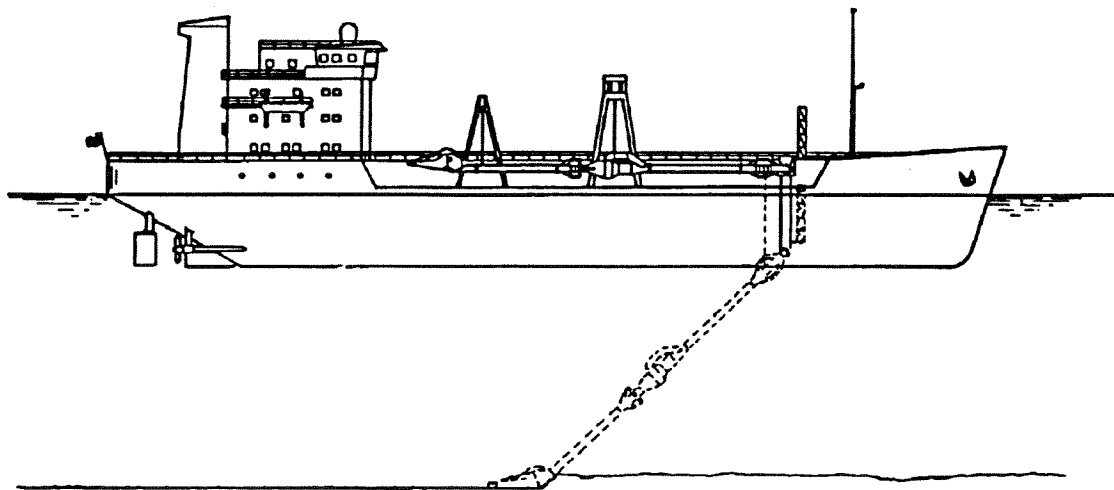


**Meting en interpretatie van de overloopverliezen
bij het baggeren van zand
met een sleephopperzuiger**



TU Delft

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde

Meting en interpretatie van de overloopverliezen
bij het baggeren van zand
met een sleephopperzuiger

Afstudeerverslag: C.F.M. Aarts

Afstudeerhoogleraar: prof. ir. K. d'Angremond (TU Delft)

Afstudeerbegeleiders: ing. J.W.A. Harbers (Boskalis)
ir. T. van de Meulen (TU Delft)
ir. F.C. van Roode (TU Delft/Boskalis)

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Waterbouwkunde
Mei 1996

Voorwoord

Voor u ligt mijn afstudeerverslag getiteld 'Meting en interpretatie van overloopverliezen bij het baggeren van zand met een sleephopperzuiger'. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Baggermaatschappij Boskalis. Dit afstudeerwerk is verricht in het kader van mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft.

In de eerste plaats wil ik Boskalis bedanken voor de mogelijkheid die zij mij geboden hebben om af te studeren. Met name wil ik dhr. J.W.A. Harbers bedanken voor de informatie en de adviezen.

Tevens wil ik de andere leden van mijn afstudeercommissie, dhr. K. d'Angremond, dhr. T. van de Meulen en dhr. F.C. van Roode hartelijk danken voor de begeleiding tijdens mijn afstuderen.

Stan Aarts

Samenvatting

Tijdens het zuigen van zand met een sleephopperzuiger wordt doorgeladen nadat het overvloeiniveau is bereikt en zal het gezogen debiet via de overvloeikoker overboord verdwijnen. Met dit mengseldebiet zal ook vaste stof overboord verdwijnen. De hoeveelheid vaste stof die overboord verdwijnt wordt het overloopverlies genoemd. De verhouding tussen de hoeveelheid vaste stof die overboord verdwijnt en de ingebrachte hoeveelheid vaste stof wordt het relatief overloopverlies genoemd. De omvang van het overloopverlies is van een groot aantal factoren afhankelijk, zoals bijvoorbeeld grondeigenschappen (korrelverdeling), laadcondities (debiet en concentratie), methode van inbrengen etc.

In het verleden zijn deze verliezen veelvuldig in theorie en in modelproeven bestudeerd. De theorie en de modelproeven beschrijven de praktijksituatie echter niet naar tevredenheid. Door aan boord permanent de overloopverliezen onder verschillende omstandigheden te meten kan het inzicht in de oorzaken van het overloopverlies worden vergroot en kan hiermee rekening worden gehouden in productie- en calculatieberekeningen.

Daarnaast is een permanente registratie aan boord interessant uit het oogpunt van optimalisatie van het laadproces. Indien de zuigbaas aan boord inzicht heeft in de efficiëntie waarmee het laadproces plaatsvindt kan het laadproces beter geoptimaliseerd worden.

Er is onderzoek gedaan naar de verschillende invloedsfactoren op het laadproces en er zijn verschillende methoden ontwikkeld om het overloopverlies aan boord te registreren. Deze methoden zijn in de praktijk onder verschillende omstandigheden aan boord van de sleephopperzuiger 'X' beproefd.

Uit het onderzoek naar de verschillende invloedsfactoren blijkt dat aan boord regeling van het debiet de beste methode is om het overloopverlies te verminderen. In bepaalde gevallen kan bij verlaging van het debiet zelfs de beladingssnelheid toenemen doordat de stroomsnelheid van het mengsel daalt en de verblijftijd stijgt. Op deze manier kan aan boord met het debiet het beladingsproces beïnvloed worden en kan het laadproces geoptimaliseerd worden. Met behulp van een permanente registratie van de overloopverliezen kan beter bepaald worden of het zinvol is om het debiet te verlagen of helemaal te stoppen met laden. Het is afhankelijk van de cyclustijd of dit ook economisch zinvol is.

Om de relatieve overloopverliezen te meten moet vast worden gesteld hoeveel vaste stof er wordt toegevoerd en hoeveel vaste stof er via de overvloeikoker overboord verdwijnt. De toegevoerde hoeveelheid vaste stof wordt bepaald met behulp van de concentratiemeters en snelheidsmeters in de zuigbuizen. De hoeveelheid vaste stof die overboord verdwijnt is afhankelijk van het debiet en de concentratie. Het debiet kan bepaald worden met behulp van het toegevoerde debiet en de verandering van

het beunvolume in een bepaalde tijd. Voor meting van de concentratie zijn vier methoden ontwikkeld. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen directe methoden en een indirecte methode. Bij de directe methoden wordt de concentratie van het overvloeiende mengsel direct in de overvloei-koker bepaald en bij de indirecte methode niet.

De volgende drie directe meetmethoden zijn toegepast in de praktijk:

- Radioactieve concentratiemeter (ra-meter) aan de overvloei-koker van het type IHC 110;
Er is een koker (L = 80cm, H = 15cm en B = 50cm) aan de achterstevenzijde van de overvloei-koker gemonteerd. Deze koker wordt in breedte richting doorstraald door een radioactieve bron. Het sediment absorbeert een deel van de straling en de hoeveelheid geabsorbeerde straling is een maat voor de dichtheid.
- Stenvork van het type 'Hydraplane';
Net als in het geval van de ra-meter is dit instrument aan de achterstevenzijde van de overvloei-koker bevestigd. Het meetprincipe is gebaseerd op de eigenschap dat de resonantiefrequentie van een stenvork afhankelijk is van de dichtheid van het medium waarin de stenvork zich begeeft.
- Monstername;
Met behulp van een monsterbus van één liter is elke vijf minuten een monster uit de overvloei-koker gehaald.

De volgende indirecte methode is toegepast:

- Met behulp van de toegevoerde lading en de verandering van het displacement is bepaald hoeveel massa er in een bepaalde tijd overboord stroomt. Daarnaast is met behulp van het toegevoerde debiet en de verandering van het beunvolume bepaald hoeveel mengsel er in een bepaalde tijd overboord stroomt. Door de massa te delen door het volume is de dichtheid bekend. De verandering van het displacement wordt bepaald met behulp van druksensoren onder het schip en de verandering van het volume wordt bepaald met behulp van niveaumeters boven het beun. Beide instrumenten zijn onderdeel van het Tonnen Droge Stof systeem (TDS-systeem).

De directe methoden bepalen de dichtheid slechts op één plaats op de overvloei-koker terwijl de indirecte methode de gemiddelde dichtheid van het gehele overvloeiende mengsel bepaald. Uit een gevoeligheidsanalyse die is uitgevoerd voor de indirecte methode blijkt dat de tijd waarover de gemiddelde dichtheid wordt bepaald een belangrijke rol speelt in de nauwkeurigheid. Indien de gemiddelde uitgaande dichtheid wordt bepaald over de gehele zuigtijd (> 60min) wordt de nauwkeurigheid volledig bepaald door de snelheidsmeters en concentratiemeters in de zuigbuizen en speelt de nauwkeurigheid van het TDS-systeem geen rol. Indien over kortere tijd (orde minuut) de gemiddelde uitgaande dichtheid wordt bepaald, wordt de nauwkeurigheid gedomineerd door de nauwkeurigheid van de druksensoren en de niveaumeters.

De verschillende methoden zijn beproefd aan boord van de 'X'. Hieruit zijn de volgende conclusies te trekken ten aanzien van het gebruik van de verschillende methoden om de uitgaande dichtheid te bepalen:

- De ra-meter geeft trends en de effecten van veranderingen in het laadproces, zoals het debiet en het overvloeiniveau, duidelijk aan. Het instrument is geschikt om de uitgaande dichtheid te bepalen op de plaats waar het instrument bevestigd is. Het instrument is echter niet op een representatieve plaats bevestigd. Indien het overvloeiniveau verlaagd wordt, bij beladingsgraden hoger dan 80%, stijgt de gemeten dichtheid tot onrealistische waarden doordat de ra-meter tot vlak op het zandbed wordt gedrukt. Ook bij lage beladingsgraden is de meting niet representatief voor de totale uitgaande dichtheid, zoals blijkt uit een massabalans voor het beun.
- De uitgaande dichtheden die zijn gemeten met de stemvork overschrijden in de fase direct na overvloeien 1500 kg/m^3 . Op basis van deze onrealistisch hoge waarden is geconcludeerd dat met de 'stemvork' van het type Hydraplane de uitgaande dichtheid niet bepaald kan worden.
- De uitgaande dichtheden bepaald met behulp van monsters zijn in het algemeen laag en overschrijden veelal de dichtheid van zeewater nauwelijks. Het monster is genomen op de rand van de overvloeikoker uit de bovenste schil water. Veranderingen in het laadproces worden in het algemeen niet waargenomen. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat de monsters niet op een representatieve plek zijn genomen.
- Met behulp van de indirecte methode is steeds de gemiddelde uitgaande dichtheid over twee minuten bepaald. De dichtheid vertoont een grote spreiding doordat de methode afhankelijk is van meerdere instrumenten (snelheidsmeters en concentratiemeters in de zuigbuizen, druksensoren onder het schip en niveaumeters boven het beun).

Het cumulatief overloopverlies en de gemiddelde uitgaande dichtheid kunnen het best bepaald worden met behulp van de indirecte methode. De nauwkeurigheid van de instrumenten van het TDS-systeem spelen dan geen rol en de nauwkeurigheid wordt bepaald door de nauwkeurigheid van de instrumenten in de zuigbuizen.

Voor de bepaling van het momentane overloopverlies en de momentane dichtheid is de ra-meter het meest geschikt. Weliswaar is het instrument niet op een representatieve plaats bevestigd, maar het geeft wel de trends aan bij verandering van het laadproces en toenemende beladingsgraad. Voor productie- en calculatieberekeningen kan de huidige meetopstelling niet gebruikt worden, maar de methode leent zich wel voor verdere ontwikkeling. Hiervoor dient de invloed van de plaats van de meting nader onderzocht te worden. Bijvoorbeeld door op twee plaatsen een ra-meter te monteren.

Naar aanleiding van metingen op locatie A en op locatie B kunnen de volgende conclusies ten aanzien van het laadproces worden getrokken:

- Bij het baggeren van zand op locatie A en op locatie B stijgen de overloopverliezen pas bij een beladingsgraad van ca. 80% sterk.
- De beladingssnelheid bij het zuigen van zand op locatie A en op locatie B verschilt sterk van reis tot reis. Verschillen van 25% in de beladingssnelheid zijn geconstateerd.
- Weersomstandigheden hebben grote invloed op de verliezen. Bij het baggeren van zand op locatie A en op locatie B nam de laadtijd onder ruwe omstandigheden met 30% toe en daalde de beladingssnelheid met 20% ten opzichte van rustige omstandigheden.
- Het is, met name bij hoge beladingsgraden, ongunstig om het overvloeiniveau in grote stappen te verlagen, omdat de uitgaande dichtheid hierdoor korte tijd toeneemt.
- Het verlagen van het debiet, ook in de eindfase, leidt tot lagere verliezen en in het geval van het zuigen van zand op locatie A en op locatie B tot een lagere beladingssnelheid.

Uit de metingen blijkt dat de verliezen en de beladingssnelheid sterk kunnen wisselen per reis als gevolg van bijvoorbeeld weersomstandigheden of andere omstandigheden die moeilijk in een model zijn weer te geven. Dit onderstreept nog maals de noodzaak van praktijkmetingen.

Door het overvloeiniveau bij maximaal displacement in kleine stappen te verlagen wordt de stroming in het beun niet onnodig verstoord. In vergelijking met het in grote stappen verlagen van het overvloeiniveau is de verhoging van de uitgaande dichtheid minder. Mogelijk dat het verlagen van het overvloeiniveau bij maximaal displacement ook te automatiseren is.

Symbolenlijst

$a_{1,2}$	=	correctiefactoren signaal concentratiemeter in zuigbuizen	[-]
$a_{3,4}$	=	correctiefactoren signaal snelheidsmeter in zuigbuizen	[-]
A	=	doorstroomoppervlak van zuigbuis	[m ²]
$b_{1,2}$	=	correctiefactoren signaal concentratiemeters in zuigbuizen	[kg/m ³]
$b_{3,4}$	=	correctiefactoren signaal snelheidsmeters in zuigbuizen	[kg/m ³]
B	=	breedte van het beun	[m]
bg	=	beladingsgraad	[%]
c_{in}	=	ingående volumeconcentratie	[-]
c_{uit}	=	uitgaande volumeconcentratie	[-]
c_v	=	volume concentratie	[-]
C	=	coëfficiënt van Chezy	[m ^{1/2} /s]
C_D	=	weerstandscoefficiënt	[-]
dt	=	dumptijd	[s]
D	=	korreldiameter	[m]
D_a	=	diepgang ter plaatse van achterste druksensor	[m]
D_{al}	=	diepgang ter plaatse van achterloodlijn	[m]
D_{gem}	=	gemiddelde diepgang	[m]
D_v	=	diepgang ter plaatse van voorste druksensor	[m]
D_{vl}	=	diepgang ter plaatse van voorloodlijn	[m]
g	=	zwaartekracht	[m/s ²]
h	=	hoogte waterlaag boven bezonken zand in beun	[m]
h_1	=	vleihogte	[m]
L	=	lengte van het beun	[m]
M_{in}	=	ingående massastroom	[kg]
M_{uit}	=	uitgaande massastroom	[kg]
N_a	=	afstand van achterste niveaumeter tot vloeistofspiegel	[m]
N_{ab}	=	afstand van referentieniveau tot aan vloeistofspiegel achterzijde beun	[m]
N_{gem}	=	gemiddelde afstand van referentieniveau tot aan vloeistofspiegel	[m]
N_v	=	afstand van voorste niveaumeter tot vloeistofspiegel	[m]
N_{vb}	=	afstand van referentieniveau tot aan vloeistofspiegel voorzijde beun	[m]
ov_{cum}	=	cumulatief relatief overloopverlies	[%]
ov_{mom}	=	momentaan relatief overloopverlies	[%]
P_a	=	druksensoren achter	[-]
P_v	=	druksensoren voor	[-]
Q_{in}	=	ingaaend debiet	[m ³ /s]
Q_{uit}	=	uitgaand debiet	[m ³ /s]
Re	=	getal van Reynolds	[-]
$Re.$	=	getal van Reynolds voor stroming in grenslaag	[-]
t_h	=	verblijftijd in beun	[s]
T	=	tijdsduur gehele laadproces	[s]
u_{bb}	=	mengselsnelheid in bakboord zuigbuis	[m/s]
u_h	=	horizontale stroomsnelheid in beun	[m/s]
\bar{u}_{in}	=	gemiddelde mengselsnelheid in zuigbuis (tijdens calibratie)	[m/s]
u_{in}	=	mengselsnelheid in zuigbuis	[m/s]
u_{sb}	=	mengselsnelheid in stuurboord zuigbuis	[m/s]
u_0	=	gemiddelde snelheid in doorsnede	[m/s]
$u.$	=	schuifspanningssnelheid	[m/s]
v_{tl}	=	vaartijd leeg	[s]
v_{tv}	=	vaartijd vol	[s]

V	=	beunvolume	[m ³]
V_{in}	=	ingaaende volumestroom	[m ³]
V_{situ}	=	volume grond in beun indien alle deeltjes bezinken	[m ³]
V_t	=	beunvolume op tijdstip t	[m ³]
$V_{t+\Delta t}$	=	beunvolume op tijdstip $t + \Delta t$	[m ³]
V_{uit}	=	uitgaande volumestroom	[m ³]
V_z	=	volume zand in beun	[m ³]
w	=	ongestoorde valsnelheid	[m/s]
w_s	=	gereduceerde valsnelheid	[m/s]
W	=	deplacement	[kg]
W_{do}	=	deplacement bij geopende bodemdeuren	[kg]
W_l	=	deplacement leeg schip	[kg]
W_m	=	maximaal deplacement	[kg]
W_{ov}	=	deplacement bij begin overlopen	[kg]
W_s	=	deplacement na aflopen schil	[kg]
W_t	=	deplacement op tijdstip t	[kg]
$W_{t+\Delta t}$	=	deplacement op tijdstip $t + \Delta t$	[kg]
W_w	=	maximaal deplacement bij alleen laden van water	[kg]
z_t	=	zuigtijd	[s]

Grieks schrift:

β	=	vormfactor korrels (± 0.7 voor zand)	[-]
γ	=	experimenteel vastgestelde reductiefactor voor 'hindered settling'	[-]
Δ	=	relatief dichtheidsverschil $(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$	[-]
Δt	=	tijdstap	[s]
ΔV	=	verandering beunvolume	[m ³]
ΔW	=	verandering deplacement	[kg]
θ	=	Shieldsparemeter	[-]
ν	=	kinematische viscositeit	[m ² /s]
ρ_b	=	gemiddelde dichtheid van in het beun aanwezig lading	[kg/m ³]
ρ_{in}	=	ingaaende dichtheid	[kg/m ³]
$\rho_{in,ind}$	=	ingaaende dichtheid bepaald m.b.v. ra-meter aan koker	[kg/m ³]
ρ_{bb}	=	mengseldichtheid in bakboord zuigbuis	[kg/m ³]
ρ_{sb}	=	mengseldichtheid in stuurboord zuigbuis	[kg/m ³]
ρ_{situ}	=	dichtheid in beun bezonken zand (1900-2000kg/m ³)	[kg/m ³]
ρ_s	=	specifieke dichtheid zand ≈ 2650 kg/m ³	[kg/m ³]
ρ_{uit}	=	uitgaand mengseldichtheid	[kg/m ³]
ρ_w	=	dichtheid zeewater ≈ 1020 kg/m ³	[kg/m ³]
τ_b	=	bodemschuifspanning	[N/m ²]

BegrippenlijstBeladingssnelheid:

Toename van het aantal tonnen droge stof in het beun per minuut.

Beladingsgraad:

Verhouding tussen totale volume grond in het beun en de beuninhoud.

Beunvolume:

Volume van de in het beun aanwezige lading.

Beuninhoud:

Volume van het beun, na aflopen waterschil.

Bezinktijd:

Tijd die een zandkorrel heeft om vanaf de vloeistofspiegel de bovenkant van het zandbed te bereiken.

Carènediagram:

Diagram waarin de waterverplaatsing als functie van de diepgang is gegeven.

Cumulatief overloopverlies:

Totale hoeveelheid vaste stof die het beun verlaat gedurende de totale zuigtijd.

Cumulatief relatief overloopverlies:

Verhouding tussen de totale hoeveelheid vaste stof die het beun verlaat en de ingebrachte hoeveelheid vaste stof gedurende de totale zuigtijd.

Cumulatief relatief overloopverlies na overvloeien:

Verhouding tussen de totale hoeveelheid vaste stof die het beun verlaat en de ingebrachte hoeveelheid vaste stof vanaf het moment van overvloeien tot aan einde zuigen.

Displacement:

Massa van het door het schip verplaatste water (waterverplaatsing $\cdot \rho_w$).

Momenteaan overloopverlies:

De hoeveelheid vaste stof die het beun verlaat op een bepaald tijdstip.

Momenteaan relatief overloopverlies:

Verhouding tussen de hoeveelheid vaste stof die het beun verlaat en de ingebrachte hoeveelheid vaste stof op een bepaald tijdstip.

Overvloeilengte:

Omtrek van de rand van de overvloekoker.

Ra-meter:

Radioactieve concentratiemeter.

TDS-systeem:

Tonnen Droge Stof systeem.

Vleihoogte:

Hoogte van de waterschil boven het niveau van de rand van de overvloekoker tijdens zuigen (bijlage 11). Zodra gestopt wordt met zuigen daalt de vleihoogte tot nul.

Waterverplaatsing:

Volume van het door het schip verplaatste water.

Productie

Volume van de ingebrachte hoeveelheid grond op een bepaald tijdstip.

Voorwoord	i
Samenvatting	iii
Symbolenlijst	vii
Begrippenlijst	ix
1. INLEIDING	1
2. PROJECTOMSCHRIJVING	3
2.1 Achtergronden en probleembeschrijving	3
2.2 Doelstellingen	3
2.3 Aanpak	3
3. ALGEMENE BESCHRIJVING VAN HET LAADPROCES	5
4. INVLOEDSFACTOREN OP HET LAADPROCES	9
4.1 Inleiding	9
4.2 Materiaaleigenschappen	9
4.3 Laadomstandigheden	12
4.4 Hoppergeometrie	15
4.5 Conclusies	17
5. ONDERZOEK, SELECTIE EN UITWERKING VAN METHODEN OM UITGAANDE DICHTHEID TE BEPALEN	19
5.1 Inleiding	19
5.2 Bepaling ingaande debiet, ingaande dichtheid en uitgaande debiet	19
5.3 Inventarisatie directe meetmethoden	21
5.4 Selectie directe meetmethoden	24
5.5 Uitwerking geselecteerde directe methoden	25
5.5.1 Plaats van meetopstelling	25
5.5.2 Uitwerking radioactieve methode	26
5.5.3 Uitwerking mechanische methode	28
5.5.4 Uitwerking monstername	30
5.6 Uitwerking indirecte methode	31
5.6.1 Inleiding	31
5.6.2 Beschrijving van Tonnen Droge Stof Systeem	32
5.6.3 Calibratie snelheidsmeter en concentratiemeter in zuigbuis	33
6. FOUTENANALYSE BEPALING UITGAANDE DICHTHEID	37
6.1 Inleiding	37
6.2 Foutenanalyse radioactieve concentratiemeter	37
6.3 Foutenanalyse 'stemvork'	38

6.4	Foutenanalyse monstername	39
6.5	Foutenanalyse indirecte methode	40
6.5.1	Inleiding	40
6.5.2	Foutenbronnen bij bepaling beunvolume	41
6.5.3	Foutenbronnen bij bepaling displacement	43
6.5.4	Foutenbronnen bij bepaling gezogen mengsel-dichtheid	46
6.5.5	Foutenbronnen bij bepaling gezogen mengsel-snelheid	47
7.	GEVOELIGHEIDSANALYSE INDIRECTE METHODE	51
7.1	Inleiding	51
7.2	Invloed van tijdstap en standaardafwijkingen op nauwkeurigheid	52
7.3	Bepaling van tijdstap	55
8.	METINGEN IN DE PRAKTIJK	57
8.1	Inleiding	57
8.2	Sleehopperzuiger 'X' en zuigcyclus	57
8.3	Computerprogramma OVERFLOW	57
8.4	Calibratie meetinstrumenten in zuigbuizen	58
8.5	Interpretatie van de verschillende signalen	64
8.5.1	Algemeen	64
8.5.2	Interpretatie signalen radioactieve concentratiemeter	65
8.5.3	Interpretatie signalen 'stenvork'	66
8.5.4	Interpretatie resultaten monsterbus	67
8.5.5	Interpretatie resultaten van indirecte methode	68
8.6	Resultaten	70
8.6.1	Algemeen	70
8.6.2	Overzicht	72
8.6.3	Beschrijving van laadproces	76
8.6.4	Invloed debiet	78
8.6.5	Invloed stand overvloeikoker	79
8.6.6	Invloed weersomstandigheden	82
8.6.7	Concentratieverticaal op overvloeirand	83
9.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN T.A.V MEETMETHODEN	85
9.1	Conclusies	85
9.1.1	Algemeen	85
9.1.2	Radioactieve concentratiemeter	85
9.1.3	'Stenvork'	86
9.1.4	Monstername	86
9.1.5	Indirecte methode	87
9.1.6	Vergelijking indirecte methode en radioactieve methode	88
9.2	Aanbevelingen	89
9.2.1	Algemeen	89
9.2.3	Indirecte methode	90

9.2.4	Radioactieve methode	91
10.	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN T.A.V. LAADPROCES	93
10.1	Conclusies	93
10.2	Aanbevelingen	94
	Literatuurlijst	95
Bijlage 1:	Calibratie ra-meter aan overvloeikoker en 'Hydraplane'	97
Bijlage 2:	Foutenbronnen indirecte methode	105
Bijlage 3:	Sleephopperzuiger 'X'	119
Bijlage 4:	Computerprogramma 'OVERFLOW'	121
Bijlage 5:	Calibratiegrafieken	123
Bijlage 6:	Verloop meetsignalen in de tijd + controle signaal ra-meter	125
Bijlage 7:	Korrelverdelingen	127
Bijlage 8:	Overzichtsgrafieken meting	131
Bijlage 9:	Uitgaande dichtheid als functie van de dikte van de waterschil	139
Bijlage 10:	Behandeling overvloeikoker	141
Bijlage 11:	Differentiaalvergelijking voor uitgaande dichtheid	143

1. INLEIDING

De sleephopperzuiger is een baggerwerktuig met een breed werkgebied. Zo wordt dit werktuig gebruikt voor het op diepte houden van vaarwegen, maar ook ten behoeven van zandwinning voor bijvoorbeeld strandsuppletie.

In het winvak aangekomen vermindert de sleephopperzuiger snelheid, laat één of twee zuigbuizen tot aan de bodem zakken en start met het zuigen van de specie. De specie wordt in het beun (laadruim) gestort. Zodra het mengselniveau in het beun de overloop heeft bereikt stroomt het mengseldebiet via de overloop overboord.

Met het mengseldebiet zullen ook zandkorreltjes overboord verdwijnen. Het is in principe de bedoeling dat zo min mogelijk zand met het mengseldebiet overboord verdwijnt om zo snel mogelijk een zo groot mogelijke belading te krijgen.

De verhouding tussen de hoeveelheid vaste stof die met het mengseldebiet weer uit het beun verdwijnt en de hoeveelheid ingebrachte vaste stof wordt ook wel het relatief overloopverlies genoemd. Het relatief overloopverlies is een maat voor de effectiviteit waarmee het beladingsproces plaats vindt.

In dit rapport worden verschillende methoden ontwikkeld om het overloopverlies te bepalen. Vier methoden zijn in de praktijk beproefd en de resultaten daarvan zijn in dit rapport vastgelegd.

2. PROJECTOMSCHRIJVING

2.1 Achtergronden en probleembeschrijving

Bij het baggeren van zand met een sleephopperzuiger ontstaan, nadat de rand van de overloopenrichting is bereikt, overloopverliezen. De omvang van deze verliezen is van een groot aantal factoren afhankelijk. In het verleden zijn deze verliezen veelvuldig in theorie en met behulp van modelproeven bestudeerd. Het blijkt echter moeilijk om het overloopverlies aan de hand van theorie en modelproeven te voorspellen. Er bestaan verschillen tussen theorie en praktijk. Door aan boord permanent de overloopverliezen onder verschillende omstandigheden te meten kan het inzicht in de oorzaken van het overloopverlies worden vergroot en kan hiermee rekening worden gehouden in productie- en calculatieberekeningen. Daarnaast heeft de zuigbaas bij een permanente meting beter inzicht in de efficiëntie waarmee het zuigproces plaatsvindt en kan het beladingsproces geoptimaliseerd worden.

2.2 Doelstellingen

- Het ontwikkelen van verschillende methoden om het overloopverlies bij het zuigen van zand te bepalen.
- Het toepassen van deze methoden in de praktijk en het beoordelen van de bruikbaarheid van deze methoden.
- Het interpreteren van de verliezen bij het zuigen van zand als functie van de beladingsgraad en diverse laadomstandigheden.
- Het verbeteren en optimaliseren van het laad- en overloopproces met behulp van de resultaten van de meting.

2.3 Aanpak

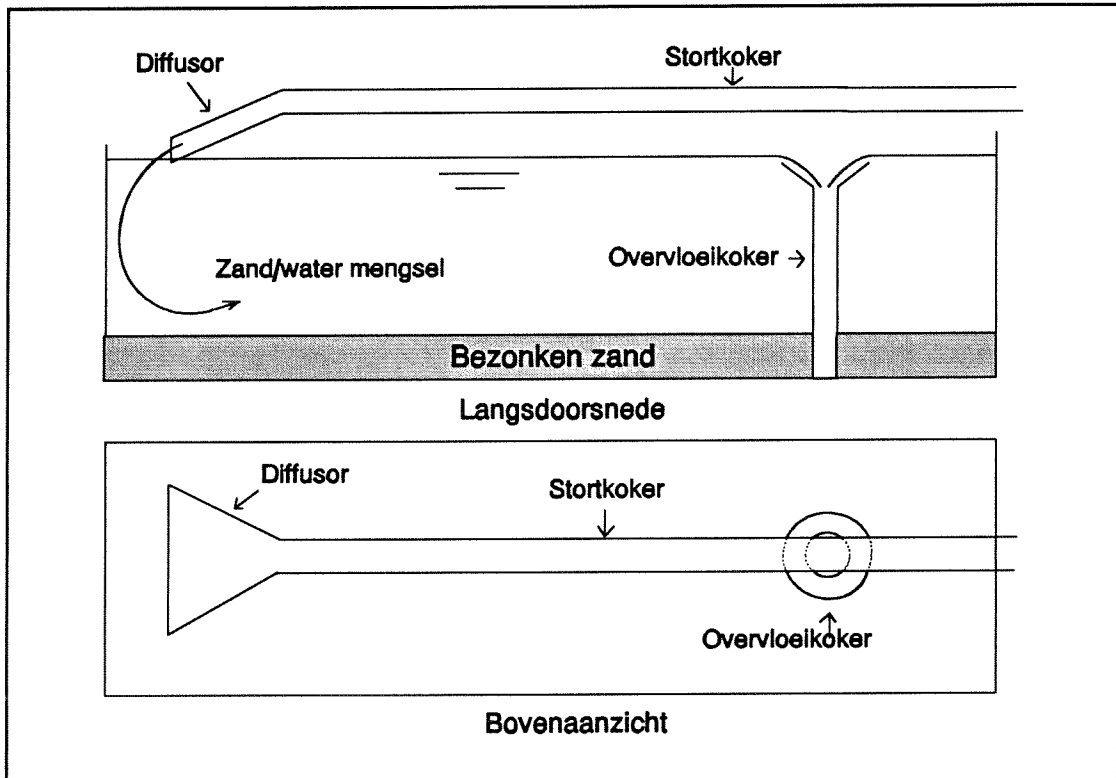
Om inzicht te krijgen in het laadproces is onderzoek gedaan naar het laadproces in het algemeen en de verschillende factoren die hier invloed op hebben. Hieruit komt naar voren welke factoren beheersbaar zijn en welke niet. Vervolgens is onderzoek gedaan naar verschillende methoden om het overloopverlies te bepalen. Vier methoden zijn ook daadwerkelijk in de praktijk toegepast aan boord van de sleephopperzuiger 'X' en getoetst op bruikbaarheid. Om inzicht te krijgen in de mogelijke foutenbronnen is voor de methoden die in de praktijk zijn beproefd een foutenanalyse gemaakt. Met behulp van de meetresultaten en de foutenanalyse zijn de methoden getoetst op toepasbaarheid. Met behulp van de meetresultaten en het onderzoek naar de verschillende invloedsfactoren, is de invloed van verschillende beladingsomstandigheden vastgesteld.

Dit rapport is als volgt ingedeeld. In hoofdstuk 3 en hoofdstuk 4 wordt verslag gedaan van het onderzoek naar de invloedsfactoren. In hoofdstuk 5 wordt de ontwikkeling van de verschillende methoden beschreven. In hoofdstuk 6 en

hoofdstuk 7 worden de foutenbronnen van de toegepaste methoden onderzocht. De resultaten van de toepassing in de praktijk worden in hoofdstuk 8 besproken. Tenslotte zijn in hoofdstuk 9 en hoofdstuk 10 de conclusies en aanbevelingen die volgen uit het onderzoek en de meting in de praktijk opgenomen.

3. ALGEMENE BESCHRIJVING VAN HET LAADPROCES

Het beladen van een sleephopperzuiger gebeurt door middel van een stortgoot die boven het beun is gemonteerd. Deze goot bestaat uit een lange koker met enkele afsluitbare stortopeningen verspreid over de lengte van het beun (laadruim). Aan het eind van de stortgoot is een diffusor gemonteerd waarmee het mengsel goed over de breedte van het beun wordt verdeeld. Zodra het mengselniveau in het laadruim de overloop heeft bereikt, stroomt het mengseldebiet overboord via de overloop. Meestal bestaat deze uit één of twee kokers die meestal in hoogte verstelbaar zijn



Figuur 3.1: Langsdoorsnede en bovenaanzicht beun (niet op schaal).

Afhankelijk van de bezinksnelheid van het mengsel wordt doorgeladen na het moment van overlopen. Tijdens de fase met overloop is het de bedoeling dat een zo groot mogelijk gedeelte van het ingebracht zand in het beun bezinkt. Het is echter onvermijdelijk dat er fracties overboord verdwijnen. Getracht wordt dit verlies zo klein mogelijk te houden. De verhouding tussen de hoeveelheid vaste stof die weer uit het beun verdwijnt en de hoeveelheid ingebrachte vaste stof wordt ook wel het relatief overloopverlies genoemd.

Het relatief overloopverlies is een maat voor de effectiviteit waarmee het beladingsproces plaats vindt.

$$ov_{cum} = \frac{\int_0^T Q_{uit} * c_{uit} * dt}{\int_0^T Q_{in} * c_{in} * dt} * 100\% \quad (1)$$

met:

ov_{cum}	=	cumulatief relatief overloopverlies	[%]
Q_{in}, Q_{uit}	=	inkomend, uitgaand debiet	[m ³ /s]
c_{in}, c_{uit}	=	inkomend, uitgaande volumeconcentratie	[-]

$$ov_{mom} = \frac{Q_{uit}(t) * c_{uit}(t)}{Q_{in}(t) * c_{in}(t)} * 100\% \quad (2)$$

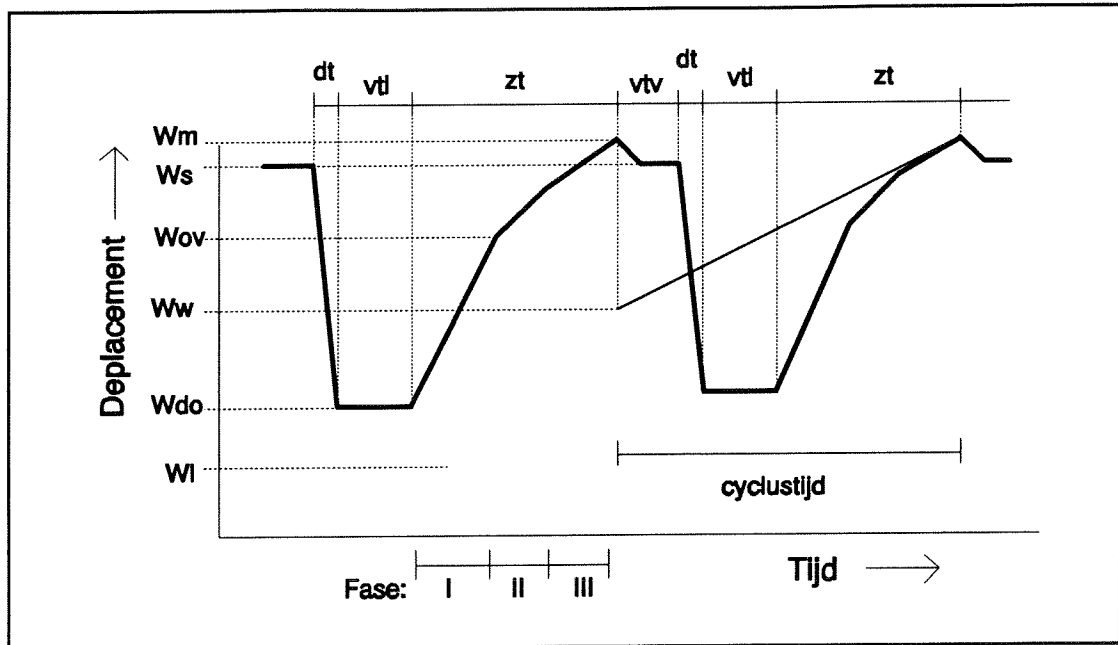
ov_{mom} = momentaan relatief overloopverlies op een bepaald tijdstip [%]

Tijdens de belading wordt het doorstroomoppervlak van het mengsel steeds kleiner, doordat het zandniveau stijgt. De stroomsnelheden boven het bed worden groter en naar verloop van tijd eroderen bezonken deeltjes weer, waardoor het laadproces steeds minder efficiënt wordt en het momentaan overloopverlies stijgt. Nadat gestopt is met zuigen zal de waterschil van de lading aflopen. Het beladingsproces is ook wel in te delen in de volgende fasen:

- Fase I; Het overvloeiniveau is nog niet bereikt. Er zijn nog geen overloopverliezen.
- Fase II; Het overvloeiniveau is bereikt en de overloopverliezen manifesteren zich.
- Fase III; De overloopverliezen nemen toe doordat de stroomsnelheden boven het bezonken zand te groot worden en bezonken zand weer gaat eroderen.

Bovenstaande fasen zijn goed zichtbaar in een beladingskromme, waarin het displacement (massa van het door het schip verplaatste water) of de waterverplaatsing (volume van het door het schip verplaatste water) tegen de tijd is uitgezet (figuur 3.2). Naast de tijd voor het beladen is er ook nog sprake van vaartijd (leeg en vol) en lostijd (dumpen of leegzuigen). Samen vormen zij de totale cyclustijd.

W_m	=	maximaal displacement	[kg]
W_s	=	displacement na aflopen schil	[kg]
W_{ov}	=	displacement bij begin overlopen	[kg]
W_w	=	maximaal displacement bij alleen laden van water	[kg]



Figuur 3.2: Beladingskromme [12]

W_{do}	=	deplacement bij geopende bodemdeuren	[kg]
W_l	=	deplacement leeg schip	[kg]
zt	=	zuigtijd	[s]
dt	=	dumptijd	[s]
vtl	=	vaartijd leeg	[s]
vtv	=	vaartijd vol	[s]
cyclustijd	=	vtl + zt + vtv + dt	[s]

Tevens is in de grafiek de gemiddelde gradiënt van het getransporteerde tonnage bezonken grond weergegeven. De maximaal haalbare gemiddelde gradiënt kan geconstrueerd worden als een raaklijn aan het gekromde gedeelte van de beladingskromme in de doorlaadfase met overloop. De raaklijn begint vanaf het deplacement dat hoort bij een volledig met water gevuld beun. De raaklijn begint niet lager, omdat de gradiënt betrekking moet hebben op de getransporteerde hoeveelheid grond en niet de hoeveelheid water. De optimale cyclusproductie wordt bereikt door te stoppen met beladen in het raakpunt van de gradiënt en de beladingskromme.

De totale cyclustijd heeft dus een grote invloed op de ligging van het raakpunt. Bij grote vaarafstanden met lange cyclustijd heeft het dus zin om langer door te laden.



4. INVLOEDSFACTOREN OP HET LAADPROCES

4.1 Inleiding

Het bezinkingsproces wordt beïnvloed door verschillende factoren. Deze factoren zijn als volgt onder te verdelen:

- materiaaleigenschappen, paragraaf 4.2
- laadomstandigheden, paragraaf 4.3
- hoppergeometrie, paragraaf 4.4

In paragraaf 4.5 worden enkele conclusies getrokken m.b.t. mogelijke beheersing van de verschillende invloedsfactoren en welke overwegingen daarbij een rol spelen.

4.2 Materiaaleigenschappen

Er wordt onderscheid gemaakt in twee verschillende materiaal eigenschappen: de valsnelheid van een korreltje en de korrelverdeling van het zand.

Valsnelheid van een korreltje

De valsnelheid van een korrel wordt beïnvloed door de korreldiameter (D), vorm (β) en specifieke dichtheid (ρ_s) en de kinematische viscositeit (ν) van de vloeistof.

De bezinksnelheid neemt af bij kleine korreldiameter, waardoor met name de kleinere korrelfracties van het mengsel het schip via de overloop verlaten. Uit het krachtenevenwicht tussen de gravitatiekracht, de opwaartsekracht en de weerstandskracht kan de volgende vergelijking worden afgeleid [2].

$$w = \beta \sqrt{\frac{4\Delta g D}{3C_D}} \quad (3)$$

Het getal Reynolds bepaalt of het bezinkingsproces laminair of turbulent is. Het Reynoldsgetal kan bepaald worden met de volgende vergelijking [2]

$$Re = \frac{wD}{\nu} \quad (4)$$

De weerstandscoefficiënt C_D is afhankelijk van het stromingstype rond het zandkorreltje en dus van het getal van Reynolds. Er wordt onderscheid gemaakt in drie gebieden [9].

Re < 1; Laminaire stroming

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (5)$$

1 < Re < 2000; Overgangsgebied

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad (6)$$

Re > 2000; Turbulente stroming

$$C_D = 0.4 \quad (7)$$

Stokes, Budryck en Rittinger gebruikten deze weerstandscoefficiënten om de valsnelheden van zandkorreltjes te berekenen in het geval van laminaire stroming (Stokes), een overgangsgebied (Budryck) en turbulente stroming (Rittinger) [9].

Laminaire stroming, $D < 0.1 \text{ mm}$, gebied van Stokes:

$$w = 424(\rho_s - \rho_w)D^2 \quad (8)$$

Overgangszone, $0.1 \text{ mm} < D < 1 \text{ mm}$, volgens Budryck:

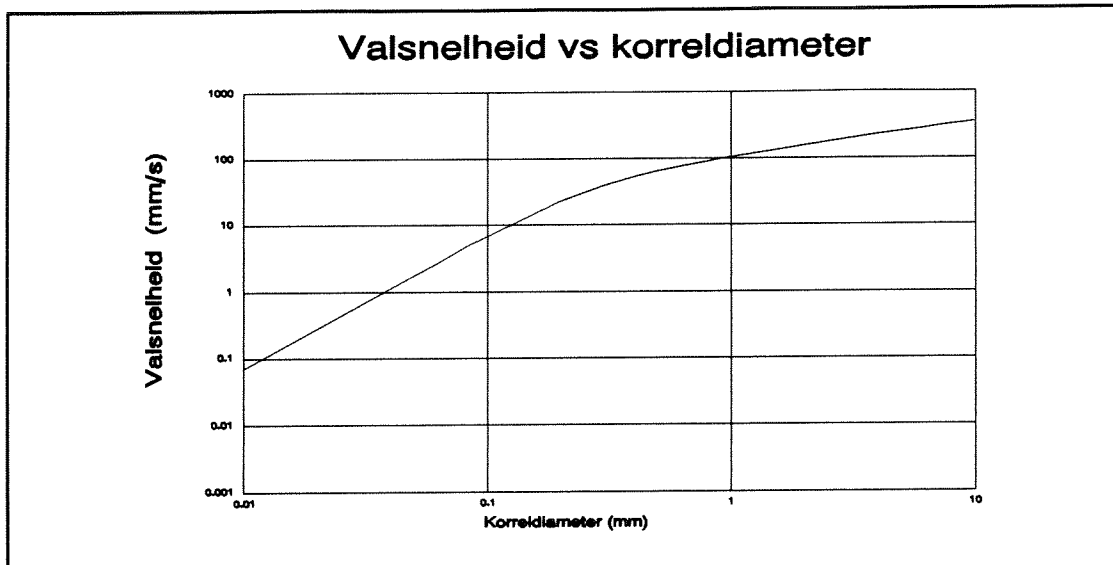
$$w = \frac{8.925}{D} (\sqrt{1 - 95(\rho_s - \rho_w)D^3} - 1) \quad (9)$$

Turbulente stroming, $D > 1 \text{ mm}$, volgens Rittinger:

$$w = 87\sqrt{(\rho_s - \rho_w)D} \quad (10)$$

Het getal van Reynolds is afhankelijk van de kinematische viscositeit ν . De kinematische viscositeit is afhankelijk van de temperatuur. Bij dalende temperatuur stijgt de kinematische viscositeit. De kinematische viscositeit neemt met 27% toe als de vloeistoftemperatuur daalt van 10°C naar 0° en daalt 30% als de vloeistoftemperatuur stijgt van 10°C naar 20° . Dus in het geval van laminaire stroming is de valsnelheid afhankelijk van de viscositeit. Dit is niet het geval voor turbulente stroming, omdat de weerstandscoefficiënt dan onafhankelijk is van het getal van Reynolds.

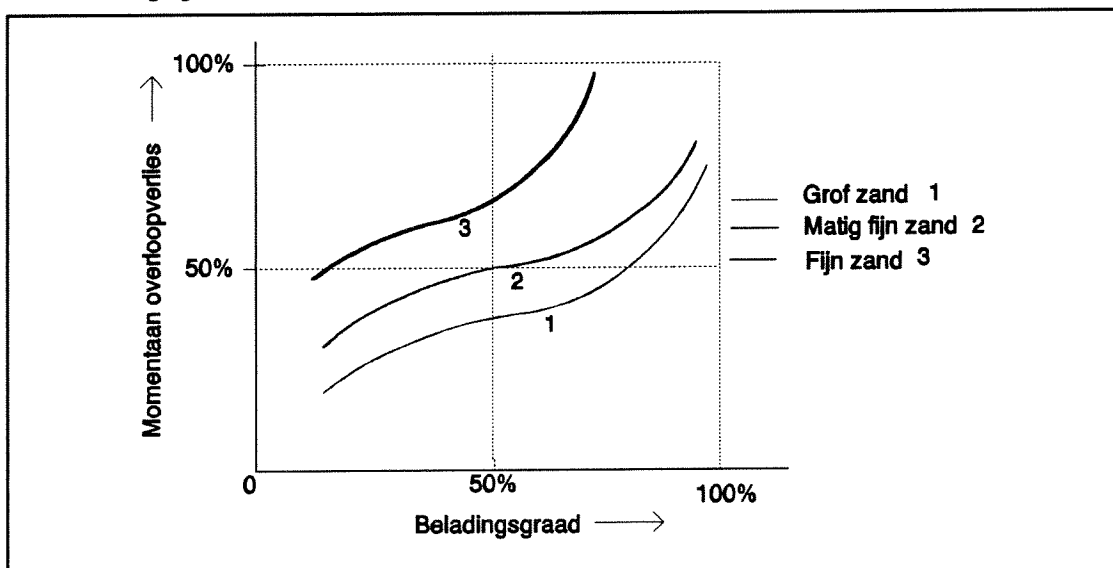
In figuur 4.2. zijn deze 3 gebieden weergegeven bij een temperatuur van 20°C en $\nu = 1.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.



Figuur 4.1: Valsnelheid in water ($t=20^{\circ}\text{C}$) als functie van de nominale korreldiameter voor kwartskorrels [13].

Korrelverdeling

De korrelverdeling heeft grote invloed op het beladingsproces, omdat de korrelverdeling het overloopverlies en de te behalen beladingsgraad sterk beïnvloed. De beladingsgraad is de verhouding tussen het volume zand in het beun en de totale beuninhoud. Grof zand heeft een korrelverdeling met een hoge fractie grote korreldiameters, waardoor grof zand makkelijker zal bezinken en een hogere beladingsgraad kan worden behaald. Fijn zand heeft een korrelverdeling met een hoge fractie kleine korreldiameters, waardoor de bezinktijd langer is en de overloopverliezen hoger zijn. In figuur 4.2. is voor drie verschillende korrelverdelingen kwalitatief het overloopverlies tegen de beladingsgraad uitgezet. In het geval fijn zand kan het overloopverlies al zijn toegenomen tot 100% voordat de beladingsgraad de 100% benadert.



Figuur 4.2: Invloed korrelverdeling op overloopverlies en beladingsgraad [5]

Een hoog slibgehalte zorgt voor een extra ongunstige situatie. Niet alleen bezinken de slibdeeltjes nauwelijks, maar een hoog percentage slibdeeltjes zorgt ook voor een verhoging van de viscositeit van de drager vloeistof, waardoor de bezinksnelheid van andere deeltjes ook lager zal zijn. Een hoog slibgehalte is dus ongunstig voor het beladingsproces.

4.3 Laadomstandigheden

In deze paragraaf worden de invloeden van mengseldebiet, concentratie, hoeveelheid ingebrachte energie, beladingsgraad en hoeveelheid ingeslagen lucht op de overloopverliezen besproken.

Mengseldebiet

Zodra het mengseldebiet toeneemt zal de verblijftijd van het water in het beun afnemen waardoor de deeltjes in suspensie minder lang de tijd hebben om te bezinken. Bovendien zorgt een hoger debiet voor een hogere stroomsnelheid over het reeds bezonken zand, waardoor de transportcapaciteit van het mengsel groter wordt en er eerder erosie plaatsvindt van het reeds bezonken zand. De overloopverliezen zullen hierdoor toenemen. Daarnaast is de stroming in het beun bij toenemend debiet steeds turbulenter waardoor de bezinking minder effectief wordt.

Het moment waarop een korreltje meegesleept zal worden door de stroming is afhankelijk van [11]:

- korrelvorm (β), korreldiameter (D) en soortelijk gewicht (ρ_s)
- dichtheid (ρ_w) en viscositeit van het water (ν)
- bodemschuifspanning (τ_b)

Via de bodemschuifspanning wordt het bodemsediment meegesleept. Op een vlak bed zijn de sleepkracht en de liftkracht in het grensvlak beide van de orde $\tau_b D^2$. de korrel ontleend stabiliteit aan zijn gewicht onder water. Het gewicht van een korrel; onder water is evenredig met $(\rho_s - \rho_w)gD^3$. De verhouding tussen beide is een maat voor de mobiliteit van het sediment, de zogenaamde Shieldsparameter (ψ):

$$\theta = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho_w)gD} \quad (11)$$

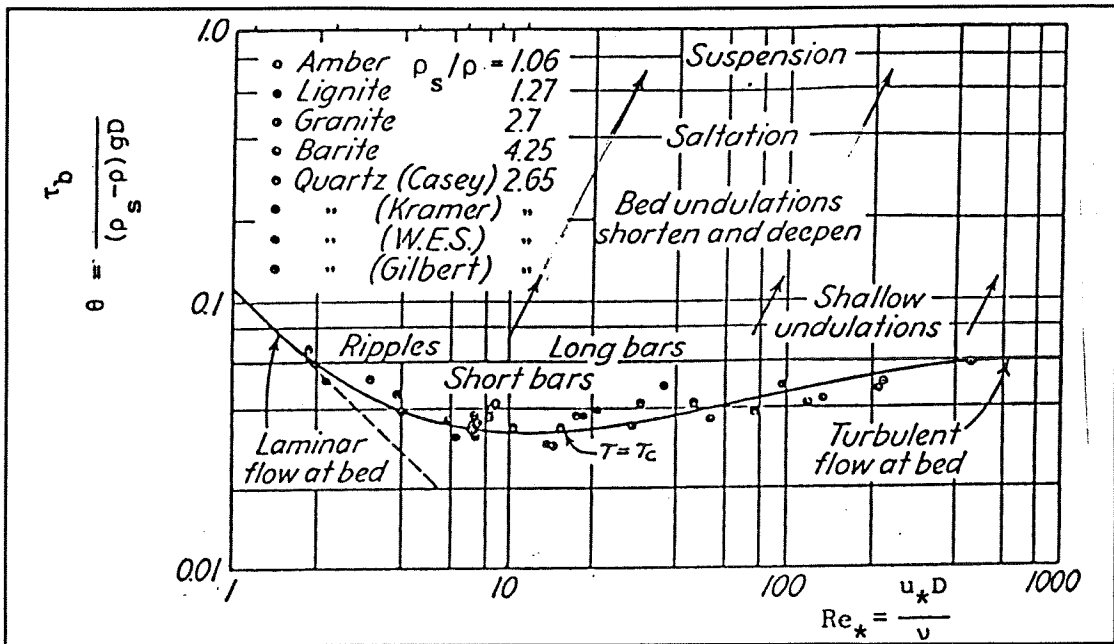
Een andere belangrijke onafhankelijke variabele is het getal van Reynolds voor stroming rond een korrel in de grenslaag.

$$Re_* = \frac{u_* D}{\nu} \quad (12)$$

met:

$$u_* = u_0 \frac{\sqrt{g}}{C} \tag{13}$$

Deze twee variabelen zijn uitgezet in het Shieldsdiagram.



Figuur 4.3: Shields diagram [3].

Concentratie

De concentratie kan de bezinksnelheid beïnvloeden via het effect van 'hindered settling'. In een suspensie, waarin een groot aantal deeltjes gelijkmatig verdeeld aanwezig zijn, is de valsnelheid kleiner naarmate de volumeconcentratie groter is. Dit wordt veroorzaakt doordat voor elk deeltje dat naar beneden beweegt er een pakketje water naar boven moet bewegen. Bij hoge concentraties is de afstand tussen deeltjes klein en neemt de snelheid van de omhooggerichte mengselstroom toe.

Door middel van experimenteel onderzoek zijn reductiefactoren bepaald voor de valsnelheid (w). Een veel gebruikte formule voor de gereduceerde valsnelheid (w_s) is de formule van Richardson en Zake [12]:

$$\frac{w_s}{w} = (1 - c_v)^{\gamma} \tag{14}$$

Met de volgende waarden voor voor de reductiefactor γ :

Re kleiner dan 0.2:	$\gamma = 4.65$
Re > 0.2 en Re < 1.0:	$\gamma = 4.35Re^{-0.03}$
Re > 1.0 en Re < 200:	$\gamma = 4.45Re^{-0.1}$
Re > 200:	$\gamma = 2.39$

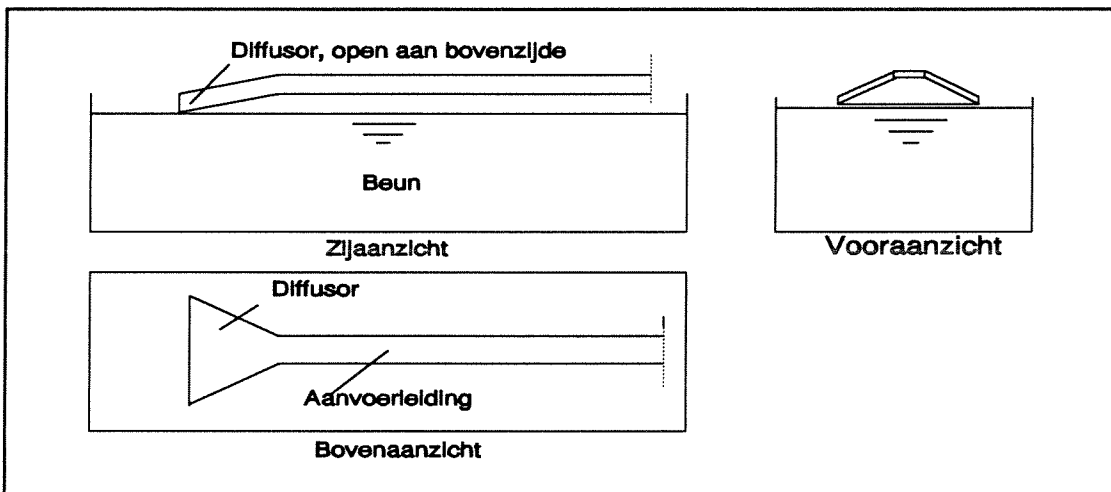
Hoeveelheid ingebrachte energie

Doordat het mengsel met een relatief hoge snelheid in het beun wordt gebracht, is de mate van turbulentie hoog waardoor turbulente diffusie optreedt en wervelingen ontstaan. Als gevolg hiervan kunnen de overloopverliezen toenemen.

De turbulentiegraad kan zo laag mogelijk worden gehouden door minimalisatie van ingebrachte energie en het zo snel mogelijk dissiperen hiervan.

De hoeveelheid ingebrachte energie wordt beperkt door de valhoogte (afstand stortkoker tot wateroppervlak) klein te houden en de snelheid waarmee het mengsel in de het beun beland zo laag mogelijk te houden door gebruik van een diffusor (figuur 4.4).

Om de energie zo snel mogelijk te dissiperen wordt het mengsel ook wel vertraagd door middel van een ketting- of staafgordijn.



Figuur 4.4: Open diffusor.

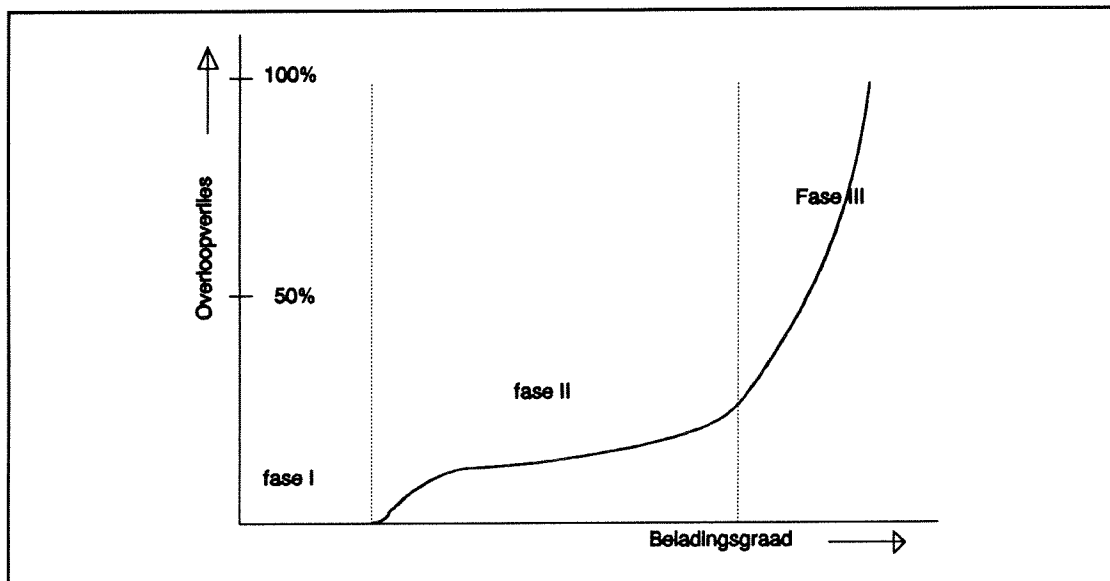
Beladingsgraad

De beladingsgraad (bg) is als volgt gedefinieerd:

$$bg = \frac{V_{situ}}{V} = \frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_{situ} - \rho_w} * 100\% \quad (15)$$

Bij toename van de beladingsgraad neemt de stroomsnelheid boven het zandoppervlak toe. Op den duur is de stroomsnelheid zo groot dat reeds bezonken korrels weer worden opgenomen. Alleen de fractie van de korrelverdeling met een grotere diameter dan voor een bepaalde uitschuringssnelheid geldt, kan dan nog

blijven liggen. Naarmate de stroomsnelheid toeneemt zal een steeds groter gedeelte van de korrelverdeling uitschuren waardoor overloopverliezen snel toenemen. De overloopverliezen nemen dus toe bij toenemende beladingsgraad. In figuur 4.5 is schetsmatig de ontwikkeling van de overloopverliezen afgebeeld bij toenemende beladingsgraad.



Figuur 4.5: Overloopverlies als functie van de beladingsgraad.

- Fase I: Het overvloeiniveau is nog niet bereikt
- Fase II: De vleihoogte ontwikkelt zich en de eerste overloopverliezen treden op. Vervolgens neemt het overloopverlies langzaam toe .
- Fase III: Het overloopverlies neemt snel toe doordat het zandniveau in het beun zover gestegen is dat de transportcapaciteit van het mengsel bijna gelijk is aan de ingebrachte hoeveelheid sediment.

Hoeveelheid ingeslagen lucht

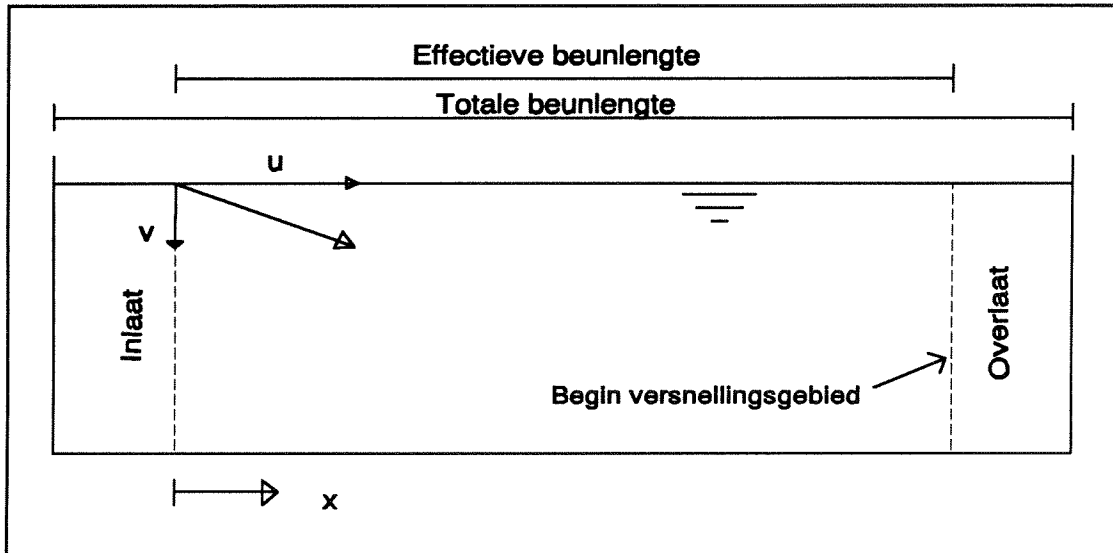
Ook de hoeveelheid ingeslagen lucht bepaald de bezinksnelheid doordat de fijne luchtbelletjes zich kunnen hechten aan de korrel. De lucht wordt door de diffusor ingebracht doordat bij bepaalde systeem het mengsel het beun in plonst en zo lucht insluit.

4.4 Hoppergeometrie

De overloopverliezen worden ook beïnvloed door de beunvorm, het type beladingsstelsel en het type overvloeijsysteem. In deze paragraaf worden deze drie invloedsfactoren besproken.

Beunvorm

Een grote invloedsfactor op het bezinkproces is de effectieve beunlengte (figuur 4.6) en het beschikbare beunoppervlak [12]. De effectieve beunlengte is de lengte waarover het sediment de gelegenheid heeft om te bezinken. Deze lengte loopt vanaf het gebied waar het mengsel goed is verdeeld tot aan het begin van het versnellingsgebied bij het overvloeisysteem.



Figuur 4.6: Effectieve beunlengte (zij-aanzicht beun).

Vergroting van het beunoppervlak en verlenging van de effectieve beunlengte heeft in het algemeen een positieve invloed op de overloopverliezen. Van belang is een gelijkmatige doorstroming zonder dat er dode hoeken overblijven. Stroomversnellingen ten gevolge van vernauwingen of obstakels moeten vermeden worden om extra erosie en het ontstaan van wervels te voorkomen.

Beladingssysteem

Het beladingssysteem moet er voor zorgen dat het mengsel rustig en gelijkmatig verspreid in het beun terecht komt. Het mengsel moet met zo min mogelijk energie in het beun terecht komen en er moeten zo min mogelijk luchtbelletjes worden ingeslagen. Er worden in de praktijk een aantal verschillende beladingssystemen toegepast, zoals de diffusor, het dieplaadstelsel, de 'sproeier' en het woelkamersysteem.

In deze paragraaf is alleen de open diffusor opgenomen omdat dit systeem ook aanwezig is aan boord van de 'X', het schip waarop de metingen worden uitgevoerd. De open diffusor is één van de meest gebruikte systemen. In figuur 4.4 is een open diffusor afgebeeld.

De diffusor verspreidt het mengsel over de breedte van het beun en vermindert de ingebrachte energie

De open diffusor is boven het wateroppervlak geplaatst. De straal wordt alleen in breedte richting gespreid, zonder dat de stroomsnelheid afneemt. Het mengsel plonst in het beun en er worden luchtballen ingeslagen.

Overvloeisysteem

Er zijn verschillende overvloeisystemen te onderscheiden. Hier wordt slechts de overvloeikoker vermeld, omdat deze ook aan boord van de 'X' wordt gebruikt.

Het overvloeien vindt nu plaats door een koker in het midden van het beun. Er kunnen bij dit systeem verticale wervels optreden, waardoor ontgrondingskuilen ontstaan.

Daarnaast wordt er nog onderscheid gemaakt tussen het Constant Tonnage System en het Constant Volume System. Indien geladen wordt met het Constant Tonnage System [8] wordt bij maximaal displacement de beuninhoud verkleind wordt door de overvloeikoker naar beneden te drukken. Op deze manier wordt voorkomen dat het maximaal displacement wordt overschreden. Het schip waarop de metingen worden uitgevoerd, de 'X', wordt met dit systeem beladen.

Indien geladen wordt met het Constant Volume System blijft het volume constant. De overvloeikoker wordt dan niet in hoogte versteld.

4.5 Conclusies

Het bezinkproces wordt beïnvloed door een groot aantal invloedsfactoren. Deze factoren kunnen ingedeeld worden in twee groepen, namelijk een groep die niet beheerst kan worden en een groep die wel beheerst kan worden.

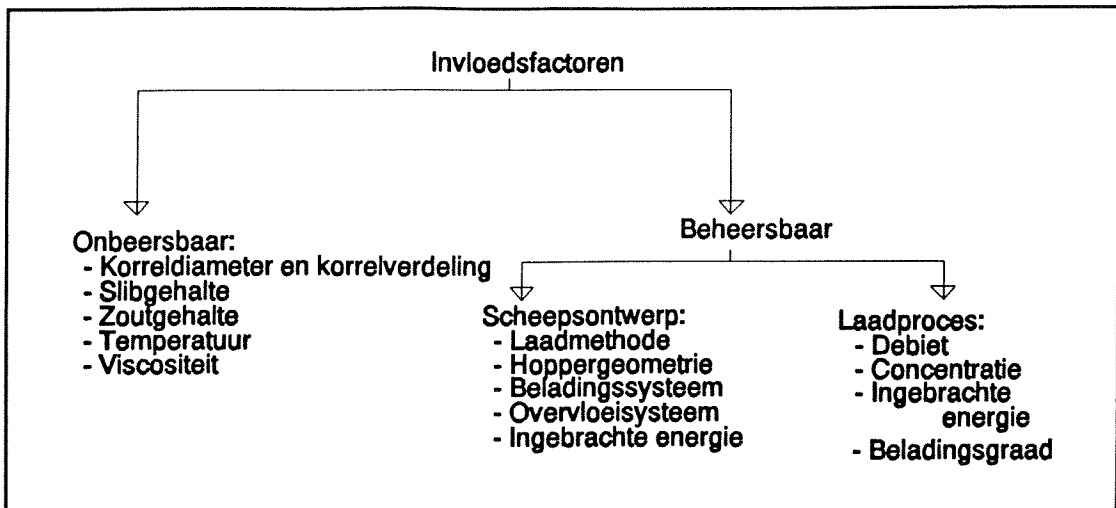
Tot de groep invloedsfactoren die niet beïnvloed kunnen worden behoren korreldiameter, korrelverdeling, temperatuur, viscositeit, slibgehalte, zoutgehalte en temperatuur.

Tot de groep invloedsfactoren die wel beheerst kunnen worden behoren debiet, concentratie (in beperkte mate), hoeveelheid ingebrachte energie, beladingsgraad, hoppergeometrie, beladingsstelsel en overvloeisysteem. Deze laatste groep is weer onder te verdelen in factoren die afhankelijk zijn van het ontwerp van het schip en factoren die tijdens het zuigen zelf beheerst kunnen worden. De hoppergeometrie, het beladingsstelsel en het overvloeisysteem kunnen in de ontwerpfase van het schip beheerst worden en het debiet, de concentratie en de beladingsgraad kunnen tijdens het zuigen zelf beïnvloed worden. De hoeveelheid ingebrachte energie is zowel afhankelijk van het ontwerp van de laadmethode als het debiet. In figuur 4.7 is deze onderverdeling gevisualiseerd.

Al deze factoren samen bepalen hoe het sediment in het mengsel bezinkt en hoe de stroming in het beun is. Het overloopverlies is een graadmeter voor de effectiviteit van beladen. Zijn de overloopverliezen groot dan zijn de stromingscondities in het beun blijkbaar zo ongunstig dat er weinig sediment bezinkt.

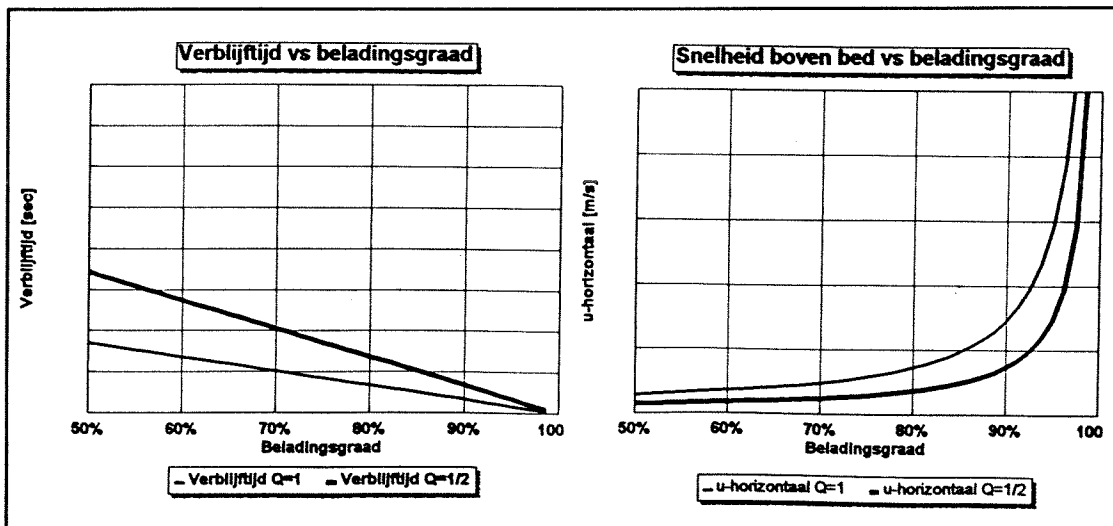
Aan boord zelf is het debiet in principe het belangrijkste middel om het proces daadwerkelijk te sturen. De concentratie is ook te beïnvloeden maar zal in het algemeen zo hoog mogelijk zijn om zo veel mogelijk zand in korte tijd het beun in te pompen.

Of het zinvol is om het debiet te verlagen hangt weer af van het zand dat wordt



Figuur 4.7: Onderverdeling van de verschillende invloedsfactoren.

gezogen. In het algemeen kan het in de eindfase van de belading interessant zijn om het debiet te verlagen. Tot dat moment nemen de overloopverliezen sterk toe doordat de stroomsnelheden sterk toenemen. Indien het mengsel zich goed verdeelt over de breedte en hoogte van het beun is er een verband tussen de snelheid boven het reeds bezonken zand en de beladingsgraad zoals weergegeven in figuur 4.9. Hieruit is op te maken dat vooral bij hoge beladingsgraden de stroomsnelheden, en dus ook de verliezen, sterk toenemen. In dit gebied kan voordeel behaald worden.



Figuur 4.9: Invloed verlaging debiet op verblijftijd en horizontale snelheid boven bed.

Door aan boord permanent het overloopverlies of de overvloeiende dichtheid te meten is direct inzicht te krijgen in het effect van een verlaging van het debiet. Of het ook economisch interessant is om in de eindfase het debiet te verlagen is afhankelijk van de cyclustijd. Bij lange vaartijd is het in het algemeen voordeliger om lang door te laden en hogere overloopverliezen te accepteren. Met behulp van de laadkromme en de cyclustijd is te bepalen wat de optimale laadtijd is.

5. ONDERZOEK, SELECTIE EN UITWERKING VAN METHODEN OM UITGAANDE DICHTHEID TE BEPALEN

5.1 Inleiding

Het momentaan relatief overloopverlies kan bepaald worden met vergelijking (2) Door elke variabele in deze vergelijking te meten of indirect te berekenen:

$$ov_{mom} = \frac{Q_{uit}(t) * c_{uit}(t)}{Q_{in}(t) * c_{in}(t)} * 100\% \quad (2)$$

In vergelijking (2) is de concentratie als volgt gedefinieerd:

$$c_{uit,in} = \frac{\rho_{uit,in} - \rho_w}{\rho_{situ} - \rho_w} \quad (17)$$

Om de overloopverliezen te meten moet vast worden gesteld hoeveel vaste stof er wordt toegevoerd en hoeveel vaste stof er via de overvloeikoker overboord verdwijnt. De toegevoerde hoeveelheid vaste stof wordt bepaald met behulp van de concentratiemeters en snelheidsmeters in de zuigbuizen. De hoeveelheid vaste stof die overboord verdwijnt is afhankelijk van het debiet en de concentratie. Het debiet kan bepaald worden met behulp van het toegevoerde debiet en de verandering van het beunvolume in een bepaalde tijd. In dit hoofdstuk worden verschillende methoden beschreven om de uitgaande dichtheid te bepalen. Door de dichtheid te bepalen is met vergelijking (17) de concentratie te berekenen. Hierbij moet de dichtheid van het (zee)water en het in het beun bezonken zand zo nauwkeurig mogelijk worden bepaald.

In paragraaf 5.2 wordt toegelicht hoe de toegevoerde hoeveelheid vaste stof en het uitgaande debiet wordt bepaald.

In de daarop volgende paragrafen worden de verschillende methoden om de uitgaande dichtheid te bepalen beschreven. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen directe methoden en een indirecte methode. De directe methoden meten in de overvloeikoker de dichtheid van het overvloeiende mengsel. Bij de indirecte methode wordt de dichtheid van het overvloeiende mengsel bepaald door de massa uit (M_{uit}) en het volume uit (V_{uit}) te bepalen en vervolgens de dichtheid te bepalen met de relatie $\rho_{uit} = M_{uit}/V_{uit}$.

In paragraaf 5.3 en paragraaf 5.4 worden de onderzochte en uitgewerkte directe methoden beschreven. In paragraaf 5.5 wordt de indirecte methode uitgewerkt.

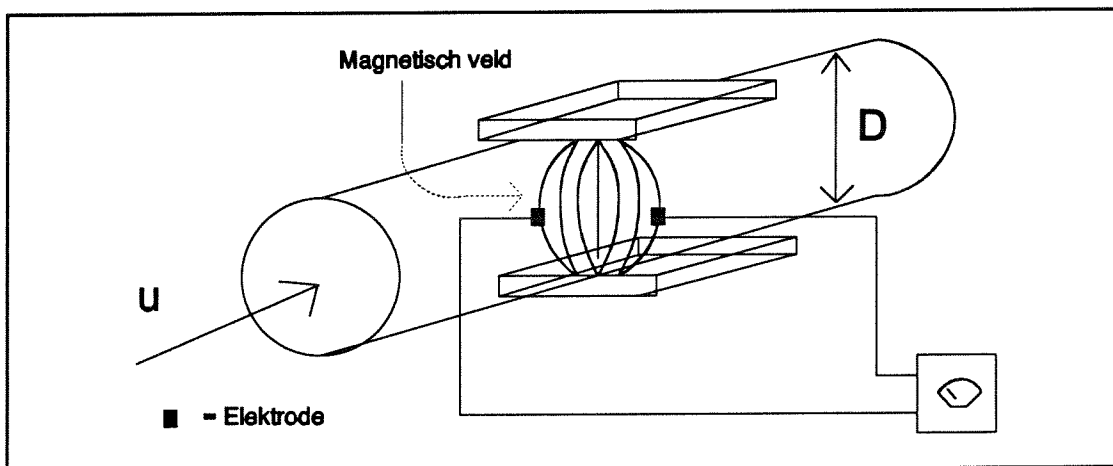
5.2 Bepaling ingaande debiet, ingaande dichtheid en uitgaande debiet

Bepaling ingaande debiet

Het ingaande debiet wordt bepaald door de mengselsnelheid en het

doorstroomoppervlak van de zuigbuis. Door met behulp van een elektromagnetische snelheidsmeter in de zuigbuis de mengselnelheid te meten en deze te vermenigvuldigen met het doorstroomoppervlak van de zuigbuis is het debiet bekend.

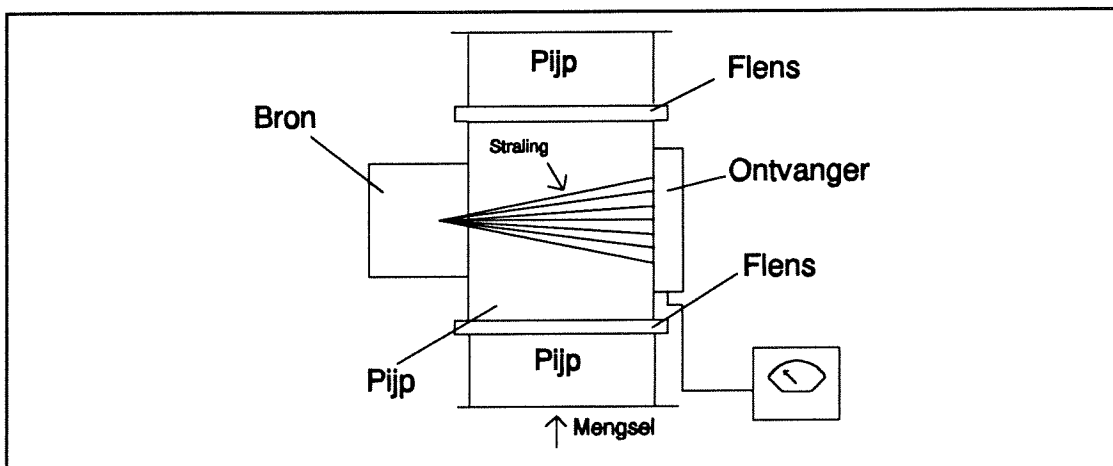
Loodrecht op de stroomrichting van het mengsel wordt een magnetisch veld opgewekt (figuur 5.1). Indien een geleider (in dit geval water) door een magnetisch veld beweegt wordt er een spanning loodrecht op het magnetisch veld en de richting waarin de geleider beweegt opgewekt. De opgewekte spanning is evenredig met de snelheid (u) waarmee de geleider door het veld beweegt, de diameter van de pijp (D) en de sterkte van het magnetisch veld. Om het voltage te meten zijn twee elektroden in de pijp bevestigd.



Figuur 5.1: Snelheidsmeting.

Bepaling inkomende dichtheid [14]

De inkomende dichtheid wordt bepaald met behulp van een radioactieve concentratiemeter. De concentratiemeter bestaat uit twee delen. Een bron zendt γ -straling uit die door het mengsel gedeeltelijk wordt geabsorbeerd. Een ontvanger vangt de straling die niet door het mengsel is geabsorbeerd op. De mate van absorptie is een maat voor de dichtheid. In bijlage 1 wordt dit meetprincipe verder uitgewerkt.



Figuur 5.2: Dichtheidsmeting.

Bepaling uitgaande debiet

Het uitgaande debiet wordt op een indirecte wijze bepaald. Met behulp van de snelheidsmeters in de zuigbuizen is bekend wat het gezogen debiet is. Daarnaast wordt met behulp van niveaumeters de verandering van het beunvolume bepaald. Met behulp van de bergingsvergelijking (18) is het uitgaande debiet bekend. Dit principe wordt in paragraaf 5.6 verder uitgewerkt.

$$Q_{uit} = Q_{in} - \frac{dV}{dt} \quad (18)$$

5.3 Inventarisatie directe meetmethoden

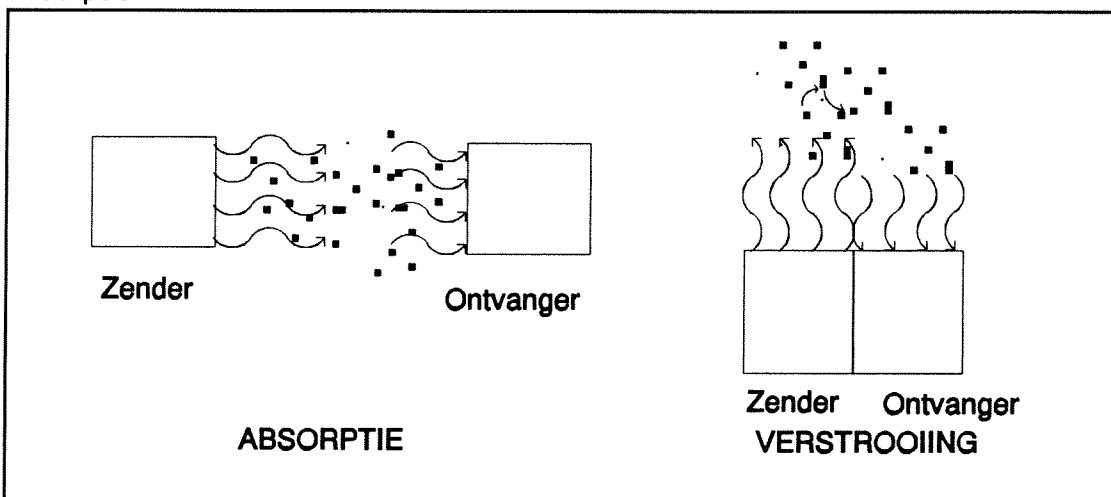
Zoals in de inleiding is vermeld, wordt er onderscheid gemaakt tussen directe- en indirecte methoden. Bij de directe methode wordt de meetapparatuur direct in het mengsel geplaatst.

Er is een indeling te maken in akoestische, optische, radioactieve, elektrische en mechanische methoden. Deze methoden geven een vrijwel continu beeld van de dichtheid van het mengsel.

Naast deze continu methoden is het ook mogelijk om op vaste tijdstippen monsters te nemen en vervolgens hiervan de dichtheid te bepalen. Op deze manier wordt met een pauze van enkele minuten de dichtheid bepaald. Op dit moment wordt ad hoc de uitgaande dichtheid bepaald met behulp van monsters.

Akoestische methoden

Binnen de akoestische methode zijn twee verschillende principes te onderscheiden. Het ene principe gaat uit van verstrooiing en het andere principe gaat uit van absorptie



Figuur 5.3: Absorptie en verstrooiing.

verstrooiing

Bij dit principe maakt men gebruik van een transducer. Deze zendt golven uit en vangt golven op. De uitgezonden golven worden echter verstrooid door de deeltjes

in het mengsel. Bij een homogeen mengsel treedt geen verstrooiing op. Bij een inhomogeen mengsel juist wel. De mate van verstrooiing is afhankelijk van het percentage vaste stof.

absorptie

Hierbij wordt gebruik gemaakt van de afname van de energieinhoud van een drukgolf door de onderlinge wrijving van deeltjes. Deze absorptie neemt toe bij een hoger percentage vaste stof. Bij deze methode zijn twee transducers tegenover elkaar nodig.

De akoestische methode is erg gevoelig voor luchtinsluitingen. Bij kleine hoeveelheden lucht kunnen er al aanzienlijke fouten optreden. Daarnaast is de methode ook gevoelig voor korrelvorm en korrelgrootte.

Optische methoden

Er wordt gebruik gemaakt van een lichtbron en een lichtgevoelig element. De concentratie kan nu worden vastgesteld aan de hand van de hoeveelheid verstrooid licht. De optische methoden zijn, net als de akoestische methoden, bijzonder gevoelig voor de hoeveelheid ingesloten lucht. Daarnaast zal ook de optische methode gevoelig zijn voor veranderingen in korrelvorm en korrelverdeling. Bovendien is de bron en het lichtgevoelige element gevoelig voor aanslag.

Radioactieve methoden

Net als bij de akoestische methode is hier onderscheid te maken tussen twee principes, namelijk verstrooiing en absorptie. Aan boord van baggerschepen wordt deze methode ook toegepast voor de meting van de dichtheid van het mengsel in de zuigbuis. Het systeem bestaat altijd uit twee delen, namelijk een bron en een ontvanger.

verstrooiing

De bron en opnemer zijn boven elkaar geplaatst. De door de bron verspreide radioactieve straling wordt verstrooid door het sediment in het mengsel en een deel van de verstrooide straling treft de opnemer. De mate van verstrooiing is nu een maat voor de dichtheid.

absorptie

De bron en opnemer zijn nu tegenover elkaar geplaatst. De door de bron uitgezonden straling wordt gedeeltelijk geabsorbeerd door het sediment. Een deel van de straling bereikt de ontvanger. De hoeveelheid door de opnemer opgevangen straling is een maat voor de dichtheid.

Aan deze methoden worden strenge veiligheidvoorschriften gesteld, omdat er gewerkt wordt met radioactieve straling. De aanwezigheid van lucht- of gasbellen kan de meting verstoren.

Electrische methoden

Bij de electrische methode is het mogelijk om van twee verschillende principes gebruik te maken. Er is een methode die gebruik maakt van de geleidbaarheid van een mengsel en er is een methode die gebruik maakt van de verandering van capaciteit tussen twee platen

weerstand

Met behulp van elektroden wordt een stroom opgewekt door het mengsel. Vervolgens wordt met twee elektroden het potentiaalverschil gemeten. Dit verschil is afhankelijk van de geleidbaarheid van het mengsel. Het potentiaalverschil is een maat voor de dichtheid.

De weerstand van het mengsel wordt echter in belangrijke mate bepaald door het zoutgehalte. Verandering van zoutgehalte in het water beïnvloedt de meting dan ook sterk. Lage concentraties zullen de weerstand nauwelijks beïnvloeden.

capacitief

Bij deze methode brengt men spanningsverschil tussen twee parallele condensatorplaten (elektroden) aan. Het mengsel tussen de twee platen beïnvloedt de capaciteit. De capaciteitsverandering is een maat voor de dichtheid.

Met dit principe is minder ervaring dan met het principe gebaseerd op weerstand. Het principe is gevoelig voor lucht en voor het zoutgehalte

Mechanische methode ('stemvork')

Deze methode is gebaseerd op het 'stemvork' principe. Er wordt gebruik gemaakt van de eigenschap dat de resonantiefrequentie van de 'stemvork' bepaald wordt door de massa van het mengsel er omheen en de viscositeit. Er wordt bij deze methoden een element in het mengsel gebracht dat in resonantie wordt gebracht. De resonantiefrequentie is nu een maat voor de dichtheid.

Het element moet wel omsloten worden door een bepaald minimum volume mengsel. Daarnaast is de methode ook gevoelig voor veranderingen van temperatuur en viscositeit. Het element kan niet bepalen of de verandering van de daarmee samenhangende resonantiefrequentie is veroorzaakt door verandering van massa of verandering van viscositeit. Fijne luchtbelletjes kunnen zich hechten aan het element en zo de meting beïnvloeden.

Monstername

Bij deze methode wordt op vaste tijdstippen een monster genomen met een monsterfles. De dichtheid is direct te bepalen door het monster te wegen en de gevonden massa te delen door het volume van het monster.

Het is echter moeilijk om een monster te nemen doordat de emmer, maatbeker of fles, zodra deze gevuld is, uit de stroom moet worden verwijderd om uitspoeling van het monster te voorkomen.

Op dit moment wordt met behulp van monsters de dichtheid van het overvloeiende mengsel bepaald.

5.4 Selectie directe meetmethoden

De processen in het beun worden gekenmerkt door de ruwe omstandigheden. De diffusor stort het mengsel in het beun, waardoor er lucht ingesloten raakt. Een deel zal op weg naar de overvloeikoker naar het oppervlak stijgen, maar het is niet onwaarschijnlijk dat de kleinere luchtbelletjes nog steeds in het mengsel aanwezig zijn als de overvloeikoker bereikt wordt. Daarnaast wordt het mengsel in het beun op en neer geklotst door de scheepsbewegingen. Ook kan het mengsel zelf verontreinigd zijn met afval zoals doeken, hout en ander afval. Bovendien zullen de dichtheden, met name net na overvloeien, laag zijn. Door deze specifieke omstandigheden is het moeilijk te voorspellen welke methode het best toegepast kan worden, mede omdat geen van de instrumenten in een vergelijkbare omgeving is toegepast. Het is daarom belangrijk om meerdere methoden toe te passen zodat deze onderling vergeleken kunnen worden.

Op basis van literatuurstudie [1], [6] en [16] en een gesprek met het Waterloopkundig Laboratorium worden de volgende methoden onder de specifieke omstandigheden niet kansrijk geacht:

- akoestische methoden;
Deze methoden zijn zeer gevoelig voor lucht. Een kleine luchtinsluiting beïnvloedt de meting sterk. Aangezien het mengsel in het beun waarschijnlijk nog lucht bevat zijn de akoestische methoden niet geschikt. Bovendien blijkt dat de methode wordt beïnvloed door korrelgrootte en korrelvorm.
- optische methoden;
De mengselsamenstelling (slib of zand) en aanslag op de bron of ontvanger hebben invloed op de meting.
- elektrische methoden;
Deze methode werkt niet goed bij lage dichtheden en luchtinsluitingen. De eigenschap van het mengsel (elektrische geleiding) die wordt gebruikt voor de bepaling van de dichtheid, wordt in hoge mate bepaald door het zoutgehalte en in mindere mate door het aanwezige sediment.

Op basis van deze gegevens is gekozen om de volgende meetmethoden verder te onderzoeken:

- radioactieve methoden
- mechanische methode
- monsternamen

Deze drie directe meetmethoden zijn in de praktijk aan boord van de sleepopperzuiger 'X' toegepast. In de volgende paragrafen wordt de implementatie van de methoden nader toegelicht.

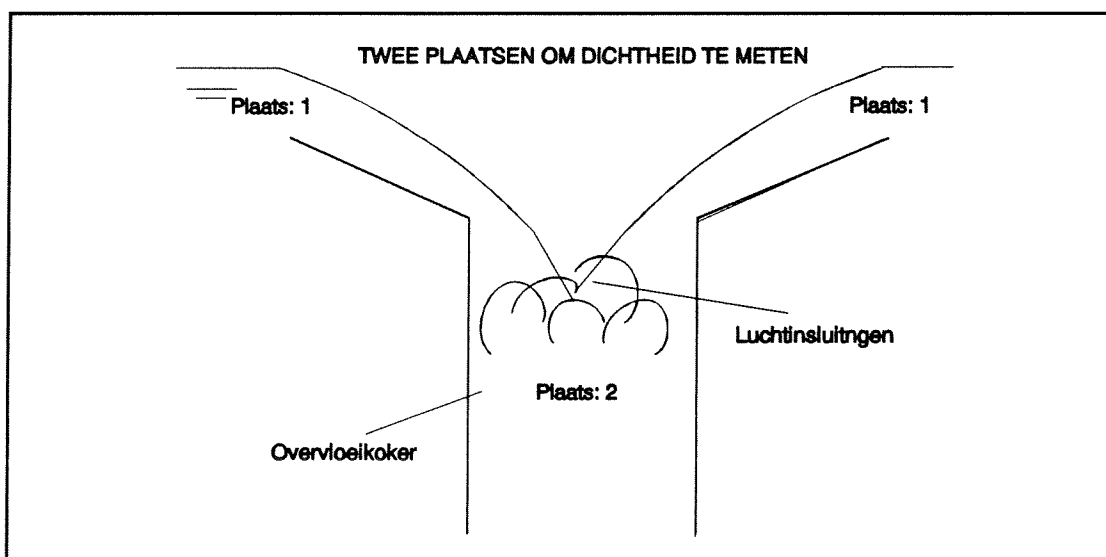
5.5 Uitwerking geselecteerde directe methoden

5.5.1 Plaats van meetopstelling

De keuze van de plaats waar de meting wordt uitgevoerd heeft grote invloed op de uitwerking van de meetopstellingen. Daarom wordt eerst een plaats gekozen waar de dichtheid van het uitgaande mengsel wordt bepaald voordat de methoden verder worden uitgewerkt.

In principe bestaan er twee verschillende plaatsen om de dichtheid van het overvloeiende mengsel te bepalen:

- De meting kan worden uitgevoerd op de rand van de overvloeioker, net voordat het mengsel zich in de overvloeioker stort (plaats 1 in figuur 5.4).
- De meting kan worden uitgevoerd in de overvloeioker zelf (plaats 2 in figuur 5.4).



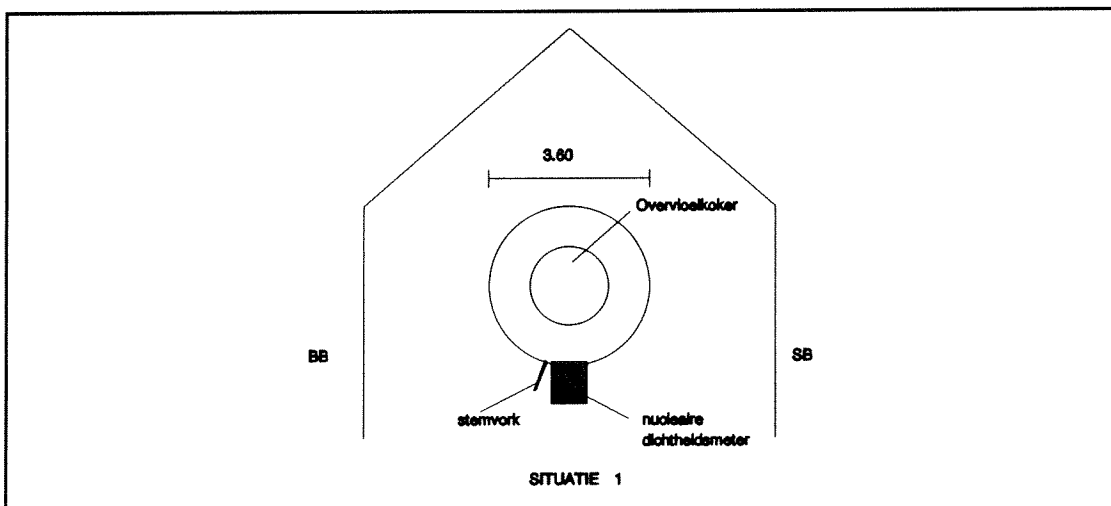
Figuur 5.4: Twee plaatsen om dichtheid te meten.

Meting van dichtheid in de overvloeioker zelf stuit op twee belangrijke bezwaren:

- Er worden grote hoeveelheden lucht ingesloten in de koker. Enerzijds doordat het mengsel zich in de koker stort, anderzijds doordat het mengselniveau in de koker sterk varieert (communicerend vat met de zee) en zo grote hoeveelheden lucht aanzuigt. Luchtinsluitingen zijn een probleem voor de meetinstrumenten, waardoor de lucht uit het mengsel verwijderd moet worden voordat de meting kan plaatsvinden. Hiervoor moet het mengsel afgezogen worden en zijn faciliteiten nodig om het mengsel te ontlichten.
- Doordat de overvloeioker direct in contact staat met de zee varieert het niveau in de overvloeioker sterk, waardoor het mengsel steeds weer omhoog langs de instrumenten wordt gestuwd. Sommige deeltjes zullen meerdere malen langs het instrument stromen en het mengsel wordt verdund.

Vanwege deze twee bezwaren is gekozen de meting op de rand van de overvloeikoker uit te voeren. Dit heeft als grote voordeel dat de meting niet beïnvloed wordt door het variërende mengselniveau in de overvloeikoker. Daarnaast is het niet nodig om extra faciliteiten voor het afzuigen en ontluichten van het mengsel te installeren.

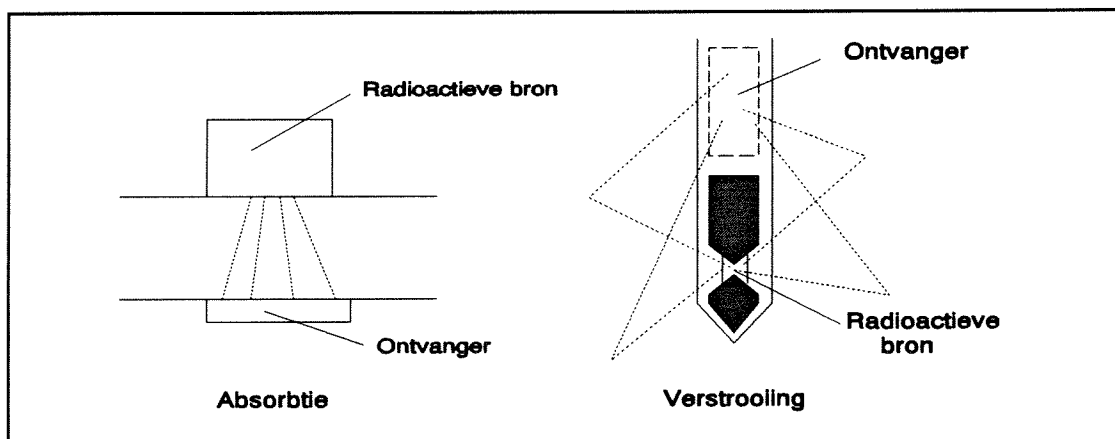
De instrumenten zullen bevestigd worden aan de achtersteven zijde van de overvloeikoker (figuur 5.5). Op vaste tijdstippen dient echter ook op andere plaatsen de dichtheid bepaald te worden om de invloed van de plaats op de overvloeikoker vast te stellen.



Figuur 5.5: Plaatsing van de meetinstrumenten tijdens meting aan boord van de 'X'.

5.5.2 Uitwerking radioactieve methode

Er zijn twee verschillende methoden. Namelijk de methode gebaseerd op absorptie en de methode gebaseerd op verstrooiing.



Figuur 5.6: Absorptie en verstrooiing bij radioactieve methode.

De methode gebaseerd op verstrooiing wordt nauwelijks gebruikt en heeft als groot

nadeel dat de straling zich vrij kan verspreiden. Hierdoor is de methode bij onzorgvuldig gebruik direct gevaarlijk.

De methode gebaseerd op absorptie is veiliger, omdat de straling niet vrij in de ruimte verdwijnt, maar binnen een afgesloten ruimte van een pijp of koker blijft. Bovendien is er reeds veel ervaring mee, omdat zich in ook elke zuigbuis een radioactieve concentratiemeter (gebaseerd is op dit principe) bevindt.

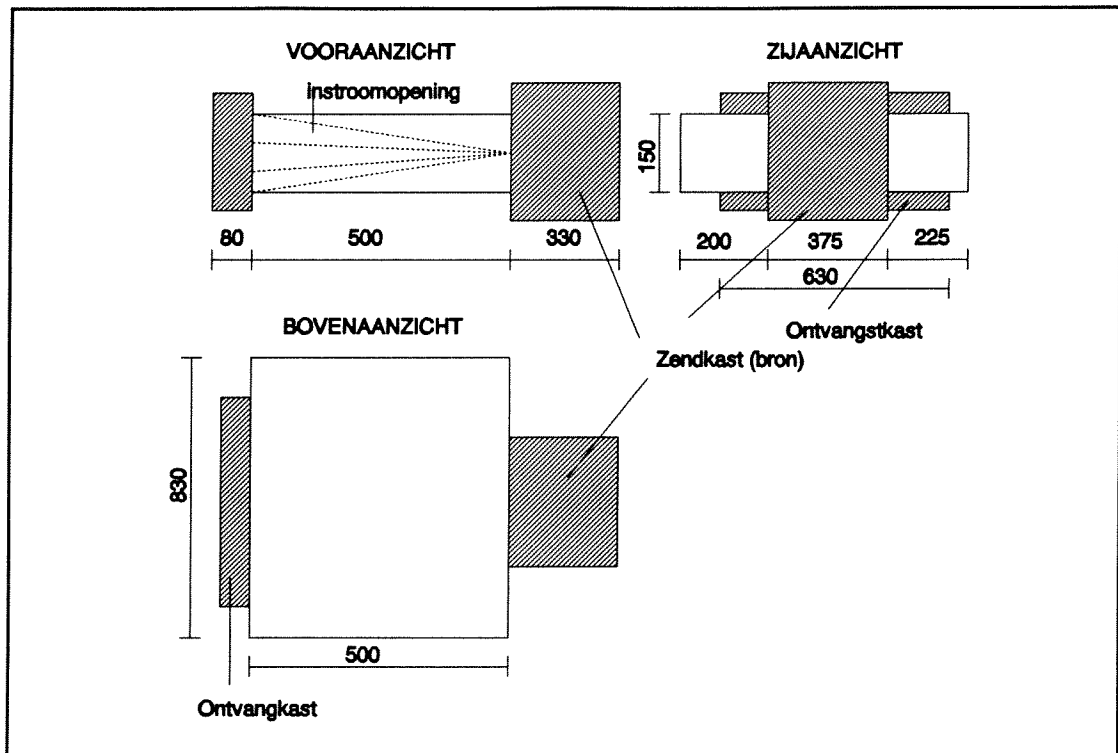
Om redenen van veiligheid en ervaring is voor de methode op basis van absorptie van radioactieve straling gekozen.

De opstelling bestaat uit een bron en een ontvanger die tegen over elkaar zijn geplaatst. De bron zendt γ -straling uit. Een deel van de straling wordt geabsorbeerd door het mengsel en het niet geabsorbeerde deel wordt opgevangen door de ontvanger. De ontvanger bestaat uit een Geigermüller buis. De afstand tussen bron en ontvanger wordt bepaald doordat er zich voldoende mengsel tussen bron en ontvanger moet bevinden om de straling te absorberen. Is de afstand tussen bron en ontvanger te klein dan zal het verschil tussen de hoeveelheid weggezonden straling en ontvangen straling te klein zijn om een nauwkeurige meting uit te voeren. Een minimale afstand van 50cm tussen bron en ontvanger is noodzakelijk.

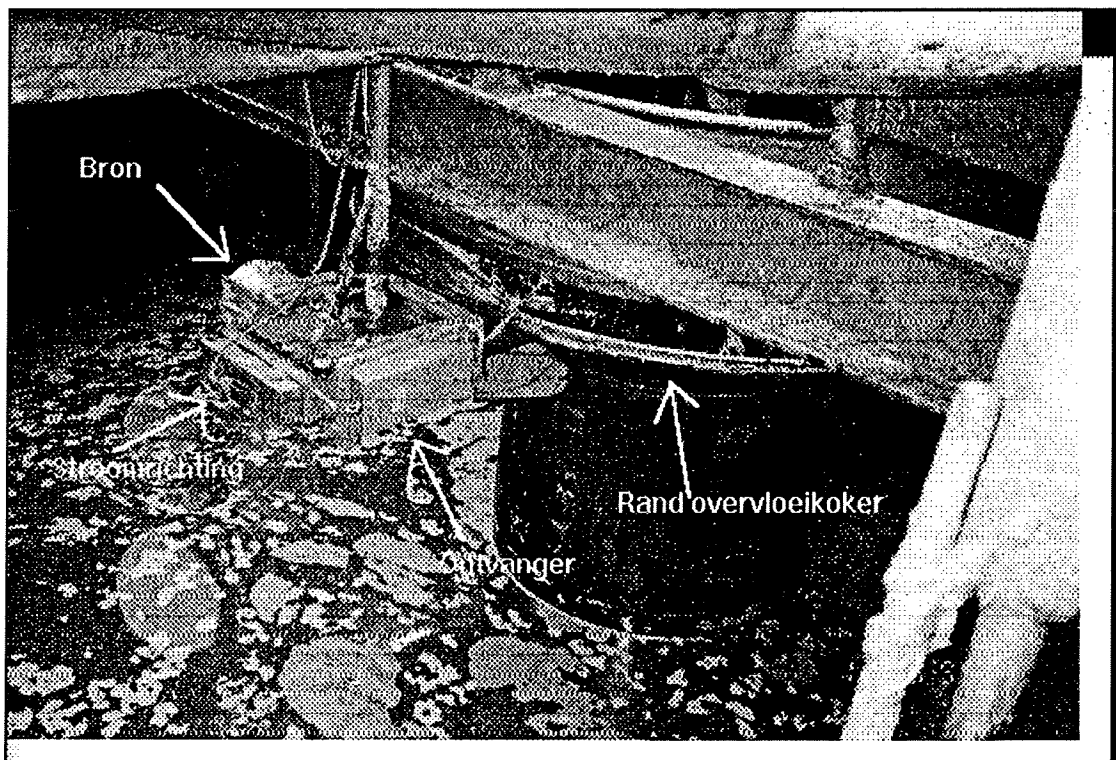
In figuur 5.7 is een schets gegeven en in figuur 5.8 is een foto van de opstelling aan boord geplaatst.

In samenwerking met IHC Systems B.V. te Sliedrecht is gekomen tot het ontwerp van een meetopstelling. Deze opstelling heeft de volgende kenmerken:

- Het mengsel stroomt door een koker ($b=0.5\text{m}$, $h=0.15\text{m}$ en $L=0.83\text{m}$).
 - Er wordt gebruik gemaakt van een radioactieve bron en stralingsdetector van het type IHC 110.
 - De bron doorstraalt het mengsel in breedte richting, waardoor de straling een lengte van 0.5m aflegt.
 - De constructie wordt aan de achterstevenzijde van de overvloeikoker geplaatst en kan de bewegingen van de koker volgen.
 - De opstelling is vooraf onder laboratorium omstandigheden gecalibreerd bij IHC Systems B.V..(bijlage 1).
 - De constructie bevindt zich met de bovenzijde aan de rand van de overvloeikoker (figuur 5.8).
 - De constructie bevindt tijdens het zuigen met vol debiet in het geval van de 'X' 40 à 50 cm onder het vloeistof oppervlak. Dit is afgeleid in bijlage 11.
-



Figuur 5.7: Afmetingen opstelling met radioactieve concentratiemeter.



Figuur 5.8: Opstelling met radioactieve concentratiemeter aan overvloeikoker.

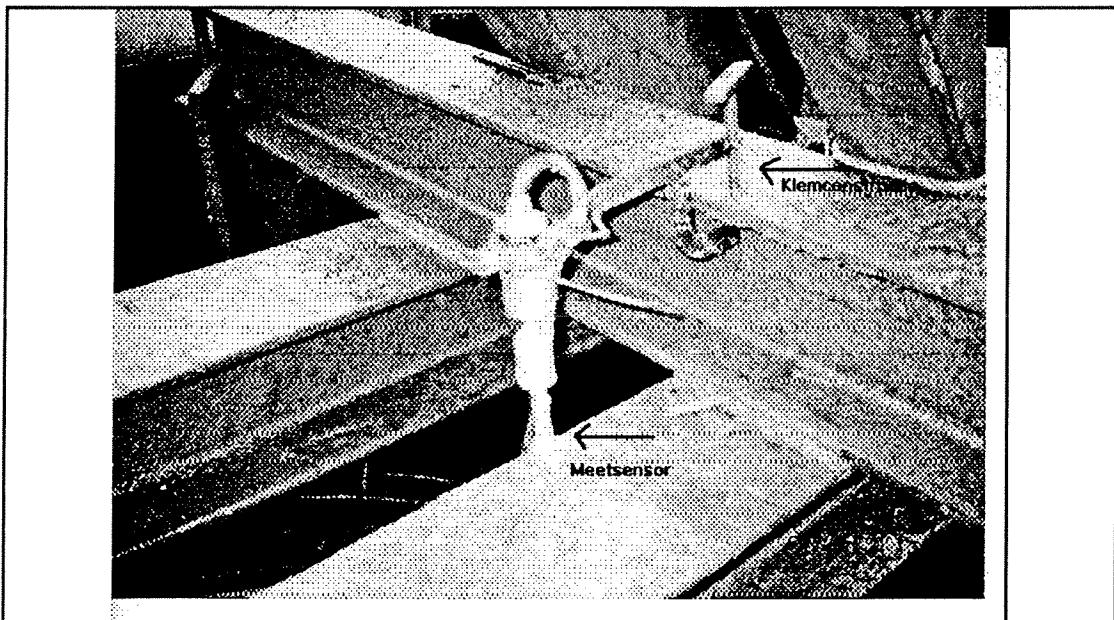
5.5.3 Uitwerking mechanische methode

Er zijn verschillende uitvoeringen van het 'stemvork' principe. De meeste meetinstrumenten zijn vrij klein (orde $L=30\text{cm}$ en $B=5\text{cm}$) en worden in het mengsel geplaatst. Het instrument wordt voor de overvloeikoker geplaatst (figuur 4.2). Het instrument is goed gestroomlijnd en hindert de stroming weinig. De eenvoud van de methode is een groot voordeel.

Het instrument is alleen te gebruiken als de samenstelling van het mengsel niet te veel verandert. Dit betekent dat indien in een zandwatermengsel wordt gemeten dit mengsel niet af en toe verontreinigd mag zijn met bijvoorbeeld grote hoeveelheden slibdeeltjes, omdat het gedrag van een slibmengsel anders is dan het gedrag van zand/watermengsel. De tenen van de stemvork moet altijd volledig ondergedompeld zijn.

Er is gekozen voor het type HydraPlane [15] van de firma HydraMotion. In bijlage 1 zijn de karakteristieken van dit instrument opgenomen. De HydraPlane is op de overvloeirand geklemd. In figuur 5.9 is een foto van de Hydraplane afgedrukt. Door de klemconstructie is het eenvoudig om het instrument op elke willekeurige plaats op de overvloeirand te bevestigen.

Het instrument is vooraf aan de meting onder laboratorium omstandigheden

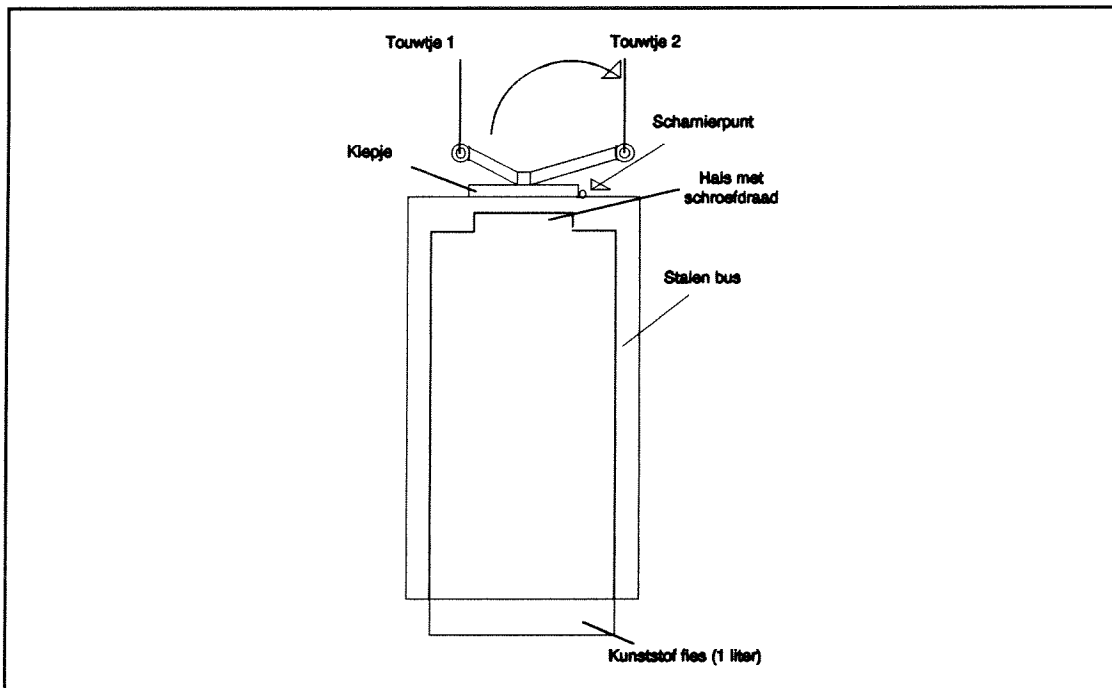


Figuur 5.9: Stemvork

gecalibreerd voor verschillende mengsel-dichtheden en samenstellingen. In bijlage 1 is dit testprogramma opgenomen.

5.5.4 Uitwerking monstername

Er is gekozen voor een stalen bus waarin een één liter monsterfles wordt gedraaid (figuur 5.10). Op de bus bevindt zich een klepje dat door middel van een touwtje kan worden geopend. Met de monsterbus worden monsters genomen vlak achter de ra-meter om zo de resultaten te kunnen vergelijken. De bus met daarin de monsterfles wordt boven ra-meter met behulp van een touwtje neergelaten, waarna met een tweede touwtje het klepje wordt geopend en de fles volloopt. Zodra de fles bijna vol is wordt het klepje weer losgelaten en wordt de bus naar boven gehaald. Vervolgens wordt de fles uit de bus gedraaid en er wordt weer een nieuwe lege fles ingedraaid.



Figuur 5.10: monsterbus

Een gevaar van deze methode is de kans op ontmenging, doordat er mengsel in de fles blijft stromen, zodra deze reeds volledig gevuld is met mengsel. Deze ontmenging kan voorkomen worden door er voor te zorgen dat de fles niet helemaal volloopt. Het zal enige vaardigheid vergen om dit punt te bepalen. Er worden gedurende de overlooffase elke 5 minuten een monster genomen.

Door de inhoud van de fles te bepalen en de inhoud te wegen is nu de dichtheid van het mengsel te berekenen.

5.6 Uitwerking indirecte methode

5.6.1 Inleiding

De indirecte methode maakt gebruik van de volgende balansvergelijkingen voor het beun:

$$V_{uit} = V_{in} - \Delta V \quad (19)$$

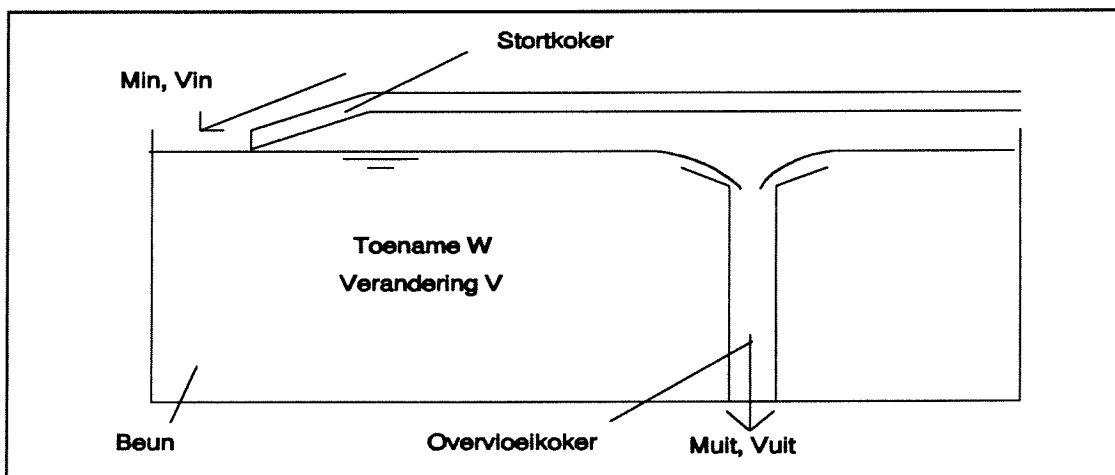
$$M_{uit} = M_{in} - \Delta W \quad (20)$$

met:

$$V_{in} = \int_0^t u_{in} A dt \quad (21)$$

$$M_{in} = A \int_0^t u_{in} \rho_{in} dt \quad (22)$$

Deze balansvergelijkingen worden in figuur 5.11 geïllustreerd.



Figuur 5.11: Beunbalans (schets van de langsdoorsnede van het beun).

De mengsnelheid (u_{in}) en dichtheid (ρ_{in}) in de zuigbuis worden bepaald met behulp van de meetinstrumenten uit paragraaf paragraaf 5.2.

De uitgaande dichtheid ρ_{uit} kan bepaald worden:

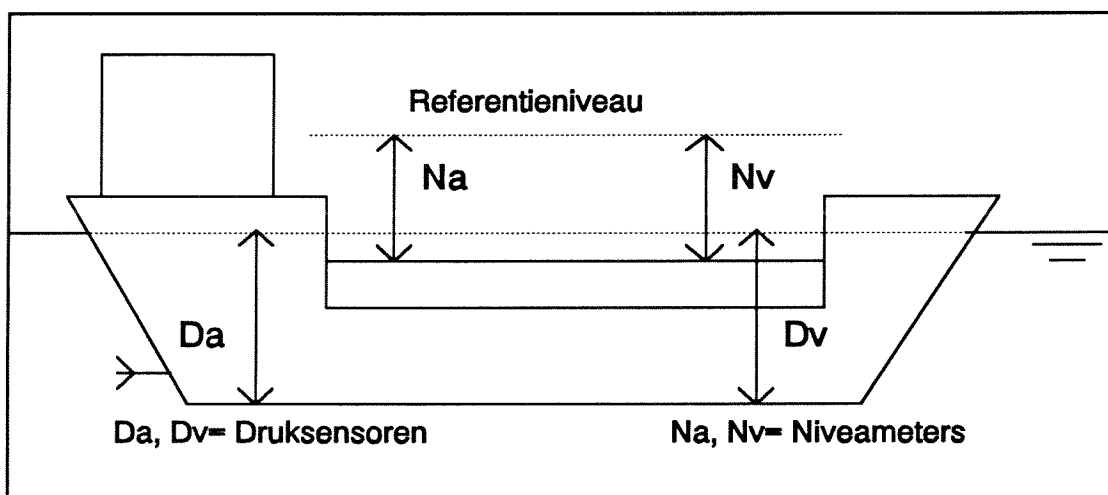
$$\rho_{uit} = \frac{M_{in} - \Delta M}{V_{in} - \Delta V} \quad (23)$$

De verandering van het beunvolume (ΔV) en het displacement (ΔW) wordt bepaald

met behulp van meetinstrumenten die behoren bij het Tonnen Droge Stof Systeem (TDS-systeem). In de volgende paragraaf wordt allereerst de werking van het TDS-systeem kort beschreven. In de paragraaf daarop wordt vervolgens beschreven hoe de snelheidsmeter en concentratiemeter kunnen worden gecalibreerd. Om een goede balans op te kunnen stellen is een goede calibratie van deze meetinstrumenten essentieel.

5.6.2 Beschrijving van Tonnen Droge Stof Systeem

Het TDS-systeem is geïntroduceerd door Rijkswaterstaat om bij onderhoudsbaggerwerk een nauwkeurige verrekeningsmethode te hebben. Het systeem bepaalt het gewicht van de deeltjes zwaarder dan water. Een schip dat is uitgerust met het TDS-systeem meet met behulp van vier drukmeters onder het schip de diepgang voor en achter en meet het beunvolume met behulp van vier niveaumeters boven het beun. Het displacement wordt berekend door de diepgang in te vullen in het Carènediagram. Dit diagram geeft de waterverplaatsing als functie van de diepgang. Het beunvolume wordt bepaald doordat de niveaumeters de afstand meten van een vast referentieniveau tot aan het vloeistofoppervlak. In de beunmeettabel kan deze afstand vertaald worden naar een beunvolume. De beunmeettabel geeft het beunvolume als functie van de afstand tussen een vast referentieniveau en het vloeistofoppervlak.



Figuur 5.12: Plaatsing niveaumeters (N_a en N_v) en druksensoren (D_a en D_v).

Allereerst wordt de waterverplaatsing van het schip met de bodemdeuren open bepaald. Als het schip vol is wordt dit opnieuw gedaan. Tevens wordt dan het beunvolume bepaald. Uit het verschil in displacement van het volle en het lege schip volgt het gewicht van de lading. Omdat ook het volume van de lading bekend is kan het gewicht van de deeltjes zwaarder dan water worden bepaald. Het TDS-systeem registreert het verschil tussen het gewicht van de lading en het gewicht van de lading als deze geheel uit water zou bestaan. Het verschil wordt veroorzaakt door de deeltjes zwaarder dan water. Het verschil is het aantal tonnen droge stof.

Er kunnen om verschillende redenen afwijkingen optreden in de bepaling van het

deplacement en het volume. Het TDS-systeem heeft twee mogelijkheden om dit te controleren:

- Als de bodemdeuren geopend zijn moet het niveau in het beun gelijk zijn aan de buitenwaterstand.
- Het verhang van het mengsel in het beun moet gelijk zijn aan het verhang buiten. Het verhang van het mengsel in het beun wordt bepaald met de niveaumeters en het verhang buiten wordt bepaald met de drukmeters. Deze controle heet de trimcontrole. Deze controle wordt elke 5 seconde uitgevoerd. Er mag een klein verschil tussen de twee verhanglijnen optreden. Zodra minimaal 5 minuten aan deze marge wordt voldaan wordt de lading goedgekeurd.

5.6.3 Calibratie snelheidsmeter en concentratiemeter in zuigbuis

Inleiding

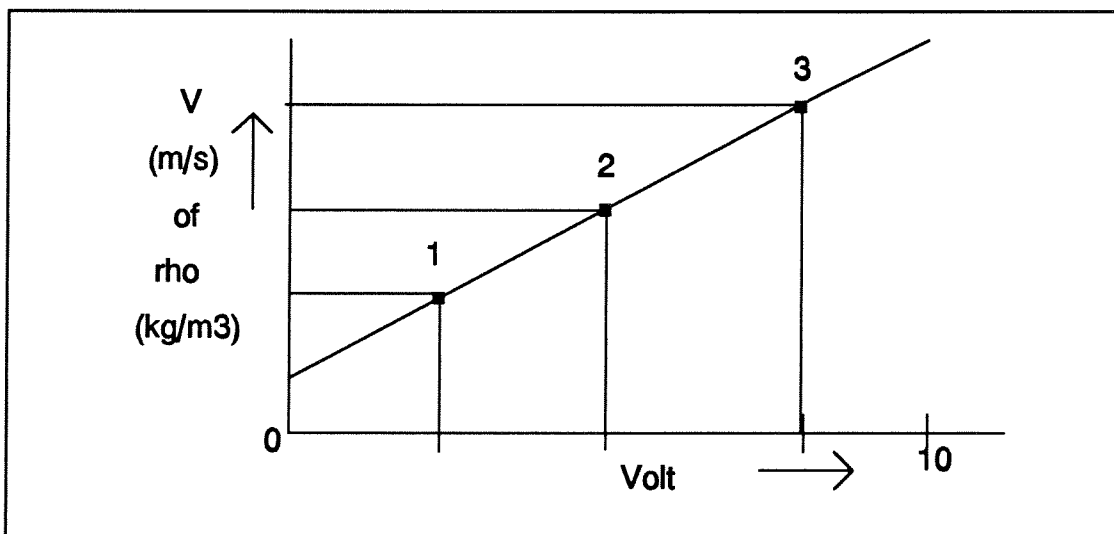
Om de balans zo nauwkeurig mogelijk te bepalen moeten de meetinstrumenten in de zuigbuizen zo nauwkeurig mogelijk worden gecalibreerd.

De concentratiemeter en de snelheidsmeter hebben beide een 0 tot 10 Volt uitgangssignaal.

Er bestaat een lineaire relatie tussen het uitgangssignaal en de eenheden behorend bij dichtheid en snelheid:

$$\rho_{sb,bb} [kg/m^3] = a_{1,2} * Volt + b_{1,2} \quad (23)$$

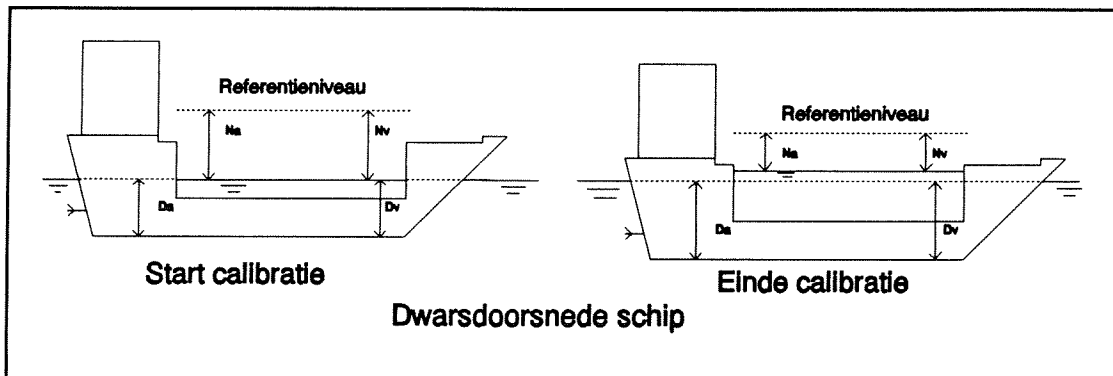
$$u_{sb,bb} [m/s] = a_{3,4} * Volt + b_{3,4} \quad (24)$$



Figuur 5.13: Principe van de calibratie.

Om te controleren of er inderdaad een lineaire relatie bestaat tussen het Voltsignaal

en de eenheden behorend bij dichtheid en snelheid moeten meer dan twee punten in bovenstaande grafiek worden bepaald.



Figuur 5.14: Principe van calibratie.

De calibratie vindt plaats in de fase tot overvloeien. Immers tot overvloeien blijft al het mengsel dat in het beun wordt gebracht ook achter in het beun. Met behulp van het TDS-systeem is nu te bepalen wat er door de zuigbuis binnen is gekomen. Met de druksensoren wordt de toename van het gewicht bepaald en met de niveaumeters wordt de toename van het beunvolume bepaald. Figuur 5.14. is een principe schets.

Ook moeten de bodemdeuren nog op lekkage worden gecontroleerd door het beun vol te pompen met water en te controleren of het volume afneemt in de tijd. Dit kan gebeuren tijdens het varen naar het zuigvak.

Calibratie snelheidsmeter

Voor de calibratie van de snelheidsmeter is alleen de volumetoename (ΔV) tussen twee tijdstippen (t en $t + \Delta t$) noodzakelijk.

Met vergelijking 26 wordt de gemiddelde snelheid van het mengsel door de zuigbuis bepaald.

$$\bar{u}_{in} = \frac{V_{t+\Delta t} - V_t}{(t+\Delta t - t)A} = \frac{\Delta V}{A \Delta t} \quad (26)$$

De op deze manier bepaalde snelheid wordt gekoppeld aan het gemiddelde uitgangssignaal van de snelheidsmeter. Op deze manier wordt een punt in figuur 5.13 bepaald.

Door nu met verschillende snelheden te zuigen kunnen meerdere punten worden berekend en kunnen de constanten a en b uit vergelijking 26 worden bepaald.

Er moet met tenminste drie verschillende snelheden worden gezogen om te controleren of de vergelijking inderdaad lineair is.

Tijdens de calibratie van de snelheidsmeter moet er water worden gezogen, omdat dan de snelheid \bar{u}_{in} volgens vergelijking 26 gecontroleerd kan worden aan de hand van de toename van het displacement (ΔW).

$$\bar{u}_{in} = \frac{W_{t+\Delta t} - W_t}{(t+\Delta t - t)A\rho_w} = \frac{\Delta W}{A\rho_w\Delta t} \quad (27)$$

Er moet met tenminste de volgende snelheden gezogen worden tijdens de calibratie:

1. afsluiter dicht, $\bar{u}_{in} = 0$
2. volvermogen, $\bar{u}_{in} = \max$
3. snelheid tussen 1. en 2.

Gedurende de calibratie moet de zuigsnelheid zo constant mogelijk blijven.

Indien er geen lineaire relatie wordt gevonden, moeten meer punten worden bepaald.

Voor beide zuigbuizen dient bovenstaande procedure te worden herhaald.

Calibratie concentratiemeter

De calibratie van de radioactieve concentratiemeter in de zuigbuis vindt plaats door de gemiddelde dichtheid van het mengsel door de zuigbuis te berekenen gedurende de calibratie. Hiervoor wordt zowel gebruik gemaakt van de niveaumeters als de drukmeters.

Met vergelijking 27 wordt de gemiddeld gezogen dichtheid bepaald.

$$\bar{\rho}_{in} = \frac{W_{t+\Delta t} - W_t}{V_{t+\Delta t} - V_t} = \frac{\Delta W}{\Delta V} \quad (28)$$

De op deze manier bepaalde dichtheid wordt gekoppeld aan het gemiddelde uitgangssignaal van de concentratiemeter. Op deze manier is een punt uit figuur 5.13 bepaald.

Door nu met verschillende dichtheden te zuigen kunnen meerdere punten worden berekend en kunnen de constanten a en b uit vergelijking 23 worden bepaald.

Er moet met tenminste drie verschillende dichtheden worden gezogen om te controleren of de vergelijking inderdaad lineair is. De gezogen dichtheden moeten zo ver mogelijk uit elkaar liggen.

Er moet met tenminste de volgende dichtheden gezogen worden tijdens de calibratie:

1. zeewater, $\rho_{in} = 1020 \text{ kg/m}^3$
2. maximale dichtheid $\rho_{in} = \text{ca. } 1300 \text{ kg/m}^3$
3. dichtheid tussen zeewater en maximale dichtheid $\rho_{in} = \text{ca. } 1150 \text{ kg/m}^3$



6. FOUTENANALYSE BEPALING UITGAANDE DICHTHEID

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een foutenanalyse gemaakt voor de bepaling van de uitgaande dichtheid met behulp van de verschillende methoden:

- Methode met behulp van ra-meter aan de overvloeikoker.
- Methode met behulp van 'stenvork'.
- Methode met behulp van monsterbus.
- Indirecte methode met behulp van het TDS-systeem.

In het algemeen zijn foutenbronnen onder te verdelen in willekeurige fouten en systematische fouten. Waarbij een willekeurige fout is gedefinieerd als een fout die leidt tot het onderschatten of overschatten van de uitgaande dichtheid, maar deze fout zal na een aantal metingen gemiddeld nul zijn en een systematische fout is gedefinieerd als een fout die ook leidt tot het onderschatten of overschatten van de uitgaande dichtheid, maar na een aantal metingen zal deze fout niet nul zijn. Indien de omvang van de systematische fout bekend is kan deze gebruikt worden om de nauwkeurigheid te vergroten.

In de foutenanalyse is aangegeven wanneer er sprake is van een systematische fout.

6.2 Foutenanalyse radioactieve concentratiemeter

Bij het gebruik van de ra-meter aan de overvloeikoker kunnen de volgende foutenbronnen onderscheiden worden:

- radioactieve concentratiemeter zelf
- samenstelling van het mengsel
- aanwezigheid van gas of lucht
- plaats op overvloeikoker

Radioactieve concentratie zelf

Volgens de literatuur [6] is de standaardafwijking van de ra-meter onder ideale omstandigheden als gevolg van hysteresis, lineariteit en reproduceerbaarheid 1%, echter aan boord zijn de omstandigheden niet ideaal. Er is sprake van een willekeurige fout.

Extra fouten worden geïntroduceerd door de samenstelling van het mengsel en eventuele invloed van gas. Hieronder wordt dit verder toegelicht.

Indien de instrumenten regelmatig en nauwkeurig gecalibreerd worden moet rekening gehouden worden met een standaardafwijking $\sigma(ra) = 3-3.5\%$

Samenstelling van het mengsel

Extra fouten worden geïntroduceerd omdat de samenstelling van het mengsel niet homogeen is en de meetomstandigheden niet ideaal zijn. De ra-meter doorstraalt

slechts een gedeelte van de zuigbuis. Het is mogelijk dat op deze wijze op bepaalde momenten een niet representatief deel van de het mengsel wordt doorstraald. Op bepaalde momenten zal een te hoge dichtheid worden gemeten en op sommige momenten een te lage dichtheid. Er is sprake van een willekeurige fout

Aanwezigheid van gas of lucht

Zoals eerder beschreven wordt bij aanwezigheid van gas of lucht een te lage dichtheid gemeten. Het is mogelijk dat het mengsel dat door de ra-meter stroomt luchtbelletjes bevat. Deze luchtbelletjes zijn ontstaan doordat de diffusor het mengsel in het beun stort. Hierdoor wordt lucht ingesloten. Gedurende de verblijftijd zal de meerderheid van de luchtbelletjes ontsnappen, maar het is niet uitgesloten dat de zeer fijne luchtbelletjes nog aanwezig zijn. Het is niet duidelijk hoeveel lucht zich nog in het mengsel bevindt.

Daarnaast kan de vloeistofspiegel tot onder de concentratiemeter dalen indien deze te hoog is geplaatst of indien de golven in het beun groot zijn.

Plaats op de overvloeikoker

De plaats op de overvloeikoker kan een belangrijke rol spelen, omdat slechts op één plaats een meting wordt gedaan. Het is mogelijk dat op andere plaatsen de dichtheid anders is.

Ook de plaats in hoogte is belangrijk. Het is mogelijk dat de dichtheid net boven de overvloeirand hoger is dan aan het vloeistof oppervlak. Het is niet mogelijk om een uitspraak te doen over de invloed van de plaats.

6.3 Foutenanalyse 'stemvork'

Bij het gebruik van de stemvork worden de volgende foutenbronnen onderscheiden:

- meetinstrument zelf
- invloed luchtbellens
- afstand tot vloeistofoppervlak
- viscositeit

Meetinstrument zelf

Fouten worden geïntroduceerd door hysteresis, lineariteit, reproduceerbaarheid en temperatuur invloed. Volgens de fabrikant bedraagt de standaardafwijking hierdoor $\sigma = 0.1\%$.

Invloed luchtbellens

Indien er zich fijne luchtbelletjes aan de meetsensor hechten kan de sensor een hogere dichtheid aangeven.

Afstand tot vloeistofoppervlak

De meetsensor moet volledig ondergedompeld zijn. Indien dit niet het geval is wordt er een te lage dichtheid gemeten. Gezien de plaatsing van het instrument zal dit geen probleem zijn.

Viscositeit en temperatuur

Het instrument is niet in staat om te bepalen of een verandering van de resonantiefrequentie wordt veroorzaakt door verandering van massa of verandering van viscositeit. Een verhoging van de viscositeit levert een verhoging van de dichtheid en een verlaging van de viscositeit levert een verlaging van de gemeten dichtheid. De viscositeit is weer gerelateerd aan mengselsamenstelling en temperatuur

6.4 Foutenanalyse monstername

Bij het gebruik van de monsterbus kunnen de volgende foutenbronnen onderscheiden:

- tijdsduur tussen twee monsternames
- tijdsduur van het nemen van een monster
- plaats waar het monster wordt genomen
- wijze van wegen en volumebepaling

Tijdsduur tussen twee monsters

De monsters worden niet continu genomen, waardoor het niet duidelijk is wat er tussen de tijdstippen (ca. 5 minuten) waarop de monsters worden genomen gebeurt. Indien zich veranderingen voordoen in het proces, bijvoorbeeld het verkleinen van het beunvolume door het neerdrukken van de overvloeikoker wordt dit niet waargenomen.

Tijdsduur voor het nemen van een monster

Het monster wordt genomen met een monsterbus op de wijze zoals eerder beschreven. Het klepje wordt geopend en het mengsel stroomt de fles in. Het is echter niet duidelijk hoelang het klepje geopend moet blijven. Indien het klepje te lang open blijft stroomt de fles over en treedt er uitspoeling op. De fijne deeltjes stromen weer uit de fles terwijl de grovere deeltjes in de fles achter blijven. Is het klepje een te korte tijd geopend dan is het volume van het monster te klein om goed het volume en het gewicht van te bepalen.

Plaats waar het monster wordt genomen

De verdeling van de dichtheid over de overvloeirand is niet bekend. Er worden fouten geïntroduceerd doordat slechts een monster op één plaats wordt genomen. Het blijkt niet mogelijk te zijn om op dezelfde plaats een monster te nemen als de ra-meter.

Wijze van wegen en volumebepaling

Van het monster wordt het volume en het gewicht bepaald. Het volume wordt bepaald door de monsterfles uit te schenken in een maatkolom en deze te wegen met behulp van een weegschaal. Bij het bepalen van het volume kunnen afleesfouten ontstaan.

6.5 Foutenanalyse indirecte methode**6.5.1 Inleiding**

Met behulp van de volgende formules wordt de uitgaande dichtheid bepaald voor een tijdstap Δt .

$$\rho_{uit} = \frac{M_{uit}}{V_{uit}} \quad (29)$$

$$\rho_{uit} = \frac{M_{in} - \Delta W}{V_{in} - \Delta V} \quad (30)$$

$$\rho_{uit} = \frac{(u_{bb}\rho_{bb} + u_{sb}\rho_{sb})A\Delta t - (W_{t+\Delta t} - W_t)}{(u_{bb} + u_{sb})A\Delta t - (V_{t+\Delta t} - V_t)} \quad (31)$$

Bij de bepaling van de uitgaande dichtheid wordt gebruik gemaakt van een viertal meetinstrumenten:

- Akoestisch niveaumeters voor de bepaling van het beunvolume.
- Druksensoren onder het schip voor het displacement.
- Radioactieve concentratiemeter in elke zuigbuis voor bepaling van de gezogen mengseldichtheid.
- Elektromagnetische snelheidsmeter (altflux-meter) voor de mengselsnelheid in de zuigbuis.

De akoestisch niveaumeters en de druksensoren zijn onderdeel van het aan boord geïnstalleerde TDS-systeem.

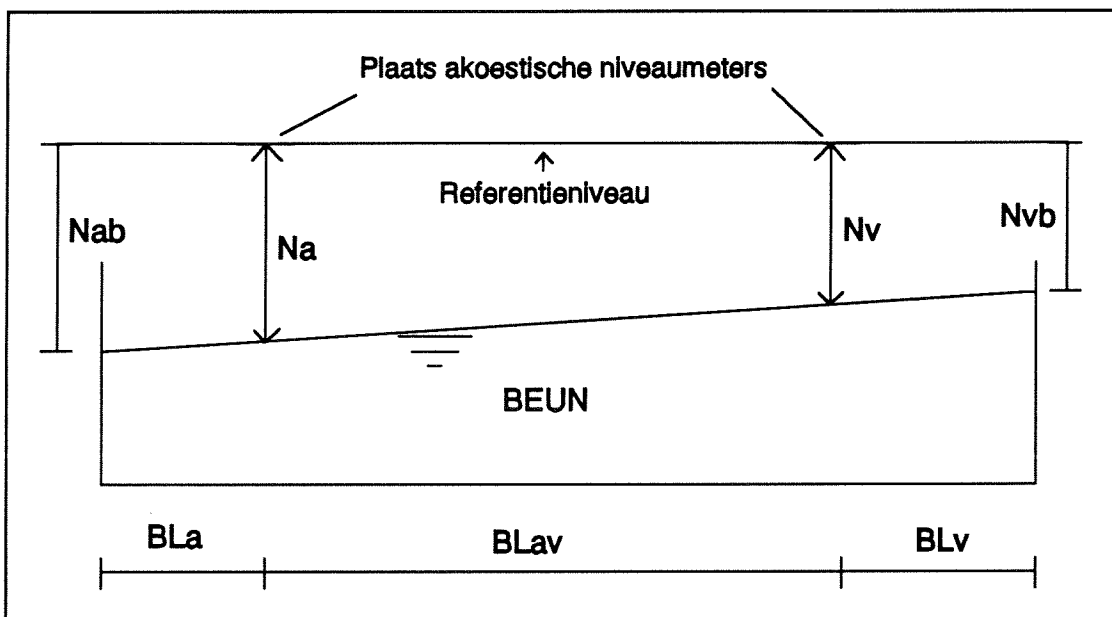
In de volgend paragrafen worden foutenbronnen beschreven bij de bepaling van het beunvolume, displacement, ingaande mengseldichtheid en ingaande mengselsnelheid. Hierbij wordt, indien mogelijk, ook een schatting gegeven van omvang van deze foutenbronnen.

6.5.2 Foutenbronnen bij bepaling beunvolume

Voor de bepaling van het beunvolume wordt gebruik gemaakt van vier akoestisch niveaumeters boven het beun. Deze niveaumeters bepalen de afstand vanaf een vast referentieniveau tot aan het vloeistofoppervlak. Met behulp van een beunmeettabel wordt deze afstand vertaald naar een volume.

De volgende foutenbronnen worden onderscheiden

- akoestische niveaumeters
- schuimlaag op het mengsel
- zand steekt tot boven het vloeistofniveau
- golven in het beun
- temperatureffecten

akoestisch niveaumeters

Figuur 6.1: Plaats akoestische niveaumeters (zijaanzicht beun).

De gemiddelde afstand tot het vloeistofoppervlak bedraagt [10]:

$$N_{gem} = \frac{N_{ab} + N_{vb}}{2} \quad (32)$$

De waarde N_{gem} wordt in de beunmeettabel ingevoerd, zodat het volume bekend is. Bij het gebruik van elk meetinstrument worden door verschillende oorzaken fouten geïntroduceerd.

Fouten ontstaan door hysteresis, lineariteit, reproduceerbaarheid en temperatuur invloed. De nauwkeurigheid van elke meetsensor wordt geschat op 0.25% (inclusief effecten van lineariteit, hysteresis etc.) van het ingestelde meetbereik. Het meetbereik is het verschil tussen de fysische grootte die bij een uitgangssignaal van 2 volt hoort en een uitgangssignaal die bij een uitgangssignaal van 10 volt

hoort. De nauwkeurigheid is op 0.25% van het ingestelde meetbereik geschat, omdat dit ook de eis is die Rijkswaterstaat aan het systeem stelt.

Dit leidt tot een standaardafwijking $\sigma = 3.5\text{m}^3$ [10]. In bijlage 2 is de berekening van de standaardafwijking opgenomen. Deze waarde is echter onwaarschijnlijk klein, omdat de standaardafwijking van de niveaumeters dan slechts 0.5cm bedraagt. Er wordt daarom in het hoofdstuk Gevoeligheidsanalyse gerekend met $\sigma = 10\text{m}^3$.

Schuimlaag op het mengsel

Door de wijze waarop het mengsel via de diffusor in het beun stort ontstaat er een schuimlaag. De dikte van de schuimlaag is afhankelijk van het debiet, het gezogen mengsel en de afstand van de diffusor tot het vloeistofoppervlak. Deze schuimlaag beïnvloedt de meting. Er wordt een te kleine afstand gemeten van het referentieniveau tot aan het vloeistofoppervlak waardoor een te groot volume wordt gepeild. Er is nog weinig inzicht in welke mate de schuimlaag de meting beïnvloedt. Echter in de berekening van de uitgaande dichtheid wordt gebruik gemaakt van het verschil in volume, waardoor slechts veranderingen in dikte van invloed zijn op de dikte van de schuimlaag. In het geval van de 'X', met een beunoppervlak van ca. 650m^2 , komt een verandering van 1cm overeen met een verandering van het volume met 6.5m^3 .

Zand steekt tot boven het vloeistofniveau

In de laatste fase van het laadproces bij een zeer hoge beladingsgraad kan het voorkomen dat het zand boven het vloeistofoppervlak uitsteekt. Zeker indien grof zand wordt gezogen en het zand ongelijk over het beun verdeeld kan zijn.

Indien de meetsensor het volume peilt op het zand boven het wateroppervlak wordt een te groot volume gepeild. Deze invloed is alleen aan het eind van het laadproces merkbaar.

Gedurende de meting werd, zodra het schip beladen was en koers werd gezet richting stortplaats, het zandniveau handmatig gepeild met behulp van een tiental peilbuizen langs het beun. Op deze manier werd het volume zand gepeild en de verdeling in het beun. Het blijkt dat het zand in het algemeen gelijkmatig over het beun verdeeld was. Het gepeilde volume zand is vergeleken met het volume dat werd bepaald met de akoestische niveaumeters vlak voor het einde van het zuigproces. Het blijkt dat dit volume in 17 van de 18 metingen groter was (bijlage 2). Er kan dus geconcludeerd worden dat in 17 van de 18 gevallen geen zand boven het water uitstak. In die gevallen was het verschil tussen het vloeistofoppervlak en het gemiddelde zandniveau 0.65cm.

Er kan geconcludeerd worden dat de invloed van het zandniveau boven het vloeistofniveau geen rol heeft gespeeld.

Golven in het beun

Door de golven op zee kan het schip gaan slingeren, waardoor golven in het beun ontstaan. Het is mogelijk dat hierdoor het volume onnauwkeurig wordt bepaald, doordat de niveaumeters bijvoorbeeld juist in een top of een dal meten. Het is moeilijk vast te stellen wat de invloed van de golven in het beun is. Deze fout is willekeurig.

Nauwkeurigheid beunmeettabel

De beunmeettabel waarmee de afstand gemeten met de niveaumeters wordt vertaald naar een volume is niet helemaal nauwkeurig.

Zo wordt er geen rekening gehouden met temperatuur veranderingen. Immers het staal zal bij stijging van temperatuur uitzetten en bij daling van temperatuur krimpen. Hierdoor zal het beunvolume als functie van de afstand van het referentieniveau tot aan het vloeistofoppervlak veranderen.

Totaal

De nauwkeurigheid waarmee met de akoestische niveaumeters het volume bepalen, kan worden geschat op $\sigma = 10 \text{ m}^3$. De invloed van de andere foutenbronnen is minder duidelijk. In het geval van de 'X' met een beunoppervlak van ca. 650 m^2 komt afwijking van slechts 1 cm al overeen met een fout van 6.5 m^3 in de bepaling van het beunvolume. Er wordt voor verdere berekening in de gevoeligheidsanalyse (hoofdstuk 7) uitgegaan van een standaardafwijking $\sigma = 10 \text{ m}^3$. Deze waarde is in hoofdstuk 7 sterk gevarieerd om de invloed hiervan vast te stellen.

6.5.3 Foutenbronnen bij bepaling displacement

Het displacement wordt bepaald met behulp van vier druksensoren onder het schip. Deze druk (p) wordt met behulp van de dichtheid van het water (ρ_w) omgerekend naar een diepgang (m). Met behulp van het Carènediagram is nu de waterverplaatsing bekend en wordt het displacement bepaald door de waterverplaatsing te vermenigvuldigen met de dichtheid van water.

Bij de bepaling van het displacement zijn de volgende foutenbronnen te onderscheiden:

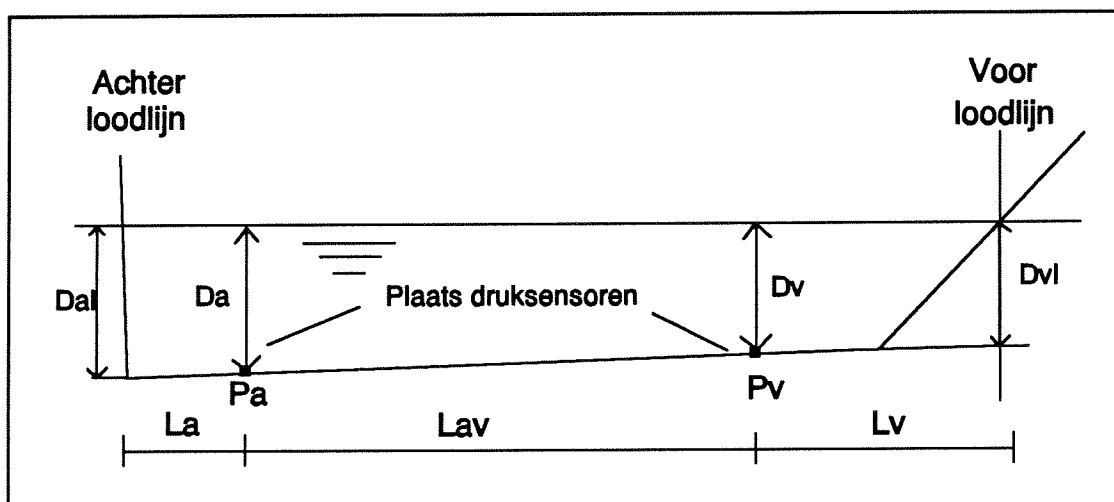
- druksensoren
 - dichtheid van het zeewater
 - golfslag
 - doorzakken schip
 - zuigbuis aan de grond
-

Druksensoren

Om de waterverplaatsing te berekenen is de diepgang ter plaatse van de loodlijnen van belang. Deze diepgang wordt berekend volgens:

$$D_{gem} = \frac{D_{al} + D_{vl}}{2} \quad (33)$$

Net als bij de akoestisch niveaumeters worden ook nu weer fouten geïntroduceerd door hysteresis, lineariteit, reproduceerbaarheid en temperatuur invloed. Ook voor deze instrumenten geldt als gevolg hiervan een nauwkeurigheid van 0.25% binnen het ingestelde meetbereik. Hiermee wordt net aan de eisen van Rijkswaterstaat voldaan. Dit komt overeen met een standaardafwijking $\sigma = 0.5\text{cm}$. In bijlage 2 is de berekening van de standaardafwijking toegelicht.



Figuur 6.2: Plaats druksensoren (zijaanzicht schip)

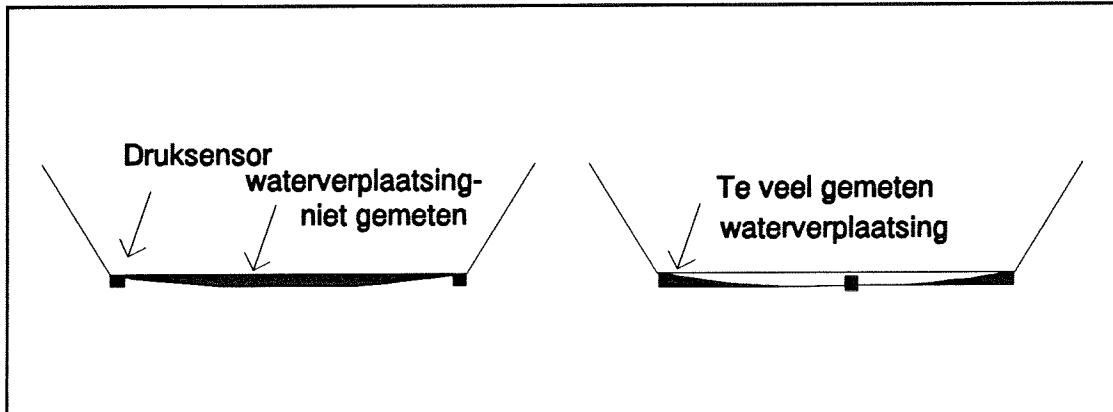
Dichtheid van het zeewater

In de berekening van het displacement wordt een aanname gedaan voor de dichtheid van het zeewater. In de berekening wordt de dichtheid van zeewater nog tweemaal gebruikt. Allereerst bij de berekening van de diepgang ($= p/\rho_w g$) en vervolgens bij de omrekening van waterverplaatsing naar het displacement ($= \text{water} \text{vpl} * \rho_w$). Indien de dichtheid van het omringende water varieert zal dit invloed hebben op de berekening van het displacement. Indien de dichtheid hoger is dan verondersteld zal het displacement in werkelijkheid hoger zijn dan berekend. Indien de dichtheid lager is dan verondersteld zal het displacement lager zijn. Indien de dichtheid van het omringende water behoorlijk varieert zal dit invloed hebben op de berekening van de waterverplaatsing in ton. In bijlage 2 is de invloed van een wisselende dichtheid van het water bepaald. Indien op zee wordt gebaggerd is het niet waarschijnlijk dat de dichtheid sterk varieert. Is de dichtheid eenmaal bekend dan kan deze als constante worden beschouwd.

Doorzakken schip

Het schip is in zekere zin te vergelijken met een ligger op twee steunpunten. Het netto drijfvermogen bevindt zich voornamelijk in het voor- en achterschip. Tijdens de belading zal het schip in het midden enigszins doorzakken, terwijl er geen druksensoren op die plaats zijn gemonteerd. In het Carènediagram is hier geen rekening meegehouden.

De druksensoren zijn echter wel zo geplaatst dat de invloed hiervan minimaal is.



Figuur 6.3: Invloed doorbuiging op waterverplaatsing.

Golfslag

De druksensoren onder het schip kunnen beïnvloed worden door golven. Door de golven zullen er drukvariaties optreden ter plaatse van de druksensoren. Hierdoor wordt de diepgang niet goed berekend. In de literatuur [10] is deze invloed voor de 'X' geanalyseerd en vastgesteld dat bij een $H_s = 1.0\text{m}$ een standaardafwijking $\sigma = 1.7\text{cm}$ optreedt.

Zuigbuis aan de grond

Tijdens het zuigen wordt de sleepkop over de bodem vooruit getrokken. De deiningscompensator (DeiCo) moet er voor zorgen dat er continu goed contact blijft tussen de zuigmond en de bodem. Tijdens normaal zuigproces wordt een deel van het gewicht van de zuigbuis en zuigmond gedragen door de bodem. Indien de eindstanden van de DeiCo worden bereikt kan de kop van de grond af komen of kan de zuigbuis voor een nog groter gedeelte door de grond worden gedragen.

Normaal gesproken worden de eindstanden van de DeiCo niet bereikt. Alleen bij een plotselinge verandering van waterdiepte of een onjuiste bediening van de zuigmondlier zullen de eindstanden bereikt worden. De eindstanden worden slechts korte tijd bereikt, hierdoor heeft deze fout slechts korte tijd invloed.

Totaal

De standaardafwijking die optreedt door golfslag en nauwkeurigheid van het meetinstrument is bekend, maar de invloed van het doorzakken van het schip is niet duidelijk. De standaardafwijking bedraagt voor de 'X' tenminste $\sigma_{\text{golf}}^2 + \sigma_{\text{meets.}}^2 = \sigma^2 = 1.8\text{cm}$. De standaardafwijking in ton hangt af van de diepgang. Voor de 'X' gelden de volgende waarden:

Leeg schip: $d = 3.5\text{ m}$ $\sigma = 31\text{ ton}$

Vol schip: $d = 8.0\text{ m}$ $\sigma = 35\text{ ton}$

Aangezien dit een ondergrens is zal bij de gevoeligheidsanalyse deze waarde sterk gevarieerd worden om de invloed hiervan vast te stellen.

6.5.4 Foutenbronnen bij bepaling gezogen mengseldichtheid

In elk zuigbuis bevindt zich in de pompkamer een radioactieve concentratiemeter (ra-meter) die de mengseldichtheid bepaald.

De volgende foutenbronnen kunnen onderscheiden worden:

- wijze van calibreren
- ra-meter zelf
- samenstelling van het mengsel

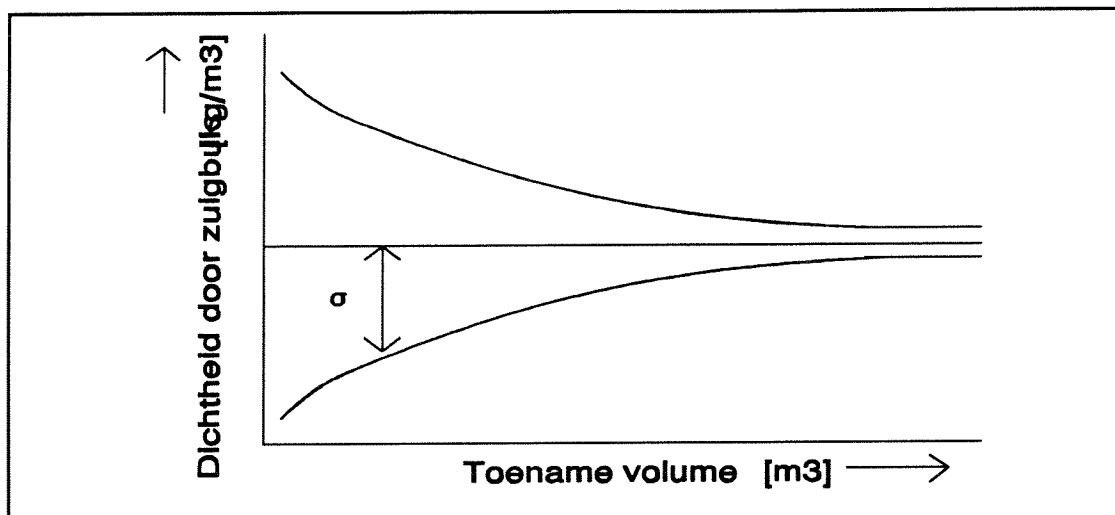
Wijze van calibreren

Het calibreren van de concentratiemeter dient bij voorkeur te gebeuren onder geconditioneerde omstandigheden in een laboratorium. Hierbij worden stoffen met bekende dichtheid tussen bron en ontvanger geplaatst. Dit is echter aan boord niet het geval. De concentratiemeter wordt gec calibreerd door gedurende enkele minuten het beun vol te pompen met mengsel en vervolgens met behulp van het TDS-systeem de dichtheid van het mengsel te bepalen. Deze dichtheid wordt gekoppeld aan het gemiddelde uitgangssignaal van de concentratiemeter. Hierbij wordt verondersteld dat gedurende enkele minuten een constante dichtheid is gezogen. In werkelijkheid is dit niet zo.

Met behulp van de volgende formule wordt de gemiddelde dichtheid berekend:

$$\bar{\rho}_{in} = \frac{W_{t+\Delta t} - W_t}{V_{t+\Delta t} - V_t} = \frac{\Delta W}{\Delta V} \quad (34)$$

De calibratie dient over een zo lang mogelijke tijd plaats te vinden, omdat dan de invloed van de fout in de bepaling van de het beunvolume en displacement geminimaliseerd is.



Figuur 6.4: Invloed toename volume op nauwkeurigheid

Voor de 'X' gelden de volgende waarden:

Beunvolume leegschip: 2200 m^3

Beunvolume overvloeien: 5800 m^3

Hieruit volgt dat het verschil in beunvolume ΔV tijdens de calibratie maximaal 3600 m^3 is. De verandering van het displacement ΔW is afhankelijk van de gezogen mengseldichtheid.

$\rho_{in} = 1020 \text{ kg/m}^3$: $\Delta W = 3600 * 1.020 = 3672 \text{ ton}$

$\rho_{in} = 1300 \text{ kg/m}^3$: $\Delta W = 3600 * 1.300 = 4680 \text{ ton}$

Radioactieve concentratiemeter zelf

De foutenanalyse van de radioactieve concentratiemeter is beschreven in paragraaf 6.2.

Samenstelling van het mengsel

De invloed van de samenstelling van het mengsel op de nauwkeurigheid is beschreven in paragraaf 6.2.

6.5.5 Foutenbronnen bij bepaling gezogen mengselsnelheid

De mengselsnelheid wordt bepaald door een elektromagnetische snelheidsmeter (Altofluxmeter).

De volgende foutenbronnen kunnen onderscheiden worden:

- wijze van calibreren
- elektromagnetische snelheidsmeter zelf
- samenstelling van het mengsel

Wijze calibratie

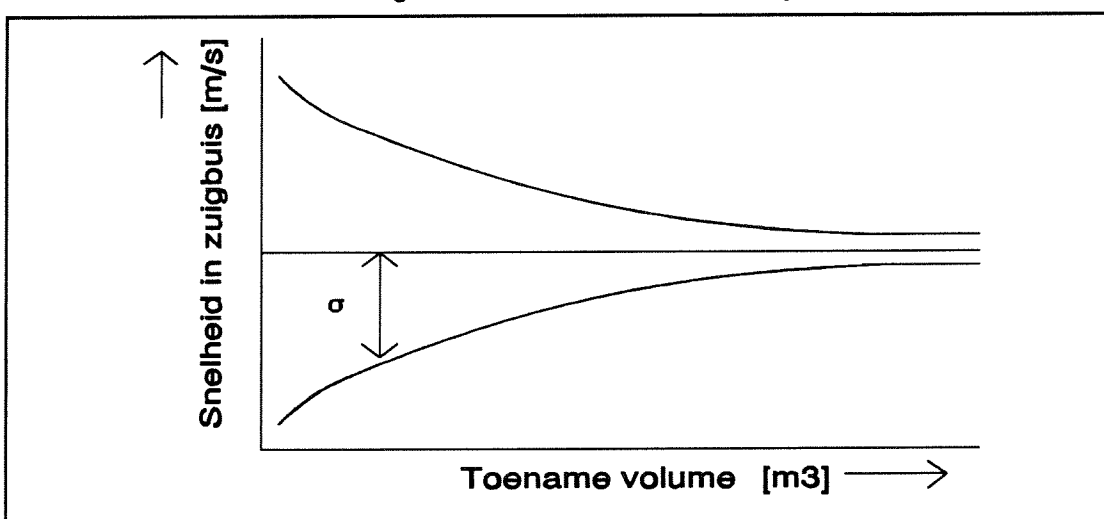
Het calibreren van de snelheidsmeter dient bij voorkeur te gebeuren onder geconditioneerde omstandigheden in een laboratorium. Hierbij wordt water met een

bekende snelheid langs de snelheidsmeter gevoerd. Dit is echter niet het geval bij de calibratie van de snelheidsmeter in de zuigbuizen.

De calibratie vindt plaats door enkele minuten mengsel te zuigen en met het TDS-systeem te meten hoeveel het beunvolume in die tijd is toegenomen. Het is zo ook bekend met welke gemiddelde snelheid het mengsel langs de snelheidsmeter is gestroomd. Deze gemiddelde snelheid wordt gekoppeld aan het uitgangssignaal van de snelheidsmeter. Hierbij wordt aangenomen dat het mengsel gedurende enkele minuten een constante snelheid had en de volumemeting voldoende nauwkeurig is. Met behulp van TDS-systeem wordt berekend:

$$\bar{u}_{in} = \frac{V_{t+\Delta t} - V_t}{A(t+\Delta t - t)} = \frac{\Delta V}{A\Delta t} \quad (35)$$

Ook nu neemt de nauwkeurigheid van de calibratie toe bij toenemende ΔV .



Figuur 6.5: Invloed toename volume op nauwkeurigheid.

Voor de 'X' gelden de volgende waarden:

Beunvolume leegschip: 2200 m³

Beunvolume overvloeien: 5800 m³

Hieruit volgt dat het verschil in beunvolume ΔV tijdens de calibratie maximaal 3600 m³ is. De tijd die voor de calibratie nodig is wordt bepaald door de mengselsnelheid.

Elektromagnetische snelheidsmeter zelf

Net als bij de akoestisch niveaumeters, de drukopnemers en de concentratiemeters worden ook nu weer fouten geïntroduceerd door hysteresis, lineariteit, reproduceerbaarheid en temperatuur invloed. Volgens de literatuur is als gevolg van deze fouten de nauwkeurigheid van de snelheidsmeter onder ideale omstandigheden 1%, echter aan boord zijn de omstandigheden niet ideaal. Hoe groot de standaardafwijking exact onder baggeromstandigheden is, is moeilijk te bepalen. Indien het instrument nauwkeurig gecalibreerd is moet er rekening worden gehouden met tenminste een afwijking van 3-3.5% [6]

Samenstelling van het mengsel

De snelheidsmeter meet de snelheid van het water en niet van de zanddeeltjes. Het is mogelijk dat de snelheid van de zanddeeltjes kleiner is dan de mengsnelheid van het water. Hoe fijner het zand, hoe kleiner de fout.



7. GEVOELIGHEIDSANALYSE INDIRECTE METHODE

7.1 Inleiding

De nauwkeurigheid waarmee de uitgaande dichtheid met behulp van het TDS-systeem bepaald wordt hangt van vele factoren af. Door middel van een gevoeligheidsanalyse is inzicht te krijgen welke factoren grote invloed hebben. De uitgaande dichtheid wordt berekend volgens de formules (29), (30) en (31).

Een belangrijke factor is de tijdstap Δt . Dit is de tijd waarover de snelheidsmeter en dichtheidsmeter worden geïntegreerd. Over die tijd wordt de gemiddelde uitgaande dichtheid berekend. Hoe groter Δt wordt gekozen hoe kleiner de invloed van de standaardafwijking van het verschil in waterverplaatsing (ΔW) en de standaardafwijking van het verschil in beunvolume (ΔV) en dus ook des te kleiner de invloed van het TDS-systeem. Wordt Δt klein gekozen dan zal de berekende dichtheid sterk variëren (grote spreiding).

De invloed van Δt wordt vastgesteld met behulp van een Monte-Carlo simulatie. Hierbij wordt aan elke variabele een kansdichtheidsfunctie toegekend met een standaardafwijking (σ) en een gemiddelde (μ). Er wordt uitgegaan dat de kansdichtheidsfuncties normaal verdeeld zijn en de variabelen onafhankelijk zijn. De Monte-Carlo simulatie houdt in dat de computer een trekking doet uit de kansdichtheidsfuncties van de verschillende variabelen in formule 30. Met deze trekking berekent de computer een waarde voor de uitgaande dichtheid. De computer bepaalt op deze wijze 30.000 keer de uitgaande dichtheid en bepaalt van het histogram dat zo ontstaat het gemiddelde en de standaardafwijking [17].

Aan de hand van praktijkgegevens zijn de gemiddelden van de variabelen bepaald in het geval van de meting aan boord van de 'X'.

Uit het hoofdstuk Foutenanalyse is gebleken dat het moeilijk is om de standaardafwijking exact te bepalen. Het is dus belangrijk om te analyseren wat de invloed is van deze standaardafwijking. Naast de invloed van de tijdstap moet dus ook de invloed van de standaardafwijking worden bepaald.

In de volgende paragraaf wordt de invloed van de tijdstap Δt en de standaardafwijkingen geanalyseerd. In de daarop volgende paragraaf worden enkele overwegingen gegeven voor de keuze van de tijdstap.

7.2 Invloed van tijdstap en standaardafwijkingen op nauwkeurigheid

In tabel 7.1 zijn de standaardafwijkingen samengevat zoals deze in de foutenanalyse zijn genoemd.

	u_{in} (m/s)	ρ_{in} (kg/m ³)	ΔV (m ³)	ΔW (ton)
σ	3.5%	3.5%	14 m ³	47 ton

Tabel 7.1: Standaardafwijkingen u_{in} , ρ_{in} , ρ_{uit} en ΔV .

De standaardafwijkingen ΔW en ΔV zijn op de volgende wijze berekend (bijlage 2):

$$\begin{aligned}\sigma^2(\Delta V) &= \sigma^2(V_{t+\Delta t}) + \sigma^2(V_t) = 10^2 + 10^2 \\ \sigma(\Delta V) &= 14 \text{ m}^3 \\ \sigma^2(\Delta W) &= \sigma^2(W_{t+\Delta t}) + \sigma^2(W_t) = 31^2 + 35^2 \\ \sigma(\Delta W) &= 47 \text{ ton}\end{aligned}$$

Tabel 7.2 geeft de aannamen voor de gemiddelde u_{in} , ρ_{in} en ρ_{uit} en ΔV .

	u_{in} (m/s)	ρ_{in} (kg/m ³)	ΔV (m ³)	ρ_{uit} (kg/m ³)	ΔW (kg)
μ	4	1300	0	1050	1271.6 * Δt

Tabel 7.2: gemiddelden van u_{in} , ρ_{in} en ρ_{uit} en ΔV .

De waarden voor $\mu(u_{in})$ en $\mu(\rho_{in})$ zijn gebaseerd op basis van de pompkarakteristiek. Tijdens overvloeien is in principe de verandering van het beunvolume 0 en geldt dat het ingaande debiet gelijk is aan het uitgaande debiet. Echter bij maximaal displacement wordt de overvloeikoker in stappen neergedrukt waardoor dit niet meer geldt. Doordat bij benadering geladen wordt volgens het Constant Tonnage System is het niet mogelijk om ΔV in de vergelijking te verwaarlozen.

De verandering van het displacement is afhankelijk van de tijdstap en de dichtheid van het overvloeiende mengsel. Voor de dichtheid van het uitgaande mengsel is 1050kg/m³ aangenomen. Dit is de situatie vlak na overvloeien, waarbij de overloopverliezen nog niet groot zijn.

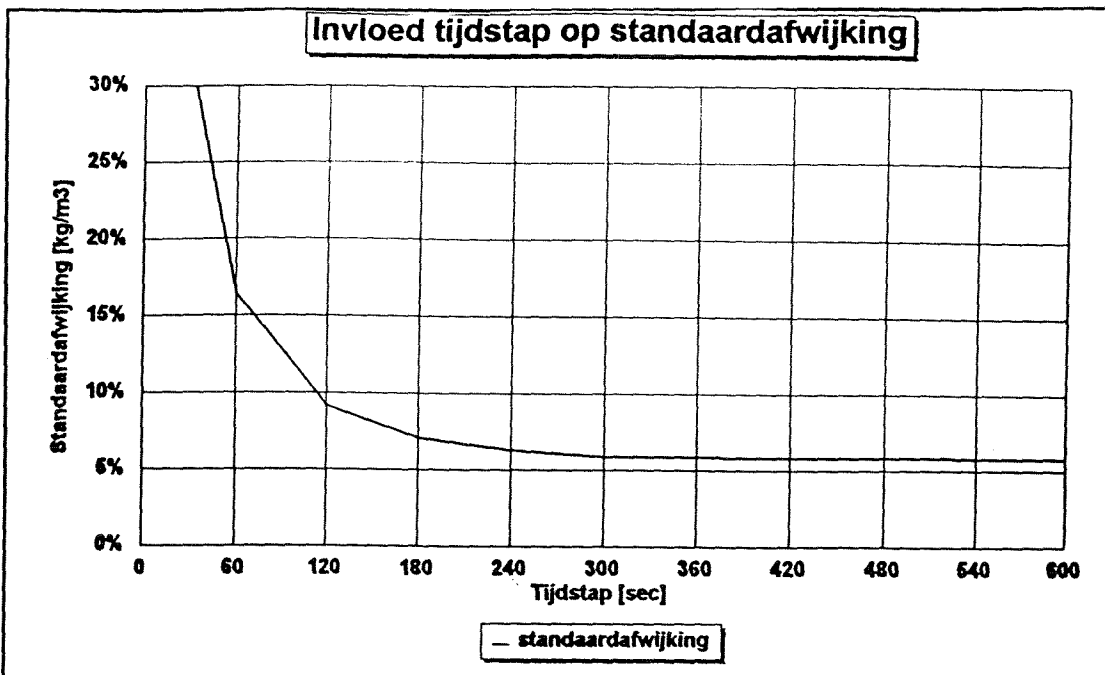
Met behulp van een Monte-Carlo simulatie is nu $\sigma(\rho_{uit})$ bepaald.

Tabel 7.3 geeft de resultaten van de simulatie.

Δt [sec]	30	60	120	180	240	300	3600
$\sigma(\rho_{uit})$ [kg/m ³]	331	172	97	75	66	62	53
$\sigma(\rho_{uit})$	31.5%	16.4%	9.2%	7.1%	6.3%	5.9%	5.0%

Tabel 7.3: Invloed tijdstap op standaardafwijking

In figuur 7.1 zijn deze waarden grafisch uitgezet. Het blijkt dat de standaardafwijking snel afneemt bij een groter wordende tijdstap.



Figuur 7.1: Afname standaardafwijking bij vergroting tijdstap.

De waarden voor de standaardafwijking waarmee tabel 7.3 is samengesteld zijn een ruwe benadering. Om de invloed van de verschillende standaardafwijkingen vast te stellen zijn deze in tabel 7.4 gevarieerd. Op deze manier is inzicht te krijgen welke instrumenten grote invloed hebben op de fout. De tabel is samengesteld door steeds één standaardafwijking te wijzigen en de rest constant te houden.

De standaardafwijkingen zijn als volgt gevarieerd:

$$\begin{aligned}\sigma(u_{in}) &= 10 \% \\ \sigma(\rho_{in}) &= 10 \% \\ \sigma(\Delta W) &= 150 \text{ ton} \\ \sigma(\Delta V) &= 50 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Indien de standaardafwijking bij de bepaling van het beunvolume 50 m^3 is, komt dit overeen met een standaardafwijking van ca. 7.5 cm in de bepaling van de afstand van het referentieniveau tot aan de vloeistofspiegel door de niveaumeters.

Indien de standaardafwijking bij de bepaling van het displacement 150 ton is, komt dit overeen met een standaardafwijking van ca. 8 cm in de bepaling van de diepgang met behulp van de drukmeters.

De waarden in rij drie van tabel 7.4 zijn bijvoorbeeld berekend met $\sigma(u_{in}) = 10 \%$, $\sigma(\rho_{in}) = 3.5 \%$, $\sigma(\Delta W) = 47 \text{ ton}$ en $\sigma(\Delta V) = 14 \text{ m}^3$

Δt [sec]	30 [sec]	60 [sec]	120 [sec]	180 [sec]	240 [sec]	300 [sec]	3600 [sec]
σ volgens tabel 1	31.5%	16.4%	9.2%	7.1%	6.3%	5.9%	5.0%
$\sigma(u_{in}) =$ 10%	32.4%	16.5%	9.6%	7.5%	6.8%	6.4%	5.5%
$\sigma(\rho_{in}) =$ 10%	33.3%	19.8%	14.6%	13.3%	13.0%	12.8%	12.4%
$\sigma(\Delta W) =$ 150ton	95.0%	47.6%	23.9%	16.6%	12.7%	10.7%	5.0%
$\sigma(\Delta V) =$ 50m ³	50.3%	24.3%	11.4%	8.8%	7.4%	6.7%	5.0%

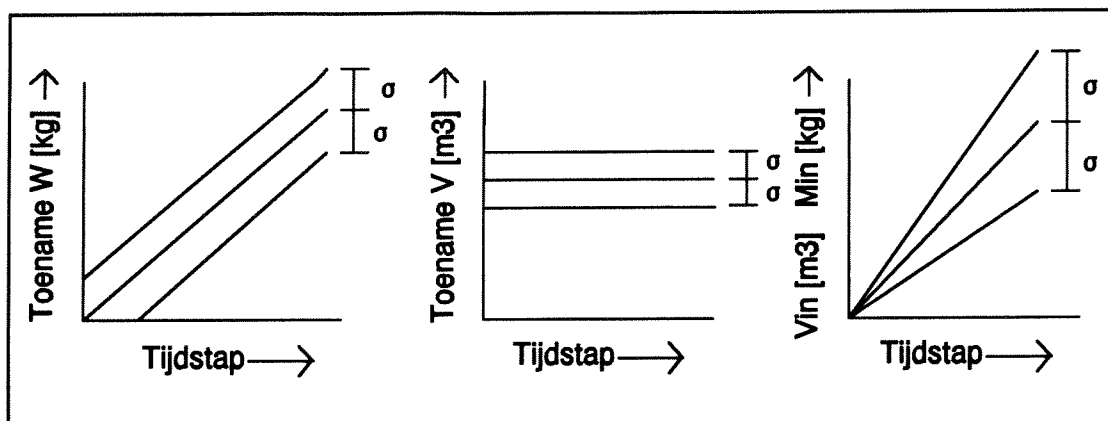
Tabel 7.4: Invloed van standaardafwijking van de verschillende variabelen op de standaardafwijking van de uitgaande dichtheid bij verschillende tijdstappen.

Het blijkt dat de standaardafwijking bij oplopende Δt snel terugloopt en de invloed van $\sigma(\Delta V)$ en $\sigma(\Delta W)$ afneemt.

Het blijkt dat gebruik gemaakt kan worden van het TDS-systeem om het cumulatief overloopverlies te bepalen, indien de tijdstap gelijk is aan de zuigtijd. De standaardafwijking van de snelheidsmeter en concentratiemeter is dan zo groot dat de standaardafwijking bij de bepaling van het volume en het displacement geen rol meer speelt. Het blijkt dat bij een tijdstap van 3600 sec. het niet uitmaakt of $\sigma(\Delta V) = 14 \text{ m}^3$ of $\sigma(\Delta V) = 50 \text{ m}^3$ en het niet uitmaakt of $\sigma(\Delta W) = 47 \text{ ton}$ of $\sigma(\Delta W) = 150 \text{ ton}$.

Dat een fout in de bepaling in het volume en het displacement een steeds kleinere rol gaat spelen is te verklaren doordat de inkomende massa wordt berekend door de snelheidsmeter en concentratiemeter te integreren in de tijd. De omvang van de fout in de bepaling de inkomende massa groeit met een grotere tijdstap. De verandering van het volume en het displacement wordt bepaald door op twee momenten respectievelijk het volume en het displacement te bepalen. De tijd tussen deze twee metingen heeft geen invloed op de omvang van de fout (figuur 7.2).

De invloed van de concentratiemeter is erg groot. Het is dus erg belangrijk om grote zorg te besteden aan de calibratie van dit instrument. Indien dit instrument niet goed wordt gecalibreerd neemt de standaardafwijking sterk toe.



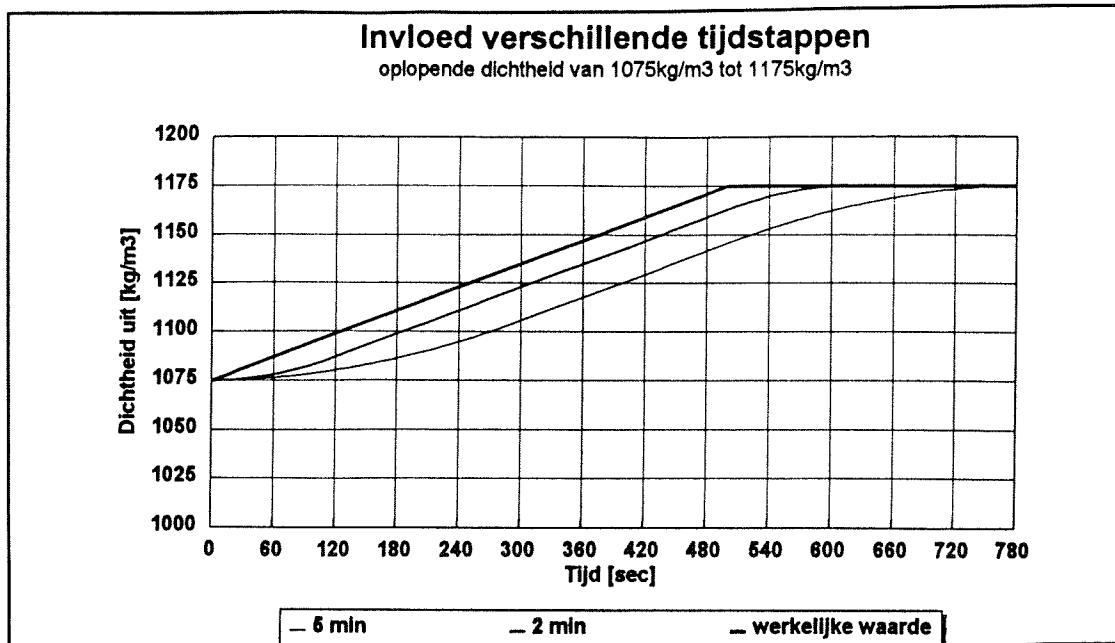
Figuur 7.2: Ontwikkeling standaardafwijkingen van de verschillende variabelen

Conclusies

- De nauwkeurigheid waarmee de uitgaande dichtheid wordt berekend neemt sterk toe bij een groter wordende tijdstep.
- Indien het cumulatief overloopverlies over de hele zuigperiode wordt bepaald, wordt de nauwkeurigheid volledig bepaald door de nauwkeurigheid van de snelheidsmeter en concentratiemeter. Het cumulatief overloopverlies is met een standaardafwijking van 5 % te berekenen met behulp van het TDS-systeem.
- De invloed van de nauwkeurigheid van de concentratiemeter op de nauwkeurigheid waarmee het overloopverlies wordt berekend is erg groot. Het is belangrijk om dit instrument zo nauwkeurig mogelijk te calibreren.
- Bij een kleine tijdstep is de invloed van de standaardafwijking waarmee het displacement wordt bepaald zeer groot. Echter bij een grotere tijdstep neemt de invloed snel af.
- De invloed van een onnauwkeurige bepaling van de mengselsnelheid heeft bij een kleine tijdstep in vergelijking met de andere variabele een kleine invloed op de nauwkeurigheid waarmee de overvloeiende dichtheid wordt bepaald.

7.3 Bepaling van tijdstep

De tijdstep bepaalt over hoeveel minuten de gemiddelde overvloeiende dichtheid wordt berekend. Indien gekozen wordt voor een grote tijdstep is de berekening nauwkeuriger, maar duurt het langer voordat wijzigingen zichtbaar zijn. Figuur 7.3 geeft een voorbeeld indien de overvloeiende dichtheid in 500 seconden oploopt van 1075 kg/m^3 tot 1175 kg/m^3 . Een stijging van de overvloeiende dichtheid op deze tijdschaal is in de praktijk ook waargenomen.



Figuur 7.3: Invloed tijdstap Δt bij continu oplopende dichtheid.

Tevens is aangegeven wat het effect is van twee verschillende tijdstappen. Uit de grafiek is af te lezen dat bij een tijdstap van 5 minuten een verandering van de dichtheid pas na ca. 150 sec. zichtbaar is. Voor productie- en calculatieberekeningen hoeft dit geen bezwaar te zijn, omdat de grafiek dan verschoven kan worden in de tijd. Voor sturing van het proces kan een tijdstap van 5 minuten te groot zijn omdat het signaal dan als het ware achterloopt. De uitgaande dichtheid in de overvloeikoker is al enkele minuten fors gestegen terwijl dit met de indirecte methode nog niet zichtbaar is. De informatie is vooral van belang in de eindfase waarin de dichtheid in korte tijd sterk kan oplopen (zie ook hoofdstuk 8).

In hoofdstuk 8 wordt de uitgaande dichtheid met verschillende tijdstappen berekend om zo een optimale tijdstap vast te stellen voor de meting in de praktijk.

8. METINGEN IN DE PRAKTIJK

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de meting aan boord van de sleephopperzuiger 'X' in december 1995 behandeld. De meting had het volgende tot doel:

- Het testen van de verschillende meetmethoden om de uitgaande dichtheid te bepalen.
- Het meten van het overloopverlies en de uitgaande dichtheid onder verschillende omstandigheden.

Het gebruik van de verschillende meetmethoden in de praktijk wordt in paragraaf 8.5 beschreven. De interpretatie van de meetresultaten komt in paragraaf 8.6 aan de orde.

Voor de meting is een speciaal computerprogramma geschreven waarmee de verschillende meetsignalen zijn vastgelegd. In paragraaf 8.3 wordt dit programma 'OVERFLOW' beschreven. De resultaten van de calibratie van de instrumenten in de zuigbuizen zijn in paragraaf 8.4 opgenomen. Allereerst worden in paragraaf 8.2 de belangrijkste kenmerken van de sleephopper 'X' en de zuigcycli op locatie A en op locatie B beschreven.

8.2 Sleephopperzuiger 'X' en zuigcyclus

Censuur

8.3 Computerprogramma OVERFLOW

Voor de meting is een computerprogramma geschreven. Het programma is geschreven door R. Rullens op basis van een functionele specificatie van C.F.M. Aarts. De volgende eisen zijn aan het programma gesteld:

1. Vastleggen van de volgende signalen met een interval van 5 seconden:
 - * displacement [ton]
 - * beunvolume [m³]
 - * tonnen droge stof in beun [ton]
 - * stand overvloeikoker [volt]
 - * tijd [jaar, maand, dag, uur, min, sec]
 - * signaal van de concentratiemeters in de zuigbuizen [volt]
 - * signaal van de snelheidsmeters in de zuigbuizen [volt]
 - * signaal van de ra-meter aan de overvloeikoker [volt]
 - * signaal van de stemvork aan de overvloeikoker [volt]

Het displacement, het beunvolume, het aantal tonnen droge stof en de tijd zijn direct uit de TDS-computer te verkrijgen zonder filtering.

De andere signalen zijn vastgelegd door de verschillende concentratiemeters en snelheidsmeters met een interval van 1 seconden te scannen en

vervolgens over 5 seconden te middelen.

2. Berekening en presentatie tijdens de meting van:

- * gemiddeld relatief overloopverlies over laatste 5 minuten
- * gemiddelde overvloeiende dichtheid over laatste 5 minuten
- * gefilterd displacement van het schip
- * cumulatieve hoeveelheid tonnen droge stof door de overvloeioker

Op deze wijze kan tijdens de meting beoordeeld worden hoe de indirecte meting verloopt.

3. Berekening en presentatie van calibratie:

- * cumulatief ingaand debiet (volume) gemeten met de snelheidsmeters
- * beunvolume met behulp van niveaumeters
- * dichtheid van het ingaande mengsel gemeten met de concentratiemeters
- * dichtheid van het ingaande mengsel volgens het TDS-systeem

Het programma maakt onderscheid tussen twee fasen: een actieve fase tijdens de status zuigen en een passieve fase tijdens de andere statussen (varen en dumpen). Zodra de sleepkop boven het gat is en er wordt gestart met zuigen schakelt het programma zelf over naar de actieve fase en start met het vastleggen en presenteren van de signalen zoals hierboven beschreven.

In de actieve fase kent het programma twee verschillende presentatieschermen:

- Meetscherm waarin de gegevens gepresenteerd worden zoals geformuleerd onder eis 2. Op het meetscherm zijn drie grafieken te zien (bijlage 4):
 - * Een grote grafiek met hierin het gefilterde displacement, de gefilterde hoeveelheid TDS in het beun en de cumulatieve hoeveelheid tonnen droge stof door de overvloeioker.
 - * Een kleinere grafiek rechts boven met hierin de gemiddeld overvloeiende dichtheid gedurende de afgelopen 5 minuten.
 - * Een kleinere grafiek hier recht onder met hierin het relatief overloopverlies gedurende de afgelopen 5 minuten.
- Calibratiescherm waarin de gegevens gepresenteerd worden zoals geformuleerd onder eis 3. Op het meetscherm is één grafiek te zien waarin de gegevens worden aangegeven zoals geformuleerd onder eis 3.
 - * ingaand debiet gemeten met de snelheidsmeters
 - * beunvolume met behulp van TDS-systeem
 - * dichtheid van het ingaande mengsel gemeten met de concentratiemeters
 - * dichtheid van het ingaande mengsel volgens het TDS-systeem

In bijlage 4 is een uitgebreidere beschrijving van het programma opgenomen.

8.4 Calibratie meetinstrumenten in zuigbuizen

Calibratie van de snelheidsmeters

Bij de calibratie van de snelheidsmeters is in hoofdlijnen uitgegaan van de procedure zoals is beschreven in paragraaf 5.6.3 Er is met verschillende snelheid gezogen om de lineaire relatie tussen het uitgangssignaal van de snelheidsmeter [volt] en de daadwerkelijke snelheid [m/s] te bepalen.

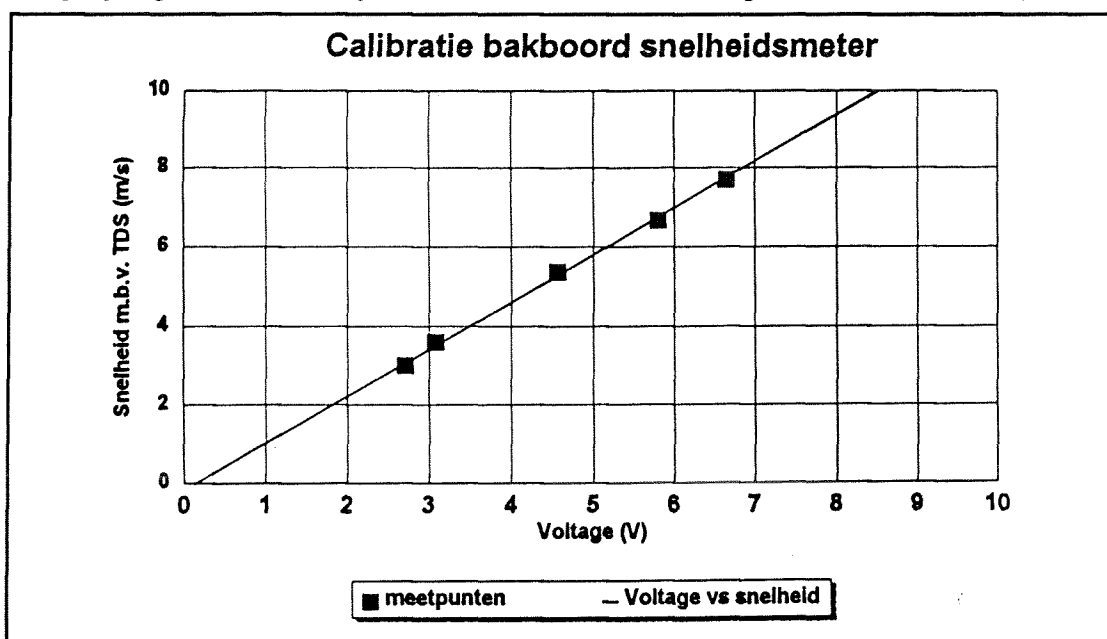
Hierbij dient echter aangetekend te worden dat tijdens het calibreren niet alleen water is gezogen, maar ook mengsel. Hierdoor is het niet mogelijk het volume te controleren met behulp van het displacement. Daarnaast is ook niet gezogen met de afsluiter dicht om het punt 0 m/s te bepalen.

De volgende relaties zijn gevonden:

$$u_{bb} = 1.19 \text{ Volt} - 0.15 \quad (36)$$

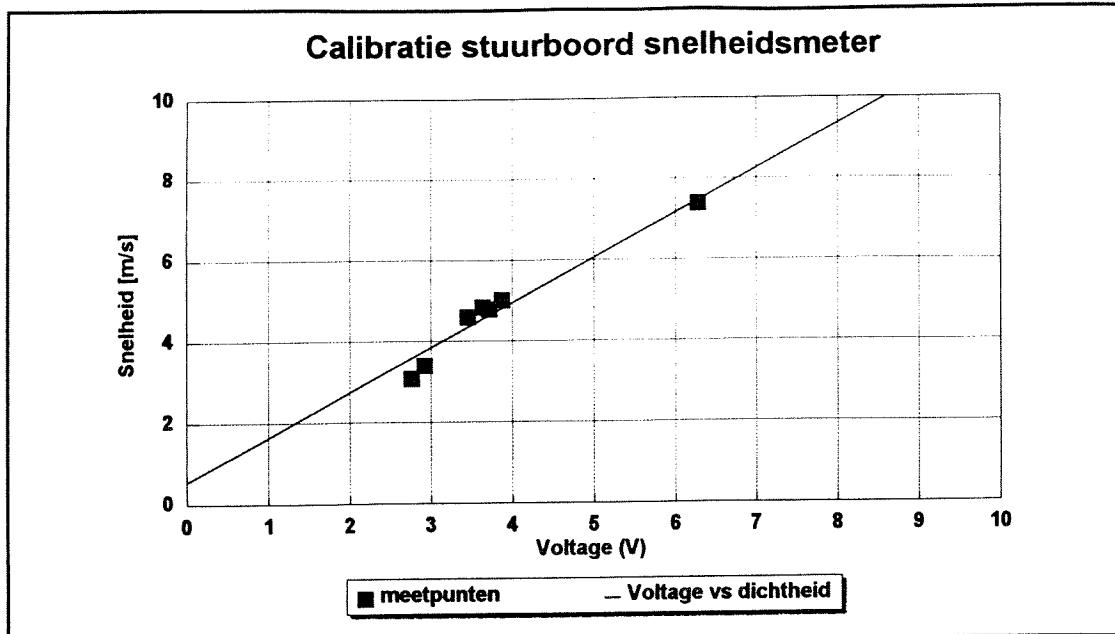
$$u_{sb} = 1.07 \text{ Volt} + 0.67 \quad (37)$$

Vergelijking (36) en (37) zijn ontstaan uit een lineaire regressie door de meetpunten.



Figuur 8.1: Calibratie van de bakboord snelheidsmeter.

Bij de calibratie van de stuurboord snelheidsmeter dient opgemerkt te worden dat de meetpunten, met uitzondering van het punt 6.33 Volt, dicht bij elkaar liggen. Dit meetpunt beïnvloed de meting sterk. Daarnaast zijn de bodemdeuren niet gecontroleerd op lekkage.



Figuur 8.2: Calibratie van de stuurboord snelheidsmeter.

Calibratie concentratiemeters

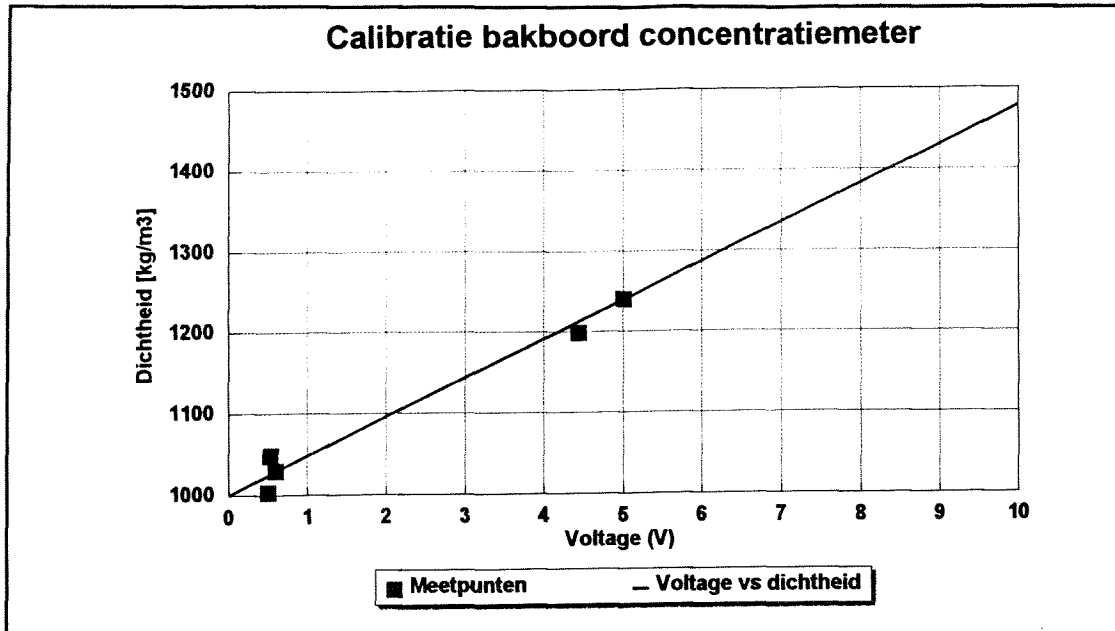
Bij de calibratie van de concentratiemeters is in hoofdlijnen uitgegaan van de procedure zoals deze is beschreven in paragraaf 5.6.3 Er is met verschillende dichtheden gezogen om de lineaire relatie tussen het uitgangssignaal van de concentratiemeter [volt] en de daadwerkelijke dichtheid [kg/m^3] te bepalen.

De volgende relaties zijn gevonden:

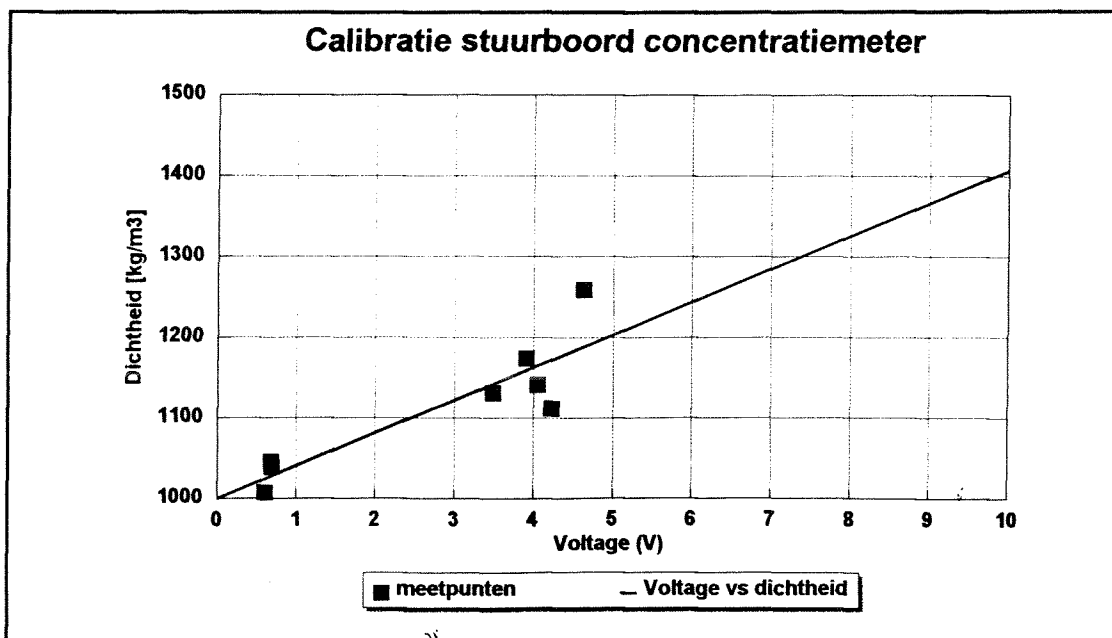
$$\rho_{bb} = 48 \text{ Volt} + 1001 \quad (38)$$

$$\rho_{sb} = 40 \text{ Volt} + 1000 \quad (39)$$

Vergelijking (38) en (39) zijn ontstaan uit een lineaire regressie door de meetpunten.



Figuur 8.3: Calibratie van de bakboord concentratiemeter.



Figuur 8.4: Calibratie van de stuurboord concentratiemeter.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat met name in het geval van de stuurboord concentratiemeter de spreiding van de meetpunten groot is.

Controle van de calibratiecoëfficiënten

De calibratiecoëfficiënten zijn gecontroleerd door met vergelijking (36), (37), (38) en (39) het cumulatief relatief overloopverlies na overvloeien met behulp van het TDS-systeem te berekenen voor de verschillende reizen (tabel 8.1). Het cumulatief relatief overloopverlies na overvloeien blijkt tijdens een aantal reizen negatief te zijn.

Reis	11 ¹	12	13	34	36	38	46	48
Relatief overloopverlies [%]	x	x	x	x	x	x	x	x
Reis	50	60	62	64	I-1	I-5	I-11	
Relatief overloopverlies [%]	x	x	x	x	x	x	x	

Tabel 8.1: Cumulatief relatief overloopverlies na overvloeien.

Een negatief relatief overloopverlies is niet mogelijk omdat in dat geval meer zand in het beun bezonken is dan dat er ingepompt is. De volgende mogelijke oorzaken voor dit resultaat zijn te onderscheiden:

- Meting van het displacement en/of volume met behulp van instrumenten van het TDS-systeem klopt niet. De massa van de lading is te hoog geschat.
- De snelheidsmeters en/of concentratiemeters in de zuigbuizen zijn niet goed gecalibreerd. Het ingaand debiet en/of dichtheid wordt te laag geschat.

De verwachting is dat de fout niet veroorzaakt wordt door de niveaumeters en druksensoren van het TDS-systeem. Tijdens de meting werd gecombineerd zand/slib gevaren en werd het TDS-systeem ook als afrekenmethode voor het gebaggerde slib gebruikt. De vereiste toetsen om de meetinstrumenten te controleren (zoals geformuleerd in paragraaf 5.6.2) zijn dus ook uitgevoerd. De resultaten van de meting zijn goedgekeurd en er kan dus verondersteld worden dat het negatieve relatief overloopverlies niet veroorzaakt wordt door de druksensoren en niveaumeters.

Waarschijnlijk zijn de instrumenten in de zuigbuizen niet goed gecalibreerd. De fout kan veroorzaakt zijn door zowel de snelheidsmeter als de concentratiemeter. De verwachting is dat de fout veroorzaakt wordt door de concentratiemeter. De spreiding van de meetpunten op basis waarvan de concentratiemeter is gecalibreerd is groot, terwijl dit bij de snelheidsmeter niet het geval is.

Met behulp van de ra-meter aan de overvloeikoker is in de fase direct na overvloeien de ingaande dichtheid op indirecte wijze bepaald tijdens reis 64. Tijdens deze reis werd geladen met alleen de bakboord zuigbuis. Gezien de nauwkeurige wijze waarop de ra-meter aan de overvloeikoker is gecalibreerd (bijlage 1) is de verwachting dat dit instrument in de beginfase de juiste dichtheid aangeeft, zeker wanneer er met één buis wordt gezogen. De stroming in het beun is dan relatief

¹ - Nummering van de reizen komt overeen met nummering in het logboek van de kapitein.
 - Relatief overloopverlies tijdens reizen 6 tot en met 10 niet te bepalen in verband met niet functionerende snelheidsmeters.

rustig en de overvloeiende dichtheid is laag en constant. Er is gebruik gemaakt van dezelfde balansvergelijkingen als bij de berekening van uitgaande dichtheid op de indirecte wijze. Nu is de ingaande dichtheid onbekend in plaats van de uitgaande dichtheid.

De volgende vergelijkingen zijn gebruikt:

$$M_{in} = M_{uit} + \Delta W \quad (40)$$

$$V_{in} = Q_{in} \Delta t \quad (41)$$

$$\rho_{in,ind.} = \frac{M_{in}}{V_{in}} \quad (42)$$

Voor de berekening van het ingaande debiet is gebruik gemaakt van vergelijking (36) om de snelheid door de zuigbuis te bepalen.

De volgende tabel is samengesteld voor het zuigproces tussen 15 en 25 minuten na start zuigen. Dit is direct na overvloeien. In deze tabel zijn de gemiddelde gemeten waarden voor de uitgaande dichtheid, het ingaande debiet, het beunvolume en de ingaande dichtheid opgenomen.

	gemiddeld (μ)	standaardafwijking (σ)
$\rho_{uit,mbv}$ ra-meter aan koker	1057 kg/m ³	0.9%
Q_{in}	3.72 m ³ /s	5.4%
V	6114 m ³	0.2%
ρ_{in}	1220 kg/m ³	1.7%

Tabel 8.2: Gemiddelden en standaardafwijking van ρ_{uit} met ra-meter, Q_{in} , V en ρ_{in} tijdens reis 64 tussen 15 en 25 minuten na start zuigen.

Doordat de spreiding rondom de gemiddelden klein is en het volume ook constant is, blijkt dat het zuigproces in deze fase constant was. In deze periode is het overvloeienniveau constant waardoor geldt: $Q_{in} = Q_{uit}$.

Met tabel 8.1 en de verandering van het displacement in deze periode is op indirecte wijze de gezogen dichtheid te bepalen met vergelijkingen (39), (40), en (41).

Met $\Delta W = 12883 - 12417 = 466$ ton en de vergelijkingen is berekend:

$$\begin{aligned} M_{in} &= 2711 \text{ ton} \\ V_{in} &= 2124 \text{ m}^3 \\ \rho_{in, ind.} &= 1276 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Hieruit kan geconcludeerd worden dat er een verschil van ca. 55 kg/m³ bestaat tussen de dichtheid bepaald met behulp van de calibratiecoëfficiënten (1220 kg/m³) en de op indirecte wijze bepaalde dichtheid (1276 kg/m³). Op basis van ervaring wordt 1275 kg/m³ niet onwaarschijnlijk geacht.

In de uitwerking wordt vergelijking (36) op de volgende wijze gecorrigeerd:

$$\rho_{bb} = 48 \text{ Volt} + 1001 + 55 \quad (43)$$

Een soortgelijke controle is niet mogelijk voor de stuurboord concentratiemeter, omdat nooit met alleen de stuurboord zuigbuis is gezogen in de fase na overvloeien. De stuurboord concentratiemeter wordt toch op dezelfde wijze gecalibreerd omdat het niet waarschijnlijk is dat de bakboord pomp substantieel slechter zuigt dan de stuurboord pomp en de meetpunten op basis waarvan de calibratie is uitgevoerd een grote spreiding hebben.

In de uitwerking wordt vergelijking (37) op de volgende wijze gecorrigeerd:

$$\rho_{sb} = 40 \text{ Volt} + 1000 + 55 \quad (44)$$

Met deze correctie geven de instrumenten bij het zuigen van water een te hoge dichtheid aan. Dit is geen probleem omdat tijdens het baggeren het gezogen mengsel een dichtheid heeft van 1250-1300 kg/m³.

De oorzaak van deze fouten ligt in de wijze waarop de concentratiemeter wordt gecalibreerd. Er wordt gebruik gemaakt van zowel de druksensoren als de niveaumeters om respectievelijk het displacement en het beunvolume vast te stellen. In beide kunnen fouten ontstaan. Vaak is de calibratie in een korte tijd uitgevoerd waardoor de toename van het displacement en volume klein is. Hierdoor hebben de fouten in bepaling van displacement en beunvolume een relatief grotere invloed (paragraaf 6.5).

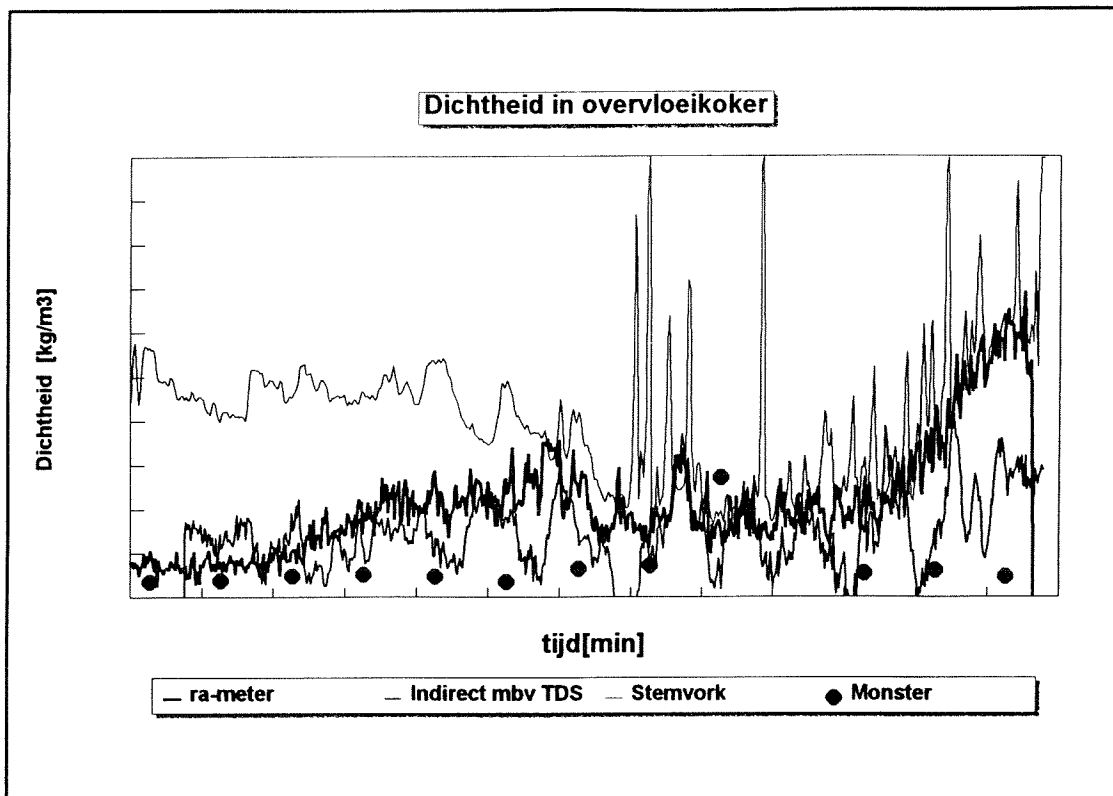
Daarnaast is het niet mogelijk om, indien er mengsel wordt gezogen, met constante dichtheid te zuigen terwijl wel met het gemiddelde wordt gerekend.

8.5 Interpretatie van de verschillende signalen

8.5.1 Algemeen

Bijlage 6 bevat een aantal grafieken waarin de uitgaande dichtheid tegen de tijd is uitgezet. Uit deze grafieken blijkt dat de verschillende methoden niet dezelfde waarden voor de overvloeiende dichtheid opleveren. Hiervoor zijn verschillende oorzaken aan te wijzen. In de volgende paragrafen zal hierop in worden gegaan. Het blijkt dat de stemvork met name in de beginfase van de belading onrealistisch hoge dichtheden meet, terwijl in de eindfase van de belading dit instrument vrijwel dezelfde dichtheden als de ra-meter meet. Van de andere methoden meet de ra-meter consequent de hoogste dichtheid. De dichtheden die zijn bepaald met behulp

van monsters zijn consequent het laagst. De dichtheden bepaald met het TDS-systeem liggen hier tussen in.



Figuur 8.5: Uitgaande dichtheid gemeten met de verschillende instrumenten tijdens reis 48.

8.5.2 Interpretatie signalen radioactieve concentratiemeter

Fluctuaties van het ruwe signaal

De signalen die verkregen zijn met de ra-meter geven een regelmatig beeld. Het is dus niet nodig deze signalen te bewerken voordat ze geplot worden.

Nauwkeurigheid

De ra-meter is vooraf en achteraf onder beheersbare omstandigheden gecalibreerd, waardoor binnen de nauwkeurigheidsgrenzen ($\sigma = 3-3.5\%$) volgens paragraaf 6.2 de uitgaande dichtheid wordt bepaald. Omdat het instrument op één plaats op de overvloeikoker de dichtheid meet is de representativiteit van deze meetlocatie het belangrijkste.

Het is in ieder geval duidelijk dat in de eindfase van de belading de gemeten dichtheid te hoog is. De dichtheid loopt op tot waarden ver boven de 1300 kg/m^3 , waardoor op dat moment meer zand het schip verlaat dan erin wordt gepompt. Het aantal tonnen droge stof in het beun zou dus moeten teruglopen, terwijl dit meestal niet het geval is. Dit is zichtbaar tijdens vrijwel alle reizen. De oorzaak van de extreem oplopende dichtheid ligt in het feit dat de overvloeikoker op dat moment naar beneden wordt gedrukt tot vrijwel op het zand, waardoor boven het zand de stroomsnelheden toenemen en er extra erosie optreedt. Na enkele minuten (2-7min) treedt er een nieuw evenwicht op en daalt de dichtheid weer.

Aan de hand van balansvergelijking 45 is te controleren of de ra-meter goed aangeeft.

$$Q_{in}c_{in} - Q_{uit}c_{uit} = \frac{dV_z}{dt} \quad (45)$$

In deze vergelijking is V_z het volume zand in het beun indien al het zand bezonken is. In bijlage 6 zijn voor de reizen 13, 34, 36, 38 en 48 twee grafieken afgebeeld die vergelijking (45) illustreren. In één grafiek zijn verandering van het volume zand in het beun (dV_z/dt) en de uitgaande concentratie (c_{uit}) met behulp van de ra-meter afgebeeld. In de andere grafiek zijn de productie ($Q_{in}c_{in}$) en het uitgaande debiet (Q_{uit}) afgebeeld. Alle signalen zijn gemiddeld over twee minuten zodat de spreiding kleiner is.

Indien de productie, het uitgaande debiet en het volume zand in het beun niet veranderen moet ook de concentratie van het uitgaande mengsel constant blijven. Dit blijkt niet altijd het geval te zijn. In tabel 8.3 zijn voor enkele reizen trajecten aangegeven waar de uitgaande concentratie niet constant is, terwijl de andere factoren wel constant zijn. Dit is direct uit de grafieken in bijlage 6 af te lezen

Reis	t [min]	$Q_{in}c_{in}$, dV_z/dt en Q_{uit}	
13	10min < t < 20min	constant	ρ_{uit} stijgt
38	25min < t < 35min	constant	ρ_{uit} stijgt
48	10min < t < 30min	constant	ρ_{uit} stijgt
50	15min < t < 25min	constant	ρ_{uit} stijgt

Tabel 8.3: Controle ra-meter m.b.v. balansvergelijking (45).

De meting met de ra-meter moet dus ook met de nodige voorzichtigheid worden geïnterpreteerd.

Plotselinge verhoging van de gemeten dichtheid

In een aantal grafieken stijgt de dichtheid niet alleen in de eindfase sterk. Een voorbeeld hiervan is reis 36. De dichtheid stijgt na 67 minuten plotseling een korte tijd. Hetzelfde gebeurt na 77 minuten en 83 minuten. Deze verhoging wordt veroorzaakt doordat op dat moment de overvloeikoker neer wordt gedrukt (zie ook paragraaf 8.6.5).

8.5.3 Interpretatie signalen 'stemvork'

De gemeten dichtheden met de stemvork zijn in het algemeen erg hoog. Ook tijdens de beginfase van beladen werden door de stemvork dichtheden gemeten tot 1500 kg/m³. Dit is niet mogelijk, want dit zou betekenen dat ook in de beginfase meer zand het schip verlaat dan erin komt. Hieruit kan geconcludeerd worden dat signaal

van de stemvork onbetrouwbaar en niet bruikbaar is.

Opvallend is dat in de eindfase zowel stemvork als ra-meter aan de overvloeikoker hetzelfde resultaat leveren. Over dit opvallende resultaat is nog tijdens de metingen contact opgenomen met de leverancier van het instrument. Dit heeft niet tot verbeteringen geleid.

De leverancier noemde als mogelijke oorzaak dat er zich luchtbelletjes aan de meetsensor hadden gehecht.

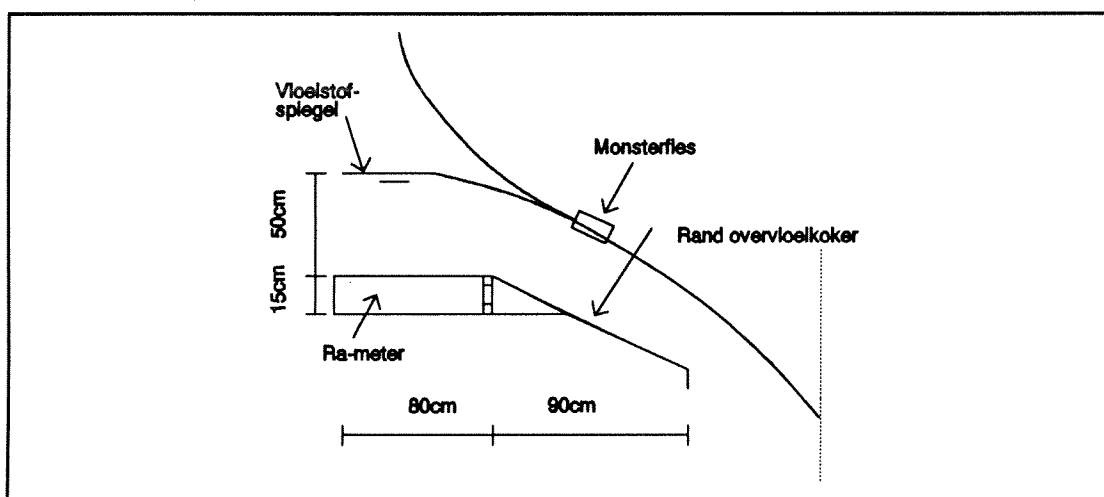
Doordat dit instrument niet goed heeft gewerkt is het niet mogelijk om het overloopverlies of de uitgaande dichtheid als functie van plaats op de overvloeikoker te bepalen. In de verdere beschrijving komt de stemvork niet meer aan de orde.

8.5.4 Interpretatie resultaten monsterbus

Algemeen

De dichtheid gemeten met de monsterbus geeft een regelmatig verloop van de dichtheid. Invloeden van veranderingen in het proces zijn niet waarneembaar en in alle fasen van de belading komt de dichtheid nauwelijks boven de dichtheid van zeewater uit. De meting met behulp van de monsterbus was onder andere bedoeld ter controle van de concentratiemeter. Deze controle is niet mogelijk, omdat het monster niet ter plaatse van de ra-meter is genomen (figuur 8.6).

De monsterbus wordt boven de overvloeikoker neergelaten, maar indien de bus niet ver genoeg wordt neergelaten blijft de bus stuiteren over het water dat de overvloeikoker in stort. Op deze wijze wordt alleen net onder het vloeistofoppervlak een monster genomen.



Figuur 8.6: Plaats waar monster wordt genomen.

Daarnaast is het moeilijk om te bepalen wanneer de monsterfles vol is. Om uitspoeling van het monster te voorkomen mag de monsterfles niet helemaal gevuld worden, maar het is van tevoren niet te bepalen wanneer de fles vol is. Bij een aantal monsters was de fles geheel gevuld. Bij een aantal monsters was de fles nauwelijks gevuld.

Nauwkeurigheid

De waarden voor de uitgaande dichtheid zijn gedurende het hele laadproces erg laag en vermoedelijk niet representatief. In het verleden zijn onder vergelijkbare omstandigheden hogere dichtheden gemeten met de monsterbus. Tijdens die metingen werd het monster diep in de overvloeikoker genomen. Tijdens de meting van december '95 is het monster uit de bovenste schil genomen. Het is niet onwaarschijnlijk dat de dichtheid daar inderdaad lager is dan in de overvloeikoker en op de plaats waar de ra-meter is bevestigd. Blijkbaar heeft de plaats waar het monster wordt genomen invloed op de resultaten.

Af en toe wijkt de dichtheid van een bepaald monster tijdens een reis sterk af van de dichtheid van de andere monsters tijdens die reis. Mogelijk dat deze monster dieper uit de overvloeikoker zijn genomen. Zoals beschreven is het onmogelijk om te bepalen wanneer de fles gevuld is. Naar mate het monster kleiner is, speelt de afleesnauwkeurigheid van de maatkolom een belangrijkere rol.

Daarnaast blijft er na het uitschenken altijd een geringe hoeveelheid sediment in de hals van de flessen achter. De effecten hiervan zullen echter klein zijn.

8.5.5 Interpretatie resultaten van indirecte methode

Bepaling tijdstap

Het programma OVERFLOW bewaart elke 5 seconde de nieuwe waarden voor de verschillende variabelen, maar zoals blijkt uit hoofdstuk 6 is het raadzaam niet elke 5 seconde de overvloeiende dichtheid te bepalen, omdat het displacement (W) en het beunvolume (V) niet met voldoende nauwkeurigheid kunnen worden bepaald. Er moet een grotere tijdstap worden gekozen. De tijdstap bepaalt over hoeveel seconden de uitgaande dichtheid wordt berekend.

Bij een grote tijdstap wordt het signaal stabiel en nauwkeuriger, maar zijn veranderingen pas erg laat zichtbaar en worden korte veranderingen afgevlakt. Indien de uitgaande dichtheid over een te kleine tijd wordt gemiddeld is de spreiding te groot en is het signaal niet te interpreteren,

In bijlage 6 is voor reis I-11 de overvloeiende dichtheid met verschillende tijdstappen bepaald. Het is duidelijk te zien dat de spreiding van de berekende uitgaande dichtheid afneemt bij een grotere tijdstap. Ook is te zien dat de berekende dichtheid bij een grotere tijdstap meer achterloopt. Bij een tijdstap van 1 minuut loopt de dichtheid in de eindfase al snel op, terwijl bij een tijdstap van 4 minuten de dichtheid nauwelijks oploopt.

In de uitwerking is gekozen voor een tijdstap van 2 minuten. Dit is een compromis tussen een kleine spreiding en een snelle reactie op veranderingen in het laadproces. De dichtheid van het mengsel dat via de overvloeikoker het schip verlaat wordt nu met het rekenschema in de tabel 8.4 bepaald.

i	tijd (sec)	Uitgaande dichtheid (kg/m ³)
0	0, start overvl.	1020
1	5	1020
2	10	1020
..
23	115	1020
24	120	$\rho_{i=24} = \frac{\sum_{i=1}^{24} u_i \rho_f A(t_i - t_{i-1}) - (W_{i=24} - W_{i=0})}{\sum_{i=1}^{24} u_i A(t_i - t_{i-1}) - (V_{i=24} - V_{i=0})}$
25	125	$\rho_{i=25} = \frac{\sum_{i=2}^{25} u_i \rho_f A(t_i - t_{i-1}) - (W_{i=25} - W_{i=1})}{\sum_{i=2}^{25} u_i A(t_i - t_{i-1}) - (V_{i=25} - V_{i=1})}$

Tabel 8.4: Rekenschema voor de bepaling van uitgaande dichtheid op een indirecte wijze.

Fluctuaties van het ruwe signaal

Ondanks dat over 2 minuten gemiddeld is volgt de dichtheid, berekend op een indirecte wijze, de trends nog niet goed. Ook als het proces nauwelijks verandert varieert de uitgaande dichtheid behoorlijk. Dit wordt veroorzaakt doordat de uitgaande dichtheid bepaald wordt met behulp van meerdere instrumenten (paragraaf 6.5). Hierdoor treedt een behoorlijke spreiding op.

Dit is bijvoorbeeld te zien tijdens reis 50. Hier daalt de dichtheid gemeten met de ra-meter na 46 minuten omdat het debiet wordt gehalveerd. De berekende dichtheid met het TDS-systeem reageert hier niet op.

De spreiding kan verkleind worden door over een langere tijd te middelen. Hierdoor worden alle veranderingen afgevlakt en zijn deze nauwelijks meer zichtbaar.

Problemen met snelheidsmeter

Tijdens reis 4 t/m 10 waren er problemen met de snelheidsmeters waardoor deze niet gebruikt konden worden. Voor deze reizen kan dan ook niet met de indirecte methode de uitgaande dichtheid worden berekend.

Problemen met bepaling tonnen droge stof

Tijdens de reizen 4, 5, 12, 34 en 48 kon de totale hoeveelheid tonnen droge stof niet bepaald worden, omdat de bepaling van het gewicht van het lege schip niet heeft plaatsgevonden. Voor de berekening van de uitgaande dichtheid is dit geen probleem, omdat daarvoor slechts het verschil in displacement en volume van belang is. Het is nu echter niet mogelijk om de beladingsgraad te berekenen.

Nauwkeurigheid

De indirecte methode bepaalt de overvloeiende dichtheid over de gehele overvloeirand. Dit is een voordeel ten opzicht van de andere methoden. Echter de nauwkeurigheid wordt nu in grote mate bepaald door een aantal andere factoren. Deze zijn in hoofdstuk 5 en hoofdstuk 6 uitvoerig besproken. Een belangrijke factor hierin is de nauwkeurigheid waarmee de calibratie van de instrumenten in de zuigbuizen plaatsvindt. Er zijn twijfels over de nauwkeurigheid waarmee dit is gebeurd. Met name de calibratie van de concentratiemeters is moeilijk uitvoerbaar, zoals ook blijkt uit paragraaf 8.4. De concentratiemeters moeten onder beheersbare omstandigheden worden gecalibreerd. In principe op dezelfde wijze als de de concentratiemeter aan de overvloeikoker. Doordat de instrumenten niet goed zijn gecalibreerd is het niet te voorspellen binnen welke grenzen de meting nauwkeurig is. Wel geeft de meting inzicht in de mogelijkheden om met behulp van het TDS-systeem de overloopverliezen te bepalen.

8.6 Resultaten

8.6.1 Algemeen

In totaal zijn gedurende 22 reizen metingen gedaan. Tijdens 10 reizen werd gebaggerd voor de kust van locatie A en gedurende 12 reizen werd gebaggerd voor de kust van locatie B. Tijdens de meting zijn de volgende variabelen gevarieerd:

- **Debiet;**
Tijdens een tweetal reizen is gedurende de gehele zuigtijd gebaggerd met het halve debiet door één zuigbuis te gebruiken. Daarnaast is ook tijdens twee reizen één zuigbuis vroegtijdig binnen boord gehaald.
- **Stand overvloeikoker;**
Tijdens twee reizen is het overvloeiniveau bij maximaal displacement in kleine stappen verlaagd en tijdens twee reizen is het overvloeiniveau bij maximaal displacement in twee of drie grote stappen verlaagd.

Daarnaast varieerden de weersomstandigheden. Gemiddeld waren de

weersomstandigheden rustig, echter tijdens een aantal reizen was de zee bijzonder ruw (schuimkoppen op zee en golven in het beun).

Tijdens de meting zijn ook korrelverdelingen bepaald van monsters uit de stortkoker en van monsters uit de overvloeikoker. Een overzicht is in bijlage 8 opgenomen.

Tabel 8.5 geeft een overzicht van de verschillende reizen en de gevarieerde variabelen

Reis	Locatie	Variabele	Reis	Locatie	Variabele
4	A	-	36	B	koker snel neer
5	A	-	38	B	-
6	A	-	46	B	zwaar weer
7	A	-	48	B	zwaar weer
8	A	-	50	B	-afladen met éénzuigbuis -koker langzaam neer -zwaar weer
9	A	-	60	B	-zwaar weer
10	A	-	62	B	-koker langzaam neer -zwaar weer
11	A	koker snel neer	64	B	één zuigbuis
12	A	-	I-1	B	afladen met één zuigbuis
13	A	-	I-5	B	-
34	B	één zuigbuis	I-11	B	koker op 5000m ³

Tabel 8.5: Overzicht reizen met de verschillende variabelen.

Per reis zijn in bijlage 8 de volgende drie grafieken afgedrukt:

- Uitgaande dichtheid en tonnen droge stof tegen de tijd.
 - Relatief overloopverlies en beuninhoud tegen de beladingsgraad.
 - Uitgaande dichtheid tegen het aantal meter water boven bezonken zandbed.
- Tevens is het gemiddeld gezogen debiet en de gemiddelde gezogen dichtheid aangegeven.

Doordat de verschillende methoden behoorlijke verschillen geven in de overvloeiende dichtheid, zullen ook de overloopverliezen verschillen. Door de verschillen is het moeilijk te bepalen welke methode het meest nauwkeurig het overloopverlies bepaald. Bovendien is de calibratie van de instrumenten in de zuigbuizen twijfelachtig, waardoor de overloopverliezen alleen onderling vergeleken kunnen worden en niet absoluut juist zijn.

Bijlage 8 bevat een tabel met een uitgebreider overzicht dan tabel 8.5 van de verschillende reizen.

8.6.2 Overzicht

In tabel 8.6 is een overzicht gegeven van het cumulatief relatief overloopverlies vanaf overvloeien tijdens de verschillende reizen. Hierbij is gebruik gemaakt van de indirecte methode.

In kolom twee is het cumulatief relatief overloopverlies na overvloeien berekend met de daadwerkelijk bepaalde coëfficiënten (zie hoofdstuk 8.4):

$$\begin{aligned} u_{bb} &= 1.19\text{Volt}-0.15 \\ u_{sb} &= 1.07\text{Volt}+0.67 \\ \rho_{bb} &= 48\text{Volt}+1001 \\ \rho_{sb} &= 40\text{Volt}+1000 \end{aligned}$$

In kolom drie is het cumulatief relatief overloopverlies na overvloeien berekend met de gecorrigeerde coëfficiënten:

$$\begin{aligned} u_{bb} &= 1.19\text{Volt}-0.15 \\ u_{sb} &= 1.07\text{Volt}+0.67 \\ \rho_{bb} &= 48\text{Volt}+1001+55 \\ \rho_{sb} &= 40\text{Volt}+1000+55 \end{aligned}$$

Het effect van een slechte calibratie van de concentratiemeters is nu zichtbaar.

Reis ²	Cumlatief verloop verlies [%]	Cumulatief overloop verlies [%] (ρ , +55kg/m ³)	Reis	Cumlatief verloop verlies [%]	Cumulatief overloop verlies [%] (ρ , +55kg/m ³)
11	x	x	50	x	x
12	x	x	60	x	x
13	x	x	62	x	x
34	x	x	64	x	x
36	x	x	I-1	x	x
38	x	x	I-5	x	x
46	x	x	I-11	x	x
48	x	x			

Tabel 8.6: Overzicht cumulatief relatief overloopverlies na overvloeien bij gebruik verschillende calibratiecoëfficiënten

² I.v.m. niet functionerende snelheidsmeters is van reis 4 t/m 10 het relatief overloopverlies niet te bepalen.

Enkele opmerkingen bij de tabel:

- Reis 34 en reis 64: één zuigbuis
- Reis 50 en reis I-1: afladen met één zuigbuis
- Reis 46 t/m reis 62: zwaar weer.
- Tot en met reis 13: locatie A
- Reis 34 t/m reis I-11: locatie B

Doordat niet exact bekend is wat de relatie is tussen uitgangssignaal van de meetinstrumenten in de zuigbuizen en de fysische grootte die daar bij hoort, kan het overloopverlies niet exact berekend worden. De verschillende reizen kunnen nu alleen onderling worden vergeleken. Voor de vorm van de verschillende grafieken heeft deze aanpassing van de coëfficiënten geen gevolg. Echter wel voor de fysische grootheden die daarbij horen. De invloed van het aanpassen van vergelijkingen (38) en (39) is groot.

In tabel 8.7 is het cumulatief relatief overloopverlies vanaf overvloeien tot een beladingsgraad van 80% berekend met de indirecte methode en met behulp van de ra-meter aan de overvloeikoker. Tevens is in de tweede kolom het cumulatief relatief overloopverlies vanaf overvloeien tot einde zuigen gegeven. Ook is de toename van het aantal tonnen droge stof per minuut aangegeven, welke een maat is voor de beladingsnelheid.

In de tabel is het cumulatief relatief overloopverlies vanaf overvloeien tot 80% beladingsgraad aangegeven omdat:

- het signaal van de ra-meter vanaf ca. 80% beladingsgraad zeer sterk oploopt en daarom vanaf dat moment zeker niet meer representatief is voor de uitgaande dichtheid.
 - naar verwachting het overloopverlies in laatste fase van het laadproces oploopt. Het verschil tussen het overloopverlies tot aan het eind van het laadproces en het overloopverlies tot aan de 80% beladingsgraad geeft een indruk van de mate waarin het overloopverlies oploopt in deze laatste fase.
 - het cumulatief overloopverlies afhankelijk is van de laadtijd. Indien lang doorgeladen wordt zijn de verliezen groot. Ook bij een goed bezinkend mengsel zal het relatief overloopverlies sterk oplopen indien maar lang genoeg wordt doorgeladen. Door het relatief overloopverlies tot 80% beladingsgraad te bekijken is het beter mogelijk om de overloopverliezen tijdens verschillende reizen met elkaar te vergelijken.
-

Reis	Cumulatief overloopverlies	dTDS/dt [ton/min]	Overloopverlies tot bg = 80% TDS	Overloopverlies tot bg = 80% ra-meter	dTDS/dt tot bg = 80% [ton/min]	Locatie	Variabele
6	x	x	x	x	x	locatie A	-
7	x	x	x	x	x	locatie A	-
8	x	x	x	x	x	locatie A	-
9	x	x	x	x	x	locatie A	-
10	x	x	x	x	x	locatie A	-
11	x	x	x	x	x	locatie A	Koker snel neer
12	x	x	x	x	x	locatie A	-
13	x	x	x	x	x	locatie A	
34	x	x	x	x	x	locatie B	één zuigbuis
36	x	x	x	x	x	locatie B	Koker snel neer
38	x	x	x	x	x	locatie B	-
46	x	x	x	x	x	locatie B	zwaar weer
48	x	x	x	x	x	locatie B	zwaar weer
50	x	x	x	x	x	locatie B	- Afladen met één zuigbuis - koker langzaam neer - zwaar weer
60	x	x	x	x	x	locatie B	- zwaar weer
62	x	x	x	x	x	locatie B	-koker langzaam neer -zwaar weer

Reis	Cumulatief overloopverlies	dTDS/dt [ton/min]	Overloopverlies tot bg = 80% TDS	Overloopverlies tot bg = 80% ra-meter	dTDS/dt tot bg = 80% [ton/min]	Locatie	Variabele
64	x	x	x	x	x	locatie B	één zuigbuis
I-1	x	x	x	x	x	locatie B	afladen met één zuigbuis
I-5	x	x	x	x	x	locatie B	-
I-11	x	x	x	x	x	locatie B	koker op 5000m ³

Tabel 8.7: Cumulatief relatief overloopverlies vanaf overvloeien tot een beladingsgraad van 80% en einde zuigen en toename TDS per minuut in beun.

- Relatief overloopverlies tijdens reizen 6 tot en met 10 niet te bepalen in verband met niet functionerende snelheidsmeters
- Tijdens reis 12, reis 34 en reis 48 niet mogelijk om beladingsgraad te berekenen, omdat Tonnen Droge Stof in beun niet zijn bepaald.
- Reis 4: belading reeds gestopt voordat beladingsgraad 80% is bereikt.

Door de kolom met het cumulatief relatief overloopverlies tot einde zuigen te vergelijken met de kolom met het cumulatief relatief overloopverlies tot 80% beladingsgraad is te zien of er nog lang is doorgeladen nadat deze beladingsgraad is bereikt. Bijvoorbeeld tijdens reis I-11 is tot een beladingsgraad van 80% het relatief overloopverlies slechts 8%. Echter over de gehele reis is het relatief overloopverlies nog toegenomen tot 15%. De verliezen in de laatste fase waren dus nog erg groot.

De beladingssnelheid varieert sterk per reis. Onder zelfde omstandigheden kan de toename van het aantal tonnen droge stof sterk variëren. Tijdens de reizen 36, 38 en I-5 wordt steeds met 2 buizen geladen en verschilt de gezogen dichtheid ook nauwelijks. Toch verloopt het zuigproces tijdens reis 36 (148 ton/min) 25% beter dan tijdens reis I-5 (117 ton/min).

De verschillen tussen het cumulatieve overloopverlies gemeten met de ra-meter en het cumulatieve overloopverlies gemeten met het TDS-systeem zijn groot.

8.6.3 Beschrijving van laadproces

Om het laadproces te analyseren is het laadproces onderverdeeld in de drie fasen zoals in hoofdstuk drie. Daarnaast is geanalyseerd hoe de uitgaande dichtheid als functie van de waterschil boven het bed tijdens de verschillende reizen varieert.

Onderverdeling laadproces in drie fasen

Het laadproces van een sleephopperzuiger is onder te verdelen in drie fasen:

- I. De fase tot overvloeien waarin het beun gevuld wordt en het overvloeiniveau nog niet bereikt is.
- II. De fase waarin de vleihoogte zich opbouwt en de overvloeiverliezen zich manifesteren.
- III. De fase waarin de verliezen toenemen als gevolg van van erosie van het reeds bezonken zand.

Fase II:

In deze fase treden de eerste overloopverliezen op. Uit de twee korrelverdelingen die van monsters uit de overvloeikoker in de beginfase zijn bepaald blijkt dat $D_{90} = 200\mu$ $90\mu < D_{50} < 150\mu$.

De start van deze fase is direct herkenbaar. In een aantal gevallen startte deze fase direct bij de start van de registratie. In dat geval was het beun tijdens het varen naar het zuigvak al volgepompt met water.

Gezien de korrelverdeling van het materiaal dat verdwijnt direct na overvloeien is het niet vreemd dat de ra-meter een overvloeiende dichtheid in het begin van fase 2 hoger dan 1020 kg/m^3 meet. Het blijkt dat de ra-meter meestal een hogere dichtheid aangeeft. Een dichtheid tot ca. 1050 kg/m^3 is te verwachten in verband met bijvoorbeeld de meetnauwkeurigheid van de ra-meter en eventuele vervuilingen.

De verwachting is dat de overloopverliezen lange tijd constant zullen blijven, omdat de korrelverdelingen erg steil zijn, zoals blijkt uit bijlage 7. Globaal kan gesteld worden op basis van de korrelverdelingen:

$$140 \mu < D_{10} < 190 \mu$$

$$190 \mu < D_{50} < 240 \mu$$

$$200 \mu < D_{90} < 300 \mu$$

$$D_{90}/D_{10} = 1.25-1.5$$

Uit de meting blijkt dat fase 2 in het laadproces verschillend kan lopen. Tijdens een aantal reizen blijft de uitgaande dichtheid constant en fluctueert deze nauwelijks, bijvoorbeeld reis I-11. Tijdens een aantal reizen fluctueert de uitgaande dichtheid sterk en loopt ook al in de beginfase sterk op, bijvoorbeeld reis 38 en 46. De stromingscondities verschillen van reis tot reis.

Fase III:

Voor een aantal reizen is zowel de korrelverdeling van het gezogen zand bepaald als van het zand dat aan het eind overboord verdween. Hieruit blijkt dat de overloopverliezen in de eindfase vrijwel 100% zijn. De korrelverdelingen aan het eind van het laadproces verschillen nauwelijks met de korrelverdelingen van het gezogen zand.

Uit de korrelverdelingen aan het eind van het laadproces blijkt:

$$100 \mu < D_{10} < 170 \mu$$

$$170 \mu < D_{50} < 220 \mu$$

$$200 \mu < D_{90} < 300 \mu$$

$$d_{90}/d_{10} = 1.5-2.0$$

De korrelverdeling van het gezogen zand is steil waardoor wordt verwacht dat de overgang van fase 2 naar fase 3 zichtbaar moet zijn in de meetresultaten. Dit blijkt niet altijd het geval te zijn. Hiervoor zijn de volgende redenen:

- Er is al gestopt met beladen voordat de verliezen sterk toenemen.
- Het beeld wordt verstoord doordat de overvloeikoker naar beneden wordt gedrukt en de stroming zich plots wijzigt.

De overgang naar fase 3 is goed te zien tijdens reis 13, 34, 48, 50 en 62. Tijdens deze reizen werd de overvloeikoker al enkele minuten voordat de stijging van de dichtheid zichtbaar was in de laagste stand gezet. Hierdoor kan gesteld worden dat tijdens die reizen de stijging van de dichtheid te wijten is aan de toegenomen erosie. De verhoging start bij een beladingsgraad van 80% à 90%.

Uitgaande dichtheid als functie van waterschil boven zandbed

Er is aan de hand van de meetresultaten geanalyseerd hoe de uitgaande dichtheid en dus ook het overloopverlies toeneemt als de schil water boven het reeds bezonken zand afneemt. In bijlage 9 is een grafiek afgebeeld met hierin de uitgaande dichtheid uit, gemeten met de ra-meter als functie van de schil water boven het zandniveau tijdens de reizen. De verwachting is dat de dichtheid bij afnemende dikte

van de waterschil zal toenemen. De verwachting is ook dat de uitgaande dichtheid bij eenzelfde dikte van de waterschil tijdens de verschillende reizen gecorreleerd zou zijn, maar dit lijkt niet het geval. Bij eenzelfde dikte van de schil boven het zandbed kan de uitgaande dichtheid sterk verschillen. Hiervoor zijn in principe twee redenen:

- Het meetinstrument werkt niet onder die omstandigheden
- De stromingscondities verschillen sterk van reis tot reis waardoor de concentratie sterk kan variëren onder deze omstandigheden

Het is moeilijk in te schatten of het meetinstrument buiten werking is, omdat de aanwijzing niet goed vergeleken kunnen worden met andere meetinstrumenten. Zo levert de stemvork met name in de beginfase onbetrouwbare resultaten, echter in de eindfase van de belading lijkt het instrument beter te werken. Het signaal wordt regelmatig en daalt naar realistische waarden. Het is opvallend dat het instrument op dat moment vrijwel dezelfde waarde aangeeft als de ra-meter. Er is een duidelijke correlatie tussen de aanwijzing van de stemvork en de ra-meter in de eindfase. Omdat beide instrumenten in de eindfase dezelfde dichtheid aangeven kan geconcludeerd worden dat de uitgaande dichtheid door de ra-meter bij een bepaalde dikte van de waterschil boven het zandbed inderdaad sterk varieert van reis tot reis. Blijkbaar variëren de stromingsomstandigheden sterk tijdens de verschillende reizen.

8.6.4 Invloed debiet

De verwachting is dat het debiet grote invloed heeft op de overloopverliezen en de uitgaande dichtheid. Als het debiet lager is, is de verblijftijd groter en is het stromingsklimaat in het beun rustiger. Hierdoor krijgen de deeltjes langer de tijd om te bezinken en zal erosie van het reeds bezonken zand later plaatsvinden. Zoals beschreven in paragraaf 4.5 kan bij hoge beladingsgraden de beladingssnelheid toenemen als het debiet verlaagd wordt.

Tijdens de meting is de invloed van het debiet vastgesteld door tijdens twee hele reizen te zuigen met één pomp en tijdens twee reizen ca.30 minuten voor het einde zuigen één pomp uit te schakelen en te analyseren wat het effect is op de beladingssnelheid en het overloopverlies in vergelijking met het zuigen met twee pompen.

Zuigen met half debiet

Tijdens reis 34 en reis 64 is met één zuigbuis gebaggerd. Uit de tabel in paragraaf 8.6.2 blijkt het effect van verlaging van het debiet. De overloopverliezen zijn lager. Dit wil niet zeggen dat het effectiever is om met laag debiet te zuigen. Hiervoor moet gekeken worden naar de toename van de beladingssnelheid.

Het blijkt dat in beide gevallen de uitgaande dichtheid gemeten met de ra-meter als functie van de tijd vrijwel constant blijft ($x \text{ kg/m}^3$ bij reis 64 en $x \text{ kg/m}^3$ bij reis 34). Pas in het eindstadium van de belading loopt de dichtheid sterk op. De berekende uitgaande dichtheid met het TDS-systeem fluctueert sterk. Omdat het signaal van

ra-meter constant blijft is deze sterke variatie niet te wijten aan het zuigproces maar aan de meting zelf (de nauwkeurigheid waarmee de verschillende factoren worden bepaald).

Het stromingsklimaat in het beun is tijdens het zuigen met half debiet veel rustiger dan tijdens het zuigen met vol debiet. Door de lagere stroomsnelheden is de turbulentie in het beun veel lager. Dit is te zien doordat bij lage stroomsnelheden de uitgaande dichtheid niet wordt verhoogd door het neerdrukken van de overvloeikoker, terwijl dit bij vol debiet wel het geval is.

De overloopverliezen zijn in de meeste gevallen in vergelijking met het zuigen met twee buizen lager. Echter tijdens de reis 12, reis 36 en reis 60 zijn de overloopverliezen ook zeer laag, terwijl wel met twee buizen is gebaggerd.

Afladen met één zuigbuis

Tijdens reis 50 en I-1 is afgeladen met één zuigbuis. De overloopverliezen dalen sterk. Voor deze reizen gelden de volgende waarden voor de beladingsnelheid:

	dTDS/dt [ton/min] 2 buizen	dTDS/dt [ton/min] 1 buis
Reis 50	x	x
Reis I-1	x	x

Tabel 8.8: Afname beladingsnelheid bij afladen met 1 zuigbuis

Het is duidelijk zichtbaar dat de beladingsnelheid sterk daalt door het zuigen met één buis. Dit is ook duidelijk zichtbaar in de grafiek waarin ook de tonnen droge stof in het beun zijn uitgezet. Zodra één buis aan dek is gebracht loopt deze lijn minder steil. De beladingsnelheid is dus afgenomen. Hieruit blijkt, zoals verwacht, dat bij het zuigen van zand op locatie A en op locatie B het niet verstandig is te zuigen met half debiet. De belading gaat hierdoor een stuk trager.

8.6.5 Invloed stand overvloeikoker

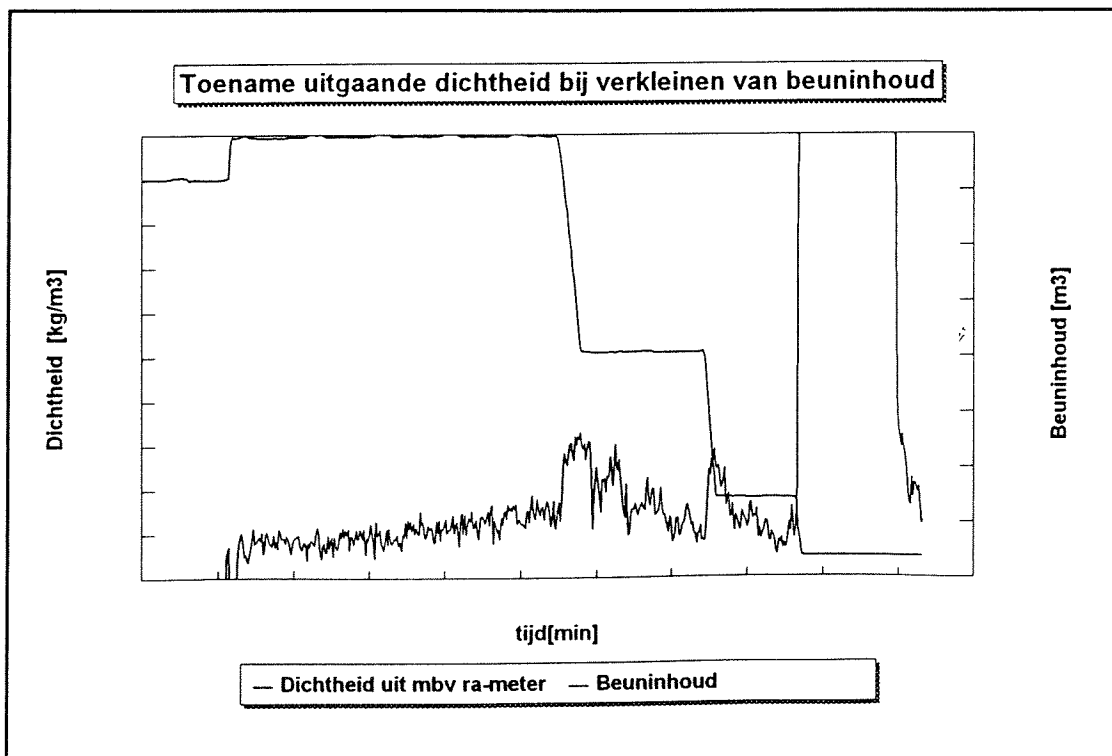
Bij maximaal displacement wordt bij de 'X' het overvloeiniveau verlaagd. In theorie dient de verlaging van het overvloeiniveau zo geleidelijk mogelijk plaats te vinden om te voorkomen dat de stroomsnelheid boven het bed onnodig snel verhoogd wordt en zal leiden tot extra erosie. De verwachting is dat de uitgaande dichtheid na het verlagen van het overvloeiniveau hoger zal zijn dan voor het verlagen van dit niveau.

Voor de reizen tijdens de meting zijn in bijlage 10 twee verschillende grafieken afgebeeld waarop zichtbaar is hoe in de praktijk omgegaan wordt met dit laadsysteem:

- Het beunvolume is uitgezet tegen het displacement. In deze grafieken wordt weergegeven bij welk displacement het beunvolume wordt verkleind en met hoeveel kubieke meter. Het maximale displacement tijdens zuigen bedraagt voor de 'X' 15.000 ton. In theorie wordt het displacement op een constante waarde gehouden en verloopt de grafiek zoals tijdens reis 64.
- Het beunvolume is uitgezet tegen de tijd na start zuigen. In deze grafieken is zichtbaar of de volume in kleine stappen wordt verlaagd of niet.

Uit de grafieken met hierin het beunvolume en het displacement blijkt dat vrijwel altijd voor het maximale displacement gestart wordt met het verkleinen van het beunvolume (meestal tussen 13500 ton en 14500 ton). Vervolgens neemt het displacement toe tot 14500 ton à 15000 ton en wordt het beunvolume maximaal verkleind. Verder blijkt uit de grafieken met hierin het beunvolume en de tijd na start zuigen dat het beunvolume lang niet altijd in kleine stappen wordt verkleind en dat niet altijd gestart wordt met de hoogste stand van de overvloeikoker.

Uit de metingen is direct te zien wat het effect is van het in grote stappen verlagen van het overvloeiniveau. Als voorbeeld wordt hier reis 36 besproken (figuur 8.2).



Figuur 8.7: Invloed snel verlagen overvloeiniveau op uitgaande dichtheid tijdens reis 36.

Het blijkt dat de uitgaande dichtheid sterk toeneemt bij het neerdrukken van de overvloeikoker. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de verhoging helemaal aan het eind van het laadproces waar de toename van de dichtheid extreem groot

is en de andere verhogingen waar de toename van dichtheid een stuk minder groot is.

De verhoging van de uitgaande dichtheid op $t = 67$ min en $t = 77$ min wordt veroorzaakt doordat het uitgaande debiet vergroot wordt. Op $t = 67$ min wordt de koker ca. 1.4 m neergedrukt. Hierdoor daalt de waterschil boven het bed van ca. 6.5 m naar ca. 5.1 m. Op $t = 77$ min wordt de overvloeikoker ca. 1 m neergedrukt. Hierdoor daalt de dikte van de waterschil van 3.4 m tot 2.4 m. Hierdoor wordt mengsel aangezogen uit diepere lagen waar de concentratie hoger zal zijn en worden de stroomsnelheden boven het bed vergroot waardoor mogelijk weer erosie kan ontstaan. Het is dan ook te verwachten dat de stijging van de uitgaande dichtheid het grootst zal zijn bij het in grote stappen verlagen van de overvloeikoker. Dit is ook duidelijk waarneembaar. Zo neemt de dichtheid tijdens reis 60 zie (bijlage 8) nauwelijks toe bij het langzaam neerdrukken van de overvloeikoker.

In het geval van het zuigen met half debiet is geen verhoging van het uitgaande dichtheid waarneembaar bij het verlagen van de overvloeikoker. Hieruit kan worden opgemaakt dat in dat geval de concentratieverdeling anders is. In vergelijking met het zuigen met vol debiet is de concentratie veel minder homogeen verdeeld. Bij het zuigen met half debiet zal de concentratie bij de bodem hoger zijn dan bij volledig debiet en zal de concentratie bij de vloeistof spiegel lager zijn.

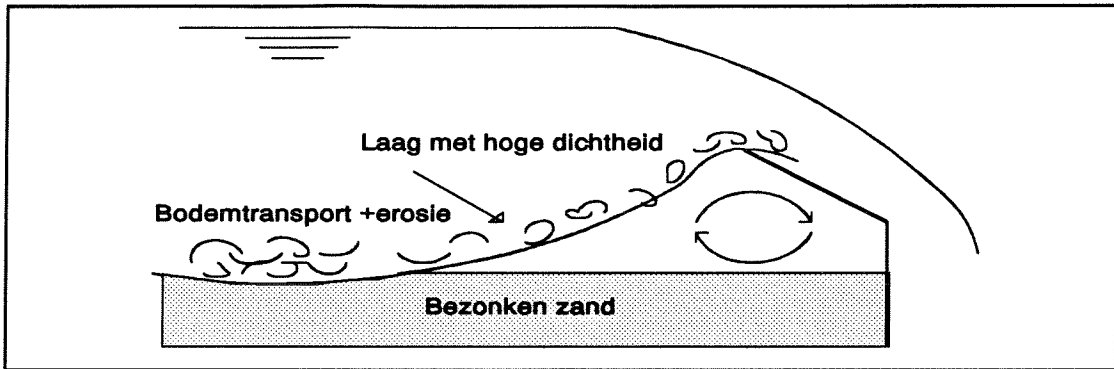
Bij hogere beladingsgraden kan de dichtheid ook toenemen doordat de tijdelijke toename van het uitgaande debiet voor extra erosie zorgt van het reeds bezonken zand.

Het blijkt dat, in het geval van vol debiet, de dichtheid na het neerdrukken van de overvloeikoker zich weer herstelt zodra de evenwichtsvleihogte zich weer heeft ingesteld. Dit is tegen de verwachting. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door de steile korrelverdeling. Indien er tamelijk grof materiaal wordt geladen zal de hogere stroomsnelheid er niet voor zorgen dat bepaalde deeltjes niet bezinken en er niet voor zorgen dat bepaalde deeltjes weer eroderen. Bij een steile korrelverdeling is er een 'duidelijk' omslagpunt tussen wel en geen erosie. Of te wel de verhoging van de stroomsnelheid leidt nog niet tot erosie en de verblijftijd van de deeltjes is nog steeds groot genoeg om te bezinken.

De extreme verhoging in de eindfase van de belading $t = 84$ min heeft een andere oorzaak. Op dat tijdstip wordt het beunvolume 150 m^3 verkleind door de koker ca. 25 cm neer te drukken. De beladingsgraad is op dat moment 85%. De koker wordt dan tot vlak boven het zand gedrukt. Hierdoor gaat het reeds bezonken zand weer eroderen en stroomt er een mengsel met grote dichtheid overboord. Ook bij andere reizen stijgt de dichtheid sterk bij een beladingsgraad van 80-90%.

Het aantal tonnen droge stof in het beun neemt nog wel toe. De meting is op dat moment dus niet representatief.

Na 5 tot 10 minuten ontstaat een nieuwe evenwichtssituatie. Er is een erosiekuil ontstaan rondom de overvloeikoker en de uitgaande dichtheid daalt weer.



Figuur 8.8: Verhoging uitgaande dichtheid door neerdrücken overvloeikoker

Opvallend is dat de verhoging van de uitgaande dichtheid geïnitieerd wordt door een kleine verlaging van het overvloeiniveau.

8.6.6 Invloed weersomstandigheden

Tijdens de metingen was de zee in het algemeen kalm. Echter tijdens de reizen 46 t/m 62 was de zee ruw. Er waren schuimkoppen zichtbaar en de bewegingen van het schip, als gevolg van de vaarrichting en de golven, hadden zichtbaar effect op de stroming in het beun. Er onstonden golven in het beun, zowel in de lengte richting als in de breedte richting. De verwachting is dat door deze golven de turbulentie in het beun zal toenemen en hierdoor de beladingssnelheid zal afnemen en het overloopverlies toenemen. In de tabel zijn voor deze reizen de gemiddelde toename van de lading, de laadtijd na overvloeien en het aantal TDS aan het eind van het laadproces voor reizen 42 t/m 62 weergegeven.

Reis	TDS/dt [ton/min]	laadtijd na overvloeien [min]	TDS einde laden [ton]
46	x	x	x
48	x	x	x
50 ³	x	x	x
60	x	x	x
62	x	x	x

Tabel 8.9: Overzicht van de reizen tijdens ruw weer.

³ Afladen met 1 zuigbuis

Binnen deze reizen zijn grote verschillen zichtbaar. De laadtijd verschilt sterk van reis tot reis en ook de toename van het aantal tonnen droge stof verschilt sterk van reis tot reis. Opvallend is het voorspoedige laadproces tijdens reis 60. Verder lijkt het dat onder ruwe omstandigheden het nauwelijks verschil maakt of er met één of twee zuigbuizen wordt gezogen.

In de volgende tabel is de gemiddelde toename van de lading, de gemiddelde laadtijd na overvloeien en het gemiddelde aantal TDS aan het eind van het laadproces tijdens reis 46, 48, 60 en 62 vergeleken met reis 1-5, 36 en 38 (kalme zee). De andere reizen zijn niet in de tabel opgenomen, omdat tijdens die reizen een periode met half debiet werd gezogen of voor de kust van locatie A. Door deze verschillen zijn deze reizen niet te vergelijken.

Reis	Gemiddelde TDS/dt [ton/min]	Gemiddelde laadtijd na overvloeien [min]	Gemiddelde TDS einde laden [ton]
Ruwe zee	x	x	x
Kalme zee	x	x	x

Tabel 8.10: Vergelijking beladingssnelheid en laadtijd tijdens ruwe en kalme zee

De verschillen tussen kalme en ruwe zee zijn duidelijk zichtbaar. Er wordt in beide situaties doorgeladen tot dezelfde belading is verkregen, maar de laadtijd na overvloeien is ruim 30% langer en de beladingssnelheid ruim 20% langzamer. uit het oogpunt van cyclusoptimalisering kan het interessant zijn om eerder te stoppen met baggeren.

8.6.7 Concentratieverticaal op overvloeirand

De verschillen tussen de metingen met de ra-meter aan de overvloeikoker en de metingen met de monsterbus zijn groot. Dit is een aanwijzing dat deconcentratie op de overvloeirand niet homogeen is verdeeld. De verwachting was dat de concentratie net onder de vloeistofspiegel gelijk was aan de concentratie op de overvloeirand zelf.

De monsters zijn steeds vlak onder de vloeistofspiegel genomen. De dichtheid is daar laag. De ra-meter bepaalde de dichtheid van het mengsel, bij normaal debiet, ca.50cm hieronder. De dichtheid gemeten met de ra-meter is consequent hoger.

9. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN T.A.V MEETMETHODEN

9.1 Conclusies

9.1.1 Algemeen

Alle meetmethoden om het relatief overloopverlies te bepalen maken gebruik van de snelheidsmeter en concentratiemeter in de zuigbuis. Met behulp van deze instrumenten wordt de dichtheid en snelheid van het gezogen mengsel en het uitgaande debiet bepaald. Het is van groot belang om de instrumenten in de zuigbuizen goed te calibreren.

Bij de uitwerking is twijfel ontstaan over de nauwkeurigheid waarmee de instrumenten in de zuigbuizen zijn gecalibreerd, waardoor de resultaten van de meting alleen onderling vergeleken kunnen worden. In het algemeen zal de calibratie van de concentratiemeters problemen opleveren, omdat:

- er gebruik wordt gemaakt van zowel de niveaumeters als de druksensoren behorende bij het TDS-systeem. Het gebruik van deze instrumenten introduceert fouten waardoor niet exact bekend is welke dichtheid de concentratiemeter is gepasseerd (paragraaf 6.5.4 en paragraaf 6.5.5).
- gedurende calibratie in werkomstandigheden de gezogen dichtheid niet constant is te houden.

9.1.2 Radioactieve concentratiemeter

Ten aanzien van het gebruik van een ra-meter aan de overvloeikoker kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De ra-meter is bruikbaar om de uitgaande dichtheid te bepalen op de plaats waar het instrument bevestigd is. De effecten van veranderingen in het laadproces zoals verlaging van het debiet en het overvloeiniveau zijn zichtbaar. Zoals verwacht daalt de uitgaande dichtheid indien het debiet verlaagd wordt en stijgt de dichtheid indien het overvloeiniveau verlaagd wordt. Ook loopt de dichtheid op bij hoge beladingsgraden. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat de ra-meter de trends aangeeft en zo inzicht geeft in de ontwikkeling van de verliezen.
- De nauwkeurigheid waarmee de uitgaande dichtheid wordt bepaald is afhankelijk van:
 - * De meetnauwkeurigheid van de ra-meter.
 - * De plaats van bevestiging.

De standaardafwijking van het instrument wordt geschat op $\sigma = 3-3.5\%$.

De representativiteit van de plaats op de overvloeikoker waar de meting is uitgevoerd, is gecontroleerd met vergelijking (45):

$$Q_{in}c_{in} - Q_{uit}c_{uit} = \frac{dV_z}{dt} \quad (45)$$

Indien de productie ($Q_{in}c_{in}$), het volume zand in het beun (V_z) en het uitgaande debiet (Q_{uit}) constant blijven moet ook de uitgaande dichtheid constant blijven. Uit de metingen tijdens reis 13, 38, 48 en 50 blijkt dit niet het geval te zijn. Hieruit wordt geconcludeerd dat het instrument niet op een representatieve plaats is bevestigd.

- De plotselinge verhoging van de uitgaande dichtheden tot boven de 1500 kg/m³ bij hoge beladingsgraden (bg > 80%) wordt veroorzaakt doordat het instrument dicht op het zandbed wordt gedrukt, waardoor het bezonken zand weer erodeert en het bodemtransport van zanddeeltjes direct via de rameter overboord verdwijnt.
- Indien echter fijn zand wordt gezogen waarbij de overloopverliezen relatief groot zijn en de beladingsgraad niet de 80% bereikt zal deze plotselinge verhoging niet optreden. Hierdoor zal het instrument bij fijne zanden in de eindfase het verloop van de uitgaande dichtheid beter weergeven.
- Het instrument is relatief eenvoudig te bevestigen en te verwijderen, waardoor de calibratie onder laboratorium omstandigheden kan plaatsvinden.

9.1.3 'Stemvork'

De uitgaande dichtheden die zijn gemeten met de stemvork van het type 'Hydraplane' aan de overvloeikoker overschrijden ook in de fase direct na overvloeien de 1500kg/m³. Ook in de beginfase is het momentaan relatief overloopverlies bepaald met de stemvork groter dan 100%. Dit is niet mogelijk, omdat de massa van de lading toeneemt in deze fase. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat het niet mogelijk is om met een stemvork van het type 'Hydraplane' de uitgaande dichtheid en de overloopverliezen te bepalen.

9.1.4 Monstername

Tijdens de meting zijn de waarden voor de uitgaande dichtheid gedurende het hele laadproces erg laag. De dichtheid is nauwelijks hoger dan de dichtheid van zeewater en volgt de wijzigingen in het laadproces nauwelijks. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat de metingen met de monsterbus niet representatief zijn.

Daarnaast zijn in het verleden onder vergelijkbare omstandigheden hogere dichtheden gemeten met de monsterbus. Bij die metingen werd het monster diep in de overvloeikoker genomen in plaats van uit de bovenste schil. Er wordt geconcludeerd dat de plaats waar het monster wordt genomen en de meetmethode belangrijk zijn voor de resultaten.

9.1.5 Indirecte methode

Ten aanzien van de indirecte methode met behulp van het TDS-systeem kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De uitgaande gemiddelde dichtheid en het cumulatief overloopverlies kunnen worden berekend met behulp van de indirecte methode. De nauwkeurigheid waarmee dit wordt bepaald is volledig afhankelijk van de nauwkeurigheid van de concentratiemeters en snelheidsmeters in de zuigbuizen. De fout in de bepaling van het verschil in volume (ΔV) en in de toename in displacement (ΔW) is dan verwaarloosbaar. De standaardafwijking voor de bepaling van de uitgaande dichtheid bedraagt dan 5%.
 - Voor een nauwkeurige berekening van de uitgaande dichtheid of het overloopverlies is een nauwkeurige calibratie van de instrumenten in de zuigbuizen een vereiste.
 - Het is niet mogelijk om het momentaan overloopverlies en de momentane uitgaande dichtheid op een indirecte wijze te bepalen. Er moet altijd gemiddeld worden over een bepaalde periode.
 - De indirecte methode kan gebruikt worden om het gemiddelde overloopverlies te bepalen over een bepaalde periode. Door het gemiddelde verlies over een periode te bepalen kan de invloed van de fout in de bepaling van het displacement en het volume worden verkleind. Naar mate de gemiddelde uitgaande dichtheid wordt berekend over een langere periode neemt de invloed van de fout in bepaling van displacement en volume af. De periode waarover gemiddeld moet worden bedraagt tenminste 5 à 10 minuten, zoals blijkt uit de gevoeligheidsanalyse. Hoe groter de tijdstap, hoe kleiner de invloed van de nauwkeurigheid waarmee de toename van het displacement en het verschil in volume wordt bepaald.
 - Indien de periode waarover de gemiddelde uitgaande dichtheid wordt berekend in de orde 1 minuut is, wordt de nauwkeurigheid bepaald door de nauwkeurigheid van de niveaumeters boven het beun en druksensoren onder het schip. De standaardafwijking waarmee de uitgaande dichtheid wordt bepaald is dan groter dan 10%.
 - Doordat de verliezen gemiddeld worden over een periode, treedt er een tijdsverschuiving op en worden extremen afgevlakt. Bijvoorbeeld de verhoging van de uitgaande dichtheid als gevolg van het verlagen van het overvloeiniveau is niet direct zichtbaar.
 - Voor sturing van het proces kan de tijdsverschuiving een probleem zijn. Dit is afhankelijk van de snelheid waarmee de overloopverliezen toenemen. Indien de overloopverliezen in korte tijd (minuten) sterk toenemen kan op basis van het overloopverlies of uitgaande dichtheid berekend met de indirecte methode geen beslissing tot ingrijpen in het laadproces worden genomen. Immers de overloopverliezen zullen al zijn toegenomen voordat dit zichtbaar is met de indirecte methode. Indien de overloopverliezen slechts langzaam oplopen kan de indirecte methode worden gebruikt voor de
-

berekening van het overloopverlies.

- De indirecte methode kan alleen gebruikt worden aan boord van schepen waar het TDS-systeem is geïnstalleerd of wordt geïnstalleerd.

9.1.6 Vergelijking indirecte methode en radioactieve methode

Indien de indirecte methode vergeleken wordt met de ra-meter aan de overvloeikoker kan het volgende geconcludeerd worden:

- De indirecte methode bepaalt de gemiddelde uitgaande dichtheid van het gehele overvloeiende mengsel. De ra-meter bepaalt slechts de dichtheid op één plaats. De plaatsnauwkeurigheid speelt een belangrijke rol bij het gebruik van de ra-meter aan de overvloeikoker.
 - De ra-meter geeft de invloed van veranderingen in het laadproces, zoals verlaging debiet en overvloeiniveau, beter weer dan de indirecte methode. Deze veranderingen zijn met de indirecte methode niet of met vertraging zichtbaar. De ra-meter aan de overvloeikoker geeft het beste inzicht in het ontstaan van overloopverliezen en het verloop van de uitgaande dichtheid.
 - De methode met behulp van een ra-meter aan de overvloeikoker is in vergelijking met de indirecte methode relatief eenvoudig en goedkoop. Er zijn geen niveaumeters en druksensoren nodig.
 - Voor de bepaling van het cumulatieve overloopverlies is de indirecte methode het meest geschikt. Bij het gebruik van de ra-meter moet om het overloopverlies te bepalen het uitgaande debiet en de uitgaande dichtheid in de tijd geïntegreerd worden.
 - Voor optimalisering van het proces aan boord is het verloop van de uitgaande dichtheid voldoende informatie om inzicht te krijgen in de efficiëntie waarmee het laadproces plaatsvindt. De ra-meter geeft trends in de uitgaande dichtheid het best weer en is het meest eenvoudig.
 - De nauwkeurigheid waarmee de uitgaande dichtheid op een indirecte wijze wordt bepaald is afhankelijk van de nauwkeurigheid van meerdere instrumenten. Indien de snelheidsmeters en concentratiemeters niet goed zijn gecalibreerd is de meting niet mogelijk. De methode met de ra-meter is voor de bepaling van de uitgaande dichtheid niet afhankelijk van de snelheidsmeters en concentratiemeters in de zuigbuizen.
 - Niet alle schepen zijn uitgerust met niveaumeters om het beunvolume te meten en druksensoren om het displacement te meten. Het plaatsen van een ra-meter aan de overvloeikoker is goedkoper dan het plaatsen van druksensoren en niveaumeters.
 - De ra-meter is eenvoudig onder laboratorium omstandigheden te calibreren.
 - In het algemeen was de dichtheid bepaald met de indirecte methode lager dan de dichtheid bepaald met ra-meter aan de overvloeikoker. Hiervoor zijn de volgende twee redenen aan te wijzen:
 - * Indien de snelheidsmeters niet goed zijn gecalibreerd en een te lage snelheid aangeven, dan zal het overloopverlies ook te laag zijn. Dit
-

komt doordat de ingaande massastroom nu te klein wordt geschat. Indien de concentratiemeters niet goed zijn gecalibreerd en bijvoorbeeld een te lage dichtheid aangeven zal ook het overloopverlies te laag worden geschat. Dit komt opnieuw doordat de ingaande massastroom te laag wordt geschat. Zoals blijkt uit paragraaf 8.4 zijn er inderdaad aanwijzingen dat de ingaande concentratie te laag is geschat.

- * De dichtheid is met de ra-meter op een niet representatieve plaats gemeten. De dichtheid op de overvloeirand is hoger dan de gemiddelde dichtheid van het overvloeiende mengsel

9.2 Aanbevelingen

9.2.1 Algemeen

In de volgende paragrafen worden enkele aanbevelingen gedaan die kunnen leiden tot een nauwkeurigere meting van de overloopverliezen. De aanbevelingen zijn gebaseerd op de ervaringen die zijn opgedaan tijdens de metingen en het onderzoek naar de verschillende meetmethoden.

In het algemeen kan gesteld worden dat voor een continu-meting van de uitgaande dichtheid de methode met de ra-meter aan de overvloeikoker het meest kansrijk wordt geacht voor verdere ontwikkeling, omdat deze methode de veranderingen in het laadproces, zoals verlaging van debiet en overvloeiniveau, weergeeft. Bij de indirecte methode met behulp van het TDS-systeem treden problemen op. Enerzijds doordat de instrumenten in de zuigbuizen niet goed gecalibreerd kunnen worden, anderzijds doordat er wordt gewerkt met instrumenten van het TDS-systeem. Indien over een korte tijd de gemiddelde uitgaande dichtheid wordt berekend, treden hierdoor grote fouten op. Bovendien beschikt niet elk schip over een TDS-systeem.

9.2.2 Calibratie van instrumenten in zuigbuizen

De calibratie dient op een nauwkeurigere wijze uitgevoerd te worden. De calibratie van de snelheidsmeter en concentratiemeter dient plaats te vinden op de wijze zoals geformuleerd in paragraaf 5.5.3 waarbij gebruik wordt gemaakt van het volledige beunvolume om een zo hoog mogelijke nauwkeurigheid te bereiken.

Ook moeten de bodemdeuren op lekkage worden gecontroleerd door het beun vol te pompen met water en te controleren of het volume afneemt in de tijd. Dit kan gebeuren tijdens het leeg varen naar het zuigvak.

9.2.3 Indirecte methode

Bij kleine middelingstijden (in de orde van minuten) is de spreiding erg groot. Dit wordt veroorzaakt doordat er gewerkt wordt met relatief kleine verschillen tussen grote getallen bij de bepaling van de toename van het displacement en de verandering van het volume.

De verandering van volume wordt gebruikt om het uitgaande debiet te bepalen. Het uitgaande debiet is echter ook te berekenen. Immers het uitgaande debiet is een functie van de vleihoogte (h_1) en de overvloeilengte (O). De overvloeilengte is de omtrek van de overvloeirand. De vleihoogte is juist weer een functie het ingaande debiet (Q_{in}), het beunoppervlak (BL) en de veranderingen van het overvloeiniveau. De volgende vergelijkingen om het uitgaande debiet te berekenen zijn in bijlage 11 afgeleid:

$$Q_{uit} = \frac{2}{3} h_1 \sqrt{\frac{2}{3} g h_1 O} \quad (49)$$

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{A_1}{A_2} h_1^{\frac{3}{2}} + \frac{Q_{in}}{A_2} \quad (50)$$

$$A_1 = \frac{2}{3} O \sqrt{\frac{2}{3} g} \quad (51)$$

$$A_2 = BL \quad (52)$$

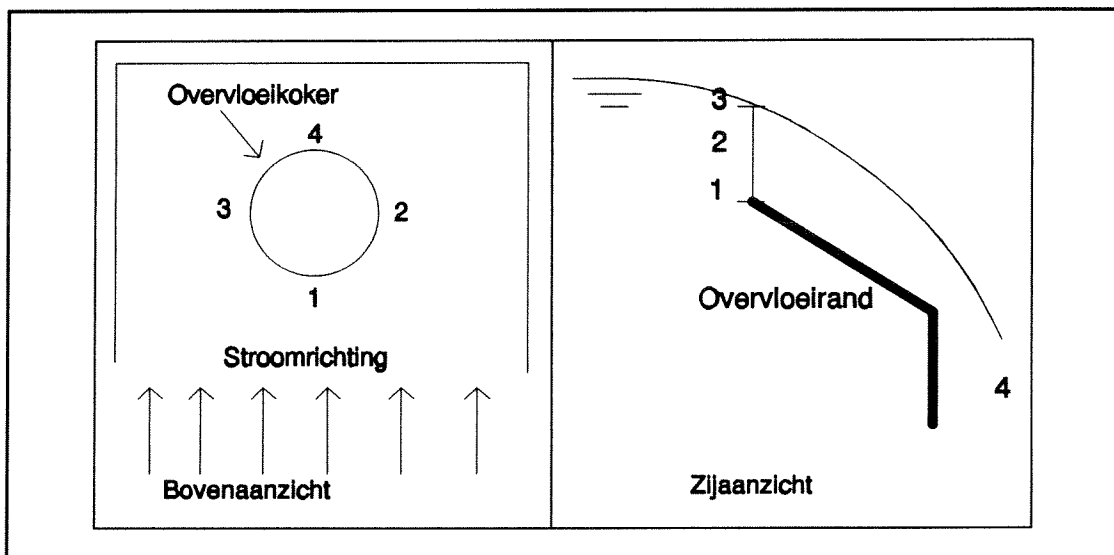
$$A_1 \sim [m^{3/2}/s] \text{ en } A_2 \sim [m^2]$$

Deze vergelijking is moeilijk analytisch op te lossen en moet daarom numeriek uitgewerkt worden.

9.2.4 Radioactieve methode

Met de ra-meter aan de overvloeikoker zijn de beste resultaten bereikt. Het is echter duidelijk dat de concentratiemeter niet op een representatieve plaats de dichtheid meet. Hier dient nader onderzoek naar te worden gedaan. Uit de meting is niet vast komen te staan hoe de dichtheid varieert met de plaats op de overvloeikoker. Tijdens de meting is alleen op positie 1 in figuur 9.1 de dichtheid gemeten.

Om te beoordelen hoe representatief de plaats waar de meting wordt uitgevoerd is, moet op meerdere plaatsen tegelijk de dichtheid worden gemeten. Dit kan door bijvoorbeeld op meerdere plaatsen tegelijk een ra-meter te plaatsen.



Figuur 9.1: Verschillende plaatsen om dichtheid te bepalen

Daarnaast dient onderzocht te worden of het niet mogelijk is een monster te nemen door deze af te zuigen op een plaats dieper in de overvloeikoker. Hier is het mengsel beter gemengd, waardoor dit mogelijk een representatievere plaats is. In het verleden is door het Waterloopkundig Laboratorium onderzoek gedaan naar de mogelijkheden om op een representatieve wijze een monster af te zuigen in een stroom waarvan de stroomsnelheid in grootte en richting verandert [4]. Het blijkt niet altijd noodzakelijk om evenwijdig aan de stroomrichting een monster af te zuigen. Indien loodrecht op de stroomrichting een monster wordt afgezogen blijkt dat de afgezogen concentratie een constante factor verschilt van de daadwerkelijk concentratie. De afzuigsnelheid moet wel voldoende groot zijn ten opzichte van de maximale stroomsnelheid.

Op dit moment is de ra-meter net onder de overvloeirand geplaatst om er voor te zorgen dat de vloeistofspiegel altijd boven het meetinstrument blijft. Tijdens de meting is de vloeistofspiegel altijd boven het meetinstrument gebleven. Ook tijdens de reizen met golven in het beun. Bij een volgende meting kan het instrument beter in de vleihoogte worden geplaatst in plaats van net daaronder.



10. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN T.A.V. LAADPROCES

10.1 Conclusies

De volgende conclusies kunnen getrokken worden naar aanleiding van de uitgevoerde metingen aan boord van de 'X' (paragraaf 8.6).

- Uit een balansvergelijking met de aan boord vastgestelde coëfficiënten blijkt dat er meer zand in het beun is bezonken dan erin is gepompt. Doordat dit niet mogelijk is wordt geconcludeerd dat de meetinstrumenten in de zuigbuizen niet voldoende nauwkeurig zijn gecalibreerd. De overloopverliezen kunnen daarom alleen onderling vergeleken worden.
 - In het geval van het zuigen van zand in locatie B of locatie A stijgt de overvloeiende dichtheid en het overloopverlies pas bij een hoge beladingsgraad (80%-90%). De overloopverliezen nemen sterk toe als gevolg van de toegenomen stroomsnelheid in het beun. Indien het overvloeiniveau en het debiet constant blijven, stijgt het overloopverlies in vijf tot tien minuten tot 100%. Dit is goed zichtbaar tijdens reis 13, 34, 48, 50 en 62.
 - De beladingsnelheid verschilt sterk van reis tot reis tijdens het zuigen van zand op locatie A en op locatie B. Uit de meting blijkt dat onder schijnbaar identieke omstandigheden de toename van het aantal tonnen droge stof per reis sterk kan verschillen. Verschillen van 25% in beladingsnelheid zijn geconstateerd. Zo was de beladingsnelheid in de fase na overvloeien tot een beladingsgraad van 80% in het geval van reis 1-5 slechts 117 ton/min, terwijl onder dezelfde omstandigheden (plaats, debiet en concentratie) tijdens reis 36 de beladingsnelheid 25% hoger was.
 - Er zijn geen significante verschillen tussen het zuigen van zand in locatie B en locatie A geconstateerd.
 - Uit de grafieken waarin de uitgaande dichtheid als functie van de dikte van de waterschil boven het bezonken zand is uitgezet, blijkt dat onder dezelfde omstandigheden de uitgaande dichtheid gemeten met de ra-meter sterk kan verschillen. Bij eenzelfde gemiddeld doorstroomoppervlak kan de stroming in het beun sterk verschillen, waardoor de uitgaande dichtheid ook sterk verschilt.
 - De weersomstandigheden hebben grote invloed op de beladingsnelheid. De laadtijd na overvloeien was tijdens slecht weer ruim 30% langer en de beladingsnelheid ruim 20% langzamer.
 - Ook tijdens ongunstige weersomstandigheden wordt doorgeladen tot het maximale displacement is bereikt. Het moment waarop gestopt wordt met laden wordt bepaald door het maximale displacement.
 - Zoals verwacht dalen de overloopverliezen sterk bij het verlagen van het debiet. De stromingscondities in het beun worden gunstiger en de turbulentiegraad daalt. Bij het zuigen van zand op locatie A en op locatie B is het echter onverstandig af te laden met één zuigbuis. Uit de meting blijkt
-

namelijk niet dat de beladingsnelheid toeneemt bij verlaging van het debiet in de eindfase van het laadproces.

- Het aantal stappen waarin het overvloeiniveau wordt verlaagd verschilt van reis tot reis en is afhankelijk van de zuigbaas.
- Het in grote stappen verlagen van het overvloeiniveau heeft in het geval er gezogen wordt met vol debiet een negatieve invloed op de verliezen. Dit blijkt uit de plotselinge verhoging van de uitgaande dichtheid bij het verlagen van het overvloeiniveau.
- Tot een beladingsgraad van ca. 80% daalt de uitgaande dichtheid na het verlagen van het overvloeiniveau in het algemeen weer tot de waarde van voor het verlagen van dit niveau. De verhoogde stroomsnelheid leidt tijdens het zuigen van zand op locatie A en op locatie B blijkbaar niet tot extra erosie.
- Doordat de overvloeikoker in de laatste fase tot vrijwel op het zand wordt gedrukt ontstaat een erosiekuil rondom de overvloeikoker.
- Bij een laag debiet heeft het neerdrukken van de overvloeikoker geen invloed op de uitgaande dichtheid. In dat geval maakt het geen verschil voor het bezinkingsproces wat het overvloeiniveau is.

10.2 Aanbevelingen

In deze paragraaf worden enkele aanbevelingen gedaan die volgen uit de metingen aan boord van de 'X'.

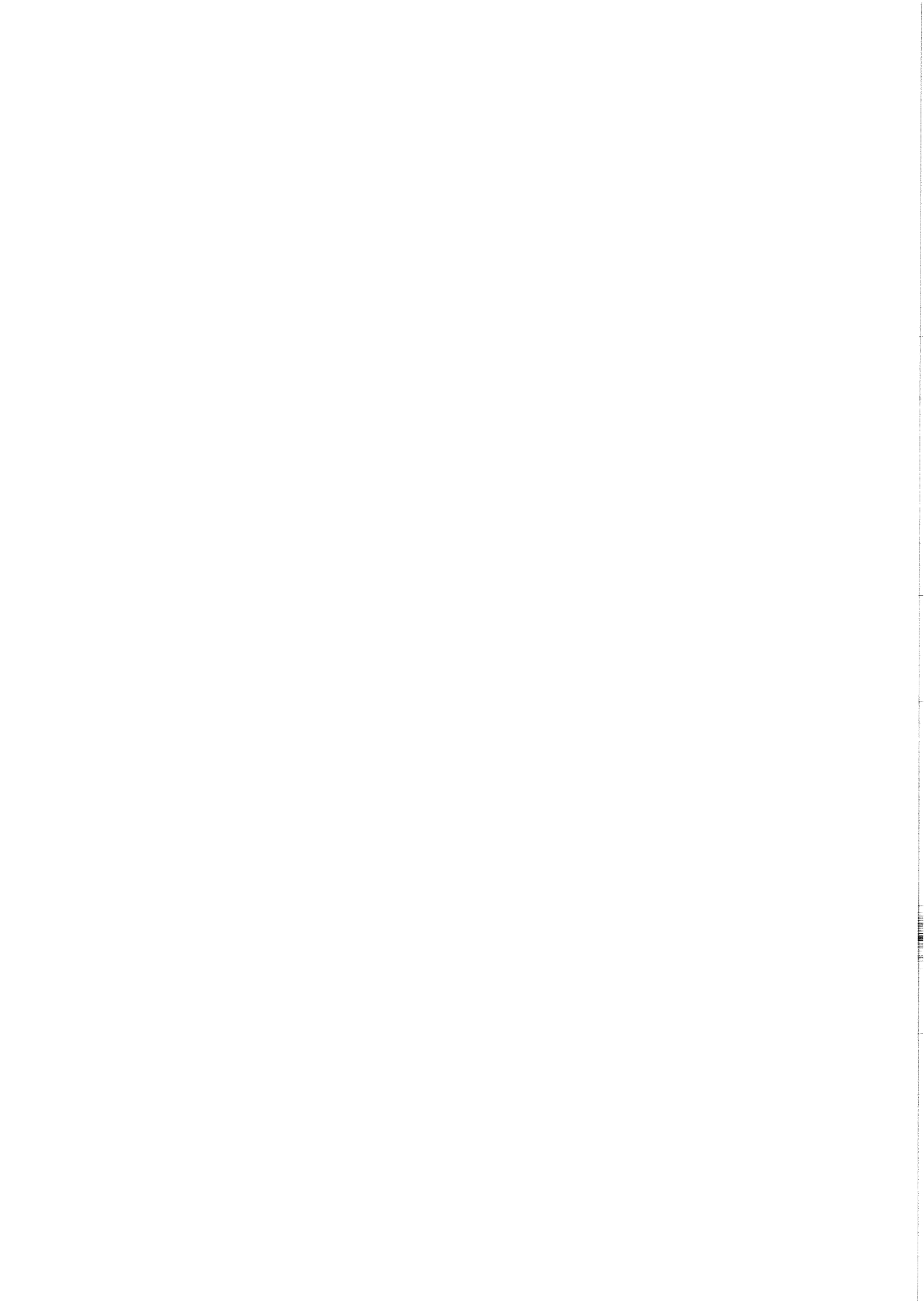
- Uit de metingen blijkt dat per reis de verliezen sterk kunnen verschillen als gevolg van wijzigende omstandigheden (bijvoorbeeld het weer) die niet in de huidige modellering zijn opgenomen. Per reis kunnen de stromingsomstandigheden in het beun sterk verschillen. Hieruit blijkt eens te meer dat praktijkmetingen noodzakelijk zijn om de invloedsfactoren op het laadproces beter te doorgronden.
 - Het verlagen van het overvloeiniveau blijkt vaak op een willekeurige wijze te gebeuren. Het in grote stappen verlagen van het overvloeiniveau leidt tot onnodige verliezen. Door het overvloeiniveau in kleine stappen bij maximaal displacement te verlagen wordt de stroming in het beun niet onnodig verstoord en wordt de stroomsnelheid in het beun niet onnodig verhoogd. De plotselinge verhogingen van de uitgaande dichtheid bij het snel verlagen van het overvloeiniveau kunnen zo voorkomen worden. Het verlagen van het overvloeiniveau is waarschijnlijk ook makkelijk te automatiseren.
 - Het criterium om te stoppen met laden is (ook bij ruw weer) het maximale displacement. Mogelijk dat uit het oogpunt van optimalisatie van het laadproces het economisch is eerder te stoppen met laden.
-

Literatuurlijst

- [1] Ambachtsheer, E. en, Helmantel, A., *Directe meting overvloeiverliezen*, Groningen: Hanzehogeschool Groningen, afdeling Baggertechnologie, 1995.
 - [2] Battjes, J.A., *Vloeistofmechanica b70*, Delft: Faculteit der Civiele Techniek, 1990.
 - [3] Battjes, J.A., *Vloeistofmechanica b71*, Delft: Faculteit der Civiele Techniek, 1991.
 - [4] Bosman, J., Van der Velden, T.J.M., en Hulsbergen, H., *Sediment Concentration Measurement by Transverse Suction*, Coastal Engineering. 11 (1987), pp353-370, Elsevier Science Publishers
 - [5] Bree, S.E.M., *Het beladen van sleepopperzuigers*, Ports and Dredging, no.92, p4 t/m 8
 - [6] Droppert, L.J., *Evaluatiestudie voor de ontwikkeling van een beunmeetsysteem 81059*, Papendrecht: Boskalis, 1981.
 - [7] Groot, J.M. , *Rapport beunbezinking Deel I, II en III*, Delft: TU Delft Faculteit der Civiele Techniek, 1982.
 - [8] Koning, J. de, *Constant tonnage loading system of trailing suction hopper dredgers*, The Hague: International Course "Modern Dredging" , 1977.
 - [9] Miedema, S.A., en Vlasblom, W.J., *A theory for determining sedimentation and overflow losses in hoppers*, Delft: TU Delft Faculteit der werktuigbouwkunde, 1995.
 - [10] Rullens, R, *Production measurement methods for trailing suction hopper dredgers*, Delft: TU Delft Faculteit der Civiele Techniek, 1993.
 - [11] Schiereck, G.J., *Introduction to bed, bank and shore protection f4*, Delft: Faculteit der Civiele Techniek, 1993.
 - [12] Schrieck, G.L.M. van der, *Baggertechniek f14*, Delft: Faculteit der Civiele Techniek, 1995.
 - [13] Smits, A., *Het beperken van het overloopverlies bij het baggeren van zand met een sleepopperzuiger*, Delft: TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1995.
-

-
- [14] *User Manuel Density Measurement type SGM 104*, Sliedrecht: IHC Systems b.v., 1995.
- [15] *User Manuel Insertion Density Measurement System*, Malton (England): Hydramotion Ltd, 1994.
- [16] Vispoel, F.M., *Bepalen van de overstroomverliezen van de sleephopperzuiger Cornelis Zanen van de firma Zanen Verstoep*, Delft: Laboratorium voor de techniek van het grondverzet, 1983.
- [17] Vrouwenvelder, A.C.W.M., en Vrijling, J.K., *Probabilistisch Ontwerpen*, Delft: TU Delft, Faculteit der Civiele Techniek, 1984.
-

Bijlage 1: Calibratie ra-meter aan overvloeikoker en 'Hydraplane'



Calibratie radioactieve concentratiemeter aan overvloeikoker

De meting met de ra-meter is gebaseerd op het principe dat een stof, afhankelijk van de dichtheid, een hoeveelheid straling absorbeert. De mate van absorptie volgt uit de volgende formule:

$$I = I_0 e^{-\eta \rho d}$$

I	=	gemeten radioactieve intensiteit [R/h]
I ₀	=	uitgezonden radioactiviteit [R/h]
η	=	absorptiecoëfficiënt [m ² /kg]
ρ	=	dichtheid van het mengsel [kg/m ³]
d	=	afstand tussen bron en detector [m]

De straling dringt door de wanden van de koker en het mengsel heen, waarbij een deel van de straling wordt geabsorbeerd. De absorptiegraad wordt bepaald door de dichtheid van het mengsel. De ontvanger is uitgerust met Geiger-müllerbuizen. Al naar gelang de ontvangen stralingsintensiteit geven de buizen elektrische pulsen met een bepaalde frequentie af. De elektronische versterker zet deze pulsen om in lineaire gelijkspanning welke weer vertaald wordt naar de fysische grootte behorend bij dichtheid.

In het geval de meting bestond de bron uit de isotoop Caesium 137. Deze bron was geplaatst in een zogenaamde IHC 110 beschermkast.

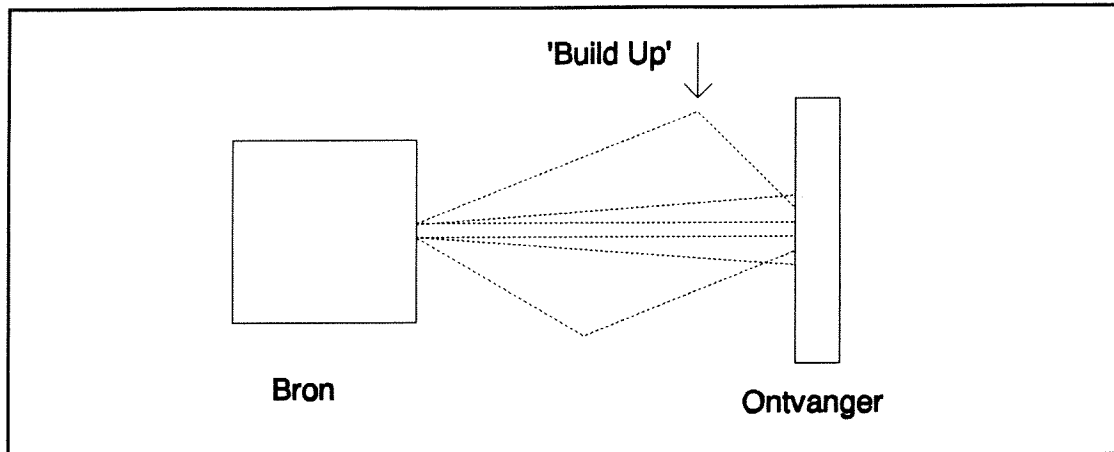
De ontvanger bestond uit een Geiger-müllerbuis van het type GM18545 en een voorversterker. De versterker was van het type SGM 104. De bron en ontvanger zijn aan een ondersteuningsconstructie bevestigd. Deze constructie bestond uit een koker met de vorm van een luciferdoosje. Op de strijkvlakken werden de bron en ontvanger geplaatst en het mengsel stroomt in lengte richting door de koker. De afstand tussen bron en ontvanger bedraagt 50cm (= breedte van de koker) en de hoogte van de koker bedraagt 15 cm. De koker had een lengte van 830cm.

Een probleem bij een meting gebaseerd op het bovenstaande principe is het probleem van 'Build up'. Dit verschijnsel is in de figuur geschetst.

Bij een bron die de straling onder een grote hoek wegzendt zal een gedeelte van de straling de ontvanger bereiken via verstrooiing. Deze straling zou eigenlijk langs de ontvanger zijn gegaan indien er geen verstrooiing was. Door de bundelbreedte te verkleinen wordt het effect van 'Build up' steeds kleiner. Echter bij een te kleine bundelbreedte bereikt te weinig straling de ontvanger waardoor de natuurlijke achtergrond straling weer een rol gaat spelen.

Er moet een optimum gezocht worden tussen:

- Smalle bundel met weinig 'Build up'
 - T.o.v. de achtergrond straling moet voldoende straling de ontvanger
-



Figuur 1: Effect van 'Build up'

bereiken

Tijdens de calibratie is geprobeerd een optimum te vinden door de bundelbreedte te verkleinen m.b.v. collimatatieplaten. Dit zijn stalen platen met een cirkelvormig gat die voor de bron worden geplaatst. Door steeds een plaat met een kleiner gat voor de bron te plaatsen wordt de bundelbreedte steeds verder verkleind.

Daarnaast is er getest met 2 verschillende GM-buizen. De volgende opstellingen zijn getest:

1. Zonder collimatatieplaat met GM-buis 18503
2. Met collimatatieplaat (doorsnede gat 15mm) met GM-buis 18503
3. Zonder collimatatieplaat met GM-buis 18545
4. Met collimatatieplaat (doorsnede gat 15mm) met GM-buis 18545

Tijdens de calibratie werd voor elke van de vier opstellingen gemeten hoeveel straling de bron bereikte bij verschillende mengseldichtheden tussen bron en ontvanger.

Er werd gestart met zuiver water en de dichtheid werd opgevoerd door vervolgens glasplaten (bestaat immers ook uit kwarts) met bekende dichtheid tussen bron en ontvanger te plaatsen.

Dit leverde het volgende resultaat op:

Dichtheid [kg/m ³]	GM-buis 18545		GM-buis 18503	
	zonder collimatie [cpm]	met collomatie [cpm]	zonder collimatie [cpm]	met collomatie [cpm]
1000	20854	11387	3976	2915
1030	18870	10289	3591	2585
1060	17596	9522	3248	2299
1100	15989	8567	-	-
1130	14524	7905	2586	1946
1160	13271	6971	-	-
1190	12093	6464	2177	1601

tabel: bepaling optimale opstelling voor meting

In deze tabel staat cpm voor 'counts per minut'. Uit de tabel is direct af te leiden dat de GM-buis 18503 niet voldoet. Het aantal cpm bij hoogste dichtheid is te laag. De achtergrondstraling (ca.100cpm) beïnvloed de meting nu te sterk.

Er is nu gekozen voor de opstelling met collimatie plaat, omdat de bundelbreedte nu zover verkleind is dat de het aantal cpm nog voldoende groot is t.o.v. de achtergrondstraling en het effect van 'build up' geminimaliseerd.

Op basis hiervan is de verzwakkingsfactor (=ijkingsfactor) ingesteld. Dit de verhouding tussen cpm voor water en cpm voor de maximaal ingestelde dichtheid. In dit geval 1190 kg/m³

$$verzw.fact. = \frac{cpm_{\rho_w}}{cpm_{\rho_{max}}}$$

Er geldt: verzw.fact. = 1.762

Deze factor moet worden ingesteld in de SGM-versterker.

Na de metingen aan boord van de X is de SGM-versterker opnieuw getest in het laboratorium van IHC om vast te stellen dat de calibratie nog steeds klopte.

Calibratie 'Hydraplane'

De 'Hydraplane' is onder laboratorium omstandigheden gecalibreerd door mengsels met bekende dichtheid aan te maken van zand met $d < 90\mu$ en mengsels aan te maken met kaoline. Kaoline heeft een andere viscositeit zodat het effect van de viscositeit ook zichtbaar is. Er is gestart met een 8 liter water. Door steeds een bekende hoeveelheid kaoline of zand toe te voegen is bekend wat de dichtheid van het mengsel is. Het zand is in suspensie gehouden met behulp van een mixer. Steeds opnieuw is de dichtheid gecontroleerd door de 'Hydraplane' in het mengsel te plaatsen.

Het instrument blijkt voor zandwatermengsels goed te zijn gecalibreerd, maar niet voor het kaoline mengsel met hogere viscositeit.

In de tabel zijn de resultaten gegeven:

Zandwatermengsel			Kaoline mengsel		
Werkelijke dichtheid [kg/m ³]	Gemeten dichtheid [kg/m ³]	Vershil [%]	Werkelijke dichtheid [kg/m ³]	Gemeten dichtheid [kg/m ³]	Vershil [%]
1008	1005	-38%	1012	1013	8%
1015	1012	-20%	1024	1022	8%
1023	1022	-4%	1035	1039	10%
1031	1030	-3%	1046	1051	11%
1038	1040	5%	1057	1064	11%
1045	1044	-2%	1068	1075	10%
1053	1052	-1%	1078	1081	4%
1060	1058	-3%	1089	1101	13%
1067	1066	-1%	1099	1118	19%
1074	1074	0%	1110	1136	24%
1081	1079	-2%	1120	1147	22%
1088	1086	-2%	1130	1161	24%
1095	1094	-1%	1140	1172	23%
1102	1104	2%	1149	1193	29%
1109	1109	0%	1159	1204	28%
1116	1114	-2%			
1122	1120	-2%			

1129	1128	-1%			
1136	1136	0%			
1142	1140	-1%			
1149	1147	-1%			
1155	1154	-1%			
1161	1160	-1%			
1168	1168	0%			
1174	1172	-1%			
1180	1179	-1%			
1186	1186	0%			

Product Sheet

No. PXL/4-200

XL/4-200 Insertion Liquid Density Transducer - Umbilical Mounted

Features

- Tank or open channel installation
- Compact design - simple insertion measurement
- No moving parts - maintenance free
- Safe operating principle

Specification

Transducer

Density Accuracy: 0.001 g/cc (@ 1cP, 20°C over calib. range)
 Density Range: 0 - 3 g/cc
 Temperature Range (sensor): -10°C to 70°C
 Pressure Range: 150 psi
 Process Connection: 3/4" BSP umbilical connection,
 adaptors available for 1/2" BSP, NPT,
 or strain-relieved neoprene cable

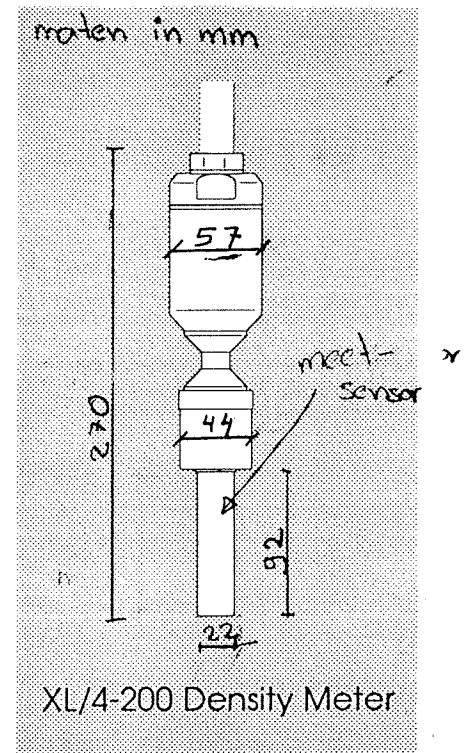
Size - Active sensor length: 92mm
 Overall length: 270mm

Weight: 1.5 kg
 Materials: All 316 SS
 Hastelloy C, optional

Certification: Safe area
 Environmental Rating: IP67

Signal Processor

Processor Unit: HP550 - see Prod. Sheet No.PHP550
 Power Supply: 12 - 30 v d.c.
 Analogue Output: 4 - 20mA, fully configurable, representing
 either density, ref. density, percent solids,
 concentration



Product Code XL/4 - 200 YZ
 Sensor type ————┐
 Installation type ———┘
 Option code —————┘
 Y = Pressure rating
 Z = Sensor material

For further information contact:

As it is Hydramotion's policy to constantly develop and improve its products some information contained in this document may change without prior notice

Hydramotion

1 York Road Ind. Park · Malton · North Yorkshire · England
 Tel: (44) 01653 600294 Fax: (44) 01653 693446

Bijlage 2: Foutenbronnen indirecte methode

- Statistiek
- Nauwkeurigheid van de acoustische niveaumeters zand boven waterniveau
- Nauwkeurigheid van de druksensoren
- Invloed golfslag
- Standaard afwijking golfslag + niveaumeters
- Invloed dichtheid zeewater



Statistiek

In de berekening van de standaardafwijking wordt gebruik gemaakt van een aantal formules.

Standaardafwijking $\sigma = \text{maximale afwijking} / U$

Een betrouwbaarheidsinterval van 99.5 [%] resulteert in $U = 2.81$. Dit is af te leiden uit de tabel met de standaard normale verdeling.

De volgende rekenregels zijn geldig voor 2 onafhankelijke variabelen:

$$z = x \pm y \quad \rightarrow \quad \sigma(z)^2 = \sigma(x)^2 + \sigma(y)^2$$

$$z = a * x + b * y \quad \rightarrow \quad \sigma(z)^2 = a^2 * \sigma(x)^2 + b^2 * \sigma(y)^2$$

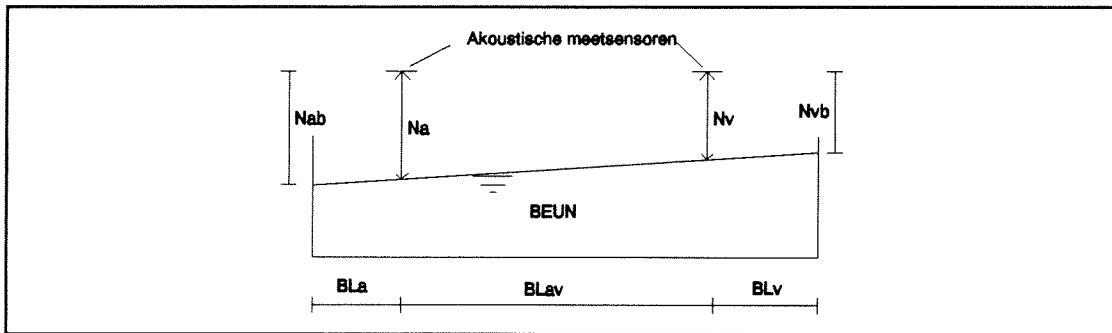
$$z = x * y \quad \rightarrow \quad \sigma(z)^2 = x^2 * \sigma(y)^2 + y^2 * \sigma(x)^2 + \sigma(x)^2 * \sigma(y)^2$$

Bij de bepaling van de nauwkeurigheid van de acoustische niveaumeters, de druksensoren en de invloed van golfslag is gebruik gemaakt van:

Rullens, R., *Production measurement methods for trailing suction hopper dredgers*, Delft: TU delft Faculteit der Civiele Techniek, 1993

Nauwkeurigheid van de acoustische niveaumeters

In onderstaande figuur zijn de plaatsen van de niveaumeters aangegeven.



De gemiddelde afstand tot het vloeistofoppervlak bedraagt:

$$N_{gem} = \frac{N_{ab} + N_{vb}}{2}$$

De waarde N_{gem} wordt in de beunmeettabel ingevoerd, zodat het volume bekend is.

$$N_{ab} = N_a + \frac{N_a - N_v}{BL_{av}} BL_a = N_a + N_a \frac{BL_a}{BL_{av}} - N_v \frac{BL_a}{BL_{av}}$$

$$N_{vb} = N_v - \frac{N_a - N_v}{BL_{av}} BL_v = N_v + N_v \frac{BL_v}{BL_{av}} - N_a \frac{BL_v}{BL_{av}}$$

N_a	=	meting sensor achterzijde beun	[m]
N_v	=	meting sensor voorzijde beun	[m]
N_{ab}	=	afstand van referentiepunt tot aan mengselniveau achterzijde beun	[m]
N_{vb}	=	afstand van referentiepunt tot aan mengselniveau voorzijde beun	[m]
BL_{av}	=	afstand tussen de niveaumeters	[m]
BL_a	=	afstand van achterste sensor tot aan achterzijde beun	[m]
BL_v	=	afstand van voorste sensor tot aan voorzijde beun	[m]

Voor de 'X' geldt $BL_a = BL_v$ waardoor:

$$N_{gem} = \frac{N_a + N_v}{2}$$

De nauwkeurigheid is gesteld op 0.25% van het ingestelde meetbereik. Het meetbereik is het verschil tussen de fysische grootte die bij een outputsignaal van 2 volt hoort en de fysische grootte die bij een outputsignaal van 10 volt hoort. Met deze nauwkeurigheid wordt net voldaan aan de eisen die Rijkswaterstaat aan de instrumenten stelt.

De standaardafwijking (σ) voor één acoustische meetsensor kan nu bepaald worden

door te veronderstellen dat tijdens 99.5% van alle metingen de fout kleiner is dan 0.25% van het meetbereik [Rullens].

$$BL_{av} = \quad \times m$$

$$BL_a = \quad \times m$$

$$BL_v = \quad \times m$$

Voor de 'X' gelden de volgende waarden:

Voor σ volgt:

$$\sigma_{N_a, N_v} = \frac{0.25\% * 12}{2.81} = 0.011m$$

De waarde 2.81 volgt uit de tabel van de standaard normale verdeling.

Omdat met 4 niveaumeters wordt gewerkt is het signaal N_a en het signaal N_b een gemiddelde van 2 niveaumeters. De nauwkeurigheid wordt hiermee vergroot. Voor de standaardafwijking van N_a bij het gebruik van 2 sensoren wordt de standaard afwijking van 1 meetsensor gehalveerd.

Voor σ^2 kan nu geschreven worden:

$$\sigma_{N_{gem}}^2 = \frac{\sigma_{N_a}^2 + \sigma_{N_v}^2}{4}$$

$$\sigma_v^2 = \sigma_{N_{gem}}^2 A_b^2$$

$$\sigma_v = \quad = \quad \text{standaardafwijking volume [m}^3\text{]}$$

Voor de 'X' kan worden berekend:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_v^2} = 3.5m^3$$

Opvallend is dat de willekeurige fout onafhankelijk is van het gebied binnen het meetbereik. Deze fout lijkt erg klein, omdat de standaardafwijking van de niveaumeters slechts 0.5cm is. Dit lijkt onwaarschijnlijk. Om hier rekening mee te houden wordt gerekend met:

$$\sigma_v = 10m^3$$

Uit:

Rullens, R., *Production measurement methods for trailing suction hopper dredgers*, Delft: TU delft Faculteit der Civiele Techniek, 1993

Zand boven waterniveau

Het gepeilde volume zand is vergeleken met het gepeilde volume met de niveaumeters vlak voor stoppen met zuigen om te controleren of er zich zand boven het vloeistofoppervlak bevond.

Reis	Zand volume gepeild [m ³]	Volume m.b.v niveaumeters [m ³]	Vershil [m ³]
4	4493	4857	364
5	4928	4790	-138
6	4480	4870	390
7	3485	5595	2110
8	4565	4909	344
9	4604	4661	57
10	4688	4880	192
11	4688	4743	55
12	4591	4853	262
36	4454	4673	219
38	4519	4713	194
46	4317	4647	330
48	4087	4902	815
50	4087	4717	630
60	4519	4840	321
62	4323	4733	410
64	4323	4614	291
I-1	4687	4821	134
I-11	4467	4874	407

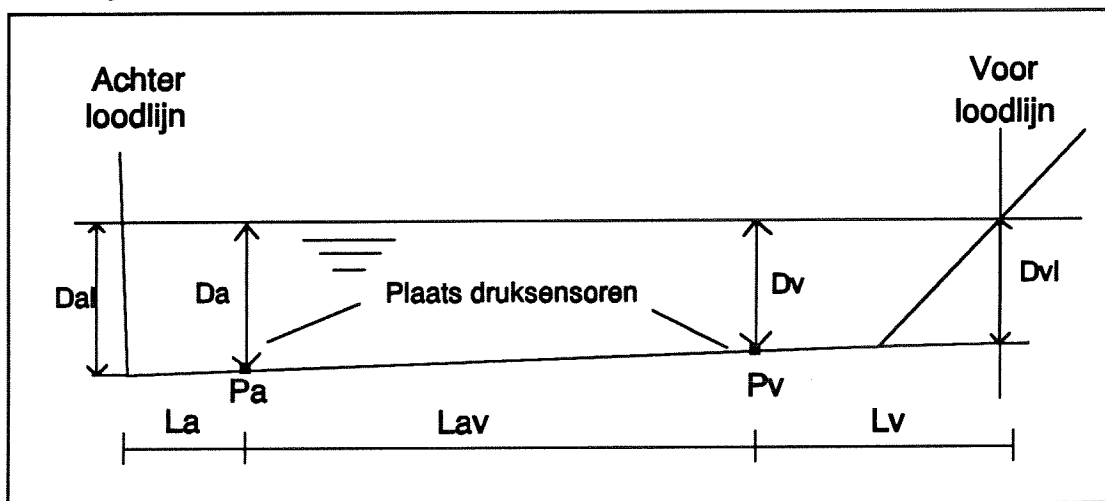
In alle gevallen op één na is het gepeilde zandniveau kleiner dan het gepeilde volume van het beun vlak voor einde zuigen.

Tevens blijkt uit de verdeling van het zand in het beun dat het zand horizontaal verdeeld was. Er steken dus geen zand bergjes boven het vloeistofoppervlak uit. In de 18 gevallen dat er water boven het zand aanwezig was, had deze laag een dikte van:

$$h_{\text{water}} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{18} V_{\text{niveaum.}} - \sum_{i=1}^{18} V_{\text{gepeild}}}{1}}{18 * A} = 0.70m$$

Nauwkeurigheid van de druksensoren

De σ behorend bij de bepaling van de diepgang m.b.v. de druksensoren wordt op dezelfde wijze vastgesteld als σ behorend bij de bepaling van het beunvolume. In de figuur hieronder zijn de plaatsen van de druksensoren weergegeven.



Om de waterverplaatsing te berekenen is de diepgang ter plaatse van de loodlijnen van belang. Deze diepgang wordt berekend volgens:

$$D_{al} = D_a + \frac{D_a - D_v}{L_{av}} L_a = D_a + D_a \frac{L_a}{L_{av}} - D_v \frac{L_a}{L_{av}}$$

$$D_{vl} = D_v - \frac{D_a - D_v}{L_{av}} L_v = D_v + D_v \frac{L_v}{L_{av}} - D_a \frac{L_v}{L_{av}}$$

$$D_{gem} = \frac{D_{al} + D_{vl}}{2}$$

D_a	=	diepgang ter plaatse van druksensor P_a	[m]
D_v	=	diepgang ter plaatse van druksensor P_v	[m]
D_{al}	=	diepgang ter plaatse van achterloodlijn	[m]
D_{vl}	=	diepgang ter plaatse van voorloodlijn	[m]
L_v	=	afstand tussen druksensor P_v en voorloodlijn	[m]
L_a	=	afstand tussen druksensor P_a en achterloodlijn	[m]
L_{av}	=	afstand tussen druksensor P_v en druksensor P_a	[m]
D_{gem}	=	gemiddelde diepgang	[m]

De nauwkeurigheid van de drukmeters wordt gesteld 0.25% van het meetbereik. Hiermee wordt net aan de eisen van Rijkswaterstaat voldaan. Het ingestelde meetbereik van de instrumenten is 8 meter.

Voor de 'X' geldt nu:

$$L_v = x \text{ m}$$

$$L_a = x \text{ m}$$

$$L_{av} = x \text{ m}$$

Op dezelfde wijze als bij de acoustische niveaumeters volgt nu:

$$\sigma_{Da,Dv} = \frac{0.25\% * 8}{2.81} = 0.0071 \text{ m}$$

Voor de standaardafwijking volgt nu:

$$\sigma_{Dal}^2 = \sigma_{Da}^2 + \sigma_{Da}^2 \left(\frac{L_a}{L_{av}}\right)^2 + \sigma_{Dv}^2 \left(\frac{L_a}{L_{av}}\right)^2$$

$$\sigma_{Dvl}^2 = \sigma_{Dv}^2 + \sigma_{Dv}^2 \left(\frac{L_v}{L_{av}}\right)^2 + \sigma_{Da}^2 \left(\frac{L_v}{L_{av}}\right)^2$$

$$\sigma_{Dgem}^2 = \frac{\sigma_{Dal}^2 + \sigma_{Dvl}^2}{4}$$

σ_{Dgem} = standaardafwijking gemiddelde diepgang [m]

Voor de X is berekend:

$$\sigma_{Dgem} = \sqrt{\sigma_{Dgem}^2} = \sqrt{2.7 * 10^{-5}} = 0.005 \text{ m}$$

Opvallend is dat de fout onafhankelijk is van het gebied binnen het meetbereik (het maakt niet uit of de diepgang maximaal is of minimaal).

uit:

Rullens, R., *Production measurement methods for trailing suction hopper dredgers*, Delft: TU delft Faculteit der Civiele Techniek, 1993

Invloed golfslag

Bij de berekening van de invloed van de golfslag is uitgegaan van de significante golfhoogte tussen 1968 en 1988. In deze periode was de significante golfhoogte 1.0 meter.

De volgende aannamen zijn hierbij gedaan:

- Golfsteilheid constant; $S = H_s/L = \text{constant}$
- Voor de golfhoogte in diep water geldt:

$$L_0 = (g / (2\pi)) * T_p^2$$

$$\text{hieruit volgt: } T_p = [1 / (S * 1.56)^{1/2}] (H_s)^{1/2}$$

Als een schip met een snelheid (V_s) tegen de golven in vaart en golven kunnen van alle kanten komen, geldt de volgende formule voor de resulterende golfperiode T_1 :

$$T_1 = T_p - \frac{2\pi}{g} V_s \sin(\alpha)$$

met:

$$g = \text{valversnelling} \quad [\text{m/s}^2]$$

In ondiep water wordt de golflengte (L_1):

$$L_1 = L_0 \tanh(kh) = \frac{9.81 T_1^2}{2\pi} \tanh(kh)$$

- Voor de golfinvloed geldt nu:

$$\Delta p = 9.81 A_w \rho_w \frac{\cosh((h+z)k)}{\cosh(kh)}$$

met:

$$\Delta p = \text{maximale golfinvloed tijdens passeren} \quad [\text{N/m}^2]$$

$$A_w = \text{amplitude van de golf} \quad [\text{m}]$$

$$z = \text{afstand tussen waterspiegel en meetsensor} \quad [\text{m}]$$

$$\rho_w = \text{dichtheid van zeewater} \quad [\text{kg/m}^3]$$

- In de tijd meet meetsensor dus:

$$P(t) = 9.81 \rho_w z + \Delta p \sin\left(\frac{2\pi}{T_1} t\right)$$

Voor een gegeven diepgang z en een gegeven golfhoogte kan de invloed van de golven worden vastgesteld. Het TDS-systeem middelt de signalen over een zekere tijd. Hierdoor vermindert de maximale golfinvloed tijdens passeren (Δp).

- M.b.v. een computerprogramma is voor alle golfrichtingen de invloed bepaald.

Uiteindelijk is vastgesteld:

- * Standaard deviatie geladen: 0.0164m
- * Standaard deviatie leeg: 0.0168m

- Voor de totale standaardafwijking bij de bepaling van het displacement wordt met de maatgevende $\sigma = 0.0168$ gerekend.

Uit:

Rullens, R., *Production measurement methods for trailing suction hopper dredgers*,
Delft: TU delft Faculteit der Civiele Techniek, 1993

Standaard afwijking golfslag + niveaumeters

Volgens rekenregels voor de standaardafwijking geldt:

$$\sigma_{\text{totaal}} = \sqrt{\sigma_{\text{golf}}^2 + \sigma_{\text{meets}}^2} = 1.8 \text{ cm}$$

Het displacement kan benaderd worden met de volgende polynoom:

$$W = (25.46D_{\text{gem}}^2 + 1570.88 * D_{\text{gem}} - 295) \rho_w$$

Voor leeg schip geldt:	D_{gem}	=	3.5m
	$\sigma(W)$	=	$W(D_{\text{gem}} = 3.5) - W(D_{\text{gem}} = 3.5 - 0.018)$
		=	31ton
Voor vol schip geldt:	D_{gem}	=	8.0m
	$\sigma(W)$	=	$W(D_{\text{gem}} = 8.0) - W(D_{\text{gem}} = 8.0 - 0.018)$
		=	35ton

Invloed dichtheid zeewater

De invloed van de dichtheid van het zeewater is bepaald door te analyseren wat de gevolgen zijn als de dichtheid van het water niet goed wordt geschat.

De diepgang wordt op de volgende wijze bepaald:

$$D = \frac{P}{\rho_w g}$$

met:

p = meetsignaal druksensor [N/m²]
 ρ_w = dichtheid water [kg/m³]

Vervolgens kan het displacement als volgt benaderd worden:

$$W = (25.46D^2 + 1570.88D - 295)\rho_w$$

In de tabel is berekend wat het displacement is bij een bepaald meetsignaal met verschillende waarden voor de dichtheid van het zeewater.

Druk-sensor [N/m ²]	W met $\rho_w = 1020$ kg/m ³ [ton]	W met $\rho_w = 1030$ kg/m ³ [ton]	Vershil t.o.v. $\rho_w = 1020$ kg/m ³ [%]	W met $\rho_w = 1010$ kg/m ³ [ton]	Vershil t.o.v. $\rho_w = 1020$ kg/m ³ [%]
5.0	8354	8345	-0.11%	8363	+0.11%
5.6	9480	9469	-0.11%	9491	+0.11%
6.2	10624	10612	-0.11%	10637	+0.11%
6.8	11787	11773	-0.12%	11802	+0.12%
7.4	12969	12952	-0.13%	12986	+0.12%
8.0	14170	14150	-0.14%	14189	+0.13%

Bij de berekening van de uitgaande dichtheid wordt gerekend met het verschil in displacement. Het verschil is vrijwel constant. In de tabel hieronder is aangegeven wat de gevolgen zijn indien de diepgang toeneemt met 0.6 m

Druk-sensor [N/m ²]	ΔW met $\rho_w = 1020$ kg/m ³ [ton]	ΔW met $\rho_w = 1030$ kg/m ³ [ton]	Vershil t.o.v. $\rho_w = 1020$ kg/m ³ [ton]	ΔW met $\rho_w = 1010$ kg/m ³ [ton]	Vershil t.o.v. $\rho_w = 1020$ kg/m ³ [ton]
5.0→5.6	1126	1124	-2	1128	2
5.6→6.2	1144	1143	-1	1146	2
6.2→6.8	1163	1161	-2	1165	2
6.8→7.4	1182	1179	-3	1184	2
7.4→8.0	1201	1198	-3	1203	2

Tijdens de meting wordt veel vaker het displacement bepaald, namelijk elke 5 seconde. In 5 seconde neemt het displacement niet toe van 5.0m naar 5.6m. Indien de diepgang met 1cm toeneemt is de de fout ca.0.2 ton. Dit is verwaarloosbaar t.o.v. de fouten in de bepaling van de diepgang a.g.v. meetfouten en golven.

Druk-sensor [N/m ²]	ΔW met $\rho_w = 1020$ kg/m ³ [ton]	ΔW met $\rho_w = 1030$ kg/m ³ [ton]	Vershil t.o.v. $\rho_w = 1020$ kg/m ³ [ton]	ΔW met $\rho_w = 1010$ kg/m ³ [ton]	Vershil t.o.v. $\rho_w = 1020$ kg/m ³ [ton]
5.00→5.01	18.62	18.44	0.18	18.81	0.18

Bijlage 3: Sleephopperzuiger 'X'

Bijlage 4: Computerprogramma 'OVERFLOW'

Beschrijving programma overflow

Datum: 4 december 1995

Door : RRUL

Het programma maakt onderscheidt tussen twee fasen: een actieve fase tijdens de status zuigen en een passieve fase tijdens de andere statussen.

Tijdens de passieve status wordt op het scherm de datum en de tijd gepresenteerd zoals ontvangen van de TDSS-computer. De datum en de tijd worden iedere 5 seconden geupdated. Onder in het scherm wordt een balk afgedrukt met 10 vakjes welke de functietoetsen voorstellen. Tijdens deze fase kunnen drie functietoetsen gebruikt worden: de toets F5 voor de overgang naar het configuratie-scherm, de toets F7 voor het gelijkzetten van de PC-klok aan de TDSS-klok. Met de toets F10 kan het programma worden beëindigd.

Tijdens de status zuigen wordt het meetscherm gepresenteerd. Op dit meetscherm wordt een grafiek gepresenteerd met daarin grafisch uitgezet het gefilterde deplacement van het schip (gele lijn), de gefilterde hoeveelheid tds in het beun (groene lijn) en de cumulatieve hoeveelheid tds door de overflow (rode lijn). Naast deze grafiek worden nog twee kleinere grafiekjes afgedrukt. Rechts boven is een grafiekje welke weergeeft de dichtheid van het mengsel in de overflow gedurende de laatste 5 minuten. Het onderste grafiekje geeft het overloopverlies weer als percentage van het inkomende mengsel gedurende de laatste 5 minuten.

Wordt in het meetscherm op de spatiebalk gedrukt dan wordt het cumulatief overloopverlies op nul gezet.

Met behulp van de functietoetsen kunnen de volgende keuzen gemaakt worden: met toets F3 wordt de calibratiefunctie opgestart, toets F5 wordt het configuratiescherm opgestart, toets F7 wordt de klok gelijk gezet en met toets F10 wordt het programma beëindigd.

In het calibratiescherm wordt een grafiek gepresenteerd waarin grafisch wordt weergegeven het debiet gemeten met de snelheidsmeters (gele lijn), het debiet gemeten in het beun (groene lijn), de dichtheid van het mengsel gemeten met de concentratiemeters (witte lijn), en de dichtheid van het inkomende mengsel in het beun volgens het TDS-systeem (rode lijn).

Zodra op de spatiebalk wordt gedrukt start het kalibreren. Op het scherm wordt een verticale lijn getrokken welke aangeeft het startpunt. Vanaf dat punt worden de meetwaarden gemiddeld totdat wederom op de spatiebalk wordt gedrukt. Een verticale lijn geeft het eindpunt aan. Op het scherm worden dan de gemiddelde waarden over de calibratietijd afgedrukt. Met de toets F3 wordt het meetscherm weer opgestart.

Met de toets F5 kan het configuratiescherm worden opgestart. In dit configuratiescherm kunnen verschillende parameters worden aangepast: het scan-interval voor het uitlezen van de APIX kaart (analoge signalen), de calibratiefactoren van de snelheid en concentratiemeters (Deze zijn $Y = C1 * Volt + C2$) en de filterfaktor. Met de pijltjestoetsen kan de gewenste parameter worden gekozen. Door op [enter] te drukken kan een nieuwe waarde worden ingevoerd. Door wederom op [enter] te drukken wordt de nieuwe waarde geaccepteerd.

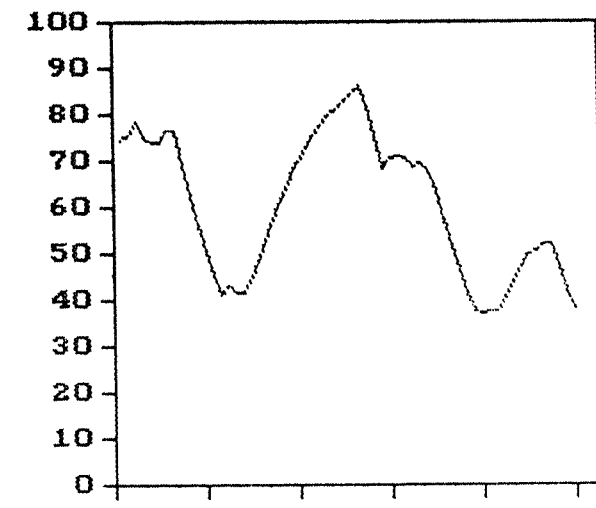
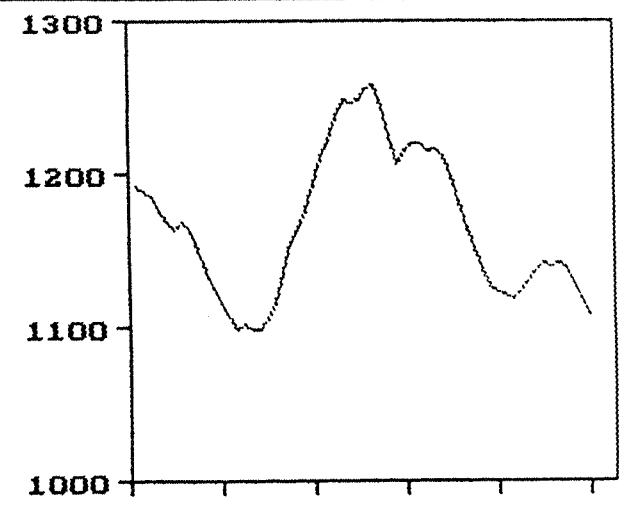
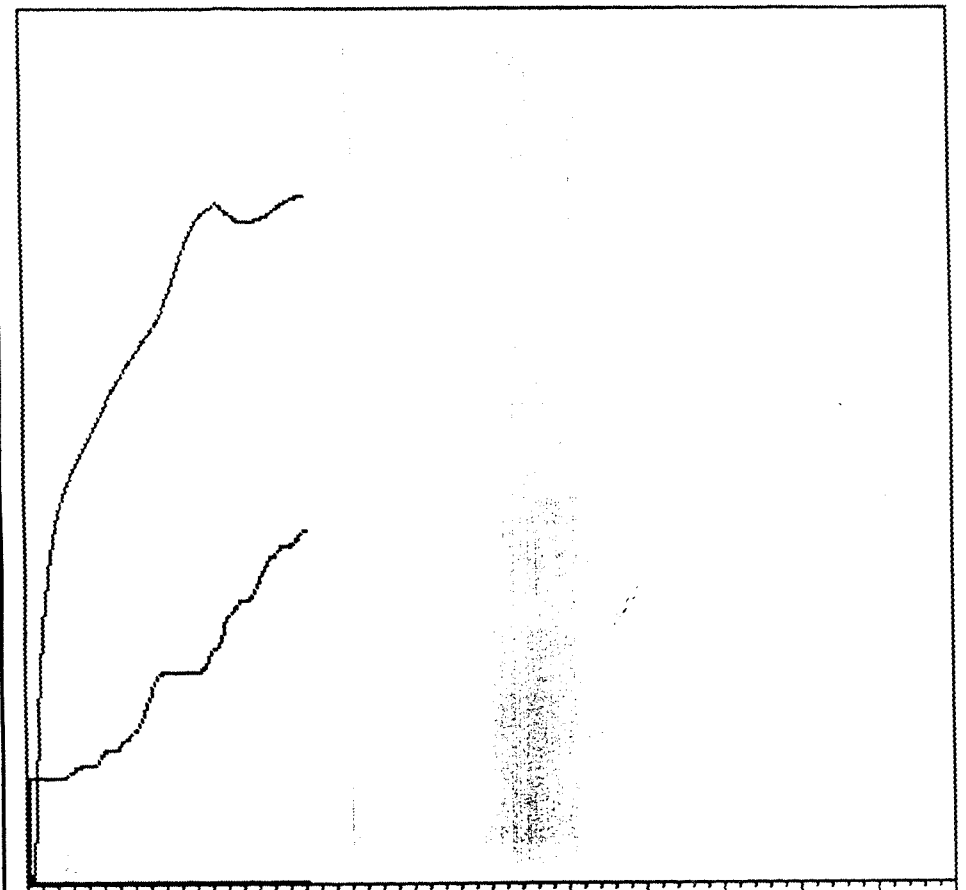
Indien het configuratie scherm actief is, worden de gemeten waarden niet geregistreerd. Het is verstandig om configuratie waarden (bijvoorbeeld calibratie factoren) te veranderen tijdens na of net voor de status zuigen.

Alle waarden die worden opgeslagen in een matrix met 15 kolommen. Dit zijn

de ongecorrigeerde waarden.

Kolom 1:a snelheidsmeter bakboord
Kolom 2:b snelheidsmeter stuurboord
Kolom 3:c concentratiemeter bakboord
Kolom 4:d concentratiemeter stuurboord
Kolom 5:e ~~stemvork of nucleaire meter~~
Kolom 6:f ~~stemvork of nucleaire meter~~
Kolom 7:g dag
Kolom 8:h maand
Kolom 9:i jaar
Kolom 10:j uur
Kolom 11:k min
Kolom 12:l sec
Kolom 13:m TDS
Kolom 14:n volume
Kolom 15:o displacement

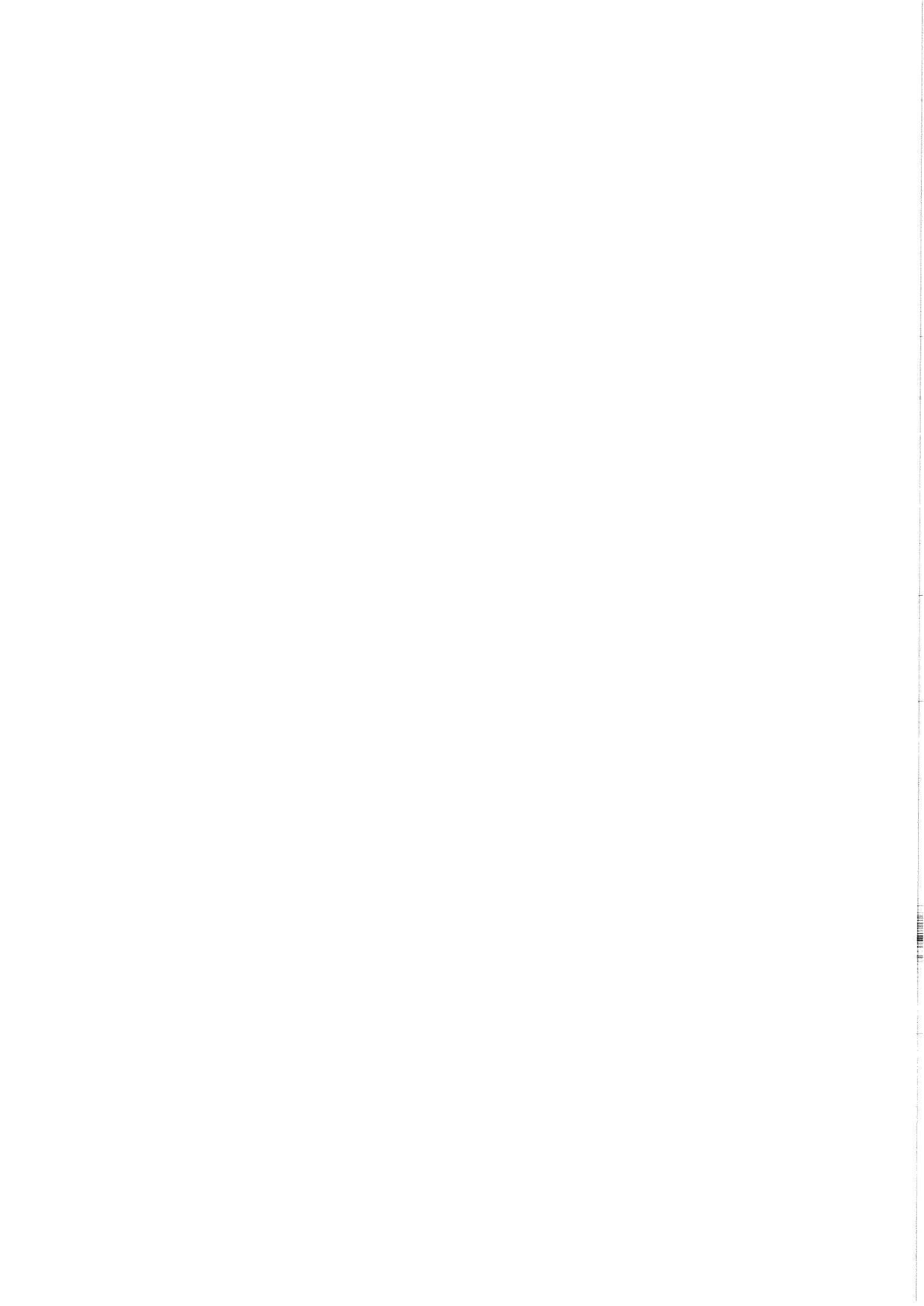
29



15 Nov 13:06:05
 Zg/st code : G 7
 Reisnummer : 1
 Deplacment: 11182
 Volume beun: 4886
 Tds in beun: -1311

	Fys.	Volt
Q_BB :	2.86	4.50
Q_SB :	2.86	4.50
P_BB :	1.22	4.50
P_SB :	1.22	4.50
Q_over:	6.13 m3/s	
P_over:	1.02 ton/m3	

	Start C		Config		Klok		Einde
--	---------	--	--------	--	------	--	-------

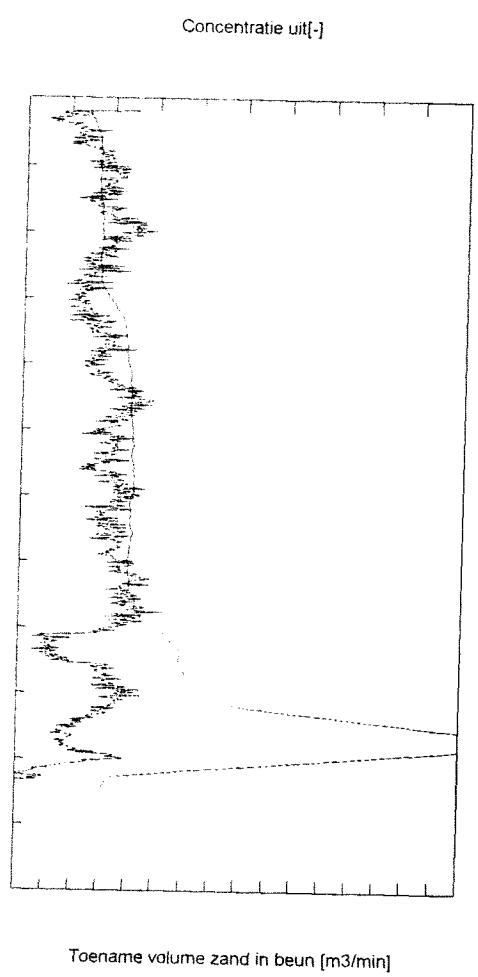


Bijlage 5: Calibratiegrafieken

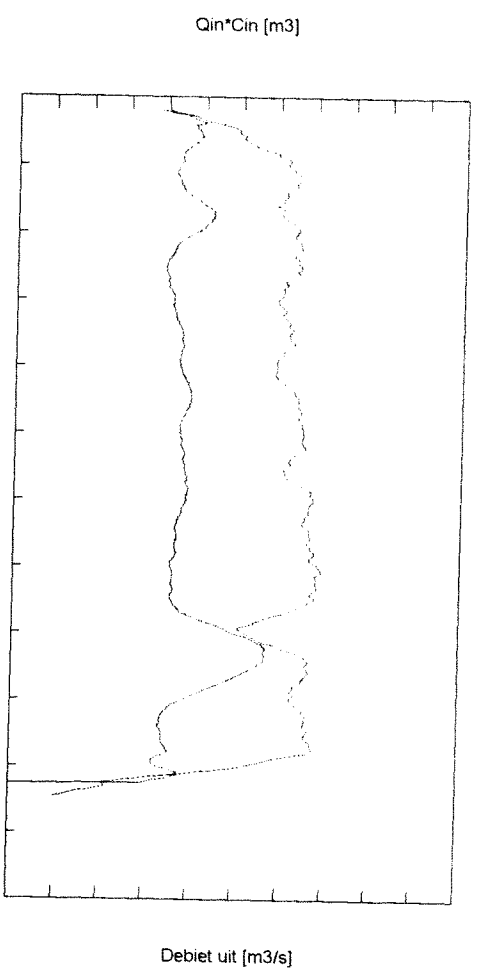
Bijlage 6: Verloop meetsignalen in de tijd + controle signaal ra-meter



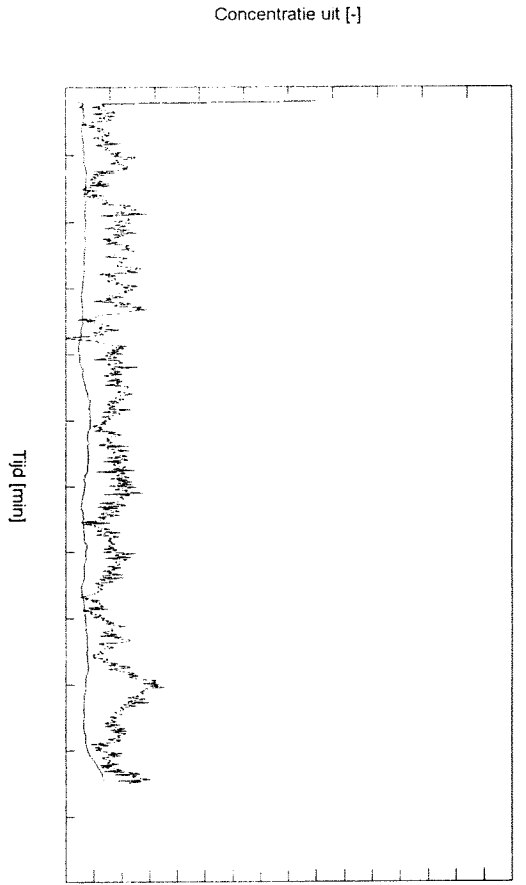
Toename volume zand in beun en concentratie uit vs tijd
reis 13



Productie en beuninhoud vs tijd
reis 13

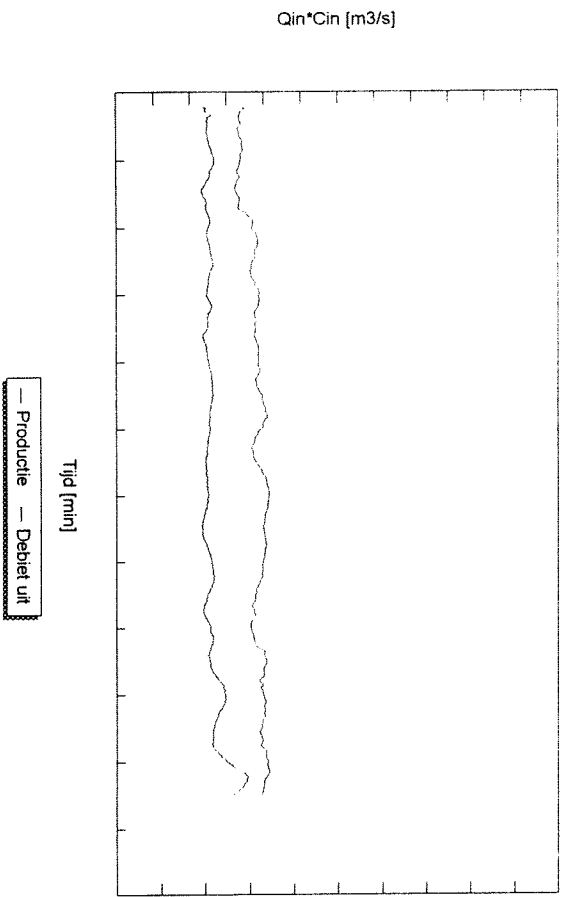


Toename volume zand in beun en concentratie uit vs tijd
reis 34



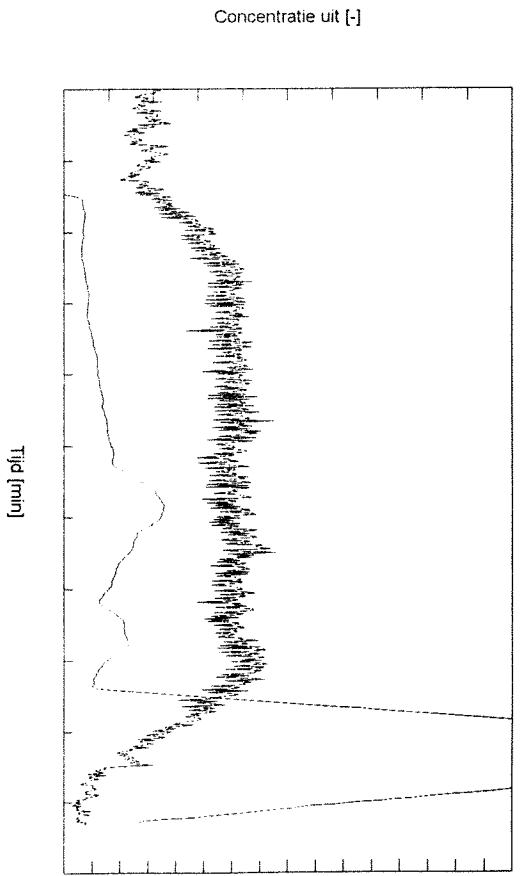
Toename volume zand in beun [m3/min]

Productie en beuninhoud vs tijd
reis 34



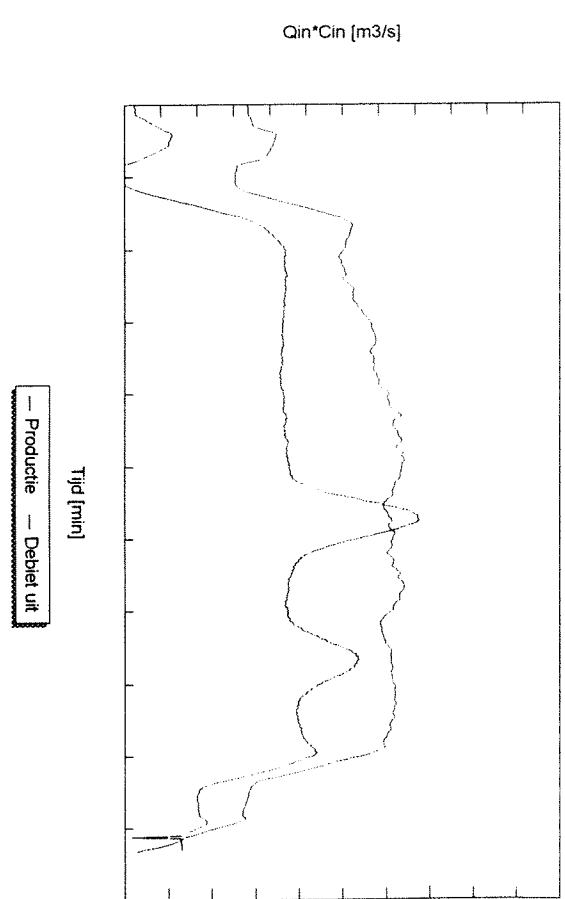
Debiet uit [m3/s]

Toename volume zand in beun en concentratie uit vs tijd
reis 36



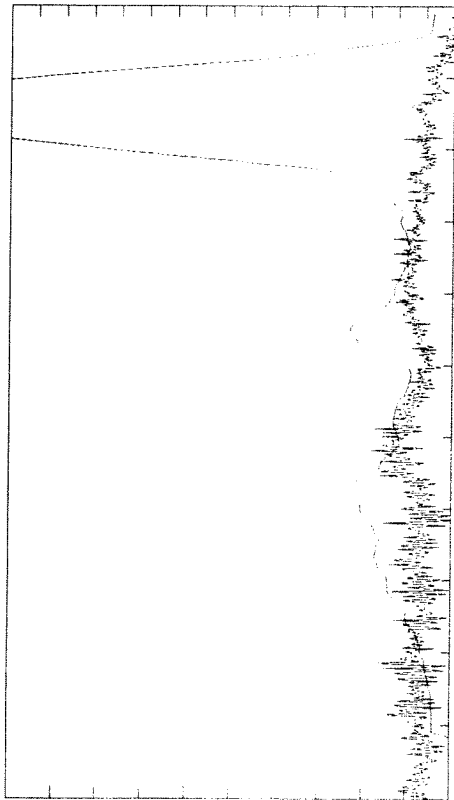
Toename volume zand in beun [m3/min]

Productie en beuninhoud vs tijd
reis 36



Debiet uit [m3/s]

Toename volume zand in beun en concentratie uit vs tijd
reis 38

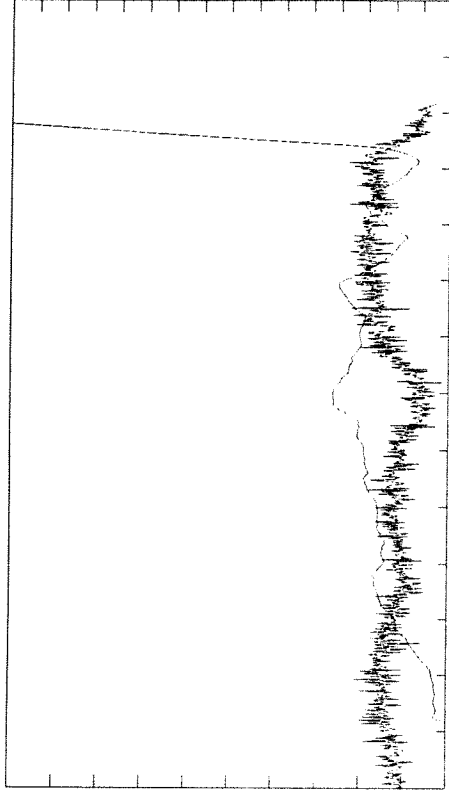


Toename volume zand in beun [m³/min]

Tijd [min]

— Concentratie uit m.b.v Ra-meter — Toename volume zand

Toename volume zand in beun en concentratie uit vs tijd
reis 46

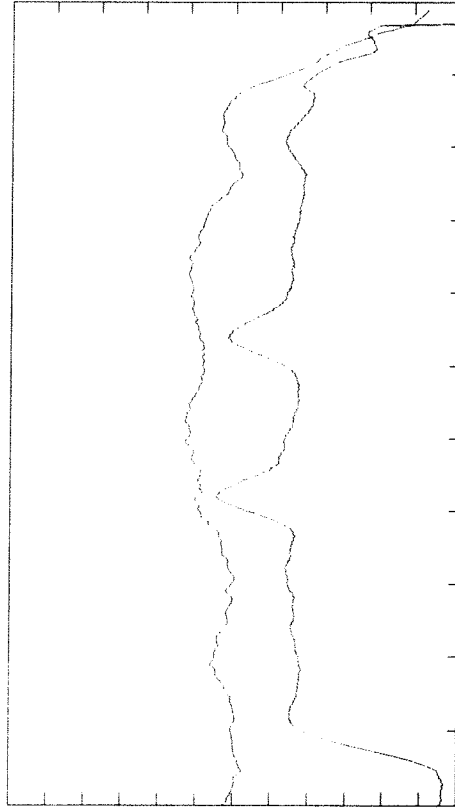


Toename volume zand in beun [m³/min]

Tijd [min]

— Dichtheid m.b.v Ra-meter — dTDS/dt

Productie en beuninhoud vs tijd
reis 38

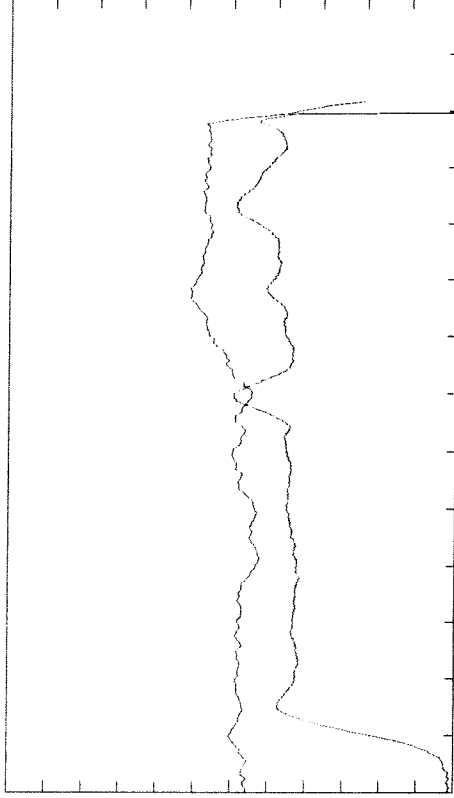


Debiet uit [m³/s]

Tijd [min]

— Productie — Debiet uit

Productie en beuninhoud vs tijd
reis 46



Debiet uit [m³/s]

Tijd [min]

— Productie — Debiet uit



Bijlage 7: Korrelverdelingen

1. Verzamelgrafiek met korrelverdelingen van alle monsters uit de zandverdeler

Verzamelgrafiek met korrelverdelingen van alle monsters uit de overvloeikoker bij het einde van het laadproces.

2. Verzamelgrafiek met korrelverdelingen van monsters uit zandverdeler en uit overvloeikoker bij het einde van het laadproces:
 - Reis 62 (R62)
 - Reis 48 (R48)
 - Reis 34 (R34)
 - Reis I-11 (RI-11)

Korrelverdelingen

Reis	Lokatie	Monster uit overvloei		Monster uit zandverdeler
		start overvloeien	einde overvloeien	
12	locatie A		*	
13	locatie A		*	*
34	locatie B		*	*
38	locatie B			
48	locatie B		*	*
50	locatie B			*
60	locatie B			
62	locatie B		*	*
64	locatie B		*	
I-1	locatie B	*	*	
I-5	locatie B	*	*	*
I-11	locatie B		*	*

Monster uit zandverdeler

Reis	Plaats	d ₁₀ (μ)	d ₅₀ (μ)	d ₉₀ (μ)
13	locatie A	161	276	471
		172	323	977 [*]
		165	314	518
34	locatie B	190	267	398
48	locatie B	142	195	280
50	locatie B	138	183	256
62	locatie B	139	179	210
I-5	locatie B	180	254	343
I-11	locatie B	171	249	305

^{*})Schelpen aanwezig

Korrelverdeling eind laadproces

Reis	Plaats	$d_{10} (\mu)$	$d_{50} (\mu)$	$d_{90} (\mu)$
12	locatie A	84	160	205
13	locatie A	41	101	193
34	locatie B	168	241	295
48	locatie B	130	178	212
62	locatie B	125	174	211
64	locatie B	96	194	281
I-1	locatie B	140	183	254
I-5	locatie B	112	231	298
I-11	locatie B	134	191	275

Korrelverdeling begin overvloeien

Reis	Plaats	$d_{10} (\mu)$	$d_{50} (\mu)$	$d_{90} (\mu)$
I-1	locatie B	39	86	177
I-5	locatie B	49	140	199

In de monsters die zijn genomen bij de start van overvloeien bleek zoveel slib ($d < 63\mu$) te zitten dat zeven redelijkerwijs niet meer mogelijk was.

Van 2 monsters is de samenstelling van het slib onderzocht. De tabel geeft de resultaten hiervan.

fractie	Reis I-1	Reis 64
$< 63\mu$	100%	100%
$> 50\mu$	9.3%	1.9%
$> 20\mu$	39%	29.2%
$< 20\mu$	61%	70.8%

Het valt op dat van de fijne fractie zelfs het grootste gedeelte kleiner is dan $< 20\mu$.

Bijlage 8: Overzichtsgrafieken meting

- **Overzicht van alle reizen**
- **Dichtheid uit en TDS in beun vs tijd**
- **Relatief overloopverlies en beuninhoud vs beladingsgraad**
- **Uitgaande dichtheid vs waterschil boven zandbed**
- **Gemiddelde dichtheid en gemiddeld debiet**

Overzicht van alle reizen:

Reis	locatie	korrel verdeling start overvloeien	korrel verdeling einde overvloeien	korrel verdeling inkomend mengsel	variabele	opmerkingen
4	locatie A	nee	nee	nee	normaal zuigproces	- ra concentratiemeter nog niet gecalibreerd - signaal snelheidsmeter niet correct
5	locatie A	nee	nee	nee	normaal zuigproces	- signaal snelheidsmeter niet correct
6	locatie A	nee	nee	nee	normaal zuigproces	- signaal snelheidsmeter niet correct
7	locatie A	nee	nee	nee	normaal zuigproces	- signaal snelheidsmeter niet correct
8	locatie A	nee	nee	nee	normaal zuigproces	- signaal snelheidsmeter niet correct
9	locatie A	nee	nee	nee	normaal zuigproces	- signaal snelheidsmeter niet correct
10	locatie A	nee	nee	nee	normaal zuigproces	- signaal snelheidsmeter niet correct
11	locatie A	nee	nee	nee	koker snel neer	
12	locatie A	nee	ja	nee	normaal zuigproces	
13	locatie A	nee	ja	ja	normaal zuigproces	
34	locatie B	nee	ja	ja	één zuigbuis	Zandverdelers uur lang open
36	locatie B	nee	nee	ja	koker snel neer	
38	locatie B	nee	nee	nee	normaal zuigproces	
46	locatie B	nee	nee	nee	normaal zuigproces	zwaar weer; golven in het beun
48	locatie B	nee	ja	ja	normaal zuigproces	zwaar weer; golven in het beun

50	locatie B	nee	nee	ja	-afladen met één zuigbuis - koker langzaam neer	zwaar weer; golven in het beun
60	locatie B	nee	nee	nee	normaal zuigproces	zwaar weer; golven in het beun
62	locatie B	nee	ja	ja	koker langzaam neer	- zwaar weer; golven in het beun - stemvork voor op ra concentratiemeter geplaatst
64	locatie B	nee	ja	nee	één zuigbuis	
I-1	locatie B	ja	ja	nee	afladen met één zuigbuis	
I-5	locatie B	ja	ja	ja	Normaal zuigproces	
I-11	locatie B		ja	ja	koker op 5000m ³	

Dichtheid uit en TDS in beun vs tijd

- De dichtheden die gemeten zijn met de ra-meter zijn ongefilterd in de grafiek weergegeven.
- De op indirecte wijze bepaalde uitgaande dichtheid is met het volgende schema berekend:

i	tijd (sec)	Uitgaande dichtheid (kg/m ³)
0	0, start overvl.	0
1	5	0
2	10	0
..
23	115	0
24	120	$\rho_{i=24} = \frac{\sum_{i=1}^{24} u_i \rho_f A(t_i - t_{i-1}) - (W_{i=24} - W_{i=0})}{\sum_{i=1}^{24} u_f A(t_i - t_{i-1}) - (V_{i=24} - V_{i=0})}$
25	125	$\rho_{i=25} = \frac{\sum_{i=2}^{25} u_i \rho_f A(t_i - t_{i-1}) - (W_{i=25} - W_{i=1})}{\sum_{i=2}^{25} u_f A(t_i - t_{i-1}) - (V_{i=25} - V_{i=1})}$

- De dichtheid van de monsters is bepaald door met behulp van het volume en de massa van het monster de dichtheid te bepalen.
- Het aantal tonnen droge stof is gemiddeld over 15 seconde weergegeven

Het aantal tonnen droge stof in het beun is als volgt berekend:

Het aantal tonnen droge stof is de massa van alleen de zanddeeltjes. Deze formule is als volgt af te leiden:

$$TDS = \left(\frac{M}{V_b} - \rho_w \right) V_b \rho_s$$

Totaal beunvolume:

$$V_b = V_s + V_w$$

Totaal massa in beun:

$$M = V_s \rho_s + V_w \rho_w$$

Met deze twee vergelijken volgt voor het volume zanddeeltjes:

$$V_s = V_b \left(\frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \right)$$

Hieruit volgt voor TDS in beun:

$$TDS = V_s \rho_s$$

$$TDS = \left(\frac{M}{V_b} - \rho_w \right) V_b \rho_s$$

met:

V_s = volume zanddeeltjes in beun
 ρ_s = specifieke dichtheid zand

[m³]
 [kg/m³]

Relatief overloopverlies en beuninhoud vs beladingsgraad

De beladingsgraad is elke 5 seconde op de volgende wijze bepaald:

$$bg = \frac{\rho_{beun} - \rho_w}{\rho_{situ} - \rho_w} * 100\%$$

Met:

$$\rho_{beun} = \frac{M_{beun}}{V_{beun}}$$

bg	=	beladingsgraad	[%]
ρ_{beun}	=	gemiddelde dichtheid van de beuninhoud	[kg/m ³]
ρ_w	=	dichtheid zeewater	[= 1020kg/m ³]
ρ_{situ}	=	dichtheid van in het beun bezonken zand	[= 2000kg/m ³]
M_{beun}	=	massa van de lading	[kg]
V_{beun}	=	volume van de lading	[m ³]

Het relatief overloopverlies is als volgt bepaald:

$$OV_{2min} = \frac{\sum_{i=1}^{24} Q_{uit,i} c_{uit,i}}{\sum_{i=1}^{24} Q_{in,i} c_{in,i}}$$

met:

$Q_{uit,i}$	=	debiet uit op tijdstip i	[m ³ /s]
$c_{uit,i}$	=	uitgaande concentratie op tijdstip i	[-]
$Q_{in,i}$	=	debiet in op tijdstip i	[m ³ /s]
$c_{in,i}$	=	concentratie uit op tijdstip i	[-]

Het gemiddelde relatief overloopverlies over 2 minuten is dus bepaald.

Uitgaande dichtheid vs waterschil boven zandbed

Het beun is geschematiseerd tot een rechthoekige bak. Het oppervlak van de vloeistof spiegel bedraagt 600m². De dikte van de waterschil is berekend voor het geval dat al het zand bezonken is. Of te wel er staat zuiver zeewater boven het zandbed. Er is gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$h = \frac{(1-bg)V_{beun}}{650}$$

met:

h = dikte van waterschil boven bezonken zand [m]
bg = beladingsgraad [-]

De uitgaande dichtheid is berekend zoals eerder beschreven

Gemiddelde dichtheid en gemiddeld debiet

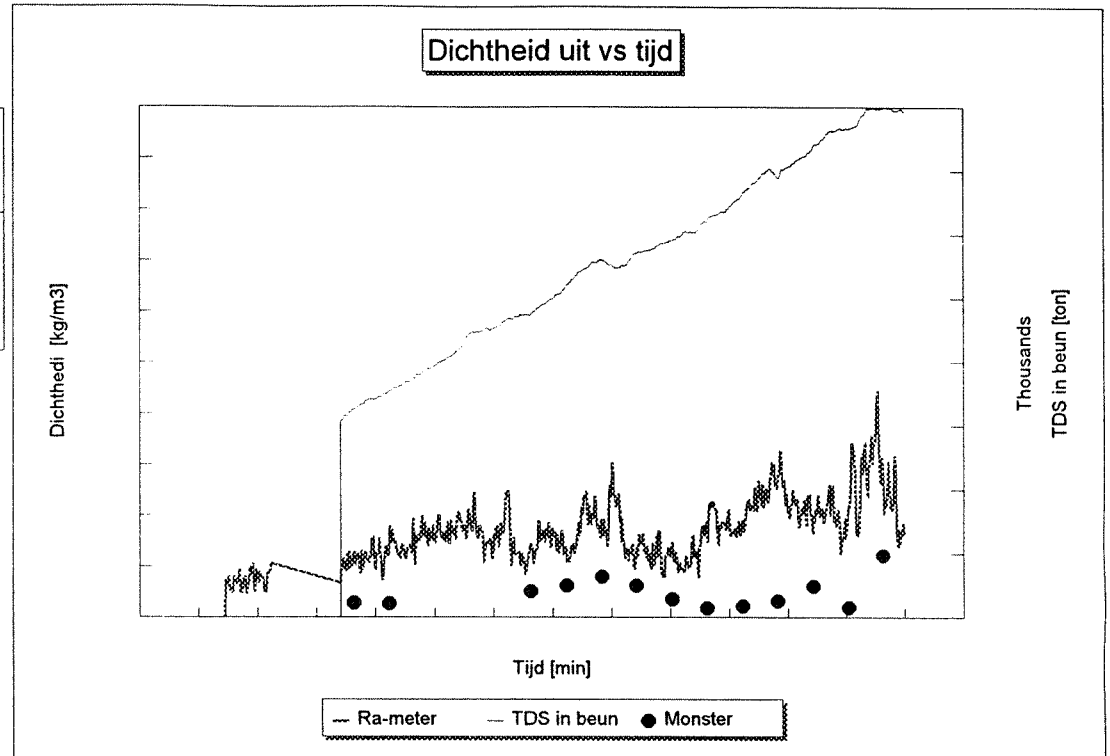
Het komt voor dat tijdens het zuigen één pomp tijdelijk uitvalt of dat vlak voor einde laden alvast één zuigbuis aan boord wordt gehaald. In een aparte tabel bij elke reis is aangegeven wanneer dit gebeurde en wat de gemiddelde dichtheid en het gemiddelde debiet over die periode was.

Reis 5

Tijd [min]	euninhoud

Tijd [min]	Debiet in [m ³ /s]	Dichtheid in [kg/m ³]

- Snelheidsmeters buiten werking
- Fout in bepaling tonnen droge stof

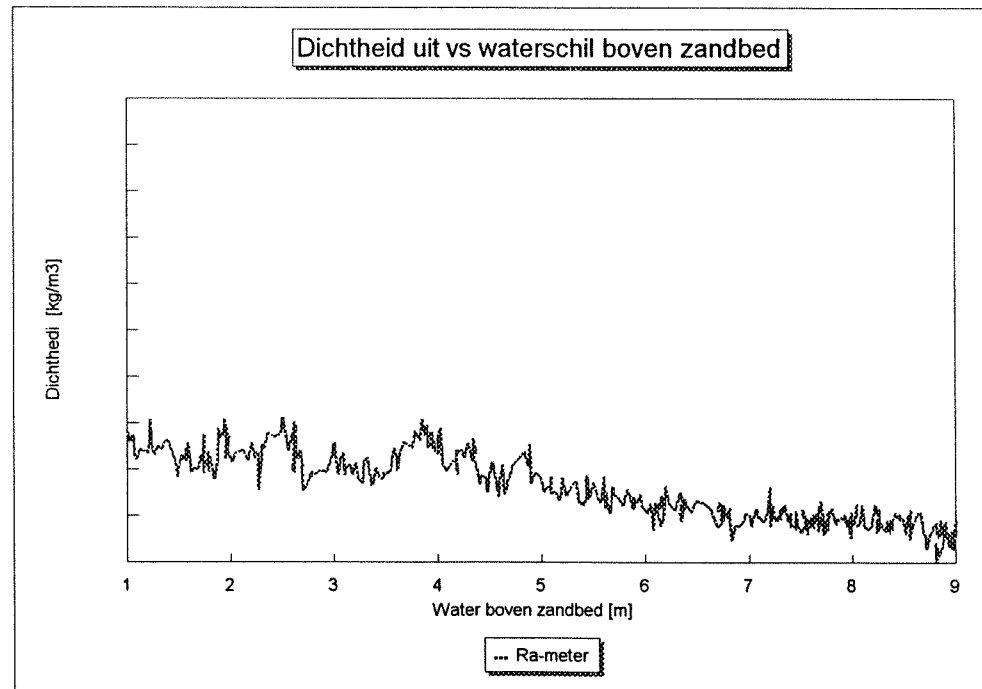
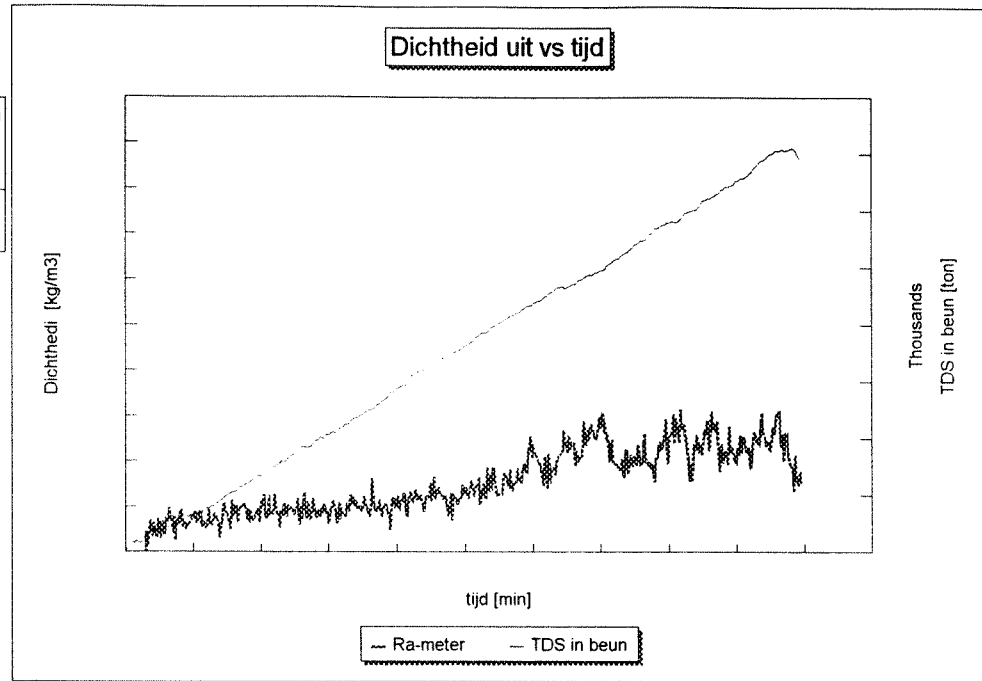


Reis 6

Tijd [min]	Beuninhoud

Tijd [min]	Debiet in [m ³ /s]	Dichtheid in [kg/m ³]

- Snelheidsmeters buiten werking

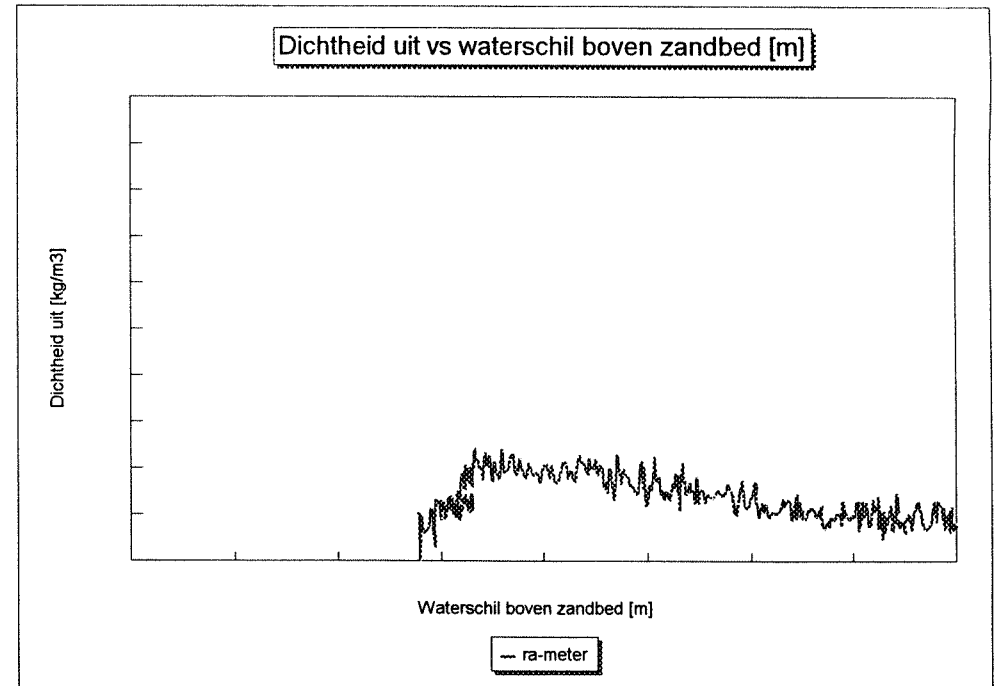
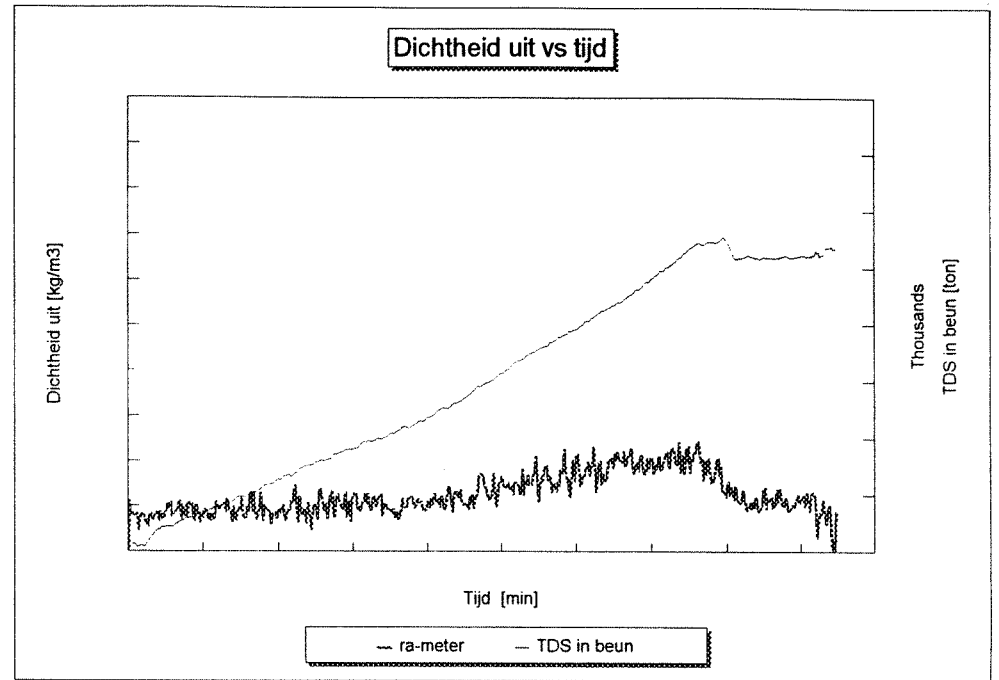


Reis 7

Tijd [min]	Afname beunvolume

Tijd [min]	Debiet in [m3/s]	Dichtheid in [kg/m3]

- Snelheidsmeters buiten werking

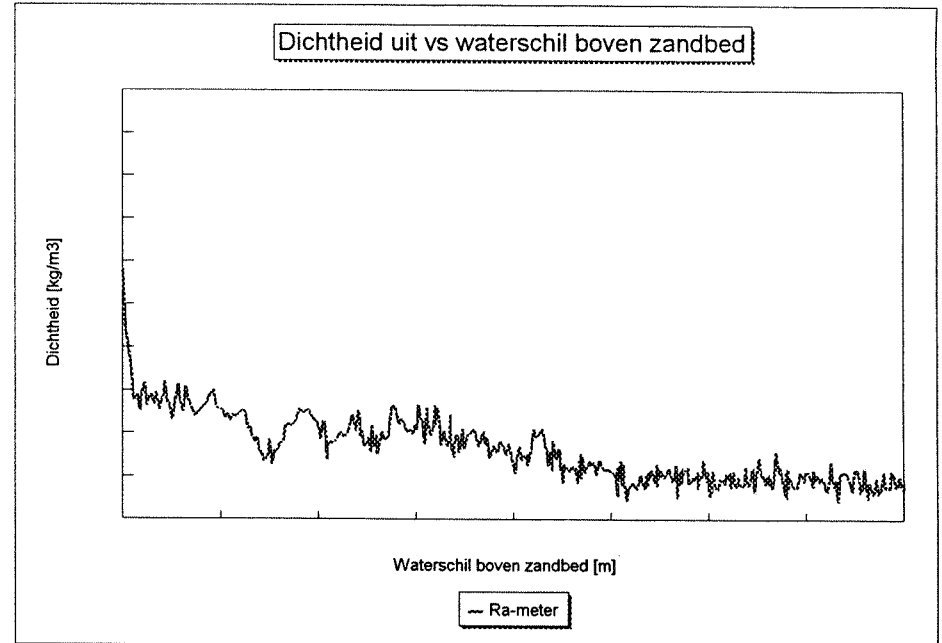
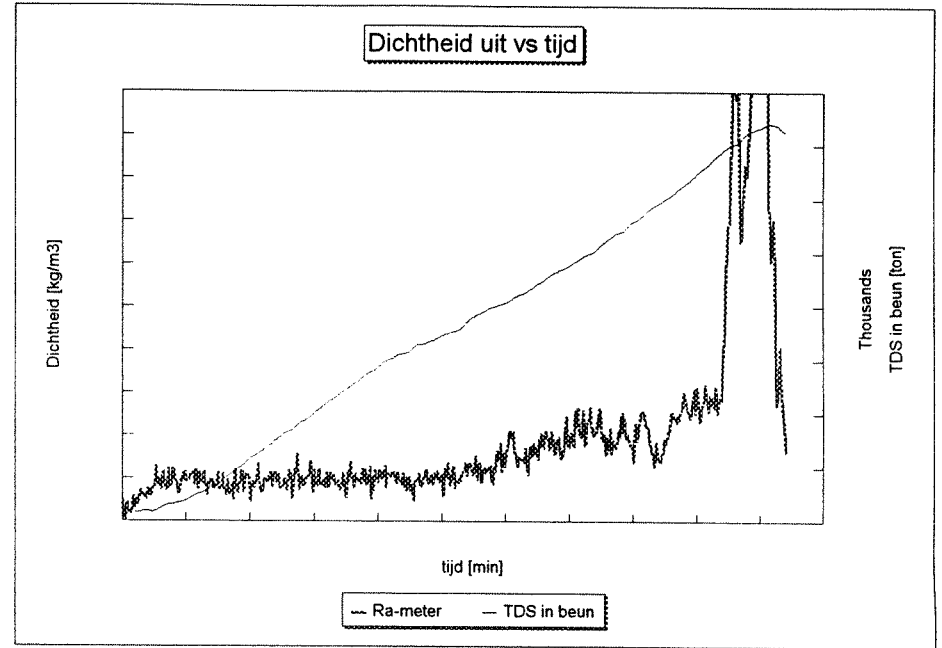


Reis 8

Tijd [min]	Beuninhoud

Tijd [min]	Debiet in [m ³ /s]	Dichtheid in [kg/m ³]

- Snelheidsmeters buiten werking

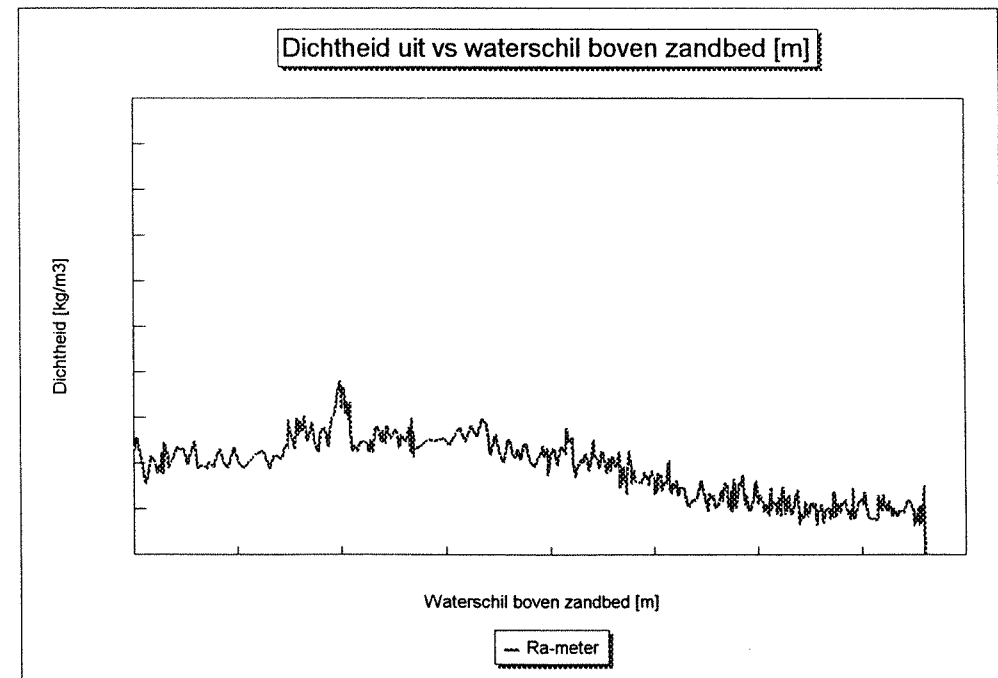
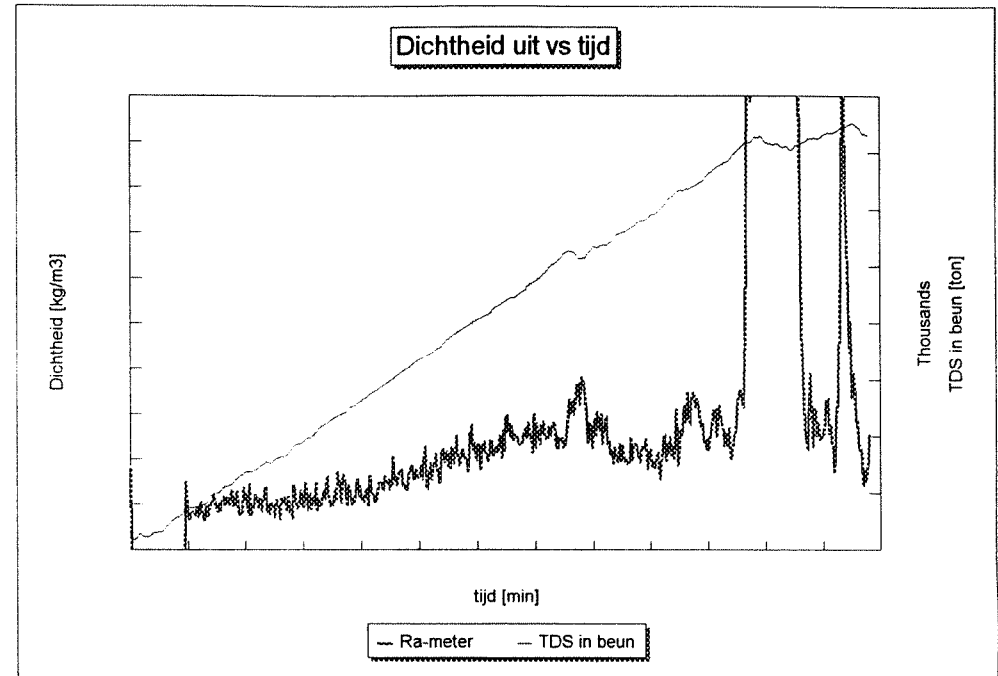


Reis 9

Tijd [min]	Beuninhoud

Tijd [min]	Debiet in [m ³ /s]	Dichtheid in [kg/m ³]

- Snelheidsmeters buiten werking

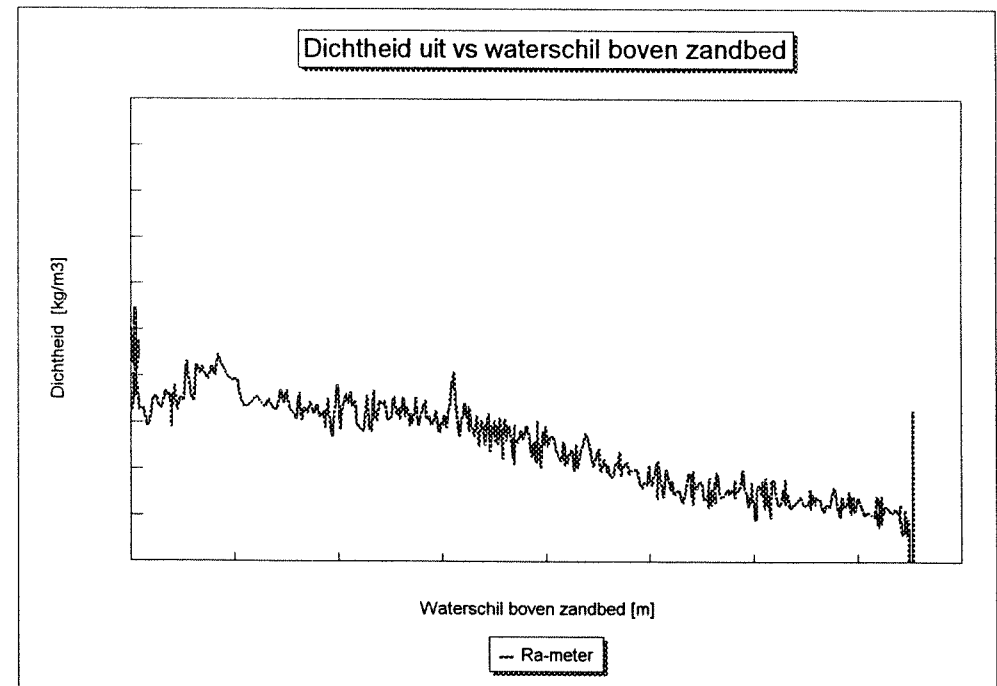
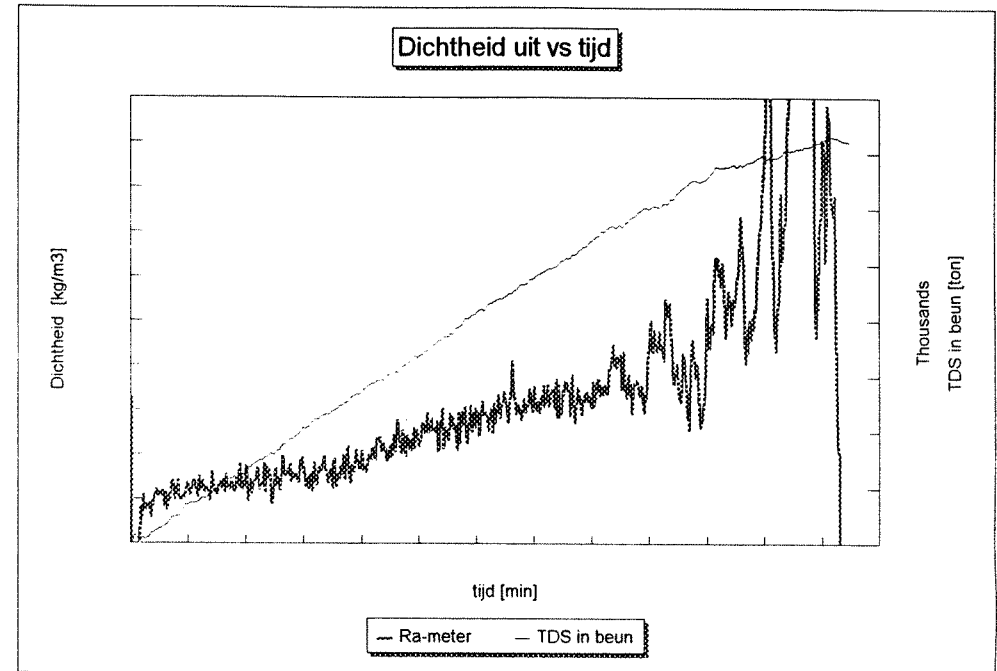


Reis 10

Tijd	Beuninhoud
[min]	start=5200m3

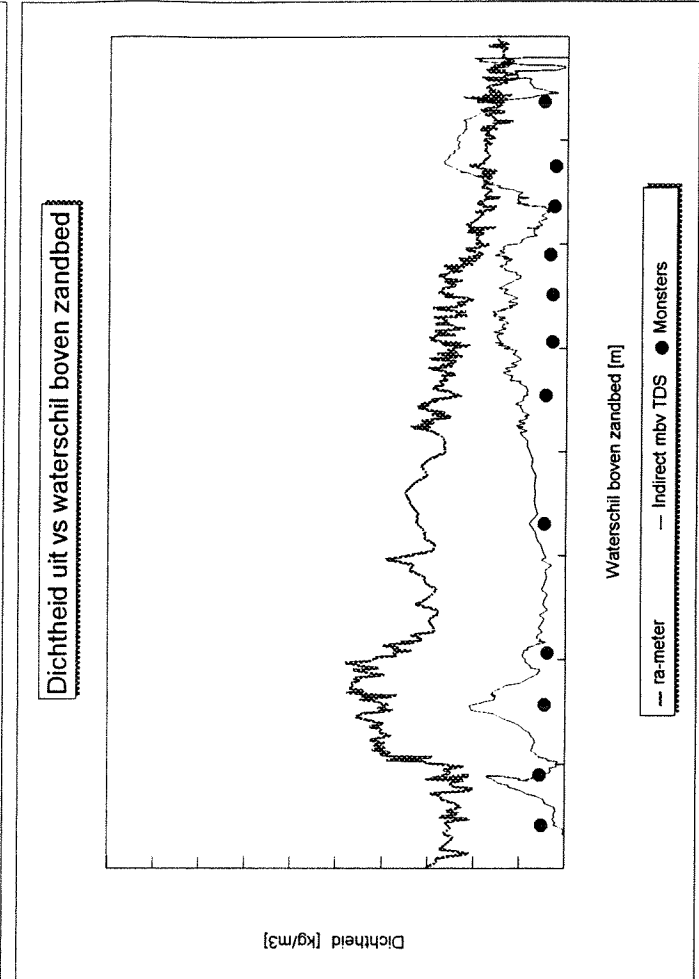
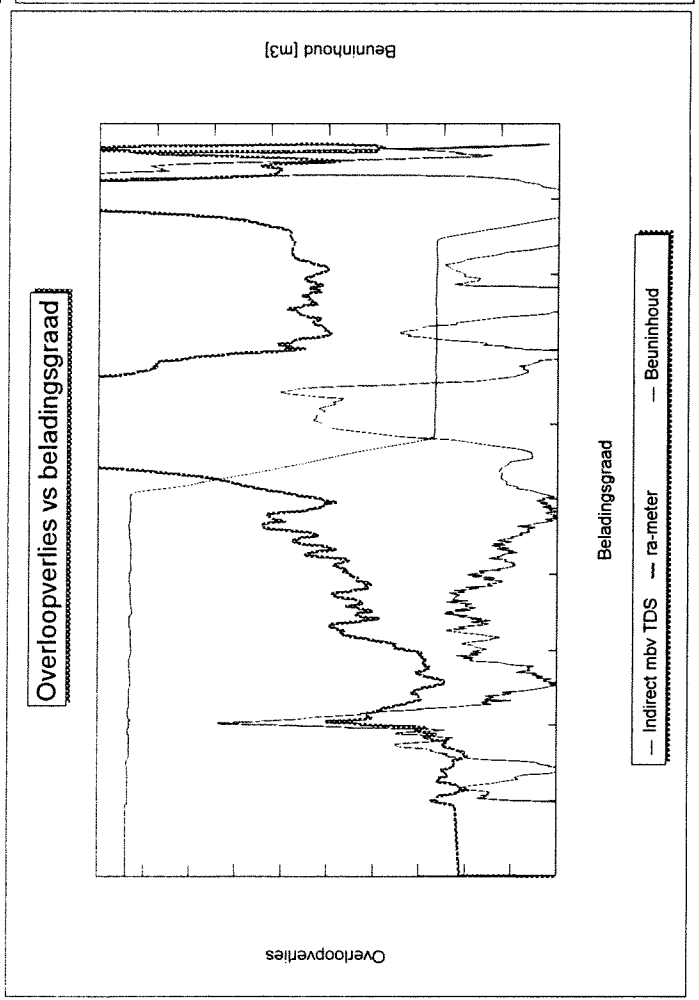
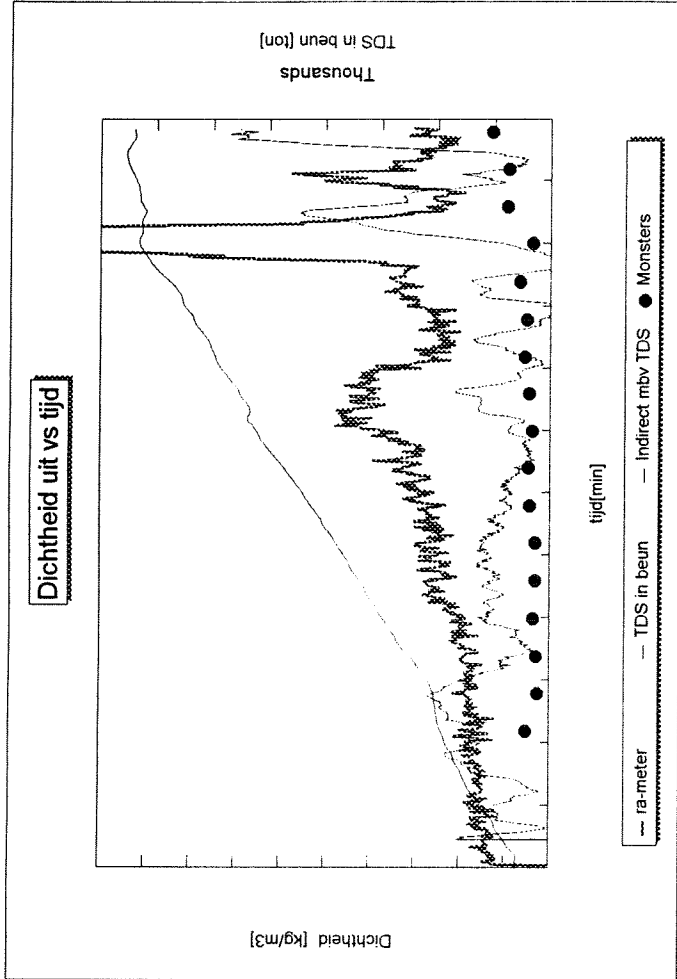
Tijd	Debiet in	Dichtheid in
[min]	[m3/s]	[kg/m3]

- Snelheidsmeters buiten werking



tijd [min]	Beuninhoud start=5800m3
------------	-------------------------

Tijd [min]	Beladingsgraad [%]	Debiet in [m3/s]	Dichtheid in [kg/m3]
------------	--------------------	------------------	----------------------

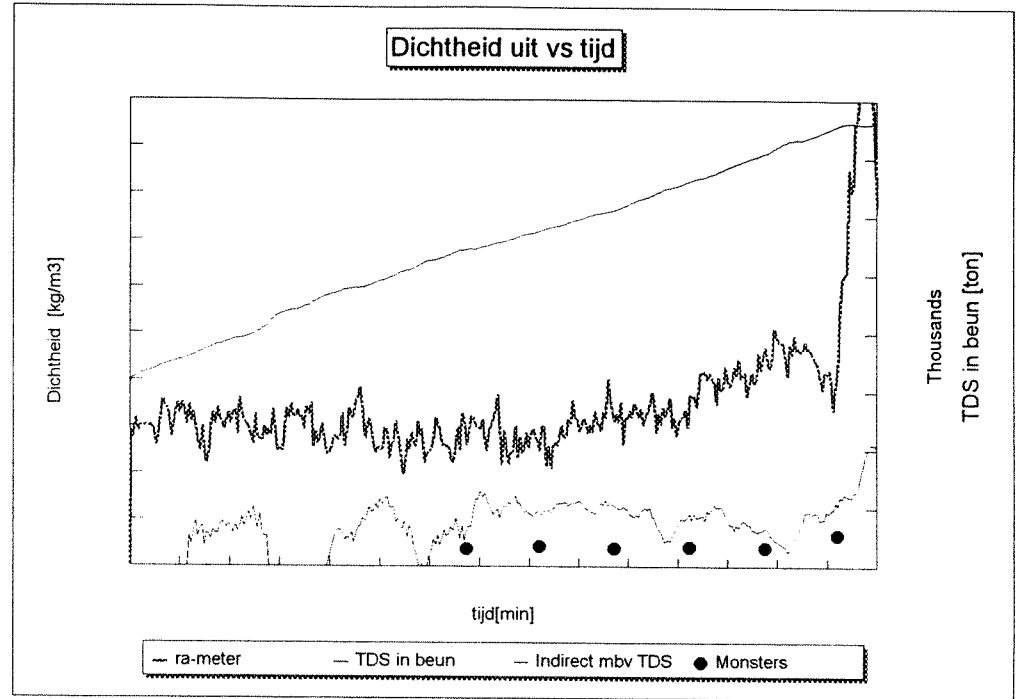


Reis 12

tijd	eunvolume
[min]	start=5400m3

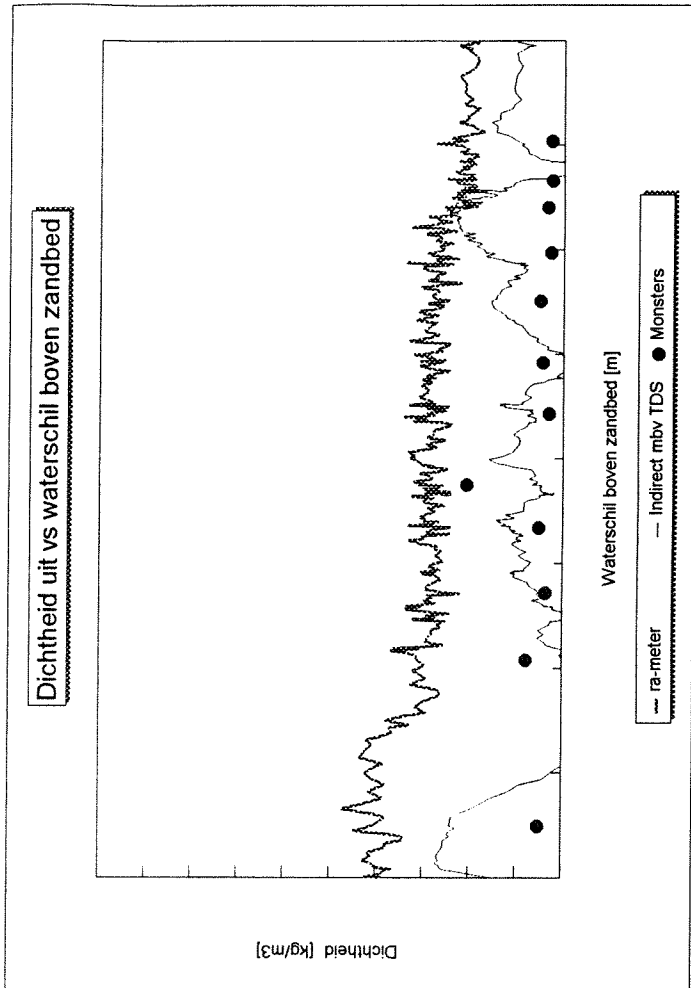
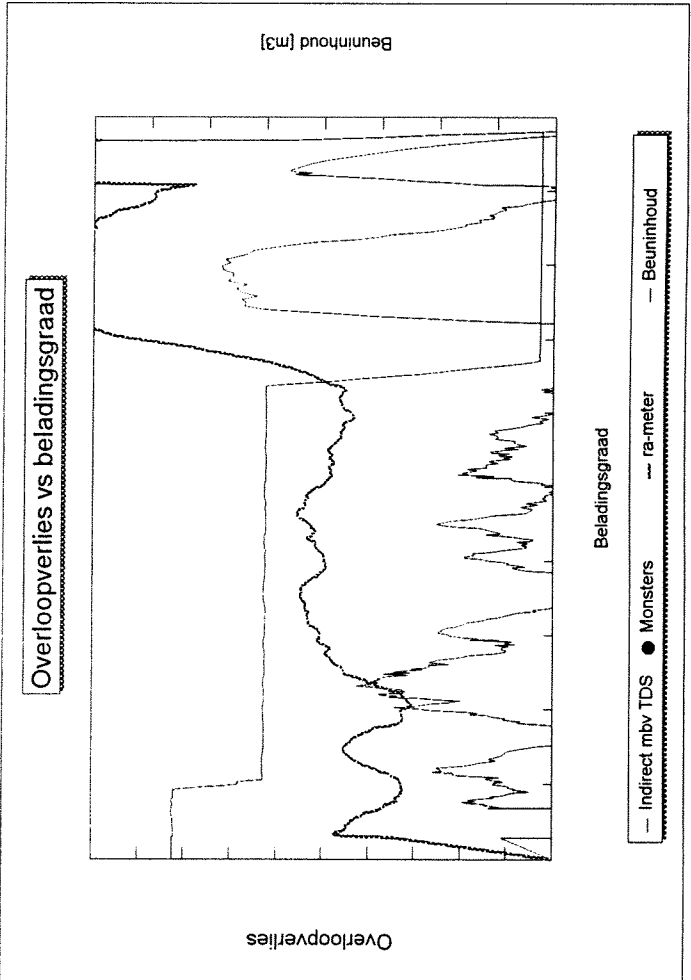
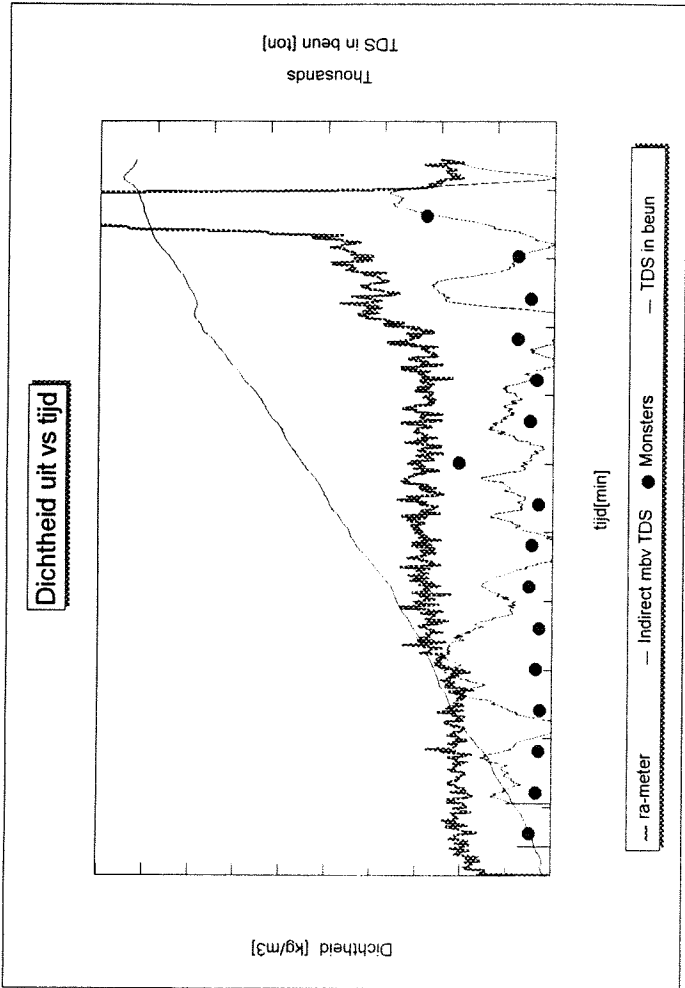
tijd	Debiet	Dichtheid
[min]	[m3/s]	[kg/m3]

-Fout in bepaling tonnen droge stof



Tijd [min]	Beuninhoud
	start: 5600m3

Tijd [min]	Beladingsgraad [%]	Debiet [m3/s]	Dichtheid [kg/m3]
------------	--------------------	---------------	-------------------

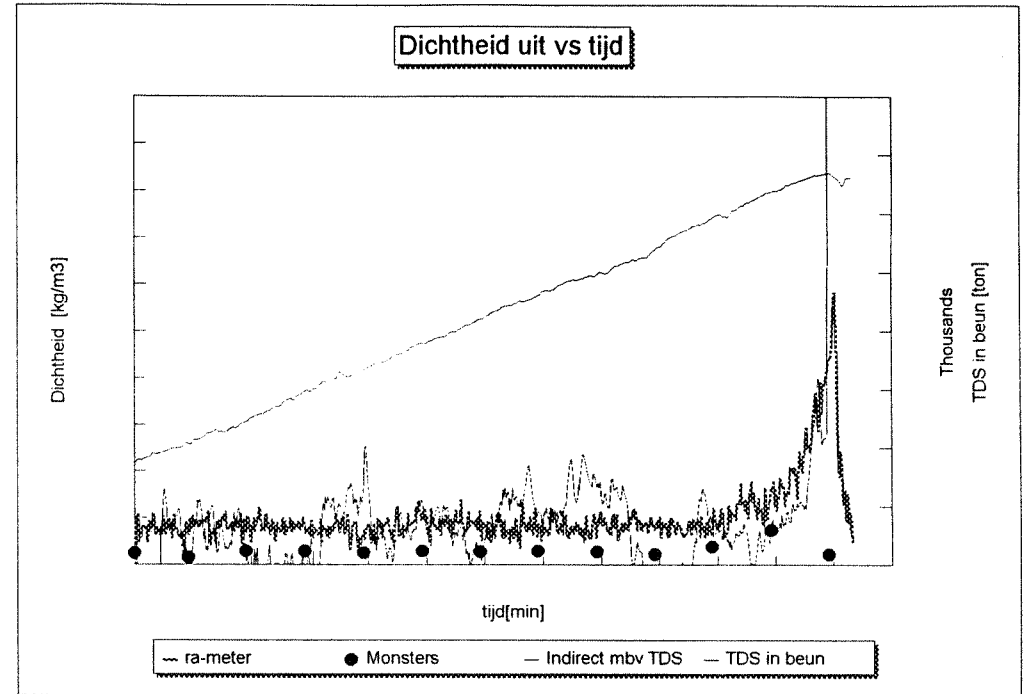


Reis 34

Tijd	Beuninhoud
[min]	

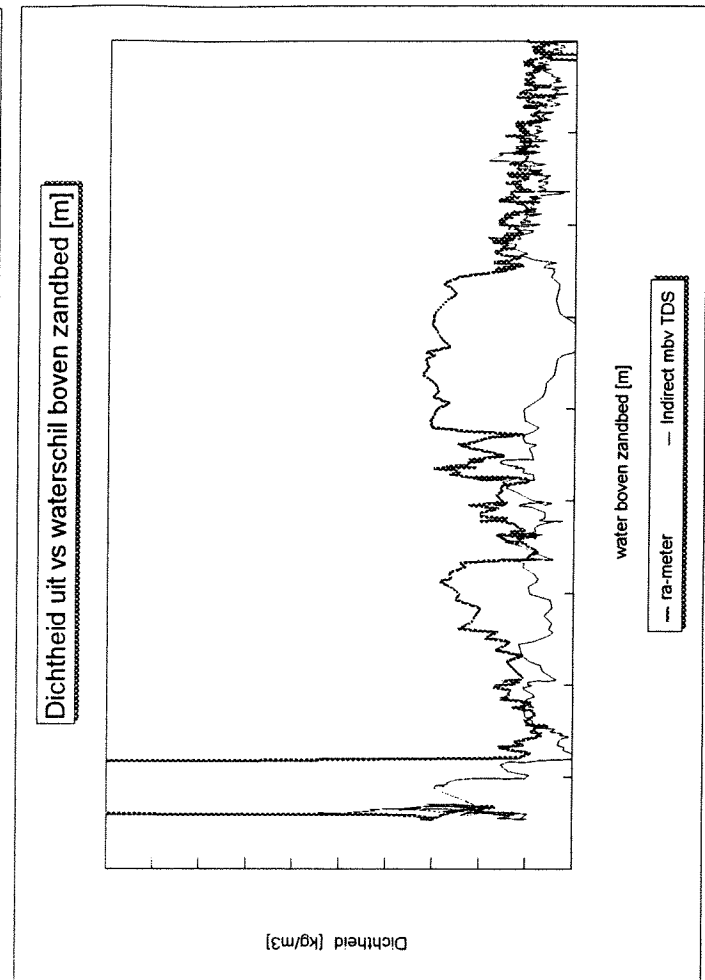
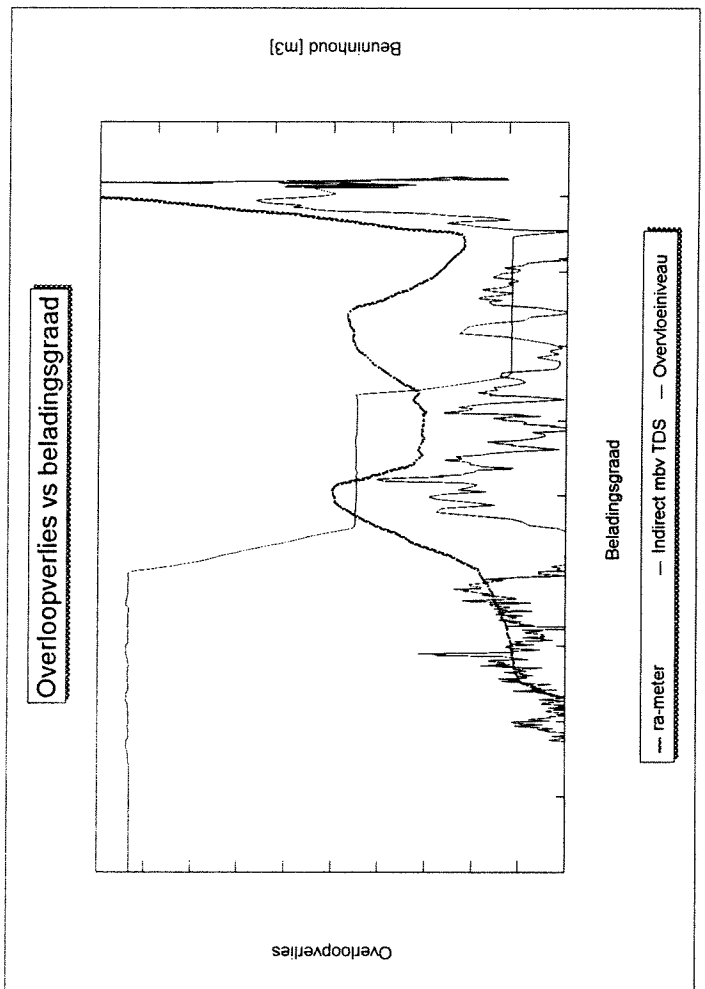
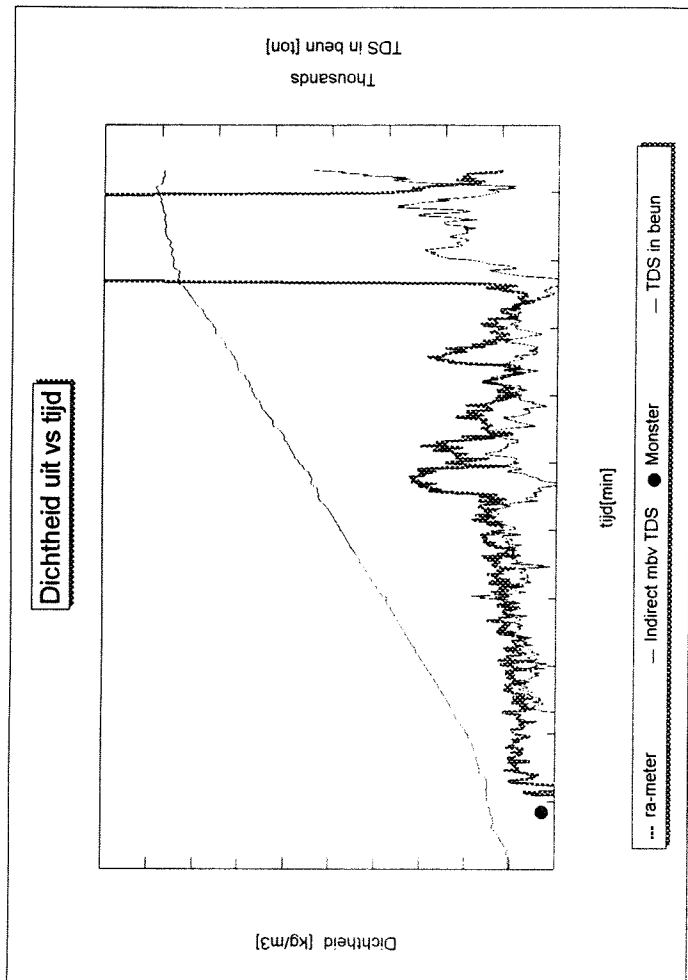
Tijd	Debiet	Dichtheid
[min]	[m ³ /s]	[kg/m ³]

- Fout in bepaling tonnen droge stof
- Tijdstap indirecte methode mbv TDS-systeem: 4min.
- Laden met 1 zuigbuis



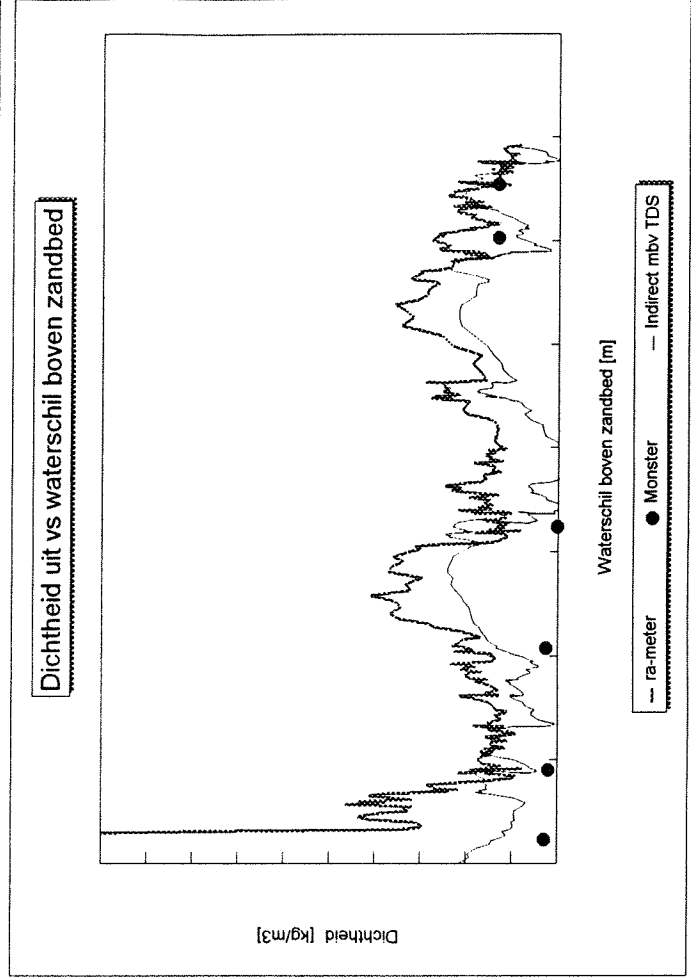
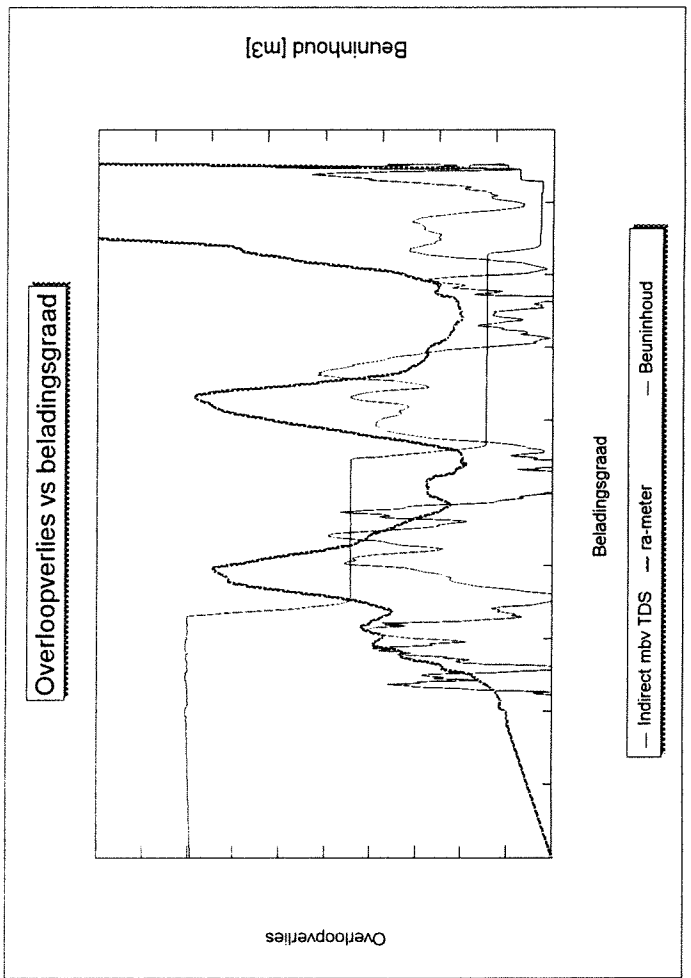
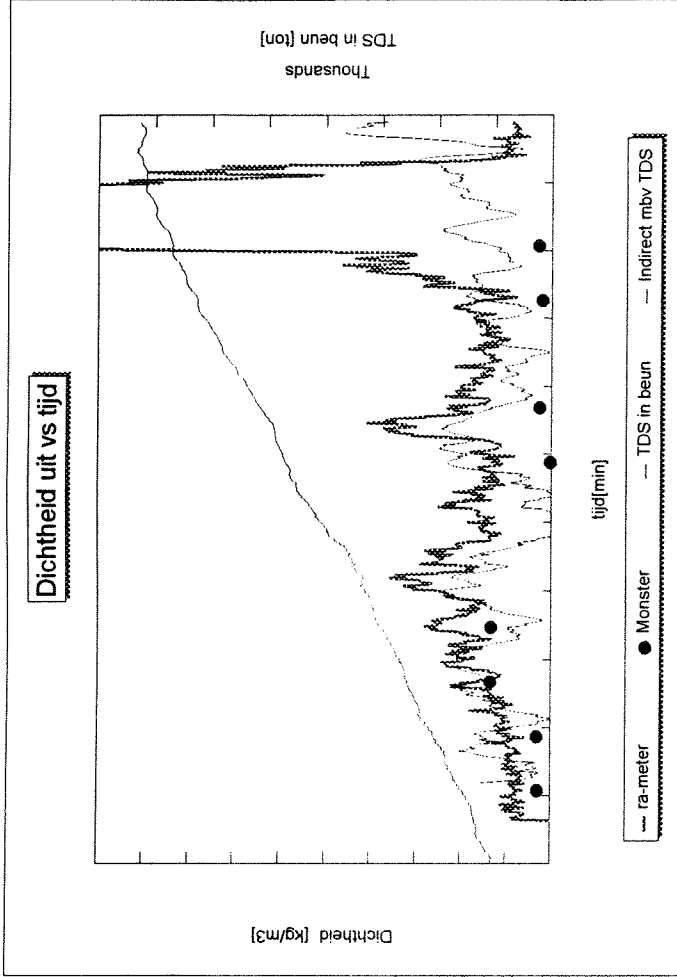
Tijd [min]	Beuninhoud

Tijd [min]	Beladingsgraad [%]	Debiet [m ³ /s]	Dichtheid [kg/m ³]



Tijd	Beuninhoud
[min]	

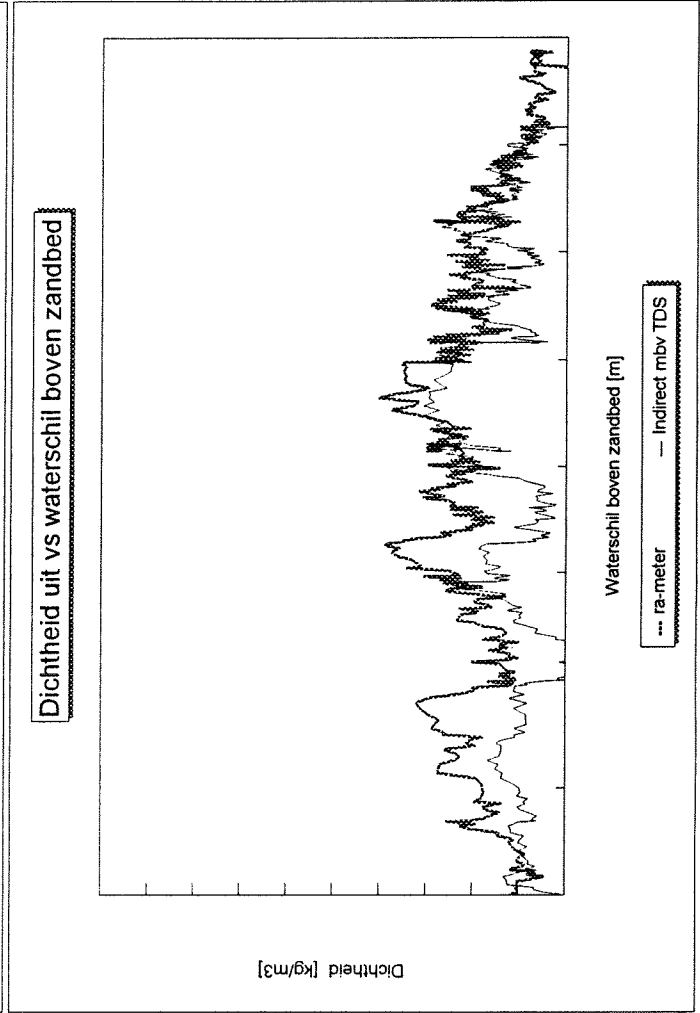
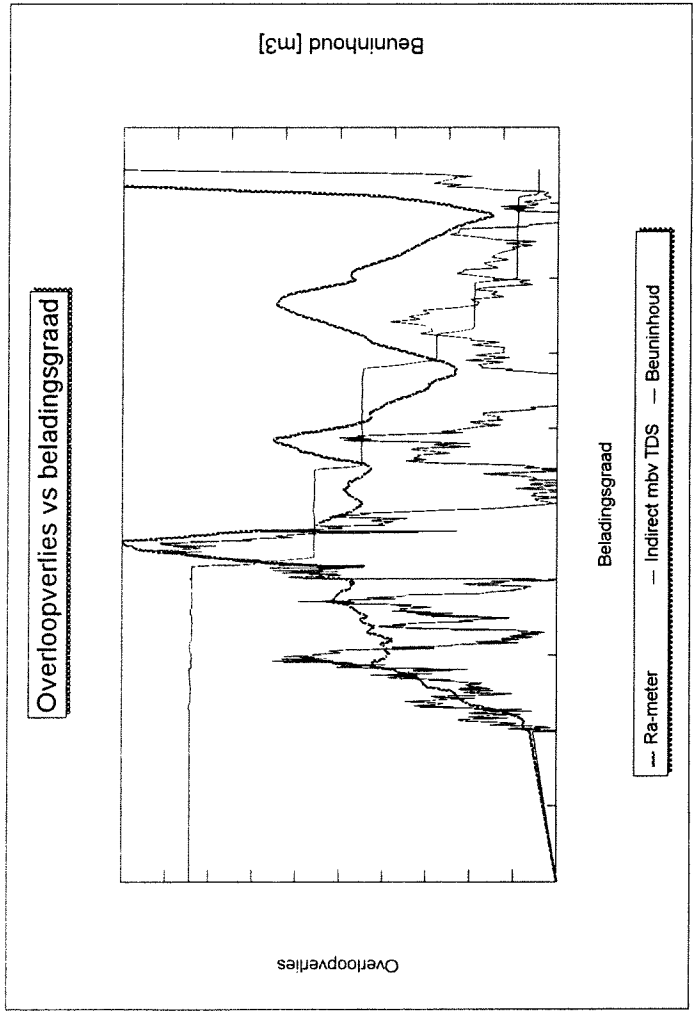
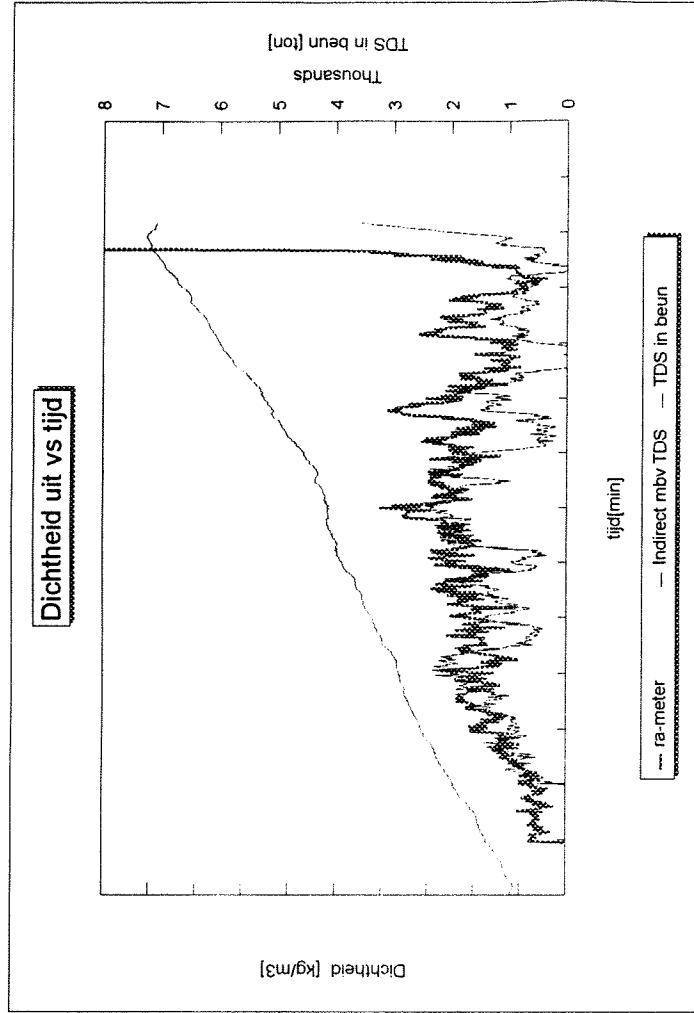
Tijd	Beladingsgraad [%]	Debiet [m ³ /s]	Dichtheid [kg/m ³]



Tijd [min]	Beuninhoud

Tijd	beladingsgraad [%]	Debiet [m ³ /s]	Dichtheid [kg/m ³]

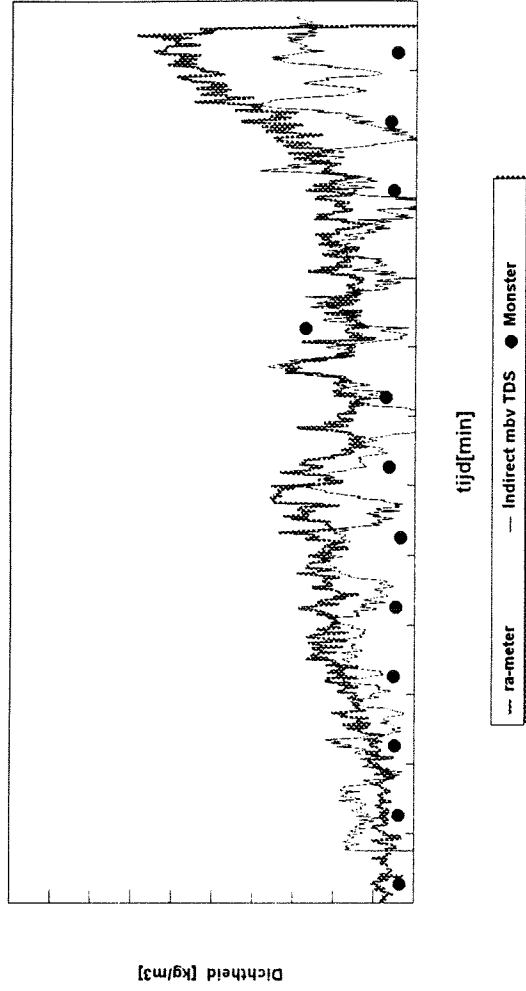
- geen monsters



Tijd	Beuninhoud
[min]	start=5500m3

Tijd	Debiet	Dichtheid
[min]	[m3/s]	[kg/m3]

Dichtheid in overvloekoker
reis 48



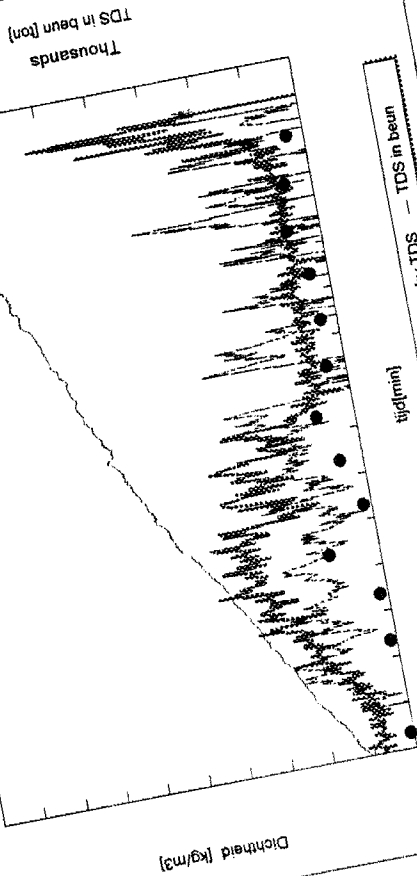
Reis 50

Tijd [min]	euninhoud

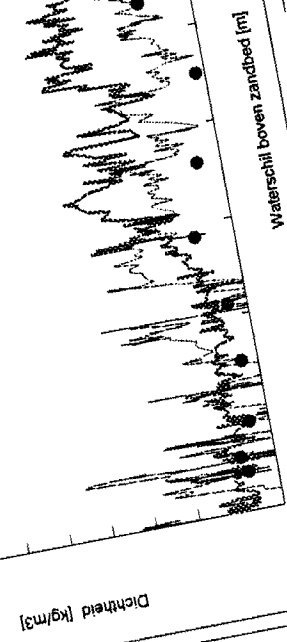
Tijd [min]	Beladingsgraad [%]	Debiet [m ³ /s]	Dichtheid [kg/m ³]

- Afladen met 1 buis vanaf 46min en beladingsgraad 55%

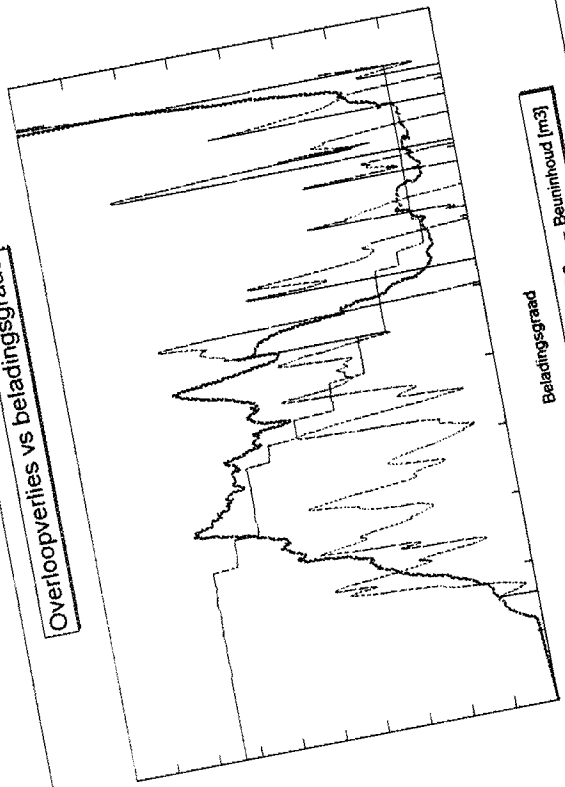
Dichtheid in overvloeioker



Dichtheid uit vs waterschil boven zandbed



Overloopverlies vs beladingsgraad



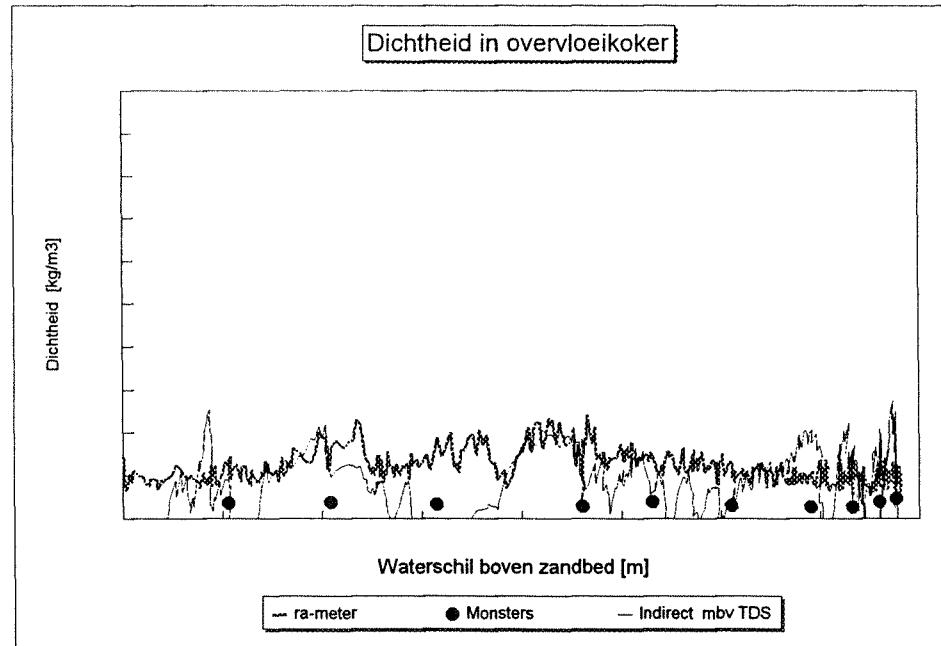
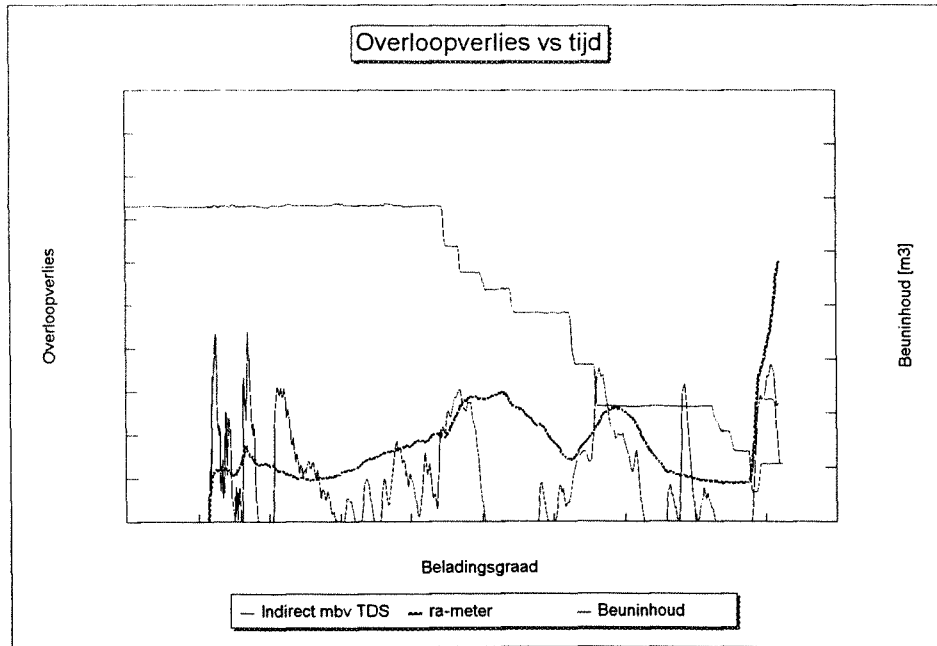
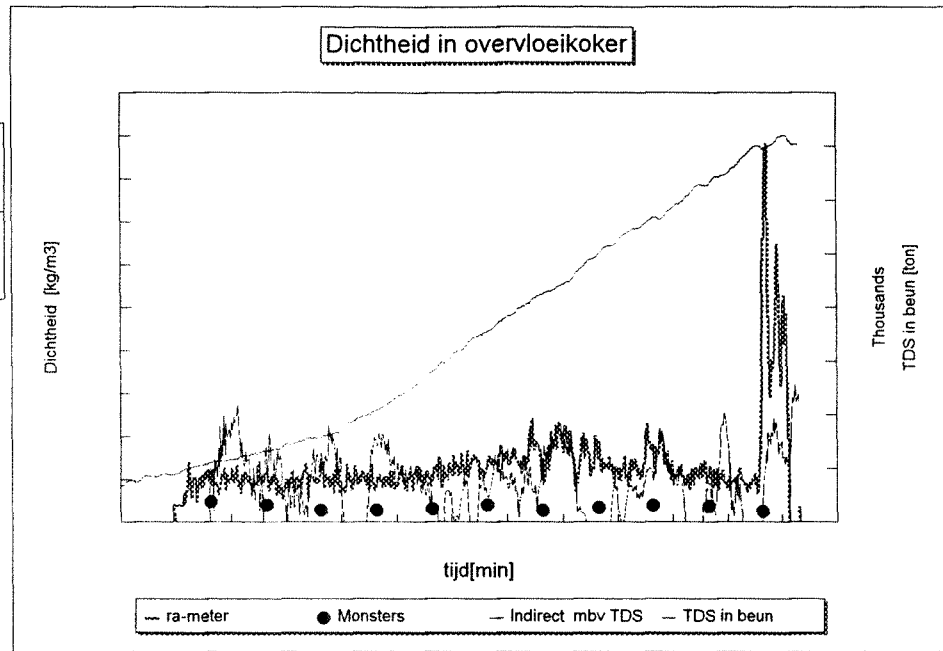
Beladingsgraad

— Indirect mbv TDS — Beuninhoud [m³]

Reis 60

Tijd [min]	euninhoud

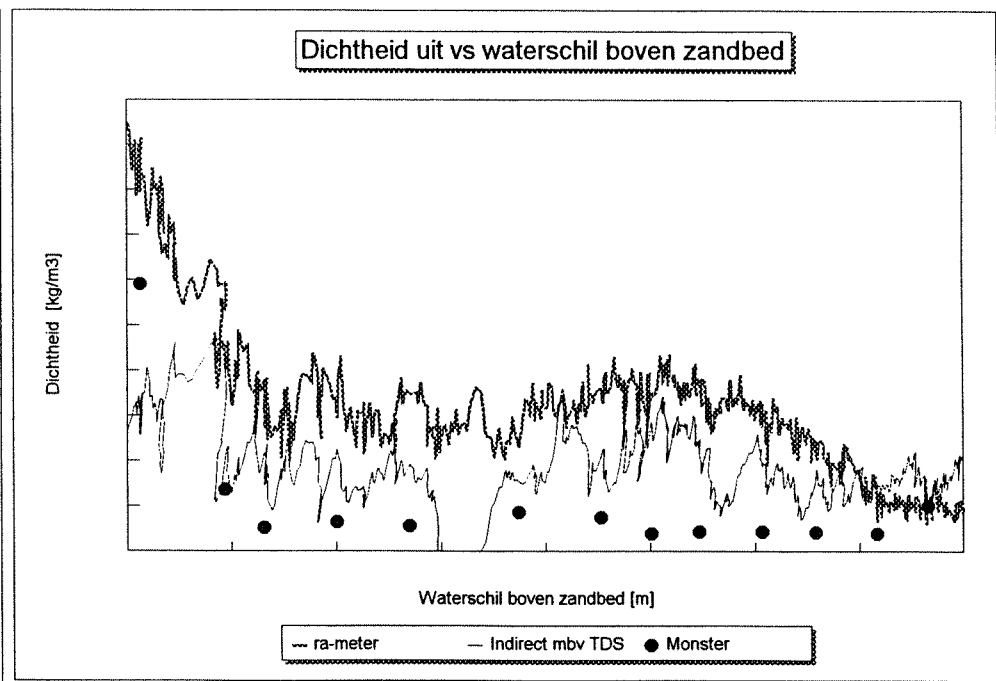
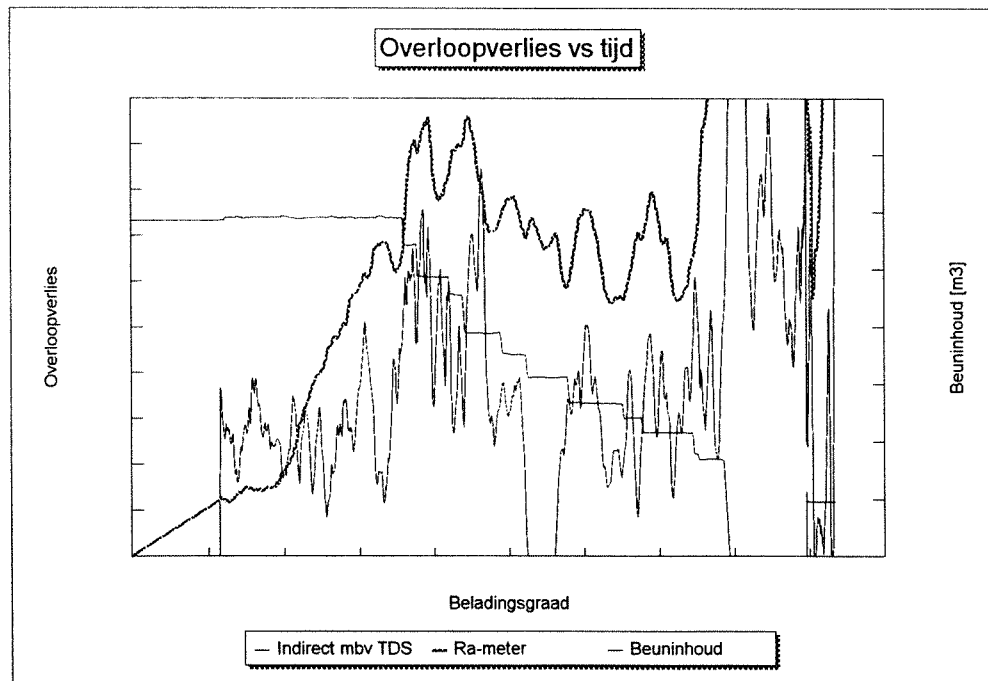
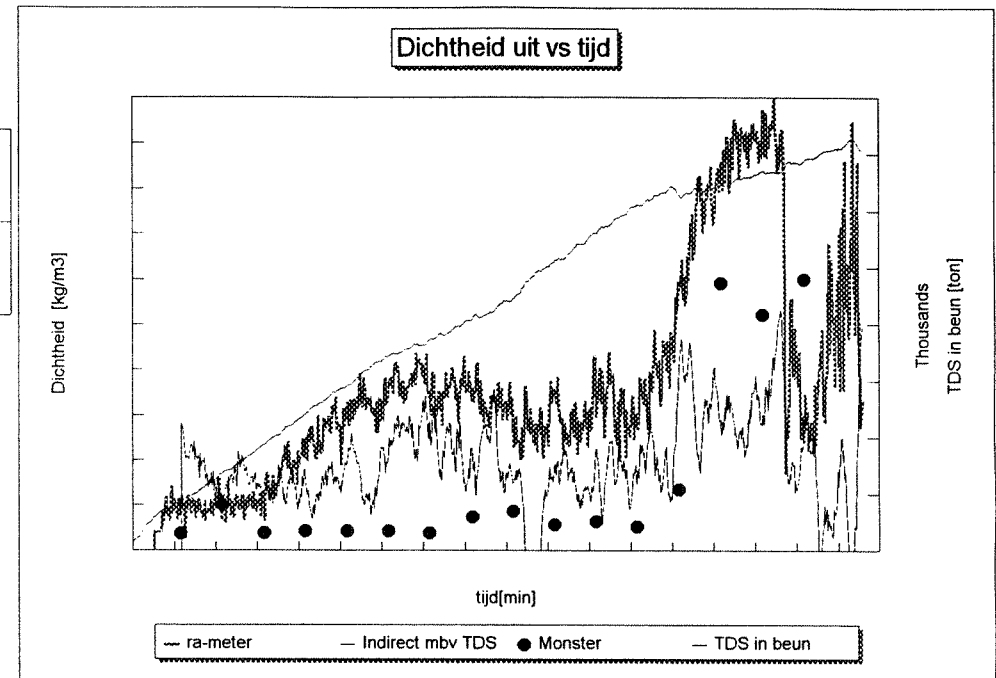
Tijd [min]	Beladings- graad [%]	Debiet [m3/s]	Dichtheid [kg/m3]



Reis 62

Tijd [min]	Beuninhoud

Tijd [min]	Beladings- graad [%]	Debiet [m3/s]	Dichtheid [kg/m3]

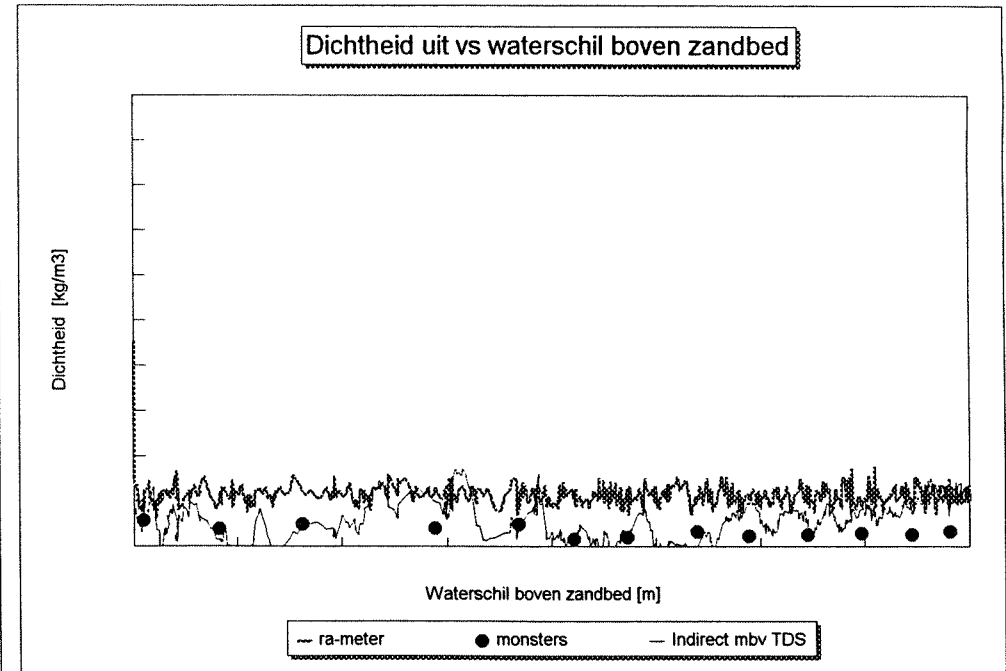
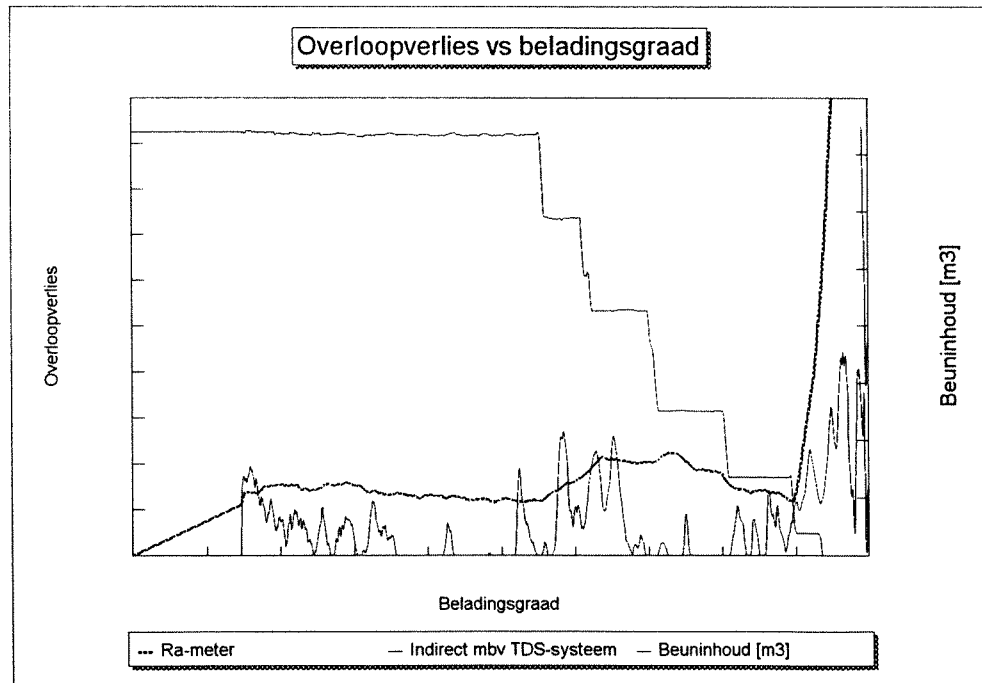
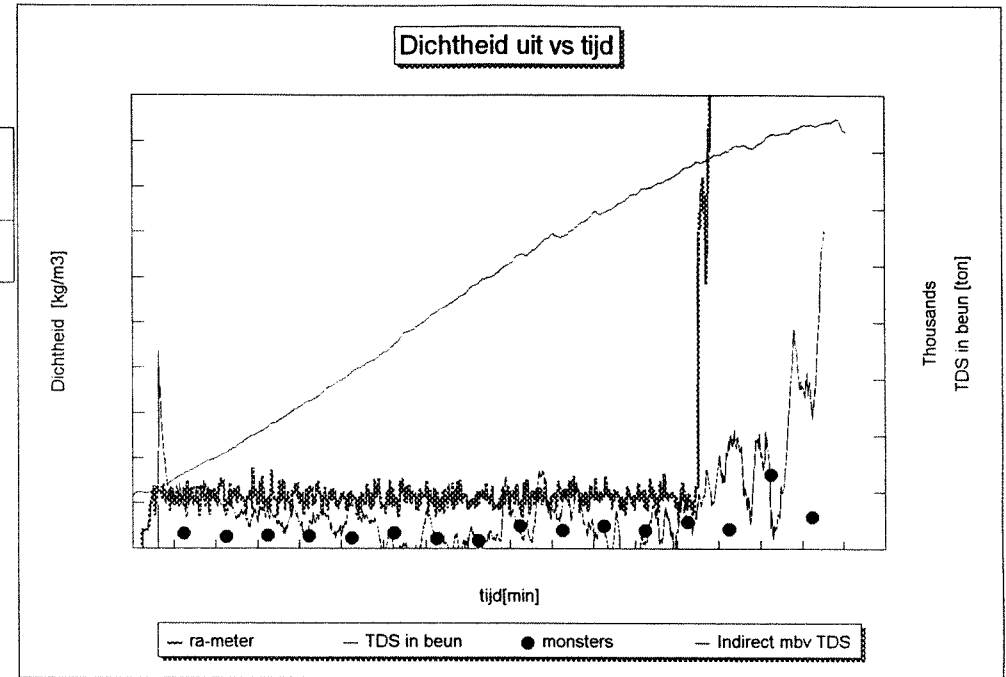


Reis 64

Tijd [min]	Beuninhoud

Tijd [min]	Beladings- graad [%]	Debiet [m3/s]	Dichtheid [kg/m3]

- Laden met 1 zuigbuis

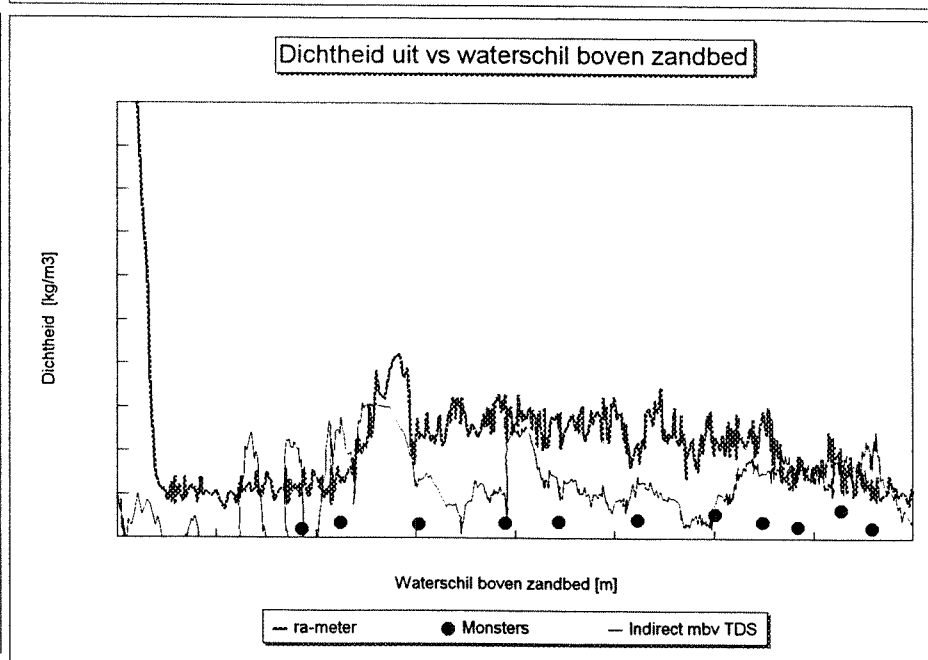
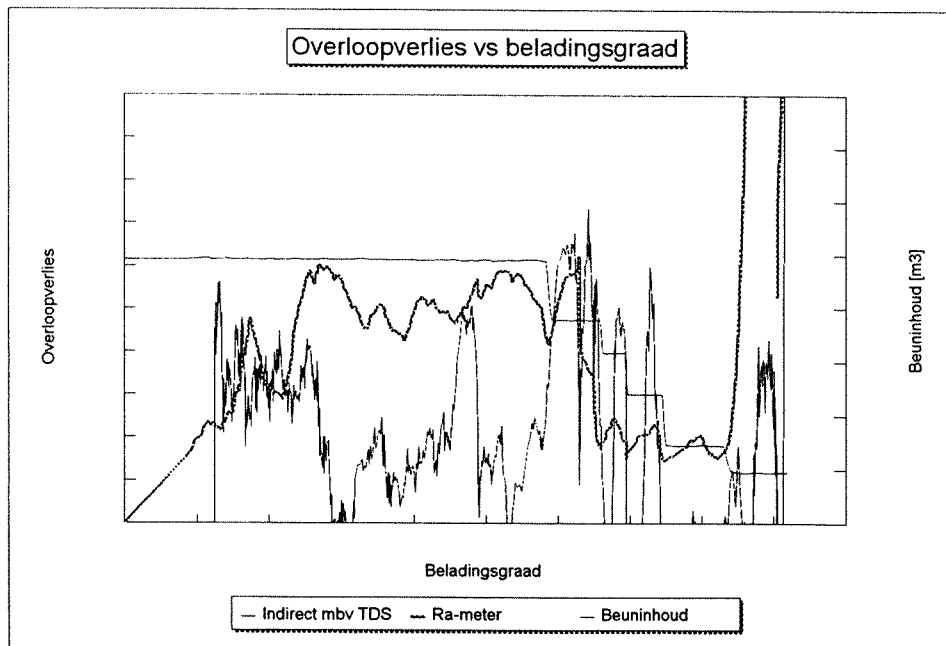
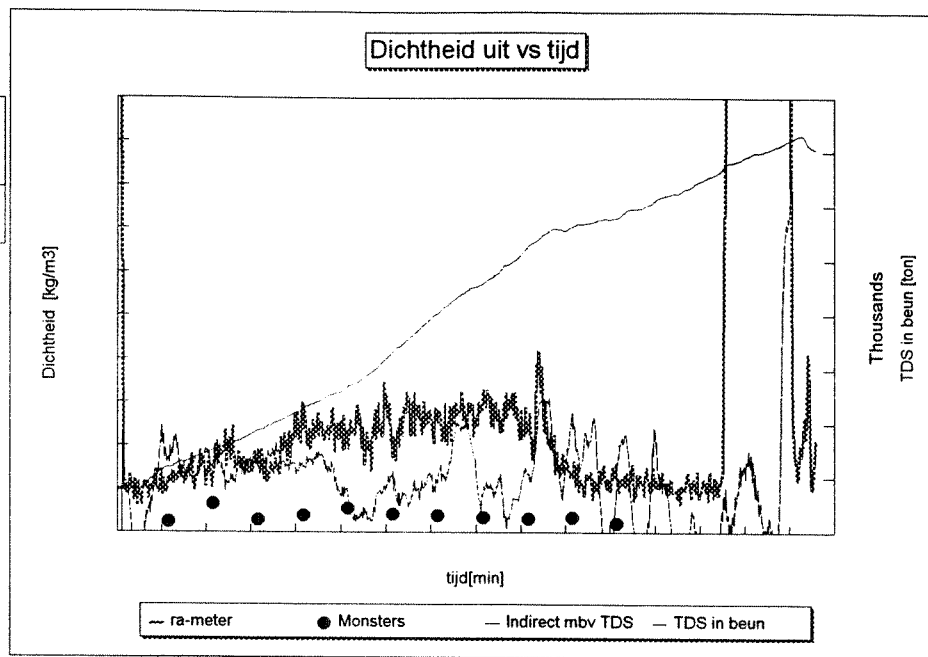


Reis I-1

Tijd	euninhoud
[min]	

Tijd	Beladingsgraad	Debiet	Dichtheid
[min]	[%]	[m3/s]	[kg/m3]

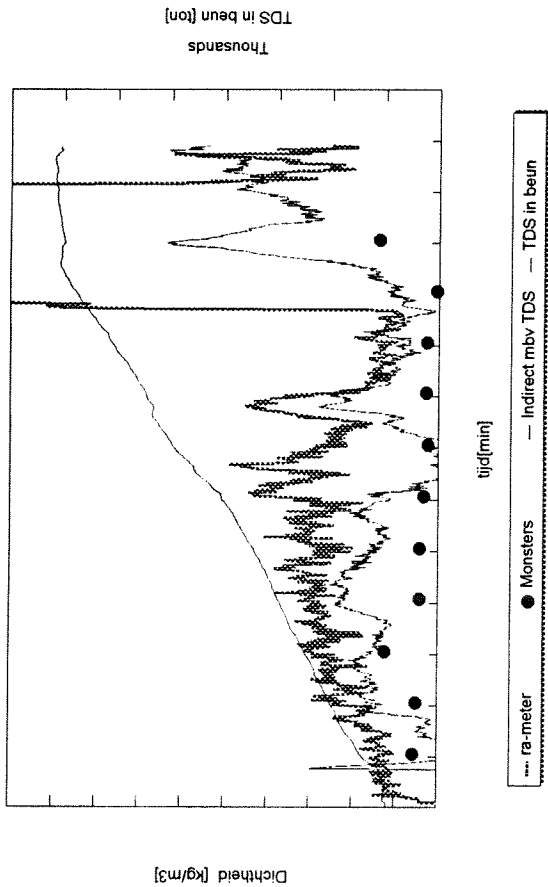
- Afladen met 1 zuigbuis vanaf 57 minuten en beladingsgraad 62%



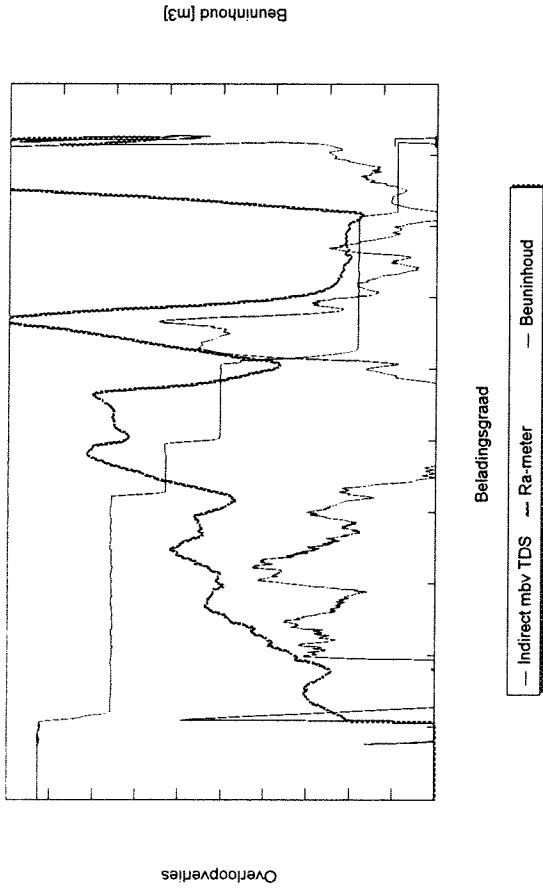
Tijd [min]	Beuninhouid

Tijd [min]	Beladingsgraad [%]	Debiet [m3/s]	Dichtheid [kg/m3]

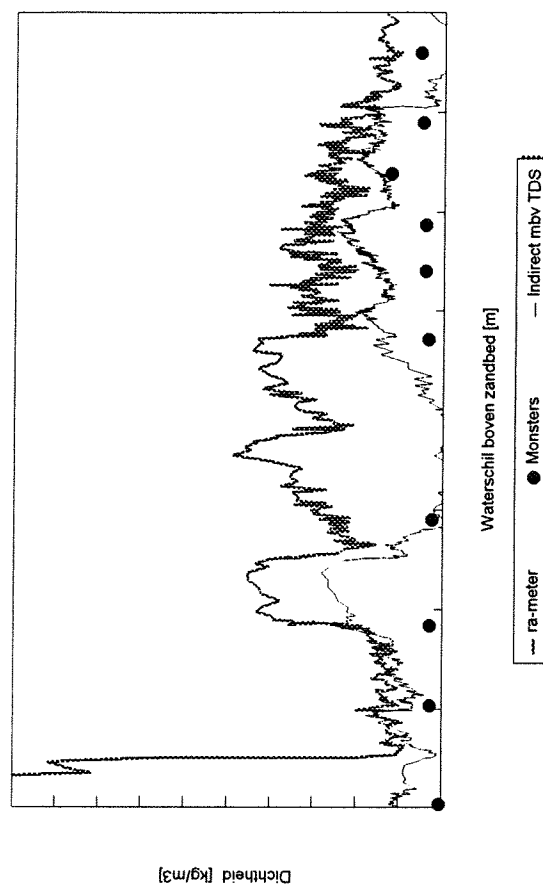
Dichtheid in overvloeioker



Overloopverlies vs beladingsgraad



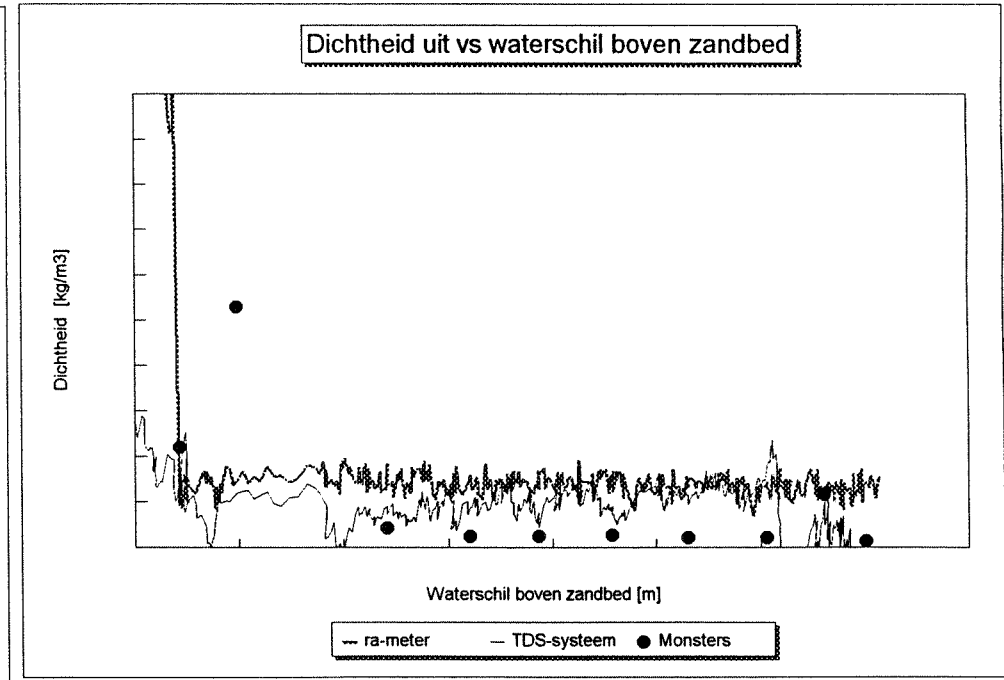
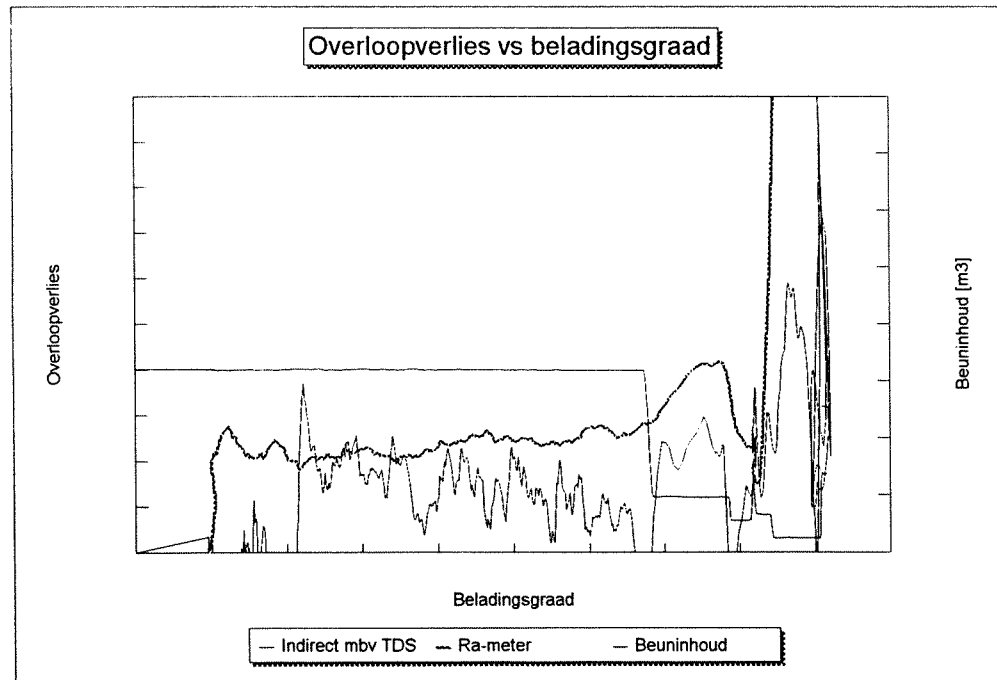
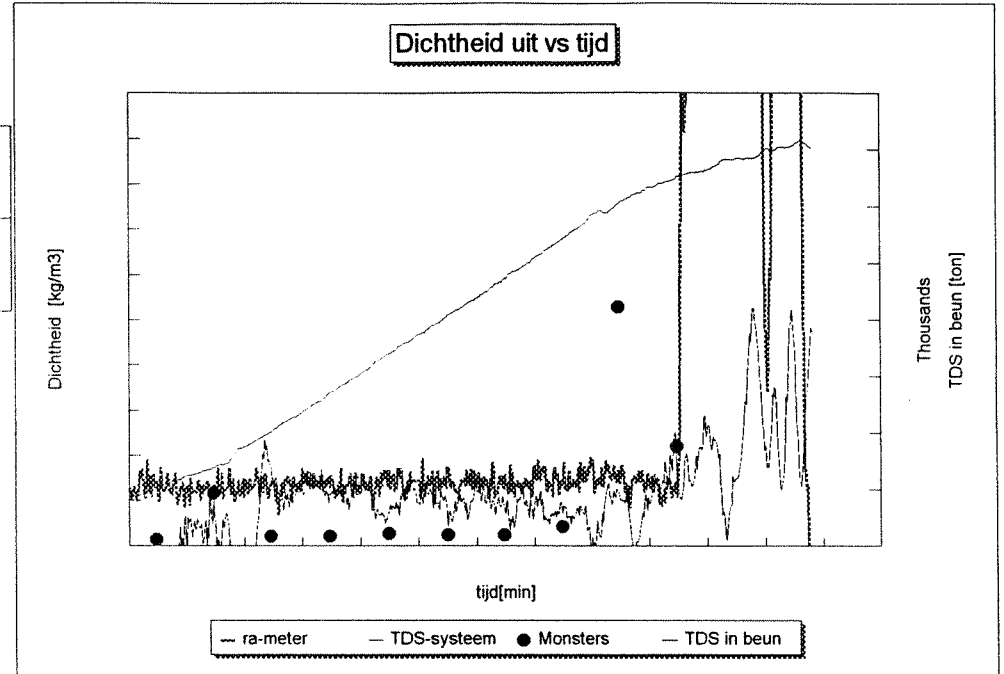
Dichtheid uit vs waterschil boven zandbed



Reis I-11

Tijd [min]	Beuninhoud
	start=4900m3

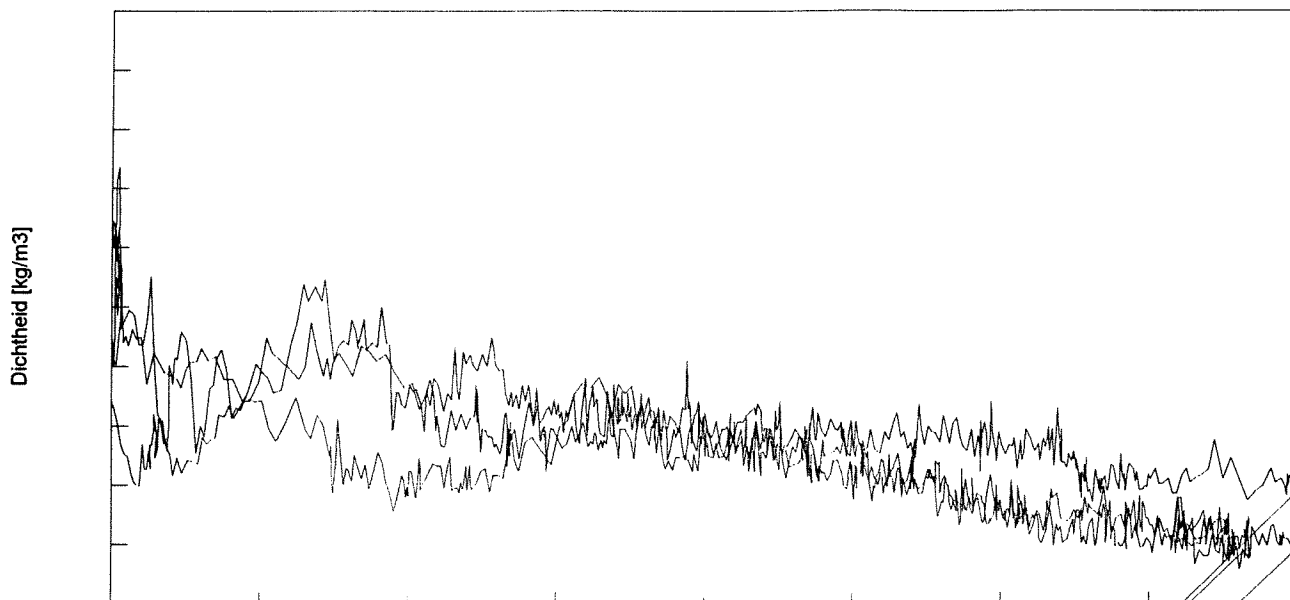
Tijd [min]	Beladings- graad [%]	Debiet [m3/s]	Dichtheid [kg/m3]



Bijlage 9: Uitgaande dichtheid als functie van de dikte van de waterschil

Dichtheid uit vs waterschil boven zandbed

Signaal: ra-meter

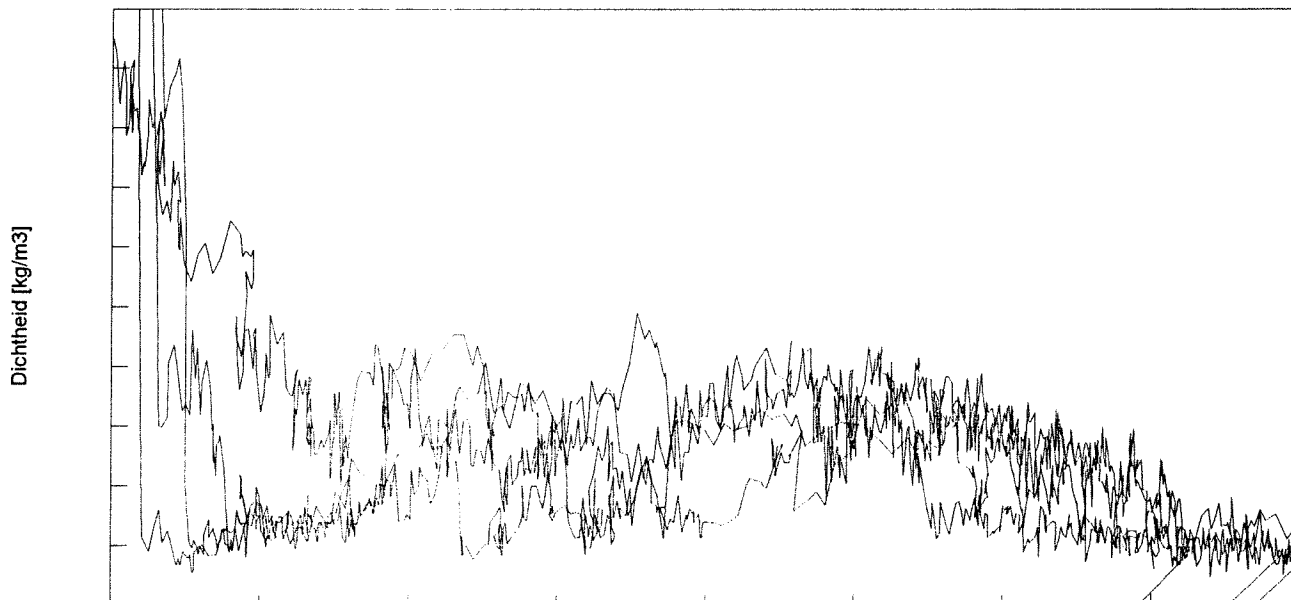


Waterschil boven zandbed [m]

— Reis 13 — Reis 10 — Reis 9

Dichtheid uit vs waterschil boven zandbed

Signaal: ra-meter



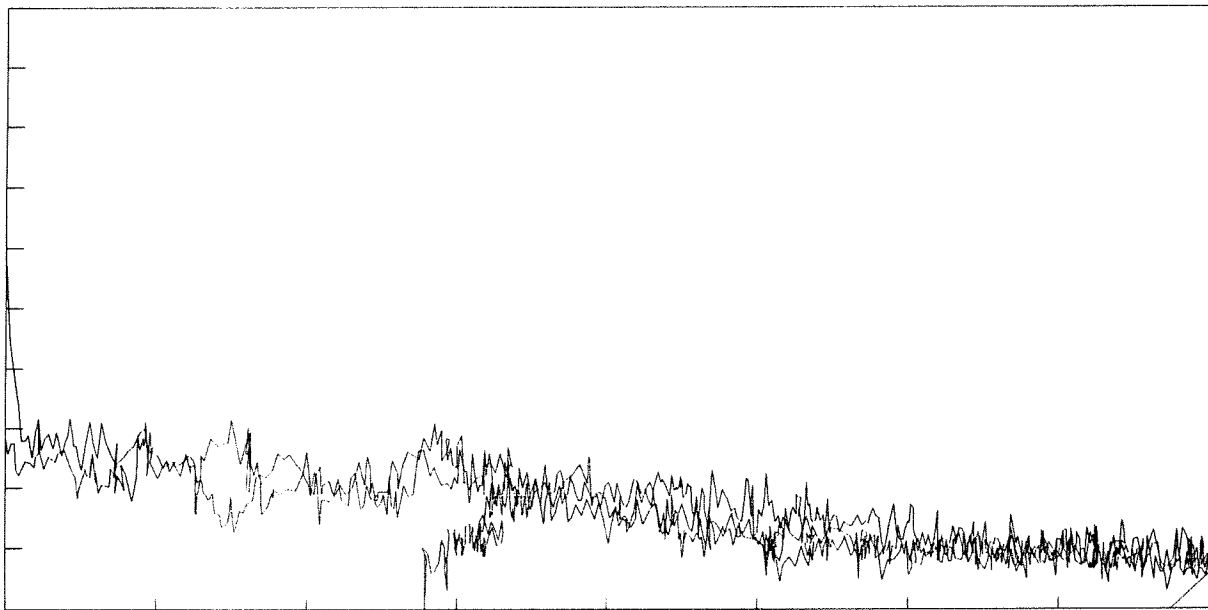
Waterschil boven zandbed [m]

— Reis I-5 — Reis 62 — Reis 38 — Reis 36

Dichtheid uit vs waterschil boven zandbed

Signaal: ra-meter

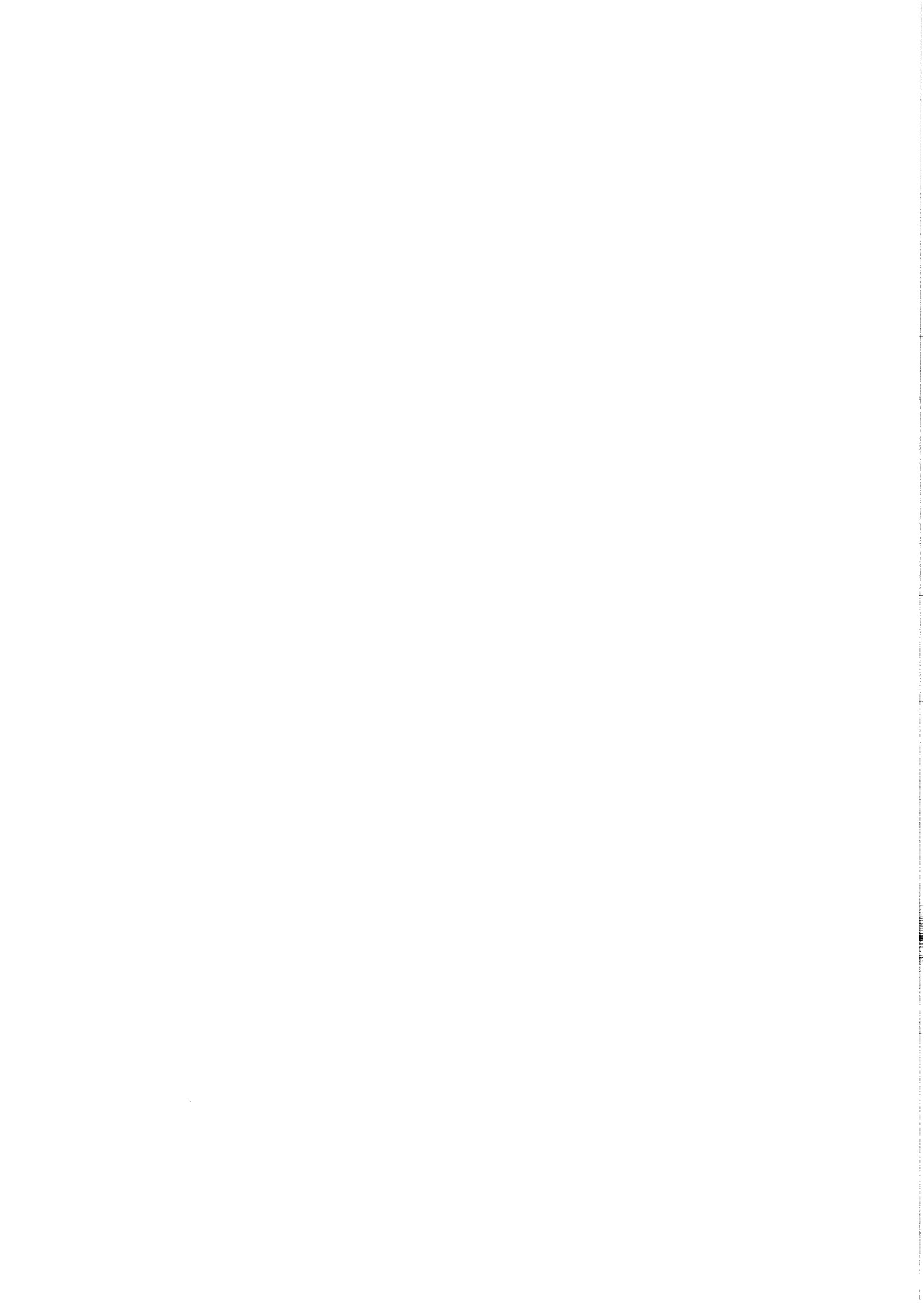
Dichtheid [kg/m³]



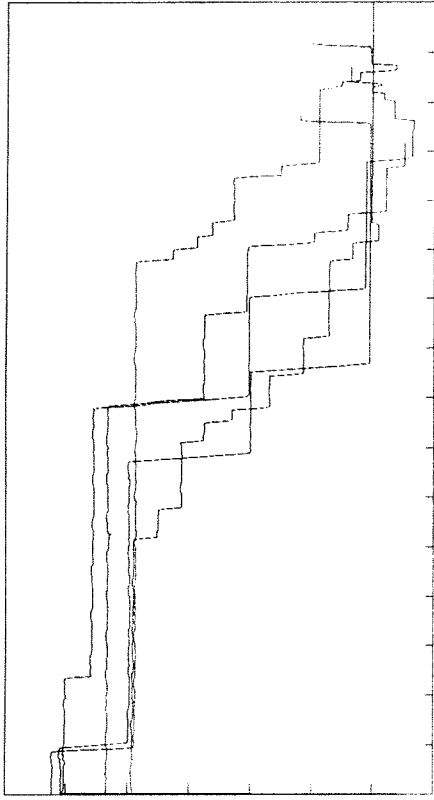
Waterschil boven zandbed [m]

— Reis 8 — Reis 7 — Reis 6

Bijlage 10: Behandeling overvloeikoker



Beuninhoud vs tijd

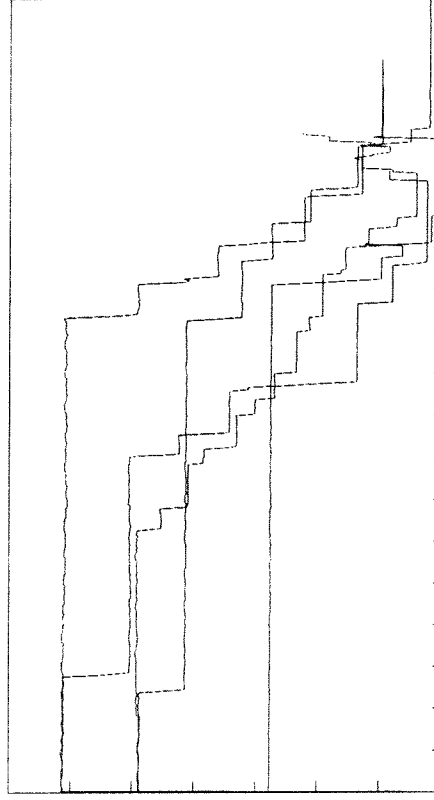


Beuninhoud (m3)

tijd (minuten)

— reis 38 — reis 46 — reis 48 — reis 50 — reis 55 — reis 60

Beuninhoud vs tijd

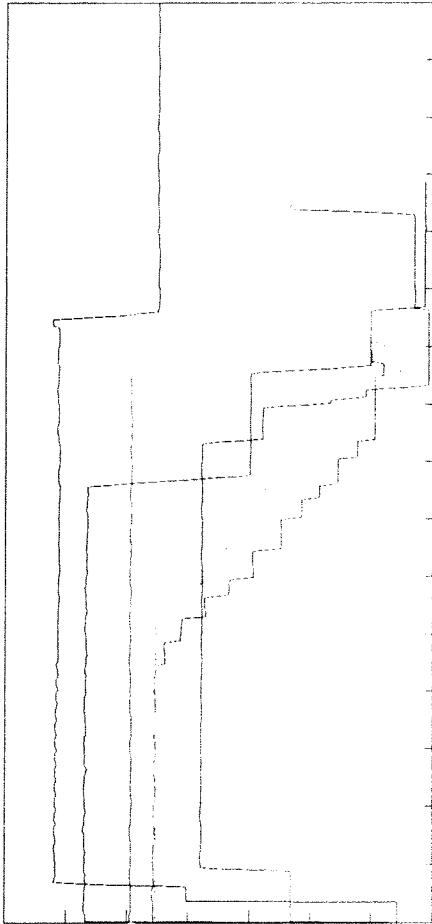


Beuninhoud (m3)

tijd (minuten)

— reis 62 — reis 64 — reis l-1 — reis l-5 — reis l-11

Beuninhoud vs tijd

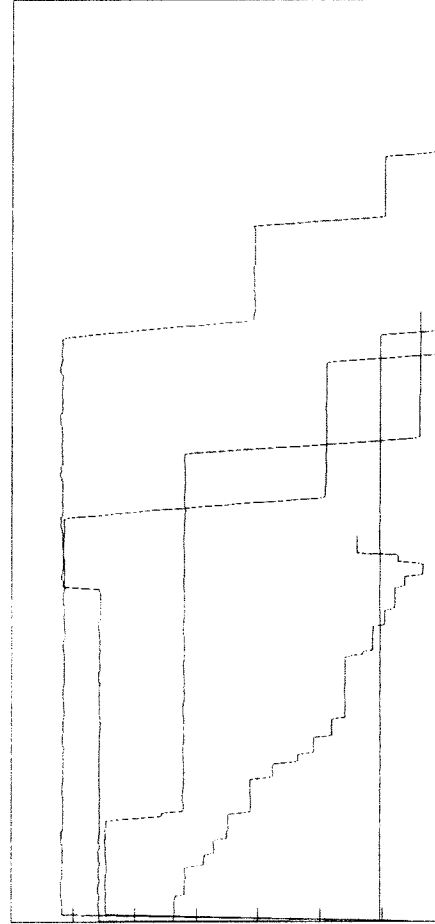


Beuninhoud (m3)

tijd (minuten)

— reis 4 — reis 6 — reis 7 — reis 8 — reis 9 — reis 10

Beuninhoud vs tijd

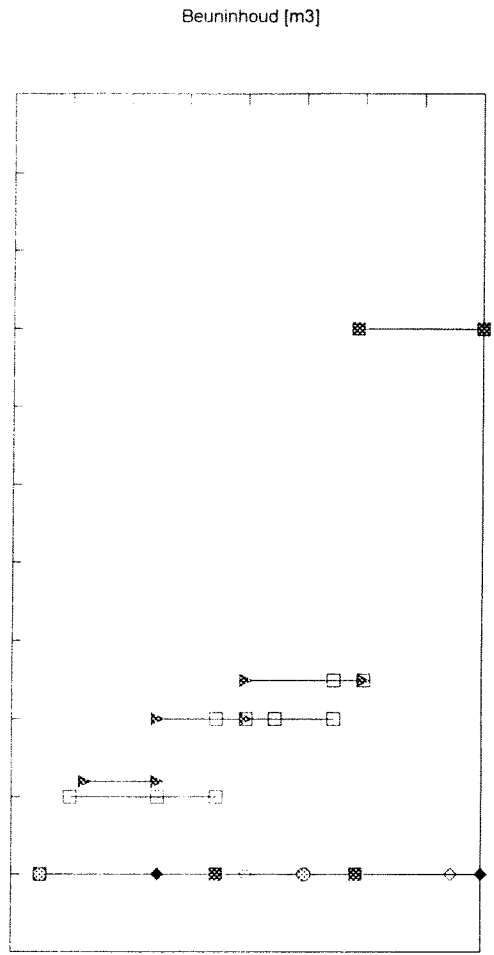


Beuninhoud (m3)

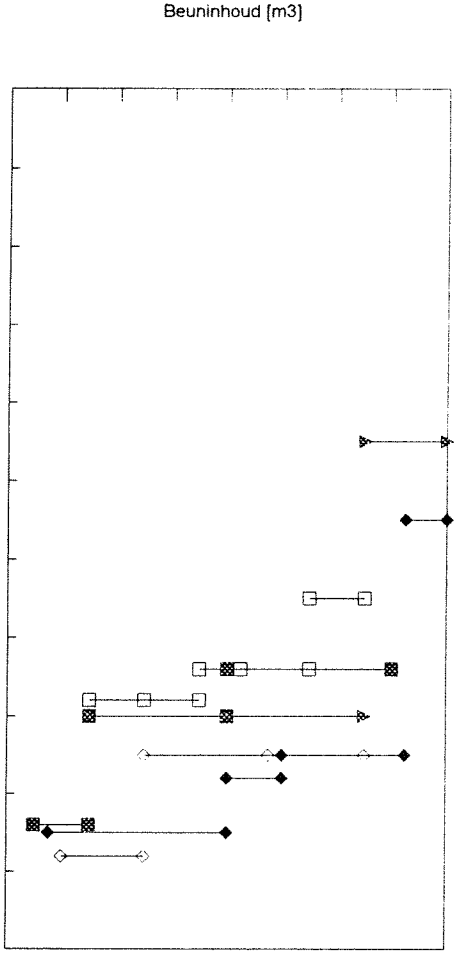
tijd (minuten)

— reis 11 — reis 12 — reis 13 — reis 34 — reis 36

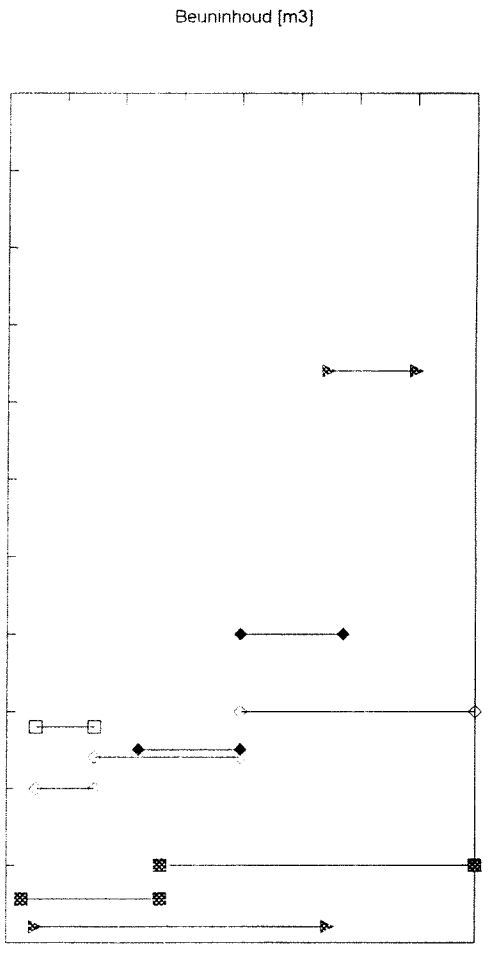
Beuninhoud vs displacement



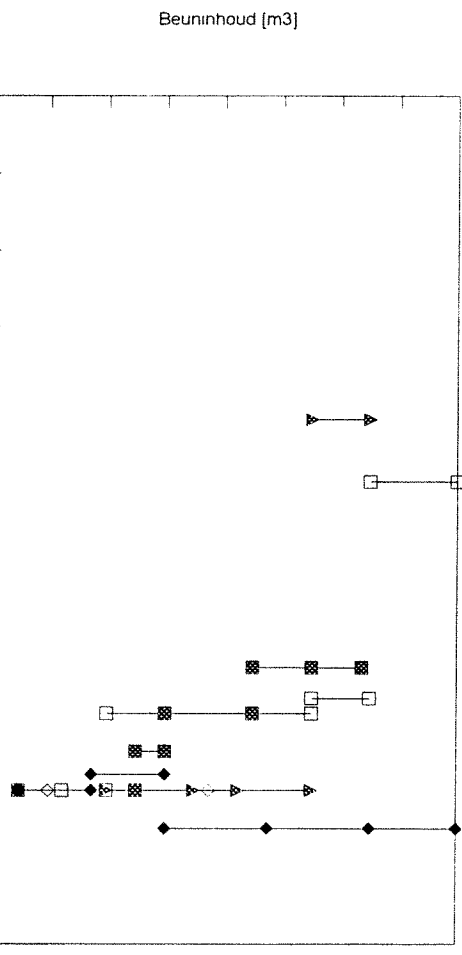
Beuninhoud vs displacement



Beuninhoud vs displacement

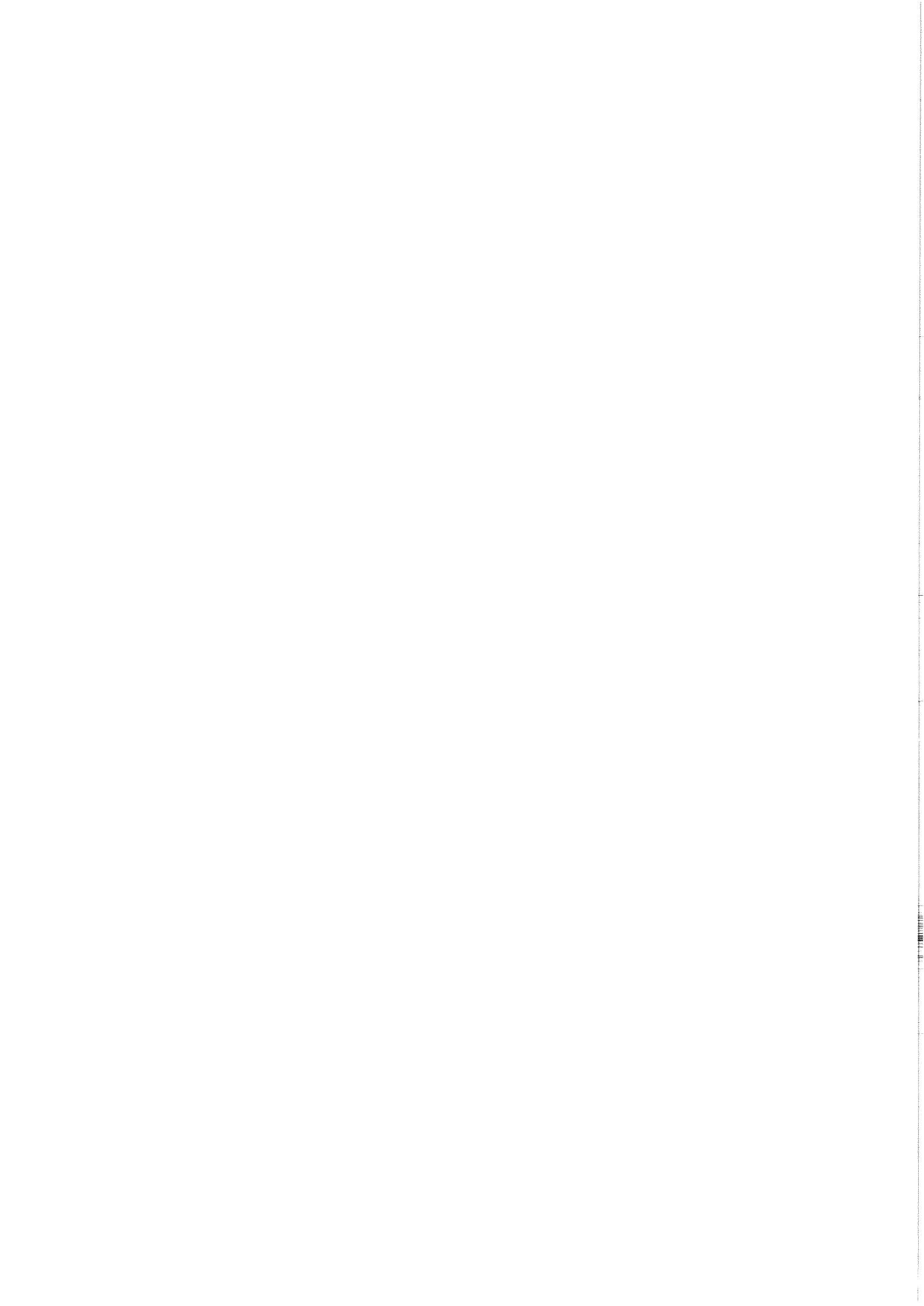


Beuninhoud vs displacement



Bijlage 11: Differentiaalvergelijking voor uitgaande dichtheid

- **Ontwikkeling van het overvloeiende debiet**
- **Bepaling Q_{out} als functie van de vleihoogte h**
- **De vleihoogte als functie van Q_{in} bij constante overvloeihoogte**



Ontwikkeling van het overvloeiende debiet

Er zijn m.b.t. het overvloeiende debiet 2 fasen te onderscheiden tijdens het laadproces:

- fase tot overvloeien: $Q_{uit} = 0 \text{ m}^3/\text{s}$
- fase na overvloeien: $Q_{uit} \geq 0 \text{ m}^3/\text{s}$

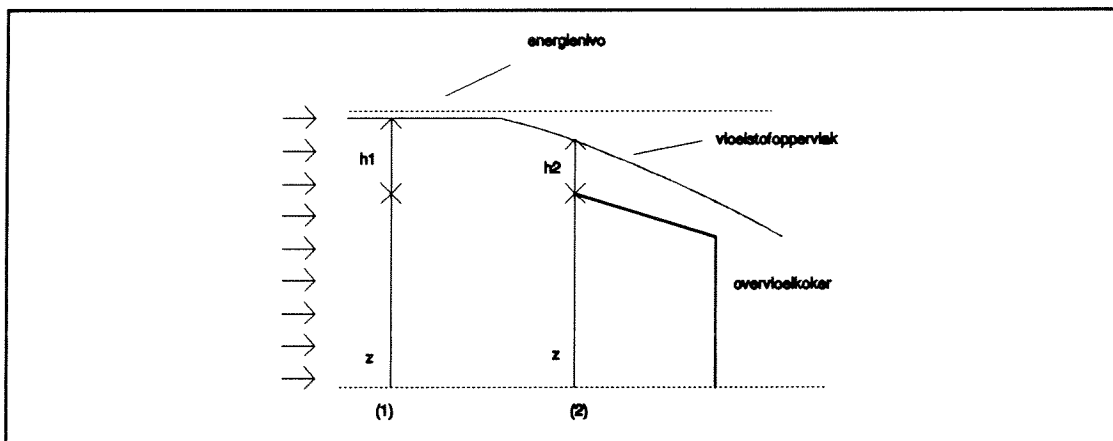
Zodra het vloeistofnivo de rand van de koker heeft bereikt zal Q_{uit} langzaam toenemen. Het zal duidelijk zijn dat Q_{uit} afhankelijk is van de vleihoogte. In deze beschouwing wordt afgeleid hoe Q_{uit} zich in de tijd ontwikkelt in de fase na overvloei.

Hiervoor zal een differentiaalvergelijking worden afgeleid.

Bepaling Q_{uit} als functie van de vleihoogte h

De wijze waarop het mengsel in de overvloei-koker verdwijnt is vergelijkbaar met een volkomen overlaat. De stroming is kritisch ($Fr = 1$).

In de figuur is de stroming over de rand van de overvloei-koker geschetst.



Indien geen energieverlies optreedt tussen 1 en 2 geldt:

$$H_1 = H_2$$

$$z + h_1 + \frac{u_1^2}{2g} = z + h_2 + \frac{u_2^2}{2g}$$

Op de rand is de stroming kritisch:

$$Fr = 1 \rightarrow u_2 = \sqrt{gh_2}$$

Met de aanname:

$$\frac{u_1^2}{2g} < \frac{u_2^2}{2g}$$

Voor de energiebalans volgt nu:

$$h_1 = h_2 + \frac{gh_2}{2g}$$

$$h_2 = \frac{2}{3}h_1$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{2}{3}gh_1}$$

Q_{uit} wordt nu geschreven als:

$$Q_{uit} = u_2 h_2 O$$

$$Q_{uit} = \frac{2}{3}h_1 \sqrt{\frac{2}{3}gh_1} O$$

In het vervolg wordt h geschreven waar h_1 bedoeld wordt. M.b.v. een volumebalans is het mogelijk om h als functie van Q_{in} te bepalen.

Volumebalans

Voor het beun is de volgende volumebalans op te stellen:

$$Q_{in} - Q_{uit} = BL \frac{dh}{dt}$$

B = breedte van het beun [m]

L = lengte van het beun [m]

De vleihoogte als functie van Q_{in} bij constante overvloeihogte

Door de volumebalans te combineren met de vergelijking voor Q_{uit} is h als functie van Q_{in} te bepalen. M.b.v. de op deze wijze berekende h wordt Q_{uit} berekend bij een constante overvloeistand.

$$Q_{in} - \frac{2}{3}h^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{2}{3}g} O = BL \frac{dh}{dt}$$

$$A_1 = \frac{2}{3} O \sqrt{\frac{2}{3} g}$$

$$A_2 = BL$$

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{A_1}{A_2} h^{\frac{3}{2}} + \frac{Q_{in}}{A_2}$$

$A_1 \sim [m^{3/2}/s]$ en $A_2 \sim [m^2]$

Deze differentiaalvergelijking is lastig analytisch op te lossen. Met een geschikte tijdstap kan deze vergelijking ook numeriek voldoende nauwkeurig benaderd worden. In tabel 1 is deze vergelijking met verschillende tijdstappen benaderd om de invloed van de tijdstap te analyseren. Met het volgende schema wordt de differentiaal vergelijking benaderd:

$$h_{t=i} = h_{t=i-1} + \Delta h_{t=i-1}$$

$$\Delta h_{t=i} = \left(\frac{Q_{in,t=i}}{A_2} - \frac{A_1}{A_2} h_{t=i}^{\frac{3}{2}} \right) \Delta t$$

Vervolgens wordt Q_{uit} bepaald volgens:

$$Q_{uit,t=i} = \frac{2}{3} h_{t=i} O \sqrt{\frac{2}{3} g h_{t=i}}$$

Voor de X gelden de volgende waarden:

O	=	x m
B	=	x m
L	=	x m
A_1	=	x $m^{3/2}/s$
A_2	=	x m^2

Tevens is uitgegaan van $Q_{in} = 7m^3/s$. Dit is het debiet in het geval dat de X met 2 buizen zuigt en de dichtheid van het mengsel circa $1300 \text{ kg}/m^3$ is. Het blijkt dat er nauwelijks verschil bestaat tussen $\Delta t = 0.2s$ en $\Delta t = 1.0s$. Het verschil tussen $\Delta t = 1sec$ en $\Delta t = 5sec$ is iets groter. Met name de eerste 90 sec. Echter ook in de begin zijn de verschillen klein ($< 5\%$).

In de buurt van de evenwichts vleihoogte (vanaf $t = 120sec$) zijn de verschillen tussen $\Delta t = 0.2sec$ en $\Delta t = 5sec$ ca 1% .

t (s)	$\Delta t = 0.2 \text{ sec}$			$\Delta t = 1 \text{ sec}$			$\Delta t = 5 \text{ sec}$		
	h (cm)	Q_{uit} (m^3/s)		h (cm)	Q_{uit} (m^3/s)		h (cm)	Q_{uit} (m^3/s)	
30	19.7	1.64	32.8 %	19.7	1.65	33.0 %	20.2	1.76	35.2 %
60	31.1	3.26	65.2 %	31.2	3.28	65.6 %	31.8	3.37	67.4 %
90	36.7	4.18	86.8 %	36.8	4.20	84.0 %	37.3	4.28	85.6 %
120	39.3	4.63	92.6 %	39.4	4.64	92.8 %	39.7	4.70	94.0 %
150	40.5	4.84	96.8 %	40.5	4.84	96.8 %	40.7	4.87	97.4 %
180	41.0	4.93	98.6 %	41.0	4.93	98.6 %	41.1	4.95	99.0 %
210	41.2	4.97	99.4 %	41.2	4.97	99.4 %	41.2	4.98	99.6 %
240	41.3	4.99	99.8 %	41.3	4.99	99.8 %	41.3	4.99	99.8 %
270	41.3	5.00	100%	41.3	5.00	100%	41.3	5.00	100%

Tabel 1: Benadering vergelijking met verschillende tijdstappen ($Q_{\text{in}} = 5 \text{ m}^3/\text{s} = 100\%$ en $h_{t=0} = 0\text{m}$)