

Uitlevering van zand

Bepaling van de relatieve dichtheid

oktober 1992

A. Veldhuis



Uitlevering van zand
Bepaling van de relatieve dichtheid

A.Veldhuis

oktober 1992

Faculteit der Civiele Techniek
T.U. Delft

VOORWOORD

Voor u ligt het verslag van het afstudeerwerk getiteld 'Uitlevering van zand'. Dit afstudeerwerk is verricht ter afsluiting van mijn studie Civiele Techniek aan de T.U. Delft.

Dit verslag bevat naast een literatuurstudie over het onderwerp 'uitlevering' eveneens de resultaten van een modelonderzoek en een praktijkmeting. Het modelonderzoek is uitgevoerd bij Grondmechanica Delft en de praktijkmeting is uitgevoerd aan boord van de sleepopperzuiger 'Cornelia', in opdracht van Boskalis. In dit verband wil ik Grondmechanica Delft en Boskalis bedanken voor hun medewerking, de geboden hulp en de ter beschikking gestelde faciliteiten. Met name wil ik ook J. Tigchelaar bedanken voor zijn hulp en advies bij het uitvoeren van de modelproeven en ing. N. de Vries voor zijn hulp bij het meten aan boord van de 'Cornelia'.

Als laatste wil ik natuurlijk mijn begeleiders hartelijk bedanken voor de tijd en moeite die ze genomen hebben om dit afstudeerwerk te begeleiden.

Begeleiders:

Prof. ir. K. d'Angremond	T.U. Delft
Ir. P. Lubking	Grondmechanica Delft
Ir. G.L.M. van Helden	Boskalis

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord

Samenvatting

Inleiding	9
1. Uitlevering of bulking	11
1.1 Inleiding.....	11
1.2 Zand.....	13
1.2.1 Algemene formules.....	13
1.2.2 De relatieve dichtheid.....	15
1.2.3 Rekenvoorbeeld van de uitleveringsfactor van zand.....	20
1.3 Klei.....	21
1.3.1 Eigenschappen van klei.....	21
1.3.2 Rekenvoorbeeld van de uitleveringsfactor van klei.....	23
1.4 Gesteente.....	25
1.5 Aanbevolen literatuur.....	29
2. Bepaling relatieve dichtheid van zand bij stortproeven op schaal	31
2.1 Inleiding.....	31
2.2 Classificatieproeven.....	33
2.2.1 Bepaling van het korrelverdelingsdiagram.....	33
2.2.1 Bepaling van de zandequivalentwaarde.....	35
2.2.3 Bepaling van de korrelvorm.....	36
2.2.4 Bepaling van het percentage hangwater.....	37
2.2.5 Bepaling van de hoek van natuurlijk talud.....	38
2.2.6 Bepaling van de minimum en maximum dichtheid.....	39
2.3 Stortproeven.....	41
2.3.1 Proevenserie 1 en 2.....	42
2.3.2 Proevenserie 3 en 4.....	47
2.3.3 Proevenserie 5.....	49
2.4 Fouten- en nauwkeurighedsanalyse.....	50
2.4.1 Foutenanalyse.....	50
2.4.2 Nauwkeurighedsanalyse.....	51
2.5 Conclusies en aanbevelingen.....	53
2.5.1 Conclusies.....	53
2.5.2 Aanbevelingen.....	53
2.5.3 Extrapolatie van de resultaten naar de praktijk.....	54
3. Bepaling relatieve dichtheid van zand in het beun van een hopperzuiger	55
3.1 Inleiding.....	55
3.2 Het T.D.S.-systeem.....	57
3.3 De 'Cornelia'.....	59
3.4 uitgevoerde meetserie.....	64
3.4.1 Bepaling van het gewicht van het zand in het beun.....	64
3.4.2 Bepaling van het volume van het zand in het beun.....	66

3.4.3 Berekening van de relatieve dichtheid.....	69
3.4.4 Bespreking en verklaring van de resultaten.....	70
3.5 Fouten- en nauwkeurighedsanalyse.....	73
3.5.1 Foutenanalyse.....	73
3.5.2 Nauwkeurighedsanalyse.....	76
3.6 Conclusies en aanbevelingen.....	79
3.6.1 Conclusies.....	79
3.6.2 Aanbevelingen.....	80
Literatuurlijst.....	81

SAMENVATTING

Als gevolg van ontgraven, transporteren en verwerken van zand treden volumeveranderingen op. Om deze volumeveranderingen te kunnen berekenen moet de dichtheid in verschillende situaties bekend zijn.

Over de situatie 'de dichtheid van zand net nadat het op een vrachtwagen geladen is' is nog erg weinig bekend. Vandaar dat deze situatie met een modelproef is onderzocht. Deze modelproef is uitgevoerd met verschillende zandsoorten en bij verschillende vochtgehaltes, zodat een verband is afgeleid voor de zandsoort, het vochtgehalte en de optredende dichtheid.

Uit de proefresultaten kan geconcludeerd worden dat als er weinig water aan droog zand wordt toegevoegd dat dan het zand een lagere dichtheid kan bezitten dan de meest losse dichtheid die bij droog zand gevonden wordt. Bovendien geldt dat tussen 4 en 10% vochtgehalte de dichtheid onafhankelijk van het vochtgehalte is.

De situatie 'de dichtheid van zand in het beun' is tevens onderzocht, omdat uit recent onderzoek is gebleken dat deze dichtheid soms veel hoger ligt dan 1950 kg/m^3 ; de waarde die voor deze situatie vaak gehanteerd wordt.

In dit verband is een dichtheidsmeting aan boord van een hopperzuiger uitgevoerd. Uit deze dichtheidsmeting volgt een waarde voor de dichtheid van 2070 kg/m^3 . Deze meting bevestigt dus eerdere onderzoeken.

INLEIDING

Bij het ontgraven, transporteren en verwerken van grond treden volumeveranderingen op. Deze volumeveranderingen worden ook uitlevering genoemd. Voor de praktijk is het van belang om de uitlevering te kennen in verband met de prijsbepaling en de verrekening van een werk.

In dit verslag is specifiek naar de grondsoort zand gekeken. Voor zand geldt dat het verschijnsel uitlevering neerkomt op het vergelijken van dichtheden in verschillende situaties. Doel van dit verslag is daarom geweest om twee van deze situaties nader te bestuderen.

Ten eerste is de dichtheid van zand bekeken dat net op een vrachtwagen geladen is. Over dit onderwerp is nog erg weinig bekend, vandaar dat er stortproeven op schaal zijn uitgevoerd, waarbij de invloed van de zandsoort en het vochtgehalte op de dichtheid is onderzocht.

Ten tweede is de dichtheid van zand in het beun van een hopperzuiger bekeken. Uit recent onderzoek is gebleken dat de waarden voor deze dichtheid soms veel hoger liggen dan de waarden die tot nu toe gehanteerd worden. Dit onderzoek is uitgevoerd aan boord van een hopperzuiger en geprobeerd is om met behulp van het Tonnen Droge Stof-systeem en een peiling van het zandvolume om de dichtheid te berekenen. Met behulp van het Tonnen Droge Stof-systeem kan het gewicht van de lading bepaald worden.

In dit verslag komt in hoofdstuk 1 een literatuurstudie aan de orde, waarin voor zand, klei en gesteente het begrip uitlevering en de bijbehorende formules beschreven worden. In hoofdstuk 2 staan de uitgevoerde stortproeven en bijbehorende conclusies vermeld. En in hoofdstuk 3 tenslotte wordt de meting aan boord van de hopperzuiger behandeld en staan eveneens de conclusies naar aanleiding van dit onderzoek vermeld.

De bijlagen waarnaar in de tekst verwezen wordt staan weergegeven in: Bijlagen behorend bij het afstudeerverslag 'Uitlevering van zand'.

HOOFDSTUK 1 UITLEVERING OF BULKING

§ 1.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden voor verschillende grondsoorten het begrip 'uitlevering' en de daarbij behorende formules behandeld. In § 1.2 wordt zand bekeken, in § 1.3 klei en in § 1.4 gesteente. In § 1.5 wordt tenslotte aangegeven welke literatuurbronnen in eerste instantie het meest zinvol zijn om te bestuderen.

Het begrip 'uitlevering' (in het Engels 'bulking' en in het Duits 'Auflockerung' genoemd) wordt in de civieltechnische wereld gebruikt als er bij het verwerken van grond volumeveranderingen optreden, zonder dat daarbij grond verdwijnt of wordt toegevoegd.

Deze volumeveranderingen zijn het gevolg van ontgraven, transporteren, storten en verdichten van grond. Vaak gaat het hierbij om een volumevergroting, maar soms ook om een volumeverkleining. Dit wordt dan klink, inklinking, compactie, verdichting of negatieve uitlevering of bulking genoemd. Opgemerkt dient te worden dat het bij uitlevering dus gaat om een volumeverandering en dat dus de hoeveelheid vaste stof niet verandert!

Bij de raming van kosten en de uitvoering van een grondwerk is het natuurlijk van belang om te weten hoe groot de uitlevering is voor verschillende stadia van verwerking; dit in verband met het transport en de opslag van grond.

De uitlevering B [1] wordt geformuleerd als de volumeverandering (in procenten) ten opzichte van het oorspronkelijke volume. Daarnaast bestaat er ook nog de uitleveringsfactor b, deze wordt gedefinieerd als de verhouding tussen het nieuwe en het oorspronkelijke volume van een grondmassa.

$$B (\%) = \frac{V_x - V_0}{V_0} * 100\%$$

$$b (\%) = \frac{V_x}{V_0} * 100\%$$

V_x = volume verwerkte grondmassa

V_0 = volume oorspronkelijke grondmassa

Door verschillende onderzoekers [2-5] zijn er waarden voor de uitlevering B bepaald. Deze resultaten staan vermeld in Bijlage 1.1. Het blijkt dat de waarden voor B afhankelijk zijn van de samenstelling van de grond, de wijze van verwerking en de optredende vochtsituatie. Als de resultaten uit Bijlage 1.1 met elkaar vergeleken worden valt op dat er onderling grote verschillen optreden en dat de waarden voor B bovendien een grote spreiding vertonen. Deze waarden zijn voor de praktijk dus niet direct toepasbaar.

Om toch tot een verantwoorde waarde voor de uitlevering te komen moeten de grondsoort, de vochtsituatie en de verwerkingswijze nader gespecificeerd worden. Vandaar dat er nu een onderverdeling in zand (cohesieloos materiaal), klei (cohesief materiaal) en

gesteente (vast materiaal) gemaakt is. Deze onderverdeling is gebaseerd op de PIANC-uitgave "Classification of soils and rocks to be dredged (1984)". Deze classificatie is in het kort samengevat in Tabel 1.1 en 1.2.

Tabel 1.1

Grondsoort:	Korrelgrootte:
Blokken	> 200 mm
Keien	200-60 mm
Grind	60-20 mm
grof	20-6 mm
middel	6-2 mm
fijn	
Zand	2-0.6 mm
grof	0.6-0.2 mm
middel	0.2-0.06 mm
fijn	
Silt	0.06-0.02 mm
grof	0.02-0.006 mm
middel	0.006-0.002 mm
fijn	
Klei	< 0.002 mm

Tabel 1.2

Kleisoort:	Ongedraineerde schuifspanning:
Zeer zacht	< 20 kN/m ²
Zacht	20-40 kN/m ²
Vast	40-75 kN/m ²
Stijf	75-100 kN/m ²
Hard	> 150 kN/m ²

Omdat klei niet geclassificeerd wordt aan de hand van de korrelgrootte maar met behulp van de ongedraineerde schuifspanning, is Tabel 1.2 bijgevoegd. Voor samengestelde gronden kan verder gebruik gemaakt worden van de norm NEN 5104 "Classificatie van onverharde grondmonsters (1989)". Deze classificatie is te vinden in Bijlage 1.2.

In de volgende paragrafen worden voor zand, klei en gesteente de verschillende methoden uitgelegd om de uitleveringsfactoren te bepalen en worden de bijbehorende formules behandeld.

§ 1.2 Zand

In deze paragraaf is de uitlevering van zand bekeken. In § 1.2.1 worden de algemene formules voor zand behandeld en wordt het verband afgeleid tussen de uitlevering, de dichtheid en het vochtgehalte. In § 1.2.2 wordt het begrip relatieve dichtheid toegelicht en in § 1.2.3 wordt tenslotte aan de hand van een voorbeeld de uitleveringsfactor van zand een keer berekend.

§ 1.2.1 Algemene formules

Zand [7-12] is een verweringsprodukt van natuursteen. Het bestaat in het algemeen uit een hoeveelheid vaste stof (korrels) en uit holle ruimte (poriën). Deze poriën kunnen al dan niet, geheel of gedeeltelijk, gevuld zijn met water. De hoeveelheid poriën wordt uitgedrukt in de porositeit n , deze wordt gedefinieerd als het volume poriën gedeeld door het totale volume van het zand.

$$n = \frac{V_p}{V}$$

V_p = het volume van de poriën

V = het totale volume van het zand

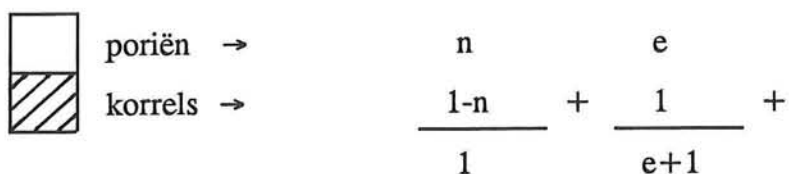
Men kan de hoeveelheid poriën ook uitdrukken in het poriëngetal e (Eng. void ratio), dit wordt dan gedefinieerd als het volume poriën gedeeld door het volume van de korrels.

$$e = \frac{V_p}{V_k}$$

V_k = het volume van de korrels

Het poriëngetal wordt voornamelijk toegepast in de Engelstalige landen, terwijl in Nederland en Duitsland vooral de porositeit gebruikt wordt.

De porositeit n en het poriëngetal e zijn in elkaar uit te drukken volgens de omrekeningsformules die zijn af te leiden uit onderstaande schematisatie.



Voor de omrekeningsformules geldt dan:

$$\frac{n}{1} = \frac{e}{e+1} \quad \frac{e}{1} = \frac{n}{1-n}$$

In hoeverre de poriën gevuld zijn met water komt tot uitdrukking in de verzadigingsgraad S_r , deze wordt gedefinieerd als het volume water gedeeld door het volume van de poriën.

$$S_r = \frac{V_w}{V_p}$$

V_w = het volume van het water

Hiermee samenhangend kan het vochtgehalte w gedefinieerd worden als het quotiënt van het gewicht van het water en het gewicht van de korrels.

$$w = \frac{G_w}{G_k}$$

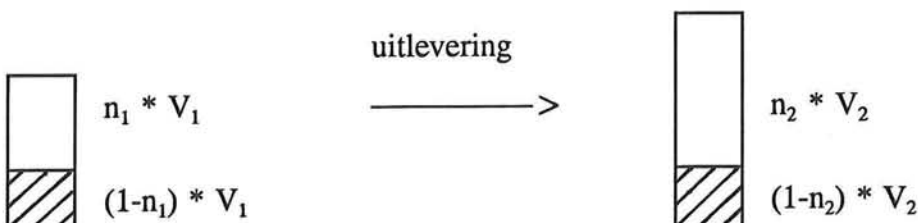
G_w = het gewicht van het water

G_k = het gewicht van de korrels

De dichtheid ρ van de grond kan nu als volgt berekend worden:

$$\rho_{\text{grond}} = n * S_r * \rho_{\text{water}} + (1-n) * \rho_{\text{specifiek}}$$

Zoals al eerder gesteld is, is er bij uitlevering alleen sprake van een volumeverandering van de poriën, de hoeveelheid vaste stof blijft gelijk. Dit principe is in de onderstaande schematisatie uitgebeeld.



Als geldt dat de hoeveelheid vaste stof gelijk blijft, geldt dus ook $(1-n_1) * V_1 = (1-n_2) * V_2$. Gezien de definitie in § 1.1 kan de uitleveringsfactor b daarom ook geschreven

worden als:

$$b (\%) = \frac{V_2}{V_1} * 100\% = \frac{1 - n_1}{1 - n_2} * 100\% = \frac{\rho_{1,droog}}{\rho_{2,droog}} * 100\%$$

Het bepalen van de uitlevering komt dus neer op het vergelijken van droge dichtheden. Aangezien zand meestal niet droog is moet dus in geval van nat zand het vochtgehalte bekend zijn om iets over de uitlevering te kunnen zeggen.

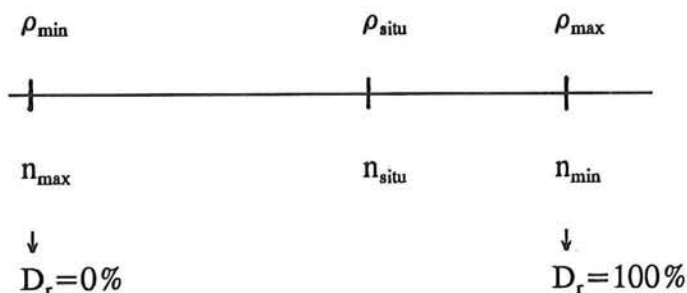
In de natuur komen verschillende zandsoorten voor en om de uitlevering van deze zandsoorten onderling te kunnen vergelijken wordt, in plaats van de absolute waarde van de dichtheid, gebruik gemaakt van de relatieve dichtheid van het zand. Het begrip relatieve dichtheid wordt in § 1.2.2 nader toegelicht.

§ 1.2.2 De relatieve dichtheid

De relatieve dichtheid [13,14] is de droge dichtheid in situ uitgedrukt ten opzichte van twee grenzen, de minimum en maximum dichtheid [8,10,12,15], die in een laboratorium volgens een standaardproef bepaald zijn. De formule voor de relatieve dichtheid D_r wordt geschreven als:

$$D_r (\%) = \frac{\rho_{situ} - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} * 100\%$$

De relatieve dichtheid kan ook in de porositeit uitgedrukt worden. Dit is te zien aan de hand van de onderstaande figuur.



D_r wordt daarom ook wel de relatieve porositeit (n_r) genoemd en gedefinieerd als:

$$D_r (\%) = \frac{n_{max} - n_{situ}}{n_{max} - n_{min}} * 100\%$$

Bovenstaande formules voor de relatieve dichtheid worden voornamelijk in Nederland en

Duitsland gebruikt. In de Engelstalige landen wordt de relatieve dichtheid uitgedrukt in het poriëngetal e en weergegeven door D_{re} .

D_{re} wordt ook wel de dichtheidsindex (I_D) genoemd en wordt gedefinieerd als:

$$D_{re} (\%) = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} * 100\%$$

of als

$$D_{re} (\%) = \frac{\rho_{\max} (\rho_{situ} - \rho_{\min})}{\rho_{situ} (\rho_{\max} - \rho_{\min})} * 100\%$$

Het onderlinge verband tussen D_{re} en D_r is weer te geven als:

$$D_{re} = \frac{1 - n_{\min}}{1 - n_{situ}} * D_r$$

of als

$$D_{re} = \frac{\rho_{\max}}{\rho_{situ}} * D_r$$

Om de relatieve dichtheid te berekenen moeten dus de maximum en minimum dichtheid volgens een standaardproef in een laboratorium bepaald worden. Aan deze proef [15] worden daarom de volgende eisen gesteld:

- de proef moet makkelijk reproduceerbaar zijn en bij herhaling dezelfde uitkomsten geven
- de proef moet de 'ideale' grenswaarden voor de dichtheid zo dicht mogelijk benaderen
- het monster mag tijdens de proef niet veranderen, d.w.z. er mag geen ontmenging plaatsvinden, de korrels mogen niet vergruizen en er mag geen verlies van de kleine korrels optreden
- de proef moet geschikt zijn voor een zo groot mogelijk gebied van de korrelgrootte

De maximum dichtheid wordt vaak bepaald met de Proctorproef. Dit is een gestandardeerde laboratoriumproef [8,10,12,16]. Hieronder wordt in het kort aangegeven hoe de Proctorproef uitgevoerd dient te worden om de maximum dichtheid te bepalen. In principe is elke verdichtingsproef hiervoor geschikt, zolang steeds maar vermeld wordt welke proef uitgevoerd is.

Er bestaan tegenwoordig een gewone en een verbeterde Proctorproef. Bij de gewone Proctorproef wordt een cilinder met een doorsnede van 10 cm gevuld met een laag zand van ongeveer 13 cm. Deze laag wordt met een 2,5 kg zware stamper door middel van 25 slagen verdicht. De diameter van de stamper is 5 cm en de valhoogte 30 cm. Er worden in totaal 3 lagen aangebracht en verdicht. Hierna wordt het volume en het gewicht bepaald, zodat de maximum dichtheid berekend kan worden. Deze proef moet met minimaal 5 verschillende vochtgehaltes worden uitgevoerd om de grootste waarde van de maximum dichtheid te bepalen.

Naast de gewone Proctorproef bestaat er ook nog de verbeterde Proctorproef (Eng. Modified Proctor Test). Hierbij wordt een stamper van 4,5 kg gebruikt en een valhoogte van 45 cm. In plaats van 3 worden er nu 5 lagen opgebouwd. De precieze omschrijving voor de gewone en de verbeterde Proctorproef zijn te vinden in de ASTM D 698-58T respectievelijk ASTM D 1557-58. ASTM is een norminstituut en staat voor: American Society for Testing and Materials. De bij een Proctorproef gevonden maximum dichtheid wordt de Proctordichtheid genoemd. Globaal geldt:

$$100\% \text{ Proctordichtheid} \approx 95\% \text{ verbeterde Proctordichtheid}$$

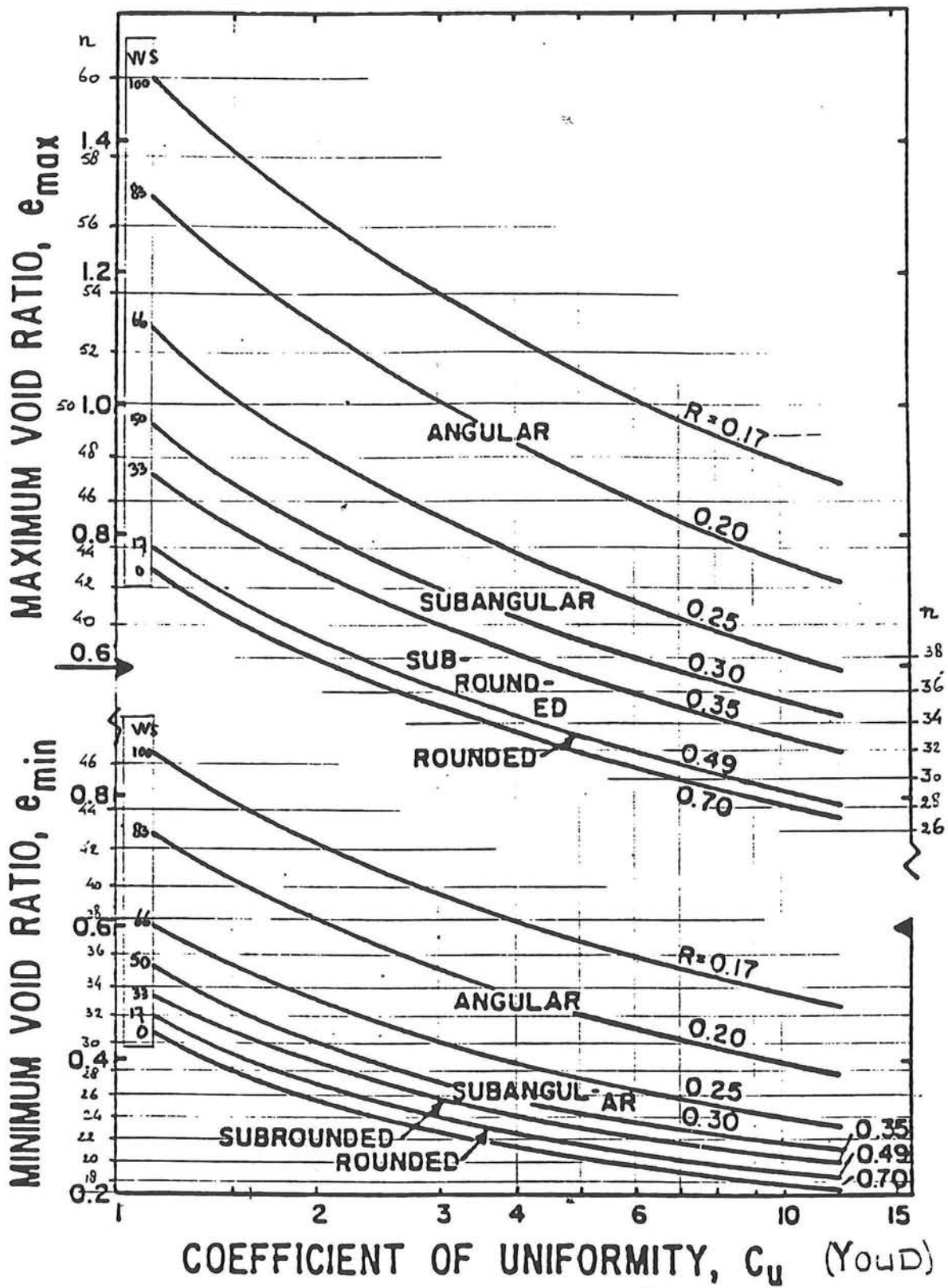
Voor de bepaling van de maximum dichtheid is de Proctorproef eigenlijk niet geschikt, omdat er bij deze proef vergruizing optreedt door de impact van de stamper. Vergruizing [17,18] treedt op bij korrels die vergruizingsgevoelig zijn of die erg hoekig zijn. Door de vergruizing ontstaan er meer kleine deeltjes die de open ruimten tussen de korrels beter opvullen, zodat er een te grote dichtheid ontstaat.

Om bovenstaand probleem te voorkomen wordt er tegenwoordig gebruik gemaakt van een zogenaamde trilverdichtingsproef om de maximum dichtheid te bepalen. Een monster wordt met een bepaalde bovenbelasting gedurende enkele minuten op een triltafel verdicht. In de ASTM-norm D 2049-64 staat precies omschreven hoe de proef uitgevoerd dient te worden (zie Bijlage 2.6). In de ASTM-norm staat eveneens omschreven hoe de minimum dichtheid bepaald kan worden. Zand wordt via een trechter, met een zo klein mogelijke valhoogte, zo los mogelijk opgebouwd.

Als laatste moet, om de relatieve dichtheid te berekenen, de dichtheid in situ bepaald worden. Dit kan met behulp van een: steekring-, CMC-, rubber ballon-, zandvervangings, nucleaire oppervlakte- of elektrische dichtheidsmeting. Deze methoden staan beschreven in Bijlage 1.3 en 1.4.

Om de relatieve dichtheid direct uit andere proeven te kunnen afleiden is er onderzoek [13,19] gedaan naar de correlatie tussen de relatieve dichtheid en de S(andard) P(enetration) T(est) en de sondering. Bij de SPT wordt onderzocht met hoeveel klappen een buis met bepaalde afmetingen een aantal centimeter de grond in wordt geslagen. Omdat de SPT een niet erg nauwkeurige onderzoeksmethode is, is de correlatie met de relatieve dichtheid ook niet erg groot. Dit is bij de sondering niet het geval. Tegenwoordig kan de relatieve dichtheid uit een sondering bepaald worden. Volgens Teferra [19] geldt dat als de conusweerstand op een diepte van 0.6 m onder het maaiveld 6 MN/m² is, daarbij een relatieve dichtheid van 65 tot 70 procent hoort. Bij een conusweerstand van 10 MN/m² hoort een relatieve dichtheid van 75 tot 80 procent.

Aangezien de relatieve dichtheid ook in de porositeit uitgedrukt kan worden is er onderzoek [13] gedaan naar de maximum en minimum porositeit van verschillende zandsoorten. Tevens is onderzocht welke factoren de relatieve dichtheid beïnvloeden. Uit dit onderzoek kunnen de volgende conclusies getrokken worden:



Figuur 1.1 Grafiek van Youd

- het traject tussen $n_{\min}$ en $n_{\max}$ bedraagt slechts 12 à 14% poriën
- de ligging van $n_{\min}$ en $n_{\max}$ is onafhankelijk van de korreldiameter van het materiaal
- de ligging van $n_{\min}$ en $n_{\max}$ is wel afhankelijk van de uniformiteit van het monster en de vorm van de korrels

Youd heeft bovenstaande gegevens in een grafiek verwerkt. Deze grafiek is afgebeeld in Figuur 1.3. In deze figuur wordt de uniformiteit gebruikt. Deze grootte wordt weergegeven door het uniformiteitsgetal U (in de grafiek met C_u) en gedefinieerd als:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

d_{60}, d_{10} = dit zijn de diameters van de zeef waardoor 60 respectievelijk 10% van het totale gewicht van het monster passeert

De uniformiteit is te bepalen met een zeefproef en geeft de steilheid van de zeefkromme weer. Een uniforme zandsoort bevat weinig verschillende korreldiameters en een gegradeerde zandsoort bevat veel verschillende korreldiameters. De waarden van U liggen globaal tussen 1 (uniform of slecht gegradeerd mengsel) en 15 (niet-uniform of goed gegradeerd mengsel).

Afgezien van de uniformiteit speelt ook de vorm van de zandkorrels een rol in het diagram van Youd. De korrelvorm wordt uitgedrukt in de 'roundness' of scherpste R van de korrels. R wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de gemiddelde waarde van de kromtestralen van de hoeken van een zandkorrel en de straal van de grootste cirkel die binnen de vorm van deze zandkorrel past. In de praktijk worden de waarden voor R geschat door het vergelijken van een aantal zandkorrels van een monster met foto's van zandkorrels die een bepaalde waarde van R hebben. De waarden van R liggen tussen 0 (erg hoekig) en 1 (bolvormig).

Aangezien de bepaling van R erg tijdsintensief en bovendien subjectief is, wordt door Volders en Verhoeven daarom voorgesteld om de scherpste van zand te bepalen met een uitstroomtrechter. Deze wordt met zand gevuld en daarna van onderen geopend. Ronde korrels zullen sneller uitstromen dan hoekig materiaal. De uitstroomtijd is dus een maat voor de scherpste van het zand. De met deze methode bepaalde scherpste, zie hiervoor Bijlage 1.5, wordt de $V(\text{olders})V(\text{erhoeven})S(\text{cherpte})$ genoemd. Waarden voor de $V.V.S.$ zijn in de grafiek van Youd verwerkt.

De relatieve dichtheid is door de onderzoeksafdeling van Boskalis voor verschillende situaties bepaald. Voor alle zandsoorten kunnen de gemiddelde relatieve dichtheden worden aangehouden die in Tabel 1.3 staan vermeld.

Bij de waarden van de relatieve dichtheid die horen bij de situatie 'op een vrachtwagen' en 'in de hopper' kunnen enige vraagtekens gezet worden, vandaar dat er in opdracht van Grondmechanica Delft en Boskalis verder onderzoek naar beide situaties is gepleegd. Dit onderzoek staat beschreven in respectievelijk hoofdstuk 2 en 3.

Het voordeel van het kennen van de relatieve dichtheid in bovenstaande situaties is dat er bij eventuele tussenhandelingen geen schatting meer gemaakt hoeft te worden van de uitlevering.

Tabel 1.3

Situatie:	Dr:
stort onder water (sproeien)	30%
stort onder water (dumpen)	50%
stort onder water	40%
stort boven water (vrije afloop van water)	65%
in de hopper	30%
in bakken gespreeid	20%
op een vrachtwagen	-15%

§ 1.2.3 Rekenvoorbeeld van de uitleveringsfactor van zand

In onderstaand rekenvoorbeeld wordt de uitleveringsfactor berekend voor de volgende situatie: stel er wordt zand gebaggerd op zee en dit zand wordt boven water gestort. Uit Tabel 1.3 volgt dat op het stort geldt $D_r = 65\%$ en stel dat uit een dichtheidsmeting blijkt dat $\rho_{\text{zeebodem}} = 2100 \text{ kg/m}^3$. Hieruit kan dan n_{zeebodem} berekend worden volgens de formule:

$$2100 = 1 * n_{\text{zeebodem}} * 1000 + (1 - n_{\text{zeebodem}}) * 2650 \rightarrow n_{\text{zeebodem}} = 0.34$$

Via het diagram van Youd of via een standaardproef kunnen de $n_{\min}$ en $n_{\max}$ van het zand bepaald worden. Stel $n_{\min} = 0.30$ en $n_{\max} = 0.44$ (voor de zeebodem geldt dan $D_r = 71\%$). Via de D_r voor boven water gestort, $n_{\min}$ en $n_{\max}$ kan de porositeit van de stort n_{stort} met de volgende formule berekend worden:

$$D_r = \frac{n_{\max} - n_{\text{stort}}}{n_{\max} - n_{\min}}$$

De waarde voor n_{stort} wordt 0.35 en de waarde van de uitleveringsfactor volgt dan uit de al eerder afgeleide formule voor b .

$$b = \frac{1 - n_{\text{zeebodem}}}{1 - n_{\text{stort}}} = \frac{0.66}{0.65} = 1.02$$

Dus door het ontgravings- en transportproces neemt bij dit voorbeeld het totale volume zand op het stort met 2% toe ten opzichte van het oorspronkelijke volume.

§ 1.3 Klei

In deze paragraaf wordt de uitlevering van klei bekeken. In § 1.3.1 worden daartoe eerst de eigenschappen van klei behandeld en in § 1.3.2 wordt aan de hand van een rekenvoorbeeld de uitleveringsfactor van klei toegelicht.

§ 1.3.1 Eigenschappen van klei

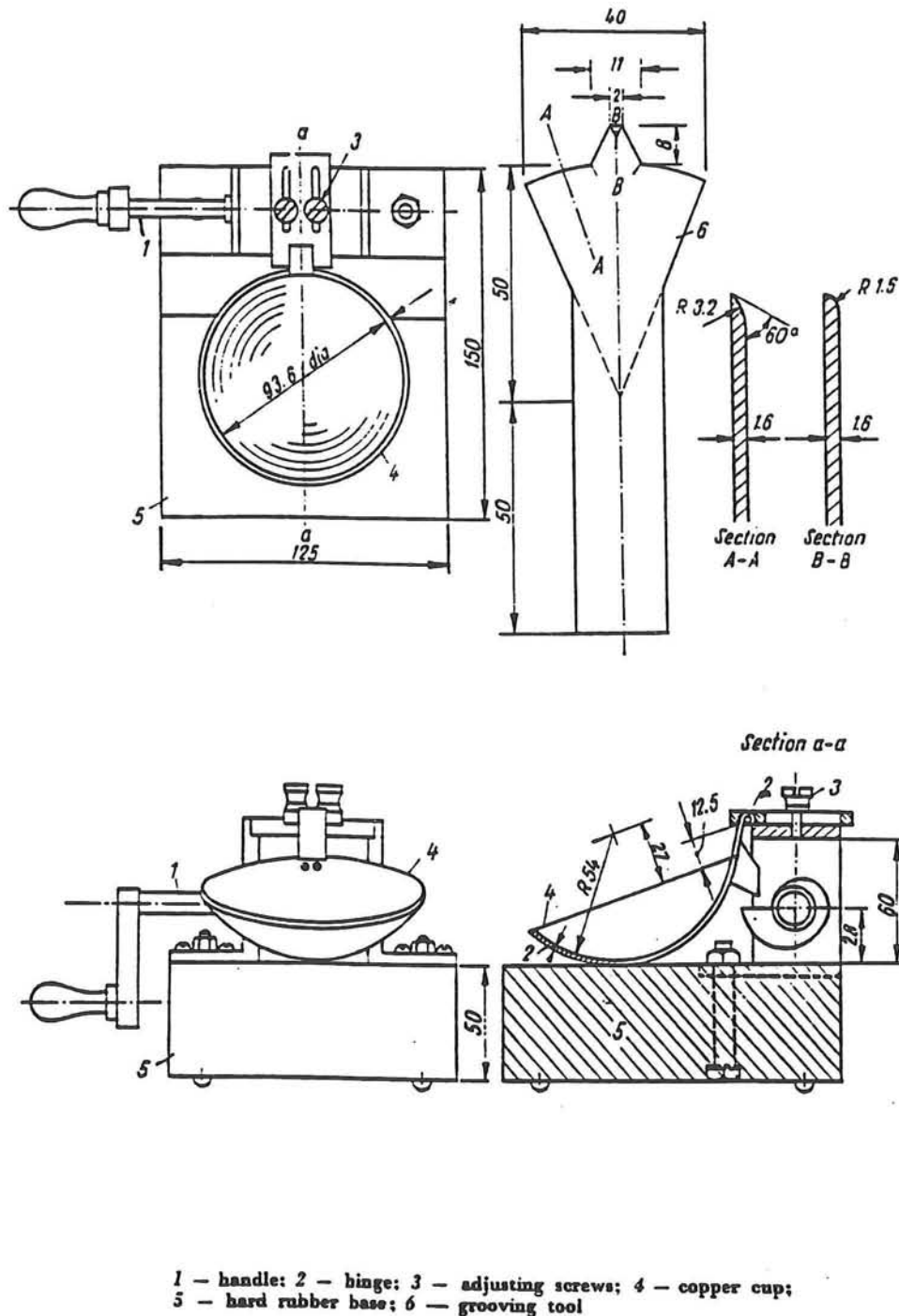
Klei [7,11,20,21] is net als zand een verweringsprodukt van natuursteen, maar wordt niet gekarakteriseerd door zijn korrels, maar door zijn chemische samenstelling. Klei bestaat namelijk uit mineralen. Voorbeelden van mineralen zijn: veldspaten, glimmers, kwarts, kleimineralen, olivien en kalkspaat. De belangrijkste uit deze groep zijn de kleimineralen. Voorbeelden hiervan zijn: kaolinite, illiet en montmorilloniet. Illiet komt veel in Nederland voor. Deze kleimineralen zijn verantwoordelijk voor de typische eigenschappen van klei. Deze zijn in Tabel 1.4 weergegeven. Voor een vergelijking zijn ook de eigenschappen van zand gegeven.

Tabel 1.4

Fys. eigenschappen:	Zand:	Klei:
plasticiteit	niet-plastisch	plastisch
volumever. t.g.v. temp. of wateropn.	nauwelijks, is verwaarloosbaar	grote volumever. zwellen/ krimpen
doorlatendheid	goed doorlatend	slecht doorlatend
drainage	wel drainage door zwaartekracht	geen drainage door zwaartekracht
capillaire werking	snelle cap. stijging, niet erg hoog	langz. cap. stijging, wel erg hoog
samendrukbaarheid	bij dichte pakking erg laag, bij losse pakking erg snel	erg hoog bij zachte klei, duurt wel lang
schuifspanning	alleen wrijving	zowel wrijving als cohesie
gedrag bij schudden	snelle verdichting	bij natte klei verbreken van samenhang, bij droge klei gebeurt niets

De meeste eigenschappen van klei kunnen verklaard worden door aan te nemen dat de kleimineralen bestaan uit negatief geladen plaatvormige deeltjes. Deze negatief geladen deeltjes kunnen positieve ionen (bijv. Ca^{2+} of Na^{+}) en watermolekulen (zijn dipolen) aantrekken. De hoeveelheid water bepaalt de verschijningsvorm of consistentie [22] van de klei. Klei kan namelijk vloeibaar, plastisch of vast zijn. Plastisch wil zeggen dat klei het vermogen bezit om na een vervorming de gegeven vorm vast te houden. Dit is tegengesteld aan elastisch materiaalgedrag. De twee grenzen tussen de drie verschijnings-

vormen worden de consistentie- of Atterbergse grenzen genoemd. De overgang van het vloeibare naar het plastische gebied heet de vloeigrens w_l (Eng. liquid limit). De vloeigrens wordt uitgedrukt in een watergehalte die bepaald is met het apparaatje van Casagrande. Zie hiervoor Figuur 1.2.



Figuur 1.2 Apparaatje van Casagrande

Met dit apparaatje wordt een monster 25 keer opgetild en laat men het weer terugvallen. Daarna wordt met een standaardmes een groef in het monster gekerfd. Het watergehalte waarbij de groef zich nog net sluit wordt de vloeigrens genoemd. Er bestaat ook een empirische formule voor de vloeigrens. Deze luidt:

$$w_l = w * \left(\frac{n}{25}\right)^{0.121}$$

n = aantal klappen waarbij de groef zich net sluit

w = het bij n behorende watergehalte

De overgang tussen het plastische en het vaste gebied wordt de uitrol- of plasticiteitsgrens w_p (Eng. plastic limit) genoemd. Deze grens wordt gedefinieerd als het watergehalte waarbij klei nog net tot draden van 3 mm gerold kan worden zonder dat deze breken. Het verschil tussen de vloeigrens en de uitrolgrens wordt de plasticiteitsindex PI genoemd.

$$PI = w_l - w_p$$

In de literatuur [20,21] worden globale grenzen voor de uitrolgrens en vloeigrens gegeven. Deze zijn in Tabel 1.5 weergegeven.

Tabel 1.5	w_p	w_l	pure klei
montmorilloniet	60-100	150-900	623
illiet	35-50	60-120	104
kaolinet	25-35	30-90	87

De hoge waarde van de vloeigrens voor montmorilloniet is te verklaren, omdat montmorilloniet een zogenaamde actieve klei is. Dat wil zeggen dat montmorilloniet veel water op kan nemen, sterk samengedrukt kan worden, veel ionen op het grensvlak kan bergen, thixotroop is en een lage waterdoorlatendheid heeft. De activiteit van klei wordt gedefinieerd als de plasticiteitsindex gedeeld door het percentage deeltjes kleiner dan $2 \mu\text{m}$. Illiet en kaolinet zijn inactief.

§ 1.3.2 Rekenvoorbeeld van de uitleveringsfactor van klei

Klei is een thixotroop materiaal, dat wil zeggen dat door schudden of trillen de samenhang verbroken kan worden. Als er voldoende water aanwezig is ontstaat een klei-watermengsel (Eng. slurry). Dit mengsel ontstaat ook als er klei gebaggerd wordt. Klei heeft dan zijn maximale volume en door het US Army Corps of Engineers [23] is ontdekt dat het watergehalte dan 2.5 maal de vloeigrens bedraagt. Als dit mengsel tot rust komt, bijvoorbeeld nadat het gestort is, bezinken de kleideeltjes. Hierdoor komt er weer een

zekere samenhang tot stand. Dit proces duurt enkele dagen tot een week. Daarna begint de veel langzamere consolidatie ten gevolge van het eigen gewicht. Het volume van de klei neemt dan weer af, omdat het water dat zich tussen de kleideeltjes bevindt er tussenuit wordt geperst.

De uitleveringsfactor voor klei (onder water) wordt als volgt gedefinieerd:

$$b (\%) = \frac{\rho_{situ} - \rho_{water}}{\rho_{mengsel} - \rho_{water}} * 100\%$$

Als van een klei de vloeigrens (w_l), de natte in situ dichtheid (ρ_{situ}) en de specifieke dichtheid (ρ_{sp}) bekend zijn kan de uitleveringsfactor berekend worden. Deze berekening is hieronder een keer uitgevoerd.

Stel $w_l = 90\%$, $\rho_{situ} = 1530 \text{ kg/m}^3$ en $\rho_{sp} = 2500 \text{ kg/m}^3$.

Hieruit volgt $w = 2.5 * 90\% = 225\%$ Uit de onderstaande figuur volgt:

		vol.	vol.	gew.	vol.
	water →	n	e	$w * G_k$	$w * G_k / \rho_w$
	klei →	1-n	1	G_k	G_k / ρ_{sp}

$$\frac{e}{1} = w * \frac{\rho_{sp}}{\rho_w} = 5.625$$

Dit is om te rekenen naar:

$$n = \frac{e}{e + 1} = \frac{5.625}{6.625} = 0.849$$

En hieruit volgt: $\rho_{mengsel} = 1 * n * 1000 + (1-n) * 2500 = 1226.5 \text{ kg/m}^3$.

De uitleveringsfactor wordt dan:

$$b = \frac{1530 - 1000}{1226.5 - 1000} = 2.34$$

Een probleem bij het berekenen van de uitleveringsfactoren voor klei is dat niet van al het materiaal de samenhang verbroken wordt. Er blijven zogenaamde 'kleiballen' over en deze vertonen geen bulking. Tussen de kleiballen treedt natuurlijk wel uitlevering op. Of er kleiballen optreden is voornamelijk afhankelijk van de kleisoort (dus de ongedraineerde schuifspanning) en de plasticiteitsindex. Van klei met een lage plasticiteitsindex is makkelijk de samenhang te verbreken en er zullen dus weinig kleiballen optreden. Aangezien de kleiballen moeilijk te meten zijn is door de onderzoeksafdeling van Boskalis de volgende richtlijn gegeven: zachte klei (20-40 kPa) bevat 40% ballen, vaste klei (40-75 kPa) bevat 60% ballen en stijve klei (75-100 kPa) bevat 80% ballen. Stel dat er in het rekenvoorbeeld sprake was van zachte klei, dan moet de bulkingfactor gecorrigeerd worden tot:

$$b = 0.4 * 1 + 0.6 * 2.34 = 1.8$$

§ 1.4 Gesteente

Gesteente vormt samen met zand en klei de natuurlijke bodemmateriële waaruit de aardkorst is opgebouwd. Gesteenten kunnen worden ingedeeld naar de wijze van hun ontstaan in drie hoofdgroepen, die elk op hun beurt onderverdeeld worden in subgroepen. Dit is in Tabel 1.6 weergegeven [24].

Tabel 1.6

Hoofdgroep:	Subgroep:	Voorbeelden
stollingsgesteenten of primaire gesteenten	dieptegesteenten ganggesteenten uitvloeiingsgesteenten	: granieten : porfieren : basalt (lava)
sedimentgesteenten of afzettingsgesteenten of secundaire gesteenten	klastische sedimenten chemische sedimenten organogene sedimenten	: grind, zand, klei : kalksteen : steenkool
metamorfe gesteenten of omvormingsgesteenten	metamorfose door temp. metamorfose door druk metamorfose door temp. en druk	: kwarsiet : gneis, lei : kristallijn marmer

Om gesteenten te kunnen winnen (bijvoorbeeld stortsteen) of te verwijderen (bijvoorbeeld bij baggeren) dient er in het algemeen gesprongen te worden. In verband met de verwerking en latere functies van het gesprongen materiaal worden er eisen gesteld aan de grootte of grofheid van de rotsblokken. Men is tegenwoordig vrij goed in staat om de grofheid en de mate van fragmentatie vast te stellen [6,25] voordat er gesprongen wordt. De grofheid en fragmentatie van rotsblokken na het springen zijn afhankelijk van de volgende factoren:

- de dichtheid van het boorpatroon
- de zwaarte en de verdeling van de springladingen
- de soort springstof
- de gelaagdheid of het breukpatroon in de steenformatie
- de richting van de gelaagdheid, hoofdbreukrichting of de basaltzuilen t.o.v. de richting van de boorgaten

Na het springen is het volume van een hoeveelheid gesteente toegenomen, omdat de blokken niet meer precies in elkaar passen als voor het springen. Om de uitleveringsfactor voor dit proces te berekenen kan gebruikt gemaakt worden van de al eerder afgeleide formule:

$$b = \frac{1 - n_1}{1 - n_2}$$

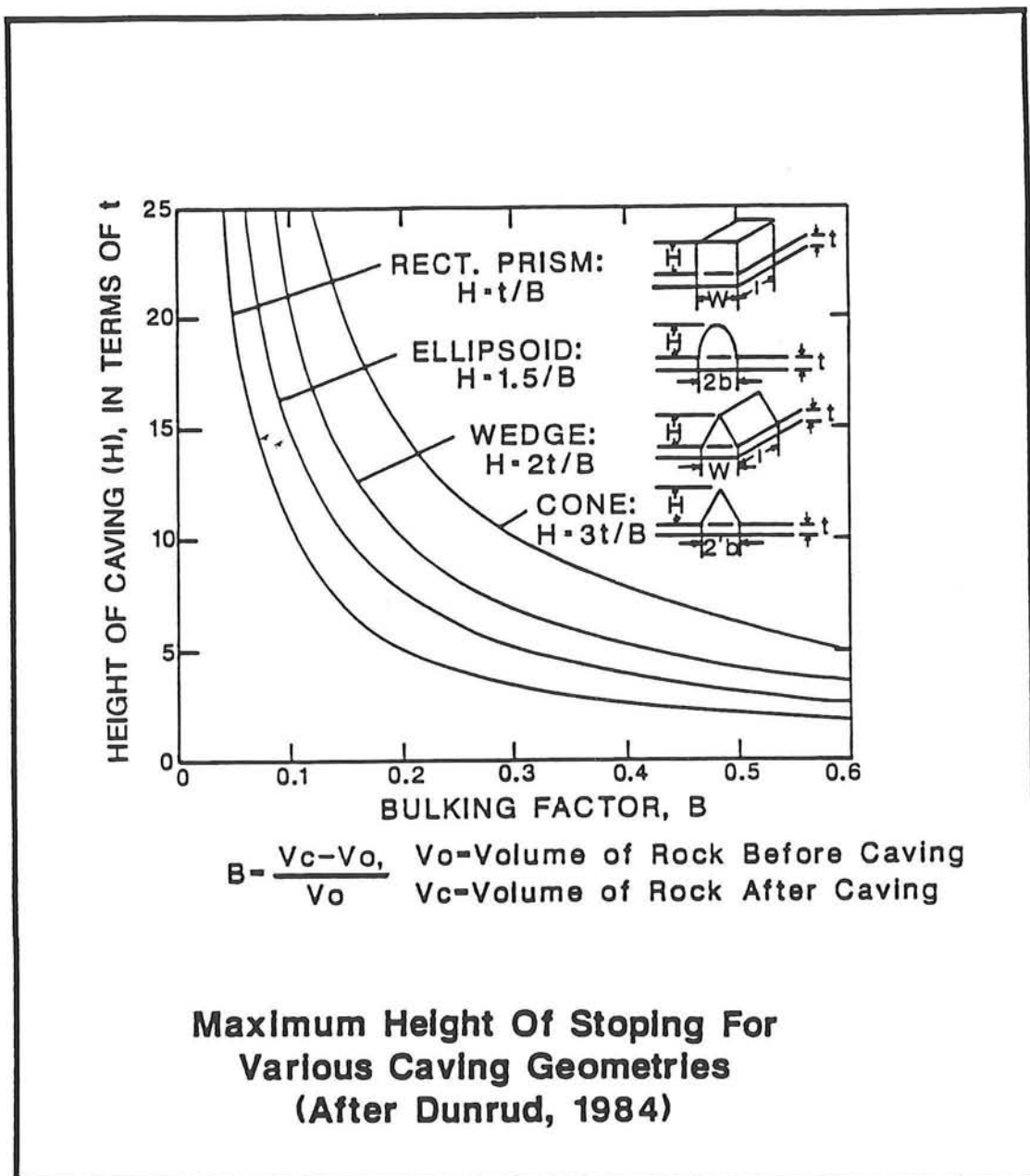
Hierin is n_1 de porositeit in situ. Deze is vaak veel kleiner dan 1 procent en kan dus verwaarloosd worden ten opzichte van n_2 ; de porositeit van het gesprongen materiaal. Als deze laatste waarde bekend is kan de uitlevering berekend worden. Helaas is er weinig literatuur over dit onderwerp bekend. Na het raadplegen van J.W. van der Meer (Waterloopkundig Laboratorium) en G.J. Laan (Dienst Weg- en Waterbouwkunde) blijkt dat er een globale richtlijn voor n_2 aangehouden kan worden. Deze luidt dat n_2 ligt tussen 25 en 30% voor een goed gegradeerd mengsel. Dit komt overeen met een waarde voor de uitleveringsfactor van 1.33 respectievelijk 1.43. Deze waarden zijn gebaseerd op de ervaring van eerder genoemde personen en zijn dus niet met experimenten onderbouwd.

In de Shore Protection Manual [26] worden wel waarden gegeven voor de porositeit van willekeurig aangebrachte stortsteen. Deze waarden liggen tussen de 37 en 40%. Dit correspondeert met een uitleveringsfactor van respectievelijk 1.59 en 1.67. Deze waarden liggen hoger dan de eerder genoemde waarden, omdat stortsteen vaak een meer uniforme verdeling heeft dan gesprongen gesteente.

Voor gesteente geldt niet dat de uitlevering afhankelijk is van de optredende vochtsituatie. Aangezien de rotsblokken een dusdanig groot gewicht en grote diameter hebben, is er geen sprake van een onderlinge aantrekkingskracht door cohesie. Deze cohesie, die bij zand wel aanwezig is, ontstaat ten gevolge van een verlaging van de oppervlaktespanning van de waterfilmpjes van zandkorrels die elkaar aantrekken.

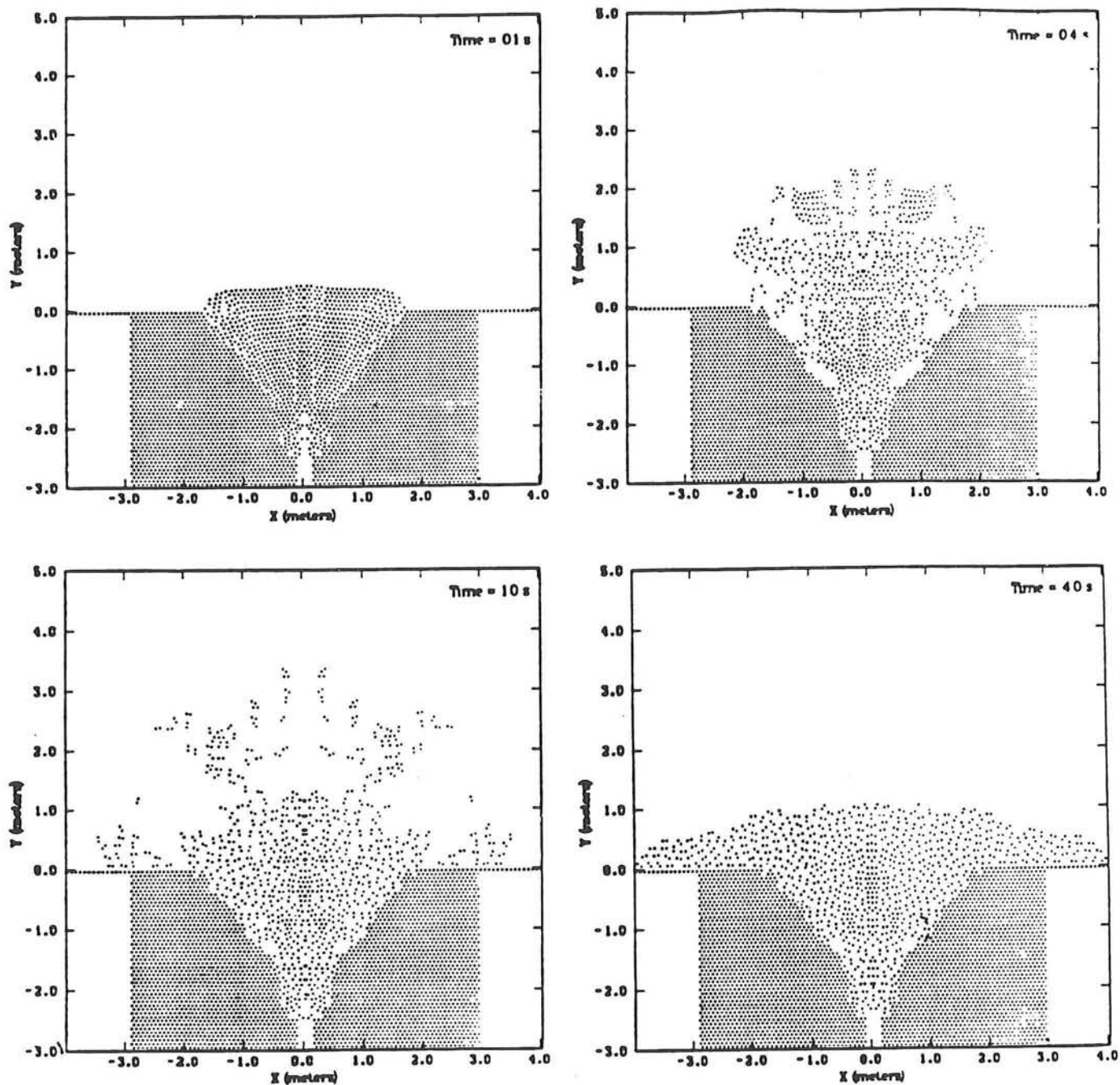
In tegenstelling tot het bovengronds springen van rots, zijn er voor het instorten van mijngangen wel uitleveringsfactoren bekend. Zie Figuur 1.3. De uitleveringsfactoren in deze figuur hangen af van de vorm van de ontstane holte en de hoogte hiervan ten opzichte van de hoogte van de mijngang. Het verschil met de uitleveringsfactoren voor bovengronds springen is dat het in dit geval gaat om instortingen en niet om explosies en dat dus de ruimte zijdelings beperkt is. De uitleveringsfactoren zijn voortgekomen uit onderzoek [27,28] naar verzakkingen van het maaiveld ten gevolge van het instorten van mijngangen.

Tegenwoordig zijn er ook computerprogramma's ontwikkeld, waarmee niet alleen de bewegingen van rotsblokken tijdens een explosie berekend kunnen worden, maar ook de vorm en de hoogte van de berg stenen die ontstaat. Een voorbeeld van zo'n programma is D(istinct) M(otion) C(ode). Zie Bijlage 1.6. De rotsblokken in dit programma worden geschematiseerd door bollen in verband met het vereenvoudigen van het rekenproces.



Figuur 1.3 Uitlevering van gesteente bij ingestorte mijngangen

Deze vereenvoudiging komt niet overeen met de werkelijkheid, vandaar dat er uitleveringsmechanismen zijn toegevoegd. Deze uitleveringsmechanismen bestaan uit het invoeren van een wrijvingskracht tussen de bollen en het invoeren van een vormfactor. De uitkomsten van de berekeningen van dit computerprogramma komen redelijk overeen met praktijkwaarnemingen. Zie voor een voorbeeld van zo'n uitkomst Figuur 1.4. Het is misschien mogelijk om in de toekomst deze computerprogramma's te gebruiken om de uitlevering te bepalen van te springen gesteente.



Figuur 1.4 Voorbeeld van een simulatie met D.M.C. van een explosie

§ 1.5 Aanbevolen literatuur

In dit hoofdstuk zijn verschillende literatuurverwijzingen gebruikt. Deze hebben allemaal direct of indirect betrekking op het begrip uitlevering. In deze paragraaf is daarom aangegeven welke literatuur het meest zinvol is om te bestuderen.

Om uitlevering en de bijbehorende begrippen te leren kennen wordt aanbevolen om eerst de artikelen te lezen die geschreven zijn door ir. P. Lubking in *Land + Water*. In deze artikelen worden in het kort de begrippen verklaard die bij uitlevering een rol spelen. Bovendien staan in deze artikelen literatuurverwijzingen vermeld, zodat er dieper op de materie kan worden ingegaan.

Het *Handbook of Soil Mechanics Vol. I* van A. Kézdi en *Bodenkennziffern und Klassifizierung von Böden* van W. H. Bölling worden aangeraden om te lezen, omdat in deze twee boekwerken voor verschillende grondsoorten de algemene formules en begrippen behandeld worden. Als aanvulling hierop kan nog *Evaluation of relative density and its role in geotechnical projects involving cohesionless soils* van E.T. Selig en R.S. Ladd gelezen worden, omdat in dit boek het begrip relatieve dichtheid en het onderzoek hiernaar uitgebreid is beschreven.

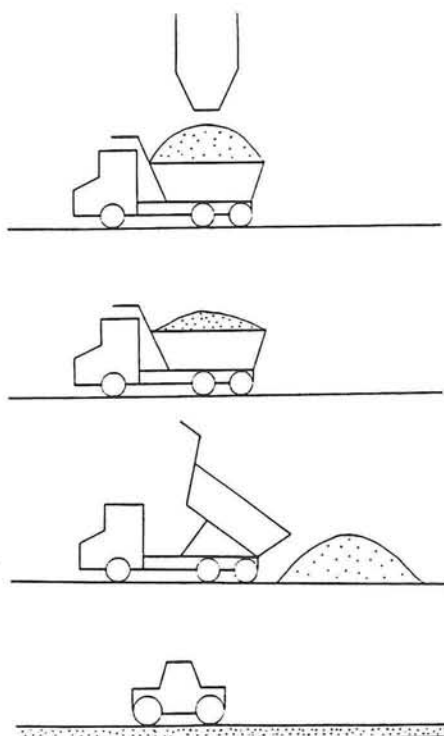
Waarden voor de uitleveringsfactoren van verschillende grondsoorten staan het meest volledig beschreven in *Auflockerungs- und Verdichtungsfaktor von Locker- und Felsböden* van Schlick. In deze publikatie worden niet alleen uitleveringsfactoren vermeld, maar ook is aangegeven wie het onderzoek heeft uitgevoerd en voor welke situatie de factoren gelden. De andere verwijzingen in de literatuurlijst met waarden voor de uitleveringsfactoren zijn waarschijnlijk voor het grootste gedeelte van Schlick afgeleid.

De overige literatuurverwijzingen die in dit hoofdstuk ter sprake zijn gekomen kunnen gezien worden als aanvulling op de in deze paragraaf behandelde literatuur.

HOOFDSTUK 2 BEPALING VAN DE RELATIEVE DICHTHEID VAN ZAND BIJ HET UITVOEREN VAN STORTPROEVEN OP SCHAAL

§ 2.1 Inleiding

Zoals in hoofdstuk 1 omschreven staat is zand dat gewonnen, getransporteerd en verwerkt wordt onderhevig aan volumeveranderingen. Deze volumeveranderingen worden 'bulking' of 'uitlevering' genoemd. Dit verschijnsel speelt onder andere een rol bij het vervoer van zand per vrachtwagen. Bij deze wijze van transport neemt een bepaalde hoeveelheid zand steeds een ander volume in. Zie hiervoor Figuur 2.1.



Figuur 2.1 Uitlevering van zand bij het vervoer per vrachtwagen

Allereerst wordt het zand op een vrachtwagen geladen en heeft dan voordat het transport plaatsvindt een bepaalde dichtheid. Tijdens het transport neemt het volume zand op de vrachtwagen af door trillingen die het zand verdichten. De dichtheid is dan dus toegenomen. De trillingen ontstaan door de bewegingen van de vrachtwagen ten gevolge van het rijden en de toestand van het wegdek. Tenslotte op het werk aangekomen wordt het zand gelost en daarna verdicht tot een bepaalde waarde die in een bestek omschreven staat. Tijdens het transport en de verwerking van het zand verandert steeds de dichtheid, en daarmee dus ook het volume, zonder dat er zand verloren gaat. Aangezien de verrekening van een werk gebaseerd is op het volume, is het dus van belang om de uitlevering te kennen.

Ook om de prijs van zand van te voren te berekenen moet bekend zijn hoeveel vrachtwagenladingen met zand er nodig zijn om een bepaald werk te maken. Om deze berekening

te kunnen uitvoeren moet dus bekend zijn wat de dichtheid van het zand in de begin- en eindtoestand is; tussenliggende situaties zijn hiervoor niet van belang. De begintoestand is in dit geval de dichtheid van het zand dat net op de vrachtwagen geladen is, maar nog niet verdicht is door het transport. De eindtoestand is de dichtheid van het zand op het moment waarop het werk opgeleverd wordt.

De dichtheid van het zand in de eindtoestand is bekend, omdat deze in een bestek omschreven staat. Over de dichtheid in de begintoestand is nog erg weinig bekend. Boskalis heeft hier al wel onderzoek naar gedaan en heeft voor één zandsoort (Noordzeezand) bij één bepaald vochtgehalte een waarde voor de relatieve dichtheid gevonden van -15% (zie Tabel 1.3). De dichtheid wordt uitgedrukt in de relatieve dichtheid om weer te geven hoe de dichtheid van het zand zich verhoudt tot de minimum en maximum dichtheid, opdat verschillende zandsoorten objectief met elkaar vergeleken kunnen worden. Gezien het voorafgaande zijn daarom de volgende probleem- en doelstelling geformuleerd.

Probleemstelling:

Er is nog weinig bekend over de dichtheid van zand, net nadat het op een vrachtwagen geladen is.

Doelstelling:

Het vergroten van de kennis en het inzicht op het gebied van de dichtheid van zand dat net op een vrachtwagen geladen is, door het uitvoeren van stortproeven op schaal.

De stortproeven worden op schaal uitgevoerd, opdat verschillende zandsoorten bij verschillende vochtgehaltes bekeken kunnen worden. Voor de stortproeven zijn vier karakteristieke zandsoorten geselecteerd die verschillen in gradatie en korrelvorm. Hieronder zijn de mogelijke combinaties van de gradatie en de korrelvorm weergegeven; met daarachter vermeld waar de betreffende zandsoort voorkomt (zie Figuur 2.2) of om welke zandsoort het gaat. Brekerzand bestaat uit gebroken grind dat gewonnen is in de buurt van Cuyk.

- goed gegradeerd en rond → Amerongen
- goed gegradeerd en hoekig → brekerzand
- slecht gegradeerd en rond → Noordzee
- slecht gegradeerd en hoekig → Zeyen



Figuur 2.2 Vindplaatsen zand

Afgezien van de verschillende zandsoorten worden de stortproeven tevens uitgevoerd bij een oplopend vochtgehalte van 0 tot 10%.

Voordat er met de stortproeven begonnen wordt, moeten er eerst classificatieproeven uitgevoerd worden om te controleren of de zandsoorten wel voldoen aan de gestelde verwachtingen. Bovendien kan dan bekeken worden welke overige eigenschappen de zandsoorten nog bezitten. De classificatieproeven en de resultaten hiervan staan beschreven in § 2.2, de stortproeven en bijbehorende resultaten in § 2.3; in § 2.4 staan een fouten- en nauwkeurigheidanalyse vermeld en in § 2.5 worden de conclusies en aanbevelingen weergegeven.

§ 2.2 Classificatieproeven

Om de vier al eerder genoemde zandsoorten te classificeren en te controleren op hun eigenschappen zijn van elke zandsoort de volgende gegevens bepaald:

- het korrelverdelingsdiagram
- de zandequivalentwaarde
- de korrelvorm
- het percentage hangwater
- de hoek van het natuurlijk talud
- de minimum en maximum dichtheid

In § 2.2.1 tot en met § 2.2.6 staat beschreven hoe deze gegevens bepaald zijn en tot welke resultaten ze geleid hebben. Afgezien van de zandequivalentwaarde, die in het laboratorium van de Dienst Water en Milieu van de provincie Drente is bepaald, zijn de overige gegevens bepaald bij Grondmechanica Delft.

§ 2.2.1 Bepaling van het korrelverdelingsdiagram

Met een korrelverdelingsdiagram [16] kan de grootte en verdeling van de zandkorrels beoordeeld worden. Om het korrelverdelingsdiagram te verkrijgen is de methode gevolgd die in Bijlage 2.1 beschreven staat. Nadat deze methode voor de vier zandsoorten was uitgevoerd, werden de korrelverdelingsdiagrammen gevonden die in Figuur 2.3 te zien zijn.

Om te controleren of de zandsoorten gegradeerd dan wel uniform zijn, kan gebruik gemaakt worden van het al eerder gedefinieerde uniformiteitsgetal U .

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

U geeft dus de steilheid van de kromme weer. In het algemeen kan gesteld worden dat als U kleiner of gelijk is dan 2 dat dan het zand uniform of slecht gegradeerd genoemd kan worden. Als U groter is dan 2 wordt het zand gegradeerd of niet-uniform genoemd. De uit de korrelverdelingsdiagrammen bepaalde waarden voor U zijn Tabel 2.1 weergegeven.

Tabel 2.1	U	< 60 μm	d ₅₀
Brekerzand	6.15	2%	600 μm
Noordzeezand	2.11	1%	340 μm
Zeyenzand	1.57	9%	95 μm
Amerongenzand	3.53	10%	195 μm

Uit deze tabel blijkt dus dat de geselecteerde zandsorten aan de verwachtingen voldoen: Zeyenzand en Noordzeezand zijn uniform en Brekerzand en Amerongenzand zijn gegradeerd. Ondanks het feit dat Noordzeezand een U-waarde groter dan 2 heeft kan toch gesteld worden dat het uniform is omdat de afwijking erg klein is. Wat verder aan deze getallen opvalt is dat Brekerzand extreem goed gegradeerd is. Dit valt te verklaren doordat Brekerzand bestaat uit grind dat gebroken en gezeefd is, waarna de fracties weer zo bij elkaar gevoegd zijn dat een goed gegradeerd mengsel ontstaat.

Ook kan uit een korrelverdelingsdiagram afgeleid worden hoeveel fijne deeltjes een zandsort bevat. Daartoe wordt het gewichtspercentage van de deeltjes kleiner dan 60 μm afgelezen. Deze gewichtspercentages zijn ook in de bovenstaande tabel weergegeven. Hieruit blijkt dat Brekerzand en Noordzeezand nauwelijks fijne deeltjes bevatten en dat Zeyenzand en Amerongenzand duidelijk een hoger percentage aan fijne deeltjes in zich hebben. In de laatste kolom staat voor elke zandsort bovendien de d₅₀ weergegeven.

Met behulp van de gevonden korrelverdelingsdiagrammen en de classificatiedriehoeken uit Bijlage 1.2 is het mogelijk om grondmonsters te benoemen met een hoofdnaam en eventuele toevoegingen. De vier monsters kunnen daarom als volgt aangeduid worden:

Brekerzand	→	zand/ zwak grindig
Noordzeezand	→	zand
Zeyenzand	→	zand
Amerongenzand	→	zand/ kleiig

§ 2.2.2 Bepaling van de zandequivalentwaarde

Bij de bepaling van de zandequivalentwaarde of ZE-waarde [29] is van de methode gebruik gemaakt die beschreven staat in Bijlage 2.2. Het voordeel van deze proef is dat op een snelle manier de aard en de hoeveelheid van het allerfijnste materiaal is te beoordelen. De resultaten van deze proef zijn in onderstaande Tabel 2.2 weergegeven.

Tabel 2.2	Zandfactor	Kleifactor	ZE-normaal
Brekerzand	0.91	0.18	87
Noordzeezand	0.98	0.07	96
Zeyenzand	0.56	0.25	53
Amerongenzand	0.77	1.50	55

De kleifactor geeft de aanwezigheid van kleideeltjes weer. Dit zijn deeltjes kleiner dan 2 μm . Hoe hoger deze waarde is hoe meer kleideeltjes aanwezig zijn. In de wegenbouw geldt, in verband met het gevaar voor opvriezen, dat de kleifactor niet groter mag zijn dan 5. Breker-, Noordzee- en Zeyenzand bevatten vergeleken met deze waarde dus erg weinig kleideeltjes. Voor Brekerzand en Noordzeezand was dit al te voorspellen omdat ze überhaupt weinig fijne deeltjes bevatten. Bij Noordzeezand zijn de kleideeltjes er uitgespoeld en het gebroken grind van Brekerzand bevat natuurlijk nauwelijks klei. Amerongenzand bevat duidelijk meer kleideeltjes. Dit valt te verklaren door de vindplaats van het zand. Amerongen ligt aan de rivier de Lek.

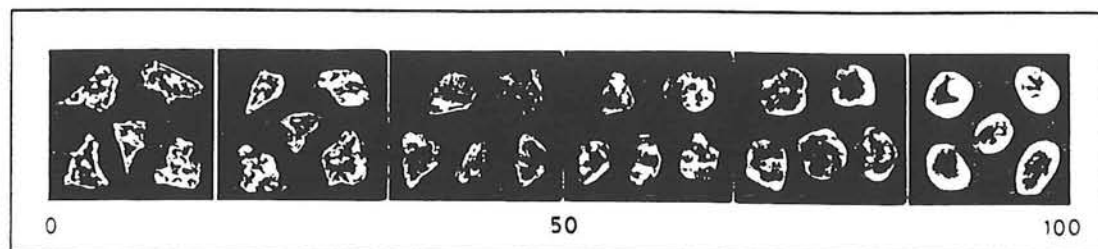
De zandfactor geeft van de fijne zand- en siltfractie het gehalte aan zanddeeltjes (= kwarts) weer. De waarde ligt tussen 0 en 1. Ook hier geldt weer hoe hoger de waarde hoe meer kwartsdeeltjes aanwezig zijn. Bij Brekerzand en Noordzeezand bestaat de eerder genoemde fractie dus duidelijk alleen uit kwartsdeeltjes. De waarde van de zandfactor voor Amerongenzand ligt lager door de aanwezigheid van de kleideeltjes. De waarde van de zandfactor voor Zeyenzand ligt nog weer lager dan die voor het Amerongenzand, hoewel Zeyenzand weinig kleideeltjes bevat. Dit valt te verklaren door het feit dat Zeyenzand humusdeeltjes bevatte. Deze waren duidelijk met het oog waar te nemen.

Als laatste staan in de tabel de waarden voor de ZE-normaal aangegeven. Deze liggen tussen de 0 en 100 en geven het gecombineerde effect van de klei- en zandfactor weer. Hoe lager deze waarde is hoe meer fijne deeltjes het monster bevat. Om te weten of die fijne deeltjes uit kleimineralen, kwarts dan wel uit iets anders bestaan is het dus nodig om de klei- en zandfactor te bepalen.

Tenslotte kan geconcludeerd worden dat Brekerzand en Noordzeezand weinig fijne deeltjes bevatten. Omdat dit al van te voren bekend was, was de proevenserie voor deze beide zandsoorten dus eigenlijk overbodig. Voor het Zeyenzand geldt dat de fijne fractie bestaat uit zanddeeltjes en humus en dat er weinig kleideeltjes aanwezig zijn. De fijne fractie van het Amerongenzand bevat duidelijk meer kleideeltjes dan de andere drie zandsoorten. Voor het Zeyenzand en Amerongenzand is de bepaling van de zandequivalentwaarde dus duidelijk een nuttige aanvulling op het korrelverdelingsdiagram.

§ 2.2.3 Bepaling van de korrelvorm

De korrelvorm is volgens twee methoden bepaald. In de eerste plaats is het K.A.S.-onderzoek [16] uitgevoerd. K.A.S. staat voor Korrelverdeling, Afronding en Spreiding. Het afrondingsonderzoek komt neer op het vergelijken van de korrels van een monster, alleen groter dan 63 μm , met foto's (zie Figuur 2.4) van gedefinieerde korrelvormen. Deze korrelvormen komen overeen met een getal op een schaal van 0 (= erg scherp) tot 100 (= erg rond). Afgeronde Nederlandse zandsoorten hebben meestal een waarde die ligt tussen de 50 en 60. K.A.S.-onderzoek wordt door specialisten van G.D. uitgevoerd.



Figuur 2.4 Korrelvormen

De tweede methode berust op het bepalen van de V(olders) V(erhoeven) S(cherpte). Deze methode staat beschreven in Bijlage 1.5 en hieruit volgt dat een monster allereerst in 7 fracties gesplitst moet worden. Met 5 fracties wordt daarna een uitstroomproef uitgevoerd, waarbij de uitstroomtijd gemeten wordt. Deze tijd is een maat voor de scherpte. Via een omrekeningsformule wordt daarna van elke fractie de V.V.S. berekend, waarna tenslotte ook de V.V.S. van het gehele monster berekend kan worden. De waarden van de V.V.S. liggen tussen 0% (= glasparels) en 100% (= brekerzand). Afgeronde Nederlandse zandsoorten hebben meestal een waarde die ligt tussen de 40 en 50%.

De resultaten van de uitstroomproef waarmee de Volders-Verhoeven-Scherpte bepaald is staan vermeld in Bijlage 2.3 en de eindresultaten van de twee methoden voor de bepaling van de korrelvorm zijn in Tabel 2.3 weergegeven.

Tabel 2.3	K.A.S.	V.V.S.
Brekerzand	32	105%
Noordzeezand	54	55%
Zeyenzand	42	75%
Amerongenzand	44	70%

Uit deze tabel kan de conclusie getrokken worden dat beide methoden hetzelfde resultaat opleveren. De scherpte van het zand neemt in beide gevallen toe in de volgorde: Noordzeezand, Amerongenzand, Zeyenzand en Brekerzand. Ook liggen bij beide methoden de waarden voor de korrelvorm van Zeyenzand en Amerongenzand dicht bij elkaar.

Afgezien van het Amerongenzand voldoen de uitkomsten van deze proeven goed aan de verwachtingen. De gevonden V.V.S.-waarde voor Brekerzand verschilt slechts weinig van de gedefinieerde waarde van 100%. Bovendien zijn Zeyenzand en Brekerzand duidelijk scherper dan Noordzeezand, dat goed voldoet aan de waarden die in deze paragraaf voor afgeronde Nederlandse zandsoorten gegeven zijn.

Van te voren was verwacht dat het Amerongenzand minder scherp zou zijn dan de waarde die uit de tabel is af te lezen, dus eigenlijk zou deze zandsoort moeten worden afgekeurd. In overleg met de begeleiders is echter besloten om dit feit te accepteren, omdat het zoeken naar en het verkrijgen van een nieuwe zandsoort veel tijd vergt en bovendien niet de garantie oplevert dat er een betere zandsoort gevonden zal worden.

§ 2.2.4 Bepaling van het percentage hangwater

Hangwater is het water dat zand tegen de werking van de zwaartekracht in nog kan vasthouden. Dit is het gevolg van de capillaire zuigkracht van de poriën. Hoe kleiner de poriën zijn hoe hoger de zuigkracht is. Kleine poriën zijn aanwezig in fijne of goed gegradeerde zandsoorten.

De bepaling van het percentage hangwater is uitgevoerd om te bekijken hoe goed de vier zandsoorten water kunnen vasthouden, zodat ook wat gezegd kan worden over de poriën die in het zand aanwezig zijn. Om dit te bepalen is zelf een proefopstelling bedacht. Deze staat beschreven in Bijlage 2.4. In principe komt de proef hierop neer dat een zandmon-

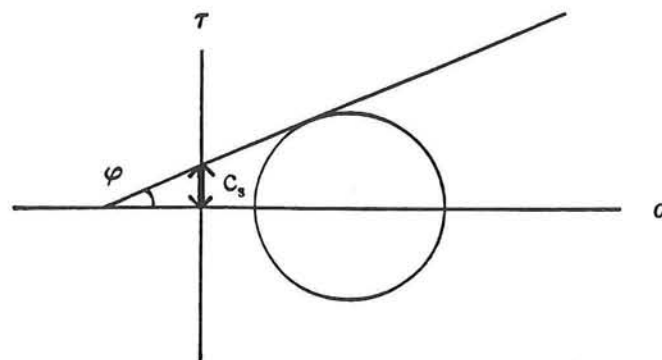
ster totaal verzadigd wordt en daarna laat men onder invloed van de zwaartekracht het water uit het monster stromen. Hierna wordt het vochtgehalte bepaald. De resultaten zijn in Tabel 2.4 weergegeven.

Uit de tabel volgt dat Zeyenzand als meest fijne zandsoort dus het beste water kan vasthouden. Amerongenzand komt daarna, omdat het redelijk gegradeerd is en bovendien ook nog fijne zanddeeltjes bevat. Noordzeezand kan minder water vasthouden, omdat het uniform en niet bijzonder fijn is. Brekerzand tenslotte kan ondanks het feit dat het extreem goed gegradeerd is, het water toch niet goed vasthouden, omdat er vrij grote poriën ontstaan door de scherpe korrels.

Tabel 2.4	Perc.hangw.
Brekerzand	17.4%
Noordzeezand	26.6%
Zeyenzand	31.7%
Amerongenzand	28.3%

§ 2.2.5 Bepaling van de hoek van natuurlijk talud

De schijnbare cohesie [30] van zand (een verschijnsel dat in § 2.3.1 ter sprake komt) kan bepaald worden uit de cirkel van Mohr [11]. Deze cirkel wordt getekend met behulp van de resultaten van een uitgevoerde triaxiaalproef of een directe schuifproef. Een voorbeeld van de cirkel van Mohr is in Figuur 2.5 afgebeeld.



Figuur 2.5 Cirkel van Mohr

Voor de schijnbare cohesie c_s [30] kan de volgende formule gebruikt worden:

$$c_s \approx u_c * S_r * \tan \varphi$$

u_c = capillaire spanning

S_r = verzadigingsgraad

φ = hoek van inwendige wrijving

Deze formule geldt alleen in het gebied $0.5 < S_r < 1.0$. De stortproeven zijn echter uitgevoerd bij een veel lagere verzadigingsgraad. De berekening van de schijnbare cohesie is op deze manier dus niet betrouwbaar. Vandaar dat geprobeerd is om via de hoek van natuurlijk talud iets over de schijnbare cohesie van zand bij verschillende vochtgehaltes te zeggen. De hoek van natuurlijk talud, weergegeven door α , wordt gedefinieerd als de hoek van het steilste talud dat van droog zand opgebouwd kan worden. Door het toevoegen van water aan droog zand ontstaat schijnbare cohesie en de hoek van natuurlijk talud zal dus toenemen. Deze hoek is dus in principe een maat voor de optredende schijnbare cohesie.

De hoek van natuurlijk talud is bepaald volgens een methode die beschreven staat in STP 523 [13]. Bij deze proef wordt zand via een trechter gestort en van het ontstane bergje wordt aan de onderkant net zo lang zand weggeschraapt, totdat het optredende afschuifvlak de top bereikt heeft. Daarna wordt de hellingshoek of de hoek van natuurlijk talud gemeten.

Deze proef werkte wel voor droog zand, maar absoluut niet voor natgemaakt zand. Vanaf een vochtgehalte van 2% werden voor de vier zandsoorten alleen maar waarden van 90° voor de hoek van natuurlijk talud gevonden. Dit resultaat is te wijten aan de schijnbare cohesie en het feit dat de proeven op schaal zijn uitgevoerd.

Voor het droge zand is per zandsoort de proef tien keer uitgevoerd en de resultaten hiervan staan in Bijlage 2.5 vermeld. De gemiddelde waarden zijn in Tabel 2.5 weergegeven.

Tabel 2.5	
	α
Brekerzand	33.3°
Noordzeezand	30.2°
Zeyenzand	33.0°
Amerongenzand	32.5°

Deze tabel bevestigt echter wel de eerder gevonden tendens in de resultaten ten aanzien van de scherpte. Brekerzand is het scherpst, daarna komen Zeyenzand en Amerongenzand en het minst scherp is Noordzeezand.

§ 2.2.6 Bepaling van de minimum en maximum dichtheid

De bepaling van de minimum en maximum dichtheid is nodig om de relatieve dichtheid te

kunnen berekenen. Deze proef is uitgevoerd volgens de droge variant van de ASTM D 2049-69. Deze norm staat weergegeven in Bijlage 2.6. Aangezien de meter waarmee de inzakking afgelezen zou moeten worden niet geheel functioneerde, is de inzakking bepaald door steeds op vier dezelfde plaatsen aan de rand van de bak de inzakking te meten met behulp van een lineaal.

Verder bleek dat bij het Zeyen- en Amerongenzand de bodemplaat wegzakte in het monster, doordat er bij het trillen veel fijn materiaal langs de bodemplaat omhoog kwam. Bij deze beide zandsoorten is daarom bij het trillen een filterpapiertje tussen de bodemplaat en de toplaag van het monster gelegd. Hierdoor kwam aan het hierboven genoemde probleem een eind.

Bij het Noordzeezand is de fractie groter dan 4 millimeter verwijderd. Deze fractie bestond in z'n geheel uit schelpen en schelpgruis. Als deze fractie niet verwijderd was zou dit de proefresultaten te veel beïnvloeden, doordat er dan een grotere trechter nodig zou zijn geweest om de bak te vullen. Het gewichtsaandeel van de fractie groter dan 4 millimeter bedraagt slechts 1%, zodat het korrelverdelingsdiagram nauwelijks verandert door het weglaten van deze fractie.

Voor elke zandsoort is de proef drie maal uitgevoerd. De laagste waarde van de minimum dichtheid is als maatgevend beschouwd en hiermee is verder gerekend. De resultaten van deze proeven staan vermeld in Bijlage 2.7 en de maatgevende resultaten staan in de tweede en derde kolom van Tabel 2.6 vermeld. In de vierde en vijfde kolom zijn de porositeiten weergegeven die corresponderen met de maatgevende minimum en maximum dichtheid. In de laatste kolom is het verschil tussen de minimum en maximum porositeit weergegeven.

Tabel 2.6	$\rho_{\min}(\text{kg/m}^3)$	$\rho_{\max}(\text{kg/m}^3)$	$n_{\max}$	$n_{\min}$	Δn
Breker	1506.7	1864.9	0.431	0.296	0.135
Noordzee	1515.9	1807.1	0.428	0.318	0.110
Zeyen	1273.1	1601.4	0.520	0.396	0.124
Amerongen	1412.4	1763.6	0.467	0.334	0.133

In hoofdstuk 1 staat vermeld bij de conclusies naar aanleiding van het onderzoek naar de minimum en maximum dichtheid van zand, dat het verschil tussen de minimum en maximum porositeit globaal ligt tussen de 12 en 14%. Deze conclusie klopt dus goed voor de bovenstaande resultaten. Alleen Noordzeezand valt buiten de marge van 12 en 14%. Dit valt enerzijds te verklaren door het verwijderen van de fractie groter dan 4 millimeter, anderzijds heeft het Noordzeezand de meest afgeronde korrelvorm. Als de fractie groter dan 4 millimeter niet verwijderd was zou er waarschijnlijk bij de bepaling van de minimum dichtheid een lossere pakking gevonden zijn door de aanwezigheid van de schelpen. De schelpen beïnvloeden het verdichtingsproces minder, maar over het geheel zou het verschil tussen de minimum en maximum porositeit toch groter zijn geweest als de schelpen niet verwijderd waren.

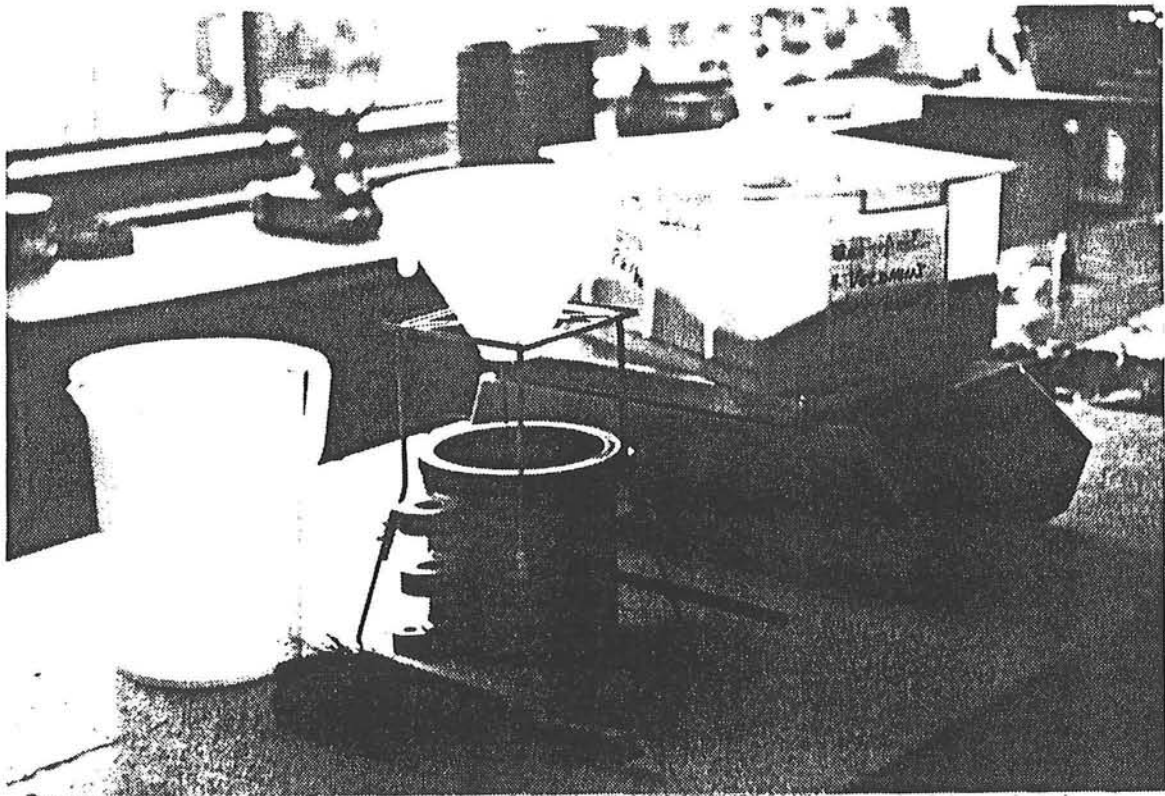
§ 2.3 Stortproeven

In werkelijkheid wordt zand op een vrachtwagen geladen met behulp van een silo of een grijper. Voor de stortproeven op schaal is dit laadproces daarom geschematiseerd door een trechter respectievelijk een grijper van een speelgoedauto.

Zand dat zich in een silo bevindt bevat volgens de N.B.M. (Den Haag) en bouwmaterialenhandel 'De Boo' (Delft) een vochtgehalte dat ligt tussen 4 en 8%. Vandaar dat de proeven uitgevoerd zijn bij een oplopend vochtgehalte van 0, 2, 4, 6, 8 en 10%.

Voor het uitvoeren van de stortproeven zijn de volgende attributen nodig, die ook in Figuur 2.6 en 2.10 te zien zijn:

- een verzamelbak met het zandmonster
- een bak om het zand in te storten
- een schenkan met een inhoud van 5 liter
- een trechter met bijbehorende standaard (zelf maken)
- een kleine grijper
- water
- een plantenspuit
- een mixer
- een weegschaal (nauwkeurigheid 1 gram)
- een ijzeren plaat om het monster af te schuimen
- een pen, papier en een handstoffer



Figuur 2.6 Attributen nodig voor stortproef

Bij het uitvoeren van de stortproeven met de trechter is elke keer de volgende procedure gevolgd:

- Neem een droog zandmonster van 10 kilogram.
- Neem de schenkan en vul deze met het zand.
- Plaats de trechter boven de bak en giet het zand zodanig in de trechter dat deze niet verstopt (Figuur 2.7).
- Vul de bak en stop met gieten als er overal zand over de rand gestroomd is (Figuur 2.8).
- Verwijder voorzichtig de standaard met de trechter en schuim het monster daarna eveneens voorzichtig af (Figuur 2.9).
- Verwijder overtollige zandresten aan de buitenkant van de bak met de handstoffer.
- Weeg de bak met het monster en noteer het gewicht.
- Verzamel al het overige zand in de verzamelbak en vul alvast weer de kan, zodat niet steeds hetzelfde zand gebruikt wordt.
- Leeg de bak in de verzamelbak en voer de stortproef vier of zes keer uit, afhankelijk van de spreiding in de resultaten.
- Voeg hierna met de plantenspuit 200 milliliter water toe, dit komt overeen met een vochtgehalte van 2%, en meng het geheel goed m.b.v. de mixer (Figuur 2.10).
- Voer de stortproef weer vier of zes keer uit.
- Bepaal voor en na het doen van de stortproeven bij elk vochtgehalte het totale gewicht van het zand, zodat de afname van het vochtgehalte tijdens de stortproef bepaald wordt.
- Herhaal het voorgaande totdat een vochtgehalte van 10% bereikt is.
- Droog het monster in de stoof, weeg het daarna en bepaal het totale verlies aan zandgedurende de proevenserie.

De proefprocedure voor de speelgoedgrijper is in principe gelijk aan die voor de trechter. Alleen wordt er niet gebruik gemaakt van de schenkan, maar wordt het zand rechtstreeks uit de verzamelbak 'gehapt' en daarna vanaf een bepaalde hoogte in de bak gestort.

§ 2.3.1 Proevenserie 1 en 2

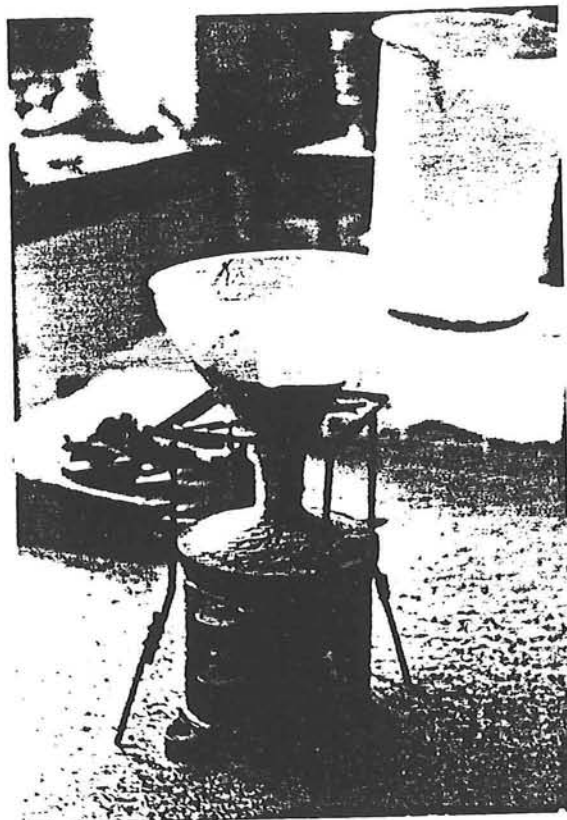
De eerste twee stortproeven zijn uitgevoerd met de bak die ook gebruikt is bij de bepaling van de minimum en maximum dichtheid. De inhoud van deze bak is 2830 kubieke centimeter. De diameter van de trechteropening is 5.3 centimeter. De valhoogte tussen de onderkant van de trechter (of grijper) met de bovenkant van de bak is 10 centimeter. Deze beide laatste waarden berusten niet op een standaardproef maar zijn willekeurig genomen. Per vochtgehalte zijn in principe vier metingen verricht. Als het verschil tussen de hoogste en laagste meting echter meer dan 75 gram bedroeg zijn er twee extra metingen uitgevoerd. De waarde van 75 gram is ook willekeurig genomen.

De berekeningen en resultaten van de eerste twee stortproeven met de trechter en de grijper voor de verschillende zandsoorten en vochtgehalten zijn te zien in Bijlage 2.8 en 2.9. In de Figuren 2.11 en 2.12 zijn de grafieken die horen bij de twee stortproeven afgebeeld.

Wat meteen opvalt aan beide grafieken is dat als er water aan het zand toegevoegd wordt de relatieve dichtheid kleiner wordt dan 0%. Dit betekent dus dat dan de pakking van het



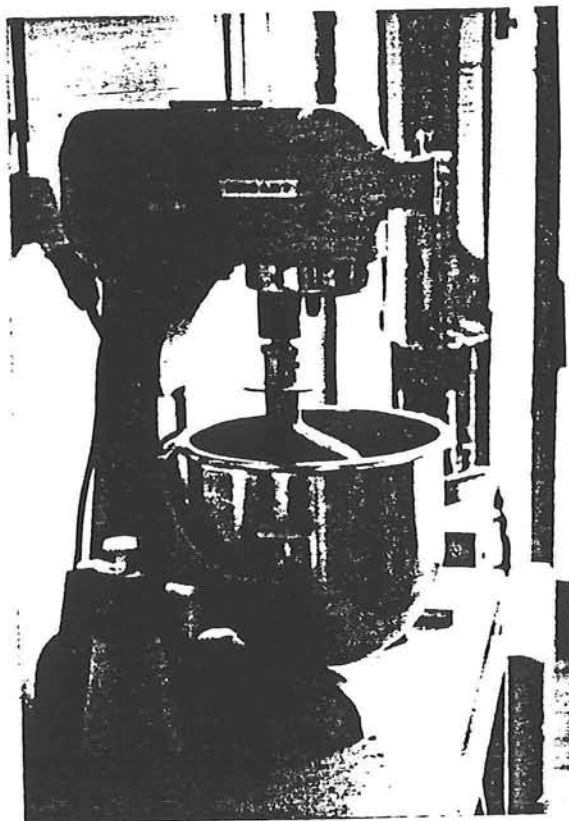
Figuur 2.7 Vullen van de bak



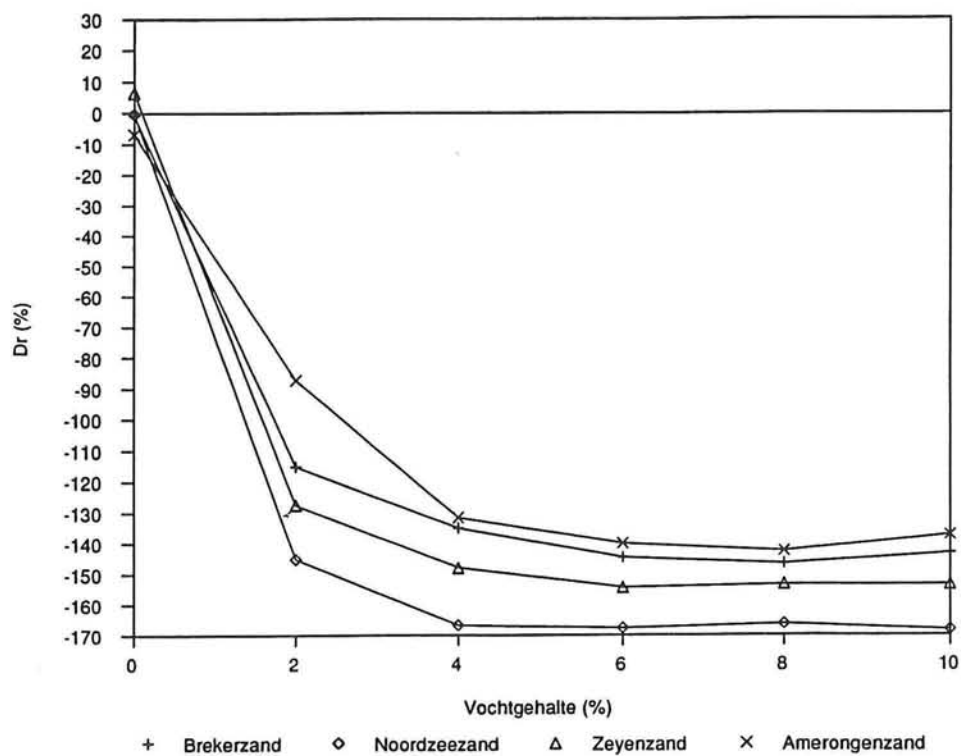
Figuur 2.8 Zand stroomt overal over de rand



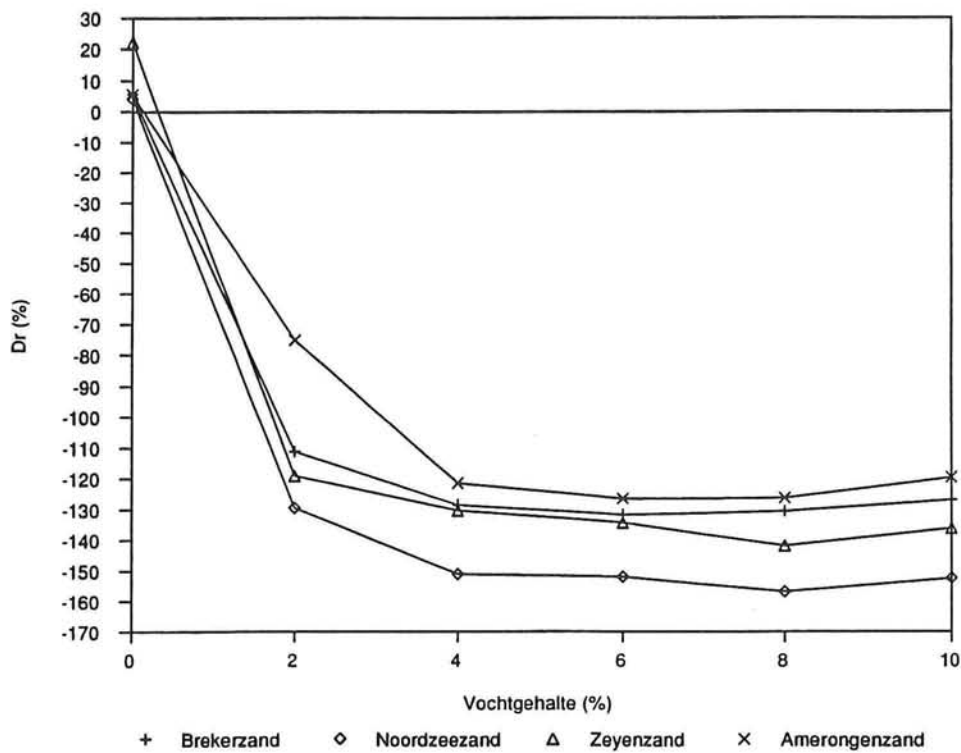
Figuur 2.9 Afschuimen zandmonster



Figuur 2.10 Plantenspuit en mixer



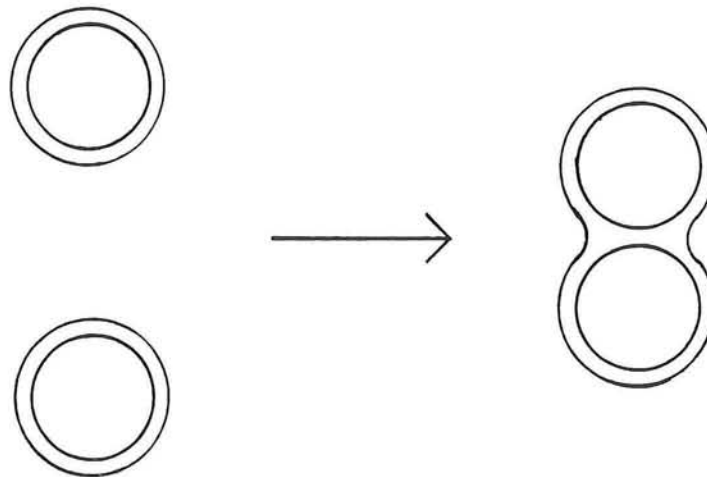
Figuur 2.11 Stortproevenserie 1



Figuur 2.12 Stortproevenserie 2

zand lossier is dan de meest losse pakking die hoort bij de minimum dichtheid van de laboratoriumproef. Deze lossere pakking is te verklaren door de aanwezigheid van het water in het zand. Dit water vormt namelijk een filmpje rondom de zandkorrels en heeft dan een zekere oppervlaktespanning.

Als twee zandkorrels met een waterfilmpje in aanraking met elkaar komen (zie Figuur 2.13) verplaatst het water zich naar het contactpunt, zodat de totale oppervlaktespanning afneemt.



Figuur 2.13 Principe schijnbare cohesie

Deze situatie heeft een lager energieniveau dan de twee afzonderlijke korrels en het resultaat is dus dat de zandkorrels elkaar gaan aantrekken en 'verbindingen' vormen [33]. Er ontstaat zo een zekere kruimelstructuur in het zand. Dit verschijnsel wordt schijnbare cohesie [30,31] genoemd, omdat als het water verdwijnt de cohesie ook verdwijnt. Door de ontstane structuur kunnen niet alle open ruimtes optimaal gevuld worden en de porositeit neemt dus toe. Als de porositeit toeneemt, nemen zowel de droge als relatieve dichtheid af.

In welke mate er verbindingen optreden is afhankelijk van de vorm, de diameter en de oppervlakte van de zandkorrels. Bij ronde, fijne en gladde korrels zal het waterfilmpje zich het gemakkelijkst kunnen vormen, zodat ook de verbindingen het snelst zullen optreden en de toename van de porositeit ook groter zal zijn dan bij scherpe, grove en ruwe korrels.

Tijdens het uitvoeren van de stortproeven was duidelijk waar te nemen dat er verbindingen tussen de korrels ontstonden, omdat er in het natgemaakte zand kluitjes te zien waren. Door deze kluitjes neemt de relatieve dichtheid ook weer af, omdat niet alleen in de kluitjes een grotere porositeit ontstaat, maar ook tussen de kluitjes bevinden zich dan veel holle ruimtes.

Als er nog meer water toegevoegd wordt raken de poriën steeds verder gevuld met water. Hierdoor ontstaat er een capillaire zuigspanning in de poriën, waardoor de zandkorrels elkaar ook gaan aantrekken. Dit verschijnsel valt ook onder de term schijnbare cohesie, maar is bij de uitgevoerde stortproeven van ondergeschikt belang, omdat er niet zo veel water toegevoegd is dat de poriën zich hiermee vullen.

Wat verder aan beide grafieken opvalt is dat de krommen voor de verschillende zandsoor-

ten keurig in een vaste volgorde onder elkaar liggen. Alleen tussen 0 en 2% vochtgehalte kruisen de lijnen elkaar. Dat de krommen elkaar in het gebied tussen 2 en 10% vochtgehalte niet kruisen valt te verklaren door het feit dat de valhoogte, bakinhoud en trechteropening klein zijn. Hierdoor is de valsnelheid van de zandkorrels ook klein, waardoor de invloed van de korrelvorm en fijne zandfractie juist groot is.

De invloed van de korrelvorm komt vooral naar voren bij het Noordzeezand. Deze zandsoort is het meest rond en de d_{50} is ook niet al te groot, zodat het water het gemakkelijkst een filmpje rond de korrels kan vormen. Hierdoor ontstaat ook het gemakkelijkst een losse structuur en bereikt het Noordzeezand de meest losse pakking van de vier zandsoorten.

Wat eveneens een rol speelt is het percentage fijn zand. Fijn zand bevat een korreldiameter tussen 0.06 en 0.2 millimeter. Voor de vier zandsoorten zijn de percentages fijn zand uit de korrelverdelingsdiagrammen afgeleid en in Tabel 2.7 weergegeven.

Tabel 2.7	Fijn zand
Brekerzand	16%
Noordzeezand	14%
Zeyenzand	88%
Amerongenzand	42%

Hoewel Zeyenzand en Amerongenzand ongeveer even scherp zijn, bevat Zeyenzand een twee keer zo hoog percentage aan fijn zand als Amerongenzand. Brekerzand is nog weer scherper en het percentage fijn zand is slechts 16% groot. De kromme voor Zeyenzand zal dus onder die voor Brekerzand en Amerongenzand moeten liggen. Dit blijkt ook uit beide grafieken.

In principe zou de kromme voor Brekerzand boven de andere drie moeten liggen, omdat Brekerzand het scherpst is en een klein percentage fijn zand bevat. Toch ligt in beide grafieken het Amerongenzand nog boven het Brekerzand. Dit valt waarschijnlijk te verklaren door de aanwezigheid van de kleideeltjes. Bij het drogen van het Amerongenzand hechten de kleideeltjes zich vast op de zandkorrels. Bij het weer toevoegen van water zal dit eerst aan de kleimineralen gebonden worden. Hierdoor is er dus minder water beschikbaar om verbindingen tussen de korrels te vormen, waardoor de dichtheid hoger ligt. De kromme voor Amerongenzand ligt daarom boven de andere drie krommen.

Wat verder aan beide grafieken opvalt is dat de krommen tussen 4 en 10% vochtgehalte redelijk horizontaal lopen. Dit betekent dat in dit gebied de relatieve dichtheid onafhankelijk wordt van het vochtgehalte.

Het verschil tussen de proevenserie 1 en 2 is dat proevenserie 1 is uitgevoerd met de trechter en proevenserie 2 met de speelgoedgrijper. Met de trechter werd de bak natuurlijk veel gelijkmatiger gevuld door de constante stroom zand die steeds op dezelfde plaats terecht kwam. Bij het vullen met de grijper werd steeds een kluit zand in de bak gedeponerd die op de bodem uit elkaar viel. Hierdoor verlopen de krommen voor proevenserie 2 wat onregelmatiger dan voor proevenserie 1.

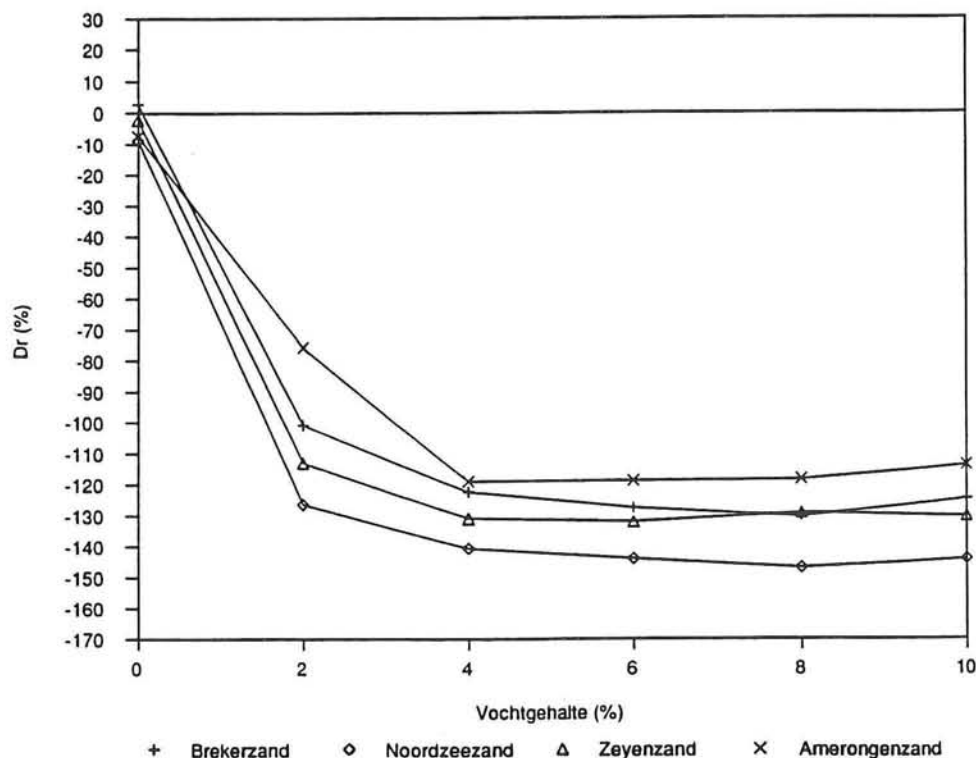
Door het laten vallen van de zandkluitjes bij het vullen van de bak met de grijper zal de

(relatieve) dichtheid toenemen ten opzichte van de (relatieve) dichtheid die bij het vullen met de trechter gevonden werd. Dit blijkt ook uit beide grafieken.

Bij het uitvoeren van de stortproeven is tevens elke keer bijgehouden hoe groot het verlies aan zand was en hoe het vochtgehalte veranderde tijdens de proef. Bij proevenserie 1 en 2 was het verlies aan zand gemiddeld 32 gram; dit komt overeen met 0.3% van het droge gewicht van het zand waarmee de stortproeven uitgevoerd werden. Het vochtgehalte nam tijdens de proeven gemiddeld met 0.2% af. Vanwege de afname van het vochtgehalte is steeds iets te veel water toegevoegd.

§ 2.3.2 Proevenserie 3 en 4

Nadat de proevenseries 1 en 2 uitgevoerd waren is gekeken wat de invloed op de relatieve dichtheid is als de valhoogte en bakinhoud vergroot worden. Bij proevenserie 3 is de valhoogte verdubbeld tot 20 centimeter. De trechteropening en bakinhoud zijn gelijk gebleven. De resultaten van deze stortproef staan vermeld in Bijlage 2.10. In Figuur 2.14 staat de bijbehorende grafiek afgebeeld.

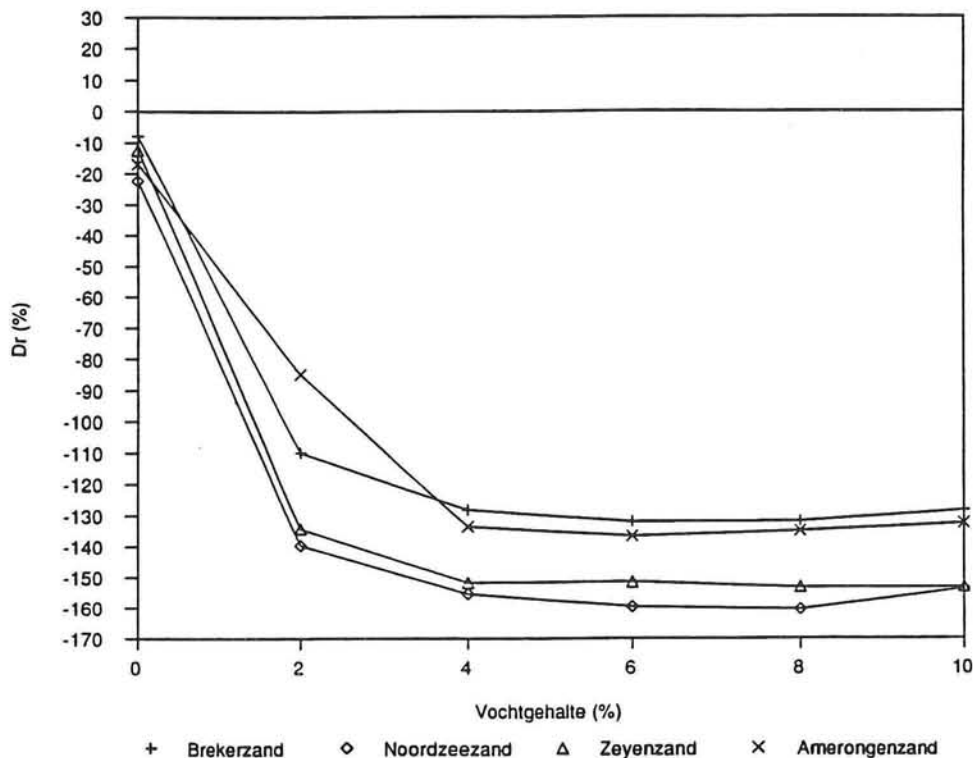


Figuur 2.14 Stortproevenserie 3

Op het eerste gezicht is er in vergelijking met de grafiek 1 niet veel veranderd. De krommen liggen nog steeds in dezelfde volgorde en vanaf 4% vochtgehalte lopen ze redelijk horizontaal. Dat de krommen van Brekerzand en Zeyenzand elkaar bij 8% vochtgehalte kruisen is waarschijnlijk te wijten aan het niet nauwkeurig genoeg uitvoeren van de stortproeven. Het gemiddelde verlies aan zand bij deze proevenserie was 30 gram en de gemiddelde afname van het vochtgehalte was 0.2%.

Als er nauwkeuriger naar de grafiek gekeken wordt valt op dat de krommen hoger liggen dan bij grafiek 1. Dit is natuurlijk ook te verwachten. Door het vergroten van de valhoogte neemt de valsnelheid en dus ook de impuls van de zandkorrels toe. De dichtheid zal hierdoor toenemen en de krommen komen dus hoger te liggen.

Bij proevenserie 4 is de bak vervangen door een grotere bak met een inhoud van 5000 kubieke centimeter. De valhoogte is met 2 centimeter vergroot tot 22 centimeter, omdat anders de standaard niet op de trechter paste. De trechteropening is niet veranderd en blijft 5.3 centimeter. De resultaten van proevenserie 4 staan vermeld in Bijlage 2.11. De bijbehorende grafiek staat in Figuur 2.15 afgebeeld.



Figuur 2.15 Stortproevenserie 4

Ook in deze grafiek hebben de krommen weer dezelfde vorm als in de voorgaande grafieken. En ook geldt weer dat vanaf 4% vochtgehalte de krommen redelijk horizontaal lopen. Wat echter wel verschilt met de vorige grafieken is dat de kromme die hoort bij het Amerongenzand vanaf 4% vochtgehalte net onder de kromme ligt die bij het Brekerzand hoort. Het lijkt er dus op dat als de modelproeven meer in overeenstemming met de werkelijkheid zijn (grotere valhoogte en bak) de volgorde van de vier zandsoorten niet meer strikt vastligt.

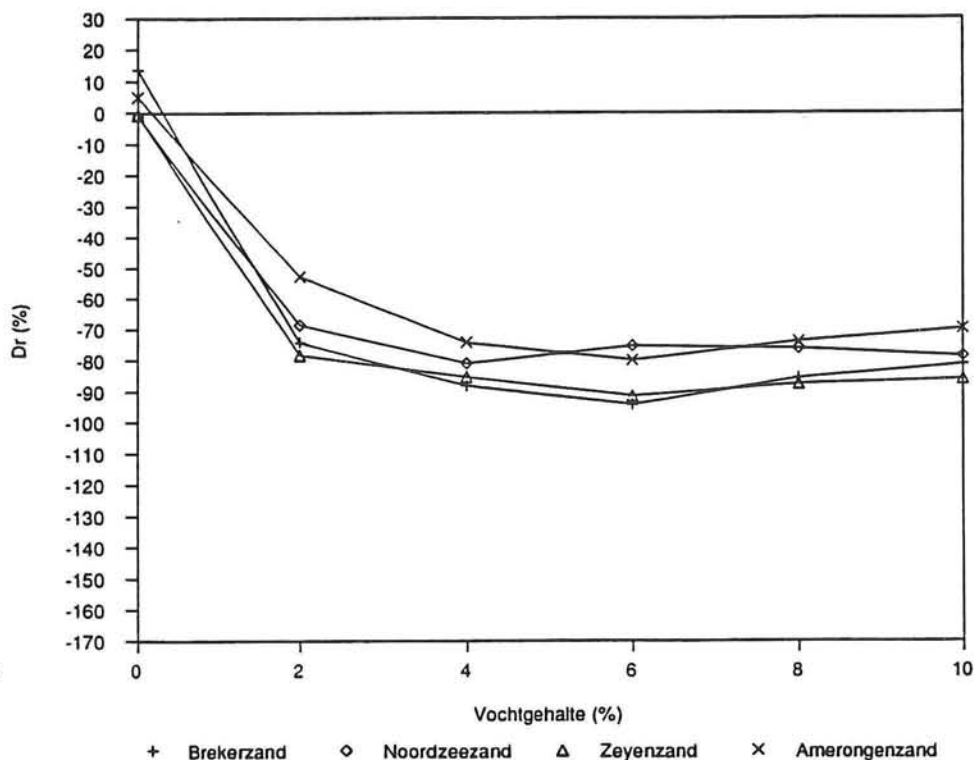
Wat verder opvalt is dat nu de (relatieve) dichtheid weer is afgenomen, omdat de krommen lager liggen dan in grafiek 3. Dit valt te verklaren door de vorm van de bak. De bak met een inhoud van 2830 kubieke centimeter was 15.5 centimeter hoog en had een diameter van 15.2 centimeter. De bak met een inhoud van 5000 kubieke centimeter had een hoogte van 11.7 centimeter en een diameter van 23.3 centimeter. Deze laatste bak is dus lager en heeft een grotere diameter. Als deze bak gevuld werd viel het zand eerst in het midden en vormde een piramide. Bij verder vullen begon het zand ook naar

de rand te rollen onder invloed van de zwaartekracht. De snelheid van deze laatste zandkorrels is natuurlijk minder groot, waardoor weer een lossere structuur ontstond dan bij proevenserie 3.

Bij proevenserie 4 was het gemiddelde verlies aan zand 31 gram en nam het vochtgehalte gemiddelde met 0.2% af.

§ 2.3.3 Stortproevenserie 5

Als laatste is een proevenserie uitgevoerd waarbij de valhoogte is vergroot tot 66 centimeter en de trechteropening tot 7.5 centimeter. De bakinhoud is 5000 kubieke centimeter gebleven. Door het vergroten van de valhoogte nam de spreiding in de meetresultaten toe. Vandaar dat bij deze stortproef de twee extra metingen pas uitgevoerd werden als het verschil tussen de hoogste en laagste waarde van het gewicht van het zand in de bak groter was dan 150 gram. De resultaten van deze stortproef staan in bijlage 2.12 en de bijbehorende grafiek is in Figuur 2.16 afgebeeld.



Figuur 2.16 Stortproevenserie 5

Deze grafiek wijkt op een aantal punten duidelijk van de vier voorgaande grafieken af. Ten eerste kruisen de krommen elkaar meerdere malen en liggen ze niet meer in een vaste volgorde. Dit gegeven ondersteunt de veronderstelling uit de vorige paragraaf dat, als de modelproeven meer in overeenstemming zijn met de werkelijkheid, er geen vaste volgorde meer is.

Ten tweede is de bandbreedte duidelijk afgenomen. Met de bandbreedte wordt bedoeld de afstand tussen de twee buitenste krommen van de grafiek. Het verloop van de bandbreedtes voor de verschillende proevenseries is in Tabel 2.8 weergegeven.

Tabel 2.8	0%	2%	4%	6%	8%	10%
Proevenserie 1	13.34	57.86	35.20	27.63	23.74	30.87
Proevenserie 2	18.22	54.34	29.60	25.36	30.56	32.71
Proevenserie 3	11.55	50.59	21.75	25.25	28.55	30.17
Proevenserie 4	14.46	54.76	27.24	27.59	28.53	25.36
Proevenserie 5	14.77	25.74	13.93	18.88	13.76	16.28

Uit Tabel 2.8 blijkt duidelijk dat de bandbreedte pas afneemt als de aan de zandkorrels meegegeven impuls sterk toeneemt. Als er nog meer impuls toegevoegd wordt zal de bandbreedte waarschijnlijk nog smaller worden.

Wat onveranderd is gebleven is dat vanaf 4% vochtgehalte de krommen redelijk horizontaal lopen. Het gemiddelde verlies aan zand gedurende deze proevenserie was 39 gram. Dit is iets groter dan bij de vorige stortproeven en valt te verklaren door de grotere valhoogte. De afname van het vochtgehalte bij deze proevenserie was gemiddeld weer 0.2%.

§ 2.4 Fouten- en nauwkeurighedsanalyse

Om te kunnen beoordelen wat de uiteindelijke resultaten waard zijn moet gekeken worden welke factoren en gegevens van invloed zijn op het eindresultaat en hoe groot de invloed hiervan is. Dit beoordelen gebeurt met behulp van een fouten- en nauwkeurighedsanalyse. In de foutenanalyse wordt bekeken welke factoren leiden tot fouten in de waarde van de relatieve dichtheid. In de nauwkeurighedsanalyse wordt een gegeven waarde opzettelijk een aantal procenten veranderd. Hierna wordt de relatieve dichtheid opnieuw berekend en gekeken wordt hoe groot de verandering is ten opzichte van de oude waarde.

§ 2.4.1 Foutenanalyse

De volgende factoren kunnen leiden tot fouten in de waarde van de berekende relatieve dichtheid:

- de minimum en maximum dichtheid van het zand
- de dichtheid van het zand in de bak
- het vochtgehalte

De bepaling van de minimum en maximum dichtheid is verricht volgens de ASTM D 2049-69. Toch zijn de resultaten erg afhankelijk van hoe nauwkeurig en voorzichtig de proef uitgevoerd wordt. Vandaar dat deze proef voor elke zandsoort drie keer uitgevoerd is en de laagste waarde van de minimum dichtheid is als maatgevend beschouwd. Zie hiervoor Bijlage 2.7.

Bij de bepaling van de dichtheid van het zand in de bak speelt ook weer de voorzichtigheid waarmee de stortproeven uitgevoerd zijn een rol. De stortproeven zijn per vochtgehalte vier of zes keer uitgevoerd. Dit was afhankelijk van het gevonden verschil tussen de hoogste en laagste waarde van het gewicht van het zand. Als de stortproeven niet nauwkeurig genoeg zijn uitgevoerd moet dit ten eerste volgen uit de Figuren 2.10 tot en met 2.15. Er zouden dan onverwachte pieken te zien moeten zijn. Dit is niet het geval.

Ten tweede zou een onnauwkeurige uitvoering van de stortproeven leiden tot een grote spreiding in de resultaten. De grafieken zijn tenslotte gebaseerd op gemiddelde waarden. Vandaar dat in Bijlage 2.8 tot en met Bijlage 2.12 achter de gemiddelde relatieve dichtheid tussen haakjes de standaardafwijking is vermeld. In deze waarden is geen patroon te ontdekken en er zijn geen extreme uitschieters te zien. In 95 procent van de gevallen is de standaardafwijking kleiner dan 5% relatieve dichtheid.

Het vochtgehalte is steeds voor en na elke stortproef bepaald om na te gaan hoe het vochtgehalte gedurende de proef veranderde. Omdat elke keer dus twee maal het vochtgehalte bepaald is, is de kans heel erg klein dat er hierbij een fout is gemaakt. De fout zou nog wel kunnen ontstaan als het verlies aan zand erg groot zou zijn, omdat bij de berekening van het vochtgehalte het totale gewicht van het zandmonster bekend moet zijn. Maar uit § 2.3.1 tot en met § 2.3.3 blijkt dat het verlies aan zand slechts enkele tientallen grammen groot is en dus verwaarloosbaar is ten opzichte van de 10 kilogram droog zand.

§ 2.4.2 Nauwkeurighedsanalyse

Bij de uitgevoerde nauwkeurighedsanalyse zijn de factoren uit § 2.4.3 een aantal procenten veranderd en daarna is opnieuw de relatieve dichtheid berekend.

Allereerst is het gewicht van het zand waarmee de minimum dichtheid bepaald is verminderd met 5%. Hierdoor verandert niet alleen de minimum dichtheid, maar ook de maximum dichtheid. Aangezien voor de maximum dichtheid de gemiddelde inzinking bekend moet zijn, is deze waarde door extrapolatie uit Bijlage 2.5 verkregen. Als dit niet mogelijk was is een zo goed mogelijke aanname gedaan. De nieuwe waarden voor de minimum en maximum dichtheid, waarmee de herberekening van de relatieve dichtheid is uitgevoerd, staan in Bijlage 2.13. De nieuwe waarden voor de relatieve dichtheid staan in Bijlage 2.14.

Ten tweede is het gewicht van het zand in de bak met 5% verhoogd. De nieuwe waarden voor de relatieve dichtheid staan ook afgebeeld in Bijlage 2.14. Ten derde zijn ook alle vochtgehaltes met 5% verhoogd. De herberekende waarden van de relatieve dichtheid staan eveneens in Bijlage 2.14.

Nadat de nieuwe waarden voor de relatieve dichtheid zijn berekend, is ook de procentuele toe- of afname bepaald. Deze waarden zijn in Bijlage 2.15 weergegeven. De resultaten zijn hieronder in Tabel 2.9 samengevat. Een min betekent dat de absolute waarde van de relatieve dichtheid afneemt en een plus dat de absolute waarde toeneemt.

In de eerste kolom staat de procentuele verandering van de relatieve dichtheid als gevolg van een afname van 5% in het gewicht van het zand waarmee de minimum dichtheid bepaald is. In de tweede kolom staat de procentuele verandering van de relatieve dichtheid als gevolg van een afname van 5% in het gewicht van het zand in de bak. En in de derde kolom staat deze verandering als gevolg van een toename van het vochtgehalte met 5%.

Tabel 2.9	BR:			NZ:		
Proef 1	-47.9%	-10.5%	+0.6%	-52.1%	-11.0%	+0.6%
Proef 2	-48.7%	-11.8%	+0.6%	-53.0%	-12.6%	+0.7%
Proef 3	-49.2%	-12.5%	+0.7%	-53.5%	-13.6%	+0.7%
Proef 4	-48.7%	-11.8%	+0.6%	-52.6%	-12.0%	+0.7%
Proef 5	-53.8%	-20.0%	+1.1%	-62.5%	-29.4%	+1.6%

Tabel 2.9	ZE:			AM:		
Proef 1	-44.9%	-8.2%	+0.4%	-47.9%	-11.3%	+0.6%
Proef 2	-45.9%	-9.7%	+0.5%	-49.2%	-11.8%	+0.7%
Proef 3	-46.3%	-10.3%	+0.4%	-49.6%	-14.0%	+0.7%
Proef 4	-44.9%	-8.1%	+0.3%	-48.1%	-11.7%	+0.6%
Proef 5	-51.0%	-17.7%	+1.0%	-56.0%	-24.3%	+1.3%

Als beide tabellen bekeken worden valt op dat een verandering in het vochtgehalte van geen invloed is op de waarde van de relatieve dichtheid. De absolute waarde van de relatieve dichtheid neemt bij de vier zandsorten door deze verandering globaal met 1% toe.

De invloed op de absolute waarde van de relatieve dichtheid door een gewichtsverandering van het zand in de bak is duidelijk veel groter. Voor proevenserie 1 tot en met 4 verandert deze waarde ongeveer met 10% en voor proevenserie 5 met 20 tot 30%. De grootste invloed op de absolute waarde van de relatieve dichtheid wordt echter veroorzaakt door een gewichtsverandering in het zand waarmee de minimum dichtheid bepaald is. De absolute waarde van de relatieve dichtheid neemt voor de vier zandsorten met zo'n 50 à 60% af.

De vraag is natuurlijk hoe reëel een gewichtsverandering van 5% is. Bij de bepaling van de minimum en maximum dichtheid komt 5% overeen met ongeveer 180 gram. In Bijlage 2.7 is voor elke zandsort de minimum dichtheid drie keer bepaald en hieruit blijkt dat het verschil in het gewicht niet groter is dan 26 gram. De kans is dus niet zo groot dat het gewicht met 5% verandert. Wat hierbij natuurlijk wel een rol speelt is hoe voorzichtig de proef uitgevoerd wordt. De ene persoon kan de proef preciezer uitvoeren dan een ander.

Bij het gewicht van het zand in de kleinste bak komt 5% gemiddeld overeen met ongeveer 150 gram. Bij de proevenseries 1 tot en met 3 die met deze bak zijn uitgevoerd, worden vier stortproeven gevonden waarbij het verschil groter is dan 150 gram. De kans dat het gewicht met 5% verandert is dus reëel aanwezig.

§ 2.5 Conclusies en aanbevelingen

In deze paragraaf zijn de conclusies uit de vorige paragrafen samengevat. Tevens worden er aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek. Als laatste is gekeken hoe de resultaten van de stortproeven voor de praktijk geïnterpreteerd kunnen worden.

§ 2.5.1 Conclusies

De volgende conclusies kunnen worden getrokken naar aanleiding van de uitgevoerde stortproeven en getekende grafieken.

- Als er een stortproef wordt uitgevoerd met droog zand waaraan water is toegevoegd, ontstaat er als gevolg van de schijnbare cohesie een kleinere dichtheid dan de minimum dichtheid die bij een laboratoriumproef gevonden is. De relatieve dichtheid bereikt dan waarden kleiner dan 0%.
- Tussen 4 en 10% vochtgehalte is de relatieve dichtheid onafhankelijk van het vochtgehalte, omdat in dit gebied de krommen redelijk horizontaal lopen.
- Als er weinig impuls aan het zand wordt meegegeven, dat wil zeggen een kleine val hoogte en/of trechteropening, is de invloed van de zandsoort (korrelvorm en fijne zandfractie) duidelijk aanwezig. De krommen kruisen elkaar vanaf 2% vochtgehalte niet. Als er meer impuls aan het zand wordt meegegeven neemt de invloed van de zandsoort af. Bovendien neemt de dichtheid toe en de bandbreedte af. De krommen kruisen elkaar, liggen hoger en dichter bij elkaar.
- Een fout van 5% in het gewicht van het zand waarmee de minimum dichtheid bepaald wordt leidt tot een fout van 50% in de waarde van de relatieve dichtheid. Een fout van 5% in het gewicht van het zand in de bak leidt tot een fout van 15% in de waarde van de relatieve dichtheid. Een fout van 5% in het vochtgehalte leidt tot een fout van 1% in de waarde van de relatieve dichtheid. Deze foutenbron kan dus verwaarloosd worden. De eerst genoemde fout veroorzaakt de grootste afwijking in de relatieve dichtheid en de tweede fout een kleinere afwijking.

§ 2.5.2 Aanbevelingen

De belangrijkste factor bij het berekenen van de relatieve dichtheid is dus de bepaling van de minimum en maximum dichtheid. Deze beide waarden moeten erg nauwkeurig bepaald worden, omdat een kleine afwijking leidt tot een grote verstoring in de waarde van de relatieve dichtheid. Voor een nauwkeurige bepaling dient deze proef dus een aantal malen uitgevoerd te worden. Als er dan geen grote onderlinge verschillen optreden mag aangenomen worden dat de minimum en maximum dichtheid nauwkeurig genoeg bepaald zijn. Daarnaast moet duidelijk vermeld worden welke proef uitgevoerd is om de minimum en maximum dichtheid te bepalen.

Bij het uitvoeren van de stortproeven spreekt het natuurlijk voor zich dat de proeven zo consistent mogelijk uitgevoerd dienen te worden om een goede waarde van de relatieve dichtheid te krijgen.

§ 2.5.3 Extrapolatie van de resultaten naar de praktijk

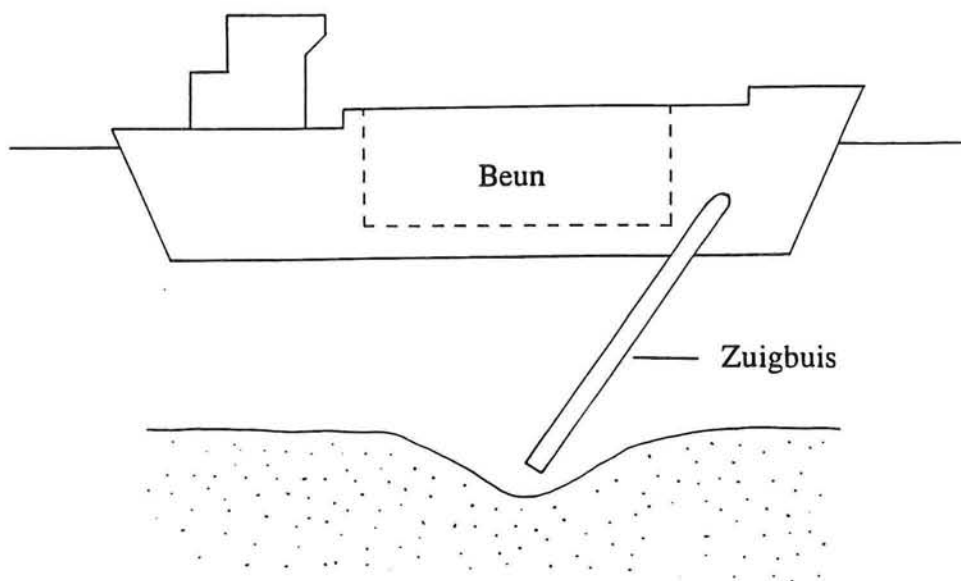
De stortproeven zijn op schaal uitgevoerd, omdat een meting in de praktijk beperkt blijft tot één zandsoort met één vochtgehalte. Door de modelproeven kunnen meerdere zandsoorten bij verschillende vochtgehalten onderzocht worden. Daarna moeten de resultaten van de modelproeven natuurlijk wel weer naar de praktijk, dus de werkelijkheid, vertaald worden.

Het verschil tussen de praktijk en de modelproef is dat in de praktijk de valhoogte, trechteropening en inhoud van de bak veel groter zijn. Dit betekent dus ook dat de valsnelheid en impuls van het zand veel groter zijn. Als nu de lijn doorgetrokken wordt die uit de grafieken volgt, zullen door een verdere vergroting van de toegevoegde impuls aan het zand de krommen voor de verschillende zandsoorten hoger en dichter bij elkaar komen te liggen. Het zou zelfs zo kunnen zijn dat de krommen zo dicht bij elkaar liggen dat ze te schematiseren zijn als een lijn. Dit zou dan betekenen dat de relatieve dichtheid onafhankelijk van de zandsoort zou worden. Voor het gebied tussen de 4 en 6% vochtgehalte, waar in de praktijk zich meestal het vochtgehalte van het zand bevindt, geldt al dat de relatieve dichtheid onafhankelijk is van het vochtgehalte. Samengevat zou het dus zo kunnen zijn dat de relatieve dichtheid van gestort zand door één waarde is weer te geven. Deze stelling kan alleen geverifieerd worden door metingen in de praktijk uit te voeren.

HOOFDSTUK 3 BEPALING VAN DE RELATIEVE DICHTHEID VAN ZAND IN HET BEUN VAN EEN HOPPERZUIGER

§ 3.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 is gekeken naar de uitlevering van zand die optreedt bij het vervoer per vrachtwagen, maar dit is natuurlijk niet de enige wijze waarop zand getransporteerd wordt. Vandaar dat in dit hoofdstuk gekeken is naar het vervoer van zand per hopperzuiger. Een hopperzuiger (zie Figuur 3.1) is een baggerschip dat is uitgerust met een ruim om het zand in op te slaan dat wordt opgezogen met behulp van zuigbuizen, zodat het zand per schip vervoerd kan worden. Het ruim wordt ook wel het beun of in het Engels de hopper genoemd, vandaar de naam hopperzuiger.



Figuur 3.1 Principeschets hopperzuiger

Bij deze wijze van transport geldt ook weer dat als de relatieve dichtheid in de begin- en eindsituatie bekend is, dat dan de uitlevering van het zand berekend kan worden. Met deze uitlevering kan daarna bijvoorbeeld berekend worden hoeveel scheepsladingen zand er nodig zijn om een bepaald werk te maken en dit bepaalt dan natuurlijk direct weer de prijs van het vervoerde zand.

Als beginsituatie wordt in dit geval gesteld het moment waarop de lading zand in het beun niet meer verandert. Dit moment is onder andere afhankelijk van het tijdstip waarop er gestopt wordt met zuigen en hoe lang het duurt voordat het overtollige water via de overflow is weggestroomd. Voor de eindsituatie zijn verschillende mogelijkheden denkbaar, maar deze hebben bij dit onderzoek geen rol gespeeld. Alleen de beginsituatie is bekeken.

Het berekenen van de relatieve dichtheid komt allereerst neer op het bepalen van de dichtheid van het zand in het beun. Daarna moeten van een zandmonster de minimum en maximum dichtheid bepaald worden. De dichtheid van het zand in het beun kan bijvoorbeeld bepaald worden met behulp van een steekapparaat of een nucleaire dichtheidsme-

ting. Boskalis heeft op deze manier een waarde voor de relatieve dichtheid gevonden van 30%. Toch bestaat er bij Boskalis het idee dat deze waarde niet helemaal klopt. Dit bleek onder andere bij een nucleaire dichtheidsmeting die in 1988 is uitgevoerd. Er werden toen hogere waarden voor de relatieve dichtheid gevonden dan 30%. Het was op dat moment echter niet duidelijk of de hogere waarde veroorzaakt werd door een fout in het meetsysteem of dat er werkelijk sprake was van een hogere dichtheid. Vandaar dat er nog steeds op verschillende manieren geprobeerd wordt om de dichtheid van het zand in het beun van een hopperzuiger zo nauwkeurig mogelijk te bepalen.

Om de dichtheid van het zand in het beun zo nauwkeurig mogelijk te bepalen, moeten eigenlijk van de totale lading zand het volume en het gewicht bepaald worden. Het totale volume van de lading zand bepalen is niet zo moeilijk. Het zandniveau kan op een aantal plaatsen gepeild worden en met behulp van een meetbrief kan daarna het bijbehorende volume afgelezen worden. Een meetbrief geeft ten opzichte van een bepaald niveau per centimeter de inhoud van het beun weer.

Veel moeilijker is het om het totale gewicht van de lading zand te bepalen. Daartoe moet de waterverplaatsing (= het gewicht) van het volle en lege schip bekend zijn. Het verschil tussen beide waarden is dan het gewicht van het vervoerde zand. De formule voor de waterverplaatsing W luidt:

$$W = B * l_{//} * b * d$$

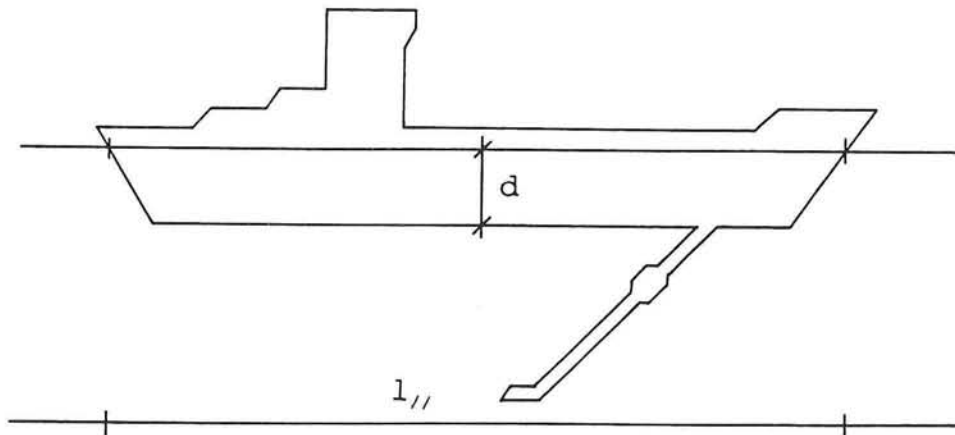
In deze formule zijn: B = de blokcoëfficiënt

$l_{//}$ = de lengte tussen de loodlijnen

b = de scheepsbreedte

d = de diepgang

In Figuur 3.2 wordt de formule voor de waterverplaatsing toegelicht. De blokcoëfficiënt is een vormfactor die ligt tussen 0.5 en 1. Een blokcoëfficiënt 1 hoort bij een vierkante bak.



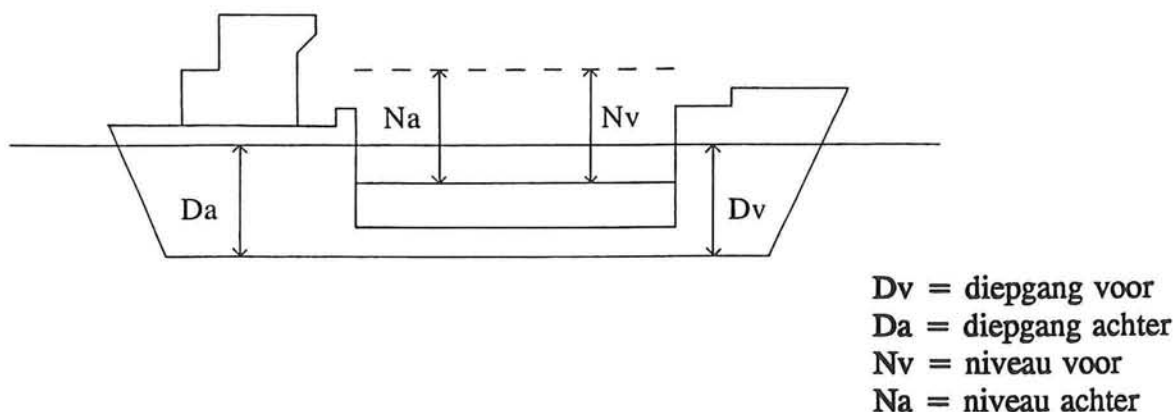
Figuur 3.2 Toelichting formule waterverplaatsing

Om de waterverplaatsing te berekenen moet dus onder andere de diepgang van het schip bekend zijn. Deze waarde is het moeilijkst te bepalen. Met behulp van drukmeters onder het schip is dit wel mogelijk, maar de kans op fouten blijkt erg groot te zijn. Bijvoorbeeld luchtbellen onder het schip of een hoge golfslag verstoren de meting van de diepgang.

Sinds anderhalf jaar is het echter mogelijk om de waterverplaatsing nauwkeuriger te bepalen met behulp van het T(onnen) D(roge) S(tof) systeem. Voordat er verder over de bepaling van de dichtheid van het zand in het beun gepraat wordt, wordt eerst het T.D.S.-systeem in de volgende paragraaf nader toegelicht.

§ 3.2 Het T.D.S.-systeem

Het T.D.S.-systeem is geïntroduceerd [32] door Rijkswaterstaat om bij het baggeren van slib een nauwkeuriger verrekeningsmethode te hebben dan de bestaande halve bol/centrifuge-methode. De bedoeling van dit systeem is derhalve om van de deeltjes zwaarder dan water het gewicht te bepalen. Een schip uitgerust met het T.D.S.-systeem (zie Figuur 3.3) meet met behulp van twee drukmeters onder het schip de diepgang voor en achteren met behulp van twee niveaumeters het niveau van het slib-water-mengsel in het beun voor en achter. Uit beide gegevens kunnen daarna de waterverplaatsing van het schip en het volume van de lading bepaald worden.



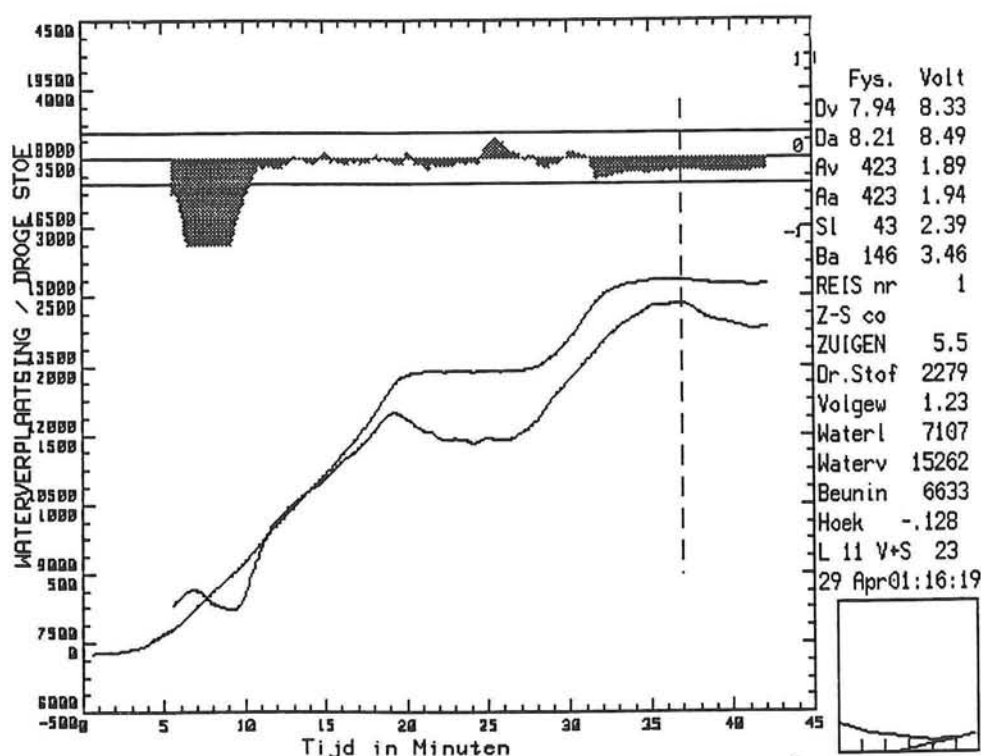
Figuur 3.3 Principeschets T.D.S.-systeem

Allereerst wordt de waterverplaatsing van het lege schip bepaald. Als het schip vol geladen is wordt dit opnieuw gedaan en tevens wordt het niveau in het beun bepaald. Uit het verschil in de waterverplaatsing van het volle en lege schip volgt het gewicht van de lading. Deze waarde is gecorrigeerd voor de inhoud van de tanks en de bunkers, omdat deze tijdens het varen en baggeren voortdurend veranderen en dus de waterverplaatsing beïnvloeden. De inhoud van de tanks en de bunkers bestaat voornamelijk uit brandstof en (drink)water.

De twee niveaumeters meten het niveau van het slib-water-mengsel in het beun en met behulp van de al eerder genoemde meetbrief kan dan het volume van de lading bepaald worden. Het T.D.S.-systeem registreert daarna het verschil tussen het gewicht van de lading en het gewicht als deze lading in zijn geheel uit water zou bestaan. Het verschil tussen beide waarden wordt veroorzaakt door de deeltjes die zwaarder zijn dan water en dit verschil wordt daarom het aantal tonnen droge stof genoemd. De aannemer wordt betaald naar het aantal tonnen droge stof die vervoerd zijn.

Zoals eerder al vermeld is kunnen er fouten optreden bij de bepaling van de diepgang. Het voordeel van het T.D.S.-systeem is echter dat er twee controles mogelijk zijn. Ten eerste moet gelden dat als de bodemkleppen geopend zijn, dat dan de waterstand in het

beun gelijk is aan de buitenwaterstand. Met deze controle kan het T.D.S.-systeem geijkt worden. Ten tweede moet gelden dat het verhang van het water in het beun gelijk is aan het verhang van de buitenwaterstand. Het eerste verhang wordt bepaald met de twee niveaumeters voor en achter in het beun en het tweede verhang met de twee drukmeters voor en achter onder het schip. Deze vergelijking wordt de trimcontrole genoemd en wordt elke 20 seconden uitgevoerd. Met de trimcontrole wordt dus gecontroleerd of er voldoende nauwkeurig gemeten is. Er mag een klein verschil tussen de twee verhanglijnen optreden, maar als er minimaal 5 minuten aan deze marge is voldaan wordt de lading goedgekeurd. In Figuur 3.4 is een voorbeeld van een grafiek te zien van het T.D.S.-systeem. De twee horizontale lijnen evenwijdig aan de x-as geven de marge weer waartussen het verschil van de verhanglijnen mag liggen.



Figuur 3.4 Voorbeeld T.D.S.-grafiek

Het T.D.S.-systeem is uitgedacht voor het baggeren van slib. Als een schip uitgerust met dit systeem en ontworpen voor het baggeren van slib gebruikt wordt voor het baggeren van zand, blijkt dat dit systeem niet geschikt is om het aantal tonnen droge stof te bepalen. In het beun komt dan namelijk het zand op sommige plaatsen boven het waterniveau uit, vanwege het beperkte draagvermogen van het schip. Omdat bovendien bij het T.D.S.-systeem slechts twee punten in het beun gepeild worden, is het dus onmogelijk om het volume van het zand nauwkeurig te bepalen.

Om de dichtheid van de totale lading zand in het beun te bepalen kan natuurlijk wel gedeeltelijk van het T.D.S.-systeem gebruik gemaakt worden. De bepaling van de waterverplaatsing is immers onafhankelijk van het type lading. Het volume kan daarnaast bepaald worden door op een aantal plaatsen in het beun het zandniveau te peilen met behulp van een peilstok of iets dergelijks.

Gezien het voorgaande kunnen de volgende probleem- en doelstelling geformuleerd worden.

Probleemstelling:

Er is tot op heden nog geen echt betrouwbare meetmethode bekend waarmee de dichtheid van het zand in het beun van een hopperzuiger voldoende nauwkeurig bepaald kan worden.

Doelstelling:

Het bekijken van de mogelijkheden of het gewicht en volume van het zand in het beun van een hopperzuiger voldoende nauwkeurig te bepalen zijn met behulp van het T.D.S.-systeem en een peiling in het beun, zodat daarmee ook de (relatieve) dichtheid van het zand voldoende nauwkeurig berekend kan worden.

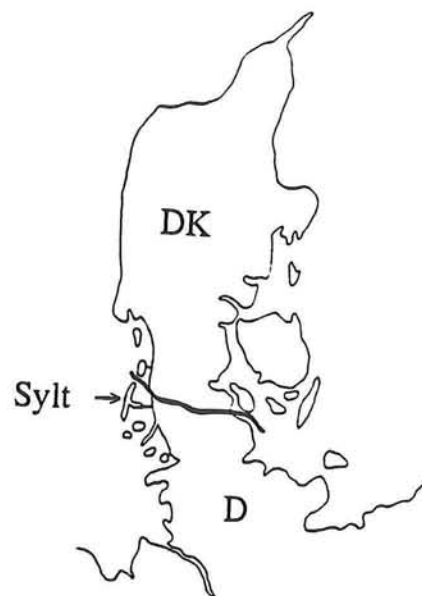
Bij Boskalis waren op het moment van afstuderen twee schepen beschikbaar die uitgerust zijn met het T.D.S.-systeem. Dit was ten eerste de 'Cornelia' en ten tweede de 'Gateway'. Aangezien de 'Gateway' een overdekt beun heeft, kon er alleen op de 'Cornelia' gemeten worden.

De 'Cornelia' en haar werkwijze staan beschreven in § 3.3, de uitgevoerde metingen en bijbehorende resultaten in § 3.4; in § 3.5 staan een fouten- en nauwkeurighedsanalyse en in § 3.6 staan tenslotte de conclusies en aanbevelingen vermeld.

§ 3.3 De 'Cornelia'

De 'Cornelia' is een sleepopperzuiger die in 1981 gebouwd is voor het baggeren van slib op de Nieuwe Waterweg. Een sleepopperzuiger is een hopperzuiger die is uitgerust met zuigbuizen, waaraan zich een sleepkop bevindt. De werking van een sleepkop is te vergelijken met een stofzuigerslang die over de bodem beweegt en zo het zand loswoelt en opzuigt. De hoofdafmetingen van het schip zijn hieronder weergegeven.

Lengte over alles	: 112.50 m
Lengte tussen de loodlijnen	: 106.00 m
Breedte	: 19.60 m
Holte	: 8.40 m
Diepgang op het baggermerk	: 7.45 m
Inhoud van het laadruim	: 6000 m ³



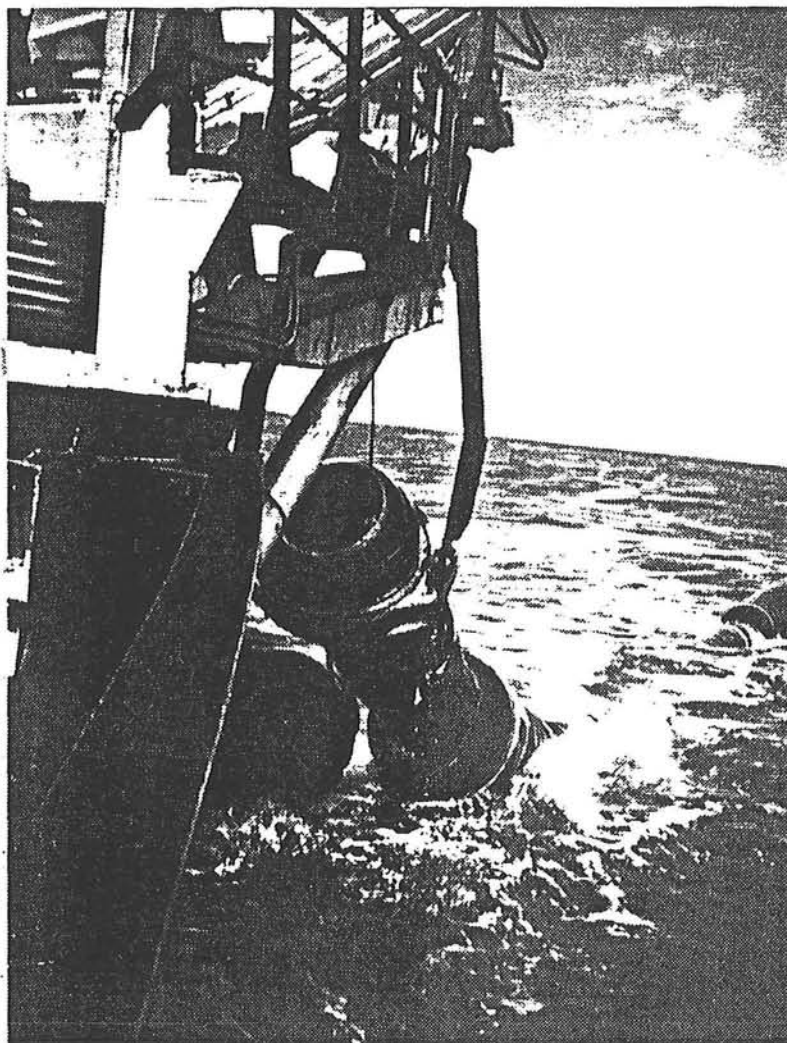
Figuur 3.5 Sylt

Tijdens het meten aan boord was de 'Cornelia' bezig bij het Duitse eiland Sylt (zie Figuur 3.5) om het strand op te spuiten. Dit gebeurde met behulp van een drijvende leiding die van het schip naar het strand liep.

De gevolgde werkwijze was als volgt. Het lege schip voer van de losgekoppelde drijvende leiding (Figuur 3.6) naar het zuigvak op zee en ging daar voor anker. De zuigbuizen (Figuur 3.7) werden neergelaten tot op de bodem en er werd gezogen.

Het opgezogen zand-water-mengsel kwam via een stortgoot (Figuur 3.8) in het beun terecht alwaar het zand bezonk. Het niveau in het beun steeg totdat de hoogte van de overflow (Figuur 3.9)

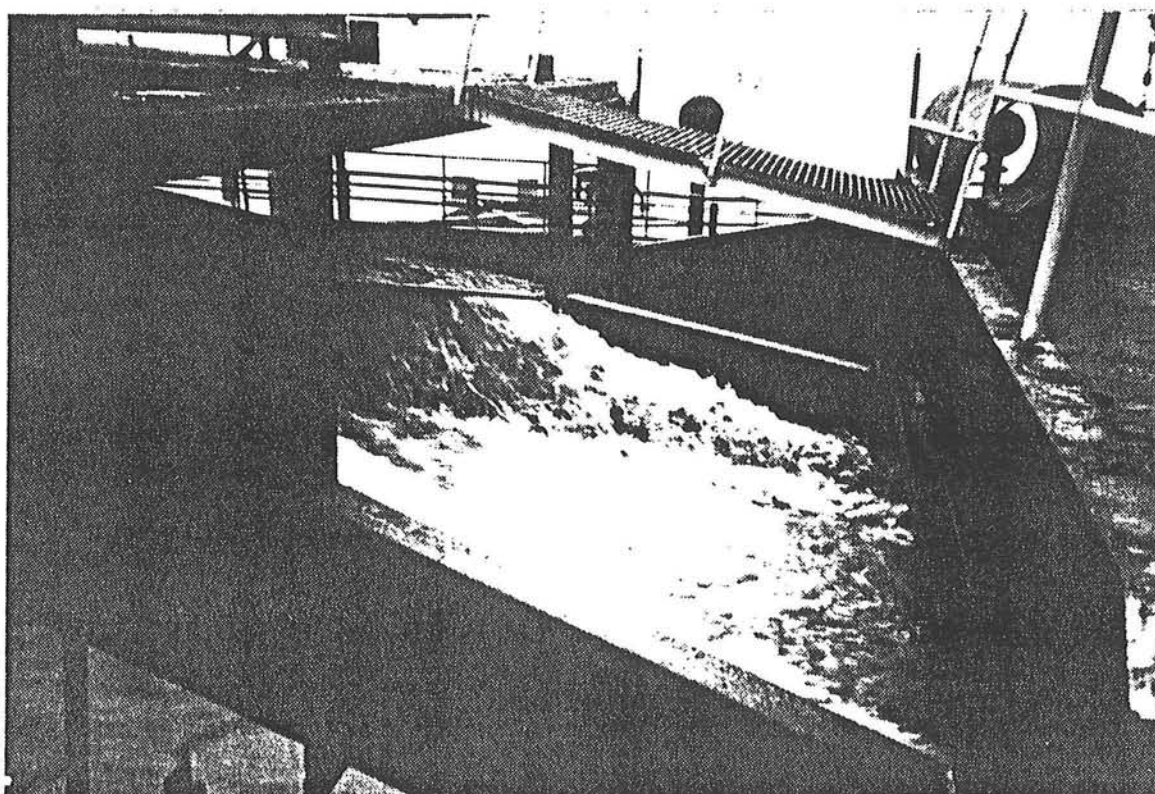
bereikt werd, waarna het water afstroomde. Er werd geladen totdat het maximum draagvermogen bereikt werd. De zuigbuizen werden daarna weer opgehesen en de ankers werden gelicht. Het schip voer weer terug naar de drijvende leiding en ging daar voor anker. Met behulp van een sleepbootje (Figuur 3.10) werd de drijvende leiding aan de neus van het schip gekoppeld (Figuur 3.11). Waterjets in het beun (Figuur 3.12) zorgden er intussen voor dat er weer een zand-water-mengsel ontstond dat met behulp van de booster (Figuur 3.13) naar het strand geperst werd. Na het leegzuigen van het beun werd de drijvende leiding weer losgekoppeld en begon de hele cyclus opnieuw.



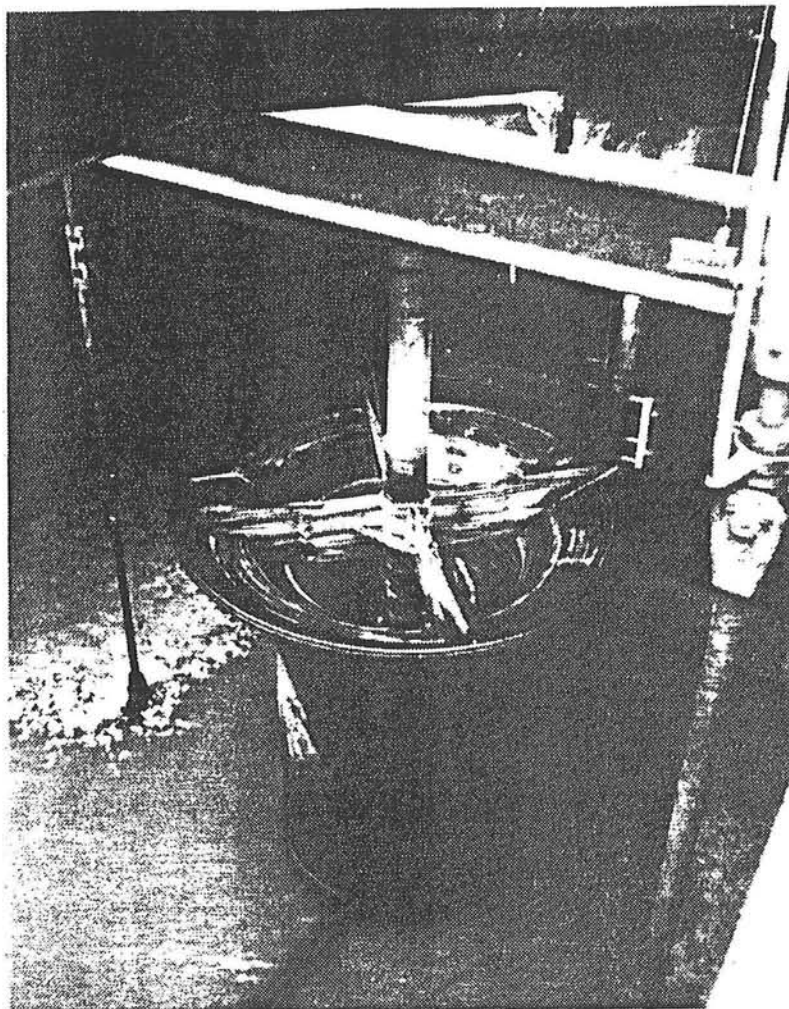
Figuur 3.6 Aan/afkoppelen van de drijvende leiding



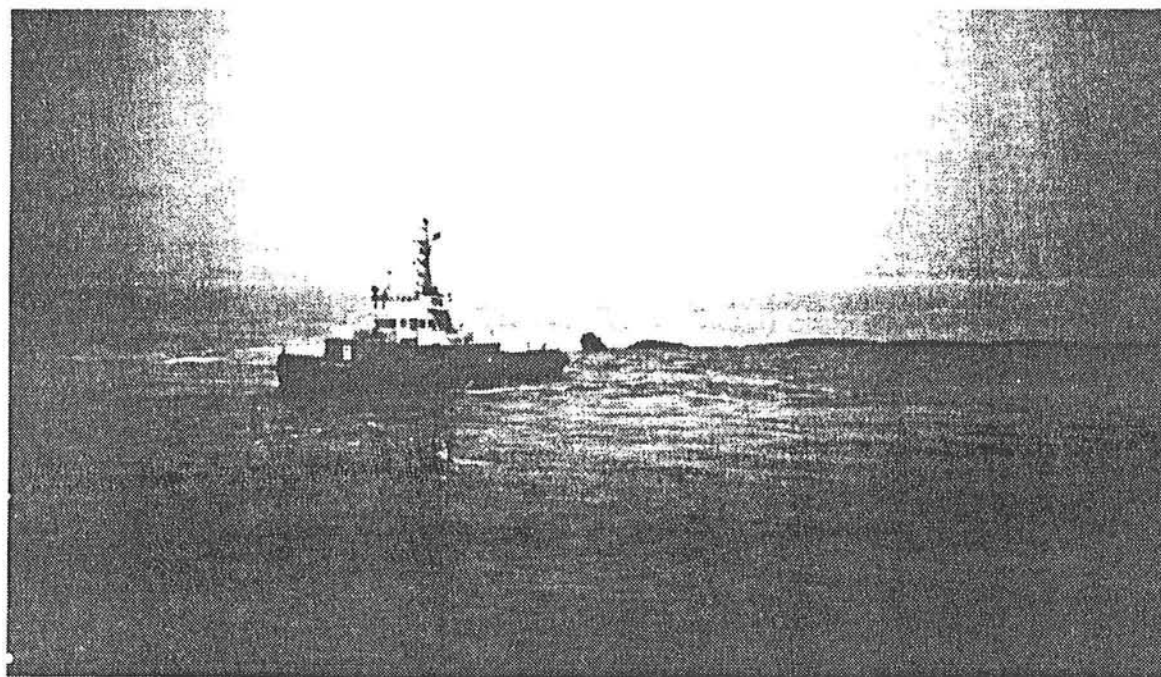
Figuur 3.7 Neerlaten/ophalen van de zuigbuizen



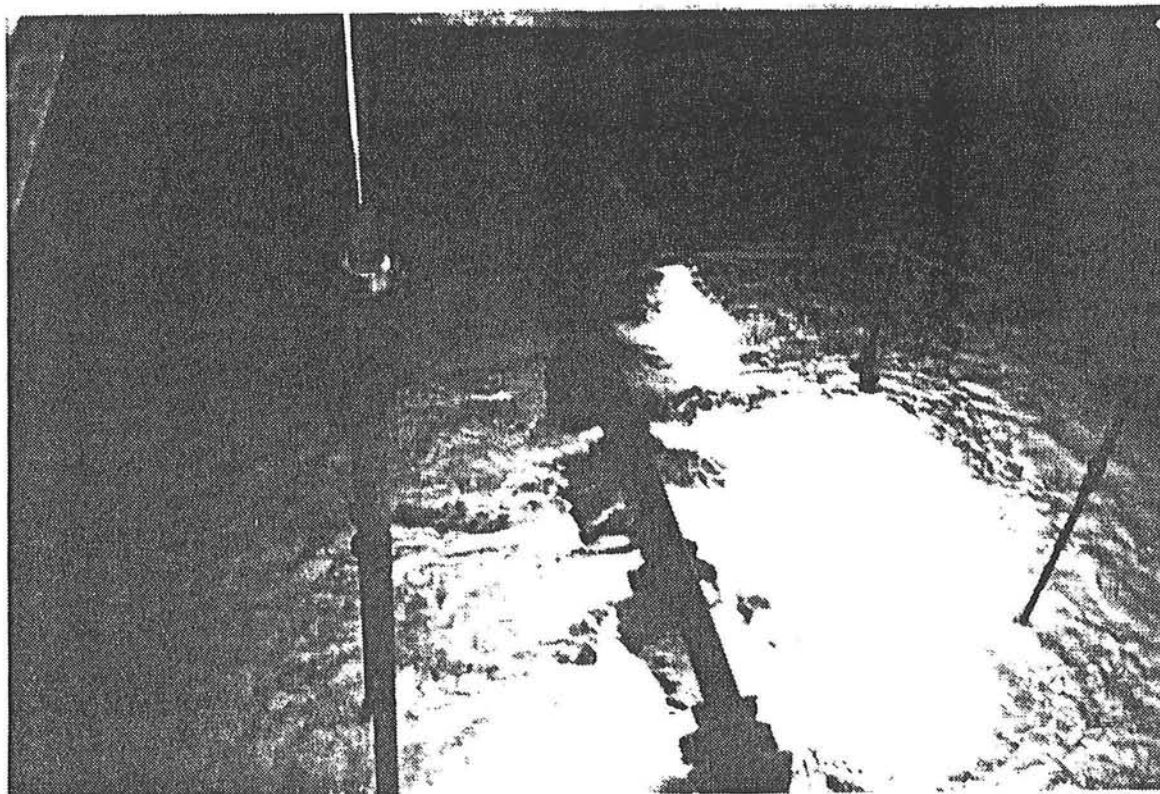
Figuur 3.8 Stortgoot



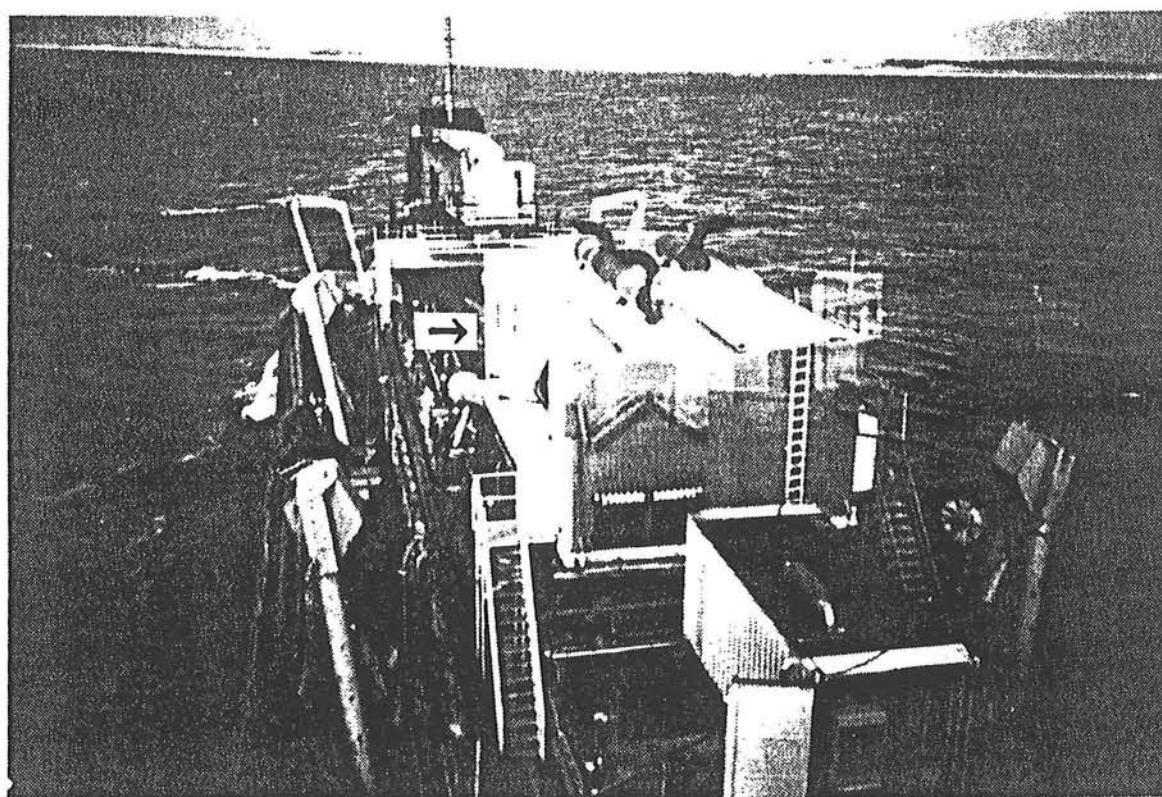
Figuur 3.9 Overflow



Figuur 3.10 Sleepbootje met drijvende leiding



Figuur 3.11 Waterjets in werking



Figuur 3.12 Booster (→)

Zoals uit het voorgaande verhaal blijkt is de 'Cornelia' op twee punten gewijzigd voor dit werk. Ten eerste zijn de sleepkoppen verwijderd, zodat er zuigbuizen ontstonden. Opgemerkt dient hierbij te worden dat het niet erg gebruikelijk is om op deze manier op zee zand te baggeren. Meestal wordt juist gebruik gemaakt van sleepkoppen, zodat het schip varend kan baggeren. Er wordt dan geen tijd verloren met het voor anker gaan en het lichten van de ankers. Een reden voor de gevolgde procedure zou kunnen zijn dat slechts op een beperkt aantal plaatsen geschikt zand voorkwam of dat de afmetingen van het zuigvak te beperkt waren. Ten tweede is er een booster of tussenstation boven het beun gebouwd, omdat er anders te weinig vermogen zou zijn om het zand naar de wal te persen.

Om te weten hoeveel metingen er uitgevoerd konden worden moest de cyclustijd bekend zijn. De cyclustijd is vast te stellen door voor elke actie de gemiddelde tijdsduur te bepalen. Dit is hieronder gebeurd.

Vaartijd (vol en leeg)	= 75 minuten
Ankertijd (in zuigvak)	= 25 minuten
Zuigen	= 40 minuten
Naar de wal persen	= 100 minuten
Aan/afkoppelen drijvende leiding	= 30 minuten +
Totaaltijd	= 270 minuten

De gemiddelde cyclustijd van de 'Cornelia' was dus 4 uur en 30 minuten. Dit betekent dat er 5 reizen per dag gemaakt werden. Aangezien er gewoon geslapen is zijn er 4 metingen per dag uitgevoerd. In totaal zijn er 21 metingen uitgevoerd. In de volgende paragraaf wordt uitgelegd hoe en wat er gemeten is aan boord van de 'Cornelia'.

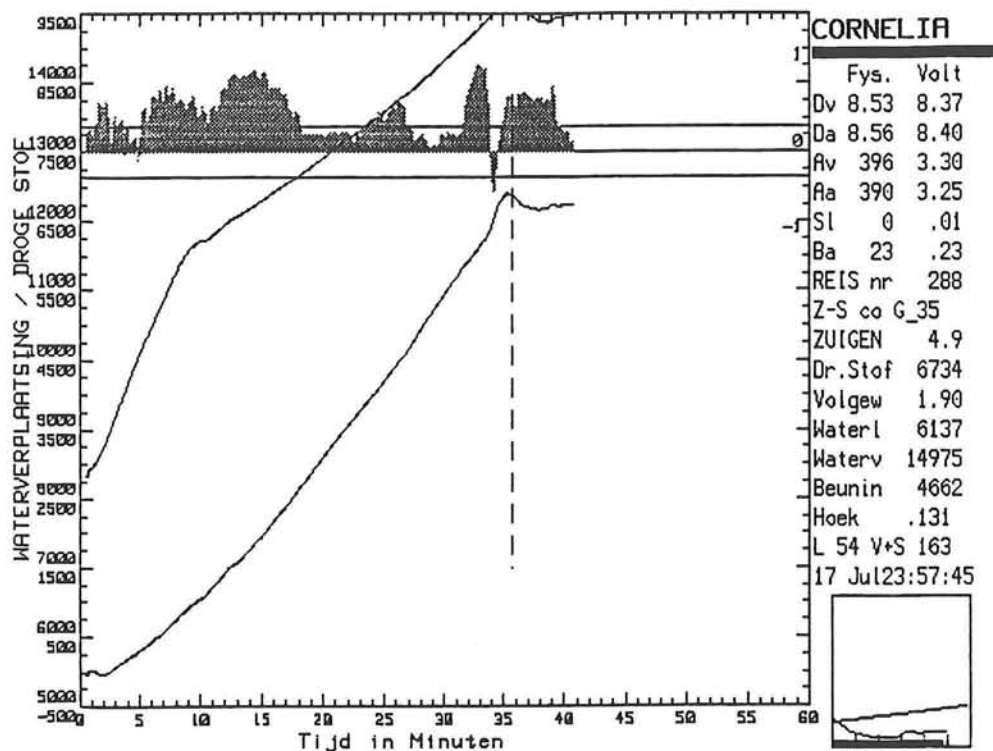
§ 3.4 Uitgevoerde meetserie

Om de dichtheid van zand in het beun te berekenen moeten dus het gewicht en de volume van de totale lading zand bepaald worden. Hoe dit is gebeurd is te lezen in § 3.4.1 en § 3.4.2. In § 3.4.3 staat beschreven hoe de relatieve dichtheid berekend is en in § 3.4.4 worden de gevonden resultaten verklaard.

§ 3.4.1 Bepaling van het gewicht van het zand in het beun

Het gewicht van het zand in het beun volgt uit het verschil in de waterverplaatsing van het volle en lege schip. De gevonden waarde voor het verschil moet nog wel gecorrigeerd worden voor het gewicht van de bunkers, het gewicht van de smeerolie en het gewicht van het water op het zand.

De waterverplaatsing van het schip is bepaald met het T.D.S.-systeem. Dit systeem registreerde de waterverplaatsing van het schip gedurende het zuigen, vol- en leegvaren en het walpersen. Bovendien werd na elke reis een grafiek van het verloop van de waterverplaatsing gedurende het zuigen geplot. Een voorbeeld hiervan is in Figuur 3.13 weergegeven. Als er gestopt werd met zuigen schakelde het T.D.S.-systeem automatisch over op de fase 'volvaren'. Van de waterverplaatsing gedurende deze fase werd geen grafiek getekend.



Figuur 3.13 Voorbeeld T.D.S.-grafiek van de 'Cornelia'

De verschillende grafieken voor het verloop van de waterverplaatsing gedurende het zuigen staan in Bijlage 3.3 afgebeeld. In deze grafieken is het moment waarop er gestopt werd met zuigen aangegeven door een verticale gestreepte lijn.

Als de zuigbuizen aan boord gehesen waren werden de ankers gelicht en werd er koers gezet naar de wal. Tijdens het lichten van de ankers werd de stortgoot gespoeld en pas als dit na enkele minuten afgelopen was werd het zandniveau in het beun gepeild. Door het spoelen van de stortgoot en het lichten van de ankers fluctueert de grafiek voor de waterverplaatsing van het volle schip na de verticale onderbroken lijn. Gezien het moment waarop er gepeild werd is voor de waterverplaatsing van het volle schip de laatste waarde uit de grafiek genomen. Deze waarde staat rechts naast de grafiek achter 'waterv' vermeld en is al gecorrigeerd voor het gewicht van de ballast- en trimtanks die op dat moment gevuld waren.

In de waarden voor de waterverplaatsing van het volle schip die rechts naast de grafiek staan zit echter een kleine fout. Deze fout wordt veroorzaakt door het T.D.S.-systeem. Om de waterverplaatsing van een schip te berekenen wordt gebruik gemaakt van een zogenaamd Carènediagram. De Carène is de vorm van het ondergedompelde deel van het schip. Als de diepgang in meters bekend is kan met behulp van het Carènediagram de waterverplaatsing in kubieke meters afgelezen worden. Deze waarde moet dan nog met de dichtheid van het zeewater vermenigvuldigd worden om de waterverplaatsing in tonnen te krijgen. Het is echter gebleken dat als de waarde voor de diepgang omgerekend wordt in meters waterkolom en deze waarde in het Carènediagram gebruikt wordt, dat dan direct de waarde voor de waterverplaatsing in tonnen verkregen wordt. Bij deze laatste methode wordt echter wel een kleine fout gemaakt, omdat het Carènediagram dan niet correct gebruikt wordt.

Het T.D.S.-systeem maakt gebruik van de tweede methode om de waterverplaatsing te

bepalen. Dit is ook af te leiden uit de waarden voor de diepgang voor en achter (Dv en Da) die rechts naast de grafiek in Figuur 3.13 staan. Onder 'Volt' staat de diepgang in meters en onder 'Fys.' is deze waarde met 1.1097 vermenigvuldigd om de waarde in meters waterkolom te krijgen. Om toch de meest nauwkeurige waarde voor de waterverplaatsing van het volle schip te verkrijgen is in Bijlage 3.1 deze waarde volgens de eerste methode berekend. De waterverplaatsing van het lege schip (inclusief het gewicht van de booster) is in Bijlage 3.2 berekend; deze waarde bedraagt 5245.6 ton.

De inhoud van de bunkers konden in de machinekamer afgelezen worden. Dit gebeurde steeds om 12 uur 's nachts. Voor tussenliggende tijdstippen is rechtlijnig geïnterpoleerd. In Bijlage 3.4 zijn alle bunkers van de 'Cornelia' weergegeven. Niet alle bunkers waren tijdens het meten gevuld. Het ging vooral om de bunkers met zware olie (IF 180), Marine Diesel Oil (MDO), Marine Gas Oil (MGO) en drinkwater. De afgelezen waarden voor de inhoud van deze bunkers en het bijbehorende gewicht staan in Bijlage 3.3 vermeld.

De hoeveelheid smeerolie was constant tijdens het meten, omdat de afgewerkte olie opgevangen werd en dus aan boord bleef. Het gewicht van de smeerolie was 8 ton. Als laatste moet bepaald worden hoeveel water er op het zand heeft gestaan. Dit kan afgeleid worden uit peilingen van het zand- en het waterniveau. De overflow stond tijdens het meten steeds in zijn laagste stand. Dit is elke reis gecontroleerd. De laagste stand van de overflow komt overeen met 4300 kubieke meter. Het niveau van het water kan dan uit de meetbrief afgeleid worden. De rekensom voor het gewicht van de lading is dus als volgt samen te vatten. Het gewicht van het zand in het beun is de waterverplaatsing van het volle schip (volgens Bijlage 3.1) min de waterverplaatsing van het lege schip (= 5245.6 ton) min het gewicht van de bunkers (IF 180, MDO/MGO, water) min het gewicht aan smeerolie (= 8 ton) min het gewicht van het water op het zand. Vanwege deze laatste waarde in de rekensom kan de berekening pas uitgevoerd worden als het zandniveau gepeild is. Dit wordt in de volgende paragraaf uitgelegd.

§ 3.4.2 Bepaling van het volume van het zand in het beun

Het volume van het zand in het beun is bepaald door op een aantal plaatsen het niveau van het zand te peilen. Met behulp van het gemiddelde zandniveau en de meetbrief kan daarna het bijbehorende volume afgelezen worden. Aan boord van de 'Cornelia' bevonden zich 10 peilbuizen (zie Figuur 3.15) waarmee gemeten kon worden. Deze 10 peilbuizen zijn in Figuur 3.14 aangegeven.

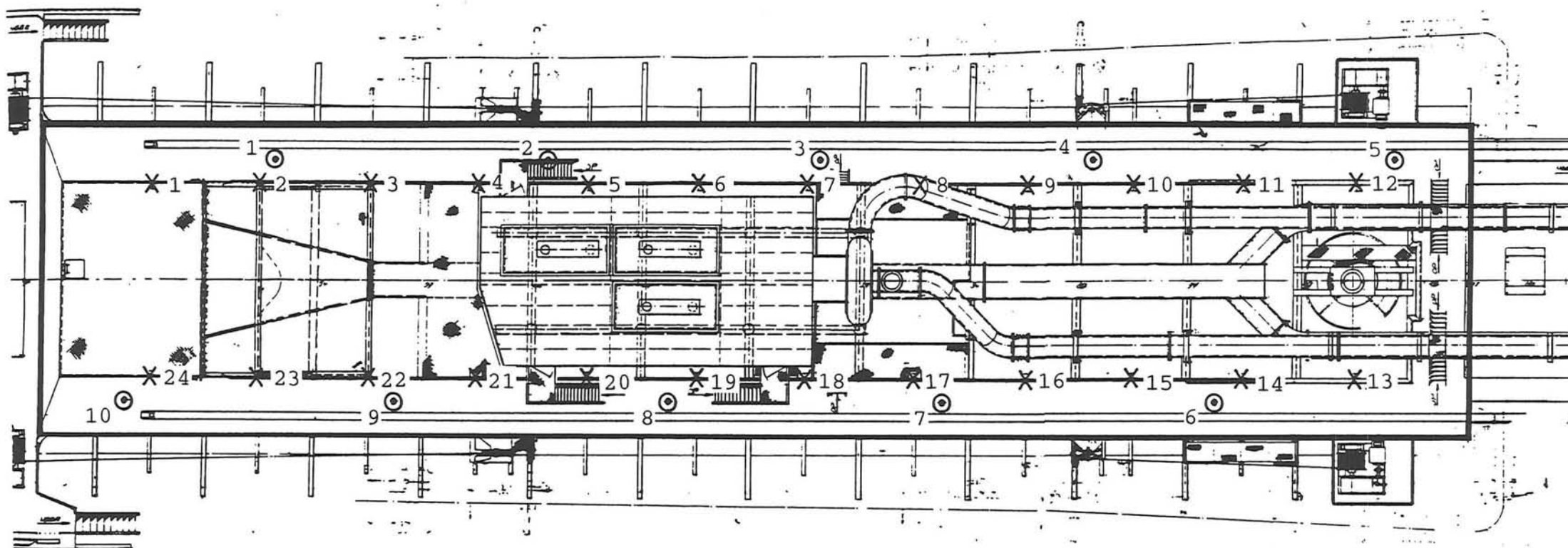
Aan boord was tijdens het baggeren een zogenaamde 'waker' aanwezig die in opdracht van de opdrachtgever elke reis met de 10 peilbuizen een meting uitvoerde. Zowel voor als na het naar de wal persen van het zand werd er gepeild. De waker schatte het zandniveau op 10 centimeter nauwkeurig. Aan de hand van deze gegevens werd bepaald hoeveel zand er vervoerd was en hoeveel Boskalis dus betaald kreeg.

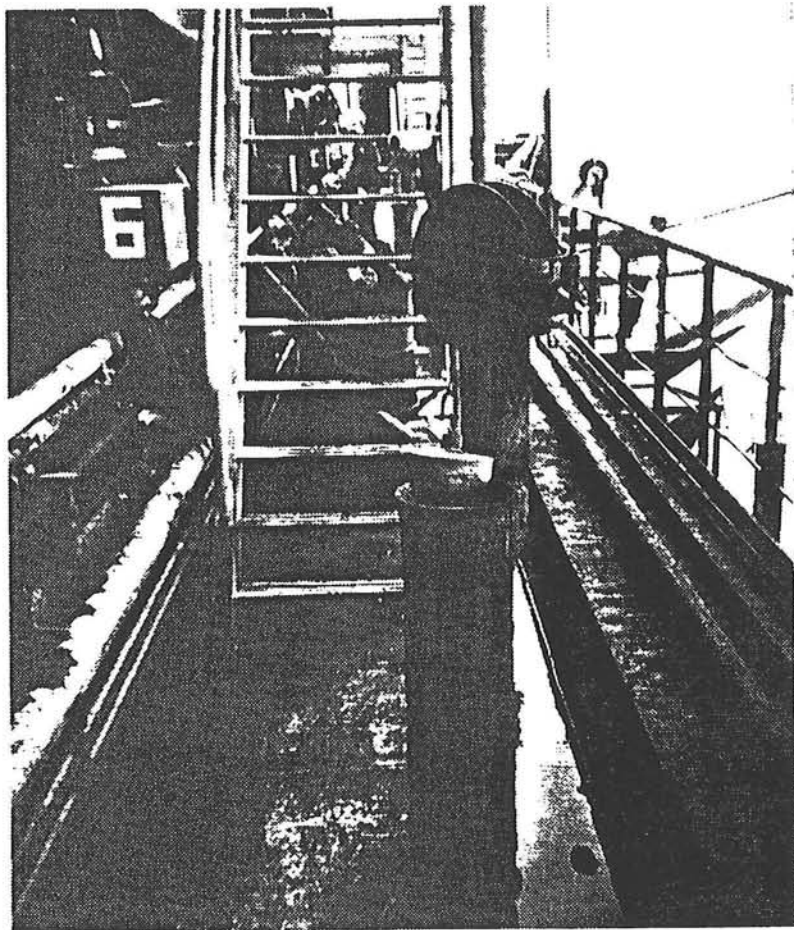
De peilingen van de waker waren natuurlijk niet zo erg nauwkeurig. Dit kwam ten eerste omdat de waarde van de peiling geschat werd; een centimeter verschil in het zandniveau komt overeen met een afwijking van 6 kubieke meter in het volume. Ten tweede ontbrak bij een aantal peilbuizen de betonnen halve bol, dit scheelt ook een aantal centimeters. Om het volume van het zand nauwkeuriger te bepalen is daarom op 24 plaatsen aan de rand van het beun gepeild. Deze 24 plaatsen zijn eveneens in Figuur 3.14 aangegeven. De dikke lijn geeft de hoofdafmetingen van het beun weer.

Figuur 3.14 Plattegrond beun 'Cornelia'

Verklaring symbolen: ⊙ = 10 vaste peilbuizen

X = 24 meetpunten





Figuur 3.15 Vaste peilbuis

Er is gepeild met behulp van een stalen voetje aan een staaldraad. De staaldraad was 4 millimeter dik en het voetje was 10 bij 10 centimeter groot en 2.5 centimeter dik. Het woog 2 kilogram. Op de staaldraad was om de 50 centimeter een merkteken aangebracht. Bij het peilen werd bovendien met een duimstok op de centimeter nauwkeurig het niveau van het zand afgelezen. Er is steeds gemeten ten opzichte van de bovenkant van de reling langs het beun. De gemeten waarden zijn daarna gecorrigeerd ten opzichte van het nulniveau van de meetbrief. Dit nulniveau ligt ter hoogte van de bovenkant van de peilbuizen. Nadat de 24 gevonden waarden gemiddeld zijn is het bijbehorende volume bepaald met behulp van de meetbrief. De resultaten hiervan staan vermeld in Bijlage 3.3. Bovendien is met behulp van de 24 gevonden waarden het verloop van het zandniveau in het beun ten opzichte van het nulniveau getekend. Deze grafieken staan ook in Bijlage 3.3. De horizontale lijn is het waterniveau in het beun. Met deze grafieken kan ook het volume water bepaald worden dat op het zand stond. Hieruit volgt dan weer het gewicht van het water, zodat de berekening uit § 3.4.1 uitgevoerd kan worden. De resultaten van deze berekening staan eveneens in Bijlage 3.3.

Afgezien van de 24-puntsmeting is ook met behulp van de 10 peilbuizen het volume zand in het beun bepaald. Ook hier werd weer met een duimstok op de centimeter nauwkeurig het niveau van het zand gemeten. Bovendien is de gemeten waarde gecorrigeerd als het betonnen voetje ontbrak. Deze waarnemingen staan ook in Bijlage 3.3.

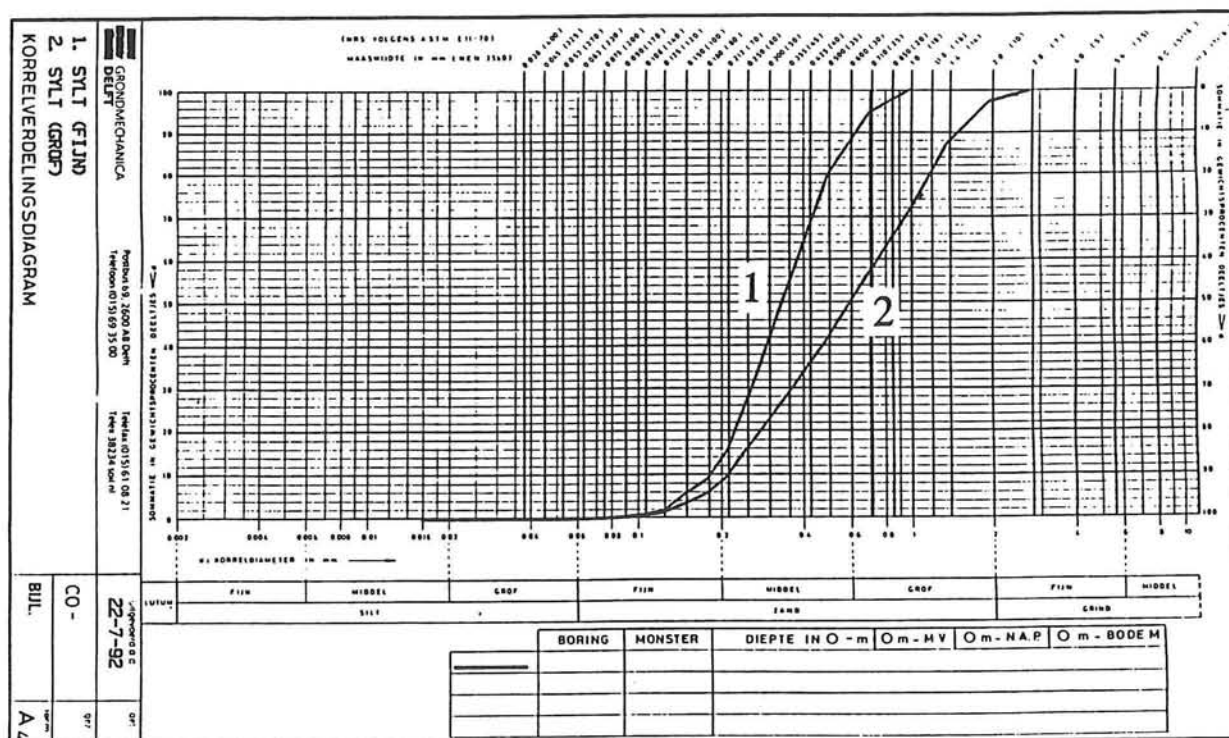
Er is elke keer begonnen met meten als het spoelen van de stortgoot afgelopen was. Het schip had dan inmiddels zijn ankers gelicht en zette koers naar de wal. Er was dan ongeveer een half uur de tijd om de metingen uit te voeren, voordat de waterjets ingeschakeld werden om het zand te fluïdiseren. Bovendien werd na een half uur ook alvast de booster gestart om warm te draaien. De booster werd met water gekoeld en dit

koelwater stroomde nadat het opgewarmd was in het beun. Beide oorzaken zouden de meting verstoord hebben als deze nog niet was uitgevoerd, omdat door het toevoegen van het water het zandniveau veranderde.

Nadat alle punten gemeten waren is er nog een controlemeting uitgevoerd; daartoe is bij 9 punten opnieuw het zandniveau gepeild. De resultaten van deze extra uitgevoerde peilingen staan eveneens in Bijlage 3.3 vermeld, achter de eerder gevonden waarden. Een plus betekent dat het niveau gedaald is en een min dat het niveau gestegen is.

§ 3.4.3 Berekening van de relatieve dichtheid

Nadat het gewicht en volume van het zand in het beun bepaald zijn is de dichtheid berekend. Deze waarden staan in Bijlage 3.7 vermeld. Om nu de relatieve dichtheid te kunnen berekenen moeten de minimum en maximum dichtheid bekend zijn. Bij Sylt deed echter het feit zich voor dat er zowel fijn als grof zand gebaggerd werd. Zie hiervoor het korrelverdelingsdiagram in Figuur 3.17. Het fijne zand is uniform ($U=2.05$) en het grove zand is gegraadeerd ($U=3.55$).



Figuur 3.16 Korrelverdelingsdiagram

De aanwezigheid van fijn en grof zand is bovendien af te leiden uit de grafieken voor het verloop van de waterverplaatsing en het verloop van het zandniveau in het beun. Als er fijn zand gebaggerd werd verdeelde dit zich gelijkmatiger over het beun dan het grove zand. Dit grove zand bezonk veel sneller, waardoor er een steiler verloop van het niveau van het zand ontstond. Als uit de grafiek voor het verloop van het zandniveau niet duide-

lijk werd of het om fijn dan wel grof zand ging is bovendien naar de plot voor het verloop van de waterverplaatsing gekeken. Bij fijn zand is de laadsnelheid veel groter dan bij grof zand, zodoende kon alsnog bepaald worden of het om fijn dan wel grof zand ging. Voor beide zandsoorten is volgens de droge versie van de ASTM D 2049-69 de minimum en maximum dichtheid bepaald. Daartoe is het zand eerst ontzout door het een aantal malen met kraanwater te spoelen. De bepaling van de minimum dichtheid is weer drie keer uitgevoerd, waarbij de laagste waarde als maatgevend is beschouwd. De resultaten van deze proef staan in Bijlage 3.5 en de waarden waarmee de relatieve dichtheid berekend zijn staan in Tabel 3.1 weergegeven.

Tabel 3.1	$\rho_{\min}(\text{kg/m}^3)$	$\rho_{\max}(\text{kg/m}^3)$	$n_{\max}$	$n_{\min}$	Δn
Fijn	1442.4	1750.4	45.16%	33.44%	11.72%
Grof	1539.2	1857.7	41.48%	29.37%	12.11%

Omdat het vochtgehalte niet bekend is, is de relatieve dichtheid berekend met de formule:

$$D_r = \frac{n_{\max} - n_{\text{hop}}}{n_{\max} - n_{\min}}$$

De porositeit in de hopper n_{hop} kan berekend worden met de formule:

$$\rho_{\text{zand}} = n_{\text{hop}} * S_r * \rho_{\text{zeewater}} + (1 - n_{\text{hop}}) * \rho_{\text{specifiek}}$$

Uit de Bijlage 3.3 volgt dat gemiddeld 3.4% van het totale volume zand boven het waterniveau lag. Dit effect is dus verwaarloosd en er is aangenomen dat het zand volledig verzadigd was; S_r is 1. Voor de dichtheid van zeewater is de waarde 1020 kilogram per kubieke meter aangenomen. De specifieke dichtheid van het fijne en grove zand is bepaald met een zogenaamde 'Flugsand'-keuring. Deze proef komt hierop neer dat een maatbeker gevuld wordt met water. Daarna wordt een hoeveelheid droog zand toegevoegd en gekeken wordt hoeveel het waterniveau stijgt. Het gewicht aan zand gedeeld door de volumetoename van het water geeft de waarde voor de specifieke dichtheid. Deze proef is voor beide zandsoorten 3 maal uitgevoerd en 6 maal werd voor de specifieke dichtheid een waarde van 2630 kilogram per kubieke meter gevonden. Met deze waarden is de porositeit van het zand in het beun berekend. De berekende waarden van de porositeit en de daarmee berekende waarden van de relatieve dichtheid staan in Bijlage 3.7 vermeld.

§ 3.4.4 Bespreking en verklaring van de resultaten

De resultaten uit Bijlage 3.7 zijn in Tabel 3.2 samengevat. In de tweede en vierde kolom staan de gemiddelde waarden voor de dichtheid en de relatieve dichtheid van het zand vermeld. En in de derde en vijfde kolom is de standaardafwijking weergegeven.

Tabel 3.2	ρ_{zand}	st.afw.	Dr	st.afw.
Fijn	2070.4 kg/m ³	21.3 kg/m ³	88.8%	11.3%
Grof	2065.3 kg/m ³	30.3 kg/m ³	52.9%	15.5%

Wat meteen aan de resultaten voor de dichtheid en relatieve dichtheid opvalt zijn de hoge waarden die gevonden worden. Tot nu toe werd voor de dichtheid van het zand in het beun meestal een waarde van 1950 kilogram per kubieke meter aangenomen. Dit correspondeert met een relatieve dichtheid van 30%. Uit de meetresultaten volgt echter een globale waarde voor de dichtheid van 2070 kilogram per kubieke meter en een bijbehorende relatieve dichtheid van 75%. Dit betekent dus dat het zand veel dichter gepakt is dan tot nu toe werd aangenomen. Hoe kunnen deze resultaten verklaard worden?

Als zand in water bezinkt in een rustige omgeving vormen de korrels een willekeurige losse stapeling. Zo gauw deze situatie echter verstoord wordt door trillingen of een uitgeoefende schuifkracht, herverdelen de korrels zich en nemen een zo dicht mogelijke pakking in. Los gepakt zand kan dus verdichten door trillingen of een uitgeoefende schuifkracht. Het is voor te stellen dat dit verschijnsel ook optreedt in het beun van een hopperzuiger.

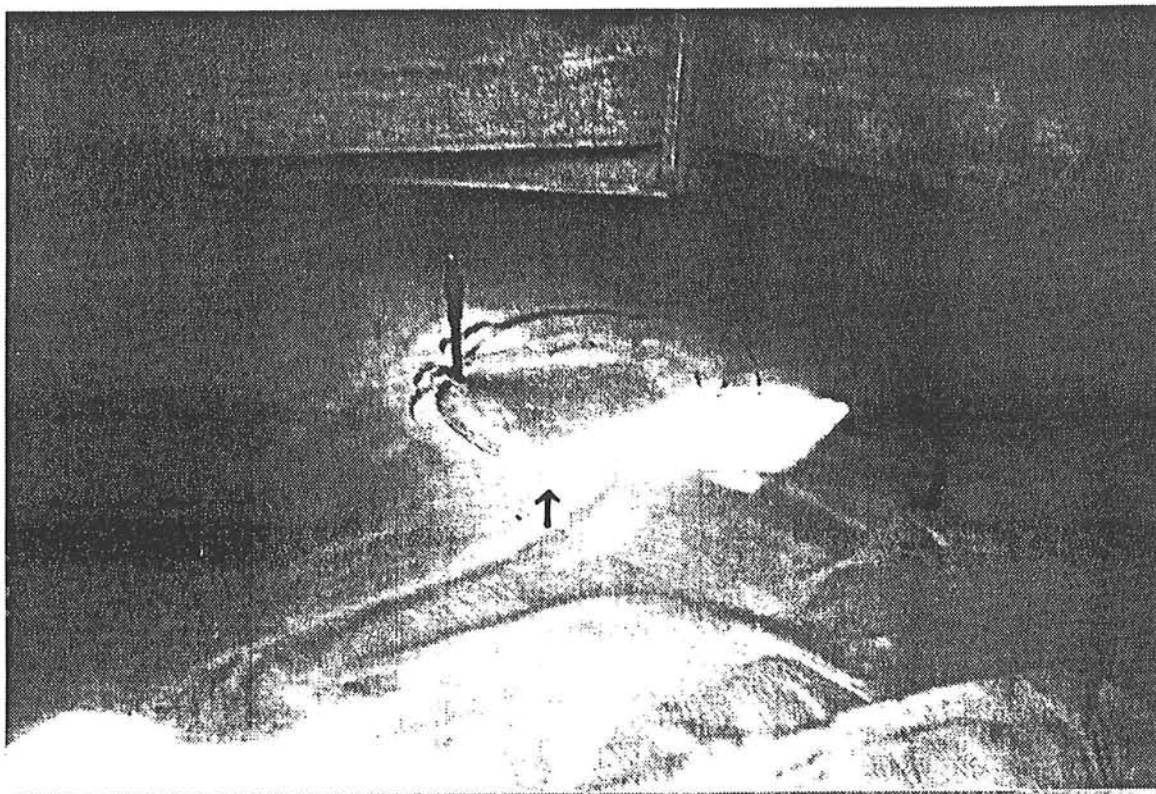
De vraag is dan natuurlijk meteen welke factoren er voor zorgen dat het zand in trilling wordt gebracht of er voor zorgen dat er een schuifkracht op het zand wordt uitgeoefend. Er zou gedacht kunnen worden aan trillingen ten gevolge van de machines en motoren en stoten geleverd door de golfslag. Deze veronderstelling is echter niet correct. Als tijdens het varen het zand zou verdichten zou dit moeten volgen uit de extra uitgevoerde metingen en bovendien zou dit ook te zien moeten zijn.

Uit een aantal extra metingen zou de conclusie getrokken kunnen worden dat het zandvolume afnam tijdens het varen, maar dit is niet juist. Bij een afwijking groter dan +0.05 meter was er steeds sprake van een niet goed gesloten klep in de zuiggoot. De twee zuiggoten bevonden zich onderin het beun en vormden de verbinding tussen het beun en de drijvende leiding. Nadat het zand gefluidiseerd was werden van achteren naar voren om de beurt de kleppen in de zuiggoot geopend, zodat het zand-water-mengsel naar de wal geperst kon worden. Als een klep niet goed afgesloten was door een kei of iets dergelijks zakke het zand tijdens het fluidiseren in de zuiggoot. Dit was duidelijk te zien (zie Figuur 3.17) door de kegelvormige verzakkingen die dan optraden.

Door dit verschijnsel ontstaan de grote verschillen bij de extra uitgevoerde metingen. De afwijkingen kleiner dan 0.05 meter zijn te verklaren door afleesfouten en omdat er niet steeds op exact dezelfde plaats gemeten is. Uit de extra metingen volgt dus niet dat het volume van het zand tijdens het varen afnam.

Als tijdens het varen het zand zou verdichten zou er bovendien water tussen de korrels uitgeperst worden. Dit zou dan ook te zien moeten zijn geweest, omdat er dan op het zand dat boven het waterniveau lag water zou komen te staan. Dit is niet waargenomen. De conclusie mag dan ook zijn dat het volume zand tijdens het varen niet afnam en dat dus de hoge dichtheid is ontstaan tijdens het vullen van het beun.

Tijdens het vullen van het beun lag het schip voor anker. De machines werkten dus niet en de invloed van de golfslag is dan ook gering. Er moet dus naar een andere oorzaak voor de hoge dichtheid van het zand tijdens het vullen gezocht worden, vandaar dat er

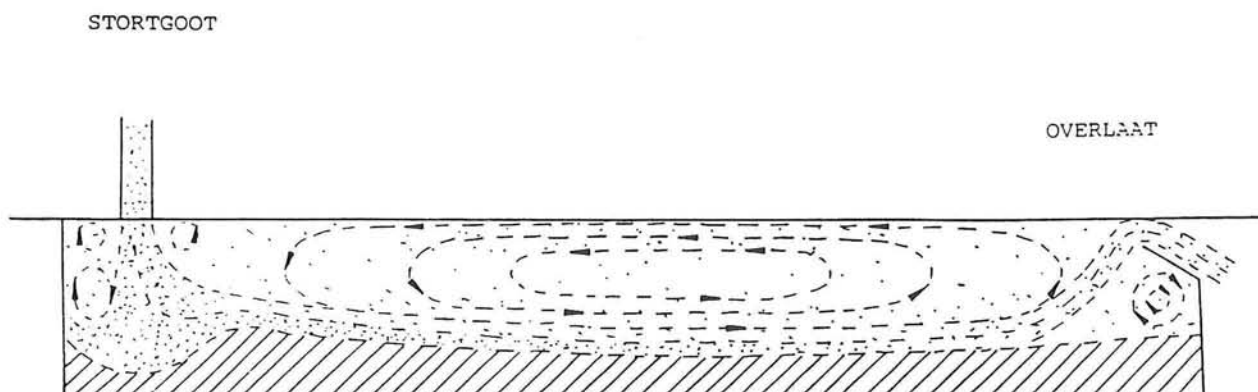


Figuur 3.17 Kegelvormige verzakking in het zandoppervlak (↑)

naar de wijze van het vullen van het beun gekeken is.

Het vullen van het beun gaat in principe als volgt. Via de stortgoot komt het zand-water-mengsel in het beun terecht. Het zand bezinkt en het niveau in het beun stijgt totdat de bovenkant van de overflow bereikt wordt. Het water en de nog niet bezonken deeltjes stromen daarna af. Het stroombeeld van het zand-water-mengsel tijdens het vullen van het beun als de overflow in werking is, is in Figuur 3.18 geschematiseerd weergegeven. Wat aan deze schets opvalt is dat het zand-water-mengsel dat in het beun terecht komt als een soort 'bedload' transport over het al bezonken zand stroomt.

Dit is het gevolg van het verschil in dichtheid tussen het mengsel en het water dat op het zand staat. Tijdens het stromen over de zandlaag bezinken de korrels die zwaar genoeg zijn.



Figuur 3.18 Stroombeeld in het beun

Eerder in deze paragraaf is gesteld dat als er op het oppervlakte van een losse stapeling zandkorrels een schuifkracht wordt uitgeoefend dat dan de dichtheid van het zand toeneemt. Het zou dus zo kunnen zijn dat het eerder genoemde 'bedload' transport van het zand-water-mengsel de benodigde schuifkracht levert, waardoor het onderliggende zand verdicht. In plaats van dat het zand in het beun bezinkt en daarna in zijn geheel verdicht wordt, wordt volgens deze veronderstelling het zand laagsgewijs verdicht. Het zand bezinkt, wordt verdicht door het er over stromende 'bedload' transport, hierop bezinkt weer nieuw zand, dit wordt ook weer verdicht etcetera.

Er moeten natuurlijk nog wel enkele kritische kanttekeningen bij deze hypothese geplaatst worden. Het is de vraag of de optredende schuifkracht overal voldoende groot is om het zand zo extreem te verdichten. Het is bovendien ook de vraag of de schuifkracht al voldoende groot is als het water nog niet over de overflow wegstroomt, omdat er dan nog niet sprake is van het eerder genoemde stroombeeld.

§ 3.5 Fouten- en nauwkeurighedsanalyse

Ook bij dit onderzoek zijn een fouten- en nauwkeurighedsanalyse uitgevoerd voor de berekening van de relatieve dichtheid van het zand. Deze staan in respectievelijk § 3.5.1 en § 3.5.2 beschreven. Bij een foutenanalyse wordt bekeken welke factoren leiden tot fouten in de berekening van de relatieve dichtheid en bij een nauwkeurighedsanalyse worden deze factoren opzettelijk een aantal procenten veranderd zodat bekeken kan worden hoe groot de invloed van een fout is op de berekende waarde van de relatieve dichtheid.

§ 3.5.1 Foutenanalyse

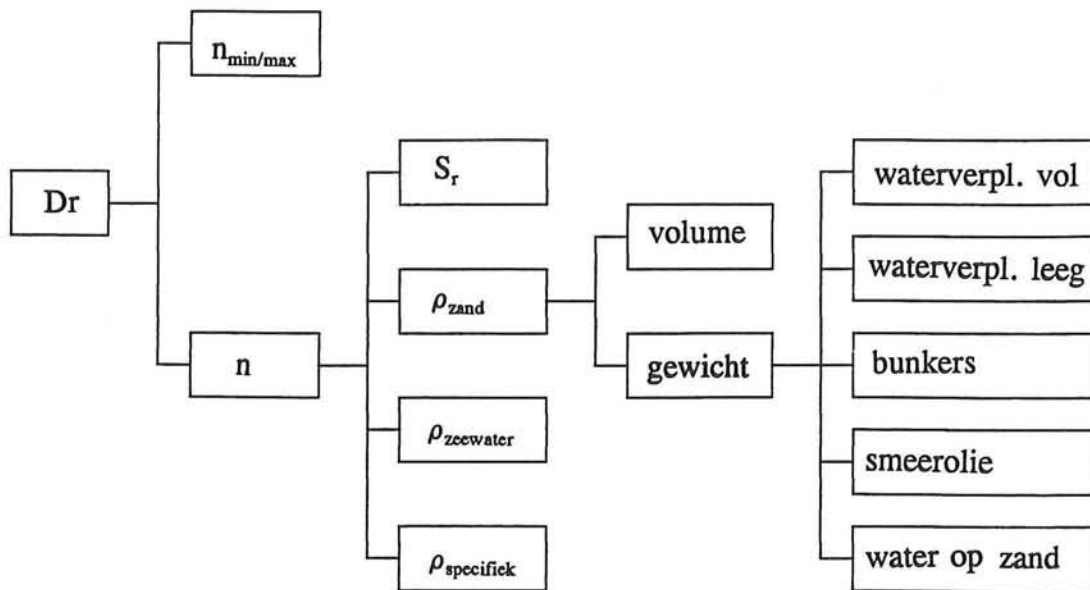
Een foutenboom voor de berekening van de relatieve dichtheid staat in Figuur 3.19 afgebeeld. Deze foutenboom wordt hieronder toegelicht.

Voor de berekening van de relatieve dichtheid moeten dus de minimum en maximum porositeit en de porositeit van het zand in het beun bekend zijn. Als er een fout gemaakt is bij de bepaling van de minimum en maximum porositeit kan dit ten eerste te wijten zijn aan het niet nauwkeurig genoeg uitvoeren van de proeven waarmee de minimum en maximum dichtheid bepaald zijn. Ten tweede zou het zandmonster onvoldoende ontzout kunnen zijn, dit verstoort ook de resultaten. Om de minimum en maximum dichtheid te verkrijgen is de proef drie keer uitgevoerd, zodat de kans op een verkeerde waarneming verkleind wordt. Beide zandmonsters zijn een aantal malen met water gespoeld om het aanwezige zout te verwijderen.

Een eventuele fout in de berekende waarde voor de porositeit van het zand in het beun kan veroorzaakt worden door een fout in de waarde voor de verzadigingsgraad van het zand, de dichtheid van het zand in het beun, de dichtheid van het zeewater of de specifieke dichtheid van het zand.

Gezien het geringe percentage zand dat boven het waterniveau lag (3.4%), kan een fout in de verzadigingsgraad verwaarloosd worden. De dichtheid van het zeewater zou inderdaad iets kunnen afwijken, omdat niet precies bekend is hoe groot deze waarde is. De specifieke dichtheid van het zand is achteraf bepaald, dus de kans dat hiermee een fout gemaakt is, is heel klein.

Een mogelijke fout in de berekende waarde van de dichtheid van het zand in het beun zou veroorzaakt kunnen worden door een fout in de bepaling van het volume of het gewicht



Figuur 3.19 Foutenboom voor de berekening van de relatieve dichtheid

van het zand. Een fout in de bepaling van het volume kan ontstaan, omdat er gezien de beschikbare tijd maar op 24 plaatsen gepeild is. Er geldt natuurlijk dat als er op meer plaatsen peilingen uitgevoerd zouden zijn, dat dan het volume nauwkeuriger bepaald zou kunnen worden. Als er een fout gemaakt is bij de bepaling van het volume zand in het beun zou dit kunnen blijken uit een verschil tussen de gepeilde volumina uit Bijlage 3.2 en de gepeilde volumina van de 'waker'. In Tabel 3.3 staan voor de verschillende reizen de gemeten waarden van de volumina vermeld.

Wat aan deze tabel opvalt is dat er per reis wel verschillen optreden, maar over het totaal blijkt het verschil tussen de drie meetseries kleiner dan 1% te zijn.

Als er een fout gemaakt is bij de bepaling van het gewicht van het zand in het beun, kunnen de volgende factoren deze fout veroorzaakt hebben:

- de waterverplaatsing van het volle schip
- de waterverplaatsing van het lege schip
- het gewicht van de bunkers
- het gewicht van de smeerolie
- het gewicht van het water op het zand

De waterverplaatsing van het volle schip is berekend in Bijlage 3.1. Bij deze berekening zou een fout kunnen optreden in de aangenomen waarde voor de dichtheid van het zeewater van 1020 kilogram per kubieke meter. Bovendien is het de vraag of het moment waarop de waterverplaatsing berekend is geheel correct is. Aangezien er geen betere waarneming voor handen is, is de waterverplaatsing dus berekend met de laatste waarden voor de diepgang uit de grafiek. In de waarden voor de diepgang kunnen natuurlijk ook altijd fouten zitten door slecht functionerende drukmeters. De waterverplaatsing van het

Tabel 3.3

Reisnr	Waker	24 pnt	10 pnt
280	4362.4	4306.8	4446.2
281	4382.1	4346.0	4269.4
282	4303.5	4293.7	4338.8
283	4441.0	4416.1	4494.7
284	4310.0	4308.7	4333.6
285	4185.6	4160.8	4201.4
286	4421.3	4420.7	4418.1
287	4205.3	4192.2	4211.8
289	4401.7	4341.5	4473.1
290	4336.2	4342.1	4359.8
291	4323.1	4350.6	4346.1
292	4238.0	4209.2	4232.1
293	4296.9	4303.5	4346.1
295	4323.1	4395.8	4420.7
296	4355.9	4357.8	4344.7
297	4395.2	4429.2	4412.2
298	4218.4	4276.0	4243.9
300	4375.5	4372.2	4437.1
301	4408.3	4378.1	4444.3
302	4467.2	4475.0	4509.0
Totaal	86750.7	86676.0	87283.1

lege schip is berekend in Bijlage 3.2 en bij deze berekening kunnen dezelfde fouten optreden als bij de berekening van de waterverplaatsing van het volle schip.

Het gewicht van de bunkers is bepaald door rechtlijnige interpolatie van de waarden die om 12 uur 's nachts in de machinekamer afgelezen zijn. Het verloop van het gewicht van de bunkers was natuurlijk niet rechtlijnig, maar omdat er niet tijdens het meten afgelezen is, is dit verloop aangenomen. Het gewicht aan smeerolie is gebaseerd op de hoeveelheid olie die aan boord genomen werd. Omdat er geen smeerolie van boord ging tijdens het varen bleef deze hoeveelheid constant. De kans op fouten is dus gering. Het gewicht van het water dat zich op het zand bevond is berekend met behulp van de grafieken uit Bijlage

3.3. De grafieken zouden natuurlijk nog veel nauwkeuriger getekend kunnen worden als er op meer plaatsen gepeild was. Hierdoor zou het volume water ook nauwkeuriger bepaald kunnen worden, maar gezien de beschikbare tijd was dit niet mogelijk. Als de stand van de overflow tijdens het varen zou veranderen zou dit ook leiden tot fouten in de berekening, maar dit is elke reis gecontroleerd. De overflow stond steeds in zijn laagste stand. Bij de berekening van het gewicht aan water dat op het zand stond is ook weer gebruik gemaakt van de dichtheid van het zeewater van 1020 kilogram per kubieke meter. Met deze waarde zou dus ook weer een fout gemaakt kunnen zijn.

§ 3.5.2 Nauwkeurighedsanalyse

Bij een nauwkeurighedsanalyse wordt bekeken hoe groot de invloed van een fout is op de berekende waarde van de relatieve dichtheid. Daartoe zijn de factoren uit de vorige paragraaf met 5% procent veranderd. De relatieve dichtheid wordt met deze waarden opnieuw berekend, waarna bekeken wordt met hoeveel procent de relatieve dichtheid veranderd is. Allereerst is er gekeken naar een verandering in de minimum en maximum porositeit van het zand, of anders gezegd een verandering in de minimum en maximum dichtheid. Het gewicht aan zand waarmee de proeven zijn uitgevoerd is met 5% verminderd. Hierdoor veranderen zowel de minimum als de maximum dichtheid. Aangezien er met de beide zandsoorten weinig verdichtingsproeven uitgevoerd zijn, is gebruik gemaakt van Bijlage 2.13. Uit deze bijlage blijkt dat als het gewicht aan zand, dus ook de minimum dichtheid, met 5% afneemt dat dan de maximum dichtheid globaal met 7.9% toeneemt. Met deze gegevens zijn de nieuwe waarden van de minimum en maximum porositeit berekend. Deze waarden staan in Bijlage 3.8 en de herberekende waarden van de relatieve dichtheid staan in Bijlage 3.9.

Na de verandering van de minimum en maximum porositeit is de waarde voor de porositeit van het zand veranderd. Allereerst is de verzadigingsgraad S_r met 5% verlaagd. Hierna is de relatieve dichtheid opnieuw berekend. Dezelfde procedure is daarna gevolgd voor de waarden van de dichtheid van het zeewater en de specifieke dichtheid van het zand. Alleen is voor beide dichtheden de waarde met 5% verhoogd in plaats van verlaagd. De waarde van de dichtheid van het zeewater is alleen veranderd bij de berekening van de porositeit, dus niet bij de berekening van de waterverplaatsing van het volle en lege schip en de berekening van het gewicht aan water dat op het zand stond, omdat anders bij deze waarden de verandering niet 5% zou zijn. In Bijlage 3.9 staan de herberekende waarden van de relatieve dichtheid weergegeven.

Om de invloed van de dichtheid van het zand op de waarde van de relatieve dichtheid te bekijken zijn de waarden van het volume met 5% verhoogd. Hierna is ook weer de relatieve dichtheid berekend en de resultaten van deze berekening staan eveneens in Bijlage 3.9 vermeld.

Na de verandering in het volume zijn alle factoren die het gewicht van het zand beïnvloeden met 5% verhoogd. Deze factoren zijn: de waterverplaatsing van het volle en lege schip, het gewicht van de bunkers, de smeerolie en het gewicht van het water dat op het zand stond. De resultaten van deze herberekening van de relatieve dichtheid staan eveneens in Bijlage 3.9 weergegeven en zijn in Tabel 3.4 samengevat. De weergegeven percentages in de tweede kolom zijn de gemiddelde veranderingen van de relatieve dichtheid ten gevolge van een verandering van 5% in de waarden van de mogelijke foutenbronnen uit de eerste kolom.

Tabel 3.4

Foutenbron:	Verandering Dr:
$n_{\min/\max}$	22.3%
S_r	13.5%
ρ_{zeewater}	14.4%
$\rho_{\text{specifiek}}$	55.0%
volume	68.3%
waterverpl. vol	132.0%
waterverpl. leeg	41.9%
bunkers	4.5%
smeerolie	0.1%
water op het zand	1.1%

Wat aan deze tabel opvalt is dat de invloed van een fout in het gewicht van de bunkers, de smeerolie en het water dat op het zand stond verwaarloosd mogen worden ten opzichte van de andere mogelijke foutenbronnen. Een fout in de waarde van de verzadigingsgraad S_r is duidelijk aanwezig, maar gezien het geringe percentage zand dat boven het waterniveau in het beun lag kan aangenomen worden dat deze fout geen grote rol speelt. De invloed van een fout in de dichtheid van het zeewater is ook duidelijk aanwezig, maar deze invloed kan verkleind worden door van een aantal monsters zeewater de dichtheid te bepalen. Dit is tijdens het meten aan boord van de 'Cornelia' helaas niet gebeurd. Opgemerkt moet wel worden dat een verandering van 5% van de dichtheid van het zeewater niet geheel realistisch is. De waarde van de dichtheid van het zeewater zou dan liggen tussen de 969 en 1071 kilogram per kubieke meter.

Net zoals in hoofdstuk 2 blijkt uit de bovenstaande tabel dat de invloed van de twee grenzen waarmee de relatieve dichtheid berekend is, dit zijn de minimum en maximum porositeit, aanzienlijk is. De conclusie kan dan ook alleen maar zijn dat beide grenswaarden zo nauwkeurig mogelijk bepaald moeten worden en dat duidelijk moet worden aangegeven op welke manier beide grenswaarden bepaald zijn. Een afwijking van 5% in de twee grenzen van de porositeit is in dit geval niet geheel realistisch, omdat uit de proeven blijkt dat het verschil in gewicht bij de bepaling van de minimum dichtheid ongeveer 30 gram bedroeg, terwijl een afwijking van 5% in het gewicht overeenkomt met een verschil van ongeveer 200 gram.

De invloed van een fout in de waarde van de specifieke dichtheid van het zand is ook aanzienlijk, maar omdat deze waarde achteraf bepaald is kan de invloed hiervan in dit geval verwaarloosd worden. Een afwijking van 5% in de waarde van de specifieke dichtheid is niet onmogelijk. Deze waarde zou dan tussen de 2498.5 en 2761.5 kilogram per kubieke meter liggen.

Een fout in de waarde van het volume van het zand is ook aanzienlijk, maar een verandering van 5% komt globaal overeen met 210 kubieke meter zand. Dit komt weer overeen

met een fout van ongeveer 35 centimeter in de peiling van het zandniveau. Het is niet erg waarschijnlijk dat er gemiddeld 35 centimeter verkeerd gepeild is. Deze fout zal eerder enkele centimeters groot zijn.

De invloed van een fout in de waarde van de waterverplaatsing van het lege schip blijkt ook aanzienlijk te zijn, maar de grootste invloed op de waarde van de relatieve dichtheid wordt veroorzaakt door een fout in de waarde van de waterverplaatsing van het volle schip. Bij een verandering in deze waarde van 5%, verandert de waarde van de relatieve dichtheid van het zand met maar liefst 132%. Deze invloed is dus gigantisch groot. Opgemerkt dient wel te worden dat een verandering van 5% niet realistisch is, dit komt namelijk overeen met een afwijking in de waterverplaatsing van ongeveer 750 ton.

Toch mag duidelijk zijn dat de waterverplaatsing van het volle schip zo nauwkeurig mogelijk bepaald moet worden.

Bij de bovenstaande nauwkeurighedsanalyse zijn de waarden waarmee de relatieve dichtheid berekend is met 5% veranderd. Deze verandering bleek niet in alle gevallen geheel realistisch te zijn. Vandaar dat de relatieve dichtheid opnieuw berekend is, nadat de waarden voor het volume van het zand, de dichtheid van het zeewater en de diepgang voor en achter met 1% veranderd zijn.

Een verandering van 1% in de waarde van het volume komt ongeveer overeen met 45 kubieke meter. Dit komt weer overeen met een afwijking van 7 à 8 centimeter in het niveau van het zand in het beun. Het is voor te stellen dat er bij het peilen van het zandniveau zo'n fout optreedt. De opnieuw berekende waarden voor de relatieve dichtheid van het zand staan in Bijlage 3.9 vermeld en de gemiddelde procentuele verandering van de relatieve dichtheid is in Tabel 3.5 weergegeven.

Een verandering van 1% in de dichtheid van het zeewater leidt tot een waarde van 1030 kilogram per kubieke meter. Met deze waarde is de berekening van de relatieve dichtheid opnieuw uitgevoerd. Deze verandering werkt zowel door in de berekening van de waterverplaatsing van het volle en lege schip als ook in de berekening van het gewicht van het water dat op het zand stond en de berekening van de porositeit. De herberekende waarden van de relatieve dichtheid staan eveneens in Bijlage 3.10 vermeld en ook de procentuele verandering is in Tabel 3.5 weergegeven.

Als laatste zijn de waarden voor de diepgang (in volt) voor en achter, die rechts naast de grafiek voor het verloop van de waterverplaatsing staan, met 1% veranderd. Hierdoor verandert ook de berekende waarde van de gemiddelde diepgang (in meters) met 1%. Deze verandering komt ongeveer overeen met een afwijking van 8 centimeter in de diepgang van het schip. De relatieve dichtheid is ook weer in Bijlage 3.10 herberekend en de procentuele verandering van de relatieve dichtheid is in Tabel 3.5 in de tweede kolom weergegeven.

Tabel 3.5

Foutenbron:	Verandering Dr:
Volume	15.7%
ρ_{zeewater}	4.9%
Dv/Da (in volt)	14.2%

Wat opvalt aan de bovenstaande tabel is dat zelfs als er realistische afwijkingen optreden van 1% in de waarden waarmee de relatieve dichtheid berekend is, dat dan nog de waarde voor de relatieve dichtheid sterk verandert. De conclusie kan daarom alleen maar zijn dat met behulp van het T.D.S.-systeem en een peiling in het beun de relatieve dichtheid van zand onvoldoende nauwkeurig te bepalen is. De kans dat er een fout optreedt, die leidt tot grote afwijkingen in het eindresultaat is te groot.

§ 3.6 Conclusies en aanbevelingen

In deze paragraaf zijn de conclusies uit de vorige paragrafen samengevat en tevens worden er aanbevelingen voor verder onderzoek gedaan. In § 3.6.1 staan de conclusies vermeld en in § 3.6.2 de aanbevelingen.

§ 3.6.1 Conclusies

De volgende conclusies kunnen getrokken worden naar aanleiding van de uitgevoerde meetseries aan boord van de 'Cornelia', de getekende grafieken en de gemaakte berekeningen.

- Uit de grafieken voor het verloop van het zandniveau in het beun, het korrelverdelingsdiagram en de laadsnelheid van het zand kan worden afgeleid dat er verschillende zandsoorten gebaggerd werden. De grafieken voor het verloop van het zandniveau staan in Bijlage 3.3 afgebeeld, het korrelverdelingsdiagram in Figuur 3.17 en de laadsnelheid wordt verkregen door het gepeilde volume te delen door de bijbehorende zuigtijd uit de T.D.S.-grafiek, welke eveneens in Bijlage 3.3 afgebeeld is. Een flauw verloop van het zandniveau en een hoge laadsnelheid duiden op een fijne zandsoort, terwijl een steil verloop van het zandniveau en een lage laadsnelheid duiden op een grove zandsoort.
- Slechts een gering percentage van het gepeilde volume zand in het beun (gemiddeld 3.4%) lag boven het waterniveau. Mede als gevolg van de capillaire opstijging kan voor de verzadigingsgraad de waarde 1 worden aangenomen.
- Om de waterverplaatsing van het volle schip zo nauwkeurig mogelijk te bepalen, moet gebruikt gemaakt worden van de waarden van de diepgang (af te lezen in volt) die rechts naast de T.D.S.-grafiek vermeld staan. Via het Carènediagram kan daarna de waterverplaatsing berekend worden. Deze berekening staat in Bijlage 3.1 vermeld. Als de waarden voor de waterverplaatsing van het volle schip uit de T.D.S.-grafiek gebruikt worden, wordt een fout gemaakt die in het T.D.S.-systeem aanwezig is, omdat het Carènediagram verkeerd toegepast wordt. Deze fout ligt in de ordegrootte van 45 ton.
- De waarden van de dichtheid en de relatieve dichtheid van zand in het beun, die bij de uitgevoerde meetserie aan boord van de 'Cornelia' bepaald zijn, liggen veel hoger dan tot nu toe werd aangenomen. Een mogelijke verklaring voor de hoge waarden die gevonden zijn, kan liggen in het 'bedload'-transport dat over het juist bezonken zand stroomt en het zodoende verdicht. Deze hypothese staat uitgebreid in § 3.4.4 beschreven.
- Een mogelijke reële fout van 1% in de waarden van het gepeilde volume, de dichtheid van het zeewater of de diepgang (in volt) leidt tot afwijkingen in de berekende waarden

van de relatieve dichtheid van respectievelijk 15.7, 4.9 en 14.2%. De conclusie kan daarom alleen maar zijn, dat de waarde van de relatieve dichtheid van zand in het beun van een hopperzuiger onvoldoende nauwkeurig te bepalen is met behulp van het T.D.S.-systeem en een peiling in het beun.

§ 3.6.2 Aanbevelingen

Naar aanleiding van het uitgevoerde onderzoek kunnen de volgende aanbevelingen gedaan worden, indien men het onderzoek naar dit onderwerp voortzet.

- Zoals in hoofdstuk 2 gesteld is, moeten bij de berekening van de relatieve dichtheid van zand de waarden van de minimum en maximum dichtheid erg nauwkeurig bepaald worden, omdat een kleine fout in deze waarden leidt tot grote afwijkingen in het eindresultaat. De verdichtingsproef dient derhalve een aantal keren uitgevoerd te worden en bovendien moet duidelijk vermeld worden welke proef is uitgevoerd.
- De waarden voor de dichtheid van het zeewater en de specifieke dichtheid van het zand moeten een aantal keren bepaald worden, opdat een fout in deze waarden uitgeschakeld kan worden.
- Bij de bepaling van de waterverplaatsing van het schip dient niet de waarde te worden gebruikt die rechts naast de T.D.S.-grafiek vermeld staat, maar de waarde berekend uit de waarden voor de diepgang volgens de methode die beschreven is in Bijlage 3.1.
- Door van zoveel mogelijk punten in het beun het zandniveau te bepalen kan de gemiddelde waarde nauwkeuriger dan nu gebruikelijk is berekend worden, zodat betrouwbare gegevens worden verkregen ter berekening van de (relatieve) dichtheid.
- Om het gecombineerde effect van de foutenbronnen te kunnen beoordelen moet een probabilistische berekening uitgevoerd worden.
- Om de (relatieve) dichtheid van zand in het beun van een hopperzuiger te bepalen, moeten meer meetmethoden ontwikkeld worden, waarbij er naar gestreefd wordt de kans op fouten in het eindresultaat zo veel mogelijk te beperken, waardoor de (relatieve) dichtheid voldoende nauwkeurig bepaald kan worden.

Literatuurlijst:

1. Lubking, P., 'Uitlevering of bulking', *Land + Water* (juli/augustus 1990).
2. Volker, L.G., *De methodiek van de raming van kosten voor de uitvoering van materieel-intensieve civieltechnische werken, deel III^A* (1977).
3. Merritt, F.S., *Standard Handbook for Civil Engineers* (1977).
4. Schlick, *Auflockerungs- und Verdichtungsfaktor von Locker- und Felsböden, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 259* (1978).
5. Bray, R.N., *Dredging: A Handbook for Engineers* (1981).
6. Clark, G.B., *Principles of Rock Fragmentation* (1987).
7. Kézdi, A., *Handbook of Soil Mechanics Vol. I* (1974).
8. *Earth Manual, a water resources technical publication*, U.S. Department of the Interior (1978).
9. *Various Properties of Natural Sands for Netherlands Highway Engineering*, SCW-Record 4 (1978).
10. Grasshoff, H., Siedek, P., Floss, R., *Handbuch Erd- und Grundbau Teil I* (1983).
11. Verruijt, A., *Grondmechanica* (1987).
12. Bölling, W.H., *Bodenkennziffern und Klassifizierung von Böden* (1976).
13. Selig, E.T. en Ladd, R.S., *Evaluation of relative density and its role in geotechnical projects involving cohesionless soils, STP 523* (1972).
14. Lubking, P., 'Verdichtingsgraad en relatieve dichtheid', *Land + Water* (juni 1989).
15. Jänke, S., 'Untersuchung von Verfahren und Geräten zur Bestimmung der Grenzen der Lagerungsdichte nichtbindiger Erdstoffe', *Berichte aus der Bauforschung Heft 95* (1974).
16. Dillingh, D.A., *Interne cursus Laboratoriumproeven en Terreinproeven*, Grondmechanica Delft (1991).
17. Lubking, P., 'Dichtheid van Zand', *Land + Water* (april 1990).
18. Lubking, P., 'Proctorstamper vergruist', *Land + Water* (januari 1992).
19. Lubking, P., 'Onderzoeksmethode bepaalt verdichtingsgraad zand', *Land + Water* (mei 1991).
20. Gillot, J.E., *Clay in engineering geology* (1987).
21. Theissing, E.M. en Verver, M.W., *Dictaat Materiaalkunde I*, T.U. Delft, (1986).
22. Lubking, P., 'Consistentie van grond', *Land + Water* (oktober 1990).
23. Brown en Thompson, *Dredged Material Research Program Vol. 14*, U.S. Army Corps of Engineers (1977).
24. Laan, G.J., *Kwaliteit en kwaliteitscontrole van breuksteen voor de waterbouw* (1982).
25. Ruyter, T.F.M. de, *A comparison of existing equations*, Department of Mining Engineering T.U. Delft (1985).
26. *Shore Protection Manual Vol. II*, U.S. Army Corps of Engineers (1984).
27. Peng, S.S., *Proceedings Workshop on surface subsidence due to underground mining* (1982).
28. Peng, S.S., *Proceedings 2nd Workshop on surface subsidence due to underground mining* (1986).
29. Wieggers, H., *Geologie, zand en wegenbouw* (1967).

30. Lubking, P., 'Schijnbare cohesie I, II en III', *Land + Water* (december, januari/februari en maart 1989/1990).
31. Neema, D.L., Patel A.N., Sharda, B.L., 'Physical en statistical models for bulking of sand', *Geotechnical Testing Journal* (juni 1990).
32. *Technische specificaties van het T.D.S.-systeem*, Rijkswaterstaat.

Bijlagen

Behorend bij het afstudeerverslag Uitlevering van zand

oktober 1992

A. Veldhuis



Bijlagen behorend bij het afstudeerverslag

Uitlevering van zand

Bepaling van de relatieve dichtheid

A.Veldhuis

oktober 1992

Faculteit der Civiele Techniek
T.U. Delft

Voorwoord

Voor u liggen de bijlage die horen bij het afstudeerverslag 'Uitlevering van zand'. Deze bijlagen staan vermeld in de volgorde waarin ze in het verslag aan de orde komen. Het eerste cijfer van de bijlagen geeft het betreffende hoofdstuk aan.

Inhoudsopgave

Voorwoord

Bijlage	1.1 Resultaten van het onderzoek naar uitlevering.....	7
Bijlage	1.2 Classificatie van onverharde grondmonsters.....	13
Bijlage	1.3 Methoden voor de bepaling van de dichtheid in situ.....	15
Bijlage	1.4 Dichtheidsmetingen in het terrein.....	17
Bijlage	1.5 Bepaling van de scherpste van zand.....	19
Bijlage	1.6 Distinct Motion Code.....	25
Bijlage	2.1 Bepaling korrelverdelingsdiagram.....	33
Bijlage	2.2 Bepaling zandequivalentwaarde.....	35
Bijlage	2.3 Bepaling V.V.S.	37
Bijlage	2.4 Bepaling percentage hangwater.....	41
Bijlage	2.5 Bepaling hoek van natuurlijk talud.....	43
Bijlage	2.6 ASTM D 2049-69.....	45
Bijlage	2.7 Bepaling minimum en maximum dichtheid.....	49
Bijlage	2.8 Proevenserie 1.....	51
Bijlage	2.9 Proevenserie 2.....	55
Bijlage	2.10 Proevenserie 3.....	59
Bijlage	2.11 Proevenserie 4.....	63
Bijlage	2.12 Proevenserie 5.....	67
Bijlage	2.13 Bepaling nieuwe minimum en maximum dichtheid.....	71
Bijlage	2.14 Herberekening van de relatieve dichtheid.....	73
Bijlage	2.15 Procentuele verandering van de relatieve dichtheid.....	79
Bijlage	3.1 Berekening van de waterverplaatsing van het volle schip...85	
Bijlage	3.2 Berekening van de waterverplaatsing van het lege schip....89	
Bijlage	3.3 Berekening van het gewicht en volume van het zand in het beun aan de hand van de meetresultaten.....	91
Bijlage	3.4 Bunkers van de 'Cornelia'.....	135
Bijlage	3.5 Meetbrief van de 'Cornelia'.....	137
Bijlage	3.6 Bepaling van de minimum en maximum dichtheid.....	139
Bijlage	3.7 Berekening van de relatieve dichtheid.....	141
Bijlage	3.8 Bepaling van de nieuwe waarden voor n_{air} en n_{max}	143
Bijlage	3.9 Herberekening van de relatieve dichtheid met een verandering van 5% in de foutenbronnen.....	145
Bijlage	3.10 Herberekening van de relatieve dichtheid met een verandering van 1% in de foutenbronnen.....	149

Bijlage 1.1 Resultaten van het onderzoek naar uitlevering

Uitleveringsfactoren volgens Volker

<u>Uitlevering:</u> geroerd/ongeroerd	Swell factor : loose cy/bank cy
	Load factor : bank cy/loose cy
	Soil factor : bank cy/loose cy
<u>Inklinking:</u> geroerd/aanvulling	Shrinkage factor: loose cy/fill cy
<u>Verdichting:</u> ongeroerd/verdicht	Compaction factor: bank cy/compacted cy
<u>Verdichte grond</u>	Compacted soil
gemeten in stort na mechanische verdichting	measured in compacted fill
<u>Load factor</u>	bank cy/loose cy
sand	0,90-1,00
common earth	0,80-0,95
clay	0,70-0,85
broken rock	0,60-0,70
completely fractured	
<u>Swell factor</u>	loose cy/bank cy
rock crumbling	1,50-1,73
hard " well blasted	1,56
hard " poorly blasted	1,98
dry sand + gravel	1,07-1,15
humid sand + gravel	1,09-1,18
surface earth	1,11-1,20
normal earth	1,20
common earth	1,24-1,35
sandy marl	1,18
marl with clay	1,25
earth with marl	1,20
clay with sand or gravel	1,30-1,45
medium hard clay	1,35-1,55
hard clay	1,42-1,50
hard clay mixed with rock	1,62

Uitleveringsfactoren volgens Meritt

Table 13-10. Percentage Swell and Load Factors of Materials

Material	Swell, %	Load factor
Cinders	45	0.69
Clay:		
Dry	40	0.72
Wet	40	0.72
Clay and gravel:		
Dry	40	0.72
Wet	40	0.72
Coal, anthracite	35	0.74
Coal, bituminous	35	0.74
Earth, loam:		
Dry	25	0.80
Wet	25	0.80
Gravel:		
Dry	12	0.89
Wet	12	0.89
Gypsum	74	0.57
Hardpan	50	0.67
Limestone	67	0.60
Rock, well blasted	65	0.60
Sand:		
Dry	12	0.89
Wet	12	0.89
Sandstone	54	0.65
Shale and soft rock	65	0.60
Slag, bank	23	0.81
Slate	65	0.60
Traprock	65	0.61

**Auflöserfaktor und Auflöserung
beim Einsatz von Hydraulikbaggern nach Kleh**

Bodenklasse (nach DIN 18 300 alt)	Ladefaktor Bereich Mittelwert	Auflöserung (%) Bereich Mittelwert
2.23 leichter Boden	0,94–0,80 0,88	6–23 14
2.24 mittelschwerer Boden	0,90–0,78 0,85	12–29 20
2.25 bindiger, mittelschwerer Boden	0,87–0,78 0,80	14–35 25
2.26 schwerer Boden	0,84–0,73 0,74	20–38 35
2.27 leichter Fels	keine Messungen	keine Messungen
2.28 Fels (gesprengt)	0,69–0,60 0,66	45–68 50

**Anhaltswerte für die Auflöserung
nach Floß (BMT 7/8 1974)**

311 020 000	Grobschluff	5–20	0,83–0,95
319 000 100	Lehm	15–25	0,80–0,87
321 000 000	Ton	20–30	0,76–0,83
141 000 000	Sand	15–25	0,80–0,87
111 000 000	Kies	25–30	0,76–0,80
131 000 300	Kies-Sand-Gemische	20–35	0,80–0,83
931 000 000	Steinige Böden mit Feinkorn 0,06 mm	20–25	0,80–0,83
633 000 000	Schluffstein, Tonstein, Mergelstein	25–30	0,76–0,80
642 000 000	Kalkstein, Sandstein u. a.	35–60	0,63–0,74
632 000 000	Granit u. a.		

**Auflöserfaktor
bei Seilbaggern nach DUC/TRAPP**

Bodenklasse (nach DIN 18 300 alt)	Auflöserfaktor
leichter Boden	0,93–0,87
mittelschwerer Boden	0,91–0,87
schwerer Boden	0,80–0,77
leichter Fels	0,77–0,74
schwerer Fels	0,74–0,67

Auflöserfaktor nach JURECKA

Boden- kennzahl	Material	Auflöserfaktor
241 000 000	Nichtbindige Sande und Kiese bis 60 mm	0,91
900 400 300	Schotter und Geröll 60–120 mm	0,87
253 000 200	Lehmiger Sand, sandiger Lehm, Lehm, Mergel, Löß, Lößlehm	0,83
318 000 000		
319 000 000		
315 037 300		
318 030 300		
321 000 086	Fetter, steifer Ton, trockener Lehm und Löß, Schotter, Geröll 200 mm	0,80
319 000 001		
315 037 301		
900 400 300		
701 700 000	Gut gesprengter Fels 10–50 cm	0,71
701 600 000	Schlecht gesprengter Fels 50–100cm	0,67

Tabelle 2
Erfahrungswerte für die Auflöserung nach
IMHOF (1944)

Boden- kennzahl	Bodenart	Auflöser- ung in %	Auflöser- ungsfaktor
141 000 000	Stichboden	10–20	0,83–0,91
111 070 000	Sand, feiner Kies, sandiger Lehm, Ton usw.		
318 000 200			
321 000 000			
319 000 003	Hackboden	20–25	0,83–0,80
321 000 003	schwerer Lehm und Ton, grober Kies		
111 020 000			
630 000 000	Gebräches Gestein	25–30	0,80–0,77
630 000 040	Keuper, Mergel, weiche Sandsteine, kleinbrüchiger Schiefer, zerklüftete Kalksteine		
630 700 000			
640 000 000			
630 000 020	Sprenggesteine, leicht schließbar	30–35	0,77–0,75
640 000 000	festes Schiefer, Kalk- und Kreidegesteine, feste Sandsteine, Konglomerate und Brekzien		
600 000 010	Sprenggesteine, schwerschießbar Granit, Gneis, Syenit, Quarzit, Hornstein, Porphy, Melaphyr, Grünstein, Diabas, Grauwacke usw.	35–50	0,74–0,67

**Auflöserfaktor
nach Gabay für Löffelbagger**

Boden- kennzahl	Bodenart	Auflöser- ung in %	Auflöser- ungsfaktor
400 000 002	leichter Boden (Mutterboden)	30	0,77
110 000 000	Sand, Kies	13	0,88
140 000 000			
321 000 084	guter Mischboden	19	0,84
321 000 002	Ton hart, zäh	49	0,67
701 000 000	Ton klebrig, feucht	43	0,70
	Fels, gut geschossen	56	0,64
	Boden mit Steinen und Wurzeln	75	0,57
703 000 000	Fels, schlecht geschossen	100	0,50

Auflockerungsfaktor
nach KÜHN (Der gleislose Erdbau)

Boden- kennzahl	Bodenart	Planier- schilde	Schürf- kübel
141 000 001	Sauberer Flußsand oder Kies, trocken	0,90	0,93
111 000 001			
141 000 001	Sand oder Kies, trocken	0,87	0,91
111 000 001			
111 000 002	Kies, feucht	0,85	0,80
141 000 002	Sand, feucht	0,84	0,89
473 000 002	Boden mit Sand oder Kies	0,82	0,87
480 000 002	Sandiger Mutterboden	0,81	0,86
318 000 200	Sandiger Lehm	0,80	0,85
319 060 100	Mittlerer Lehm	0,77	0,82
433 000 002	Mittlerer Mutterboden	0,75	0,80
317 060 200	Mittlerer Lehm mit Sand oder Kies	0,74	0,80
453 000 002	Fetter Mutterboden	0,73	0,77
321 000 062	Magerer Ton, erdfeucht	0,72	0,77
323 000 061	Magerer Ton, trocken mit Kies	0,71	0,74
316 000 302	Fetter Lehm, mit Sand oder Kies	0,69	0,72
316 000 302	erdfeucht		
321 000 080	Mittlerer Ton, zäh	0,68	0,70
604 000 000	Schichtgestein oder weicher Fels, gesprengt	0,67	0,69
321 000 081	Fetter Ton, trocken (Tiefreißer)	0,66	0,67
701 000 000	Fels, gut gesprengt	0,66	0,67
944 000 082	Fetter Ton, feucht mit Geröll	0,65	0,65
321 000 080	Fetter Ton, klebend	0,64	0,63
701 000 030	Mittlerer Fels, schlecht gesprengt	0,59	0,55
701 000 020	Harter Fels, schlecht gesprengt	0,58	0,50

Auflockerungsfaktor nach KÜHN

Boden- kennzahl	Bodenart	Auflockerungsfaktor
321 000 001	Ton trocken	0,80
321 000 020	Ton locker	0,77
321 000 045	Ton dicht, zäh oder feucht	0,75
321 000 042		
	Boden trocken	0,80
	Boden naß	0,80
	Boden mit Sand und Kies	0,85
	Boden und Fels, gemischt	0,77
111 000 001	Kies trocken	0,89
111 000 003	Kieß naß	0,88
318 000 000	Lehm	0,83
701 000 020	Fels gut gesprengt, fest	0,67
	Fels und Steine, gebrochen	0,74
	Fels weich oder geschichtet	0,75

Auflockerungsfaktor nach KNAUPE

Gewinnungsklasse nach DDR-Norm	Bodenklasse nach DIN 18300	Auflockerungsfaktor
2	3	0,86
3	4	0,84
4	4	0,82
5	5	0,77
6	6	0,73

Auflockerungsfaktor
nach KRAUTH-VOSBERG (1950 Erdbau)
WIELAND-STÖCKLE

Boden- kennzahl	Bodenklasse	Auflockerungsfaktor KRAUTH/ VOSBERG WIELAND/ STÖCKLE	
400 000 002	I – Loser Boden ohne Zusammenhang z. B. Mutterboden, Sand, reiner Feinkies	0,87	0,91
141 000 000			
111 070 000			
253 000 100	II – Bodenarten mit geringem Zusammenhang 223 000 100 z. B. schwach lehmiger Sand und Kies, feuchter Sand und Kies, Löß, weicher Löß und Ton, Moorboden	0,83	0,83
141 000 002			
111 000 002			
319 000 100			
321 000 007			
510 000 002			
319 000 204	III – Bodenarten mit starkem Zusammenhang 321 000 004 z. B. fester Lehm und Ton, Mergel, grober Kies, Gerölle, verfilzter Torf	0,80	0,80
111 020 000			
930 000 000			
510 000 300			
604 000 040	IV – brüchiges und weiches Gestein Klasse III mit Erschwerung z. B. Trümmergesteine, weiche Sandsteine, zerklüfteter Kalkstein, grobes Gerölle, verwitterter Fels	0,77	0,77
604 060 000	V – Klüftiges Gestein in leicht lösbaaren Bänken z. B. Schiefer, Sandstein, Kalkstein, Kreide, in Bänden von nicht zu großer Mächtigkeit	0,74	0,74
602 020 000	VI – Felsen in geschlossenen starken Bänken z. B. harte Sandsteine, harte Kalksteine, fester Schiefer, gut bohrbar	0,71	0,71
601 010 010	VII – ganz fester, gesunder Fels z. B. Granit, Gneis, Basalt, Syenit, Porphy, schwer bohrbar, nicht oder wenig zerklüftet	0,67	0,67

Auflockerungsfaktor
nach MECKLENBURG

Boden- kennzahl	Bodenart	Auflockerungsfaktor
141 000 001	Sand, Kies-Sand auch mit wenig bindigen Bestandteilen (= 15 Gew.-%) (= 0,06 mm ϕ)	
230 000 001		
252 000 011		
232 000 011		
141 000 002/3	W = 0 bis 5 % trocken	0,90
230 000 002/3	W = 6 bis 14 % feucht/naß	0,89
252 000 012/3		
232 000 012/3		
930 400 200	Haufwerk 30 Gew.-% Steine 200 mm ϕ wie z. B. Grobkies, Geröll, Gesteinschotter	0,90
930 400 300	Haufwerk mit 30 bis 60 Gew.-% Steinen 200 mm ϕ wie z. B. Moränegeschlebe, Felsgeröll, gut gesprengter Fels	0,70
701 400 000		
930 100 300	Haufwerk mit Gesteinstrümmern 500 mm ϕ , wie z. B. Felsgerölle, schlecht gesprengter Fels	0,60
703 100 000		
	Gemischtkörnige Böden 15 bis 40 Gew.-% bindige Bestandteile wie z. B. Aulehm, Geschiebelehm, Geschiebemergel, weich	0,80
203 000 207		0,75
203 000 206	Bindige Böden, 40 Gew.-% bindige Bestandteile, wie z. B. Geschiebemergel, Keupermergel, Bänderthon weich	0,75
204 000 307		0,75
204 000 306		0,75

Auflockerungsfaktor
nach VIBROMAX-WELLER

Boden- kennzahl		Auflocke- rung in %	Auflocke- rungsfaktor
141 000 001	Sand trocken	14	0,88
111 000 002	Kies grubenfeucht	15	0,87
111 000 003	Kies naß (Wasserkies)	12	0,89
483 000 000	Humus	25	0,80
243 000 300	Lehmboden	30	0,77
244 000 300	Tonboden	35	0,74
600 000 000	Felsboden	50	0,67

Auflockerung und Auflöckerungsfaktor
nach WALCH (1956)

Boden- kennzahl	Bodenart	Auflocke- rung in %	Auflocke- rungsfaktor
141 000 001	trockener Sand — Kies	12	0,89
111 000 001			
141 000 002	feuchter Sand — Kies	14	0,88
111 000 002			
318 000 000	Lehm	20	0,83
321 000 061	Leichter Ton	30	0,77
321 000 083	Schwerer Ton	40	0,71
702 000 040	Weicher Fels, gesprengt	45	0,69
701 000 020	Harter Fels, kleingeschossen	50	0,67

Auflöckerung nach WESERHÖTTE

Boden- kennzahl	Bodenklassen nach DIN 18300	Auflocke- rung in %	Auflocke- rungsfaktor
482 000 000	2.21 Mutterboden, sandiger Lehm, Sandton	25	0,80
318 000 000			
252 000 300			
482 000 002	2.22 Mutterboden, magerer Ton, erdfeucht	30	0,77
328 000 362			
141 000 001	2.23 Sand oder Feinkies, trocken	12	0,89
141 070 001			
141 000 002			
111 070 002	Sand oder Feinkies, erdfeucht	14	0,88
318 000 201			
328 000 301	2.24 Lehm oder Ton, sandig, trocken	16	0,86
318 000 301			
319 000 304	Lehm oder Ton, bindig, trocken	20	0,83
329 000 304			
	Lehm oder Ton, gut bindig, hart	25	0,80
	Boden mit Sand oder Kies, trocken	18	0,85
253 000 302	2.25 Lehm mit Sand oder Kies, erdfeucht	35	0,74
213 000 302			
630 080 000	schieferartiger Fels, Grobkies	35	0,74
111 020 000			
213 000 204	Kies mit Lehm oder Ton, hart	45	0,69
212 000 204			
923 000 002	Geröll im Lehm oder Ton, erdfeucht	50	0,67
924 000 002			
923 000 004	Geröll im Lehm oder Ton, hart	45	0,69
924 000 004			
703 000 040	2.26 Weicher Fels, gut zerkleinert	45	0,69
321 000 083			
318 000 024	Fetter Ton, fester Mergel, trocken	50	0,68
703 000 030			
701 700 000	2.27 Mittlerer Fels, schlecht gesprengt	60	0,83
701 800 000			
	Harter Fels, gut vorgesprengt	50	0,67
	Harter Fels, schlecht vorgesprengt	75	0,57

Table 5.1 Bulking factor, B , for various soil types when excavated by mechanical dredger

(NB $B = \frac{\text{dredged volume}}{\text{in situ volume}}$)

Soil type	Bulking factor, B ,
Hard rock (blasted)	1.50–2.00
Medium rock (blasted)	1.40–1.80
Soft rock (unblasted)	1.25–1.40
Gravel, hardpacked	1.35
Gravel, loose	1.10
Sand, hardpacked	1.25–1.35
Sand, medium soft to hard	1.15–1.25
Sand, soft	1.05–1.15
Silts, freshly deposited	1.00–1.10
Silts, consolidated	1.10–1.40
Clay, very hard	1.15–1.25
Clay, medium soft to hard	1.10–1.15
Clay, soft	1.00–1.10
Sand/gravel/clay mixtures	1.15–1.35

Bijlage 1.2 Classificatie van onverharde grondmonsters

De nieuwe geotechnische norm NEN 5104 "Classificatie van onverharde grondmonsters", 1e druk juli 1989, vervangt de reeds een halve eeuw oude normen N 209 en N 210, die overigens in de civiele techniek vrijwel in onbruik waren geraakt.

In de zeventiger jaren ontstond vooral in de grond- en wegenbouw een dringende behoefte aan een genormd systeem voor de beschrijving van zand en andere in Nederland voorkomende gronden, wat onder andere leidde tot de "RGD-SCW-classificatie". Die was gebaseerd op bestaande classificaties van de Stichting Bodemkartering, Stiboka, en de Rijks Geologische Dienst, RGD, en werd gepubliceerd door de Stichting Studiecentrum Wegenbouw, SCW nu CROW. Uit dezelfde periode stamt de door Grondmechanica Delft ontwikkelde classificatie.

De opstellers van de nieuwe norm hebben zich vooral laten inspireren door deze classificaties, die hun bruikbaarheid in de praktijk reeds hadden bewezen.

De nieuwe norm gebruikt de korrelgrootteverdeling en het gehalte aan organische stof als basis voor een duidelijke en eenduidige benaming/beschrijving en/of weergave in getekende vorm van grondmonsters. Daarbij wordt de uit andere classificaties bekende driehoekpresentatie gehanteerd als belangrijk hulpmiddel. De classificatie geschiedt in drie opeenvolgende stappen; bij elke stap wordt de som van de op de driehoekszijden vermelde gehalten in % (m/m) van de beschouwde bestanddelen op 100 gesteld.

Indien het monster meer dan 30% grind bevat, krijgt het de hoofdnaam *grind*. Uit de "lutum + silt-zand-grind-driehoek" blijkt of het grind als siltig of (zwak, matig, sterk of uiterst) zandig moet worden aangemerkt. Bij massa-percentages grind beneden 30% wordt het monster met een andere hoofdnaam, *veen*, *klei*, *zand* of *leem*, aangeduid onder toevoeging van de mate van grindigheid: zwak, matig of sterk grindig.

Voorts wordt in de tweede driehoek het massa-percentage

aan organische stof uitgezet tegen het massa-percentage lutum en het massa-percentage zand + silt. Hiermede wordt het monster geassocieerd als *veen* bij meer dan 15% organisch materiaal of als (zwak, matig of sterk) humeus materiaal met een andere hoofdnaam, *klei*, *zand* of *leem*, bij minder dan 15% organische stof.

Grondmonsters die niet als *grind* of *veen* kunnen worden benoemd, moeten op basis van de massa-percentages aan lutum, silt en zand worden geassocieerd in de "lutum-siltzand-driehoek".

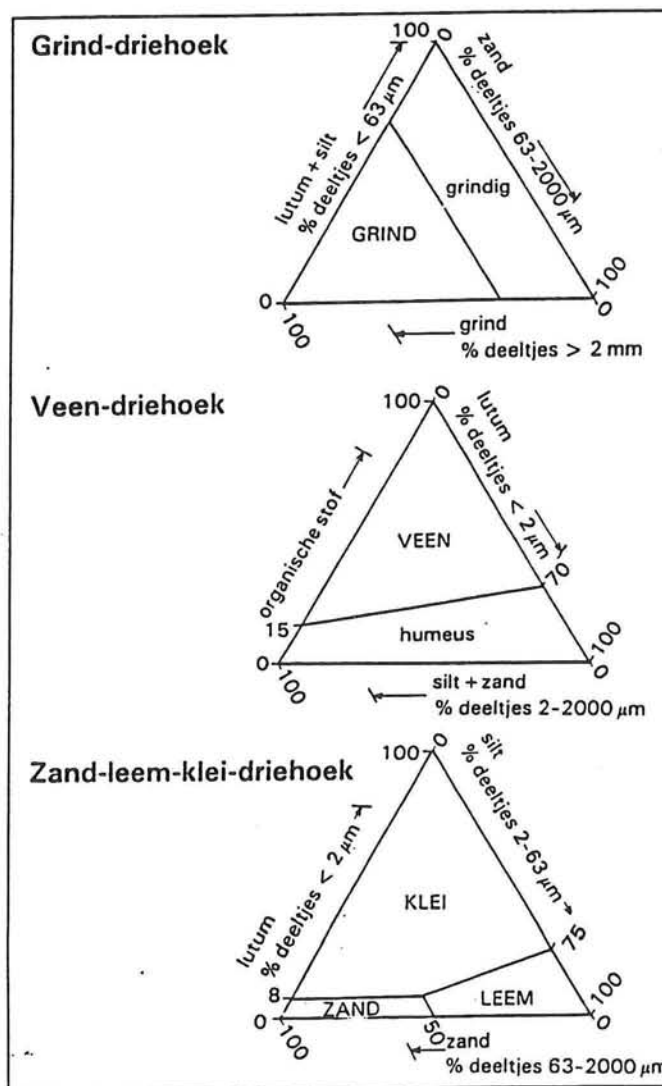
Die beslist over de hoofdnaam-classificatie als *klei*, *leem* of *zand*. De *klei* kan daarbij worden onderverdeeld als (zwak, matig, sterk of uiterst) siltig of als (zwak, matig of sterk) zandig; de *leem* als zwak of sterk zandig en het *zand* als kleiig of (zwak, matig, sterk of uiterst) siltig.

Daarmee kan een grondmonster probleemloos worden aangeduid met de hoofdnaam en naar behoefte aangevuld met toevoegingen voor de mate van "grindig", "humeus", "siltig", "zandig" en/of "kleiigheid". Bij de hantering van het classificatiesysteem moet worden bedacht dat de uitgangspunten, het gehalte organische stof en de korrelgrootteverdeling, worden verkregen met proefprocedures die van discipline tot discipline en zelfs binnen een bepaalde discipline aanmerkelijke verschillen vertonen; daardoor zullen ook verschillen ontstaan in de uitkomst en daarmee in de classificatie van het materiaal. ▲

Ir. P. Lubking
Grondmechanica Delft

Literatuur
SCW-classificatie van zand, Mededeling 38. Studiecentrum Wegenbouw, SCW (CROW) 1975.
Grond bij de naam noemen. Uitgave Studiecentrum Wegenbouw (CROW). Visser, H. Ch., 1976. Grondbeschrijving, LGM-Medelingen, deel XVII, no. 5.

LAND + WATER DECEMBER 1990



Bijlage 1.3 Methoden voor de bepaling van de dichtheid in situ

11.7.1 Het steekapparaat

Het steekapparaat bestaat uit een stalen bus, voorzien van een snijrand. Deze bus wordt door middel van een bajonetsluiting verlengd met een opzetstuk, waaraan een steel bevestigd kan zijn (zie fig. 11.15).

De steekbus wordt op de gereedgemaakte plaats gezet en rechtstandig in de grond gedrukt. *Zijdelingse bewegingen mogen niet voorkomen.* Vroeger werd de steekbus door middel van de steel in de grond gedrukt door het blad van een bulldozer. Dit is vrij kostbaar, terwijl zijdelingse beweging niet uitgesloten is.

Een goedkopere methode, waarbij zijdelingse beweging niet hoeft voor te komen, is gebruik te maken van een dommekracht, bevestigd aan een trekker. De trekkerchauffeur kan de tweede man zijn bij het nemen van de monsters. Deze methode werkt snel en men heeft vervoer voor de genomen monsters.

Bij een derde methode gebruikt men een eenvoudig, licht raamwerk, waarin een valgewicht op en neer be-

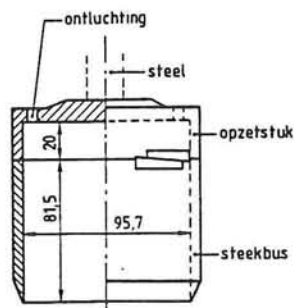


Fig. 11.15 Steekapparaat

wogen kan worden. Deze methode is in de 'Eisen' voorgeschreven.

De steekbus wordt (samen met het opzetstuk en een korte steel) onder het valgewicht in een geleiding geplaatst. De steekbus wordt nu in de grond 'geheid', zonder dat zijdelingse beweging mogelijk is. Als er grind in het zand voorkomt stuit de steekringmethode op problemen.

11.7.2 Densometer en CMC-methode

Als men de mogelijkheid heeft een monster te nemen en daarna het volume van het gat op te meten, dan heeft men niet te maken met de zijdelingse bewegingen die voorkomen bij het nemen van monsters met een steekapparaat. Ook is het voorstelbaar dat ten gevolge van wrijving van

de binnenzijde van de steekbus tijdens het in de grond drukken een extra verdichting kan plaatshebben. Dit heeft in ieder geval niet plaats bij bovengenoemde methoden.

Het bepalen van het volume doet men door het gat vol te laten lopen met een vloeistof of met zand. Bij gebruik van de densometer wordt de wand afgesloten met een rubber vlies. Bij de CMC-methode maakt men gebruik van verschillende stoffen die bij contact een 'vlies' vormen en daardoor de wand afsluiten.

DENSOMETER OF RUBBER-BALLON-METHODE

De densometer (fig. 11.16) bestaat uit een grondplaat waarop (ondersteboven) een glazen maatglas is bevestigd. Onder aan het maatglas is een zeer dunwandige rubberballon bevestigd. Het maatglas kan gevuld worden door middel van een pompje en afgesloten worden door een kraan.

Werkwijze

De werkwijze komt vrijwel overeen met die van de CMC-methode. De afsluiting van het gat gebeurt door het rubbervlies dat door middel van het pompje tegen de wand van het gat wordt gedrukt.

Het nadeel van deze methode is de kwetsbaarheid van de ballon, vooral voor scherpe steentjes.

Ook zal bij grofkorrelig materiaal (funderingen) de aansluiting tegen de wand niet ideaal zijn. Grote poriën worden echter beter afgesloten dan bij de CMC-methode.

CMC-METHODE

In grote lijnen is de CMC-methode (fig. 11.17) gelijk aan de rubberballonmethode. Het maatglas is van boven open en is voorzien van een kraan.

De hoogte van het zand vóór het ontgraven wordt vastgelegd door een taster.

Zoals eerder beschreven is, wordt de wand van het gat afgesloten door een neerslag, ontstaan bij de reactie van twee stoffen die opgelost zijn in water. Deze stoffen zijn:

- 1 een verbinding van natrium en carboxy methyl cellulose;
- 2 aluminiumsulfaat (20% aluminiumsulfaat en 80% water).

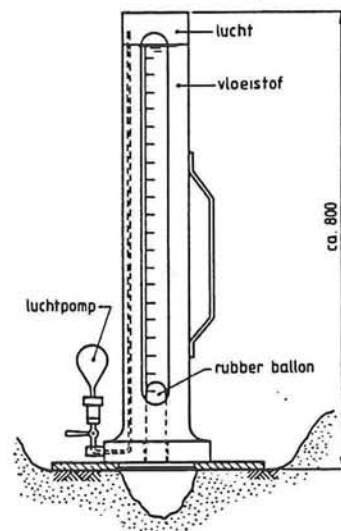
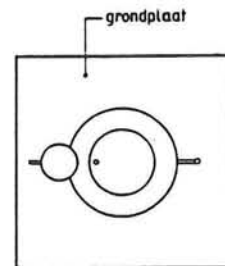
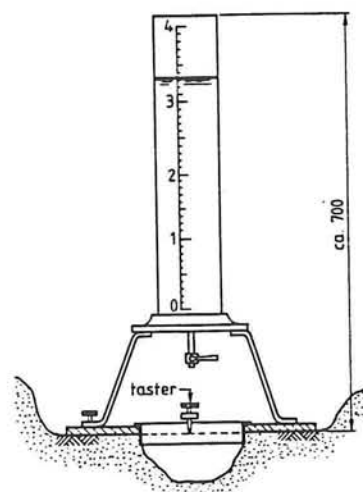
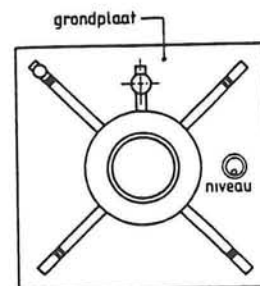


Fig. 11.16 Densometer



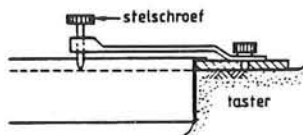


Fig. 11.17 CMC-toestel

Werkwijze

De werkwijze is als volgt:

- 1 Grondplaat plaatsen op het van tevoren waterpas gemaakte zand.
- 2 Stelschroef van de taster tot het oppervlak van het zand stellen.
- 3 Taster wegdraaien en binnen de grondplaat een stalen ring in de grond slaan ter bescherming van de rand van het bovenste deel van het gat.
- 4 Binnen de ring een gat graven en het zand in een plastic zakje doen, goed afsluiten en er een label met gegevens aan bevestigen.
- 5 Het gegraven gat bespuiten met een oplossing van aluminiumsulfaat (nevelen).
- 6 Taster terugdraaien, waardoor de hoogte vóór het graven weer bekend is. Stand van de vloeistof in het maatglas aflezen.
- 7 Kraan openen en de CMC-oplossing voorzichtig in het gat laten lopen (straal breken met pollepel) tot de vloeistof de punt van de stelschroef van de taster bereikt.
- 8 Vloeistofpeil in het maatglas aflezen en noteren.
Het verschil van de twee aflezingen is het volume van het monster (b.v. 1 500 cm³).
(De vloeistof in het gat kan na afloop met de pollepel in het maatglas teruggedaan worden.)

Het blijkt dat de reactie tussen de stoffen zo snel is dat het verlies in het zand geheel te verwaarlozen is.

ZANDMETHODE

In Engeland wordt een andere methode toegepast. De methode komt overeen met de CMC-methode; het materiaal waarmee het gat gevuld wordt is echter volkomen droog zand.

Opdat er geen verschil zal zijn tussen de volumieke massa in de houder en (na het vullen) in het gegraven gat, wordt een speciaal zand gebruikt, voornamelijk wat de korrelgrootte betreft.

11.9 Nucleair verdichtingsonderzoek

De nieuwste methode om de dichtheid van materiaal in het werk te meten (zand, stabilisatielagen, wegdekken) gaat uit van de mate van doordringbaarheid van een materiaal voor γ -stralen of voor neutronenstralen.

Men maakt gebruik van een stralingsbron van radio-actief materiaal. Met γ -stralen, wordt de dichtheid gemeten, deze kan bijvoorbeeld gegeven worden in g/cm³, dus de volumieke massa.

Met neutronen meet men de hoeveelheid waterstof; hiermee kan men het vochtgehalte bepalen of de hoeveelheid bitumen in een mengsel. Om een goede betrouwbaarheid van de apparatuur te verkrijgen is het nodig de uitkomsten te refereren aan die van het proctoronderzoek.

Men past de volgende twee methoden toe:

- 1 de doorstralingsmethode;
- 2 de verstrooiingsmethode.

Bij de *doorstralingsmethode* (fig. 11.18) zijn de stralingsbron en de ontvanger in afzonderlijke buizen ondergebracht. De onderlinge afstand is een vast gegeven. De buizen worden van tevoren in het zand of in de fundering gebracht, daarna brengt men de stralingsbron en de ontvanger aan.

Ook is mogelijk dat alleen de stralingsbron in een buis in het te meten materiaal wordt gebracht. De ontvanger bevindt zich dan in het toestel boven op het materiaal. Dit is de meest voorkomende methode.

De doorstralingsmethode wordt ook toegepast bij het meten van de dichtheid van het zand/watermengsel in de zuigbuis van een zandzuiger. Samen met de stroomsnelheid is daaruit de hoeveelheid zand te bepalen die per tijdseenheid wordt opgezogen.

Bij de *verstrooiingsmethode* (fig. 11.19) zijn de stralingsbron en de ontvanger in één huis ondergebracht. De stralingsbron zendt stralen uit naar alle kanten (naar boven worden ze afgeschermd). Een gedeelte hiervan wordt opgevangen door de ontvanger. De intensiteit van de straling is een maat voor de verdichting. Het is noodzakelijk dat het toestel goed vlak tegen het oppervlak van het te onderzoeken materiaal ligt.

De doorstralingsmethode is nauwkeuriger dan de verstrooiingsmethode en kan op verschillende diepten gebruikt worden.

De verstrooiingsmethode werkt sneller.

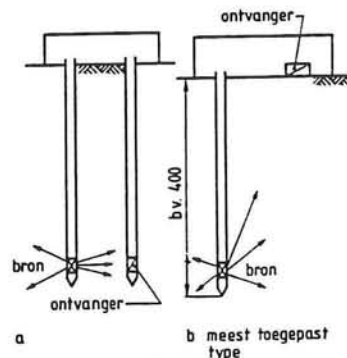


Fig. 11.18 Doorstralingsmethode

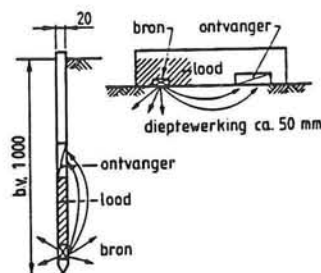
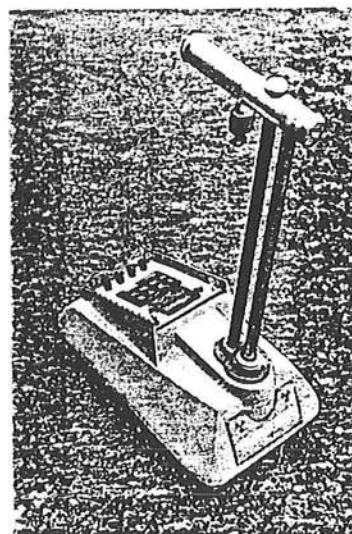


Fig. 11.19 Verstrooiingsmethode

Fig. 11.20 Nucleair meetapparaat

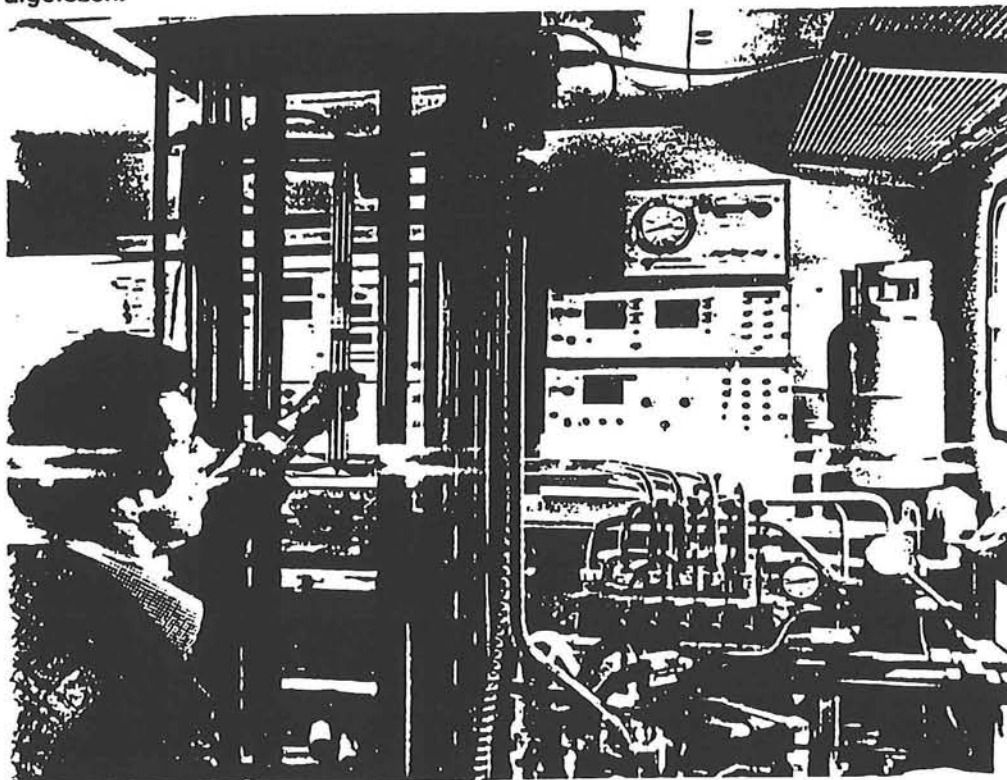


Bijlage 1.4 Dichtheidsmetingen in het terrein

Voor de meting van de dichtheid van oppervlaktelagen zijn verschillende methoden beschikbaar, waarvan er één is geïllustreerd op de volgende pagina. Deze methoden worden echter in dit informatieblad verder buiten beschouwing gelaten. Het bepalen van de dichtheid van de dieper gelegen lagen met behulp van metingen aan monsters is minder nauwkeurig, omdat het steken van ongeroerde zandmonsters zonder dat de dichtheid verandert, praktisch onmogelijk is. In verband hiermee wordt de dichtheid ter plaatse gemeten. Dit kan in principe met een tweetal meetmethoden geschieden, te weten de elektrische en de nucleaire dichtheidsmeting.

1. Elektrische dichtheidsmeting

Door het Laboratorium voor Grondmechanica is apparatuur ontwikkeld om het poriëngehalte van met water verzadigd zand in het terrein als functie van de diepte te kunnen vaststellen. De apparatuur kan zowel vanaf land als vanaf water met normale sondeerapparaten in de grond worden gebracht. De bijbehorende elektronische meetinstrumenten zijn batterij-gevoed en ondergebracht in handzame kasten. De toegepaste meetmethode berust op het feit dat de zandkorrels uit elektrisch niet-geleidend materiaal bestaan, terwijl het poriënwater wel elektrisch geleidend is. De eigenlijke meting geschiedt dan ook in twee fasen. In de eerste fase wordt de specifieke elektrische weerstand gemeten van het totale grondmassief - korrels en poriënwater - met behulp van de zogenaamde grondsonde. Deze grondsonde bestaat uit een speciale sondeerbuis, waarin de meetelementen elektrisch geïsoleerd zijn aangebracht. Tevens is de sonde voorzien van een conus en een kleefmantel, zodat tegelijkertijd de ook in dit geval waardevolle conusweerstand en plaatselijke kleef worden geregistreerd. De sonde wordt in de grond weggedrukt en elke 0,20 m wordt de specifieke elektrische weerstand afgelezen.



Interieur meetwagen

In de tweede fase van de meting wordt door middel van de zogenaamde watersonde de specifieke elektrische weerstand van het poriënwater bepaald. De watersonde bevat een meetcel die via een filter kan worden volgezogen met een kleine hoeveelheid poriënwater, waarna de specifieke elektrische weerstand van dit water wordt gemeten. Deze meting wordt op verschillende diepten uitgevoerd.

Het poriëngehalte kan worden afgeleid uit het quotiënt van de beide gemeten specifieke elektrische weerstanden. Een theoretische afleiding van het verband is praktisch niet mogelijk, daar een zandmassa bestaat uit korrels van verschillende grootte en vorm, die niet regelmatig gerangschikt zijn. De gevraagde betrekking wordt daarom in het laboratorium vastgesteld, in de vorm van een ijklijn, door middel van proeven op monsters uit het onderzochte zandpakket. Daartoe wordt in een uit isolerend materiaal vervaardigde cilinder een met water verzadigd zandmonster opgebouwd met een bekend poriëngehalte. Dan kan zowel de specifieke elektrische weerstand van het verzadigde zand als die van het poriënwater worden gemeten. Deze proef wordt bij verschillende poriëngehalten van een monster herhaald. Na ijkking van een aantal monsters uit het onderzochte gebied wordt een gemiddelde ijklijn vastgesteld.

Het Laboratorium voor Grondmechanica beschikt over apparatuur, waarmee zowel bij verzadigde als bij onverzadigde grond langs nucleaire weg het poriëngehalte als functie van de diepte kan worden bepaald.

De hiertoe gevolgde werkwijze is, dat met sondeerapparatuur een meetbuis in de grond wordt gedrukt. Vervolgens wordt in de buis een meetlichaam neergelaten, opgebouwd uit een gammastraler, een neutronenstraler en een kristal. Met behulp van het kristal en de daarbij behorende elektronika wordt de intensiteit van de door de grond verstrooide en verzwakte straling gemeten.

De intensiteit van de gemeten gamma-straling is bepalend voor de volumieke massa van de grond.

Uit de intensiteit van de gemeten neutronenstraling kan de hoeveelheid water in de grond worden afgeleid, immers hoe meer water zich in de grond bevindt des te meer energie van de uitgezonden neutronen bij botsing met de even zware waterstof-atomen van het poriënwater wordt geabsorbeerd. Uit de combinatie van de bekende soortelijke massa, de gemeten volumieke massa en de hoeveelheid water is het poriëngehalte te bepalen, ook bij niet verzadigde grond.

Evenals bij de elektrische methode wordt bij deze methode het verband tussen stralingsintensiteit en poriëngehalte in de vorm van een ijklijn bepaald.

Doordat een nauwkeurige meting een dunwandige meetbuis vraagt, is bij de nucleaire methode de bereikbare diepte beperkt. De bereikbare diepte zal echter veelal voldoende zijn om in ieder geval de onverzadigde zone, die met de hiervoor genoemde elektrische methode niet verkend kan worden, te onderzoeken.



Nucleaire dichtheidsmeting
oppervlaktelagen

Dichtheidsmetingen in het laboratorium

In het terrein uitgevoerde dichtheidsmetingen verschaffen gegevens over het poriëngehalte van de verschillende grondlagen. Bij zandformaties kan dit poriëngehalte worden vergeleken met de minimaal en maximaal mogelijke dichtheid van het betreffende zand. Hierdoor krijgt men een indruk in hoeverre het zand los- of vastgepakt is. De gevoeligheid van zand voor zettingsvloeiingen kan uitsluitend worden beoordeeld indien men kennis heeft van de in het terrein aanwezige pakkingsdichtheid van het zand enerzijds en anderzijds, ter vergelijking, de relatieve en de kritieke dichtheid. In het algemeen kan men stellen dat hoe losser het zand is gepakt des te meer gevaar bestaat voor evenwichtsverlies ten gevolge van het optreden van zettingsvloeiingen.

1. Minimale en maximale dichtheid

In het laboratorium wordt proefondervindelijk vastgesteld welke minimale en maximale dichtheid bij een bepaalde zandsoort mogelijk is. Hiertoe wordt eerst het zandmonster kunstmatig zo losgepakt mogelijk in een cilinder opgebouwd en daarna door middel van trillen verdicht.

Bepaling van de scherppte van zand met de uitstroomtrechter

door Ir. F. A. Verhoeven en Ir. R. H. Volders

1. Inleiding

De 'scherppte' van zand is nog steeds een miskende grootheid. De oorzaak daarvan moet vermoedelijk worden gezocht in de subjectiviteit van de bestaande methoden om de scherppte van zand te bepalen. De verschillende methoden die in de literatuur bekend staan, bepalen in de meeste gevallen telkens een andere 'scherppte'. Weliswaar berusten de meeste op hetzelfde principe, namelijk de vergelijking van de zandkorrels met standaardscherpten op foto's, maar de interpretatie daarvan is erg persoonsafhankelijk. Bovendien zijn deze bepalingswijzen bijzonder arbeidsintensief.

In dit artikel wordt de aandacht gevestigd op een andere methode, die niet alleen eenvoudig is uit te voeren, maar waarvan bovendien de resultaten niet afhankelijk zijn van de persoon die de testen uitvoert. De 'scherppte' van zand kan daardoor eenduidig worden bepaald.

De methode is gebaseerd op de toepassing van een standaardtrechter, waarin een bepaalde hoeveelheid droog zand wordt gedeponeerd, terwijl de uitstroomopening nog gesloten is. Als vervolgens de trechtermond wordt geopend en het zand gaat uitstromen, dan is de tijd die daarbij verstrijkt, een maat voor de 'scherppte'. De uitstroomtijd van afgerond zand is kort, terwijl hoekig zand een langere uitstroomtijd behoeft.

Na een beschouwing over de bestaande scherpptemethoden worden in het onderstaande artikel de testresultaten met de uitstroomtrechter beschreven. Daarbij zal ook summier worden ingegaan op het belang van de 'scherppte' als zandeigenschap.

2. Bestaande methoden

Bij de meeste bestaande methoden worden de te onderzoeken zandkor-

rels met behulp van de microscoop vergeleken met standaardscherpten, die op foto's zijn weergegeven. Aangezien de 'scherppte' van zand geen eenduidig gedefiniëerd begrip

is, kan het, theoretisch gezien, voorkomen dat een bepaalde zandsoort volgens de ene methode als hoekig aangeduid wordt, terwijl een andere methode dit zand als afgerond betitelt. Dit kan bijvoorbeeld verklaard worden uit het feit dat de ene methode meer aandacht schenkt aan de macro belijning van de korrel, terwijl de andere methode meer op de micro belijning gebaseerd is (zie figuur 1).

Thoeness [1] was één van degenen, die een scherpptebepaling met behulp van standaardfoto's ontwikkelde (figuur 2). Deze methode was in eerste instantie bedoeld voor de keuring van straatzand.

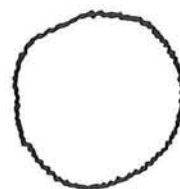
Thoeness stelde bij zijn methode voor om de scherppte te bepalen per fractie van 200 korrels.

Wadell [2] maakte als eerste onderscheid tussen de gedaante van de korrels en de afronding. Hierbij wordt onder de gedaante van een

Figuur 1.



hoekig



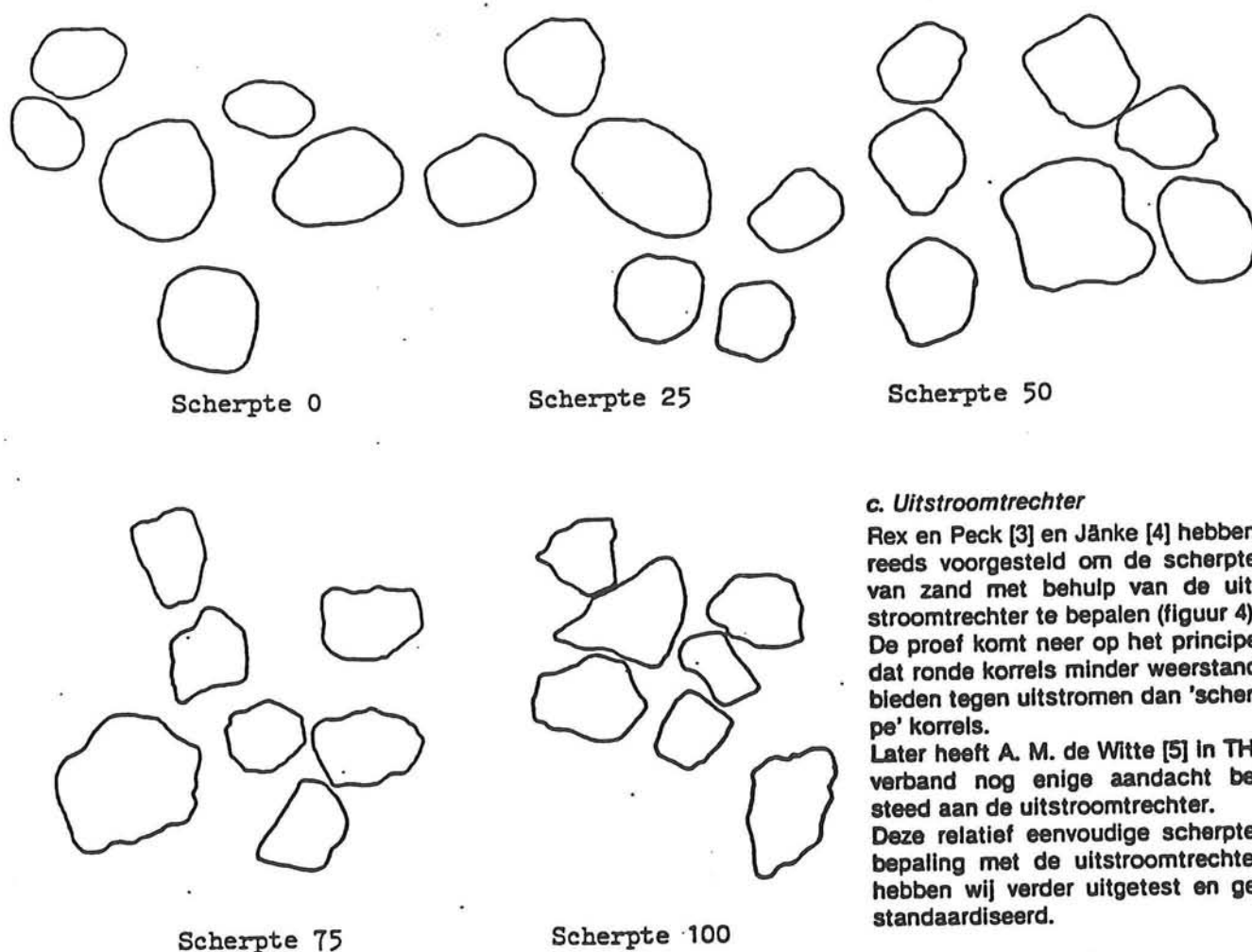
afgerond

methode A
(gebaseerd op
macro-belijning)

methode B
(gebaseerd op
micro-belijning)

afgerond

hoekig



Figuur 2. De standaardfoto's van Thoeness

korrel verstaan de omlijnung ervan als geheel gezien, terwijl met de term afronding meer wordt bedoeld op de detaileigenschap van de korrelbegrenzing.

De bepaling van de gedaante vindt hierbij plaats door vergelijking van de projectie van de korrel met een cirkel, terwijl de afronding bepaald wordt door het tellen van de hoeken van de korrel en het meten van hierbij behorende afrondingsstralen. De methoden van Thoeness en Wadell zijn slechts twee voorbeelden uit de talrijke microscopische methoden die in de literatuur worden vermeld.

Naast genoemde microscopische methoden wordt in de literatuur nog een zeer beperkt aantal andere scherptebepalingsmethoden beschreven:

a. Meting hoek van natuurlijk talud

Door zand uit een trechter op een vlakke plaat te laten stromen zal het een kegelvorm aannemen. De grootte van de hellingshoek van de kegel is onder meer een maat voor de 'scherpte'.

b. Methode Winkelmolen

Bij deze methode, die ontwikkeld is ten behoeve van de sedimentologie, wordt de zogenaamde 'rollability' gemeten. Het testapparaat bestaat uit een holle cylinder, die enkele graden heilt en kan roteren om zijn lengteas (figuur 3).

Bij deze methode wordt het zand eerst uitgezeefd in fracties, die door de cylinder rollen. De tijd, die de zandfractie nodig heeft om door de cylinder te rollen, is een maat voor de 'rollability'.

c. Uitstroomtrechter

Rex en Peck [3] en Jänke [4] hebben reeds voorgesteld om de scherpte van zand met behulp van de uitstroomtrechter te bepalen (figuur 4). De proef komt neer op het principe dat ronde korrels minder weerstand bieden tegen uitstromen dan 'scherpe' korrels.

Later heeft A. M. de Witte [5] in TH-verband nog enige aandacht besteed aan de uitstroomtrechter. Deze relatief eenvoudige scherpte-bepaling met de uitstroomtrechter hebben wij verder uitgetest en gestandaardiseerd.

3. Uitstroomtrechter

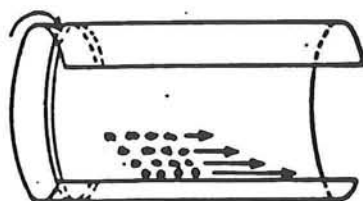
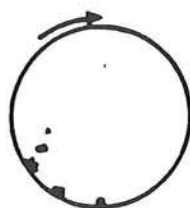
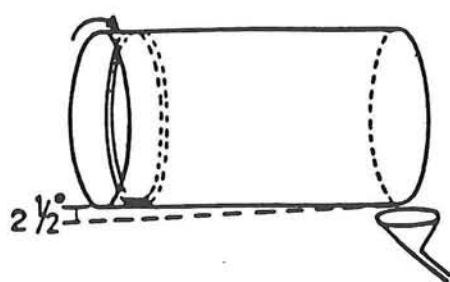
In tegenstelling tot de eerder genoemde onderzoekers, zijn wij uitgegaan van twee referentiematerialen, namelijk een uiterst rond materiaal, glasparsels, en een uiterst hoekig zand, brekerzand, dat afkomstig was uit de steenbrekerijen te Maastricht. De uitstroomtrechters die zijn gebruikt hadden de volgende uitstroomopeningen:

$$\begin{aligned} d &= 13,5 \text{ mm} \\ &= 7,9 \text{ mm} \\ &= 6,4 \text{ mm} \end{aligned}$$

Om de invloed van verschil in korrelgrootte zoveel mogelijk uit te schakelen op de uitstroomtijd, moet het zand worden uitgezeefd in fracties. Wij hebben de volgende fractieindeling aangehouden:

$$\begin{aligned} 63 \mu\text{m} &- 125 \mu\text{m} \\ 125 \mu\text{m} &- 250 \mu\text{m} \\ 250 \mu\text{m} &- 500 \mu\text{m} \\ 500 \mu\text{m} &- 1000 \mu\text{m} \\ 1000 \mu\text{m} &- 2000 \mu\text{m} \end{aligned}$$

In eerste instantie is de reproduceer-



Figuur 3. Het 'Rollability' testapparaat

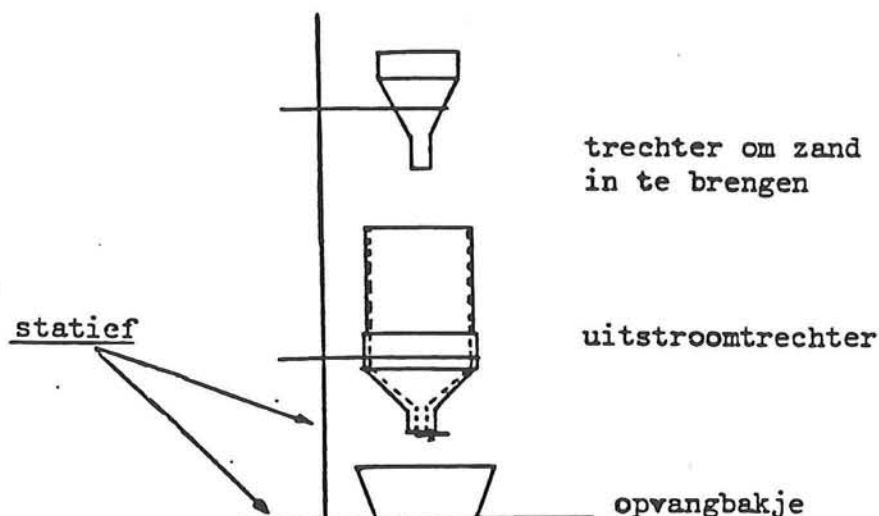
baarheid van de uitstroomtrechter voor de drie verschillende openingen getest. Hiertoe is voor iedere fractie van beide referentiematerialen, glasparsels en brekerzand, vier maal een uitstroomtest uitgevoerd voor elk van de uitstroomopeningen. De beste reproduceerbaarheid voor de verschillende fracties gaven de uitstroomopeningen zoals weergegeven in tabel 1.

In het algemeen kan gesteld worden dat de reproduceerbaarheid zeer goed is, terwijl bovendien bleek dat de testresultaten nagenoeg onafhankelijk zijn van de persoon (laborant), die de proef uitvoert.

Vervolgens is voor iedere fractie van beide referentiematerialen het verband tussen de uitstroomtijd en het uitstroomvolume bepaald (figuur 5). Nu wordt de lijn voor glasparsels op-

63 — 125 μm	$d = 6,4 \text{ mm}$
125 — 250 μm	$= 6,4 \text{ mm}$
250 — 500 μm	$= 6,4 \text{ mm}$
500 — 1000 μm	$= 7,9 \text{ mm}$
1000 — 2000 μm	$= 13,5 \text{ mm}$

Tabel 1



Figuur 4. De uitstroomtrechter

gevat als 0% scherp en de lijn voor brekerzand als 100% scherp.

Van een willekeurige zandsoort kan nu per fractie de uitstroomscherpte (V.V.Sf) bepaald worden door de uitstroomtijd (U_t) voor een bepaald volume (V_1) te relateren aan de uitstroomtijden van glasparsels en brekerzand voor dat gelijke volume. In formulevorm:

$$V.V.Sf = \frac{U_t - U_t \text{ glsp.}}{U_{br.z} - U_t \text{ glsp.}} \times 100\%$$

De testhoeveelheid is niet aan nauwe grenzen gebonden, aangezien deze verwerkt zit in deze scherpteformule. Als richtlijn kan een hoeveelheid van 150 gram worden genoemd. Met behulp van bovenvermelde for-

mule kan voor de verschillende fracties de scherpte worden bepaald.

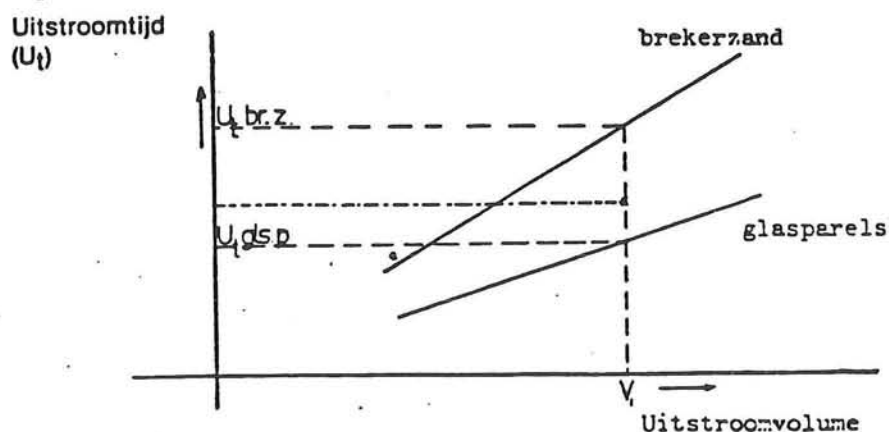
Voor de berekening van de totale scherpte (V.V.S) van een zand kan een door Jänke aangegeven formule worden gebruikt. Hierbij wordt naast de scherpte van iedere fractie (VVSf) het gewichtsaandeel van deze fractie t.o.v. het totale monster verdisconteerd en het bijbehorende specifieke oppervlak.

In formulevorm:

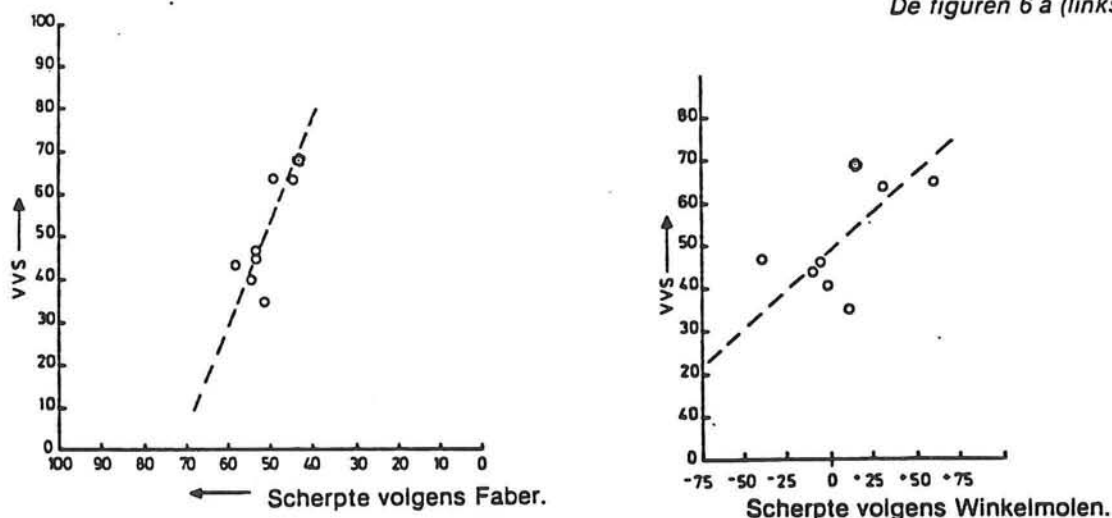
$$\frac{100 \cdot O_t}{V.V.S} = \frac{A_1 \cdot O_1}{V.V.Sf^1} + \frac{A_2 \cdot O_2}{V.V.Sf^2} + \frac{A_n \cdot O_n}{V.V.Sf^n}$$

waarin:

Figuur 5. Het verband tussen de uitstroomtijd en het uitstroomvolume



De figuren 6 a (links) en 6 b (rechts)



- O_t = specifiek oppervlak van het totale monster
V.V.S = gewenste 'scherpte' van het totale monster
A_i = gewichtsaandeel van deze fractie in procenten
O_i = specifiek oppervlak van de betreffende fractie
V.V.S._{fi} = scherpte van i^e fractie.

4. Relaties uitstroomscherpte en andere scherptebepalingsmethoden

Het is uiteraard interessant om te weten welk verband er bestaat tussen de uitstroomsterkte en andere scherptebepalingsmethoden. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van de resultaten van werkgroep F 4 van het Studietoelagen Centrum Wegenbouw (S.C.W.), die van een groot aantal Nederlandse zanden de eigenschappen heeft bepaald [6]. Binnen dit kader zijn de scherpten bepaald volgens onderstaande methoden:

- Een door het Laboratorium van Grondmechanica gebruikte methode met standaardfoto's, die door Faber [7] is geïntroduceerd,
- de methode Winkelmolen en
- de hier beschreven methode met de uitstroomtrechter.

* Een exacte proefbeschrijving van de hier, in het kort besproken, methode kan opgevraagd worden bij Eykelkamp, Nijverheidsstraat 14, 6987 EM Giesbeek. Dit bedrijf levert ook de betreffende uitstroomtrechters.

In de figuren 6a en 6b zijn de relaties tussen de uitstroomscherpte (V.V.S.) en beide andere genoemde methoden weergegeven.

Uit die figuren komt duidelijk naar voren, dat er een verband bestaat tussen de verschillende scherptemethoden, maar ook blijkt dat de afwijkingen van de relaties aanzienlijk kunnen zijn.

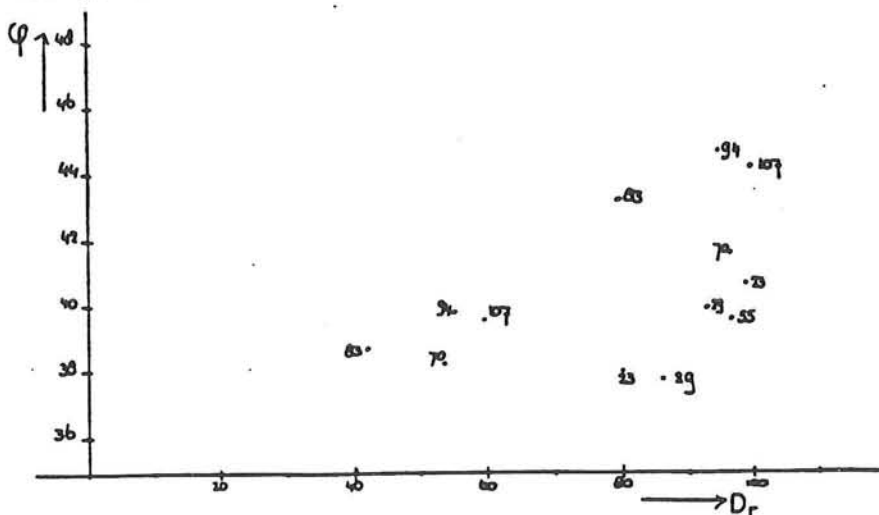
Vanzelfsprekend kan niet gesteld worden dat de ene methode beter is dan de andere. De te kiezen methode is afhankelijk van het beoogde doel. Wel echter lijkt de eenvoudige uitvoerbare uitstroomtest een zeer geschikte methode voor grondmechanische doeleinden. Dit blijkt met name uit de duidelijke relaties die er

zijn tussen de uitstroomscherpte en veel gebruikte grondmechanische grootheden zoals hoek van inwendige wrijving, maximum- en minimumdichtheden, etc.

5. Relaties tussen uitstroomscherpte en grondmechanische grootheden

Zoals reeds in de inleiding is vermeld wordt de 'scherpte' van zand veelal niet beschouwd als een basis-eigenschap ervan, zoals bij de korrelverdeling wel het geval is. Op zichzelf is dit vreemd omdat de scherpte evenals de korrelverdeling van zeer grote invloed is op het mechanisch gedrag van een zandpakket.

Figuur 7. De relatie tussen de hoek van inwendige wrijving φ en de relatieve dichtheid D_r . De bijgeschreven waarden zijn de bijbehorende uitstroomscherpten.



Dit kan het beste aangetoond worden door te wijzen op de relaties tussen de scherppte en enkele grondmechanische basisgrootheden.

Zo blijkt de 'scherppte' van veel sterkere invloed op de hoek van natuurlijk talud (α) en op de hoek van inwendige wrijving (φ) dan de korrelverdeling.

In figuur 7 is globaal enige informatie af te lezen uit de invloed van de scherppte op de hoek van inwendige wrijving (φ). In deze figuur, die gebaseerd is op eigen onderzoekingen, is de hoek van inwendige wrijving (φ) uitgezet tegen de relatieve dichtheid 'Dr.'. De bijgeschreven waarden in de figuur hebben betrekking op de uitstroomscherpten. Duidelijk blijkt dat de scherpere zanden een grotere hoek van inwendige wrijving (φ) bezitten.

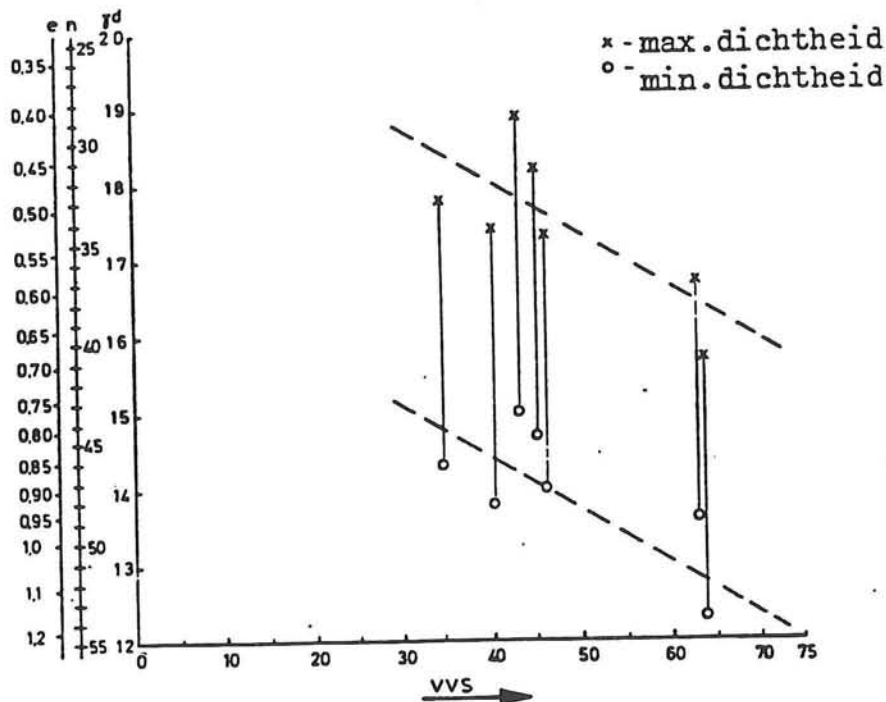
Een ander voorbeeld, waarbij de belangrijke invloed van de scherppte blijkt, vormen de dichtheden van zandpakketten. De maximum en minimum dichtheden bezitten bij 'scherpe' zanden aanzienlijk lagere waarden dan bij meer afgeronde zanden.

Deze tendens volgt uit figuur 8.

Hierin zijn de resultaten weergegeven van de eerder genoemde werkgroep F 4 van het Studie Centrum Wegenbouw.

Literatuur

1. Thoeness D., Straatzand Wegen, februari '49.
2. Wadell H., Volume, shape and



Figuur 8: Het verband tussen de uiterste dichtheden en de scherppte

roundness of quartz particles. Journal Geology, vol. 43, 1935.

3. Rex H. M., Peck R. A., A laboratory test to evaluate partides. Public Roads, dec. '56.

4. Jänke S., Verfahren zur Bestimmung des Rauigkeitsgrades von Sanden. Baumaschine und Bautechnik, okt. '61.

5. Witte A. M., Het beoordelen van de

scherppte van zand en de invloed van de scherppte op de stabiliteit. Intern T.H. rapport (Stevin-lab.).

6. Werkgroep F 4 S.C.W., Various properties of natural sands for Netherlands highway engineering. S.C.W. record 4, 1979.

7. Faber F. J., Size and shape analysis of sand grains. Int. Geol. Congress 21st session, Norden, 1960.

SPHERICAL ELEMENT BULKING MECHANISMS FOR
MODELING BLASTING INDUCED ROCK MOTION*

Dale S. Preece¹ and Lee M. Taylor²

INTRODUCTION

Accurate computer prediction of the muck pile produced by a conventional blast requires modeling of the physics that occurs during the rock motion phase of a blast. The ability to predict the motion and the subsequent muck pile can have a significant economic impact on the mining industry.

Some of the computer programs previously used to predict rock motion employed polygonal elements with corners and sides to model the rock (Cundall, 1971; Walton, 1982; Taylor, 1983). This approach allows the elements to bulk because of the corners and the aspect ratio. However, tracking the many interactions of the corners and sides of the elements is a computationally intensive process. Several other rock motion computer programs were developed that employed spherical elements, (Schamaun, 1984; Gorham-Bergeron et al, 1987) but they lacked correct bulking mechanisms or could not be vectorized for efficient execution on vector processing machines. A new spherical element code called DMC (Distinct Motion Code) (Taylor and Preece, 1989a, 1989b) has been developed this past year. DMC was designed and written to take advantage of super-computer vector processing capabilities. The efficiency has also been increased through the use of spherical elements, explicit time integration and a new contact search algorithm. When spherical elements were chosen for efficiency, some physically correct mechanisms for capturing the bulking behavior of the rock mass also had to be developed. This paper will treat several mechanisms that were developed to allow spherical elements to exhibit correct bulking behavior. The

* This work performed at Sandia National Laboratories supported by the U.S. Department of Energy under contract number DE-AC04-76DP00789.

1 Senior Member of Technical Staff
Advanced Technology Division, 6258
Sandia National Laboratories
Albuquerque, New Mexico 87185

2 Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
100 Medway St.
Providence, RI 02906 4402

SAND--89-1895C

DE90 009569

DISCLAIMER

This report was prepared as an account of work sponsored by an agency of the United States Government. Neither the United States Government nor any agency thereof, nor any of their employees, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. Reference herein to any specific commercial product, process, or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States Government or any agency thereof. The views and opinions of authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States Government or any agency thereof.

MASTER

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED

study of bulking behavior and the development of these numerical capabilities has been aided by the use of data from 48 cratering experiments. These experiments were performed in two different rock types, with two different explosives, ANFO and Emulsion, and at four different depths of burial. One depth of burial was under-buried, one was at optimal and two were over-buried. Data acquisition from the tests consisted of high speed film, SLIFER (continuous velocity of detonation measurement) as well as extensive pre- and post-test surveying of muck piles and craters. These cratering experiments were designed and carried out in cooperation with Atlas Powder Company specifically to aid in the development of the numerical prediction capabilities. The results from one of these experiments is presented in this paper for comparison with an example numerical simulation. This exercise has shown that computer modeling of a simple cratering experiment is not an easy task and that the computer model must include all of the physics involved in order to obtain accurate results.

ASPECT RATIO

The bulking or dilatation of the rock in the muck pile results from the fact that the rock in the muck pile does not fit together as well as it did before it was moved. The close fit of the in-situ rock is destroyed during motion by rocks with aspect ratio tumbling (rotating) into a random orientation as they land. This behavior has been difficult to capture with spherical element motion codes because a sphere has an aspect ratio of one and rotation has no effect on the volume it occupies.

Introduction of aspect ratio into DMC is accomplished by kinematically tying several spheres together. The kinematic tie is done by summing all the forces and moments on the group of tied spheres during a time step and using that information to determine the linear motion of and the rotation about the center-of-gravity (cg) of the group. After the motion of the "cg" is determined, the motion of the spheres tied to the group can be determined (Taylor and Preece, 1989a, 1989b). Calculation of the motion of tied particles is a vectorized process and requires only slightly more computation time than single spheres. An aspect ratio of two can be obtained by tying two spheres together and an aspect ratio of three can be obtained by tying three spheres together in a line. Currently DMC only has the capability for an aspect ratio of two.

Bitlage 1.6 Distinct Motion Code

FRICTION

A Coulomb friction law, where the friction force is proportional to normal force, is used in DMC. Interparticle friction is specified using the friction angle of the material which is easily obtained by triaxial or direct shear testing. The friction angle is the angle between the normal and shear force during contact between two spheres. It also represents the angle of repose (from horizontal) of the material when the cohesion is zero. The normal force used in the friction law is the force required to eliminate all overlap between spheres during the next time step. The friction force is limited by a term called "stick friction" which is the friction force required to eliminate all tangential relative velocity between the two colliding spheres. If the friction force is not limited by the stick friction, energy will be added to the system.

Interparticle friction exists in nature and is an essential element in rock bulking. A rock motion simulation using spherical elements and no friction would not exhibit any bulking since the particles would seek a close-packed arrangement. Therefore, friction is an important part of any rock motion simulation using spherical elements.

ROTATION-INDUCED DILATATION

Dilatation of muck during rock motion is directly related to the rotation of the particles as they move. A method has been developed to include this particular mechanism in the behavior of spherical elements. Figure 1 shows that spheres actually represent cubes of material where the sphere is circumscribed inside the cube. If the cube rotates by 45 degrees, the effective volume occupied by the sphere is more accurately represented by a sphere scribed on the outside of the cube. This can be accomplished by expanding the radius of the sphere, according to the rotation, up to the point where it is scribed on the outside of the sphere. Spheres in close proximity to each other are not allowed to have their radii expanded so they overlap each other by an uncontrolled amount, as this would add energy to the system. A small amount of overlap, as specified by the user, is allowed and has an important influence on the motion of the spheres, as will be discussed in the example problem. The mass and rotational-moment-of-inertia of each sphere are determined before the motion calculation is begun so these

quantities are not effected by the increased radius. What is effected is the sphere's calculated contact with other spheres. The calculation of rotation-induced dilatation requires one more pass through the list of spheres at each time step and thus slightly reduces the computational efficiency.

Within DMC, rotation-induced dilatation is handled by computing a radius scale factor which is multiplied by the radius of the sphere during the contact search. The maximum radius scale factor for two dimensions is $1/\cos(45)$ or the square root of two. If one considers that we are actually modeling three dimensions then it makes some sense to account for the bulking in the third dimension and use a maximum radius scale factor of the square root of three. In the calculations included in the paper the maximum radius scale factor chosen was the square root of three.

Since most rock particles are not totally angular, a method has been developed to allow the user to reduce the maximum radius by rounding the corners of the cube. Figure 2 shows the definition of the variable sphericity. A sphericity of one implies that "r" equals "R" and no radius expansion will occur during rotation of the sphere. A sphericity of zero implies that "r" is zero and that the effective radius can expand to the corner of the cube. The user can specify the sphericity to be any real number between zero and one. It is hoped that sphericity can be correlated to rock type.

EXAMPLE PROBLEM

Figure 3 shows a spherical element model of a crater experiment with spheres that represent unfragmented material drawn with an "x" through their centers. These spheres are not allowed to move (frozen) during the calculation. Open spheres represent fragmented material and these are unfrozen, or allowed to move during the calculation. A vertical symmetry plane exists down the center of the explosive so only the right half is modeled. Explosive loading of the model is treated using forces on the spheres at the top of the explosive. These forces decrease linearly with time to zero at 4.0 milliseconds. The magnitude of the forces was chosen by correlation with field data. The explosive is one meter in height, 0.15 meters in diameter and centered at three meters below the surface. The fragmentation status (Preece and Taylor, 1989) of each sphere is transferred automatically from a PRONTO-2D (Taylor and

Flanagan, 1987) finite element calculation of the detonation and transient stress wave propagation (Thorne, Houmert and Brown, 1990). Three different calculations using the same spherical element model are presented here to show the effects of aspect ratio and rotation-induced dilatation on both the final muck pile shape and the nature of the rock motion. This model has a total of 2292 spheres with 1094 being free to move (fragmented) and 1198 being frozen (unfragmented). The three calculations each required approximately 1500 CPU seconds on a Cray XMP/416 computer.

Figure 4 shows a DMC calculation with neither aspect ratio nor rotation-induced dilatation. This calculation shows a significant lateral component to the motion that was not observed in the field experiments. The field experiments, especially at optimal depth of burial, showed mostly vertical movement of the material and thus produced a muck pile on top of the crater. The calculation shown in Figure 4 shows a preference for motion at the edges of the crater and at approximately 30 degrees from vertical. This results partly from the close-packed array of spheres where a direct sphere-to-sphere contact exists at 30 degrees from vertical from the top of the blastwell along the edge of the crater to the surface. The rock motion shown in Figure 4 does not produce any bulking of the material, and the motion of the material as it exits the crater is completely contrary to field data.

Figure 5 shows a DMC calculation with rotation-induced dilatation but with no aspect ratio. The pattern of the motion is similar to that obtained when there is no rotation-induced dilatation (Figure 4), but there is slightly less lateral motion. The bulking of the material is improved significantly over that shown in Figure 4 and a muckpile is actually obtained. Comparison of this calculated muck pile with field data is treated later. Even though a muck pile is formed, the motion observed in this calculation is not consistent with the motion observed in the field using high frame-rate cameras.

Figure 6 shows a DMC calculation with both rotation-induced dilatation and an aspect ratio of two. Of the 1094 fragmented (free) spheres, there are 535 pairs of spheres and 24 single spheres. The tying algorithm works by row and leaves a single sphere if the row contains an odd number of spheres. Rotation-induced dilatation together with aspect ratio has an interesting effect on the characteristics of the motion. In this calculation, the dilatation of the material early on, while it

is still in the crater, causes the velocity vectors to rotate toward vertical, which results in more vertical motion of the material for this depth of burial. This behavior has also been observed by other computer modelers (Butkovich, Walton and Heuze, 1988). The preference for motion along a line 30 degrees from vertical is eliminated because spheres are kinematically tied to their neighbors and thus are constrained from transmitting load from sphere to sphere along the edge of the crater. The motion pattern is significantly different from that shown in the previous two examples and much more like that observed in the field.

Comparison of the three calculated muck pile shapes with those measured in the field are shown in Figure 7. The muck pile shown was produced from a crater experiment using an Emulsion explosive and the same geometry shown in Figure 3 as well as in Thorne, Houmert and Brown, 1990. Figure 7 shows quite vividly that a calculation using spherical elements, without any bulking mechanisms except friction, will give a completely erroneous final muck pile shape. The shape produced in this case is, in fact, a crater instead of a muck pile. The best results in Figure 7, in terms of correlating with field data, comes from the calculation using tied spheres (aspect ratio of two) and rotation-induced dilatation. This calculation also compares the best with high speed film of the experiment where the motion was mostly vertical.

There are two areas where the calculated and measured muck piles differ. The first is the height of the muck pile which seems to be related to the angle of repose or the friction angle of the material. The calculated muck pile is not quite as high as the measured muck pile and the angle of repose of the material is slightly less for the calculation than that seen in the experiment. The second major difference is the bulking of the material where the calculated bulking from DMC is slightly higher because the muck is spread over a larger area even though the calculated height is slightly lower. The difference in muck pile height and angle of repose indicates that we are missing something related to the treatment of material friction. The present architecture of DMC makes it impossible to use a friction angle higher than 45 degrees. This may need to be changed in order to obtain more realistic results.

The motion calculated using tied spheres and rotation-induced dilatation has more lateral motion than that revealed in the high speed motion pictures, even though it is much

closer than the other two calculations presented here. There could be several mechanisms contributing to this difference. First, the granite formation in which we were working had a vertical foliation associated with the axial plane of a fold. High speed film of several experiments showed parting along vertical planes as the motion began. This could have contributed to the vertical motion. Second, we are currently treating the gas pressure in a very simple manner. A more sophisticated treatment of coupled gas flow and rock motion should influence the calculated rock motion.

It is obvious in all three calculations that some fragmented material, as shown in Figure 3, becomes trapped and does not move during any of the calculations. The criteria used in excavating craters has been to look for material that has obviously experienced some movement. Material that is fragmented but unmoved and unbulked would probably not appear to be part of the crater. It is therefore important to realize that the excavated craters in the experiments is determined by both fragmentation and rock motion.

CONCLUSIONS

A new computer program called DMC (Distinct Motion Code) has been developed for modeling the rock motion phase of a conventional blast. DMC uses spherical elements along with explicit time integration and a new contact search algorithm to make the computation more efficient. The use of spherical elements poses special problems in terms of capturing the bulking behavior of the material during rock motion. Therefore, several physically correct bulking mechanisms have been developed for spherical elements. These include aspect ratio, which is obtained by tying spheres together, friction and rotation-induced dilatation, which allows the radius of a sphere to expand with rotation.

The development of DMC and the spherical element bulking mechanisms has been guided by field data from 48 cratering experiments. The results from one of these experiments is presented in this paper. Comparison of DMC calculations with experiment shows that totally erroneous rock motion and bulk piles can be obtained unless some correct bulking mechanisms are included in the calculation. Two of the mechanisms that appear to be essential are aspect ratio and rotation-induced dilatation.

Development of DMC is continuing. Current research activities include better treatment of

coupled gas flow and rock motion as well as revisiting the friction mechanism. We hope that DMC can be developed into a valuable tool that can be used to accurately predict rock motion.

REFERENCES

- Buckovich, T. R., Walton, O. R. and Heuze, F. E., 1988.
 Insights in Cratering Phenomenology by Discrete Element Modeling, 29th U. S. Symposium on Rock Mechanics, pp 359-368, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota.
- Cundall, P. A., 1971.
 A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, Proceedings of Symposium of International Society of Rock Mechanics.
- Gorham-Bergeron, E., Kuszmaul, J. S., Bickel, T. C. and Shirley, D. L., 1987.
 Confined Volume Blasting Experiments - Description and Analysis, Second Int. Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Keystone, Colorado.
- Preece, D. S. and Taylor, L. M., 1989.
 Complete Computer Simulation of Crater Blasting Including Fragmentation and Rock Motion, Society of Explosives Engineers Research Symposium, Spring Meeting, New Orleans, Louisiana.
- Schumann, J. T., 1984.
 Methods for Predicting Rubble Motion During Blasting, Proceedings of 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Northwestern University.
- Taylor, L. M., 1983.
 BLOCKS: A Block Motion Code for Geomechanics Studies, Sandia National Laboratories, Albuquerque, SAND-82-2373.
- Taylor, L. M. and Flanagan, D. P., 1987.
 PRONTO 2D A Two-Dimensional Transient Solid Dynamics Program, Sandia National Laboratories, SAND86-0594.
- Taylor, L. M. and Preece, D. S., 1989a.
 DMC - A Rigid Body Motion Code for Determining the Interaction of Multiple Spherical Particles, Sandia National Laboratories, SAND88-3482.
- Taylor, L. M. and Preece, D. S., 1989b.
 Simulation of Blasting Induced Rock Motion Using Spherical Element Models, Proceedings of 1st U.S. Conference on Discrete Element Methods, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- B.J. Thorne, P.J. Hommert, B. Brown
 Experimental and computational investigations of the fundamental mechanisms of cratering, 3rd international symposium on rock fragmentation by blasting, Brisbane, Queensland, Australia, august 1990.
- O.R. Walton
 Explicit Particle Dynamics Model for granular Materials, numerical methods in Geomechanics, Edmonton, Alberta
 A.A. Balkema Rotterdam

Figure Captions

Figure 1: Expansion of effective sphere radius with rotation

Figure 2: Definition of sphericity

Figure 3: 2-D Spherical element model of crater experiment. Unfragmented spheres have an "X" through their centers.

Figure 4: Rock motion simulation as calculated by DMC. No aspect ratio and no rotation-induced dilatation is included. This calculation does not match experimental data.

Figure 5: Rock motion simulation as calculated by DMC. Rotation-induced dilatation is included but aspect ratio is not. This calculation does not match field data.

Figure 6: Rock motion simulation as calculated by DMC. Rotation-induced dilatation and aspect are included. This calculation is the closest match with field data.

Figure 7: Final muck pile shapes from both field data and as predicted by DMC.

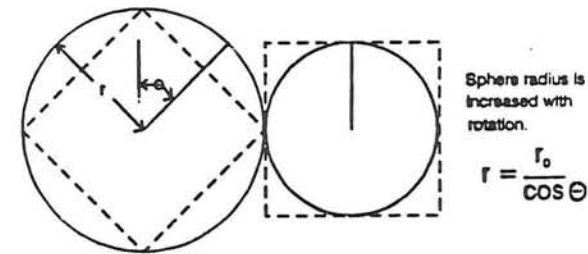
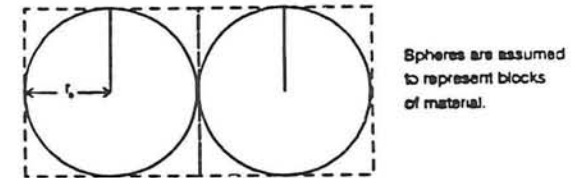


Figure 1: Expansion of Effective Sphere Radius With Rotation

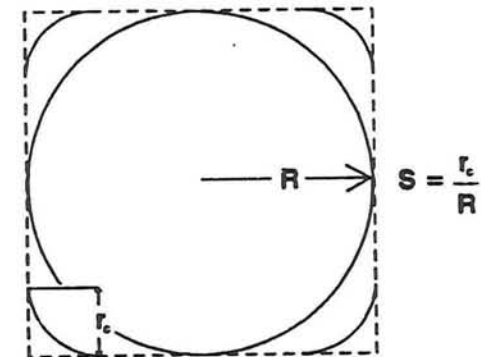


Figure 2: Definition of Sphericity

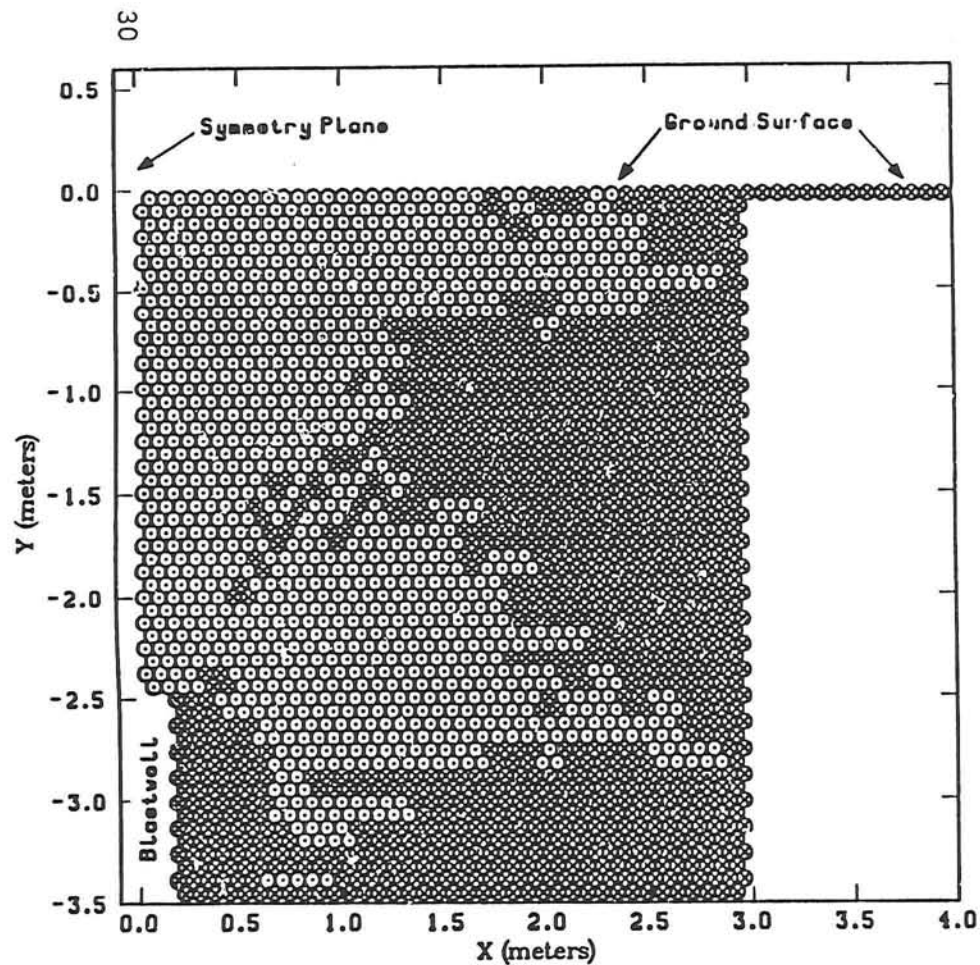


Figure 3: 2-D Spherical Element Model of Crater Experiment. Unfragmented Spheres Have an "X" at their centers.

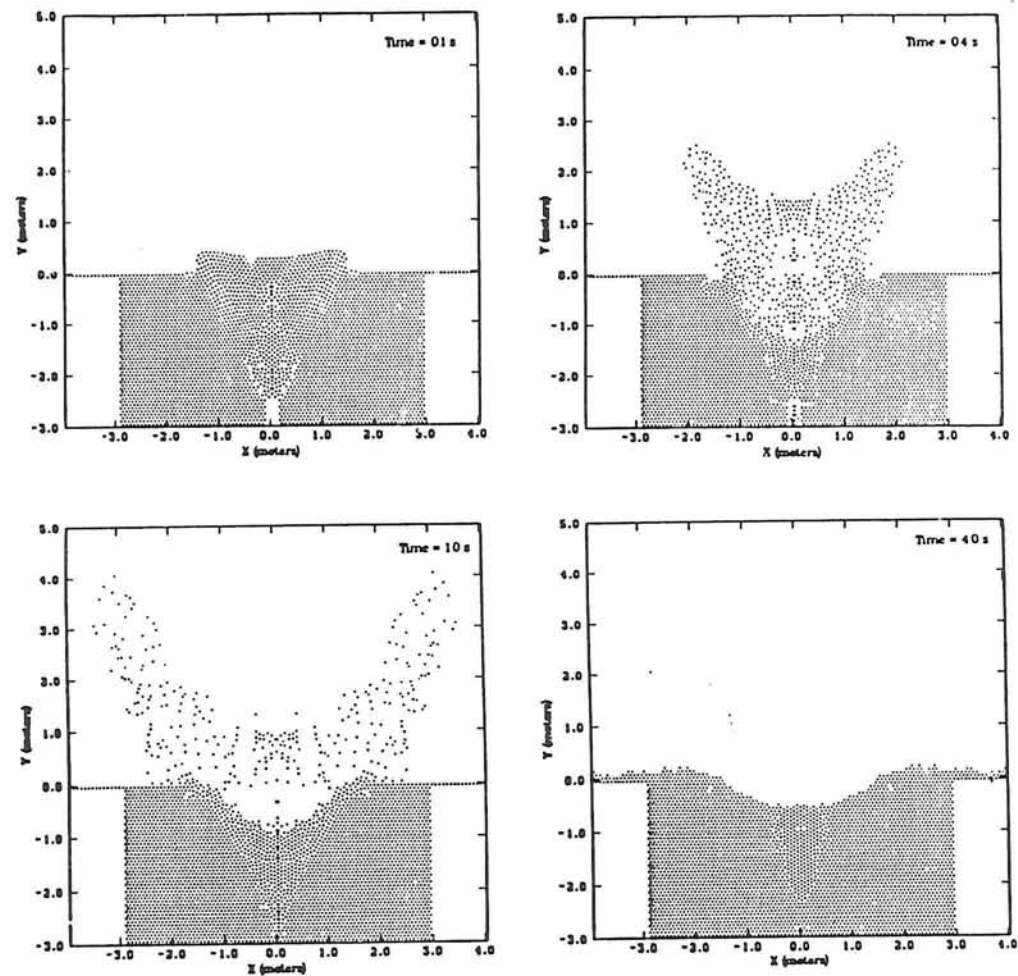


Figure 4: Rock Motion Simulation as Calculated by DMC. No Aspect Ratio and No Rotation-Induced-Dilatation is included. This calculation does not match experimental data.

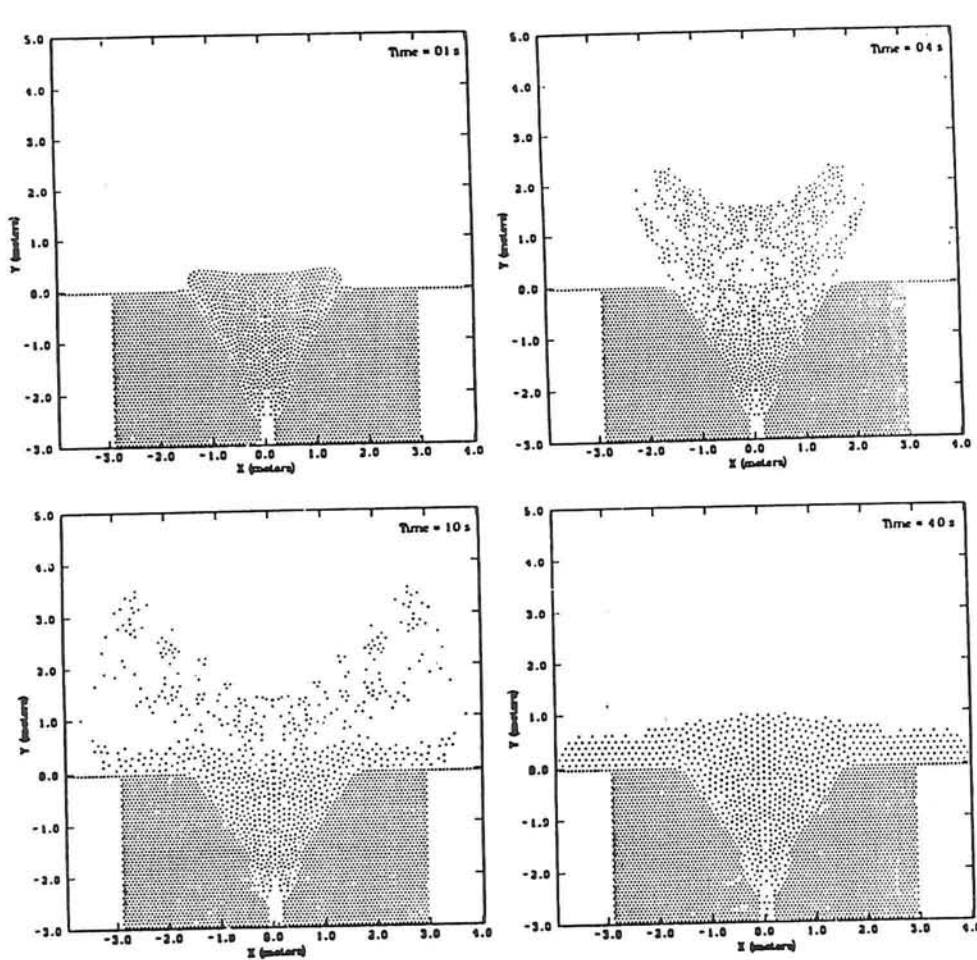


Figure 5: Rock Motion Simulation as Calculated by DMC.
Rotation-Induced-Dilatation is included but aspect ratio is not.
This calculation does not match field data.

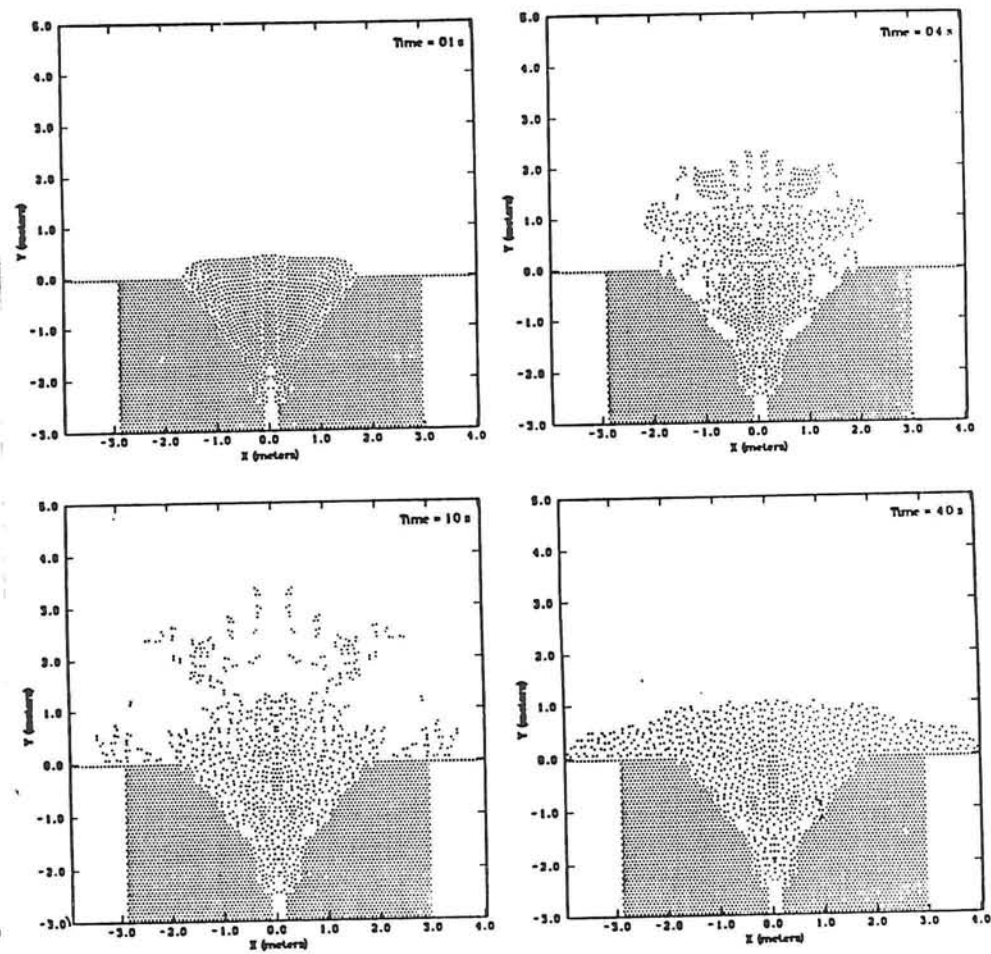
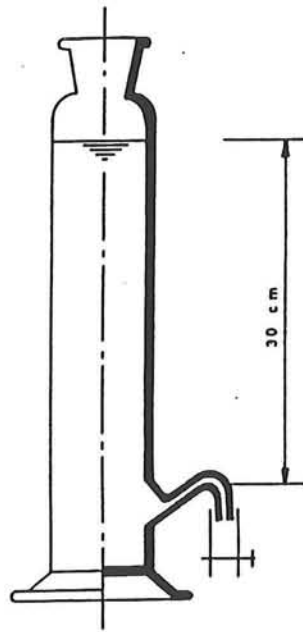


Figure 6: Rock Motion Simulation as Calculated by DMC.
Rotation-Induced-Dilatation and aspect are included.
This calculation is the closest match with field data.

CILINDER VAN ATTERBERG



Temp. °C	Bezinktijd voor d in μ m						v van water Stokes
	5	16	20	23	30	34	
10	4 h 55'	28' 8"	18' 0"	13' 42"	8' 18"	6' 17"	1,3077
11	47'	27' 22"	17' 32"	13' 20"	8' 04"	6' 07"	1,2713
12	39'	26' 35"	17' 00"	13' 00"	7' 51"	5' 57"	1,2363
13	32'	25' 53"	16' 35"	12' 39"	7' 40"	5' 48"	1,2028
14	24'	25' 12"	16' 09"	12' 18"	7' 26"	5' 38"	1,1709
15	17'	24' 30"	15' 41"	11' 59"	7' 13"	5' 28"	1,1404
16	10'	23' 55"	15' 19"	11' 40"	7' 02"	5' 19"	1,1111
17	4'	23' 20"	14' 56"	11' 22"	6' 51"	5' 11"	1,0828
18	3 h 58'	22' 42"	14' 33"	11' 06"	6' 42"	5' 04"	1,0559
19	52'	22' 10"	14' 12"	10' 50"	6' 32"	4' 57"	1,0299
20	47'	21' 38"	13' 50"	10' 34"	6' 23"	4' 50"	1,0050
21	42'	21' 09"	13' 31"	10' 18"	6' 14"	4' 43"	0,9810
22	36'	20' 38"	13' 12"	10' 04"	6' 05"	4' 36"	0,9579
23	31'	20' 10"	12' 55"	9' 50"	5' 50"	4' 40"	0,9358
24	26'	19' 40"	12' 25"	9' 36"	5' 48"	4' 24"	0,9142
25	22'	19' 14"	12' 11"	9' 24"	5' 40"	4' 18"	0,8937

Bijlage 2.1 Bepaling korrelverdelingsdiagram

Om het korrelverdelingsdiagram te verkrijgen is onderstaande methode gevolgd die bij Grondmechanica Delft in gebruik is.

- Droog een hoeveelheid zand (± 1.5 kg) gedurende minimaal 12 uur in een stoof bij 100°C .
- Zeef dit gedroogde monster over de zeven: 11.2, 8.0, 5.6, 4.0, 2.8 en 2.0 millimeter en bepaal het gewicht van de betreffende fracties.
- Maak m.b.v. een verdeelapparaat van de fractie kleiner dan 2.0 mm een representatief monster van ongeveer 30 gram.
- Bepaal het exacte gewicht van het monster en noteer dit.
- Voeg aan dit monster 100 ml peptisator en daarna 500 ml oplossing toe. De oplossing bestaat uit 5% peptisator en 95% gedemineraliseerd water. Peptisator wordt toegevoegd om de kleideeltjes chemisch van de zandkorrels los te weken.
- Zet het monster gedurende 10 minuten in een ultrasoon bad, terwijl er gelijktijdig geroerd wordt. Door het trillen en roeren worden de kleideeltjes nog beter losgemaakt.
- Slib daarna het monster af m.b.v. een cylinder van Atterberg; met deze proef kan het $16\ \mu\text{m}$ -punt bepaald worden. Vul daartoe de cylinder met het zandmonster en gedemineraliseerd water. Schud de cylinder op en laat het monster afhankelijk van de temperatuur van het water een aantal minuten bezinken. Open na de bezinktijd het kraantje en laat het nog niet bezonken mengsel afstromen. Aangezien de bezinktijd van de zandkorrels o.a. afhankelijk is van de valsnelheid en deze weer afhankelijk is van de korreldiameter, is de bezinktijd dus direkt gerelateerd aan het punt in het korrelverdelingsdiagram dat bepaald wil worden. De tabel die voor de bezinktijd gebruikt is staat op de linker bladzijde afgebeeld.
- Herhaal het afslibben, totdat het water na de bezinktijd helder genoeg is. Spoel daarna al het overgebleven zand uit de cylinder m.b.v. gedemineraliseerd water in een indampschaal. Droog het geheel ongeveer 1 uur onder een lamp ($T = 220^{\circ}\text{C}$).
- Zeef daarna het monster 10 minuten mechanisch over de volgende zeven: 2.0, 1.4, 1.0, 0.71, 0.50, 0.355, 0.250, 0.212, 0.180, 0.150, 0.106, 0.090, 0.075, 0.063, 0.053 en 0.038 mm.
- Bepaal van elke fractie het gewicht, zodat hierna het korrelverdelingsdiagram getekend kan worden.

	berkening van de Z.E.-waarden	uiterste waarden	factoren die van invloed zijn
 gewicht 37,5 totale hoogte (max. 37,5) uitgevlakte kleisuspensie tussenspiegel, ca. 10,5 hoogte onderkant voetje schoongespoeld zand en micro-zand (=silt) zandkolom	A: Z.E. opzicht (visueel) = $\frac{b}{c} \times 100$ B: Z.E. zandfactor⁴⁾ = $\frac{a}{b}$ C: Z.E. normaal = $\frac{a}{c} \times 100$	ca. 28-100^{1) 2)} 0 - 1 0 - 100	{ soort, hoeveelheid en toestand³⁾ van de kleideeltjes (secundaire mineralen) { gehalte aan micro-zand (=silt) en fijn zand (primaire mineralen, hoofdzakelijk kwarts) achter A en B genoemde invloeden tezamen
1) $\text{ca. } \frac{10,5}{37,5} \times 100 = \text{ca. } 28$ 2) Z.E. opzicht: 50-100: ca. 1% lutum (< 2µ) 40-50: ca. 1- ca. 3% lutum (< 2µ) 28-40: > ca. 3% lutum (< 2µ) 3) stadium van de fysische rijping 4) maat voor de indringing van het voetje in de zandkolom			

Bijlage 2.2 Bepaling zandequivalentwaarde

Om de ZE-waarde te bepalen is onderstaande methode gevolgd.

- Neem een niet-gedroogd monster van ongeveer 125 gram.
- Vul een doorzichtige buis met water en het monster en laat dit 10 minuten staan.
- Schud de buis in horizontale stand in een daarvoor ontwopen machine.
- Spoel met een dun buisje het fijne materiaal tussen de grovere korrels vandaan, totdat een op de buis aangegeven waterniveau bereikt wordt.
- Laat het mengsel gedurende 20 minuten ongestoord bezinken.
- Meet de hoogte van de totale kolom en van de zandkolom.
- Laat het gewicht met het voetje in de buis zakken en bepaal de hoogte van het voetje.
- Bereken hierna de klei- en zandfactor en de waarde voor de ZE-normaal.

De formules voor de kleifactor, zandfactor en ZE-normaal luiden:

$$\text{Kleifactor} = \frac{\text{Totale hoogte} - \text{Zandspiegel}}{28} * 100$$

$$\text{Zandfactor} = \frac{\text{Hoogte voetje}}{\text{Zandspiegel}}$$

$$\text{ZE-normaal} = \frac{\text{Hoogte voetje}}{\text{Totale hoogte}} * 100$$

Brekerzand:

Totale hoogte = 11.7 cm	}	kleifactor = 0.18
Zandspiegel = 11.2 cm		zandfactor = 0.91
Hoogte voetje = 10.2 cm		ZE-normaal = 87

Noordzeezand:

Totale hoogte = 11.0 cm	}	kleifactor = 0.07
Zandspiegel = 10.8 cm		zandfactor = 0.98
Hoogte voetje = 10.6 cm		ZE-normaal = 96

Zeyenzand:

Totale hoogte = 13.1 cm	}	kleifactor = 0.25
Zandspiegel = 12.4 cm		zandfactor = 0.56
Hoogte voetje = 6.9 cm		ZE-normaal = 53

Amerongenzand:

Totale hoogte = 14.6 cm	}	kleifactor = 1.50
Zandspiegel = 10.4 cm		zandfactor = 0.77
Hoogte voetje = 8.0 cm		ZE-normaal = 55

Bijlage 2.3 Bepaling V.V.S.

Brekerzand:

Fractie	1	2	3	4	5
Gewicht (gr)	383.96	307.44	217.18	178.06	90.37
Zandfractie (%)	32.62	26.12	18.45	15.13	7.68
Uitstroomgew. 1	120	120	120	120	90.35
Uitstr.tijd (s)	5.75	18.44	23.75	20.13	16.95
	5.84	18.53	23.71	20.05	16.86
	5.78	18.53	23.78	20.09	17.08
	5.76	18.41	23.76	20.07	16.82
Gemiddelde tijd1	5.78	18.48	23.75	20.09	16.93
V.V.S. _{fi}	78.86	108.09	123.42	107.01	100.89
Uitstroomgew. 2	80	80	80	80	80
Uitstr.tijd (s)	3.91	12.63	16.09	13.45	15.12
	3.89	12.56	16.09	13.48	15.21
	3.91	12.53	16.13	13.50	15.03
	3.92	12.53	16.06	13.46	15.20
Gemiddelde tijd2	3.91	12.56	16.09	13.47	15.14
Tijd2*gew1/gew2	5.86	18.84	24.14	20.21	17.10

$$O_t = 0.3262 \cdot 43.3 + 0.2612 \cdot 86.6 + 0.1845 \cdot 173 + 0.1513 \cdot 347 + 0.0768 \cdot 673$$

$$= 172.85$$

$$\frac{A_i \cdot O_i}{V.V.S._{fi}} = \frac{32.62 \cdot 43.3}{78.86} + \frac{26.12 \cdot 86.6}{108.09} + \frac{18.45 \cdot 173}{123.42} + \frac{15.13 \cdot 347}{107.01} + \frac{7.68 \cdot 673}{100.89} = 164.99$$

$$V.V.S. = \frac{100 \cdot 172.85}{164.99} = 104.8\%$$

Noordzeezand:

Fractie	1	2	3	4	5
Gewicht (gr)	21.15	152.38	736.10	399.00	33.12
Zandfractie (%)	1.57	11.36	54.86	29.74	2.47
Uitstroomgew. 1	21.15	120	120	120	33.12
Uitstr.tijd (s)	2.08	12.95	17.92	16.30	4.83
	2.10	12.81	18.02	16.40	4.85
	1.90	12.94	17.94	16.35	4.82
	2.09	12.88	17.97	16.39	4.86
Gemiddelde tijd1	2.04	12.90	17.96	16.36	4.84
V.V.S. _{fi}	205.52	39.25	56.60	55.00	56.30
Uitstroomgew. 2	21.15	80	80	80	33.12
Uitstr.tijd (s)	1.96	8.76	12.02	10.98	4.84
	2.05	8.73	12.09	10.93	4.82
	1.95	8.75	12.06	11.02	4.79
	2.07	8.78	12.02	10.96	4.77
Gemiddelde tijd2	2.00	8.76	12.05	10.97	4.81
Tijd2*gew1/gew2	2.00	13.13	18.07	16.46	4.81

$$O_t = 0.0157 * 43.3 + 0.1136 * 86.6 + 0.5486 * 173 + 0.2974 * 347 + 0.0247 * 673$$

$$= 225.25$$

$$\frac{A_i * O_i}{V.V.S._{fi}} = \frac{1.57 * 43.3}{205.52} + \frac{11.36 * 86.6}{39.25} + \frac{54.86 * 173}{56.60} + \frac{29.74 * 347}{55.00} + \frac{2.47 * 673}{56.30} = 410.24$$

$$V.V.S. = \frac{100 * 225.25}{410.24} = 54.9\%$$

Zeyenzand:

Fractie	1	2	3	4	5
Gewicht (gr)	–	0.19	0.71	135.26	936.30
Zandfractie (%)	–	0.02	0.07	12.61	87.30
Uitstroomgew. 1	–	–	0.71	120	120
Uitstr.tijd (s)			0.49	21.34	19.74
			0.47	21.56	19.66
			0.52	21.50	19.64
			0.52	21.38	19.67
Gemiddelde tijd1	–	–	0.50	21.45	19.68
V.V.S. _{fi}	–	–	167.50	126.06	72.83
Uitstroomgew. 2	–	–	0.71	80	80
Uitstr.tijd (s)			0.58	14.14	13.16
			0.51	14.32	12.95
			0.51	14.23	13.33
			0.46	14.31	13.22
Gemiddelde tijd2	–	–	0.52	14.25	13.17
Tijd2*gew1/gew2	–	–	0.52	21.38	19.75

$$O_t = 0.0007*173 + 0.1261*347 + 0.8730*673 = 631.29$$

$$\frac{A_i * O_i}{V.V.S._{fi}} = \frac{0.07*173}{167.50} + \frac{12.61*347}{126.06} + \frac{87.30*673}{72.83} = 841.50$$

$$V.V.S. = \frac{100*631.29}{841.50} = 75.0\%$$

Amerongenzand:

Fractie	1	2	3	4	5
Gewicht (gr)	0.91	16.88	373.91	766.50	132.56
Zandfractie (%)	0.07	1.31	28.97	59.38	10.27
Uitstroomgew. 1	-	16.88	120	120	120
Uitstr.tijd (s)		2.00	18.08	17.36	21.44
		2.00	18.11	17.40	21.50
		1.99	18.08	17.38	21.43
		2.01	18.12	17.39	21.12
Gemiddelde tijd1	-	2.00	18.10	17.38	21.37
V.V.S. _{fi}	-	44.37	58.21	69.24	89.86
Uitstroomgew. 2	-	16.88	80	80	80
Uitstr.tijd (s)		1.92	12.10	11.66	13.82
		1.98	12.13	11.68	13.61
		1.98	12.13	11.67	13.84
		1.95	12.16	11.64	13.69
Gemiddelde tijd2	-	1.96	12.13	11.66	13.74
Tijd2*gew1/gew2	-	1.96	18.20	17.49	20.61

$$O_t = 0.0007 * 43.3 + 0.0131 * 86.6 + 0.2897 * 173 + 0.5938 * 347 + 0.1027 * 673$$

$$= 326.45$$

$$\frac{A_i * O_i}{V.V.S._{fi}} = \frac{1.31 * 86.6}{44.37} + \frac{28.97 * 173}{58.21} + \frac{59.38 * 347}{69.24} + \frac{10.27 * 673}{89.68}$$

$$= 463.31$$

$$V.V.S. = \frac{100 * 326.45}{463.31} = 70.4\%$$

Bijlage 2.4 Bepaling percentage hangwater

De bepaling van het percentage hangwater is volgens onderstaande methode uitgevoerd.

- Neem een lege cylinder van Atterberg en weeg deze (= Gewicht cylinder droog).
- Vul de cylinder met filtergrind tot 2.5 cm boven de uitstroomopening.
- Vul water bij tot dit zelfde punt en plaats op het grind een filterpapiertje.
- Voeg eerst ongeveer 3 cm water toe en daarna 200 gr droog zand. Spoel de binnenkant van de cylinder schoon.
- Open daarna het kraantje en wacht tot er geen water meer uitstroomt.
- Sluit het kraantje en weeg de cylinder opnieuw (= Gewicht cylinder eind).
- Bereken het gewicht van het water in het zand (= Gewicht water) door van het 'Gewicht cylinder eind' het 'Gewicht cylinder droog' en de 200 gr zand af te trekken. Het percentage hangwater wordt tenslotte berekend door het 'Gewicht water' te delen door de 200 gr zand. Zie voor deze berekening de onderstaande tabel.

Deze proef is voor de vier zandsoorten drie keer uitgevoerd. Bij Zeyenzand is de proef echter zes keer uitgevoerd, maar zijn er slechts twee geslaagde resultaten. Dit kwam omdat het zand tussen het filterpapiertje en de binnenkant van de cylinder stroomde, zodat de proef mislukte. Achter de zandsoort staat de gemiddelde waarde van het percentage hangwater.

Brekerzand: 17.4%

Gewicht cilinder eind (gr)	1327.3	1357.5	1304.3
Gewicht cilinder droog (gr)	1091.1	1122.0	1071.4
Gewicht droog zand (gr)	200.0	200.0	200.0
Gewicht water (gr)	36.2	35.5	32.9
Percentage hangwater (%)	18.1	17.8	16.5

Noordzeezand: 26.6%

Gewicht cilinder eind (gr)	1355.9	1307.3	1314.2
Gewicht cilinder droog (gr)	1099.8	1055.1	1062.9
Gewicht droog zand (gr)	200.0	200.0	200.0
Gewicht water (gr)	56.1	52.2	51.3
Percentage hangwater (%)	28.1	26.1	25.7

Zeyenzand: 31.7%

Gewicht cilinder eind (gr)	1391.1	1338.2	1304.3
Gewicht cilinder droog (gr)	1127.7	1074.8	1071.4
Gewicht droog zand (gr)	200.0	200.0	200.0
Gewicht water (gr)	63.4	63.4	32.9
Percentage hangwater (%)	31.7	31.7	16.5

Amerongenzand: 28.3%

Gewicht cilinder eind (gr)	1545.1	1320.6	1342.2
Gewicht cilinder droog (gr)	1292.2	1062.9	1083.0
Gewicht droog zand (gr)	200.0	200.0	200.0
Gewicht water (gr)	52.9	57.7	59.2
Percentage hangwater (%)	26.5	28.9	29.6

Bijlage 2.5 Bepaling hoek van natuurlijk talud

Per zandsoort is tien keer de hoek van het natuurlijk talud bepaald. De gemiddelde waarde staat in de onderste rij van de tabel aangegeven.

BR:	NZ:	ZE:	AM:
34°	30°	34°	34°
33°	30°	34°	31°
33°	31°	33°	32°
34°	30°	32°	32°
33°	31°	33°	34°
33°	30°	33°	33°
33°	31°	32°	32°
33°	29°	33°	34°
33°	30°	33°	31°
34°	30°	33°	32°
33.3°	30.2°	33.0°	32.5°



AMERICAN NATIONAL
STANDARD

ANSI/ASTM D 2049 - 69¹

Standard Test Method for RELATIVE DENSITY OF COHESIONLESS SOILS¹

This Standard is issued under the fixed designation D 2049; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval.

¹ Notes—Paragraphs 6.1.2 and 8.1 were corrected editorially in December 1977.

1. Scope

1.1 This method² covers the determination of the relative density of cohesionless free-draining soils for which impact compaction will not produce a well-defined moisture-density relationship curve and the maximum density by impact methods will generally be less than by vibratory methods. Soils for which this method is applicable may contain up to 12 weight % of soil particles passing a No. 200 (75- μ m) sieve, depending upon the distribution of particle sizes which will cause them to have free-draining characteristics. This method utilizes vibratory compaction to obtain maximum density and pouring to obtain minimum density.

2. Definition

2.1 *relative density*—the state of compactness of a soil with respect to the loosest and densest states at which it can be placed by the laboratory procedures described in this method. It is expressed as the ratio of (1) the difference between the void ratio of a cohesionless soil in the loosest state and any given void ratio, to (2) the difference between its void ratios in the loosest and densest states. Mathematical expressions for this definition are presented in Section 8.

3. Apparatus

3.1 The assembly of the apparatus is shown in Fig. 1. Individual components and accessories shall be as follows:

3.1.1 *Vibratory Table*—A steel table with a cushioned steel vibrating deck about 30 by 30 in. (762 by 762 mm) actuated by an electromagnetic vibrator. The vibrator should be a

semioleless type with a net weight over 100 lb (45.4 kg). The vibrator shall have a frequency of 3600 vibrations per minute, a vibrator amplitude variable between 0.002 and 0.025 in. (0.05 and 0.64 mm) under a 250-lbf (1112-N) load, and shall be suitable for use with 230-V ac.

3.1.2 *Molds*—Cylindrical metal unit-weight molds of 0.1 and 0.5 ft³ (2830 cm³ and 14160 cm³) capacity, conforming to the dimensional requirements as shown in Fig. 2.

3.1.3 *Guide Sleeves*—One guide sleeve with clamp assembly (see Fig. 3(a)) for each size mold. Two of the three set screws on the clamp assembly should be provided with lock nuts.

3.1.4 *Surcharge Base Plates*—One surcharge base plate $\frac{1}{2}$ in. (12.7 mm) in thickness for each size mold.

3.1.5 *Surcharge Weights*—One surcharge weight (see Fig. 4) for each size mold. The total weight of surcharge base plate and surcharge weight shall be equivalent to 2 psi (14 kPa) for the mold being used.

3.1.6 *Surcharge Base Plate Handle*—One for each surcharge base plate (see Fig. 3(b)).

3.1.7 *Dial Indicator Gage Holder*, as shown in Fig. 3(c).

3.1.8 *Dial Indicator*, 2-in. (50.8-mm) travel with 0.001-in. (0.025-mm) graduations.

3.1.9 *Calibration Bar*, metal, 3 by 12 by $\frac{1}{4}$ in. (76.2 by 304.8 by 3.2 mm).

² This method is under the jurisdiction of ASTM Committee D-18 on Soil and Rock for Engineering Purposes. Current edition approved Sept. 19, 1969. Originally issued 1964. Replaces D 2049 - 64 T.

³ This method is currently under extensive revision by ASTM Committee D-18 because of the many limitations pointed out in *Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils*, ASTM STP 523, Am. Soc. Testing Mats., 1973.

3.1.10 *Pouring Devices*—Pouring devices consisting of funnels $\frac{1}{2}$ in. (12.7 mm) and 1 in. (25.4 mm) in diameter by 6 in. (152.4 mm) in length, with cylindrical spouts and lipped brims for attaching to 6 in. diameter by 12 in. (304.8 mm) high metal cans.

3.1.11 *Mixing Pans*—Two sizes of metal pans, one approximately 2 by 3 ft by 4 in. (0.6 by 0.9 m by 102 mm) deep and the other approximately 16 by 16 by 2 in. (406 by 406 by 51 mm) deep.

3.1.12 *Scale*—One portable platform scale, 250-lb (113-kg) capacity, with 0.01-lb (4.5-g) graduations.

3.1.13 *Hoist*—A rope, chain, or cable hoist of at least 300 lb (136-kg) capacity.

3.1.14 *Other Equipment*, including a large metal scoop, a hair-bristled dusting brush, a timing device indicating in minutes and seconds, a 15-in. (381-mm) metal straightedge, and a 0 to 1-in. (0 to 25-mm) micrometer accurate to 0.001 in. (0.025 mm).

4. Calibration

4.1 Determine the volume of the mold by direct measurement and check the volume by filling with water as provided in 4.1.1 or 4.1.2. Determine the initial dial reading for computing the volumes of the specimen as provided in 4.1.3.

4.1.1 *Volume by Direct Measurement*—Determine the average inside diameter and height of the mold to 0.001 in. (0.025 mm). Calculate the volume of the 0.1 ft³ (2830-cm³) mold to the nearest 0.0001 ft³ (2.83 cm³) and the 0.5-ft³ (14 160-cm³) mold to the nearest 0.001 ft³ (28.3 cm³). Calculate also the average inside cross-sectional area of the mold in square feet.

4.1.2 *Volume by Filling with Water*—Determine the weight of the water, in grams, required to fill the mold. Slide a glass plate carefully over the top surface of the mold in such a manner as to ensure that the mold is completely filled with water. Determine the temperature of the water in the mold. A thin film of cup grease on the top surface of the mold will make a watertight joint between the glass plate and top of the mold. Calculate the volume of the mold, in cubic feet, by multiplying the weight of water, in grams, used to fill the mold by the unit volume of water, in millilitres per gram at the observed tempera-

D 2049

ture taken from Table 1, and dividing the result by 28 317 ml/ft³.

4.1.3 *Initial Dial Reading*—Determine the thicknesses of the surcharge base plate and the calibration bar to 0.001 in. (0.025 mm) using a micrometer. Place the calibration bar across a diameter of the mold along the axis of the guide brackets. Insert the dial indicator gage holder in each of the guide brackets on the measure with the dial gage stem on top of the calibration bar and on the axis of the guide brackets. The dial gage holder should be placed in the same position in the guide brackets each time by means of matchmarks on the guide brackets and the holder. Obtain six dial indicator readings, three on the left side and three on the right side, and average these six readings. Compute the initial dial reading by adding together the surcharge base plate thickness and the average of the six dial indicator readings and subtract the thickness of the calibration bar. The initial dial reading is constant for a particular measure and surcharge base plate combination.

5. Sample

5.1 Select a representative sample of soil. The weight of sample required is determined by the maximum size of particle as prescribed in Table 2.

5.2 Dry the soil sample in an oven at a temperature of 230 $\pm$ 9 F (110 $\pm$ 5 C). Process the soil through a sieve with openings sufficiently small to break up all weakly cemented soil particles.

6. Minimum Density Procedure

6.1 Determine the minimum density (zero relative density), (maximum void ratio) as follows:

6.1.1 Select the pouring device and mold according to the maximum size of particle as indicated in Section 5. Weigh the mold and record the weight. Use oven-dried soil.

6.1.2 Place soil containing particles smaller than $\frac{3}{4}$ in. (9.5 mm) as loosely as possible in the mold by pouring the soil from the spout in a steady stream while at the same time adjusting the height of the spout so that the free fall of the soil is 1 in. (25.4 mm). At the same time, move the pouring device in a spiral motion from the outside toward the center to form a soil layer of uniform thickness without segre-

gation. Fill the mold approximately 1 in. above the top and screed off the excess soil level with the top by making one continuous pass with the steel straightedge. If all excess material is not removed, an additional continuous pass shall be made but great care must be exercised during the entire pouring and trimming operation to avoid jarring the mold.

6.1.3 Place soil containing particles larger than $\frac{3}{4}$ in. (9.5 mm) by means of a large scoop (or shovel) held as close as possible to and just above the soil surface to cause the material to slide rather than fall onto the previously placed soil. If necessary, hold large particles back by hand to prevent them from rolling off the scoop. Fill the mold to overflowing but not more than 1 in. (25.4 mm) above the top. With the use of the steel straightedge (and the fingers when needed), level the surface of the soil with the top of the measure in such a way that any slight projections of the larger particles above the top of the mold shall approximately balance the larger voids in the surface below the top of the mold.

6.1.4 Weigh the mold and soil and record the weight.

7. Maximum Density Procedure

7.1 Determine the maximum density (100% relative density, minimum void ratio) by either the dry or wet method as follows:

7.1.1 Dry Method:

7.1.1.1 Mix the sample of oven-dried soil to provide an even distribution of particle sizes with as little segregation as possible.

7.1.1.2 Assemble the guide sleeve on top of the mold and tighten the clamp assemblies so that the inner wall of the sleeve is in line with the inner wall of the mold. Tighten the lock nuts on the two set screws equipped with lock nuts. Loosen the clamp assembly having no lock nuts, remove the guide sleeve. Weigh the empty mold and record the weight.

7.1.1.3 Fill the mold with soil by the procedure specified in 6.2 or 6.3.

NOTE 1—Normally, the mold filled with soil for the minimum density determination may be used for the maximum density determination without refilling the mold.

7.1.1.4 Attach the guide sleeve to the mold and place the surcharge base plate on the soil surface. Lower the surcharge weight onto the

surcharge base plate, using the hoist in the case of the 0.5-ft³ (14 160 cm³) mold.

7.1.1.5 Set the vibrator control at maximum amplitude and vibrate the loaded specimen for 8 min. Remove the surcharge weight and guide sleeve from the mold. Obtain and record dial indicator gage readings on two opposite sides of the surcharge base plate average, and record the average. Weigh the mold and soil if this has not been done in the minimum density determination or if an appreciable amount of fines has been lost during vibration. Record the weight.

7.1.2 Wet Method:

NOTE 2—While the dry method is preferred from the standpoint of securing results in a shorter period of time, the highest maximum density is obtained for some soils in a saturated state. At the beginning of a laboratory testing program, or when a radical change of materials occurs, the maximum density test should be performed on both wet and dry soil to determine which method results in the higher maximum density. If the wet method produces higher maximum densities, (in excess of one percent) it shall be followed in succeeding tests.

7.1.2.1 The wet method may be conducted on oven-dried soil to which sufficient water is added or, if preferred, on wet soil from the field. If water is added to dry soil allow a minimum soaking period of $\frac{1}{2}$ h.

7.1.2.2 Fill the mold with wet soil by means of a scoop or shovel. Add sufficient water to the soil to allow a small amount of free water to accumulate on the surface of the soil during filling. The correct amount of water can be estimated by a computation of the void ratio at expected maximum density or by experimentation with the soil. During and just after filling the mold, vibrate the soil for a total of 6 min. During this period reduce the amplitude of the vibrator as much as necessary to avoid excessive boiling and fluffing of the soil, which may occur in some soils. During the final minutes of vibration, remove any water appearing above the surface of the soil.

7.1.2.3 Assemble the guide sleeve, surcharge base plate, and surcharge weight as described in 4.1.1.

7.1.2.4 Vibrate the specimen and surcharge weight for 8 min. After the vibration period, remove the surcharge weight and guide sleeve from the mold. Obtain and record dial indicator gage readings on two opposite sides of the surcharge base plate. Carefully remove the entire wet specimen from the mold and dry to

constant weight. Weigh dry specimen and record.

8. Calculations

8.1 Minimum Density—Calculate minimum density, γ_{min} , in pounds per cubic foot, as follows:

$$\gamma_{min} = W_s/V_c$$

8.2 Maximum Density—Calculate maximum density, γ_{max} , in pounds per cubic foot, as follows:

$$\gamma_{max} = W_s/V_c$$

where:

W_s = weight of dry soil, lb.

V_c = calibrated volume of mold, ft³.

V = volume of soil, ft³ = $V_c - (R_i - R_f)/12 \times A$.

R_f = final dial gage reading on the surcharge base plate after completion of the vibration period, in., and

R_i = initial dial gage reading, in., and
 A = cross-sectional area of mold, ft².

8.3 Density of Soil in Place—Determine the density of the soil in place, γ_d , in a compacted fill or a natural deposit in accordance with either ASTM Method D 1556, Test for Density of Soil in Place by the Sand-Cone Method³ or ASTM Method D 2167, Test for Density of Soil in Place by the Rubber-Bal-

loon Method.³

8.4 Relative Density—Calculate relative density, D_r , expressed as a percentage as follows:

$$D_r = [\gamma_{max}(\gamma - \gamma_{min}) / (\gamma \gamma_{max} - \gamma_{min})] \times 100$$

or in terms of void ratio

$$D_r = [(e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min})] \times 100$$

where:

e = volume of voids divided by the volume of solid particle.

e_{max} = void ratio in loosest state, and

e_{min} = void ratio in most compact state.

9. Report

9.1 The report shall include the following information. A recommended form is shown in Fig. 5.

9.1.1 Method used for determining minimum density (funnel or scoop).

9.1.2 Method used for obtaining maximum density (dry or wet, and mold size).

9.1.3 Minimum and maximum densities.

9.1.4 Density "in-place" of the field sample, and

9.1.5 Relative density of the field sample.

³ Annual Book of ASTM Standards, Part 19.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, Pa. 19103, which will schedule a further hearing regarding your comments. Failing satisfaction there, you may appeal to the ASTM Board of Directors.

TABLE 1 Volume of Water per Gram Based on Temperature*

Temperature		Volume of Water, ml/g
deg C	deg F	
12	53.6	1.00048
14	57.2	1.00073
16	60.8	1.00103
18	64.4	1.00138
20	68.0	1.00177
22	71.6	1.00221
24	75.2	1.00268
26	78.8	1.00320
28	82.4	1.00375
30	86.0	1.00435
32	89.6	1.00497

* Values other than shown may be obtained by referring to the Handbook of Chemistry & Physics, Chemical Rubber Publishing Co., Cleveland, Ohio.

TABLE 2 Required Weight of Sample.

Maximum Size of Soil Particle in. (mm)	Weight of Sample Required, lb (kg)	Pouring Device To Be Used in Minimum Density Test	Size of Mold To Be Used, ft ³ (cm ³)
3/76.2)	100 (45.4)	Shovel or extra large scoop	0.5 (14 160)
1 1/4 (38.1)	25 (11.3)	Scoop	0.1 (2 830)
3/4 (19.1)	25 (11.3)	Scoop	0.1 (2 830)
3/8 (9.5)	25 (11.3)	Pouring Device (1-in. (25.4-mm) dia. spout)	0.1 (2 830)
No. 4 (4.75)	25 (11.3)	Pouring Device (1/4-in. (12.7-mm) dia. spout)	0.1 (2 830)

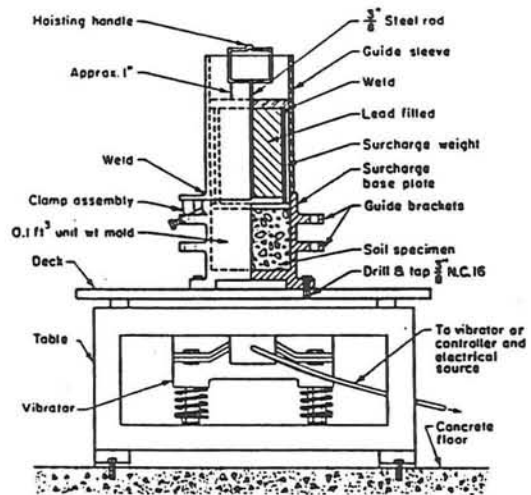
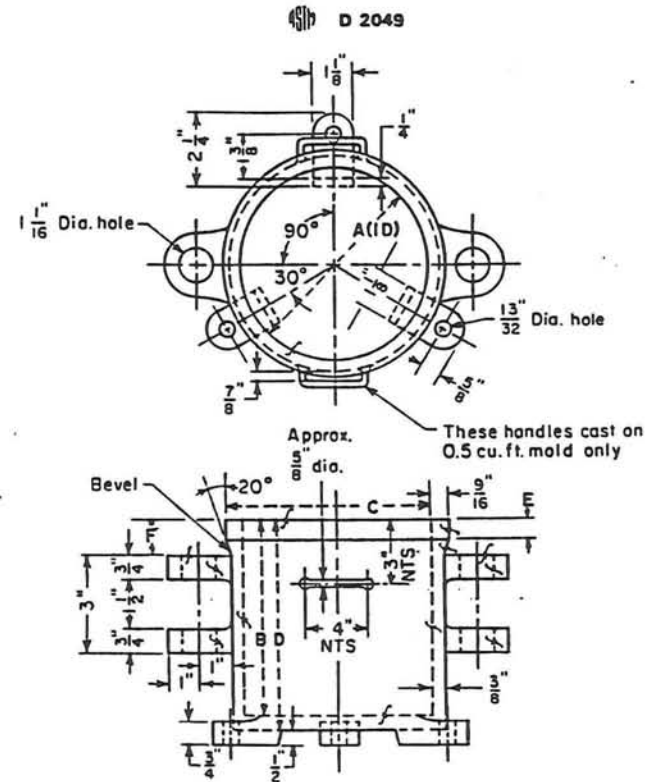


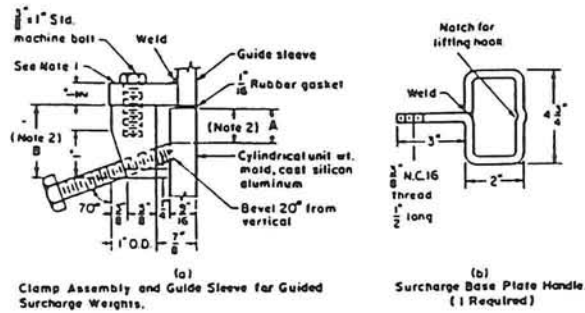
FIG. 1 Assembly of Apparatus (with 0.1 ft³ (2830 cm³) Mold Assembly).



Size Mold ft ³ (cm ³)	Dimensions, in. (mm)					
	A	B	C	D	E	F
0.1 (14.160)	6.000 (152.4)	6.112 (155.19)	7 ¹ / ₈ (181.0)	6 ¹ / ₈ (105.1)	¹ / ₂ (12.7)	1 ¹ / ₈ (28.6)
0.5 (2.830)	11.000 (279.4)	9.092 (230.89)	12 ¹ / ₈ (308.0)	9 ¹ / ₈ (241.3)	³ / ₈ (15.9)	2 (50.8)

FIG. 2 Details of Molds.

D 2049



NOTE 1—This piece shall be a steel bar, 1/2" by 1/2" in. (12.7 by 12.7 mm) of a length necessary to produce the indicated dimension from the inside of the guide sleeve. Weld 3 clamp assemblies to the guide sleeve at equal spacing.

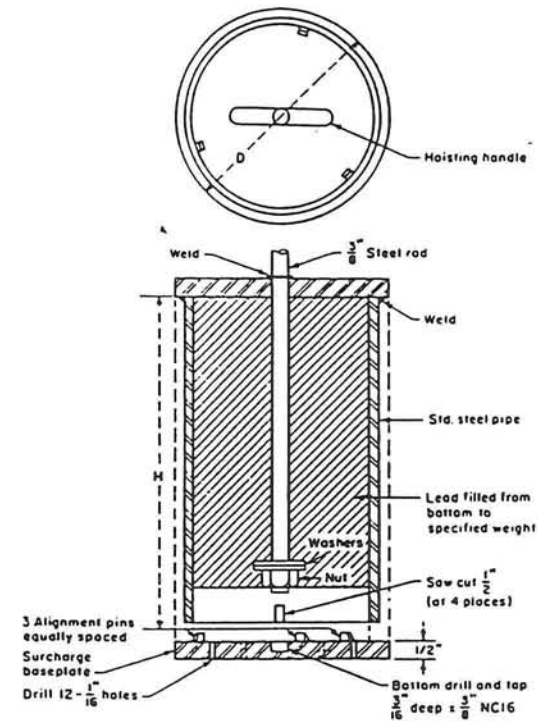
NOTE 2—See the following tabulation.

Size Mold, ft ³ (cm ³)	A, in. (mm)	B, in. (mm)	Guide Sleeve, in. (mm)
0.1 (14,160 cm ³)	1/2 (12.7)	1 1/2 (34.9)	Steel tubing, 6 in. (152.4 mm) I.D., 1/2 in. (6.4 mm) wall, 12 in. long (304.8 mm)
0.5 (2,830 cm ³)	1/2 (15.9)	1 1/2 (38.1)	Steel pipe, 11 in. (279.4 mm) I.D., 1/2 in. (9.5 mm) wall, 8 in. (203.2 mm) long

NOTE 3—These dimensions must be changed to fit the dial gage indicator used.

FIG. 3 Details of Apparatus Components.

D 2049



Size Mold, ft ³ (cm ³)	D, in. (mm)	H, in. (mm)	Std. pipe, in. (mm)	Total wt. required, lb (kg)
0.1 (14,160)	5 11/16 (150.8)	9 (228.6)	4 (101.6)	57 ± 0.5 (25.9 ± 0.2)
0.5 (2,830)	10 3/4 (276.2)	6 (152.4)	10 (254.0)	190 ± 1.0 (86 ± 0.4)

NOTE 1—All plates shall be 1/2 in. (12.7 mm) thick steel.

NOTE 2—Top plates for weights may be torch-cut, but edges must be ground as smooth as practicable. Surcharge base plates must be machined to the specified diameter.

NOTE 3—Hoisting handles shall have the same shape as the Surcharge Base Plate Handle (see Fig. 3(b)).

FIG. 4 Surcharge Weight.

Bijlage 2.7 Bepaling minimum en maximum dichtheid

De minimum en maximum dichtheidsproeven zijn drie keer uitgevoerd. Alleen als een hogere waarde voor de minimum dichtheid gevonden werd dan eerdere waarnemingen is het verdichten achterwege gelaten.

Brekerzand:	Proef 1	Proef 2	Proef 3
Gewicht volle bak (kg)	7.811	7.801	7.825
Gewicht lege bak (kg)	3.537	3.537	3.537
Gewicht zand (kg)	4.274	4.264	4.288
Volume bak (cm ³)	2830	2830	2830
Minimum dichtheid (kg/m ³)	1510.2	1506.7	1515.2
Inzinking 1 (cm)	2.85	2.75	–
Inzinking 2 (cm)	2.80	2.95	–
Inzinking 3 (cm)	3.30	2.90	–
Inzinking 4 (cm)	3.05	3.30	–
Gemiddelde inzinking (cm)	3.00	2.98	–
Volumeafname (cm ³)	547.2	543.6	–
Volume zand (cm ³)	2282.8	2286.4	–
Maximum dichtheid (kg/m ³)	1872.3	1864.9	–

Noordzeezand:	Proef 1	Proef 2	Proef 3
Gewicht volle bak (kg)	7.844	7.853	7.827
Gewicht lege bak (kg)	3.537	3.537	3.537
Gewicht zand (kg)	4.307	4.316	4.290
Volume bak (cm ³)	2830	2830	2830
Minimum dichtheid (kg/m ³)	1521.9	1525.1	1515.9
Inzinking 1 (cm)	2.70	2.10	2.80
Inzinking 2 (cm)	2.45	2.40	2.40
Inzinking 3 (cm)	2.35	2.00	2.45
Inzinking 4 (cm)	2.30	2.50	2.35
Gemiddelde inzinking (cm)	2.45	2.25	2.50
Volumeafname (cm ³)	446.9	410.4	456.0
Volume zand (cm ³)	2383.1	2419.6	2374.0
Maximum dichtheid (kg/m ³)	1807.3	1783.8	1807.1

Zeyenzand:	Proef 1	Proef 2	Proef 3
Gewicht volle bak (kg)	7.153	7.151	7.140
Gewicht lege bak (kg)	3.537	3.537	3.537
Gewicht zand (kg)	3.616	3.614	3.603
Volume bak (cm ³)	2830	2830	2830
Minimum dichtheid (kg/m ³)	1277.7	1277.0	1273.1
Inzinking 1 (cm)	2.95	3.05	3.05
Inzinking 2 (cm)	3.10	2.90	2.90
Inzinking 3 (cm)	2.85	3.30	3.30
Inzinking 4 (cm)	3.30	3.10	3.40
Gemiddelde inzinking (cm)	3.05	3.09	3.18
Volumeafname (cm ³)	556.4	563.7	580.1
Volume zand (cm ³)	2273.6	2266.3	2249.9
Maximum dichtheid (kg/m ³)	1590.4	1594.7	1601.4

Amerongenzand:	Proef 1	Proef 2	Proef 3
Gewicht volle bak (kg)	7.534	7.547	7.540
Gewicht lege bak (kg)	3.537	3.537	3.537
Gewicht zand (kg)	3.997	4.010	4.003
Volume bak (cm ³)	2830	2830	2830
Minimum dichtheid (kg/m ³)	1412.4	1417.0	1414.5
Inzinking 1 (cm)	2.95	-	-
Inzinking 2 (cm)	3.00	-	-
Inzinking 3 (cm)	3.10	-	-
Inzinking 4 (cm)	3.30	-	-
Gemiddelde inzinking (cm)	3.09	-	-
Volumeafname (cm ³)	563.6	-	-
Volume zand (cm ³)	2266.4	-	-
Maximum dichtheid (kg/m ³)	1763.6	-	-

Bijlage 2.8 Proevenserie 1

In de eerste kolom staat het gewicht van het zand in de bak. In de tweede kolom is de bijbehorende dichtheid weergegeven. Als er water is toegevoegd wordt de natte dichtheid gedeeld door 1.04, waarbij a staat voor het vochtpercentage. De dan ontstane droge dichtheid staat weergegeven in kolom 3. In de laatste kolom staat de relatieve dichtheid vermeld die berekend is m.b.v. Bijlage 2.7. Achter elk vochtpercentage is tenslotte de bijbehorende gemiddelde relatieve dichtheid aangegeven. M.b.v. deze waarden zijn de grafieken getekend. Tussen haakjes staat achter de relatieve dichtheid de standaardafwijking vermeld.

Brekerzand (voor 10.006 kg na 9.975 kg → verlies= 31 gr):

0% vocht: $Dr = -0.9\%$ ($\pm 1.1\%$)

4.251 kg → $\rho_{droog} = 1502.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -1.3\%$

4.271 kg → $\rho_{droog} = 1509.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 0.7\%$

4.258 kg → $\rho_{droog} = 1502.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -1.3\%$

4.241 kg → $\rho_{droog} = 1509.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 0.7\%$

2% vocht (voor 2.2% na 2.1%): $Dr = -115.1\%$ ($\pm 2.6\%$)

3.165 kg → $\rho_{nat} = 1118.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1096.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -114.5\%$

3.172 kg → $\rho_{nat} = 1118.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1096.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -114.5\%$

3.115 kg → $\rho_{nat} = 1118.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1096.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -114.5\%$

3.185 kg → $\rho_{nat} = 1118.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1096.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -114.5\%$

4% vocht (voor 4.1% na 4.0%): $Dr = -134.9\%$ ($\pm 1.0\%$)

3.010 kg → $\rho_{nat} = 1063.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1022.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -135.1\%$

3.027 kg → $\rho_{nat} = 1069.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1028.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -133.5\%$

3.014 kg → $\rho_{nat} = 1065.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1024.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -134.7\%$

2.998 kg → $\rho_{nat} = 1059.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1018.6 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -136.3\%$

6% vocht (voor 6.1% na 5.9%): $Dr = -144.6\%$ ($\pm 1.2\%$)

2.956 kg → $\rho_{nat} = 1044.5 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 985.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -145.5\%$

2.961 kg → $\rho_{nat} = 1046.3 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 987.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -145.1\%$

2.989 kg → $\rho_{nat} = 1056.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 996.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -142.5\%$

2.960 kg → $\rho_{nat} = 1045.9 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 986.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -145.2\%$

8% vocht (voor 8.1% na 7.9%): $Dr = -146.6\%$ ($\pm 0.5\%$)

3.003 kg → $\rho_{nat} = 1061.1 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 982.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -146.3\%$

2.996 kg → $\rho_{nat} = 1058.7 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 980.3 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -147.0\%$

3.008 kg → $\rho_{nat} = 1062.9 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 984.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -145.9\%$

2.993 kg → $\rho_{nat} = 1057.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 979.3 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -147.2\%$

10% vocht (voor 10.1% na 9.8%): $Dr = -143.2\%$ ($\pm 2.0\%$)

3.095 kg → $\rho_{nat} = 1093.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 994.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -143.1\%$

3.097 kg → $\rho_{nat} = 1094.3 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 994.9 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -142.9\%$

3.123 kg → $\rho_{nat} = 1103.5 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1003.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -140.6\%$

3.061 kg → $\rho_{nat} = 1081.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 983.3 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -146.1\%$

Noordzeezand (voor 10.000 kg na 9.967 kg → verlies= 32 gr):

0% vocht: $Dr = -0.4\%$ ($\pm 0.5\%$)

4.283 kg → $\rho_{droog} = 1513.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -0.9\%$

4.290 kg → $\rho_{droog} = 1515.9 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 0.0\%$

4.282 kg → $\rho_{droog} = 1513.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -1.0\%$

4.291 kg → $\rho_{droog} = 1516.3 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 0.1\%$

2% vocht (voor 2.1% na 1.8%): $Dr = -145.1\%$ ($\pm 2.2\%$)

3.182 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1124.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1102.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -142.0\%$
3.142 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1110.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1088.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -146.8\%$
3.136 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1108.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1086.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -147.5\%$
3.163 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1117.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1095.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -144.3\%$

4% vocht (voor 4.4% na 4.1%): $Dr = -166.7\%$ ($\pm 5.3\%$)

3.115 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1100.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1058.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -157.1\%$
3.048 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1077.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1035.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -164.9\%$
2.966 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1048.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1007.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -174.5\%$
3.036 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1072.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1031.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -166.3\%$
3.000 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1060.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1019.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -170.5\%$
3.032 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1071.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1030.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -166.8\%$

6% vocht (voor 6.1% na 5.9%): $Dr = -167.6\%$ ($\pm 5.0\%$)

3.080 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1088.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1026.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -168.0\%$
3.040 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1074.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1013.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -172.6\%$
3.059 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1080.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1019.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -170.4\%$
3.154 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1114.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1051.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -159.5\%$

8% vocht (voor 8.1% na 7.8%): $Dr = -166.2\%$ ($\pm 3.1\%$)

3.181 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1124.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1040.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -163.2\%$
3.120 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1102.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1020.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -170.0\%$
3.135 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1107.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1025.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -168.3\%$
3.181 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1124.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1041.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -163.0\%$

10% vocht (voor 10.1% na 9.9%): $Dr = -168.2\%$ ($\pm 1.7\%$)

3.201 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1131.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1028.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -167.4\%$
3.213 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1135.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1032.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -166.1\%$
3.192 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1127.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1025.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -168.4\%$
3.172 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1120.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1018.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -170.7\%$

Zeyenzand (voor 10.001 kg na 9.973 kg $\rightarrow$ verlies = 28 gr):

0% vocht: $Dr = 6.4\%$ ($\pm 1.3\%$)

3.667 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1295.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 6.9\%$
3.677 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1299.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 8.0\%$
3.662 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1294.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 6.4\%$
3.643 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1287.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 4.3\%$

2% vocht (voor 2.3% na 2.1%): $Dr = -127.4\%$ ($\pm 3.2\%$)

2.415 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 853.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 836.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -132.9\%$
2.487 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 878.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 861.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -125.3\%$
2.479 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 876.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 858.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -126.2\%$
2.489 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 879.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 862.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -125.1\%$

4% vocht (voor 4.4% na 4.2%): $Dr = -147.9\%$ ($\pm 3.4\%$)

2.358 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 833.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 801.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -143.7\%$
2.370 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 837.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 805.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -142.5\%$
2.296 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 811.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 780.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -150.2\%$
2.282 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 806.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 775.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -151.6\%$
2.302 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 813.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 782.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -149.6\%$
2.300 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 812.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 781.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -149.8\%$

6% vocht (voor 6.2% na 6.0%): $Dr = -154.2\%$ ($\pm 1.0\%$)

2.291 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 809.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 763.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -155.2\%$
2.308 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 815.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 769.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -153.5\%$

2.289 kg → $\rho_{nat} = 808.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 763.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-155.4%
 2.312 kg → $\rho_{nat} = 817.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 770.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-153.0%

8% vocht (voor 8.1% na 7.9%): Dr=-153.4% (± 2.7%)

2.381 kg → $\rho_{nat} = 841.3 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 779.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-150.5%
 2.346 kg → $\rho_{nat} = 829.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 767.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-154.0%
 2.357 kg → $\rho_{nat} = 832.9 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 771.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-152.9%
 2.325 kg → $\rho_{nat} = 821.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 760.7 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-156.1%

10% vocht (voor 10.0% na 9.8%): Dr=-153.4% (± 2.7%)

2.432 kg → $\rho_{nat} = 859.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 781.3 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-149.8%
 2.354 kg → $\rho_{nat} = 831.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 756.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-157.4%
 2.396 kg → $\rho_{nat} = 846.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 769.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-153.4%
 2.399 kg → $\rho_{nat} = 847.7 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 770.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-153.1%

Amerongenzand (voor 10.000 kg na 9.963 kg → verlies= 37 gr):

0% vocht: Dr=-7.0% (± 1.3%)

3.911 kg → $\rho_{droog} = 1382.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-8.7%
 3.933 kg → $\rho_{droog} = 1389.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-6.4%
 3.922 kg → $\rho_{droog} = 1385.9 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-7.6%
 3.946 kg → $\rho_{droog} = 1394.3 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-5.1%

2% vocht (voor 2.1% na 2.0%): Dr= -87.3% (± 1.8%)

3.221 kg → $\rho_{nat} = 1138.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1115.9 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-84.4%
 3.169 kg → $\rho_{nat} = 1119.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1097.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-89.6%
 3.190 kg → $\rho_{nat} = 1127.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1105.1 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-87.5%
 3.189 kg → $\rho_{nat} = 1126.9 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1104.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-87.6%

4% vocht (voor 4.1% na 3.9%): Dr=-131.5% (± 3.8%)

2.813 kg → $\rho_{nat} = 994.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 955.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-130.0%
 2.866 kg → $\rho_{nat} = 1012.7 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 973.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-124.9%
 2.741 kg → $\rho_{nat} = 968.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 931.3 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-137.0%
 2.796 kg → $\rho_{nat} = 988.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 950.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-131.7%
 2.767 kg → $\rho_{nat} = 977.7 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 940.1 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-134.5%
 2.803 kg → $\rho_{nat} = 990.5 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 952.4 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-131.0%

6% vocht (voor 6.1% na 5.9%): Dr=-140.0% (± 4.1%)

2.776 kg → $\rho_{nat} = 980.9 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 925.4 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-138.7%
 2.826 kg → $\rho_{nat} = 998.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 942.1 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-133.9%
 2.720 kg → $\rho_{nat} = 961.1 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 906.7 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-144.0%
 2.744 kg → $\rho_{nat} = 969.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 914.7 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-141.7%
 2.801 kg → $\rho_{nat} = 989.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 933.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-136.3%
 2.706 kg → $\rho_{nat} = 956.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 902.1 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-145.3%

8% vocht (voor 8.1% na 7.8%): Dr=-142.4% (± 1.9%)

2.815 kg → $\rho_{nat} = 994.7 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 921.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-139.9%
 2.781 kg → $\rho_{nat} = 982.7 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 909.9 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-143.1%
 2.796 kg → $\rho_{nat} = 988.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 914.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-141.7%
 2.760 kg → $\rho_{nat} = 975.3 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 903.1 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-145.0%

10% vocht (voor 10.1% na 9.8%): Dr=-137.3% (± 2.0%)

2.914 kg → $\rho_{nat} = 1029.7 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 936.1 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-135.6%
 2.881 kg → $\rho_{nat} = 1018.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 925.5 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-138.6%
 2.868 kg → $\rho_{nat} = 1013.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 921.3 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-139.8%
 2.920 kg → $\rho_{nat} = 1031.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 938.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-135.1%

Bijlage 2.9 Proevenserie 2

Proevenserie 2 is tegelijkertijd met proevenserie 1 uitgevoerd, zodat voor het 'verlies' en 'vochtgehalte' dezelfde waarden als bij proevenserie 1 genomen kunnen worden.

Brekerzand:

0% vocht: $Dr = 5.7\% (\pm 1.2\%)$

4.314 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1524.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 4.9\%$

4.307 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1521.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 4.2\%$

4.336 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1532.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 7.1\%$

4.331 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1530.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 6.6\%$

2% vocht: $Dr = -111.2\% (\pm 1.6\%)$

3.172 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1120.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1098.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -113.9\%$

3.218 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1137.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1114.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -109.4\%$

3.203 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1131.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1109.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -110.9\%$

3.205 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1132.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1110.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -110.7\%$

4% vocht: $Dr = -128.4\% (\pm 1.5\%)$

3.087 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1090.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1048.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -127.8\%$

3.093 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1092.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1050.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -127.2\%$

3.054 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1079.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1037.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -130.4\%$

3.088 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1091.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1049.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -127.7\%$

6% vocht: $Dr = -131.8\% (\pm 2.9\%)$

3.144 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1111.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1048.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -128.0\%$

3.120 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1102.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1040.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -130.3\%$

3.089 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1091.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1029.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -133.2\%$

3.060 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1081.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1020.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -135.9\%$

8% vocht: $Dr = -130.6\% (\pm 2.7\%)$

3.175 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1121.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1038.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -130.6\%$

3.171 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1120.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1037.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -131.0\%$

3.137 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1108.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1026.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -134.1\%$

3.219 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1137.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1053.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -126.6\%$

10% vocht: $Dr = -126.9\% (\pm 1.0\%)$

3.282 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1059.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1054.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -126.3\%$

3.277 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1158.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1052.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -126.7\%$

3.285 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1160.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1055.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -126.0\%$

3.257 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1150.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1046.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -128.5\%$

Noordzeezand:

0% vocht: $Dr = 4.1\% (\pm 0.5\%)$

4.326 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1528.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 4.4\%$

4.326 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1528.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 4.4\%$

4.325 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1528.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 4.2\%$

4.317 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1525.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 3.3\%$

2% vocht: $Dr = -129.4\% (\pm 2.3\%)$

3.265 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1153.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1131.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -132.1\%$

3.312 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1170.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1147.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -126.6\%$

3.301 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1166.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1143.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -127.9\%$

3.274 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1156.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1134.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -131.1\%$

4% vocht: $Dr = -151.1\%$ ($\pm 3.5\%$)

3.143 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1110.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1067.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -153.9\%$
 3.131 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1106.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1063.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -155.3\%$
 3.198 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1130.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1086.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -147.4\%$
 3.195 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1129.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1085.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -147.8\%$

6% vocht: $Dr = -151.9\%$ ($\pm 2.2\%$)

3.223 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1138.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1074.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -151.6\%$
 3.202 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1131.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1067.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -154.0\%$
 3.206 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1132.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1068.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -153.6\%$
 3.250 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1148.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1083.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -148.5\%$

8% vocht: $Dr = -156.9\%$ ($\pm 5.0\%$)

3.187 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1126.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1042.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -162.5\%$
 3.242 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1145.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1060.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -156.3\%$
 3.213 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1135.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1051.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -159.6\%$
 3.306 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1168.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1081.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -149.1\%$

10% vocht: $Dr = -152.4\%$ ($\pm 2.2\%$)

3.308 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1168.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1062.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -155.7\%$
 3.358 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1186.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1078.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -150.1\%$
 3.353 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1184.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1077.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -150.7\%$
 3.331 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1177.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1070.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -153.1\%$

Zeyenzand:

0% vocht: $Dr = 22.3\%$ ($\pm 1.1\%$)

3.796 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1341.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 20.8\%$
 3.819 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1349.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 23.3\%$
 3.820 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1349.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 23.4\%$
 3.805 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1344.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 21.8\%$

2% vocht: $Dr = -119.1\%$ ($\pm 1.5\%$)

2.555 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 902.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 885.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -118.2\%$
 2.565 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 906.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 888.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -117.1\%$
 2.529 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 893.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 876.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -120.9\%$
 2.535 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 895.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 878.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -120.3\%$

4% vocht: $Dr = -130.3\%$ ($\pm 1.4\%$)

2.484 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 877.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 844.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -130.7\%$
 2.507 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 885.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 851.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -128.3\%$
 2.490 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 879.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 846.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -130.1\%$
 2.469 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 872.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 838.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -132.3\%$

6% vocht: $Dr = -134.4\%$ ($\pm 3.5\%$)

2.551 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 901.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 850.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -128.8\%$
 2.491 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 880.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 830.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -134.8\%$
 2.434 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 860.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 811.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -140.6\%$
 2.498 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 882.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 832.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -134.1\%$
 2.494 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 881.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 831.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -134.5\%$
 2.507 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 885.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 835.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -133.2\%$

8% vocht: $Dr = -141.8\%$ ($\pm 3.4\%$)

2.426 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 857.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 793.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -146.0\%$
 2.521 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 890.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 824.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -136.5\%$
 2.460 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 869.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 804.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -142.6\%$
 2.465 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 871.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 806.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -142.1\%$

10% vocht: $Dr = -136.1\%$ ($\pm 2.6\%$)

2.612 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 923.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 893.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -132.2\%$
2.575 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 909.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 827.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -135.8\%$
2.537 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 896.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 815.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -139.5\%$
2.563 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 905.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 823.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -137.0\%$

Amerongenzand:

0% vocht: $Dr = 5.5\%$ ($\pm 0.7\%$)

4.059 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1434.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 6.2\%$
4.058 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1433.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 6.1\%$
4.050 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1431.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 5.3\%$
4.042 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1428.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = 4.5\%$

2% vocht: $Dr = -75.1\%$ ($\pm 1.0\%$)

3.331 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1177.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1154.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -73.6\%$
3.305 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1167.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1144.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -76.2\%$
3.320 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1173.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1150.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -74.7\%$
3.308 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1168.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1146.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -75.9\%$

4% vocht: $Dr = -121.5\%$ ($\pm 2.0\%$)

2.899 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1024.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 985.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -121.7\%$
2.887 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1020.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 980.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -122.9\%$
2.884 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1019.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 979.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -123.2\%$
2.935 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1037.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 997.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -118.2\%$

6% vocht: $Dr = -126.6\%$ ($\pm 0.3\%$)

2.900 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1024.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 966.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -126.9\%$
2.901 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1025.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 967.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -126.8\%$
2.908 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1027.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 969.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -126.1\%$
2.905 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1026.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 968.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -126.4\%$

8% vocht: $Dr = -126.3\%$ ($\pm 4.2\%$)

2.944 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1040.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 963.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -127.9\%$
2.936 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1037.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 960.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -128.6\%$
3.036 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1072.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 993.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -119.3\%$
2.958 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1045.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 967.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -126.6\%$
2.895 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1023.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 947.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -132.5\%$
2.997 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1059.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 980.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -123.0\%$

10% vocht: $Dr = -119.7\%$ ($\pm 1.5\%$)

3.115 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1100.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1000.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -117.2\%$
3.085 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1090.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 991.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -120.0\%$
3.071 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1085.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 986.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -121.3\%$
3.082 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1089.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 990.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -120.3\%$

Bijlage 2.10 Proevenserie 3

Brekerzand (voor 10.003 kg na 9.976 kg → verlies= 27 gr):

0% vocht: $Dr = 2.7\%$ ($\pm 1.0\%$)

4.274 kg → $\rho_{droog} = 1510.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 1.0\%$

4.294 kg → $\rho_{droog} = 1517.3 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 3.0\%$

4.294 kg → $\rho_{droog} = 1517.3 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 3.0\%$

4.303 kg → $\rho_{droog} = 1520.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 3.9\%$

2% vocht (voor 2.1% na 2.0%): $Dr = -100.9\%$ ($\pm 2.2\%$)

3.288 kg → $\rho_{nat} = 1161.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1139.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -102.6\%$

3.322 kg → $\rho_{nat} = 1173.9 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1150.8 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -99.3\%$

3.335 kg → $\rho_{nat} = 1178.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1155.3 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -98.1\%$

3.280 kg → $\rho_{nat} = 1159.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1136.3 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -103.4\%$

4% vocht (voor 4.3% na 4.2%): $Dr = -122.3\%$ ($\pm 1.2\%$)

3.155 kg → $\rho_{nat} = 1114.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1072.0 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -121.4\%$

3.160 kg → $\rho_{nat} = 1116.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1073.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -120.9\%$

3.135 kg → $\rho_{nat} = 1107.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1065.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -123.3\%$

3.131 kg → $\rho_{nat} = 1106.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1063.8 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -123.6\%$

6% vocht (voor 6.2% na 6.1%): $Dr = -127.6\%$ ($\pm 2.4\%$)

3.174 kg → $\rho_{nat} = 1121.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1058.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -125.2\%$

3.137 kg → $\rho_{nat} = 1108.5 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1045.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -128.7\%$

3.172 kg → $\rho_{nat} = 1120.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1057.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -125.4\%$

3.113 kg → $\rho_{nat} = 1100.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1037.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -130.9\%$

8% vocht (voor 8.0% na 7.9%): $Dr = -130.2\%$ ($\pm 2.2\%$)

3.151 kg → $\rho_{nat} = 1113.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1031.0 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -132.8\%$

3.160 kg → $\rho_{nat} = 1116.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1033.9 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -132.0\%$

3.205 kg → $\rho_{nat} = 1132.5 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1048.6 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -127.9\%$

3.203 kg → $\rho_{nat} = 1131.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1048.0 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -128.1\%$

10% vocht (voor 10.0% na 9.9%): $Dr = -124.7\%$ ($\pm 2.4\%$)

3.277 kg → $\rho_{nat} = 1158.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1052.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -126.7\%$

3.302 kg → $\rho_{nat} = 1166.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1060.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -124.5\%$

3.354 kg → $\rho_{nat} = 1185.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1077.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -119.8\%$

3.274 kg → $\rho_{nat} = 1156.9 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1051.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -127.0\%$

3.305 kg → $\rho_{nat} = 1167.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1061.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -124.2\%$

3.290 kg → $\rho_{nat} = 1162.5 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1056.9 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -125.6\%$

Noordzeezand (voor 10.000 kg na 9.971 kg → verlies= 29 gr):

0% vocht: $Dr = -8.9\%$ ($\pm 1.4\%$)

4.200 kg → $\rho_{droog} = 1484.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -10.9\%$

4.217 kg → $\rho_{droog} = 1490.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -8.9\%$

4.218 kg → $\rho_{droog} = 1490.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -8.7\%$

4.233 kg → $\rho_{droog} = 1495.8 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -6.9\%$

2% vocht (voor 2.1% na 1.9%): $Dr = -126.3\%$ ($\pm 8.0\%$)

3.305 kg → $\rho_{nat} = 1167.1 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1144.9 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -127.4\%$

3.368 kg → $\rho_{nat} = 1190.1 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1166.8 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -119.9\%$

3.406 kg → $\rho_{nat} = 1203.5 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1179.9 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -115.4\%$

3.190 kg → $\rho_{nat} = 1127.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1105.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -141.1\%$

3.307 kg → $\rho_{nat} = 1168.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1145.6 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -127.2\%$

3.310 kg → $\rho_{nat} = 1169.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1146.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -126.8\%$

4% vocht (voor 4.1% na 3.9%): $Dr = -140.6\%$ ($\pm 5.3\%$)

3.277 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1158.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1113.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -138.2\%$
 3.299 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1165.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1120.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -135.6\%$
 3.323 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1174.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1129.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -132.8\%$
 3.201 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1131.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1087.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -147.1\%$
 3.224 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1139.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1095.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -144.4\%$
 3.217 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1136.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1093.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -145.2\%$

6% vocht (voor 6.1% na 5.9%): $Dr = -144.0\%$ ($\pm 2.0\%$)

3.279 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1158.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1093.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -145.2\%$
 3.304 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1167.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1101.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -142.3\%$
 3.270 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1155.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1090.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -146.2\%$
 3.306 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1168.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1102.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -142.1\%$

8% vocht (voor 8.1% na 7.8%): $Dr = -146.9\%$ ($\pm 5.4\%$)

3.377 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1193.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1104.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -141.1\%$
 3.383 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1195.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1106.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -140.5\%$
 3.269 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1155.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1069.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -153.3\%$
 3.292 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1163.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1077.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -150.7\%$
 3.276 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1157.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1071.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -152.5\%$
 3.357 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1186.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1098.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -143.4\%$

10% vocht (voor 10.1% na 9.7%): $Dr = -144.1\%$ ($\pm 6.8\%$)

3.506 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1238.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1126.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -133.8\%$
 3.420 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1208.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1098.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -143.3\%$
 3.406 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1203.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1094.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -144.8\%$
 3.297 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1165.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1059.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -156.9\%$
 3.435 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1213.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1103.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -141.6\%$
 3.414 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1206.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1096.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -144.0\%$

Zeyenzand (voor 10.001 kg na 9.960 kg $\rightarrow$ verlies = 41 gr):

0% vocht: $Dr = -2.2\%$ ($\pm 1.3\%$)

3.577 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1264.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -2.8\%$
 3.586 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1267.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -1.8\%$
 3.567 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1260.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -3.9\%$
 3.600 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1272.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -0.3\%$

2% vocht (voor 2.1% na 2.0%): $Dr = -112.9\%$ ($\pm 1.1\%$)

2.618 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 925.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 906.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -111.5\%$
 2.611 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 922.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 904.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -112.3\%$
 2.595 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 917.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 899.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -114.0\%$
 2.595 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 917.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 899.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -114.0\%$

4% vocht (voor 4.2% na 4.0%): $Dr = -130.9\%$ ($\pm 5.1\%$)

2.559 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 904.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 869.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -122.9\%$
 2.461 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 869.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 836.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -133.1\%$
 2.505 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 885.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 851.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -128.5\%$
 2.481 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 876.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 843.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -131.0\%$
 2.396 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 846.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 814.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -139.8\%$
 2.492 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 880.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 846.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -129.9\%$

6% vocht (voor 6.1% na 5.9%): $Dr = -132.1\%$ ($\pm 2.4\%$)

2.525 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 892.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 841.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -131.4\%$
 2.483 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 877.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 827.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -135.7\%$
 2.548 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 900.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 849.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -129.1\%$
 2.518 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 889.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 839.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -132.1\%$

8% vocht (voor 8.1% na 7.9%): $Dr = -129.1\%$ ($\pm 2.6\%$)

2.635 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 931.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 862.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -125.2\%$
2.600 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 918.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 850.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -128.7\%$
2.564 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 906.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 838.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -132.3\%$
2.583 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 912.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 845.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -130.4\%$

10% vocht (voor 10.1% na 9.9%): $Dr = -130.2\%$ ($\pm 4.2\%$)

2.629 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 929.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 844.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -130.5\%$
2.711 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 958.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 870.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -122.5\%$
2.661 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 940.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 854.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -127.4\%$
2.580 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 911.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 828.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -135.3\%$
2.595 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 917.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 833.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -133.9\%$
2.620 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 925.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 841.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -131.4\%$

Amerongenzand (voor 10.001 kg na 9.977 kg $\rightarrow$ verlies = 37 gr):

0% vocht: $Dr = -7.5\%$ ($\pm 1.8\%$)

3.895 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1376.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -10.3\%$
3.924 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1386.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -7.4\%$
3.927 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1387.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -7.1\%$
3.945 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1394.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -5.2\%$

2% vocht (voor 2.0% na 1.9%): $Dr = -75.7\%$ ($\pm 1.8\%$)

3.221 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1179.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1156.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -73.0\%$
3.169 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1163.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1140.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -77.4\%$
3.190 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1164.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1141.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -77.1\%$
3.189 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1171.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1148.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -75.2\%$

4% vocht (voor 4.0% na 3.9%): $Dr = -118.8\%$ ($\pm 2.1\%$)

2.910 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1028.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 988.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -120.6\%$
2.942 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1039.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 999.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -117.5\%$
2.906 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1026.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 987.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -121.0\%$
2.957 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1044.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1004.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -116.1\%$

6% vocht (voor 6.0% na 5.8%): $Dr = -118.7\%$ ($\pm 5.3\%$)

2.953 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1043.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 984.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -121.9\%$
3.075 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1086.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1025.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -110.3\%$
2.965 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1047.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 988.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -120.7\%$
3.041 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1074.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1013.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -113.5\%$
2.910 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1028.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 970.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -125.9\%$
2.973 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1050.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 991.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -120.0\%$

8% vocht (voor 8.0% na 7.7%): $Dr = -118.4\%$ ($\pm 3.5\%$)

3.083 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1089.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1008.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -114.9\%$
3.016 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1065.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 986.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -121.2\%$
2.980 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1053.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 975.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -124.5\%$
3.079 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1088.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1007.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -115.3\%$
3.047 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1076.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 996.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -118.3\%$
3.073 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1085.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1005.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -115.9\%$

10% vocht (voor 10.0% na 9.8%): $Dr = -113.9\%$ ($\pm 6.4\%$)

3.282 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1159.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1054.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -102.0\%$
3.168 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1119.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1017.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -112.4\%$
3.145 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1111.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1010.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -114.5\%$
3.159 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1116.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1014.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -113.2\%$
3.055 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1079.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 981.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -122.7\%$
3.100 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1095.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 995.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -118.6\%$

Bijlage 2.11 Proevenserie 4

Brekerzand (voor 10.000 kg na 9.975 kg → verlies= 25 gr):

0% vocht: $Dr = -7.9\%$ ($\pm 1.0\%$)

7.403 kg → $\rho_{nat} = 1480.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1480.6 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -7.3\%$

7.368 kg → $\rho_{nat} = 1473.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1473.6 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -9.2\%$

7.379 kg → $\rho_{nat} = 1475.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1475.8 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -8.6\%$

7.415 kg → $\rho_{nat} = 1483.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1483.0 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -6.6\%$

2% vocht (voor 2.1% na 2.0%): $Dr = -110.0\%$ ($\pm 1.2\%$)

5.653 kg → $\rho_{nat} = 1130.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1108.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -111.2\%$

5.689 kg → $\rho_{nat} = 1137.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1115.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -109.2\%$

5.652 kg → $\rho_{nat} = 1130.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1108.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -111.2\%$

5.704 kg → $\rho_{nat} = 1140.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1118.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -108.4\%$

4% vocht (voor 4.2% na 4.0%): $Dr = -128.2\%$ ($\pm 2.2\%$)

5.395 kg → $\rho_{nat} = 1079.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1037.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -131.0\%$

5.478 kg → $\rho_{nat} = 1095.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1053.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -126.5\%$

5.473 kg → $\rho_{nat} = 1094.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1052.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -126.8\%$

5.495 kg → $\rho_{nat} = 1099.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1056.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -125.6\%$

5.392 kg → $\rho_{nat} = 1078.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1036.9 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -131.1\%$

5.447 kg → $\rho_{nat} = 1089.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1047.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -128.2\%$

6% vocht (voor 6.3% na 6.1%): $Dr = -132.1\%$ ($\pm 2.8\%$)

5.574 kg → $\rho_{nat} = 1114.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1051.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -127.0\%$

5.448 kg → $\rho_{nat} = 1089.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1027.9 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -133.7\%$

5.449 kg → $\rho_{nat} = 1099.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1037.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -131.0\%$

5.476 kg → $\rho_{nat} = 1095.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1033.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -132.2\%$

5.399 kg → $\rho_{nat} = 1079.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1018.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -136.2\%$

5.465 kg → $\rho_{nat} = 1093.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1031.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -132.8\%$

8% vocht (voor 8.3% na 8.1%): $Dr = -132.1\%$ ($\pm 0.7\%$)

5.581 kg → $\rho_{nat} = 1116.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1033.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -132.1\%$

5.598 kg → $\rho_{nat} = 1119.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1036.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -131.2\%$

5.562 kg → $\rho_{nat} = 1112.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1030.0 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -133.1\%$

5.586 kg → $\rho_{nat} = 1117.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1034.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -131.8\%$

10% vocht (voor 10.2% na 10.0%): $Dr = -128.4\%$ ($\pm 0.4\%$)

5.768 kg → $\rho_{nat} = 1153.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1048.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -127.9\%$

5.755 kg → $\rho_{nat} = 1151.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1046.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -128.5\%$

5.749 kg → $\rho_{nat} = 1149.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1045.3 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -128.8\%$

5.754 kg → $\rho_{nat} = 1150.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1046.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -128.6\%$

Noordzeezand (voor 10.000 kg na 9.971 kg → verlies= 29 gr):

0% vocht: $Dr = -22.4\%$ ($\pm 0.9\%$)

7.239 kg → $\rho_{droog} = 1447.8 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -23.4\%$

7.257 kg → $\rho_{droog} = 1451.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -22.1\%$

7.274 kg → $\rho_{droog} = 1454.8 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -21.0\%$

7.246 kg → $\rho_{droog} = 1449.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -22.9\%$

2% vocht (voor 2.1% na 2.0%): $Dr = -139.6\%$ ($\pm 1.9\%$)

5.687 kg → $\rho_{nat} = 1137.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1115.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -137.6\%$

5.616 kg → $\rho_{nat} = 1123.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1101.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -142.4\%$

5.677 kg → $\rho_{nat} = 1235.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1113.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -138.3\%$

5.650 kg → $\rho_{nat} = 1130.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1107.8 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -140.1\%$

4% vocht (voor 4.1% na 3.9%): $Dr = -155.5\%$ ($\pm 0.9\%$)

5.550 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1110.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1067.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -154.0\%$
5.521 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1104.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1061.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -156.0\%$
5.531 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1106.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1063.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -155.3\%$
5.513 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1102.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1060.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -156.5\%$

6% vocht (voor 6.1% na 5.9%): $Dr = -159.7\%$ ($\pm 2.2\%$)

5.556 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1111.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1048.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -160.6\%$
5.522 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1104.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1041.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -162.8\%$
5.541 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1108.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1045.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -161.5\%$
5.622 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1124.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1060.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -156.3\%$
5.578 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1115.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1052.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -159.2\%$
5.595 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1119.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1055.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -158.0\%$

8% vocht (voor 8.0% na 7.8%): $Dr = -160.6\%$ ($\pm 3.3\%$)

5.745 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1149.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1063.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -155.2\%$
5.610 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1122.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1038.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -163.8\%$
5.608 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1121.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1038.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -163.9\%$
5.617 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1123.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1040.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -163.4\%$
5.686 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1137.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1053.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -159.0\%$
5.698 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1139.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1055.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -158.2\%$

10% vocht (voor 10.1% na 9.8%): $Dr = -153.8\%$ ($\pm 3.3\%$)

5.907 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1181.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1074.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -151.8\%$
5.810 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1162.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1056.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -157.8\%$
5.863 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1172.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1066.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -154.5\%$
5.966 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1193.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1084.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -148.1\%$
5.820 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1164.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1058.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -157.2\%$
5.879 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1175.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1068.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -153.5\%$

Zeyenzand (voor 10.000 kg na 9.962 kg $\rightarrow$ verlies = 38 gr):

0% vocht: $Dr = -12.3\%$ ($\pm 0.6\%$)

6.169 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1233.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -12.0\%$
6.171 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1234.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -11.8\%$
6.166 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1233.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -12.2\%$
6.147 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1229.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -13.3\%$

2% vocht (voor 2.1% na 1.9%): $Dr = -134.2\%$ ($\pm 1.2\%$)

4.256 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 851.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 834.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -133.6\%$
4.273 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 854.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 837.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -132.6\%$
4.228 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 845.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 829.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -135.3\%$
4.224 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 844.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 828.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -135.5\%$

4% vocht (voor 4.1% na 3.9%): $Dr = -151.7\%$ ($\pm 1.1\%$)

4.035 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 807.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 776.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -151.4\%$
4.058 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 811.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 780.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -150.1\%$
4.019 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 803.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 772.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -152.4\%$
4.007 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 801.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 770.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -153.1\%$

6% vocht (voor 6.1% na 5.8%): $Dr = -151.6\%$ ($\pm 3.8\%$)

4.237 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 847.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 799.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -144.3\%$
4.147 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 829.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 782.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -149.5\%$
4.100 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 820.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 773.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -152.2\%$
4.055 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 811.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 765.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -154.7\%$
4.036 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 807.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 761.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -155.8\%$
4.085 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 817.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 770.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -153.0\%$

8% vocht (voor 8.1% na 7.8%): $Dr = -153.3\%$ ($\pm 3.1\%$)

4.263 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 852.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 789.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -147.3\%$
4.156 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 831.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 769.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -153.4\%$
4.179 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 835.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 773.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -152.1\%$
4.092 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 818.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 757.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -157.0\%$
4.129 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 825.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 764.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -154.9\%$
4.122 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 824.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 763.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -155.3\%$

10% vocht (voor 10.0% na 9.8%): $Dr = -153.3\%$ ($\pm 4.3\%$)

4.336 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 867.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 788.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -147.7\%$
4.345 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 869.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 790.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -147.2\%$
4.209 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 841.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 765.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -154.7\%$
4.174 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 834.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 758.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -156.6\%$

Amerongenzand (voor 10.001 kg na 9.970 kg $\rightarrow$ verlies = 31 gr):

0% vocht: $Dr = -17.0\%$ ($\pm 1.7\%$)

6.741 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1348.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -18.3\%$
6.759 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1351.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -17.3\%$
6.741 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1348.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -18.3\%$
6.814 kg $\rightarrow \rho_{droog} = 1362.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -14.1\%$

2% vocht (voor 2.1% na 2.0%): $Dr = -84.9\%$ ($\pm 1.3\%$)

5.702 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1140.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1118.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -83.8\%$
5.649 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1129.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1107.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -86.8\%$
5.677 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1135.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1113.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -85.2\%$
5.705 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1141.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 1118.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -83.6\%$

4% vocht (voor 4.3% na 4.2%): $Dr = -133.6\%$ ($\pm 1.2\%$)

4.922 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 984.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 946.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -132.6\%$
4.930 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 986.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 948.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -132.2\%$
4.886 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 977.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 939.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -134.6\%$
4.881 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 976.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 938.7 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -134.9\%$

6% vocht (voor 6.1% na 6.0%): $Dr = -136.7\%$ ($\pm 3.2\%$)

5.005 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1001.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 944.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -133.3\%$
5.030 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1006.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 949.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -131.9\%$
4.905 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 981.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 925.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -138.6\%$
4.886 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 977.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 921.9 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -139.7\%$
4.949 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 989.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 933.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -136.3\%$
4.874 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 974.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 919.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -140.3\%$

8% vocht (voor 8.1% na 7.9%): $Dr = -135.1\%$ ($\pm 4.6\%$)

5.180 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1036.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 959.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -129.0\%$
5.083 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1016.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 941.3 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -134.1\%$
4.981 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 996.2 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 922.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -139.5\%$
5.174 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1034.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 958.1 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -129.3\%$
4.982 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 996.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 922.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -139.5\%$
4.992 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 998.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 924.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -138.9\%$

10% vocht (voor 10.0% na 9.8%): $Dr = -132.7\%$ ($\pm 0.9\%$)

5.234 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1046.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 951.6 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -131.2\%$
5.194 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1038.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 944.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -133.3\%$
5.194 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1038.8 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 944.4 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -133.3\%$
5.200 kg $\rightarrow \rho_{nat} = 1040.0 \text{ kg/m}^3 \rightarrow \rho_{droog} = 945.5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow Dr = -133.0\%$

Bijlage 2.12 Proevenserie 5

Brekerzand (voor 10.001 kg na 9.962 kg → verlies= 39 gr):

0% vocht: $Dr = 13.6\%$ ($\pm 2.7\%$)

7.723 kg → $\rho_{nat} = 1544.6 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 10.6\%$

7.737 kg → $\rho_{nat} = 1547.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 11.4\%$

7.820 kg → $\rho_{nat} = 1564.0 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 16.0\%$

7.831 kg → $\rho_{nat} = 1566.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 16.6\%$

2% vocht (voor 2.1% na 1.9%): $Dr = -74.1\%$ ($\pm 4.2\%$)

6.332 kg → $\rho_{nat} = 1266.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1241.6 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -74.0\%$

6.291 kg → $\rho_{nat} = 1258.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1233.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -76.3\%$

6.475 kg → $\rho_{nat} = 1295.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1269.6 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -66.2\%$

6.222 kg → $\rho_{nat} = 1244.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1220.0 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -80.0\%$

6.349 kg → $\rho_{nat} = 1269.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1244.9 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -73.1\%$

6.311 kg → $\rho_{nat} = 1262.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1237.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -75.2\%$

4% vocht (voor 4.1% na 3.9%): $Dr = -88.1\%$ ($\pm 4.4\%$)

6.144 kg → $\rho_{nat} = 1228.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1181.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -90.8\%$

6.351 kg → $\rho_{nat} = 1270.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1221.3 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -79.7\%$

6.110 kg → $\rho_{nat} = 1222.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1175.0 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -92.6\%$

6.171 kg → $\rho_{nat} = 1234.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1186.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -89.3\%$

6.249 kg → $\rho_{nat} = 1249.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1201.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -85.1\%$

6.140 kg → $\rho_{nat} = 1228.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1180.8 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -91.0\%$

6% vocht (voor 6.1% na 5.9%): $Dr = -94.2\%$ ($\pm 4.6\%$)

6.303 kg → $\rho_{nat} = 1260.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1189.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -88.6\%$

6.099 kg → $\rho_{nat} = 1219.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1150.8 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -99.4\%$

6.091 kg → $\rho_{nat} = 1218.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1149.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -99.8\%$

6.256 kg → $\rho_{nat} = 1251.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1180.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -91.1\%$

6.286 kg → $\rho_{nat} = 1257.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1186.0 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -89.5\%$

6.153 kg → $\rho_{nat} = 1230.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1160.9 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -96.5\%$

8% vocht (voor 8.1% na 7.7%): $Dr = -85.7\%$ ($\pm 4.5\%$)

6.495 kg → $\rho_{nat} = 1299.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1202.8 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -84.8\%$

6.297 kg → $\rho_{nat} = 1259.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1166.1 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -95.1\%$

6.472 kg → $\rho_{nat} = 1294.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1198.5 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -86.0\%$

6.554 kg → $\rho_{nat} = 1310.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1213.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -81.8\%$

6.501 kg → $\rho_{nat} = 1300.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1203.9 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -84.5\%$

6.552 kg → $\rho_{nat} = 1310.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1213.3 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -81.9\%$

10% vocht (voor 10.0% na 9.7%): $Dr = -81.3\%$ ($\pm 2.7\%$)

6.712 kg → $\rho_{nat} = 1342.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1220.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -79.9\%$

6.755 kg → $\rho_{nat} = 1351.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1228.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -77.8\%$

6.659 kg → $\rho_{nat} = 1331.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1210.7 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -82.6\%$

6.613 kg → $\rho_{nat} = 1322.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1202.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -85.0\%$

Noordzeezand (voor 10.000 kg na 9.964 kg → verlies= 36 gr):

0% vocht: $Dr = -1.1\%$ ($\pm 2.6\%$)

7.533 kg → $\rho_{droog} = 1506.6 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -3.2\%$

7.622 kg → $\rho_{droog} = 1524.4 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = 2.9\%$

7.571 kg → $\rho_{droog} = 1514.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -0.6\%$

7.526 kg → $\rho_{droog} = 1505.2 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -3.7\%$

2% vocht (voor 2.1% na 1.9%): $Dr = -68.5\%$ ($\pm 3.2\%$)

6.721 kg → $\rho_{nat} = 1344.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog} = 1317.8 \text{ kg/m}^3$ → $Dr = -68.0\%$

6.658 kg → $\rho_{nat}=1331.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1305.5 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-72.3%
 6.786 kg → $\rho_{nat}=1357.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1330.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-63.6%
 6.693 kg → $\rho_{nat}=1338.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1312.4 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-69.9%

4% vocht (voor 4.2% na 4.0%): Dr=-80.9% (± 8.8%)

6.555 kg → $\rho_{nat}=1311.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1260.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-87.7%
 6.520 kg → $\rho_{nat}=1304.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1253.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-90.0%
 6.582 kg → $\rho_{nat}=1316.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1265.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-85.9%
 6.822 kg → $\rho_{nat}=1364.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1311.9 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-70.0%
 6.864 kg → $\rho_{nat}=1372.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1320.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-67.3%
 6.604 kg → $\rho_{nat}=1320.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1270.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-84.4%

6% vocht (voor 6.1% na 5.9%): Dr=-75.3% (± 7.2%)

6.923 kg → $\rho_{nat}=1384.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1306.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-72.0%
 6.852 kg → $\rho_{nat}=1370.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1292.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-76.6%
 6.665 kg → $\rho_{nat}=1333.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1257.5 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-88.7%
 6.970 kg → $\rho_{nat}=1394.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1315.1 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-69.0%
 7.002 kg → $\rho_{nat}=1400.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1321.1 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-66.9%
 6.823 kg → $\rho_{nat}=1364.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1287.4 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-78.5%

8% vocht (voor 8.3% na 8.1%): Dr=-76.2% (± 6.6%)

6.913 kg → $\rho_{nat}=1382.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1280.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-80.9%
 6.949 kg → $\rho_{nat}=1389.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1286.9 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-78.7%
 7.154 kg → $\rho_{nat}=1430.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1324.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-65.6%
 6.841 kg → $\rho_{nat}=1368.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1266.9 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-85.5%
 7.077 kg → $\rho_{nat}=1415.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1310.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-70.5%
 6.993 kg → $\rho_{nat}=1398.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1295.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-75.9%

10% vocht (voor 10.0% na 9.8%): Dr=-78.7% (± 3.0%)

7.052 kg → $\rho_{nat}=1410.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1282.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-80.3%
 7.030 kg → $\rho_{nat}=1406.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1278.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-81.6%
 7.156 kg → $\rho_{nat}=1431.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1301.1 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-73.8%
 7.071 kg → $\rho_{nat}=1414.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1285.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-79.1%

Zeyenzand (voor 10.000 kg na 9.953 kg → verlies= 47 gr):

0% vocht: Dr=-0.7% (± 1.4%)

6.388 kg → $\rho_{droog}=1277.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr= 1.4%
 6.323 kg → $\rho_{droog}=1264.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-2.6%
 6.356 kg → $\rho_{droog}=1271.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-0.6%
 6.347 kg → $\rho_{droog}=1269.4 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-1.1%

2% vocht (voor 2.2% na 2.0%): Dr=-78.3% (± 4.2%)

5.239 kg → $\rho_{nat}=1047.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1027.3 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-74.9%
 5.280 kg → $\rho_{nat}=1056.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1035.3 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-72.4%
 5.230 kg → $\rho_{nat}=1046.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1025.5 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-75.4%
 5.097 kg → $\rho_{nat}=1019.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=999.4 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-83.4%
 5.111 kg → $\rho_{nat}=1022.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1002.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-82.6%
 5.132 kg → $\rho_{nat}=1026.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1006.3 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-81.3%

4% vocht (voor 4.1% na 3.9%): Dr=-85.2% (± 2.1%)

5.118 kg → $\rho_{nat}=1023.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=984.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-88.0%
 5.198 kg → $\rho_{nat}=1039.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=999.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-83.3%
 5.201 kg → $\rho_{nat}=1040.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1000.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-83.1%
 5.144 kg → $\rho_{nat}=1028.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=989.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-86.5%

6% vocht (voor 6.1% na 5.9%): Dr=-91.5% (± 1.5%)

5.121 kg → $\rho_{nat}=1024.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=966.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-93.5%
 5.143 kg → $\rho_{nat}=1028.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=970.4 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-92.2%
 5.167 kg → $\rho_{nat}=1033.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=974.9 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-90.8%
 5.193 kg → $\rho_{nat}=1038.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=979.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-89.3%

8% vocht (voor 8.2% na 8.0%): Dr=-87.6% (± 4.0%)

5.314 kg → $\rho_{nat}=1062.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=984.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-88.0%
 5.341 kg → $\rho_{nat}=1068.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=989.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-86.5%
 5.454 kg → $\rho_{nat}=1090.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1010.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-80.1%
 5.317 kg → $\rho_{nat}=1063.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=984.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-87.9%
 5.213 kg → $\rho_{nat}=1042.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=965.4 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-93.7%
 5.288 kg → $\rho_{nat}=1057.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=979.3 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-89.5%

10% vocht (voor 10.0% na 9.8%): Dr=-86.1% (± 4.1%)

5.399 kg → $\rho_{nat}=1079.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=981.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-88.8%
 5.439 kg → $\rho_{nat}=1087.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=988.9 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-86.6%
 5.601 kg → $\rho_{nat}=1120.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1018.4 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-77.6%
 5.379 kg → $\rho_{nat}=1075.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=978.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-89.9%
 5.411 kg → $\rho_{nat}=1082.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=983.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-88.1%
 5.459 kg → $\rho_{nat}=1091.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=992.5 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-85.5%

Amerongenzand (voor 10.000 kg na 9.958 kg → verlies= 42 gr):

0% vocht: Dr= 4.9% (± 0.8%)

7.138 kg → $\rho_{droog}=1427.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr= 4.3%
 7.173 kg → $\rho_{droog}=1434.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr= 6.3%
 7.136 kg → $\rho_{droog}=1427.2 \text{ kg/m}^3$ → Dr= 4.2%
 7.148 kg → $\rho_{droog}=1429.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr= 4.9%

2% vocht (voor 2.2% na 2.0%): Dr=-52.6% (± 1.8%)

6.239 kg → $\rho_{nat}=1247.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1223.3 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-53.8%
 6.227 kg → $\rho_{nat}=1245.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1221.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-54.5%
 6.270 kg → $\rho_{nat}=1254.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1229.4 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-52.1%
 6.310 kg → $\rho_{nat}=1262.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1237.3 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-49.9%

4% vocht (voor 4.1% na 3.9%): Dr=-74.2% (± 1.9%)

6.015 kg → $\rho_{nat}=1203.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1156.7 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-72.8%
 5.931 kg → $\rho_{nat}=1186.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1140.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-77.4%
 5.995 kg → $\rho_{nat}=1199.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1152.9 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-73.9%
 6.020 kg → $\rho_{nat}=1204.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1157.7 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-72.5%

6% vocht (voor 6.1% na 5.9%): Dr=-79.8% (± 2.5%)

5.962 kg → $\rho_{nat}=1192.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1124.9 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-81.9%
 6.013 kg → $\rho_{nat}=1202.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1134.5 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-79.1%
 6.073 kg → $\rho_{nat}=1214.6 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1145.8 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-75.9%
 5.995 kg → $\rho_{nat}=1191.0 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1123.6 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-82.2%

8% vocht (voor 8.1% na 7.9%): Dr=-73.9% (± 7.0%)

6.134 kg → $\rho_{nat}=1226.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1135.9 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-78.7%
 6.257 kg → $\rho_{nat}=1251.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1158.7 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-72.2%
 6.272 kg → $\rho_{nat}=1254.4 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1161.5 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-71.4%
 6.426 kg → $\rho_{nat}=1285.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1190.0 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-63.3%
 6.271 kg → $\rho_{nat}=1254.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1161.3 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-71.5%
 5.996 kg → $\rho_{nat}=1199.2 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1110.4 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-86.0%

10% vocht (voor 10.0% na 9.8%): Dr=-69.8% (± 5.7%)

6.329 kg → $\rho_{nat}=1265.8 \text{ kg/m}^3$ → $\rho_{droog}=1150.7 \text{ kg/m}^3$ → Dr=-74.5%

6.608 kg	→	$\rho_{\text{nat}}=1321.6 \text{ kg/m}^3$	→	$\rho_{\text{droog}}=1201.5 \text{ kg/m}^3$	→	Dr=-60.1%
6.377 kg	→	$\rho_{\text{nat}}=1275.4 \text{ kg/m}^3$	→	$\rho_{\text{droog}}=1159.5 \text{ kg/m}^3$	→	Dr=-72.0%
6.467 kg	→	$\rho_{\text{nat}}=1293.4 \text{ kg/m}^3$	→	$\rho_{\text{droog}}=1175.8 \text{ kg/m}^3$	→	Dr=-67.4%
6.472 kg	→	$\rho_{\text{nat}}=1294.4 \text{ kg/m}^3$	→	$\rho_{\text{droog}}=1176.7 \text{ kg/m}^3$	→	Dr=-67.1%
6.268 kg	→	$\rho_{\text{nat}}=1253.6 \text{ kg/m}^3$	→	$\rho_{\text{droog}}=1139.6 \text{ kg/m}^3$	→	Dr=-77.7%

Bijlage 2.13 Bepaling nieuwe minimum en maximum dichtheid

De berekening van de nieuwe waarden voor de minimum en maximum dichtheid is hieronder uitgevoerd.

	BR	NZ	ZE	AM
Gewicht zand (kg)	4.051	4.076	3.423	3.797
Volume bak (cm ³)	2830	2830	2830	2830
Minimum dichtheid (kg/m ³)	1431.4	1440.3	1209.5	1341.7
Afname (%)	5.0	5.0	5.0	5.0
Inzinking (cm)	4.48	4.06	4.65	4.59
Volumeafname (cm ³)	817.2	740.6	848.2	837.3
Volume zand (cm ³)	2012.8	2089.4	1981.8	1992.7
Maximum dichtheid (kg/m ³)	2012.6	1950.3	1727.2	1905.4
Toename (%)	7.9	7.9	7.9	8.0

Bijlage 2.14 Herberekening van de relatieve dichtheid

In onderstaande tabellen staat in de 1^e kolom de waarde van de relatieve dichtheid uit Bijlage 2.6 t/m 2.10. In de 2^e t/m de 4^e kolom staan de herberekende waarden van de relatieve dichtheid door het gewicht van het zand waarmee de minimum dichtheid berekend is met 5% te verlagen, het gewicht van het zand in de bak en het vochtgehalte met 5% te verhogen. Bij het vochtgehalte van 0% wisselt vaak het teken van de relatieve dichtheid, vandaar dat deze waarden buiten beschouwing zijn gebleven.

Proevenserie 1:

BR:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-115.1%	-58.0%	-99.8%	-115.4%
4% vocht	-134.9%	-70.2%	-120.6%	-135.5%
6% vocht	-144.6%	-76.1%	-130.8%	-145.3%
8% vocht	-146.6%	-77.4%	-132.9%	-147.6%
10% vocht	-143.2%	-75.3%	-129.3%	-144.4%

NZ:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-145.1%	-68.0%	-126.4%	-145.5%
4% vocht	-166.7%	-80.3%	-149.0%	-167.4%
6% vocht	-167.6%	-80.8%	-150.0%	-168.6%
8% vocht	-166.2%	-80.0%	-148.4%	-167.5%
10% vocht	-168.2%	-81.1%	-150.6%	-169.8%

ZE:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-127.4%	-68.5%	-114.4%	-127.7%
4% vocht	-147.9%	-81.5%	-135.9%	-148.4%
6% vocht	-154.2%	-85.5%	-142.6%	-154.9%
8% vocht	-153.4%	-85.0%	-141.6%	-154.2%
10% vocht	-153.4%	-85.0%	-141.7%	-154.5%

AM:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-87.3%	-41.8%	-71.5%	-87.6%
4% vocht	-131.5%	-69.4%	-118.0%	-132.0%
6% vocht	-140.0%	-74.7%	-126.9%	-140.7%
8% vocht	-142.4%	-76.2%	-129.4%	-143.4%
10% vocht	-137.3%	-73.0%	-124.1%	-138.5%

Proevenserie 2:

BR:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-111.2%	-55.6%	-95.7%	-111.5%
4% vocht	-128.4%	-66.2%	-113.8%	-129.0%
6% vocht	-131.8%	-68.3%	-117.4%	-132.6%
8% vocht	-130.6%	-67.5%	-116.1%	-131.6%
10% vocht	-126.9%	-65.3%	-112.2%	-128.2%

NZ:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-129.4%	-59.0%	-109.8%	-129.8%
4% vocht	-151.1%	-71.4%	-132.6%	-151.8%
6% vocht	-151.9%	-71.9%	-133.5%	-153.0%
8% vocht	-156.9%	-74.7%	-138.7%	-158.2%
10% vocht	-152.4%	-72.1%	-134.0%	-154.1%

ZE:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-119.1%	-63.3%	-105.7%	-119.4%
4% vocht	-130.3%	-70.4%	-117.5%	-130.8%
6% vocht	-134.4%	-72.9%	-121.7%	-135.1%
8% vocht	-141.8%	-77.7%	-129.5%	-142.7%
10% vocht	-136.1%	-74.1%	-123.6%	-137.3%

AM:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-75.1%	-34.2%	-58.7%	-75.4%
4% vocht	-121.5%	-63.1%	-107.5%	-122.0%
6% vocht	-126.6%	-66.3%	-112.8%	-127.3%
8% vocht	-126.3%	-66.2%	-112.5%	-127.3%
10% vocht	-119.7%	-62.0%	-105.6%	-121.0%

Proevenserie 3:

BR:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-100.9%	-49.2%	-84.9%	-101.2%
4% vocht	-122.3%	-62.4%	-107.4%	-122.9%
6% vocht	-127.6%	-65.7%	-112.9%	-128.4%
8% vocht	-130.2%	-67.3%	-115.7%	-131.3%
10% vocht	-124.7%	-63.9%	-109.9%	-126.0%

NZ:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-126.3%	-57.2%	-106.6%	-126.7%
4% vocht	-140.6%	-65.4%	-121.6%	-141.3%
6% vocht	-144.0%	-67.3%	-125.1%	-145.0%
8% vocht	-146.9%	-69.0%	-128.2%	-148.3%
10% vocht	-144.1%	-67.4%	-125.2%	-145.8%

ZE:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-112.9%	-59.3%	-99.2%	-113.2%
4% vocht	-130.9%	-70.7%	-118.0%	-131.8%
6% vocht	-132.1%	-71.5%	-119.3%	-132.8%
8% vocht	-129.1%	-69.6%	-116.2%	-130.1%
10% vocht	-130.2%	-70.3%	-117.3%	-131.4%

AM:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-75.7%	-34.6%	-59.4%	-76.0%
4% vocht	-118.8%	-61.5%	-104.7%	-119.4%
6% vocht	-118.7%	-61.4%	-104.5%	-119.5%
8% vocht	-118.4%	-61.2%	-104.2%	-119.4%
10% vocht	-113.9%	-58.4%	-99.5%	-115.2%

Proevenserie 4:

BR:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-110.0%	-54.8%	-94.5%	-110.3%
4% vocht	-128.2%	-66.1%	-113.6%	-128.8%
6% vocht	-132.1%	-68.5%	-117.7%	-133.0%
8% vocht	-132.1%	-68.4%	-117.6%	-133.1%
10% vocht	-128.4%	-66.2%	-113.8%	-129.8%

NZ:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-139.6%	-64.8%	-120.6%	-140.0%
4% vocht	-155.5%	-73.9%	-137.2%	-156.2%
6% vocht	-159.7%	-76.3%	-141.7%	-160.8%
8% vocht	-160.6%	-76.8%	-142.6%	-161.9%
10% vocht	-153.8%	-72.9%	-135.5%	-155.5%

ZE:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-134.2%	-72.8%	-121.6%	-134.5%
4% vocht	-151.7%	-83.9%	-139.9%	-152.2%
6% vocht	-151.6%	-83.8%	-139.8%	-152.2%
8% vocht	-153.3%	-84.9%	-141.6%	-154.2%
10% vocht	-153.3%	-84.9%	-141.6%	-154.3%

AM:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-84.9%	-40.3%	-69.0%	-85.2%
4% vocht	-133.6%	-70.7%	-120.2%	-134.1%
6% vocht	-136.7%	-72.6%	-123.4%	-137.4%
8% vocht	-135.1%	-71.6%	-121.7%	-136.1%
10% vocht	-132.7%	-70.1%	-119.2%	-133.9%

Proevenserie 5:

BR:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-74.1%	-32.7%	-56.8%	-74.5%
4% vocht	-88.1%	-41.3%	-71.5%	-88.7%
6% vocht	-94.2%	-45.1%	-77.8%	-95.1%
8% vocht	-85.7%	-39.9%	-69.0%	-86.9%
10% vocht	-81.3%	-37.2%	-64.4%	-82.6%

NZ:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-68.5%	-24.2%	-45.8%	-68.9%
4% vocht	-80.9%	-31.3%	-58.9%	-81.7%
6% vocht	-75.3%	-28.1%	-53.0%	-76.5%
8% vocht	-76.2%	-28.6%	-54.0%	-77.8%
10% vocht	-78.7%	-30.1%	-56.6%	-80.7%

ZE:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-78.3%	-37.4%	-62.8%	-78.6%
4% vocht	-85.2%	-41.8%	-70.1%	-85.8%
6% vocht	-91.5%	-45.7%	-76.6%	-92.3%
8% vocht	-87.6%	-43.3%	-72.6%	-88.7%
10% vocht	-86.1%	-42.3%	-71.0%	-87.4%

AM:	Dr	Dr'	Dr''	Dr'''
2% vocht	-52.6%	-20.2%	-35.1%	-52.9%
4% vocht	-74.2%	-33.7%	-57.8%	-74.8%
6% vocht	-79.8%	-37.2%	-63.7%	-80.7%
8% vocht	-73.9%	-33.5%	-57.5%	-75.1%
10% vocht	-69.8%	-30.9%	-53.2%	-71.3%

Bijlage 2.15 Procentuele verandering van de Dr

In onderstaande tabellen is in de 3 kolommen de procentuele verandering van Dr weergegeven a.g.v. de aangebrachte wijzigingen in de berekening. Deze zijn respectievelijk: de afname met 5% van het gewicht aan zand waarmee de minimum en maximum dichtheid berekend zijn, de toename met 5% van het gewicht van het zand in de bak en het vochtgehalte. Een plus (min) betekent dat de absolute waarde van de relatieve dichtheid toeneemt (afneemt).

Proevenserie 1:

BR:			
2% vocht	-49.6%	-13.3%	+0.3%
4% vocht	-48.0%	-10.6%	+0.4%
6% vocht	-47.3%	-9.6%	+0.5%
8% vocht	-47.2%	-9.4%	+0.7%
10% vocht	-47.4%	-9.7%	+0.9%

NZ:			
2% vocht	-53.2%	-12.9%	+0.3%
4% vocht	-51.8%	-10.6%	+0.4%
6% vocht	-51.8%	-10.5%	+0.6%
8% vocht	-51.9%	-10.7%	+0.8%
10% vocht	-51.8%	-10.5%	+1.0%

ZE:			
2% vocht	-46.2%	-10.2%	+0.2%
4% vocht	-44.9%	-8.1%	+0.3%
6% vocht	-44.6%	-7.6%	+0.4%
8% vocht	-44.3%	-7.6%	+0.6%
10% vocht	-44.6%	-7.6%	+0.7%

AM:			
2% vocht	-52.1%	-18.0%	+0.4%
4% vocht	-47.2%	-10.3%	+0.4%
6% vocht	-46.7%	-9.4%	+0.5%
8% vocht	-46.5%	-9.1%	+0.7%
10% vocht	-46.8%	-9.7%	+0.9%

Proevenserie 2:

BR:			
2% vocht	-50.0%	-13.9%	+0.3%
4% vocht	-48.5%	-11.4%	+0.4%
6% vocht	-48.2%	-11.0%	+0.6%
8% vocht	-48.3%	-11.1%	+0.8%
10% vocht	-48.6%	-11.6%	+1.0%

NZ:			
2% vocht	-54.4%	-15.1%	+0.3%
4% vocht	-52.8%	-12.2%	+0.5%
6% vocht	-52.7%	-12.1%	+0.7%
8% vocht	-52.4%	-11.6%	+0.9%
10% vocht	-52.7%	-12.1%	+1.1%

ZE:			
2% vocht	-46.9%	-11.3%	+0.2%
4% vocht	-46.0%	-9.9%	+0.4%
6% vocht	-45.7%	-9.4%	+0.5%
8% vocht	-45.3%	-8.7%	+0.6%
10% vocht	-45.6%	-9.2%	+0.8%

AM:			
2% vocht	-54.4%	-21.8%	+0.4%
4% vocht	-48.0%	-11.6%	+0.4%
6% vocht	-47.6%	-10.9%	+0.6%
8% vocht	-47.6%	-10.9%	+0.8%
10% vocht	-48.2%	-11.8%	+1.1%

Proevenserie 3:

BR:			
2% vocht	-51.2%	-15.9%	+0.3%
4% vocht	-49.0%	-12.2%	+0.5%
6% vocht	-48.5%	-11.5%	+0.7%
8% vocht	-48.3%	-11.2%	+0.8%
10% vocht	-48.8%	-11.9%	+1.1%

NZ:			
2% vocht	-54.7%	-15.6%	+0.3%
4% vocht	-53.5%	-13.5%	+0.5%
6% vocht	-53.2%	-13.1%	+0.7%
8% vocht	-53.0%	-12.7%	+0.9%
10% vocht	-53.2%	-13.1%	+1.2%

ZE:			
2% vocht	-47.5%	-12.2%	+0.2%
4% vocht	-46.0%	-9.8%	+0.4%
6% vocht	-45.9%	-9.7%	+0.5%
8% vocht	-46.1%	-10.0%	+0.6%
10% vocht	-46.0%	-9.9%	+0.8%

AM:			
2% vocht	-54.3%	-21.6%	+0.4%
4% vocht	-48.3%	-11.9%	+0.5%
6% vocht	-48.3%	-11.9%	+0.7%
8% vocht	-48.3%	-12.0%	+0.9%
10% vocht	-48.7%	-12.7%	+1.1%

Proevenserie 4:

BR:			
2% vocht	-50.1%	-14.1%	+0.3%
4% vocht	-48.5%	-11.4%	+0.4%
6% vocht	-48.2%	-10.9%	+0.6%
8% vocht	-48.2%	-10.9%	+0.8%
10% vocht	-48.5%	-11.4%	+1.0%

NZ:			
2% vocht	-53.6%	-13.6%	+0.3%
4% vocht	-52.5%	-11.7%	+0.5%
6% vocht	-52.2%	-11.3%	+0.6%
8% vocht	-52.2%	-11.2%	+0.8%
10% vocht	-52.6%	-11.9%	+1.1%

ZE:			
2% vocht	-45.7%	-9.4%	+0.2%
4% vocht	-44.7%	-7.8%	+0.3%
6% vocht	-44.7%	-7.8%	+0.4%
8% vocht	-44.6%	-7.7%	+0.6%
10% vocht	-44.6%	-7.7%	+0.7%

AM:			
2% vocht	-52.5%	-18.7%	+0.4%
4% vocht	-47.1%	-10.1%	+0.4%
6% vocht	-46.9%	-9.7%	+0.6%
8% vocht	-47.0%	-9.9%	+0.7%
10% vocht	-47.2%	-10.2%	+0.9%

Proevenserie 5:

BR:			
2% vocht	-55.9%	-23.4%	+0.5%
4% vocht	-53.1%	-18.9%	+0.7%
6% vocht	-52.1%	-17.3%	+1.0%
8% vocht	-53.5%	-19.5%	+1.4%
10% vocht	-54.3%	-20.9%	+1.9%

NZ:			
2% vocht	-64.6%	-33.0%	+0.7%
4% vocht	-61.3%	-27.2%	+1.0%
6% vocht	-62.6%	-29.6%	+1.7%
8% vocht	-62.4%	-29.2%	+2.2%
10% vocht	-61.8%	-28.1%	+2.5%

ZE:			
2% vocht	-52.3%	-19.8%	+0.4%
4% vocht	-51.0%	-17.8%	+0.7%
6% vocht	-50.0%	-16.2%	+0.9%
8% vocht	-50.6%	-17.1%	+1.3%
10% vocht	-50.9%	-17.5%	+1.6%

AM:			
2% vocht	-61.6%	-33.2%	+0.7%
4% vocht	-54.6%	-22.1%	+0.9%
6% vocht	-53.4%	-20.2%	+1.1%
8% vocht	-54.7%	-22.2%	+1.6%
10% vocht	-55.7%	-23.8%	+2.2%

Bijlage 3.1 Berekening van de waterverplaatsing van het volle schip

De berekening van de waterverplaatsing van het volle schip is uitgevoerd aan de hand van de, m.b.v. het T.D.S.-systeem, gemeten waarden voor de diepgang voor en achter (D_v en D_a). Deze beide waarden staan rechts naast de grafiek voor het verloop van de waterverplaatsing tijdens het zuigen. De eenheid van de gemeten waarde is volt. Er geldt dat 0 tot 10 volt overeenkomt met 0 tot 1 bar. Een bar komt overeen met 100 kPa of 100 kN/m². Aangezien voor de waterdruk onder het schip geldt:

$$\text{waterdruk} = \rho_{\text{zeewater}} * g * \text{diepgang}$$

kan met bovenstaande formule de diepgang berekend worden. Stel dat geldt $\rho_{\text{zeewater}} = 1020 \text{ kg/m}^3$ en $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ dan volgt hieruit dat voor de waarde van de diepgang geldt:

$$\text{diepgang (in meters)} = D \text{ (in volt)} / 1.00062$$

Om de waterverplaatsing te berekenen moet de diepgang ter plaatse van de loodlijnen bekend zijn. I.v.m. de drukverdeling onder het schip zijn de drukopnemers meer naar het midden geplaatst. Bij de 'Cornelia' zit de voorste drukopnemer 25.45 meter van de loodlijn voor en de achterste drukopnemer 35.20 meter van de loodlijn achter. Als er een lineair verloop van de diepgang wordt aangenomen geldt voor de diepgang op de loodlijnen (D_{v11} en D_{a11}):

$$D_{v11} = D_v - (D_a - D_v) * 0.561$$

$$D_{a11} = D_a + (D_a - D_v) * 0.776$$

De beide uitkomsten voor de diepgang op de loodlijnen voor en achter moeten daarna gemiddeld worden en deze waarde D_g wordt gebruikt in het Carènediagram. Het Carènediagram van de 'Cornelia' wordt geschematiseerd door een 2^e graads polynoom van de volgende vorm:

$$W \text{ (in m}^3\text{)} = 25.46 * D_g^2 + 1570.88 * D_g - 295.00$$

De berekende waarde voor de waterverplaatsing W moet daarna nog met de dichtheid van het zeewater vermenigvuldigd worden om de waterverplaatsing in tonnen te vinden. De gevonden waarde moet tenslotte nog gecorrigeerd worden voor de inhoud van de ballast- en trimtanks. De inhoud kan eveneens rechts naast de grafiek voor het verloop van de waterverplaatsing afgelezen worden achter 'Ba'. Deze waarde is vermeld in kubieke meters en moet dus ook weer met de dichtheid van het zeewater vermenigvuldigd worden om het gewicht te verkrijgen. Nadat de waarde voor het gewicht van de ballast- en trimtanks van de eerder berekende waarde voor de waterverplaatsing is afgetrokken wordt de waarde voor de waterverplaatsing van het volle schip gevonden, zodat de berekening uit § 3.4.1 uitgevoerd kan worden. Op de volgende bladzijde is de bovenstaande berekening in tabelvorm weergegeven. In de eerste kolom van de tabel staan de reisnummers vermeld. In de tweede kolom de staan de waarden voor de diepgang (D_v en D_a in volt) weergegeven en in de derde kolom zijn deze waarden voor de diepgang omgerekend in meters. In de vierde kolom is de waarde voor de diepgang omgerekend naar de plaats van de loodlijnen (D_{v11} en D_{a11} in meters) en in de vijfde kolom zijn beide waarden gemiddeld. In de zesde en zevende kolom zijn respectievelijk de waarden voor de waterverplaatsing van het volle schip vermeld (W in tonnen) en het gewicht van de ballast- en trimtanks (Ba eveneens in

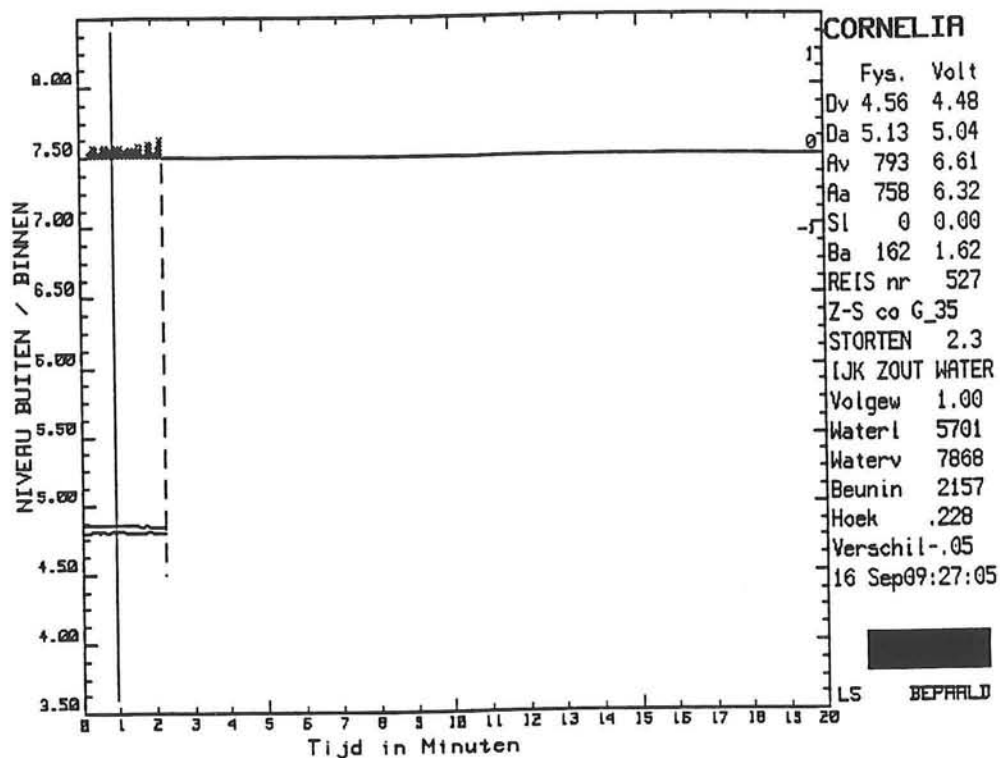
tonnen). In de achtste kolom is tenslotte de gecorrigeerde waarden voor de waterverplaatsing van het volle schip vermeld (W in tonnen).

Reis	Dv/Da	Dv/Da	Dv11/Da11	Dg	W'	Ba	W
280	8.35 8.41	8.345 8.405	8.311 8.451	8.381	14952.6	42.8	14909.7
281	8.30 8.47	8.295 8.465	8.200 8.597	8.398	14986.8	39.8	14947.1
282	8.40 8.53	8.395 8.525	8.322 8.626	8.474	15141.2	42.8	15098.4
283	8.52 8.48	8.515 8.475	8.537 8.444	8.490	15175.4	38.8	15136.6
284	8.29 8.28	8.285 8.275	8.290 8.267	8.279	14744.1	19.4	14724.7
285	8.18 8.32	8.175 8.315	8.096 8.423	8.260	14705.7	21.4	14684.3
286	8.46 8.43	8.455 8.425	8.472 8.402	8.437	15065.3	22.4	15042.9
287	8.26 8.23	8.255 8.225	8.272 8.202	8.237	14658.5	20.4	14638.1
289	8.27 8.46	8.265 8.455	8.158 8.602	8.380	14950.5	25.5	14925.0
290	8.28 8.26	8.275 8.255	8.286 8.239	8.263	14711.4	26.5	14684.9
291	8.41 8.31	8.405 8.305	8.461 8.227	8.344	14876.9	30.6	14846.3
292	8.21 8.35	8.205 8.345	8.126 8.453	8.290	14766.7	33.7	14733.0
293	8.36 8.25	8.355 8.245	8.416 8.160	8.288	14762.9	50.0	14712.9
295	8.39 8.37	8.385 8.365	8.396 8.349	8.373	14935.1	31.6	14903.4
296	8.32 8.39	8.315 8.385	8.276 8.439	8.357	14903.9	33.7	14870.2
297	8.55 8.39	8.545 8.385	8.634 8.261	8.448	15087.8	37.7	15050.1
298	8.18 8.19	8.175 8.185	8.169 8.193	8.181	14545.6	75.5	14470.1
300	8.40 8.32	8.395 8.315	8.440 8.253	8.346	14881.2	28.8	14842.5

301	8.29 8.35	8.285 8.345	8.251 8.391	8.321	14830.5	40.8	14789.7
302	8.39 8.36	8.385 8.355	8.402 8.332	8.367	14922.7	44.9	14877.8
303	8.41 8.41	8.405 8.405	8.405 8.405	8.405	15000.6	45.9	14954.7

Bijlage 3.2 Berekening van de waterverplaatsing van het lege schip

De berekening van de waterverplaatsing van het lege schip is op dezelfde wijze uitgevoerd als de berekening van de waterverplaatsing van het volle schip, die beschreven staat in de Bijlage 3.1. De benodigde gegevens zijn afgeleid uit de onderstaande T.D.S.-grafiek.



Reis	Dv/Da	Dv/Da	Dv11/Da11	Dg	W'	Ba	W
527	4.48	4.477	4.163	4.817	8019.9	165.2	7854.7
	5.04	5.037	5.472				

IF 180 = 292 m³ → 283.2 ton
MDO/MGO = 142 m³ → 122.1 ton
water = 37 m³ → 37.0 ton +

442.1 ton

Het gewicht van de lading water in het beun bedroeg:

7868 - 5701 = 2167 ton

De waterverplaatsing van het lege schip was dus:

7854.7 - 442.1 - 2167 = 5245.6 ton

Bijlage 3.3 Berekening van het gewicht en volume van het zand in het beun aan de hand van de meetresultaten

Op de volgende bladzijden zijn de resultaten samengevat van alle reizen dat er gemeten is. Bovendien is de berekening van het gewicht en volume van het zand in het beun weergegeven.

Op de linkerbladzijde zijn steeds twee grafieken te zien. De bovenste grafiek geeft het verloop van het draagvermogen van de 'Cornelia' weer gedurende het zuigen. De grafiek is aan boord geplot. De tweede grafiek geeft het verloop van het zandniveau in het beun weer. Deze grafiek is getekend m.b.v. de waarden die bovenaan op de rechterbladzijde staan vermeld in de linker kolom. Deze kolom bevat de 24 waarden van het zandniveau die gemeten zijn aan de rand van het beun. De rechter kolom bevat de waarden van het zandniveau die gemeten zijn met de 10 peilbuizen. Achter beide kolommen staan de extra uitgevoerde metingen vermeld. Een plus betekent dat het zandniveau gedaald is en een min dat het zandniveau gestegen is t.o.v. de eerder gedane meting. Nadat de gemeten waarden gemiddeld zijn is m.b.v. de meetbrief uit Bijlage 3.4 het volume van het zand bepaald.

Onderaan de rechterbladzijde is de berekening uit § 3.4.1 weergegeven. De waarden voor de waterverplaatsing van het volle schip kunnen uit Bijlage 3.1 afgelezen worden. De waarden voor het gewicht van de bunkers zijn berekend door lineaire interpolatie van de waarden uit de onderstaande tabel. De inhoud van de bunkers is steeds om 0.00 uur 's nachts bepaald. Om het gewicht van de bunkers te kunnen berekenen moet het soortelijk gewicht van de brandstoffen en het water bekend zijn. De waarden voor het soortelijk gewicht zijn:

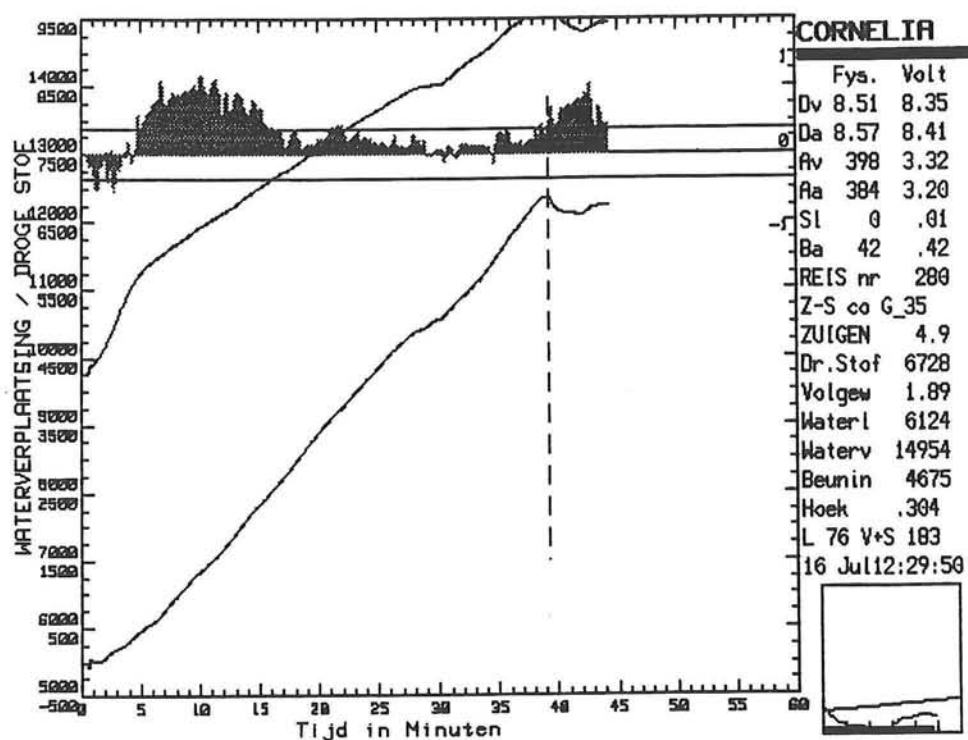
$$\text{IF 180} = 0.97 \text{ ton/m}^3 \quad \text{MDO/MGO} = 0.86 \text{ ton/m}^3 \quad \text{water} = 1.00 \text{ ton/m}^3$$

	16-7	17-7	18-7	19-7	20-7	21-7
IF 180	381 m ³	361 m ³	348 m ³	316 m ³	295 m ³	277 m ³
MDO/MGO	136 m ³	130 m ³	112 m ³	111 m ³	92 m ³	88 m ³
water	95 m ³	97 m ³	98 m ³	100 m ³	104 m ³	106 m ³
gewicht	581.5	559.0	531.9	502.0	469.3	450.4

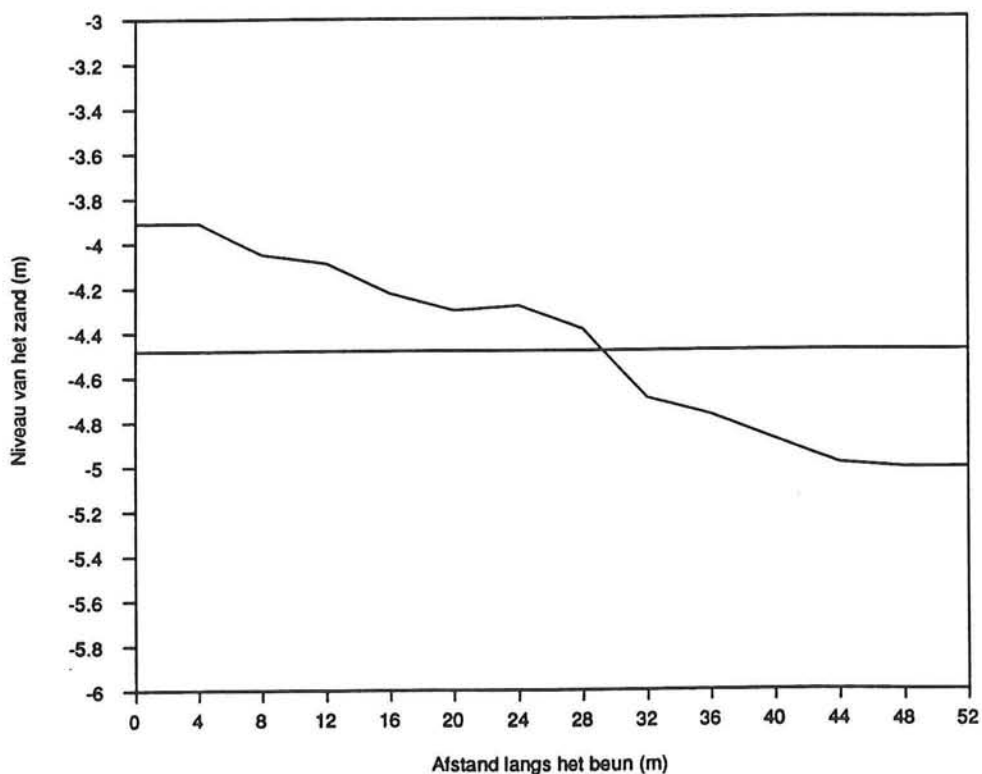
De waarden voor het gewicht zijn vermeld in tonnen.

Om het gewicht van het water op het zand te kunnen berekenen moet eerst het volume van het water bepaald worden. Dit is gebeurd m.b.v. de grafieken die onderaan op de linkerbladzijden staan. Uit deze grafieken kan de oppervlakte die door het water wordt ingenomen bepaald worden. Door deze waarde te vermenigvuldigen met 12.6 meter (= de breedte van het beun) wordt het volume water gevonden. Als deze waarde vermenigvuldigd wordt met 1020 (= de dichtheid van zeewater) wordt het gewicht van het water gevonden dat op het zand staat.

Als laatste is op dezelfde wijze bepaald hoe groot het volumepercentage van het zand is dat boven het waterniveau ligt.



Reisnummer 280



Reisnummer 280: datum 16-7-92 tijdstip 13:30

Punt	Waarde	Extra
1	3.82 m	+0.02 m
2	4.01 m	+0.00 m
3	4.06 m	+0.00 m
4	4.12 m	
5	4.09 m	
6	4.01 m	
7	4.19 m	
8	4.59 m	
9	4.43 m	
10	4.52 m	
11	4.91 m	
12	5.02 m	
13	5.00 m	
14	5.07 m	
15	5.24 m	
16	5.11 m	
17	4.80 m	
18	4.58 m	
19	4.55 m	
20	4.51 m	
21	4.33 m	
22	4.12 m	+0.00 m
23	4.09 m	+0.03 m
24	4.00 m	+0.00 m

Punt	Waarde	Extra
1	3.87 m	+0.01 m
2	4.07 m	
3	4.22 m	
4	4.22 m	
5	4.93 m	
6	5.02 m	
7	4.84 m	
8	4.49 m	
9	4.05 m	+0.00 m
10	3.91 m	+0.00 m

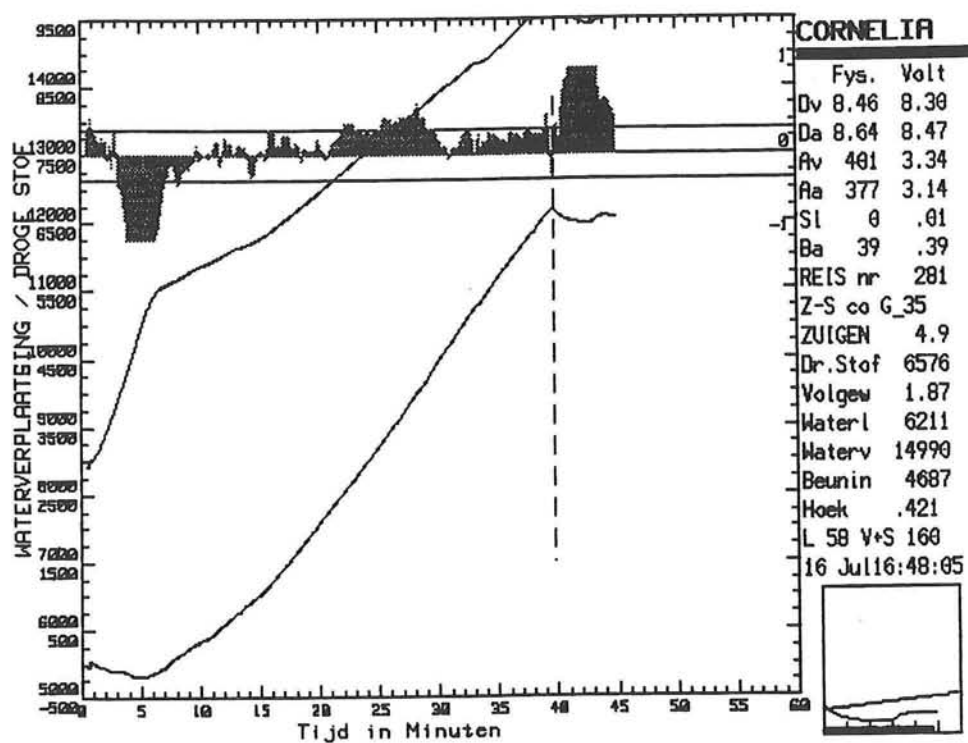
Gemiddelde waarde = 4.362 m
 → Volume = 4374.2 m³

Gemiddelde waarde = 4.465 m → volume = 4306.8 m³

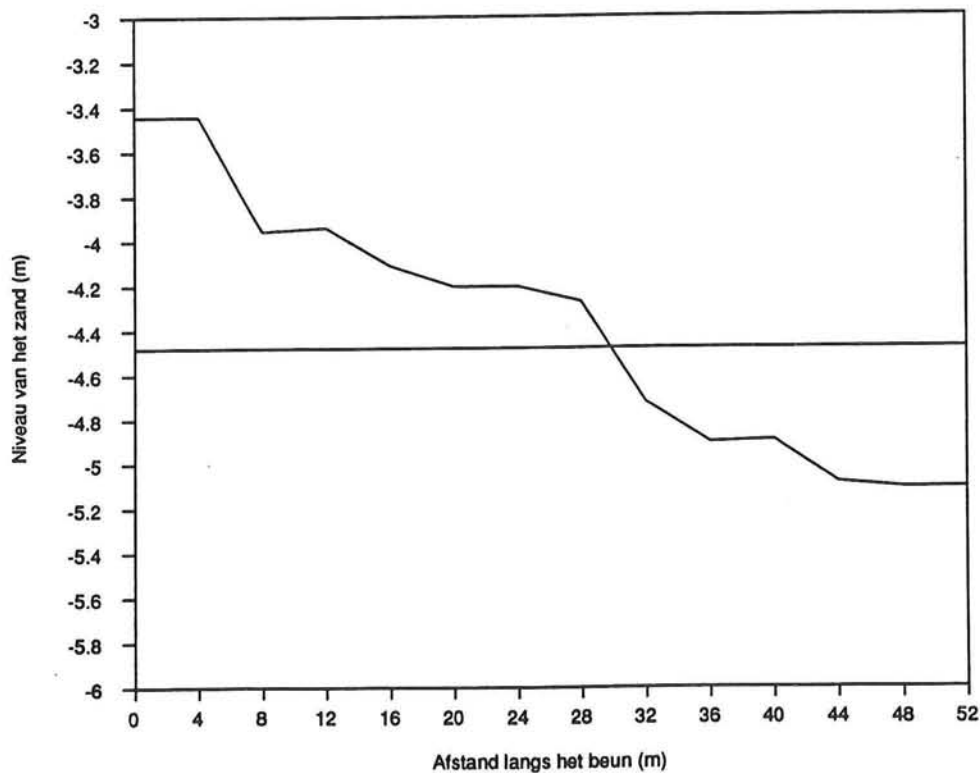
Waterverplaatsing schip vol = 14909.7 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (13:30) = 568.8 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 111.9 ton

Gewicht van het zand = 8975.4 ton

Volume zand boven water = 119.6 m³ → 2.8%



Reisnummer 281



Reisnummer 281: datum 16-7-92 tijdstip 18:00

Punt	Waarde	Extra
1	3.38 m	+0.01 m
2	3.94 m	-0.01 m
3	3.90 m	+0.02 m
4	4.03 m	
5	4.11 m	
6	4.06 m	
7	4.21 m	
8	4.49 m	
9	4.71 m	
10	4.60 m	
11	5.02 m	
12	5.05 m	
13	5.17 m	
14	5.15 m	
15	5.19 m	
16	5.10 m	
17	4.96 m	
18	4.34 m	
19	4.35 m	
20	4.30 m	
21	4.19 m	
22	3.98 m	+0.01 m
23	3.97 m	+0.07 m
24	3.51 m	+0.02 m

Punt	Waarde	Extra
1	3.81 m	+0.01 m
2	3.88 m	
3	4.18 m	
4	4.34 m	
5	5.10 m	
6	5.14 m	
7	4.50 m	
8	4.27 m	
9	4.01 m	-
10	3.29 m	-

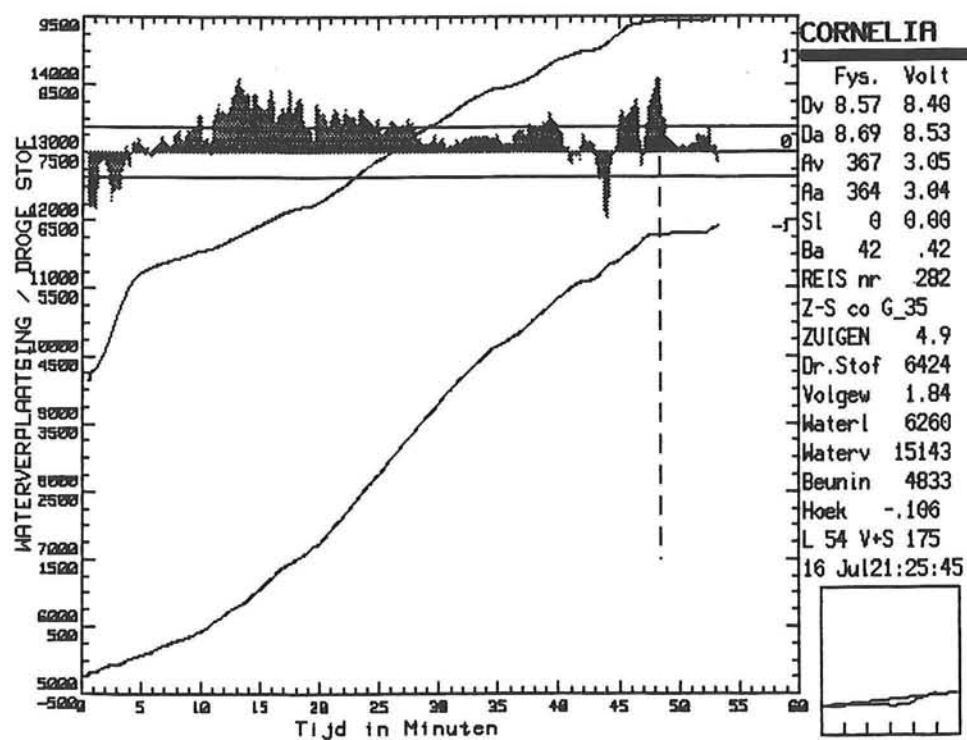
Gemiddelde waarde = 4.252 m
 → Volume = 4446.2 m³

Gemiddelde waarde = 4.405 m → volume = 4346.0 m³

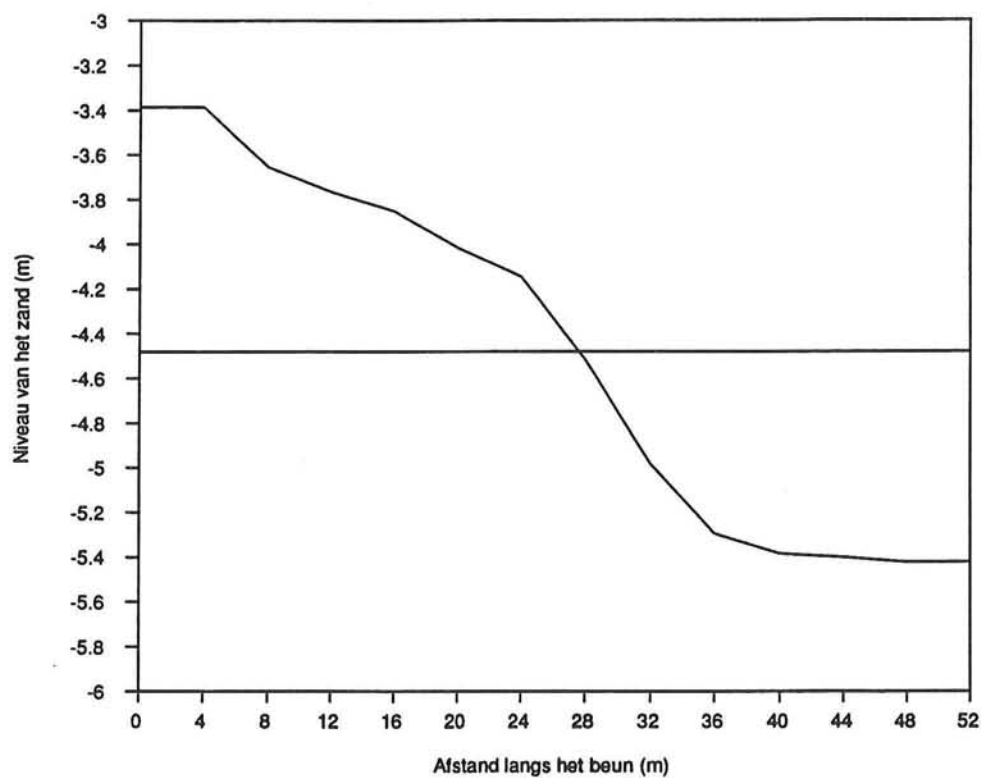
Waterverplaatsing schip vol = 14947.1 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (18:00) = 564.6 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 132.6 ton

Gewicht van het zand = 8996.3 ton

Volume zand boven water = 199.7 m³ → 4.6%



Reisnummer 282



Reisnummer 282: datum 16-7-92 tijdstip 22:30

Punt	Waarde	Extra
1	3.37 m	+0.06 m
2	3.61 m	+0.03 m
3	3.87 m	+0.00 m
4	3.87 m	
5	4.13 m	
6	4.19 m	
7	4.45 m	
8	5.09 m	
9	5.31 m	
10	5.42 m	
11	5.46 m	
12	5.48 m	
13	5.37 m	
14	5.34 m	
15	5.35 m	
16	5.28 m	
17	4.88 m	
18	4.58 m	
19	4.10 m	
20	3.90 m	
21	3.83 m	
22	3.66 m	+0.02 m
23	3.70 m	+0.03 m
24	3.40 m	+0.02 m

Punt	Waarde	Extra
1	3.69 m	+0.11 m
2	4.00 m	
3	4.50 m	
4	5.23 m	
5	5.54 m	
6	5.30 m	
7	4.87 m	
8	3.97 m	
9	3.65 m	+0.02 m
10	3.41 m	+0.00 m

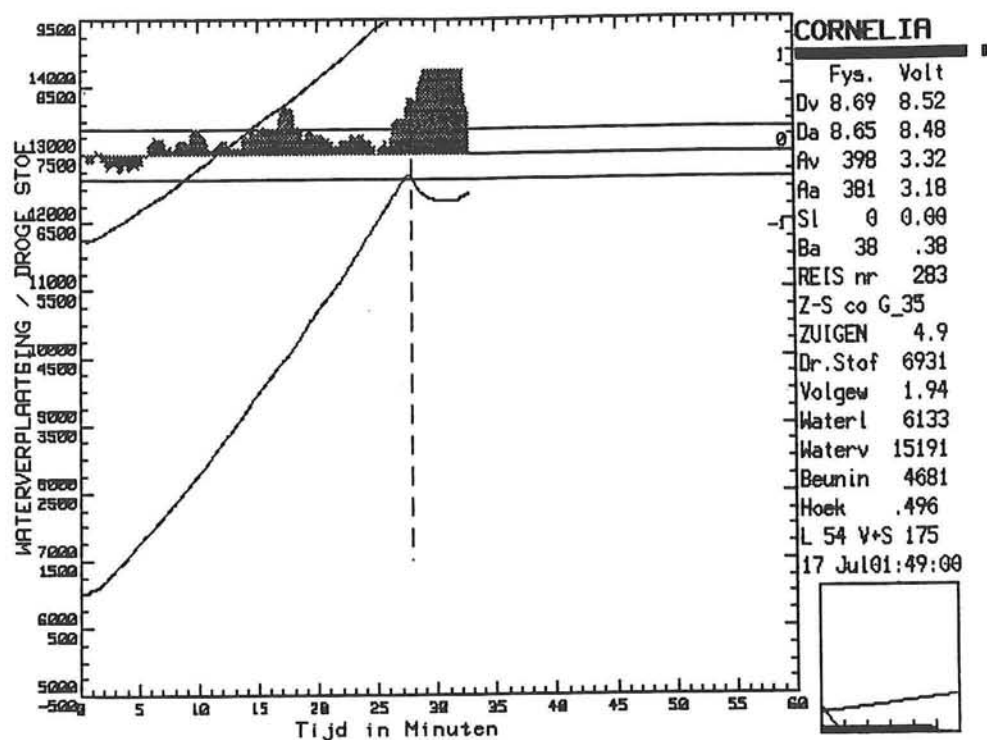
Gemiddelde waarde = 4.416 m
 → Volume = 4338.8 m³

Gemiddelde waarde = 4.485 m → volume = 4293.7 m³

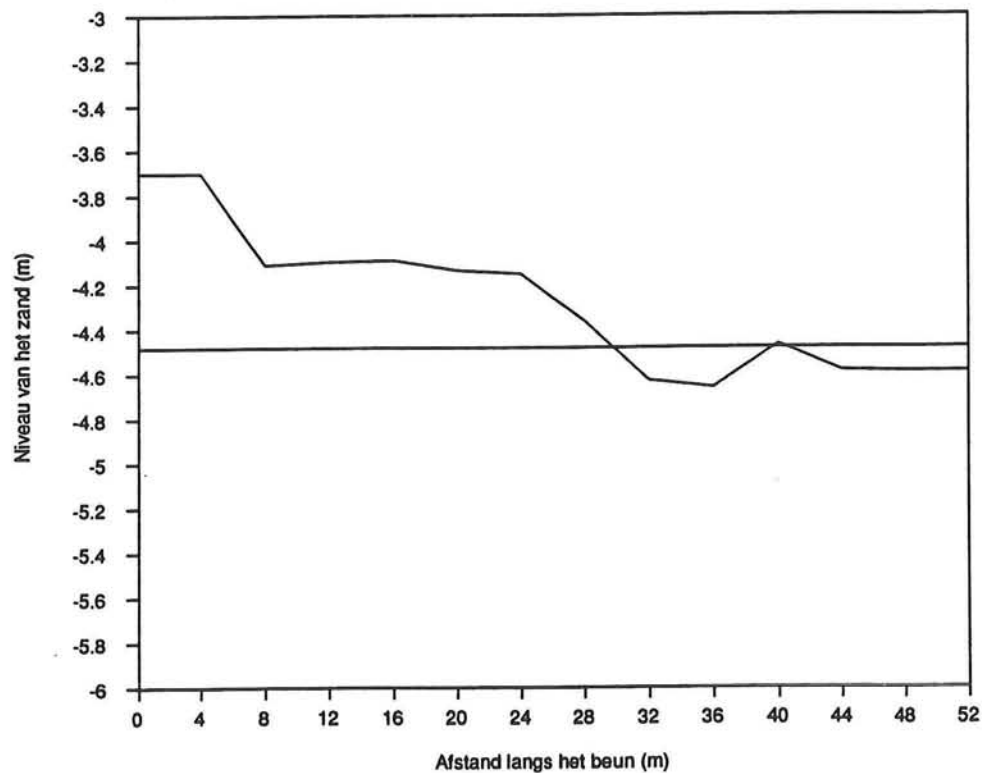
Waterverplaatsing schip vol = 15098.4 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (22:30) = 560.4 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 235.5 ton

Gewicht van het zand = 9048.9 ton

Volume zand boven water = 231.7 m³ → 5.4%



Reisnummer 283



Reisnummer 283: datum 17-7-92 tijdstip 03:00

Punt	Waarde	Extra
1	3.68 m	-
2	4.10 m	-
3	4.19 m	-
4	4.19 m	
5	4.22 m	
6	4.17 m	
7	4.51 m	
8	4.84 m	
9	4.90 m	
10	4.46 m	
11	4.67 m	
12	4.69 m	
13	4.49 m	
14	4.50 m	
15	4.47 m	
16	4.42 m	
17	4.42 m	
18	4.21 m	
19	4.13 m	
20	4.05 m	
21	3.99 m	
22	4.00 m	-
23	4.12 m	-
24	3.72 m	-

Punt	Waarde	Extra
1	4.09 m	-
2	4.24 m	
3	4.37 m	
4	4.38 m	
5	4.73 m	
6	4.42 m	
7	4.16 m	
8	4.03 m	
9	3.91 m	-
10	3.45 m	-

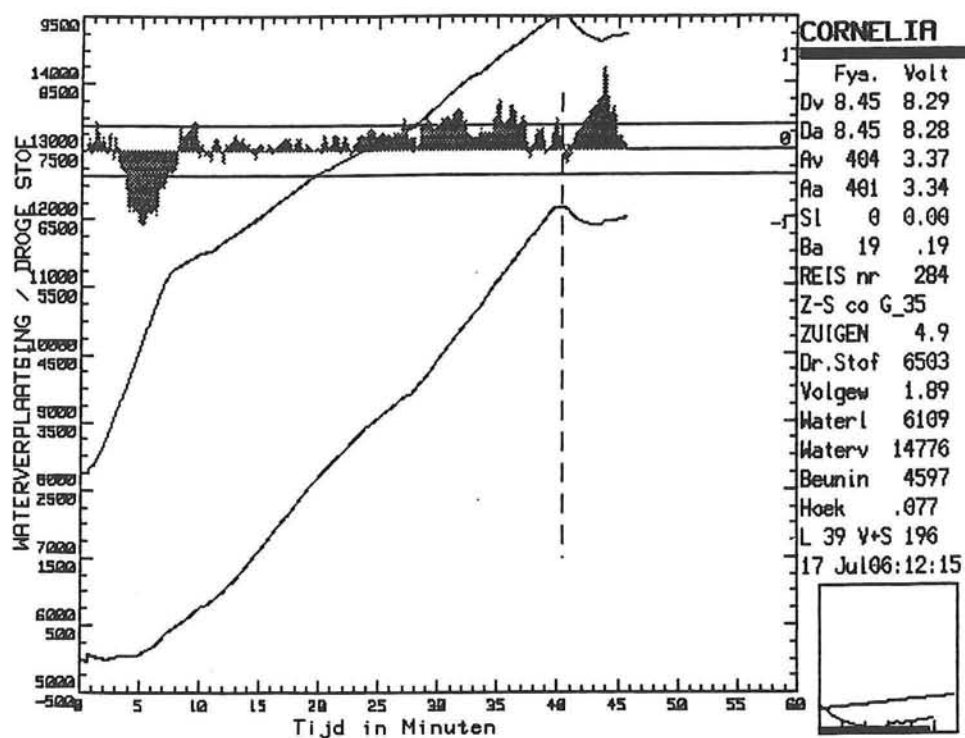
Gemiddelde waarde = 4.178 m
 → Volume = 4494.7 m³

Gemiddelde waarde = 4.298 m → volume = 4416.1 m³

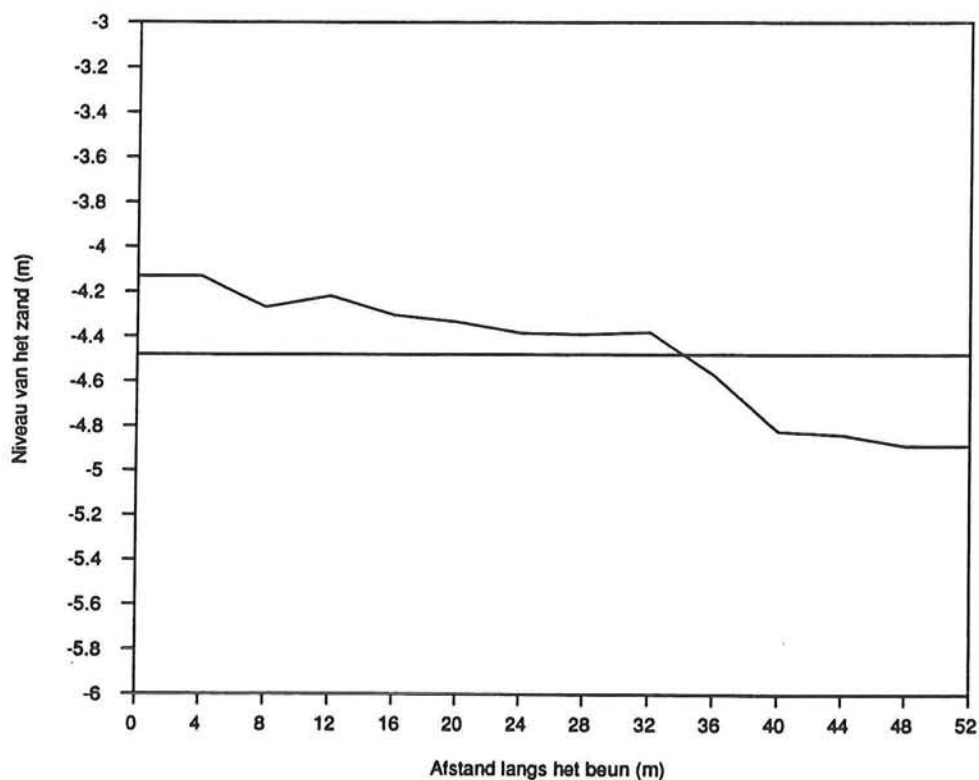
Waterverplaatsing schip vol = 15136.6 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (03:00) = 555.6 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 29.9 ton

Gewicht van het zand = 9297.5 ton

Volume zand boven water = 155.1 m³ → 3.5%



Reisnummer 284



Reisnummer 284: datum 17-7-92 tijdstip 07:30

Punt	Waarde	Extra
1	4.17 m	-
2	4.17 m	-
3	4.22 m	-
4	4.32 m	
5	4.32 m	
6	4.37 m	
7	4.32 m	
8	4.17 m	
9	4.47 m	
10	4.87 m	
11	4.90 m	
12	4.91 m	
13	4.87 m	
14	4.78 m	
15	4.78 m	
16	4.67 m	
17	4.59 m	
18	4.46 m	
19	4.40 m	
20	4.35 m	
21	4.29 m	
22	4.22 m	-
23	4.37 m	-
24	4.09 m	-

Punt	Waarde	Extra
1	4.15 m	-
2	4.32 m	
3	4.31 m	
4	4.48 m	
5	4.95 m	
6	4.74 m	
7	4.60 m	
8	4.35 m	
9	4.14 m	-
10	4.20 m	-

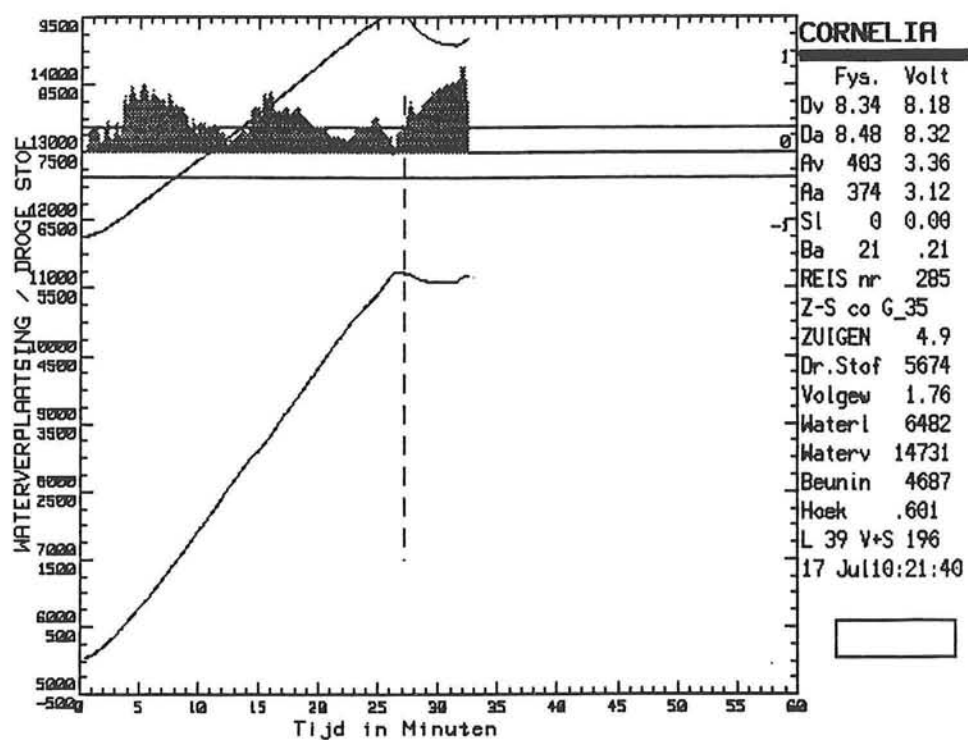
Gemiddelde waarde = 4.424 m
 → Volume = 4333.6 m³

Gemiddelde waarde = 4.462 m → volume = 4308.7 m³

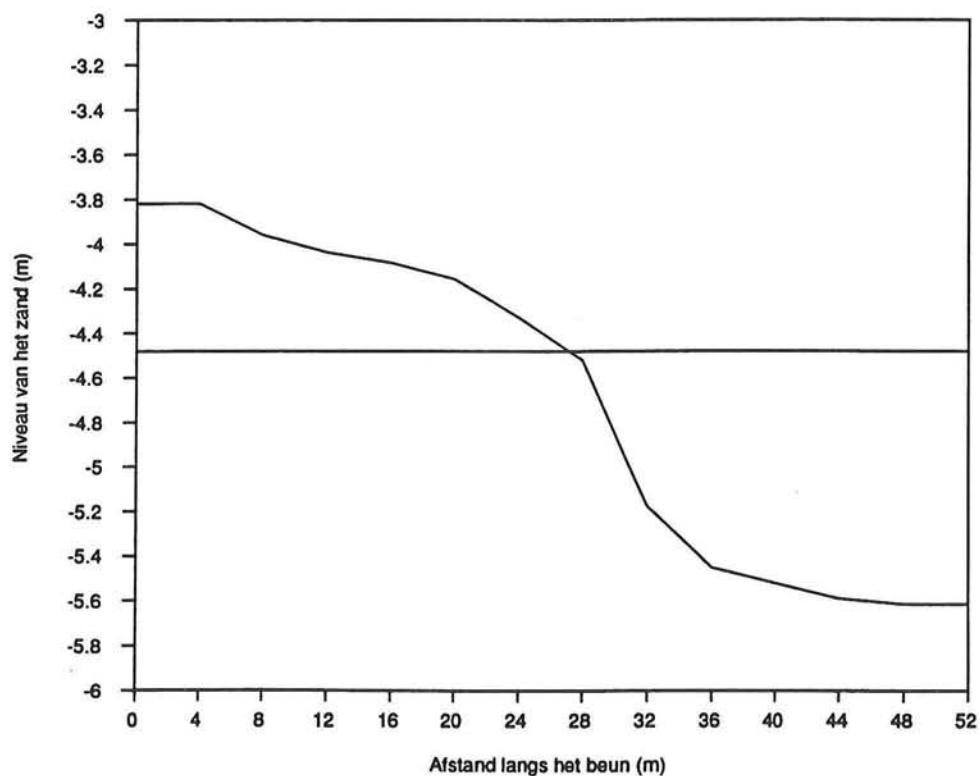
Waterverplaatsing schip vol = 14724.7 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (07:30) = 550.5 ton
 Gewicht smeeroilie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 71.3 ton

Gewicht van het zand = 8849.3 ton

Volume zand boven water = 79.4 m³ → 1.8%



Reisnummer 285



Reisnummer 285: datum 17-7-92 tijdstip 11:30

Punt	Waarde	Extra
1	3.74 m	+0.02 m
2	3.96 m	+0.00 m
3	3.97 m	+0.02 m
4	4.08 m	
5	4.21 m	
6	4.44 m	
7	4.56 m	
8	5.08 m	
9	5.37 m	
10	5.49 m	
11	5.61 m	
12	5.63 m	
13	5.60 m	
14	5.57 m	
15	5.55 m	
16	5.53 m	
17	5.27 m	
18	4.48 m	
19	4.22 m	
20	4.10 m	
21	4.09 m	
22	4.11 m	+0.02 m
23	3.96 m	+0.07 m
24	3.90 m	+0.00 m

Punt	Waarde	Extra
1	3.95 m	+0.00 m
2	4.07 m	
3	4.55 m	
4	5.27 m	
5	5.65 m	
6	5.54 m	
7	5.28 m	
8	4.17 m	
9	4.01 m	-0.01 m
10	3.77 m	+0.01 m

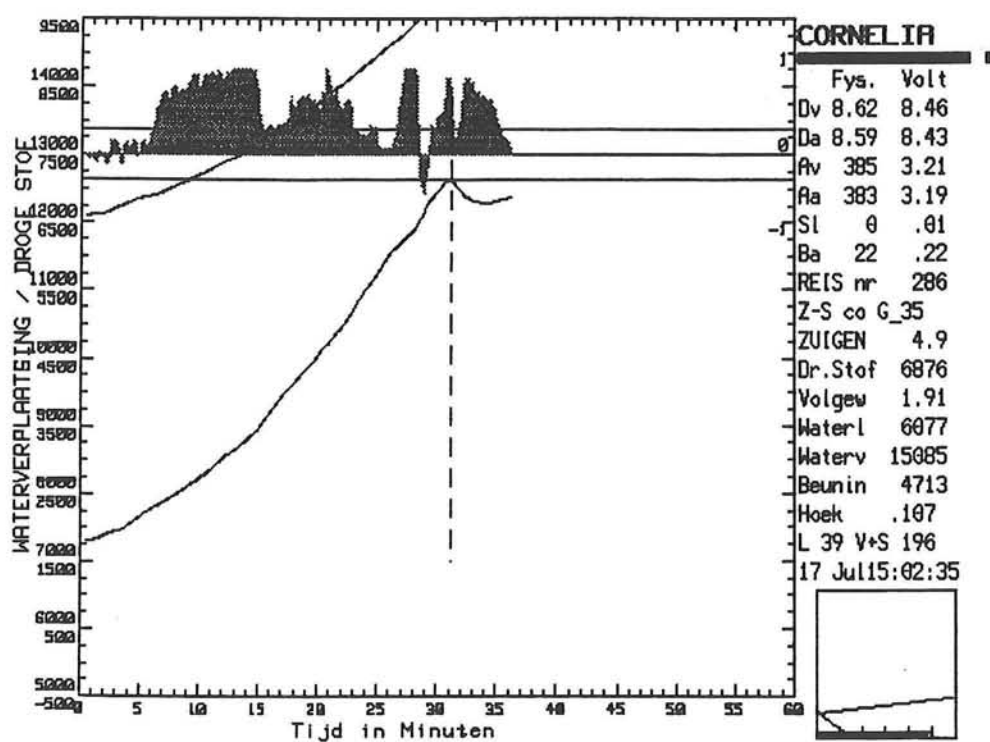
Gemiddelde waarde = 4.626 m
→ Volume = 4201.4 m³

Gemiddelde waarde = 4.688 m → volume = 4160.8 m³

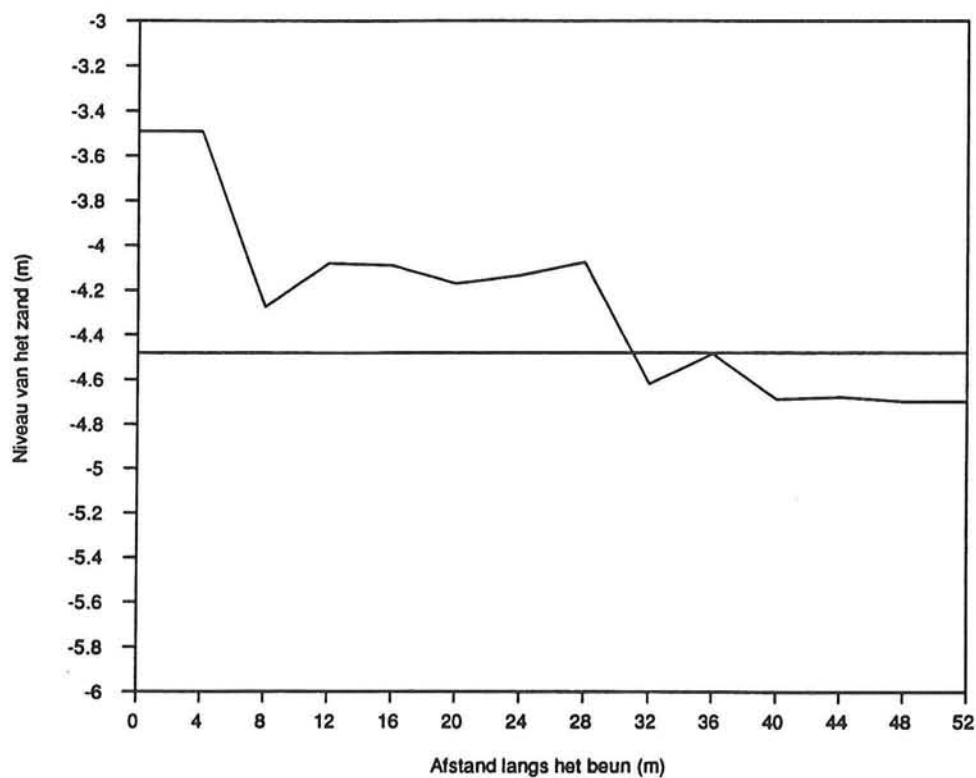
WATERVERPLAATSING schip vol = 14684.3 ton
WATERVERPLAATSING schip leeg = 5245.6 ton
Gewicht bunkers (11:30) = 546.0 ton
Gewicht smeerolie = 8.0 ton
Gewicht water op het zand = 284.9 ton

Gewicht van het zand = 8599.8 ton

Volume zand boven water = 141.3 m³ → 3.4%



Reisnummer 286



Reisnummer 286: datum 17-7-92 tijdstip 16:00

Punt	Waarde	Extra
1	3.19 m	-
2	4.34 m	-
3	4.25 m	-
4	4.17 m	
5	4.13 m	
6	4.12 m	
7	4.09 m	
8	4.66 m	
9	4.34 m	
10	4.66 m	
11	4.71 m	
12	4.73 m	
13	4.67 m	
14	4.65 m	
15	4.72 m	
16	4.63 m	
17	4.58 m	
18	4.06 m	
19	4.15 m	
20	4.21 m	
21	4.01 m	
22	3.91 m	-
23	4.21 m	-
24	3.79 m	-

Punt	Waarde	Extra
1	4.28 m	-
2	4.15 m	
3	4.26 m	
4	4.36 m	
5	4.76 m	
6	4.77 m	
7	4.57 m	
8	4.19 m	
9	3.87 m	-
10	3.74 m	-

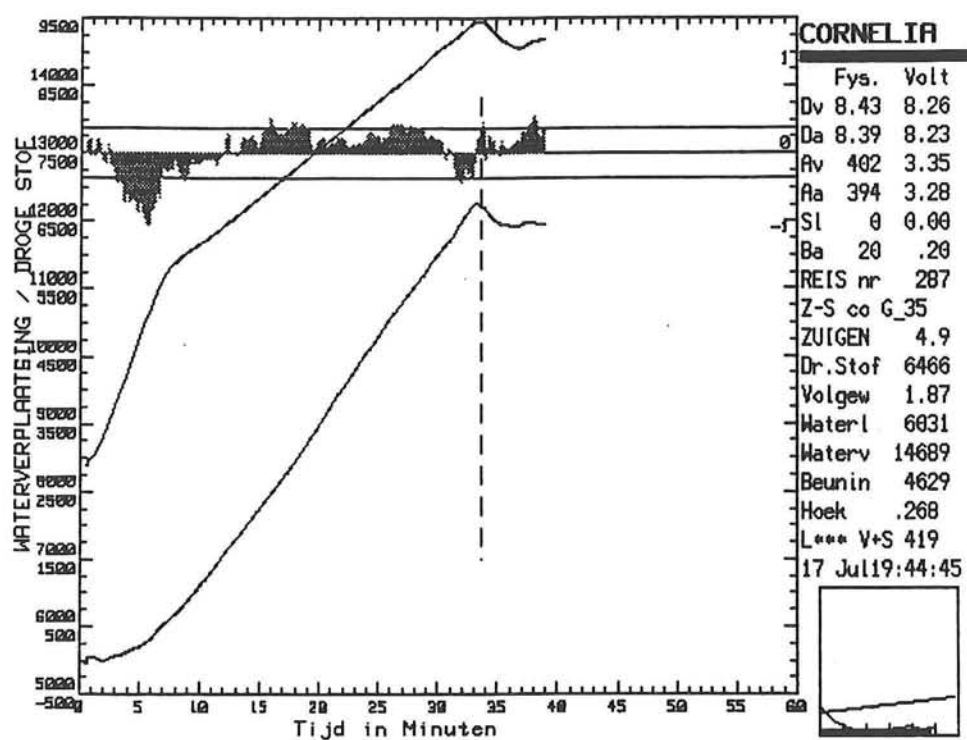
Gemiddelde waarde = 4.295 m
 → Volume = 4418.1 m³

Gemiddelde waarde = 4.291 m → volume = 4420.7 m³

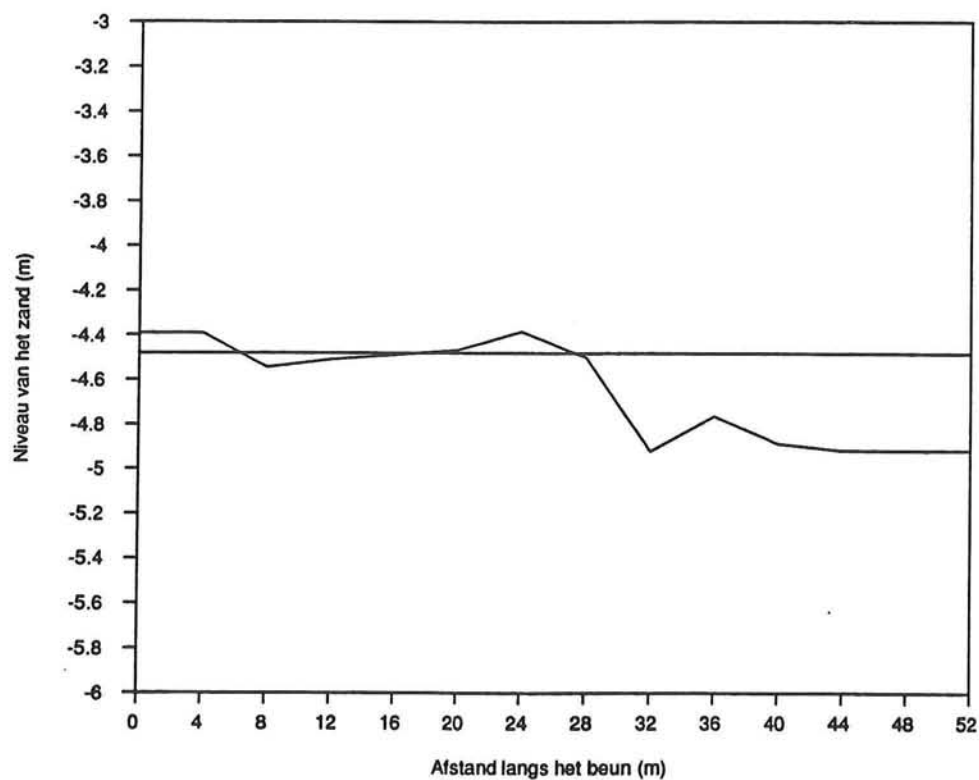
Waterverplaatsing schip vol = 15042.9 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (16:00) = 540.9 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 42.9 ton

Gewicht van het zand = 9205.5 ton

Volume zand boven water = 172.0 m³ → 3.9%



Reisnummer 287



Reisnummer 287: datum 17-7-92 tijdstip 21:00

Punt	Waarde	Extra
1	4.54 m	+0.00 m
2	4.51 m	-0.01 m
3	4.53 m	+0.02 m
4	4.52 m	
5	4.46 m	
6	4.21 m	
7	4.37 m	
8	4.91 m	
9	4.56 m	
10	4.82 m	
11	4.87 m	
12	4.87 m	
13	4.96 m	
14	4.96 m	
15	4.95 m	
16	4.96 m	
17	4.93 m	
18	4.63 m	
19	4.56 m	
20	4.47 m	
21	4.46 m	
22	4.49 m	+0.00 m
23	4.58 m	+0.05 m
24	4.24 m	+0.01 m

Punt	Waarde	Extra
1	4.49 m	+0.00 m
2	4.46 m	
3	4.54 m	
4	4.35 m	
5	4.93 m	
6	4.95 m	
7	4.93 m	
8	4.51 m	
9	4.45 m	+0.01 m
10	4.49 m	+0.02 m

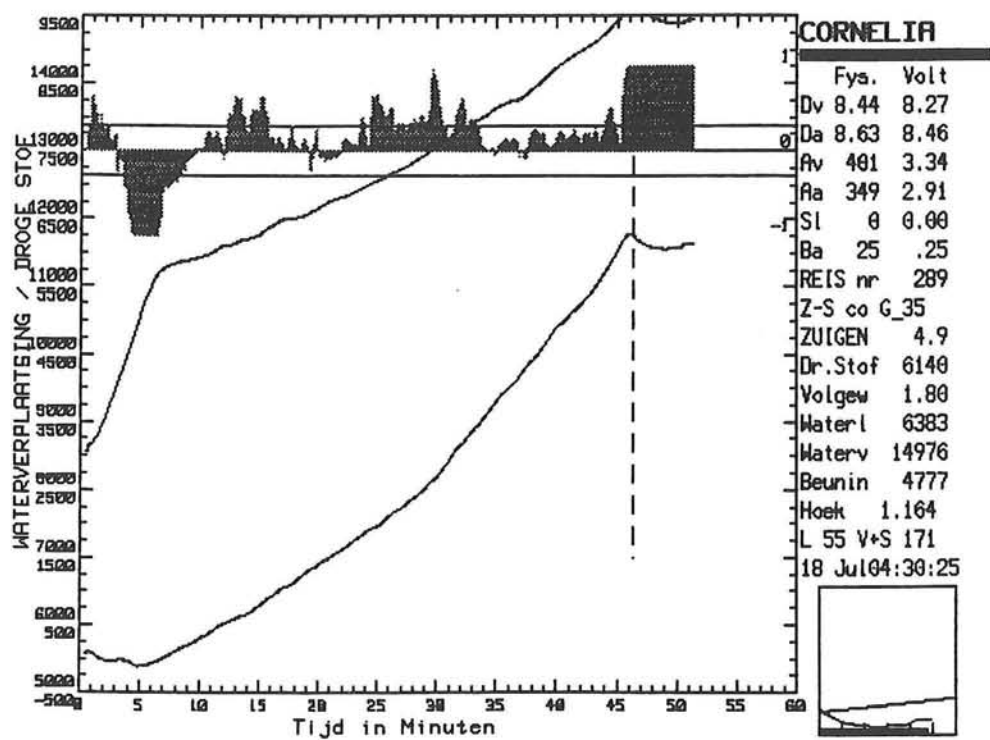
Gemiddelde waarde = 4.610 m
 → Volume = 4211.8 m³

Gemiddelde waarde = 4.640 m → volume = 4192.2 m³

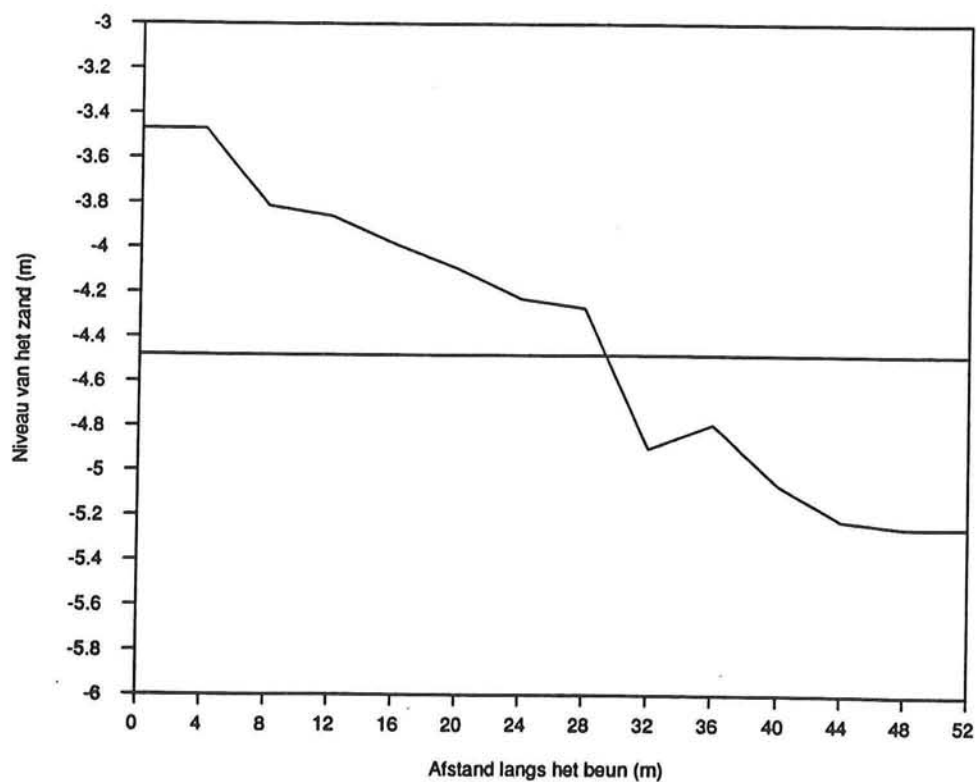
Waterverplaatsing schip vol = 14638.1 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (21:00) = 535.3 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 118.6 ton

Gewicht van het zand = 8730.6 ton

Volume zand boven water = 10.8 m³ → 0.3%



Reisnummer 289



Reisnummer 289: datum 18-7-92 tijdstip 05:30

Punt	Waarde	Extra
1	3.28 m	+0.05 m
2	3.73 m	+0.10 m
3	3.84 m	+0.09 m
4	3.94 m	
5	4.08 m	
6	4.26 m	
7	4.08 m	
8	4.66 m	
9	4.37 m	
10	4.87 m	
11	5.18 m	
12	5.20 m	
13	5.30 m	
14	5.26 m	
15	5.25 m	
16	5.21 m	
17	5.14 m	
18	4.46 m	
19	4.20 m	
20	4.11 m	
21	4.03 m	
22	3.88 m	+0.03 m
23	3.90 m	+0.07 m
24	3.66 m	+0.02 m

Punt	Waarde	Extra
1	3.77 m	+0.06 m
2	3.75 m	
3	4.15 m	
4	4.10 m	
5	5.23 m	
6	5.28 m	
7	4.48 m	
8	4.10 m	
9	3.82 m	+0.00 m
10	3.43 m	+0.02 m

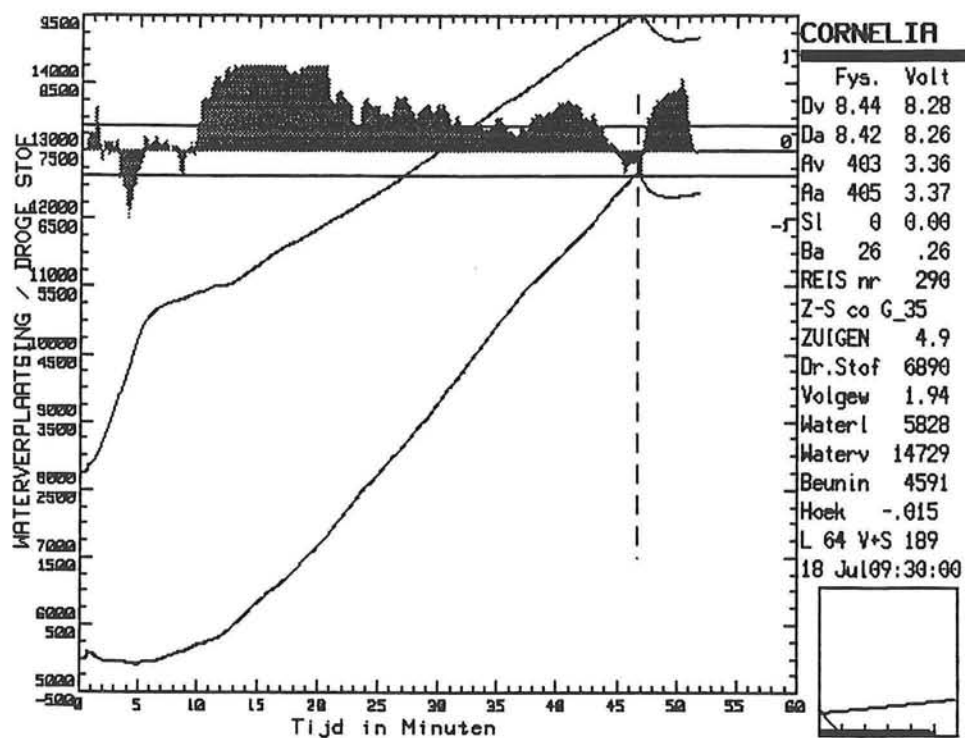
Gemiddelde waarde = 4.211 m
 → Volume = 4473.1 m³

Gemiddelde waarde = 4.412 m → volume = 4341.5 m³

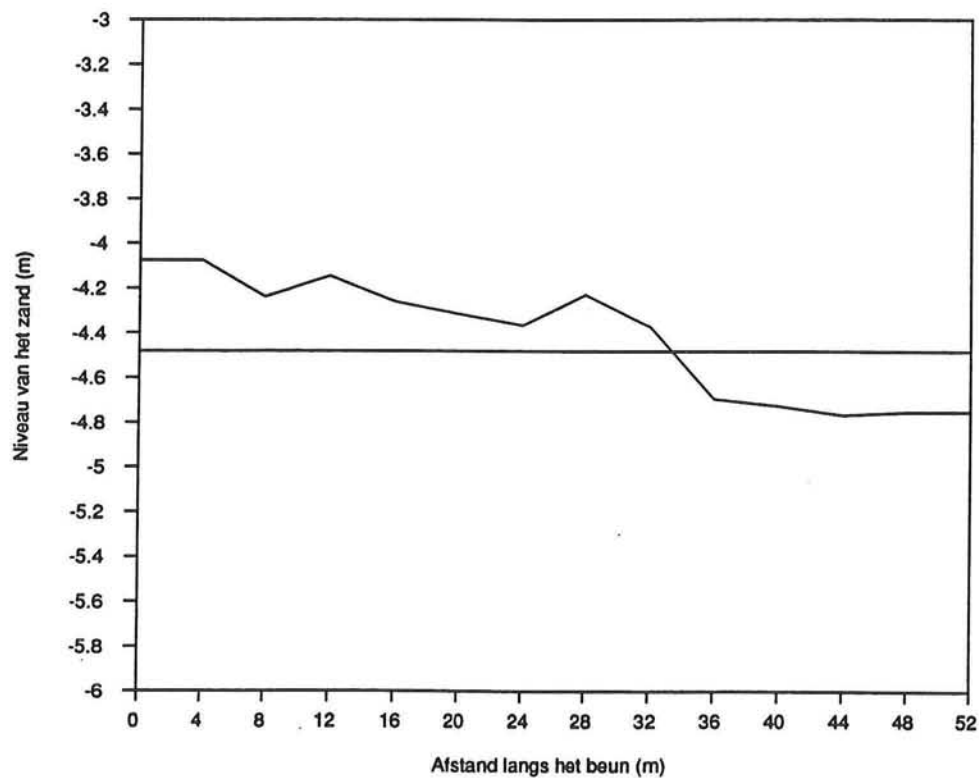
Waterverplaatsing schip vol = 14925.0 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (05:30) = 525.0 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 161.2 ton

Gewicht van het zand = 8985.2 ton

Volume zand boven water = 205.1 m³ → 4.7%



Reisnummer 290



Reisnummer 290: datum 18-7-92 tijdstip 10:30

Punt	Waarde	Extra
1	4.06 m	-
2	4.20 m	-
3	4.17 m	-
4	4.27 m	
5	4.37 m	
6	4.43 m	
7	4.35 m	
8	4.12 m	
9	4.69 m	
10	4.72 m	
11	4.79 m	
12	4.77 m	
13	4.73 m	
14	4.74 m	
15	4.73 m	
16	4.70 m	
17	4.62 m	
18	4.11 m	
19	4.30 m	
20	4.26 m	
21	4.25 m	
22	4.12 m	-
23	4.28 m	-
24	4.09 m	-

Punt	Waarde	Extra
1	4.23 m	-
2	4.32 m	
3	4.04 m	
4	4.62 m	
5	4.86 m	
6	4.72 m	
7	4.60 m	
8	4.21 m	
9	4.04 m	-
10	4.20 m	-

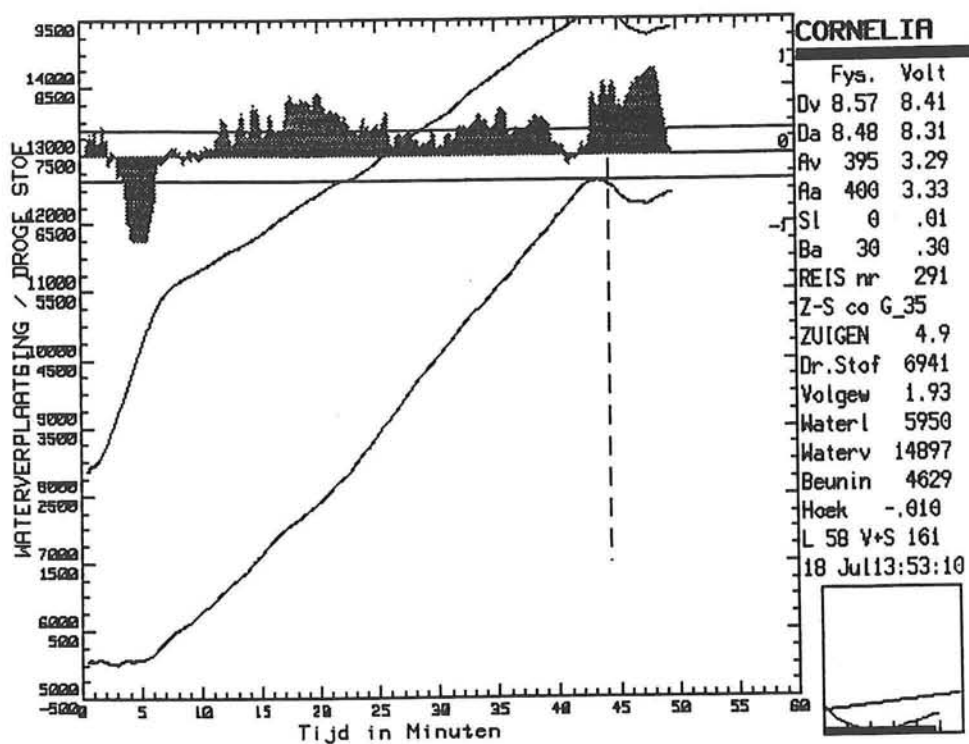
Gemiddelde waarde = 4.384 m
 → Volume = 4359.8 m³

Gemiddelde waarde = 4.411 m → volume = 4342.1 m³

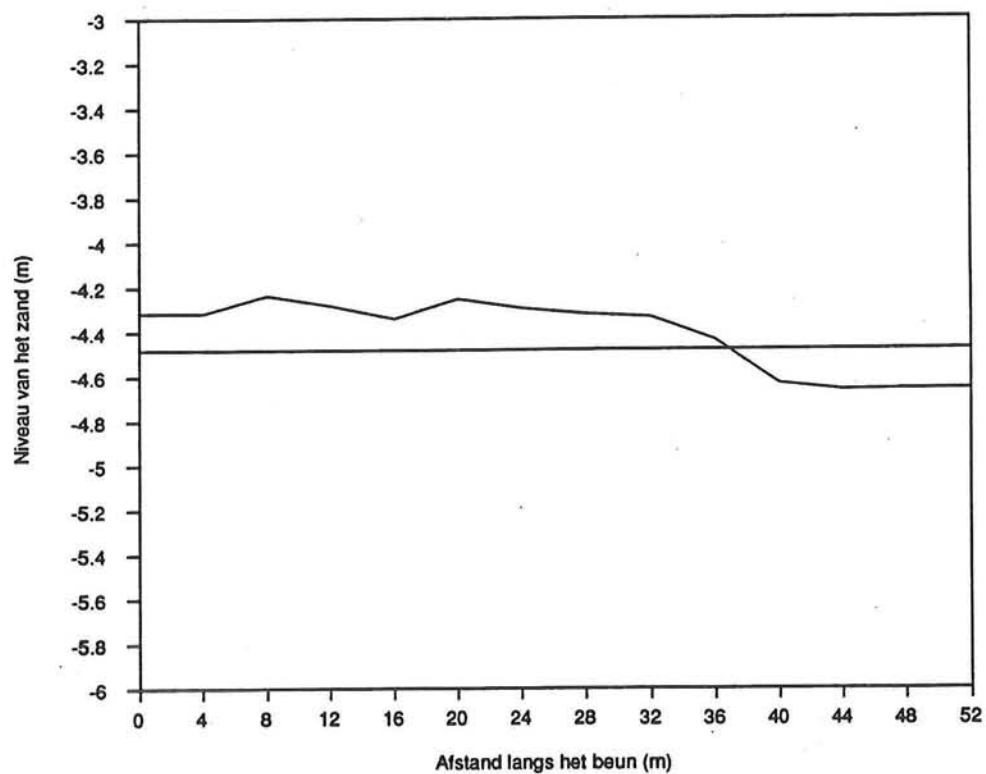
Waterverplaatsing schip vol = 14684.9 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (10:30) = 518.8 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 57.2 ton

Gewicht van het zand = 8855.3 ton

Volume zand boven water = 101.1 m³ → 2.3%



Reisnummer 291



Reisnummer 291: datum 18-7-92 tijdstip 15:00

Punt	Waarde	Extra
1	4.34 m	-0.01 m
2	4.27 m	+0.02 m
3	4.31 m	+0.02 m
4	4.41 m	
5	4.37 m	
6	4.34 m	
7	4.36 m	
8	4.32 m	
9	4.42 m	
10	4.68 m	
11	4.72 m	
12	4.71 m	
13	4.61 m	
14	4.61 m	
15	4.59 m	
16	4.46 m	
17	4.35 m	
18	4.28 m	
19	4.25 m	
20	4.13 m	
21	4.27 m	
22	4.25 m	+0.00 m
23	4.20 m	+0.03 m
24	4.29 m	+0.02 m

Punt	Waarde	Extra
1	4.27 m	+0.00 m
2	4.38 m	
3	4.39 m	
4	4.56 m	
5	4.78 m	
6	4.56 m	
7	4.29 m	
8	4.20 m	
9	4.18 m	+0.00 m
10	4.44 m	+0.02 m

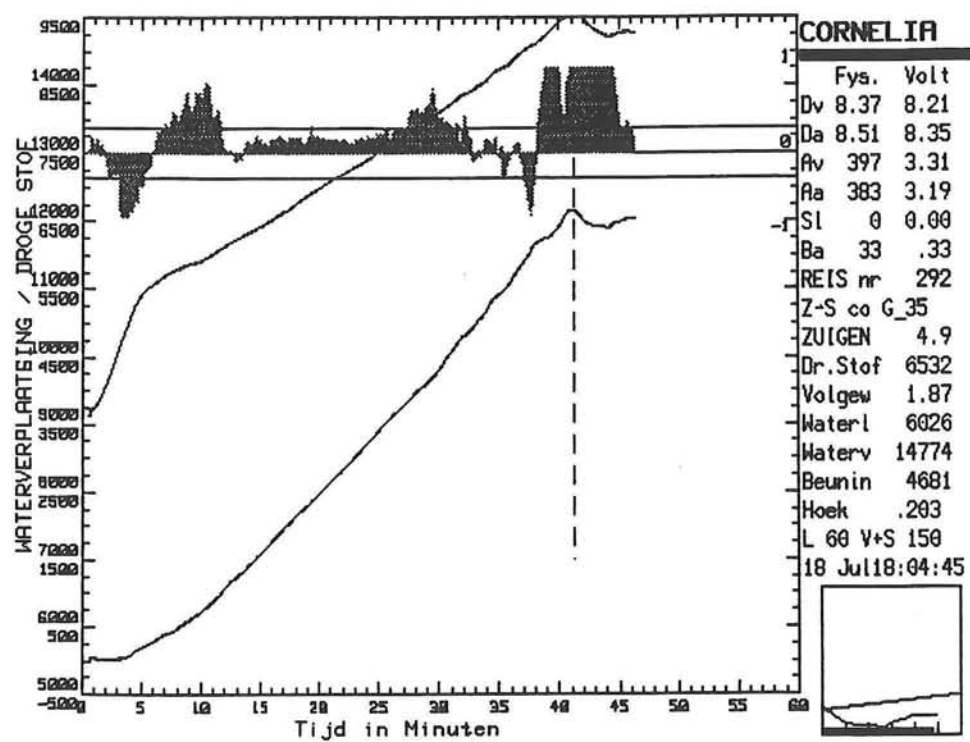
Gemiddelde waarde = 4.405 m
 → Volume = 4346.1 m³

Gemiddelde waarde = 4.398 m → volume = 4350.6 m³

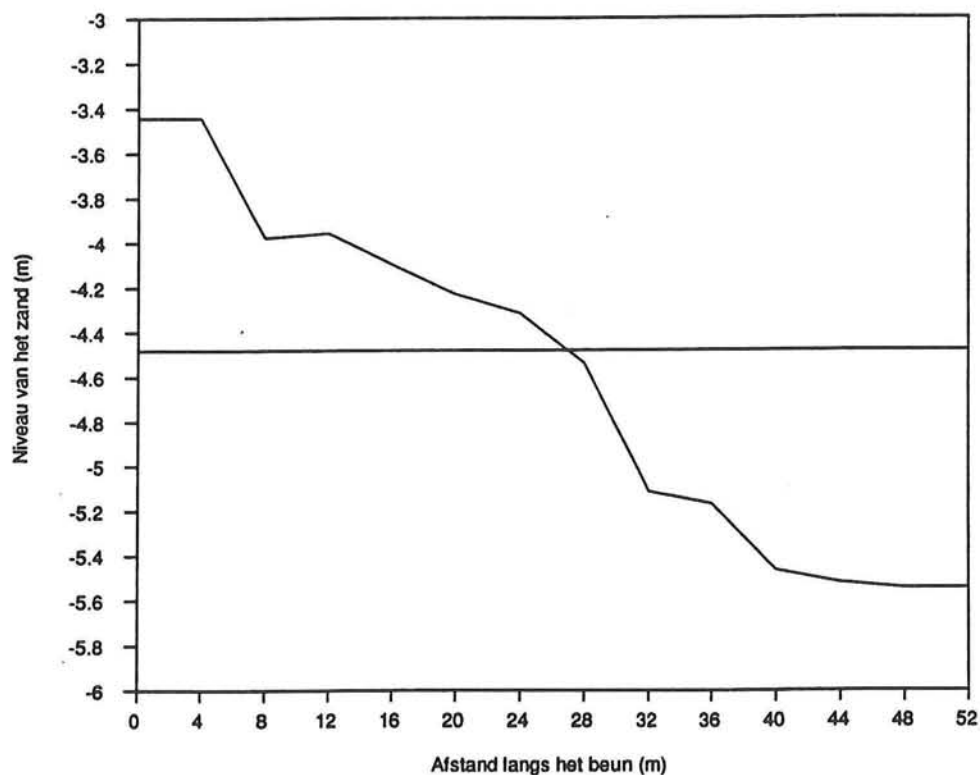
Waterverplaatsing schip vol = 14846.3 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (15:00) = 513.2 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 30.5 ton

Gewicht van het zand = 9049.0 ton

Volume zand boven water = 79.5 m³ → 1.8%



Reisnummer 292



Reisnummer 292: datum 18-7-92 tijdstip 19:00

Punt	Waarde	Extra
1	3.39 m	-
2	3.95 m	-
3	4.02 m	-
4	4.17 m	
5	4.25 m	
6	4.27 m	
7	4.43 m	
8	5.02 m	
9	4.92 m	
10	5.44 m	
11	5.52 m	
12	5.54 m	
13	5.55 m	
14	5.52 m	
15	5.49 m	
16	5.42 m	
17	5.21 m	
18	4.65 m	
19	4.36 m	
20	4.21 m	
21	4.02 m	
22	3.89 m	-
23	4.00 m	-
24	3.50 m	-

Punt	Waarde	Extra
1	4.01 m	-
2	4.25 m	
3	4.54 m	
4	5.05 m	
5	5.63 m	
6	5.50 m	
7	5.19 m	
8	4.27 m	
9	3.85 m	-
10	3.50 m	-

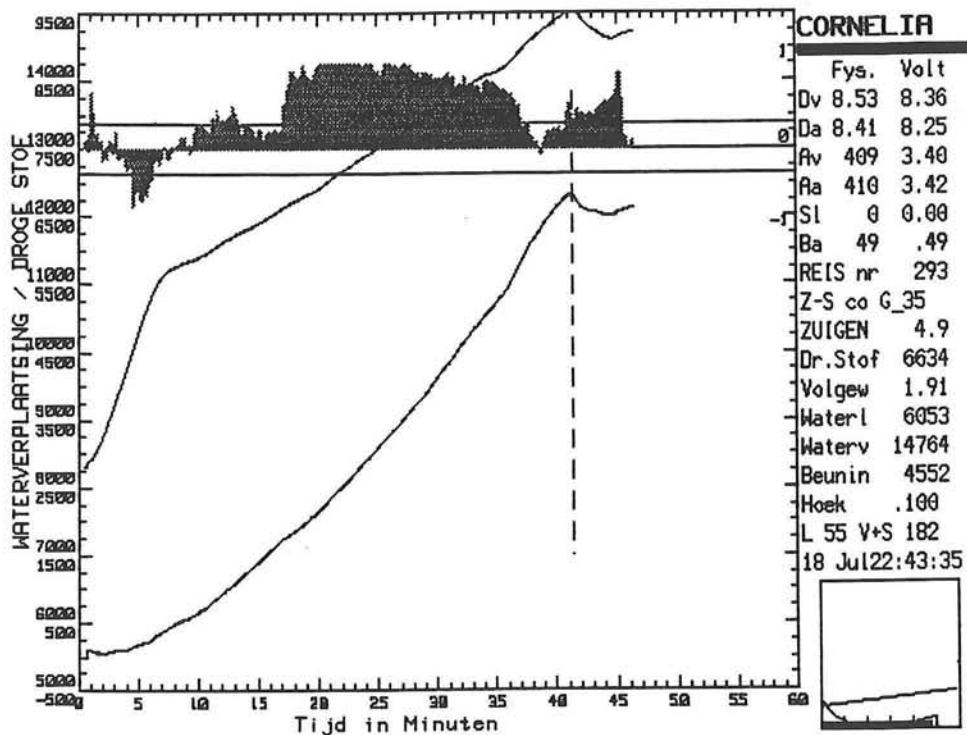
Gemiddelde waarde = 4.579 m
 → Volume = 4232.1 m³

Gemiddelde waarde = 4.614 m → volume = 4209.2 m³

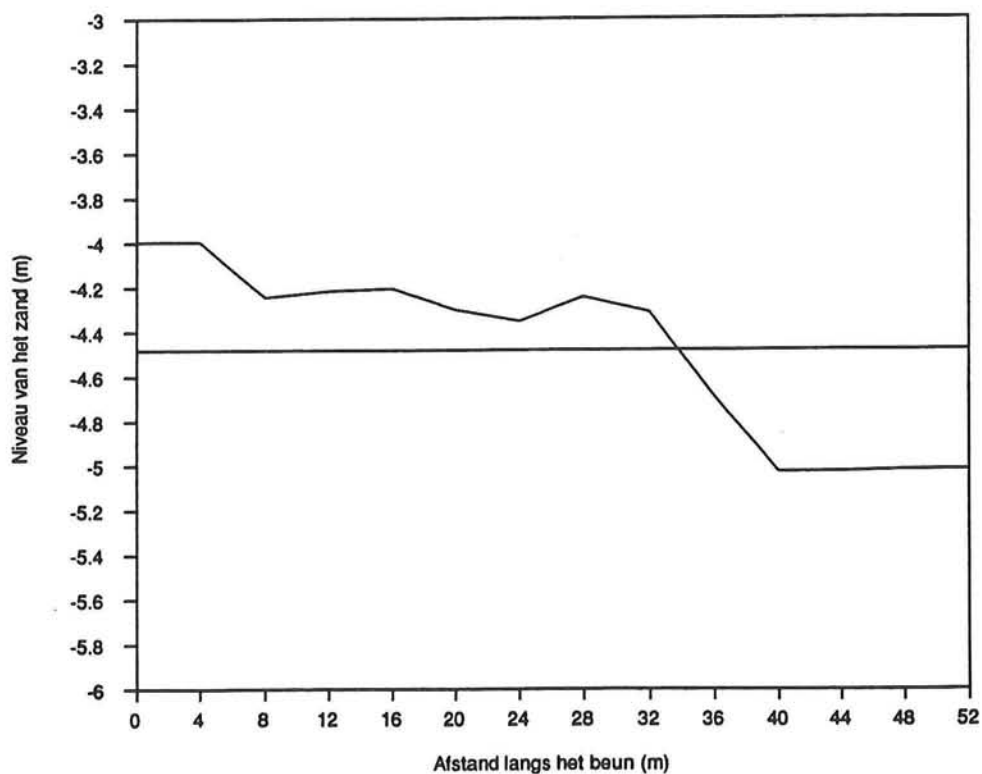
WATERVERPLAATSING
 Waterverplaatsing schip vol = 14733.0 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (19:00) = 508.2 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 256.3 ton

Gewicht van het zand = 8714.9 ton

Volume zand boven water = 169.4 m³ → 4.0%



Reisnummer 293



Reisnummer 293: datum 19-7-92 tijdstip 00:00

Punt	Waarde	Extra
1	4.03 m	+0.05 m
2	4.19 m	+0.02 m
3	4.15 m	+0.00 m
4	4.17 m	
5	4.22 m	
6	4.33 m	
7	4.10 m	
8	4.19 m	
9	4.54 m	
10	5.01 m	
11	5.01 m	
12	4.99 m	
13	5.05 m	
14	5.05 m	
15	5.05 m	
16	4.84 m	
17	4.43 m	
18	4.39 m	
19	4.37 m	
20	4.38 m	
21	4.24 m	
22	4.28 m	+0.00 m
23	4.30 m	+0.00 m
24	3.96 m	+0.13 m

Punt	Waarde	Extra
1	4.17 m	+0.16 m
2	4.16 m	
3	3.96 m	
4	4.71 m	
5	5.09 m	
6	5.02 m	
7	4.45 m	
8	4.32 m	
9	4.19 m	+0.01 m
10	3.98 m	+0.16 m

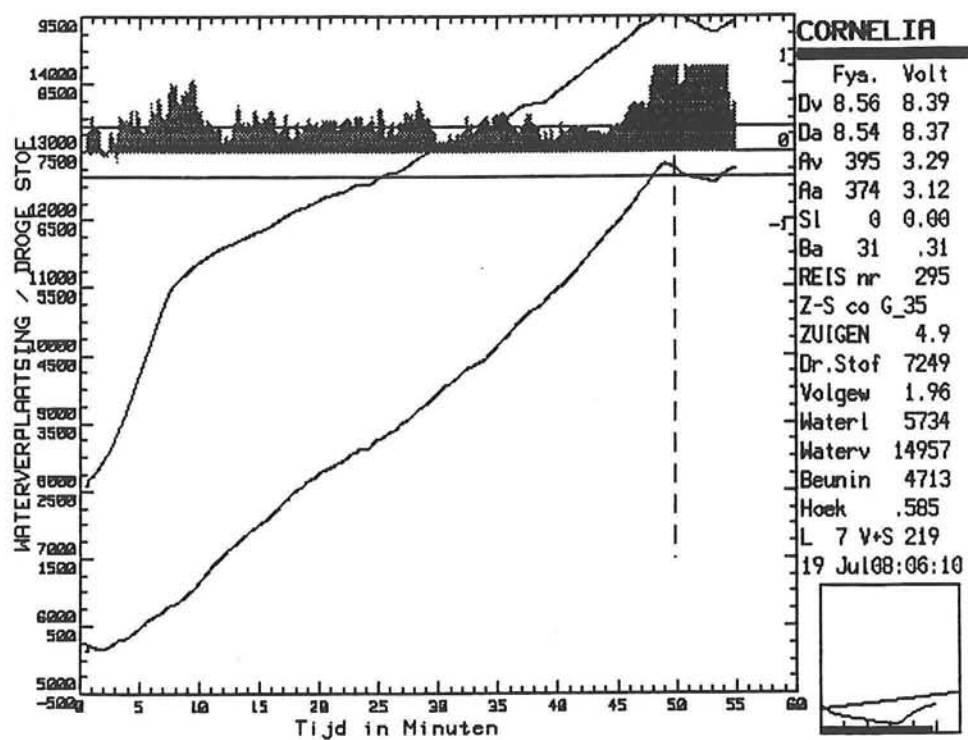
Gemiddelde waarde = 4.405 m
→ Volume = 4346.1 m³

Gemiddelde waarde = 4.470 m → volume = 4303.5 m³

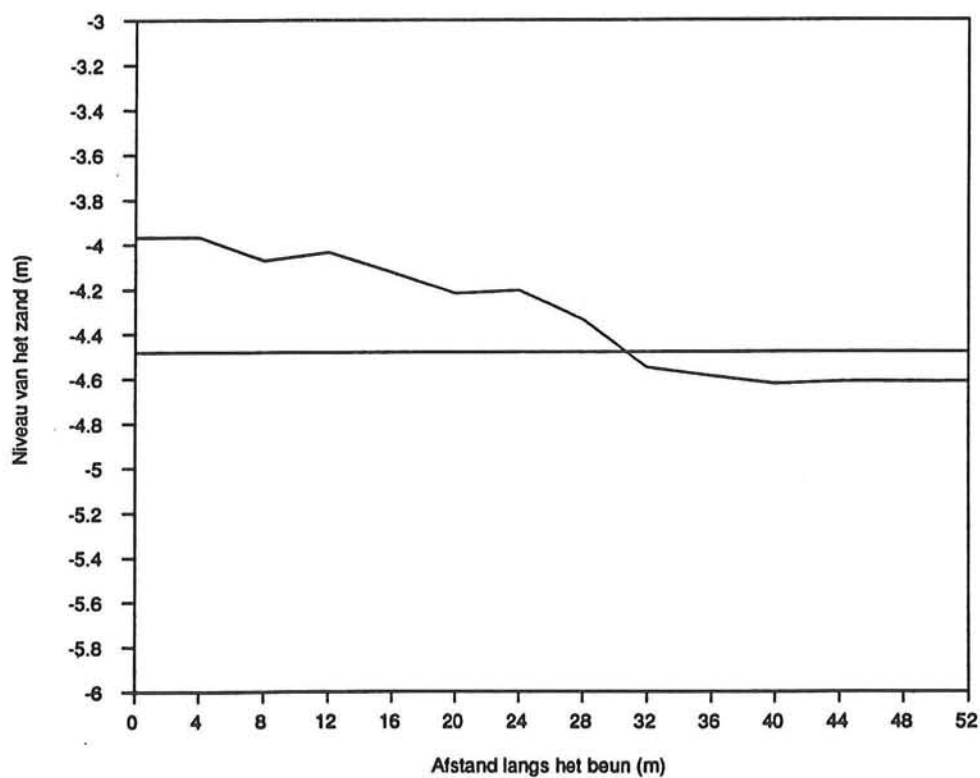
Waterverplaatsing schip vol = 14712.9 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (00:00) = 502.0 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 106.6 ton

Gewicht van het zand = 8850.7 ton

Volume zand boven water = 109.4 m³ → 2.5%



Reisnummer 295



Reisnummer 295: datum 19-7-92 tijdstip 09:00

Punt	Waarde	Extra
1	4.03 m	+0.34 m
2	4.07 m	+0.05 m
3	4.11 m	+0.01 m
4	4.11 m	
5	4.22 m	
6	4.23 m	
7	4.37 m	
8	4.58 m	
9	4.59 m	
10	4.64 m	
11	4.65 m	
12	4.65 m	
13	4.58 m	
14	4.58 m	
15	4.61 m	
16	4.59 m	
17	4.52 m	
18	4.30 m	
19	4.18 m	
20	4.22 m	
21	4.14 m	
22	3.96 m	+0.01 m
23	4.07 m	+0.00 m
24	3.90 m	+0.31 m

Punt	Waarde	Extra
1	4.06 m	+0.51 m
2	4.25 m	
3	4.43 m	
4	4.63 m	
5	4.70 m	
6	4.48 m	
7	4.53 m	
8	4.11 m	
9	3.96 m	+0.00 m
10	3.76 m	+0.17 m

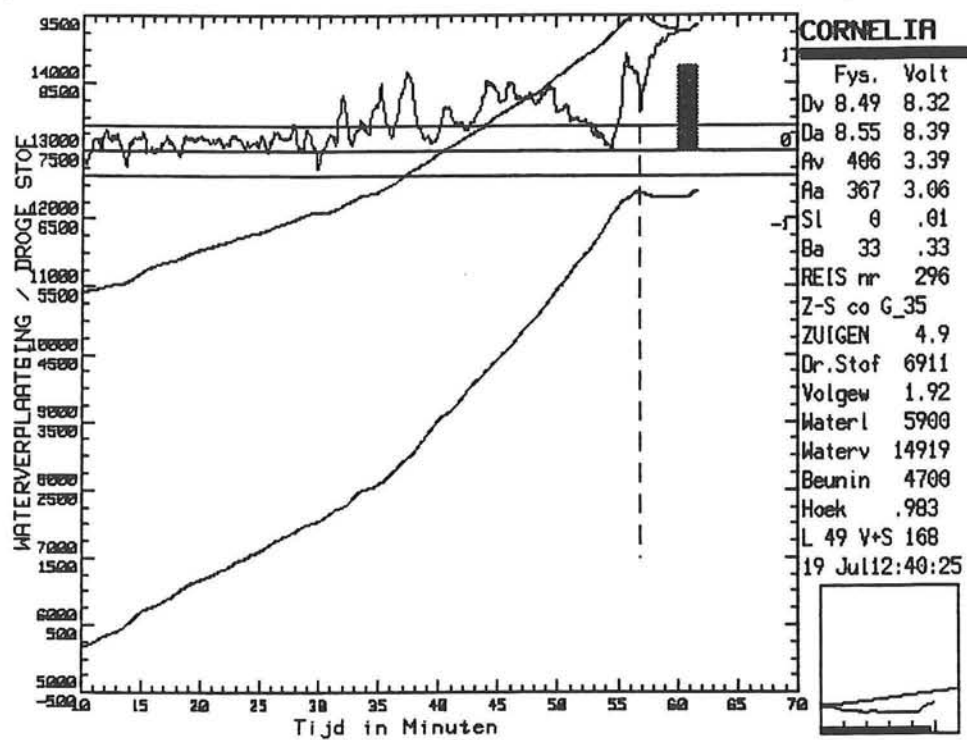
Gemiddelde waarde = 4.291 m
 → Volume = 4420.7 m³

Gemiddelde waarde = 4.329 m → volume = 4395.8 m³

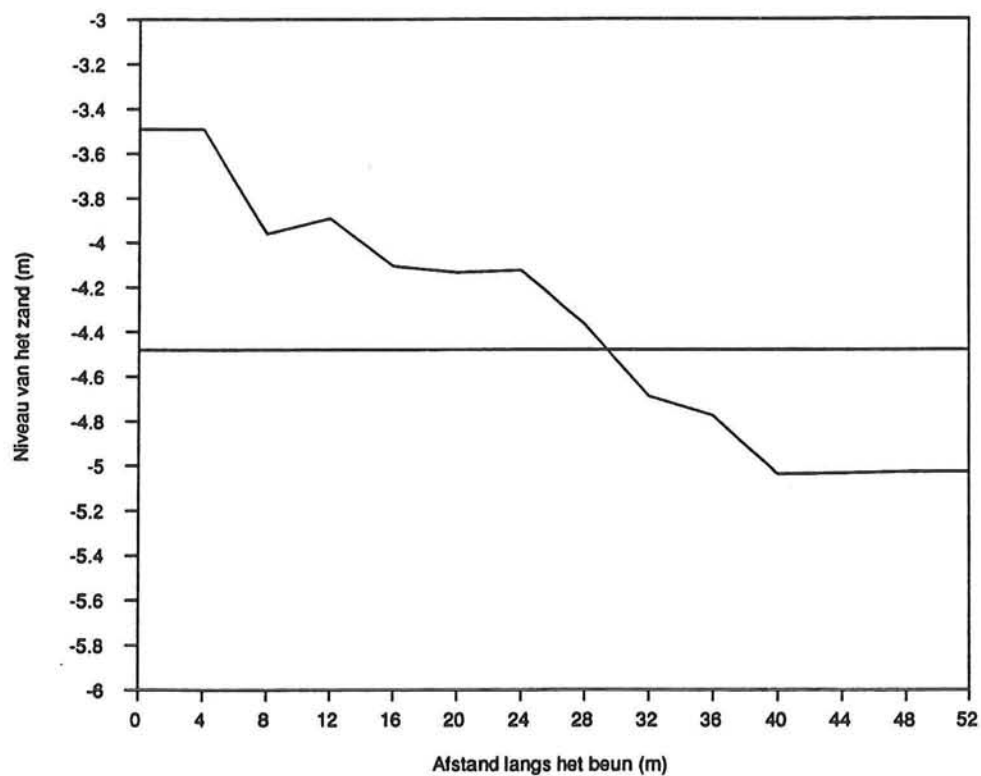
Waterverplaatsing schip vol = 14903.4 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (09:00) = 489.7 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 32.8 ton

Gewicht van het zand = 9127.3 ton

Volume zand boven water = 133.0 m³ → 3.0%



Reisnummer 296



Reisnummer 296: datum 19-7-92 tijdstip 14:00

Punt	Waarde	Extra
1	3.69 m	+0.05 m
2	3.99 m	+0.24 m
3	3.77 m	+0.01 m
4	4.08 m	
5	4.12 m	
6	4.12 m	
7	4.36 m	
8	4.52 m	
9	4.68 m	
10	5.05 m	
11	5.03 m	
12	5.03 m	
13	5.03 m	
14	5.04 m	
15	5.03 m	
16	4.87 m	
17	4.86 m	
18	4.37 m	
19	4.13 m	
20	4.15 m	
21	4.13 m	
22	4.01 m	+0.03 m
23	3.93 m	+0.03 m
24	3.29 m	+0.28 m

Punt	Waarde	Extra
1	4.07 m	+0.07 m
2	4.13 m	
3	4.38 m	
4	4.78 m	
5	5.05 m	
6	5.02 m	
7	4.86 m	
8	4.10 m	
9	4.00 m	+0.00 m
10	3.68 m	+0.07 m

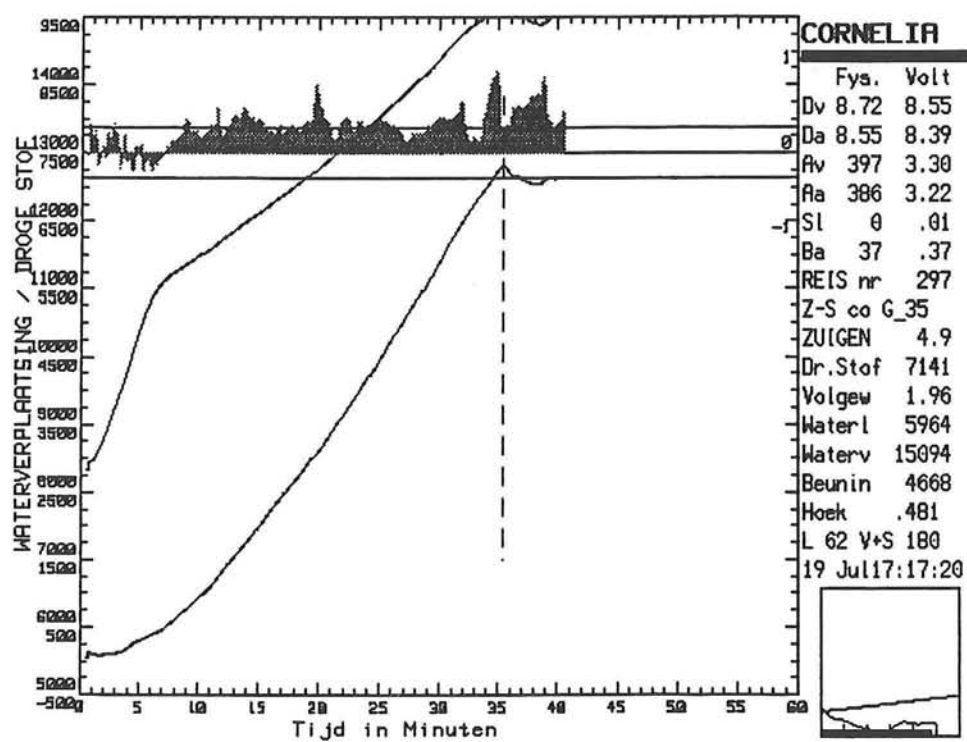
Gemiddelde waarde = 4.407 m
→ Volume = 4344.7 m³

Gemiddelde waarde = 4.387 m → volume = 4357.8 m³

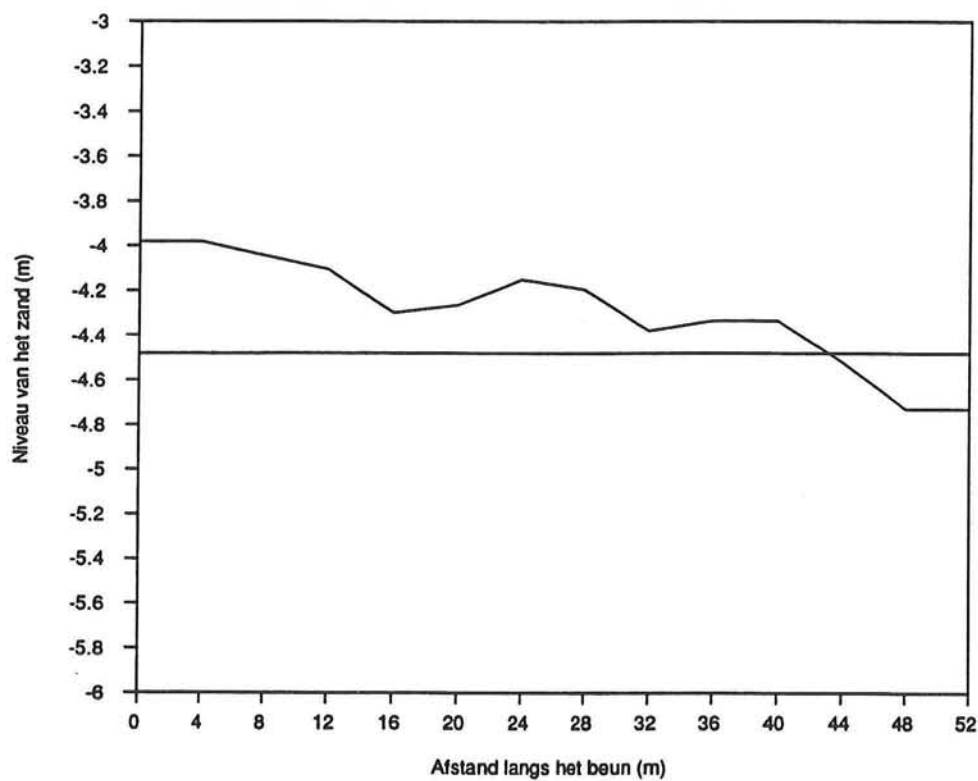
WATERVERPLAATSING SCHIP VOL = 14870.2 ton
WATERVERPLAATSING SCHIP LEEG = 5245.6 ton
Gewicht bunkers (14:00) = 482.9 ton
Gewicht smeerolie = 8.0 ton
Gewicht water op het zand = 123.8 ton

Gewicht van het zand = 9009.9 ton

Volume zand boven water = 188.9 m³ → 4.3%



Reisnummer 297



Reisnummer 297: datum 19-7-92 tijdstip 18:00

Punt	Waarde	Extra
1	3.93 m	+0.02 m
2	4.03 m	+0.02 m
3	4.10 m	+0.04 m
4	4.37 m	
5	4.22 m	
6	4.00 m	
7	4.12 m	
8	4.45 m	
9	4.32 m	
10	4.26 m	
11	4.42 m	
12	4.60 m	
13	4.86 m	
14	4.62 m	
15	4.41 m	
16	4.35 m	
17	4.31 m	
18	4.27 m	
19	4.30 m	
20	4.31 m	
21	4.23 m	
22	4.11 m	+0.00 m
23	4.06 m	-0.01 m
24	4.03 m	+0.00 m

Punt	Waarde	Extra
1	4.05 m	+0.03 m
2	4.34 m	
3	4.60 m	
4	4.20 m	
5	4.66 m	
6	4.50 m	
7	4.33 m	
8	4.27 m	
9	4.03 m	+0.00 m
10	4.06 m	+0.01 m

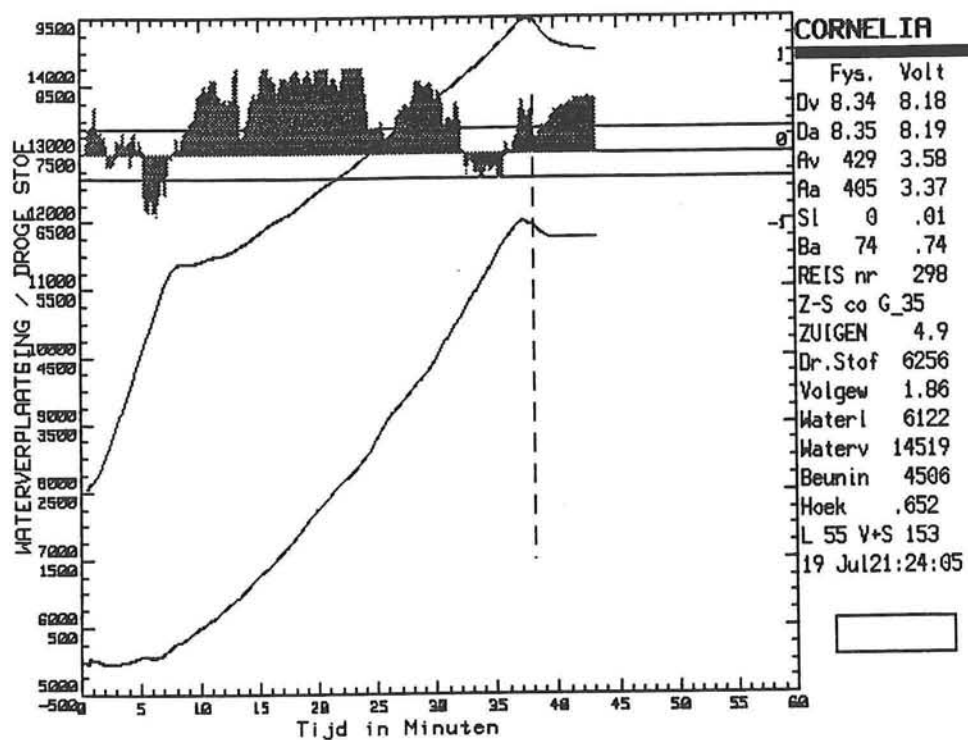
Gemiddelde waarde = 4.304 m
 → Volume = 4412.2 m³

Gemiddelde waarde = 4.278 m → volume = 4429.2 m³

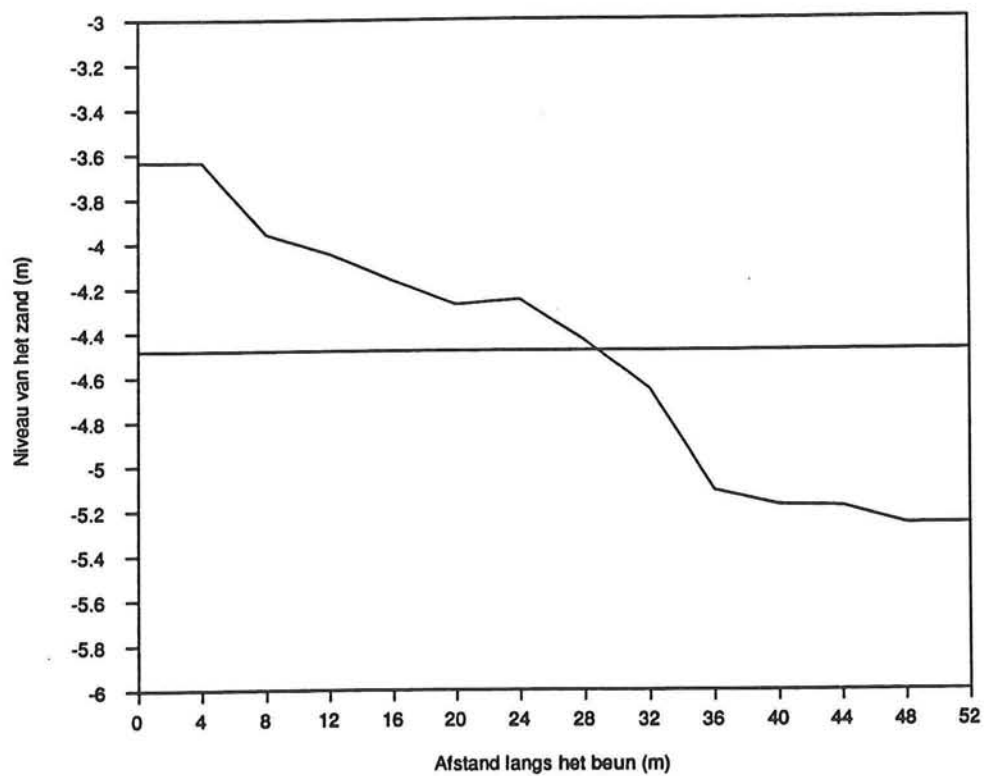
Waterverplaatsing schip vol = 15050.1 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (18:00) = 477.5 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 20.5 ton

Gewicht van het zand = 9298.5 ton

Volume zand boven water = 148.4 m³ → 3.4%



Reisnummer 298



Reisnummer 298: datum 19-7-92 tijdstip 22:30

Punt	Waarde	Extra
1	3.84 m	+0.00 m
2	4.00 m	+0.04 m
3	4.00 m	+0.00 m
4	4.13 m	
5	4.26 m	
6	4.28 m	
7	4.52 m	
8	4.44 m	
9	5.02 m	
10	5.12 m	
11	5.13 m	
12	5.15 m	
13	5.37 m	
14	5.23 m	
15	5.23 m	
16	5.20 m	
17	4.87 m	
18	4.36 m	
19	4.22 m	
20	4.29 m	
21	4.20 m	
22	4.09 m	+0.04 m
23	3.91 m	+0.02 m
24	3.43 m	+0.06 m

Punt	Waarde	Extra
1	3.84 m	+0.05 m
2	4.14 m	
3	4.52 m	
4	5.02 m	
5	5.20 m	
6	5.29 m	
7	4.92 m	
8	4.30 m	
9	4.08 m	+0.05 m
10	4.30 m	+0.04 m

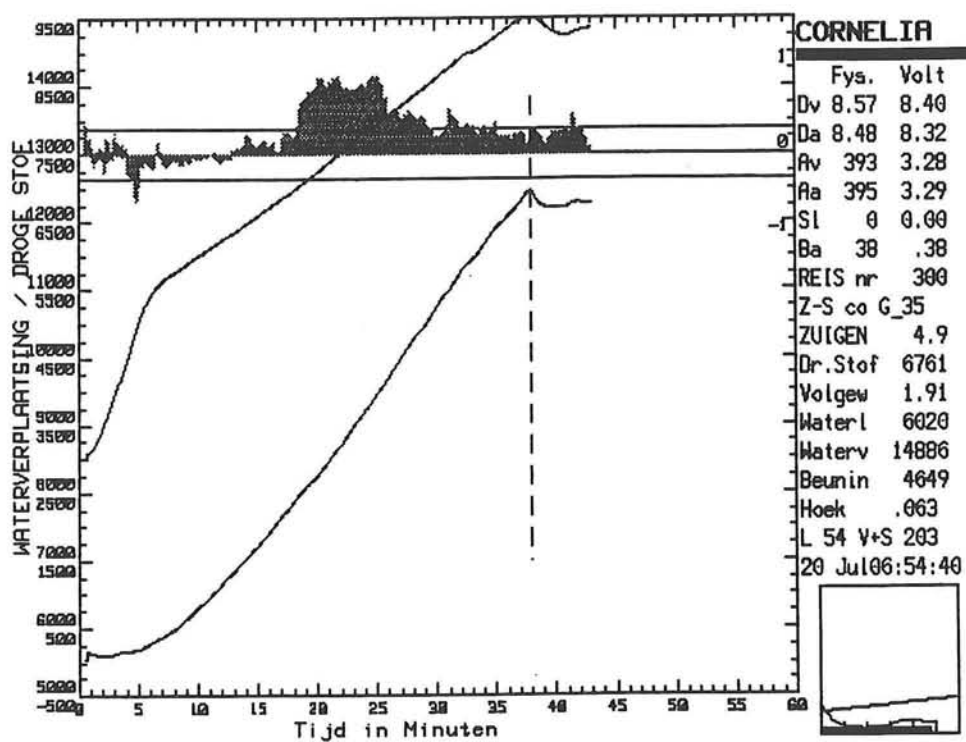
Gemiddelde waarde = 4.561 m
 → Volume = 4243.9 m³

Gemiddelde waarde = 4.512 m → volume = 4276.0 m³

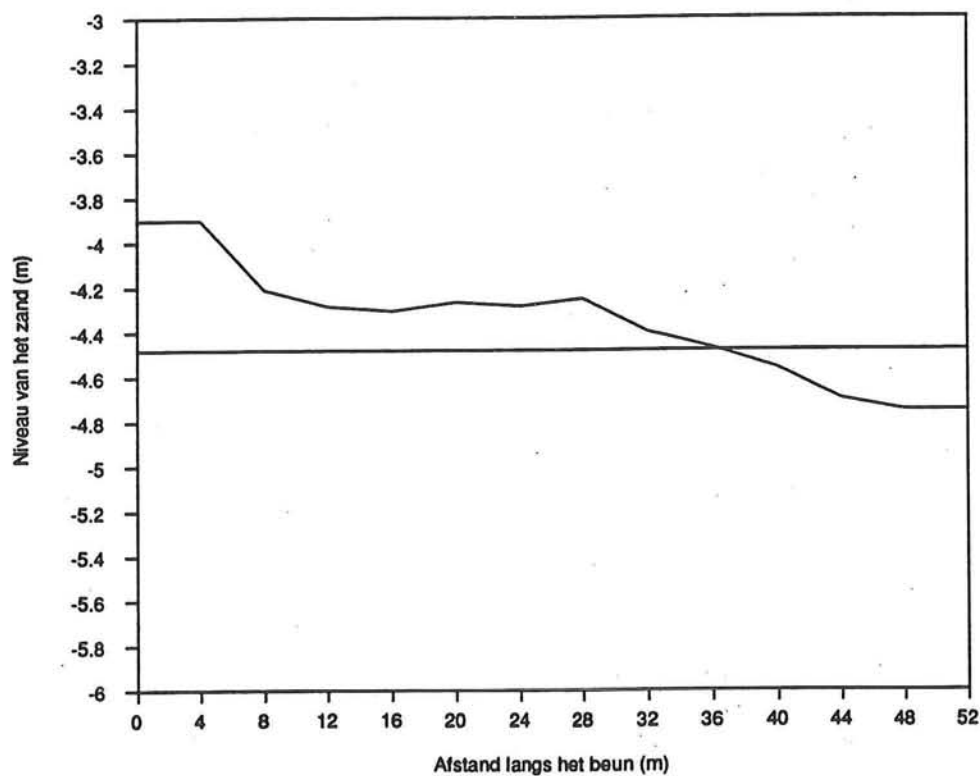
Waterverplaatsing schip vol = 14470.1 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (22:30) = 471.3 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 172.4 ton

Gewicht van het zand = 8572.8 ton

Volume zand boven water = 150.3 m³ → 3.4%



Reisnummer 300



Reisnummer 300: datum 20-7-92 tijdstip 08:00

Punt	Waarde	Extra
1	3.87 m	+0.00 m
2	4.18 m	-0.01 m
3	4.26 m	+0.00 m
4	4.31 m	
5	4.27 m	
6	4.24 m	
7	4.18 m	
8	4.37 m	
9	4.17 m	
10	4.33 m	
11	4.62 m	
12	4.70 m	
13	4.80 m	
14	4.78 m	
15	4.79 m	
16	4.77 m	
17	4.43 m	
18	4.32 m	
19	4.33 m	
20	4.26 m	
21	4.30 m	
22	4.31 m	+0.00 m
23	4.24 m	+0.05 m
24	3.93 m	+0.02 m

Punt	Waarde	Extra
1	4.18 m	+0.00 m
2	4.30 m	
3	4.21 m	
4	4.18 m	
5	4.59 m	
6	4.36 m	
7	4.46 m	
8	4.31 m	
9	4.22 m	+0.03 m
10	3.85 m	+0.01 m

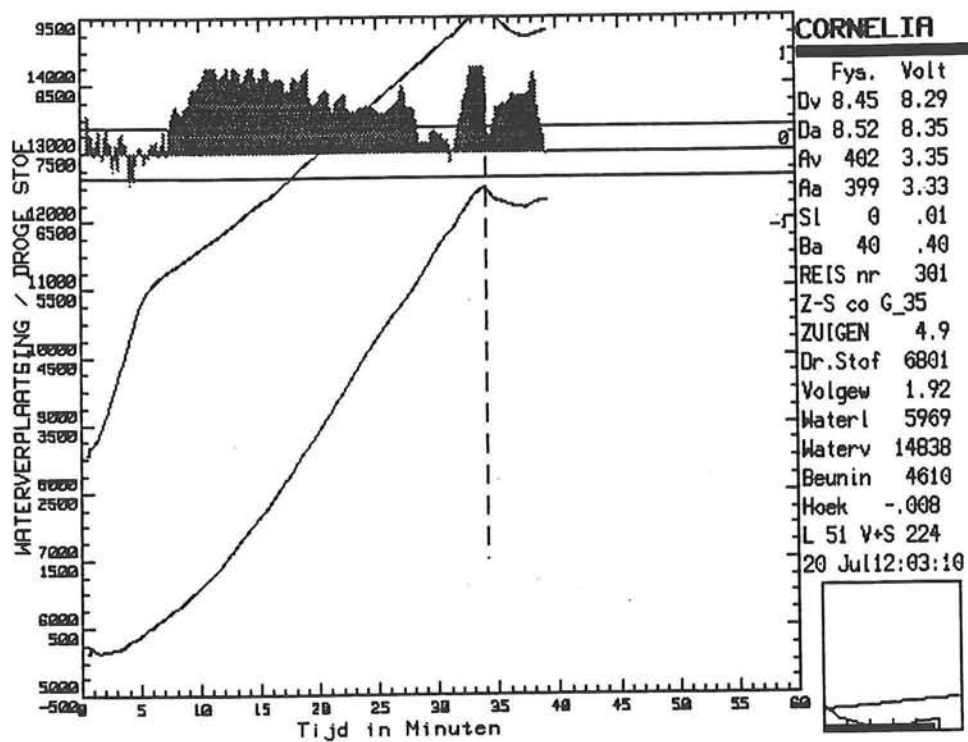
Gemiddelde waarde = 4.266 m
→ Volume = 4437.1 m³

Gemiddelde waarde = 4.365 m → volume = 4372.2 m³

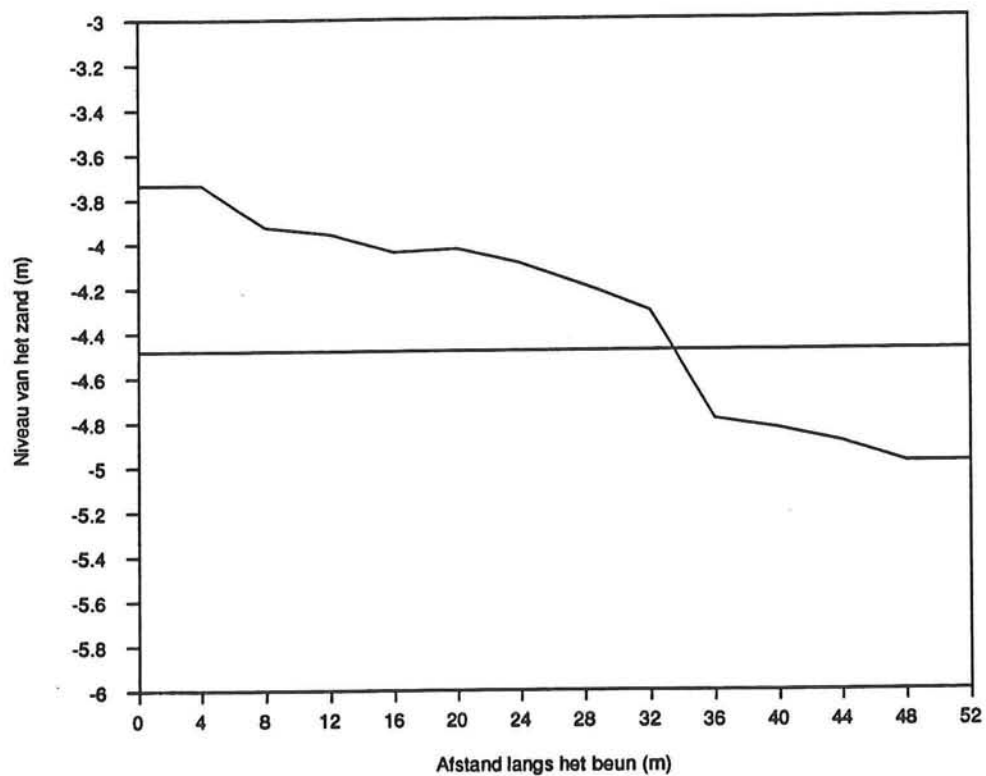
Waterverplaatsing schip vol = 14842.5 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (08:00) = 463.0 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 36.0 ton

Gewicht van het zand = 9089.9 ton

Volume zand boven water = 112.7 m³ → 2.6%



Reisnummer 301



Reisnummer 301: datum 20-7-92 tijdstip 13:00

Punt	Waarde	Extra
1	3.74 m	+0.03 m
2	3.94 m	+0.00 m
3	3.94 m	+0.03 m
4	4.01 m	
5	4.01 m	
6	4.15 m	
7	4.21 m	
8	4.40 m	
9	4.77 m	
10	4.82 m	
11	4.90 m	
12	5.00 m	
13	4.97 m	
14	4.89 m	
15	4.85 m	
16	4.81 m	
17	4.21 m	
18	4.17 m	
19	4.03 m	
20	4.04 m	
21	4.07 m	
22	3.97 m	+0.01 m
23	3.91 m	-0.01 m
24	3.73 m	+0.01 m

Punt	Waarde	Extra
1	3.87 m	+0.02 m
2	4.03 m	
3	4.25 m	
4	4.70 m	
5	4.98 m	
6	4.85 m	
7	4.26 m	
8	4.00 m	
9	3.97 m	+0.00 m
10	3.64 m	+0.02 m

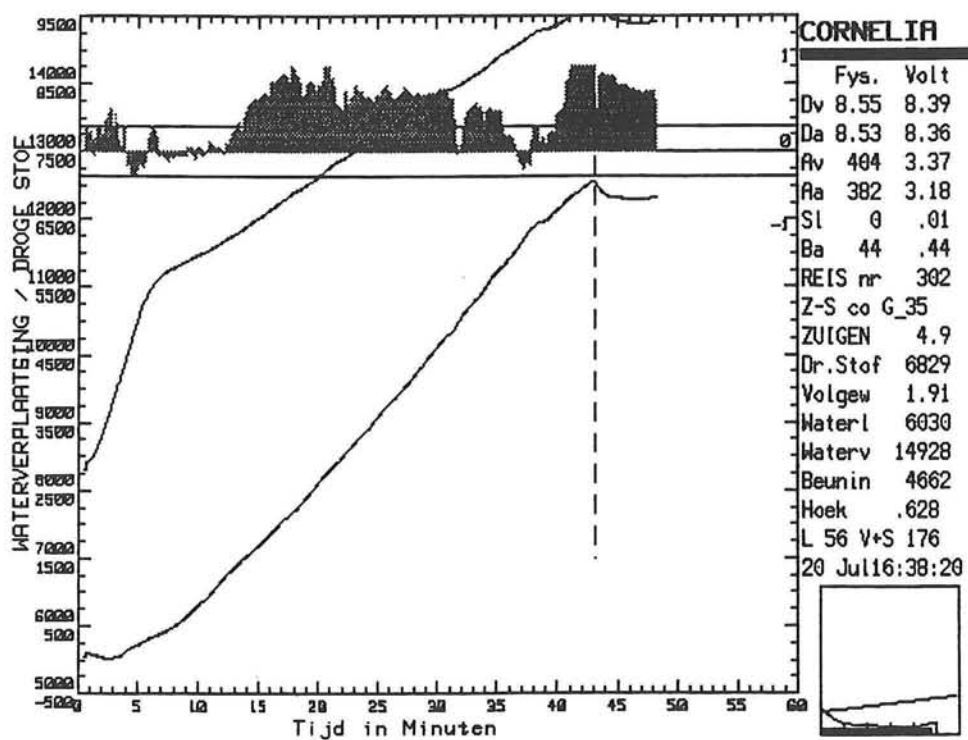
Gemiddelde waarde = 4.255 m
→ Volume = 4444.3 m³

Gemiddelde waarde = 4.356 m → volume = 4378.1 m³

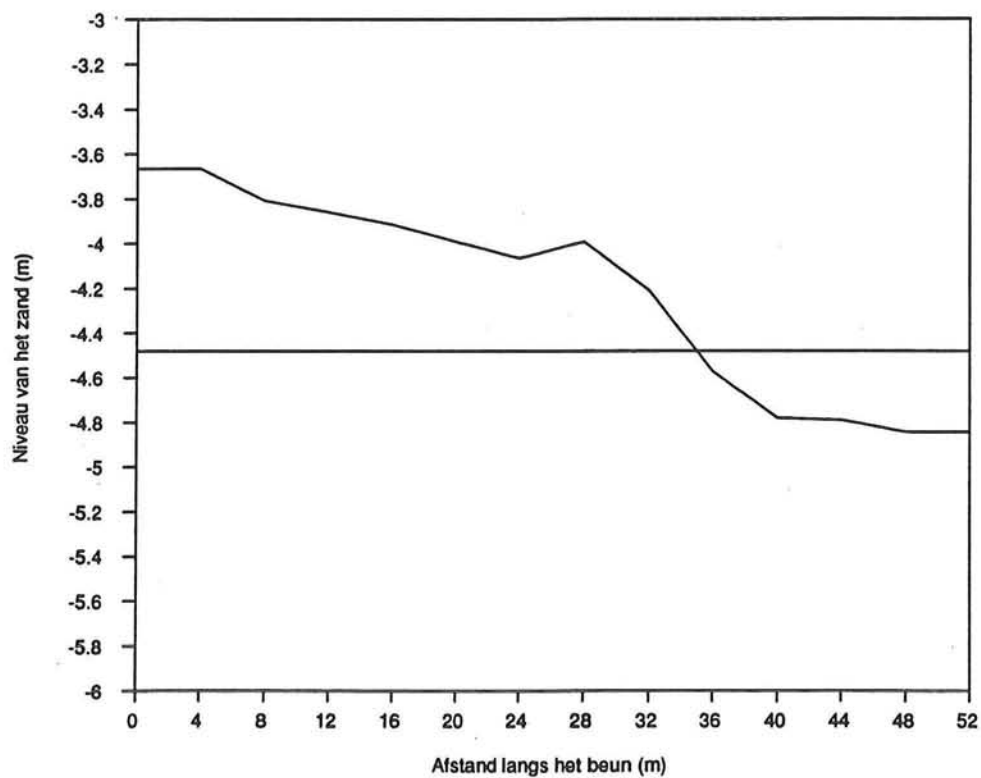
Waterverplaatsing schip vol = 14789.6 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (13:00) = 459.1 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 91.6 ton

Gewicht van het zand = 8985.3 ton

Volume zand boven water = 196.1 m³ → 4.5%



Reisnummer 302



Reisnummer 302: datum 20-7-92 tijdstip 17:30

Punt	Waarde	Extra
1	3.67 m	+0.02 m
2	3.84 m	+0.27 m
3	3.90 m	+0.09 m
4	3.96 m	
5	4.02 m	
6	4.09 m	
7	4.15 m	
8	4.12 m	
9	4.27 m	
10	4.57 m	
11	4.71 m	
12	4.69 m	
13	5.00 m	
14	4.87 m	
15	4.99 m	
16	4.87 m	
17	4.30 m	
18	3.83 m	
19	4.04 m	
20	3.96 m	
21	3.87 m	
22	3.82 m	+0.02 m
23	3.78 m	-0.01 m
24	3.66 m	+0.00 m

Punt	Waarde	Extra
1	3.87 m	+0.10 m
2	3.97 m	
3	4.16 m	
4	4.35 m	
5	4.74 m	
6	4.85 m	
7	4.28 m	
8	3.99 m	
9	3.80 m	+0.00 m
10	3.55 m	+0.00 m

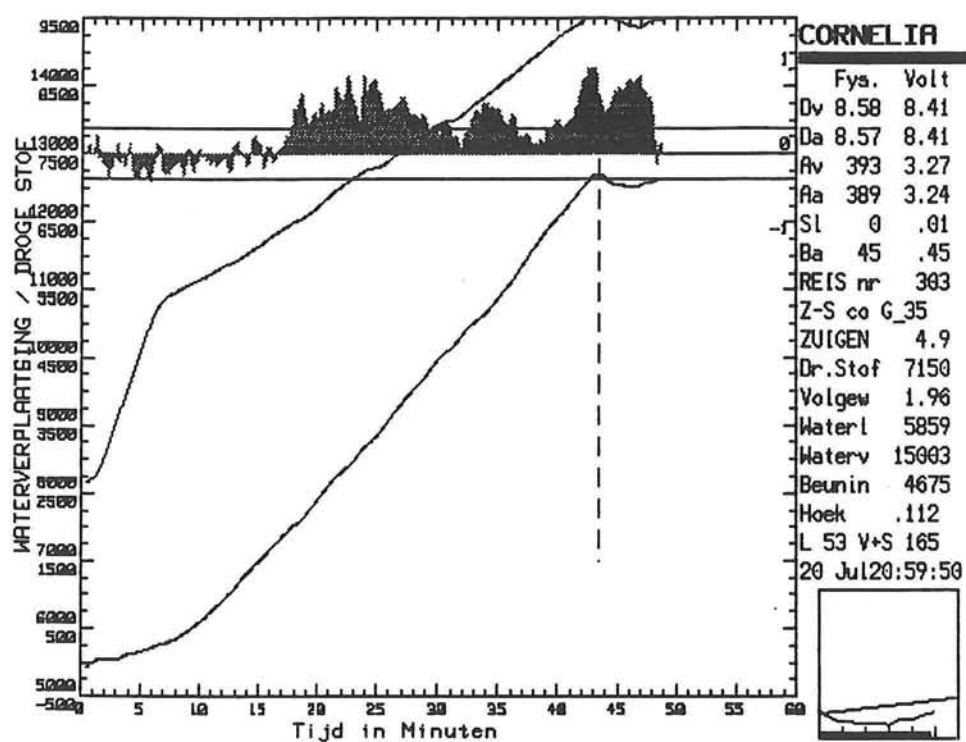
Gemiddelde waarde = 4.156 m
 → Volume = 4509.0 m³

Gemiddelde waarde = 4.208 m → volume = 4475.0 m³

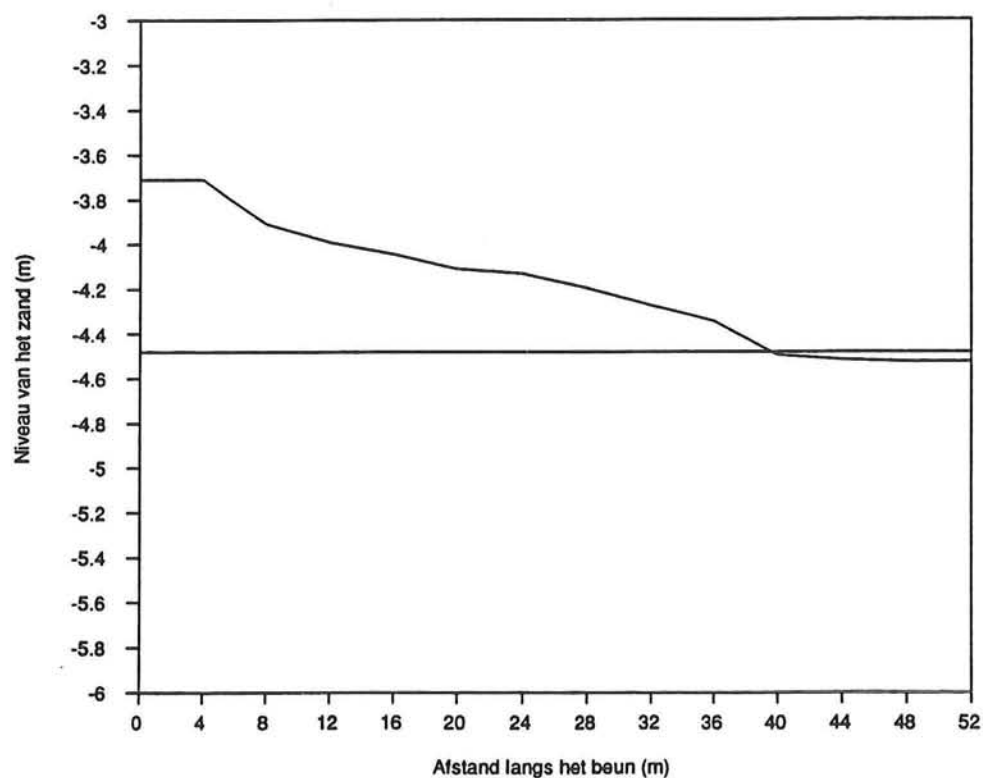
Waterverplaatsing schip vol = 14877.8 ton
 Waterverplaatsing schip leeg = 5245.6 ton
 Gewicht bunkers (17:30) = 455.5 ton
 Gewicht smeerolie = 8.0 ton
 Gewicht water op het zand = 62.4 ton

Gewicht van het zand = 9106.3 ton

Volume zand boven water = 246.1 m³ → 5.5%



Reisnummer 303



Reisnummer 303: datum 20-7-92 tijdstip 22:00

Punt	Waarde	Extra
1	3.58 m	-
2	3.88 m	-
3	3.96 m	-
4	4.06 m	
5	4.10 m	
6	4.11 m	
7	4.24 m	
8	4.26 m	
9	4.27 m	
10	4.52 m	
11	4.55 m	
12	4.56 m	
13	4.49 m	
14	4.48 m	
15	4.47 m	
16	4.42 m	
17	4.29 m	
18	4.15 m	
19	4.15 m	
20	4.12 m	
21	4.03 m	
22	4.02 m	-
23	3.94 m	-
24	3.84 m	-

Punt	Waarde	Extra
1	3.90 m	-
2	4.09 m	
3	4.20 m	
4	4.18 m	
5	4.63 m	
6	4.46 m	
7	4.25 m	
8	4.01 m	
9	3.97 m	-
10	3.39 m	-

Gemiddelde waarde = 4.108 m
→ Volume = 4540.3 m³

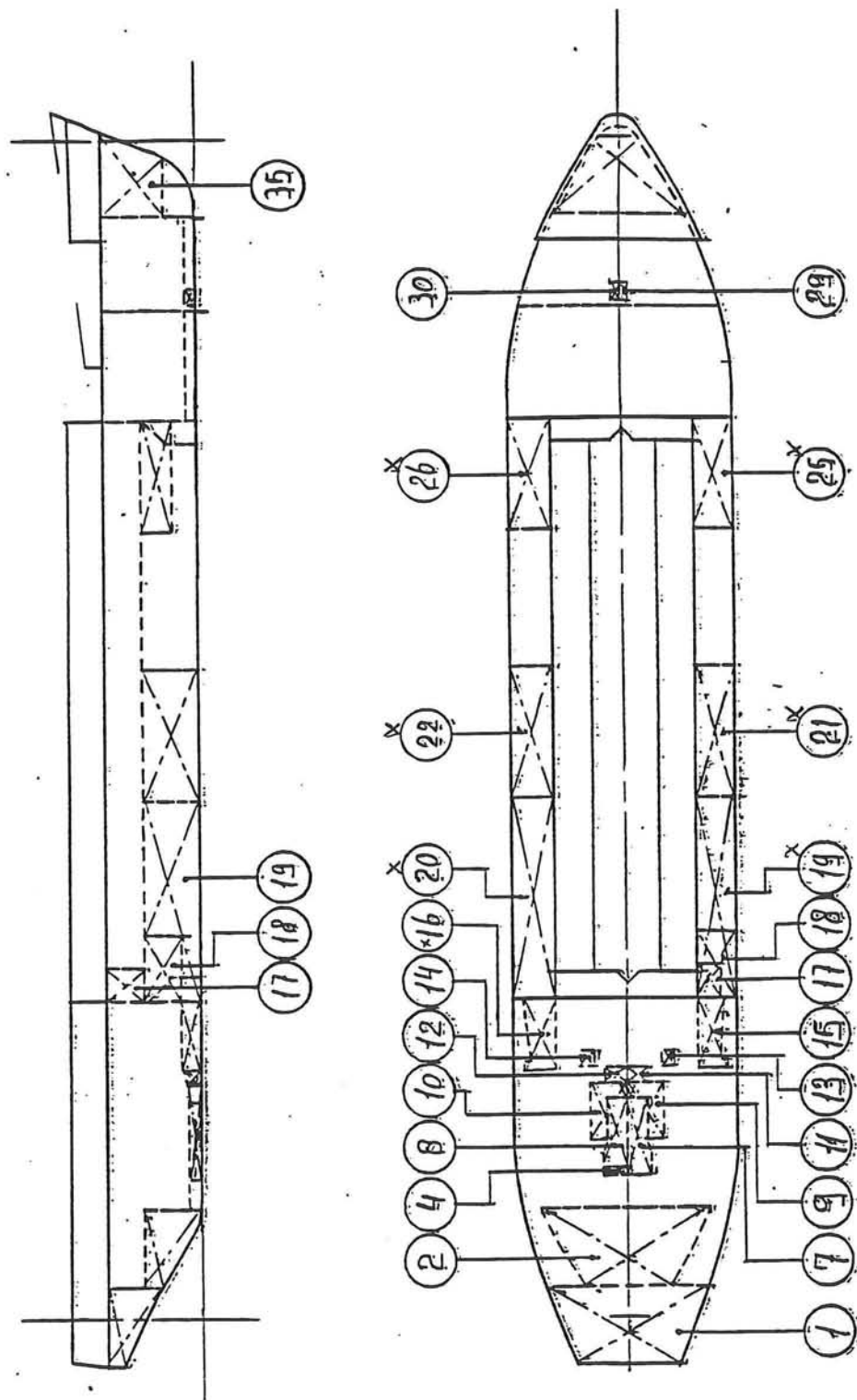
Gemiddelde waarde = 4.187 m → volume = 4488.8 m³

WATERVERPLAATSING SCHIP VOL = 14954.7 ton
WATERVERPLAATSING SCHIP LEEG = 5245.6 ton
Gewicht bunkers (22:00) = 452.0 ton
Gewicht smeerolie = 8.0 ton
Gewicht water op het zand = 5.7 ton

Gewicht van het zand = 9243.6 ton

Volume zand boven water = 162.2 m³ → 3.6%

Situatie Tanks Co 1140



01140-03.53-002 2

Tank no.	Omschrijving	Plaats	Inh. in m ³	0-all	0-basis	0-4	I in m ⁴
1	Waterballast	-6-4	177,80	0,24	7,04	-	1170
2	Waterballast	4-14	160,00	7,34	3,46	-	970
4	Brandstof lekolie	18-19	1,45	12,96	0,54	1,03	-
7	Vuile smeerolie	18-28	13,93	15,99	0,53	0,97	4
8.	Smeerolie voorraad <u>MG 324</u>	19-28	12,45	16,36	0,53	0,96	4
9+10	Smeerolie afloop	23-30	9,36	19,05	0,53	2,05	6
11+12	Smeerolie voorraad	30-32	3,48	21,77	0,71	0,91	-
13+14	Smeerolie afloop	32-34	1,64	23,11	1,27	3,63	-
15	Sludge tank SB	32-41	22,40	25,89	1,02	7,48	8
16	Gasolie dagtank BB	32-41	22,40	25,89	1,02	7,48	8
18	Settlingtank SB	41-49	66,40	31,75	3,33	8,06	21
19	Zware olie SB	41-64	<u>218,60</u>	39,59	2,37	7,94	41
20	Zware olie BB	41-64	<u>285,70</u>	37,75	2,60	7,96	63
21+22	Dieselolie	64-79	<u>189,30</u>	52,81	2,60	7,96	42
25+26	Drinkwater	94-107	<u>97,60</u>	75,86	3,50	8,06	35
29+30	Smeerolie afloop	122-124	1,00	92,09	0,52	0,35	-
35	Trimtank	133-144	197,70	101,97	5,73	-	338

cm	m ³	cm	m ³	cm	m ³	cm	m ³
323	5094.522	348	4940.196	373	4783.102	398	4623.240
324	5088.402	349	4933.966	374	4776.761	399	4616.788
325	5082.278	350	4927.730	375	4770.415	400	4610.331
326	5076.150	351	4921.491	376	4764.065	401	4603.870
327	5070.016	352	4915.247	377	4757.710	402	4597.405
328	5063.879	353	4908.999	378	4751.351	403	4590.935
329	5057.736	354	4902.746	379	4744.987	404	4584.461
330	5051.590	355	4896.489	380	4738.620	405	4577.982
331	5045.439	356	4890.227	381	4732.247	406	4571.499
332	5039.284	357	4883.961	382	4725.870	407	4565.012
333	5033.124	358	4877.691	383	4719.489	408	4558.519
334	5026.960	359	4871.416	384	4713.103	409	4552.023
335	5020.792	360	4865.137	385	4706.714	410	4545.523
336	5014.618	361	4858.853	386	4700.319	411	4539.017
337	5008.441	362	4852.564	387	4693.920	412	4532.507
338	5002.259	363	4846.272	388	4687.517	413	4525.993
339	4996.073	364	4839.975	389	4681.109	414	4519.475
340	4989.882	365	4833.673	390	4674.697	415	4512.952
341	4983.687	366	4827.367	391	4668.280	416	4506.425
342	4977.487	367	4821.057	392	4661.859	417	4499.893
343	4971.283	368	4814.743	393	4655.434	418	4493.357
344	4965.075	369	4808.423	394	4649.004	419	4486.816
345	4958.862	370	4802.099	395	4642.569	420	4480.271
346	4952.644	371	4795.771	396	4636.130	421	4473.723
347	4946.423	372	4789.439	397	4629.688	422	4467.177



Naam van het vaartuig: CORNELIA

BEUN

bladnr. 6

cm	m ³	cm	m ³	cm	m ³	cm	m ³
423	4460.629	448	4296.947	473	4133.264	498	3969.582
424	4454.082	449	4290.399	474	4126.717	499	3963.034
425	4447.534	450	4283.852	475	4120.169	500	3956.487
426	4440.987	451	4277.305	476	4113.622	501	3949.940
427	4434.440	452	4270.757	477	4107.075	502	3943.392
428	4427.892	453	4264.210	478	4100.527	503	3936.845
429	4421.345	454	4257.663	479	4093.980	504	3930.298
430	4414.798	455	4251.115	480	4087.433	505	3923.750
431	4408.251	456	4244.568	481	4080.886	506	3917.203
432	4401.703	457	4238.021	482	4074.338	507	3910.656
433	4395.156	458	4231.473	483	4067.791	508	3904.108
434	4388.609	459	4224.926	484	4061.244	509	3897.561
435	4382.061	460	4218.379	485	4054.696	510	3891.014
436	4375.514	461	4211.832	486	4048.149	511	3884.467
437	4368.967	462	4205.284	487	4041.602	512	3877.919
438	4362.420	463	4198.737	488	4035.054	513	3871.372
439	4355.872	464	4192.190	489	4028.507	514	3864.825
440	4349.325	465	4185.642	490	4021.960	515	3858.277
441	4342.777	466	4179.095	491	4015.412	516	3851.730
442	4336.230	467	4172.548	492	4008.865	517	3845.183
443	4329.683	468	4166.000	493	4002.318	518	3838.635
444	4323.136	469	4159.453	494	3995.771	519	3832.088
445	4316.588	470	4152.906	495	3989.223	520	3825.541
446	4310.041	471	4146.359	496	3982.676	521	3818.994
447	4303.494	472	4139.811	497	3976.129	522	3812.446



Bijlage 3.6 Bepaling van de minimum en maximum dichtheid

De minimum en maximum dichtheid zijn in principe drie keer bepaald. Als er een hogere waarde voor de minimum dichtheid gevonden werd dan de vorige waarde(n) is de bepaling van de maximum dichtheid achterwege gebleven.

Fijn zand:	Proef 1	Proef 2	Proef 3
Gewicht (kg)	4.082	4.101	4.110
Volume (cm ³)	2830	2830	2830
ρ_{min} (kg/m ³)	1442.4	1449.1	1452.3
Inzinking 1 (cm)	2.70	-	-
Inzinking 2 (cm)	2.75	-	-
Inzinking 3 (cm)	2.80	-	-
Inzinking 4 (cm)	2.65	-	-
Gemiddeld (cm)	2.73	-	-
Volume (cm ³)	2332.0	-	-
ρ_{max} (kg/m ³)	1750.4	-	-

Grof zand:	Proef 1	Proef 2	Proef 3
Gewicht (kg)	4.385	4.356	4.361
Volume (cm ³)	2830	2830	2830
ρ_{min} (kg/m ³)	1549.5	1539.2	1541.0
Inzinking 1 (cm)	2.50	2.50	-
Inzinking 2 (cm)	2.70	2.65	-
Inzinking 3 (cm)	2.70	2.85	-
Inzinking 4 (cm)	2.60	2.65	-
Gemiddeld (cm)	2.63	2.66	-
Volume (cm ³)	2350.2	2344.8	-
ρ_{max} (kg/m ³)	1865.8	1857.7	-

Bijlage 3.7 Berekening van de relatieve dichtheid

In de eerste kolom staat het reisnummer vermeld. In de tweede en derde kolom staan de waarden voor het gewicht en het volume die in Bijlage 3.1 berekend zijn. In de vierde kolom staat vervolgens de dichtheid van het zand in kg/m^3 . Deze waarden zijn verkregen door de waarden uit de tweede kolom te delen door de waarden uit de derde kolom. De porositeit in kolom vijf is berekend m.b.v. de formule $p_{\text{zand}} = S_r * n * \rho_{\text{zeewater}} + (1-n) * \rho_{\text{specifiek}}$. Voor S_r is de waarde 1 aangenomen, voor ρ_{zeewater} de waarde 1020 kg/m^3 en voor $\rho_{\text{specifiek}}$ de waarde 2630 kg/m^3 . In de zesde kolom staat vermeld of het gebaggerde zand fijn of grof was. In de zevende kolom staan tenslotte de, m.b.v. Bijlage 3.4, berekende waarden van de relatieve dichtheid.

Reis	Gewicht	Volume	ρ_{zand}	n	Type	Dr
280	8975.4	4306.8	2084.0	33.91%	Fijn	96.0%
281	8996.3	4346.0	2070.0	34.78%	Grof	55.3%
282	9048.9	4293.7	2107.5	32.45%	Grof	74.5%
283	9297.5	4416.1	2105.4	32.59%	Fijn	107.3%
284	8849.3	4308.7	2053.8	35.79%	Fijn	80.0%
285	8599.8	4160.8	2066.9	34.98%	Grof	53.7%
286	9205.5	4420.7	2082.4	34.01%	Fijn	95.1%
287	8730.6	4192.2	2082.6	34.00%	Fijn	95.2%
289	8985.2	4341.5	2069.9	34.81%	Grof	55.1%
290	8855.3	4342.1	2039.4	36.68%	Fijn	72.3%
291	9049.0	4350.6	2079.9	34.17%	Fijn	93.8%
292	8714.9	4209.2	2070.4	34.76%	Grof	55.5%
293	8850.7	4303.5	2056.6	35.61%	Fijn	81.5%
295	9127.3	4395.8	2076.4	34.39%	Fijn	91.9%
296	9009.9	4357.8	2067.5	34.94%	Grof	54.0%
297	9298.5	4429.2	2099.4	32.96%	Fijn	104.1%
298	8572.8	4276.0	2004.9	38.83%	Grof	21.9%
300	9089.9	4372.2	2079.0	34.22%	Fijn	93.3%
301	8985.3	4378.1	2052.3	35.88%	Fijn	79.2%
302	9106.3	4475.0	2034.9	36.96%	Fijn	70.0%
303	9243.6	4488.8	2059.3	35.45%	Fijn	82.9%

Bijlage 3.8 Bepaling van de nieuwe waarden voor $n_{\min}$ en $n_{\max}$

De nieuwe waarden voor de minimum en maximum porositeit zijn bepaald m.b.v. Bijlage 2.13. Uit deze bijlage blijkt namelijk dat als de minimum dichtheid met 5% afneemt dat dan de maximum dichtheid globaal met 7.9% toeneemt. Met dit gegeven is de onderstaande tabel samengesteld.

	$\rho_{\min}(\text{kg/m}^3)$	$\rho_{\max}(\text{kg/m}^3)$	$n_{\max}$	$n_{\min}$
Fijn	1370.3	1888.7	47.90%	28.19%
Grof	1462.2	2004.5	44.40%	23.78%

Bijlage 3.9 Herberekening van de relatieve dichtheid met een verandering van 5% in de foutenbronnen

In de onderstaande tabel is de waarde van de relatieve dichtheid een aantal malen herberekend t.b.v. de nauwkeurigheidsanalyse. In de tweede kolom staan de waarden van de relatieve dichtheid vermeld a.g.v. een verandering in de waarden van de minimum en maximum porositeit die in Bijlage 3.7 bepaald zijn. In de derde kolom staan de bijbehorende procentuele afwijkingen in de waarde van de relatieve dichtheid weergegeven. In de vierde en zesde kolom staan respectievelijk de waarden van de relatieve dichtheid vermeld a.g.v. een afname in de verzadigingsgraad met 5% en een toename in de dichtheid van het zeewater met 5%. In de vijfde en zevende kolom staan de bijbehorende procentuele afwijkingen van de waarde van de relatieve dichtheid weergegeven. De gemiddelde procentuele afwijkingen zijn in de onderste rij berekend.

Reis	$n_{\min/\max}$	afw.	S_r	afw.	ρ_{zeew}	afw.
280	71.0	26.1%	104.9	9.3%	86.5	9.9%
281	46.6	15.7%	64.1	15.9%	45.9	17.0%
282	57.9	22.3%	82.8	11.0%	65.8	11.8%
283	77.7	27.6%	115.8	8.0%	98.2	8.5%
284	61.5	23.2%	89.3	11.7%	70.0	12.5%
285	45.7	14.9%	62.6	16.5%	44.2	17.6%
286	70.4	25.9%	104.0	9.4%	85.6	10.0%
287	70.5	25.9%	104.1	9.4%	85.7	10.0%
289	46.5	15.6%	63.9	16.0%	45.7	17.1%
290	56.9	21.3%	81.9	13.3%	62.1	14.2%
291	69.7	25.7%	102.8	9.5%	84.3	10.2%
292	46.8	15.8%	64.3	15.9%	46.1	16.9%
293	62.3	23.5%	90.8	11.5%	71.5	12.2%
295	68.6	25.4%	100.9	9.8%	82.3	10.4%
296	45.9	15.1%	62.9	16.4%	44.6	17.5%
297	75.8	27.2%	112.7	8.3%	94.9	8.8%
298	27.0	23.4%	31.7	45.0%	11.4	47.9%
300	69.4	25.6%	102.3	9.6%	83.8	10.2%
301	61.0	23.0%	88.6	11.9%	69.2	12.6%
302	55.5	20.7%	79.6	13.8%	59.6	14.7%
303	63.2	23.8%	92.1	11.2%	73.0	11.9%
Gem		22.3%		13.5%		14.4%

In de onderstaande tabel is de waarde van de relatieve dichtheid herberekend door in de tweede kolom de waarde van de specifieke dichtheid van het zand met 5% te verhogen, in de vierde kolom is de waarde van het volume met 5% verhoogd en in de zesde kolom is de waarde van de waterverplaatsing van het volle schip met 5% verhoogd. In de derde, vijfde en zevende kolom staan weer de bijbehorende procentuele afwijkingen in de waarde van de relatieve dichtheid vermeld. Van de procentuele afwijkingen zijn weer in de onderste rij de gemiddelde waarden berekend.

Reis	ρ_{spec}	afw.	volume	afw.	watv.vol	afw.
280	53.4	44.4%	43.4	54.8%	187.7	95.6%
281	14.6	73.5%	4.8	91.4%	143.5	159.5%
282	32.4	56.5%	23.1	69.1%	164.7	121.0%
283	63.9	40.5%	54.2	49.5%	198.1	84.7%
284	38.6	51.7%	28.1	64.8%	170.5	113.2%
285	13.2	75.5%	3.2	94.0%	144.2	168.6%
286	52.6	44.7%	42.5	55.3%	185.3	94.8%
287	52.7	44.7%	42.7	55.2%	187.7	97.2%
289	14.5	73.8%	4.6	91.7%	134.3	160.0%
290	31.5	56.4%	20.9	71.2%	161.9	123.9%
291	51.4	45.2%	41.3	56.0%	184.2	96.4%
292	14.8	73.3%	5.0	91.1%	145.3	161.7%
293	40.0	50.9%	29.6	63.7%	172.0	111.2%
295	49.6	46.0%	39.5	57.0%	181.8	97.7%
296	13.5	75.1%	3.5	93.4%	141.5	161.9%
297	60.9	41.5%	51.1	50.9%	194.1	86.5%
298	-16.2	-	-27.1	-	108.7	396.3%
300	50.9	45.4%	40.9	56.2%	183.3	96.4%
301	37.9	52.2%	27.4	65.4%	168.7	113.1%
302	29.3	58.1%	18.6	73.4%	158.1	125.9%
303	41.3	50.2%	30.9	62.7%	171.1	106.5%
Gem		55.0%		68.3%		132.0%

In de onderstaande tabel staan de herberekende waarden van de relatieve dichtheid vermeld door in de tweede kolom de waarde van de waterverplaatsing van het lege schip met 5% te verhogen. In de vierde, zesde en achtste kolom zijn respectievelijk het gewicht van de bunkers, de smeerolie en het water op het zand met 5% verhoogd. In de derde, vijfde, zevende en negende kolom staan weer de bijbehorende procentuele afwijkingen in de waarden van de relatieve dichtheid vermeld en in de onderste rij is weer de gemiddelde waarde van de procentuele afwijkingen berekend.

Reis	watv.1	afw.	bunkers	afw.	sm.olie	afw.	water	afw.
280	63.7	33.6%	92.5	3.6%	95.9	0.1%	95.3%	0.7%
281	24.4	56.0%	52.0	6.0%	55.3	0.1%	54.5%	1.4%
282	43.2	42.0%	71.2	4.5%	74.5	0.1%	73.1%	1.9%
283	75.8	29.3%	103.9	3.1%	107.2	0.0%	107.1%	0.2%
284	47.7	40.3%	76.6	4.2%	79.9	0.1%	79.5%	0.6%
285	21.4	60.2%	50.3	6.3%	53.6	0.1%	51.9%	3.3%
286	63.7	33.1%	91.9	3.4%	95.0	0.1%	94.8%	0.3%
287	62.1	34.8%	91.8	3.6%	95.2	0.1%	94.5%	0.8%
289	24.1	56.2%	52.0	5.6%	55.1	0.1%	54.1%	1.7%
290	40.3	44.3%	69.2	4.4%	72.3	0.1%	72.0%	0.5%
291	61.9	34.1%	90.7	3.3%	93.8	0.1%	93.6%	0.2%
292	23.6	57.6%	52.4	5.6%	55.5	0.1%	54.0%	2.8%
293	49.2	39.7%	78.4	3.8%	81.4	0.1%	80.8%	0.8%
295	60.3	34.4%	89.0	3.2%	91.9	0.1%	91.7%	0.2%
296	23.2	57.1%	51.2	5.2%	54.0	0.1%	53.3%	1.4%
297	72.7	30.1%	101.2	2.7%	104.1	0.0%	104.0%	0.1%
298	-9.6	-	19.1	12.9%	21.8	0.2%	20.9%	4.7%
300	61.5	34.1%	90.5	3.0%	93.3	0.1%	93.1%	0.2%
301	47.4	40.1%	76.4	3.5%	79.1	0.1%	78.6%	0.7%
302	38.9	44.4%	67.3	3.9%	69.9	0.1%	69.6%	0.5%
303	51.9	37.4%	80.2	3.2%	82.8	0.1%	82.8%	0.0%
Gem		41.9%		4.5%		0.1%		1.1%

Bijlage 3.10 Herberekening van de relatieve dichtheid met een verandering van 1% in de foutenbronnen

In de onderstaande tabel zijn de waarde van de relatieve dichtheid herberekend door in respectievelijk de tweede, vierde en zesde kolom de waarden van het volume, de dichtheid van het zeewater en de diepgang met 1% te verhogen. In de derde, vijfde en zevende kolom staan weer de bijbehorende procentuele afwijkingen in de waarden van de relatieve dichtheid vermeld en in de onderste rij is weer de gemiddelde procentuele afwijking berekend.

Reis	Volume	afw.	$\rho_{zeew.}$	afw.	Dv/Da	afw.
280	85.0	11.4%	92.7	3.4%	106.0	10.4%
281	44.8	19.0%	52.0	6.0%	64.9	17.4%
282	63.8	14.4%	71.2	4.5%	84.5	13.4%
283	96.2	10.3%	104.1	2.9%	117.4	9.4%
284	69.2	13.5%	76.7	4.1%	89.7	12.1%
285	43.2	19.5%	50.3	6.4%	63.3	18.0%
286	84.2	11.5%	91.9	3.4%	105.0	10.4%
287	84.3	11.5%	91.9	3.4%	105.0	10.3%
289	44.6	19.1%	51.8	6.0%	64.7	17.4%
290	61.6	14.8%	69.0	4.6%	81.9	13.2%
291	82.9	11.6%	90.6	3.4%	103.6	10.4%
292	45.0	18.9%	52.1	6.1%	65.2	17.3%
293	70.7	13.2%	78.1	4.1%	91.2	11.9%
295	81.0	11.9%	88.7	3.5%	101.7	10.6%
296	43.5	19.4%	50.8	6.0%	63.5	17.6%
297	93.1	10.6%	101.0	3.0%	114.0	9.5%
298	11.7	46.5%	18.4	15.9%	31.0	41.8%
300	82.4	11.7%	90.1	3.4%	103.1	10.4%
301	68.4	13.6%	75.9	4.2%	88.9	12.2%
302	59.3	15.3%	66.6	4.8%	97.5	13.7%
303	72.0	13.0%	79.6	3.9%	92.5	11.6%
Gem		15.7%		4.9%		14.2%