



Porositeit in breuksteenconstructies

Onderzoek naar en bepaling van factoren die de hoeveelheid geplaatst materiaal bepalen

Afstudeerverslag

Carlos Bosma
Studienummer 108113

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek en
Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde en Offshore
Technologie



Van Oord ACZ



Van Oord ACZ

Joosten Bouwstoffen



Afstudeercommissie:

Prof. ir. K. d'Angremond
Dr. ir. H.L. Fontijn
Dr. ir. P.H.A.J.M. van Gelder
Ir. W. Sint Nicolaas (Van Oord ACZ)
Ir. H.J. Verhagen



Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van het afstudeeronderzoek 'Porositeit in breuksteenconstructies'. Het onderzoek is uitgevoerd ter afronding van mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft in de periode november 2000 tot en met november 2001. Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met Van Oord ACZ een bedrijf dat veelvuldig werkzaam is met breuksteenconstructies. Tijdens het onderzoek is modelonderzoek gedaan op de werf van Van Oord ACZ. Daar is van de mogelijkheid gebruikgemaakt de proefopstelling naar eigen wens te kunnen bouwen.

Naast mijn examencommissie, gaat mijn dank uit naar iedereen binnen Van Oord ACZ die dit afstudeeronderzoek mogelijk heeft gemaakt en naar Geert Keukens en Geert Mulder van Joosten bouwstoffen die het proefmateriaal beschikbaar hebben gesteld voor het zeven van de proefgraderingen.

Carlos Bosma
Delft, 12 december 2001

Samenvatting

In de praktijk worden na afloop van de bouw van waterbouwkundige constructies aanzienlijke verschillen geconstateerd tussen de hoeveelheid steenmateriaal die wordt geplaatst en de hoeveelheid die volgens het ontwerp zou moeten worden geplaatst. Gebrek aan kwantitatief inzicht in de van belang zijnde factoren leidt ertoe dat geconstateerde afwijkingen in de hoeveelheid geplaatst steenmateriaal niet kunnen worden verklaard. Uit eerder onderzoek hiernaar is gebleken dat de gehele problematiek wat betreft de hoeveelheid steenmateriaal in twee delen kan worden opgesplitst; onderzoek naar de bulkeigenschappen (werkelijke porositeit en laagdikte bepaald zonder invloed van randen afhankelijk van steen- en productie eigenschappen) en onderzoek naar de randinvloeden van het steenmateriaal (penetratie in onderliggende laag, surveymethode, porositeitsverloop in randen van breuksteenlagen, etc. wat leidt tot de schijnbare porositeit ofwel gemiddelde porositeit over de *gemeten* laagdikte). In dit rapport is onderzoek verricht naar randinvloeden van breuksteenlagen. Er is onderzocht wat de invloed is van de surveymethode, penetratie in onderliggende lagen en het verloop van porositeit in randen van breuksteenlagen.

In de literatuur worden twee onderzoeken gevonden die betrekking hebben op deze randinvloeden. Het onderzoek van Gauss en Latham, 1995 (The measurement of layer thickness and the estimation of as-built bulk density and void porosity in a rock armour revetment at Beesands, South Devon) laat zien dat verschillende surveymethoden aanzienlijke verschillen opleveren in de schijnbare porositeit. De oorzaak ligt in het feit dat elke surveymethode een verschillende laagdikte meet, waardoor er voor elke surveymethode een andere steenbehoefte ontstaat. Uit het onderzoek is gebleken dat het formuleren van een goede definitie van de randen (afhankelijk van de toe te passen surveymethode) een belangrijk uitgangspunt is.

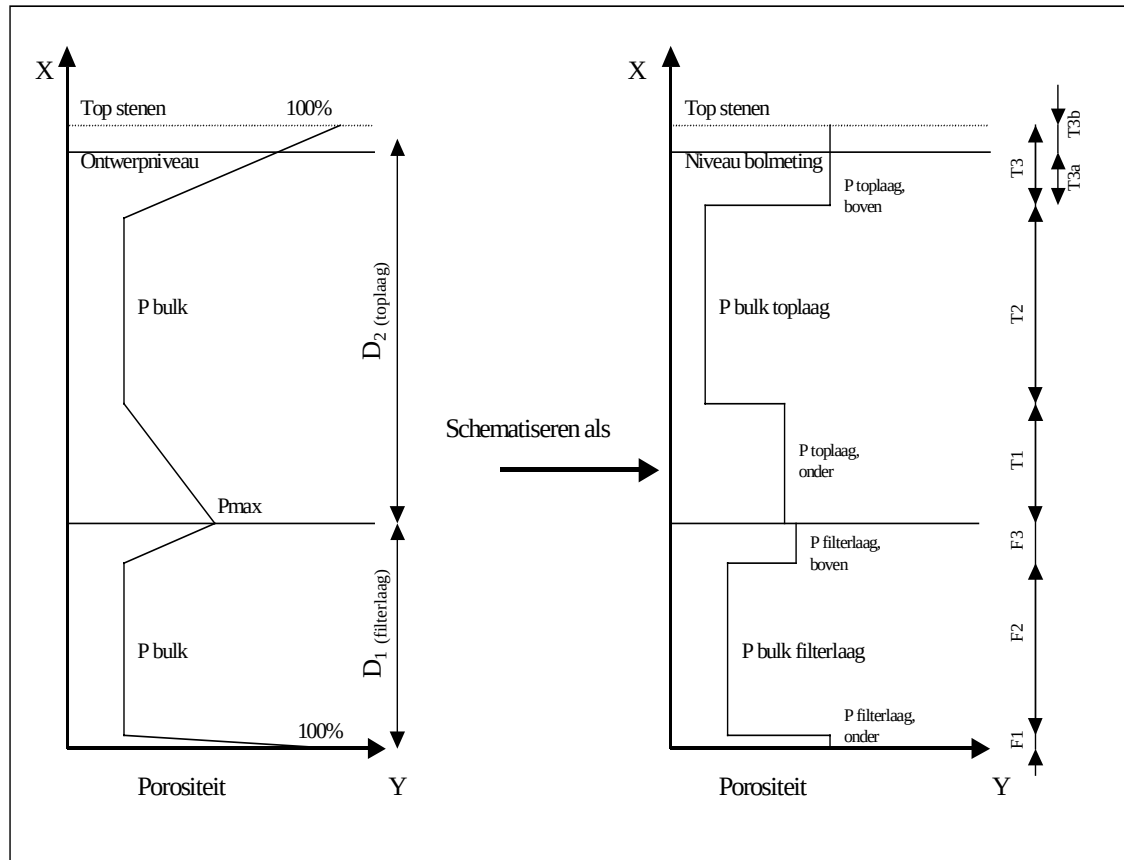
Het onderzoek van Knieß, 1977 (Bemessung von Schüttstein-Deckwerken im Verkehrswasserbau) geeft een opzet van het porositeitsverloop over een breuksteenlaag. Hierbij worden voor de boven- en onderrand andere porositeitswaarden toegepast dan voor het midden van de laag, waar de bulkporositeit geldt. De beschrijving en achtergrond van deze methoden zijn beknopt en niet onderbouwd door onderzoeksresultaten.

Mede aan de hand van de bovenstaande onderzoeken is dit onderzoek opgesteld, waarbij de nadruk ligt op de invloed van de surveymethode op de schijnbare porositeit en het porositeitsverloop in randen van breuksteenlagen.

In het onderzoek van Gauss en Latham, is gebruik gemaakt van de conventionele surveymethoden (survey uitgevoerd met waterpasinstrument dat het niveau meet van de baak die op de constructie is geplaatst). In dit onderzoek is ook gebruik gemaakt van deze surveymethoden, alleen is de voet van de baak op twee manieren uitgerust; er is gekozen voor een bolvormig voetstuk (diameter is gelijk aan $0.5D_{n50}$) en voor een pinvormig voetstuk. Tijdens de proefuitvoering zijn beide methoden naast elkaar gebruikt voor de bepaling van het niveau van de breuksteenlaag. Het verschil tussen deze methoden laat een lineair verband zien als functie van D_{n50} welke voldoet aan:

$$y_{\text{survey verschil}} = 0.204 * D_{n50} + 0.18 \text{ [cm]}$$

Naast de vergelijking van de toegepaste surveymethoden is onderzoek gedaan naar het porositeitsverloop in de randen van de breuksteenlaag. Dit porositeitsverloop is onderzocht door het in kleine stapjes vullen van het meetvat met water (waarin de breuksteenlagen zijn geplaatst). Per toegevoegde hoeveelheid water is opgemeten wat de stijghoogte van het water in het meetvat was. Aan de hand van deze gegevens is het mogelijk het porositeitsverloop te bepalen (in kleine stapjes over de hoogte van de breuksteenlaag). De resultaten van deze proef zijn weergegeven in de onderstaande figuur.



Het linker schema geeft de proefresultaten weer, waarbij het porositeitsverloop in de randen is benaderd door een lineair verband. De meetpunten (niet weergegeven) die om deze lineaire regressielijn liggen hebben een normale verdeling. In het schema zijn vier randen van de twee breuksteenlagen te onderscheiden, waarbij elke rand en dus elke regressielijn zijn eigen eigenschappen heeft. De onderste- en bovenste regressielijn kunnen worden beschreven door een lineair verband als functie van D_{n50} . De twee middelste regressielijnen (bovenkant onderste laag en onderkant bovenste laag) kunnen ook worden beschreven door een regressielijn met een machtsfunctie van D_{n50} , maar hierin is tevens de verhouding in D_{n50} tussen de bovenste en onderste breuksteenlaag verwerkt. De laagscheiding is bepaald door het punt van maximale porositeit in de overgang tussen de breuksteenlagen.

Voor de bepaling van de steenhoeveelheid is het schema aangepast tot een 'blok schema'. Hierbij zijn de regressielijnen weergegeven door de gemiddelde porositeit van deze lijn over het hoogteverschil van de regressielijn (hoogtes F_1 , F_3 , T_1 en T_3 in de figuur). Op deze manier is het mogelijk om voor de randen van



breuksteenlagen de steenbehoefte te bepalen. In het middelste deel van de breuksteenlaag geldt de bulkporositeit welke wordt bepaald door de eigenschappen van de toegepaste steen (voor richtlijnen zie o.a. het CIRIA/CUR Manual en het onderzoek van Bregman (1998)).

Om te voldoen aan de ontwerpgrenzen is een vergelijking gemaakt tussen het gemeten niveau van de toegepaste surveymethoden en het niveau waar de porositeit een waarde van 100% bereikt (zie bovenkant tweede breuksteenlaag). Uit het schema is zichtbaar dat de toppen van de stenen boven het niveau van de surveymethode uitkomen. Dit betekent dus ook dat er een bepaalde hoeveelheid steen boven de ontwerpgrens geplaatst moet worden om met de voorgeschreven surveymethode te voldoen aan de ontwerpgrenzen.

Met de onderzoeksresultaten is het mogelijk om voor alle stukjes van de breuksteenlaag (T en F) de hoogte en de gemiddelde porositeit te bepalen. De proeven zijn (vanwege de manier van proefuitvoering met water) alleen uitgevoerd op horizontale breuksteenlagen, het is dus niet zonder meer mogelijk deze resultaten ook op hellende constructies toe te passen.

Het geschematiseerde verloop van de profresultaten geeft meer inzicht in het porositeitsverloop dan de methode Knieß. Knieß gebruikte voor de invloedslengete (hoogteverschil van de regressielijn) altijd 1/6 deel van de laagdikte. Door toepassing van de onderzoeksresultaten kan deze lengte nauwkeuriger bepaald worden. Dit geldt zowel voor de invloedslengeten aan de boven- en onderkant van breuksteenconstructies, maar ook voor de invloedslengeten in de overgang tussen twee breuksteenlagen. Porositeit in de overgangen wordt door Knieß altijd gelijkgesteld aan 60% (uitzondering bij zachte ondergrond). De onderzoeksresultaten geven de porositeit aan door het gemiddelde van de maximaal optredende porositeit en de gemiddelde bulkporositeit en is dus niet zonder meer gelijk aan 60%.

Tot slot is er onderzocht wat het effect is van indringing in onderliggende lagen (in deze proef waren de onderliggende lagen altijd breuksteenlagen). Indringing in breuksteenlagen laat zien dat bij toepassing van het bolvormige voetstuk op de baak de indringing nihil is. Toepassing van het pinvormige voetstuk op de baak laat een resultaat zien met veel spreiding tussen de meetpunten. Dit is een eigenschap van deze surveymethode die gedurende het hele onderzoek zichtbaar was.



Inhoudsopgave

VOORWOORD

SAMENVATTING

INHOUDSOPGAVEI

SYMBOLENLIJSTIII

1 INLEIDING..... 1

- 1.1 AANLEIDING TOT HET ONDERZOEK 1
- 1.2 PROBLEEMSTELLING EN DOELSTELLING..... 2
- 1.3 INHOUD VAN HET RAPPORT 2

2 TOEPASSING HUIDIGE ONTWERPPARAMETERS..... 4

- 2.1 POROSITEIT 4
- 2.2 INTRINSIEKE EIGENSCHAPPEN 8
 - 2.2.1 *Dichtheid gesteente*..... 9
 - 2.2.2 *Natuurlijke gesteldheid* 9
- 2.3 GEPRODUCEERDE STEENEIGENSCHAPPEN 10
 - 2.3.1 *Steilheid van de gradering* 10
 - 2.3.2 *Vorm van de steenstukken* 11
 - 2.3.3 *Onderzoek Bregman* 11
- 2.4 UITVOERINGSEIGENSCHAPPEN 12
 - 2.4.1 *Plaatsingsmethode*..... 12
 - 2.4.2 *Invloed van onderliggende lagen*..... 14
 - 2.4.3 *Methode Knieß*..... 15
 - 2.4.4 *Definitie randen*..... 17
 - 2.4.5 *Surveymethoden*..... 18
 - 2.4.6 *Onderzoek van Latham & Gauss (1995) in South Devon*..... 23
- 2.5 ONDERZOEKSMOGELIJKHEDEN..... 25

3 ONDERZOEKSMETHODEN..... 27

- 3.1 THEORETISCHE STUDIE 27
- 3.2 PRAKTISCHE METING 27
- 3.3 MODELONDERZOEK..... 28

4 OPZET VAN HET ONDERZOEK..... 30

- 4.1 INLEIDING 30
- 4.2 PROEFOPSTELLING..... 30
 - 4.2.1 *Schematisering proefopstelling* 30
 - 4.2.2 *Proefuitvoering indringing*..... 31
 - 4.2.3 *Proefuitvoering porositeitsverloop*..... 32
 - 4.2.4 *Schematisering werkelijkheid*..... 33
 - 4.2.5 *Surveymethode en definitie randen*..... 33
 - 4.2.6 *Plaatsingsmethode*..... 35
 - 4.2.7 *Stappenplan proefuitvoering*..... 36
- 4.3 SAMENSTELLEN PROEFGRADERINGEN..... 37
 - 4.3.1 *Bepalen minimale steenafmeting* 38
 - 4.3.2 *Maximale steenafmeting* 39
 - 4.3.3 *Vorm van de gradering* 40
 - 4.3.4 *Stapgrootte tussen proefgraderingen*..... 41
 - 4.3.5 *Eigenschappen proefmateriaal*..... 43
 - 4.3.6 *Keuze proefmateriaal*..... 43
 - 4.3.7 *Ontwerp proefgraderingen*..... 44



4.3.8	Samenstellen proefgraderingen.....	46
4.3.9	Steenbehoefte.....	47
4.4	ONTWERP PROEFOPSTELLING.....	47
4.4.1	Funcieanalyse meetvat.....	47
4.4.2	Vorm van het meetvat.....	48
4.4.3	Dimensies meetvat.....	49
4.4.4	Uitvoeringseisen aan het meetvat.....	51
4.4.5	Meting van het waterniveau.....	52
4.4.6	Meting van het breuksteenoppervlak.....	52
4.4.7	Maximaal toegestane meetfouten.....	53
4.4.8	Procedure meten breuksteenoppervlak.....	55
4.4.9	Procedure meting waterniveau.....	57
4.4.10	Programma van eisen en ontwerptekeningen.....	57
5	RESULTATEN VAN HET ONDERZOEK.....	58
5.1	INLEIDING.....	58
5.2	ANALYSE MEETFOUTEN OPPERVLAKTEMETING.....	58
5.2.1	Meetfout door aflezen van de meetstaf.....	59
5.2.2	Fout door het uitvoeren van 100 individuele metingen per laagdiktemeting.....	60
5.2.3	Meetfout in toegevoegde steenmassa.....	61
5.2.4	Meetfout door doorbuiging bodem.....	62
5.2.5	Meetfout door rek wanden meetvat.....	62
5.2.6	Bepaling laagdikte.....	62
5.3	ANALYSE MEETFOUTEN WATERVULPROEF.....	63
5.3.1	Meetfout door aflezen peilnaald.....	63
5.3.2	Meetfout door toevoegen water aan het meetvat.....	64
5.3.3	Meetfout bepalen vatvolume.....	66
5.3.4	Meetfout door het randeffect.....	66
5.3.5	Fout door verandering dichtheid water.....	67
5.3.6	Fout door waterabsorptie breuksteen.....	67
5.3.7	Fout in bepaling nulniveau stijgbuizen.....	68
5.3.8	Fout in bepaling volume vulbuizen.....	69
5.4	DATAVERWERKING EN SCHEMATISERING WATERVULPROEF.....	69
5.4.1	Totale meetfout in proefuitvoering.....	70
5.4.2	Correctie voor het wandeffect.....	70
5.4.3	Waterabsorptie door breuksteen.....	71
5.4.4	Verwerken data watervulproef.....	71
5.4.5	Schematisering porositeitsverloop.....	73
5.5	RESULTATEN OPPERVLAKTEMETING.....	79
5.5.1	Bepalen verschil tussen bol- en pinmetingen.....	80
5.5.2	Bepaling van indringing.....	83
5.6	RESULTATEN WATERVULPROEF.....	87
5.6.1	Porositeitsverloop.....	88
5.6.2	Invloedslenge porositeitsverloop over een enkele laag.....	88
5.6.3	Invloedslenge porositeitsverloop in laagovergang.....	89
5.6.4	Gemiddelde porositeit.....	92
5.6.5	Punt van maximale porositeit.....	93
5.6.6	Gevolgen afvlakking breuksteenlaag.....	93
5.6.7	Vergelijking theoretische grens en niveau oppervlaktemetingen.....	95
5.6.8	Vergelijking P_{maximaal} en oppervlaktemeting.....	99
6	VERGELIJKING ONDERZOEKSRESULTATEN MET CIRIA/CUR-METHODE. ...	101
6.1	BEREKENING STEENHOEVEELHEID VOLGENS CIRIA/CUR-METHODE.....	101
6.2	BEREKENING STEENBEHOEFTE MET GEBRUIKMAKING VAN ONDERZOEKSRESULTATEN.....	102
6.3	VERGELIJKING RESULTATEN EN CONCLUSIES.....	105
7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	106
7.1	CONCLUSIES.....	106
7.2	AANBEVELINGEN.....	109
	LITERATUURLIJST.....	110

Symbolenlijst

Letters

A	oppervlakte [m^2]
d	gelijk aan de minimale afmeting van het steenstuk welke weergegeven wordt door de minimale afstand tussen twee parallelle rechte vlakken [m](waar dat steenstuk juist tussendoor kan).
D	D_{n50} bovenste laag/ D_{n50} onderste laag
D_n	nominale steendiameter; de lengte van de ribbe van een kubus met een zelfde gewicht als het desbetreffende steenstuk [m]
D_{n50}	nominale steendiameter van een steenstuk met een massa die overeenkomt met M_{50} [m].
D_y	de zeefmaat waardoor y% van het materiaal kan passeren [m/m].
D_{85}, D_{50}, D_{15}	de D_y -waarden voor respectievelijk 85, 50 en 15% [m/m].
F_s	vormfactor van steenstukken [-]
h	stijghoogte [m]
I	Invloeds lengte porositeitsverloop [m] (hoogteverschil waarover toe- of afnemende porositeit is gemeten in randen breuksteenlaag.
K	wandcorrectiefactor; bij de proef ter bepaling van de porositeit in de gestorte steenlaag brengt deze factor het verstorende effect van de wanden in rekening [-]
k_t	laagdikte-coëfficiënt [-]
l	gelijk aan de maximale afmeting van het steenstuk welke weergegeven wordt door de maximale afstand tussen twee punten op het steenstuk
M	massa van een steenstuk [kg]
M_y	de massa van een denkbeeldig steenstuk, waarvoor geldt dat y% van het materiaal bestaat uit steenstukken die lichter zijn dan dit steenstuk [m/m]
M_{85}, M_{50}, M_{15}	de M_y -waarden voor respectievelijk 85, 50 en 15% [m/m].
N_a	aantal stenen per m^2 constructie [-]
n_v	poriëngehalte; het volume van de holle ruimte tussen de korrels (of steenstukken) uitgedrukt als percentage van het volume van de korrels en holle ruimte [%]
P	porositeit [%]
r	straal [m]
t	dikte van de steenlaag [m]
V	verdeling van verschil tussen twee datasets
Y_x	fout in 'x' [mm] weergegeven als normale verdeling
y_x	regressielijn die het verloop van 'x' weergeeft [x]

Griekse letters

α	hellingshoek [graden of rad.]
Δ	relatieve dichtheid van de steenstukken [-]
$\mu(x)$	gemiddelde van x [x]
ρ_b	bulk-dichtheid [kg/m^3]; de (droge) massa van het steenmateriaal per volume-eenheid inclusief de holle ruimte tussen de steenstukken



ρ_r	de specifieke dichtheid van de vaste stof [kg/m^3]; de massa van het steenmateriaal per volume-eenheid steenmateriaal exclusief poriën
ρ_{water}	dichtheid water [kg/m^3]
$\sigma(x)$	standaardafwijking van x [x]
indices	
bol	meting waarbij de baak is uitgerust met halve bol
bulk	ongestoord, in het midden van de laag
correctie	correctie door vermindering aantal metingen
gem	gemiddeld
indr	indringing
ld	laagdikte
ld1	laagdikte 1
ld2	laagdikte 2
m1	meting 1
m2	meting 2
ms	100 maal aflezen meetstaf
ms,i	aflezen meetstaf, i ^e meting
nul	bepalen nulniveau
pin	meting waarbij de baak is uitgerust met pin
pn	aflezen peilnaald
vbol	verschil theoretisch grens en bolmeting
vpin	verschil theoretische grens en pinmeting
vulbuis	volumebepaling vulbuis
w	toevoegen water
w,h	toevoegen water uitgedrukt in stijghoogte
wv	watervulmethode



1 Inleiding

1.1 Aanleiding tot het onderzoek

Jaarlijks worden er door aannemers enorme hoeveelheden breuksteen gestort of geplaatst. Het doel van deze breuksteenwerken is verschillend van aard. Er worden steenbestortingen aangelegd ter bescherming van een constructie (bijvoorbeeld een pijpleiding op de zeebodem), maar ook ter voorkoming van erosie van rivierbodems of kustlijnen.

Problemen blijven ontstaan op het moment dat de steenhoeveelheid bepaald moet worden uit de beschikbare ontwerptekeningen. Dit kan gebeuren tijdens een aanbestedingsfase of tijdens de werkvoorbereidingsfase waarin de definitieve hoeveelheden bepaald en besteld moeten worden. Het principe van de hoeveelhedsbepaling lijkt makkelijk: uit de ontwerptekeningen wordt het theoretische volume, per gradering, van de constructie bepaald. Aan de hand van de opgegeven specificaties voor vorm, steilheid van de gradering, dichtheid en natuurlijke gesteldheid kunnen grofweg de porositeit en de laagdikte berekend worden. Met deze gegevens is het mogelijk de totaal benodigde hoeveelheid te bepalen. Op deze hoeveelheid moeten echter nog verschillende correctiefactoren toegepast worden voor o.a. indringing in onderliggende lagen en verliezen door overslag en plaatsing. Deze correctiefactoren zijn allemaal gebaseerd op ervaringscijfers.

In de praktijk blijkt dat bij deze manier van omrekening afwijkingen ontstaan ten opzichte van de verwachte steenhoeveelheid. De huidige tendens is dat het werk betaald wordt per theoretisch volume constructie (bepaald uit ontwerptekeningen) en niet meer per geplaatste hoeveelheid steenmateriaal. Voor de betreffende aannemer is het dus van wezenlijk belang om de hoeveelheden voorafgaand aan het project goed in te schatten om zo het project financieel goed af te sluiten.

De huidige manier om de steenmassa te bepalen bevat vele factoren die op het moment niet eenduidig zijn vastgesteld. Factoren die invloed hebben zijn o.a.:

- bulkeigenschappen steenmateriaal (vorm steenstukken en steilheid gradering)
- intrinsieke eigenschappen (dichtheid, sterkte e.d.)
- uitvoeringseigenschappen (plaatsingsmethode, indringing onderliggende lagen, definitie randen en toegepaste surveymethode).

Een veel gebruikte richtlijn, het CIRIA/CUR Manual, geeft geen duidelijk uitsluitsel. Op verschillende punten is deze richtlijn vaag en onduidelijk. Al met al is de omrekening van het ontwerpvolume van breuksteenconstructies naar de hiervoor benodigde steenmassa er een met vele vraagtekens.

Tijdens mijn stageperiode was ik werkzaam voor Van Oord ACZ op een kustverdedigingswerk in Eastborne. Ook op dit werk ontstonden problemen wat betreft de hoeveelhedsbepaling. Door de problemen die in Eastborne ontstonden ben ik mij gaan interesseren in de problematiek. Deze interesse heeft geresulteerd in dit onderzoek dat is uitgevoerd in samenwerking met Van Oord ACZ. Er zijn inmiddels al verschillende onderzoeken uitgevoerd om de steenhoeveelheden beter te kunnen bepalen, maar het probleem is nog niet opgelost. Is de porositeit in de steenlaag de beslissende factor? Wordt de afwijking door de surveymethode veroorzaakt? Ligt het verschil in de plaatsingsmethode van de stenen? Komt het door het feit dat boven



elkaar geplaatste lagen deels in elkaar vallen? Dergelijke vragen zijn op dit moment nog niet beantwoord en vanuit de praktijk komt een duidelijk signaal om opheldering van dit probleem.

1.2 Probleemstelling en doelstelling

Er bestaat onduidelijkheid omtrent de verschillen die zijn geconstateerd tussen het geplaatste volume steenmateriaal in diverse constructies en de equivalente tonnage. De geschetste problematiek kan beschreven worden door de volgende probleemstelling:

Gebrek aan inzicht in de van belang zijnde factoren leidt ertoe dat geconstateerde afwijkingen in de hoeveelheid van geplaatst steenmateriaal niet kunnen worden verklaard.

Dit afstudeeronderzoek beoogt inzicht te verschaffen in de verschillende factoren die kunnen leiden tot afwijkingen in de hoeveelheid geplaatst steenmateriaal. Gedurende dit onderzoek zal de nadruk komen te liggen op:

- de invloed die de surveymethode heeft op de hoeveelheid geplaatst materiaal,
- het porositeitsverloop in overgangen tussen breuksteenlagen.

Dit porositeitsverloop kan vervolgens vergeleken worden met de resultaten van de gebruikte surveymethoden. Het bovenstaande wordt weergegeven door de volgende doelstelling:

Vergroten van het inzicht in de factoren die leiden tot afwijkingen in de hoeveelheid geplaatst steenmateriaal, waarbij de nadruk ligt op de invloed van de verschillende surveymethoden. Bovendien wordt het porositeitsverloop in overgangen tussen breuksteenlagen onderzocht en vergeleken met de toegepaste surveymethoden.

1.3 Inhoud van het rapport

Na de inleiding worden in hoofdstuk 2 de verschillende factoren geanalyseerd die kunnen leiden tot afwijkingen in de geplaatste hoeveelheid steenmateriaal. Als eerste zal worden gekeken naar de onduidelijkheid in de ontwerpparameters. Er wordt een inventarisatie gemaakt van de ontwerpwaarden die de verschillende richtlijnen voorschrijven. De factoren die bepalend zijn voor de hoeveelheidsbepaling kunnen onderverdeeld worden in twee delen; bulkeigenschappen en randinvloeden. Dit onderzoek zal betrekking hebben op de randinvloeden waarbij surveymethode, onderliggende lagen en porositeitsverloop centraal staan. In het vervolg van het literatuuronderzoek zal dan ook uitvoerig aandacht besteed worden aan de huidige aanpak van deze randinvloeden. Het hoofdstuk wordt afgesloten met een resumé van factoren en de mogelijkheden om deze factoren verder te onderzoeken.

In hoofdstuk 3 wordt een afweging gemaakt tussen de verschillende manieren van onderzoek. Deze mogelijkheden worden met elkaar vergeleken waarna een keuze volgt voor de manier van onderzoek van de factoren.



In hoofdstuk 4 is de opzet van het onderzoek gemaakt. Het hoofdstuk is opgebouwd uit drie fasen. In de eerste fase wordt geïnventariseerd wat de mogelijkheden zijn om de factoren te kunnen onderzoeken, wat resulteert in een schematische proefopstelling. In de tweede fase wordt het proefmateriaal samengesteld waarmee de proeven uitgevoerd gaan worden. In de laatste fase wordt met alle reeds bekende parameters en eisen het meetvat ontworpen.

In hoofdstuk 5 worden de resultaten gepresenteerd. Voordat de resultaten weergegeven worden is een foutenanalyse uitgevoerd waarmee de fouten en dus de nauwkeurigheid van de proeven vastgelegd worden. Vervolgens worden er enkele schematiseringen toegepast om de proefresultaten weer te geven als een eenduidig resultaat. In het laatste deel van het hoofdstuk volgt per invloedsfactor het resultaat en de benodigde onderbouwing van deze resultaten.

In hoofdstuk 6 wordt de vergelijking gemaakt tussen onderzoeksresultaten en de 'CIRIA/CUR-methode' voor de steenhoeveelheidberekening. De vergelijking is opgezet aan de hand van een filterconstructie. Per laagovergang wordt aangegeven hoe de onderzoeksresultaten geïmplementeerd kunnen worden en wat voor verschillen die opleveren in vergelijking met de CIRIA/CUR-methode. Het onderzoek wordt in hoofdstuk 7 afgesloten met conclusies en aanbevelingen.

2 Toepassing huidige ontwerpparameters

2.1 Porositeit

Porositeit in breuksteenconstructies is een parameter die mede verantwoordelijk is voor de bepaling van de hoeveelheid te plaatsen materiaal. De porositeit wordt afhankelijk verondersteld van vele factoren, voornamelijk de bulkeigenschappen (vorm gradering en vorm steenstukken) en uitvoeringseigenschappen (definitie randen, surveymethode, plaatsingsmethode en invloed van onderliggende lagen). Al deze factoren tezamen maken het moeilijk de grootte van de porositeit, in de voorbereidingsfase van een project, te bepalen. In een veelvuldig toegepaste internationale richtlijn; het CIRIA/CUR Manual, kan de porositeit voor steenpartijen met een smalle gradering ($D_{85}/D_{15} < 1.5$) worden weergegeven door de volgende definitie:

$$n_v = 1 - (\rho_b / \rho_r) \cdot 100\%$$

waarin:

ρ_r :	dichtheid van het gesteente (inclusief poriën in gesteente)	[kg/m ³]
ρ_b :	bulkdichtheid (inclusief holle ruimte tussen stenen)	[kg/m ³]
n_v :	porositeit	[%]

De porositeit, zoals deze is weergegeven in de bovenstaande definitie, geeft de gemiddelde porositeit over de laag weer. In deze definitie is de bulkdichtheid de onbekende variabele die de waarde voor de porositeit bepaald. Deze bulkdichtheid wordt bepaald door het percentage holle ruimte in de constructie, de definitie (en dus de ligging) van de laagscheidingen en de dichtheid van het gesteente.

Naast de porositeit is de laagdikte een ontwerpparameter die veelvuldig toegepast wordt. Met behulp van de definitie voor laagdikte is het mogelijk laagdikten te bepalen voor verschillende breuksteenconstructies. De laagdikte maakt het mogelijk de geometrie en dus het volume van de constructie te bepalen. De laagdikte wordt bepaald als functie van de nominale steendiameter, het aantal steenlagen en een laagdiktecoëfficiënt. De laagdiktecoëfficiënt is een correctie voor het feit dat twee op elkaar geplaatste steenlagen niet zonder meer een dikte hebben van twee maal de nominale steendiameter. Het CIRIA/CUR Manual (en het Shore Protection Manual) geven de definitie voor bepaling van de laagdikte als volgt weer:

$$t = n \cdot k_t \cdot D_{n50}$$

waarin:

t :	totale dikte van de steenlaag	[m]
n :	aantal lagen waaruit de steenlaag is opgebouwd	[-]
k_t :	laagdiktecoëfficiënt	[-]
D_{n50} :	nominale steendiameter	[m]

De grootte van de laagdikte is deels afhankelijk van de waarde van de laagdiktecoëfficiënt. Deze coëfficiënt is bepaald uit proeven die uitgevoerd zijn voor



een groot aantal constructies. Bij de bepaling van de laagdiktecoëfficiënt zijn er veel invloeden die ook van toepassing zijn bij de bepaling van de porositeit. Een invloed waar beide definities gevoelig voor zijn is de bepaling ofwel definiëring van de grenzen van de breuksteenlaag. Bij verschil in definitie van deze grens zal er verschil optreden in de hieruit bepaalde porositeit en laagdikte. Uit deze beschrijving blijkt dus dat de bepaling van deze ontwerpparameters gevoelig is voor de manier van weergeven van de grenzen van de breuksteenconstructie. Om verwarring te voorkomen in aanduiding van de porositeit kan onderscheid gemaakt worden in twee verschillende definities voor porositeit:

Werkelijke porositeit:

Werkelijk optredende porositeitswaarde in een breuksteenconstructie die niet gevoelig is voor de invloed van de definitie van de randen van deze constructie. Dit komt overeen met de porositeitswaarde in een oneindige breuksteenconstructie zonder randen.

Schijnbare porositeit:

Gemeten porositeitswaarde, waarbij het volume van de gebouwde breuksteenconstructie is bepaald met een surveymethode. De surveymethode is verantwoordelijk voor de ligging en dus de definitie van de randen van deze constructie. De schijnbare porositeit is een gemiddelde waarde over de bepaalde breuksteenlaag.

De laagdiktecoëfficiënt is altijd afhankelijk van de definiëring van de randen van de constructie en dus hoeft er voor de laagdikte geen onderscheid gemaakt te worden. De randen van een breuksteenconstructie worden na afloop van de bouw bepaald met behulp van een surveymethode. Deze surveymethode is dus bepalend voor de ligging van de randen ten opzichte van een bepaalde referentie. De definitie van de randen komt dus voort uit de voorgeschreven surveymethode (veelal voorgeschreven in het bestek van het project) voor de betreffende constructie.

Porositeit en laagdikte zijn ‘gereedschappen’ die voor verschillende doeleinden gebruikt worden. Ten eerste voor de bepaling van de benodigde hoeveelheid tonnen steen in de ontworpen constructie, wat gevolgen heeft voor het kostenplaatje van het project. De huidige tendens is dat steeds vaker betaald wordt per theoretisch volume (volume bepaald uit de ontwerptekeningen), maar de aannemer moet de steen inkopen waarbij de prijzen zijn uitgedrukt per ton steen. Het is dus van groot belang om voor de betreffende constructie de conversie van m³ naar tonnen zo exact mogelijk uit te voeren. Naast de betaling is het bepalen van het juiste aantal tonnen steen belangrijk voor de planning van het werk en het ontwerp van de constructie. De Van der Meer ontwerpformule voor golfbrekers is voorzien van de ‘permeability factor P’ welke gevoelig is voor de laagdikte en de porositeitswaarde in deze laag.

Met behulp van definities voor de bepaling van porositeit en laagdikte kan het benodigd aantal stenen per oppervlakte berekend worden. Deze berekening kan uitgevoerd worden door toepassing van de volgende definitie:

$$N_a = nAk_t(1 - n_v)D_{n50}^{-2}$$



waarin:

N_a :	aantal stenen per m^2 constructie	[-]
n_v :	porositeit	[%]
n :	aantal lagen waaruit de steenlaag is opgebouwd	[-]
k_t :	laagdiktecoëfficiënt	[-]
D_{n50} :	nominale steendiameter	[m]
A :	beschouwd oppervlakte	[m^2]

De bestaande richtlijnen geven geen eenduidige oplossing voor het probleem. In tabel 2.1 en tabel 2.2 worden de waarden weergegeven volgens o.a. het Shore Protection Manual (SPM), British Standards (BS), Queen Mary and Westfield College (QMW), Hydraulics Research (HR) en het CIRIA/CUR Manual (1991).

Vorm van de steenstukken	SPM (1984) BS 6349 (1991)	QMW/ HR (1988)	CIRIA/CUR (1991)
Gelijkzijdig/ onregelmatig	40%	37% - 39%	39% - 40%
Rond	38%	35%	35% - 36%

Tabel 2.1: overzicht verschillende richtlijnen voor de porositeit

Vorm van de steenstukken	SPM (1984) BS 6349 (1991)	QMW/ HR (1988)	CIRIA/CUR (1991)
Gelijkzijdig/ onregelmatig	1.15	0.75 – 0.85	0.75 – 1.20
Rond	1.02	0.73	0.80 – 1.20

Tabel 2.2: overzicht verschillende richtlijnen m.b.t. de laagdiktecoëfficiënt.

In deze richtlijnen is slechts rekening gehouden met de vorm van de steenstukken en daarbij is gekozen om een onderscheid te maken in maar twee categorieën. Er is bijvoorbeeld geen rekening gehouden met de invloed van de survey- en plaatsingsmethoden. Het CIRIA/CUR Manual heeft dit probleem op een andere manier aangepakt en heeft geprobeerd de invloed van de plaatsingsmethode mee te nemen. De resultaten hiervan worden weergegeven in tabel 2.3.

Vorm van de steenstukken	Methode van plaatsen	Boven/onder waterniveau	Laagdikte-coëfficiënt (k_t)	Porositeit [%]
Onregelmatig	(b) + (d)	Boven	1.20	39
	(b) + (e)	Boven	1.05	39
	(c) + (f)	Boven of onder	0.75	40 max.
Semi-rond	(b) + (d)	Boven	1.25	36
	(b) + (e)	Boven	1.10	36
	(c) + (f)	Boven of onder	0.75	37
Gelijkzijdig	(b) + (d)	Boven	1.15	37
	(b) + (e)	Boven	1.00	37
	(c) + (f)	Boven of onder	0.80	38
Rond	(b) + (d)	Boven	1.20	35 min
	(b) + (e)	Boven	1.05	35
	(c) + (f)	Boven of onder	0.80	36

Tabel 2.3: porositeit volgens CIRIA/CUR Manual (1991)



Toelichting op tabel:

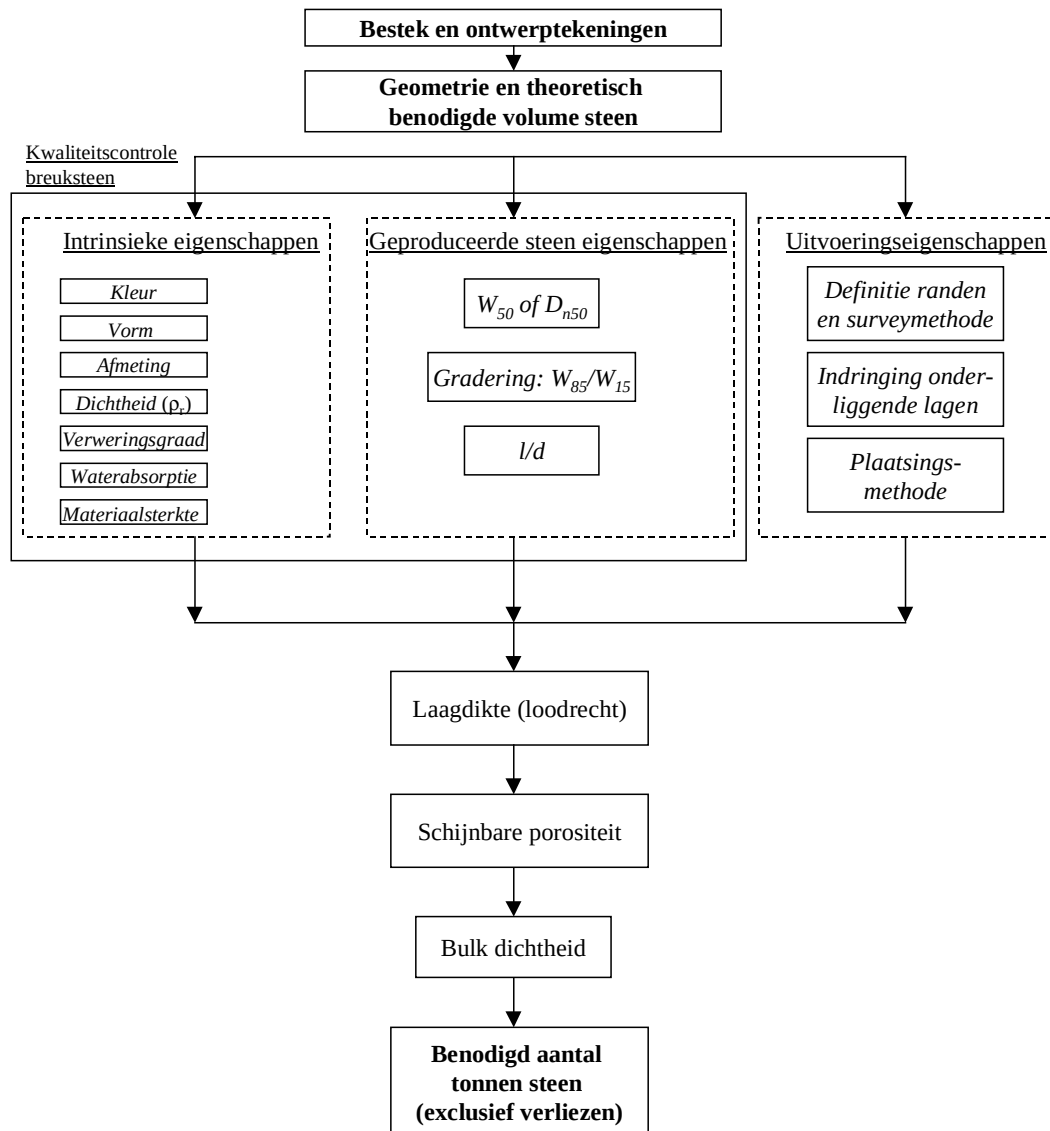
- (b) individuele plaatsing van de stenen
- (c) willekeurige plaatsing van de stenen om een hoge porositeit te krijgen (bijv. voor dissipatie van golfenergie)
- (d) lengteassen van de stenen worden plat op talud geplaatst
- (e) Lengteassen van de stenen worden naar boven geplaatst en de breedtepassages worden plat op het talud geplaatst
- (f) de lengteassen krijgen een willekeurige oriëntatie

De verschillende handleidingen geven waarden aan voor de ontwerpparameters die een grote mate van spreiding bezitten. In de richtlijnen is rekening gehouden met de invloeden die de vorm van de steenstukken en de plaatstingsmethoden hebben, waarbij deze invloeden zijn onderverdeeld in een aantal categorieën. Naast deze twee invloeden is het mogelijk meerdere invloeden aan te geven die samen verantwoordelijk zijn voor de bepaling van de porositeit in een breuksteenconstructie.

Uit de beschrijving van de bovenstaande ontwerpparameters en weergave hiervan door de verschillende richtlijnen blijkt dat er drie groepen factoren invloed hebben op de waarde van de ontwerpparameters. Deze invloedsfactoren zijn:

- Intrinsieke steeneigenschappen (o.a. dichtheid, sterkte, verweringsgraad e.d.)
- Bulkeigenschappen (vorm van steenstukken l/d en steilheid gradering D_{85}/D_{15})
- Uitvoeringseigenschappen (plaatsingsmethode, surveymethode en definitie randen en invloed onderliggende lagen).

De factoren die van invloed zijn voor de bepaling van de ontwerpparameters kunnen schematisch worden weergegeven. Door deze weergave is zichtbaar geworden hoe de onderlinge relaties tussen ontwerpparameters en invloeden liggen. Dit schema is weergegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1: schema ontwerpparameters

Uit het schema zijn een aantal groepen invloedsfactoren te onderscheiden. Deze groepen (intrinsieke eigenschappen, geproduceerde eigenschappen of bulkeigenschappen en uitvoeringseigenschappen) zullen nader toegelicht worden, waarbij bepaald wordt wat de invloed is op de ontwerpparameters.

2.2 Intrinsieke eigenschappen

De intrinsieke eigenschappen hebben betrekking op de kwaliteit van de toegepaste breuksteen. De eigenschappen zijn onder te verdelen in kleur, vorm, afmeting, dichtheid, verweringsgraad, waterabsorptie en materiaalsterkte. Vorm en afmeting zijn eigenschappen die ook terugkomen in de geproduceerde eigenschappen of bulkeigenschappen en zullen daar verder worden toegelicht. De eigenschap kleur is een eigenschap die gebruikt kan worden voor de inpassing van de constructie in het landschap, maar heeft verder geen invloed op hoeveelheden of stabiliteit. In het



vervolg van dit hoofdstuk worden de overgebleven intrinsieke eigenschappen besproken en de invloed van deze eigenschappen op de ontwerpparameters bepaald.

2.2.1 Dichtheid gesteente

Door de aanwezigheid van poriën in het gesteente en holle ruimten tussen stenen zijn twee belangrijke dichtheden te onderscheiden:

ρ_r :	de dichtheid van het gesteente (inclusief poriën)	[kg/m ³]
ρ_b :	de bulkdichtheid (inclusief holle ruimten tussen stenen)	[kg/m ³]

De dichtheid van het gesteente ρ_r is afhankelijk van de dichtheid van de vaste stof en het poriëngehalte in het steenmateriaal. De dichtheid van het gesteente ρ_r is een belangrijke eigenschap, omdat het van grote invloed is op de weerstand tegen verplaatsing door golven of stroming. Een hogere dichtheid betekent meestal ook een grotere duurzaamheid door een grotere sterkte en betere weerstand tegen vorst- en dooiwisselingen en de voor Nederland niet relevante zoutkristallisatie. Variatie in dichtheid is voor bijvoorbeeld twee opeenvolgende partijen van een zelfde groeve een indicatie dat andere eigenschappen ook variëren.

Mede door de relatie met de duurzaamheid wordt in NEN 5180 een minimumeis gesteld aan de gemiddelde dichtheid van 2500 kg/m³. Om een grote spreiding in dichtheden te voorkomen kan, naast de eis voor de gemiddelde dichtheid, ook de volgende eis worden opgenomen: 'maximaal 10% van het aantal steenstukken mag een dichtheid hebben die maximaal 100 kg/m³ lager ligt dan de vereiste gemiddelde dichtheid'.

In NEN 5186 wordt beschreven hoe de dichtheid wordt bepaald. Om het volume van een steenstuk te bepalen, wordt het steenstuk zowel onder als boven water gewogen. Uit dit volume en de droge massa wordt de dichtheid berekend. Door een goede kwaliteitszorg kan de invloed van de dichtheid op de ontwerpparameters in de hand gehouden worden.

2.2.2 Natuurlijke gesteldheid

Onder de natuurlijke gesteldheid verstaan we de graad van verwering, de integriteit en de sterkte van het steenmateriaal. De natuurlijke gesteldheid van het steenmateriaal zal de geplaatste hoeveelheid indirect beïnvloeden. Bij verweerd materiaal, of materiaal met een slechte integriteit, zal gedurende transport en verwerking sneller breuk optreden. Als gevolg van deze breuk ontstaat er een groter gehalte aan fijn materiaal. Dit fijne materiaal zal enkel poriën in de steenlaag opvullen en zelf geen volume maken. Het gebruik van dergelijk steenmateriaal zal dus leiden tot meer fijn materiaal, wat zal resulteren in een afnemende porositeit. Hoe groot dit materiaalverlies is als gevolg van verwering, slechte integriteit en lage sterkte, is niet precies bekend. Door een goede kwaliteitszorg kan deze invloed worden verwaarloosd. In NEN 5180 t/m NEN 5187 wordt beschreven aan welke eisen de breuksteen moet voldoen.

Een laatste factor die aan de natuurlijke gesteldheid van de breuksteen kan worden toegevoegd is de waterabsorptie. Deze eigenschap is van invloed op de

stabiliteit van breuksteen onder water en dient bij die toepassing goed gecontroleerd te worden.

2.3 Geproduceerde steeneigenschappen

De selectie van breuksteen voor toepassing in een breuksteenconstructie wordt uitgevoerd aan de hand van verschillende steeneigenschappen. De invloedsfactoren steilheid van de gradering (weergegeven door D_{85}/D_{15}) en vorm van de steenstukken (l/d) die tot de geproduceerde steeneigenschappen horen zijn onderzocht in het afstudeerwerk van Bregman (1998). In dit afstudeerwerk is onderzoek gedaan naar de bulkeigenschappen van breuksteen. Voor de factoren steilheid van de gradering en vorm van de steenstukken is bepaald wat de invloed hiervan is op de porositeit in breuksteenlagen. De porositeit die in dit onderzoek gemeten wordt is de werkelijke porositeit in de breuksteenlaag. De randeffecten (vergroting van de porositeit in de buurt van de randen van het meetvat) worden gemeten en gecorrigeerd op het volume van de poriën; de eventuele invloed van een surveymethode (definitie van de randen) wordt uitgeschakeld door de manier van uitvoering van de proeven. Het resultaat is de werkelijke porositeit (dus zonder randeffecten) gemiddeld over de breuksteenlaag.

2.3.1 Steilheid van de gradering

De steilheid van de gradering wordt in de literatuur veelvuldig genoemd als invloedsfactor op de porositeit. Onderbouwing hiervan wordt eigenlijk alleen teruggevonden voor fijn materiaal als zand en grind. In het CIRIA/CUR Manual wordt wel aangegeven dat de steilheid van de gradering (W_{85}/W_{15}) invloed heeft op de porositeit maar het geeft niet aan in welke mate. Zoals te verwachten valt, neemt bij het wijder worden van de gradering de porositeit af. Dit wordt veroorzaakt doordat het fijnere materiaal de poriën van het grovere materiaal opvult, waardoor een dichtere pakking wordt verkregen. Opvallend is dat er geen richtlijnen zijn die de invloed van de steilheid van de gradering op de porositeit (en dus op de hoeveelheid steenmateriaal) in rekening brengt. Dat de steilheid van de gradering wel degelijk van belang is blijkt uit verschillende citaten:

- *“De breedte van de sortering heeft invloed op de maat voor de holle ruimte tussen de steenstukken (poriëngehalte n).”*
Laan, G.J., 1996.
- *“One should not ignore the influence that variations from one site to another in grading can have on the appropriate values of these porosity coefficients.”*
Gauss, G.A., and Latham, J.P., 1995.
- *“Opvallend is dat variatie in steilheid van de gradering (W_{85}/W_{15}) bij iedere vormklasse ongeveer dezelfde invloed heeft. Zo is de afname van de porositeit bij ieder van de vormklassen ongeveer 3%. Ook na verdichten blijft de afname ongeveer 3%.”*
Bregman, M., 1998.

Deze drie onderzoekers geven aan dat de steilheid van de gradering invloed heeft op de porositeit, zoals logischerwijs verwacht mag worden. Echter, alleen Bregman heeft daadwerkelijk onderzocht wat de invloed is, wat resulteert in een variatie van

de porositeitswaarde van ongeveer 3%. De manier van onderzoek van Bregman heeft invloed van uitvoeringseigenschappen uitgesloten waardoor de resultaten betrekking hebben op de porositeit in een breuksteenconstructie zonder grenzen.

2.3.2 Vorm van de steenstukken.

Voor de vorm van het steenstuk geldt eigenlijk hetzelfde als voor de steilheid van de gradering. De vorm wordt als een belangrijke parameter gezien die de grootte van de porositeit beïnvloedt. In het CIRIA/CUR Manual wordt wel een onderscheid gemaakt om de invloed van de vorm op de porositeit in rekening te brengen. Hiervoor zijn de verschillende vormen van de stenen onderverdeeld in verschillende klassen. Deze klassen zijn onderverdeeld in een geometrische en een visuele vormklasse. Het CIRIA/CUR Manual heeft alleen gebruik gemaakt van een visuele vormklasse (onregelmatig, semi-rond, gelijkzijdig of rond). Deze indeling heeft tot resultaat dat er wel een bandbreedte van de porositeit aangegeven kan worden, maar het blijft moeilijk om een getalsmatige onderbouwing te vinden. Het belang van de vorm van de steen blijkt tevens uit de volgende citaten:

- *“Block shape is an important factor that influences the bulk density/porosity of armour.”*
Gauss, G.A., and Latham, J.P., 1995.
- *“De vorm van de steenstukken heeft invloed op de maat voor de holle ruimte tussen de steenstukken (poriëngehalte n).”*
Laan, G.J., 1996.
- *“Wat als eerste duidelijk opvalt, in de resultaten van de proeven, is dat de vorm van de steenstukken een significante invloed heeft op de gemeten porositeit.”*
Bregman, M., 1998.

Ook voor de invloed van de vorm van de steenstukken geldt dat alleen Bregman een onderzoek gedaan heeft naar de significantie van deze invloed. Het werk van Bregman geeft meer inzicht in de invloed van de steilheid van de gradering en de vorm van de steenstukken op de porositeitswaarde in een oneindige breuksteenconstructie. Vanwege het belang van dit onderzoek wordt het in de volgende paragraaf beschreven.

2.3.3 Onderzoek Bregman

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat de gehele problematiek met betrekking tot de hoeveelheid steenmateriaal in twee stukken kan worden opgedeeld: onderzoek naar de bulkeigenschappen (werkelijke porositeit) en onderzoek naar de randinvloeden van het steenmateriaal (resulteert in de schijnbare porositeit). Vanwege de omvang van de gehele problematiek is gedurende dit onderzoek alleen de invloed van de bulkeigenschappen onderzocht.

Vergeleken met de aanbevelingen van het Shore Protection Manual (1984), het CIRIA/CUR Manual (1991) en andere blijkt dat geplaatst steenmateriaal een lagere porositeit kan hebben dan wordt verondersteld in de richtlijnen. Uit het onderzoek naar de bulkeigenschappen van het steenmateriaal is gebleken dat de vorm van de steenstukken (lengte/dikte verhouding) en de steilheid van de gradering (verhouding D_{85}/D_{15}) een significante invloed hebben op de gemeten porositeit. Zo is

er voor alle toegepaste verhoudingen D_{85}/D_{15} een verschil in porositeit geconstateerd van 5% tussen onregelmatige ($1 < l/d < 2$) en platte steenstukken ($l/d > 3$). Uit de onderzoeksresultaten komt ook naar voren dat de geometrische vormklasse (lengte/dikte verhouding) een grotere invloed heeft dan de visuele vormklasse.

Deze conclusie is goed te onderbouwen vanwege het feit dat de onderverdeling in de visuele vormklasse geschiedt door grenzen tussen bijvoorbeeld rond en onregelmatige stenen. De geometrische vormklasse wordt onderverdeeld door een meetbare grootte en maakt daarom een veel scherpere grens tussen de vormklassen. Het feit dat de visuele vormklasse een minder grote invloed heeft kan dus voortkomen uit de manier van samenstellen van de klassen, waarbij in de visuele vormklasse enige overlap mogelijk is. De conclusie die uit het onderzoek naar de invloed van de vorm kan worden getrokken is dat naarmate de vorm van de steenstukken regelmatiger wordt (equidimensionaal) er een lagere porositeit te verwachten valt. Dit betekent dat bij toenemen van de lengte/dikte verhouding van de steenstukken de porositeit eveneens toeneemt.

De invloed van de steilheid van de gradering (D_{85}/D_{15} of W_{85}/W_{15}) op de porositeit blijkt voor de in de praktijk toegepaste steilheden gering te zijn. Toch wordt er gaande van $W_{85}/W_{15}=2.0$ naar $W_{85}/W_{15}=7.5$ een gemiddelde afname geconstateerd van 3%. Opvallend is dat de invloed van de steilheid van de gradering op de porositeit voor iedere vormklasse ongeveer gelijk is. Op grond hiervan wordt dan ook de conclusie getrokken dat de vorm van de steenstukken en de steilheid van de gradering nauwelijks gecorreleerd zijn.

De invloed van verdichten op de porositeit blijkt af te nemen bij een toenemende verhouding W_{85}/W_{15} . Dit is voor iedere vormklasse waargenomen. Verder blijkt dat binnen de visuele vormklassen de platte steenstukken gevoeliger zijn voor verdichten dan de onregelmatige steenstukken. Tussen de geometrische vormklassen en de afname in porositeit door verdichten is geen correlatie geconstateerd.

2.4 Uitvoeringseigenschappen

De uitvoeringseigenschappen kunnen worden onderverdeeld in drie groepen: plaatsingsmethode, invloed onderliggende lagen en definitie randen en surveymethode. Alleen de eerste groep heeft een directe invloed op de porositeitswaarde in een breuksteenconstructie en kan de werkelijke porositeit beïnvloeden. De twee resterende groepen hebben geen invloed op de werkelijke porositeit, maar op de schijnbare porositeit die gevoelig is voor o.a. de grenzen van de breuksteenconstructie en onderliggende lagen. In de onderstaande paragrafen worden die drie groepen nader onderzocht om de invloed te kunnen weergeven.

2.4.1 Plaatsingsmethode

De plaatsingsmethode is een invloedsfactor die de mate van pakking van breuksteenconstructies beïnvloed. Door de verschillende manieren van plaatsen/storten wordt dus ook een verschillende porositeit bereikt. Het probleem dat zich voordoet bij de verschillende plaatsingsmethoden is dat deze methoden moeilijk eenduidig vast te leggen zijn. Dit komt vooral door het feit dat de plaatsingsmethode niet te beschrijven is door een meetbare grootte of verhouding zoals wel mogelijk

is bij de steilheid van de gradering (W_{85}/W_{15}). Door de afwezigheid van een meetbare grootheid zijn ervaring en inzicht van het betrokken personeel een belangrijke factor bij het plaatsen van de steenstukken en de te bereiken bulkdichtheid.

Het CIRIA/CUR Manual is de invloed van de plaatsingsmethode niet vergeten. De invloed die de plaatsingsmethode op de porositeit heeft, is onderverdeeld in vijf verschillende plaatsingsmethoden, namelijk:

- individuele plaatsing van de stenen,
- willekeurige plaatsing van de stenen om een hoge porositeit te krijgen (bijv. voor dissipatie van golfenergie),
- lengteassen van de stenen worden plat op talud geplaatst,
- lengteassen van de stenen worden naar boven geplaatst en de breedte-assen worden plat op het talud geplaatst,
- de lengteassen krijgen een willekeurige oriëntatie

Door proeven zijn aan deze verschillende methoden getalswaarden gekoppeld voor de porositeit en de laagdikte. In de literatuur komen we toch nog verschillende citaten tegen over deze invloedsfactor:

- *“The void porosity of a layered system of armouring will depend on the method of placement.”*
Gauss, G.A., and Latham, J.P., 1995.
- *“De manier van aanbrengen heeft invloed op de maat voor de holle ruimte tussen de steenstukken (poriëngehalte n).”*
Laan, G.J., 1996.

Bovenstaande auteurs geven aan dat de plaatsingsmethode invloed heeft op de werkelijke porositeit in een breuksteenconstructie. De significantie van de invloed wordt echter niet bepaald.

2.4.1.1 Plaatsing van breuksteen onder het waterniveau

Het plaatsen van lagen breuksteen, te storten vanaf de waterlijn, stelt hoge eisen aan het in te zetten materieel. De dosering van het stortmateriaal en het beheerst manoeuvreren van het stortschip zijn hierbij essentieel voor het verkrijgen van gelijkmatigheid in de aan te brengen laagdikte. Door het op deze manier aanbrengen van de breuksteen zullen er altijd verliezen ontstaan doordat er stenen buiten de constructie vallen. Deze stenen worden wel geplaatst, maar maken geen deel uit van de constructie en mogen dus ook geen invloed hebben op de bulkdichtheid. Verliezen kunnen ontstaan door:

- Verlies en breuk als gevolg van behandeling en opslag. Elke handeling vergroot de kans op breuk en een percentage van de steen kan, als fijn materiaal, achterblijven in de opslag.
- Verliezen als gevolg van golfbelastingen en het misplaatsen van de breuksteen buiten de constructie.
- Verschillen tussen werkelijk bezorgde hoeveelheden en hoeveelheden volgens de groevebon. Dit heeft opnieuw directe gevolgen voor de werkelijke bulkdichtheid van de breuksteenconstructie.

2.4.1.2 Plaatsing van breuksteen boven het waterniveau

Het voordeel van plaatsing boven het waterniveau is dat er een betere controle op het gemaakte werk is. De nauwkeurigheid is groter in vergelijking met plaatsing onder het waterniveau wat zal resulteren in minder verloren steenmateriaal (wat ook invloed heeft op de porositeit). De hoeveelheid steenmateriaal die een constructie vergt is dus ook nauwkeuriger te bepalen. Over het algemeen zal breuksteen boven het waterniveau geplaatst worden met behulp van hydraulisch materieel.

2.4.2 Invloed van onderliggende lagen

De onderliggende lagen dienen als fundering voor de te plaatsen breuksteenlaag. Het is dus van belang te weten hoe deze laag erbij ligt en wat de gevolgen zijn voor deze laag als er breuksteen bovenop wordt geplaatst. De onderliggende laag kan worden gevormd door een zandbed, maar ook door een eerder aangebrachte laag van fijner steenmateriaal (opbouw filterconstructie). In deze paragraaf worden twee factoren behandeld die kunnen leiden tot afwijkingen in de geplaatste hoeveelheid steenmateriaal en worden veroorzaakt door de onderliggende laag. Achtereenvolgens worden behandeld:

- afwijkende hoogte onderliggende laag,
- penetratie in de onderliggende laag,
- zetting of consolidatie van de ondergrond.

2.4.2.1 Afwijkende hoogte van het onderliggend materiaal

Tijdens de uitvoering is het van belang om te controleren of de hoogte van de geplaatste laag overeenkomt met die volgens het ontwerp. Afwijkingen tussen de theoretisch en de gerealiseerde laag zijn niet erg zolang ze binnen de toleranties vallen, maar kunnen op papier al snel resulteren in afwijkende bulkdichtheden. Dit kan worden veroorzaakt doordat tijdens de verwerking van de gegevens wordt gerekend met laagdikten volgens het ontwerp en niet met de gerealiseerde laagdikten.

De surveymethode en definitie van de randen speelt ook hier een belangrijke rol. De afwijking in hoogte van de onderliggende laag zal kleiner zijn dan de afwijking in de bovenliggende laag. Dit wordt veroorzaakt doordat naar boven toe de afmetingen van de steenstukken toenemen, waarmee ook de afwijking in de resultaten van de surveymethode toeneemt.

2.4.2.2 Penetratie in de onderliggende laag

Op de ontwerptekeningen wordt de overgang tussen twee lagen weergegeven door een rechte lijn, maar in werkelijkheid zal deze overgang niet zo rechtlijnig zijn. Dit wordt veroorzaakt doordat de grotere steenstukken van de bovenliggende laag penetreren tussen de kleinere steenstukken van de onderliggende laag. De grootte van dit penetratie-effect is afhankelijk van de pakkingsdichtheid van de

onderliggende laag, de verhouding tussen de grootte van de nominale steendiameter van beide lagen en de steilheid van de gradering.

2.4.2.3 Zetting of consolidatie van de ondergrond

De breuksteenconstructie zorgt voor een permanente toename van de bovenbelasting op de ondergrond. Door deze belasting zal het aanwezige grondwater uittreden, waardoor de grond inklinkt. Dit proces wordt aangeduid met de term 'consolidatie'. Een kenmerk hiervan is dat de zakkingsnelheid in het begin het grootst is en in de tijd zal afnemen. De consolidatie is, als de bovenbelasting en de grondgesteldheid bekend zijn, goed te berekenen. Met deze invloedsfactor kan dus van tevoren al rekening gehouden worden.

Enkele van deze factoren kunnen beschreven worden aan de hand van het onderzoek naar losse steenbestortingen door H.G. Knieß (Bemessung von Schüttstein-Deckwerken, Mitt.Bl.d.BAW(1977) Nr.2). Dit onderzoek wordt beschreven in de volgende paragraaf.

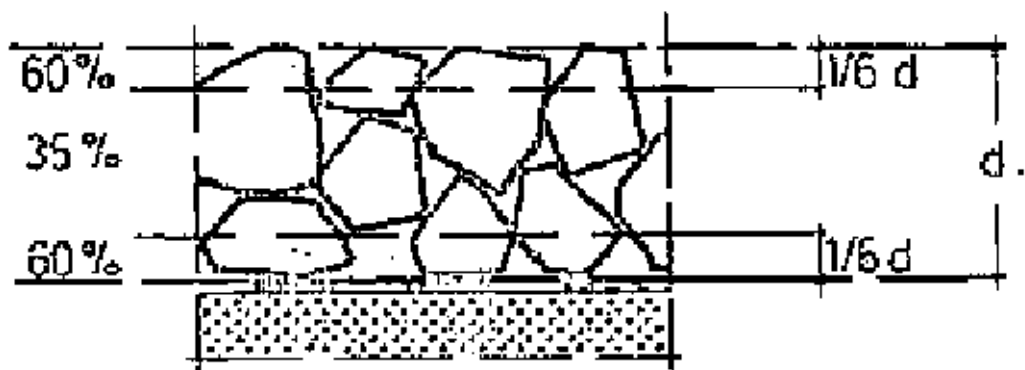
2.4.3 Methode Knieß

De methode Knieß wordt in de praktijk toegepast bij de berekening van de totale steenhoeveelheid benodigd voor een bepaald volume. De methode Knieß wordt hieronder beschreven.

De holle ruimten in een steenstapeling worden beïnvloed door de volgende parameters:

- maatgevende steengrootte D_x ,
- wijdte van de gradering,
- vorm van de steenstukken.

De holle ruimte in het midden van de constructie hebben een waarde van ongeveer 35-40%. Deze waarde wordt bepaald door de geproduceerde steeneigenschappen. Knieß gebruikt in zijn weergave een waarde van 35% voor de werkelijke porositeit (niet beïnvloed door randen). De waarde van de werkelijke porositeit wordt momenteel aardig weergegeven door Tabel 20 in het CIRIA/CUR Manual en die waarden kunnen in de methode van Knieß ook toegepast worden. In figuur 2.2, aan de hand waarvan de methode Knieß uitgelegd zal worden, wordt een percentage van 35% voor de holle ruimten aangehouden.

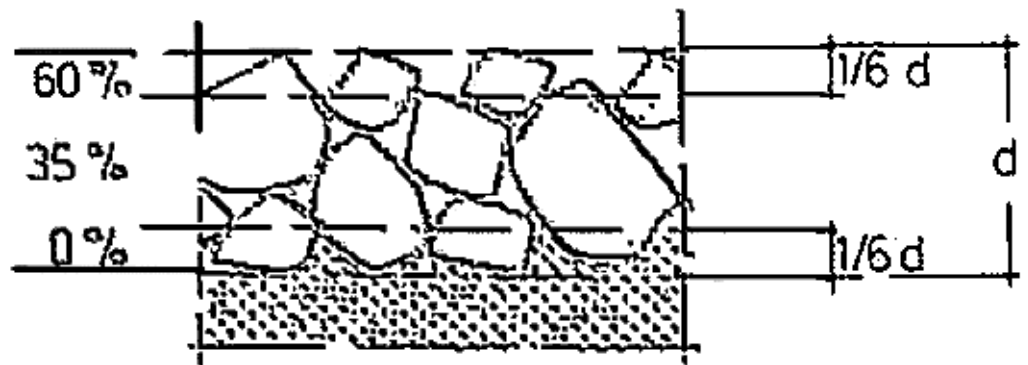


Figuur 2.2: breuksteenlaag geplaatst op harde ondergrond

Het is logisch dat er langs de randen van een constructie een hogere porositeit optreedt dan in het midden waar de waarden volgens het CIRIA/CUR Manual gelden. Knieß zegt dat er voor het bovenste 1/6 deel van de laagdikte een porositeit optreedt van 60% ten opzichte van 35% in het midden van de constructie. Dit betekent dat er lokaal, in kleine stapjes Δd van de laagdikte, een porositeit optreedt van 60% (randen) of 35% (buiten de randen). In het bovenstaande plaatje is de breuksteenlaag geplaatst op een harde filterlaag waar geen indringing plaatsvindt. Voor deze rand geldt dan ook een lokale toename van de holle ruimte tot 60% wat geldt voor het onderste 1/6 deel van de laagdikte. Op deze manier kan de porositeit over de laagdikte (dit is dus de schijnbare porositeit), die bepaald is door de ontwerpdikte 'd', bepaald worden volgens:

$$\frac{2}{6} \cdot 60\% + \frac{4}{6} \cdot 35\% = 43.3\%$$

Een ander situatie doet zich voor als de filterlaag niet hard is, zodat er indringing van de breuksteenlaag in de filterlaag kan optreden. Deze situatie is in figuur 2.3 geschematiseerd. In deze situatie treden er geen veranderingen op voor de bovenkant van de breuksteenlaag, het verschil wordt gevonden in de rand tussen de breuksteenlaag en de zachte filterlaag. Doordat de filterlaag zacht is kan de breuksteenlaag hier iets in wegzakken. Knieß schematiseert deze



Figuur 2.3: breuksteenlaag geplaatst op zachte ondergrond

situatie door voor het onderste 1/6 deel van de breuksteenlaag een porositeit van 0% toe te passen. Voer je nu dezelfde berekening uit als in de situatie waar de breuksteenlaag op een harde filterlaag rust dan krijg je een gemiddelde porositeit van:

$$\frac{1}{6} \cdot 60\% + \frac{1}{6} \cdot 0\% + \frac{4}{6} \cdot 35\% = 33.3\%$$

2.4.3.1 Conclusie methode Knieß

De schijnbare porositeit in deze twee situaties verschilt dus van 33.3% tot 43.3%. Als je beide situaties echter goed bekijkt zijn de holle ruimten (werkelijke porositeit) in beide situaties gelijk, het verschil ontstaat doordat er in de tweede situatie geen holle

ruimte wordt toegekend voor het onderste 1/6 deel van de laagdikte. In dit onderzoek is het echter niet van belang te weten dat de holle ruimte in dit deel is opgevuld door de onderliggende basislaag. De interesse gaat uit naar de bepaling van de hoeveelheid steen die nodig is om een constructie te kunnen realiseren. De bovenkant van de breuksteenlaag in de tweede situatie zal echter lager uitkomen dan in de eerste situatie door de indringing van deze laag in de onderliggende basislaag. Voor de berekening van de benodigde hoeveelheid steen is het dus niet juist om voor deze laag een porositeit toe te passen van 33.3% ten opzichte van 43.3% voor een zelfde breuksteenlaag op een harde ondergrond. Uit het plaatje blijkt duidelijk dat de indringing gelijk is aan 1/6d, dus dat betekent ook dat de bovenkant 1/6d lager uitkomt dan in een situatie op een harde ondergrond. Het is dus van belang te weten wat de indringing is in de onderliggende lagen om vervolgens deze indringing extra aan te brengen om de bovenkant van de laag op ontwerpniveau te brengen.

In de beschrijving van deze methode door Knieß is helaas geen verdere beschrijving gegeven van de waarden van de verschillende parameters. Er wordt nergens aangetoond dat er lokaal in de randen van de constructie een porositeitswaarde van 60% ontstaat. Toepassing van deze methode in de praktijk blijkt toch goede resultaten op te leveren. Er is alleen niet bekend wat er nu precies in deze overgangen gebeurt!

Er zijn mogelijkheden om de effecten van deze indringing in onderliggende lagen te meten. Knieß heeft ervoor gekozen om de porositeitsveranderingen bij de randen van een breuksteenlaag te bepalen. Een andere mogelijkheid is om de indringing te meten, waardoor je kan bepalen waar de bovenkant van de breuksteenlaag zich zal bevinden. Vervolgens kunnen aanpassingen gemaakt worden om de breuksteenlaag toch op het ontwerpniveau te laten eindigen. Op deze manier wordt er geen onderzoek gedaan naar de porositeit in de overgangszones, maar er is wel bekend waar de bovenkant van de laatst geplaatste breuksteenlaag zich zal bevinden.

2.4.4 Definitie randen

Een belangrijke vraag die tijdens de ontwerpfase en werkvoorbereiding speelt is: 'hoe is de oppervlakte van de steenlaag gedefinieerd'? In de ontwerptekeningen zijn deze weergegeven door scherpe lijnen die theoretisch de grens tussen de verschillende lagen moeten aangeven. In werkelijkheid kunnen deze lijnen, vanwege het feit dat er met onregelmatige stenen wordt gewerkt, nooit gerealiseerd worden. Op het moment is er geen eenduidige definitie waarmee de grenzen van een laag bepaald wordt waardoor de grenzen van werk tot werk verschillen. Doorgaans worden ze vooraf gespecificeerd in het bestek door maximale toleranties rondom de ontwerpgrenzen.

De ligging van de grenzen van een breuksteenconstructie zijn afhankelijk van de methode waarmee deze grenzen worden vastgelegd. Dit betekent dat de surveymethoden, die gebruikt worden om het niveau van de breuksteenconstructie te bepalen, verantwoordelijk zijn voor de ligging van de grenzen. Hoe deze ligging wordt weergegeven (referentie) is een volgend probleem. Het is mogelijk dit referentieniveau te koppelen aan bijvoorbeeld het NAP, maar hiermee is nog niet weergegeven hoe de ligging van de grens is ten opzichte van bijvoorbeeld de toppen van de stenen in de constructie.

In een gesprek met G.J. Laan (Dienst Weg en Waterbouw, Rijkswaterstaat) kwam ditzelfde onderwerp ook ter discussie. De onverklaarbare verschillen in de schijnbare porositeit die naar boven komen in de nacalculaties van projecten, kunnen wel eens veroorzaakt worden door deze invloedsfactor. Variatie in het niveau van de grenzen van de breuksteenconstructie hebben direct invloed op de schijnbare porositeit, waarmee de nacalculaties worden uitgevoerd. Volgens Laan is het zinvol om de randen van de constructie zo eenduidig mogelijk te definiëren en dat als basis te gebruiken voor de porositeitsbepaling in breuksteenconstructies. Voor een aantal veelvuldig toegepaste surveymethoden kan dan de ligging van de grenzen bepaald worden ten opzichte van de ligging van de stenen in de breuksteenconstructie. Hiermee kan variatie in de schijnbare porositeit, als gevolg van verschillen in niveau van grenzen, worden verminderd.

Het is noodzakelijk goed in beeld te brengen welke surveymethoden worden toegepast en op wat voor soort constructies deze methoden worden toegepast. In de volgende paragrafen wordt een inventarisatie van surveymethoden en hun toepassingsgebied gemaakt.

2.4.5 Surveymethoden

De manier waarop het profiel van een breuksteenconstructie wordt bepaald is een onderwerp dat al veel stof heeft doen opwaaien. Er zijn vele geschillen geweest tussen opdrachtgever en aannemer, waaraan de manier van volumebepaling ten grondslag lag. De vraag die hier speelt is hoe groot de overeenkomst tussen het ‘werkelijke’ profiel, het gemeten profiel en het ontwerpprofiel van de breuksteenconstructie is.

2.4.5.1 Survey boven water

Survey boven het waterniveau gebeurt over het algemeen met behulp van conventionele surveytechnieken. Hiervoor is surveyapparatuur benodigd in de vorm van een waterpasinstrument, baak of theodoliet (of hun elektronische equivalenten). Men is aan het experimenteren met fotografische methoden, maar voorlopig worden deze methoden slechts gebruikt voor het vaststellen van de toestand van de steenconstructie. Deze methoden zijn nog niet bruikbaar voor profielbepaling. Het uiteindelijke profiel dat resulteert uit de survey, is afhankelijk van de volgende aspecten:

- De vorm en grootte van de voet van de baak,
- De lengte van het interval tussen opeenvolgende metingen.

In figuur 2.4 worden verschillende toegepaste vormen weergegeven van het voetstuk van een baak.

**Cirkelvormige disk als voetstuk**

(gebruikt door Zwamborn, J.A. (1980) [‘Measurement techniques and effect of relative block density’])

**Half bolvormig voetstuk**

(in het CIRIA/CUR Manual wordt dit voetstuk aangeraden, waarbij een diameter van $0.5 \cdot D_{n50}$ wordt aangehouden)

**Pinvormig voetstuk**

(gebruikt door Latham, J.P. (1988) [‘Developments in the analysis of armour layer profile data’]); dit voetstuk wordt ook wel de conventionele staf genoemd)

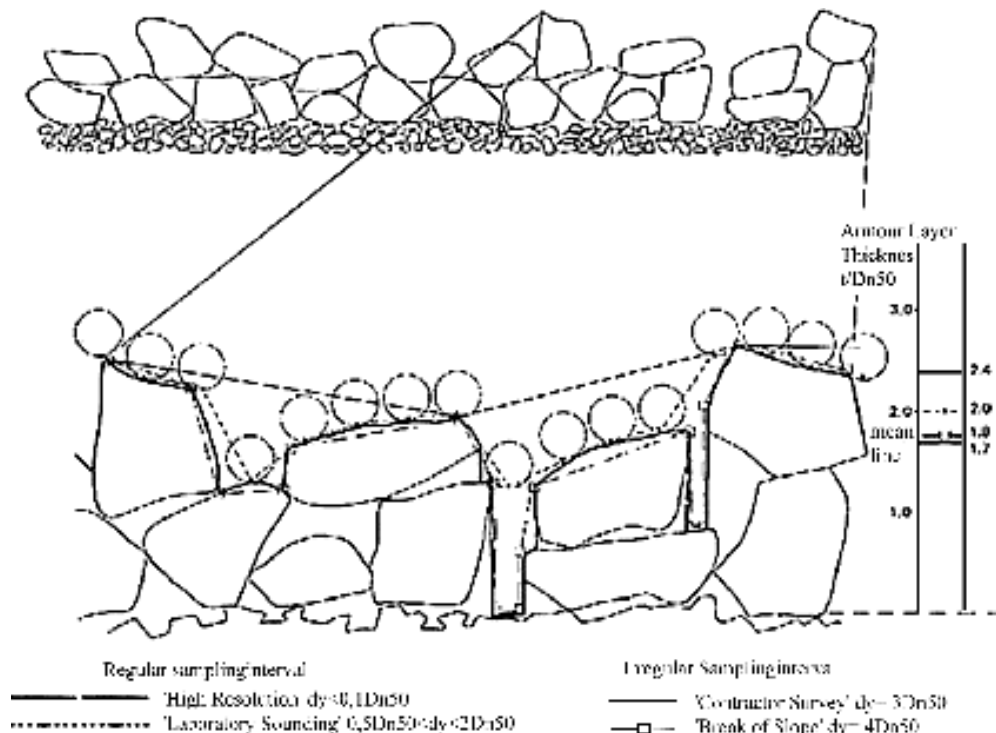
Figuur 2.4: verschillende toepassingen voor uitrusting voetstuk baak

De grootte van het voetstuk wordt vaak uitgedrukt in D_{n50} en is van invloed op het profiel dat wordt verkregen door de survey. Hoe groter de afmetingen van het voetstuk, des te meer informatie over het verloop van het profiel verloren gaat. Zo zullen gaten in de constructie niet meer zichtbaar kunnen worden gemaakt als de diameter van het gat kleiner is dan de diameter van het voetstuk van de baak.

Latham e.a., 1988, concludeerden dat er gestreefd moet worden naar een eenduidige vorm en afmeting van het voetstuk om tot een duidelijke beschrijving van het oppervlak te komen. Latham vermeldde bovendien dat het onderzoek naar het effect van de grootte en de vorm van het voetstuk niet overal op prijs werd gesteld. Zo is het namelijk niet precies bekend op welke wijze Hudson (1958) de survey in zijn experimenten heeft uitgevoerd. Op diens experimenten zijn de formules van het Shore Protection Manual, over laagdikte en pakkingsdichtheid, gebaseerd.

Er zijn verschillende methoden beschikbaar die in de praktijk gebruikt worden. Er is echter niet bekend wat de invloed van een bepaalde surveymethode is op de schijnbare porositeit. Het probleem hierbij is dat er niet duidelijk is wat er precies gemeten wordt; kortom, wat is de begrenzing van een breuksteenconstructie en hoe kan die met de huidige surveymethoden bepaald worden.

In figuur 2.5 wordt de invloed van de intervalafstand en de grootte van het voetstuk nog eens visueel verduidelijkt. Aan de rechterkant van de figuur is de gemiddelde laagdikte weergegeven die verkregen is uit de verschillende surveymethoden. Merk op dat de gemeten laagdikte per surveymethode aanzienlijk kan verschillen. Aangezien de schijnbare porositeit van de breuksteenlaag direct gerelateerd is aan de laagdikte, kan de figuur een indicatie geven van de invloed die de surveymethode heeft op de porositeit.



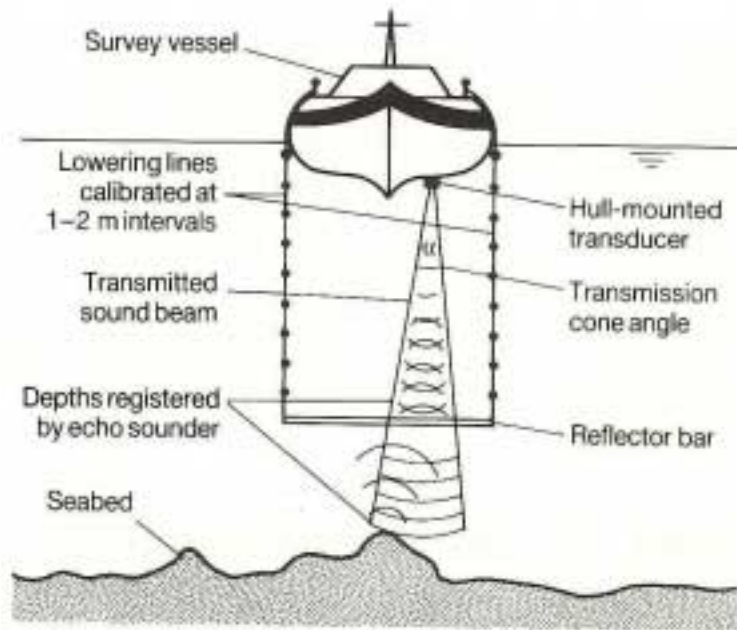
Figuur 2.5: invloed intervalafstand en grootte voetstuk op surveyresultaat (Latham, JP., Poole, AB., and Mannion, M., 1988. Developments in the analysis of armour layer profile data. Tomas Telford, London.)

2.4.5.2 Survey onder water

Bathymetrische kaarten worden samengesteld uit drie componenten: de locatie in het horizontale vlak, de dieptebepaling door geluidsmeting en de waterhoogte op het moment van meting. In deze inventarisatie wordt alleen ingegaan op de dieptebepaling door geluidsmeting. Controle van de dimensies van een constructie onder het waterniveau gebeurt vanaf een vaartuig. De surveymethoden die op het moment het meest gebruikt worden zijn electro-akoestisch van karakter, waarbij vanaf het vaartuig een signaal wordt uitgezonden in de richting van de constructie. Bij echosounders ligt de frequentie van het signaal tussen de 30 en 210 kHz, terwijl sonars frequenties tot 1MHz gebruiken.

2.4.5.3 Survey met behulp van een echosounder

Het principe van echosounding berust op het feit dat er vanaf het vaartuig een signaal wordt uitgezonden in de richting van de steenconstructie. Het uitgezonden signaal wordt gereflecteerd door een oppervlak met hogere dichtheid dan water, in dit geval de zeebodem en/of steenconstructie. Aan boord van het vaartuig wordt de tijdsduur gemeten die het signaal nodig heeft voor de heen- en terugweg. Deze tijd geeft een indicatie voor de diepte. Het principe van echosounding is weergegeven in figuur 2.6.



Figuur 2.6: principe van survey met behulp van een echosounder

Er kan onderscheid gemaakt worden tussen de zogenaamde singlebeam- en multibeam-systemen. Bij singlebeam-systemen wordt gebruik gemaakt van één geluidsbundel, waarbij alleen een deel van de bodem recht onder het meetschip wordt opgemeten. Het beschouwde deel van de bodem (de zogenaamde ‘footprint’) bestaat daarbij uit een cirkelvormig oppervlak, waarvan de diameter afhangt van zowel de bundelhoek α van de geluidsbundel als van de waterdiepte h ter plaatse.

Singlebeam-systemen zijn vooral geschikt voor steekproefsgewijze opnames van het verloop van een onder waterbodembodem. Wanneer men bodembedekkende informatie met een hoge dichtheid wil verkrijgen, dan zijn multibeam-systemen een betere keuze. Bij multibeam-systemen wordt gebruikt gemaakt van een groot aantal geluidsbundels, waarmee tijdens een meting een hele strook van de bodem wordt opgemeten. Deze strook bevindt zich zowel recht onder het schip als opzij van het schip (aan beide zijden). Net als bij singlebeam-systemen wordt per meting slechts één geluidssignaal uitgezonden. De opdeling in verschillende geluidsbundels wordt verkregen door wiskundige bewerking van het meetsignaal wat geheel automatisch wordt verricht door de bij het systeem behorende software.

De echosounder moet regelmatig gekalibreerd worden. Dit is nodig vanwege het feit dat bij een veranderde dichtheid van het water de voortplantingssnelheid van het signaal in het water verandert. De nauwkeurigheid van de echosounder kan worden vergroot door de spreiding van het signaal te verkleinen. Deze nauwe spreiding kan alleen worden verkregen in het gebied van de hogere frequenties. Een restrictie tijdens de survey wordt opgelegd door de toestand van het wateroppervlak. Zo kan de echosounder hoeken van 10 tot 15 graden met de horizontaal, veroorzaakt door deining en golven, nog compenseren. Worden door de weersomstandigheden deze hoeken groter dan zal de survey gestaakt moeten worden.

De nauwkeurigheid die bereikt kan worden met een echosounder ligt, onder ideale omstandigheden, in de orde van ± 5 centimeter op 30 meter diepte. In de praktijk wordt echter, vanwege niet-ideale omstandigheden, een nauwkeurigheid aangehouden van 30 centimeter, ongeacht de waterdiepte. Om een indicatie te geven van de nauwkeurigheid van een echosound-systeem zijn in tabel 2.4 verschillende

methoden met elkaar vergeleken. De basis is een traditionele meting volgens de halve-bol-methode.

Meetsysteem	Singlebeam systeem	Meting met peilstang	Multibeam systeem
Afwijking laagdikte	-3 % (10-60 kg)	-14 % (10-60 kg)	-21 % (10-60 kg)
toev. Bolmeting	-5 % (40-200 kg)	-8 % (40-200 kg)	-11 % (40-200 kg)

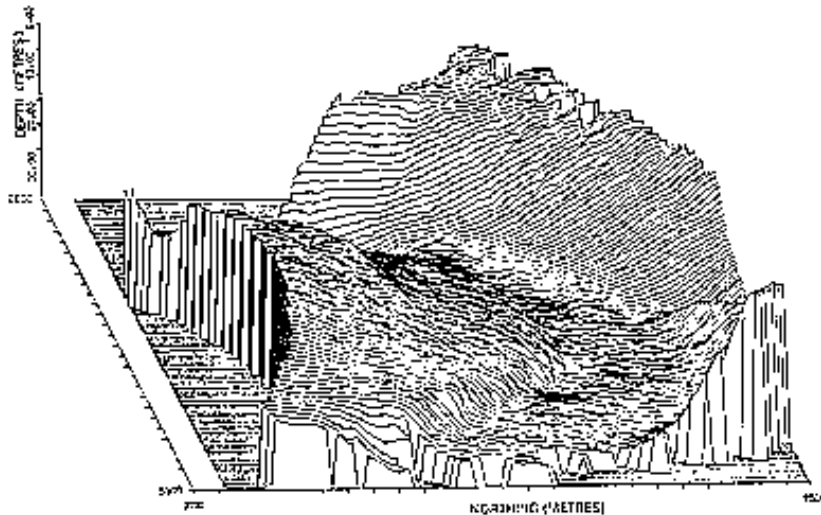
Tabel 2.4: onderlinge verschillen in de meting voor de gemiddelde laagdikte bij dokproef (Gemeentewerken Rotterdam, Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, VBKO., 2000).

De resultaten die de echosounder produceert in de vorm van een getekende weergave van de constructie geeft een vertekend beeld. De werkelijke omtrek van de constructie vertoont een veel grilliger verloop. De echosounder vlakt namelijk de pieken en dalen van de constructie af en geeft dit als lijn weer. De mate van deze afvlakking is gevoelig voor de grootte van de footprint; hoe kleiner de footprint des te groter is de indringing van het signaal in de dalen van de constructie.

2.4.5.4 Survey met behulp van een sonar

Side-scan sonar systemen opereren op een gelijke manier als de echosound-systemen. Het verschil zit in het feit dat de uitgezonden signalen naar de zijkanten worden geleid. De metingen worden hier meestal niet verricht vanaf het vaartuig zelf, maar vanaf een vrijvarend vaartuigje, de zogenaamde 'fish'. Deze 'fish' bevindt zich onder het waterniveau en is met kabels verbonden aan een computer op het vaartuig. Door de 'fish' worden signalen uitgezonden, welke door de zeebodem en/of de constructie worden gereflecteerd. De recorder noteert het gereflecteerde signaal als een donker gebied op de kaart. Hoe beter het object het signaal reflecteert, des te donkerder het gebied op de kaart wordt aangegeven. Door de verschillende grijstinten ontstaat er reliëf in de kaart. Met de side-scan sonar is het dus mogelijk om een brede strip van de bodem te bekijken op oneffenheden.

De mate van nauwkeurigheid wordt voornamelijk bepaald door de frequentie van het uitgezonden signaal. Zenders met een frequentie van 500 Hz zijn in staat om meer details weer te geven dan zenders met een frequentie van bijvoorbeeld 100 Hz. Het beeld dat wordt geprojecteerd op de sonograaf is geen werkelijke representatie van het gemeten profiel. Dit beeld moet namelijk nog gecorrigeerd worden voor vervormingen. Het golfklimaat en de snelheid waarmee de 'fish' wordt bewogen zijn van invloed op de uiteindelijke kwaliteit van de survey. In figuur 2.7 is een voorbeeld gegeven van een kaart die geproduceerd is met behulp van een sonar.



Figuur 2.7: resultaat van een survey uitgevoerd met behulp van een sonar (Latham, JP., Poole, AB., and Mannion, M., 1988. Developments in the analysis of armour layer profile data. Tomas Telford, London.)

Net als bij de echosounder, heeft ook de hoek waaronder het signaal zich spreidt invloed op de kwaliteit van de survey. Hier geldt ook dat een nauwere straal, dus een kleinere hoek α , een grotere nauwkeurigheid tot gevolg heeft.

2.4.6 Onderzoek van Latham & Gauss (1995) in South Devon

Latham en Gauss (1995) [‘Measurement of layer thickness and estimation of as-built density and void porosity in a rock armour revetment at Beesands, South Devon’] onderzochten de invloed van de surveymethode op de porositeit. Hiertoe bepaalden zij het gerealiseerde profiel (revetment bestaande uit een filterlaag en een armourlaag bestaande uit stenen van 4-7 ton) aan de hand van verschillende surveymethoden. Voor bepaling van het oppervlak van de armourlaag is gebruik gemaakt van de conventionele surveytechniek. Het niveau van de armourlaag is bepaald met in de praktijk veelvuldig gebruikte uitrustingen voor deze surveymethode (baak is uitgerust met twee voetstukken; pinvormig en halve bol met diameter gelijk aan $0.5D_{n50}$). Tevens is er gevarieerd met het interval tussen de metingen. Voor iedere surveymethode bepaalden zij de dikte van de armourlaag en berekenden hieruit de grootte van de laagdiktecoëfficiënt, de bulkdichtheid en de schijnbare porositeit. In het onderzoek is alleen onderzoek gedaan naar de eigenschappen van de armour laag. Voor het niveau van de filterlaag is gebruik gemaakt van het ontwerpniveau en het niveau van de filterlaag gemeten door gaten van de armourlaag (voor zover mogelijk en door toepassing van pinvormig voetstuk op de baak). De reden van hun onderzoek was de bestaande onduidelijkheid over de grootte van de schijnbare porositeit en de laagdiktecoëfficiënt, bij toepassing van verschillende surveymethoden.

2.4.6.1 Doelen van het onderzoek

Aangezien er in het verleden geen eenduidige surveymethode is geweest voor het bepalen van het profiel, zal in dit onderzoek een vergelijking worden gemaakt tussen een aantal verschillende methoden, inclusief de methode die aangeraden wordt in het CIRIA/CUR Manual (conventionele surveymethode waarbij het voetstuk van de baak uitgevoerd is als halve bol).

De doelen van het onderzoek zijn als volgt samen te vatten:

- vergelijken van de laagdiktecoëfficiënt, bepaald door verschillende surveymethoden,
- vergelijken van de bulkdichtheid (en schijnbare porositeit) verkregen uit de verschillende surveymethoden,
- leveren van een richtlijn voor de bovenstaande parameters bestaande uit waarden voor de parameters behorende bij verschillende surveymethoden,
- illustreren van de gevolgen voor de kosten bij het gebruik van de verschillende surveymethoden.

De opzet van het onderzoek en de resultaten staan vermeld in bijlage 1.

2.4.6.2 Conclusies van het onderzoek

Verschiede methoden voor bepaling van het niveau van de armourlaag geven substantiële verschillen in de waarde van de laagdiktecoëfficiënt (variatie van 0.76 tot 0.92). De resulterende armourlaag volumes, bulkdichtheid en porositeitswaarden, waarop hoeveelheden en betaling normaal gesproken zijn gebaseerd, laten een overeenkomende variatie zien. Surveys uitgevoerd met de halve bol als voetstuk (diameter bol is gelijk aan $0.5D_{n50}$, interval in doorsnede 1 meter, wat ongeveer overeenkomt met $0.75D_{n50}$) geven een hogere laagdiktecoëfficiënt en porositeitswaarde dan die uitgevoerd met het pinvormige voetstuk waarbij de intervallen gefixeerd zijn op 2.5 meter in de doorsnede.

De gemeten porositeitswaarde komt overeen met de eerder gedefinieerde schijnbare porositeit (porositeitswaarde beïnvloed door randen en onderliggende lagen en dus niet gelijk aan de werkelijke porositeit in de constructie) die de gemiddelde porositeit weergeeft over de gemeten laagdikte. De gemeten porositeitswaarden zijn over het algemeen significant lager (variatie van 24% tot 37%) dan die weergegeven in o.a. het CIRIA/CUR manual. De porositeitswaarde van 37%, welke binnen de historisch geaccepteerde range van 35-40% valt voor zware armourconstructies, resulteert uit de surveymethode waarbij de hoogste punten van de armourlaag zijn opgemeten (pinvormig voetstuk).

Toepassing van een porositeitswaarde van 35% ten tijde van de werkvoorbereiding (zoals voorgeschreven voor dit soort constructies in o.a. het CIRIA/CUR Manual) zou geresulteerd hebben in een onderbetaling voor de aannemer van 5.4% tot 15%. Uitzondering hierop is de toepassing van de surveymethode waarbij de hoogste punten van de armourlaag gemeten worden en het volume van de armourlaag wordt berekend door toepassing van het ontwerpniveau van de filterlaag als ondergrens (in plaatst van het gemeten niveau van de filterlaag). Deze toepassing zal resulteren in een overbetaling van 3%.

Toepassing van een porositeitswaarde van 40% ten tijde van de werkvoorbereiding (zoals voorgeschreven voor dit soort constructies in o.a. het CIRIA/CUR manual) zou geresulteerd hebben in een onderbetaling van de aannemer van 4.3% tot 21.7%.

Bij de presentatie van de conclusies van het onderzoek werd de kanttekening gemaakt dat de weergegeven waarden nog beïnvloed kunnen worden door factoren als de vorm van de steenstukken, steilheid van de gradering en plaatsingsmethode. Echter de materialen gebruikt in Beesands waren geen uitzondering op materialen in soortgelijke constructies.

Maakt men gebruik van de surveymethode zoals wordt aangeraden in het CIRIA/CUR Manual (met $0.5 D_{n50}$ voet en interval in de doorsnede van $0.75D_{n50}$) dan liggen de maximale waarden van de porositeit tussen 30 en 34 procent. Volgens Gauss en Latham kunnen bij deze surveymethode beter de richtlijnen worden aangehouden die zijn weergegeven in tabel 2.5. Deze waarden en de variatie zijn bepaald uit de meetgegevens van het onderzoek in Beesands. De waarden die zijn weergegeven in het CIRIA/CUR Manual geven echter een veel grotere spreiding aan en liggen aanzienlijk hoger.

Richtlijn Ontwerpparameter	Gauss en Latham	CIRIA/CUR Manual
Laagdiktcoëfficiënt [-]	0.85 ± 0.03	0.75-1.25
Schijnbare porositeit [%]	31 ± 3	35-40

Tabel 2.5: conclusies Gauss en Latham

Gauss en Latham maken echter nog wel de kanttekening dat deze waarden nog beïnvloed kunnen worden door factoren als de vorm van de steenstukken, gradering en plaatsingsmethode. Naast deze factoren is het onderzoek uitgevoerd op een bepaald type constructie. Het is niet zonder meer mogelijk deze resultaten op andere constructies toe te passen.

2.5 Onderzoeksmogelijkheden

Uit de bovenstaande paragrafen is duidelijk geworden dat er nogal wat onzekerheden zijn in de bepaling van de porositeit (en dus de benodigde hoeveelheid materiaal). De invloed van de surveymethode die onderzocht is door Latham e.a. (1995) blijkt een heel ander effect te hebben op de porositeit in vergelijking met de weergave in het CIRIA/CUR Manual. De effecten die naast de verschillende surveymethoden een rol kunnen spelen zijn o.a. de vormklasse (l/d), de steilheid van de gradering en de plaatsingsmethode. Voor de uitvoering van de proeven is het wezenlijk om te kijken welke van de verschillende surveymethoden het best overeenkomt met de werkelijke porositeit, kortom welke surveymethode geeft het juiste volume weer.

De theorie die ontwikkeld is door Knieß is helaas summier weergegeven en brengt dus ook verschillende vraagtekens met zich mee. De onduidelijkheden omtrent de porositeit in de overgang van de ene breuksteenlaag in de andere zijn met de beschrijving van deze methode niet opgelost. Bovendien wordt er geen eenduidig antwoord gegeven op de bepaling van de indringing van de ene breuksteenlaag in de andere. Dit is echter wel een essentiële factor voor de bepaling van de benodigde hoeveelheid steen voor een constructie.

Samenvattend kan gezegd worden dat er invloedsfactoren zijn die nader onderzocht kunnen worden. Bij dit onderzoek zullen de bulkeigenschappen van het te gebruiken materiaal niet onderzocht worden, maar wel gecontroleerd worden ten opzichte van de waarden gegeven in het CIRIA/CUR Manual. De bulkeigenschappen en in het bijzonder de invloed van vorm (l/d) en steilheid van de gradering (W_{85}/W_{15})



zijn reeds onderzocht in het afstudeeronderzoek van Bregman (1998). De invloedsfactoren die in dit onderzoek onderzocht zullen worden zijn:

- Indringing van breuksteenlagen in onderliggende (breuksteen)lagen. Hierbij is het doel de indringing te bepalen als functie van de steenafmetingen van het materiaal of als functie van bijvoorbeeld de verhouding tussen de materialen. Hieruit kan dan weer bepaald worden hoeveel materiaal er verloren gaat door de indringing en dus hoeveel extra materiaal er eventueel nodig is om aan het ontwerpniveau te voldoen.
- Tijdens de uitvoering van deze proef kan een controle uitgevoerd worden op de bulkeigenschappen van het proefmateriaal. Door bepaling van de randeffecten is de bulkporositeit te bepalen
- Door toepassing van verschillende surveymethoden tijdens deze proef is het bovendien mogelijk om de resultaten van het onderzoek van Latham (1995) te controleren. Aan de hand van deze controle is het mogelijk om aan te geven welke methode de oppervlakte van het proefmateriaal het beste weergeeft. Hierbij moet dus ook duidelijk gedefinieerd zijn wat het oppervlak van het proefmateriaal is.
- Porositeit in de overgang tussen twee breuksteenlagen. Hierbij kan onderzoek plaatsvinden naar het verloop van de porositeit rond de overgangen en hoe groot de zone is waarover dit randeffect merkbaar is. Een overgang kan op verschillende manieren optreden, zoals overgangen tussen ondergrond en breuksteenlaag, breuksteenlagen onderling en breuksteenlaag naar de omgeving.
- Tijdens deze proef kan er nogmaals een controle uitgevoerd worden op de porositeit van de bulk van het proefmateriaal.
- Porositeitsbepaling in het bovenste en onderste deel van een breuksteenlaag. In de randen zal een bepaald verloop van de porositeit optreden. Dit verloop kan worden aangegeven door de verandering in porositeit en de lengte waarover dit porositeitsverschil optreedt.

Het onderzoek heeft betrekking op factoren die de schijnbare porositeit bepalen. In het vervolg van dit rapport wordt met 'de porositeit' dan ook de schijnbare porositeit bedoeld.

3 Onderzoeksmethoden

Aan de hand van het literatuuronderzoek is reeds bepaald welke factoren onderzocht gaan worden. Nu rest de vraag op wat voor manier de invloed van deze factoren bepaald wordt. Hiervoor zijn verschillende methoden beschikbaar zoals, de theoretische studie, praktische meting of een modelonderzoek. In dit hoofdstuk zal bepaald worden welke manier van onderzoek het meest geschikt is voor het onderzoek naar de factoren die de porositeit in breuksteenconstructies bepalen.

3.1 Theoretische studie

Naar schatting levert een theoretische studie nog niet de juiste waarden op voor de verschillende invloedsfactoren. Het probleem dat zich voordoet is, dat een stuk steen of een steenachtig materiaal wat vorm betreft, niet voldoende nauwkeurig mathematisch uitgedrukt kan worden. Dit is alleen mogelijk als de vorm geschematiseerd wordt tot bijvoorbeeld een kubus of een bol. In de literatuur is toch het een en ander beschikbaar voor een opzet voor een theoretische benadering van de porositeit in breuksteenconstructies. In een artikel presenteert Aberg, B., (1992) een theorie voor de berekening van de porositeit van niet-cohesieve grond en soortgelijke materialen. De meeste belangrijke onafhankelijke variabele in deze berekening is de korrelgrootteverdeling van het materiaal, maar ook de vorm en de mate van verdichting wordt meegewogen door een empirische coëfficiënt. De problemen die zich voordoen bij eventuele toepassing van deze methode zijn de volgende:

- de verdeling van de korrelgrootte moet mathematisch weergegeven kunnen worden om de berekening uit te kunnen voeren,
- er wordt onderscheid gemaakt tussen twee typen materiaal, het verschil tussen deze typen is dat het ene materiaal geen losse korrels bevat (alle korrels zijn gefixeerd tot hun eigen positie door de omliggende korrels) en het andere wel. Het probleem dat vervolgens optreedt is dat de scheiding tussen eventueel losse en vaste korrels heel precies moet worden vastgelegd (uitgedrukt in de korrelgrootte) in de mathematische verdeling van de korrelgrootte om tot goede resultaten te kunnen komen.
- er moeten verschillende constanten bepaald worden die o.a. de vorm van de korrels, mate van verdichting en de plaatsingsmethode weergeven.

Vanwege de vele eisen wat invoerparameters betreft is de theoretische benadering van Aberg (1992) niet verder onderzocht.

3.2 Praktische meting

Praktische metingen betreffen luchtfoto-opnamen, volumemetingen door waterpassing of volumemeting van materiaal in schepen, bakken of op pontons. Een nadeel van metingen in de praktijk is dat het zeer moeilijk is om steeds dezelfde proefomstandigheden te creëren. Bovendien zijn praktische metingen arbeidsintensief en tijdrovend en bovendien gaat dit vaak samen met hoge kosten.

Gegevens uit de praktijk kunnen moeilijk met elkaar vergeleken worden, vanwege het feit dat de omstandigheden iedere keer van elkaar verschillen. Hoe kan nu de bulkdichtheid van een golfbreker in Nederland worden vergeleken met dezelfde golfbreker in Bangladesh, als je weet dat de survey in Nederland is uitgevoerd met elektronische apparatuur en in Bangladesh met de conventionele baak. Bovendien wordt er vanuit gegaan dat degenen die de meting hebben verricht beiden gekwalificeerd zijn en de meting even serieus hebben uitgevoerd.

3.3 Modelonderzoek

Door proeven te doen op verschaald materiaal kan inzicht verkregen worden in de mate waarin factoren van invloed kunnen zijn op de porositeit. Door de resultaten van het onderzoek op verschaald materiaal te confronteren met metingen uit de praktijk, kan de geldigheid van deze resultaten geverifieerd worden.

De belangrijkste vraag die speelt bij modelonderzoek is of de gevonden resultaten representatief zijn voor de werkelijke afmetingen, oftewel: 'treedt er een schaaleffect op?' Proeven vinden plaats op macroscopische schaal in het laboratorium, waar de omstandigheden en invloedsfactoren kunnen worden gecontroleerd. Dit betekent echter wel dat er een schaalverschil is met de werkelijkheid. Dit verschil betreft de grootte van de krachten die in het spel zijn, de grootte van het beproefde materiaal en de tijdsduur van de proef. Deze effecten worden samen het schaaleffect genoemd en hebben tot gevolg dat er geen lineair verband bestaat tussen de kleinschalige proef en de grootschalige werkelijkheid.

Bij het naslaan van de literatuur over het schaaleffect valt al snel op dat dit onderwerp zich in een grijs gebied bevindt. Veel onderzoekers verscalen het steenmateriaal op een gekozen schaal en gaan er vanuit dat storende schaaleffecten geen rol spelen. Andere onderzoekers voeren een of andere eigen correctiefactor in. Zo corrigeert Simm (1997) [vermeld in Bregman (1998)] de gemeten porositeit met een correctiefactor volgens Gupta (1985). Simm geeft hier echter een verkeerde interpretatie, want Gupta beweert enkel dat bij toenemende hoekigheid van de steenstukken de porositeit toeneemt. Deze factor mag niet zonder meer worden toegepast als correctiefactor voor de porositeit.

In de literatuur wordt opvallend veel aandacht besteed aan het verscalen van de golfhoogte, de stroomsnelheid en het golfspectrum, terwijl het steenmateriaal gewoon wordt verschaald naar de modelschaal. Uit persoonlijke communicatie met Laan (DWW, Rijkswaterstaat) bleek dat er, voor zover hem bekend was, geen schaaleffecten optreden bij toepassing van steenmateriaal. Gedurende zijn onderzoeken heeft hij het steenmateriaal altijd gewoon op gewicht of zeefmaat verschaald en heeft hij nooit aanleiding gehad voor het vermoeden van een schaaleffect. In Bregman (1998) geeft Laan (DWW, Rijkswaterstaat) zijn mening over dit onderwerp:

Laan vermoedt dat de gemeten verschillen in porositeit zo klein zullen zijn dat er geen onderscheid gemaakt kan worden tussen meetonnauwkeurigheden en de aanwezigheid van een schaaleffect. Bij het doorvoeren van dit onderwerp naar afmetingen die in de praktijk voorkomen (zware graderingen) treden er praktische problemen op bij de uitvoering van onderzoek naar dit probleem. Als de invloed van W_{50} onderzocht moet worden in een bak, dan zullen de afmetingen van deze bak meer en meer toenemen. Past men de afmetingen van de bak niet aan de grootte van W_{50} aan, dan zal de storende invloed van de wanden zo groot worden dat de gemeten waarden niet meer betrouwbaar zijn. Een ander probleem is dat de



steenstukken niet meer handmatig kunnen worden geplaatst, waardoor de kosten van een onderzoek snel zullen stijgen.'

De onwetendheid over de aanwezigheid van een eventueel schaafeffect is waarschijnlijk te wijten aan verwarring rond het begrip 'porositeit'. Wat vaak vergeten wordt is dat de porositeit een relatief getal is, namelijk het percentage dat de holle ruimten innemen ten opzichte van de totale ruimte. Het zegt zelf niets over de grootte van de holle ruimten. Bij toenemende W_{50} zullen de afmetingen van de holle ruimten toenemen, maar dit houdt niet in dat hierdoor de porositeit ook verandert. Door visuele misleiding kan deze conclusie echter wel snel getrokken worden. Wanneer de steenstukken als ideale bollen worden geschematiseerd komt duidelijk naar voren dat er geen schaafeffect optreedt. Duidelijk is te zien dat de holle ruimten groter worden, maar dat de porositeit constant blijft.

Uit de literatuur blijkt geen eenduidige mening over het schaafeffect voor proeven naar porositeit in breuksteenconstructies. In de meeste gevallen worden de stenen gewoon op gewicht of zeefmaat verschaald naar de gewenste proefafmetingen. Hierbij dient toch de kanttekening gemaakt te worden, dat er mogelijk een verschil optreedt bij de productie van het proefmateriaal ten opzichte van het werkelijke materiaal. Het proefmateriaal zal, in tegenstelling tot het werkelijke materiaal meerdere malen gebroken moeten worden. Verwacht kan worden dat door het brekingsproces (en dus de productie van de gewenste steenmaat) verschillen ontstaan die betrekking hebben op de vorm van de steenstukken. De steenmaat heeft op deze manier invloed op de vorm van de steenstukken (via het productieproces) en moet dus als een schaafeffect beschouwd worden. Dit effect is moeilijk te kwantificeren vanwege het feit dat er geen rechtstreeks aantoonbaar verschil aangegeven kan worden.

Uit de beschrijving van de mogelijkheden voor de uitvoering van het onderzoek is reeds gebleken, dat voor dit onderzoek het modelonderzoek de beste mogelijkheid is. Het onderzoek zal dan ook opgezet en uitgevoerd worden op modelschaal. Aan de hand van de onderzoeken en uitspraken van Laan (DWW, Rijkswaterstaat) wordt er in de voorbereiding en uitvoering van de proeven aangenomen dat er geen schaafeffecten zullen optreden. Deze aanname zal aan de hand van de resultaten van de proeven gecontroleerd worden.

4 Opzet van het onderzoek

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het principe van het onderzoek weergegeven. De manier van onderzoek is in eerste instantie bepaald door het ontwerp van de proefopstelling. Hierin wordt beschreven wat de mogelijkheden zijn om de verschillende invloedsfactoren te kunnen onderzoeken. De invloedsfactoren die met behulp van de proefopstelling onderzocht moeten worden zijn:

- indringing in onderliggende lagen (breuksteenlagen of bestaande ondergrond),
- porositeitsverloop in overgangen (overgangen van ondergrond naar breuksteenlaag, overgang tussen breuksteenlagen en overgang van breuksteenlaag naar omgeving),
- invloed van toepassing verschillende surveymethoden op de porositeit en hoeveelheid benodigd steenmateriaal.

Door analyse van de mogelijkheden is een geschematiseerde proefopstelling en een proevenschema opgesteld. Nu de proefopstelling is bepaald kunnen de benodigde graderingen ontworpen worden waarmee het mogelijk is om de invloedsfactoren te kunnen bepalen. De graderingen zijn ontworpen aan de hand van de volgende eisen:

- minimale steenafmetingen,
- maximale steenafmetingen,
- vorm van de gradering,
- stapgrootte tussen graderingen,
- beschikbaarheid materiaal en intrinsieke eigenschappen.

Met de bovenstaande gegevens en uitgangspunten zijn tenslotte de proefopstelling en meetmethoden ontworpen. Het ontwerp is uitgevoerd met gebruikmaking van de volgende uitgangspunten:

- dimensies en sterkte van het meetvat,
- plaatsing breuksteen,
- toevoegen water tijdens proefuitvoering,
- meten breuksteenoppervlak,
- meten waterniveau.

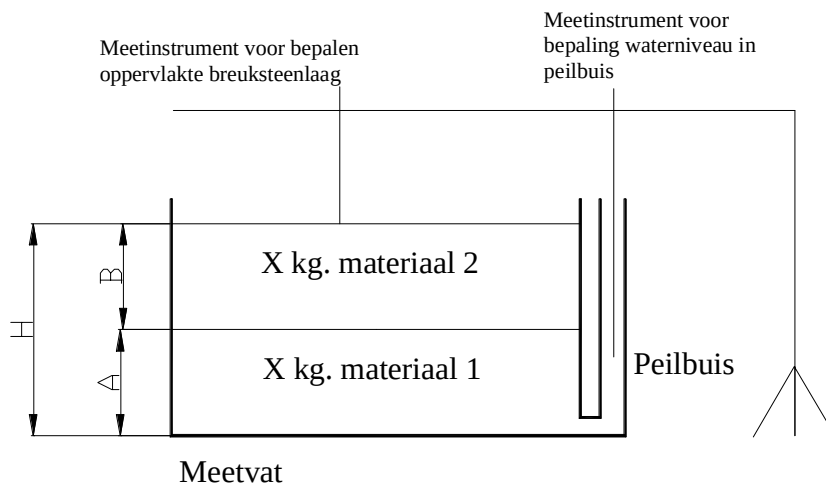
4.2 Proefopstelling

4.2.1 Schematisering proefopstelling

De proeven die uitgevoerd gaan worden kunnen onderverdeeld worden in twee verschillende manieren van meten. De eerste manier die gebruikt wordt is het meten van het niveau van de geplaatste breuksteenlaag. De manier van oppervlaktemeting

zal nader bepaald worden. Het porositeitsverloop is echter niet meetbaar door uitvoering van een oppervlaktetmeting. De eigenschap die onderzocht moet worden is het verloop van het percentage holle ruimte in de constructie over de hoogte van de laag. Dit verloop is wel meetbaar door het vullen van de poriën met water, waarbij het poriënvolume wordt weergegeven door de toegevoegde waterhoeveelheid. Door het vullen van het meetvat met water uit te voeren in kleine stapjes is per stapje het poriënvolume te bepalen. Dit is de tweede manier van meten die gebruikt gaat worden in de proefuitvoering.

De proefopstelling die nodig is voor het op bovenstaande manier meten van de invloedsfactoren is schematisch weergegeven in figuur 4.1. Hoe de schematisering omgezet wordt in de werkelijke proef- en meetmethoden wordt in de rest van dit hoofdstuk weergegeven.



Figuur 4.1: geschematiseerde proefopstelling

4.2.2 Proefuitvoering indringing

Het doel van deze proef is om weer te geven wat het effect is van indringing van breuksteenlagen in onderliggende lagen. De onderliggende lagen kunnen bestaan uit breuksteenlagen; deze lagen zijn dan wel opgebouwd uit een gradering met kleinere steenafmetingen of uit de bestaande ondergrond. De onderliggende lagen zullen altijd opgebouwd zijn uit kleinere steenafmetingen vanwege de aard van breuksteenconstructies waar de bovenste laag de grootste stabiliteit moet bezitten en dus de grootste steenafmetingen heeft (zie bijvoorbeeld de filterconstructies). Het verschil in steenafmeting tussen de breuksteenlagen wordt bepaald door de verschillende filterregels die in de praktijk gebruikt worden.

Voor de uitvoering van de indringingsproef kan gebruik gemaakt worden van de geschematiseerde proefopstelling die wordt weergegeven in figuur 4.1. De indringingsproef kan met de proefopstelling in de volgende stappen uitgevoerd worden:

- In het lege vat wordt X kg van gradering 1 (de kleinste gradering) in het meetvat geplaatst.
- Het niveau van de bovenkant van deze laag wordt gemeten met behulp van de oppervlaktetmeetmethode.

- c. Er wordt nogmaals X kg van gradering 1 bovenop de al geplaatste breuksteenlaag geplaatst (de hoeveelheden X in stap 1 en 3 zijn precies gelijk).
- d. Het niveau van de bovenkant van de tweede breuksteenlaag wordt gemeten met behulp van de oppervlaktemeetmethode.

Door vergelijking van de oppervlaktemetingen, wat resulteert in vergelijking van twee laagdikten, zijn de volgende resultaten te bereiken:

- Indringingsdiepte tussen plaatsing op een harde ondergrond en plaatsing op een breuksteenlaag met dezelfde afmeting is te bepalen door vergelijking van de laagdikten.
- De porositeit zonder invloed van de randen kan berekend worden door een correctiefactor voor de randeffecten toe te passen.

Deze proefcyclus kan vervolgens voortgezet worden door het bovenstaande voor de verschillende graderingen uit te voeren. Bovendien kan er onderscheid gemaakt worden door verschillende graderingen op elkaar te plaatsen zodat de indringing tussen de verschillende graderingen bepaald kan worden.

4.2.3 Proefuitvoering porositeitsverloop

Het porositeitsverloop wordt gemeten door het vullen van het meetvat met water in stapjes met bekend volume. Elke keer na toevoeging van water wordt de stijghoogte in het meetvat opgemeten wat een indicatie geeft van het poriënvolume. Elke meting geeft de porositeit weer gemiddeld over het oppervlak van het meetvat over een kleine hoogte Δh . De proef zal een beeld geven van het porositeitsverloop in overgangen tussen breuksteenlagen; hiernaast geeft de proef ook informatie over de grootte van de bulkporositeit.

De stapgrootte in de stijghoogte ' Δh ' is bepalend voor de hoeveelheid meetpunten die de proef zal opleveren. Voornamelijk in randen van de breuksteenlaag is het van belang genoeg meetpunten te verzamelen met het oog op de te bereiken nauwkeurigheid. Hoe meer meetpunten er in deze randen beschikbaar zijn hoe groter de nauwkeurigheid van het porositeitsverloop zal zijn. Voorafgaand aan de proefuitvoering zal bepaald moeten worden wat de vereiste nauwkeurigheid en dus de stapgrootte in de stijghoogte is.

De randeffecten (toename poriënvolume langs de randen van het meetvat) zijn geïntegreerd in het poriënvolume dat volgt uit deze meting. Om de porositeit te kunnen bepalen zonder invloed van het randeffect van de wanden van het meetvat zal er een correctie toegepast moeten worden om deze effecten uit te schakelen. De proefcyclus voor de uitvoering van de 'watervulproef' kan beschreven worden met de volgende stappen:

- a. Plaatsen van X kg van gradering 1 in het vat.
- b. Meten van het porositeitsverloop door vulling van het vat met water.
- c. Plaatsen van X kg. van gradering 2 bovenop de al reeds geplaatste gradering 1.
- d. Meten van het porositeitsverloop, van de twee op elkaar geplaatste breuksteenlagen, door vulling met water.

Met behulp van deze meetresultaten zijn de volgende resultaten te bereiken:



- Bepaling van het verloop van de porositeit in de overgangen tussen breuksteenlagen, waardoor de methode Knieß getoetst en eventueel aangepast kan worden.
- De manier en ligging van het porositeitsverloop in de bovenrand van een breuksteenlaag kunnen vergeleken worden met het resultaat van de toegepaste oppervlaktemeting. Op deze manier is er een referentie beschikbaar waarmee verschillende manieren van oppervlaktemetingen vergeleken kunnen worden.
- De proef kan gebruikt worden als controle op de porositeit van de bulk die in de eerste proef bepaald is.

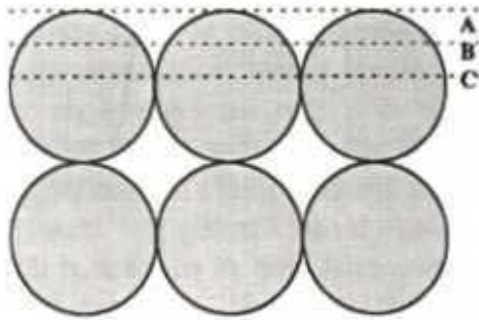
Door uitvoering van deze proefcyclus voor verschillende laagopbouw in het meetvat is het mogelijk een verband aan te tonen over de manier waarop de porositeit in de randen verloopt. De variatie in laagopbouw kan worden gerealiseerd door plaatsing van verschillende graderingen in het meetvat; onderlinge verschillen tussen graderingen kunnen bepaald worden aan de hand van de bestaande filterregels.

4.2.4 Schematisering werkelijkheid

De bovenstaande schematisering van de proefuitvoering leidt tot een afbakening van de mogelijke waterbouwkundige constructies die geschematiseerd kunnen worden in de proefopstelling. De watervulmethode waarmee het porositeitsverloop in overgangen tussen (breuksteen)lagen bepaald kan worden heeft als bepalende eigenschap dat de constructie een horizontale oriëntatie moet hebben. Dit betekent dat de te onderzoeken constructies, constructies moeten zijn op het horizontale vlak. Het wateroppervlak in het meetvat zal immers altijd horizontaal blijven waardoor alleen laagovergangen gemeten kunnen worden die ook horizontaal geplaatst zijn. Deze horizontale oriëntatie is meteen een voorwaarde voor de constructie van het meetvat en de te gebruiken plaatsings- en surveymethode.

4.2.5 Surveymethode en definitie randen

De surveymethode is al aan bod gekomen bij het bepalen van de laagdikten voor de indringingsproeven. Het type surveymethode is echter bepalend voor het type constructie dat gemeten gaat worden. Naast de keuze voor het type surveymethode is het van belang hoe het oppervlak van de breuksteenlaag gedefinieerd wordt. Deze definitie is op het moment niet eenduidig en kan van werk tot werk verschillen. In figuur 4.2 wordt een geschematiseerde steenlaag weergegeven. De getekende lijnen geven de variëteit weer die kan ontstaan bij toepassing van verschillende definities



Figuur 4.2: verschil in niveau door definitie van oppervlak

voor het oppervlak. Lijn A geeft het omhullend oppervlak weer, dat is gemeten over de hoogste punten. Lijn C geeft het minimum niveau aan. Dit correspondeert met het vlak door de raakpunten van de stenen (een gangbare methode voor survey boven het waterniveau). Lijn B geeft het gemiddelde weer van de twee eerder genoemde niveaus.

Zoals uit de figuur wel blijkt is het noodzakelijk om tijdens het ontwerp goed op de hoogte te zijn van wat het getekende profiel in de ontwerp-tekening nu precies voorstelt. Duidelijk zal zijn dat het aanzienlijk scheelt of nu lijn A of lijn C is weergegeven op de tekening. Tijdens het ontwerp moet er behalve een duidelijk gedefinieerd oppervlak, ook duidelijkheid bestaan over de geaccepteerde toleranties. Het getekende profiel in de ontwerp-tekening kan een gemiddeld profiel zijn (met zowel toleranties naar beneden als naar boven). Het blijkt dus dat het profiel dat op de ontwerp-tekening is weergegeven duidelijk gedefinieerd moet zijn. Onduidelijkheid hierin zal onherroepelijk leiden tot fouten in de hoeveelheidsbepaling. Het schema van de proefopstelling levert al enige randvoorwaarden voor de te gebruiken surveymethode. Deze randvoorwaarden zijn:

- er moet een horizontaal oppervlak gemeten worden, dat boven water ligt (plaatsing van stenen kan eventueel onder water gebeuren, maar het oppervlak van de constructie kan droog gezet worden voor de oppervlaktemeting),
- er moet in een vat gemeten worden, waarbij het meetinstrument alleen van bovenaf het oppervlak van de constructie kan bereiken,
- nauwkeurigheid van de metingen moet van dezelfde orde zijn als die van de watervulmethode (voor vergelijking beide methoden).

Op basis van de te behalen nauwkeurigheid van de metingen en het feit dat het oppervlak van de constructie droog gezet kan worden voor de oppervlaktemeting leidt de keuze voor de surveymethode al snel naar de conventionele surveytechnieken. Hiervoor is surveyapparatuur benodigd in de vorm van een waterpasinstrument, baak of theodoliet (of hun elektronische equivalenten). Het uiteindelijke profiel dat resulteert uit de survey, is afhankelijk van de volgende aspecten:

- de vorm en grootte van de voet van de baak,
- de lengte van het interval tussen opeenvolgende metingen.

Door toepassing van twee verschillende vormen voor de voet van de baak, is het mogelijk de resultaten van de proeven te vergelijken met die van Latham (1995) en met die volgens het CIRIA/CUR Manual. De keuzen voor de uitvoering van de voet van de baak zijn: ten eerste de halve-bol-methode, omdat die volgens Latham de beste resultaten geeft, en ten tweede de methode met de conventionele baak (hier is de baak uitgevoerd met een pinvormig voetstuk), omdat deze veelvuldig wordt toegepast in de praktijk.

De keuze van het type surveymethode heeft gevolgen voor de definitie van de randen. De randen worden gedefinieerd als het gemiddelde uit de meetpunten uit de oppervlaktemeting (uitgevoerd met zowel de halve bol als het pinvormig voetstuk). De enige referentie die gebruikt kan worden is de onderkant van de constructie. Deze referentie levert echter nog steeds geen informatie over de ligging van het gemiddelde van de meetpunten ten opzichte van bijvoorbeeld de toppen van de stenen in de breuksteenlaag. Dit betekent dat er geen nieuwe gegevens uit de proeven volgen wat betreft de ligging van de meetpunten.

De uitvoering van de watervulproef levert informatie over het porositeitsverloop in de randen van de constructie. In de bovenrand, waar de oppervlaktemetingen uitgevoerd worden, zal de porositeit oplopen van de gemiddelde bulkporositeit tot de maximale porositeit van 100%. Het niveau waar de maximale porositeit optreedt is gelijk aan het niveau van de toppen van de stenen in de breuksteenlaag. Koppeling van het porositeitsverloop in de bovenrand aan de resultaten van de oppervlaktemeting biedt mogelijkheden wat betreft de ligging van deze oppervlaktemeting.

4.2.6 Plaatsingsmethode

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat de plaatsingsmethode een variabele is die de porositeit in de constructie kan beïnvloeden. Voor het onderzoek is het van belang dat deze variabele constant blijft zodat de plaatsingsmethode geen invloed zal hebben op de eindresultaten van het onderzoek.

In de praktijk zijn verschillend methoden beschikbaar om de stenen te plaatsen. Dit betekent dat er voor de proefuitvoering een keuze gemaakt moet worden uit deze mogelijkheden. De keuze voor de plaatsingsmethode wordt bepaald door de invloed die de plaatsingsmethode heeft op de eindresultaten. De invloed kan het best gecontroleerd worden door het ‘random’ plaatsen van de stenen in het meetvat. Door het ‘random’ plaatsen wordt verwacht dat de invloed van de persoon kleiner is dan bij de individuele plaatsing.

Naast de keuze voor de plaatsingsmethode is het nog mogelijk om het materiaal boven of onder water te plaatsen. Bij de plaatsing onder water zullen de stenen in hun val invloed ondervinden van het water waardoor bepaalde verplaatsingen zullen optreden. Verwacht wordt dat deze verplaatsingen het ‘random’ karakter van de plaatsing bevordert, waardoor de invloed van de persoon minder zal worden. Voor de plaatsing van het proefmateriaal zal dus gebruik worden gemaakt van de ‘random’ plaatsingsmethode, waarbij de stenen onder water geplaatst worden.

De invloed van de persoon kan bij het ‘random’ plaatsen zo gering mogelijk gehouden worden door toepassing van de volgende methode (volgens ir. P.C. Kreijger (TNO)):

Het meetvat wordt gevuld met behulp van een soort schep en wel zodanig, dat steeds een nagenoeg horizontaal oppervlak van het steenmateriaal in het vat aanwezig is. Men houdt de schep dus direct boven het meetvat en laat de korrels hiervan afglijden, terwijl de schep zodanig boven de bak bewogen wordt, dat na elke schep een zo goed mogelijk horizontaal oppervlak wordt verkregen. Op deze wijze gaat men door tot het benodigd aantal kilo's gestort is. Het afrijen van het vat vindt vervolgens plaats met een houten afstrijkplaat die onder een hoek van 45° aan één zijde is afgeschuind. Men beweegt dan de plaat, met de scherpe kant naar voren, éénmaal over de wand van het vat heen waardoor het overtollige materiaal wordt afgeschoven.

De methode die Kreijger voorstelt is niet precies uitvoerbaar in de proefuitvoering. Het meetvat zal namelijk nooit tot de rand gevuld worden waardoor het niet mogelijk is om het oppervlak op die manier af te strijken. Het plaatsen van het materiaal in het meetvat zal op de volgende manier uitgevoerd worden:

Het meetvat wordt gevuld met behulp van een emmer en wel zodanig, dat steeds een nagenoeg horizontaal oppervlak van het steenmateriaal in de bak aanwezig is. De emmer wordt direct boven het waterniveau (ten alle tijde staat er minimaal 20 cm water boven het breuksteenoppervlak) in het meetvat gehouden en zo gekanteld dat de korrels uit de emmer kunnen rollen. Terwijl de korrels uit de emmer rollen wordt de emmer zodanig bewogen dat er een zo goed mogelijk horizontaal oppervlak wordt verkregen. Op deze wijze wordt het benodigde aantal kilo's breuksteen gestort. Als referentie voor het afstrijken van het oppervlak van de breuksteenlaag wordt het horizontale oppervlak van het water gebruikt. Het waterniveau wordt zodanig verlaagd dat dit net onder de toppen van de stenen komt te liggen. Voor de kleinste twee graderingen vindt het afstrijken plaats met een houten afstrijkplaat. Deze plaat wordt zodanig over het oppervlak bewogen dat er een zo goed mogelijk horizontaal oppervlak van de breuksteenlaag ontstaat. Voor de grootste twee graderingen is het afstrijken niet mogelijk en worden 'hoge stenen' weggehaald om vervolgens in 'dalen' van het breuksteenoppervlak teruggeplaatst te worden.

4.2.7 Stappenplan proefuitvoering

Het stappenplan voor de proefuitvoering beschrijft de volgorde van proefuitvoering. Hiermee worden alle benodigde combinaties van op elkaar geplaatste graderingen vastgelegd. De combinaties zijn bepaald aan de hand van de onderlinge verschillen. Deze verschillen zijn bepaald aan de hand van de filterregels voor geometrisch gesloten filters en door de verhouding in M_{50} bij de opbouw van golfbrekers. Het stappenplan wordt weergegeven in tabel 4.1.

In de kolom meting zijn de metingen genummerd. Hier staat 'ld' voor laagdiktemeting ofwel oppervlaktemeting en 'wv' staat voor watervulmethode. De kolom 'code' geeft de volgorde weer waarop de vier graderingen op elkaar geplaatst kunnen worden. Bijvoorbeeld 'b-1' betekent gradering 1 geplaatst op de bodem en 1-2 betekent gradering 2 geplaatst op gradering 1 enz.

Plaatsing proef 1	Meting	Code
½ G1	ld 1	b-1
½ G1	ld 2	1-1
	wv 1	
½ G2	ld 3	1-2
½ G2	ld 4	2-2
	wv 2	
½ G3	ld 5	2-3
½ G3	ld 6	3-3
	wv 3	
Plaatsing proef 2	Meting	Code
G2	ld 7	b-2
	wv 4	
½ G4	ld 8	2-4
½ G4	ld 9	4-4
	wv 5	
Plaatsing proef 3	Meting	Code
G1	ld 10	(b-1)
G4	ld 11	1-4
	wv 6	
Plaatsing proef 4	Meting	Code
G1	ld 12	(b-1)
G3	ld 13	1-3
	wv 7	
Plaatsing proef 5	Meting	Code
G3	ld 14	b-3
	wv 8	
Plaatsing proef 6	Meting	Code
G4	ld 15	b-4
	wv 9	

Tabel 4.1: schema proefuitvoering

4.3 Samenstellen proefgraderingen

De samenstelling van de graderingen die gebruikt worden voor de uitvoering van de proeven wordt bepaald door een aantal voorwaarden. Sommige eigenschappen zullen in hun waarde gelaten moeten worden om de vergelijking met de werkelijkheid niet te verstoren. Eigenschappen die een probleem opleveren in de proefuitvoering zullen gecorrigeerd of omzeild moeten worden. De voorwaarden die invloed hebben op de samenstelling van de proefgraderingen zijn:

- Minimale steenafmetingen. Deze afmetingen worden bepaald door de invloed van capillaire werking in de poriën van de breuksteenlaag. Capillaire werking zal de metingen tijdens de uitvoering van de watervulproef verstoren, waardoor de meetfouten groter zullen worden.

- Maximale steenafmetingen. Deze worden bepaald door de handelbaarheid van het materiaal. Naast de handelbaarheid heeft de steenafmeting van de grootste gradering invloed op het randeffect dat optreedt bij de randen van het meetvat. Bij dezelfde vatgrootte wordt bij toenemende steenafmetingen het randeffect groter. Om het storende effect hiervan niet te groot te laten worden moet er een evenwicht gezocht worden tussen de maximale steenafmeting en de afmeting van het meetvat.
- Vorm van de gradering. In de praktijk worden, waar mogelijk, standaardgraderingen gebruikt. Deze standaardgraderingen bezitten bepaalde waarden voor de steilheid (D_{85}/D_{15}) van de gradering. Om de vergelijking met de praktijksituatie mogelijk te houden moet er rekening gehouden worden met de vorm van de standaardgraderingen die zijn gespecificeerd in o.a. het CIRIA/CUR Manual.
- Stapgrootte tussen de gebruikte graderingen. Uit het schema voor de proefuitvoering is gebleken dat er vier graderingen toegepast worden om voldoende meetgegevens te vergaren. Binnen de minimale en maximale steenafmeting moeten vier graderingen samengesteld worden. De onderlinge verhouding tussen de graderingen kan bepaald worden door de verschillende filterregels die toegepast worden bij het ontwerp van breuksteenconstructies.
- Beschikbaarheid breuksteen. De breuksteen die gebruikt gaat worden in de proefuitvoering zal moeten voldoen aan bepaalde intrinsieke eigenschappen. De voorwaarden aan deze eigenschappen zijn gespecificeerd in het CIRIA/CUR Manual. Er zal onderzocht moeten worden wat de beschikbaarheid is van dit materiaal voor de steenafmetingen die benodigd zijn voor de proefuitvoering.

4.3.1 Bepalen minimale steenafmeting

De capillaire werking in de poriën van de breuksteenlaag kunnen de meetresultaten van het porositeitsverloop beïnvloeden. De ideale situatie tijdens de uitvoering van de proeven is echter een situatie zonder invloed van capillaire werking. Om het effect te kunnen elimineren moet eerst in kaart gebracht worden wat de precieze invloed is. De invloed van de capillaire werking is bepaald door uitvoering van de volgende proef:

Een glazen reservoir is in het midden voorzien van een doorlatende scheidingswand. Deze wand moet ervoor zorgen dat een helft van het reservoir gevuld kan worden met breuksteen, maar water moet zich nog wel vrij kunnen verplaatsen door het hele reservoir. Vervolgens zal het vat met water gevuld worden met als resultaat dat aan de ene kant een vrije waterspiegel ontstaat en aan de andere kant een waterspiegel in de breuksteenlaag. Het verschil tussen de waterspiegels geeft het effect van de capillaire werking weer.

De proef naar capillaire werking in het reservoir is in eerste instantie uitgevoerd met zuiver water. Van deze situatie is een foto gemaakt waarmee de capillaire werking gekwantificeerd kan worden. De foto's van de proeven zijn weergegeven in bijlage 2. Uit de foto van de proef zijn de volgende gegevens te halen (voor elke foto is de capillaire opstijging op 40 plaatsen bepaald; de meetpunten hebben alle dezelfde onderlinge afstand):

Gemiddelde capillaire opstijging water: 5.21mm.

Afmetingen toegepaste breuksteen:

$$D_{15}=6.7\text{mm}$$

$$D_{50}=8.4\text{mm}$$

$$D_{85}=10.1\text{mm}$$

De grootte en vorm van de poriën in een breuksteenlaag zijn moeilijk te bepalen. Om een uitspraak te kunnen doen over de invloed van de capillaire werking zijn de volgende aannamen gedaan:

- In een capillair buisje is de capillaire opstijging van water gelijk aan 29.76 mm. Deze meetwaarde wordt gelijkgesteld aan de capillaire opstijging van water in een breuksteenconstructie waarvan de poriën een afmeting hebben van 1 mm (diameter van het capillaire buisje).
- De gemiddelde afmeting van de poriën in de breuksteenlaag komt overeen met de ruimte tussen drie 'knikkers'. De afmeting van deze ruimte is ongeveer gelijk aan 1/6 deel van de diameter van de knikkers. Voor het materiaal gebruikt in de proef naar capillaire opstijging is de D_{50} gelijk aan 8.4mm. De gemiddelde afmeting van de poriën wordt hiermee: $8.4/6 = 1.4\text{mm}$.

Door een lineair verband te leggen tussen deze twee situaties is het mogelijk om de afmetingen van de poriën te bepalen waarbij de capillaire opstijging kleiner is dan 1mm (1mm wordt voorlopig als maximale meetfout aangehouden). Door de afmeting van de poriën, waarbij een maximale capillaire opstijging optreedt van 1mm, te vermenigvuldigen met zes kan de D_{50} van dit materiaal bepaald worden. Door gebruikmaking van deze veronderstelling kan de volgende conclusie getrokken worden voor steenafmetingen waarbij de capillaire opstijging kleiner is dan 1 mm.

Voor water geldt: $D_{50} > 9\text{mm}$ (mits $D_{85}/D_{15} < 1.51$)

Aan de hand van deze resultaten kan voor de kleinste gradering gekozen worden een D_{50} van 10mm.

De proef ter bepaling van de capillaire opstijging in breuksteenconstructies is niet alleen met zuiver water uitgevoerd. Door toevoeging van het middel 'Teepol' aan water wordt de oppervlaktespanning verminderd. Als gevolg hiervan zal de capillaire opstijging ook verminderen. Het uiteindelijke resultaat van deze proef was dat de D_{50} groter moest zijn dan 8.5mm, wat maar een klein verschil maakt met zuiver water. Vanwege de verschillende aannames die gedaan zijn is de proef herhaald voor de kleinste toegepaste gradering in het onderzoek. Uit deze controle bleek dat de invloed van de capillaire werking inderdaad minder was dan de eis van 1 millimeter. In de bijlage 2 zijn foto's en de meetresultaten van de proef weergegeven. Hier is ook het resultaat zichtbaar van de toevoeging van 'Teepol' aan het water.

4.3.2 Maximale steenafmeting

De bovengrens van de samenstelling van de graderingen wordt aan de ene kant bepaald door de handelbaarheid van de grootste stenen in de modelsituatie en aan de andere kant door de grootte van het randeffect behorende bij die steenafmeting. Met de grootste steen wordt de D_{85} van de grootste toe te passen gradering bedoeld.

Bij de uitvoering van de proeven moeten veel stenen verplaatst worden; daarom mag de zwaarste steen niet zwaarder zijn dan ongeveer 20 kg. De conversie van massa naar zeefmaat wordt bepaald door de volgende definitie:

$$M_y = F_s * \rho_r * D_y^3$$

waarin:

- F_s : vormfactor van een steenstuk. Deze is gemiddeld ongeveer 0.60 voor breuksteen. Voor een kubus heeft F_s de waarde 1.
- ρ_r : dichtheid van het materiaal [kg/m^3]
- D_y : zeefmaat waardoor $y\%$ (m/m) kan passeren [m]
- M_y : de massa van een denkbeeldig steenstuk waarvoor geldt dat $y\%$ (m/m) van het materiaal bestaat uit steenstukken die lichter zijn dan dit steenstuk.

Invullen van 20 kg levert een maximale steenafmeting van ongeveer 230mm ($\rho_r=2700 \text{ kg/m}^3$ en $F_s=0.6$). De maximale steenafmeting van 230mm komt overeen met de D_{85} van de betreffende gradering.

De afmetingen van het meetvat dienen zo klein mogelijk gehouden te worden om zo de steenhoeveelheden te minimaliseren. Naast het streven naar minimale afmetingen ligt de eis dat het randeffect niet te groot mag worden. Het randeffect heeft een storende invloed op de meetresultaten en dient daarom beperkt gehouden te worden. Een maximale correctiefactor voor het randeffect van 1.1 wordt in eerste instantie aangehouden. De correctiefactor en de afmeting van het meetvat bepalen samen de maximaal toe te passen steengrootte. De afmeting van het meetvat is nog niet bepaald, maar uit het verloop van de correctiefactor blijkt dat de maximale steenafmeting kleiner moet blijven dan ongeveer 185 mm. De berekening van het randeffect en de onderbouwing van de maximale steenafmeting zijn weergegeven in bijlage 3. Beperking van de afmeting van het vat en het maximaal toegestane randeffect zijn bepalend voor de maximale steenafmeting. Uit de combinatie volgt een D_{85} van maximaal 185 millimeter voor de grootste gradering.

4.3.3 Vorm van de gradering.

De vorm van de gradering kan weergegeven worden door de factor D_{85}/D_{15} en is mede bepalend voor de grootte van de porositeit in een breuksteenlaag. Volgens Bregman (1998) is de invloed niet groot, maar wel degelijk aanwezig. Om ervoor te zorgen dat deze invloedsfactor geen storend effect heeft op de meetresultaten moet het effect uitgesloten worden. Een manier om het storende effect uit te sluiten is om deze constant te houden voor alle toe te passen graderingen.

In de praktijk wordt veelvuldig gewerkt met de standaardgraderingen die gepresenteerd worden in o.a. de NEN-norm 5180 tot 5186 (1990). Voor de standaard lichte en zware graderingen loopt de factor D_{85}/D_{15} uiteen van ongeveer 1.9 tot 1.15. Voor de uitvoering van de proeven is gekozen voor een vorm die kenmerkend is voor de standaardgraderingen en overeenkomt met de vorm van de standaardgradering 40-200 kg. De factor D_{85}/D_{15} , van deze gradering, is gelijk aan 1.57.

De standaard lichte en zware graderingen worden in de norm weergegeven op massabasis. Voor de samenstelling van de graderingen is het handiger deze samenstelling weer te geven op basis van de zeefmaat. Voor de proefuitvoering

zullen graderingen samengesteld moeten worden uit bestaande en/of beschikbare graderingen. De samenstelling op massabasis betekent dat elk steentje wordt gewogen en aan de hand van deze steengewichten wordt de gradering samengesteld. Door gebruik te maken van de zeefmaten moeten de stenen gezeefd worden om de fracties samen te stellen. Dit zeven is echter veel minder bewerkelijk waardoor de keuze is gevallen op de zeefmaten.

De standaardgraderingen worden in de NEN-Norm (1990) met een bepaalde bandbreedte aangegeven. Als de desbetreffende gradering binnen deze bandbreedte valt wordt er voor die gradering aan de norm voldaan. Voor de samenstelling van het proefmateriaal is de 40-200 kg gradering met de bijbehorende minimum- en maximumgrenzen uitgezet in een spreadsheet. De samenstelling van de graderingen voor de uitvoering van de proeven wordt bepaald door het verschuiven van de kromme over de zeefmaat. Op deze manier wordt een gradering bepaald die precies dezelfde vormeigenschappen bevat als de standaardgradering. De vorm van standaardgradering 40-200 kg is in figuur 4.3 weergegeven.

Vorm standaard gradering 40-200 kg



Figuur 4.3: vorm voor proefgradering is gelijk aan standaardgradering 40-200 kg

De lijn 'gemiddelde' zal gebruikt worden voor de samenstelling van de vorm van de proefgraderingen.

4.3.4 Stapgrootte tussen proefgraderingen.

De stapgrootte tussen twee opeenvolgende graderingen wordt bepaald door de situaties die optreden in de praktijk. Breuksteenconstructies worden in de praktijk in verschillende lagen opgebouwd, waarbij eisen bestaan voor de onderlinge verhoudingen tussen deze lagen. In werkelijkheid wordt de laagopbouw bepaald door een aantal criteria, welke verschillend zijn voor de gekozen manier van aanpak. Zo kan een filterconstructie onworpen worden als een geometrisch gesloten of een geometrisch open filter. Voor de samenstelling van de proefgraderingen wordt

uitgegaan van de criteria die gelden voor een geometrisch gesloten filter. De criteria die gelden voor het geometrisch open filter worden niet gebruikt omdat in deze criteria de kritieke stroomsnelheid gebruikt wordt. Door gebruik te maken van de geometrisch gesloten criteria worden er geen extra variabelen ingebracht zodat er gewerkt kan worden met een eenduidig criterium. De criteria voor een geometrisch gesloten filter zijn:

$$\text{Stabiliteit: } \frac{d_{15F}}{d_{85B}} < 5 \quad \text{Doorlatendheid: } \frac{d_{15F}}{d_{15B}} > 5 \quad \text{Interne stabiliteit: } \frac{d_{60}}{d_{10}} < 10$$

In eerste instantie wordt voor de stapgrootte de eis van de stabiliteit gebruikt. Dit criterium is meestal doorslaggevend en de andere twee kunnen na afloop gecontroleerd worden. Dit betekent dat de stapgrootte die ontstaat tussen de D_{15} van het filter en de D_{85} van de basis een waarde krijgt van 4-5.

Bij de opbouw van golfbrekers wordt echter een andere opbouw gebruikt dan de bovenstaande methode voor de geometrisch gesloten filters. In het 'Shore Protection Manual' wordt gezegd dat de gewichtsverhouding (verhouding tussen M_{50}) tussen armourlaag en eerste filterlaag een waarde moet hebben van 1/10 tot 1/15. Dit is echter wel een heel erg conservatieve benadering en een gewichtsverhouding van 1/25 moet nog mogelijk geacht worden. Dit betekent dat de verhouding van de D_{n50} ligt tussen de 2 en de 3. De reden voor de verkleining van de filterstap in onder andere golfbrekers kan gemotiveerd worden door de volgende argumenten:

- In golfbrekers wordt niet geaccepteerd dat sommige van de kleinere korrels van de filterlaag kunnen ontsnappen uit een laagdikte van slechts twee stenen dik. De grootte van deze stenen is nog zo groot dat er serieuze zakkingen kunnen ontstaan.
- Door de begrenzing van de laagdikte tot ongeveer 2 maal D_{n50} kan er in de laag geen boogvorming ontstaan die de kleinere korrels tegen kunnen houden.
- Door het cyclische karakter van de golfbelastingen zullen de bogen die wel ontstaan zijn verdwijnen bij verandering van de stromingsrichting.
- Fijner materiaal in de filterlagen heeft een negatief effect op de stabiliteit van de armourstenen. Door het fijnere materiaal is de doorlatendheid van deze laag kleiner waardoor de P-factor in de Van-der-Meer-formule lager uitvalt. Door de kleinere P wordt de stabiliteit van de armourlaag verkleind.
- Fijner materiaal in de filterlaag betekent dat het oppervlak van deze laag minder ruw is in vergelijking met grover filtermateriaal. Vermindering van ruwheid van de filterlaag betekent voor de armourlaag minder 'interlocking' waardoor de stabiliteit van deze laag verkleind wordt.

Door de verschillende aanpak van golfbrekers en filters zijn er twee manieren waarop een filter samengesteld kan worden. Voor de stapgrootte tussen de proefgraderingen is rekening gehouden met deze situaties. Er is gekozen om twee graderingen samen te stellen met een stapgrootte van 4 tot 5 voor de verhouding D_{15F}/D_{85B} . Verder worden er minimaal twee graderingen samengesteld die gescheiden worden door een stapgrootte van 2,4 tot 2,7 maal D_{50} .

4.3.5 Eigenschappen proefmateriaal.

Er zijn nog verschillende eigenschappen die betrekking hebben op het proefmateriaal. Hierbij kan gedacht worden aan dichtheid, ruwheid, sterkte, verweringsgraad en de lengte/dikte verhouding.

De intrinsieke eigenschappen hebben geen grote invloed op de proefresultaten, maar moeten wel goed in de gaten gehouden worden. Bij gebruik van de standaardgraderingen zijn deze eigenschappen gestandaardiseerd. Het materiaal dat gebruikt gaat worden voor de proefgraderingen moet dus ook voldoen aan deze normen. De eigenschappen kunnen getest en bepaald worden volgens de testmethoden die zijn weergegeven in de norm NEN 5180-5185 (1990).

Een eigenschap die een grotere invloed heeft op de porositeit is de lengte/dikte verhouding. Volgens Bregman (1998) is er een verschil in porositeit van 5% tussen onregelmatige ($1 < l/d < 2$) en platte steenstukken ($l/d > 3$). Voor de verschillende standaardgraderingen zijn ook eisen opgesteld voor de vorm van de steenstukken. Om te voldoen aan de eis voor standaardgraderingen moet de lengte/dikte verhouding van de proefgraderingen kleiner zijn dan 2,5 tot 3. De eigenschappen van het proefmateriaal zijn getest conform de hieraan gestelde eisen en zijn weergegeven in bijlage 4.

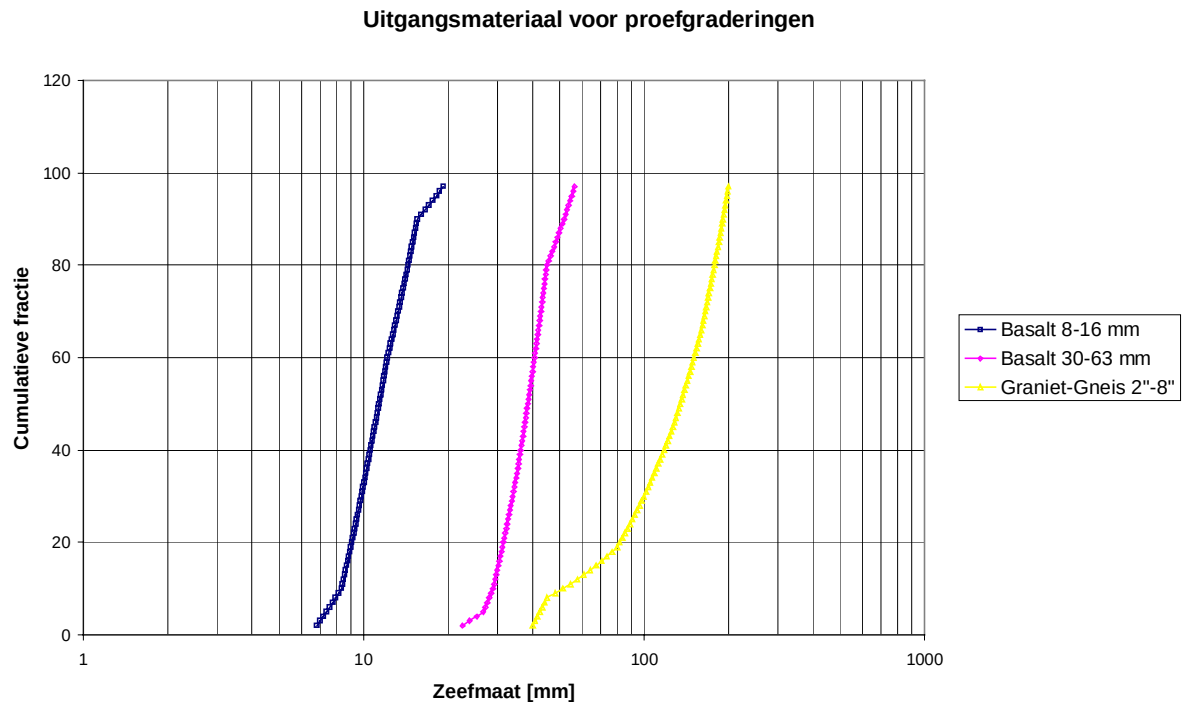
4.3.6 Keuze proefmateriaal.

De keuze voor het proefmateriaal is deels afhankelijk van de eerder in dit hoofdstuk beschreven eisen. Naast deze eisen moet uit het uitgangsmateriaal het proefmateriaal gezeefd kunnen worden. Dit betekent dat er binnen het proefmateriaal voldoende materiaal (met de juiste steenafmetingen) beschikbaar moet zijn om de proefgraderingen te kunnen samenstellen. Voor het zoeken naar het juiste materiaal is een opzet gemaakt voor de onderlinge verschillen tussen de proefgraderingen. Aan de hand van deze opzet is gekeken of de proefgraderingen uit het uitgangsmateriaal te zeven zijn.

In samenwerking met een leverancier van Van Oord ACZ (Joosten Bouwstoffen Werkendam) is het gelukt om het juiste materiaal te vinden. Er zijn drie bestaande graderingen gevonden waaruit het mogelijk is om de vier proefgraderingen te zeven. De drie materialen en hun afmetingen zijn:

Basalt 8-16 mm
Basalt 30-63 mm
Graniet-Gneis 2"-8"

Weergeven van het uitgangsmateriaal door hun zeefkrommes geeft meer inzicht in de vorm. De zeefkrommes zijn afgebeeld in figuur 4.4. Nu het uitgangsmateriaal bekend is kunnen de proefgraderingen exact samengesteld worden.



Figuur 4.4: zeefkromme uitgangsmateriaal

4.3.7 Ontwerp proefgraderingen

Alle voorwaarden voor de samenstelling van de proefgraderingen zijn nu bepaald. Aan de hand van deze voorwaarden kunnen de proefgraderingen worden samengesteld. De voorwaarden waaraan de proefgraderingen moeten voldoen zijn:

minimale steenafmeting:	10 mm
maximale steenafmeting:	185 mm
vorm gradering (D_{85}/D_{15}):	1.57 (de vorm wordt beschreven door de vorm van standaardgradering 40-200 kg)
stapgrootte tussen proefgraderingen:	eis filter: $D_{15F}/D_{85B} < 5$
vorm individuele steen:	eis golfbreker: verhouding D_{50} 2.4-2.7
intrinsieke eigenschappen:	lengte-dikte verhouding: $< 2.5-3$
uitgangsmateriaal:	volgens eisen aan standaardgraderingen
	Basalt 8-16mm
	Basalt 30-63 mm
	Graniet-Gneis 2''-8''

De intrinsieke eigenschappen en de lengte-dikte verhouding zijn getest voor de uitgangsgraderingen. Uit de testresultaten blijkt dat het uitgangsmateriaal voldoet aan de hiervoor gestelde eisen, die zijn weergegeven in de norm NEN 5180-5186 (1990). De resultaten van deze tests zijn weergegeven in bijlage 4.

De belangrijkste eisen voor het samenstellen van de proefgraderingen zijn de minimale en maximale steenafmeting, de vorm van de gradering, de stapgrootte tussen de graderingen en het uitgangsmateriaal. Binnen deze voorwaarden is het mogelijk om vier graderingen samen te stellen, waarbij voldaan is aan de eis voor verschillende onderlinge stapgroottes zoals deze voorkomen bij filterconstructies en

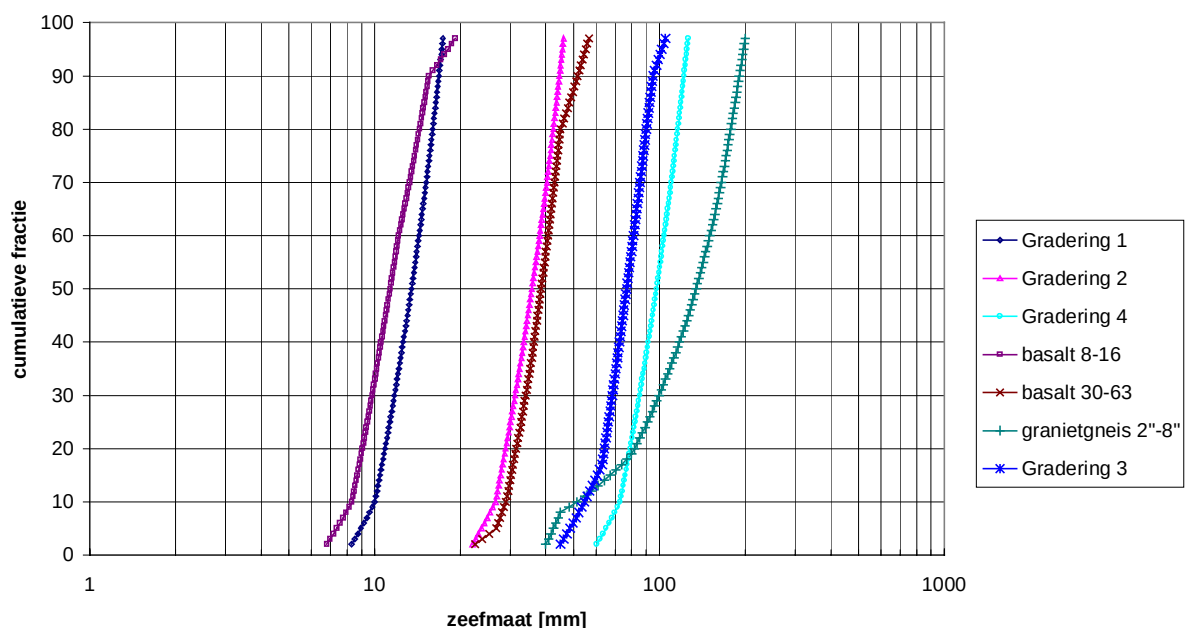
golfbrekers. De proefgraderingen worden in tabel 4.2 weergegeven aan de hand van de zeefmaten.

Gradering	1	2	3	4
D_v				
2	8,3	22,0	45,0	60,4
15	10,5	27,7	60,6	76,0
50	13,5	35,7	76,8	97,8
85	16,4	43,5	92,5	119,2
97	17,4	46,1	105,0	126,3
D_{n50}	11,3	30,0	64,5	82,2

Tabel 4.2: zeefmaten proefgraderingen

Binnen de voorwaarden was het niet mogelijk om meer dan vier graderingen samen te stellen. Deze vier graderingen moeten echter wel genoeg informatie kunnen opleveren om de te onderzoeken invloeden te kunnen beschrijven. De mogelijkheid om de proefgradering te kunnen zeven is onderzocht door de zeefkrommes van de uitgangsgaderingen te vergelijken met de proefgraderingen. Deze vergelijking wordt weergegeven in figuur 4.5.

Proefgraderingen vergeleken met uitgangsgaderingen



Figuur 4.5: vergelijking zeefkrommes uitgangsmateriaal en proefgraderingen

Uit de grafiek is goed te zien dat bij het zeven van graderingen 1 en 2 geen problemen zullen ontstaan wat betreft het uitgangsmateriaal. Voor de samenstelling van gradering 3 en 4 zal echter veel meer uitgangsmateriaal gezeefd moeten worden. Uit de grafiek valt af te lezen dat alleen de kleinste 50% van het uitgangsmateriaal gebruikt kan worden. Dit leverde tijdens het zeven van de graderingen dan ook problemen op. Het samenstellen van gradering 4 liep naar wens, maar voor bepaalde zeefintervallen van gradering 3 was niet genoeg materiaal beschikbaar uit het uitgangsmateriaal. Als gevolg hiervan is voor de vorm van gradering 3 dan ook iets

afgeweken van de standaardvorm die eerder bepaald is. De steilheid (D_{85}/D_{15}) van de standaard gradering had een waarde van 1.57, voor gradering 3 is deze waarde iets verkleind naar 1.53. Uit de resultaten van het onderzoek van Bregman (1998) komt naar voren dat de invloed van de steilheid van de gradering op de porositeit niet groot is. Het kleine verschil dat voor gradering 3 optreedt zal naar verwachting geen problemen opleveren in de resultaten.

De onderlinge verhoudingen tussen de proefgraderingen worden op twee manieren weergegeven. Het onderscheid is gemaakt in de verhouding D_{15F}/D_{85B} en in de verhouding tussen de D_{50} van beide graderingen. De onderlinge verhoudingen tussen de vier graderingen zijn in tabel 4.3 weergegeven.

Verhouding in Tussen graderingen	D_{15F}/D_{85B}	D_{50}/D_{50}
1 en 2	<u>1,69</u>	2,65
1 en 3	3,69	<u>5,70</u>
1 en 4	4,63	<u>7,26</u>
2 en 3	<u>1,39</u>	2,15
2 en 4	1,74	2,74

Tabel 4.3: onderlinge verhoudingen tussen proefgraderingen

In de onderlinge verhoudingen komen ongebruikelijke waarden voor. De cursief gedrukte en onderstreepte verhoudingen zijn verhoudingen waarop de graderingen niet zijn samengesteld. De onderlinge verhouding is dan gebaseerd op de andere verhouding. Toch kunnen de kleinere onderlinge verhoudingen meer informatie bieden. Aan de hand van deze verhoudingen kan gecontroleerd worden of bereikte resultaten ook opgaan voor grotere of kleinere verhoudingen en dus een algemene conclusie kunnen verdedigen (zoals bijvoorbeeld tussen graderingen 2 en 4).

4.3.8 Samenstellen proefgraderingen

De proefgraderingen zullen, zoals eerder aangegeven, samengesteld worden op zeefmaat. Door toepassing van de zeefmethode wordt het samenstellen van de proefgraderingen minder bewerkelijk (totale steenbehoefte voor de vier graderingen is ongeveer 2500 kg.). Volgens het CIRIA/CUR Manual mogen alleen de standaard fijne graderingen samengesteld worden door zeven. De maximale zeefopening die gebruikt wordt voor de standaard fijne graderingen is gelijk aan 250 mm. De maximale afmeting van gradering 4 valt binnen deze 250 mm. Het CIRIA/CUR Manual geeft verder de volgende richtlijnen voor de samenstelling van de zeven:

- de zeven moet worden uitgevoerd als draadzeven,
- de draden moeten onder een rechte hoek met elkaar verbonden worden (voorkeur lassen),
- bakken waarop de zeven geplaatst kunnen worden hebben een minimale inhoud van 0.1m^3 .

Voor het samenstellen van de proefgraderingen is gekozen voor een minimum van vier zeven per gradering. Door toepassing van vier zeven zijn er in de zeefkromme van de gradering drie zeefintervallen te onderscheiden. Aan de hand van de zeefkromme is te bepalen welk percentage van de gradering in de verschillende

zeefintervallen valt. Als het totale gewicht per gradering bekend is, is ook te bepalen hoeveel kilogram breuksteen er per zeefinterval gezeefd moet worden. Het zeven is uitgevoerd volgens de richtlijnen in het CIRIA/CUR Manual. Verdere uitwerking van de zeefintervallen en steenbehoefte per zeefinterval zijn weergegeven in bijlage 5.

4.3.9 Steenbehoefte

De graderingen die gebruikt worden voor de proefuitvoering zijn bepaald. De laagdikten die toegepast worden tijdens de proefuitvoering zijn mede bepalend voor de steenbehoefte. De laagdikten zijn bepaald aan de hand van de volgende uitgangspunten:

- Uit het proefschema volgt dat de graderingen in twee keer geplaatst worden. De plaatsing van deze halve gradering moet een voldoende grote laagdikte opleveren om de metingen te kunnen uitvoeren. Verwacht wordt dat de invloeds lengten van het porositeitsverloop in de boven- en onderkant van de laag ongeveer $0.75 \cdot D_{n50}$ bedragen. Om een goed onderscheid te kunnen maken tussen de twee invloeds lengten wordt er gekozen voor een minimale laagdikte van $3 \cdot D_{50}$. Per gradering moet er voldoende steen aanwezig zijn om deze laagdikte twee keer te kunnen plaatsen. Dit betekent minimaal $2 \cdot 3 = 6 \cdot D_{n50}$.
- Voor de twee kleinste graderingen levert $3 \cdot D_{n50}$ nog steeds een kleine laagdikte op. Een grotere laagdikte is noodzakelijk om verschillende laagdikten met elkaar te kunnen vergelijken. Een laagdikte van 10 centimeter (hierop wordt ook de maximale meetfout bij de oppervlaktemeting gebaseerd) wordt voldoende geacht. De twee kleinste graderingen hebben 20 centimeter materiaal nodig om aan de bovenstaande richtlijn te voldoen.

De totale steenbehoefte kan bepaald worden als de afmetingen van het meetvat bepaald zijn. De berekening van de steenbehoefte wordt echter alleen in de bijlage weergegeven en is te vinden in bijlage 5.

4.4 Ontwerp proefopstelling

4.4.1 Functieanalyse meetvat

Het ontwerp van de proefopstelling kan het best weergegeven worden aan de hand van de functieanalyse. Deze functieanalyse kan vervolgens uitgewerkt worden tot concrete eisen aan de proefopstelling die individueel uitgewerkt moeten worden. De functies waarover het meetvat moet beschikken zijn:

- nauwkeurige uitvoering van meting breuksteenoppervlak en waterniveau,
- uitvoering voorgeschreven proeven zonder te grote of storende vervormingen van het meetvat,
- eenduidige manier van plaatsing proefmateriaal en water in het meetvat,
- eenvoudige manier voor verwijderen proefmateriaal en water na de uitvoering van de proef.

Deze functies stellen verschillende eisen aan het ontwerp van de proefopstelling. De eisen die voortkomen uit de functieanalyse hebben betrekking op:

- dimensies en sterkte van het meetvat,
- plaatsing breuksteen,
- toevoegen water tijdens proefuitvoering,
- meten breuksteenoppervlak,
- meten waterniveau.

In het ontwerp van de proefopstelling zullen de bovenstaande eisen stuk voor stuk uitgewerkt worden in waarden, procedures en eigenschappen die het meetvat moet bezitten.

4.4.2 Vorm van het meetvat

De keuze voor de vorm van het meetvat kan bepaald worden door drie factoren. De invloed van deze factoren zal vergeleken worden voor een rond en een vierkant meetvat. In deze vergelijking wordt de zijde van het vierkante meetvat gelijk verondersteld aan de diameter van het ronde meetvat. De factoren die de keuze bepalen zijn het randeffect, de inhoud en de vervorming.

- Invloed randeffect.
De formule die afgeleid is voor de bepaling van de randeffecten is gebaseerd op een rond vat. In eerste instantie is voor de bepaling van het randeffect uitgegaan van een rechte wand, maar deze benadering mag ook toegepast worden op vaten met een ronde wand mits de kromming van de wand veel kleiner is dan de kromming van de gebruikte stenen. De eis van de kromming kan als volgt in formulevorm uitgedrukt worden: $1/R_{\text{vat}} \ll 1/R_{\text{steen}}$.
Een probleem dat optreedt bij een rechthoekig vat is dat de formule geen extra correctie bevat voor de hoeken van het vat. Het is niet bekend of de invloed van de hoeken een grote invloed heeft op de grootte van het randeffect. Deze invloed brengt dus een onzekere factor in de bepaling van de porositeit met zich mee.
- Verschil in inhoud.
Er treden verschillen op tussen de inhoud van ronde en vierkante vaten. Deze verschillen in volume hebben geen storende invloed op de uitvoering van de proeven, maar wel op de hoeveelheid benodigd materiaal. De inhoud van een vierkant vat is 21,5% groter dan de inhoud van een rond vat.
- Sterkte en vervorming.
Het meetvat moet in staat zijn om de belasting te dragen die uitgeoefend wordt door de maximale hoeveelheid water en steen die in het meetvat geplaatst wordt. Deze maximale belasting zorgt voor vervormingen van het meetvat die geen invloed mogen hebben op de meetresultaten van de proef. Als de sterkte van een vierkant en een rond meetvat worden vergeleken is te zien dat de wanden van het vierkante vat worden belast op buiging, dwarskracht en normaalkracht. In het geval van het ronde meetvat is de belasting altijd loodrecht op de wand gericht wat alleen normaalkrachten oplevert in de wanden. Aangezien normaalkracht door ijzer (waarschijnlijk de keuze voor het materiaal van het meetvat) veel beter

opgenomen kan worden dan buiging zal het ronde meetvat sterker zijn en minder vervormen bij dezelfde belastingen en dimensies.

De bovenstaande factoren laten een voorkeur zien voor het ronde meetvat. Het enige aandachtspunt blijft de eis die het randeffect met zich meebrengt. De kromming van het meetvat moet veel kleiner zijn dan de kromming van de gebruikte stenen.

4.4.3 Dimensies meetvat

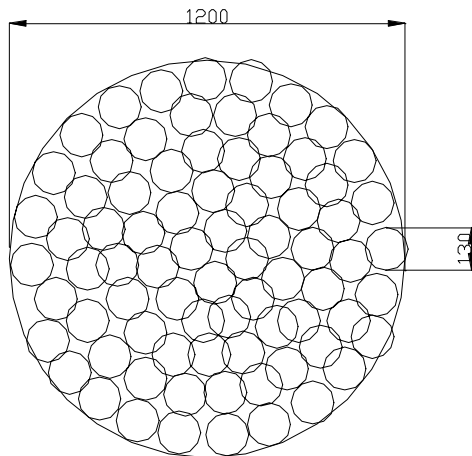
De dimensies van het meetvat worden bepaald door de toe te passen breuksteengraderingen en de daaruit volgende belastingen. De dimensies van het meetvat worden vastgelegd door factoren zoals het randeffect, sterkte- en vervormingseisen en de maximale totale laagdikte die wordt toegepast tijdens de uitvoering van de proeven.

4.4.3.1 Diameter meetvat.

Het randeffect is de bepalende factor voor de minimale diameter van het meetvat. De grootste gradering die toegepast wordt is maatgevend voor de grootste correctie door het wandeffect. Het wandeffect wordt bepaald door de D_{85} van de desbetreffende gradering. Voor de grootste toe te passen gradering geldt: $D_{85} = 119.2\text{mm}$. Bij de samenstelling van de gradering is geëist dat de correctiefactor door het randeffect niet groter mag zijn dan 1,1. De combinatie van deze steengrootte en de maximale correctiefactor geven als resultaat een minimale diameter voor het meetvat. Bij toepassing van deze twee eisen moet voor de diameter van het meetvat minimaal 1300mm worden aangehouden.

Bij verkleining van de diameter blijkt dat de correctiefactor nauwelijks oploopt. Om de steenhoeveelheden benodigd voor de proef toch enigszins beperkt te houden is gekozen voor een diameter van 1200 mm. Bij deze diameter zal de correctiefactor voor het wandeffect niet veel groter worden. De kleine verhoging zal bovendien gecorrigeerd worden door het feit dat de randeffecten op de boven- en onderkant van de breuksteenlaag niet gecorrigeerd hoeven te worden. Deze randeffecten worden gemeten door de watervulproef.

Ter controle is in figuur 4.6 te zien hoe de randeffecten zijn als het vat met diameter = 1200 mm gevuld wordt met 'stenen' met $d = 130\text{ mm}$. In de figuur is goed te zien dat deze combinatie van steendiameter en vattendiameter geen grote correcties oplevert voor het randeffect (Poriën langs de randen van het meetvat zijn niet significant groter dan die in het midden van het vat. Toepassing van deze correctie voor het wandeffect is gebaseerd op de aanname dat $1/R_{\text{vat}} \ll 1/R_{\text{steen}}$).



Figuur 4.6: controle invloed randeffect bij grootste steendiameters

4.4.3.2 De dikte van de wanden.

Voor de bepaling van de wanddikte is in de bijlage 6 een geschematiseerde berekening gemaakt van de vervorming van de wanden onder maximale belasting. Bij de berekening van de vervorming is uitgegaan van een wanddikte van 20mm. Door de vervormingen van de wand ontstaat een volumetoename van 0.000375%. Dit percentage is zo klein dat de wand wellicht dunner uitgevoerd kan worden zonder dat de vervorming mee gaat spelen in de meetresultaten. Bij een wanddikte van 10 mm is de volumetoename gelijk aan 0.00075%. Deze toename is zo klein dat zij nog steeds verwaarloosd kan worden. De wanddikte wordt echter niet kleiner gekozen dan deze 10mm, omdat het vat ook vormvast moet zijn.

4.4.3.3 De dikte van de vloer.

De dikte van de vloer is afhankelijk van de draagconstructie waar de vloer op komt te steunen. Deze draagconstructie zal als een vierkant raster de vloerplaat van het meetvat ondersteunen. De vloerplaat kan dus in alle richtingen belasting afdragen naar de ondersteuningsconstructie.

De vloerconstructie wordt geschematiseerd als een ligger (zie bijlage 6) die slechts in één richting belasting afdraagt. Dit is een conservatieve benadering van de situatie die in werkelijkheid optreedt, omdat er nu slechts in één richting belasting wordt afgedragen. Als de constructie voldoet aan deze conservatieve benadering zullen er in werkelijkheid geen problemen optreden.

De maximale doorbuiging van de vloer mag niet meer bedragen dan 0,5 mm. Als de vloer 0,5 mm zou zakken, dan wordt het volume van het vat ongeveer 0.05% groter. Deze waarde is klein genoeg, zodat de invloed van de doorbuiging van de vloer geen consequenties heeft voor de meetresultaten. Aan de hand van deze eis zijn de benodigde vloerdikte en de ondersteuningsconstructie te bepalen.

Vloerdikte:	minimaal 10mm.
Ondersteuningsbalken h.o.h.:	400 mm.

De berekening van de vloerdikte en de opbouw van de ondersteuningsconstructie worden weergegeven in de bijlage 6.

4.4.3.4 De hoogte van het meetvat

De hoogte van het meetvat wordt bepaald door het totaal van laagdikten dat in het meetvat geplaatst moet worden. Met behulp van de gegevens van de toe te passen steengraderingen, minimale laagdikten en uitvoeringsvolgorden is het mogelijk om de minimale hoogte te bepalen. De totale dikte van de toe te passen breuksteenlagen is gelijk aan 787mm. Het meetvat moet op basis van deze gegevens en een kleine marge minimaal een hoogte hebben van 850 mm.

4.4.3.5 Oriëntatie van het meetvat.

Het meetvat moet zo geplaatst en eventueel bijgesteld kunnen worden dat het precies horizontaal staat. Deze eis komt voort uit het feit dat de laagscheidingen in het meetvat zo horizontaal mogelijk moeten zijn om metingen door de watervulmethode niet te verstoren. De ondersteuningsconstructie van de vloer moet zo uitgerust worden dat deze kan bijdragen aan de horizontale afstelling. De verbinding tussen vloer en wanden moet loodrecht uitgevoerd worden.

4.4.3.6 Resumé dimensies meetvat

Het uitwerken van de eisen heeft geleid tot de volgende dimensies voor het meetvat:

- vorm: rond
- diameter: 1200 mm.
- dikte wanden: 10 mm.
- dikte vloer: 10 mm. (hoh afstand ondersteuningsconstructie 400mm)
- hoogte meetvat: 850 mm.
- oriëntatie: mogelijkheden tot vlakstelling meetvat

4.4.4 Uitvoeringseisen aan het meetvat

- Toevoegen van breuksteen aan het meetvat.
Het vat moet toegankelijk zijn om de benodigde hoeveelheid op de voorgeschreven manier te kunnen plaatsen. Voor het meetvat betekent dit dat de opening/bovenkant van het vat geheel vrij moet zijn van obstakels (dit stelt eisen aan de constructie waarmee het breuksteenoppervlak gemeten gaat worden). Door deze eis is er bovendien genoeg ruimte voor het verwijderen van het proefmateriaal na afloop van de proef.
- Toevoegen van water aan het meetvat.
Het water moet in vooraf gedoseerde hoeveelheden aan het meetvat toegediend kunnen worden. Het water mag echter niet in het meetvat geplaatst worden via de breuksteenlaag (een deel van het water zou in de poriën tussen de stenen kunnen

blijven hangen waardoor dat volume niet meewerkt aan het verhogen van de waterspiegel). Het water kan bijvoorbeeld via een van de stijgbuizen aan het vat toegevoegd worden. Op deze manier wordt het vat via de onderkant gevuld en kan er geen water in de poriën blijven hangen.

- Verwijderen van het water uit het meetvat.
Het water moet ten alle tijde uit het meetvat gelaten kunnen worden. Dit betekent dat er in de bodem van het meetvat een af te sluiten afvoer moet zitten waardoor het water weg kan lopen.

4.4.5 Meting van het waterniveau

Voor de uitvoering van de meting van het waterniveau zijn twee stijgbuizen nodig. Het maximale bereik van de peilnaald is niet groter dan 50 cm, waardoor het verloop van het waterniveau in twee stappen van ongeveer 45 cm gemeten moet worden. Hiervoor moet stijgbuis 1 een hoogte krijgen van 45 cm vanaf de bodem van het meetvat en stijgbuis 2 moet doorlopen tot aan de bovenkant van het meetvat (de onderkant van stijgbuis 2 bevindt zich in ieder geval onder de bovenkant van stijgbuis 1, en de onderkant van stijgbuis 1 bevindt zich onder het bodemniveau van het meetvat). Verder worden nog de volgende eisen gesteld aan de stijgbuizen:

- De twee stijgbuizen moeten als communicerende vaten met het meetvat verbonden zijn. Dit betekent dat de onderkant van de stijgbuizen via een slang verbonden moet worden met de onderkant van het meetvat. De verbinding met de onderkant van het meetvat is noodzakelijk om de stijghoogte te kunnen meten vanaf de bodem van het meetvat.
- De diameter van de stijgbuizen moet ongeveer 10 cm zijn. Bij deze afmetingen zal er geen capillaire werking in de buizen optreden en bovendien is er ruimte genoeg om de meting met behulp van de peilnaald uit te voeren.
- Direct boven het uiteinde van de stijgbuizen moet een horizontaal plateautje geplaatst worden waarop de peilnaald geplaatst kan worden. De oriëntatie en de afmetingen van het plateautje zorgen ervoor dat de peilnaald verticaal boven de stijgbuis bevestigd kan worden.

4.4.6 Meting van het breuksteenoppervlak

Voor de meting van het breuksteenoppervlak wordt gebruik gemaakt van een meetstaf. Voor de toepassing van de meetstaf in de proefopstelling worden de volgende eisen gesteld:

- De meetstaf moet op elke plaats in het meetvat verticaal op de breuksteenlaag geplaatst kunnen worden.
- De meetstaf moet voorzien zijn van een millimeterverdeling.
- De meetstaf moet uitgerust kunnen worden met een halve bol en met een pinvormig voetstuk.

De meting zal plaatsvinden met behulp van een constructie die weergegeven is in 'procedure meting breuksteenoppervlak'. De precieze specificaties van deze constructie volgen uit de tekening van het meetvat.

4.4.7 Maximaal toegestane meetfouten

Uitgangspunt bij de bepaling van de meetnauwkeurigheden is een toe te laten meetfout van maximaal 1%. Deze waarde is gekozen aan de hand van de huidige spreiding van de bepaling van de porositeit; deze spreiding bedraagt momenteel ongeveer 5%. Door te kiezen voor een maximale meetfout van 1% is het mogelijk om de bandbreedte waarin de porositeit voor een bepaalde constructie zich bevindt te verkleinen.

4.4.7.1 Meetfout meting breuksteenoppervlak

De meetfout die gemaakt wordt bij de meting van het breuksteenoppervlak is het gevolg van de nauwkeurigheid van het meetinstrument. De meting van het breuksteenoppervlak betreft een meting van een bepaalde laagdikte. Deze laagdikte heeft dus ook invloed op de meetfout die gemaakt wordt. De minimale laagdikte die gemeten moet worden is ongeveer 100 mm (laagdikten worden niet kleiner dan deze 100mm.). Een maximaal toegestane meetfout van 1% betekent voor het meetinstrument dat dit nauwkeuriger moet kunnen meten dan 1% van 100 millimeter, wat overeenkomt met 1.00 millimeter.

Elke individuele meting heeft een maximale fout van 1%. De maximale fout van het gewogen gemiddelde van de meetpunten is dan ook gelijk aan 1% (de metingen zijn onafhankelijk en elke meting heeft een zelfde maximale fout). Het gewogen gemiddelde van de meetpunten wordt gebruikt om de grens van de breuksteenlaag aan te geven. De keuze om op deze manier de grens van de breuksteenlaag aan te geven is gemaakt, omdat in verschillende artikelen die de surveymethoden beschrijven het gewogen gemiddelde als uitgangspunt wordt genomen dat vervolgens aangevuld wordt door een ruwheidparameter (zie o.a. Latham en Poole, 1986).

Voor de meting van het breuksteenoppervlak moet een meetinstrument gebruikt worden dat voldoet aan de bovenstaande eisen (maximale meetfout van 1.00mm). In werkelijkheid wordt het niveau gemeten met behulp van een waterpasinstrument dat de meetstaf afleest. Deze opstelling zal ook gebruikt worden om het breuksteenniveau in het meetvat te bepalen. De nauwkeurigheid van het waterpasinstrument is minimaal 1.00mm waarmee het instrument voldoet aan de gestelde eisen. Voor de meetstaf betekent dit dat de schaalverdeling hierop ook in millimeters moet zijn.

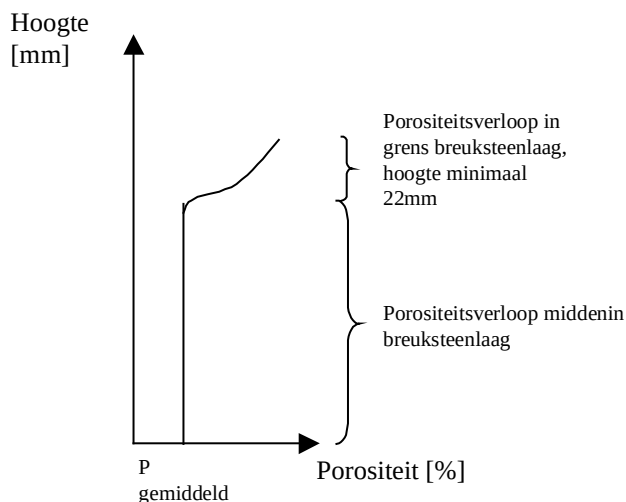
4.4.7.2 Meetfout watervulmethode

De meetfout die gemaakt wordt bij de uitvoering van de watervulmethode is afhankelijk van twee factoren. In eerste instantie moet het toegevoegde volume water gemeten worden en ten tweede moet de stijging van het waterniveau in het meetvat door het toegevoegde water bepaald worden.

De toevoeging van water wordt uitgevoerd in stappen van 0.5 tot 10 liter. Deze volumens worden bepaald door weging van het water en bepaling van de dichtheid. Gebruikmakend van een weegschaal met een nauwkeurigheid van 1 gram wordt de volgende meetfout gemaakt: 0.5 liter = 500 gram; (deze relatie is afhankelijk van samenstelling en temperatuur van het water) de fout is dan 1 gram op

500 gram = $1/500 = 0.2\%$. De fout in het watervolume zal in werkelijkheid iets groter worden omdat de dichtheid van het water nog bepaald moet worden. De meetfout blijft echter ruim onder de grens van de 1%.

De belangrijkste metingen van deze proef betreffen de metingen rondom de grenzen van de breuksteenlaag waar de porositeit niet meer constant zal zijn. Het kritieke punt ligt bij de metingen van de boven- en onderkant van de laag en deze gebieden hebben een dikte van ongeveer $2 \cdot D_{n50}$. Voor de kleinste toe te passen gradering komt $2 \cdot D_{n50}$ overeen met $\pm 22\text{mm}$. Over deze 22mm moeten verschillende metingen gedaan worden om het verloop van de porositeit te bepalen. De peilnaald waarmee het waterniveau gemeten gaat worden heeft een nauwkeurigheid van 0.1mm. Deze fout wordt dus elke meting gemaakt en heeft geen betrekking op de gemeten laagdikte, kortom het is een absolute fout.



Figuur 4.7: porositeitsverloop over de laagdikte

In figuur 4.7 is goed te zien dat er sprake is van een absolute fout. Het interessante deel van het porositeitsverloop is minimaal 22mm hoog en de meetpunten in dit deel worden bepaald met een fout van $0.1/22 = 0.455\%$. Deze waarde is kleiner dan de gestelde maximale fout van 1%, zodat het meetinstrument nauwkeurig genoeg is voor gebruik in deze proef.

De totale fout die gemaakt wordt en dus bepalend is voor het eindresultaat bestaat uit de twee boven beschreven fouten. De twee meetfouten moeten gecombineerd worden om de totale meetfout te bepalen. Voor de bepaling van de totale meetfout is de volgende berekening uitgevoerd die de meetfout in de stijghoogte bepaalt door de fout in de toegevoegde hoeveelheid water:

- 1 gram op 500 gram komt overeen met 0.001 liter op 0.500 liter
- $0.001 \text{ liter} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$.
- Stel, het meetvat heeft een diameter van 1m, hieruit volgt $A=0.785 \text{ m}^2$.
- Stel, in de breuksteen bevindt zich 35% holle ruimte.
- De waterstijging door de meetfout is gelijk aan:

$$\frac{1 \cdot 10^{-6}}{0.785 \cdot 35\%} = 0.0036 \text{ mm}$$

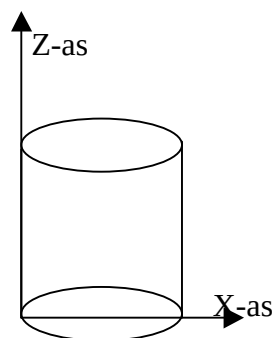
Deze fout is dus heel erg klein ten opzichte van de 0.1mm die gemaakt wordt bij de niveaubepaling. De doorslaggevende en dus de totale fout is de fout die gemaakt wordt bij de niveaubepaling en deze is ongeveer gelijk aan 0.5%.

4.4.8 Procedure meten breuksteenoppervlak

De meting van het breuksteenoppervlak moet elke keer volgens dezelfde procedure uitgevoerd worden. De procedure bestaat uit een beschrijving van de te volgen handelingen. Naast de beschrijving van de meetprocedure wordt het referentievlak bepaald waaraan de metingen gerefereerd kunnen worden.

4.4.8.1 Referentievlak

Om de gemeten laagdikte te kunnen uitdrukken moet het gemeten punt ‘opgehangen’ worden aan een referentievlak. Het referentievlak dat gebruikt gaat worden voor de bepaling van de laagdikten is de bodem van het meetvat. Voor aanvang van de proeven zal het niveau van de bodem bepaald worden volgens dezelfde methode als die waarmee het niveau van het breuksteenoppervlak bepaald wordt. Dit niveau wordt vervolgens gekozen als het ‘nul-niveau’ ($z = 0$). In figuur 4.8 is het assenstelsel weergegeven dat ontstaat door gelijkstelling van het niveau van de bodem aan $z = 0$. De gemeten laagdikten zullen vervolgens allemaal deze referentie



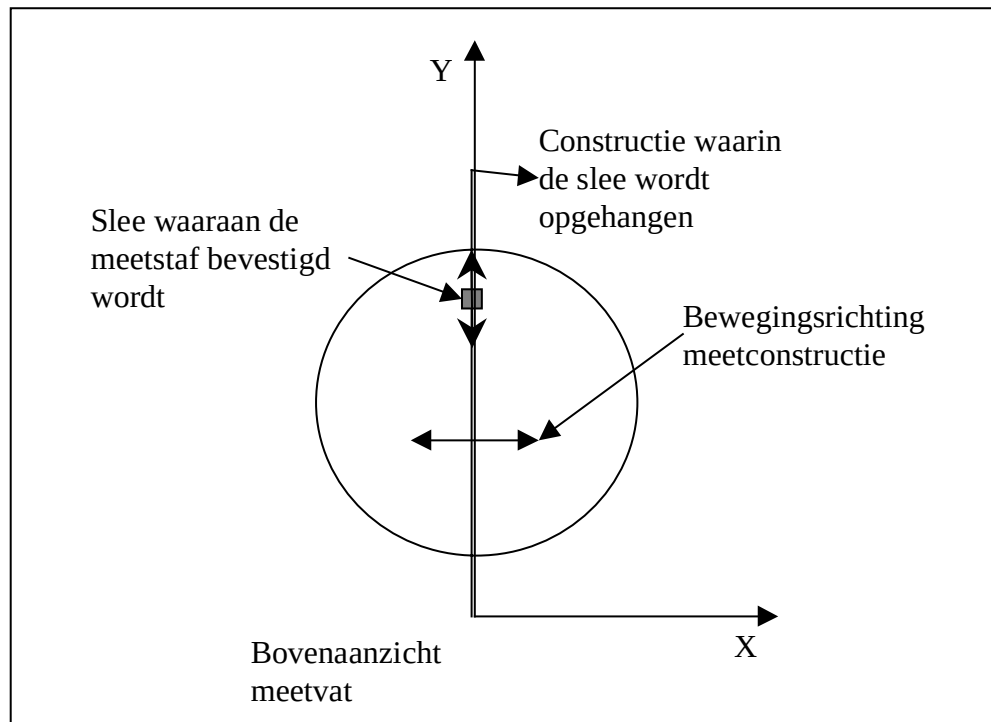
gebruiken.

Figuur 4.8:referentievlak meting breuksteenoppervlak

4.4.8.2 Uitvoering meting

Zoals eerder beschreven is wordt de meting uitgevoerd conform de praktijkmethode. Deze methode bestaat uit een staf met daarop een schaalverdeling. Met behulp van een waterpasinstrument wordt het niveau van de meetstaf bepaald. In de modelsituatie wordt de meetstaf in een geleidingsbuis gehangen die boven het meetvat wordt bevestigd. De onderkant van de meetstaf wordt vervolgens op de breuksteenlaag geplaatst en het niveau kan opgemeten worden.

Per breuksteenlaag zullen verschillende punten gemeten worden om zo een gemiddelde laagdikte te kunnen bepalen. In figuur 4.9 wordt aangegeven hoe de verschillende punten gemeten worden. Boven op het meetvat wordt een balk geplaatst die ten opzichte van het meetvat kan transleren. Op deze balk wordt een



Figuur 4.9: twee vrijheidsgraden van de oppervlakte-metconstructie

slee geplaatst waaraan de meetstaf wordt bevestigd. Deze slee kan over de gehele lengte van de balk bewegen. Door de twee vrijheidsgraden die de meetstaf nu heeft (translatie in x- en y-richting) is het mogelijk om het breuksteenoppervlak, in een bepaald raster, op te meten (zie tekeningen in bijlage 7 voor de details van de meetconstructie).

4.4.8.3 Aantal meetpunten per laag en meetintervallen.

De twee vrijheidsgraden die de locaties van de meetpunten bepalen kunnen op verschillende manieren ingevuld worden. Het CIRIA/CUR Manual geeft de volgende richtlijnen voor het raster waarin gemeten moet worden:

- In de doorsnede: niveau meten met een interval van 1m of $0.75D_{n50}$.
- Afhankelijk van het contract wordt er minimaal elke 10 tot 15 meter een doorsnede profiel opgemeten.

In de doorsnede is het gebruikelijk om intervallen te gebruiken die afhangen van de steendiameter. Aangezien de kleinste toe te passen gradering een diameter heeft van ongeveer 11mm is het erg bewerkelijk om elke $0.75D_{n50}$ een meting uit te voeren. Om toch voldoende meetpunten te verkrijgen is er gekozen voor een minimaal aantal metingen per laagdikte.

Het minimum aantal metingen zal door een proef vastgesteld moeten worden. Als basis wordt een meting uitgevoerd waarbij de intervallen in x- en y-richting gelijk zijn aan $0.75D_{n50}$. Aan de hand van deze dataset kan er gekeken worden hoever het aantal metingen teruggebracht kan worden zonder dat dit gevolgen heeft voor de resultaten.

Voor de proefuitvoering wordt ook afgestapt van meting van verschillende doorsneden. Om toch voldoende spreiding van de meetpunten binnen het meetvat te krijgen is gekozen om de meetpunten in het meetvat random te bepalen. Een randomgenerator trekt een locatie in het meetvat. Rond dit punt in het meetvat worden 10 metingen uitgevoerd met een interval van $0.75D_{n50}$.

Op deze manier wordt er voldaan aan de richtlijnen die zijn weergegeven in het CIRIA/CUR Manual. Tegelijkertijd is het aantal meetpunten geminimaliseerd waardoor de uitvoeringstijd van de proeven niet te extreem wordt.

4.4.9 Procedure meting waterniveau

De meting van het waterniveau wordt uitgevoerd door het laten zakken van de peilnaald tot op de waterspiegel in de stijgbuis. Voordat de proef gaat beginnen moet het bodemniveau, in het meetvat, vastgesteld worden. Het bodemniveau kan bepaald worden door vulling van de leidingen en het deel van de stijgbuis dat onder het bodemniveau zit met water. Als alle leidingen gevuld zijn, zal het water het meetvat in gaan lopen. Op dit punt moet het waterniveau in de stijgbuis gemeten worden en dit niveau komt overeen met het bodemniveau van het meetvat.

Voor aanvang van de watervulproef moeten de leidingen en de stijgbuis weer gevuld worden tot op het bepaalde bodemniveau. Als de stijgbuizen tot op het bodemniveau zijn gevuld kunnen de metingen beginnen. Vanaf dit moment wordt elke keer als er water aan het meetvat is toegevoegd, het niveau van de waterspiegel in de stijgbuis gemeten.

4.4.10 Programma van eisen en ontwerptekeningen

Met de beschrijving van de meetprocedures is het ontwerp van de proefopstelling afgerond. Het ontwerp kan in het kort beschreven worden door het programma van eisen, aan de hand waarvan de ontwerptekeningen gemaakt kunnen worden. Het programma van eisen, de ontwerptekeningen en een materiaallijst zijn weergegeven in de bijlage 7.

5 Resultaten van het onderzoek

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de data die verkregen is uit de proeven uitgewerkt tot concrete resultaten. Verwerking van de data wordt aangepakt door stap voor stap analyseren van de proefgegevens. In eerste instantie worden de gemaakte meetfouten geanalyseerd aan de hand waarvan de betrouwbaarheid van de resultaten te bepalen is. Een aantal factoren dat de resultaten beïnvloedt kan aan de hand van eerder uitgevoerde onderzoeken omschreven en bepaald worden. Toepassing van deze factoren als correctie op de gegevens zorgt ervoor dat de invloed gecompenseerd wordt.

Na analyse van de meetfouten kan de data geschematiseerd worden tot een minder complex model. Deze schematisering biedt mogelijkheden om porositeitswaarden en invloeds lengten van porositeitsverloop weer te geven.

Tot slot kunnen de resultaten van de verschillende proeven bepaald worden. Er worden resultaten en conclusies gegeven voor:

- verschil tussen bol- en pinmeting,
- indringing in onderliggende lagen,
- porositeitsverloop over een enkele breuksteenlaag uitgedrukt in porositeitswaarden en invloeds lengten,
- porositeitsverloop voor overgang tussen breuksteenlagen uitgedrukt in porositeitswaarden en invloeds lengten,
- gevolgen voor porositeit door afvlakking breuksteenlaag,
- vergelijking tussen porositeitsverloop in breuksteenlaag en ligging oppervlaktemetingen.

De ruwe data verkregen uit de uitvoering van de proeven wordt in zijn geheel weergegeven in bijlage 8. In de data-analyse komen wel kleine stukjes van de ruwe data naar voren in voorbeeldberekeningen, maar hier worden geen complete data sets gegeven.

5.2 Analyse meetfouten oppervlaktemeting

De eerste stap in de bepaling van de resultaten is de analyse van de meetfouten. De meetpunten verkregen uit de proeven zijn normaal verdeeld en kunnen weergegeven worden door een gemiddelde waarde en een standaardafwijking. De meetfouten die voorkomen tijdens de oppervlaktemetingen zijn:

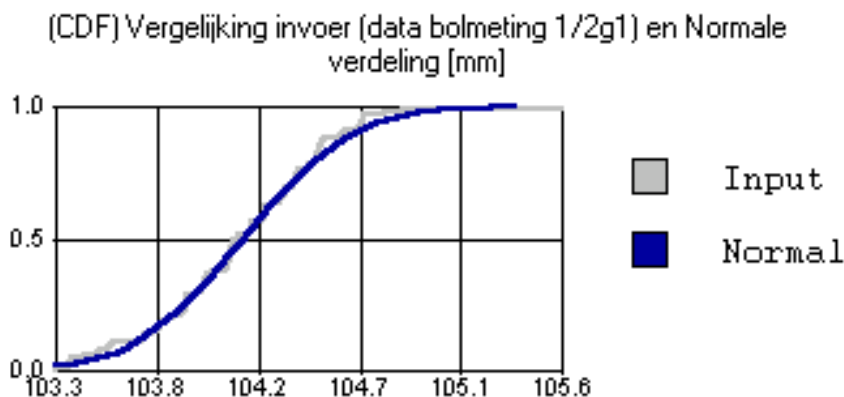
- aflezen meetstaf,
- aantal meetpunten per laagdiktemeting,
- bepalen steenhoeveelheid,
- vervormingen meetvat.

Het totaal van deze meetfouten geeft de uiteindelijke fout aan waarmee de laagdikten bepaald kunnen worden.

5.2.1 Meetfout door aflezen van de meetstaf.

De meetstaf is met behulp van een waterpasinstrument afgelezen. Dit instrument maakt het mogelijk om de meetstaf nauwkeurig genoeg te kunnen aflezen. De fout in het aflezen wordt echter bepaald door de schaalverdeling op de meetstaf. De meetstaf is voorzien van een millimeterverdeling zodat er maximaal een fout gemaakt kan worden van één millimeter. Door de toepassing van het waterpasinstrument is het echter mogelijk om het niveau nauwkeuriger af te lezen dan één millimeter. Deze mogelijkheid ontstaat omdat tussen de millimeterstreepjes nog een schatting gemaakt kan worden. Door deze mogelijkheid is het reëel om te zeggen dat de maximale fout die gemaakt wordt bij het aflezen van de meetstaf gelijk is aan 0.3 millimeter.

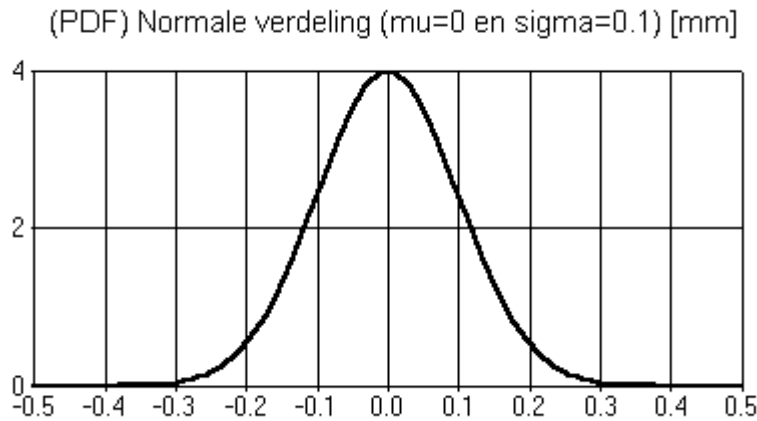
De maximale fout die bij het aflezen gemaakt wordt is echter niet altijd gelijk aan 0.3 millimeter. Als de schatting iets beter uitgevoerd wordt zal de fout kleiner zijn. Wanneer een groot aantal onafhankelijke stochastische variabelen, waarvan geen enkele domineert, worden opgeteld, ongeacht de uitgangsverdeling van die variabelen ontstaat er een normale verdeling. In figuur 5.1 is de data van de oppervlaktemeting uit proef 1 vergeleken met de exacte normale verdeling. De gebruikte data betreft de oppervlaktemeting door de bolmethode van gradering 1, waarbij de helft van het materiaal geplaatst is (notatie 1/2g1). Deze grafiek laat duidelijk zien dat het mogelijk is om de data te beschouwen als normaal verdeelde data.



Figuur 5.1: vergelijking data oppervlaktemeting met normale verdeling

Het bovenstaande staat bekend als de centrale limietstelling. Bij de bewerking van normale verdelingen geldt dat de som van twee normaal verdeelde variabelen ook weer normaal verdeeld is. Aan de hand van dit gegeven is het mogelijk om de meetfout die gemaakt wordt door het aflezen van de meetstaf weer te geven met een normale verdeling. Deze normale verdeling wordt gekenmerkt door een fout van 0.3 millimeter en een gemiddelde van 0.0 millimeter. De verdeling kan weergegeven worden volgens figuur 5.2. Uit de vorm van de normale verdeling (Gauss-verdeling) volgt dat de standaardafwijking σ gelijk is aan 0.1 millimeter. Dit betekent dat de meetfout door het aflezen van de meetstaf als volgt kan worden weergegeven:

$$Y_{ms,i} \sim N(0, 0.1) \text{ in mm}$$



Figuur 5.2: normale verdeling met $\mu = 0$ en $\sigma = 0.1$ mm

Dit is de fout die in elke meting gemaakt wordt; de laagdikte wordt echter bepaald aan de hand van 100 van dergelijke metingen. De fout in de bepaling van de laagdikte kan als volgt bepaald worden:

$$Y_{ms} = \sum Y_{ms,i}$$

$$\sigma(Y_{ms}) = \sigma\left(\frac{\sum Y_{ms,i}}{n}\right) = \frac{1}{n} \sigma(Y_{ms}) = \frac{1}{n} \sqrt{\sigma_1^2 + \dots + \sigma_n^2} = \frac{\sigma_1}{\sqrt{n}}$$

Uit deze vergelijkingen volgt:

$$\mu(Y_{ms}) = 0 \text{ mm}$$

$$\sigma(Y_{ms}) = 0.01 \text{ mm}$$

Hiermee is de meetfout bepaald voor de oppervlaktemeting die in totaal uit 100 individuele metingen bestaat. Deze fout zal later worden verwerkt bij het bepalen van de totale meetfout.

5.2.2 Fout door het uitvoeren van 100 individuele metingen per laagdiktemeting.

In het CIRIA/CUR Manual is de manier van meten met behulp van de meetstaf gestandaardiseerd. Deze meetmethode zou echter extreem veel meetpunten opleveren. Om de hoeveelheid metingen per laagdiktemeting te kunnen verminderen is er één testmeting uitgevoerd volgens de gestandaardiseerde meetmethode. Deze gestandaardiseerde meting is uitgevoerd op gradering 4, welke de minste meetpunten vereist. Aan de hand van deze complete populatie is gekeken tot hoever het aantal metingen teruggebracht kan worden zonder dat de afwijking te groot wordt.

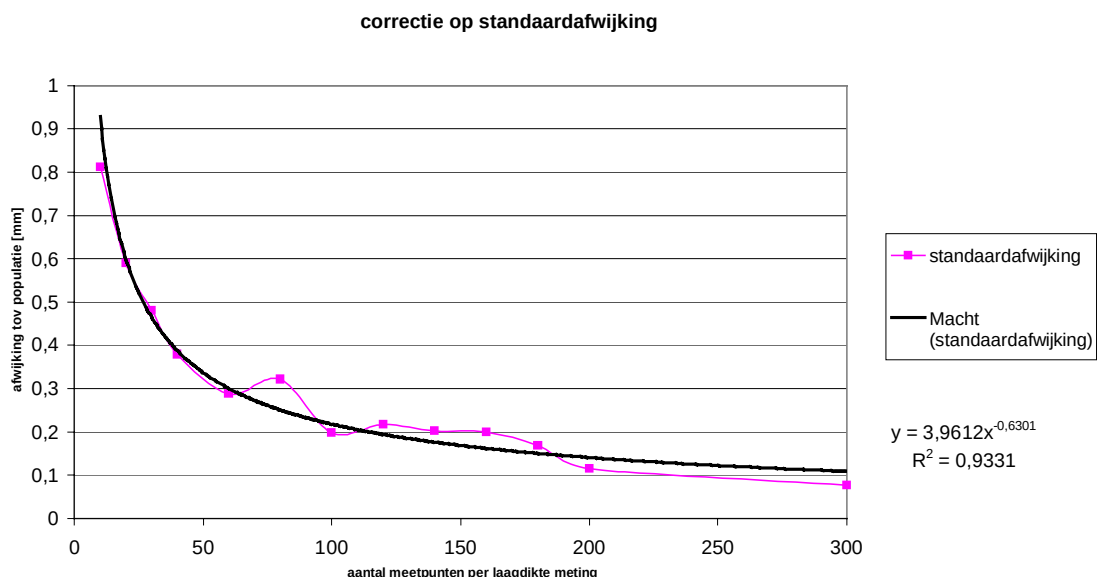
Door het terugbrengen van het aantal metingen zal het resultaat onnauwkeuriger worden ten opzichte van de gehele populatie. Deze onnauwkeurigheid uit zich in een vergroting van de standaardafwijking, terwijl het gemiddelde niet verandert. De vergroting van de standaardafwijking is weergegeven door random trekkingen te doen uit de gehele populatie. Het aantal trekkingen uit de

populatie wordt geleidelijkaan teruggebracht. Voor elk aantal trekkingen is de procedure vele malen uitgevoerd om zo een betrouwbaar beeld te krijgen. Voor elk aantal trekkingen is de verhoging van de standaardafwijking ten opzichte van de gehele populatie bepaald. De vergroting van de standaardafwijking wordt in figuur 5.3 weergegeven. Door de meetpunten is een regressielijn getrokken om het verband tussen het aantal meetpunten per laagdiktemeting en de afwijking te kunnen weergegeven.

Aan de hand van de grafiek is gekozen voor 100 meetpunten per laagdiktemeting. Worden er minder dan deze 100 metingen uitgevoerd dan zal de afwijking snel oplopen, waardoor de onnauwkeurigheid van de proeven groter wordt. De regressielijn die getrokken is door de meetpunten kan worden weergegeven door de volgende vergelijking:

$$y_{correctie} = 3,9612x^{-0,6301}$$

Invullen van $x = 100$ geeft een vergroting van de standaardafwijking van: $\sigma_{correctie} = 0.218$. Hiermee is de meetfout bepaald die ontstaan is door vermindering van het aantal metingen per laagdikte.



Figuur 5.3: toename fout door uitvoering van 100 metingen

5.2.3 Meetfout in toegevoegde steenmassa.

De steenhoeveelheid die aan het meetvat is toegevoegd is bepaald door weging. Afhankelijk van de gradering moet er een aantal keren een hoeveelheid stenen afgewogen worden om de totale hoeveelheid te bereiken. De gebruikte weegschaal heeft een capaciteit van 100 kilogram en een nauwkeurigheid van 100 gram. Dit betekent dat er ongeveer een fout gemaakt wordt van $0.1/100 = 1\%$. Deze fout is zo klein ten opzichte van de hierboven beschreven fouten dat deze verwaarloosd kan worden.

5.2.4 Meetfout door doorbuiging bodem.

Door het gewicht van het materiaal zal de bodem van het meetvat doorbuigen. Het meetvat is echter zo ontworpen dat de doorbuiging die eventueel ontstaat geen invloed zal hebben op de meetresultaten. Bij het ontwerp is een maximale doorbuiging gebruikt van 0,5 millimeter. Hieruit volgde een bodemdikte van 10 millimeter. Het meetvat is echter uitgerust met een bodem die een dikte van 25 millimeter heeft. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de doorbuiging van de bodem een dermate kleine fout oplevert dat die geen invloed zal hebben op de meetresultaten.

5.2.5 Meetfout door rek wanden meetvat.

Hier is in het ontwerp ook uitgegaan van een maximale rek die resulteerde in een wanddikte van 10 millimeter. De wanden zijn echter ook uitgevoerd met een dikte van 25 millimeter waardoor de rek van de wanden geen invloed zal hebben op de meetresultaten.

5.2.6 Bepaling laagdikte

Nu zijn alle mogelijke fouten die invloed hebben op de meetgegevens beschreven en gekwantificeerd. We hebben echter te maken met een meting van een breuksteenoppervlak. Door het karakter van dit oppervlak hebben we te maken met een natuurlijke spreiding, omdat er soms een 'top' en soms een 'dal' gemeten wordt. Deze natuurlijke spreiding kan uitgedrukt worden door een gemiddeld niveau en een spreiding om dat gemiddelde. Volgens de centrale limietstelling kan een dergelijke populatie weergegeven worden door een normale verdeling. Het gemiddelde van deze normale verdeling wordt als volgt bepaald:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

De spreiding, ofwel de standaardafwijking wordt bepaald door:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

De meetpunten worden nu uitgedrukt als een normale verdeling met een gemiddelde en een standaardafwijking. Alle gegevens, correcties en meetfouten zijn nu beschreven als een normale verdeling. Omdat het allemaal normale verdelingen zijn kunnen ze opgeteld worden om op die manier de laagdikte te kunnen bepalen. De laagdikte $Y_{ld} \sim N(\mu, \sigma)$ kan als volgt bepaald worden:

$$\mu(Y_{ld}) = \mu_{m1} - \mu_{m2}$$

waarin:

μ_{m1} : gemiddelde oppervlaktemeting 1

μ_{m2} : gemiddelde oppervlaktemeting 2

en

$$\sigma(Y_{ld}) = \sqrt{4 * \sigma_{ms}^2 + \sigma_{correctie}^2 + \sigma_{m1}^2 + \sigma_{m2}^2}$$

waarin:

σ_{ms} : standaardafwijking door meetfout (0.01 mm)

$\sigma_{correctie}$: standaardafwijking door 100 meetpunten (0.21758 mm)

σ_{m1} : standaardafwijking oppervlaktemeting 1

σ_{m2} : standaardafwijking oppervlaktemeting 2

5.3 Analyse meetfouten watervulproef

Voor de meetpunten verkregen uit de watervulproef geldt hetzelfde als voor de oppervlaktemeting. De meetpunten kunnen gezien worden als een normale verdeling die wordt weergegeven door het gemiddelde en de standaardafwijking. De fouten die gemaakt zijn tijdens de uitvoering van deze proef hebben betrekking op:

- aflezen peilnaald,
- meten watervolume,
- bepalen vatvolume,
- randeffecten,
- waterabsorptie breuksteen,
- ijken meetvat.

Een deel van de bovenstaande meetfouten kan dermate uitgewerkt en gemotiveerd worden dat de gemaakte fout als een correctie op het volumeverloop kan worden toegepast. Deze fouten dragen dan niet bij in de totale fout die tijdens de proefuitvoering gemaakt wordt.

5.3.1 Meetfout door aflezen peilnaald

De stijghoogte van het water in het meetvat kan gemeten worden in de stijgbuizen die naast het meetvat geplaatst zijn. De meting wordt uitgevoerd met behulp van een peilnaald die boven de stijgbuizen geplaatst is. De peilnaald kan de stijghoogte meten met een nauwkeurigheid van 0.1 mm. Bij het aflezen wordt de volgende fout gemaakt: als van de peilnaald een waarde van bijvoorbeeld 207.8 mm wordt afgelezen, dan ligt de werkelijke waarde ergens tussen de 207.75 en 207.85 mm.

De maximale fout bij het aflezen van de stijghoogte is dus gelijk aan 0.05 mm. Dit is echter de maximale fout die gemaakt wordt en bij meerdere herhalingen van dezelfde meting zal er een bepaalde verdeling van de meetfout volgen. De meetfout van de stijghoogte kan volgens de centrale limietstelling weergegeven worden door een normale verdeling. Bij een normale verdeling is de standaardafwijking gelijk aan 1/3 van de maximale fout en in dit geval dus gelijk aan $0.05/3 = 0.0167$ mm.



Het meten met behulp van de peilnaald brengt nog een tweede fout met zich mee. De peilnaald moet, voordat deze afgelezen kan worden, op het wateroppervlak geplaatst worden. Om dit nauwkeurig uit te kunnen voeren is de peilnaald uitgerust met een 'scherpe' punt. Als de punt van de peilnaald dicht genoeg bij het wateroppervlak komt zorgt de oppervlaktespanning van het water ervoor dat het water tegen de peilnaald aan gaat staan. Het moment van contact tussen water en peilnaald is, door de oppervlaktespanning van het water, visueel goed vast te stellen. In principe wordt er door de oppervlaktespanning van het water een fout gemaakt, omdat het water de peilnaald al raakt terwijl deze nog iets boven het wateroppervlak zit. Deze fout wordt echter bij elke meting gemaakt en is dus niet van belang voor de eindresultaten. De meetfout die ontstaat door het aflezen van de peilnaald kan dus als volgt weergegeven worden:

$$Y_{pn} \sim N(0, 0.0167) \text{ in mm}$$

5.3.2 Meetfout door toevoegen water aan het meetvat

De bepaling van waterhoeveelheden is uitgevoerd door weging. Bij deze methode is een weegschaal gebruikt die een nauwkeurigheid heeft van 5 gram. Dit betekent dat bij weging van bijvoorbeeld 1000 gram water de werkelijke hoeveelheid ligt tussen 997.5 en 1002.5 gram. De maximale fout die gemaakt wordt bij deze weging is dan gelijk aan 2.5 gram. De meetfout kan beschreven worden met behulp van de normale verdeling (door toepassing centrale limietstelling). De standaardafwijking van deze verdeling is dan gelijk aan $2.5/3 = 0.833$ gram. Hiermee kan de meetfout door toevoegen van water aan het meetvat beschreven worden door:

$$Y_w \sim N(\mu, 0.833) \text{ in gram.}$$

De ' μ ' geeft het gemiddelde van de verdeling weer. Dit gemiddelde is echter niet constant gebleven tijdens de uitvoering van de proeven. Tijdens de proefuitvoering zijn voor μ de volgende waarden gebruikt: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 en 10 kilogram. De keuze voor de waarde van μ was afhankelijk van het aantal benodigde meetpunten tijdens de proef.

Er zal eerst gekeken worden welke fout ontstaat door toevoeging van 1 'liter' (veronderstelling dat 1 kilogram water overeenkomt met 1 liter) water, bij een porositeit van 40%. In een leeg vat zou dit overeenkomen met een toevoeging van $1/40\% = 2.5$ 'liter' water ($2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$).

$$\text{Oppervlakte van het meetvat:} \quad A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{1.19}{2}\right)^2 = 1.1122 \text{ m}^2$$

$$\Delta h \text{ door toevoeging 1 kilo water:} \quad \Delta h = \frac{2.5 \cdot 10^{-3}}{1.1122} = 2.247 \text{ mm}$$

$$\text{De fout die gemaakt wordt is gelijk aan:} \quad \frac{\sigma}{\mu} = \frac{0.83 \cdot 10^{-3}}{1} = 0.83 \cdot 10^{-3}$$

Het gemiddelde μ geeft de afgewogen hoeveelheid water weer, wat in dit geval gelijk is aan 1 kilogram.

Door de fout in de waterhoeveelheid ontstaat er ook een fout in de stijghoogte. De fout in de stijghoogte door de fout in de waterhoeveelheid is gelijk aan:

$$\sigma(Y_{w,h}) = 0.83 \cdot 10^{-3} * 2.247 = 1.865 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

De fout in de stijghoogte $Y_{w,h}$ door toevoeging van water aan het meetvat kan als volgt uitgedrukt worden:

$$Y_{w,h} \sim N(0, 1.865 \cdot 10^{-3})$$

De totale fout $Y_{wv} \sim N(\mu, \sigma)$ per meting van de stijghoogte kan als volgt bepaald worden:

$$\mu(Y_{wv}) = \mu(Y_{pn}) + \mu(Y_{w,h}) = 0 + 0 = 0 \text{ mm}$$

waarin:

$\mu(Y_{pn})$: gemiddelde fout meting peilnaald

$\mu(Y_{w,h})$: gemiddelde fout toevoegen water

$$\sigma(Y_{wv}) = \sqrt{\sigma(Y_{pn})^2 + \sigma(Y_{w,h})^2} = \sqrt{0.0167^2 + (1.865 \cdot 10^{-3})^2} = 0.0168 \text{ mm}$$

waarin:

$\sigma(Y_{pn})$: standaardafwijking meting peilnaald

$\sigma(Y_{w,h})$: standaardafwijking (in de stijghoogte) door toevoegen water aan meetvat

De bovenstaande afleiding beschrijft de fout die gemaakt wordt in de stijghoogte door toevoeging van 1 kilogram water aan het meetvat. Hierboven is al aangeduid dat er verschillende hoeveelheden water aan het vat toegevoegd worden. Als we de situatie bekijken waarbij 2 kilogram water aan het meetvat toegevoegd wordt dan heeft dat de volgende gevolgen voor Δh en σ/μ :

Δh wordt twee keer zo groot omdat er twee maal zoveel water aan het meetvat toegevoegd wordt, $\Delta h = 4.494 \text{ mm}$.

σ/μ wordt twee keer zo klein, omdat μ twee keer zo groot wordt, $\sigma/\mu = 4.15 \cdot 10^{-4}$.

De totale fout in de stijghoogte is dus gelijk aan:

$$\sigma(Y_{wv}) = 4.15 \cdot 10^{-4} * 4.494 = 1.865 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

Hieruit blijkt dat de totale fout in de stijghoogte, door toevoeging van water aan het meetvat, gelijk blijft bij variatie in de toegevoegde waterhoeveelheid. De totale fout Y_{wv} die per meting van de stijghoogte gemaakt wordt kan weergegeven worden door:

$$Y_{wv} \sim N(0,0.0168) \text{ in mm}$$

Met deze afleiding is de fout bepaald die ontstaat door de meetmethode die is toegepast tijdens het onderzoek. De meetfout die hierboven beschreven is komt echter twee keer voor tijdens de proefuitvoering. Om de porositeit te kunnen bepalen wordt er gebruik gemaakt van de verhouding tussen het poriënvolume en het vatvolume. Beide volumes worden bepaald door de bovenstaande methode.

5.3.3 Meetfout bepalen vatvolume

De totale inhoud van het meetvat is niet gelijk aan de inhoud van het vat zelf. Dit wordt veroorzaakt doordat het vat verbonden is met een buizenstelsel dat een onbekend volume heeft. Deze buizen worden gebruikt om de stijghoogte te kunnen meten en om het water aan het meetvat toe te voegen (zie ontwerp van het meetvat). Ondanks dat het vat zo rond mogelijk gemaakt is, mag er niet van uit worden gegaan dat het geheel rond is. Om het volumeverloop van het meetvat te bepalen is het vat in kleine intervallen met water gevuld. Bij deze methode worden dezelfde fouten gemaakt als bij de meting van het poriënvolume. Door gebruikmaking van dezelfde procedures is de fout die gemaakt wordt bij het bepalen van het vatvolume ook gelijk aan Y_{wv} .

5.3.4 Meetfout door het randeffect

Tijdens de proefuitvoering zal een storend effect optreden langs de wanden van het meetvat. Nabij de wanden zal de porositeit groter zijn dan in de vrije ruimte. Deze verhoging in de porositeit ontstaat doordat de holle ruimten bij de wand niet opgevuld worden door overige steenstukken. In de proefvoorbereiding is het wandeffect benaderd met behulp van een theoretische methode.

Voor de gegevensverwerking van de watervulproef is het niet gewenst om de correctiefactoren van het wandeffect toe te passen op de boven- en onderkant van de breuksteenlaag. Het verloop van de porositeit in deze gebieden wordt al weergegeven door de watervulmethode; de correctie moet alleen toegepast worden voor de wanden van het meetvat. Aanpassing van de 'methode Kreijger' (Cement XV nr. 5 1963) is noodzakelijk om een correctiefactor te krijgen die alleen het storende effect van de wanden compenseert. Kreijger stelt het wandeffect afhankelijk van de oppervlakte van de wanden van de bak en de grootte van D_{85} . De door hem ingevoerde evenredigheidsfactor wordt gelijk aan K gesteld. Voor een ronde meetbak met diameter d en hoogte h geldt de volgende volumereductie door het wandeffect:

$$2 * \frac{1}{4} \pi d^2 * K * D + \pi d * h * K * D$$

waarbij het eerste deel de volumereductie is voor de boven- en onderkant van de breuksteenlaag en het tweede deel de reductie voor het storende effect van de wanden. De volumereductie voor het effect van de wanden is dus gelijk aan:

$$\pi d * h * K * D_{85} [mm^3]$$

waarin:

d: diameter meetvat = 1190 mm.

K: evenredigheidsfactor (voor breuksteen gelijk aan 0.15)

D_{85} : zeefmaat waardoor 85% (m/m) van het materiaal kan passeren [mm]

h: hoogte van het meetvat [mm]

De bovenstaande correctie is de correctie die toegepast moet worden op de ruwe data uit de proeven. Per gradering kan, met behulp van de bovenstaande methode, de correctie bepaald worden en van het in de proeven bepaalde poriënvolume afgetrokken worden. Een gedetailleerde uitwerking van het randeffect is weergegeven in bijlage 3.

5.3.5 Fout door verandering dichtheid water.

Het water dat gebruikt is voor de proeven is leidingwater. De proeven zijn echter niet allemaal met dezelfde water- en luchttemperatuur uitgevoerd. Om het dichtheidsverschil dat ontstaat door temperatuursverschillen te kunnen compenseren is de watertemperatuur tijdens de proeven in de gaten gehouden. Aan de hand van de watertemperatuur is het mogelijk de werkelijke dichtheid van het water te bepalen. Het dichtheidsverloop als functie van de watertemperatuur wordt in tabel 5.1 weergegeven.

Temperatuur [C]	0	4	10	15	16	17	18
Dichtheid [Kg/l]	0,9998	1,000	0,9997	0,9991	0,9989	0,9987	0,9985

Temperatuur [C]	19	20	21	22	23	24	25
Dichtheid [Kg/l]	0,9984	0,9982	0,9979	0,9977	0,9975	0,9973	0,9970

Tabel 5.1: dichtheidsverloop water als functie van temperatuur

5.3.6 Fout door waterabsorptie breuksteen

Deze fout heeft betrekking op de waterabsorptie van het gebruikte materiaal. Omdat breuksteen een poreus materiaal is, zal het na verloop van tijd water gaan opnemen. Uit de specificaties van de stenen blijkt dat de wateropname het grootst is voor basalt en gelijk is aan 0.5 % [m/m] (voor de andere drie graderingen bestaande uit Graniet-Gneis is dit gelijk aan 0.25% [m/m]).

De waterabsorptie zal geen invloed hebben op het porositeitsverloop omdat de fout in elke meting gemaakt zal worden. De waterabsorptie zorgt er wel voor dat de porositeit niet goed wordt weergegeven. Hierdoor ontstaan fouten in de gemiddelde porositeit wat gevolgen heeft op de uiteindelijke resultaten. Om deze invloed te bepalen wordt er voor de twee gebruikte steensoorten de wateropname bepaald. De gegevens voor de waterabsorptie zijn afkomstig uit de testen die op het uitgangsmateriaal zijn uitgevoerd; de resultaten hiervan zijn weergegeven in bijlage 4.



Wateropname door Basalt:

Waterabsorptie:	0.5% [m/m].
Dichtheid Basalt:	2976 [kg/m ³].
Gemiddelde porositeit:	40 % [-].
Bulkdichtheid:	60%*2976 = 1785.6 [kg/m ³].
Oppervlakte bodem meetvat:	$A=\pi r^2 = 1.112 \text{ m}^2$.

Per meter vathoogte zal de waterabsorptie door Basalt gelijk zijn aan:

$$1 * 1.112 * 1785.6 * 0.5\% = 9.929 \text{ kg water}$$

Deze waarde komt ongeveer overeen met 1% van het vatvolume. Het is dus noodzakelijk om deze correctie toe te passen en niet te verwaarlozen.

Voor Graniet-Gneis geldt het volgende:

Waterabsorptie:	0.25% [m/m].
Dichtheid Graniet-Gneis:	2700 [kg/m ³].
Gemiddelde porositeit:	40 % [-].
Bulkdichtheid:	60%*2700 = 1620 [kg/m ³].
Oppervlakte bodem meetvat:	$A=\pi r^2 = 1.112 \text{ m}^2$.

Per meter vathoogte zal de waterabsorptie door Graniet-Gneis gelijk zijn aan:

$$1 * 1.1122 * 1620 * 0.25\% = 4.504 \text{ kg water}$$

Deze waarde komt ongeveer overeen met 0.5% van het vatvolume en mag dus ook niet verwaarloosd worden in de porositeitsberekening.

5.3.7 Fout in bepaling nulniveau stijgbuizen

Voorafgaand aan de proeven is het nulniveau in de stijgbuizen bepaald. Dit nulniveau is bepaald door het vullen van de buizen met water totdat het water het meetvat net niet inloopt. Het bijbehorende waterniveau in de stijgbuizen is met behulp van de peilnaald gemeten. Deze proef is meerdere malen herhaald om zo een betrouwbaar nulniveau te krijgen.

Volgens de centrale limietstelling is de verdeling van de nulpunten weer een normale verdeling. Deze normale verdeling heeft een gemiddelde μ van 20.78 cm. De spreiding rond dit gemiddelde σ is gelijk aan 0.0176 cm. Naast de spreiding rond het gemiddelde maakt de peilnaald ook nog een fout die meegenomen moet worden. De standaardafwijking van de peilnaald is gelijk aan 0.00167 cm. De totale standaardafwijking komt hiermee op:

$$\sigma = \sqrt{0.01764^2 + 0.00167^2} = 0.0177 \text{ cm}$$

Het nulniveau kan dus weergegeven worden door:

$Y_{\text{nul}} \sim N(20.78, 0.0177) [\text{cm}]$.

Aangezien de spreiding rond het nulniveau zo klein is en deze fout maar een keer per proef gemaakt wordt, kan er voor het nulniveau in de stijgbuizen gebruik gemaakt worden van de gemiddelde waarde van 20.78 cm.

5.3.8 Fout in bepaling volume vulbuizen

De vulbuis is net als de stijgbuizen via een buizenstelsel met de bodem van het meetvat verbonden. Dit buizenstelsel heeft een bepaalde inhoud die voorafgaand aan de proeven bepaald moet worden. Dit is noodzakelijk omdat als het vat gevuld is het niet meer mogelijk is om te zien wanneer het water vanuit de vulbuis het meetvat inloopt. Voor het bepalen van dit volume is er een proef uitgevoerd met het lege meetvat. Het volume is bepaald door toevoeging van water aan de buis tot het moment dat het water het meetvat wil gaan inlopen. De waterhoeveelheid toegevoegd aan de vulbuis is door weging bepaald. Deze proef is meerdere malen uitgevoerd waardoor de verdeling van dit volume volgens de centrale limietstelling beschreven mag worden door een normale verdeling. Het gemiddelde volume bedraagt 0.495 kg. De standaardafwijking van de verschillende metingen is gelijk aan 0.005477 kg. De weegschaal maakt echter ook nog een fout en bedraagt 0.000833 kg (standaardafwijking van de weegschaal is al eerder bepaald). De totale standaardafwijking komt hiermee op:

$$\sigma = \sqrt{0.005477^2 + 0.000833^2} = 0.00554 \text{ kg}$$

Het volume van de vulbuis, onder het bodemniveau van het meetvat, kan beschreven worden door:

$Y_{\text{vulbuis}} \sim N(0.495, 0.00554) [\text{kg}]$

Aangezien de spreiding rond het nulniveau zo klein is en deze fout maar een keer per proef gemaakt wordt, kan er voor het 'nulvolume' in de vulbuis gebruik gemaakt worden van de gemiddelde waarde van 0.495 kg.

Hiermee zijn alle fouten die gemaakt zijn tijdens de uitvoering van de proeven weergegeven en gekwantificeerd. De correcties kunnen nu verwerkt worden in de data verkregen uit de proeven. Bovendien is het mogelijk de spreiding weer te geven van de resultaten die worden veroorzaakt door de gemaakte meetfouten.

5.4 Dataverwerking en schematisering watervulproef

De meetfouten en correcties die zijn beschreven in hoofdstuk 5.2 moeten op de ruwe data, verkregen uit de proefuitvoering, toegepast worden. In dit hoofdstuk wordt bepaald welke fouten relevant zijn en wat de gevolgen zijn op de verwerking van de data.

De gecorrigeerde data wordt na correctie geschematiseerd. Deze schematisering bepaald het porositeitsverloop in de boven- en onderrand en de gemiddelde porositeit van de breuksteenlaag. Aan de hand van de schematisering kan per onderdeel bepaald worden wat de waarde voor de porositeit is. De betrouwbaarheid van de

porositeitswaarde wordt bepaald door een analyse van de spreiding van de meetpunten.

5.4.1 Totale meetfout in proefuitvoering

In de foutenanalyse is bepaald dat bij de bepaling van het poriënvolume en het vatvolume een fout gemaakt wordt per meting die voldoet aan de volgende verdeling:

$Y_{wv} \sim N(0, 0.0168)$ in millimeters.

Het verloop van het poriënvolume en het vatvolume bestaat echter uit een serie meetpunten die bestaat uit ongeveer 100 individuele metingen. Voor de spreiding betekent dit het volgende:

$$\sigma(Y_{wv}) = \frac{1}{100} \sqrt{(\sigma_1^2 + \dots + \sigma_{100}^2)} = 0.00168 \text{ mm}$$

In de verwerking van de resultaten wordt gebruik gemaakt van delen van het totale meetbereik. Het kleinste deel komt voor bij de bepaling van de invloeds lengte van de boven- en ondergrens van de breuksteenlaag. Deze invloeds lengte is echter niet groter dan ongeveer 10 mm. De fout die bij de bepaling van deze invloeds lengte gemaakt wordt is dan gelijk aan $0.00168/10 = 0.0168\%$. Deze fout door de meetfouten in de proefuitvoering is zo klein en heeft zo weinig invloed op de uiteindelijke resultaten dat deze meetfouten uit de watervulproef verwaarloosd kunnen worden.

5.4.2 Correctie voor het wandeffect.

De variabelen in de theoretische benadering van het wandeffect zijn verantwoordelijk voor de grootte van dit effect. Het gevolg hiervan is dat het wandeffect zal verschillen per gradering omdat de D_{85} in de vergelijking voorkomt. De correctie voor het wandeffect zal uitgedrukt worden per eenheid van hoogte. Hiervoor is gekozen omdat de data uit de proeven uit te zetten is tegen de hoogte van het meetvat. Door alle storende effecten uit te drukken in deze eenheid kan de 'ruwe data' eenvoudig gecorrigeerd worden.

Het wandeffect dat optreedt kan weergegeven worden door de theoretische betrekking die empirisch is bepaald door P.C Kreijger (Cement XV Nr. 5, 1963). De volumereductie door het wandeffect is gelijk aan:

$$\pi d * h * K * D_{85} \text{ [mm}^3\text{]}$$

waarin:

d:	diameter meetvat = 1190 mm.
K:	evenredigheidsfactor (voor breuksteen gelijk aan 0.15)
D_{85} :	zeefmaat waardoor 85% (m/m) van het materiaal kan passeren [mm]
h:	hoogte van het meetvat [mm]

Met behulp van deze betrekking is het mogelijk om voor elke gradering de correctie te bepalen. De correcties voor de vier verschillende graderingen worden weergegeven in tabel 5.2. De correctie wordt weergegeven in liters zodat dit meteen vergeleken kan worden met de toegevoegde hoeveelheid water in het meetvat.

Gradering	1	2	3	4
Wandcorrectie per 0,1mm vathoogte [l]	0.0009210	0.002442	0.005187	0.006685

Tabel 5.2: correctie voor wandeffect

De evenredigheidsfactor 'K' is door Kreijger bepaald door uitvoering van proeven. De waarde van 'K' kan gecontroleerd worden door te kijken naar het porositeitsverloop vanaf de bodem van het meetvat. Hier loopt de porositeit terug van 100% op de bodem naar ongeveer 35-40% in een breuksteenlaag. Uit de proefresultaten blijkt dat de waarde voor 'K' ongeveer 0.1 is, wat aanzienlijk lager is dan de 0.15 die Kreijger voorschrijft.

Deze twee waarden mogen niet zonder meer vergeleken worden omdat een randeffect op de bodem niet overeenkomt met een randeffect aan de randen van het meetvat. Door het bovenliggende gewicht van de breuksteen zal het randeffect bij de bodem kleiner zijn. Hierdoor is het niet mogelijk te bewijzen dat de waarde voor 'K' van 0.15 (die bepaald is door een proefuitvoering opgezet om deze factor te bepalen) niet voldoet voor de randen. In het geval dat 'K' toch niet gelijk is aan 0.15 heeft dit niet zoveel gevolgen voor de proefuitvoering. Het gebruikte meetvat heeft een redelijk grote afmeting ten opzichte van de steendiameter waardoor het randeffect niet groot zal zijn. Eventuele afwijking in de waarde van 'K' betekent een kleine afwijking in de gemeten porositeit. Deze kleine afwijking heeft nog steeds geen gevolgen omdat de essentie van de proef is om het porositeitsverloop te bepalen.

5.4.3 Waterabsorptie door breuksteen

De waterabsorptie door breuksteen is reeds in de foutenanalyse beschreven. De absorptie voor de twee verschillende steensoorten, uitgedrukt in liters per 0,1mm vathoogte is weergegeven in tabel 5.3. Voor de dichtheid van water is hier gebruik gemaakt van $\rho_{\text{water}} = 1000 \text{ kg/m}^3$.

Steensoort	Basalt	Graniet Gneis
Waterabsorptie per 0,1mm vathoogte [l]	$9.929 \cdot 10^{-4}$	$4.504 \cdot 10^{-4}$

Tabel 5.3: waterabsorptie breuksteen

Hiermee kan de waterabsorptie door breuksteen gecorrigeerd worden op de 'ruwe data'.

5.4.4 Verwerken data watervulproef.

De data zoals deze is verkregen door de proefuitvoering moet bewerkt worden om de resultaten eruit te kunnen halen. De manier van bewerken wordt bepaald door de weergave van de verkregen data en van de toe te passen correcties. De resultaten

komen voort uit de verhouding tussen het poriënvolume en het vatvolume die tezamen de porositeit bepalen. De gegevens uit de proeven geven het verloop van het poriënvolume en het vatvolume weer zoals beschreven in figuur 5.4.

Weergave poriënvolume		Weergave vatvolume	
Toegevoegde hoeveelheid water	Stijghoogte [cm]	Toegevoegde hoeveelheid water	stijghoogte [cm]
beginwaarde	20,78	beginwaarde	20,78
2l	21,02	5l	21,15
2l	21,23	5l	21,60
2l	21,48	5l	22,01
2l	21,83	5l	22,45
2l	22,07	5l	22,91
2l	22,41	5l	23,35
3l	22,97	5l	23,80
3l	23,62	5l	24,24
3l	24,12	5l	24,67
3l	24,83	7l	25,29
3l	25,41	7l	25,91
3l	26,00	7l	26,51
3l	26,54	7l	27,14

Figuur 5.4: data uit watervulproef

Het probleem dat optreedt is dat het verloop van de stijghoogte niet gelijk is, zodat het met deze weergave niet mogelijk is om de gegevens van elkaar af te trekken of op elkaar te delen. Het doel is om per eenheid van vathoogte de porositeit te kunnen bepalen.

Om dit probleem op te lossen is ervoor gekozen om de toegevoegde hoeveelheid water te gaan interpoleren over de vathoogte. Deze interpolatie wordt zo uitgevoerd dat de stijghoogte in stapjes van 0.1 mm groter wordt. Bij deze 0.1 mm stijghoogte is te bepalen wat het volume toegevoegd water is dat deze verhoging veroorzaakt. De interpolatieprocedure wordt beschreven aan de hand van het onderstaande voorbeeld.

In de tabel 'Weergave poriënvolume' is het stijghoogteverschil na toevoeging van 2 liter water gelijk aan $21.02 - 20.78 = 0.24$ cm. 0.24 cm is gelijk aan 24 maal 0.1 mm, wat de stapgrootte in de stijghoogte moet worden. Het aantal stappen volgt uit het aantal malen dat er 0.1 mm tussen de twee stijghoogtemetingen past. Het volume water behorend bij deze 0.1 mm stijghoogte is gelijk aan 2 liter/ 24 stappen = 0.0833 liter. Vervolgens worden de interpolatiestappen uitgevoerd, wat resulteert in de spreadsheet die wordt weergegeven in figuur 5.5.

stijghoogte[0,1mm]	2074	2115	2160	2201	2245
liters	0	5,0089	5,0089	5,0089	5,0089
stapgrootte [l]	0,122	0,111	0,122	0,113	0,108
aantal stappen	41	45	41	44	46
totaal liters [l]	0,0000	5,0089	10,0177	15,0266	20,0355

Interpolatiestap	liters	liters	liters	liters	liters
0					
1	0,122	5,120	10,139	15,140	20,144
2	0,244	5,231	10,262	15,254	20,253
3	0,366	5,342	10,384	15,368	20,362
4	0,488	5,454	10,506	15,481	20,471
5	0,610	5,565	10,628	15,595	20,579
6	0,733	5,676	10,750	15,709	20,688
7	0,855	5,788	10,872	15,823	20,797
8	0,977	5,899	10,995	15,937	20,906
9	1,099	6,010	11,117	16,051	21,015

Figuur 5.5: interpolatiestappen op data watervulproef

Door deze interpolatie is het mogelijk geworden om de porositeit te berekenen per 0.1 mm stijghoogteverschil. Om deze berekening uit te kunnen voeren is het verloop van het vatvolume ook op deze manier geïnterpoleerd. Van de geïnterpoleerde ruwe data worden eerst de correcties afgetrokken om vervolgens de vergelijking te maken met het volumeverloop van het meetvat. De berekening van het porositeitsverloop is uitgevoerd in een spreadsheet, een voorbeeld hiervan wordt in figuur 5.6 weergegeven.

stapgrootte [l]	stijg-hoogte [0.1mm]	liters totaal [l]	absorptie [l]	wand-correctie [l]	stapgrootte incl. correcties [l]	volume verloop meetvat [l]	porositeit [%]
0,05091	2588	29,42	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1131	38,70
0,05091	2589	29,47	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1131	38,70
0,05091	2590	29,52	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1131	38,70
0,05091	2591	29,57	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1131	38,70
0,05091	2592	29,62	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1168	37,45
0,05091	2593	29,68	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1168	37,45
0,05091	2594	29,73	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1168	37,45
0,05091	2595	29,78	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1168	37,45
0,05091	2596	29,83	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1168	37,45
0,05091	2597	29,88	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1168	37,45
0,05091	2598	29,93	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1168	37,45
0,05091	2599	29,98	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1168	37,45
0,05091	2600	30,03	0,0004504	0,006685	0,04377	0,1168	37,45
0,05562	2601	30,09	0,0004504	0,006685	0,04848	0,1168	41,48
0,05562	2602	30,14	0,0004504	0,006685	0,04848	0,1168	41,48
0,05562	2603	30,20	0,0004504	0,006685	0,04848	0,1168	41,48
0,05562	2604	30,25	0,0004504	0,006685	0,04848	0,1168	41,48

Figuur 5.6: berekening porositeit uit data watervulproef

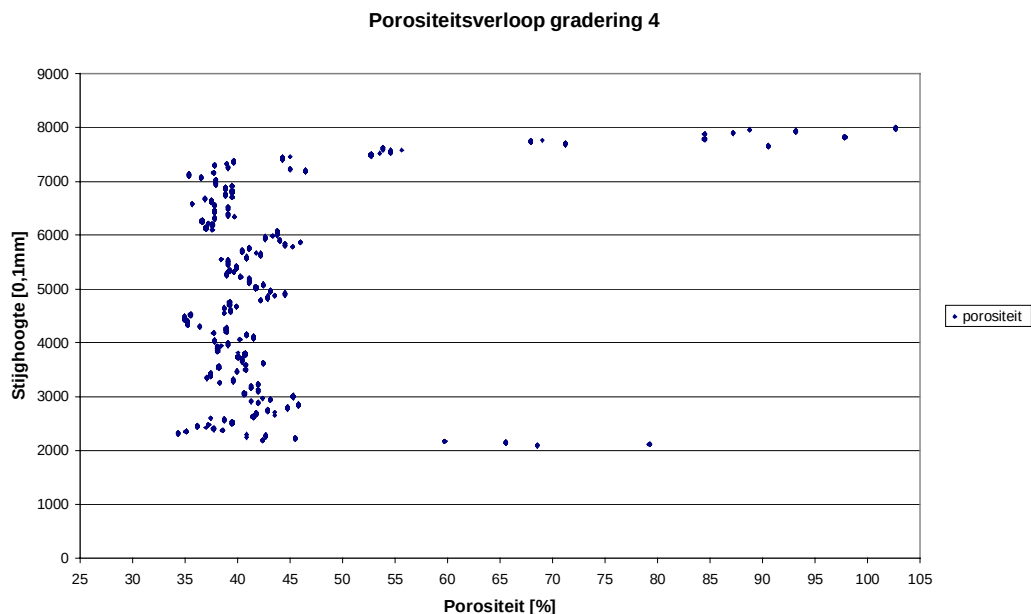
Met deze bewerking is het mogelijk om voor alle 'watervulproeven' het porositeitsverloop over de hoogte weer te geven.

5.4.5 Schematisering porositeitsverloop

Om resultaten te kunnen bepalen uit het ontstane porositeitsverloop is het nodig om dit verloop te schematiseren. Het doel van de schematisering is de bepaling van de gemiddelde porositeit over een laag en het porositeitsverloop over de laagscheidingen. In dit hoofdstuk zal beschreven worden hoe deze schematisering zal plaatsvinden.

5.4.5.1 Gemiddelde porositeit over een laag.

Het probleem bij de bepaling van de gemiddelde porositeit over een laag is de bepaling van het punt waarbij de gemiddelde porositeit overgaat in de oplopende porositeit bij de boven- en onderkant van de laag. In figuur 5.7 wordt het porositeitsverloop weergegeven van de watervulproef van gradering 4, zoals deze volgt uit de databewerking.



Figuur 5.7: porositeitsverloop gradering 4

In de figuur zijn alle geïnterpoleerde punten die volgen uit de bewerking van de ruwe data weergegeven. Zoals te zien is, moet er een definitie volgen die vastlegt waar de overgang van de gemiddelde porositeit naar de oplopende porositeit in de randen plaatsvindt. In de gemiddelde porositeit zit een bepaalde spreiding die goed weergegeven kan worden door de standaardafwijking. Het overgangspunt kan nu als volgt gedefinieerd worden:

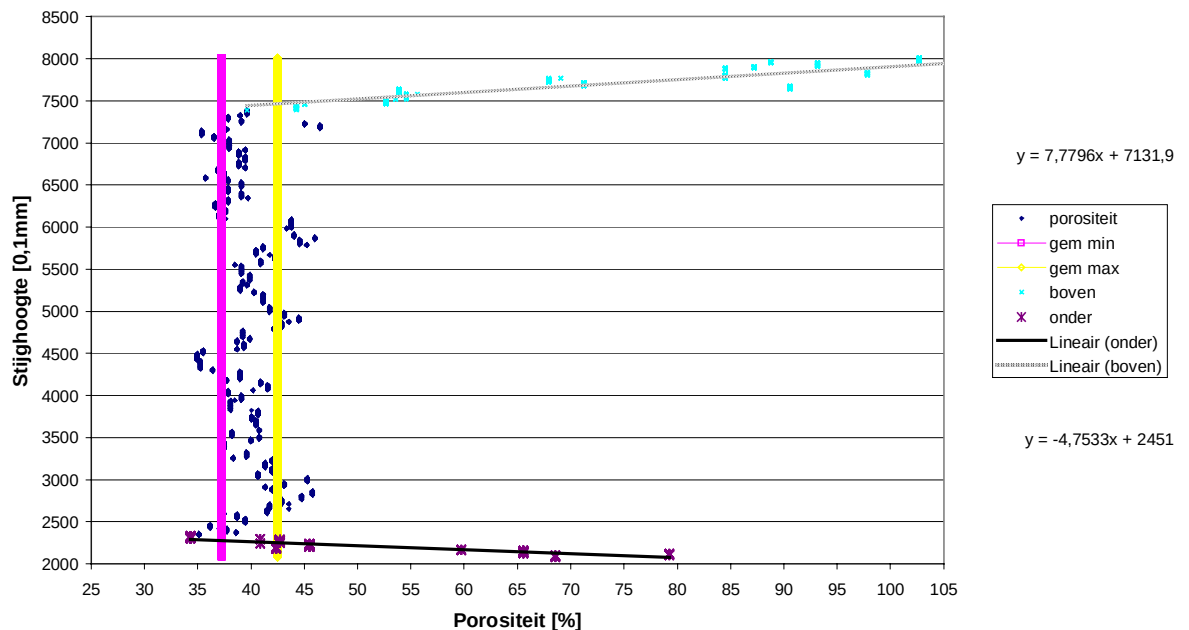
De punten, aan de boven- en onderkant van de laag die zich buiten de bandbreedte rond het gemiddelde bevinden worden niet meer tot het gemiddelde, maar tot de randen gerekend.

De bandbreedte rond het gemiddelde wordt gedefinieerd door:

De ondergrens van de bandbreedte is gelijk aan de gemiddelde waarde verminderd met de standaardafwijking (bepaald uit de meetpunten die het gemiddelde bepalen),

en de bovengrens is gelijk aan de gemiddelde waarde vermeerderd met de standaardafwijking.

Schematisatie gradering 4



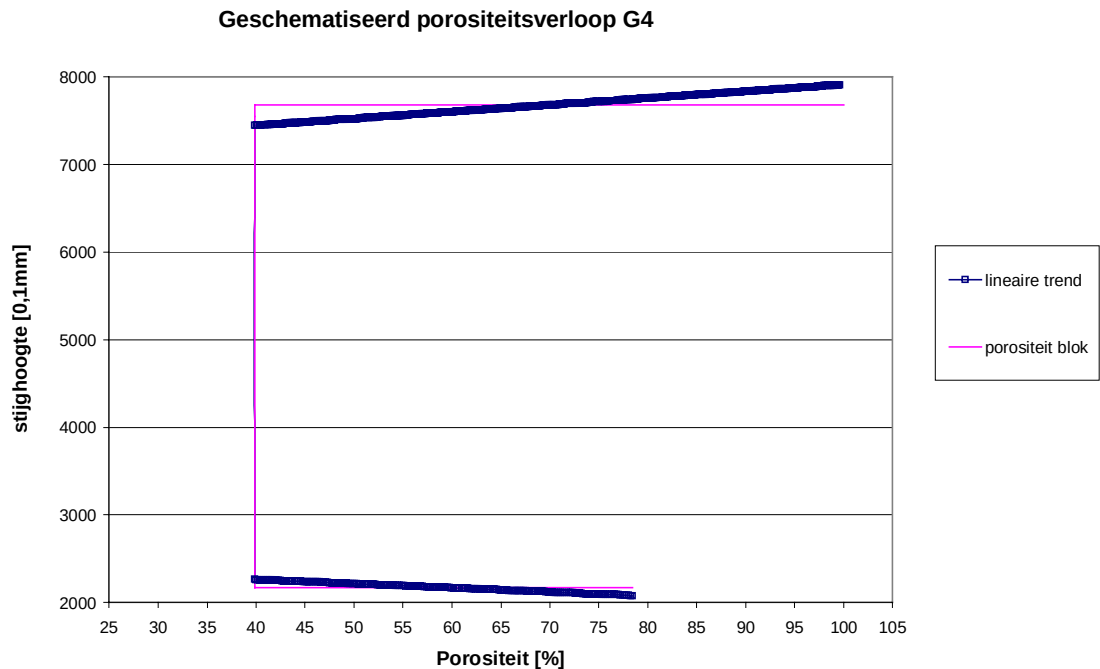
Figuur 5.8: bandbreedte rond gemiddelde porositeit

In figuur 5.8 wordt de bandbreedte rond het gemiddelde aangegeven. De punten, aan de boven- en onderkant, die buiten de bandbreedte vallen worden als de boven- en onderrand gedefinieerd.

In de bovenrand komen enkele punten voor die een grotere porositeit hebben dan de maximale waarde van 100%. Dit kan het gevolg zijn van een fout in de correctie van het wandeffect. Naast deze fout neemt de nauwkeurigheid in de bovenrand af doordat de stijging van het waterniveau per liter water afneemt door het toenemende poriënpercentage. De gelijkblijvende meetfout wordt nu gemaakt op een kleiner wordende stijghoogte waardoor de fout toeneemt. De meetpunten die boven de toppen van de stenen liggen geven echter wel hetzelfde verloop weer als het volumeverloop van het meetvat. De punten in de boven- en onderrand kunnen geschematiseerd worden met een lineaire regressielijn. Deze regressielijn is bepaald met behulp van de kleinste-kwadraten-methode. Deze methode plaatst de regressielijn op een zodanige manier dat de fout die gemaakt wordt ten opzichte van de meetpunten minimaal is. De functies van de regressielijnen zijn boven en onder de legenda weergegeven.

Tot dusver is bepaald waar de overgangen liggen tussen de gemiddelde porositeit en de oplopende porositeit in de randen. De gemiddelde porositeit over de laag kan worden weergegeven met behulp van het bepalen van het gemiddelde van deze meetpunten. Er kan momenteel echter nog niet aangegeven worden waar de boven- en onderkant van de laag liggen; ze worden immers nog door een lineaire functie beschreven. Om de theoretische boven- en ondergrens te kunnen bepalen moet het gemiddelde van de regressielijn gevonden worden. Dit niveau wordt weergegeven door het gemiddelde van de grootste en de kleinste y-waarde van de regressielijn. Hiermee is dan de theoretische laagscheiding bepaald. In de figuur 5.9 wordt zichtbaar gemaakt hoe de schematisering er uit zal gaan zien. In figuur 5.9

geeft de reeks 'porositeit' het verloop aan met de lineaire regressielijnen voor de boven- en onderkant en daartussenin de gemiddelde porositeit over de laagdikte. De reeks 'porositeit blok' maakt verschil met de reeks 'porositeit' door de lineaire trends voor de boven- en onderkant weer te geven door het gemiddelde niveau hiervan. Door uitvoering van de bovenstaande bewerkingen is het porositeitsverloop geschematiseerd, zodat met behulp van deze

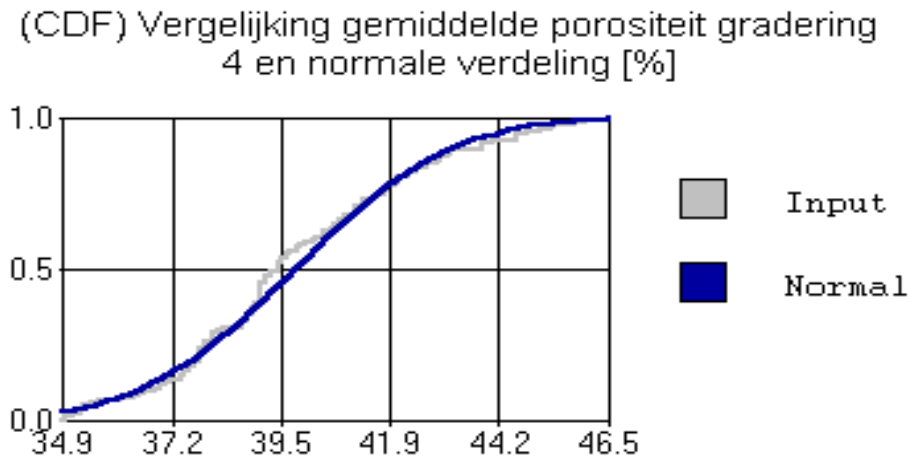


Figuur 5.9: schematisering porositeitsverloop

schematisering de resultaten bepaald kunnen worden. Er zal echter nog wel vastgesteld moeten worden wat de betrouwbaarheid is van deze schematisering, ofwel in hoeverre komt deze schematisering overeen met de werkelijke meetgegevens. Hierbij zal ook rekening gehouden moeten worden met de meetfouten die gemaakt zijn in de bepaling van de meetgegevens.

5.4.5.2 Bepaling spreiding in porositeitsverloop

De spreiding van de gemiddelde porositeit kan worden weergegeven door de standaardafwijking van deze punten rond het gemiddelde. Hierbij wordt aangenomen dat op grond van de centrale limietstelling de spreiding rond het gemiddelde kan worden weergegeven door een normale verdeling. In figuur 5.10 is de cumulatieve kansverdeling



Figuur 5.10: vergelijking data porositeit met normale verdeling

weergegeven van de data die de gemiddelde porositeit in gradering 4 bepalen. Deze kansverdeling is vergeleken met een normale verdeling. Uit de kansverdeling is goed te zien dat het goed mogelijk is om de data die de gemiddelde porositeit weergeven te beschouwen als een normale verdeling. De spreiding van de meetpunten rond de boven- en ondergrens van de laag moet anders aangepakt worden. Deze punten volgen namelijk de lineaire regressielijn die door de punten is gefit. De lineaire regressielijn en de meetpunten er omheen kunnen worden beschreven door de volgende functie:

$$f(t) = Ax + b + g(t)$$

waarin $Ax+b$ de lineaire regressielijn weergeeft en $g(t)$ de spreiding is van de meetpunten rond de regressielijn. De functie $g(t)$ is normaal verdeeld en kan als volgt worden weergegeven:

$$g(t) \sim N(0, \sigma), \text{ onafhankelijk van } t.$$

Met behulp van deze weergave kan de spreiding bepaald worden door de lineaire trend uit de functie $f(t)$ te elimineren. De lineaire trend kan geëlimineerd worden door rotatie van de regressielijn en de meetpunten, totdat de regressielijn horizontaal komt te liggen. Na rotatie van de regressielijn en de meetpunten kan eenvoudig de spreiding bepaald worden. Op grond van de centrale limietstelling kan de spreiding rond de regressielijn worden weergegeven door een normale verdeling; de regressielijn zelf geeft bij benadering (alleen bij een exacte normale verdeling komt het gemiddelde overeen met de regressielijn) het gemiddelde weer. In figuur 5.11 staat een berekening zoals hierboven beschreven is.



g4 boven	aX	+b	x bodem	ymin	ymax	ygem
Helling onder	-4,7533	2451	78,47	2078	2261	2170
helling boven	7,7796	7131,9		7442	7910	7676
Bulkporositeit [%]						
Gemiddelde	39,87					
Standaard afwijking	2,599					
Minimum	37,27					
Maximum	42,47					

Stijghoogte [0.1mm]	Porositeit [%]	delta y [0.1mm]	y' [0.1mm]	Volgnummer	y' gesorteerd [0.1 mm]
7442	44,28	344,5	7097	1	6935
7443	44,28	344,5	7098	2	6936
7444	44,28	344,5	7099	3	6937
7445	44,28	344,5	7100	4	6938
7446	44,28	344,5	7101	5	6939
7447	44,28	344,5	7102	6	6940
7448	44,28	344,5	7103	7	6941
7449	44,28	344,5	7104	8	6942
7450	44,28	344,5	7105	9	6943
7451	44,28	344,5	7106	10	6944
7452	44,28	344,5	7107	11	6945
7453	44,28	344,5	7108	12	6946
7454	44,28	344,5	7109	13	6947
7455	44,28	344,5	7110	14	6948
7456	44,28	344,5	7111	15	6949
7457	44,28	344,5	7112	16	6950
7458	45,01	350,1	7107	17	6951
7459	45,01	350,1	7108	18	6952
7460	45,01	350,1	7109	19	6953

Figuur 5.11: berekening spreiding in porositeitsverloop voor boven- en ondergrens breuksteenlaag

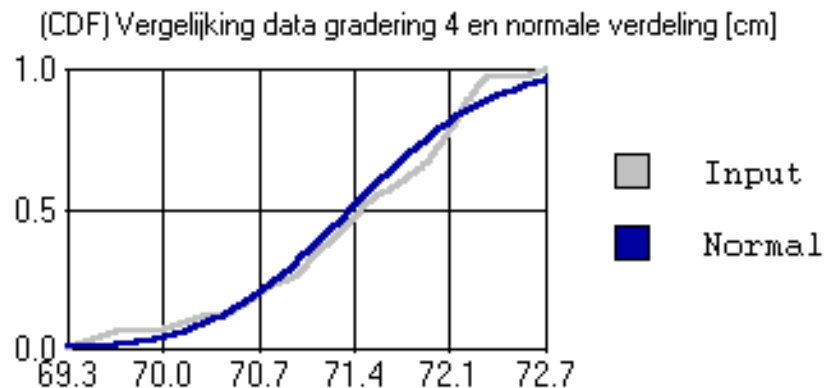
Linksboven in de spreadsheet staan de gegevens van de lineaire regressielijn weergegeven. Hierachter staan de begin- en eindcoördinaten in y-richting weergegeven. Onder de regressielijngegevens staan de gegevens die het gemiddelde over de laag beschrijven. Deze gegevens bestaan uit het gemiddelde en de standaardafwijking van de meetpunten rond dit gemiddelde; bovendien zijn de onder- en bovenmarge aangegeven door respectievelijk gemiddelde – standaardafwijking en gemiddelde + standaardafwijking.

Het onderste deel van de spreadsheet bestaat uit 6 kolomen die de berekening van de spreiding voor de bovenkant van gradering 4 weergeven. Kolom 'h' geeft de stijghoogte [0,1mm] weer van de meetpunten in de bovenkant van gradering 4. 'p' bevat de porositeit behorende bij de stijghoogte. Kolom 'delta y' geeft de correctie van dat meetpunt in y-richting weer; deze correctie wordt berekend door vermenigvuldiging van de porositeit met de helling van de lineaire regressielijn. 'y'' is de nieuwe y-coördinaat die ontstaat door de oude y-coördinaat te verminderen met 'delta y'. In principe worden de meetpunten geroteerd om het snijpunt van de lineaire regressielijn en de y-as. Dit betekent dat het gemiddelde gelijk is aan 'b' en niet meer overeenkomt met de theoretische grens zoals deze bepaald is door de blokfunctie.

Deze fout kan echter makkelijk gecorrigeerd worden, omdat het verschil tussen de theoretische grens en het snijpunt van de lineaire regressielijn met de y-as bekend is. Voor de bepaling van de spreiding van de meetpunten rond de regressielijn is dit echter niet nodig.

In de laatste kolom 'y' gesorteerd' zijn de nieuwe y-coördinaten weergegeven, maar dan gesorteerd met de kleinste waarde boven. Als deze meetpunten uitgezet worden tegen het volgnummer gedeeld door n, waarbij n het totaal aantal volgnummers is, dan ontstaat de kansverdeling van de spreiding van de meetpunten rond de regressielijn. Als we aan deze grafiek een normale verdeling toevoegen dan is goed te zien dat deze normale verdeling aardig benaderd wordt door de meetpunten. Deze grafiek wordt weergegeven in figuur 5.12.

Met behulp van de bovenstaande bewerking is het mogelijk geworden om de spreiding rond de theoretische grens te bepalen. In de spreadsheet hierboven staat de spreiding weergegeven boven de kolom 'y' gesorteerd'.



Figuur 5.12: verdeling meetpunten die de theoretische grens bepalen

5.5 Resultaten oppervlaktemeting

De oppervlaktemetingen zijn uitgevoerd met als doel aan te kunnen geven wat het verschil is tussen de bol- en de pinmeting en wat de invloed van indringing in onderliggende lagen is. In dit hoofdstuk zullen de resultaten van deze proeven bepaald worden. De resultaten worden weergegeven door gemiddelde waarden welke zijn getest op betrouwbaarheid. De betrouwbaarheid wordt weergegeven door de spreiding van de gemiddelde waarde.

Het verschil tussen de bol- en pinmeting resulteert in een regressielijn die een functie is van de D_{n50} . De indringing wordt weergegeven voor de twee verschillende surveymethoden als een functie van de verhouding in D_{n50} (D_{n50} bovenste laag/ D_{n50} onderste laag) van de twee op elkaar geplaatste lagen.

De resultaten worden weergegeven door de gemiddelde waarde van een normale verdeling. In de tabellen is deze gemiddelde waarde voorzien van de standaardafwijking. In de grafieken is een regressielijn bepaald door de gemiddelde waarden. De standaardafwijking is hier niet aangegeven maar kan berekend worden met een regressie-analyse die wordt beschreven door:

Regressie analyse van $y = Ax + B$ gegeven een dataset (x_i, y_i) met $i=1, \dots, N$ (en x_i in oplopende volgorde)

Schatters voor A en B zijn:

$$A^* = \text{cov}(x, y) / s_x^2$$

$$B^* = \text{mean}(y) - A^* \text{mean}(x)$$

met cov de covariantie, s_x de standaardafwijking van x , en mean het gemiddelde.

De onzekerheden in de schatters A en B zijn:

$$CV(A) = s_i^2 / s_x^2$$

$$CV(B) = s_i^2 \{1/N + \text{mean}^2(x)/s_x^2\}$$

met CV de variatiecoëfficiënt, en s_i de standaardafwijking van de residuen.

5.5.1 Bepalen verschil tussen bol- en pinmetingen.

De gegevens verkregen uit deze proef bestaan uit verschillende datasets van 100 metingen. De helft van de datasets zijn meetpunten van de bolmeting en de andere helft zijn meetpunten van de pinmeting. Tijdens de proefuitvoering is voor elke gradering de oppervlaktemeting uitgevoerd met zowel de bol- als de pinmethode. Als deze twee datasets van elkaar afgetrokken worden ontstaat het verschil tussen de bol- en de pinmeting volgens $V \sim N(\mu, \sigma)$. Het verschil $\mu(v)$ tussen de bol- en de pinmeting wordt weergegeven door:

$$\mu(v) = \mu(\text{bol}) - \mu(\text{pin})$$

waarin:

$\mu(\text{bol})$: gemiddelde van de meetpunten verkregen door de bolmeting.
 $\mu(\text{pin})$: gemiddelde van de meetpunten verkregen door de pinmeting.

De spreiding in $\mu(v)$ kan weergegeven worden door bepaling van $\sigma(\mu(v))$. Deze spreiding kan bepaald worden door:

$$\sigma(\mu(v)) = \sqrt{\sigma^2(\mu(\text{bol})) + \sigma^2(\mu(\text{pin}))}$$

waarin:

$\sigma(\mu(\text{bol}))$: spreiding van de gemiddelde waarde uit de bolmeting
 $\sigma(\mu(\text{pin}))$: spreiding van de gemiddelde waarde uit de pinmeting

De spreiding van de gemiddelde waarde kan bepaald worden met behulp van de bootstrapmethode. De bootstrapmethode wordt als volgt beschreven:

Trek een groot aantal malen, zeg 100 keer, een nieuwe dataset van 100 getallen uit de empirische verdelingsfunctie van de dataset en bepaal van elk van de verzamelde 100 datasets de waarde van de steekproefgrootheid μ .

Aannemende dat de dataset een goede benadering is van de werkelijke situatie en dat de empirische verdelingsfunctie een goede weerspiegeling is van de dataset, kan er verwacht worden dat deze procedure een goede indruk geeft over hoe het gemiddelde van deze dataset kan variëren.

Het trekken van een getal uit de empirische verdelingsfunctie van de dataset is equivalent met het trekken van een getal uit de data zelf met een gelijke kans $1/100$ op ieder element van de dataset. Zodoende is het trekken van de 100 getallen uit de dataset equivalent met het trekken met teruglegging van 100 getallen uit de oorspronkelijke dataset met gelijke kans $1/100$. Het is gebruikelijk om de 100 getallen die op deze wijze worden getrokken te onderscheiden van de getallen in de oorspronkelijke dataset door ze van een ster te voorzien. Dus

$$x_1^*, x_2^*, \dots, x_{100}^*$$

is de algemene aanduiding van 100 trekkingen met teruglegging uit de oorspronkelijke data, aangegeven door

$$x_1, x_2, \dots, x_{100}$$

Met andere woorden, elke x_i^* is gelijk aan een x_k uit de oorspronkelijke dataset. Hierbij is het mogelijk dat een x_k uit de oorspronkelijke dataset meerdere malen wordt getrokken. De nieuw getrokken dataset wordt een bootstrap dataset genoemd. Als het goed is zal de gemiddelde waarde van de gebootstrapte dataset overeenkomen met de gemiddelde waarde van de oorspronkelijke dataset, de spreiding rond het oorspronkelijke gemiddelde wordt weergegeven door de standaardafwijking van de gebootstrapte dataset.

Het bovenstaande kan worden weergegeven in de volgende procedure:

De empirische bootstrap

1. Trek met teruglegging een bootstrap dataset van 100 getallen uit de oorspronkelijke dataset $x_1, x_2, \dots, x_{100}$

$$x_1^*, x_2^*, \dots, x_{100}^*$$

2. Bereken voor de bootstrap dataset de gemiddelde waarde

$$\bar{x}_{100} = (x_1^* + x_2^* + \dots + x_{100}^*) / 100$$

3. Herhaal 1 en 2 100 maal
4. Bepaal $\sigma(\mu)$ door de standaardafwijking van de 100 gemiddelde waarden van de bootstrap dataset te bepalen.

Door de uitvoering van de bootstrapmethode is er een aantal meetfouten dat wegvalt. Alleen de meetfout die ontstaat door het aflezen van de peilnaald moet nog in rekening gebracht worden. Dit is de enige meetfout die invloed heeft op de gemiddelde waarde. Meetfouten die invloed hebben op de standaardafwijking van de meetfouten vallen weg, omdat de bootstrapmethode de spreiding van de gemiddelde waarde weergeeft. De fout door het aflezen van de peilnaald is gelijk aan 0.1mm, de minimaal gemeten laagdikte is gelijk aan 100 mm. De fout is in dit geval gelijk aan $0.1/100 = 1\%$ wat verwaarloosd kan worden, zodat er geen correcties op de bootstrapresultaten gedaan hoeven te worden.

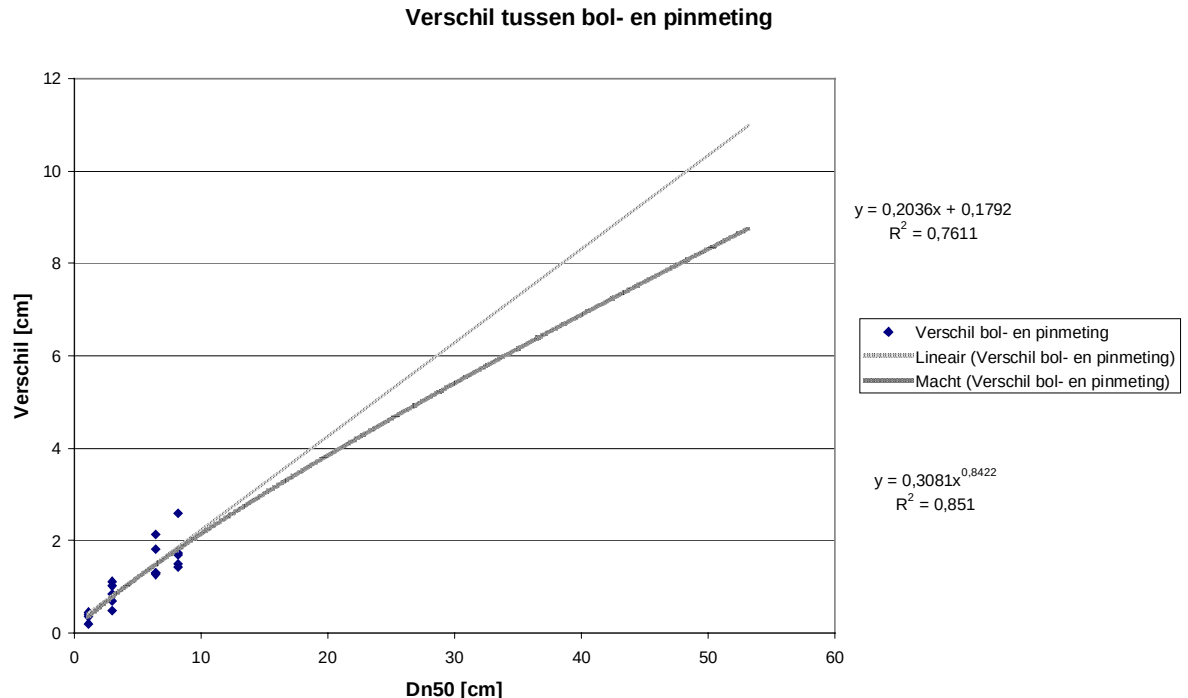
Door toepassing van de bootstrapmethode is het mogelijk om van een dataset van een bolmeting de waarde te bepalen voor $\sigma(\mu(\text{bol}))$. Van dezelfde proef is ook een oppervlaktemeting met de pinmethode beschikbaar; uit deze dataset kan de waarde voor $\sigma(\mu(\text{pin}))$ bepaald worden. Nu is het mogelijk om een verschil aan te geven tussen de bol- en de pinmeting en ook de betrouwbaarheid of spreiding van dit verschil een waarde te geven. De ontstane verschillen uit de verschillende proeven worden weergegeven in tabel 5.4.

Meting	1	2	3	4	5
Gradering 1					
$\mu(v)$ [cm]	0,3503	0,4024	0,1988	0,4479	
$\sigma(\mu(v))$ [cm]	0,07304	0,06830	0,06729	0,08104	
Gradering 2					
$\mu(v)$ [cm]	0,8460	1,016	0,6970	0,4795	1,110
$\sigma(\mu(v))$ [cm]	0,1780	0,1545	0,1504	0,1648	0,1764
Gradering 3					
$\mu(v)$ [cm]	1,812	1,269	1,302	2,136	1,307
$\sigma(\mu(v))$ [cm]	0,2952	0,3037	0,2761	0,3373	0,3030
Gradering 4					
$\mu(v)$ [cm]	2,592	1,495	1,739	1,688	1,423
$\sigma(\mu(v))$ [cm]	0,4035	0,3063	0,4113	0,3632	0,4262

Tabel 5.4: gemiddelde waarden van het verschil tussen bol- en pinmeting [cm]

De resultaten laten zien dat de bolmeting altijd een hoger niveau meet dan de pinmeting. Deze conclusie mag geen verrassing zijn omdat de bolmeting de 'dalen' in het breuksteenoppervlak maar gedeeltelijk weergeeft. Uit het literatuuronderzoek kwam naar voren dat er hoogstwaarschijnlijk geen schaafeffecten optreden door de verschaling naar proefniveau. De waarden die het verschil tussen de bol- en pinmeting bepalen kunnen uitgezet worden tegen de D_{n50} van de gradering. Het verloop van het verschil als functie van de D_{n50} van de gradering wordt weergegeven in figuur 5.13. De gemiddelde waarden zijn in de grafiek benaderd door een regressielijn. In het geval dat er geen schaafeffecten zullen optreden moet de regressielijn lineair zijn, wat in de grafiek is weergegeven door de bovenste regressielijn. De onderste regressielijn is een weergave van de gemeten waarden met behulp van een machtsfunctie. Boven en onder de legenda zijn de vergelijkingen van de twee regressielijnen weergegeven. Hieruit blijkt dat de exponent in de machtsfunctie gelijk is aan 0.8422, terwijl deze bij de lineaire trend gelijk is aan 1. Dit betekent een verschil van $1 - 0.8422 = 15.78\%$. De machtsfunctie heeft een iets hogere waarde voor R^2 (Pearson-correlatiecoëfficiënt R), wat weergeeft dat deze functie het meest geschikt is om de meetpunten weer te geven.

Hiermee kan niet bevestigd worden dat er geen schaafeffecten optreden. De werkelijke waarde ligt waarschijnlijk ergens tussen de twee regressielijnen in. Deze twee regressielijnen geven een boven- en een ondergrens aan die in de praktijk gebruikt kunnen worden voor het verschil tussen de bol- en pinmeting.



Figuur 5.13: verschil tussen bol- en pinmeting als functie van D_{n50}

5.5.2 Bepaling van indringing

De mate van indringing in onderliggende lagen wordt bepaald door het verschil te nemen tussen twee metingen van dezelfde laagdikte. Echter, de ene keer is de laag bijvoorbeeld op de bodem van het meetvat geplaatst en de andere keer op een kleinere gradering. De geplaatste laagdikte wordt gelijk verondersteld vanwege het volgende feit:

De hoeveelheid steen die een laag vormt is bepaald door weging van de steen vóór plaatsing in het meetvat. In de foutenanalyse van de oppervlaktemeting is al aangetoond dat de fout die gemaakt wordt door de weging van de breuksteen verwaarloosbaar klein is.

Het verschil tussen de twee laagdiktemetingen vormt de basis voor de bepaling van de indringing. De waarde van de indringing wordt bepaald door:

$$\mu(\text{indr}) = \mu(\text{ld1}) - \mu(\text{ld2})$$

waarin:

$\mu(\text{ld1})$: gemiddelde laagdikte 1

$\mu(ld2)$: gemiddelde laagdikte 2

In dit geval zijn beide laagdikten bepaald door dezelfde surveymethode. Bij de bepaling van de indringing worden twee laagdikten die op een verschillende ondergrond geplaatst zijn van elkaar afgetrokken. Bij de bepaling van het verschil wordt als uitgangspunt gebruikt dat de laagdikte 1 altijd de laagdikte is die ontstaat door plaatsing op 'zichzelf'. Hiermee wordt bedoeld dat de laagdikte gemeten is op een ondergrond van dezelfde gradering als de laagdikte zelf. Laagdikte 2 wordt bepaald door plaatsing van de gradering op verschillende ondergronden.

De betrouwbaarheid van of spreiding rond de gemiddelde waarde $\mu(indr)$ kan worden weergegeven worden door $\sigma(\mu(indr))$ die bepaald wordt door de volgende formule:

$$\sigma(\mu(indr)) = \sqrt{\sigma^2(\mu(ld1)) + \sigma^2(\mu(ld2))}$$

waarin:

$\sigma(\mu(ld1))$: spreiding rond de gemiddelde waarde van de dataset die laagdikte 1 bepaalt.

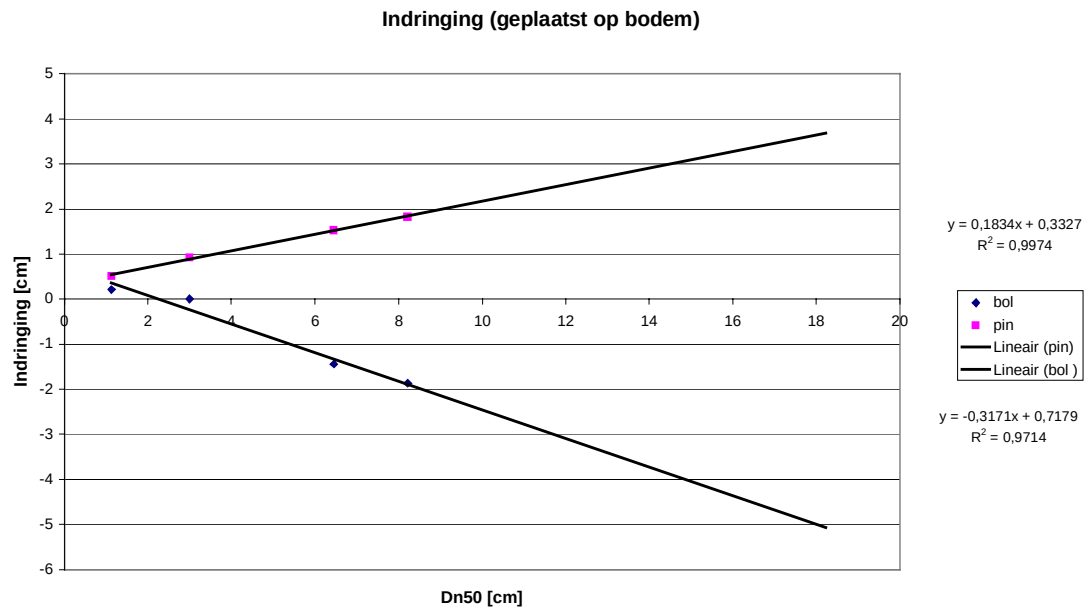
$\sigma(\mu(ld2))$: spreiding rond de gemiddelde waarde van de dataset die laagdikte 2 bepaalt.

De resultaten van de indringingsproef worden weergegeven in tabel 5.5. De eerste kolom resultaten (plaatsing op bodem, bepaald met bolmethode) is ontstaan door vermindering van laagdikte van gradering1 (plaatsing op gradering 1) met laagdikte van gradering1 (plaatsing op bodem).

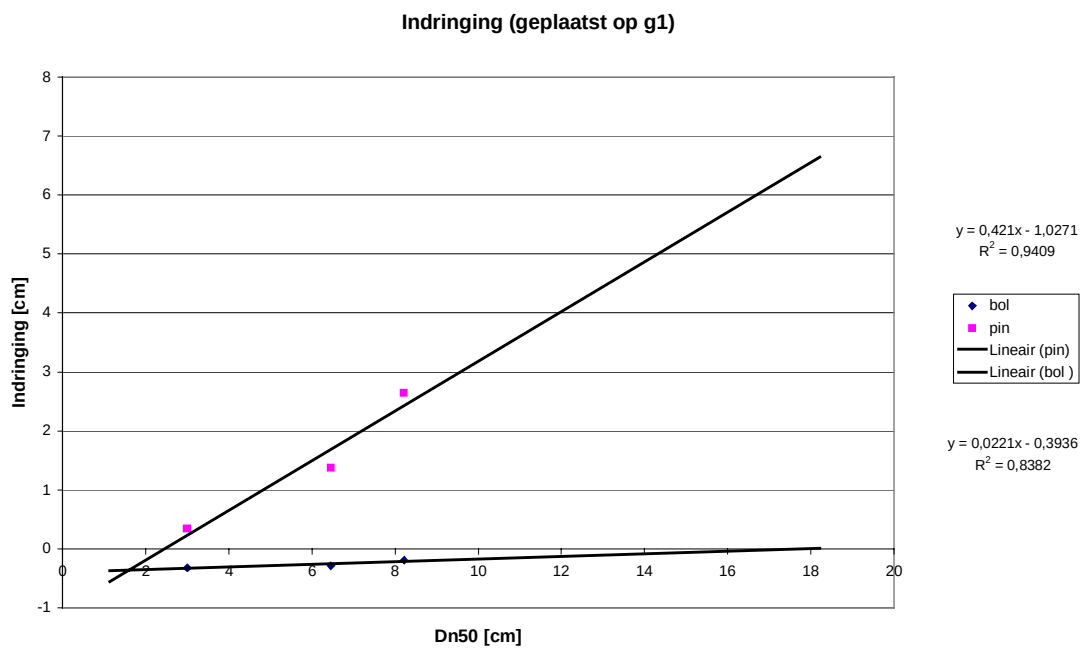
Ondergrond Meetmethode	Bodem		Gradering 1		Gradering 2	
	Bol	Pin	Bol	Pin	Bol	Pin
Gradering 1						
$\mu(indr)$ [cm]	0,2116	0,5098				
$\sigma(\mu(indr))$ [cm]	0,0679	0,1053				
Gradering 2						
$\mu(indr)$ [cm]	0,0057	0,9202	-0,3173	0,3438		
$\sigma(\mu(indr))$ [cm]	0,1624	0,2085	0,1639	0,2354		
Gradering 3						
$\mu(indr)$ [cm]	-1,439	1,526	-0,2802	1,370	-0,6764	0,9478
$\sigma(\mu(indr))$ [cm]	0,3230	0,4638	0,2925	0,5238	0,3215	0,4801
Gradering 4						
$\mu(indr)$ [cm]	-1,867	1,822	-0,1924	2,644	-0,4882	2,298
$\sigma(\mu(indr))$ [cm]	0,3527	0,6046	0,4012	0,5707	0,4138	0,4915

Tabel 5.5: resultaten indringingsproef

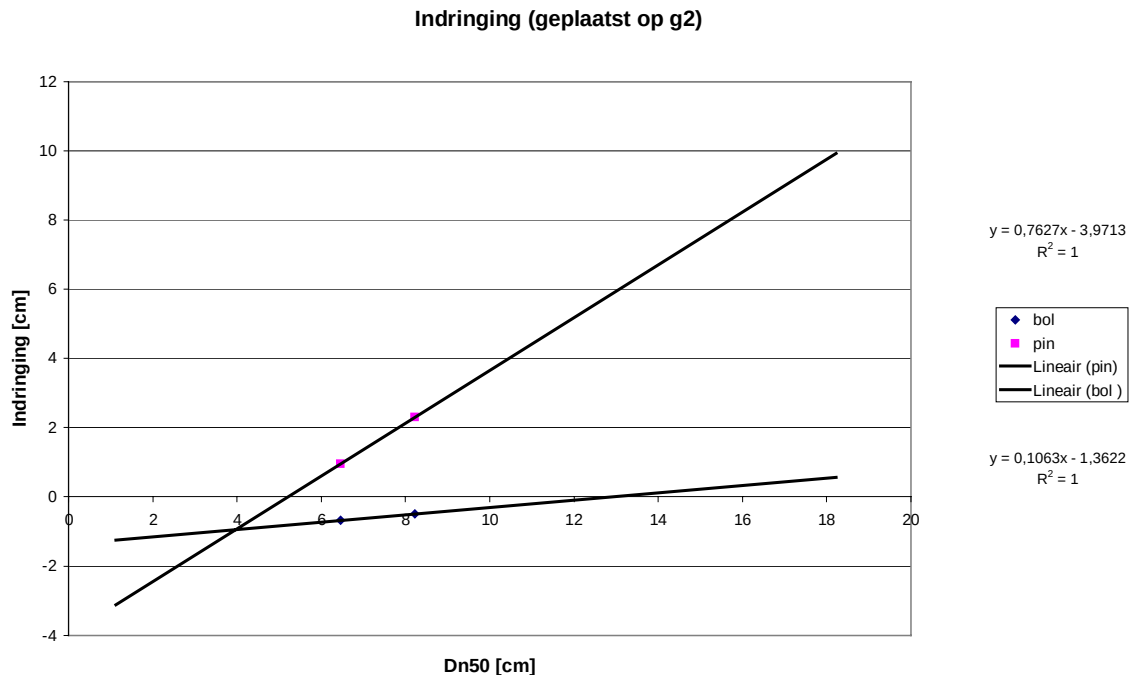
De resultaten uit de tabel worden beter weergegeven in een grafiek. Voor de drie verschillende ondergronden zijn grafieken opgesteld waarin de indringing voor zowel de bol- als de pinmeting is uitgezet tegen de D_{n50} . De grafieken worden gepresenteerd in figuur 5.14.



Figuur 5.14a: indringing bij plaatsing op harde ondergrond



Figuur 5.14b: indringing bij plaatsing op gradering 1



Figuur 5.14c: indringing bij plaatsing op gradering 2

De meetpunten die verkregen zijn uit de proeven zijn in de grafieken voorzien van een regressielijn. Per gradering en per ondergrond is het hiermee mogelijk de indringing te verschalen naar grotere steenafmetingen. De meetpunten die verkregen zijn uit de proeven worden het best beschreven (R^2 neemt grootste waarde aan) door een lineaire regressielijn. Ook deze resultaten bevestigen de afwezigheid van schaafeffecten bij uitvoering van modelproeven met breuksteenconstructies.

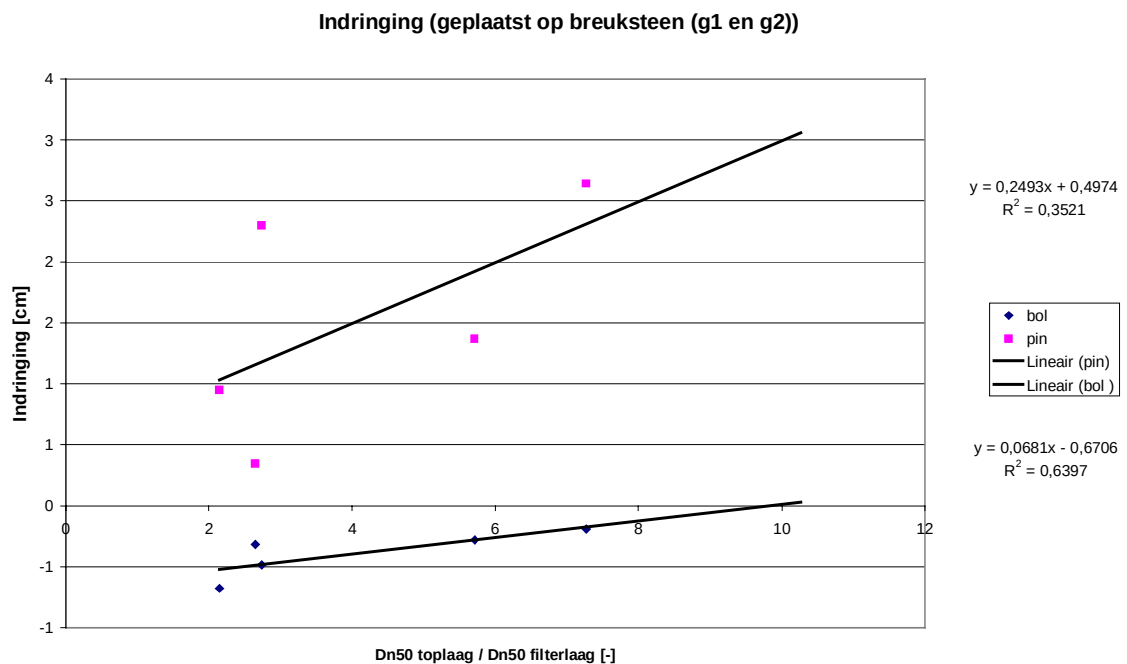
De grafieken zijn voor een deel nog samen te voegen. De bepalende factor voor de indringing is de verhouding in D_{n50} tussen de bovenste- en onderste breuksteenlaag. De indringingsproeven die vergeleken worden met plaatsing op een harde ondergrond zijn resultaten die op zichzelf staan. De eigenschappen van een harde en vlakke ondergrond zijn niet te vergelijken met een ondergrond van breuksteen. Uit de resultaten blijkt meteen het verschil tussen de bol- en de pinmeting. De twee methoden geven geen verschil in niveau van de bodem, maar wel in het niveau van de breuksteenlaag. Het gevolg hiervan is dat de bolmeting een negatieve en de pinmeting een positieve indringing geeft bij plaatsing op de bodem. Het verschil is puur te wijten aan het verschil van de twee surveymethoden, waarbij de pinmeting een lager niveau geeft bij meting van hetzelfde breuksteenoppervlak.

De onderste twee grafieken, waarin de indringing is bepaald bij plaatsing op een breukstenen onderlaag, zijn wel te combineren. Om de combinatie mogelijk te maken wordt de indringing gerelateerd aan de verhouding in D_{n50} . De verhouding D kan worden weergegeven door:

$$D = \frac{D_{n50}(\text{bovenste breuksteenlaag})}{D_{n50}(\text{onderste breuksteenlaag})}$$

Door vergelijking van de indringing op deze manier kan de grafiek in figuur 5.15 samengesteld worden. Uit deze resultaten blijkt de waarde van de bolmeting. De

bolmeting is veel minder gevoelig voor metingen en vergelijking van laagdikten van verschillende graderingen. De verandering van D_{n50} per gradering wordt gecompenseerd door de verandering van de halve bol die onder aan de meetstaf gemonteerd wordt. Aan de resultaten van de bolmeting is tegelijkertijd te zien dat de invloed van indringing gering is. De indringing loopt van $-0,5$ tot 0 centimeter bij variatie in D van 0 tot 15 cm. Voor de pinmeting verloopt de indringing van $1,0$ tot $2,5$ centimeter voor dezelfde variatie van D . Het is aannemelijk dat de pinmeting een hogere waarde geeft voor de indringing. Dit is het gevolg van het lagere gemiddelde niveau van de pinmetingen ten opzichte van de bolmetingen. De grafiek laat ook zien dat de spreiding van de indringing bij de pinmeting groter is, wat een logische gevolg is van de grotere spreiding van de meetpunten bepaald door de pinmeting.



Figuur 5.15: indringing bij plaatsing op breukstenen ondergrond

5.6 Resultaten watervulproef

De watervulproef is uitgevoerd met de doelstelling het verloop van de porositeit in de randen van een breuksteenlaag te bepalen. Het porositeitsverloop is al eerder geschematiseerd door een lineaire trend, waardoor resultaten van de proef worden weergegeven door de invloeds lengten van deze lineaire trends. Invloeds lengte is gedefinieerd als de hoogte waarover het porositeitsverloop in randen van breuksteenlagen zichtbaar is. Voor de boven- en ondergrens van een enkele breuksteenlaag is de invloeds lengte een functie van D_{n50} . Invloeds lengten in overgangen tussen breuksteenlagen kunnen worden weergegeven door een functie van de verhouding in D_{n50} van beide lagen. Naast de invloeds lengten zullen porositeitswaarden over deze lengten worden bepaald.

De resultaten van de watervulproef lieten een opmerkelijk verschijnsel zien, dat het gevolg is van de afvlakking van de breuksteenlaag. De afvlakking is uitgevoerd met als doel het verkrijgen van een zo vlak mogelijk oppervlak voor de

uitvoering van de oppervlaktemeting. Uit de proeven blijkt dat de afvlakking een verlagende werking heeft op de porositeit.

Tot slot wordt er een vergelijking getrokken tussen het porositeitsverloop in de bovenranden en de ligging van de oppervlaktemetingen. Deze vergelijking zorgt voor een referentie voor de oppervlaktemeting en geeft dus meer inzicht in de ligging van de gemiddelde niveaus. In de situatie van een dubbele breuksteenlaag kan de oppervlaktemeting van de eerste laag vergeleken worden met de ligging van het punt van maximale porositeit in de overgang.

5.6.1 Porositeitsverloop

De weergave van de porositeit over de laagdikte biedt mogelijkheden om de porositeit in de randen beter te kunnen bepalen. Om dit te bereiken zal eerst het porositeitsverloop worden weergegeven. Uit dit porositeitsverloop kunnen vervolgens antwoorden gevonden worden voor het porositeitsverloop in een rand, zoals de invloedslengte en de gemiddelde porositeit in deze randen. Deze invloedslengten en gemiddelde porositeit worden vervolgens ook weer gegeven voor overgangen tussen twee breuksteenlagen.

5.6.2 Invloedslengte porositeitsverloop over een enkele laag

De invloedslengten van de boven- en ondergrens van de breuksteenlagen volgen direct uit de schematisering van de proefgegevens. In tabel 5.6 worden de invloedslengten en de gemiddelde porositeit over deze invloedslengten van enkele breuksteenlagen weergegeven.

In de waarde van de invloedslengte zit enige spreiding, wat het gevolg kan zijn van de bepaling van de meetpunten die bij de boven- en ondergrens behoren. Bij de grotere graderingen zijn er echter meer punten beschikbaar voor deze bovengrens, waardoor de betrouwbaarheid van deze waarden groter wordt. Voor gradering 3 en 4 kan met een enkele uitschieter gesteld worden dat de invloedslengte ongeveer 0.73-0.74 maal D_{n50} bedraagt.

De ondergrenzen geven hier een ander beeld dan de bovengrenzen. In dit geval zijn de vier graderingen op de bodem van het meetvat geplaatst, wat invloed heeft op de grootte van de invloedslengte. Alleen gradering 1 valt wat buiten de trend, wat opnieuw het gevolg is van de weinige meetpunten die mogelijk zijn in deze invloedslengte. Bij plaatsing van de graderingen op de bodem van het meetvat geldt dat de invloedslengte ligt rond de 0.25- 0.30 maal D_{n50} .

	Pgem [-]	Invloedslengte [0,1mm]	Dn50 [cm]	Invloedslengte./Dn50 [-]
Gradering 1				
Helling onder	57,1	93	1,13	0,82
helling boven	70,2	139	1,13	1,23
Gradering 2				
Helling onder	53,7	82	3	0,27
helling boven	71,3	423	3	1,41
helling boven	71,8	293	3	0,98
gem boven	71,58			1,19
Gradering 3				
Helling onder	55,9	152	6,45	0,24
helling boven	70,1	577	6,45	0,89
helling boven	69,7	452	6,45	0,70
helling boven	69,9	401	6,45	0,62
gem boven	69,89			0,74
Gradering 4				
Helling onder	59,2	256	8,22	0,31
helling boven	69,9	620	8,22	0,75
helling boven	69,5	638	8,22	0,78
helling boven	69,4	548	8,22	0,67
gem boven	69,64			0,73

Tabel 5.6: invloedslengte van porositeitsverloop in enkele breuksteenlaag

De waarden voor invloedslengte en gemiddelde porositeit bij een enkele breuksteenlaag geplaatst op een harde ondergrond worden weergegeven in tabel 5.7. Deze waarden zijn bepaald door het bootstrappen van de individuele uitkomsten zoals weergegeven in tabel 5.6. Voor de bepaling van de invloedslengte van de ondergrens zijn de waarden van gradering 2, 3 en 4 gebruikt, voor de bovengrens is gebruik gemaakt van gradering 3 en 4. Niet alle resultaten zijn in de bootstrap gebruikt vanwege de onzekerheid door het kleine aantal meetpunten voor de ondergrens van gradering 1 en de bovengrenzen van gradering 1 en 2.

	Invloedslengte [$*D_{n50}$]
Ondergrens	0,275±0,013
Bovengrens	0,740±0,036

Tabel 5.7: enkele breuksteenlaag geplaatst op harde ondergrond

5.6.3 Invloedslengte porositeitsverloop in laagovergang

Plaatsing van een tweede breuksteenlaag op een reeds aanwezige laag zal invloed hebben op de invloedslengte. De bovenste laag zal indringen in de onderste laag waardoor de invloedslengte verandert ten opzichte van de situatie met de enkele laag.



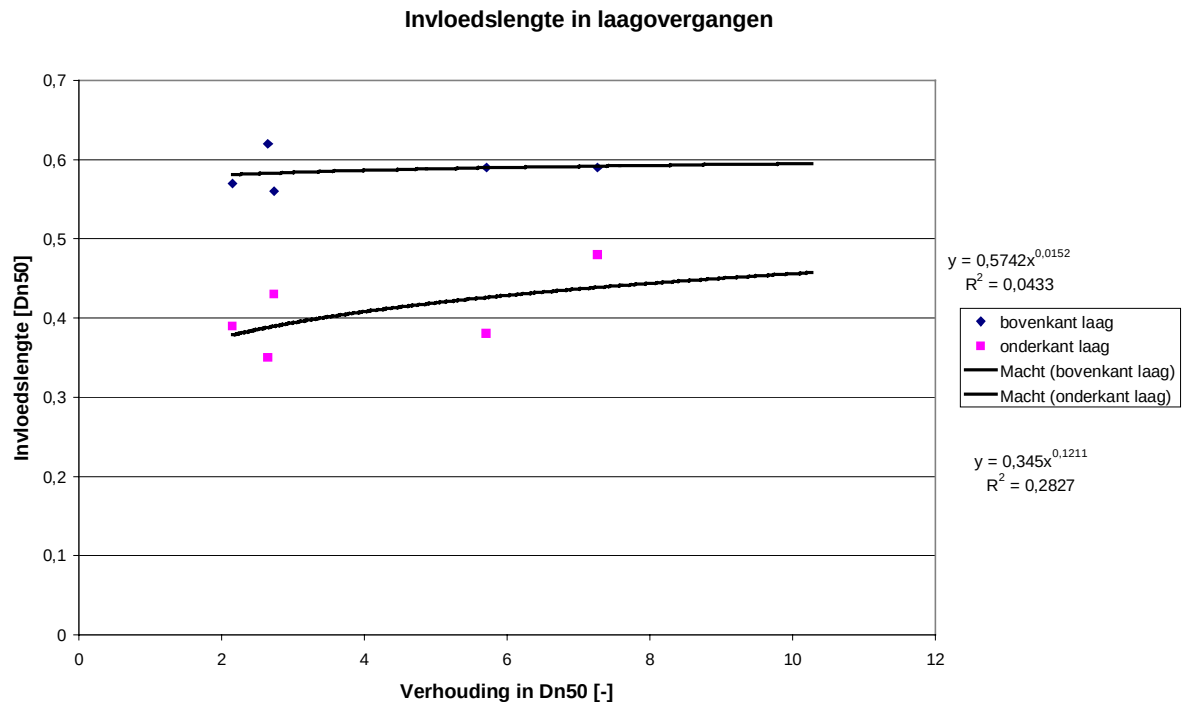
Laagopbouw	P gem [-]	Invloedslengte [0,1mm]	D _{n50} [cm]	Invloedslengte/D _{n50} [-]
G2 op G1				
G1 boven	50,9	70	1,13	0,62
G2 onder	52,6	104	3,00	0,35
G3 op G1				
G1 boven	48,5	67	1,13	0,59
G3 onder	48,4	245	6,45	0,38
G4 op G1				
G1 boven	46,7	67	1,13	0,59
G4 onder	46,1	393	8,22	0,48
G3 op G2				
G2 boven	53,0	170	3	0,57
G3 onder	51,0	250	6,45	0,39
G4 op G2				
G2 boven	51,1	168	3	0,56
G4 onder	49,5	356	8,22	0,43

Tabel 5.8: invloedslengte voor overgang tussen breuksteenlagen.

De scheiding tussen de twee graderingen is gedefinieerd als het punt van maximale porositeit. Hiervoor is gekozen omdat de porositeit in de overgang oploopt tot een bepaalde maximale waarde om vervolgens in de bovenliggende laag weer terug te lopen naar de gemiddelde waarde van die laag. Aan de hand van deze definitie is het mogelijk de invloedslengte te bepalen als het punt waar de porositeit buiten de bandbreedte rond het gemiddelde komt tot het punt van maximale porositeit. In tabel 5.8 worden de waarden van de invloedslengte en gemiddelde porositeit in de verschillende overgangen weergegeven.

De resultaten zoals deze in de tabel zijn weergegeven zijn moeilijk op betrouwbaarheid te controleren. Dit is niet mogelijk omdat elke meting andere omstandigheden heeft, waardoor het uitvoeren van een bootstrapmethode niet mogelijk is. De veranderende omstandigheden per uitgevoerde meting hebben betrekking op de D_{n50} van de twee graderingen. De verhouding $D_{n50} G_x / D_{n50} G_y$ is voor elke proef verschillend (waarbij G_x de grootste en G_y de kleinste gradering voorstelt).

Toch laten de meetpunten een bepaalde trend zien. Als de meetpunten uitgezet worden tegen de verhouding $D_{n50} G_x / D_{n50} G_y$ zijn er conclusies te trekken voor de invloedslengte in de overgang tussen breuksteenlagen. De meetpunten worden weergegeven in figuur 5.16.



Figuur 5.16: invloedslengte voor overgang tussen breuksteenlagen als functie van verhouding in D_{n50}

De meetpunten zijn te beschrijven door een regressielijn. De regressielijn die de meetpunten het beste weergeeft is een machtsfunctie. Dit resultaat is een goede indicatie van de invloedslengte, maar er zijn niet meer meetpunten beschikbaar en de betrouwbaarheid is moeilijk te controleren. De invloedslengte ‘bovenkant laag’ (invloedslengte bovenkant van de onderste laag) wordt beschreven door:

$$I_{\text{bovenkant laag}} = 0.5741 \left[\frac{D_{n50 \text{ bovenste laag}}}{D_{n50 \text{ onderste laag}}} \right]^{0.0153} * D_{n50 \text{ filterlaag}}$$

De invloedslengte ‘onderkant laag’ (invloedslengte onderkant van de bovenste laag) wordt beschreven door:

$$I_{\text{onderkant laag}} = 0.3452 \left[\frac{D_{n50 \text{ bovenste laag}}}{D_{n50 \text{ onderste laag}}} \right]^{0.1207} * D_{n50 \text{ toplaag}}$$

Vergelijking van de invloedslengten van de enkele breuksteenlaag en die in de overgang tussen breuksteenlagen levert verrassende resultaten op. Zo is de invloedslengte op een harde ondergrond kleiner dan de invloedslengte bij plaatsing op een breuksteenlaag. Een logische gedachte bij plaatsing op een breuksteenlaag is dat door de ruwheid van het oppervlak de lagen ‘in elkaar’ vallen. Dit betekent dat de invloedslengte kleiner zou moeten uitvallen in vergelijking tot de invloedslengte bij plaatsing op een harde ondergrond, waar het ‘in elkaar vallen’ niet optreedt. Uit de proefresultaten blijkt dat deze gedachte niet opgaat en dat het tegenovergestelde het geval is. Een verklaring hiervan kan zijn dat de stenen die op de bodem van het meetvat geplaatst worden nog geen ondersteuning van elkaar hebben en plat op de

bodem vallen. Eventuele gaten tussen de op de bodem liggende stenen worden vervolgens opgevuld door stenen die daar bovenop geplaatst worden. Het gevolg hiervan is dat de porositeit vanaf de bodem snel zal afnemen tot de gemiddelde bulkwaarde. Het gevolg hiervan is dat de invloeds lengte klein zal blijven.

Een zelfde gedachtengang gaat op voor de waarde van de porositeit. In het overgangsgebied tussen twee breuksteenlagen worden de ‘grotere’ poriën in de bovenste gradering opgevuld door het kleinere materiaal van de onderste gradering. Het gevolg is dat de porositeit moet gaan afnemen. Uit de resultaten blijkt echter het tegenovergestelde: de porositeit in de overgang laat in eerste instantie een kleine afname zien, maar loopt vervolgens op tot een maximale waarde die groter is dan de bulkwaarde. De kleine afname kan het gevolg zijn van de afvlakking van de breuksteenlaag wat, zoals later wordt aangetoond, een porositeitsverlaging oplevert. De conclusie die getrokken kan worden uit de resultaten is dat de grotere poriën van de bovenste gradering nauwelijks worden opgevuld, waardoor de porositeit in het overgangsgebied toeneemt.

Vergelijking van de invloeds lengten tussen de overgang tussen breuksteenlagen en de overgang tussen een breuksteenlaag en de omgeving geven wel de verwachte resultaten. In de overgang tussen breuksteenlagen zal de invloeds lengte kleiner zijn door de invloed van de bovenliggende laag waardoor de porositeit niet zo ver kan oplopen. In de overgang tussen breuksteenlaag en omgeving loopt de porositeit op naar 100%, waar een grotere invloeds lengte voor nodig is.

5.6.4 Gemiddelde porositeit

Uit de schematisering van de proefgegevens is ook de gemiddelde porositeit over de laag te bepalen. De gemiddelde porositeit is bepaald door de meetpunten die binnen de gedefinieerde bandbreedte van de gemiddelde porositeit vallen. In tabel 5.9 worden de gemiddelde waarden van de porositeit in de breuksteenlagen weergegeven.

	gradering 1	gradering 2	gradering 3	gradering 4
Gemiddelde [%]	40,17	43,10	39,79	39,46
Standaardafwijking [%]	2,66	2,85	2,99	2,69

Tabel 5.9: gemiddelde porositeit

In de foutenanalyse werd aangeduid dat de meetfouten die volgen uit de uitvoering van de metingen dermate klein zijn dat ze verwaarloosd kunnen worden. De standaardafwijking die de spreiding rond de gemiddelde waarden aangeeft ontstaat door een andere invloed. Deze afwijking is volledig tot stand gekomen door de ‘natuurlijke spreiding’ die breuksteen met zich meebrengt. Door de onregelmatige vorm van breuksteen zal het poriënvolume over de hoogte van de laag niet constant zijn, maar schommelen rond een gemiddelde. Het schommelen rond het gemiddelde komt tot uitdrukking in deze standaardafwijking.

De standaardafwijking rond het gemiddelde is nogal groot (5% a 6 % van het gemiddelde). Een manier om de betrouwbaarheid van het gemiddelde te vergroten is om meerdere proeven uit te voeren en te bekijken wat er gebeurt met de gemiddelde waarde. Het probleem is echter dat deze proeven niet uitgevoerd zijn.

Aangezien we geïnteresseerd zijn in de mate van variatie van dit gemiddelde bij verzamelen van nieuwe data onder dezelfde omstandigheden, brengt de bootstrapmethode een oplossing. In tabel 5.10 staan de resultaten weergegeven van de bootstrapresultaten van de gemiddelde porositeit in de verschillende breuksteenlagen.

	gradering 1	gradering 2	gradering 3	gradering 4
Gemiddelde [%]	40,17	43,11	39,80	39,47
Standaardafwijking [%]	0,0259	0,0300	0,0205	0,0182

Tabel 5.10: gebootstrapte waarden voor gemiddelde porositeit

Uit deze resultaten valt op te maken dat de variatie van het gemiddelde veel lager is dan de standaardafwijking in eerste instantie aangaf. Dit komt omdat de standaardafwijking het eerste geval de variatie van de meetpunten weergeeft. Door de bootstrapmethode toe te passen worden er een heleboel nieuwe datasets getrokken die alle een gemiddelde hebben. De spreiding van deze gemiddelden wordt weergegeven door de standaardafwijking in tabel 5.10.

Het CIRIA/CUR Manual geeft voor de porositeit, bij dezelfde omstandigheden als gelden voor de proefuitvoering, een waarde van 39-40%. Dit komt goed overeen met de gevonden waarden uit de proeven met uitzondering van gradering 2. Deze grotere porositeit is mogelijk het gevolg van een andere lengte-dikte verhouding. Bregman (1998) concludeert in zijn onderzoek dat de lengte-dikte verhouding een variatie in de porositeit kan opleveren van 5%. De lengte-dikte verhouding van gradering 2 voldoet wel aan de eisen die gelden voor de standaardgraderingen (volgens het CIRIA/CUR Manual), maar daarbinnen is toch nog een beperkte ruimte voor variatie van deze verhouding. Dit zou de verhoging van de porositeit voor gradering 2 kunnen verklaren.

5.6.5 Punt van maximale porositeit

Het punt van maximale porositeit is een aantal keren genoemd bij de bepaling van de invloedslengte en maakt ook deel uit van de definitie van deze lengte. Uit de proefgegevens zijn een aantal waarden bepaald voor P_{maximaal} . Hieruit blijkt dat dit punt ongeveer dezelfde waarde aanneemt. Dit zou logischerwijs ook het geval moeten zijn, omdat bij de proeven materiaal is gebruikt dat voldoet aan de specificaties die worden gegeven door het CIRIA/CUR Manual. Bij graderingen die hieraan voldoen kan bij dezelfde omstandigheden (plaatsingsmethode) dezelfde waarde verwacht worden voor P_{maximaal} .

De waarden die vergrepen zijn uit de proefresultaten zijn getest door uitvoering van de bootstrapmethode. Hiermee is de spreiding van de gemiddelde waarde bepaald en kan P_{maximaal} worden weergegeven door:

$$P_{\text{maximaal}} = 59.1 \pm 1.5\%$$

5.6.6 Gevolgen afvlakking breuksteenlaag

Na de plaatsing van de benodigde hoeveelheid breuksteen in het meetvat is de bovenkant afgevlakt om een goede oppervlaktemeting uit te kunnen voeren. De

afvlakking is uitgevoerd door het meetvat te vullen met water tot aan de bovenkant van de breuksteenlaag om zo een horizontaal referentieniveau te krijgen. Vervolgens zijn stenen die een 'hoge ligging' hadden weggehaald en teruggeplaatst op locaties met 'gaten'. Deze manier van afvlakking kan vergeleken worden met het afrijen van een breuksteenlaag, wat in de praktijk gebeurt met behulp van een balk die over de breuksteenlaag wordt getrokken.

Na de plaatsing is het breuksteenniveau met behulp van de oppervlaktemeting opgemeten. Na deze meting is de tweede helft van de breuksteenlaag geplaatst en zijn een oppervlaktemeting en de watervulmeting uitgevoerd.

Uit de proefresultaten zijn de gevolgen van de afvlakking zichtbaar geworden door een schommeling in de porositeit. In figuur 5.17 is het porositeitsverloop weergegeven van gradering 3. In deze figuur is te zien dat de porositeit eerst lager wordt waarna zij vervolgens weer oploopt. De laagdikte uit de bolmeting is weergegeven; daaraan is zichtbaar waar de laag in eerste instantie eindigde. Aan de hand van deze weergave is het mogelijk een meer algemenere conclusie te trekken over de gevolgen van de afvlakking.

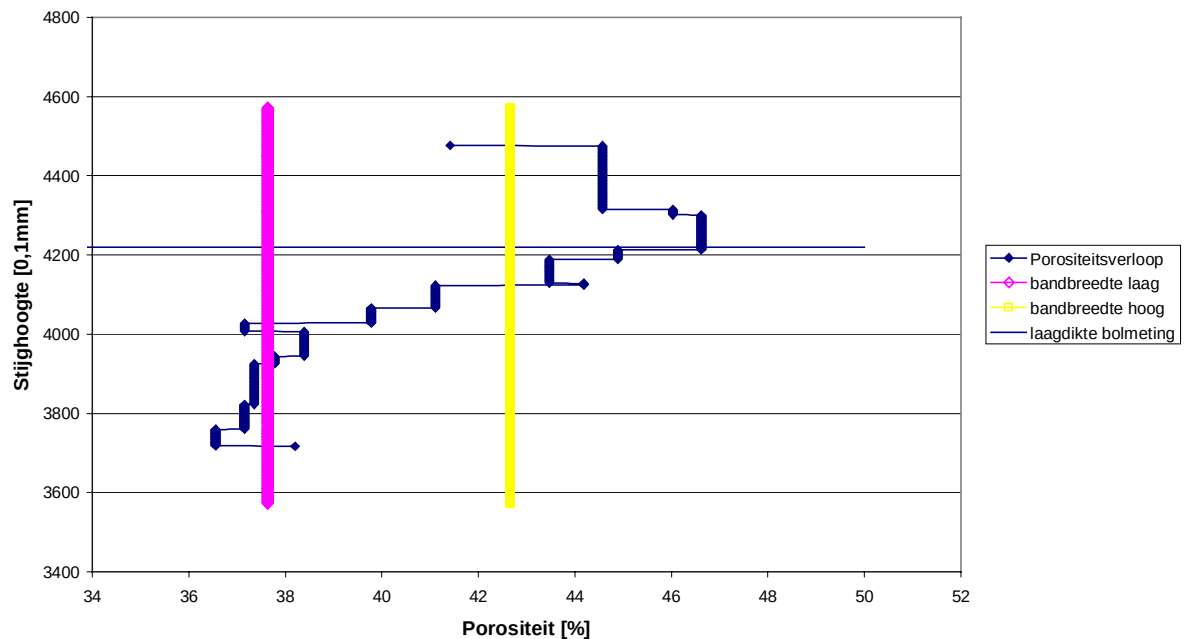
De afvlakking zal worden weergegeven voor het deel onder- en boven het niveau van de bolmeting. In tabel 5.11 worden de gevolgen voor de porositeit weergegeven.

	P boven [%]	P onder [%]	Invloedslengte onder [D_{n50}]	Invloedslengte boven [D_{n50}]
Gradering 1	42,7	38,5	1,31	2,73
Gradering 3	45,3	39,3	0,4	0,78
Gradering 4	43,4	38,4	0,45	0,45

Tabel 5.11: resultaten afvlakking

In de tabel is gradering 2 weggelaten omdat het porositeitsverloop door de afvlakking moeilijk weer te geven is. In het porositeitsverloop tussen lagen, zoals weergegeven in een eerder hoofdstuk, is de invloed van afvlakking meegenomen. De resultaten die in tabel 5.11 zijn weergegeven zijn alleen resultaten die de invloed van de afvlakking weergeven. Hieruit kan geconcludeerd worden dat door afvlakking de porositeit in de bovenkant van de laag met enkele procenten afneemt over een lengte van ongeveer 0.5 maal D_{n50} . Vervolgens zal de porositeit geleidelijk oplopen tot 100% boven de breuksteenlaag. Voor een exactere benadering van de invloed van afvlakking moeten andere proeven uitgevoerd worden. Uit de gegevens die voortkomen uit de proeven is alleen waarneembaar dat de afvlakking invloed heeft op de porositeit. Voor bepaling van de precieze invloed zijn meerdere meetpunten nodig.

Gevolgen afvlakking in gradering 3



Figuur 5.17: gevolgen afvlakking voor porositeit

5.6.7 Vergelijking theoretische grens en niveau oppervlaktemetingen

Deze vergelijking bestaat uit het samenvoegen van gegevens uit de verschillende proeven. De data uit de oppervlaktemetingen worden vergeleken met de data uit de watervulmethode. Het niveau gemeten in de oppervlaktemeting wordt weergegeven door het gemiddelde van de meetpunten en de spreiding hierin. De spreiding bestaat uit de invloeden die bij de bepaling van de meetfouten zijn aangegeven en wordt weergegeven door:

$$\sigma(Y_{ld}) = \sqrt{4 * \sigma_{ms}^2 + \sigma_{correctie}^2 + \sigma_{m1}^2 + \sigma_{m2}^2}$$

waarin:

- σ_{ms} : standaardafwijking door meetfout (0.01 mm)
- $\sigma_{correctie}$: standaardafwijking door 100 meetpunten (0.21758 mm)
- σ_{m1} : standaardafwijking oppervlaktemeting 1
- σ_{m2} : standaardafwijking oppervlaktemeting 2

De theoretische grenzen zijn bepaald en worden weergegeven door het gemiddelde niveau en de standaardafwijking (zie spreiding in porositeitsverloop).

De resultaten van de vergelijking van de verschillende methodes om het niveau van een breuksteenlaag te bepalen zijn weergegeven in tabel 5.12. In de kolom 'proef' staat het proefnummer weergegeven. Proefnummer g1-g2 staat voor de uitvoering van de proef waarbij gradering 2 boven op gradering 1 is geplaatst; hieruit volgen dan de niveaus van gradering één en twee. Deze niveaus zijn in de tweede kolom

weergegeven. De volgende kolommen geven de resultaten van de verschillende methoden meteen gevolgd door de standaardafwijking van die methode.

Proef	Niveau [cm]	Theoretische grens	Standaard afwijking	Niveau bolmeting	Standaard afwijking	Niveau pinmeting	Standaard afwijking
g1	g1	43,23	0,092	43,09	0,433	42,68	0,542
g1-0,5g4	g1	43,54	0,176	43,48	0,360	43,28	0,496
	g4	71,02	0,542	70,34	2,131	68,40	3,570
g1-g2	g1	42,73	0,102	43,09	0,433	42,68	0,542
	g2	64,57	0,427	64,53	0,979	63,51	1,425
g1-g3	g1	42,88	0,080	42,93	0,514	42,48	0,655
	g3	83,26	0,353	82,80	1,169	81,50	2,726
g2	g2	41,76	0,386	41,24	1,004	40,48	1,261
g2-g3	g2	64,23	0,099	64,53	0,979	63,51	1,425
	g3	95,15	0,436	94,33	1,496	92,81	2,430
g2-0,5g4	g2	41,07	0,145	41,24	1,004	40,48	1,261
	g4	69,33	0,445	68,89	2,115	66,73	2,629
g3	g3	62,78	0,622	62,18	1,676	60,87	2,496
g4	g4	76,76	0,779	75,98	1,976	74,49	2,666

Tabel 5.12: invloedlengte en porositeit door afvlakking

De resultaten uit de bovenstaande tabel kunnen ook anders weergegeven worden, zodat er meer overzicht in de resultaten komt. Het resultaat van de vergelijking tussen de methoden is uitgevoerd met de data van proef g4 en wordt in figuur 5.18 weergegeven.

Uit de grafiek valt op te maken dat de theoretische grens en het niveau bepaald door de bolmeting dicht op elkaar liggen. Hierdoor is het moeilijk om een conclusie te verbinden aan dit resultaat: het is immers mogelijk dat twee methoden hetzelfde niveau aangeven.

De onderlinge verschillen tussen de meetmethoden kunnen weergegeven worden door de gemiddelde waarden met elkaar te verminderen. Hierdoor ontstaat een resultaat waarin spreiding van beide gemiddelden een belangrijke rol spelen. De betrouwbaarheid van het verschil kan bepaald worden met behulp van de bootstrapmethode. Het verschil wordt bepaald door:

Verskil theoretische grens en bolmeting: $\mu(vbol) = \mu(wv) - \mu(bol)$

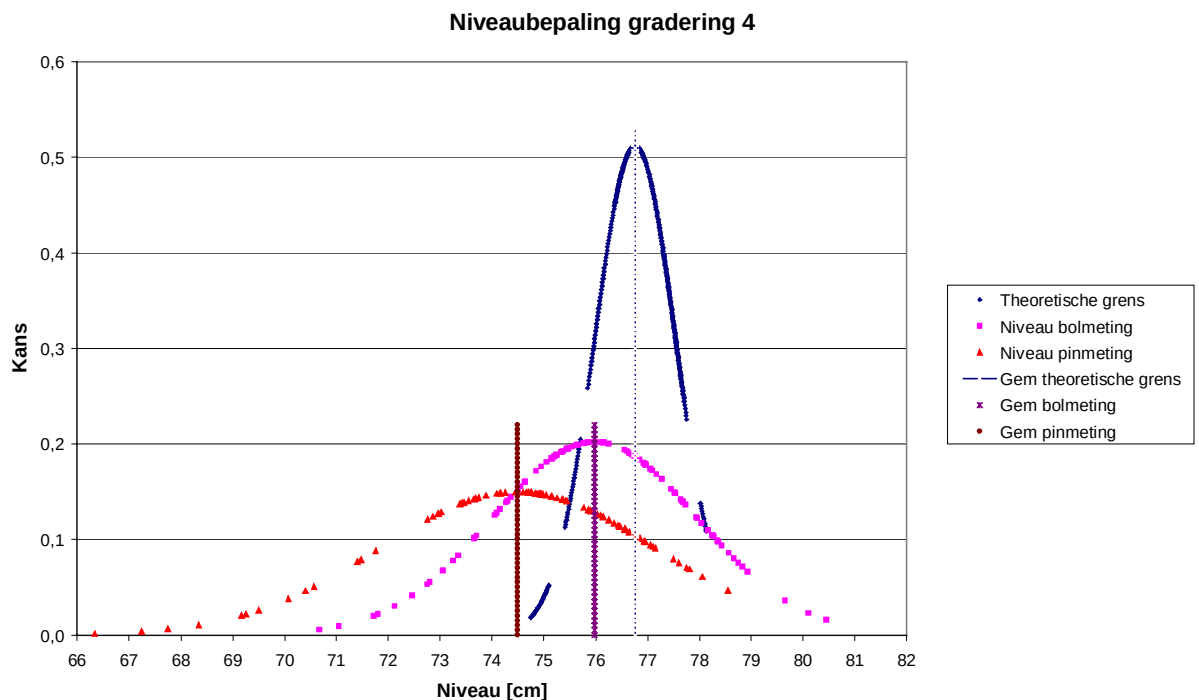
Verskil theoretische grens en pinmeting: $\mu(vpin) = \mu(wv) - \mu(pin)$

waarin:

$\mu(wv)$: Gemiddelde waarde data watervulproef.

$\mu(bol)$: Gemiddelde waarde data oppervlaktemeting uitgevoerd met de bolmethode.

$\mu(pin)$: Gemiddelde waarde data oppervlaktemeting uitgevoerd met de pinmethode.



Figuur 5.18: verschil tussen theoretische grens en oppervlaktemeting

De verschillen worden altijd bepaald door het gemiddelde niveau van de watervulmethode $\mu(wv)$ te verminderen met het gemiddelde niveau uit de oppervlaktemeting. De spreiding rond het verschil in metingen wordt weergegeven door:

$$\sigma(\mu(bol, pin)) = \sqrt{\sigma^2(\mu(wv)) + \sigma^2(\mu(opp))}$$

waarin:

$\sigma(\mu(bol, pin))$: spreiding rond gemiddelde waarde van het verschil tussen de watervulmethode en de oppervlaktemeting (uitgevoerd met zowel de bol- als de pinmethode).

$\sigma(\mu(wv))$: spreiding rond gemiddelde waarde van de data uit de watervulproef.

$\sigma(\mu(opp))$: spreiding rond gemiddelde waarde van de data uit de oppervlaktemeting uitgevoerd met zowel de bol- als de pinmethode.

In de vergelijking tussen de verschillende methoden zijn de meetfouten die gemaakt zijn bij de proefuitvoering niet meegenomen. In de foutenanalyse van beide methoden is al duidelijk geworden dat deze fouten verwaarloosbaar klein zijn.

De resultaten van de bootstrapmethode worden weergegeven in tabel 5.13. Door de manier van proefuitvoering zijn er voor gradering 2, 3 en 4 meerdere datasets en dus meerdere resultaten beschikbaar.

Meetmethode	Bolmeting		Pinmeting	
	$\mu(\text{vbol})$ [cm]	$\sigma(\mu(\text{vbol}))$ [cm]	$\mu(\text{vpin})$ [cm]	$\sigma(\mu(\text{vpin}))$ [cm]
Gradering1	0,1619	0,0439	0,5643	0,0535
Gradering2	0,1720	0,1000	0,6515	0,1233
	0,0534	0,0890	1,070	0,1352
Gradering 3	0,6071	0,1755	1,915	0,2431
	0,4884	0,1219	1,790	0,2959
	0,8603	0,1317	2,386	0,2600
Gradering 4	0,5048	0,2089	2,673	0,2407
	0,6890	0,1997	2,626	0,3425
	0,7766	0,1996	2,271	0,2608

Tabel 5.13: gebootstrapte verschillen tussen theoretische grens en oppervlaktemeting

De spreiding in de verschillen, die bepaald worden door de spreiding in de gebootstrapte gemiddelden, zijn veel lager dan de standaardafwijkingen uit de individuele datasets. Deze standaardafwijkingen werden voor het grootste deel bepaald door de ‘natuurlijke spreiding’ in de meetpunten. Deze ‘natuurlijke spreiding’ ontstaat omdat er een breuksteenoppervlak gemeten wordt, wat per definitie een bepaalde spreiding oplevert.

Door de resultaten uit tabel 5.13 anders weer te geven is het mogelijk een trend te ontdekken in de verschillen. Dit wordt weergegeven in figuur 5.19. De meetpunten zijn in de grafiek uitgezet tegen de nominale steendiameter om op deze manier een goed beeld te krijgen wat het effect is bij grotere steenafmetingen. De waarden die het verschil aangeven tussen de theoretische grens en de bol- of pinmeting, kunnen weergegeven worden door een regressielijn. De regressielijnen die het best bij de meetpunten passen zijn in de grafiek weergegeven. Voor het verschil met de bolmeting is dit een lineaire functie die beschreven kan worden volgens:

$$y = 0.0918 * D_{n50} - 0.04 \text{ [cm]}$$

De waarde van R^2 (Pearson-correlatiecoëfficiënt R , de waarde van R^2 kan worden gezien als dat deel van de variantie in y dat toe te schrijven is aan de variantie in x) van deze regressielijn is gelijk aan 0.92. Het verschil met de pinmeting kan het best weergegeven worden door een lineaire regressielijn welke voldoet aan:

$$y = 0.297 * D_{n50} + 0.08 \text{ [cm]}$$

De waarde van R^2 voor deze lineaire trend is gelijk aan 0.706. Het feit dat de meetpunten het best kunnen worden weergegeven door een lineaire regressielijn versterkt nogmaals het vermoeden dat er geen schaafeffecten optreden in de proeven.

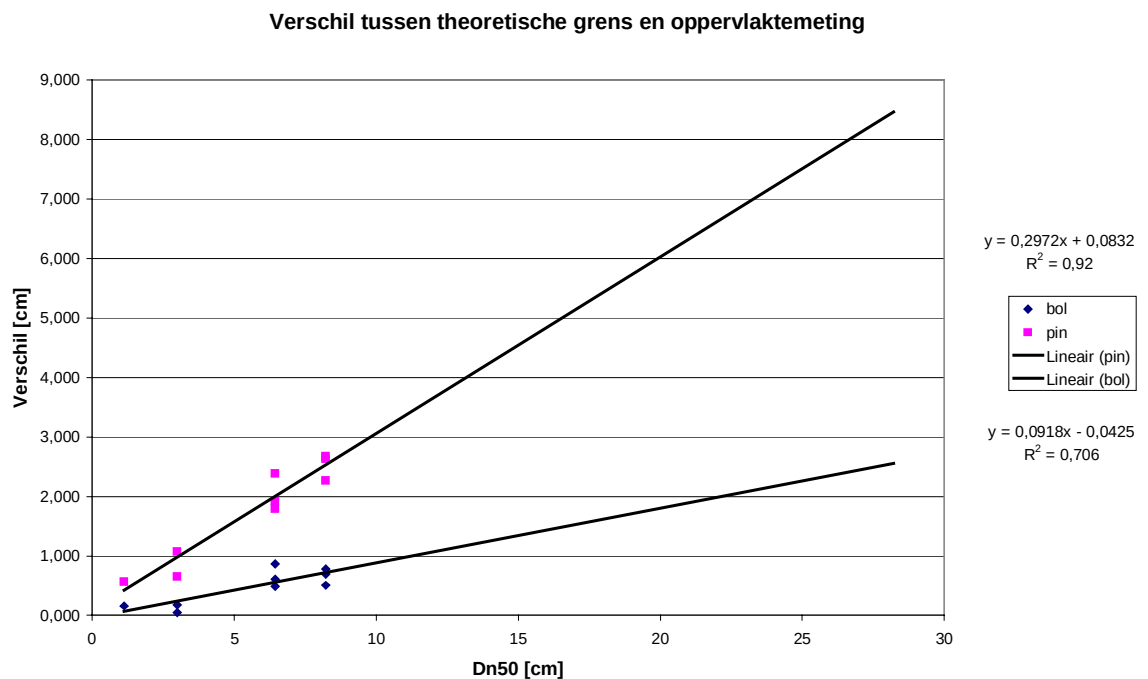
Door bovenstaande vergelijking is de ligging van de oppervlaktemeting zichtbaar geworden. Als de ligging gerefereerd wordt met de ‘toppen’ van de breuksteenlaag (niveau waar porositeit een waarde van 100% bereikt) kan een vergelijking worden gemaakt met de invloedslengte in de bovenkant van de

breuksteenlaag. De ligging van de oppervlaktemetingen onder de toppen van de breuksteenlaag wordt weergegeven door:

Bolmeting: $y = 0.462 * D_{n50} - 0.04 [cm]$

Pinmeting: $y = 0.667 * D_{n50} + 0.08 [cm]$

De invloedslengte in de bovenkant van de breuksteenlaag voldoet aan $0.74 * D_{n50}$ wat laat zien dat de oppervlaktemetingen een grote indringing hebben in de bovenkant van de breuksteenlaag. De pinmeting komt zelfs dicht bij het niveau te liggen waar de invloedslengte begint.



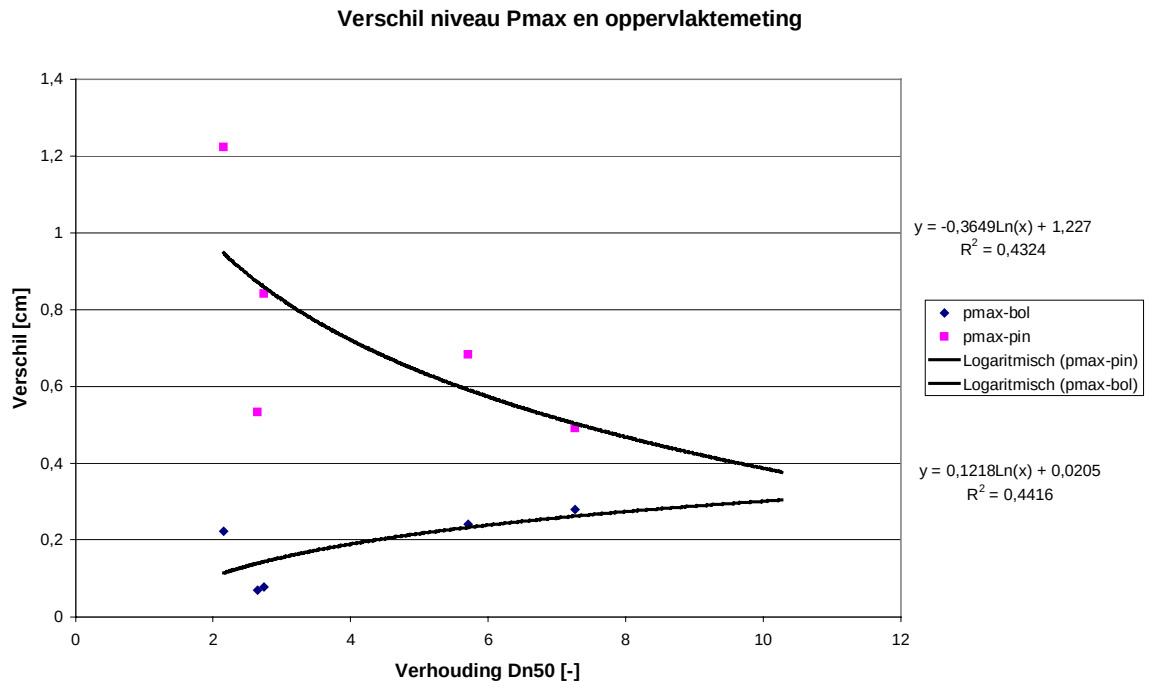
Figuur 5.19: verschil theoretische grens en oppervlaktemeting als functie van D_{n50}

5.6.8 Vergelijking P_{maximaal} en oppervlaktemeting

In de overgang tussen twee breuksteenlagen wordt het punt van maximale porositeit (P_{max}) als scheiding tussen de lagen gebruikt. Dit punt wordt bepaald door het snijpunt van de lineaire trends van het porositeitsverloop. De vergelijking tussen het niveau van P_{max} en het oppervlakteniveau volgens de oppervlaktemetingen levert een bijzonder resultaat. Opgemerkt moet worden dat de oppervlaktemetingen zijn uitgevoerd voor de plaatsing van de tweede laag, terwijl de metingen voor P_{max} zijn uitgevoerd na het plaatsen van beide lagen. De verschillen tussen P_{max} en de oppervlaktemetingen worden weergegeven in figuur 5.20.

Door de manier van bepaling van P_{max} is het niet mogelijk een spreiding van deze waarde aan te geven. De betrouwbaarheid van de gemiddelde waarde van de oppervlaktemeting kan bepaald worden met de bootstraphmethode. De spreiding van deze gemiddelden heeft echter weinig invloed op de betrouwbaarheid van de verschillen (spreiding is ongeveer gelijk aan 2% van de gemiddelde waarde).

Uit de grafiek blijkt dat er een aardige spreiding is tussen de onderlinge meetpunten waardoor het moeilijk is om een trend weer te geven van de verschillen (zie de waarde voor R^2).



Figuur 5.20: ligging van Pmaximaal ten opzichte van oppervlaktemeting

Uit het verschil tussen $P_{\max}$ en de oppervlaktemetingen kan geconcludeerd worden dat dit verschil door de proefresultaten moeilijk weergegeven kan worden. Aan de meetpunten te zien zal er wel een klein verschil optreden, maar de werkelijke waarde kan niet bewezen worden door de meetpunten. Het niveau van $P_{\max}$ is echter de enige manier om de laagscheiding aan te geven, wat van belang is voor de bepaling van de steenbehoefte. Voor verdere verwerking mag er aangenomen worden dat het verschil niet bestaat; de eventuele fout die gemaakt wordt zal niet groot zijn en weinig invloed hebben.

6 Vergelijking onderzoeksresultaten met CIRIA/CUR-methode.

In de praktijk situatie is de berekening van steenhoeveelheden voor een breuksteenconstructie vooral gebaseerd op ervaring en ontwerpgegevens die staan gespecificeerd in het CIRIA/CUR Manual. In dit hoofdstuk zal de steenhoeveelheid benodigd voor een ontwerp berekend worden zoals dat met de methode uit het CIRIA/CUR Manual gebeurt. Vervolgens zal aangegeven worden hoe de onderzoeksresultaten invloed hebben op de berekende steenhoeveelheid.

6.1 Berekening steenhoeveelheid volgens CIRIA/CUR-methode

Het CIRIA/CUR Manual geeft richtlijnen en definities voor de bepaling van de ontwerpparameters. Deze richtlijnen en definities worden in de praktijk veelvuldig overgenomen en toegepast. Met behulp van de ontwerpparameters porositeit en laagdiktecoëfficiënt is het mogelijk om de steenbehoefte te berekenen voor een gegeven constructie. De berekening van de steenhoeveelheid is gebaseerd op de conversie van m^3 naar tonnen. Deze conversie kan bepaald worden door gebruikmaking van de plaatsingsdichtheid die het aantal tonnen steen per m^3 weergeeft. De plaatsingsdichtheid wordt bepaald door de volgende factoren:

- ρ_r (dichtheid steen [kg/m^3])
- gespecificeerde steengradering, hierin worden de steeneigenschappen en graderingsopbouw vastgelegd
- vormparameter (voor breuksteen dat een onregelmatige vorm heeft doorgaans gelijk aan 0.84)

Voor de berekening van de steenhoeveelheid wordt een ontwerp gebruikt van een tweelaags filtersysteem. Op een harde ondergrond is de filterlaag geplaatst; op deze filterlaag is de toplaag geplaatst. De harde ondergrond krijgt de coördinaat $x=0$, welke naar boven toeneemt.

Voor het ontwerp gelden de volgende specificaties:

- Gradering filterlaag: 5-40 kg. deze gradering is een van de standaardgraderingen
- Gradering toplaag: 1T-3T. ook dit is een standaardgradering

Voor de gebruikte graderingen gelden de volgende eigenschappen:

	D_{15} [m]	D_{50} [m]	D_{85} [m]	D_{n50} [m]
Filterlaag	0.16	0.22	0.29	0.18
Toplaag	0.89	1.05	1.23	0.88

- Voor beide graderingen geldt: $l/d < 3$
- Intrinsieke eigenschappen worden goed verondersteld (is hier niet van belang).
- $\rho_{\text{steen}} = 2800 \text{ kg/m}^3$.
- Surveymethode: halve-bol-methode gespecificeerd volgens het CIRIA/CUR Manual.



- Plaatsingsmethode: random, boven water
- Vormbeschrijving: onregelmatig (normaal voor breuksteen)
- Verliezen door verwerking, transport e.d. vallen buiten beschouwing.
- $D_{\text{filterlaag}} = 0.55 \text{ m. (3 maal } D_{n50})$
- $D_{\text{toplaag}} = 1.76 \text{ m. (2 maal } D_{n50})$

Met behulp van de bovenstaande specificaties kan tabel 20 uit het CIRIA/CUR Manual geraadpleegd worden voor de bulkporositeit en laagdiktecoëfficiënt. Hieruit volgt een waarde van 39% voor de bulkporositeit.

Met deze gegevens is het mogelijk om de plaatsingsdichtheid te berekenen. Deze dichtheid is in dit geval gelijk aan 1.708 T/m^3 .

Met de plaatsingsdichtheid en het volume steen, dat volgt uit de ontwerptekening, is het mogelijk de steenbehoefte te bepalen.

Filterlaag: 0.939 T/m^2 .

Toplaag: 3.01 T/m^2 .

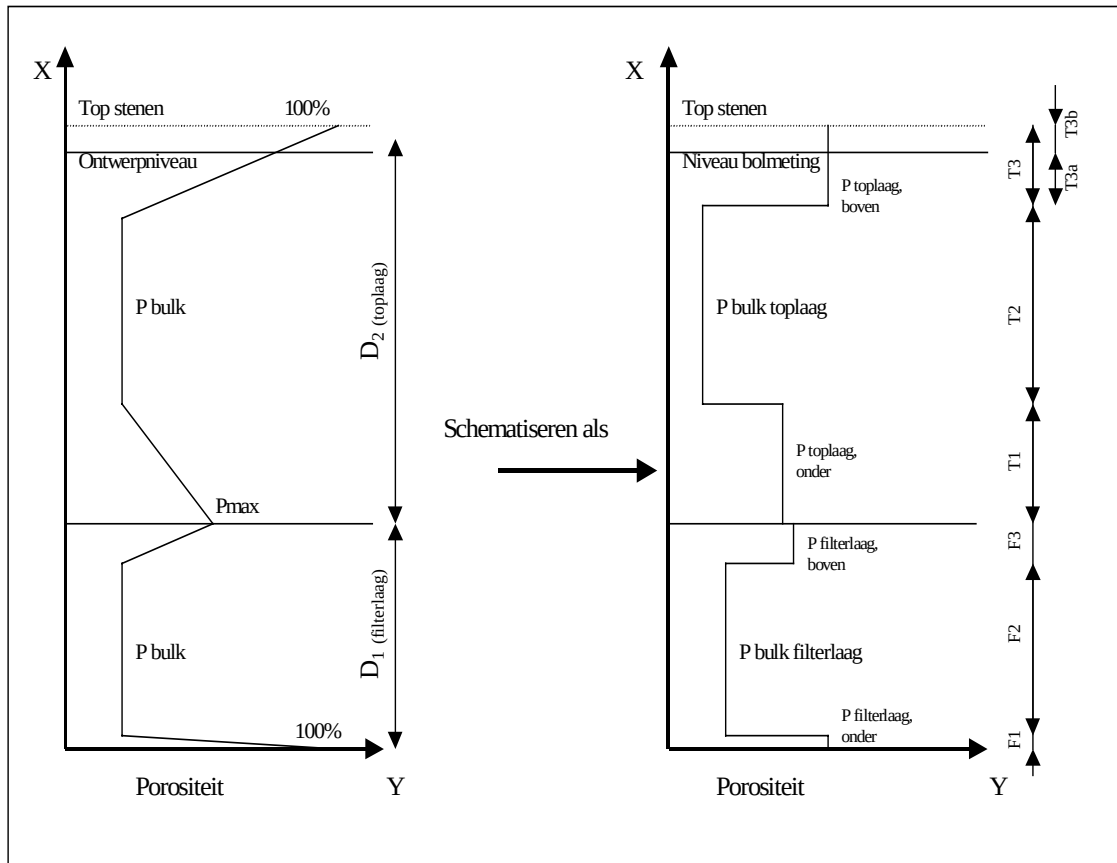
Hiermee is de steenbehoefte voor deze constructie volgens de methode die wordt beschreven in het CIRIA/CUR Manual bepaald

6.2 Berekening steenbehoefte met gebruikmaking van onderzoeksresultaten.

Het verschil met de huidige methode voor de berekening van de steenbehoefte zit in de overgangen van de lagen. In deze situatie zijn drie overgangen aanwezig namelijk:

- van bodem naar filterlaag,
- van filterlaag naar toplaag,
- van toplaag naar omgeving.

De resultaten uit het onderzoek hebben geresulteerd in benaderingen voor deze overgangen. De invloed van de overgangen worden aangegeven met een invloedslengte waarover een andere porositeit optreedt dan gemiddeld in de breuksteenlaag. Bij de verwerking van de resultaten is het porositeitsverloop in de overgangen geschematiseerd door een lineair verloop. Voor de berekening van de steenbehoefte in de boven beschreven constructie wordt dit verloop anders geschematiseerd. Deze schematisering wordt weergegeven in figuur 6.1.



Figuur 6.1: schematisering porositeitsverloop

In figuur 6.1 zijn in de schematisering van het porositeitsverloop een aantal overgangsgebieden aangegeven. Deze overgangsgebieden worden door de proefresultaten benaderd door verschillende vergelijkingen. In de bovengrens wordt het gemeten niveau (baak uitgevoerd met bolvormig voetstuk) gelijkgesteld aan het ontwerpniveau van de toplaag. De toppen van de stenen van deze toplaag zullen dus boven dit niveau uitsteken. Om de onderlinge ligging van deze niveaus te kunnen weergeven is de lengte 'T3' onderverdeeld in twee stukken waarin 'T3b' het niveauverschil weergeeft tussen de toppen van de stenen en het ontwerpniveau. 'T3a' is vervolgens eenvoudig te bepalen. De lengtes die in de figuur zijn weergegeven kunnen bepaald worden door (uitgedrukt in centimeters en de afleiding van de formules is weergegeven in hoofdstuk 5):

- D_1 : 55 cm (ontwerp dikte)
- D_2 : 176 cm (ontwerp dikte)
- F_1 : $0.275 \cdot D_{n50} \text{ filterlaag}$
- F_2 : $D_1 - F_1 - F_3$

- F_3 :
$$I_{\text{bovenkant laag}} = 0.5741 \left[\frac{D_{n50 \text{ bovenste laag}}}{D_{n50 \text{ onderste laag}}} \right]^{0.0153} * D_{n50 \text{ filterlaag}}$$

- T_1 :
$$y_{\text{onderkant laag}} = 0.3452 \left[\frac{D_{n50 \text{ bovenste laag}}}{D_{n50 \text{ onderste laag}}} \right]^{0.1207} * D_{n50 \text{ toplaag}}$$



- T_2 : $D_2 - T_1 - T_{3a}$
- T_3 : $0.740 * D_{n50}$ toplaag
- T_{3a} : $T_3 - T_{3b}$
- T_{3b} : $0.462 * D_{n50} - 0.04$

Door toepassing van de bovenstaande definities is het mogelijk de verschillende lengtes in de schematisering te bepalen. Naast de lengtes moeten de waarden voor de porositeit over deze lengtes bepaald worden. Voor het bepalen van de porositeit wordt gebruik gemaakt van de volgende uitgangspunten:

- De bulkporositeit wordt bepaald door de specificaties van de graderingen. Aan de hand van deze specificaties kan met behulp van tabel 20 uit het CIRIA/CUR Manual de bulkporositeit worden afgelezen. In dit geval geldt voor beide graderingen een bulkporositeit van 39%.
- Voor de waarde van P_{max} geldt: $59.1\% \pm 1.5\%$. Deze waarde is bepaald uit de proefresultaten.

Met gebruikmaking van de bovenstaande uitgangspunten kan voor elk deel van de schematisering de porositeit bepaald worden door:

- $P_{\text{filterlaag, onder}}$: $(P_{\text{bulk filterlaag}} + 100)/2$ [%]
- $P_{\text{filterlaag, boven}}$: $(P_{\text{bulk filterlaag}} + P_{max})/2$ [%]
- $P_{\text{toplaag, onder}}$: $(P_{\text{bulk toplaag}} + P_{max})/2$ [%]
- $P_{\text{toplaag, boven}}$: $(P_{\text{bulk toplaag}} + 100)/2$ [%]

Uitwerking van de voorbeeldconstructie geeft met gebruikmaking van de onderzoeksresultaten de volgende steenbehoefte:

Filterlaag: 0.867 T/m^2

Toplaag: 3.04 T/m^2

In deze situatie is uitgegaan van een oppervlaktemeting die uitgevoerd is volgens de halve-bol-methode, tijdens het onderzoek is de oppervlaktemeting ook uitgevoerd volgens de pinmethode. In de berekening van de steenbehoefte levert dit één verandering op voor de lengte van ' T_{3b} '. Voor de berekening van deze lengte geldt de volgende definitie:

- T_{3b} (pinmeting): $0.667 * D_{n50} + 0.08$ [cm]

Toepassing van de oppervlaktemeting volgens de pinmethode levert geen verschil op voor de steenbehoefte van de filterlaag; voor de toplaag treedt er wel een verandering op. De steenbehoefte bij uitvoering van de oppervlaktemeting volgens de pinmethode geeft de volgende steenbehoefte:

Filterlaag: 0.867 T/m^2

Toplaag: 3.35 T/m^2

6.3 Vergelijking resultaten en conclusies

De steenbehoefte is op verschillende manieren berekend. In deze paragraaf zullen de resultaten van deze berekening vergeleken worden. De resultaten van de steenbehoefteberekeningen worden weergegeven in tabel 6.1.

Laag	Methode CIRIA/CUR [T/m ²]	Methode onderzoeksresultaten [T/m ²]	
		bolmethode	pinmethode
Filterlaag	0.939	0.8669	0.8669
Toplaag	3.01	3.04	3.35

Tabel 6.1: vergelijking resultaten

De vergelijking van de toegepaste methoden voor de berekening leveren verschillen op in de steenbehoefte voor de voorbeeldconstructie. Uit deze vergelijking zijn de volgende conclusies te trekken:

- Methode onderzoeksresultaten levert alleen lagere steenbehoeften voor de filterlaag. Dit is het gevolg van de surveymethoden die invloed heeft op de ligging van de grens van de breuksteenlaag. Voor de bepaling van de steenbehoefte is de laagscheiding gedefinieerd als het punt van maximale porositeit tussen de twee breuksteenlagen. De definitie van de breuksteenlaag definieert het gemiddelde van de meetpunten van de surveymethode als de laagscheiding. Deze gemiddelde waarde ligt onder de toppen van de stenen, zodat er altijd een verschil is tussen de gedefinieerde laagscheiding en de toppen van de stenen. Het volume steen dat in dit gebied ligt is wel noodzakelijk om het vereiste niveau te bereiken, maar valt eigenlijk buiten de ontwerplijnen van de constructie. Door toepassing van P_{maximaal} als laagscheiding tussen twee breuksteenlagen treedt het verschijnsel rond de surveymethode niet op en komt de steenbehoefte lager uit.
- Hogere behoefte voor pinmethode ten opzichte van bolmethode. Deze hogere steenbehoefte is het gevolg van de grotere indringing van de pinmetingen ten opzichte van de bolmetingen. Hierdoor wordt het verschil tussen de gedefinieerde laagscheiding en de toppen van de stenen groter. Het gevolg is dat er meer steen buiten de gedefinieerde laag valt waardoor er een grotere steenbehoefte ontstaat.
- Het geschematiseerde verloop geeft meer inzicht in het porositeitsverloop dan de methode Knieß. Knieß gebruikte voor de lengte waarover de porositeit verhoogd is altijd 1/6 deel van de laagdikte. Door toepassing van de onderzoeksmethode kan deze lengte nauwkeuriger bepaald worden. Dit geldt niet alleen voor de invloeds lengten aan de boven- en onderkant van een breuksteenconstructie, maar ook voor de invloeds lengten in de overgang tussen twee breuksteenlagen. De waarde van de porositeit in de overgangen werd door Knieß altijd gelijkgesteld aan 60%. In het geval van plaatsing op een zachte filterlaag wordt er voor 0% gerekend voor het onderste 1/6 deel van de laag. De onderzoeksmethode houdt rekening met het porositeitsverloop in deze overgangen. De gemiddelde porositeit wordt dan ook bepaald aan de hand van de maximaal optredende porositeit en de gemiddelde bulkporositeit en is dus niet zonder meer gelijk aan 60%.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

De doelstelling van dit onderzoek was: “vergroten van het inzicht in de factoren die leiden tot afwijkingen in de hoeveelheid geplaatst steenmateriaal, waarbij de nadruk ligt op de invloed van de verschillende surveymethoden. Bovendien wordt het porositeitsverloop in overgangen tussen breuksteenlagen onderzocht en vergeleken met de toegepaste surveymethoden”.

Naar voren is gekomen dat de gehele problematiek wat betreft de hoeveelheid steenmateriaal in twee fasen kan worden opgedeeld: onderzoek naar de bulkeigenschappen (porositeit) en onderzoek naar randinvloeden van het steenmateriaal (penetratie in onderliggende laag, surveymethode, etc.). Vanwege de grote omvang van de gehele problematiek is gedurende dit onderzoek alleen de invloed van de randinvloeden onderzocht.

Het CIRIA/CUR Manual dringt aan op een eenduidige surveymethode voor breuksteenconstructies boven water. Uit het onderzoek is gebleken dat het formuleren van een goede definitie van de randen (bepaald door de toegepaste surveymethode) een belangrijk uitgangspunt is. De twee toegepaste surveymethoden (conventionele surveymethode, maar de baak uitgevoerd met een bolvormig of pinvormig voetstuk) laten duidelijke verschillen zien. Het verschil tussen deze methoden laat een lineair verband zien als functie van D_{n50} welke voldoet aan:

$$y_{\text{verschil survey}} = 0.204 * D_{n50} + 0.18 [\text{cm}]$$

Vergelijking van het resultaat van de oppervlaktemeting met het porositeitsverloop in de bovenkant van een breuksteenlaag geeft meer inzicht in de ligging van het gemeten niveau ten opzichte van de stenen in de breuksteenlaag. Uit het onderzoek volgt de volgende getalsmatige onderbouwing waarbij ‘y’ de afstand aangeeft tussen het gemeten niveau (door de surveymethode) en de ‘toppen van de stenen’ (toppen zijn gedefinieerd als het niveau waar de porositeit 100% wordt):

Voor uitvoering met ‘halve-bol-methode’ geldt:

$$y_{bol} = 0.462 * D_{n50} - 0.04 [\text{cm}]$$

Voor uitvoering met de ‘pinmethode’ geldt:

$$y_{pin} = 0.667 * D_{n50} + 0.08 [\text{cm}]$$

Het verschil tussen deze twee definities moet gelijk zijn aan het verschil tussen de surveymethoden. Dit is niet helemaal het geval, wat veroorzaakt wordt door de fouten die gemaakt worden tijdens de proefuitvoering en door het bepalen van de regressielijnen.

Porositeitsverloop in randen van breuksteenconstructies is een onderwerp dat nog niet eerder aan een grondig onderzoek onderworpen is. Het porositeitsverloop gemeten in dit onderzoek kan geschematiseerd worden door een lineaire regressielijn. Meetpunten uit de proeven vormen een normale verdeling met een gemiddelde dat gelijk is aan deze lineaire regressielijn. Bij toepassing van een enkele breuksteenlaag geplaatst op een harde ondergrond kan de invloedslengte van het porositeitsverloop worden weergegeven door de volgende definities (de invloedslengte is gedefinieerd als het hoogteverschil van een toe- of afnemende porositeit in de randen van een breuksteenlaag).

Ondergrens: $I_{onder} = (0.275 \pm 0.013) * D_{n50}$

Bovengrens: $I_{boven} = (0.74 \pm 0.036) * D_{n50}$

De gemiddelde porositeit in deze invloedslengte is te bepalen door:

$$P_{gem} = (P_{bulk} + 100) / 2 [\%]$$

waarin:

P_{bulk} : gemiddelde porositeit in een breuksteenlaag (ongestoorde porositeit).

Uit de proeven zijn invloedslengten bepaald voor overgangen tussen twee breuksteenlagen. De scheiding van de lagen is gedefinieerd door het niveau van P_{max} welke uit de proeven is bepaald. Voor laagovergangen geldt:

$$P_{max} = 59.1 \pm 1.5 [\%]$$

Invloedslengte onder de laagscheiding:

$$I_{bovenkant laag} = 0.5741 \left[\frac{D_{n50 \text{ bovenste laag}}}{D_{n50 \text{ onderste laag}}} \right]^{0.0153} * D_{n50 \text{ filterlaag}} [m]$$

Invloedslengte boven de laagscheiding:

$$I_{onderkant laag} = 0.3452 \left[\frac{D_{n50 \text{ bovenste laag}}}{D_{n50 \text{ onderste laag}}} \right]^{0.1207} * D_{n50 \text{ toplaag}} [m]$$

De porositeit verloopt over deze invloedslengten van P_{bulk} tot P_{max} of andersom in het geval boven de laagscheiding.

Vergelijking van de invloedslengte op harde ondergrond en onder de laagscheiding laat een verrassend resultaat zien. De invloedslengte op de harde ondergrond is namelijk kleiner, wat niet de verwachting was. Een reden kan zijn dat bij plaatsing op de harde bodem de stenen met de platte kant op de bodem vallen waardoor de porositeit snel kan oplopen.

Het geschematiseerde verloop van de proefresultaten geeft meer inzicht in het porositeitsverloop dan de methode Knieß. Knieß gebruikte voor de invloedslengte altijd 1/6 deel van de laagdikte. Door toepassing van de onderzoeksresultaten kan deze lengte nauwkeuriger bepaald worden. Dit geldt zowel voor de invloedslengten aan de boven- en onderkant van een breuksteenconstructie, maar ook voor de invloedslengten in de overgang tussen twee breuksteenlagen.

Porositeit in de overgangen wordt door Knieß altijd gelijkgesteld aan 60% (uitzondering bij zachte ondergrond). De onderzoeksresultaten geven de porositeit aan door het gemiddelde van de maximaal optredende porositeit en de gemiddelde bulkporositeit en is dus niet zonder meer gelijk aan 60%.

Resultaten van de proef naar indringing kunnen onderverdeeld worden in twee categorieën. Indringing in breuksteenlagen laat zien dat bij toepassing van het bolvormige voetstuk op de baak de indringing nihil is. Toepassing van het



pinvormige voetstuk laat een resultaat zien met veel spreiding tussen de meetpunten. Dit is een eigenschap van deze surveymethode die gedurende het hele onderzoek zichtbaar was.

Plaatsing op een harde ondergrond laat een heel ander resultaat zien, dat beïnvloed is door de verschillende surveymethoden. Het bodemniveau wordt door beide methoden gelijk weergegeven terwijl meting van breuksteenniveaus een verschillend resultaat geeft. Het gevolg is dat de bolmeting een negatieve en de pinmeting een positieve indringing geeft.

In het literatuuronderzoek is aandacht besteedt aan de aanwezigheid van een schaaleffect. Veel van de resultaten uit de proeven kunnen worden beschreven door een lineaire trend die aanduidt dat er geen schaaleffecten optreden. Enkele resultaten voldoen niet aan een lineaire trend, maar wijken hier niet veel vanaf. De onderzoeksresultaten geven nogmaals een bevestiging van het vermoeden dat schaaleffecten niet optreden.

Het toepassingsgebied van de resultaten die verkregen zijn uit de proeven is in eerste instantie beperkt tot horizontale constructies. Deze beperking ontstaat door de manier van uitvoering van de proeven. Voordat de resultaten op andere constructies toegepast kunnen worden zal eerst onderzocht moeten worden hoe de surveymethoden zich op bijvoorbeeld een hellend vlak gedragen.

7.2 Aanbevelingen

Vanwege de grote omvang van de gehele problematiek is er in dit rapport onderzoek gedaan naar de randinvloeden van het steenmateriaal in breuksteenconstructies. De manier waarop de onderzoeken zijn uitgevoerd hebben tot gevolg dat de resultaten niet voor alle soorten breuksteenconstructies zijn toe te passen. Om een grotere groep breuksteenconstructies te kunnen weergeven is verder onderzoek nodig.

Het onderzoek zal nog uitgebreid moeten worden voor:

- breuksteenconstructies die onder een helling zijn geplaatst,
- toepassing van andere plaatsingsmethoden,
- toepassen van kubussen als ‘armour’ laag van een breuksteenconstructie.

Naast deze uitbreidingen die meer inzicht zullen geven in de randeffecten zijn er een aantal aandachtspunten uit het onderzoek die nog aandacht vergen:

- meer herhalingsproeven voor een betere betrouwbaarheid (vooral voor bepaling van de ligging van P_{maximaal} ten opzichte van de surveymethode en de invloedslengten in overgangen tussen breuksteenlagen);
- andere varianten toepassen voor uitvoering van de oppervlaktemetingen (denk vooral aan de huidige praktijksituatie waar over het algemeen de hoge punten van de constructie gemeten worden).

Naast dit onderzoek naar de randinvloeden van het steenmateriaal in breuksteenconstructies zijn er meerdere onderzoeken gedaan naar de bepaling van steenhoeveelheden. Een interessant onderzoek is dat van Bregman (1998) waarin de bulkeigenschappen worden onderzocht. Het zou bijzonder zinvol zijn Bregmans resultaten te combineren met de resultaten uit dit onderzoek. Combinatie geeft een completer beeld en is bepaald aan de hand van meerdere variabelen.

Literatuurlijst

1. CUR Rapport 169, 1995.
Manual on the use of rock in hydraulic engineering. ISBN 9037600603.
2. CIRIA/CUR report 154, 1991.
Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering. ISBN 0-86017-326-7
3. Kreijger, P.C.
Het volumegewicht van zand en grind
Cement XV (1963), Nr. 5, pp 282-284.
4. Laan, G.J., 1996.
De relatie tussen eisen aan loskorrelige steenmaterialen en ontwerpparameters.
Rapport P-DWW-96-096, Dienst Weg en Waterbouwkunde.
5. Bregman, M., 1998.
Porositeit in geplaatste steenlagen; onderzoek naar de factoren die de hoeveelheid geplaatst steenmateriaal beïnvloeden. Afstudeerverslag TU Delft, faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen, Royal Boskalis Westminster N.V.
6. CUR Rapport 192, 1998.
Breuksteen in de praktijk. Deel 1: productie, verwerking en kwaliteitszorg.
ISBN: 90 376 0049 2.
7. CUR Rapport 197, 2000.
Breuksteen in de praktijk. Deel 2: dimensionering van constructies in binnenwateren. ISBN: 90 3760 132 4
8. Rijn, P.H.J. van, 1984.
De dichtheid van korrelstapelings bij waterbouwkundige werken. Rapport DWW, Rijkswaterstaat.
9. Gemeentewerken Rotterdam, Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam, VBKO., 2000.
Maak- en meetnauwkeurigheden.
10. Knieß, H.G., 1977.
Bemessung von Schüttstein-Deckwerken im Verkehrswasserbau; Teil 1: lose Steinschüttungen.
Mitt.Bl.d.BAW (1977) nr. 42.
11. Aberg, B., 1992.
Void ratio of noncohesive soils and similar materials. Journal of Geotechnical Engineering, vol 118, nr 9, sept 1992. Pp 1315-1334.
12. Aberg, B., 1996.
Grain-size distribution for smallest possible void ratio. Journal of Geotechnical Engineering, vol 122, nr 1, jan 1996. Pp 74-77.
13. Gauss, G.A., and Latham, J.P., 1995.
The measurement of layer thickness and the estimation of as-built bulk density and void porosity in a rock armour revetment at Beesands, South Devon.
Proc. of the Instn. of Civ. Engs, Water Maritime and Energy, Vol 112, pp 326-335, ISSN 0965-0946.
14. Gauss, G. A., and Latham, J.P., 1995.
The on-site quality control of the as-produced properties of armourstone during construction of a rock revetment in South Devon.
Geotechnical and Geological Engineering, 13, pp 29-49. ISSN: 0960-3182



15. Latham, J.P., Poole, A.B., and Mannion, M., 1988.
 Developments in the analysis of armour layer profile data
 Design of breakwaters. Thomas Telford, London. 1988. 343-361. ISBN: 0-7277-1351-5
16. Read, J., 1988.
 The control of rubble-mound construction, with particular reference to Helguvik Breakwater in Iceland
 Proc. Conf. Breakwaters 1988. Inst. Civ. Engrs. 1988
 Design of breakwaters. Thomas Telford, London. 1988. 343-361. ISBN: 0-7277-1351-5
17. Latham, J.P., and Poole, A.B., 1986.
 The quantification of breakwater armour profiles for design purposes.
 Coastal Engineering, 10, pp 253-273
18. CUR rapport 161, 1993.
 Filters in de waterbouw. ISBN: 90 3760029 8
19. Bouwdienst Rijkswaterstaat, 1991.
 Handboek uitvoering bodemverdedigingsconstructies van los gestorte granulaire materialen.
 Bouwdienst Rijkswaterstaat, hoofdafdeling Waterbouw, Utrecht, juni 1991
20. Nederlandse Norm, NEN, september 1990.
 NEN 5180-5186 Breuksteen: Termen, definities, eisen en keuring



Porositeit in breuksteenconstructies

Onderzoek naar en bepaling van factoren die de hoeveelheid geplaatst materiaal bepalen

Bijlagen afstudeerverslag

Carlos Bosma
Studienummer 108113

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek en
Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde en Offshore
Technologie



Van Oord ACZ



Van Oord ACZ

Joosten Bouwstoffen



Afstudeercommissie:

Prof. ir. K. d'Angremond
Dr. ir. H.L. Fontijn
Dr. ir. P.H.A.J.M. van Gelder
Ir. W. Sint Nicolaas (Van Oord ACZ)
Ir. H.J. Verhagen



Inhoudsopgave bijlagen

Bijlage 1: onderzoek van Latham, J.P., and Gauss, G.A. 1995	2
Bijlage 2: onderzoek naar capillaire werking in breuksteen.....	7
Bijlage 3: berekening randeffect	11
Bijlage 4: testresultaten uitgangsmateriaal	17
Bijlage 5:samenstelling proefgradering en steenbehoefte	26
Bijlage 6: sterkteberekening meetvat	32
Bijlage 7: materiaallijst, programma van eisen en ontwerptekeningen meetvat	36
Bijlage 8: data proefuitvoering	41



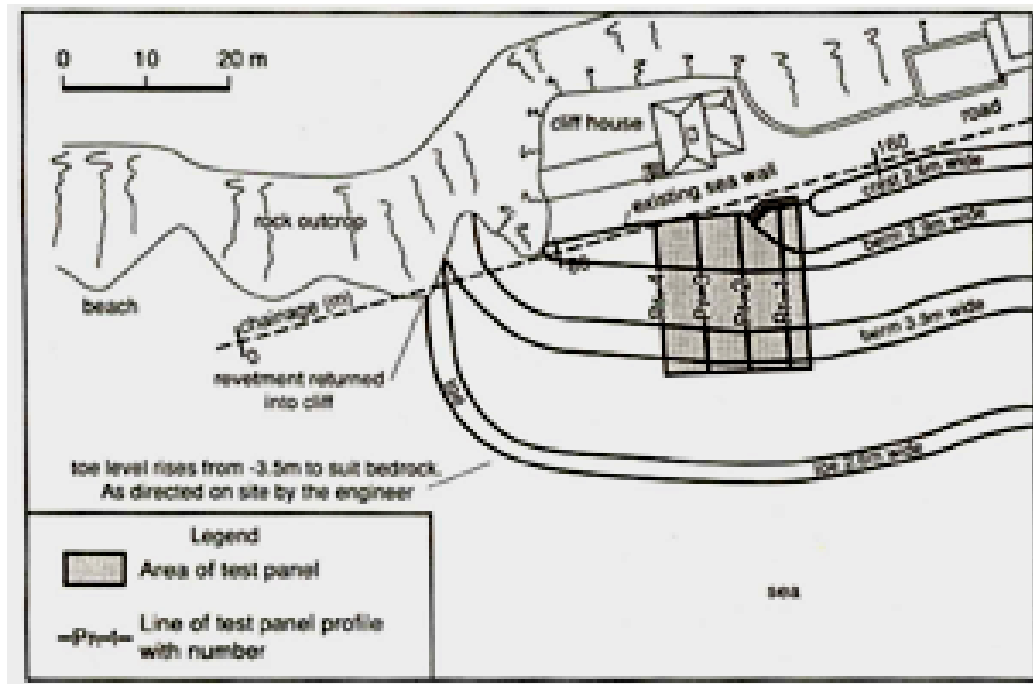
Bijlage 1: onderzoek van Latham, J.P., and Gauss, G.A. 1995

The on-site quality control of the as-produced properties of armourstone during construction of a rock revetment in South Devon.

Geotechnical and Geological Engineering, 13, pp 29-49. ISSN: 0960-3182

Opzet van het onderzoek

Het onderzoek is uitgevoerd op een bepaald gedeelte van de totale breuksteenconstructie. De oppervlakte van het testgebied was 17 bij 21 meter. In dit testgebied werd elke steen individueel gewogen en geregistreerd. Bovendien werden in dit gebied vier lijnen op de steenstukken geverfd, waarlangs de survey werd uitgevoerd. In figuur 1 is het testgebied, inclusief de 4 lijnen, weergegeven.



Figuur 1: overzicht testgebied

Uit de gemeten dikte van de steenlaag en het mediaan steengewicht werd de laagdiktecoëfficiënt bepaald door:

$$t = n \cdot k_t \cdot D_{n50}$$

$$D_{n50} = (W_{50} / \rho_r)^{1/3}$$

waarin:

t:	totale dikte van de steenlaag	[m]
n:	aantal lagen waaruit de steenlaag is opgebouwd	[-]
k_r :	laagdiktecoëfficiënt	[-]
D_{n50} :	nominale steendiameter	[m]

Uit de gemeten laagdikte, het gewicht van de stenen en de oppervlakte van het testgebied werd de bulkdichtheid bepaald. De porositeit kan nu berekend worden door:

$$n_v = 1 - (\rho_h / \rho_r)$$

waarin:



ρ_r :	de dichtheid van het gesteente (inclusief poriën).	$[\text{kg/m}^3]$
ρ_b :	de bulkdichtheid (inclusief holle ruimten tussen stenen).	$[\text{kg/m}^3]$
n_v :	porositeit.	$[-]$

Er zijn bij dit onderzoek drie verschillende surveymethoden gebruikt om het profiel van de buitenste steenlaag te bepalen:

1. profiel gedefinieerd door het grondvlak van een halfbolvormig voetstuk van een baak met een diameter van $0.5 \cdot D_{n50}$, waarbij gemeten werd met EDM apparatuur (elektronische equivalent van het waterpasinstrument) en intervallen van 1 meter hellingafwaarts (methode zoals wordt aangeraden in het CIRIA/CUR Manual);
2. profiel gedefinieerd door het grondvlak van een conventionele baak, waarbij de hoogten werden gemeten met een interval van 2.5 meter (methode die vaak wordt gebruikt voor volumebepaling op het werk);
3. profiel op dezelfde manier gedefinieerd als bij de voorgaande methode, maar nu worden, met een interval van 2.5 meter, alleen de hoogste punten gemeten (methode die de grootste laagdikte oplevert in vergelijking met de andere methoden).

Elke surveymethode werd uitgevoerd langs de lijnen die weergegeven zijn in figuur 1.

Voor de bepaling van de top van de filterlaag, ofwel de basis van de armourlaag die gemeten gaat worden, zijn twee methoden toegepast:

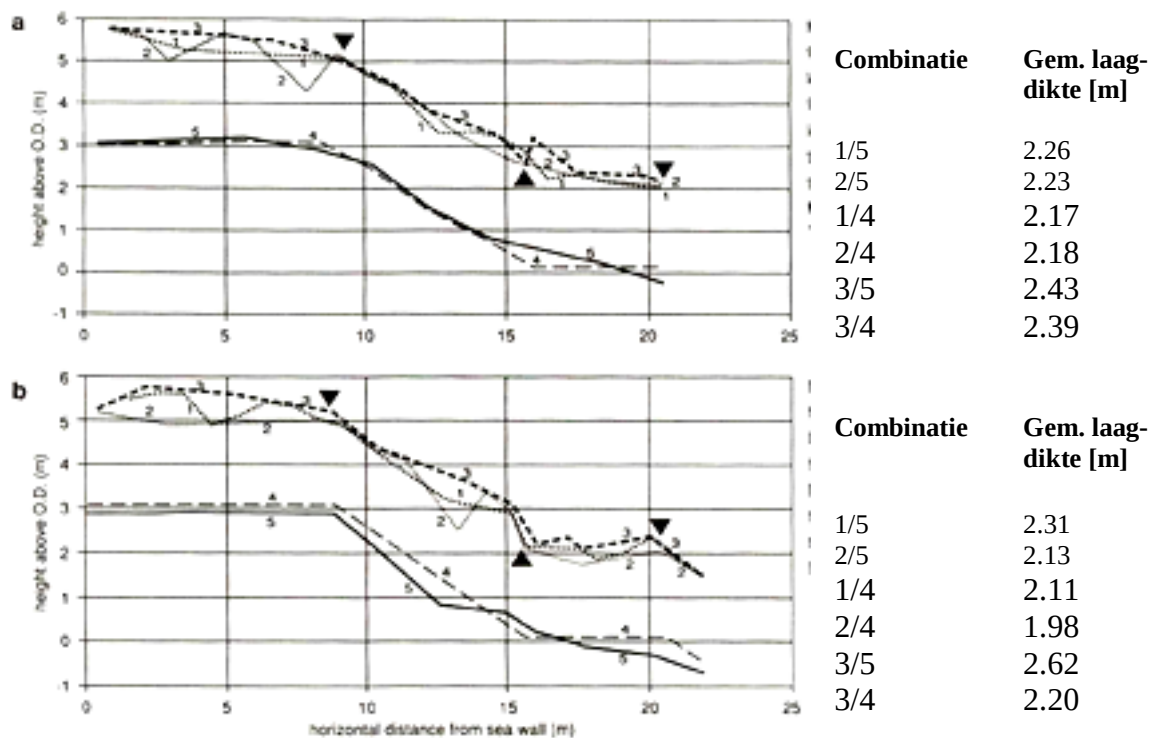
4. de top van de filterlaag wordt verondersteld gelijk te zijn aan de hoogte die volgt uit de ontwerptekeningen,
5. de top van de filterlaag wordt bepaald door middel van een conventionele baak, waarbij deze waar mogelijk naar beneden wordt gelaten door de gaten in de armourlaag.

De combinatie van de drie surveymethoden om de top van de armourlaag te bepalen en de twee methoden om de top van de filterlaag vast te stellen, resulteert uiteindelijk in zes verschillende dikten van de armourlaag. Dit geldt voor elk van de vier lijnen in het testgebied.

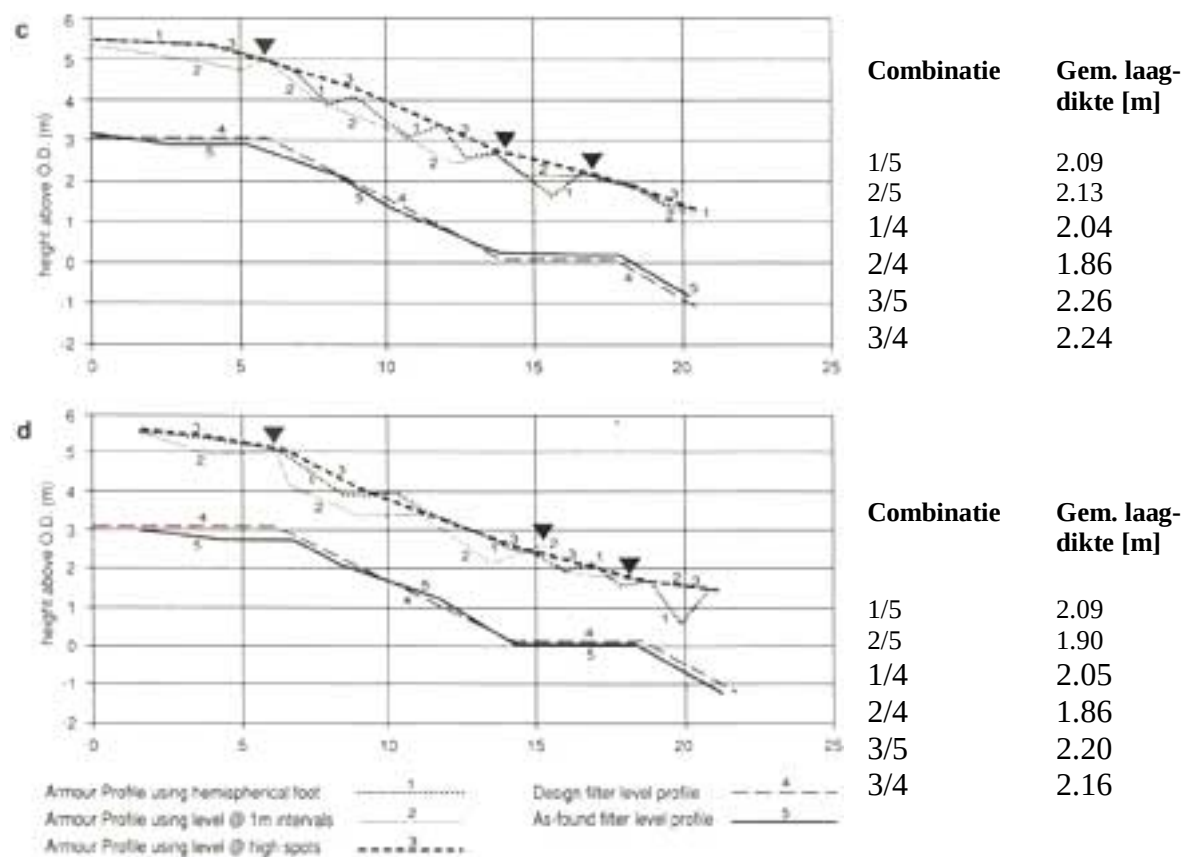
Resultaten van het onderzoek

Op de omschreven manier werd voor elk van de vier lijnen de laagdikte bepaald. Per lijn resulteerde dit in zes verschillende laagdikten. De onderzoeksresultaten zijn geïllustreerd in figuur 2 en 3. De voorkomende cijfers hebben de volgende betekenis:

1. top armourlaag gemeten met half bolvormige voet ($0.5 \cdot D_{n50}$); interval 1 meter;
2. top armourlaag gemeten met baak; interval 2.5 meter;
3. top armourlaag bepaald door meten van de hoogste punten; interval 2.5 meter;
4. top filterlaag gelijk gesteld aan de ontwerphoogte;
5. top filterlaag bepaald door het meten met baak door ruimten in de armourlaag.



Figuur 2a: resultaten onderzoek



Figuur 2b: resultaten onderzoek



Uit de verschillende laagdikten, die zijn afgebeeld in de figuren 2 en 3, zijn de gemiddelden bepaald. Aan de hand van deze gemiddelden zijn, per surveymethode, de laagdiktecoëfficiënt, bulkdichtheid en porositeit bepaald. Resultaten die uit dit onderzoek volgen staan vermeld in tabel 1.

Combinatie	t_s [m]	k_t [-]	ρ_b [ton/m ³]	n_v [%] gem.	range
1. 2-5	2.04	0.79	2.04	26.21	23.96 - 28.46
2. 2-4	1.97	0.76	2.11	23.59	21.56 - 25.61
3. 3-5	2.38	0.92	1.75	36.75	33.58 - 39.91
4. 3-4	2.25	0.87	1.85	33.10	30.25 - 35.95
5. 1-5	2.19	0.85	1.90	31.26	28.57 - 33.95
6. 1-4	2.09	0.81	1.99	27.97	25.56 - 30.37

Tabel 1: Resultaten onderzoek Latam e.a. (1995)



Bijlage 2: onderzoek naar capillaire werking in breuksteen

Onderzoek uitgevoerd ter bepaling van minimale steenafmetingen voor toepassing in de watervulproef.

Capillaire werking in de poriën van de breuksteenlaag.

Voor aanvang van deze proef is een proefje uitgevoerd met een capillair buisje. Dit proefje is uitgevoerd ter bepaling van de minimale concentratie “Teepol” (soort afwasmiddel dat de oppervlaktespanning van water vermindert). De resultaten van dit proefje worden in de onderstaande tabel 1 weergegeven.

Concentratie ‘Teepol’ [%]	Stijging oplossing in capillair buisje [mm]
0	29.6
0.5	23
1	13
1.5	13
10	13

Tabel 1: Bepaling capillaire opstijging bij toepassing van verschillende concentraties “Teepol”.

Capillaire opstijging in een capillair buisje wordt bepaald door de volgende formule:

$$h = \frac{4 * \sigma}{\rho * g * d}$$

waarin:

- σ oppervlakte spanning [N/m] (0.073 voor water)
- d diameter buisje [m]
- h stijghoogte [m]

Invullen van de bekende waarden geeft het volgende resultaat:

$$h_{\text{water}} = 29.76 \text{ mm}$$

$$h_{\text{‘Teepol’}} = 13 \text{ mm}$$

Hieruit volgt de oppervlaktespanning voor het “Teepol” water: $\sigma_{\text{‘Teepol’}} = 0.032 \text{ N/m}$. Dit betekent dat de oppervlaktespanning meer dan gehalveerd is door de toevoeging van “Teepol” aan het water.

Voor beide situaties zijn twee foto’s gemaakt en per foto is op 40 plaatsen de capillaire stijging bepaald. De resultaten hiervan staan in tabel 2. Uit de meetpunten volgen de volgende gemiddelde waarden:

Capillaire stijging water: 5.21 mm

Capillaire stijging ‘Teepol’ water 1.37 mm





Proef Meting	Water 1	Water 2	Teepol 1	Teepol 2
1	4,17	7,01	1,27	0,73
2	5,58	7,37	1,18	0,73
3	9,74	7,44	-0,03	0,80
4	6,77	3,18	-0,13	0,88
5	2,53	4,12	0,26	0,95
6	4,57	6,12	-1,15	1,02
7	7,31	6,24	1,27	1,15
8	5,44	5,25	1,27	1,26
9	3,85	2,48	-0,48	-0,54
10	2,79	5,04	0,50	0,02
11	4,92	4,15	2,28	2,49
12	4,31	10,18	2,67	2,49
13	10,20	8,73	1,83	1,25
14	4,67	5,04	0,92	0,47
15	5,63	8,53	1,07	0,89
16	7,79	7,11	2,54	2,45
17	5,45	3,64	2,67	2,29
18	4,57	2,95	2,67	1,49
19	5,92	6,90	2,39	1,61
20	6,40	5,97	0,39	0,16
21	5,24	6,43	1,10	0,47
22	5,69	6,79	1,97	2,65
23	6,62	8,29	0,57	0,21
24	5,84	5,50	0,50	0,17
25	4,00	4,74	0,81	-0,46
26	5,20	6,71	1,61	1,97
27	6,38	5,88	2,50	2,66
28	4,84	4,61	3,02	2,49
29	4,45	6,49	1,27	1,44
30	4,36	4,11	1,40	1,96
31	0,64	1,78	0,51	0,03
32	3,11	6,34	1,21	1,80
33	4,61	4,64	3,20	2,71
34	1,58	2,21	1,97	1,69
35	-0,49	1,44	2,67	2,49
36	7,28	8,33	1,24	1,14
37	5,91	5,36	1,62	3,01
38	2,40	3,96	1,21	1,68
39	2,26	3,02	2,05	2,14

Tabel 2: resultaten proef capillaire werking in breuksteen



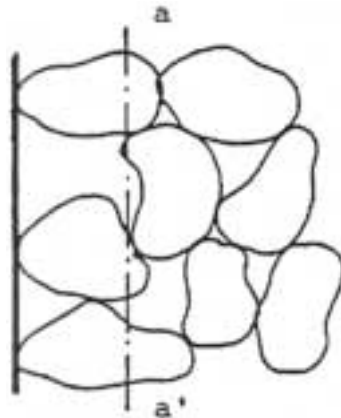
Bijlage 3: berekening randeffect

Berekening ter bepaling van het randeffect nabij de wanden van het meetvat.

Principe van het wandeffect

Tijdens de uitvoering van het onderzoek zal een storend effect optreden langs de wanden van de bak. Nabij de wanden zal de porositeit namelijk groter zijn dan in de vrije ruimte. Dit wordt veroorzaakt doordat de holle ruimten bij de wand niet worden opgevuld door overige steenstukken. Het gevolg hiervan is dat de gemeten porositeit moet worden gecorrigeerd met een zogenaamde wandcorrectiefactor.

Theoretisch kan de invloed van het wandeffect als volgt worden omschreven. Stel dat een zekere hoeveelheid korrels tegen de wand rust en denk een vlak a-a' evenwijdig aan de wand (zie figuur 1).



Figuur 1: principe wandeffect

In dit vlak wordt een oppervlak S genomen, terwijl S_k het oppervlak van de door S gesneden korrels voorstelt. De verhouding $(\rho_k \cdot S_k)/S$ is dan vergelijkbaar met de dichtheid. Uit de formule blijkt dat ter plaatse van de wand de dichtheid nul is. Wordt het vlak a-a' van de wand verwijderd dan zal S_k toenemen tot een constante waarde, zodat na een bepaalde afstand het wandeffect verdwenen is. De totale invloed van dit wandeffect wordt afhankelijk gesteld van het begrenzend oppervlak van de proefbak en van de korrelafmeting D van het onderzochte steenmateriaal.

Er zijn verschillende methoden bekend die het wandeffect in rekening brengen. Een methode is ontwikkeld door ir. P.C. Kreijger (TNO). Uit een onderzoek van PHJ. van Rijn (1984) is gebleken dat deze methode met succes kan worden toegepast. Een tweede methode wordt toegepast door een Noors onderzoeksbureau (Noteby). Beide methoden stellen het wandeffect afhankelijk van de grootte van de korrelafmeting en de grootte van het begrenzend oppervlak van de bak.

In het onderzoek van Bregman (1998) zijn beide methoden vergeleken. Uit deze vergelijking blijkt dat voor bakafmetingen groter dan ongeveer 300 mm de verschillen tussen de twee methoden verdwenen zijn. Aangezien de bak die in dit onderzoek gebruikt gaat worden groter is dan deze 300 mm is het niet noodzakelijk om beide methoden te bekijken. In dit onderzoek wordt voor de correctie van het wandeffect de methode Kreijger toegepast.

Wandeffect volgens Kreijger (TNO)

Kreijger stelt het wandeffect afhankelijk van de oppervlakte van de wanden van de bak en de grootte van D_{85} . De door hem ingevoerde evenredigheidsfactor wordt gelijk aan K gesteld. Voor een ronde meetbak met diameter d en hoogte h geldt:

volumereductie als gevolg van wandeffect:

$$2 * \frac{1}{4} \pi d^2 * K * D + \pi d * h * K * D$$

waardoor de massa van het steenmateriaal in de meetbak gelijk is aan:

$$V_0 \left(\frac{1}{4} \pi d^2 * h - \frac{1}{2} \pi d^2 * K * D - \pi d * h * K * D \right)$$

waarin:

V_0 :de bulkdichtheid in de vrije ruimte (te bepalen in een zeer grote bak met verwaarloosbaar wandeffect) [kg/m³]

De bulkdichtheid wordt verkregen door deling van de totale massa van het steenmateriaal in de bak door het volume ingenomen door het steenmateriaal:

$$V_x = \frac{V_0 \left(\frac{1}{4} \pi d^2 * h - \frac{1}{2} \pi d^2 * K * D - \pi d * h * K * D \right)}{\frac{1}{4} \pi d^2 * h}$$

Dit komt overeen met:

$$V_x = V_0 \left[1 - K * D \left(\frac{2}{h} + \frac{4}{d} \right) \right]$$

wat uiteindelijk leidt tot:

$$V_x = V_0 (1 - \beta * K * D) \quad \text{met} \quad \beta = \left(\frac{2}{h} + \frac{4}{d} \right)$$

waarin:

V_x :bulkdichtheid gemeten in de bak (dus beïnvloed door het wandeffect) [kg/m³]

Uit het verrichte onderzoek van Kreijger bleek dat de theoretisch berekende invloed van het wandeffect uitstekend overeenkwam met de werkelijk gevonden waarden. De evenredigheidsfactor K blijkt, voor het in dit onderzoek toegepaste steenmateriaal, gelijk te zijn aan:

$$K = 0.15$$

Invullen van deze waarde voor K geeft de volgende verhouding tussen de gemeten bulkdichtheid en die aanwezig in de vrije ruimte:

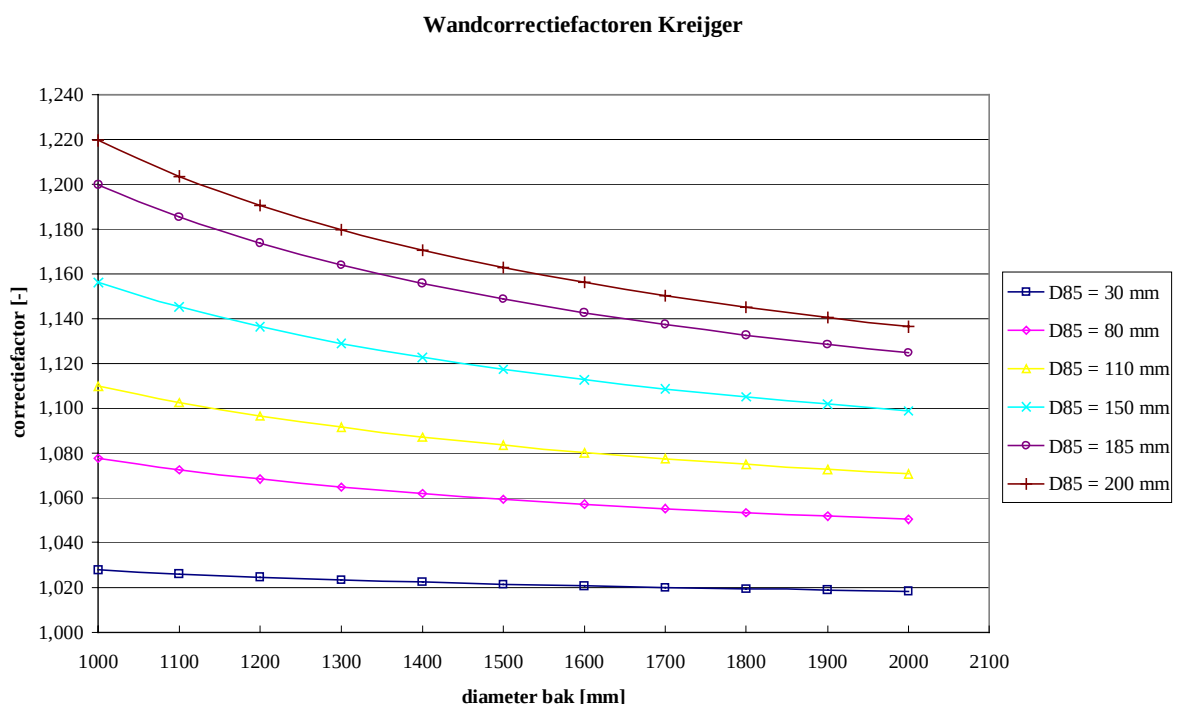
$$V_0 = V_x * C \quad \text{met} \quad C = \frac{1}{1 - 0.15 * \beta * D}$$

De factor C bepaald dus de verhouding tussen de gemeten bulkdichtheid V_x en de bulkdichtheid in de vrije ruimte V_0 . De D die voorkomt in deze factor komt volgens Kreijger overeen met de D_{85} uit de toegepaste gradering.

Uit de bovenstaande formule zijn de volgende conclusies te trekken:

- hoe kleiner het toegepaste steenmateriaal (bij gelijk blijvende afmetingen van de bak) des te kleiner de toe te passen wandcorrectie;
- Hoe groter de afmetingen van de bak (bij gelijkblijvende grootte van het steenmateriaal) des te kleiner de toe te passen wandcorrectie.

In grafiek 1 zijn voor verschillende waarden van D_{85} de grootten van de wandcorrectiefactor bepaald volgens de methode Kreijger.



Grafiek 1: wandeffect voor verschillende steen- en bakafmetingen

Wandeffect voor watervulproef

Voor de uitvoering van de watervulproef is het niet gewenst om de correctiefactoren van het wandeffect toe te passen op de boven- en de onderkant van de breuksteenlaag. De correctie moet alleen toegepast worden voor de wanden van het meetvat. Het porositeitsverloop wordt immers al bepaald in de watervulproef. Hierdoor moet de methode Kreijger enigszins aangepast worden om een correctiefactor te krijgen die alleen het storende effect van de wanden compenseert.

Volumereductie als gevolg van wandeffect: $\pi d * h * K * D$

waardoor de massa van het steenmateriaal in de meetbak gelijk is aan:



$$V_0 \left(\frac{1}{4} \pi d^2 * h - \pi d * h * K * D \right)$$

waarin:

V_0 :de bulkdichtheid in de vrije ruimte (te bepalen in een zeer grote bak met verwaarloosbaar wandeffect) [kg/m³]

De bulkdichtheid wordt verkregen door deling van de totale massa van het steenmateriaal in de bak door het volume ingenomen door het steenmateriaal:

$$V_x = \frac{V_0 \left(\frac{1}{4} \pi d^2 * h - \pi d * h * K * D \right)}{\frac{1}{4} \pi d^2 * h}$$

Dit komt overeen met:

$$V_x = V_0 \left[1 - \frac{K * D}{\frac{1}{4} * d} \right]$$

wat uiteindelijk leidt tot:

$$V_x = V_0 (1 - \beta * K * D) \quad \text{met} \quad \beta = \frac{1}{\frac{1}{4} * d}$$

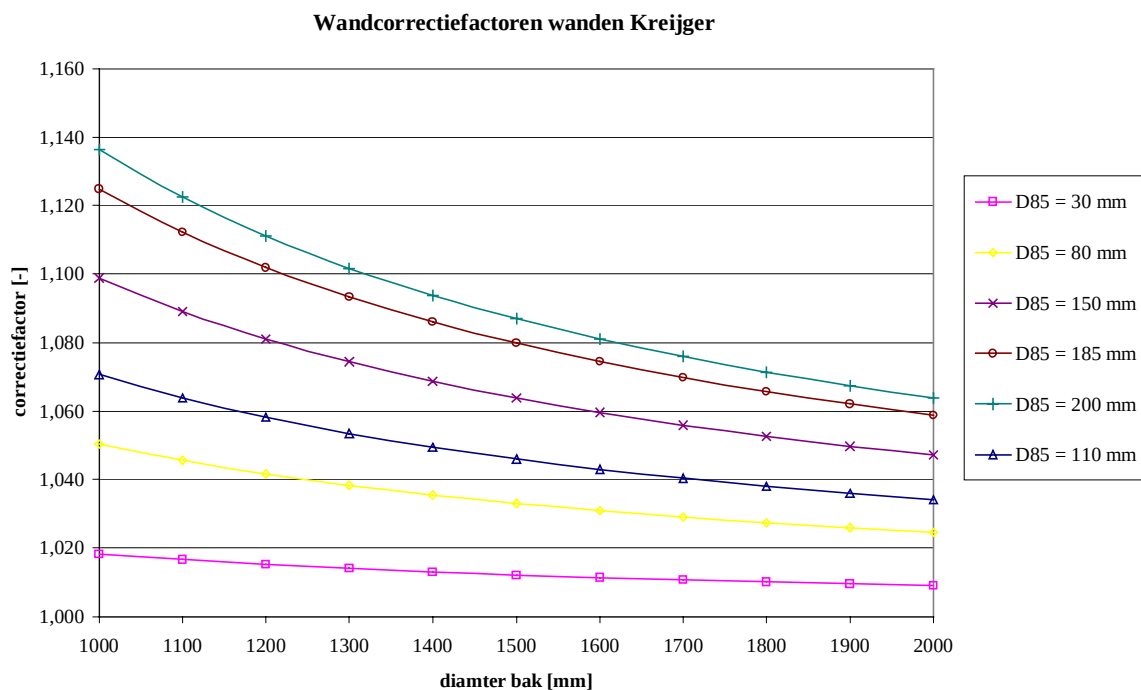
waarin:

V_x :bulkdichtheid gemeten in de bak (dus beïnvloed door het wandeffect) [kg/m³]

Invullen van 0.15 voor K geeft de volgende verhouding tussen de gemeten bulkdichtheid en die aanwezig in de vrije ruimte:

$$V_0 = V_x * C \quad \text{met} \quad C = \frac{1}{1 - 0.15 * \beta * D}$$

In grafiek 2 is de wandcorrectiefactor voor de watervulproef weergegeven als functie van de diameter van het vat. Met behulp van deze grafiek is in het ontwerp van de graderingen gekozen voor een maximale steenafmeting van 185 millimeter. Met een maximale correctiefactor van 1.1 moet de afmeting van het meetvat komen te liggen tussen de 1200 en 1300 mm.



Grafiek 2: wandeffect voor de watervulproef



Bijlage 4: testresultaten uitgangsmateriaal

Resultaten van de proeven naar de eigenschappen van het steenmateriaal, bepaald aan de hand van de richtlijnen die zijn weergegeven in NEN Norm 5180-5186 (1990).

PRODUCTS AND SERVICES

[Home](#)
[About Us](#)
[Contact Us](#)
[Privacy Policy](#)
[Terms of Service](#)

1999 AC ANTICIPATION

T4: 015.4146.242 1.67 030.4513946

$$\|u\|_{L^2(\mathbb{R}^n)}^2 \leq C \|u\|_{L^2(\mathbb{R}^n)}^2 + C \|u\|_{L^2(\mathbb{R}^n)}^2$$

GRANJET IMPORT

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z



PARTIALS

4.2.2. *Water Quality (Turbidity)*

TEL: 043-3691698 FAX: 043-3691834/07

2010-2011 2011-2012 2012-2013 2013-2014 2014-2015 2015-2016 2016-2017 2017-2018 2018-2019 2019-2020 2020-2021 2021-2022 2022-2023 2023-2024 2024-2025 2025-2026 2026-2027 2027-2028 2028-2029 2029-2030 2030-2031 2031-2032 2032-2033 2033-2034 2034-2035 2035-2036 2036-2037 2037-2038 2038-2039 2039-2040 2040-2041 2041-2042 2042-2043 2043-2044 2044-2045 2045-2046 2046-2047 2047-2048 2048-2049 2049-2050 2050-2051 2051-2052 2052-2053 2053-2054 2054-2055 2055-2056 2056-2057 2057-2058 2058-2059 2059-2060 2060-2061 2061-2062 2062-2063 2063-2064 2064-2065 2065-2066 2066-2067 2067-2068 2068-2069 2069-2070 2070-2071 2071-2072 2072-2073 2073-2074 2074-2075 2075-2076 2076-2077 2077-2078 2078-2079 2079-2080 2080-2081 2081-2082 2082-2083 2083-2084 2084-2085 2085-2086 2086-2087 2087-2088 2088-2089 2089-2090 2090-2091 2091-2092 2092-2093 2093-2094 2094-2095 2095-2096 2096-2097 2097-2098 2098-2099 2099-2100 2100-2101 2101-2102 2102-2103 2103-2104 2104-2105 2105-2106 2106-2107 2107-2108 2108-2109 2109-2110 2110-2111 2111-2112 2112-2113 2113-2114 2114-2115 2115-2116 2116-2117 2117-2118 2118-2119 2119-2120 2120-2121 2121-2122 2122-2123 2123-2124 2124-2125 2125-2126 2126-2127 2127-2128 2128-2129 2129-2130 2130-2131 2131-2132 2132-2133 2133-2134 2134-2135 2135-2136 2136-2137 2137-2138 2138-2139 2139-2140 2140-2141 2141-2142 2142-2143 2143-2144 2144-2145 2145-2146 2146-2147 2147-2148 2148-2149 2149-2150 2150-2151 2151-2152 2152-2153 2153-2154 2154-2155 2155-2156 2156-2157 2157-2158 2158-2159 2159-2160 2160-2161 2161-2162 2162-2163 2163-2164 2164-2165 2165-2166 2166-2167 2167-2168 2168-2169 2169-2170 2170-2171 2171-2172 2172-2173 2173-2174 2174-2175 2175-2176 2176-2177 2177-2178 2178-2179 2179-2180 2180-2181 2181-2182 2182-2183 2183-2184 2184-2185 2185-2186 2186-2187 2187-2188 2188-2189 2189-2190 2190-2191 2191-2192 2192-2193 2193-2194 2194-2195 2195-2196 2196-2197 2197-2198 2198-2199 2199-2200 2200-2201 2201-2202 2202-2203 2203-2204 2204-2205 2205-2206 2206-2207 2207-2208 2208-2209 2209-2210 2210-2211 2211-2212 2212-2213 2213-2214 2214-2215 2215-2216 2216-2217 2217-2218 2218-2219 2219-2220 2220-2221 2221-2222 2222-2223 2223-2224 2224-2225 2225-2226 2226-2227 2227-2228 2228-2229 2229-2230 2230-2231 2231-2232 2232-2233 2233-2234 2234-2235 2235-2236 2236-2237 2237-2238 2238-2239 2239-2240 2240-2241 2241-2242 2242-2243 2243-2244 2244-2245 2245-2246 2246-2247 2247-2248 2248-2249 2249-2250 2250-2251 2251-2252 2252-2253 2253-2254 2254-2255 2255-2256 2256-2257 2257-2258 2258-2259 2259-2260 2260-2261 2261-2262 2262-2263 2263-2264 2264-2265 2265-2266 2266-2267 2267-2268 2268-2269 2269-2270 2270-2271 2271-2272 2272-2273 2273-2274 2274-2275 2275-2276 2276-2277 2277-2278 2278-2279 2279-2280 2280-2281 2281-2282 2282-2283 2283-2284 2284-2285 2285-2286 2286-2287 2287-2288 2288-2289 2289-2290 2290-2291 2291-2292 2292-2293 2293-2294 2294-2295 2295-2296 2296-2297 2297-2298 2298-2299 2299-2300 2300-2301 2301-2302 2302-2303 2303-2304 2304-2305 2305-2306 2306-2307 2307-2308 2308-2309 2309-2310 2310-2311 2311-2312 2312-2313 2313-2314 2314-2315 2315-2316 2316-2317 2317-2318 2318-2319 2319-2320 2320-2321 2321-2322 2322-2323 2323-2324 2324-2325 2325-2326 2326-2327 2327-2328 2328-2329 2329-2330 2330-2331 2331-2332 2332-2333 2333-2334 2334-2335 2335-2336 2336-2337 2337-2338 2338-2339 2339-2340 2340-2341 2341-2342 2342-2343 2343-2344 2344-2345 2345-2346 2346-2347 2347-2348 2348-2349 2349-2350 2350-2351 2351-2352 2352-2353 2353-2354 2354-2355 2355-2356 2356-2357 2357-2358 2358-2359 2359-2360 2360-2361 2361-2362 2362-2363 2363-2364 2364-2365 2365-2366 2366-2367 2367-2368 2368-2369 2369-2370 2370-2371 2371-2372 2372-2373 2373-2374 2374-2375 2375-2376 2376-2377 2377-2378 2378-2379 2379-2380 2380-2381 2381-2382 2382-2383 2383-2384 2384-2385 2385-2386 2386-2387 2387-2388 2388-2389 2389-2390 2390-2391 2391-2392 2392-2393 2393-2394 2394-2395 2395-2396 2396-2397 2397-2398 2398-2399 2399-2400 2400-2401 2401-2402 2402-2403 2403-2404 2404-2405 2405-2406 2406-2407 2407-2408 2408-2409 2409-2410 2410-2411 2411-2412 2412-2413 2413-2414 2414-2415 2415-2416 2416-2417 2417-2418 2418-2419 2419

BEWIJS VAN OORSPRONG

(Volgens RAW Standaard 1995 en Wijziging 1996)

Nummer: 99-03

Datum: 19.07-1999

Volgnummer: 13

Verstrekt aan: Joosten Bouwstoffen

Steensoort (aard): Graniet - Schotland

Winplaats: Glensanda (Foster Yeoman)

Product: Granet Import Benelux BV

Gemiddelde korrelverdeling:

[illegible]

Eenheden in % (m/m), uitgedrukt in volle procenten Conform 2 onder NEN 6340

Dichtheid	RAW Proef 60	2651 kg/m ³	28-01-1999
-----------	--------------	------------------------	------------

Gehalte gebroken oppervlakten:	Klasse	1	
	Bepaald door	KOAC-Vuigt	28-01-1999

Gehalte platte stukken: (vlakheidsindex)	Klasse	1	
	Bepaald door	KOAC-Vucht	28-01-1999

Gehalte vuursteen	0%		
Betaald door	KOAC-Vuurt		28-01-1999

Polijstwaarde:	Klasse	1	
	Waarde	59	
	Bepaald door	Ceitest Limited	12-02-1999

Verrijzing:	Klasse	2	
	Bepaald door	KOAC-Vught	28-01-1999

De steenslag, respectievelijk het brekerzand, is bestendig en is toegelaten voor toepassing in asfalt.
Naam: J.H. Hoitsma Datum: 19-07-99

De steenslag, respectievelijk
Naam: J.H. Holsma

U.S. PAT. AND TM. OFFICE

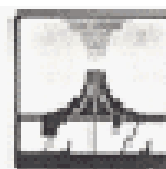
DOI: 10.1002/for



RPBL

ZENTRALLABORATORIUM

Frankfurt, Rheinische Straße 104/105, Markt der Warenverteilung Rheinland Pfalz
 1-8000 1 1-2083-82-870-8 für Bestellungen und Gütereinführungen an den Basaltstein und
 Basaltgeräten sowie Basaltsteinmaterialien
 12 - Poststelle nach DIN 1045



Rheinische Provinzial-Basalt- und Lavawerke
 10450 Wiesbaden - Tel. 20833 1045 - 1045

Lab. Nr. 1688/59

RHEINISCHE PROVINZIAL
 BASALT- UND LAVAWERKE GMBH

WERK NAAR

STEINQUART: BASALT

Opdracht: Onderzoek van waterbestendigheid volgens:

NEN 5180 Breuksteen. Termen, definities,
 -meten en loading.

NEN 5182 Bepaling van de massa-verdeling,
 lichte sortering 40/700 kg

NEN 5183 Bepaling van het gehalte aan steen-
 stukken met een verhouding tussen
 dikte en lengte kleiner dan 1:1

NEN 5184 Bepaling van de bestandheid tegen
 voort- en doorwindingen.

NEN 5185 Bepaling van de dynamische ver-
 blijingswanda

NEN 5186 Bepaling van de dichtheid van steen-
 stukken met een volume van ten
 minste 50 m³

NEN 5187 Bepaling van de wateropname bij
 atmosferische druk

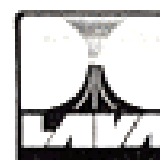
- 2 -



ZENTRALLABORATORIUM

Freibrecht, anerkannt nach RAB-Gesetz durch die Straßenverwaltung Rheinland-Pfalz
I-0000-1 S-3088/92 M70 S für Ergänzungs- und Güteprüfungen an bel. Baustoffen und
Baustoffgemischen sowie Frostschutzmaterial

E - Prüfstelle nach DIN 1045



Rheinischer Provinzial-Bauart- und Lösswerke-Ges.
54953 Wiesbaden, Tel. (0224) 4801 Fax 23

- 2 -

1.0 Bepaling van de massaverdeling, NEN 5180 en 5182, lichte sortering 40-200 kg

Grootte monster:	200 steenstukken		Eisen NEN 5180
	kg	Gew.-%	
Cumulatief	20781.5	100.0	
< 15 kg	60.0	0.3	< 2 %
< 40 kg	287.0	1.4	< 10 %
> 200 kg	1570.5	7.6	< 90 %
> 300 kg	0.0	0.0	< 1 %
Gemiddelde massa:	103.9		80 - 120 kg

2.0 Bepaling van het gehalte aan steenstukken met een verhouding tussen dikte en lengte kleiner dan 1:3, NEN 5180 en 5183

50 genomen steenstukken, sortering 40/200 kg 5.4 %

Eis volgens NEN 5180 < 20 %

3.0 Bepaling van de bestandheid tegen vorst- en dooiwisselingen, NEN 5180 en 5184

3.1 Bepaling van de wateropnemning bij atmosferische druk, NEN 5180 en 5187

Monster- Nr.	massa (g.)	wateropname % (m/m)	Massaverlies % (m/m)
1	319.3	0.5	0.2
2	267.1	0.5	0.2
3	425.7	0.4	0.1
4	385.9	0.7	0.4
5	371.4	1.0	0.3
6	408.0	0.8	0.3
7	297.1	0.6	0.3
8	254.5	0.6	0.1
9	284.9	0.6	0.2
10	390.0	0.7	0.3
11	325.8	0.5	0.2
12	298.7	0.4	0.4
13	301.2	0.5	0.3
14	400.8	0.5	0.1
15	297.7	0.5	0.3
16	378.8	0.4	0.2
17	361.3	0.5	0.2
18	325.4	0.4	0.2
19	300.2	0.5	0.1
20	299.9	0.5	0.4

- Eis volgens NEN 5180: < 0,5 % (m/m) massaverlies

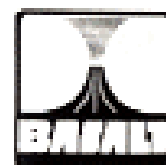
- Geen vertoning van scheuren.

- 3 -



ZENTRALLABORATORIUM

Privatrecht, anerkannt nach RnA (Stg. durch die Straßenverwaltung Rheinland Pfalz
 1. 2006: 1 5-2006/10-10/10 5 für brennungs- und Güteprüfungen an bet. Baustoffen und
 Baustoffprüfungen sowie Frostschadtmessung
 E - Prüfstelle nach DIN 1045



Hessische Provinzial-Baustoff- und Leinwandwerke AG
 34109 Wassenach Tel. (0520.20) 480-1 Fax :

- 3 -

4.0 Bepaling van de dynamische verbrijzelingswaarde, NEN 5180 en 5185

Dynamische verbrijzelingswaarde: 10,6 %

Eis volgens NEN 5180: < 40 %

5.0 Bepaling van de dichtheid van steenstukken met een volume van ten minste 50 ml NEN 5180 en 5186

Monster- Nr.	Dichte: (kg/m³)
1	2981
2	2963
3	3004
4	2978
5	2951
6	2989
7	2947
8	2986
9	2993
10	2968
Gemiddeld	2976

6.0 Keuring.

De in het zentrallaboratorium van de RPBL onderzochte breuksteen voldoet
 aan de NEN 5180

Bij de keuring bevatte de sorteringen breuksteen geen visueel waarneembare
 of chemisch te bepalen verontreinigingen of vreemde bestanddelen

Wassenach, den 29.06.1999

Schmidt
 (Schmidt)



PRÜFINSTITUT UND
INGENIEURBÜRO

DAR - Deutscher Akkreditierungsrat
DAP-P-02.710-00-93-38

Durch das DAP (Deutsches Akkreditierungssystem
Prüfwesen GmbH) akkreditiertes Prüflaboratorium
für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.

Dr. Moll GmbH, Gutenbergstrasse 2, 30916 Isernhagen

Halsvik Aggregates

Solvag

N - 5960 Dalsoyra

43, 94

Gutenbergstrasse 2
30916 Isernhagen

Telefon 05 11/730 59-0
Telefax 05 11/730 59-26

Bahnstation Express/Fracht: 30167 Hannover

Ihr Zeichen	Ihre Nachricht vom	Unser Zeichen sch	Datum 17.05.1999
-------------	--------------------	----------------------	---------------------

PRÜFUNG AN WASSERBAUSTEINEN

Prüfzeugnis-Nr : 1914 / 2 / 99

Auftraggeber: Halsvik Aggregates
Solvag
N - 5960 Dalsoyra

Inhalt des Auftrages: Untersuchung von Wasserbausteinen
nach den Technischen Lieferbedingungen für
Wasserbausteine (TLW), Ausgabe 1997

Werk: Halsvik

Gesteinsart: Gneis

Lieferbedingungen: Klasse 0 - V



03.05.1999 durch Herrn Pykett
und Herrn Dr. Schmid (Prüfstelle)

Das Prüfzeugnis umfaßt 4 Seiten.

Mitglied im BSI. Bundesverband unabhängiger Institute für bautechnische Prüfungen e.V.
Anerkannt für Untersuchungen von Baustoffen gemäß RAP-Str.
Zugelassen für Eignungs- und Fremdüberwachungsprüfungen im Sinne der RGM in und DIN 4226.
Prüfberichte, Prüfzeugnisse und Gutachten dürfen nur ungekürzt an Dritte weitergegeben werden.
Jede Veröffentlichung, auch von Auszügen, bedarf der vorherigen schriftlichen Zustimmung.

Geschäftsführung:
L. W. Treske, K.-H. Quakenack, Dr. M. Schmid

Eingetragen beim Amtsgericht Burgwedel
HRB Nr. 449.



1. Vorgang

Die Fa. Halsvik Aggregates, N - 5960 Dalsoyra stellt aus dem Gneis des Steinbruches Halsvik Wasserbausteine her.

Die Dr. Moll GmbH wurde beauftragt, die aus dem Gneis des Steinbruches Halsvik hergestellten Wasserbausteine hinsichtlich der Eignung für den Einsatz als Wasserbausteine gemäß den Technischen Lieferbedingungen für Wasserbausteine (TLW, Ausgabe 1997) zu prüfen. Im Rahmen der Fremdüberwachung nach RG Min-StB wurden am 03.05.1999 der Gneis des Steinbruches Halsvik durch Herrn Dr. Schmid hinsichtlich der Eignung zur Herstellung von Wasserbausteinen augenscheinlich begutachtet und für die entsprechenden Untersuchungen Proben entnommen.

2. Petrographische Beschreibung

Im Steinbruch Halsvik wird massiger Gneis abgebaut.

Das Gestein zeigt die typische Textur eines Gneises. Es wechseln hellere und dunklere Lagen im 1 - 5 cm Bereich.

Die Korngröße des Gesteins liegt überwiegend bei 0,2 mm, erreicht aber in einzelnen Körnern 1 mm (heteroblastische Struktur). Eine Paralleltextur ist deutlich ausgebildet.

Unter dem Mikroskop erkennt man folgende Zusammensetzung der dunkleren Lagen:

- ca. 50 Vol.% Feldspäte (überwiegend schwach saussuritierter Plagioklas neben wenig Mikroklin)
- ca. 30 Vol.-% Quarz als Kleinstkorn (0,2 mm) zu größeren Linsen (1 - 2 mm) aggregiert
- ca. 20 Vol.-% Mafite überwiegend repräsentiert von feinschuppigem, oliv-farbigem Biotit neben Epidot, Titanit und etwas Opak-Anteil

Der Dünnschliff aus einer hellen Lage zeigt im Prinzip das gleiche Gefüge und den gleichen Modus wie der dunklere Anteil, nur in anderen Anteilen der Gemengteile:

- ca. 50 Vol.% Feldspäte (überwiegend schwach saussuritierter Plagioklas neben wenig Mikroklin)
- ca. 30 - 40 Vol.-% Quarz als Kleinstkorn (0,2 mm) zu größeren Linsen (1 - 2 mm) aggregiert
- ca. 5 Vol.-% feinschuppiger, oliv-farbiger Biotit neben wenig Titanit. Der Biotit ist stellenweise chloritisiert.

3. Beschreibung der Lagerstätte und der Produktion

Im Steinbruch wird der Gneis auf einer Sohle abgebaut. Störungen sind im derzeitigen Abbaubereich nicht zu beobachten. Das Gestein ist weitständig, aber deutlich geklüftet. Dabei ist die Klüftung senkrecht zu Faltung des Gneises ausgebildet.

Die oberflächennahe Verwitterung ist geringfügig. Auf einigen Klüftflächen sind braune Verwitterungsbestege vorhanden.

Zur Zeit läuft die maschinelle Wasserbausteinproduktion an. Die Wasserbausteine der Klasse 0 - V werden mit Hilfe von Stangensieben hergestellt.



Dr. Moll GmbH, Prüfinstitut u. Ingenieurbüro

30916 Isernhagen
Gutenbergstraße 2
Telefon (0511) 73059-0
Telefax (0511) 73059-26

Seite 3/4

zum Prüfzeugnis-Nr.: 1914 / 2 / 99

Datum: 17.05.1999

4. Beschaffenheit nach Augenschein

Das untersuchte Material ist frei von Rissen. Schiefbrige, sandige, mergelige oder tonige Einlagen sind nicht vorhanden.

5. Trockenrohdichte

Die Trockenrohdichte wurde nach DIN 52 102 bestimmt.

Die ermittelte Rohdichte für den Gneis beträgt: $2,70 \text{ kg/dm}^3$.

Die Trockenrohdichte darf im Mittel den Wert von $2,3 \text{ kg/dm}^3$ nicht unterschreiten. Einzelwerte müssen mindestens einen Wert von $2,27 \text{ kg/dm}^3$ aufweisen.

Der im Werk Halsvik abgebaute Gneis hält diese Anforderung der TLW ein.

6. Druckfestigkeit

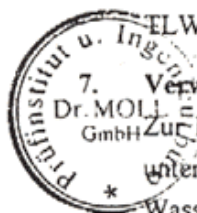
Die Druckfestigkeit wurde gemäß DIN 52 105 bestimmt. Aus den Wasserbausteinen wurden Würfel mit einer Kantenlänge von $50 \pm 2 \text{ mm}$ herausgesägt. Mit einer Druckprüfmaschine wurde die Belastungsgeschwindigkeit so geregelt, daß der Bruch innerhalb von 60 - 90 Sekunden eintrat.

Die Prüfungen erbrachten für den Gneis folgende Werte:

Versuchs-Nr.	Druckfestigkeit in N/mm^2	
	Einzelwert	Mittelwert
1	163	
2	184	
3	186	
4	196	
5	152	183
6	220	
7	175	
8	159	
9	189	
10	205	

Die Druckfestigkeit muß im lufttrockenen Zustand der Proben im Mittel mindestens 80 N/mm^2 betragen. Einzelwerte dürfen nicht kleiner als 70 N/mm^2 sein.

Die im Werk Halsvik aus Gneis hergestellten Wasserbausteine halten diese Anforderung der TLW ein.

**7. Verwitterungsbeständigkeit**

Zur Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit gemäß DIN 52 106 ist die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck nach DIN 52 103 an 10 Steinen zu bestimmen. Ist die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck $< 0,5 \text{ M.-%}$ und treten bei der Wasserlagerung keine Risse oder sonstige Anzeichen von Schäden auf, so gelten die Wasserbausteine als verwitterungsbeständig. Ein Frostversuch ist dann in der Regel nicht erforderlich.



Dr. Moll GmbH, Prüfinstitut u. Ingenieurbüro

30916 Isernhagen
Gutenbergstraße 2
Telefon (0511) 73059-0
Telefax (0511) 73059-26

Seite 4/4

zum Prüfzeugnis-Nr.: 1914 / 2 / 99

Datum: 17.05.1999

7.1 Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck wurde in Anlehnung an DIN 52 103 an drei Wasserbausteinen bestimmt.

Folgende Werte wurden für den Gneis ermittelt:

Versuchs-Nr.	Wasseraufnahme in M.-%	
	Einzelwert	Mittelwert
1	0,33	
2	0,24	
3	0,17	
4	0,23	
5	0,27	0,25
6	0,26	
7	0,29	
8	0,24	
9	0,26	
10	0,23	

Die für den Gneis aus Halsvik ermittelte Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck beträgt 0,25 M.-%. Kein Einzelwert liegt über 0,5 M.-%. Nach der Wasserlagerung wurden an dem Gestein keine Rißneubildungen oder sonstige Anzeichen von Schäden festgestellt.

Gemäß TLW sind die untersuchten, aus Gneis hergestellten Wasserbausteine als verwitterungsbeständig zu bezeichnen.

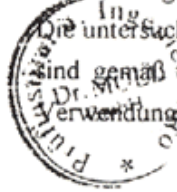
7.2 Widerstand gegen Frost

Die für den Gneis festgestellte Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck liegt unter 0,5% M.-%. Anzeichen von Rißneubildungen oder sonstigen Schäden wurden nach der Wasserlagerung nicht festgestellt. Gemäß TLW sind die Wasserbausteine aus Gneis als verwitterungsbeständig zu bezeichnen.

Aus diesem Grund wurden keine Frostversuche nach dem Luftfrostverfahren gemäß TLW durchgeführt.

8. Beurteilung

Die untersuchten Wasserbausteine, welche aus Gneis im Steinbruch Halsvik hergestellt werden, sind gemäß der "Technischen Lieferbedingungen für Wasserbausteine" (Ausgabe 1997) zur Verwendung als Wasserbausteine geeignet.



Dr. Moll GmbH
Prüfinstitut u. Ingenieurbüro
Dr. M. Schmid



Bijlage 5:samenstelling proefgradering en steenbehoefte

Berekening van de proefgraderingen. Hier worden de zeefintervallen per gradering en de benodigde zeven bepaald. Aan de hand van deze gegevens is per gradering per zeefinterval de steenbehoefte berekend.



Samenstelling steengraderingen

De graderingen zijn samengesteld aan de hand van de vorm van de standaardgradering 20-400 kg. De vorm van deze gradering kan worden weergegeven door de steilheid D_{85}/D_{15} en is gelijk aan 1.57. De proefgraderingen zijn gemaakt door toepassing van een schaafactor op de zeefkromme van deze standaardgradering. De standaardgradering en de ontstane proefgraderingen zijn weergegeven in tabel 1.

Standaard gradering 20-400 kg				Nummer proefgradering			
Cumulatieve fractie	min	gem	max	1	2	3	4
0	0,0	34,7	69,4				
1	0,0	35,0	70,1				
2	50,0	60,4	70,8	8,3	22,0	45,0	60,4
3	52,4	62,0	71,5	8,5	22,6	46,2	61,9
4	54,9	63,5	72,2	8,7	23,2	47,4	63,5
5	57,3	65,1	72,9	9,0	23,8	48,6	65,0
6	59,7	66,6	73,6	9,2	24,3	49,8	66,6
7	62,1	68,2	74,3	9,4	24,9	51,0	68,2
8	64,5	69,8	75,0	9,6	25,5	52,2	69,7
9	66,9	71,3	75,7	9,8	26,0	53,4	71,3
10	69,4	72,9	76,4	10,0	26,6	54,6	72,8
11	69,9	73,5	77,1	10,1	26,8	55,8	73,5
12	70,5	74,1	77,8	10,2	27,1	57,0	74,1
13	71,0	74,8	78,5	10,3	27,3	58,2	74,7
14	71,6	75,4	79,2	10,4	27,5	59,4	75,3
15	72,1	76,0	79,9	10,5	27,7	60,6	76,0
16	72,6	76,6	80,6	10,5	28,0	61,8	76,6
17	73,2	77,3	81,3	10,6	28,2	63,0	77,2
18	73,7	77,9	82,0	10,7	28,4	63,6	77,8
19	74,3	78,5	82,7	10,8	28,7	64,3	78,5
20	74,8	79,1	83,4	10,9	28,9	64,9	79,1
21	75,4	79,8	84,1	11,0	29,1	65,5	79,7
22	75,9	80,4	84,8	11,1	29,3	66,2	80,3
23	76,5	81,0	85,5	11,2	29,6	66,8	81,0
24	77,0	81,6	86,2	11,2	29,8	67,4	81,6
25	77,6	82,3	87,0	11,3	30,0	68,1	82,2
26	78,1	82,9	87,7	11,4	30,3	68,7	82,8
27	78,7	83,5	88,4	11,5	30,5	69,3	83,5
28	79,2	84,1	89,1	11,6	30,7	69,9	84,1
29	79,8	84,8	89,8	11,7	30,9	70,6	84,7
30	80,3	85,4	90,5	11,8	31,2	71,2	85,3
31	80,9	86,0	91,2	11,8	31,4	71,8	86,0
32	81,4	86,6	91,9	11,9	31,6	72,5	86,6
33	81,9	87,3	92,6	12,0	31,9	73,1	87,2
34	82,5	87,9	93,3	12,1	32,1	73,7	87,8
35	83,0	88,5	94,0	12,2	32,3	74,4	88,5



Standaard gradering 20-400 kg				Nummer proefgradering			
Cumulatieve fractie	min	gem	max	1	2	3	4
36	83,6	89,1	94,7	12,3	32,5	75,0	89,1
37	84,1	89,8	95,4	12,4	32,8	75,4	89,7
38	84,7	90,4	96,1	12,4	33,0	75,8	90,3
39	85,2	91,0	96,8	12,5	33,2	76,2	91,0
40	85,8	91,6	97,5	12,6	33,5	76,6	91,6
41	86,3	92,3	98,2	12,7	33,7	77,0	92,2
42	86,9	92,9	98,9	12,8	33,9	77,4	92,8
43	87,4	93,5	99,6	12,9	34,1	77,8	93,5
44	88,0	94,1	100,3	13,0	34,4	78,2	94,1
45	88,5	94,8	101,0	13,0	34,6	78,6	94,7
46	89,1	95,4	101,7	13,1	34,8	79,1	95,3
47	89,6	96,0	102,4	13,2	35,1	79,5	96,0
48	90,2	96,6	103,1	13,3	35,3	79,9	96,6
49	90,7	97,3	103,8	13,4	35,5	80,3	97,2
50	91,2	97,9	104,5	13,5	35,7	80,7	97,8
51	91,8	98,5	105,2	13,6	36,0	81,1	98,5
52	92,3	99,1	105,9	13,6	36,2	81,5	99,1
53	92,9	99,8	106,6	13,7	36,4	81,9	99,7
54	93,4	100,4	107,3	13,8	36,6	82,3	100,3
55	94,0	101,0	108,1	13,9	36,9	82,7	101,0
56	94,5	101,6	108,8	14,0	37,1	83,1	101,6
57	95,1	102,3	109,5	14,1	37,3	83,5	102,2
58	95,6	102,9	110,2	14,2	37,6	83,9	102,8
59	96,2	103,5	110,9	14,2	37,8	84,3	103,5
60	96,7	104,1	111,6	14,3	38,0	84,7	104,1
61	97,3	104,8	112,3	14,4	38,2	85,1	104,7
62	97,8	105,4	113,0	14,5	38,5	85,5	105,3
63	98,4	106,0	113,7	14,6	38,7	85,9	106,0
64	98,9	106,6	114,4	14,7	38,9	86,4	106,6
65	99,5	107,3	115,1	14,8	39,2	86,8	107,2
66	100,0	107,9	115,8	14,9	39,4	87,2	107,8
67	100,6	108,5	116,5	14,9	39,6	87,6	108,5
68	101,1	109,1	117,2	15,0	39,8	88,0	109,1
69	101,6	109,8	117,9	15,1	40,1	88,4	109,7
70	102,2	110,4	118,6	15,2	40,3	88,8	110,3
71	102,7	111,0	119,2	15,3	40,5	89,2	110,9
72	103,3	111,6	119,9	15,4	40,7	89,6	111,5
73	103,8	112,2	120,5	15,4	40,9	90,0	112,1
74	104,4	112,8	121,1	15,5	41,2	90,3	112,7
75	104,9	113,4	121,8	15,6	41,4	90,6	113,3
76	105,5	113,9	122,4	15,7	41,6	90,9	113,9
77	106,0	114,5	123,1	15,8	41,8	91,2	114,5
78	106,6	115,1	123,7	15,8	42,0	91,5	115,1
79	107,1	115,7	124,3	15,9	42,2	91,8	115,7



Standaard gradering 20-400 kg				Nummer proefgradering			
Cumulatieve fractie	min	gem	max	1	2	3	4
80	107,7	116,3	125,0	16,0	42,5	92,1	116,3
81	108,2	116,9	125,6	16,1	42,7	92,4	116,8
82	108,8	117,5	126,2	16,2	42,9	92,6	117,4
83	109,3	118,1	126,9	16,3	43,1	92,9	118,0
84	109,9	118,7	127,5	16,3	43,3	93,2	118,6
85	110,4	119,3	128,1	16,4	43,5	93,5	119,2
86	110,9	119,9	128,8	16,5	43,8	93,8	119,8
87	111,5	120,5	129,4	16,6	44,0	94,1	120,4
88	112,0	121,0	130,1	16,7	44,2	94,4	121,0
89	112,6	121,6	130,7	16,7	44,4	94,7	121,6
90	113,1	122,2	131,3	16,8	44,6	95,0	122,2
91	113,7	122,8	132,0	16,9	44,8	97,1	122,8
92	114,2	123,4	132,6	17,0	45,1	99,3	123,4
93	114,8	124,0	133,2	17,1	45,3	101,4	123,9
94	115,3	124,6	133,9	17,1	45,5	103,6	124,5
95	115,9	125,2	134,5	17,2	45,7	105,7	125,1
96	116,4	125,8	135,1	17,3	45,9	107,9	125,7
97	117,0	126,4	135,8	17,4	46,1	110,0	126,3
98	117,5	58,8	0,0	18,0			
99	118,1	59,0	0,0				
100	118,6	59,3	0,0				

Tabel 1: zeefmaten [mm] van standaardgradering 20-400 kg en ontwerpgraderingen

De eigenschappen van de proefgraderingen kunnen worden samengevat door weergave van de zeefmaat [mm] voor belangrijke waarden van de cumulatieve fractie D_y , zie tabel 2.

Gradering D_y [%]	1	2	3	4
2	8,3	22,0	45,0	60,4
15	10,5	27,7	60,6	76,0
50	13,5	35,7	76,8	97,8
85	16,4	43,5	92,5	119,2
97	17,4	46,1	105,0	126,3
D_{n50}	11,3	30,0	64,5	82,2

Tabel 2: samenvatting zeefmaten [mm] ontwerpgraderingen

Zeefintervallen en steenbehoefte

Nu de proefgraderingen zijn samengesteld kunnen de zeefintervallen, waarmee de graderingen gezeefd moeten worden, bepaald worden. Door de beschikbaarheid van draadzeven kwam de verdeling van de zeefintervallen niet altijd even goed uit. In een enkel geval is de gradering nog iets aangepast om het zeven van deze gradering mogelijk te maken. De zeefintervallen zijn bepaald aan de hand van de beschikbare zeven. De zeefmaten en



zeefintervallen zijn weergegeven in tabel 3. Onder de zeefintervallen is het percentage van de totale gradering weergegeven dat in het zeefinterval valt.

zeefinterval [mm]	8-12	12-15	15-18	22-31,5	31,5-36	36-45	45-63	63-75	75-90	90-95	95-125	totaal [kg]
Gradering 1 [%]	33,0	35,0	32,0									390
Gradering 2 [%]				31,0	20,0	49,0						390
Gradering 3 [%]							17,0	19,0	37,0	17,0	10,0	755
Gradering 4 [%]								14,0	24,0	8,0	54,0	963

Tabel 3: verdeling gradering over de verschillende zeefintervallen [%]

De laatste kolom betreft de benodigde kilo's per gradering. Deze kilo's zijn bepaald door de afmetingen van het meetvat en de toe te passen laagdikten. Deze steenbehoefteberekening wordt in tabel 4 weergegeven. Voor deze berekening is uitgegaan van een porositeit van 35% en een ρ_{steen} van 2700kg/m^3 .

Gradering	1	2	3	4
D ₅₀ [mm]	13,5	35,7	76,8	97,8
D _{n50} [mm]	11,3	30,0	64,5	82,2
6*D _{n50} [mm]	67,9	180,1	386,9	493,1
Laagdikte [mm]	200	200	386	493
Steen [kg]	390	390	755	963

Tabel 4: steenbehoefte per gradering [kg]

Nu de benodigde kilo's per gradering en de zeefintervallen bekend zijn, is het mogelijk om de benodigde kilo's per zeefinterval te bepalen. Om genoeg materiaal te hebben voor de uitvoering van de proeven is 5% extra materiaal gezeefd (ook omdat de uitgangspunten van de steenhoeveelheidberekening, de porositeit en de dichtheid schattingen waren). De berekening is in tabellen 5 en 6 weergegeven.

Zeefinterval [mm]	8-12	12-15	15-18	22-31,5	31,5-36	36-45	45-63	63-75	75-90	90-95	95-125	totaal [kg]
Gradering 1	128,7	136,5	124,8									390
Gradering 2				120,9	78,0	191,1						390
Gradering 3							128,4	143,5	279,4	128,4	75,5	755
Gradering 4								134,8	231,1	77,0	520,0	963
Totaal [kg]	128,7	136,5	124,8	120,9	78,0	191,1	128,4	278,3	510,5	205,4	595,5	2498

Tabel 5: benodigde kilo's per zeefinterval

Zeefinterval [mm]	8-12	12-15	15-18	22-31,5	31,5-36	36-45	45-63	63-75	75-90	90-95	95-125	totaal [kg]
Gradering 1	135,1	143,3	131,0									409,5
Gradering 2				126,9	81,9	200,7						409,5
Gradering 3							134,8	150,6	293,3	134,8	79,3	792,8
Gradering 4								141,6	242,7	80,9	546,0	1011,2
Totaal [kg]	135,1	143,3	131,0	126,9	81,9	200,7	134,8	292,2	536,0	215,7	625,3	2622,9

Tabel 6: benodigde kilo's per zeefinterval met 5% extra materiaal



De benodigde kilo's zijn per zeefinterval bepaald. Deze gegevens vormen het uitgangspunt voor het zeven van de graderingen. Om de gezeefde graderingen te kunnen vergelijken met de ontwerpgraderingen zijn de werkelijk gezeefde kilo's per zeefinterval in tabel 7 weergegeven.

Zeefinterval [mm]	8-12	12-15	15-18	22-31,5	31,5-36	36-45	45-63	63-75	75-90	90-95	95-125	totaal [kg]
Gradering 1	135,0	143,0	131,0									409
Gradering 2				127,0	82,0	201,0						410
Gradering 3							130,0	150,0	290,0	130,0	80,0	780
Gradering 4								142,0	243,0	81,0	546,0	1012
Totaal [kg]	135,0	143,0	131,0	127,0	82,0	201,0	130,0	292,0	533,0	211,0	626,0	2611

Tabel 7: gezeefde kilo's per zeefinterval



Bijlage 6: sterkteberekening meetvat

Berekening van minimale dikte voor wanden en vloerconstructie van het meetvat.

Sterkte en maximaal toegestane vervorming van het meetvat.

Het meetvat moet in staat zijn om de belasting te dragen die uitgeoefend wordt door de maximale hoeveelheid water en steen die in het meetvat geplaatst wordt. Naast deze eis mogen de vervormingen die het meetvat ondergaat onder invloed van de maximale belasting, geen invloed hebben op de meetresultaten van de proef. Voor deze eisen worden het vierkante en het ronde meetvat vergeleken. Voor de afmetingen worden de volgende algemene afmetingen genomen:

diameter rond vat:	1.5m,
lengte wand vierkant vat:	1.5m,
hoogte beide vaten:	1m.

De belasting op de wanden wordt veroorzaakt door de druk van het breuksteenmateriaal en het water. Voor de eigenschappen van steen en water zijn de volgende waarden aangenomen:

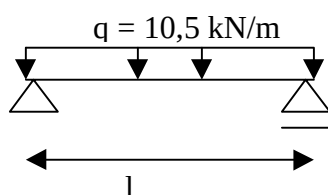
ρ_{steen} :	2700 kg/m ³ ,
ρ_{water} :	1000 kg/m ³ ,
poriënpercentage:	35%

De gecombineerde dichtheid van water en steen komt hiermee op:
 $0.65 \cdot 2700 + 0.35 \cdot 1000 = 2105 \text{ kg/m}^3$.

De belasting op de wand kan als een driehoek (net als waterdruk) geschematiseerd worden. De maximale belasting is dan gelijk aan: $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot h^2$ wat voor $g = 10 \text{ m/s}^2$ gelijk is aan $\frac{1}{2} \cdot 2105 \cdot 10 \cdot 1 = 10,5 \text{ kN/m}$.

Bij de berekening zal geen rekening worden gehouden met het feit dat de wand onderin ondersteund wordt door de bodem. De resultaten zullen vrij conservatief zijn, maar als er op deze manier aan de eisen wordt voldaan zullen, er tijdens de proefuitvoering geen problemen optreden.

Schematisatie wand voor vierkant vat



De wand van het vierkante vat zal op buiging belast worden, de maximale doorbuiging kan berekend worden met:

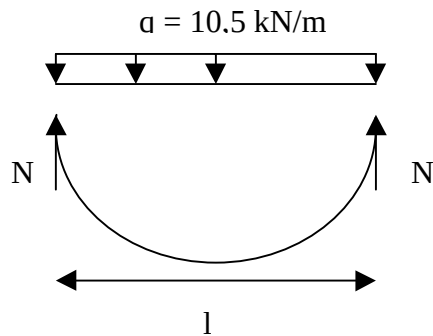
$$W_{\max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EI} \quad \text{waarin:} \quad \begin{array}{ll} E_{\text{staal}} &= 2.1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2. \\ I &= 1/6 \cdot b \cdot h^3. \end{array}$$

Figuur 1: belastingsschematisatie vierkant vat

In eerste instantie wordt een wand berekend met een dikte van 20mm. De maximale doorbuiging die voor deze situatie ontstaat is gelijk aan:

$$W_{\max} = 2.47 \text{ mm}.$$

Bij vervorming van de hele wand volgens de bovenstaande situatie betekent dit een volumetoename van 0.14%.

Schematisatie wand voor rond vat

Figuur 2: belastingschematisatie rond vat.

In deze situatie wordt de wand alleen door normaalkrachten belast. De grootte van de normaalkracht 'N' is te bepalen uit het evenwicht. Uit het evenwicht volgt:

$$ql = 2N \rightarrow N = \frac{1}{2}ql \rightarrow \frac{1}{2} \cdot 10,5 \cdot 1,5 = 7,875 \text{ kN}$$

De rek die ontstaat door deze belasting kan bepaald worden met de volgende formules:

$$\sigma = \frac{N}{A} = E\varepsilon \rightarrow \varepsilon = \frac{N}{EA}$$

Met behulp van deze formules kan de rek in de wand van het vat bepaald worden. De maximale rek is gelijk aan:

$$\varepsilon = 1.875 \cdot 10^{-6}. \quad \text{Bovendien geldt:} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

waarin ' Δl ' gelijk is aan de rek in de wand en ' l ' de wandlengte is. In deze situatie is ' l ' gelijk aan de halve omtrek van een cirkel. De straal van de cirkel heeft invloed op de boven gedefinieerde ' l '. Uitwerken van de bovenstaande gegevens geeft als resultaat de vergroting van de straal van het meetvat Δr .

$$\Delta r = 1.875 \cdot 10^{-6} \cdot r.$$

De vergroting van het volume van het meetvat komt hiermee op 0.000375%

De bovenstaande geschematiseerde berekening van de vervorming van de twee verschillende meetvaten duidt duidelijk aan dat het vierkante meetvat veel grotere vervormingen zal ondergaan.

De dikte van de wanden.

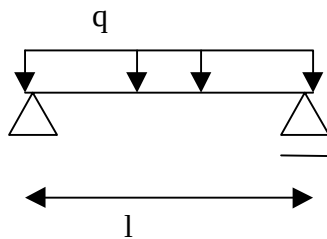
Hierboven is een geschematiseerde berekening gemaakt van de vervorming van de wanden onder maximale belasting. Bij de berekening van de vervorming is uitgegaan van een wanddikte van 20mm. Door de vervormingen van deze wand ontstaat een volumetoename van 0.000375%. Dit percentage is zo klein dat de wand wellicht dunner uitgevoerd kan worden zonder dat de vervorming mee gaat spelen in de meetresultaten. Bij een wanddikte van 10 mm

is de volumetoename gelijk aan 0.00075%. Deze toename is zo klein dat zij nog steeds verwaarloosd kan worden. De wanddikte wordt echter niet kleiner gekozen dan deze 10mm, omdat het vat ook vormvast moet zijn.

De dikte van de vloer.

De dikte van de vloer is afhankelijk van de draagconstructie waar de vloer op komt te steunen. Deze draagconstructie zal als een vierkant raster de vloerplaat van het meetvat ondersteunen. De vloerplaat kan dus in alle richtingen belasting afdragen naar de ondersteuningsconstructie.

De vloerconstructie wordt geschematiseerd als een ligger (zie figuur 4) die slechts in één richting belasting afdraagt. Dit is een conservatieve benadering van de situatie die in



Figuur 4: belastingsschema vloer

werkelijkheid optreedt, omdat er nu slechts in één richting belasting wordt afgedragen. Als de constructie voldoet aan deze conservatieve benadering zullen er in werkelijkheid geen problemen optreden.

Voor de eigenschappen van steen en water zijn de volgende waarden aangenomen:

ρ_{steen} :	2700 kg/m ³ ,
ρ_{water} :	1000 kg/m ³ ,
poriënpercentage:	35%.

Met een maximale steenhoogte in het meetvat van 1 meter is de belasting op de vloer gelijk aan: $0.65 \cdot 2700 \cdot 1 \cdot 1 + 0.35 \cdot 1000 \cdot 1 \cdot 1 = 2105 \text{ kg/m}$. Dit komt overeen met een belasting van $q = 21 \text{ N/mm}$. De doorbuiging kan berekend worden volgens:

$$W_{\max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EI} \quad \text{waarin:} \quad \begin{aligned} E_{\text{staal}} &= 2.1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2. \\ I &= 1/6 \cdot b \cdot h^3. \end{aligned}$$

De maximale doorbuiging van de vloer mag niet meer bedragen dan 0,5 mm. Als de vloer 0,5 mm zou zakken dan wordt het volume van het vat ongeveer 0.05% groter. Deze waarde is zo klein dat de invloed van de doorbuiging van de vloer geen consequenties heeft voor de meetresultaten. Aan de hand van deze eis is de benodigde vloerdikte en de ondersteuningsconstructie te bepalen.

Vloerdikte:	minimaal 10mm.
Ondersteuningsbalken h.o.h.:	400 mm.

De maximale doorbuiging in deze situatie is gelijk aan 0.5mm.

De opbouw van de ondersteuningsconstructie wordt weergegeven in de technische tekeningen van het meetvat.

Bijlage 7: materiaallijst, programma van eisen en ontwerptekeningen meetvat

PVE meetvat

afmetingen

- Diameter 1200 mm,
- Hoogte minimaal 850 mm,
- Wanddikte minimaal 10mm,
- Vloerconstructie gespecificeerd in tekening oriëntatie meetvat,
- vloer-wand verbinding moet loodrecht zijn,
- vloer-wand verbinding moet waterdicht zijn,
- het vat moet zo geplaatst worden dat het horizontaal staat, vlakstelling kan uitgevoerd worden met behulp van stelbouten die in de poten van het meetvat bevestigd worden. Na vlakstelling van het vat met behulp van de stelbouten moet de ruimte tussen de bodem van het vat en het maaiveld vol gestort worden met krimpvast cement. Op deze manier is de vloerconstructie in staat om de belasting van het proefmateriaal op te nemen.
- de bovenrand van het meetvat moet in een horizontaal vlak liggen, hierop moet de constructie geplaatst worden voor de meting van het breuksteenoppervlak en die heeft een horizontale basis nodig,

Stijgbuizen

- buisdiameter ± 10 cm,
- stijgbuis 1 loopt van onder het bodemniveau tot 45cm boven het bodemniveau,
- stijgbuis 2 loopt van ongeveer 40 cm boven de bodem tot de bovenkant van het meetvat (niet hoger dan 85 cm boven het bodemniveau),
- stijgbuizen kunnen aan het meetvat bevestigd worden met klemmen,
- stijgbuizen moeten een verticale oriëntatie hebben,
- stijgbuizen moeten door slangen verbonden zijn met de bodem van het meetvat,
- stijgbuizen kunnen ook dienen als ‘vulopeningen’ van het vat (hiervoor moet de capaciteit van de slangen groot genoeg zijn, diameter slangen ongeveer 3 cm),
- bevestiging van slangen aan stijgbuizen en meetvat moet waterdicht zijn,
- één van de slangen moet ook gebruikt worden voor het leeg laten lopen van het meetvat, hiervoor moet deze slang ontkoppeld kunnen worden van de stijgbuis, hulpconstructies meetvat (zie tekening)
- bevestigingsnokken voor klemmen stijgbuizen,
- De constructie voor het meten van het steenoppervlak moet met behulp van klemmen op het meetvat geplaatst worden. Voor de bevestiging van deze klemmen zijn nokken nodig aan de buitenkant van het meetvat,
- Plateautjes voor de bevestiging van de peilnaalden boven de stijgbuizen. constructie meting breuksteenoppervlak (zie tekening),
- basis is een rechte kokerbalk,
- de slee met het meetinstrument moet zonder speling over de kokerbalk kunnen schuiven,
- slee is ugerust met een verticaal georiënteerde buis waardoor de meetstaf spelingloos kan bewegen,
- Meetstaf is voorzien van millimeterverdeling,
- Meetstaf kan voorzien worden van halve bollen en een punt,

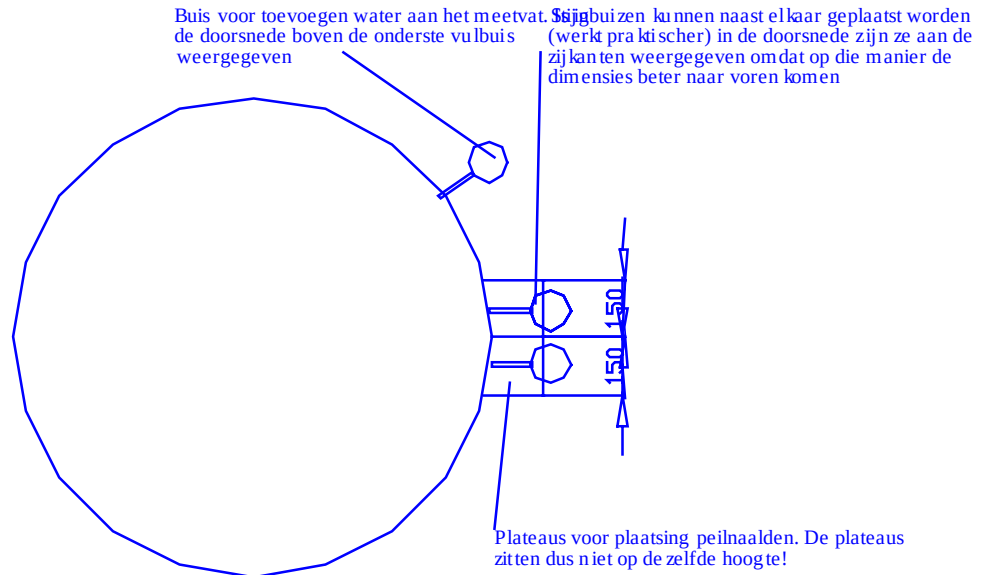


Het programma van eisen wordt toegelicht door tekeningen van het meetvat en meetconstructies.

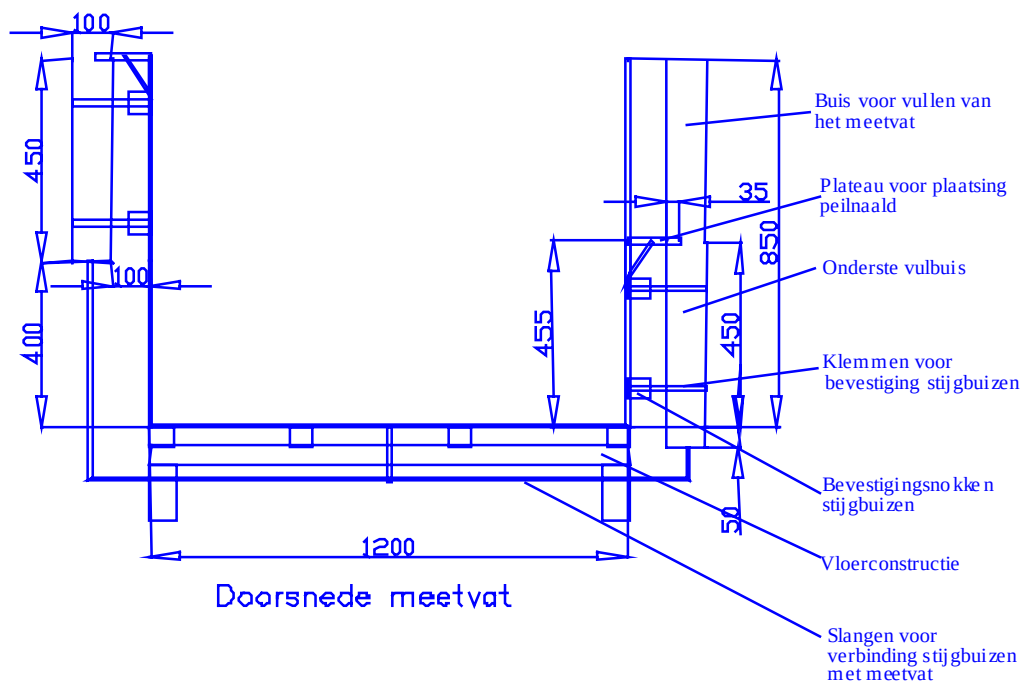
Materiaallijst

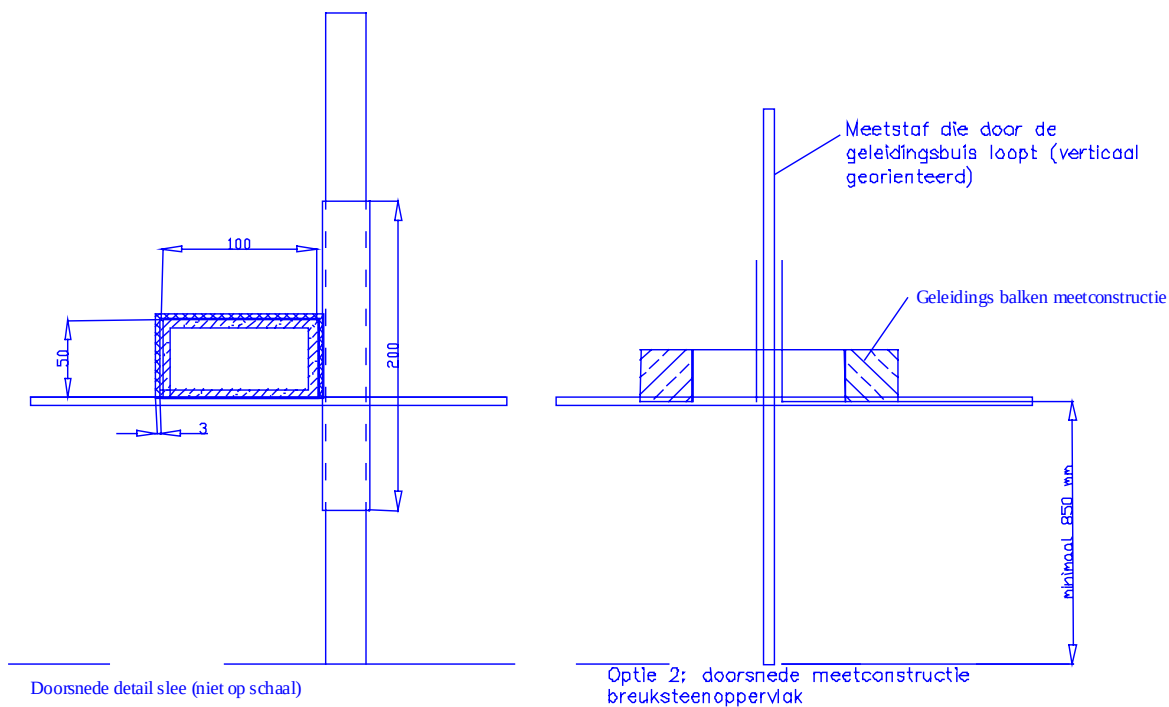
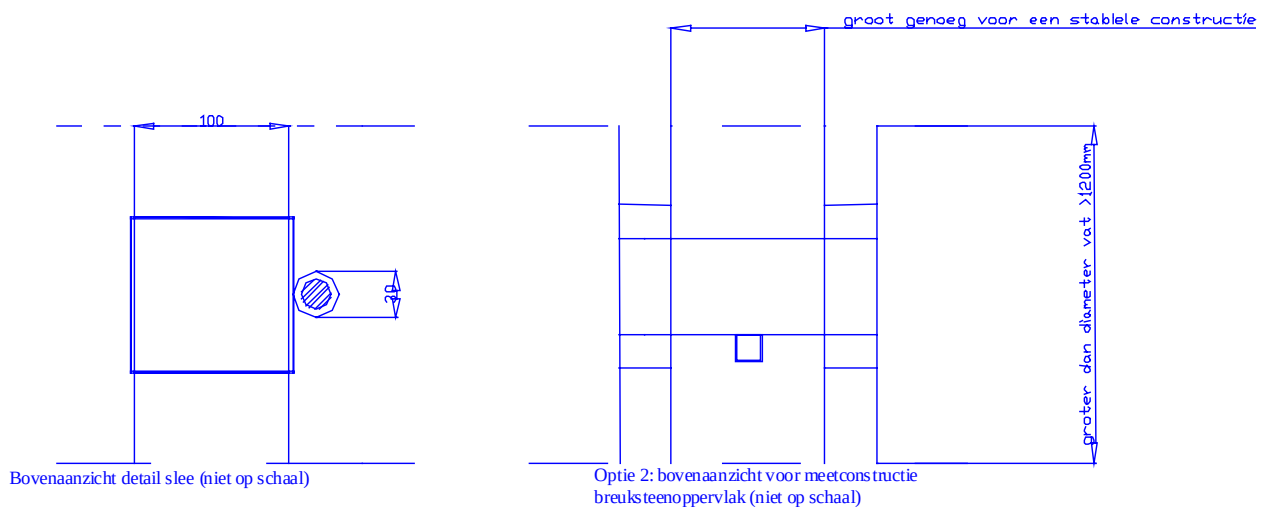
Item	Aantal	Opmerking/levering	beschikbaar
Meetvat en hulp- en meetconstructies	1	kan gemaakt worden in overleg met personeel werf	Werk VOACZ
Breksteen	-	Leverancier: Joosten bouwmaterialen Werkendam	Joosten
Draadzeven en opvangbakken	-	Zeven proefmateriaal, beschikbaar bij Joosten: 31.5/45/63/90/125/180/250 mm De rest wordt gemaakt in vloeistof lab.	Joosten/TU
Schop	1	Zeven van het proefmateriaal	Joosten
Greep	1	Zeven van het proefmateriaal	Joosten
Harde bezem	1	Borstelen proefmateriaal	Joosten
Weegschaal	1	Capaciteit 100-200 kg voor wegen gezeefd materiaal.	nee, (niet bij Joosten)
Water	-	Beschikbaar op werf (dichtheid??)	Werk VOACZ
Meetstaf voor meting oppervlak steenlaag	1	Instrument moet geschikt zijn voor toepassing van halve bol en conventionele baak!?	TU
Waterpastoestel	1	Meting niveau breuksteen	Werk VOACZ
Uitrusting meetstaf	2	Halve bol en conventionele baak	TU
Peilnaald	1	Nauwkeurigheid 0.1 mm bereik minimaal 50 cm	TU
Verf	4	Verschillende kleuren voor het uit elkaar houden van de verschillende graderingen	nvt
Millimeterverdeling	2	Schaalverdeling op meetstaf en slee	TU
Waterpas	1	Vlakstellen meetvat en afrijen breuksteenlaag	Werk VOACZ
Meetlat	1	Liniaal 30 cm, meetlint 2 m. ?	Werk VOACZ
Weegschaal	1	Capaciteit 10 kg. Nauwkeurigheid 1 gram voor toevoegen water aan meetvat	Werk VOACZ
Digitale camera	1	Fotomateriaal proefresultaten en proefuitvoering	eigen camera
Maatbeker	1	1/2/5 liter voor toevoegen water aan meetvat	Werk VOACZ
Emmers	5	Verplaatsen van het steemateriaal	Werk VOACZ
Computer	1	Uitwerken en opslaan proefresultaten	Werk VOACZ
Afrij balk	1	Afrijen gestorte breuksteenlaag	Werk VOACZ

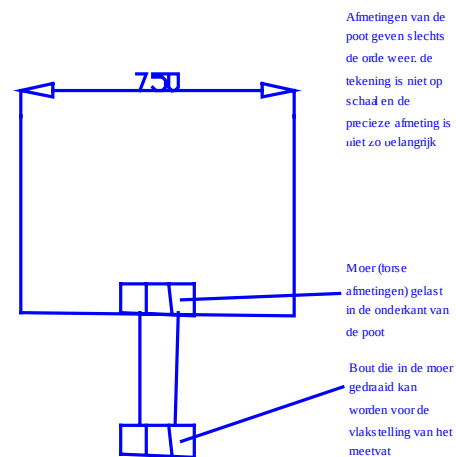
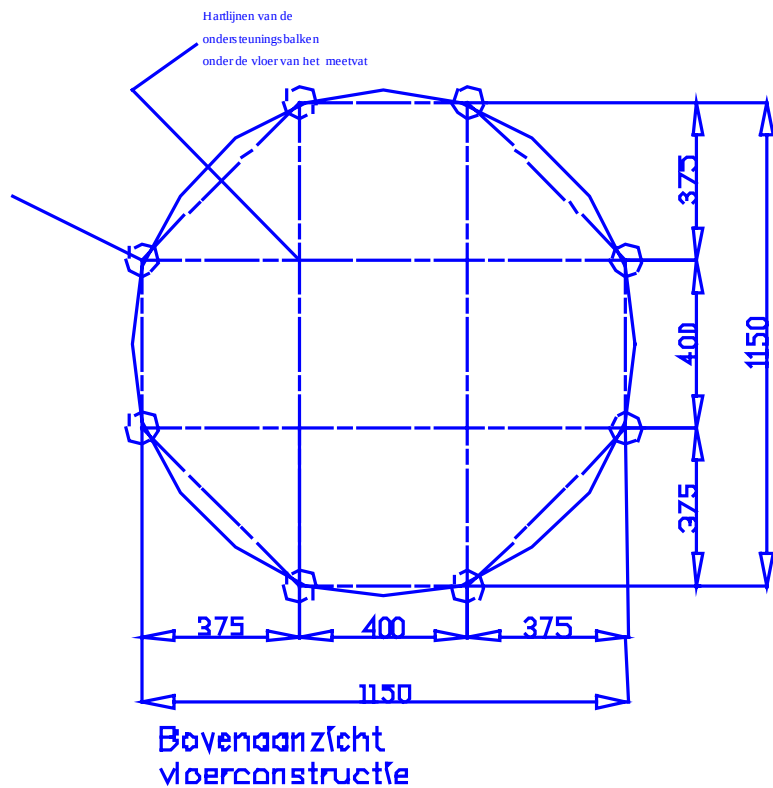
Ontwerptekeningen meetvat



Bovenaanzicht meetvat









Bijlage 8: data proefuitvoering

Data voor de proeven is in tabellen per proef samengevoegd (oppervlaktemetingen en stijghoogtemetingen).



Ruwe data uit proefuitvoering

De data is uitgedrukt in centimeters. Aanduidingen voor de oppervlaktemeting:

- bol1/2g1: oppervlaktemeting met halve-bol-methode, geplaatst helft van gradering 1
 pin1/2g1: oppervlaktemeting met pinmethode, geplaatst helft van gradering 1
 bol g1: oppervlaktemeting met halve-bol-methode, geplaatst gradering 1
 pin g1: oppervlaktemeting met pinmethode, geplaatst gradering 1

Liters geven het volume water aan dat de stapgrootte in de stijghoogte bepaald. In de kolom is de watertemperatuur ook aangegeven. Eventuele veranderingen in temperatuur zijn te vinden in de kolom 'liters'.

Referentie is bepaald door uitvoering van een oppervlaktemeting van de bodem van het meetvat. Vervolgens zijn deze meetpunten gekoppeld aan niveaus buiten het meetvat. Door meting van de punten buiten het meetvat is de referentie te controleren of opnieuw vast te stellen.

Metingen proef 1 gradering 1

Geplaatst materiaal 2*190 kg.

bol1/2g1	pin1/2g1	bolg1	ping1	Liters	watervul
103,39	103,19	92,12	93,21	2liter	21,01
103,39	103,58	92,50	93,98	T0=17	21,43
103,45	104,21	92,95	93,88		21,72
103,32	103,84	93,45	93,82		22,14
103,38	103,40	93,40	93,25		22,54
104,02	103,66	93,45	94,10		22,94
104,15	104,48	93,39	93,90		23,35
104,11	104,28	93,21	93,40		23,75
103,38	104,61	92,35	93,58		24,14
103,52	104,43	92,30	92,80		24,57
103,95	104,00	92,36	93,00		24,97
104,69	104,70	92,41	92,90		25,40
104,61	104,10	93,08	93,35		26,48
104,51	104,61	93,78	93,08		27,62
104,49	105,00	93,12	93,48		28,74
104,30	105,10	93,13	92,82		29,87
104,41	104,90	93,21	92,79		30,97
104,38	104,19	93,37	93,00		32,02
104,19	103,76	92,61	92,78		33,04
103,72	103,60	92,69	93,29		34,04
103,50	104,49	93,50	94,60		35,08
104,70	104,35	92,70	92,90		35,45
104,45	104,49	93,02	92,75		35,88
104,39	104,11	92,91	92,60		36,27
104,09	103,80	92,70	92,91		36,69
103,84	103,64	92,49	93,40		37,12
104,39	104,80	92,68	93,40		37,53
104,50	104,70	92,71	93,68		37,96
104,49	104,70	92,92	93,00		38,38
103,80	104,76	92,82	93,60		38,81



bol1/2g1	pin1/2g1	bolg1	ping1	Liters	watervul
104,49	104,61	93,02	93,38		39,24
103,91	104,60	92,69	93,21		39,64
104,39	104,51	93,50	93,95		40,08
104,25	105,09	92,57	94,28		40,52
104,70	104,48	92,81	93,82		40,97
103,91	104,70	93,35	93,60		41,48
103,79	104,02	93,00	93,30		41,78
104,19	104,40	93,22	92,85		42,22
103,98	104,61	93,21	93,19		42,64
104,40	105,00	92,80	93,40		42,98
103,90	104,72	93,06	93,59		43,24
104,50	103,80	92,60	93,38		43,47
103,98	104,59	92,80	92,50		43,67
104,26	104,35	93,00	93,12		43,86
103,82	105,32	93,50	93,49		44,04
103,55	105,10	93,10	93,32		
103,98	104,42	92,60	93,56		
104,09	104,31	92,89	92,92		
103,58	104,32	92,90	93,25		
103,89	104,10	92,51	93,38		
103,71	105,10	92,89	93,20		
104,29	105,30	92,72	93,42		
104,41	104,38	92,61	94,08		
104,35	103,84	92,61	94,50		
103,79	103,78	92,82	93,88		
104,08	104,72	93,45	93,82		
103,91	104,23	93,00	94,78		
103,56	104,48	93,31	93,25		
103,72	105,08	92,80	92,78		
104,11	104,92	93,20	92,12		
104,35	104,42	93,76	92,55		
104,68	104,07	93,02	93,49		
104,51	104,42	93,72	93,50		
104,46	103,80	93,35	94,31		
104,20	104,05	93,21	92,30		
104,88	104,89	92,81	93,55		
104,62	104,20	93,30	94,00		
104,52	103,51	93,79	93,72		
104,59	104,05	92,89	92,30		
104,10	106,08	93,29	92,60		
104,35	104,12	91,90	93,12		
104,50	104,10	92,20	92,71		
104,70	103,51	92,50	92,39		
103,91	104,10	91,93	93,18		
103,98	104,40	92,29	93,12		
104,10	105,20	92,08	93,02		
104,14	104,15	92,13	92,71		
103,98	104,20	92,79	92,27		
104,00	104,40	92,20	92,50		
104,11	103,91	92,56	93,08		
104,20	105,90	93,01	93,01		



bol1/2g1	pin1/2g1	bolg1	ping1	Liters	watervul
104,80	105,31	92,40	92,95		
104,11	105,41	92,25	93,30		
104,35	104,02	92,80	93,30		
105,60	104,61	93,12	93,71		
104,70	104,21	92,10	93,52		
104,50	106,15	92,50	93,48		
104,11	105,90	92,41	93,98		
104,25	105,10	92,81	92,92		
104,25	105,62	93,22	92,22		
104,10	104,60	92,91	92,37		
104,00	104,55	93,28	93,22		
103,88	105,30	93,00	93,88		
104,10	105,31	93,01	94,09		
103,79	103,98	92,62	93,61		
104,32	104,90	92,90	92,90		
104,20	105,02	92,92	93,29		
104,25	104,10	93,58	93,38		
103,90	104,75	93,48	93,70		
103,75	105,19	93,02	93,35		

Proef 1 gradering 2

Geplaatst 2*190 kg.

bol 1/2g2	pin1/2g2	bol g2	pin g2	Liters	watervul g1 en g2
83,12	83,25	72,82	72,99	l=1	20,78
80,98	82,50	71,92	71,25	T0=18	20,91
81,34	82,28	70,69	71,38		21,12
82,41	81,81	70,90	72,81		21,33
81,70	82,20	69,78	71,90		21,54
81,25	82,83	70,80	72,17		21,75
82,29	81,90	72,00	72,59		21,94
81,10	80,80	69,95	70,27		22,15
80,60	81,20	71,50	70,80		22,35
81,75	85,50	70,15	71,41		22,56
82,40	84,25	70,49	70,30		22,76
81,52	87,08	69,79	69,80		22,94
82,28	81,70	70,33	71,69	l=5	23,96
83,32	82,33	71,36	71,03		25
82,60	83,20	73,21	70,80		26,03
81,98	81,50	72,18	71,40		27,09
81,42	81,42	71,72	72,76		28,19
82,10	81,75	70,20	73,00		29,26
82,80	83,40	70,22	70,10		30,42
81,22	82,75	69,78	75,04		31,55
82,69	83,96	72,30	70,52		32,54
82,10	82,78	72,22	72,79		33,52
80,66	82,94	71,89	71,90		34,57
82,21	84,13	71,20	71,65		35,58
82,90	85,72	71,01	72,50		36,63
80,80	82,31	70,50	73,10		37,64
82,35	83,51	69,59	71,31		38,7



bol 1/2g2	pin1/2g2	bol g2	pin g2	Liters	watervul g1 en g2
81,20	82,39	72,89	73,09		39,8
80,50	80,92	73,12	73,09		40,91
81,58	83,85	73,40	74,12		42,07
82,48	80,52	72,85	73,48	l=1	42,31
81,65	82,81	71,20	73,50		42,5
80,90	81,82	72,22	73,89		42,71
82,29	81,12	69,89	71,92		42,87
82,10	81,26	72,30	73,41		43,03
82,30	82,08	71,50	70,50		43,2
83,80	80,72	70,22	72,50		43,35
82,90	82,47	69,90	73,41		43,51
80,98	83,36	71,11	72,82		43,69
83,30	83,48	70,95	73,69		43,85
81,10	81,39	72,71	71,71		44,05
81,30	83,02	71,09	71,81		44,23
80,91	81,70	72,22	76,38		44,42
81,22	81,50	70,65	73,15		44,63
81,61	83,92	70,81	72,92		44,82
81,93	84,38	71,02	71,48		45,01
82,58	84,30	70,69	71,80		45,2
81,62	81,83	72,31	74,15		45,38
81,90	86,05	71,60	72,63		45,58
83,40	81,15	72,32	72,18		45,76
81,80	83,80	71,20	71,60		45,94
83,30	84,59	71,32	72,00		46,11
82,70	82,81	71,39	71,48		46,31
81,70	81,68	71,13	73,21		46,49
83,80	83,06	72,12	71,98		46,7
81,78	83,82	71,50	72,49		46,88
83,10	82,76	70,40	71,52		47,06
82,86	83,82	70,92	71,91		47,23
83,20	84,61	73,10	71,20		47,41
82,15	85,48	72,32	71,40		47,58
81,90	83,61	71,21	72,01		47,78
83,21	82,98	70,32	71,69		47,97
83,31	81,90	72,05	73,52		48,17
83,12	82,60	72,11	71,00		48,35
82,92	84,56	70,48	72,79		48,54
82,00	83,98	70,42	74,72		48,75
81,22	83,20	71,90	72,96		48,93
81,98	82,10	72,49	73,80		49,13
82,22	85,50	72,40	75,35	l=2	49,47
82,34	82,21	72,03	73,72		49,86
82,97	81,60	71,09	73,52		50,29
83,81	80,19	72,03	73,45		50,66
80,71	80,85	71,09	72,89		51,04
80,71	81,06	72,56	71,75		51,45
82,91	82,50	69,49	71,19		51,79
83,20	86,38	71,90	70,98		52,18
81,10	85,39	71,10	72,60		52,56
81,00	82,80	70,70	70,55	l=5	53,51



bol 1/2g2	pin1/2g2	bol g2	pin g2	Liters	watervul g1 en g2
81,48	81,30	71,80	71,98		54,43
83,09	81,29	73,11	70,71		55,32
83,26	83,40	70,20	72,40		56,25
82,91	83,21	71,51	70,96		57,21
82,72	85,12	72,22	72,31		58,14
81,13	84,20	71,80	72,71		59,11
81,45	86,80	71,53	72,19	l=2	60,08
81,75	83,43	70,98	72,00		60,48
80,46	81,00	71,43	75,10		60,88
80,95	82,85	71,05	73,13		61,21
84,29	83,02	71,55	70,72		61,58
81,70	84,36	71,88	70,31		61,99
83,21	81,15	70,40	74,50		62,36
82,58	82,25	71,19	74,18		62,72
82,70	82,32	72,85	76,55		63,09
82,71	82,60	73,12	72,52		63,45
82,56	80,41	72,80	75,02		63,71
80,98	84,51	73,10	74,30		63,99
80,92	83,43	72,64	71,70		64,23
80,78	87,10	72,30	76,95		64,53
81,92	82,19	70,50	71,69		64,66
83,01	82,80	70,36	72,11		64,88
					65,07
					65,29
					65,47
					65,65
					65,82
					66,02

Proef 1 gradering 3

Geplaatst 338.2 kg en 169.1 kg

bol 1/2g3	pin 1/2g3	bol 3/4g3	pin3/4g3	Liters	watervullen g2-g3
51,01	51,25	39,85	44,35	l=2	63,07
50,52	59,50	40,09	43,48	Tovat=18	63,36
50,01	57,65	42,70	41,91	Toin=17	63,72
49,52	55,38	41,08	46,30		64,07
52,83	53,35	38,46	45,83		64,37
51,59	54,31	42,20	40,28		64,72
48,60	52,60	40,39	40,08		64,98
49,53	52,10	41,10	47,00		65,32
49,71	50,69	43,00	44,92		65,67
48,50	51,35	41,82	46,75		66,06
50,31	58,00	39,80	41,63		66,47
51,22	53,60	43,50	42,83		66,82
51,72	54,20	42,61	42,89		67,26



bol 1/2g3	pin 1/2g3	bol 3/4g3	pin3/4g3	Liters	watervullen g2-g3
51,51	54,92	43,02	41,72		67,61
52,09	52,30	41,40	47,29		68,03
50,35	51,81	41,10	42,42		68,43
49,75	57,81	43,21	42,05		68,70
49,75	54,88	40,82	44,59		69,16
50,92	52,41	42,65	52,72		69,54
52,95	53,25	42,92	42,68		69,90
52,50	53,25	42,15	42,50		70,32
50,20	52,89	40,03	41,19		70,64
50,00	53,01	43,38	40,48		71,05
51,40	58,79	42,98	40,67		71,42
54,03	52,39	42,89	40,91		71,86
51,61	52,90	40,71	40,48		72,22
50,79	52,51	41,48	40,49		72,69
51,45	53,00	43,40	42,80		73,06
51,79	52,12	40,68	42,94		73,45
50,70	53,81	42,12	42,20		73,85
51,00	55,10	41,87	45,00		74,13
50,45	55,53	43,82	41,80		74,52
50,13	48,05	41,90	40,85		74,93
49,35	49,98	41,40	42,05		75,29
49,50	58,11	42,21	42,80		75,62
52,10	55,70	43,53	40,50		76,01
50,21	51,31	45,51	41,20		76,44
50,63	52,02	40,98	44,48		76,82
49,49	52,69	41,32	45,75	l=5	77,75
49,25	51,58	43,21	41,79		78,72
49,45	51,55	42,35	41,31		79,73
49,35	52,40	41,72	40,38		80,81
49,79	54,02	45,30	42,97		81,87
50,08	48,89	43,02	44,02		82,91
51,59	50,12	40,65	39,50		83,86
50,41	51,48	39,40	39,80		84,75
49,25	51,00	42,90	46,31		85,63
52,89	54,30	43,40	45,00		86,52
49,80	50,58	41,10	43,05		87,58
49,90	50,80	40,49	43,20	l=2	87,93
50,19	52,00	41,00	41,10		88,35
50,74	50,72	43,77	45,75		88,78
52,12	50,61	41,35	47,71		89,18
50,68	51,10	40,89	40,30		89,62
49,61	54,85	42,49	41,98		90,06
50,11	53,45	43,21	43,30		90,52
50,79	49,51	40,38	40,52		90,95
50,10	48,50	43,11	45,10		91,34
48,40	49,88	43,81	42,68		91,83
49,00	52,10	39,68	43,65		92,28
55,40	54,60	44,98	41,28		92,63
50,99	50,42	42,50	45,85		93,03
50,31	53,40	42,60	44,95		93,41



bol 1/2g3	pin 1/2g3	bol 3/4g3	pin3/4g3	Liters	watervullen g2-g3
51,61	50,97	43,50	39,80		93,71
51,82	50,72	40,60	40,98		94,00
51,43	55,60	39,38	41,80		94,31
52,80	51,89	42,05	42,73		94,58
50,69	55,40	41,02	41,62		94,79
50,72	50,52	41,00	43,31		95,04
54,10	50,20	40,08	46,45		95,28
51,20	51,70	39,03	40,21		95,48
50,08	50,20	43,20	40,18		95,68
51,42	53,50	39,82	42,51		95,89
51,18	52,31	39,90	42,50		96,08
51,59	49,80	41,85	40,12	l=4	96,48
51,98	50,58	41,19	45,10		96,86
51,50	53,81	40,61	41,40		97,21
51,23	55,70	40,79	43,90		97,58
49,61	50,31	44,90	45,84		97,93
50,05	49,55	40,48	46,49		
49,60	57,60	42,00	47,70		
50,30	50,00	40,61	40,90		
51,29	50,01	41,85	45,11		
49,93	50,89	41,88	49,25		
49,50	52,62	40,58	44,61		
49,45	53,41	39,21	43,88		
48,52	50,61	40,30	47,50		
51,20	50,21	39,90	45,49		
49,60	53,93	39,69	43,69		
48,62	60,15	40,42	43,22		
53,88	51,59	42,09	43,30		
50,35	55,53	41,38	41,43		
50,44	50,85	42,75	40,70		
52,60	48,82	38,90	42,00		
51,97	54,25	40,45	41,79		
50,09	53,45	40,00	42,79		
50,25	48,52	42,76	43,91		
52,60	50,10	42,40	40,75		
53,70	51,61	40,30	46,00		
52,10	50,80	39,89	45,48		

Proef 1

Referenties oppervlaktmeting.

Meetpunten referentie proef 1			
115,08	115,19	115,21	115,20
115,18	115,11	115,15	115,19
115,25	115,21	115,10	115,27
115,28	115,25	115,19	115,22
115,25			



Proef 2: gradering 2 en 4

geplaatst: 2*190 kg, gradering 4 1* 450 kg

bol 1/2 g2	pin 1/2g2	bol g2	pin g2	bol 1/2 g4	pin 1/2 g4	Liters	water- vullen g2	Liters	water- vullen g2 +1/2 g4
104,31	107,49	93,55	96,25	66,5	70,23	2l	20,56	2l	20,69
104,4	107,14	93,78	97,38	69,1	67,29		20,88		20,92
104,29	106,32	93	95,63	68,84	67,91		21,17		21,24
105,18	108,12	95,38	94,69	70,08	64,53		21,52		21,62
104,8	105,02	94,08	94,58	64,74	71,9		21,91		22,05
104,8	104,8	95,7	94,28	66,71	68,93		22,33		22,48
105,22	106,71	94,55	93,09	67,89	66,81		22,78		22,87
105,3	105,92	94,23	92,82	67,03	66,09		23,15		23,24
105,18	104,88	94,7	94,48	69,59	73,81		23,55		23,62
103,6	106,78	93,28	94,26	68,28	70,41		23,9		23,97
103,93	106,06	94,2	95,5	72,42	67,78		24,25		24,35
104,71	107,2	94,5	96,68	69,09	72,89		24,7		24,76
105,9	106,07	93,93	94,39	63,94	66,29		25,03		25,14
104,59	105,42	93,6	94,97	69,3	74,11		25,41	Tin=19C	25,51
104,1	106,22	93,72	95,32	69,9	72,4		25,84	5l	26,52
104	105,49	94,5	93,39	67,9	67,66		26,26		27,56
104,42	105,39	93,6	94,17	69,85	67,88		26,61		28,55
105,31	103,2	94,11	96,08	64,8	68,01	tin=19C	27,02		29,54
105,27	105,01	94,43	95,49	64,09	70,4	5l	28,06		30,53
105,79	105,52	94,61	95,67	66,68	69,48		29,09		31,48
105,4	103,59	93,28	93,82	70,4	67,86		30,02		32,41
106,75	107,7	95,58	96,08	69,21	65,54		30,98		33,35
107,16	103,24	94,04	95,3	69,28	67,98		31,91		34,39
105,8	103,4	94,9	93,6	64,91	67,72		32,85		35,38
105,09	104,59	95,17	97,2	64,39	69,19		33,77		36,22
104,38	107,19	94,6	94,12	65,1	73,1		34,73		37,20
104,71	103,71	94,08	94,19	68,1	68,87		35,64		38,20
104,88	103	93,85	95,48	67,13	68,13		36,56		39,16
105,43	108,4	94,4	95,43	67	74,08		37,52	2l	39,55
104,12	107,61	94,69	93,41	66,61	64,76	2l	37,96		39,92
105,22	104,32	95,07	95,6	68,69	68,41		38,36		40,28
106,28	105	94,22	95,12	70,1	64,2		38,69		40,66
104,13	107,17	93,32	93,85	69,05	66,41		39,04		41,05
104,5	105,21	94,14	97,91	62,9	68,8		39,44		41,33
104,65	105,21	92,81	95,59	66,19	71,51		39,74		41,60
104,28	104,89	94,2	94,49	66,2	66,5		40,07		41,91
104,76	105,11	93,5	95,02	65,69	68,53		40,38		42,21
105,03	104,16	94,72	94,35	64,38	70,52		40,72		42,52
104,11	106,11	95,18	94,57	70,3	70,38		41,09		42,83
106,68	106,11	94,92	94,31	68,73	68,43		41,37		43,19
103,81	106,2	94,55	94,76	69,17	69,1		41,62		43,53
103,68	105,98	93,85	96,47	69,15	75,61		41,9		43,91
104,72	105,17	94,62	93,72	65,11	75,6		42,12		44,34
106,18	106,09	92,83	97,32	66,79	71		42,36		44,78



bol 1/2 g2	pin 1/2g2	bol g2	pin g2	bol 1/2 g4	pin 1/2 g4	Liters	water- vullen g2	Liters	water- vullen g2 +1/2 g4
104,11	105,8	95,22	94,9	64,52	65,43		42,56		45,21
103,72	104,71	95,2	93,5	65,7	68,53		42,74		45,64
106,13	104,9	94,6	96,58	68,21	67,85		42,97		46,05
104,61	105,14	94,14	95,96	67,69	70,39		43,12		46,47
103,95	107,34	93,5	94,71	68,48	66,8		43,33		46,87
104,2	105,08	94,3	94,11	66,91	70,1		43,5	3l	47,46
104,28	105	95,09	94,23	69,8	69,65		43,67		48,05
104,42	105,07	93,65	95,39	65,95	74,54	tin=19C			48,60
107,3	104,9	93,64	97,5	65,82	70,59				49,18
105,3	104,79	94,8	95,1	64,32	71,89				49,80
104,7	106,2	94,47	93,12	65,32	69,92				50,35
104,68	104,8	94,39	96,17	67,2	70,3			5l	51,28
104,7	106,68	93,88	95,2	65,32	68,93				52,19
104,39	104,62	93,92	96,07	67,88	67,7				53,14
104,38	105,89	95,93	94,6	67,45	67,18				54,08
104,14	106,56	96,37	96,39	68,21	68,79				55,00
104,03	106,85	94,13	94,08	66,64	71,21				56,00
104,27	107,35	93,38	96,31	69,3	70,9				56,98
105,22	106,99	94,86	94,46	68,92	76,19				57,98
106,03	106,32	96,09	94,1	69,75	71,7			b2	58,97
103,55	107,74	93,65	94,01	64,88	67,52				59,94
103,93	106,09	95,8	94,5	68	68,31				60,90
106,48	105,8	96,05	93,68	68,85	66,79				61,90
104,71	104,59	94,73	93,71	67,7	71,38			3l	62,86
104,11	105,29	95,5	94,83	66,68	68,29				63,43
103,33	103,69	96,7	94,91	65,92	66,63				64,00
105,18	105,03	94,17	96,32	66,93	69,19				64,56
104,88	103,8	94,12	96,93	64,41	69,88				65,16
105,8	106,32	95,42	95,9	65,52	72,98				65,75
105,61	104,6	94,82	93,98	68,08	70,01				66,27
107,78	106,49	94,13	94,07	68	69,64				66,81
107	105,32	98,1	94,39	65,6	69,59				67,28
104,98	104,2	96,3	94,4	68,98	66,7				67,77
104,99	104,89	95,7	97,32	68,53	75,35				68,19
104,13	105,48	94,92	94,42	65,92	66,97				68,61
104,84	105,71	93,83	95,41	65,13	69,43				69,01
104,21	103,71	97,6	94,41	70	71,78				69,36
105,19	106,7	94,56	96,26	71,33	68,7				69,68
105,4	106,13	94,98	93,89	70,92	68,43				70,03
105,8	103,97	93,99	94,28	65,99	66,51				70,34
103,3	104,22	94,82	96,32	67,41	68,98				70,68
103,96	106,2	97,1	94,33	65,99	67,41				70,95
105,92	105,03	93,41	95,62	66,41	68,72				71,24
105,68	104,79	94,83	97,52	65,95	75,11			5l	71,51
106,31	107,4	92,56	95,6	65,58	69,01				71,96
104,18	104,02	92,5	95,69	68,2	70,39				72,41
107	104,2	93,63	95,6	68,3	70,2				72,87
106,7	108,4	93,92	97,2	66,28	68,98				73,33
104,55	106,52	94,53	93,8	72,3	66,8				73,76



bol 1/2 g2	pin 1/2g2	bol g2	pin g2	bol 1/2 g4	pin 1/2 g4	Liters	water- vullen g2	Liters	water- vullen g2 +1/2 g4
103,79	104,89	95,38	93,85	66,87	73,82				74,22
103,69	107,5	95,05	94,38	62,49	68,29				74,64
104,11	105,12	93,52	95,01	62,13	68,38				75,08
104,2	106,33	94,23	99,4	64,4	66				75,51
104,3	106,41	94,9	95,53	67,05	65,98				
103,52	108,27	93,61	93,16	64,57	68,4				
104,8	105,06	94,6	92,45	65,58	72,18				

Proef 2

Referentie oppervlaktmetingen

Bodem	p2r1	verschil	p2r2	verschil	p2r3	verschil	p2r4	verschil	p2r5	verschil
118,74	117,41	-1,33	117,46	-1,28	117,59	-1,15	117,51	-1,23	117,38	-1,36
118,56	117,21	-1,35	117,28	-1,28	117,41	-1,15	117,32	-1,24	117,20	-1,36
118,79	117,43	-1,36	117,49	-1,30	117,61	-1,18	117,56	-1,23	117,40	-1,39
118,52	117,20	-1,32	117,22	-1,30	117,38	-1,14	117,31	-1,21	117,16	-1,36
	gem	-1,34	gem	-1,29	gem	-1,16	gem	-1,23	gem	-1,37
116,70	ref	115,36	ref	115,41	ref	115,54	ref	115,47	ref	115,33

Proef 3 gradering 1 en 4

geplaatst:gradering 1 380 kg en gradering 4 450 kg.

pin g1	bol g1	pin 1/2 g4	bol 1/2 g4	Liters	watervullen proef 3
93,12	92,65	66,31	62,08	1l	20,48
92,95	93,3	68,18	66,2	Tin=20	20,74
93,5	93,2	65,19	62,12		20,95
93,14	92,81	68,3	64,17		21,18
93,42	92,71	66,6	65,9		21,39
93,41	92,91	65,88	64,72		21,61
93,4	93,02	64,88	64,62		21,81
93,49	93,91	64,9	67,22	Tin=18	22,01
93,81	93,97	68,35	70,48		22,22
93,12	92,61	70,98	64,61	5l	23,22
92,9	93,48	65,46	66,69		24,21
93,81	93,9	64,71	68,43		25,21
93,6	93,22	63,41	65,8		26,21
94,6	92,91	69,71	62,07		27,21
93,91	93,19	66,55	64,85		28,22
94,42	93,9	66,49	65,32		29,25
93,2	93,6	68,55	65,17		30,27
93,25	93,56	63,53	65,4		31,34
93,8	93,9	66,91	67,23		32,38
93,37	92,99	68,82	65,91		33,44
92,6	93,25	64,08	69,88	Tin=18	34,50



pin g1	bol g1	pin 1/2 g4	bol 1/2 g4	Liters	watervullen proef 3
93,21	92,84	80,13	64,99		35,55
92,89	93,31	67,89	66,9		36,62
93,02	93,21	65,8	65,42		37,69
92,9	92,5	67,96	67,08		38,80
93	92,9	67,28	70,95		39,87
92,49	92,91	66,5	69,21		41,03
92,71	93,35	65,8	67,13		41,22
93,1	93,18	72,49	66,53	1l	41,43
93,15	92,79	67,42	67,12		41,68
92,4	92,96	75,7	63,2		41,94
92,91	93,21	69,1	65,22		42,44
94,2	93,18	66,92	65,11		42,68
93,14	93,2	66,3	69		42,92
93,25	93,43	66,58	67,41		43,16
93,29	93,74	66,07	66,9		43,36
93	93,55	65,82	64,23		43,53
92,79	93,23	72	68,4		43,72
93,91	93,1	64,41	66,88		43,89
93,68	93,2	65,09	70,01		44,05
93,2	93,78	65,22	68,02		44,21
94,08	93,22	69,69	67,81		44,39
93,75	93,35	69,9	72,67		44,55
94,6	93,32	72,2	69,8		44,72
93,82	92,98	67,3	66,8	2l	45,07
93,9	93,39	74,59	67,38		45,47
93,6	93,18	68,91	64,49		45,90
94,46	93,42	66,75	67,52		46,30
93,25	93,41	68,69	67,19		46,78
93,11	93,41	71,83	69,53		47,18
93	92,82	65,92	68,9		47,64
93,29	92,7	64,55	65,9		48,05
92,95	92,93	67,1	69,95		48,46
93,48	93,07	67,7	67,79		48,88
93,62	93,49	69,92	65,89		49,30
93,88	93,11	74,53	66,47		49,68
94,17	92,87	76,28	67,4		50,04
93,58	92,69	65,52	63,84		50,39
93,32	92,75	82,1	63,22		50,81
93,26	92,6	69,52	69,01		51,18
94,43	93,3	68,5	67,82		51,51
93,82	92,89	66,77	65,65		51,88
93,72	92,62	72,02	64,9	Tvat=20	52,24
93,31	93,48	67,74	67,66	Tin=18	52,61
93,3	92,96	73,49	68,9	5l	53,53
93,5	93,04	66,78	65,81		54,49
93,2	93,58	66,72	65,69		55,44
93,3	93,28	65,33	69,89		56,39
93	93,55	68,72	64,5		57,34
93,6	93,58	69,2	64,43		58,31
93,69	92,93	71,91	66,8		59,28
92,81	93,38	68,42	64,52		60,20



pin g1	bol g1	pin 1/2 g4	bol 1/2 g4	Liters	watervullen proef 3
93,41	93,52	71,08	66,95		61,12
93,1	93,52	62,79	66,89		62,00
93,6	93,58	64,6	62,71	2l	62,37
92,61	93,12	67	67,78		62,75
93,02	92,91	74,32	69,29		63,11
92,72	93,19	63,31	65,81	Tvat=18	63,50
93,48	93,58	74,28	65,32	Tin=18	63,89
93,6	92,8	72,61	68,92		64,27
92,88	93,49	69,79	66,44		64,71
92,51	93,12	67,99	65,93		65,16
92,9	93,71	73	65,73		65,53
93,97	93,9	63,2	66,74		65,90
93,3	93,62	66,05	66,15	3l	66,60
93,48	93,39	69,3	65,11		67,14
93,85	93,71	66,18	65,71		67,74
93,9	93,81	69,6	63,62		68,38
93,22	92,88	62,52	64		68,85
94	93,43	68,52	63,82		69,37
92,85	93,04	69,18	65,31		69,80
93,71	93,22	67,4	63,2		70,22
93,39	92,7	68,02	65,17		70,62
93,41	92,89	66,15	64,9		70,95
94,9	93,45	74,82	66,21		71,30
93,81	92,9	65,68	69,2		71,58
93,45	93,59	69,18	63,76		71,89
93,6	93	67,43	67,72		72,24
93,85	92,89	64,46	63,08		72,51
93,19	92,87	70,08	63,48		72,80
					73,07
					73,33
				Tin=18	73,61
				Tvat=18	73,86

Proef 3

Referentie oppervlaktetellingen

Bodem	hele proef:	Vershil
118,74	117,90	-0,84
118,56	117,82	-0,74
118,79	117,95	-0,84
118,52	117,80	-0,72
	gem	-0,79
116,70	ref	115,91



Proef 4

Gradering 1: 380 kg, gradering 3: 2*338.2 kg

g1 bol	g1 pin	1/2 g3 bol	1/2 g3 pin	g3 pin	g3 bol	Liters	watervul proef 4
94,35	94,12	73,49	80,41	53,91	54,80	2l	38,66
94,41	94,13	74,08	72,84	55,77	56,21	Tin=18	39,14
95,50	94,02	76,29	74,35	53,30	55,30	nulniveau:	39,62
95,70	94,15	71,20	74,82	54,98	54,70	3820	39,86
94,65	95,15	74,84	77,08	57,60	54,81	1l	40,11
95,32	94,58	74,69	75,70	53,90	52,45		40,33
94,50	94,10	73,87	74,80	57,61	52,22		40,63
94,59	93,92	73,32	72,99	54,29	55,35		40,82
95,38	93,92	75,94	77,47	55,49	54,35		41,06
94,70	94,29	75,12	72,91	51,79	53,28		41,31
94,31	94,10	76,15	71,65	53,92	55,92		41,56
93,81	94,20	72,12	75,29	57,28	53,53		41,79
93,60	93,80	71,98	72,92	56,75	56,72		42,00
93,73	93,79	76,20	74,03	61,00	55,12		42,26
93,76	94,91	75,10	81,20	56,40	53,60		42,48
93,98	95,22	70,81	73,12	53,95	54,25		42,69
93,59	94,10	74,18	77,38	53,85	52,95		42,87
93,59	94,90	71,10	73,40	54,44	53,60		43,03
94,34	94,27	72,46	74,31	52,03	54,78		43,19
94,00	94,60	76,70	79,82	55,20	54,90		43,38
94,00	94,98	75,60	72,78	57,81	54,51		43,51
93,82	94,59	72,00	72,79	55,62	52,92		43,70
93,59	95,61	76,30	77,19	53,84	52,70		43,88
93,61	95,42	72,72	77,50	54,82	54,28		44,06
94,03	94,51	72,28	75,10	52,70	53,80		44,24
93,05	95,50	75,00	73,05	56,37	55,34		44,42
93,52	95,30	74,35	70,80	55,08	54,83		44,61
93,48	95,08	74,66	75,41	53,41	53,18	2l	45,02
93,90	94,82	73,04	71,48	54,51	53,52		45,41
94,78	93,78	72,20	72,82	53,08	56,30		45,87
94,11	93,91	72,92	77,72	57,20	56,49		46,31
93,55	95,22	73,02	71,90	53,35	53,62		46,68
93,60	94,35	72,98	73,20	53,89	56,18		47,09
93,68	93,68	74,40	77,81	53,89	55,10		47,54
93,71	93,59	74,69	75,03	55,85	53,79		47,90
93,98	95,58	74,40	71,60	56,87	54,00		48,32
93,83	94,21	74,60	75,12	53,61	53,50		48,67
94,28	94,30	72,71	72,41	54,79	54,18		49,06
94,19	94,18	72,00	72,42	52,80	53,77		49,44
94,00	94,40	73,81	82,75	53,89	55,20		49,82
94,70	94,40	73,99	72,95	52,25	54,12		50,21
94,58	93,64	75,99	75,00	55,47	54,12		50,61
94,40	94,55	75,21	83,31	53,38	56,08		51,00
94,49	95,31	73,70	74,00	57,12	54,70	5l	52,00
93,72	93,82	73,66	78,63	53,40	53,01		52,97
94,31	95,80	73,70	74,12	51,05	52,78		53,93
94,41	94,24	75,35	79,18	51,61	53,78		54,92



g1 bol	g1 pin	1/2 g3 bol	1/2 g3 pin	g3 pin	g3 bol	Liters	watervul proef 4
93,75	94,98	75,30	74,10	54,29	55,60		55,92
93,52	95,60	73,62	74,31	58,20	54,60		56,91
93,75	94,75	72,78	74,36	54,25	54,52		57,89
93,19	94,80	73,00	74,35	51,95	54,69		58,91
93,31	94,32	72,22	77,51	56,93	55,28		59,89
93,98	94,28	72,50	76,42	56,68	54,99		60,85
93,68	94,30	74,03	75,68	54,21	53,36		61,84
93,52	94,35	74,04	75,91	59,63	53,50		62,81
94,30	94,20	76,10	73,28	62,59	52,97		63,73
93,79	94,02	74,41	80,58	55,68	54,81		64,58
93,79	93,85	72,91	74,31	55,68	53,55		65,51
93,42	94,28	72,71	74,10	63,11	52,07		66,50
93,40	95,28	73,83	73,13	52,97	53,30		67,49
94,00	93,84	73,72	73,80	60,20	52,41		68,62
94,30	95,20	72,48	72,91	60,82	54,28		69,69
94,85	92,73	72,21	72,30	53,19	56,11		70,74
94,95	93,19	72,31	72,35	52,88	53,85		71,80
94,21	94,52	72,21	72,50	55,70	53,98		72,74
94,22	93,89	73,10	74,09	54,40	53,55		73,76
94,21	94,20	73,50	76,72	53,41	54,53		74,73
94,52	94,81	71,58	71,73	57,72	52,38		75,71
93,91	95,30	75,80	75,97	55,81	53,02		76,69
94,23	94,01	74,92	78,77	55,10	54,62		77,68
93,50	94,52	74,63	74,09	54,20	53,29	2l	78,09
93,65	94,01	71,38	79,12	53,44	53,11		78,50
93,70	93,71	72,18	86,61	53,82	54,70		78,91
94,57	94,40	71,62	74,31	60,31	55,21		79,30
94,69	94,00	74,35	72,75	54,03	53,89		79,74
94,34	94,90	73,25	77,39	53,32	53,91		80,16
94,10	95,39	76,75	71,43	57,31	52,89		80,57
93,62	93,28	73,30	74,09	59,10	54,19		81,03
94,10	93,88	72,95	77,01	57,21	54,59		81,34
94,01	94,95	75,22	75,40	54,15	53,50		81,74
94,03	94,30	73,38	78,61	56,71	52,12		82,05
93,60	94,10	73,52	73,77	56,79	54,62		82,35
93,98	94,75	71,33	75,40	60,72	51,57		82,61
93,46	94,13	72,30	72,49	53,90	53,12		82,86
93,36	94,62	73,91	74,99	67,00	53,51		83,10
93,48	95,08	75,88	73,70	55,97	57,57		83,35
93,60	94,98	71,80	73,48	55,99	55,58	5l	83,88
93,54	93,20	74,71	74,22	51,71	55,69		84,38
94,44	94,28	75,56	73,23	55,39	53,30		84,84
93,89	93,75	73,00	72,51	62,21	52,03		85,29
93,81	96,10	72,81	71,88	53,82	53,58		85,75
93,28	93,87	73,03	72,95	55,35	54,38		
93,84	95,35	74,09	73,69	54,25	53,75		
93,62	93,62	72,70	75,41	55,10	56,61		
93,62	93,50	73,72	75,42	53,61	54,60		
93,50	95,02	74,13	75,00	55,74	54,31		
93,70	95,10	73,05	76,75	54,31	53,89		
93,81	95,82	73,48	80,62	56,30	54,91		



g1 bol	g1 pin	1/2 g3 bol	1/2 g3 pin	g3 pin	g3 bol	Liters	watervul proef 4
93,60	94,75	75,25	73,61	56,28	54,55		
94,41	94,47	74,28	77,29	56,80	55,60		

Proef 4

Referentie oppervlaktemetingen

ref g1	verschil	ref1/2g3bol	verschil	rest g3	verschil
118,3	0,5	118,2	0,6	118,3	0,5
118,0	0,6	118,0	0,6	118,1	0,5
118,2	0,6	118,2	0,6	118,3	0,5
118,0	0,5	118,0	0,6	118,1	0,5
gem	0,5	gem	0,6	gem	0,5
ref	116,2	ref	116,1	ref	116,2

Proef 5

Gradering 3: 2*338.2 kg.

1/2g3 bol	1/2g3 pin	g3 bol	g3 pin	Liters	watervullen proef 5
92,72	96,85	74,10	77,04	2l	20,58
93,50	92,47	73,12	79,65	Tin=22	20,87
92,92	94,30	75,60	77,40		21,11
94,89	102,52	74,39	71,91		21,38
93,10	94,00	74,02	74,28		21,67
95,69	94,60	72,12	72,56		21,96
95,32	98,47	74,50	78,21		22,29
92,03	102,10	74,94	73,69		22,71
91,40	97,72	75,00	73,51		23,16
94,78	94,89	74,30	76,41		23,50
94,70	94,56	77,36	72,29		23,96
91,21	94,19	76,70	71,83		24,37
92,20	94,60	74,02	74,10		24,81
94,40	94,61	74,51	73,49	Tin=21	25,22
95,27	94,08	77,52	74,40		25,62
93,02	99,16	74,30	77,59		26,00
94,75	98,09	73,30	73,05		26,40
92,76	95,37	75,82	74,60		26,79
93,60	95,18	74,78	77,25		27,20
92,78	99,97	74,90	77,15		27,60
95,30	102,40	72,69	72,10		27,99
92,30	97,50	70,60	76,30	5l	28,38
95,39	100,89	76,35	74,28		29,35
94,41	97,55	72,10	74,20		30,33
94,30	96,49	70,01	78,19		31,31
94,90	93,88	71,28	75,19		32,32



1/2g3 bol	1/2g3 pin	g3 bol	g3 pin	Liters	watervullen proef 5
96,66	94,79	72,90	74,93		33,30
93,91	94,48	74,57	76,07		34,24
95,71	95,27	71,68	72,31		35,20
93,48	101,07	73,31	76,50		36,16
92,29	97,71	72,71	72,48		37,17
93,13	92,68	75,08	78,00		38,22
94,69	97,50	73,62	79,58		39,25
93,95	95,55	73,60	76,83		40,27
93,42	97,43	77,75	73,11	Tin=20	41,23
95,00	100,40	73,60	78,69		42,13
96,14	96,59	71,59	75,32		43,00
95,71	94,01	71,69	75,19		43,88
93,20	93,03	74,47	71,91		44,76
95,10	95,30	75,02	78,00		45,70
93,19	95,14	73,60	72,81		46,67
93,30	91,10	73,00	72,99		47,67
93,57	93,07	74,60	74,76		48,62
94,00	96,70	73,81	72,28		49,60
95,20	98,70	73,93	73,72		50,56
90,20	99,78	73,70	72,15		51,53
96,78	95,61	76,90	73,41		52,51
94,72	93,79	73,70	75,01		53,46
97,60	94,30	75,19	75,35		54,41
93,75	97,70	74,69	77,72		55,41
91,85	93,20	76,66	75,60		56,45
90,10	93,52	74,59	74,49	3l	57,02
89,52	100,72	75,51	72,67		57,56
94,88	95,00	75,19	72,20		58,17
96,00	95,51	74,10	73,72		58,70
93,60	101,19	72,91	71,97		59,38
94,00	98,51	71,37	73,96		59,96
91,93	100,70	74,55	72,12		60,53
91,96	91,81	77,11	75,09		60,99
95,12	100,75	75,49	73,38		61,48
93,83	96,10	74,11	75,28		61,88
92,87	91,48	76,59	77,59		62,29
91,48	92,41	79,45	74,61		62,67
95,11	102,21	75,18	80,59		63,01
90,85	100,20	71,62	77,02		63,32
93,89	93,19	72,59	74,35		63,59
95,90	95,01	74,58	80,19		63,87
94,52	92,90	73,20	76,29		64,16
92,92	98,70	72,00	77,90		64,42
94,51	93,00	71,80	77,46		64,69
95,71	94,59	71,71	80,70		64,99
94,72	94,41	73,12	79,41		65,22
91,31	94,68	72,79	78,45		65,53
93,93	92,33	72,60	72,97		65,80
94,20	93,01	74,32	71,76	Tvat=22	66,02
97,70	94,10	74,62	75,39	Tin=20,5	66,30
95,42	102,12	75,80	74,93		



1/2g3 bol	1/2g3 pin	g3 bol	g3 pin	Liters	watervullen proef 5
96,80	92,31	76,01	79,20		
94,34	93,42	72,31	76,52		
96,72	93,15	72,61	77,96		
94,46	94,78	73,60	72,50		
96,45	97,68	72,10	73,39		
95,90	100,02	73,50	78,50		
92,61	92,02	73,43	78,10		
93,71	103,11	74,24	79,09		
95,83	96,54	74,80	77,79		
94,02	94,72	75,39	71,37		
95,12	94,17	73,10	72,82		
95,80	94,51	75,61	75,53		
93,78	94,19	74,01	74,93		
92,15	99,97	72,11	73,33		
91,88	94,78	74,01	73,68		
94,00	96,40	72,58	75,21		
96,92	98,02	73,05	74,61		
92,10	94,32	76,21	71,68		
90,22	99,29	73,38	79,10		
95,95	98,28	74,22	75,80		
98,89	94,10	75,60	75,32		
91,51	93,28	74,25	78,96		
93,49	97,91	72,10	80,29		

Proef 5

Referentie oppervlaktmetingen

Bodem	proef 5	verschil
118,74	117,5	-1,24
118,56	117,32	-1,24
118,79	117,51	-1,28
118,52	117,28	-1,24
	gem	-1,25
116,70	ref	115,45

Proef 6

Gradering 4: 2*450 kg

1/2g4 bol	1/2g4 pin	g4 bol	g4 pin	Liters	watervullen proef 6
85,31	86,08	60,00	71,88	2l	20,78
86,91	88,50	58,63	62,78	Tin=19	21,02
90,40	89,18	60,91	63,13		21,23
87,62	87,35	57,22	60,29		21,48
87,30	91,40	57,49	61,29		21,83
81,45	89,12	61,30	61,65		22,07
87,15	89,71	59,49	59,10		22,41



1/2g4 bol	1/2g4 pin	g4 bol	g4 pin	Liters	watervullen proef 6
83,95	90,00	59,60	59,29	3l	22,97
87,18	91,40	57,88	64,40	Tin=18	23,62
86,61	95,81	59,55	61,01		24,12
93,37	93,68	59,20	59,22		24,83
89,85	92,29	58,19	69,82		25,41
89,29	85,06	64,43	65,75		26,00
88,30	88,19	58,42	61,32		26,54
85,15	87,00	57,40	59,90		27,10
84,95	86,18	59,50	66,90		27,64
89,07	88,70	57,32	61,71		28,26
85,70	85,31	61,10	62,41		28,67
91,12	92,78	62,49	59,69		29,12
87,48	87,09	63,10	62,61		29,75
85,41	87,18	58,88	60,90		30,25
91,43	87,99	57,90	59,20	6l	31,35
87,40	93,49	58,48	60,01		32,45
84,90	88,32	61,00	62,51		33,64
88,41	86,51	65,48	60,01		34,82
86,90	85,80	57,72	63,19		35,98
86,40	94,10	64,35	62,76		37,10
87,20	86,88	60,82	58,40		38,23
85,81	83,92	57,59	59,05		39,41
87,70	86,23	58,21	66,65	Tin=16	40,58
87,29	88,52	62,45	60,72		41,69
89,99	87,30	58,98	62,51		42,88
89,12	86,72	59,39	66,99		44,14
86,42	93,39	56,50	61,20		45,41
86,20	85,80	60,37	58,66		46,59
87,28	83,92	61,52	61,18		47,74
87,30	85,30	57,81	61,55		48,82
89,01	88,43	62,80	61,90		49,88
87,14	85,16	62,00	59,31		50,97
85,06	95,32	60,38	59,60		52,09
87,61	85,34	65,10	60,25		53,23
87,85	95,42	60,60	62,06		54,38
90,50	84,99	56,05	65,59		55,55
86,17	87,28	60,95	60,26		56,66
87,31	84,39	61,65	66,08		57,78
88,32	90,85	61,00	62,69		58,81
88,09	85,30	60,90	61,22		59,88
87,12	95,02	59,18	62,00		60,94
86,14	87,50	61,88	61,42		62,15
83,70	86,89	62,06	61,19		63,37
84,03	83,65	64,03	60,07		64,54
83,98	90,43	60,78	59,51		65,71
88,59	98,35	55,70	62,27		66,94
87,87	92,50	62,50	63,20		68,10
82,52	85,85	62,10	58,10		69,26
87,58	91,81	60,70	57,60		70,46
84,70	86,22	60,29	59,72		71,70
85,23	92,30	61,85	61,46	4l	72,39



1/2g4 bol	1/2g4 pin	g4 bol	g4 pin	Liters	watervullen proef 6
86,46	86,88	60,69	60,71		73,17
85,00	88,69	61,00	59,60		73,93
84,91	83,04	57,79	62,47		74,62
87,10	89,50	63,35	61,49		75,22
87,68	86,96	59,20	67,81		75,81
88,68	93,40	60,68	68,40		76,39
85,95	90,68	60,50	61,32		76,75
86,20	87,59	60,00	61,25		77,20
87,73	96,30	61,51	59,30		77,67
88,41	93,96	59,10	58,55		78,06
81,39	88,89	59,23	64,69		78,35
87,30	95,22	58,11	63,30		78,71
87,50	88,64	60,72	61,11		79,10
88,12	87,10	60,81	61,39	6l	79,65
88,60	90,46	60,50	58,35		80,13
87,60	86,22	58,51	59,00		
86,12	91,91	61,79	60,79	Tvat=17,5	
83,78	89,01	61,60	61,98	Tin=17	
86,61	88,76	59,19	60,39		
89,32	92,99	60,30	59,70		
86,59	89,49	58,70	64,75		
88,21	90,78	59,06	60,79		
88,42	90,70	58,70	59,60		
87,39	91,61	58,47	59,57		
89,30	88,05	59,31	59,68		
89,22	96,40	63,40	61,30		
88,39	88,89	60,50	61,45		
90,00	100,45	60,11	60,30		
87,21	99,75	60,01	61,40		
88,50	87,71	60,52	59,50		
86,51	87,39	59,90	59,40		
86,00	87,89	58,62	64,68		
84,76	88,27	57,99	60,12		
84,70	86,78	59,22	63,40		
84,14	93,60	63,69	60,80		
83,29	89,06	59,41	59,59		
84,03	87,83	57,90	68,91		
86,02	88,50	60,19	61,00		
81,90	89,35	62,90	59,90		
82,39	87,38	61,20	61,23		
84,70	88,22	59,44	59,80		
85,99	99,68	60,18	62,72		



Proef 6

Referentie oppervlaktemetingen

Bodem	ref proef 6	Vershil
118,74	117,41	-1,33
118,56	117,24	-1,32
118,79	117,48	-1,31
118,52	117,19	-1,33
	gem	-1,32
116,70	ref	115,37

Volumeverloop meetvat

Liters	Meetvat	Liters	Meetvat	Liters	Meetvat	Liters	Meetvat
5l	20,57		40,06				81,99
Tin=23	21,15		40,66		61,64		82,61
	21,6		41,28		62,26		83,22
	22,01		41,89		62,87		83,83
Tin=20,5	22,45	Tin=19	42,52		63,5		84,44
	22,91		43,15		64,12		85,08
	23,35		43,76		64,72		85,69
	23,8		44,37		65,34		86,31
	24,24		44,98		65,94		86,92
7l	24,67		45,6		66,57		87,54
	25,29		46,23		67,19		88,16
	25,91		46,85		67,8		88,79
	26,51		47,46		68,42		89,4
	27,14		48,07		69,03		90,01
	27,76		48,69		69,65		90,62
	28,38	Tvat=20	49,32		70,27		91,23
	29		49,93		70,89		91,86
	29,61		50,54		71,49	Tin=20	92,47
	30,21		51,16		72,13		93,09
	30,81		51,78		72,75		93,71
	31,43		52,4		73,35		94,33
	32,04		53		73,96		94,95
	32,66		53,61		74,57		95,56
	33,3		54,23		75,19		96,18
	33,9		54,85		75,82		96,78
	34,5		55,47		76,43		97,4
	35,14		56,08		77,04		98,03
	35,74		56,71		77,65		98,64
	36,38		57,32		78,27		99,26
	36,99		57,94		78,89		99,89
	37,6		58,55		79,53		100,48
	38,22		59,18		80,14		101,1
	38,83		59,79		80,75		101,73
	39,44		60,41		81,38	Tin=19,5	102,36
			61,03			Tvat=20	102,97