnelheid van het water van achter naar voren in het beun. Door de steeds dunner wordende laag water op het bezonken zand werd de stroomsnelheid van het water, wat nog steeds met hetzelfde debiet aangevoerd werd, steeds groter. Korte tijd later was de maximale hoeveelheid zand geladen en het

*Figuur B.4. Alleen maar zand*

laatste beetje water via de overvloei over boord geloosd. Pas nu was duidelijk te zien dat het beun vol met zand zat (figuur B.4). Om te meten hoeveel zand er ongeveer geladen was werd op vier plaatsen, verdeeld over de lengte van het beun, het niveau van het zand gemeten. Dit werd gedaan door middel van peillijnen vanaf de loopbrug. Aan het uiteinde van de ze lijnen hing een halve bol die men tot op het zandbed liet zakken, waarna op de lijn het niveau van het zand gemeten kon worden. Aan de hand van het gemiddelde van deze vier niveaus kon de totale hoeveelheid geladen zand bepaald worden.

Enmaal terug op het rustige vaarwater van de Nieuwe Waterweg was het toegestaan om op het achterdek van het schip een kijkje te nemen bij de sleepkop, aan het eind van de zuigbuis (figuur B.5).

*Figuur B.5. Sleepkop*

