

VOORWOORD

Voor u ligt het eindrapport van mijn afstudeeronderzoek getiteld “Het stortgedrag van een schuifstorter; modelonderzoek ter vergroting van de voorspelbaarheid van het stortresultaat ten behoeve van bodem- en oeverbeschermingen”. Dit rapport dient ter afsluiting van mijn studie Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft.

Het onderzoek, bestaande uit een literatuurstudie en een experimenteel gedeelte, is uitgevoerd in samenwerking met Van Oord N.V., het voormalige Ballast Ham Dredging. De experimenten hebben plaatsgevonden in het Laboratorium van Vloeistofmechanica.

Bovengenoemde instanties wil ik dan ook hartelijk bedanken voor het verlenen van de benodigde faciliteiten en financiële ondersteuning tijdens mijn afstudeeronderzoek.

Voor wat betreft de begeleiding wil ik in eerste instantie de leden van mijn afstudeercommissie bedanken; prof. drs. ir. J.K. Vrijling, dr. ir. H.L. Fontijn en ir. H.J. Verhagen van de Technische Universiteit Delft, faculteit Civiele Techniek en ir. J. Brakel van de afdeling Engineering van Van Oord N.V.

Verder is een woord van dank gericht aan de medewerkers van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van wie de hulp onmisbaar was bij het uitvoeren van de modelproeven; Arie den Toom, Fred van den Brugge, Hans Tas, Jaap van Duijn, Karel de Bruin en Michiel van der Meer, en de medestudenten uit Stevin III.

Tenslotte dank ik de medewerkers en medestudenten van de afdeling Engineering van Van Oord N.V. en alle anderen die op welke wijze dan ook een bijdrage aan dit onderzoek hebben geleverd.

Timo de Vos,
september 2004

SAMENVATTING

Wanneer relatief dunne stortlagen ten behoeve van bodem- en oeverbeschermingen met een schuifstortor worden aangebracht is moeilijk te voorspellen hoe het profiel er op de bodem uit komt te zien. Deze onvoorspelbaarheid volgt voornamelijk uit (de onregelmatigheden in) het stortproces van de schuifstortor. Het doel van dit onderzoek is dan ook als volgt:

“Inzicht verkrijgen in het stortproces van de schuifstortor om de voorspelbaarheid van het stortresultaat ten behoeve van bodem- en oeverbeschermingen te kunnen verbeteren”.

Het accent van het onderzoek ligt hierbij voornamelijk op het inzichtelijk maken van

1. (de onregelmatigheid in) de hoeveelheid stortmateriaal die van het laaddek geschoven wordt (“bresgedrag”), en
2. het val- en bodemgedrag van het gestorte materiaal onder water (“spreiding”).

Beide aspecten zijn in dit onderzoek middels (denk)modellen theoretisch benaderd en vervolgens getoetst aan de hand van experimenten die op verkleinde schaal zijn uitgevoerd.

Ad 1.

Tijdens het stortproces, wanneer door middel van de hydraulische schuiven het stortmateriaal zijdelings overboord wordt gezet, ontwikkelt zich aan de stortzijde een valfront met een helling (ϕ_f) die steiler is dan de hoek van natuurlijk talud van het stortmateriaal. Dit omdat de lading tijdens het schuifproces wordt ingedrukt en dus meer ‘samenhang’ krijgt. Deze ‘evenwichtssituatie’ wordt verstoord doordat er onderaan de helling, aan de rand van het laaddek, stenen overboord vallen. De ‘fluctuatie’ – steendiameter (D_{n50}) / schuifsnij snelheid (V_s) – waarmee dit gebeurt, is in belangrijke mate bepalend voor de ontwikkeling van de hoek van het valfront. Bij toenemende waarden voor D_{n50} / V_s zal ook ϕ_f toenemen.

Met betrekking tot het bresgedrag is er nu een tweetal onregelmatigheden in de hoeveelheid stortmateriaal die van het laaddek wordt geschoven, namelijk

1. een (theoretische) begin- en eindonregelmatigheid van het bresproces, en
2. een onregelmatigheid in het afwisselend afschuiven – bressen – van het stortmateriaal.

Nota bene:

Het bresgedrag verloopt ook ongelijkmatig over de lengte van het laaddek. In dit onderzoek is hier echter geen aandacht aan besteed.

(a) Afhankelijk van de hoek van het valfront en de hoek van natuurlijk talud waaronder de stenen op het laaddek liggen zal de ‘valhoogte’ van de stenen aan het begin van het schuifproces toenemen. Een en ander leidt tot een beginonregelmatigheid in het bresproces. Aan het eind van het schuifproces blijven er steeds minder stenen op het laaddek achter. De lading neemt dan ook in ‘(val)hoogte’ af, zodat hier ook een onregelmatigheid in het bresproces optreedt.

(b) De (on)regelmaticheid in het bresgedrag door het afwisselend afschuiven van het stortmateriaal kan op een tweetal manieren worden geïnterpreteerd.

De (on)regelmaticheid van het bresgedrag over de tijd waarover geschoven wordt, wordt in verband gebracht met de hoek van het valfront waaronder het materiaal afschuift. Het materiaal kan sneller – en dus regelmatig – afschuiven wanneer de hoek van het valfront zich ‘moeilijk’ kan ontwikkelen. Dit is het geval voor kleine waarden van D_{n50} / V_s . Deze (on)regelmaticheid zal dan ook toenemen met toenemende waarden voor D_{n50} / V_s .

De (on)regelmaticheid in het bresgedrag wanneer een bepaalde hoeveelheid materiaal is/wordt gestort, dus wanneer de schuif over een bepaalde afstand is verschoven, is enkel afhankelijk van de steendiameter van het stortmateriaal. De schuifsnellheid heeft slechts invloed op de opeenvolging tussen twee bressen en niet op de (on)regelmaticheid ervan.

Ad 2

Wanneer met een schuifstortter, vanaf en lijn, stenen op een vlakke bodem worden gestort kunnen de horizontale verplaatsingen van de stenen door spreiding onder water worden beschreven door:

$$f_{XY}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_N} \right)^2} \cdot \left(\phi \left(\frac{X_1 - x}{\sigma_N} \right) - \phi \left(\frac{X_0 - x}{\sigma_N} \right) \right), \text{ met } \sigma_N = 0,685 \sqrt{D_{n50} \cdot h}$$

Hierin is $X_1 - X_0$ gelijk aan de lengte van de stortlijn, waar vanaf wordt gestort.

Als een hoeveelheid materiaal wordt gestort, zal de vorm van het profiel en de hoogte ervan afhankelijk zijn van de waterdiepte waar op wordt gestort.

(a) Op een waterdiepte die groter is dan $h = h_\Delta$, kan de dwarsdoorsnede van het stortprofiel worden beschreven door een Gausskromme. De hoogte ervan kan benaderd worden met onderstaande vergelijking.

$$z_{stort} = \frac{A_{dek}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N} = \frac{A_{dek}}{1,71 \sqrt{D_{n50} \cdot h}}$$

De waterdiepte h_Δ is hierbij gedefinieerd als

$$h_\Delta = \frac{A_{dek}}{2c^2 \cdot \sqrt{2\pi} \tan(\phi_m) \cdot D_{n50}} = \frac{A_{dek}}{2,35 \tan(\phi_m) \cdot D_{n50}}$$

(b) Voor waterdiepten die kleiner zijn dan $h = h_\Delta$, gaat de dwarsdoorsnede van het stortprofiel, door afschuiving, over in een driehoeksvorm. De profielhoogte is dan onafhankelijk van de waterdiepte en slechts afhankelijk van de lading en de hoek van natuurlijk talud van de stenen onder water:



$$z_{\Delta} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\sqrt{2\pi}}} \sqrt{A_{dek} \cdot \tan(\phi_m)} = 0,89 \sqrt{A_{dek} \cdot \tan(\phi_m)}$$

De spreiding van het materiaal onder water, maar vooral de onregelmatigheden in het bresgedrag van de stenen en, hebben gevolgen voor (de gelijkmatigheid van) het stortprofiel, als steenbestortingen op een vlakke bodem worden aangebracht en het stortschip tijdens het stortproces met een ‘constante’ snelheid (zijdelings) langs de stortkoers wordt verplaatst:

- De onregelmatigheden in het bresproces dragen bij aan een ‘ongelijkmatige’ laagdikte (over de lengte) van het stortprofiel.
- De ongelijkmatigheid van het bresgedrag over de lengte van het laaddek veroorzaakt ‘gaten’ in (de breedte van) de stortlaag.

Beter lijkt het dan om te om de methode van “discreet verhalen” toe te passen. Hieronder wordt verstaan: op één positie de schuiven over een bepaalde lengte uitdrukken, vervolgens de steenstort over een bepaalde afstand verhalen, en weer opnieuw over een zekere lengte de schuiven uitdrukken, etc... Onregelmatigheden in tijd en plaats worden dan uitgemiddeld en er wordt gebruik gemaakt van de spreiding van het materiaal onder water.

In dit onderzoek is deze methode theoretisch benaderd en is het resultaat van de storting beoordeeld aan de hand van experimenten op een vlakke bodem.

Het aantal storts kan worden bepaald met:

$$s = \frac{A_{dek}}{2cm \sqrt{D_{n50}^3 \cdot h}} = \frac{A_{dek}}{1,4m \sqrt{D_{n50}^3 \cdot h}}$$

De afstand waarover het stortschip steeds moet worden verhaald wordt gegeven door:

$$dv = 2c \sqrt{D_{n50} \cdot h} = 1,4 \sqrt{D_{n50} \cdot h}$$

Er blijkt dan dat in sommige gevallen slechts een klein aantal storts benodigd is voor het aanbrengen van een ‘dunne’ stortlaag (met een laagdikte van ca. $1,5D_{n50}$). Dit is het geval als relatief grote steendiameters op een relatief grote waterdiepte worden gestort. Als relatief kleine stenen op kleine waterdiepten worden gestort is juist een groot aantal storts benodigd met een kleine tussenafstand. De methode van “discreet verhalen” wordt dan een continu proces en gaat over in de methode die gebruikelijk is, het “continu verhalen” van het stortschip tijdens het stortproces.

Tenslotte zijn nog enkele stortproeven op een talud uitgevoerd, ter oriëntatie op het val- en bodemgedrag op een talud en als aanbeveling voor vervolgonderzoek.

INHOUDSOPGAVE

VOORWOORD	III
SAMENVATTING	IV
LIJST MET FIGUREN	XI
LIJST MET TABELLEN	XV
1 INLEIDING	1
1.1 ACHTERGROND	1
1.2 AANLEIDING VAN HET ONDERZOEK	1
1.3 DOELSTELLING	2
1.4 AANPAK	3
1.5 OPBOUW VAN HET RAPPORT	4
2 STORTPROCES VAN DE SCHUIFSTORTER	5
2.1 INLEIDING	5
2.2 PLAATSBEPALING	6
2.3 POSITIONERING EN BEWEGINGSVRIJHEDEN TIJDENS HET STORTEN	7
2.3.1 Manoeuvreren langs de stortkoers	7
2.3.2 Bewegingsvrijheden tijdens storten	8
2.4 BRESGEDRAG VAN HET STORTMATERIAAL	9
2.4.1 Beschrijving van het bresgedrag	9
2.4.2 Parameters die van invloed zijn op het bresgedrag	10
2.5 VERPLAATSING VAN STEEN (BOVEN EN) ONDER WATER	13
2.5.1 Verplaatsing van materiaal ten gevolge van de afzet	13
2.5.2 Verplaatsing van materiaal door de invloed van golven	14
2.5.3 Verplaatsing van materiaal onder invloed van stroming	14
2.6 BODEMGEDRAG VAN STEEN	15
2.6.1 Wegspringen van het gestorte materiaal	15
2.6.2 (Af)rollen van het stortmateriaal	17
2.6.3 Afschuiven van het stortprofiel	17
3 VALGEDRAG VAN EEN ENKELE STEEN IN STILSTAAND WATER	19
3.1 INLEIDING	19
3.2 AFLEIDEN VAN DE EVENWICHTSVALSNELHEID	21
3.2.1 Krachten op een vrij vallende steen in stilstaand water	21
3.2.2 De evenwichtsvalsnelheid van een voorwerp in stilstaand water	23

3.3	SPREIDING (=HORIZONTALE VERPLAATSING) VAN DE VALLENDE STENEN ONDER WATER	24
3.3.1	Vortex-shedding	24
3.3.2	Magnus-effect	26
3.3.3	Asymmetrisch loslaten van de grenslaag	27
3.4	RANDOM WALK: HET ENKELE STEEN MODEL	27
4	VALPROCES VAN EEN GROEP STENEN IN STILSTAAND WATER.....	31
4.1	INLEIDING	31
4.2	VALBEWEGING VAN EEN GROEP STENEN	31
4.2.1	Twee fasen in het valproces van steengroepen	31
4.2.2	Vijf fasen volgens Van der Wal.....	32
4.3	GROEPSEFFECT BIJ HET STORTEN VAN HOEVEELHEDEN STEEN	33
4.3.1	Groepseffect bij een bulkstort	33
4.3.2	Groepseffect bij een lijnstort	34
5	SCHALEN EN MODELPROEVEN.....	35
5.1	INLEIDING	35
5.2	GELIJKVORMIGHEID.....	36
5.3	SCHAALREGELS	36
5.3.1	Afleiden schaalregels: analyse van de vergelijking van Navier-Stokes.....	36
5.3.2	Schalen met behulp van de schaalregel van Froude.....	38
5.4	(MOGELIJKE) SCHAALEFFECTEN BIJ MODELPROEVEN.....	40
6	VOORBEREIDING EN ORIËNTATIE.....	41
6.1	INLEIDING	41
6.2	HET STORTMATERIAAL	41
6.2.1	Keuze steensortering	41
6.2.2	Selecteren stortmateriaal.....	43
6.2.3	Bepalen steeneigenschappen.....	43
6.2.4	Analyse van de meetresultaten	45
6.3	DE MODELSCHUIFSTORTER.....	46
6.3.1	Beschrijving modelschuifstort uit [BISSCHOP, 2002]	46
6.3.2	Aangepast 'ontwerp' modelschuifstort	47
6.4	ORIËNTATIE	48
6.4.1	Het bresgedrag van het stortmateriaal.....	48
6.4.2	Het valgedrag van het materiaal tijdens storten	51
6.5	EISEN/ASPECTEN VOOR HET VERVOLG VAN HET ONDERZOEK	52
6.5.1	(Aanpassen) modelschuifstort	52
6.5.2	Proefparameters	52
7	PROEVENPROGRAMMA EN UITVOERINGSMETHODIEK.....	57
7.1	PROEFSERIE A: BRESPROEVEN	57
7.2	PROEFSERIE B: (STATIONAIRE) STORTPROEVEN OP EEN VLAKE BODEM	59
7.3	PROEFSERIE C: AANBRENGEN VAN STEENBESTORTINGEN OP EEN VLAKE BODEM	62
7.4	PROEFSERIE D: (STATIONAIRE) STORTPROEVEN OP EEN TALUD	63

8	SERIE A: BRESPROEVEN.....	65
8.1	INLEIDING	65
8.2	DE STORTKARAKTERISTIEK.....	66
8.2.1	Weergave stortkarakteristieken	66
8.2.2	'Discretiseren' stortkarakteristieken	67
8.2.3	Gemiddelde stortkarakteristiek	68
8.3	THEORETISCHE BENADERING VAN HET BRESGEDRAG.....	69
8.3.1	1 ^e benadering: geen samendrukking van het stortmateriaal	70
8.3.2	2 ^e benadering: wel samendrukking van het stortmateriaal	72
8.3.3	Verklaring vorm/verloop van benaderde stortkarakteristieken	73
8.4	TOETSEN THEORETISCHE BENADERING: ALGEMENE BESCHOUWING VAN DE STORTKARAKTERISTIEKEN	74
8.4.1	Vorm en verloop van de theoretische stortkarakteristieken	74
8.4.2	'Juistheid' van de theoretische benadering	76
8.5	DE (ON)REGELMATIGHEID VAN HET BRESPROCES.....	79
8.5.1	Begin- en eindonregelmatigheid van het bresproces.....	79
8.5.2	'(On)regelmatigheid' in het afschuiven van het stortmateriaal	84
8.6	DE (ON)REGELMATIGHEID BIJ HET AANBRENGEN VAN STEENBESTORTINGEN	89
8.7	CONCLUSIES SERIE A.....	91
9	SERIE B: (STATIONAIRE) STORTPROEVEN OP EEN VLAKKE BODEM.....	93
9.1	INLEIDING	93
9.2	DEFINITIES STORTPROFIEL.....	94
9.3	THEORETISCHE BENADERING STORTPROFIEL	95
9.3.1	Het lijnstort spreiding model (LSM).....	95
9.3.2	Opbouw stortprofiel bij toenemende storthoeveelheden	98
9.4	TOETSEN THEORETISCHE BENADERING.....	99
9.4.1	Waarnemingen van het valproces van het stortmateriaal	99
9.4.2	Gemeten hoogten van de stortprofielen.....	99
9.4.3	Afleiding grens Gaussprofiel en overgangsprofiel: $h = h_0$	101
9.4.4	Afleiding grens overgangsprofiel en driehoekspromiel: $h = h_{\Delta}$	104
9.5	OVERIGE BEPALINGEN AAN HET STORTPROFIEL	106
9.5.1	Afzet van het stortprofiel	106
9.5.2	Zijdelingse spreiding van het stortprofiel.....	108
9.5.3	Kopse spreiding	110
9.6	CONCLUSIES SERIE B	113
10	SERIE C: AANBRENGEN VAN STEENBESTORTINGEN OP EEN VLAKKE BODEM .	115
10.1	INLEIDING	115
10.2	THEORETISCHE BENADERING METHODE VAN "DISCREET VERHALEN"	116
10.2.1	Tussenafstand twee opeenvolgende stort: verhaalafstand	116
10.2.2	Aantal stort	117

10.3	STORTRESULTAAT METHODE VAN “DISCREET VERHALEN”	119
10.3.1	Resultaat voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm	119
10.3.2	Resultaat voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm	121
10.4	CONCLUSIES	123
11	SERIE D: (STATIONAIRE) STORTPROEVEN OP EEN TALUD	125
11.1	INLEIDING	125
11.2	THEORETISCHE BENADERING STORTEN OP EEN TALUD	126
11.2.1	Spreiding op een talud met helling $1 : \alpha_t$	126
11.2.2	Afschuiven van het stortprofiel op een talud van $1 : \alpha_t$	128
11.3	WAARNEMINGEN VAN HET VALGEDRAG VAN STENEN OP EEN TALUD	129
11.4	AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK	130
12	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	132
12.1	CONCLUSIES	132
12.1.1	Conclusies met betrekking tot het bresgedrag van het stortmateriaal.	132
12.1.2	Conclusies met betrekking tot de spreiding van het materiaal onder water	135
12.1.3	Conclusies met betrekking tot het aanbrengen van steenbestortingen	136
12.2	AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK	137
12.2.1	Aanbevelingen volgend uit proefserie A	137
12.2.2	Aanbevelingen volgend uit proefserie B	137
12.2.3	Aanbevelingen volgend uit proefserie C	137
12.2.4	Aanbevelingen volgend uit proefserie D	138
	GERAADPLEEGDE LITERATUUR	140
	VERKLARENDE BEGRIPPENLIJST	142
	GEBRUIKTE SYMBOLEN	144
	LATIJNSE LETTERS	144
	GRIEKSE LETTERS	147

LIJST MET FIGUREN

Figuur 1.1	De rolstortter (a), de schuifstortter (b), de klep- of trilstortter (c) en de kettingstortter (d). [BOUWDIENST RWS, 1991].....	1
Figuur 1.2	Enkele definities: minimale laagdikte, stortprofiel en “gat”.....	2
Figuur 1.3	Processen die van invloed zijn op het uiteindelijke stortresultaat: (1) het bresgedrag, (2) het valgedrag en (3) het bodemgedrag van het stortmateriaal.....	3
Figuur 1.4	Storten van steen op een alternatieve manier. [SCHIERECK, 2001]	4
Figuur 2.1	Definities stortschip.....	5
Figuur 2.2	Storten met behulp van een ponton. [BISSCHOP, 2002]	8
Figuur 2.3	Valhoogte (h_f) en hoek van het valfront (ϕ_f).....	10
Figuur 2.4	Gemiddelde stortkarakteristieken van breuksteen en grind bij schuifsnelheden van 0,55 en 1,1 m/min. [WL Q 673, 1989]	11
Figuur 2.5	Bresgedrag van breuksteen bij een schuifsnelheid van 1,1 m/min (links) en 0,55 m/min (rechts). [WL Q 673, 1989].....	12
Figuur 2.6	Afzetgrootte als functie van de waterdiepte. [BOUWDIENST RWS, 1991]	14
Figuur 2.7	Plaatscorrectie stortschip bij aanvang van het stortproces.	15
Figuur 2.8	Benadering van wegspringen van stenen op een vlakke bodem en op een talud.	16
Figuur 3.1	Weerstandscoefficiënt (of sleepkrachtcoëfficiënt) als functie van het Reynoldsgetal. [VAN DER WAL, 2002]	21
Figuur 3.2	Sterk viskeuze stroming (links) en zwak viskeuze stroming (rechts). [VAN DER WAL, 2002]	22
Figuur 3.3	Het Magnus-effect. [DE REUS, 2004]	26
Figuur 3.4	Schematische weergave van het Random Walk Model. [CREGTEN, 1995].....	27
Figuur 4.1	Bulkstort: een onderlosser en een splijtbak.	33
Figuur 4.2	Lijnstort: een rolstortter en een schuifstortter.....	34
Figuur 5.1	De omweg bij een modelonderzoek. [DE VRIES, 1977]	35
Figuur 6.1	Stenen uit sortering A uitgelegd in rijen en kolommen.	44
Figuur 6.3	Aangepast ontwerp voor de modelschuifstortter.....	47
Figuur 6.4	Opstelling voor (vergelijkende) bresproeven.....	50
Figuur 6.5	Een “gordijn” van stenen bij het bestorten van een pijpleiding. [BOUWDIENST RWS, 1991]	52
Figuur 6.6	Belading modelstortter.....	54
Figuur 7.1	Opstelling bresproeven.	58
Figuur 7.2	Opstelling voor de (stationaire) storproeven op een vlakke bodem.....	60
Figuur 7.3	Het assenstelsel, de stortlijn en de referentiepunten.....	61
Figuur 7.4	Positionering van het stortschip ten opzichte van de bodem.....	62
Figuur 7.5	Opstelling voor stortproeven op een talud van 1:3 met het stortresultaat van serie D.1.....	63
Figuur 8.1	Definitie stortkarakteristieken: het cumulatieve stortgewicht en de toename van het stortgewicht uitgezet tegen de schuifafstand.	66

Figuur 8.2	Discretiseren van de gemeten storthoeveelheden (ingezoomd).	68
Figuur 8.3	Gemiddelde stortkarakteristiek serie A.2 na 2, 3, 4 en 5 metingen (ingezoomd).	69
Figuur 8.4	Geschematiseerde doorsnede van de lading over de breedte van het laaddek.	70
Figuur 8.5	(Af)schuifvlakken benadering 1: lading onvervormd.	71
Figuur 8.6	Theoretische stortkarakteristieken benadering 1: lading onvervormd.....	72
Figuur 8.7	(Af)schuifvlakken benadering 2 lading wordt ingedrukt.	72
Figuur 8.8	Theoretische stortkarakteristieken benadering 2: lading wordt ingedrukt.	73
Figuur 8.9	De vorm en het verloop van de theoretische stortkarakteristieken worden bepaald door de doorsnede van de lading en de afschuifhoek van de stenen.	74
Figuur 8.10	Gemiddelde stortkarakteristieken voor de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm in vergelijking met de theoretische benaderingen.	75
Figuur 8.11	Gemiddelde stortkarakteristieken voor de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm in vergelijking met de theoretische benaderingen.	75
Figuur 8.12	Toename stortgewicht serie A.1 vs benadering 1 (links) en benadering 2 (rechts).	76
Figuur 8.13	Toename stortgewicht serie A.2 vs benadering 1 (links) en benadering 2 (rechts).	77
Figuur 8.14	Toename stortgewicht serie A.3 vs benadering 1 (links) en benadering 2 (rechts).	77
Figuur 8.15	Toename stortgewicht serie A.4 vs benadering 1 (links) en benadering 2 (rechts).	78
Figuur 8.16	Toename stortgewicht serie A.5 vs benadering 1 (links) en benadering 2 (rechts).	78
Figuur 8.17	Toename stortgewicht serie A.6 vs benadering 1 (links) en benadering 2 (rechts).	78
Figuur 8.18	Karakteristieke breshoek voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm bij verschillende schuifsnellheden.	80
Figuur 8.19	ϕ_f uitgezet tegen D_{n50} / V_s	81
Figuur 8.20	Storthoeveelheden serie A.2 vs theoretische stortkarakteristieken.	82
Figuur 8.21	Storthoeveelheden serie A.5 vs theoretische stortkarakteristieken.	83
Figuur 8.22	'(On)regelmaticheid van bresgedrag over het (gehele) schuifproces.	85
Figuur 8.23	'(On)regelmaticheid' van het bresproces (in de tijd) gedurende de verschillende fasen van het bresproces.	86
Figuur 8.24	'(On)regelmaticheid' van het bresgedrag over de schuifafstand.	87
Figuur 8.25	'(On)regelmaticheid' van het bresproces (over de schuifafstand) gedurende de verschillende fasen van het bresproces.	88
Figuur 8.26	'(On)regelmaticheid van het bresproces over de schuifafstand uitgezet tegen d_a / D_{n50}	89
Figuur 8.27	(Absolute) onregelmaticheid uitgezet tegen d_a / D_{n50}	90
Figuur 8.28	(Theoretische) begin- en eindonregelmaticheid van het bresproces.	91

Figuur 9.1	De afzetgrootte en het (y,z) assenstelsel.	94
Figuur 9.2	De zijdelingse en kopse spreiding en het (y,z) en (x,z) assenstelsel.	94
Figuur 9.3	Stortprofiel volgens het "Lijnstort Spreiding Model".	96
Figuur 9.4	Theoretische langs- en dwarsdoorsnede volgens het "Lijnstort Spreiding Model".	97
Figuur 9.5	Gemeten profielhoogten voor sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm en de theoretische waarden volgens het "Lijnstort Spreiding Model".	100
Figuur 9.6	Gemeten profielhoogten voor sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en de theoretische waarden volgens het "Lijnstort Spreiding Model".	100
Figuur 9.7	Stortprofielen voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm bij waterdiepten van achtereenvolgens 120 cm (links), 60 cm (midden) en 30 cm (rechts).	101
Figuur 9.8	Stortprofielen voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm bij waterdiepten van achtereenvolgens 120 cm (links), 60 cm (midden) en 30 cm (rechts).	103
Figuur 9.9	Naar prototypie geschaalde meetwaarden voor de profielhoogte van stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm met meetwaarden uit [WL Q 673, 1989] en de theoretische hoogte volgens het LSM.	103
Figuur 9.10	Overgang in driehoeksprofiel.	104
Figuur 9.11	Theoretische verloop van de profielhoogte over de waterdiepte samen met de meetwaarden voor de hoogte van het stortprofiel.	105
Figuur 9.12	Afzetgrootte van het stortprofiel voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm en voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm.	107
Figuur 9.13	Naar prototypie geschaalde meetwaarden voor de afzet van stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm vergeleken met meetwaarden uit [WL Q 673, 1989].	108
Figuur 9.14	Zijdelingse spreiding van het stortprofiel voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm.	109
Figuur 9.15	Naar prototypie geschaalde meetwaarden voor de zijdelingse spreiding van stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm samen met meetwaarden uit [WL Q 673, 1989].	110
Figuur 9.16	Kopse spreiding van het stortprofiel voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm.	111
Figuur 9.17	Naar prototype geschaalde meetwaarden voor de kopse spreiding van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm vergeleken met meetwaarden uit [WL Q 673, 1989].	112
Figuur 10.1	Aansluiting stort bij verschillende tussenafstanden.	117
Figuur 10.2	Aantal stort en aantal tussenafstanden bij stortvaklengte L.	118
Figuur 10.3	Aantal stort bij verschillende combinaties van waterdiepte (h) en steendiameter (D_{n50}).	118
Figuur 10.4	Stortresultaat voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm, op een waterdiepte van 120 cm, bij 4 en bij 5 stort.	120
Figuur 10.5	Stortresultaat voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm, op een waterdiepte van 120 cm, bij 8 en bij 9 stort.	122
Figuur 10.6	Zijaanzicht stortprofiel voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm bij 9 stort.	123

Figuur 11.1	Schematisatie van het valproces van stenen op een vlakke bodem en op een talud.	127
Figuur 11.2	Theoretische vorm van het stortprofiel op een talud in vergelijking met het stortprofiel op een vlakke bodem.....	128
Figuur 11.3	Zijaanzicht van de stortprofielen op een talud van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm (links) en van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm (rechts).	129
Figuur 11.4	Vooraanzicht van de stortprofielen op een talud van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm (links) en van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm (rechts).	130
Figuur 12.1	ϕ_f uitgezet tegen D_{n50} / V_s	133
Figuur 12.2	(Theoretische) begin- en eindonregelmaticheid van het bresproces.....	133
Figuur 12.3	'(On)regelmaticheid van bresgedrag over het (gehele) schuifproces.....	134
Figuur 12.4	'(On)regelmaticheid van bresgedrag over het de geschoven schuifafstand. .	135

LIJST MET TABELLEN

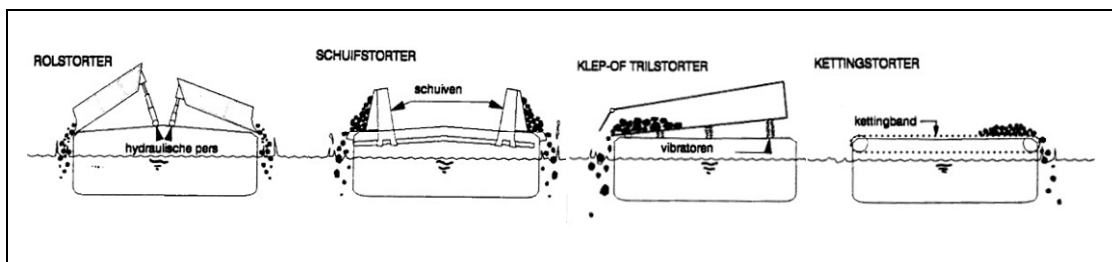
Tabel 2.1	Percentage DGPS-metingen dat voldoet aan gegeven nauwkeurigheid. [VAN OORD, 1995].....	6
Tabel 6.1	Waarden voor D_{85} , D_{n85} , D_{15} , D_{n15} , D_{50} en D_{n50} voor de prototypesortering ⁰	42
Tabel 6.2	Waarden voor D_{85} , D_{n85} , D_{15} , D_{n15} , D_{50} en D_{n50} voor de modelsortering.	42
Tabel 6.3	Berekende minimale en maximale waarden voor $V_{s,m}$	54
Tabel 7.1	Overzicht experimenten serie A.	57
Tabel 7.2	Overzicht experimenten serie B.	59
Tabel 7.3	Overzicht experimenten serie C.	62
Tabel 7.4	Overzicht experimenten serie D.	63
Tabel 8.1	Overzicht experimenten serie A.	65
Tabel 8.2	Gemiddeld gemeten schuifsneldheid van de verschillende series.	67
Tabel 8.3	Waarden voor ϕ_f van (de “best fit” van) de gemiddelde stortkarakteristiek.	81
Tabel 9.1	Overzicht experimenten serie B.	93
Tabel 9.2	Waarden voor h_o	102
Tabel 9.3	Waarden voor h_{Δ}	105
Tabel 10.1	Overzicht experimenten serie C.	116
Tabel 10.2	Theoretisch benodigd aantal storts (s) bij waarden voor D_{n50} , h en m	119
Tabel 11.1	Overzicht experimenten serie D.	125
Tabel 11.2	Waarden voor $h_{o,t}$	129

1 INLEIDING

1.1 ACHTERGROND

Bodem- en oeververdedigingswerken, op een zinkstuk (traditioneel), op geotextiel of met een filtergradering in lagen, vormen een belangrijk onderdeel in waterbouwkundige constructies. Deze verdedigingswerken, tegen de eroderende werking van stroom-, verval- en/of golfbelastingen, worden onder andere toegepast op bodem en oevers in rivieren en zeearmen en bij afsluitingswerken. Ze zijn veelal opgebouwd uit relatief dunne lagen van granulair materiaal.

De uitvoering van deze steenbestortingen geschiedt hoofdzakelijk met behulp van stortschepen die hun lading materiaal vanaf de waterlijn zijdelings overboord zetten, zie onderstaande figuur.



Figuur 1.1 De rolstorter (a), de schuifstorter (b), de klep- of trilstorter (c) en de kettingstorter (d). [BOUWDIENST RWS, 1991]

Bij deze werktuigen wordt het stortmateriaal achtereenvolgens

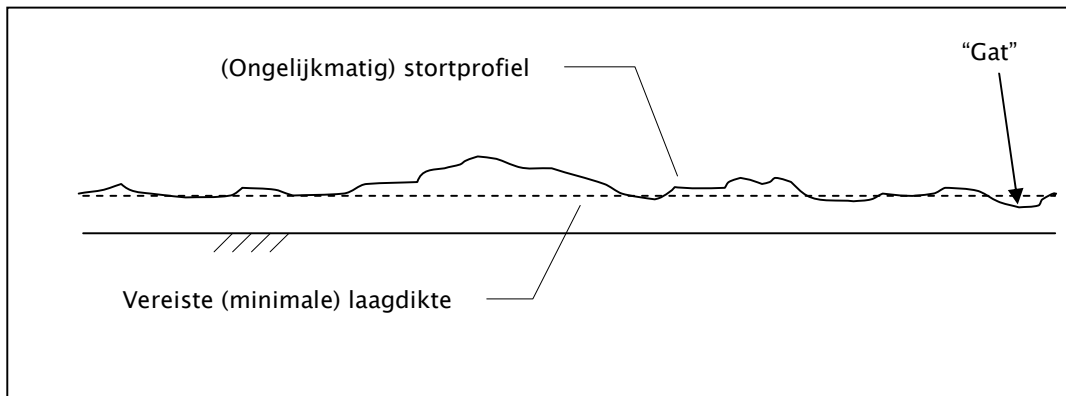
- (a) door het hydraulisch kantelen van steenbakken,
- (b) door het indrukken van verticale schuiven,
- (c) door middel van vibratoren of
- (d) door kettingmeenemers van het dek 'geschoven'.

Dit onderzoek richt zich op het stortproces/stortgedrag van de schuifstorter.

1.2 AANLEIDING VAN HET ONDERZOEK

Aan bodem- en oeverbeschermingen worden in de praktijk eisen gesteld. In de eerste plaats is een minimale laagdikte vereist om de stabiliteit van de steenbestorting te waarborgen. "Gaten" in de steenbestorting – daar waar de (gestorte) laagdikte kleiner is dan het gewenste niveau, zie ook Figuur 1.2 – moeten tot een minimum worden beperkt. Gelijktijdigheid van de laagdikte is dus gewenst.

Vanwege de onregelmatigheden in het stortproces (zie Hoofdstuk 2) zal de steenbestorting echter een ongelijkmatige vorm hebben. De kans op een “gat” zal hierdoor toenemen. In de praktijk wordt dan ook veelal een extra hoeveelheid materiaal gestort. Kostentechnisch is dit echter ongunstig.



Figuur 1.2 Enkele definities: minimale laagdikte, stortprofiel en “gat”.

In sommige gevallen is ook een tweede eis van kracht, namelijk dat een bepaalde (maximale) laagdikte niet overschreden mag worden. Denk aan een minimale waterdiepte voor een kade in verband de diepgang van de schepen. Een en ander houdt in dat niet zonder meer extra stenen gestort kunnen worden.

Steenbestortingen ten behoeve van bodem- en oeververdedigingswerken worden verder veelal in verschillende (talud)secties – zogenaamde “vakken” – aangebracht. Deze moeten goed op elkaar aansluiten. Dit houdt in, dat niet alleen de gelijkmatigheid van de storting van belang is, maar ook de plaats waar de steen die gestort wordt de bodem bereikt.

1.3 DOELSTELLING

De gelijkmatigheid van het stortprofiel en de verplaatsing van het materiaal volgen uit het stortproces van de schuifstorter.

De (algemene) doelstelling kan dan ook als volgt geformuleerd worden:

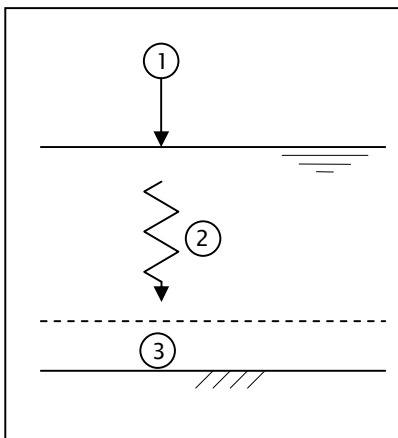
“Inzicht verkrijgen in het stortproces van de schuifstorter om de voorspelbaarheid van het stortresultaat ten behoeve van bodem- en oeverbeschermingen te kunnen verbeteren”.

1.4 AANPAK

Het stortresultaat kan gezien worden als het resultaat van drie (onafhankelijke) processen, te weten:

1. de 'aanvoer' door het gedrag van stenen wanneer deze van het laaddek geschoven worden (bresgedrag),
2. het valgedrag van de stenen onder water en
3. het gedrag van gestorte stenen als deze in contact komen met de bodem.

Een en ander is ook weergegeven in Figuur 1.3.



Figuur 1.3 Processen die van invloed zijn op het uiteindelijke stortresultaat: (1) het bresgedrag, (2) het valgedrag en (3) het bodemgedrag van het stortmateriaal.

Het analyseren van en het inzicht in deze processen is van groot belang om de voorspelbaarheid van het stortresultaat ten behoeve van bodem- en oeverbeschermingen te kunnen verbeteren.

De analyse van de processen vindt plaats door middel van een literatuurstudie, waarbij zoveel mogelijk gebruik gemaakt wordt van bestaande afstudeerverslagen met betrekking tot het storten van stenen met behulp van een schuifstorter.

Inzicht in en metingen aan de afzonderlijke processen vindt plaats door middel van een experimenteel onderzoek. Het betreft hier proeven die op verkleinde schaal worden uitgevoerd met als belangrijkste leerdoelen:

- ♦ Inzicht krijgen in het gedrag van het stortmateriaal wanneer dit van het laaddek afgeschoven wordt.
- ♦ Inzicht krijgen in het val- en bodemgedrag van de hoeveelheden afgeschoven materiaal onder water, zowel op een vlakke bodem als op een talud.

Het stortresultaat kan vervolgens beoordeeld worden door het analyseren van het resultaat van steenbestortingen bij gebruikmaking van bestaande uitvoeringsmethodieken. Dit is tevens het derde leerdoel.

1.5 OPBOUW VAN HET RAPPORT

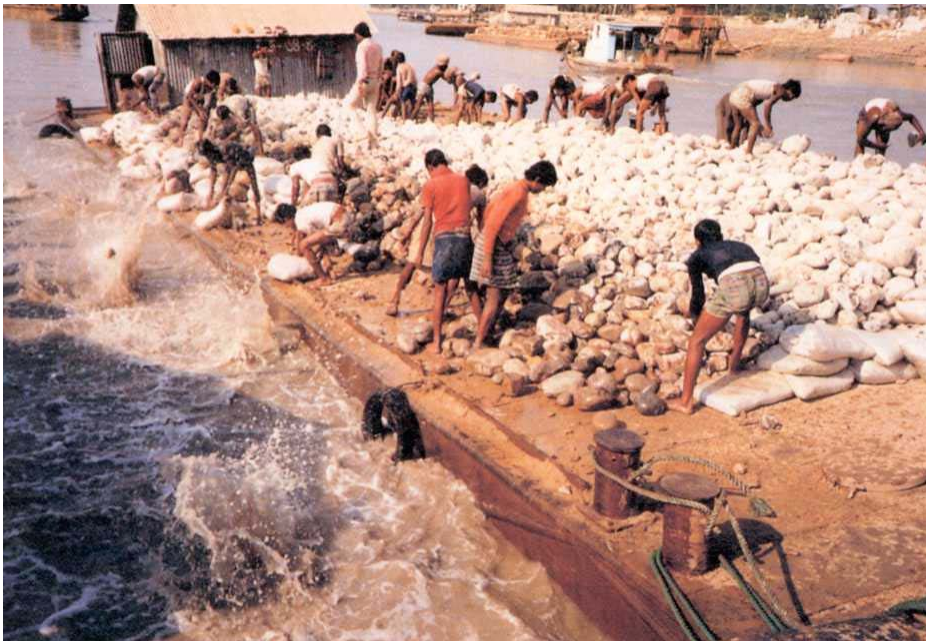
Het rapport is als volgt opgebouwd.

In de Hoofdstukken 2 tot en met 5 is de literatuurstudie verder uitgewerkt. Het stortproces van de schuifstortor wordt geanalyseerd in Hoofdstuk 2. In Hoofdstuk 3 wordt het valgedrag van enkele stenen in stilstaand water behandeld. Voor steengroepen wordt dit gedrag besproken in Hoofdstuk 4. De noodzaak om op (verkleinde) schaal te werken dwingt tot bestudering van de relevante schaalregels. Deze zijn opgenomen in Hoofdstuk 5.

De voorbereiding op de (uiteindelijke) experimenten is beschreven in Hoofdstuk 6, waarna in Hoofdstuk 7 een proevenprogramma is opgesteld. Ook de uitvoeringsmethodiek is hierin opgenomen.

De analyse van het experimentele gedeelte vindt plaats in de Hoofdstukken 8 tot en met 11. In Hoofdstuk 8 is de proevenserie met betrekking tot het bresgedrag van het stortmateriaal verder uitgewerkt. Voor de stortproeven op een vlakke bodem is dit gedaan in Hoofdstuk 9. Hoofdstuk 10 handelt over het aanbrengen van steenbestortingen op een vlakke bodem en in Hoofdstuk 11 is een korte analyse van het storten op een talud gegeven.

De conclusies en aanbevelingen zijn tenslotte opgenomen in Hoofdstuk 12.



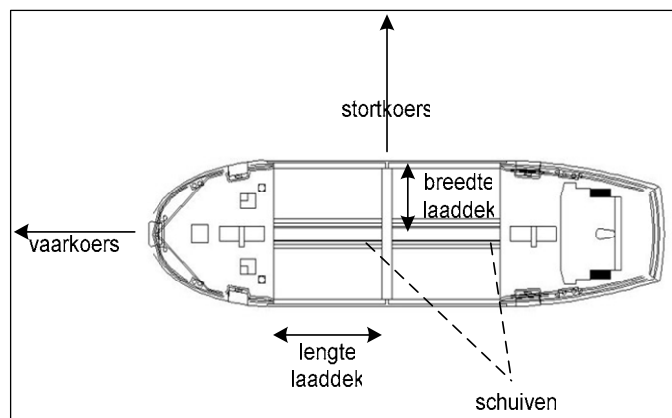
Figuur 1.4 Storten van steen op een alternatieve manier. [SCHIERECK, 2001]

2 STORTPROCES VAN DE SCHUIFSTORTER

In dit hoofdstuk vindt een analyse plaats van het stortproces van de schuifstorter. Verschillende aspecten die een rol spelen bij het aanbrengen van steenbestortingen en daar de nauwkeurigheid van bepalen, worden behandeld. Basis voor dit hoofdstuk is [BOUWDIENST RIJKSWATERSTAAT, 1991] en [WL Q 673, 1989].

2.1 INLEIDING

De schuifstorter – in dit voorbeeld de “HAM-601” – is verdeeld in een stuurboord- en een bakboordzijde, die elk twee onafhankelijke laaddekken bezitten. De lengte(richting) van dit



stortschip.

laaddek loopt evenwijdig aan de lengterichting van het schip. Door middel van de vier hydrauliek-schuiven wordt de lading zijdelings overboord gezet, terwijl het schip zich, door middel van boeg- en hekschroeven⁽¹⁾, verplaatst langs een vooraf bepaalde koers, de stortkoers. De vaarkoers is de richting waarin de boeg van het schip wijst en staat dus loodrecht op de stortkoers.

Figuur 2.1 Definities

De nauwkeurigheid van het uiteindelijke resultaat – in dit geval de bodem- en/of oeverbescherming – zal voor een gedeelte bepaald worden door het ‘gedrag’ van de steenstorter tijdens het stortproces, te weten:

- de plaatsbepaling (zie paragraaf 2.2) en
- de positionering en bewegingsvrijheden tijdens het storten (zie paragraaf 2.3)

Naast het ‘gedrag’ van het stortschip wordt, voordat het stortmateriaal zijn uiteindelijke positie op de bodem vindt, een aantal fasen doorlopen. In dit hoofdstuk wordt uitgegaan van een drietal fasen:

- het bresgedrag (of het afschuiven) van het stortmateriaal (zie paragraaf 2.4),
- het valgedrag van de stenen boven en onder water (zie paragraaf 2.5) en
- het gedrag van het stortmateriaal bij het treffen van de bodem (zie paragraaf 2.6)

¹ Schroeven aan de voor- en achterzijde van het schip

In de volgende paragrafen worden de bovengenoemde aspecten besproken en wordt van de variabelen die hierin een rol spelen aangegeven in hoeverre ze (de nauwkeurigheid van) het stortproces beïnvloeden.

2.2 PLAATSBEPALING

Voordat de eerste stenen overboord geschoven kunnen worden moet de juiste stortpositie van het stortschip nauwkeurig vastgesteld worden. Een 'goed' plaatsbepalingssysteem is dus van groot belang.

Veruit de meeste (zo niet alle) stortschepen maken gebruik van satellietplaatsbepaling. Hiervan is het zogenaamde "Differential Global Positioning System" (DGPS) het meest nauwkeurig.

Het DGPS systeem koppelt de informatie van het GPS⁽²⁾ satellietstelsel met de informatie van een bepaald punt, waarvan de locatie 'exact' bekend is. Dit meten en versturen moet wel continue (zij het met een zeker tijdsinterval) doorgaan, omdat de nauwkeurigheden van de GPS-signalen in de tijd variëren. Afhankelijk van dit "sample-interval" kan een bepaalde nauwkeurigheid gehaald worden, zie onderstaande tabel.

Tabel 2.1 Percentage DGPS-metingen dat voldoet aan gegeven nauwkeurigheid. [VAN OORD, 1995]

Verskil tussen exacte positie en met DGPS bepaalde positie	Short Range DGPS	Long Range DGPS	Real Time Kinetic (RTK) / On The Fly (OTF)
<0,5m (DGPS RTK <0,5cm)	41,0 %	13,5 %	12,4 %
<1,0m (DGPS RTK <1,0cm)	79,1 %	41,9 %	48,2 %
<1,5m (DGPS RTK <1,5cm)	92,5 %	68,3 %	59,9 %
<2,0m (DGPS RTK <2,0cm)	97,1 %	84,8 %	86,7 %
<2,5m (DGPS RTK <2,5cm)	98,8 %	93,3 %	92,0 %

Uit de bovenstaande tabel is af te lezen dat het RTK-systeem veruit de grootste nauwkeurigheid geeft; in 92% van de gevallen wordt een nauwkeurigheid behaald die kleiner is dan 2,5 cm. Aangezien plaatsbepaling op de meeste schuifstorters geschiedt door middel van dit systeem, mag aangenomen worden dat geen significantie onnauwkeurigheden op het stortproces zijn te verwachten.

Nota bene:

Voor een uitvoerige beschrijving van de verschillende plaatsbepalingssystemen en hun specifieke nauwkeurigheden wordt verwezen naar [VBKO, 1997].

² Het GPS systeem maakt gebruik van satellieten die in een baan om de aarde draaien. Door de afstand van een willekeurig (meet)punt op de aarde tot (minimaal) 4 satellieten te bepalen, kan de positie ervan bepaald worden.

2.3 POSITIONERING EN BEWEGINGSVRIJHEDEN TIJDENS HET STORTEN

De gevaren stortkoers (zie Figuur 2.1) heeft ook een belangrijk aandeel in de nauwkeurigheid van de steenbestorting. Afwijkingen van deze koers, door de positionering van het stortschip tijdens het storten – het manoeuvreren langs de stortkoers – enerzijds en de scheepsbewegingen (in het horizontale vlak) anderzijds, zijn van invloed op het uiteindelijke stortresultaat.

2.3.1 Manoeuvreren langs de stortkoers

Tijdens het stortproces kan de schuifstorter zowel vrij varend, als met behulp van pontons langs de stortkoers gemanoeuvreerd worden.

Vrij varend storten

Bij relatief lage stroomsnelheden kan het schip ‘vrij’ voortbewogen worden. Bij dit vrij varend storten is onderscheid te maken tussen manuele positionering en positionering door middel van Dynamic Positioning (DP).

Manuele positionering wordt veelal gebruikt bij het bestorten van relatief kleine stortvakken. Er wordt dan constant van ‘koers’ gewisseld. Door middel van de voortstuwing, het plaatsbepaling systeem en een beeldscherm wordt de geplande stortkoers (door de stuurman) gevaren.

Positionering met behulp van Dynamic Positioning (DP) is gebruikelijk als in relatief grote stortvakken wordt gestort. De schroeven worden dan automatisch aangestuurd om de stortkoers te varen. Door middel van het plaatsbepalingssysteem wordt steeds de actuele positie/koers met de gewenste positie/koers vergeleken. Het verschil tussen beide waarden bepaalt dan in hoeverre er door het systeem gecorrigeerd moet worden.

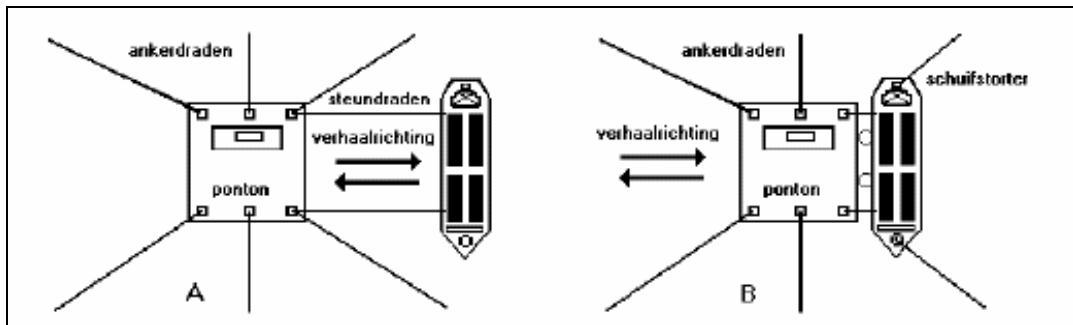
Er mag worden aangenomen dat zowel manuele positionering – de ervaring van de stuurman – als positionering volgens het DP-principe geen significante onnauwkeurigheid oplevert in de vaarroute, en dus in het stortresultaat

Storten met behulp van een ponton

Storten met behulp van een ponton wordt meestal toegepast bij relatief hoge stroomsnelheden en wanneer op een zinkstuk, dan wel op geotextiel met wiepen, moet worden gestort. Het stortschip wordt dan gekoppeld aan een met ankerdraden afgemeerd ponton.

De lading kan vervolgens op twee manieren gestort worden, zie ook Figuur 2.2:

- A. De lierdraden worden onder spanning gezet met behulp van de eigen voortstuwing van de schuifstorter. Bij het storten van dunne lagen steen kunnen de lieren met een bepaalde verhaalsnelheid gevierd worden, terwijl de steen overboord wordt geschoven. Het ponton doet in dit geval dienst als afmeer- en positioneerponton.
- B. In dit geval doet het ponton dienst als afmeer-, positioneer- en verhaalponton, doordat de steen wordt gestort terwijl het ponton, met de daaraan gekoppelde schuifstorter, wordt verhaald door de eigen ankerdraden. Deze ankerdraden worden ook nu weer onder spanning gehouden door de voortstuwing van de schuifstorter.



Figuur 2.2 Storten met behulp van een ponton. [BISCHOP, 2002]

Door het gebruik van ankerdraden en lieren is het mogelijk de schuifstorter nauwkeurig te manoeuvreren, en dus om nauwkeurig steen te storten. Er zal dan ook niet significant van de stortkoers worden afgeweken.

2.3.2 Bewegingsvrijheden tijdens storten

Een (stort)schip kent 6 bewegingsvrijheden: 3 translaties en 3 rotaties:

- ♦ een horizontale verplaatsing in de lengterichting van het schip: "schrikken",
- ♦ een horizontale verplaatsing loodrecht op de lengterichting van het schip: "verzetten",
- ♦ een verticale verplaatsing van het schip: "dompen",
- ♦ een rotatie om een horizontale as loodrecht op de lengterichting van het schip: "stampen",
- ♦ een rotatie om een horizontale as in de lengterichting van het schip: "rollen", en
- ♦ een rotatie om de verticale as: "gieren"

Voor het "schrikken", "verzetten" en "gieren" zijn van invloed op het manoeuvreren van het stortschip en dus op de nauwkeurigheid van het stortproces. Deze scheepsbewegingen in het horizontale vlak worden veroorzaakt door golf-, wind- en stroomkrachten.

Invloed van golven

Golven hebben, mits ze klein genoeg zijn, geen significante invloed op de beweging van de zijstorter tijdens het stortproces. Relatief kleine golven zullen, afhankelijk van de belading, en dus het gewicht van de steenstorter, langs het schip 'lopen'. Bij toenemende golfhoogte (en vooral golflengte) ondervindt het stortschip steeds meer invloed van deze golfbeweging.

Bij relatief hoge en lange golven zullen de scheepsbewegingen wel significant zijn. De werkcondities zijn dan echter zodanig dat normaliter niet gestort wordt. Denk ook aan overslaande golven die het stortmateriaal vanaf het laaddek zouden kunnen 'meenemen'

Invloed van wind

De invloed van wind op het bewegingsgedrag van het stortschip is tweeledig. In de eerste plaats veroorzaakt het windveld golven, waarvan de invloed al is besproken. In tweede instantie zal de (zij)windgevoeligheid van de steenstorter van invloed zijn op de nauwkeurigheid van het stortproces. Aangenomen wordt dat zowel de vrijvarende positionering als de positionering door middel van pontons voldoende nauwkeurig is om invloeden van het windveld op het uiteindelijke stortproces te beperken.

Verwacht wordt dan ook dat wind geen significante invloed heeft op de bewegingen van de schuifstorter tijdens het manoeuvreren. Opgemerkt moet worden dat bij 'extreme' windcondities – en dus een 'significant' golfveld – sprake is van een "niet-werkbare" situatie.

Invloed van stroming

Er wordt, zeker bij relatief kleine steengradaties, bij voorkeur gestort gedurende de kentering van het getij, dus bij relatief kleine stroomsnelheden. Aangenomen mag worden dat het positioneringssysteem op de schuifstorter voldoende nauwkeurig is om op deze stroom te kunnen manoeuvreren.

Tot een stroomsnelheid van 1 à 1,2 m/s kan de steenstorter dwars op de stroom manoeuvreren; bij hogere stroomsnelheden moet dit met behulp van een ponton gebeuren.

2.4 BRESGEDRAG VAN HET STORTMATERIAAL

Onder het bresgedrag wordt verstaan:

"De onregelmatigheid in de hoeveelheid materiaal die, per tijdseenheid en per meter laaddek, onder invloed van het verplaatsten van de schuif gedurende het stortproces overboord wordt gezet". [VAN OORD, 1995]

Het stortproces is als gevolg van deze onregelmatigheid geen continu proces. Voor een, in veel gevallen gewenst, gelijkmatig stortprofiel is het dus van belang inzicht te hebben in dit bresgedrag.

2.4.1 Beschrijving van het bresgedrag

Als het stortmateriaal op het laaddek aangebracht wordt, stelt zich een hoek van natuurlijk talud in.

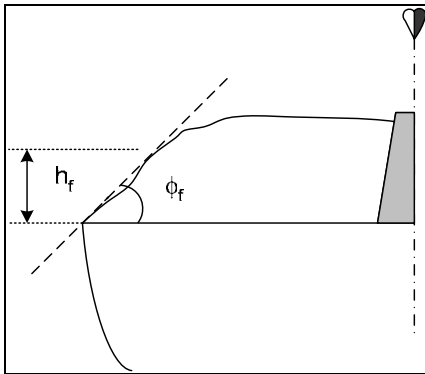
Bij aanvang van het storten wordt, door de voortbewegende schuiven, slechts een (relatief) kleine hoeveelheid steen overboord geschoven. Eerst wordt de lading namelijk samengedrukt, waarbij het talud zich aan de stortzijde (zijkant stortschip) steeds steiler opbouwt. Gedurende de tijd die hiervoor nodig is, zullen dus minder stenen overboord vallen. Pas als een bepaalde grenshoek $\phi_g^{(3)}$ is bereikt, zal door het afschuiven van het stortmateriaal een 'flinke' hoeveelheid stenen overboord vallen, net zolang tot er weer een stabiele hoek – ϕ_s – bereikt wordt.

Vervolgens bouwt het talud zich weer op, waarna weer een instorting optreedt. De hoek van het valfront – ϕ_r , zie Figuur 2.3 – schommelt dus tussen de waarden van de stabiele hoek en de grenshoek.

³ Gedwongen hoek van talud; de hoek waarbij instabiliteit bereikt wordt bij het over de rand duwen van de stenen [CREGTEN, 1995].

$$\phi_s \leq \phi_f \leq \phi_g$$

Langs dit valfront zal het materiaal over een bepaalde hoogte – valhoogte van het valfront genoemd – afschuiven. Zie onderstaande figuur.



Figuur 2.3 Valhoogte (h_f) en hoek van het valfront (ϕ_f).

Aan het begin van het stortproces zal, buiten het onregelmatige afschuiven om, steeds meer materiaal per tijdseenheid gestort worden. De valhoogte wordt immers, door de vorm van de lading, steeds groter.

Tegen het eind neemt de hoeveelheid stenen en de daarmee samenhangende valhoogte af, waardoor er steeds minder materiaal wordt gestort.

2.4.2 Parameters die van invloed zijn op het bresgedrag

Het verloop van de hoeveelheid overboord gezet materiaal in de tijd is voornamelijk afhankelijk van

- ♦ de eigenschappen van het stortmateriaal,
- ♦ de schuifsnelheid van de hydraulische schuiven,
- ♦ de beladingsvorm op het laaddek, en
- ♦ de scheepsbewegingen tijdens het storten

Eigenschappen stortmateriaal

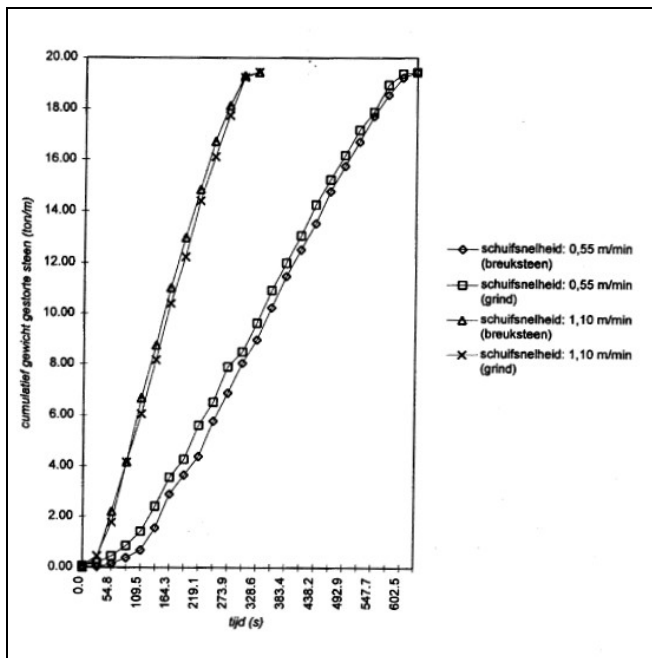
De belangrijkste materiaaleigenschappen die het bresproces beïnvloeden zijn

- de equivalente diameter (D_{n50}),
- de breedte van de sortering (D_{85} / D_{15}) en het poriëngehalte (n)
- de hoek van inwendige wrijving (ϕ_m) van het stortmateriaal

Verondersteld wordt dat het bresgedrag ‘regelmatiser’ wordt naarmate de afmetingen van het te storten materiaal afnemen. De breedte van de sortering en het daarmee samenhangende poriëngehalte spelen tevens een belangrijke rol. Verwacht wordt dat, bij relatief brede sorteringen, de ‘kleinere’ steenfracties zich tussen de ‘grotere’ fracties nestelen – het poriëngehalte van het stortmateriaal wordt dan kleiner.

Het valfront krijgt meer samenhang en het afschuiven verloopt dan minder 'regelmatig'. De hoek van inwendige wrijving is vooral van invloed op de beladingsvorm van de lading; zie verderop.

De invloed van het soort materiaal op het bresproces is behandeld in [WL Q 673, 1989]. In de onderstaande figuur is het cumulatieve stortgewicht van breuksteen en grind uitgezet tegen de tijd bij verschillende schuifsnelheden.



Figuur 2.4 Gemiddelde stortkarakteristieken van breuksteen en grind bij schuifsnelheden van 0,55 en 1,1 m/min. [WL Q 673, 1989]

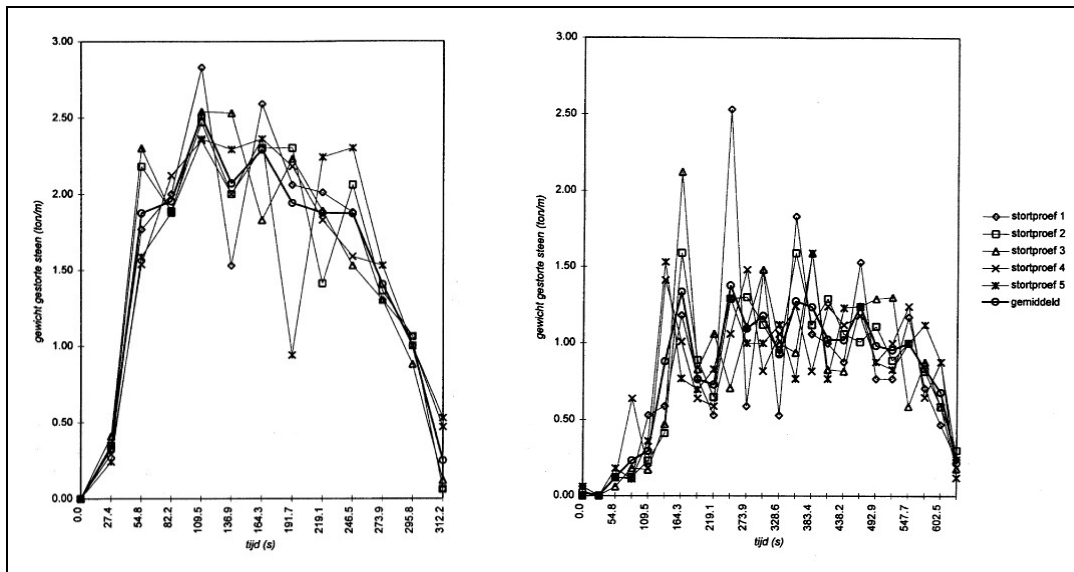
Uit de figuur blijkt dat de stortkarakteristieken van breuksteen en grind, vooral bij een schuifsnelheid van 1,1 m/min, niet gelijk lopen. Het soort materiaal – vooral de vorm en de hieruit volgende haakweerstand – heeft dus wel degelijk invloed op het bresproces. Verondersteld wordt dat materiaal met platte en meer rondere vormen een regelmatiger bresproces heeft. Er kan zich dan namelijk een minder steil talud ontwikkelen, waardoor het materiaal eerder afschuift.

Nota bene:

De resultaten, zoals weergegeven in Figuur 2.4, zijn naar prototype geschaalde modelmetingen. De vraag is in hoeverre prototypemetingen hiervan afwijken.

Schuifsnelheid van de hydraulische schuiven

In [WL Q 673, 1989] is ook de invloed van de schuifsnelheid op het bresgedrag behandeld. Zie onderstaande figuur.



Figuur 2.5 Bresgedrag van breuksteen bij een schuifsnelheid van 1,1m/min (links) en 0,55m/min (rechts). [WL Q 673, 1989]

Uit de figuur blijkt dat het verhogen van de schuifsnelheid een regelmatig bresgedrag tot gevolg heeft. Verondersteld wordt dat, door het vergroten van de schuifsnelheid, zich een minder steil talud op het laaddek kan ontwikkelen. Hierdoor zal het stortmateriaal sneller, en dus regelmatig, afschuiven.

Beladingsvorm

Ook van belang voor de regelmatigheid waarmee het materiaal wordt gestort, is de 'vorm' van de lading op de schuifstorter. Belangrijk is het om een zo gelijkmatig en regelmatig mogelijke verdeling van het materiaal te hebben.

Voor een gelijkmatige verdeling van het stortmateriaal is het van belang dat de verschillende steendiameters zo gelijkmatig mogelijk over het laaddek van de steenstorter verdeeld worden, zodat het poriëngehalte van het stortmateriaal in de verschillende vakken niet 'ernstig' uiteenloopt. In de praktijk lijkt dit echter een lastige opgave.

Voor een zo regelmatig mogelijke verdeling dient de 'vorm' van de lading, voor wat betreft de doorsnede over zowel de lengte als de breedte van het stortschip zo regelmatig mogelijk te zijn. Dit blijkt in de praktijk echter een lastige opgave. Afhankelijk van de manier van laden – met behulp van een kraan of door middel van bijvoorbeeld een laadschop – kan het materiaal niet overal even gemakkelijk geplaatst worden.

Scheepsbewegingen

Van de scheepsbewegingen zoals opgesomd in paragraaf 2.3.2 zijn "rollen" – rotatie om een horizontale as in de lengterichting van het schip – en "stampen" – rotatie om een horizontale as loodrecht op de lengterichting van het schip – van belang voor het bresgedrag van de stenen op het laaddek van de schuifstorter.

Vooral door het “rollen” van het stortschip zal het stortmateriaal eerder dan wel later afschuiven, omdat, door het ‘kantelen’ van het stortschip, de hoek van het valfront respectievelijk steiler en flauwer wordt.

Deze door golven geïnduceerde scheepsbewegingen lijken echter van geringe invloed te zijn op het uiteindelijke stortresultaat. Verondersteld wordt namelijk dat de discontinuïteiten uitgemiddeld worden doordat er over het algemeen in meerdere stortgangen wordt gestort, zie ook Bijlage C.3.

Opgemerkt moet worden dat het stortschip, bij toenemende steendiameter van het stortmateriaal, steeds meer gaat ‘verzetten’ als gevolg van de reactiekracht van het (onregelmatig) overboord vallen van de stenen. De steenstorter zal dan nog heftiger gaan “rollen”.

2.5 VERPLAATSING VAN STEEN (BOVEN EN) ONDER WATER

Vanaf het moment dat de lading van het dek geschoven wordt tot op het moment dat de stenen de bodem raken, kan het stortmateriaal door een aantal oorzaken horizontaal verplaatsen. Deze zijn van invloed op de uiteindelijke plaats en vorm van het stortprofiel.

Deze paragraaf behandelt de volgende verschijnselen:

- ♦ de verplaatsing van het materiaal ten gevolge van de afzet,
- ♦ de verplaatsing van het materiaal door de invloed van golven, en
- ♦ de verplaatsing van het materiaal onder invloed van stroming.

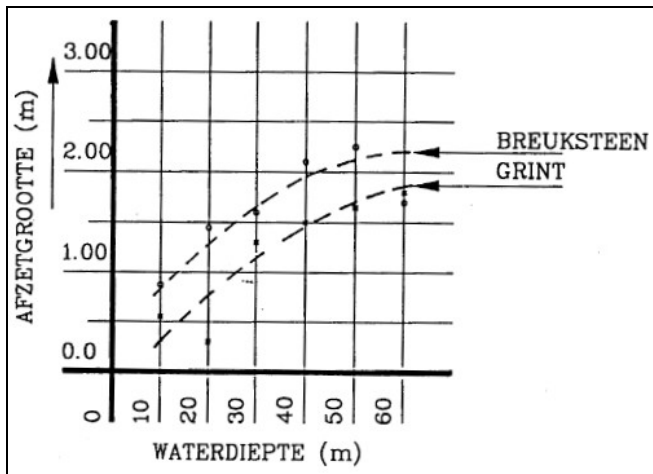
Er is nog een vierde manier waarop het materiaal (onder water) horizontaal wordt verplaatst. Dit is de spreiding van de stenen onder water; deze wordt behandeld in paragraaf 3.3

2.5.1 Verplaatsing van materiaal ten gevolge van de afzet

Doordat de lading van een helling afschuift en dus een horizontale en verticale (begin)snelheid bezit, ondergaat het materiaal op de waterlijn (al) een initiële zijdelingse verplaatsing.

Deze verplaatsing is van toepassing op alle stenen en dus zal het stortprofiel op de bodem enigszins worden opgeschoven in de richting loodrecht op de lengterichting van de schuifstorter.

Deze zogenaamde ‘afzetgrootte’ is onderzocht in [WL Q 673, 1989] en blijkt afhankelijk te zijn van het soort materiaal. Verder speelt (uiteraard) de waterdiepte een rol; een grotere waterdiepte zorgt voor een langer valtraject en dus een grotere afzetgrootte.



Figuur 2.6 Afzetgrootte als functie van de waterdiepte. [BOUWDIENST RWS, 1991]

Tevens lijkt het voor de hand liggend dat er ook een verband is tussen de afzetgrootte en de steendiameter. Dit is echter nog niet eenduidig vastgesteld.

2.5.2 Verplaatsing van materiaal door de invloed van golven

Op vrijwel iedere stortlocatie zat gestort moeten worden bij aanwezigheid van golven. De vraag is in hoeverre deze golfomstandigheden invloed hebben op de verplaatsing van het materiaal onder water. Uit [WL M 1768, 1983] kan geconcludeerd worden dat deze gering is. De orbitaalbeweging zorgt namelijk voor een gemiddeld neutrale horizontale verplaatsing⁽⁴⁾. De invloed van golven op het verplaatsingsgedrag van steen onder water kan dus verwaarloosd worden.

Voor de afleiding van de invloed van golven op de baan van een individuele steen wordt doorverwezen naar Bijlage D.1.

2.5.3 Verplaatsing van materiaal onder invloed van stroming

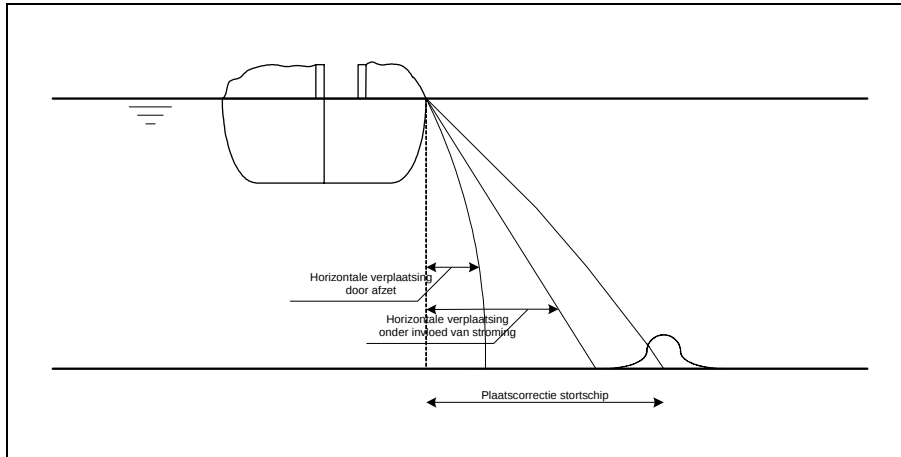
Bij veel stortwerkzaamheden is er tevens sprake van stromend water. In tegenstelling tot het voorgaande, zal in dit geval wel rekening gehouden moeten worden met een extra horizontale verplaatsing van het stortmateriaal op de bodem. In [DE REUS, 2004] is hier uitvoerig onderzoek naar gedaan; zie ook Bijlage D.2.

In dit onderzoek wordt echter uitgegaan van storten op stilstaand water.

De invloed van de stroming op de horizontale verplaatsing van het stortmateriaal kan nu 'opgevangen' worden door de (start)positie van de schuifstorter te corrigeren aan de hand van

⁴ Volgens de 1^e-orde golftheorie.

de (berekende) stromingsinvloed⁽⁵⁾. Dit geldt overigens ook voor de afzet en de daarbij horende afzetgrootte; zie onderstaande figuur.



Figuur 2.7 Plaatscorrectie stortschip bij aanvang van het stortproces.

2.6 BODEMGEDRAG VAN STEEN

Op het moment dat de gestorte stenen in contact komen met de bodem kunnen deze door “wegspringen”, “(af)rollen” en/of afschuiven een laatste verplaatsing ondergaan.

2.6.1 Wegspringen van het gestorte materiaal

Onderscheid wordt gemaakt in het storten op een vlakke bodem en op een talud.

Storten op een vlakke bodem

Het vallende materiaal zal, vanwege de (horizontale) verplaatsing van de stenen onder water – zie paragraaf 2.5 – niet altijd ‘loodrecht’ op de bodem vallen. Afhankelijk van de mate waarin de kinetische energie (volgend uit de verticale valsnelheid) wordt gedissipeerd kunnen de stenen dus enigszins “wegspringen”. Op een vlakke, volledig stijve bodem en bij verwaarlozing van wrijving is dit verschijnsel geanalyseerd in [VAN OORD,1995]. Voor een ‘gladde bol’ met een wrijvingscoëfficiënt $C_d = 1$ (in de formule voor de valsnelheid, zie paragraaf 3.2.2) en bij verwaarlozing van energiedissipatie geldt dan:

$$S_x = U_x \cdot t_{weg} = \frac{2 \cdot U_{weg}^2 \cdot \cos(\phi_{weg}) \sin(\phi_{weg})}{g}$$

waarin: S_x : maximale horizontale verplaatsing; de “wegspringafstand” [m]
 U_x : horizontale snelheid van de wegspringende steen – zie ook [m/s]
 Figuur 2.8.

⁵ Voorwaarde is dan wel dat, vóór aanvang van het stortproces, de stroomsnelheid (over de waterdiepte) bekend moet zijn. In de praktijk wordt dan ook veelal een stroommeting uitgevoerd, ook omdat de toelaatbare stroomsnelheid niet te groot mag zijn.

t_{weg}	: tijdsduur van “wegspringen”	[s]
U_{weg}	: wegspringsnelheid, gelijk aan de valsnelheid voor een ‘gladde bol’	[m/s]
ϕ_{weg}	: wegspringhoek – zie Figuur 2.8.	

De maximale horizontale verplaatsing van een wegspringende steen wordt bereikt bij een wegspringhoek van 45° . Er blijkt dan dat de steen op een vlakke bodem niet verder weg kan springen dan 2,2 maal zijn diameter.

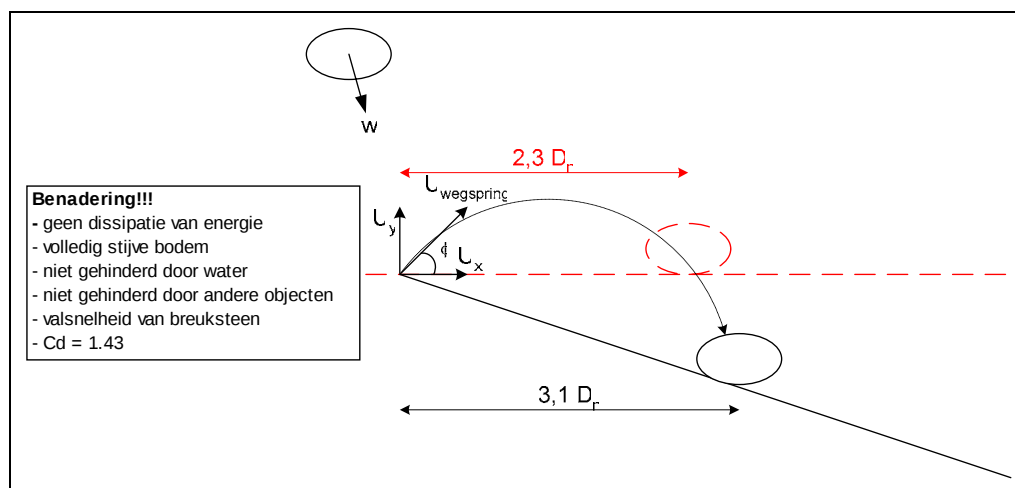
In dit onderzoek wordt echter uitgegaan van het storten van breuksteen. Als we de diameter van de bol vervangen door een nominale steendiameter (D_n) en voor de weerstandscoefficiënt een waarde invullen van $C_d = 1,43^{(6)}$, dan blijkt dat de maximale wegspringafstand $2,3D_n$ bedraagt.

Storten op een talud

Als op een talud gestort wordt, zal het stortmateriaal onder een grotere hoek op de bodem vallen. Verondersteld wordt dan ook dat op een talud gestorte stenen verder zullen “wegspringen”.

Er is eenzelfde soort berekening als in [VAN OORD, 1995] uitgevoerd. Bij een wegspringhoek van 45° en een talud van 1:3 bedraagt de maximale horizontale verplaatsing op de bodem door “wegspringen” $3,1D_n$.

In de onderstaande figuur is het wegspringgedrag voor beide gevallen nog eens weergegeven.



Figuur 2.8 Benadering van wegspringen van stenen op een vlakke bodem en op een talud.

Nota bene:

Beide berekeningen zijn een grove benadering van de werkelijkheid en geven een orde grootte aan.

⁶ Uit: [VAN DER WAL, 2002] en [DE REUS, 2004]

2.6.2 (Af)rollen van het stortmateriaal

Wanneer de component van de zwaartekracht groter is dan de wrijvingskracht tussen de steen en de bodem en/of al aanwezige stenen, zal de steen gaan “(af)rollen”. De mate van “afrollen” zal in belangrijke mate bepaald worden door de ruwheid en de haakweerstand van het stortmateriaal en van de ondergrond. Een belangrijke parameter is dus de vorm van de stenen.

Verondersteld wordt dat het “afrollen” alleen van betekenis is wanneer op een talud wordt gestort.

Opgemerkt moet worden dat, voor wat betreft het aanbrengen van oeverbeschermingen, in veel gevallen op een relatief flauw talud – niet steiler dan 1:3; zie Bijlage A.3 – van beneden naar boven wordt gestort. Het afrollen wordt dan in zekere mate beperkt, doordat stenen tegen het al gestorte gedeelte aanrollen.

2.6.3 Afschuiven van het stortprofiel

Daar waar afrollen van toepassing is op een individuele steen, heeft afschuiven betrekking op het (gehele) stortprofiel. Wanneer de hoek van inwendige wrijving – hoek van natuurlijk talud – onder water wordt overschreden zal het stortprofiel vervormen (of afschuiven) totdat weer een stabiele situatie ontstaat.

Het principe van het afschuiven van de ‘berg’ stenen gaat pas een rol spelen als er een relatief grote hoeveelheid wordt gestort. Bodem- en oeververdedigingen worden echter veelal in ‘dunne’ lagen aangebracht. Verondersteld wordt dat het mechanisme van afschuiven dan van ondergeschikt belang is.

3 VALGEDRAG VAN EEN ENKELE STEEN IN STILSTAAND WATER

Dit hoofdstuk behandelt het valgedrag van een steen in stilstaand water. Dit is, naast de horizontale verplaatsingen zoals besproken in Hoofdstuk 2, van belang voor de uiteindelijke positie van de steen op de bodem.

3.1 INLEIDING

Het valgedrag van een enkele vallende steen in stilstaand water beschrijft de baan die deze steen aflegt, vanaf het moment dat hij is gestort tot het moment dat de bodem wordt bereikt.

Tijdens dit proces kunnen, bij voldoende waterdiepte, twee fasen worden onderscheiden. In de eerste fase zal de steen, afhankelijk van zijn beginsnelheid, versnellen of vertragen na in contact te zijn gekomen met het water. Na verloop van tijd bereikt de steen zijn (gemiddelde) evenwichtsvalsnelheid, waarmee overgegaan is op fase twee.

De diepte waarop een steen een bepaald deel (α) van zijn evenwichtssnelheid bereikt is onderzocht door VAN MAZIJK [DE REUS, 2004] en kan bepaald worden met de vergelijking (3.1). Hierbij moet opgemerkt worden dat bij de benadering is uitgegaan van een beginsnelheid nul; de steen bevindt zich op het moment van loslaten dus juist onder water.

$$h_{\alpha} = -\frac{1}{\beta} \ln(1 - \alpha^2), \text{ met } \beta = 1.5 \frac{C_d}{D_b} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad (3.1)$$

waarin:	h_{α}	:	waterdiepte waarop (100 · α)% van de evenwichtssnelheid is bereikt	[m]
	α	:	deel van de evenwichtsvalsnelheid	[-]
	β	:	coëfficiënt in de vergelijking van Van Mazijk	[m ⁻¹]
	C_d	:	sleeppranchcoëfficiënt	[-]
	D_b	:	diameter van de bol	[m]
	ρ_w	:	massadichtheid van het water	[kg/m ³]
	ρ_s	:	massadichtheid van de steen	[kg/m ³]

Er blijkt dat 90% van de evenwichtsvalsnelheid wordt bereikt na een valdiepte van 3 à 4 maal de diameter. Na een afgelegde weg van ongeveer 8 maal de diameter is 99% van de evenwichtsvalsnelheid bereikt.

De evenwichtsvalsnelheid van een vallende steen wordt afgeleid in paragraaf 3.2.

Een ander belangrijk aspect tijdens het valtraject onder water is het stroombeeld dat ontstaat rondom de vallende steen. Dit wordt gekarakteriseerd door het heersende Reynoldsgetal, een dimensieloze verhouding tussen de stationaire traagheidskracht en de visceuze kracht:

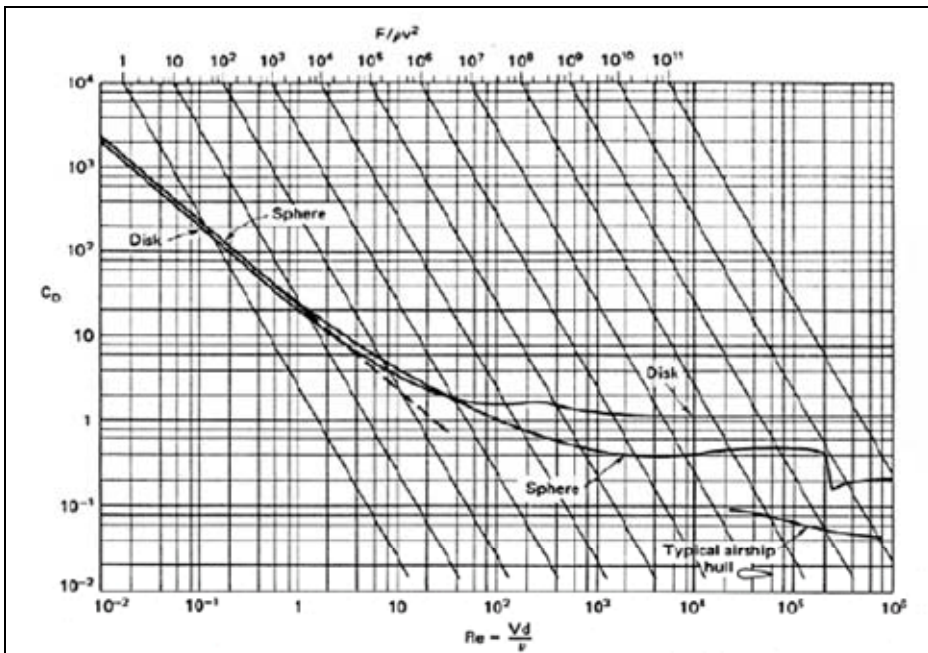
$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu}, \text{ met } \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

waarin:	U	:	snelheid van het aangestroomde voorwerp	[m/s]
	D	:	diameter van het aangestroomde voorwerp	[m]
	ν	:	kinematische viscositeit	[m ² /s]
	μ	:	dynamische viscositeit	[kg/ms]
	ρ	:	massadichtheid van de vloeistof	[kg/m ³]

Met betrekking tot het valproces van een steen in water zijn (globaal) drie soorten stroombeelden te onderscheiden:

1. $Re \ll 1$
De stroming rondom het voorwerp is laminair; de weerstandscoefficiënt is relatief groot en de valsnelheid relatief laag.
2. $1000 < Re < 2 \cdot 10^5$
Door de turbulente (buiten)stroming ontstaat er achter het aangestroomde oppervlak een zog van turbulente wervels. De grenslaagstroming is nog wel laminair. In dit gebied neemt de weerstandscoefficiënt een zo goed als constante waarde aan, zie ook Figuur 3.1.
3. $Re > 2 \cdot 10^5$
Bij een nog verder toenemend getal van Reynolds wordt ook de grenslaagstroming turbulent en neemt de weerstandscoefficiënt nog lagere waarden aan.

Een en ander is ook weergegeven in de onderstaande figuur.



Figuur 3.1 Weerstandscoefficiënt (of sleepkrachtcoëfficiënt) als functie van het Reynoldsgetal. [VAN DER Wal, 2002]

Voor het stroombeeld met $Re > 1000$ wordt de spreiding van een enkele steen in stilstaand water afgeleid in paragraaf 3.3. In paragraaf 3.4 wordt het hieruit volgende "Enkele Steen Model" behandeld.

3.2 AFLEIDEN VAN DE EVENWICHTSVALSNELHEID

De evenwichtsvalsnelheid kan afgeleid worden als de krachten die op het vallende voorwerp werken bekend zijn.

3.2.1 Krachten op een vrij vallende steen in stilstaand water

Op een vrij vallende steen in stilstaand water werkt een drietal krachten:

- ♦ een netto neerwaartse kracht,
- ♦ een sleepkracht, en
- ♦ een liftkracht.

Voor de bepaling van de evenwichtssnelheid van de vallende steen zijn alleen de netto neerwaartse kracht en de sleepkracht van belang. Deze twee worden dan ook in deze paragraaf besproken; voor een beschrijving van de liftkracht wordt verwezen naar paragraaf 3.3.

Netto neerwaartse kracht

De aandrijvende kracht voor de valbeweging wordt bepaald door het gewicht van de vallende steen (F_g) verminderd met de opwaartse kracht (F_{opw}):

$$F_{\downarrow} = F_g - F_{opw} = (\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot V \quad (3.2)$$

waarin:	$F_{\downarrow}$	:	netto neerwaartse kracht	[N]
	ρ_s	:	massadichtheid van de steen	[kg/m ³]
	ρ_w	:	massadichtheid van het water	[kg/m ³]
	g	:	zwaartekrachtsversnelling	[m/s ²]
	V	:	volume van de steen	[m ³]

Sleepkracht

Tijdens het valproces ondervindt de steen een weerstandskracht, die tegen de valrichting in werkt. Deze weerstandskracht, ook wel sleepkracht of in het Engels “drag force” (F_d), genoemd, is afhankelijk van de stroming rondom de steen. Twee gevallen worden onderscheiden, zie ook paragraaf 3.1

1. Sterk viskeuze stroming ($Re \ll 1$)

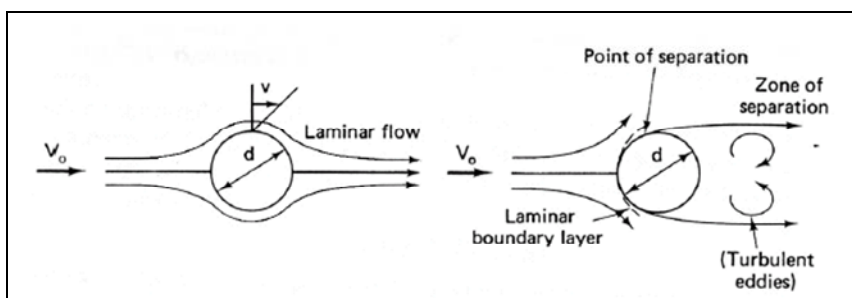
De stroming laat het aangestroomde oppervlak niet of nauwelijks los, waardoor aan de achterzijde van het voorwerp vrijwel volledig drukherstel is. De sleepkracht wordt dan gedomineerd door de viskeuze wrijving over het oppervlak. Dit stroombeeld is echter niet van toepassing op het valproces van een steen.

2. Zwak viskeuze of turbulente stroming ($Re \gg 1$)

In dit geval wordt de weerstand grotendeels bepaald door het, door loslating veroorzaakte, drukverschil tussen de voor- en achterzijde van het aangestroomde voorwerp. De uitdrukking voor de sleepkracht is in dit geval:

$$F_{\uparrow} = F_d = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_w \cdot A \cdot w^2 \quad (3.3)$$

waarin:	$F_{\uparrow}$	:	netto opwaartse kracht (= sleepkracht)	[N]
	C_d	:	weerstandscoefficiënt	[-]
	A	:	aangestroomd oppervlak	[m ²]
	w	:	valsnelheid van het voorwerp	[m/s]



Figuur 3.2 Sterk viskeuze stroming (links) en zwak viskeuze stroming (rechts). [VAN DER WAL, 2002]

3.2.2 De evenwichtsvalsnelheid van een voorwerp in stilstaand water

Door gelijkstelling van de vergelijkingen (3.2) en (3.3) kan een uitdrukking voor de evenwichtsvalsnelheid afgeleid worden:

$$w = \sqrt{2 \frac{V}{A} \Delta \frac{g}{C_d}}, \text{ met } \Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad (3.4)$$

De verhouding V/A in de bovenstaande uitdrukking is een maat voor de afmeting van de steen. Drie gevallen worden onderscheiden:

Evenwichtsvalsnelheid van een bol

Het volume en het aangestroomde oppervlak van een bol worden achtereenvolgens gegeven door $V = \frac{1}{6} \pi D^3$ en $A = \frac{1}{4} \pi D^2$. De evenwichtsvalsnelheid wordt dan:

$$w = \sqrt{\frac{4}{3} \Delta \frac{g}{C_d} D}, \text{ of voor een 'gladde' bol met } C_d = 1: w = \sqrt{\frac{4}{3} \Delta \cdot g \cdot D} \quad (3.5)$$

Evenwichtsvalsnelheid van een kubus

Voor een kubusvormige steen is de verhouding tussen V en A gelijk aan D ($V = D^3$ en $A = D^2$), waardoor de evenwichtsnelheid van een vallende kubus wordt gegeven door:

$$w = \sqrt{2 \Delta \frac{g}{C_d} D} \quad (3.6)$$

Evenwichtsvalsnelheid van breuksteen

De uitdrukking voor de evenwichtsvalsnelheid van een kubus wordt ook aangehouden om de evenwichtsvalsnelheid van breuksteen te bepalen, waarbij D wordt vervangen door D_n , de nominale steendiameter.

$$w = \sqrt{2 \Delta \frac{g}{C_d} D_n} \quad (3.7)$$

De enige 'onbekende' is dan de C_d -waarde van breuksteen.

Onderzoek naar de evenwichtsvalsnelheid, en dus de weerstandscoefficiënt, van breuksteen in water is onder andere uitgevoerd in [VAN OORD, 1996], [VAN DER WAL, 2002] en [DE REUS, 2004].

VAN OORD bepaalde de gemiddelde valsnelheid door de valtijd over een bepaalde waterdiepte te meten. Hij vond hierbij een weerstandscoefficiënt voor breuksteen van 2,3. VAN DER WAL concludeerde dat de C_d van breuksteen normaal verdeeld is, met een gemiddelde van 1,42. DE REUS kwam tot een gemiddelde waarde voor de weerstandscoefficiënt van 1,43.

Nota bene:

Over het algemeen valt breuksteen met het grootste oppervlak naar 'beneden'; de weg van de meeste weerstand. De vorm van de steen heeft dus ook invloed op de weerstandscoefficiënt. Denk aan relatief platte stenen die, met een relatief grote L/d verhouding, tijdens hun valproces meer wrijving ondervinden dan bijvoorbeeld kubusvormige stenen (met een relatief kleine L/d verhouding).

3.3 SPREIDING (=HORIZONTALE VERPLAATSING) VAN DE VALLENDE STENEN ONDER WATER

Naast de eerder beschreven sleepkracht, de weerstandskracht tegen de valrichting in, werkt er ook nog een weerstandskracht loodrecht op de valbeweging van het voorwerp; de liftkracht. Deze kan worden beschreven door middel van onderstaande vergelijking.

$$F_l = \frac{1}{2} \cdot C_l \cdot \rho_w \cdot A \cdot w^2 \quad (3.8)$$

waarin: F_l : liftkracht [N]
 C_l : weerstandscoefficiënt loodrecht op de valbeweging [-]

Deze liftkracht veroorzaakt een horizontale verplaatsing van het vallende voorwerp en wordt veroorzaakt door:

- ♦ onregelmatigheden in de vorm van breuksteen en het daarmee samenhangende asymmetrische stroombeeld ("vortex-shedding"),
- ♦ rotatie van het voorwerp ("Magnus-effect"), en
- ♦ asymmetrische loslating van de grenslaag rondom het vallende voorwerp.

Nota bene:

Met de horizontale verplaatsing van de vallende steen is een versnelling in de richting van de liftkracht gemoeid. Deze volgt uit de tweede wet van Newton ($F = ma$) en wordt gegeven door:

$$a_{hor} = \frac{\frac{1}{2} C_l \cdot \rho_w \cdot A \cdot w^2}{V \rho_s}, \text{ of met vergelijking (3.7), } a_{hor} = \frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{C_l}{C_d} \Delta g \quad (3.9)$$

waarin: a_{hor} : horizontale versnelling ten gevolge van de liftkracht [m/s²]

Deze blijkt onafhankelijk van de steenafmetingen te zijn.

3.3.1 Vortex-shedding

De onderstaande afleiding van de spreiding van het stortmateriaal door "vortex-shedding" is overgenomen uit [VRIJLING, MANNI EN DE WILDE, 1995].

Door het turbulente karakter van de stroming rond een voorwerp, bij Reynoldsgetallen groter dan ongeveer 1000, ontstaan wervels die afwisselend aan weersijden van de steen loslaten. Dit

zogenaamde “vortex-shedding” kan in het tweedimensionale geval worden beschreven met het getal van Strouhal:

$$St = \frac{\omega \cdot D}{w} = \frac{2\pi}{T} \frac{D}{w}$$

waarin:	St	:	getal van Strouhal	[–]
	ω	:	radiaalfrequentie van wervelloslating	[1/s]
	D	:	diameter van het aangestroomde voorwerp	[m]
	w	:	snelheid van het voorwerp	[m/s]
	T	:	periode van wervelloslating	[s]

Stel dat in het driedimensionale geval ook een getal van Strouhal kan worden gedefinieerd. Bij een constante valsnelheid (en bij gelijkblijvende diameter) is het getal van Strouhal ook constant. Uitgaande van de formule voor de evenwichtssnelheid van breuksteen, vergelijking (3.7), wordt de uitdrukking voor de periode van wervelloslating/afschudding gegeven door:

$$T = \frac{2\pi}{St \sqrt{2\Delta \frac{g}{C_d}}} \sqrt{D} \quad (3.10)$$

waarin:	T	:	periode van wervelloslating = de periode van richtingswisseling van de versnelling loodrecht op de valrichting.	[s]
---------	---	---	---	-----

Uit (3.10) kan worden geconcludeerd dat de tijd die verloopt tussen deze twee richtingswisselingen evenredig is met de wortel uit de karakteristieke steenafmeting.

De horizontale afstand die in de tijd tussen twee richtingswisselingen, bij verwaarlozing van de weerstand, wordt afgelegd, kan worden beschreven met:

$$S_{hor} = \frac{1}{2} a_{hor} T^2 = \frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{\pi^2}{St^2} \cdot C_I \cdot D \quad (3.11)$$

waarin:	S_{hor}	:	horizontale afstand die de steen aflegt tussen twee richtingswisselingen van de versnelling loodrecht op de valrichting	[m]
---------	-----------	---	---	-----

De verticale afstand, die het vallende voorwerp gedurende deze periode aflegt, wordt gegeven door:

$$S_{ver} = wT = \frac{2\pi}{St} \cdot D \quad (3.12)$$

waarin: S_{ver} : verticale afstand die de steen aflegt tussen twee richtingswisselingen van de versnelling loodrecht op de valrichting [m]

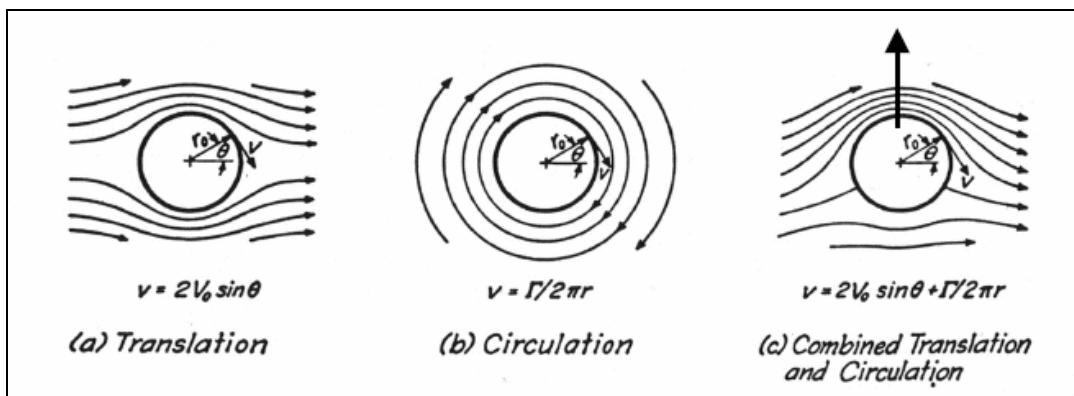
Afhankelijk van de beschikbare waterdiepte kan het aantal horizontale richtingswisselingen worden beschreven met:

$$N = \frac{h}{S_{ver}} = \frac{h}{2\pi D} \cdot St \quad (3.13)$$

waarin: N : aantal horizontale richtingwisselingem [-]
 h : waterdiepte [m]

3.3.2 Magnus-effect

Een andere oorzaak voor het ontstaan van een liftkracht is het zogenaamde “Magnus-effect”. Deze treedt op als een roterend voorwerp door een medium (in dit geval water) heen beweegt.



Figuur 3.3 Het Magnus-effect. [DE REUS, 2004]

Door wrijving zal de vloeistof mee willen bewegen met het roterende voorwerp, waardoor er een verschil in relatieve vloeistofsnelheid boven en onder het voorwerp ontstaat. Daar waar het voorwerp roteert tegen de bewegingsrichting in, zal de vloeistof vertragen, waardoor de stroming langer blijft aanliggen. Aan de andere kant, waar de richting van de rotatie gelijk is aan de bewegingsrichting, versnelt de vloeistof. Het hiermee gepaard gaande drukverschil – relatief lage druk daar waar de vloeistof versnelt en relatief hoge druk waar de vloeistof vertraagt – veroorzaakt een resulterende kracht loodrecht op de bewegingsrichting.

Doordat de richting van de rotatie gedurende het valproces hetzelfde blijft, is de richting van de liftcomponent constant. De horizontale verplaatsing neemt dan evenredig toe met de diepte; de valbaan is dus rechtlijnig.

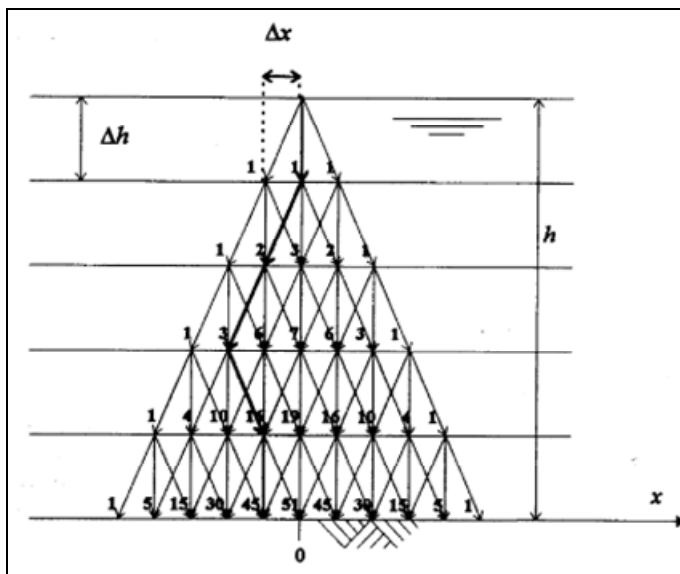
3.3.3 Asymmetrisch loslaten van de grenslaag

Een derde oorzaak voor het ontstaan van een liftkracht loodrecht op de valbeweging van het vallende voorwerp is het asymmetrisch loslaten van de grenslaag. Dit effect kan optreden als een lichaam een relatief gladde en een relatief ruwe kant bezit. De laminaire grenslaagstroming aan de 'gladde' zijde laat eerder los dan de grenslaagstroming die over de 'ruwe' kant loopt. Er is dan sprake van asymmetrische loslating wat een asymmetrische drukverdeling tot gevolg heeft.

Opgemerkt moet worden dat, wanneer de resulterende liftkracht niet door het zwaartepunt van het voorwerp gaat, het voorwerp een rotatie ondergaat. Het verschijnsel gaat dan over in het eerder beschreven Magnus-effect. Bij onregelmatige vormen als breuksteen is dit meestal het geval. Dit volgt uit [VAN DER WAL, 2002].

3.4 RANDOM WALK: HET ENKELE STEEN MODEL

Aangezien een steen onregelmatig van vorm en ruwheid is en omdat de oriëntatie van de vallende steen tijdens het valproces steeds verandert, zal het loslaten van wervels willekeurig over het oppervlak plaatsvinden. Een en ander betekent dat de richting van de verplaatsing in een bepaalde tijdstap onafhankelijk is van de verplaatsing in de vorige tijdstap. Er wordt dan ook wel gesproken van een “Random Walk” van de vallende stenen in de tijd.



Figuur 3.4 Schematische weergave van het Random Walk Model. [CREGTEN, 1995]

Het Random Walk Model, ontwikkeld door VRIJLING, MANNI EN DE WILDE, geeft een statistische beschrijving van de valbeweging van een enkele steen veroorzaakt door een diffusieproces: “vortex-shedding”, zie paragraaf 3.3.1.

Volgens de centrale limietstelling is de som van N onafhankelijke variabelen, ongeacht de uitgangsverdelingen van die variabelen, normaal verdeeld. De kansdichtheidsfunctie van de bodempositie, en dus de spreiding, van een enkele vallende steen kan dus worden beschreven met een normale verdeling:

$$f_{\underline{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_N}\right)^2} \quad (3.14)$$

waarin: x : horizontale verplaatsing in x-richting [m]
 σ_N : standaardafwijking van de totale horizontale verplaatsing [m]
 μ_x : gemiddelde van de totale horizontale verplaatsing in x-richting [m]
 (verticale projectie van het loslaatpunt)⁽⁷⁾

Uitgaande van een soortgelijke functie voor de verplaatsing in de y-richting, die onafhankelijk is van de verplaatsing in x-richting, kan de tweedimensionale kansdichtheidfunctie van de bodempositie van het stortmateriaal beschreven worden met:

$$f_{\underline{xy}}(x,y) = f_{\underline{x}}(x) \cdot f_{\underline{y}}(y) = \frac{1}{\sigma_N^2 \cdot 2\pi} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-\mu_x)^2 + (y-\mu_y)^2}{\sigma_N^2}\right)} \quad (3.15)$$

waarin: y : horizontale verplaatsing in y-richting [m]
 μ_y : gemiddelde van de totale horizontale verplaatsing in y-richting [m]
 (vertikale projectie van het loslaatpunt)

Bovenstaand rekenmodel wordt ook wel het “Enkele Steen Model” genoemd omdat het de (kans op een bepaalde) positie van één steen aan het einde van het valproces bepaalt.

De standaardafwijking van de totale horizontale verplaatsingen wordt gegeven door:

$$\sigma = \sigma_N = c\sqrt{h \cdot D_{n50}} \quad (3.16)$$

waarin: σ_N : standaardafwijking van de totale horizontale verplaatsingen [m]
 c : constante [-]
 h : waterdiepte [m]
 D_{n50} : nominale steendiameter [m]

⁷ De som van de N horizontaal afgelegde afstanden is gemiddeld nul. De stenen vallen dus gemiddeld ‘recht’ naar beneden; de verticale projectie van het loslaatpunt.

De constante “c” in vergelijking (3.16) is bepaald in [VAN GELDEREN, 1999] en bedraagt $c = 0,685$.

Nota bene:

Opgemerkt moet worden dat, wanneer naast het diffusieproces door “vortex-shedding” ook het Magnus-effect en/of het asymmetrisch loslaten van de grenslaag optreedt, het Enkele Steen Model zijn geldigheid verliest.

4 VALPROCES VAN EEN GROEP STENEN IN STILSTAAND WATER

Dit hoofdstuk handelt over de processen die zich afspelen wanneer een groep stenen in het water wordt gestort. Basis voor dit hoofdstuk is [VAN DER WAL, 2002].

4.1 INLEIDING

Als meerdere stenen tegelijkertijd worden gestort kunnen deze elkaar in hun valbeweging beïnvloeden. De vraag is wanneer deze (onderlinge) beïnvloeding een significante rol gaat spelen in het valproces van het stortmateriaal en dus in het stortproces van de zijstorter. Ofwel, wanneer treedt een zogenaamd groepseffect op waarbij de snelheid van de groep duidelijk groter is dan die van de individueel vallende stenen.

De valbeweging van een groep stenen wordt behandeld in paragraaf 4.2. In paragraaf 4.3 wordt het (wel of niet optreden van het) groepseffect besproken.

4.2 VALBEWEGING VAN EEN GROEP STENEN

Tijdens het valproces van een 'grote' groep stenen in (stilstaand) water zullen verschillende fasen optreden.

4.2.1 Twee fasen in het valproces van steengroepen

In [VAN DER WAL, 2002] zijn de bevindingen van een aantal onderzoeken, waarbij het groepsproces van vallende deeltjes een rol speelt, uiteengezet. Hierbij wordt veelal een tweetal fasen onderscheiden, namelijk

- ♦ de thermische fase, en
- ♦ de zwermfase.

Nota bene:

De namen van de onderzoekers, waarnaar in het onderstaande overzicht wordt verwezen, komen uit het verslag van VAN DER WAL.

Thermische fase

Kenmerkend voor de thermische fase is dat de groepssnelheid (van de tegelijk vallende stenen) aanzienlijk groter is dan de (evenwichts)valsnelheid van de individuele stenen.

SLACK constateerde tijdens modelproeven, waarbij een groot aantal glazen bolletjes gelijktijdig in lucht werden losgelaten, dat er een circulatie van deeltjes door de bolvormige groep was waar te nemen. De vallende groep was hierbij in het begin bolvormig en kreeg naarmate de snelheid toenam een komvormig front.

SLACK stelde vast dat het valproces in de bolfase vergelijkbaar was met het proces dat zich afspeelt in een wielerpeloton of in cumuluswolken, waarin warme lucht via het midden stijgt en aan de bovenkant weer langs de zijkant daalt. Vandaar ook de naam thermische fase.

Zwermfase

Als de groepssnelheid nagenoeg gelijk is aan de evenwichtsvalsnelheid van de individuele stenen uit de groep spreekt men van een zogenaamde zwermfase. De stenen vallen dan door het water heen en nemen het niet langer mee.

4.2.2 Vijf fasen volgens Van der Wal

In zijn onderzoek naar het valgedrag van steengroepen onderscheidde VAN DER WAL, bij een lang genoeg valtraject en dus voldoende waterdiepte, vijf fasen tijdens het valproces van een groep stenen in stilstaand water.

Fase 1: versnelling van de steengroep

De eerste fase van het valproces kenmerkt zich door een groep stenen, die uit één lichaam bestaat met een bijbehorend groepsvolume en dichtheid. In vergelijking met een individuele steen, is de snelheid van deze steengroep hoger, waarbij het versnellings-/vertragingsgebied zich over een grotere diepte uitstrekt.

Door opname van water (entrainment) in de groep, en dus een met de diepte toenemende (front)doorsnede, neemt de tegen de valrichting in werkende weerstand toe. Het volume wordt tevens groter, waardoor een steeds grotere massa versneld moet worden. De vallende groep stenen is dus onderhevig aan een met de diepte afnemende versnelling. Wanneer de groeiende weerstand gelijk is aan de kracht in de valrichting is de versnelling nul en de snelheid van de groep maximaal; het einde van fase 1.

Fase 2: vertraging van de steengroep

Tijdens de tweede fase is de versnelling van de steengroep overgegaan in een vertraging, doordat het volume van de groep door entrainment blijft toenemen en dus meer weerstand ondervindt. Ten gevolge van de groter wordende hoeveelheid water binnen de steengroep zal het groepseffect ook verder afnemen.

Dit proces zet zich voort totdat de snelheid van de 'groep' de evenwichtssnelheid van de grootste stenen uit deze 'groep' benadert. De grotere individuele stenen beginnen dan onderuit de groep te vallen, waarmee het einde van deze fase is bereikt.

Fase 3: steenfront van grotere stenen

Wanneer de (grotere) stenen onderuit de groep vallen, wordt de (kinetische) energie van het opgenomen (en meegenomen) water gedissipeerd door het (omringende) ‘omgevingswater’. De stenen vallen nu dus door het water en nemen het niet of nauwelijks mee. Achter het front van de grootste stenen vallen kleinere stenen in het zog mee.

Fase 4: valproces volgens het Enkele Steen Model

De vierde fase gaat van start wanneer de stenen elkaar, tijdens het valproces, niet meer beïnvloeden. De stenen zijn dan zo ver uit elkaar bewogen dat deze als individueel vallend worden beschouwd. Het valgedrag kan dan beschreven worden door het Enkele Steen Model (zie paragraaf 3.4).

Fase 5: radiale afstroming

Er is sprake van radiale afstroming (fase 5), wanneer de stenen als groep (volgens fase 1 en 2) de bodem bereiken. De kinetische energie van het meegenomen water is dan nog niet gedissipeerd en moet dus ergens naartoe. Het water wordt door de bodem afgebogen en er ontstaat een radiale afstroming uit het midden, het stuwpunt. De stenen uit de groep worden met deze stroming meegevoerd totdat de snelheid van het afstromende water zodanig is afgenomen dat een stabiele situatie is ontstaan.

Nota bene:

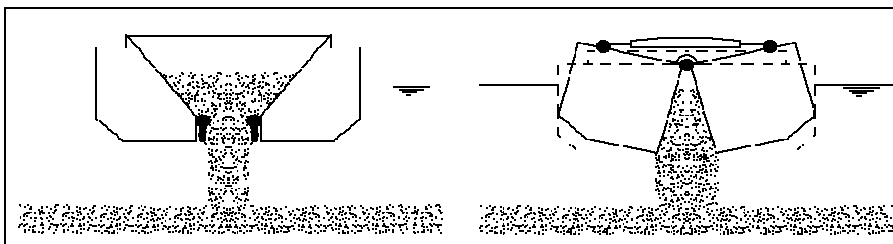
De eerste en tweede fase volgens VAN DER WAL vallen onder de eerder genoemde thermische fase. De derde en vierde fase worden gerekend tot de zwermfase.

4.3 GROEPSEFFECT BIJ HET STORTEN VAN HOEVEELHEDEN STEEN

Bij het storten van een ‘grote’ hoeveelheid steen treedt een zogenaamd groepseffect op, dat zich (onder andere) kenmerkt door een relatief hoge groepssnelheid in verhouding tot de valsnelheid van de individuele stenen (binnen de groep). Belangrijk is het om onderscheid te maken tussen het groepseffect (dat op kan treden) bij een bulkstort en bij een lijnstort.

4.3.1 Groepseffect bij een bulkstort

Een bulkstort kenmerkt zich door een compacte ‘wolk’ stenen – met bepaalde ‘lengte’, ‘breedte’ en ‘hoogte’ – die in korte tijd gestort wordt. Dit is het geval bij het stortproces van een “onderlosser” of een “spleijtbak”, zie Figuur 4.1. Het groepseffect dat hierbij op kan treden is onderzocht in [VAN DER WAL, 2002].



Figuur 4.1 Bulkstort: een onderlosser en een spleijtbak.

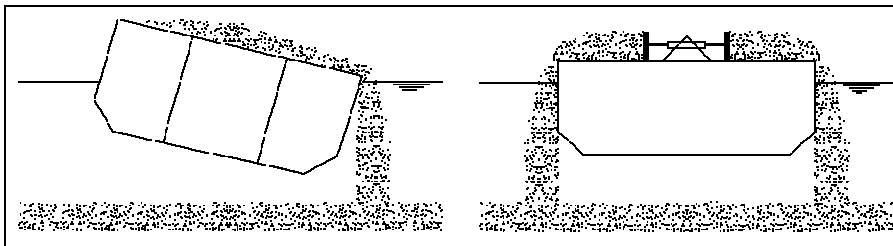
De relatief grote valsnelheid van de steengroep is waarneembaar vanaf een steenaantal van 50 à 100 stuks. De maximale snelheid is dan afhankelijk van de totale steenmassa in de groep, waarbij een toename in de groepsmassa een verhoging van de valsnelheid tot gevolg heeft. Individuele steeneigenschappen, zoals diameter en vorm, hebben bij steenaantallen groter dan 100 nauwelijks invloed op de maximale valsnelheid van de groep. In de zwermfase, wanneer het individuele valproces weer ter sprake komt, gaan deze pas weer een significante rol spelen.

Nota bene:

Verschillend gegradeerde groepen met gelijke totale massa bereiken eenzelfde maximale snelheid.

4.3.2 Groepseffect bij een lijnstort

Bij het storten met een zijstorter is er sprake van een lijnstort. Gedurende langere tijd is er sprake van een 'continue' stroom stortmateriaal, zie Figuur 4.2. De bevindingen uit het onderzoeksrapport van VAN DER WAL zijn dan niet zonder meer geldig. Echter, bepaalde verschijnselen die door hem zijn waargenomen kunnen wel degelijk van invloed zijn op het 'groepsgedrag' bij het storten met een schuifstorter.



Figuur 4.2 Lijnstort: een rolstorter en een schuifstorter.

In [VAN OORD, 1995] waarin (onder andere) het stortproces van een schuifstorter wordt geanalyseerd, wordt opgemerkt dat een (kleine) toename in de spreiding is waar te nemen, wanneer stenen tegelijk worden gestort.

De verklaring kan gezocht worden in een fenomeen dat ook in [VAN DER WAL, 2002] werd waargenomen, namelijk dat de kleinere stenen (mee)vallen in het zog van de grotere stenen. Aangezien grotere stenen over het algemeen meer spreiding vertonen dan kleinere stenen – de spreiding is evenredig met de wortel uit de steendiameter –, heeft dit een toename in de spreiding van het totaal tot gevolg.

In [DE REUS, 2004] zijn, voor het onderzoek naar het valgedrag van stenen onder invloed van stroming, groepen van 50, 100, 150 en 200 stenen gestort vanaf een 'lijn' in stilstaand water. Er bleek dat de (verschillende) groepssnelheden niet significant groter waren dan de snelheid van de individueel vallende stenen.

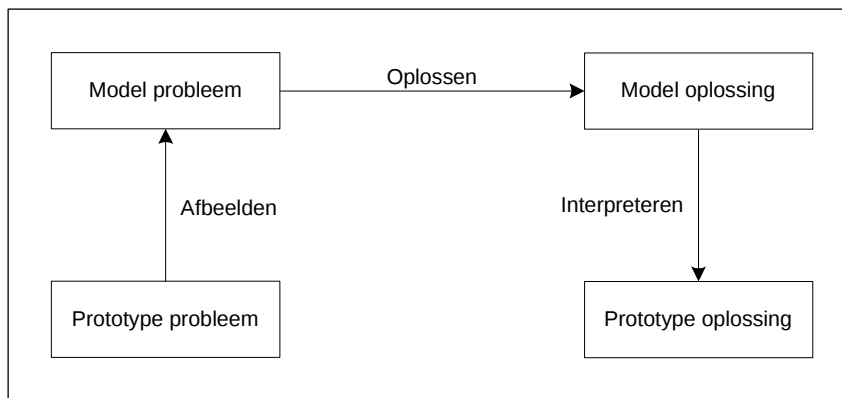
Verondersteld wordt dan ook dat groepseffecten bij een lijnstort zijn te verwaarlozen. De stenen mogen dus als enkel vallend worden beschouwd. Dit is ook een algemeen gebruikt uitgangspunt in [BOUWDIENST RWS, 1991].

5 SCHALEN EN MODELPROEVEN

De noodzaak om op schaal te werken dwingt tot bestudering van de relevante schaalregels. Dit hoofdstuk handelt hierover. Basis voor dit hoofdstuk is [DE VRIES, 1977].

5.1 INLEIDING

In de waterbouwkunde wordt veelvuldig gebruik gemaakt van modelonderzoek, waarbij het eigenlijke aspect/object – het prototype – vereenvoudigd wordt weergegeven in een model. Veelal wordt gebruik gemaakt van schaalmodellen en/of wiskundige modellen. In het eerste geval wordt door meten, in het tweede geval door berekening vastgesteld wat de eigen-



Figuur 5.1 De omweg bij een modelonderzoek. [DE VRIES, 1977]

schappen van het model zijn. De resultaten worden daarna door interpretatie omgezet in resultaten voor het prototype. Een en ander staat weergegeven in Figuur 5.1.

Er moet worden opgemerkt dat

- een slechte afbeelding moeilijkheden geeft bij de interpretatie – ook als er een voortreffelijke oplossing is gevonden – en dat
- een ‘te goede’ afbeelding – er worden veel variabelen uit het prototype probleem meegenomen – weinig zin heeft als de onderzoeker niet in staat is om technisch goede oplossingen te vinden.

De experimenten die in dit onderzoek worden uitgevoerd zijn weliswaar op verkleinde schaal, maar niet zijn bedoeld zijn als schaalproeven, zoals bovenstaand beschreven. Het gaat om de processen die zich afspelen tijdens het storten van stenen met een schuifstortter.

Aspecten als, de steendiameter van het stortmateriaal en de afmetingen van het laaddek van de modelschuifstortter moeten echter wel een ‘goede’ weergave van de werkelijkheid zijn. Hiertoe dient er “gelijkvormigheid” tussen model en prototype te bestaan. Dit wordt behandeld in paragraaf 5.2. De hieruit volgende schaalregels worden afgeleid in paragraaf 5.3, waarna de mogelijke schaaffecten worden behandeld in paragraaf 5.4.

5.2 GELIJKVORMIGHEID

Onder gelijkvormigheid wordt verstaan:

“De overeenkomst in de verhouding van grootheden in het prototype tot diezelfde grootheden in het model”.

Er zijn drie soorten gelijkvormigheid.

Meetkundige gelijkvormigheid

Er is sprake van meetkundige (of geometrische) gelijkvormigheid als de verhoudingen van alle overeenkomende afmetingen gelijk zijn. Voorbeelden zijn gelijkvormige lengte, oppervlakte en inhoud.

Kinematische gelijkvormigheid

Wanneer bij model en prototype overeenkomstige afstanden in overeenkomstige tijdsintervallen worden afgelegd, dan zijn deze twee systemen kinematisch gelijkvormig. Afgeleide grootheden zijn bijvoorbeeld snelheid en versnelling.

Dynamische gelijkvormigheid

Twee systemen zijn dynamisch gelijkvormig als overeenkomstige massa's onder invloed van overeenkomstige krachten kinematische gelijkvormigheid bezitten. Grootheden die in dit geval een rol spelen zijn onder andere dichtheid, kracht, energie en vermogen. Deze vorm van gelijkvormigheid is gebaseerd op de tweede wet van Newton, $F = ma$.

De vraag is nu onder welke voorwaarden sprake is van gelijkvormigheid tussen model en prototype. Deze schaalregels worden in de volgende paragraaf afgeleid.

5.3 SCHAAALREGELS

De voor gelijkvormigheid benodigde schaalregels worden afgeleid door een analyse van de (fundamentele) vergelijking die het optredende proces beschrijft: de Navier-Stokes vergelijking.

5.3.1 Afleiden schaalregels: analyse van de vergelijking van Navier-Stokes

Voor de beschrijving van de vloeistofstroming – in dit geval water – rond een voorwerp wordt de vergelijking van Navier-Stokes gebruikt:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) + \rho \vec{u} \left(\nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \rho \vec{f} + \eta \nabla^2 \vec{u} \quad (5.1)$$

waarin:	ρ	:	dichtheid van de vloeistof (water)	[kg/m ³]
	$\vec{u}$	:	snelheidsvector	[m/s]
	t	:	tijd	[s]
	p	:	waterdruk	[Pa]
	$\vec{f}$	:	versnellingsvector ten gevolge van de externe kracht	[m/s ²]
	η	:	dynamische viscositeit van de vloeistof	[Pa.s]

Worden nu voor de grootheden snelheid, lengte, tijd en druk respectievelijk de maten U , L , T en P_0 ingevoerd, dan kunnen de volgende dimensieloze grootheden opgesteld worden:

$$\vec{u}_d = \frac{\vec{u}}{U}, t_d = \frac{t}{T}, p_d = \frac{p}{P_0}, \vec{g}_d = \frac{\vec{g}}{g}, \nabla_d = L \cdot \nabla \text{ en } \nabla_d^2 = L^2 \cdot \nabla^2$$

Invullen in (3.1) geeft:

$$\left(\frac{\rho \cdot U}{T} \right) \frac{\partial \vec{u}_d}{\partial t} + \left(\frac{\rho \cdot U^2}{L} \right) \vec{u}_d \cdot \nabla_d \cdot \vec{u}_d = - \left(\frac{P_0}{L} \right) \nabla_p \cdot p_d + g \cdot \rho \cdot \vec{g}_d + \left(\frac{\eta \cdot U}{L} \right) \nabla_d^2 \cdot \vec{u}_d \quad (5.2)$$

Delen door $\rho U^2 L^{-1}$ geeft:

$$\left(\frac{L}{U \cdot T} \right) \frac{\partial \vec{u}_d}{\partial t} + \vec{u}_d \cdot \nabla_d \cdot \vec{u}_d = - \left(\frac{P_0}{\rho \cdot U^2} \right) \nabla_p \cdot p_d + \left(\frac{g \cdot L}{U^2} \right) \cdot \vec{g}_d + \left(\frac{\eta}{\rho \cdot U \cdot L} \right) \nabla_d^2 \cdot \vec{u}_d \quad (5.3)$$

In vergelijking (5.3) zijn vier dimensieloze kentallen – tussen de haakjes in de vergelijking – te onderscheiden:

Getal van Strouhal

Het getal van Strouhal (St) geeft de verhouding van de instationaire en stationaire traagheidskracht en is een maat voor het optreden en afschudden van wervels door “vortex shedding”; zie ook paragraaf 3.3.1:

$$St = \frac{\rho \cdot U \cdot L^3 \cdot T^{-1}}{\rho \cdot U^2 \cdot L^2} = \frac{L}{U \cdot T}$$

Reciproke van het getal van Euler

Het getal van Euler (Eu) geeft de verhouding tussen de stationaire traagheidskracht en de drukkracht en wordt gebruikt voor de beschrijving van samendrukbare en caverende stromingen:

$$Eu = \frac{\rho \cdot U^2 \cdot L^2}{P_0 \cdot L^2} = \frac{\rho \cdot U^2}{P_0}$$

Reciproke van het getal van Froude

Het getal van Froude geeft de verhouding tussen de stationaire traagheidskracht en de zwaartekracht:

$$Fr = \frac{\rho \cdot U^2 \cdot L^2}{\rho \cdot g \cdot L^3} = \frac{U^2}{g \cdot L}$$

Let op: hier wordt Fr gebruikt in plaats van de, uit de scheepsbouw bekende, Fr^2 .

Reciproke van het getal van Reynolds

Het getal van Reynolds geeft de verhouding van de stationaire traagheidskracht en de viskeuze wrijvingskracht en correspondeert met het karakter van het stroomregime.

$$Re = \frac{\rho \cdot U^2 \cdot L^2}{\eta \cdot U \cdot L} = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\eta} = \frac{U \cdot L}{\nu}$$

Twee systemen zijn alleen dan gelijkvormig wanneer de dimensieloze kentallen dezelfde waarde hebben in model en prototype. Schaalecten – ‘fouten’ in het model – worden dan uitgesloten.

5.3.2 Schalen met behulp van de schaalregel van Froude

Bij de schaalregel van Froude wordt aangenomen dat de vloeistofbeweging uitsluitend door de zwaartekracht wordt veroorzaakt; andere krachten worden verwaarloosd. Voor het modelleren van vallende stenen is dit aannemelijk.

De schaal (of schaafactor) van een fysische grootte wordt bepaald door de verhouding van de waarde in het prototype en in het model:

$$n_i = \frac{i_{prototype}}{i_{model}}$$

waarin: n_i : schaafactor van grootte i [–]

Als het Froudegetal in model en prototype dezelfde waarde heeft – $n_{Fr} = \frac{Fr_{prototype}}{Fr_{model}} = 1$ – dan

is er sprake van meetkundige gelijkvormigheid. Factoren als lengte, (val)snelheid en massa worden dan bepaald met onderstaande schaalregels.

Lengteschaal	n_l	:	x
Snelheidsschaal	n_u	:	$x^{1/2}$
Massaschaal	n_m	:	x^3
Tijdschaal	n_t	:	$x^{1/2}$

Schaaleffecten worden uitgesloten als ook de getallen van Euler, Reynolds en Strouhal in model en prototype gelijk zijn.

Het getal van Euler is gelijk voor prototype en model als er geen luchtinsluiting aanwezig is. Aangezien de stenen vlak boven het wateroppervlak worden gestort en de luchtinsluiting dus relatief klein is mag verondersteld worden dat er geen schaaffecten optreden.

Verder blijkt dat de schaalregels van Froude en Reynolds niet met elkaar overeenstemmen. Zwaartekracht en viskeuze krachten kunnen dus niet in een model op dezelfde schaal weergegeven worden. Viskeuze krachten moeten in het geval, waarbij de zwaartekracht belangrijk is, dus zo klein mogelijk zijn. Verondersteld wordt dat dit, gezien de turbulente stroming rondom een vallende steen, ook zo is.

Het stroomregime moet wel gelijkvormig zijn. Dit wordt voornamelijk toegeschreven aan gelijke waarden voor de weerstandscoefficiënt (C_d) in model en prototype. Uit Figuur 3.1 is af te lezen dat voor $1000 < Re < 2 \cdot 10^5$ deze een zo goed als constante waarde aanneemt. Als het Reynoldsgetal zich tussen deze twee waarden bevindt treden dus geen schaaffecten op.

De minimale steendiameter die in de modelproeven gebruikt mag worden kan dan, uitgaande van de vergelijking (3.7), bepaald worden met:

$$D_{\min}^{\frac{3}{2}} = \frac{Re \cdot \nu}{\sqrt{2\Delta \frac{g}{C_d}}} = \frac{1000 \cdot \nu}{\sqrt{2\Delta \frac{g}{C_d}}} \quad (5.4)$$

waarin:	$D_{\min}$	:	minimale diameter	[m]
	Re	:	Reynoldsgetal	[-]
	ν	:	kinematische viscositeit	[m ² /s]
	Δ	:	relatieve dichtheid	[-]
	g	:	zwaartekrachtversnelling	[m/s ²]
	C_d	:	weerstandscoefficiënt voor de sleepkracht	[-]

Invullen van een aantal gebruikelijke waarden in (5.4):

- ♦ $\nu = 1.33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,
- ♦ $\Delta = 1.65$; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ en
- ♦ $C_d = 1.43$

geeft $D_{\min} = 0.004 \text{ m}$. De minimale steendiameter bedraagt dus 4 mm.

Het getal van Strouhal is gelijkvormig als, zowel in model als prototype, de wervels op vergelijkbare wijze loslaten. Het (stort)materiaal moet dan, naast de weerstandscoefficiënt ook een overeenkomstige dichtheid en vorm hebben. Bij het selecteren van de (model)steensortering moet hier dus rekening mee gehouden worden.

5.4 (MOGELIJKE) SCHAALEFFECTEN BIJ MODELPROEVEN

Een schaaffect ontstaat als de schaal van punt tot punt in een model verschilt of indien voor een bepaald verschijnsel niet wordt voldaan aan de schaalregels. Onderstaand wordt een tweetal mogelijke schaaffecten behandeld.

Invloed van de elasticiteit

Als er meerdere stenen tegelijk worden gestort – en dat is het geval bij het stortproces van een schuifstort – kunnen de stenen (vooral tijdens het valproces) met elkaar in contact komen. Omdat de elasticiteit van de stenen in het model niet op schaal wordt gebracht kunnen schaaffecten optreden. Uit [WL M 1768, 1983] blijkt echter dat dit effect verwaarloosbaar klein is.

De verklaring ligt in het feit dat de baan en de beweging van de steen, na botsing met een andere steen, voornamelijk wordt bepaald door de vorm van de individuele stenen. Beide stenen zullen een rotatie ondergaan, waarbij de impulsoverdracht wordt bepaald door de grootte van het aanrakingsoppervlak en in mindere mate door de elasticiteit van de vallende stenen. De beweging van de roterende stenen in het water na de botsing wordt, zoals blijkt uit de voorgaande paragraaf, goed weergegeven.

Om dezelfde reden zal ook de baan van een vallende steen, nadat deze bijvoorbeeld tegen de romp van het stortschip is gebotst, voornamelijk worden bepaald door de vorm van deze 'wand'. In [WL M 1768, 1983] wordt eenzelfde soort vergelijking gemaakt, namelijk stortmateriaal dat tegen de pijlers van de (toekomstige) stormvloedkering in de Oosterschelde aanbotst.

Een en ander betekent dat er geen schaaffecten te verwachten zijn als de modelschuifstort in hout wordt uitgevoerd.

Invloed van de (ruwheid van de) bodem

De invloed van de bodem lijkt echter wel invloed te hebben. Niet zozeer op het 'stuiteren' van het gestorte materiaal – vergelijk bovenstaande geval –, maar wel op de horizontale verplaatsing van de vallende stenen wanneer ze contact maken met de bodem. Vergeleken met bijvoorbeeld een houten of betonnen ondergrond, heeft een bed van (op schaal aangebrachte) stenen een remmende werking op de verplaatsing van de gestorte stenen.

De mate waarin de stenen nog verplaatsen als ze op de bodem terecht komen moet dus geanalyseerd worden alvorens een ondergrond te kiezen.

6 VOORBEREIDING EN ORIËNTATIE

Dit hoofdstuk handelt over de voorbereidingsfase van het experimentele onderzoek. De voorbereidingen en oriëntatie op de uiteindelijke proevenseries hebben plaatsgevonden in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft.

6.1 INLEIDING

Voordat met de eerste (oriënterende) proeven kan worden begonnen, moet een tweetal zaken geregeld zijn, namelijk:

- (a) materiaal om te storten, en
- (b) een model(schuifstorter) om mee te storten.

De bovengenoemde aspecten worden achtereenvolgens behandeld in paragraaf 6.2 en paragraaf 6.3.

Het vervolg van dit hoofdstuk is gewijd aan de oriënterende proeven (paragraaf 6.4). Dit zijn veelal kwalitatieve bepalingen, waaruit de eisen voor het vervolg van het onderzoek volgen (paragraaf 6.5)

6.2 HET STORTMATERIAAL

6.2.1 Keuze steensortering

Uit de procesanalyse uit Hoofdstuk 2 blijkt dat de steensortering een belangrijke parameter is voor het stortgedrag van de schuifstorter. Vooral

- ♦ het soort materiaal
- ♦ de equivalente steendiameters van de sortering (D_{n15} , D_{n50} en D_{n85}), en
- ♦ de gradering van de sortering (D_{85} / D_{15})

zijn van belang.

Wat betreft het soort materiaal is gekozen voor (een sortering van) natuur- of breuksteen. Uit het overzicht van het werkgebied van de steenstorter “HAM-601” in Bijlage A.3 blijkt dit een veelgebruikt stortmateriaal te zijn. Voor een overzicht van de karakteristieken van een breuksteensortering wordt verwezen naar Bijlage B.

Verder wordt getracht de steendiameters binnen de (model)sortering zo goed mogelijk overeen te laten komen met die van de (standaard) breuksteensorteringen uit de praktijk⁸. Uit het

⁸ Standaard breuksteensorteringen uit de praktijk: (bijvoorbeeld) 40 – 250 mm, 60 – 300 mm, 5 – 40 kg, 10 – 60 kg en 60 – 300 kg.

overzicht uit Bijlage A.3 blijkt dat gemiddeld genomen tot een sortering van 60–300 kg wordt gestort.

Voor het verscalen van de standaard breuksteen sorteringen worden de geometrische schaalregels volgens Froude gebruikt, zie Hoofdstuk 5. Gezien de veel voorkomende (maximale) stortdiepte van 20m – uit bijlage A.3 – en de beschikbare waterdiepte – van ca. 80 cm⁽⁹⁾ – voor de uitvoering van de modelproeven, is gekozen voor een schaalfactor van 25. De diameters van de steensorteringen uit de praktijk moeten dus met een factor 25 verkleind worden.

Uit paragraaf 5.3.2 blijkt dat de minimale ‘diameter’ van het stortmateriaal 4 mm mag bedragen. Van de bestaande breuksteensorteringen vallen de 40–250 mm, de 60–300 mm en de 5–40 kg sortering dan af. Blijven over de 10–60 kg en de 60–300 kg sortering.

In de onderstaande tabel zijn de (gemiddelde) waarden van de steenkaracteristieken – zie Bijlage B – van deze sorteringen uitgezet.

Tabel 6.1 Waarden voor D_{85} , D_{n85} , D_{15} , D_{n15} , D_{50} en D_{n50} voor de prototypesortering⁽¹⁰⁾.

Sortering	D_{15} [m]	D_{50} [m]	D_{85} [m]	D_{n15} [m]	D_{n50} [m]	D_{n85} [m]
10 – 60 kg	0.23	0.28	0.35	0.19	0.24	0.29
60 – 300 kg	0.41	0.50	0.60	0.34	0.42	0.50

Als deze naar modelwaarden worden geschaald, volgen waarden zoals weergegeven in de onderstaande tabel.

Tabel 6.2 Waarden voor D_{85} , D_{n85} , D_{15} , D_{n15} , D_{50} en D_{n50} voor de modelsortering.

Sortering ca.	D_{15} [cm]	D_{50} [cm]	D_{85} [cm]	D_{n15} [cm]	D_{n50} [cm]	D_{n85} [cm]
1 – 4 g	0.9	1.1	1.4	0.8	0.9	1.1
4 – 20 g	1.6	2.0	2.3	1.3	1.7	2.0

In eerste instantie wordt er van uitgegaan slechts één steensortering te gebruiken in de experimentele fase. Gezien de afmetingen van de stenen wordt gekozen om de verschaalde 60 – 300 kg sortering te gebruiken.

⁹ Hierbij is uitgegaan van het feit dat de (uiteindelijke) modelproeven uitgevoerd zouden worden op de onderzoeksfaciliteit van Van Oord N.V. – het voormalige Ballast Ham Dredging – te Moerdijk. Later is besloten deze uit te voeren in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft, faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen.

¹⁰ De getallen in Tabel 6.1 zijn bepaald met een correctiefactor van $(2500/2650)^{1/3}$, zie Bijlage B

6.2.2 Selecteren stortmateriaal

De modelsortering wordt samengesteld door uit een bestaande 'sortering'⁽¹¹⁾ materiaal te zeven binnen (twee) rasters met vierkante openingen van respectievelijk 24x24 mm² en 12x12 mm². Deze zeefmaten volgen door de waarden van D₁₅ en D₈₅ uit Tabel 6.2 af te ronden naar beschikbare 'zeefmaten'.

Het aantal stenen dat gezeefd moet worden volgt uit:

$$N_{dek} = \frac{W_{dek}}{W_{em}} \quad (6.1)$$

waarin:	N _{dek}	:	aantal stenen op één laaddek van de schuifstortter	[-]
	W _{dek}	:	lading op het dek	[kg]
	W _{em}	:	rekenkundig gemiddelde gewicht van de stenen binnen de sortering	[kg]

Vullen we de volgende (prototype) waarden in

- ♦ W₅₀ / W_{em} = 1,15;
- ♦ W₅₀ = 150 kg (behorend bij de 'lichtste' sortering, het aantal stenen is dan maximaal), en
- ♦ W_{dek} = 250 ton (de totale lading van 1000 ton is verdeeld over 4 vakken)

dan volgt:

N_{dek} = ca. 2000 stenen.

6.2.3 Bepalen steeneigenschappen

Van de gezeefde sortering – in het vervolg aangeduid met sortering A – worden de steeneigenschappen bepaald. Gezien het aantal stenen binnen sortering A is het ondoenlijk van alle stenen de eigenschappen te bepalen. Daarom is een aselechte (=willekeurige) steekproef getrokken, waarvan de eigenschappen representatief worden verondersteld voor de gehele sortering. Voorwaarde is wel dat het aantal stenen binnen de steekproef voldoende groot is. Verondersteld wordt dat een "steekproefgrootte" van 150 stenen hieraan voldoet.

De stenen uit sortering A zijn uitgelegd in rijen en kolommen (zie Figuur 6.1), waarbij uit het oog springende (afwijkende) stenen tevens zijn verwijderd. Vooral té platte stenen en stenen met een duidelijke afwijkende structuur zijn uit de sortering gehaald. Vervolgens zijn willekeurig 150 coördinaten gegenereerd – combinaties van rijen en kolommen – en de bijbehorende stenen uit de sortering gehaald.

¹¹ Wellicht geen zuivere sortering; bevat ook afval van anderen e.d.



Figuur 6.1 Stenen uit sortering A uitgelegd in rijen en kolommen.

Van deze stenen⁽¹²⁾ zijn achtereenvolgens bepaald:

1. de massa van de (droge) steen (M_{droog}),
2. de massa van de steen onder water (M_{ow}),
3. de grootste afstand tussen twee punten van de steen (L), en
4. de kleinste afstand tussen twee verticale platen waar de steen nog juist door kan (d)

(1) en (2) zijn bepaald door gebruik te maken van een weegopstelling, waarbij het gewicht in 1 milligram nauwkeurig afgelezen kan worden. De “ L ” en “ d ” van de stenen zijn bepaald door middel van een schuifmaat met een nauwkeurigheid van 0,1 mm.

De ‘eigenschappen’ van de stenen uit sortering A kunnen nu bepaald worden door voor elke steen achtereenvolgens te bepalen:

1. de massadichtheid:
$$\rho_s = \frac{M_{\text{droog}}}{V} = \frac{M_{\text{droog}}}{M_{\text{droog}} - M_{\text{ow}}} \rho_{\text{water}}$$
2. de nominale diameter:
$$D_n = 3 \sqrt{\frac{M_{\text{droog}}}{\rho_s}}$$
3. de zeefmaat:
$$D_x = \frac{D_n}{0.84}$$
4. de L/d verhouding:
$$\frac{L}{d}$$

De belangrijkste steeneigenschappen van sortering A zijn:

D_{n15}	:	1,5 cm
D_{n50}	:	1,7 cm
D_{n85}	:	1,9 cm

¹² De stenen zijn voorzien van een verlaagje, zodat ze genummerd kunnen worden.

$$\begin{aligned} D_{85}/D_{15} &: 1,3 \\ \rho_{s, \text{gem}} &: 2650 \text{ g/cm}^3 = 2650 \text{ kg/m}^3 \\ L/d_{\text{gem}} &: 2,3 \end{aligned}$$

Dit zijn aannemelijke waarden voor de geschaalde 60 – 300 kg sortering. Voor een volledig overzicht van de steeneigenschappen van sortering A wordt verwezen naar bijlage E.

6.2.4 Analyse van de meetresultaten

In paragraaf 5.4 is opgemerkt dat de stenen uit het model en het prototype een overeenkomstige dichtheid en vorm moeten hebben. In deze paragraaf wordt nagegaan of dit ook zo is.

Dichtheid

De gemiddeld gemeten dichtheid van de modelsortering bedraagt 2,65 g/cm³. Dit is een aannemelijke waarde voor de dichtheid van breuksteen.

Voor sommige stenen is echter een (té) hoge dichtheid gemeten – rood gearceerd in Bijlage E.1. Gezien de significante verschillen met de overige metingen – 2,90 g/cm³ in plaats van (gemiddeld) 2,65 g/cm³ – mag geconcludeerd worden dat het hier niet gaat om meetfouten, maar om structureel ander materiaal met een significant hogere dichtheid. De desbetreffende stenen – 7 stuks in totaal – zijn dan ook uit de sortering gehaald. Van de oorspronkelijke 150 stenen uit de steekproef blijven dus 143 geldige metingen over.

Tussen de overige stenen uit de sortering zullen echter ook foutieve zitten; zeg (7/150=) 5%. Deze moeten eigenlijk ook uit de sortering gehaald worden. Van alle stenen binnen de sortering zou de dichtheid dan bekend moeten zijn. Dit is echter gezien de omvang van de sortering, onbegonnen werk. Getracht is dan ook om aan de hand van het ‘uiterlijk’ van de stenen – stenen met een vergelijkbare structuur als de te zware stenen – de sortering ‘op te schonen’.

Hiertoe is van een aantal stenen, waarvan verondersteld werd dat ze te zwaar zouden zijn, de dichtheid gemeten. Al snel bleek dat het moeilijk is, op het oog, ‘zware’ stenen te detecteren; van de tien gemeten stenen waren er namelijk (maar) vier ook daadwerkelijk te zwaar. Een en ander houdt in dat de sortering nog steeds stenen met een te hoge dichtheid bezit. Gedurende het onderzoek worden ‘twijfelachtige’ stenen steeds gecontroleerd en, zonodig, uit de sortering gehaald. Daarom wordt de ‘fout’ in de dichtheid geschat op 5%.

Tot slot moet opgemerkt worden dat, door de invloed van de verf, de gemeten dichtheid van de stenen lager is dan de ‘werkelijke’ waarde. Van een vijftal stenen (met afwijkende vormen) is de dichtheid voor en na het verven gemeten. Uit de meetresultaten (zie bijlage E.1) volgt een afwijking van orde 2%.

Vorm: L/d verhouding

Uit de gemeten waarden voor de L/d verhouding van de stenen blijkt dat ca. 9% – 13% van de 150 stenen – een L/d verhouding groter dan 3 heeft. Uit [CUR/RWS 169, 1994] blijkt dat dit maximaal 3 à 5% mag bedragen.

De sortering is dus duidelijk ‘te plat’. Stenen met een, op het oog, te grote L/d verhouding worden dan ook uit de sortering gehaald.

6.3 DE MODELSCHUIFSTORTER

In [BISSCHOP, 2002] is, voor “het aanbrengen van kubussen in de toplaag van een golfbreker met een zijschuifstorter” een modelschuifstorter ontwikkeld die in aangepaste vorm geschikt lijkt voor dit onderzoek.

6.3.1 Beschrijving modelschuifstorter uit [BISSCHOP, 2002]

Van de bestaande modelschuifstorter zijn onderstaand de belangrijkste eigenschappen opgesomd:

- Het model bestaat grofweg uit een grondplaat (125 cm bij 80 cm) met aan de zijkanten twee verticale plaatjes. Daartussen is een schuif (op wieltjes) geplaatst die op zijn plek gehouden wordt door een spindel, die weer verbonden is met twee steunen die op de grondplaat vastzitten. Aan weerszijden van de schuif zijn twee platen bevestigd, zodat de schuif niet kan schrammen tijdens het schuiven.
- De schuif wordt aangedreven door een spindel met een spoed van 4 mm, zodat bij één keer draaien aan de spindel de schuif 4 mm verschuift. Draaien aan de spindel wordt mogelijk gemaakt door een wiel aan de achterkant van het model.
- De schuif is iets onderuit bevestigd, zodat het materiaal aan de onderzijde wordt weggedrukt.
- De afstand waarover materiaal afgeschoven kan worden – de breedte van het laaddek – bedraagt ca. 24 cm.



Figuur 6.2 De modelschuifstorter.

6.3.2 Aangepast 'ontwerp' modelschuifstorter

Vooralsnog lijkt het alleen noodzakelijk om het laaddek van de schuifstorter aan te passen. De lengte en de breedte van het laaddek van het model moeten gelijkvormig – zie Hoofdstuk 5 – zijn met die van de prototype schuifstorter.

In Bijlage A.2 komen de volgende prototypegegevens naar voren:

- ♦ de lengte van het (door een tussenschot gescheiden) laaddek is 28 meter; er zijn twee schuiven per kant die onafhankelijk van elkaar kunnen bewegen; één (van de vier) vak(ken) heeft dan een lengte van ca. 14 meter;
- ♦ de breedte van het laaddek, zowel aan stuurboord- als aan bakboordzijde, bedraagt 6 meter.

De prototype “laaddekbreedte” kan, met de geometrische schaalfactor van $n = 25$ precies verschaald worden naar een schuiflengte – de breedte van het laaddek – van 24 cm. Wat dit betreft hoeft het ontwerp van de modelschuifstorter dus niet aangepast te worden.

Wordt de lengte van het laaddek op eenzelfde manier verschaald dan volgen een modelwaarde van 56 cm. Door twee plankjes, met een lengte van 24 cm, loodrecht en met een tussenafstand van 56 cm, op de schuif van de bestaande schuifstorter te monteren, kan deze lengte (gemakkelijk) gecreëerd worden. Gevolg is wel dat de ‘wanden’ (van het laaddek) samen met de schuif weggeschoven worden. Dit is in de praktijk niet het geval.

Op gelijke wijze worden aan weerszijden van het gecreëerde laaddek nog twee vakken met een lengte van 28 cm – een half laaddek – aangebracht, zodat het volgende beeld ontstaat:



Figuur 6.3 Aangepast ontwerp voor de modelschuifstorter.

De oriënterende proeven kunnen met deze (aangepaste) schuifstorter uitgevoerd worden.

6.4 ORIËNTATIE

De oriënterende proeven zijn bedoeld om 'feeling' te krijgen met het schuifstorten. Dit wordt gedaan aan de hand van experimenten met betrekking tot:

- ♦ het bresgedrag van het stortmateriaal, en
- ♦ het valgedrag van het materiaal onder water.

De doelstelling is tweeledig:

1. Bekijken op welk vlak de modelschuifstorter aangepast dient te worden, of wellicht niet.
2. Beoordelen – voor zover dat in dit stadium mogelijk is – welke variabelen een belangrijke rol spelen in het stortproces van de schuifstorter. Tevens bepalen van welke variabelen de invloed gering is.

6.4.1 Het bresgedrag van het stortmateriaal

Deze serie 'proeven' is bedoeld om inzicht te krijgen in het bresgedrag – de eerste 'stap' in het stortproces – van het stortmateriaal, ofwel de '(on)regelmatigheid' waarmee de stenen van het laaddek geschoven worden.

In eerste instantie lijkt het interessant de invloed van:

1. de steendiameter, en
 2. de schuifsnelheid
- op het bresgedrag te analyseren

Ad 1

Voor het analyseren van het verschil in afschuiven tussen verschillende steendiameters worden twee 'sorteringen' bijgezeefd. De eigenschappen hiervan worden niet bepaald, het gaat puur om een vergelijking van het bresgedrag.

- ♦ De stenen uit de tweede ('extra') sortering zijn gezeefd tussen twee zeven met vierkante openingen van $12 \times 12 \text{ mm}^2$ en $8 \times 8 \text{ mm}^2$. De grootste stenen uit deze sortering zijn dan kleiner dan de kleinste stenen uit sortering A. Er is geprobeerd de stenen qua vorm zo goed mogelijk gelijk te houden aan het materiaal uit sortering A; op het oog afwijkende (veel te) platte stenen zijn uit de sortering gehaald.
- ♦ De zeefmaat van de derde ('extra') sortering loopt van 5 mm tot 8 mm. Ook hier geldt dus weer dat de grootste stenen uit deze sortering kleiner zijn dan de kleinste stenen uit de overige sorteringen.

Ad 2

Bij de experimenten is een drietal schuifsnelheden toegepast:

- ♦ $V_s = \text{ca. } 0,67 \text{ mm/s}$,
- ♦ $V_s = \text{ca. } 1,33 \text{ mm/s}$, en
- ♦ $V_s = \text{ca. } 4 \text{ mm/s}$.

Dit zijn (berekende) schuifsnelheden afgerond op één omwenteling (van de spindel) in een geheel aantal seconden. De snelheden worden immers met de hand gedraaid. In het onderstaande overzicht is een toelichting op de schuifsnelheden gegeven.

$V_s = 0,67 \text{ mm/s}$ (spindel 1x rond in 6 s).

Uitgangspunt voor deze berekening is dat op het laaddek van het model een even grote hoeveelheid stenen aanwezig is als op het dek van de prototype steenstortter. Voor een 'gelijk' stortproces moet het laaddek dan in dezelfde tijd leeg geschoven worden. Voor de schuifsnelheid geldt dan:

$$V_{s,m} = \frac{B_{dek,m}}{T_{leeg}} \quad (6.2)$$

waarin:	$V_{s,m}$	:	schuifsnelheid in het model	[m/s]
	T_{leeg}	:	tijd benodigd voor het leegschuiven van het laaddek	[s]
	$B_{dek,m}$	:	breedte van het laaddek van de modelschuifstortter	[m]

Uitgaande van prototype waarden van $V_{s,p} = 1 \text{ m/min}$ en $B_{dek} = 6 \text{ m}$ en een modelbreedte van $B_{dek,m} = 0,24 \text{ m}$. geeft een schuifsnelheid van $V_{s,m} = 0,67 \text{ mm/s}$, ofwel één keer de spindel ronddraaien in 6 seconden.

$V_s = 4 \text{ mm/s}$ (spindel 1x rond in 1 s).

Deze waarde volgt als de schuifsnelheid wordt berekend met behulp van de (geometrische) schaalregels volgens Froude. Er geldt dan:

$$V_{s,m} = \frac{V_{s,prot}}{\sqrt{n}} \quad (6.3)$$

waarin:	$V_{s,p}$	:	schuifsnelheid van het prototype	[m/s]
	n	:	schaalfactor	[-]

Vergelijking (6.3) geeft een schuifsnelheid van $V_{s,m} = 3,33 \text{ mm/s}$. Afgerond geeft dit één keer de spindel ronddraaien in 1 s.

$V_s = 1,33 \text{ mm/s}$ (1x spindel rond in 3 s).

Deze waarde voor de schuifsnelheid is gekozen omdat deze mooi tussen de voorgaande twee snelheden ligt en tevens dubbel zo snel is als de langzaamste van de drie.

Nota bene:

De drie schuifsnelheden liggen ‘ver’ uit elkaar om te kunnen bepalen door welke schuifsnelheid het bresproces het beste gekarakteriseerd kan worden.

Proefopstelling

De schuifstortor wordt op een tafel boven twee bakken geplaatst en aan weerszijden gevuld met gelijke hoeveelheden van verschillend materiaal. De totale lading per dek bedraagt 8 kg. De spindel wordt uitgedraaid en het bresproces gefilmd.



Figuur 6.4 Opstelling voor (vergelijkende) bresproeven.

Waarnemingen

Naar aanleiding van het analyseren van de videobeelden kan, wat betreft het bresgedrag van het stortmateriaal, het volgende gezegd worden:

1. Tijdens het schuifproces is goed te zien dat het talud zich steil opbouwt alvorens de stenen gaan afschuiven.
2. Het bresproces van het materiaal uit sortering A verloopt (erg) onregelmatig en niet constant over de breedte van het laaddek; afwisselend schuiven ‘klompjes’ stenen af. Het stortmateriaal uit de overige sorteringen lijkt een ‘regelmatiger’ bresgedrag te hebben. Vooral bij de kleinste stenen is een (redelijk) constante stroom gestort materiaal waarneembaar.
3. De begin- en eindonregelmatigheid van het bresproces zijn ook duidelijk te herkennen.
4. De schuifsnelheid lijkt een duidelijke invloed op het bresgedrag te hebben⁽¹³⁾; bij een hogere schuifsnelheid worden de (steen)hellingen minder steil opgebouwd waardoor eerder en ‘regelmatiger’ bressen. De vraag is alleen of de ‘hoge’ schuifsnelheden – $V_s = 1,33 \text{ mm/s}$ en $V_s = 4 \text{ mm/s}$ – ook aannemelijk zijn.

¹³ Dit vanwege het feit dat er een relatief groot verschil zit tussen de verschillende schuifsnelheden en omdat het bresgedrag bij $0,6 \text{ mm/s}$ behoorlijk onregelmatig is. Verwacht wordt dat het verschil in afschuiven bij snelheden van (bijvoorbeeld) $0,6 \text{ mm/s}$ en $0,3 \text{ mm/s}$ moeilijker waar te nemen zal zijn.

6.4.2 Het valgedrag van het materiaal tijdens storten

Het doel van deze serie is om te kijken hoe het gestorte materiaal zich onder water gedraagt. Tevens wordt gekeken hoe het materiaal op de bodem terecht komt.

Er is gevarieerd in de grootte van het stortmateriaal en in de schuifsnelheid; de waterdiepte is (nagenoeg) constant.

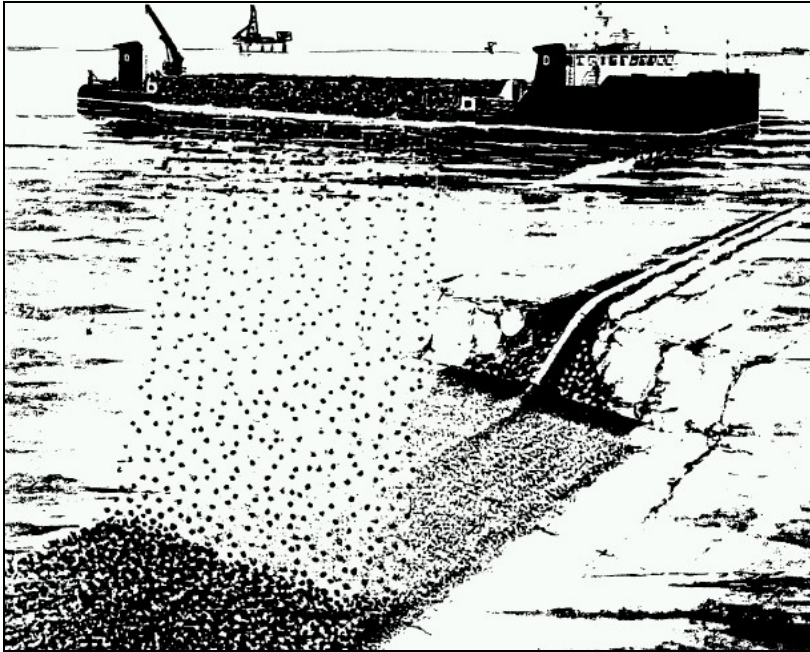
Proefopstelling

Het model wordt op een bestaande constructie, ongeveer 120 cm boven de bodemplaat, in het 'aquarium' van 2,5x2,5x2,0 m³ geplaatst. Het middelste vak van de schuifstorter wordt hierbij gevuld met 16 kg stortmateriaal. Het laaddek wordt vervolgens leeggeschoven en het valproces wordt vastgelegd met een digitale camera.

Waarnemingen

Na het bekijken van de video-opnames kan het volgende gezegd worden:

1. De onregelmatigheden in het bresgedrag (boven water) worden in het water (redelijk) uitgewist. "Klompjes" stenen, die boven water afschuiven, worden onder water uitgespreid.
2. Als de gestorte stenen in contact komen met de bodem, stuiteren deze niet of nauwelijks weg. Dit ondanks het feit dat op een relatief gladde bodemplaat is gestort.
3. De stenen uit sortering A vallen 'individueel'. Er is geen significante toename van de valsnelheid waar te nemen. Er lijkt dus geen sprake van een "groepseffect" te zijn.
4. Het groepseffect gaat (vooral bij een relatief hoge schuifsnelheid) wel zichtbaar een rol spelen bij het stortmateriaal uit de tweede sortering. Duidelijk is te zien dat het stortmateriaal met een 'grotere' valsnelheid de bodem bereikt. Wel komt bij deze stenen het zogenaamde "gordijntje" (zie Figuur 6.5) steeds beter in beeld. Een relatief 'constante' stroom gestort materiaal over de lengte van het laaddek.
5. Het stortprofiel is een over de breedte van het laaddek geïntegreerd Gauss-profiel.



Figuur 6.5 Een “gordijn” van stenen bij het bestorten van een pijpleiding. [BOUWDIENST RWS, 1991]

6.5 EISEN/ASPECTEN VOOR HET VERVOLG VAN HET ONDERZOEK

6.5.1 (Aanpassen) modelschuifstorter

Tijdens de oriënterende fase is gebleken dat de modelschuifstorter – weliswaar met een kleine aanpassing tegen het vastlopen van de schuif – uitermate geschikt is voor het uitvoeren van de vervolgprouven. Wel is het dan belangrijk dat de aandrijving van de schuif wordt aangepast.

Tijdens de bres- en stortprouven is namelijk gebleken dat (vooral) de relatief kleine schuifsnellheden niet nauwkeurig en constant te ‘draaien’ zijn. Er is dan ook voor gekozen om de schuif automatisch aan te drijven met behulp van een elektromotor. Voor een overzicht van de karakteristieken van deze aandrijving wordt verwezen naar Bijlage G.

6.5.2 Proefparameters

Wat betreft de proefparameters van het vervolgonderzoek kan het volgende gezegd worden met betrekking tot:

- ♦ de steensortering,
- ♦ de schuifsnellheid,
- ♦ de belading,
- ♦ de waterdiepte, en
- ♦ de ondergrond waar op gestort wordt.

Steensortering (B)

Uit de vergelijkende bresproeven, zoals beschreven in paragraaf 6.4.1, is ‘geconcludeerd’ dat kleinere stenen een ‘regelmatiser’ bres- of afschuifgedrag vertonen. Of dit ook echt het geval is kan worden onderzocht door in de vervolgprouven een tweede steensortering te gebruiken – sortering B – waarvan ook de eigenschappen bekend zijn.

Bij voorkeur moeten de stenen uit deze sortering qua vorm en qua steenafmetingen weer zo goed mogelijk overeenkomen met een sortering uit de praktijk, in dit geval de 10 – 60 kg. Verder moet het materiaal een overeenkomstige dichtheid hebben met de stenen uit sortering A.

Aangezien de stenen uit de sorteringen die voor de vergelijkende bresproeven (tijdelijk) zijn bijgezeefd óf te kleine afmetingen óf een te grote dichtheid hebben, moet gezocht worden naar een andere sortering.

Gekozen is om een steensortering uit [DESSENS, 2004] te gebruiken, waarvan onderstaand de belangrijkste eigenschappen zijn opgesomd.

D_{n15}	:	0,75 cm
D_{n50}	:	0,82 cm
D_{n85}	:	0,90 cm
D_{85}/D_{15}	:	1,2
$\rho_{s,gem}$	:	2,68 g/cm ³ = 2680 kg/m ³

Voor een compleet overzicht van de eigenschappen van de stenen uit sortering B wordt verwezen naar Bijlage F.

Schuifsnelheid

In paragraaf 6.4.1 is opgemerkt dat het verhogen van de schuifsnelheid ten goede komt aan de regelmatigheid van het bresproces. Of dit ook daadwerkelijk het geval is kan worden bepaald door ook te variëren in de schuifsnelheid. Er moet dan alleen wel vastgesteld worden welke schuifsnelheden in het vervolg van het onderzoek worden toegepast.

Uit een vergelijking van videobeelden van het ‘echte’ bresgedrag en de video-opnames van de bresproeven blijkt dat de schuifsnelheden van $V_s = 1,33$ mm/s en $V_s = 4,0$ mm/s té groot zijn om het bresproces goed te karakteriseren. Na wat aanpassingen aan de afspeelsnelheid van de filmpjes blijkt dat de schuifsnelheid ca. 0,75 mm/s moet bedragen.

De toe te passen schuifsnelheid kan nu, in analogie met vergelijking (6.2), berekend worden door er van uit te gaan dat in het model evenveel stenen per tijdseenheid worden gestort als in de prototype situatie. Afhankelijk van het gemiddelde steengewicht (W_{em}) van de sortering (uit de praktijk) volgt dan een waarde voor de schuifsnelheid. In de onderstaande tabel is dit gedaan voor de stenen uit sortering A en sortering B.

Tabel 6.3 Berekende minimale en maximale waarden voor $V_{s,m}$.

	Sortering A		Sortering B	
	$W_{em,p}$ [kg]	$V_{s,m}$ [mm/s]	$W_{em,p}$ [kg]	$V_{s,m}$ [mm/s]
min	190	0,65	20	0,42
max	130	0,95	35	0,75

De waarden uit Tabel 6.1 komen overeen met de grafisch bepaalde waarde (zie boven).

Voor het vervolgonderzoek wordt een drietal schuifsnelheden toegepast, namelijk:

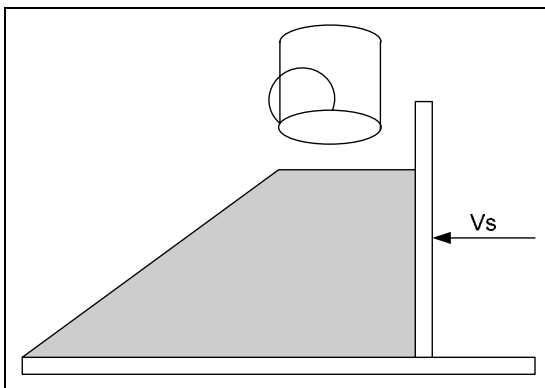
- ♦ $V_s = 0,4 \text{ mm/s}$,
- ♦ $V_s = 0,65 \text{ mm/s}$ en
- ♦ $V_s = 0,9 \text{ mm/s}$.

Nota bene:

In eerste instantie is uitgegaan van de schuifsnelheden $V_s = 0,5 \text{ mm/s}$, $V_s = 0,75 \text{ mm/s}$ $V_s = 1,0 \text{ mm/s}$. Deze zijn 'gecorrigeerd' tot de schuifsnelheden van hierboven, zie Bijlage G.3.

Belading

De belading van de stenen op het laaddek van de modelstorter is zoals weergegeven in de onderstaande figuur.



Figuur 6.6 Belading modelstorter.

Het is van belang dat de belading steeds 'gelijk' is. Hiertoe worden de stenen steeds op eenzelfde manier, vanuit een emmer, op het laaddek 'gegoten'.

De totale belading bedraagt steeds 16 kg stortmateriaal. Dit is de, met $n = 25$, geschaalde hoeveelheid die ook op het laaddek van de prototype schuifstorter aanwezig is:

$$\frac{250 \text{ ton}}{25^3} = 16 \text{ kg}.$$

Waterdiepte

Bij de proeven in de waterbak is slechts op één waterdiepte gestort. De waterdiepte speelt, vanwege de spreiding van de stenen onder water, echter wel een belangrijke rol in het uiteindelijke stortresultaat van de steenbestorting. In het vervolgonderzoek wordt dan ook een drietal waterdieptes toegepast, te weten:

- $h = (\text{ca.}) 120 \text{ cm}$ (vergelijkbaar met een 'echte' waterdiepte van $h = 120 \text{ cm} \times 25 = 30 \text{ m}$)
- $h = (\text{ca.}) 60 \text{ cm}$ (vergelijkbaar met een 'echte' waterdiepte van $h = 15 \text{ m}$)
- $h = (\text{ca.}) 30 \text{ cm}$ (vergelijkbaar met een 'echte' waterdiepte van $h = 7,5 \text{ m}$)

Zodoende wordt op relatief diep, op 'gemiddeld' en op relatief ondiep water gestort.

Ondergrond

In paragraaf 6.4.2 is opgemerkt dat het stortmateriaal niet of nauwelijks verplaatst als het in contact komt met de bodem. Het soort ondergrond lijkt dus, zeker voor stortproeven op een vlakke bodem, nauwelijks van invloed te zijn op het uiteindelijke stortresultaat.

Als ondergrond wordt dan ook de bestaande 'bodem' van de waterbak gebruikt.

7 PROEVENPROGRAMMA EN UITVOERINGSMETHODIEK

Dit hoofdstuk is bedoeld om een overzicht te geven van de uit te voeren modelproeven. Het totale proevenprogramma wordt hierbij opgesplitst in een viertal series, namelijk:

- Serie A: Bresproeven,
- Serie B: (Stationaire) stortproeven op een vlakke bodem,
- Serie C: Aanbrengen van steenbestortingen op een vlakke bodem, en
- Serie D: (Stationaire) stortproeven op een talud.

In de onderstaande paragrafen worden deze series achtereenvolgens behandeld.

7.1 PROEFSERIE A: BRESPROEVEN

De ‘eerste fase’ van het stortproces, het bresgedrag van het stortmateriaal op het laaddek van de steenstortor, is in belangrijke mate bepalend voor het uiteindelijke resultaat van de steenbestorting. Immers, de onregelmatigheid in de ‘aanvoer’ van de stenen is, vooral wanneer de positie van het stortschip in de tijd varieert, van invloed op de plaats waar deze stenen terecht komen. Inzicht in het bresgedrag is dus van essentieel belang.

Doel

Het doel van deze proefserie is dan ook

“het inzichtelijk maken van het bresgedrag van het stortmateriaal op het laaddek van de schuifstortor, middels het meten van de hoeveelheid overboord gezet materiaal per tijdseenheid”.

De invloed van de steendiameter en de schuifsnelheid op de ‘regelmatigheid’ van het bresgedrag wordt geanalyseerd aan de hand van de gemeten storthoeveelheden.

Parameters

Er wordt gevarieerd in steendiameter en in schuifsnelheid volgens onderstaand overzicht.

Tabel 7.1 Overzicht experimenten serie A.

Serie nr.	D_{n50} [cm]	V_s [mm/s]
A.1	1,71	0,40
A.2	1,71	0,65
A.3	1,71	0,90
A.4	0,82	0,40
A.5	0,82	0,65
A.6	0,82	0,90

In iedere serie worden de metingen vijf keer herhaald.

Opstelling

De modelschuifstortor wordt op een tafel boven een (digitale) weegschaal geplaatst; zie Figuur 7.1. Op deze weegschaal, die aangesloten kan worden op (de COM poort van) een computer, is een bak geplaatst om het vallende materiaal op te vangen. Onderin de bak wordt een voorziening getroffen om er voor te zorgen dat de stenen 'niet' stuiten. Tevens wordt langs de onderrand van het schuifgedeelte een strook vilt bevestigd zodat de stenen niet onder de schuif terecht kunnen komen en het schuifproces verstoren. Verondersteld wordt dat dit geen invloed heeft op het bresproces. De strook is namelijk zo 'dun' dat er geen stenen 'op blijven hangen'.



Figuur 7.1 Opstelling bresproeven.

Meetmethode

Voor het meten van de cumulatieve storthoeveelheden is het programma "Sartorius"⁽¹⁴⁾ ontwikkeld dat de waarde op de display van de weegschaal steeds (met een bepaald tijdsinterval) uitleest in de computer.

Dit tijdsinterval mag niet te groot zijn omdat dan 'informatie' verloren gaat. Ook mag het tijdsinterval niet te klein worden omdat dan ook 'ruis' gemeten wordt. Als het materiaal op de weegschaal valt zal namelijk niet direct het juiste gewicht weergegeven/gemeten worden. Voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm wordt (pas) na ca. 0,7 seconde het 'juiste' stortgewicht weergegeven/gemeten. Er wordt dan ook gekozen om het stortgewicht steeds met een tijdsinterval van 1 seconde uit te lezen.

Werkwijze

(1) De afgewogen hoeveelheid – 16 kg – stortmateriaal wordt op het laaddek aangebracht. (2) Vervolgens wordt de weegschaal, met daarop de 'lege' opvangbak, op nul gezet en het computerprogramma geactiveerd. (3) Het laaddek wordt nu met een bepaalde schuifsnelheid leeg geschoven terwijl het gewicht op de weegschaal steeds uitgelezen wordt. Ook de schuiftijd wordt gemeten, om achteraf de schuifsnelheid te kunnen bepalen.

¹⁴ Geschreven in de ontwikkelomgeving TestPoint© door A. D. Schuit (Technische Universiteit Delft, sectie Gezondheidstechniek)

7.2 PROEFSERIE B: (STATIONAIRE) STORTPROEVEN OP EEN VLAKKE BODEM

Naast het bresgedrag van het stortmateriaal is het ook belangrijk te weten hoe, en met welke spreiding, het materiaal op de bodem terecht komt. Een en ander is bepaald aan de hand van stationaire stortproeven op een vlakke bodem.

Doe1

Het doel van deze proevenserie is dan ook

“het analyseren van het val- en bodemgedrag van het stortmateriaal aan de hand van waarnemingen van stortproeven en het karakteriseren van het stortresultaat op een vlakke bodem door middel van het meten van de hoogte, de verplaatsing en spreiding van het stortprofiel”.

Parameters

Er wordt gevarieerd in steendiameter, waterdiepte en eenmalig in schuifsnellheid volgens onderstaand overzicht.

Tabel 7.2 Overzicht experimenten serie B.

Serie nr	D _{n50} [cm]	h [cm]	V _s [mm/s]
B.1	1,71	120	0,40
B.2	1,71	120	0,65
B.3	1,71	120	0,90
B.4	0,82	120	0,65
B.5	1,71	60	0,65
B.6	0,82	60	0,65
B.7	1,71	30	0,65
B.8	0,82	30	0,65

Vanwege de tijdsduur van één experiment wordt dit niet herhaald.

Opstelling

Voor de stortproeven wordt gebruik gemaakt van een waterbak met afmetingen $l \times b \times h = 2,5 \times 2,5 \times 2,0 \text{ m}^3$. De modelstortter wordt onder een ‘brug’, ca. 120 cm boven de bodem van de bak, gepositioneerd. Deze ‘brug’ kan zijdelings over de bak ‘gereden’ worden. De bodemplaat van de waterbak is voorzien van een zwart tapijt met daarop een schaalverdeling in de vorm van cirkels met stralen variërend van 10 tot 100 cm. Zie ook Figuur 7.2 en Figuur 7.3.



Figuur 7.2 Opstelling voor de (stationaire) stortproeven op een vlakke bodem.

De verschillende stortdieptes (zie Tabel 7.2) worden gecreëerd door de bodem steeds te ‘verhogen’. Hiervoor worden kubussen uit [BISSCHOP, 2002] gebruikt met afmetingen $l \times b \times h = 15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$.

Met het oog op de stortproeven (onder water) ondergaat de modelstorter een laatste ‘aanpassing’. Ter hoogte van de stortlijn wordt een plankje loodrecht onder het laaddek bevestigd. Deze moet de zijkant/wand van het stortschip voorstellen en er voor zorgen dat het materiaal aan het begin van het valproces niet richting het schip kan vallen.

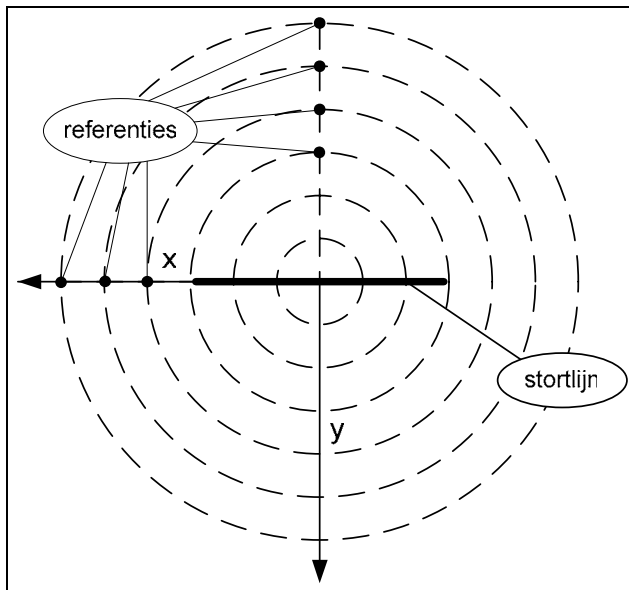
Meetmethode

Metingen aan het stortprofiel – verplaatsing (afzet) en spreiding – vinden plaats door middel van foto’s van het bovenaanzicht van het stortprofiel. Met behulp van het programma “L&C Scan XY”⁽¹⁵⁾ kunnen de posities van (willekeurige) punten op de foto bepaald worden. Voorwaarde is wel dat er twee referentiepunten met bekende onderlinge afstand mee gefotografeerd worden.

De positie van de stortlijn moet ook bekend zijn. Tijdens de stationaire stortproeven wordt de stortlijn van de modelstorter steeds boven het nulpunt van het assenstelsel gepositioneerd.

Een en ander is weergegeven in de onderstaande figuur

¹⁵ Geschreven door A.M. den Toom (Technische Universiteit Delft, Laboratorium voor Vloeistofmechanica)



Figuur 7.3 Het assenstelsel, de stortlijn en de referentiepunten.

Het stortprofiel zelf wordt gekarakteriseerd aan de hand van hoogtelijnen. Deze worden bepaald aan de hand van foto's van het stortprofiel met het waterniveau, dat steeds in stapjes van 1 cm wordt verlaagd. De hoogtelijnen, die de grens tussen het water en de stenen uit het stortprofiel weergeven, worden weer 'getekend' met behulp van "L&C Scan XY".

Werkwijze

(1) De stenen worden op het laaddek aangebracht, de schuifstorter wordt gepositioneerd en de bak wordt gevuld met water, waarbij het laaddek zich ca. 1 cm boven de waterlijn bevindt. (2) Vervolgens worden de stenen in het water gestort, waarbij het stortproces (in sommige gevallen) wordt vastgelegd op video. Ook wordt de schuiftijd weer gemeten. (3) Aan het eind van het stortproces wordt de waterbak (langzaam) geleegd. Vanaf het moment dat de eerste stenen van het stortprofiel uit het water steken worden de hoogtelijnen bepaald.

7.3 PROEFSERIE C: AANBRENGEN VAN STEENBESTORTINGEN OP EEN VLAKKE BODEM

Na de analyse van het bres-, val- en bodemgedrag kunnen steenbestortingen van ‘dunne’ maar gelijkmatige dikte op een vlakke bodem aangebracht worden. Hierbij is de werkmethode gebruikt waarbij het stortschip steeds discreet wordt verhaald, zie Bijlage C.2.

Doe1

Het doel van deze proevenserie is dan ook

“het analyseren van (de gelijkmatigheid van) het stortresultaat van ‘dunne’ bestortingslagen op een vlakke bodem middels een (kwalitatieve) vergelijking van het stortresultaat bij verschillende uitvoeringscondities.”

Parameters

Er wordt gevarieerd in steendiameter, waterdiepte en aantal storts volgens het onderstaande overzicht.

Tabel 7.3 Overzicht experimenten serie C.

Serie	D_{n50} [cm]	h [cm]	V_s [mm/s]	aantal storts [-]
C.1	1,71	120	0,65	4
C.2	1,71	120	0,65	5
C.3	0,82	120	0,65	8
C.4	0,82	120	0,65	9

De experimenten worden niet herhaald.

Opstelling

Dezelfde opstelling als voor de stationaire stortproeven wordt gebruikt, met dit verschil dat aan de bovenkant van de waterbak een schaalverdeling voor de horizontale positie van het stortschip wordt aangebracht. Met behulp van twee klemmetjes aan weersijden van de bak kan het stortschip op de juiste (stort)plaats gepositioneerd worden, zie onderstaande figuur.



Figuur 7.4 Positionering van het stortschip ten opzichte van de bodem.

Meetmethode

Het stortprofiel wordt in kaart gebracht door middel van hoogtelijnen die (weer) bepaald worden aan de hand van het waterniveau. Er kan dan een (globale) schatting gemaakt worden van de gelijkmatigheid van het stortprofiel.

Werkwijze

Het verschil in werkwijze, in vergelijking tot de stationaire stortproeven, is dat het schuifproces gedurende de 'stortproef' enige malen wordt stilgezet, waarna het stortschip wordt verplaatst.

7.4 PROEFSERIE D: (STATIONAIRE) STORTPROEVEN OP EEN TALUD

Deze serie is uitgevoerd ter oriëntatie op het stortproces op een talud. Er hebben dan ook geen metingen plaatsgevonden en de proefenserie is meer op te vatten als een 'pilot project'.

In de onderstaande figuur is een overzicht gegeven van de uitgevoerde (pilot) stortproeven.

Tabel 7.4 Overzicht experimenten serie D.

Serie	D_{n50} [cm]	$h_L^{(16)}$ [cm]	V_s [mm/s]
D.1	1,71	90	0,65
D.2	0,82	90	0,65
D.3	1,71	80, 100 ⁽¹⁷⁾	0,65
D.4	0,82	80, 100 ⁽¹⁸⁾	0,65

Voor wat betreft de opstelling wordt, met behulp van de kubussen uit [BISSCHOP, 2002], in de waterbak een talud van 1:3 gecreëerd, zie onderstaande figuur.



Figuur 7.5 Opstelling voor stortproeven op een talud van 1:3 met het stortresultaat van serie D.1.

¹⁶ h_L : de waterdiepte (loodrecht) onder de loslaatlijn van het stortschip.

¹⁷ De lading wordt in twee keer gestort; op verschillende posities met bijbehorende waterdiepten van 80 cm en 100 cm.

¹⁸ Idem als ⁽¹⁷⁾

8 SERIE A: BRESPROEVEN

In dit hoofdstuk worden de resultaten behandeld van de (eerste serie) experimenten die betrekking hebben op de 'eerste fase' van het stortproces – het bresgedrag van het stortmateriaal.

8.1 INLEIDING

Het bresgedrag van de stenen op het laaddek van de schuifstortter is van belang voor het uiteindelijke resultaat van een steenbestorting. Onregelmatigheden in het bresgedrag leiden tot ongelijkmatigheden in het stortprofiel.

Aan de hand van meetwaarden van de hoeveelheid overboord gezet materiaal per tijdseenheid zijn stortkarakteristieken bepaald om het bresgedrag inzichtelijk te maken. Dit is gedaan voor een zestal combinaties van steendiameter en schuifsnelheid, zie onderstaande tabel.

Tabel 8.1 Overzicht experimenten serie A.

Serie nr.	D_{n50} [cm]	V_s [mm/s]
A.1	1,71	0,40
A.2	1,71	0,65
A.3	1,71	0,90
A.4	0,82	0,40
A.5	0,82	0,65
A.6	0,82	0,90

Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

Paragraaf 8.2 handelt over de stortkarakteristiek, hoe deze is gedefinieerd en hoe ze zijn gebruikt in dit onderzoek. De theoretische benadering van het bresproces en de daaruit volgende (theoretische) stortkarakteristieken zijn beschreven in paragraaf 8.3. De toetsing van deze theoretische benadering vindt plaats in paragraaf 8.4, waarna de (on)regelmatigheid van het bresproces wordt besproken in paragraaf 8.5. In paragraaf 8.6 wordt kort besproken wat de (on)regelmatigheid is bij het aanbrengen van steenbestortingen. De conclusies ten aanzien van het bresgedrag van het stortmateriaal op het laaddek van de schuifstortter zijn tenslotte opgenomen in paragraaf 8.7.

8.2 DE STORTKARAKTERISTIEK

De stortkarakteristiek kan gedefinieerd worden als

“de (grafische) weergave (van het verloop) van de hoeveelheid gestort materiaal per tijdseenheid”.

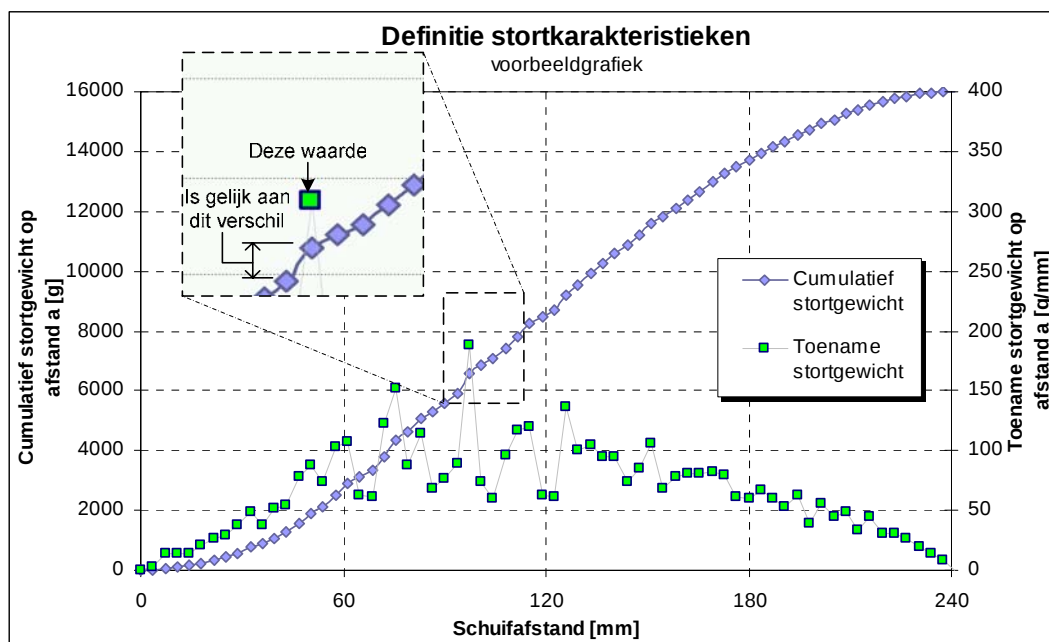
De hoeveelheid gestort materiaal kan hierbij worden uitgezet als:

- ♦ het cumulatieve stortgewicht op tijdstip t (verder ook wel “cumulatieve storkromme” genoemd), of als
- ♦ de toename in het (cumulatieve) stortgewicht tussen tijdstip t en tijdstip $t-1$.

Een en ander is ook weergegeven in Figuur 8.1.

8.2.1 Weergave stortkarakteristieken

In dit hoofdstuk worden de gemeten storthoeveelheden echter niet uitgezet tegen de storttijd (t_s), maar tegen de schuifafstand (a), zie Figuur 8.1. Dit is de afstand waarover de schuif is ingedrukt – i.e. de schuifsnelheid vermenigvuldigd met de storttijd. Dit is gedaan omdat de (gemeten) schuifsnelheid (en dus ook de storttijd) binnen een serie experimenten niet constant is. De eindpunten van de stortkarakteristieken vallen dan niet samen.



Figuur 8.1 Definitie stortkarakteristieken: het cumulatieve stortgewicht en de toename van het stortgewicht uitgezet tegen de schuifafstand.

Nota bene:

(1) De karakteristiek van het cumulatieve stortgewicht kan opgevat worden als $M(a)$, het stortgewicht als functie van de schuifafstand. De karakteristiek van de toename van het (cumulatieve) stortgewicht kan worden gezien als dM/da , de 'afgeleide' van de cumulatieve storkromme.

(2) Aangezien de toenames van het stortgewicht afhankelijk zijn van de afstand waarover de schuif tussen twee opeenvolgende metingen is verschoven, worden deze hoeveelheden genormeerd met de tussenafstand van de meetpunten (eenheid: g/mm).

8.2.2 'Discretiseren' storkarakteristieken

Eerder is al opgemerkt dat de schuifsnelheden binnen een bepaalde serie metingen niet constant is. Dit betekent dat ook het aantal meetwaarden varieert. Voor wiskundige bewerkingen aan de gemeten storthoeveelheden is het van belang dat het aantal meetpunten juist gelijk is.

Hiertoe zijn de gemeten storthoeveelheden van elke serie 'gediscretiseerd' in een gelijk aantal meetpunten met een onderlinge schuifafstand (da), gelijk aan de afstand die in 1 s wordt geschoven. Deze is dus weer afhankelijk van de (gemeten) schuifsnelheid. In de onderstaande tabel zijn de gemiddelden van de gemeten schuifsnelheden uitgezet.

Tabel 8.2 Gemiddeld gemeten schuifsnelheid van de verschillende series.

Serie nr.	D_{n50} [cm]	V_s [mm/s]	$V_{s,gem}$ [mm/s]
A.1	1,71	0,40	0,40
A.2	1,71	0,65	0,66
A.3	1,71	0,90	0,90
A.4	0,82	0,40	0,38
A.5	0,82	0,65	0,64
A.6	0,82	0,90	0,90

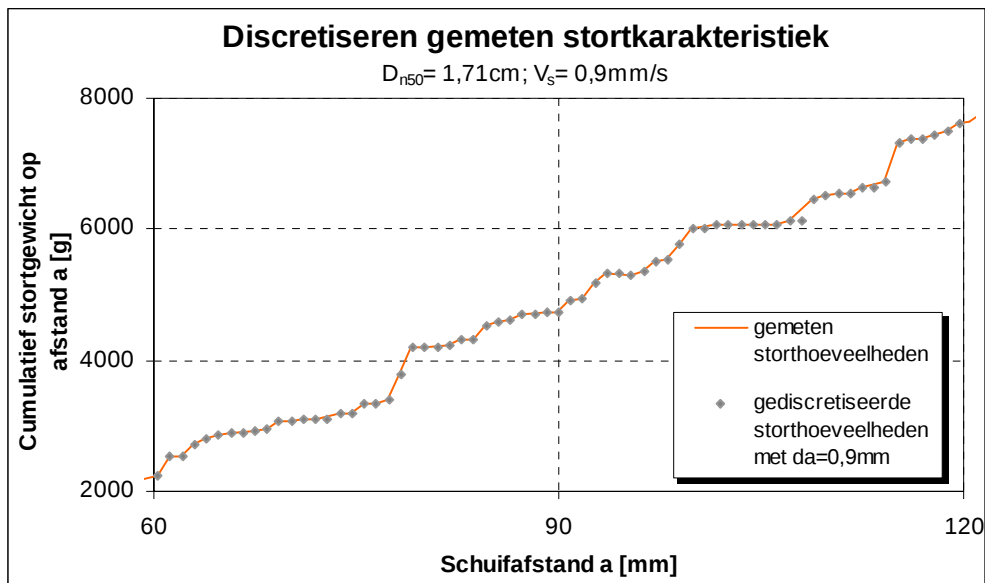
Afhankelijk van de (ingestelde) schuifsnelheid worden de storkarakteristieken nu 'gediscretiseerd' door meetpunten met een tussenafstand van achtereenvolgens:

- $V_s = 0,4 \text{ mm/s}$: $da = 0,4 \text{ mm}$,
- $V_s = 0,65 \text{ mm/s}$: $da = 0,6 \text{ mm}$, en
- $V_s = 0,9 \text{ mm/s}$: $da = 0,9 \text{ mm}$.

Nota bene:

De keuze voor deze tussenafstanden van de meetpunten heeft als belangrijke voordeel dat alle storkarakteristieken met een tussenafstand van $da = 3,6 \text{ mm}$ weergegeven kunnen worden. Er is dan steeds een gelijk aantal meetpunten.

In de onderstaande figuur is een 'gediscretiseerde' storkarakteristiek weergegeven.

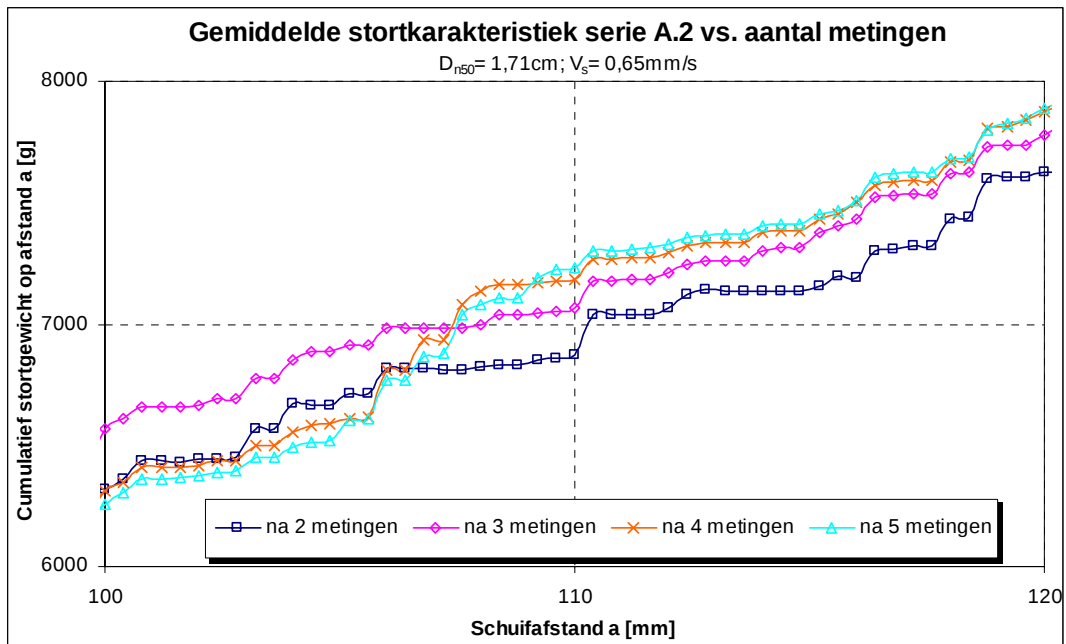


Figuur 8.2 Discretiseren van de gemeten storthoeveelheden (ingezoomed).

8.2.3 Gemiddelde stortkarakteristiek

Aangezien het aantal metingen van het stortgewicht binnen een serie bresproeven gelijk is, kan voor elke serie, per schuifstand, een gemiddelde storthoeveelheid bepaald worden. Al deze gemiddelde storthoeveelheden vormen dan de gemiddelde stortkarakteristiek van een serie.

Van de gemiddelde stortkarakteristiek wordt verondersteld dat het een representatief beeld geeft van het bresgedrag van de stenen. De vraag is alleen of het vijftal herhalingen hiervoor voldoende is. Om dit te kunnen beoordelen is de gemiddelde stortkarakteristiek bepaald na 2, 3, 4 en 5 metingen. In de onderstaande figuur is dit gedaan voor de serie A.2.

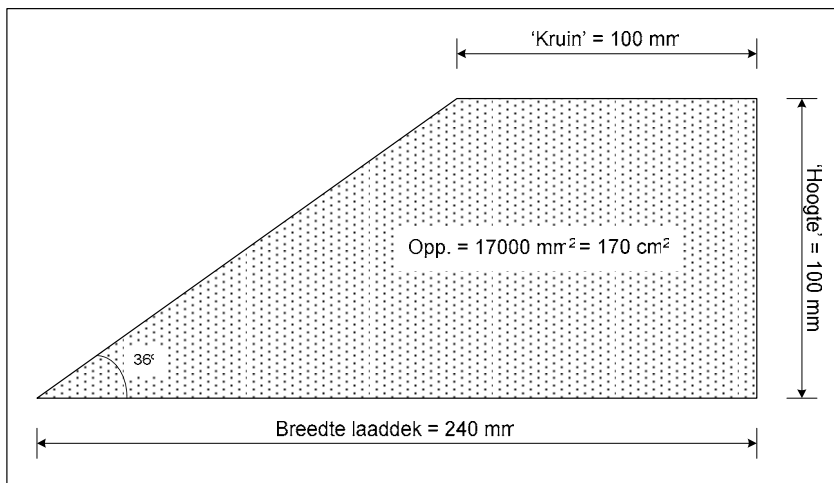


Figuur 8.3 Gemiddelde stortkarakteristiek serie A.2 na 2, 3, 4 en 5 metingen (ingezoomd).

Uit de figuur blijkt dat de gemiddelden na vier en na vijf metingen redelijk samenvallen. Dit wordt bij de overige series ook geconstateerd. Verder is het zo dat het verhogen van het aantal metingen niet per definitie een nauwkeuriger gemiddelde geeft. De stenen zullen namelijk niet altijd 'hetzelfde' op het laaddek liggen. Verondersteld wordt dan ook dat het aantal herhalingen – vijf – voldoende is om een betrouwbaar gemiddelde te bepalen.

8.3 THEORETISCHE BENADERING VAN HET BRESGEDRAG

Het uitgangspunt voor de theoretische benadering van het bresgedrag (van het stortmateriaal) wordt gevormd door de doorsnede van de lading over de breedte van het laaddek. Deze kan geschematiseerd worden als gepresenteerd in Figuur 8.4.



Figuur 8.4 Geschematiseerde doorsnede van de lading over de breedte van het laaddek.

De hoek van natuurlijk talud van de lading bedraagt 36° . Dit is een aannemelijke waarde.

De totale lading is, uitgaande van

- ♦ $\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$,
- ♦ $L_{\text{dek}} = 56 \text{ cm}$, en
- ♦ $n=0,4$ [BosMA, 2002]

bepaald op ca. 15,1 kg. Dit is (redelijk) in overeenstemming met de 'werkelijke' waarde van 16 kg. Wellicht is het poriëngehalte wat aan de hoge kant. Bij een poriëngehalte van $n=0,37$ is de totale lading namelijk ca. 15,9 kg.

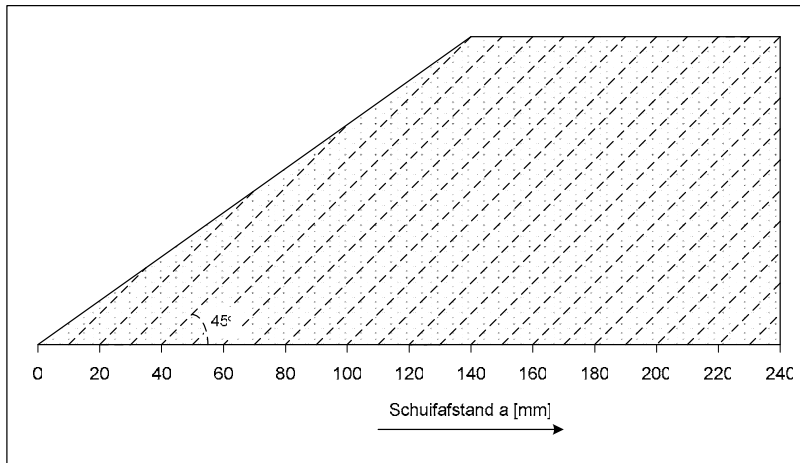
Het theoretische bresgedrag wordt nu bepaald aan de hand van een tweetal benaderingen.

8.3.1 1^e benadering: geen samendrukking van het stortmateriaal

Bij deze benadering wordt er van uitgegaan dat de lading stortmateriaal onvervormd op het laaddek wordt vooruitgeschoven.

Wel zullen de stenen afschuiven over een hoek die groter is dan de hoek van natuurlijk talud. Naast de hoek van natuurlijk talud is er namelijk nog de zogenaamde "rusthoek". Dit is de maximale hoek die een onbelast en stabiel talud kan hebben ten opzichte van een horizontaal vlak. Uit [CUR/RWS 169, 1994] volgt dat deze ca. 10° steiler kan zijn dan de hoek van natuurlijk talud (of hoek van inwendige wrijving).

Er wordt dan ook van uitgegaan dat het stortmateriaal steeds afschuift onder een hoek van 45° , zie onderstaande figuur.



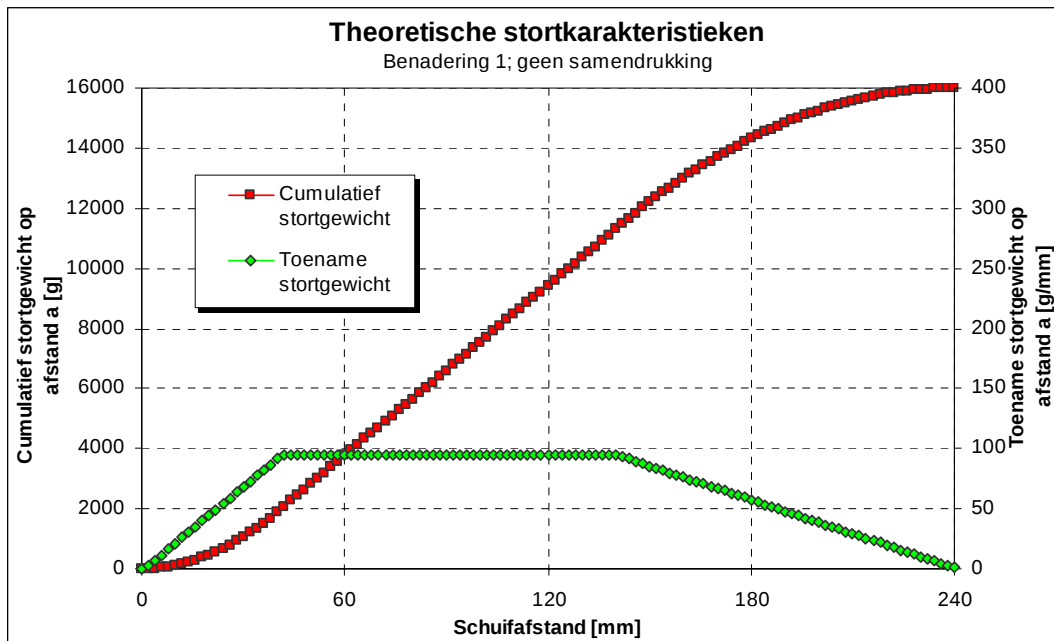
Figuur 8.5 (Af)schuifvlakken benadering 1: lading onvervormd.

De storthoeveelheden worden nu gerelateerd aan de oppervlakte van de (voorgaande) afschuifvlakken. Op (schuif)afstand a is/wordt namelijk een hoeveelheid materiaal gestort die gelijk is aan:

$$dM = \frac{A_{sv}}{A_{dek}} \cdot 16000 \quad (8.1)$$

Waarin:	dM	:	toename stortgewicht	[kg]
	A_{sv}	:	oppervlak (voorgaand) schuifvlak	[m ²]
	A_{dek}	:	oppervlak van de doorsnede van de lading	[m ²]

In de onderstaande figuur zijn de met (3.1) berekende waarden in theoretische stortkarakteristieken weergegeven.

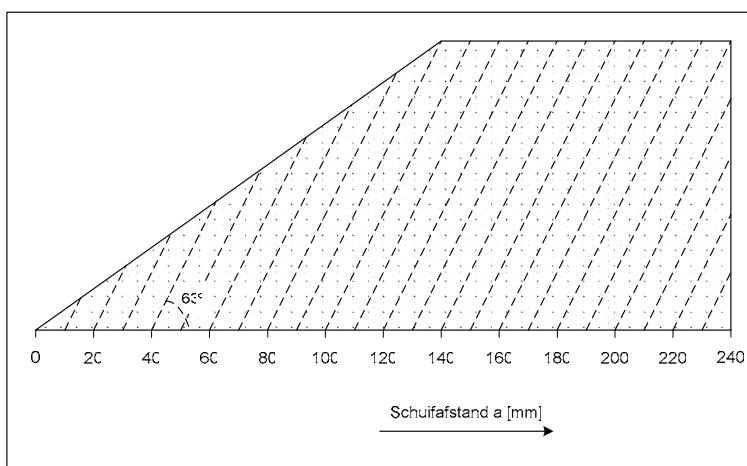


Figuur 8.6 Theoretische stortkarakteristieken benadering 1: lading onvervormd.

8.3.2 2^e benadering: wel samendrukking van het stortmateriaal

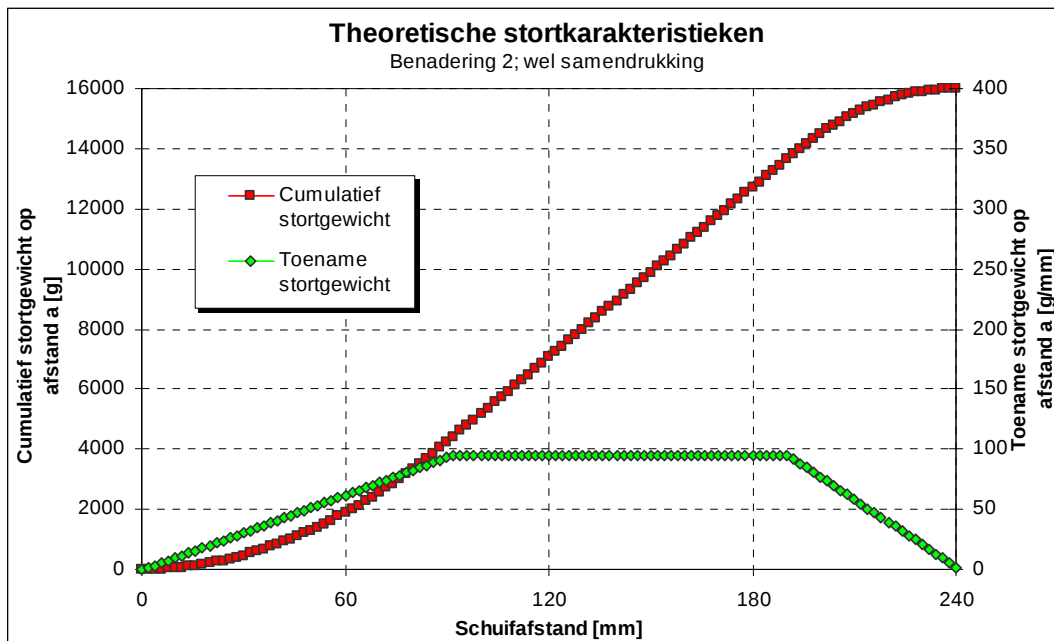
Bij deze benadering wordt verondersteld dat de stenen tijdens het schuifproces worden ingedrukt. Hierdoor krijgt het valfront meer samenhang. Aan de stortzijde bouwt de helling van de lading zich dan op, waardoor de stenen later en met een steilere helling (van het valfront) afschuiven.

In [CREGTEN, 1995] wordt opgemerkt dat de helling van het valfront tussen de 60° en 70° ligt. Voor deze benadering wordt een helling aangenomen van 1:2. Dit is een makkelijke rekenwaarde die overeenkomt met een hellingshoek van $63,4^\circ$. Zie ook onderstaande figuur.



Figuur 8.7 (Af)schuifvlakken benadering 2 lading wordt ingedrukt.

De theoretische stortkarakteristieken zijn nu als volgt.



Figuur 8.8 Theoretische stortkarakteristieken benadering 2: lading wordt ingedrukt.

8.3.3 Verklaring vorm/verloop van benaderde stortkarakteristieken

De vorm en het verloop van de theoretische stortkarakteristieken kunnen worden verklaard door van een drietal fasen uit te gaan:

A. *Beginfase*

Aan het begin van het bresproces neemt de valhoogte van het stortmateriaal toe. Dit vanwege de hellingshoek van de lading en het afschuiven onder een hoek die groter is dan de hoek van natuurlijk talud. De (toename in de) hoeveelheid gestort materiaal wordt dan steeds groter.

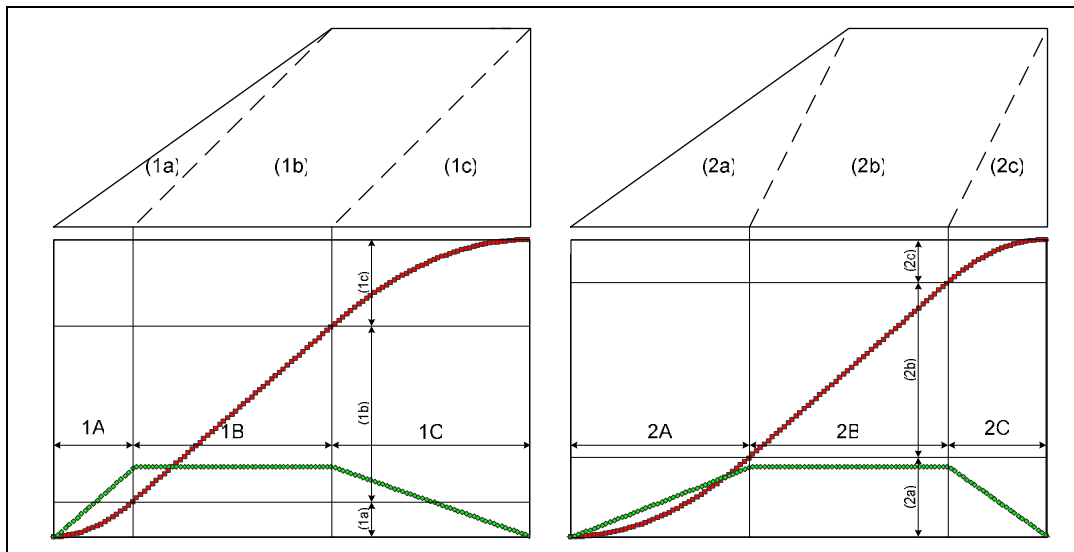
B. *Tussenfase*

Na enige tijd beginnen de stenen over de totale hoogte van de lading af te schuiven. Gedurende deze fase is de hoeveelheid gestort materiaal per mm ingedrukte schuif constant.

C. *Eindfase*

Aan het eind van het bresproces neemt de valhoogte (van het achterblijvende materiaal) weer af, waardoor de (toename in de) storthoeveelheid afneemt.

Het begin- en eindpunt van de drie fasen is afhankelijk van de vorm van de lading en de afschuifhoek van de stenen. In de onderstaande figuur is dit voor beide benaderingen geschetst.



Figuur 8.9 De vorm en het verloop van de theoretische stortkarakteristieken worden bepaald door de doorsnede van de lading en de afschuifhoek van de stenen.

8.4 TOETSEN THEORETISCHE BENADERING: ALGEMENE BESCHOUWING VAN DE STORTKARAKTERISTIEKEN

In deze paragraaf worden de theoretisch benaderde stortkarakteristieken getoetst aan de hand van de metingen (en waarnemingen) van het bresgedrag van het stortmateriaal.

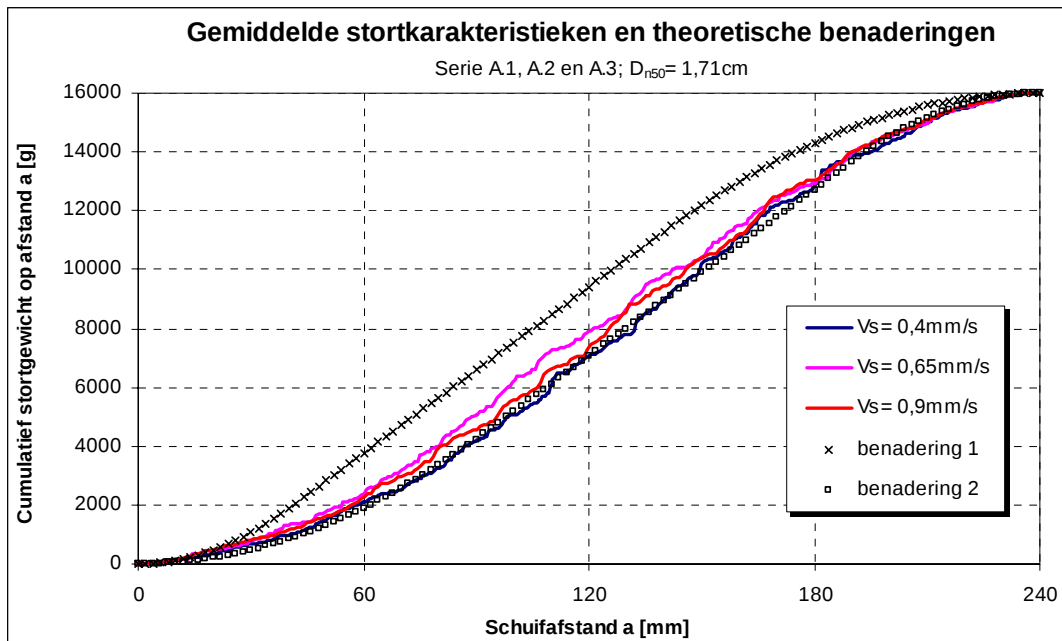
Allereerst moeten de vorm en het verloop van de theoretisch benaderde stortkarakteristieken 'overeenkomen' met de gemeten waarden van het stortgewicht. Dit om het uitgangspunt van de benadering – de doorsnede van de belading – te verifiëren.

In tweede instantie moet de 'juistheid' van de benadering vastgesteld worden. Ofwel, hoe goed geeft de benadering het gemeten bresgedrag weer voor verschillende combinaties van schuifsnelheid en steendiameter.

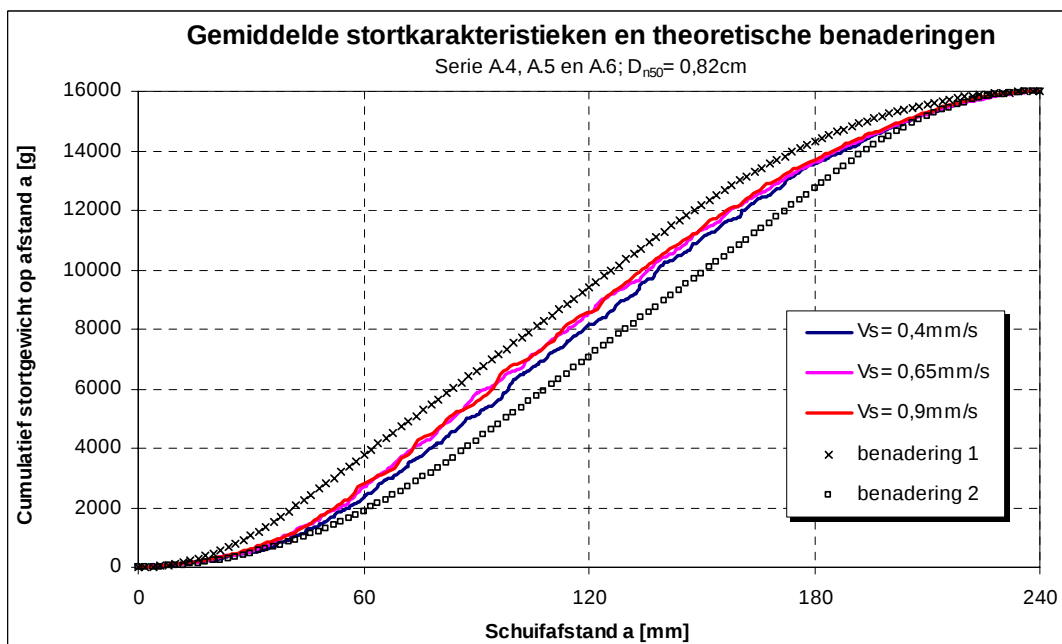
8.4.1 Vorm en verloop van de theoretische stortkarakteristieken

De vorm en het verloop van de theoretisch bepaalde stortkarakteristieken worden getoetst aan de hand van de gemeten waarden van het cumulatieve stortgewicht.

In de onderstaande figuren zijn de gemiddelde stortkarakteristieken voor de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm en voor de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm weergegeven, samen met de twee theoretische benaderingen.



Figuur 8.10 Gemiddelde stortkarakteristieken voor de sortering met $D_{r50} = 1,71\text{ cm}$ in vergelijking met de theoretische benaderingen.



Figuur 8.11 Gemiddelde stortkarakteristieken voor de sortering met $D_{r50} = 0,82\text{ cm}$ in vergelijking met de theoretische benaderingen.

Uit Figuur 8.10 en Figuur 8.11 blijkt dat de vorm van de benaderde kromme voor de cumulatieve stortgewichten goed overeenkomt met die van de gemeten waarden.

Voor beide sorteringen is de helling van de “tussenfase” – lineaire gedeelte – van de benaderde krommes in overeenstemming met die van de gemeten stortkarakteristieken. Ook de vorm aan het begin en eind van het bresproces vertoont overeenkomsten met de theoretische benaderingen. Vooral in Figuur 8.10 is dit goed te zien.

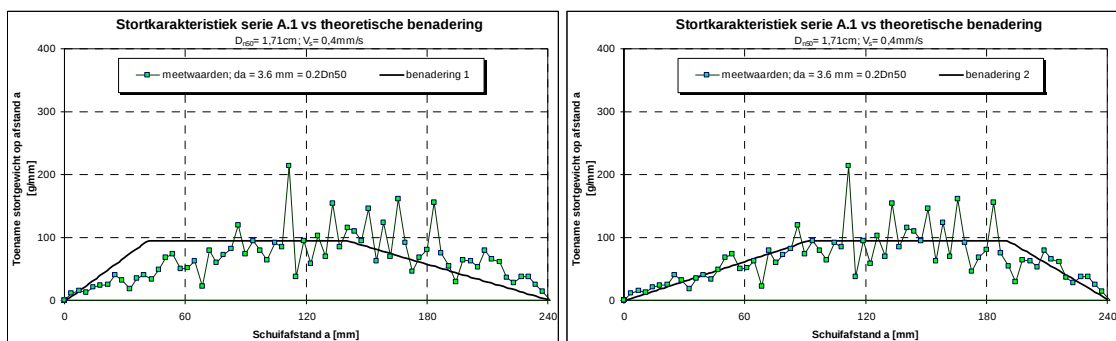
Het ‘grillige’ karakter van de gemeten stortkarakteristieken – zeker voor de sortering met $D_{n50} = 1,71\text{ cm}$ en in mindere mate voor het kleinere materiaal met $D_{n50} = 0,82\text{ cm}$ – laat wel zien dat er duidelijk afwisselende hoeveelheden materiaal afschuiven. Op deze onregelmatigheid wordt later in dit hoofdstuk uitvoerig teruggekomen.

Geconcludeerd kan worden dat de ‘vorm’ en het ‘verloop’ van de theoretische stortkarakteristieken het bresgedrag van het stortmateriaal goed benaderen.

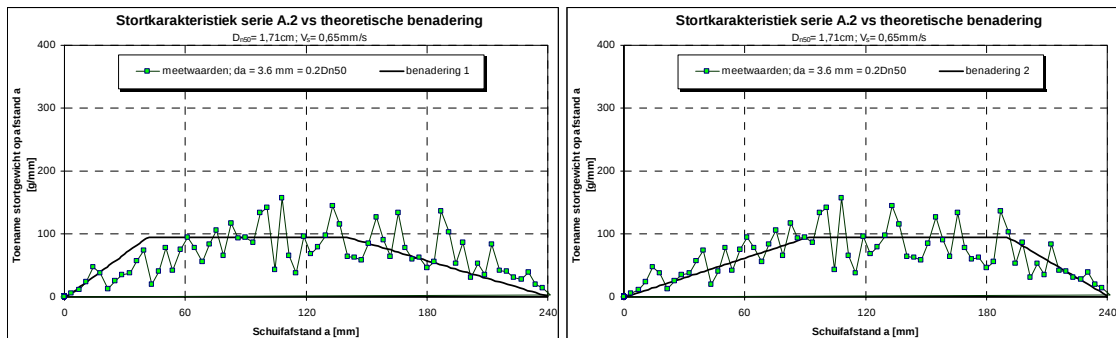
8.4.2 ‘Juistheid’ van de theoretische benadering

Hoe ‘goed’ de theoretische stortkarakteristiek bij de gemeten storthoeveelheden past wordt geverifieerd aan de hand van de toenames van het stortgewicht. De stortkarakteristiek wordt hiervoor wat “gefilterd”. De tussenafstand van de meetpunten bij opeenvolgende schuifafstanden bedraagt nu (in alle gevallen) 3,6 mm. Dit is gedaan omdat de stortkarakteristiek anders een wirwar van punten is en de vorm ervan niet terug te vinden is.

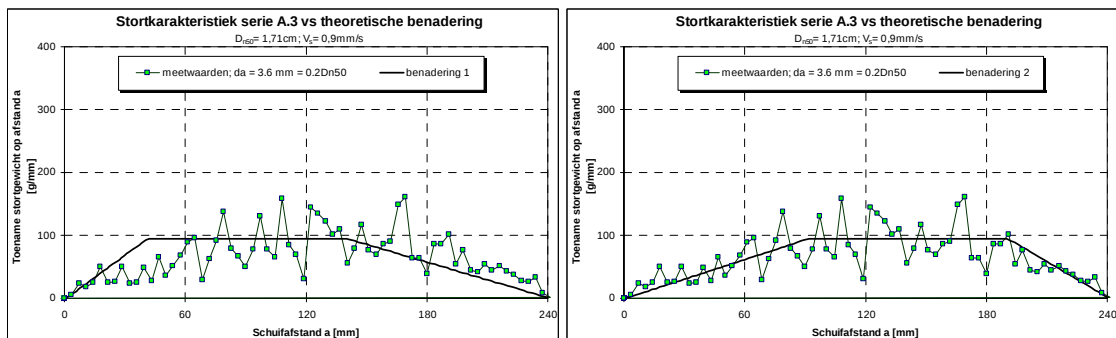
In Figuur 8.12, Figuur 8.13 en Figuur 8.14 zijn de toenames van het stortgewicht voor de sortering met $D_{n50} = 1,71\text{ cm}$ uitgezet. De theoretische stortkarakteristieken volgens de 1^e en 2^e benadering zijn daar steeds doorheen geplot.



Figuur 8.12 Toename stortgewicht serie A.1 vs benadering 1 (links) en benadering 2 (rechts).



Figuur 8.13 Toename stortgewicht serie A.2 vs benadering 1 (links) en benadering 2 (rechts).



Figuur 8.14 Toename stortgewicht serie A.3 vs benadering 1 (links) en benadering 2 (rechts).

De gemeten storthoeveelheden voor de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm worden het best benaderd door de theoretische karakteristiek volgens de tweede benadering. Dit blijkt duidelijk uit de bovenstaande figuren. Klaarblijkelijk wordt het stortmateriaal dus tijdens het schuifproces ingedrukt; dit is ook duidelijk waargenomen tijdens de experimenten.

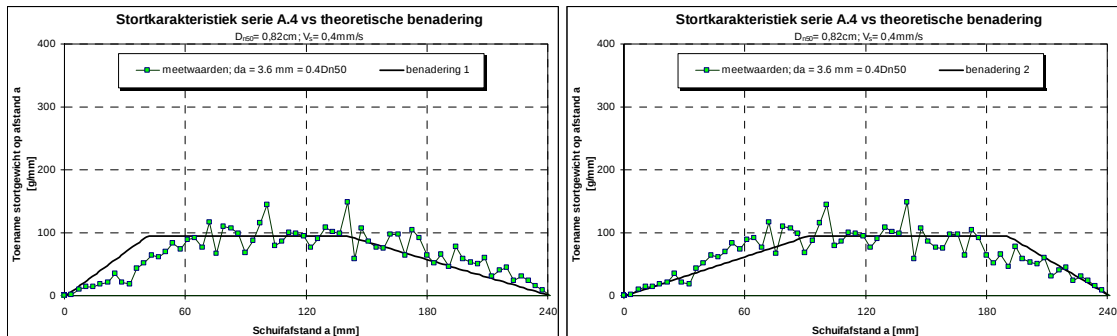
Wat niet direct blijkt, is welke invloed de schuifsnelheid heeft op het bresgedrag van het stortmateriaal. Op het eerste gezicht lijkt de kromme volgens de tweede benadering de storthoeveelheden in alle drie de gevallen - $V_s = 0,4$ mm/s, $V_s = 0,65$ mm/s en $V_s = 0,9$ mm/s - 'goed' te benaderen.

Verondersteld wordt echter dat, door het vergroten van de schuifsnelheid, de stenen aan het valfront sneller overboord geduwd worden, en dus het proces van indrukken verstoren. Immers, als 'onderaan' de helling een steen verdwijnt zullen de stenen 'daarboven' ook afschuiven. Het stortmateriaal zal dan met een flauwere helling afschuiven. Dit zou betekenen dat de meetpunten steeds meer richting de lijn van de eerste benadering moeten gaan 'bewegen'. Uit de figuur met het cumulatieve stortgewicht - Figuur 8.10 - blijkt dit ook het geval te zijn. Het stortmateriaal heeft dus bij een grotere schuifsnelheid, minder - of te weinig - tijd om ingedrukt te worden en schuift dus met een flauwere helling af.

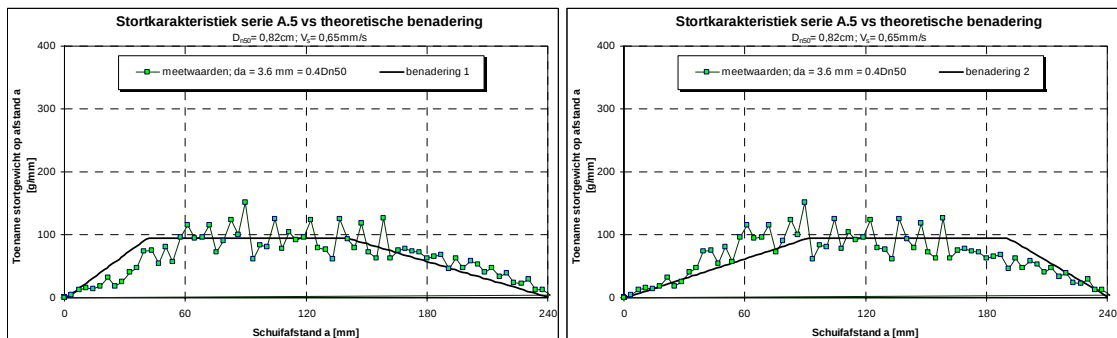
Verder wordt verondersteld dat het bresgedrag 'regelmatiser' wordt naarmate de afmetingen van het te storten materiaal afnemen. Deze regelmatigheid wordt voornamelijk toegeschreven

aan het feit dat het materiaal eerder en onder een flauwere helling afschuift. Impliciet betekent dit dat de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm dus in mindere mate wordt ingedrukt.

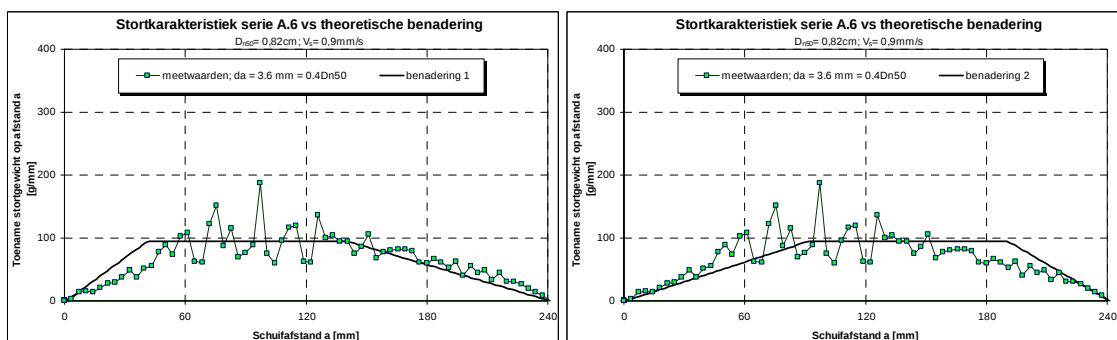
Of dit ook zo is zou moeten blijken uit de volgende figuren:



Figuur 8.15 Toename stortgewicht serie A.4 vs benadering 1 (links) en benadering 2 (rechts).



Figuur 8.16 Toename stortgewicht serie A.5 vs benadering 1 (links) en benadering 2 (rechts).



Figuur 8.17 Toename stortgewicht serie A.6 vs benadering 1 (links) en benadering 2 (rechts).

Uit Figuur 8.15, Figuur 8.16 en Figuur 8.17 blijkt dat de gemeten storthoeveelheden van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm minder 'goed' overeenkomen met de karakteristiek volgens de tweede benadering. Dit is in overeenstemming met de veronderstelling dat het kleine materiaal in mindere mate wordt ingedrukt.

Wat wel opvalt, is dat de (toename van de) storthoeveelheden aan het begin van het schuifproces in alle drie de gevallen goed wordt benaderd door de karakteristiek volgens benadering 2. Na een schuifafstand van ca. 30 mm gaan de meetpunten pas van deze lijn afwijken. Aan het begin van het schuifproces wordt de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm blijkbaar relatief meer ingedrukt.

Dit kan verklaard worden door te veronderstellen dat de lading bij aanvang van het stortproces verder ingedrukt kan worden, omdat

- er, gezien de geringe valhoogte, relatief weinig stenen overboord geschoven worden, en omdat
- de stenen, vanwege de ‘rand’ van het laaddek, minder dicht gepakt zijn.

Nota bene:

Het bovengenoemde verschijnsel is niet, of in mindere mate, waargenomen bij de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm. Blijkbaar hebben deze stenen later in het schuifproces ook nog voldoende tijd om zichzelf ‘steil’ op te bouwen. Dit lijkt ook logisch gezien het feit dat de stenen bij het valfront ca. $(1,71 / 0,82 =)$ twee keer zo lang blijven liggen.

8.5 DE (ON)REGELMATIGHEID VAN HET BRESPROCES

Tijdens het indrukken van de schuif is er een tweetal onregelmatigheden in het bresgedrag van de stenen op het laaddek van de schuifstortter:

1. Het bresproces heeft een begin- en eindonregelmatigheid, die worden toegeschreven aan de vorm van de lading en de hoek van het valfront (ϕ_f).
2. De onregelmatigheid in het (feitelijke) bresen komt voort uit het afwisselend afschuiven van het stortmateriaal.

De laatste onregelmatigheid kan worden gekarakteriseerd als de spreiding van de gemeten storthoeveelheden rondom de theoretische lijn. Deze spreiding zou dan kleiner moeten worden naarmate de steendiameter afneemt en/of de schuifsnelheid toeneemt – het bresgedrag wordt dan ‘regelmatiser’.

Verondersteld wordt echter dat deze ‘regelmatiser’ ook samenhangt met hoek (ϕ_f) waaronder het materiaal afschuift. Als stenen eerder en dus onder een flauwere helling afschuiven, zou het bresproces regelmatiser moeten verlopen.

8.5.1 Begin- en eindonregelmatigheid van het bresproces

De begin- en eindonregelmatigheid van het bresproces kan gekarakteriseerd worden door de bres- of afschuifhoek (ϕ_f) waaronder het materiaal afschuift. De karakteristieke afschuifhoek is dan die waarde voor ϕ_f waarvan de (bijbehorende) theoretische lijn het beste bij de meetpunten past, de zogenaamde “best fit”.

Deze “best fit” is bepaald aan de hand van de meetwaarden van het cumulatieve stortgewicht met behulp van de “kleinste kwadraten methode”. De “best fit” is dan die theoretische lijn –

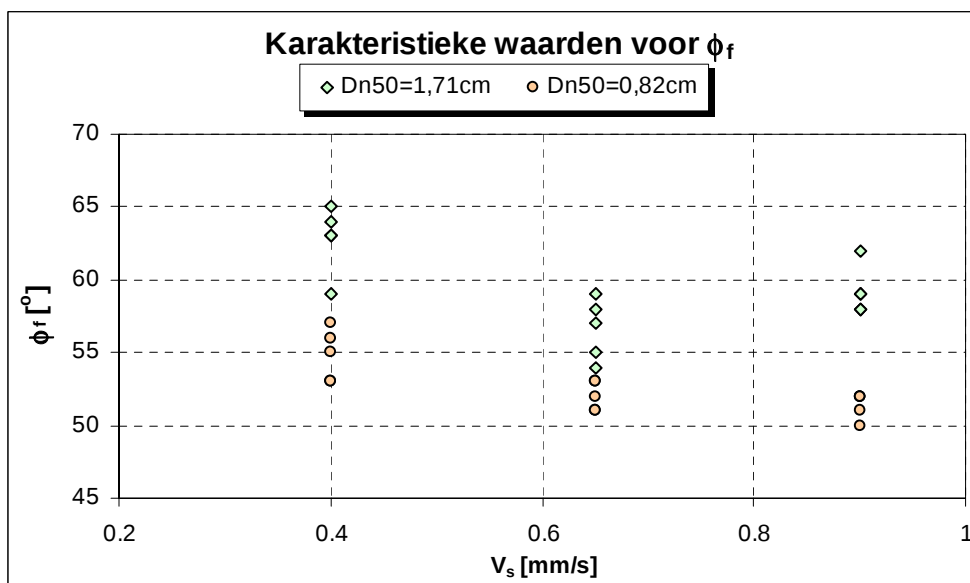
met bijbehorende ϕ_f – waarvan de gemiddelde som van de kwadraten van het verschil tussen de meetwaarde en theoretische waarde minimaal is.

Of in formulevorm: die waarde voor ϕ_f waarvoor geldt:

$$\min \left(\frac{\sum_k (M(a) - M_{ben}(\phi_f, a))^2}{k} \right)$$

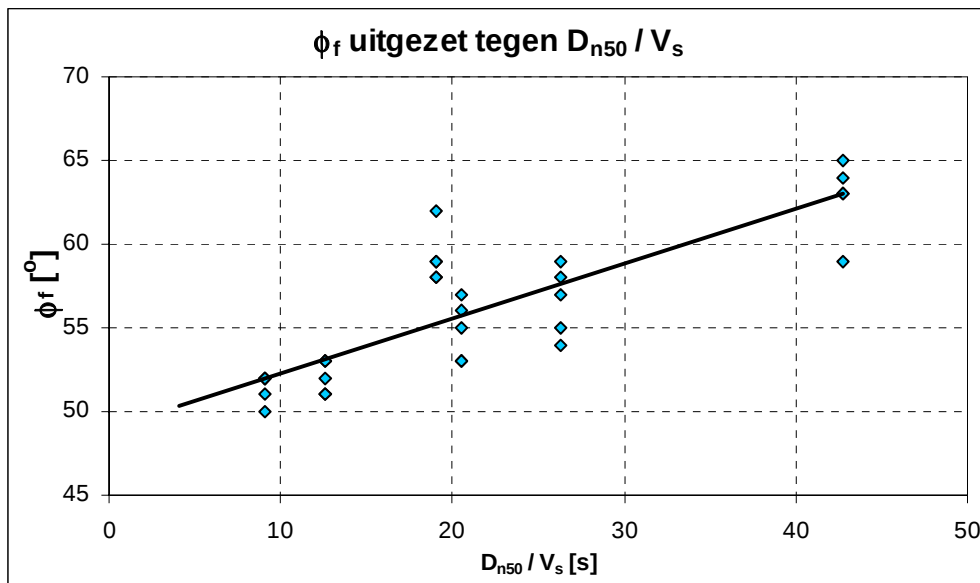
waarin: $M(a)$: gemeten (cumulatieve) stortgewicht op schuifafstand a [kg]
 $M_{ben}(\phi_f, a)$: theoretische (cumulatieve) stortgewicht op schuifafstand a [kg]
 bij een afschuifhoek ϕ_f
 k : aantal meetwaarden [-]

Verondersteld wordt dat (de karakteristieke) ϕ_f groter wordt naarmate de schuifsnelheid afneemt en/of de steendiameter toeneemt. Dit blijkt ook uit de onderstaande figuur waarin de karakteristieke waarden voor ϕ_f voor elke meting uit serie A.1 tot en met A.6 zijn uitgezet tegen de schuifsnelheid.



Figuur 8.18 Karakteristieke breshoek voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm bij verschillende schuifsnelheden.

Duidelijker wordt het wanneer ϕ_f wordt uitgezet tegen het quotiënt van de steendiameter (D_{n50}) en de schuifsnelheid (V_s), zie Figuur 8.19. D_{n50} / V_s is dan een parameter die aangeeft hoe lang een steen aan het valfront gemiddeld op het laaddek blijft liggen. Voor relatief grote waarden van D_{n50} / V_s blijven de stenen relatief lang op het laaddek liggen, waardoor ze onder grotere hoek af kunnen schuiven.



Figuur 8.19 ϕ_f uitgezet tegen D_{n50} / V_s .

Nota bene:

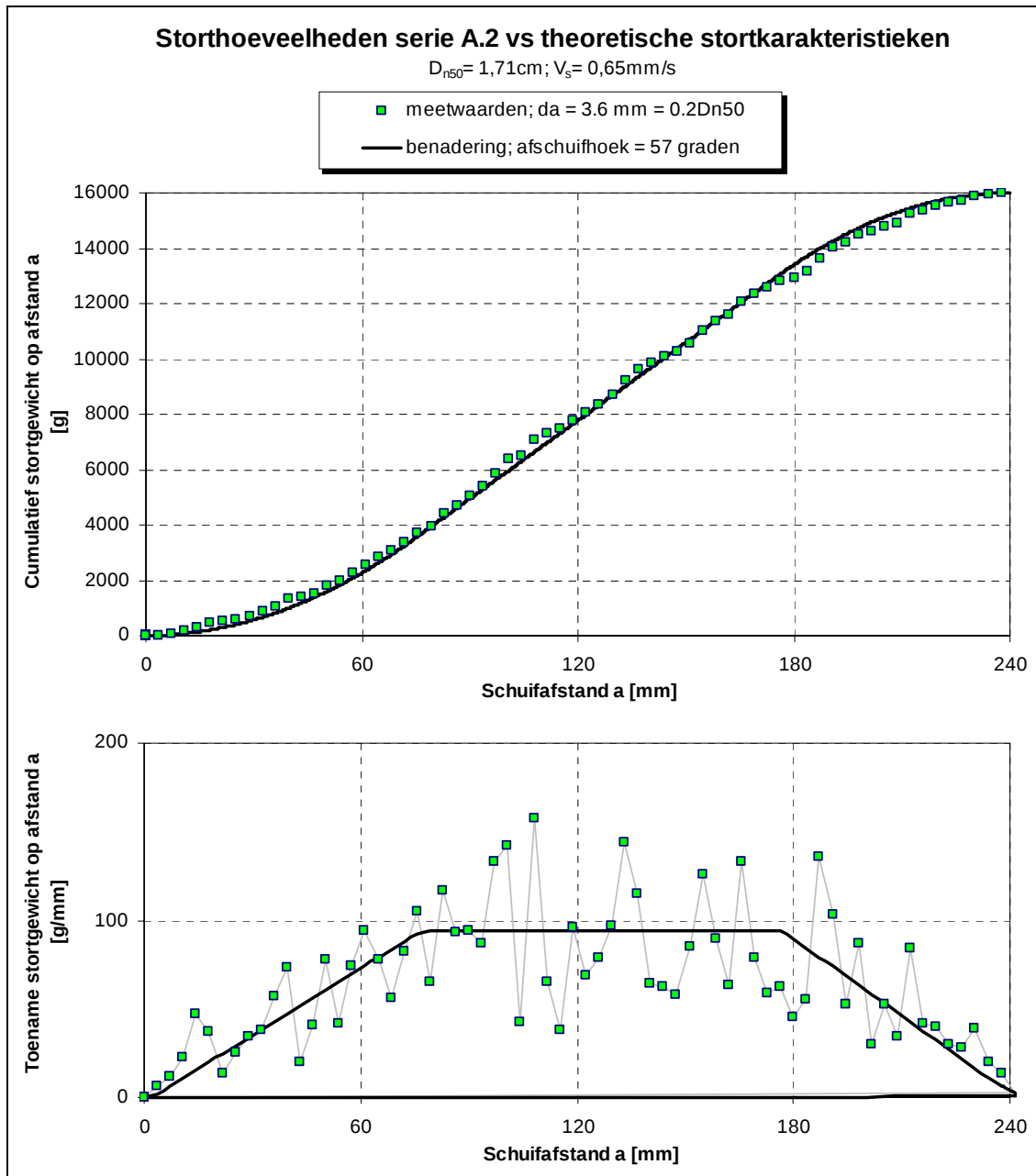
Als de 'trend' uit Figuur 8.19 wordt doorgezet voor kleine waarden van D_{n50} / V_s , dan volgt een afschuifhoek die ligt tussen 45° en 50° . Deze is, wat orde grote betreft, gelijk aan de "rusthoek" van breuksteen.

Ter illustratie zijn in Figuur 8.20 en Figuur 8.21 de storthoeveelheden uit de gemiddelde stortkarakteristieken van serie A.2 en serie A.5 vergeleken met de theoretische stortkarakteristieken volgens de "best fit" van de desbetreffende serie. De bijhorende waarden voor ϕ_f , die bepaald kunnen worden aan de hand van de "best fit" van de gemiddelde stortkarakteristiek en gelijk zijn aan het gemiddelde van de waarden uit Figuur 8.18, zijn weergegeven in de onderstaande tabel.

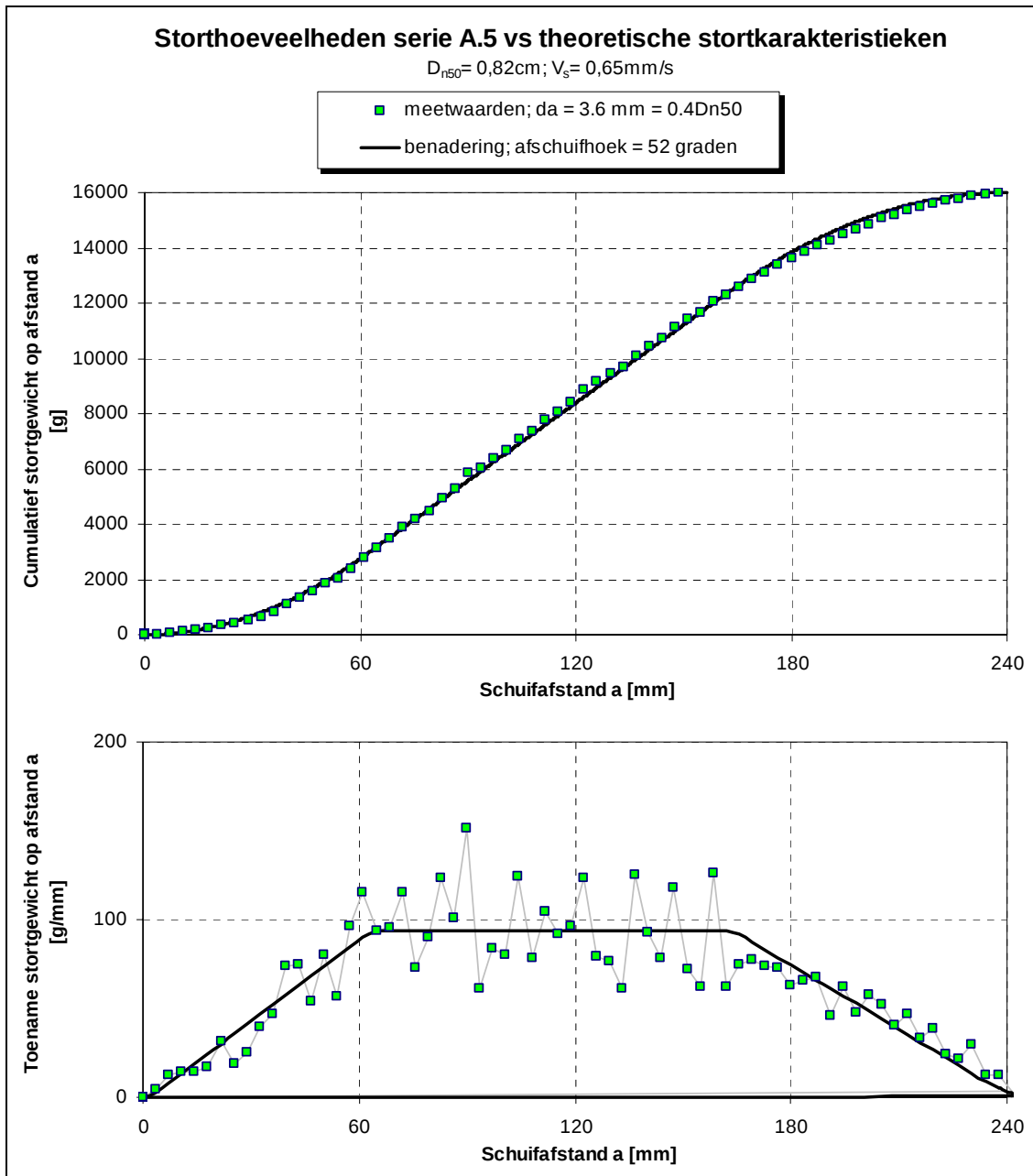
Tabel 8.3 Waarden voor ϕ_f van (de "best fit" van) de gemiddelde stortkarakteristiek.

Serie nr	D_{n50} [mm]	V_s [mm/s]	ϕ_f [°]
A.1	1,71	0,40	63
A.2	1,71	0,65	57
A.3	1,71	0,90	59
A.4	0,82	0,40	55
A.5	0,82	0,65	52
A.6	0,82	0,90	51

Voor een volledig overzicht wordt verwezen naar Bijlage H.



Figuur 8.20 Storhoeveelheden serie A.2 vs theoretische stortkarakteristieken.



Figuur 8.21 Storthoeveelheden serie A.5 vs theoretische stortkarakteristieken.

Uit de bovenstaande figuren kan geconcludeerd worden dat de theoretische benaderingen goed voldoen. Dit is vooral goed te zien bij de cumulatieve storthoeveelheden.

8.5.2 '(On)regelmatigheid' in het afschuiven van het stortmateriaal

De '(on)regelmatigheid' van het bresgedrag (in de hoeveelheden afgeschoven materiaal) kan worden gekarakteriseerd door een spreidingsgetal, dat de standaardafwijking van de verschillen tussen de gemeten en de theoretische storthoeveelheden weergeeft (eenheid: g/mm).

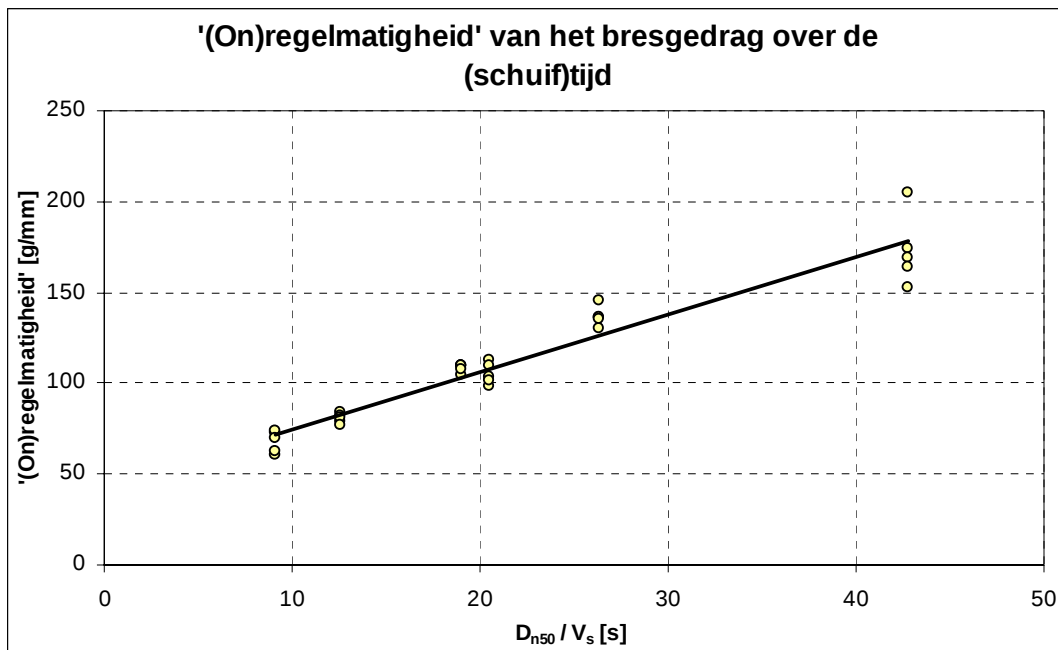
De spreidingsgetallen voor verschillende combinaties van steendiameter en schuifsnelheden kunnen onderling vergeleken worden om te onderkennen wat de invloed van de steendiameter en de schuifsnelheid op de 'regelmaat' van het bressen is. Dit is ook de reden waarom de '(on)regelmatigheid' tussen '..' is geschreven.

'(On)regelmatigheid van bresgedrag over de (schuif)tijd

Deze '(on)regelmatigheid is gedefinieerd als de (on)regelmatigheid in de hoeveelheid materiaal die, per 'tijdseenheid', onder invloed van het verplaatsten van de schuif gedurende het schuifproces overboord wordt gezet. De 'tijdseenheid' is hierbij gelijk aan de afstand waarover de schuif in 1 s wordt geschoven. Het spreidingsgetal wordt dus bepaald aan de hand van alle gemeten storthoeveelheden.

Verondersteld wordt dat zowel de schuifsnelheid als de steendiameter invloed hebben op deze '(on)regelmatigheid. (1) De schuifsnelheid is van invloed op de karakteristieke tijd tussen twee opeenvolgende bressen en is dus van invloed op de hoeveelheid gestort materiaal per 'tijdseenheid'. Hoe groter de schuifsnelheid, hoe regelmatiger het bresgedrag over de tijd waarover de schuif wordt ingedrukt. (2) De steendiameter van het stortmateriaal is van invloed op de hoeveelheid stenen die op het laaddek, en in het specifieke geval, aan het valfront aanwezig zijn. Hoe meer stenen aanwezig zijn, hoe regelmatiger (in het gewicht gestort materiaal) deze zullen afschuiven.

Of dit zo is, zou moeten blijken als de '(on)regelmatigheid' wordt uitgezet tegen D_{n50} / V_s , zie onderstaande figuur.



Figuur 8.22 '(On)regelmaticheid van bresgedrag over het (gehele) schuifproces.

Uit Figuur 8.22 kan geconcludeerd worden dat de hoeveelheid materiaal die, per 'tijdseenheid', overboord wordt gezet (inderdaad) regelmatig wordt naarmate de schuifsnellheid toeneemt en de steendiameter afneemt.

Verder kan gesteld worden dat, wanneer er meer materiaal gestort wordt, de 'onregelmaticheid' ervan ook toeneemt; wel weer afhankelijk van de steendiameter en schuifsnellheid uiteraard. Dit zou betekenen dat de '(on)regelmaticheid' in de "tussenfase" van het bresproces – zie paragraaf 8.3.3 – groter zou moeten zijn dan de '(on)regelmaticheid' in de "begin- en eindfase" van het bresproces.

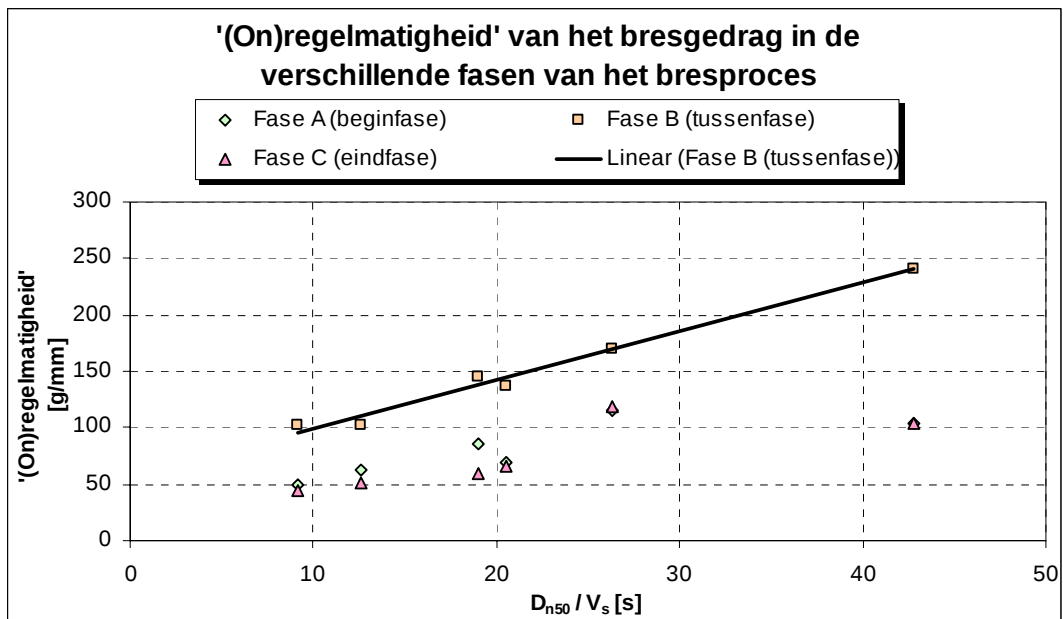
In Figuur 8.23 zijn de karakteristieke waarden voor de '(on)regelmaticheid' van het bresgedrag in de verschillende fasen van het bresproces uitgezet tegen D_{n50} / V_s . Deze waarden zijn bepaald aan de hand van de gemiddelde stortkarakteristieken van de series A.1 t/m A.6.

Nota bene:

De 'spreiding' (van de meetpunten) van de gemiddelde stortkarakteristiek is niet gelijk aan het gemiddelde van de 'spreidingen' (van de meetpunten) van de stortkarakteristieken waarvan het gemiddelde is bepaald. De statistiek leert het volgende verband:

$$\sigma\left(\frac{k_1 + k_2 + \dots + k_n}{n}\right) = \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\frac{\sigma(k_1) + \sigma(k_2) + \dots + \sigma(k_n)}{n} \right)$$

In dit geval geldt $n = 5$; de karakteristieke waarden voor de '(on)regelmaticheden' uit Figuur 8.23 zijn dan ook 'opgeschaald' met een factor $\sqrt{5}$.



Figuur 8.23 '(On)regelmaticheid' van het bresproces (in de tijd) gedurende de verschillende fasen van het bresproces.

Uit de bovenstaande figuur blijkt dat de '(on)regelmaticheid' van het bresgedrag in de "tussenfase" het grootst is. De '(on)regelmaticheden' in de "begin- en eindfase" zijn kleiner en van dezelfde orde grootte.

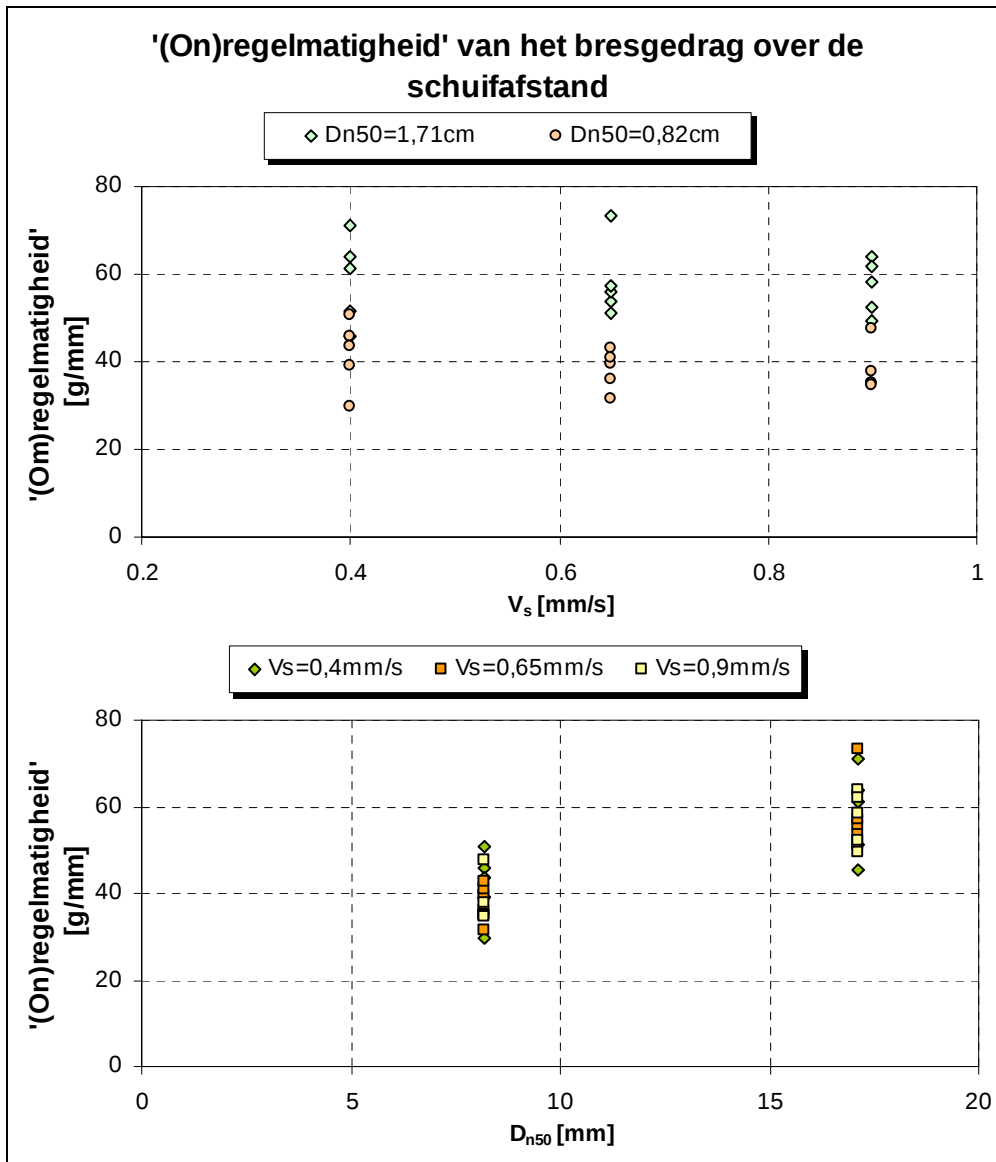
'(On)regelmaticheid' van het bresgedrag over de schuifafstand

De '(on)regelmaticheid' van het bresgedrag over de schuifafstand is gedefinieerd als de (on)regelmaticheid in het bresgedrag als de schuif over een bepaalde afstand wordt ingedrukt, ofwel, als een bepaalde hoeveelheid materiaal is gestort.

Verondersteld wordt dat alleen de (nominale) steendiameter van invloed is op deze '(on)regelmaticheid'. De schuifsnellheid is immers alleen van invloed op het tijdsinterval tussen twee opeenvolgende bressen en niet zozeer op de regelmaticheid van de hoeveelheid gestort materiaal ervan.

Om de invloed van de steendiameter (en de schuifsnellheid) op de '(on)regelmaticheid' van het bresgedrag over de schuifafstand te onderkennen is het van belang dat het spreidingsgetal (van het verschil tussen de gemeten en theoretische storthoeveelheden) gebaseerd is op een gelijk aantal meetwaarden met gelijke tussenafstand.

Voor elke meting uit de series A.1 tot en met A.6 is het spreidingsgetal dan ook steeds bepaald voor de meetwaarden op schuifstanden met een tussenafstand van 3,6 mm. In de onderstaande figuur is de gemeten '(on)regelmaticheid' uitgezet tegen de schuifsnellheid en tegen de steendiameter.



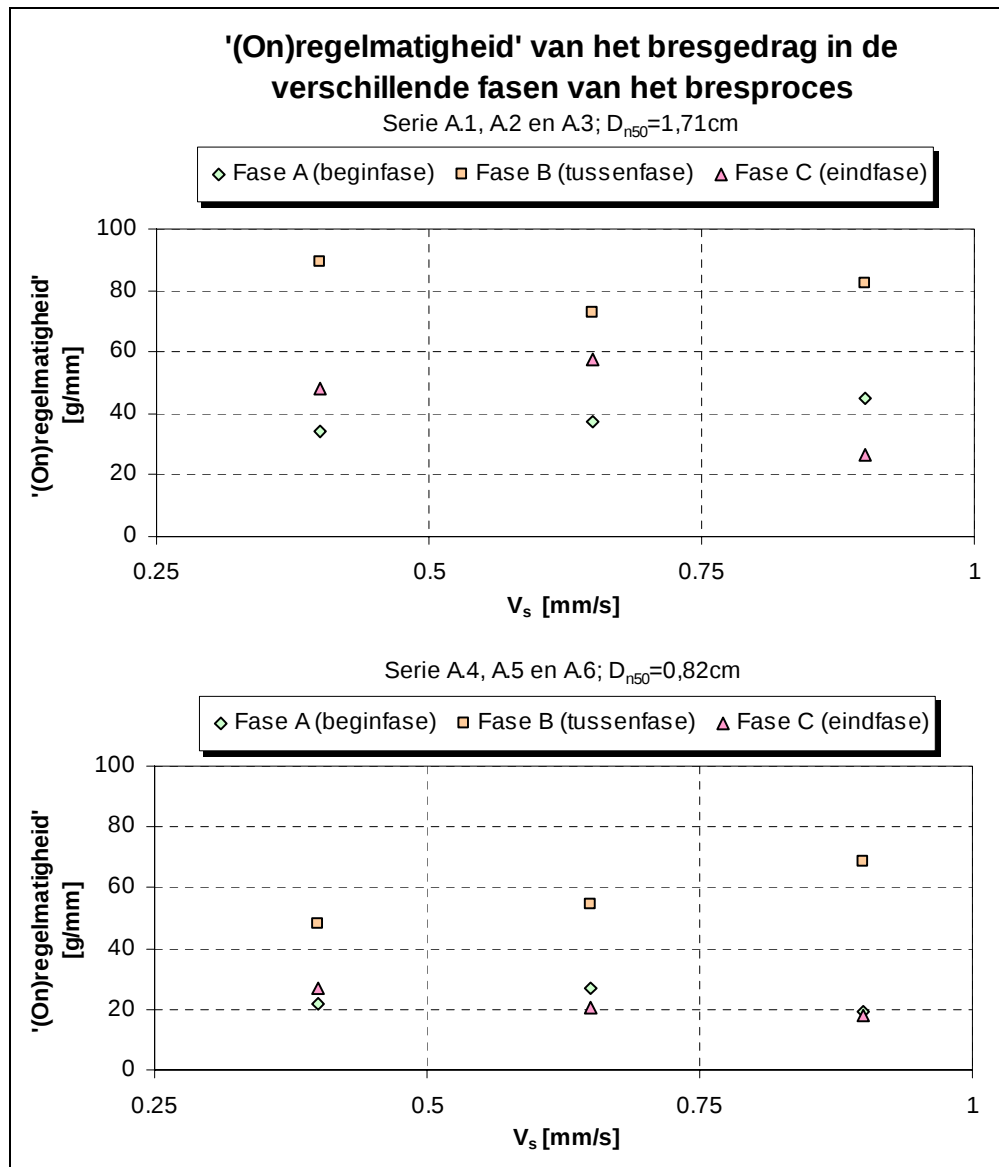
Figuur 8.24 '(On)regelmaticheid' van het bresgedrag over de schuifafstand.

Uit Figuur 8.24 blijkt dat de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm een onregelmatiger bresgedrag hebben dan de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en dat de invloed van de schuifsnellheid gering is.

Nota bene:

De kentallen voor de '(on)regelmaticheid' uit Figuur 8.24 zijn beduidend lager dan die uit Figuur 8.22 en Figuur 8.23. Dit komt omdat de storthoeveelheden zijn genormeerd aan de schuifafstand tussen twee opeenvolgende meetwaarden. In dit geval bedraagt deze $da = 3,6$, aanmerkelijk hoger dan de tussenafstand van de meetwaarden voor het bepalen van de '(on)regelmaticheid' over de (schuif)tijd.

Ter illustratie is de (on)regelmatigheid van het bresgedrag (over de schuifafstand) in de verschillende fasen van het bresproces in Figuur 8.25 uitgezet. De kentallen zijn bepaald aan de hand van de gemiddelde stortkarakteristieken van de series A.1 tot en met A.6 en weer 'opgeschaald' met een factor $\sqrt{5}$.



Figuur 8.25 '(On)regelmatigheid' van het bresproces (over de schuifafstand) gedurende de verschillende fasen van het bresproces.

Uit Figuur 8.25 blijkt (ook) weer dat het bresgedrag over de schuifafstand niet wordt beïnvloed door de schuifsnellheid – wel door de steendiameter – en tijdens de tussenfase het meest onregelmatig is. De begin- en eindonregelmatigheid zijn weer van dezelfde orde grootte.

8.6 DE (ON)REGELMATIGHEID BIJ HET AANBRENGEN VAN STEENBESTORTINGEN

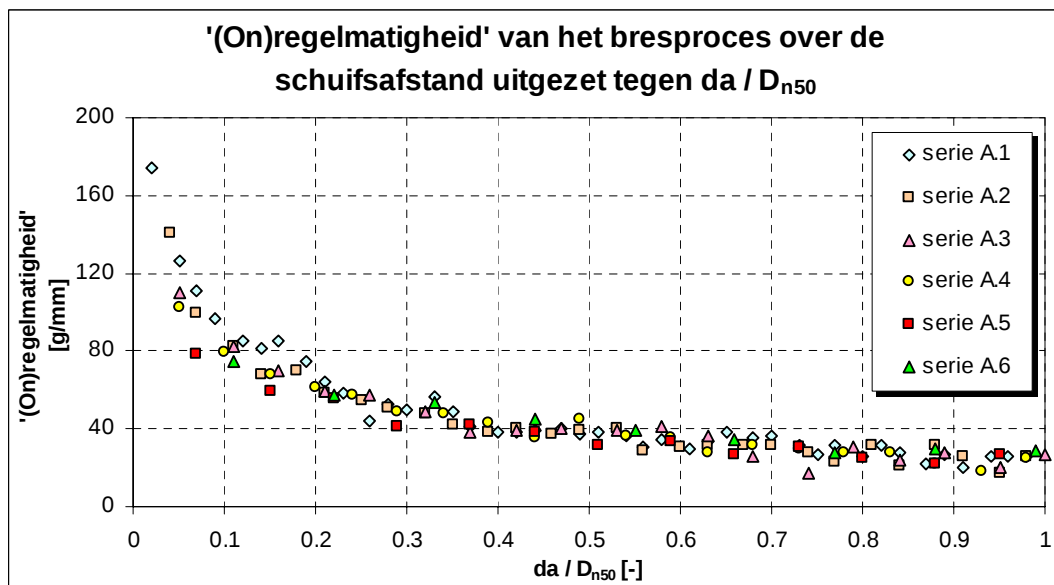
Bij het aanbrengen van steenbestortingen is het van belang de 'echte' (on)regelmaticheid van het bresgedrag te weten. De vraag is alleen hoe deze (over de schuifafstand) is gedefinieerd. De 'echte' (on)regelmaticheid zal namelijk afhangen van de schuifafstand waarover deze wordt beschouwd.

Hiertoe zijn in eerste instantie (de kentallen voor) de '(on)regelmaticheden' over de beschouwde schuifafstand geplot. Als relatief veel materiaal wordt gestort – de tussenafstand van de meetpunten waarvan de '(on)regelmaticheid' wordt bepaald is dan relatief groot – zullen deze kentallen relatief klein zijn. Deze worden namelijk genormeerd met de tussenafstand van de verschillende schuifstanden .

Dit blijkt ook uit de onderstaande figuur, waarin de '(on)regelmaticheid' van de verschillende bresproeven is uitgezet tegen d_a/D_{n50} ; de schuifafstand – uitgedrukt in een aantal maal de steendiameter van het stortmateriaal – waarover de '(on)regelmaticheid' wordt beschouwd.

Nota bene:

De kentallen zijn weer bepaald aan de hand van de gemiddelde stortkarakteristieken en dus weer 'opgeschaald' met een factor $\sqrt{5}$.



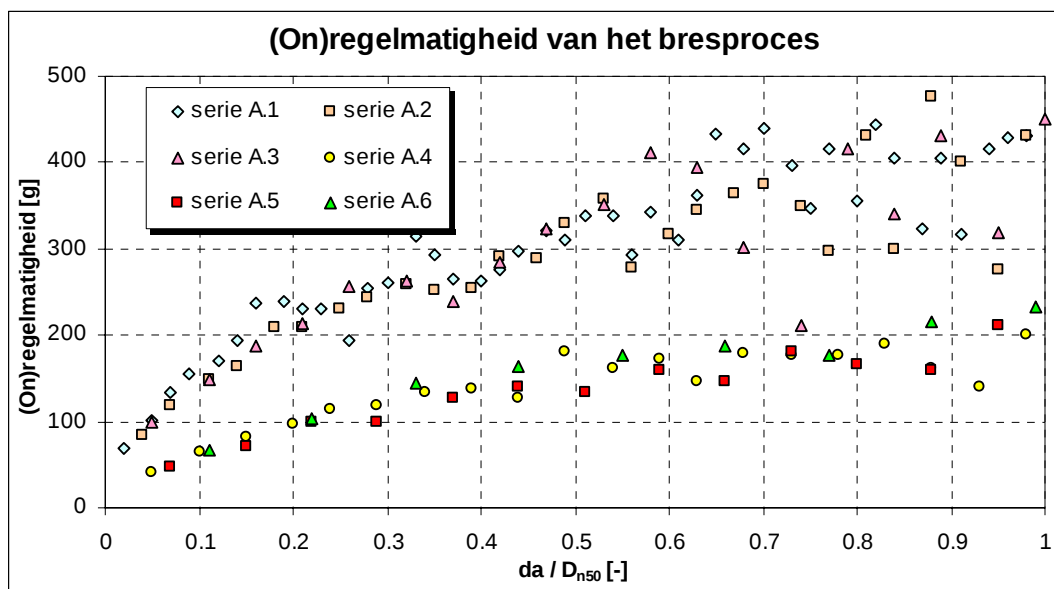
Figuur 8.26 '(On)regelmaticheid van het bresproces over de schuifafstand uitgezet tegen d_a / D_{n50} .

Uit Figuur 8.26 blijkt dat de '(on)regelmaticheden' (van het bresgedrag) van de verschillende combinaties van schuifsnellheid en steendiameter over een schuifafstand van $d_a = mD_{n50}$ gelijk zijn. 'Kleine' stenen op een 'kleine' schuifafstand hebben dezelfde onregelmaticheid als 'grote' stenen op een 'grote' afstand.

Dit is ook logisch gezien het feit dat eigenlijk dezelfde processen op een verschillende schaal worden bekeken. Een en ander duidt ook aan dat er geen schaaleffecten zijn met betrekking tot dit aspect.

Voor de 'echte' (on)regelmatigheid worden de '(on)regelmatigheden' uit Figuur 8.26 vermenigvuldigd met de schuifafstand waarover deze is beschouwd.

Verwacht wordt dat dan juist het omgekeerde beeld optreedt. Namelijk dat de (on)regelmatigheden – in grammen – op kleine schuifafstanden kleiner zijn dan de onregelmatigheid over grotere schuifafstanden en dat de waarde voor de regelmatigheid naar een bepaald 'eindwaarde' – asymptoot – gaat. Deze 'eindwaarde' is dan een maat voor de (on)regelmatigheid van het bresgedrag. Dit blijkt ook uit de onderstaande figuur.



Figuur 8.27 (Absolute) onregelmatigheid uitgezet tegen da / D_{n50} .

Uit Figuur 8.27 blijkt dat de (on)regelmatigheid van het bresgedrag zijn 'eindwaarde' bereikt als deze wordt beschouwd over schuifstanden met een tussenafstand van $da = 0,5D_{n50}$.

Nota bene:

Voor grote schuifafstanden 'waaiert' de (on)regelmatigheid uit. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door het feit dat de (on)regelmatigheid gebaseerd wordt op een steeds kleiner aantal meetpunten.

Verder valt op te maken dat de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm – Serie A.1, A.2 en A.3 – een ca. 2 keer zo onregelmatig bresgedrag hebben dan de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm. Als wordt gekeken naar de (on)regelmatigheid in het bresgedrag op schuifstanden van $0,5D_{n50}$ dan is de (on)regelmatigheid voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm ca. 350 g. Voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm geldt een (on)regelmatigheid van ca. 175 g.

Als we dit uitdrukken in een percentage ten opzichte van de gemiddeld gestorte hoeveelheid materiaal dan is de (on)regelmatigheid voor beide sorteringen ca 60%.

8.7 CONCLUSIES SERIE A

Tijdens het zijdelings overboord zetten van het stortmateriaal is er een tweetal onregelmatigheden in het bresgedrag van de stenen op het laaddek van de schuifstort:

1. een begin- en eindonregelmatigheid van het bresproces,
2. een onregelmatigheid in het afwisselend afschuiven -bressen - van het stortmateriaal.

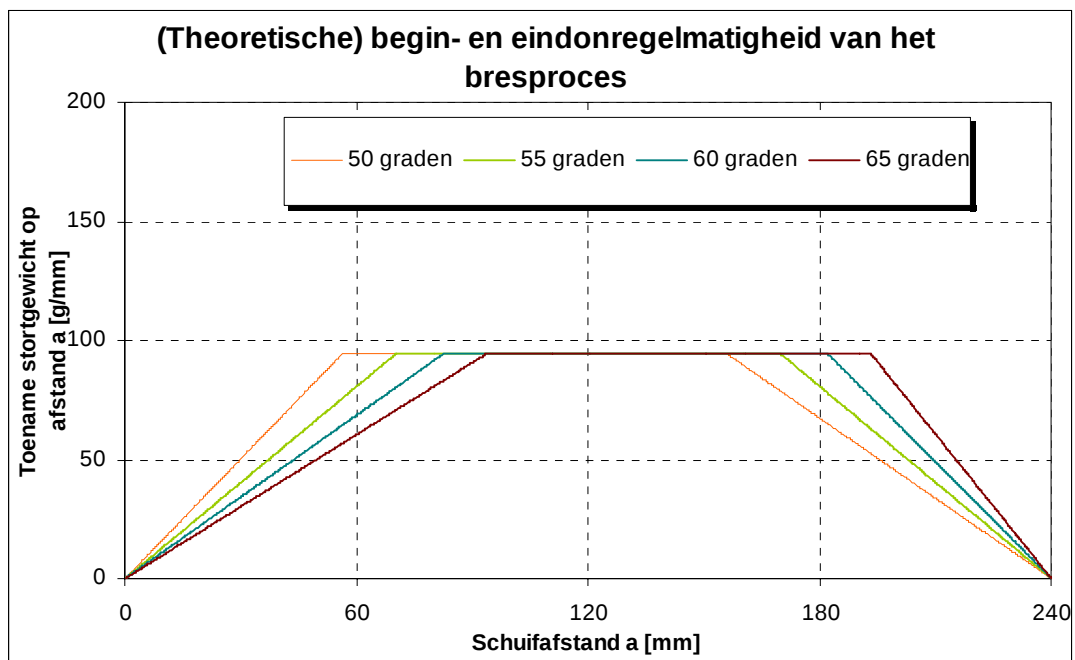
Ook verloopt het bresgedrag niet gelijkmatig over de lengte van het laaddek.

Ad 1

De begin- eindonregelmatigheid van het bresproces wordt toegeschreven aan de vorm van de lading en de hoek van het valfront (ϕ_f).

De hoek van het valfront wordt steiler naarmate de steendiameter toeneemt en de schuifsnellheid afneemt; ϕ_f neemt dus toe met toenemende waarden voor D_{n50} / V_s , een kental dat de 'fluctuatie' tussen twee opeenvolgende bressen aangeeft.

Voor verschillende waarden voor ϕ_f is de (theoretische) begin- en eindonregelmatigheid van het bresproces volgens onderstaande figuur.



Figuur 8.28 (Theoretische) begin- en eindonregelmatigheid van het bresproces.

Ad 2

De (on)regelmaticheid in het bresgedrag door het afwisselend afschuiven van het stortmateriaal kan op een tweetal manieren worden geïnterpreteerd.

(1) De (on)regelmaticheid van het bresgedrag over de tijd waarover geschoven wordt is afhankelijk van de steendiameter van het stortmateriaal en de schuifsnelheid waarmee gestort wordt en wordt onregelmatiger naarmate de steendiameter toeneemt en de schuifsnelheid afneemt.

(2) De (on)regelmaticheid van het bresgedrag over de afstand waarover geschoven wordt – als een bepaalde hoeveelheid materiaal wordt gestort – is enkel afhankelijk van de steendiameter van het stortmateriaal. De schuifsnelheid heeft slechts invloed op de opeenvolging tussen twee bressen en niet op de (on)regelmaticheid ervan.

Als de (on)regelmaticheid wordt beschouwd over een schuifafstand van een aantal maal de D_{n50} van het stortmateriaal, dan hebben stenen met verschillende diameters dezelfde (on)regelmaticheid. Op schuifstanden met een tussenafstand van $0,5 D_{n50}$ bedraagt deze ca. 60% ten opzichte van de gemiddelde gestorte hoeveelheid over die schuifafstand.

Voor (1) en (2) geldt dat het bresgedrag het meest onregelmatig is wanneer de meeste stenen worden gestort, dus tijdens de tussenfase van het bresproces.

9 SERIE B: (STATIONAIRE) STORTPROEVEN OP EEN VLAKKE BODEM

Dit hoofdstuk handelt over de experimenten betreffende het val- en bodemgedrag van het stortmateriaal. Het gaat hierbij om stationaire stortproeven op stilstaand water.

9.1 INLEIDING

Steenbestortingen (op een vlakke bodem) worden in verschillende ‘vakken’ aangebracht. Deze moeten goed op elkaar aansluiten. Belangrijk is het dan te weten:

- ♦ hoe het materiaal valt, en
- ♦ waar het terecht komt.

Dit is geanalyseerd aan de hand van stortproeven waarbij het stortschip niet wordt verplaatst. In Tabel 7.2 is het uitvoeringsschema nog eens weergegeven.

Tabel 9.1 Overzicht experimenten serie B.

Serie	D _{n50} [cm]	h [cm]	V _s [mm/s]
B.1	1,71	120	0,40
B.2	1,71	120	0,65
B.3	1,71	120	0,90
B.4	0,82	120	0,65
B.5	1,71	60	0,65
B.6	0,82	60	0,65
B.7	1,71	30	0,65
B.8	0,82	30	0,65

Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

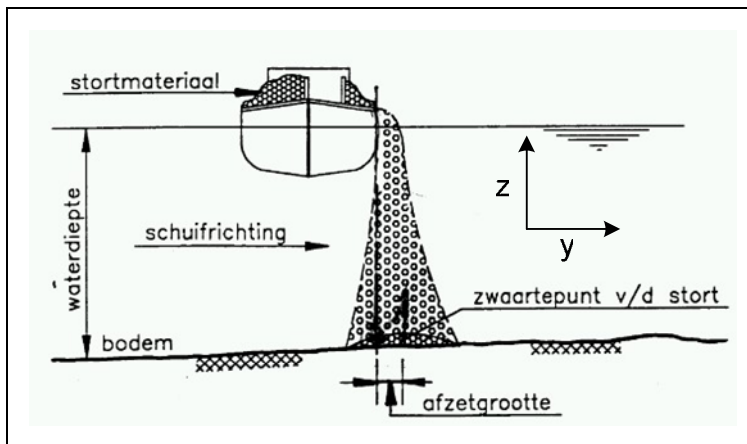
In paragraaf 9.2 worden enkele karakteristieken van het stortprofiel gedefinieerd. De theoretische (wiskundige) benadering voor het stortprofiel van een stationaire stortproef is beschreven in paragraaf 9.3. In paragraaf 9.4 wordt deze theoretische benadering getoetst aan de hand van waarnemingen en resultaten van de stortproeven, waarna in paragraaf 9.5 de afzet, de zijdelingse en kopse spreiding van het stortprofiel worden behandeld. De belangrijkste conclusies en aanbevelingen zijn tenslotte opgenomen in paragraaf 9.6.

9.2 DEFINITIES STORTPROFIEL

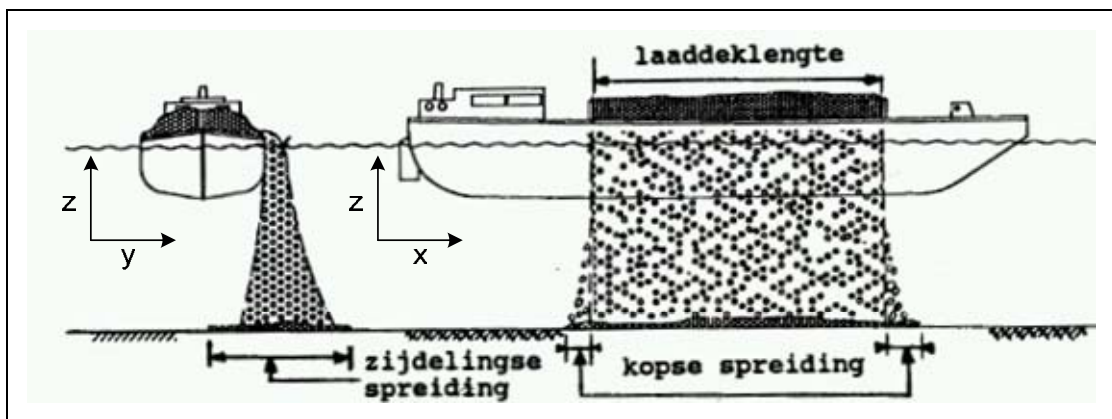
Het stortprofiel van de stationaire stortproeven kan worden gekarakteriseerd door:

- de afzet,
- de zijdelingse spreiding, en
- de kopse spreiding.

In Figuur 9.1 en Figuur 9.2 zijn deze, samen met het gedefinieerde assenstelsel, weergegeven.



Figuur 9.1 De afzetgrootte en het (y, z) assenstelsel.



Figuur 9.2 De zijdelingse en kopse spreiding en het (y, z) en (x, z) assenstelsel.

Afzet

Onder de afzet wordt verstaan de verplaatsing van het zwaartepunt van het stortprofiel ten opzichte van de stortlijn, loodrecht op de lengterichting van het stortschip.

Zijdelingse spreiding

De zijdelingse spreiding betreft de 'breedte' van (de dwarsdoorsnede van) het stortprofiel, loodrecht op de lengterichting van het stortschip.

Kopse spreiding

De kopse spreiding is gedefinieerd als de 'breedte' van (de lengtedoorsnede van) het stortprofiel, evenwijdig aan de lengterichting van het stortschip, verminderd met de lengte van het laaddek.

9.3 THEORETISCHE BENADERING STORTPROFIEL

Onderstaand is een tweetal wiskundige theorieën beschreven waarmee het stortprofiel van een stationaire stortproef benaderd kan worden, namelijk:

- ♦ het Lijnstort Spreiding Model, en
- ♦ de opbouw van het stortprofiel bij toenemende storthoeveelheden.

9.3.1 Het lijnstort spreiding model (LSM)

In [CREGTEN, 1995] is een wiskundig model ontwikkeld voor de verdeling van het stortmateriaal op de bodem, wanneer vanaf een lijnstuk gestort wordt.

De belangrijkste uitgangspunten zijn hierbij:

- ♦ de vallende stenen beïnvloeden elkaar niet tijdens het valproces,
- ♦ het aantal stenen dat wordt gestort is (relatief) groot,
- ♦ er wordt gestort in stilstaand water,
- ♦ de waterdiepte is constant,
- ♦ zodra de stenen contact maken met de bodem of met de al aanwezige stenen, ondergaan zij geen verplaatsing meer,
- ♦ de stenen ondergaan geen initiële verplaatsing tijdens het overboord vallen,
- ♦ het volume van de stenen is uniform verdeeld over het lijnstuk waar vanaf gestort wordt, en
- ♦ de porositeit van de stenen op het laaddek is gelijk aan de porositeit van de stenen onder water.

Een en ander heeft geresulteerd in het zogenaamde "Lijnstort Spreiding Model", een integratie van het "Enkele Steen Model" over de lengte van het laaddek.

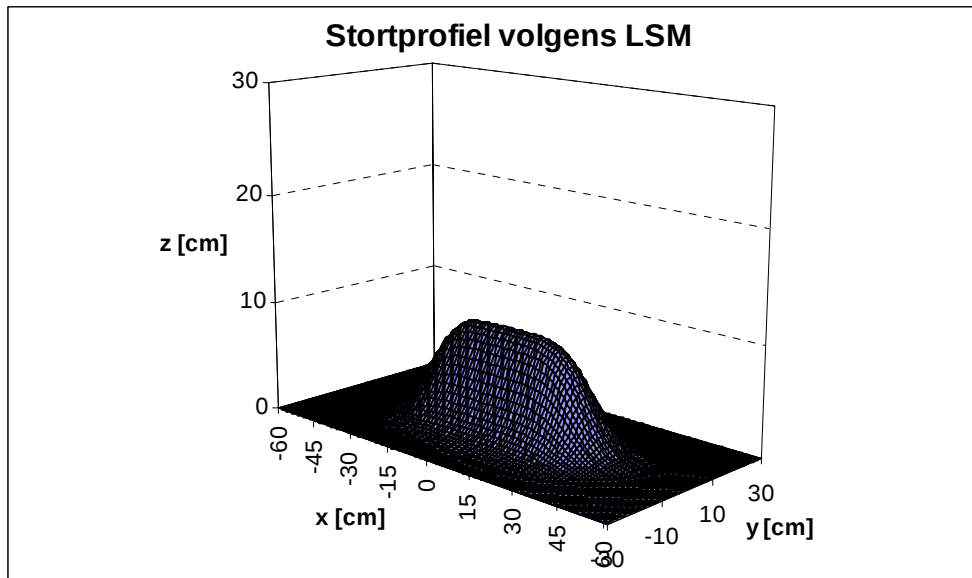
De kansverdeling voor de horizontale verplaatsingen van de stenen en de hoogte van het stortprofiel op de positie (x,y) worden dan respectievelijk gegeven door vergelijking (9.1) en vergelijking (3.1).

$$f_{XY}(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_N} \right)^2} \cdot \left(\phi \left(\frac{X_1 - x}{\sigma_N} \right) - \phi \left(\frac{X_0 - x}{\sigma_N} \right) \right) \quad (9.1)$$

$$z(x,y) = \frac{V_{dek}}{L \sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_N} \right)^2} \cdot \left(\phi \left(\frac{X_1 - x}{\sigma_N} \right) - \phi \left(\frac{X_0 - x}{\sigma_N} \right) \right) \quad (9.2)$$

waarin:	$z(x,y)$	: hoogte van het stortprofiel op positie (x,y)	[m]
	V_{dek}	: volume van het stortmateriaal op het laaddek inclusief poriën	[m ³]
	L	: lengte van het lijnstuk waar vanaf wordt gestort, $L = X_1 - X_0$	[m]
	σ_N	: standaardafwijking van de normale verdeling van het “Enkele Steen Model”	[m]
	ϕ	: functie voor de standaard normale verdeling	[-]
	X_0	: x-coördinaat van het begin van het lijnstuk waar vanaf wordt gestort	[m]
	X_1	: x-coördinaat van het eind van het lijnstuk waar vanaf wordt gestort	[m]

De vorm van het stortprofiel volgens het “Lijnstort Spreiding Model” is gepresenteerd in de onderstaande figuur.



Figuur 9.3 Stortprofiel volgens het “Lijnstort Spreiding Model”.

Voorts kunnen een (maximale) langs- en dwarsdoorsnede afgeleid worden.

(Maximale) langsdoorsnede

De maximale langsdoorsnede is bepaald door $y = 0$ in te vullen in vergelijking (3.1). Er volgt dan:

$$z(x,0) = z(x) = \frac{A_{dek}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N} \cdot \left(\phi\left(\frac{X_1 - x}{\sigma_N}\right) - \phi\left(\frac{X_0 - x}{\sigma_N}\right) \right) \quad (9.3)$$

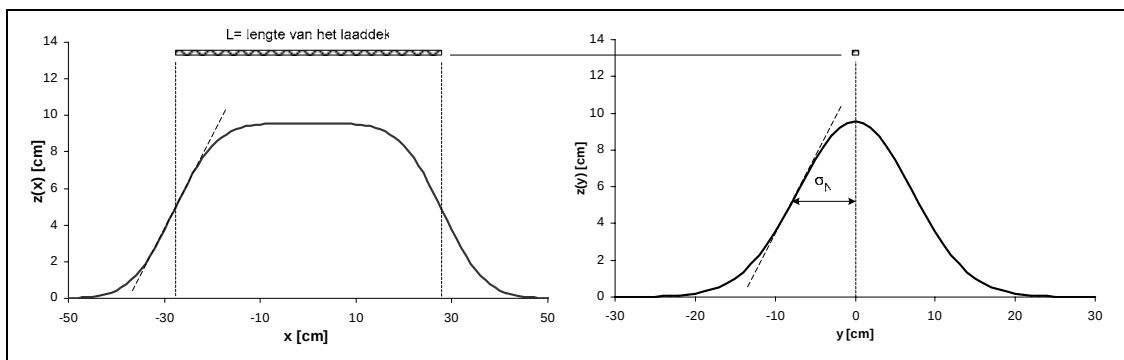
waarin:	A_{dek}	: oppervlakte van de (dwars)doorsnede van de lading	[m ²]
---------	-----------	---	-------------------

(Maximale) dwarsdoorsnede

De maximale dwarsdoorsnede volgt door $x = 0$ in te vullen in vergelijking (3.1) en wordt gegeven door:

$$z(0,y) = z(y) = \frac{A_{dek}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_N} \right)^2} \quad (9.4)$$

De vergelijkingen (9.3) en (9.4) zijn grafisch weergegeven in de onderstaande figuur.



Figuur 9.4 Theoretische langs- en dwarsdoorsnede volgens het "Lijnstort Spreiding Model".

Bij Figuur 9.4 kan worden opgemerkt dat

- de buigpunten van de langsdoorsnede samenvallen met het begin- en eindpunt van de lijnstort, en dat
- de dwarsdoorsnede gelijk is aan de doorsnede volgens het "Enkele Steen Model".

De (maximale) hoogte van het stortprofiel kan vervolgens berekend worden door $x = 0$ in te vullen in vergelijking (9.3) óf door $y = 0$ in te vullen in vergelijking (9.4). Er volgt dan:

$$z_{stort} = \frac{A_{dek}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N} \quad (9.5)$$

waarin: z_{stort} : (maximale) hoogte van het stortprofiel [m]

9.3.2 Opbouw stortprofiel bij toenemende storthoeveelheden

Bij toenemende storthoeveelheden, worden in [CREGTEN, 1995] drie verschillende stortprofielen onderscheiden, te weten:

1. een gaussprofiel,
2. een overgangsprofiel, en
3. een driehoekspromiel

Nota bene:

Het betreft hier relatieve storthoeveelheden. Als op een kleinere waterdiepte een even grote hoeveelheid materiaal gestort wordt, is de voor de opbouw van het stortprofiel benodigde storthoeveelheid groter. De spreiding van het stortmateriaal neemt immers af.

Bij een relatief kleine storthoeveelheid voldoet het profiel aan een Gausskromme volgens het "Lijnstort Spreiding Model". De traagheidsstraal (σ) van de (doorsnede van de) gestorte hoeveelheid steen is gelijk aan de standaardafwijking van de horizontale verplaatsingen van de individuele stenen (σ_N).

$$\sigma = \sigma_N = c\sqrt{h \cdot D_{n50}}$$

waarin:	c	:	constante = 0,685	[-]
	h	:	waterdiepte	[m]
	D _{n50}	:	nominale steendiameter	[m]

Bij een toename van de hoeveelheid stortmateriaal bouwt het profiel zich op volgens verschillende Gausskrommes. Op een zeker moment – bij een zekere profielhoogte – zal de helling in het buigpunt van de Gausskromme groter worden dan de hoek van maximaal talud van het stortmateriaal onder water. Het stortmateriaal zal gaan afschuiven en de doorsnede gaat over in het zogenaamde overgangsprofiel.

Bij een toenemende storthoeveelheid zal de afschuiving zich steeds over een groter gedeelte van de 'doorsnede' uitstrekken. Immers op steeds meer punten op de Gauss-kromme zal de maximale helling overschreden worden. Bij een bepaalde storthoeveelheid zal ook bij de top van de gestorte 'berg' afschuiving plaatsvinden. Het ontstane profiel voldoet dan aan een driehoeksvorm. De traagheidsstraal (σ_Δ) van deze doorsnede kan bepaald worden met:

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\frac{A_{stort}}{6 \cdot \tan(\phi_m)}}$$

waarin:	σ_Δ	:	traagheidsstraal van het driehoekspromiel	[m]
	A _{stort}	:	oppervlak van de doorsnede van het stortprofiel	[m ²]
	ϕ_m	:	maximale hoek van het talud	[°]

De traagheidsstraal van het driehoeksprofiel blijkt onafhankelijk van de waterdiepte te zijn. De vorm van het stortprofiel is dus niet meer waterdiepte-gebonden, maar slechts afhankelijk van de hoeveelheid stenen die gestort wordt.

9.4 TOETSEN THEORETISCHE BENADERING

Waarnemingen uit de experimenten met betrekking tot het valproces van het stortmateriaal dienen als eerste ‘controlemiddel’ voor de theoretische benadering van het stortprofiel. De gemeten hoogten van het stortprofiel kunnen vervolgens gebruikt worden om de theoretische benadering verder te toetsen.

9.4.1 Waarnemingen van het valproces van het stortmateriaal

De belangrijkste waarnemingen met betrekking tot het valproces van het stortmateriaal zijn onderstaand opgesomd.

1. De (totale) spreiding van het stortmateriaal op de bodem wordt voornamelijk bepaald door het “Random Walk” valgedrag van de vallende stenen.
2. Als de stenen op de bodem terechtkomen, verplaatsen deze niet of nauwelijks meer; het “wegspringen” en “afrollen” van het stortmateriaal (op een vlakke) bodem is dus van ondergeschikte betekenis.
3. Tijdens het valproces zijn ‘nauwelijks’ groepseffecten waargenomen. In een enkel geval, vooral bij de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm wordt een dusdanige hoeveelheid stenen tegelijk gestort dat deze zich als een groep – met een grotere valsnelheid – gaat gedragen. Deze ‘groep’ is niet zozeer een ‘bulk’ stortmateriaal, maar moet meer opgevat worden als een stroom materiaal waarbij stenen in het zog van andere stenen ‘meeliften’ en met de kleinere weerstand een grotere snelheid kunnen halen.

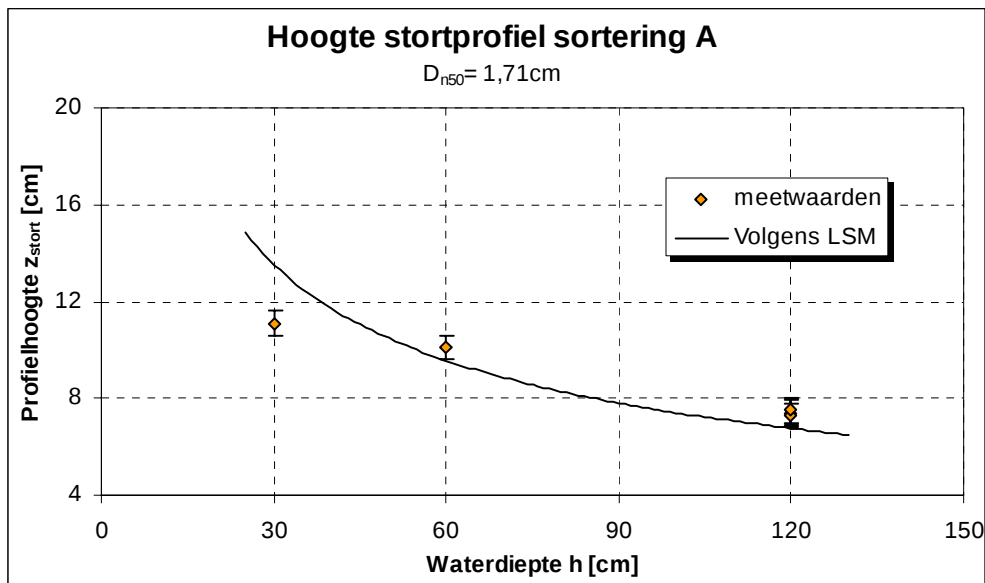
Waarnemingen (1), (2) en (3) zijn in overeenstemming met de uitgangspunten voor de theoretische benadering volgens het “Lijnstort Spreiding Model”. Dit lijkt dus goed bruikbaar.

9.4.2 Gemeten hoogten van de stortprofielen

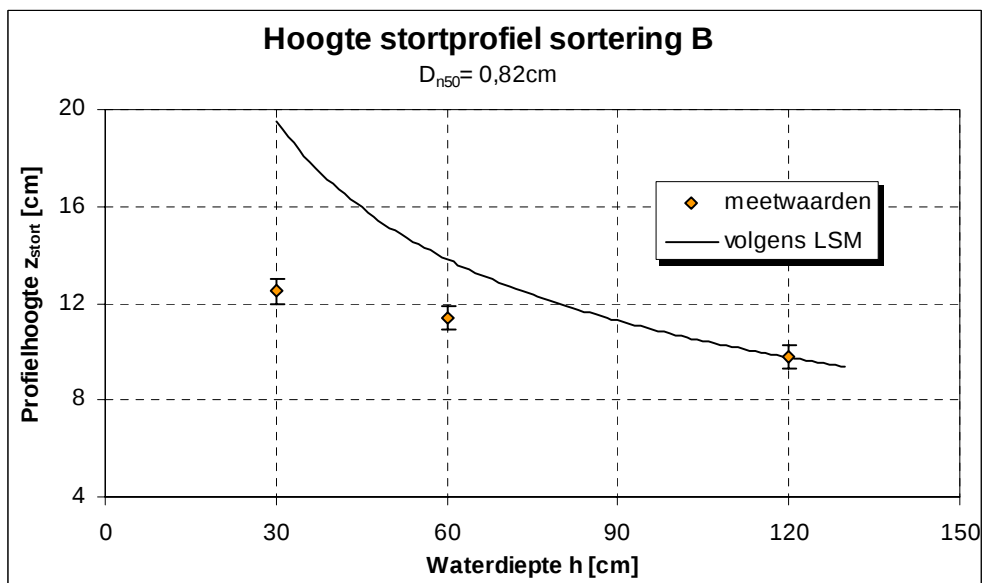
De geldigheid van het “Lijnstort Spreiding Model” wordt getoetst aan de hand van de gemeten hoogten van de verschillende stortprofielen.

De storthoogten zijn bepaald aan de hand van het waterniveau waarbij de stenen aan de top van het profiel allemaal net uit het water steken. Aangezien de waterstand steeds met stapjes van (ca.) 1 cm is verlaagd, wordt rondom de meetpunten een ‘betrouwbaarheidsinterval’ van $\pm 0,5$ cm aangehouden.

In Figuur 9.5 en Figuur 9.6 zijn de gemeten profielhoogten van het stortmateriaal uit sortering A en sortering B uitgezet samen met de theoretische waarden volgens vergelijking (9.5).



Figuur 9.5 Gemeten profielhoogten voor sortering met $D_{n50} = 1,71 \text{ cm}$ en de theoretische waarden volgens het "Lijnstort Spreiding Model".

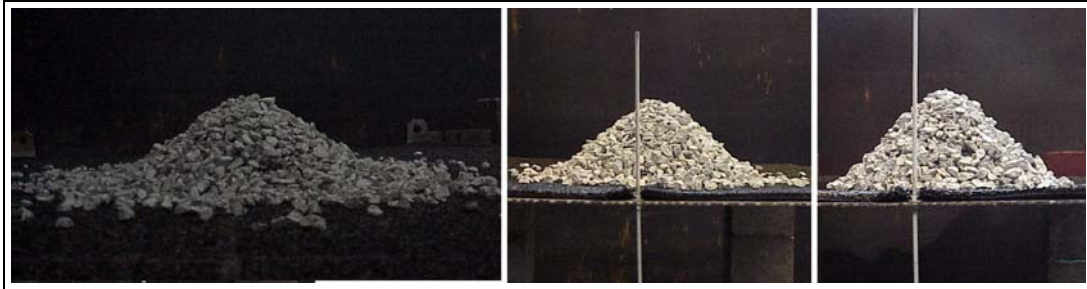


Figuur 9.6 Gemeten profielhoogten voor sortering met $D_{n50} = 0,82 \text{ cm}$ en de theoretische waarden volgens het "Lijnstort Spreiding Model".

Tot op een waterdiepte van 60 cm komen de gemeten hoogten van het stortprofiel van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71 \text{ cm}$ goed overeen met de berekende waarden volgens het "Lijnstort Spreiding Model". Voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82 \text{ cm}$ voldoet de gemeten storthoogte alleen op 120 cm waterdiepte.

Bij waterdiepten die beneden deze waarden liggen gaan de gemeten hoogten duidelijk van de theoretische lijn afwijken. Het stortprofiel gaat dus blijkbaar afschuiven.

Dit is ook waargenomen tijdens de experimenten. In de onderstaande figuur zijn de dwarsdoorsneden van het stortprofiel voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm bij verschillende waterdiepten weergegeven.



Figuur 9.7 Stortprofielen voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm bij waterdiepten van achtereenvolgens 120 cm (links), 60 cm (midden) en 30 cm (rechts).

In het linker plaatje uit Figuur 9.7 is (nog) een Gaussprofiel te herkennen, dat overigens al wel enigszins is 'afgeplat'. De overige stortprofielen voldoen meer aan het eerder beschreven driehoeksprofiel.

Het feit dat de profielhoogten voor de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm eerder van de theoretische lijn gaan afwijken dan de hoogten van het stortprofiel voor de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm is als volgt te verklaren. Onder water zullen de kleinere stenen minder spreiding geven. Bij eenzelfde storthoeveelheid wordt de doorsnede dan smaller, maar vooral ook steiler. Afschuiven treedt dan eerder op.

De vraag is nu bij welke (combinatie van) waterdiepte en steendiameter (de dwarsdoorsnede van) het stortprofiel begint af te schuiven. Het Gaussprofiel gaat dan over in het overgangsprofiel, zie paragraaf 0.

9.4.3 Afleiding grens Gaussprofiel en overgangsprofiel: $h = h_0$

Wanneer nog geen afschuiven heeft plaatsgevonden kan de helling van het stortprofiel worden beschreven met de afgeleide van het functievoorschrift voor de (dwars)doorsnede van het Gaussprofiel, zie vergelijking (9.4).

$$z'(y) = \left(\frac{A_{dek}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_N} \right)^2} \right)' = -\frac{A_{dek} \cdot y}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N^3} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_N} \right)^2} \quad (9.6)$$

Deze helling is maximaal voor $y = -\sigma_N$; daar ligt immers het buigpunt van de doorsnede. Invullen in vergelijking (9.6) geeft:

$$z'(-\sigma_N) = \frac{A_{dek} \cdot \sigma_N}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N^3} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{-\sigma_N}{\sigma_N} \right)^2} = \frac{A_{dek}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N^2} e^{-\frac{1}{2}} \quad (9.7)$$

Substitueren we $\sigma_N = c\sqrt{h \cdot D_{n50}}$ in (9.7) dan volgt:

$$z'(-\sigma_N) = \frac{e^{-\frac{1}{2}}}{c^2 \cdot \sqrt{2\pi}} \frac{A_{dek}}{h \cdot D_{n50}} = \frac{A_{dek}}{1,94h \cdot D_{n50}} \quad (9.8)$$

Het stortprofiel begint af te schuiven als de (maximale) helling van de doorsnede groter wordt dan de hoek van natuurlijk talud van het materiaal onder water (ϕ_m), ofwel

$$\frac{A_{dek}}{1,94h \cdot D_{n50}} > \tan(\phi_m) \quad (9.9)$$

Dit gebeurt op een waterdiepte van

$$h_o = \frac{A_{dek}}{1,94 \tan(\phi_m) \cdot D_{n50}} \quad (9.10)$$

waarin: h_o : waterdiepte waarbij het profiel begint af te schuiven [m]

Een veelgebruikte waarde voor de hoek van inwendige wrijving van breuksteen onder water is $\phi_m = 40^\circ$.

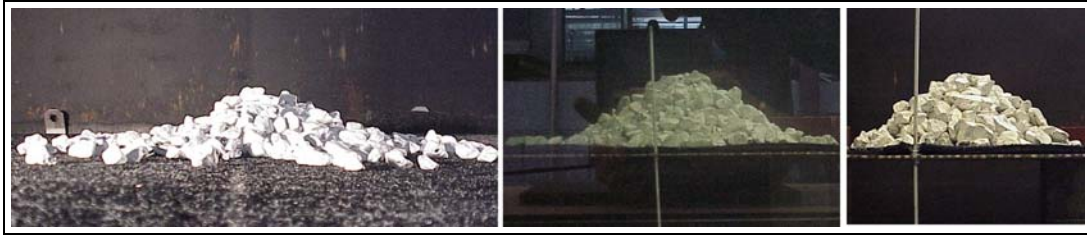
Invullen van $A_{dek} = 170 \text{ cm}^2$ en $\phi_m = 40^\circ$ in vergelijking (9.10) geeft voor de sortering met $D_{n50} = 0,82 \text{ cm}$ en voor de sortering met $D_{n50} = 1,71 \text{ cm}$ waarden voor h_o volgens onderstaande tabel.

Tabel 9.2 Waarden voor h_o .

D_{n50}	h_o
[cm]	[cm]
0.82	127
1.71	61

Theoretisch is het dwarsprofiel van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82 \text{ cm}$ op een waterdiepte van 120 cm dus al gaan afschuiven. Het linker plaatje in Figuur 9.7 laat dit ook zien.

Het stortprofiel van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71 \text{ cm}$ moet op de waterdiepte van 120 cm theoretisch nog wel voldoen aan een Gausskromme en op een waterdiepte van 60 cm pas beginnen met afschuiven. Dit blijkt ook uit de onderstaande figuur, waarin het stortprofiel van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71 \text{ cm}$ steeds bij waterdiepten van achtereenvolgens 120 cm, 60 cm en 30 cm is weergegeven.

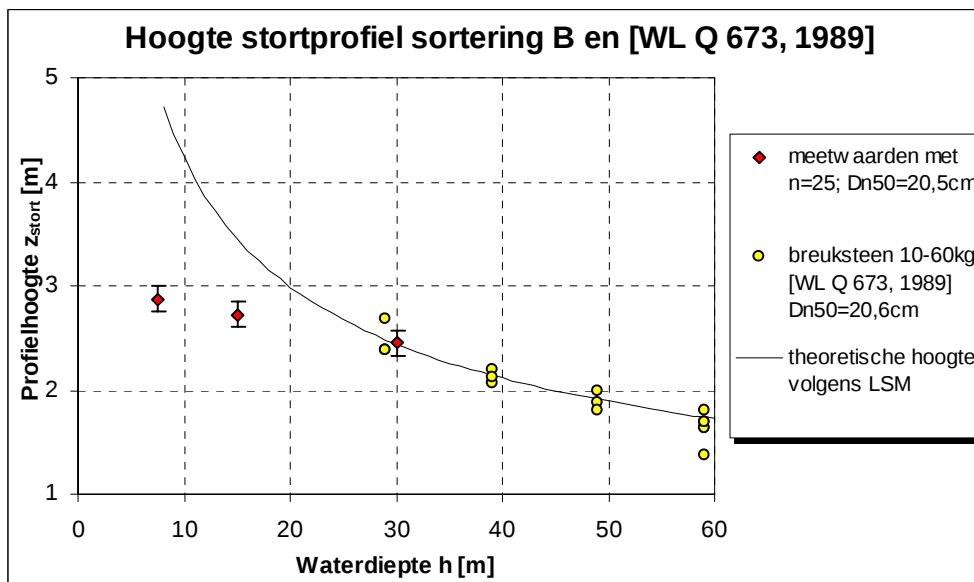


Figuur 9.8 Stortprofielen voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm bij waterdiepten van achtereenvolgens 120 cm (links), 60 cm (midden) en 30 cm (rechts)

Voor $h > h_0$ moet het stortprofiel theoretisch voldoen aan een Gausskromme. Voor het toetsen van deze hypothese is echter een gering aantal metingen beschikbaar.

In [WL Q 673, 1989] zijn ook profielhoogten gemeten. Het stortmateriaal betreft hier een geschaalde sortering van de 10 – 60 kg uit de praktijk met $D_{n50} = 20,6$ cm. Deze stenen zijn in overeenstemming met de stenen uit de sortering B ($D_{n50} = 20,5$ cm). Ook zijn overeenkomstige afmetingen van het laaddek en steenhoeveelheden (lading) gebruikt. De meetresultaten, die overigens naar prototypewaarden zijn geschaald, zijn dus bruikbaar.

In de onderstaande figuur zijn de meetwaarden uit [WL Q 673, 1989] uitgezet samen met de (naar prototype geschaalde) meetwaarden voor de stenen uit sortering B en de theoretische profielhoogte volgens vergelijking (9.5).

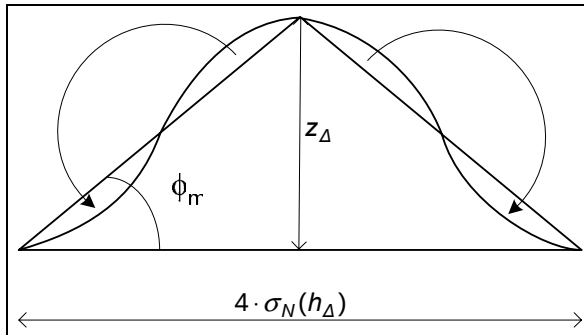


Figuur 9.9 Naar prototype geschaalde meetwaarden voor de profielhoogte van stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm met meetwaarden uit [WL Q 673, 1989] en de theoretische hoogte volgens het LSM.

De waarde voor h_0 in Figuur 9.9 bedraagt ca. 30 m. Er blijkt dat de profielhoogte bij waterdieptes groter dan 30 m inderdaad voldoen aan de theoretische hoogten volgens het "Lijnstort Spreiding Model".

9.4.4 Afleiding grens overgangsprofiel en driehoeksprofiel: $h = h_{\Delta}$

Als op steeds ondieper water wordt gestort, zal het stortprofiel steeds verder afschuiven. Bij een bepaalde waterdiepte (h_{Δ}) is het oorspronkelijke Gaussprofiel over de gehele 'hoogte' afgeschoven en ontstaat er een driehoeksprofiel, zie onderstaande figuur.



Figuur 9.10 Overgang in driehoeksprofiel

Voor de benaderingsvergelijking voor het bepalen van h_{Δ} wordt uitgegaan van het volgende:

- Op een waterdiepte van $h = h_{\Delta}$ is de hoogte van het driehoeksprofiel gelijk aan de hoogte van het theoretische Gaussprofiel.
- De breedte van het driehoeksprofiel is gelijk aan $4\sigma_N$ op de waterdiepte $h = h_{\Delta}$.
Theoretisch omvat dit 95% van het stortmateriaal.

De hoogte van het driehoeksprofiel (z_{Δ}) kan nu op een tweetal manieren uitgedrukt worden:

$$z_{\Delta} = 2 \tan(\phi_m) \sigma_N(h_{\Delta}) \text{ en} \quad (9.11)$$

$$z_{\Delta} = \frac{A_{dek}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N(h_{\Delta})} \quad (9.12)$$

Combineren van (9.11) en (9.12) geeft na enig rekenwerk:

$$h_{\Delta} = \frac{A_{dek}}{2c^2 \cdot \sqrt{2\pi} \tan(\phi_m) \cdot D_{n50}} = \frac{A_{dek}}{2,35 \tan(\phi_m) \cdot D_{n50}} \quad (9.13)$$

waarin: h_{Δ} : waterdiepte waarbij het profiel is overgegaan in een driehoeksvorm [m]

De hoogte van het driehoeksprofiel kan nu bepaald worden door (9.13) te substitueren in (9.11) of in (9.12). Er volgt dan:

$$z_{\Delta} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\sqrt{2\pi}}} \sqrt{A_{dek} \cdot \tan(\phi_m)} = 0,89 \sqrt{A_{dek} \cdot \tan(\phi_m)} \quad (9.14)$$

waarin: z_{Δ} : hoogte van het driehoeksprofiel [m]

De hoogte van het driehoeksprofiel blijkt inderdaad alleen afhankelijk te zijn van de storthoeveelheid (A_{dek}) en de hoek van natuurlijk talud onder water (ϕ_m).

In de onderstaande tabel zijn de berekende waarden voor h_{Δ} voor de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en voor de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm weergegeven.

Tabel 9.3 Waarden voor h_{Δ} .

D_{n50} [cm]	h_{Δ} [cm]
0.82	105
1.71	50

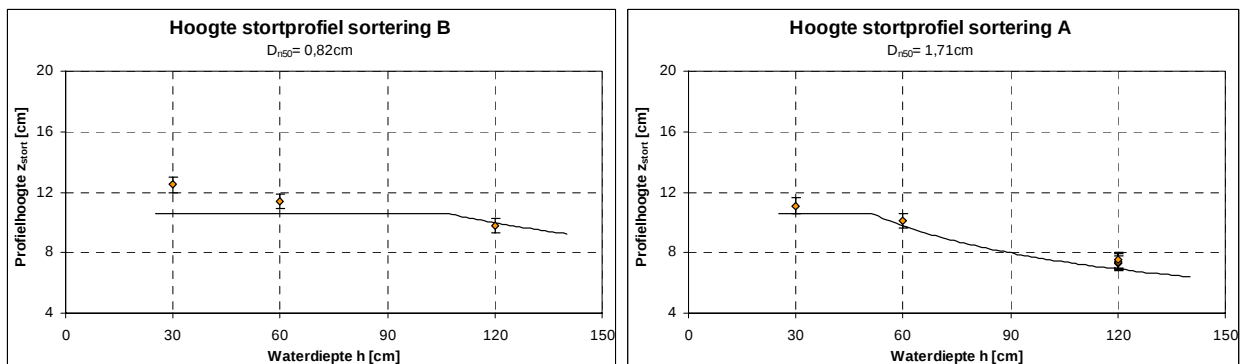
Vergelijken we deze de waarden voor h_{Δ} met de waarden voor h_0 uit Tabel 9.2 dan blijkt dat het overgangsprofiel relatief snel overgaat in het driehoeksprofiel. Voorgesteld wordt dan ook om de hoogte van het overgangsprofiel te benaderen door de hoogte van het theoretische Gaussprofiel op de diepte tussen $h = h_{\Delta}$ en $h = h_0$.

Het verloop van de storthoogte over de waterdiepte wordt dan benaderd door:

$$h < h_{\Delta} \quad z_{\Delta} = 0,89 \sqrt{A_{dek} \cdot \tan(\phi_m)}$$

$$h > h_{\Delta} \quad z_{stort} = \frac{A_{dek}}{1,71 \sqrt{D_{n50} \cdot h}}$$

In de onderstaande figuur is dit verloop voor de sortering met met $D_{n50} = 0,82$ cm en voor de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm uitgezet samen met de gemeten profielhoogten.



Figuur 9.11 Theoretische verloop van de profielhoogte over de waterdiepte samen met de meetwaarden voor de hoogte van het stortprofiel.

Uit de bovenstaande figuur blijkt dat het benaderde verloop van de storthoogte over de waterdiepte overeenkomt met de gemeten waarden voor de hoogte van het stortprofiel. Het aantal meetpunten is echter te gering om dit met zekerheid te kunnen zeggen.

Nota bene:

Op relatief kleine waterdiepte is de, door het driehoeksprofiel, benaderde hoogte van het stortprofiel kleiner dan de gemeten hoogte.

9.5 OVERIGE BEPALINGEN AAN HET STORTPROFIEL

Naast de hoogte, kunnen ook

- ♦ de afzet,
- ♦ de zijdelingse spreiding, en
- ♦ de kopse spreiding

van het stortprofiel bepaald worden, zie ook paragraaf 9.2.

Deze paragraaf handelt hierover. De gemeten waarden zijn, daar waar mogelijk, vergeleken met, naar prototype geschaalde, meetwaarden uit [WL Q 673, 1989].

9.5.1 Afzet van het stortprofiel

De afzet van het stortprofiel wordt – in dit geval – veroorzaakt door een drietal verschijnselen.

(1) Als de stenen in het water worden gestort zijn deze al $\frac{1}{2}D_{n50}$ 'voorbij' de loslaatlijn. (2)

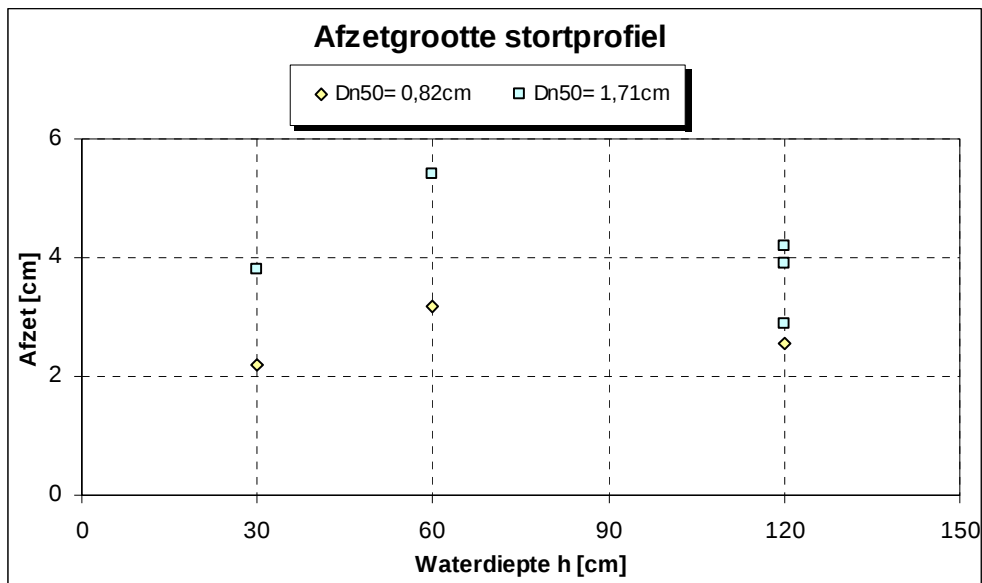
Tevens worden de stenen – doordat ze van een helling afschuiven – met een zekere horizontale snelheid in het water gestort. Deze snelheidscomponent zal echter na een relatief kort valtraject de (horizontale) snelheid van het water – in dit geval $u_w = 0$ – aannemen. (3)

Verder is het zo dat de spreiding van de stenen aan het begin van het valproces wordt beperkt door de 'wand' van het stortschip. Het materiaal kan dan alleen 'vanaf' het schip verplaatsen.

Verondersteld wordt dan ook dat de afzetgrootte groter wordt naarmate de steendiameter toeneemt en dat de waterdiepte slechts een 'geringe' invloed heeft.

De afzetgrootte is steeds bepaald aan de hand van de (gemiddelde) 'zwaartelijn' van het stortprofiel. Het verschil tussen de zwaartelijn en de stortlijn – de lijn waar vandaan het materiaal wordt gestort – is dan een maat voor de afzet.

In de onderstaande figuur zijn de gemeten waarden voor de afzet van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm uitgezet tegen de waterdiepte.

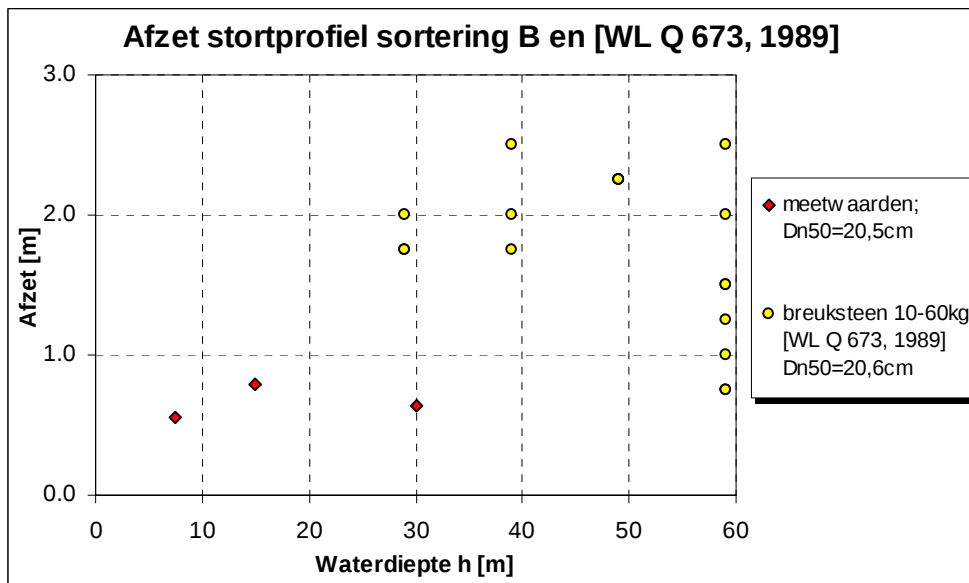


Figuur 9.12 Afzetgrootte van het stortprofiel voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm en voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm.

Uit Figuur 9.12 blijkt dat het stortprofiel van de grotere stenen een grotere afzet heeft. Dit lijkt algemeen geldig – zie boven. Het aantal meetpunten is echter onvoldoende om dit met ‘zekerheid’ te zeggen.

Ook het verloop van de afzetgrootte over de waterdiepte, is vanwege het geringe aantal meetpunten, niet met zekerheid vast te stellen. De veronderstelling dat de waterdiepte slechts van geringe invloed is op de afzetgrootte wordt echter niet tegengesproken.

Uit [WL Q 673, 1989] zijn wel (weer) naar prototype geschaalde waarden beschikbaar voor de afzet van het stortprofiel voor stenen met $D_{n50} = 20,6$ cm. Deze zijn vergelijkbaar met de opgeschaalde metingen voor de afzet van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm, zie onderstaande figuur.



Figuur 9.13 Naar prototypie geschaalde meetwaarden voor de afzet van stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm vergeleken met meetwaarden uit [WL Q 673, 1989]

De metingen uit [WL Q 673, 1989] volgens Figuur 9.13 geven weliswaar grotere waarden voor de afzetgrootte van het stortprofiel maar lijken ook constant over de waterdiepte te verlopen.

Nota bene:

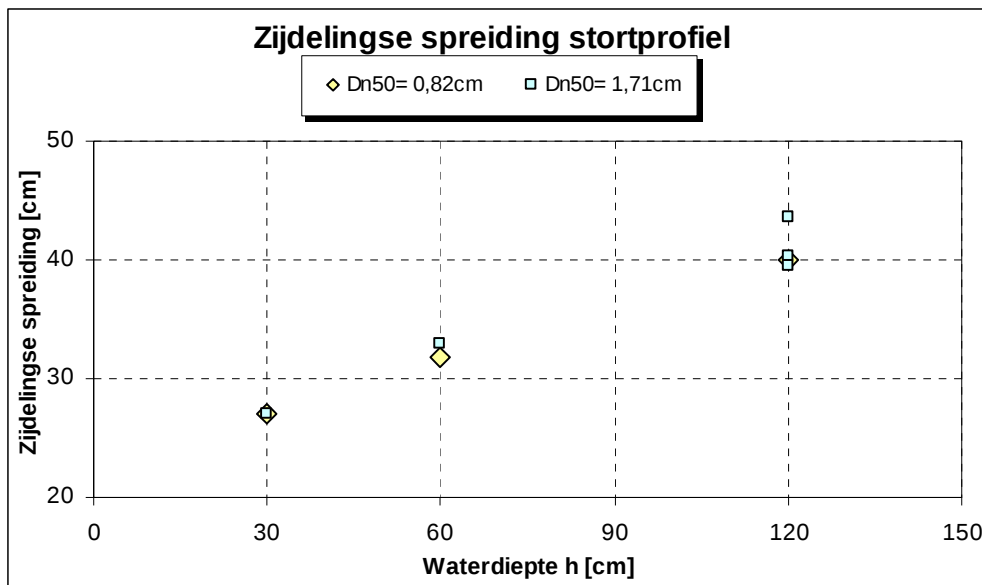
Een vergelijking van de afzetgrootten voor de stenen uit sortering B met die uit [WL Q 673, 1989] is om een tweetal redenen niet juist, namelijk:

- (1) In [WL Q 673, 1989] wordt het stortmateriaal verder boven de waterlijn losgelaten. Verondersteld wordt dat de afzet dan groter wordt. Het materiaal valt immers relatief langer door de lucht en heeft dan (in horizontale zin) minder last van de remmende werking van het water. Tevens zal de snelheid van de steen, wanneer deze in contact komt met het water, hoger zijn.
- (2) De modelstorter uit [WL Q 673, 1989] is niet voorzien van een verticale wand die de zijkant van het schip moet voorstellen. Direct onder water kunnen de stenen dan naar 'achteren' vallen, wat een kleinere afzet tot gevolg heeft.

9.5.2 Zijdelingse spreiding van het stortprofiel

De zijdelingse spreiding van het stortprofiel is bepaald door, in het gebied waar het stortprofiel theoretisch een constante zijdelingse spreiding heeft, van verschillende sneden steeds de breedte te bepalen. De zijdelingse spreiding van het stortprofiel kan dan opgevat worden als het gemiddelde van deze waarden.

In de onderstaande figuur zijn de gemeten waarden voor de zijdelingse spreiding uitgezet tegen de waterdiepte.

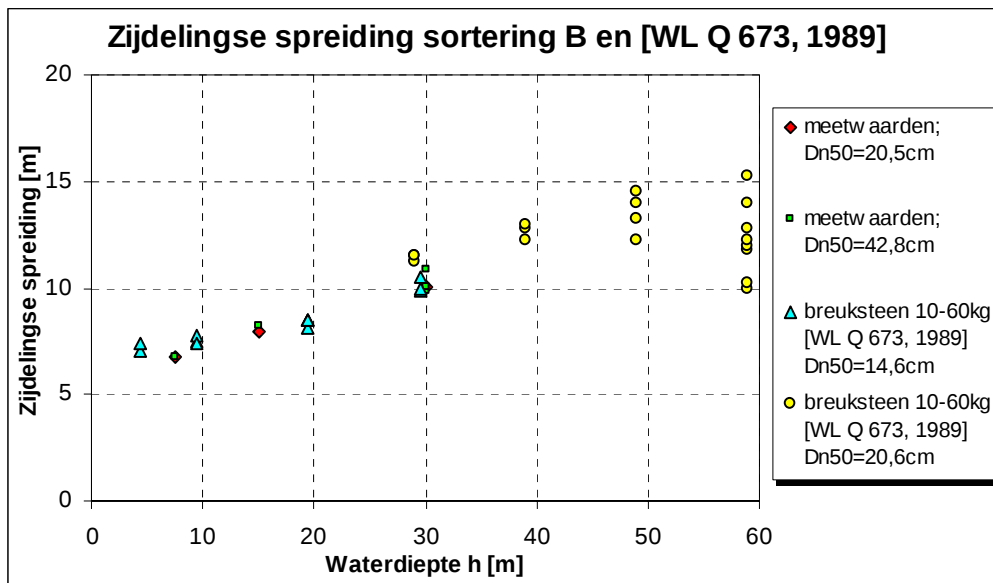


Figuur 9.14 Zijdelingse spreiding van het stortprofiel voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm.

Wat direct opvalt, is dat het verschil in (zijdelingse) spreiding tussen de verschillende steendiameters gering is. Dit is vreemd omdat kleine stenen over het algemeen minder spreiding hebben. De spreiding is immers evenredig met de wortel uit de nominale steendiameter.

Echter, voor de definitie van de zijdelingse spreiding is een 'rand' nodig waar het profiel 'ophoudt'. Hierbuiten liggen nog wel gewoon stenen. Van de grotere stenen zullen er procentueel gezien meer buiten de 'rand' liggen, omdat deze simpelweg een grotere spreiding hebben. Het stortprofiel wordt dan dus relatief smal. Voor de kleinere stenen is het verhaald precies omgekeerd. Er zullen relatief minder stenen buiten de 'rand' liggen, waardoor het stortprofiel relatief breder worden en de zijdelingse spreiding dus toeneemt.

Verondersteld wordt dan ook dat de zijdelingse spreiding onafhankelijk is van de steendiameter. Dit blijkt ook uit de onderstaande figuur, waarin prototypewaarden voor de zijdelingse spreiding van verschillende steendiameters tegen de waterdiepte zijn uitgezet.

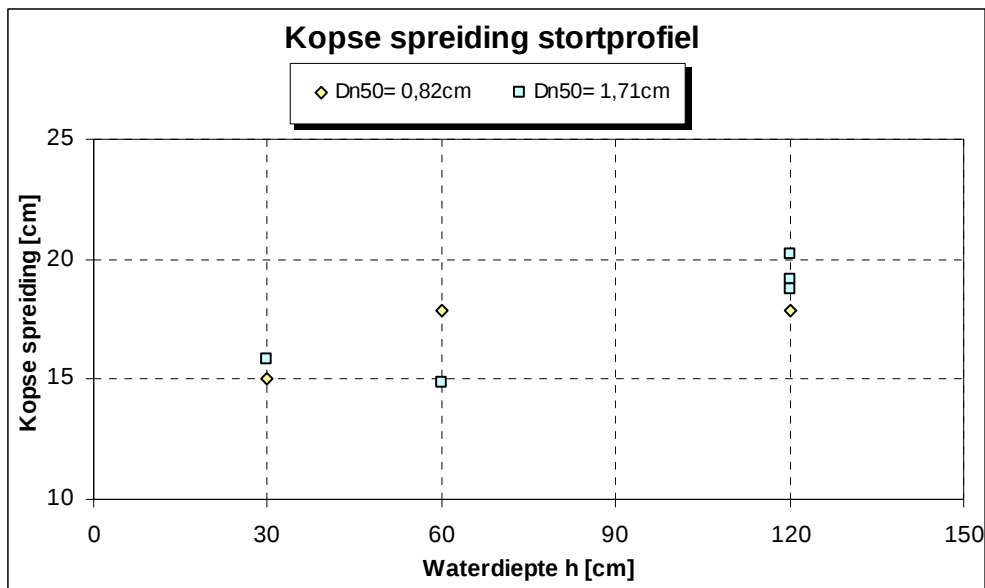


Figuur 9.15 Naar prototypie geschaalde meetwaarden voor de zijdelingse spreiding van stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm samen met meetwaarden uit [WL Q 673, 1989].

Tot slot van deze paragraaf moet opgemerkt worden dat, op een waterdiepte van 30 cm, de zijdelingse spreiding voor de stenen uit sortering A 'exact' gelijk is aan die van de stenen uit sortering B. Dit is niet toevallig. Op een waterdiepte van 30 cm is het stortprofiel van beide sorteringen namelijk overgegaan in een driehoeksvorm. Aangezien de profielhoogte (theoretisch) gelijk is, moet ook de breedte (zijdelingse spreiding) gelijk zijn.

9.5.3 Kopse spreiding

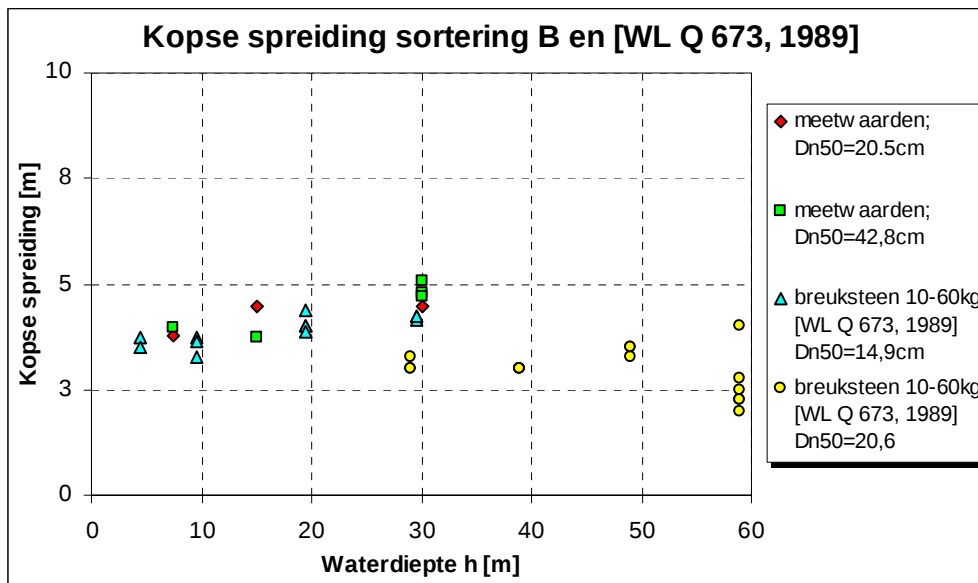
In de onderstaande figuur zijn de gemeten waarden voor de kopse spreiding van de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm uitgezet tegen de waterdiepte.



Figuur 9.16 Kopse spreiding van het stortprofiel voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm.

Voor de kopse spreiding geldt hetzelfde als voor de zijdelingse spreiding, namelijk dat een 'rand' van het stortprofiel gedefinieerd moet worden. Van de kleinere stenen zal dan relatief meer materiaal binnen deze 'rand' liggen. Verondersteld wordt dan ook dat de kopse spreiding weer onafhankelijk van de steendiameter is. Figuur 9.16 lijkt dit te bevestigen. Het aantal metingen is echter weer onvoldoende.

In [WL Q 673, 1989] is de kopse spreiding ook gemeten. In de onderstaande figuur zijn deze samen met de naar prototype geschaalde metingen uit Figuur 9.16 weergegeven.



Figuur 9.17 Naar prototype geschaalde meetwaarden voor de kopse spreiding van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm en van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm vergeleken met meetwaarden uit [WL Q 673, 1989].

De kopse spreiding lijkt inderdaad niet zozeer beïnvloed te worden door de steendiameter van het stortmateriaal. Wat verder opvalt is dat de kopse spreiding redelijk constant over de waterdiepte verloopt. Blijkbaar zijn de stenen meer geneigd in zijdelingse richting te spreiden. Wellicht omdat er in deze richting meer 'bewegingsvrijheid' is. In langsrichting – kopse spreiding – ondervinden de stenen wellicht hinder van de andere stenen die zijn gestort.

9.6 CONCLUSIES SERIE B

Naar aanleiding van paragraaf 9.4 kan het volgende geconcludeerd worden met betrekking tot de geldigheid van het "Lijnstort Spreiding Model".

Voor steenhoeveelheden, waarvan het stortprofiel voldoet aan een Gausskromme, kan de spreiding van het materiaal worden benaderd met de spreiding volgens het "Lijnstort Spreiding Model". Dit is het geval voor de relatief dunne stortlagen ten behoeve van bodem- en oeververdedigingswerken.

De hoogte van het stortprofiel kan, voor waterdiepten groter dan $h = h_{\Delta}$, benaderd worden door de hoogte volgens het "Lijnstort Spreiding Model":

$$z_{stort} = \frac{A_{dek}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N} = \frac{A_{dek}}{1,71\sqrt{D_{n50}} \cdot h}$$

De waterdiepte h_{Δ} is hierbij gedefinieerd als

$$h_{\Delta} = \frac{A_{dek}}{2c^2 \cdot \sqrt{2\pi} \tan(\phi_m) \cdot D_{n50}} = \frac{A_{dek}}{2,35 \tan(\phi_m) \cdot D_{n50}}$$

Voor waterdiepten die kleiner zijn dan $h = h_{\Delta}$, voldoet de hoogte volgens het "Lijnstort Spreiding Model" niet meer. De profielhoogte is dan onafhankelijk van de waterdiepte en slechts afhankelijk van de lading en de hoek van natuurlijk talud van de stenen onder water:

$$z_{\Delta} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\sqrt{2\pi}}} \sqrt{A_{dek} \cdot \tan(\phi_m)} = 0,89\sqrt{A_{dek} \cdot \tan(\phi_m)}$$

Het aantal metingen waarop deze 'conclusies' zijn gebaseerd is gering. Enige voorzichtigheid is dus geboden en aanvullende metingen zijn welkom.

10 SERIE C: AANBRENGEN VAN STEENBESTORTINGEN OP EEN VLAKE BODEM

Dit hoofdstuk handelt over het resultaat van steenbestortingen van ‘dunne’ maar gelijkmatige dikte op een vlakke bodem bij gebruikmaking van een bestaande stortmethode, de methode van het “discreet verhalen”.

10.1 INLEIDING

Het aanbrengen van steenbestortingen van ‘dunne’ maar gelijkmatige dikte met behulp van een schuifstorter gebeurt veelal door middel van de methode van “continu-verhalen”, zie bijlage C. Het laaddek wordt dan (met een ‘constante’ schuifsnellheid) leegggeschoven, terwijl het schip met een ‘constante’ verhaalsnellheid een zijdelingse beweging maakt langs de stortkoers.

Uit de bresproeven blijkt dat de hoeveelheid materiaal die van het laaddek wordt geschoven niet constant (over de tijd) verloopt. In de eerste plaats is er de begin- en eindonregelmatigheid in het bresproces en de onregelmatigheid in het feitelijke afschuiven van het stortmateriaal. Verder is het zo dat de hoeveelheden materiaal niet gelijkmatig over de lengte van het laaddek afschuiven.

Als het stortschip nu met een ‘constante’ snelheid (zijdelings) wordt verplaatst, dan hebben de bovengenoemde onregelmatigheden direct gevolgen voor het stortresultaat.

- ♦ De onregelmatigheden in het bresproces dragen bij aan een ‘ongelijkmatige’ laagdikte (over de lengte) van het stortprofiel.
- ♦ De ongelijkmatigheid van het bresgedrag over de lengte van het laaddek veroorzaakt ‘gaten’ in (de breedte van) de stortlaag.

Voorgesteld wordt dan ook om de methode van “discreet-verhalen” toe te passen. Hieronder wordt verstaan: op één positie de schuiven over een bepaalde lengte uitdrukken, vervolgens de steenstorter over een bepaalde afstand verhalen, en weer opnieuw over een zekere lengte de schuiven uitdrukken, etc... Onregelmatigheden in tijd en plaats worden dan uitgemiddeld.

Deze werkmethode van het “discreet verhalen” is getest aan de hand van een viertal experimenten; zie onderstaande tabel.

Tabel 10.1 Overzicht experimenten serie C.

Serie	D_{n50} [cm]	h [cm]	V_s [mm/s]	aantal storts [-]
C.1	1,71	120	0,65	4
C.2	1,71	120	0,65	5
C.3	0,82	120	0,65	8
C.4	0,82	120	0,65	9

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

In paragraaf 10.2 wordt de methode van “discreet verhalen” theoretisch benaderd. Deze uitvoeringsmethodiek wordt vervolgens in paragraaf 10.3 getest aan de hand van de resultaten van de experimenten. De conclusies en aanbevelingen zijn tenslotte opgenomen in paragraaf 10.4.

10.2 THEORETISCHE BENADERING METHODE VAN “DISCREET VERHALEN”

Bij de theoretische benadering van de methode van “discreet verhalen” spelen twee aspecten een belangrijke rol, namelijk:

- de tussenafstand van twee opeenvolgende storts (ook wel: verhaalafstand) en
- het aantal storts.

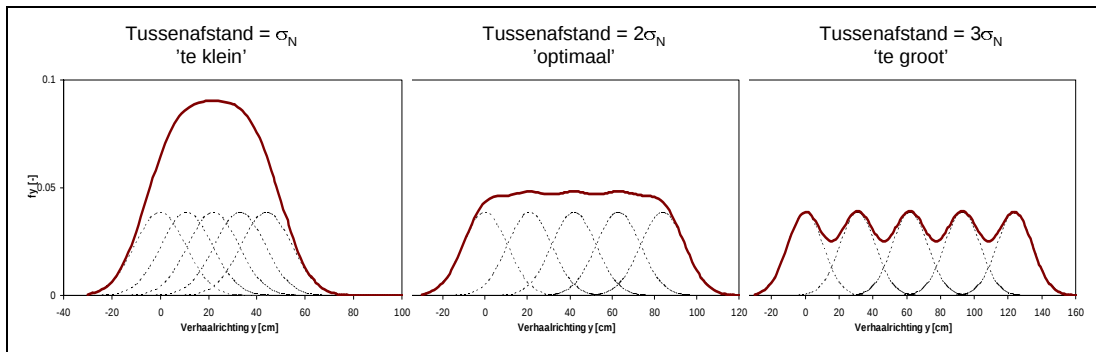
10.2.1 Tussenafstand twee opeenvolgende storts: verhaalafstand

De (kansverdeling voor de) verplaatsing van het stortmateriaal in de verhaalrichting van het stortschip, de y -richting, wordt gegeven door:

$$f_y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_N}\right)^2}, \text{ met } \sigma_N = c\sqrt{h \cdot D_{n50}} \quad (10.1)$$

Met behulp van (3.1) kan een tussenafstand gekozen worden die een ‘optimale’ aansluiting van de onderlinge storts geeft. Voorwaarde is wel dat er per stort voldoende stenen worden gestort om aan de kansverdeling te voldoen.

De tussenafstand mag niet ‘te klein’ mag zijn, omdat de verschillende storts dan zodanig dicht bij elkaar liggen dat voornamelijk laagdikte wordt opgebouwd. Verder mag de tussenafstand ook niet ‘te groot’ worden. Het uiteindelijke stortprofiel krijgt dan een ongelijkmatige vorm.



Figuur 10.1 Aansluiting stort bij verschillende tussenafstanden.

Er wordt dan ook gekozen voor tussenafstand die gelijk is aan $2\sigma_N$. Dit geeft een 'optimale' aansluiting. Zie Figuur 10.1.

10.2.2 Aantal stort

Het aantal stort is bepaald door de tussenafstand en de zogenaamde "stortvaklengte". Dit is de lengte van het theoretische stortvak met laagdikte " d_0 " en breedte " B ". De "stortvaklengte" kan worden bepaald met vergelijking (10.2).

$$V_{dek} = L_{stort} \cdot B_{stort} \cdot d_0, \text{ of } L_{stort} = \frac{V_{dek}}{B_{stort} \cdot d_0} = \frac{A_{dek}}{d_0} \quad (10.2)$$

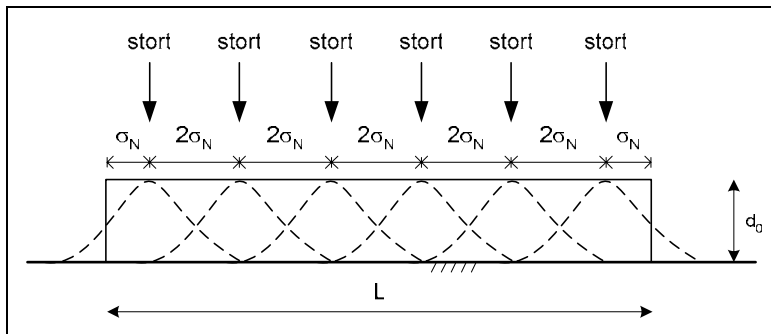
Waarin:	V_{dek}	:	volume van het stortmateriaal op het laaddek inclusief poriën	[m ³]
	L_{stort}	:	"stortvaklengte"	[m]
	B_{stort}	:	breedte van het stortvak; bij benadering de lengte van het laaddek van de modelschuifstort	[m]
	A_{dek}	:	oppervlak van de doorsnede op het laaddek	[m ²]
	d_0	:	laagdikte van het stortprofiel	[m]

De laagdikte (d_0) wordt veelal uitgedrukt in een aantal malen de D_{n50} .

$$d_0 = m \cdot D_{n50} \quad (10.3)$$

Waarin:	m	:	aantal malen de D_{n50}	[-]
---------	-----	---	---------------------------	-----

Verder geldt dat het aantal stort gelijk is aan het aantal tussenafstanden, zie onderstaande figuur.



Figuur 10.2 Aantal storts en aantal tussenafstanden bij stortvklengte L.

Het aantal storts kan nu worden bepaald met:

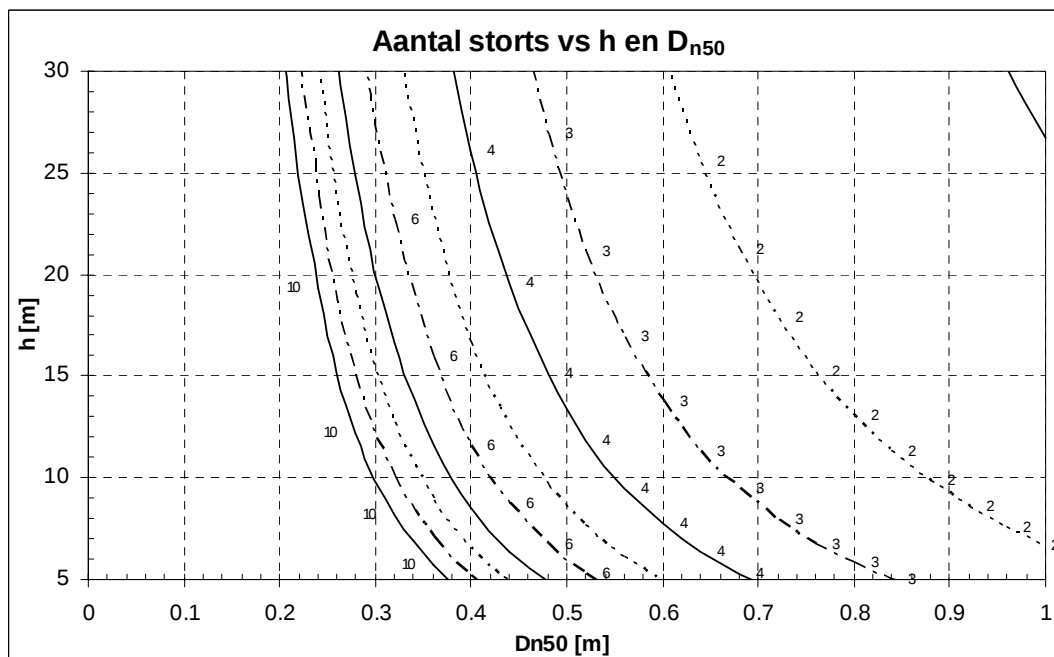
$$s = \frac{\text{stortvklengte}}{\text{tussenafstand}} = \frac{L_{\text{stort}}}{2\sigma_N} = \frac{A_{\text{dek}}}{2cm\sqrt{D_{n50}^3 \cdot h}} \quad (10.4)$$

Waarin: s : aantal storts

[-]

Aan de hand van de stortkarakteristiek kan de storttijd van elk afzonderlijk stort bepaald worden. Algemeen geldt dat deze aan het begin en aan het eind van het stortproces langer, en daar tussenin zo goed als constant is

In Figuur 10.1 is vergelijking (10.4) voor praktijkwaarden van D_{n50} en h grafisch weergegeven. De laagdiktefactor "m" is hierbij gesteld op 1,5 met een minimale laagdikte van 20 cm.



Figuur 10.3 Aantal storts bij verschillende combinaties van waterdiepte (h) en steendiameter (D_{n50}).

Nota bene:

- (1) Uit Figuur 10.3 blijkt dat het aantal storts bij relatief kleine steendiameters en/of relatief kleine waterdiepten 'groot' wordt. Het steeds (discreet) verhalen van het stortschip gaat dan over in een continu proces die kan worden opgevat als de methode van "continu-verhalen". Het bresgedrag wordt dan ook regelmatig.
- (2) De beoogde 'dunne' stortlaag maakt onderdeel uit van een uit meerdere stortlagen opgebouwde laagdikte.

10.3 STORTRESULTAAT METHODE VAN "DISCREET VERHALEN"

Het theoretisch benodigde aantal storts kan met behulp van vergelijking (10.4) bepaald worden, waarin:

- ♦ $A_{dek} = 170 \text{ cm}^2$ en
- ♦ $c = 0,685$.

Zie onderstaande tabel.

Tabel 10.2 Theoretisch benodigd aantal storts (s) bij waarden voor D_{n50} , h en m .

D_{n50} [cm]	h [cm]	m [-]	s [-]
1,71	120	1,5	4
0,82	120	2,0	8

Nota bene:

De vereiste laagdikte voor het stortprofiel van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82 \text{ cm}$ is gesteld op $2D_{n50}$. Bij een laagdikte van $1,5D_{n50}$ wordt de (totale) afstand waarover het stortschip theoretisch moet worden verhaald namelijk te groot.

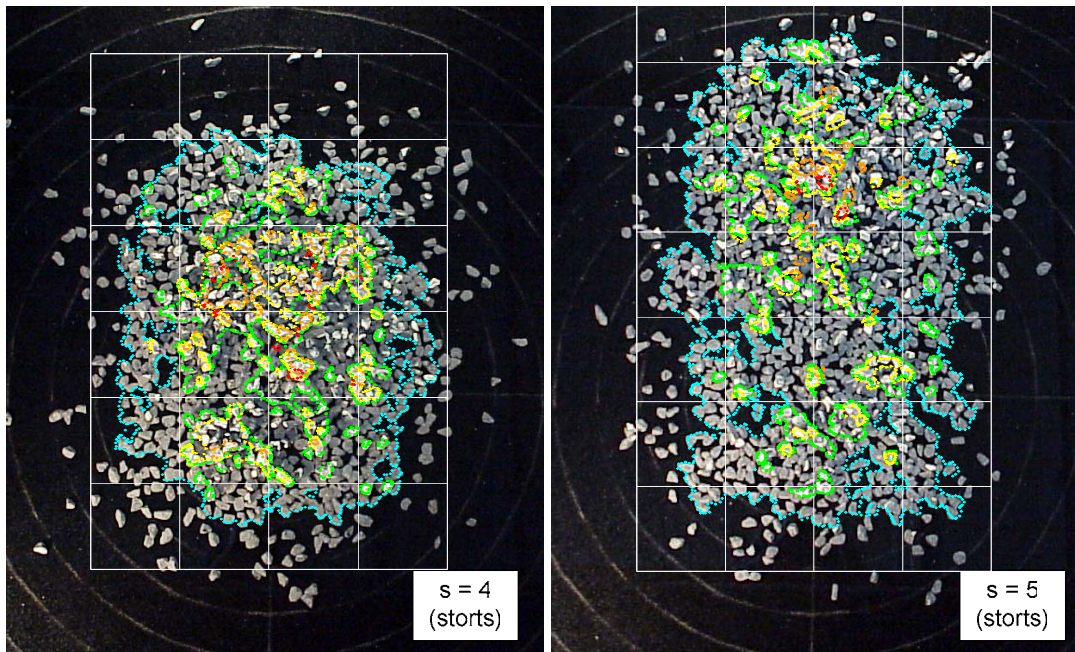
De theoretische benadering volgens de methode van het "discreet verhalen" wordt in deze paragraaf 'getest' aan de hand van het profiel van de stortproeven.

10.3.1 Resultaat voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71 \text{ cm}$

In Figuur 10.4 is het stortresultaat voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71 \text{ cm}$, op een waterdiepte van 120 cm, bij 4 en bij 5 storts weergegeven. De gekleurde lijnen geven hierbij een indicatie⁽¹⁹⁾ van de verschillende 'hoogtes' over het stortprofiel, met:

- : $z = 0,0 \text{ cm}$
- : $z = 2,0 \text{ cm}$ ($=1,2D_{n50}$)
- : $z = 2,7 \text{ cm}$ ($=1,6D_{n50}$)
- : $z = 3,2 \text{ cm}$ ($=1,9D_{n50}$)
- : $z = 4,0 \text{ cm}$ ($=2,4D_{n50}$)

¹⁹ Vanwege de geringe laagdikte zijn de verschillende hoogtes van het stortprofiel moeilijk te onderscheiden. Ook ligt de bodem niet 'exact' horizontaal.



Figuur 10.4 Stortresultaat voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm, op een waterdiepte van 120 cm, bij 4 en bij 5 storts.

Uit de bovenstaande figuur kan geconcludeerd worden dat het stortprofiel bij het theoretische aantal van 4 storts het 'beste' resultaat geeft. Het stortprofiel bij $s = 5$ storts is weliswaar 'gelijkmatiger' (en 'dunner'), maar er komen duidelijk (te grote) gaten in het stortprofiel.

In het bovenaanzicht van het stortprofiel bij $s = 4$ storts zijn ook kleine 'gaatjes' zichtbaar. Verondersteld wordt echter dat de totale laagdikte uit meerdere van dit soort 'dunne' stortlagen wordt opgebouwd ("multi-passing"), waarbij de 'gaatjes' (uit de eerste stortlaag) 'opgevuld' worden.

Aan de hand van de hoogtelijnen van de stortlaag bij $s = 4$ storts kan gesteld worden dat de laagdikte grofweg varieert tussen (ca.) $1D_{n50}$ en (ca.) $2D_{n50}$. Dit is de vereiste laagdikte met een 'afwijking' van $\pm 0,5D_{n50}$.

Opgemerkt moet worden dat de hoogte van het stortprofiel hier en daar ca. $2,5D_{n50}$ bedraagt. Dit zijn voornamelijk 'losse' stenen die uit het stortprofiel steken, die dan ook niet tot de 'gemiddelde' laagdikte meegerekend worden.

10.3.2 Resultaat voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm

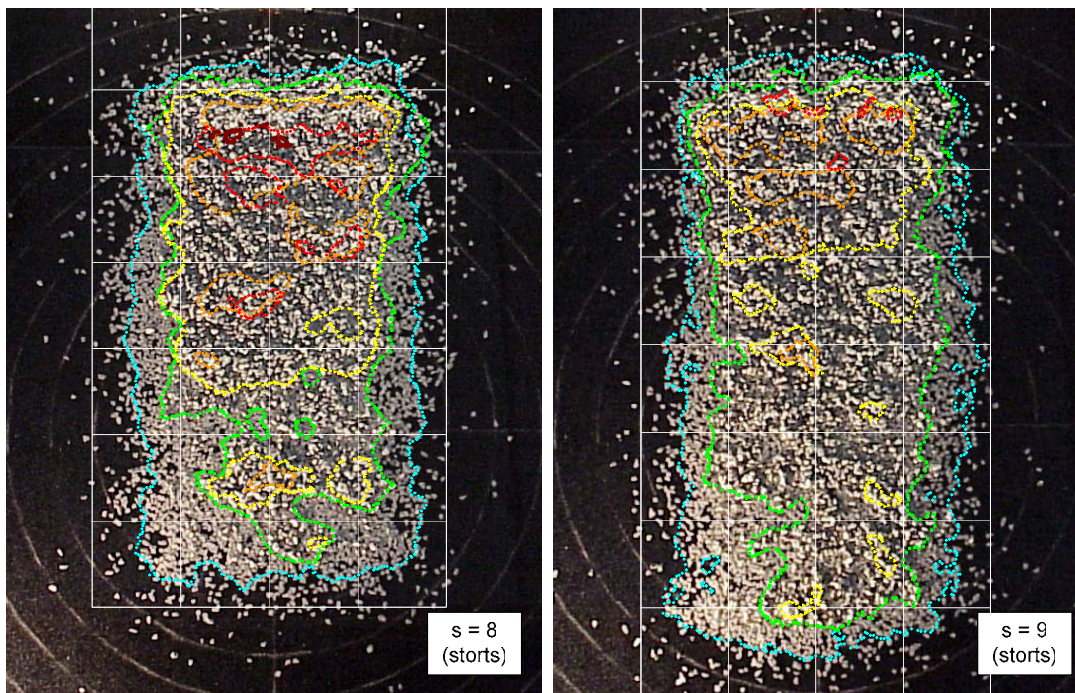
In Figuur 10.5 is het stortresultaat voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm, op een waterdiepte van 120 cm, bij 8 en bij 9 storts weergegeven. Voor beide stortlagen is de “kleuren-index”:

	:	$z = 0,0$ cm	
	:	$z = 1,3$ cm	($=1,6D_{n50}$)
	:	$z = 1,7$ cm	($=2,1D_{n50}$)
	:	$z = 2,4$ cm	($=2,9D_{n50}$)
	:	$z = 3,0$ cm	($=3,7D_{n50}$)
	:	$z = 3,6$ cm	($=4,4D_{n50}$)

Opmerking:

Aan de hand van de hoogtelijnen lijkt het of het stortprofiel ‘scheef’ gestort is. Dit is echter niet het geval, zie ook Figuur 10.6. Het is namelijk de bodem die ietwat onder een helling ligt. Het begin en eind van het stortvak (met een totale lengte heeft van ca. 1,2 meter) hebben een ‘hoogteverschil’ van ca. 4 mm. De bodem ligt dan onder een helling van ca. 1:300 wat nog steeds ‘recht’ te noemen is. Voor de hoogte van het stortprofiel, die maximaal ca. 3,6 cm bedraagt, is het echter wel een grote afwijking. De twee stortprofielen kunnen dan ook alleen kwalitatief vergeleken worden.

Bovengenoemde speelt overigens ook bij de stortprofielen uit de vorige paragraaf. Hier is het effect echter minder erg omdat het stortprofiel ten eerste korter, en ten tweede hoger is.



Figuur 10.5 Stortresultaat voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm, op een waterdiepte van 120 cm, bij 8 en bij 9 storts.

Bij beide stortprofielen uit Figuur 10.5 zijn geen ‘gaten’ in het stortprofiel zichtbaar. Dit is ook te verwachten omdat er, in verhouding tot de stortprofielen uit de vorige paragraaf, een relatief dikkere laag wordt gestort – $2D_{n50}$ in plaats van $1,5D_{n50}$. Voor een stortlaag met een dikte van $1,5D_{n50}$ zouden theoretisch 11 storts benodigd zijn met een totale lengte van ca. 1,5 meter. Vanwege de beperkte afmetingen van de bak kan deze niet gestort worden.

Met het oog op de vereiste laagdikte kan gesteld worden dat het stortprofiel bij $s = 8$ storts het beste voldoet. In vergelijking tot het stortprofiel bij $s = 9$ storts liggen er meer stenen binnen de hoogtelijn van $z = 2D_{n50}$ (gele lijn in Figuur 10.5).

Al met al kan geconcludeerd worden dat het stortprofiel bij het berekende aantal van $s = 8$ storts het ‘beste’ resultaat geeft.

Nota bene:

Dat het stortprofiel ‘gelijkmatig’ is blijkt wel uit de onderstaande figuur.



Figuur 10.6 Zijaanzicht stortprofiel voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm bij 9 storts.

10.4 CONCLUSIES

De methode van “discreet verhalen” lijkt, op basis van de stortresultaten, een geschikte methode voor de uitvoering van het aanbrengen van ‘dunne’ bestortingslagen ten behoeve van bodem- en oeververdedigingswerken.

Het aantal storts kan worden bepaald met:

$$s = \frac{A_{dek}}{2cm\sqrt{D_{n50}^3 \cdot h}} = \frac{A_{dek}}{1,4m\sqrt{D_{n50}^3 \cdot h}} \quad (10.5)$$

De afstand waarover het stortschip steeds moet worden verhaald wordt gegeven door:

$$dv = 2c\sqrt{D_{n50} \cdot h} = 1,4\sqrt{D_{n50} \cdot h} \quad (10.6)$$

Voorzichtigheid is echter geboden gezien het geringe aantal experimenten. Aanvullende metingen zijn gewenst.

11 SERIE D: (STATIONAIRE) STORTPROEVEN OP EEN TALUD

Dit hoofdstuk handelt over de experimenten betreffende het storten op een talud.

11.1 INLEIDING

Tot op het moment dat het stortmateriaal de bodem bereikt is het valgedrag van de stenen, wanneer op een talud wordt gestort, identiek aan het valgedrag bij het storten op een vlakke bodem. Pas wanneer het materiaal in aanraking komt met de bodem gaat het gedrag afwijken.

Er is een viertal (stationaire) stortproeven uitgevoerd op een talud van 1:3 om dit gedrag te onderkennen, zie Tabel 7.4. Het betreft experimenten met een oriënterend karakter, die (voornamelijk) bedoeld zijn als aanbeveling voor vervolgonderzoek.

Tabel 11.1 Overzicht experimenten serie D.

Serie	D_{n50} [cm]	h_L [cm]	V_s [mm/s]
D.1	1,71	90	0,75
D.2	0,82	90	0,75
D.3	1,71	80, 100 ⁽²⁰⁾	0,75
D.4	0,82	80, 100 ⁽²¹⁾	0,75

Dit hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

In paragraaf 11.2 is het storten op een talud theoretisch benaderd. De waarnemingen met betrekking tot het valgedrag van stenen op een talud staan vermeld in paragraaf 11.3. De hieruit volgende aanbevelingen voor een vervolgonderzoek zijn tenslotte opgenomen in paragraaf 11.4.

²⁰ De lading wordt in twee keer gestort; op verschillende posities met bijbehorende 'waterdiepten' van 80 cm en 100 cm.

²¹ Idem als ⁽²²⁾.

11.2 THEORETISCHE BENADERING STORTEN OP EEN TALUD

In deze paragraaf wordt een tweetal aspecten, met betrekking tot het storten op een talud, theoretisch benaderd, namelijk:

- de spreiding van het stortmateriaal, en
- het afschuiven van het stortprofiel op een talud met helling $1 : \alpha_t$.

11.2.1 Spreiding op een talud met helling $1 : \alpha_t$

Het belangrijkste uitgangspunt voor de benaderingsvergelijking voor de spreiding van het stortmateriaal op een talud is dat de stenen, wanneer deze in contact komen met de ondergrond, niet “wegspringen” of “afrollen”. Verder wordt de spreiding gerelateerd aan de waterdiepte loodrecht onder de ‘stortlijn’ (h_1).

De spreiding van het stortmateriaal op een vlakke bodem, bij een waterdiepte van $h = h_1$, wordt, gezien als een ‘breedte’ (van het stortprofiel) waarbinnen (theoretisch) 95% van het stortmateriaal ligt:

$$y_{stort} = 4\sigma_N = 4c\sqrt{D_{n50} \cdot h_1} \quad (11.1)$$

waarin: y_{stort} : breedte van het stortprofiel [m]

Het verloop van deze ‘breedte’ over de diepte is dan bepaald door de vergelijkingen

$$y = \pm 2c\sqrt{D_{n50} \cdot h}, \text{ of door } h = \frac{y^2}{4c^2 D_{n50}} \quad (11.2)$$

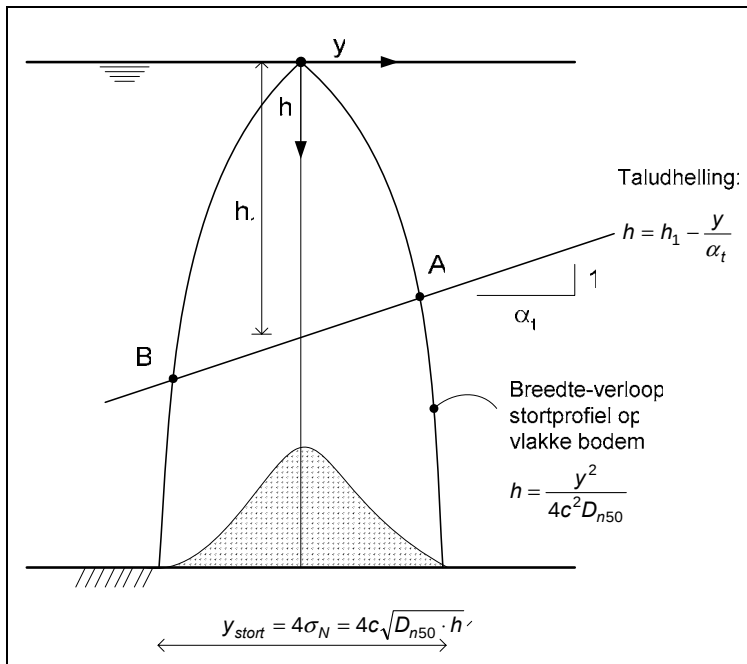
waarin: y : horizontale verplaatsing in y-richting [m]
 h : waterdiepte [m]

De geometrie van het talud kan worden beschreven met de vergelijking

$$h = h_1 - \frac{y}{\alpha_t} \quad (11.3)$$

waarin: α_t : taludhelling $1 : \alpha_t$ [-]

Een en ander is ook weergegeven in de onderstaande figuur.



Figuur 11.1 Schematisatie van het valproces van stenen op een vlakke bodem en op een talud.

De breedte van het stortprofiel op een talud ten opzichte van de bodem (en de waterlijn) kan gezien worden als de loodrechte afstand tussen de punten "A" en "B", zie Figuur 11.1. Dit zijn de twee snijpunten van vergelijking (3.1) en vergelijking (11.3).

Gelijkstelling van (3.1) en (11.3) geeft na enig rekenwerk:

$$y = -\frac{2c^2 D_{n50}}{\alpha_t} \pm 2c \sqrt{D_{n50}} \sqrt{h_1 + \frac{c^2 D_{n50}}{\alpha_t^2}} \quad (11.4)$$

De 'factor' $\frac{c^2 D_{n50}}{\alpha_t^2}$ in vergelijking (11.4) is verwaarloosbaar klein ten opzichte van de waterdiepte (h_1).

Ter illustratie: voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm en bij een taludhelling van 1:3 bedraagt deze 'factor' 0,09 cm. De waterdiepten zijn een orde 100 tot 1000 groter.

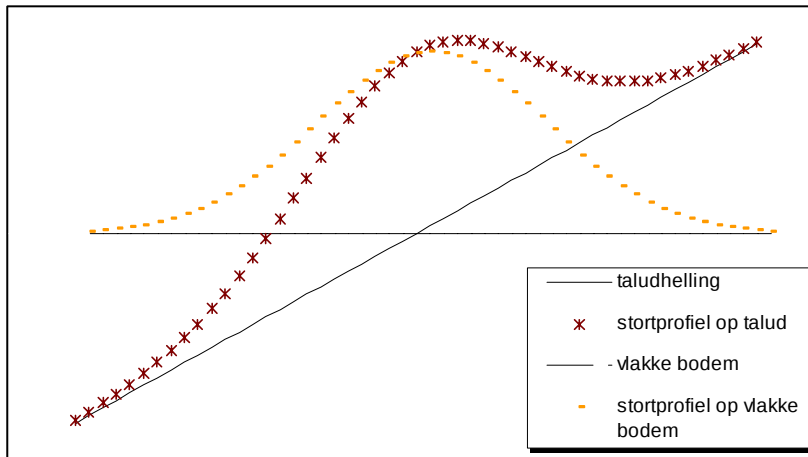
Voor de 'breedte' van het stortprofiel op een talud met helling 1 : α_t geldt dan:

$$y_{stort} = \left(-\frac{2c^2 D_{n50}}{\alpha_t} + 2c \sqrt{D_{n50} \cdot h_1} \right) - \left(-\frac{2c^2 D_{n50}}{\alpha_t} - 2c \sqrt{D_{n50} \cdot h_1} \right) = 4c \sqrt{D_{n50} \cdot h_1} \quad (11.5)$$

Deze is gelijk aan de 'breedte' van het stortprofiel op een vlakke bodem bij een waterdiepte van $h = h_{\perp} = h_1$.

De spreiding van de stenen op een talud op een 'diepte' $h_{\perp} = h_1$ – de diepte loodrecht onder de stortlijn – is dus gelijk aan de spreiding van de stenen op een vlakke bodem bij een waterdiepte van $h = h_1$: $\sigma_N = c\sqrt{D_{n50} \cdot h_{\perp}}$.

De theoretische vorm van het stortprofiel is dan, in vergelijking met het stortprofiel op een vlakke bodem, zoals weergegeven in de onderstaande figuur.



Figuur 11.2 Theoretische vorm van het stortprofiel op een talud in vergelijking met het stortprofiel op een vlakke bodem.

11.2.2 Afschuiven van het stortprofiel op een talud van $1 : \alpha_t$

Ten gevolge van de taludhelling zal het stortprofiel aan de 'achterzijde' – van het talud af – eerder gaan afschuiven. De waterdiepte ($h_{o,t}$) waarop dit gebeurt kan worden bepaald met onderstaande vergelijking.

$$h_{o,t} = \frac{A}{1,94 \left(\tan(\phi_m) - \frac{1}{\alpha_t} \right) \cdot D_{n50}} \quad (11.6)$$

waarin: $h_{o,t}$: waterdiepte waarbij het profiel begint af te schuiven op een talud [m]

De berekende waarden voor $h_{o,t}$ voor het stortprofiel van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm en voor het stortprofiel van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm zijn in de onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 11.2 Waarden voor $h_{o,t}$.

D_{n50} [cm]	$h_{o,t}$ [cm]
0.82	211
1.71	101

Nota bene:

De waarden voor $h_{o,t}$ uit de bovenstaande tabel gelden wanneer de ‘volledige’ lading van het dek geschoven wordt. In serie D.3 en serie D.4 (zie Tabel 7.4) wordt slechts het ‘halve’ laaddek leeg geschoven, de waarden voor $h_{o,t}$ worden dan gehalveerd.

11.3 WAARNEMINGEN VAN HET VALGEDRAG VAN STENEN OP EEN TALUD

De belangrijkste waarnemingen met betrekking tot het valgedrag van de stenen wanneer deze op een talud gestort worden zijn:

1. Wanneer de stenen in contact komen met de bodem “rollen” ze soms van het talud af.
2. Het proces van “afrollen” speelt vooral aan het begin van het stortproces een rol. Naarmate er meer stenen worden gestort wordt het “afrollen” verhinderd door de al gestorte stenen.
3. Tijdens het stortproces is, vooral voor de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm, het afschuiven van het ‘stortprofiel’ duidelijk waar te nemen, zie ook Figuur 11.3.

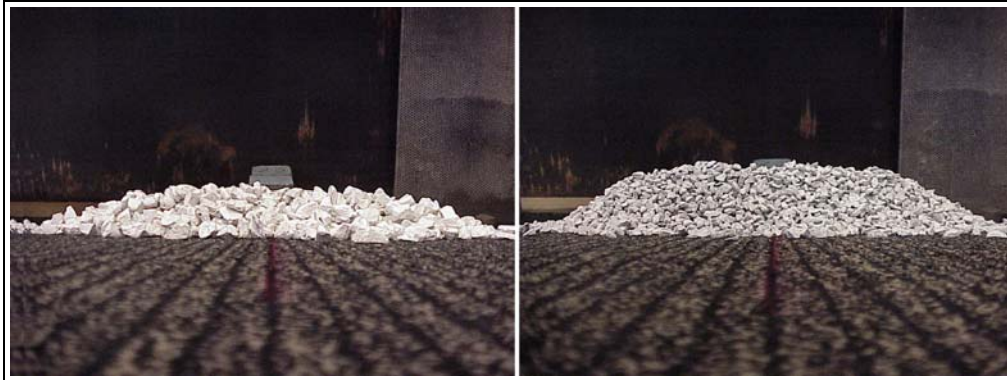
Met betrekking tot het stortprofiel van de gestorte stenen kan het volgende gezegd worden.

1. De dwarsdoorsnede van het stortprofiel is, qua vorm, in overeenstemming met het profiel zoals geschetst in Figuur 11.2. Zie ook onderstaande figuur.



Figuur 11.3 Zijaanzicht van de stortprofielen op een talud van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm (links) en van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm (rechts).

2. Aan de 'voorzijde' heeft het profiel een overeenkomstige vorm met het stortprofiel op een vlakke bodem. De hoogte ervan (loodrecht op het talud) is wel duidelijk lager.



Figuur 11.4 Vooraanzicht van de stortprofielen op een talud van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm (links) en van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 0,82$ cm (rechts).

Voor een volledig overzicht van de foto's van de stortprofielen uit serie D wordt verwezen naar Bijlage K.

11.4 AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK

In paragraaf 11.3 is opgemerkt dat het stortmateriaal, na in contact te zijn gekomen met de ondergrond, van het talud afrolt. Dit is in tegenspraak met het uitgangspunt voor de theoretische benadering uit paragraaf 11.2.

De vraag is alleen in hoeverre dit "afrollen" van invloed is op de theoretische benadering voor de spreiding van het stortmateriaal volgens vergelijking (11.5). Wellicht is het aantal stenen dat naar beneden rolt 'klein' genoeg, zodat de spreiding van het stortmateriaal op een talud nog steeds voornamelijk wordt bepaald door het "Random Walk" gedrag van de stenen onder water.

Nota bene:

In de praktijk zal, wanneer op een talud steenbestortingen aangebracht worden, veelal 'tegen het talud op' worden gestort. Het "afrollen" van het stortmateriaal wordt dan beperkt omdat door het al gestorte gedeelte. Dit komt de geldigheid van de benadering voor de spreiding op een talud ten goede.

Voor wat betreft de spreiding op een talud wordt aanbevolen deze te bepalen aan de hand van een kansverdeling van de horizontale verplaatsingen van het stortmateriaal op het talud. De voorgestelde methode is als volgt:

(1) De stenen worden vanaf een 'volbeladen' schuifstortor op de bodem gestort. (2) Na enige tijd, wanneer er voldoende stenen op de bodem liggen (waar een betrouwbare kansverdeling van kan worden bepaald), wordt het schuifproces stilgezet. (3) De verdeling van het materiaal op de bodem kan bepaald worden door, aan de hand van een foto van het bovenaanzicht, de posities van de verschillende stenen te bepalen.

Verder lijkt het zinvol deze kansverdeling te bepalen op verschillende taludhellingen. De mate van “afrollen” zal namelijk afhangen van de taludhelling en afnemen als op een flauwer talud wordt gestort.

12 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Dit hoofdstuk handelt over de belangrijkste conclusies en aanbevelingen met betrekking tot het stortgedrag van een schuifstortter.

12.1 CONCLUSIES

Het doel van dit onderzoek was om inzicht te krijgen in het stortproces van de schuifstortter. Conclusies met betrekking tot

- ♦ het gedrag van het stortmateriaal wanneer dit van het laaddek afgeschoven wordt (“bresgedrag”), en
 - ♦ hoe dit materiaal zich onder water gedraagt (“spreiding”)
- zijn onderstaand opgenomen.

De hieruit volgende werkmethode voor het aanbrengen van steenbestortingen is aansluitend beschouwd.

12.1.1 Conclusies met betrekking tot het bresgedrag van het stortmateriaal.

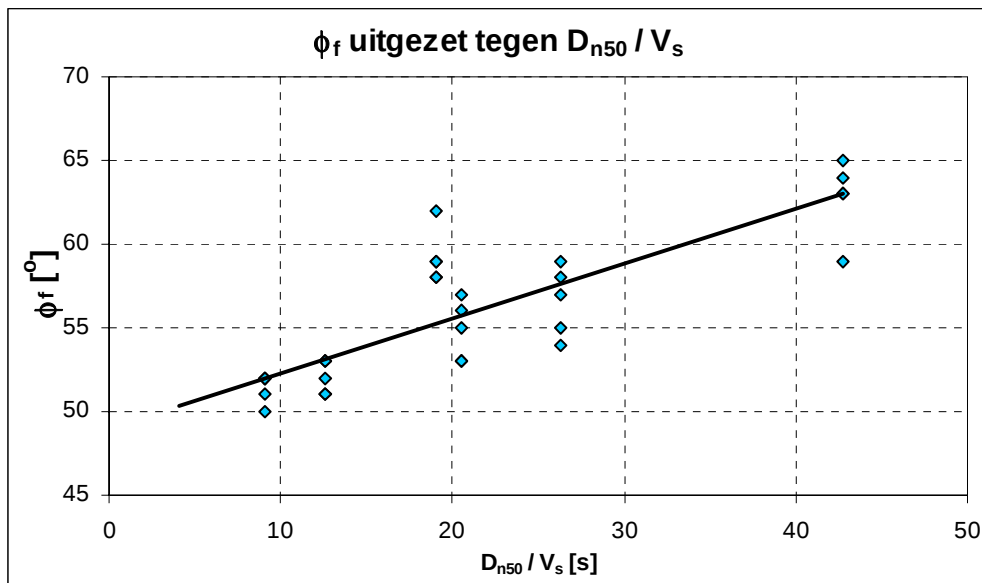
Tijdens het zijdelings overboord zetten van het stortmateriaal is er een tweetal onregelmatigheden in het bresgedrag van de stenen op het laaddek van de schuifstortter, namelijk

3. een (theoretische) begin- en eindonregelmatigheid van het bresproces, en
 4. een onregelmatigheid in het afwisselend afschuiven –bressen – van het stortmateriaal.
- Ook verloopt het bresgedrag niet gelijkmatig over de lengte van het laaddek.

Ad 1

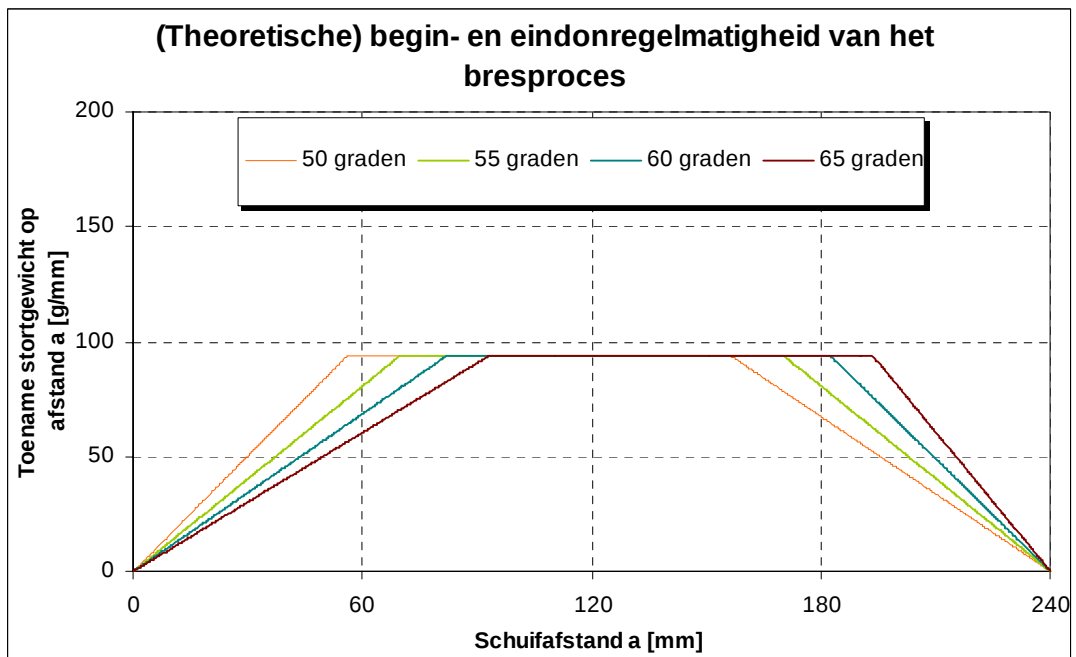
De begin- eindonregelmatigheid van het bresproces wordt toegeschreven aan de hoek van het valfront (ϕ_f) en aan de vorm van de lading. Doordat de hoek van het valfront groter is dan de hoek van natuurlijk talud waaronder de stenen op het laaddek liggen zal de ‘valhoogte’ van de stenen aan het begin van het schuifproces toenemen. Een en ander leidt tot een beginonregelmatigheid in het bresproces. Aan het eind van het schuifproces blijven er steeds minder stenen op het laaddek achter. De lading neemt dan ook in ‘(val)hoogte’ af, zodat hier ook een onregelmatigheid in het bresproces optreedt.

De hoek van het valfront wordt steiler naarmate de steendiameter toeneemt en de schuifsnellheid afneemt; ϕ_f neemt dan ook toe met toenemende waarden voor D_{n50} / V_s . In de onderstaande figuur is dit weergegeven.



Figuur 12.1 ϕ_f uitgezet tegen D_{n50} / V_s .

De (theoretische) begin- en eindonregelmatigheid van het bresproces is dan, voor verschillende waarden voor ϕ_f , als volgt:

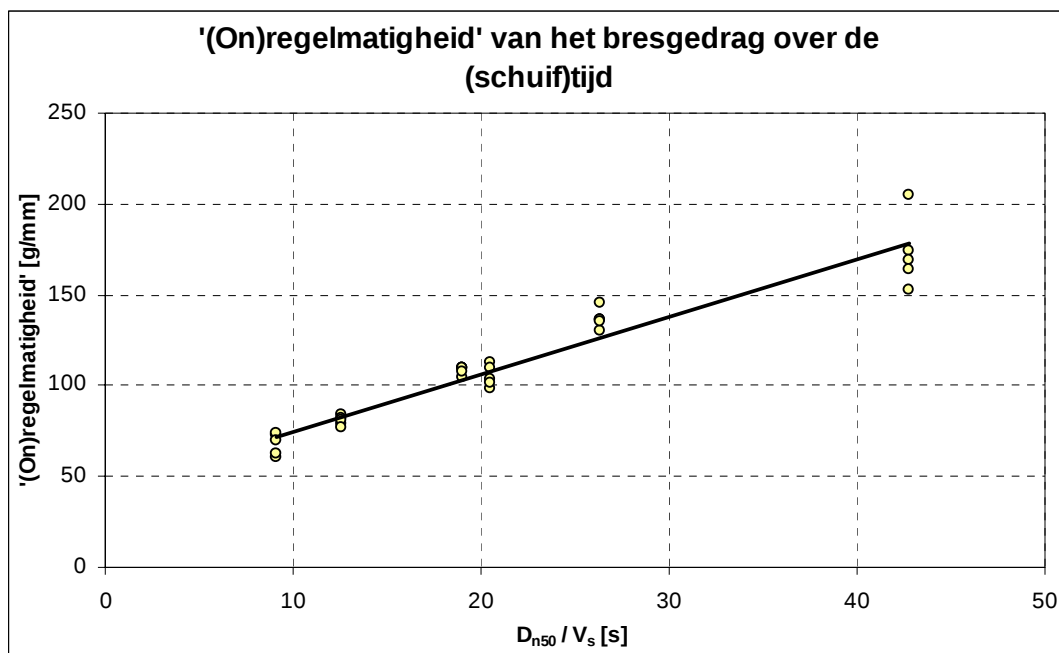


Figuur 12.2 (Theoretische) begin- en eindonregelmatigheid van het bresproces.

Ad 2

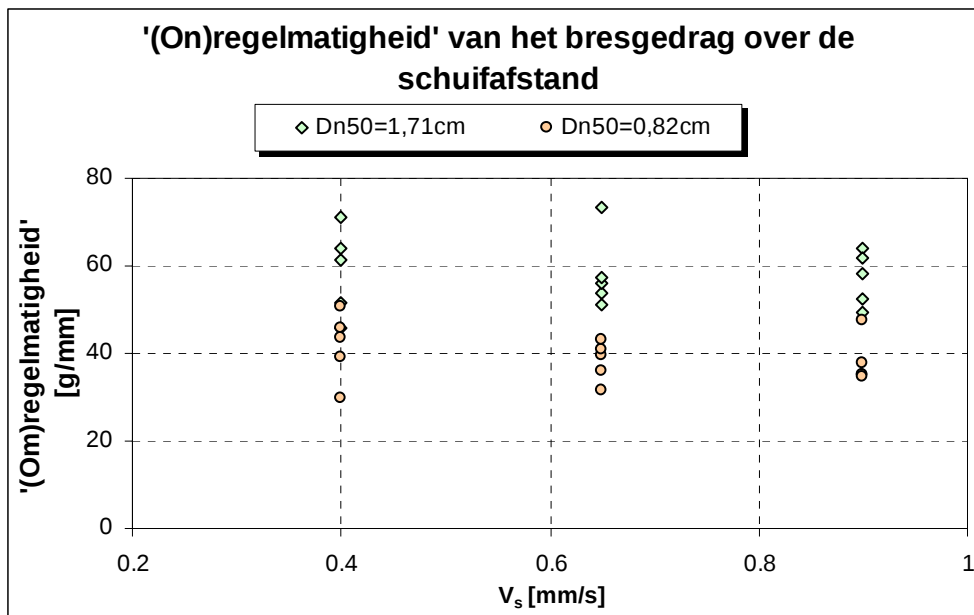
De (on)regelmaticheid in het bresgedrag door het afwisselend afschuiven van het stortmateriaal kan op een tweetal manieren worden geïnterpreteerd.

(1) De (on)regelmaticheid van het bresgedrag over de tijd waarover geschoven wordt is afhankelijk van de steendiameter van het stortmateriaal en de schuifsnellheid waarmee het materiaal wordt gestort. Het bresgedrag wordt onregelmaticger naarmate de steendiameter toeneemt en de schuifsnellheid afneemt. De (on)regelmaticheid neemt dus weer toe met toenemende waarden voor D_{n50} / V_s , zie ook onderstaande figuur.



Figuur 12.3 '(On)regelmaticheid van bresgedrag over het (gehele) schuifproces.

(2) De (on)regelmaticheid van het bresgedrag over de afstand waarover geschoven wordt – als een bepaalde hoeveelheid materiaal is/wordt gestort – is enkel afhankelijk van de steendiameter van het stortmateriaal. De schuifsnellheid heeft slechts invloed op de opeenvolging tussen twee bressen en niet op de (on)regelmaticheid ervan. Zie onderstaande figuur.



Figuur 12.4 '(On)regelmatigheid van bresgedrag over het de geschoven schuifafstand.

Als de (on)regelmatigheid wordt beschouwd over een schuifafstand van een aantal maal de D_{n50} van het stortmateriaal, dan hebben stenen met verschillende diameters dezelfde (on)regelmatigheid. Op schuifstanden met een tussenafstand van $0,5 D_{n50}$ bedraagt deze ca. 60% ten opzichte van de gemiddelde gestorte hoeveelheid over die schuifafstand.

Voor (1) en (2) geldt dat het bresgedrag het meest onregelmatig is wanneer de meeste stenen worden gestort, dus tijdens de tussenfase van het bresproces.

12.1.2 Conclusies met betrekking tot de spreiding van het materiaal onder water

Wanneer met een schuifstort wordt gestort kan de spreiding van het stortmateriaal onder water worden beschreven met de spreiding volgens het "Lijnstort Spreiding Model":

$$f_{XY}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_N} \right)^2} \cdot \left(\phi \left(\frac{X_1 - x}{\sigma_N} \right) - \phi \left(\frac{X_0 - x}{\sigma_N} \right) \right)$$

Op waterdiepten groter dan $h = h_{\Delta}$, voldoet (de dwarsdoorsnede van) het stortprofiel aan een Gausskromme. De hoogte ervan kan benaderd worden door de hoogte volgens het "Lijnstort Spreiding Model":

$$z_{stort} = \frac{A_{dek}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_N} = \frac{A_{dek}}{1,71 \sqrt{D_{n50} \cdot h}}$$

De waterdiepte h_{Δ} is hierbij gedefinieerd als

$$h_{\Delta} = \frac{A_{dek}}{2c^2 \cdot \sqrt{2\pi} \tan(\phi_m) \cdot D_{n50}} = \frac{A_{dek}}{2,35 \tan(\phi_m) \cdot D_{n50}}$$

Voor waterdiepten die kleiner zijn dan $h = h_{\Delta}$, kan de dwarsdoorsnede van het stortprofiel beschreven worden door een driehoeksvorm. De profielhoogte is dan onafhankelijk van de waterdiepte en slechts afhankelijk van de lading en de hoek van natuurlijk talud van de stenen onder water:

$$z_{\Delta} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\sqrt{2\pi}}} \sqrt{A_{dek} \cdot \tan(\phi_m)} = 0,89 \sqrt{A_{dek} \cdot \tan(\phi_m)}$$

12.1.3 Conclusies met betrekking tot het aanbrengen van steenbestortingen

De onregelmatigheden in het bresproces en ongelijkmatigheid van het bresgedrag over de lengte van het laaddek veroorzaken een ‘ongelijkmatige’ stortprofiel wanneer het stortschip tijdens het storten met een constante snelheid zijdelings wordt verplaatst. De methode van “discreet verhalen” lijkt dan ook meer geschikt voor het aanbrengen van ‘dunne’ bestortingslagen ten behoeve van bodem- en oeververdedigingswerken. Onregelmatigheden in tijd en plaats worden dan uitgemiddeld.

Het aantal storts kan worden bepaald met:

$$s = \frac{A_{dek}}{2cm \sqrt{D_{n50}^3 \cdot h}} = \frac{A_{dek}}{1,4m \sqrt{D_{n50}^3 \cdot h}} \quad (12.1)$$

De afstand waarover het stortschip steeds moet worden verhaald wordt gegeven door:

$$dv = 2c \sqrt{D_{n50} \cdot h} = 1,4 \sqrt{D_{n50} \cdot h} \quad (12.2)$$

Voor stenen die kleiner zijn dan ca $D_{n50}=0,2m$ (prototype) gaat de bovenstaande methode over in de methode volgens het continu verplaatsen van het stortschip. Het aantal storts wordt dan dusdanig groot dat de methode van “discreet verhalen” overgaat in een continu proces.

12.2 AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGONDERZOEK

De vragen die tijdens het onderzoek naar het stortgedrag van een schuifstortter zijn opgekomen kunnen worden vertaald in aanbevelingen voor (een) vervolgonderzoek(en). Onderstaande aanbevelingen hebben voornamelijk betrekking op de proefseries B, C en D.

12.2.1 Aanbevelingen volgend uit proefserie A

Aanbevolen wordt aanvullende metingen te verrichten naar het bresgedrag van het stortmateriaal. Vooral variatie in de steendiameter van het stortmateriaal is hierbij gewenst.

Tevens is de ongelijkmatigheid van het bresgedrag over de lengte van het laaddek een belangrijk aspect voor vervolgonderzoek.

12.2.2 Aanbevelingen volgend uit proefserie B

In dit onderzoek is het “Lijnstort Spreiding Model” getoetst aan de hand van de hoogte van het stortprofiel en zijn de afzet, de zijdelingse en de kopse spreiding aan de hand van het stortprofiel bepaald. Aanbevolen wordt om het “Lijnstort Spreiding Model” (ook) te toetsten aan de hand van de kansverdeling van de kopse en zijdelingse verplaatsingen van het stortmateriaal. De voorgestelde methode is als volgt:

(1) De stenen worden vanaf een ‘volbeladen’ schuifstortter op de bodem gestort. (2) Na enige tijd, wanneer er voldoende stenen op de bodem liggen (waar een betrouwbare kansverdeling van kan worden bepaald), wordt het schuifproces stilgezet. (3) De verdeling van het materiaal op de bodem kan bepaald worden door, aan de hand van een foto van het bovenaanzicht, de posities van de onderlinge stenen te bepalen. Aan de hand van een kansverdeling van de verplaatsing van de stenen in langs- en dwarsrichting kan het “Lijnstort Spreiding Model” nu op juistheid getoetst worden.

Verder is het mogelijk om, aan de hand van de kansverdeling in dwarsrichting, de afzet te bepalen. Dit is immers de verschuiving van de gemiddelde verplaatsing μ_y ten opzicht van $y = 0$. Tevens kan dan geanalyseerd worden of de afzet wordt veroorzaakt door het stortproces of door de spreiding van het stortmateriaal.

Tenslotte wordt aanbevolen het benaderde verloop van de hoogte van het stortprofiel over de waterdiepte met aanvullende metingen te verifiëren.

12.2.3 Aanbevelingen volgend uit proefserie C

De methode van “discreet verhalen” is in dit onderzoek getest aan de hand van een beperkt aantal stortproeven. Er wordt dan ook in eerste instantie aanbevolen aanvullende experimenten uit te voeren die meer uitsluitsel kunnen geven. Hierbij kunnen tevens de toleranties van de steenbestorting aan de orde gebracht worden, uitgedrukt in een standaardafwijking (iD_{n50}) ten opzichte van gemiddelde (en vereiste) laagdikte (mD_{n50}).

Verder is het zinvol experimenten uit te voeren waarbij het stortschip niet discreet, maar continu (en met een constante verhaalsnelheid) zijdelings wordt verplaatst. Verschillen in het stortresultaat van de twee uitvoeringsmethodieken kunnen dan aan het licht gebracht worden. Wellicht kan een grens aangegeven worden waar vanaf de ene methode de voorkeur boven de andere methode verdient.

Ook wordt aanbevolen de invloed van het aantal passages op (vooral) de 'gelijkmatigheid' van het stortprofiel te onderzoeken. Dit heeft vooral betrekking op de methode van "continu verhalen". Wellicht is er een (economisch) optimum tussen het aantal passages en de 'gelijkmatigheid' van de stortlaag.

12.2.4 Aanbevelingen volgend uit proefserie D

Tijdens de stortproeven op een talud is waargenomen dat het stortmateriaal, na in contact te zijn gekomen met de ondergrond, van het talud afrolt. De vraag is alleen in hoeverre dit "afrollen" van invloed is op de theoretische benadering voor de spreiding van het stortmateriaal op een talud. Wellicht is het aantal stenen dat naar beneden rolt 'klein' genoeg, dat de spreiding van het stortmateriaal op een talud nog steeds voornamelijk wordt bepaald door het "Random Walk" gedrag van de stenen onder water. Er wordt dan ook aanbevolen om de spreiding van het stortmateriaal op een talud te meten aan de hand van een kansverdeling van de horizontale verplaatsingen van het stortmateriaal. De voorgestelde methode is gelijk aan de methode voor het bepalen van de kansverdeling van de horizontale verplaatsingen op een vlakke bodem.

Verder lijkt het zinvol deze kansverdeling te bepalen bij verschillende taludhellingen. De mate van "afrollen" zal namelijk afhangen van de taludhelling en afnemen als op een flauwer talud wordt gestort.

Voor alle proefseries geldt dat prototype metingen uiteraard zeer gewenst zijn, voornamelijk voor het onderkennen van eventuele schaaffecten.

GERAADPLEEGDE LITERATUUR

- [1] BATTJES, J.A. (2000), *Vloeistofmechanica*, Collegehandleiding CTme2100, Technische Universiteit Delft.
- [2] BISSCHOP, C. (2002), *Modelonderzoek naar het aanbrengen van kubussen in de toplaag van een golfbreker met een zijschuiftorster*, afstudeerverslag vakgroep Waterbouwkunde, Technische Universiteit Delft.
- [3] BOSMA, C. (2002), *Onderzoek naar en bepaling van factoren die de hoeveelheid geplaatst materiaal bepalen*, afstudeerverslag vakgroep Waterbouwkunde, Technische Universiteit Delft.
- [4] BOUWDIENST RIJKSWATERSTAAT (1991), *Handboek uitvoering bodemverdedigingsconstructies van losgestorte granulaire materialen*.
- [5] BUIJS, A. (1993), *Statistiek om mee te werken*.
- [6] CREGTEN, H.J. (1995), *Het gebruik van probabilistische methoden bij het beoordelen van het stortresultaat van een zijstort*, afstudeerverslag vakgroep Waterbouwkunde, Technische Universiteit Delft.
- [7] CUR/RWS 169 (1994), *Manual on the use of rock in Hydraulic Engineering*, Centre for Civil Engineering Research and Codes (CUR), Directorate-General for Public Works and Water Management, Road and Hydraulic Engineering Division.
- [8] CUR/RWS 192 (1998), *Breuksteen in de praktijk. Deel1: productie, verwerking en kwaliteitszorg*, Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving (CUR), Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat Dienst- Weg en Waterbouwkunde.
- [9] DESSENS, M. (2004), *The influence of flow acceleration on stone stability*, MSc Thesis section Hydraulic Engineering, Delft University of Technology.
- [10] GELDEREN, P.J.G. VAN (1999), *Het Enkele Steen Model. Een verificatie op basis van modelproeven*, afstudeerverslag vakgroep Waterbouwkunde, Technische Universiteit Delft.
- [11] NEDERLANDSE NORM, NEN (1990), *NEN 5180-5186. Breuksteen: Termen, definities, eisen en keuring*.
- [12] OORD, G. VAN (1996), *Spreiding van steen in het stortproces van schuiftorstors. Modelproeven ter verificatie van het Enkele Steen Model*, afstudeerverslag vakgroep

Waterbouwkunde, Technische Universiteit Delft.

- [13] REUS, J.S. DE (2004), *Het valgedrag van stortsteen onder de invloed van stroming*, afstudeerverslag vakgroep Waterbouwkunde, Technische Universiteit Delft.
- [14] SCHIERECK, G.J. (2001), *Introduction to bed, bank and shoreprotections*, Collegehandleiding CTwa4310, Technische Universiteit Delft.
- [15] VBKO (1997), *Voortgezette Opleiding Uitvoering Baggerwerken (VOUB)*.
- [16] VOSSERS, G. (1966), *Inleiding tot de theorie van modellen en modelwetten*, Koninklijk Instituut voor Ingenieurs afdeling voor Werktuig- en Scheepsbouw, Technische Hogeschool Eindhoven.
- [17] VRIES, M. DE (1977), *Waterloopkundig onderzoek*, collegedictaat b80, Technische Universiteit Delft.
- [18] VRIJLING, J.K., MANNI, R.J. EN WILDE, D. DE (1995), *Prediction of the deposition-mound of dumped rubble*, 4th International Conference on Coastal & Port Engineering in Developing Countries, Rio de Janeiro, Copedec IV.
- [19] WAL, J.R. VAN DER (2002), *Het valgedrag van steengroepen. Modelonderzoek ter vergroting van het inzicht in het valgedrag van breuksteen*, afstudeerverslag vakgroep Waterbouwkunde, Technische Universiteit Delft.
- [20] WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM (1983), *Stormvloedkering Oosterschelde. Stormmethoden voor drempel en overgangsconstructie*, verslag modelonderzoek M 1768.
- [21] WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM (1987), *Onderzoek naar het resultaat van een steenstorter*, verslag modelonderzoek Q 673, deel I.
- [22] WATERLOOPKUNDIG LABORATORIUM (1989), *Onderzoek naar het resultaat van een steenstorter*, verslag modelonderzoek Q 673, deel II.

VERKLARENDE BEGRIPPENLIJST

Afzet (ook: afzetgrootte)	De verplaatsing van het zwaartepunt van het stortprofiel ten opzichte van de stortlijn, loodrecht op de lengterichting van het stortschip.
Bresgedrag (ook: afschuifgedrag; afschuiven van stortmateriaal)	De '(on)regelmaticheid' in de hoeveelheid materiaal die, per tijdseenheid en per meter laaddek, onder invloed van het verplaatsten van de schuif gedurende het schuifproces overboord wordt gezet.
Breshoek (ook: hoek van het valfront, afschuifhoek)	De hoek waaronder het materiaal op het laaddek van de schuifstortor afschuift.
Bresproces (ook: schuifproces)	Het proces dat beschrijft wat er met het stortmateriaal gebeurt wanneer deze van het laaddek worden geschoven.
Groepseffect	Effect dat optreedt wanneer meerdere stenen tegelijkertijd worden gestort en waarbij de valsnelheid van de groep stenen significant groter is dan de evenwichtsvalsnelheid van de individuele stenen binnen die groep.
Kopse spreiding	De 'breedte' van (de lengtedoorsnede van) het stortprofiel, evenwijdig aan de lengterichting van het stortschip, verminderd met de lengte van het laaddek.
L/d verhouding	Eigenschap van granulair materiaal dat wat zegt over de 'platheid' van de steen. Hoe groter de L/d verhouding hoe 'platter' de steen.
Laaddek (ook: dek, vak)	Dat deel van de schuifstortor waar het (stort)materiaal aangebracht wordt en waar vandaan het wordt weggeschoven.
Model (ook: modelschuifstortor; modelstortor)	De op verkleinde schaal weergegeven schuifstortor

Schuifstorter (ook: <i>zijsschuifstorter</i> ; <i>schuifstorter</i> ; <i>steenstorter</i> ; <i>stortschip</i>)	Stortschip dat de lading materiaal, door middel van het indrukken van (hydraulische) schuiven, vanaf de waterlijn zijdelings overboord zet
Stortkarakteristiek (ook: <i>stortkromme</i>)	Weergave van het cumulatieve stortgewicht of de toename in de storthoeveelheid per tijdseenheid.
Stortproces	Het proces dat beschrijft wat er, tijdens het storten, met de stenen gebeurt, vanaf het moment dat ze overboord worden geschoven tot het moment dat ze de bodem bereiken.
Zijdelingse spreiding	De 'breedte' van (de dwarsdoorsnede van) het stortprofiel, loodrecht op de lengterichting van het stortschip.

GEBRUIKTE SYMBOLEN

LATIJNSE LETTERS

Symbool	Omschrijving	Eenheid
A	aangestroomd oppervlak	$[m^2]$
a	schuifafstand	$[m]$
A_{dek}	oppervlakte van de (dwars) doorsnede van de lading op het laaddek	$[cm^2]$
A_{dek}	oppervlak van de doorsnede van de lading	$[m^2]$
a_{hor}	horizontale versnelling ten gevolge van de liftkracht	$[m/s^2]$
A_{stort}	oppervlak van de doorsnede van het stortprofiel	$[m^2]$
A_{sv}	oppervlak (voorgaand) schuifvlak	$[m^2]$
$B_{dek,m}$	breedte van het laaddek van de modelschuifstort	$[m]$
B_{stort}	breedte van het stortvak; bij benadering de lengte van het laaddek van de modelschuifstort	$[m]$
c	constante ($c = 0,685$)	$[-]$
C_d	weerstandscoefficiënt voor de sleepkracht (dragforce)	$[-]$
C_l	weerstandscoefficiënt loodrecht op de valbeweging	$[-]$
D	diameter van het aangestroomde voorwerp	$[m]$
d	kleinste afstand tussen twee verticale platen waar de steen nog juist door kan	$[m]$
d_0	laagdikte van het stortprofiel	$[m]$
D_{15}	zeefmaat waar 15 massaprocent van de sortering door heen gaat	$[m]$
D_{50}	zeefmaat waar 50 massaprocent van de sortering door heen gaat	$[m]$
D_{85}	zeefmaat waar 85 massaprocent van de sortering door heen gaat	$[m]$
D_{85}/D_{15}	gradering van steensortering	$[-]$
da	tussenafstand in de schuifstanden	$[m]$
D_b	diameter van de bol	$[m]$
dM	toename stortgewicht	$[kg]$
D_{min}	minimale steendiameter	$[m]$
D_n	nominale steendiameter	$[m]$
D_{n15}	nominale diameter die door 15 massaprocent wordt onderschreden	$[m]$
D_{n50}	nominale diameter die door 50 massaprocent wordt onderschreden	$[m]$
D_{n85}	nominale diameter die door 85 massaprocent wordt onderschreden	$[m]$
D_{nx}	nominale diameter die door x massaprocent wordt onderschreden	$[m]$
dv	afstand waarover het schip wordt verhaald	$[m]$
D_x	zeefmaat waar x massaprocent van de sortering door heen gaat	$[m]$
Eu	getal van Euler	$[-]$
$\vec{f}$	versnellingsvector ten gevolge van de externe kracht	$[m/s^2]$
$F_{\downarrow}$	netto neerwaartse kracht	$[N]$

Symbool	Omschrijving	Eenheid
$F_{\uparrow}$	netto opwaartse kracht	[N]
F_g	gewicht van de vallende steen	[N]
F_l	liftkracht	[N]
F_{opw}	opwaartse kracht	[N]
Fr	getal van Froude	[-]
g	zwaartekracht versnelling	[m/s ²]
h	waterdiepte	[m]
h_{α}	waterdiepte waarop $(100 \cdot \alpha)\%$ van de evenwichtssnelheid is bereikt	[m]
h_{Δ}	waterdiepte waarbij het profiel is overgegaan in een driehoeksvorm	[m]
$h_{\perp}$	de waterdiepte loodrecht onder de loslaatlijn van het stortschip	[m]
h_o	waterdiepte waarbij het profiel begint af te schuiven	[m]
$h_{o,t}$	waterdiepte waarbij het profiel begint af te schuiven op een talud	[m]
i_m	waarde van grootheid "i" in het model	
i_p	waarde van grootheid "i" in de prototype situatie	
k	aantal meetwaarden	[-]
L	lengte van het lijnstuk waar vanaf wordt gestort, $L = X_1 - X_0$	[m]
L_{stort}	"stortvaklengte"	[m]
m	aantal malen de D_{n50}	[-]
$M(a)$	gemeten (cumulatieve) stortgewicht op schuifafstand a	[kg]
$M_{ben}(\phi_f, a)$	theoretische (cumulatieve) stortgewicht op schuifafstand a bij een afschuifhoek ϕ_f	[kg]
M_{droog}	massa van de (droge) steen	[g]
M_{ow}	massa van de steen onder water	[g]
M_x	steenmassa die voor x massaprocent wordt onderschreden	[kg]
N	aantal horizontale richtingswisselingen	[-]
n	schaalfactor	[-]
N_{dek}	aantal stenen op één laaddek van de schuifstortter	[-]
n_i	schaalfactor van grootheid i	[-]
p	waterdruk	[Pa]
Re	getal van Reynolds	[-]
s	aantal storts	[-]
S_{hor}	horizontale afstand die de steen aflegt tussen twee richtingswisselingen van de versnelling loodrecht op de valrichting	[m]
St	getal van Strouhal	[-]
S_{ver}	verticale afstand die de steen aflegt tussen twee richtingswisselingen van de versnelling loodrecht op de valrichting	[m]
S_x	maximale horizontale verplaatsing; de "wegspringafstand"	[m]
t	tijd	[s]
T	periode van wervelloslating = de periode van richtingswisseling van de versnelling loodrecht op de valrichting.	[s]
T_{leeg}	tijd benodigd voor het leegschuiven van het laaddek	[s]
t_s	storttijd	[s]

Symbool	Omschrijving	Eenheid
t_{weg}	tijdsduur van "wegspringen"	[s]
$\vec{u}$	snelheidsvector	[m/s]
U	snelheid van het aangestroomde voorwerp	[m/s]
U_{weg}	wegspringsnelheid	[m/s]
U_x	horizontale snelheid van de wegspringende steen	[m/s]
V	volume van de steen	[m ³]
V_{dek}	volume van het stortmateriaal op het laaddek inclusief poriën	[m ³]
V_s	schuifsnelheid (van de modelschuifstorter)	[m/s]
$V_{s,m}$	schuifsnelheid in het model	[m/s]
$V_{s,p}$	schuifsnelheid van de prototype schuifstorter	[m/s]
w	valsnelheid van het voorwerp	[m ³]
W_{dek}	lading op het dek	[kg]
W_{em}	rekenkundig gemiddelde gewicht van de stenen binnen de sortering	[kg]
x	horizontale verplaatsing in x-richting	[m]
X_0	x-coördinaat van het begin van het lijnstuk waar vanaf wordt gestort	[m]
X_1	x-coördinaat van het eind van het lijnstuk waar vanaf wordt gestort	[m]
y	horizontale verplaatsing in y-richting	[m]
y_{stort}	de breedte van (de dwarsdoorsnede) van het stortprofiel	[m]
z_{Δ}	hoogte van het driehoeksprofiel	[m]
$z(x,y)$	hoogte van het stortprofiel op positie (x,y)	[m]
z_{stort}	(maximale) hoogte van het stortprofiel	[m]

GRIEKSE LETTERS

Symbool	Omschrijving	Eenheid
α	deel van de evenwichtsvalsnelheid	[-]
α_t	taludhelling 1: α_t	[-]
β	coëfficiënt in de vergelijking van Van Mazijk	[m ⁻¹]
Δ	relatieve dichtheid	[-]
ϕ	functie voor de standaard normale verdeling	[-]
ϕ_f	hoek van het valfront	[°]
ϕ_m	maximale hoek van het talud (onder water)	[°]
ϕ_{weg}	wegspringhoek	[rad]
η	dynamische viscositeit	[Pa.s]
μ	dynamische viscositeit	[kg/ms]
μ_x	gemiddelde van de totale horizontale verplaatsing in x-richting (verticale projectie van het loslaatpunt)	[m]
μ_y	gemiddelde van de totale horizontale verplaatsing in y-richting (vertikale projectie van het loslaatpunt)	[m]
ρ	dichtheid van de vloeistof	[kg/m ³]
ρ_s	massadichtheid van de steen	[kg/m ³]
ρ_w	massadichtheid van het water	[kg/m ³]
σ_Δ	traagheidsstraal van het driehoeksprofiel	[m]
σ_N	standaardafwijking van de totale horizontale verplaatsingen	[m]
ν	kinematische viscositeit	[m ² /s]
ω	radiaal frequentie van wervelloslating	[1/s]

INHOUDSOPGAVE BIJLAGEN

LIJST MET FIGUREN	III
LIJST MET TABELLEN	VII
BIJLAGE A DE ZIJSCHUIFSTORTER	A-1
A.1 Overzicht verschillende zijschuifstorters	A-2
A.2 De steenstorter "HAM-601"	A-3
A.3 Werkgebied "HAM-601"	A-4
BIJLAGE B BREUKSTEEN IN DE PRAKTIJK	B-7
B.1 Definities	B-8
B.2 Eigenschappen breuksteen (sortering)	B-8
B.3 Waarden uit de praktijk	B-9
BIJLAGE C STORTMETHODEN	C-11
C.1 Inleiding	C-12
C.2 Verhaalmethoden	C-12
C.3 Aantal stortgangen	C-12
C.4 Eenzijdig, tweezijdig storten	C-13
BIJLAGE D INVLOED VAN GOLVEN EN STROMING OP DE VERPLAATSING VAN MATERIAAL	
ONDER WATER	D-15
D.1 Invloed van golven op de baan van een individuele steen	D-16
D.1.1 1 ^e benadering	D-16
D.1.2 2 ^e benadering	D-17
D.1.3 Conclusie	D-18
D.2 Invloed van stroming op de baan van een individuele steen	D-19
BIJLAGE E EIGENSCHAPPEN VAN HET MATERIAAL UIT SORTERING A	E-23
E.1 Meetgegevens	E-24
E.1.1 Steeneigenschappen sortering A	E-24
E.1.2 Invloed van de verf op de gemeten dichtheid van de stenen	E-28
E.2 Overzicht meetresultaten	E-29
E.3 Verificatie meetresultaten	E-31
BIJLAGE F EIGENSCHAPPEN VAN HET MATERIAAL UIT SORTERING B	F-33
F.1 Meetgegevens: steeneigenschappen	F-34
F.2 Overzicht meetresultaten	F-40
F.3 Verificatie meetresultaten	F-41

BIJLAGE G DE AANDRIJVING VAN DE MODELSCHUIFSTORTER	G-43
G.1 Algemeen.....	G-44
G.2 Ijken elektromotor: verband tussen voltage en schuifsnelheid.....	G-45
G.3 Controle ingestelde schuifsnelheden	G-47
BIJLAGE H RESULTATEN SERIE A: BRESPROEVEN	H-49
H.1 Resultaten serie A.1	H-50
H.2 Resultaten serie A.2	H-53
H.3 Resultaten serie A.3	H-56
H.4 Resultaten serie A.4	H-59
H.5 Resultaten serie A.5	H-62
H.6 Resultaten serie A.6	H-65
BIJLAGE I RESULTATEN SERIE B: STATIONAIRE STORTPROEVEN OP EEN VLAKKE BODEM.....	I-69
I.1 Resultaten serie B.1	I-70
I.2 Resultaten serie B.2.....	I-72
I.3 Resultaten serie B.3.....	I-74
I.4 Resultaten serie B.4.....	I-76
I.5 Resultaten serie B.5.....	I-78
I.6 Resultaten serie B.6.....	I-80
I.7 Resultaten serie B.7.....	I-82
I.8 Resultaten serie B.8.....	I-84
BIJLAGE J RESULTATEN SERIE C: STEENBESTORTINGEN OP EEN VLAKKE BODEM.	J-87
J.1 Resultaten serie C.1	J-88
J.2 Resultaten serie C.2	J-89
J.3 Resultaten serie C.3	J-90
J.4 Resultaten serie C.4	J-91
BIJLAGE K FOTO'S SERIE D: STORTPROEVEN OP EEN TALUD.	K-93
K.1 Foto's serie D.1	K-94
K.2 Foto's serie D.2.....	K-95
K.3 Foto's serie D.3.....	K-97
K.4 Foto's serie D.4.....	K-98

LIJST MET FIGUREN

Figuur A.1	De zijschuifstorter aan het werk. [SCHIERECK, 2001].....	A-1
Figuur A.2	Steenstorter HAM-601.	A-3
Figuur B.1	Breuksteen tegen een asfaltglooiing.....	B-7
Figuur C.1	Bestorting op een zinkstuk bij de Afsluitdijk. [SCHIERECK, 2001]	C-11
Figuur C.2	"Dakpansgewijs" storten (a) en storten volgens het "halfsteensverband" (b). [BOUWDIENST RWS, 1991]	C-13
Figuur C.3	Eenzijdig storten. [BOUWDIENST RWS, 1991].....	C-13
Figuur C.4	Tweezijdig storten. [BOUWDIENST RWS, 1991]	C-14
Figuur D.1	Verplaatsing van het stortmateriaal als gevolg van stroming. [SCHIERECK, 2001].....	D-15
Figuur D.2	Maximale snelheid ($u_{\max}$) en verticale verplaatsing (B).....	D-17
Figuur D.3	Verplaatsing ten gevolge van stroming. [BOUWDIENST RWS, 1991].....	D-19
Figuur D.4	De verplaatsing van een individuele steen onder water. [BOUWDIENST RWS, 1991]	D-19
Figuur D.5	Stortmiddel met "kop op de stroom".	D-20
Figuur D.6	Stortmiddel dwars op stroomrichting.	D-21
Figuur D.7	Willekeurige stroomrichting γ	D-22
Figuur E.1	Materiaal uit sortering A op het laaddek van de modelstorter.	E-23
Figuur E.2	Massaverdeling van de stenen uit sortering A.....	E-29
Figuur E.3	Zeefkromme sortering A.	E-29
Figuur E.4	Verdeling van de gemeten massadichtheden in vergelijking met een normale verdeling met $\mu = 2654 \text{ kg/m}^3$ en $\sigma = 19 \text{ kg/m}^3$	E-30
Figuur E.5	Verdeling van de gemeten L/d verhouding van de stenen vergeleken met een normale verdeling met $\mu = 2,29$ en $\sigma = 0,49$	E-30
Figuur E.6	De, naar prototype geschaalde, massaverdeling van sortering A met grenswaarden van de 60 – 300 kg sortering uit de praktijk.	E-31
Figuur F.1	Materiaal uit sortering B op het laaddek van de modelstorter.....	F-33
Figuur F.2	Massaverdeling sortering B.	F-40
Figuur F.3	Zeefkromme sortering B.....	F-40
Figuur F.4	Verdeling van de gemeten massadichtheden in vergelijking met een normale verdeling met $\mu = 2680 \text{ kg/m}^3$ en $\sigma = 41 \text{ kg/m}^3$	F-41
Figuur F.5	De, naar prototype geschaalde, massaverdeling van sortering B met grenswaarden van de 10 – 60 kg sortering uit de praktijk.	F-42

Figuur G.1	Modelschuifstorter met aandrijving.	G-43
Figuur G.2	Electrische aandrijving van de modelschuifstorter.	G-44
Figuur G.3	Bepalen van het koppel voor de aandrijving van de schuif.....	G-44
Figuur G.4	Schuifsnelheden met en zonder lading uitgezet tegen het ingestelde voltage.	G-45
Figuur G.5	Gemeten schuifsnelheden uitgezet tegen de ingestelde schuifsnelheden.	G-47
Figuur H.1	Opstelling bresproeven.	H-49
Figuur H.2	Stortkarakteristieken serie A.1.	H-50
Figuur H.3	Storthoeveelheden serie A.1 (volgens de gemiddelde stortkarakteristieken) en theoretische benaderingen met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-51
Figuur H.4	Storthoeveelheden serie A.1.1 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-52
Figuur H.5	Storthoeveelheden serie A.1.2 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-52
Figuur H.6	Stortkarakteristieken serie A.2.	H-53
Figuur H.7	Storthoeveelheden serie A.2 (volgens de gemiddelde stortkarakteristieken) en theoretische benaderingen met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-54
Figuur H.8	Storthoeveelheden serie A.2.3 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-55
Figuur H.9	Storthoeveelheden serie A.2.1 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-55
Figuur H.10	Stortkarakteristieken serie A.3.	H-56
Figuur H.11	Storthoeveelheden serie A.3 (volgens de gemiddelde stortkarakteristieken) en theoretische benaderingen met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-57
Figuur H.12	Storthoeveelheden serie A.3.4 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-58
Figuur H.13	Storthoeveelheden serie A.3.3 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-58
Figuur H.14	Stortkarakteristieken serie A.4.	H-59
Figuur H.15	Storthoeveelheden serie A.4 (volgens de gemiddelde stortkarakteristieken) en theoretische benaderingen met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-60
Figuur H.16	Storthoeveelheden serie A.4.5 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-61
Figuur H.17	Storthoeveelheden serie A.4.3 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-61
Figuur H.18	Stortkarakteristieken serie A.5.	H-62
Figuur H.19	Storthoeveelheden serie A.5 (volgens de gemiddelde stortkarakteristieken) en theoretische benaderingen met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-63
Figuur H.20	Storthoeveelheden serie A.5.5 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-64
Figuur H.21	Storthoeveelheden serie A.5.3 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-64
Figuur H.22	Stortkarakteristieken serie A.6.	H-65

Figuur H.23	Stortheoevelheden serie A.6 (volgens de gemiddelde stortkarakteristieken) en theoretische benaderingen met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-66
Figuur H.24	Stortheoevelheden serie A.6.4 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-67
Figuur H.25	Stortheoevelheden serie A.6.5 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f	H-67
Figuur I.1	Stortresultaat van een stationaire stortproef op een vlakke bodem bij een waterdiepte van ca. 60 cm.	I-69
Figuur I.2	Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.1.....	I-70
Figuur I.3	Hoogtelijnen stortprofiel serie B.1.....	I-71
Figuur I.4	Afzet en zijdelingse spreiding serie B.1.....	I-71
Figuur I.5	Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.2.....	I-72
Figuur I.6	Hoogtelijnen stortprofiel serie B.2.....	I-72
Figuur I.7	Afzet en zijdelingse spreiding serie B.2.....	I-73
Figuur I.8	Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.3.....	I-74
Figuur I.9	Hoogtelijnen stortprofiel serie B.3.....	I-74
Figuur I.10	Afzet en zijdelingse spreiding serie B.3.....	I-75
Figuur I.11	Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.4.....	I-76
Figuur I.12	Hoogtelijnen stortprofiel serie B.4.....	I-76
Figuur I.13	Afzet en zijdelingse spreiding serie B.4.....	I-77
Figuur I.14	Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.5.....	I-78
Figuur I.15	Hoogtelijnen stortprofiel serie B.5.....	I-78
Figuur I.16	Afzet en zijdelingse spreiding serie B.5.....	I-79
Figuur I.17	Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.6.....	I-80
Figuur I.18	Hoogtelijnen stortprofiel serie B.6.....	I-80
Figuur I.19	Afzet en zijdelingse spreiding serie B.6.....	I-81
Figuur I.20	Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.7.....	I-82
Figuur I.21	Bovenaanzicht stortprofiel serie B.7.....	I-82
Figuur I.22	Afzet en zijdelingse spreiding serie B.7.....	I-83
Figuur I.23	Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.8.....	I-84
Figuur I.24	Bovenaanzicht stortprofiel serie B.8.....	I-84
Figuur I.25	Afzet en zijdelingse spreiding serie B.4.....	I-85
Figuur J.1	Stortresultaat van een steenbestorting op een vlakke bodem op een waterdiepte van ca. 120 cm.	J-87
Figuur J.2	Foto bovenaanzicht stort serie C.1.....	J-88
Figuur J.3	Bovenaanzicht stort en stortposities serie C.1.....	J-88
Figuur J.4	Foto bovenaanzicht stort serie C.2.....	J-89
Figuur J.5	Bovenaanzicht stort en stortposities serie C.2.....	J-89
Figuur J.6	Foto bovenaanzicht stort serie C.3.....	J-90
Figuur J.7	Bovenaanzicht stort en stortposities serie C.3.....	J-90
Figuur J.8	Foto bovenaanzicht stort serie C.4.....	J-91
Figuur J.9	Bovenaanzicht stort en stortposities serie C.4.....	J-91

Figuur K.1	Stortresultaat van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm talud van 1:3.	K-93
Figuur K.2	Bovenaanzicht stortprofiel serie D.1	K-94
Figuur K.3	Zijaanzicht stortprofiel serie D.1	K-94
Figuur K.4	Vooraanzicht stortprofiel serie D.1	K-95
Figuur K.5	Bovenaanzicht stortprofiel serie D.2.....	K-95
Figuur K.6	Zijaanzicht stortprofiel serie D.2.	K-96
Figuur K.7	Vooraanzicht stortprofiel serie D.2.....	K-96
Figuur K.8	Bovenaanzicht stortprofielen serie D.3.	K-97
Figuur K.9	Zijaanzicht stortprofielen serie D.3.	K-97
Figuur K.10	Bovenaanzicht stortprofielen serie D.4.	K-98
Figuur K.11	Zijaanzicht stortprofielen serie D.4.	K-98

LIJST MET TABELLEN

Tabel A.1	Overzicht kenmerkende eigenschappen van verschillende schuifstorters. ..A-2
Tabel A.2	Inventarisatie werkgebied HAM-601.A-4
Tabel B.1	D ₈₅ , D ₁₅ , D ₈₅ /D ₁₅ en D ₅₀ voor lichte sorteringen. [CUR/RWS 192, 1998].....B-9
Tabel B.2	Gemiddelde waarden voor D ₈₅ , D _{n85} , D ₁₅ , D _{n15} , D ₅₀ en D _{n50}B-9
Tabel D.1	U _{max} bij verschillende combinaties van T, L en H..... D-16
Tabel D.2	α en u _{st} bij verschillende combinaties van T, L en H..... D-18
Tabel E.1	Eigenschappen van de stenen uit sortering A ('afwijkende' metingen zijn rood gearceerd)..... E-24
Tabel E.2	Dichtheid van stenen met en zonder een verlaag..... E-28
Tabel E.3	Grenzen massaverdeling 60 --300 kg sortering [SCHIERECK, 2001] vergeleken met grenzen uit sortering A..... E-31
Tabel F.1	Eigenschappen van de stenen uit sortering B..... F-34
Tabel F.2	Grenzen massaverdeling 10 - 60 kg sortering [SCHIERECK, 2001] vergeleken met grenzen uit sortering B..... F-41
Tabel G.1	Benodigde voltages bij verschillende schuifsnelheden. G-46
Tabel H.1	Gegevens serie A.1. H-50
Tabel H.2	Gegevens serie A.2. H-53
Tabel H.3	Gegevens serie A.3. H-56
Tabel H.4	Gegevens serie A.4. H-59
Tabel H.5	Gegevens serie A.5. H-62
Tabel H.6	Gegevens serie A.6. H-65

BIJLAGE A DE ZIJSCHUIFSTORTER



Figuur A.1 De zijschuifstortor aan het werk. [SCHIERECK, 2001]

A.1 OVERZICHT VERSCHILLENDE ZIJSCHUIFSTORTERS

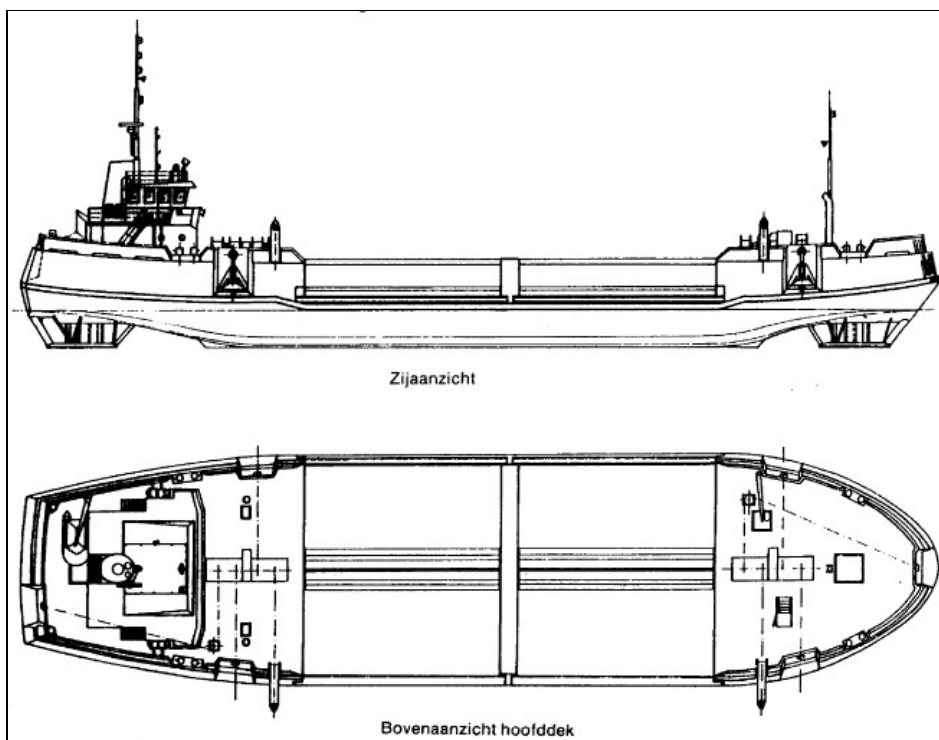
In de onderstaande tabel is een beknopt, en niet volledig, overzicht gegeven van de kenmerkende eigenschappen van een aantal zijschuifstorters. De gegevens zijn ontleend uit [BISSCHOP, 2002].

Tabel A.1 Overzicht kenmerkende eigenschappen van verschillende schuifstorters.

Naam	"Ave- lingen"	"Pieter"	"Frans"	"HAM- 601"	"Jan Steen"	"Lauwers zee"	"Cetus"	"Pompei"
Eigenaar	Van Oord	Van Oord	Van Oord	Van Oord	Van Oord	Boskalis	Boskalis	DI
Bouwjaar	1969	1965	1973	1983	1985	1966	1968	1988
Werkgebied	15 mijl	15 mijl	Deep sea	Deep sea	Deep sea	15 mijl	Deep sea	Deep sea
Tonnage ca.	550 t	700 t	980 t	1000 t	2000 t	690 t	1500 t	1750 t
Lengte over alles	51,1 m	55,5 m	65,5 m	61,8 m	76,0 m	53,8 m	78,3 m	65,5 m
Breedte	11,8 m	11,9 m	15,8 m	15,8 m	19,0 m	14,1 m	20,2 m	16,0 m
Max. diepgang	2,2 m	2,9 m	2,8 m	3,4 m	3,9 m	2,8 m	4,0 m	
Lengte steendek	28,0 m	28,0 m	28,0 m	28,0 m	28,0 m	28,0 m	45,0 m	28,0 m
Compartimenten	4 stuks	4 stuks	4 stuks	4 stuks	4 stuks	4 stuks	2 stuks	4 stuks

Voor wat betreft de modelschuifstorter worden de eigenschappen/gegevens van de "HAM-601" (en "Frans") gebruikt. Onderstaand zijn deze opgesomd; sommige kenmerken zijn hierbij nog een keer herhaald.

A.2 DE STEENSTORTER "HAM-601"



Figuur A.2 Steenstorter HAM-601.

Afmetingen

Lengte over alles	:	61,75 m
Breedte	:	15,80 m
Lengte laaddek	:	28,00 m
Breedte laaddek	:	6,00 m
(bakboord, stuurboord)		
Hoogte schuiven	:	2,50 m
Maximale diepgang	:	3,40 m
Holte ⁽¹⁾	:	3,50 m

Belading

De op het dek geladen steen wordt met behulp van 4 hydraulisch gedreven schuiven overboord gezet; de snelheid van de schuiven is traploos regelbaar (0 m/s – 1,05 m/s). Het schip kan minimaal binnen 10 minuten gelost worden.

Voortstuwing

De voortstuwingsinstallatie bestaat uit één voorin en één achterin geplaatste diesелgedreven Voith-Schneider propeller.

¹ De holte is gelijk aan de maximale diepgang vermeerderd met het minimale vrijboord (=afstand van de waterlijn tot de onderkant van het stortdek).

Lieren

Op het voordek zowel als achter het laaddek staat een hydraulisch gedreven 4-trommellier opgesteld, die gelijktijdig gebruikt kan worden.

Positioneren

Tot een stroomsnelheid van 1 à 1,2 m/s kan de steenstorter met behulp van de Voith-Schneider propellers dwars op de stroom manoeuvreren; bij hogere stroomsnelheden moet dit met behulp van de lieren gebeuren, of langs een afvierponton. Ook is een combinatie van beide systemen mogelijk.

Ballastsysteem

Om bij het eenzijdig storten van de lading de slagzij te kunnen beperken wordt een ballastsysteem aangebracht, waarvan het principe berust op het vol laten lopen van ballasttanks via bodemafluiters.

A.3 WERKGEBIED "HAM-601"

Onderstaand is een (beknopt) overzicht gegeven van (een aantal) projecten waar de steenstorter "HAM-601" is ingezet.

Tabel A.2 Inventarisatie werkgebied HAM-601.

Project	Werkzaamheden	Steenklassering(en)		Waterdiepte		Talud-helling	Materiaal
		van	tot	van	tot		
SVKO	Aanbrengen drempel voor Stormvloedkering	40 mm 60 mm 5 kg 10 kg 60 kg 300 kg 1000 kg 6000 kg	250 mm 300 mm 40 kg 60 kg 300 kg 1000 kg 3000 kg 10000 kg	23 m		1:3 1:3.5	Grind Breuksteen
Stormvloedkering Nieuwe Waterweg	Aanbrengen filterbed onder betonnen dorpelblokken	30 mm 10 kg 300 kg	140 mm 60 kg 1000 kg	10 m	24 m	1:3	Grind Breuksteen
Bestorting Helderse Zeewering	Bijstorten taludbescherming Helderse zeewering	40 mm 80 mm	160 mm 200 mm	6 m	55 m	1:3	Mijnsteen Staalslak
Calais Talud Bescherming	Taludbescherming in de havenmonding van Calais		500 kg 1000 kg 500 kg 1500 kg 1000 kg 3000 kg	10 m		1:2 1:3	Breuksteen
Scour Protection at AWG-1 (Ameland) Offshore location	Aanbrengen bodembescherming Offshore platform	4 mm 30 mm 70 mm 60 kg 1000 kg	16 mm 80 mm 210 mm 300 kg 3000 kg	10 m		–	Grind Breuksteen

Project	Werkzaamheden	Steenklassering(en)		Waterdiepte		Talud-helling	Materiaal
		van	tot	van	tot		
Sand and Stone Dumping Protection Works Ameland	Storten staalslakken op zandbed	10 mm	100 mm		20 m	–	Staalslak
Poste-5 Calais	Bodembescherming nieuwe kademuur poste-5	1000 kg	500 kg 3000 kg		10 m	–	Breuksteen
Solent Pipeline Crossing Remedial Rock Dumping Works	Storten breuksteen op pijpleidingen	75 mm	350 mm		20 m	–	Breuksteen
Humber International Terminal	Aanbrengen oeverbescherming	100 mm 200 kg	400 mm 600 kg		6 m	1:3 1:5	Breuksteen
West Clacton to Jaywick See Defences	Bestortingen golfbrekers	5 kg 350 kg 2000 kg 3500 kg	75 kg 650 kg 4000 kg 6500 kg				Breuksteen
Drempelconstructie Oude Maas Botlek Spoortunnel	Aanbrengen Ballastbed in de Oude Maas	40 mm 10 kg 40 kg	250 mm 60 kg 200 kg	6 m	10 m	–	Breuksteen

‘Gemiddeld’ genomen kan het volgende aangenomen worden voor de toepasbaarheid van de steenstorter met betrekking tot het aanbrengen van bodem- en oeverbeschermingen:

- ♦ er worden stenen gestort van 40 mm (40–250 mm) tot 300 kg (60–300 kg),
- ♦ dit gebeurt op een waterdiepte van (orde grootte) 20 m en
- ♦ op een vlakke bodem tot op een talud van 1:3;
- ♦ het stortmateriaal is veelal breuksteen.

Nota bene:

Bij bestortingen voor (bijvoorbeeld) golfbrekers wordt op een steiler talud gestort dan 1:3.

BIJLAGE B BREUKSTEEN IN DE PRAKTIJK



Figuur B.1 Breuksteen tegen een asfaltglooiing.

B.1 DEFINITIES

Breuksteen:	gebroken natuursteen die grover is dan nominaal 32 mm.
Sortering breuksteen:	breuksteen die is gesorteerd op zeefmaat of massa van de steenstukken.
Fijne sortering:	een sortering breuksteen die met behulp van zeefmaten wordt aangegeven
Lichte sortering:	een sortering breuksteen die met behulp van massa's van ten hoogste 300 kg. wordt aangegeven.
Zware sortering:	een sortering breuksteen die met behulp van massa's van ten minste 300 kg. wordt aangegeven.

B.2 EIGENSCHAPPEN BREUKSTEEN (SORTERING)

Breuksteensorteringen worden veelal gekarakteriseerd door:

M_{15} , M_{50} en M_{85} : de massa van een (denkbeeldig) steenstuk waarvoor geldt dat respectievelijk 15%, 50% en 85% van het materiaal bestaat uit steenstukken die lichter zijn dan dit steenstuk.

Of door:

D_{15} , D_{50} en D_{85} : de zeefmaat – met veelal vierkante openingen – waardoor respectievelijk 15%, 50% en 85% (van de massa) kan passeren.

De nominale steendiameter, die beter aangeeft wat de constructieve waarde is van een steenstuk dan de zeefmaat, kan worden bepaald met.

$$D_{nx} = \sqrt[3]{\frac{M_x}{\rho_s}} \quad (\text{B.1})$$

Waarin:	D_{nx}	:	Nominale diameter van het steenstuk	[cm]
	ρ_s	:	Massadichtheid van het steenstuk	[g/cm ³]

De D_{n50} van een steensortering is dus die nominale diameter die door 50% van de massa van de stenen binnen de sortering wordt onderschreden.

Er bestaat een verband tussen de zeefmaat en de nominale steendiameter, namelijk:

$$D_x = \frac{D_{nx}}{0.84} \quad (\text{B.2})$$

De breedte van de sortering – verhouding tussen de ‘grote’ en ‘kleine’ fracties binnen de sortering wordt weergegeven door:

$$b = \frac{M_{85}}{M_{15}}, \text{ of } b = \frac{\sqrt[3]{M_{85}}}{\sqrt[3]{M_{15}}} = \frac{D_{85}}{D_{15}} \quad (\text{B.3})$$

B.3 WAARDEN UIT DE PRAKTIJK

In de praktijk zullen de steensorteringen karakteristieke waarden hebben die liggen tussen een onder- en bovengrens. In de onderstaande tabel is hiervan een overzicht gegeven.

Tabel B.1 D_{85} , D_{15} , D_{85}/D_{15} en D_{50} voor lichte sorteringen. [CUR/RWS 192, 1998]

Sortering	D_{85} [m]		D_{15} [m]		D_{85}/D_{15} [-]			D_{50} [m]	
	min	max	min	max	min	max	gem	min	max
5 – 40 kg	0,29	0,34	0,16	0,21	1,4	2,1	1,7	0,20	0,26
10 – 60 kg	0,33	0,37	0,21	0,26	1,3	1,8	1,5	0,26	0,31
40 – 200 kg	0,49	0,55	0,32	0,38	1,3	1,7	1,5	0,39	0,45
60 – 300 kg	0,56	0,63	0,37	0,44	1,3	1,7	1,5	0,47	0,53

De gemiddelde waarden voor D_{85} , D_{n85} , D_{15} , D_{n15} , D_{50} en D_{n50} volgen nu uit Tabel B.1 en vergelijking (B.2):

Tabel B.2 Gemiddelde waarden voor D_{85} , D_{n85} , D_{15} , D_{n15} , D_{50} en D_{n50} .

Sortering	D_{85} [m]	D_{n85} [m]	D_{15} [m]	D_{n15} [m]	D_{50} [m]	D_{n50} [m]
5 – 40 kg	0,31	0,26	0,18	0,15	0,23	0,19
10 – 60 kg	0,35	0,29	0,23	0,19	0,28	0,24
40 – 200 kg	0,52	0,44	0,35	0,29	0,42	0,35
60 – 300 kg	0,60	0,50	0,41	0,34	0,50	0,42

Nota bene:

Genoemde waarden in Tabel B.1 en Tabel B.2 gelden voor $\rho_s = 2500 \text{ kg/m}^3$. Voor andere dichtheden kunnen deze worden omgerekend met de factor $\sqrt[3]{\frac{2500}{\rho_s}}$.

BIJLAGE C

STORTMETHODEN



Figuur C.1 Bestorting op een zinkstuk bij de Afsluitdijk. [SCHIERECK, 2001]

C.1 INLEIDING

Het aanbrengen van ‘dunne’ bestortingslagen kan op verschillende manieren plaatsvinden. Deze stortmethoden hebben vooral betrekking op:

- de gebruikte verhaalmethode (paragraaf C.2),
- het aantal verhaalslagen of stortgangen waarmee de laagdikte wordt opgebouwd (paragraaf C.3) en
- eenzijdig of tweezijdig storten (paragraaf C.4).

De tekst uit het onderstaande overzicht is grotendeels ontleend uit [BOUWDIENST RWS, 1991].

C.2 VERHAALMETHODEN

Tijdens het stortproces kan het stortschip op een drietal manieren langs de stortkoers gemanoeuvreed worden.

Niet verhalen

Tijdens het storten wordt het schip niet verhaald, en blijft dus op dezelfde positie liggen.

Discreet verhalen

Hieronder wordt verstaan: op één positie de schuiven over een bepaalde lengte uitdrukken, vervolgens de steenstorter over een bepaalde afstand verhalen, en weer opnieuw over een zekere lengte de schuiven uitdrukken, etc...

Continu verhalen

Tijdens het (leeg)schuiven wordt het schip met een (‘constante’) verhaalsnelheid zijdelings, langs de stortkoers, voortbewogen.

C.3 AANTAL STORTGANGEN

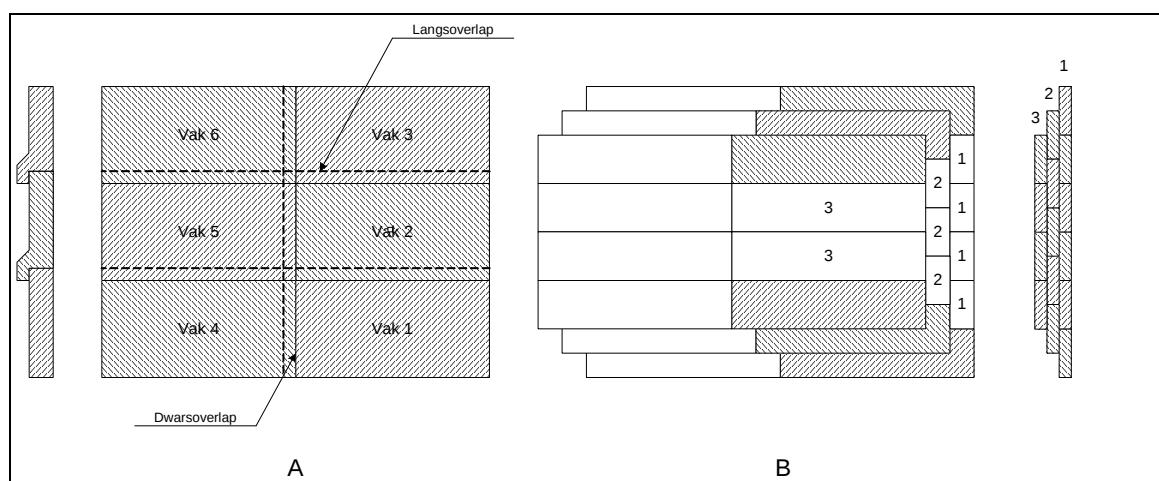
Steenbestortingen ten behoeve van bodem- en oeververdedigingswerken worden veelal in verschillende (talud)secties aangebracht. Deze moeten goed op elkaar aansluiten. Tevens is – uit economische overwegingen – enige gelijkmatigheid van de laagdikte gewenst. Ongelijkmatig storten vereist immers extra materiaal, wat ongunstig is. De onregelmatige verdeling van de materialen op de bodem kan worden opgevangen de totale laagdikte in meerdere stortgangen aan te brengen

Dakpansgewijs

Deze manier van storten wordt veelal toegepast wanneer de stortvaklengte relatief klein is. De totaal benodigde hoeveelheid materiaal wordt dan met één scheepslading veelal in meerdere verhaalslagen aangebracht, door het schip verschillende keren in dezelfde koers en over het zelfde stortvak te manoeuvreren. Onregelmatigheden doen zich veelal voor aan de randen van de (talud)secties. Om een goede aansluiting te waarborgen wordt het aangrenzende stort met een langs- en dwarsoverlap aangebracht, zie Figuur C.2a.

Halfsteensverband

In dit geval wordt de te realiseren laagdikte per stortvak met meerdere scheepsladingen en in meerdere stortgangen aangebracht. De stortvakken, waarvan de lengte relatief groot is, verspringen per laag zodanig, dat geen overlappen nodig zijn. Aan de randen van het bestortingsveld komen uiteraard wel onregelmatigheden voor. Storten volgens dit "halfsteensverband" is weergegeven in Figuur C.2b



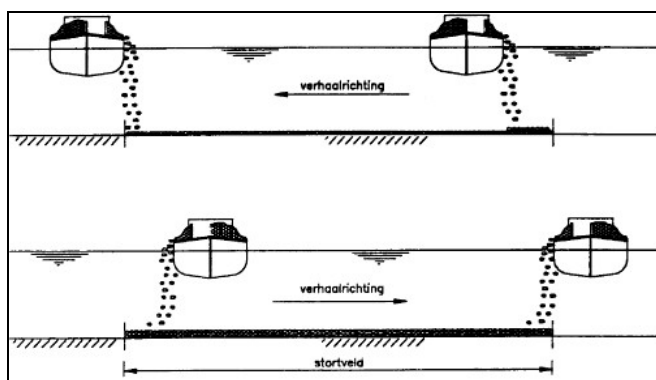
Figuur C.2 "Dakpansgewijs" storten (a) en storten volgens het "halfsteensverband" (b). [BOUWDIENST RWS, 1991]

C.4 EENZIJDIG, TWEEZIJDIG STORTEN

Het laaddek van een schuifstorter is in de lengterichting verdeeld in een bakboord- en stuurboorddek. Dit geeft, qua stortmethode, een tweetal mogelijkheden.

Eenzijdig storten

De inhoud van één laaddek wordt, afhankelijk van de stortvaklengte, in een of meerdere verhaalslagen aangebracht. Vervolgens gebeurt hetzelfde met het tweede laaddek; dit kan uitgevoerd worden door heen en weer gaande verhaalslagen, door draaien van het stortschip, maar ook door opnieuw terug te stellen naar het beginpunt.

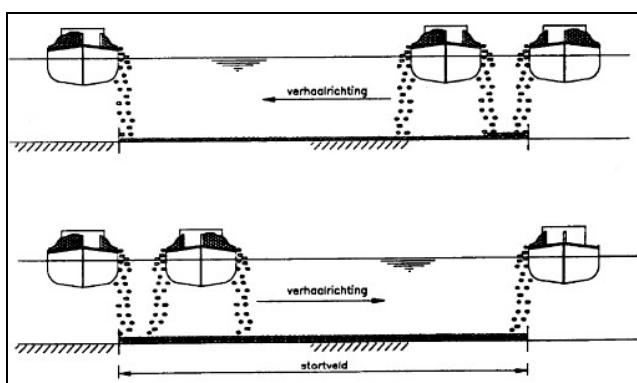


Figuur C.3 Eenzijdig storten. [BOUWDIENST RWS, 1991]

Tweezijdig storten

Hierbij wordt de hoeveelheid stortmateriaal van beide laaddekken in meerdere stortgangen tegelijk gestort. Aan het 'beginpunt' wordt met één dek begonnen. Pas wanneer over een afstand, gelijk aan de breedte van het schip, is verhaald, wordt ook met het tweede dek begonnen. Aan het einde van het stortveld stopt het stortproces in omgekeerde volgorde.

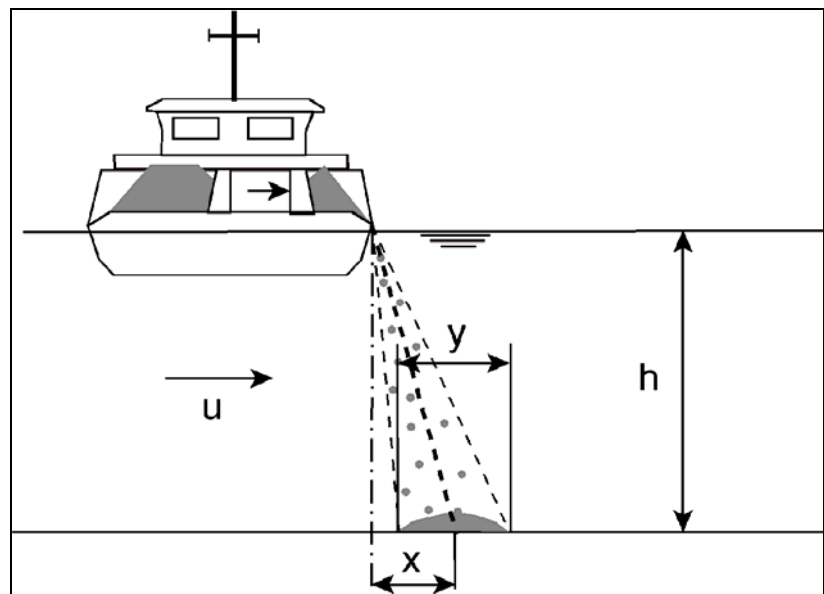
In eerste instantie lijkt de nauwkeurigheid van de steenbestorting niet of nauwelijks afhankelijk te zijn van een- of tweezijdig storten. Voordeel van tweezijdig storten is wel dat de lading in een relatief kortere tijd overboord gezet kan worden. Tevens zal niet of nauwelijks bijgetrimd⁽²⁾ hoeven te worden omdat, na enige tijd weliswaar, zowel van stuurboord als van bakboord een (ongeveer) evengrote hoeveelheid materiaal het schip verlaat.



Figuur C.4 Tweezijdig storten. [BOUWDIENST RWS, 1991]

² Dit corrigeren van de scheefstand van het stortschip geschiedt veelal door middel van ballasttanks die met water gevuld kunnen worden.

BIJLAGE D INVLOED VAN GOLVEN EN STROMING OP DE VERPLAATSING VAN MATERIAAL ONDER WATER



Figuur D.1 Verplaatsing van het stortmateriaal als gevolg van stroming. [SCHIERECK, 2001]

D.1 INVLOED VAN GOLVEN OP DE BAAN VAN EEN INDIVIDUELE STEEN

De onderstaande afleiding is overgenomen uit [WL M 1768, 1983].

D.1.1 1^e bedadering

Aanname 1: De verticale snelheid van de steen: $w = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\Delta g D_b}{C_d}}$

Aanname 2: Horizontale snelheid van de steen: $u_{st} = u_w$ (snelheid van het water)

Aanname 3: De uitwijking van de steen volgt uit: $tg\varphi = \frac{u_w}{w} = 0.85 \frac{u_w}{\sqrt{\Delta g D_b}}$

Berekening u_w

$$u_w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh\{2\pi(z+d)/L\}}{\cosh\{2\pi d/L\}} \cos\left\{\frac{2\pi}{T}t\right\}$$

Voor $z=0$ (waterspiegel) geldt: $u_w = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \cos\left\{\frac{2\pi}{T}t\right\}$.

Tabel D.1 u_{max} bij verschillende combinaties van T, L en H

Golftermijn T [s]	Golflengte L [m]	$u_{max} = \frac{H}{2} \frac{gT}{L}$ [m/s]		
		H = 0,5 m,	H = 1,0 m,	H = 1,5 m,
5	39	0,31	0,63	0,94
6	56,2	0,27	0,53	0,80
10	156	0,16	0,31	0,47

Situatie 1: Golfhoogte $H = 0,5$ m., steensortering 5–40 kg. ($\Delta D_b = 0,36$ m.) en $u_w = u_{st} = 0,31$ m/s. Er volgt $tg\varphi = 0,45$ en $u_w = 0,14$ m/s.

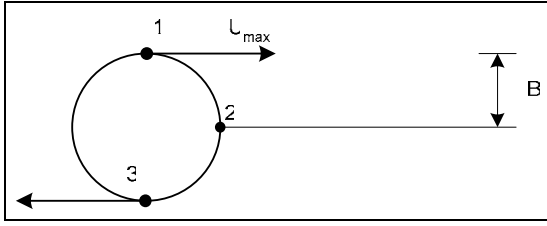
Verticale verplaatsing $B = H/2 = 0,25$ m.

Horizontale verplaatsing $x = 0,25 \times 0,14 = 0,035$ m.

Situatie 2: Golfhoogte $H = 1,0$ m. geeft $x = 0,12$ m.

Situatie 3: Golfhoogte $H = 1,5$ m. geeft $x = 0,28$ m.

In onderstaande figuur is naast de maximale snelheid in horizontale richting (u_{max}) ook de verticale verplaatsing B weergegeven.



Figuur D.2 Maximale snelheid ($u_{\max}$) en verticale verplaatsing (B).

Na punt 2 verandert de snelheid van richting en gaat de steen dus terug. De verschuiving van het zwaartepunt van de steen zal dus minder zijn dan de hierboven gegeven waarden.

D.1.2 2^e benadering

Het belangrijkste verschil met de voorgaande benadering is dat nu de snelheid van de steen (horizontaal) kleiner is dan de snelheid van het water.

$$F = \frac{1}{8} \pi D_b^2 C_d \rho_w u^2 = A u^2$$

$$F = M \frac{du_{st}}{dt}$$

$$A u^2 = \frac{1}{6} \pi D_b^3 (\rho_s - \rho_w) \frac{du_{st}}{dt}$$

$$\frac{du_{st}}{dt} = \frac{3}{4} \frac{C_d \rho_w}{D_b (\rho_s - \rho_w)} u^2 = K u^2$$

$$\text{Met } u = \alpha \cos(kx + \omega t) \text{ en met } \alpha = \frac{H}{2} \frac{gT}{L}$$

$$\frac{du_{st}}{dt} = K \alpha^2 \cos^2(+\omega t)$$

Te beschouwen over een kwart periode

$$u_{st} = \int_{t=0}^{t=\frac{1}{4}T} K \alpha^2 \cos^2(+\omega t) dt = \frac{K \alpha^2}{\omega} \left\{ \frac{1}{2} \omega t - \frac{1}{2} \sin(\omega t) \cos(\omega t) \right\}$$

$$u_{st} = \frac{K \alpha^2}{\omega} \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{4} \frac{2\pi}{T} - 0 \right\} - \left\{ \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{T} \frac{T}{4}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{T} \frac{T}{4}\right) - \frac{1}{2} \sin(0) \cos(0) \right\}$$

$$u_{st} = \frac{K \alpha^2}{2\pi} T \left\{ \frac{2\pi}{8} - 0 \right\} = \frac{K \alpha^2}{8} T$$

Over de periode $0 - \frac{1}{4}T$ is het gemiddelde van u_{st} :

$$u_{st} = \frac{1}{T/4} \frac{K \alpha^2}{8} T = \frac{K \alpha^2}{2}$$

Voor steen uit de sortering 5-40 kg geldt $K=2,16$

Tabel D.2 α en u_{st} bij verschillende combinaties van T, L en H.

T [s]	L [m]	H=0,5 m,		H=1,0 m,		H=1,5 m,	
		[m/s]	[m/s]	α [m/s]	u_{st} [m/s]	α [m/s]	u_{st} [m/s]
5	39	0,31	0,09	0,63	0,43	0,94	0,95
6	56,2	0,27	0,08	0,53	0,30	0,80	0,70
10	156	0,16	0,03	0,31	0,11	0,47	0,24

De 2^e benadering geeft duidelijke kleinere waarden voor u_{st} dan de 1^e benadering en derhalve ook kleinere horizontale verplaatsingen.

D.1.3 Conclusie

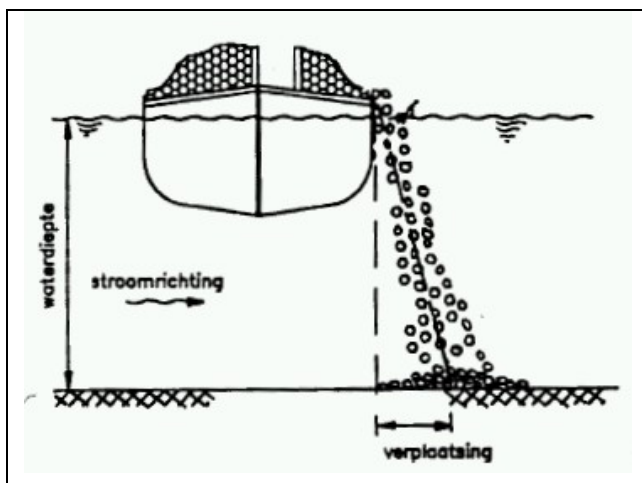
Geconcludeerd kan worden dat de invloed van golven op de horizontale verschuiving verwaarloosbaar klein is.

D.2 INVLOED VAN STROMING OP DE BAAN VAN EEN INDIVIDUELE STEEN

Indien er gestort wordt onder stromingscondities zal rekening gehouden moeten worden met een extra verplaatsing van het stortmateriaal. Een en ander is ontleend aan [BOUWDIENST RWS, 1991] en [DE REUS, 2004].

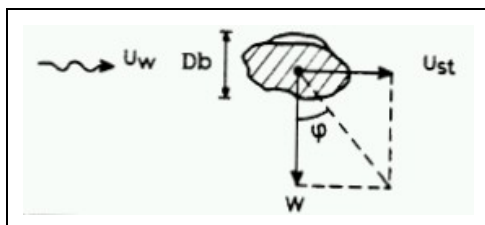
De grootte van de verplaatsing blijkt met name afhankelijk te zijn van:

- de waterdiepte,
- de karakteristieke steendiameter,
- de stroomsnelheid,
- de stroomrichting,
- de weerstandscoefficiënt van het stortmateriaal en
- de relatieve dichtheid van het materiaal onder water



Figuur D.3 Verplaatsing ten gevolge van stroming. [BOUWDIENST RWS, 1991]

De verplaatsing van individuele stenen onder water kan worden bepaald door berekening van de verschuiving volgens onderstaande relatie:



Figuur D.4 De verplaatsing van een individuele steen onder water. [BOUWDIENST RWS, 1991]

De baan van de steen in de evenwichtssituatie ($u_{st}=u_w$) volgt uit:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{u_w}{w} = C \frac{u_w}{\sqrt{\Delta g D_b}}$$

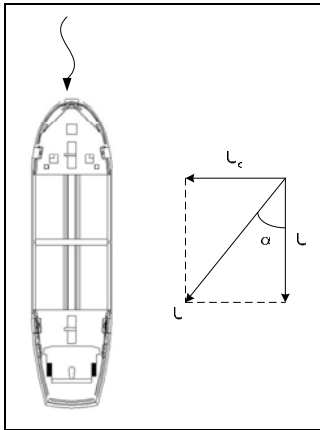
Waarin:	u_w	:	snelheid van het water	[m/s]
	w	:	valsnelheid van de steen	[m/s]
	C	:	coëfficiënt	[-]

Voor een verklaring van de overige parameters wordt verwezen naar de formules voor “kop” en “dwars” op de stroom.

Voor kopse en zijdelingse stromingsomstandigheden zijn de verplaatsingen weer te geven door de relaties uit [WL M 1768, 1983].

Storten met kopse stroming

Het stortschip ligt tijdens het storten voornamelijk met “de kop op de stroom”.



Figuur D.5 Stortmiddel met “kop op de stroom”.

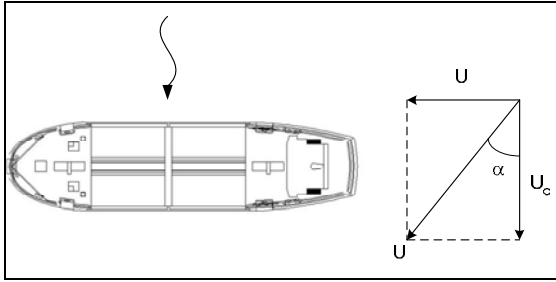
De verplaatsing van het stortmateriaal ten gevolge van deze stroomomstandigheden worden nu gegeven door:

$$l_k = h_0 \frac{C_l}{\sqrt{\Delta g D_b}} U \cos \alpha$$

$$d_k = h_0 \frac{C_{dw}}{\sqrt{\Delta g D_b}} U \sin \alpha$$

Storten met zijwaartse stroming

Het stortmiddel ligt nu voornamelijk dwars op stroomrichting.



Figuur D.6 Stortmiddel dwars op stroomrichting.

De verplaatsing van het stortmateriaal in dwars- en lengterichting van het stortschip kunnen nu bepaald worden met:

$$l_d = h_0 \frac{C_l}{\sqrt{\Delta g D_b}} U \sin \alpha$$

$$d_d = h_0 \frac{C_{dw}}{\sqrt{\Delta g D_b}} U \cos \alpha$$

Waarin:	l_k, l_d	: Verplaatsing in lengterichting	[m]
	d_k, d_d	: Verplaatsing in dwarsrichting	[m]
	h_0	: Waterdiepte	[m]
	C_l	: Meeneemcoëfficiënt in lengterichting	[-]
	C_{dw}	: Meeneemcoëfficiënt in dwarsrichting	[-]
	Relatieve dichtheid van het materiaal onder water;		
	Δ	: $\frac{\rho_{steen} - \rho_{water}}{\rho_{water}}$	[-]
	ρ_w, ρ_{st}	: Dichtheid van het water en van het stortmateriaal	[kg/m ³]
	g	: Versnelling van de zwaartekracht	[m/s]
	D_b	: Karakteristieke steendiameter; $D_b = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \frac{M_{50}}{\rho_{st}}}$	[m]
	M_{50}	: Massa van de steen overschreden door 50% van de massa	[kg]
	U	: Stroomsnelheid	[m/s]
	α	: Aanstroomhoek	[rad]

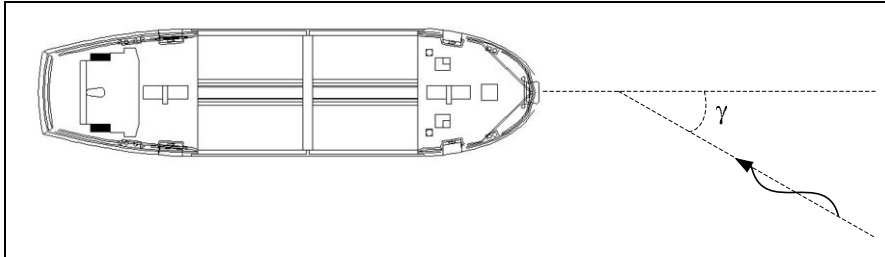
Uit [DE REUS, 2004] blijkt:

$$C_l = 0.95 \cdot C_{dw}$$

en

$$C_{dw} = \sqrt{\frac{1}{2} C_d}, \text{ hierin is } C_d \text{ de weerstandscoefficiënt van een steen.}$$

Bij een willekeurige stroomrichting – zie Figuur D.7 – kan de verplaatsing van het stortmateriaal in dwars- en lengterichting worden bepaald aan de hand van de onderstaande relaties.



Figuur D.7 Willekeurige stroomrichting γ .

$$d = \sin \gamma \frac{h_0 \cdot U}{\sqrt{\Delta g D_b}} \sqrt{C_l \cos^2 \gamma + C_{dw} \sin^2 \gamma}$$

$$l = \cos \gamma \frac{h_0 \cdot U}{\sqrt{\Delta g D_b}} \sqrt{C_l \cos^2 \gamma + C_{dw} \sin^2 \gamma}$$

Of, vereenvoudigd met de veronderstelling dat veelal loodrecht – $\gamma = 90^\circ$ – op en evenwijdig – $\gamma = 0^\circ$ – aan de stroming wordt gestort, door:

$$d = \frac{h_0 \cdot U}{\sqrt{\Delta g D_b}} \sqrt{\frac{1}{2} C_d}$$

$$l = 0.95 \frac{h_0 \cdot U}{\sqrt{\Delta g D_b}} \sqrt{\frac{1}{2} C_d}$$

BIJLAGE E EIGENSCHAPPEN VAN HET MATERIAAL UIT SORTERING A



Figuur E.1 Materiaal uit sortering A op het laaddek van de modelstorter.

E.1 MEETGEGEVENS

De gepresenteerde meetgegevens hebben betrekking tot:

- ♦ de steeneigenschappen van het materiaal (uit sortering A) en
- ♦ de invloed van de verf op de dichtheid van het materiaal.

E.1.1 Steeneigenschappen sortering A

In de onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de steeneigenschappen van het materiaal uit sortering A.

Tabel E.1 Eigenschappen van de stenen uit sortering A ('afwijkende' metingen zijn rood gearceerd).

Nr.	M _{droog} [g]	M _{ow} [g]	V _{steen} [cm ³]	ρ _{steen} [g/cm ³]	D _n [cm]	D _x [cm]	L [cm]	d [cm]	L/d [-]
1	11,946	7,419	4,527	2,639	1,654	1,969	2,80	1,45	1,93
2	12,904	8,058	4,846	2,663	1,692	2,015	3,78	1,10	3,44
3	13,698	8,465	5,234	2,617	1,736	2,067	3,10	1,36	2,28
4	15,538	9,654	5,885	2,640	1,805	2,149	3,92	1,18	3,32
5	15,841	9,885	5,956	2,660	1,813	2,158	3,47	1,84	1,89
6	9,173	5,678	3,495	2,625	1,518	1,807	2,69	1,20	2,24
7	14,499	9,052	5,447	2,662	1,759	2,095	3,06	1,28	2,39
8	6,051	3,766	2,285	2,649	1,317	1,568	2,21	1,34	1,65
9	19,590	12,191	7,400	2,647	1,949	2,320	4,17	1,78	2,34
10	17,319	10,796	6,523	2,655	1,868	2,224	3,42	1,66	2,06
11	8,748	5,443	3,305	2,647	1,490	1,773	2,74	1,37	2,00
12	20,300	12,674	7,626	2,662	1,968	2,343	4,67	1,67	2,80
13	7,601	4,730	2,871	2,648	1,421	1,692	3,13	1,29	2,43
14	9,028	5,640	3,388	2,665	1,502	1,788	2,79	1,23	2,27
15	13,171	8,221	4,950	2,661	1,704	2,029	3,16	1,68	1,88
16	11,561	7,213	4,348	2,659	1,632	1,943	2,99	1,20	2,49
17	9,842	6,132	3,710	2,653	1,548	1,843	3,09	1,57	1,97
18	9,533	5,945	3,588	2,657	1,531	1,823	2,47	1,71	1,44
19	11,434	7,141	4,293	2,663	1,625	1,935	2,88	1,44	2,00
20	13,305	8,321	4,984	2,670	1,708	2,034	2,90	1,84	1,58
21	8,261	5,153	3,108	2,658	1,459	1,737	2,70	1,17	2,31
22	23,525	14,698	8,827	2,665	2,067	2,460	4,55	2,04	2,23
23	16,232	10,124	6,108	2,657	1,828	2,176	3,27	1,50	2,18
24	11,947	7,454	4,493	2,659	1,650	1,964	2,93	1,12	2,62
25	12,551	7,833	4,718	2,660	1,677	1,997	3,32	1,32	2,52
26	10,669	6,674	3,995	2,671	1,587	1,889	3,18	1,34	2,37
27	9,785	6,099	3,686	2,655	1,545	1,839	3,45	1,20	2,88
28	21,072	13,165	7,907	2,665	1,992	2,372	3,30	2,11	1,56
29	16,245	10,146	6,099	2,664	1,827	2,175	3,64	1,60	2,28
30	13,392	8,265	5,127	2,612	1,724	2,053	4,06	1,35	3,01
31	7,846	5,226	2,620	2,995	1,379	1,641	xxxx	xxxx	xxxx

Bijlage E Eigenschappen van het materiaal uit sortering A

32	11,040	6,899	4,141	2,666	1,606	1,912	3,14	1,47	2,14
Nr.	M _{droog} [g]	M _{ow} [g]	V _{steen} [cm ³]	ρ _{steen} [g/cm ³]	D _n [cm]	D _x [cm]	L [cm]	d [cm]	L/d [-]
33	18,758	11,882	6,876	2,728	1,902	2,264	3,62	1,70	2,13
34	14,009	8,760	5,249	2,669	1,738	2,069	3,14	1,85	1,70
35	17,291	10,839	6,452	2,680	1,862	2,216	3,50	1,71	2,05
36	10,407	6,497	3,910	2,662	1,575	1,875	3,32	1,04	3,19
37	10,221	6,410	3,811	2,682	1,562	1,860	2,94	1,40	2,10
38	24,238	15,175	9,063	2,674	2,085	2,482	4,90	2,03	2,41
39	13,812	8,593	5,219	2,646	1,735	2,065	3,10	1,39	2,23
40	16,011	10,028	5,983	2,676	1,815	2,161	4,09	1,55	2,64
41	7,564	5,035	2,529	2,991	1,362	1,622	xxxx	xxxx	xxxx
42	15,550	9,723	5,827	2,669	1,799	2,142	3,56	1,46	2,44
43	6,564	4,070	2,494	2,632	1,356	1,614	2,73	0,72	3,79
44	11,556	7,225	4,331	2,668	1,630	1,941	3,59	1,47	2,44
45	15,070	9,425	5,645	2,670	1,781	2,120	3,42	1,65	2,07
46	14,432	9,022	5,410	2,668	1,755	2,090	3,20	1,50	2,13
47	6,323	3,932	2,391	2,645	1,337	1,592	2,43	1,10	2,21
48	8,231	5,132	3,099	2,656	1,458	1,736	3,11	1,41	2,21
49	8,356	5,218	3,138	2,663	1,464	1,743	2,40	1,28	1,88
50	17,733	11,088	6,645	2,669	1,880	2,238	3,73	2,04	1,83
51	7,682	4,790	2,892	2,656	1,425	1,696	2,90	1,01	2,87
52	8,893	5,546	3,347	2,657	1,496	1,781	3,66	1,26	2,90
53	14,704	9,166	5,538	2,655	1,769	2,106	3,29	1,28	2,57
54	7,257	4,531	2,726	2,662	1,397	1,663	2,49	1,28	1,95
55	11,252	7,015	4,237	2,656	1,618	1,926	3,21	1,56	2,06
56	9,201	5,733	3,468	2,653	1,514	1,802	2,98	1,41	2,11
57	8,947	5,533	3,414	2,621	1,506	1,793	3,17	1,27	2,50
58	9,756	6,496	3,260	2,993	1,483	1,765	xxxx	xxxx	xxxx
59	17,751	11,836	5,915	3,001	1,808	2,153	xxxx	xxxx	xxxx
60	13,434	8,389	5,045	2,663	1,715	2,042	3,13	1,35	2,32
61	7,482	4,649	2,833	2,641	1,415	1,684	2,53	1,11	2,28
62	13,210	8,228	4,982	2,652	1,708	2,033	3,06	1,73	1,77
63	9,499	5,906	3,593	2,644	1,532	1,823	3,27	1,30	2,52
64	18,233	11,397	6,836	2,667	1,898	2,259	4,40	1,22	3,61
65	12,879	8,043	4,836	2,663	1,691	2,013	2,90	1,78	1,63
66	11,785	7,368	4,417	2,668	1,641	1,953	2,63	1,94	1,36
67	17,949	11,215	6,734	2,665	1,888	2,248	3,01	1,92	1,57
68	14,952	9,329	5,623	2,659	1,778	2,117	3,63	1,30	2,79
69	11,468	7,166	4,302	2,666	1,626	1,936	3,14	1,33	2,36
70	8,980	5,587	3,393	2,647	1,503	1,789	3,37	1,34	2,51
71	8,828	5,505	3,323	2,657	1,492	1,776	3,20	1,69	1,89
72	20,803	13,016	7,787	2,672	1,982	2,360	4,28	1,85	2,31
73	14,296	8,917	5,379	2,658	1,752	2,086	3,33	1,33	2,50
74	12,236	7,634	4,602	2,659	1,663	1,980	4,51	1,48	3,05
75	6,590	4,087	2,503	2,633	1,358	1,616	3,03	0,91	3,33
76	10,766	6,713	4,053	2,656	1,594	1,898	3,11	1,54	2,02

Bijlage E Eigenschappen van het materiaal uit sortering A

77	15,054	9,424	5,630	2,674	1,779	2,118	3,50	1,86	1,88
Nr.	M _{droog} [g]	M _{ow} [g]	V _{steen} [cm ³]	ρ _{steen} [g/cm ³]	D _n [cm]	D _x [cm]	L [cm]	d [cm]	L/d [-]
78	11,052	6,895	4,157	2,659	1,608	1,914	3,74	1,40	2,67
79	16,622	10,382	6,240	2,664	1,841	2,192	3,63	1,37	2,65
80	18,543	11,555	6,988	2,654	1,912	2,276	4,15	1,63	2,55
81	11,291	7,050	4,241	2,662	1,619	1,927	2,95	1,27	2,32
82	19,639	12,265	7,374	2,663	1,946	2,317	3,99	1,96	2,04
83	8,691	5,420	3,271	2,657	1,484	1,767	2,93	0,98	2,99
84	17,792	11,130	6,662	2,671	1,882	2,240	3,51	1,76	1,99
85	4,593	2,854	1,739	2,641	1,203	1,432	2,62	0,97	2,70
86	23,679	14,813	8,866	2,671	2,070	2,464	4,16	1,99	2,09
87	8,992	5,595	3,397	2,647	1,503	1,790	3,73	0,98	3,81
88	9,002	5,551	3,451	2,609	1,511	1,799	2,97	1,32	2,25
89	10,494	6,568	3,926	2,673	1,578	1,878	2,89	1,64	1,76
90	15,838	9,914	5,924	2,674	1,809	2,154	3,57	1,45	2,46
91	11,454	7,165	4,289	2,671	1,625	1,934	3,02	1,59	1,90
92	9,870	6,137	3,733	2,644	1,551	1,847	3,12	1,32	2,36
93	9,232	5,760	3,472	2,659	1,514	1,803	2,78	1,46	1,90
94	15,069	9,427	5,642	2,671	1,780	2,119	3,65	1,80	2,03
95	14,833	9,230	5,603	2,647	1,776	2,114	3,50	1,66	2,11
96	8,094	5,016	3,078	2,630	1,455	1,732	3,14	1,04	3,02
97	4,853	3,001	1,852	2,620	1,228	1,462	2,20	1,34	1,64
98	7,082	4,421	2,661	2,661	1,386	1,650	2,60	1,19	2,18
99	10,841	6,739	4,102	2,643	1,601	1,906	3,27	1,62	2,02
100	8,280	5,149	3,131	2,645	1,463	1,742	2,74	1,31	2,09
101	13,201	8,194	5,007	2,637	1,711	2,037	2,89	1,65	1,75
102	15,083	9,401	5,682	2,655	1,784	2,124	3,86	1,61	2,40
103	20,498	12,819	7,679	2,669	1,973	2,349	3,96	1,75	2,26
104	14,687	9,126	5,561	2,641	1,772	2,109	3,92	1,34	2,93
105	8,876	5,546	3,330	2,665	1,493	1,778	2,75	1,47	1,87
106	11,034	6,885	4,149	2,659	1,607	1,913	3,10	1,52	2,04
107	18,893	11,818	7,075	2,670	1,920	2,285	4,19	1,85	2,26
108	12,657	7,877	4,780	2,648	1,685	2,005	3,81	1,65	2,31
109	25,082	15,694	9,388	2,672	2,110	2,511	4,14	1,71	2,42
110	8,372	5,228	3,144	2,663	1,465	1,744	2,54	1,44	1,76
111	10,879	6,804	4,075	2,670	1,597	1,902	3,30	1,63	2,02
112	9,145	5,702	3,443	2,656	1,510	1,798	2,93	1,21	2,42
113	11,370	7,086	4,284	2,654	1,624	1,933	2,88	1,28	2,25
114	16,542	10,295	6,247	2,648	1,842	2,193	3,85	1,19	3,24
115	10,309	6,435	3,874	2,661	1,571	1,870	3,10	1,47	2,11
116	3,393	2,096	1,297	2,616	1,091	1,298	2,30	0,90	2,56
117	22,093	13,812	8,281	2,668	2,023	2,409	3,38	2,28	1,48
118	10,532	6,992	3,540	2,975	1,524	1,814	xxxx	xxxx	xxxx
119	18,346	11,475	6,871	2,670	1,901	2,263	3,82	1,74	2,20
120	5,352	3,335	2,017	2,653	1,263	1,504	2,59	0,89	2,91
121	13,135	8,187	4,948	2,655	1,704	2,029	3,64	1,44	2,53

Bijlage E Eigenschappen van het materiaal uit sortering A

122	7,570	4,716	2,854	2,652	1,418	1,689	2,87	1,24	2,31
Nr.	M _{droog} [g]	M _{ow} [g]	V _{steen} [cm ³]	ρ _{steen} [g/cm ³]	D _n [cm]	D _x [cm]	L [cm]	d [cm]	L/d [-]
123	15,643	10,453	5,190	3,014	1,731	2,061	xxxx	xxxx	xxxx
124	16,255	10,151	6,104	2,663	1,828	2,176	4,10	1,45	2,83
125	5,922	3,694	2,228	2,658	1,306	1,555	2,63	1,23	2,14
126	13,704	8,529	5,175	2,648	1,730	2,059	3,85	1,54	2,50
127	6,895	4,292	2,603	2,649	1,376	1,638	2,50	1,35	1,85
128	4,074	2,524	1,550	2,628	1,157	1,378	2,24	0,86	2,60
129	12,288	7,685	4,603	2,670	1,663	1,980	3,17	1,36	2,33
130	7,790	5,120	2,670	2,918	1,387	1,652	xxxx	xxxx	xxxx
131	10,139	6,332	3,807	2,663	1,561	1,859	3,10	1,33	2,33
132	9,830	6,127	3,703	2,655	1,547	1,842	2,88	1,64	1,76
133	11,458	7,151	4,307	2,660	1,627	1,937	2,69	1,78	1,51
134	14,307	8,917	5,390	2,654	1,753	2,087	4,24	1,52	2,79
135	4,965	3,112	1,853	2,679	1,228	1,462	2,45	1,33	1,84
136	6,717	4,140	2,577	2,607	1,371	1,632	3,28	0,95	3,45
137	4,373	2,685	1,688	2,591	1,191	1,417	2,16	1,11	1,95
138	12,342	7,700	4,642	2,659	1,668	1,986	3,67	1,32	2,78
139	7,613	4,782	2,831	2,689	1,415	1,684	2,48	1,17	2,12
140	5,197	3,196	2,001	2,597	1,260	1,500	2,49	0,92	2,71
141	10,603	6,644	3,959	2,678	1,582	1,883	3,41	1,46	2,34
142	6,777	4,217	2,560	2,647	1,368	1,629	2,37	1,20	1,98
143	6,209	3,815	2,394	2,594	1,338	1,593	2,26	1,33	1,70
144	11,164	6,947	4,217	2,647	1,616	1,923	3,42	1,06	3,23
145	7,874	4,907	2,967	2,654	1,437	1,711	2,80	1,22	2,30
146	5,901	3,650	2,251	2,622	1,311	1,560	2,43	1,35	1,80
147	4,481	2,770	1,711	2,619	1,196	1,424	2,25	1,30	1,73
148	3,732	2,300	1,432	2,606	1,127	1,342	1,99	0,97	2,05
149	6,916	4,300	2,616	2,644	1,378	1,640	2,52	1,44	1,75
150	9,270	5,784	3,486	2,659	1,516	1,805	2,39	1,90	1,26

Nota bene:

Van de stenen met een afwijkende dichtheid is de L/d verhouding niet meer gemeten.

E.1.2 Invloed van de verf op de gemeten dichtheid van de stenen

In de onderstaande tabel is een overzicht gegeven van de dichtheid van een vijftal stenen met en zonder een verflaag.

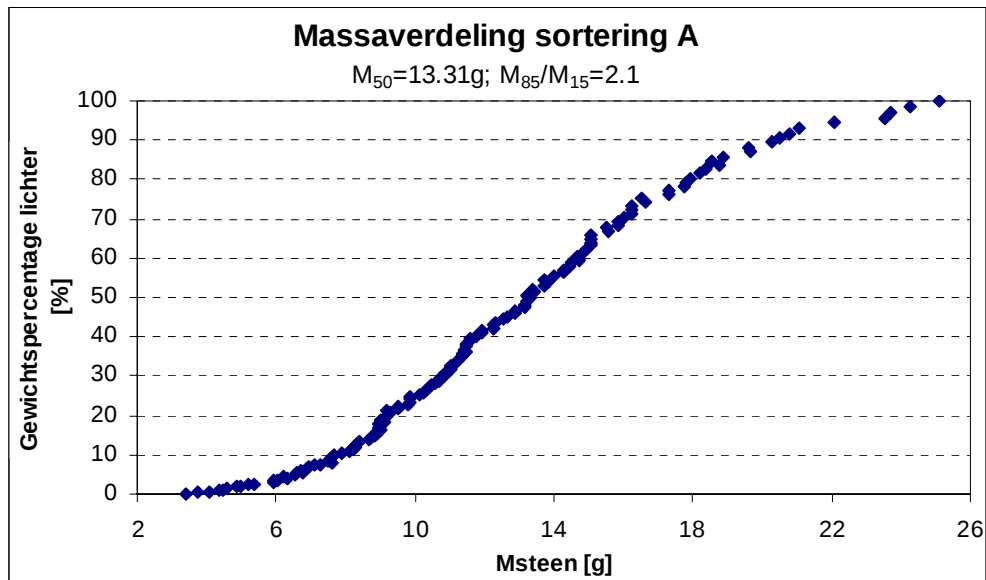
Tabel E.2 Dichtheid van stenen met en zonder een verflaag.

Nr.	M _{droog} [g]	M _{ow} [g]	ρ _{steen} [g/cm ³]	afwijking
a	9,082	5,695	2,681	
a, geverfd	<u>9,441</u>	<u>5,797</u>	<u>2,591</u>	
verschil	0,359	0,102	-0,091	-3,38%
b	12,565	7,917	2,703	
b.geverfd	<u>12,941</u>	<u>8,051</u>	<u>2,646</u>	
verschil	0,376	0,134	-0,057	-2,10%
c	7,377	4,644	2,699	
c, geverfd	<u>7,652</u>	<u>4,735</u>	<u>2,623</u>	
verschil	0,275	0,091	-0,076	-2,82%
d	19,528	12,295	2,700	
d, geverfd	<u>19,994</u>	<u>12,464</u>	<u>2,655</u>	
verschil	0,466	0,169	-0,045	-1,65%
e	14,505	9,073	2,670	
e, geverfd	<u>14,914</u>	<u>9,233</u>	<u>2,625</u>	
verschil	0,409	0,16	-0,045	-1,69%

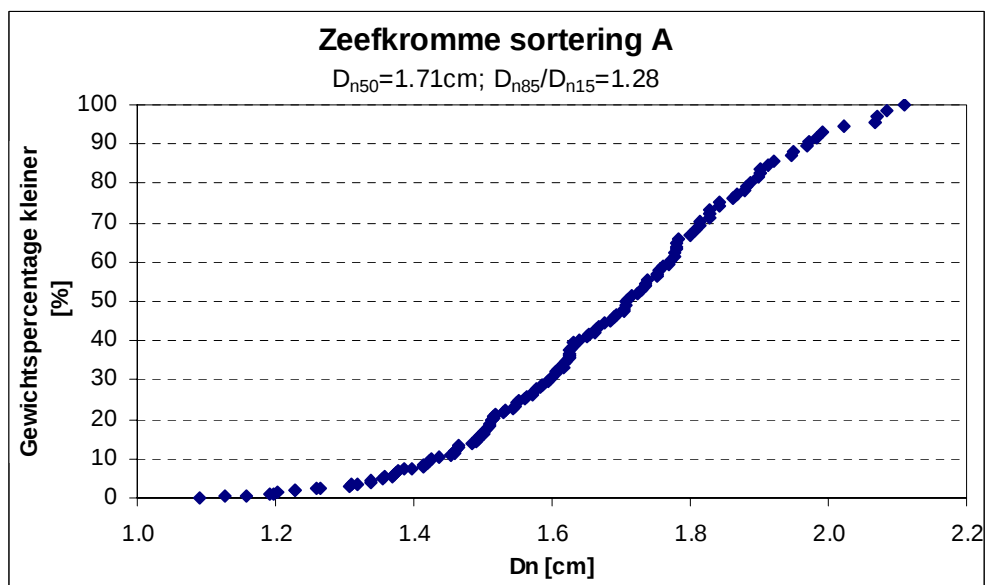
Nota bene:

- (1) De verf is niet verdund en dus redelijk dik op de steen aangebracht; de waarden zijn wellicht een bovengrens voor de invloed van de verf op de massadichtheid van de stenen.
- (2) De gemeten stenen hebben verschillende L/d verhoudingen. Op 'platte' stenen zal de invloed van de verf relatief groot zijn in verband met het relatief grote steenoppervlak en de daarmee samenhangende hoeveelheid verf.

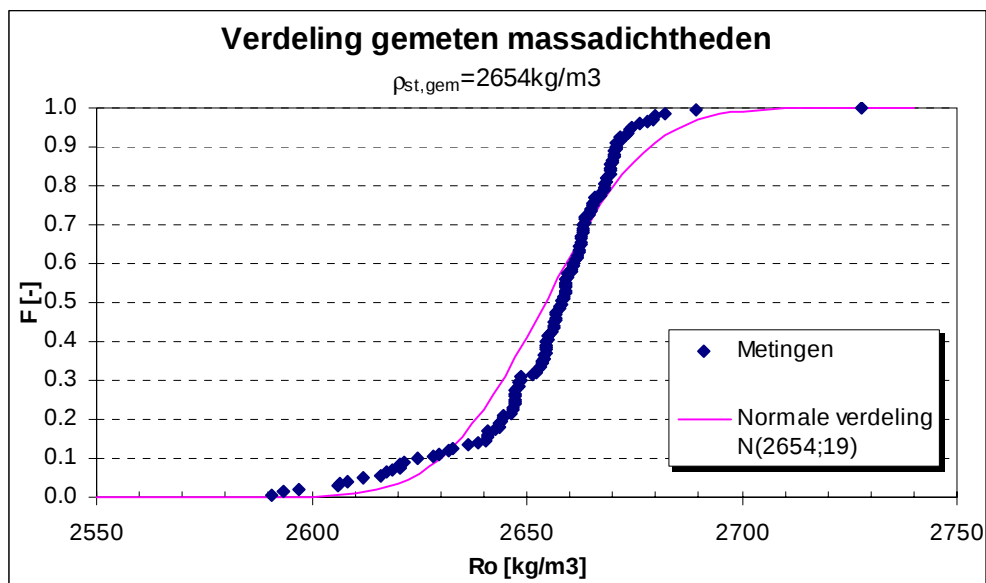
E.2 OVERZICHT MEETRESULTATEN



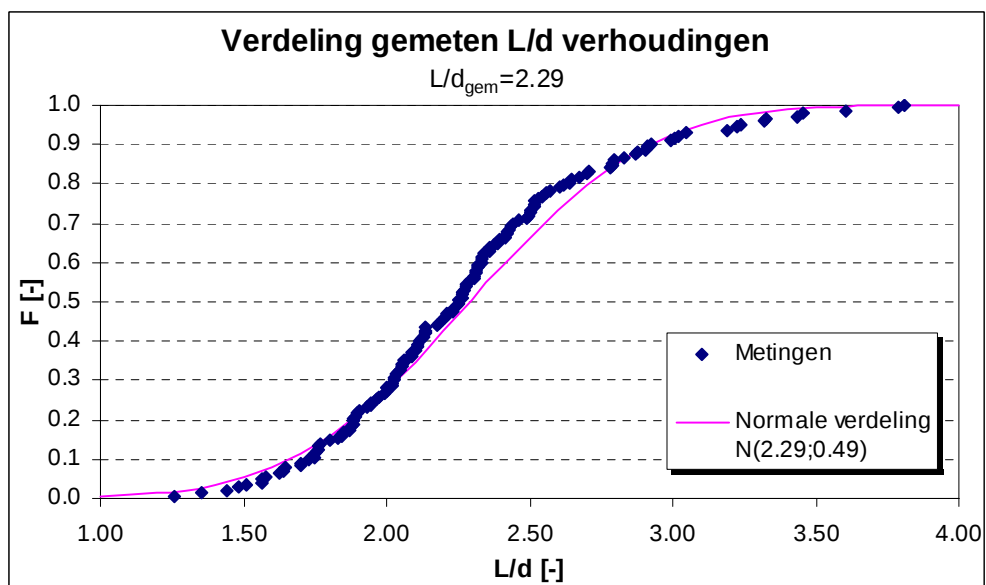
Figuur E.2 Massaverdeling van de stenen uit sortering A.



Figuur E.3 Zeefkromme sortering A.



Figuur E.4 Verdeling van de gemeten massadichtheden in vergelijking met een normale verdeling met $\mu = 2654 \text{ kg/m}^3$ en $\sigma = 19 \text{ kg/m}^3$.



Figuur E.5 Verdeling van de gemeten L/d verhouding van de stenen vergeleken met een normale verdeling met $\mu = 2,29$ en $\sigma = 0,49$.

E.3 VERIFICATIE MEETRESULTATEN

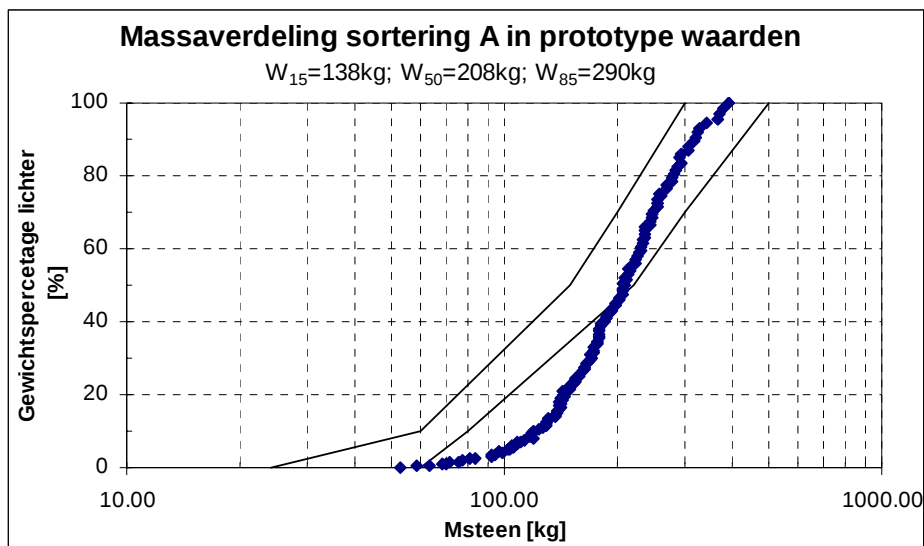
Bij het zeven van sortering A is beoogd de 60 – 300 kg sortering uit de praktijk zo goed mogelijk na te bootsen. In deze paragraaf wordt nagegaan of dit ook het geval is. Dit wordt gedaan aan de hand van een verificatie van de meetresultaten met betrekking tot de massaverdeling.

In de onderstaande tabel zijn de grenzen van de 60 – 300 kg sortering vergeleken met de geschaalde grenswaarden voor de stenen uit sortering A.

Tabel E.3 Grenzen massaverdeling 60 – 300 kg sortering [SCHIERECK, 2001] vergeleken met grenzen uit sortering A.

(3)	60 – 300 kg		Sortering A		
	My	y in My	My	y in My	
ELCL	30	$y < 2$	1,9	0,0	OK
LCL	60	$y < 10$	3,8	0,4	OK
UCL	300	$70 < y < 100$	19,2	85,9	OK
EUCL	450	$y > 97$	28,8	100,0	OK

Uit Tabel E.3 blijkt dat de stenen uit sortering A voldoen aan de grenzen voor de 60 – 300 kg sortering uit de praktijk. Dit blijkt ook als de massaverdeling van sortering A in prototype waarden worden weergegeven, zie Figuur E.6.



Figuur E.6 De, naar prototype geschaalde, massaverdeling van sortering A met grenswaarden van de 60 – 300 kg sortering uit de praktijk.

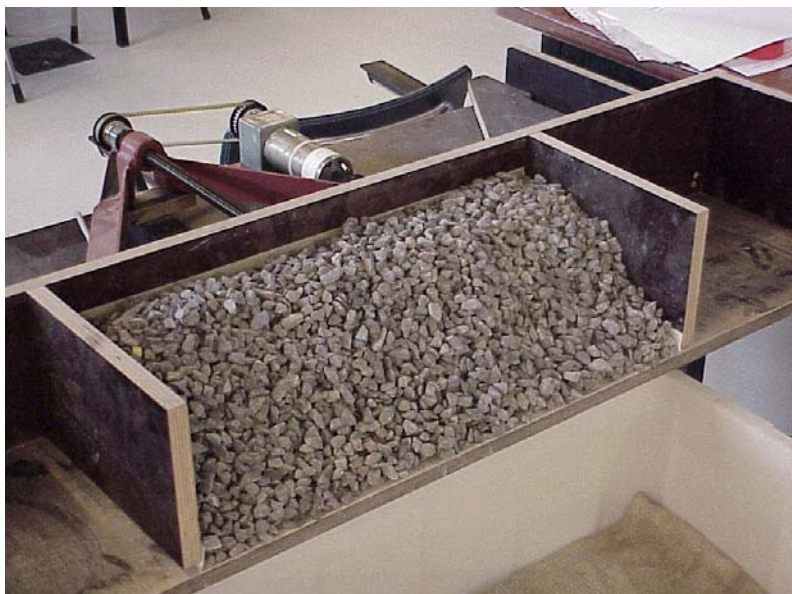
³ ELCL: extreme lower class limit

LCL: lower class limit

UCL: upper class limit

EUCL: extreme upper class limit

BIJLAGE F EIGENSCHAPPEN VAN HET MATERIAAL UIT SORTERING B



Figuur F.1 Materiaal uit sortering B op het laaddek van de modelstorter.

F.1 MEETGEGEVENS: STEENEIGENSCHAPPEN

Onderstaande meetgegevens met betrekking tot de eigenschappen van het materiaal uit sortering B zijn afkomstig uit [DESSENS, 2004].

Tabel F.1 Eigenschappen van de stenen uit sortering B.

Nr.	M _{droog} [g]	M _{ow} [g]	V _{steen} [cm ³]	ρ _{steen} [g/cm ³]	D _n [cm]	D _x [cm]
1	0,569	0,365	0,204	2,789	0,589	0,701
2	0,629	0,393	0,236	2,666	0,618	0,736
3	0,755	0,474	0,281	2,685	0,655	0,780
4	0,762	0,478	0,284	2,684	0,657	0,782
5	0,904	0,617	0,287	3,153	0,659	0,785
6	0,765	0,478	0,287	2,663	0,660	0,786
7	0,792	0,497	0,295	2,683	0,666	0,793
8	0,804	0,507	0,297	2,710	0,667	0,794
9	0,813	0,508	0,305	2,663	0,673	0,802
10	0,817	0,511	0,306	2,672	0,674	0,802
11	0,834	0,522	0,312	2,674	0,678	0,807
12	0,836	0,521	0,315	2,657	0,680	0,810
13	0,833	0,516	0,317	2,629	0,682	0,812
14	0,866	0,546	0,320	2,704	0,684	0,815
15	0,853	0,532	0,321	2,655	0,685	0,815
16	0,870	0,548	0,322	2,704	0,685	0,816
17	0,899	0,574	0,325	2,766	0,688	0,819
18	0,936	0,596	0,340	2,752	0,698	0,831
19	0,929	0,586	0,343	2,706	0,700	0,834
20	0,940	0,596	0,344	2,734	0,701	0,834
21	0,923	0,579	0,344	2,684	0,701	0,834
22	0,942	0,597	0,345	2,731	0,701	0,835
23	0,934	0,585	0,349	2,678	0,704	0,838
24	0,950	0,597	0,353	2,691	0,707	0,841
25	0,971	0,613	0,358	2,710	0,710	0,846
26	0,955	0,594	0,361	2,644	0,712	0,848
27	0,968	0,605	0,363	2,667	0,713	0,849
28	0,985	0,618	0,367	2,685	0,716	0,852
29	1,008	0,634	0,374	2,696	0,720	0,858
30	1,011	0,633	0,378	2,675	0,723	0,861
31	1,013	0,635	0,378	2,680	0,723	0,861
32	1,044	0,664	0,380	2,745	0,725	0,863
33	1,029	0,646	0,383	2,686	0,726	0,865
34	1,039	0,656	0,383	2,711	0,726	0,865
35	1,031	0,647	0,384	2,684	0,727	0,865
36	1,034	0,648	0,386	2,677	0,728	0,867
37	1,036	0,649	0,387	2,676	0,729	0,868
38	1,041	0,653	0,388	2,685	0,729	0,868

Nr.	M _{droog} [g]	M _{ow} [g]	V _{steen} [cm ³]	ρ _{steen} [g/cm ³]	D _n [cm]	D _x [cm]
39	1,031	0,642	0,389	2,650	0,730	0,869
40	1,072	0,683	0,389	2,755	0,730	0,869
41	1,046	0,656	0,390	2,684	0,730	0,869
42	1,043	0,650	0,393	2,656	0,732	0,872
43	1,048	0,655	0,393	2,669	0,732	0,872
44	1,048	0,654	0,394	2,659	0,733	0,873
45	1,051	0,655	0,396	2,653	0,735	0,874
46	1,049	0,652	0,397	2,644	0,735	0,875
47	1,068	0,670	0,398	2,682	0,736	0,876
48	1,059	0,660	0,399	2,654	0,736	0,876
49	1,079	0,676	0,403	2,679	0,738	0,879
50	1,078	0,674	0,404	2,670	0,739	0,880
51	1,086	0,680	0,406	2,677	0,740	0,881
52	1,087	0,681	0,406	2,679	0,740	0,881
53	1,116	0,710	0,406	2,749	0,740	0,882
54	1,104	0,695	0,409	2,697	0,743	0,884
55	1,105	0,692	0,413	2,674	0,745	0,887
56	1,104	0,690	0,414	2,665	0,745	0,887
57	1,106	0,690	0,416	2,660	0,746	0,889
58	1,114	0,698	0,416	2,678	0,746	0,889
59	1,147	0,728	0,419	2,738	0,748	0,891
60	1,126	0,706	0,420	2,682	0,749	0,891
61	1,135	0,715	0,420	2,701	0,749	0,892
62	1,143	0,721	0,422	2,707	0,750	0,893
63	1,129	0,706	0,423	2,669	0,751	0,894
64	1,131	0,705	0,426	2,656	0,752	0,896
65	1,133	0,704	0,429	2,640	0,754	0,898
66	1,144	0,714	0,430	2,660	0,755	0,899
67	1,157	0,725	0,432	2,678	0,756	0,900
68	1,172	0,739	0,433	2,707	0,756	0,900
69	1,168	0,735	0,433	2,696	0,757	0,901
70	1,154	0,719	0,435	2,654	0,758	0,902
71	1,166	0,727	0,439	2,658	0,760	0,904
72	1,175	0,736	0,439	2,677	0,760	0,905
73	1,174	0,735	0,439	2,673	0,760	0,905
74	1,187	0,747	0,440	2,700	0,760	0,905
75	1,182	0,741	0,441	2,682	0,761	0,906
76	1,178	0,737	0,441	2,671	0,761	0,906
77	1,169	0,728	0,441	2,650	0,761	0,906
78	1,189	0,746	0,443	2,685	0,762	0,907
79	1,204	0,758	0,446	2,701	0,764	0,909
80	1,185	0,739	0,446	2,657	0,764	0,910
81	1,205	0,755	0,450	2,680	0,766	0,912
82	1,233	0,783	0,450	2,740	0,766	0,912
83	1,214	0,763	0,451	2,693	0,767	0,913

Nr.	M _{droog} [g]	M _{ow} [g]	V _{steen} [cm ³]	ρ _{steen} [g/cm ³]	D _n [cm]	D _x [cm]
84	1,204	0,753	0,451	2,670	0,767	0,913
85	1,218	0,766	0,452	2,695	0,767	0,914
86	1,228	0,775	0,453	2,712	0,768	0,914
87	1,211	0,757	0,454	2,668	0,768	0,915
88	1,109	0,654	0,455	2,436	0,769	0,916
89	1,223	0,766	0,457	2,676	0,770	0,917
90	1,213	0,753	0,460	2,638	0,772	0,919
91	1,232	0,771	0,461	2,671	0,773	0,920
92	1,225	0,762	0,463	2,646	0,774	0,921
93	1,247	0,784	0,463	2,692	0,774	0,921
94	1,247	0,784	0,463	2,692	0,774	0,921
95	1,232	0,768	0,464	2,654	0,774	0,922
96	1,241	0,776	0,465	2,670	0,775	0,922
97	1,267	0,797	0,470	2,696	0,777	0,925
98	1,240	0,770	0,470	2,639	0,777	0,925
99	1,268	0,796	0,472	2,686	0,779	0,927
100	1,264	0,791	0,473	2,671	0,779	0,928
101	1,260	0,785	0,475	2,653	0,780	0,929
102	1,279	0,802	0,477	2,681	0,781	0,930
103	1,290	0,811	0,479	2,694	0,782	0,931
104	1,282	0,802	0,480	2,672	0,783	0,932
105	1,290	0,810	0,480	2,687	0,783	0,932
106	1,284	0,803	0,481	2,669	0,784	0,933
107	1,273	0,791	0,482	2,643	0,784	0,933
108	1,297	0,815	0,482	2,692	0,784	0,933
109	1,308	0,823	0,485	2,696	0,786	0,935
110	1,291	0,805	0,486	2,655	0,786	0,936
111	1,294	0,807	0,487	2,658	0,787	0,936
112	1,307	0,817	0,490	2,668	0,788	0,938
113	1,325	0,833	0,492	2,694	0,789	0,940
114	1,317	0,824	0,493	2,672	0,790	0,940
115	1,307	0,814	0,493	2,652	0,790	0,940
116	1,326	0,833	0,493	2,688	0,790	0,941
117	1,341	0,846	0,495	2,710	0,791	0,942
118	1,321	0,826	0,495	2,669	0,791	0,942
119	1,330	0,834	0,496	2,681	0,792	0,943
120	1,360	0,861	0,499	2,724	0,793	0,944
121	1,342	0,841	0,501	2,678	0,794	0,946
122	1,349	0,847	0,502	2,686	0,795	0,946
123	1,347	0,845	0,502	2,682	0,795	0,946
124	1,352	0,849	0,503	2,690	0,795	0,946
125	1,306	0,803	0,503	2,598	0,795	0,946
126	1,440	0,935	0,505	2,850	0,796	0,948
127	1,363	0,854	0,509	2,676	0,799	0,951
128	1,377	0,864	0,513	2,685	0,800	0,953

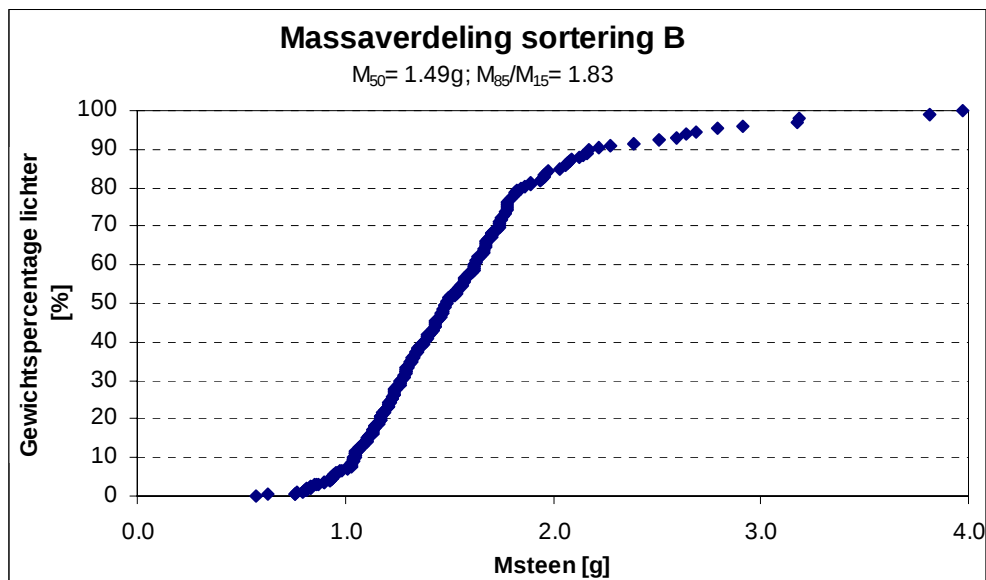
Bijlage F Eigenschappen van het materiaal uit sortering B

Nr.	M _{droog} [g]	M _{ow} [g]	V _{steen} [cm ³]	ρ _{steen} [g/cm ³]	D _n [cm]	D _x [cm]
129	1,262	0,749	0,513	2,461	0,801	0,953
130	1,376	0,861	0,515	2,672	0,802	0,954
131	1,395	0,877	0,518	2,694	0,803	0,956
132	1,382	0,862	0,520	2,658	0,804	0,957
133	1,396	0,876	0,520	2,684	0,804	0,957
134	1,391	0,870	0,521	2,670	0,805	0,958
135	1,394	0,872	0,522	2,672	0,805	0,958
136	1,424	0,902	0,522	2,728	0,805	0,959
137	1,415	0,886	0,529	2,674	0,809	0,963
138	1,434	0,902	0,532	2,696	0,810	0,965
139	1,425	0,892	0,533	2,673	0,811	0,965
140	1,431	0,896	0,535	2,674	0,812	0,967
141	1,436	0,900	0,536	2,678	0,812	0,967
142	1,432	0,895	0,537	2,666	0,813	0,968
143	1,432	0,894	0,538	2,663	0,813	0,968
144	1,404	0,864	0,540	2,601	0,814	0,969
145	1,452	0,910	0,542	2,678	0,816	0,971
146	1,461	0,914	0,547	2,672	0,818	0,973
147	1,458	0,911	0,547	2,665	0,818	0,974
148	1,469	0,921	0,547	2,682	0,818	0,974
149	1,468	0,919	0,549	2,675	0,819	0,975
150	1,484	0,933	0,551	2,693	0,820	0,976
151	1,495	0,943	0,552	2,708	0,820	0,977
152	1,499	0,945	0,554	2,707	0,821	0,978
153	1,480	0,926	0,554	2,670	0,822	0,978
154	1,490	0,935	0,555	2,684	0,822	0,978
155	1,483	0,926	0,557	2,663	0,823	0,979
156	1,473	0,916	0,557	2,644	0,823	0,980
157	1,508	0,946	0,562	2,683	0,825	0,983
158	1,493	0,930	0,563	2,652	0,826	0,983
159	1,531	0,964	0,567	2,701	0,827	0,985
160	1,457	0,884	0,573	2,543	0,830	0,989
161	1,545	0,971	0,574	2,693	0,831	0,989
162	1,537	0,962	0,575	2,673	0,832	0,990
163	1,537	0,962	0,575	2,673	0,832	0,990
164	1,553	0,978	0,575	2,700	0,832	0,990
165	1,560	0,984	0,576	2,709	0,832	0,990
166	1,541	0,960	0,581	2,653	0,834	0,993
167	1,573	0,992	0,581	2,707	0,835	0,993
168	1,564	0,979	0,585	2,674	0,836	0,996
169	1,592	1,005	0,587	2,712	0,837	0,997
170	1,577	0,989	0,588	2,681	0,838	0,998
171	1,570	0,980	0,590	2,661	0,839	0,998
172	1,591	1,000	0,591	2,692	0,839	0,999
173	1,599	1,005	0,594	2,692	0,841	1,001

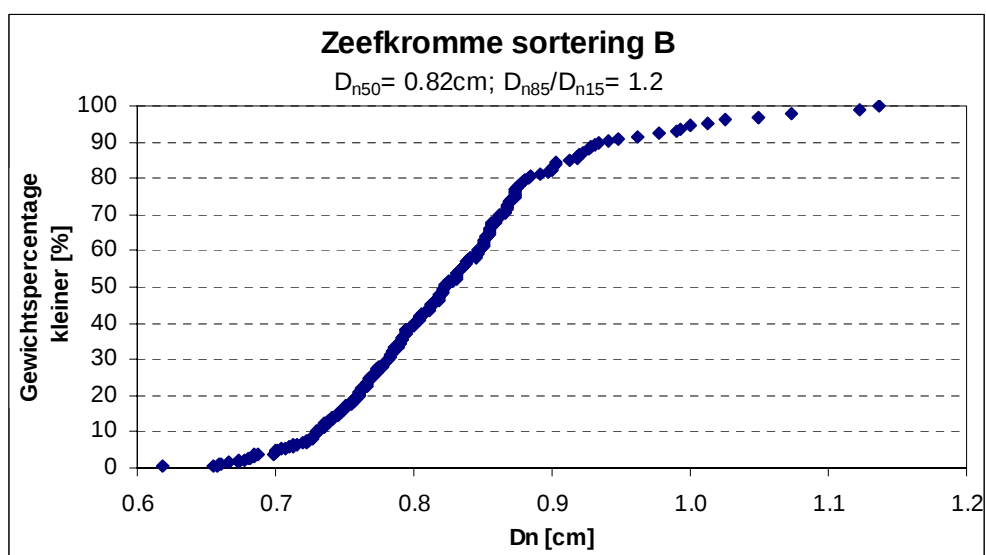
Nr.	M _{droog} [g]	M _{ow} [g]	V _{steen} [cm ³]	ρ _{steen} [g/cm ³]	D _n [cm]	D _x [cm]
174	1,620	1,017	0,603	2,688	0,845	1,006
175	1,625	1,022	0,603	2,694	0,845	1,006
176	1,610	1,003	0,607	2,654	0,846	1,008
177	1,623	1,016	0,607	2,675	0,847	1,008
178	1,623	1,015	0,608	2,670	0,847	1,008
179	1,630	1,021	0,609	2,677	0,848	1,009
180	1,702	1,088	0,614	2,773	0,850	1,012
181	1,631	1,016	0,615	2,653	0,850	1,012
182	1,641	1,025	0,616	2,664	0,851	1,013
183	1,651	1,035	0,616	2,680	0,851	1,013
184	1,655	1,039	0,616	2,687	0,851	1,013
185	1,669	1,050	0,619	2,698	0,852	1,014
186	1,677	1,058	0,619	2,709	0,852	1,015
187	1,642	1,020	0,622	2,639	0,854	1,016
188	1,664	1,040	0,624	2,667	0,854	1,017
189	1,673	1,048	0,625	2,678	0,855	1,018
190	1,673	1,047	0,626	2,672	0,855	1,018
191	1,677	1,051	0,626	2,678	0,856	1,018
192	1,669	1,042	0,627	2,662	0,856	1,019
193	1,701	1,073	0,628	2,707	0,857	1,020
194	1,775	1,146	0,629	2,821	0,857	1,020
195	1,687	1,053	0,634	2,662	0,859	1,023
196	1,709	1,075	0,634	2,695	0,859	1,023
197	1,703	1,065	0,638	2,669	0,861	1,025
198	1,713	1,074	0,639	2,681	0,861	1,025
199	1,823	1,182	0,641	2,843	0,862	1,026
200	1,740	1,091	0,649	2,682	0,866	1,030
201	1,740	1,091	0,649	2,681	0,866	1,031
202	1,747	1,095	0,652	2,680	0,867	1,032
203	1,736	1,083	0,653	2,658	0,868	1,033
204	1,754	1,101	0,653	2,685	0,868	1,033
205	1,739	1,085	0,654	2,659	0,868	1,033
206	1,753	1,097	0,656	2,672	0,869	1,035
207	1,769	1,111	0,658	2,689	0,870	1,035
208	1,765	1,104	0,661	2,671	0,871	1,037
209	1,772	1,108	0,664	2,668	0,873	1,039
210	1,777	1,111	0,666	2,669	0,873	1,039
211	1,784	1,118	0,666	2,679	0,873	1,040
212	1,781	1,115	0,666	2,673	0,873	1,040
213	1,796	1,129	0,667	2,694	0,874	1,040
214	1,793	1,125	0,668	2,684	0,874	1,041
215	1,784	1,115	0,669	2,667	0,875	1,041
216	1,814	1,142	0,672	2,700	0,876	1,043
217	1,891	1,215	0,676	2,798	0,878	1,045
218	1,816	1,136	0,680	2,671	0,879	1,047

Nr.	M _{droog} [g]	M _{ow} [g]	V _{steen} [cm ³]	ρ _{steen} [g/cm ³]	D _n [cm]	D _x [cm]
219	1,813	1,131	0,682	2,659	0,880	1,048
220	1,844	1,157	0,687	2,683	0,883	1,051
221	1,860	1,167	0,693	2,685	0,885	1,053
222	1,889	1,180	0,709	2,663	0,892	1,062
223	1,940	1,218	0,722	2,688	0,897	1,068
224	1,944	1,215	0,729	2,667	0,900	1,071
225	1,954	1,225	0,729	2,679	0,900	1,072
226	1,975	1,243	0,732	2,698	0,901	1,073
227	1,954	1,219	0,735	2,659	0,902	1,074
228	1,968	1,232	0,736	2,675	0,903	1,075
229	2,031	1,271	0,760	2,673	0,912	1,086
230	2,061	1,287	0,774	2,664	0,918	1,093
231	2,075	1,300	0,775	2,678	0,918	1,093
232	2,086	1,308	0,778	2,681	0,920	1,095
233	2,081	1,295	0,786	2,648	0,923	1,099
234	2,147	1,351	0,796	2,698	0,927	1,103
235	2,126	1,328	0,798	2,664	0,928	1,104
236	2,164	1,358	0,806	2,686	0,931	1,108
237	2,174	1,358	0,816	2,665	0,934	1,112
238	2,217	1,385	0,832	2,665	0,940	1,120
239	2,386	1,536	0,850	2,807	0,947	1,128
240	2,276	1,386	0,890	2,558	0,962	1,145
241	2,510	1,575	0,935	2,684	0,978	1,164
242	2,599	1,627	0,972	2,674	0,991	1,179
243	2,642	1,663	0,979	2,699	0,993	1,182
244	2,684	1,683	1,001	2,681	1,000	1,191
245	2,792	1,755	1,037	2,692	1,012	1,205
246	2,913	1,835	1,078	2,703	1,025	1,221
247	3,183	2,030	1,153	2,760	1,049	1,248
248	3,179	1,942	1,237	2,570	1,073	1,278
249	3,810	2,398	1,412	2,698	1,122	1,336
250	3,973	2,503	1,470	2,702	1,137	1,354

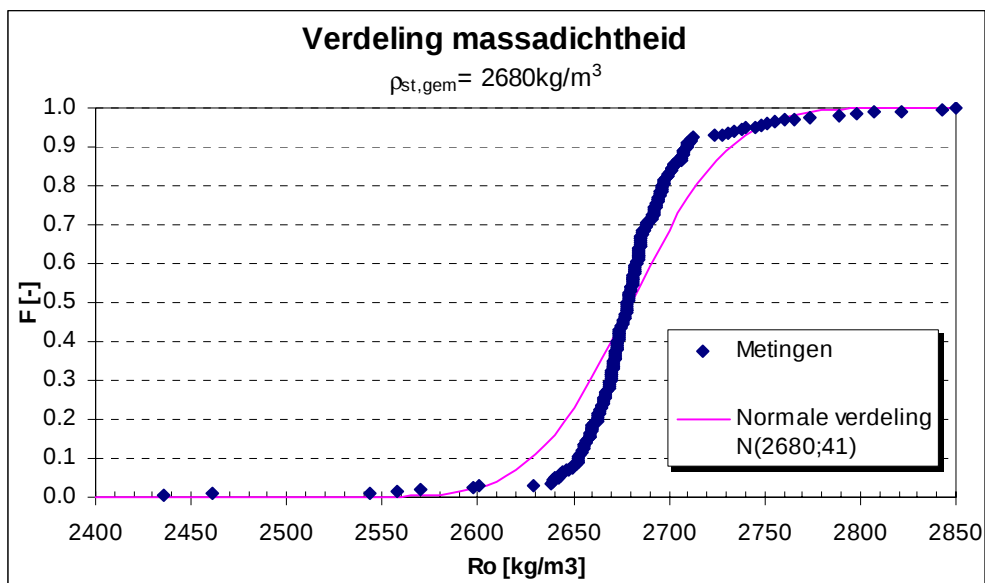
F.2 OVERZICHT MEETRESULTATEN



Figuur F.2 Massaverdeling sortering B.



Figuur F.3 Zeefkromme sortering B.



Figuur F.4 Verdeling van de gemeten massadichtheden in vergelijking met een normale verdeling met $\mu = 2680 \text{ kg/m}^3$ en $\sigma = 41 \text{ kg/m}^3$.

F.3 VERIFICATIE MEETRESULTATEN

In deze paragraaf wordt nagegaan in hoeverre de stenen uit sortering B voldoen aan de 10 – 60 kg sortering uit de praktijk.

In de onderstaande tabel zijn de grenzen van de massaverdeling van de 10 – 60 kg sortering vergeleken met de geschaalde grenswaarden voor de stenen uit sortering B.

Tabel F.2 Grenzen massaverdeling 10 – 60 kg sortering [SCHIERECK, 2001] vergeleken met grenzen uit sortering B.

(4)	10 – 60 kg		Sortering B		
	My	y in My	My	y in My	
ELCL	2	<2	0.13	0.0	OK
LCL	10	$y < 10$	0.64	0.3	OK
UCL	60	$70 < y < 100$	3.84	98.9	OK
EUCL	120	$y > 97$	7.68	100.0	OK

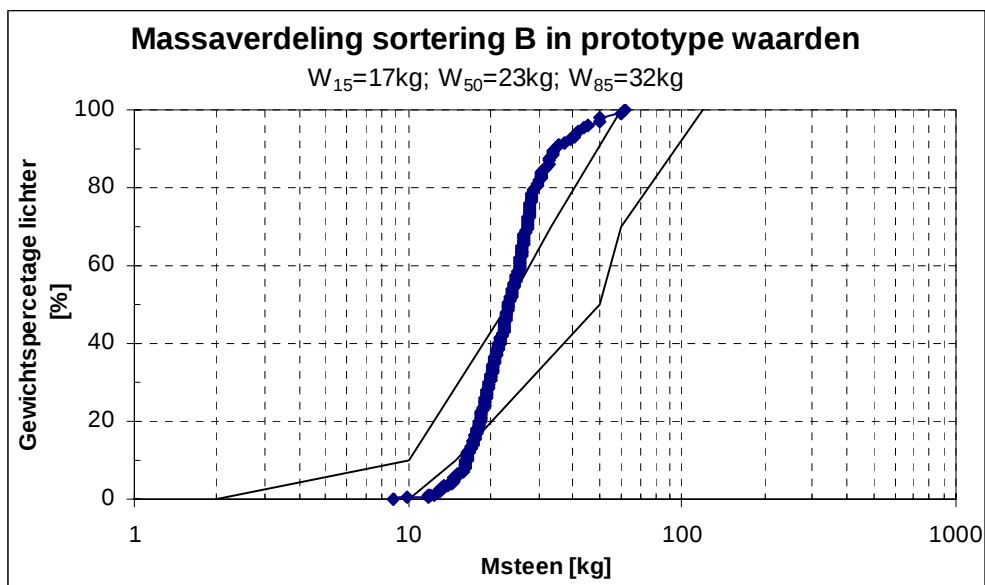
Uit Tabel E.3 blijkt dat de stenen uit de sortering B voldoen aan de grenzen voor de 10 – 60 kg sortering uit de praktijk. Dit blijkt ook als de massaverdeling van sortering B in prototype waarden worden weergegeven, zie onderstaande figuur.

⁴ ELCL: extreme lower class limit

LCL: lower class limit

UCL: upper class limit

EUCL: extreme upper class limit



Figuur F.5 De, naar prototype geschaalde, massaverdeling van sortering B met grenswaarden van de 10 - 60 kg sortering uit de praktijk.

Nota bene:

De stenen uit sortering B hebben wel een aanzienlijk "smallere" gradering dan de 10 - 60 kg sortering. Dit blijkt ook uit de waarde voor D_{85}/D_{15} (zie Figuur F.3). Deze bedraagt (slechts) 1,2.

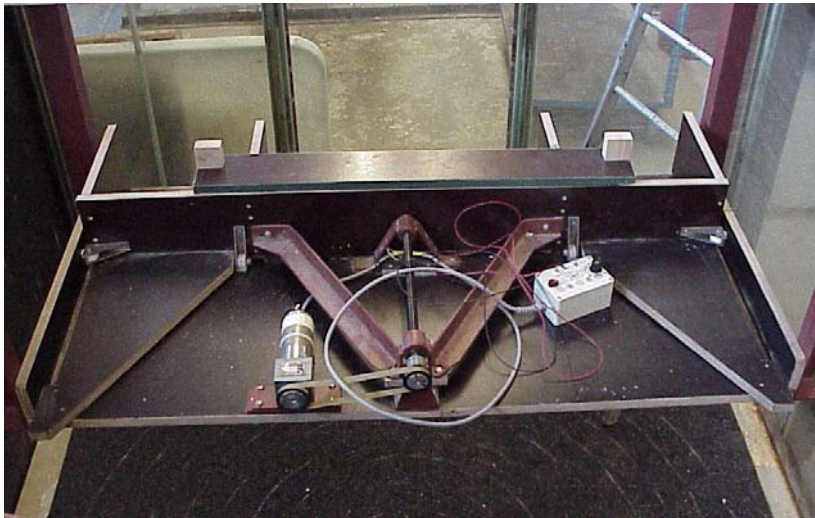
BIJLAGE G DE AANDRIJVING VAN DE MODEL- SCHUIFSTORTER



Figuur G.1 Modelschuifstorter met aandrijving.

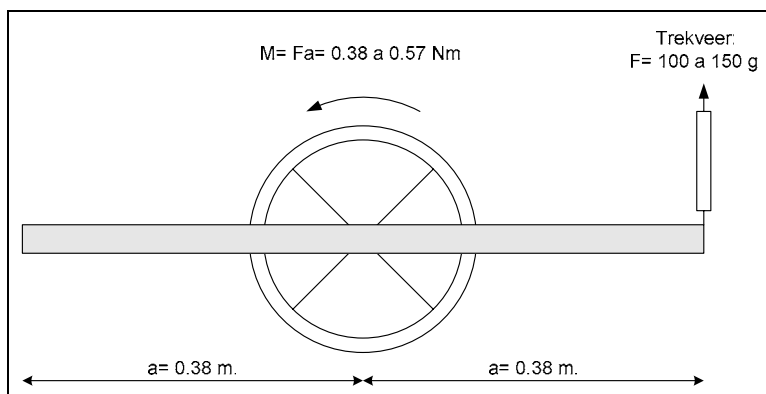
G.1 ALGEMEEN

De schuif van de modelstorter wordt aangedreven door een elektromotor die, bij een input van 24 volt, 3000 omwentelingen per minuut geeft met een reductiefactor van 75 ('netto' dus 40 omwentelingen per minuut). De overbrenging geschied door middel van een tandriempje met een factor 1:1,25. Zie Figuur G.2.



Figuur G.2 Elektrische aandrijving van de modelschuifstorter.

De 'soort' elektromotor is bepaald door het benodigde koppel voor het ronddraaien van de schroefspindel. Deze is bepaald met behulp van onderstaande constructie en bedraagt ca. 0,5 Nm.



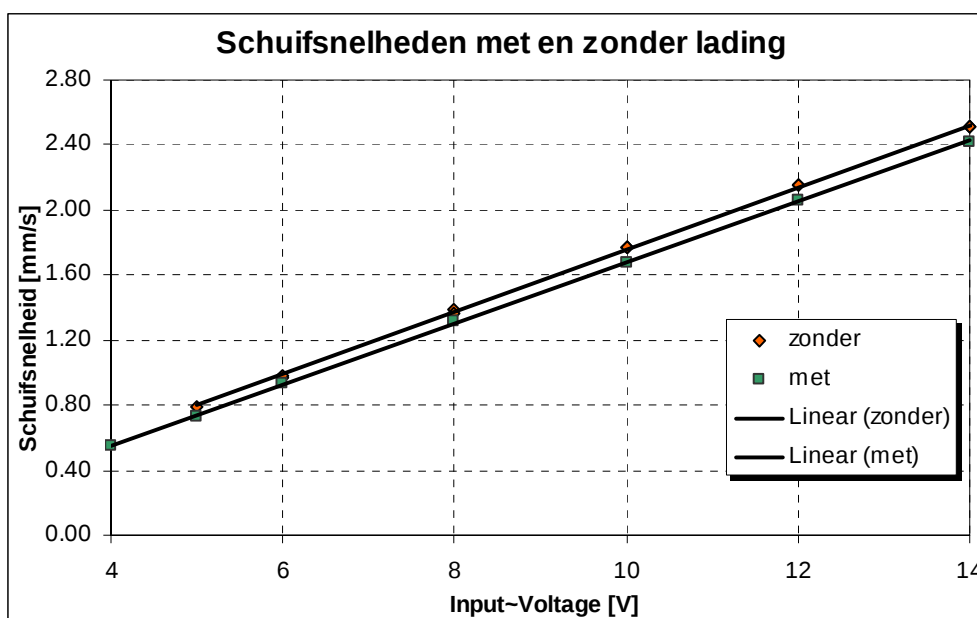
Figuur G.3 Bepalen van het koppel voor de aandrijving van de schuif.

G.2 IJKEN ELEKTROMOTOR: VERBAND TUSSEN VOLTAGE EN SCHUIFSNELHEID

De output van de elektromotor – in dit geval de schuiftijd en de daaruit volgende schuifsnelheid – is afhankelijk van het (ingestelde) voltage. Hoe groter dit voltage hoe sneller de schuiftijd en dus hoe hoger de schuifsnelheid.

Verder is het zo dat de ‘weerstand’ (die de elektromotor ondervindt) ook van invloed is op de uiteindelijke schuifsnelheid. De schuifsnelheid is, bij eenzelfde voltage, lager wanneer er stenen op het laaddek liggen.

De ‘prestatie’ van de elektromotor is geijkt door steeds de input – voltage – te veranderen en de output – schuiftijd – te meten. Dit is gedaan voor zowel een leeg als een met stenen beladen laaddek, zie onderstaande figuur.



Figuur 6.4 Schuifsnelheden met en zonder lading uitgezet tegen het ingestelde voltage.

Uit de figuur blijkt dat er een gering verschil is tussen de schuifsnelheid met en zonder lading. Dit is een belangrijk gegeven. Tijdens het stortproces zullen namelijk steeds minder stenen op het laaddek achterblijven waardoor de aandrijving steeds minder weerstand ondervindt. De schuifsnelheid zal dan echter niet ‘veel’ hoger worden. Verondersteld wordt dan ook dat de schuifsnelheid een (zo goed als) constante waarde aanneemt tijdens het stortproces.

Nota bene:

De temperatuur van de elektromotor is wel van grote invloed op de schuifsnelheid. Uit de proefmetingen blijkt echter dat dit effect bij deze elektromotor geen rol speelt. De motor hoeft namelijk niet zo lang te draaien, dat hij significant warmer wordt.

Wat verder valt op te maken is dat er een lineair verband is tussen de schuifsnelheid en het ingestelde voltage. Deze kan bepaald worden door middel van de methode van “lineaire regressie”.

Voor de aandrijving van de schuif willen we echter niet de schuifsnelheid bij een bepaald voltage weten, maar het voltage dat hoort bij een bepaalde schuifsnelheid. Zodoende kunnen steeds ‘vaste’ schuifsnelheden ingesteld worden.

De lineaire vergelijking uit Figuur G.4 kan worden omgezet naar een vergelijking waarmee het benodigde voltage voor een bepaalde schuifsnelheid berekend kan worden.

Voor 11 schuifsnelheden, van 0,5 mm/s oplopend met steeds 0,25 mm/s tot 3,0 mm/s, zijn de benodigde voltages bepaald. In de onderstaande tabel zijn deze weergegeven.

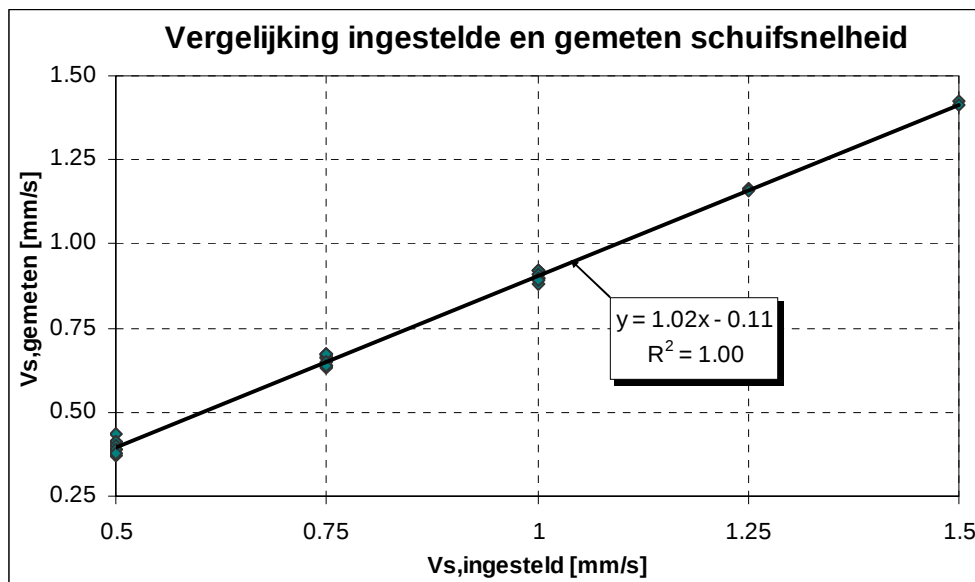
Tabel G.1 Benodigde voltages bij verschillende schuifsnelheden.

#	V _{schuif} [mm/s]	Voltage [V]
1	0,50	3,47
2	0,75	4,80
3	1,00	6,14
4	1,25	7,47
5	1,50	8,81
6	1,75	10,14
7	2,00	11,48
8	2,25	12,82
9	2,50	14,15
10	2,75	15,49
11	3,00	16,82

Met de berekende voltages (als input) is vervolgens een schakelkastje gemaakt waarmee de verschillende schuifsnelheden – met een draaiknop – ingesteld kunnen worden.

G.3 CONTROLE INGESTELDE SCHUIFSNELHEDEN

Controle vindt plaats door de ingestelde schuifsnelheden te vergelijken met de gemeten waarden⁵. In de onderstaande figuur zijn beide snelheden tegen elkaar uitgezet.



Figuur G.5 Gemeten schuifsnelheden uitgezet tegen de ingestelde schuifsnelheden.

Uit de figuur blijkt dat de gemeten schuifsnelheden lager uitvallen dan de ingestelde waarden.

De oorzaak hiervan is (nul) fout in de voltmeter die gebruikt is om de elektromotor te ijken. Deze gaf standaard een te lage waarde.

Gevolg is dat alle (ingestelde) schuifsnelheden ca. 0.1 mm/s lager uitvallen.

De 'oorspronkelijk' (toe te passen) schuifsnelheden van $V_s = 0,5$ mm/s, $V_s = 0,75$ mm/s, $V_s = 1,0$ mm/s zijn dan ook 'gecorrigeerd' tot respectievelijk $V_s = 0,4$ mm/s, $V_s = 0,65$ mm/s, $V_s = 0,9$ mm/s. Dit zijn nog steeds aannemelijke waarden.

⁵ Een gedeelte van deze waarden volgt uit de gemeten schuifsnelheden tijdens de bresproeven.

BIJLAGE H RESULTATEN SERIE A: BRESPROEVEN



Figuur H.1 Opstelling bresproeven.

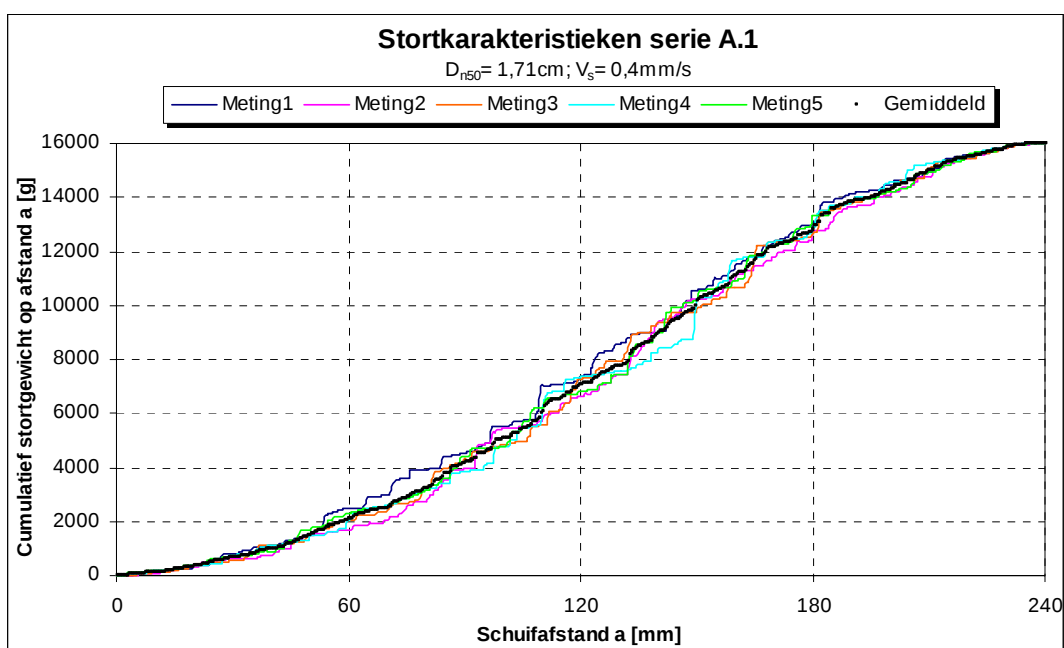
Voor de series A.1 tot en met serie A.6 worden achtereenvolgens gepresenteerd:

- de (meet)gegevens,
- de stortkarakteristieken van de gemeten cumulatieve storthoeveelheden en de gemiddelde stortkarakteristiek van het cumulatieve stortgewicht,
- de storthoeveelheden volgens de gemiddelde stortkarakteristieken en de “best fit” volgens de theoretische benadering, en
- de storthoeveelheden van de metingen met de kleinste en grootste karakteristieke breshoek van de “best fit” volgens de theoretische benadering.

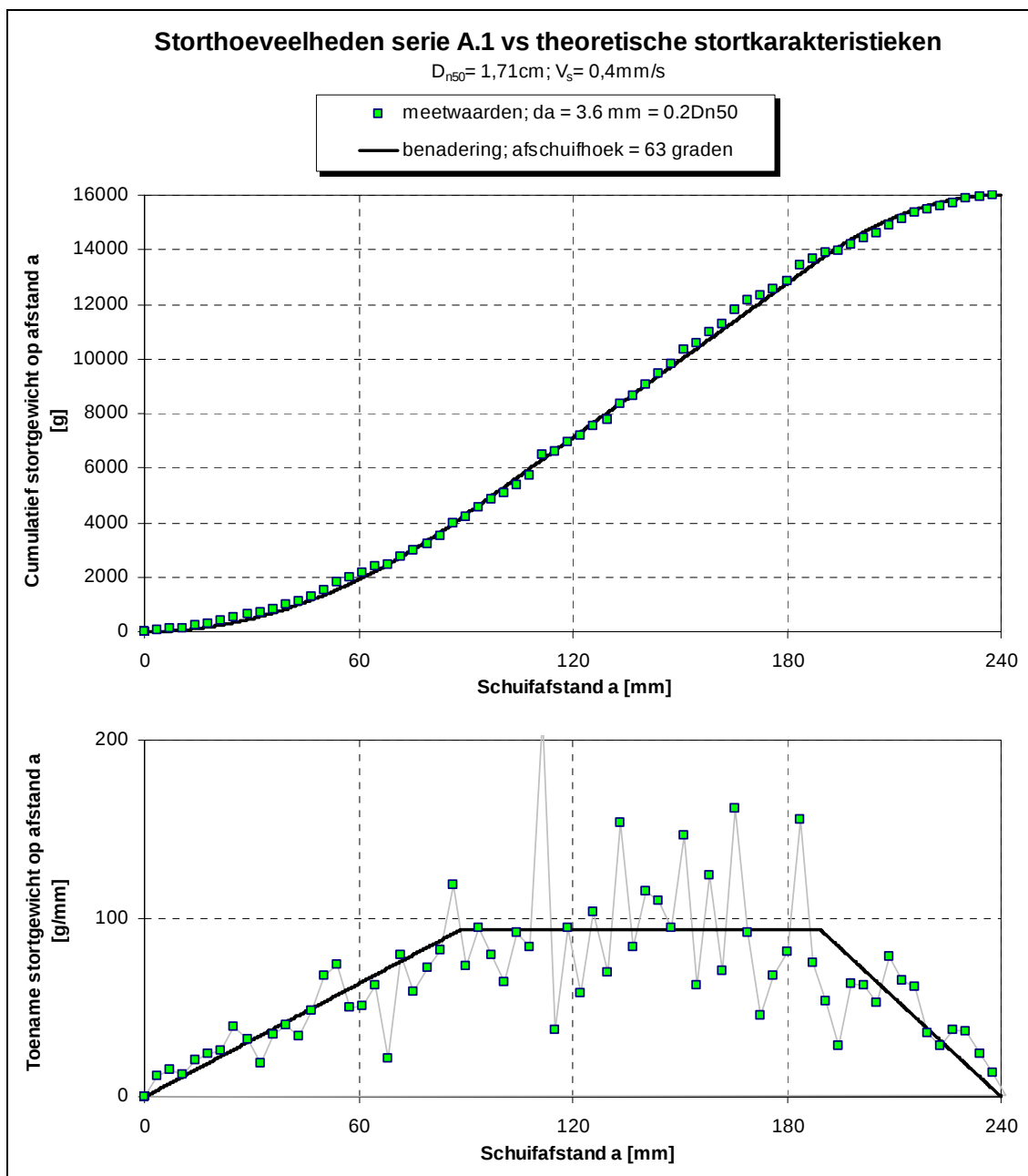
H.1 RESULTATEN SERIE A.1

Tabel H.1 Gegevens serie A.1.

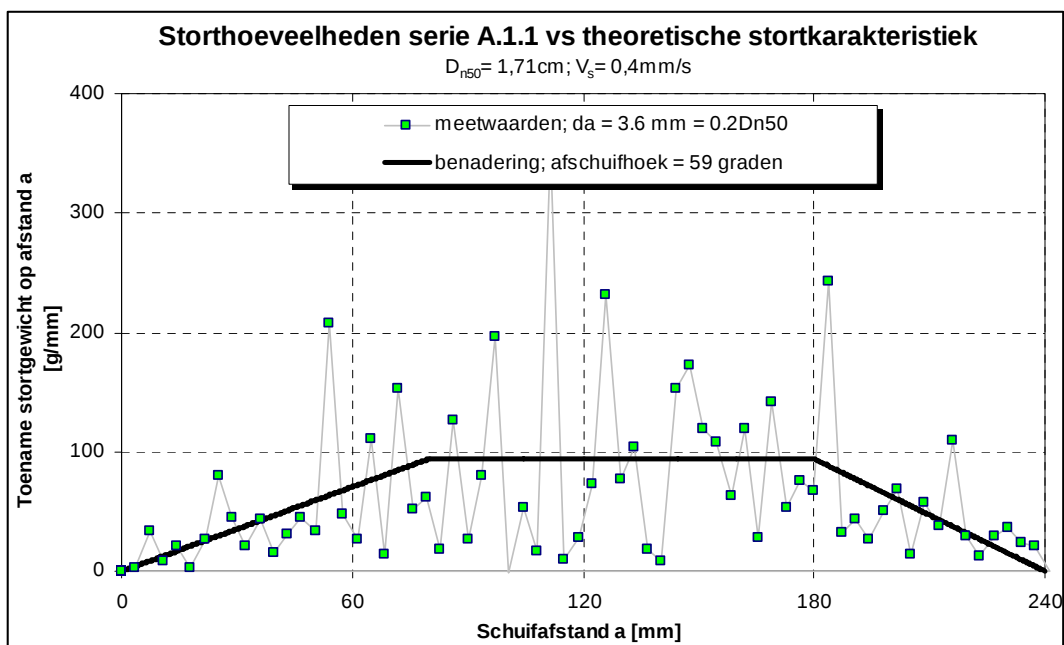
Serie	D_{n50} [mm]	V_s [mm/s]	$V_{s, \text{gemeten}}$ [mm/s]	ϕ_f [°]	onreg. schuiftijd [g/mm]	onreg. $da=3,6\text{mm}$ [g/mm]
A.1.1	17,1	0,4	0,41	59	174,4	61,3
A.1.2	17,1	0,4	0,39	65	152,9	45,6
A.1.3	17,1	0,4	0,37	63	168,8	64,0
A.1.4	17,1	0,4	0,41	64	204,6	70,9
A.1.5	17,1	0,4	0,40	63	164,2	51,4



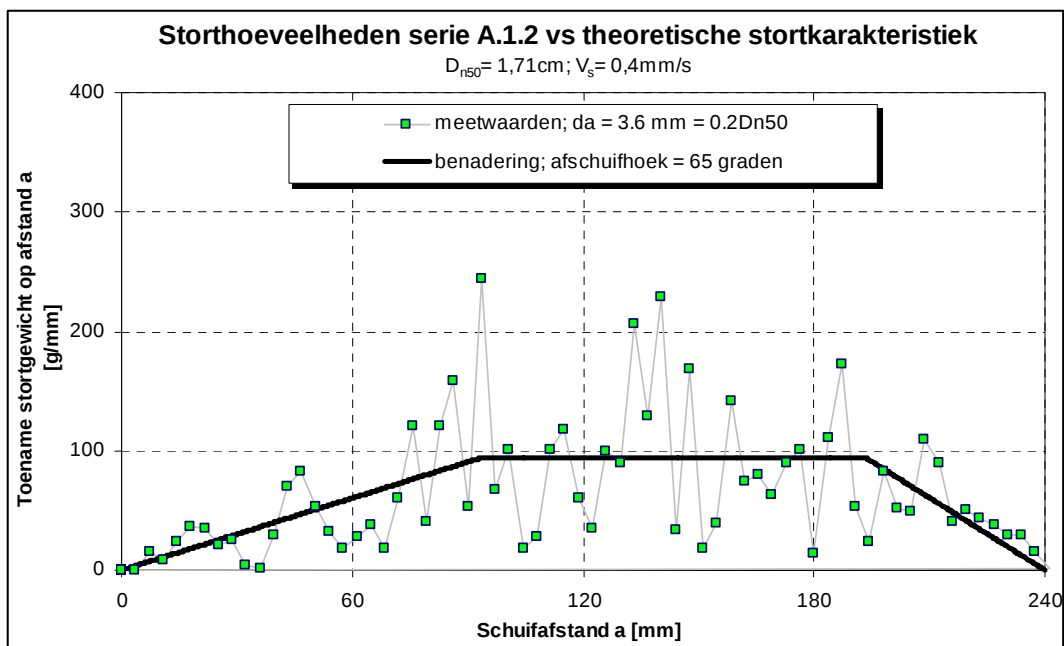
Figuur H.2 Stortkarakteristieken serie A.1.



Figuur H.3 Stortheoevelheden serie A.1 (volgens de gemiddelde stortkarakteristieken) en theoretische benaderingen met karakteristieke waarde voor ϕ .



Figuur H.4 Stortheoveelheden serie A.1.1 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f .

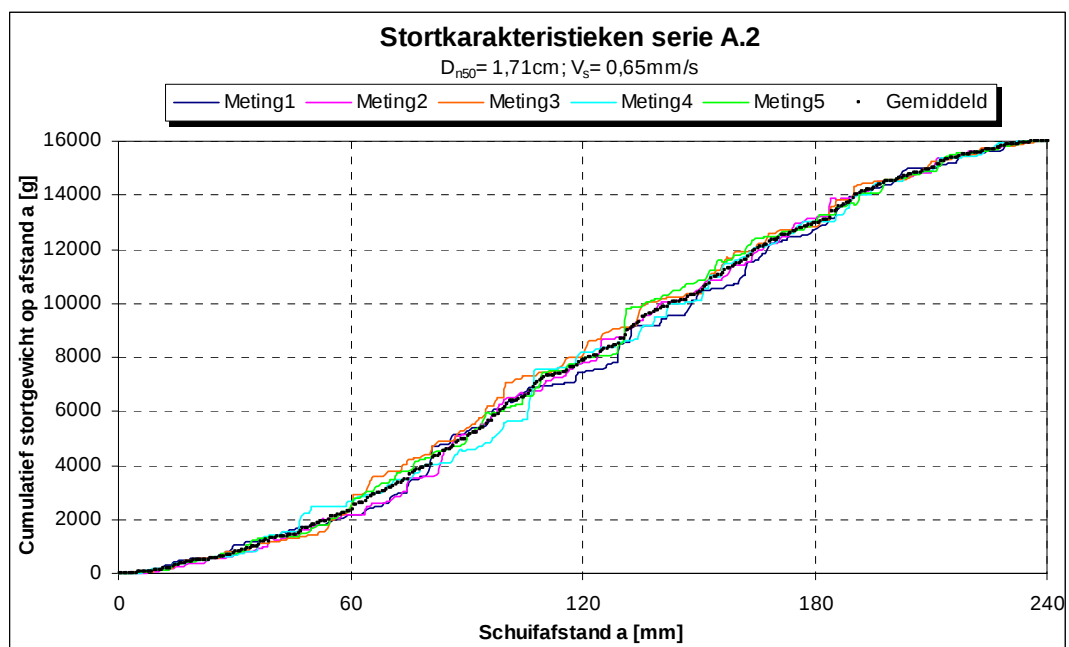


Figuur H.5 Stortheoveelheden serie A.1.2 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f .

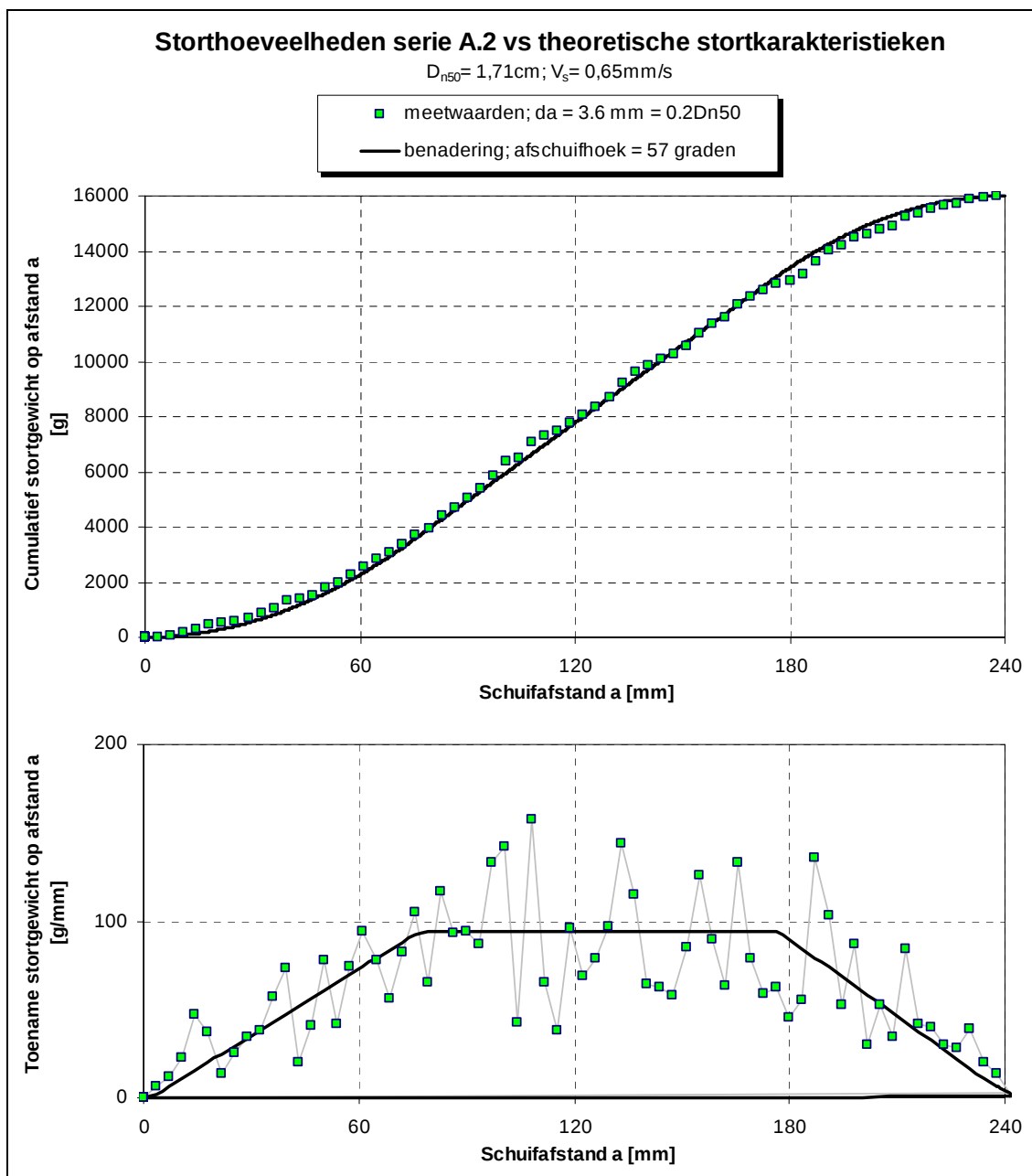
H.2 RESULTATEN SERIE A.2

Tabel H.2 Gegevens serie A.2.

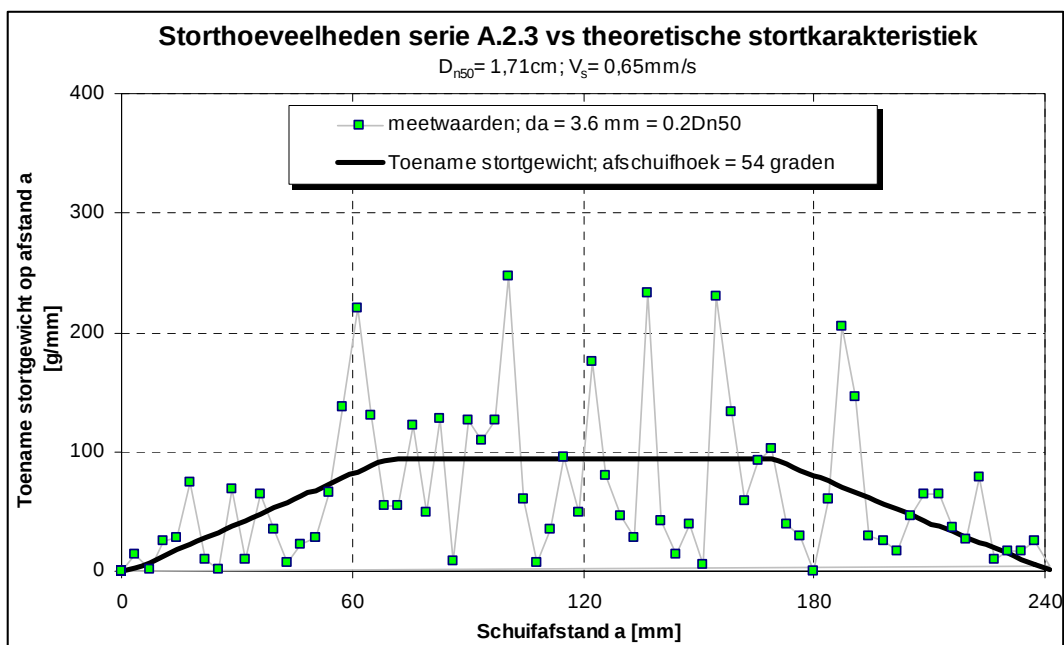
Serie	D_{n50} [mm]	V_s [mm/s]	$V_{s, \text{gemeten}}$ [mm/s]	ϕ_f [°]	onreg. schuiftijd [g/mm]	onreg. $d_a = 3,6 \text{ mm}$ [g/mm]
A.2.1	17,1	0,65	0,64	59	136,2	53,7
A.2.2	17,1	0,65	0,66	57	130,2	51,3
A.2.3	17,1	0,65	0,66	54	136,1	55,9
A.2.4	17,1	0,65	0,67	58	145,9	73,4
A.2.5	17,1	0,65	0,67	55	135,5	57,3



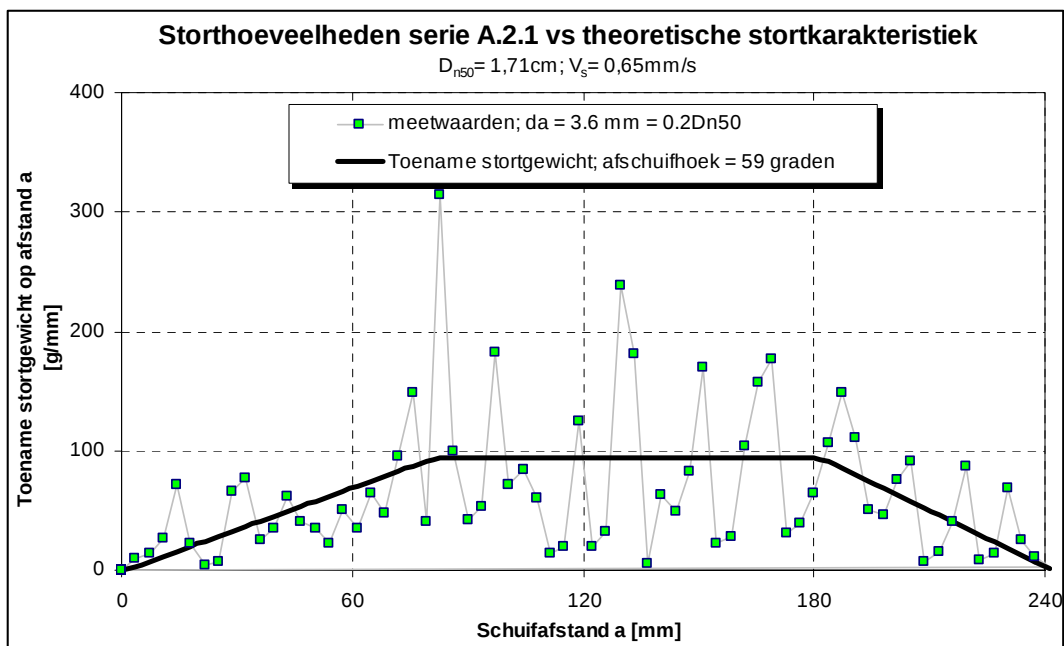
Figuur H.6 Stortkarakteristieken serie A.2.



Figuur H.7 Stortheoeveelheden serie A.2 (volgens de gemiddelde stortheoeveeligheden) en theoretische benaderingen met karakteristieke waarde voor ϕ .



Figuur H.8 Stortheveelheden serie A.2.3 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f .

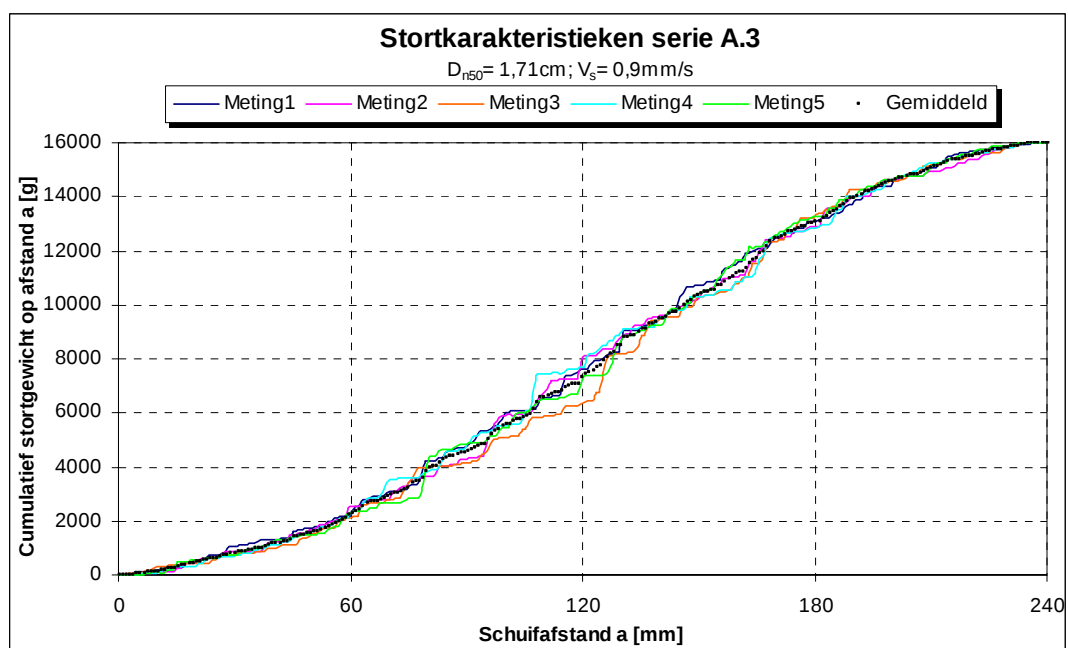


Figuur H.9 Stortheveelheden serie A.2.1 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f .

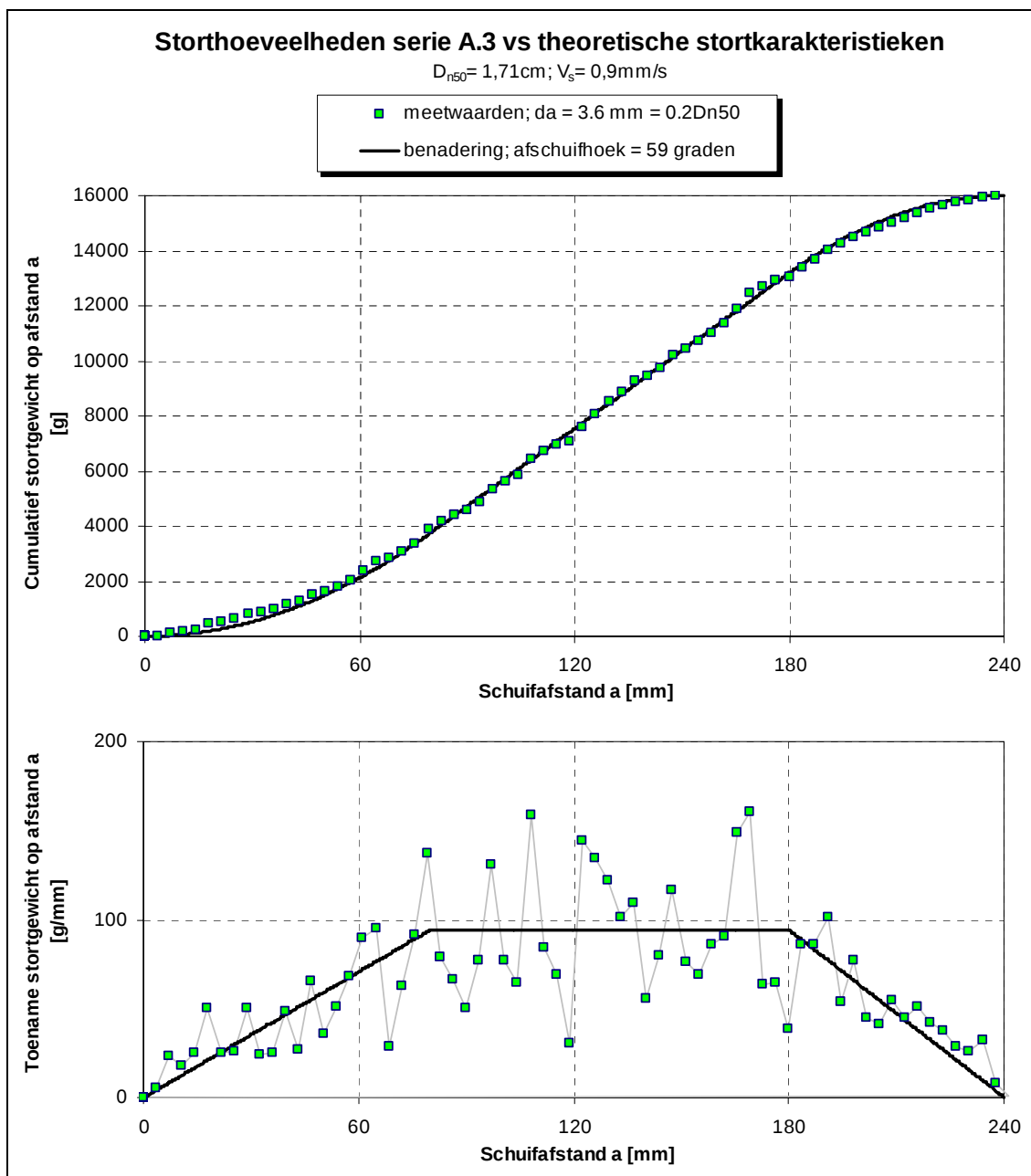
H.3 RESULTATEN SERIE A.3

Tabel H.3 Gegevens serie A.3.

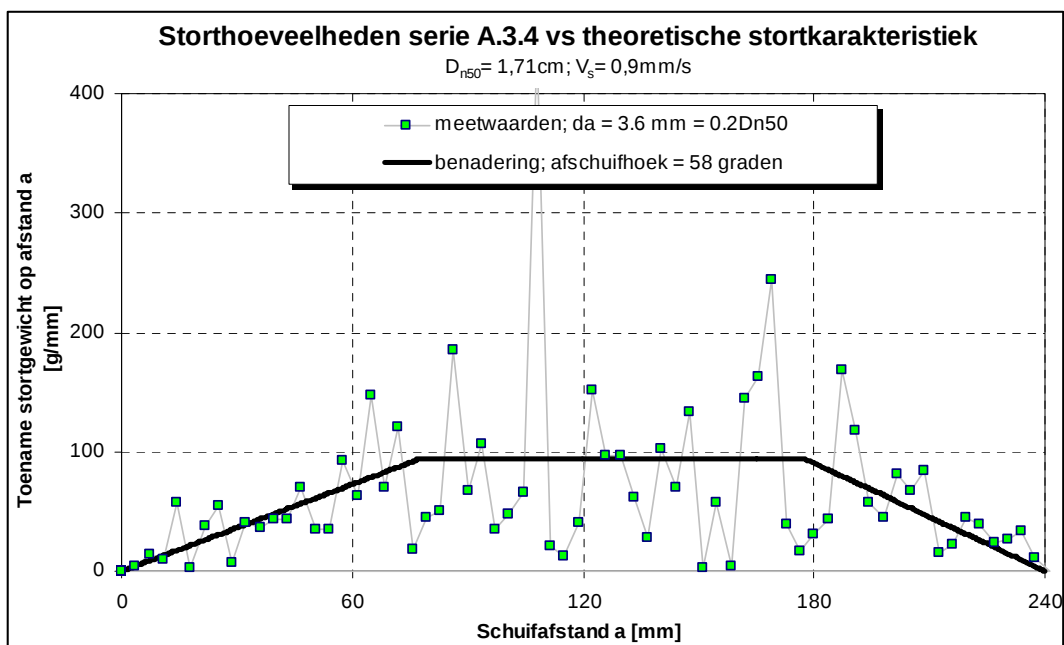
Serie	D_{n50} [mm]	V_s [mm/s]	$V_{s, \text{gemeten}}$ [mm/s]	ϕ_f [°]	onreg. schuiftijd [g/mm]	onreg. $d_a = 3,6 \text{ mm}$ [g/mm]
A.3.1	17,1	0,9	0,90	58	109,7	49,5
A.3.2	17,1	0,9	0,92	59	104,9	58,3
A.3.3	17,1	0,9	0,90	62	109,4	64,0
A.3.4	17,1	0,9	0,90	58	109,5	62,0
A.3.5	17,1	0,9	0,88	59	107,8	52,3



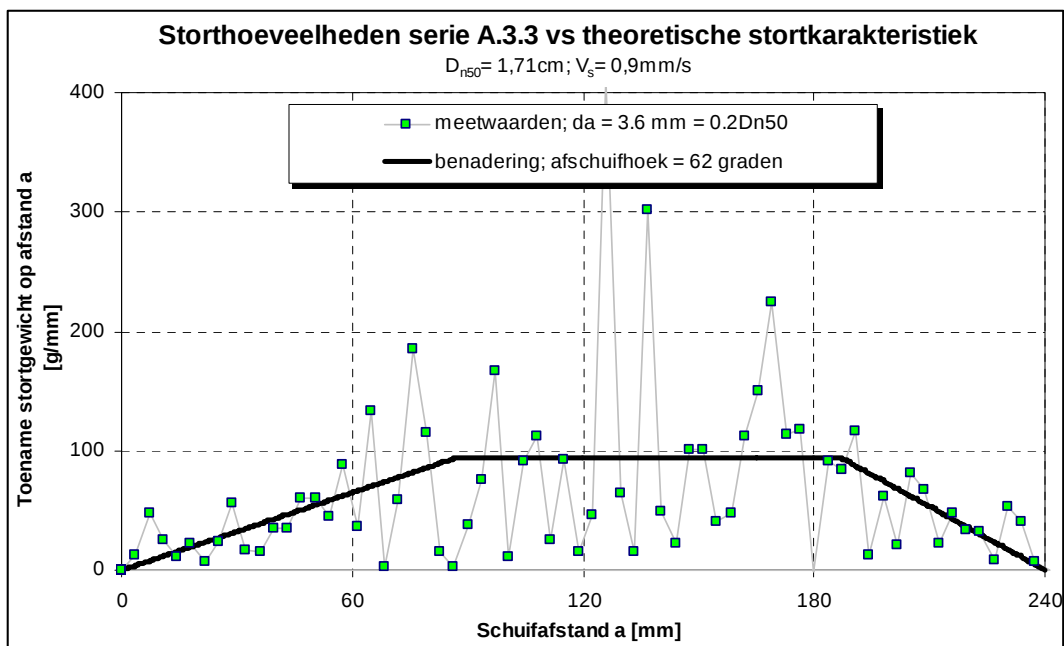
Figuur H.10 Stortkarakteristieken serie A.3.



Figuur H.11 Stortheoevelheden serie A.3 (volgens de gemiddelde stortheoevelheden) en theoretische benaderingen met karakteristieke waarde voor ϕ .



Figuur H.12 Stortheveelheden serie A.3.4 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f .

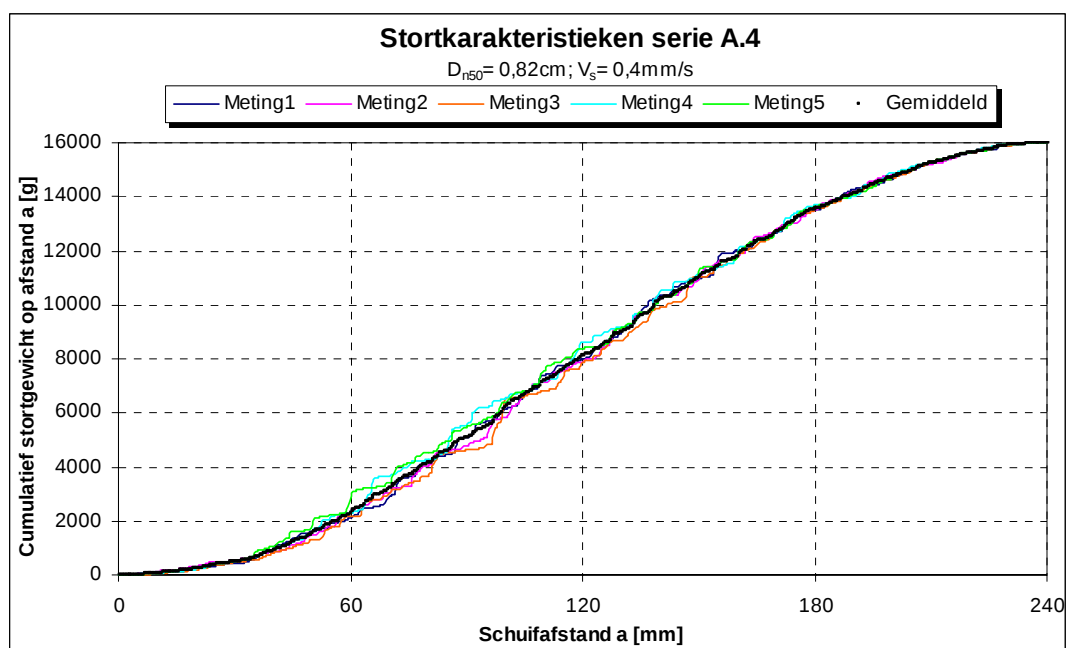


Figuur H.13 Stortheveelheden serie A.3.3 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f .

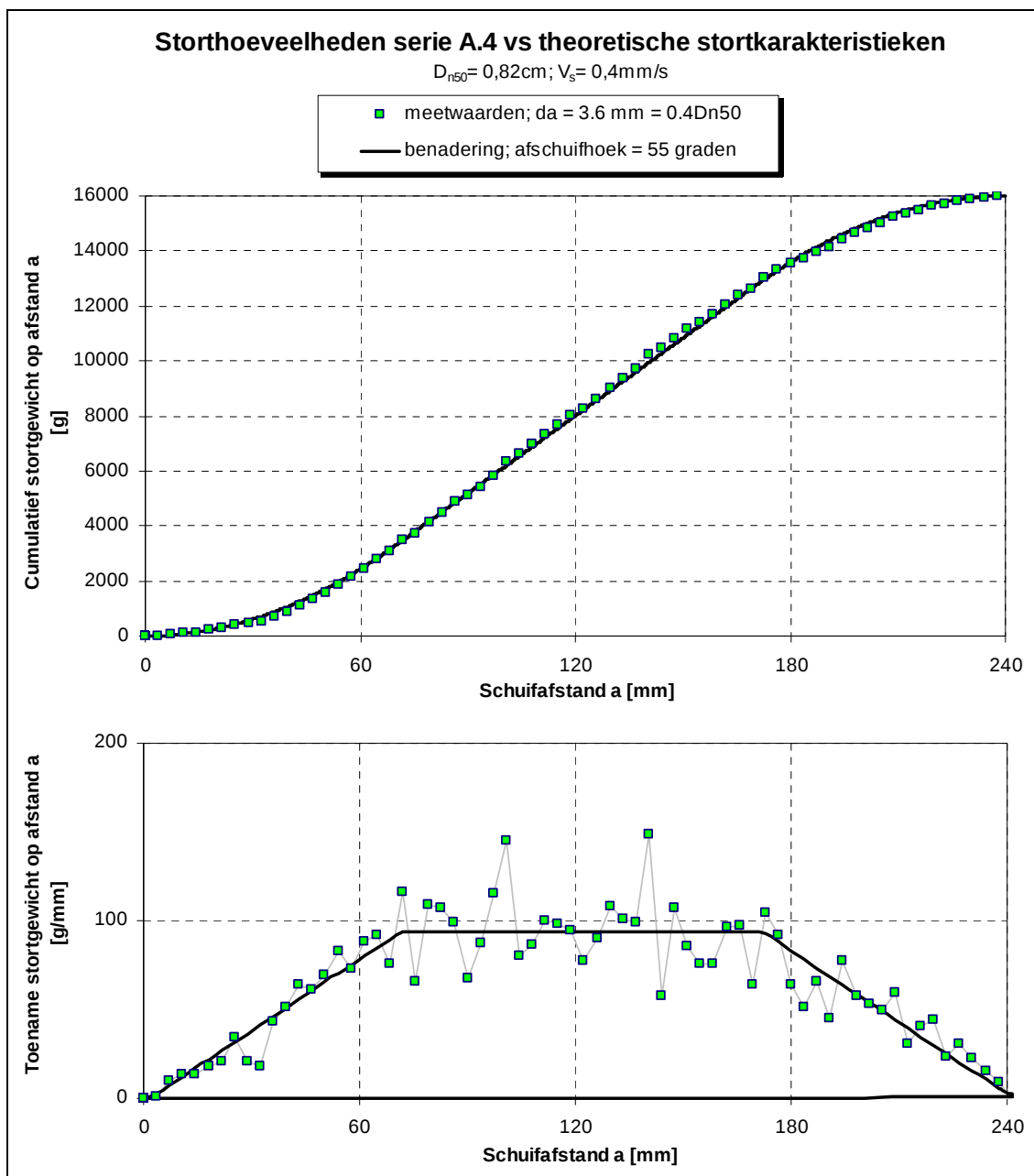
H.4 RESULTATEN SERIE A.4

Tabel H.4 Gegevens serie A.4.

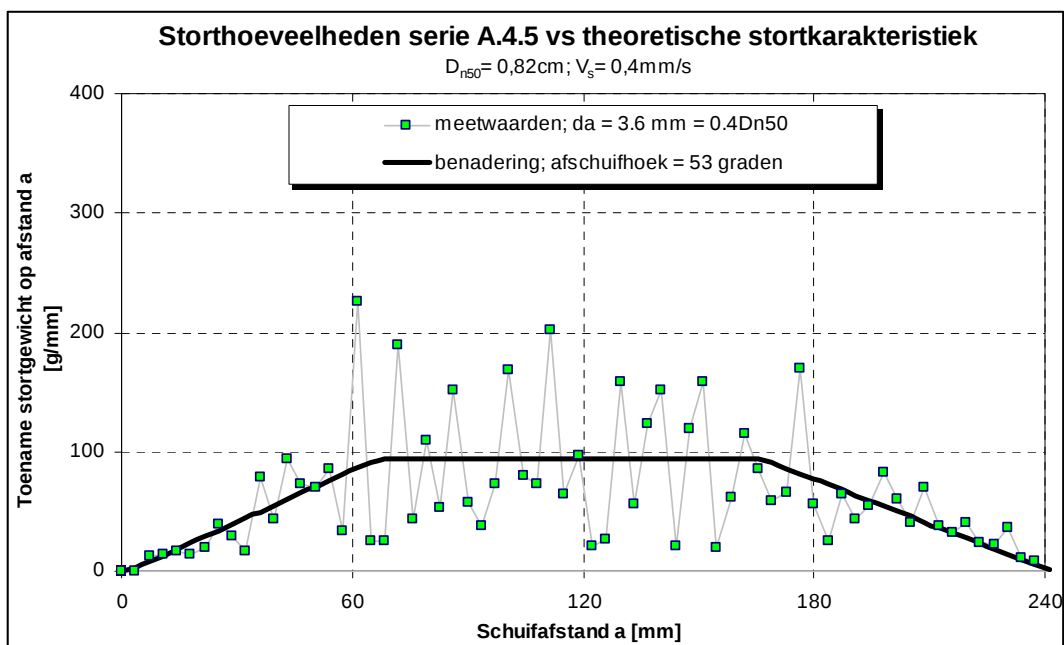
Serie	D_{n50} [mm]	V_s [mm/s]	$V_{s, \text{gemeten}}$ [mm/s]	ϕ_f [°]	onreg. schuiftijd [g/mm]	onreg. $d_a = 3,6 \text{ mm}$ [g/mm]
A.4.1	8,2	0,4	0,39	55	103,8	29,6
A.4.2	8,2	0,4	0,38	56	98,4	38,9
A.4.3	8,2	0,4	0,37	57	112,5	50,6
A.4.4	8,2	0,4	0,39	53	109,4	45,9
A.4.5	8,2	0,4	0,38	53	101,0	43,4



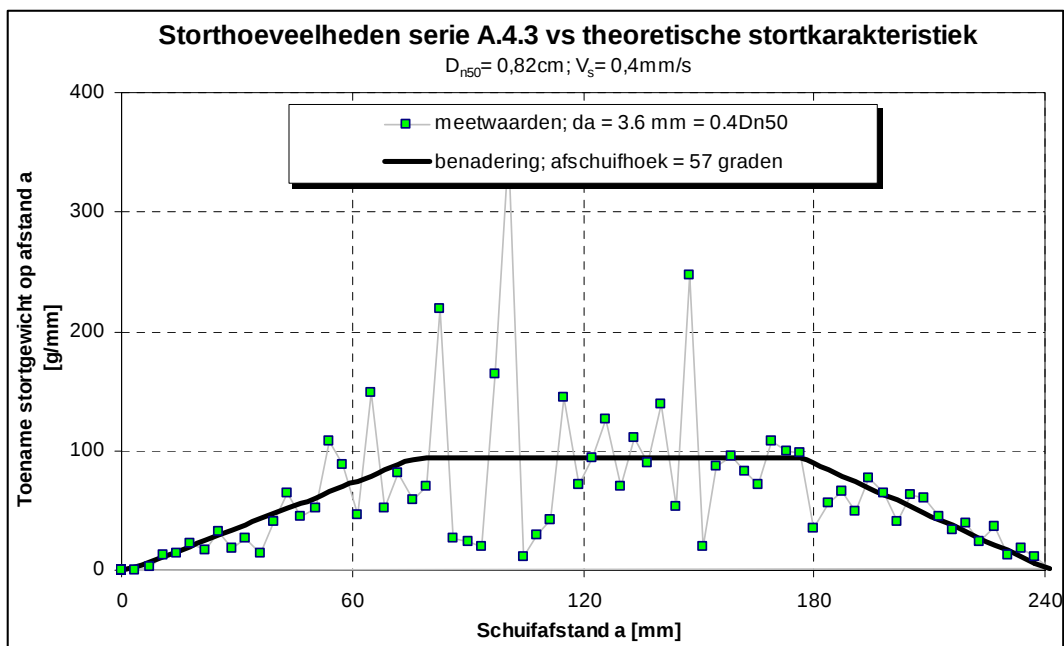
Figuur H.14 Stortkarakteristieken serie A.4.



Figuur H.15 Storthoeveelheden serie A.4 (volgens de gemiddelde storkarakteristieken) en theoretische benaderingen met karakteristieke waarde voor ϕ_f .



Figuur H.16 Stortheveelheden serie A.4.5 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f .

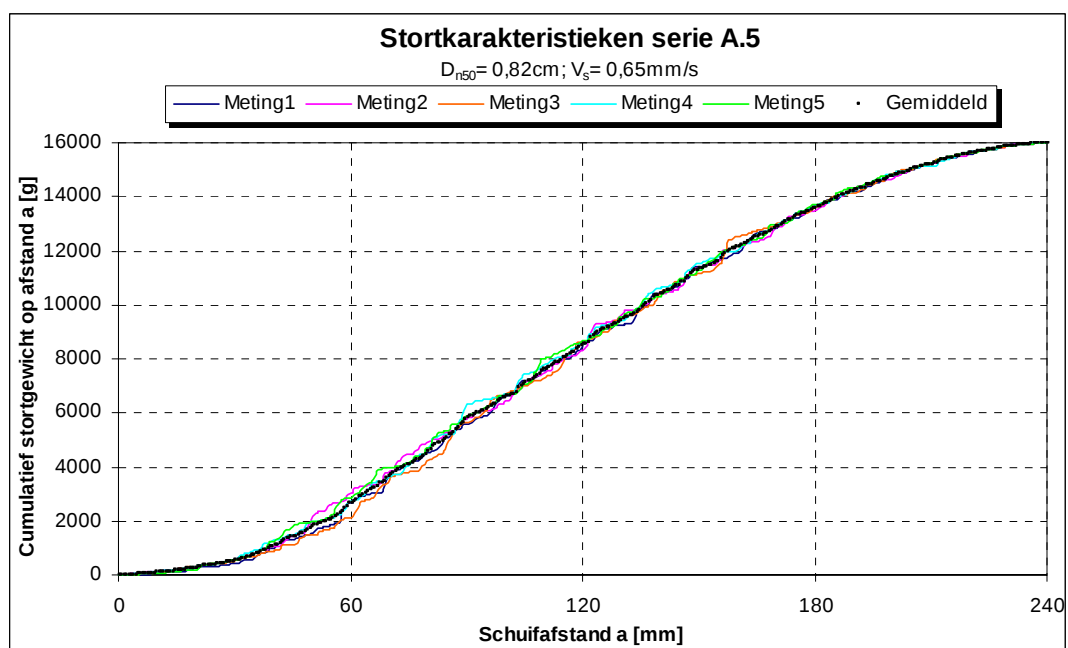


Figuur H.17 Stortheveelheden serie A.4.3 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f .

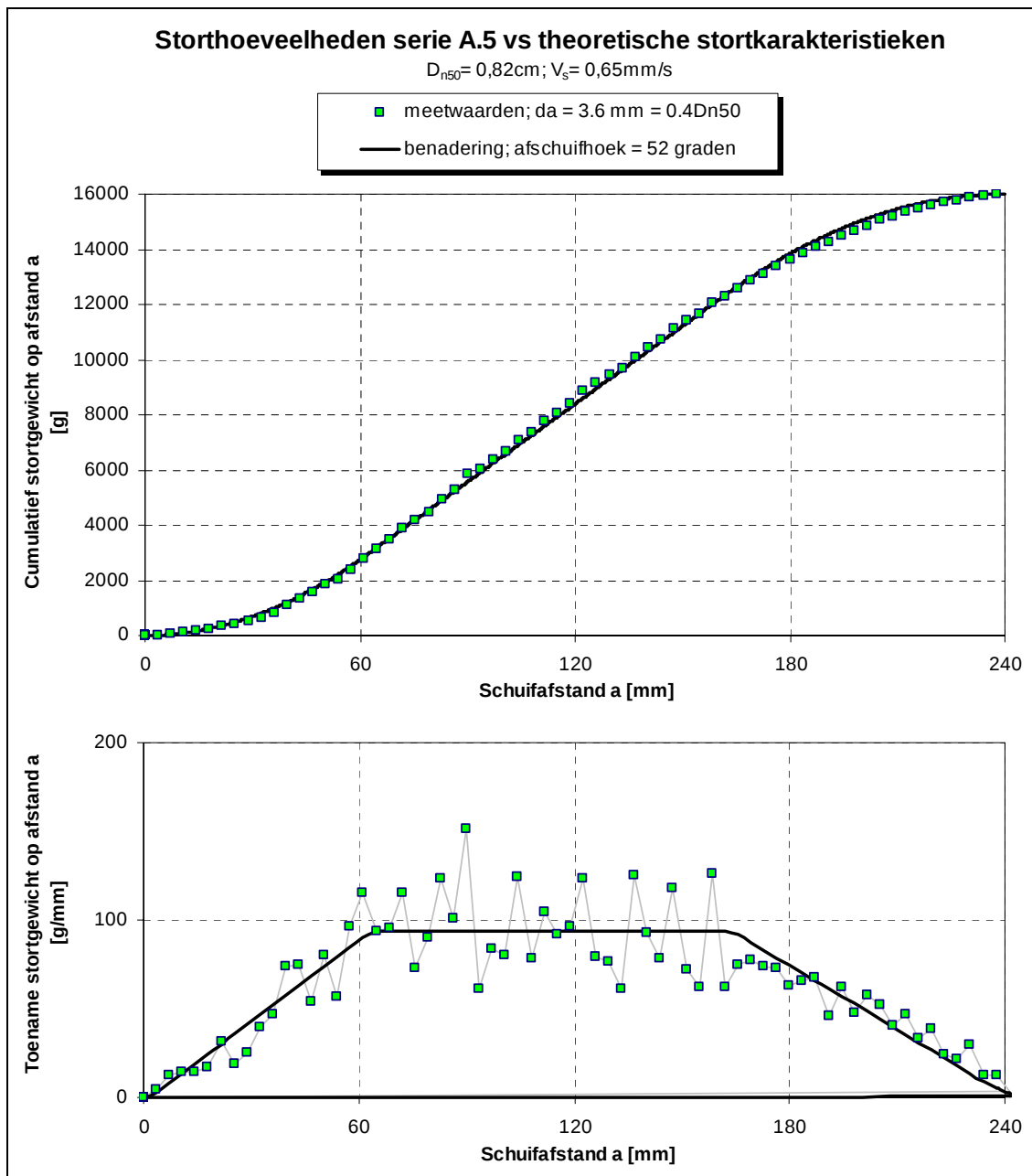
H.5 RESULTATEN SERIE A.5

Tabel H.5 Gegevens serie A.5.

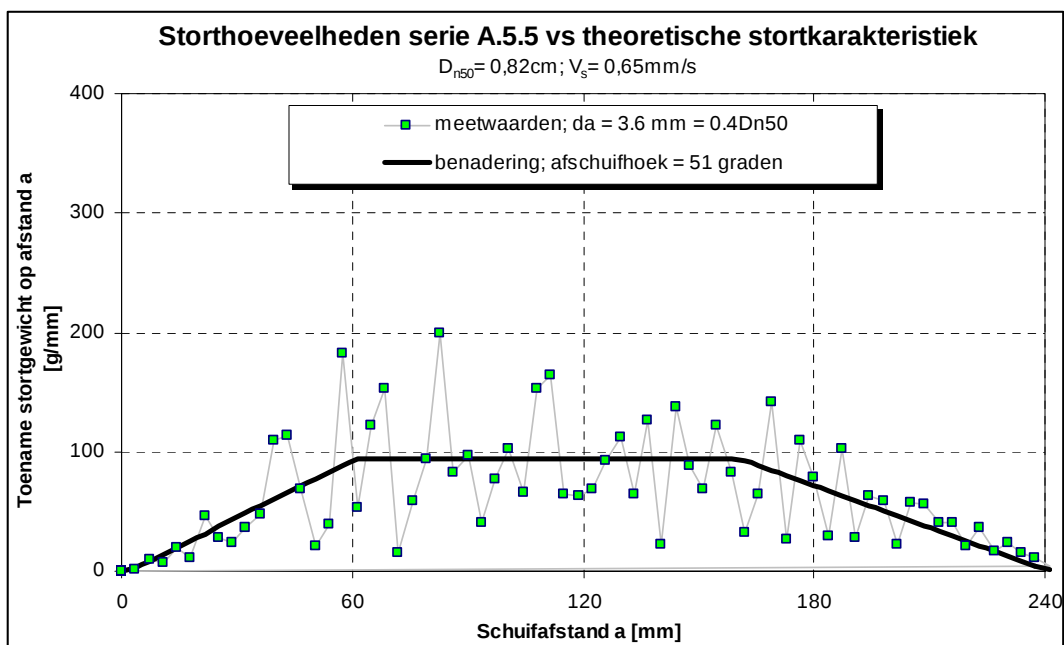
Serie	D_{n50} [mm]	V_s [mm/s]	$V_{s, \text{gemeten}}$ [mm/s]	ϕ_f [°]	onreg. schuiftijd [g/mm]	onreg. $d_a = 3,6 \text{ mm}$ [g/mm]
A.5.1	8,2	0,65	0,64	53	79	31,6
A.5.2	8,2	0,65	0,65	52	83,8	39,5
A.5.3	8,2	0,65	0,63	53	82,3	40,7
A.5.4	8,2	0,65	0,64	51	81,3	42,9
A.5.5	8,2	0,65	0,64	51	76,8	36,0



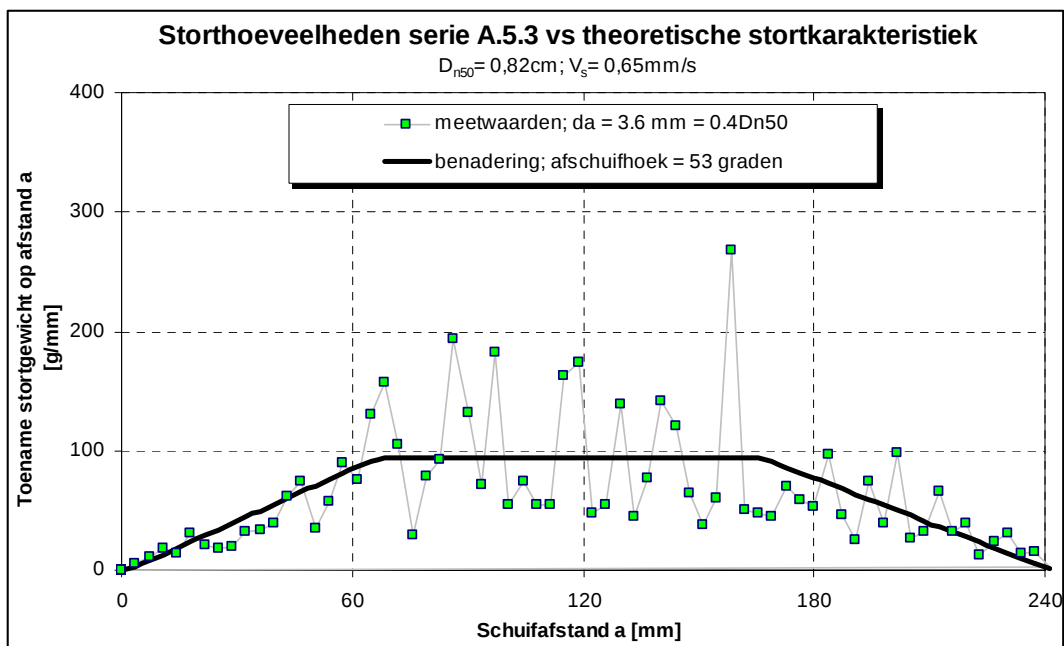
Figuur H.18 Stortkarakteristieken serie A.5.



Figuur H.19 Stortheoevelheden serie A.5 (volgens de gemiddelde stortheoevelheden) en theoretische benaderingen met karakteristieke waarde voor ϕ .



Figuur H.20 Storthoeveelheden serie A.5.5 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f .

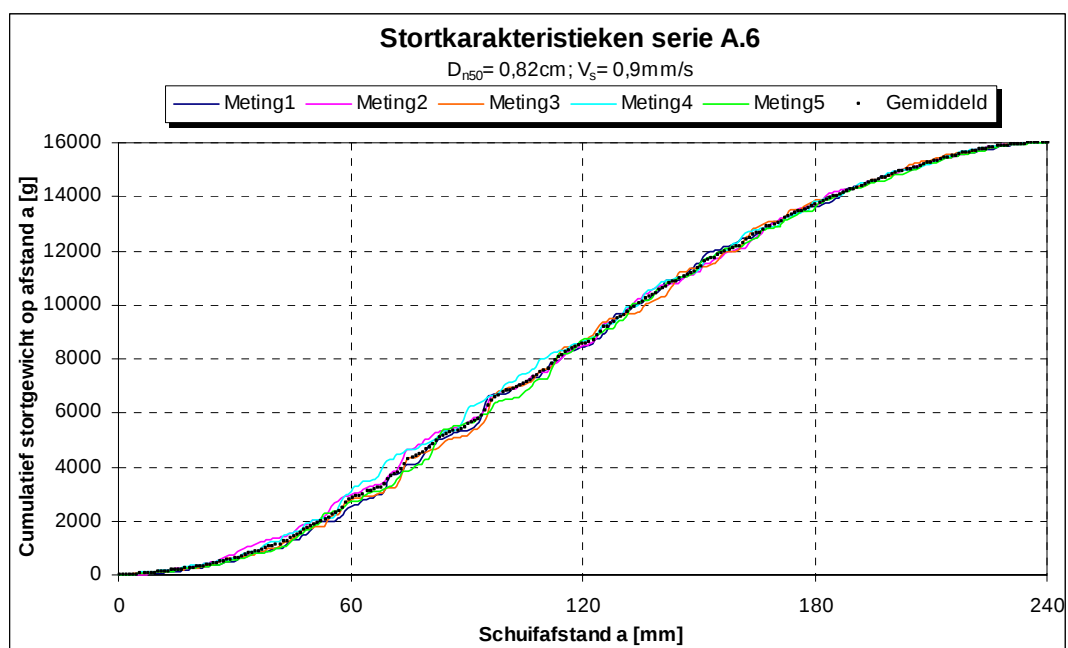


Figuur H.21 Storthoeveelheden serie A.5.3 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f .

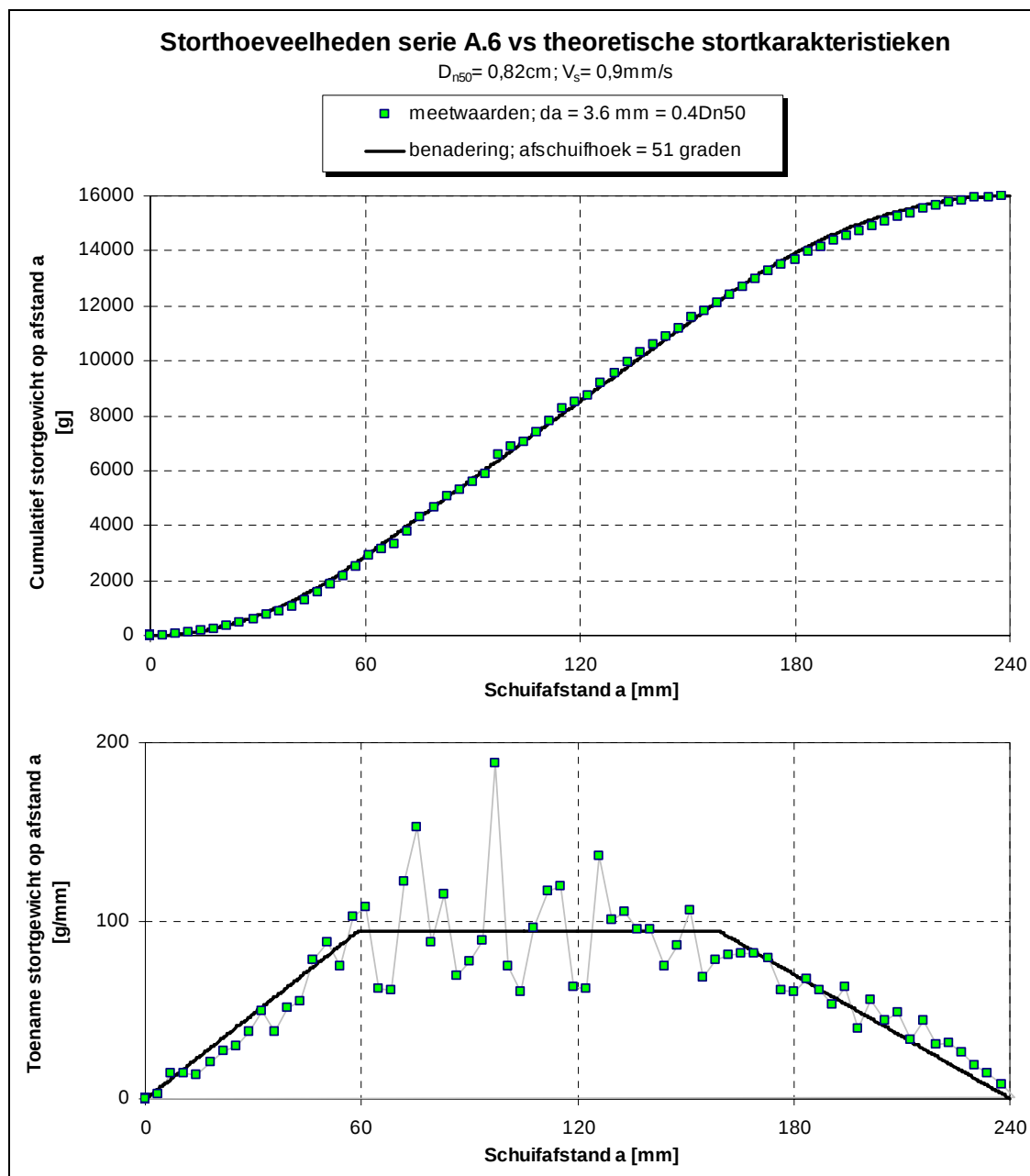
H.6 RESULTATEN SERIE A.6

Tabel H.6 Gegevens serie A.6.

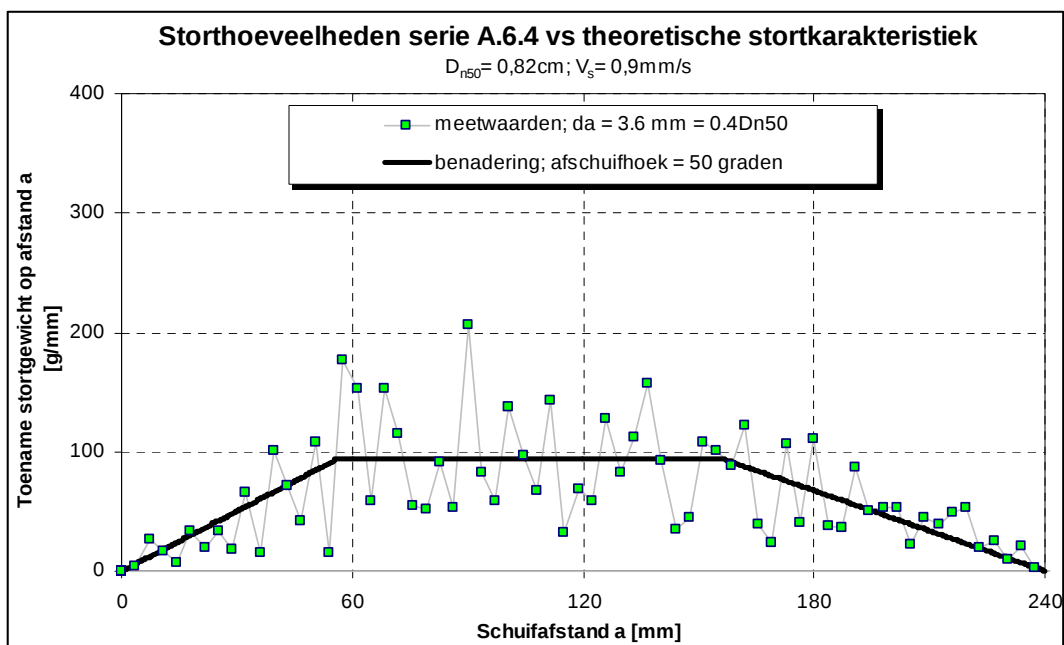
Serie	D_{n50} [mm]	V_s [mm/s]	$V_{s, \text{gemeten}}$ [mm/s]	ϕ_f [°]	onreg. schuiftijd [g/mm]	onreg. $d_a = 3,6 \text{ mm}$ [g/mm]
A.6.1	8,2	0,9	0,92	52	73	37,9
A.6.2	8,2	0,9	0,91	51	60,7	35,1
A.6.3	8,2	0,9	0,90	52	73,4	47,6
A.6.4	8,2	0,9	0,89	50	62,9	35,2
A.6.5	8,2	0,9	0,89	52	69,8	34,8



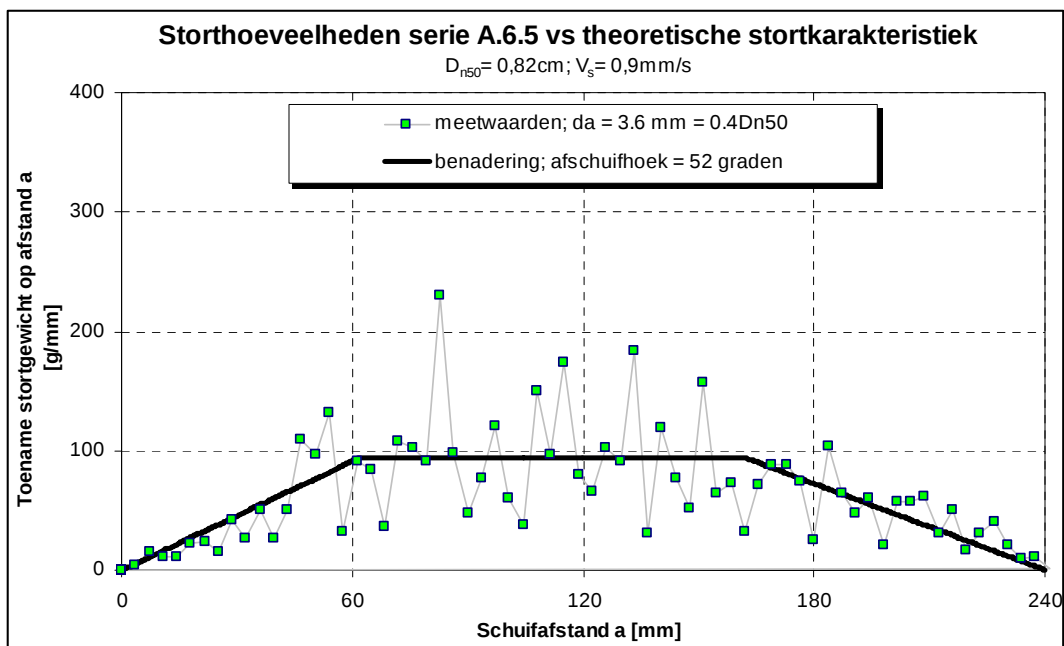
Figuur H.22 Stortkarakteristieken serie A.6.



Figuur H.23 Stortheoeveelheden serie A.6 (volgens de gemiddelde stortkarakteristieken) en theoretische benaderingen met karakteristieke waarde voor ϕ_F .

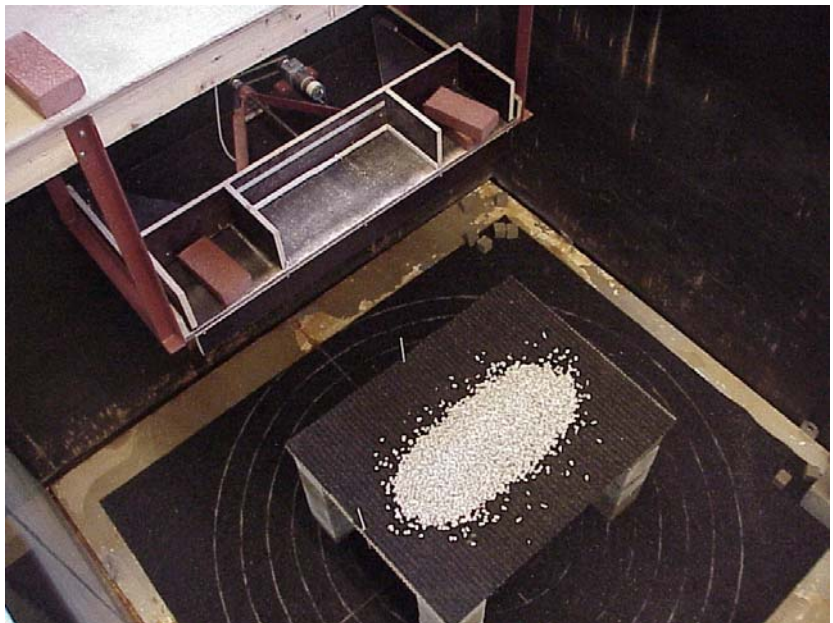


Figuur H.24 Stortheoeveelheden serie A.6.4 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f .



Figuur H.25 Stortheoeveelheden serie A.6.5 en theoretische benadering met karakteristieke waarde voor ϕ_f .

BIJLAGE I RESULTATEN SERIE B: STATIONNAIRE STORTPROEVEN OP EEN VLAKKE BODEM



Figuur I.1 Stortresultaat van een stationaire stortproef op een vlakke bodem bij een waterdiepte van ca. 60 cm.

Onderstaand worden de resultaten van de stortproeven uit serie B.1 tot en met serie B.8 gepresenteerd. In het bovenaanzicht (cq. hoogtelijnen) van het stortprofiel bevindt het stortschip zich op de positie $y = 0$, met de 'uiteinden' van het laaddek op respectievelijk $x = -28$ en $x = 28$.

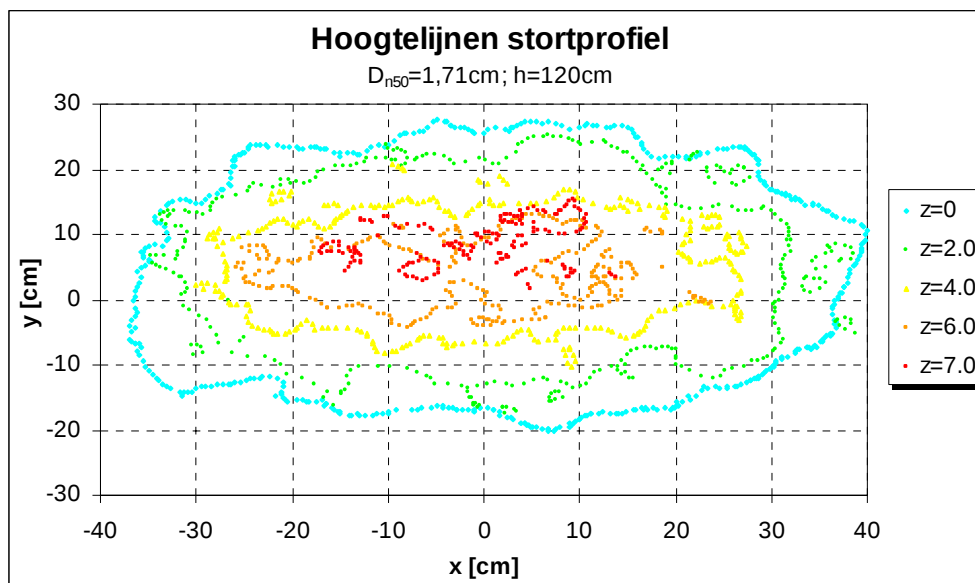
I.1 RESULTATEN SERIE B.1

Gegevens:

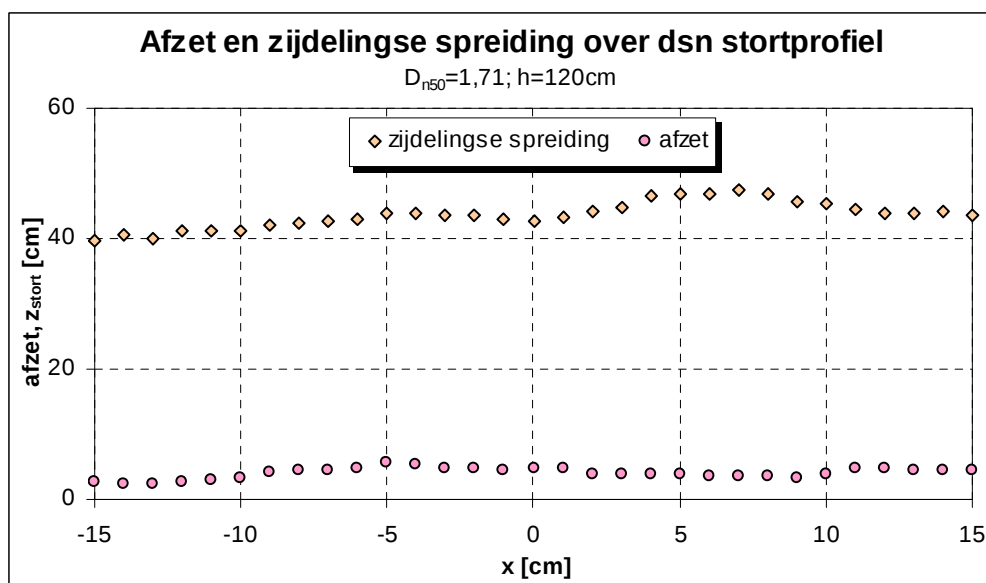
D_{n50} : 1,71 cm
 h : 120 cm
 V_s : 0,4 mm/s



Figuur I.2 Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.1.



Figuur I.3 Hoogtelijnen stortprofiel serie B.1.



Figuur I.4 Afzet en zijdelingse spreading serie B.1.

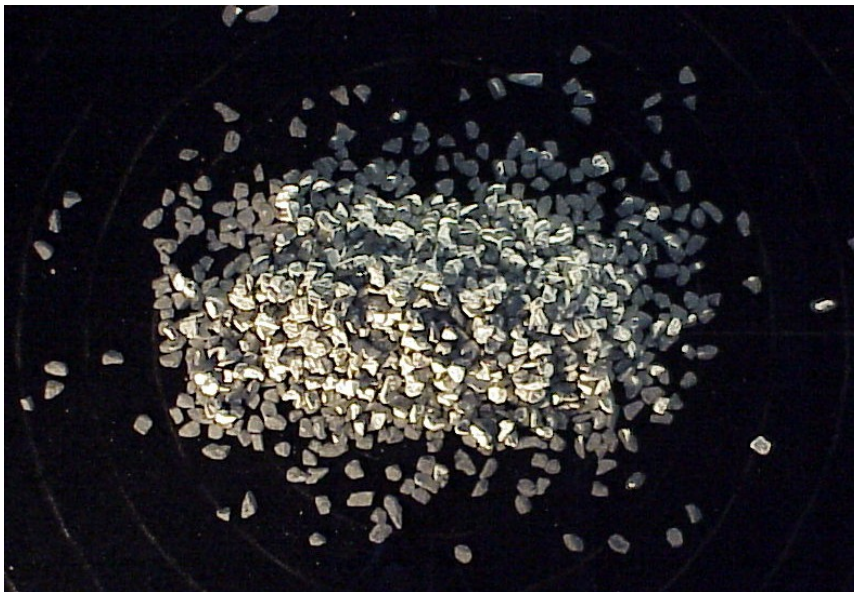
Profiel eigenschappen:

hoogte	:	7,4 cm
afzet	:	3,9 cm
zijdelingse spreading	:	43,6 cm
kopse spreading	:	20,2 cm

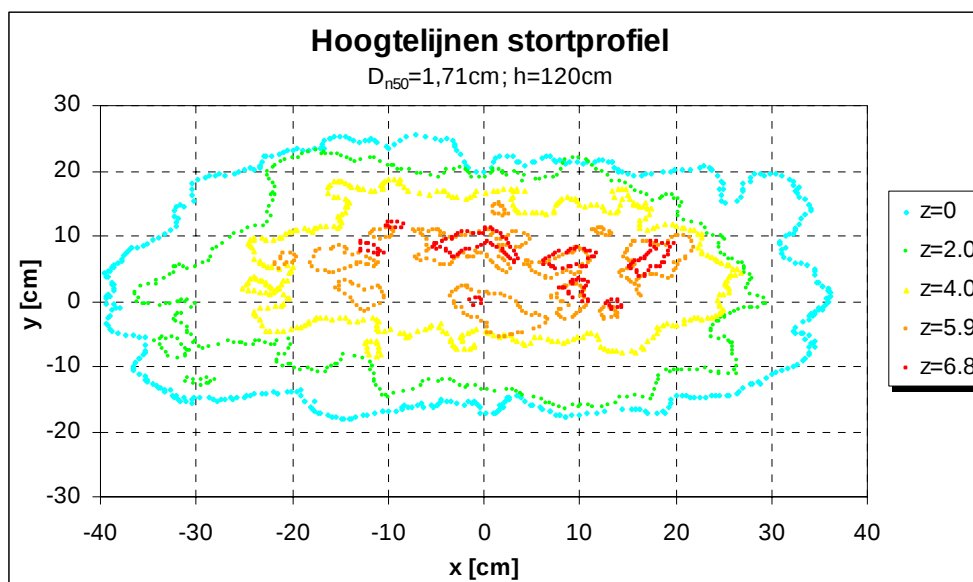
I.2 RESULTATEN SERIE B.2

Gegevens:

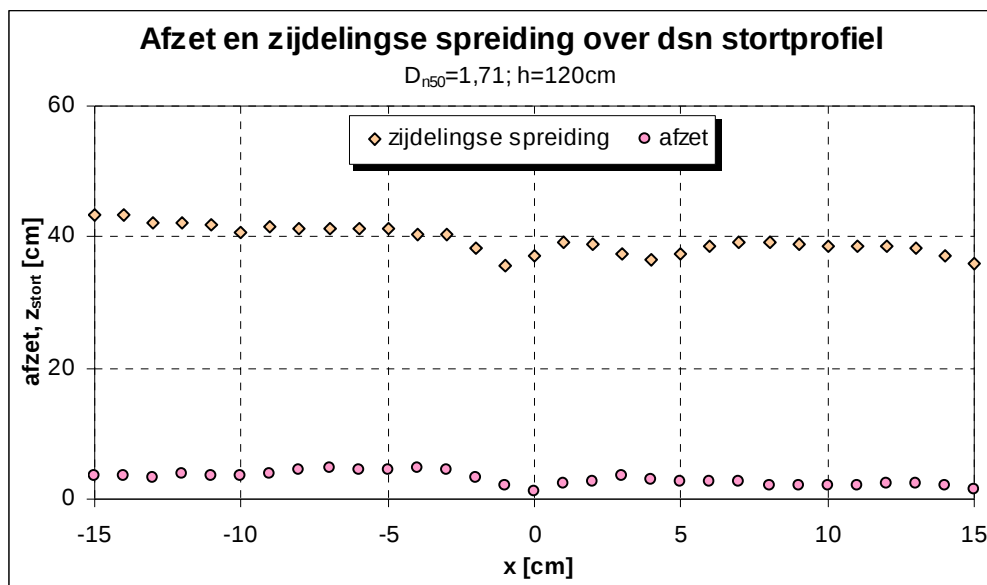
D_{n50} : 1,71 cm
 h : 120 cm
 V_s : 0,65 mm/s



Figuur I.5 Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.2.



Figuur I.6 Hoogtelijnen stortprofiel serie B.2.



Figuur I.7 Afzet en zijdelingse spreiding serie B.2.

Profiel eigenschappen:

hoogte	:	7,3 cm
afzet	:	2,9 cm
zijdelingse spreiding	:	39,5 cm
kopse spreiding	:	19,2 cm

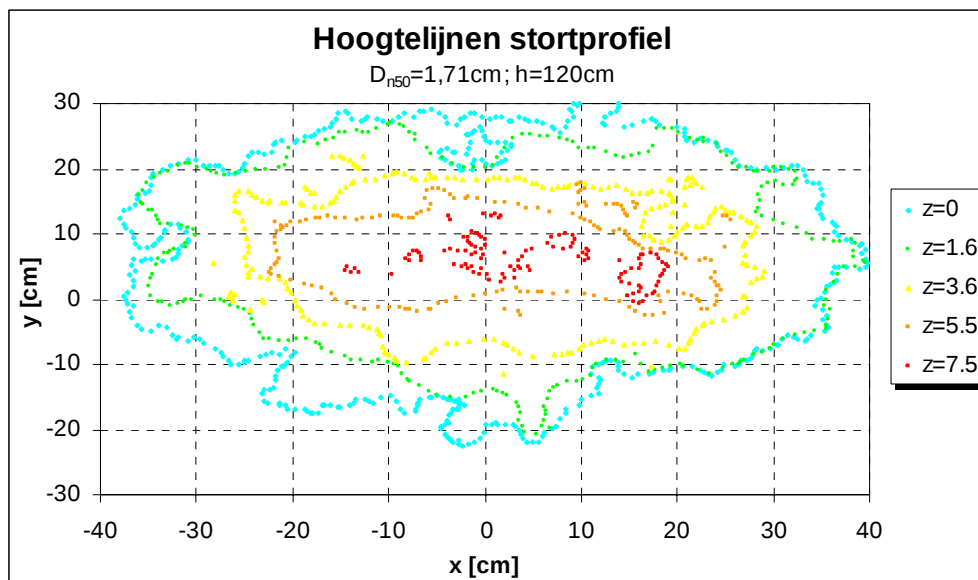
I.3 RESULTATEN SERIE B.3

Gegevens:

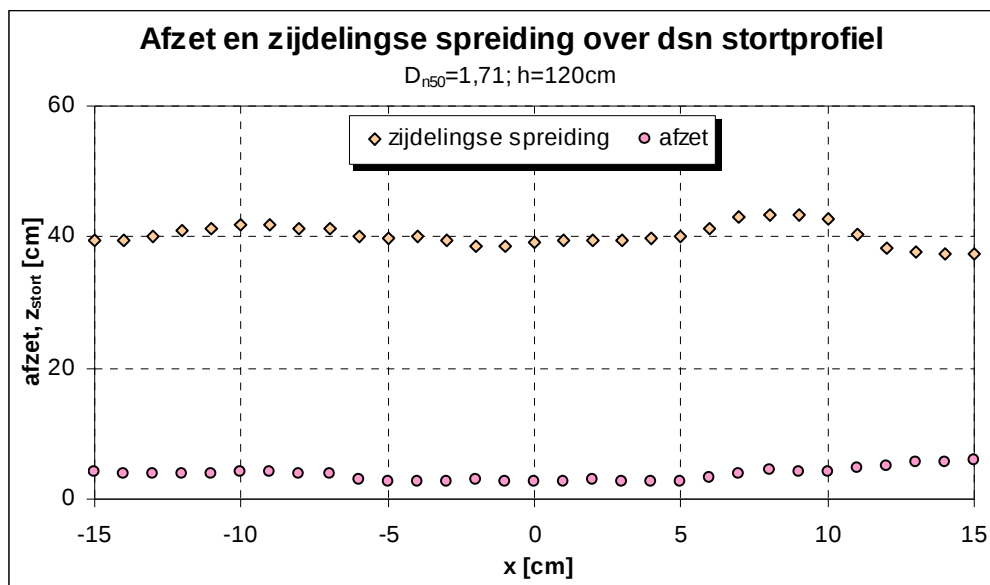
D_{n50} : 1,71 cm
 h : 120 cm
 V_s : 0,9 mm/s



Figuur I.8 Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.3.



Figuur I.9 Hoogtelijnen stortprofiel serie B.3.



Figuur I.10 Afzet en zijdelingse spreiding serie B.3.

Profiel eigenschappen:

hoogte	:	7,5 cm
afzet	:	4,2 cm
zijdelingse spreiding	:	40,3 cm
kopse spreiding	:	18,8 cm

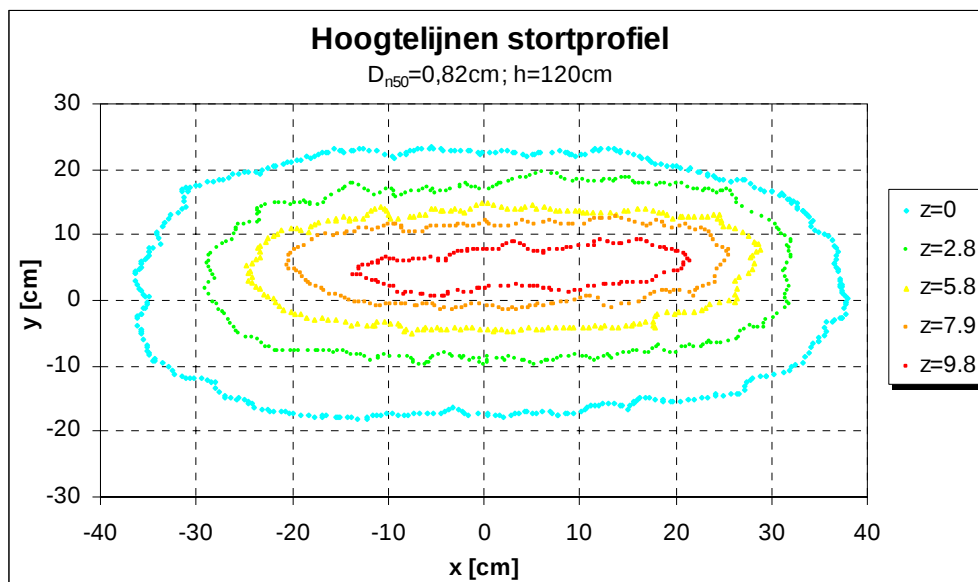
I.4 RESULTATEN SERIE B.4

Gegevens:

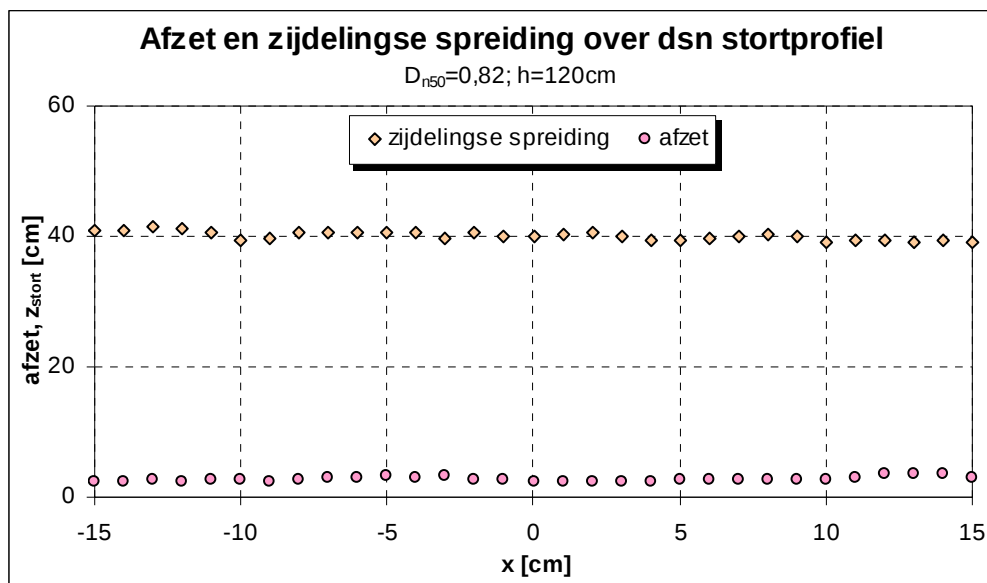
D_{n50} : 0,82 cm
 h : 120 cm
 V_s : 0,65 mm/s



Figuur I.11 Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.4.



Figuur I.12 Hoogtelijnen stortprofiel serie B.4.



Figuur I.13 Afzet en zijdelingse spreiding serie B.4.

Profiel eigenschappen:

hoogte	:	9,8 cm
afzet	:	2,6 cm
zijdelingse spreiding	:	40,1 cm
kopse spreiding	:	17,8 cm

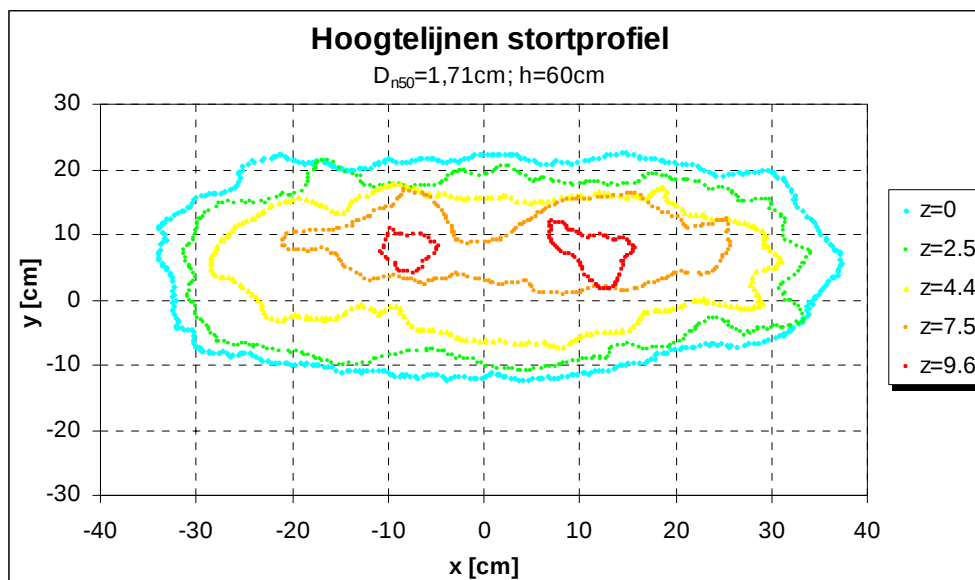
I.5 RESULTATEN SERIE B.5

Gegevens:

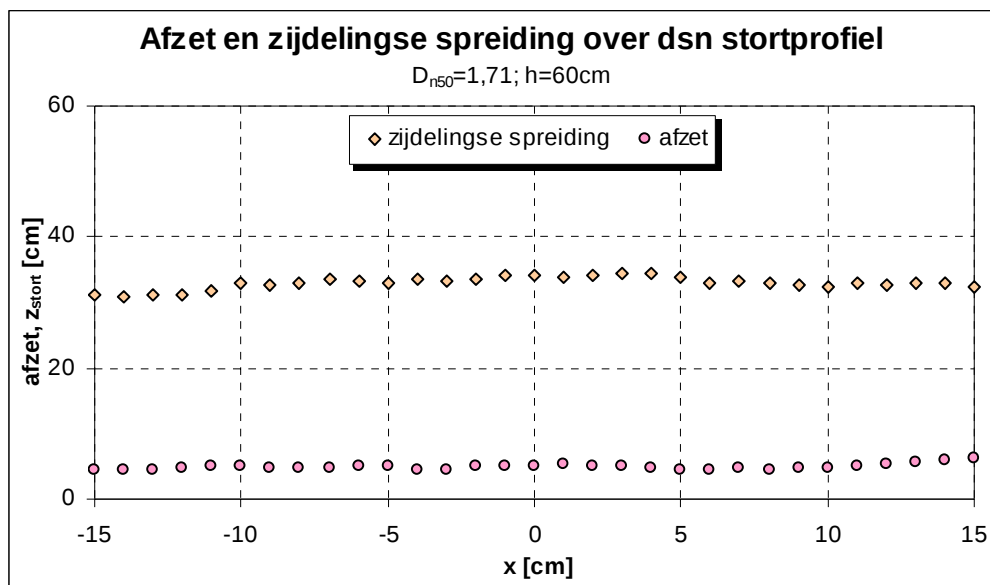
D_{n50} : 1,71 cm
 h : 60 cm
 V_s : 0,65 mm/s



Figuur I.14 Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.5.



Figuur I.15 Hoogtelijnen stortprofiel serie B.5.



Figuur I.16 Afzet en zijdelingse spreiding serie B.5.

Profiel eigenschappen:

hoogte	:	10,1 cm
afzet	:	5,4 cm
zijdelingse spreiding	:	33,0 cm
kopse spreiding	:	14,9 cm

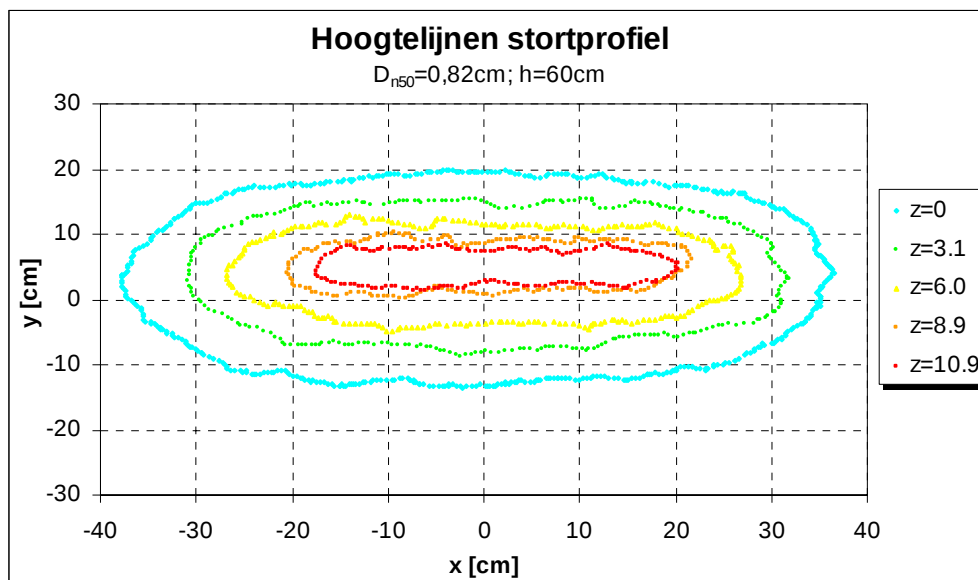
I.6 RESULTATEN SERIE B.6

Gegevens:

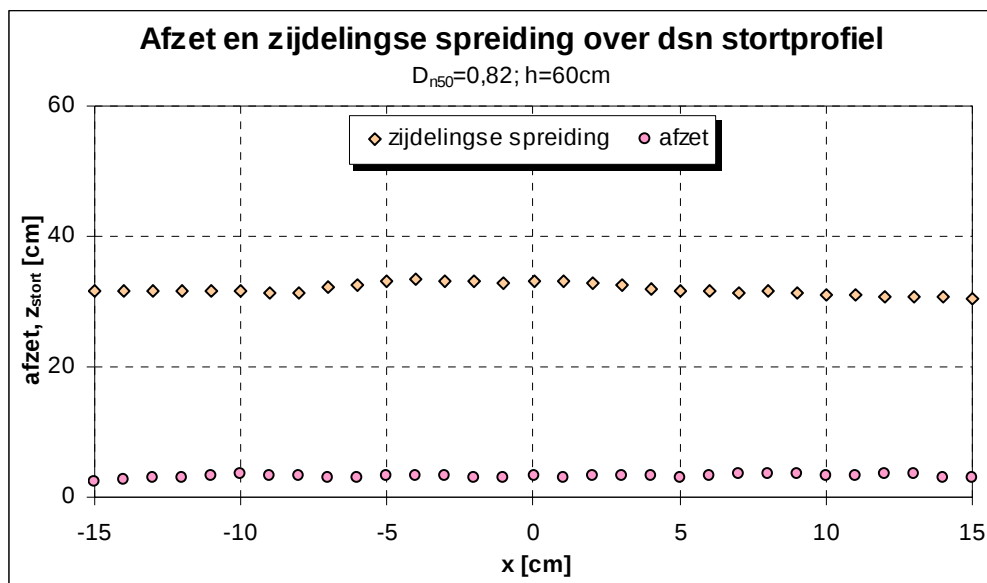
D_{n50} : 0,82 cm
 h : 60 cm
 V_s : 0,65 mm/s



Figuur I.17 Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.6.



Figuur I.18 Hoogtelijnen stortprofiel serie B.6



Figuur I.19 Afzet en zijdelingse spreiding serie B.6.

Profiel eigenschappen:

hoogte	:	11,4 cm
afzet	:	3,2 cm
zijdelingse spreiding	:	31,9 cm
kopse spreiding	:	17,9 cm

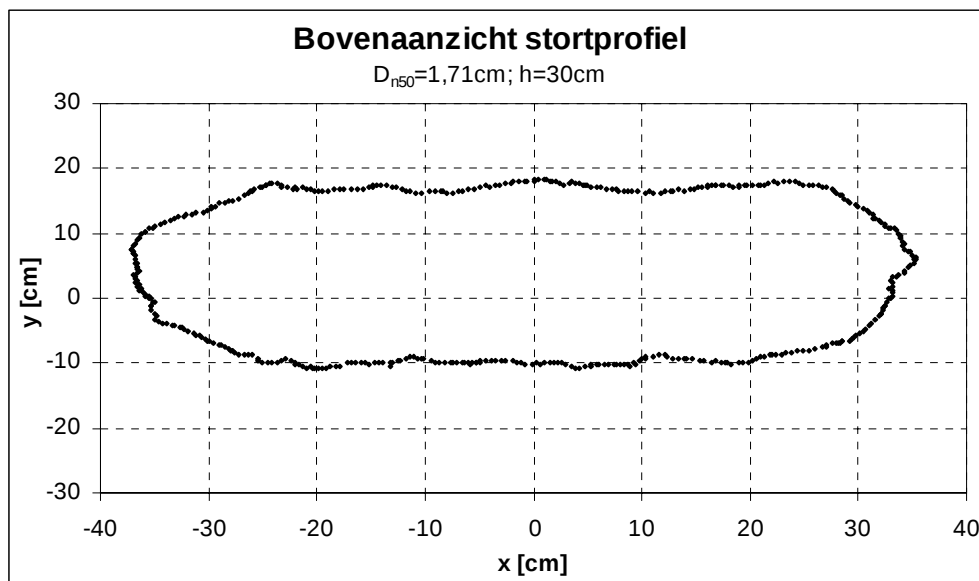
I.7 RESULTATEN SERIE B.7

Gegevens:

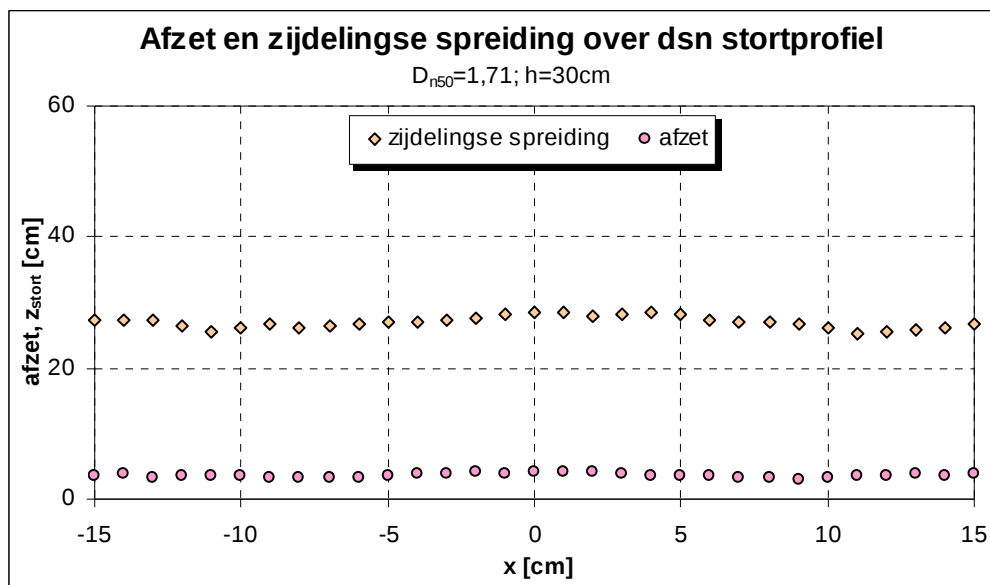
D_{n50} : 1,71 cm
 h : 30 cm
 V_s : 0,65 mm/s



Figuur I.20 Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.7.



Figuur I.21 Bovenaanzicht stortprofiel serie B.7.



Figuur I.22 Afzet en zijdelingse spreading serie B.7.

Profiel eigenschappen:

hoogte	:	11,1 cm
afzet	:	3,8 cm
zijdelingse spreading	:	27,0 cm
kopse spreading	:	15,8 cm

I.8 RESULTATEN SERIE B.8

Gegevens:

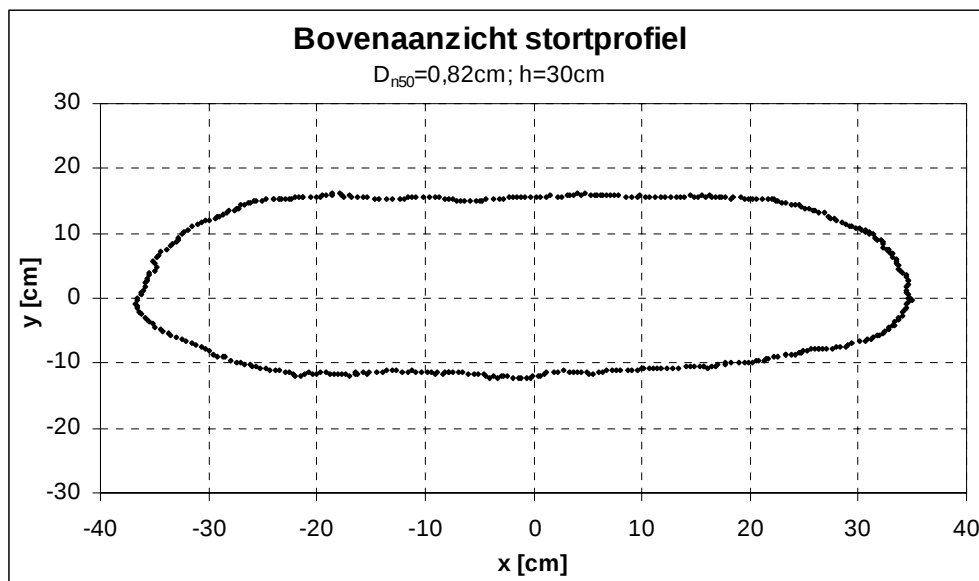
D_{n50} : 0,82 cm

h : 30 cm

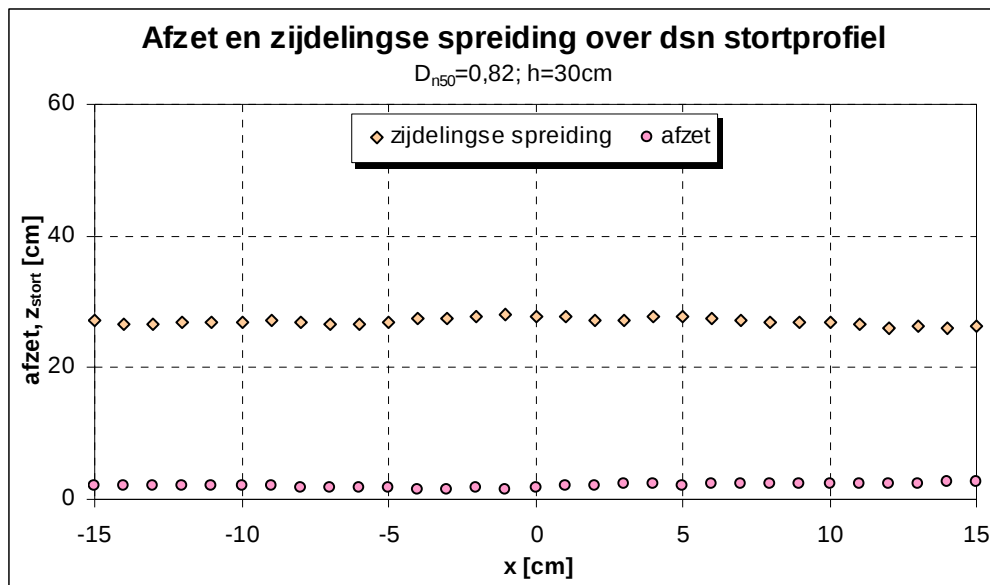
V_s : 0,65 mm/s



Figuur I.23 Foto bovenaanzicht stortprofiel serie B.8.



Figuur I.24 Bovenaanzicht stortprofiel serie B.8.



Figuur I.25 Afzet en zijdelingse spreiding serie B.4.

Profiel eigenschappen:

hoogte	:	12,5 cm
afzet	:	2,2 cm
zijdelingse spreiding	:	27,0 cm
kopse spreiding	:	15,1 cm

BIJLAGE J

RESULTATEN SERIE C: STEENBESTORTINGEN OP EEN VLAKE BODEM.



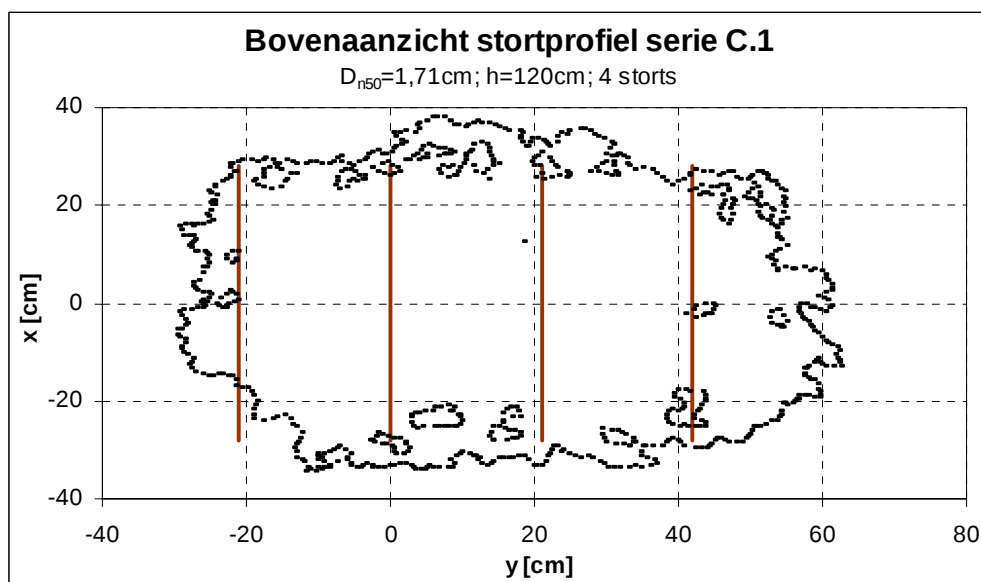
Figuur J.1 Stortresultaat van een steenbestorting op een vlakke bodem op een waterdiepte van ca. 120 cm.

Onderstaand worden de resultaten van de stortproeven uit serie B.1 tot en met serie B.8 gepresenteerd. De bruine lijnen in de figuren voor het bovenaanzicht van het stortprofiel geven steeds de posities van de stortlijn van de verschillende storts aan.

J.1 RESULTATEN SERIE C.1



Figuur J.2 Foto bovenaanzicht stort serie C.1.

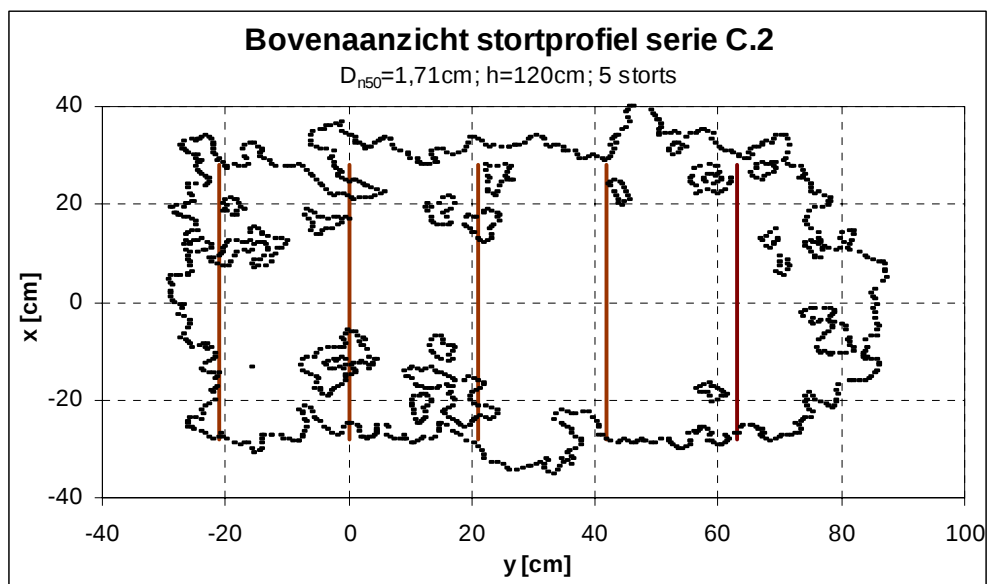


Figuur J.3 Bovenaanzicht stort en stortposities serie C.1.

J.2 RESULTATEN SERIE C.2



Figuur J.4 Foto bovenaanzicht stort serie C.2.

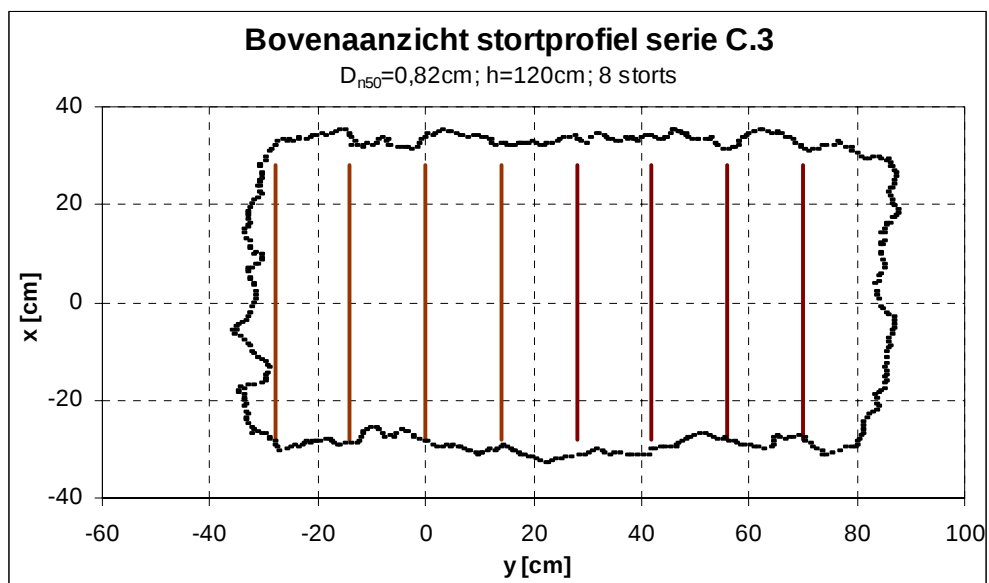


Figuur J.5 Bovenaanzicht stort en stortposities serie C.2.

J.3 RESULTATEN SERIE C.3



Figuur J.6 Foto bovenaanzicht stort serie C.3.

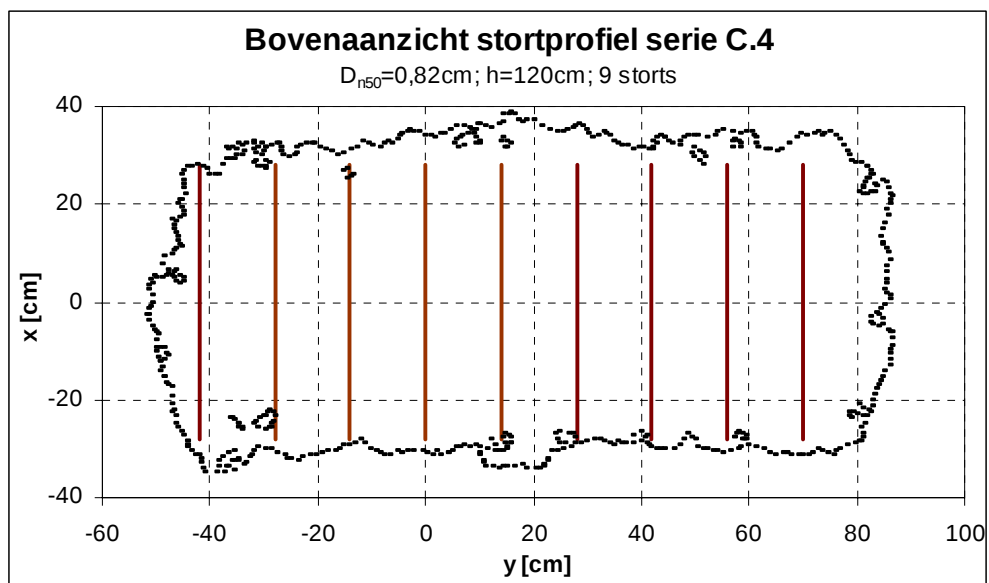


Figuur J.7 Bovenaanzicht stort en stortposities serie C.3.

J.4 RESULTATEN SERIE C.4



Figuur J.8 Foto bovenaanzicht stort serie C.4.



Figuur J.9 Bovenaanzicht stort en stortposities serie C.4.

BIJLAGE K FOTO'S SERIE D: STORTPROEVEN OP EEN TALUD.



Figuur K.1 Stortresultaat van de stenen uit de sortering met $D_{n50} = 1,71$ cm op een talud van 1:3.

K.1 FOTO'S SERIE D.1

Gegevens:

D_{n50} : 1,71 cm

h_l : 90 cm

V_s : 0,65 mm/s



Figuur K.2 Bovenaanzicht stortprofiel serie D.1.



Figuur K.3 Zijaanzicht stortprofiel serie D.1.



Figuur K.4 Vooraanzicht stortprofiel serie D.1.

K.2 FOTO'S SERIE D.2

Gegevens:

D_{n50} : 0,82 cm
 $h_{\perp}$: 90 cm
 V_s : 0,65 mm/s



Figuur K.5 Bovenaanzicht stortprofiel serie D.2.



Figuur K.6 Zijaanzicht stortprofiel serie D.2.



Figuur K.7 Vooraanzicht stortprofiel serie D.2.

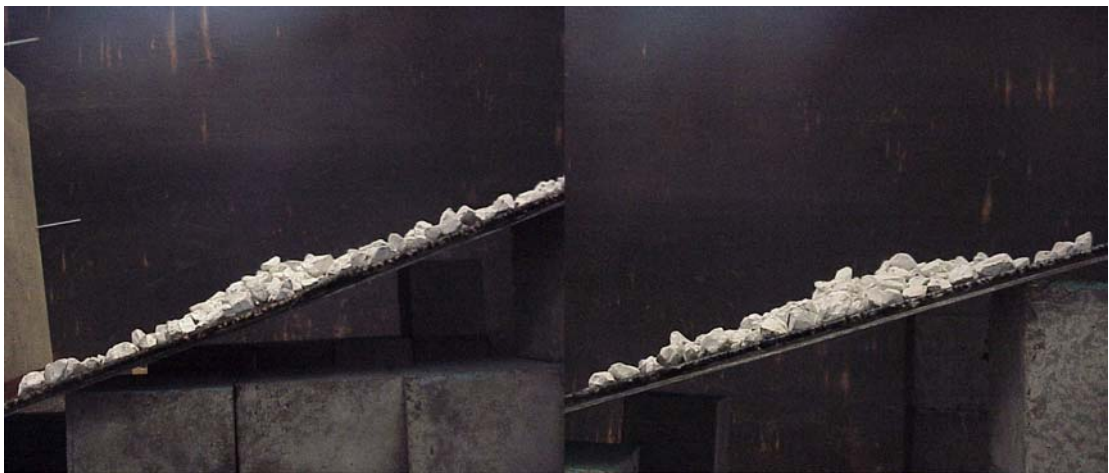
K.3 FOTO'S SERIE D.3

Gegevens:

D_{n50} : 1,71 cm
 h_l : 80 en 100 cm
 V_s : 0,65 mm/s



Figuur K.8 Bovenaanzicht stortprofielen serie D.3.



Figuur K.9 Zijaanzicht stortprofielen serie D.3.

K.4 FOTO'S SERIE D.4

Gegevens:

D_{n50} : 0,82 cm
 h_l : 80 en 100 cm
 V_s : 0,65 mm/s



Figuur K.10 Bovenaanzicht stortprofielen serie D.4.



Figuur K.11 Zijaanzicht stortprofielen serie D.4.