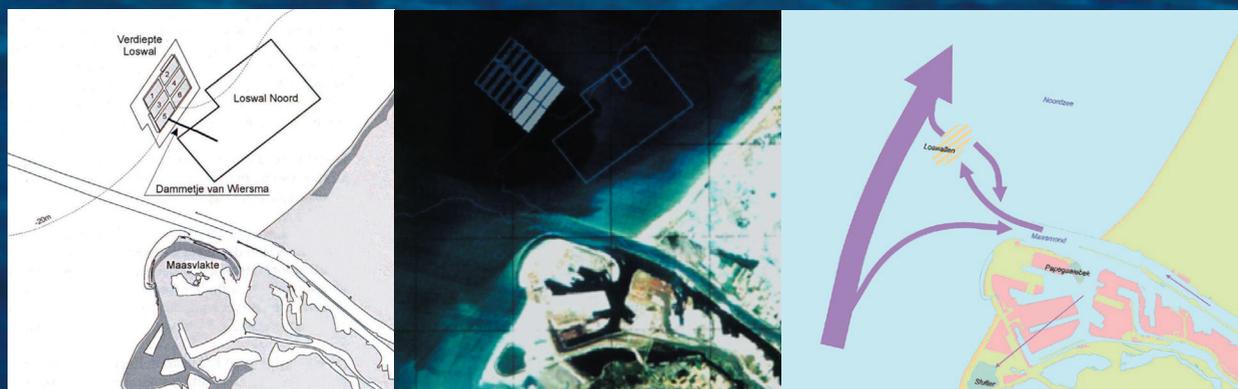




Verdiepte Loswal

fysisch onderzoek naar het gedrag van baggerspecie



Cuno Langeveld

februari 2005



Verdiepte Loswal

Fysisch onderzoek naar het gedrag van baggerspecie

Status: definitief
Cuno R. Langeveld

februari 2005

Commissie:

Prof. dr. ir. G.S. Stelling

dr. ir. J.C. Winterwerp

ir. M.A.J. de Nijs

ir. T. Vellinga

ing. G.W. Berger

dr. J.M. de Kok

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Technische Universiteit Delft

Voorwoord

Wat gebeurt er met baggerspecie die in de Verdiepte Loswal wordt gestort? Door middel van dit onderzoek is geprobeerd hierop inzicht te verwerven. Dit rapport is het resultaat van mijn afstudeeronderzoek aan de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek is uitgevoerd bij het Havenbedrijf Rotterdam N.V. in samenwerking met de directies Noordzee en Zuid-Holland van Rijkswaterstaat. Het onderzoek is tot stand gekomen middels een uitgebreide literatuurstudie en een geotechnisch onderzoek dat is uitgevoerd door TNO-NITG.

Van diegenen die bijgedragen hebben aan dit onderzoek wil ik als eerste mijn begeleiders bedanken. Daarnaast wil ik de afdeling SIMZ van het Havenbedrijf Rotterdam N.V. bedanken voor zowel de inhoudelijke als sociale steun, en in het bijzonder hiervan: Rinske van der Meer, Imke Deibel en Marc Eisma. Verder wil ik Hans Otten van Rijkswaterstaat Directie Noordzee, Sytze van Heteren van TNO-NITG en de bemanning van de ms. Arca bedanken voor hun medewerking aan het onderzoek.

Cuno Langeveld
Rotterdam, februari 2005

Samenvatting

Verdiepte Loswal

Fysisch onderzoek naar het gedrag van baggerspecie.

Jaarlijks wordt er grofweg 15 miljoen kubieke meter sediment uit de havens en vaarwegen in de regio Rijnmond opgebaggerd. Een groot deel hiervan is schoon genoeg om op de Noordzee te mogen worden verspreid. Tot 1996 werd dit gedaan op de zogenaamde 'Loswal Noord' in de Noordzee dicht bij de Maasmond en sindsdien op de verder weg gelegen 'Loswal Noordwest'. De locatie van deze loswal was zodanig gekozen dat aan de ene kant de vaarafstand niet te groot, en aan de andere kant de hoeveelheid baggerspecie die vanaf de stortlocatie naar het Rijnmondgebied terugstroomt (de zogenaamde retourstroom) acceptabel was. Sinds augustus 2000 wordt ook gebruik gemaakt van Verdiepte Loswal. Op een locatie 10 kilometer uit de kust van Hoek van Holland zijn putten van 500 bij 1250 meter en met een gemiddelde diepte van 8 meter aangelegd. Het voordeel van deze werkwijze is dat zand, dat vrijkomt bij de aanleg van de putten kan worden verhandeld, terwijl het deel van de gestorte baggerspecie dat met de retourstroom wordt teruggevoerd naar het Rijnmondgebied beperkt zou blijven.

In de op vergunningen voor gebruik van de Verdiepte Loswal is de verplichting opgenomen om te onderzoeken of de voorspellingen in het MER (Projectgroep MER, 1995) over het gedrag van de gestorte baggerspecie ook zijn uitgekomen. Daarnaast hebben de gebruikers van de Verdiepte Loswal inzicht nodig in het gedrag van baggerspecie in de put voor de juiste strategie voor het aanleggen van de volgende putten en voor het storten van baggerspecie in de toekomst.

In mei 2004 bleek uit metingen dat de capaciteit van de eerste put volledig was gebruikt. De eerste praktijkervaringen wijzen echter uit dat er meer in de put is gestort dan op grond van het volume ervan werd verwacht.

Om te bezien onder welke condities het gestorte materiaal zich daadwerkelijk in de put bevindt zijn hiervan een aantal monsters genomen. In combinatie met de inhoud, bepaald uit lodingen, kan de hoeveelheid sediment in de put bepaald worden. Na vergelijking met de totaal gestorte hoeveelheid blijkt dat er over de gehele gebruiksfase van put één 57% van het in de put gestorte materiaal, daar niet in is terug te vinden. Daarbij valt op dat het verlies in het eerste jaar klein is en vervolgens met de afnemende waterdiepte sterk toeneemt tot een relatief groot verlies in de laatste twee jaar.

Aan de hand van experimentele data en onderzoek van HR Wallingford Ltd. naar de sterkte en samenhang van baggerspecie is voor verschillende stadia na het storten de kritische schuifspanning van het sediment bepaald. Direct na het storten is de kritische schuifspanning van de baggerspecie laag door de geringe dichtheid van de bovenste laag. Dit neemt vervolgens in enkele uren langzaam toe tot dezelfde samenhang als in het beun van een sleehopperzuiger. Na enkele weken is de baggerspecie al zover geconsolideerd dat de kritische schuifspanning hoger is dan de kritische schuifspanning van het granulaire materiaal waar de zeebodem uit bestaat. Hierdoor is het zeer waarschijnlijk dat de put langzamerhand verzand.

De bodemschuifspanning is zowel voor de invloed van stroming als voor golven bepaald. Daarbij valt op dat de door stroming veroorzaakte bodemschuifspanning nauwelijks afhankelijk is van de waterdiepte. De bodemschuifspanning van golven is echter wel sterk afhankelijk van de waterdiepte. Hierdoor is het verlies in de lege put erg klein en in de volle put erg groot. De stroomsnelheden in de put zijn gelijk aan de stroomsnelheden in de omgeving. Dit wordt veroorzaakt doordat de put in de richting van de stroming ligt, hierdoor vind er stroomattractie plaats. Indien de put dwars op de stroming ligt zal de stroomsnelheid in de lege put met 30% afnemen.

Uit het onderzoek blijkt dat het verdwijnen van baggerspecie uit de Verdiepte Loswal voornamelijk kort na het storten plaatsvindt. Na enkele uren krijgt het sediment meer samenhang waardoor de hoeveelheid die wegstroomt afneemt. Stroming heeft dan alleen nog tijdens springtij invloed op het sediment. Stormen hebben in deze fase nog wel een aanzienlijke invloed op het sediment. Na enkele weken is de kritische schuifspanning dusdanig dat alleen nog zeer zware stormen erosie kunnen veroorzaken.

Het gewogen gemiddelde van het wegstroompercentage door stroming wordt geschat op circa 10 à 20%. Hiernaast gaat 3,5 % verloren tijdens het storten. Het overige deel (30 à 40%) gaat verloren door de invloed van golven, in het bijzonder door stormen die kort na het storten van baggerspecie optreden. De theoretisch berekende verliespercentages voor de invloed van stroming en golven bevatten een aanzienlijke foutmarge, deze resultaten moeten door monitoring aan de praktijk gevalideerd worden. Onder andere wordt aanbevolen om op regelmatige basis peilingen te doen. Door deze te vergelijken met de gestorte hoeveelheden kan de relatie tussen stormen en het verdwijnen van baggerspecie verder onderbouwd worden. Om gedetailleerder inzicht te krijgen in het verspreidingsproces van het sediment dat wegstroomt uit de Verdiepte Loswal zijn aanbevelingen gedaan voor vervolg onderzoek. Een modelering zoals die ook gedaan zijn voor de verspreiding van Loswal Noord kan hier een goed beeld van geven.

Summary

Lowered Dumping Site

Physical research on the behaviour of dredged sediment.

Every year, about 15 million cubic meters of sediment is being dredged from the port of Rotterdam. Most of the dredged material is not polluted; it is therefore allowed to dispose this material at dumping sites in the North Sea. Until 1996 this was executed at 'Loswal Noord', close the harbour entrance. Since 1996, the dredged sediment is being disposed at 'Loswal Noordwest', a dumping site located slightly more offshore. This location was chosen from an optimisation between short sailing distance and a small amount of dredged material which will return to the port at the other hand. Since 2000, dredged material is disposed at the Lowered Dumping Site (LDS) as well. The LDS is located 10 kilometres offshore from Hoek van Holland, the dimensions of one pit are 500 meters wide, 1250 meters long and an average depth of 8 meters below the seafloor. The two main advantages of a Lowered Dumping Site are: first of all there is reduced percentage of dredged material that will relocate into the harbour. Secondly, the sand that has been excavated during the construction of the pit can be sold.

After completion of the Environmental Impact Assessment (EIA, 1995) a concession for the construction of the first two pits of the LDS was granted. The concession included the obligation to verify the predictions mentioned in the EIA. Besides this, the Port Authority and Rijkswaterstaat need to have knowledge of the best strategy for construction of new pits and the disposal of dredged material in the future.

The full capacity of the first pit had been reached in May 2004. This has been determined with measurements performed at the LDS. The first experiences with this pit indicate that a lot more sediment can be disposed at the LDS than expected. The actual capacity of the pit is larger than one would expect from its volume.

Seabed cores were taken to determine the physical properties of the sediment in the LDS. The volume of the pit is determined by different soundings. When combining the current amount of sediment in the pit with the total disposed amount of sediment, 57% seems to have left the pit. The loss of sediment appears to be very small in the first year that the pit has been used. The loss of sediment increases strongly with time due to the decreasing water depth. Due to the substantial influence of waves to erosion, the increasing percentage of erosion in time can be explained

The strength and coherence of disposed sediment is determined with help of some experimental data and research from HR Wallingford Ltd. The critical shear stresses can be determined with this data. Just after dumping dredged material at the LDS, the critical shear stress of the upper layer is very low. This is induced by the low coherence of the sediment. The coherence increases slowly after only a few hours and the critical shear stress as well, until it reaches the coherence like in the bin of the ship. Consolidation of the sediment will take some time and the critical shear stress of the cohesive sediment will be higher than the natural seabed after a few weeks. It is very likely that the pit will slowly be covered with sand finally.

The shear stresses are determined by influences of current and waves. It appears that the influence of water depth to the current induced bottom shear stress is very small. On the other hand, the wave induced bottom shear stress does depend on the water depth. Current velocities inside the pit can increase substantially due to attraction, which is induced by water depth difference and a current parallel ($\pm 10\%$) to the pit. However, due to the limited length of the pit (1250 m) no acceleration will occur. This agrees with a measurement performed inside the empty pit: current velocities are in the pit approximately the same in respect to the surroundings. By rotating the pit with 90 degree, the current velocity will decrease with 30%.

Most of the erosion of disposed material takes place shortly after depositing the dredged material at the LDS. In a few hours the coherence of the sediment increases and erosion decreases, at this moment erosion will only occur during springtide. After a few weeks the critical shear stress will be about 1,6 N/m². At that moment only major gales can have an impact on the resuspension of sediment.

The averaged erosion caused by currents is expected to be 10 to 20%, excluded the loss during the dumping phase of the dredged sediment (3,5%). The remainder of erosion (30 to 40%) is caused by the influence of waves, especially due to gales that occur shortly after disposing dredged material at the LDS. The percentage of erosion is very small with large water depth and the percentage of erosion is much higher with less water depth. Regularly measurements are recommended to evaluate these calculated values. For a complete understanding of the distribution of the sediment which is eroded from the LDS, and the amount of sediment, which relocates into the dredging areas, further investigation with computer models has to be carried out.

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Samenvatting	5
Summary	7
Inhoudsopgave	9
1 Inleiding	11
2 Probleemanalyse	13
3 Samenvatting van eerder uitgevoerd onderzoek	15
4 Procesanalyse	17
5 Storten van baggerspecie	27
6 Hoeveelheden en samenstelling sediment	29
6.1 Gestorte hoeveelheid baggerspecie	29
6.2 Volumebepaling uit lodingen	32
6.3 Geotechnisch onderzoek	33
6.4 Resterende massa op zeebodem	38
6.5 Verliespercentage	38
7 Schuifspanningen	41
7.1 Kritische schuifspanning	41
7.2 Invloed van stroming op sediment	43
7.3 Invloed van golven op sediment	46
8 Sediment transport	53
9 Verspreiding	57
9.1 Retourpercentage	57
9.2 Globale slibbalans Noordzeekust	58
10 Conclusie	59
11 Aanbevelingen	61
Lijst van Symbolen	67
Lijst van Afkortingen	68
Bijlagen 1 t/m 17	

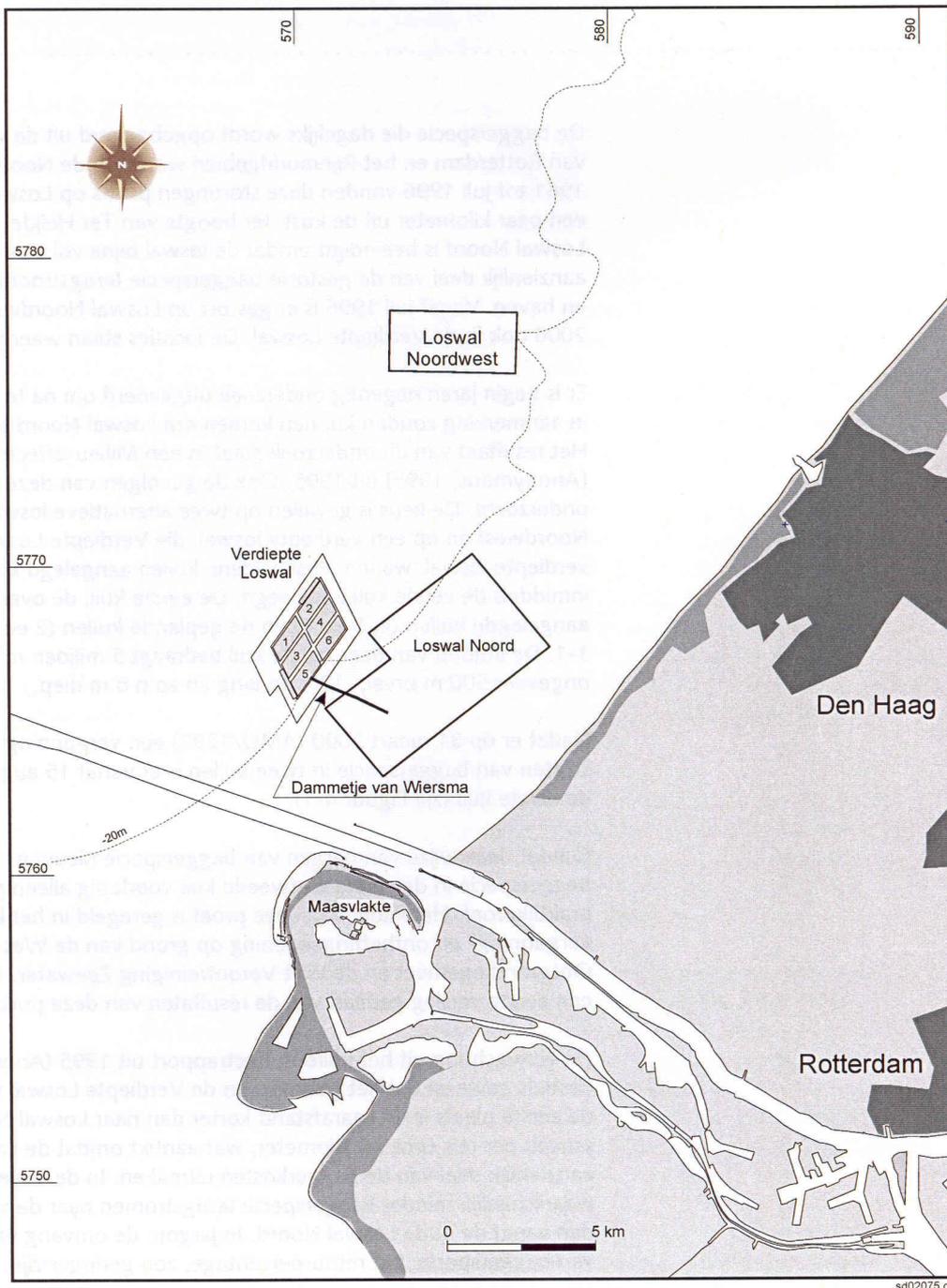
1 Inleiding

De haven van Rotterdam ligt in het estuarium van het Rijnstroomgebied en is als zodanig een gebied waar voortdurend sedimentatie plaatsvindt van sediment uit de rivier en uit de zee. Om de haven toegankelijk te houden voor de scheepvaart wordt er jaarlijks ongeveer 15 miljoen kubieke meter slib gebaggerd. Dit is een continu proces waar dagelijks meerdere baggerschepen mee bezig zijn. De havens worden op diepte gehouden door het Havenbedrijf Rotterdam N.V. (HbR) en de vaarwegen door Rijkswaterstaat directie Zuid-Holland (DZH). Baggerspecie die dermate schoon is dat het op de Noordzee kan worden verspreid wordt op loswallen in de Noordzee gestort. Een kleine hoeveelheid (ongeveer 2 miljoen kubieke meter) is hiervoor nog te verontreinigd en wordt opgeslagen in de Slufter.

Sinds 1961 wordt baggerspecie in de Noordzee gestort op Loswal Noord, gelegen ten noorden van de monding van de Nieuwe Waterweg. Deze loswal raakte vol en daarnaast werd duidelijk dat een deel ($44\% \pm 22\%$ [Stutterheim, 2002-c]) van de baggerspecie terug stroomt naar de haven. Als alternatief is in 1996 Loswal Noordwest (zie Figuur 1) in gebruik genomen. Door de grotere afstand tot de haven en een gunstiger ligging ten opzichte van de stroming werd verwacht dat de retourstroom vanaf deze locatie kleiner zou zijn ($13\% \pm 6,5\%$ [Stutterheim, 2002-a]). Een grotere vaarafstand zorgt echter voor extra kosten. Besloten werd te onderzoeken of het storten van baggerspecie in zogenaamde verdiepte loswallen een goed alternatief zou kunnen zijn. Hiervoor is in 1995 een m.e.r.-procedure afgerond, op basis waarvan de vergunningen zijn afgegeven voor een grootschalige proef met twee putten, de zogenaamde verdiepte loswallen. Door de baggerspecie te storten in putten met een diepte van circa 10 meter over een oppervlak van 1250 bij 500 meter werd verwacht dat slechts een klein deel van de baggerspecie terug zou stromen naar het herkomstgebied. [MER, 1995].

Op grond van de Milieueffectrapportage (MER) uit 1995, die is opgesteld door de Gemeente Rotterdam en de Directie Zuid-Holland van Rijkswaterstaat, heeft het bevoegd gezag (VROM en V&W) toestemming gegeven om twee Verdiepte Loswallen in gebruik te nemen. Op grond van de procedure ten aanzien van de milieueffectrapportage en op grond van de vergunningen en ontheffingen moet tijdens het gebruik van de eerste twee Verdiepte Loswallen verder onderzoek worden verricht naar het effect van het storten van baggerspecie in de Verdiepte Loswallen. Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van de 'stuurgroep *Baggerdriehoek*' waarin verschillende partijen vertegenwoordigd zijn.

Na diverse onderzoeken is de eerste put van de Verdiepte Loswal in augustus 2000 in gebruik genomen. Omdat deze wijze van bergen van baggerspecie nieuw is, zal het storten van baggerspecie in de eerste en tweede put voorlopig alleen plaatsvinden als praktijkproef. Echter waar werd voorspeld dat de eerste put van de Verdiepte Loswal een inhoud van zeven miljoen ton verrekenbare kubieke meters zou hebben, bleek dat de put pas vol was na het storten van 24 miljoen kubieke meter (bron: DNZ). Voorliggend onderzoek poogt een verklaring te geven voor het feit dat er aanzienlijk meer baggerspecie in de putten kan worden gestort dan op grond van het werkelijke volume ervan kan worden verwacht.



Figuur 1. De loswallen op de Noordzee.

2 Probleemanalyse

Inleiding

De eerste put van de Verdiepte Loswallen is in augustus 2000 in gebruik genomen. In mei 2004 bleek uit metingen dat de capaciteit van de put volledig was gebruikt. Op dat moment was er circa 24 miljoen kubieke meter baggerspecie in de put gestort, terwijl berekend was dat er op grond van de inhoud van de put ruimte was voor circa 7 miljoen kubieke meter. Naar aanleiding hiervan heeft het Havenbedrijf Rotterdam N.V. (HbR) mede namens de 'Stuurgroep Baggerdriehoek'¹ gevraagd om een onderzoek naar het verschil in de gestorte hoeveelheid baggerspecie en het daadwerkelijke beschikbare volume van de betreffende put. Meer informatie hieromtrent is niet alleen gewenst om de efficiëntie van de Verdiepte Loswallen te bekijken, maar wordt ook geëist door de vergunningverlener, het Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Deze verwacht van de gebruiker een verklaring waar het gestorte materiaal terecht komt.

Probleemstelling

In de praktijk blijkt dat er een groot verschil bestaat tussen het volume dat in de put gestort is (ongeveer 24 mln. m³) en het netto volume van de put (5 mln. m³). De oorzaak hiervan is onbekend.

Vraagstelling

Er is meer baggerspecie in de eerste Verdiepte Loswal gestort dan op grond van volume verwacht kan worden. De vraag is hoe dit is te verklaren.

Doelstelling

Doel van het onderzoek is om meer inzicht te krijgen in het gedrag van baggerspecie die wordt gestort in de Verdiepte Loswal op de Noordzee, toegespitst op de vraag hoe het kan dat er aanzienlijk meer baggerspecie in is gestort dan op grond van het volume ervan kan worden verwacht.

Aanpak

Om goed inzicht te krijgen in het daadwerkelijke verlies is er een massa balans opgesteld (hoofdstuk 6). Om de condities van het gestorte materiaal dat zich daadwerkelijk in de put bevindt te bepalen, zijn verschillende monsters genomen. De beschrijving hiervan is te vinden in paragraaf 6.3.

Op het eerste gezicht valt op dat er meer baggerspecie in de Verdiepte Loswal is gestort dan er in kan. Dit kan komen door verlies tijdens het storten. Dit proces wordt beschreven in hoofdstuk 5. Het kan ook komen door erosie en transport van reeds gestort materiaal. In dit geval is de hypothese dat het verlies wordt veroorzaakt door baggerspecie die wegstroomt kort na het storten van de baggerspecie. Voor dit proces is de bodemschuifspanning van groot belang. Hierop wordt nader ingegaan in hoofdstuk 7. Vervolgens wordt in hoofdstuk 8 een beschrijving gegeven van het sedimenttransport uit de Verdiepte Loswal.

Uiteraard is eerst begonnen met te kijken naar reeds uitgevoerd onderzoek. In hoofdstuk 3 worden de belangrijkste onderzoeken en de conclusies hieruit besproken.

¹ Gezamenlijk beheerders overleg (RWS-HbR)

Afbakening

- Het stortproces wordt beschouwd door middel van een beknopte literatuurstudie. Aan de hand hiervan wordt met behulp van eenvoudige berekeningen een aanname gedaan over de hoeveelheid baggerspecie die direct na het storten in de put terecht komt.
- De bodemschuifspanning wordt berekend volgens de lineaire golftheorie.
- Er wordt geen studie gedaan naar de totale slibflux langs de kust; wat hiervan bekend is wordt meegenomen.
- Effecten op het ecosysteem worden niet in beschouwing genomen.

3 Samenvatting van eerder uitgevoerd onderzoek

De kennis over sedimentstromen is gebaseerd op proceskennis afgeleid uit diverse meetcampagnes en geïmplementeerd in een 3-dimensionaal slibtransport model. Wijzigingen ten gevolge van de verschillende alternatieve loswallen zijn hieruit afgeleid in de milieueffectrapportage (1995). Voor de Verdiepte Loswal en Loswal Noordwest wordt uit het 3D-slibstroommodel afgeleid dat de retourstroom (de baggerspecie die na het storten terug stroomt naar de omgeving waaruit het verwijderd is) klein is. Op basis van veld- en modelgegevens heeft De Kok een schatting gemaakt dat 30% van de hoeveelheid slib onder jaargemiddelde condities uit een Verdiepte Loswal zal eroderen. Van deze hoeveelheid, waarin het verlies aan slib tijdens de losfase is inbegrepen, zal ongeveer een derde deel retourstromen naar de baggerlocaties. Dat is 10% van de hoeveelheid slib. In de baggerspecie is gemiddeld 49% slib en 51% zand aanwezig, aangenomen werd dat zand niet gevoelig is voor erosie. Dat betekent dat 5% van de totale hoeveelheid baggerspecie verwacht werd retour te stromen.

Het wegstroompercentage is gedefinieerd als de hoeveelheid baggerspecie die de loswal verlaat uitgedrukt als percentage van de totale gestorte hoeveelheid. Het retourstroompercentage is het percentage van de gestorte baggerspecie die terugstroomt naar het havengebied.

Uitgebreid onderzoek naar de verschillende loswallen is gedaan door De Kok (2000) en Stutterheim (2002) van het Rijksinstituut voor Kust en Zee van Rijkswaterstaat (RIKZ). De Verdiepte Loswal bestaat uit een aantal putten. Voorliggend onderzoek spitst zich toe op de eerste put die is aangelegd. Deze put heeft een inhoud van ongeveer 5 mln. m³. In de periode september 2000 tot juli 2002 is er 7,0 miljoen ton baggerspecie op droge stof basis (MTDS) gestort, hetgeen overeenkomt met 146% van de potentiële hoeveelheid die er volgens het volume van de put in kan worden gestort. Er ligt in de Verdiepte Loswal dan een laag baggerspecie van gemiddeld 5,5 meter hoog.

Stutterheim (2002-a) concludeert dat het jaargemiddelde retourtransport vanaf Loswal Noord aan de hand van modelberekeningen (door De Kok, 2002) uitkomt op 44% ± 22% van de totaal gestorte hoeveelheid specie. Voor deze modelering is aangenomen dat het wegstroompercentage van Loswal Noord 50% bedraagt. Het jaargemiddelde retourtransport vanaf Loswal Noordwest wordt aan de hand van modelberekeningen geschat op 13% ± 6,5%. De Kok (2002) geeft aan dat de onzekerheden bij deze modelberekeningen ten gevolge van modelaannamen een onzekerheidsmarge van 50% bedraagt, afgezien van de variatie in wind en rivierafvoer. Een overzicht van alle resultaten van eerder uitgevoerde onderzoeken is te vinden in Tabel 1.

Het wegstroompercentage van baggerspecie van de Verdiepte Loswal ligt in dezelfde orde van grootte als de geraamde omvang van het wegstroompercentage van Loswal Noord en het gemeten wegstroompercentage van Loswal Noordwest, zie Tabel 1. Stutterheim (2002-a) concludeert dat de verdieping niet in staat is om de baggerspecie c.q. het slib beter te fixeren dan in Loswal Noord of Loswal Noordwest. Er wordt geen uitspraak gedaan over het retourpercentage van baggerspecie vanaf de Verdiepte Loswal, omdat dit niet te meten viel.

In de periode van augustus 2000 tot februari 2002 zijn er vier series van vijf steekboringen door TNO uitgevoerd om de fysieke toestand van het in de Verdiepte Loswal gestorte sediment vast te stellen. Het aangetroffen, niet natuurlijk afgezette materiaal bestaat grotendeels uit silt (2µm < silt < 63 µm) en kleiig silt (< 63 µm). Het droge stof gehalte van het gestorte materiaal is in februari 2002 bepaald op 1180 kg/m³ en een dichtheid in-situ van 1740 kg/m³.

Op grond van radiometrisch kartering kan de hoeveelheid slib in de zeebodem berekend worden. Dit is gebruikt om de verspreiding van de baggerspecie uit de Loswal vast te stellen aan de hand van de hoeveelheid slib in de zeebodem in de omgeving van de Loswal. Twee maal is er een radiometrische kartering rondom de Verdiepte Loswal uitgevoerd, een opname voor de ingebruikname in januari 2000 en een opname in februari 2002. Op de tweede meting is duidelijk te zien dat de put met slib is gevuld. Een kleine hoeveelheid sediment migreert langs de randen uit het stortvak. De verspreiding strekt zich uit over een afstand van circa 500 meter. Deze verspreiding heeft geen preferente richting waardoor het niet mogelijk is aan de hand hiervan een retourpercentage vast te stellen.

Als alternatief voor Loswal Noordwest en de Verdiepte Loswallen heeft De Kok (2002) de mogelijkheid onderzocht om afhankelijk van de omstandigheden een locatie te kiezen om te storten zodat de retourstroom minimaal is. Met een driedimensionaal numeriek waterbewegings- en slibverspreidingsmodel zijn retourpercentages voor de slibfractie van de baggerspecie bepaald voor diverse situaties wat betreft getij fase, wind, Rijnafvoer en stortlocatie. De belangrijkste conclusies uit dit onderzoek waren als volgt:

- het retourpercentage is kleiner, als er gestort wordt bij beginnende vloedstroom (vloedkentering).
- Bij wind uit Zuidwestelijke richtingen is er minder retourtransport dan bij wind uit andere richtingen.
- Bij lage rivierafvoer is het retourtransport kleiner dan bij hoge afvoer.

Aangegeven wordt dat de onzekerheden in de modellering van het retourtransport vooral de aannamen omtrent sedimentatie en resuspensie betreft.

Methode	Bron	Wegstroompercentage		Retourpercentage	
		Sediment (zand en slib)	slib	Sediment (zand en slib)	slib
Loswal Noord					
Model 1991 Gem. omstandigheden	MER	50% (schatting)	80% (schatting)	32%	44%
Model 1999 Gem. omstandigheden	St. 2002 ²	50% (schatting)		44 ± 22%	
Loswal Noordwest					
Model 1991 Gem. omstandigheden	MER	29%	68%	0%	0%
Model 1999 Gem. omstandigheden Noordwesterstorm Zuidwesterstorm	St. 2002 ²	24 à 48%	42 à 84%	16 ± 6% 28% 0%	33% 59% 0%
Loding	St. 2002 ²	50±5%	78±3%		
Verdiepte Loswal					
Model 1991 Gem. omstandigheden	MER	8%	20%	3%	7%
Loding	St. 2002 ²	51±3%	70±7%		

Tabel 1. Overzicht resultaten van eerder uitgevoerd onderzoek.

² Stutterheim, 2002-c

4 Procesanalyse

Inleiding

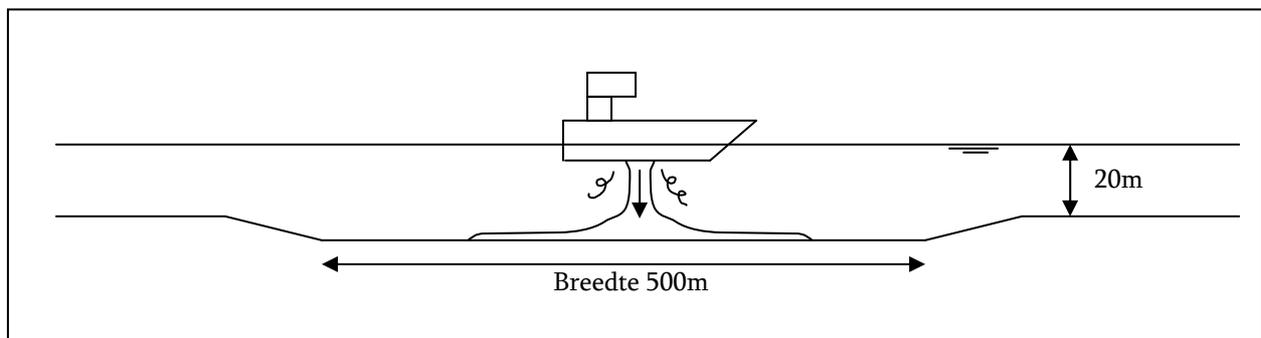
Dit hoofdstuk geeft een beschrijving van de processen die een rol spelen bij het gedrag van baggerspecie in de verdiepte loswallen. De processen worden verdeeld in 'Near-field', waarin het gedrag in en rondom de put wordt beschouwd, en 'Far-field', waarin wordt gekeken naar de verspreiding van in en rond de put gemobiliseerd materiaal.

Near-field

Naar het morfologisch gedrag van zand en slib afzonderlijk zijn verschillende onderzoeken gedaan. Er is echter nog weinig bekend over het gedrag van zand-slibmengsels. De reden dat de meeste onderzoeken naar zand en slib gescheiden zijn uitgevoerd, is het grote verschil in gedrag tussen beide. Pas recentelijk zijn er enkele onderzoeken gedaan naar de combinatie van zand en slib (zie Van Ledden, 2003).

Storten door bodemdeuren

Het materiaal dat gestort wordt in de Verdiepte Loswal bevat over het algemeen een combinatie van zand, klei en vooral silt. Het materiaal dat in de Verdiepte Loswal is gestort, is afkomstig uit de Rotterdamse havens, Nieuwe Maas, Maasmond en Maasgeul. Door de verschillende herkomst verschilt de samenstelling van materiaal ook sterk per vracht. De baggerspecie wordt op de Verdiepte Loswal gestort door bodemdeuren van sleephopperzuigers met een beuninhoud van 3600m³ (HbR) en 7000m³ (RWS).



Figuur 2. Storten in Verdiepte Loswal

Met het openen van de bodemdeuren vormt zich een pluim naar de bodem. Het verschil in dichtheid met de omringende vloeistof draagt zorg voor de aandrijvende kracht. Het zand-water mengsel bereikt de bodem met een zekere dichtheid, omvang en snelheid. De straal wordt door de impact met de bodem omgebogen en stroomt als een horizontale suspensiestroming verder. De snelheid, het stroomprofiel en de dichtheid van de bezinkselstroom vlak naast het gebied van impact kunnen direct worden afgeleid uit de theorie van vlakke pluimen. Een eerste grove schatting zegt dat het materiaal dat de bodem bereikt zich verspreidt en een 'donut' vormt met een diameter in de orde van 100-200 meter (Van Heuvel, 1988). De laagdikte is bij het storten van baggerspecie met lage dichtheid is veelal kleiner dan 0,1 m, tot enkele decimeters voor baggerspecie met hogere dichtheid (Van Heuvel, 1988).

Materiaaleigenschappen

Het is gebruikelijk grond onder te verdelen in verschillende soorten aangezien deze verschillende mechanische eigenschappen hebben. Een eenvoudige onderverdeling kan geschieden op basis van de korrelgrootte van de deeltjes waaruit de grond bestaat. Onderscheid tussen klei (<2 μm) en silt (2 μm <silt<63 μm) wordt niet alleen gebaseerd op korrelgrootte, omdat de belangrijkste fysische eigenschappen slechts een indirecte relatie met de korrelgrootte hebben. De combinatie van klei en silt wordt ook wel slib (<63 μm) genoemd. In Nederlandse kleisoorten komt vooral het mineraal illiet voor. De structuur wordt gevormd door kleine deeltjes, vaak in de vorm van kleine plaatjes. Klei heeft daardoor sterke cohesieve en plastische eigenschappen en een kleine doorlatendheid. Zand bestaat in Nederland voornamelijk uit kwarts (Klugt, 2004).

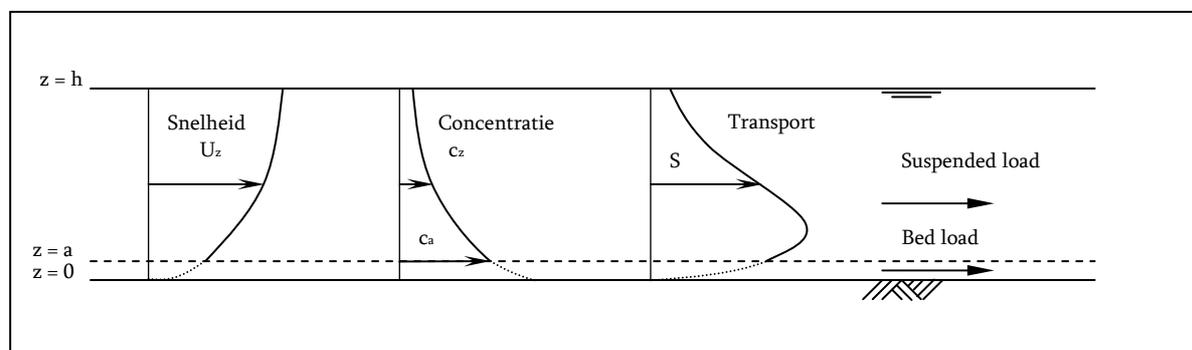
Horizontaal transport

In algemeen zijn we geïnteresseerd in het sedimenttransport over de waterdiepte, het sedimenttransport is het product van de concentratie en stroomsnelheid geïntegreerd over de diepte en tijd:

$$S = \frac{1}{t} \int_{z=0}^{h+\eta} \int_{t=0}^{t'} c(z,t) U(z,t) dt dz$$

waarin:	S	Sedimenttransport	[m ³ /s/m ²]
	c(z)	sedimentconcentratie	[m ³ / m ³]
	U(z)	snelheid	[m/s]
	t'	tijdsperiode	[s]
	η	instantane toename waterspiegel	[m]
	h	gemiddeld waterdiepte	[m]

In Figuur 3 is de verdeling van de snelheid en transport weergegeven voor quasi-stationaire stroming. Hier is tevens het onderscheid in 'bed load' en 'suspended load' weergegeven. Deze verdeling is gemaakt vanwege de grootte verschillen in gedrag tussen beide toestanden.

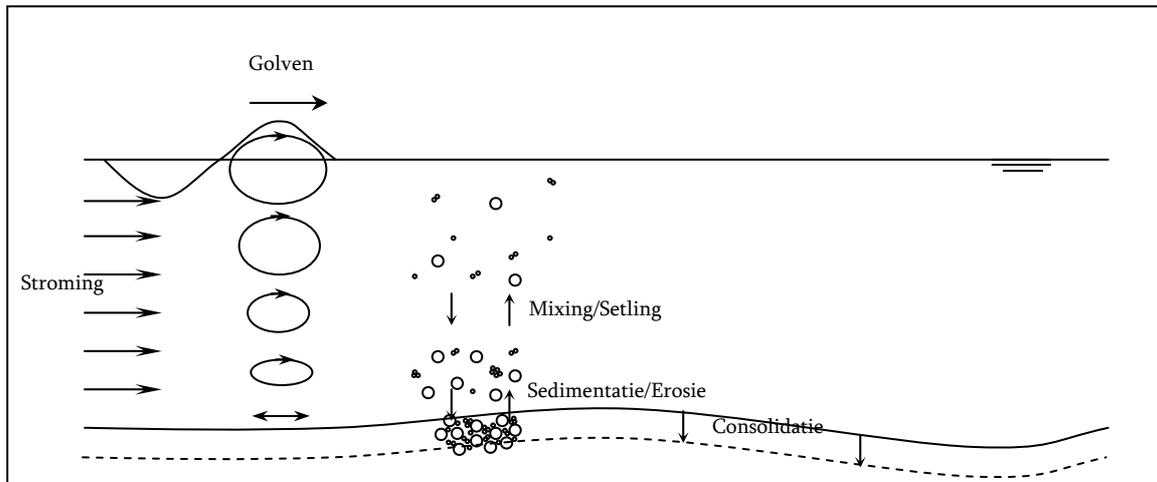


Figuur 3. principe sediment transport berekening

Stroming over de zeebodem ondervindt weerstand van de bodem. Hierdoor ontstaat een turbulente grenslaag. Het snelheidsprofiel over de waterkolom kan aangenomen worden als een logaritmische verdeling van nul aan de bodem tot een maximum aan de waterspiegel.

Hydrodynamica

De basis van sedimenttransport is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4. Principeschets sedimenttransport

De bodemschuifspanning is een cruciale parameter voor sedimenttransport. De bodemschuifspanning wordt veroorzaakt door de weerstand van de bodem op de waterbeweging over de bodem. Stromingen worden voornamelijk veroorzaakt door het getij, wind, rivierafvoer en dichtheidsverschillen als gevolg van zoutgehalte of sedimentgehalte. Een fundamenteel verschil tussen de invloed van stroming en golven is dat de stroming als gevolg van getij quasi-stationair is, terwijl golven voor een orbitaal beweging van het water zorgen. Door deze niet stationaire beweging hebben golven relatief veel invloed op resuspensie in de kustzone.

Een eenvoudige benadering van de bodemschuifspanning wordt gegeven door de logaritmische snelheidsverdeling van Prandtl-Von Karman te gebruiken. De bodemschuifspanning is als volgt gerelateerd aan de diepte gemiddelde stromingssnelheid (volgens Chézy):

$$\tau_s = c_f \rho U^2$$

$$c_f = g/C^2$$

Waarin:

C	Chézy coëfficiënt: $C=18\log(12h/k_r)$	[m ^{1/2} /s]
k _r	Nikuradse bodemruwheid	[m]
U	Diepte gemiddelde snelheid	[m/s]

Golven in voldoende ondiep water zorgen voor een oscillerende beweging aan de bodem. De invloed aan de bodem is afhankelijk van de golfhoogte en vooral de golflengte. De grenswaarde van deze invloed wordt benaderd door:

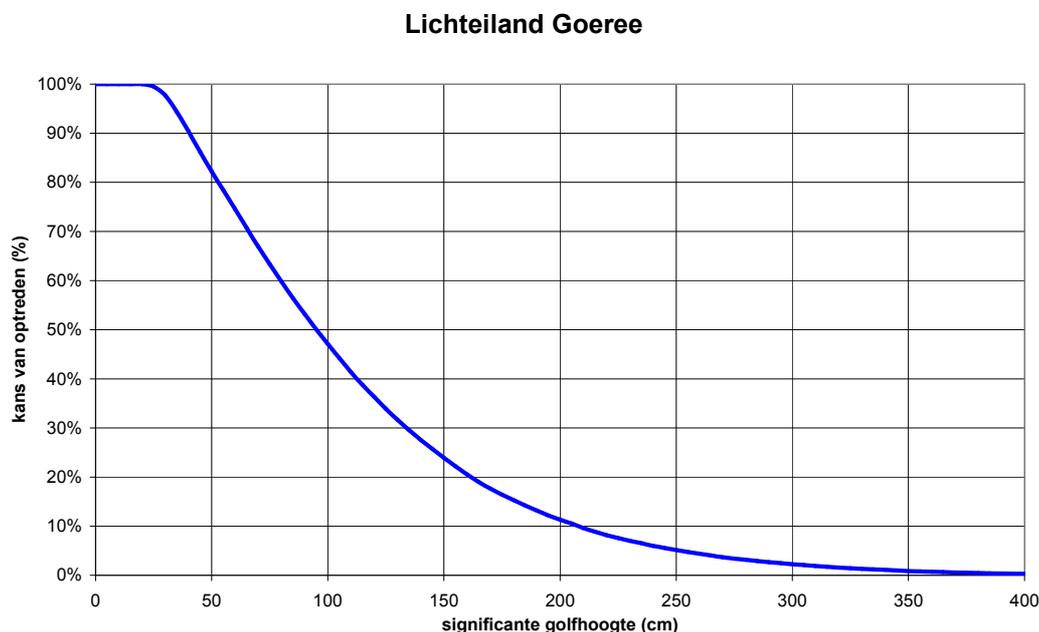
$$h < 10H_s$$

of:

$$h < 0.1gT^2$$

H _s	significante golfhoogte	[m]
T	periode	[s]

Langs de Nederlandse kust komen golven met een hoogte van drie meter gemiddeld tien dagen per jaar voor (zie Figuur 5). Deze golven kunnen fijn sediment tot een diepte van 30 meter resuspenderen.



Figuur 5 Overschrijdingsdiagram significante golfhoogte Lichteiland Goeree (Bron: DNZ).

De schuifspanning aan de bodem als gevolg van golven kan uitgerekend worden aan de hand van de

$$\hat{u}_w = \frac{\pi H_{rms}}{T_p \sinh(kh)}$$

amplitude van de orbitaalbeweging veroorzaakt door golven. Met de lineaire golftheorie kan de amplitude van de orbitaalbeweging gegeven worden door:

\hat{u}_w	snelheidsamplitude	[m/s]
H_{rms}	kwadratisch gemiddelde golfhoogte ($= H_s / \sqrt{2}$)	[m]
T_p	Periode met hoogste energiedichtheid	[s]
k	golfgetal ($= 2\pi/L$)	[1/m]
h	waterdiepte	[m]
ω	hoekfrequentie	[Hz]

Gebaseerd op experimentele data heeft Jonsson (1966) de relatie voor schuifspanning onder golven geformuleerd:

$$\tau_w = 0.5 \rho f_w (\hat{u}_w)^2 \sin^2(\omega t)$$

ρ	dichtheid van water	[kg/m ³]
f_w	golf wrijvings factor	[-]

De maximum bodemschuifspanning is dan:

$$\hat{\tau}_w = 0.5 \rho f_w (\hat{u}_w)^2$$

De bodemruwheid is meestal verdeeld in een formweerstand en een korrelruwheidsfactor. Op zandbodems overheerst over het algemeen de formweerstand. In geval van slib is de bodem daarentegen meestal vrij vlak waardoor de bodemruwheid vooral wordt bepaald door de korrelruwheidsfactor.

De bodemweerstand voor hydraulisch ruwe bodem wordt door Soulsby (Whitehouse et al. 2000) gegeven:

$$f_{wr} = 0,237 r^{-0,52}$$

De bodemweerstand is afhankelijk van de relatieve bodemruwheid:

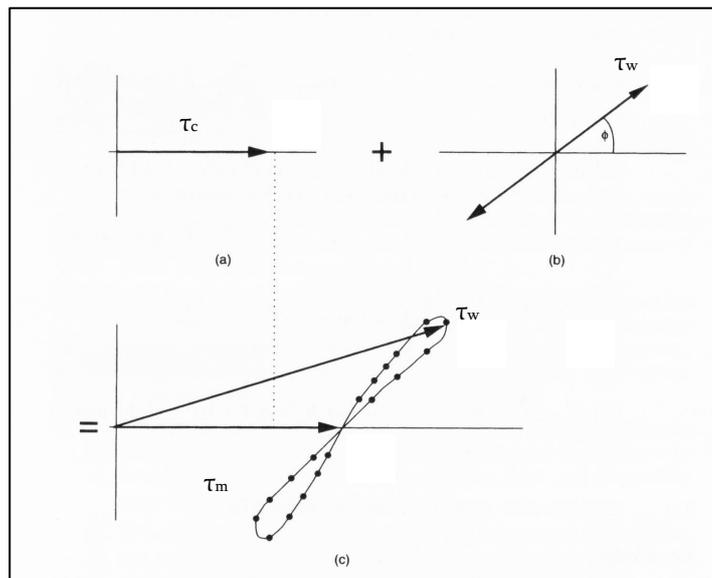
$$r = \frac{U_w \cdot T_p}{2 \cdot \pi \cdot k_s}$$

Waarin: r relatieve bodemruwheid [-]
 k_s Nikuradse bodemruwheid ($k_s=2,5 \cdot d_{50}$) [m]

De resultante bodemschuifspanning als gevolg van zowel stroming als golven bestaat uit een stationaire component veroorzaakt door de stroming en een oscillerende component veroorzaakt door golven. Deze geschematiseerde vectoren zijn weergegeven in Figuur 6. Voor de gecombineerde bodemschuifspanning over een hydraulisch ruwe bodem heeft Soulsby (Whitehouse et al. 2000) de volgende formule opgesteld:

$$\tau_m = \tau_c \left[1 + 1,2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3,2} \right]$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{(\tau_m + \tau_w \cos \phi)^2 + (\tau_w \sin \phi)^2}$$



Figuur 6 Schematische weergaven van bodemschuifspanning veroorzaakt door stroming en golven.

Bodemveranderingen

Bodemveranderingen, erosie en sedimentatie, worden veroorzaakt door een horizontale variatie in sedimenttransport:

$$(1 - p) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y}$$

waarin: S_x, S_y Sedimenttransport in resp. x en y richting [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$]
 p poriëngehalte [-]

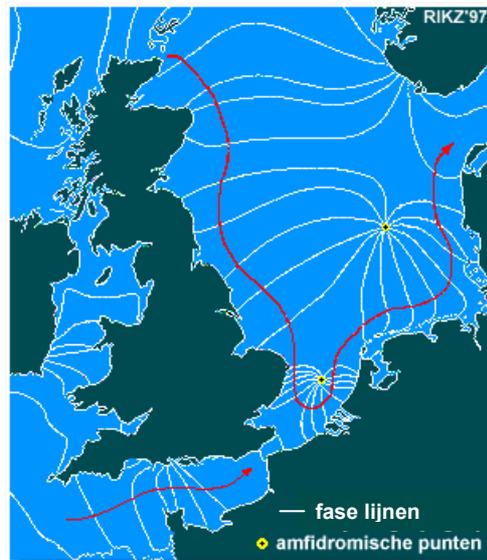
Het gedrag van sediment ten aanzien van erosie wordt voor een belangrijk deel bepaald door de cohesie van de bodem. Niet cohesief bodemmateriaal heeft een granulaire structuur en vormt geen coherente massa. In dat geval is de korrelgrootte en gewicht bepalend voor de weerstand tegen erosie. Cohesief bodemmateriaal dankt deze samenhang aan elektrochemische krachten tussen de korrels. Of het bodemmateriaal zich cohesief gedraagt wordt voornamelijk bepaald door het kleipercentage. Slechts drie tot vijf procent klei zorgt al voor cohesief gedrag (Torfs, 1995). Panagiotopoulos e.a. (1997) hebben de kritische erosieschuifspanning van zand-slibmengsels gemeten en constateerden een verandering in erosief gedrag wat overeenkomt met een kritisch percentage klei van vijf tot tien procent. Houwing (2000) heeft hetzelfde gedaan in de Waddenzee en constateerde een kritisch percentage klei van vijf tot zeven procent. De verschillende onderzoeken komen dus redelijk overeen, waaruit geconcludeerd kan worden dat bij minder dan drie procent klei de grond zich granulair gedraagt en boven de tien procent cohesief.

Far-field

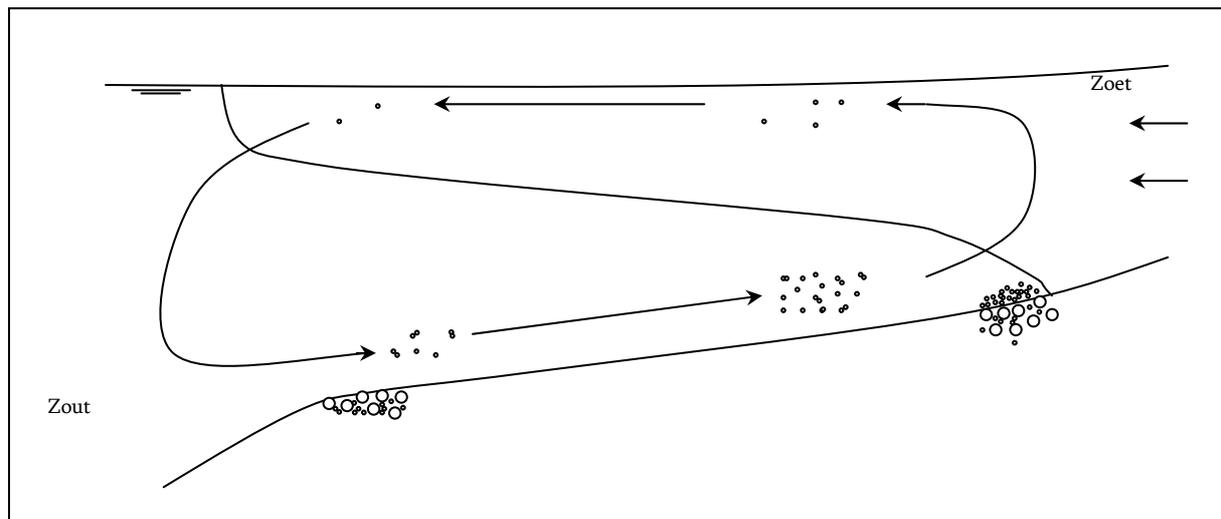
Dichtheidsstromen

De Rijn voert gemiddeld ongeveer 2.300 m^3 zoetwater per seconde af naar de Noordzee. Deze aanvoer van zoetwater zorgt voor een gradiënt in zoutgehalte waarbij het lichtere zoete water over het zwaardere zoute water heen stroomt. Deze gradiënt veroorzaakt een circulatie in het verticale vlak (zie Figuur 8) in de Maasmond, de invloed hiervan is te merken van de Maasgeul tot de Botlekhaven. De stroming langs de bodem zorgt voor een landwaarts gerichte sedimentstroom over de bodem. Omdat de slibconcentraties in de onderste helft van de waterkolom altijd hoger zijn bepaald de bodemstroming het netto sedimenttransport.

De aanvoer van zoet water van de rivieren zorgt langs de Nederlandse kust voor een horizontale saliniteitsgradiënt. Dit veroorzaakt een pluim van relatief zoetwater, die tot globaal 15 tot 30 km uit de kust reikt en de kust in noord-oostelijke richting volgt als gevolg van de Coriolis-kracht en het getij (zie Figuur 7) en wordt ook wel de Kustrivier genoemd. Langs de Nederlandse kust, ten noorden van Hoek van Holland, ontstaat hierdoor een naar de kust gerichte reststroming die een naar de kust gericht sedimenttransport veroorzaakt.

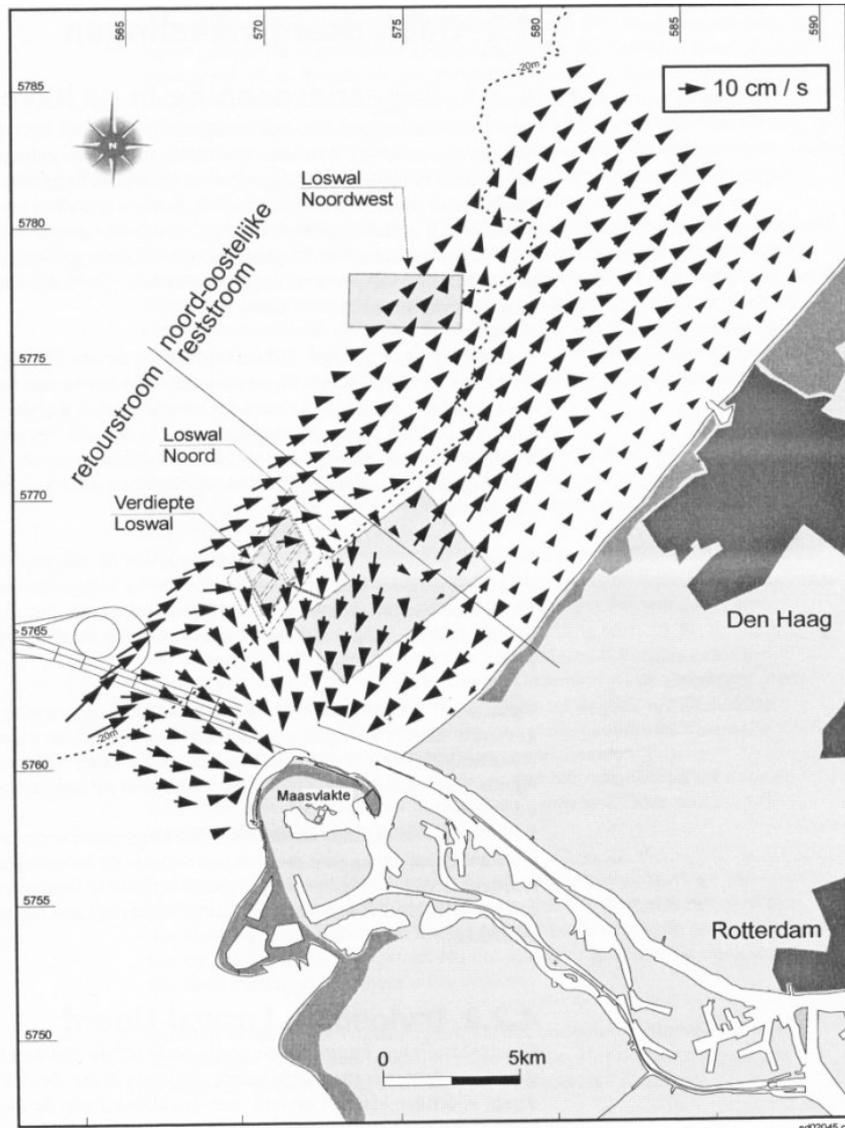


Figuur 7. Voortplanting getijde golf.



Figuur 8 Principeschets dichtheidsstroming in estuaria.

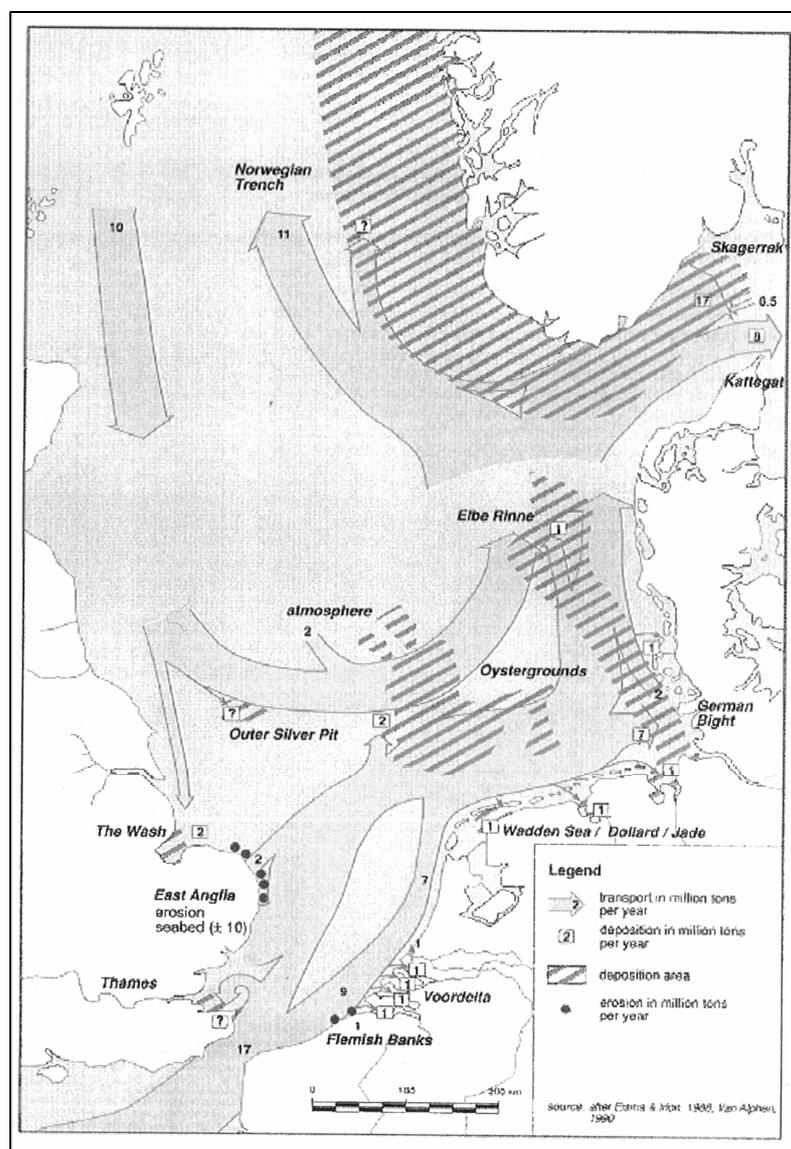
De Kok (1991) heeft voor Loswal Noord en Loswal Noordwest onder verschillende omstandigheden de waterbeweging en het slibtransport gemodelleerd. De reststroom (met reststroom wordt bedoeld de netto tijdsgemiddelde getijdestroming) tijdens de meest voorkomende omstandigheden is weergegeven in Figuur 9. In 1999 is met een vernieuwd model (Delft3D/Slib3D) en grotere reken capaciteit de berekening herhaald (zie de Kok en Stutterheim, 2000). Hoewel de berekende retourpercentages behoorlijk verschillen met die in 1991, kan aangenomen worden dat de waterbeweging voldoende betrouwbaar is om de richting van slibtransport aan te geven.



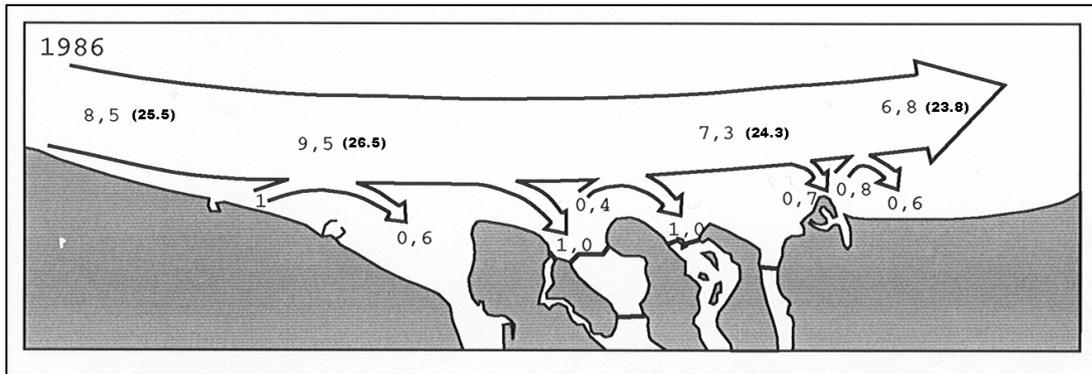
Figuur 9 Reststroming op 7 meter boven de bodem bij zuidwestenwind van 5 m/s. (de Kok, 1991)

De eigenlijke bronnen van het slib in de Nederlandse kusttrivier zijn niet goed bekend. Aangenomen wordt dat het grootste deel door het zuidelijke deel van het Nauw van Calais de Noordzee binnen komt. De schattingen van de slibflux door het Nauw van Calais variëren van 13 tot 45 miljoen ton droge stof per jaar (De Kok, 2004). De grote variatie heeft vooral te maken met de variabiliteit van wind en golven.

Slibtransport treedt vooral op in suspensie, waardoor het de stromingspatronen goed volgt. Verschillende studies (van Alphen, 1990) laten zien dat de concentraties sterk variëren in plaats en tijd. Het jaarlijks gemiddelde sedimenttransport langs de Nederlandse kust varieert sterk (minstens 50%) van jaar tot jaar. Dit is erg afhankelijk van het aantal en de duur van stormen, zo is de flux in de winter minstens vijf keer zo groot als in de zomer. Van Alphen constateert een jaarlijks gemiddelde longshoreflux van ongeveer zeven tot negen miljoen ton per jaar. Salden (1998) constateert dat de sedimenttoevoer door de straat van Dover drie keer groter is dan in voorgaande berekeningen. Hij stelt hiermee de balans van Van Alphen bij en komt op een jaarlijks gemiddelde longshoreflux van ongeveer 24 miljoen ton per jaar. Een overzicht wordt gegeven in Figuur 10 en Figuur 11.



*Figuur 10. Sedimentflux van fijn sediment in de Noordzee.
(Salden, 1998, Eisma, 1981 en Van Alphen, 1990)*

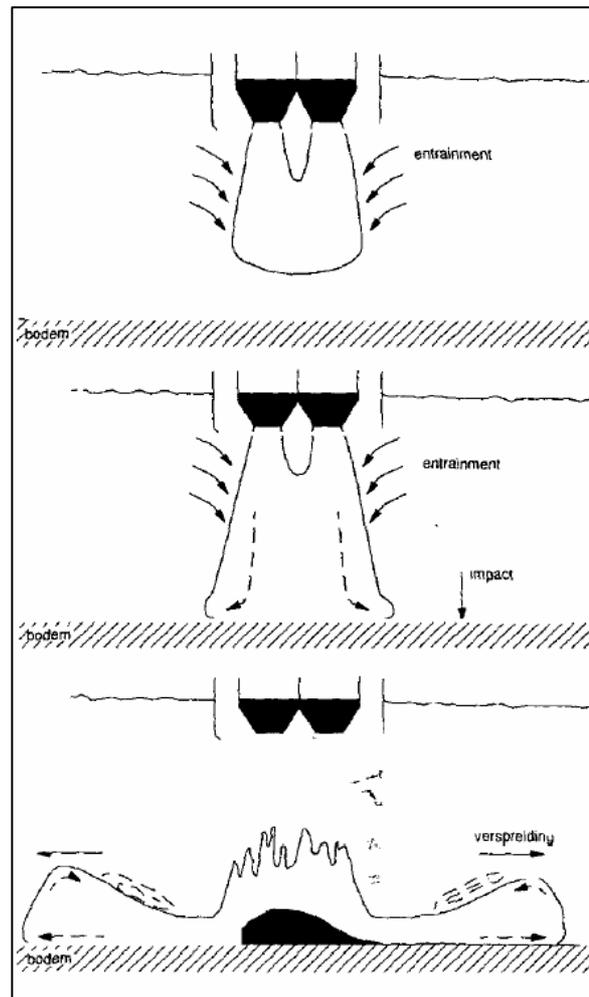


Figuur 11 Sedimentflux voor de Belgische en Nederlandse kust in miljoen ton per jaar, opgesteld door Van Alphen (1990) en bijgesteld door Salden (1998) (waarden tussen haakjes).

5 Storten van baggerspecie

Het storten van baggerspecie op de Verdiepte Loswal wordt gedaan door bodemdeuren. Bokunowicz (Van Heuvel, 1988) heeft voor dit proces een duidelijke schematische voorstelling gegeven (zie Figuur 12.). Hierin is aangegeven dat een deel van de baggerspecie met hoge dichtheid, direct op de stortlocatie blijft liggen, dit sediment zal over het algemeen niet gevoelig zijn voor erosie. Het gedeelte met lagere dichtheid zich zal verspreiden over een oppervlak met een diameter van 150 tot 200 meter. Dit is voor deze situatie afgeleid van het onderzoek naar de verspreiding van baggerspecie van Van Heuvel (1988). Voor cohesief materiaal kan aangenomen worden dat de baggerspecie met hogere dichtheid zich niet verder heeft verspreid en niet gevoelig is voor erosie. In het onderzoek naar het verlies van baggerspecie zal dus vooral gekeken worden naar de baggerspecie die zich verspreid heeft op de loswal.

Tijdens het storten van baggerspecie zal een deel van de specie in de waterkolom achterblijven. Dit wordt het potentiële stortverlies genoemd. De grootte hiervan is voornamelijk afhankelijk van de stortmethode, de lokale omstandigheden en de fysische eigenschappen van het gestorte materiaal. Een deel van de zwevende stof zal alsnog in de put bezinken. Onder invloed van de stroming zal ook een deel buiten de put terecht komen. Het deel van het potentiële stortverlies, dat buiten de put terecht komt, is het actuele stortverlies. Naast het actuele verlies kan een deel van de gestorte specie ook door erosieverlies tot buiten de put worden verspreid. Dit wordt behandeld in paragraaf 5.4.



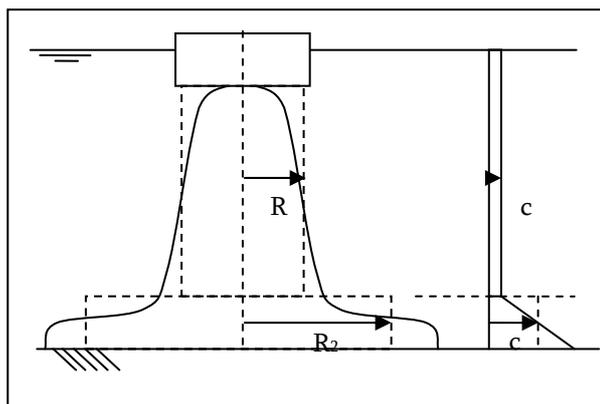
Figuur 12. Het stortproces in drie fasen volgens Bokunowicz.

Zowel het Havenbedrijf Rotterdam N.V.(HbR) als Rijkswaterstaat (RWS) storten op mechanische wijze met onderlossers. De dichtheid echter van de baggerspecie in de beun van de sleephopperzuigers (en daarmee het gedrag ervan tijdens het storten) verschilt erg veel. De jaarlijks gemiddelde dichtheid in beun van baggerspecie uit de havenbassins en voor baggerspecie uit de rivier en de Maasmond (RWS) zijn bepaald in hoofdstuk 6 en weergegeven in Tabel 2. De baggerspecie met hogere dichtheid in beun zal zich gedragen volgens de reguliere theorie voor het storten van baggerspecie door bodemdeuren (AKWA, 2001). Dat wil zeggen dat de baggerspecie in een dichtheidsstroom naar beneden valt. Als de specie de bodem raakt zal het als gevolg van de contactklap zich radiaal verspreiden. Storten van baggerspecie met lage dichtheid in beun kan beter vergeleken worden met hydraulisch gestorte specie, door de hoge vloeibaarheid van de baggerspecie. Specie met een lage stortdichtheid kan gemakkelijk mengen met het omgevingswater, waardoor het stortverlies toeneemt.

Herkomst	Dichtheid in beun	Dichtheid droge stof
Havens (HbR)	1220 kg/m ³	320 kg/m ³
Vaarwegen (RWS)	1400 kg/m ³	650 kg/m ³

Tabel 2.

Ruimtelijke afmetingen van de slibwolk die ontstaat tijdens het storten van baggerspecie, kunnen worden beschreven als een driedimensionale Gausskromme. Vorm en grootte van de slibwolk zijn afhankelijk van de stortmethode. De verdeling van de zwevende stofconcentraties over de waterdiepte heeft dezelfde vorm als de Gausskromme die de ruimtelijke afmetingen beschrijft. De hoogste concentraties zijn te vinden in de onderste waterlaag net boven de waterbodem. De schematisatie en werkelijke contouren van de slibwolk zijn in combinatie met de zwevende stofconcentratie afgebeeld in Figuur 13. De concentratieverhoging zijn in het AKWA (2001) onderzoek gemeten, voor de bovenste laag (c_1) bedraagt dit circa 30 tot 50 mg/l. In het onderste deel, vlak boven de bodem, kan de zwevende stofconcentratie toenemen tot 200 a 500 mg/l, waarbij de gemiddelde concentratie circa 100-200 mg/l bedraagt (AKWA, 2001). De verhouding tussen de hoogte van het onderste en bovenste deel van de waterkolom bedraagt 1:5 a 1:10.



Figuur 13 Karakteristiek slibwolk na storten met een onderlosser en concentratieprofiel zwevende stof.

Het potentiële stortverlies in het bovenste deel van de waterkolom is verwaarloosbaar (circa 0,2%). Bijna al de zwevende stof bevindt zich in de onderste paar meter van de waterkolom. Het potentiële stortverlies, bij het storten door een onderlosser van baggerspecie met een dichtheid in beun van ongeveer 1400 kg/m^3 , bedraagt gemiddeld 3,5% (AKWA, 2001). Storten met lage dichtheid kan vergeleken worden met hydraulisch storten. Gegevens van hydraulisch storten in diep water zijn gebaseerd op één meting, waardoor het beeld niet erg betrouwbaar is. Aan de hand van deze meting wordt het potentiële verliespercentage geschat op 7% (AKWA, 2001).

De hoeveelheid slib in het bovenste deel van de waterkolom neemt in enkele tientallen minuten sterk af, in tegenstelling tot de concentratie in de onderste waterlaag. Afgezien van meevoering door stroming zal door uitzakken van de slibdeeltjes, na een uur nagenoeg geen zwevende stof meer in de bovenste laag te vinden zijn. Onder omstandigheden zonder stroming of golven is de hoeveelheid zwevende stof in de onderste waterlaag na één uur nog circa 10 tot 30% van de zwevende stof dat tijdens het storten in de waterkolom aanwezig was (AKWA, 2001). Het overige deel is bezonken.

Aangezien onbekend is in welke getijfase en onder welke omstandigheden is gestort, is het niet zinvol om gedetailleerde berekeningen te maken voor de afgelegde weg van een deeltje. Aangenomen wordt dat door de turbulente omstandigheden als gevolg van stroming en golven het uitzakken wordt vertraagd en dat door stroming 75% van het potentiële stortverlies als gevolg van meevoering buiten de put terecht komt.

In Tabel 3. is het gewogen gemiddelde stortverlies weergegeven. Hieruit blijkt dat 3,5 % van de totale hoeveelheid (gewicht) gestorte baggerspecie nooit in de put terecht komt. Dit deel wordt met de stroom meegevoerd.

Herkomst	Aandeel in totale hoeveelheid	Pot. stortverlies	Actueel stortverlies	Gem. gewogen stortverlies
Havens (HbR)	1/3	7%	$0,75 \cdot 7 = 5\%$	3,5 %
Vaarwegen (RWS)	2/3	3,5%	$0,75 \cdot 3,5 = 3\%$	

Tabel 3. Stortverlies.

6 Hoeveelheden en samenstelling sediment

6.1 Gestorte hoeveelheid baggerspecie

Een deel van de baggerspecie, die in de Verdiepte Loswal wordt gestort, is afkomstig uit de havens van Rotterdam en wordt opgebaggerd door het HbR. Het andere deel is afkomstig uit de rivier, Maasmond en vaargeul (vaarwegen) en valt onder verantwoordelijkheid van RWS. Door het HbR worden de hoeveelheden opgegeven in kubieke meters, bepaald volgens de "halvebolmethode". Daarbij wordt tevens een aanname voor de dichtheid in beun gegeven, afhankelijk van de locatie waar de baggerspecie is opgebaggerd. Rijkswaterstaat bepaalt elektronisch de dichtheid van het opgezogen mengsel en doet opgaven in hoeveelheid droge stof.

De Verdiepte Loswal wordt gecreëerd door zandwinning. De hoeveelheid gewonnen zand is de bruto inhoud van de put. Een overzicht van hoeveelheden van zowel de zandwinning in de eerste put als de gestorte hoeveelheden baggerspecie is gegeven in Tabel 4. Over de gehele gebruiksfase is er 12 miljoen ton droge stof gestort in de eerste put van de Verdiepte Loswal; hetgeen overeen komt met 24 miljoen kubieke meter baggerspecie in beun. De foutmarge van de gestorte hoeveelheid wordt volgens experts geschat op $\pm 10\%$. De gegevens in Tabel 4 zijn verkregen van DNZ. DNZ is verantwoordelijk voor de baggeradministratie.

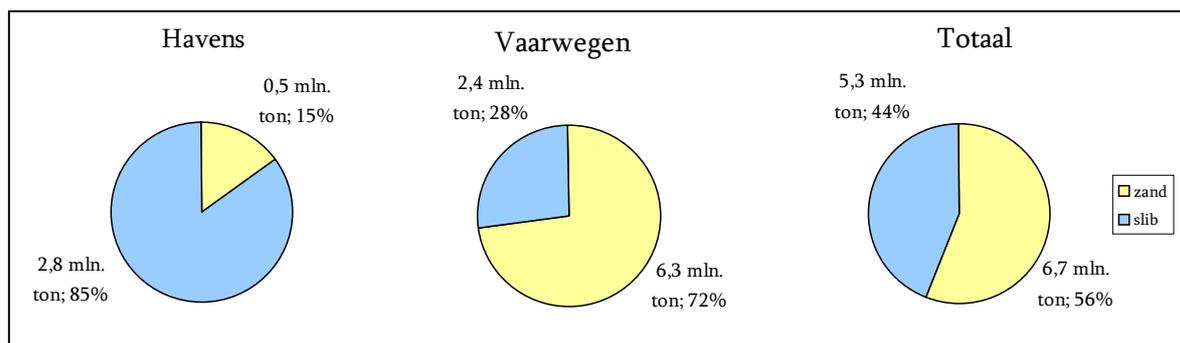
	Zandwinning x 1000 m3				Gestort x 1000 m3			Gestort x 1000 TDS		
	totaal	RWS	HbR	derden	totaal	RWS	HbR	totaal	RWS	HbR
					berekend	gemeten		gemeten	berekend	
1997	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1998	3057			3057	0	0	0	0	0	0
1999	1913			1913	0	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	1737	1100	637	899	694	205
2001	0	0	0	0	5037	4121	916	2958	2663	295
2002	0	0	0	0	6224	3135	3089	2872	1877	995
2003	14	0	14	0	6468	3409	3059	3374	2384	990
2004	0	0	0	0	4187	1662	2525	1870	1060	810
t/m week 23										
totaal	4.984	0	14	4.970	23.653	13.427	10.226	11.973	8.678	3.295

Tabel 4. Hoeveelheden van zandwinning en storten van baggerspecie in de eerste put van de Verdiepte Loswallen (bron: DNZ).

De hoeveelheid slib ($<63\mu\text{m}$) in de gestorte baggerspecie uit de havens is in het verleden bepaald door TNO-NITG en bedraagt 86% (Stutterheim, 2002-b). Voor de Maasmond en mond Calland- Beerkanaal bedraagt het slibpercentage 28%. Dit is bepaald door het nemen van 36 monsters in de meetbuis van de sleephopperzuigers. Deze percentages zijn 2 jaar geleden berekend maar aangenomen kan worden dat er weinig is veranderd aan de samenstelling van het materiaal dat opgebaggerd wordt. Het gewogen gemiddelde van het slibpercentage over de totale gestorte hoeveelheid bedraagt $44\% \pm 8\%$. Totaal is er dus ongeveer 5,3 miljoen ton droge stof slib ($<63\mu\text{m}$) en 6,7 miljoen ton droge stof zand gestort in de eerste put van de Verdiepte Loswallen. In Tabel 5. zijn de uit Tabel 4 bepaalde dichtheden gegeven van de gestorte baggerspecie.

Herkomst	Volume (m ³)	Massa (ton)	Dichtheid in beun	Dichtheid droge stof	Zandperc.
Havens (HbR)	10,2 mln.	3,3 mln.	1220 kg/m ³	320 kg/m ³	14%
Vaarwegen (RWS)	13,4 mln.	8,7 mln.	1400 kg/m ³	650 kg/m ³	72%

Tabel 5. Samenstelling in beun.



Figuur 14. Gestorte hoeveelheden.

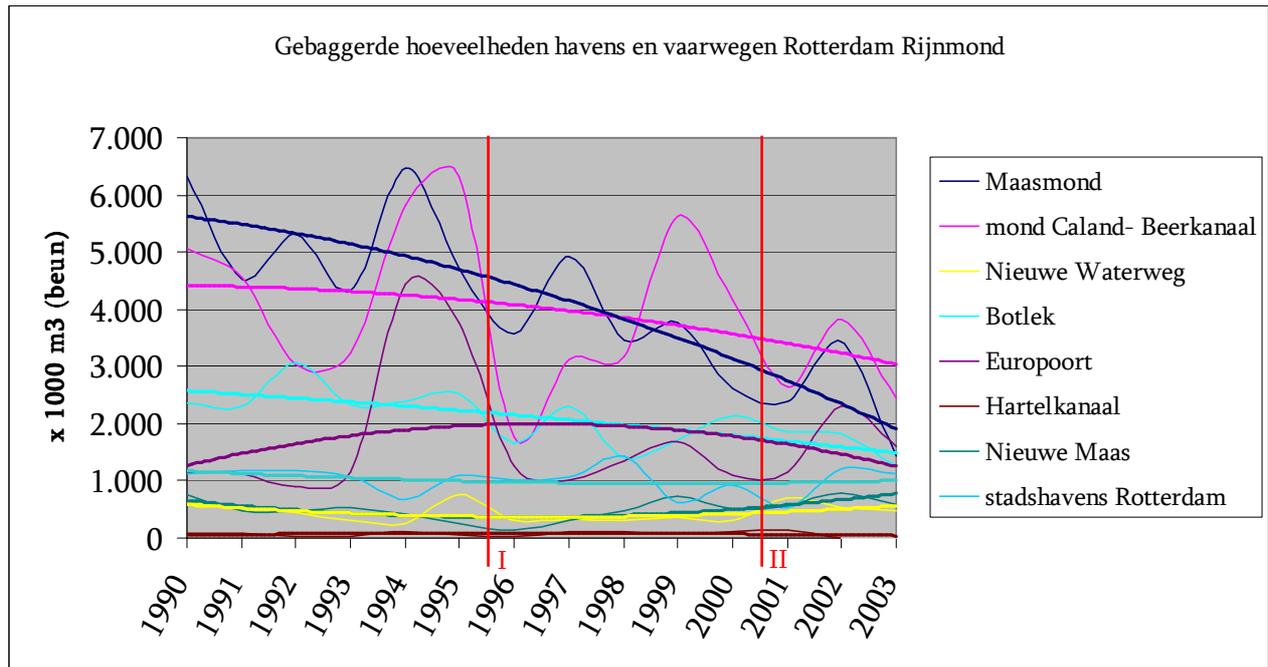
In Figuur 16 en Figuur 17 zijn per regio de jaarlijkse hoeveelheden onderhoudsbaggerwerk vanaf 1990 weergegeven. Aangezien de gebaggerde hoeveelheden zeer variabel zijn doordat veel onberekenbare factoren, zoals stormen en rivierafvoer, een invloed hebben op de aanslibbing in de haven, kan de invloed van het gebruik van de loswallen niet teruggezien worden in de aanslibbing van de haven. Wel valt op dat voor de Maasmond en de mond van het Caland- en Beerkanaal de trend dalend is. Deze daling is echter terug te zien vanaf 1990 en vertoont geen verband met het gebruik van de Loswallen. Het moment waarop gestopt is met storten op Loswal Noord en het moment waarop gestart is met storten in put één van de Verdiepte Loswal zijn aangegeven in Figuur 16. Aangezien de hoeveelheid onderhoudsbaggerwerk in de Maasmond en de mond van het Caland- en Beerkanaal afneemt, kan geen negatieve invloed van het storten van baggerspecie in de Verdiepte Loswal op de aanslibbing in de regio Rijnmond terug gevonden worden.



Figuur 15. Overzicht baggervakken.

In Figuur 15 is een overzicht gegeven van de baggervakken waarin is aangegeven welk deel tot vaarwegen (beheersgebied RWS) en welk deel tot havens (beheersgebied HbR) wordt gerekend. Tevens zijn de hier gebruikte baggervakken aangegeven:

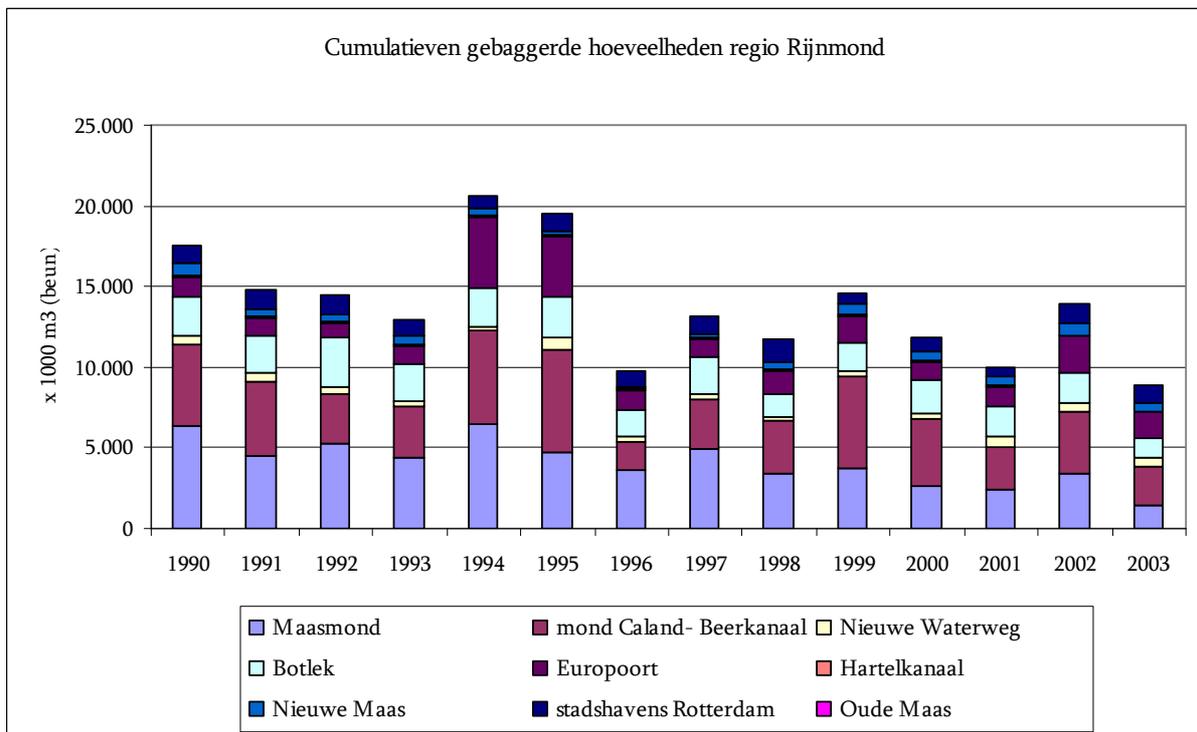
1. Maasmond (vak F)
2. Mond Caland- Beerkanaal (vak E)
3. Nieuwe Waterweg
4. Botlek
5. Europoort (inclusief Maasvlakte)
6. Hartelkanaal
7. Nieuwe Maas
8. Stadshavens Rotterdam
9. Oude Maas



Figuur 16. Gebaggerde hoeveelheden havens en vaarwegen Rijnmond (dikke lijken zijn trendlijnen).

I: einde storten Loswal Noord, begin storten op Loswal Noordwest.

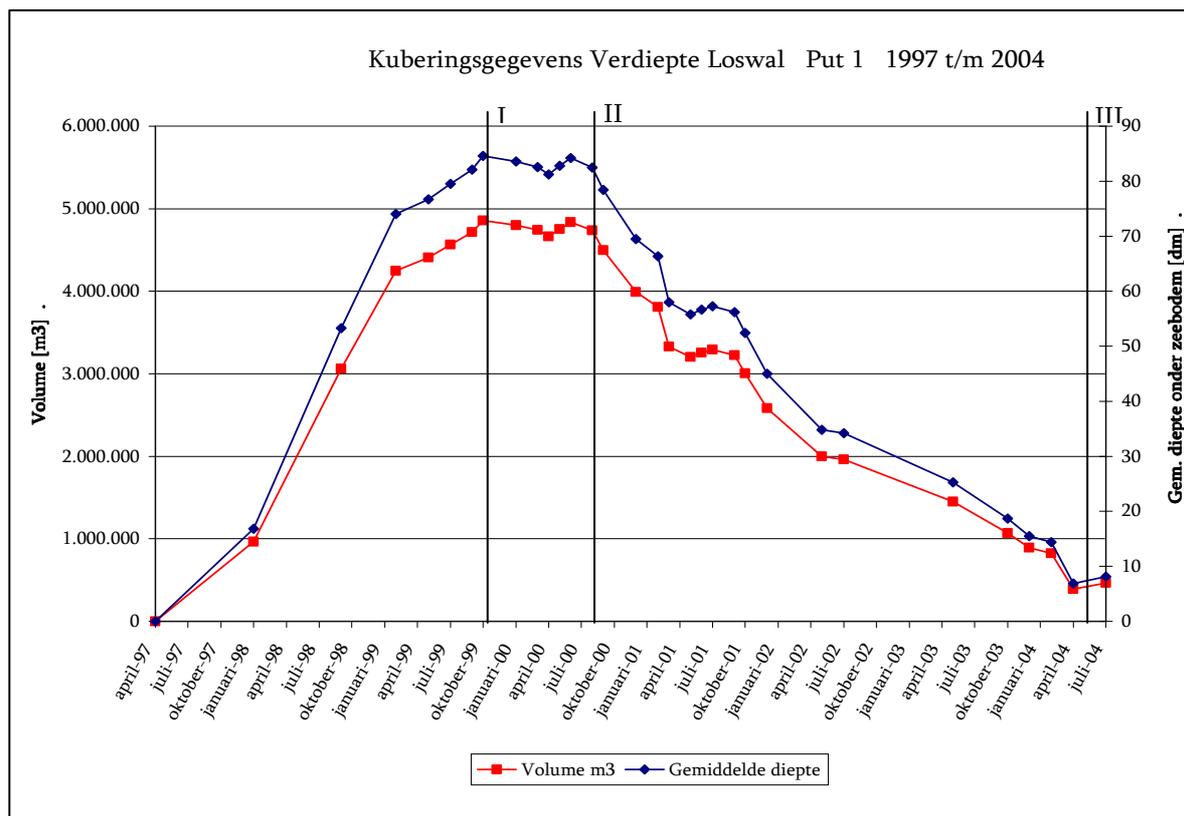
II: begin storten in eerste put Verdiepte Loswal (Loswal Noordwest blijft in gebruik).



Figuur 17. Cumulatieve gebaggerde hoeveelheden regio Rotterdam Rijnmond.

6.2 Volumebepaling uit lodingen

Door Directie Noordzee (DNZ) van Rijkswaterstaat wordt er elk kwartaal een loding gedaan van de Verdiepte Loswal. De laatste loding die beschikbaar is voor dit onderzoek is uitgevoerd op 7 en 8 juli 2004. Uit deze lodingen is de gemiddelde diepte per put berekend en is een inhoudsberekening gedaan om het volume van de put te bepalen ten opzichte van de originele zeebodem. Deze informatie is voor alle lodingen vanaf het begin van zandwinning tot nu uitgezet in Figuur 18. Hierin is te zien dat het grootste volume (tussen einde zandwinning, eind 1999 en eerste storting, augustus 2000) 4,9 miljoen kubieke meter bedraagt. Dit komt goed overeen met de hoeveelheid zand die is gewonnen in de eerste put (zie Tabel 4).



Figuur 18 Bron: DNZ.

In Figuur 18 zijn de momenten aangegeven waarop de put gereed is gekomen (I), wanneer is gestart met storten (II) en het moment waarop gestopt is met storten (III). Uit Figuur 18 valt op dat de continue afname van volume tussen aanvang storten en het beëindigen van het storten in put één onderbroken wordt door een kleine toename van volume tussen mei 2001 en juli 2001. Aangezien de gestorte hoeveelheden momenteel nog slechts per jaar beschikbaar zijn en nog niet gedetailleerder door de beheerder kunnen worden opgegeven is een goede vergelijking niet mogelijk. In de periode van juni tot september 2001 is er niet gestort op de Verdiepte Loswal, uit de afgeleide van de inhoud is berekend dat er in die periode 74 m³ per uur is geërodeerd.

Volgens de vergunning mag er baggerspecie gestort worden in de Verdiepte Loswal totdat het niveau van 1 meter onder de originele bodem is bereikt. In Figuur 18 is te zien dat er gestopt is met storten nadat in mei 2004 geconstateerd werd dat dit niveau was bereikt. Het volume dat in de eerste put door baggerspecie in beslag wordt genomen is op 8 juli 2004 circa 4,35 miljoen kubieke meter.

Een vergelijking tussen de gestorte hoeveelheden en het verloop van de massa in de put kan worden gemaakt nadat de dichtheid van de baggerspecie in de put is bepaald.

6.3 Geotechnisch onderzoek

Op 1,2,3 en 7 september 2004 is door TNO-NITG op het ms Arca (Figuur 19) van Rijkswaterstaat directie Noordzee (DNZ) een uitgebreid geotechnisch onderzoek uitgevoerd. Het doel hiervan was om de fysieke toestand van het in de Verdiepte Loswal gestorte sediment vast te stellen en daarnaast het slibpercentage in de omgeving van de eerste Verdiepte Loswal en in de overige gedeeltelijk op diepte gebrachte loswallen te bepalen. In deze paragraaf wordt een korte beschrijving van de uitvoering van het onderzoek en de relevante resultaten weergegeven. Meer informatie over het geotechnisch onderzoek en alle resultaten zijn te vinden in de rapportage van TNO-NITG (Klugt et al, 2004). Tevens is bij het betreffende rapport een CD met alle digitale gegevens beschikbaar.



Figuur 19 ms Arca

Uitvoering

Ten behoeve van het geotechnisch onderzoek zijn 21 steekboringen met een vibrocorer (bijlage 2) en acht boxcoremonsters (bijlage 2) genomen. Daarnaast zijn er negen seismische opnamen gemaakt. Van de 21 steekboringen zijn er vijf in de eerste put genomen en vier direct aan de randen van de put. Daarnaast zijn in de putten 2,3,4 en 5 elk twee steekboringen genomen, 2 langs de as van de dominante getijstrooming (Zuid-Noord) en 1 dwars daarop. Een overzicht van de bemonsterde locaties is te vinden in bijlage 1. Vier Boxcoremonsters zijn in put 1 genomen en in de putten 2,3,4 en 5 elk één monster. Voor een goede vergelijking zijn alle Boxcoremonsters genomen op dezelfde locaties als de steekboringen. Een week voor de monsternamen is begonnen met het storten van baggerspecie in de zesde put. In deze put zijn daarom geen monsters genomen.

De steekboringen en Boxcoremonsters zijn met steekringen (39 monsters) en met een Multi-Sensor Core Logger (continue diepteprofielen) geanalyseerd op dichtheid. Ter bepaling van het slibgehalte en overige texturale kenmerken is de korrelgrootteverdeling van 48 monsters gemeten met behulp van een Malvern laserparticlesizer. Tenslotte zijn de kernen digitaal gefotografeerd en lithologisch beschreven. Een uitgebreide beschrijving van de uitvoering is te vinden in de rapportage van TNO-NITG (Klugt et al, 2004). Er is door TNO-NITG ook een seismische opname van de putten gemaakt met behulp van een X-star systeem. Dit instrument zendt geluidsgolven de zeebodem in, waar deze ten dele worden weerkaatst op de grensvlakken tussen de lagen en vervolgens weer door het systeem worden opgevangen. Dit systeem heeft helaas niet het gewenste resultaat geleverd en geen extra inzicht kunnen verschaffen in de opbouw van materiaal. De dikke lagen baggerspecie werden door de seismische golven niet volledig gepenetreerd door gasvorming in de baggerspecie. Seismisch onderzoek is hier erg gevoelig voor, slecht enkele volumepercenten gas in het sediment is voldoende om het signaal te absorberen. Ook dunne lagen (in put 3, 4 en 5) slib zijn niet waarneembaar in het seismisch onderzoek, dit komt doordat deze dunne lagen binnen de harde bodemreflectie vallen.

Dichtheid

De data verkregen uit het geotechnisch onderzoek van TNO-NITG zijn ‘ruwe data’, dat wil zeggen niet gecorrigeerd voor eventuele meetafwijkingen. Twee dingen vallen op bij de verkregen dichtheden uit de monsters. Allereerst het verschil tussen de gemeten dichtheid in-situ en het gemeten gehalte droge stof (zie Tabel 6). Ten tweede zijn de dichtheden in-situ hoger dan verwacht werd aan de hand van ervaring met onder andere de slufster. In samenwerking met TNO-NITG zijn de verschillende resultaten vergeleken en is een betrouwbaarheidsanalyse gemaakt.

Locatie	Boxcore (0-0,5 meter)				Vibrocore 0-1meter			
	dichtheid bulk monster		dichtheid droog monster		dichtheid bulk monster		dichtheid droog monster	
	gemeten	berekend	gemeten		gemeten	berekend	gemeten	
M0 (D5)					1520	1565	880	
M1 (E6)	1500	1657	1030		1680	1792	1250	
M2 (C6)	1750	1731	1150		1880	1878	1390	
M3 (C4)	* 1870	* 1761	* 1200		1820	1817	1290	
M5 (E4)	1600	1700	1100		1480	1627	980	

* onbetrouwbare waarde

Tabel 6. Dichtheid toplaag put 1 (in kg/m³).

De gemeten in-situ dichtheden zijn structureel lager dan de uit de hoeveelheid droge stof berekende in-situ dichtheden. De relatie tussen droge stof gehalte en in-situ dichtheid is te vinden in bijlage 3. Het verschil kan verklaard worden doordat het aannemelijk is dat de monsters tijdens de analyse niet volledig waren verzadigd met water. Dit betekent dat gerekend moet worden met de hoeveelheid droge stof per kubieke meter en met de daaruit berekende in-situ dichtheid.

De resultaten van de verschillende methoden waarmee de dichtheden zijn bepaald, zijn voor de boringen in put 1 gegeven in bijlage 4. In bijlage 6 is een overzicht gegeven van de dichtheden in de bovenste laag van de eerste put. Deze dichtheden zijn bepaald uit boxcoremonsters.

Alle gemeten dichtheden zijn hoger dan men zou verwachten op grond van bestaande stort- en consolidatietheorieën. Bij geotechnisch onderzoek in de periode 2000 tot 2002 zijn door TNO-NITG tevens deze hoge dichtheden waargenomen (Klugt, 2001), maar toen is daar geen verklaring voor gevonden. Het is de vraag of de in de boxcore en vibrocore monsters aangetroffen dichtheden de werkelijke in-situ dichtheid in de put weergeven. Een grotere dichtheid in het monster kan gedeeltelijk worden verklaard door het volgende: bij het indrukken van de pijpjes (PVC buis met diameter van 100 mm) in het boxcore monster (zie Figuur 20) werd een verkorting van de materiaalkern van gemiddeld 13% waargenomen. Deze compactie bleek niet reversibel aangezien de verkorting tijdens de analyse enkele weken later nog steeds dezelfde verkorting toonde. Het lijkt verantwoord om voor het werkelijke droge stofgehalte een correctie toe te passen die overeenkomt met de aangetoonde compactie die veroorzaakt wordt door de monstername.



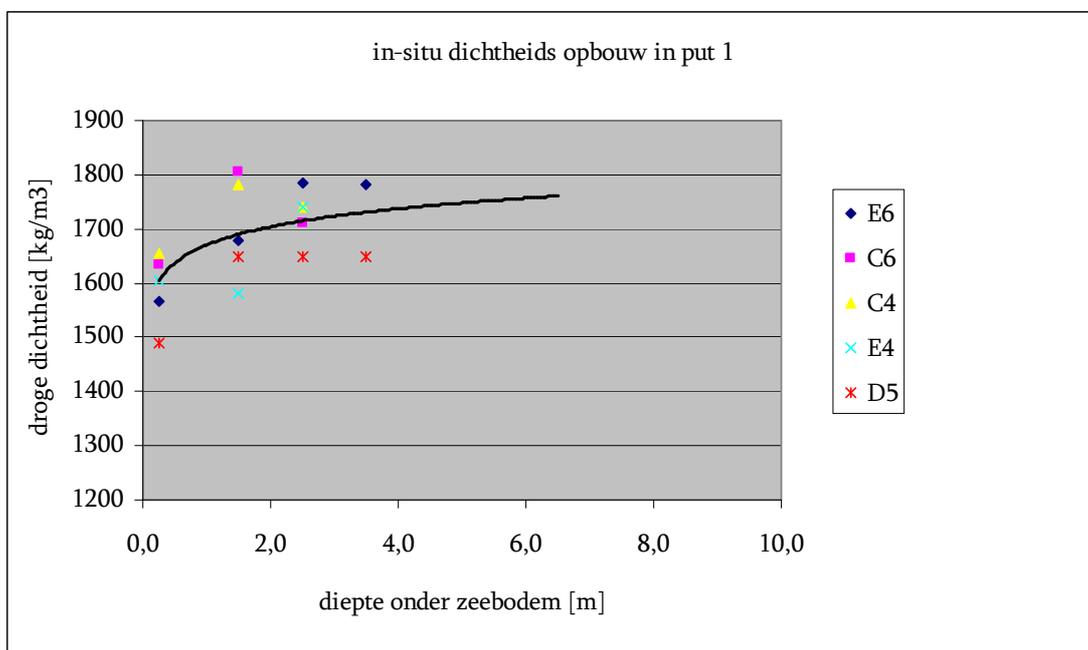
Figuur 20 Indrukken van een steekbuis in het box core monster, vervolgens wordt de steekbuis verwijderd en de overige grond verwijderd.

De steekboring op locatie M5 (E4) is gedaan op een locatie waar uit peilingen bekend was, dat de laagdikte van het gestorte sediment 4,5 meter is. De opbrengst van de steekboring was 3,30 meter gestort materiaal met daaronder schoon zand. De boring heeft dus de bodem van de put gehaald maar niet de volledige sliblaag bemonsterd. Het verschil tussen de kernlengte en de sliblaag is 28%. Verondersteld wordt dat de vibrocorer de bovenste laag van ongeveer een halve meter verdringt als gevolg van de weerstand die de core-catcher biedt. Dit is af te leiden uit het dichtheidsverloop over de kernlengtes van de

vibrocoremonsters en de boxcoremonsters. Door het boxcoremonster (0,5 meter) als toplaag te beschouwen en het vibrocore monster als het vervolg, ontstaat er voor de meeste monsterlocaties een logisch dichtheidsverloop over de diepte. Ongeveer 11%³ wordt in dit geval dus verdrongen, de rest van het verlies zou veroorzaakt kunnen zijn door compactie door de interne schachtweerstand van de monsterbuis. Dit komt overeen met bovenstaande bevinding bij het indrukken van een buisje in de boxcoremonsters.

Hieruit volgt dat bij het nemen van de monsters een compactie tussen de 13⁴ en 20%⁵ optreedt. Een compactie van 15% lijkt het meest waarschijnlijk. Dit betekent dat de hoeveelheid droge stof per kubieke meter, zoals bepaald in vibrocore monsters, met 15% naar beneden gecorrigeerd moet worden. Omgerekend naar in-situ dichtheid is dit een correctie van 6%.

De gecorrigeerde in-situ dichtheden in de eerste put van de Verdiepte Loswal, bepaald uit de boringen en boxcoremonsters, zijn weergegeven in Figuur 21. Hiervan is de gemiddelde waarde bepaald om een schatting van de totale inhoud van de put te kunnen maken. De gemiddelde dichtheden voor en na correctie staan in Tabel 7.



Figuur 21. In-situ dichtheid put 1.

	ρ_{droog}	$\rho_{\text{in-situ}}$
Gemeten en berekende dichtheid	1390 kg/m ³	1870 kg/m ³
Gecorrigeerde dichtheid	1180 kg/m ³	1750 kg/m ³

Tabel 7. Gemiddelde dichtheid put 1,

Tevens is in tabelvorm in bijlage 5 een overzicht gegeven van alle dichtheden van de bovenste laag bepaald uit vibrocore en boxcoremonsters. Hierin zijn naast de gemeten dichtheden, de gecorrigeerde dichtheid droge stof gegeven en de daaruit berekende (zie Bijlage 3) gecorrigeerde dichtheid in-situ.

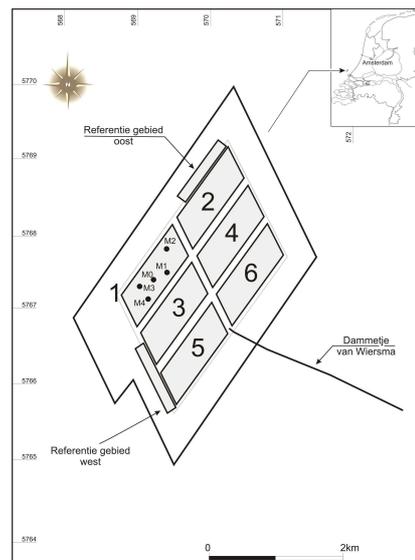
³ $0,5 / 4,5 \cdot 100\% = 11\%$

⁴ Compactie van boxcoremonsters

⁵ Verlies min minimale verdringing = maximum van 28% - (11% ± 3)

Materiaalsamenstelling

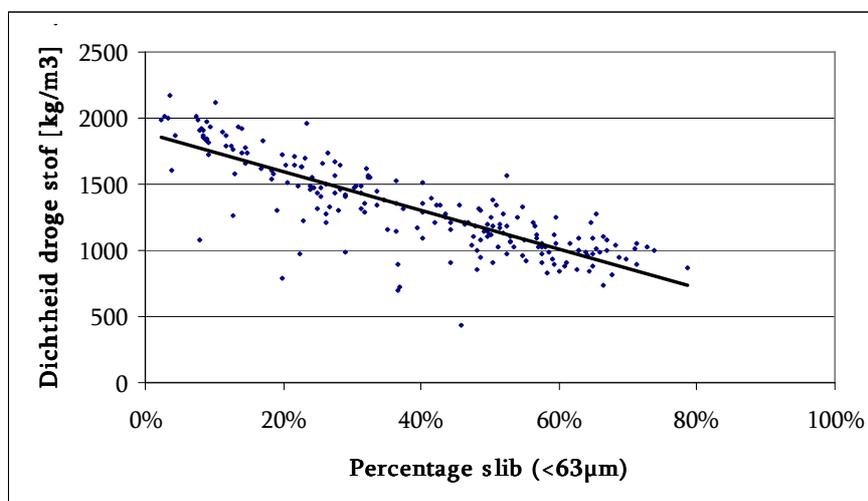
Het materiaal aangetroffen in de boringen kan verdeeld worden in drie categorieën: natuurlijk gesedimenteerd Holoceen sediment, natuurlijk gesedimenteerd Pleistoceen sediment en gestort sediment. Het natuurlijk gesedimenteerde Holoceen sediment vormt de toplaag van enkele kernen buiten de put. Het bestaat uit zwak tot matig siltig, zeer fijn tot matig grof zand (105-300 μm) met een spoor schelpfragmenten en schelpen. Het natuurlijk gesedimenteerde Pleistocene sediment vormt de basis van deze omgeving. Het bestaat uit scheef gelaagd, matig tot uiterst grof zand (210-2000 μm) met een spoor verweerde schelpfragmenten. Het sediment in de eerste put van de Verdiepte Loswal bevat veel fijnkorrelig materiaal en is veelal zeer slap tot matig stevig. Het bestaat voornamelijk uit met silt en klei gelaagd zand, met zand gelaagde silt en klei, en zandige en siltige klei met organisch materiaal. Kernbeschrijvingen kunnen in de bijlage van de rapportage van TNO-NITG (van der Klugt et al, 2004) gevonden worden.



Figuur 22.
Overzicht putnummers.

Van alle kernen zijn uit elke meter representatieve monsters genomen voor het bepalen van de korrelgrootte verdeling. Van deze monsters is de korrelgrootteverdeling gegeven en is het percentage fijn materiaal (<63 μm) bepaald (zie bijlage 9 en 10). In bijlage 11 zijn de korrelgrootteverdelingen van alle monsters uit de bovenste laag van de eerste put weergegeven en in bijlage 12 en 13 voor de punten C4 en E6 (beiden in put 1) over de diepte.

De korrelgrootteverdeling in de eerste put van de Verdiepte Loswal is sterk heterogeen. Het percentage fijne delen (<63 μm) varieert tussen 8 en 57 %, het gemiddelde over de gehele put is 29%. Het percentage fijne delen in de bovenste laag van de eerste put is gemiddeld 51%, dit is voor de verschillende bemonsteringslocaties weergegeven in bijlage 7. Opvallend is dat monster M1/E6 uit veel grover materiaal bestaat dan de overige monsters. Verwacht kan worden dat de gemiddelde korrelgrootte toeneemt met de bodemdikte, aangezien er meer fijne delen eroderen naarmate de waterdiepte kleiner wordt. Dit blijkt echter niet uit het geotechnisch onderzoek. Enkele monsters laten zelfs een afname van de korrelgrootte naar de hoogte boven de putbodem zien. Door het hoge zandpercentage (71%) in de Verdiepte Loswal kan verklaard worden waarom de dichtheid veel hoger is dan in bijvoorbeeld de Slufter (van Tol, 2004 – persoonlijke communicatie). In Figuur 23 zijn, van alle monsters uit de jaarlijkse monstercampagne in het Rijnmond gebied, de dichtheden uitgezet tegen het percentage slib (<63 μm). Hierin is terug te zien dat de dichtheid toeneemt met een toenemend percentage zand.



Figuur 23. *Dichtheid versus percentage slib, monstercampagne 2004 Rotterdam Rijnmond.*

Put 2,3,4,5 en 6

In het geotechnisch onderzoek is ook de omgeving van de eerste put van de Verdiepte Loswal meegenomen. In put twee werd ten tijde van het geotechnisch onderzoek zand gewonnen tot twee meter beneden de zeebodem. Deze laag bestaat uit natuurlijk gesedimenteerd Holoceen sediment met een D_{50} van 250 μm . Hieronder is grover Pleistoceen sediment te vinden.

Put drie is verlaagd tot gedeeltelijk 4 meter onder de zeebodem. Op het diepste punt (G4) bevindt zich ongeveer 40 cm zeer slappe siltige klei die organisch materiaal bevat. De korrelgrootteverdeling ($D_{50} = 250 \mu\text{m}$) komt niet goed overeen met de kernbeschrijving. Dit geeft de indruk dat in put vijf in beperkte mate gestort sediment is terechtgekomen.

Ongeveer 50% van put 4 is tot ruim vier meter beneden de zeebodem verdiept. Dit gedeelte bevat een laag van 0,5 tot 1,0 meter zeer slappe siltige klei waarvan de toplaag organisch materiaal bevat. De totale hoeveelheid sediment die terecht is gekomen in put vier wordt geschat op 140.000 m^3 . Het materiaal bestaat voor 77% uit silt en klei ($<63 \mu\text{m}$) met een in-situ dichtheid van 1560 kg/m^3 . Deze hoge dichtheid is opmerkelijk aangezien het zeer fijn sediment betreft. Natuurlijke sedimentatie heeft hier dus voor een hoge pakkingsgraad gezorgd. Verwacht wordt dat een aanzienlijke hoeveelheid van de fijne fractie uit de baggerspecie in put vier terecht komt. De hoeveelheid is echter verwaarloosbaar op de totale gestorte hoeveelheid ($10^{-6}\%$). Put vier ligt waarschijnlijk in de resulterende stroomrichting ten opzichte van put één.

Put vijf vertoont hetzelfde beeld als put vier. Het diepste punt van de put ligt ongeveer zes meter onder de zeebodem en is opgevuld met een laag van 40 cm zeer slappe klei. Het is hier opmerkelijk dat de korrelgrootteverdeling vrij grof materiaal aangeeft. Dit geeft de indruk dat in put vijf in zeer beperkte mate gestort sediment terecht is gekomen.

Omgeving

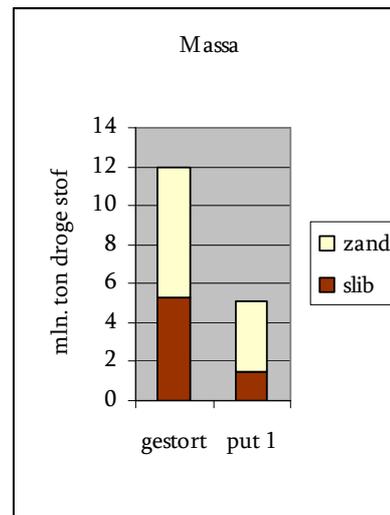
In de steekboring D1, 1000 meter ten zuidwesten van put één, is een kleine hoeveelheid sterk siltig sediment in de bovenste 40 cm van de zeebodem aangetroffen met enkele losse kleibrokjes aan de top. Steekboring D11, 1500 meter ten noordoosten van de eerste put, heeft een toplaag van 15 cm sterk siltige klei en bevat organisch materiaal. Deze laag is afgedekt met 10 cm sterk siltig zand. 500 meter ten Noordwesten (A5) van put één wordt geen invloed van gestorte baggerspecie waargenomen, de toplaag bestaat uit natuurlijk gesedimenteerd Holoceen sediment (zwak siltig zand).

Deze waarnemingen geven de indruk dat de overheersende transportrichting van het sediment zuidwest – noordoost loopt. Dit betekent dat de invloed van het storten ten noordoosten en oosten van de put veel groter is dan zuidwesten ervan. Ten noordwesten van de put is geen invloed waargenomen. Hier wordt in het hoofdstuk 'Far-field' meer aandacht aan besteed.

6.4 Resterende massa op zeebodem

Het volume van baggerspecie in de put is uit lodingen bepaald, met het geotechnisch onderzoek de hoeveelheid droge stof per kubieke meter. Aan de hand van deze gegevens kan een schatting voor de massa baggerspecie in de eerste put van de Verdiepte Loswallen gedaan worden. De massa baggerspecie in de eerste Verdiepte Loswal is $4,35 \cdot 10^6 \times 1180 = 5,13 \cdot 10^9$ kg.

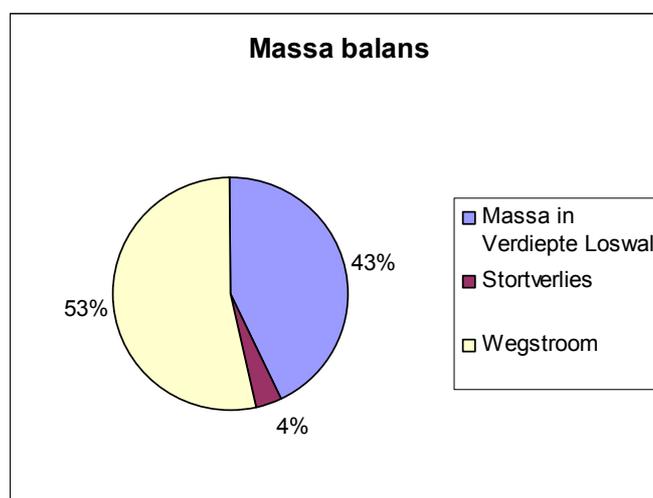
In paragraaf 6.1 wordt vastgesteld dat er 5,27 miljoen ton droge stof slib (<63 μ m) en 6,70 miljoen ton droge stof zand (>63 μ m) in de eerste put van de Verdiepte Loswal is gestort (Figuur 24, links). Uit de korrelgrootte analyse in het geotechnisch onderzoek blijkt 29% van de totale hoeveelheid baggerspecie in de put slib (<63 μ m) te zijn. Dat betekent dat er op dit moment 3,6 miljoen ton droge stof aan zand in de put aanwezig is en 1,5 miljoen ton droge stof aan slib (Figuur 24, rechts). Uiteindelijk is over de gehele gebruiksfase gemiddeld 46% van de totaal gestorte hoeveelheid zand en 72% van de totaal gestorte hoeveelheid slib niet in de put terug te vinden.



Figuur 24. Massa balans zand-slib.

6.5 Verliespercentage

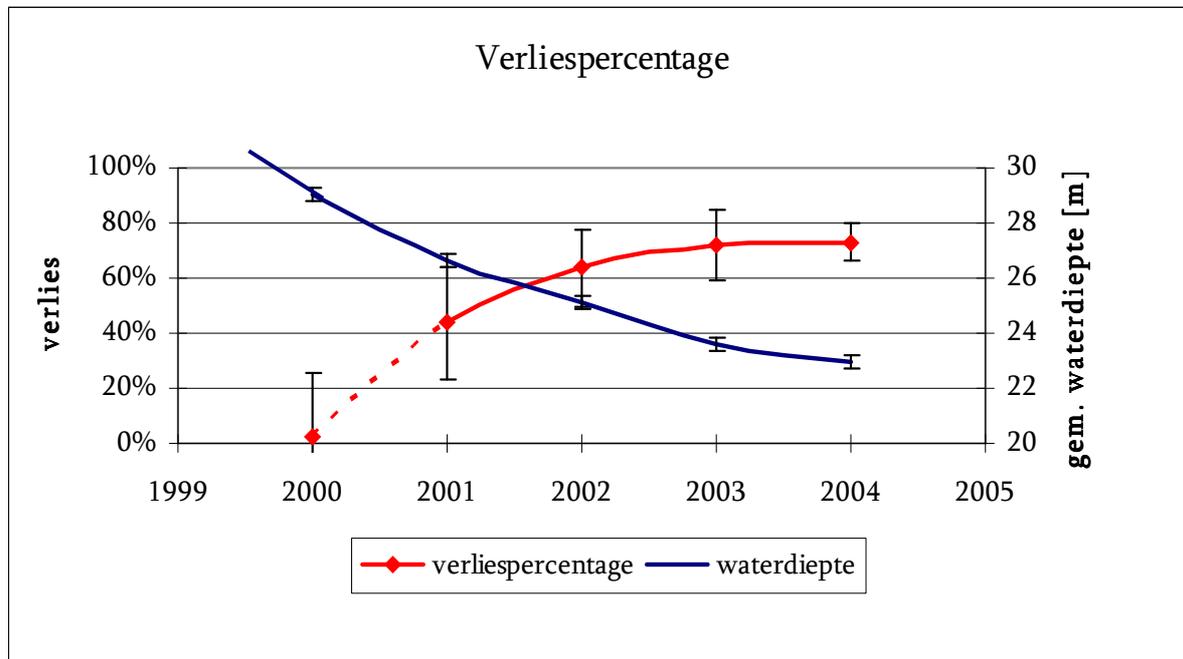
Uit de baggeradministratie is de totaal gestorte massa baggerspecie in de eerste put van de Verdiepte Loswallen bekend. In de voorgaande paragrafen is berekend hoeveel hiervan daadwerkelijk in de put is terecht gekomen. Het verliespercentage is gedefinieerd als de hoeveelheid baggerspecie die niet in de put wordt teruggevonden, uitgedrukt als percentage van de totale gestorte hoeveelheid.



Figuur 25. Massa balans

Over de gehele gebruiksfase is in de eerste put van de Verdiepte Loswal 12 miljoen ton droge stof gestort (Figuur 25). Hiervan wordt volgens berekening 5,13 miljoen ton droge stof teruggevonden. Het gemiddelde wegstroompercentage inclusief stortverlies over de gehele gebruiksfase is dan $(11,97 \cdot 10^9 - 5,13 \cdot 10^9) / 11,97 \cdot 10^9 \times 100 = 57\%$. In paragraaf 5.2 is het gemiddelde actuele stortverlies op 3,5% vastgesteld. Dat betekent dat het wegstroompercentage als gevolg van stroming en golven 53,5% is (zie Figuur 25).

Uit het verschil tussen de gestorte hoeveelheden (Tabel 4) en de massa bepaald uit de lodingen in combinatie met het geotechnisch onderzoek, is het jaarlijkse verliespercentage berekend (wegstroom inclusief stortverlies) gedurende de gebruiksfase (Figuur 26). Hieruit valt op dat het wegstroompercentage toeneemt bij een afnemende waterdiepte.



*Figuur 26 Verliespercentage en gemiddelde waterdiepte gedurende de gebruiksfase.
(waterdiepte is de afstand van het baggerspecieniveau in de put t.o.v. gemiddeld NAP)*

Aangezien de gegevens van gestorte hoeveelheden slechts per jaar beschikbaar zijn kan het verliespercentage helaas niet voor de verschillende seizoenen berekend worden. De foutmarge van het verliespercentage is afhankelijk van de lodingsfout, de fout in de dichtheidsbepaling en de fout in de gestorte hoeveelheid baggerspecie. Een standaardfout van 0,12 meter voor de loding met een multibeam echolood, bij kubering met een gritgrootte van 5 x 5 km, is berekend door van Duin (Stutterheim, 2002-e). Door de geringe laagdikte in het eerste jaar, is een standaardfout van 0,12 meter relatief erg veel. De fout in de dichtheid is na correctie voor compactie en verdringing 5% en de fout in de gestorte hoeveelheid wordt door experts aangenomen op 10%. De foutmarge in het verliespercentage is weergegeven in Figuur 26 en varieert van 28% in 2000 tot 7% in 2004. Deze grote foutmarge in het eerste wordt veroorzaakt door de lodingsfout.

7 Schuifspanningen

7.1 Kritische schuifspanning

De kritische schuifspanning is de schuifspanning die het begin van bewegen van het materiaal aangeeft. Het gedrag van sediment en daarmee de kritische schuifspanning is afhankelijk van veel factoren, zoals onder andere de in-situ dichtheid, korrel dichtheid, dichtheidsgradiënt, korrelgrootteverdeling, viscositeit, cohesie, mineralogische opbouw en het gehalte organische stof. Hierdoor is een waarde voor de kritische schuifspanning erg moeilijk te bepalen.

Op enkele delen van de Oude Maas, Nieuwe Waterweg en Eurogeel na, bestaat de baggerspecie die in de Verdiepte Loswal wordt gestort uit cohesief materiaal (Wensveen, 2004 en Duintjer 2002). Cohesief materiaal wordt gekenmerkt door een minimaal percentage van 5 a 10 % klei ($< 2 \mu\text{m}$) (van Ledden, 2003). Bij cohesief materiaal werken er bindende krachten tussen de afzonderlijke deeltjes, die ervoor zorgen dat het gedrag van sediment afhankelijk is van vlokken bestaand uit samengeklitte korrels. Er is echter ook een hoeveelheid zand uit bijvoorbeeld de Maasgeul die in de Verdiepte Loswal wordt gestort. Dit granulair sediment gedraagt zich anders dan cohesief sediment.

Cohesief materiaal

Een schatting van de kritische schuifspanning kan gemaakt worden aan de hand van in-situ en laboratoriumexperimenten. Verschillende onderzoeken zijn gedaan om met de uit experimenten verkregen data een beschrijving van de kritische schuifspanning te geven. Door de zeer grote hoeveelheid variabelen die hier invloed op hebben zijn de resultaten zeer wisselend en een relatie tussen de dichtheid en de kritische schuifspanning blijkt niet nauwkeurig vast te stellen. HR Wallingford (Feates, 2000) heeft uitgebreid onderzoek gedaan naar de sterkte en samenhang van baggerspecie, zowel in-situ (voor baggeren) als in beun van de slephopperzuiger en op de loswal na het storten. De in dit onderzoek gemeten kritische schuifspanningen, van in in-situ experimenten op twee verschillende loswallen, zijn weergegeven in bijlage 14.

Baggerspecie uit het beheersgebied van het HbR heeft een gemiddelde dichtheid in beun van 1220 kg/m^3 en bevat gemiddeld 86% fijn materiaal ($< 63 \mu\text{m}$). De kritische schuifspanning van het materiaal in beun ligt in de orde van $0,1 \text{ N/m}^2$ tot $0,3 \text{ N/m}^2$.

Baggerspecie uit het beheersgebied van RWS heeft gemiddeld een hogere dichtheid (1400 kg/m^3) maar de dichtheid heeft een grote variatie ($1250\text{-}1600 \text{ kg/m}^3$) aangezien sommige gebieden erg zandig zijn en anderen erg slibrijk. Het gemiddelde percentage zand ligt veel hoger, het percentage fijn materiaal is gemiddeld 28%. De kritische schuifspanning van het materiaal in beun wordt geschat in de orde van $0,1 \text{ N/m}^2$ tot $0,7 \text{ N/m}^2$.

In onderzoek van HR Wallingford Ltd. (Feates et al, 2000) is opgemerkt dat de structuur van siltige baggerspecie na storten op een loswal in open water sterk verzwakt is ten opzichte van de samenhang in-situ of in beun. De bovenste laag die uit net gestorte baggerspecie bestaat en nog in sedimentatiefase verkeert, heeft nog geen enkele samenhang maar zal door consolidatie in enkele uren samenhang krijgen. Tijdens het sedimenteren heeft de specie geen erosiesterkte, bij aanvang van consolidatie heeft de specie een sterkte in de orde van $0,05 \text{ N/m}^2$. Vervolgens neemt de sterkte in enkele uren toe tot de waarden van de kritische schuifspanning in beun.

De kritische schuifspanning van deels geconsolideerd materiaal kan beschreven worden met de relatie van Mitchener et al. (zie Whitehouse et al. 2000). Mitchener heeft een relatie tussen de in-situ dichtheid van cohesief materiaal en de kritische schuifspanning gegeven, gebaseerd op data van deels geconsolideerd materiaal uit laboratorium experimenten. De relatie tussen kritische schuifspanning en in-situ dichtheid luid volgens Mitchener:

$$\tau_{kr} = E3(\rho_B - 1000)^{E4}$$

Met daarin de parameters:

ρ_B	in-situ dichtheid bodemmateriaal	[kg/m ³]
E3	=0,015	
E4	=0,73	

De bovenste 50cm van eerste Verdiepte Loswal heeft, op het moment van geotechnisch onderzoek, drie maanden na de laatste storting, een gemiddelde in-situ dichtheid van 1610 kg/m³. Volgens bovenstaande relatie betekent dat een kritische schuifspanning van 1,6 N/m².

Door de verstoring van de samenhang van de baggerspecie veroorzaakt door het storten, is de sterkte van het sediment na storten dus erg laag. De samenhang zal in enkele uren toenemen tot de sterkte van de baggerspecie in beun voor de storting. Vervolgens neemt de sterkte in enkele maanden verder toe tot de sterkte die beschreven kan worden met de relatie van Mitchener.

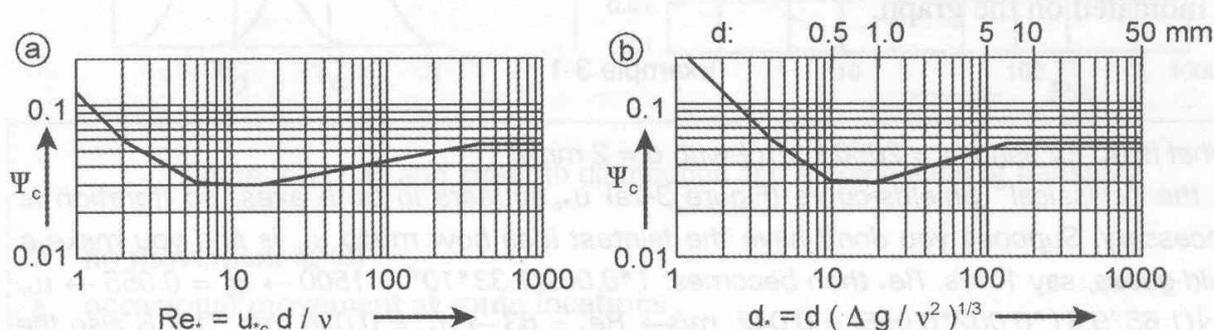
Granulair materiaal

Resuspensie van niet cohesief sediment kan worden beschouwd door het krachten en moment evenwicht per korrel te bekijken. De beste beschrijving van kritische bodemschuifspanning van granulair materiaal geeft Shields. De relatie tussen de dimensieloze schuifspanning en een zogenoemd getal van Reynolds is volgens Shields:

$$\psi_c = \frac{\tau_{kr}}{(\rho - \rho_w)gd} = \frac{u_{*c}^2}{\Delta gd} = f(\text{Re}_*) = f\left(\frac{u_{*c}d}{\nu}\right)$$

Ψ_c	Shields stabiliteits parameter	[-]
u_{*c}	kritische schuifspannings snelheid	[m/s]
d	korrelgrootte	[m]

Deze relatie voor de kritische bodemschuifspanning is weergegeven volgens Shields - van Rijn in Figuur 27.



Figuur 27. Kritische bodemschuifspanning volgens Shields - van Rijn.

Het natuurlijk gesedimenteerde Pleistocene sediment heeft een korrelgrootte van 210 μm tot 2000 μm . Dit sediment heeft volgens de relatie van Shields een kritische schuifspanning van 0,2 N/m² tot 0,7 N/m². Geconsolideerd cohesief materiaal erodeert dus slechter dan de gewone zandige zeebodem.

Baggerspecie uit enkele delen van de Oude Maas, Nieuwe Waterweg en Eurogeel bestaat uit granulair materiaal met een d_{50} in de orde van 200 μm (Wensveen, 2004 en Duintjer 2002). Dit materiaal heeft een constante kritische schuifspanning afhankelijk van de korrelgrootte, voor dit materiaal zal de kritische schuifspanning in de orde van 0,2 N/m² liggen. De kritische schuifspanning van granulair materiaal vertoont dus geen toename in de tijd zoals cohesief materiaal. Aangezien de kritische schuifspanning, op de eerste uren na het storten na, lager is dan van cohesief materiaal zal er een groter percentage eroderen.

7.2 Invloed van stroming op sediment

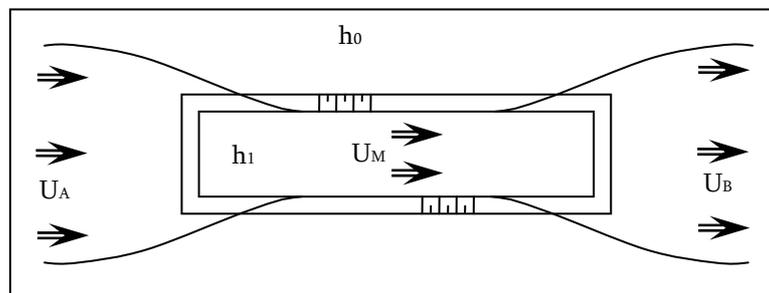
Stroming

Voor de invloed van de put op stroomsnelheden in de Verdiepte Loswal is gebruik gemaakt van data uit het PUTMOR onderzoek (PUTMOR, 2001). In het kader van het PUTMOR onderzoek zijn in de periode oktober 1999 tot maart 2000 data van de stroming in de lege eerste put van de Verdiepte Loswal verzameld en geanalyseerd. In bijlage 15 is gemeten stroomsnelheid over deze periode weergegeven met de daarbij behorende troebelheid.

In bijlage 16 zijn de op drie hoogtes in de waterkolom gemeten stroomsnelheid binnen (locatie M; groen) en buiten (locatie A; rood) de put weergegeven. Daarin valt op dat buiten de put de vloed-stroom op 14,5 meter boven de zeebodem sterker is dan in de put, dit geldt niet voor de eb-stroom. Op 9,5 meter boven de zeebodem is het tegenovergestelde waarneembaar: de maximale vloed snelheden zijn ongeveer gelijk maar de maximale eb stroom is in de put kleiner dan er buiten. Op 4 meter boven de zeebodem worden geen significante verschillen tussen de stroomsnelheden in en buiten de put waargenomen (Walstra et al, 2002).

Bijlage 17 laat de gemodelleerde snelheden zien (Walstra et al. 2002) voor binnen en buiten de put (zowel ten Noorden als Zuiden van de put). De resultaten komen goed overeen met de gemeten snelheden en laten zien dat de stroming ten noorden van de put (locatie B) precies het zelfde gedrag vertoont als ten zuiden van de put (locatie A). De maximale vloed snelheid is 0,7 m/s en voor de eb 0,6 m/s (Walstra et al. 2002).

De zeer kleine snelheidsverschillen tussen in de put en de omgeving, betekenen dat het debiet in de put is toegenomen met ongeveer 30% aangezien de waterdiepte in de put 30% groter is dan de omgeving. In geval van constant debiet (2-dimensionale beschouwing) zou de snelheid evenredig afnemen (immers: $q=U \cdot h$). In de put treedt dus stroomcontractie op (Figuur 28), omdat het debiet toeneemt.



Figuur 28 Schets stroomcontractie.

Dit kan theoretisch onderbouwd worden door aan te nemen dat het wateroppervlak niet beïnvloed wordt door de put. Dit is reëel aangezien er anders geen evenwicht van energie kan zijn. De snelheid parallel aan de put ondervindt minder hydraulische weerstand in de put dan er buiten, dit wordt veroorzaakt door de grotere waterdiepte. Hierdoor kan er in een voldoende lange put, waarbij de breedte klein is ten opzichte van de lengte, stroomversnelling optreden. In een relatief korte put zal de snelheid gelijk blijven en het debiet in de put dus toenemen.

Als uitgegaan wordt van Chézy ($U = C\sqrt{hi}$) kunnen we de snelheid parallel aan een geul uitdrukken als:

$$\frac{U_{x,1}}{U_{x,0}} = \frac{C_1}{C_0} \sqrt{\frac{h_1}{h_0}}$$

$U_{x,1}$	snelheid in de put langs de lengte as	[m/s]
$U_{x,0}$	snelheid buiten de put langs de lengte as	[m/s]
C_1	Chézycoefficient in de put	[m ^{1/2} /s]
C_0	Chézycoefficient buiten de put	[m ^{1/2} /s]
h_1	waterdiepte in de put	[m]
h_0	waterdiepte buiten de put	[m]
i	waterspiegel verhang	[-]

Haaks op de geul is de snelheid alleen afhankelijk van de waterdiepte:

$$\frac{U_{y,1}}{U_{y,0}} = \frac{h_0}{h_1}$$

$U_{x,1}$	snelheid in de put dwars op de lengte as	[m/s]
$U_{x,0}$	snelheid buiten de put dwars op de lengte as	[m/s]

Aangenomen dat C constant is, kan de snelheid in de geul uitgedrukt worden als:

$$U_1 = U_0 \frac{h_0}{h_1} \sqrt{\sin^2 \alpha_0 + \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^3 \cos^2 \alpha_0}$$

α_0	hoek van inval van de stroming t.o.v de lengte as van de put.	[graden]
------------	---	----------

Aangezien de put ongeveer parallel ligt ten opzichte van de stroming ($\pm 10^\circ$) kan de stroomsnelheid in de put toenemen met 22% in de put. Daarentegen zou de stroomsnelheid in de put afnemen met 33% als de put dwars op de stroming ligt.

Uiteraard moet de stroming wel de gelegenheid hebben om te versnellen. Uit evenwicht tussen advectie en weerstand heeft Roos (2004) hiervoor de aanpassingslengte bepaald:

$$\lambda_a = h_1 C^2 / 2g$$

λ_a	aanpassingslengte	[m]
g	zwaartekrachtsversnelling	[m/s ²]

De Chézycoefficient hangt sterk af van de vorm en samenstelling van de zeebodem. Voor zandige zeebodem liggen de typische waarden tussen de 40 en 60 m^{1/2}/s. Voor slibachtige omgeving is de Chézycoefficient over het algemeen hoger en ligt tussen de 60 en 100 m^{1/2}/s (Van Rijn). Ondanks dat de ruwheid sterk afhankelijk is van de bodemvorm kan aangenomen worden dat de Chézycoefficient 60 m^{1/2}/s is (Winterwerp, 2002).

Dit betekent dat de aanpassingslengte voor de stroming parallel aan de put 5,5 km is. De versnelling van 22% kan dus niet behaald worden in een put met een lengte van 1.250 meter. Dit komt overeen met de data (PUTMOR, 2001): er treed geen versnelling op in de put. De snelheid zal ongeveer gelijk blijven wat betekent dat het debiet toe neemt 30%.

Voor de snelheidsvertraging indien de stroming dwars over op de put loopt, is de aanpassingslengte niet van toepassing, de vertraging van 33% kan wel behaald worden in de put. Aangezien de verdieping in eerste instantie bedoeld is om het verlies te verminderen zou de put 90° gedraaid moeten worden zodat de stroomsnelheid in de put afneemt en daarmee het verlies.

Bodem schuifspanning

Een eenvoudige benadering van de bodemschuifspanning wordt gegeven door de logaritmische snelheidsverdeling van Prandtl-Von Karman te gebruiken. De bodemschuifspanning is als volgt gerelateerd aan de diepte gemiddelde stromingsnelheid (volgens Chézy):

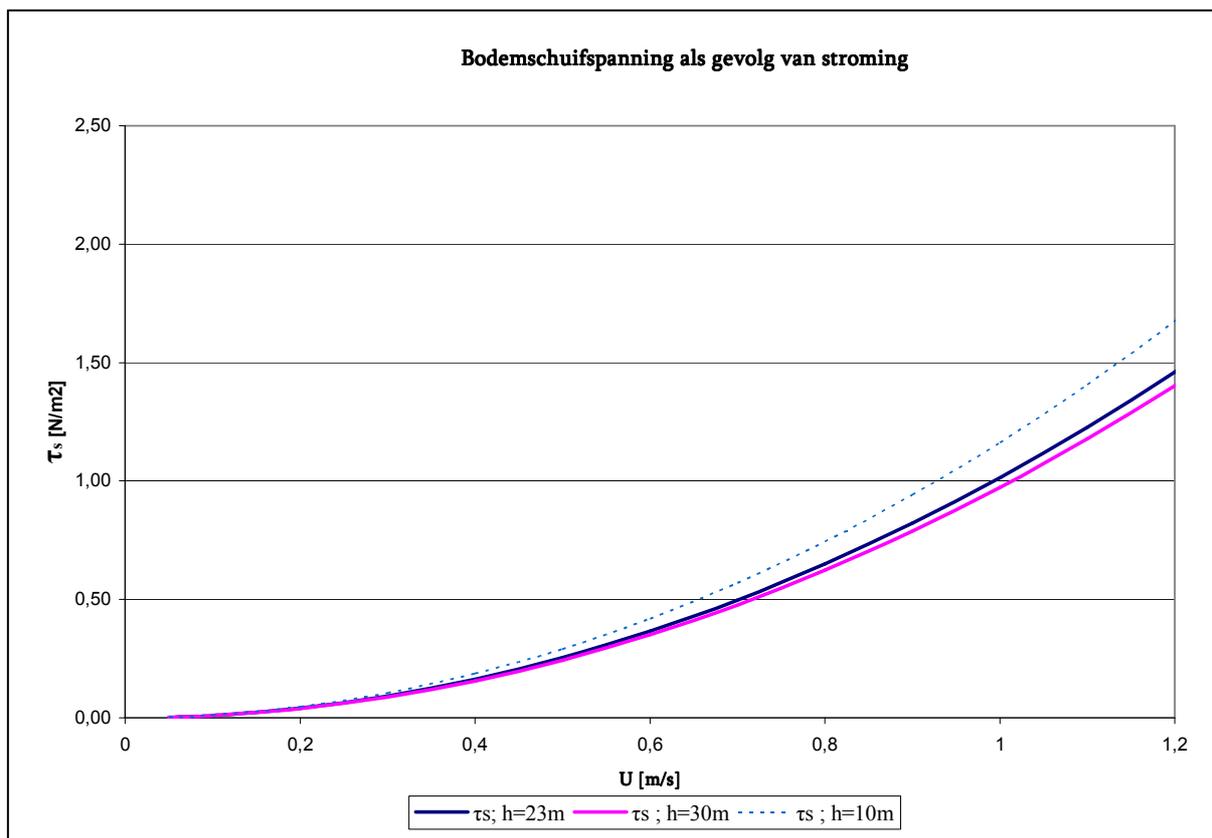
$$\tau_s = c_f \rho U^2$$

$$c_f = g / C^2$$

Waarin:

C	Chézy coëfficiënt: $C=18\log(12h/k_r)$	$[m^{1/2}/s]$
k_r	Nikuradse bodemruwheid	$[m]$
U	Diepte gemiddelde snelheid	$[m/s]$

De bodemschuifspanning is voor verschillende dieptes volgens deze relatie uitgezet tegen de diepte gemiddelde snelheid in Figuur 29. Dit is gedaan voor de maximale diepte van de lege put (30 meter), voor de waterdiepte in de huidige situatie en ter vergelijking ook voor 10 meter diep water. De bodemruwheid is bepaald aan de hand van de D_{90} : $r = 3 \cdot D_{90}$ (van Rijn, 1984). In het geotechnisch onderzoek is de D_{90} aan de bodem in de eerste Verdiepte Loswal vastgesteld op 269 μm .



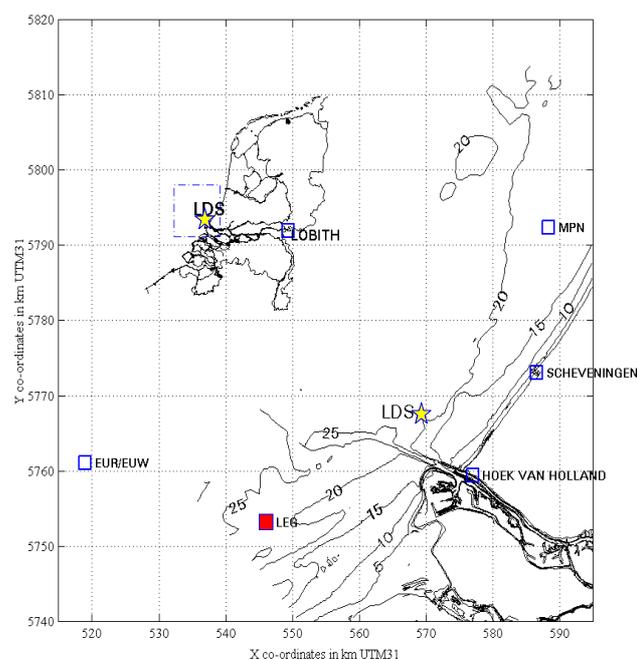
Figuur 29 Bodemschuifspanning als gevolg van stroming.

7.3 Invloed van golven op sediment

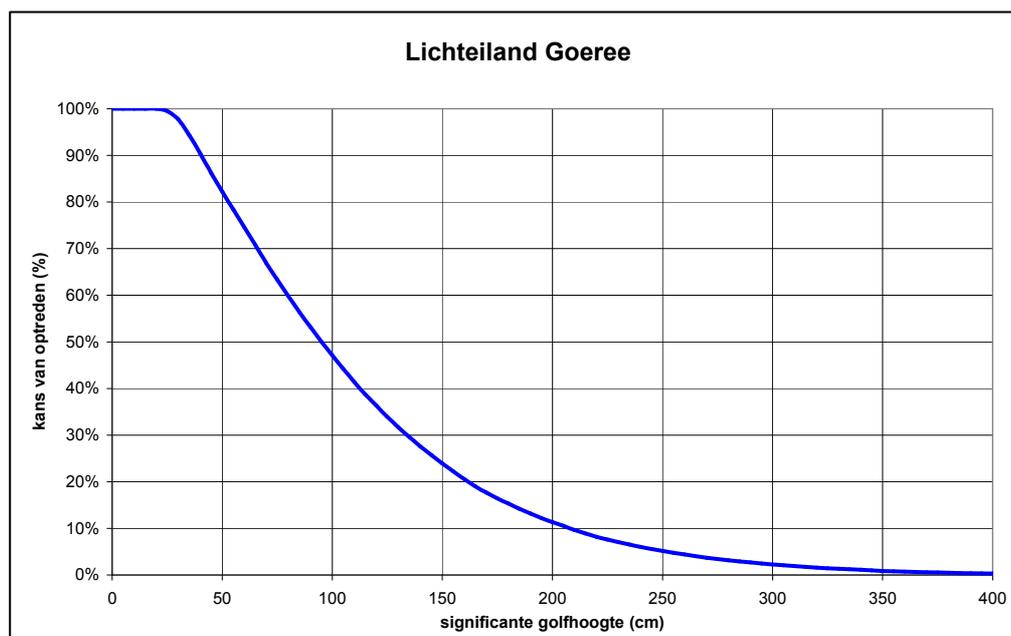
Golfstatistieken

Voor de invloed van golven op het sediment in de eerste put van de Verdiepte Loswallen is gebruik gemaakt van de golfgegevens van Lichteiland Goeree (LEG). Deze meetlocatie ligt op een diepte van 21 meter en 27,5 km Zuidwest van de Verdiepte Loswallen (LDS) (zie Figuur 30). De data zijn verkregen met radar metingen over een periode van 5 jaar (1998-2003).

Uit deze data is een overschrijdingsdiagram samengesteld (Figuur 31). Hierin is de significante golfhoogte uitgezet tegen de kans van optreden.



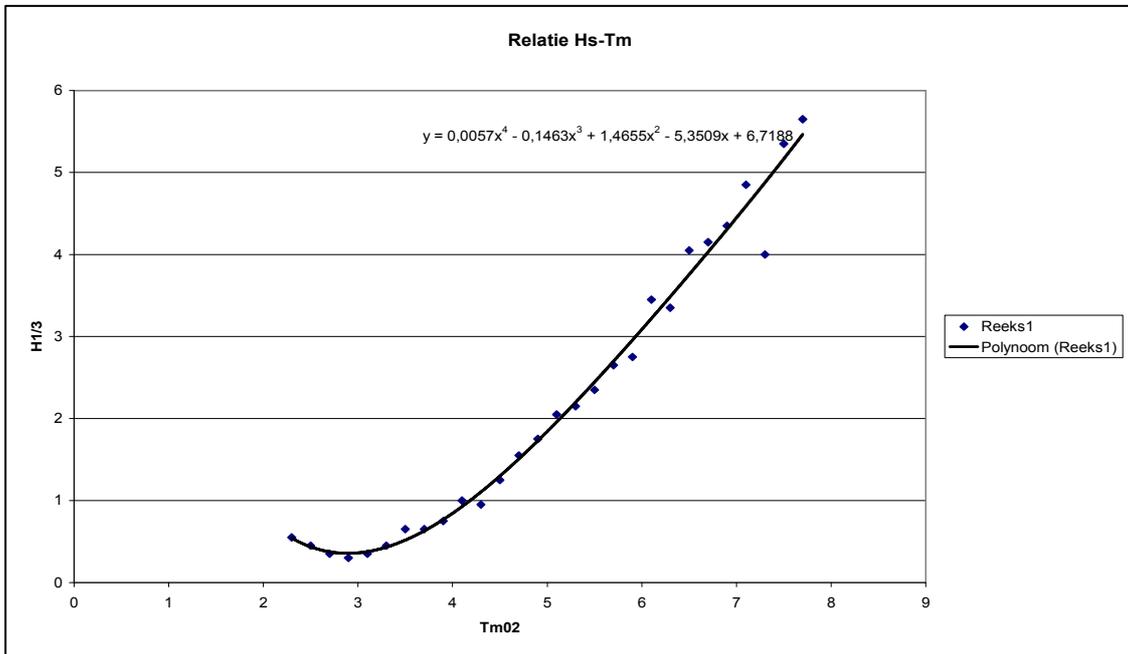
Figuur 30 Overzicht Verdiepte loswal en meetlocaties.



Figuur 31 Golfhoogte overschrijdingsdiagram Lichteiland Goeree

Aangezien de golfperiode grote invloed heeft op de bodemschuifspanning is een niet lineaire relatie tussen golfhoogte en periode bepaald uit de statistieken van Lichteiland Goeree (Figuur 32):

$$H_s = 0,0057 \cdot T_m^4 - 0,1463 \cdot T_m^3 + 1,4655 \cdot T_m^2 - 5,3509 \cdot T_m + 6,7188$$



Figuur 32 Relatie Hs-Tm

Bodemschuifspanning

De amplitude van de orbitaalbeweging aan de bodem, veroorzaakt door golven, afhankelijk van de golfhoogte en periode:

$$U_w = \frac{\pi H_{rms}}{T_p \sinh(kh)}$$

Waarin: U_w	bodem orbitaal snelheid	[m/s]
H_{rms}	kwadratisch gemiddelde golfhoogte	[m]
T_p	periode die behoort bij de waarde met de hoogste energie dichtheid in het spectrum	[s]
k	golfgetal	[1/m]
h	waterdiepte	[m]

De bodemschuifspanning veroorzaakt door golven kan gevonden worden aan de hand van de amplitude van de orbitaalbeweging, veroorzaakt door golven:

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_w^2$$

f_w	bodemweerstand	[-]
ρ	dichtheid van water	[kg/m ³]

De bodemweerstand voor hydraulisch ruwe bodem wordt door Soulsby (Whitehouse et al. 2000) gegeven:

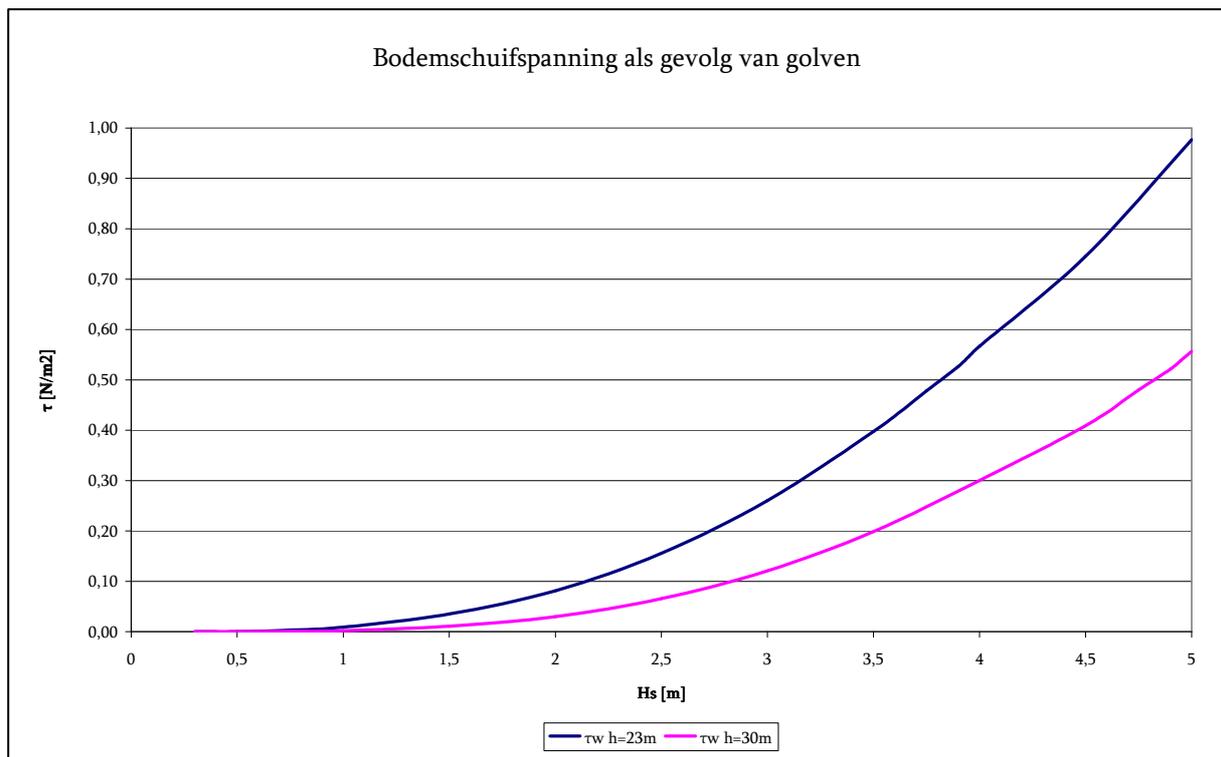
$$f_{wr} = 0,237 r^{-0,52}$$

De bodemweerstand is afhankelijk van de relatieve bodemruwheid:

$$r = \frac{U_w \cdot T_p}{2 \cdot \pi \cdot k_s}$$

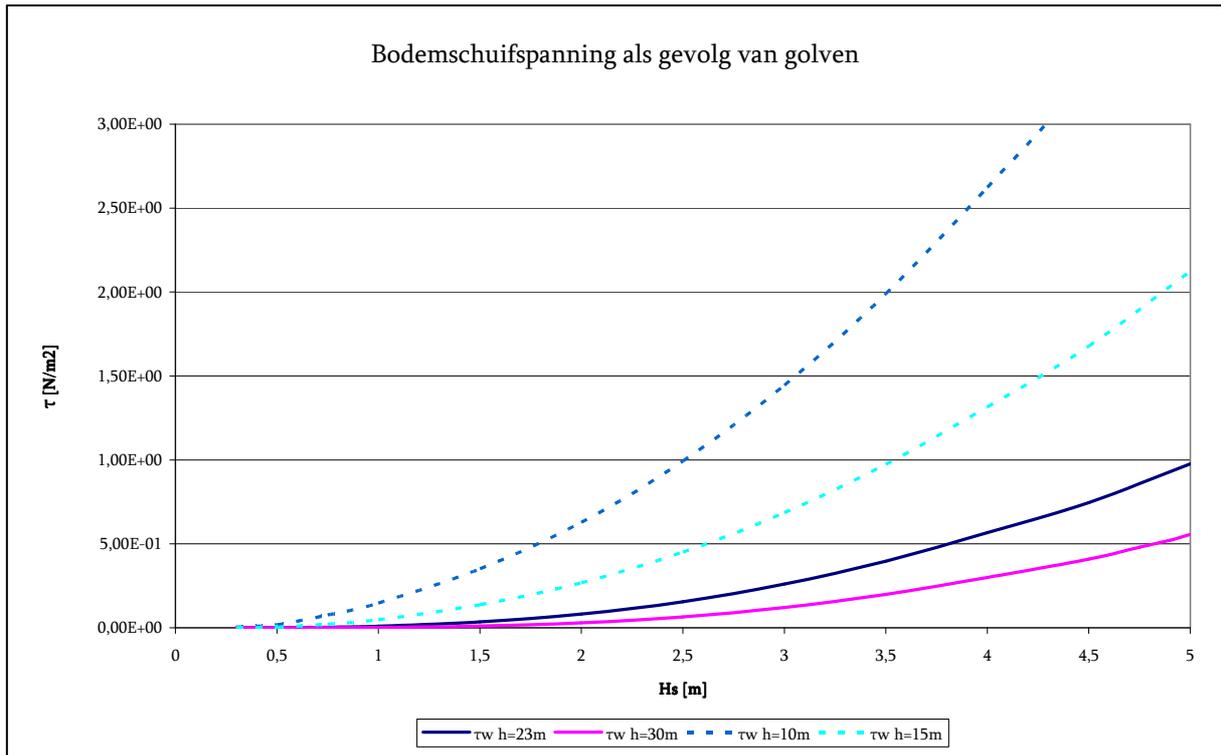
Waarin: r relatieve bodemruwheid [-]
 k_s Nikuradse bodemruwheid ($k_s=2,5 \cdot d_{50}$) [m]

Met deze beschrijving voor de bodem weerstand is de bodemschuifspanning als gevolg van golven weergegeven in Figuur 33, zowel voor de lege loswal (blauw) als voor de huidige situatie (paars).



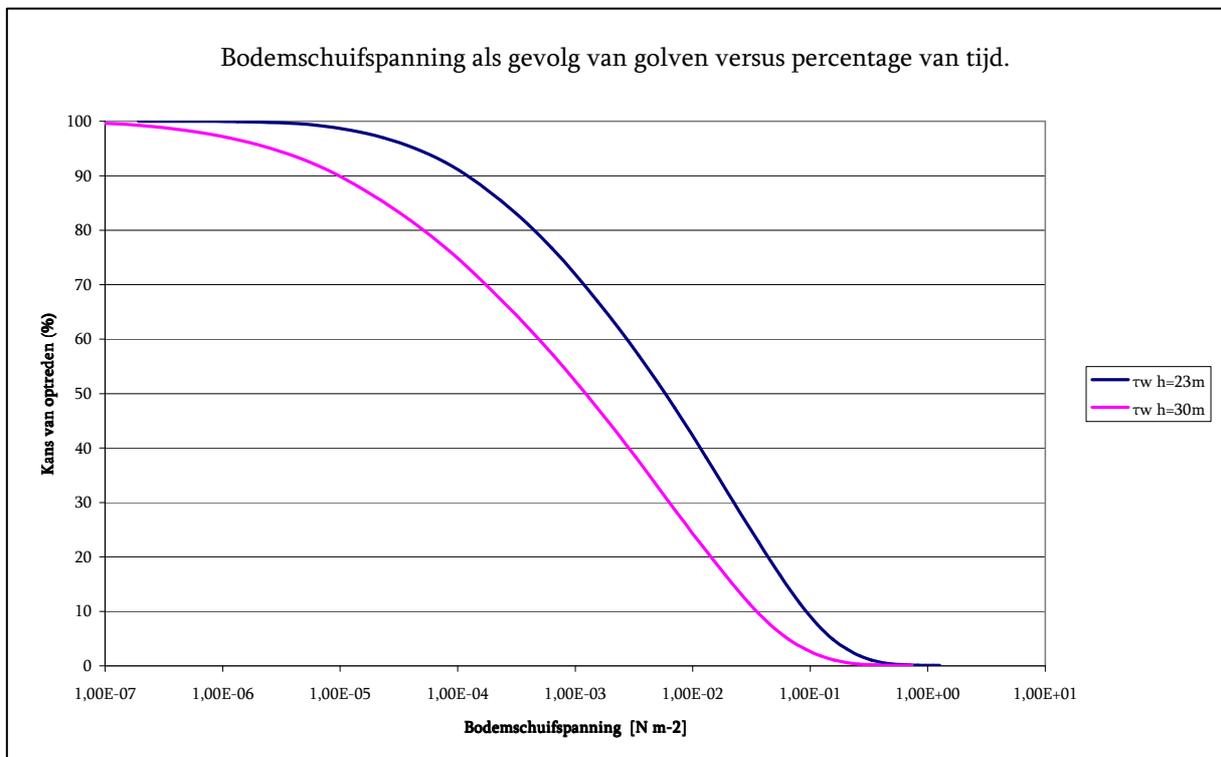
Figuur 33 Bodemschuifspanning veroorzaakt door golven.

Ter vergelijking zijn in Figuur 34 ook de bodemschuifspanning als gevolg van golven voor 10 meter en 15 meter diep water gegeven.



Figuur 34. Bodemschuifspanning veroorzaakt door golven op verschillende dieptes.

Als bovenstaande relatie tussen bodemschuifspanning en golfhoogte wordt gecombineerd met de kans van voorkomen van de golfhoogte (Figuur 31) wordt een verband verkregen als in Figuur 35.



Figuur 35. Kans van optreden bodemschuifspanning van golven.

Gecombineerde bodemschuifspanning door golven en stroming

Resuspensie van sediment wordt veroorzaakt door de gecombineerde maximale bodemschuifspanning door golven en stroming, aangezien de gecombineerde bodemschuifspanning een oscillerende beweging is. Hiervoor wordt de vergelijking van Soulsby gebruikt (zie ook hoofdstuk 4):

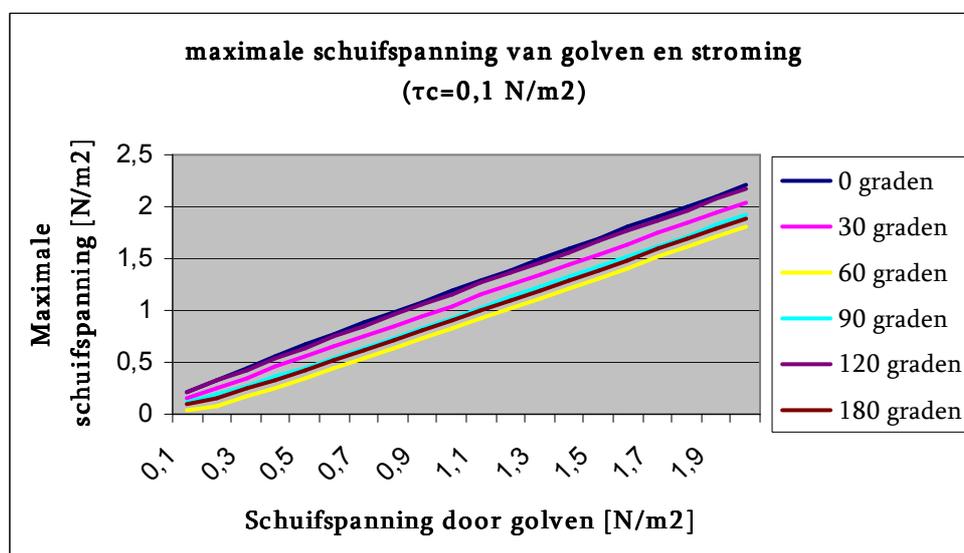
$$\tau_m = \tau_c \left[1 + 1,2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3,2} \right]$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{(\tau_m + \tau_w \cos \phi)^2 + (\tau_w \sin \phi)^2}$$

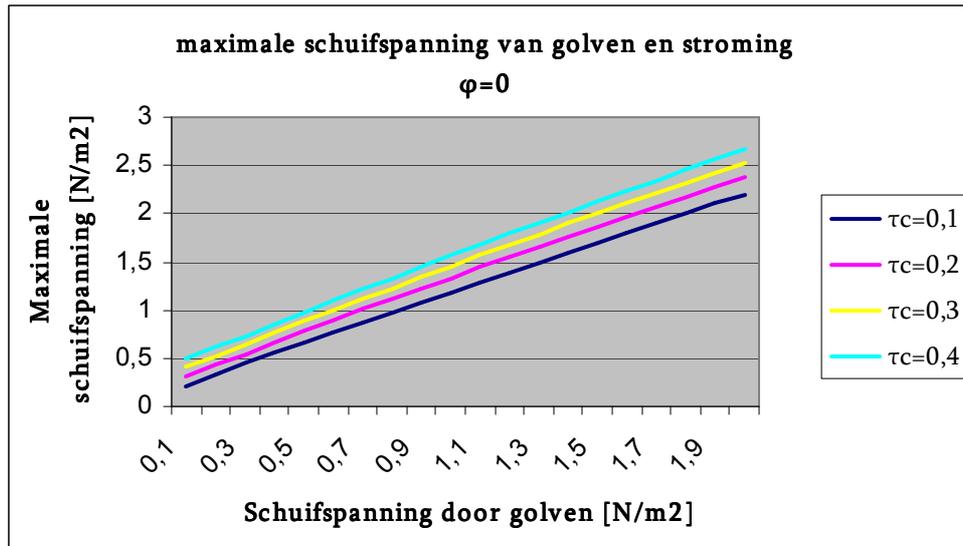
τ_m	netto bodemschuifspanning als gevolg van stroming en golven	[N/m ²]
τ_{\max}	maximale bodemschuifspanning als gevolg van stroming en golven	[N/m ²]
ϕ	hoek tussen stroming en golven	[graden]

De maximale bodemschuifspanning door een constante stroming van 0,3 m/s (0,1 N/m²), is tegen verschillende hoeken van inval tussen stroming en golven uitgezet in Figuur 36. In Figuur 37 is de maximale bodem-schuifspanning weergegeven voor verschillende stroomsnelheden waarbij de hoek van inval van de golven evenwijdig is aan de stroming.

Over het algemeen kan worden aangenomen dat de maximale bodemschuifspanning voor resuspensie zorgt en de stroming voor sedimenttransport (long-shore transport). Zonder stroming of dwars op de stroming is het sedimenttransport verwaarloosbaar klein.



Figuur 36. Maximale bodemschuifspanning afhankelijk van hoek tussen stroming en golven.



Figuur 37. Maximale bodemschuifspanning waarbij de golven evenwijdig lopen aan de stroming ($\varphi=0^\circ$).

De overheersende windrichting is Zuidwest, in dat geval loopt de windrichting evenwijdig aan de stromingsrichting (0 of 180 graden). Als wind en stroom gelijk gericht zijn (bij Zuidwesten wind tijdens de vloed) is de bodemschuifspanning maximaal.

Uit deze figuren valt op dat de maximale bodemschuifspanning veroorzaakt door golven en stroming aanzienlijk groter is dan de som van de bodemschuifspanning veroorzaakt door golven en de bodemschuifspanning door stroming. Hierdoor hebben stormen een grote invloed op erosie van baggerspecie uit de put. Voor stormen met een significante golfhoogte van 3 tot 4 meter zijn de maximale bodemschuifspanningen weergegeven in Tabel 8.

Kans van overschrijden		H_s	waterdiepte	τ_w	τ_{max}
0,28%	25 uur/jaar	4 m	23 m	0,3 N/m ²	0,8-1,1 N/m ²
			30 m	0,6 N/m ²	0,5-0,7 N/m ²
2,7%	240 uur/jaar	3 m	23 m	0,3 N/m ²	0,5-0,7 N/m ²
			30 m	0,1 N/m ²	0,2-0,6 N/m ²

Tabel 8. Maximale bodemschuifspanning tijdens stromen.

Conclusie hoofdstuk 7

Direct na het storten van baggerspecie is de samenhang van de bovenste laag klein waardoor de erosiesterkte laag is. Dit neemt in enkele uren toe tot de samenhang en sterkte die het materiaal in het beun van de sleephopperzuiger had. Vervolgens zal het materiaal in enkele maanden verder consolideren en wordt een grote samenhang bereikt.

De kritische schuifspanning van granulair sediment is lager dan die van cohesief sediment zodra het cohesieve sediment gedeeltelijk geconsolideerd is. Het sediment in de put heeft dus een grotere erosieweerstand dan het natuurlijke zand van de zeebodem, hierdoor treed er langzaam verzanding van de toplaag op. Zowel voor de invloed van stroming als golven is een beschrijving van de bodemschuifspanning gegeven. Daaruit valt op dat de door stroming veroorzaakte bodemschuifspanning nauwelijks afhankelijk is van de waterdiepte. De bodemschuifspanning door golven is daarentegen wel afhankelijk van de waterdiepte. De maximale bodemschuifspanning is groter dan de som van de bodemschuifspanning veroorzaakt door golven en de bodemschuifspanning door stroming. Hierdoor kan de invloed van stormen groot zijn.

8 Sediment transport

Zoals de kritische bodemschuifspanning afhankelijk is van veel natuurlijke factoren, waardoor de waarde moeilijk te bepalen is, geldt dit ook voor de erosiesnelheid van het sediment in de Verdiepte Loswal. In eerste instantie omdat de erosiesnelheid direct afhankelijk is van het verschil tussen de bodemschuifspanning en de kritische schuifspanning van het sediment. Uit zowel laboratoriumexperimenten als veldproeven is geconstateerd dat de erosiesnelheid dm/dt , uitgedrukt in droge massa per tijd ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) gerelateerd is aan het verschil tussen de schuifspanning en kritische schuifspanning ($\tau - \tau_{kr}$) door de coëfficiënt m_e , de erosieconstante. Dit wordt uitgedrukt met de empirische formule van Partheniades (Whitehouse et al. 2000):

$$dm/dt \quad \begin{cases} = m_e (\tau - \tau_{kr}) & \text{als } \tau > \tau_{kr} \\ = 0 & \text{als } \tau \leq \tau_{kr} \end{cases}$$

Aangezien het moment van storten en de (weers)omstandigheden tijdens het storten onbekend zijn, is het niet mogelijk de erosie te kwantificeren. Wel kan met de beschikbare informatie een goede inschatting gemaakt worden door een erosieconstante van $0,001 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ te gebruiken in de empirische formule van Partheniades (Whitehouse et al. 2000). De richting van de stroming bepaald hoe het geresuspendeerde materiaal zich verspreidt (zie hoofdstuk 9).

In de resuspensie na het storten van baggerspecie zijn er drie fasen te onderscheiden. In fase één, direct na het storten, heeft de bovenste laag van het sediment een erosie sterkte van slechts ongeveer $0,05 \text{ N/m}^2$. De erosie zal in de eerste uren na storten groot zijn, totdat door consolidatie het sediment de samenhang terug vindt die het in het beun had. Dit is fase twee: het sediment vertoont dezelfde karakteristieken als in het beun voordat het gestort werd. Fase twee treedt op vanaf enkele uren (in de orde van een halve getijde cyclus) na het storten en zal enkele dagen tot weken voortduren. Vervolgens zal het sediment in fase drie een sterke samenhang vertonen met een grote erosieweerstand. Onder eigengewicht van bovenop gestorte lagen zal het sediment verder consolideren.

Scenario's

Kwantificeren van sedimenttransport en erosie over de gebruiksfase van de Verdiepte Loswal is niet mogelijk aangezien dit van te veel variabelen afhankelijk is. Dit betreft met name de materiaalsamenstelling van gestort sediment, windkracht en windrichting. Door het verlies per stort voor een aantal scenario's zo goed mogelijk te berekenen wordt een inzicht in het proces van erosie in de Verdiepte Loswal verkregen. Om kwantificering mogelijk te maken is validatie met meetgegevens nodig. Hiervoor is monitoring tijdens het gebruik van een volgende put van de Verdiepte Loswal belangrijk.

In de scenario's wordt onderscheid gemaakt tussen havenslib en slib uit de vaarwegen. Voor elk van deze slibsoorten is berekend hoeveel kan eroderen bij door stroming met doodtij en springtij. Tevens is een scenario met storm berekend.

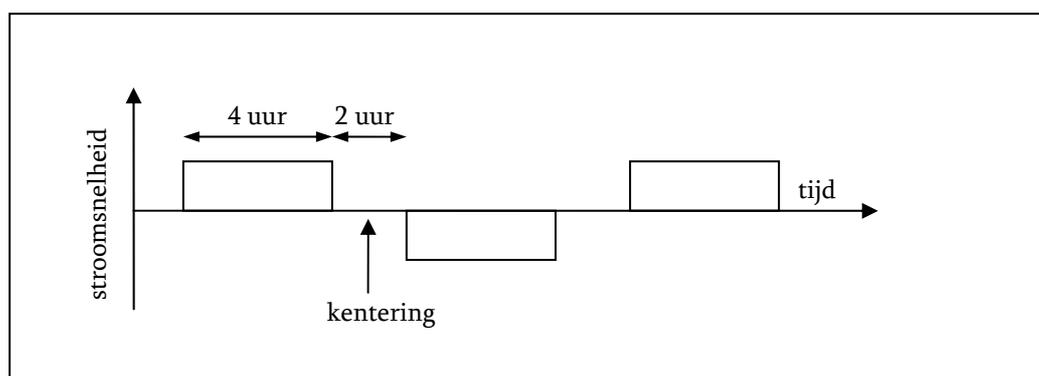
Storten havenslib.

Voor het storten van baggerspecie met lage dichtheid wordt havenslib (dichtheid in beun: 1220 kg/m^3) als voorbeeld gebruikt. Er zijn 3 scenario's uitgewerkt, te weten voor doortij ($0,3 \text{ m/s}$), springtij ($0,7 \text{ m/s}$) en onder stormcondities (zie § 7.3). Dit zijn drie uitersten scenario's, de werkelijkheid zal in het midden liggen.

Onder alle omstandigheden zal er met het storten van havenslib een stortverlies van 5% optreden (hoofdstuk 5). Aan de hand van dit onderzoek wordt verondersteld dat het havenslib in fase 1 (de eerste paar uur na het storten) een zeer lage samenhang heeft waardoor de kritische bodemschuifspanning slechts ongeveer $0,05 \text{ N/m}^2$ is. De sterkte zal vervolgens langzaam toenemen tot $0,3 \text{ N/m}^2$ (fase 2). Drie maanden na de stort is een dichtheid in de orde van $1,6 \text{ N/m}^2$ waardoor erosie alleen nog kan optreden tijdens extreme stormen (fase 3).

Aannames:

- Voor het getij wordt een blokfunctie aangenomen (Figuur 38).
- Aangenomen wordt dat de oppervlakte één stort een diameter van 150 meter heeft (zie hoofdstuk 5).
- Het beunvolume van één storting bedraagt 4000 m^3 .
- Fase 1 duurt 6 uur, fase 2 duurt 1 week en fase 3 treedt op na 1 à 3 maanden.



Figuur 38. Blokfunctie getij.

Onder bovenstaande aannames is de resuspensie en het verlies berekend voor de drie verschillende scenario's. Dit is weergegeven in Tabel 9. Daaruit valt op dat er naast het stortverlies tijdens doortij nauwelijks wegstromen optreedt (totaal 6%). Tijdens een volledige week springtij kan er echter een verlies ontstaan van 28%. Gemiddeld kan 23% van het verlies verklaard worden door stroming en het stortverlies. Indien er zich een storm voordoet in de eerste week na het storten van havenslib in de put kan een groot deel van het vers gestorte sediment wegstromen.

Opvallend is dat na drie maanden het sediment in alle scenario's niet meer zal resuspenderen. Er is een golfhoogte van 5 meter nodig om in combinatie met stroming een bodemschuifspanning van $1,6 \text{ N/m}^2$ te veroorzaken.

	Omschrijving	τ_{cr} [N/m ²]	U [m/s]; τ_b [N/m ²]	Resuspensie kg m ⁻² s ⁻¹	Verlies per uur	Verlies
Doodtij						
	stortverlies					5 %
fase 1	eerste 6 uur	0,05	0,3 m/s ; 0,1 N/m ²	5 10 ⁻⁵	0,3 %	1%
fase 2	eerste week	0,3	0,3 m/s ; 0,1 N/m ²	0	-	-
fase 3	na 1 à 3 maanden	1,6	0,3 m/s ; 0,1 N/m ²	0	-	-
Springtij						
	stortverlies					5 %
fase 1	eerste 6 uur	0,05	0,6 m/s ; 0,35 N/m ²	3 10 ⁻⁴	1,5%	6%
fase 2	eerste week	0,3	0,6 m/s ; 0,35 N/m ²	0,5 10 ⁻⁴	0,25%	28%
fase 3	na 1 à 3 maanden	1,6	0,6 m/s ; 0,35 N/m ²	0	-	-
Storm						
	stortverlies					5 %
fase 1	eerste 6 uur	0,05	0,5 – 1,1 N/m ²	4,5 10 ⁻⁴ -10,1 10 ⁻⁴	2-5%	8-20%
fase 2	eerste week	0,3	0,5 – 1,1 N/m ²	2 10 ⁻⁴ -8 10 ⁻⁴	1-4%	groot*
fase 3	na 1 à 3 maanden	1,6	0,5 – 1,1 N/m ²	0	-	-

*afhankelijk van duur van de storm (8-32% voor een twaalf uur durende storm)

Tabel 9. Drie scenario's voor het verlies van havenslib uit de Verdiepte Loswal.

Storten van baggerspecie uit de vaarwegen

Voor baggerspecie uit de vaarwegen (dichtheid in beun: 1400 kg/m³) zijn eveneens 3 scenario's uitgewerkt: voor doodtij, springtij en onder stormcondities. Onder alle omstandigheden zal er met het storten van baggerspecie uit de vaarwegen een stortverlies van 3% optreden (hoofdstuk 5). Aan de hand van dit onderzoek wordt verondersteld dat de baggerspecie uit de vaarwegen in fase 1 en fase 3 dezelfde eigenschappen heeft als havenslib. In fase twee is de samenstelling van het sediment gelijk aan het sediment in beun van de sleephopper zuiger. De gemiddelde kritische schuifspanning zal voor baggerspecie uit de vaarwegen in deze fase dan ook hoger liggen (0,7 N/m², zie § 7.1)

Aannames:

- Voor het getij wordt een blokfunctie aangenomen (Figuur 38)
- Aangenomen wordt dat de oppervlakte één stort een diameter van 200 meter heeft (zie hoofdstuk 5).
- Het beunvolume van één storting bedraagt 7000 m³
- Fase 1 duurt 6 uur, fase 2 duurt 1 week en fase 3 treedt op na 1 à 3 maanden.

Onder bovenstaande aannames is op dezelfde manier als voor havenslib de resuspensie en het verlies berekend. Dit is weergegeven in Tabel 9. Daaruit valt op dat het percentage dat wegstroomt veel kleiner is dan dat van havenslib. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de grotere dichtheid in beun, het grotere beunvolume en door de hogere kritische schuifspanning in de eerste week na storten. Gemiddeld zal 3% van de baggerspecie uit de vaargeul wegstromen uit de put door stroming. De invloed van golven kan enkele dagen tot weken na het storten aanzienlijk zijn.

	Omschrijving	τ_{cr} [N/m ²]	U [m/s]; τ_b [N/m ²]	Resuspensie kg m ⁻² s ⁻¹	Verlies per uur	Verlies
Doodtij						
	stortverlies					3 %
fase 1	eerste 6 uur	0,05	0,3 m/s ; 0,1 N/m ²	5 10 ⁻⁵	0,1 %	0,4%
fase 2	eerste week	0,7	0,3 m/s ; 0,1 N/m ²	0	-	-
fase 3	na 1 à 3 maanden	1,6	0,3 m/s ; 0,1 N/m ²	0	-	-
Springtij						
	stortverlies					3 %
fase 1	eerste 6 uur	0,05	0,6 m/s ; 0,35 N/m ²	3 10 ⁻⁴	1,5%	6%
fase 2	eerste week	0,7	0,6 m/s ; 0,35 N/m ²	0	-	-
fase 3	na 1 à 3 maanden	1,6	0,6 m/s ; 0,35 N/m ²	0	-	-
Storm						
	stortverlies					3 %
fase 1	eerste 6 uur	0,05	0,5 – 1,1 N/m ²	4,5 10 ⁻⁴ -10,1 10 ⁻⁴	1-2,5%	4-10%
fase 2	eerste week	0,7	0,5 – 1,1 N/m ²	0-4 10 ⁻⁴	0-1%	Groot*
fase 3	na 1 à 3 maanden	1,6	0,5 – 1,1 N/m ²	0	-	-

*afhankelijk van duur van de storm (tot 8 % voor een twaalfuur durende storm)

Tabel 10. Drie scenario's voor het verlies baggerspecie uit de Vaarwegen uit de Verdiepte Loswal.

Gevoeligheid

Bovenstaande berekeningen blijken zeer gevoelig te zijn voor enkele aannames waardoor de betrouwbaarheid moeilijk is aan te geven. Drie uitgangspunten blijken hiervoor van groot belang: de erosie constante, het invloedsgebied van een storting en de stroomsnelheid tijdens springtij.

Voor de erosie constante m_e is een waarde van 0,001 kg N⁻¹ s⁻¹ aangenomen (Whitehouse et al, 2000). De erosie constante kan onder bepaalde omstandigheden echter ook 2 keer zo hoog zijn, dat zou betekenen dat het verlies percentage 2 keer zo hoog wordt. Verder is aangenomen dat de invloed van een storting van 4000 m³ havenslib een diameter van 150 meter heeft en voor 7000 m³ baggerspecie uit de vaarwegen 200 meter. Aangezien het verlies afhankelijk is van het oppervlak heeft een afwijking in deze aanname een kwadratische invloed op het verlies. Door de relatie met de schuifspanning veroorzaakt het verschil tussen een stroomsnelheid van 0,6 m/s en 0,7 m/s een toename van het verlies met 40%.

In de periode juni tot september 2001 is er niet gestort op de Verdiepte Loswal, in hoofdstuk 6.2 is bepaald dat er gemiddeld 74 m³/uur is geërodeerd over deze periode. In combinatie met de gemiddelde dichtheid van de bovenste laag (953 kg/m³) kan geconcludeerd worden dat er 3,1 10⁻⁵ kg m⁻² s⁻¹ is geërodeerd. Dit ligt in de zelfde orde als het gemiddelde verlies over de eerste drie maanden zoals hierboven bepaald.

Conclusie hoofdstuk 8

Ondanks de grote foutmarge in bovenstaande berekeningen is het verlies goed te verklaren met redelijke aannames. Geconcludeerd kan worden dat slechts een klein deel van het verlies uit de Verdiepte Loswal veroorzaakt wordt door stroming en een aanzienlijk deel door in invloed van golven. Volgens deze berekeningen zal van het verlies door stroming in de orde van 10 à 20% liggen (exclusief stortverlies). Dit betekent dat ruim 30 à 40% van het verlies veroorzaakt wordt door de invloed van golven. Er dient rekening mee gehouden te worden dat deze percentages een grote foutmarge kunnen hebben zoals in de gevoeligheidsanalyse is aangegeven.

9 Verspreiding

9.1 Retourpercentage

In dit onderzoek is het verliespercentage berekend en is bepaald onder welke omstandigheden erosie van sediment uit de Verdiepte Loswal plaats kan vinden. Hiermee is echter nog niet de vraag beantwoord hoeveel sediment retour stroomt naar de Rotterdamse havens en vaargeul.

In januari 2000 en februari 2002 is er een radiometrische kartering rondom de Verdiepte Loswal uitgevoerd. De hieruit afgeleide slibverspreiding vertoont geen voorkeursrichting. Tot op heden is er geen modellering van de verspreiding van sediment uit de Verdiepte Loswal is gedaan en kan er geen uitspraak worden gedaan over de verspreiding van baggerspecie uit de Verdiepte Loswal en het retourpercentage. Om goed inzicht te krijgen in de verspreiding van het sediment dat wegstroomt uit de Verdiepte Loswal is een uitgebreid 'Far-field' onderzoek nodig. Dit kan gedaan worden door middel van modellering met bijvoorbeeld Slib3D, zoals dat ook gedaan is voor Loswal Noord door het RIKZ.

In het geotechnisch onderzoek zijn monsters genomen in de omgeving van de Verdiepte Loswal. Hieruit komt naar voren dat ten Noordoosten van de put geen invloed van baggerspecie terug te vinden is. Ten Zuidoosten van de put worden enkele brokjes klei terug gevonden en ten Noordwesten en Westen van de put is een aanzienlijk hoeveelheid slib terug te vinden in de originele zeebodem. Dit geeft de indruk dat de overheersende transportrichting Oostnoordoost loopt. Dit komt overeen met de reststroming zoals gemodelleerd door De Kok (1991), zie Figuur 9 in hoofdstuk 4. Uit deze figuur blijkt echter dat deze transportrichting voor een groot deel retourstroomt richting Maasmond. Een uitspraak over het retourpercentage kan hiermee niet gedaan worden. Wat wel gezegd kan worden is dat het retourpercentage tijdens Noordwesterstorm groter zal zijn dan bij Zuidwesterstorm, hetgeen ook valt af te leiden uit modellering van de verspreiding van baggerspecie uit Loswal Noordwest (Stutterheim, 2002-d).

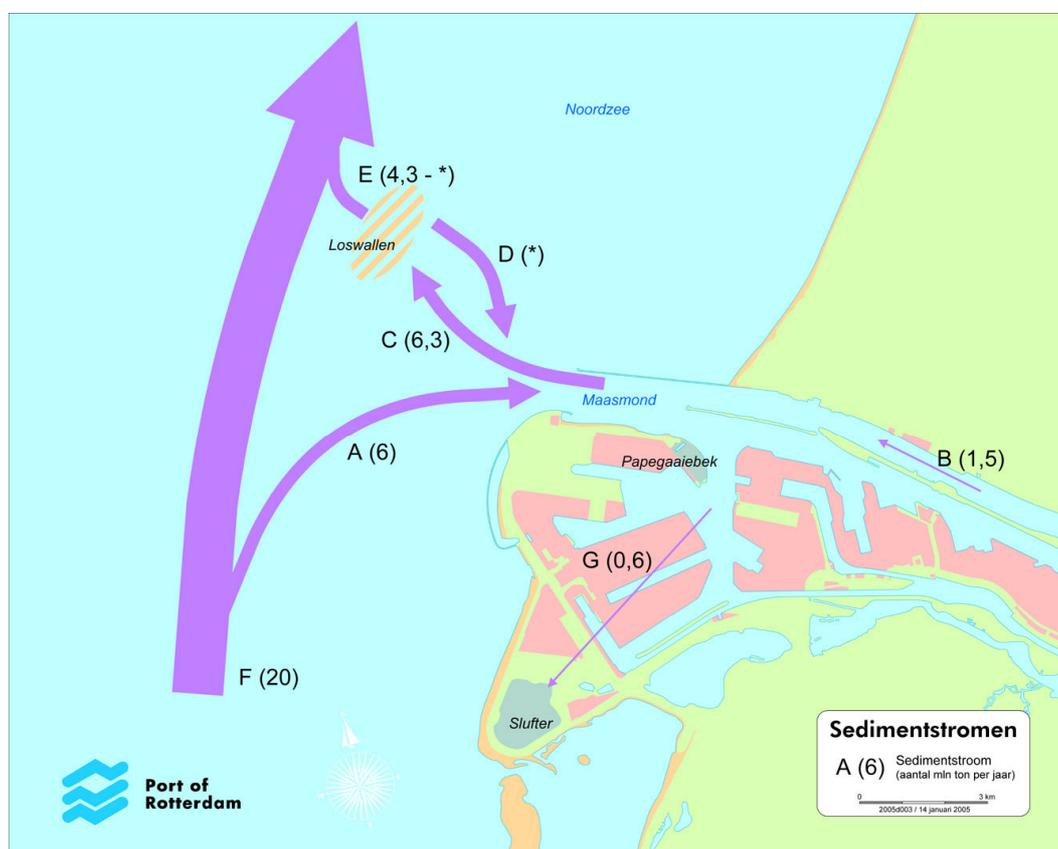
Het retourpercentage voor Loswal Noord is in een modelberekening in 1999 vastgesteld op 44 ± 22 % en het wegstroompercentage is in 1991 met modelberekeningen bepaald op ongeveer 50% (Stutterheim, 2002-c). Voor Loswal Noordwest is het retourpercentage onder gemiddelde omstandigheden en gemiddelde stormen bepaald op $13 \pm 6,5$ % en het wegstroompercentage op 24 à 48 procent (Stutterheim, 2002-c). Aan de hand van deze gegevens en stromings modelering van De Kok (1991), kan verondersteld worden dat een deel van de wegstroom vanaf de Verdiepte Loswal retourstroomt naar de baggerlocaties.

Door verliespercentages van de verschillende loswallen te vergelijken zou de indruk kunnen ontstaan dat de verdieping van de Verdiepte Loswal niet in staat is de wegstroom van sediment te beperken, dit is echter geen juiste conclusie. Dit onderzoek heeft aangetoond dat de verdieping een positieve invloed heeft op het beperken van de wegstroom van sediment uit de put. Het feit dat het verliespercentage van de Verdiepte Loswal in dezelfde orde ligt als de percentages die eerder zijn berekend voor Loswal Noord en Loswal Noordwest is onvoldoende bewijs dat het verlies ook daadwerkelijk gelijk is aangezien de verschillende onderzoeken niet gelijktijdig en met verschillende methoden zijn uitgevoerd. Hierdoor is de vrij grote foutmarge die in de natuur onvermijdelijk optreedt niet overal precies hetzelfde meegerekend.

9.2 Globale slibbalans Noordzeekust

Om de wegstroom en daarmee de invloed van de Verdiepte Loswal in perspectief te brengen tot de natuurlijke omgeving wordt in deze paragraaf de wegstroom vergeleken met het natuurlijk slibtransport langs de Noordzeekust. Als meest waarschijnlijke waarde van het netto sedimenttransport voor de Nederlandse kust wordt de waarde van Salden aangenomen van 20 miljoen ton per jaar (De Kok, 2004). Dit sediment is voornamelijk afkomstig van de Vlaamse banken en de Engelse zuidkust, het verplaatst zich dankzij de Noordoostelijke reststroming langs de Nederlandse kust. De variabiliteit van het jaarlijks sedimenttransport is erg groot en ligt in de orde van 100%. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de intensiteit van stormen.

De rivieren de Maas en de Rijn leveren jaarlijks 1,5 miljoen ton (van Alphen, 1990) sediment aan. Ook hierin is een aanzienlijke variatie terug te zien, afhankelijk van de rivierafvoer. Jaarlijks sedimenteerd gemiddeld 7,5 miljoen ton (gemiddelde over 1990-2003) in de Rotterdamse havens en vaarwegen. Hiervan wordt ongeveer 0,6 ton geborgen in de slufter, de overige 6,9 ton mag worden verspreid op de Noordzee.



Figuur 39. Sedimentstromen regio Rijnmond (* = onbekend).

Een overzicht van het globale sediment transport is weergegeven in Figuur 39. Hierin is terug te zien de sedimentatie van sediment uit zee (stroom A), de aanvoer van sediment door de rivier (B), de hoeveelheid sediment die gestort wordt op de Verdiepte Loswal en Loswal Noordwest (C), het onbekende retourpercentage (D), de wegstroom exclusief het retourpercentage (E), de netto sedimentstroom voor de kust vanuit het kanaal richting het Noorden (F) en het sediment uit de havens dat in de Slufter wordt gestort.

Van de 20 miljoen ton sediment die jaarlijks langs de kust wordt getransporteerd bezinkt aldus ongeveer een derde deel in de Rotterdamse havens en vaarwegen, en wordt vandaar als baggerspecie naar de (verdiepte) loswallen weer in de Noordzee gebracht.

10 Conclusie

Het fysisch onderzoek naar het gedrag van baggerspecie in de Verdiepte Loswal geeft aanleiding tot onderstaande discussie en de volgende conclusies kunnen worden getrokken.

- 1) Het stortverlies bij de Verdiepte Loswallen van havenslib is 5%, van baggerspecie uit de rivier is dit 3%. Het gewogen gemiddelde is 3,5%.
- 2) Totaal is er 24 miljoen kubieke meter baggerspecie gestort in put één. Hetgeen overeen komt met 12 ($\pm 1,2$) miljoen ton droge stof. Uit lodingen is vastgesteld dat er 4,35 mln. kubieke meter baggerspecie in de eerst put aanwezig is. In het geotechnisch onderzoek wordt geconcludeerd dat er 5 ($\pm 0,4$) miljoen ton droge stof in de put aanwezig is. Er is dus een verlies van $57\% \pm 7\%$ over de gehele gebruiksfase opgetreden. Van de totaal gestorte hoeveelheid zand is het verlies ongeveer 46% en van de totaal gestorte hoeveelheid slib ongeveer 72 %.
- 3) Het eerste jaar is het verlies klein maar naarmate de put voller wordt en de waterdiepte afneemt, neemt het verlies sterk toe tot $70\% \pm 7\%$ in de laatste twee jaar.
- 4) Direct na het storten van baggerspecie is de samenhang van de bovenste laag klein waardoor de erosiersterkte laag is. Dit neemt in enkele uren toe tot de samenhang en sterkte die het materiaal in het beun van de sleephopperzuiger had. Vervolgens zal het materiaal in enkele maanden verder consolideren en wordt een grote samenhang bereikt.
- 5) De kritische schuifspanning van granulair sediment is lager dan die van cohesief sediment zodra het cohesieve sediment gedeeltelijk geconsolideerd is. Het sediment in de put heeft dus een grotere erosieweerstand dan het natuurlijke zand van de zeebodem. Hierdoor treedt er langzaam verzanding van de toplaag op.
- 6) De door stroming veroorzaakte bodemschuifspanning is nauwelijks afhankelijk van de waterdiepte. De bodemschuifspanning door golven is daarentegen sterk afhankelijk van de waterdiepte. Hierdoor is de invloed van stormen op het verlies van baggerspecie, klein in de lege put en groot in de volle put.
- 7) Het verlies van baggerspecie vindt voornamelijk kort na het storten plaats. Het totale gewogen gemiddelde van het wegstroompercentage door stroming ligt in de orde van 10% à 20%. 3,5 % van het verlies wordt veroorzaakt door stortverlies en het overige deel (30 à 40%) door de invloed van golven en stormen in het bijzonder. Er dient rekening mee gehouden te worden dat deze percentages een grote foutmarge kunnen hebben zoals in de gevoeligheidsanalyse in hoofdstuk 8 is aangegeven.
- 8) De invloed van golven is kort na het storten erg groot. Als het materiaal enigszins geconsolideerd is (na 1 tot 3 maanden) kunnen alleen nog zeer zware stormen voor erosie uit de put zorgen.
- 9) Doordat de Verdiepte Loswal evenwijdig aan de stroming loopt treedt er stroom attractie op waardoor de stroomsnelheid in de put niet af neemt. Door de put dwars op de stroming aan te leggen kan wel een afname van de stroomsnelheid behaald worden waardoor het totale verlies met ongeveer 5 procent af neemt.
- 10) Retourstroom: uit de gebaggerde hoeveelheden in de havens en vaarwegen in het Rijnmondgebied is geen invloed van een eventuele retourstroom ten gevolge van het in gebruik nemen van de Verdiepte Loswal af te leiden. Dit komt ook door het grillige verloop van de gebaggerde hoeveelheden in de tijd. Wel is een dalende trend sinds 1990 in de gebaggerde hoeveelheden in de Maasmond en mond Caland- Beerkanaal zichtbaar.

Discussie

Dit onderzoek heeft aangetoond dat de verdieping een positieve invloed heeft op het beperken van de hoeveelheid baggerspecie die wegstroomt. Het feit dat het verliespercentage van de Verdiepte Loswal in dezelfde orde ligt als de percentages die eerder zijn berekend voor Loswal Noord en Loswal Noordwest is onvoldoende bewijs dat het verlies ook daadwerkelijk gelijk is aangezien de verschillende onderzoeken niet gelijktijdig en met verschillende methoden zijn uitgevoerd. Hierdoor is verschillend omgegaan met de vrij grote foutmarge die in de natuur onvermijdelijk optreedt.

Doordat vergelijking met Loswal Noord en Noordwest niet goed mogelijk is en er geen onderzoek naar de verspreiding van sediment vanaf de Verdiepte Loswal gedaan is, kan het retourstroompercentage niet worden vastgesteld. Hoewel het niet onwaarschijnlijk is dat een deel van het sediment dat wegstroomt uit de put, retourstroomt naar de baggerlocaties. Aanbevolen wordt om dit in een vervolg onderzoek met behulp van modeleringen verder te onderzoeken.

Om het wegstroompercentage en een eventuele retourstroom te verminderen kan de vormgeving en positionering van de Verdiepte Loswal worden geoptimaliseerd. Door de putten dwars op de stromingsrichting aan te leggen wordt de invloed van de stroming kleiner (50% in de lege put). Op het totale verlies levert dit echter maar een afname op van circa 5%.

11 Aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden aanbevelingen gedaan ten aanzien van zowel het gebruik van de Verdiepte Loswal, als vervolgonderzoek en voor verificatie van de resultaten van dit onderzoek aan de praktijk.

Kennisleemtes

- 1) Er is weinig kennis omtrent het bepalen van kritische schuifspanningen van cohesief materiaal. Dit geldt in het bijzonder voor het bepalen van de kritische bodemschuifspanning van niet-natuurlijk gesedimenteerd cohesief sediment. De kritische bodemschuifspanning kan nauwkeuriger worden bepaald door in-situ metingen op een grote hoeveelheid boxcoremonsters te doen, bijvoorbeeld met de door HR Wallingfort ontwikkelde in-situ erosie test ISIS en SedErode (Feates, 2000). Ook kan door viscositeit, kleef en breukgrens naast de korrelgrootte verdeling en dichtheid van de monsters te bepalen een betere inschatting van de kritische schuifspanningen worden gegeven.

Aanbevelingen voor vervolgonderzoek

- 1) Het wordt aanbevolen om verder onderzoek te doen naar de invloed van storten op de samenhang van het sediment. Daarbij kunnen boxcoremonsters direct na het storten en op verschillende momenten in de eerste maand na een storting veel informatie geven.
- 2) Het wordt aanbevolen om met de uit dit onderzoek verkregen informatie omtrent resuspensie van sediment uit de Verdiepte Loswal met het programma Slib3D, modelleringen uit te voeren, zoals deze ook gedaan zijn voor Loswal Noord en Loswal Noordwest. Hiermee kan verder inzicht in de verspreiding van het sediment en het retourpercentage verkregen worden.

Aanbevelingen gebruik Verdiepte Loswal

Monitoring

- 1) Om de resultaten van dit onderzoek aan de praktijk te kunnen valideren zal het verlies percentage (verschil tussen lodingen en gestorte hoeveelheden) minimaal elk kwartaal moeten worden berekend. Hiervoor zal elk kwartaal een loding gedaan moeten worden en moet de administratie van gebaggerde hoeveelheden beter bijgehouden worden zodat de gegevens per kwartaal beschikbaar komen.
- 2) Het wordt aanbevolen om Pistoncore monsters (onder vrije val) te nemen van de eerste put en van elke volgende put zodra deze halfvol en vol is, in combinatie met verschillende Boxcoremonsters. Er wordt verwacht dat een Pistoncorer een beter monster oplevert dan de Vibrocorer die gebruikt is voor dit onderzoek.
- 3) Het wordt aanbevolen om de resultaten van dit onderzoek te vergelijken met de praktijk door aan de randen van een put troebelheidsmeters te installeren gedurende de gebruiksfase van één put.
- 4) Uit voorliggend onderzoek komt naar voren dat golven en stormen van grote invloed zijn op resuspensie van gestort materiaal in de put. In een vervolgonderzoek zou meer aandacht moeten worden besteed aan dit fenomeen, bijvoorbeeld door metingen uit te voeren vlak na het storten en tijdens of direct na een storm.

Ontwerp

- 1) Het wordt aanbevolen om in de toekomst aan te leggen putten, dwars op de overheersende stromingsrichtingen te plaatsen in plaats van evenwijdig hieraan zoals nu het geval is. Hiermee kan een kleine reductie van het wegstroompercentage behaald worden.
- 2) Een slibvang om het retourpercentage te beperken kan gemaakt worden door ten Zuid-Westen en Zuid-Oosten van de putten een geul te baggeren.

Storten van baggerspecie

- 1) Het is aannemelijk dat er meer baggerspecie in de put terecht komt als er bij het storten van baggerspecie in de Verdiepte Loswal een afstand van circa 75 m tot de rand van de put wordt aangehouden.
- 2) Het stortverlies kan beperkt worden door niet te storten in stormperiodes.

Literatuurlijst

AKWA (2001)

Storten van baggerspecie in putdepots; Eindnota
Advies- en Kenniscentrum Waterbodems (AKWA)
AKWA rapport:01.012
RIZA rapport: 2001.049

CUR rapport 152 (1991)

Kunstmatig in water opgebouwde zandlichamen
Civieltechnisch centrum uitvoering research en regelgeving

Duintjer, J. (2002)

Milieuaspecten Onderhoudsbaggerspecie
Resultaten Monstercampagne Rotterdamse havens en vaarwegen.
Havenbedrijf Rotterdam N.V.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Zuid-Holland
MGR2002

Evers, E.H.G., Joordens, J.C.A., Kok de, J.M., Leussen van, W., Ruig de, J.

Loswal Noord veraf of verdiept. Onderzoek naar de mogelijkheden van baggerspecie.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Feates N., Mitchener H., Spearman J. (2000)

Properties of Dredged Material
HR Wallingfort
Report SR 517

Graaff de, J. (2003)

Draft Coastal Morphology & Coastal Protection
TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.

Heuvel, Tj. van (1988)

Verspreiding van baggerspecie tijdens en na het storten vanuit een baggerschip.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, dienst getijdewateren.
Nota:GWAO-88.034

Klugt, P.C. van der (2001)

Steekboringen Verdiepte Loswal, Loswal Noord en Loswal Noordwest, oktober-november 2001.
Beschrijving van het gestorte materiaal.
Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO,
Projectnummer 005.31024/01.01; NITG 02-022-B

Klugt, P.C. van der (2002)

Steekboringen Verdiepte Loswal, februari 2002.
Beschrijving van het gestorte materiaal.
Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO,
Projectnummer 005.32005/01.01; NITG 02-087-B

Klugt, P.C.M. van der, Pijl, L.R., Frantsen, P.C., Heteren, S. van. (2004)

Seismisch onderzoek en steekboringen in Loswal nr.1.
Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO,
NITG 04-223-C

Kok de, J.M. (1991)

Slibtransport rond Loswal Noord.

Alternatieve stortlocaties.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren.

nota GWAO-91.002

Kok de, J.M. (2000)

Slibtransport rond de Maasmond. Resultaten van het SILTMAN onderzoek.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

RIKZ/2000.027

Kok de, J.M., Sandeh (2000)

Retourpercentage voor de nieuwe loswal.

Vergelijking modeluitkomsten MER en Aquavision voor retourpercentage voor Loswal Noord en Loswal Noordwest.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee

Werkdocument RIKZ/OS/200.129X

Kok de, J.M. (2002)

Getijafhankelijk storten van baggerspecie.

Resultaten van numeriek modelonderzoek.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

RIKZ/2002.027

Kok de, J.M. (2004)

Slibtransport langs de Nederlandse kust.

Bronnen, fluxen en concentraties.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

RIKZ/OS/2004.148w

Koomans, R.L., Oosterhof, E. (2002)

Monitoring Verdiepte Lowal t₁, sedimentbalans.

MEDUSA explorations, Groningen. Rapport 2001-P-019-R3

Ledden, M van (2003)

Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins

TU Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.

Projectgroep MER Loswal Noord (1995)

Een nieuwe Loswal Noord voor het lossen van baggerspecie in zee? Milieu-effectrapport. Verplaatst of verdiept?

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Directie Zuid-Holland / Gemeentelijk Havenbedrijf van Rotterdam.

PUTMOR (2001)

Field measurements at a temporary sand pit

Part 2: data analysis

Svasek, coastal & harbour engineering consultants

Rijn, L.C. van, Walstra, D.J.R. (2004)

Analysis and modelling of sand mining pits.
WL I Delft Hydraulics
Z3748.30

Salden, R.M. (1998)

Een model voor het transport van slib in de Nederlandse kustzone
Rapportage van de SILTMAN deelprojecten 11 en 14.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee
RIKZ/OS/98.119x

Schiereck, G.J. (2001)

Introduction to bed, bank and shore protection
Delft University Press
ISBN 90-407-1683-8

Stutterheim, S. (2002-a)

Opleg-notitie . Conclusies naar aanleiding van onderzoek naar de loswallen in de Noordzee voor baggerspecie uit het Rijnmondgebied.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee. Werkdocument
RIKZ/AB/2002.120x

Stutterheim, S. (2002-b)

Retourpercentage van Loswal Noordwest. Bepaling op grond van baggeradministratie, lodingen en radiometrische kartering.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee. Werkdocument
RIKZ/AB/2002.115x

Stutterheim, S. (2002-c)

Van Noord tot Noordwest. Een studie naar de berging van baggerspecie op loswallen.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee. Rapport
RIKZ/2002.047

Stutterheim, S. (2002-d)

Het storten van baggerspecie in de Verdiepte Loswal.
Verslag van praktijkproef, een tussenstand.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee. Rapport
RIKZ/2002.025

Stutterheim, S. (2002-e)

Werkwijze voor de berekening van het wegstroom percentage van baggerspecie en de standaard fout ervan voor Loswal Noordwest en de Verdiepte Loswal.
Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee. Werkdocument
RIKZ/AB/2002.120x

Van Alphen, J.S.L.J. (1990)

A mud balance for the Belgian-Dutch coastal waters between 1969 and 1986.
Netherlands Journal of Sea Research 25, 19-30

Verruijt, A. (1983)

Grondmechanica
Delft University Press
ISBN 90 407 1857 1

Walstra, D.J.R., Rijn, L.C. van, Helvert, M.A.G. van (2002)

Morphology of Pits, Channels and Trenches.

PartII: Model Verification of Delft3D with PUTMOR dataset

WL I Delft Hydraulics

Z3223

Wensveen, M. (2004)

Kwaliteit onderhoudsbaggerspecie

Resultaten Monstercampagne Rotterdamse havens en vaarwegen.

Havenbedrijf Rotterdam N.V.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Zuid-Holland

MCR2004

Werkgroep MER (1984)

5. Fysische processen

Consolidatie, ontwikkeling draagkracht en waterhuishouding in het depot.

Grootschallige locatie voor de berging van baggerspecie uit het benedenrivierengebied.

Gemeente Rotterdam, Rijkswaterstaat, openbaar lichaam Rijnmond

Whitehouse, R.; Soulsby, R.; Roberts, W.; Mitchener, H.; (2000)

Dynamics of estuarine muds

HR Wallingfort

ISBN: 0 7277 2864 4

Winterwerp, J.C.; Kranenburg C. (2002)

Fine Sediment Dynamics in the Marine Environment.

Elsevier Science B.V.

ISBN: 0-444-51136-9

Lijst van Symbolen

c	sedimentconcentratie	[m ³ /m ³]
C	Chézy coëfficiënt (=log(12h/r))	[m ^{1/2} /s]
d _x	korrelgrootte die door x procent word onderschreden	[m]
f _w	golfwrijving constante	[-]
g	zwaartekracht versnelling	[m/s ²]
h	waterdiepte	[m]
H	golfhoogte	[m]
H _s	significante golfhoogte (gemiddelde van het hoogste 1/3 deel van alle golven in een golfveld)	[m]
k	golfgetal	[1/m]
k _r	Nikuradse bodemruwheid	[m]
L	golflengte	[m]
P	poriëngehalte	[-]
r	bodemruwheid	[m]
S	sediment transport	[m ³ /s/m ²]
t	tijd	[s]
TDS	ton droge stof	[10 ³ kg]
T	golfperiode	[s]
T _m	gemiddelde van alle golfperiode	[s]
T _p	periode die behoort bij de waarde met de hoogste energiedichtheid in het spectrum	[s]
u _x	snelheid in x-richting	[m/s]
u _y	snelheid in y-richting	[m/s]
u _w	orbitaal snelheid	[m/s]
u [*]	schuifspannings snelheid	[m/s]
\bar{u}	gemiddelde snelheid in ruimte of tijd	[m/s]
v	snelheid in y-richting	[m/s]
x	afstand langs de horizontale as in de richting van de stroming	[m]
y	afstand langs de horizontale as haaks op de richting van de stroming	[m]
z	afstand langs de verticale as	[m]
α	hoek van inval	[graden]
Δ	relatieve dichtheid	[-]
ρ	dichtheid	[kg/m ³]
ρ _{bulk}	dichtheid van met waterverzadigde sediment	[kg/m ³]
ρ _{droog}	dichtheid van droog sediment	[kg/m ³]
λ _a	aanpassingslengte	[m]
κ	Von Karman's constante (0,40)	[-]
τ	bodemschuifspanning	[N/m ²]
τ _{kr}	kritische bodemschuifspanning	[N/m ²]
τ _s	bodemschuifspanning veroorzaakt door stroming	[N/m ²]
τ _w	bodemschuifspanning veroorzaakt door golven	[N/m ²]
τ _m	gemiddelde bodemschuifspanning veroorzaakt door golven en stroming	[N/m ²]
ν	kinematische viscositeit	[m ² /s]
ω	hoekfrequentie	[Hz]
Ψ _{kr}	Shields stabiliteits parameter (=τ _{kr} /Δgd)	[-]

Lijst van Afkortingen

AKWA	Advies en Kenniscentrum Waterbouw
DNZ	Rijkswaterstaat, Directie Noordzee
DZH	Rijkswaterstaat, Directie Zuid Holland
HbR	Havenbedrijf Rotterdam N.V.
LDS	Lowered Dumping Site (Verdiepte Loswal)
LEG	Lichteiland Goeree
MER	Milieueffectrapport
MTDS	Miljoen ton droge stof
RIKZ	Rijkswaterstaat, Rijks Instituut van Kust en Zee
TDS	Ton Droge Stof
TU Delft	Technische Universiteit Delft
VROM	Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer
V&W	Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Verdiepte Loswal

Fysisch onderzoek naar het gedrag van baggerspecie

Bijlagen

Status: definitief
Cuno R. Langeveld

februari 2005

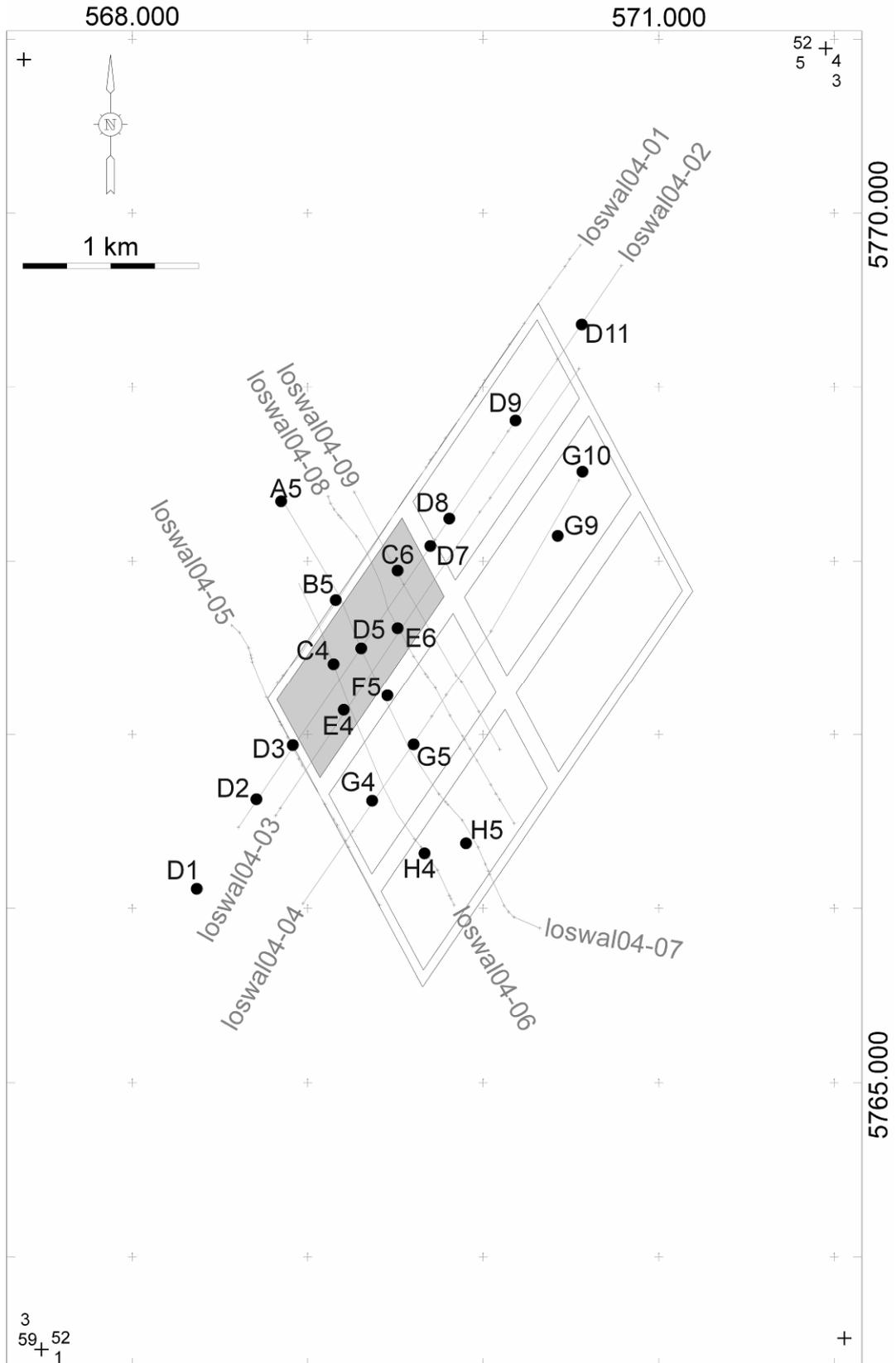
Commissie:
Prof. dr. ir. G.S. Stelling
dr. ir. J.C. Winterwerp
ir. M.A.J. de Nijs
ir. T. Vellinga
ing. G.W. Berger
dr. J.M. de Kok

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Technische Universiteit Delft

Inhoudsopgave

Bijlage 1	Locatie van boringen en seismische leinen
Bijlage 2	Foto's monstername apparatuur
Bijlage 3	Dichtheid berekening methode
Bijlage 4	Resultaten bemonstering
Bijlage 5	Dichtheden toplaag
Bijlage 6	Schematische weergave dichtheden in toplaag
Bijlage 7	Schematische weergave percentage fijne delen in toplaag
Bijlage 8	In-situ dichtheids opbouw in put 1
Bijlage 9	Korrelgrootte verdeling in tabel
Bijlage 10	Korrelgrootte analyse
Bijlage 11	Korrelgrootte analyse toplaag put 1
Bijlage 12	Korrelgrootte analyse C4
Bijlage 13	Korrelgrootte analyse E6
Bijlage 14	Verskillende grafieken van kritische bodemschuifspanning van HR Wallingford
Bijlage 15	Stroomsnelheden, golfhoogte en troebelheid uit PUTMOR onderzoek
Bijlage 16	Gemeten stroomsnelheid in put 1
Bijlage 17	Door WL Delft gemodeleerde stroomsnelheid in put 1

Bijlage 1



Locatie van boringen en seismische lijnen.

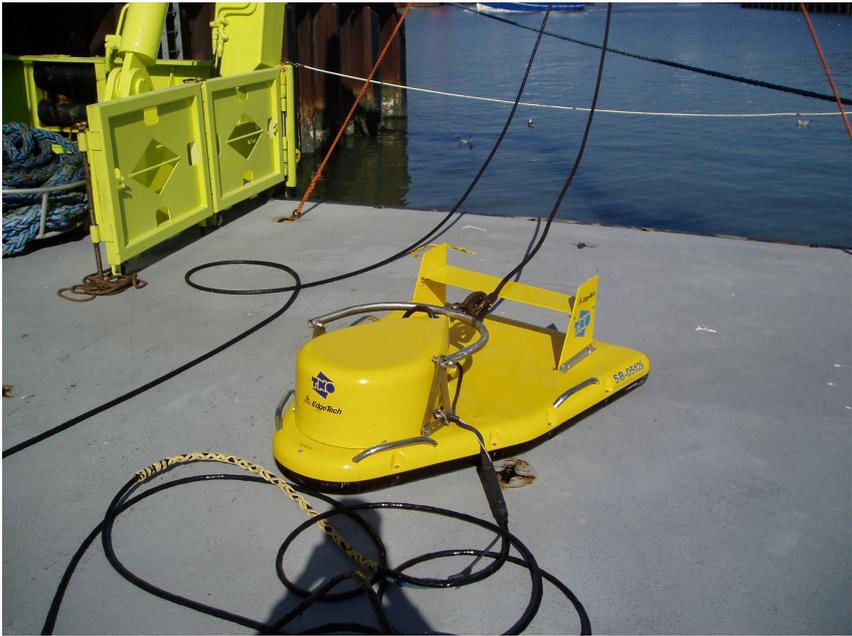
Bijlage 2



Vibrocorer



Boxcore



X-star

Bijlage 3

Dichtheid in-situ, in beun en droge stof.

De dichtheid in-situ en in beun zijn het gewicht van een kubieke meter baggerspecie respectievelijk in de originele zeebodem of in beun van de sleepopperzuiger, beiden worden ook wel uitgedrukt als ρ_{bulk} . De dichtheid droge stof is het gewicht van dezelfde kubieke meter maar zonder water.

Om uit de dichtheid in bulk de dichtheid droge stof te bepalen of andersom wordt een omrekenformule gebruikt. In de omrekenformule zit het soortelijk gewicht van de vaste massa (2650 kg/m³) en het soortelijk gewicht van zeewater (1026 kg/m³). Bij dit onderzoek zijn zowel de bulkdichtheid als de dichtheid droge stof gemeten, aangezien bleek dat beiden niet met elkaar overeenkomen is uitgegaan van de dichtheid droge stof en de daaruit berekende bulk dichtheid. Dit omdat de dichtheid droge stof betrouwbaarder is, en er waarschijnlijk water is verdampt uit het natte monster. Er is gerekend met de volgende formules:

$$\rho_{\text{droog}} = \left(\frac{\rho_{\text{bulk}} - 1026}{2650 - 1026} \right) * 2650 \quad [\text{kg} / \text{m}^3]$$
$$\rho_{\text{bulk}} = \left(\frac{\rho_{\text{droog}} * (2650 - 1026)}{2650} \right) + 1026 \quad [\text{kg} / \text{m}^3]$$

Bijlage 4

put 1, locatie: M1 (E6)

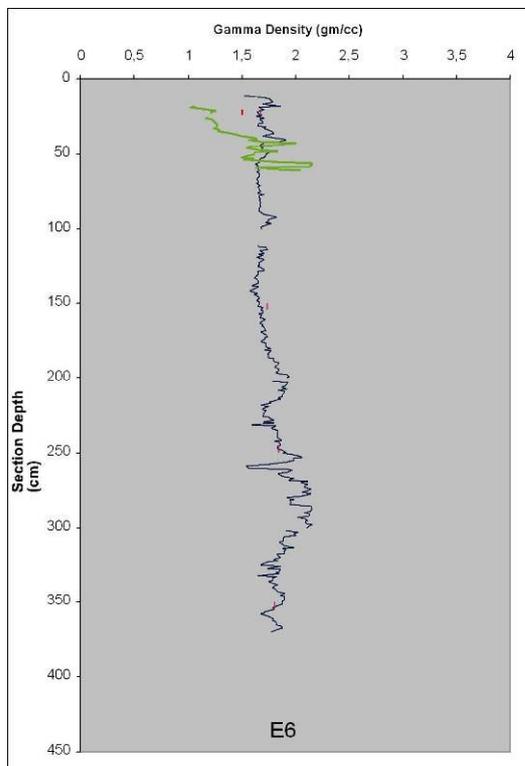


Boxcore monster

E6		
diepte	ρ bulk [kg/m ³]	ρ droog [kg/m ³]
0.20-0.25	1574	894
0.20-0.25	1678	1063
1.50-1.55	1687	1079
2.45-2.50	1795	1255
3.50-3.55	1790	1247



Boxcore monster



*Multi sensor core logger
groen: dichtheidsverloop Boxcore
Blauw: dichtheidsverloop Vibrocore*



Vibrocore monster

put 1, locatie: M2 (C6)

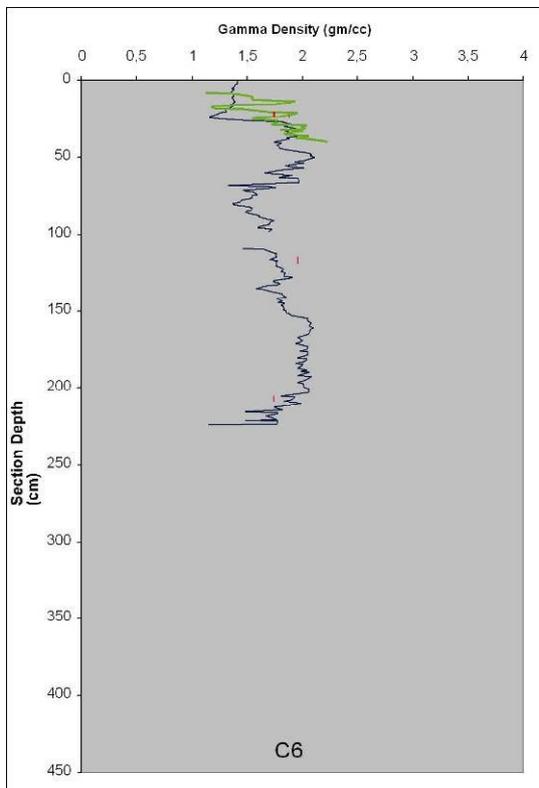


Boxcore monster

	C6		
	diepte	ρ bulk [kg/m ³]	ρ droog [kg/m ³]
Boxcore	0.20-0.25	1639	1001
Vibrocore	0.20-0.25	1751	1182
	1.15-1.20	1814	1285
	2.05-2.10	1719	1131



Boxcore monster



*Multi sensor core logger
groen: dichtheidsverloop Boxcore
Blauw: dichtheidsverloop Vibrocore*



Vibrocore monster

put 1, locatie: M3 (C4)

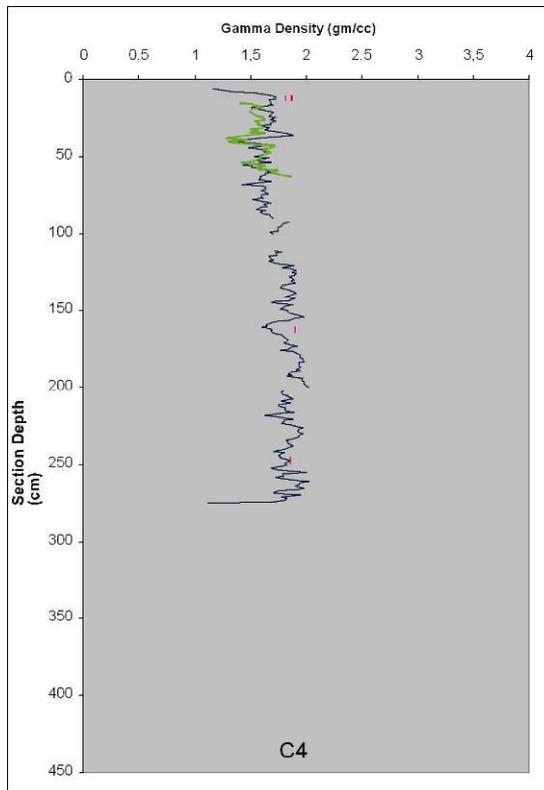


Boxcore monster

	C4		
	diepte	ρ bulk [kg/m ³]	ρ droog [kg/m ³]
Boxcore	0.10-0.15	1663	1040
Vibrocore	0.10-0.15	1695	1092
	1.60-1.65	1791	1249
	2.45-2.50	1751	1182



Boxcore monster



*Multi sensor core logger
groen: dichtheidsverloop Boxcore
Blauw: dichtheidsverloop Vibrocore*



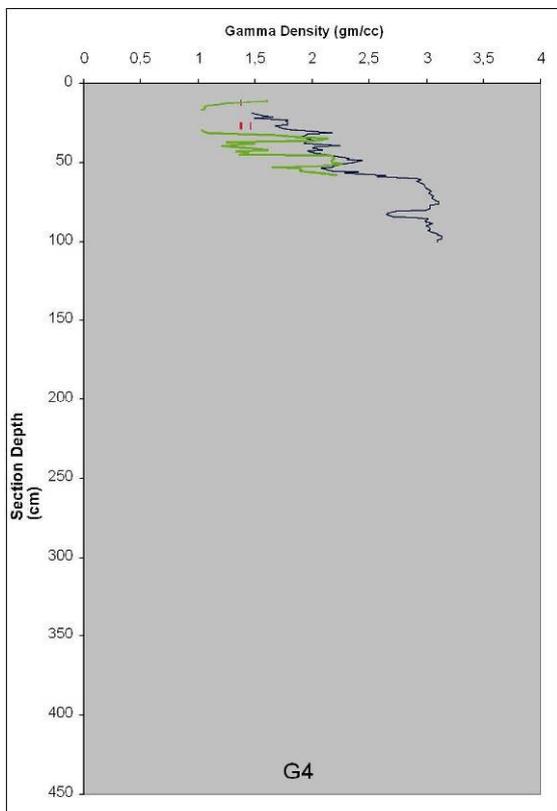
Vibrocore monster

put 3, locatie: G4



G4		
diepte	ρ bulk [kg/m ³]	ρ droog [kg/m ³]
0.25-0.30	1556	864
0.10-0.15	1551	856

Boxcore monster



*Multi sensor core logger
groen: dichtheidsverloop Boxcore
Blauw: dichtheidsverloop Vibrocore*



Vibrocore monster

put 4, locatie: G 10

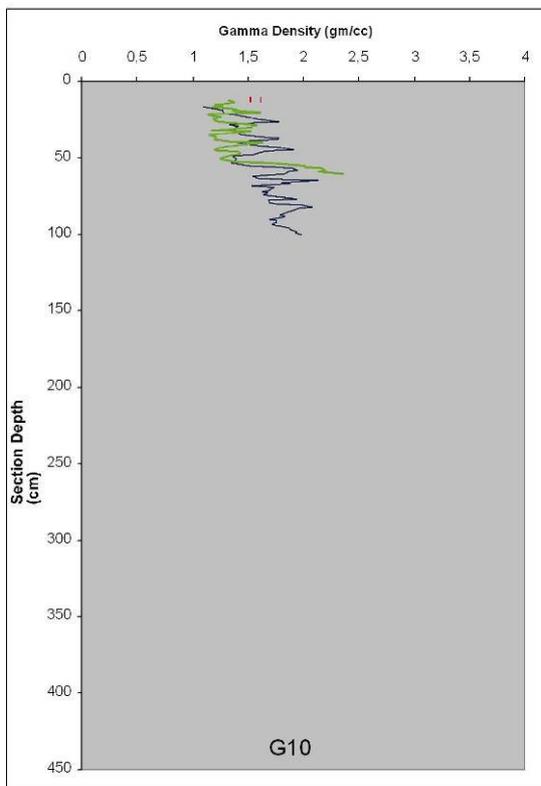


Boxcore monster



Boxcore monster

G10		
diepte	ρ bulk [kg/m ³]	ρ droog [kg/m ³]
0.10-0.15	1545	847
0.10-0.15	1770	1215



*Multi sensor core logger
groen: dichtheidsverloop Boxcore
Blauw: dichtheidsverloop Vibrocore*



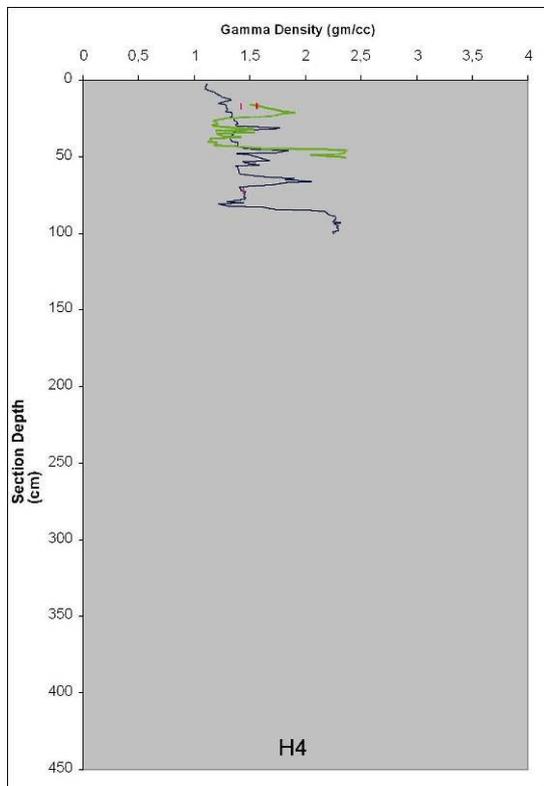
Vibrocore monster

put 5, locatie: H4



	H4		
	diepte	ρ bulk [kg/m ³]	ρ droog [kg/m ³]
Boxcore	0.15-0.20	1560	871
Vibrocore	0.15-0.20	1508	787
	0.70-0.75	1572	891

Boxcore monster



*Multi sensor core logger
groen: dichtheidsverloop Boxcore
Blauw: dichtheidsverloop Vibrocore*



Vibrocore monster

Bijlage 5

Locatie	Box core 0-0,5 meter				Vibrocore 0-0,5meter			
	ρbulk		ρdroog		ρbulk		ρdroog	
	gemeten	berekend (gecor.)	gecorrigeerd	gemeten	gemeten	berekend (gecor.)	gecorrigeerd	gemeten
M0 (D5)					1520	1495	766	880
M1 (E6)	1500	1575	896	1030	1680	1692	1088	1250
M2 (C6)	1750	1639	1001	1150	1880	1767	1209	1390
M3 (C4)	1870 *	1666 *	1044 *	1200 *	1820	1714	1122	1290
M5 (E4)	1600	1612	957	1100	1480	1548	853	980
A5								
B5								
F5					1650	1596	931	1070
D1					2020	1884	1401	1610
D2								
D3					1630	1564	879	1010
D7					1520	1479	740	850
put 2								
D8	1980	1858	1357	1560				
D9					1840	1730	1148	1320
D11					1590	1559	870	1000
put 3								
G4	1380	1570	887	1020	1380/1460	1564	879	1010
G5								
put 4								
G9					1620	1570	887	1020
G10	1520	1559	870	1000	1610	1788	1244	1430
put 5								
H4	1560	1559	870	1000	1420	1522	809	930
H5								

Eenheid: kg/m3

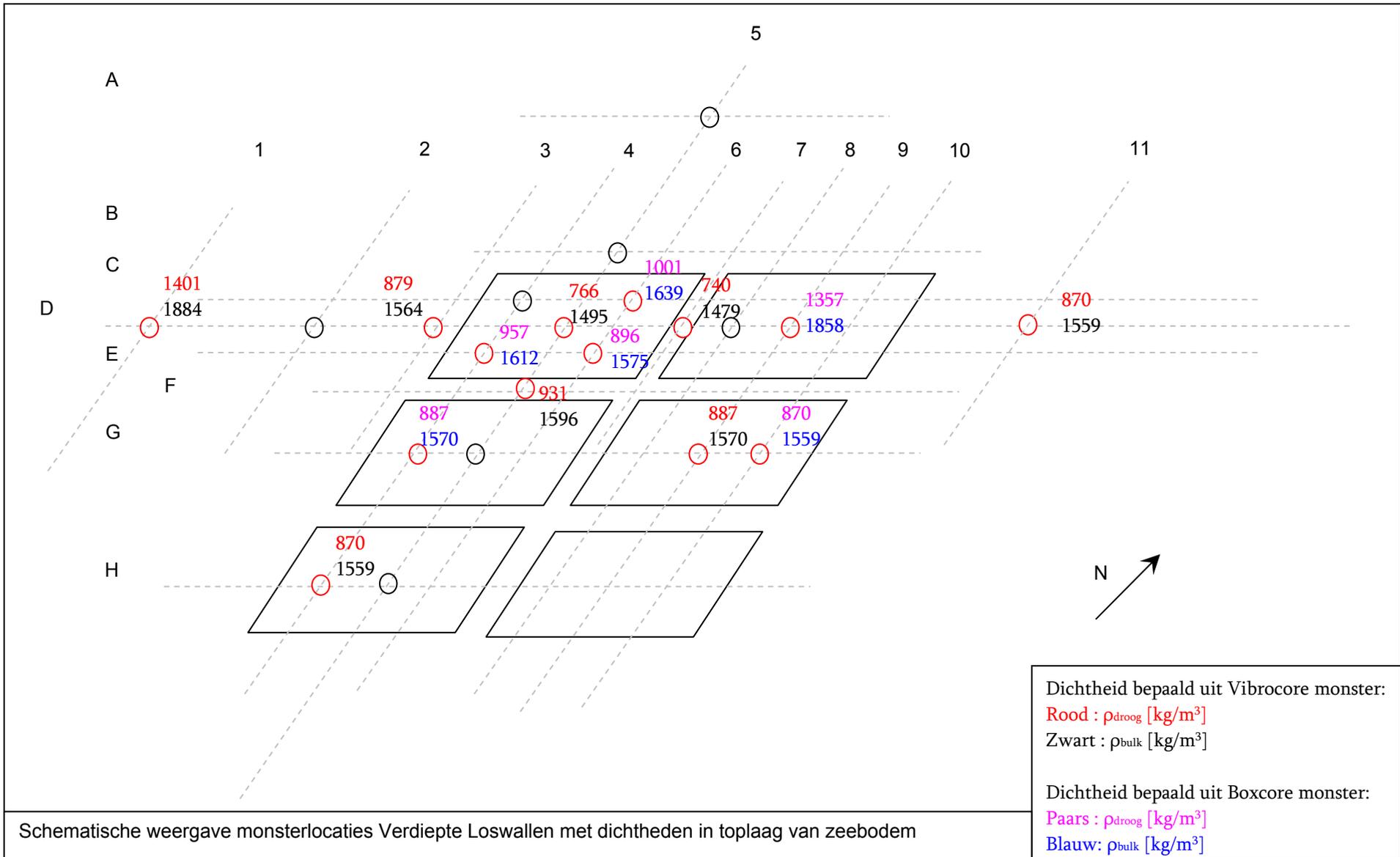
* = onbetrouwbare waarde

relatie natte dichtheid (bulk) - droge dichtheid:

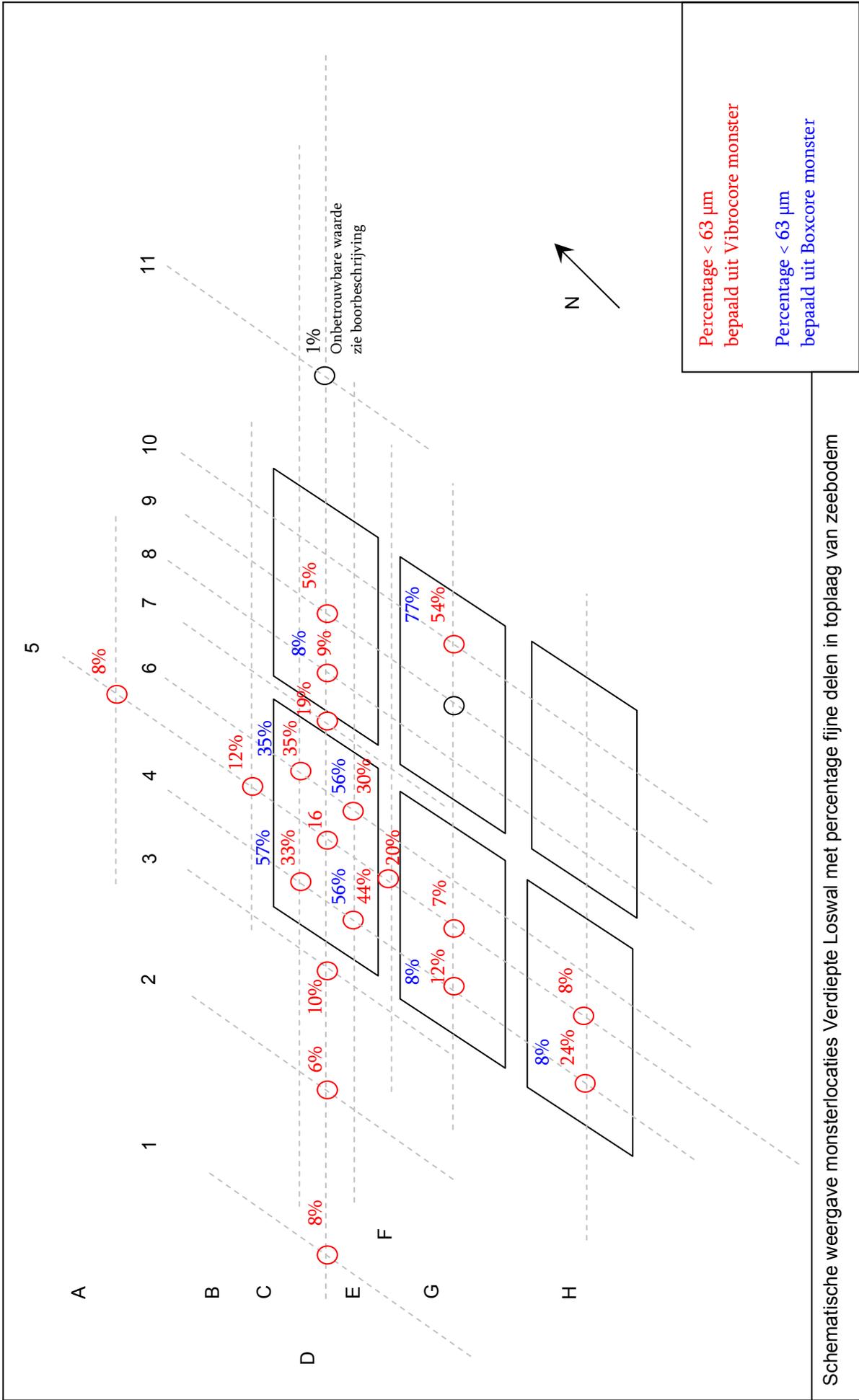
$$\rho_{\text{bulk}} = \{\rho_{\text{droog}} * (\rho_{\text{mat}} - 1026) / \rho_{\text{mat}}\} + 1026 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\rho_{\text{mat}} = 2650 \text{ kg/m}^3$$

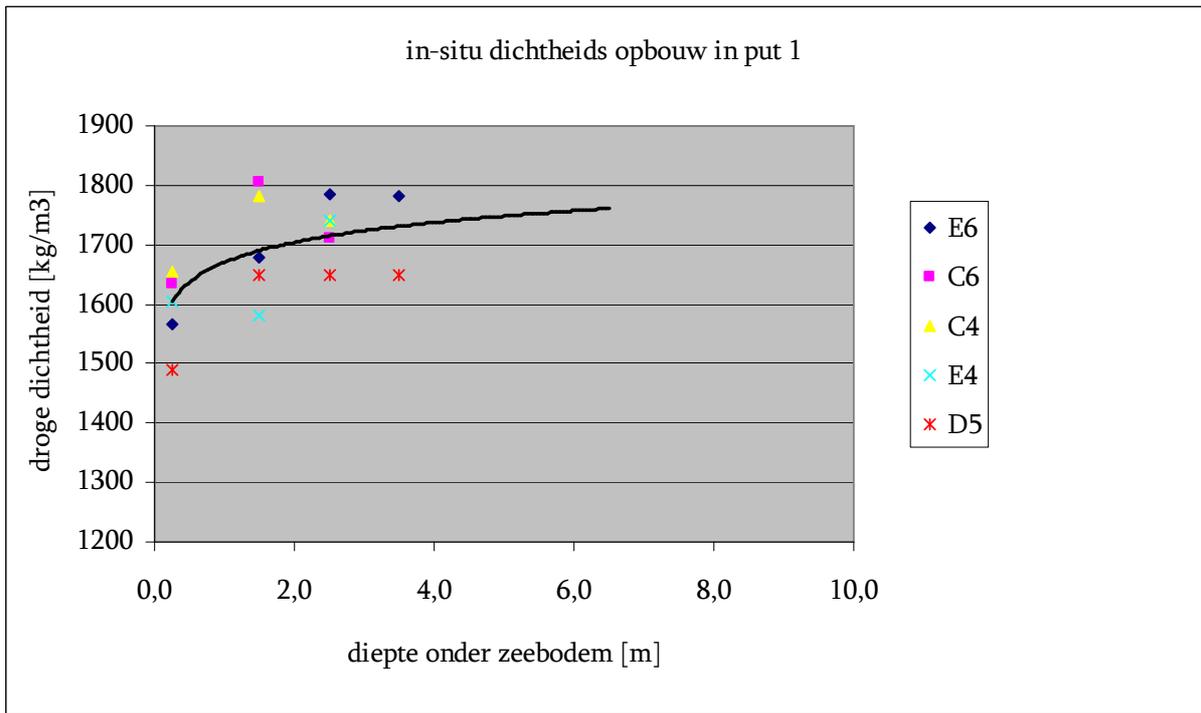
Bijlage 6



Bijlage 7



Bijlage 8



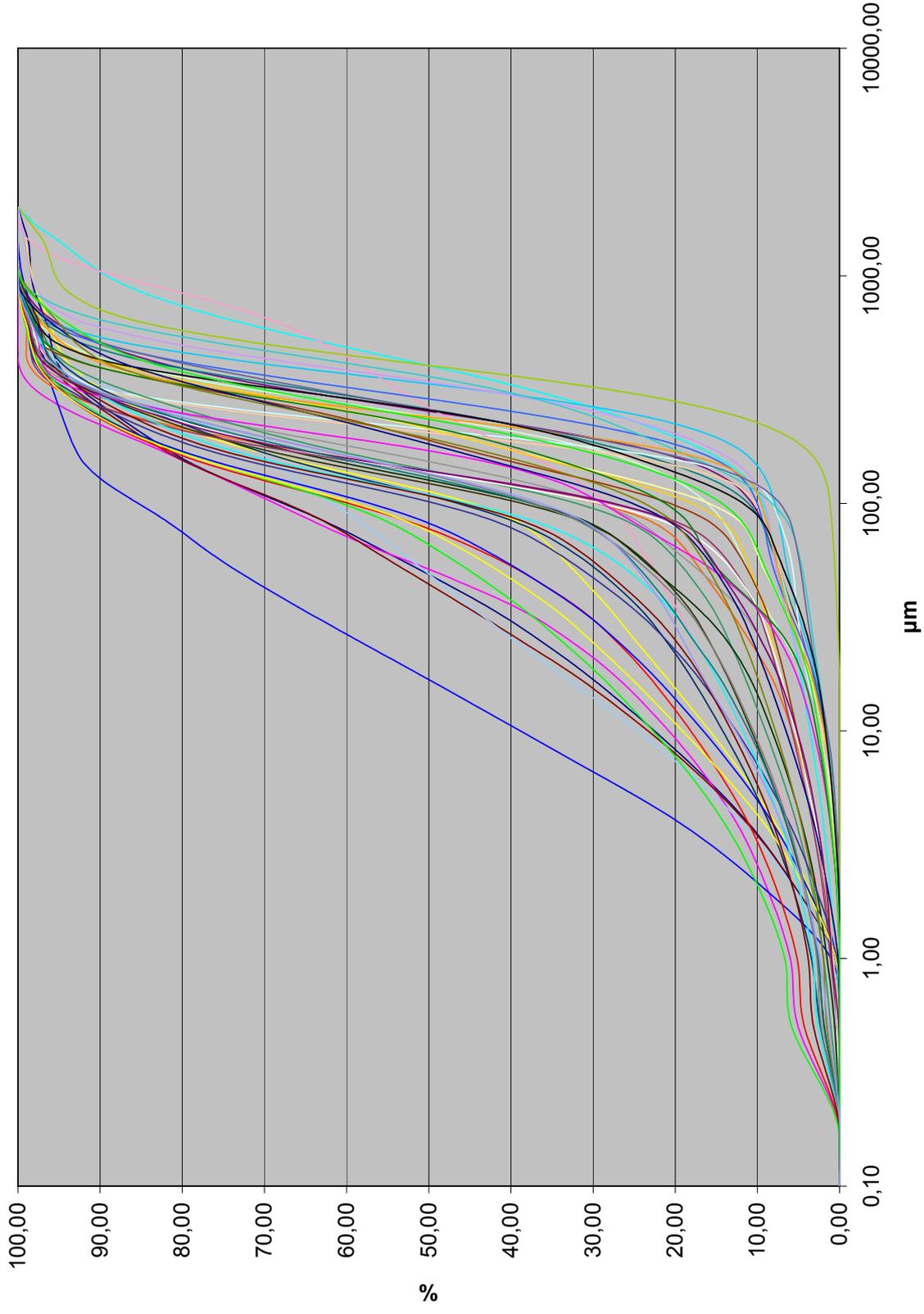
Bijlage 9

korrelgrootte verdeling

Sample	< 63 (%)	d (0.1) (µm)	d (0.5) (µm)	d(0.6) (µm)	d (0.9) (µm)	d(0.6)/d(0.1)
E4box diepte 0.12 - 0.63 m	55,95	3,53	48,77	74,91	272,25	21,25
C6box diepte 0.00 - 0.41 m	56,35	2,60	51,33	71,52	221,60	27,52
E6box diepte 0.14 - 0.62 m	34,89	5,26	112,88	136,66	322,26	25,99
H4box diepte 0.1 - 0.45 m	7,94	111,80	403,37	485,12	1042,65	4,34
D8box diepte 0.08 - 0.4 m	8,17	91,83	253,90	288,24	502,13	3,14
C4box diepte 0.12 - 0.63 m	57,05	3,48	44,24	73,32	262,02	21,08
G4box diepte 0.06 - 0.55 m	8,24	89,21	259,62	297,53	475,54	3,34
G10box diepte 0.05 - 0.55 m	77,26	2,17	16,79	26,61	128,60	12,24
G5 diepte 0.0 - 1.00 m	6,77	146,01	335,15	370,45	538,18	2,54
D2 diepte 0.15 - 1.00 m	6,19	120,44	211,58	229,93	320,03	1,91
G4 diepte 0.11 - 1.00 m	12,30	41,23	240,25	273,03	436,62	6,62
D3 diepte 0.11 - 1.00 m	10,23	59,81	212,21	253,51	397,36	4,24
G10 diepte 0.15 - 1.00 m	53,92	3,32	49,01	91,08	332,32	27,48
H4 diepte 0.0 - 1.00 m	24,14	8,21	263,72	441,62	1046,23	53,82
H5 diepte 0.10 - 1.00 m	8,11	118,84	341,60	385,07	593,64	3,24
D1 diepte 0.10 - 1.00 m	8,02	96,21	205,02	223,69	314,84	2,33
D8 diepte 0.15 - 1.00 m	8,63	99,63	287,55	323,59	504,44	3,25
D9 diepte 0.00 - 1.00 m	5,10	112,49	360,89	413,37	641,82	3,67
D11 diepte 0.00 - 1.00 m	0,71	225,89	404,38	448,56	710,23	1,99
B5 diepte 0.14 - 1.00 m	11,81	42,13	213,09	256,14	425,26	6,08
A5 diepte 0.14 - 1.00 m	8,00	110,00	239,56	264,55	416,62	2,41
D7 diepte 0.00 - 1.00 m	18,79	21,95	138,30	157,99	266,29	7,20
D8 diepte 0.00 - 1.00 m	5,17	120,39	258,42	299,76	511,09	2,49
F5 diepte 0.12 - 1.00 m	20,25	26,65	152,64	179,15	304,79	6,72
C4 diepte 0.09-1.14 m	33,04	5,15	108,25	132,83	319,66	25,80
C4 diepte 1.14- 1.3 m	21,08	12,67	139,70	166,50	346,51	13,14
C4 diepte 1.3 - 1.55 m	25,58	14,59	126,46	149,44	314,04	10,24
C4 diepte 1.55 - 2.53 m	25,37	8,67	122,25	143,38	296,69	16,53
C4 diepte 2.53 - 2.75 m	12,68	42,08	189,33	234,87	395,07	5,58
C6 diepte 0.25 - 0.70 m	14,84	33,76	136,40	154,47	266,47	4,58
C6 diepte 0.70 - 1.24 m	35,13	7,13	101,82	122,72	265,26	17,21
C6 diepte 1.24 - 1.96 m	7,80	88,60	257,01	289,57	428,71	3,27
C6 diepte 1.96 - 2.35 m	15,56	34,78	136,39	156,64	313,37	4,50
E4 diepte 0.18 - 1.00 m	44,15	3,27	77,32	100,68	235,93	30,83
E4 diepte 1.00 - 2.25 m	49,16	2,11	65,81	98,40	244,61	46,63
E4 diepte 2.25 - 3.2 m	43,42	5,00	81,86	106,95	241,07	21,41
E4 diepte 3.2 - 3.32 m	45,94	4,29	75,47	102,69	238,12	23,91
E4 diepte 3.32 - 4.3 m	19,49	34,30	170,29	194,02	295,51	5,66
E6 diepte 0.1 - 1.25 m	29,68	7,27	109,25	129,55	298,89	17,83
E6 diepte 1.25 - 2.5 m	32,00	5,84	108,09	128,11	284,34	21,95
E6 diepte 2.5 - 3.15 m	16,52	34,92	217,52	253,49	395,54	7,26
E6 diepte 3.15 - 3.54 m	17,05	22,24	182,30	226,66	455,46	10,19
E6 diepte 3.54 - 3.7 m	17,49	17,20	193,08	230,63	428,32	13,41
D5 diepte 0.13 - 0.47 m	16,46	26,91	138,59	157,79	300,43	5,86
D5 diepte 0.47 - 0.88 m	26,73	8,32	129,66	155,32	308,05	18,66
D5 diepte 0.88 - 1.05 m	10,02	62,81	234,29	271,07	507,00	4,32
D5 diepte 1.05 - 2.2 m	26,47	9,13	133,87	162,06	306,89	17,74
D5 diepte 2.20 - 3.6 m	26,82	6,74	135,16	162,42	311,42	24,11

Bijlage 10

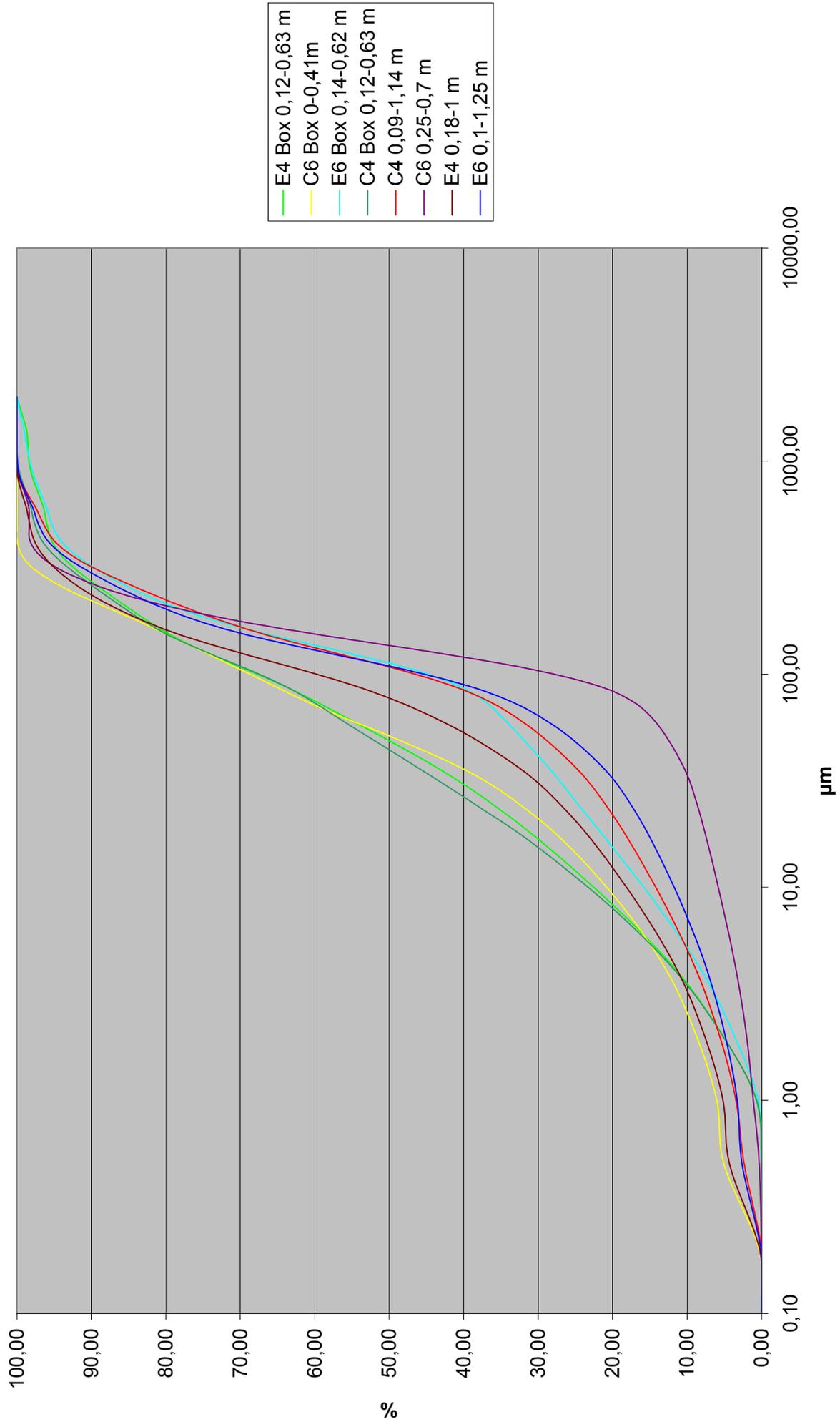
Korrelgrootte analyse



- E4 Box 0,12-0,63 m
- C6 Box 0-0,41 m
- E6 Box 0,14-0,62 m
- H4 Box 0,1-0,45 m
- D8 Box 0,08-0,4 m
- C4 Box 0,12-0,63 m
- G4 Box 0,06-0,55 m
- G10 Box 0,05-0,55 m
- G5 0-1 m
- D2 0,15-1 m
- G4 0,11-1 m
- D3 0,11-1 m
- G10 0,15-1 m
- H4 0-1 m
- H5 0,1-1 m
- D1 0,1-1 m
- D8 0,15-1 m
- D9 0-1 m
- D11 0-1 m
- B5 0,14-1 m
- A5 0,14-1 m
- D7 0-1 m
- D8 0-1 m
- F5 0,12-1 m
- C4 0,09-1,14 m
- C4 1,14-1,3 m
- C4 1,3-1,55 m
- C4 1,55-2,53 m
- C4 2,53-2,75 m
- C6 0,25-0,7 m
- C6 0,7-1,24 m
- C6 1,24-1,96 m
- C6 1,96-2,35 m
- E4 0,18-1 m
- E4 1-2,25 m
- E4 2,25-3,2 m
- E4 3,2-3,32 m
- E4 3,32-4,3 m
- E6 0,1-1,25 m
- E6 1,25-2,5 m
- E6 2,5-3,15 m
- E6 3,15-3,54 m
- E6 3,54-3,7 m
- D5 0,13-0,47 m
- D5 0,47-0,88 m
- D5 0,88-1,05 m
- D5 1,05-2,2 m
- D5 2,2-3,6 m

Bijlage 11

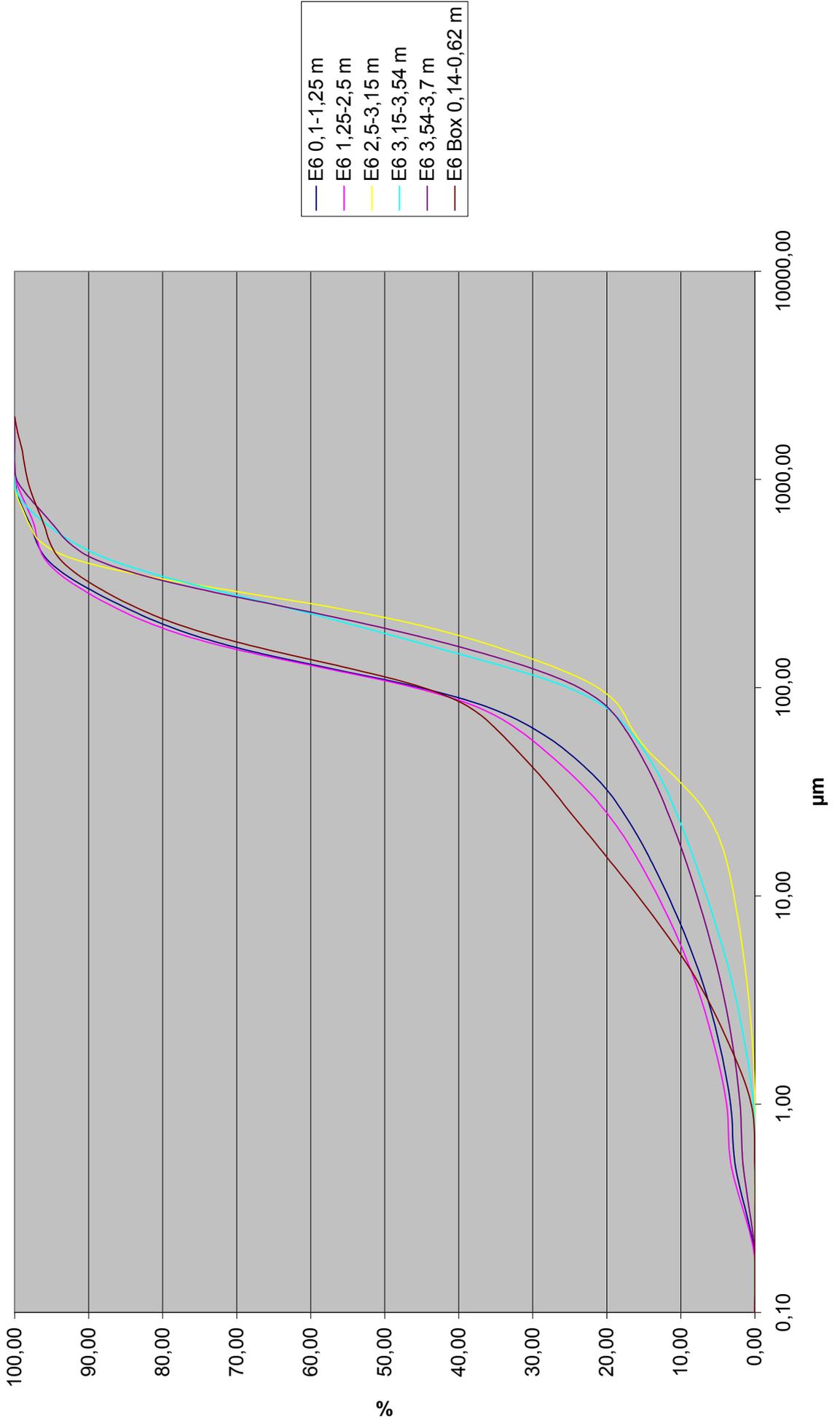
Korrelgrootte analyse monsters toplaag eerste put



Bijlage 12

Bijlage 13

Korrelgrootte verdeling E6



Bijlage 14

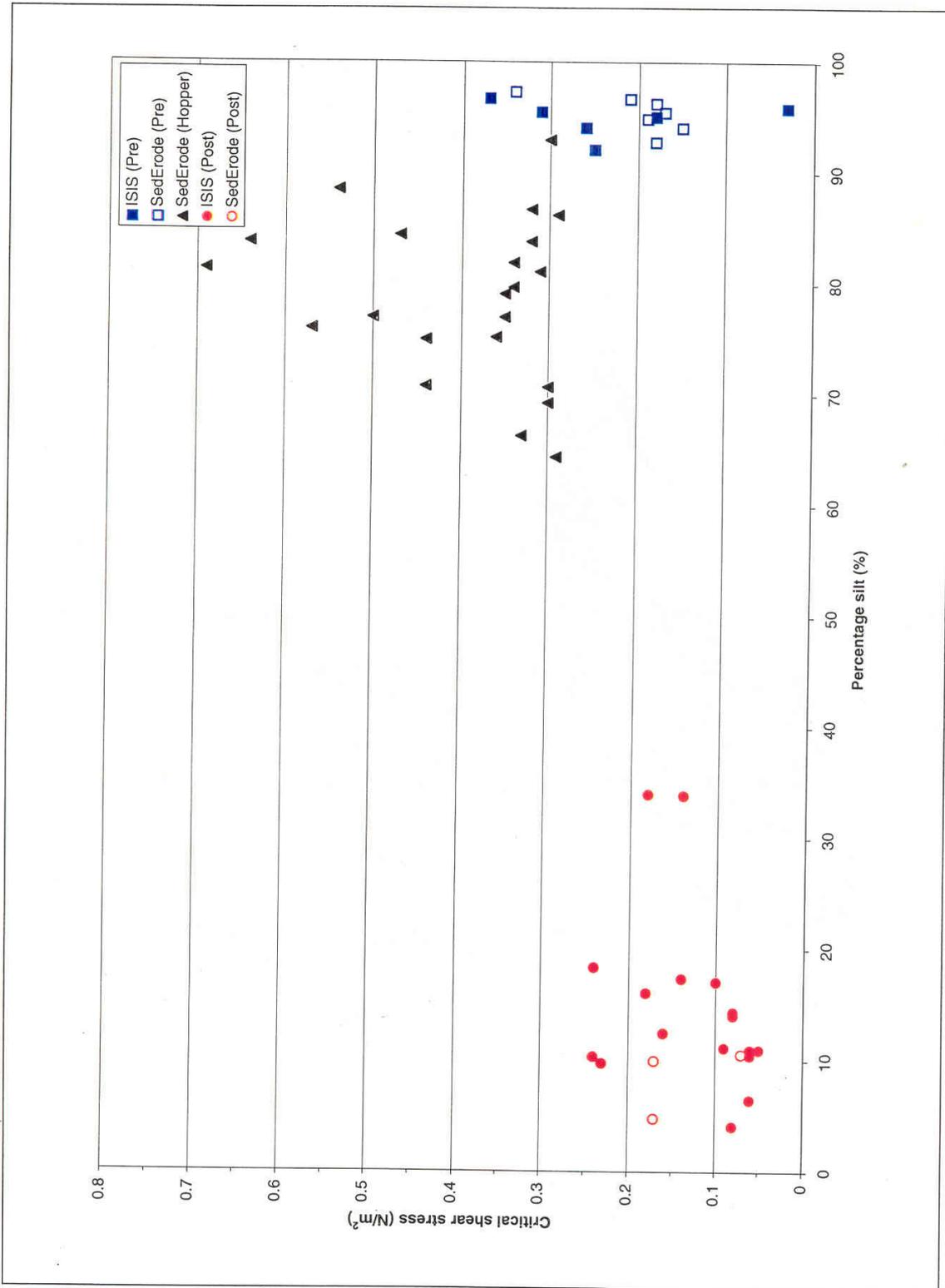


Figure 2 Silt content versus critical shear stress - Tees

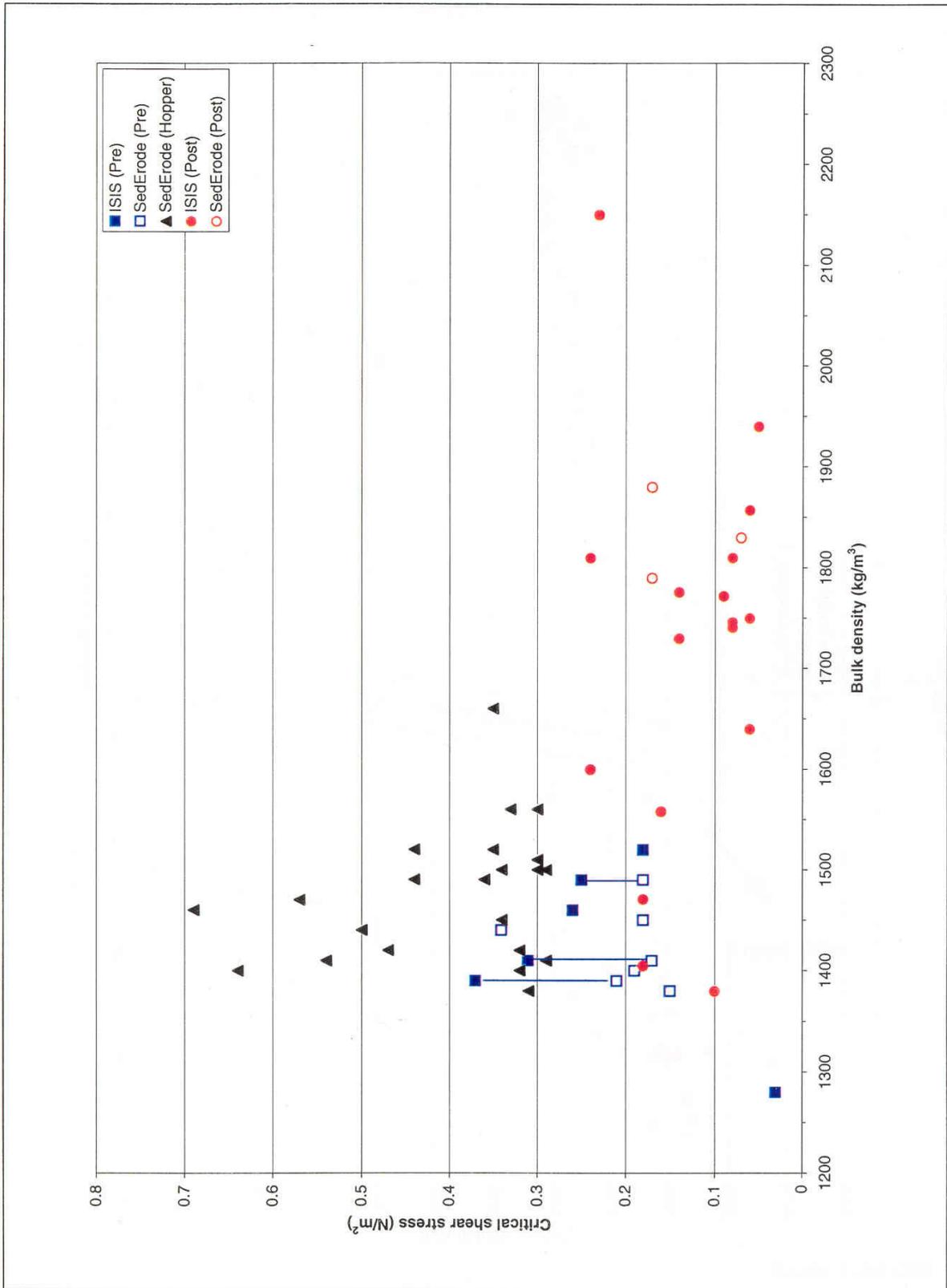


Figure 3 Bulk density versus critical shear stress - Tees

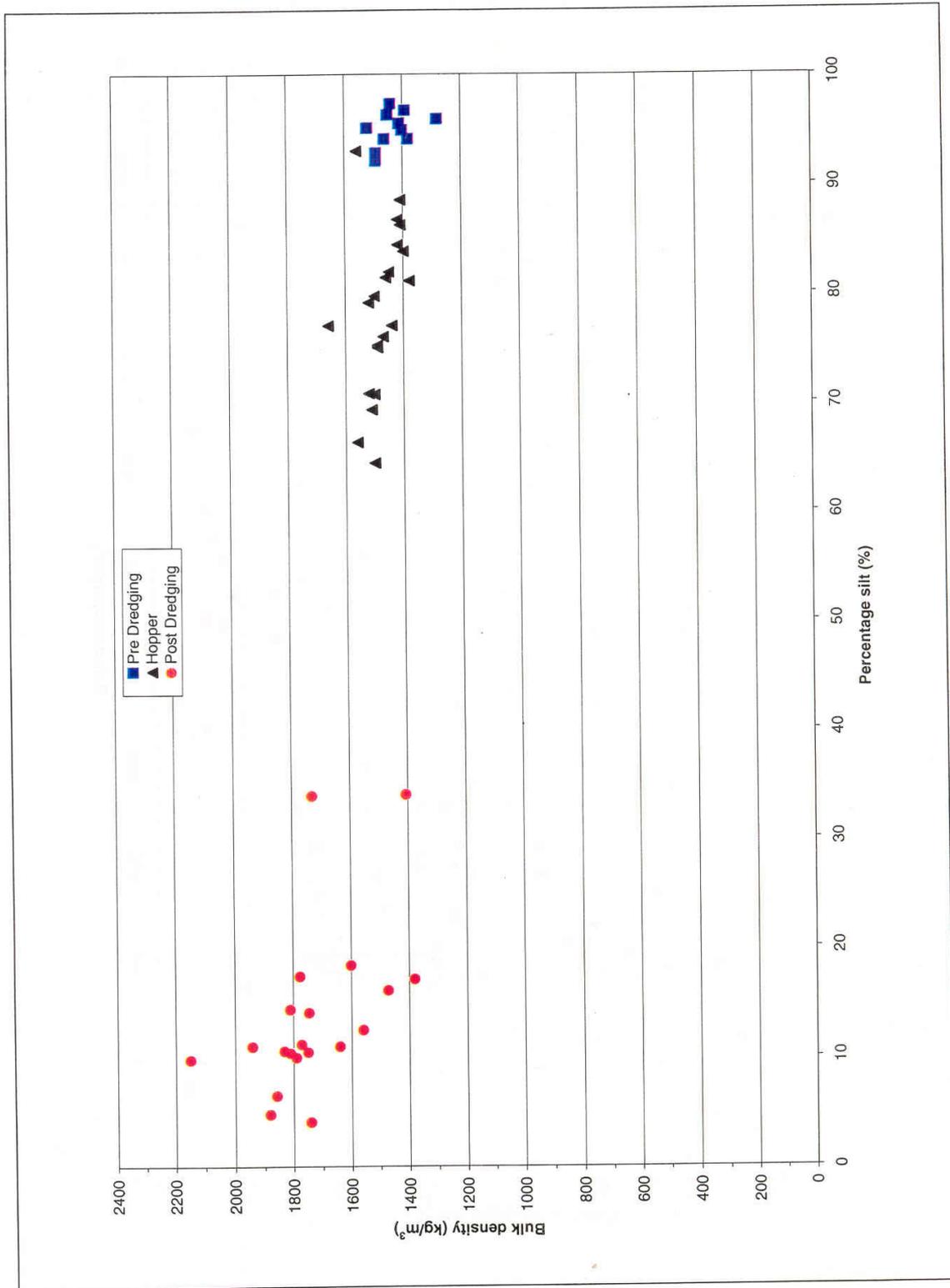


Figure 4 Silt content versus bulk density - Tees

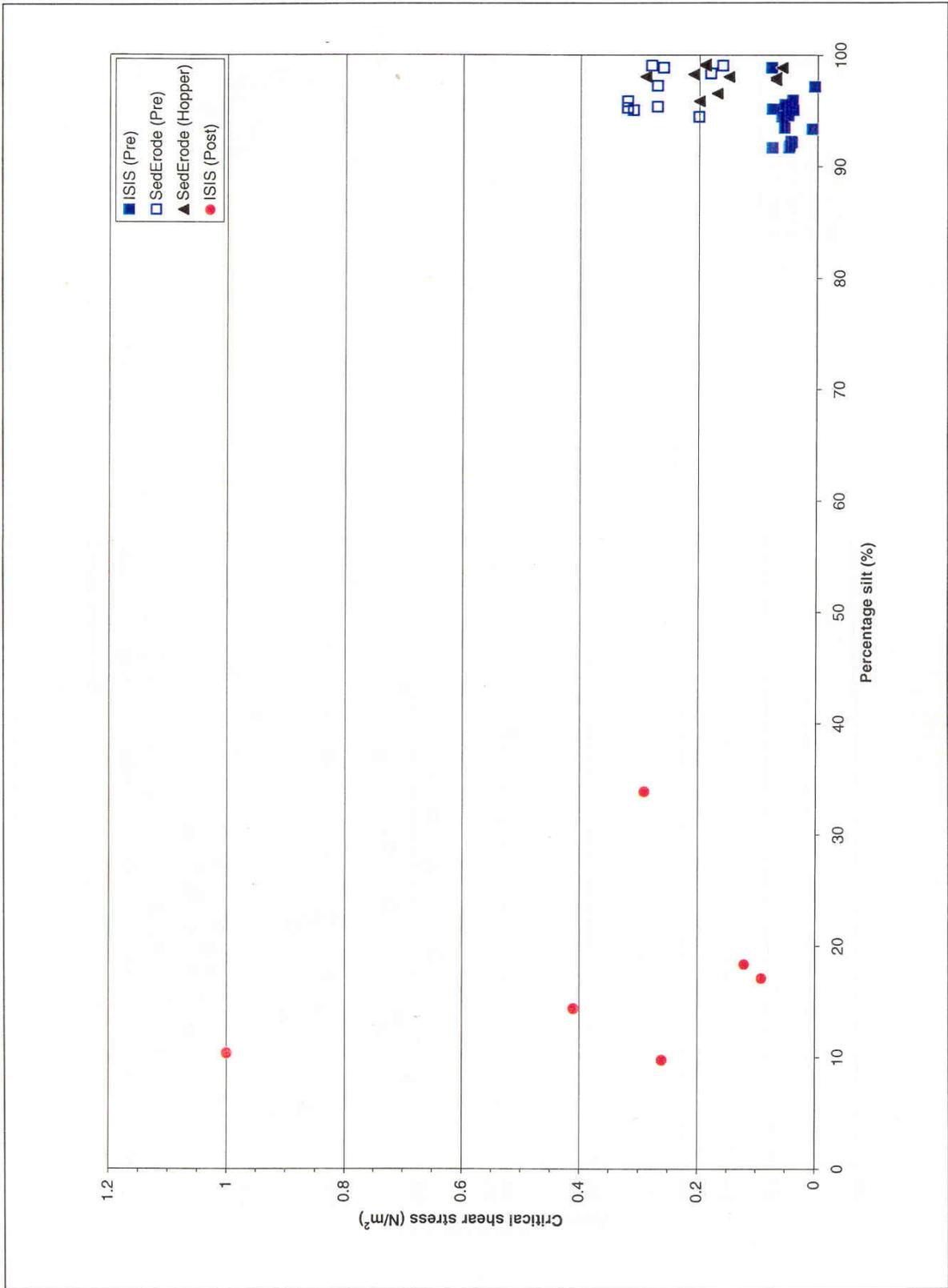


Figure 11 Silt content versus critical shear stress - Harwich

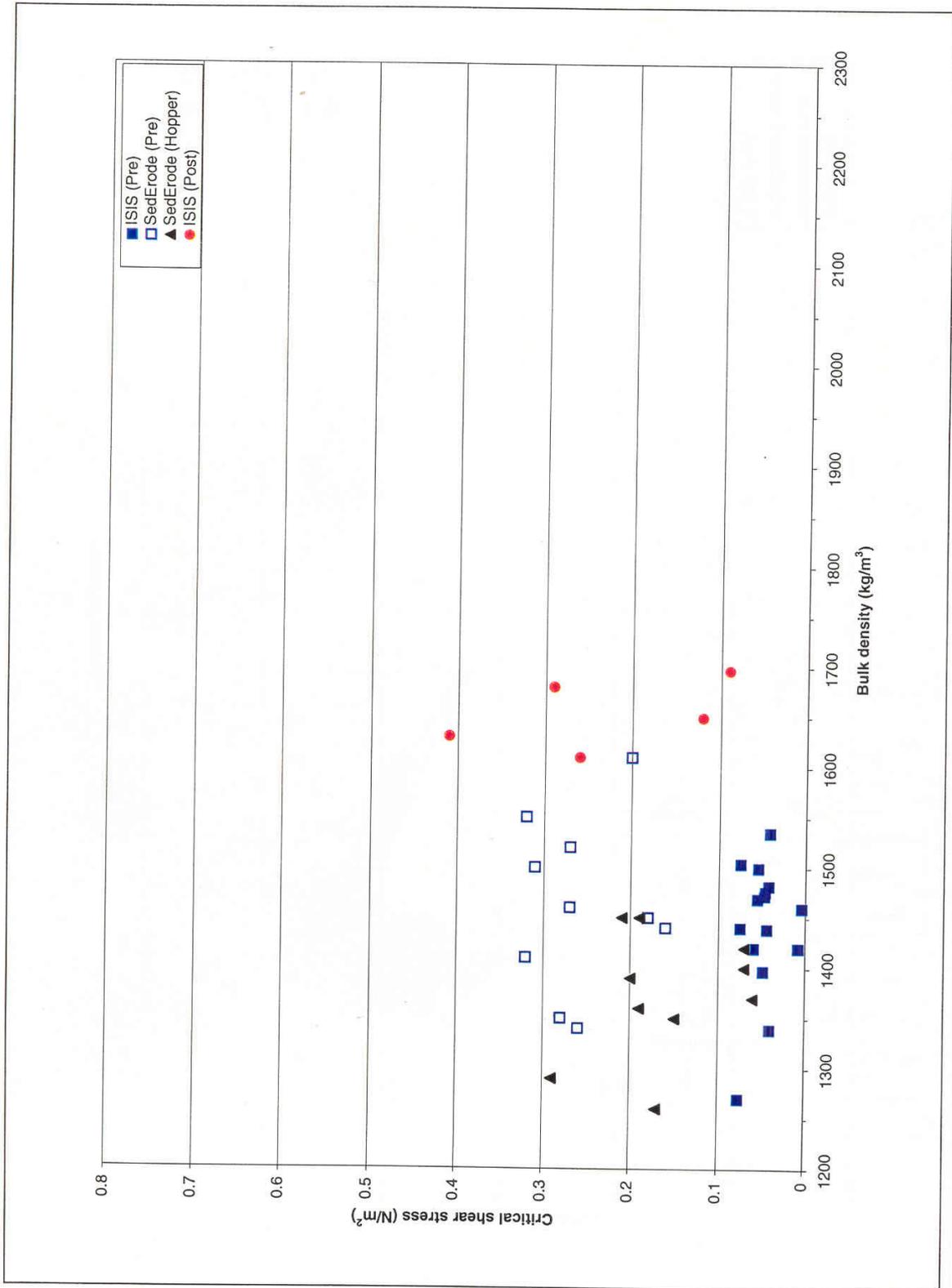


Figure 12 Bulk density versus critical shear stress - Harwich

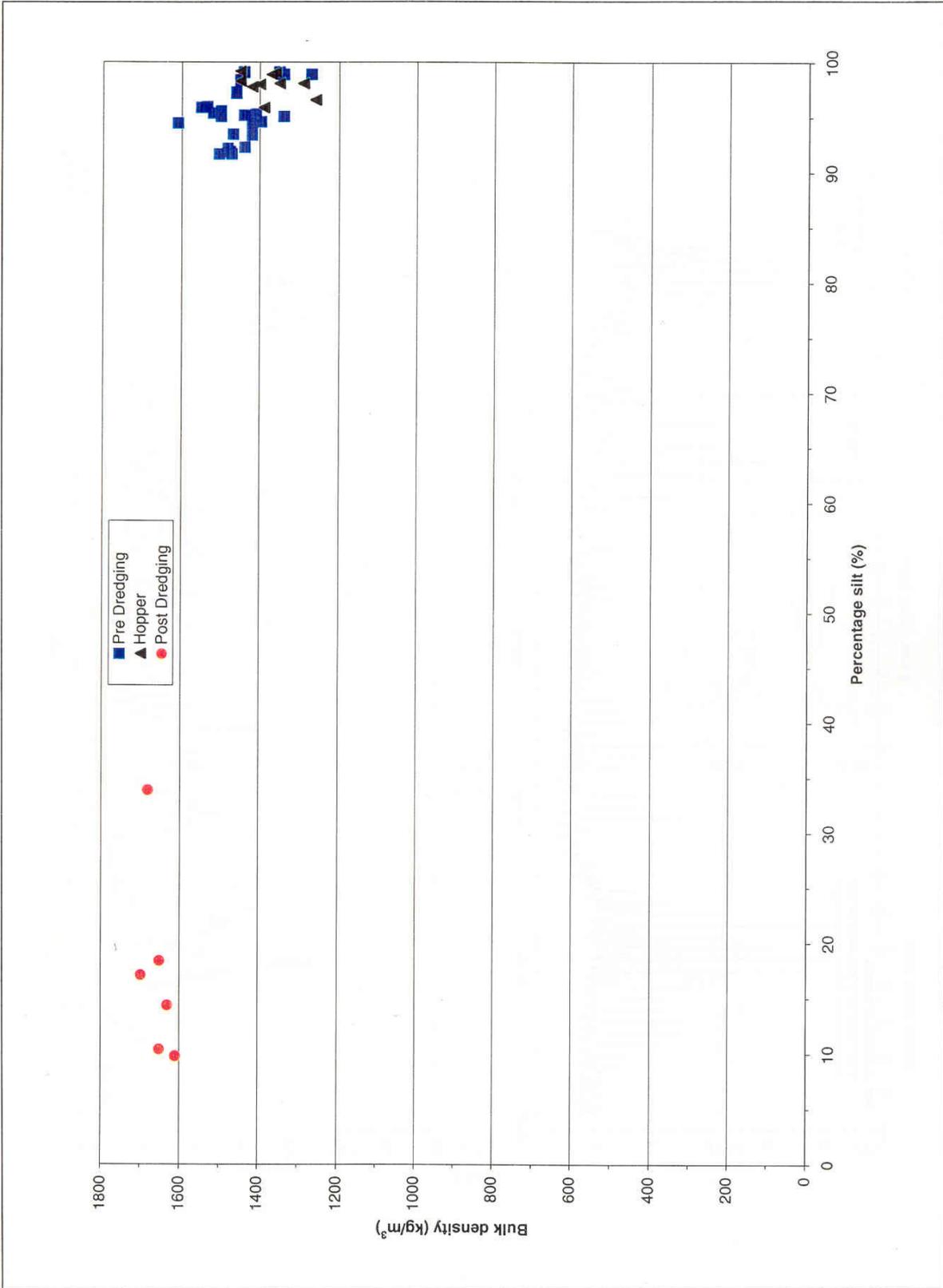
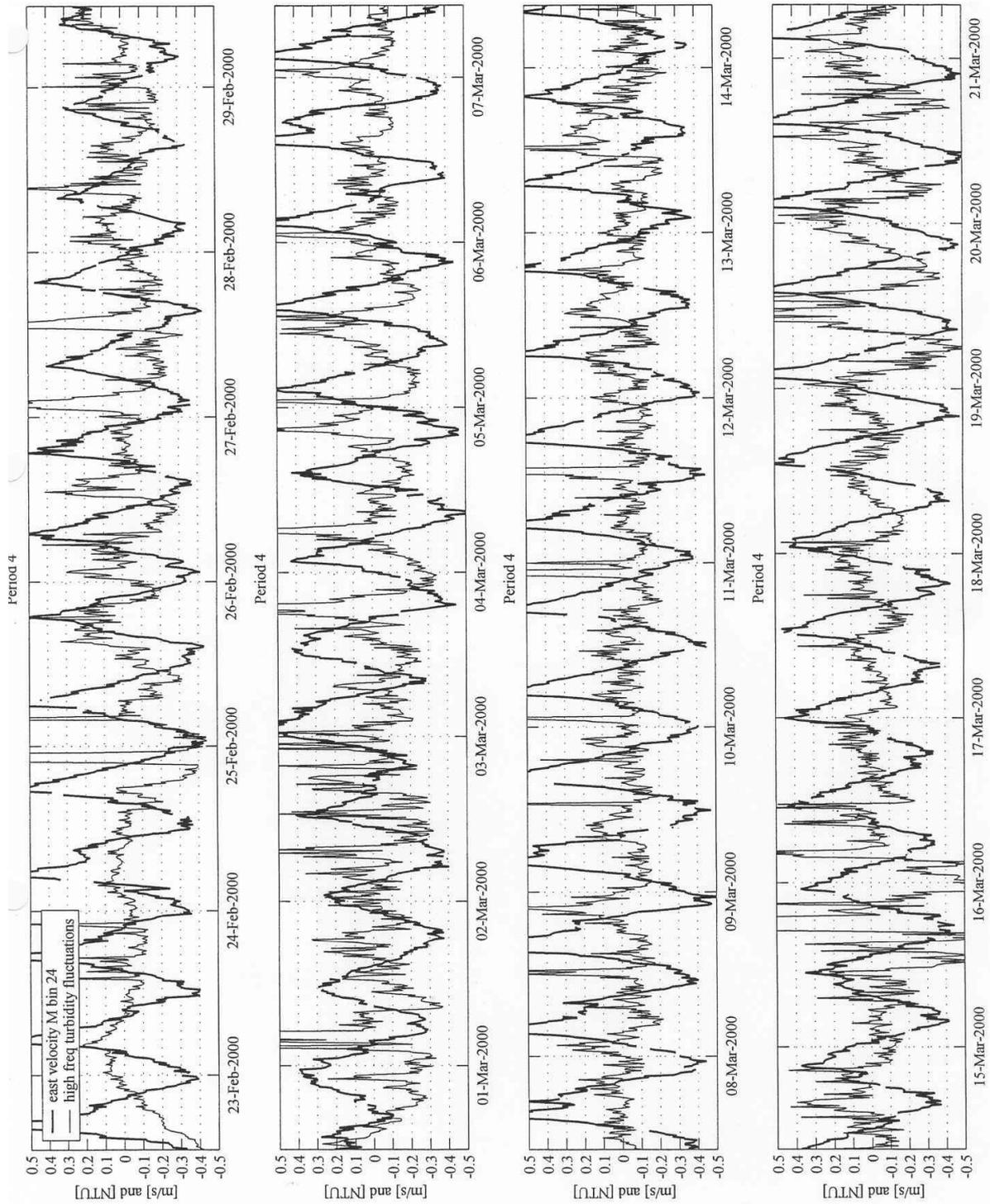


Figure 13 Silt content versus bulk density – Harwich

Bijlage 15



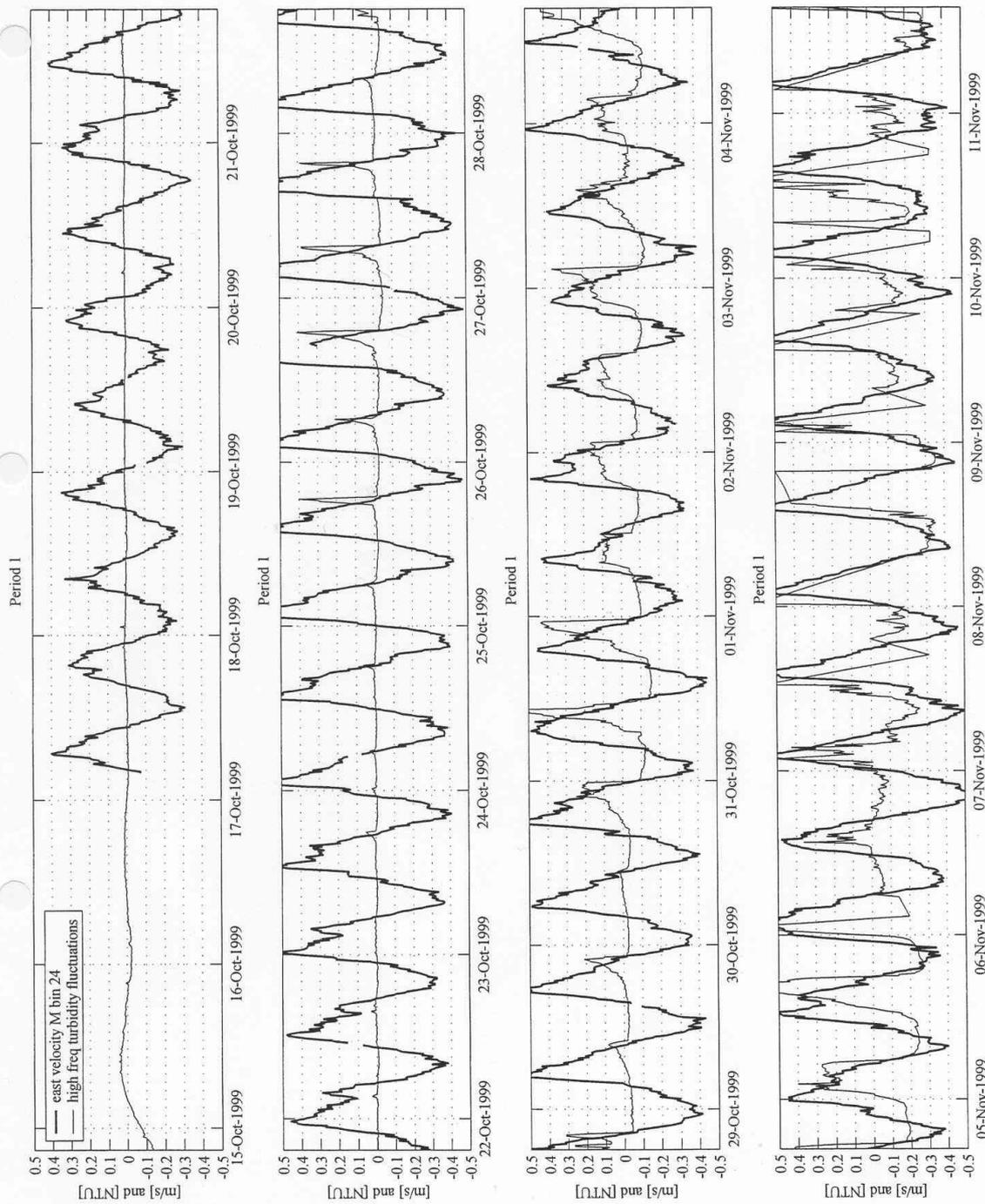
Velocity and turbidity, location M, period 4

FIGURE 6.6.d

1177

0.005 * turbidity fluctuations (< 30 hr) near seabed

22-Jun-2001



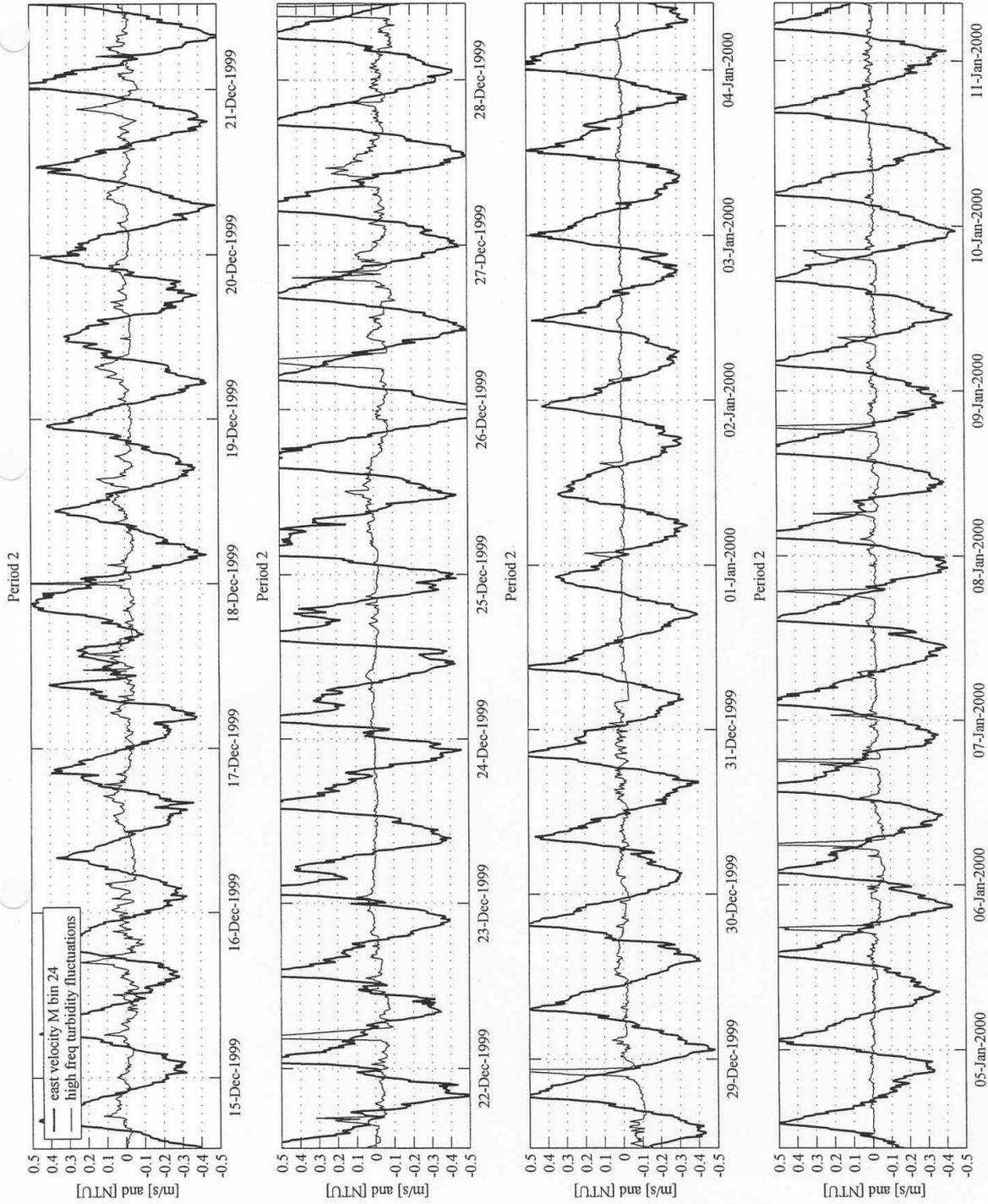
Velocity and turbidity, location M, period 1

0.001 * turbidity fluctuations (< 30 hr) near seabed

FIGURE 6.6.a

1177

22-Jun-2001



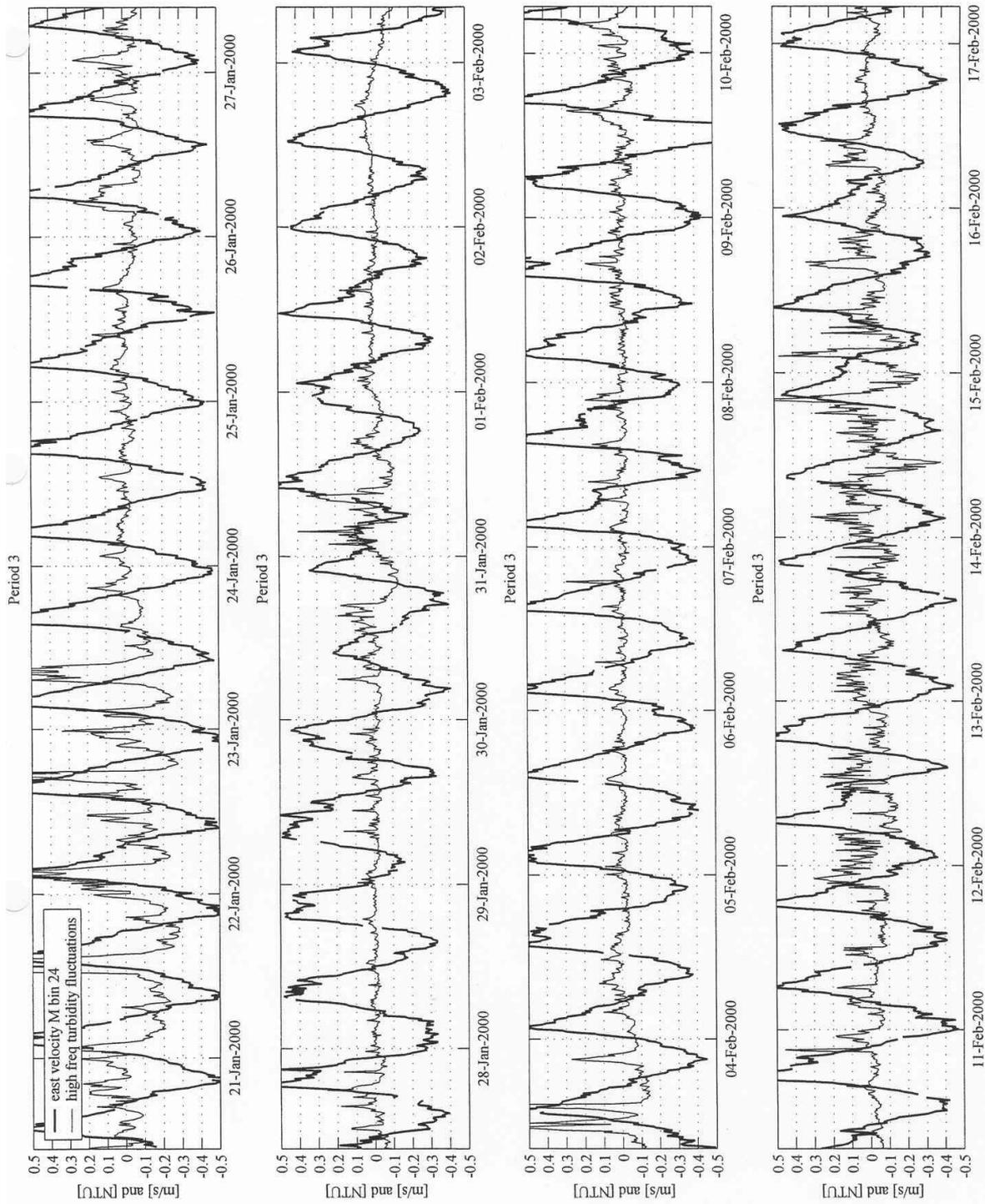
Velocity and turbidity, location M, period 2

0.001 * turbidity fluctuations (< 30 hr) near seabed

FIGURE 6.6.b

1177

22-Jun-2001



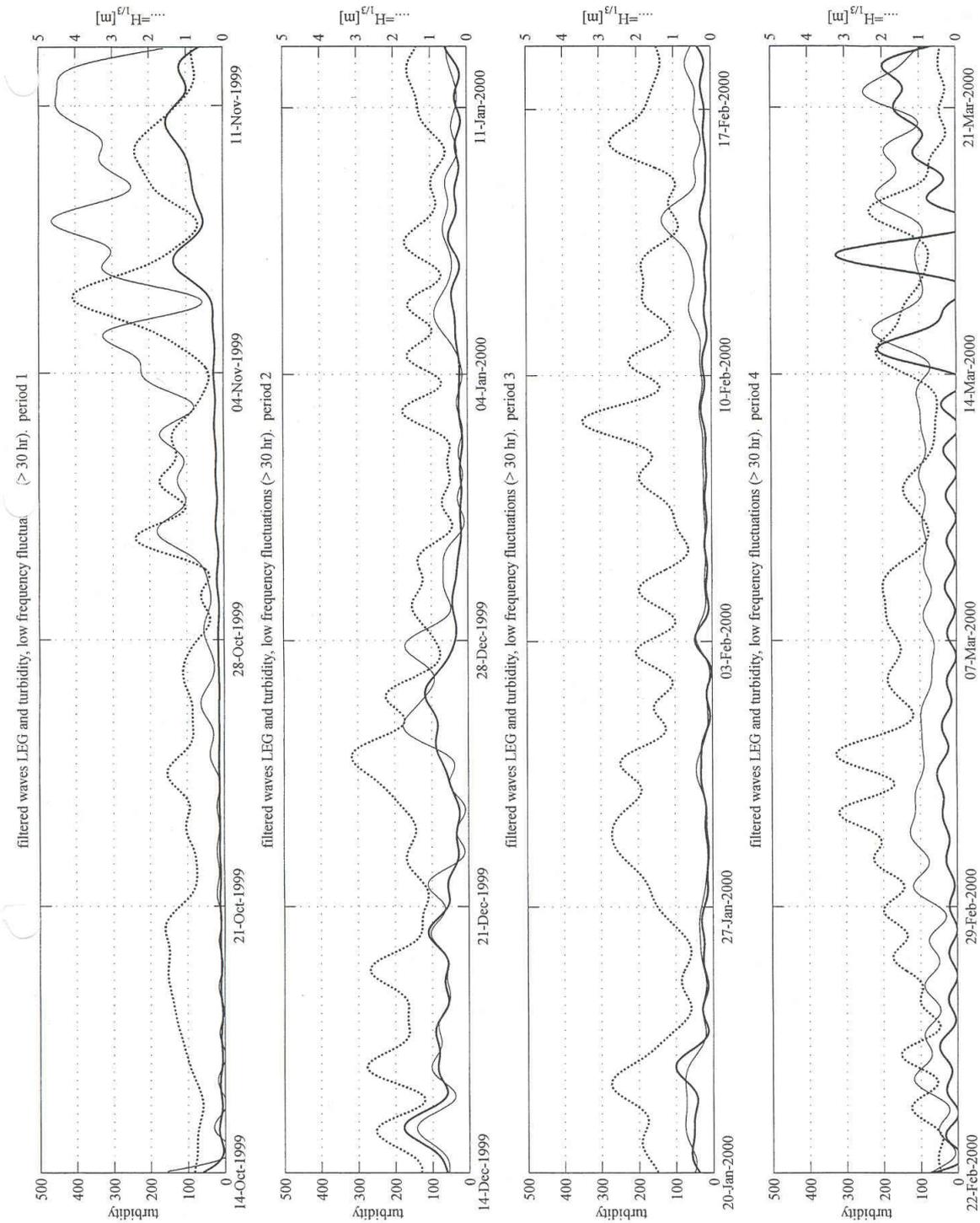
Velocity and turbidity, location M, period 3

0.005 * turbidity fluctuations (< 30 hr) near seabed

FIGURE 6.6.c

1177

22-Jun-2001



Filtered time series waves and turbidity

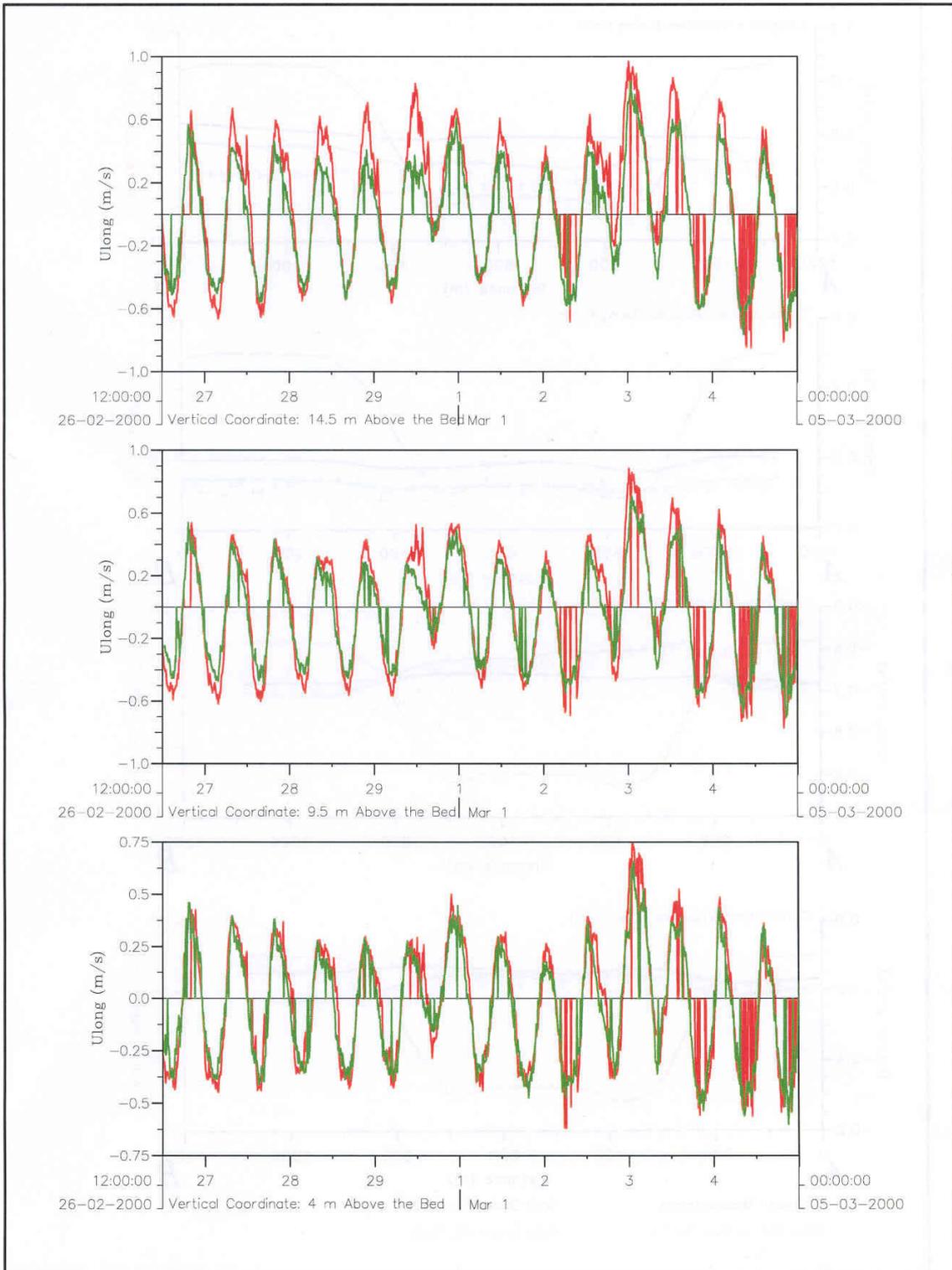
LEG and Hydrolabs location A (bold) and M (fine) near the seabed

FIGURE 6.5

1177

22-Jun-2001

Bijlage 16



Morphology of pits, channels and trenches
 Comparison of measured longshore velocities at Locations A and M
 Red: Location A, Green: Location M

Bijlage17

