

Het valgedrag van stortsteen onder invloed van stroming



J.S. de Reus
Papendrecht, februari 2004

Afstudeercommissie

Prof. drs. ir. J.K. Vrijling
Dr. ir. H.L. Fontijn
Ir. J. Olthof
Ir. W.H. Tutuarima
Ir. H.J. Verhagen



Royal Boskalis Westminster
Afdeling Hydronamic
Rosmolenweg 20, Postbus 43
3350 AA Papendrecht



Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde

J.S. de Reus
Lisleede 12
2991 WG Barendrecht

Het valgedrag van stortsteen onder invloed van stroming

J.S. de Reus
Papendrecht, februari 2004

Afstudeercommissie

Prof. drs. ir. J.K. Vrijling
Dr. ir. H.L. Fontijn
Ir. J. Olthof
Ir. W.H. Tutuarima
Ir. H.J. Verhagen



Royal Boskalis Westminster
Afdeling Hydronamic
Rosmolenweg 20, Postbus 43
3350 AA Papendrecht



Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde

J.S. de Reus
Lisleede 12
2991 WG Barendrecht



Voorwoord

Voor U ligt het eindrapport van mijn onderzoek naar: "Het valgedrag van stortsteen onder invloed van stroming".

Dit rapport is het resultaat van mijn afstudeeronderzoek aan de faculteit Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met Hydronamic, het ingenieursbureau van Boskalis Westminster.

Het doel van dit onderzoek is het vergroten van inzicht met betrekking tot de spreiding en offset van stortsteen, gestort in stromend water. Het onderzoek is tot stand gekomen middels een literatuurstudie en modelproeven, waarna een modellering van de verdeling van de uitwijkingen, optredend bij verschillende stroomsnelheden is opgesteld.

Mijn dank gaat in het bijzonder uit naar het Laboratorium voor Vloeistofmechanica en Boskalis Westminster voor het verlenen van de benodigde faciliteiten en de financiële ondersteuning tijdens mijn afstudeeronderzoek.

Van diegenen die bij mijn afstudeeronderzoek hebben geholpen wil ik als eerste de leden van mijn afstudeercommissie bedanken: Prof. Drs. Ir. J.K. Vrijling, Dr. Ir. H.L. Fontijn, Ir. J. Olthof, Ir. W.H. Tutuarima en Ir. H.J. Verhagen.

Vervolgens gaat mijn dank uit naar de medewerkers van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica: Arie, Fred, Hans, Jaap, Kadir, Karel, Michiel en Wim, en alle collega-studenten uit keet Oost.

Ten slotte degenen die een bijzondere bijdrage hebben geleverd: Frank, Ida, Jan, Joost, Michiel en Nancy.

Jeroen de Reus

Papendrecht, februari 2004



Inhoudsopgave

VOORWOORD.....	IV
INHOUDSOPGAVE	VI
INHOUDSOPGAVE BIJLAGEN.....	X
SAMENVATTING	XII
SYMBOLENLIJST	XVI
1 INLEIDING	20
1.1 ACHTERGROND VAN HET ONDERZOEK	20
1.2 PROBLEEMBESCHRIJVING.....	21
1.3 PROBLEEMSTELLING	22
1.4 DOELSTELLING.....	22
1.5 STRUCTUURBESCHRIJVING.....	22
2 HET STORTEN MET EEN ZIJSTORTER.....	24
2.1 INLEIDING	24
2.2 POSITIE EN GEDRAG STORTSCHIP	24
2.2.1 Gedrag en positionering.....	24
2.2.2 Plaatsbepaling.....	24
2.3 HET BRESGEDRAG VAN STORTMATERIAAL	25
2.3.1 Oorzaak bresgedrag	25
2.3.2 Aspecten van invloed op het bresgedrag.....	26
2.4 VERPLAATSING VAN STEEN BOVEN EN ONDER WATER.....	27
2.4.1 Verplaatsing van steen boven water.....	27
2.4.2 De invloed van golven op de spreiding van de steen	28
2.4.3 Verplaatsing van steen door stroming	28
2.5 BODEMGEDRAG	31
3 HET VALGEDRAG VAN EEN ENKELE STEEN IN WATER.....	34
3.1 INLEIDING	34
3.2 KRACHTEN OP EEN VALLENDE STEEN IN WATER	34
3.2.1 De resultante van de opwaartse kracht en de zwaartekracht	34
3.2.2 De sleepkracht.....	34
3.2.3 Het effect van het Reynoldsgetal	35
3.2.4 De liftkracht.....	36
3.2.5 Versnelling / vertraging van een bol in water.....	36
3.2.6 De evenwichtsvalsnelheid	37
3.2.7 De evenwichtsvalsnelheid van breuksteen in water	37
3.3 DE VALBEWEGING EN VALBAAN	38
3.3.1 Vortex shedding.....	38
3.3.2 Magnus-effect en asymmetrische loslating	39
3.4 RANDOM WALK MODEL.....	40
4 HET VALGEDRAG VAN EEN GROEP STENEN	44
4.1 INLEIDING	44
4.2 DE OPTREDENDE FASEN BIJ GROEPSGEWIJS VALLEN VAN STENEN	44
4.2.1 Het 2 fasen principe	44
4.2.2 Het 5 fasen principe	45
4.3 GROEPSSNELHEID	45
4.4 ONDERLINGE BEÏNVLOEDING BIJ HET STORTEN MET EEN ZIJSTORTER.....	45
5 SCHAALEFFECTEN BIJ MODELPROEVEN.....	48
5.1 INLEIDING	48

5.2	GELIJKVORMIGHEID	48
5.2.1	Soorten gelijkvormigheid.	48
5.2.2	Herschrijven van de vergelijking van Navier-Stokes	48
5.2.3	Het getal van Strouhal.....	50
5.2.4	Het getal van Euler	50
5.2.5	Het getal van Froude.....	50
5.2.6	Het getal van Reynolds.....	51
5.3	DE VERSCHALING VAN WERKELIJKHEID NAAR MODEL.....	52
5.4	AANNAMEN EN VEREENVOUDIGINGEN.....	52
6	UITVOERING VAN DE EXPERIMENTEN IN HET AQUARIUM.....	54
6.1	INLEIDING	54
6.2	DOEL VAN DE PROEVEN IN HET AQUARIUM	54
6.3	DE MODELPROEFOPSTELLING.....	54
6.3.1	Het aquarium.....	54
6.3.2	De gebruikte apparatuur en software	55
6.3.3	Het calibratiekruis.....	55
6.4	DE UITVOERINGSMETHODIEK.....	55
6.4.1	Het uitzoeken van de steen en het bepalen van de individuele steeneigenschappen.....	55
6.4.2	Samenvatting foutenanalyse	55
7	ANALYSE RESULTATEN VALSNELHEDEN INDIVIDUELE STENEN	58
7.1	INLEIDING	58
7.2	INVLOED VAN DE PARAMETERS OP DE WEERSTANDSCOËFFICIËNT	58
7.2.1	Invloed van de diameter op de L/d verhouding.....	58
7.2.2	Invloed van de L/d verhouding op de weerstandscoefficiënt	61
7.3	EVENWICHTSVALSNEELHEID	63
7.4	CONCLUSIES.....	66
7.4.1	Conclusies met betrekking tot de weerstandscoefficiënt	66
7.4.2	Conclusies evenwichtsvalsneelheid.....	66
8	UITVOERING VAN DE EXPERIMENTEN IN DE STROOMGOOT	68
8.1	INLEIDING	68
8.2	DOELEN VAN DE VERSCHILLENDE EXPERIMENTEN	68
8.3	DE MODELPROEFOPSTELLING.....	68
8.3.1	De stroomgoot	68
8.3.2	De gebruikte apparatuur en software	70
8.4	DE ALGEMENE UITVOERINGSMETHODIEK	74
8.4.1	De gebruikte stenen.....	74
8.4.2	Het instellen van de stroomgoot.....	74
8.4.3	Het verschijnsel scheve aanstroming	75
8.5	DE UITVOERINGSMETHODIEK VOOR DE PROEVEN MET INDIVIDUELE STENEN	76
8.5.1	Doel van de proeven met individueel losgelaten stenen	76
8.5.2	Uitgevoerde proeven met individueel losgelaten stenen	77
8.6	DE UITVOERINGSMETHODIEK VOOR DE PROEVEN MET STEENGROEPEN IN DE STROOMGOOT ...	77
8.6.1	Doel van de proeven met tegelijk gestorte stenen	77
8.6.2	Uitgevoerde proeven met tegelijk gestorte stenen.....	77
8.6.3	Codering van de uitgevoerde proeven.....	78
8.6.4	Stappenplan bij het uitvoeren van de proeven met steengroepen in de stroomgoot	79
8.6.5	Samenvatting foutenanalyse	79
9	RESULTATEN VAN EXPERIMENTEN MET INDIVIDUEEL GESTORTE STENEN IN DE STROOMGOOT.....	82
9.1	INLEIDING	82
9.2	GEMIDDELDE OFFSET EN SPREIDING INDIVIDUEEL GESTORTE STENEN	82
9.2.1	Offset individueel gestorte stenen	82
9.2.2	Evenwichtsvalsneelheden van stenen in stromend water	83
9.2.3	Analyse invloed snelheidsverticaal	84
9.2.4	De t-toets toegepast op de evenwichtsvalsneelheden bij stroming	87
9.2.5	De parameters C_b en C_l voor individueel losgelaten stenen	88



9.2.6	<i>Vergelijking meeneemcoëfficiënt en weerstandcoëfficiënt door combinatie vergelijking evenwichtsvalsnelheid met offsetvergelijking.....</i>	89
9.2.7	<i>Spreiding van individueel gestorte stenen onder invloed van stroming.....</i>	90
9.3	THEORETISCHE BENADERING: COMBINATIE VAN HET ESM EN HET WL OFFSETMODEL.....	93
9.4	EIGENSCHAPPEN STORTPROFIEL.....	95
9.4.1	<i>Toetsing verdelingen en offset aan model</i>	95
9.4.2	<i>Vuistregels verloop van de steenparameters over de x-richting van een stort</i>	96
9.5	CONCLUSIES.....	99
10	RESULTATEN VAN EXPERIMENTEN MET STEENGROEPEN IN DE STROOMGOOT	102
10.1	INLEIDING	102
10.2	BESCHRIJVING VAN DE OPTREDENDE PROCESSEN	102
10.2.1	<i>Beschrijving van het verticale valgedrag.....</i>	105
10.2.2	<i>Beschrijving van het horizontale valgedrag bij evenwijdig storten.....</i>	107
10.2.3	<i>Optredende groeps(val)snellheden.....</i>	108
10.3	OFFSETS	111
10.3.1	<i>Dwars op de stroming gestorte groepen</i>	111
10.3.2	<i>Evenwijdig gestorte groepen.....</i>	113
10.3.3	<i>De parameters C_b en C_l voor dwars en evenwijdig gestorte groepen.....</i>	114
10.3.4	<i>De parameters C_b en C_l voor onder 45 graden gestorte groepen.....</i>	117
10.4	SPREIDING VAN GROEPEN OP DE BODEM	118
10.4.1	<i>Theoretische beschouwing Lijnstort Model (LSM)</i>	118
10.4.2	<i>Praktische toepasbaarheid LSM</i>	121
10.4.3	<i>De in de goot bepaalde spreidingen.....</i>	122
10.4.4	<i>De constante c' bij groepsstorten.....</i>	126
10.5	VALIDATIE VAN HET IN HOOFDSTUK 9.3 OPGESTELDE MODEL	127
10.6	CONCLUSIES.....	127
11	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	130
11.1	CONCLUSIES.....	130
11.1.1	<i>Conclusies van de experimenten met individueel losgelaten stenen</i>	130
11.1.2	<i>Conclusies van de experimenten met steengroepen met beperkte groottes.....</i>	131
11.2	AANBEVELINGEN	133
	LIJST VAN FIGUREN.....	134
	LIJST VAN TABELLEN	138
	LITERATUURLIJST	140



Inhoudsopgave Bijlagen

- A Theorie bij het uitwerken van de data
- B Stappenplan en foutenanalyse aquarium
- C Stappenplan en foutenanalyse stroomgoot
- D Steeneigenschappen beproefde sorteringen
- E Verdeling steeneigenschappen kleinere diameters
- F Verdeling steeneigenschappen grotere diameters
- G Stortresultaten individueel gestorte stenen
- H Verdelingen uitwijkingen individueel gestorte stenen
- I Bovenanzichten groepsstorten zonder stroming
- J Bovenanzichten groepsstorten met 0,10 m/s
- K Bovenanzichten groepsstorten met 0,22 m/s
- L Bovenanzichten groepsstorten met 0,40 m/s
- M verdeling uitwijkingen groepsstorten per stort
- N Spreiding en KS toets uitwijkingen per stort bepaald
- O Groepsindeling stenen
- P Stuweigenschapppen
- Q Weerstandscoefficienten
- R Afleiding van Mazijk
- S Het Enkele Steen Model
- T Mogelijke oorzaken toename evenwichtsvalsnelheid
- U Numeriek Model
- V Verticale snelheidsprofielen
- W Modeluitkomsten vergeleken met data
- X Weerstandscoefficiënt versus Reynoldsgetal
- Y Parameters individueel gestorte stenen
- Z Gemiddelde groepssnelheden
- AA Afleiding verplaatsingen WL model met stroming



Samenvatting

Dit rapport is het resultaat van mijn afstudeeronderzoek dat is uitgevoerd aan de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, sectie waterbouwkunde en vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek bestaat uit een literatuurstudie en experimenten, verricht in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica. Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met Hydronamic BV. Dit onderzoek is uitgevoerd tussen januari en december 2003.

Het doel van dit onderzoek is het vergroten van het inzicht in de processen die optreden bij het storten van breuksteen met een zij(steen)storter in stromend water. De nadruk ligt hierbij op de invloed van stroming op de stortresultaten. De resultaten van dit onderzoek worden vergeleken met de uitkomsten van eerdere onderzoeken, teneinde de bestaande modellering te toetsen en eventueel aan te passen.

Tijdens de literatuurstudie bleek dat er al veel onderzoek is verricht naar de weerstandscoefficiënt van basisvormen. Naar de weerstandscoefficiënt van stortsteen is onderzoek gedaan door van der Wal [2002] en Kniess [1981]. De resultaten van Kniess zijn gebaseerd op een klein aantal metingen met een niet gebruikelijke definitie van de diameter. Van der Wal heeft de gemiddelde weerstandscoefficiënt bepaald van breuksteen met een kleine diameter. Er is geen onderzoek gedaan naar de invloed van stroming of turbulentie op de weerstandscoefficiënt van breuksteen.

Het Waterloopkundig Laboratorium heeft veel onderzoek verricht naar de invloed van stroming op de eigenschappen van een 'dump'. Hierbij is gekeken naar opbouw, vorm, oriëntering en offset. Bij de interpretatie van de resultaten van deze onderzoeken dient rekening gehouden te worden met het feit dat er in deze onderzoeken sprake was van bulkstorten en relatief hoge stroomsnelheden.

Op basis van de literatuurstudie is gekozen voor de volgende experimentele opzet:

1. Modelproeven ter bepaling van de weerstandscoefficiënt van breuksteen met een d_{n50} van 0,016 m in stilstaand water, teneinde deze te vergelijken met de weerstandscoefficiënt van breuksteen in stromend water.
2. Modelproeven ter bepaling van de weerstandscoefficiënt van breuksteen met een d_{n50} van 0,077 m bij stilstaand water.
3. Modelproeven met stromend water, waarbij wordt aangenomen dat er bij het storten met een zijstorter sprake is van een individueel of beperkt groepsgedrag van de gestorte steen, teneinde de meeneemcoëfficiënten, eerder bepaald door het Waterloopkundig Laboratorium, te toetsen.

De modelproeven met stilstaand water zijn uitgevoerd in het 'aquarium', een waterbak met dimensies van 2,5 x 2,5 x 2 m. Van 234 stenen is de evenwichtsvalsnelheid bepaald. Ook is er een beperkt aantal proeven met steengroepen in het aquarium uitgevoerd.

De overige proeven zijn uitgevoerd in een stroomgoot. De afmetingen van deze stroomgoot bedragen 35 x 0,8 x 0,85 m.

De proeven ter bepaling van de evenwichtsvalsnelheid van individuele stenen in de stroomgoot zijn uitgevoerd bij 3 verschillende stroomsnelheden: 0,10; 0,22; en 0,40 m/s. Van 100 stenen is de optredende evenwichtsvalsnelheid bepaald. De proeven waarbij steengroepen met beperkte groottes zijn gebruikt, zijn uitgevoerd met snelheden van 0; 0,10; 0,22 en 0,40 m/s. Hierbij zijn 2 oriënteringen op de stroming aangehouden, de lengteas dwars op, en evenwijdig aan de stroming. Er is gewerkt met groepsgroottes van 50, 100, 150 en 200 stenen.

De resultaten, volgend uit de proeven met stilstaand water, uitgevoerd in het aquarium (1 en 2), leiden tot de volgende conclusies:

- De gemiddelde weerstandscoefficiënt van stenen met een d_{n50} van 0,016 m en een $\mu_{L/d}$ van 1,75 is: $\mu_{Cd,n} = 1,43$ met een spreiding van $\sigma_{Cd,n} = 0,22$.
- De gemiddelde weerstandscoefficiënt van stenen met een d_{n50} van 0,077 m en een $\mu_{L/d}$ van 1,98 is: $\mu_{Cd,n} = 1,64$ met een spreiding van $\sigma_{Cd,n} = 0,30$.

De weerstandscoefficiënt van breuksteen in de praktijk zal een waarde van ongeveer 1,6 aannemen. Deze stelling is gebaseerd op de volgende punten:

- De L/d verhouding van breuksteen in de praktijk is groter dan de L/d verhouding van de stenen met een d_{n50} van 0,016 m, dit zorgt voor een grotere weerstandscoefficiënt.
- De grenslaagstroming rondom een steen wordt turbulent bij een diameter van 0,15 m, dit zorgt voor een verlaging van de weerstandscoefficiënt.
- De gemiddelde L/d verhouding van een steen neemt in de praktijk af naarmate de diameter van de steen groter wordt, dit zorgt eveneens voor een verlaging van de weerstandscoefficiënt.

De resultaten van de experimenten met individuele stenen, uitgevoerd in de stroomgoot zijn gebruikt om:

- De invloed van de stroming op de evenwichtsvalsnelheid te bepalen.
- De meeneemcoëfficiënt zoals die is voorgesteld door het Waterloopkundig Laboratorium te toetsen.
- Een model op te stellen, aan de hand van het Enkele Steen Model en het offsetmodel van het Waterloopkundig Laboratorium.

Uit de resultaten van experimenten is naar voren gekomen dat de evenwichtsvalsnelheden van individuele stenen toenemen bij toenemende stroomsnelheid. De oorzaak hiervoor moet gezocht worden in een fase-overgang van de grenslaagstroming om de steen, veroorzaakt door de turbulentie van het stromende water.

De variabele evenwichtsvalsnelheid veroorzaakt samen met de invloed van de snelheidsverticaal een met toenemende stroomsnelheid afnemende meeneemcoëfficiënt. De in dit rapport bepaalde meeneemcoëfficiënt van individueel gestorte stenen komt echter goed overeen met de meeneemcoëfficiënt bepaald door het Waterloopkundig laboratorium.

Het in dit rapport opgestelde model voor de kansverdeling van de uitwijkingen van een individueel gestorte steen in stromend water heeft de volgende vergelijking:

$$f_{\underline{x}}(x) = \frac{1}{c' \sqrt{2\pi \cdot h \cdot d_n}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \frac{h \sqrt{C_d/2 \cdot \bar{U}}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}}{c' \sqrt{h \cdot d_n}} \right)^2}$$

Dit is de vergelijking van een normale verdeling met een gemiddelde $\mu = h \frac{\sqrt{C_d/2 \cdot \bar{U}}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}$, en

een spreiding $\sigma_N = c' \sqrt{h \cdot d_{n50}}$.

De resultaten van dit model komen goed overeen met de resultaten van de experimenten met individueel gestorte stenen. De uitwijkingen gedragen zich normaal verdeeld bij alle beschouwde stroomsnelheden, zowel bij individueel gestorte stenen al bij groepsgewijs



gestorte stenen. De spreidingsconstante c' neemt toe bij toenemende stroomsnelheid. Dit is het gevolg van de optredende ontmenging, dat wil zeggen dat de kleinere stenen door hun lagere gewicht relatief verder verplaatsen en voor een grotere spreiding van de uitwijkingen zorgen.

De resultaten van de experimenten met groepen, uitgevoerd in de stroomgoot zijn gebruikt om:

- Het verschil tussen dwars op de stroming en individueel storten te bestuderen
- Het verschil tussen dwars en evenwijdig op de stroming storten te bestuderen

De resultaten van de proeven, waarbij met de lengteas dwars op de stroming gestort is, komen goed overeen met de resultaten van de proeven met individueel gestorte stenen. Enkele verschillen zijn:

- De grotere spreiding ten opzichte van individueel storten is te wijten aan steen – steen interacties tijdens de val en loslaateffecten.
- De gemiddeld lagere meeneemcoëfficiënt is te wijten aan loslaateffecten die zich uiten in hogere (groeps)valsnelheden.

Er kan geconcludeerd worden dat bij het dwars op de stroming storten van steengroepen met beperkte grootte de stenen zich als individueel gestort gedragen. Het model geeft dan ook een redelijke voorspelling van de optredende uitwijkingen.

De resultaten van de proeven waarbij met de lengteas evenwijdig aan de stroming gestort is, vertonen verschillen ten opzichte van de resultaten van proeven waarbij met de lengteas dwars op de stroming gestort is.

De offset neemt relatief gezien af bij toenemende stroomsnelheid. Dit is het gevolg van indrukking van de kop van de groep, de aangestroomde zijde. Hierdoor wordt de relatieve dichtheid in de kop van de groep groter en veroorzaakt een grotere groepsvalsnelheid. Tevens wordt de kracht van het stromende water 'opgevangen' zodat achterliggende stenen minder invloed ondervinden. Dit zorgt voor een lagere meeneemcoëfficiënt.

Het verschil in meeneemcoëfficiënt tussen dwars en evenwijdig gestorte groepen is volgens de uitgevoerde experimenten:

$$C_l = 0,95 \cdot C_b$$

Dit komt goed overeen met de waarden zoals die in de praktijk zijn bepaald. Het WL had hiervoor een factor 1/3 gevonden.

Bij het storten onder een hoek met de stroming moet er behalve toepassing van de juiste meeneemcoëfficiënten ook nog rekening gehouden worden met een extra horizontale verplaatsing door een liftkracht.

Het in dit rapport samengestelde model gaat ervan uit dat de uitwijkingen van een enkele steen, die door stromend water valt, bij een groot aantal herhalingen normaal verdeeld zijn. De juistheid van deze stelling dient nog onderzocht te worden.

Om de resultaten van dit rapport en voorgaande rapporten naar in situ waarden te kunnen opschalen zijn prototype proeven gewenst. Deze kunnen dan eventuele schaafeffecten ondervangen.



Symbolenlijst

Symbol	Omschrijving	Dimensie
A	oppervlakte dwarsdoorsnede stortprofiel	[m ²]
a	versnelling	[m/s ²]
A _s	aangestroomd oppervlak	[m ²]
b	breedte	[m]
C	Chezy coëfficiënt	[m ^{1/2} / s]
c'	spreidingsconstante ESM	[-]
C _b	meeneemcoëfficiënt in de breedte richting	[-]
C _d	weerstandcoëfficiënt in verticale richting	[-]
C _{d,n}	weerstandcoëfficiënt die door n % van de stenen onderschreden wordt	[-]
C _{d,50}	weerstandcoëfficiënt die door 50% van de stenen onderschreden wordt	[-]
C _l	meeneemcoëfficiënt in de x-richting	[-]
C _{lift}	lift coëfficiënt	[-]
d	kortste afstand tussen 2 platen waar een steen nog net tussendoor kan	[m]
d	diepte	[m]
D	diameter voorwerp (aangestroomd)	[m]
d ₁₅	diameter waarbij 15 massa % door de zeef valt	[m]
d ₈₅	diameter waarbij 85 massa % door de zeef valt	[m]
D _b	diameter bol	[m]
D _{min}	minimale diameter	[m]
D _n	nominale diameter	[m]
D _{n,x}	nominale diameter die door X x 100 % wordt onderschreden	[m]
d _{n15}	nominale diameter die door 15 % wordt onderschreden	[m]
d _{n50}	nominale diameter die door 50 % wordt onderschreden	[m]
d _{n85}	nominale diameter die door 85 % wordt onderschreden	[m]
f	versnelling t.g.v. externe kracht in de x _i richting	[m/s ²]
F _d	weerstandskraft	[N]
F _g	zwaartekracht	[N]
F _{lift}	liftkracht	[N]
F _{opw}	opwaartse kracht	[N]
F _{res}	resulterende kracht	[N]
F _u	kracht van stromend water op steen	[N]
F _x	kracht in de x-richting	[N]
F _y	kracht in de y-richting	[N]
g	versnelling van de zwaartekracht	[m/s ²]
h	waterdiepte	[m]
h _k	waterdiepte op een afstand van 3 x de diepte stroomopwaarts van de overlaat	[m]
k _r	2 x d _{n50} bodem	[m]
L	grootst mogelijke afstand tussen 2 punten van een steen	[m]
l	lengte	[m]
L/d	lengte / breedte verhouding steen	[-]
L/d ₅₀	L/d verhouding die door 50 % van de stenen wordt onderschreden	[-]
L _{dek}	lengte stortdek	[m]
m	massa	[kg]
M _{steen,droog}	massa droge steen	[kg]
M _{steen,subm}	massa steen onder water	[kg]

Symbool	Omschrijving	Dimensie
$M_{\text{verpl.water}}$	massa van het verplaatste water	[kg]
n	aantal stenen	[-]
p	waterdruk	[Pa]
Q	debiet	[m ³ /s]
R	hydraulische straal	[m]
r	straal cirkel	[m]
R^2	determinatiecoëfficiënt	[-]
Re	Reynoldsgetal	[-]
S_{Cd}	standaard deviatie weerstandcoëfficiënt	[-]
S_{dn}	standaard deviatie nominale diameter	[m]
$S_{L/d}$	standaard deviatie L/d verhouding	[-]
St	dimensieloos getal van Strouhal	[-]
S_{ver}	verticale verplaatsing	[m]
S_w	standaard deviatie evenwichtsvalsnelheid	[m/s]
S_x	maximale horizontale verplaatsing	[m]
T	periode van wervelloslating	[s]
U	snelheidsverschil tussen water en lichaam	[m/s]
u_x	component van de snelheid in x_i richting	[m/s]
U_{gem}	gemiddelde groepssnelheid horizontaal	[m/s]
U_{links}	horizontale snelheid linkerkant groep	[m/s]
U_{rechts}	horizontale snelheid rechterkant groep	[m/s]
U_{steen}	horizontale snelheid steen	[m/s]
$U_{\text{stroming,x}}$	stroomsnelheid in de x-richting	[m/s]
$U_{\text{stroming,y}}$	stroomsnelheid in de y-richting	[m/s]
U_{stroom}	horizontale stroomsnelheid	[m/s]
$\bar{U}$	dieptegemiddelde horizontale stroomsnelheid gemeten in het midden van de goot	[m/s]
$\bar{U}_c$	dieptegemiddelde kritische stroomsnelheid	[m/s]
V_s	volume van het voorwerp	[m ³]
$V_{\text{verpl water}}$	volume van het verplaatste water	[m ³]
w	evenwichtsvalsnelheid	[m/s]
W_{50}	evenwichtsvalsnelheid die door 50 % van de stenen wordt overschreden	[m/s]
W_{boven}	verticale snelheid bovenkant groep	[m/s]
W_{front}	frontvalsnelheid	[m/s]
W_{gem}	gemiddelde groepsvalsnelheid bepaald door het	[m/s]
x_{maz}	diepte waarop (100x)a% van de evenwichtsvalsnelheid bereikt	[m]
x	offset in de x-richting	[m]
y	offset in de y-richting	[m]
α	hoek schip met stromingsrichting	[-]
α_{maz}	bereikt percentage evenwichtsvalsnelheid	[%]
β	bewegingshoek ten opzichte van de vertikaal	[-]
β_{maz}	coëfficiënt evenwichtsvalsnelheid vergelijking Mazijk	[m ⁻¹]
ζ	vormfactor	[-]
η	dynamische viscositeit van water	[Pa·s]



Symbol	Omschrijving	Dimensie
μ_{Cd}	gemiddelde weerstandscoefficient	[-]
$\mu_{L/d}$	gemiddelde L/d verhouding	[-]
$\mu_{MLS,Cd}$	maximum likelihood schatter voor de gemiddelde weerstandscoefficient	[-]
μ_{MLS,d_n}	maximum likelihood schatter voor de gemiddelde nominale diameter	[m]
$\mu_{MLS,L/d}$	maximum likelihood schatter voor de gemiddelde L/d verhouding	[-]
μ_x	gemiddelde van de verplaatsingen in de x-richting	[m]
μ_y	gemiddelde van de verplaatsingen in de y-richting	[m]
$\mu_{MLS,w}$	maximum likelihood schatter voor de gemiddelde evenwichtsvalsnelheid	[m/s]
ν	kinematische viscositeit	[m ² /s]
ν	vormfactor	[-]
ξ	vormfactor	[-]
ρ	massadichtheid van de vloeistof	[kg/m ³]
ρ_s	massadichtheid van het voorwerp	[kg/m ³]
ρ_w	massadichtheid van het water	[kg/m ³]
$\sigma_{C_d,n}$	standaard deviatie weerstandscoefficient	[-]
$S_{MLS L/d}$	maximum likelihood schatter voor de standaard deviatie van de L/d verhoudingen	[-]
$S_{MLS w}$	maximum likelihood schatter voor de standaard deviatie van de evenwichtsvalsnelheid	[m/s]
$S_{MLS Cd}$	maximum likelihood schatter voor de standaard deviatie van de weerstandscoefficient	[-]
S_w	spreiding rond lineaire regressielijn evenwichtsvalsnelheid	[m/s]
$S_{rayleigh}$	coëfficiënt Rayleighverdeling	[m]
$S_{MLS Dn}$	maximum likelihood schatter voor de standaard deviatie van de nominale diameter	[m]
σ_N	spreiding volgens het ESM	[m]
$\sigma_{L/d}$	standaard deviatie L/d verhouding	[-]
σ_Δ	traagheidsstraal driehoeksprofiel	[m]
ϕ	wegspringhoek	[°]
ϕ_m	maximale hellingshoek stortmateriaal	[°]
ϕ_f	hoek front	[°]
ϕ_g	grenshoek	[°]
ϕ_s	stabiele hoek	[°]
ψ_c	kritieke Shields parameter	[-]
ω	radiaal frequentie	[1/s]
Δ	relatieve dichtheid	[-]
Δa_1	verschil in projectie 1	[m]
Δa_2	verschil in projectie 2	[m]
?KS	toelaatbaar verschil tussen datapunt en gefitte verdeling	[-]
?max	maximaal optredend verschil tussen datapunt en gefitte verdeling	[-]



1 Inleiding

1.1 Achtergrond van het onderzoek

Er worden over de hele wereld jaarlijks grote hoeveelheden (breuk)steen of andere materialen in het water gestort. Dit heeft tot doel het beschermen tegen invloeden van buitenaf. Dit is het geval bij het bestorten van zinktunnels, leidingen en bodems langs kademuuren ter bescherming tegen respectievelijk vallende of slepende ankers en ontgronding. Ook grondwater doorlatende funderingen waar caissons op geplaatst kunnen worden en filter- en egaliseerfuncties in de funderingen van pijpleidingen behoren tot de mogelijke toepassingen.

Voor het plaatsen van deze hoeveelheden (breuk)steen zijn een aantal methoden mogelijk. De stornauwkeurigheid van deze methoden is verschillend. Alle stenen die niet binnen het te bestorten gebied terecht komen, kunnen over het algemeen als verloren worden beschouwd. Aangezien steen kostbaar is, is het winstgevend om nauwkeurig te kunnen voorspellen hoe de spreiding en offset van de stenen zich gedraagt.

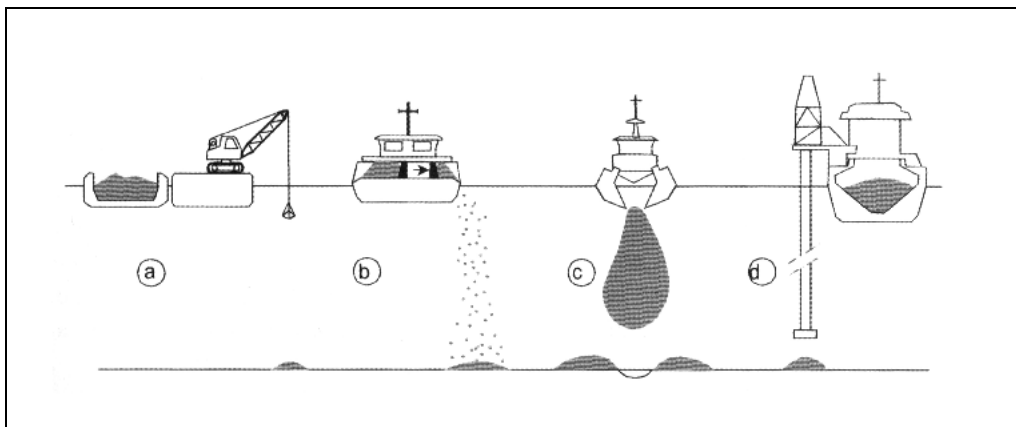
Er zijn een aantal methoden om steen te plaatsen. Deze zijn te verdelen in 2 categorieën:

1. De steen op diepte brengen en nauwkeurig plaatsen.

Dit is het geval indien er gebruik gemaakt wordt van een kraan of een *fall-pipe* schip. Met de hedendaagse technieken voor plaatsbepaling kan zo, met minimaal verlies de benodigde hoeveelheid steen geplaatst worden.

2. De stenen vanaf het wateroppervlak storten.

Dit is het geval indien er met een splijtbak of zijstorter gewerkt wordt. Deze schepen zijn meestal uitgerust met een Dynamic Positioning System en kunnen nauwkeurig hun lading lossen. De nauwkeurigheid van een stort hangt in dit geval af van de heersende diepte en het optredende golfbeeld en stromingen.



figuur 1-1 Stortmethoden (Schiereck [2000])

Dit onderzoek zal zich gaan richten op het storten van steen met een zijstorter.

1.2 Probleembeschrijving

Het storten van breuksteen met een zijstorter wordt op steeds grotere dieptes toegepast. Boskalis wil de nauwkeurigheid van het storten van steen met een zijstorter vergroten. Dit om het verlies en dus de te storten hoeveelheid steen te minimaliseren.

Het Waterloopkundig Laboratorium (WL) heeft in WL [1983, M1768] een voorstel gedaan om de offset tussen het zwaartepunt van een stort en de stortlijn te bepalen. Dit rekenmodel is beschreven in paragraaf 2.4.3.

De offset (zie figuur 2-5) van stenen gestort met een zijstorter wordt o.a. bepaald door onderstaande factoren (zie hoofdstuk 2 voor een uitgebreide beschrijving van het stortproces):

1. De beweging die de stenen meekrijgen als ze van het dek afgeschoven worden.
2. Het horizontale en verticale versnellings- of vertragingstraject.
3. Het snelheidsprofiel van het water over de verticaal.
4. De hoek van aanstroming.
5. De diepte waarover de steen valt.
6. De evenwichtsvalsnelheid van de steen (en daarmee de diameter).
7. De hoeveelheid stenen die tegelijk overboord gaat.

De invloed van de initiële beweging (1) is bestudeerd door WL [1989, Q673]. De resultaten van dat onderzoek zijn kort samengevat in paragraaf 2.4.1.

Het snelheidsprofiel, de hoek van aanstroming en de diepte zijn omstandigheden die te meten en te controleren zijn.

De evenwichtsvalsnelheid (6) van een steen is afhankelijk van de vorm, diameter, relatieve dichtheid en de weerstandscoefficiënt. De resultaten van de in dit onderzoek uitgevoerde experimenten laten zien dat er geen sprake is van 'de evenwichtsvalsnelheid'. Doordat stromend water van invloed is op de grenslaagstroming van een steen is de weerstandscoefficiënt niet constant. De evenwichtsvalsnelheid van een steen is afhankelijk van de stroomsnelheid.

De hoeveelheid steen die tegelijk overboord gaat (7) is van invloed op het versnellings- en / of vertragingstraject (3). Een groep stenen vertoont een ander valgedrag dan een enkele steen. Een van de conclusies in van der Wal [2002] is, dat er pas een groepseffect optreedt, indien er meer dan 50 tot 100 stenen tegelijk vallen. Slack [1963] constateerde echter bij een veel kleiner aantal objecten al groepseffecten. Van Oord [1996] constateerde bij het achter elkaar storten van steen enige invloed op de spreiding. Het is onbekend bij welke hoeveelheden steen en bij welke omstandigheden er al een groepsinteractie te bemerken is.

De stroomsnelheid is van invloed op de offset door meevoering¹. Het is te verwachten de stroomsnelheid tevens van invloed is op de spreiding van de stenen rond het zwaartepunt evenwijdig aan en loodrecht op de stromingsrichting. Dit komt ook naar voren uit de resultaten van de experimenten.

¹ In dit rapport wordt voor de meevoering door stroming de omschrijving "offset" gebruikt. Hierbij is dus geen sprake van verplaatsing door afrolverschijnselen, zoals beschreven in hoofdstuk 2.4.1.



1.3 Probleemstelling

In paragraaf 1.2 zijn in het kort een aantal problemen beschreven rondom het bepalen van de offset van een steen gestort in stromend water. Daaruit zijn een aantal punten gevolgd die de nauwkeurigheid van het beschouwde model in twijfel trekken. De vorm, ruwheid, diameter en relatieve dichtheid van een steen of steengroep, beïnvloeden de evenwichtsvalsnelheid en het versnellings- en / of vertragingstraject, dus de offset. Dit heeft gevolgen voor de spreiding rond het zwaartepunt.

Het probleem is als volgt te definiëren:

- Wat is de invloed van de stroming op de offset van een dump en de spreiding daaromheen.
- Beïnvloedt het stromende water de verticale evenwichtsvalsnelheid van een steen, en dus de offset.
- Treden er bij het storten van groepen met een zijstorter in stromend water groepseffecten op.

1.4 Doelstelling

Het uitgangspunt van dit rapport is het verbeteren van inzicht in het storten met een zijstorter. Het doel van dit onderzoek is, door het uitvoeren van experimenten, een betere voorspelling van de offset van een dump en de spreiding daaromheen te ontwikkelen. De doelen kunnen als volgt worden samengevat:

- Onderzoek doen naar de invloed van de stroming op de offset van en de horizontale spreiding rond het zwaartepunt van het stortprofiel.
- Vaststellen of horizontale stroming invloed heeft op de verticale evenwichtsvalsnelheid.
- Bestuderen of er een groepseffect waar te nemen is bij het storten met een gemodelleerde zijstorter in stromend water.

1.5 Structuurbeschrijving

De structuur van dit rapport is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van het stortproces van een zijstorter. In hoofdstuk 3 en 4 wordt de theorie achter het valgedrag van respectievelijk een enkele steen en steengroepen beschreven. In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op mogelijke optredende schaaffecten. In hoofdstuk 6 wordt beschreven op welke manier de experimenten in het aquarium zijn uitgevoerd waarna in hoofdstuk 7 de resultaten van deze experimenten worden gepresenteerd. De manier van uitvoeren van de experimenten uitgevoerd in de stroomgoot wordt in hoofdstuk 8 beschreven, waarna in hoofdstuk 9 en 10 de resultaten van de experimenten met stroming voor individuele en kleine steengroepen worden gepresenteerd. De conclusies en aanbevelingen uit dit onderzoek volgen in hoofdstuk 11.

De bijlagen worden in een apart document aangereikt.



2 Het storten met een zijstorter

2.1 Inleiding

Het plaatsen van stortsteen op de daarvoor aangewezen plek wordt vaak gerealiseerd met een splijtbak of zijstorter. Bij het storten met een splijtbak treedt er een groepsproces op dat niet te vergelijken is met het stortgedrag van een zijstorter. Dit onderzoek gaat zich richten op het verkrijgen van een beter inzicht in het valgedrag van een dump met een zijstorter. Een uitgebreide beschrijving van het stortproces van zijstorters en splijtbakken is te vinden in Bouwdienst Rijkswaterstaat [1991] en Cregten [1995].

In dit rapport wordt het stortproces in 4 fasen ingedeeld:

1. Positie en gedrag stortschip.
2. Het bresgedrag van het stortmateriaal.
3. Verplaatsing van de steen boven en onder water.
4. Bodemgedrag van de steen.

De 4 genoemde fasen worden besproken in de paragrafen 2.2 tot en met 2.5

2.2 Positie en gedrag stortschip

2.2.1 Gedrag en positionering

Steenstorters kunnen op een aantal verschillende manieren georiënteerd worden en vervolgens die positie handhaven.

Zo is het gebruikelijk dat het schip verhaald werd met behulp van lieren verbonden met een verankerd ponton. Er kon zo een vaste koers worden gehandhaafd en het was ook mogelijk om met verschillende verhaalsnelheden te storten. De methode is erg nauwkeurig maar wel tijdrovend.

Tegenwoordig wordt er veel gebruik gemaakt van DP systemen (Dynamic Positioning). Het schip kan met behulp van moderne apparatuur zeer nauwkeurig zijn plaats en koers bepalen. Op die manier kan de lading precies op de gewenste locatie worden losgelaten. Bij deze methode zijn de omstandigheden tijdens het storten zoals het golfklimaat en het stroombeeld bepalend voor de nauwkeurigheid.

2.2.2 Plaatsbepaling

Om nauwkeurig te kunnen storten wordt er een positie in x- en y-coördinaten bepaald. Er zijn 2 systemen in gebruik.

Het optische systeem.

Hierbij wordt gebruik gemaakt van laserapparatuur. Door het meten van de afstand tussen de bekende posities van de lasers en de ontvanger kan de exacte positie van het schip worden bepaald.

De nadelen van deze methode zijn:

- Afhankelijk van de zichtkwaliteit.
- Het noodzakelijk zijn van een ononderbroken zichtlijn tussen laser en schip.
- Een maximale afstand van 10 km tussen laserstation en schip.

Het DGPS systeem

Het DGPS (Differential Global Positioning System) koppelt de informatie van het GPS satellietstelsel met de informatie van een vaste zender op de wal, waarvan de positie bekend is. Op die manier wordt een zeer nauwkeurige meting van de positie gemaakt. Er zijn verschillende soorten DGPS die zich kenmerken door een bepaald verversingsinterval en daarmee samenhangend maximaal bereik. Van onnauwkeurig met een groot verversingsinterval en een groot bereik tot nauwkeurig met een kleiner bereik:

- Long Range DGPS.
- Short Range DGPS.
- Real Time Kinematic OTF (RTK).

Het nadeel van deze methoden is dat de nauwkeurigheid van het signaal door de eigenaar van de satelliet veranderd kan worden.

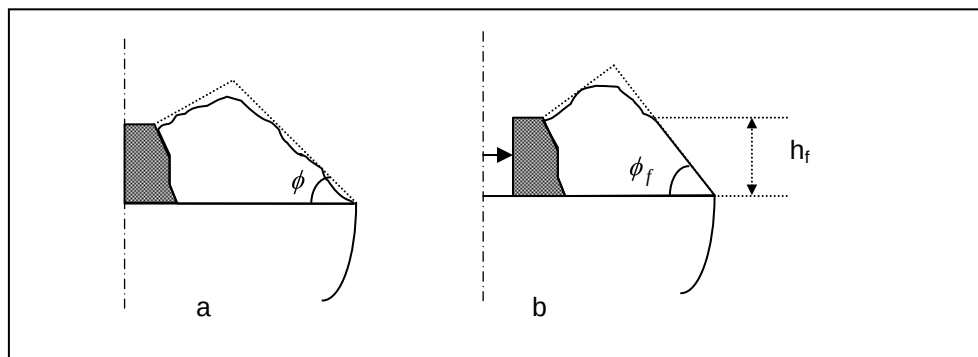
2.3 Het bresgedrag van stortmateriaal

2.3.1 Oorzaak bresgedrag

Het bresgedrag beschrijft het gemiddelde en de onregelmatigheid van de hoeveelheid materiaal die per tijdseenheid overboord gaat. Doordat er tijdens het storten met een zijstorter allerlei onregelmatigheden in het bresgedrag voorkomen, kan dit niet als een continu proces worden opgevat.

Het proces is als volgt:

De lading wordt op het schip aangebracht. Daarbij stelt zich een hoek van natuurlijk talud in. Zie figuur 2-1 a.

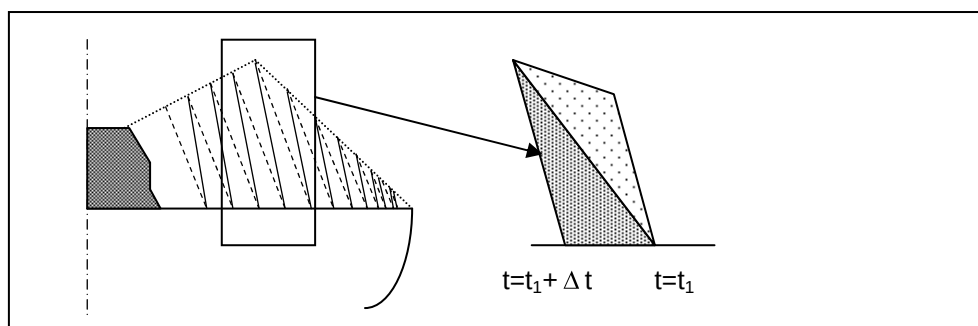


figuur 2-1 Beladingsvorm en weergave valfront

Als de schuif naar rechts beweegt wordt de berg steen ingedrukt. Daarbij stelt zich een hoek in die groter is dan de hoek van het natuurlijk talud. Deze bouwt zich op totdat een grenshoek bereikt wordt waarna het talud instort. Die instorting houdt op als er weer een stabiele hoek bereikt wordt. Deze hoeken zijn afhankelijk van de herkomst, afmetingen en de soort te storten steen. De hoek van het valfront schommelt tussen deze grenshoek en stabiele hoek.

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

Dit resulteert in het volgende beeld:

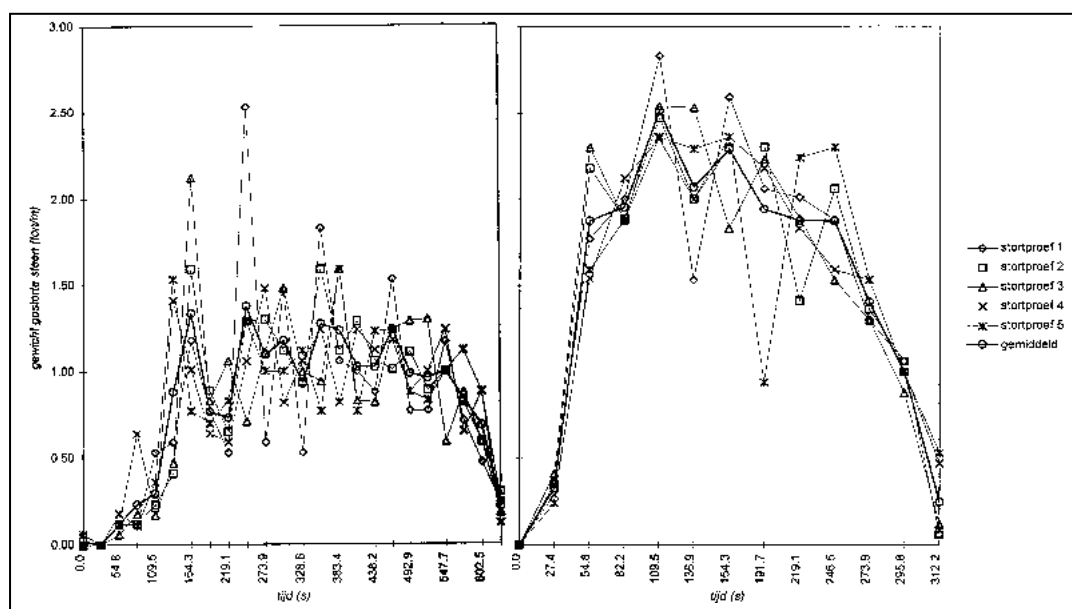


figuur 2-2 Instellen valfront

Het principe geschetst in figuur 2-2 kan als volgt beschreven worden.

Op t_1 , als de lading een hoek ϕ_g heeft stort het talud in en valt er een hoeveelheid steen gelijk aan het licht gearceerde gedeelte overboord. Daarna vallen er af en toe wat stenen overboord tussen $t = t_1$ en $t = t_1 + \Delta t$. De hoeveelheid die in die periode overboord gaat is gelijk aan het donker gearceerde gedeelte. Dit gaat door totdat er zich opnieuw een hoek ϕ_g gevormd heeft. Dit proces zal zich steeds blijven herhalen. In het begin zal de lading met kleine tussenpozen afschuiven. Daarna zal de periode tussen de afschuivingen toenemen totdat de maximale hoogte van de berg stenen bereikt wordt. Vervolgens zal de tijd tussen de afschuivingen weer afnemen.

Dit gedrag komt ook naar voren in figuur 2-3.



figuur 2-3 Bresgedrag, links schuifsneldheid 0,55 m/min, rechts schuifsneldheid 1,10 m/min. (WL Q673[1989])

2.3.2 Aspecten van invloed op het bresgedrag

Eigenschappen stortmateriaal

De belangrijkste eigenschappen die het bresgedrag kunnen beïnvloeden zijn de D_{n50} , de breedte van de sortering, de $\frac{d_{85}}{d_{15}}$ en de hoek van inwendige wrijving. Voor een uitgebreide omschrijving van de eigenschappen van breuksteen zie 6.4.1. Het is verstandig vooraf aan het 'echte' stortwerk een aantal proefstorten uit te voeren om zo een stortkarakteristiek vast te stellen.

Ladingsverdeling stortschip

Om discontinuïteiten in het bresgedrag zoveel mogelijk te voorkomen is het van belang om aandacht te besteden aan de ladingsverdeling. Dat wil zeggen: het dwarsprofiel over de gehele lengte zo regelmatig mogelijk te houden en het waarborgen van een gelijkmatige verdeling van de lading. Het is in de praktijk echter niet gemakkelijk om een lading steen gelijkmatig over het dek te verdelen.

De schuifsnelheid

Bij een zijstorter is het mogelijk om de schuifsnelheid te veranderen, waarmee een optimale verhouding tussen schuifsnelheid en verhaalsnelheid kan worden gevonden.

Scheepsbewegingen

Het is mogelijk dat indien een zijstorter aan het storten is, er door de beweging van het schip eerder dan door het principe zoals geschetst in figuur 2-2 een grenshoek wordt bereikt. Deze onregelmatigheid wordt door het random walk gedrag van steen en het toepassen van meerdere stortgangen uitgemiddeld.

2.4 Verplaatsing van steen boven en onder water

Bij de verplaatsing van steen boven en onder water wordt onderscheid gemaakt tussen een viertal factoren:

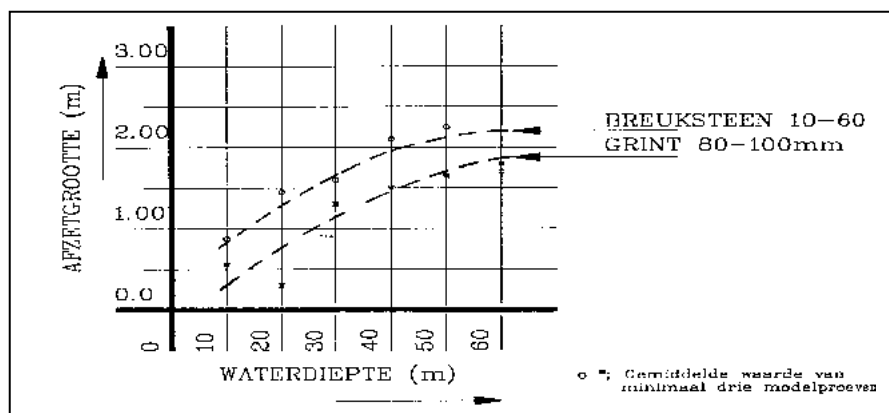
1. Verplaatsing van steen boven water
2. De invloed van de golven op de spreiding van de steen
3. De invloed van de stroming op de verplaatsing van de steen
4. De invloed van de spreiding van de steen door het random karakter van het valgedrag

De punten 1, 2 en 3 zullen in dit hoofdstuk behandeld worden. De oorzaken verantwoordelijk voor de spreiding van de steen (punt 4) worden beschreven in de paragrafen 3.3 en 3.4.

2.4.1 Verplaatsing van steen boven water

Doordat de stenen tijdens het afrollen / schuiven al een horizontaal duwtje krijgen ondergaat het materiaal al een verplaatsing. In WL [1989, Q673, deel 2] is hiernaar onderzoek verricht. Er is gebleken dat deze offset afhankelijk is van de vorm van het materiaal.

De horizontale snelheid waarmee de steen het water raakt zal zich aanpassen aan de snelheid van het water. Naarmate er een groter snelheidsverschil tussen steen en stromend water optreedt, zal het aanpassingstraject zich verder over de diepte uitstrekken, totdat er geen horizontaal snelheidsverschil meer is. Zie figuur 2-4. Deze figuur is een samenvatting van de resultaten van bovenstaand onderzoek.



figuur 2-4 Invloed diepte en vorm op offset in stilstaand water (Bouwdienst RWS [1991])



2.4.2 De invloed van golven op de spreiding van de steen

Het is bijna onmogelijk om te storten zonder dat er golven aanwezig zijn. In WL [1989, Q673, deel 2] wordt er geconcludeerd dat de invloed van de golven op de horizontale verschuiving verwaarloosbaar klein is. Reden hiervoor is de orbitaalbeweging, die zorgt voor een gemiddeld neutrale verplaatsing. Deze orbitaalbeweging wordt bij toenemende diepte kleiner. De golfbeweging kan ook op het schip een beweging veroorzaken. De invloed van de golven is echter beperkt.

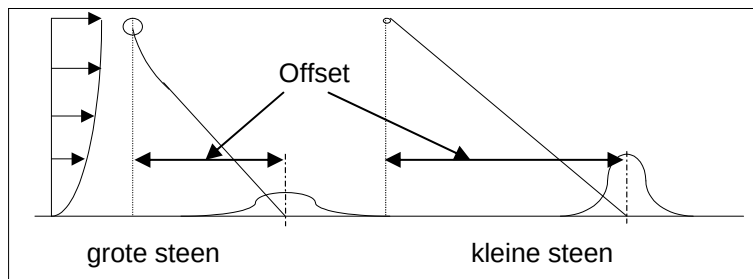
2.4.3 Verplaatsing van steen door stroming

Er wordt gestort in rivieren, estuaria en op zee. Over het algemeen is er dus sprake van storten in stromend water. Er treedt dan een extra verplaatsing op van de gestorte stenen. Deze verplaatsing is afhankelijk van:

- De waterdiepte.
- De karakteristieke steendiameter.
- De stroomsnelheid.
- De stroomrichting.
- De weerstandscoefficiënt van de steen.
- De relatieve dichtheid.
- De onderlinge beïnvloeding van de stenen.

Op het laatste punt wordt in paragraaf 4.4 dieper ingegaan.

In WL [1983, M1768] wordt de invloed van stroming op het stortresultaat bestudeerd. De volgende kwalitatieve conclusies zijn gemaakt, mede op basis van eerder uitgevoerde onderzoeken: WL [1983, M1244] en WL [1960, M598-IV, meetserie 2, 9, 10, 11 en 12].



figuur 2-5 Offset en ontmenging

- Bij het storten van grind in stromend water treedt ontmenging op, waarbij het grovere materiaal op het bovenstroomse talud terechtkomt.
- Bij het storten in stroming is het bovenstroomse talud steiler dan het benedenstroomse. Een verklaring hiervoor zou ontmenging kunnen zijn.
- $\tan(\beta)$ neemt lineair toe met de gemiddelde stroomsnelheid indien er gestort wordt met fosforslakken. (Zie figuur 2-6 voor de definiëring van β)

De afleiding van de verplaatsingsformules ontwikkeld door het WL zal hieronder gegeven worden. De horizontale kracht die op een steen in stromend water werkt is:

$$F_U = \frac{1}{2} \rho_w A_s C_l (U_{stroom} - U_{steen})^2 \quad (2.1)$$

Waarin: C_l	weerstandscoefficiënt in horizontale richting	[-]
ρ_w	massadichtheid van het water	[kg/m ³]
A_s	aangestroomd oppervlak	[m ²]
U_{stroom}	horizontale stroomsnelheid	[m/s]
U_{steen}	horizontale snelheid steen	[m/s]

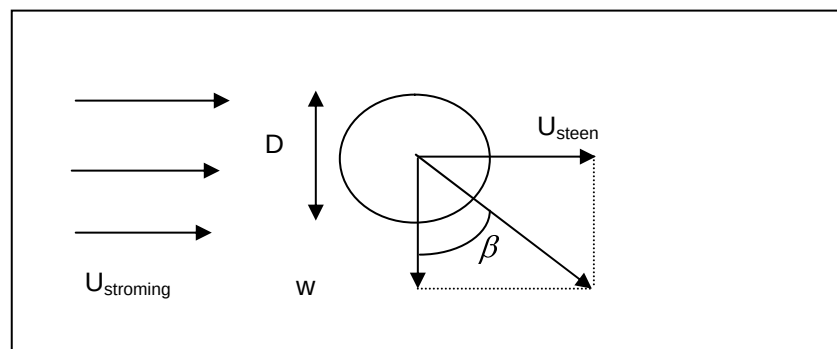
Toepassing van de 2^e wet van Newton ($F = ma$) geeft:

$$\frac{1}{2} \rho_w A_s C_l (U_{stroom} - U_{steen})^2 = V_s (\rho_s - \rho_w) \frac{dU_{steen}}{dt}$$

Het horizontale versnellingstraject van een steen is dus te bepalen met behulp van de volgende vergelijking:

$$\frac{dU_{steen}}{dt} = \frac{A_s}{2V_s} \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} C_l (U_{steen} - U_{stroom})^2 \quad (2.2)$$

Waarin: ρ_s massadichtheid van het voorwerp [kg/m³]
 V_s volume van het voorwerp [m³]



figuur 2-6 Horizontale aanstroming steen

Als alle normaal geldende waarden worden ingevuld blijkt dat de steen, na een korte inspeelperiode, even snel horizontaal voortbeweegt als het water. Er kan worden aangenomen dat $U_{steen} = U_{stroom}$.

De volgende regel kan worden aangehouden:

$$\tan \beta = \frac{U_{steen, \text{horizontaal}}}{w} = \frac{\bar{U}_{stroom}}{w} \quad (2.3)$$

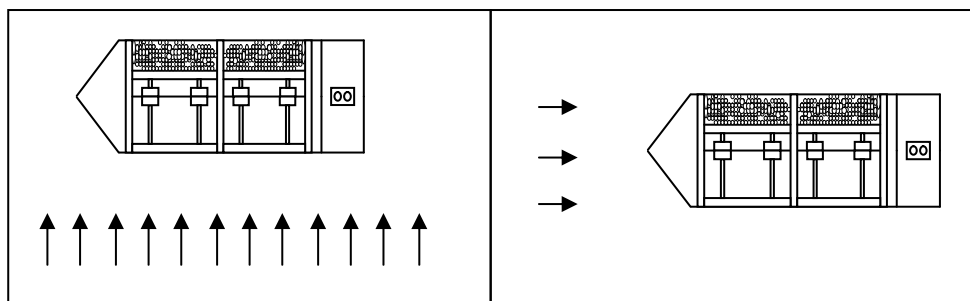
Waarin: β bewegingshoek ten opzichte van de verticaal [-]
 w evenwichtsvalsnelheid [m/s]

Met behulp van vergelijking 3.8 volgt hieruit:

$$\tan \beta = \frac{U_{stroom}}{w} = cst \cdot \frac{\bar{U}_{stroom}}{\sqrt{\Delta g D}}$$

Naar aanleiding hiervan is een rekenmodel ontwikkeld aan de hand van modelproeven. De afleiding van het model is gegeven in bijlage AA. Hieronder zullen de hoofdlijnen beschreven worden.

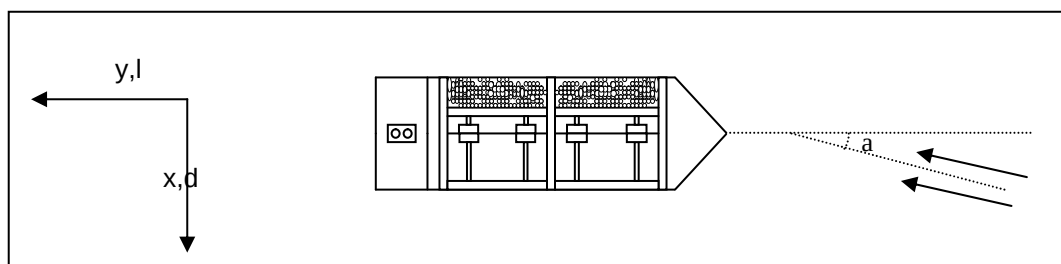
Er wordt in het model uitgegaan van 2 verschillende aanstromingshoeken. Zie figuur 2-7 en figuur 2-8. Deze worden vervolgens samen gecombineerd om de totale verplaatsing te bepalen.



figuur 2-7 Dwars op de stroming storten

figuur 2-8 Storten met de kop op de stroming

In onderstaande figuur is het assenstelsel uitgezet.



figuur 2-9 Assenstelsel en principeschets rekenmodel WL

De verplaatsing van het zwaartepunt van een stort ten opzichte van het punt waar de stenen in het water vallen voor storten met stroming is te berekenen met de onderstaande vergelijkingen:

Verplaatsing in de x-richting (breedterichting van het schip):

$$x = \sin(\alpha) \cdot \frac{h\bar{U}}{\sqrt{\Delta g d_n}} \sqrt{(C_l \cos(\alpha))^2 + (C_b \sin(\alpha))^2} \quad (2.4)$$

Verplaatsing in de y-richting (lengterichting van het schip):

$$y = \cos(\alpha) \cdot \frac{h\bar{U}}{\sqrt{\Delta g d_n}} \sqrt{(C_l \cos(\alpha))^2 + (C_b \sin(\alpha))^2} \quad (2.5)$$

Waarin: x	offset in de x-richting	[m]
y	offset in de y-richting	[m]
h	waterdiepte	[m]
$\bar{U}$	dieptegemiddelde stroomsnelheid	[m/s]
w	evenwichtsvalsnelheid	[m/s]
C_l	meeneemcoëfficiënt in de x-richting	[-]
C_b	meeneemcoëfficiënt in de y-richting	[-]
α	hoek lengteas schip met stromingsrichting	[°]

In hoofdstuk 9.2.6 wordt betoogd dat $C_b = \sqrt{\frac{1}{2}} C_d$. Uit figuur 9-1 blijkt dat dit dezelfde resultaten geeft als de formules 2.4 en 2.5. Het is dus verantwoord om de factoren C_b en C_l uit de formules 2.4 en 2.5 te vervangen door respectievelijk $C_b = \sqrt{\frac{1}{2}} C_d$ en

$C_l = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{1}{2}} C_d$, volgend uit hoofdstuk 10.3.3, formule 10.1.

In WL [1983,M1768] wordt voor C_i een waarde van $1/3C_b$ en voor C_b een waarde van 0,86 gegeven. Bouwdienst RWS [1991] geeft voor C_b een waarde van $0,86 \Delta^{-1/2}$ en voor C_i een waarde van $1/3C_b$. De nauwkeurigheid van de formule hangt af van de ijking van de parameters C_b en C_i . Deze parameters zijn experimenteel bepaald. In dit rapport wordt getracht beter gefundeerde parameters te bepalen aan de hand van experimenten.

Bij de experimenten van het WL was er sprake van bulkstorten, terwijl het model afgeleid is aan de hand van een enkele steen. Aandachtspunt is dat de parameters bepaald zijn met een omschrijving van de diameter van een steen uitgaande van een bol met gelijk volume. Deze zou dan overeenkomen met $1,24 \times d_n$. Hierdoor moeten de waarden van de parameters C_b en C_i worden gedeeld door $\sqrt{1,24}$ om een correcte vergelijking op te leveren met de parameters bepaald in dit onderzoek. In WL [1983,M1768] wordt op basis van WL [1983,M1244] eveneens geconcludeerd dat C_b 0,83 is. Deze waarde zal in dit rapport aangehouden worden als uitgangspunt. De correctie van bol naar kubus is dan ook niet van belang. In plaats van de parameter " C_d " gebruikt in de rapporten van het Waterloopkundig Laboratorium, wordt gebruik gemaakt van C_b . Dit om verwarring met de weerstandscoefficiënt van een enkele steen te voorkomen.

In de experimenten wordt gebruik gemaakt van een assenstelsel waarvan de x-richting in de positieve stroomrichting wijst. Aangezien er vooral loodrecht op en evenwijdig aan de stroming wordt gestort kan volstaan worden met de volgende formules:

Bij dwars op de stroming storten:

$$offset = h \frac{\bar{U}}{w} = h \frac{\sqrt{C_d/2} \cdot \bar{U}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}} \quad (2.6)$$

Bij evenwijdig aan de stroming storten:

$$offset = h \frac{\bar{U}}{w} = h \frac{0,95 \cdot \sqrt{C_d/2} \cdot \bar{U}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}} \quad (2.7)$$

2.5 Bodemgedrag

Bij het neerkomen op de bodem kunnen er ook nog een aantal mechanismen voor verspreiding van de steen zorgen. Deze mechanismen zullen in deze paragraaf beschreven worden.

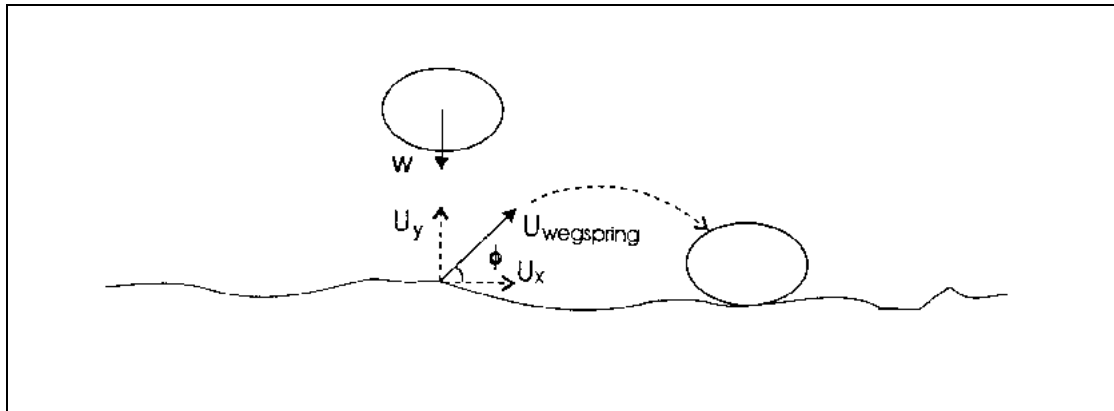
Wegspringen

Van Oord [1995] heeft een model ontwikkeld om de maximale wegspringafstand te bepalen. Hij ging uit van behoud van energie. De wegspringafstand is als volgt te bepalen:

$$S_x = U_x t = \frac{2(U_{wingspring})^2 \cos(\phi) \sin(\phi)}{g} \quad (2.8)$$

waarin: S_x maximale horizontale verplaatsing [m]

Na invoer van de valsnelheid van een steen en een maximale afstand van wegspringen bij $\phi = 45^\circ$ blijft over: $S_x = 2,2D_{bol}$. De maximale wegspringafstand is dus 2,2 maal de diameter.



figuur 2-10 Bodemgedrag steen (van Oord [1996])

Afrollen

Indien een steen zich op een hellend vlak bevindt kan deze gaan rollen, afhankelijk van de eigenschappen van de steen. Doordat stortsteen zeer onregelmatig gevormd is kan er weinig gezegd worden over het al dan niet rollen van een steen.

Afschuiven

Indien er zich een talud opbouwt met een hellingshoek groter dan die van het natuurlijk talud kan er afschuiving optreden. Zie ook hoofdstuk 3.4.

Bovendien kan een snel zinkende steen zo hard neer komen dat er als gevolg afschuiving optreedt.



3 Het valgedrag van een enkele steen in water

3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt getracht het valgedrag van een enkele steen te beschrijven aan de hand van de krachten die op een steen werken. Daarna wordt het principe van het Enkele Steen Model beschreven, gebaseerd op een random walk model, en de aannamen die daaraan ten grondslag liggen.

3.2 Krachten op een vallende steen in water

3.2.1 De resultante van de opwaartse kracht en de zwaartekracht

De verticale resulterende kracht die de valbeweging van een steen aandrijft bestaat uit:

- de zwaartekracht (F_g) waaraan de steen onderhevig is
- de opwaartse kracht (F_{opw}), bestaande uit de massa van het verplaatste water

In formulevorm:

$$F_{res} = F_g - F_{opw} = (\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot V_s \quad (3.1)$$

Waarin: ρ_s	massadichtheid van het voorwerp	[kg/m ³]
ρ_w	massadichtheid van het water	[kg/m ³]
g	versnelling van de zwaartekracht	[m/s ²]
V_s	volume van het voorwerp	[m ³]

3.2.2 De sleepkracht

Op een bewegend object onder water zal er een weerstandskracht tegen de bewegingsrichting in gaan werken. Deze kracht wordt de sleepkracht genoemd (in het engels 'drag force').

De sleepkracht is het gevolg van twee effecten, de schuifspanning op de oppervlakte van het voorwerp en het drukverschil tussen de voor en achterkant van het voorwerp. De mate waarin deze effecten optreden is afhankelijk van de grenslaagstroming rond het voorwerp, opgelegd door het Reynoldsgetal. Zie ook hoofdstuk 3.2.3.

Bij $Re \ll 1$ is er sprake van sterk viskeuze stroming. Er treedt geen loslating op. Bij dit stromingsbeeld heeft de wandwrijving de grootste invloed op de sleepkracht.

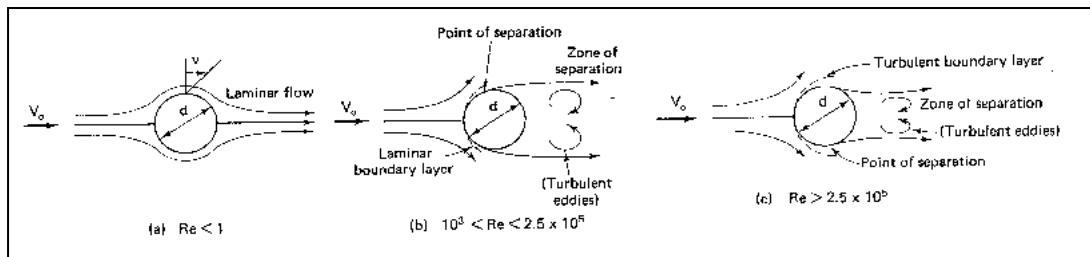
Vanaf $Re = \pm 4000$ is er sprake van zwak viskeuze stroming. Door loslating ontstaat er een drukverschil tussen de voor en de achterkant van het voorwerp. Er is dan sprake van een gecombineerd effect van schuifspanning en drukverschil. Zie ook figuur 3-1.

Indien Re groter wordt dan $2,5 \times 10^5$ is er sprake van een turbulente grenslaag. De schuifspanning verminderd en het drukverschil gaat de weerstand leveren.

De in dit rapport beschouwde valprocessen zullen bevinden in het gebied $4000 < Re < 2,5 \times 10^5$. Er wordt dan uitgegaan van de volgende vergelijking:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_w \cdot A_s \cdot U^2 \quad (3.2)$$

Waarin: C_d	weerstandscoefficiënt	[-]
ρ_w	massadichtheid van het water	[kg/m ³]
A_s	aangestroomd oppervlak	[m ²]
U	snelheidsverschil tussen water en lichaam	[m/s]



figuur 3-1 Laminare en turbulente grenslaagstroming om een bol (Prasuhn [1980])

3.2.3 Het effect van het Reynoldsgetal

Het stroombeeld dat ontstaat indien een voorwerp door een vloeistof valt kan worden gekarakteriseerd met behulp van het Reynoldsgetal. Het Reynoldsgetal kan als volgt worden weergegeven:

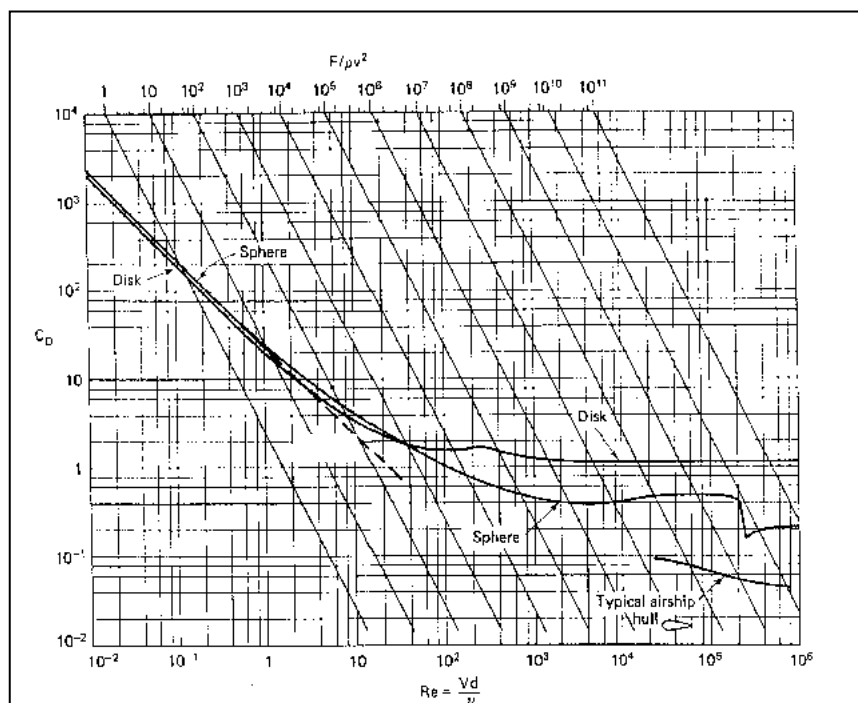
$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\eta} \quad (3.3)$$

Waarin: ρ	massadichtheid van de vloeistof	[kg/m ³]
U	snelheid	[m/s]
D	diameter voorwerp (aangestroomd)	[m]
η	dynamische viscositeit in water	[kg/ms]

Met toepassing van $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ verkrijgt men

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (3.4)$$

Waarin: ν	kinematische viscositeit	[m ² /s]
---------------	--------------------------	---------------------



figuur 3-2 Weerstandscoefficiënt als functie van Re (Bron [Prasuhn [1980]])

Tussen $4000 < Re < 200000$ neemt de weerstandscoefficiënt een zo goed als constante waarde aan voor de verschillende basisvormen. Dit belangrijke gegeven wordt gebruikt in paragraaf 5.2.6.



3.2.4 De liftkracht

In bovengaande paragraaf wordt er uitgegaan van een symmetrisch stroombeeld om een lichaam. In de praktijk wordt er gewerkt met onregelmatige, niet symmetrische vormen. Dit leidt tot een asymmetrisch stroombeeld. Door dit asymmetrische stroombeeld wordt de totale weerstandskracht opgesplitst in een component evenwijdig aan de bewegingsrichting en een component loodrecht op de bewegingsrichting, de liftkracht. Ook rotatie kan een liftkracht veroorzaken. Effecten die hiervoor verantwoordelijk zijn, zijn vortex shedding en het Magnus effect. In hoofdstuk 3.3.2 wordt hierop dieper ingegaan.

De liftkracht wordt weergegeven in de volgende vergelijking:

$$F_{lift} = \frac{1}{2} \cdot C_{lift} \cdot \rho_w \cdot U^2 \cdot A_s \quad (3.5)$$

Waarin: C_{lift}	weerstandscoefficiënt loodrecht op bewegingsrichting	[-]
ρ_w	massadichtheid van het water	[kg/m ³]
A_s	aangestroomd oppervlak	[m ²]
U	snelheidsverschil tussen water en lichaam	[m/s]

3.2.5 Versnelling / vertraging van een bol in water

Afhankelijk van de aanvangssnelheid waarmee een steen in het water valt krijgt na een periode van vertraging of versnelling de steen een evenwichtsvalsnelheid. Van Mazijk [1982] heeft de diepte waarop een steen zijn evenwichtsnelheid bereikt berekend als percentage van die evenwichtsvalsnelheid. Voor de afleiding van dit model zie bijlage R.

$$x_{maz} = -\frac{1}{\beta_{maz}} \ln(1 - \alpha_{maz}^2) \quad (3.6)$$

Waarin:

$$\beta_{maz} = 1,5 \cdot \frac{C_d}{D_b} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad (3.7)$$

x	diepte waarop (100x)a% van de evenwichtsvalsnelheid bereikt	[m]
C_d	weerstandscoefficiënt	[-]
D_b	diameter bol	[m]
ρ_w	massadichtheid van het water	[kg/m ³]
ρ_s	massadichtheid van een steen	[kg/m ³]
α_{maz}	bereikt percentage evenwichtsvalsnelheid	[%]
β_{maz}	coëfficiënt evenwichtsvalsnelheidsvergelijking Mazijk	[m ⁻¹]

Hieruit blijkt dat:

- 90% van de evenwichtsvalsnelheid wordt bereikt na een afgelegde weg van ongeveer 4 keer de diameter
- 99% van de evenwichtsvalsnelheid wordt bereikt na een afgelegde weg van ongeveer acht keer de diameter

3.2.6 De evenwichtsvalsnelheid

Door de vergelijkingen van de aandrijvende kracht (3.1) en de sleepkracht (3.2) met elkaar te combineren kan de vergelijking van de evenwichtsvalsnelheid voor een kubus worden afgeleid:

$$w = \sqrt{2\Delta \frac{g \cdot V_s}{C_D \cdot A_s}} \quad \text{of} \quad w = \sqrt{2\Delta \frac{g \cdot D_n}{C_d}} \quad (3.8)$$

Waarin: Δ	relatieve dichtheid	[-]
g	versnelling van de zwaartekracht	[m/s ²]
C_D	weerstandscoefficiënt / dragcoëfficiënt	[-]
V_s	volume van het voorwerp	[m ³]
A_s	aangestroomd oppervlak	[m ²]
D_n	Nominale diameter	[m]

Deze evenwichtsnelheid wordt bereikt nadat de in de vergelijking van Mazijk (zie paragraaf 3.2.5) bepaalde afstand is afgelegd.

Vergelijking 3.8 wordt ook aangehouden voor het bepalen van de evenwichtsvalsnelheid van breuksteen.

3.2.7 De evenwichtsvalsnelheid van breuksteen in water

Doordat breuksteen een hoekig karakter heeft ontstaan er gefixeerde loslaatpunten. Dit zou kunnen betekenen dat de resultaten van modelproeven opgeschaald mogen worden. Uit de resultaten van de experimenten blijkt dat de weerstandscoefficiënt niet constant is bij toenemende stroomsnelheid, zie hoofdstuk 9.2.2. Er dient dus voorzichtigheid in acht genomen te worden met opschalen.

Van der Wal [2002] concludeert dat de weerstandscoefficiënt van breuksteen in stilstaand water normaal verdeeld is, onafhankelijk van de diameter. Een kleine verbetering in de nauwkeurigheid kan bereikt worden door de weerstandscoefficiënt als functie van de L/d verhouding te beschouwen, omdat breuksteen over het algemeen met het grootste oppervlakte naar beneden gericht valt. De vorm van de steen heeft dus invloed op de weerstandscoefficiënt.

De methode aangeraden door van der Wal [2002] voor het bepalen van de evenwichtsvalsnelheid is als volgt:

1. Bepalen individuele steeneigenschappen conform 6.4.1.
2. Berekenen van de evenwichtsvalsnelheid met vergelijking (3.8) waarbij de weerstandscoefficiënt bepaald dient te worden conform

$$f_{CD,n}(C_{D,n}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{CD,n}} \cdot e^{-\frac{(C_{D,n} - \mu_{CD,n})^2}{2\sigma_{CD,n}^2}} \quad \text{waarin} \quad \mu_{CD,n} = 0,54 \cdot \frac{L}{d} + 0,42 \quad . \quad \text{De spreiding}$$

is berekend en bedraagt $\sigma_{CD,n} = 0,30$.

Er dient overigens wel rekening gehouden te worden met het feit dat deze relatie is afgeleid met behulp van een sortering steen uit een bepaalde groeve. Ook is er een selectie toegepast op de steensortering.

Onderzoek naar de evenwichtsvalsnelheid van breuksteen is o.a. uitgevoerd door Kniess [1981], van Oord [1996] en van der Wal [2002].

De resultaten van Kniess zijn moeilijk vergelijkbaar door een afwijkende definitie van de diameter.

Van Oord kwam tot een bepaling van de evenwichtsvalsnelheid door de tijd te meten van het gehele valtraject. Hij kwam hierbij op een gemiddelde weerstandscoefficiënt van 2,3 voor breuksteen en 1,4 voor grind. Het versnellingstraject is meegenomen in deze bepaling.



Van der Wal constateerde een normaal verdeelde weerstandscoefficiënt van breuksteen met een gemiddelde van 1,42 met een spreiding van 0,33. Deze metingen zijn uitgevoerd met stenen met een relatief kleine diameter. Het is mogelijk dat er bij het gebruik van deze kleinere stenen schaaleffecten optreden, die bij in situ storten niet voorkomen.

Al met al kan de volgende conclusie worden getrokken: Bij een toenemende afwijkende vorm van een object ten opzichte van de bolvorm, wordt de weerstandscoefficiënt steeds groter.

3.3 De valbeweging en valbaan

De valbeweging en valbaan van een steen worden door verschillende optredende verschijnselen beïnvloed. De van invloed zijnde processen worden beschreven in hoofdstuk 3.3.1 en 3.3.2. In de navolgende hoofdstukken wordt het random walk model kort omschreven.

3.3.1 Vortex shedding

Als de stroming rond een voorwerp gaat loslaten, bij $Re > 4000$, ontstaat een min of meer regelmatig loslaten van de wervels. Deze treden afwisselend aan de ene dan wel aan de andere kant op. Von Karman heeft dit theoretisch onderzocht en kwam tot de conclusie dat er maar 1 stabiele asymmetrische configuratie is. Daarom spreekt men ook wel van een wervelstraat van Von Karman.



figuur 3-3 Wervelstraat van Von Karman (Battjes [1998])

De frequentie van de loslating kan worden beschreven met het getal van Strouhal:

$$St = \frac{\omega \cdot D}{U} \quad (3.9)$$

Waarin: ω	radiaal frequentie van het proces	[1/s]
St	dimensieloos getal van Strouhal	[-]
D	diameter van de bol	[m]
U	relatieve snelheid	[m/s]

Die uitdrukking kan ook herschreven worden:

$$St = \frac{\omega \cdot D}{U} = 2 \frac{\pi D}{TU}$$

Aangenomen dat, zowel de evenwichtsvalsnelheid als het getal van Strouhal constant zijn, resulteert:

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

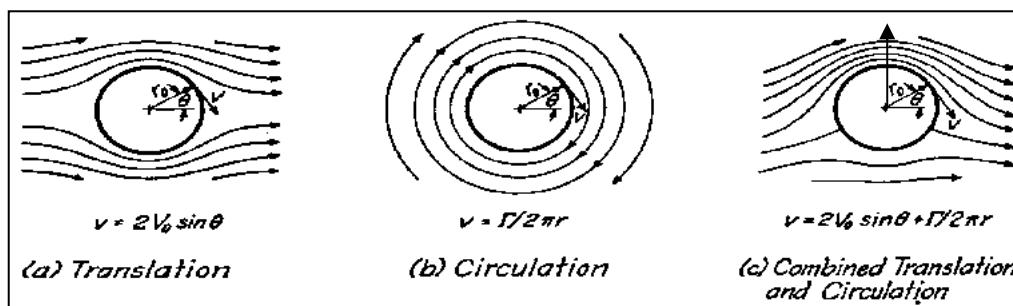
waarin: T periode van wervelloslating [s]

Hieruit kan worden opgemaakt dat de tijd tussen 2 richtingswisselingen evenredig is met de wortel van de diameter van de steen. Gebaseerd op dit principe hebben Vrijling, Manni en de Wilde [1995] het random walk model afgeleid. Zie ook hoofdstuk 3.4 en bijlage S.

3.3.2 Magnus-effect en asymmetrische loslating

Het Magnuseffect

Als een voorwerp beweegt door een medium en tegelijkertijd een rotatie heeft, ontstaat er een liftkracht loodrecht op de bewegingsrichting. Dit wordt het Magnus-effect genoemd. De verklaring van de oorzaak van het optreden van het Magnus-effect is weergegeven in figuur 3-4.



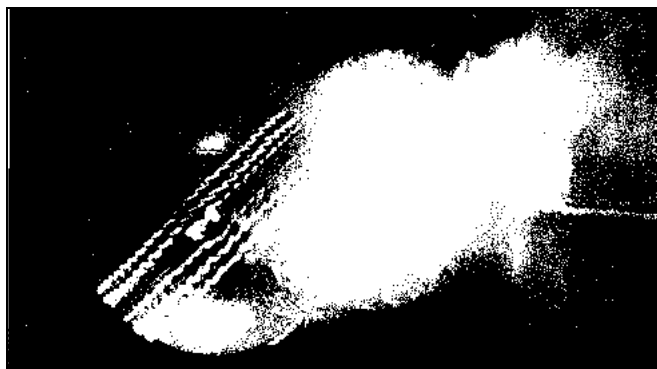
figuur 3-4 Het principe van het Magnus-effect (Albertson et al [1960]).

In de uitleg wordt uitgegaan van een bol in vloeistof. Doordat er wrijving optreedt tussen de bol en de vloeistof zal de vloeistof willen meebewegen met de rotatie van de bol. Hierdoor ontstaat een snelheidsverschil tussen de boven en onderkant van de bol en het water. Aan de bovenkant van de bol (waar de stroomlijnen dicht op elkaar zitten) blijft de grenslaag langer aanliggen dan aan de onderkant van de bol. Dit resulteert in een asymmetrische drukverdeling. Hierdoor ontstaat een drukverschil, lagere druk boven en hogere druk onder, met als gevolg een resulterende kracht loodrecht op de bewegingsrichting.

Asymmetrische loslating

Een soortgelijk effect kan ook optreden als een lichaam een gladde en een niet gladde kant bezit. Er treedt aan de gladde kant een laminaire grenslaagstroming op. Deze laat eerder los dan de grenslaagstroming die over de ruwe kant loopt. Er is dan sprake van asymmetrische loslating. Dit zorgt weer voor een asymmetrische drukverdeling.

Bij een juist geworpen cricketbal versterkt de stiknaad het fenomeen. Er is echter in dit geval geen sprake van het Magnus-effect, maar van asymmetrische loslating (Metha [1985]). Door de asymmetrische drukverdeling ontstaat er een liftkracht op de bal. Deze werkt loodrecht op de bewegingsrichting. In figuur 3-5 werkt deze kracht dus naar beneden.



figuur 3-5 Asymmetrische loslating (Mehta [1985])

In het geval dat de resulterende kracht niet door het zwaartepunt van het voorwerp gaat krijgt het voorwerp een rotatie. Het optredende verschijnsel gaat dan over in het Magnus-effect.

3.4 Random walk model

Een steen is onregelmatig van vorm. Daarom zal de loslating van wervels willekeurig over het oppervlak plaatsvinden. Een tweede effect dat bovendien voor willekeurige loslating zorgt, is dat de oriëntatie van de steen steeds anders is. De steen zal dus over de diepte een aantal horizontale verplaatsingen in willekeurige richtingen hebben. De som van die verplaatsingen geeft de totale horizontale verplaatsing.

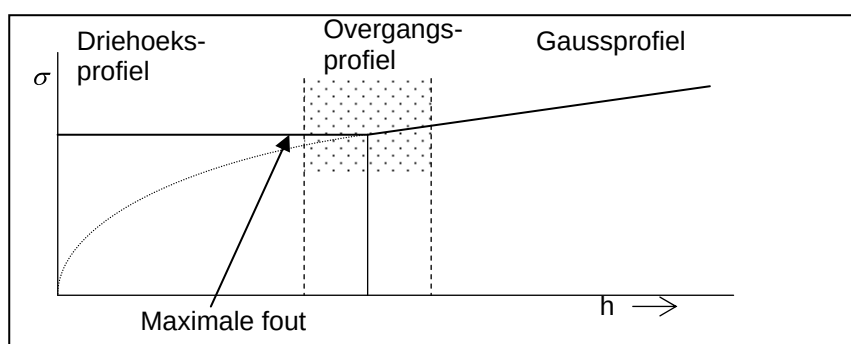
De centrale limiet stelling stelt dat de som van een groot aantal onafhankelijke variabelen opgevat kan worden als een normale verdeling, ongeacht de uitgangsverdeling.

Op basis hiervan kan worden gesteld dat de horizontale verplaatsingen van stenen, die een valtraject afleggen, bij benadering normaal verdeeld zijn.

Voor het kunnen voorspellen van de horizontale spreiding in water is een groot aantal onderzoeken uitgevoerd. Het model dat daaruit volgt is het random walk model, ontwikkeld door Vrijling, Manni en de Wilde [1995]. De afleiding van dit model is gegeven in bijlage S.

Er worden bij het storten vanaf een zijstorter 3 profielen onderscheiden, met toenemende storthoeveelheid:

- Het Gaussprofiel.
- Het overgangsprofiel.
- Het driehoekprofiel.



figuur 3-6 Optredende stortprofielen

Het Gaussprofiel

Indien er sprake is van het Gaussprofiel, kan de spreiding van een gestorte hoeveelheid steen worden weergegeven met behulp van de volgende vergelijking:

$$\sigma_n = c \sqrt{h \cdot D_{n50}} \quad (3.11)$$

Waarin: c'	constante	[-]
h	waterdiepte	[m]
D _{n50}	nominale diameter	[m]

Het overgangsprofiel

Indien de helling van het ontstane gaussprofiel de hoek van natuurlijk talud bereikt treedt er afschuiving op. Cregten [1995] concludeerde dat bij verwaarlozing van het overgangsprofiel een maximale fout van 6% ontstaat bij gebruik van een vereenvoudigde lijn. Zie figuur 3-6. Het is dus geoorloofd om de vereenvoudigde lijn aan te houden.

Het driehoeksprofiel

Indien er nog meer stenen gestort worden zal ook de top gaan afschuiven met als gevolg dat er een driehoeksprofiel ontwikkeld wordt. De traagheidsstraal van dit profiel kan als volgt worden berekend:

$$\sigma_\Delta = \sqrt{\frac{A}{6 \cdot \tan(\phi_m)}} \quad (3.12)$$

Waarin: σ_Δ	traagheidsstraal driehoeksprofiel	[m]
A	oppervlakte dwarsdoorsnede stortprofiel	[m ²]
ϕ_m	maximale hellingshoek stortmateriaal	[graden]

Uit figuur 3-6 is af te lezen dat de traagheidsstraal van het driehoeksprofiel onafhankelijk is van de waterdiepte.

Het Enkele Steen Model

Het driedimensionale gedrag van stenen kan vereenvoudigd worden door te veronderstellen dat de stenen tussen twee parallelle platen vallen. Er is dan sprake van een horizontale spreiding van breuksteen volgens een normale verdeling. De kansdichtheid kan dan worden gegeven door de volgende vergelijking:

$$f_{\underline{x}}(x) = \frac{1}{\sigma_N \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_N} \right)^2} \quad (3.13)$$

Door aan te nemen dat de verplaatsing in de y-richting onafhankelijk is van de verplaatsing in de x-richting kan de 3-dimensionale kansdichtheid worden berekend met:

$$f_{\underline{x}, \underline{y}}(x, y) = f_{\underline{x}}(x) \cdot f_{\underline{y}}(y) = \frac{1}{\sigma_N^2 \cdot 2\pi} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - \mu_x)^2 + (y - \mu_y)^2}{\sigma_N^2} \right)} \quad (3.14)$$

In bijlage S is de afleiding van het ESM gegeven.

Naar de geldigheid van het Enkele Steen Model (ESM) zijn een aantal onderzoeken uitgevoerd. De conclusies van de onderzoekers waren niet altijd eenduidig. De conclusie van Van Gelderen [1999] was:

“De fysische afleiding van het Enkele Steen Model geeft slechts voor een bepaald percentage van de stenen in een sortering een juiste weergave van de werkelijkheid. Dit omdat er behalve random walk ook andere valbewegingen optreden.



Desondanks is de in het ESM veronderstelde evenredigheid van de spreiding van de stenen met de wortel uit het product van de waterdiepte en de karakteristieke steendiameter een in de praktijk bruikbare modellering.”

Van der Wal [2002] bevestigt dit. De conclusie dat het ESM de spreiding van breuksteen in stilstaand water voldoende nauwkeurig voorspelt is hiermee voldoende gemotiveerd.

De invloed van stroming op de geldigheid van dit model is niet bekend. In de modelproeven uitgevoerd in het WL is er gekeken naar de invloed van stroming op de offset en de opbouw van het dwarsprofiel van een lijnstort met grind. (WL 1960, M598 IV) In dat onderzoek is er tevens gekeken naar de ontmenging. Het is nuttig om dit ook voor stortsteen te bestuderen.

Het is de vraag of in stromend water de horizontale spreiding van stortsteen zich hetzelfde gedraagt als in stilstaand water. Anders geformuleerd: geeft het ESM een bruikbare voorspelling van de horizontale spreiding van steen in stromend water, oftewel zijn de uitwijkingen normaal verdeeld?



4 Het valgedrag van een groep stenen

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de conclusies en observaties van eerdere onderzoeken omtrent het al dan niet optredende groepsgedrag beschreven.

Er is bij het storten van steen met een zijstorter waarschijnlijk geen sprake van groepsgedrag zoals beschreven in de paragrafen 4.2 en 4.3. In paragraaf 4.4 wordt beschreven wat er aan onderlinge beïnvloeding zou kunnen optreden bij het storten met een zijstorter.

4.2 De optredende fasen bij groepsgewijs vallen van stenen

Als een voldoende grote groep stenen in een keer in het water wordt losgelaten kunnen er tijdens de val verschillende fasen optreden.

4.2.1 Het 2 fasen principe

Slack [1963a] constateerde dat er naast proeven met slechts enkele deeltjes en proeven met heel veel deeltjes er nog geen proeven waren gedaan met tussenliggende aantallen.

Enkele observaties bij de uitgevoerde experimenten met tussenliggende aantallen waren:

- De valsnelheid van een cluster bolletjes was groter dan de valsnelheid van een enkel bolletje.
- Hoe kleiner de porositeit, hoe groter de toename van de snelheid.
- Indien de bollen zich van elkaar verwijderden, vindt die verwijdering steeds minder snel plaats.

Fase 1

Voor de experimenten met grote aantallen gingen bovenstaande observaties eveneens op.

Eén van de observaties was opmerkelijk: in het geval dat meerdere bollen tegelijk vielen kregen deze een rotatie in de richting van het middelpunt! Bij een grotere groep ontstond een circulatie van bolletjes in dezelfde richting.

Een vergelijkbaar proces speelt zich af bij het bovenaanzicht van een peleton wielrenners of in cumuluswolken. In later gepubliceerde artikelen wordt deze fase de "thermal stage" genoemd oftewel de thermische fase. Tijdens deze fase heeft het water tussen de stenen die vallen een snelheid gelijk aan die van de stenen.

De 'thermal stage' kenmerkt zich door een toename van het volume van de steengroep. Hierdoor neemt de groepssnelheid af. Een kleine compensatie op die afname komt voort uit het feit dat erachteraan de groep water opgenomen wordt (entrainment). Dit leidt tot een onontwikkeld zog waardoor de weerstandscoefficiënt van de groep afneemt. Daardoor heeft het vergrote volume (en dus lagere massadichtheid van de groep) minder invloed op de afname van de valsnelheid.

De vallende groep was in het begin bolvormig en kreeg naarmate de snelheid toenam een komvorm.

Fase 2

Als de groep zich in de zwermfase bevindt is de groepssnelheid ongeveer gelijk aan de individuele snelheid van de grootste stenen, die zich onderaan bevinden. Het water wordt niet langer door de groep meegenomen en de grote stenen trekken de kleinere stenen mee in hun zog.

4.2.2 Het 5 fasen principe

Van der Wal [2002] onderscheidde vijf fasen bij een lang genoeg valtraject.

De 1e fase is te schematiseren als een groep stenen die een geheel vormt met het meegenomen water. Deze groep heeft dus een groepsvolume met bijbehorende dichtheid. De maximale verticale snelheid van zo'n groep is groter dan de evenwichtsvalsnelheid voor een enkele steen. Ook is het versnellingstraject langer dan voor een enkele steen. Doordat er steeds meer water opgenomen wordt in de groep worden de lengte en de breedte van de groep steeds groter en neemt de relatieve dichtheid af. Hierdoor gaat de groep steeds langzamer versnellen totdat de versnelling nul is. De snelheid is dan maximaal. Dit betekent het einde van de 1e fase.

De 2e fase zet zich in op het moment dat de versnelling nul is. De versnelling zet zich dan om in een vertraging. Doordat er steeds meer water in de groep opgenomen wordt, wordt het groepseffect steeds kleiner. Dit gaat net zolang door totdat de grotere individuele stenen uit de groep beginnen te vallen. Dit is het einde van de 2e fase.

De 3e fase gaat in zodra individuele stenen uit de groep vallen. De energie van het meegenomen water wordt gedissipeerd door het omringende water. De grotere stenen vallen als individuele stenen uit de groep met in hun zog de kleinere stenen.

De 4e fase gaat van start als de stenen geen invloed meer op elkaar uitoefenen. De beweging zet zich dan voort volgens de in paragraaf 3.3 en 3.4 beschreven principes.

De 5e fase. Als de stenen de bodem raken en zich nog in fase 1 of 2 bevinden zal er een effect optreden door radiale afstroming.

Doordat het meegenomen water nog een grote hoeveelheid kinetische energie bezit, zal deze op de bodem afbuigen en horizontaal afstromen. De stenen in de groep zullen dan worden meegenomen totdat de snelheid van het afstromende water zodanig is afgenomen dat er een stabiele situatie ontstaat.

De 5 fasen onderkend door van der Wal [2002] kunnen binnen de 2 fasen aanduiding van Slack [1963] geplaatst worden op fase 5 na. De 1e en 2e fase vallen onder de thermische fase. De fasen 3 en 4 kunnen worden geplaatst onder de zwermfase.

4.3 Groepssnelheid

Groepen stenen bereiken hogere snelheden dan de evenwichtssnelheden van de individuele stenen binnen de groep. Dit is aangetoond in van der Wal [2002]. Er dient wel een hoeveelheid steen te zijn die groot genoeg is om daadwerkelijk groepsgedrag te vertonen. Dit is het geval bij een aantal stenen dat tegelijk gestort wordt vanaf 50 tot 100 stenen.

De maximaal te bereiken snelheid is afhankelijk van de totale massa van de groep. Hoe groter de massa, hoe groter de maximale snelheid van de groep. De weerstandscoefficiënt van de groep neemt af. Individuele steeneigenschappen gaan pas weer spelen in de zwermfase. De gradering van een groep heeft geen invloed op de groepssnelheid, alleen de totale massa.

4.4 Onderlinge beïnvloeding bij het storten met een zijstorter

Van Oord [1996] heeft getracht het stortproces van een zijstorter te simuleren.

Uit de resultaten van de uitgevoerde experimenten bleek dat er een kleine toename in de spreiding was waar te nemen bij 'tegelijk' storten van breuksteen.

Van der Wal [2002] constateerde dit fenomeen bij bestudering van het valgedrag in fase 3. De kleinere stenen vallen dan in het zog van de grotere stenen. Dit is mogelijk het gevolg van een zelfde soort fenomeen dat ervoor zorgt dat vliegtuigen niet in elkaars zog mogen opstijgen. Er bestaat dan het gevaar dat er niet genoeg liftkracht ontwikkeld kan worden. Als



ze een bepaalde tijd wachten is dat gevaar geweken. Mogelijk is er voor stenen zo'n zelfde wachttijd.

Bij formule 1 racen is er sprake van een slipstream waar coureurs gebruik van kunnen maken. In die slipstream is de weerstand van de lucht op de achterste auto lager.

Bovenstaande verschijnselen zijn het resultaat van de invloed van turbulentie op de weerstandscoefficiënt. Hiernaar is onderzoek gedaan door Robertson et al [1972].

Een van de conclusies was dat een toe- of afname van de weerstandscoefficiënt optrad, afhankelijk van de vorm van het voorwerp, bij toenemende turbulentie. Indien de eerder losgelaten stroming weer langs het voorwerp kan gaan aanliggen is er sprake van een verlaging van de weerstandscoefficiënt. Indien dit niet mogelijk is wordt de weerstandscoefficiënt groter.

Er kan ook indrukking van de kop van de groep, de meest stroomopwaartse stenen, optreden. Meer over dit fenomeen wordt beschreven in hoofdstuk 10.2.2 en geschetst in figuur 10-5.



5 Schaaleffecten bij modelproeven

5.1 Inleiding

Een modelonderzoek is een onderzoek wat plaatsvindt volgens een vereenvoudigde en verkleinde weergave van de werkelijkheid (het prototype). Over het algemeen wordt er gebruik gemaakt van schaalmodellen omdat deze goedkoper zijn om uit te voeren en beter beheersbaar zijn.

Bij het uitvoeren van schaalproeven is het uitgangspunt dat dezelfde processen zowel in het model als in de werkelijkheid optreden. Er dient dus gelijkvormigheid te bestaan tussen model en werkelijkheid. In hoofdstuk 5.2 zal de gelijkvormigheid aan de hand van schaalregels uitgewerkt worden. De veronderstellingen en vereenvoudigingen van de modelproeven zullen worden behandeld in hoofdstuk 5.3. Basis voor dit hoofdstuk was de Vries [1977].

5.2 Gelijkvormigheid

5.2.1 Soorten gelijkvormigheid.

Voor een juiste interpretatie van de koppeling tussen model en prototype dienen bepaalde aspecten gelijkvormig te zijn. Er bestaan 3 typen gelijkvormigheid.

Geometrische gelijkvormigheid:

Er is sprake van geometrische gelijkvormigheid als de verhouding van geometrische parameters zoals lengte, oppervlakte en volume onderling gelijk is.

Kinematische gelijkvormigheid:

Er is sprake van kinematische gelijkvormigheid als overeenkomstige afstanden in overeenkomstige tijdsintervallen worden afgelegd. Afgeleide grootheden zijn snelheid en versnelling.

Dynamische gelijkvormigheid:

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

Bij het modelleren van bewegende stenen in water is dynamische gelijkmatigheid van belang. Voor het bepalen van die dynamische gelijkvormigheid wordt de vergelijking van Navier-Stokes omgeschreven. Er blijft dan een aantal kentallen over die in model en prototype gelijkwaardig behoren te zijn.

5.2.2 Herschrijven van de vergelijking van Navier-Stokes

Voor het beschrijven van de vloeistofstroming rond een voorwerp in de drie hoofdrichtingen wordt de vergelijking van Navier-Stokes gebruikt:

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

Waarin: ρ	massadichtheid van de vloeistof	[kg/m ³]
η	dynamische viscositeit van water	[Pa·s]
p	waterdruk	[Pa]

u	component van de snelheid in x_i richting	[m/s]
f	versnelling t.g.v. een externe kracht in de x_i richting	[m/s ²]

Vervolgens worden de volgende dimensieloze grootheden ingevoerd:

$$\vec{u}_D = \frac{\vec{u}}{U} \quad (5.2),$$

$$t_D = \frac{t}{T} \quad (5.3)$$

$$p_D = \frac{p}{P_0} \quad (5.4)$$

$$\nabla_D^2 = L^2 \nabla^2 \quad (5.5)$$

$$\vec{g}_D = \frac{\vec{g}}{g} \quad (5.6)$$

Invullen van bovenstaande dimensieloze kentallen in (5.1) geeft:

$$\left(\frac{\rho \cdot U}{T} \right) \frac{\partial \vec{u}_D}{\partial t} + \left(\frac{\rho \cdot U^2}{L} \right) \vec{u}_D (\nabla_D \vec{u}_D) = - \left(\frac{P_0}{L} \right) \nabla_D p_D + g \rho \vec{g}_D + \left(\frac{\eta U}{L^2} \right) (\nabla_D^2 \vec{u}_D) \quad (5.7)$$

Voor het verkrijgen van dimensieloze coëfficiënten wordt vergelijking (5.7) gedeeld door:

$$\frac{\rho U^2}{L}$$

Hieruit volgt:

$$\left(\frac{L}{UT} \right) \frac{\partial \vec{u}_D}{\partial t} + \vec{u}_D (\nabla_D \vec{u}_D) = - \left(\frac{P_0}{\rho U^2} \right) \nabla_D p_D + \left(\frac{gL}{U^2} \right) \vec{g}_D + \left(\frac{\eta}{\rho UL} \right) (\nabla_D^2 \vec{u}_D) \quad (5.8)$$

In deze vergelijking staan een aantal dimensieloze kentallen:

Het getal van Strouhal:

$$St = \frac{\omega \cdot D}{U} = \frac{L}{U \cdot T} \quad (5.9)$$

De reciproque van het getal van Euler:

$$Eu = \frac{\rho \cdot U^2}{P_0} \quad (5.10)$$

De reciproque van het getal van Froude:

$$Fr = \frac{U^2}{g \cdot L} \quad (5.11)$$



De reciproque van het getal van Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\eta} \quad (5.12)$$

5.2.3 Het getal van Strouhal

Het getal van Strouhal geeft de verhouding van tussen de stationaire traagheidskracht ($\rho U^2 L^2$) en de interstationaire traagheidskracht ($\rho U L^3 / T$). Dit is een dimensieloze maat voor het optreden en afschudden van wervels.

Door de onregelmatige oppervlakte en oppervlakteruwheid, in combinatie met een wisselende aanstroomoriëntatie van het materiaal, laten de wervels onregelmatig los. Het gevolg is een wervelstraat van Von Karman (zie ook figuur 3-3).

$$St = \frac{\text{instationaire traagheidskracht}}{\text{stationaire traagheidskracht}} = \frac{\rho \cdot U \cdot L^3 / T}{(\rho \cdot L^3) (U^2 / L)} = \frac{L}{U \cdot T}$$

Door de onregelmatige loslating van de wervels treed er ook een zeer onregelmatige liftkracht op. Deze zijn verantwoordelijk voor de spreiding van het stortmateriaal tijdens de val. Om zowel in model als in prototype dezelfde loslaatkarakteristieken te krijgen moet het te storten materiaal gelijkvormig zijn. Zowel in massadichtheid als in oppervlakteruwheid en vorm. Indien er in model en prototype breuksteen wordt gebruikt is er geen invloed te verwachten. Er dient rekening gehouden te worden met het feit dat het getal van Strouhal zich niet als een constante gedraagt tussen $1000 < Re < 200.000$. Dit volgt uit figuur T-3 uit bijlage T.

5.2.4 Het getal van Euler

Het getal van Euler geeft de verhouding tussen de stationaire traagheidskracht en de drukkracht:

$$Eu = \frac{\text{stationaire traagheidskracht}}{\text{drukkracht}} = \frac{\rho \cdot U^2 \cdot L^2}{P_0 \cdot L^2} = \frac{\rho \cdot U^2}{P_0}$$

Het wordt gebruikt om samendrukbare en caverende stromingen te beschrijven. Het getal is gelijk voor prototype en model als er geen luchtinsluiting aanwezig is.

Er worden geen proeven met individuele gestorte stenen uitgevoerd losgelaten boven het wateroppervlak.

De experimenten met steengroepen worden uitgevoerd op een manier, waarbij een aantal stenen zich nog boven water bevindt. Er wordt aangenomen dat de kleine hoeveelheid luchtinsluiting geen grote invloed heeft op het stortresultaat.

Luchtinsluiting heeft weinig tot geen invloed op het moment dat de evenwichtsvalsnelheid is bereikt. Met de huidige beschikbare apparatuur is de onnauwkeurigheid te groot om betrouwbare uitspraken over de invloed van het verschijnsel te kunnen doen. Er wordt geen rekening gehouden met het getal van Euler bij opschalen van de resultaten.

5.2.5 Het getal van Froude

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

$$Fr = \frac{\text{stationaire traagheidskracht}}{\text{zwaartekracht}} = \frac{(\rho \cdot L^3) \left(\frac{U^2}{L} \right)}{\rho \cdot g \cdot L} = \frac{U^2}{g \cdot L}$$

(Let wel: er word hier gebruik gemaakt van Fr en niet van Fr^2 bekend uit de scheepsbouw.)

Het verschalen van factoren zoals lengte, snelheid en massa kan worden vastgelegd met het getal van Froude. De schaalfactor is gegeven door:

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

De volgende schaalregels kunnen zo worden afgeleid:

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

Indien de getallen van Reynolds en Strouhal in prototype en model gelijkvormig zijn, kunnen schaafeffecten worden uitgesloten.

5.2.6 Het getal van Reynolds

Het getal van Reynolds geeft de verhouding van de stationaire traagheidskracht en de viskeuze wrijvingskracht:

$$\text{Re} = \frac{\text{stationaire traagheidskracht}}{\text{wrijvingskracht}} = \frac{(\rho \cdot L^3) \left(\frac{U^2}{L} \right)}{(\eta \cdot U \cdot L^{-1}) (L^2)} = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\eta} = \frac{U \cdot L}{\nu}$$

Zie ook hoofdstuk 3.2.3.

Het getal van Reynolds correspondeert met het karakter van het stroomregime. Er kan alleen opgeschaald worden als de grenslaagstroming hetzelfde regime heeft. In figuur 3-2 wordt het verband tussen het Reynoldsgetal en de weerstandscoefficiënt gegeven. Daar is uit af te lezen dat voor $4000 < \text{Re} < 200.000$ de weerstandscoefficiënt min of meer constant is. Hetzelfde geldt voor het getal van Strouhal.

Er kan dus vergelijkbaar gewerkt worden met een minimale diameter bepaald met de volgende vergelijking:

$$D_{\min}^{3/2} > \frac{\text{Re} \cdot \nu}{\sqrt{\left(\frac{2\Delta g}{C_D} \right)}} \quad (5.13)$$

Waarin: $D_{\min}$	minimale diameter		[m]
ν	dynamische viscositeit	$(1,33 \cdot 10^{-6})$	$[\text{m}^2/\text{s}]$
g	zwaartekracht	(9,81)	$[\text{m}/\text{s}^2]$
Δ	relatieve dichtheid	(1,65)	[-]
C_d	weerstandscoefficiënt	(1,42)	[-]
Re	Reynoldsgetal	(4000)	[-]

Na invullen van bovenstaande waarden blijkt dat de minimaal benodigde diameter van de stenen die in de experimenten gebruikt worden 0,010 m bedraagt. Dit komt overeen met een zeefmaat van 0,012m. De maximale diameter die gebruikt mag worden is 0,146 m. Dit komt overeen met een zeefmaat van 0,175 m.



5.3 De verschaling van werkelijkheid naar model

De maximaal instelbare diepte van de stroomgoot is 0,81 m. Bij een verschaling van 1 : 20 komt dit overeen met een prototype diepte van 16 meter.

In werkelijkheid wordt er gebruik gemaakt van bijvoorbeeld een sortering 10-60 kg of 60-300 kg. Als dit ook verschaald wordt verkrijgt men het volgende beeld:

Sortering (kg)		Prototype (m)	Valsnelheid prototype (m/s)	Model (m)	Valsnelheid model (m/s)
10 - 60 (A)	d _{n85}	0,28	2,53	0,014	0,56
	d _{n50}	0,21	2,19	0,011	0,50
	d _{n15}	0,16	1,91	0,008	0,42
60 - 300 (B)	d _{n85}	0,46	3,24	0,023	0,72
	d _{n50}	0,40	3,02	0,02	0,67
	d _{n15}	0,28	2,53	0,014	0,56

tabel 5-1 Verschaling beproefde sorteringen.

De theoretische evenwichtsvalsnelheid is berekend met de volgende waarden: $\Delta = 1,65$, $g = 9,81$ en $C_d = 1,42$.

5.4 Aannamen en vereenvoudigingen

Het is niet mogelijk te voldoen aan gelijke getallen van Reynolds en Froude. Gegeven het feit dat bij $4000 < Re < 200.000$ de weerstandscoefficiënt en het getal van Strouhal nagenoeg constant zijn, zijn dit de grenzen waartussen gewerkt mag worden. Zolang de nominale diameter groter is dan 10 mm en kleiner is dan 146 mm wordt er verondersteld dat hetzelfde stroombeeld optreedt in model en prototype.

Bij de selectie van stenen wordt er rekening gehouden met een toegestaan maximum van 3% met een L/d verhouding groter dan 3. De stenen die hieraan niet voldoen worden er op het oog uitgehaald.



6 Uitvoering van de experimenten in het aquarium

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de uitvoering van de proeven in het aquarium beschreven. Deze proeven zijn uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen. In dit hoofdstuk worden de modelproefopstelling en de uitvoeringsmethodiek beschreven. In bijlage B is het stappenplan en de foutenanalyse opgenomen.

6.2 Doel van de proeven in het aquarium

De proeven met individuele stenen in het aquarium worden uitgevoerd, teneinde de weerstandscoefficiënt van stenen met kleine en grotere diameter te bepalen. De evenwichtsvalsnelheid van stenen met kleinere diameter kan dan vergeleken worden met de optredende evenwichtsvalsnelheden gemeten in de stroomgoot, teneinde de invloed van de stroming op die evenwichtsvalsnelheid te bepalen.

6.3 De modelproefopstelling

6.3.1 Het aquarium

Voor de proeven is gebruik gemaakt van een waterbak die zich in het laboratorium bevindt. Deze heeft de volgende afmetingen: $l \times b \times d = 2,5 \times 2,5 \times 2,0$ m. De maximaal beschikbare waterdiepte bedraagt 1,85 m. De stalen wanden van de bak zijn zwart geverfd, om een zo groot mogelijk contrast ten opzichte van de wit geverfde stenen te creëren.



figuur 6-1 Het aquarium

Twee wanden van het aquarium zijn voorzien van glas, deze zijn in een stalen frame geplaatst. Dit maakt het mogelijk om de valbaan van een steen te filmen.

De bak is gevuld met water uit het circulatiesysteem van het laboratorium. Omdat de 3 cm dikke ruiten langzaam op temperatuur moeten komen dient de bak langzaam gevuld te worden.

Op de bodem van de bak is een zwart stuk tapijt aangebracht.

6.3.2 De gebruikte apparatuur en software

Voor het opnemen van de valbeweging van de stenen is gebruik gemaakt van een Panasonic Super VHS videocamera type NV-MS1E. De videoband werd vervolgens afgespeeld met een JVC Super VHS videorecorder type HR-S7500 en tegelijkertijd opgenomen met een Sony digitale videorecorder type DHR 1000 VC. De gedigitaliseerde beelden werden vervolgens overgezet op een computer voor verdere bewerking met het programma Adobe Premiere. Vervolgens kunnen met het programma L&C scan XY de coördinaten op de beelden gelinkt worden met de werkelijk afgelegde afstanden.

6.3.3 Het calibratiekruis

Het is noodzakelijk om een aantal vaste referentiepunten te hebben waarvan de onderlinge afstanden bekend zijn. Op deze manier kan per serie het aantal pixels in een bepaalde afstand worden berekend. Als deze schaal bekend is kan de afstand die de steen afgelegd heeft tussen 2 geknipte beelden berekend worden.

6.4 De uitvoeringsmethodiek

6.4.1 Het uitzoeken van de steen en het bepalen van de individuele steeneigenschappen

Uit 3 bakken met stenen van verschillende afmetingen wordt een gradatie samengesteld. Deze selectie wordt gezeefd tussen een 12 en 24 mm zeef. Er wordt zo een selectie van ongeveer 400 stenen gemaakt. Zeer scherpe en platte stenen worden daarna op het oog verwijderd.

De stenen worden wit geverfd in een betonmolen.

Van 200 random geselecteerde stenen worden per steen de eigenschappen bepaald en ze worden genummerd. Er wordt gewerkt conform onderstaande checklist.

1.	Wegen van de droge steen	$M_{\text{steen,droog}}$
2.	Wegen van de steen onder water	$M_{\text{steen,subm}}$
3.	Bepalen massa verplaatst water	$M_{\text{verpl.water}} = M_{\text{steen,droog}} - M_{\text{steen,subm}}$
4.	Bepalen volume van de steen	$V_s = V_{\text{verpl.water}} = \frac{M_{\text{verpl.water}}}{\rho_w}$
5.	Bepalen massadichtheid steen	$\rho_s = \frac{M_{\text{steen,droog}}}{V_s}$
6.	Bepalen nominale diameter steen	$D_{n,x} = \sqrt[3]{\frac{M_{\text{steen,droog}}}{\rho_s}}$
7.	Bepalen zeefmaat	$D_x = \frac{D_n}{0.84}$
8.	Bepalen L/d verhouding	De grootste afstand tussen 2 punten is de L-waarde De kleinste afstand tussen 2 platen waar de steen nog net tussendoor kan is de d-waarde

De op deze manier bepaalde eigenschappen staan in bijlage D.

In bijlage B wordt het stappenplan voor de bepaling van de evenwichtsvalsnelheden uiteengezet.

6.4.2 Samenvatting foutenanalyse

In bijlage B is de gehele foutenanalyse opgenomen.



Type fout	oorzaak	Max % van de gemeten w
Verschil valsnelheden	Random karakter valbeweging	22,4
Meet onnauwkeurigheden	Aanklikfout	0,5
	Bewegingsonscherpte	2
	Horizontale uitwijkingen	7
Totaal meetfouten		9,5

tabel 6-1 Samenvatting foutenanalyse

Uit bovenstaande tabel is af te leiden dat het verschil in metingen 22,4% is. In deze fout zitten ook de meetfouten van 10 procent die met een kleine kans kunnen optreden. Het random karakter van de valbeweging heeft dus een grote invloed.



7 Analyse resultaten valsnelheden individuele stenen

7.1 Inleiding

In het voorgaande hoofdstuk is beschreven op welke wijze de experimenten voor het bepalen van de individuele valsnelheden zijn uitgevoerd. In dit hoofdstuk zullen de resultaten van de uitgevoerde experimenten worden gepresenteerd. De theoretische achtergronden voor het verwerken van de data worden beschreven in bijlage A. De eigenschappen van de bij de experimenten gebruikte stenen worden gegeven in bijlage D.

De vergelijking die gebruikt wordt om de weerstandscoefficiënt te bepalen is:

$$w = \sqrt{\frac{2\Delta g D_n}{C_d}} \quad (7.1)$$

Als aangenomen wordt dat in de experimenten de relatieve dichtheid constant is en de weerstandscoefficiënt C_d afhankelijk is van de L/d verhouding, is het mogelijk om de evenwichtsvalsnelheid uit te drukken in de steen dimensies d_{n50} en de L/d verhouding. In onderstaande hoofdstukken zal gekeken worden naar de onderlinge afhankelijkheid van de verschillende parameters.

Er zal worden gekeken naar de invloed van verschillende parameters op de weerstandscoefficiënt. Vervolgens zal er een regressie worden toegepast om de evenwichtsvalsnelheid voldoende nauwkeurig te kunnen voorspellen en de invloed van de verschillende parameters te bepalen.

7.2 Invloed van de parameters op de weerstandscoefficiënt

7.2.1 Invloed van de diameter op de L/d verhouding

In onderstaande tabel worden alle bepaalde weerstandscoefficiënten met elkaar vergeleken. De bovenste 4 rijen geven de waardes bepaald door van der Wal [2002].

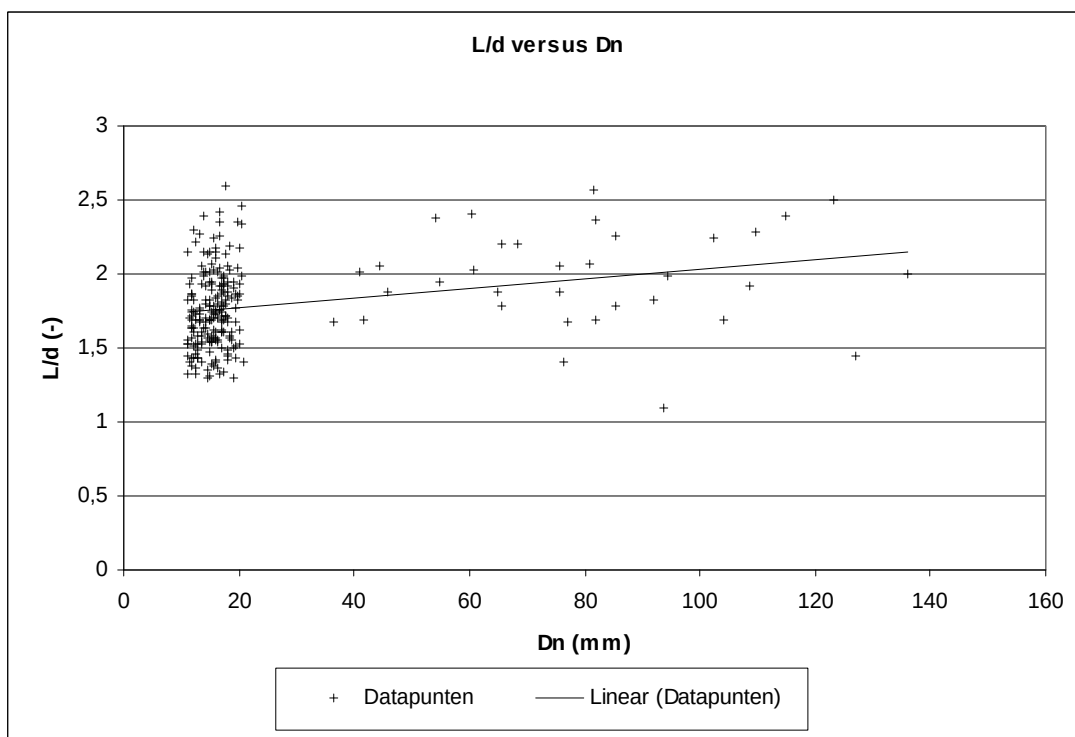
Aantal stenen	d_{n50} (m)	$\mu_{MLS L/d}$ (-)	$\mu_{MLS C_d}$ (-)	S_{C_d} (-)	$S_{MLS C_d}$ (-)
85	0,013	1,83	1,24	0,27	0,24
128	0,019	1,84	1,29	0,33	0,31
105	0,027	1,87	1,57	0,28	0,26
57	0,039	1,99	1,67	0,40	0,36
200	0,016	1,75	1,43	0,22	0,22
34	0,077	1,98	1,64	0,30	0,30
gemiddeld	0,024	1,82	1,45	0,32	0,32

tabel 7-1 Weerstandscoefficiënten alle data

Het lijkt erop dat de weerstandscoefficiënt en L/d verhouding toenemen bij toenemende diameter. Deze stijging kan het gevolg zijn van de procedures gevolgd bij het selecteren van de stenen of van een afhankelijkheid tussen beide parameters.

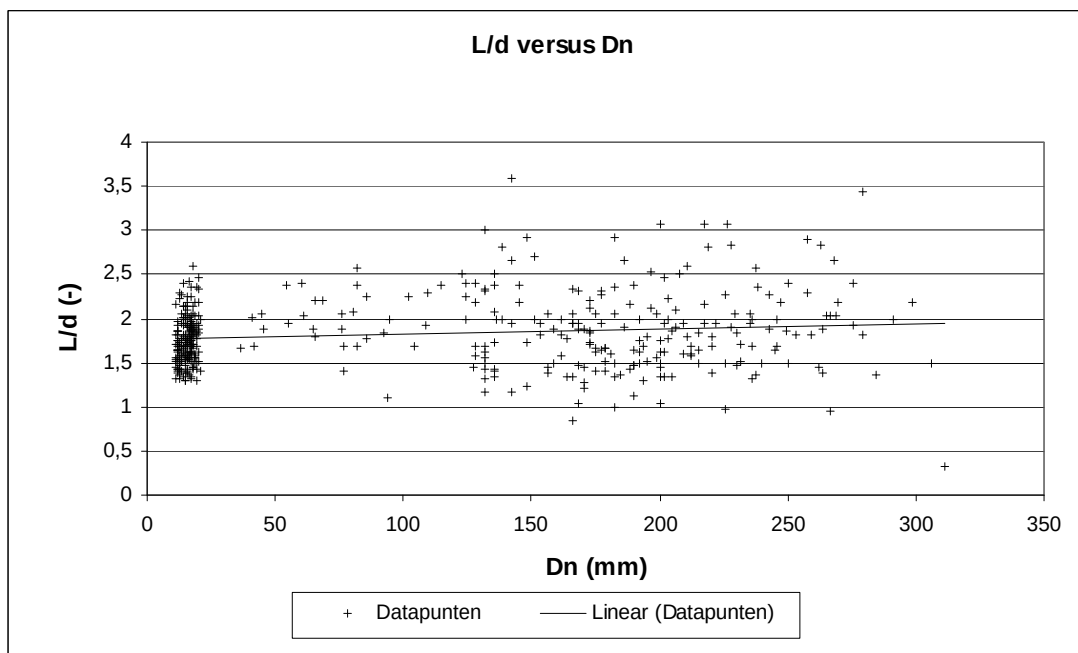
Zie ook bijlage E, bijlage F en figuur 7-1 ter illustratie.

Om dit te onderzoeken worden voor verschillende sorteringen de L/d verhoudingen ten opzichte van de d_{n50} bekeken. In figuur 7-1 zijn de L/d verhoudingen van de geselecteerde stenen uitgezet tegen de d_{n50} van diezelfde stenen.



figuur 7-1 Regressielijn L/d versus d_n van de geselecteerde stenen exclusief de stenen uit Karimun

Om dit te vergelijken met de resultaten van een grading test, uitgevoerd in een quarry in Karimun, Indonesië, zijn de daar bepaalde punten eveneens in de grafiek geplot en is er wederom een trendlijn doorheen geplot.



figuur 7-2 Regressielijn L/d versus d_n quarry en geselecteerde stenen inclusief de stenen uit Karimun

Door het toevoegen van de dataset uit de quarry neemt de helling van de regressielijn iets af. Het lijkt op basis van figuur 7-2 aannemelijk dat de L/d waarde constant en onafhankelijk van de diameter is, indien als uitgangspunt wordt genomen dat de L/d verhouding niet afhankelijk is van de soort steen.

Bij het interpreteren van de waarden van de gradingtest wordt gebruik gemaakt van waarden die door derden zijn verzameld. Het is daarom goed mogelijk dat deze waarden niet zijn



verkregen door de langste afstand tussen 2 punten en de kortste afstand tussen 2 platen te bepalen, maar door de 'doos'-methode te volgen. Indien dit laatste het geval is zijn de in dit rapport weergegeven L/d waarden te laag.

De steilere trendlijn in figuur 7-1 kan het gevolg zijn van een combinatie van de volgende factoren:

- Het op het oog verwijderen van stenen met een relatief grote L/d verhouding uit de sortering met een d_{n50} van 15,6 mm.
- De manier van selecteren van de steen.
- De herkomst of soort van de stenen. De stenen met grotere diameter lijken wat meer gelaagd te zijn.
- De methode waarmee de afmetingen zijn bepaald.

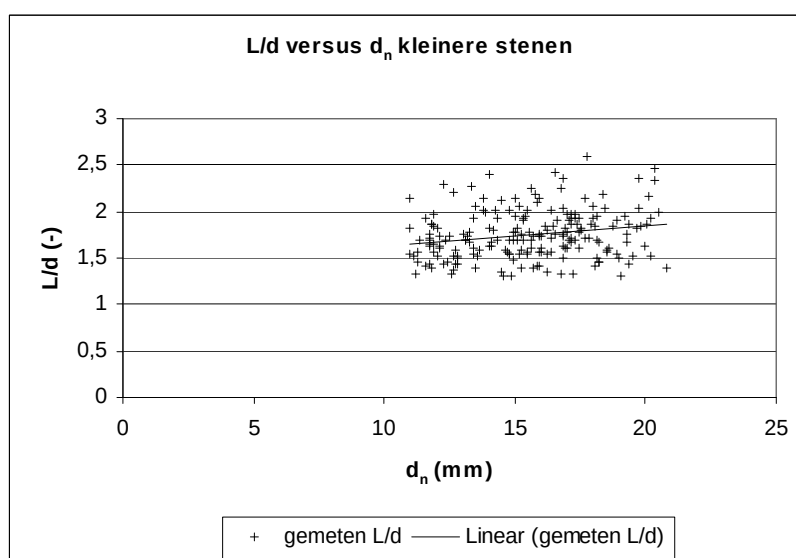
Dezelfde toename van de L/d verhouding bij toenemende diameter kwam ook naar voren uit de dataset van van der Wal [2002]. (Zie tabel 7-1). In dat onderzoek zijn de platte stenen eveneens op het oog verwijderd.

Het op het oog verwijderen van de platte stenen bij een sortering met kleine diameters heeft dus invloed op de resultaten. Bij opschaling dient hiermee rekening gehouden te worden. In tabel 7-2 zijn enkele karakteristieke waarden gegeven van de voorkomende L/d verhoudingen in de beproefde sorteringen en in de realiteit.

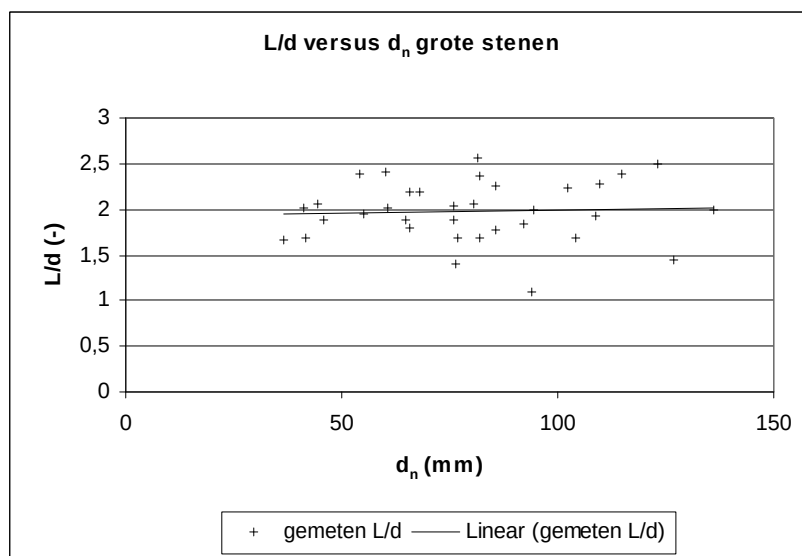
Sortering	d_{n50} (m)	$\mu_{L/d}$ (-)
Kleinere diameter	0,016	1,75
Grotere diameter	0,077	1,98
Karimun	0,192	1,87

tabel 7-2 L/d verhoudingen en nominale diameters experimenten vergeleken met quarry test

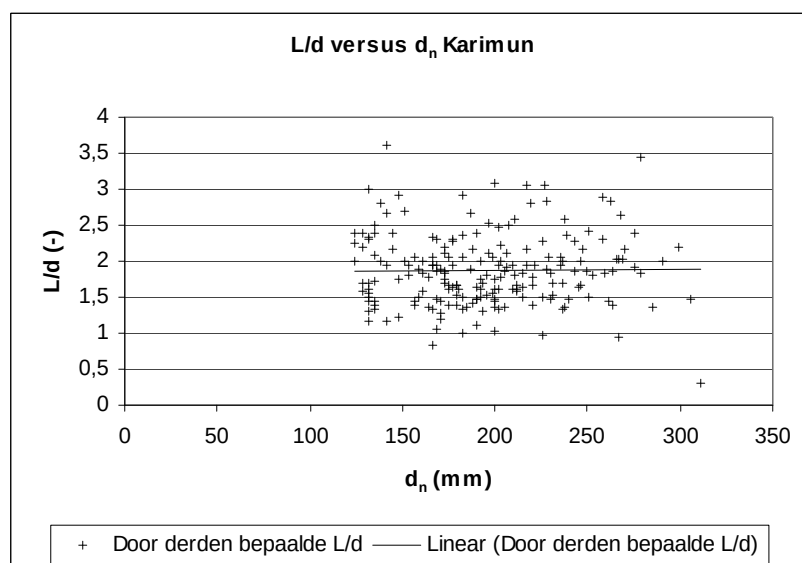
Ter illustratie worden grafieken getoond van de diverse datasets.



figuur 7-3 Gemeten L/d waarden uitgezet tegen de nominale diameter bij kleinere stenen



figuur 7-4 Gemeten L/d waarden uitgezet tegen de nominale diameter bij grotere stenen



figuur 7-5 Door derden bepaalde waarden uitgezet tegen de nominale diameter van een grading test

In de praktijk neemt de L/d verhouding af bij toenemende diameter. Dit is het gevolg van de volgende oorzaken:

1. Grotere stenen worden op het oog uit een sortering geselecteerd of 'op maat gemaakt'.
2. Bij het transport en verwerken van grote stenen brokkelen de scherpe kanten af waardoor de steen steeds ronder wordt.

De manier waarop de kleinere steen wordt gesorteerd is tevens van invloed. Indien er met een trommel wordt gewerkt is de kans dat een steen met een grote L/d verhouding erdoor valt kleiner dan wanneer er wordt gezeefd met trilstaven.

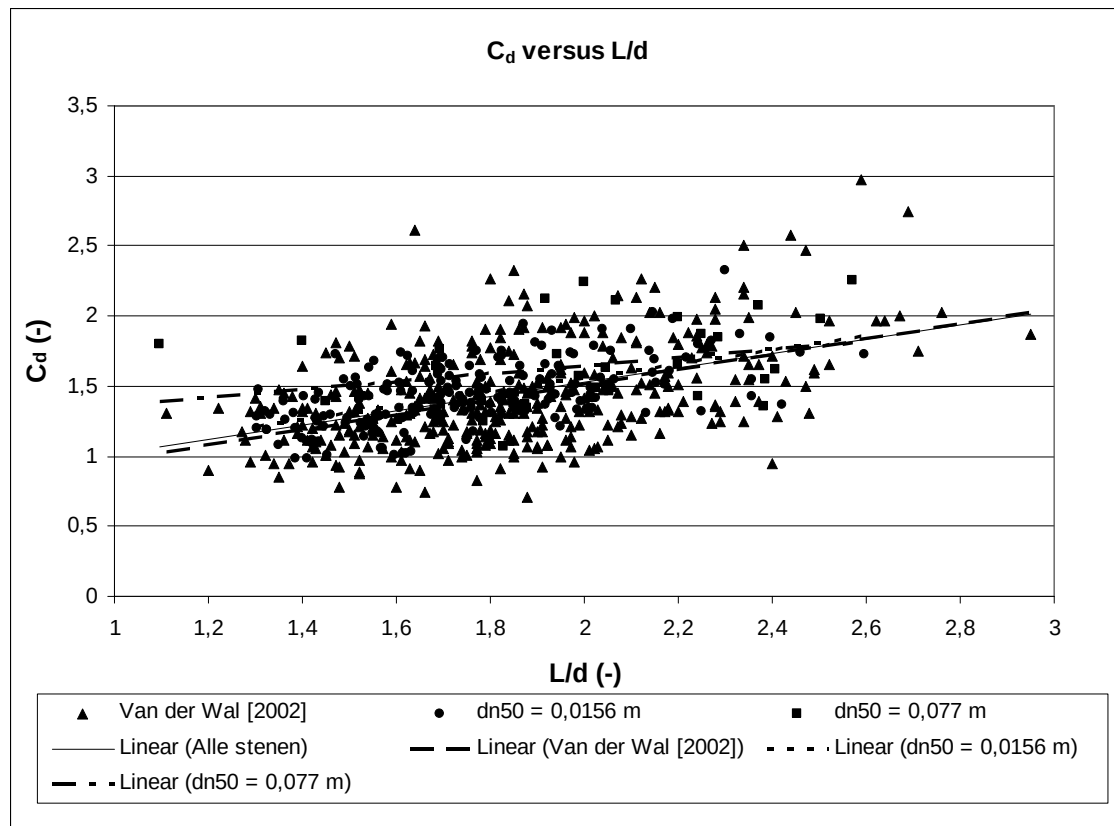
Ook de herkomst, steensoort, dichtheid of manier van springen kan van invloed zijn op de L/d verhouding van de steen.

7.2.2 Invloed van de L/d verhouding op de weerstandscoefficiënt

In de onderstaande grafiek is de L/d verhouding van alle beproefde stenen uitgezet tegen de waarde van de weerstandscoefficiënt. Door de punten is een trendlijn geplott. In bijlage Q is



de weerstandscoefficiënt uitgezet tegen de L/d verhouding voor de verschillende beproefde sorteringen.



figuur 7-6 Regressielijnen C_d versus L/d voor alle datapunten

De punten bevinden zich met een redelijk grote spreiding rondom de trendlijn. Dit komt doordat er meer factoren van invloed zijn.

Enkele factoren zijn:

- Verschillen in massadichtheid.
- Meet onnauwkeurigheden.
- Verschillen in ruwheid, zowel in vormruwheid (rond versus hoekig) als in oppervlakteruwheid.
- De vorm van een steen wordt niet volledig vastgelegd met de L/d verhouding.
- De beproefde stenen met kleinere diameter zijn geleverd met behulp van een cementmolen, wat voor een rondere steen zorgt, zowel door het aanbrengen van een laagje verf als voor het eventueel afspringen van scherven.

Het verschil tussen de verticale afstanden van de dataset en de regressielijn is normaal verdeeld. (Zie tabel 7-3)

Sortering	Regressielijn	R^2	$s_{Cd,n}$	?KS	?max	Voldoet
	(-)	(-)	(-)			
$D_{n50} = 15,6$ mm	$\mu_{Cd,n} = 0,50 \frac{L}{d} + 0,56$	0,34	0,25	0,12	0,09	JA
$D_{n50} = 77$ mm	$\mu_{Cd,n} = 0,29 \frac{L}{d} + 1,07$	0,10	0,28	0,28	0,14	JA
Van der Wal [2002]	$\mu_{Cd,n} = 0,54 \frac{L}{d} + 0,42$	0,24	0,30	0,09	0,06	JA
$D_{n50} = 15,6$ en 77 mm	$\mu_{Cd,n} = 0,49 \frac{L}{d} + 0,59$	0,32	0,22	0,12	0,09	JA
Alle	$\mu_{Cd,n} = 0,51 \frac{L}{d} + 0,51$	0,24	0,28	0,07	0,09	NEE

tabel 7-3 Controle verdeling en spreiding van Cd waardes om de regressielijnen voor alle datapunten

Het niet voldoen van de KS test, voor alle datasets samen, is het gevolg van de afronding van waarden in die datasets.

In bijlage X is het verloop van de in de experimenten bepaalde weerstandscoefficiënt uitgezet tegen het Reynoldsgetal van de stenen. In bijlage Q is de weerstandscoefficiënt per sortering geplot.

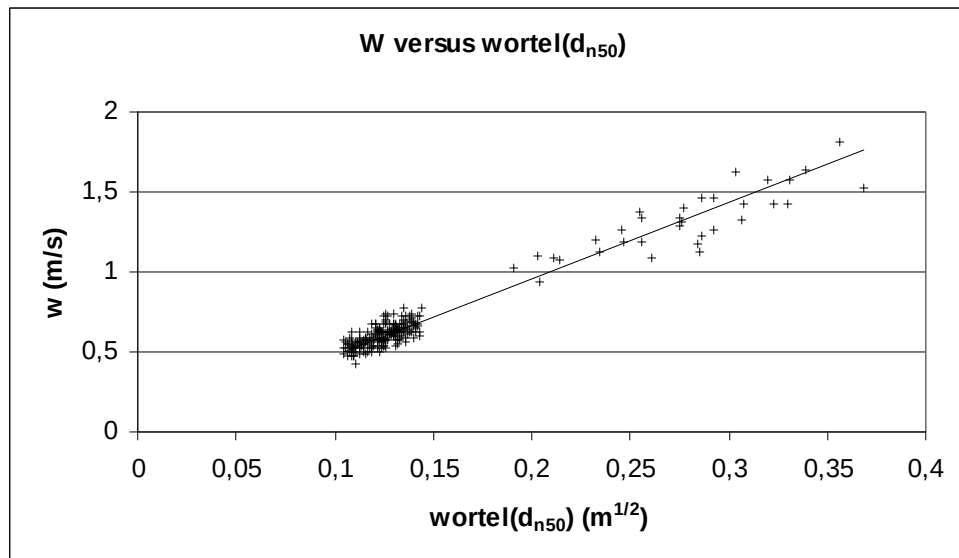
7.3 Evenwichtsvalsnelheid

In de vorige paragraaf en in van der Wal [2002] is aangetoond dat de berekening van de weerstandscoefficiënt volgens paragraaf 3.2.7 een redelijke indicatie geeft voor de optredende waarden.

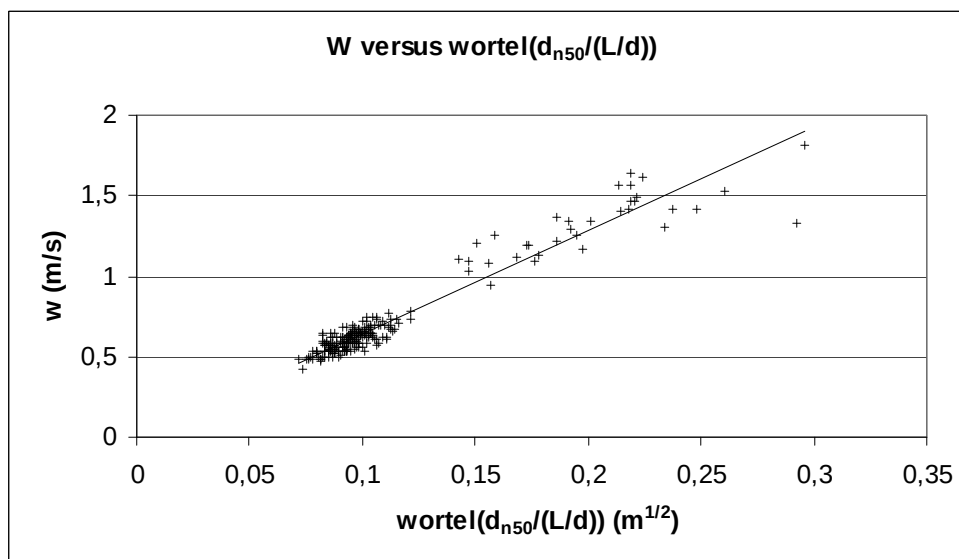
Als we vergelijking (3.8): $w = \sqrt{2\Delta \frac{g \cdot D_n}{C_d}}$ nemen en $2\Delta g$ als een constante beschouwen

blijkt dat de evenwichtsvalsnelheid afhankelijk is van de weerstandscoefficiënt en de nominale diameter.

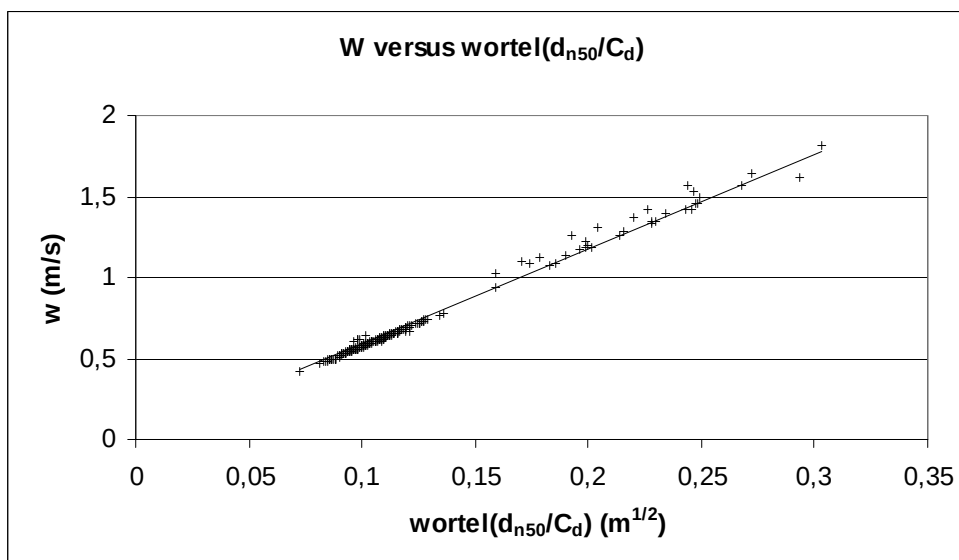
Wegens het feit dat de weerstandscoefficiënt een matige correlatie vertoont met de L/d verhouding, moet het mogelijk zijn om een voorspelling van de evenwichtsvalsnelheid van een steen te maken, aan de hand van de nominale diameter en de L/d verhouding.



figuur 7-7 De evenwichtsvalsnelheid uitgezet tegen de wortel d_{n50}



figuur 7-8 De evenwichtsvalsnelheid uitgezet tegen de wortel($d_{n50} / L/d$)



figuur 7-9 W versus wortel(d_{n50}/C_d)

In figuur 7-7, figuur 7-8 en figuur 7-9 zijn de regressielijnen door de puntenwolken van de beproefde stenen getekend.

In tabel 7-4 zijn de vergelijkingen van de regressielijnen en overige parameters gegeven.

Parameters	Regressielijn	Figuur	R ²	s _w
$w :: \sqrt{d_{n50}}$	$w = 4,80\sqrt{d_n}$	figuur 7-7	0,95	0,06
$w :: \sqrt{\frac{d_{n50}}{L/d}}$	$w = 6,425\sqrt{\frac{d_{n50}}{L/d}}$	figuur 7-8	0,93	0,07
$w :: \sqrt{\frac{d_{n50}}{C_d}}$	$w = 5,87\sqrt{\frac{d_{n50}}{C_d}}$	figuur 7-9	0,99	0,03

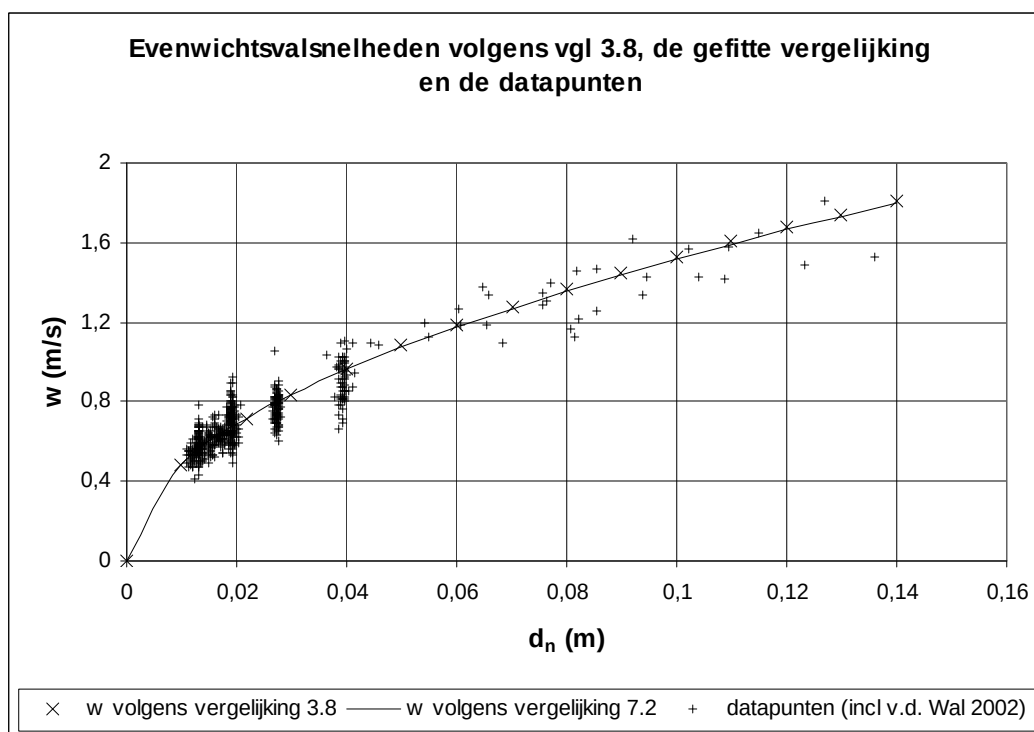
tabel 7-4 Vergelijkingen regressielijnen evenwichtsvalsnelheden en spreiding van waarden om de regressielijnen

Hieruit blijkt dat de evenwichtsvalsnelheid een positieve correlatie vertoont met de nominale diameter en een negatieve correlatie met de L/d verhouding. Een grotere nominale diameter houdt in dat de steen zwaarder is, en harder naar beneden valt. Een grotere L/d verhouding zorgt voor een grotere C_d waarde en daarom een lagere evenwichtsvalsnelheid.

De evenwichtsvalsnelheid kan worden bepaald met de volgende vergelijking:

$$w = 6,425\sqrt{\frac{d_{n50}}{L/d}} \quad (7.2)$$

Ter vergelijking zijn in figuur 7-10 de evenwichtsvalsnelheden bepaald met zowel vergelijking 3.8 als met vergelijking 7.2 geplot samen met de tijdens de experimenten bepaalde waarden. De waarden ingevuld in vergelijking 3.8 zijn: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $C_d = \mu_{C_d} = 1,43$ en $\Delta = 1,70$. De waarden in vergelijking 7.2 zijn $d_n = 0,000 - 0,14 \text{ m}$ en $L/d = \mu_{L/d} = 1,75$.



figuur 7-10 Evenwichtsvalsnelheden volgens vergelijkingen en data



7.4 Conclusies

De conclusies in dit hoofdstuk zijn tot stand gekomen aan de hand van de analyse in de hoofdstukken 7.2 en 7.3.

7.4.1 Conclusies met betrekking tot de weerstandscoefficiënt

Uit hoofdstuk 7.2 blijkt dat de L/d verhouding van een steen binnen een sortering een lichte toename vertoont bij toenemende nominale diameter. Indien de L/d verhouding van de stenen met een kleinere diameter wordt vergeleken met de L/d verhouding van de stenen met een grotere diameter blijkt dat hier verschil tussen zit. Door de manier van selecteren is het echter niet mogelijk om een verband tussen de nominale diameter en de L/d verhouding te veronderstellen.

Er blijkt tevens dat de weerstandscoefficiënt een matige correlatie met de L/d verhouding vertoont.

In hoofdstuk 7.2 is bepaald dat de weerstandscoefficiënt van breuksteen met een d_{n50} van 0,0156 m normaal verdeeld is met een gemiddelde waarde van $\mu_{Cd,n} = 1,43$; met een spreiding van $\sigma_{Cd,n} = 0,22$. bij een gemiddelde L/d verhouding van 1,75.

Dit komt redelijk overeen met de bevindingen van van der Wal [2002]. Hij vond $\mu_{Cd,n} = 1,42$ met een spreiding van $\sigma_{Cd,n} = 0,33$ voor een d_{n50} van 0,019 m.

De resultaten van de stenen met een d_{n50} van 0,077 m ligt hier iets boven: $\mu_{Cd,n} = 1,64$ met $\sigma_{Cd,n} = 0,303$.

De gemiddelde weerstandscoefficiënt van de datasets van van der Wal en de beproefde dataset is $\mu_{Cd,n} = 1,45$ met een spreiding van $\sigma_{Cd,n} = 0,32$ bij een gemiddelde L/d verhouding van 1,82.

De gemiddelde L/d verhouding van een grading test op een sortering stortsteen uit Karimun met een d_{n50} van 192 mm bedroeg 1,87. Omdat deze test door derden is uitgevoerd, is het mogelijk dat er gebruik is gemaakt van de 'doos' methode. Dit zou dan een te lage L/d verhouding geven.

De L/d verhouding van steen neemt af bij toenemende diameter. Dit is het gevolg van het sorteringsproces. Grotere stenen worden vaak op het oog eruit gepikt of 'op maat gemaakt'. Tijdens het transport van grotere stenen is er ook grotere kans dat de scherpe randen eraf brokkelen.

Mogelijk treden er bij opschaling ook nog andere schaaffecten op. Te denken valt aan een veranderende grenslaagstroming bij voldoende grote diameter. Dit zou zorgen voor een afname van de weerstandscoefficiënt. Door het uitvoeren van 'in situ' proeven kunnen deze onderkend worden.

7.4.2 Conclusies evenwichtsvalsnelheid

De evenwichtsvalsnelheid van een individueel vallende steen is een functie van de massa van een steen en zijn weerstandscoefficiënt. Indien nu aangenomen wordt dat de weerstandscoefficiënt afhankelijk is van de L/d verhouding of een andere vormfactor, kan de evenwichtsvalsnelheid van stortsteen geschat worden met behulp van de resultaten van een gradingtest.

Daarbij wordt de d_n bepaald aan de hand van de massa en worden een aantal afmetingen bepaald. Er kan dan een vormfactor worden vastgesteld waarin, in de meeste gevallen, ook de kortste afstand tussen twee platen en de langste afstand tussen twee punten is opgenomen, de L/d verhouding.

Indien nu de constante, die voor de wortel van vergelijking 7.2 staat, wordt bepaald voor verschillende steensoorten en gradaties, kan er een goede schatting worden gemaakt van de optredende evenwichtsvalsnelheden.



8 Uitvoering van de experimenten in de stroomgoot

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de uitgevoerde proeven in de stroomgoot beschreven aan de hand van de modelproefopstelling, de uitvoeringsmethodiek algemeen, de uitvoeringsmethodiek voor de proeven met enkele stenen en de uitvoeringsmethodiek voor de proeven met steengroepen. De foutenanalyse en de stappenplannen zijn opgenomen in bijlage C.

8.2 Doelen van de verschillende experimenten

De experimenten beschreven in dit rapport, worden uitgevoerd om de doelstelling, beschreven in hoofdstuk 1.4 te behalen. De doelstelling zal hieronder nog even kort worden samengevat:

De doelen van dit onderzoek zijn:

- Onderzoek doen naar de invloed van de stroming op de offset van en de horizontale spreiding rond het zwaartepunt van het stortprofiel.
- Vaststellen of horizontale stroming invloed heeft op de verticale evenwichtsvalsnelheid.
- Bestuderen of er een groepseffect waar te nemen is bij het storten met een gemodelleerde zijstorter in stromend water.

Om te bepalen of horizontale stroming invloed heeft op de weerstandscoefficiënt van breuksteen wordt er als volgt te werk gegaan:

In de experimenten beschreven in hoofdstuk 6, wordt de weerstandscoefficiënt van breuksteen bepaald in stilstaand water. Deze resultaten zijn gepresenteerd in hoofdstuk 7. Om deze te vergelijken met de weerstandscoefficiënt van breuksteen in stromend water, worden experimenten uitgevoerd met verschillende stroomsnelheden. Deze experimenten staan beschreven in hoofdstuk 8.5. Bij het doen van experimenten met individueel gestorte stenen wordt tevens de offset en de spreiding bepaald.

De offset en spreiding van individueel gestorte stenen wordt vergeleken met de offset en spreiding van kleine groepen tegelijk gestorte stenen. Er kan dan bepaald worden of er interacties tussen tegelijk gestorte stenen bestaan die voortkomen uit groepsgedrag. De uitvoering van de experimenten met tegelijk gestorte stenen is beschreven in hoofdstuk 8.6. Bij deze experimenten wordt eveneens naar de groepsvalsnelheden gekeken. Een toename van de groepsvalsnelheid wijst op het bestaan van een groepsgedrag.

8.3 De modelproefopstelling

8.3.1 De stroomgoot

Voor de proeven is gebruik gemaakt van een stroomgoot in het Laboratorium voor de Vloeistofmechanica van de faculteit Civiele Techniek van de TU Delft.

De afmetingen van de stroomgoot bedragen: $l \times b \times d = 35 \times 0,805 \times 0,85$ m.



figuur 8-1 De stroomgoot

De maximaal beschikbare waterdiepte bedraagt 0,81 m. De wanden van de goot zijn van glas. In het meetgebied is de achterwand voorzien van zwart folie om het contrast met de witte stenen zo groot mogelijk te maken.

Bodeminrichting

In de stroomgoot is op de bodem een tapijt plaatsvast aangebracht met behulp van acrylkit. Dit tapijt zorgt voor enige bodemruwheid.

De maximale toepasbare stroomsnelheid in de goot met betrekking tot het begin van bewegen van stenen wordt berekend met de volgende vergelijking: (G.J. Schiereck [2000])

$$\bar{u}_c = C \sqrt{\psi_c \Delta d_{n50}} \quad (8.1)$$

waarin: $\bar{u}_c$ dieptegemiddelde kritische snelheid [m/s]
 ψ_c Shields parameter 0,03

C Chezy coëfficiënt $C = 18 \log \frac{12R}{k_r}$

Waarin R = hydraulische straal (0,272 m) en $k_r = 2d_{n50 \text{ bodem}}$

Bij een bodembekleding van tapijt wordt aangenomen dat $k_r = 0,003 \text{ m}$.

De minimale nominale diameter die in de experimenten is gebruikt is 0,01 m. De daarbij toelaatbare dieptegemiddelde stroomsnelheid is 1,22 m/s bij een bekleding met tapijt.

Indien de bodem voorzien is van stenen met een d_n van 0,02 m is de maximaal toelaatbare dieptegemiddelde stroomsnelheid 0,77 m/s.

Aangezien de maximale dieptegemiddelde stroomsnelheid 0,4 m/s bedroeg, trad er geen bodemtransport op.

In de realiteit komen de stenen gedeeltelijk neer op de al liggende stenen en gedeeltelijk op de bestaande bodem. Aangezien de steen al een horizontale impuls door het stromende water heeft treedt er een bodemeffect op. In van Oord [1996] is de verwachte



wegspringafstand van steen berekend, in het geval van stilstaand water. De uitkomst was dat een steen maximaal 2,2 maal zijn eigen diameter wegspringt.

De inrichting van het meetgebied

In het gebied waar de stenen neerkomen, is een assenstelsel van witte lijnen aangebracht. Op deze manier kunnen de relatieve posities van de stenen ten opzichte van het loslaatpunt bepaald worden. Hiervoor is het van belang dat het gebied groot genoeg is zodat alle stenen daadwerkelijk in het meetgebied vallen.

In tabel 8-1 zullen enkele theoretische waarden worden gegeven waarmee rekening is gehouden.

De verwachte offset is bepaald met de volgende vergelijking: $x = h \frac{\sqrt{C_d/2} \bar{U}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}$ waarin h de

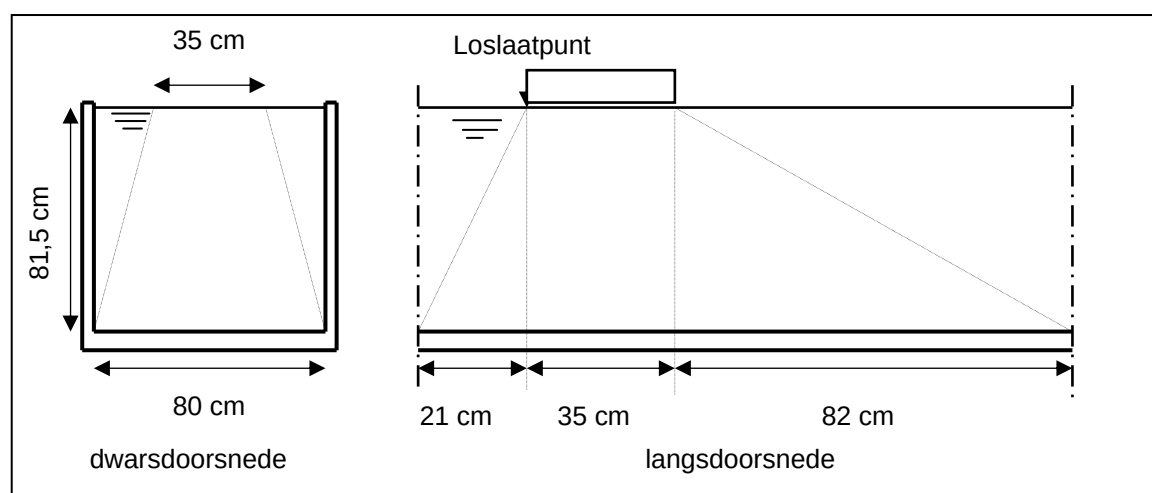
waterdiepte is en C_d de weerstandscoefficiënt met een waarde van 1,43 (Zie hoofdstuk 7.2 en 7.4.1). Voor de maximale horizontale uitwijking die door 99% van de stenen als gevolg van het Random Walk gedrag wordt overschreden, wordt een waarde van 2,34 maal σ_n van het ESM genomen (Vrijling et al [1995], Van Gelderen [1998]). Deze geldt echter voor stilstaand water.

Diameter (m)	Stroomsnelheid (m/s)	Offset (m)	2,34 σ (m)	Min x (m)	Max x (m)
0,01	0	0,00	0,15	-0,15	0,15
	0,4	0,67	0,15	0,52	0,82
0,02	0	0,00	0,21	-0,21	0,21
	0,4	0,48	0,21	0,27	0,69

tabel 8-1 Spreiding en verplaatsing met en zonder stroming

Een en ander wordt in figuur 8-2 duidelijk gemaakt.

Uit tabel 8-1 blijkt tevens dat er niet te dicht bij de randen gestort mag worden. Bij een diameter van 0,02 m is de maximale uitwijking 0,21 meter. Dit betekent dat er niet gestort mag worden binnen een afstand van 21 cm vanuit de wanden. Hierdoor blijft er een werkbare ruimte over van 38 cm voor het dwars op de stroming storten van een groep. (Zie figuur 8-16). Zie figuur 8-2 voor de grenzen van het ingerichte meetgebied.

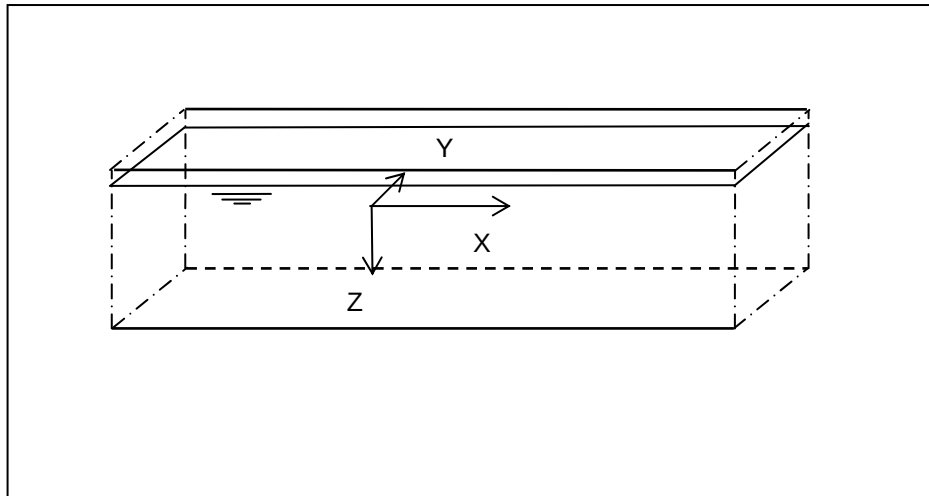


figuur 8-2 Theoretische spreiding en offset van steen in de stroomgoot

8.3.2 De gebruikte apparatuur en software

De bepaling van de x en y coördinaten op de bodem

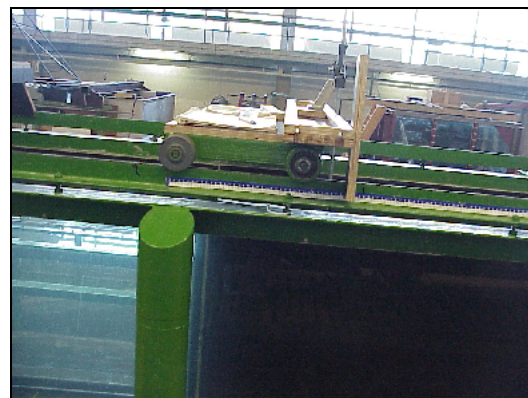
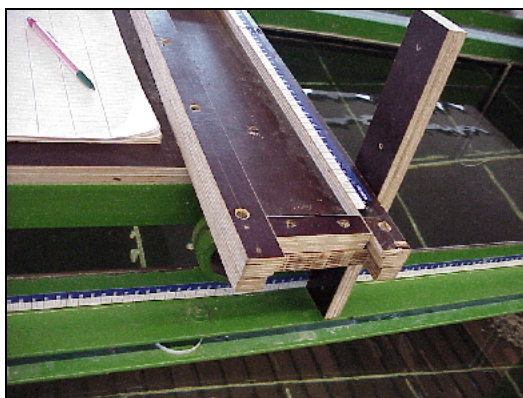
Er dient een assenstelsel aangebracht te worden om de coördinaatrichtingen vast te leggen. Dit assenstelsel is geschetst in figuur 8-3.



figuur 8-3 Assenstelsel in de stroomgoot

Om de vergelijking te trekken tussen de uitwijkingen bij verschillende stroomsnelheden dient de positie na het neerkomen op de bodem bepaald te worden.

In eerste instantie is er gebruik gemaakt van een verplaatsbaar platform waarop een schaal aanduiding en een peilnaald gemonteerd waren. Zie figuur 8-4 voor een voorbeeld.



figuur 8-4 Plaatsbepaling met meetwagentje.

Tijdens het bepalen van de x en y posities van de gestorte stenen bleek dit zeer tijdrovend te zijn. Om sneller en nauwkeuriger te werken, is overgestapt op de wijze die in het stappenplan in bijlage C beschreven is.

Deze methode is gedurende de overige experimenten toegepast.

Het meten van het stromingsprofiel

Het verticale stromingsprofiel is gemeten voor en na het loslaatpunt, in het geval dat de loslaatconstructie loodrecht op de stroming stond.

Voor het meten van de stroomsnelheid over de verticaal is gebruik gemaakt van een, door het Waterloopkundig Laboratorium ontwikkelde, Elektro Magnetische Snelheidsmeter (EMS). Een EMS creëert een wisselend magnetisch veld met behulp van een spoel. Er wordt dan een voltage gemeten. Dit voltage wordt doorgegeven aan een Analoo / Digitaal Converter en met behulp van een PC met het programma Daisylab gevisualiseerd, zie figuur 8-5. Door het verschil te berekenen tussen het voltage bij stroming en het voltage bij stilstaand water, kan, na toepassen van een correctie, de stroomsnelheid worden berekend.

Om de uitkomsten te valideren zijn er bij elke stroomsnelheid tevens oppervlakte snelheidsmetingen met behulp van een stopwatch uitgevoerd.

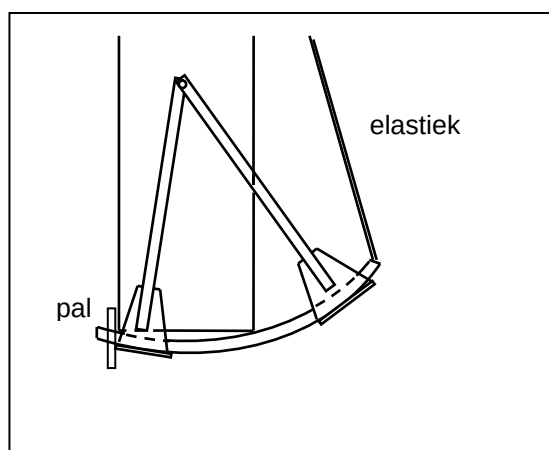


figuur 8-5 EMS met A/D converter en PC

De loslaatconstructie

Voor de experimenten in de goot is er gebruik gemaakt van een platform dat 380° kan draaien. Op het platform kunnen zowel de ring voor het loslaten van individuele stenen als de loslaatconstructie voor het loslaten van groepen geplaatst worden. Een en ander is zodanig geconstrueerd en nagemeten met behulp van een peillood en waterpas dat het midden van het loslaatpunt zich telkens op dezelfde locatie bevindt. Zie figuur 8-8 en figuur 8-9 voor een indruk.

Het loslaatmechanisme bestaat uit een rechthoekig bakje. De onderkant van het bakje is voorzien van een klep. De klep kan mechanisch worden geopend door een pal weg te trekken. Hij wordt dan opengetrokken door elastiekjes. Zie figuur 8-6.

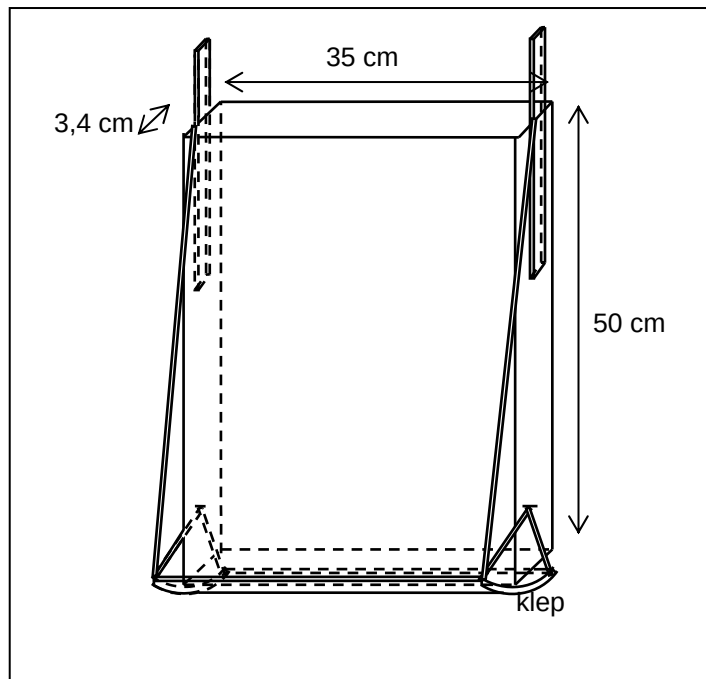


figuur 8-6 Zijaanzicht klep constructie loslaatmechanisme

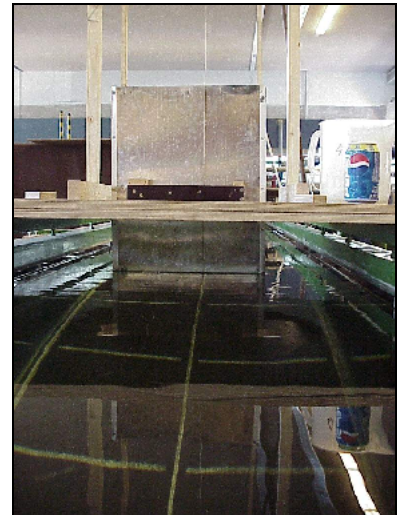
De afmetingen (figuur 8-7)

De afmetingen van het loslaatmechanisme worden bepaald door 2 eisen.

- De lengte mag niet meer dan 40 cm bedragen omdat anders de stenen tegen de rand van de goot aankomen: $l = 35$ cm.
- De breedte is 3,4 cm.
- De hoogte moet voldoende zijn om alle stenen erin te passen. Er gaan gemiddeld 25 stenen op een rij. Dat houdt in dat er bij een vulling van 200 stenen 8 rijen op elkaar gestapeld zijn. 8 maal d_{n50} geeft 12,5 cm. Voor de zekerheid wordt er gewerkt met een hoogte van 50 cm.



figuur 8-7 Inwendige afmetingen loslaatmechanisme



figuur 8-8 Platform en ring voor loslaten individuele stenen



figuur 8-9 Grid indeling meetgebied



De videoapparatuur

De apparatuur die gebruikt is om te filmen is niet dezelfde als beschreven in paragraaf 6.3.2. Er is gebruikt gemaakt van een videocamera die direct op een PC is aangesloten. Deze PC is voorzien van een RAID systeem. Dat wil zeggen dat er 3 SCSI schijven tegelijkertijd verschillende beelden opslaan. Op deze manier is het mogelijk om 25 frames per seconde weg te schrijven. Met behulp van een video-captureprogramma kan de opname worden gestart, gestopt en opgeslagen. Vervolgens kunnen met L&C scan X-Y de stenen worden aangeklikt om de locatie te bepalen.

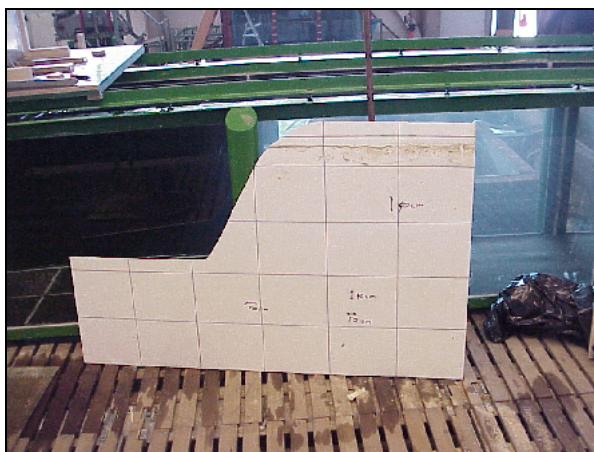
Er is gebruik gemaakt van een 3 tal halogeenlampen voor de belichting.

De overlaat

Voor het vastzetten van de overlaat is gebruik gemaakt van een plank die diende als overlaat. Aangezien er meerdere stroomsnelheden toegepast werden is er stapsgewijs een stuk vanaf gezaagd. Zie bijlage P voor de eigenschappen.

Het calibratievlak

Voor het vaststellen van de referentiepunten is gebruik gemaakt van een calibratievlak. Zie figuur 8-10



figuur 8-10 Het calibratievlak

8.4 De algemene uitvoeringsmethodiek

8.4.1 De gebruikte stenen

De gebruikte stenen zijn dezelfde als degene die zijn gebruikt bij de metingen van de evenwichtsvalsnelheden. De eigenschappen van de individuele stenen worden beschreven in hoofdstuk 7 en bijlage D.

8.4.2 Het instellen van de stroomgoot

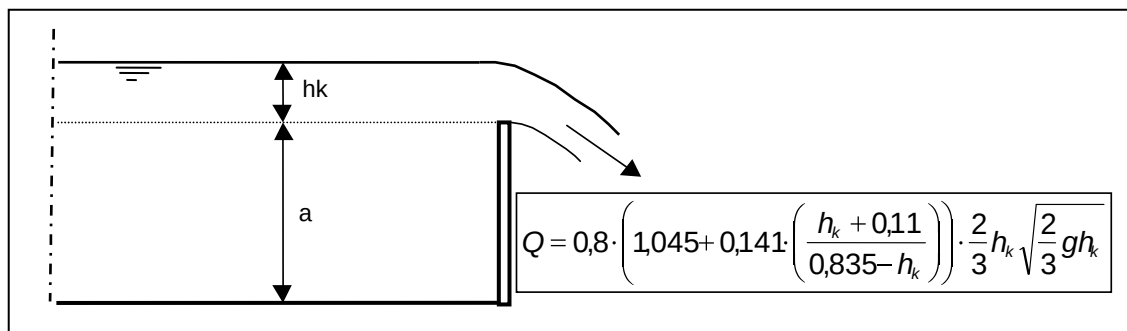
Voor er met de proeven kan worden begonnen dient de stroomsnelheid in de stroomgoot ingesteld te zijn. Daarvoor wordt er gebruik gemaakt van 2 opleggende voorwaarden:

- De opening van de afsluiter aan de instroomzijde.
- De stuwhoogte.

De toegepaste methodiek is als volgt:

Allereerst wordt de plank die als overlaat fungeert tot de juiste afmeting gezaagd. Hiermee ligt de diepte a vast. Zie figuur 8-11. Vervolgens wordt de mechanische hoofdafsluiter geopend, terwijl de regelbare afsluiter dicht staat.

Als de hoofdafsluiter geheel open gedraaid is wordt de regelbare afsluiter open gedraaid totdat de waterstand over de gehele goot de diepte $h_k + a$ bedraagt. Zie figuur 8-11. Vervolgens wordt het verticale stroomprofiel gemeten door met de EMS op 8 punten het voltageverschil te bepalen. Dit wordt doorgetrokken naar de oppervlakt snelheid die gemeten wordt door 10 keer de afgelegde afstand van een drijvend balletje te timen met een stopwatch. Zo ontstaat de dieptegemiddelde snelheid U , gemeten in het midden van de goot. Zie bijlage V voor de verticale snelheidsprofielen.



figuur 8-11 Schematisatie overlaat

Indien alles naar behoren is ingesteld wordt er vervolgens alleen nog maar gewerkt met de hoofdafsluiter en blijft de regelbare afsluiter in dezelfde stand staan totdat de proeven met de desbetreffende stroomsnelheid zijn afgerond.

8.4.3 Het verschijnsel scheve aanstroming

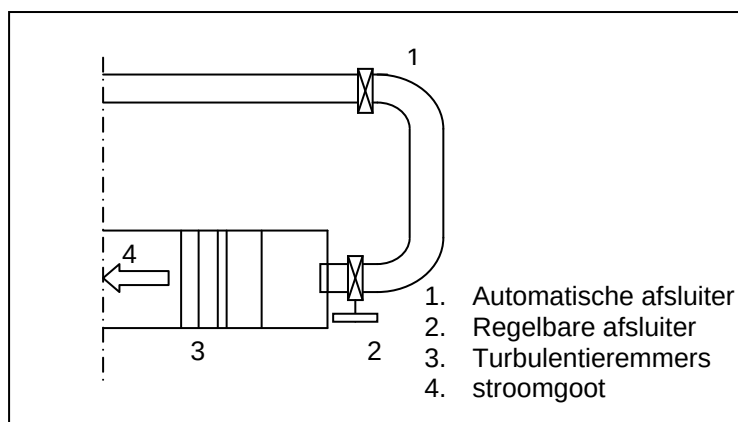
Bij het uitwerken van de proeven met een stroomsnelheid van 0,40 m/s bleek dat het stortprofiel aan de ene zijde van de goot een grotere offset vertoonde dan het stortprofiel aan de andere zijde van de goot. Na deze constatering is de stroomsnelheid gemeten op 5 punten in de goot. Uit de resultaten van deze metingen, zoals gepresenteerd in figuur 8-13 bleek de stroomsnelheid niet gelijkmatig over de breedte van de goot verdeeld te zijn.

Dit kan een aantal oorzaken hebben:

1. De wandruwheid van de ene wand verschilt van die van de andere wand.
2. De bodemruwheid is niet cumulatief gelijkmatig verdeeld over de breedte.
3. Door een ongelijkmatige vulling van de loslaatconstructie treedt er aan de ene kant in grotere mate een groepseffect op dan aan de andere kant.
4. De instroomopening is asymmetrisch.
5. De snelheidsverdeling over de breedte van de goot is asymmetrisch.

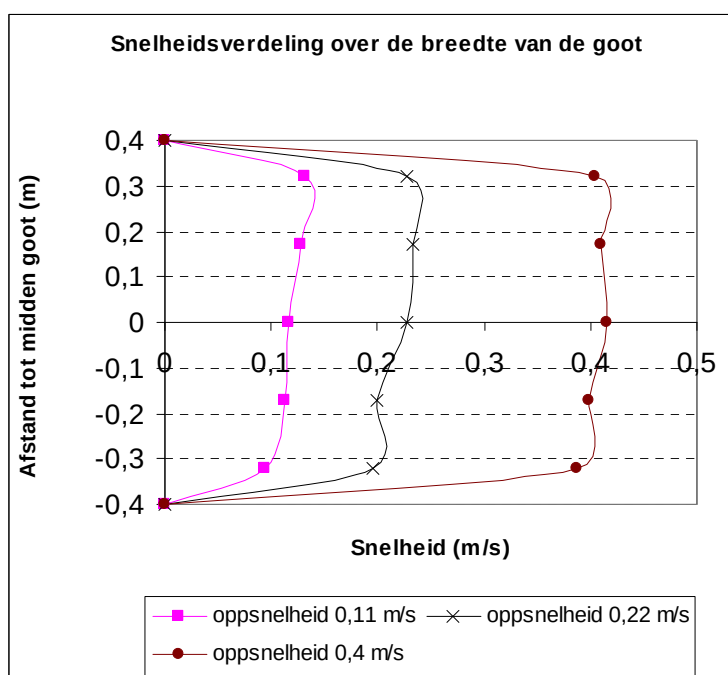
De punten 1, 2 en 4 lijken niet de oorzaak en punt 3 is zo goed als uitgesloten omdat na het vullen van de loslaatconstructie de verdeling in het bakje is gecontroleerd met een peilstok en zo nodig is herverdeeld.

Een mogelijke verklaring is dat de leiding waarmee het water in de goot wordt gebracht voor de instroomopening een hoek maakt van 180° (zie figuur 8-12). Hierdoor heeft het water aan de buitenzijde van de bocht een grotere snelheid dan het water aan de binnenzijde van de bocht.



figuur 8-12 Principetekening bovenaanzicht instroomopening

Na het bepalen van het snelheidsprofiel over de breedte van de goot op een diepte van 0,48 meter bleek dat de snelheid niet gelijkmatig over de breedte van de goot was verdeeld (zie figuur 8-13).



figuur 8-13 Snelheidsverdeling over de breedte van de goot

Het effect van deze scheve aanstroming is dat de stenen een kleine zijdelingse verplaatsing ondergaan. Bij het dwars storten van groepen is de verplaatsing in x-richting van de stenen die zijn gestort aan de positieve kant groter dan van de stenen die zijn gestort aan de negatieve kant gezien vanuit het midden. Hierdoor is de totale spreiding van de uitwijkingen in x-richting groter dan wanneer er sprake zou zijn van een symmetrisch stroombeeld. Het effect is dus van invloed op de resultaten.

8.5 De uitvoeringsmethodiek voor de proeven met individuele stenen

8.5.1 Doel van de proeven met individueel losgelaten stenen

Van de helft van de geselecteerde 200 stenen worden de evenwichtsvalsnelheden bepaald. Deze worden vervolgens omgerekend naar weerstandscoefficienten. Door dit te doen voor verschillende stroomsnelheden kan de invloed van de stroomsnelheid op de evenwichtsvalsnelheid worden onderzocht. Indien een steen een hogere evenwichtsvalsnelheid bezit zal de tijd dat deze zich in stromend water bevindt korter worden. Hierdoor wordt de horizontale verplaatsing als gevolg van de stroming kleiner.

8.5.2 Uitgevoerde proeven met individueel losgelaten stenen

In tabel 8-2 worden de uitgevoerde proeven met individueel losgelaten stenen uiteengezet.

$\bar{U}$ (m/s)	Uitwijkingen bepaald	Valsnelheden bepalen	Herhalingen	Codering (x = 1,2)
0,00	Stralen (200 stuks)	nee	2	Serie x:0 m/s
0,10	X- en y-posities (200 stuks)	100 stuks	2	Serie x:0,10 m/s
0,22	X- en y-posities (200 stuks)	100 stuks	2	Serie x:0,22 m/s
0,40	X- en y-posities (200 stuks)	100 stuks	2	Serie x:0,40 m/s

tabel 8-2 Uitgevoerde proeven met individueel losgelaten stenen in de stroomgoot

Te zien is dat de evenwichtsvalsnelheden bij stroming worden bepaald van 100 van de stenen waarvan de evenwichtvalsnelheid zonder stroming is bepaald. Om een goede verdeling van de stenen binnen de selectie van 100 stenen te verkrijgen, is de selectie als volgt uitgevoerd:

1. Alle stenen zijn gerangschikt naar de d_n (massa).
2. Vervolgens zijn in die volgorde 4 groepen samengesteld van ieder 50 stenen conform volgend selectieprofiel: gr1 - gr2 - gr3 - gr4 - gr4 - gr3 - gr2 - gr1 - gr1 - gr2 – enz.

De steennummers en hun massa verdeeld over de groepen staan in bijlage O.

De evenwichtsvalsnelheden van individuele stenen zijn bepaald met de stenen uit de groepen de groepen 1 en 4. Het stappenplan staat beschreven in bijlage C.

8.6 De uitvoeringsmethodiek voor de proeven met steengroepen in de stroomgoot

8.6.1 Doel van de proeven met tegelijk gestorte stenen

Bij de experimenten met steengroepen zijn er 2 oriëntaties toegepast. Loodrecht op de stroming en evenwijdig aan de stroming. Bij de experimenten evenwijdig aan de stroming wordt bepaald of er sprake is van een groepseffect in horizontale zin. Hierbij zou indrukking moeten optreden. In figuur 8-15 zijn de verschillende oriëntaties schematisch weergegeven. In figuur 10-5 is het effect van indrukking van de kop van de groep schematisch weergegeven.

Bij de dwars op de stroom gestorte groepen kunnen de offset en de spreiding in de x-richting (zie figuur 8-15) vergeleken worden met de offset en de spreiding van de individueel gestorte stenen.

8.6.2 Uitgevoerde proeven met tegelijk gestorte stenen

In tabel 8-3 worden de uitgevoerde proeven met tegelijk gestorte stenen uiteengezet.

Aantal stenen stuks	Groeps- samenstelling	Oriëntaties op stroming (dwars of evenwijdig)	Stroomsnelheden $\bar{U}$	Herhalingen	Aantal proeven
50	gr1	2(+1 bij 0 m/s)	0,10; 0,22 en 0,40 m/s	2	14
100	gr2 + gr3	2(+1 bij 0 m/s)	0,10; 0,22 en 0,40 m/s	2	14
150	gr2 + gr3 + gr4	2(+1 bij 0 m/s)	0,10; 0,22 en 0,40 m/s	2	14
200	gr1 + gr2 + gr3 + gr4	2(+1 bij 0 m/s)	0,10; 0,22 en 0,40 m/s	2	14
Totaal aantal proeven (exclusief 8 proeven uitgevoerd in het aquarium):					56

tabel 8-3 Uitgevoerde proeven met steengroepen in de stroomgoot

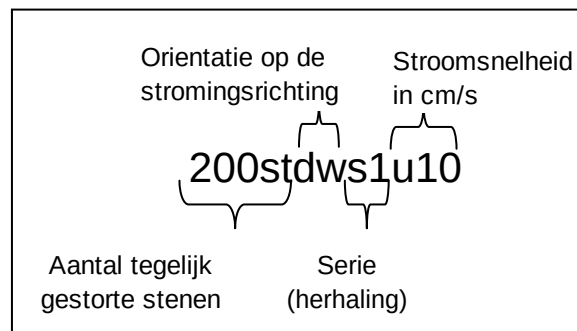


8.6.3 Codering van de uitgevoerde proeven

Elke proef is voorzien van een unieke code van 12 letters en cijfers. Deze code komt als volgt tot stand:

- De eerste 5 posities staan voor het aantal tegelijk gestorte stenen: 050st, 100st, 150st en 200st.
- De 6e en 7e positie staan voor de oriëntering van de loslaatconstructie boven de stroomgoot: dw voor dwars en ev voor evenwijdig aan de stroomrichting.
- De 8e en 9e positie geven de herhaling aan: s1 voor serie 1 en s2 voor serie 2.
- De laatste 3 posities geven aan voor welke stroomsnelheid de proef is uitgevoerd: u00 voor 0 m/s, u10 voor 0,10 m/s, u22 voor 0,22 m/s en u40 voor 0,40 m/s.

Zie ook figuur 8-14.



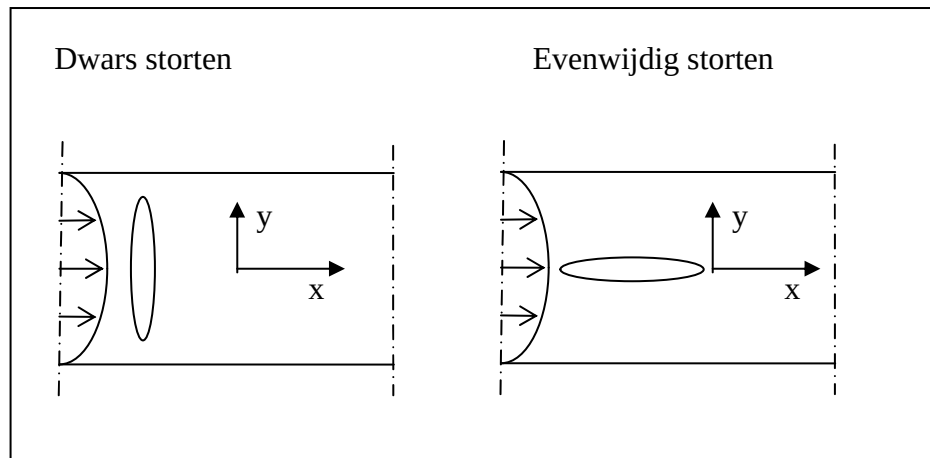
figuur 8-14 Codering proeven met steengroepen

De uitgevoerde experimenten met steengroepen staan gerangschikt in tabel 8-4.

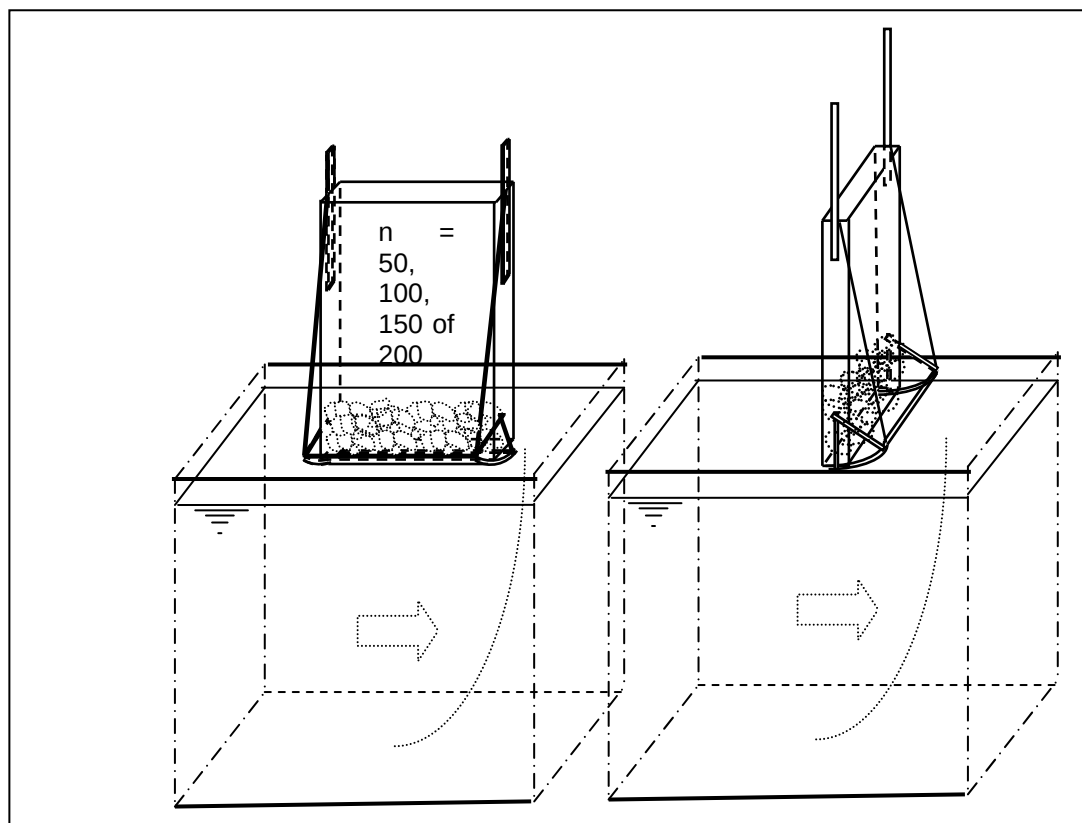
Experimenten 0 m/s		Experimenten 0,10 m/s		Experimenten 0,22 m/s		Experimenten 0,40 m/s	
Nr.	Code	Nr.	Code	Nr.	Code	Nr.	Code
1	050stdws1u00	17	050stdws1u10	33	050stdws1u22	49	050stdws1u40
2	050stdws2u00	18	050stdws2u10	34	050stdws2u22	50	050stdws2u40
3	100stdws1u00	19	100stdws1u10	35	100stdws1u22	51	100stdws1u40
4	100stdws2u00	20	100stdws2u10	36	100stdws2u22	52	100stdws2u40
5	150stdws1u00	21	150stdws1u10	37	150stdws1u22	53	150stdws1u40
6	150stdws2u00	22	150stdws2u10	38	150stdws2u22	54	150stdws2u40
7	200stdws1u00	23	200stdws1u10	39	200stdws1u22	55	200stdws1u40
8	200stdws2u00	24	200stdws2u10	40	200stdws2u22	56	200stdws2u40
9	050stevs1u00	25	050stevs1u10	41	050stevs1u22	57	050stevs1u40
10	050stevs2u00	26	050stevs2u10	42	050stevs2u22	58	050stevs2u40
11	100stevs1u00	27	100stevs1u10	43	100stevs1u22	59	100stevs1u40
12	100stevs2u00	28	100stevs2u10	44	100stevs2u22	60	100stevs2u40
13	150stevs1u00	29	150stevs1u10	45	150stevs1u22	61	150stevs1u40
14	150stevs2u00	30	150stevs2u10	46	150stevs2u22	62	150stevs2u40
15	200stevs1u00	31	200stevs1u10	47	200stevs1u22	63	200stevs1u40
16	200stevs2u00	32	200stevs2u10	48	200stevs2u22	64	200stevs2u40

tabel 8-4 Uitgevoerde proeven met steengroepen

In figuur 8-15 wordt het verschil in oriëntatie tussen dwars op de stroming storten (dwars storten) en evenwijdig aan de stroming storten (evenwijdig storten) geschetst. In figuur 8-16 is een 3-D schets opgenomen.



figuur 8-15 Bovenaanzicht oriëntatie en assenstelsel



figuur 8-16 3-D schets los te laten stenen, plaatje links is evenwijdig aan en rechts is dwars op de stroming storten

8.6.4 Stappenplan bij het uitvoeren van de proeven met steengroepen in de stroomgoot

Dit stappenplan is gelijk aan het stappenplan beschreven in bijlage C. Behalve op de punten 9 en 14. De stenen worden als een groep losgelaten en de groep wordt aangeklikt door 4 maal 3 punten aan te klikken die de positie van de onderkant, rechterzijde, bovenkant en linkerzijde van de groep weergeven.

Doordat de tijd tussen de beelden bekend is kunnen de valsnelheden bepaald worden.

8.6.5 Samenvatting foutenanalyse

De volledige foutenanalyse is opgenomen in bijlage C. Hier zal alleen het resultaat getoond worden.



Type fout	oorzaak	Max % van de gemeten w
Verschil valsnelheden	Random karakter valbeweging	27
Meet onnauwkeurigheden	Aanklikfout	0,6
	Bewegingsonscherpthe	3
	Horizontale uitwijkingen	12
Totaal meetfouten		15,6

tabel 8-5 Samenvatting foutenanalyse stroomgoot

Uit tabel 8-5 is af te leiden dat het verschil in de gemeten evenwichtsvalsnelheid bij dezelfde steen met dezelfde stroomsnelheid 27% kan bedragen. In deze fout zitten ook de meetfouten van 16 procent die met een kleine kans kunnen optreden. Het random karakter van de valbeweging heeft dus een grote invloed op de optredende valsnelheden.



9 Resultaten van experimenten met individueel gestorte stenen in de stroomgoot

9.1 Inleiding

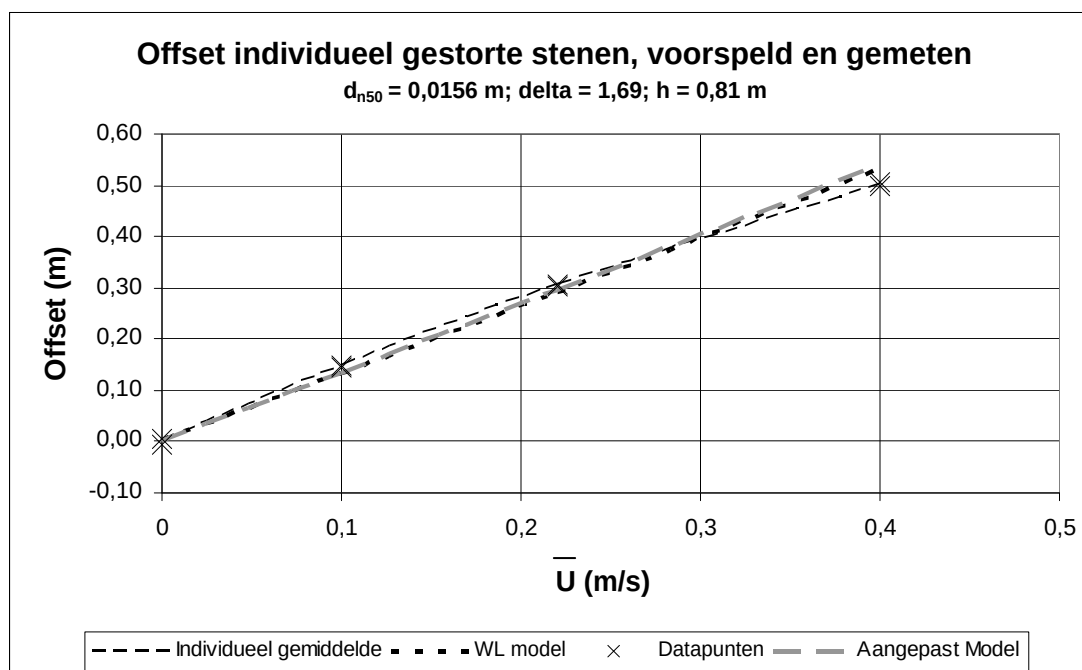
In dit hoofdstuk zullen de resultaten behandeld worden volgens uit de experimenten met individueel gestorte stenen in de stroomgoot.

In hoofdstuk 9.2 wordt de offset en spreiding van individueel gestorte stenen bij stroming besproken. Ook wordt er aandacht besteed aan de gemeten evenwichtsvalsnelheden. Er zal een theoretische benadering gegeven worden van de verdeling van de uitwijkingen in hoofdstuk 9.3. In hoofdstuk 9.4 wordt het model getoetst aan de metingen en wordt er enige aandacht besteed aan de optredende ontmenging. In hoofdstuk 9.5 zijn enkele conclusies opgenomen. In de paragrafen 3.3 en 3.4 is een en ander theoretisch uitgelicht met betrekking tot uitwijkingen van een steen.

9.2 Gemiddelde offset en spreiding individueel gestorte stenen

9.2.1 Offset individueel gestorte stenen

In figuur 9-1 is de gemiddelde offset van 2 x 200 individueel gestorte stenen en de voorspelde offset geplott bij verschillende stroomsnelheden. De gemiddelde verplaatsing van de individueel gestorte stenen per stroomsnelheid is als offsetwaarde aangehouden. De uitwijkingen per stort zijn opgenomen in bijlage G.



figuur 9-1 Offset individueel gestorte stenen, gemeten en voorspeld

Het WL model is weergegeven aan de hand van formule 2.4. Het aangepaste model is weergegeven volgens formule 2.6. Uit deze grafiek blijkt dat de door het WL ingevoerde coëfficiënten C_b en C_i vervangen kunnen worden door $\sqrt{C_d/2}$ en door $0,95 \cdot \sqrt{C_d/2}$.

De waarde van de datapunten van de bepaalde offset is het gemiddelde van 200 uitwijkingen per stroomsnelheid. De spreiding rond dat gemiddelde is gegeven in figuur 9-10. Dit geeft 8 datapunten. (2 per stroomsnelheid). Alle waarden zijn bepaald aan de hand van metingen in

de stroomgoot. De door het model voorspelde offset is berekend door de d_{n50} van de gestorte stenen in te vullen.

De voorspelde offset (WL) is bepaald aan de hand van vergelijking 2.6.

$$offset = h \frac{\bar{U}}{w} = h \frac{\sqrt{C_d/2} \cdot \bar{U}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}} \quad (2.6)$$

De in dit onderzoek geldende theoretische waarden zijn: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $d_{n50} = 0,0156 \text{ m}$, $\Delta = 1,69$, $h = 0,81 \text{ m}$, $C_b = 0,83$ en $\alpha = 0$. Voor $\bar{U}$ is de dieptegemiddelde snelheid genomen van 0; 0,10; 0,22 of 0,40 m/s.

Opvallend is dat vergelijking 2.6 bij stroomsnelheden tot 0,2 m/s een te kleine offset voorspelt en naarmate de stroomsnelheid oploopt een grotere offset. Deze verschillen zijn klein, maar wel aanwezig. Het verschil tussen de voorspelde offset en de bepaalde offset is waarschijnlijk het gevolg van het niet constant zijn van de evenwichtsvalsnelheid, en dus de weerstandscoefficiënt bij toenemende stroomsnelheid. Dit zal in de volgende paragraaf toegelicht worden.

9.2.2 Evenwichtsvalsnelheden van stenen in stromend water

Bij de experimenten in de stroomgoot zijn de evenwichtsvalsnelheden bepaald van stenen in stromend water. De stenen hebben de bovenste 40 cm van de goot om een evenwichtsvalsnelheid te ontwikkelen. Daarna wordt de evenwichtsvalsnelheid gemeten. Deze is bepaald over een traject van ongeveer 0,35 meter.

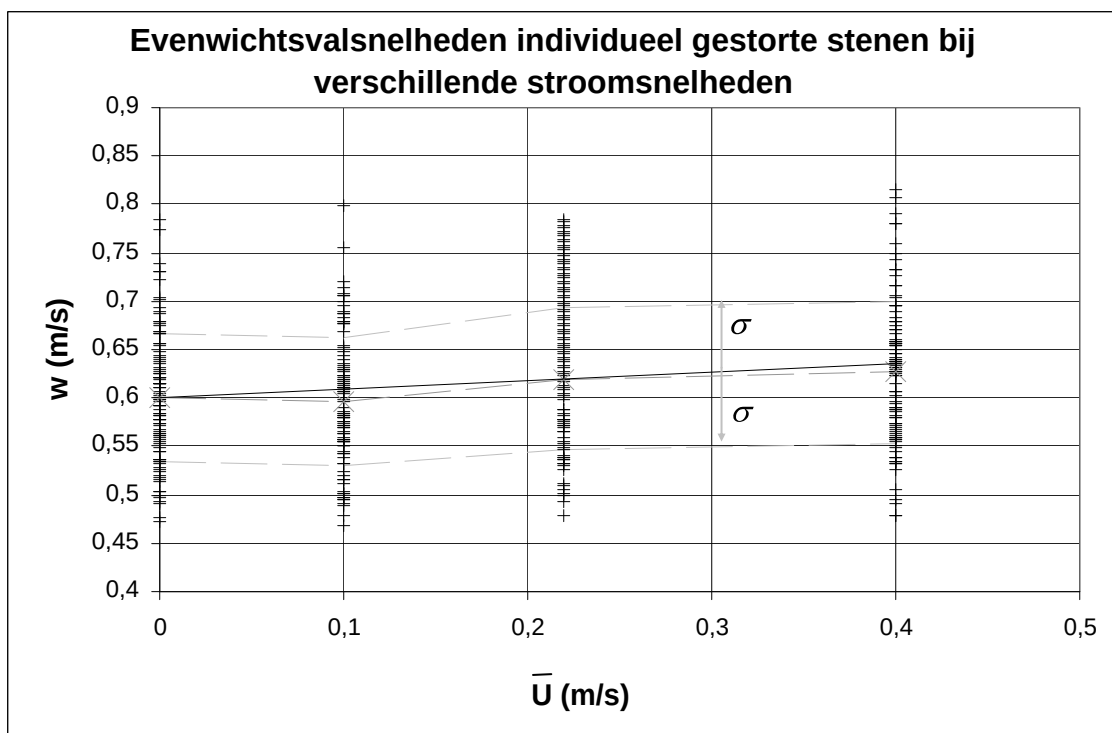
De gemiddelde evenwichtsvalsnelheden van de 100 op snelheden beproefde stenen (zie paragraaf 8.5.2) zijn weergegeven in figuur 9-2. De rechte lijn is een trendlijn gebaseerd op alle datapunten. De gestreepte lijn is getrokken door de gemiddelden per stroomsnelheid. Opvallend is, dat er zich bij een stroming van 0,10 m/s een minimum bevindt (de rode lijn). Daarna neemt de evenwichtsvalsnelheid toe tot een bijna constante waarde. Dit minimum is echter niet statistisch significant.

Het minimum bij 0,1 m/s kan het gevolg zijn van het feit dat de waarden van de evenwichtsvalsnelheden zonder stroming in het aquarium zijn bepaald en de overige waarden in de stroomgoot zijn bepaald. Dit is overigens onwaarschijnlijk, omdat dezelfde manier van meten is toegepast. Ondanks het verschil in opstelling is het mogelijk dat het hier geschetste verloop, zoals weergegeven in figuur 9-2, inderdaad optreedt.

Oorzaak hiervoor kan zijn dat, door het stromende water, het type grenslaagstroming naar een overgangsfase of een andere fase wordt gedwongen. Het is niet duidelijk of er nu moet worden uitgegaan van Re_{steen} of Re_{goot} .

Het verloop van de evenwichtsvalsnelheid vanaf een stroomsnelheid van 0,10 m/s is te verklaren. Bij toenemende stroomsnelheid neemt de turbulentie ook toe. Door de toegenomen turbulentie van het water kan er zich geen laminaire grenslaagstroming instellen. De grenslaag zal dan naar een turbulente grenslaag gaan neigen. Indien een bol een turbulente grenslaag ontwikkeld neemt zijn weerstandscoefficiënt af. Hetzelfde geldt dan ook voor de in deze experimenten beproefde stortsteen. Zie ook bijlage T voor de invloed van turbulentie op de weerstandscoefficiënt.

Zie ook de $Re-C_d$ kromme voor een bol in figuur 3-2. Gezien de afhankelijkheid van het getal van Strouhal en de weerstandscoefficiënt van het Reynoldsgetal (Bijlage T) is het te verklaren dat hetzelfde beeld optreedt voor de spreiding bij verschillende stroomsnelheden.

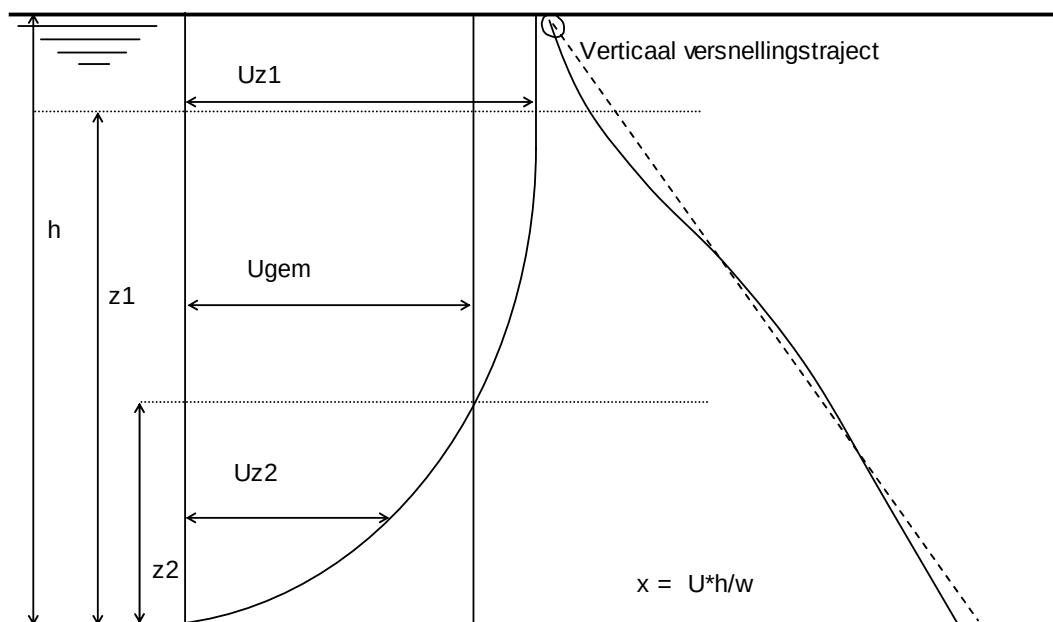


figuur 9-2 Gemeten evenwichtsvalsnelheden van 4 x 2 x 100 individueel losgelaten stenen bij toenemende stroomsnelheid

De rode punten en lijn in figuur 9-2 zijn tot stand gekomen door voor elke dieptegemiddelde snelheid 2 maal de evenwichtsvalsnelheid van 100 stenen te bepalen en deze te middelen. Vervolgens is er een kromme door die punten getrokken.

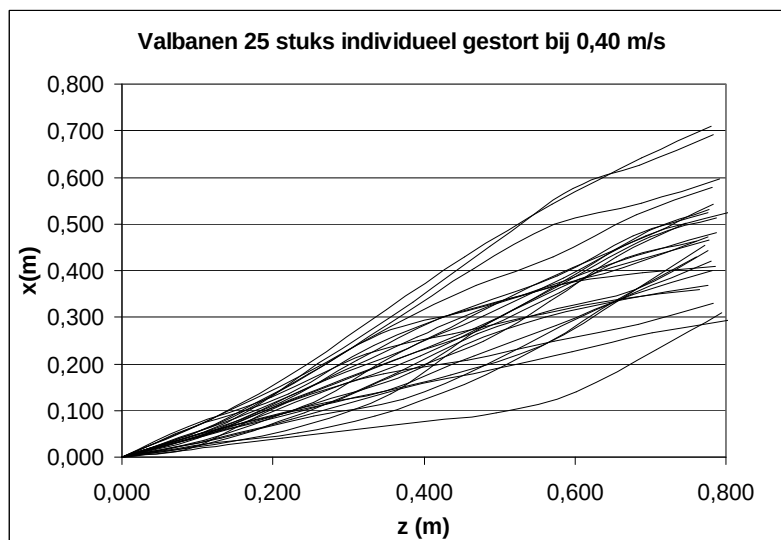
De zwarte trendlijn is door alle datapunten getrokken. Deze punten staan voor de gemiddelde snelheid per steen per stroomsnelheid.

9.2.3 Analyse invloed snelheidsverticaal



figuur 9-3 Invloed snelheidsverticaal

In figuur 9-3 is de theoretische invloed van de snelheidsverticaal geschetst. Indien de invloed van het versnellingstraject buiten beschouwing zou worden gelaten, blijkt dat het model is gebaseerd op een lineaire verplaatsing. In het model zou de steen de snelheid volgen, ware het niet dat de steen onderhevig is aan een random walk proces. Door dit random walk proces is het zo goed als uitgesloten dat een steen precies de baan zou volgen die door de snelheidsverticaal wordt opgelegd. Zie ter illustratie de valbanen van 25 individueel losgelaten stenen bij een stroomsnelheid van 0,40 m/s.



figuur 9-4 Gemeten valbanen van 25 verschillende individueel losgelaten stenen bij 0,40 m/s

De valbanen van de stenen getoond in figuur 9-4 zijn bepaald met stenen uit een sortering met een d_{n50} van 0,016 m en een d_{85}/d_{15} van 1,5.

Zoals getoond in figuur 9-4, komt de valbeweging zoals geschetst in figuur 9-3 slechts bij benadering bij enkele stenen voor. Wel is opvallend dat op een diepte van ongeveer 0,6 meter een de stenen een horizontale richtingsverandering ondergaan, veroorzaakt door de invloed van het getal van Strouhal. Deze diepte is als volgt te bepalen. In bijlage S is de formule S.7 gegeven om de periode van wervelafschudding te bepalen. In dien deze formule wordt toegepast op de in deze experimenten gebruikte stenen met de waarden die in tabel 9-1 zijn gegeven blijkt dat de stenen op een diepte van zo'n 0,65 m een richtingsverandering moeten ondergaan. Dit blijkt inderdaad het geval. Later in dit rapport zal de uiteindelijke positie van de stenen op de bodem gebruikt worden om de optredende verschijnselen te verklaren.

Parameter	d_{n50}	w	St
Waarde	0,0156	0,60	0,8

tabel 9-1 Ingevulde waarden ter bepaling wervel afschudperiode

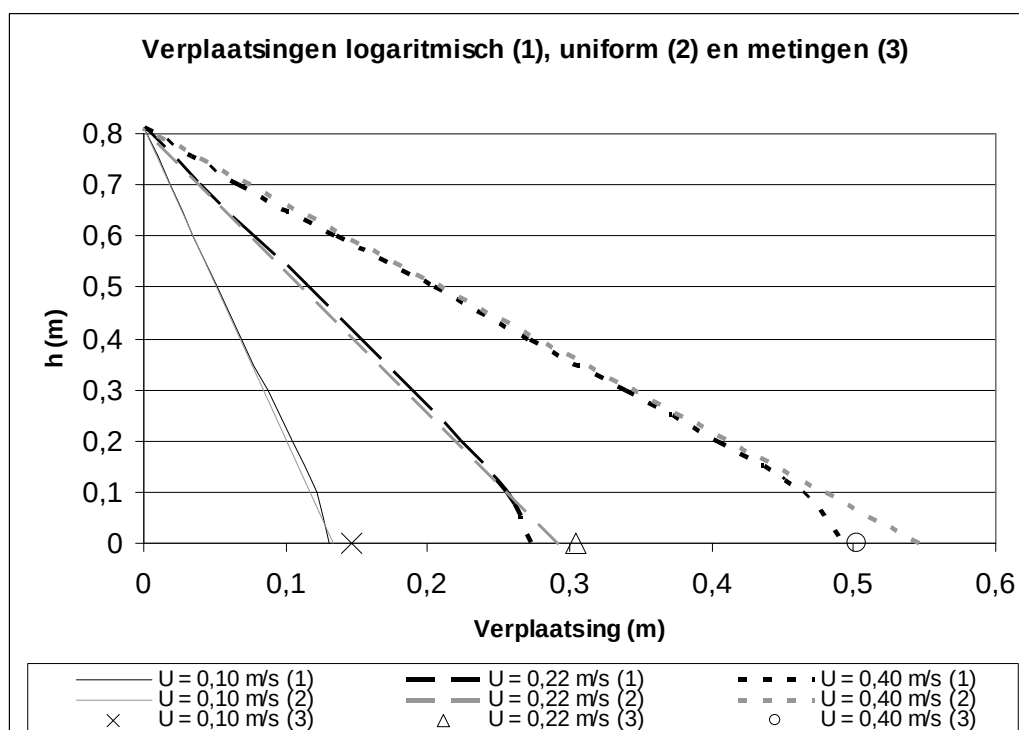
Om toch enig inzicht te verkrijgen in de nauwkeurigheid van de voorspelling van het WL model, is er op 2 manieren een berekening gemaakt van de te verwachten offset van een steen. Daarvoor is uitgegaan van een steen met een evenwichtsvalsnelheid van 0,6 m/s.

De cumulatieve berekening is gemaakt door de diepte van 0,8 m op te delen in 8 deelintervallen. Vervolgens is per deelinterval de gemiddelde snelheid over dat interval bepaald met behulp van de resultaten uit bijlage V. Per deelinterval is gekeken naar de verplaatsing volgens $x = \overline{U_{\Delta h}} \cdot \frac{\Delta h}{w}$. Vervolgens zijn de horizontale en verticale verplaatsingen geplot. Hetzelfde is gedaan voor de lineaire benadering, alleen is er dan sprake van 1 deelinterval, waarbij gebruik wordt gemaakt van de diepte en de dieptegemiddelde snelheid. Tevens zijn de gemeten punten uit de experimenten in de grafiek geplot.



h (m)	U (0,10) m/s	dt (s)	dx (m)	U (0,22) m/s	dt (s)	dx (m)	U (0,40) m/s	dt (s)	dx (m)
0,80	0,12	0,17	0,02	0,23	0,17	0,04	0,39	0,17	0,07
0,70	0,10	0,17	0,02	0,23	0,17	0,04	0,41	0,17	0,07
0,60	0,10	0,17	0,02	0,23	0,17	0,04	0,41	0,17	0,07
0,50	0,10	0,17	0,02	0,23	0,17	0,04	0,41	0,17	0,07
0,40	0,11	0,17	0,02	0,22	0,17	0,04	0,41	0,17	0,07
0,30	0,11	0,17	0,02	0,21	0,17	0,03	0,40	0,17	0,06
0,20	0,10	0,17	0,02	0,20	0,17	0,03	0,37	0,17	0,06
0,10	0,10	0,17	0,01	0,20	0,17	0,02	0,35	0,17	0,03
0,00	0,00			0,00			0,00		
$x = \overline{U}_{\Delta h} \cdot \frac{\Delta h}{w}$	0,13			0,27			0,49		
$x = \overline{U} * h/w$	0,16			0,29			0,55		
data	0,15			0,30			0,50		

tabel 9-2 Verplaatsing zwaartepunt dump volgens WL basismodel (logaritmisch en uniform) en metingen



figuur 9-5 Verplaatsingen: logaritmisch, uniform en metingen

Uit figuur 9-5 blijkt dat de door het WL voorspelde offset wordt beïnvloed door de manier van toepassen. Indien de dieptegemiddelde stroomsnelheid over de gehele diepte wordt gebruikt, blijkt er een overschatting van de offset te ontstaan ten opzichte van de cumulatief bepaalde offset. Indien de datapunten bepaald in de experimenten worden bekeken is het opvallend dat geen van beide benaderingen, cumulatief of lineair, een correcte voorspelling geeft. Het over en onderschatten van de offset zoals getoond in figuur 9-1 lijkt enigszins verklaarbaar te zijn volgens figuur 9-5. Er is af te lezen dat de offset onderschat wordt voor 0,1 en 0,22 m/s terwijl de offset bij 0,4 m/s redelijk voorspeld wordt indien er gebruikt gemaakt wordt van de cumulatieve methode. Naast andere factoren heeft de verticale snelheidsverdeling dus ook een invloed op de offset.

9.2.4 De t-toets toegepast op de evenwichtsvalsnelheden bij stroming

De verschillen van de gemiddelde evenwichtsvalsnelheden bij verschillende stroomsnelheden zijn klein. Desondanks kan de toename van de evenwichtsvalsnelheid wel verklaard worden vanuit theoretisch oogpunt (zie bijlage T en hoofdstuk 9.2.2). Om te bepalen of het verschil significant is, wordt een t-toets toegepast. De evenwichtsvalsnelheid zonder stroming is bepaald in het aquarium en zal daarom buiten beschouwing worden gelaten.

Bij het toepassen van een t-toets wordt uitgegaan van de volgende hypothese:

$$H_0: \mu_a = \mu_b$$

De toetsingsgrootheid t volgt uit:

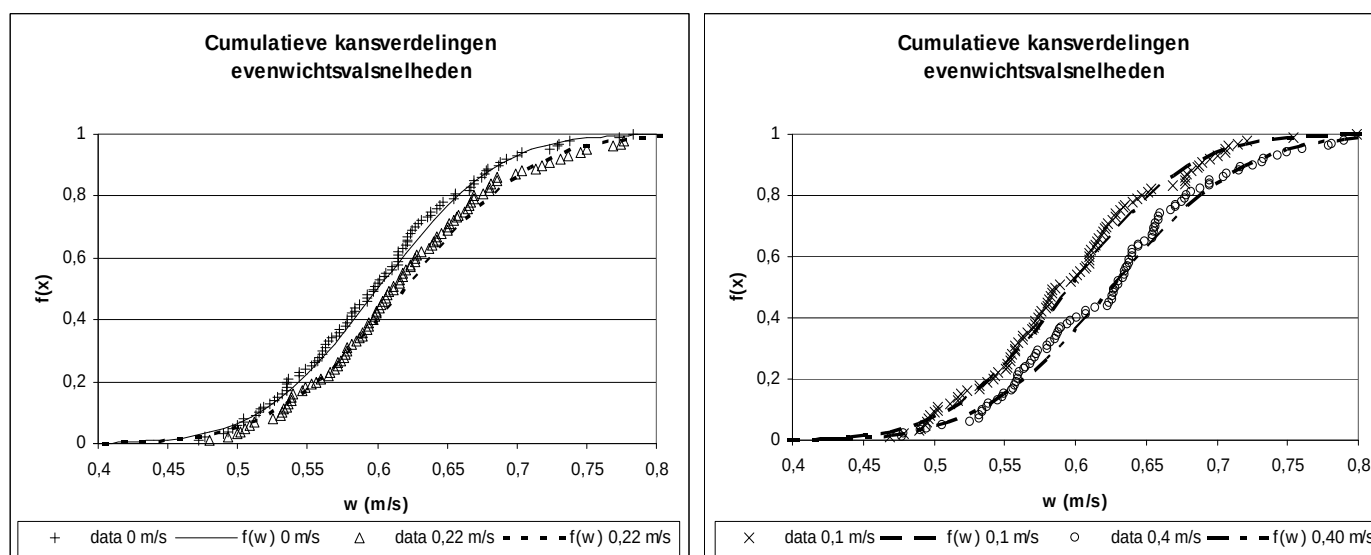
$$t = \frac{|\mu_a - \mu_b|}{\sqrt{\frac{S_a^2}{n_a} + \frac{S_b^2}{n_b}}} \quad (9.1)$$

In tabel 9-3 worden de invoerparameters en resultaten gegeven. De evenwichtsvalsnelheden bij 0,22 en 0,40 m/s worden getoetst aan de evenwichtsvalsnelheid bij 0,10 m/s. Het gemiddelde en de standaarddeviatie zijn bepaald en weergegeven in tabel 9-3.

U (m/s)	μ_w	S_w	n	t
0,00	0,60	0,067	100	nvt
0,10	0,60	0,067	100	nvt
0,22	0,62	0,073	100	2,02
0,40	0,63	0,074	100	3,01

tabel 9-3 Gemiddelden en spreidingen evenwichtsvalsnelheden

In figuur 9-6 zijn de datapunten met daardoorheen de passende normale verdeling geplot. De datapunten voldoen allemaal aan de KS toets.



figuur 9-6 Verdelingen en datapunten evenwichtsvalsnelheden

Het aantal vrijheidsgraden is $100 + 100 - 2 = 198$ bij een significantieniveau van 1 %. De kritieke waarden zijn dan:

$$k_1 = -2,576 \text{ en } k_2 = 2,576$$

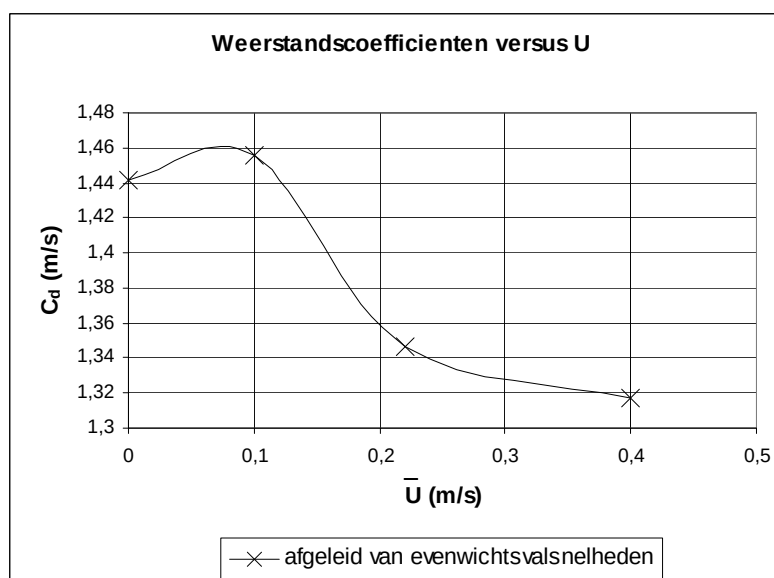


Indien de toetsingsgrootte t zich buiten het kritieke gebied bevindt dient de nulhypothese te worden verworpen, anders:

Indien de waarde van t zich bevindt in $t \leq -2,576 \cup t \geq 2,576$ wordt de nulhypothese verworpen. Dit is het geval bij de evenwichtsvalsnelheid van 0,40 m/s. Het verschil is dus significant. De kans dat het verschil door toeval is ontstaan is erg klein.

Er kan dus geconcludeerd worden dat de evenwichtsvalsnelheid bij een stroomsnelheid van 0,40 m/s verschilt van de evenwichtsvalsnelheid bij een stroomsnelheid van 0,1 m/s. Zowel op basis van een statistische als een fysische analyse.

Ter illustratie is het verloop van de weerstandscoefficiënt afgeleid van het verloop van de evenwichtsvalsnelheid opgenomen in figuur 9-7. Voor de verklaring van het verloop zie de tekst boven figuur 9-2.



figuur 9-7 Gemiddelde afgeleide verticale weerstandscoefficienten individueel losgelaten stenen bij toenemende stroming

De toename van de evenwichtsvalsnelheid, dus de afname van de weerstandscoefficiënt, is het gevolg van een, of een combinatie van de volgende effecten:

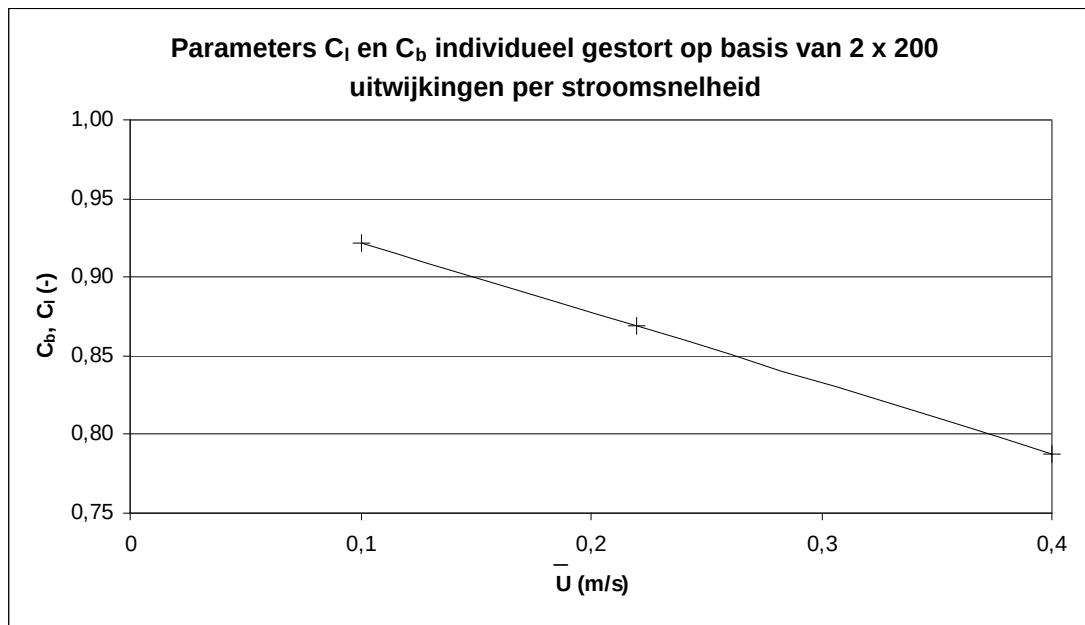
- Afname weerstandscoefficiënt door toename van turbulentie/afname getal van Strouhal.
- Gedwongen valbeweging bij toenemende stroomsnelheid door de manier van uitvoeren van de experimenten.
- Verschillende positioneringen camera bij opeenvolgende experimenten.

Een nadere omschrijving van de hierboven genoemde effecten wordt gegeven in bijlage T. Daaruit blijkt dat de positionering van de camera niet de verschillen verklaart die optreden.

9.2.5 De parameters C_b en C_l voor individueel losgelaten stenen

De afname van de weerstandscoefficiënt bij toenemende stroomsnelheid geeft ook een afname van de coëfficiënten gebruikt in de offset formules, immers, hoe sneller een steen valt, hoe minder hij verplaatst.

De coëfficiënt C_b is bepaald door het gemiddelde van 2 maal 200 uitwijkingen per stroomsnelheid te berekenen en de overige geldende waarden in te vullen in vergelijking 2.6.



figuur 9-8 Coëfficiënten offsetvergelijking WL voor individueel gestorte stenen

U (m/s)	0,1	0,22	0,4
C _b (-)	0,92	0,87	0,79

tabel 9-4 Coëfficiënten individueel gestorte stenen

Uit figuur 9-8 en tabel 9-4 blijkt dat de coëfficiënt gebruikt in de offsetvergelijking van het WL (2.6) niet constant is bij toenemende stroomsnelheid, indien deze wordt bepaald aan de hand van de uitwijkingen van de individueel gestorte stenen bij verschillende stroomsnelheden. De datapunten in deze grafiek zijn bepaald aan de hand van de gemiddelde posities van de zwaartepunten van de uitwijkingen op de bodem, geplott in figuur 9-1 ingevuld in vergelijking 2.6. De overige ingevulde waarden zijn: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$; $\Delta = 1,69$; $d_{n50} = 0,0156 \text{ m}$ en $h = 0,81 \text{ m}$.

Deze afname van de coëfficiënten is het gevolg van de toegenomen evenwichtsvalsnelheid bij toenemende stroomsnelheid. En de invloed van de snelheidsverticaal, die immers ook verloopt over de diepte.

Er dient opgemerkt te worden dat bij individueel storten de coëfficiënten C_i en C_b aan elkaar gelijk zijn. Indien men een lijnstort beschouwt waarbij individueel wordt gestort, wordt alleen de coëfficiënt C_b weergegeven door bovenstaande waarden.

9.2.6 Vergelijking meeneemcoëfficiënt en weerstandcoëfficiënt door combinatie vergelijking evenwichtsvalsnelheid met offsetvergelijking

De evenwichtsvalsnelheid wordt beschreven met vergelijking 3.8:

$$w = \sqrt{2\Delta \frac{g \cdot d_n}{C_d}}$$

De offset wordt bepaald volgens de methode beschreven in hoofdstuk 2.4. Als voorbeeld wordt een stort dwars op de stroming genomen (vergelijking 2.6):

$$x = h \frac{\bar{U}}{w} = h \frac{C_b \cdot \bar{U}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}. \text{ Als dit wordt omgeschreven naar } w = \frac{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}{C_b} \text{ kan er een}$$



vergelijking gemaakt worden tussen de parameters C_d en C_b ; de weerstandscoefficiënt en de meeneemcoëfficiënt.

$$w = \sqrt{2\Delta \frac{g \cdot d_n}{C_d}} = \frac{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}{C_b} \Rightarrow C_b = \sqrt{\frac{1}{2}} C_d \quad (9.2)$$

In woorden: de meeneemcoëfficiënt bij het storten dwars op de stroming, C_b is gelijk aan de wortel uit een half maal C_d , de weerstandscoefficiënt van individueel losgelaten stenen.

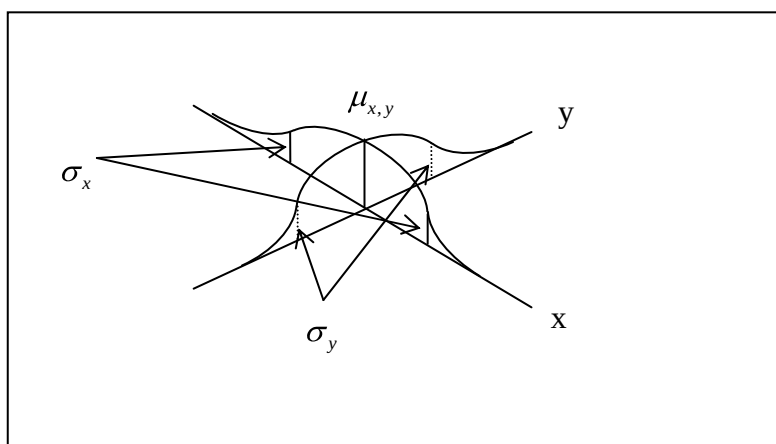
Indien nu wordt ingevuld dat $C_d = 1,43$ volgt daaruit dat $C_b = 0,85$. Dit komt redelijk overeen met de meeneemcoëfficiënt van het WL: $C_{d,WL} = 0,86$.

Er dient wel rekening gehouden te worden met het feit dat de factor 2 in vergelijking 3.8 geldt voor een kubusvormige steen. Indien er sprake is van een bolvormige steen zou deze factor $4/3$ bedragen. Aangezien een steen nooit helemaal rond of kubusvormig is, zal deze factor afwijken. Aangezien de weerstandscoefficiënten van individuele stenen bepaald worden met vergelijking 3.8 is het belangrijk dat in vervolgonderzoeken dezelfde factor wordt gebruikt om de weerstandscoefficiënten te bepalen.

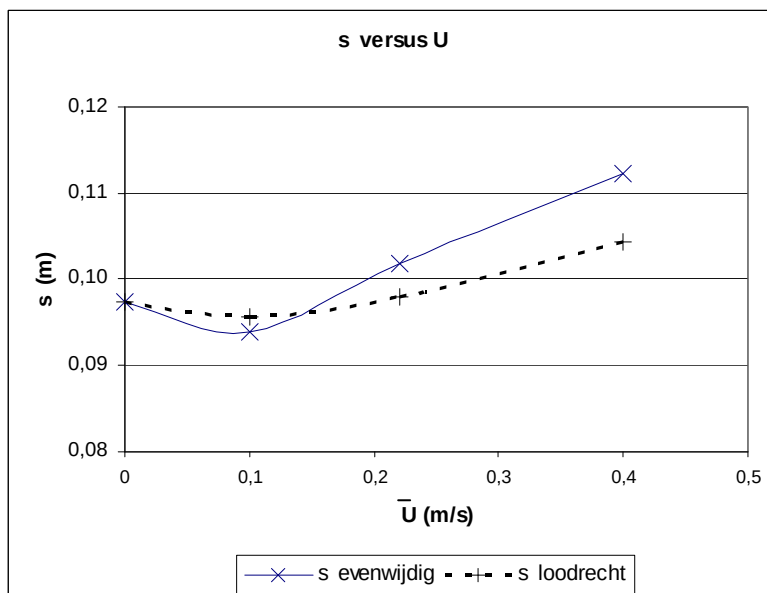
9.2.7 Spreiding van individueel gestorte stenen onder invloed van stroming

Er is in deze paragraaf een scheiding aangebracht in de als normaal verdeeld beschouwde spreiding loodrecht op en evenwijdig aan de stromingsrichting. Desondanks worden de uitwijkingen toch aan de Rayleighverdeling getoetst.

Voor het bepalen van de waarde van de spreiding in figuur 9-10 is de spreiding is per stort bepaald. Van elke serie (2 per stroomsnelheid) is een gemiddelde genomen. Zie figuur 9-9 voor de interpretatie van de spreiding in x en y-richting.



figuur 9-9 Principe tekening spreiding in de x en y-richting



figuur 9-10 s bij individueel storten gemiddeld over uitwijkingen gehele groepen

De data in deze grafiek is met behulp van de experimenten in de stroomgoot tot stand gekomen. Er is weer een minimum zichtbaar bij 0,1 m/s, evenals bij de gemeten evenwichtsvalsnelheden in figuur 9-2. Blijkbaar treedt er een nog niet onderkend effect op. Dezelfde verklaring als voor de evenwichtsvalsnelheden geldt: Doordat de grenslaagstroming zich in de overgangsfase van laminair naar turbulent bevindt, neemt de weerstandscoefficiënt af. Daar verdere bestudering van dit fenomeen buiten de scope van dit onderzoek valt wordt er notie genomen van het optreden.

U (m/s)	0	0,1	0,22	0,4
s_x (m)	0,097	0,094	0,102	0,112
s_y (m)	0,097	0,096	0,098	0,104

tabel 9-5 s bij individueel storten

Uit figuur 9-10 en tabel 9-5 blijkt dat de spreiding in de x- en y-richting toeneemt bij toenemende stroomsnelheid. De toename van de spreiding in de x-richting is het gevolg van het optreden van het effect ontmenging.

Indien we de waarden van de spreiding omrekenen naar de coëfficiënt c' volgens

$$c' = \frac{\sigma}{\sqrt{h \cdot d_{n50}}} \text{ blijkt dat deze afwijkt van de waarde gevonden door van Gelderen [1999] en}$$

van der Wal [2002]: 0,685. Bij een stroomsnelheid van 0 m/s bedraagt de waarde van c' bepaald in de experimenten 0,863. Dit is het gevolg van de lagere gemiddelde L/d verhouding van de stenen gebruikt in dit onderzoek.

De verdelingen van de gestorte stenen gedragen zich volgens de in bijlage H geplote grafieken. De theorie om tot de resultaten in deze bijlage te komen is opgenomen in bijlage A. Zie ook tabel 9-6. De uitwijkingen in de x en y-richting gedragen zich normaal verdeeld. De stralen van de stenen ten opzichte van het middelpunt gedragen zich Rayleigh verdeeld. Dit is in overeenstemming met de resultaten van van Gelderen [1999], die voor de uitwijkingen op ondiep water dezelfde conclusie trok. De stenen bevinden zich in het gebied $h/d_{50} = 0,81/0,0156 = 52$.

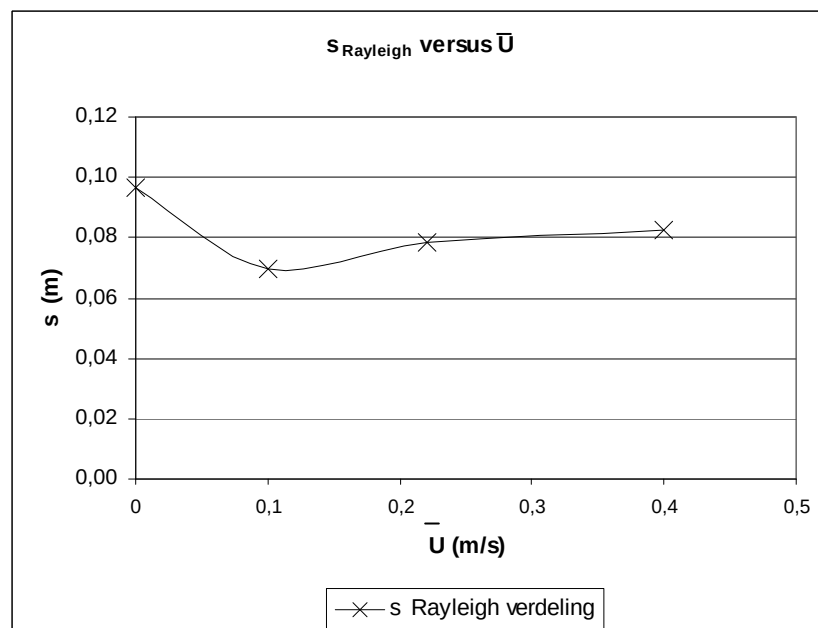
In van Gelderen [1999] is gesteld dat, indien stenen zich in het gebied $h/d_{50} > 40$ à 50 bevinden, de 'uitbijters' ervoor zorgen dat de verdeling van de stralen zich niet meer volgens een Rayleighverdeling gedraagt. Dat is hier dus niet het geval.



Codering	σ_x	σ_y	σ_{Rayleigh}	KS_x	KS_y	KS_{Rayleigh}	KS_{max}	KS voldaan?
Serie 1: 0 m/s	0,102	0,098	0,10	0,04	0,04	0,05	0,12	Ja
Serie 4: 0 m/s	0,093	0,097	0,10	0,03	0,04	0,05	0,12	Ja
Serie 1: 0,10 m/s	0,091	0,093	0,09	0,04	0,06	0,07	0,12	Ja
Serie 4: 0,10 m/s	0,096	0,098	0,10	0,07	0,04	0,06	0,12	Ja
Serie 1: 0,22 m/s	0,105	0,102	0,10	0,05	0,05	0,09	0,12	Ja
Serie 4: 0,22 m/s	0,098	0,093	0,10	0,03	0,05	0,09	0,12	Ja
Serie 1: 0,40 m/s	0,109	0,095	0,10	0,07	0,03	0,04	0,12	Ja
Serie 4: 0,40 m/s	0,115	0,113	0,11	0,03	0,05	0,05	0,12	Ja

tabel 9-6 Toetsing verdelingen individueel gestorte stenen (per stort)

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de uitwijkingen van individueel gestorte stenen voldoen aan het Enkele Steen Model, volgens de normale verdeling. Het zelfde geldt voor de verdeling van de stralen. Zie figuur 9-11.

figuur 9-11 σ_{Rayleigh} versus U

Voor de volledigheid is de parameter σ van de Rayleighverdeling eveneens uitgezet tegen de stroomsnelheid.

9.3 Theoretische benadering: Combinatie van het ESM en het WL offsetmodel

De plaats van neerkomen van stortsteen onder invloed van stroming wordt bepaald door 2 processen. Het ESM geeft de variatie in het punt van neerkomen per steen rond een gemiddelde. Zie ook hoofdstuk 3.

Het zwaartepunt van een verdeling stortsteen op de bodem van de goot kan worden bepaald met het offsetmodel van het Waterloopkundig Laboratorium. Zie ook hoofdstuk 2.

De vergelijkingen voor de verplaatsing en spreiding van een enkele steen die zijn opgesteld met behulp van de 2 modellen worden hieronder gegeven.

ESM (Vergelijking 3.13)

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

waarin $\sigma_N = c' \sqrt{h \cdot d_{n50}}$, de waarde van de constante $c' = 0,685$ (van Gelderen [1999], van der Wal [2002])

Offset model (WL) (Vergelijking 2.6)

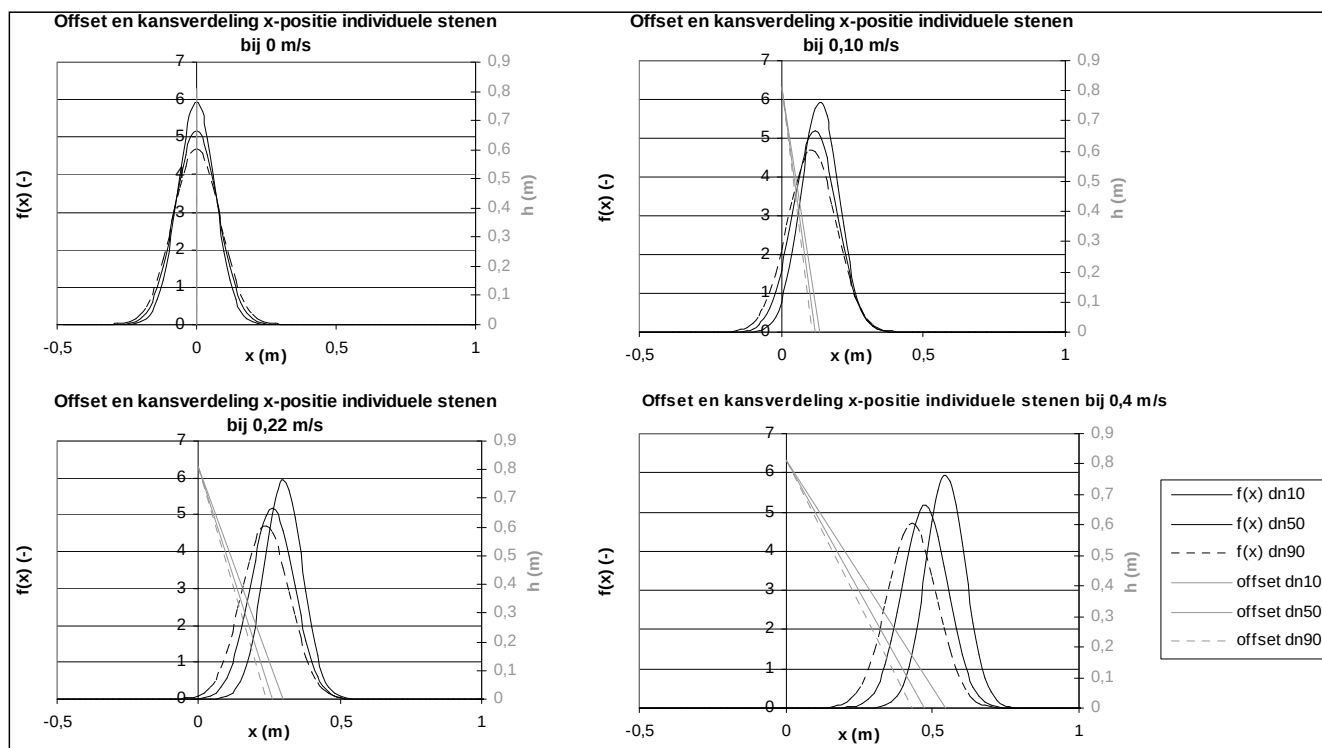
$$offset = h \frac{U}{w} = h \frac{\sqrt{C_d/2} \cdot \bar{U}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}$$

Indien deze vergelijkingen worden gecombineerd, kan de kansverdeling, in het verticale vlak van de stromingsrichting, van de plaats van neerkomen van een enkele steen, worden weergegeven door:

$$f_{\underline{x}}(x) = \frac{1}{\sigma_N \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - h \frac{\sqrt{C_d/2} \cdot \bar{U}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}}{\sigma_N} \right)^2} \quad \text{of}$$

$$f_{\underline{x}}(x) = \frac{1}{c' \sqrt{2\pi \cdot h \cdot d_n}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{c' \sqrt{h \cdot d_n}} - \frac{\sqrt{h \cdot C_d/2} \cdot \bar{U}}{c' \cdot d_n \sqrt{g \cdot \Delta}} \right)^2} \quad (9.3)$$

Ter illustratie zijn in figuur 9-12 de verdelingen en offsets geplot van de stenen met een d_{n10} , d_{n50} en d_{n90} bij verschillende stroomsnelheden.



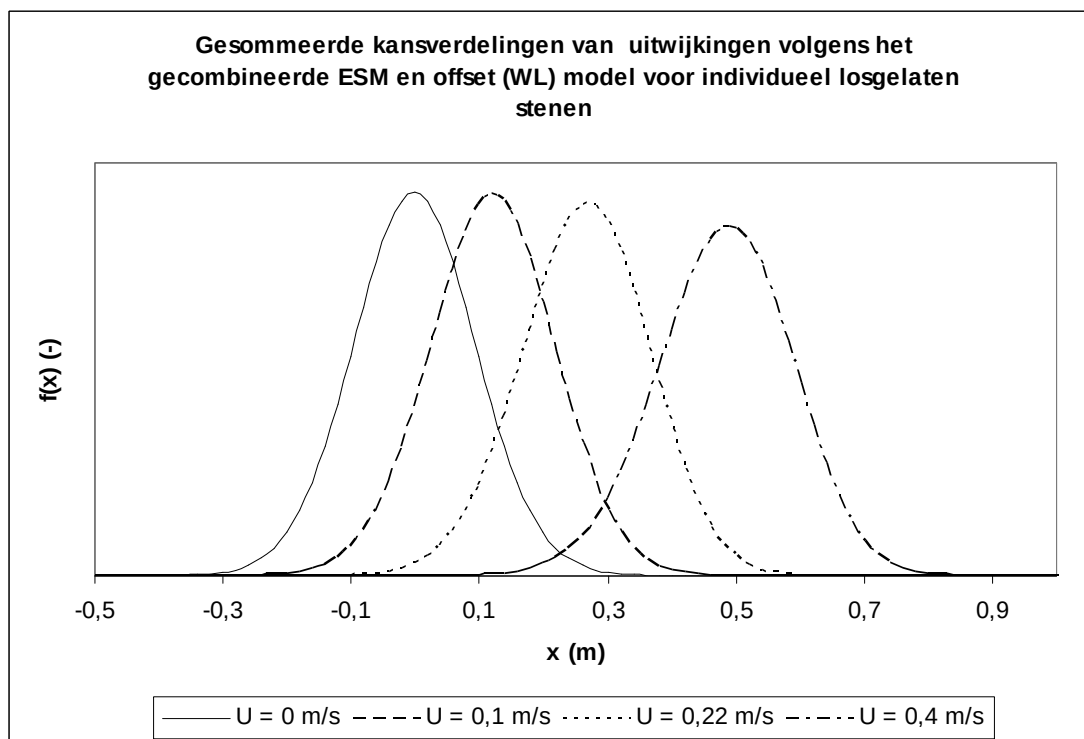
figuur 9-12 Offsets en verdelingen volgens vergelijking 9.2 bij verschillende stroomsnelheden

De in figuur 9-12 geplote lijnen zijn bepaald door de waarden uit tabel 9-7 in te vullen in vergelijking 9.2.

h	C_b	g	Δ	c'	d_{n10}	d_{n50}	d_{n90}
(m)	(-)	(m/s^2)	(-)	(-)	(m)	(m)	(m)
0,81	0,75	9,81	1,69	0,685	0,012	0,016	0,019

tabel 9-7 Waarden ingevuld in vergelijking 9.2

De berekening wordt gemaakt voor iedere steen in een sortering. Vervolgens worden de kansverdelingen van die stenen, per stroomsnelheid, bij elkaar op opgeteld. Door nu te middelen, ontstaan de kansdichtheidsverdelingen geschetst in figuur 9-13. Zie bijlage U voor de basis van het model.



figuur 9-13 Theoretische opgetelde verdelingen volgens vergelijking 9.2

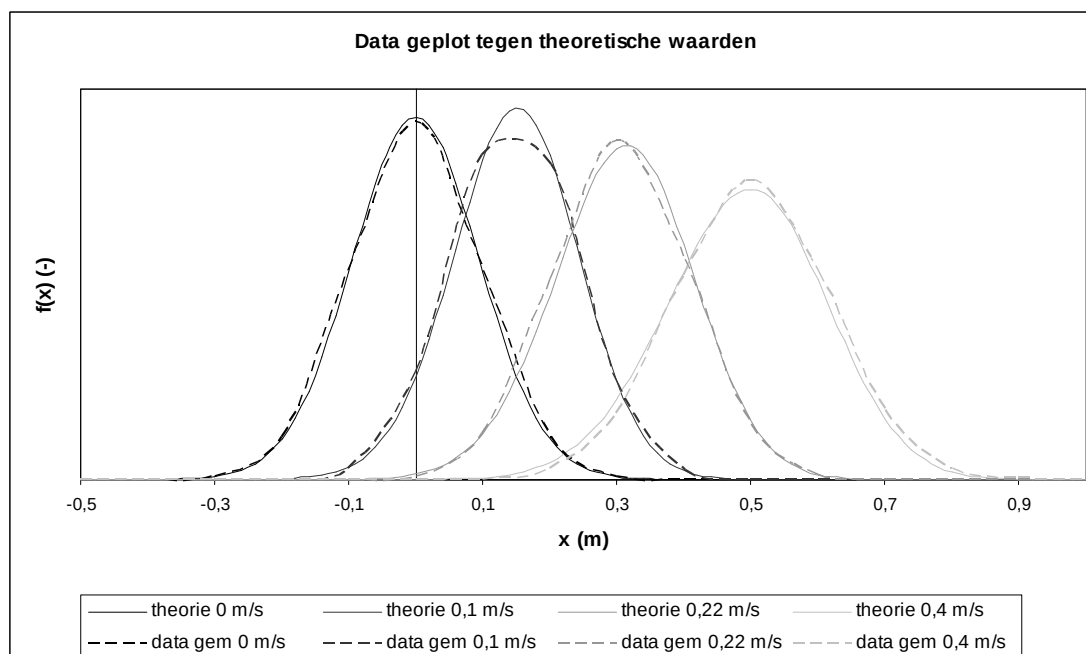
Uit figuur 9-13 blijkt dat de standaard deviatie van de lengte van een stort toeneemt bij toenemende stroomsnelheid. Dit is het gevolg van ontmenging. De kleinere stenen vallen langzamer en worden dus verder weggevoerd dan de grote stenen.

9.4 Eigenschappen stortprofiel

9.4.1 Toetsing verdelingen en offset aan model

Om te bepalen of de verdeling van de stenen op de bodem volgens de theorie van de gecombineerde modellen uit hoofdstuk 9.3 verloopt worden de resultaten van de proeven geplot samen met de theoretisch voorspelde waarden. Zie figuur 9-14 en tabel 9-8.

De waarden die gebruikt zijn om de theoretische voorspelling te maken komen uit tabel 9-4. De overige waarden zijn: $h = 0,81 \text{ m}$; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$; $\Delta = 1,69$ en c' is afgelezen uit tabel 10-5.



figuur 9-14 Data versus theoretische voorspelling verdeling uitwijkingen in de stromingsrichting

Zoals uit figuur 9-14 blijkt, komen de resultaten van het model en de experimenten redelijk met elkaar overeen.

U (m/s)	Experimenten		Theorie	
	μ_x	σ_x	μ_x	σ_x
0,00	0,00	0,10	0,00	0,14
0,10	0,15	0,09	0,15	0,10
0,22	0,31	0,10	0,31	0,11
0,40	0,50	0,12	0,49	0,11

tabel 9-8 Experimentele en theoretische waarden gemiddelde en spreiding individueel losgelaten stenen

De waarden van de spreiding van de theoretisch opgetelde kansverdelingen zijn bepaald met behulp van het programma Bestfit. Het verdient aanbeveling om het hier ontwikkelde model te toetsen met behulp van een Monte Carlo simulatie. Op die manier kan er extra toets plaatsvinden of het model een juiste weergave van de praktijk geeft.

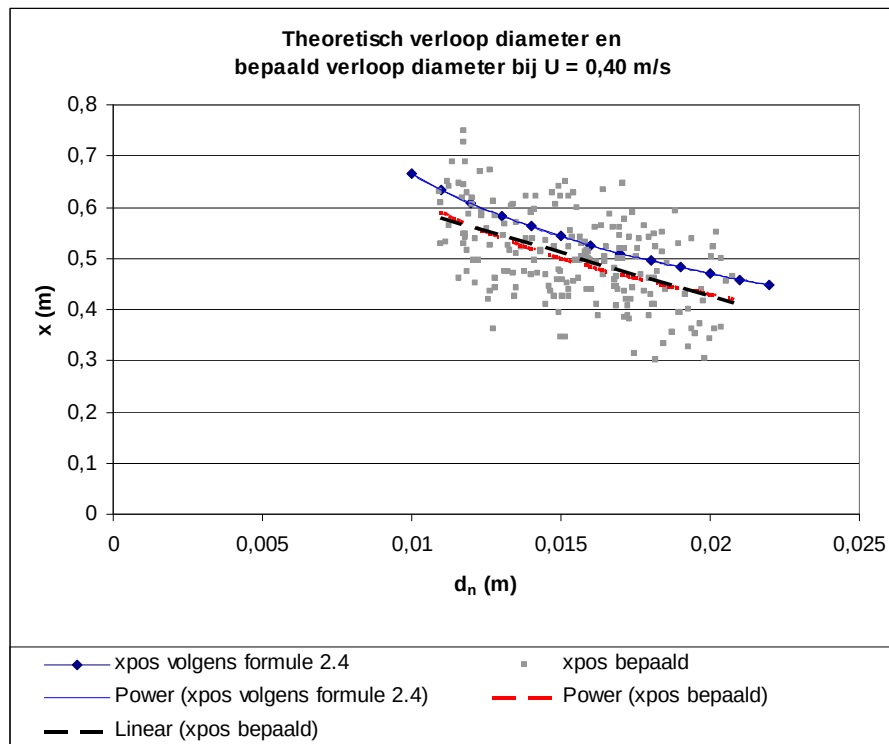
9.4.2 Vuistregels verloop van de steenparameters over de x-richting van een stort

Na het omschrijven van vergelijking 2.6 wordt het verwachte verband tussen de afnemende diameter en de toenemende x positie bij constante diepte duidelijk:

$$d_n = \frac{(h \cdot C \cdot \bar{U})^2}{g \cdot \Delta} \cdot \frac{1}{x^2} \text{ of } d_n = cst \cdot \frac{1}{x^2}. \text{ Anders geschreven: } x = cst^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{d_n}}$$

Om dit verband te vergelijken met de waardes die bepaald zijn tijdens de experimenten worden deze samen in een grafiek geplot en vergeleken met elkaar met behulp van trendlijnen. Als voorbeeld worden de gemiddelde resultaten van een stort bij 0,40 m/s stroming genomen (zie figuur 9-15).

Aangezien er 200 datapunten zijn is het gerechtvaardigd om een rechte lijn door deze wolk te plotten.



figuur 9-15 Verloop diameter over stortlengte, theoretisch en bepaald

De toepassing van een rechte lijn heeft als gevolg dat er geen extrapolatie mag plaatsvinden op basis van het afgeleide verband tussen de parameters. Aangezien er overgangsfases in de grenslaagstroming optreden is dit op fysische basis al niet geoorloofd.

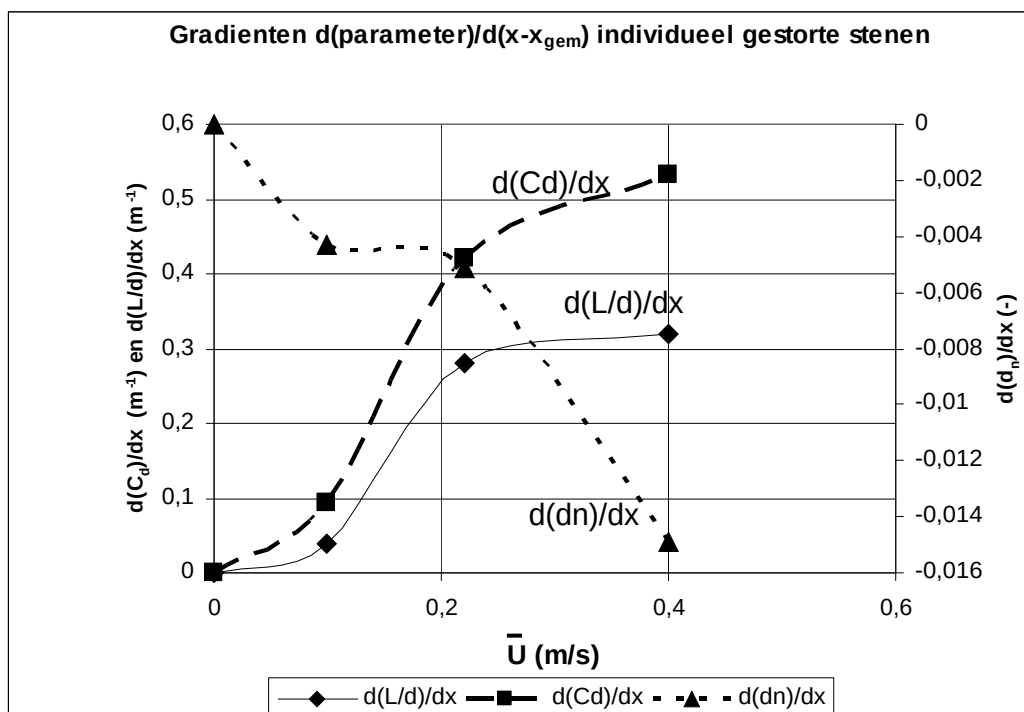
In Excel zijn de waardes van de nominale diameter, de L/d verhouding en de C_d -waarde uitgezet tegen de individuele x-coördinaat van het punt van neerkomen van diezelfde steen. Zie ook bijlage Y. Na het uitwerken van alle grafieken is gebleken dat de correlaties tussen de x-coördinaten en de overige parameters voor de individueel gestorte stenen zwak ($R^2 = 0,26$) zijn. Dit is het gevolg van de optredende combinatie van het random walk effect gedomineerd door de vorm van de steen en het verplaatsingsprincipe gedomineerd door de massa van de steen. Blijkbaar heeft het random walk een zodanige invloed dat ontmenging, zeker bij lagere stroomsnelheden, slechts in beperkte mate optreedt.

Bij het interpreteren van figuur 9-15 kan geconcludeerd worden dat de 2 processen die de plaats van neerkomen bepalen beide aanwezig zijn. Er is een random gedrag waarneembaar wat tot uiting komt in de spreiding om de regressielijn. Dit gedrag wordt veroorzaakt door de optredende effecten die tijdens de val kunnen optreden. Deze staan beschreven in hoofdstuk 3.3 en 3.4.

Uit figuur 9-15 blijkt dat de afname van de diameter bij benadering lineair verloopt. De richtingscoëfficiënt van de lineaire trendlijn kan dus als een maat voor de afnemende diameter in de toenemende x-richting dienen.

Voorbeeld: afname diameter over stort bij een stroomsnelheid van 0,40 m/s.

$d(d_n)/dx = -0,015$, anders: $d(d_n) = -0,015 \times dx$ (figuur 9-16). Stel $dx = 0,2$ meter. Dan is $d(d_n) = 0,2 \times -0,015$ m. Dit houdt in dat over een lengte van 0,2 meter in de x-richting van het stortprofiel de nominale diameter van de stenen gemiddeld genomen met 0,003 meter afneemt. Dit is het geval op schaalniveau.

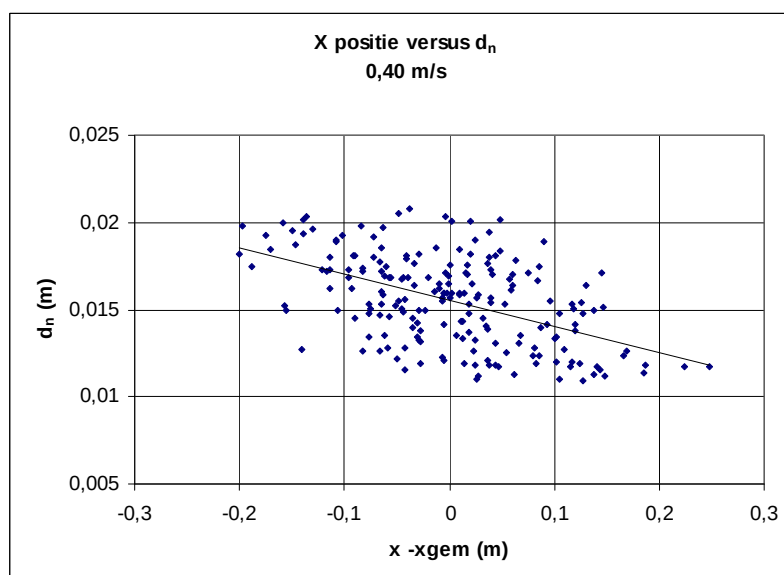


figuur 9-16 Gradiënten steenparameters versus stroomsnelheid

In figuur 9-16 zijn de gradiënten van de verschillende parameters uitgezet tegen de stroomsnelheid in de goot. Deze gradiënten zijn bepaald door van elk van de 2 series de data te sorteren van lage nominale diameter naar hoge nominale diameter en de bijbehorende x posities te middelen. Dat is gedaan voor 200 stenen.

De afname van $d(d_n)/dx$ geeft weer dat bij hogere stroomsnelheden de ontmenging steeds meer parten gaat spelen. Hierbij neemt de regressiecoëfficiënt toe bij toenemende stroomsnelheid. (Zie ook figuur 9-17).

De toename van de $d(C_d)/dx$ vlak uit en lijkt naar een constante waarde te gaan. Blijkbaar heeft de vorm van de steen geen invloed op de plaats van neerkomen rond het gemiddelde. Dit betekent dat het random walk proces, van toepassing blijft, maar de gemiddelde nominale diameter zich gaat gedragen zoals geschetst in figuur 9-17, als gevolg van ontmenging.



figuur 9-17 Afname d_{n50} bij toenemende x-richting

9.5 Conclusies

In figuur 9-1 wordt getoond dat de met het model voorspelde offset door meevoering bij stroomsnelheden tot 0,22 m/s onderschat wordt en bij hogere stroomsnelheid wordt overschat.

Als oorzaak daarvoor zijn de optredende evenwichtsvalsnelheden en de invloed van de verticale snelheidsverdeling in het midden van de goot nader bestudeerd.

De verticale snelheidsverdeling heeft enige invloed, maar verklaart niet volledig het over- en onderschatten van de optredende offset.

De evenwichtsvalsnelheden nemen toe bij een toenemende stroomsnelheid. Als de stroomsnelheid nog meer toeneemt, lijkt de evenwichtsvalsnelheid een constante waarde aan te nemen. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de invloed van de toenemende turbulentie van het water op de grenslaagstroming om de steen. Deze wordt hierdoor in een overgangsfase gedwongen. Dit heeft weer invloed op de weerstandscoefficiënt en dus de evenwichtsvalsnelheid.

De toename van de evenwichtsvalsnelheid is getoetst met behulp van een t-toets. Hieruit bleek dat het verschil tussen de evenwichtsvalsnelheid van 0,60 m/s bij een stroomsnelheid van 0,11 m/s en een evenwichtsvalsnelheid van 0,63 m/s bij een stroomsnelheid van 0,40 m/s significant is.

De toename van de evenwichtsvalsnelheid en de afname van de offset hangen met elkaar samen. Immers, hoe sneller een steen valt, hoe minder tijd hij doorbrengt in de stroming, hoe minder de stroming zijn invloed kan uitoefenen op die steen, hoe minder ver hij verplaatst. Deze afhankelijkheid komt ook naar voren uit:

$$C_b = \sqrt{\frac{1}{2}} C_d$$

De offsetformules kunnen in het vervolg worden weergegeven door:

$$x = \sin(\alpha) \cdot \frac{h\bar{U}}{\sqrt{\Delta g d_n}} \sqrt{0,45 C_d \cos^2(\alpha) + 0,5 C_d \sin^2(\alpha)}$$

$$y = \cos(\alpha) \cdot \frac{h\bar{U}}{\sqrt{\Delta g d_n}} \sqrt{0,45 C_d \cos^2(\alpha) + 0,5 C_d \sin^2(\alpha)}$$

De locatie van neerkomen van de stenen bij het storten met stroming wordt bepaald door het random walk proces en de verplaatsing van de stenen door de stroming. Bij toenemende stroomsnelheid wordt de invloed van de verplaatsing van stenen door de stroming groter. Dit uit zich in een toenemende mate van ontmenging. Dit komt eveneens naar voren in het verschil tussen de spreiding in de x- en y-richting en de toenemende spreiding in de x-richting bij toenemende stroomsnelheid. (Zie figuur 9-10)

Het optreden van ontmenging bij hogere stroomsnelheden heeft geen invloed op de verdeling van de uitwijkingen van een stort. Deze voldoen aan de normale verdeling. De uitwijkingen van de stralen voldoen aan de Rayleigh verdeling. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de uitwijkingen per stort gebruikt zijn om deze veronderstelling te toetsen. Het ESM is dus ook geldig bij het storten met stroming, ondanks de optredende ontmenging.

Er wordt in dit rapport een model opgesteld dat bestaat uit een combinatie van het Enkele Steen Model en het WL offset model. Dit model sommeert de kansverdelingen van de uitwijkingen van individuele stenen met hun spreiding en deelt deze som door het aantal



stenen. Zo wordt een goede benadering van de totale verdeling van de uitwijkingen verkregen. De basisformule voor dit model is:

$$f_{\underline{x}}(x) = \frac{1}{\sigma_N \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - h \frac{\sqrt{C_d/2 \cdot U}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}}{\sigma_N} \right)^2}$$

Indien de uitkomsten van het model in dezelfde grafiek worden geplot als de resultaten van de experimenten, blijkt dat het model een goede voorspelling geeft van de te verwachten verdeling van de uitwijkingen op de bodem.



10 Resultaten van experimenten met steengroepen in de stroomgoot

10.1 Inleiding

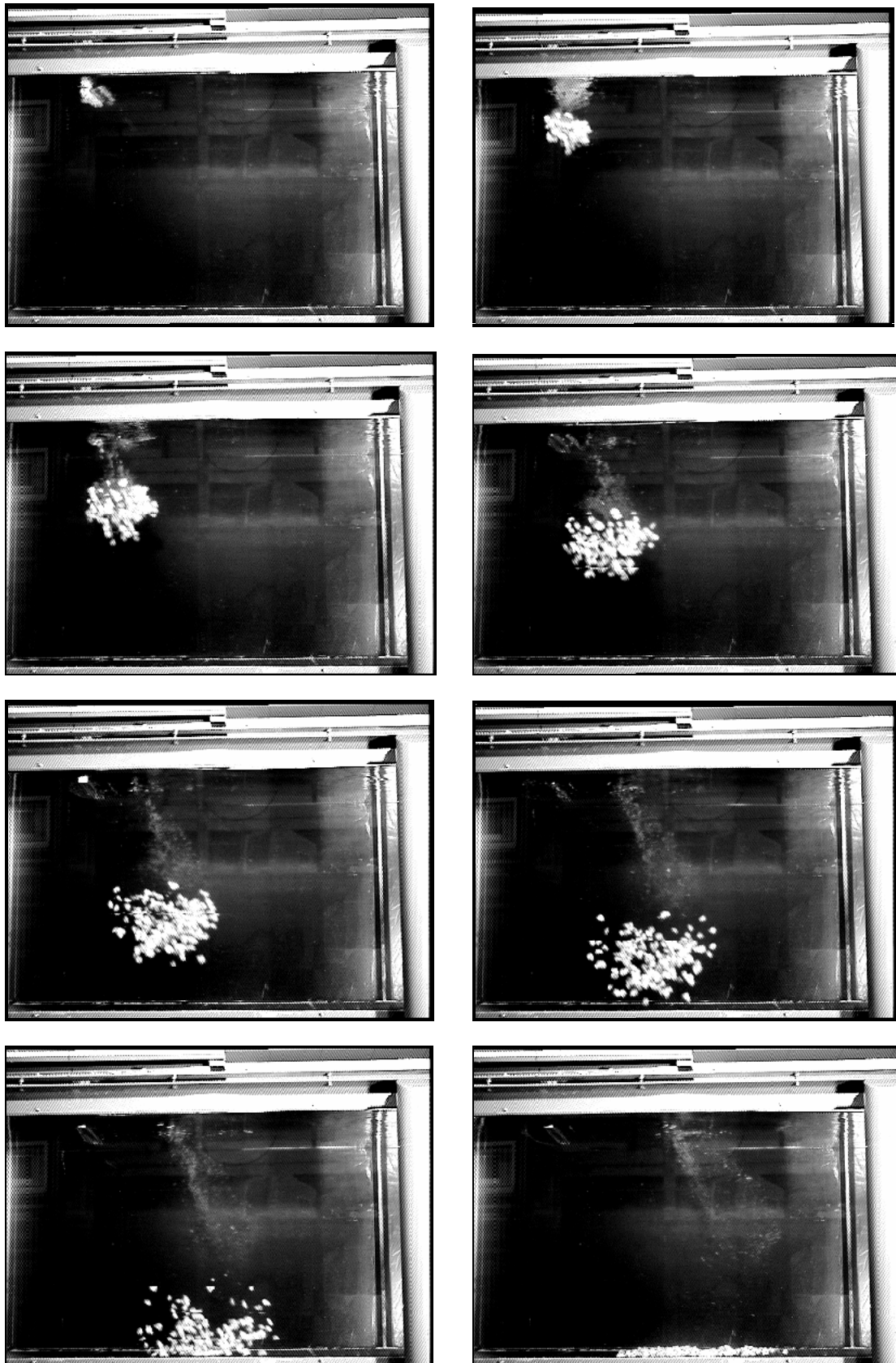
In dit hoofdstuk worden de resultaten van de experimenten met tegelijk gestorte stenen gepresenteerd. Hierbij moet een verdeling worden gemaakt in 2 oriëntaties op de stroming, loodrecht en evenwijdig. Allereerst worden de optredende processen beschreven in paragraaf 10.2. In paragraaf 10.3 wordt er gekeken naar het verschil in offset tussen evenwijdig aan en loodrecht op de stroming storten en de reden daarvoor. Vervolgens wordt in paragraaf 10.4 aandacht besteed aan de spreiding van de uitwijkingen van de stortresultaten. In de hoofdstukken 10.5 en 10.6 wordt respectievelijk de toepassing van het model getoetst en de conclusies gegeven. De posities van de stenen zijn opgenomen in de bijlagen I, J, K en L.

10.2 Beschrijving van de optredende processen

Tijdens de experimenten zijn video-opnames gemaakt van de val van de steengroepen. Deze zijn later verwerkt door de posities van de onder, boven, linker en rechterkant van de groep vast te leggen met elk 3 klikken op 8 vaste hoogtes. Hierbij zijn stenen die niet tot de groep gerekend zijn buiten beschouwing gelaten. Dit betreft stenen die zich zo ver verwijderd hebben van de groep dat ze daar geen invloed op kunnen uitoefenen.

Doordat de posities van de afmetingen van de groep evenals de tijdstippen tussen de beelden bekend zijn kunnen er snelheden berekend worden.

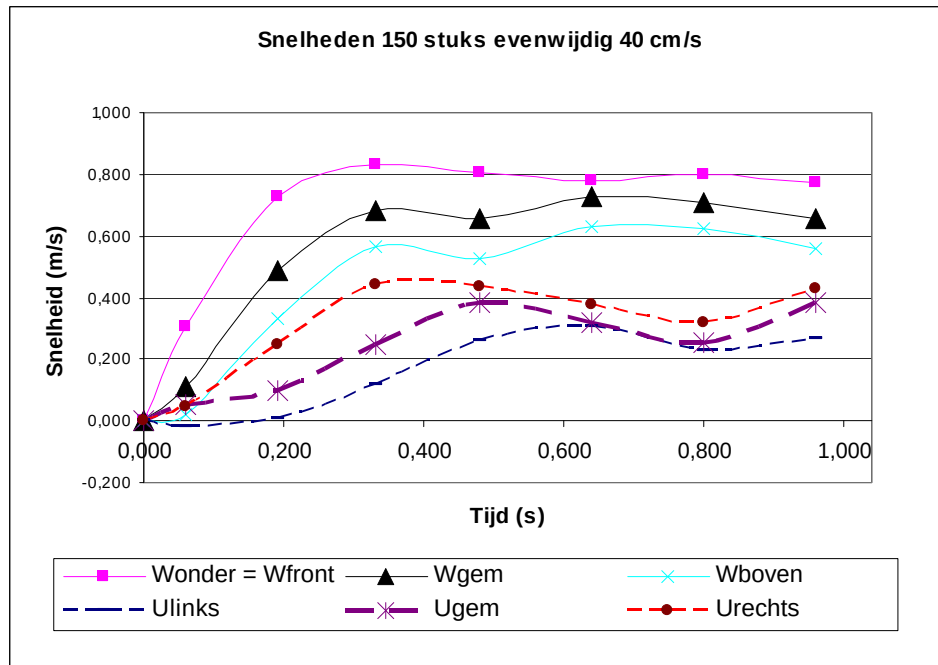
Op de volgende 2 pagina's worden foto's getoond van een groepsstort van 200 stuks bij een stroomsnelheid van 0,40 m/s, evenwijdig en dwars gestort.



figuur 10-1 Foto's 200stdws1u40 (200 dwars gestort met een stroomsnelheid van 0,40 m/s)



figuur 10-2 Foto's 200stevs1u40 (200 evenwijdig gestort met een stroomsnelheid van 0,40 m/s)



figuur 10-3 Voorbeeld optredende gemiddelde groeps(val)snelheden

In figuur 10-3 is een voorbeeld van de optredende gemiddelde groeps(val)snelheden gegeven voor een evenwijdig aan de stromingsrichting gestorte groep van 150 stuks bij 0,40 m/s. De overige grafieken zijn opgenomen in bijlage Z. Het beeld wat hier geschetst wordt is een algemeen beeld bij het storten van groepen in stromend water.

Er zijn 6 snelheids verlopen geplot:

- $W_{\text{onder}} = W_{\text{front}}$ frontvalsnelheid
- W_{gem} gemiddelde groepsvalsnelheid bepaald door het gemiddelde van de verticale snelheden van de onder-, boven-, linker en rechter zijde
- W_{boven} verticale snelheid bovenkant groep
- U_{links} horizontale snelheid linkerkant groep
- U_{gem} gemiddelde groepsvalsnelheid bepaald door het gemiddelde van de horizontale snelheden van de onder-, boven-, linker en rechter zijde
- U_{rechts} horizontale snelheid rechterkant groep

10.2.1 Beschrijving van het verticale valgedrag

Het verloop van de verticale snelheden wordt bepaald door een aantal invloeden. Zie hoofdstuk 4.2.2 voor de 5 fasen van van der Wal [2002]. Deze invloeden zullen hieronder in fasen worden beschreven. De hier beschreven fasering van het groepsvalproces verschilt van de fasering beschreven in van der Wal [2002]. Van der Wal liet zijn stenen onder water los en had dus geen versnellingsfase veroorzaakt door stenen die zich boven de waterlijn bevonden.

Fase 1 Verticale versnelling door 'loslaat'invloeden.

De verticale versnelling van een lichaam in water wordt beheerst door een 3 tal krachten:

Een verticale kracht naar beneden.

De groep versnelt omdat een gedeelte van de massa stenen zich nog boven het wateroppervlak bevindt. De volledige massa stenen die in zich in het bakje bevindt, rust op $t =$



0 s nog op de klep. Op het moment dat de klep opzij schiet komt deze kracht op de onderste stenen te staan. Deze krijgen hierdoor een versnelling.

Een verticale kracht omhoog

Deze kracht is het gevolg van de opwaartse kracht van Archimedes en de invloed van een kleine hoeveelheid luchtinsluiting. Doordat het volume van de ondergedompelde groep toeneemt, neemt de opwaartse kracht eveneens toe. De stenen nemen ook een hoeveelheid lucht mee. Deze luchtinsluiting is slechts beperkt en na een bepaalde afgelegde valweg (ongeveer de helft van de diepte van de goot: +/- 40 cm) niet meer van invloed. In van der Wal [2002] bleef de lucht ingeloten tot de groep de bodem bereikte. Dit was mogelijk doordat er gebruik werd gemaakt van cilindervormige steengroepen. De lucht in het midden van de cilinder doet er dan langer over om te ontsnappen. Hoe meer stenen zich in het water bevinden, hoe meer lucht er zich bevindt tussen de stenen, hoe groter de omhoogwerkende kracht van de lucht.

Een weerstands- of wrijvingskracht

Een bewegend lichaam in water ondervindt een weerstandskracht, afhankelijk van oppervlakte en vorm. Doordat de stenen die zich nog boven het wateroppervlak bevinden de onderliggende stenen naar beneden en opzij duwen neemt het oppervlakte van de groep toe in de tijd. Dit zorgt voor een toenemende weerstandskracht.

Dit heeft ook tot gevolg dat de groep onder water een groter volume krijgt. Dit houdt in dat er zich steeds meer water tussen de stenen bevindt. Aangezien de groep in deze fase gezien kan worden als 1 lichaam wordt de massatraagheid van de groep bepaald door het opgenomen water, de massa van de stenen en de ingesloten lucht.

In eerste instantie is de naar beneden gerichte verticale kracht de grootste. Deze neemt snel af terwijl de opwaartse en weerstandskracht toenemen. De massatraagheid van de groep neemt eveneens toe door het toenemende volume (toenemende hoeveelheid water), waardoor een steeds groter volume versneld moet worden.

De aanvankelijk grote versnelling neemt af en slaat om in een vertraging.

Het begin van deze vertraging is het begin van fase 2.

Fase 2 Vertraging

Hoe meer stenen zich in het water bevinden, hoe kleiner de massa boven het wateroppervlakte is die voor deze versnelling zorgt.

De hoeveelheid lucht die wordt meegenomen neemt toe totdat alle stenen zich onder het wateroppervlak bevinden. Vanaf het moment dat de eerste lucht zich in het water bevindt, heeft zij de neiging om de groep weer te verlaten. De snelheid waarmee de lucht de groep verlaat neemt toe met de toenemende hoeveelheid ingesloten lucht. De lucht die de groep verlaten heeft wordt vervangen door water.

Hierdoor neemt de totale opwaartse kracht van de groep af.

Het groepsvolume blijft toenemen en er wordt steeds meer water in de groep opgenomen. Dit zorgt dan weer voor een toename van de massatraagheid en weerstand.

De groep gaat overigens wel als een geheel met het water naar beneden vallen, zodat het 'added mass' effect ook een rol gaat spelen. Dit is ook te zien door afstroming van steentjes aan de uiteinden bij groepen van 150 en 200 stenen.

De aanvankelijke vertraging neemt eerst toe en daarna weer af. De toename van de vertraging is te wijten aan de afname van de massa die zich boven het wateroppervlakte bevindt en de toenemende massatraagheid. Als de ingesloten lucht de groep heeft verlaten en het 'added mass' effect gaat overheersen neemt de vertraging af en gaat de groep uiteindelijk weer versnellen. Het begin van deze versnelling luidt fase 3 in.

Fase 3 Versnelling door 'added mass' effect

Deze fase komt overeen met de door van der Wal [2002] omschreven fase 1, die beknopt is weergegeven in hoofdstuk 4.2.2.

Tijdens deze versnelling nemen oppervlakte en volume van de groep toe waardoor de relatieve dichtheid afneemt en de weerstand toeneemt. Dit gaat zolang door totdat een significant aantal stenen zich uit de groep gaan verwijderen en als enkele stenen hun weg vervolgen. Dit luidt fase 4 in.

Fase 4 Terugkeer naar individuele eigenschappen

Fase 4 komt overeen met de door van der Wal [2002] omschreven fases 2 en 3. De snelheid van de groep neemt af en de stenen gaan in elkanders zog vallen. Dit gaat net zolang door totdat de stenen geen invloed meer op elkaar uitoefenen.

10.2.2 Beschrijving van het horizontale valgedrag bij evenwijdig storten

Indien de horizontale groepssnelheden uit figuur 10-3 worden bekeken blijkt het volgende beeld op te treden.

De horizontale snelheden aan de linker en rechterkant lijken hetzelfde verloop te hebben, behalve wat betreft de optredende snelheden. Er treedt een faseverschil op.

Dit faseverschil wordt veroorzaakt door een 3 tal effecten:

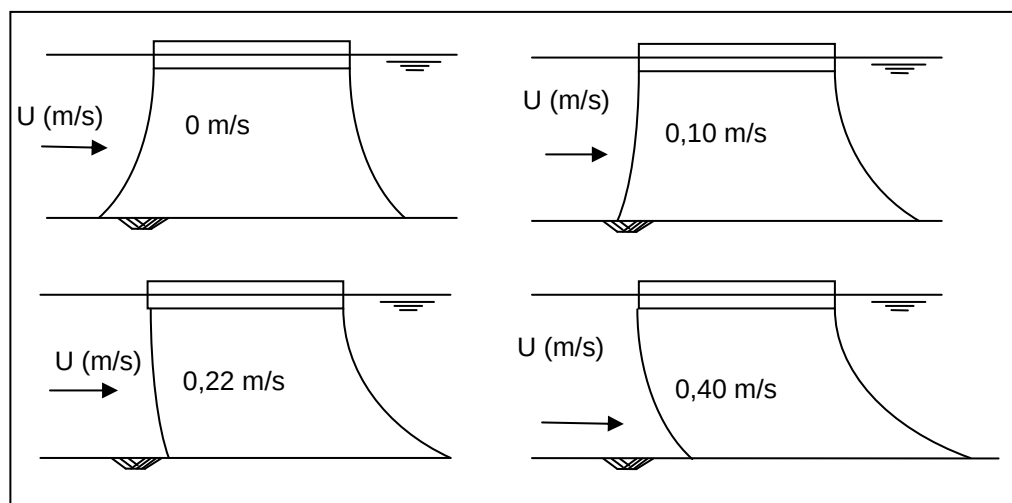
Een loslaat effect

De richting van de snelheid aan de linkerkant (aangestroomde zijde) is eerst tegen de stroming in en keert dan om. Dit is te wijten aan het feit dat de bovenliggende stenen de eerst vrijgekomen stenen na het wegschieten van het klepje wegdrücken. Hierdoor ontstaat een faseverschil tussen de toename van de horizontale snelheid aan de voor en achterzijde van de groep. Desondanks blijft de horizontale snelheid aan de linkerzijde (aangestroomde zijde) van de groep lager dan aan de rechterzijde.

De stenen die aan de rechterzijde vrijkomen worden naar rechts gedrukt. Dit verklaart dat de snelheid van de zijkant van de groep groter is dan de stroomsnelheid in de goot.

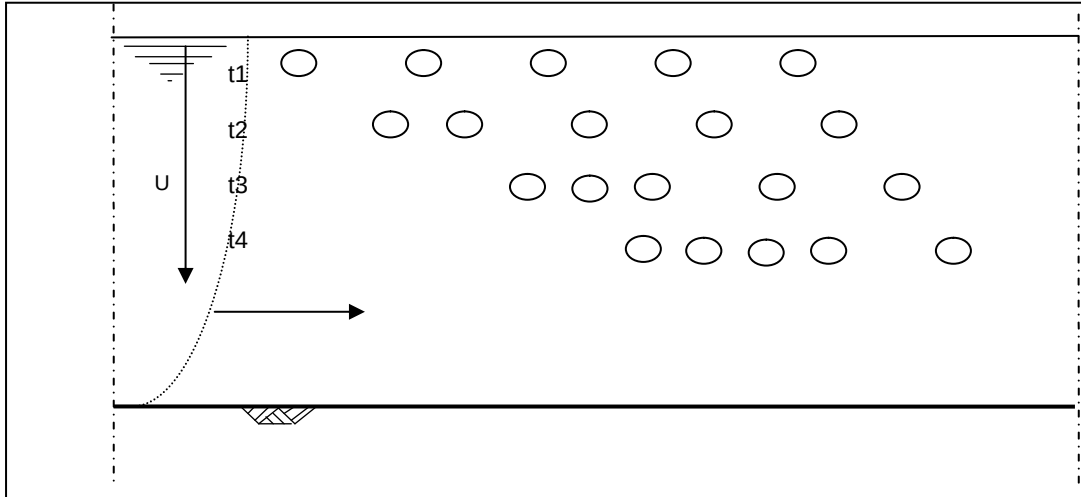
Een effect aangedreven door het spreidingsgedrag

De stenen die zich aan de zijkanten van de groep bevinden krijgen door de werking van het random walk effect en de vorming van een komvormig front een zijdelingse verplaatsing uit de groep. Aan de kant van het horizontale front willen de stenen tegen de stroming in verplaatsen, aan de luwttekant krijgen de stenen juist een extra verplaatsing. Dit komt ook naar voren uit figuur 10-4.



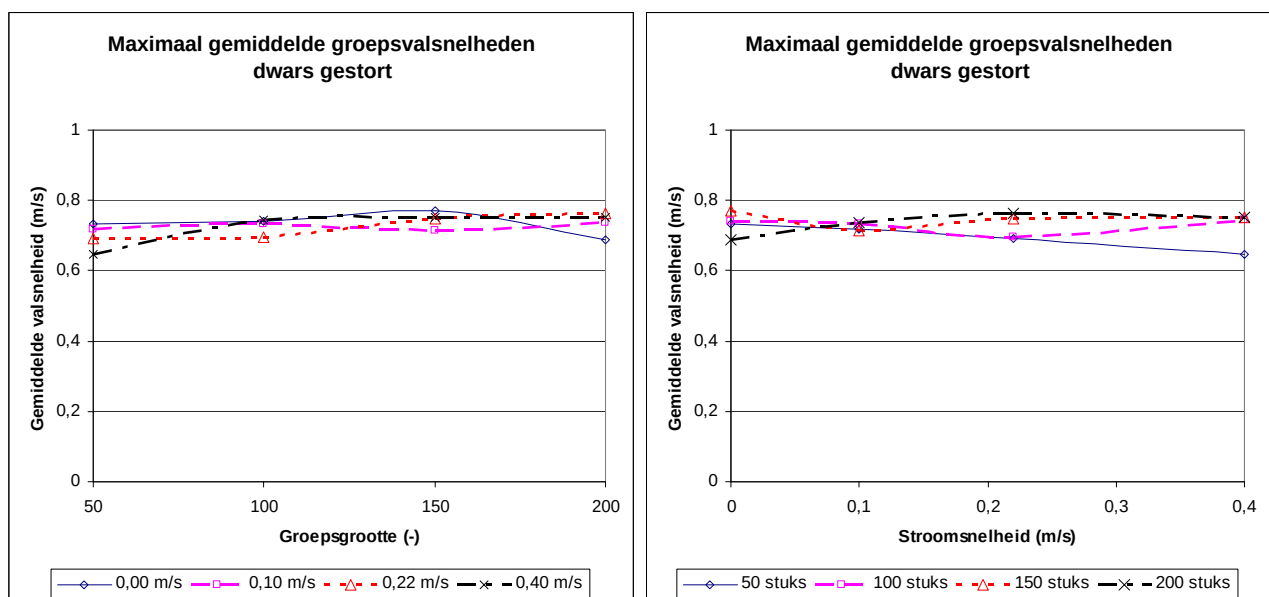
figuur 10-4 Schematische weergave globale valbeweging

Doordat de stenen in de kop van de groep de stroming wegvangen van de achterliggende stenen, kunnen de achterliggende stenen niet snel verplaatsen. Deze 2 samen vangen de stroming van de daar achterliggende stenen weer weg zodat deze relatief nog minder verplaatsen enzovoorts. Zie figuur 10-5.



10.2.3 Optredende groeps(val)snelheden

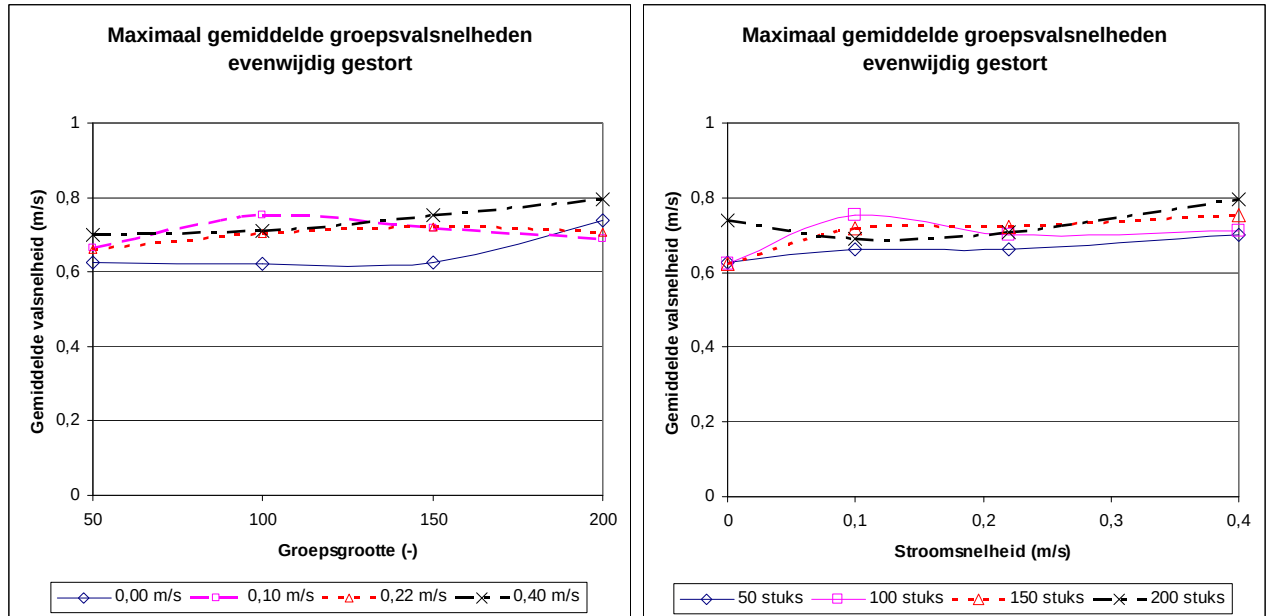
In figuur 10-6 zijn de maximaal optredende gemiddelde groepsvalsnelheden uitgezet.



figuur 10-6 Maximaal optredende gemiddelde groepsvalsnelheden dwars gestorte groepen

Bij dwars op de stroming storten (figuur 10-6) komt het volgende naar voren:

- De variatie in optredende valsnelheden is klein.
- Er is een lichte toename van valsnelheden bij toenemende groepsgrootte.
- Bij toenemende stroomsnelheid blijft de gemiddelde groepsvalsnelheid ongeveer constant.



figuur 10-7 Maximaal optredende gemiddelde groepsvalsnelheden evenwijdig gestorte groepen

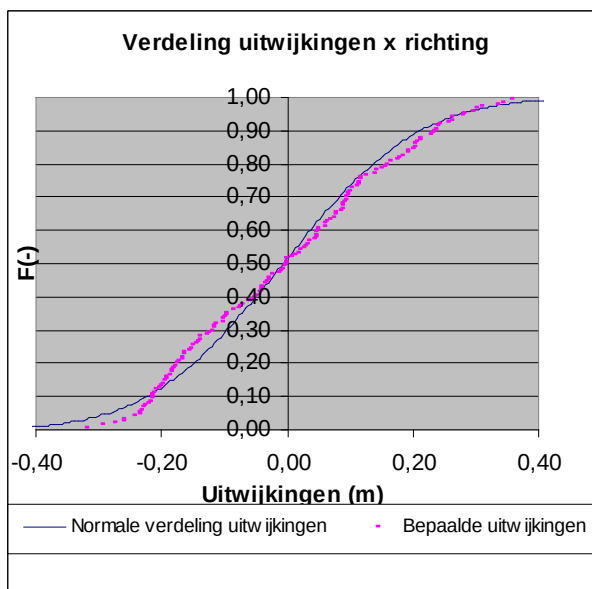
Bij evenwijdig aan de stroming storten (figuur 10-7) treedt het volgende beeld op:

Bij toenemende stroming worden de valsnelheden hoger, blijkbaar wordt een optredend groepsproces versterkt.

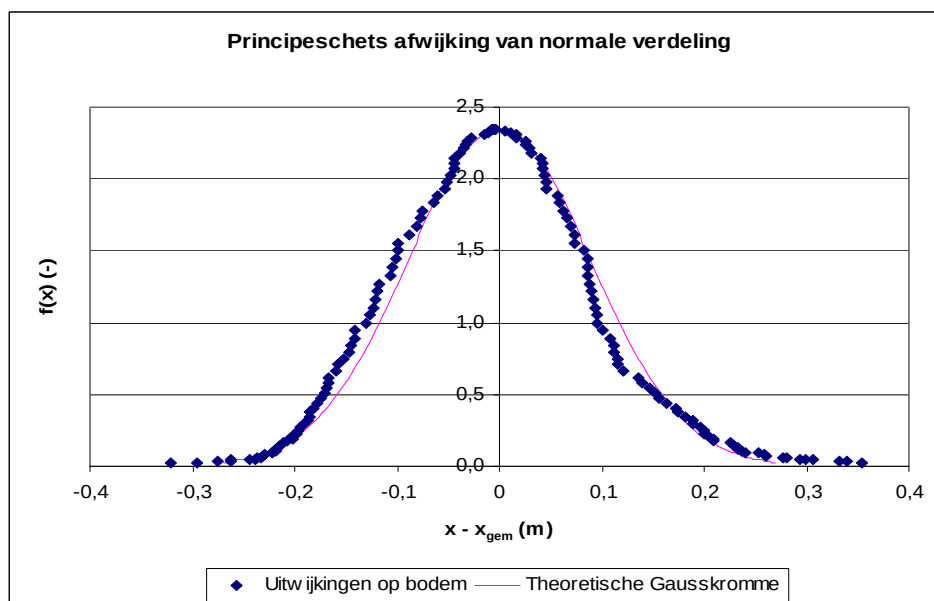
Het verschil tussen dwars op en evenwijdig aan de stroming storten is dat het groepseffect bij evenwijdig op de stroming storten een toename in de valsnelheid laat zien. Dit is waarschijnlijk het gevolg van indrukking. Door deze indrukking neemt de dichtheid van het water - stenen mengsel toe. Daarom wordt de gemiddelde valsnelheid groter. Deze toenemende valsnelheid is de reden dat de offset relatief afneemt bij toenemende groepsgrootte en stroomsnelheid.

Deze indrukking komt ook naar voren bij het bestuderen van de cumulatieve verdelingen van de uitwijkingen in de x-richting, opgenomen in bijlage M.

In figuur 10-8 is de cumulatieve kansverdelingfrequentie opgenomen voor een evenwijdige stort van 150 stenen bij een stroomsnelheid van 0,40 m/s. Er is hier sprake van indrukking van de kop van de groep.



figuur 10-8 Cumulatieve verdeling uitwijkingen in de x-richting bij evenwijdig storten van 150 stenen bij 0,40 m/s



figuur 10-9 Principeschets afwijking uitwijkingen in de x-richting bij 150 stuks gestort met 0,40 m/s bij evenwijdig storten

De cumulatieve kansverdeling in figuur 10-8 is omgezet naar een kansverdeling in figuur 10-9. Hier wordt duidelijk wat indrukking van het front van een groep voor effect heeft op de uitwijkingen van de stenen.

Bij dwars op de stroming storten wordt de onderlinge samenhang al snel verstoord. Doordat de stroming de stenen uit elkaar haalt is er in kleine mate nog sprake van een groepseffect.

Bij het storten op stilstaand water komt naar voren dat er pas echt een groepseffect optreedt bij het storten van 200 stenen tegelijk.

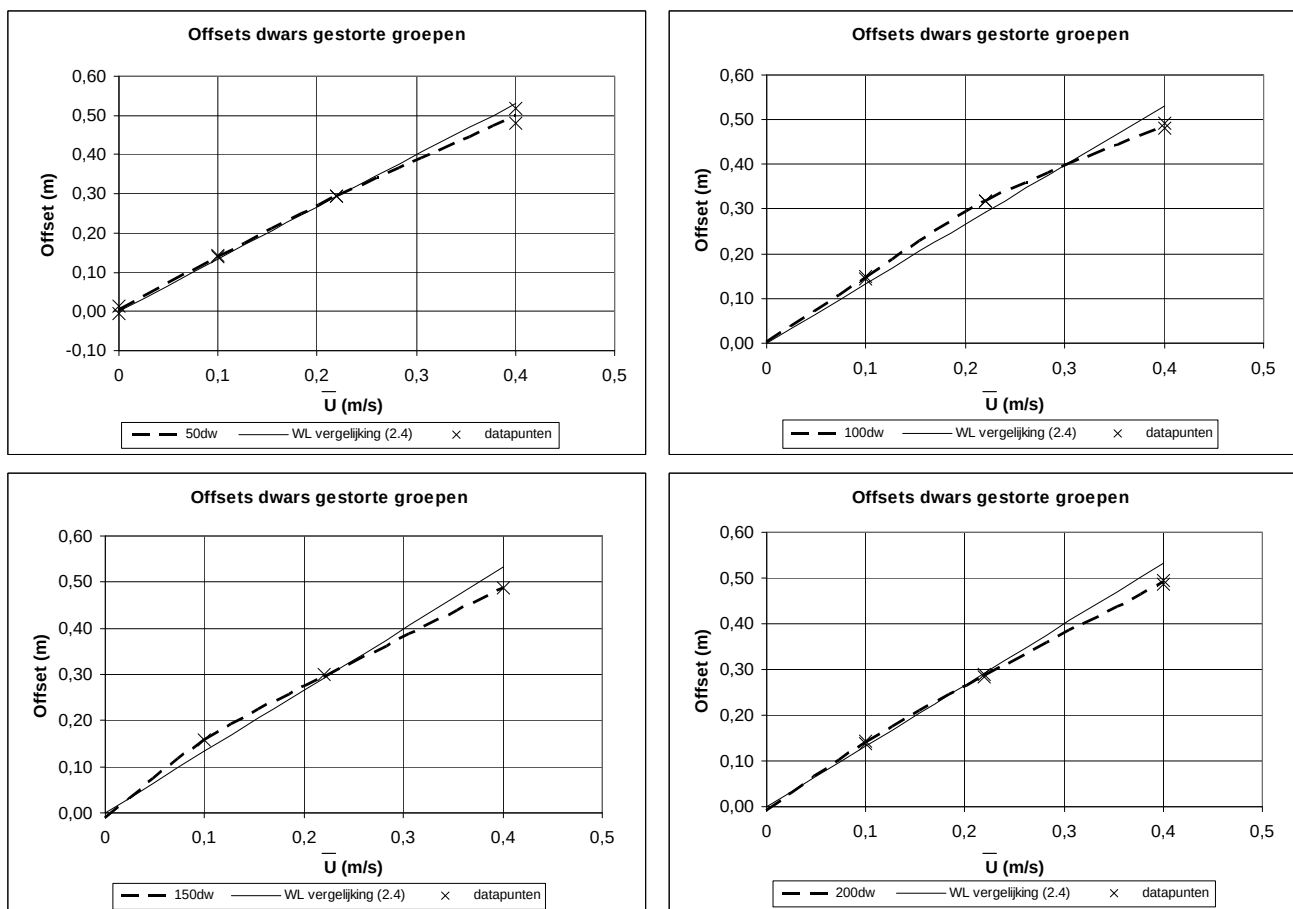
Indien deze resultaten worden vergeleken met de resultaten van van der Wal [2002], moet rekening gehouden worden met het feit dat in die experimenten een cilindervormige massa stenen tegelijkertijd is losgelaten. Daarbij treedt er in meerdere mate een groepseffect op. De buitenste stenen maken zich het eerst los. Indien er sprake is van een cilindervormige massa stenen zullen de stenen die zich in het midden van de groep bevinden, pas later de groep verlaten.

In het geval van een lijnstort zullen de stenen die zich aan de buitenkanten van de groep bevinden zich verwijderen en heeft de groep al snel weinig samenhang meer.

10.3 Offsets

Onder de offset van de gestorte groepen wordt verstaan:
de afstand tussen het punt van loslaten en het gemiddelde van de uitwijkingen van de stenen op de bodem ten opzichte van dat punt.

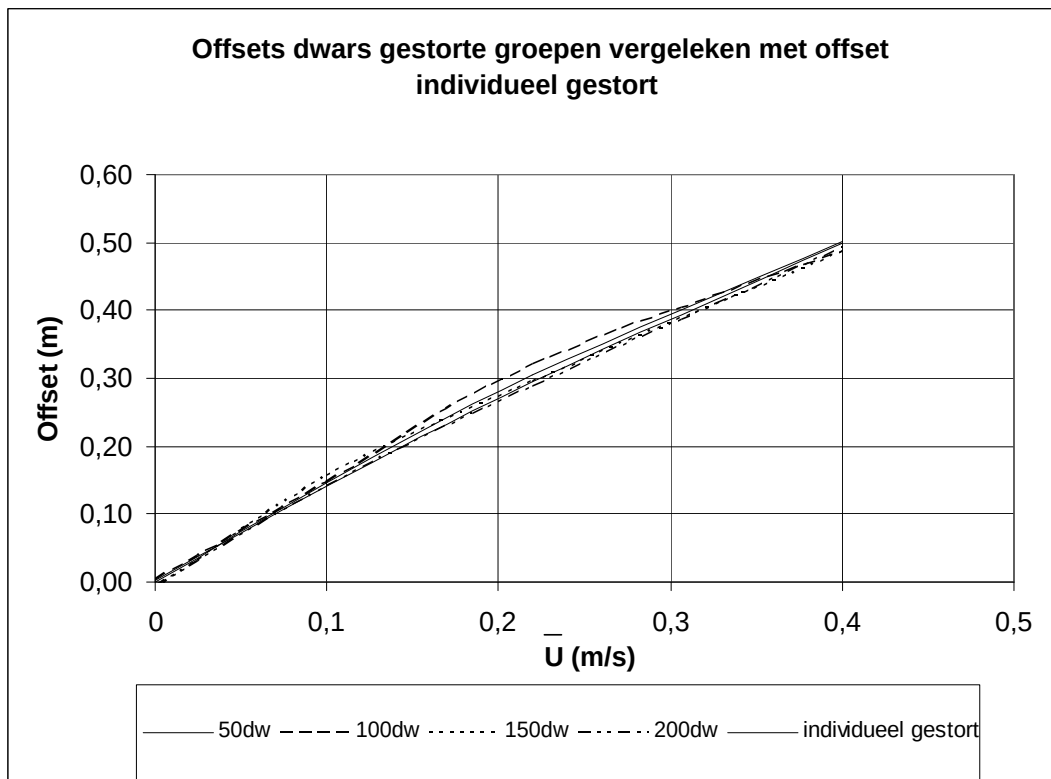
10.3.1 Dwars op de stroming gestorte groepen



figuur 10-10 Offset dwars gestorte stenen. De datapunten zijn het gemiddelde van de uitwijkingen in de x-richting per serie.

In figuur 10-10 zijn de verplaatsingen voor alle groepsstorten die in de stroomgoot bij verschillende snelheden dwars op de stroming zijn losgelaten ingetekend. Er is veel gelijkheid met figuur 9-1. Het aantal tegelijk losgelaten stenen heeft weinig invloed op de waarde van de offset.

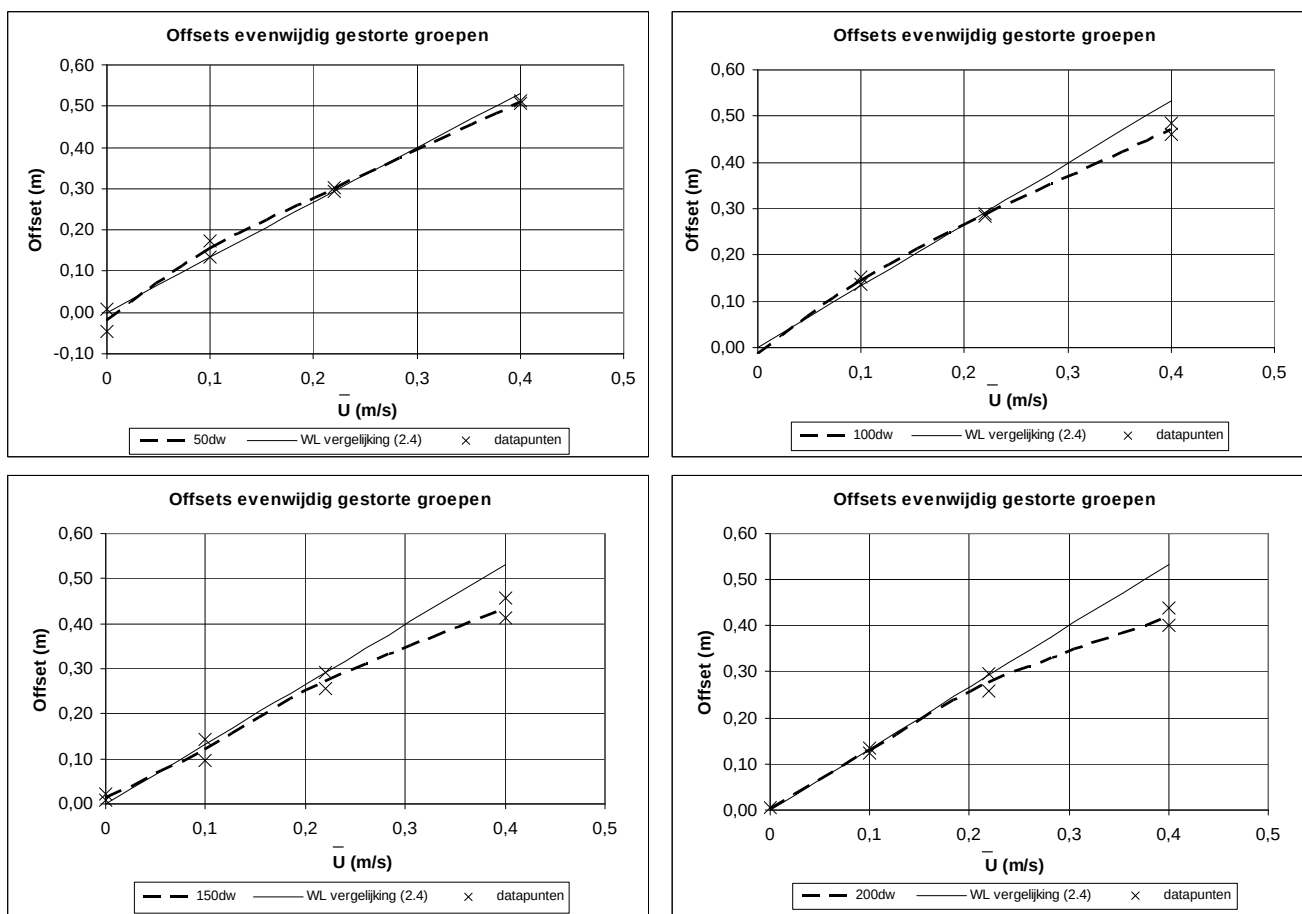
De stenen kunnen zich vrijelijk bewegen evenwijdig aan de stromingsrichting. Ze worden bijna niet gehinderd door de naastliggende stenen.



figuur 10-11 Verloop offset dwars gestorte groepen en individueel gestorte stenen

In figuur 10-11 is de offset van de dwars gestorte groepen samen met de offset van de individueel gestorte stenen geplot. Deze zijn bijna identiek. Bij dwars gestorte groepen is de offset van 150 en 200 stuks tegelijk gestort iets kleiner dan de offset van individueel gestorte stenen. De aanname dat bij dwars op de stroming storten hetzelfde proces optreedt als bij individueel storten lijkt hiermee gegrond te zijn.

10.3.2 Evenwijdig gestorte groepen



figuur 10-12 Offset evenwijdig gestorte groepen. De datapunten zijn het gemiddelde van de uitwijkingen in de x-richting per serie.

In figuur 10-12 volgt dat er een heel ander beeld optreedt bij evenwijdig storten, vergeleken met de dwars gestorte groepen. De voorspelde offset wordt onnauwkeuriger naarmate er meer stenen tegelijkertijd worden gestort. Hoe meer stenen er tegelijk worden gestort, hoe kleiner de offset wordt

Er zijn een aantal verklaringen mogelijk voor het optredende beeld:

- De groepsvalsnelheid wordt groter naarmate er meerdere stenen tegelijk worden gestort.
- Naarmate er meer stenen tegelijk worden gestort treedt er meer indrukking van de groep op. Dit komt doordat de eerst aangestroomde stenen de kracht van het stromende water wegvangen voor de stenen die zich hierachter bevinden. Hierdoor treedt er een langer durend horizontaal versnellingsproces op, waardoor de totale uitwijking minder wordt.
- Het effect van indrukking van de groep zorgt voor extra hoge groepsvalsnelheden, waardoor de verblijftijd in het stromende water korter wordt en er minder verplaatsing door de stroming optreedt. (zie ook hoofdstuk 10.2.3)



10.3.3 De parameters C_b en C_l voor dwars en evenwijdig gestorte groepen

De waarden in tabel 10-1 zijn bepaald door het gemiddelde van de uitwijkingen per stort te bepalen en deze te middelen over 2 series.

	U (m/s)	x (m) Individueel	x (m) 50 st.	x (m) 100 st.	x (m) 150 st.	x (m) 200 st.
Dwars	0	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01
	0,1	0,15	0,14	0,15	0,16	0,14
	0,22	0,30	0,30	0,32	0,30	0,29
	0,4	0,50	0,50	0,49	0,49	0,49
Evenwijdig	0	0,00	-0,02	-0,01	0,01	0,00
	0,1	0,15	0,15	0,14	0,12	0,13
	0,22	0,30	0,30	0,29	0,27	0,28
	0,4	0,50	0,51	0,47	0,44	0,42

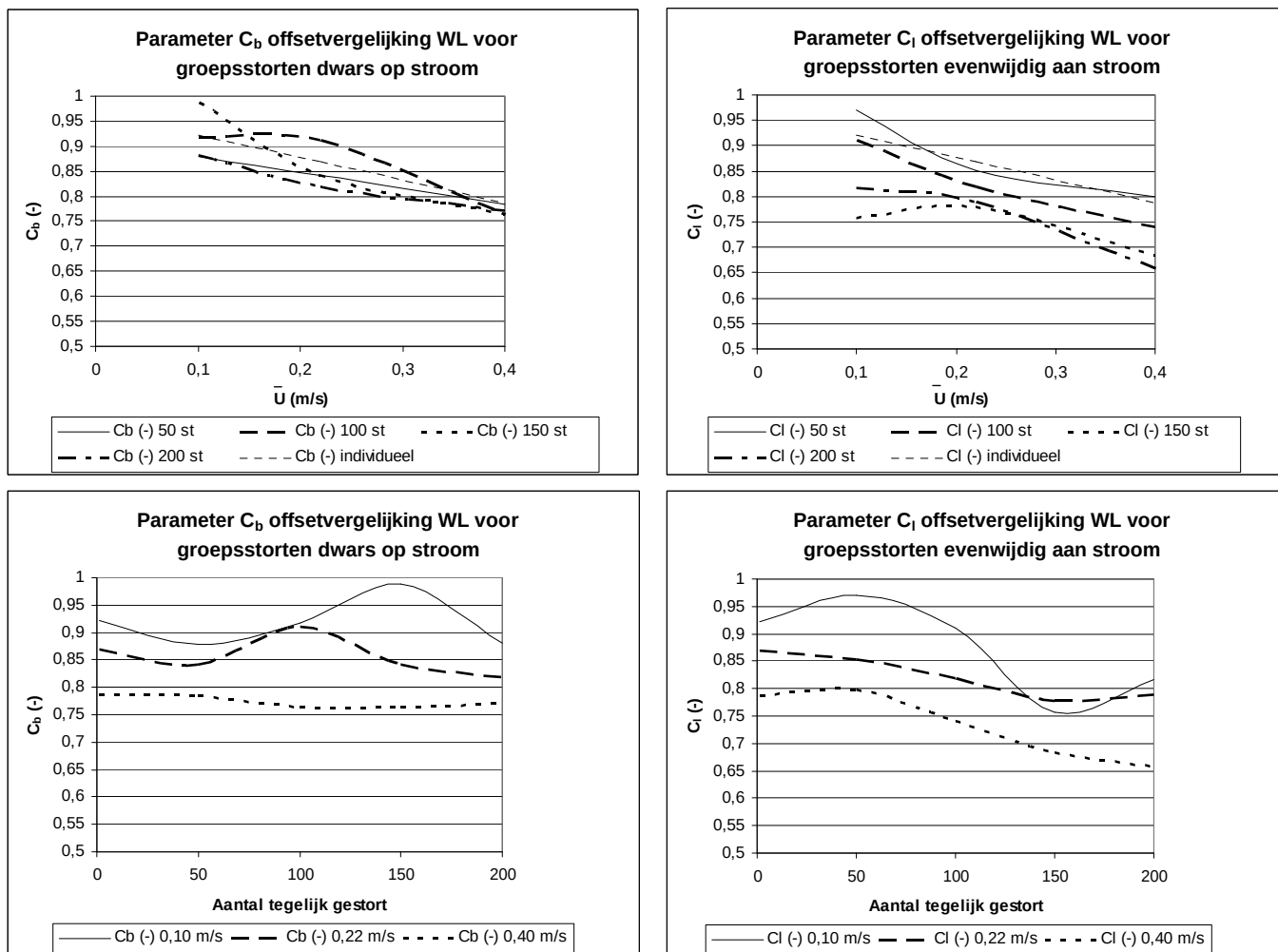
tabel 10-1 Gemiddelde uitwijkingen (zwaartepunt) per stort gemiddeld over 2 series in de x-richting

Deze uitwijkingen zijn vervolgens met vergelijking 2.6 en 2.7 omgerekend naar de desbetreffende waarden van C_b en C_l . Zie tabel 10-2.

	U (m/s)	Individueel gestort	Groepsgrootte			
			50	100	150	200
C_b	0,1	0,922001	0,878619	0,917104	0,98831	0,881449
	0,22	0,86929	0,842667	0,911221	0,842504	0,818487
	0,4	0,787474	0,783888	0,764389	0,76369	0,770798
C_l	0,1	0,922001	0,969624	0,910373	0,757047	0,816514
	0,22	0,86929	0,852165	0,818178	0,778555	0,789892
	0,4	0,787474	0,799029	0,740806	0,684277	0,659049

tabel 10-2 Waarden van C_b en C_l

De overige waarden, ingevuld in de vergelijkingen zijn dezelfde als in hoofdstuk 9.2.5.



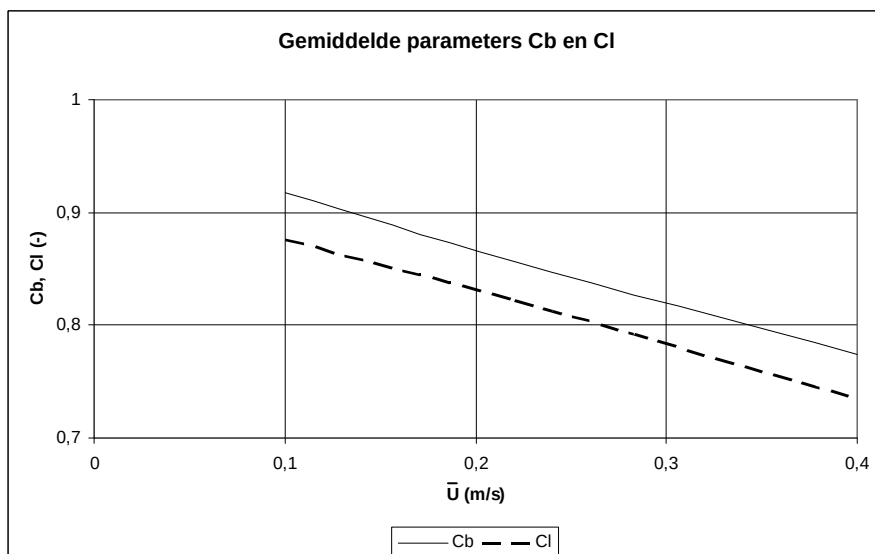
figuur 10-13 Parameters C_b en C_i bij tegelijk gestorte stenen

Uit bovenstaande figuren blijkt duidelijk dat C_b en C_i afnemen bij toenemende stroomsnelheid. Bij evenwijdig op stroom storten is duidelijk te zien dat een toenemende groeps-grootte verantwoordelijk is voor de afname van C_i .

Door nu te veronderstellen dat bij het storten met een zijstorter het aantal stenen dat per tijdseenheid over boord gaat opgedeeld kan worden in individueel vallende stenen en groepen van maximaal 200 stuks tegelijk kan er een gemiddelde worden bepaald van de parameters C_b en C_i . Hieruit volgen de waarden in figuur 10-14 en tabel 10-3.

Gemiddelden	0,10 m/s	0,22 m/s	0,40 m/s
C_b	0,92	0,86	0,77
C_i	0,88	0,82	0,73

tabel 10-3 Gemiddelde parameters C_b en C_i



figuur 10-14 Gemiddelde parameters C_b en C_l

Uit figuur 10-14 en tabel 10-3 kan worden afgeleid dat de C_l zich verhoudt tot C_b als:

$$C_l = 0,95 \cdot C_b \quad (10.1)$$

Opvallend is dat er bijna geen verschil is tussen de parameters C_b en C_l , bepaald met behulp van de resultaten van de experimenten. Dit in tegenstelling tot de waarden gegeven door het WL. Op basis van dumps gedaan met splitsbakken en zijstorters blijkt dat de verhouding $C_l = 1/3 \times C_b$ uit die experimenten volgde. Het verschil is dat er in de onderzoeken van het WL met bulkstorten is gewerkt, terwijl uit dit onderzoek blijkt dat het optredende proces bij het storten met een zijstorter gezien kan worden als een enkel steens proces.

Bij het interpreteren van figuur 10-14 moet er wel rekening gehouden worden met schaafeffecten, indien er wordt opgeschaald naar in situ waarden. Zoals in hoofdstuk 9.2.2 is betoogd, dat de toename van de evenwichtsvalsnelheid het gevolg is van een overgangsfase opgelegd door het Reynoldsgetal, dient er rekening gehouden te worden met het feit dat Reynolds getallen voor prototypediameters (Bijvoorbeeld $Re \approx 600.000$ voor een steen met een d_n van 0,3 m.) zich vaak al in het gebied van de turbulente grenslaagstroming bevinden. Hierdoor daalt de weerstandscoefficiënt van een enkele steen. Dit heeft ook zijn invloed op de parameters C_b en C_l .

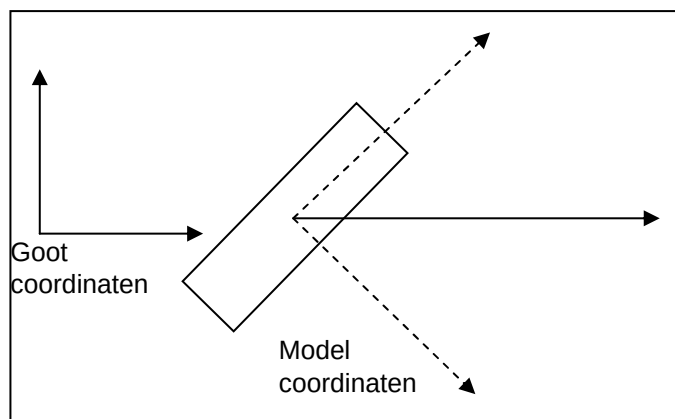
10.3.4 De parameters C_b en C_l voor onder 45 graden gestorte groepen

Indien in de vergelijkingen 2.4 en 2.5 de in de experimenten geldende waarden worden ingevuld voor het storten onder een hoek van 45 graden met de stroming komen er andere waarden uit dan bepaald met de experimenten.

In de experimenten werden de volgende gemiddelde waarden gevonden voor het onder 45 graden storten:

	Coördinaten volgens assenstelsel goot	Coördinaten volgens assenstelsel offsetformules (figuur 2-9) experiment	Coördinaten volgens assenstelsel offsetformules (figuur 2-9) theorie
x	0,455	0,34	0,34
y	0,031	0,30	0,34

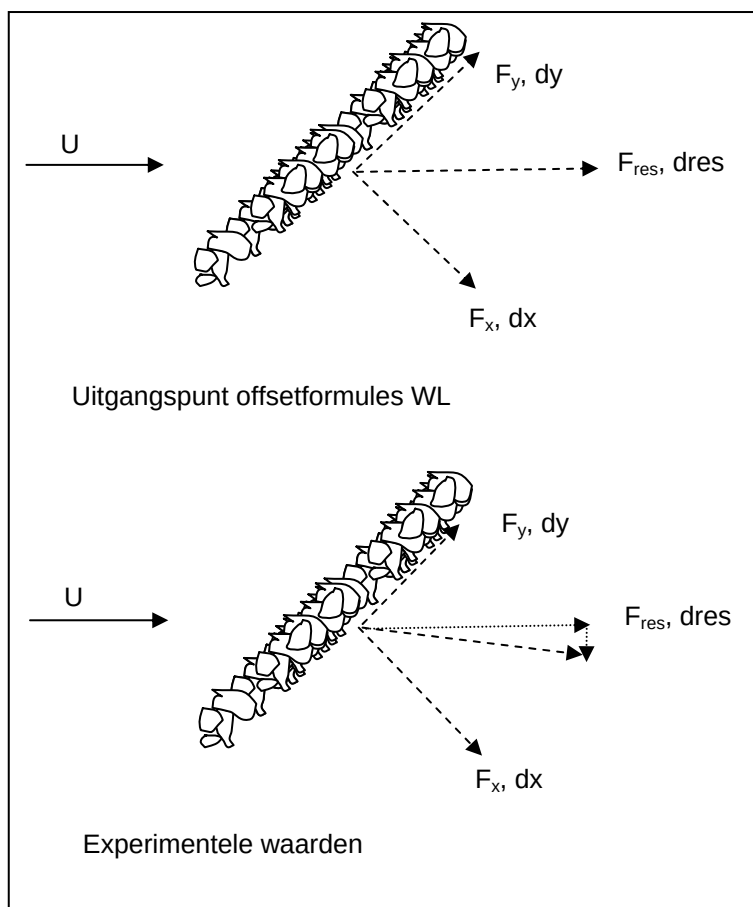
tabel 10-4 Verschil theoretische en experimentele waarden verplaatsing groep van 200 stuks onder 45 graden



figuur 10-15 Assenstelsels bij bepaling verplaatsingen onder 45° gestort

De waarden die zijn aangehouden voor C_b en C_l zijn de gemiddeld gemeten waarden bij 0,40 m/s.

Er treedt blijkbaar nog een extra effect op. Dit is geschetst in figuur 10-16.



figuur 10-16 Extra effect storten onder 45 graden

Indien we uitgaan van de offsetvergelijking is de verplaatsing in de x-richting even groot als de verplaatsing in de y-richting. Uit de experimenten blijkt: $dx > dy$. Er is blijkbaar een effect aanwezig dat niet opgenomen is in de offsetvergelijkingen (vergelijking 2.4 en 2.5).

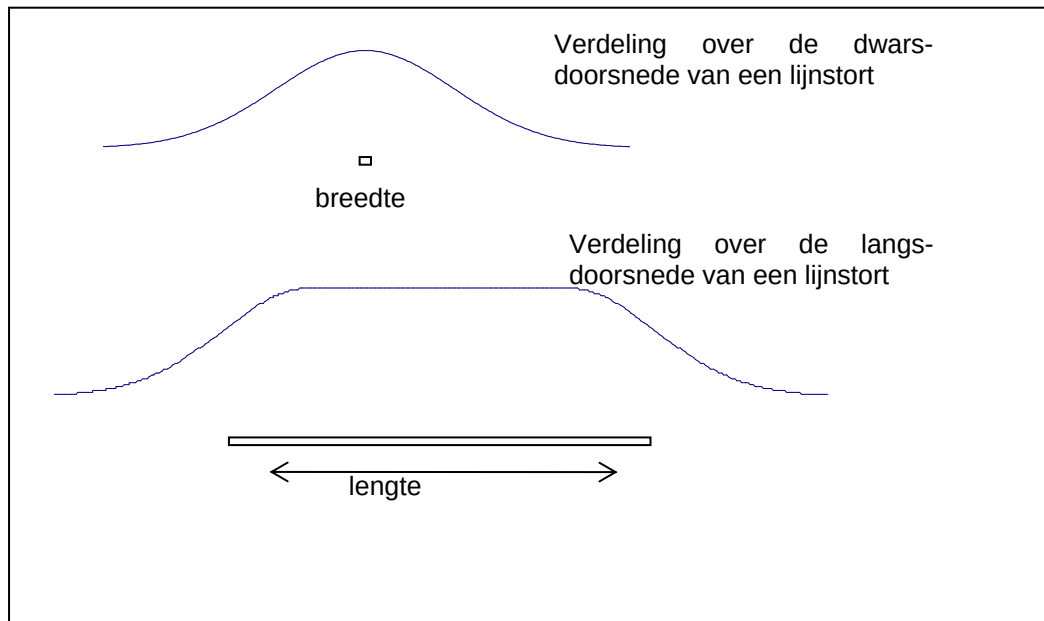
Dit extra effect wordt veroorzaakt doordat de groep als een geheel samenwerkt en een liftkracht loodrecht op de stroming creëert. Om dit effect mee te kunnen nemen in de offsetformules dienen er proeven met verschillende hoeken op de stroming te worden uitgevoerd teneinde de, met de hoek variërende, liftkracht in kaart te brengen. Er moet wel rekening gehouden worden met het feit dat deze liftkracht, als gevolg van een groepswerking, niet over de gehele diepte aanwezig is, omdat de stenen, bij voldoende waterdiepte, zich gaan gedragen als individueel vallende stenen.

10.4 Spreiding van groepen op de bodem

10.4.1 Theoretische beschouwing Lijnstort Model (LSM)

In Cregten [1995] is een model ontwikkeld om de verdeling op de bodem te bepalen indien de stenen vanaf een lijn worden gestort. Dit wordt het Lijn Stort Model genoemd (LSM). Het uitgangspunt hierbij is, dat zich loodrecht op een lijnstort een normale verdeling ontwikkelt.

Over de lengte van het stort is de verdeling aanvankelijk normaal, vervolgens uniform en uiteindelijk weer een normaal. Een en ander wordt in figuur 10-17 duidelijk gemaakt.



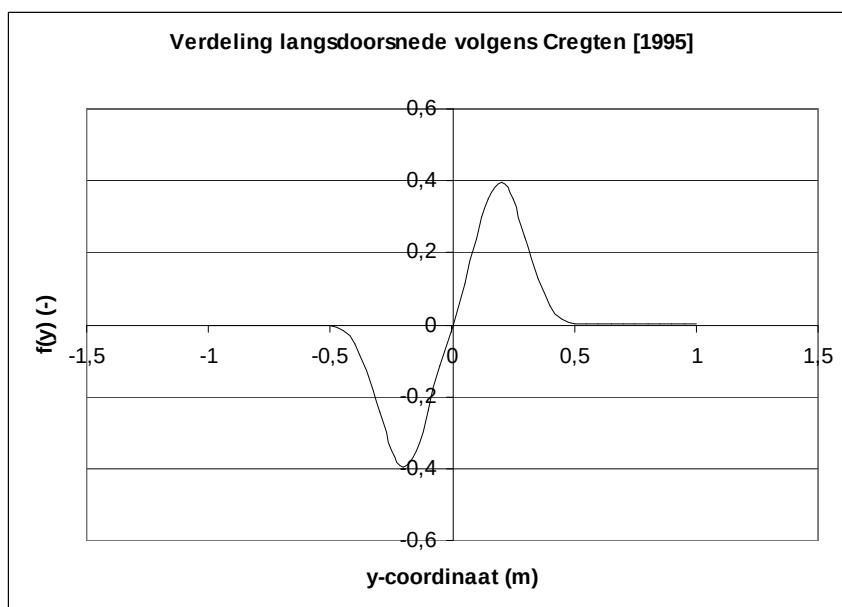
figuur 10-17 Verdeling uitwijkingen lijnstort volgens Cregten [1995]

De verdeling over de dwarsdoorsnede is normaal verdeeld. De vergelijking van de verdeling over de langsdoorsnede is volgens Cregten [1995]:

$$f_x(x, y) = \frac{1}{L \cdot \sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma_n}\right)^2\right)} \cdot \left(\Phi\left(\frac{Y_1 - y}{\sigma_n}\right) - \Phi\left(\frac{Y_0 - y}{\sigma_n}\right) \right) \quad (10.2)$$

Indien men in het rechterdeel van de vergelijking $\left(\Phi\left(\frac{Y_1 - y}{\sigma_n}\right) - \Phi\left(\frac{Y_0 - y}{\sigma_n}\right) \right)$ de volgende waarden invult:

$Y_0 = -0,2$; $Y_1 = 0,2$ en $\sigma_n = 0,1$ volgt de verdeling geplot in figuur 10-18.



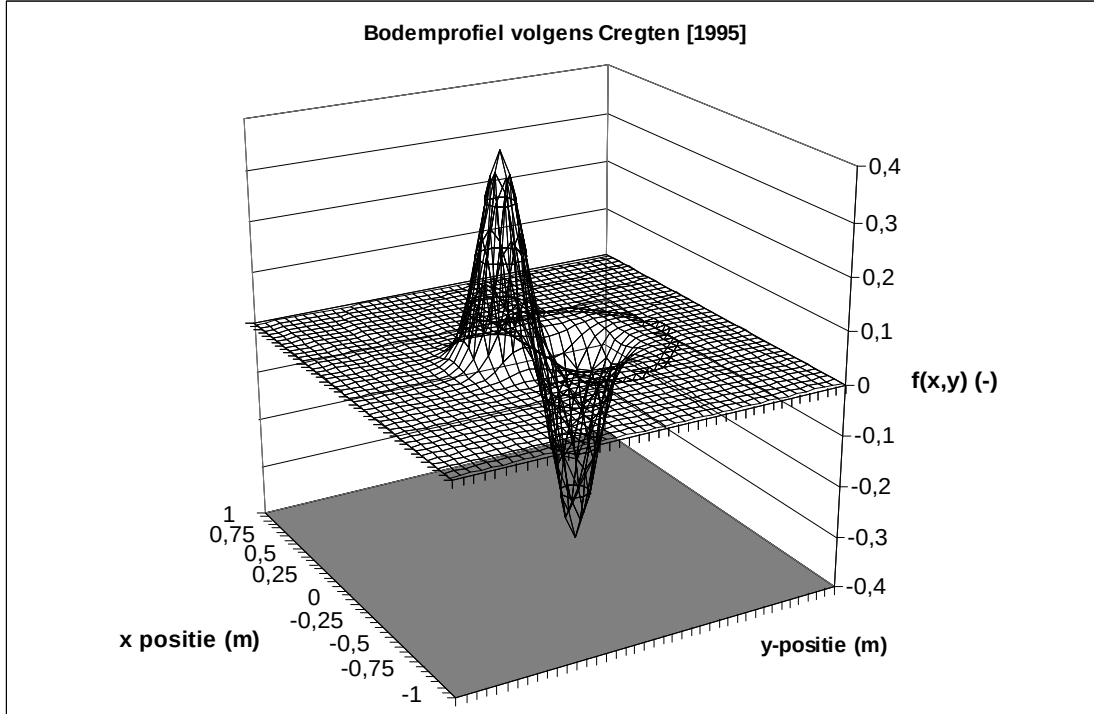
figuur 10-18 Verdeling langsdoorsnede LSM volgens Cregten [1995]



Hierbij is uitgegaan van een normale verdeling van de x posities van de stenen. (Zie ook hoofdstuk 9.2.7)

Op deze manier zou dan eenvoudig een bodemprofiel kunnen worden bepaald. Er moet echter wel vermeld worden dat er in Cregten [1995] ook aangegeven wordt dat de verdelingsfuncties worden voorgesteld door een normale verdeling en een omgedraaide normale verdeling.

Indien men dezelfde waarden als voor figuur 10-18 invult in vergelijking 10.2 verkrijgt men het bodemprofiel weergegeven in figuur 10-19:



figuur 10-19 Bodemprofiel volgens vergelijking 10.2

Er wordt nu voorgesteld om de volgende formule te gebruiken voor het plotten van een te verwachten stortprofiel:

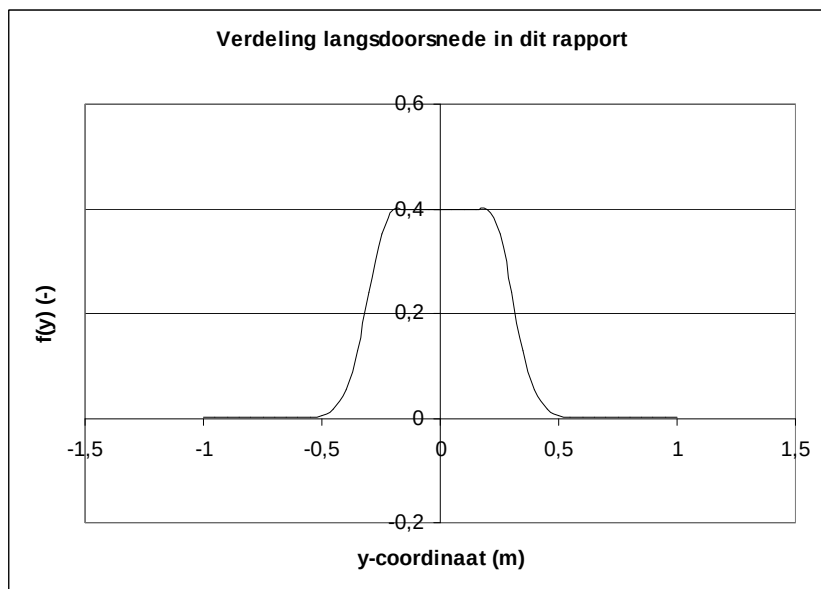
$$\text{Voor } y \leq Y_0: \quad f_x(x, y) = \frac{1}{L \cdot \sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_n}\right)^2\right)} \cdot \left(\Phi\left(\frac{Y_1 - y}{\sigma_n}\right) + \Phi\left(\frac{Y_0 - y}{\sigma_n}\right) \right),$$

$$\text{Voor } Y_0 \leq y \leq Y_1: \quad f_x(x, y) = \frac{1}{L \cdot \sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_n}\right)^2\right)} \cdot \left(\Phi\left(\frac{Y_1 - Y_0}{\sigma_n}\right) + \Phi\left(\frac{Y_0 - Y_0}{\sigma_n}\right) \right)$$

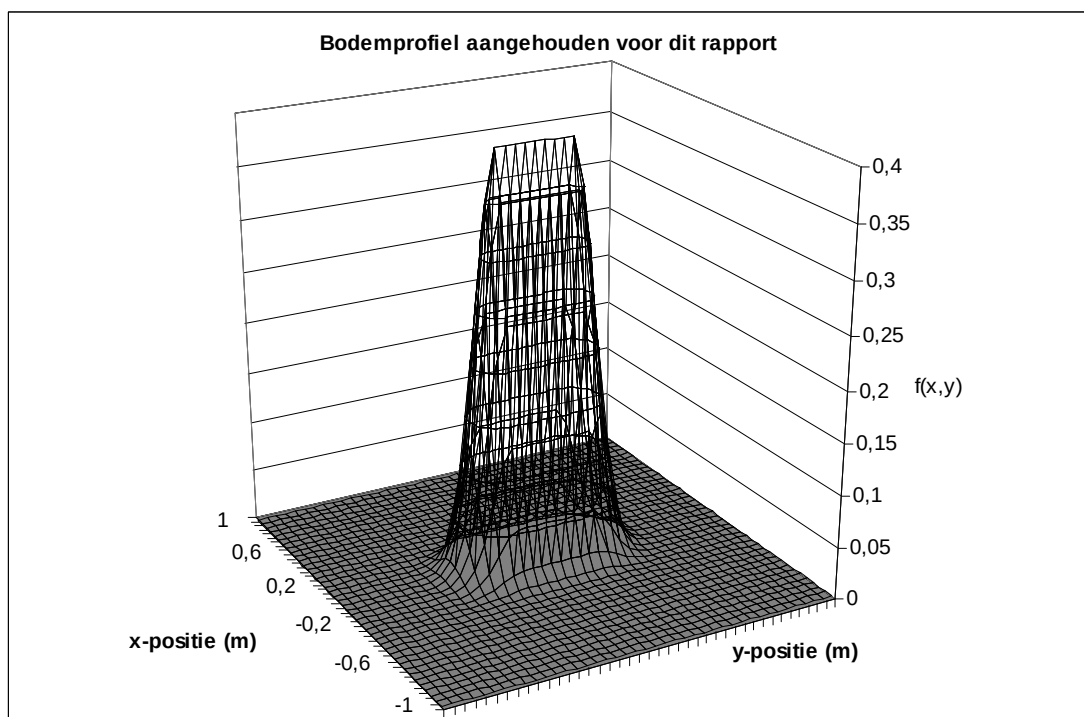
en

$$\text{Voor } y > Y_1: \quad f_x(x, y) = \frac{1}{L \cdot \sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_n}\right)^2\right)} \cdot \left(\Phi\left(\frac{Y_1 - y}{\sigma_n}\right) + \Phi\left(\frac{Y_0 - y}{\sigma_n}\right) \right)$$

De uitkomsten van deze vergelijkingen worden getoond in figuur 10-20 en figuur 10-21.



figuur 10-20 Langsdoorsnede aangehouden in dit rapport



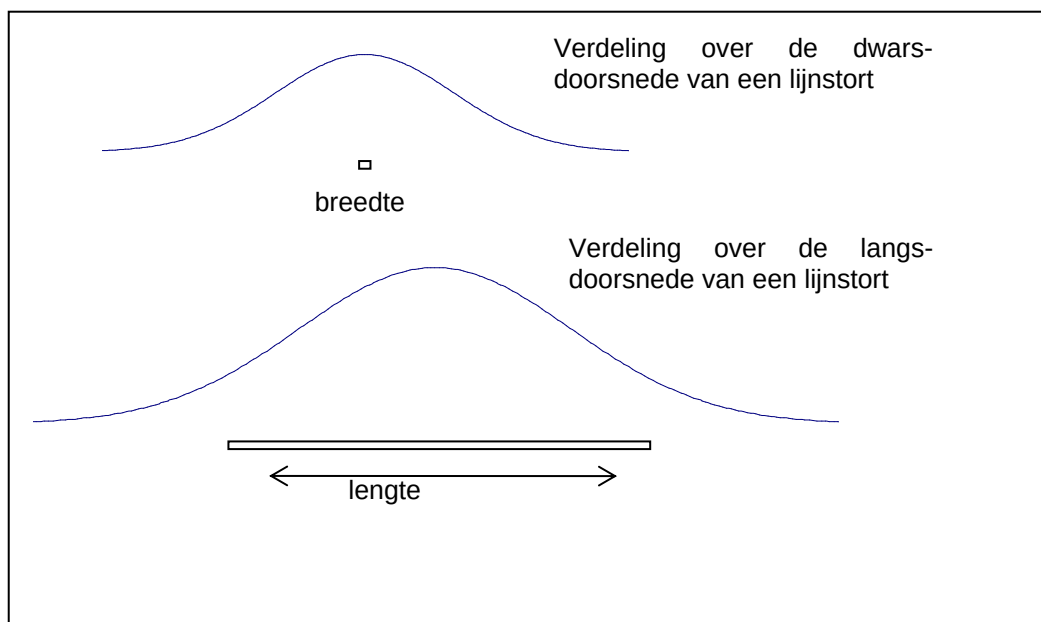
figuur 10-21 LSM aangehouden in dit rapport

Dit geeft een betere voorstelling van het optredende bodemprofiel bij een lijnstort.

10.4.2 Praktische toepasbaarheid LSM

De verdeling van de uitwijkingen die tijdens de experimenten is bepaald, gedraagt zich, in de dwarsrichting van een stort gezien, normaal verdeeld. Opvallend is dat de verdeling van de uitwijkingen in de lengterichting gezien ook normaal verdeeld is, conform de KS toetsen op de cumulatieve verdelingsfrequenties (Zie bijlage N). Zowel voor het dwars op als evenwijdig aan de stroming storten.

Het LSM gaat dus niet op voor een L_{dek} / σ_n waarde $\leq 3,5$. Waarin σ_n de spreiding voorstelt. L_{dek} is de lengte van de lijn is waarlangs de stenen worden losgelaten. De verdelingen gedragen zich volgens figuur 10-22.

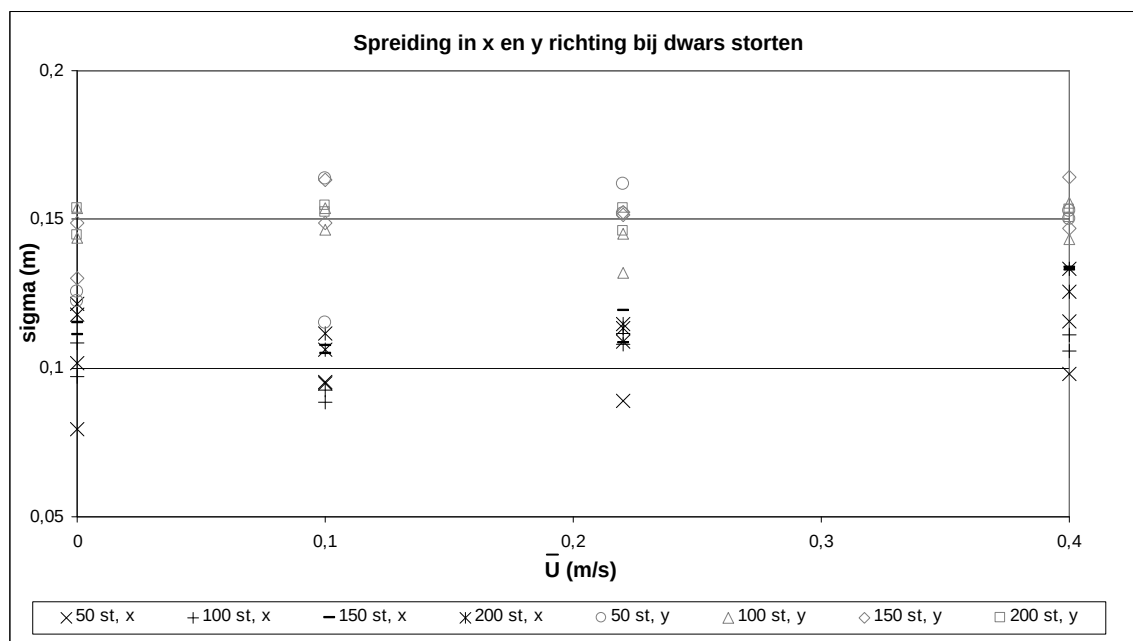


figuur 10-22 Theoretische verdeling uitwijkingen lijnstort optredend tijdens de uitgevoerde experimenten

10.4.3 De in de goot bepaalde spreidingen

De spreiding van de verdeling op de bodem van verschillende groepen is voor de verschillende groepsgroottes en stroomsnelheden opgesplitst in een spreiding in de x en y-richting (zie figuur 8-3) voor zowel evenwijdig aan als loodrecht op de stroming storten.

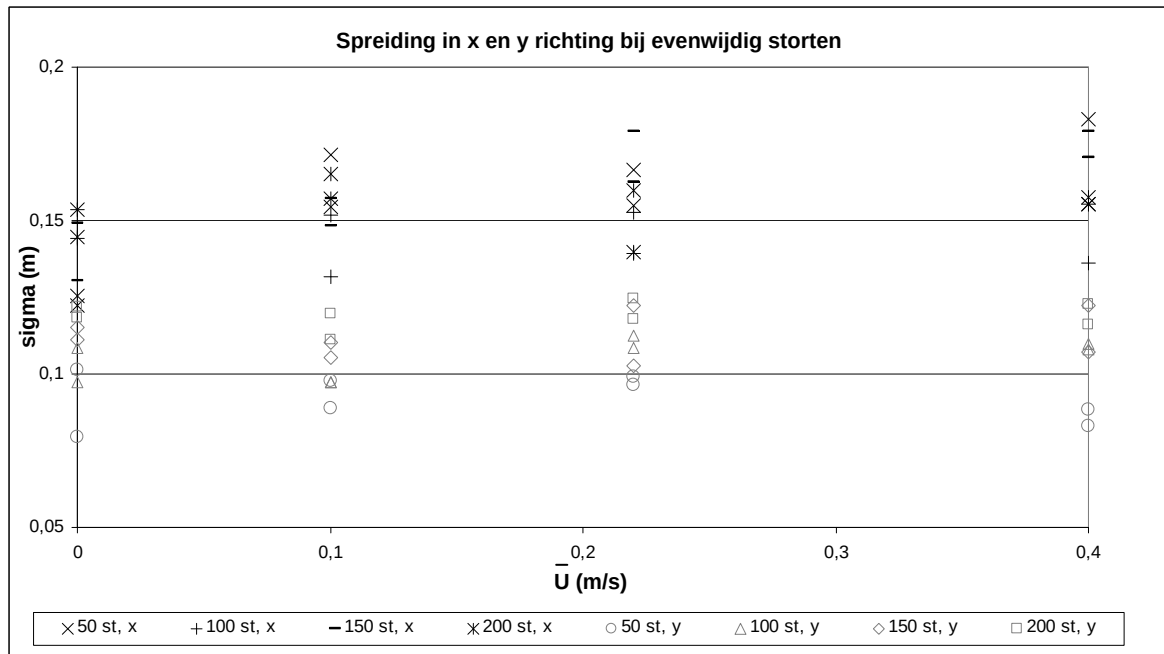
De grafieken zijn geplot in figuur 10-23, figuur 10-24, figuur 10-25 en figuur 10-26. De geplotte waarde van de spreiding is bepaald door van elke stort de totale spreiding te bepalen en die te middelen over de 2 uitgevoerde storten, dezelfde manier als toegepast in hoofdstuk 9.2.7. Op deze manier is de invloed van het verschil in locaties door het random valgedrag uitgeschakeld.



figuur 10-23 Spreiding in de x- en y-richting bij storten dwars op de stroming, toenemende stroming

Bij het bestuderen van de figuren valt op dat bij dwars op de stroming storten (figuur 10-23) de spreiding van alle groepen licht toeneemt. Bij de groepen van 100, 150 en 200 stuks is er eerst een kleine afname van de spreiding waarneembaar. Deze afname was ook zichtbaar bij het bepalen van de spreiding van individueel gestorte stenen. Zie figuur 9-10.

De spreiding in de y-richting lijkt onafhankelijk van de stroomsnelheid. Alleen bij een toename van de stroomsnelheid van 0 tot 0,1 m/s is er over het geheel gezien een kleine toename van de spreiding in de y-richting waarneembaar, deze is echter zeer klein.



figuur 10-24 Spreiding in de x- en y-richting bij storten evenwijdig aan de stroming, toenemende stroming

Bij het storten evenwijdig aan de stroming (figuur 10-24) blijft de spreiding in de y-richting zo goed als constant, bij toenemende stroomsnelheid.

De spreiding in de x-richting neemt gemiddeld genomen iets toe tot 0,22 m/s en wordt vanaf 0,22 m/s stroomsnelheid zo goed als constant.

Bij de groep van 200 stuks is te zien dat de spreiding in de x-richting eerst iets toeneemt, dan iets afneemt en vervolgens weer iets toeneemt. Dit kan duiden op een indrukking van de groep.

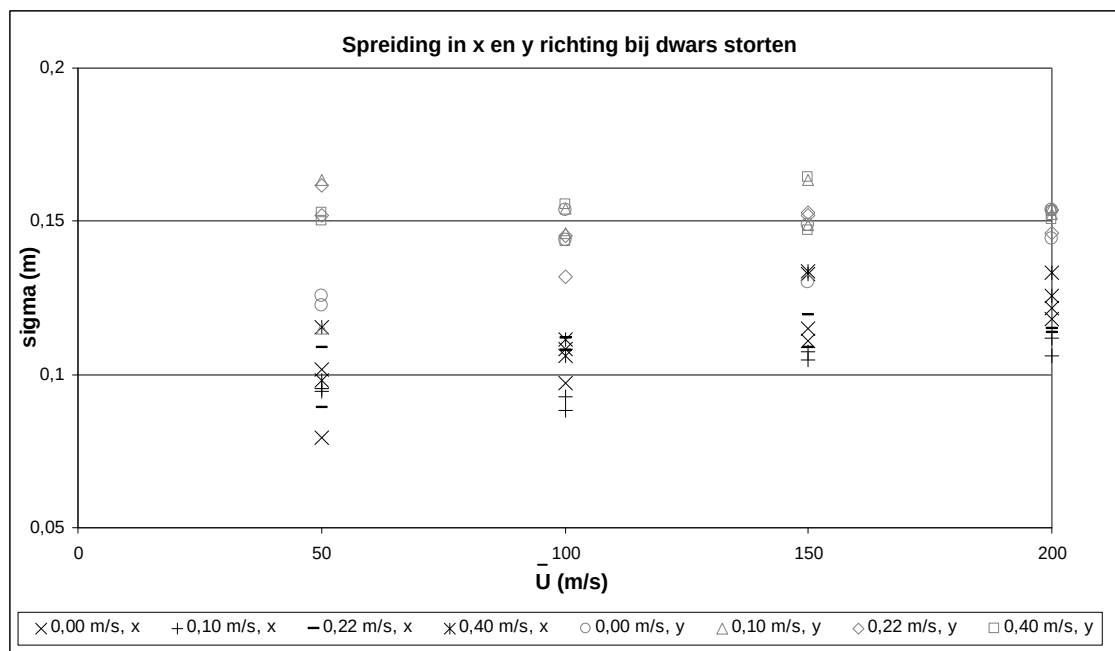
Opvallend is dat de spreiding in de y-richting toeneemt met toenemende groeps grootte. Dit komt ook naar voren in figuur 10-26.

Indien figuur 10-23 en figuur 10-24 met elkaar vergeleken worden blijkt dat het verschil in spreiding niet zo groot is, indien de spreiding in de x-richting bij dwars storten vergeleken wordt met de spreiding in y-richting bij evenwijdig storten. Alleen de spreiding in de y-richting van de groep van 50 stuks neemt af bij evenwijdig storten.

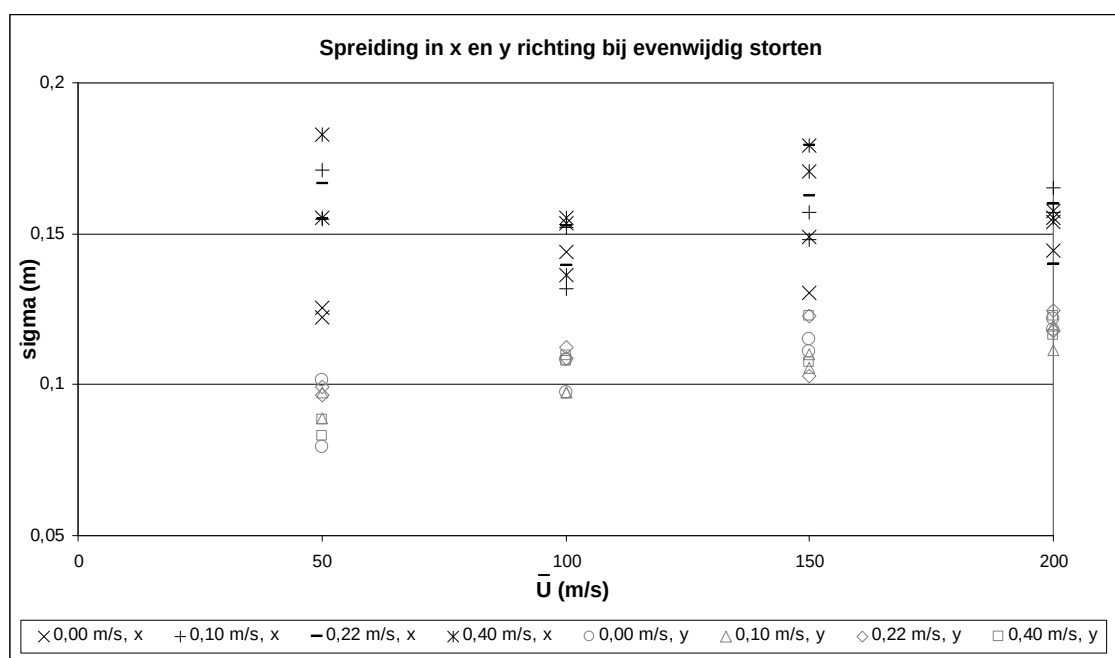
Het verschil in spreiding tussen de y-richting bij dwars storten en de x-richting bij evenwijdig storten is dat bij evenwijdig storten de gemiddelde spreiding in de x-richting groter is. Dit is het gevolg van uitrekking van evenwijdig gestorte groepen.

Blijkbaar heeft de stroming weinig invloed op de spreiding van de verschillende groeps groottes. Vooral de oriëntatie heeft invloed op het verschil in spreiding tussen de x- en y-richting.

Indien men de spreiding in de y-richting bij dwars storten vergelijkt met de spreiding in x-richting bij evenwijdig storten valt op dat bij hogere stroomsnelheid de spreiding in de x-richting bij evenwijdig storten iets kleiner is. Dit kan duiden op een indrukking van de groep bij evenwijdig storten.



figuur 10-25 Spreiding in de x- en y-richting bij storten dwars op de stroming, toenemende groeps grootte



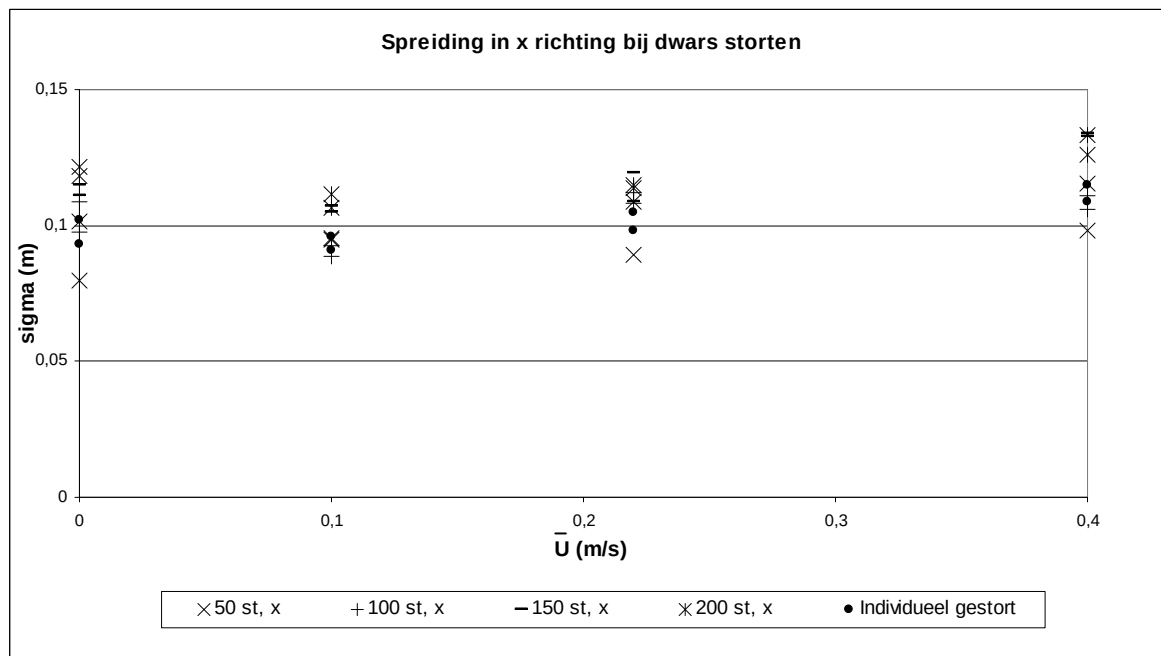
figuur 10-26 Spreiding in de x- en y-richting bij storten evenwijdig op de stroming, toenemende groeps grootte

In figuur 10-25 en figuur 10-26 is de spreiding geplot aan de hand van toenemende groeps grootte.

In figuur 10-25 komt duidelijk naar voren dat een toenemende groeps grootte voor een toenemende spreiding zorgt, indien dwars op de stroming gestort wordt in x-richting. De spreiding in de y-richting is zo goed als constant bij toenemende groeps grootte.

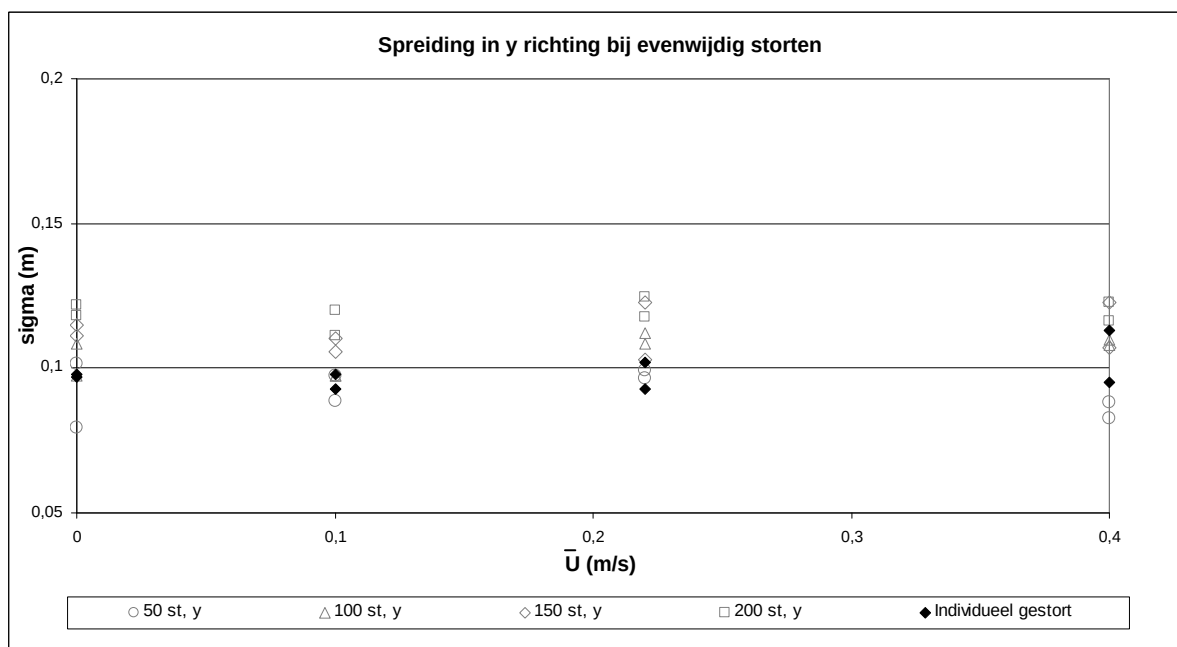
Indien evenwijdig aan de stroming gestort wordt (figuur 10-26) neemt de spreiding in de y-richting toe met toenemende groeps grootte. De spreiding in de x-richting neemt van 0 tot 0,1 m/s af, dan weer van 0,1 tot 0,22 m/s en vervolgens weer af. De afname van de spreiding van 0 tot 0,1 m/s kan het gevolg zijn van de verschillende opstellingen waarin de proeven zijn uitgevoerd. De proeven met een stroomsnelheid van 0 m/s zijn in het aquarium uitgevoerd, de overige proeven zijn uitgevoerd in de stroomgoot.

De spreiding in de x-richting bij dwars storten en in de y-richting bij evenwijdig storten zou volgens de theorie dezelfde trend moeten vertonen. Alleen zou de spreiding bij toenemende groeps grootte groter moeten worden.



figuur 10-27 Spreiding dwars gestorte groepen in x-richting vergeleken met spreiding individueel gestort in x-richting

Uit figuur 10-27 blijkt dat deze theorie inderdaad opgaat voor het storten dwars op de stroming.



figuur 10-28 Spreiding evenwijdig gestorte groepen in y-richting vergeleken met spreiding individueel gestort in y-richting

Uit figuur 10-28 blijkt dat hetzelfde geldt voor de spreiding in de y-richting bij evenwijdig op de stroming storten.

In bijlage N is er per stort getoetst met behulp van de Kolmogorov Smirnov toets of de spreiding normaal verdeeld is, zowel voor de x- als de y-richting. Dit blijkt voor alle storten het geval te zijn, behalve voor de stort met codering 150stevs2u10 in de x-richting. In bijlage J



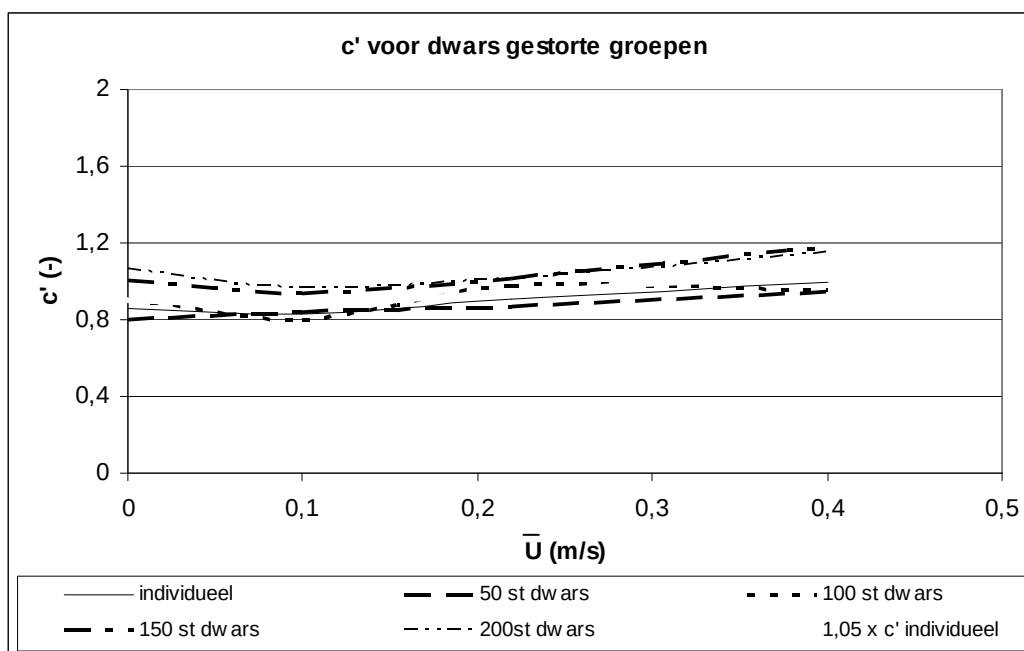
zijn de uitwijkingen van die stort gegeven. Debet, aan het niet aan de KS toets voldoen van 150stevens2u10, is het feit dat de stenen zich teveel concentreren aan de linkerkant van het stort (in positieve y-richting gezien).

10.4.4 De constante c' bij groepsstorten

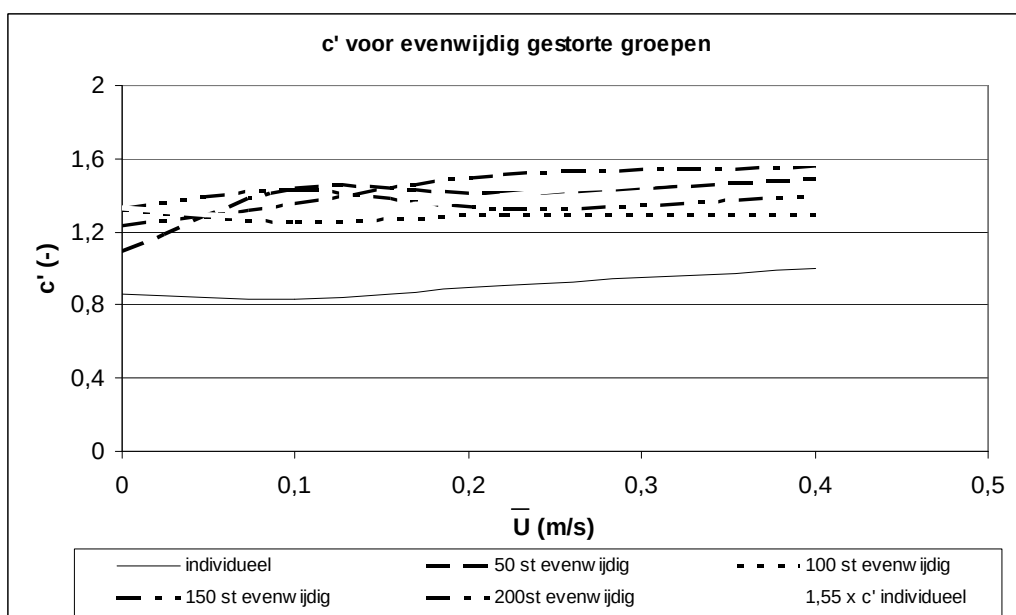
In voorgaand hoofdstuk is de spreiding die optreedt bij verschillende snelheden en groepsgroottes besproken. Deze spreiding kan met behulp van vergelijking 3.11 omgerekend worden naar c' . In figuur 10-29 en figuur 10-30 zijn de waarden hiervoor gegeven.

In de figuren staat c' geplot voor individueel losgelaten stenen, groepen van 50, 100, 150 en 200 stuks en een benadering van de representatieve c' voor de groepen op basis van de c' voor individueel losgelaten stenen.

Opvallend is de overeenkomst tussen de dwars gestorte groepen en de individueel gestorte stenen.



figuur 10-29 De factor c' afgeleid van de spreiding, volgend uit de experimenten met dwars gestorte groepen



figuur 10-30 De factor c' afgeleid van de spreiding, volgend uit de experimenten met evenwijdig gestorte groepen

U (m/s)	individueel gestort $c'_{\text{individueel}}$	dwars gestort $1,05 \times c'_{\text{individueel}}$	evenwijdig gestort $1,55 \times c'_{\text{individueel}}$
0,00	0,86	0,91	1,34
0,10	0,83	0,87	1,29
0,22	0,90	0,95	1,40
0,40	1,00	1,05	1,54

tabel 10-5 Uit de experimenten afgeleide parameters voor c'

10.5 Validatie van het in hoofdstuk 9.3 opgestelde model

Voor de volledigheid wordt gekeken of het model dat in hoofdstuk 9.3 opgesteld is ook van toepassing is op groepsgewijs storten.

Hiertoe wordt op dezelfde manier te werk gegaan als in hoofdstuk 9.4.1. De invoerparameters van het model komen uit tabel 10-3 en tabel 10-5. De grafieken zijn opgenomen in bijlage W. Het model lijkt een redelijke voorspelling te geven van de optredende verdelingen, indien er dwars op de stroming wordt gestort. De voorspelling is echter minder nauwkeurig dan voor individueel gestorte stenen.

Indien het model toegepast wordt op evenwijdig storten is de voorspelling aanzienlijk minder nauwkeurig. Opvallend is dat bij 150 en 200 stuks evenwijdig gestort de indrukking van de groep valt af te lezen, bij een stroomsnelheid van 0,40 m/s.

De processen die optreden bij het tegelijk storten van stenen, worden niet door het model voorspeld. Het gaat dan om indrukking van de kop van de groep en een grotere spreiding door loslaateffecten en steen – steen interacties tijdens de val.

10.6 Conclusies

Bij het storten met kleine groepen tegelijk is er met 2 oriëntaties op de stroming gewerkt. Zie ook figuur 8-15. De resultaten zullen dan ook gescheiden worden behandeld.

Dwars op de stroming storten

Het verloop van de offset door meevoering bij dwars storten is bijna identiek aan het verloop van de offset van individueel gestorte stenen. Zie figuur 10-11. Bij de groepen van 150 en 200 stuks is de offset iets kleiner. Dit is het gevolg van een interactie van de stenen in de groep. Uit figuur 10-6 blijkt dat de maximaal optredende gemiddelde groepsvalsnelheid iets toeneemt bij de groep van 200 stuks.

De spreiding in de x-richting van storten met groepen tot 200 stuks vertoont hetzelfde beeld als de spreiding van individueel gestorte stenen in de x-richting. Er is weliswaar een toename bij toenemende groepsgrootte, maar de trend blijft hetzelfde. (figuur 10-27) Er is tevens een kleine toename te zien bij toenemende stroomsnelheid, hetzelfde beeld als bij individueel storten. De uitwijkingen gedragen zich normaal verdeeld om het gemiddelde.

Er kan op basis van dit onderzoek bevestigd worden dat dwars op de stroming storten en individueel storten goed met elkaar overeen komen, zowel qua spreidingsgedrag als qua verplaatsing.

Er werd al van deze stelling uitgegaan bij de opstelling van het offsetmodel van het WL, aangezien de verplaatsing loodrecht op de lengteas van het schip gebaseerd is op de verplaatsing van een enkele steen.

Evenwijdig aan de stroming storten.

Bij het evenwijdig aan de stroming storten is de voorspelling van de offset in de x-richting bij toenemende stroomsnelheid in toenemende mate onnauwkeuriger. Bij toenemende groepsgrootte is de werkelijk optredende offset in toenemende mate kleiner dan de



voorspelde offset. Zie figuur 10-12. Er treedt indrukking van de groep op die zorgt dat de groep als geheel een grotere valsnelheid krijgt, en dus een kleinere verplaatsing.

Het effect van indrukking op de uitwijkingen is geïllustreerd in figuur 10-8 en figuur 10-9. Uit figuur 10-7 blijkt dat de gemiddelde groepsvalsnelheden een lichte toename laten zien bij toenemende groepsgrootte. De stroming heeft in zekere mate een positief effect op het eventueel optredend horizontaal georiënteerd groepsgedrag, wat zich uit in indrukking van de groep.

De spreiding in de x-richting neemt toe bij toenemende stroomsnelheid. Zie figuur 10-24. Dit zou het effect van indrukking van de kop van de groep tegen spreken. Bij het bestuderen van de videobeelden is echter te zien dat bij het evenwijdig storten van groepen het meegezogen water nog voor kleine verplaatsingen in de staart van de groep kan zorgen.

De spreiding in de y-richting gedraagt zich hetzelfde als de spreiding in de y-richting van individuele storten. Zie figuur 10-28. Wel is weer een toename van de spreiding te zien bij toenemende groepsgrootte.

Algemeen

De uitwijkingen van de storten met groepen zijn verdeeld in x en y-posities. Die posities zijn uitgezet met behulp van cumulatieve verdelingen. Na het fitten van een normale verdeling blijkt dat volgens de Kolmogorov Smirnov toets deze verdeling een juiste weergave is van de verdelingen van de uitwijkingen in de x- en y-richting. Zoals beschreven in hoofdstuk 10.4.1 en 10.4.2 gaat het LSM niet op. De oorzaak hiervoor is de lage deklengte / spreiding verhouding.

Ondanks de verschillen in evenwijdig aan en loodrecht op de stroming storten verschillen de waarden van de meeneemcoëfficiënten niet zoveel als het Waterloopkundig Laboratorium en Rijkswaterstaat hebben bepaald. Het verschil is waarschijnlijk ontstaan doordat er in die onderzoeken met bulk is gestort en er in dit onderzoek onderzocht is wat een individueel losgelaten steen en groepen met beperkte grootte doen. Het verschil in parameters, volgend uit dit onderzoek is:

$$C_l = 0,95 \cdot C_b$$

Bij het onder een hoek storten met de stroming treedt er nog een extra liftkracht op loodrecht op de stromingsrichting. Deze liftkracht is niet ingecalculeerd in de vergelijkingen van het WL. Nader onderzoek is gewenst om meer inzicht in dit fenomeen te verkrijgen.



11 Conclusies en aanbevelingen

11.1 Conclusies

De belangrijkste conclusies voortvloeiend uit de doelstellingen van dit afstudeeronderzoek zullen in dit hoofdstuk worden besproken. Er is in dit rapport onderzocht wat de invloed is van stroming op de offset en spreiding van individuele stenen en steengroepen met beperkte groottes. Indien er gesproken wordt over de offset wordt er bedoeld verplaatsing van de stenen door meevoering.

11.1.1 Conclusies van de experimenten met individueel losgelaten stenen

Weerstandscoefficiënt in stilstaand water

Op basis van de modelproefresultaten van dit onderzoek en het onderzoek van van der Wal [2002] kan worden aangenomen dat de weerstandscoefficiënt van breuksteen een correlatie vertoont met de L/d verhouding van een steen.

De L/d verhouding van een steen neemt binnen de in dit rapport beproefde sorteringen iets toe bij toenemende diameter.

De waarde van de weerstandscoefficiënt van een sortering stenen met een d_{n50} van 0,0156 m is normaal verdeeld met een gemiddelde waarde van $\mu_{Cd,n} = 1,43$ en een spreiding van $\sigma_{Cd,n} = 0,22$. Er is tevens een beperkt aantal experimenten uitgevoerd met stenen met een d_{n50} van 0,077 m om te bepalen of deze conclusie ook geldig is voor stenen met een grotere diameter. Het resultaat hiervan was een gemiddelde van $\mu_{Cd,n} = 1,64$ met een spreiding $\sigma_{Cd,n} = 0,30$.

Dit lijkt een groot verschil, ware het niet dat de L/d verhouding van de sortering met een d_{n50} van 0,0156 m 1,75 bedroeg en de L/d verhouding van de sortering met een d_{n50} van 0,077 m 1,98.

Indien de weerstandscoefficiënt van stortsteen gebruikt in de praktijk moet worden voorspeld, moet er rekening gehouden worden met 2 bijkomende factoren. Deze factoren maken het moeilijk om de uitkomsten door te schalen naar in situ diameters.

- Bij een nominale diameter van 0,15 m krijgt de grenslaagstroming rond een steen een turbulent karakter. Dit zorgt voor een verlaging van de weerstandscoefficiënt.
- De L/d verhouding van een steensortering in de praktijk ligt rond de 2. Dit zou voor een hogere weerstandscoefficiënt zorgen.

Weerstandscoefficiënt in stromend water

De weerstandscoefficiënt in stromend water is afhankelijk van de stroomsnelheid. Er is dus geen sprake van een 'vaste' evenwichtsvalsnelheid van een steen.

De oorzaak van deze afhankelijkheid moet gezocht worden in de grenslaagstroming om een steen.

In stromend water komt veel turbulentie voor. Bij toenemende stroomsnelheid neemt ook de turbulentie toe. Dit zorgt ervoor dat een laminaire grenslaagstroming verstoord wordt. Hoe groter de turbulentie, hoe meer de grenslaagstroming naar de turbulente fase opschuift.

Dit zorgt voor een toenemende evenwichtsvalsnelheid en dus een afnemende weerstandscoefficiënt bij toenemende stroomsnelheid. Een en ander is vergelijkbaar met de overgang van een laminaire naar een turbulente grenslaagstroming van een bol.

Spreiding in stromend water

De spreiding van de stenen, gezien in de stromingsrichting neemt toe bij toenemende stroomsnelheid. Oorzaak hiervoor is het ontmengingsprincipe. Indien een steen in stroming wordt losgelaten zal een zware steen een kleinere horizontale afstand afleggen dan een lichte steen. Dit kan zorgen voor een onevenwichtige opbouw van het stortprofiel. De grotere stenen zullen dan dichter bij het loslaatpunt liggen dan de kleinere stenen. In de experimenten is gebleken dat er geen noemenswaardige ontmenging optrad. Dit kan wel het geval zijn indien er gestort wordt op dieper water en bij hogere snelheden.

Ondanks de toenemende spreiding blijven de uitwijkingen van de stenen normaal verdeeld. Dit houdt in dat het Enkele Steen Model op de uitwijkingen van toepassing is.

Het ESM bij stromend water

Er is een model opgesteld met als basis het Enkele Steen Model van Vrijling et al. (1995) en de verplaatsingsformules van het WL (1983). Indien voor het zwaartepunt van het stortprofiel

de offsetvergelijking van het WL, $\mu = h \frac{\sqrt{C_d/2} \cdot \bar{U}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}$, en voor de spreiding,

$\sigma_N = c' \sqrt{h \cdot d_{n50}}$, word ingevuld, wordt onderstaande vergelijking verkregen.

$$f_{\underline{x}}(x) = \frac{1}{c' \sqrt{2\pi \cdot h \cdot d_n}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \frac{h \sqrt{C_d/2} \cdot \bar{U}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}}{\frac{c' \sqrt{h \cdot d_n}}{c' \sqrt{h \cdot d_n}}} \right)^2}$$

Bijzondere aandacht verdienen de parameters c' en C_b .

De parameter c' is de spreidingsconstante zoals die voorkomt in het Enkele Steen Model. Deze is aan de hand van experimentele uitkomsten bepaald. Indien het model gebruikt wordt voor een andere sortering dient de parameter c' bepaald te worden met een steekproef uit de desbetreffende sortering.

De parameter C_b is afhankelijk van de weerstandscoefficient. Zoals hierboven is beschreven, dat de weerstandscoefficient van breuksteen niet eenduidig kan worden vastgesteld, dient er enige voorzichtigheid in acht genomen te worden bij het schatten van de parameter. De in dit rapport bepaalde meeneemcoefficient voor individuele stenen komt echter goed overeen met de meeneemcoefficient bepaald door het Waterloopkundig laboratorium.

Bovenstaande vergelijking geldt slechts voor een enkele steen. Indien er een berekening wordt gemaakt met een sortering dient deze berekening voor een aantal stenen uit die sortering gemaakt te worden. Dit kan gedaan worden door van 200 willekeurig gekozen stenen de eigenschappen te bepalen. Deze eigenschappen kunnen dan per steen in de kansdichtheidsfunctie worden ingevuld. De gemiddelde kansdichtheidsfunctie van die stenen, geeft dan een indicatie van het te verwachten stortprofiel.

11.1.2 Conclusies van de experimenten met steengroepen met beperkte groottes

Dwars op de stroming storten

De resultaten bij dwars op de stroming storten vertonen veel overeenkomsten met individueel storten. De optredende offset vertoont veel overeenkomsten met de optredende offset bij individueel storten en de spreiding volgt eenzelfde trend.



De aanname dat dwars op de stroming storten gemodelleerd kan worden door individueel storten lijkt gegrond.

Evenwijdig aan de stroming storten

Indien er evenwijdig aan de stroming gestort wordt, blijkt dat er bij toenemende groepsgrootte en toenemende stroomsnelheid een relatief steeds kleinere offset optreedt bij het evenwijdig aan de stroming storten. Het verschil in offset is echter groter dan bij dwars op de stroming storten. Dit is het gevolg van een horizontaal georiënteerd groepsgedrag. De stroming heeft hier een positief effect op. Dit groepsgedrag kan worden toegeschreven aan indrukking van de kop van de groep. Hierdoor krijgt de groep een grotere dichtheid en zal dus een grotere gemiddelde groepsvalsnelheid ontwikkelen. Deze indrukking komt ook tot uiting in de uitwijkingen.

Desondanks gedragen de uitwijkingen, opgesplitst in de x-richting en de y-richting zich normaal verdeeld, voor zowel de dwars als evenwijdig gestorte groepen. Het LSM (Cregten, 1995) gaat blijkbaar voor de verhouding deklengte / optredende spreiding (3) niet op.

Ondanks de verschillen in evenwijdig aan en loodrecht op de stroming storten verschillen de waarden van de meeneemcoëfficiënten voor dwars op en evenwijdig aan de stroming storten niet zoveel als het Waterloopkundig Laboratorium heeft bepaald. Het verschil is waarschijnlijk ontstaan doordat er in die onderzoeken met bulk is gestort en er in dit onderzoek vooral onderzocht is wat de processen zijn bij een individueel losgelaten steen en groepen met beperkte grootte. Het verschil in parameters, volgend uit dit onderzoek is:

$$C_l = 0,95 \cdot C_b$$

Bij het onder een hoek van 45° met de stroomrichting storten treedt er nog een extra liftkracht op, loodrecht op de stromingsrichting. Deze liftkracht is niet ingecalculeerd in de vergelijkingen van het Waterloopkundig Laboratorium. Nader onderzoek is gewenst om meer inzicht in dit fenomeen te verkrijgen.

11.2 Aanbevelingen

In deze paragraaf zullen de aanbevelingen worden beschreven van onderwerpen die openstaan en van vragen die tijdens het onderzoek zijn opgekomen.

1. In dit onderzoek is gekeken naar ontmenging op basis van een beperkt aantal proeven met dezelfde sortering. Hetzelfde geldt voor de toename van de evenwichtsvalsnelheid. Om een duidelijker en gefundeerder inzicht te krijgen in de werkelijke optredende processen dienen er modelproeven te worden uitgevoerd in een goot met grotere afmetingen. Hierdoor kan er gemeten worden over een groter gebied en zijn de afwijkingen kleiner. Het in dit rapport samengestelde model gaat ervan uit dat de uitwijkingen van een enkele steen in stromend water normaal verdeeld zijn. De juistheid van deze aanname dient nog geverifieerd te worden. Het is dan nodig om een klein aantal stenen of basisvormen meerdere keren te beproeven, bij verschillende stroomsnelheden. De resultaten van een dergelijk onderzoek kunnen dan uitsluitend geven of de aanname die in dit rapport is gedaan inderdaad juist is.
2. Er zijn verscheidene onderzoeken uitgevoerd naar de invloed van turbulentie op het getal van Strouhal en de weerstandscoefficiënt. In een van deze onderzoeken wordt betoogd dat de weerstandscoefficiënt en het getal van Strouhal afhankelijk van elkaar zijn. Al deze onderzoeken zijn echter gebaseerd op andere vormen dan stortsteen. Een onderzoek naar deze afhankelijkheid voor stortsteen zou meer inzicht creëren in de optredende verschijnselen.
3. De afschuifsnelheid, verhaalsnelheid en stortlengte en -breedte kunnen gevarieerd worden om te bepalen wat de beste methode is bij het storten met verschillende doeleinden. De methode voor het afdekken van een leiding verschilt van de methode voor het plaatsen van een bodembescherming. Indien men bovenstaande variaties uitvoert wordt tevens beter inzicht verkregen in het bresgedrag en daarmee de afzetgrootte alsmede de dichtheid van het gestorte bodemprofiel.
4. Het bodemgedrag bij verschillende omstandigheden. Te denken valt aan rots-, klei- en zandbodems en gedeeltelijk gestorte bodems. De dichtheid van de stortprofielen kan dan tevens bepaald worden, waarna de uitlevering bekend is, evenals het verlies door indringing in de bodem.
5. Tijdens de uitgevoerde experimenten is gebleken dat de verplaatsing, bij het storten onder een hoek met de stroming, niet voldoende onderkend wordt door het invoeren van een aanstromingshoek. Bij het storten onder een hoek met de stroming treedt er nog een extra lifteffect op. Er kan extra nauwkeurigheid bij het storten bereikt worden door de extra verplaatsing als gevolg van dat effect voor verschillende aanstromingshoeken in kaart te brengen.
6. Het in dit rapport samengestelde model geeft redelijke resultaten, gegeven dat het proces met een zijstort grotendeels gekarakteriseerd wordt door het enkelsteens valgedrag. Om het model via een andere kant te benaderen is een Monte Carlo simulatie nuttig. Er is dan op 2 manieren bekeken of de uitkomsten op een goede manier tot stand komen, experimenteel en numeriek. Indien dit gecombineerd wordt met de aanbevelingen uit punt 1 kan er uitsluitend gegeven worden over het al dan niet geldig zijn van het model. Bij bepaalde omstandigheden.

Prototype proeven zijn uiteraard zeer gewenst om eventuele schaaffecten bij het opschalen van de resultaten van modelproeven te onderkennen.



Lijst van figuren

FIGUUR 1-1 STORTMETHODEN (SCHIERECK [2000])	20
FIGUUR 2-1 BELADINGSVORM EN WEERGAVE VALFRONT	25
FIGUUR 2-2 INSTELLEN VALFRONT	26
FIGUUR 2-3 BRESGEDRAG, LINKS SCHUIFSNELHEID 0,55 M/MIN, RECHTS SCHUIFSNELHEID 1,10 M/MIN.(WL Q673[1989])	26
FIGUUR 2-4 INVLOED DIEPTTE EN VORM OP OFFSET IN STILSTAAND WATER (BOUWDIENST RWS [1991])	27
FIGUUR 2-5 OFFSET EN ONTMENGING	28
FIGUUR 2-6 HORIZONTALE AANSTROMING STEEN.....	29
FIGUUR 2-7 DWARS OP DE STROMING STORTEN	30
FIGUUR 2-8 STORTEN MET DE KOP OP DE STROMING	30
FIGUUR 2-9 ASSENSTELSEL EN PRINCIPESCHETS REKENMODEL WL	30
FIGUUR 2-10 BODEMGEDRAG STEEN (VAN OORD [1996]).....	32
FIGUUR 3-1 LAMINAIRE EN TURBULENTE GRENSLAAGSTROMING OM EEN BOL (PRASUHN [1980])	35
FIGUUR 3-2 WEERSTANDSCOËFFICIËNT ALS FUNCTIE VAN RE (BRON [PRASUHN [1980])	35
FIGUUR 3-3 WERVELSTRAAT VAN VON KARMAN (BATTJES [1998])	38
FIGUUR 3-4 HET PRINCIPE VAN HET MAGNUS-EFFECT (ALBERTSON ET AL [1960]).	39
FIGUUR 3-5 ASYMMETRISCHE LOSLATING (MEHTA [1985])	40
FIGUUR 3-6 OPTREDENDE STORTPROFIELEN	40
FIGUUR 6-1 HET AQUARIUM.....	54
FIGUUR 7-1 REGRESSIELIJN L/D VERSUS DN VAN DE GESELECTEERDE STENEN EXCLUSIEF DE STENEN UIT KARIMUN	59
FIGUUR 7-2 REGRESSIELIJN L/D VERSUS DN QUARRY EN GESELECTEERDE STENEN INCLUSIEF DE STENEN UIT KARIMUN	59
FIGUUR 7-3 GEMETEN L/D WAARDEN UITGEZET TEGEN DE NOMINALE DIAMETER BIJ KLEINERE STENEN	60
FIGUUR 7-4 GEMETEN L/D WAARDEN UITGEZET TEGEN DE NOMINALE DIAMETER BIJ GROTERE STENEN.	61
FIGUUR 7-5 DOOR DERDEN BEPAALDE WAARDEN UITGEZET TEGEN DE NOMINALE DIAMETER VAN EEN GRADING TEST	61
FIGUUR 7-6 REGRESSIELIJNEN CD VERSUS L/D VOOR ALLE DATAPUNTEN	62
FIGUUR 7-7 DE EVENWICHTSVALSNELHEID UITGEZET TEGEN DE WORTEL D_{N50}	64
FIGUUR 7-8 DE EVENWICHTSVALSNELHEID UITGEZET TEGEN DE WORTEL ($D_{N50} / L/D$)	64
FIGUUR 7-9 W VERSUS WORTEL (D_{N50}/C_D).....	64
FIGUUR 7-10 EVENWICHTSVALSNELHEDEN VOLGENS VERGELIJKINGEN EN DATA.....	65
FIGUUR 8-1 DE STROOMGOOT	69
FIGUUR 8-2 THEORETISCHE SPREIDING EN OFFSET VAN STEEN IN DE STROOMGOOT	70
FIGUUR 8-3 ASSENSTELSEL IN DE STROOMGOOT.....	71
FIGUUR 8-4 PLAATSBEPALING MET MEETWAGENTJE.....	71
FIGUUR 8-5 EMS MET A/D CONVERTER EN PC.....	72
FIGUUR 8-6 ZIJAAANZICHT KLEP CONSTRUCTIE LOSLAATMECHANISME	72
FIGUUR 8-7 INWENDIGE AFMETINGEN LOSLAATMECHANISME	73
FIGUUR 8-8 PLATFORM EN RING VOOR LOSLATEN INDIVIDUELE STENEN	73
FIGUUR 8-9 GRID INDELING MEETGEBIED	73
FIGUUR 8-10 HET CALIBRATIEVLAK.....	74
FIGUUR 8-11 SCHEMATISATIE OVERLAAT	75
FIGUUR 8-12 PRINCIPETEKENING BOVENAANZICHT INSTROOMOPENING.....	76
FIGUUR 8-13 SNELHEIDVERDELING OVER DE BREEDTE VAN DE GOOT	76
FIGUUR 8-14 CODERING PROEVEN MET STEENGROEPEN	78
FIGUUR 8-15 BOVENAANZICHT ORIËNTATIE EN ASSENSTELSEL	79
FIGUUR 8-16 3-D SCHETS LOS TE LATEN STENEN, PLAATJE LINKS IS EVENWIJDIG AAN EN RECHTS IS DWARS OP DE STROMING STORTEN.....	79
FIGUUR 9-1 OFFSET INDIVIDUEEL GESTORTE STENEN, GEMETEN EN VOORSPELD	82
FIGUUR 9-2 GEMETEN EVENWICHTSVALSNELHEDEN VAN 4 x 2 x 100 INDIVIDUEEL LOSGELATEN STENEN BIJ TOENEMENDE STROOMSNELHEID	84
FIGUUR 9-3 INVLOED SNELHEIDSVERTICAAL	84
FIGUUR 9-4 GEMETEN VALBANEN VAN 25 VERSCHILLENDE INDIVIDUEEL LOSGELATEN STENEN BIJ 0,40 M/S	85
FIGUUR 9-5 VERPLAATSINGEN: LOGARITMISCH, UNIFORM EN METINGEN.....	86
FIGUUR 9-6 VERDELINGEN EN DATAPUNTEN EVENWICHTSVALSNELHEDEN	87

FIGUUR 9-7 GEMIDDELDE AFGELEIDE VERTICALE WEERSTANDSCOËFFICIËNTEN INDIVIDUEEL LOSGELATEN STENEN BIJ TOENEMENDE STROMING.....	88
FIGUUR 9-8 COËFFICIËNTEN OFFSETVERGELIJKING WL VOOR INDIVIDUEEL GESTORTE STENEN	89
FIGUUR 9-9 PRINCIPE TEKENING SPREIDING IN DE X EN Y-RICHTING	90
FIGUUR 9-10 S BIJ INDIVIDUEEL STORTEN GEMIDDELD OVER UITWIJINGEN GEHELE GROEPEN.....	91
FIGUUR 9-11 $\sigma_{Rayleigh}$ VERSUS U.....	92
FIGUUR 9-12 OFFSETS EN VERDELINGEN VOLGENS VERGELIJKING 9.2 BIJ VERSCHILLENDE STROOMSNELHEDEN.....	94
FIGUUR 9-13 THEORETISCHE OPGETELDE VERDELINGEN VOLGENS VERGELIJKING 9.2.....	95
FIGUUR 9-14 DATA VERSUS THEORETISCHE VOORSPELLING VERDELING UITWIJINGEN IN DE STROMINGSRICHTING	96
FIGUUR 9-15 VERLOOP DIAMETER OVER STORTLENGTE, THEORETISCH EN BEPAALD	97
FIGUUR 9-16 GRADIËNTEN STEENPARAMETERS VERSUS STROOMSNELHEID	98
FIGUUR 9-17 AFNAME D_{N50} BIJ TOENEMENDE X-RICHTING	98
FIGUUR 10-1 FOTO'S 200STDWS1U40 (200 DWARS GESTORT MET EEN STROOMSNELHEID VAN 0,40 M/S)	103
FIGUUR 10-2 FOTO'S 200STEV51U40 (200 EVENWIJDIG GESTORT MET EEN STROOMSNELHEID VAN 0,40 M/S).....	104
FIGUUR 10-3 VOORBEELD OPTREDENDE GEMIDDELDE GROEPS(VAL)SNELHEDEN	105
FIGUUR 10-4 SCHEMATISCHE WEERGAVE GLOBALE VALBEWEGING	107
FIGUUR 10-5 INDRUKKING VAN DE KOP VAN EEN GROEP	108
FIGUUR 10-6 MAXIMAAL OPTREDENDE GEMIDDELDE GROEPSVALSNELHEDEN DWARS GESTORTE GROEPEN	108
FIGUUR 10-7 MAXIMAAL OPTREDENDE GEMIDDELDE GROEPSVALSNELHEDEN EVENWIJDIG GESTORTE GROEPEN	109
FIGUUR 10-8 CUMULATIEVE VERDELING UITWIJINGEN IN DE X-RICHTING BIJ EVENWIJDIG STORTEN VAN 150 STENEN BIJ 0,40 M/S	110
FIGUUR 10-9 PRINCIPESCHETS AFWIJKING UITWIJINGEN IN DE X-RICHTING BIJ 150 STUKS GESTORT MET 0,40 M/S BIJ EVENWIJDIG STORTEN.....	110
FIGUUR 10-10 OFFSET DWARS GESTORTE STENEN. DE DATAPUNTEN ZIJN HET GEMIDDELDE VAN DE UITWIJINGEN IN DE X-RICHTING PER SERIE.....	111
FIGUUR 10-11 VERLOOP OFFSET DWARS GESTORTE GROEPEN EN INDIVIDUEEL GESTORTE STENEN.....	112
FIGUUR 10-12 OFFSET EVENWIJDIG GESTORTE GROEPEN. DE DATAPUNTEN ZIJN HET GEMIDDELDE VAN DE UITWIJINGEN IN DE X-RICHTING PER SERIE.....	113
FIGUUR 10-13 PARAMETERS C_B EN C_L BIJ TEGELIJK GESTORTE STENEN	115
FIGUUR 10-14 GEMIDDELDE PARAMETERS C_B EN C_L	116
FIGUUR 10-15 ASSENSTELS BIJ BEPALING VERPLAATSINGEN ONDER 45° GESTORT	117
FIGUUR 10-16 EXTRA EFFECT STORTEN ONDER 45 GRADEN.....	118
FIGUUR 10-17 VERDELING UITWIJINGEN LIJNSTORT VOLGENS CREGTEN [1995].....	119
FIGUUR 10-18 VERDELING LANGSDOORSNEDE LSM VOLGENS CREGTEN [1995].....	119
FIGUUR 10-19 BODEMPROFIEL VOLGENS VERGELIJKING 10.2.....	120
FIGUUR 10-20 LANGSDOORSNEDE AANGEHOUDEN IN DIT RAPPORT.....	121
FIGUUR 10-21 LSM AANGEHOUDEN IN DIT RAPPORT.....	121
FIGUUR 10-22 THEORETISCHE VERDELING UITWIJINGEN LIJNSTORT OPTREDEND TIJDENS DE UITGEVOERDE EXPERIMENTEN	122
FIGUUR 10-23 SPREIDING IN DE X- EN Y-RICHTING BIJ STORTEN DWARS OP DE STROMING, TOENEMENDE STROMING	122
FIGUUR 10-24 SPREIDING IN DE X- EN Y-RICHTING BIJ STORTEN EVENWIJDIG AAN DE STROMING, TOENEMENDE STROMING.....	123
FIGUUR 10-25 SPREIDING IN DE X- EN Y-RICHTING BIJ STORTEN DWARS OP DE STROMING, TOENEMENDE GROEPSGROOTTE.....	124
FIGUUR 10-26 SPREIDING IN DE X- EN Y-RICHTING BIJ STORTEN EVENWIJDIG OP DE STROMING, TOENEMENDE GROEPSGROOTTE	124
FIGUUR 10-27 SPREIDING DWARS GESTORTE GROEPEN IN X-RICHTING VERGELEKEN MET SPREIDING INDIVIDUEEL GESTORT IN X-RICHTING	125
FIGUUR 10-28 SPREIDING EVENWIJDIG GESTORTE GROEPEN IN Y-RICHTING VERGELEKEN MET SPREIDING INDIVIDUEEL GESTORT IN Y-RICHTING	125
FIGUUR 10-29 DE FACTOR C' AFGELEID VAN DE SPREIDING, VOLGEND UIT DE EXPERIMENTEN MET DWARS GESTORTE GROEPEN	126



FIGUUR 10-30 DE FACTOR C' AFGELEID VAN DE SPREIDING, VOLGEND UIT DE EXPERIMENTEN MET EVENWIJDIG GESTORTE GROEPEN.....	126
--	-----



Lijst van tabellen

TABEL 5-1 VERSCHALING BEPROEFDE SORTERINGEN	52
TABEL 6-1 SAMENVATTING FOUTENANALYSE	56
TABEL 7-1 WEERSTANDSCOËFFICIËNTEN ALLE DATA	58
TABEL 7-2 L/D VERHOUDINGEN EN NOMINALE DIAMETERS EXPERIMENTEN VERGELEKEN MET QUARRY TEST	60
TABEL 7-3 CONTROLE VERDELING EN SPREIDING VAN CD WAARDES OM DE REGRESSIELIJNEN VOOR ALLE DATAPUNTEN	63
TABEL 7-4 VERGELIJKINGEN REGRESSIELIJNEN EVENWICHTSVALSNELHEDEN EN SPREIDING VAN WAARDES OM DE REGRESSIELIJNEN	65
TABEL 8-1 SPREIDING EN VERPLAATSING MET EN ZONDER STROMING.....	70
TABEL 8-2 UITGEVOERDE PROEVEN MET INDIVIDUEEL LOSGELATEN STENEN IN DE STROOMGOOT	77
TABEL 8-3 UITGEVOERDE PROEVEN MET STEENGROEPEN IN DE STROOMGOOT.....	77
TABEL 8-4 UITGEVOERDE PROEVEN MET STEENGROEPEN	78
TABEL 8-5 SAMENVATTING FOUTENANALYSE STROOMGOOT	80
TABEL 9-1 INGEVULDE WAARDEN TER BEPALING WERVEL AFSCHUDPERIODE	85
TABEL 9-2 VERPLAATSING ZWAARTEPUNT DUMP VOLGENS WL BASISMODEL (LOGARITMISCH EN UNIFORM) EN METINGEN	86
TABEL 9-3 GEMIDDELDEN EN SPREIDINGEN EVENWICHTSVALSNELHEDEN	87
TABEL 9-4 COËFFICIËNTEN INDIVIDUEEL GESTORTE STENEN	89
TABEL 9-5 S BIJ INDIVIDUEEL STORTEN	91
TABEL 9-6 TOETSING VERDELINGEN INDIVIDUEEL GESTORTE STENEN (PER STORT)	92
TABEL 9-7 WAARDEN INGEVULD IN VERGELIJKING 9.2.....	94
TABEL 9-8 EXPERIMENTELE EN THEORETISCHE WAARDEN GEMIDDELDE EN SPREIDING INDIVIDUEEL LOSGELATEN STENEN	96
TABEL 10-1 GEMIDDELDE UITWIJKINGEN (ZWAARTEPUNT) PER STORT GEMIDDELD OVER 2 SERIES IN DE X-RICHTING	114
TABEL 10-2 WAARDEN VAN CB EN CL	114
TABEL 10-3 GEMIDDELDE PARAMETERS C_B EN C_L	115
TABEL 10-4 VERSCHIL THEORETISCHE EN EXPERIMENTELE WAARDEN VERPLAATSING GROEP VAN 200 STUKS ONDER 45 GRADEN	117
TABEL 10-5 UIT DE EXPERIMENTEN AFGELEIDE PARAMETERS VOOR C'	127



Literatuurlijst

Anderson, D.R., Sweeney, D.J., Williams, T.A., *Statistics for business and economics*, South-Western College Publishing, Cincinnati (Ohio), 1999

Battjes, J.A., *Vloeistofmechanica*, collegehandleiding CTme2100, Technische Universiteit Delft, maart 1998

Bouwdienst Rijkswaterstaat, *Handboek uitvoering bodemverdedigingsconstructies van losgestorte granulaire materialen*, 1991

Bron onbekend, http://www.enseeiht.fr/hmf/travaux/CD0102/travaux/optmfn/gpfmho/01-02/grp1/phy_know.htm.

Cregten, H.J., *Het gebruik van probabilistische methoden bij het beoordelen van het stortresultaat van een zijstorter*, afstudeerverslag Vakgroep Waterbouwkunde, Technische Universiteit Delft, aug. 1995

Gelderen, P.J.G. van, *Het Enkele Steen Model. Een verificatie op basis van modelproeven*, afstudeerverslag Vakgroep Waterbouwkunde, Technische Universiteit Delft, maart 1999

Mazijk, A. Van, *Bepaling valhoogte van een steen in water vanaf het moment van loslaten tot het moment, waarop de evenwichtsvalsnelheid wordt bereikt*, Deltadienst Rijkswaterstaat, Burgh-Haamstede, september 1982

Kniess, H.G., *Schütten von Steinen unter Wasser*, Mitt. Bl.d.BAW, nr. 50, pp 41-57, 1981

Metha, R.D., *Aerodynamics of sports balls*, Annual Review Fluid Mechanics, 17, pp. 151-189, 1985

Oord, G. Van, *Spreiding van steen in het stortproces van schuifstorters. Modelproeven ter verificatie van het Enkel Steen Model*, afstudeerverslag Vakgroep Waterbouwkunde, Technische Universiteit Delft, december 1996

Pirner, M., *The SBRA method as the powerful technique for probabilistic design in aerodynamics and aeroelasticity of civil engineering structures*, Euro-SiBRAM'2002 Prague, Czech Republic, Institute of Theoretical and Applied Mechanics Academy of Sciences of the Czech Republic, 2002

Potter, M.C., Wiggert, D.C., *Mechanics of Fluids*, Englewood Cliffs: Prentice-Hill, Inc., 1991

Prasuhn, A.L. *Fundamentals of fluid mechanics*, New Jersey, South Dakota State University: Prentice Hall Inc., 1980

Robertson, J.A., Chi Yu Lin, Rutherford, G.S., Stine, M.D., *Turbulence effects on drag of sharp edged bodies*, Journal of the Hydraulics division, Proc. of the ASCE, pp 1187-1203, 1972

Roes, P.B.M. en Oorschot, H.J.L. van, *Kansrekening en statistiek*, handleiding bij het college a80, Delftse uitgeversmaatschappij, 1976

Schiereck, G.J., *Introduction to Bed, Bank and Shore Protection*, collegehandleiding Ctwa4310, Technische Universiteit Delft, 2000

Slack, G.W., *Sedimentation of compact clusters of uniform spheres*, Nature, 200, pp. 466-467, 1963a

Slack, G.W., *Sedimentation of a large number of particles as a cluster in air*, Nature, 200, pp. 1306, 1963b

Thomas, G.B. en Finney, R.L., *Calculus and Analytic Geometry*, Addison-Wesley Publishing Company, 1996

Viets, H. en Lee, D.A., *Motion of free falling Spheres at moderate Reynolds numbers*, AIAA Journal, pp. 2038-2042, 1971

Vries, M. de, *Waterloopkundig onderzoek*, collegehandleiding b80, Technische Universiteit Delft, 1977

Vrijling, J.K., Manni, R.J. en Wilde, D. de, *Prediction of the deposition-mound of dumped rubble*, 4th International Conference on Coastal & Port Engineering in Developing Countries, Rio de Janeiro, Copedec IV, 1995

Wal, J.R. van der, *Het valgedrag van steengroepen. Modelonderzoek ter vergroting van het inzicht in het valgedrag van breuksteen*, afstudeerverslag Vakgroep Waterbouwkunde, Technische Universiteit Delft, september 2002

Waterloopkundig laboratorium, *Storten van grind in stromend water*, Verslag modelonderzoek M598, 1960

Waterloopkundig laboratorium, *Opbouw drempel in wintersluitgat*, Verslag modelonderzoek M1244, 1983

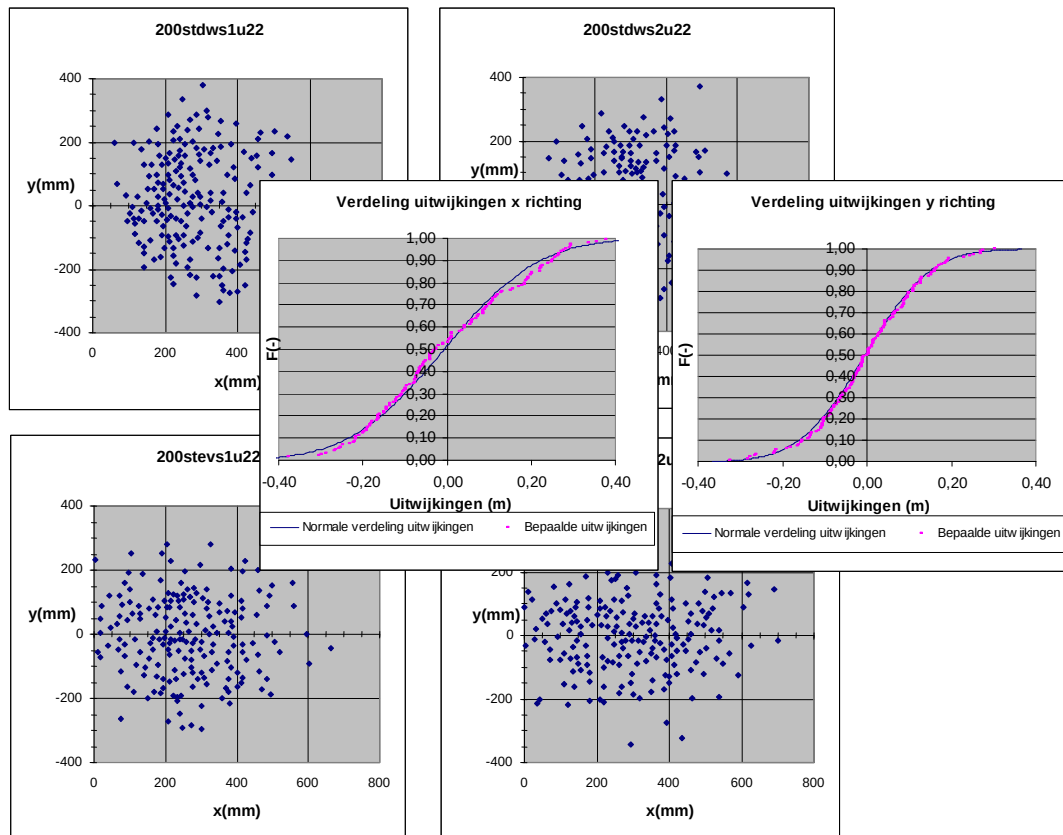
Waterloopkundig laboratorium, *Stormvloedkering Oosterschelde, Stortmethoden voor drempel en overgangsconstructie*, Verslag modelonderzoek M 1768, 1983

Waterloopkundig laboratorium, *Onderzoek naar het resultaat van een steenstorter*, Verslag modelonderzoek Q673, 1989



Het valgedrag van stortsteen onder invloed van stroming

Bijlagen



J.S. de Reus
Papendrecht, februari 2004

Afstudeercommissie

Prof. Drs. Ir. J.K. Vrijling
Dr. Ir. H.L. Fontijn
Ir. J. Olthof
Ir. W.H. Tutuarima
Ir. H.J. Verhagen



Royal Boskalis Westminster
Afdeling Hydraulica
Rosmolenweg 20, Postbus 43
3350 AA Papendrecht



TU Delft

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde

J.S. de Reus
Lisleede 12
2991 WG Barendrecht

Het valgedrag van stortsteen onder invloed van stroming

Bijlagen

J.S. de Reus
Papendrecht, februari 2004

Afstudeercommissie

Prof. Drs. Ir. J.K. Vrijling
Dr. Ir. H.L. Fontijn
Ir. J. Olthof
Ir. W.H. Tutuarima
Ir. H.J. Verhagen



Royal Boskalis Westminster
Afdeling Hydronamic
Rosmolenweg 20, Postbus 43
3350 AA Papendrecht



TU Delft

Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen
Sectie Waterbouwkunde

J.S. de Reus
Lisleede 12
2991 WG Barendrecht

Inhoudsopgave Bijlagen

INHOUDSOPGAVE BIJLAGEN	- 4 -
BIJLAGE A: THEORIE BIJ HET UITWERKEN VAN DE DATA.....	- 8 -
Bijlage A-1: Maximum Likelihood Schatter voor de normale verdeling	- 8 -
Bijlage A-2: Van de Normale verdeling naar de Rayleighverdeling	- 9 -
Bijlage A-3: De Maximum Likelihood Schatter voor de Rayleigh-verdeling.....	- 10 -
Bijlage A-4: De vergelijking van Simpson	- 11 -
Bijlage A-5: De Kolmogorov Smirnov toets	- 11 -
Bijlage A-6: Verwerking data tot grafiek	- 11 -
BIJLAGE B: STAPPENPLAN EN FOUTENANALYSE AQUARIUM	- 12 -
Bijlage B-1: Stappenplan van de proeven in het aquarium.....	- 12 -
Bijlage B-2: De opstelling van de videocamera	- 12 -
Bijlage B-3: Foutenanalyse bij het uitvoeren van proeven in het aquarium.....	- 13 -
BIJLAGE C: STAPPENPLAN EN FOUTENANALYSE STROOMGOOT	- 16 -
Bijlage C-1: Stappenplan van de proeven in de stroomgoot.....	- 16 -
Bijlage C-2: Foutenanalyse bij het uitvoeren van proeven in de stroomgoot.....	- 16 -
BIJLAGE D: STEENEIGENSCHAPPEN BEPROEFDE SORTERINGEN.....	- 20 -
Bijlage D-1: Eigenschappen stenen met een d_n van 11 tot 21 mm.....	- 21 -
Bijlage D-2: Eigenschappen stenen met een d_n van 36 tot 136 mm.....	- 26 -
BIJLAGE E: VERDELING STEENEIGENSCHAPPEN KLEINERE DIAMETERS	- 28 -
Bijlage E-1: De nominale diameter.....	- 28 -
Bijlage E-2: De L/d verhoudingen	- 28 -
Bijlage E-3: Verdeling valsnelheden	- 29 -
Bijlage E-4: Verdeling weerstandscoefficienten	- 29 -
BIJLAGE F: VERDELING STEENEIGENSCHAPPEN GROTERE DIAMETERS.....	- 32 -
Bijlage F-1: De nominale diameter.....	- 32 -
Bijlage F-2: De L/d verhoudingen	- 32 -
Bijlage F-3: Verdeling valsnelheden	- 32 -
Bijlage F-4: Verdeling weerstandscoefficienten	- 33 -
BIJLAGE G: STORTRESULTATEN INDIVIDUEEL GESTORTE STENEN.....	- 36 -
Bijlage G-1: Bovenaanzichten storten zonder stroming	- 36 -
Bijlage G-2: Bovenaanzichten van storten met 0,10 m/s.	- 36 -
Bijlage G-3: Bovenaanzichten van storten met 0,22 m/s.	- 37 -
Bijlage G-4: Bovenaanzichten van storten met 0,40 m/s.	- 37 -
BIJLAGE H: VERDELINGEN UITWIJKINGEN INDIVIDUEEL GESTORTE STENEN	- 38 -
BIJLAGE I: BOVENAANZICHTEN GROEPSSTORTEN ZONDER STROMING.....	- 46 -
Bijlage I-1: Groepsstorten zonder stroming 50 stuks	- 46 -
Bijlage I-2: Groepsstorten zonder stroming 100 stuks	- 46 -
Bijlage I-3: Groepsstorten zonder stroming 150 stuks	- 47 -
Bijlage I-4: Groepsstorten zonder stroming 200 stuks	- 47 -
BIJLAGE J: BOVENAANZICHTEN GROEPSSTORTEN MET 0,10 M/S	- 48 -
Bijlage J-1: Groepsstorten 50 stuks met 0,10 m/s.....	- 48 -
Bijlage J-2: Groepsstorten 100 stuks met 0,10 m/s.....	- 49 -
Bijlage J-3: Groepsstorten 150 stuks met 0,10 m/s.....	- 50 -
Bijlage J-4: Groepsstorten 200 stuks met 0,10 m/s.....	- 51 -
BIJLAGE K: BOVENAANZICHTEN GROEPSSTORTEN MET 0,22 M/S.....	- 52 -

Bijlage K-1:	Groepsstorten 50 stuks met 0,22 m/s.....	- 52 -
Bijlage K-2:	Groepsstorten 100 stuks met 0,22 m/s.....	- 53 -
Bijlage K-3:	Groepsstorten 150 stuks met 0,22 m/s.....	- 54 -
Bijlage K-4:	Groepsstorten 200 stuks met 0,22 m/s.....	- 55 -
BIJLAGE L: BOVENAANZICHTEN GROEPSSTORTEN MET 0,40 M/S		- 56 -
Bijlage L-1:	Groepsstorten 50 stuks met 0,40 m/s.....	- 56 -
Bijlage L-2:	Groepsstorten 100 stuks met 0,40 m/s.....	- 57 -
Bijlage L-3:	Groepsstorten 150 stuks met 0,40 m/s.....	- 58 -
Bijlage L-4:	Groepsstorten 200 stuks met 0,40 m/s.....	- 59 -
Bijlage L-5:	Groepsstorten 200 stuks onder 45 graden met 0,40 m/s.....	- 60 -
Bijlage L-6:	Groepsstorten 200 stuks onder -45 graden met 0,40 m/s.....	- 60 -
BIJLAGE M: VERDELING UITWIJKINGEN GROEPSSTORTEN PER STORT		- 62 -
Bijlage M-1:	50 stuks tegelijk gestort	- 62 -
Bijlage M-2:	100 stuks tegelijk gestort	- 67 -
Bijlage M-3:	150 stuks tegelijk gestort	- 72 -
Bijlage M-4:	200 stuks tegelijk gestort	- 77 -
BIJLAGE N: SPREIDING EN KS TOETS UITWIJKINGEN PER STORT BEPAALD		- 82 -
BIJLAGE O: GROEPSINDELING STENEN.....		- 84 -
BIJLAGE P: STUWEIGENSCHAPPEN		- 86 -
BIJLAGE Q: WEERSTANDSCOËFFICIËNTEN		- 88 -
BIJLAGE R: AFLEIDING VAN MAZIK		- 90 -
AFLEIDEN TRAJECT VOOR DE VERTICALE SNELHEID.....		- 90 -
ANALYTISCHE UITWERKING.....		- 91 -
BIJLAGE S: HET ENKELE STEEN MODEL		94
BIJLAGE T: MOGELIJKE OORZAKEN TOENAME EVENWICHTSVALSNELHEID.....		- 98 -
Bijlage T-1:	Scheefstand camera.....	- 98 -
Bijlage T-2:	De invloed van turbulentie	- 99 -
Bijlage T-3:	De invloed van het getal van Strouhal.....	- 100 -
Bijlage T-4:	Interpretatie volgens valbeweging	- 102 -
BIJLAGE U: NUMERIEK MODEL		- 104 -
Bijlage U-1:	Basisberekening model	- 104 -
Bijlage U-2:	Visual Basic Source numeriek Excel model	- 109 -
VERTICALE SNELHEIDSPROFIELEN.....		- 116 -
BIJLAGE V: MODELUITKOMSTEN VERGELEKEN MET DATA.....		- 118 -
Bijlage V-1:	Data dwars gestorte groepen geplot tegen theoretische waarden volgend uit gecombineerd ESM-WL model	- 119 -
Bijlage V-2:	Data evenwijdig gestorte groepen geplot tegen theoretische waarden volgend uit gecombineerd ESM-WL model	- 120 -
BIJLAGE W: WEERSTANDSCOËFFICIËNT VERSUS REYNOLDSGETAL		- 122 -
BIJLAGE X: PARAMETERS INDIVIDUEEL GESTORTE STENEN		- 124 -
Bijlage X-1:	0,10 m/s.	- 124 -
Bijlage X-2:	0,22 m/s.	- 125 -
Bijlage X-3:	0,40 m/s.	- 126 -
BIJLAGE Y: GEMIDDELDE GROEPSSNELHEDEN		- 128 -

BIJLAGE Z: AFLEIDING VERPLAATSINGEN WL MODEL MET STROMING	- 136 -
LIJST VAN FIGUREN	- 138 -
LIJST VAN TABELLEN	- 142 -

Bijlage A: Theorie bij het uitwerken van de data

Bijlage A-1: Maximum Likelihood Schatter voor de normale verdeling

Om te bepalen of de verzamelde data (valsnelheden, weerstandscoefficienten en afmetingen) normaal verdeeld is moeten zo goed mogelijke waarden voor μ en σ worden gevonden. Dit wordt gedaan middels een Maximum Likelihood schatting. (Zie Roes [1976])

Voor het bepalen van goede schatters uit de gemeten data wordt er gebruik gemaakt van het maximum likelihood principe. Er wordt in dit geval ervan uitgegaan dat de data normaal verdeeld is.

De kansdichtheidsfunctie van de normale verdeling is gegeven door:

$$f_{\mu,\sigma}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad -\infty < x < \infty \quad (\text{A.1})$$

De likelihood is gegeven als functie van μ , σ door:

$$\begin{aligned} l(\mu, \sigma) &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_1-\mu}{\sigma}\right)^2} \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_2-\mu}{\sigma}\right)^2} \dots \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_n-\mu}{\sigma}\right)^2} \\ &= \frac{1}{(\sigma\sqrt{2\pi})^n} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}\{(x_1-\mu)^2 + (x_2-\mu)^2 + \dots + (x_n-\mu)^2\}} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

De loglikelihood is dan gelijk aan:

$$L(\mu, \sigma) = -n \log \sigma - n \log \sqrt{2\pi} - \frac{1}{2\sigma^2} \{(x_1 - \mu)^2 + (x_2 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2\} \quad (\text{A.3})$$

De extremen worden gevonden door te differentiëren naar μ en σ , en deze afgeleiden 0 te stellen:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \mu} &= \frac{1}{\sigma^2} \{(x_1 - \mu) + (x_2 - \mu) + \dots + (x_n - \mu)\} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \sigma} &= -\frac{n}{\sigma} + \frac{1}{\sigma^3} \{(x_1 - \mu)^2 + (x_2 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2\} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.4}) \text{ en } (\text{A.5})$$

Als we beide vergelijkingen oplossen vinden we:

$$\begin{aligned} \mu &= \bar{x}_n \\ \sigma &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2} \end{aligned} \quad (\text{A.6}) \text{ en } (\text{A.7})$$

Waarin: μ	gemiddelde	[m]
σ	spreiding	[m]

Dit zijn de ML schatters voor de normale verdeling.

Bijlage A-2: Van de Normale verdeling naar de Rayleighverdeling

Als we uitgaan van de volgende vergelijking voor de normaal verdeelde uitwijkingen van de stenen op de bodem geldt:

$$f_{\underline{X},\underline{Y}}(x,y) = f_{\underline{X}}(x) \cdot f_{\underline{Y}}(y) = \frac{1}{\sigma_N^2 \cdot 2\pi} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{(x-\mu_x)^2 + (y-\mu_y)^2}{\sigma_N^2} \right)} \quad (\text{A.8})$$

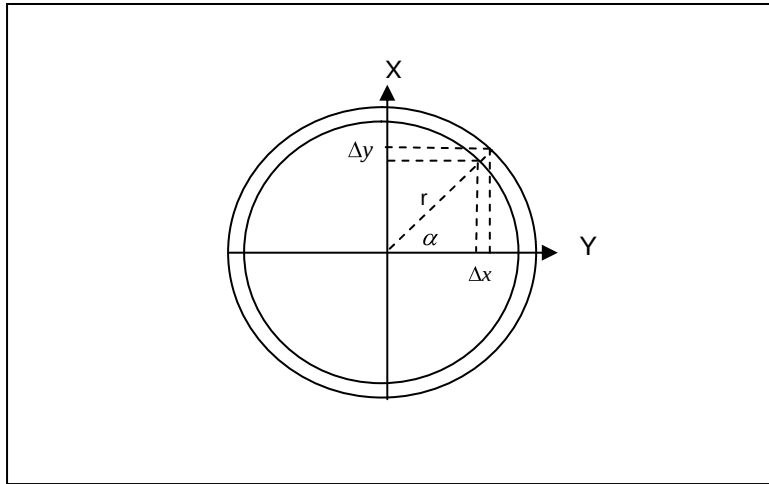
Het is nu mogelijk de uitwijkingen in x- en y-richting om te rekenen naar een straal met coördinaat r. Deze geeft dan de afstand tot het midden aan. Gegeven dat de uitwijkingen onafhankelijk van elkaar zijn en normaal verdeeld in alle richtingen kan voor de verdeling van de stralen de Rayleigh-verdeling worden gebruikt. De afleiding is gemaakt aan de hand van de theorie van Battjes [1970].

Door de kansdichtheidsfuncties van $\underline{X}$ en $\underline{Y}$ om te schrijven naar $\underline{r}$ ontstaat via

$$\underline{r} = \sqrt{\underline{X}^2 + \underline{Y}^2} \quad \text{de kansverdelingfunctie:}$$

$$F_{\underline{r}}(r) = \text{kans}[\underline{r} < r] = \text{kans}\left[\sqrt{\underline{X}^2 + \underline{Y}^2} < r\right] \quad (\text{A.9})$$

Dit is de kans dat de resultante kleiner is dan een bepaalde lengte r. In figuur A-1 wordt deze kans grafisch uitgebeeld. Deze kans is dus gelijk aan de sommatie van kansen binnen de ring.



figuur A-1 Kansdichtheidsring waarbij X en Y sommeren tot r (van Oord [1995])

Het volume onder een drie-dimensionaal Gaussprofiel begrensd door een cilinder met straal r wordt weergegeven door de kans: $\left[\sqrt{\underline{X}^2 + \underline{Y}^2} < r\right]$.

De richting van de uitwijkingen is niet van belang zodat overgegaan kan worden op de cilindercoördinaten:

$$x = r \cdot \cos(\alpha) \quad \text{en} \quad y = r \cdot \sin(\alpha).$$

Vervolgens wordt de volgende vergelijking opgesteld:

$$F_{\underline{r}}(r) = \text{kans}\left[\sqrt{\underline{X}^2 + \underline{Y}^2} < r\right] = \iint_{\underline{X}^2 + \underline{Y}^2 < r^2} f_{\underline{x},\underline{y}}(x,y) dx dy \quad (\text{A.10})$$

$$F_r(r) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^r \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} r dr d\alpha = \int_0^r r e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} dr \int_{-\pi}^{\pi} \frac{d\alpha}{2\pi\sigma^2} = \frac{1}{\sigma^2} \int_0^r r e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} dr \quad (\text{A.11})$$

Oplossen van deze integraal geeft de verdelingsfunctie van Rayleigh:

$$F_r(r) = 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{A.12})$$

Door nu te toetsen of de stralen van de stenen voldoen aan de Rayleigh-verdeling kan geverifieerd worden of de uitwijkingen van een stort normaal verdeeld zijn. Door de traagheidsstraal van het Gaussprofiel in te vullen in de vergelijking van de Rayleigh-verdeling kan het onderschrijdingspercentage van de Rayleighverdeling overeenkomend met die traagheidsstraal berekend worden.

$$F_r(r) = 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} = 1 - e^{-\frac{\sigma^2}{2\sigma^2}} = 1 - e^{-\frac{1}{2}} \approx 0,3935 \quad (\text{A.13})$$

Dit houdt in dat de straal r door 39,35 procent van de stenen onderschreden gelijk is aan de traagheidsstraal van het Gaussprofiel.

Bijlage A-3: De Maximum Likelihood Schatter voor de Rayleigh-verdeling

De kansdichtheidsfunctie van de Rayleigh-verdeling is:

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{A.14})$$

De likelihood wordt gegeven door:

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{r_i}{\sigma^2} e^{-\frac{r_i^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{A.15})$$

De loglikelihood is gelijk aan:

$$\log L = \sum_{i=1}^n \left\{ \log(r_i) - (2n) \cdot \log(\sigma) - \frac{1}{2\sigma^2} \cdot \sum r_i^2 \right\} \quad (\text{A.16})$$

Partieel differentiëren naar σ en gelijkstellen aan 0 geeft:

$$\frac{\partial \log(L)}{\partial \sigma} = -\frac{2N}{\sigma} + \frac{1}{\sigma^3} \sum_{i=1}^n r_i^2 = 0 \quad (\text{A.17})$$

Na omschrijven rest:

$$\sigma_{ML,R} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n r_i^2}{2 \cdot n}} \quad (\text{A.18})$$

waarin: $\sigma_{ML,R}$ Max likelihood schatter voor σ van de Rayleigh-verdeling. [m]

r_i	Straal van de gestorte steen t.o.v. middelpunt stort	[m]
n	aantal gestorte stenen	[-]

Bijlage A-4: De vergelijking van Simpson

In Calculus [1996] worden 2 numerieke oplossingen beschreven om de verdelingsfunctie van niet analytisch oplosbare kansdichtheidsfuncties, zoals de kansdichtheidsfunctie van de normale verdeling, te berekenen. Deze zijn:

- De Trapeziumregel
- De Simpson regel

Er wordt in dit onderzoek gewerkt met de Simpson regel.

Deze is als volgt:

Om $F(x) = \int_a^b f(x)dx$ te berekenen wordt de volgende vergelijking gebruikt:

$$S = \frac{h}{3} (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + \dots + 2y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n) \quad (\text{A.19})$$

waarin n even is en $h = \frac{b-a}{n}$.

Bijlage A-5: De Kolmogorov Smirnov toets

Deze toets wordt toegepast om te kijken of een dataset normaal is verdeeld. De gebruikte vergelijking:

$$y = \max_{i=1}^N |y_i - F_x(x_i)| \quad (\text{A.20})$$

De toets is dat $y \leq \frac{\alpha}{\sqrt{n}}$.

In dit onderzoek geldt $y \leq 0,12$ voor n=200.

Bijlage A-6: Verwerking data tot grafiek

De Simpson regel wordt toegepast om de normale verdelingsfunctie te plotten aan de hand van de parameters bepaald met de maximum likelihood schatters.

De set datapunten wordt ook ingetekend. Met de Simpson regel worden de bijbehorende F(xi) waarden van de datapunten in de normale verdelingsfunctie berekend. Deze kunnen dan getoetst worden aan de hand van de Kolmogorov Smirnov toets.

De lineaire regressieanalyse is uitgevoerd met de methode der kleinste kwadraten.

Bijlage B: Stappenplan en foutenanalyse aquarium

Bijlage B-1: Stappenplan van de proeven in het aquarium

Vorbereiding

1. Noteren steennummers
2. Plaatsen kalibratiekruis
3. Afstellen camera

Kalibratie

4. Video opname kalibratiekruis
5. Kalibratiekruis weg, trechter plaatsen

Herhalingen

6. Stenen een voor een in trechter laten vallen (zonder luchtinsluiting)
7. Video aanzetten, stenen laten vallen, video uitzetten
8. Trechter weghalen
9. Stenen omhoog halen
10. Opnieuw trechter installeren
11. Stap 7 tot en met 12 drie maal herhalen

Dataverwerking (voor elke steen drie keer)

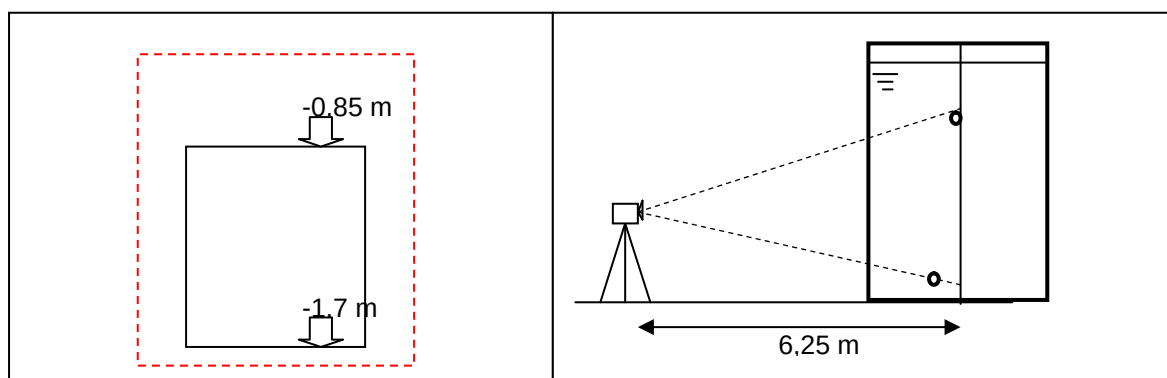
12. Videobeelden naar harde schijf kopiëren
13. 3 foto's van het kalibratiekruis en 2 foto's van de steen op ongeveer vastgestelde dieptes knippen uit de video met Adobe Premiere
14. Met "L&C scan X-Y" een punt op de foto aanklikken voor de positie van de steen en opslaan met een steen- en framenummer
15. Met "L&C scan X-Y" 6 punten van het kalibratiekruis aanklikken
16. De aparte datafiles van de stenen en de kalibratiefiles in Excel samenbrengen middels een Visual Basic macro en de afgelegde afstanden en verlopen tijd uitrekenen. De tijd tussen 2 frames kan worden bepaald doordat er gedigitaliseerd wordt met 25 frames per seconde
17. In Excel de gemiddelde valsnelheden en weerstandscoefficienten berekenen

Er zijn in totaal op deze manier $2 \times 3 \times 200 = 1200$ beelden verwerkt.

Bijlage B-2: De opstelling van de videocamera

De videocamera wordt op een afstand van 5 meter van het raam van de bak. De afstand tussen het midden van de bak en de camera bedraagt dan 6,25 m.

Er wordt zodanig gezoomd dat er een meetraam overblijft dat op 5 cm boven de bodem eindigt. De lengte waarover de valsnelheid gemeten wordt is ongeveer 85 cm.



figuur B-1 De opstelling van de videocamera bij het aquarium

Bijlage B-3: Foutenanalyse bij het uitvoeren van proeven in het aquarium

Inleiding

Tijdens het uitvoeren van modelproeven treden er een aantal onnauwkeurigheden op. Deze zijn het gevolg van:

- Statistische onnauwkeurigheden
- Beïnvloeding door de modelproefopstelling
- Meet onnauwkeurigheden

Deze onnauwkeurigheden zullen worden beschreven in de volgende paragrafen. Aansluitend zal er een samenvatting worden gegeven met daarin de uitkomsten van de voorgaande paragrafen.

Statistische onnauwkeurigheden

Een van de eigenschappen van breuksteen is dat elke steen een andere vorm heeft. Dit houdt in dat de valbaan en de evenwichtsvalsnelheid van elke steen anders zijn. Indien dezelfde steen meerdere keren vanuit een punt wordt losgelaten zal er telkens een andere horizontale uitwijking en evenwichtsvalsnelheid uit volgen. Dit wordt veroorzaakt door een steeds andere oriëntering van de steen.

Door te werken met gemiddeldes van een aantal herhalingen kan er een kans van optreden bepaald worden aan de hand van de verdeling van de uitkomsten. Deze verdeling bevindt zich met een spreiding rond een bepaald gemiddelde. In deze spreiding zitten zowel het random karakter van de steen als de meetfouten ingesloten.

Het grootste voorkomende verschil tussen 2 evenwichtsvalsnelheid metingen van dezelfde steen waargenomen tijdens 3 herhalingen is 22,4 %.

Beïnvloeding door de modelproef opstelling

De opstelling kan zorgen voor een aantal onnauwkeurigheden. Deze zullen hieronder behandeld worden.

De beperkte afmetingen van de bak

Deze worden bij proeven met enkele stenen niet van invloed geacht op de resultaten.

Het vallen in het zog van een steen die kort ervoor is losgelaten

Dit effect kan van invloed zijn op de resultaten van de bepaling van de individuele evenwichtsvalsnelheden. Door stenen los te laten met een interval van 20 tot 30 seconden, wordt aangenomen dat dit effect geen invloed heeft op de resultaten.

Beïnvloeding van de steen door loslaten in de trechter

Bij het loslaten van de stenen in de trechter kan er een botsing met de trechterrand optreden. Aangenomen dat een steen na een afgelegde weg van ongeveer 8 tot 16 maal zijn diameter zijn evenwichtsvalsnelheid bereikt is dit effect niet van belang.

Meet onnauwkeurigheden

De optredende fouten bij de verwerking van de videobeelden met L&C scan-XY.

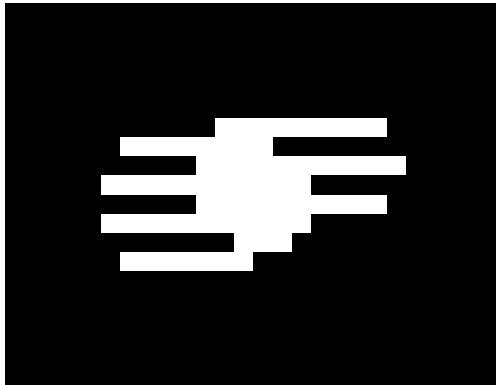
1. Beperkte resolutie door digitaliseren videobeeld

Er wordt bij het aanklikken van een steen een pixel aangeklikt. Er wordt dus gemeten met de nauwkeurigheid van 1 pixel. Bij het digitaliseren wordt het beeld van +/- 1,50 meter hoog opgedeeld in 720 pixels. Dit houdt dus in ongeveer 2 mm per pixel. Als er

een pixel verkeerd word geklikt komt dit terug in het bepalen van de evenwichtsvalsnelheid. Deze fout is ongeveer +/- 0,5 % van de gemeten snelheid. Van het kalibratiekruis worden 3 maal 6 punten aangeklikt om de fout in de kalibratiefile te minimaliseren.

2. Bewegingsonscherpte

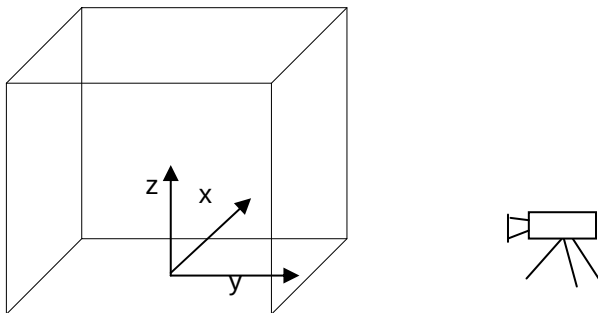
Doordat bij het digitaliseren van de Super VHS beelden eerst de even lijnen en dan de oneven lijnen worden opgebouwd lijkt het alsof 1 frame opgebouwd is uit 2 half over elkaar liggende stenen. Er wordt geprobeerd het midden van het overlappende stuk aan te klikken. Aanklikken in het midden geeft een maximale fout van ongeveer 5 pixels. Omdat er per steen 2 keer geklikt wordt kan de fout 2 keer optreden. Dit zorgt voor een afwijking van 2% van de snelheid.



figuur B-2 Weergave interlaced projectie bewegende steen

De horizontale uitwijking uit het kalibratievlak

Aan het begin van de video-opnamen wordt er een kalibratiekruis in de bak geplaatst. De afstanden van de punten van dit kalibratiekruis zijn bekend ten opzichte van elkaar. Op deze manier kan er een grid bepaald worden waarmee de afgelegde afstanden berekend kunnen worden. Er wordt uitgegaan van het volgende assenstelsel:



figuur B-3 Assenstelsel in aquarium

Aangezien een steen een random valbaan heeft, zal deze nooit precies in een vlak door het midden van de bak vallen. Daardoor ontstaat er een verschil tussen de berekende en werkelijke afstand en dus de weerstandscoefficiënt.

Een en ander wordt uitgelegd in het volgende rekenvoorbeeld:

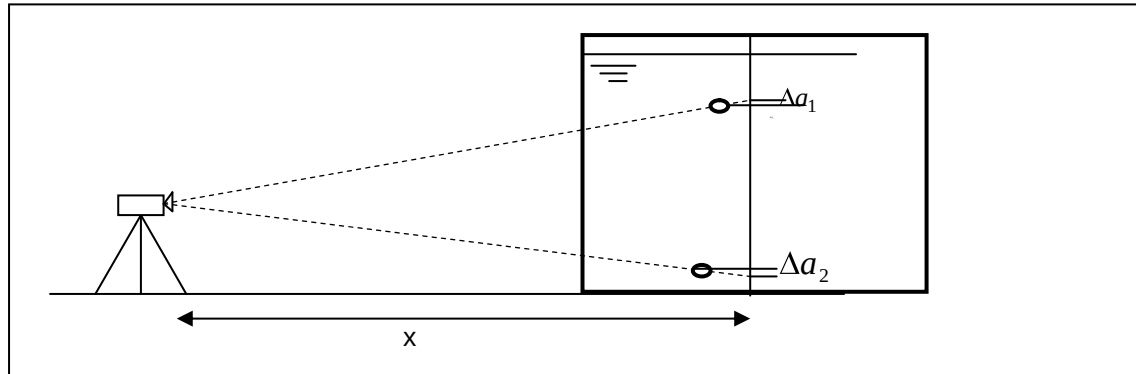
De kans dat de afgelegde afstand door 99% van de stenen wordt onderschreden is:

$$\Pr\{X < x\} = \Pr\left\{Y < \frac{x - \mu}{\sigma}\right\} = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) = \Phi(2,34)$$

Een steen met een d_{n50} van 20 mm wordt aangeklikt op 0,90 meter diepte. Deze steen wijkt alleen af in het y-z vlak.

De theoretische standaardafwijking volgens het ESM van de horizontaal afgelegde afstand is dan 0,092 meter. De uitwijking die die steen dan heeft met een kans van optreden van 1% is dan 0,21 meter. Dezelfde steen heeft op een diepte van 1,70 meter een standaardafwijking van 0,126 meter, de uitwijking is dan 0,29 meter met een kans van optreden van 1%.

De fout in de meting wordt in dit geval:



figuur B-4 Projectie horizontale uitwijkingen

De afstand tussen het vlak en de camera bedraagt 6,25 meter. De afstand waarover het valtraject wordt gemeten bedraagt ongeveer 0,85 meter.

De afstand van de steen tot het vlak op 0,90 m diepte bedraagt 0,21 meter. Het verschil in

$$\text{projectie bedraagt dan } \Delta a_1 = \frac{\frac{0,85}{2} \cdot 0,21}{6,25} = 0,014 \text{ m.}$$

De afstand van de steen tot het vlak op een diepte van 1,70 meter bedraagt 0,29 m.

$$\text{Het verschil in projectie hier is dan } \Delta a_2 = \frac{\frac{0,85}{2} \cdot 0,29}{6,25} = 0,020 \text{ m.}$$

Dit komt overeen met een afwijking van 0,035 m, ongeveer 17 pixels. Dit geeft een procentuele afwijking van de evenwichtsvalsnelheid van 7% met een zeer kleine kans van optreden.

Bijlage C: Stappenplan en foutenanalyse stroomgoot

Bijlage C-1: Stappenplan van de proeven in de stroomgoot

Vorbereiding

1. Uitsorteren stenen naar groepen
2. Opstellen en afstellen videocamera en opstarten computer en software
3. Pompen aanzetten, automatische afsluiter openen en regelbare afsluiter controleren
4. De eerder ingestelde snelheid meten en controleren

Kalibratie

5. Video opname calibratievlak
6. Calibratievlak uitnemen
7. Loslaatconstructie in positie brengen en controleren

Uitvoering

8. Image capture software op PC activeren
9. Stenen 1 voor 1 in het midden van de ring voorzichtig loslaten en de volgorde noteren (per groep van 50 stenen)
10. Image-capture software op PC uitzetten en de automatische afsluiter sluiten

Data verwerking

11. 3 beelden van het calibratievlak opslaan
12. Met L&C scan X-Y 10 punten aanklikken
13. De beelden van de valbeweging opslaan aan de hand van de genoteerde volgorde van loslaten
14. Van deze beelden op 8 hoogtes de posities van de stenen tijdens de valbeweging aanklikken met het programma L&C scan X-Y
15. De datafiles in Excel samenbrengen en de gegevens vertalen naar snelheden en afstanden
16. Een foto van de positie van de stenen van bovenaf maken en invoeren in de laptop
17. Aanklikken van de posities van de stenen met L&C scan X-Y en de steennummers in de geklikte volgorde noteren
18. Op dezelfde foto 6 kalibratie punten aanklikken met L&C scan X-Y
19. De datafiles van de kalibraties, de posities van de stenen en de lijst met steennummers in de geklikte volgorde in Excel samenbrengen en de afstanden bepalen

Bijlage C-2: Foutenanalyse bij het uitvoeren van proeven in de stroomgoot

Inleiding

Dit hoofdstuk is gebaseerd op hoofdstuk Bijlage B-3:. Alleen de afmetingen zijn anders, wat resulteert in iets grotere onnauwkeurigheden. Aangezien de tekst in beide hoofdstukken hetzelfde is zal alleen de veranderde tekst worden gegeven.

Statistische onnauwkeurigheden

Het grootste voorkomende verschil tussen 2 evenwichtsvalsnelheid metingen van dezelfde steen waargenomen tijdens 2 herhalingen is 27 %.

Beïnvloeding door de modelproef opstelling

De opstelling kan zorgen voor een aantal onnauwkeurigheden. Deze zullen hieronder behandeld worden.

De beperkte afmetingen van de goot

Deze worden bij proeven met enkele stenen niet van invloed geacht op de resultaten. Er is geen enkele steen tegen de zijramen gebotst.

Het vallen in het zog van een steen die kort ervoor is losgelaten

Dit effect kan van invloed zijn op de resultaten van de bepaling van de individuele evenwichtsvalsnelheden. Aangezien de stenen in stromend water worden losgelaten bevindt het turbulente zog van de voorgaande steen zich al verder stroomafwaarts. De volgende steen heeft dan geen last van turbulentie, veroorzaakt door de voorgaande steen.

Beïnvloeding van de steen door loslaten in de ring

Bij het loslaten van de stenen in de ring bevindt de onderkant van de steen zich in stromend water en de bovenkant zich in relatief stil water. Hierdoor zou de steen in rotatie kunnen komen en een hogere evenwichtsvalsnelheid kunnen ontwikkelen door het Magnus-effect.

Meet onnauwkeurigheden

De optredende fouten bij de verwerking van de videobeelden met L&C scan-XY.

1. Beperkte resolutie door digitaliseren videobeeld

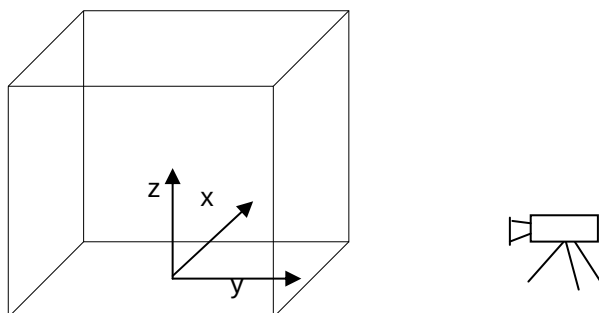
Er wordt bij het aanklikken van een steen een pixel aangeklikt. Er wordt dus gemeten met de nauwkeurigheid van 1 pixel. Bij het digitaliseren wordt het beeld van +/- 1 meter hoog opgedeeld in 576 pixels. Dit houdt dus in ongeveer 2 mm per pixel. Als er een pixel verkeerd wordt geklikt komt dit terug in het bepalen van de evenwichtsvalsnelheid. Deze fout is ongeveer +/- 0,6 % van de gemeten snelheid. Van het kalibratiekruis worden 3 maal 10 punten aangeklikt om de fout in de kalibratiefile te minimaliseren.

2. Bewegingsonscherpte

Doordat bij het digitaliseren van de Super VHS beelden eerst de even lijnen en dan de oneven lijnen worden opgebouwd lijkt het alsof 1 frame opgebouwd is uit 2 half over elkaar liggende stenen. Er wordt geprobeerd het midden van het overlappende stuk aan te klikken. Aanklikken in het midden geeft een maximale fout van ongeveer 5 pixels. Omdat er per steen 2 keer geklikt wordt kan de fout 2 keer optreden. Dit zorgt voor een afwijking van 3% van de snelheid.

De horizontale uitwijking uit het calibratievlak

Aan het begin van de video-opnamen wordt er een calibratievlak in de goot geplaatst. De afstanden van de punten van dit calibratievlak zijn bekend ten opzichte van elkaar. Op deze manier kan er een grid bepaald worden waarmee de afgelegde afstanden berekend kunnen worden. Er wordt uitgegaan van het volgende assenstelsel:



figuur C-1 Assenstelsel in aquarium

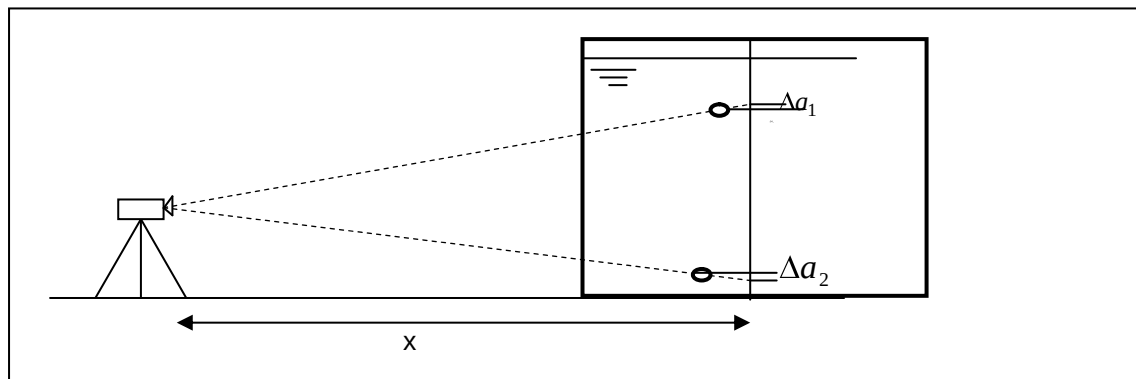
Aangezien een steen een random valbaan heeft, zal deze nooit precies in een vlak door het midden van de goot vallen. Daardoor ontstaat er een verschil tussen de berekende en werkelijke afstand en dus de evenwichtsvalsnelheid. Een en ander wordt uitgelegd in het volgende rekenvoorbeeld:

De kans dat de afgelegde afstand door 99% van de stenen wordt onderschreden is:

$$\Pr\{X < x\} = \Pr\left\{Y < \frac{x - \mu}{\sigma}\right\} = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) = \Phi(2,34)$$

Een steen met een d_n van 20 mm wordt aangeklikt op 0,40 meter diepte. Deze steen wijkt alleen af in het y-z vlak.

De theoretische standaardafwijking volgens het ESM van de horizontaal afgelegde afstand is dan 0,061 meter. De uitwijking die die steen dan heeft met een kans van optreden van 1% is dan 0,14 meter. Dezelfde steen heeft op een diepte van 0,75 meter een standaardafwijking van 0,084 meter, de uitwijking is dan 0,2 meter met een kans van optreden van 1%. De fout in de meting wordt in dit geval:



figuur C-2 Projectie horizontale uitwijkingen

De afstand tussen het vlak en de camera bedraagt 2,5 meter. De afstand waarover het valtraject wordt gemeten bedraagt ongeveer 0,35 meter.

De afstand van de steen tot het vlak op 0,40 m diepte bedraagt 0,14 meter. Het verschil in

$$\text{projectie bedraagt dan } \Delta a_1 = \frac{\frac{0,4}{2} \cdot 0,14}{2,5} = 0,011 \text{ m.}$$

De afstand van de steen tot het vlak op een diepte van 0,75 meter bedraagt 0,2 m.

$$\text{Het verschil in projectie hier is dan } \Delta a_2 = \frac{\frac{0,75}{2} \cdot 0,2}{2,5} = 0,03 \text{ m.}$$

Dit komt overeen met een afwijking van 0,041 m, ongeveer 17 pixels. Dit geeft een procentuele afwijking van de evenwichtsvalsnelheid van 12% met een zeer kleine kans van optreden.

Bijlage D: Steeneigenschappen beproefde sorteringen

Bijlage D-1: Eigenschappen stenen met een d_n van 11 tot 21 mm

Steeneigenschappen

Nr.	M _{droog} (g)	M _{nat} (g)	? _{steen} (g/mm ³)	V (mm ³)	D _n (mm)	? (-)	w (m/s)	L (mm)	d (mm)	L/d (-)	C _d (-)
1	3,83	2,39	0,00268	1430	11,27	1,66	0,55	17,75	12,26	1,45	1,22
2	3,91	2,47	0,00273	1434	11,28	1,71	0,55	18,78	12,08	1,55	1,26
3	4,19	2,63	0,00271	1547	11,57	1,69	0,59	18,43	13,08	1,41	1,11
4	5,73	3,62	0,00273	2094	12,79	1,72	0,63	20,72	14,42	1,44	1,10
5	5,00	3,12	0,00273	1869	12,79	1,72	0,53	20,60	13,82	1,49	1,54
6	3,55	2,22	0,00269	1319	10,97	1,67	0,53	18,64	10,22	1,82	1,30
7	5,50	3,46	0,00271	2024	12,65	1,70	0,58	20,28	14,86	1,36	1,26
8	4,66	2,90	0,00267	1746	12,04	1,65	0,48	21,80	11,94	1,83	1,72
9	4,67	2,92	0,00268	1740	12,03	1,67	0,50	19,42	12,82	1,51	1,55
10	4,46	2,80	0,00271	1648	11,81	1,69	0,53	21,70	11,62	1,87	1,37
11	3,76	2,37	0,00272	1385	11,15	1,70	0,53	18,64	12,26	1,52	1,34
12	4,94	3,09	0,00269	1840	12,25	1,67	0,54	19,84	13,90	1,43	1,40
13	6,41	3,97	0,00264	2427	13,44	1,63	0,59	21,40	13,88	1,54	1,23
14	4,56	2,92	0,00279	1633	11,78	1,78	0,57	20,56	12,16	1,69	1,25
15	3,56	2,24	0,00271	1316	10,96	1,69	0,57	17,32	11,30	1,53	1,14
16	6,26	3,94	0,00271	2309	13,22	1,70	0,57	22,48	13,02	1,73	1,35
17	5,69	3,62	0,00277	2057	12,72	1,75	0,59	21,20	14,80	1,43	1,24
18	6,40	4,03	0,00272	2352	13,30	1,70	0,58	22,58	13,43	1,68	1,31
19	4,48	2,81	0,0027	1659	11,84	1,68	0,55	18,48	13,36	1,38	1,31
20	3,82	2,39	0,00269	1417	11,23	1,68	0,56	17,46	13,16	1,33	1,19
21	4,34	2,71	0,00268	1617	11,74	1,67	0,50	20,58	12,00	1,72	1,57
22	6,06	3,79	0,00269	2252	13,11	1,67	0,52	23,25	13,76	1,69	1,60
23	4,56	2,88	0,00273	1670	11,87	1,71	0,62	18,42	11,76	1,57	1,06
24	5,36	3,35	0,00268	1998	12,59	1,67	0,56	19,72	14,92	1,32	1,31
25	4,50	2,87	0,00278	1621	11,75	1,76	0,56	20,04	12,22	1,64	1,31
26	6,33	3,98	0,00271	2332	13,26	1,70	0,50	24,18	13,66	1,77	1,75
27	4,34	2,72	0,00269	1614	11,73	1,68	0,54	20,96	12,82	1,63	1,35
28	3,62	2,28	0,00271	1335	11,01	1,70	0,49	19,50	9,06	2,15	1,52
29	4,55	2,86	0,00271	1676	11,88	1,70	0,54	20,72	12,56	1,65	1,34
30	4,83	3,02	0,00269	1796	12,15	1,67	0,56	20,26	12,56	1,61	1,27
31	4,34	2,70	0,00266	1631	11,77	1,65	0,51	18,72	13,04	1,44	1,44
32	4,42	2,76	0,00268	1647	11,81	1,67	0,54	21,20	11,40	1,86	1,33
33	3,97	2,50	0,00271	1465	11,36	1,70	0,47	19,22	11,30	1,70	1,71
34	5,55	3,48	0,0027	2058	12,72	1,68	0,53	20,60	13,02	1,58	1,47
35	5,00	3,12	0,00268	1864	12,31	1,66	0,42	24,12	10,48	2,30	2,33
36	4,99	3,10	0,00265	1881	12,34	1,64	0,50	21,52	12,74	1,69	1,58
37	5,60	3,58	0,00278	2013	12,63	1,77	0,56	20,50	13,48	1,52	1,40
38	6,01	3,77	0,0027	2229	13,06	1,68	0,55	21,68	12,35	1,76	1,45
39	5,67	3,55	0,00269	2107	12,82	1,68	0,54	21,22	13,86	1,53	1,43
40	4,75	2,97	0,00269	1767	12,09	1,67	0,53	21,78	12,49	1,74	1,41
41	5,27	3,30	0,00269	1956	12,51	1,68	0,55	20,33	11,76	1,73	1,37
42	4,16	2,60	0,00268	1552	11,58	1,67	0,50	20,62	10,69	1,93	1,49
43	4,56	2,86	0,0027	1690	11,91	1,68	0,48	23,28	11,80	1,97	1,74
44	8,00	4,95	0,00264	3034	14,48	1,62	0,65	21,90	16,24	1,35	1,08
45	4,48	2,80	0,00268	1673	11,87	1,66	0,52	22,39	12,09	1,85	1,45
46	7,92	4,95	0,00268	2953	14,35	1,67	0,54	25,56	15,06	1,70	1,62
47	5,44	3,40	0,00268	2029	12,66	1,67	0,49	24,38	11,00	2,22	1,71

Nr.	Mdroog	Mnat	?steen	V	Dn	?	w	L	d	L/d	Cd
	(g)	(g)	(g/mm3)	(mm3)	(mm)	(-)	(m/s)	(mm)	(mm)	(-)	(-)
48	7,95	4,98	0,00269	2957	14,35	1,67	0,58	26,82	13,94	1,92	1,40
49	9,81	6,15	0,0027	3640	15,38	1,68	0,56	27,44	14,10	1,95	1,65
50	4,34	2,71	0,00267	1625	11,76	1,66	0,48	20,53	11,68	1,76	1,65
51	7,63	4,79	0,0027	2823	14,13	1,69	0,61	23,60	14,10	1,67	1,29
52	7,58	4,74	0,00269	2821	14,13	1,67	0,54	24,42	14,92	1,64	1,61
53	9,25	5,81	0,0027	3420	15,07	1,69	0,59	25,64	14,06	1,82	1,43
54	10,96	7,36	0,00306	3584	15,30	2,04	0,62	29,42	15,22	1,93	1,58
55	10,95	6,84	0,00268	4084	15,98	1,67	0,58	28,70	16,62	1,73	1,54
56	10,99	6,90	0,0027	4071	15,97	1,69	0,58	30,01	13,98	2,15	1,60
57	9,16	5,75	0,0027	3387	15,02	1,69	0,50	30,99	14,43	2,15	2,02
58	10,33	6,44	0,00267	3865	15,69	1,66	0,58	26,28	15,20	1,73	1,50
59	9,02	5,64	0,00268	3363	14,98	1,67	0,56	27,82	15,63	1,78	1,58
60	7,03	4,36	0,00265	2658	13,85	1,63	0,57	25,24	12,67	1,99	1,39
61	8,69	5,46	0,0027	3215	14,76	1,69	0,57	26,97	13,39	2,01	1,49
62	9,95	6,24	0,0027	3685	15,45	1,68	0,63	25,04	16,00	1,57	1,29
63	6,62	4,13	0,00268	2471	13,52	1,66	0,50	26,14	12,70	2,06	1,76
64	11,62	7,31	0,00271	4281	16,24	1,70	0,62	26,12	19,22	1,36	1,39
65	15,76	9,90	0,00271	5824	17,99	1,69	0,63	32,86	16,00	2,05	1,51
66	8,54	5,35	0,00269	3168	14,69	1,68	0,68	23,56	14,98	1,57	1,05
67	12,88	8,09	0,00271	4760	16,82	1,69	0,64	30,01	17,04	1,76	1,35
68	12,31	7,55	0,0026	4734	16,79	1,59	0,67	26,54	20,05	1,32	1,18
69	11,79	7,37	0,00268	4395	16,38	1,67	0,61	29,53	17,30	1,71	1,46
70	12,95	8,14	0,00271	4785	16,85	1,69	0,61	28,61	19,01	1,50	1,50
71	7,03	4,37	0,00266	2642	13,82	1,64	0,52	24,59	11,44	2,15	1,69
72	9,02	5,66	0,0027	3340	14,95	1,69	0,62	24,81	13,94	1,78	1,27
73	20,79	12,95	0,00267	7798	19,83	1,65	0,68	35,70	19,32	1,85	1,39
74	13,51	8,46	0,00269	5025	17,13	1,67	0,62	31,84	18,61	1,71	1,49
75	18,69	11,76	0,00271	6891	19,03	1,70	0,73	29,00	22,24	1,30	1,19
76	21,58	13,51	0,00269	8031	20,03	1,67	0,65	37,84	20,22	1,87	1,57
77	14,96	9,39	0,0027	5539	17,69	1,69	0,58	33,80	15,80	2,14	1,75
78	19,52	12,18	0,00267	7296	19,40	1,66	0,62	36,38	19,52	1,86	1,64
79	8,16	5,10	0,00268	3043	14,49	1,67	0,60	25,10	11,78	2,13	1,31
80	6,86	4,29	0,00269	2550	13,66	1,67	0,55	23,68	14,96	1,58	1,51
81	8,02	4,87	0,00256	3131	14,63	1,55	0,67	22,86	14,33	1,60	1,00
82	9,68	6,09	0,00271	3569	15,28	1,70	0,62	26,28	15,04	1,75	1,32
83	7,77	4,86	0,00269	2889	14,24	1,67	0,59	25,54	12,70	2,01	1,34
84	10,71	6,73	0,00271	3953	15,81	1,69	0,57	28,27	12,96	2,18	1,60
85	13,11	8,18	0,00268	4899	16,98	1,66	0,62	28,94	14,65	1,98	1,45
86	23,38	14,68	0,0027	8650	20,53	1,69	0,72	37,80	19,03	1,99	1,33
87	4,79	3,00	0,00269	1780	12,12	1,68	0,53	19,90	12,16	1,64	1,46
88	6,06	3,79	0,00268	2260	13,12	1,67	0,55	23,74	14,06	1,69	1,41
89	8,95	5,61	0,00269	3321	14,92	1,68	0,63	25,84	15,33	1,69	1,24
90	6,57	4,10	0,00268	2454	13,49	1,66	0,56	21,48	15,32	1,40	1,42
91	9,05	5,61	0,00265	3422	15,07	1,63	0,61	25,75	15,24	1,69	1,28
92	16,81	10,55	0,0027	6221	18,39	1,69	0,56	34,54	15,78	2,19	1,97
93	8,24	5,15	0,00268	3070	14,53	1,67	0,61	21,71	16,66	1,30	1,28
94	7,41	4,65	0,0027	2739	13,99	1,69	0,68	22,10	13,54	1,63	1,03
95	6,35	3,97	0,00268	2367	13,33	1,67	0,49	25,92	11,42	2,27	1,82
96	7,63	4,78	0,00269	2837	14,16	1,68	0,56	26,08	14,54	1,79	1,48
97	9,60	6,01	0,00269	3565	15,28	1,68	0,58	21,96	13,94	1,58	1,47

Nr.	M _{droog}	M _{nat}	? _{steen}	V	D _n	?	w	L	d	L/d	C _d
	(g)	(g)	(g/mm ³)	(mm ³)	(mm)	(-)	(m/s)	(mm)	(mm)	(-)	(-)
98	9,60	5,96	0,00265	3619	15,35	1,64	0,62	24,86	14,66	1,70	1,29
99	19,00	11,90	0,00269	7058	19,18	1,68	0,63	36,42	18,68	1,95	1,61
100	12,01	7,48	0,00267	4500	16,51	1,65	0,62	28,40	16,14	1,76	1,38
101	8,77	5,45	0,00266	3304	14,89	1,64	0,57	24,14	18,48	1,31	1,48
102	9,12	5,72	0,0027	3377	15,00	1,68	0,64	24,58	12,60	1,95	1,22
103	22,16	13,90	0,0027	8211	20,17	1,68	0,73	33,52	22,00	1,52	1,24
104	9,99	6,27	0,0027	3701	15,47	1,68	0,54	28,88	14,28	2,02	1,79
105	7,11	4,46	0,0027	2633	13,81	1,68	0,59	24,42	12,10	2,02	1,34
106	5,14	3,23	0,00271	1900	12,39	1,69	0,56	20,40	13,95	1,46	1,30
107	14,06	8,82	0,0027	5207	17,33	1,68	0,64	29,70	17,52	1,70	1,38
108	9,03	5,66	0,0027	3348	14,96	1,68	0,53	23,28	15,84	1,47	1,73
109	13,06	8,20	0,0027	4834	16,91	1,69	0,63	28,44	15,66	1,82	1,41
110	18,43	11,57	0,0027	6823	18,97	1,69	0,70	31,18	20,82	1,50	1,27
111	22,28	13,99	0,0027	8238	20,20	1,69	0,67	36,00	18,68	1,93	1,51
112	16,71	10,43	0,00268	6240	18,41	1,66	0,65	34,94	17,24	2,03	1,42
113	16,29	10,21	0,00269	6048	18,22	1,68	0,77	27,30	18,76	1,46	1,01
114	17,82	11,19	0,0027	6588	18,75	1,69	0,66	31,78	17,24	1,84	1,45
115	18,31	11,49	0,0027	6785	18,93	1,68	0,64	33,56	17,60	1,91	1,55
116	22,89	14,37	0,0027	8467	20,38	1,69	0,62	42,94	17,46	2,46	1,74
117	13,53	8,35	0,00263	5154	17,27	1,61	0,54	32,10	16,62	1,93	1,89
118	21,46	13,44	0,00269	7977	19,98	1,68	0,62	35,30	21,72	1,63	1,71
119	12,08	7,55	0,00268	4505	16,52	1,67	0,63	27,44	11,34	2,42	1,37
120	9,50	5,96	0,0027	3520	15,21	1,68	0,65	23,78	17,16	1,39	1,20
121	15,70	9,80	0,00268	5871	18,04	1,66	0,65	31,10	16,78	1,85	1,39
122	13,22	8,30	0,0027	4894	16,98	1,69	0,63	29,42	18,26	1,61	1,46
123	20,11	12,63	0,0027	7441	19,52	1,69	0,66	34,10	22,44	1,52	1,51
124	20,51	12,88	0,0027	7591	19,65	1,69	0,69	36,44	19,98	1,82	1,39
125	18,14	11,38	0,0027	6722	18,87	1,68	0,61	35,11	22,60	1,55	1,68
126	13,74	8,64	0,00271	5072	17,18	1,69	0,58	33,22	16,80	1,98	1,73
127	15,89	9,96	0,0027	5891	18,06	1,68	0,73	27,76	19,52	1,42	1,12
128	17,19	10,79	0,0027	6364	18,53	1,69	0,69	30,00	19,00	1,58	1,30
129	13,67	8,58	0,0027	5062	17,17	1,69	0,66	31,96	17,14	1,86	1,32
130	20,64	12,92	0,00269	7673	19,72	1,67	0,68	38,26	16,24	2,36	1,43
131	19,63	12,31	0,0027	7279	19,38	1,68	0,71	29,98	20,96	1,43	1,27
132	11,04	6,89	0,00267	4129	16,04	1,66	0,72	24,90	15,42	1,61	1,02
133	16,30	10,23	0,0027	6038	18,21	1,68	0,68	28,50	19,68	1,45	1,29
134	15,59	9,78	0,0027	5772	17,94	1,68	0,67	29,60	15,80	1,87	1,32
135	9,50	6,01	0,00274	3471	15,14	1,72	0,64	24,60	16,00	1,54	1,26
136	20,77	13,01	0,00269	7719	19,76	1,68	0,59	37,66	18,48	2,04	1,90
137	12,73	7,99	0,0027	4709	16,76	1,69	0,65	30,48	13,54	2,25	1,32
138	14,33	8,99	0,0027	5306	17,44	1,68	0,64	30,14	15,56	1,94	1,44
139	14,05	8,88	0,00273	5142	17,26	1,72	0,67	27,20	20,42	1,33	1,30
140	10,84	6,80	0,0027	4021	15,90	1,68	0,69	27,62	15,78	1,75	1,12
141	14,04	8,81	0,0027	5202	17,33	1,68	0,62	30,50	15,40	1,98	1,52
142	11,54	7,24	0,0027	4275	16,23	1,68	0,62	27,32	17,70	1,54	1,43
143	16,05	10,06	0,0027	5952	18,12	1,68	0,65	32,16	16,58	1,94	1,43
144	14,33	9,00	0,0027	5302	17,44	1,69	0,64	31,02	17,42	1,78	1,41
145	17,03	10,68	0,0027	6316	18,48	1,68	0,72	31,16	19,96	1,56	1,17
146	22,69	14,20	0,00269	8438	20,36	1,67	0,60	40,82	17,50	2,33	1,88
147	14,14	8,88	0,0027	5232	17,36	1,69	0,55	33,96	18,14	1,87	1,94

Nr.	Mdroog (g)	Mnat (g)	?steen (g/mm3)	V (mm3)	Dn (mm)	? (-)	w (m/s)	L (mm)	d (mm)	L/d (-)	Cd (-)
148	14,55	9,11	0,00269	5407	17,55	1,68	0,58	30,30	16,66	1,82	1,70
149	11,90	7,45	0,00269	4428	16,42	1,67	0,68	26,32	16,94	1,55	1,20
150	12,03	7,53	0,00269	4478	16,48	1,67	0,63	29,88	16,16	1,85	1,36
151	12,05	7,59	0,00272	4430	16,42	1,70	0,62	29,76	14,78	2,01	1,44
152	10,20	6,43	0,00272	3749	15,53	1,71	0,59	28,22	15,86	1,78	1,49
153	11,29	7,07	0,00269	4199	16,13	1,67	0,59	29,76	16,16	1,84	1,54
154	13,39	8,39	0,00269	4973	17,07	1,68	0,63	31,80	16,76	1,90	1,42
155	19,32	12,10	0,00269	7179	19,29	1,68	0,69	33,60	19,98	1,68	1,32
156	15,70	9,87	0,00271	5796	17,96	1,69	0,60	33,46	17,44	1,92	1,65
157	11,54	7,24	0,0027	4277	16,23	1,68	0,63	30,36	16,86	1,80	1,37
158	7,41	4,65	0,0027	2741	14,00	1,69	0,50	27,18	11,34	2,40	1,85
159	13,00	8,14	0,00269	4828	16,90	1,68	0,67	27,02	16,80	1,61	1,26
160	16,11	10,06	0,00268	6013	18,18	1,66	0,63	30,70	18,38	1,67	1,52
161	13,59	8,51	0,00269	5049	17,16	1,68	0,65	28,58	17,00	1,68	1,33
162	12,85	8,04	0,00269	4785	16,85	1,67	0,63	29,50	16,94	1,74	1,38
163	7,52	4,73	0,00271	2778	14,06	1,69	0,52	26,44	14,48	1,83	1,75
164	21,74	13,56	0,00267	8133	20,11	1,66	0,66	37,16	17,10	2,17	1,51
165	10,82	6,78	0,00269	4017	15,90	1,68	0,61	28,46	16,38	1,74	1,42
166	10,94	6,88	0,00271	4038	15,92	1,69	0,74	25,10	17,78	1,41	0,98
167	9,59	5,99	0,00268	3580	15,30	1,66	0,53	26,40	13,92	1,90	1,81
168	12,83	8,05	0,0027	4749	16,81	1,69	0,60	31,92	15,68	2,04	1,56
169	9,83	6,13	0,00267	3678	15,44	1,66	0,56	23,62	15,32	1,54	1,63
170	6,54	4,12	0,00272	2407	13,40	1,70	0,58	22,16	13,80	1,61	1,34
171	13,94	9,30	0,00302	4615	16,65	2,00	0,61	29,26	15,30	1,91	1,79
172	12,89	8,06	0,00269	4798	16,87	1,67	0,74	27,94	17,22	1,62	1,01
173	13,18	8,25	0,00269	4902	16,99	1,67	0,60	33,56	18,82	1,78	1,56
174	15,05	9,36	0,00266	5659	17,82	1,64	0,59	31,58	18,44	1,71	1,66
175	13,35	8,35	0,00268	4976	17,07	1,67	0,66	30,38	18,00	1,69	1,28
176	11,06	6,93	0,00269	4105	16,01	1,68	0,64	28,00	18,00	1,56	1,30
177	17,26	10,81	0,00269	6411	18,58	1,68	0,59	34,20	21,24	1,61	1,74
178	12,83	8,04	0,00269	4761	16,82	1,68	0,60	34,72	14,74	2,36	1,55
179	13,65	8,57	0,0027	5048	17,15	1,69	0,64	30,00	15,64	1,92	1,37
180	24,21	15,20	0,0027	8960	20,77	1,69	0,78	31,36	22,38	1,40	1,12
181	17,15	11,50	0,00305	5618	17,78	2,04	0,64	33,22	12,80	2,60	1,73
182	10,28	6,46	0,00271	3795	15,60	1,69	0,67	24,84	15,36	1,62	1,16
183	10,33	6,48	0,0027	3832	15,65	1,68	0,58	27,64	16,28	1,70	1,53
184	15,82	9,84	0,00266	5948	18,12	1,64	0,64	31,04	18,28	1,70	1,43
185	10,93	6,88	0,00271	4027	15,91	1,70	0,68	25,46	16,28	1,56	1,16
186	7,56	5,07	0,00305	2479	13,53	2,03	0,62	24,40	16,02	1,52	1,40
187	19,32	12,11	0,0027	7165	19,28	1,68	0,74	31,96	18,12	1,76	1,18
188	6,47	4,05	0,00269	2402	13,39	1,68	0,59	25,98	13,40	1,94	1,27
189	10,71	6,71	0,00269	3976	15,84	1,68	0,52	29,00	13,80	2,10	1,91
190	14,81	9,27	0,00269	5506	17,66	1,67	0,63	30,36	17,70	1,72	1,46
191	16,11	10,12	0,0027	5958	18,13	1,69	0,70	29,86	20,00	1,49	1,23
192	10,29	6,45	0,00269	3822	15,64	1,68	0,54	32,02	14,28	2,24	1,79
193	10,44	6,55	0,0027	3867	15,70	1,68	0,73	24,36	17,60	1,38	0,98
194	8,55	5,32	0,00266	3212	14,75	1,65	0,54	25,40	15,02	1,69	1,63
195	8,79	5,53	0,00271	3246	14,81	1,69	0,64	25,12	16,34	1,54	1,21
196	14,62	9,18	0,0027	5412	17,56	1,69	0,67	29,10	16,14	1,80	1,31
197	10,54	7,02	0,00301	3502	15,19	1,99	0,62	28,74	13,92	2,06	1,55

Nr.	M _{droog}	M _{nat}	ρ_{steen}	V	D _n	α	w	L	d	L/d	C _d
	(g)	(g)	(g/mm ³)	(mm ³)	(mm)	(-)	(m/s)	(mm)	(mm)	(-)	(-)
198	10,82	6,80	0,00271	3997	15,87	1,69	0,70	23,94	16,84	1,42	1,10
199	8,65	5,40	0,00268	3229	14,78	1,66	0,64	24,22	15,64	1,55	1,16
200	14,32	8,94	0,00268	5348	17,49	1,66	0,62	32,36	20,14	1,61	1,52

tabel D-1 Eigenschappen stenen met een d_n van 11 tot 21 mm

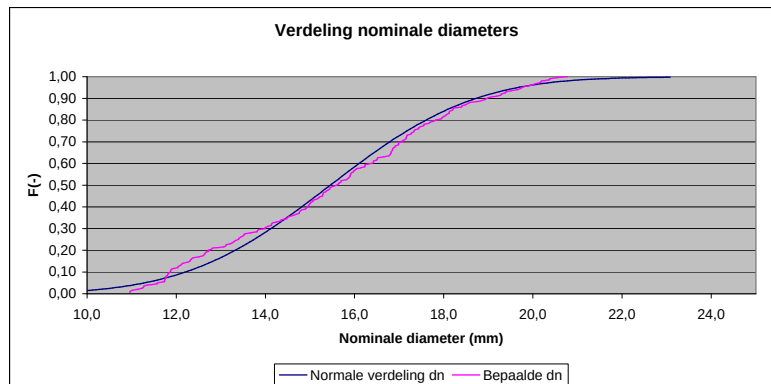
Bijlage D-2: Eigenschappen stenen met een d_n van 36 tot 136 mm

Steeneigenschappen

Nr.	M _{droog} (g)	M _{nat} (g)	? _{steen} (g/mm ³)	V (mm ³)	D _n (mm)	? (-)	w (m/s)	L (mm)	d (mm)	L/d (-)	C _d (-)
A	201,7	129,2	0,00280	72090	41,62	1,78	0,94	79,8	47,3	1,7	1,65
B	150,2	101,9	0,00313	48037	36,35	2,11	1,03	66,5	39,7	1,7	1,43
C	214,4	144,8	0,00310	69246	41,06	2,08	1,1	79,6	39,5	2	1,41
D	265,3	169,1	0,00277	95636	45,73	1,76	1,08	84,5	45,1	1,9	1,37
E	405	269,4	0,00300	134813	44,53	1,99	1,09	103	50	2,1	1,46
F	441,7	281	0,00276	159791	54,26	1,75	1,2	133	55,82	2,4	1,35
G	803,4	529,6	0,00295	272300	64,82	1,93	1,37	115	61,42	1,9	1,34
H	620,7	395,1	0,00277	224283	60,76	1,75	1,19	113	56	2	1,49
I	499	331,9	0,00300	166194	54,98	1,99	1,12	99,6	51,24	1,9	1,73
J	768,7	483,8	0,00271	283258	65,67	1,7	1,34	133	74,38	1,8	1,25
K	796,3	512,9	0,00283	281816	65,56	1,81	1,19	120	54,52	2,2	1,65
L	883,4	564	0,00278	317582	68,23	1,77	1,09	141	64,1	2,2	1,99
M	622,9	401,3	0,00283	220366	60,4	1,81	1,26	119	49,26	2,4	1,62
N	1286	826,4	0,00281	456959	77,02	1,8	1,4	132	78,62	1,7	1,4
O	1200,6	763,4	0,00276	434765	75,76	1,75	1,34	155	82,2	1,9	1,45
P	1251,6	803,4	0,00281	445703	76,39	1,79	1,31	134	95,38	1,4	1,83
Q	1211,9	774,6	0,00279	434825	75,76	1,77	1,29	135	65,82	2	1,63
R	1483,3	953,8	0,00282	526464	80,75	1,8	1,17	143	69,04	2,1	2,1
S	1723,7	1094	0,00275	626156	85,55	1,74	1,26	179	79,5	2,3	1,88
T	1530,1	974,6	0,00277	552376	82,05	1,75	1,22	186	78,44	2,4	2,07
U	1464,9	919,1	0,00270	542751	81,57	1,68	1,13	160	62,2	2,6	2,25
V	3063,1	1930	0,00272	1126687	104,1	1,7	1,42	193	114	1,7	1,76
W	2271	1440	0,00275	826297	93,84	1,73	1,33	117	106,3	1,1	1,8
X	1999	1215	0,00256	779563	92,03	1,55	1,62	160	87,46	1,8	1,07
Y	2291,1	1445	0,00272	841312	94,4	1,71	1,42	185	93	2	1,57
Z	2810,5	1735	0,00263	1069413	102,3	1,61	1,57	195	87	2,2	1,42
AA	1484	934,6	0,00272	546251	81,75	1,7	1,46	140	83,16	1,7	1,33
BB	1698,9	1072	0,00272	623849	85,45	1,71	1,46	143	80	1,8	1,39
CC	3831	2510	0,00292	1313524	109,5	1,9	1,57	217	95	2,3	1,84
DD	7305	4775	0,00290	2515682	136	1,89	1,53	274	137	2	2,24
EE	3589	2300	0,00280	1281705	108,6	1,78	1,42	207	108	1,9	2,12
FF	4341	2818	0,00287	1514381	114,8	1,85	1,64	222	93	2,4	1,55
GG	5714	3650	0,00278	2052319	127,1	1,77	1,81	203	140	1,5	1,38
HH	5288	3410	0,00283	1867372	123,1	1,82	1,49	268	107	2,5	1,98

Bijlage E: Verdeling steeneigenschappen kleinere diameters

Bijlage E-1: De nominale diameter



figuur E-1 Verdeling nominale diameters $d_{n50} = 15,6$ mm

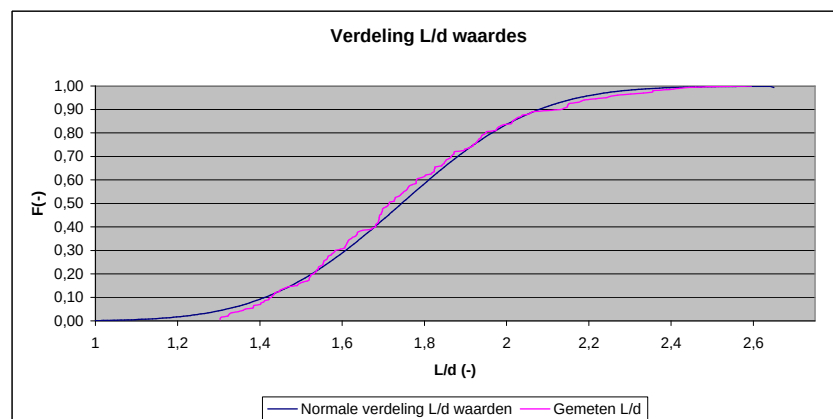
Aantal stenen	D_{n50} (mm)	$\mu_{MLS Dn}$ (mm)	S_{Dn} (mm)	$S_{MLS Dn}$ (mm)	D_{85} (mm)	D_{15} (mm)	D_{85}/D_{15}	?KS	?max	Voldoet
200	15,6	15,5	2,55	2,54	18,2	12,3	1,5	0,12	0,10	JA

tabel E-1 Nominale diameters sortering $d_{n50} = 15,6$ mm

Er is hier dus sprake van een smalle gradatie. De gefitte verdeling voldoet aan de KS toets en kan dus als normaal verdeeld worden beschouwd.

Bijlage E-2: De L/d verhoudingen

De L/d verhoudingen zijn als volgt:



figuur E-2 Verdeling L/d waardes $d_{n50} = 15,6$ mm

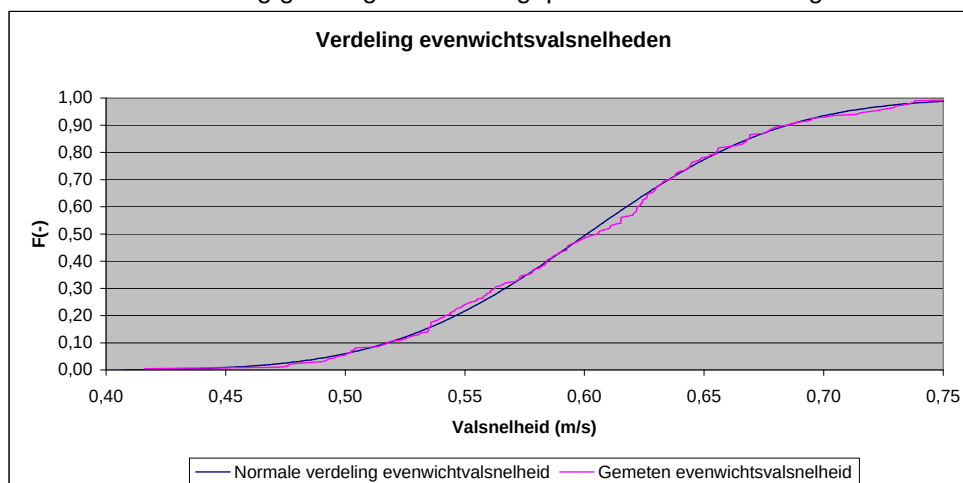
Aantal stenen	D_{n50} (mm)	L/d_{50} (-)	$\mu_{MLS L/d}$ (-)	$S_{L/d}$ (-)	$S_{MLS L/d}$ (-)	?KS	?max	Voldoet
200	15,6	1,72	1,75	0,26	0,26	0,12	0,10	JA

tabel E-2 L/d waardes sortering $d_{n50} = 15,6$ mm

Deze kunnen als normaal verdeeld worden beschouwd.

Bijlage E-3: Verdeling valsnelheden

De verdeling gedraagt zich zoals geplot in onderstaande figuur.



figuur E-3 Verdeling evenwichtsvalsnelheden $d_{n50} = 15,6$ mm

Aantal stenen	W_{50} (m/s)	$\mu_{MLS\ Ue}$ (m/s)	S_{Ue} (m/s)	$S_{MLS\ Ue}$ (m/s)	?KS	?max	Voldoet
200	0,60	0,60	0,065	0,065	0,12	0,04	JA

tabel E-3 Evenwichtsvalsnelheden $d_{n50} = 15,6$ mm

De aanname van normaliteit van de data is dus gegrond volgens de uitkomsten in bovenstaande tabel.

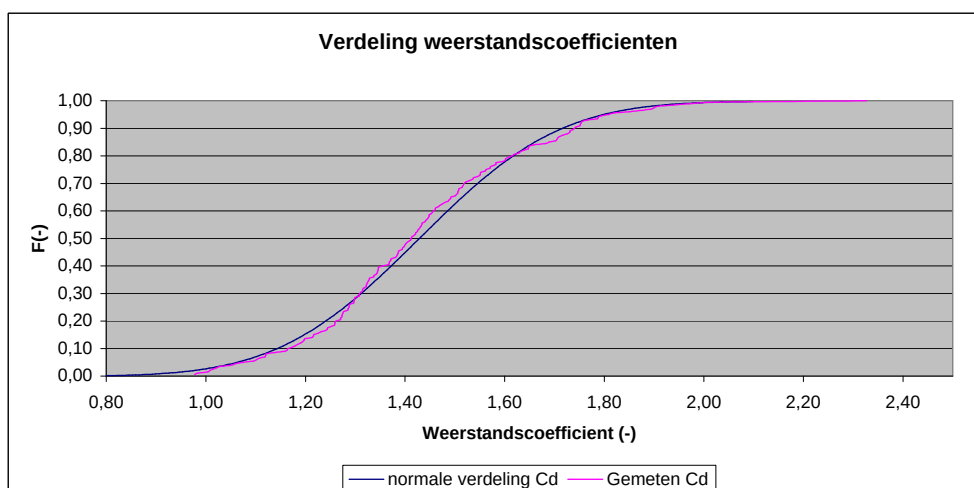
Bijlage E-4: Verdeling weerstandscoefficienten

Deze kan berekend worden aan de hand van de gemeten evenwichtsvalsnelheden en de bepaalde individuele steeneigenschappen. Er wordt gewerkt met het kwadraat van de nominale diameter om het aangestroomde oppervlak weer te geven.

De formule die gebruikt wordt om de weerstandscoefficient te bepalen is als volgt:

$$C_{D,n} = \frac{2\Delta g D_n}{v_e^2}. \text{ Zie voor de verdeling van de weerstandscoefficienten onderstaande grafiek}$$

en tabel.



figuur E-4 Verdeling weerstandscoefficienten $d_{n50} = 15,6$ mm

Aantal stenen	Cd_{50}	$\mu_{MLS\ Cd}$	S_{Cd}	$S_{MLS\ Cd}$	?KS	?max	Voldoet
---------------	-----------	-----------------	----------	---------------	-----	------	---------

	(-)	(-)	(-)	(-)			
200	1,41	1,43	0,22	0,22	0,12	0,08	JA

tabel E-4 Weerstandscoefficienten sortering $d_{n50} = 15,6 \text{ mm}$

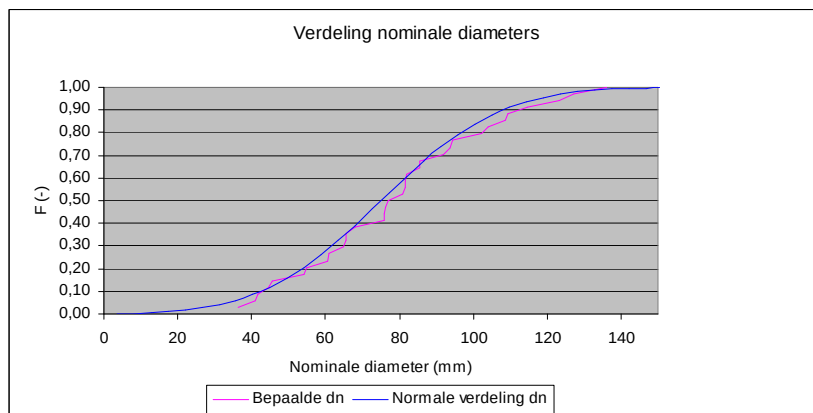
De weerstandscoefficiënt blijkt normaal verdeeld om $\mu = 1,43$ met een spreiding van $\sigma = 0,22$. Dit kan worden weergegeven met de volgende formule:

$$f_{Cd,n}(C_{d,n}) = \frac{1}{\sigma_{Cd,n} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{C_{d,n} - \mu_{Cd,n}}{\sigma_{Cd,n}} \right)^2}$$

De verdeling van weerstandscoefficienten wordt verondersteld gelijk te zijn voor verschillende sorteringen stenen mits de ruwheid (vorm en oppervlakte) hetzelfde is en de L/d verhoudingen en het soortelijke gewicht dezelfde verdeling hebben.

Bijlage F: Verdeling steeneigenschappen grotere diameters

Bijlage F-1: De nominale diameter



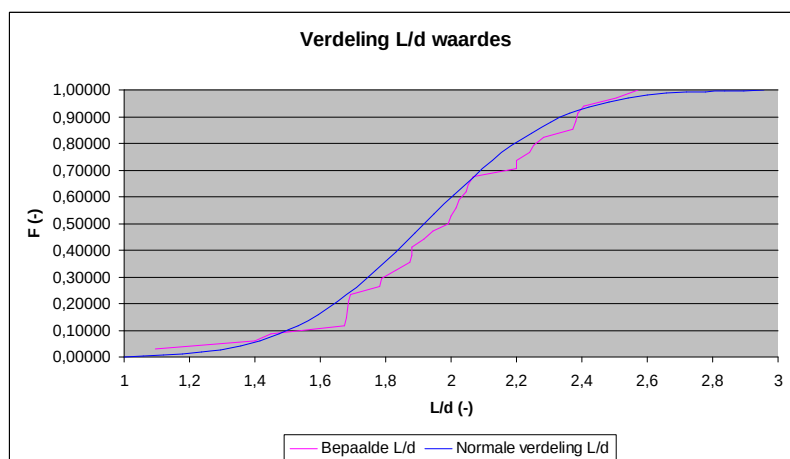
figuur F-1 Verdeling nominale diameters $d_{n50} = 77$ mm

Aantal stenen	D_{n50} (mm)	$\mu_{MLS Dn}$ (mm)	S_{Dn} (mm)	$S_{MLS Dn}$ (mm)	D_{85} (mm)	D_{15} (mm)	D_{85}/D_{15}	?KS	?max	Voldoet
34	77	79,8	25,8	25,4	108,6	45,7	2,38	0,28	0,10	JA

tabel F-1 Nominale diameters sortering $d_{n50} = 77$ mm

Bijlage F-2: De L/d verhoudingen

De L/d verhoudingen zijn als volgt verdeeld:



figuur F-2 Verdeling L/d waardes $d_{n50} = 77$ mm

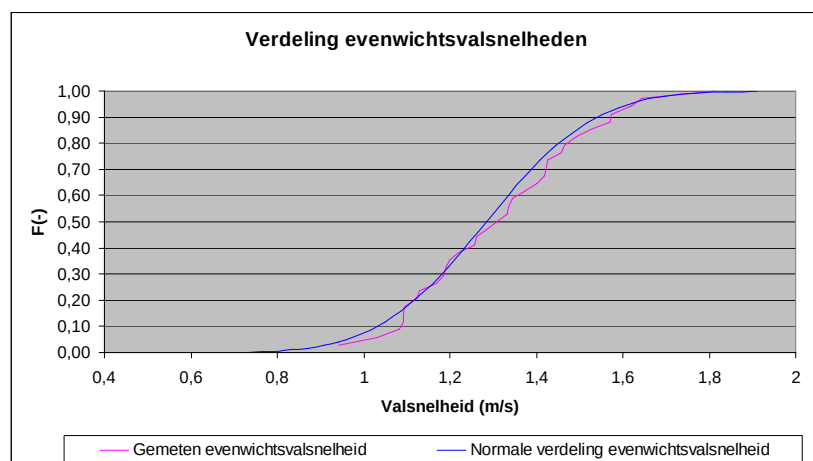
Aantal stenen	D_{n50} (mm)	L/d_{50} (-)	$\mu_{MLS L/d}$ (-)	$S_{L/d}$ (-)	$S_{MLS L/d}$ (-)	?KS	?max	Voldoet
34	77	1,99	1,98	0,33	0,33	0,28	0,09	JA

tabel F-2 L/d waardes sortering $d_{n50} = 77$ mm

Deze kunnen als normaal verdeeld worden beschouwd.

Bijlage F-3: Verdeling valsnelheden

De verdeling gedraagt zich zoals geplot in onderstaande figuur.



figuur F-3 Verdeling evenwichtsvalsnelheden $d_{n50} = 77 \text{ mm}$

Aantal stenen	W_{50} (m/s)	$\mu_{MLS Ue}$ (m/s)	S_{Ue} (m/s)	$S_{MLS Ue}$ (m/s)	?KS	?max	Voldoet
34	1,31	1,32	0,19	,020	0,28	0,08	JA

tabel F-3 Evenwichtsvalsnelheden $d_{n50} = 77 \text{ mm}$

De aanname van normaliteit van de data is dus gegrond volgens de uitkomsten in bovenstaande tabel.

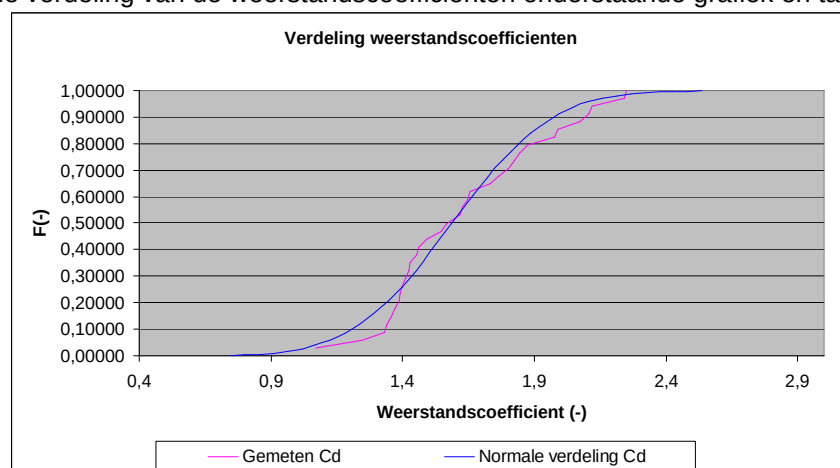
Bijlage F-4: Verdeling weerstandscoefficienten

Deze kan berekend worden aan de hand van de gemeten evenwichtsvalsnelheden en de bepaalde individuele steeneigenschappen. Er wordt gewerkt met het kwadraat van de nominale diameter om het aangestroomde oppervlak weer te geven.

De formule die gebruikt wordt om de weerstandscoefficient te bepalen is als volgt:

$$C_{D,n} = \frac{2\Delta g D_n}{v_e^2} \quad (\text{F.1})$$

Zie voor de verdeling van de weerstandscoefficienten onderstaande grafiek en tabel.



figuur F-4 Verdeling weerstandscoefficienten $d_{n50} = 77 \text{ mm}$

Aantal stenen	Cd ₅₀	μ _{MLS Cd}	S _{Cd}	S _{MLS Cd}	?KS	?max	Voldoet
	(-)	(-)	(-)	(-)			
34	1,57	1,64	0,30	0,30	0,28	0,13	JA

tabel F-4 Weerstandscoefficienten sortering d₅₀ = 77 mm

De weerstandscoefficiënt blijkt normaal verdeeld om $\mu = 1,57$ met een spreiding van

$\sigma = 0,30$.

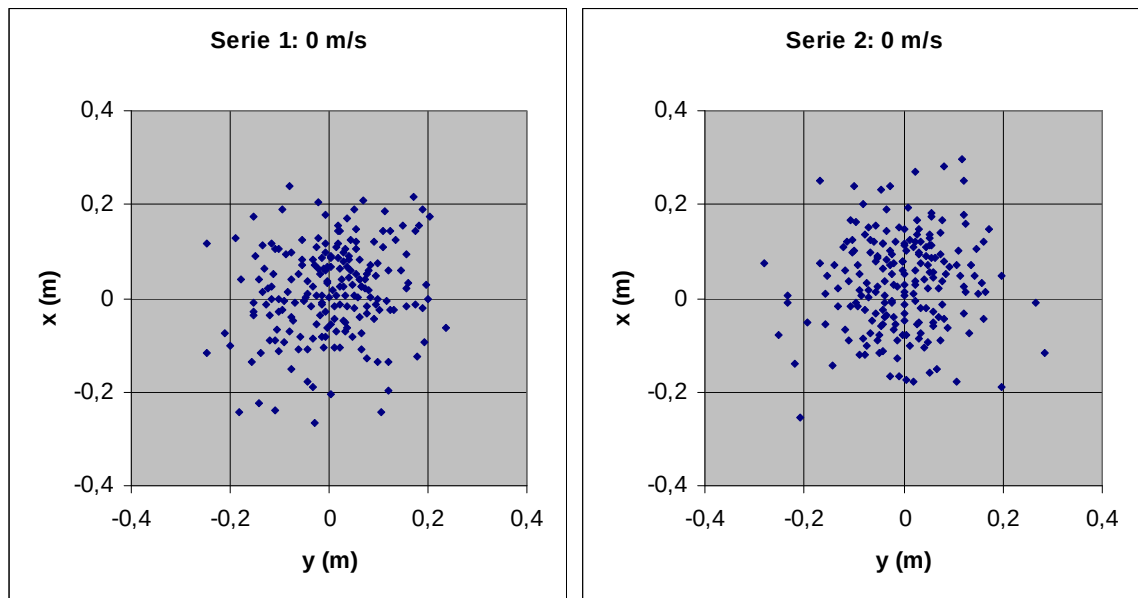
Dit kan worden weergegeven met de volgende formule:

$$f_{Cd,n}(C_{d,n}) = \frac{1}{\sigma_{Cd,n} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{C_{d,n} - \mu_{Cd,n}}{\sigma_{Cd,n}} \right)^2} \quad (\text{F.2})$$

De verdeling van weerstandscoefficienten wordt verondersteld gelijk te zijn voor verschillende sorteringen stenen mits de ruwheid (vorm en oppervlakte) hetzelfde is en de L/d verhoudingen en het soortelijk gewicht dezelfde verdeling hebben

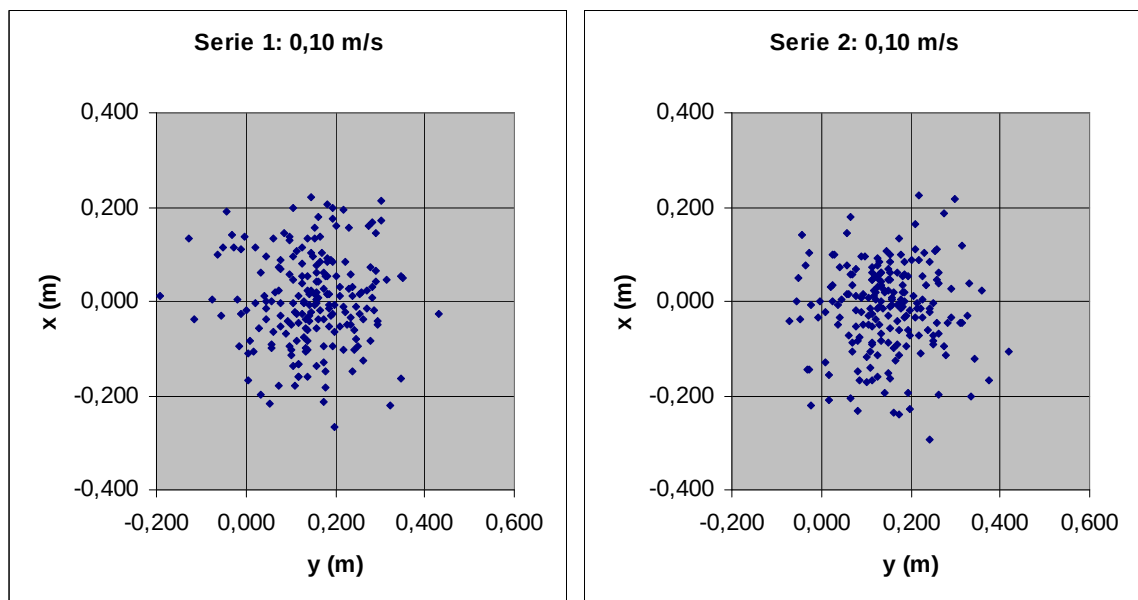
Bijlage G: Stortresultaten individueel gestorte stenen

Bijlage G-1: Bovenanzichten storten zonder stroming



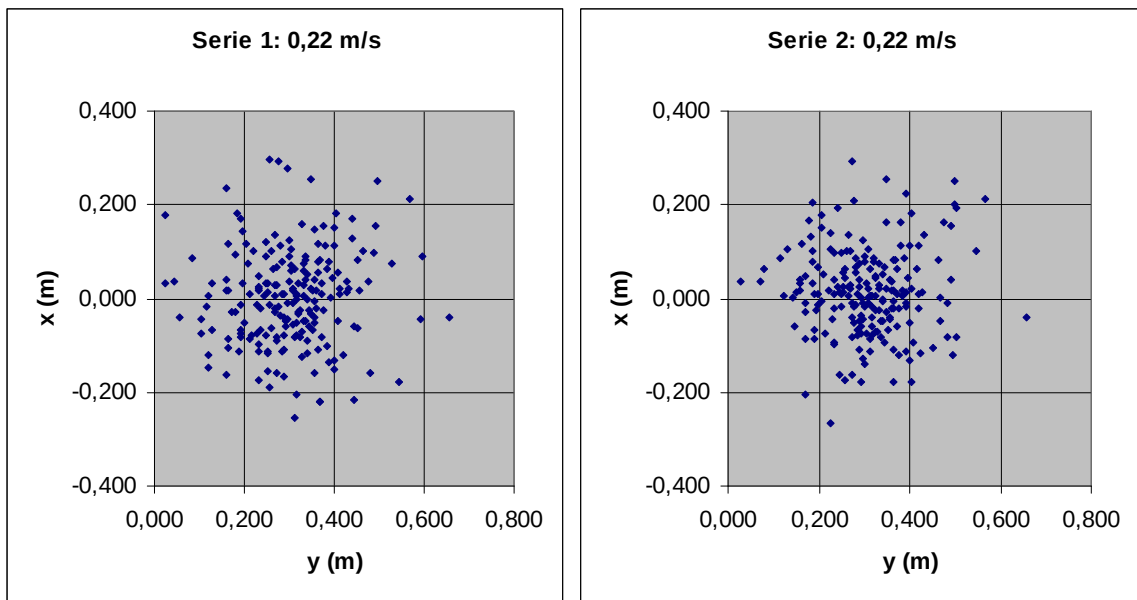
figuur G-1 Bovenanzichten storten zonder stroming

Bijlage G-2: Bovenanzichten van storten met 0,10 m/s.



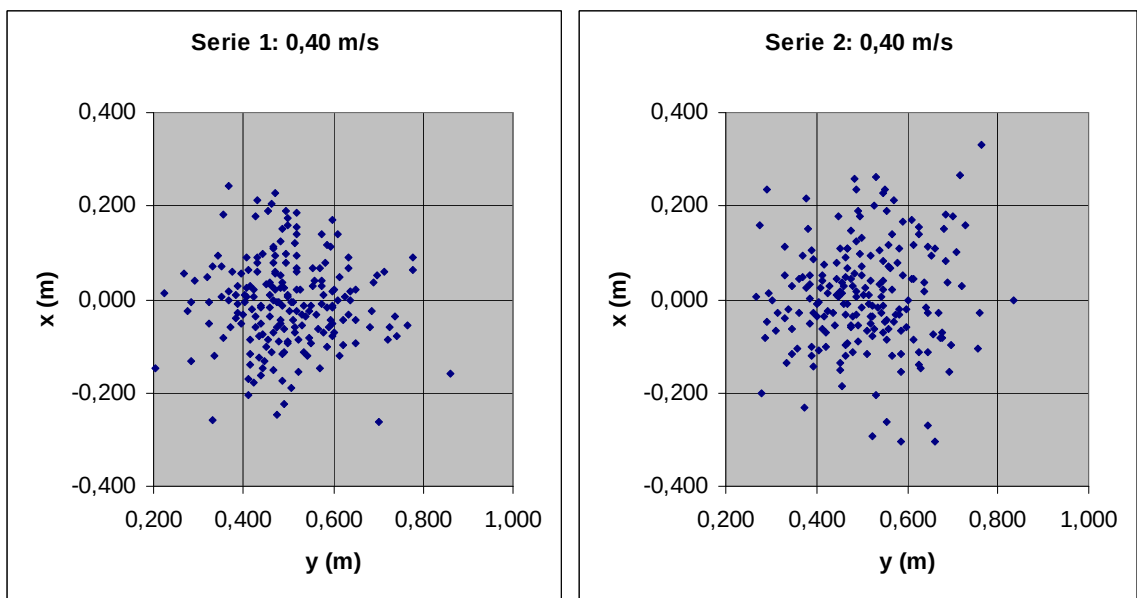
figuur G-2 Bovenanzichten van storten met 0,10 m/s

Bijlage G-3: Bovernaanzichten van storten met 0,22 m/s.



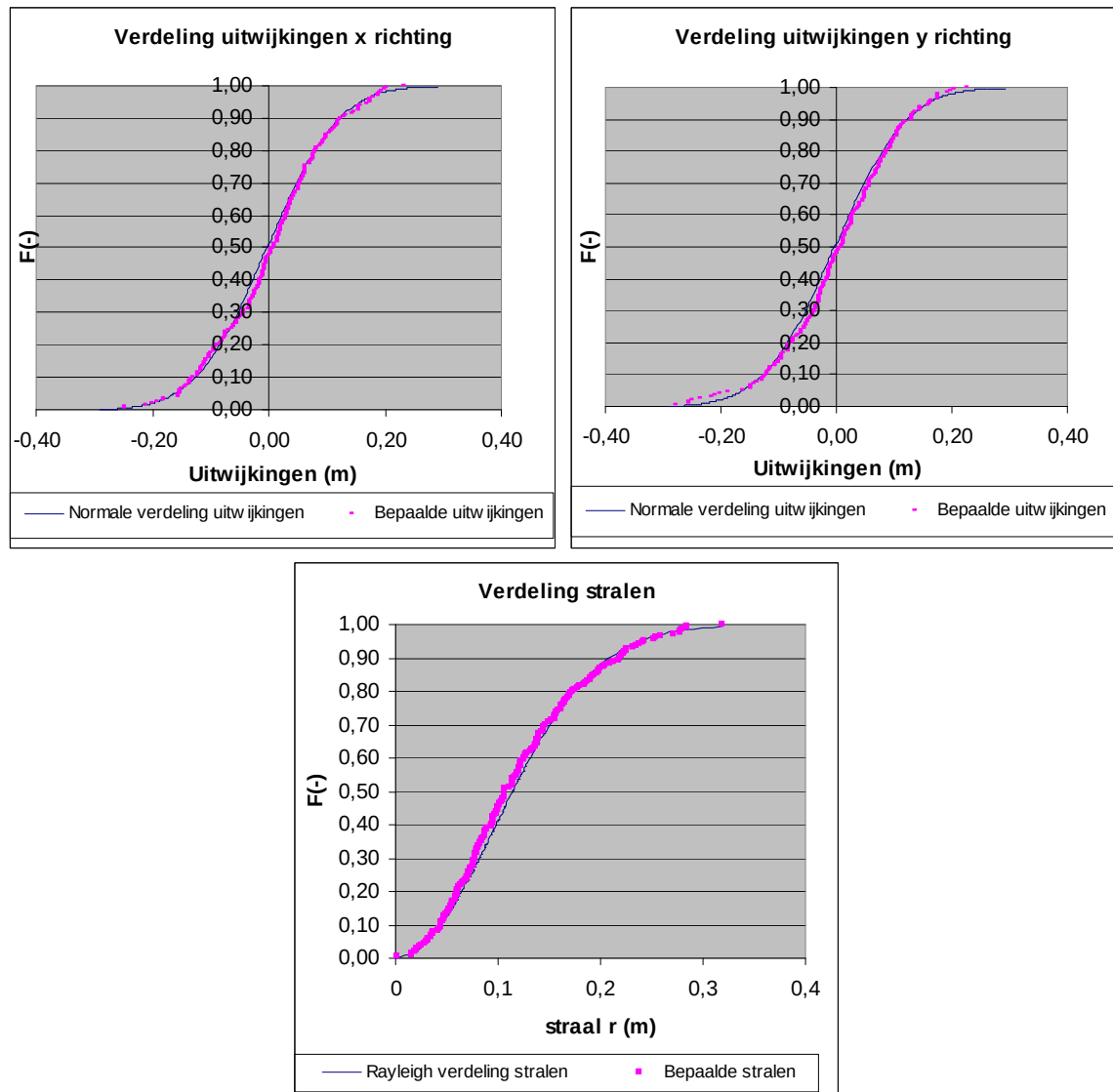
figuur G-3 Bovernaanzichten van storten met 0,22 m/s

Bijlage G-4: Bovernaanzichten van storten met 0,40 m/s.

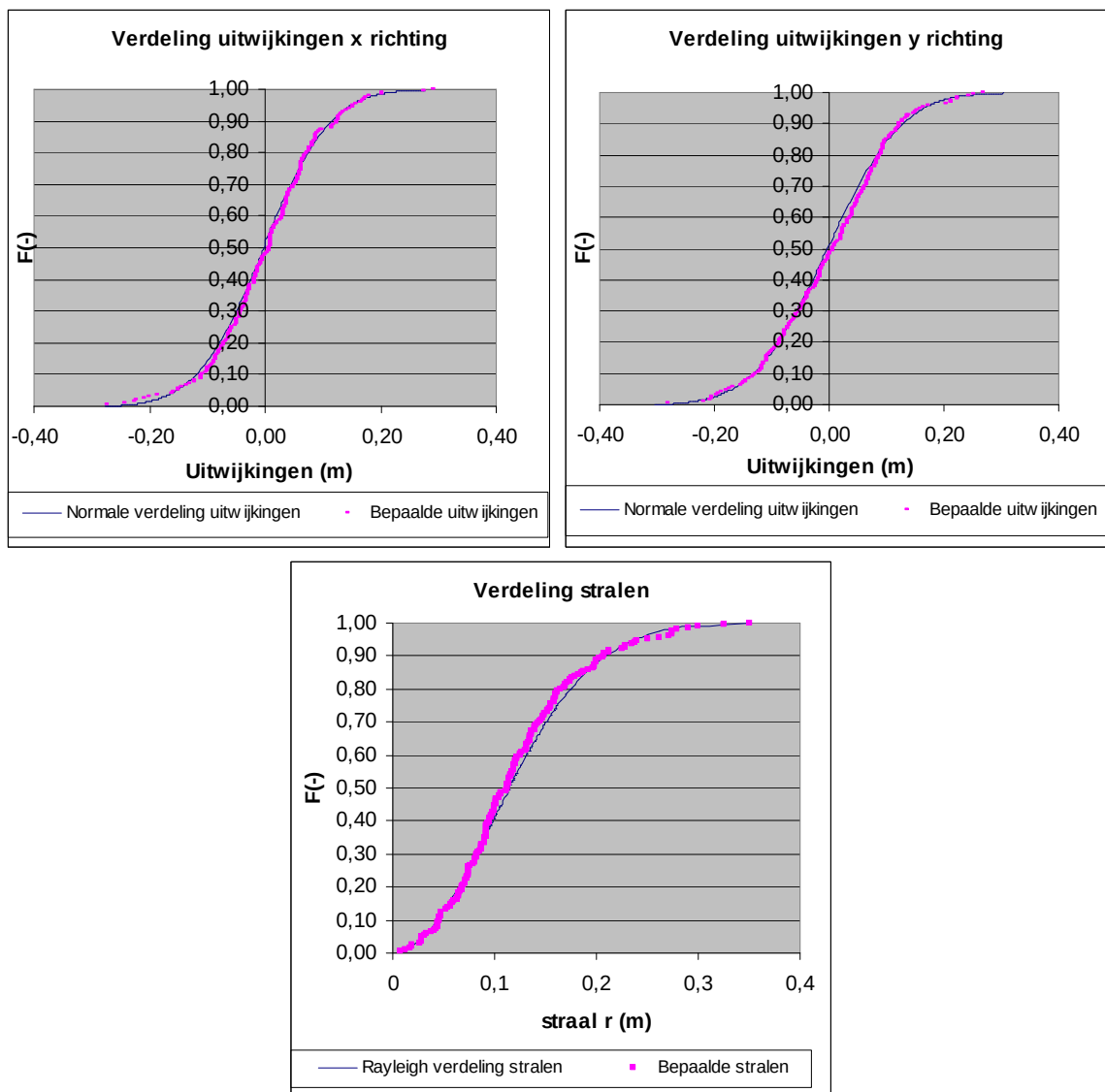


figuur G-4 Bovernaanzichten van storten met 0,40 m/s

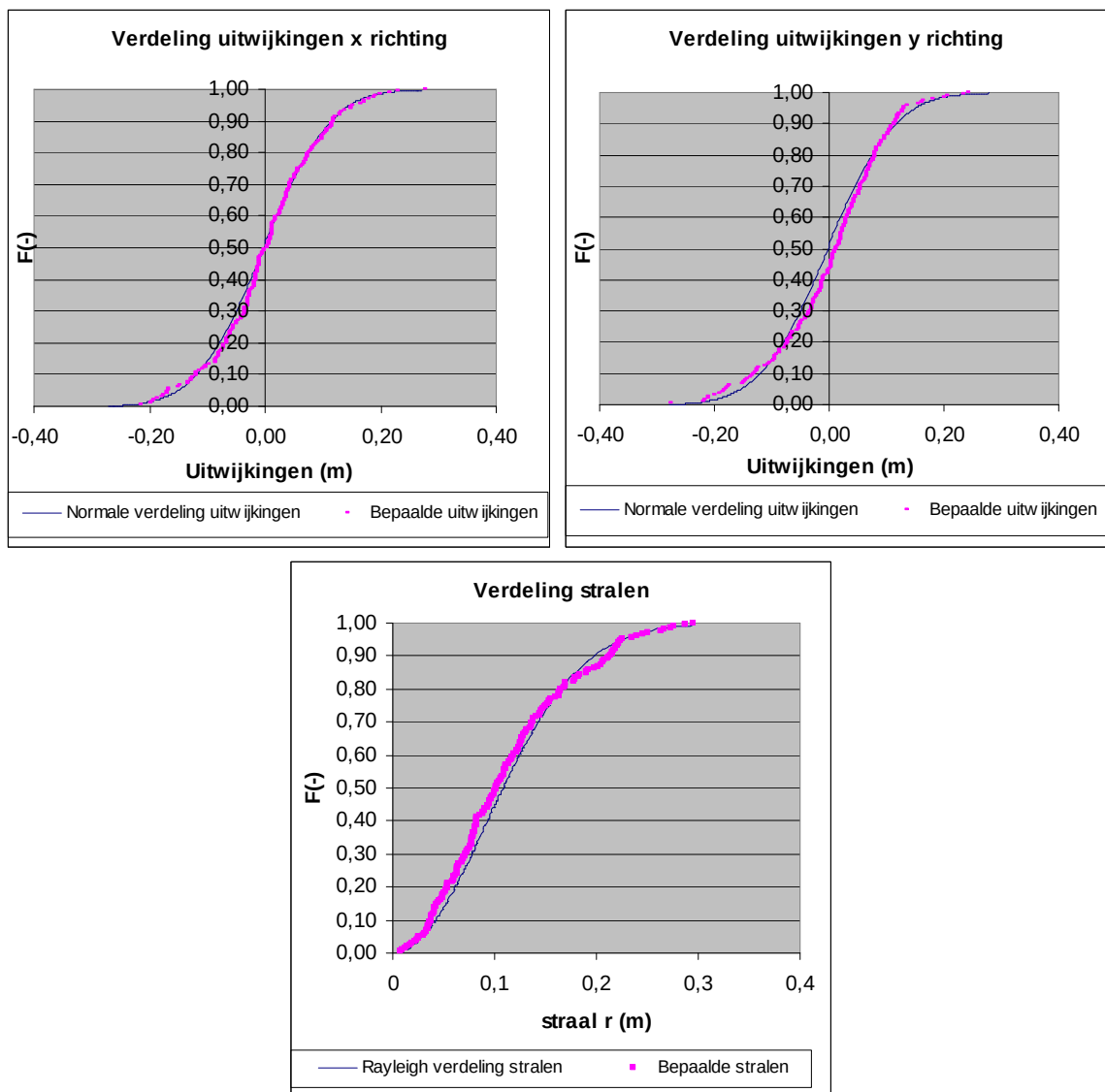
Bijlage H: Verdelingen uitwijkingen individueel gestorte stenen



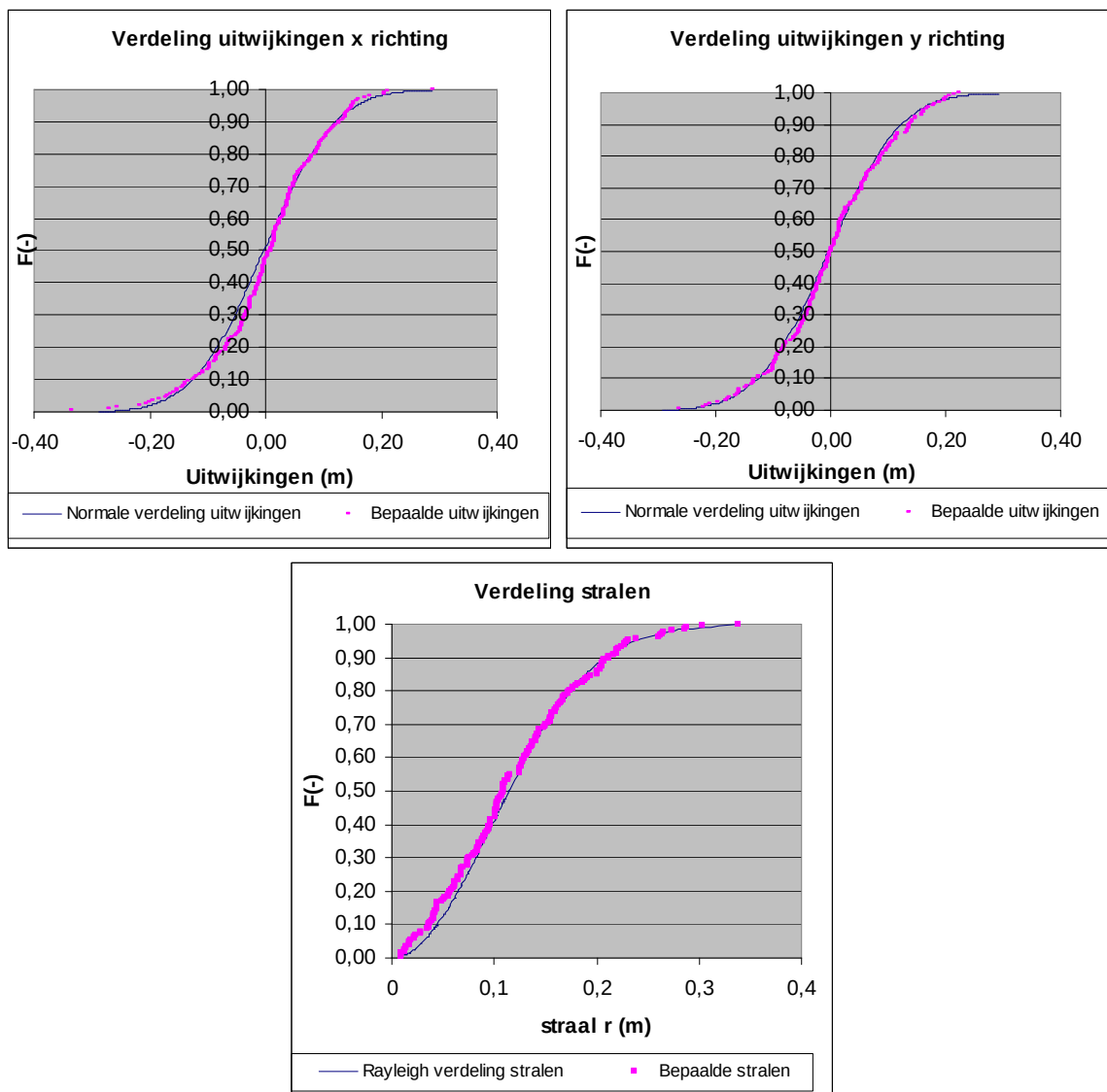
figuur H-1 Serie1: 0 m/s



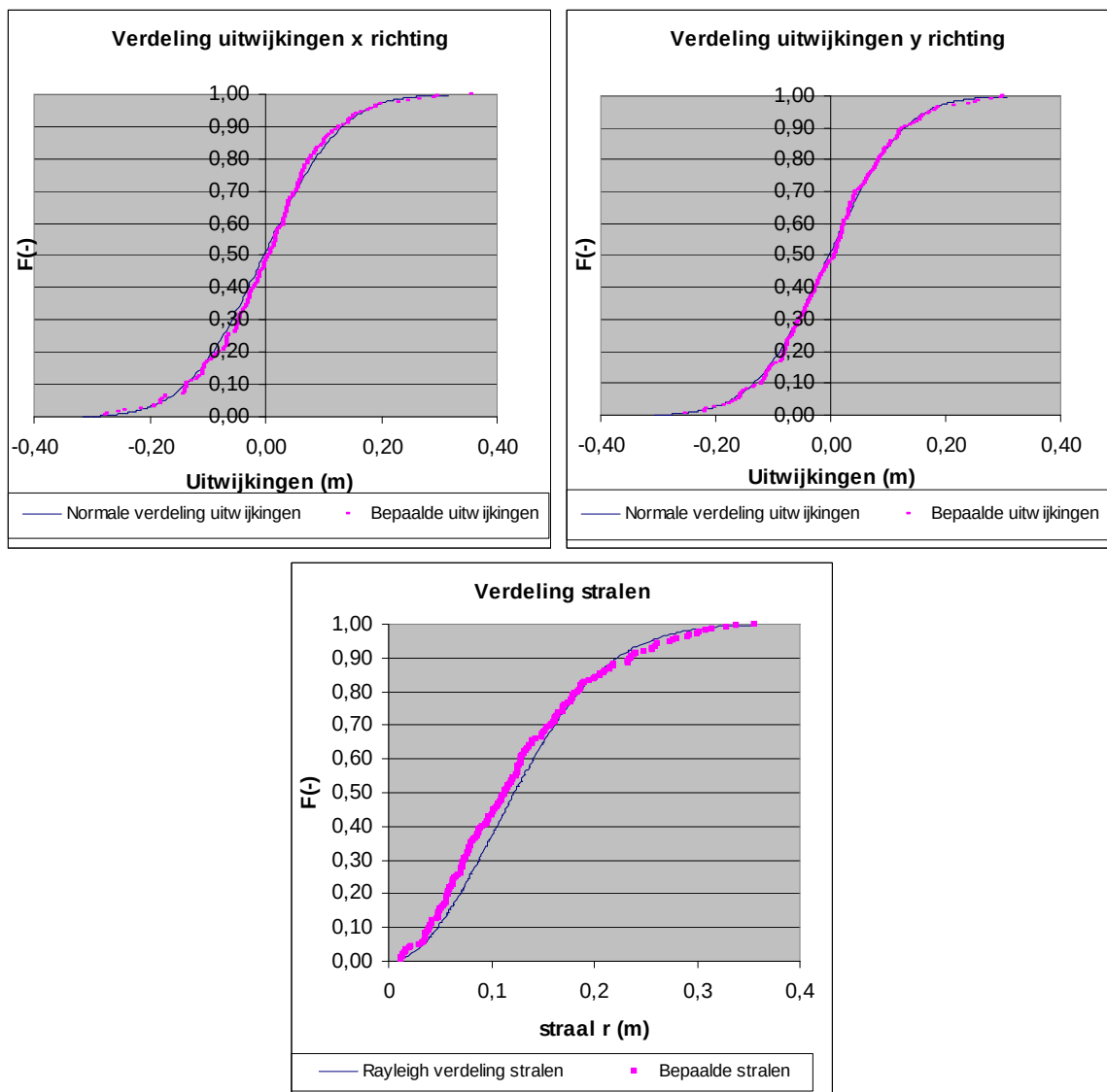
figuur H-2 Serie 2: 0 m/s



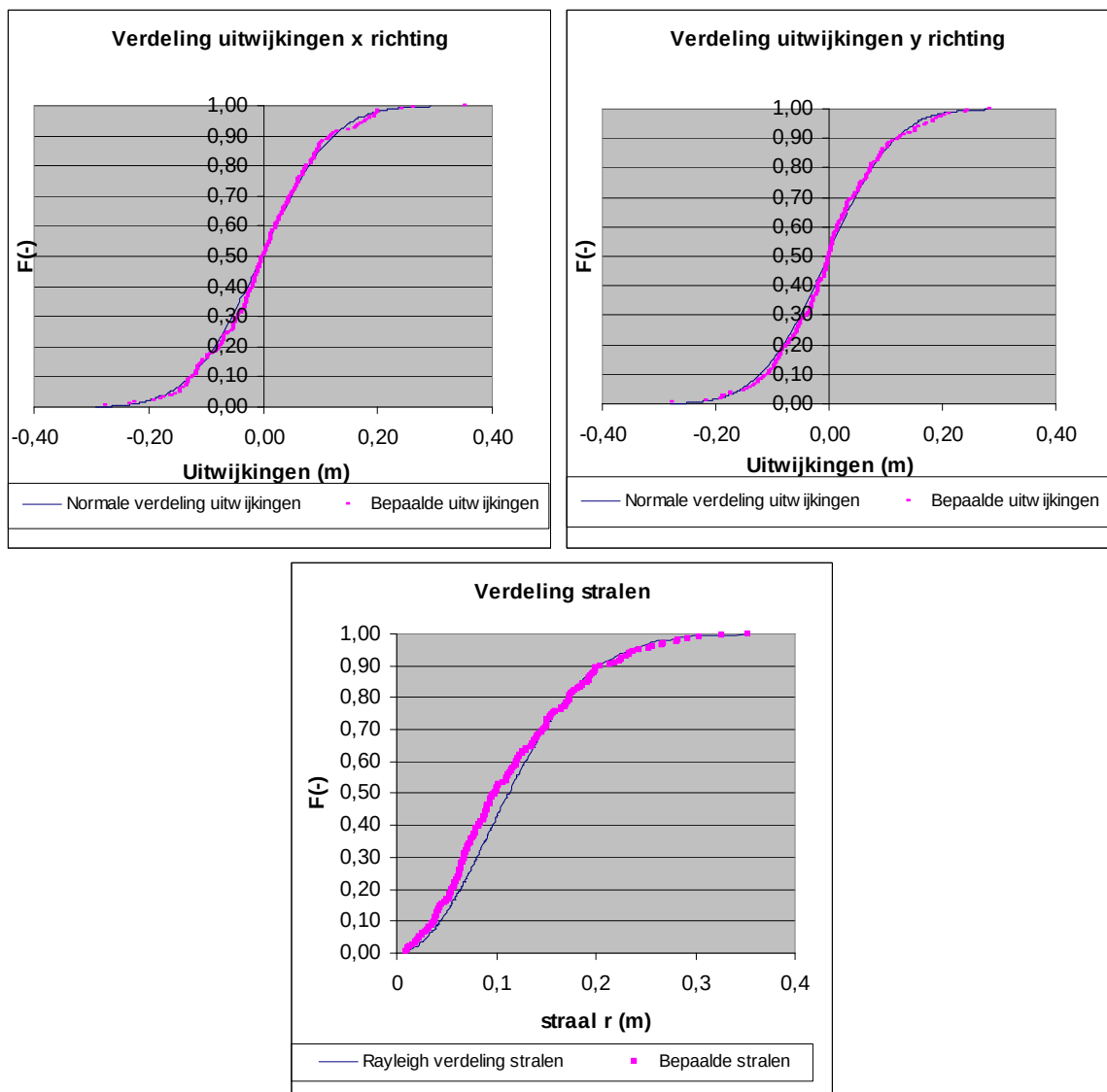
figuur H-3 Serie 1: 0,10 m/s



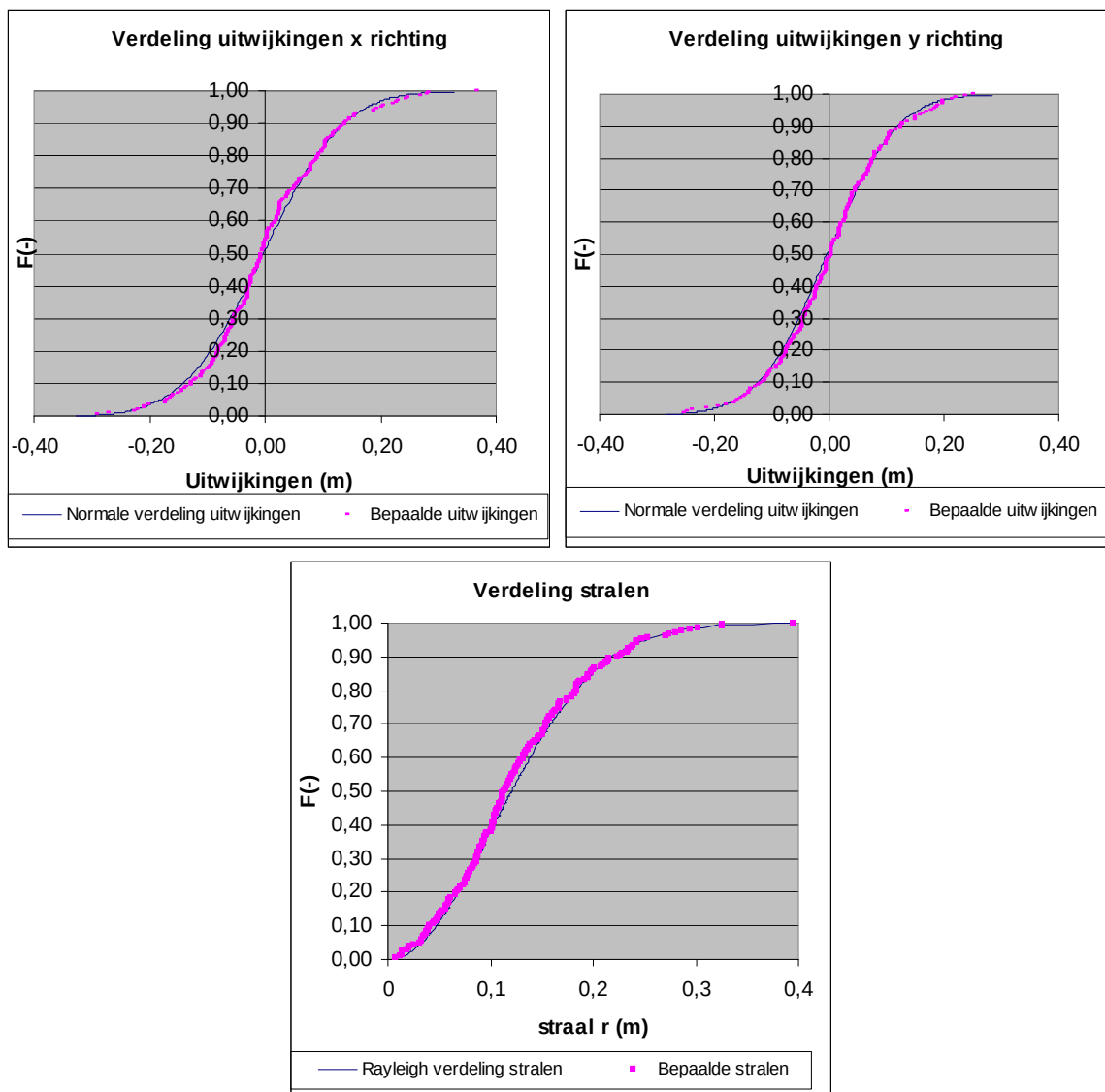
figuur H-4 Serie 2: 0,10 m/s



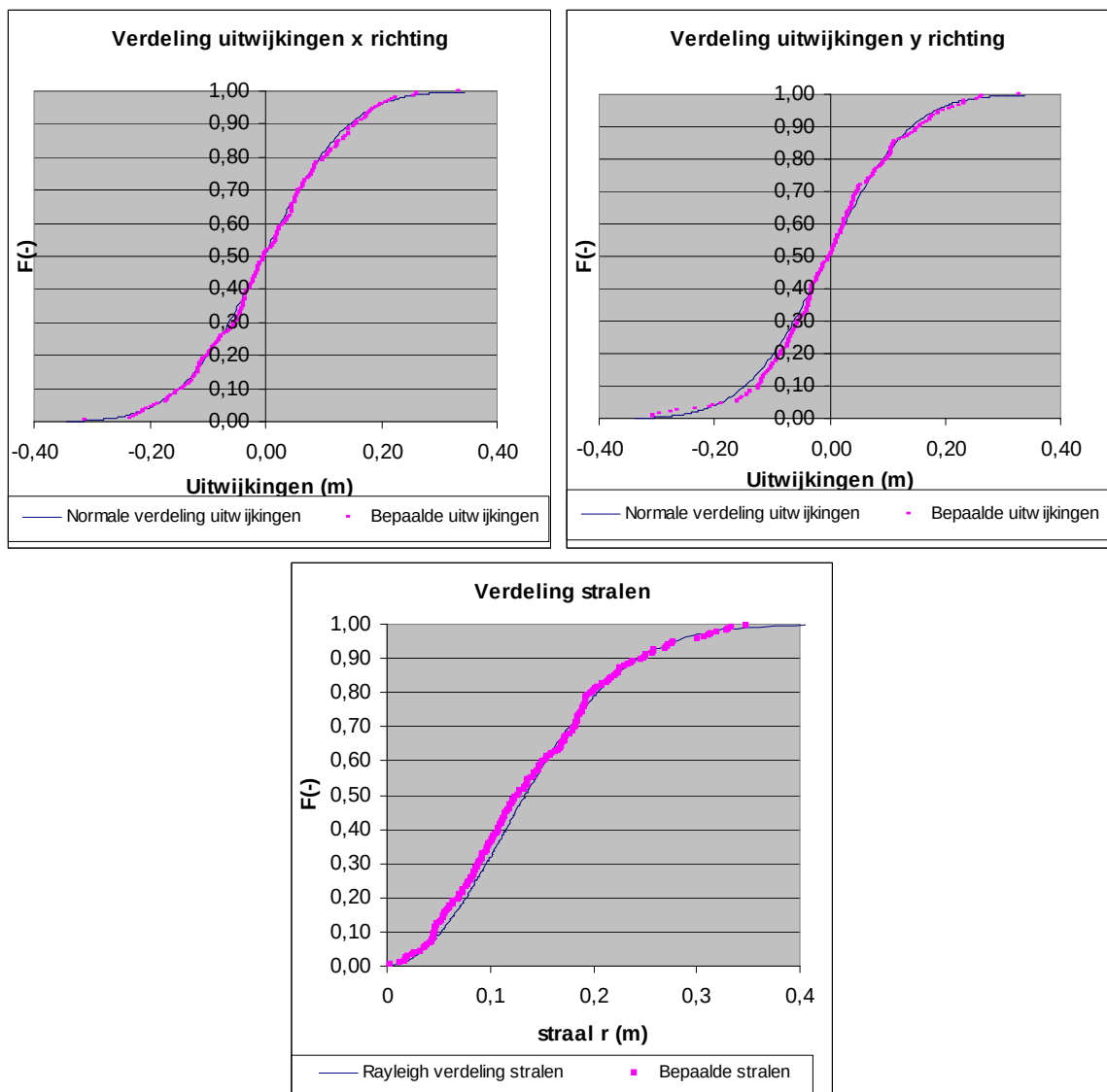
figuur H-5 Serie 1: 0,22 m/s



figuur H-6 Serie 2: 0,22 m/s



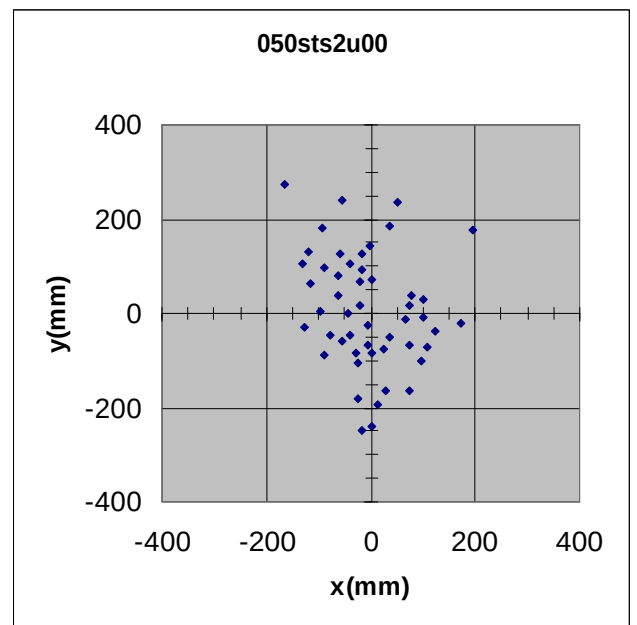
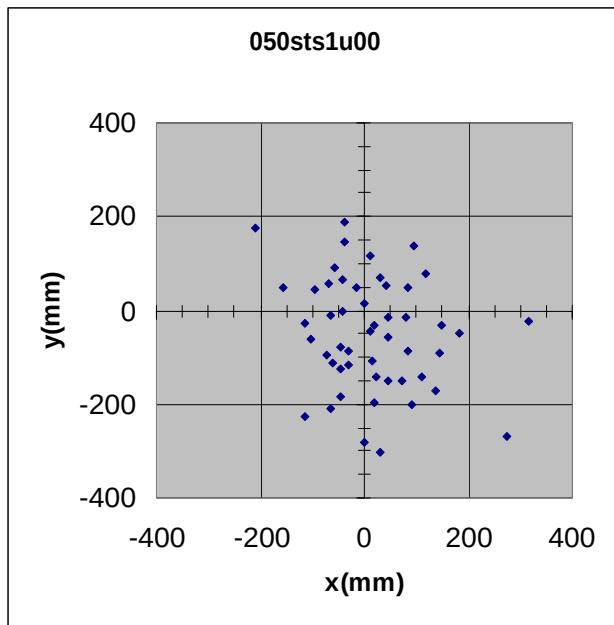
figuur H-7 Serie 1: 0,40 m/s



figuur H-8 Serie 2: 0,40 m/s

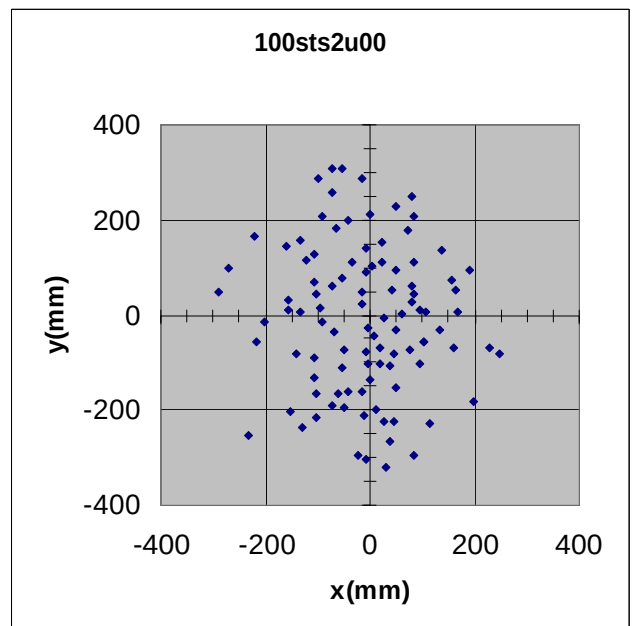
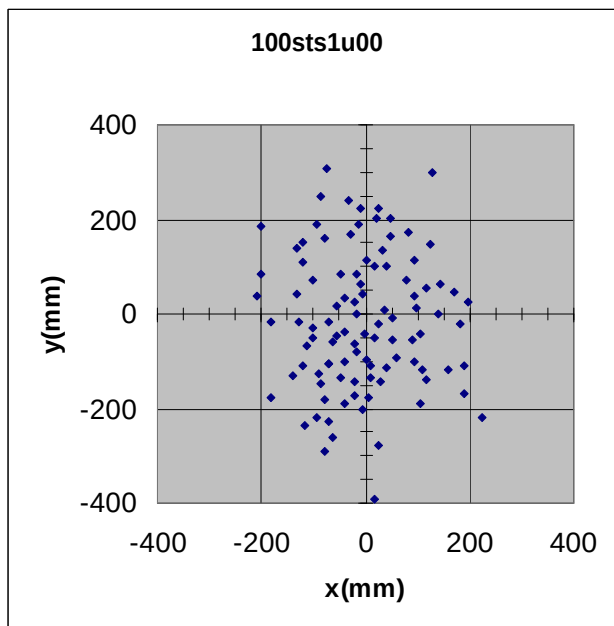
Bijlage I: Bovenanzichten groepsstorten zonder stroming

Bijlage I-1: Groepsstorten zonder stroming 50 stuks



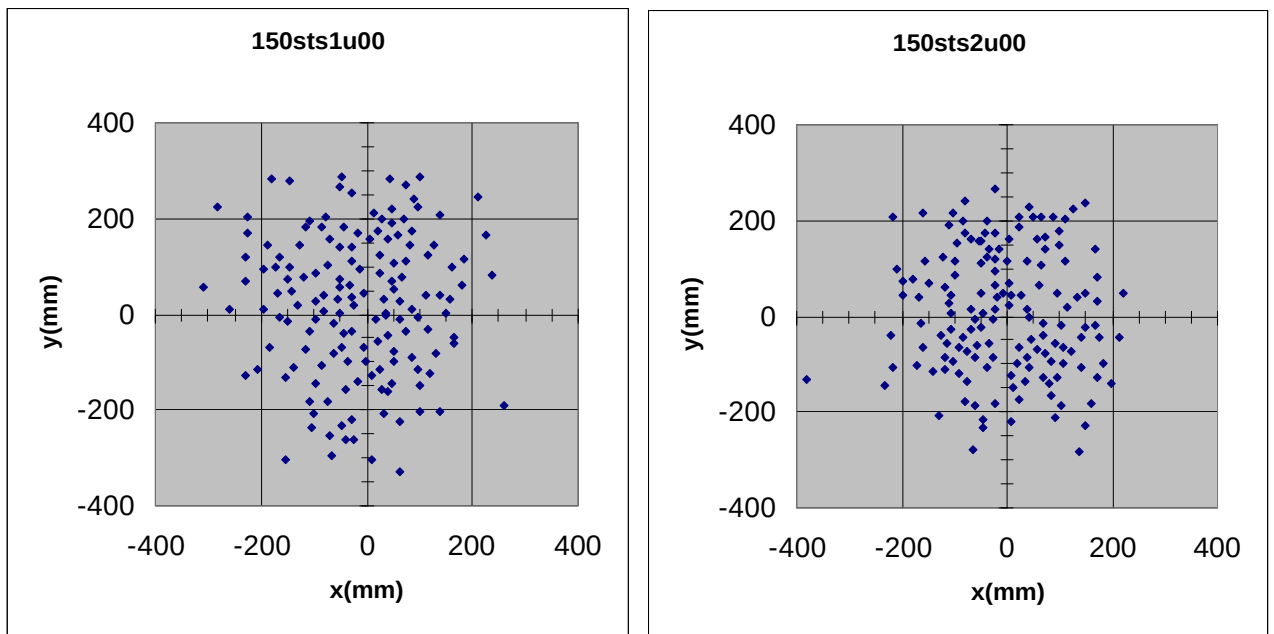
figuur I-1 Groepsstorten zonder stroming 50 stuks

Bijlage I-2: Groepsstorten zonder stroming 100 stuks



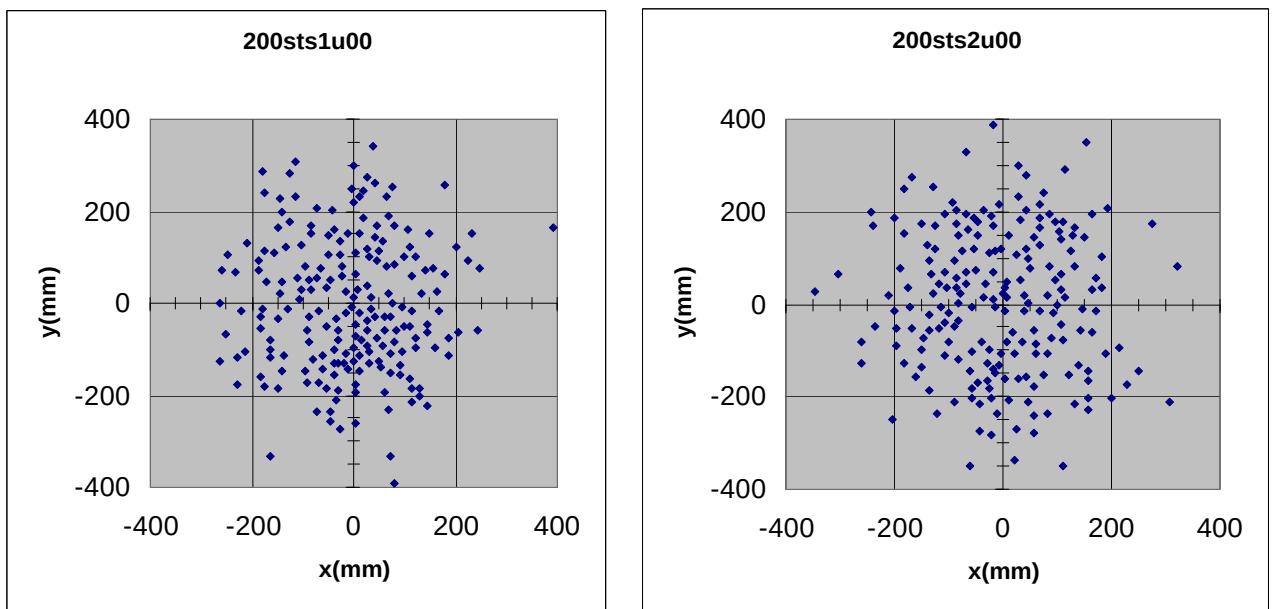
figuur I-2 Groepsstorten zonder stroming 100 stuks

Bijlage I-3: Groepsstorten zonder stroming 150 stuks



figuur I-3 Groepsstorten zonder stroming 150 stuks

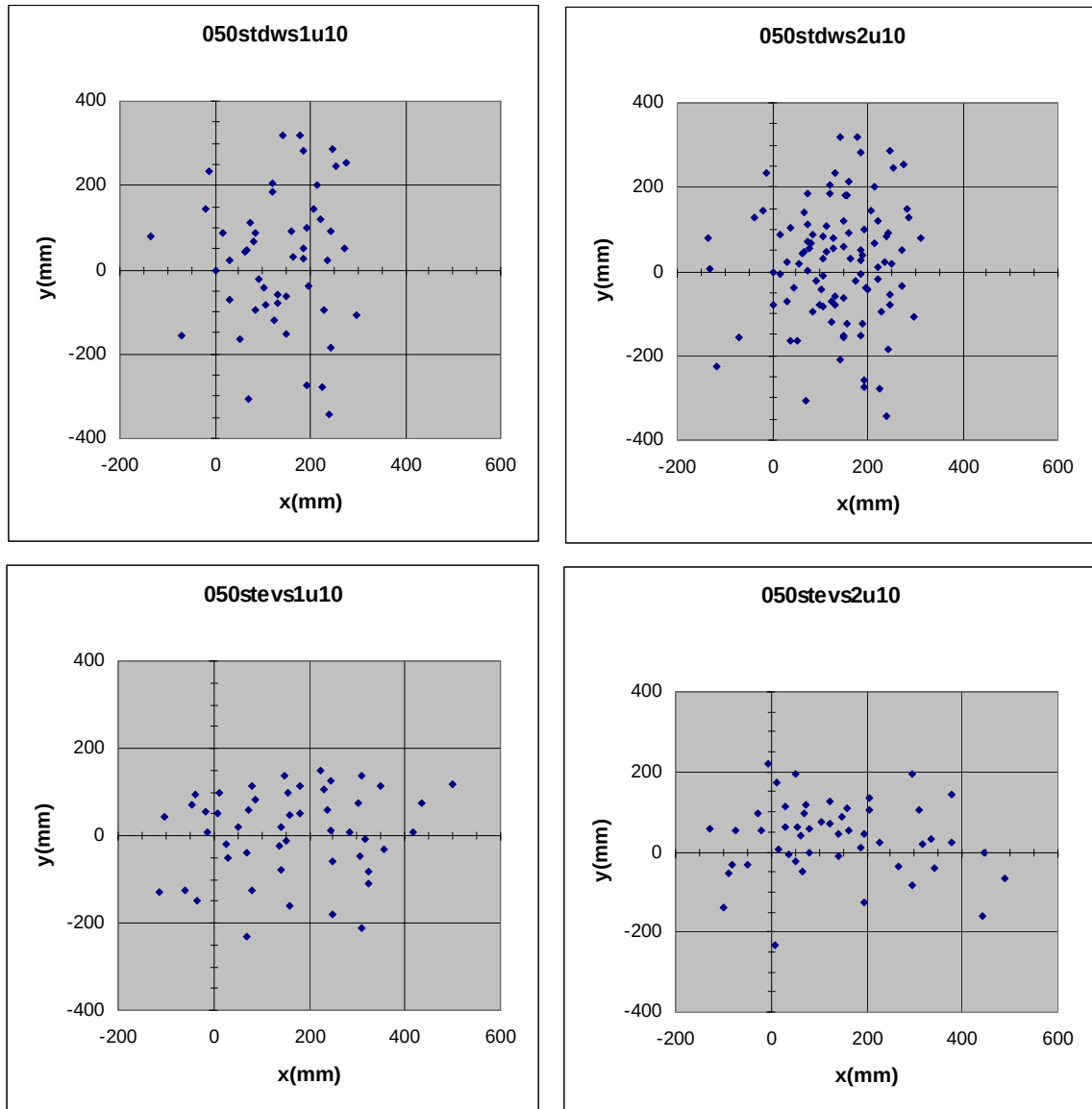
Bijlage I-4: Groepsstorten zonder stroming 200 stuks



figuur I-4 Groepsstorten zonder stroming 200 stuks

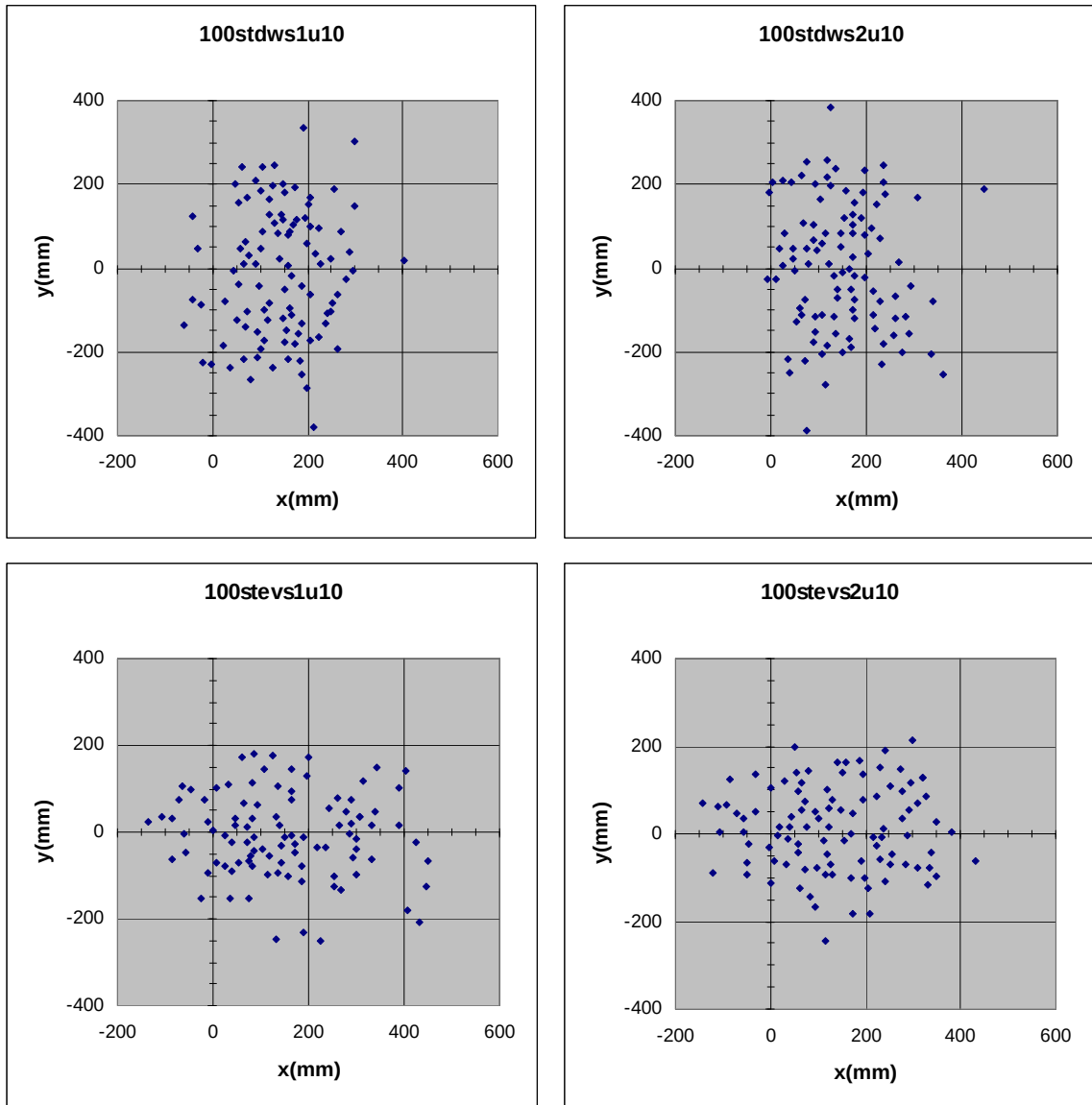
Bijlage J: Bovenanzichten groepsstorten met 0,10 m/s

Bijlage J-1: Groepsstorten 50 stuks met 0,10 m/s



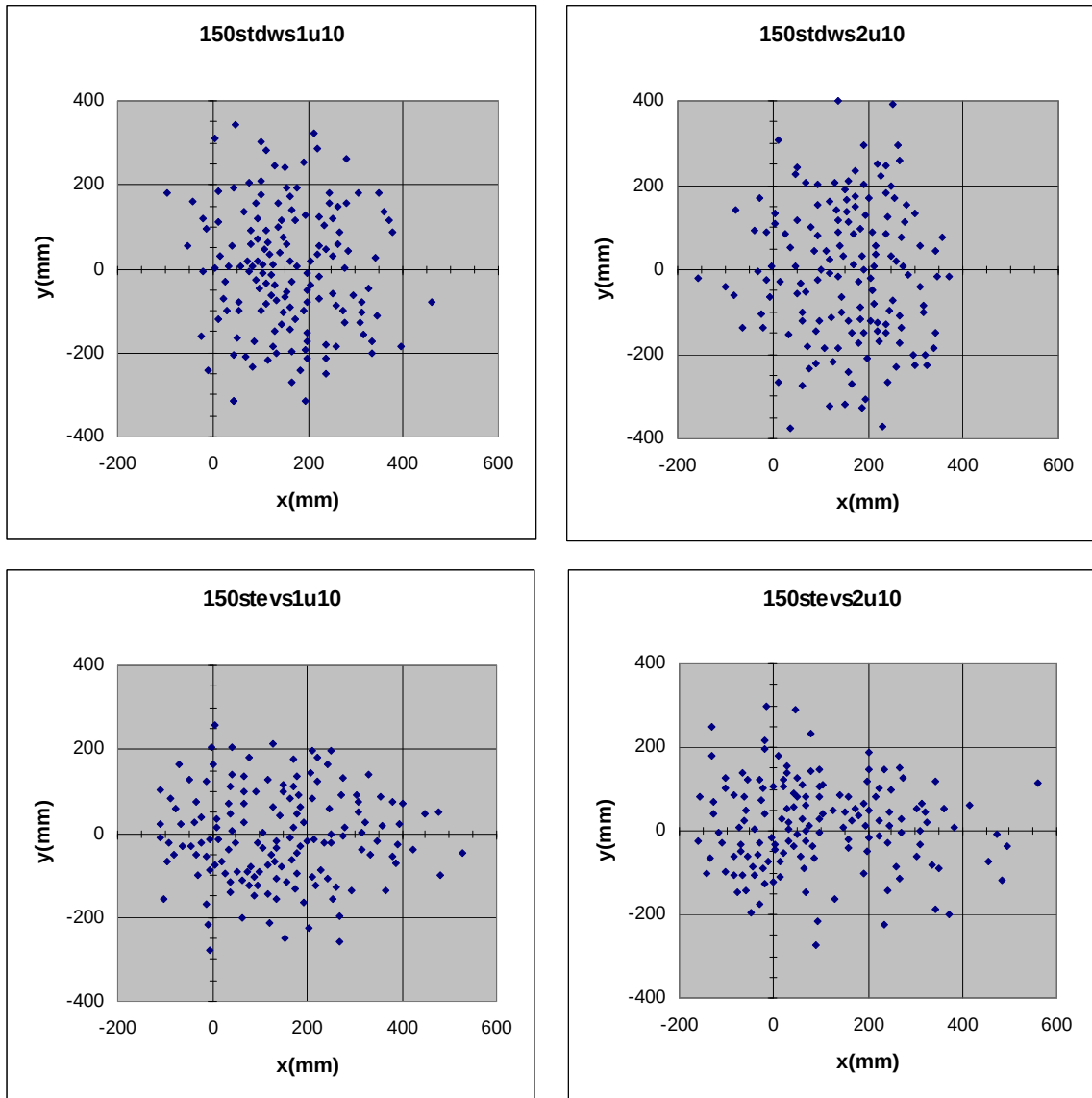
figuur J-1 Groepsstorten 50 stuks met 0,10 m/s

Bijlage J-2: Groepsstorten 100 stuks met 0,10 m/s



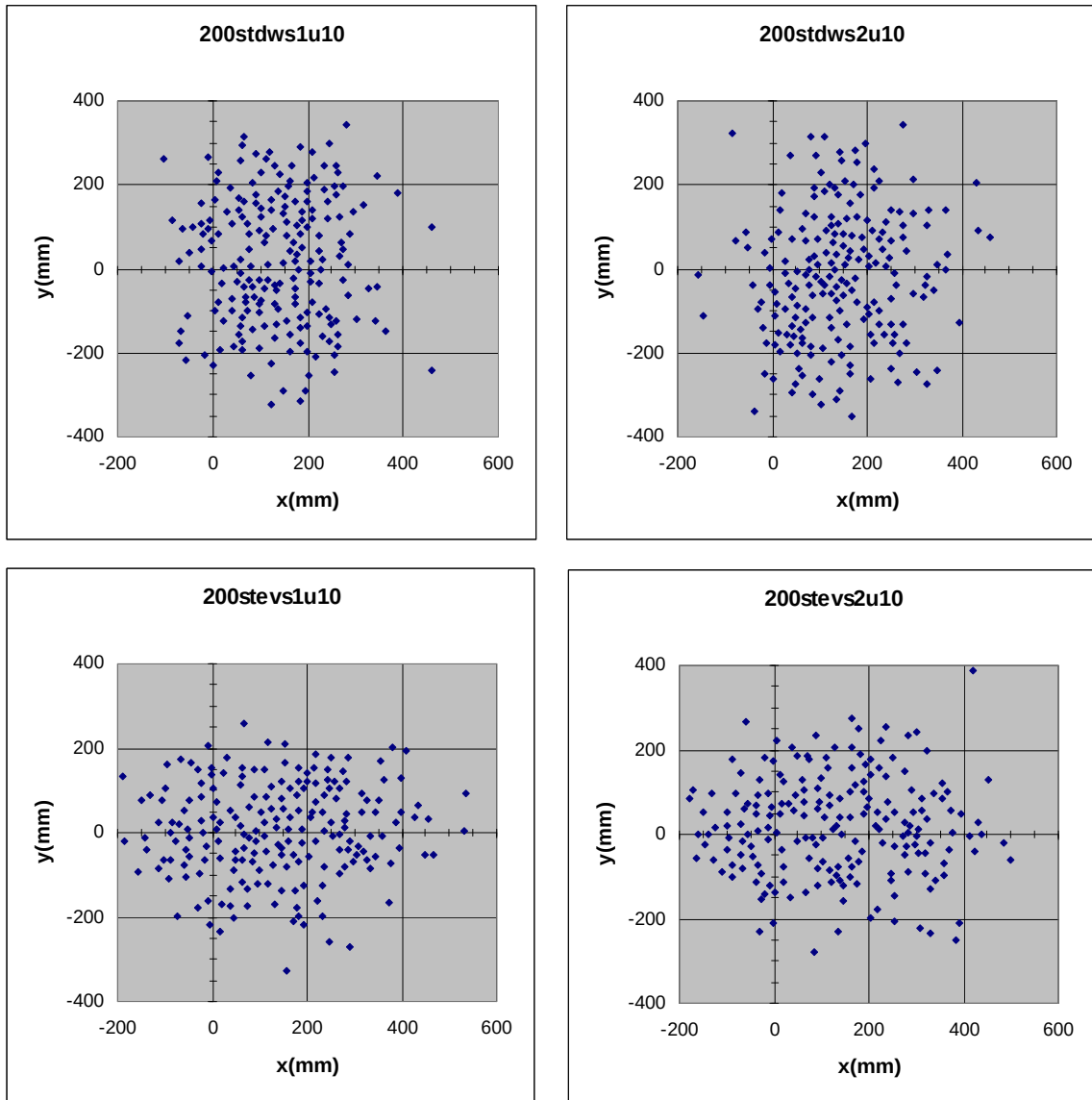
figuur J-2 Groepsstorten 100 stuks met 0,10 m/s

Bijlage J-3: Groepsstorten 150 stuks met 0,10 m/s



figuur J-3 Groepsstorten 150 stuks met 0,10 m/s

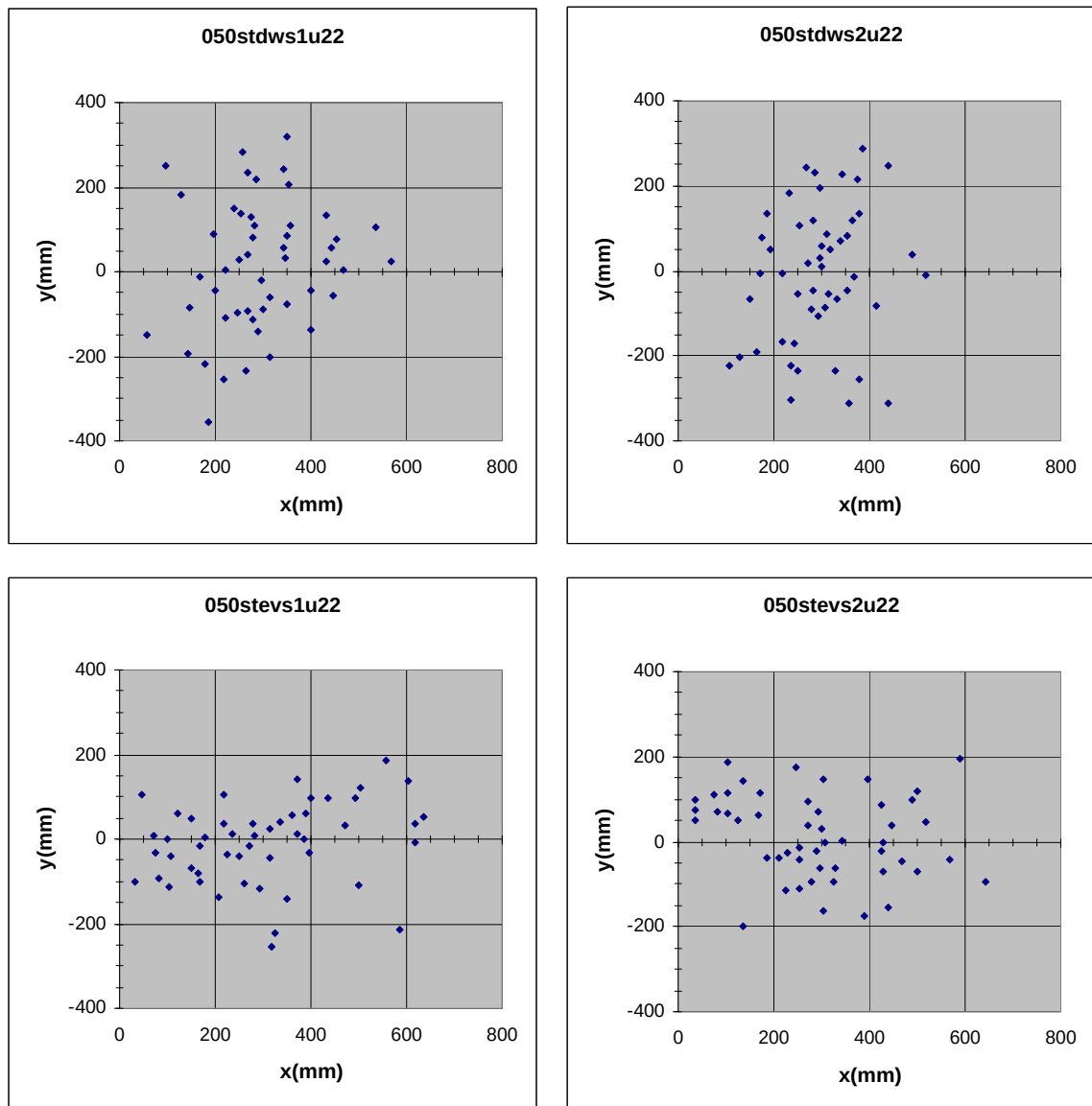
Bijlage J-4: Groepsstorten 200 stuks met 0,10 m/s



figuur J-4 Groepsstorten 200 stuks met 0,10 m/s

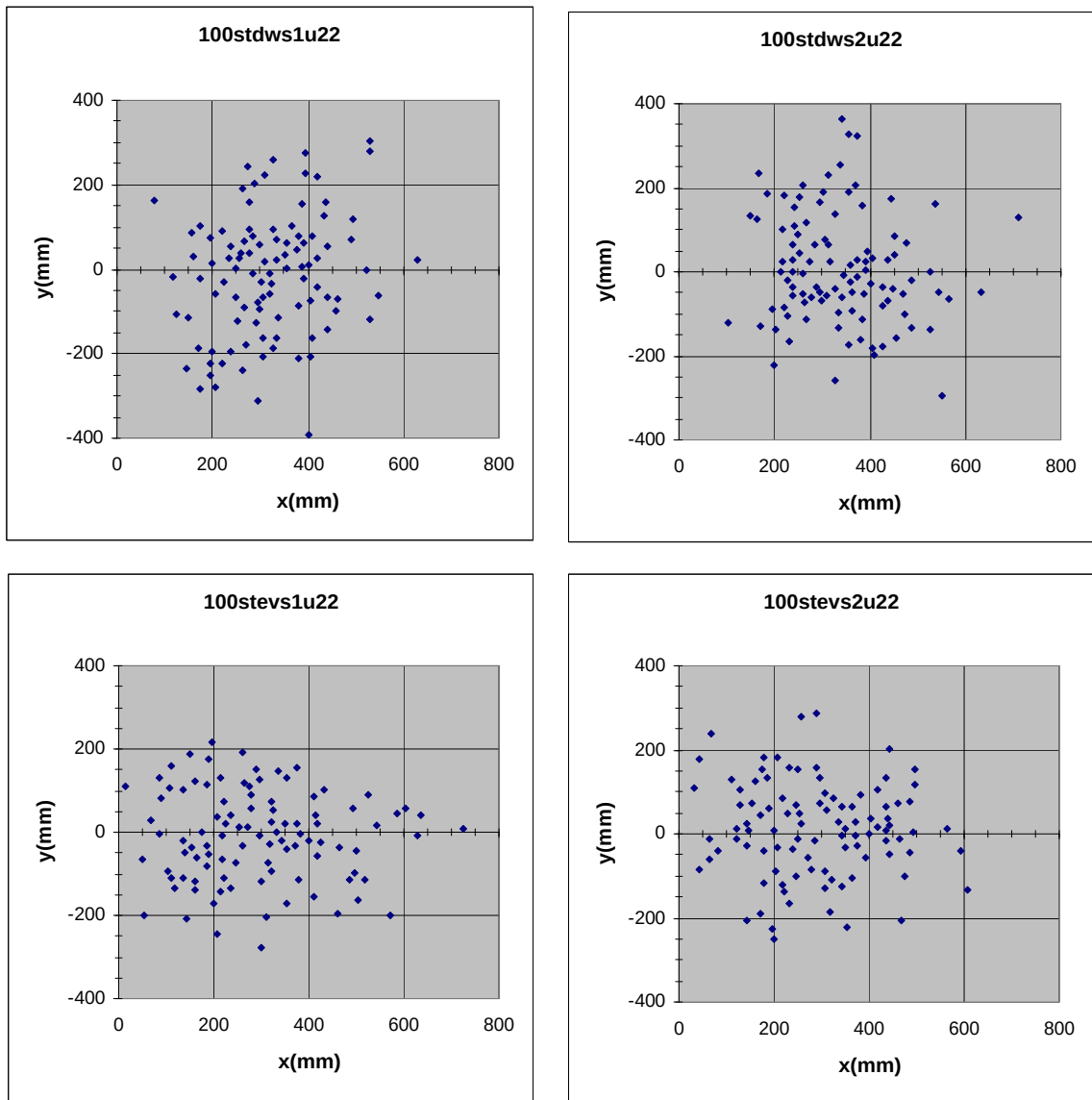
Bijlage K: Bovenanzichten groepsstorten met 0,22 m/s

Bijlage K-1: Groepsstorten 50 stuks met 0,22 m/s



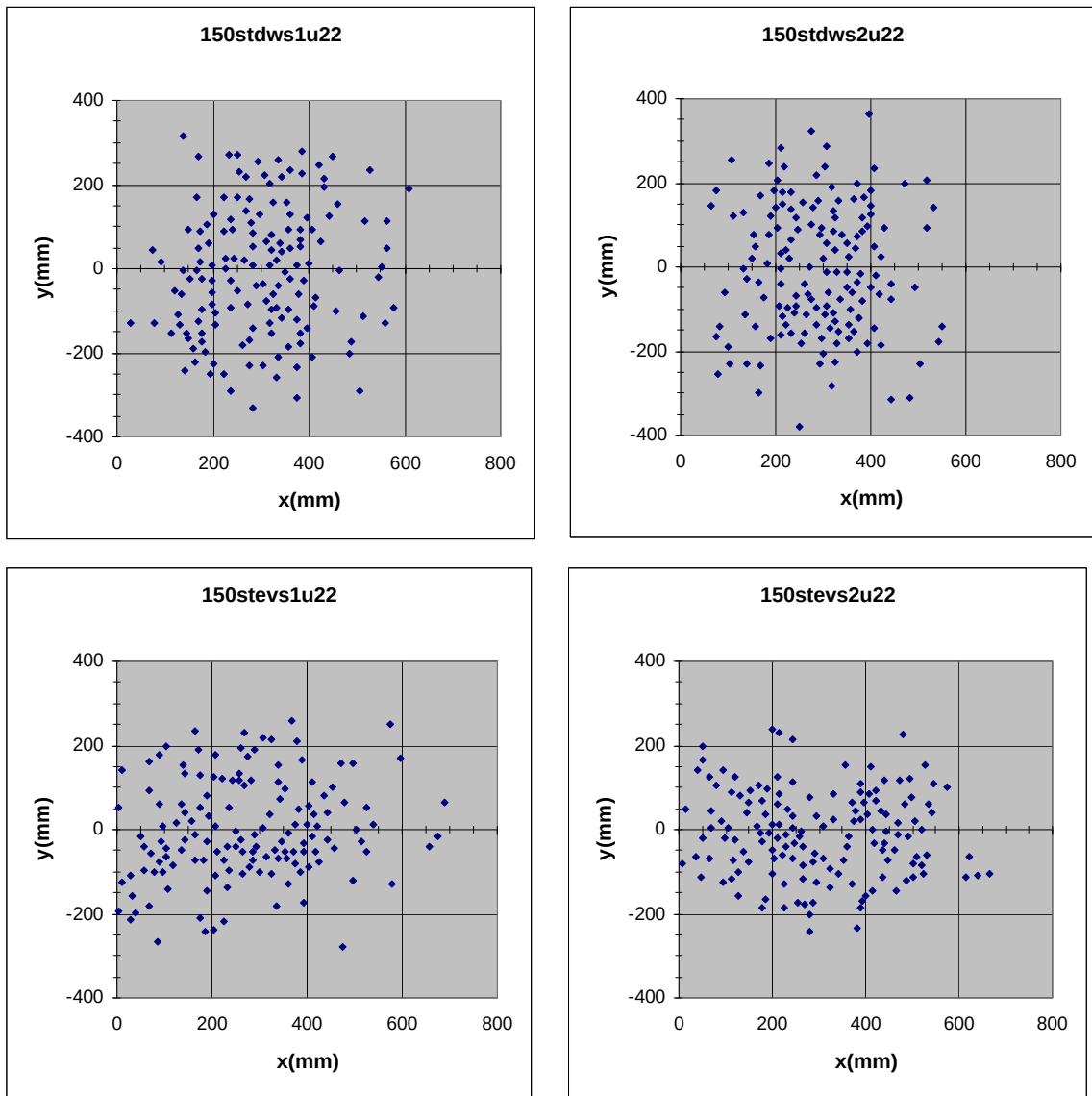
figuur K-1 Groepsstorten 50 stuks met 0,22 m/s

Bijlage K-2: Groepsstorten 100 stuks met 0,22 m/s



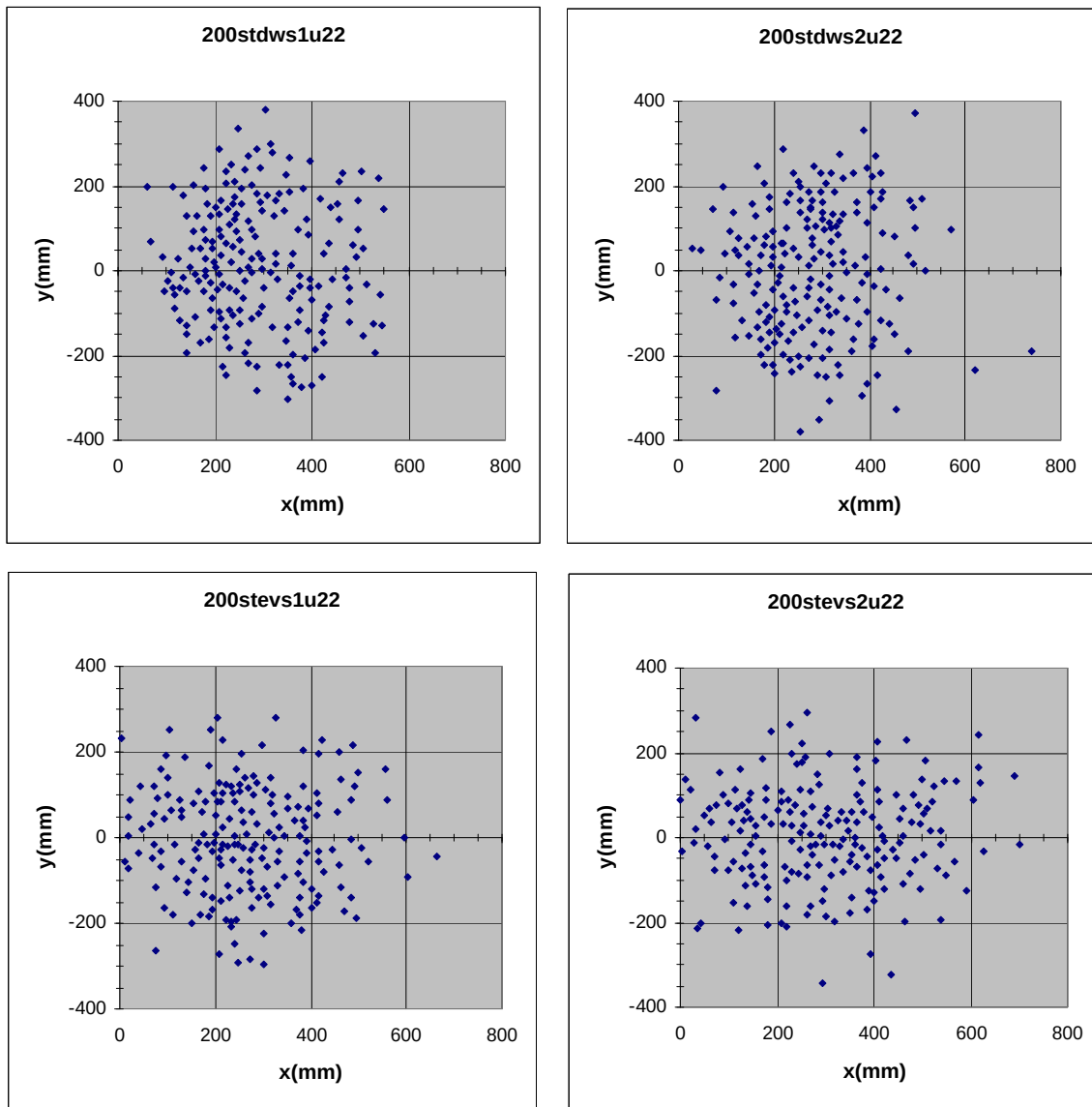
figuur K-2 Groepsstorten 100 stuks met 0,22 m/s

Bijlage K-3: Groepsstorten 150 stuks met 0,22 m/s



figuur K-3 Groepsstorten 150 stuks met 0,22 m/s

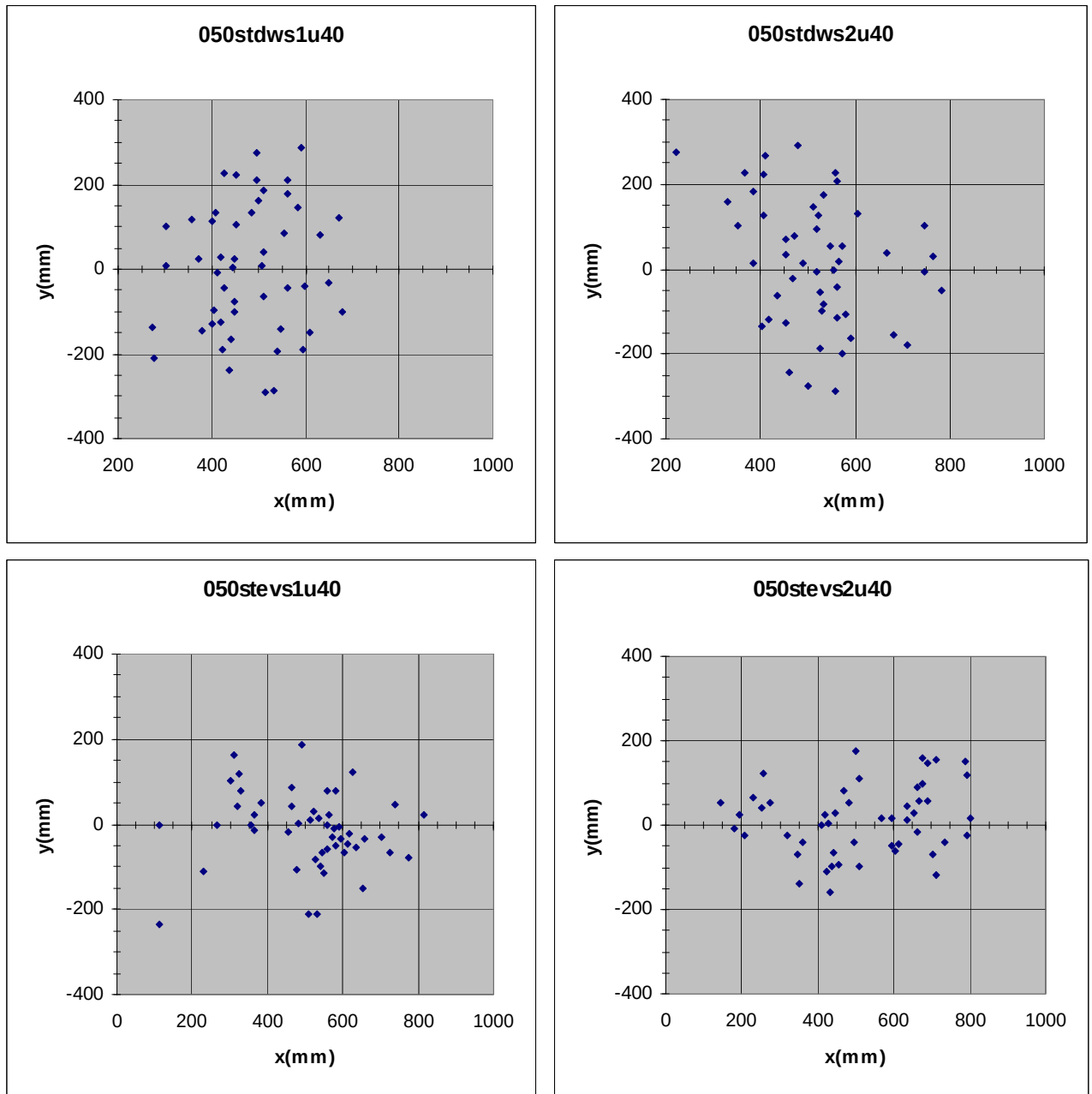
Bijlage K-4: Groepsstorten 200 stuks met 0,22 m/s



figuur K-4 Groepsstorten 200 stuks met 0,22 m/s

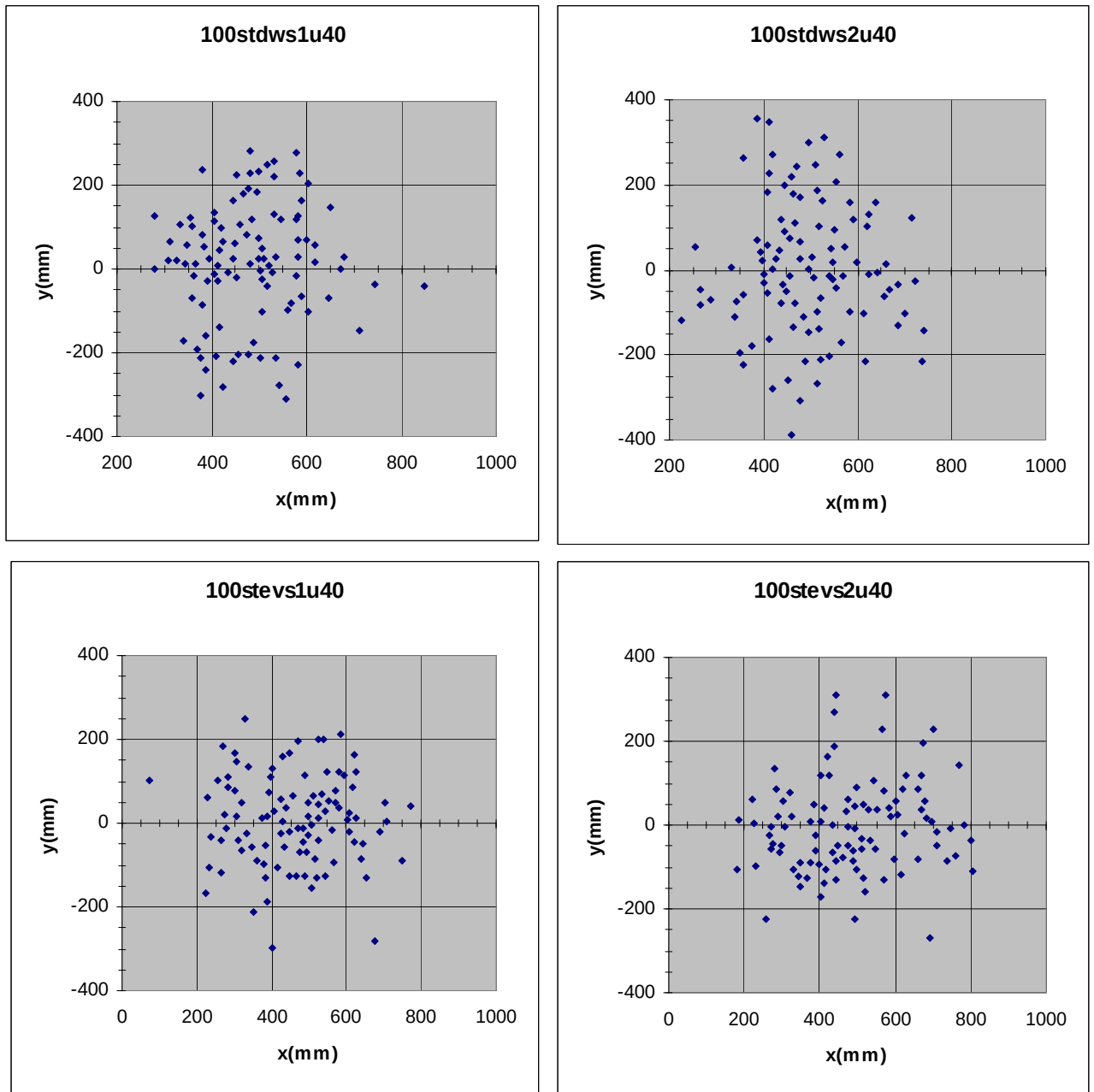
Bijlage L: Bovenanzichten groepsstorten met 0,40 m/s

Bijlage L-1: Groepsstorten 50 stuks met 0,40 m/s



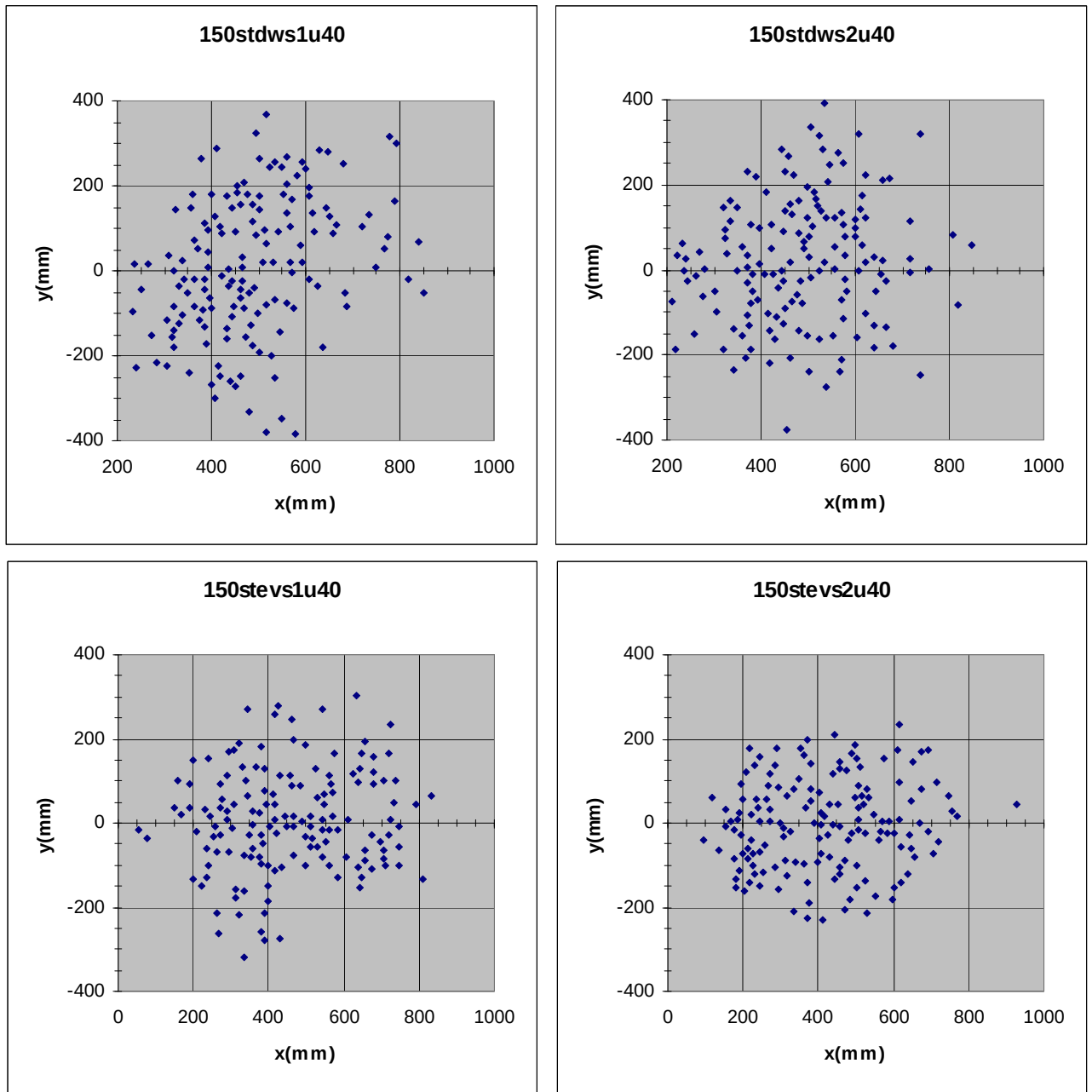
figuur L-1 Groepsstorten 50 stuks met 0,40 m/s

Bijlage L-2: Groepsstorten 100 stuks met 0,40 m/s



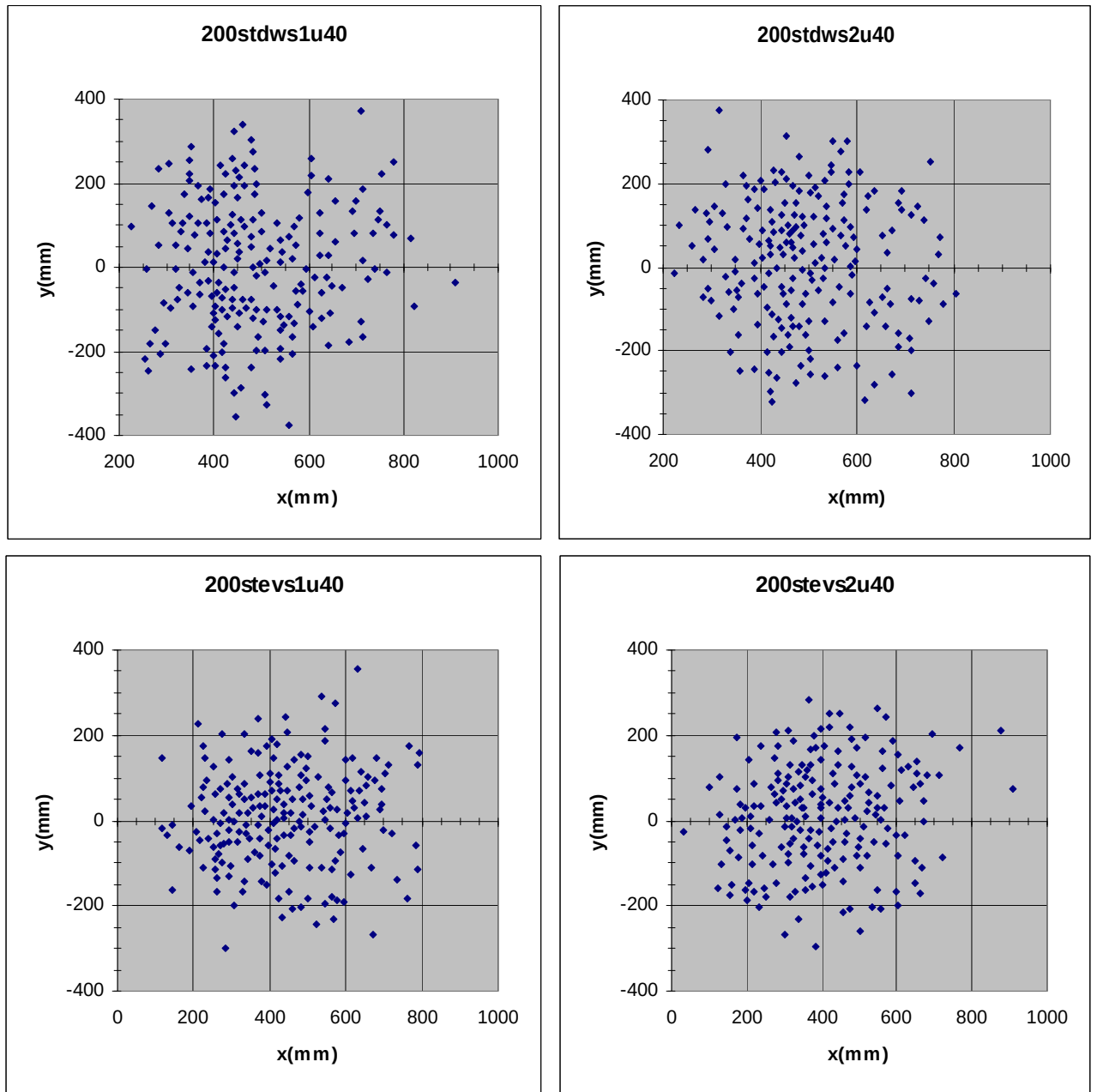
figuur L-2 Groepsstorten 100 stuks met 0,40 m/s

Bijlage L-3: Groepsstorten 150 stuks met 0,40 m/s



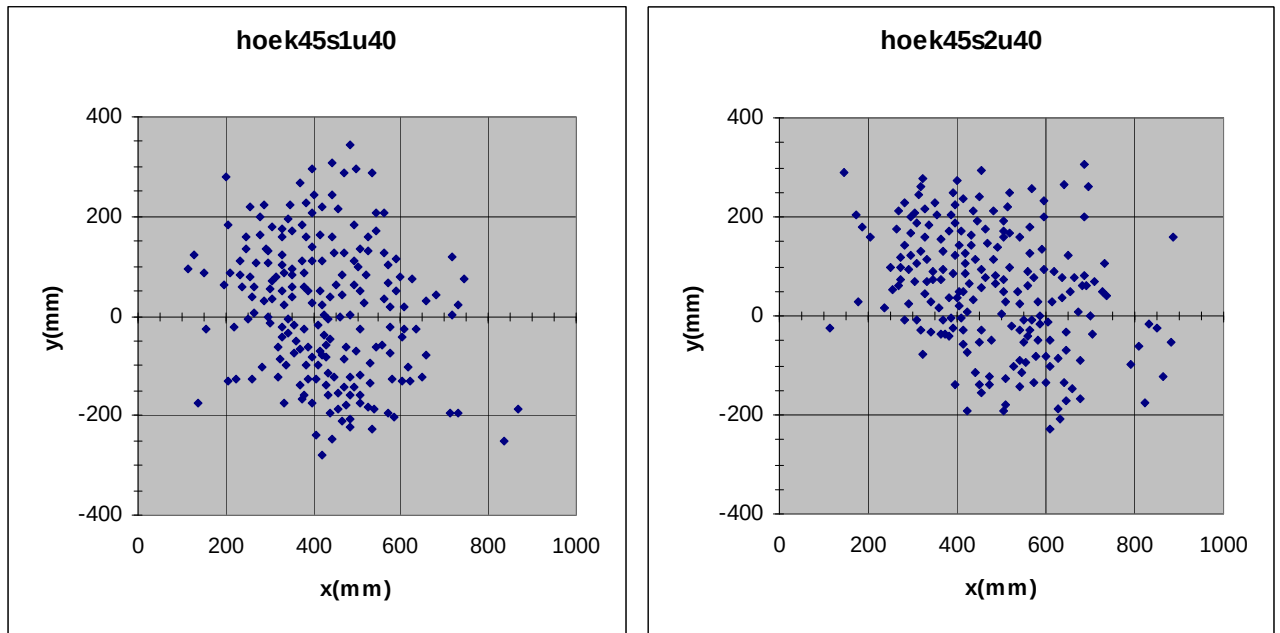
figuur L-3 Groepsstorten 150 stuks met 0,40 m/s

Bijlage L-4: Groepsstorten 200 stuks met 0,40 m/s



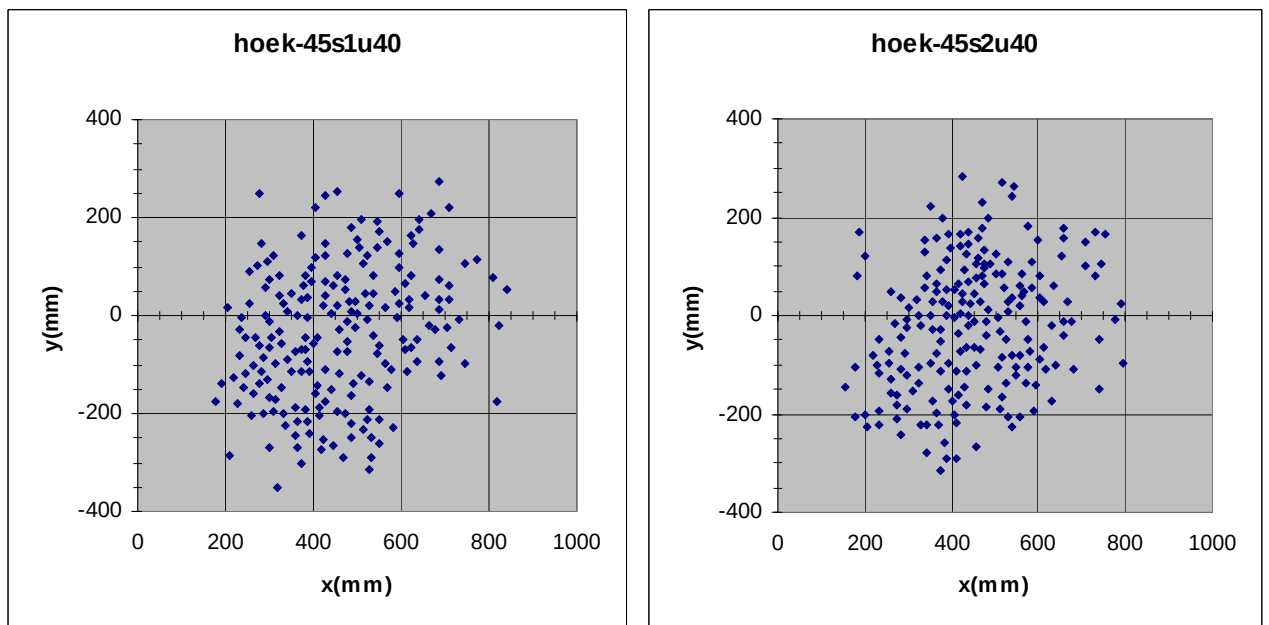
figuur L-4 Groepsstorten 200 stuks met 0,40 m/s

Bijlage L-5: Groepsstorten 200 stuks onder 45 graden met 0,40 m/s



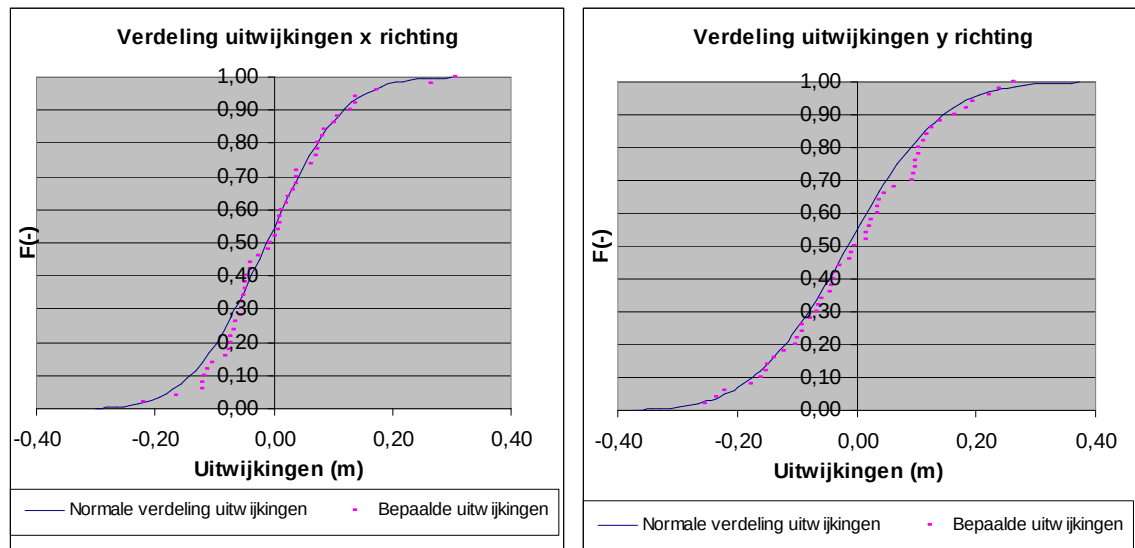
figuur L-5 Groepsstorten 200 stuks onder 45 graden met 0,40 m/s

Bijlage L-6: Groepsstorten 200 stuks onder -45 graden met 0,40 m/s

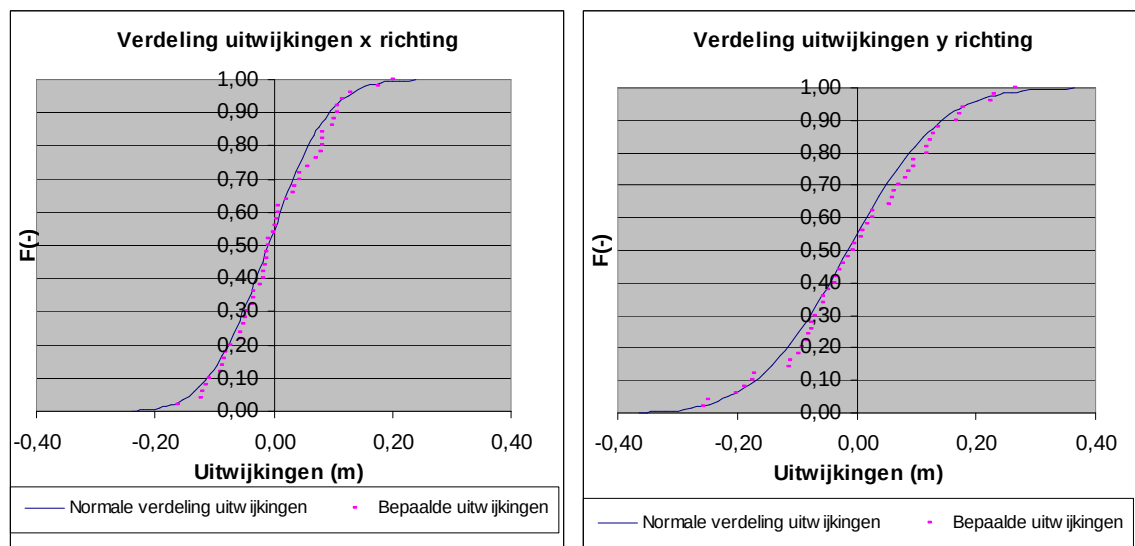


Bijlage M: verdeling uitwijkingen groepsstorten per stort

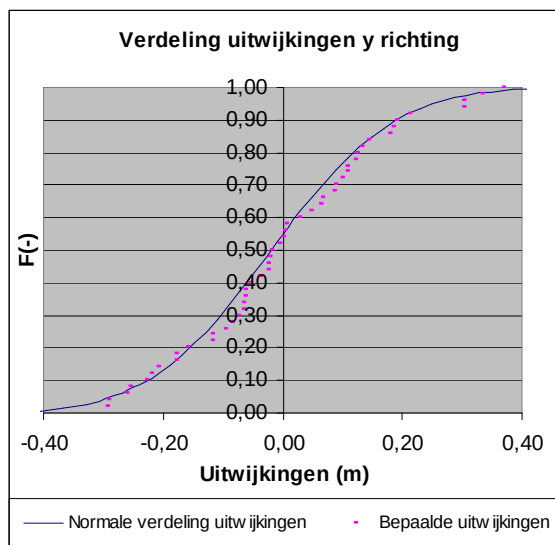
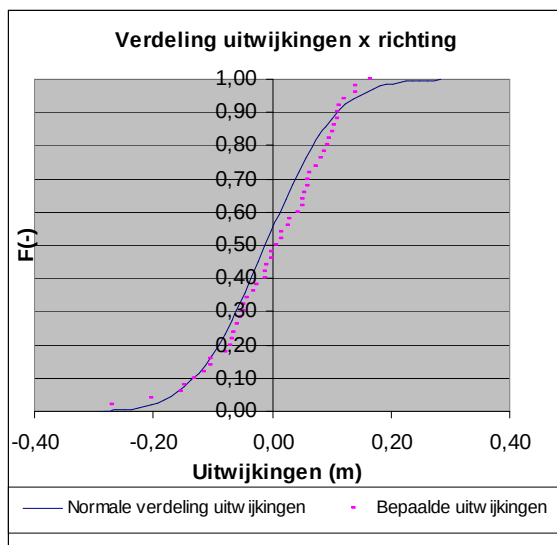
Bijlage M-1: 50 stuks tegelijk gestort



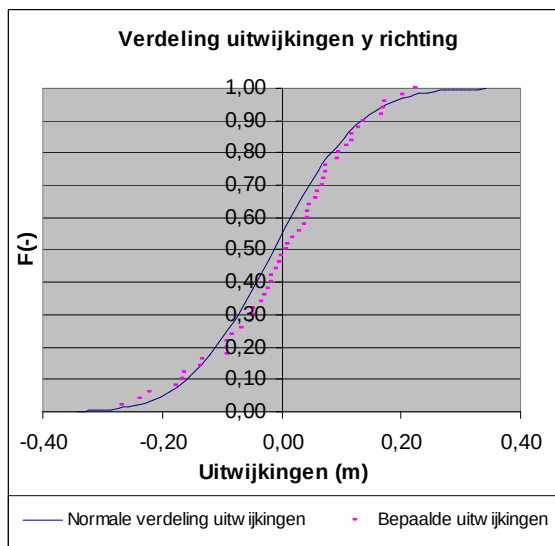
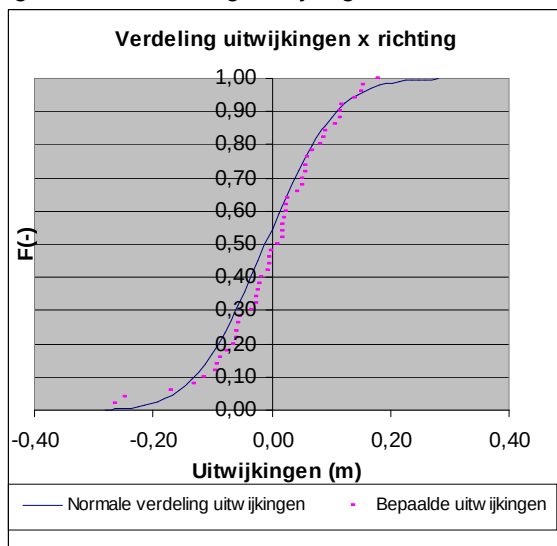
figuur M-1 Verdeling uitwijkingen 50sts1u00



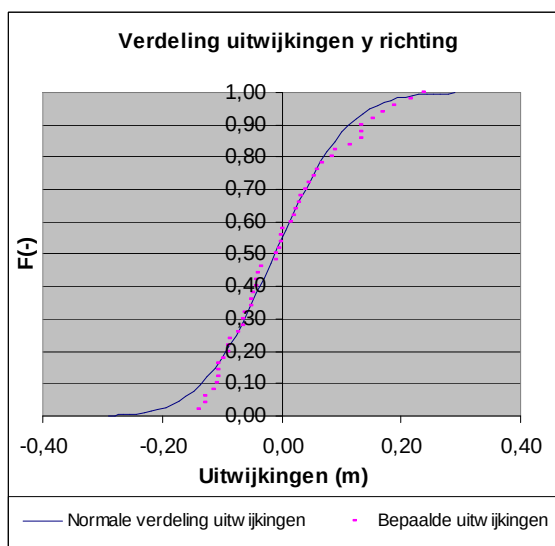
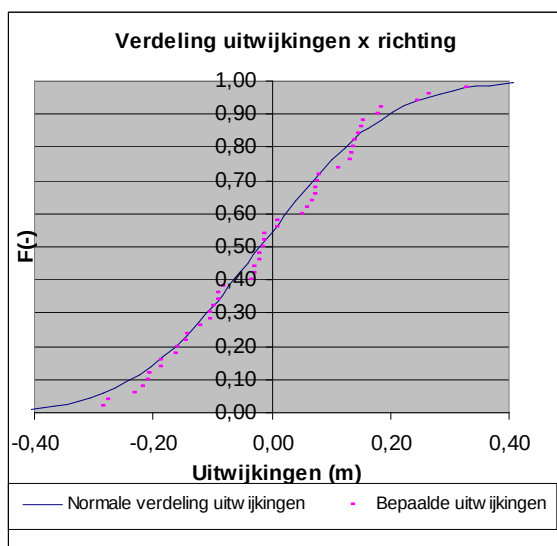
figuur M-2 Verdeling uitwijkingen 50sts2u00



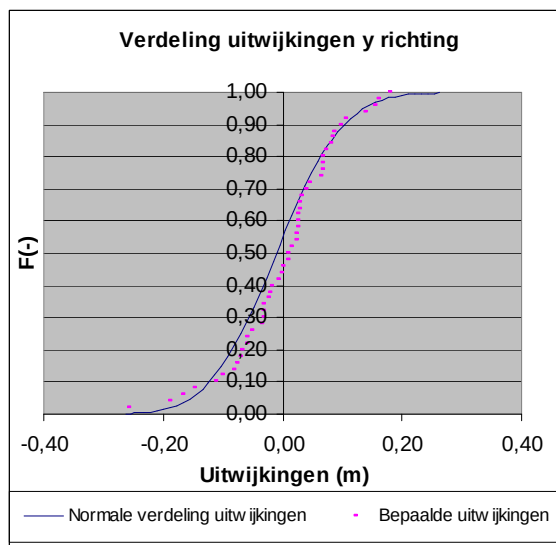
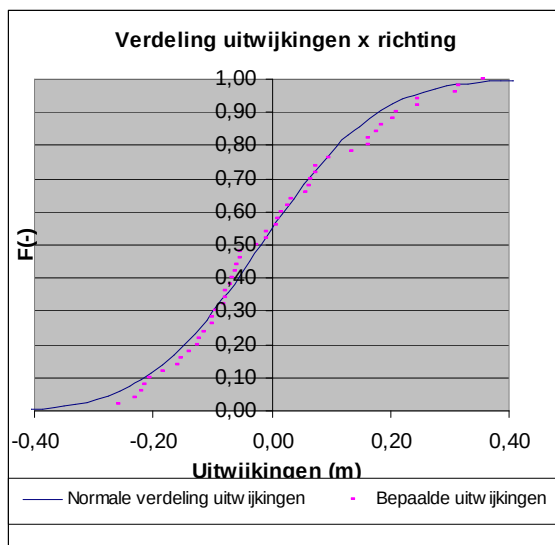
figuur M-3 Verdeling uitwijkingen 50stdws1u10



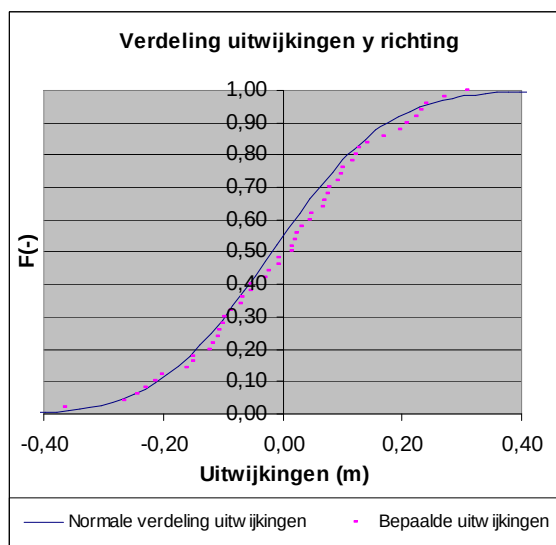
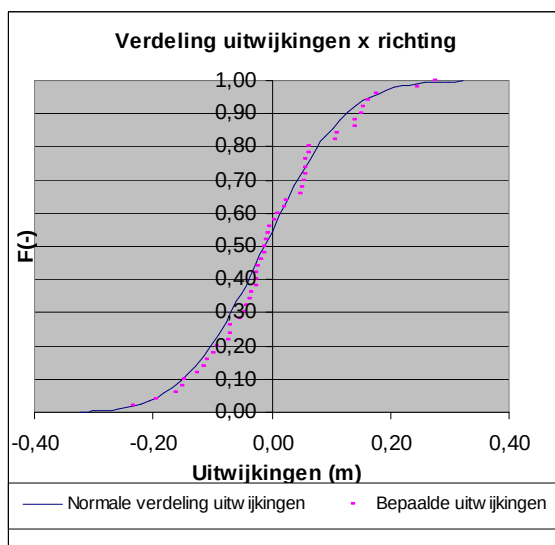
figuur M-4 Verdeling uitwijkingen 50dws2u10



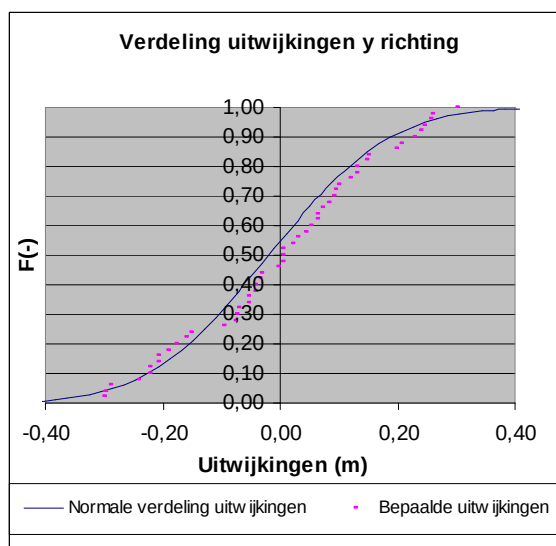
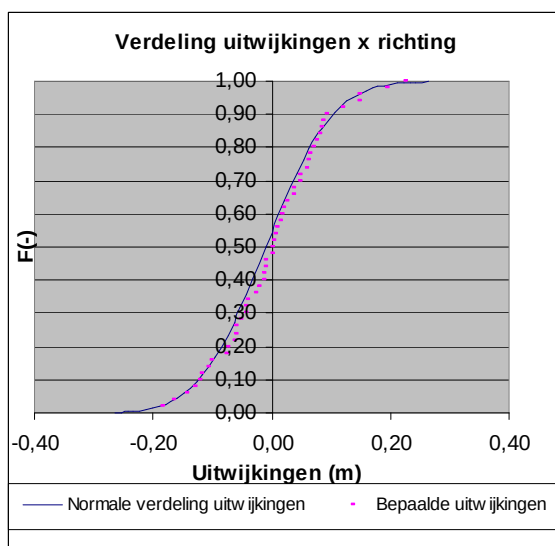
figuur M-5 Verdeling uitwijkingen 50stevs1u10



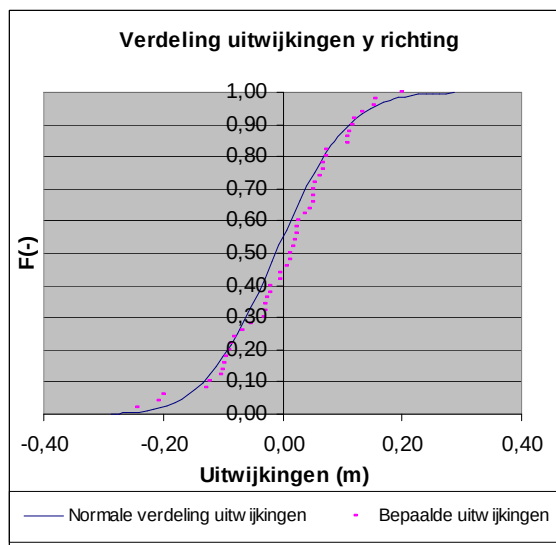
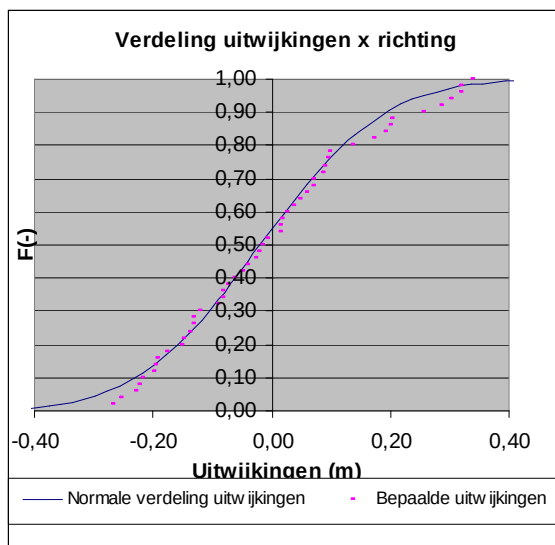
figuur M-6 Verdeling uitwijkingen 50stevs2u10



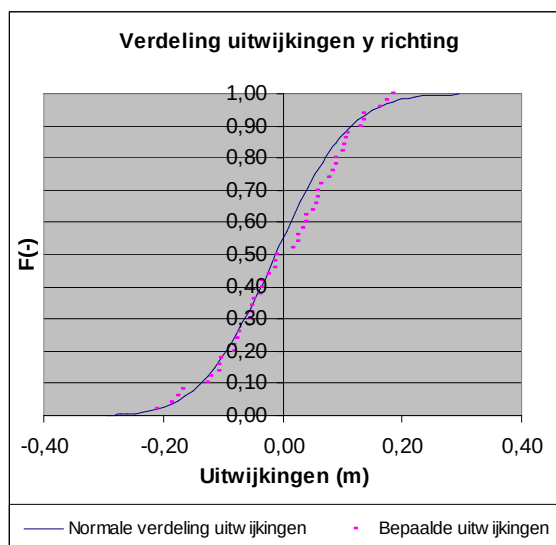
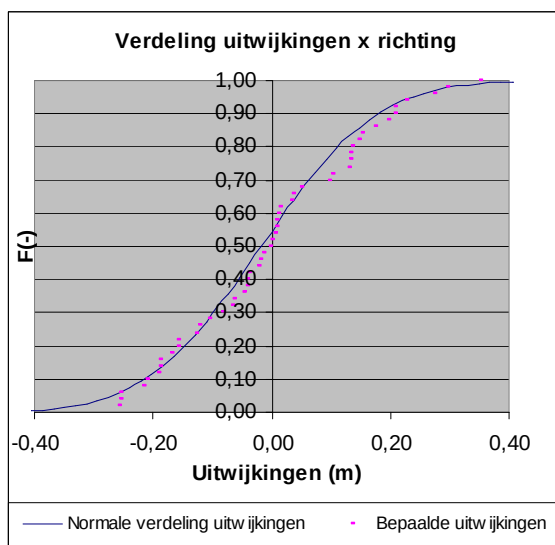
figuur M-7 Verdeling uitwijkingen 50stdws1u22



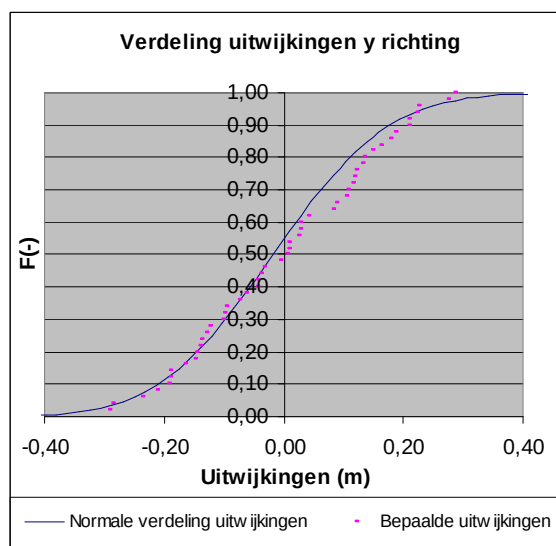
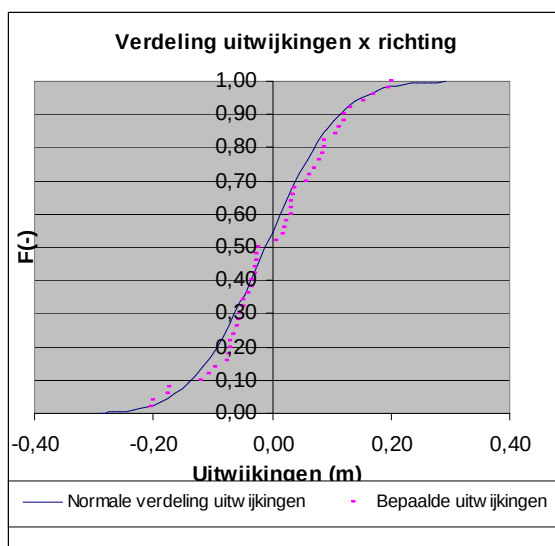
figuur M-8 Verdeling uitwijkingen 50stdws2u22



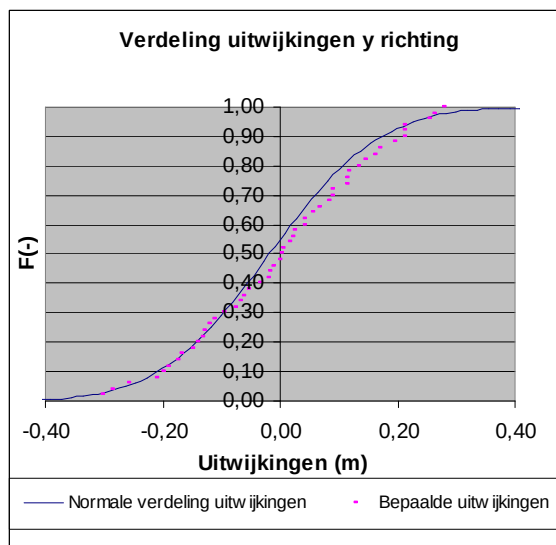
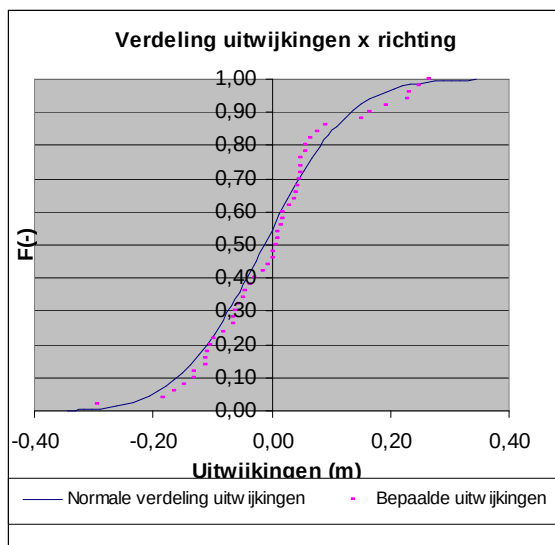
figuur M-9 Verdeling uitwijkingen 50stevs1u22



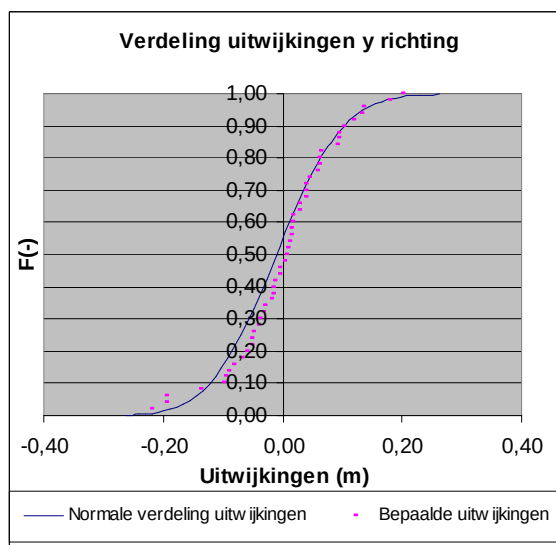
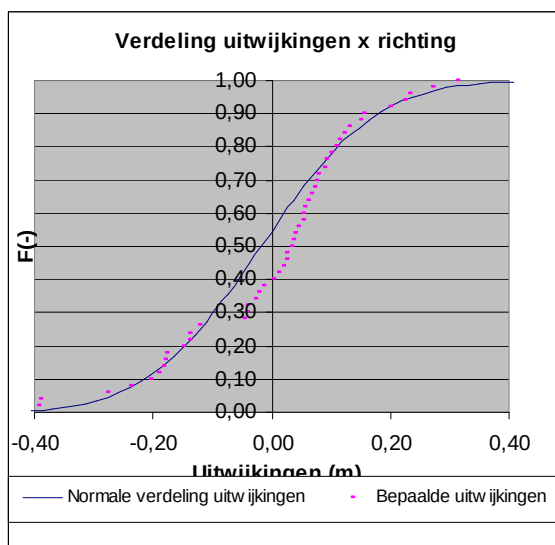
figuur M-10 Verdeling uitwijkingen 50stevs2u22



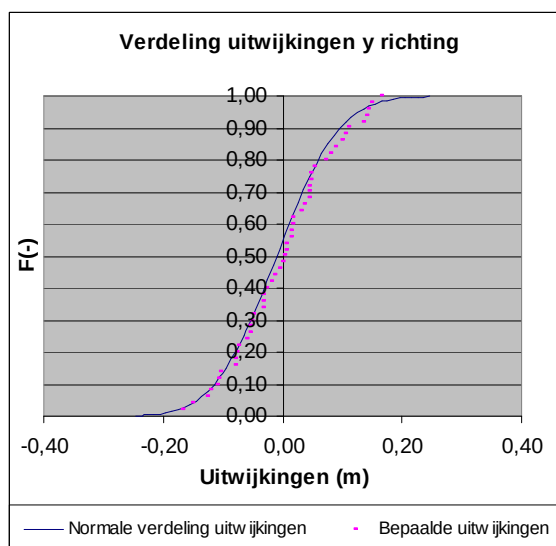
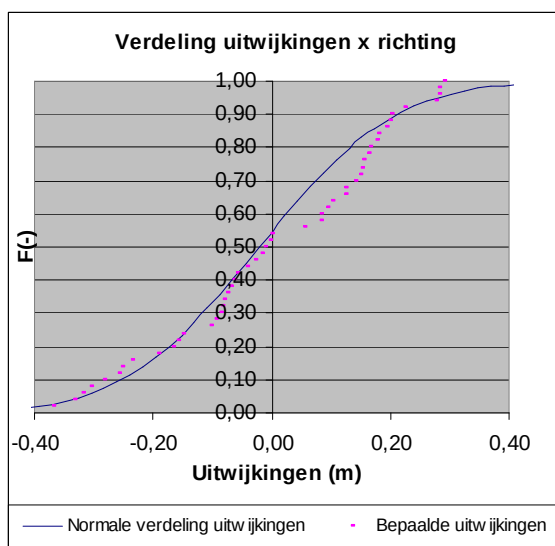
figuur M-11 Verdeling uitwijkingen 50stdws1u40



figuur M-12 Verdeling uitwijkingen 50stdws2u40

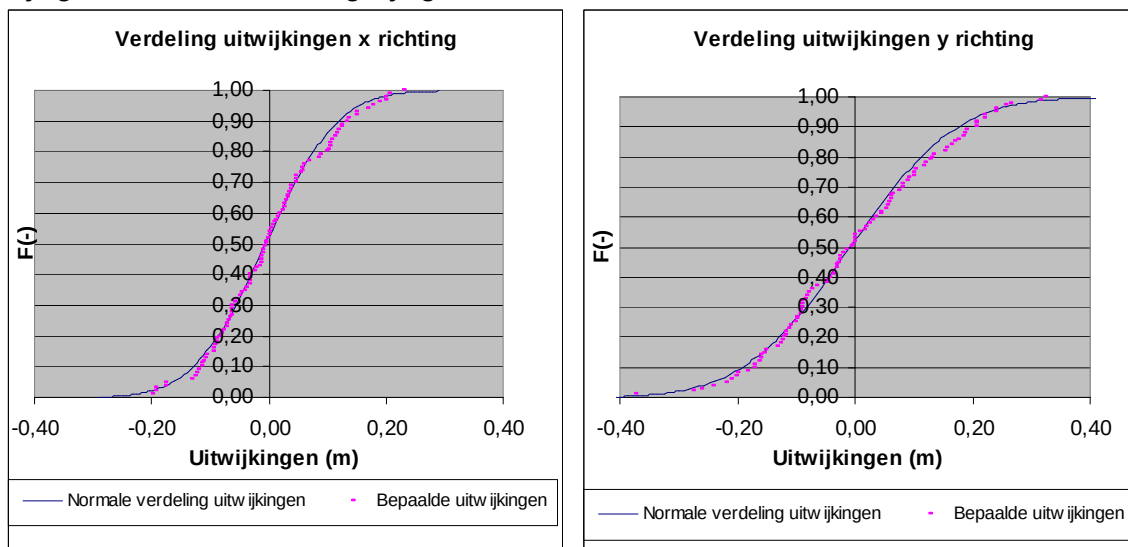


figuur M-13 Verdeling uitwijkingen 50stevs1u40

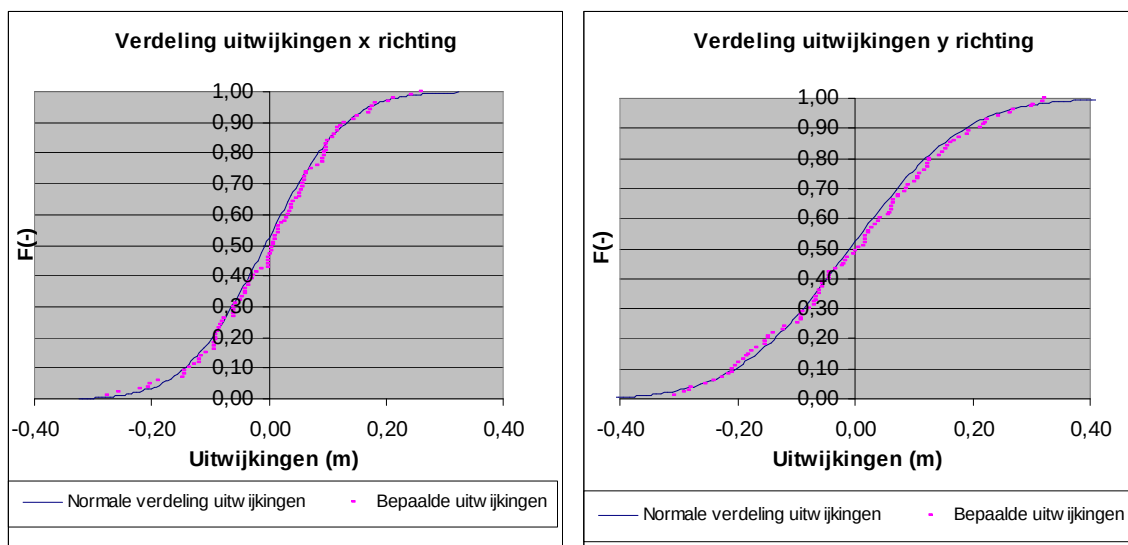


figuur M-14 Verdeling uitwijkingen 50stevs2u40

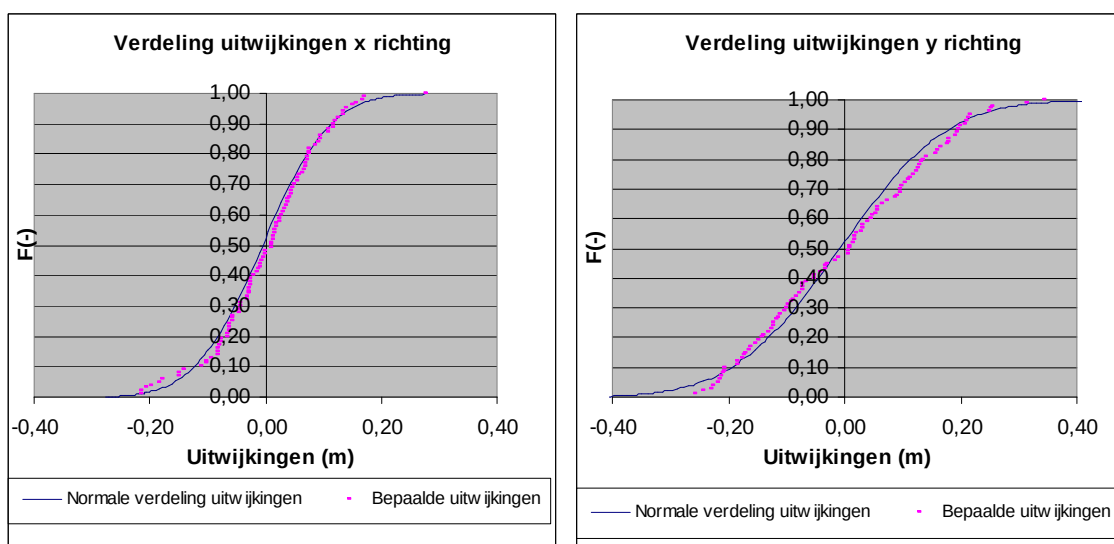
Bijlage M-2: 100 stuks tegelijk gestort



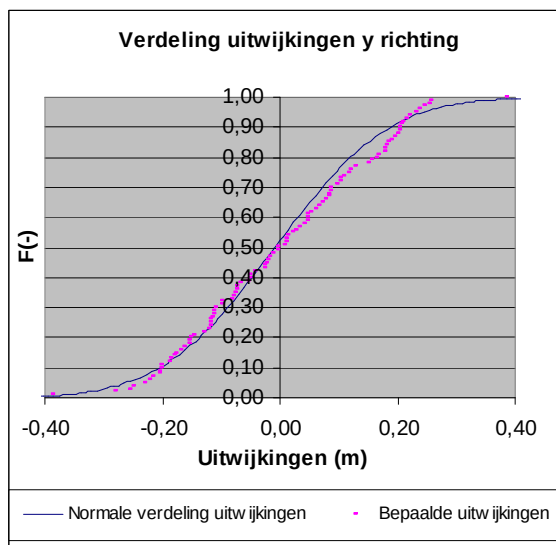
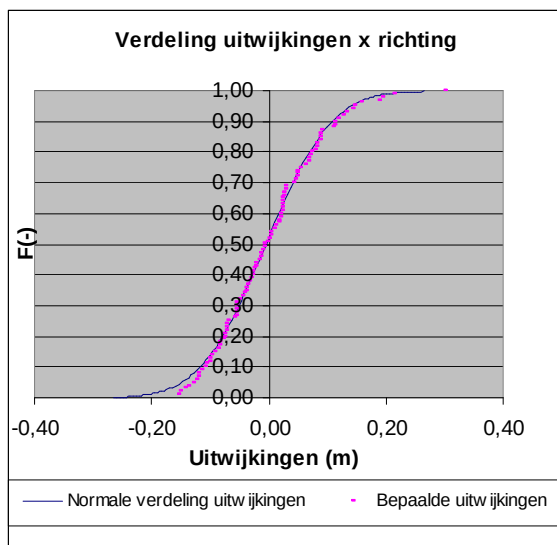
figuur M-15 Verdeling uitwijkingen 100sts1u00



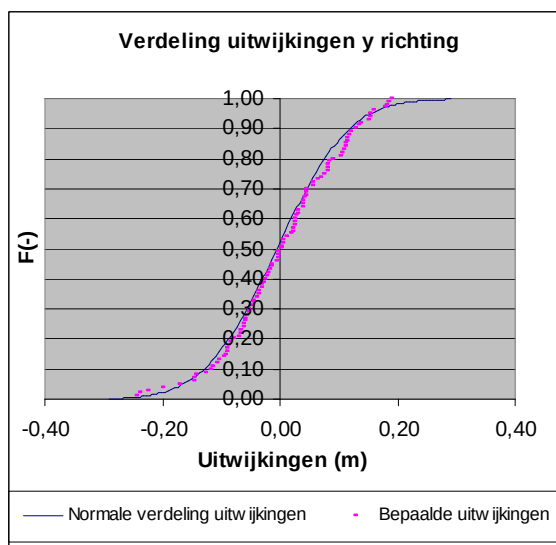
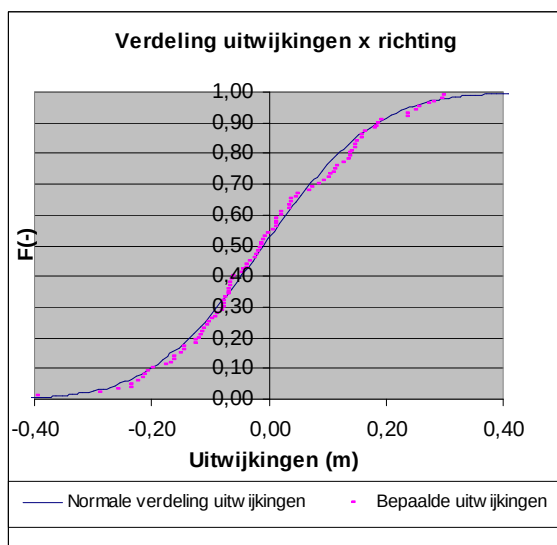
figuur M-16 Verdeling uitwijkingen 100sts2u00



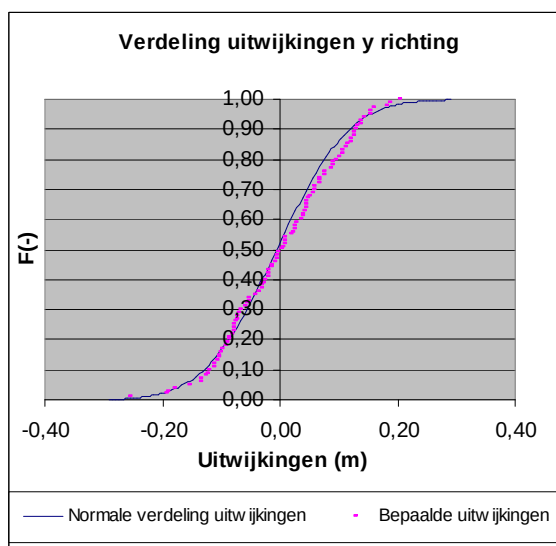
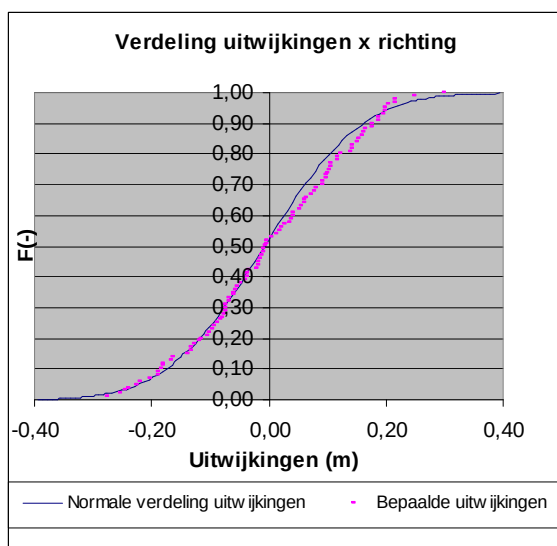
figuur M-17 Verdeling uitwijkingen 100stdws1u10



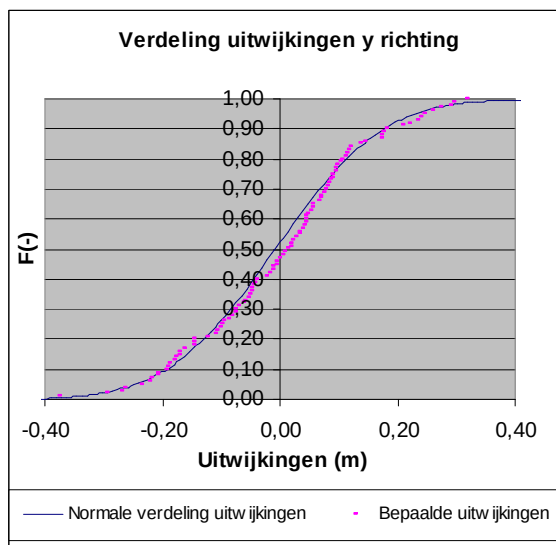
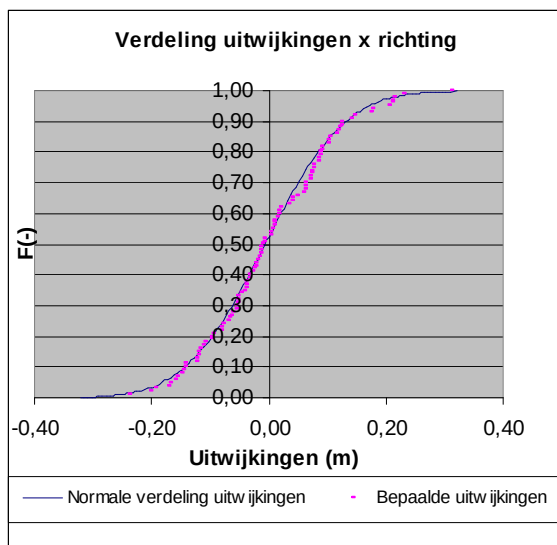
figuur M-18 Verdeling uitwijkingen 100stdws2u10



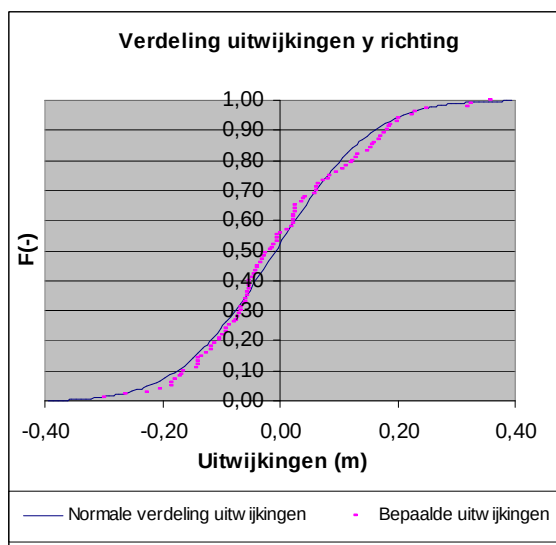
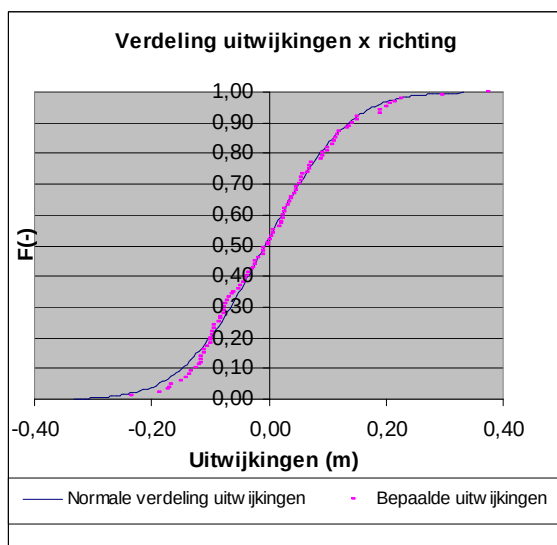
figuur M-19 Verdeling uitwijkingen 100stevs1u10



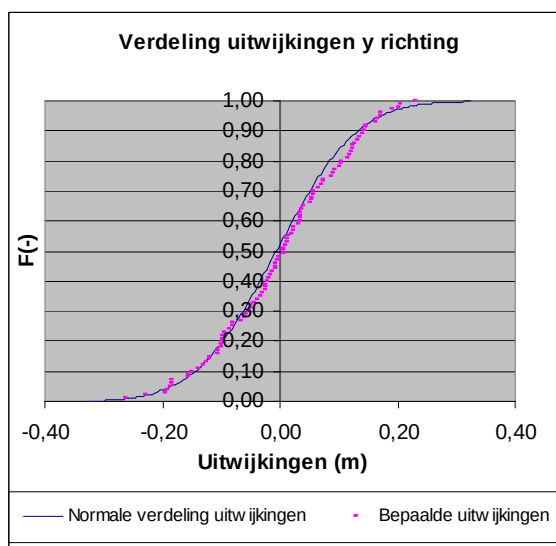
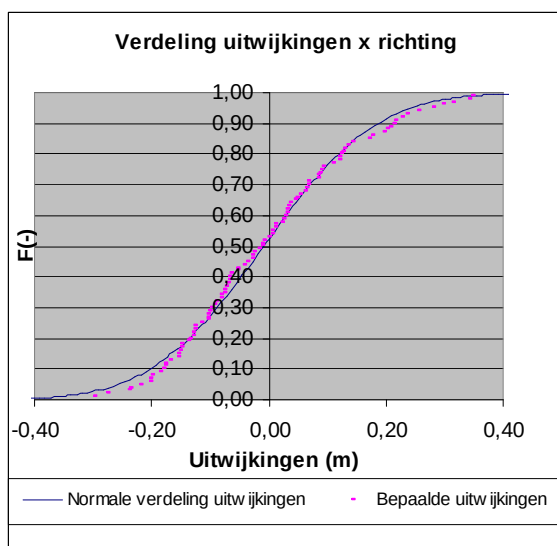
figuur M-20 Verdeling uitwijkingen 100stevs2u10



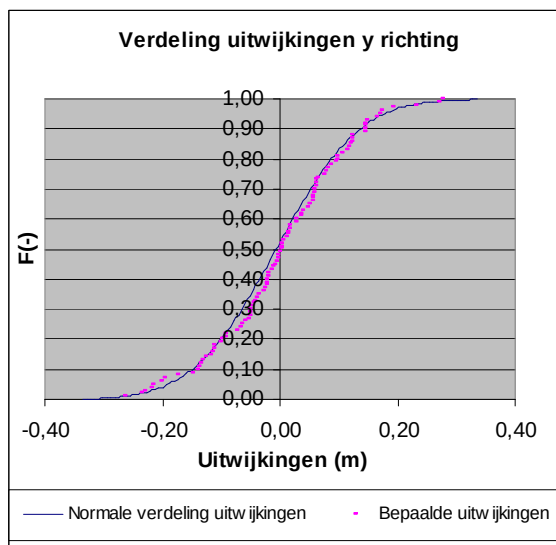
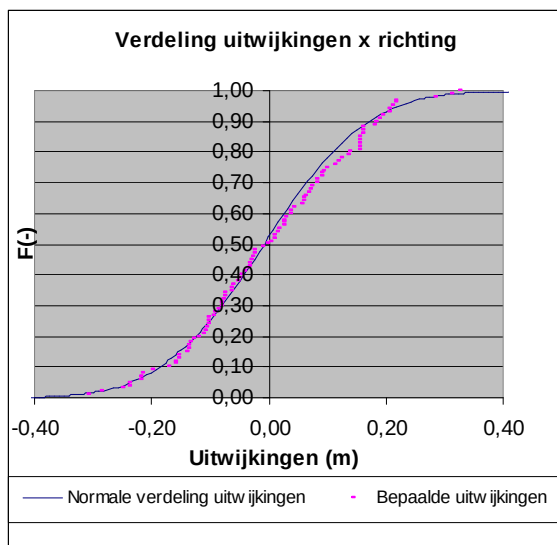
figuur M-21 Verdeling uitwijkingen 100stdws1u22



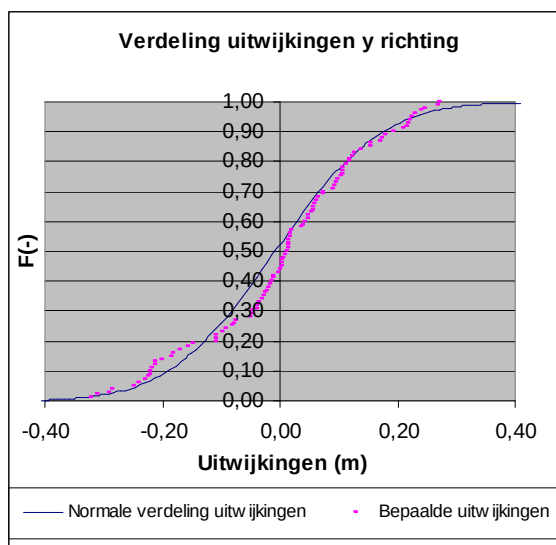
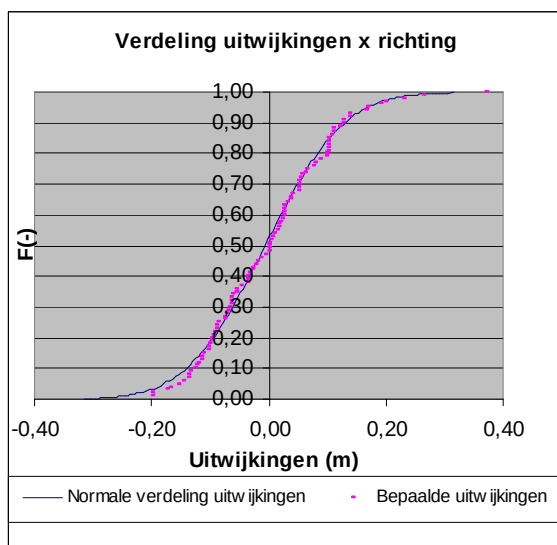
figuur M-22 Verdeling uitwijkingen 100stdws2u22



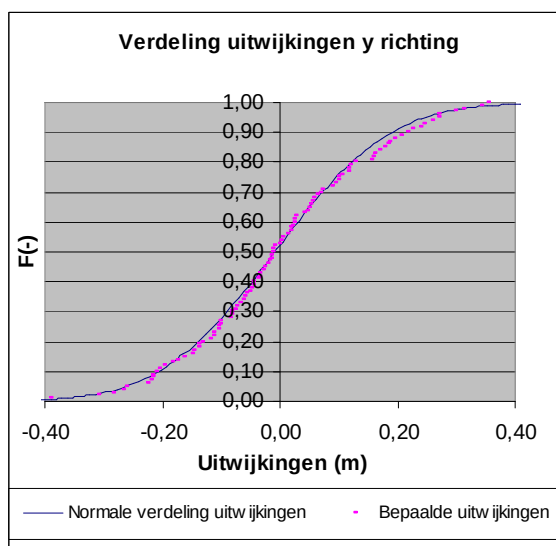
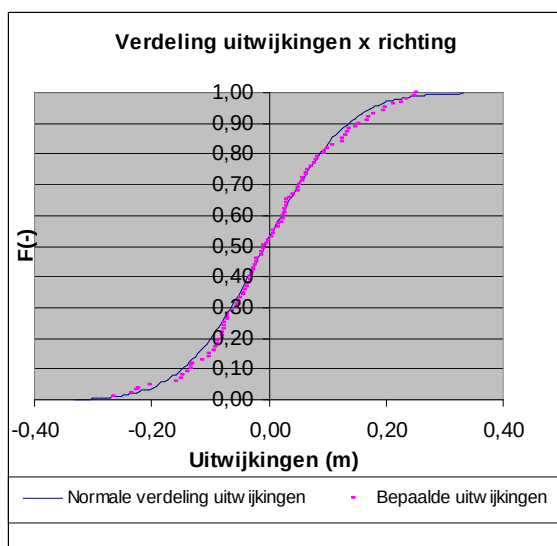
figuur M-23 Verdeling uitwijkingen 100stevs1u22



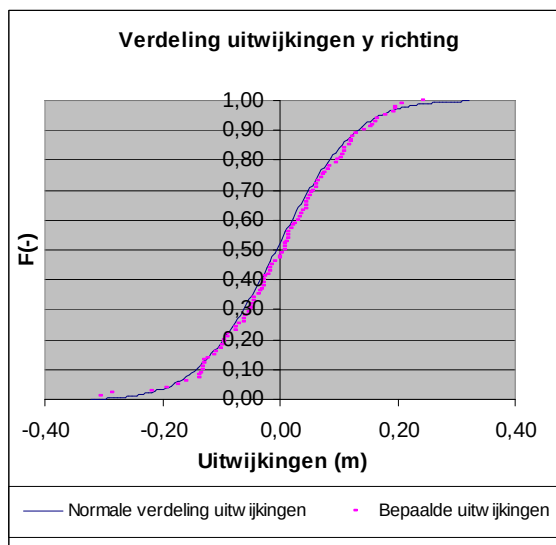
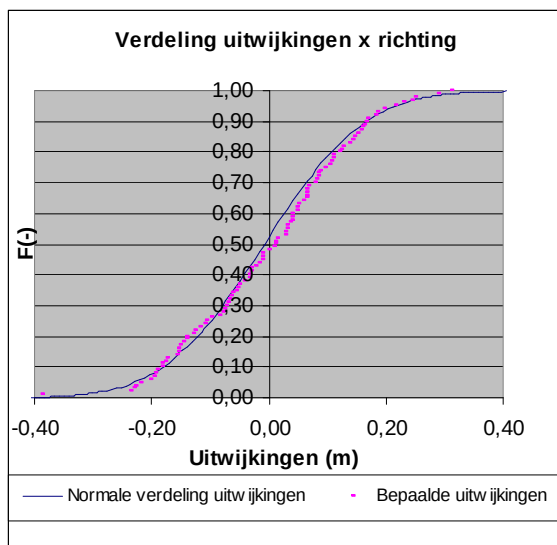
figuur M-24 Verdeling uitwijkingen 100stevs2u22



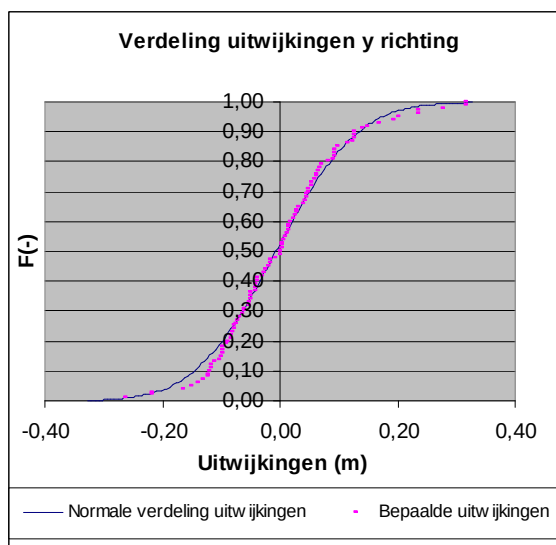
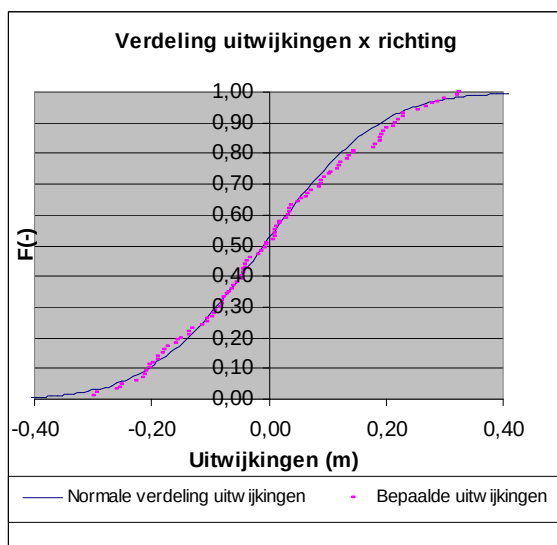
figuur M-25 Verdeling uitwijkingen 100stdws1u40



figuur M-26 Verdeling uitwijkingen 100stdws2u40

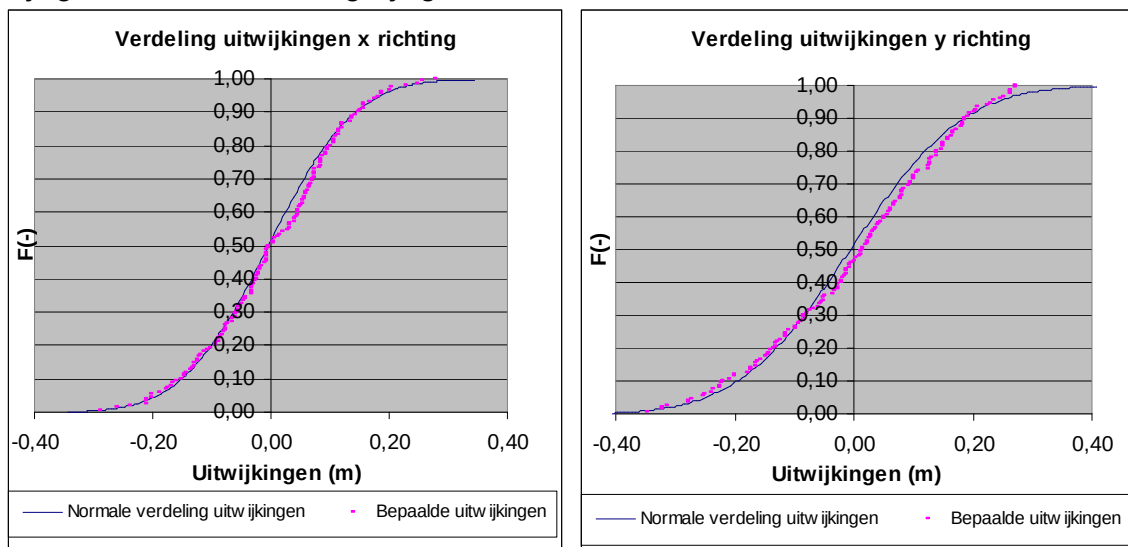


figuur M-27 Verdeling uitwijkingen 100stevs1u40

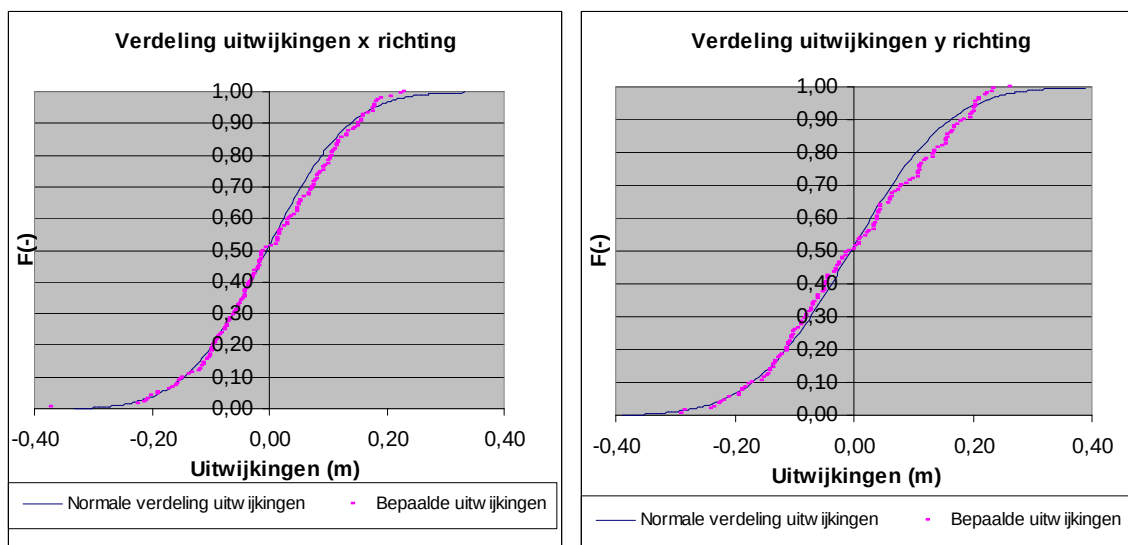


figuur M-28 Verdeling uitwijkingen 100stevs2u40

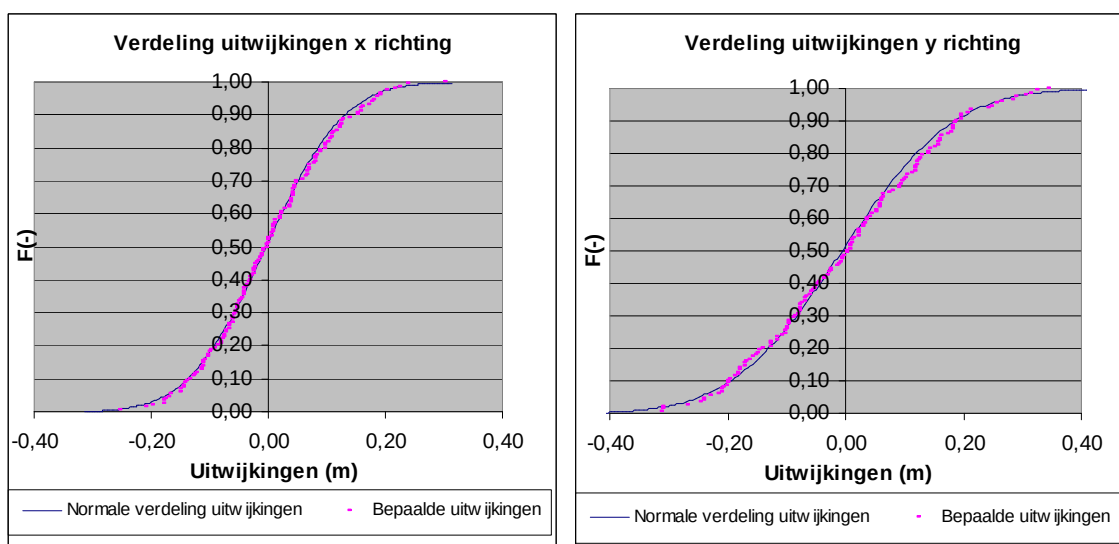
Bijlage M-3: 150 stuks tegelijk gestort



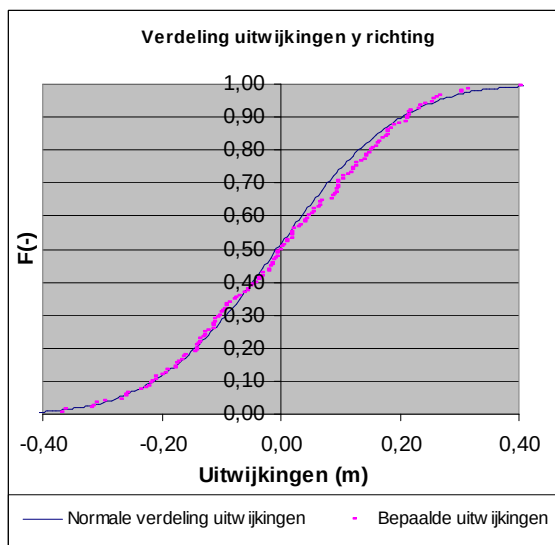
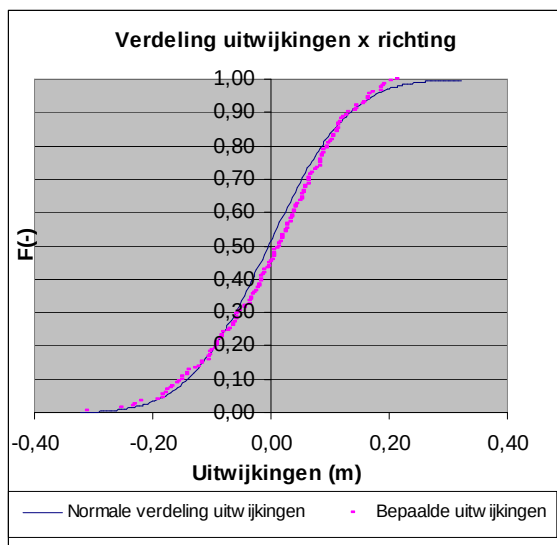
figuur M-29 Verdeling uitwijkingen 150sts1u00



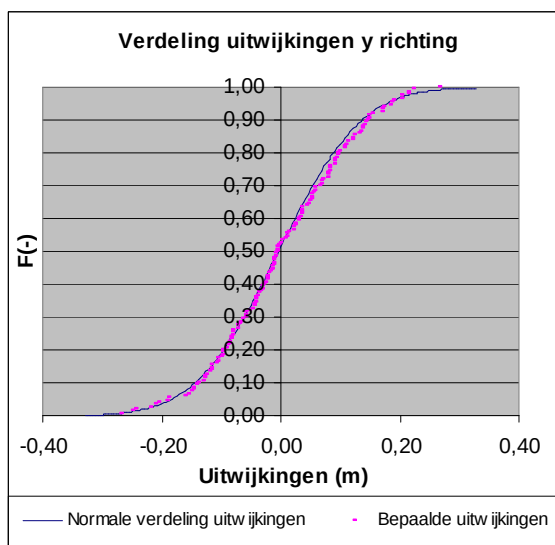
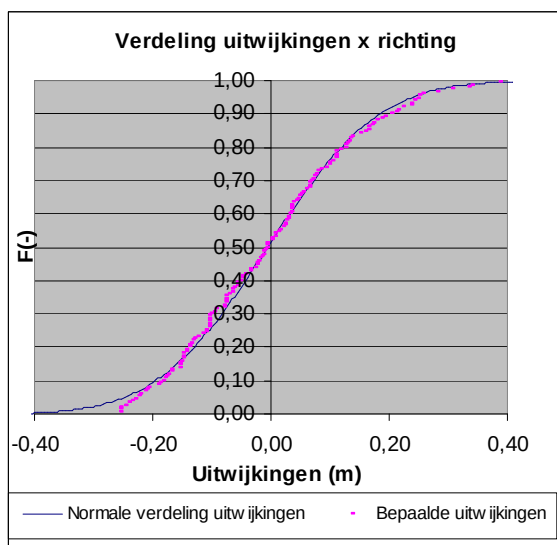
figuur M-30 Verdeling uitwijkingen 150sts2u00



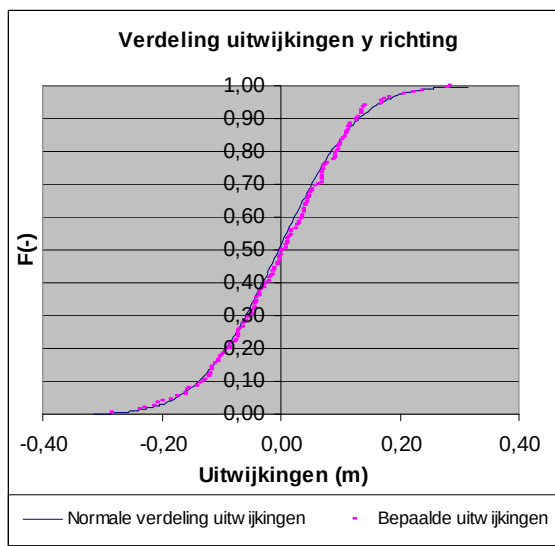
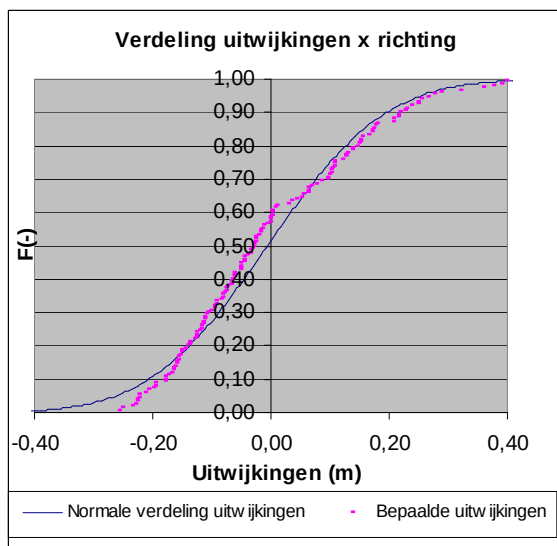
figuur M-31 Verdeling uitwijkingen 150stdws1u10



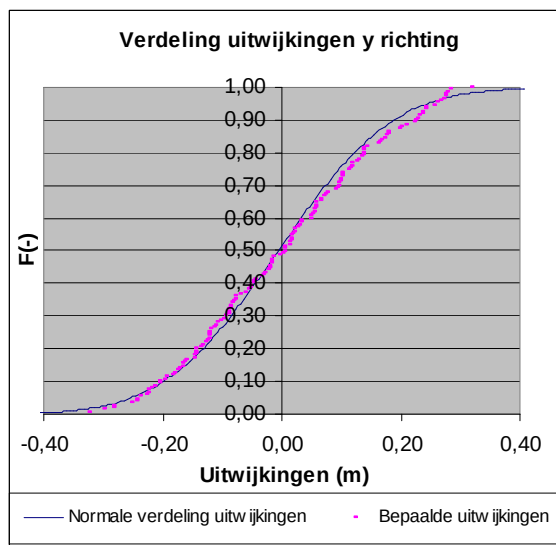
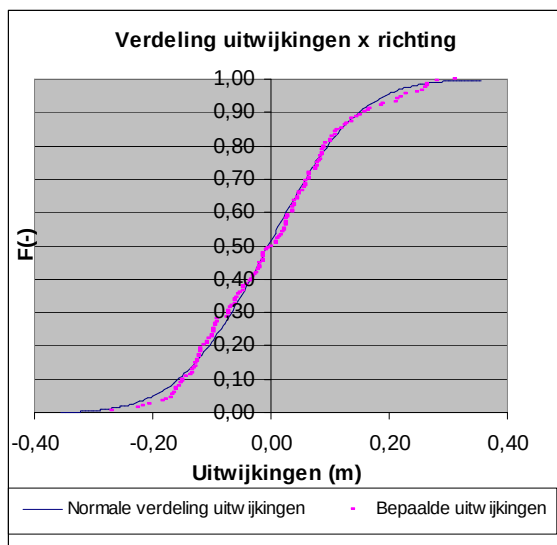
figuur M-32 Verdeling uitwijkingen 150stdws2u10



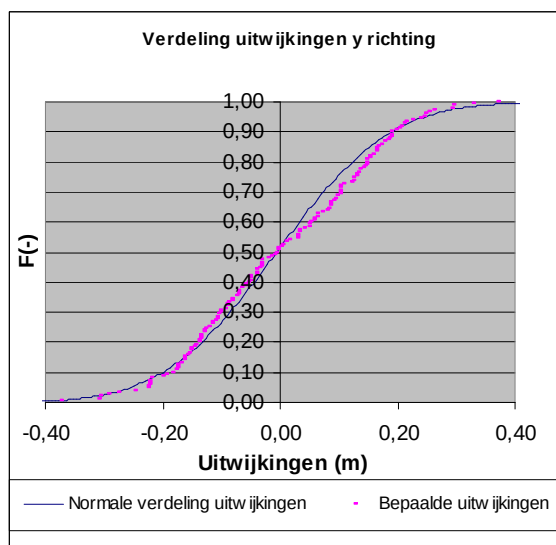
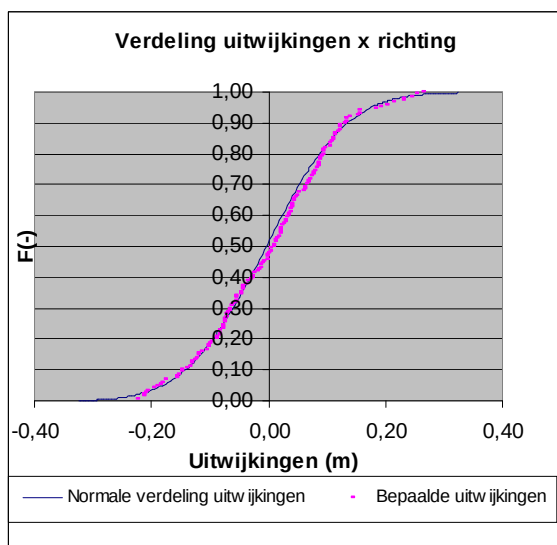
figuur M-33 Verdeling uitwijkingen 150stevs1u10



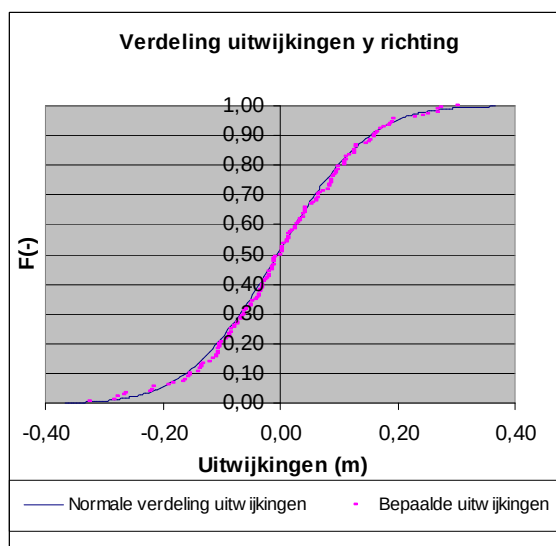
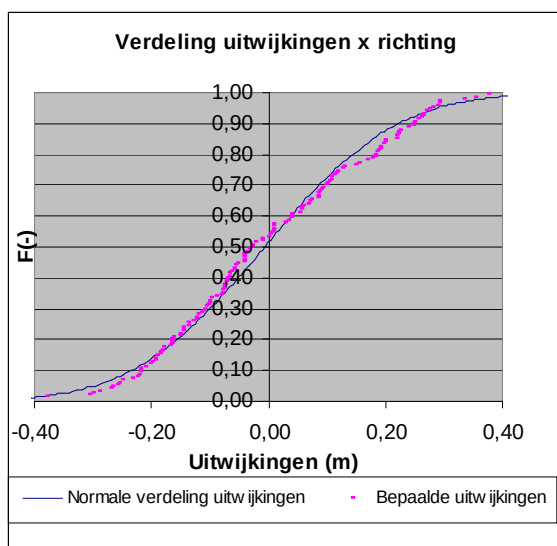
figuur M-34 Verdeling uitwijkingen 150stevs2u10



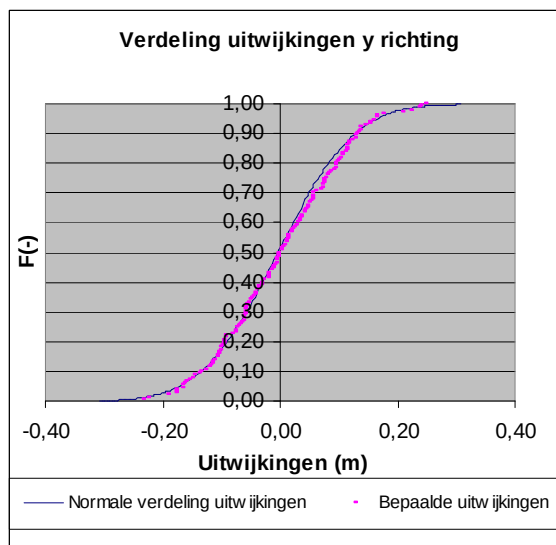
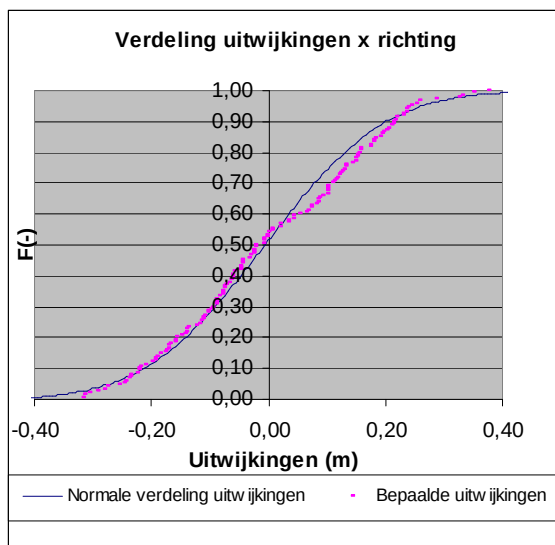
figuur M-35 Verdeling uitwijkingen 150stdws1u22



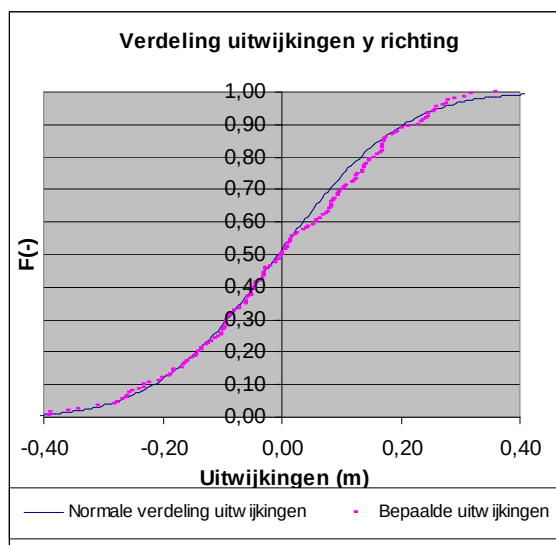
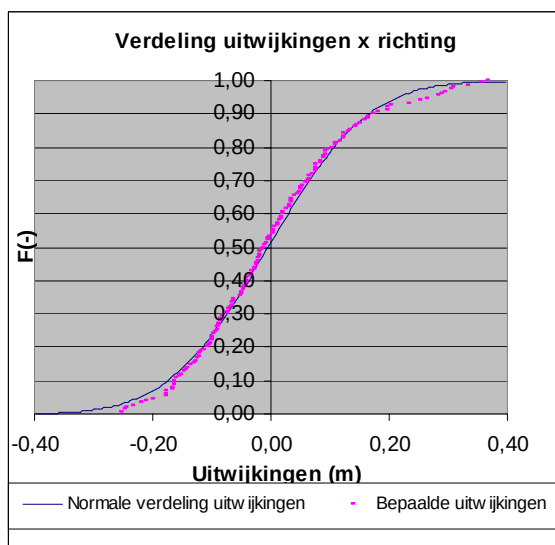
figuur M-36 Verdeling uitwijkingen 150stdws2u22



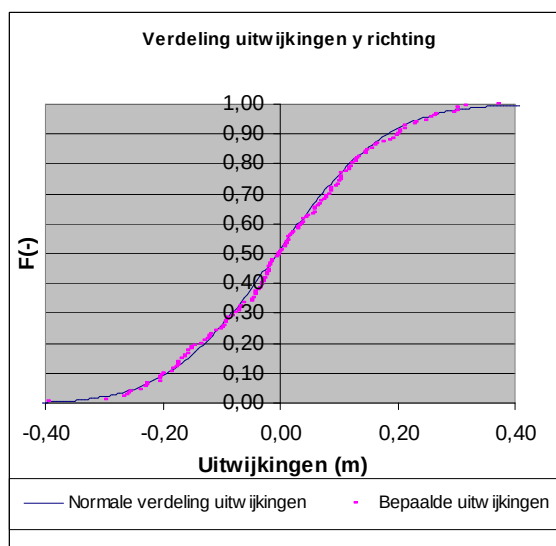
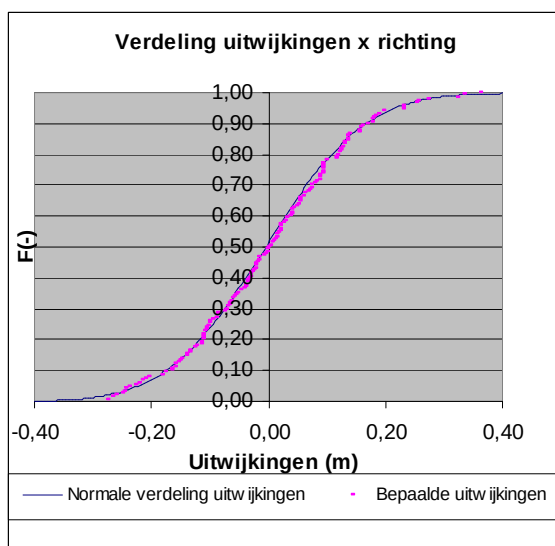
figuur M-37 Verdeling uitwijkingen 150stevs1u22



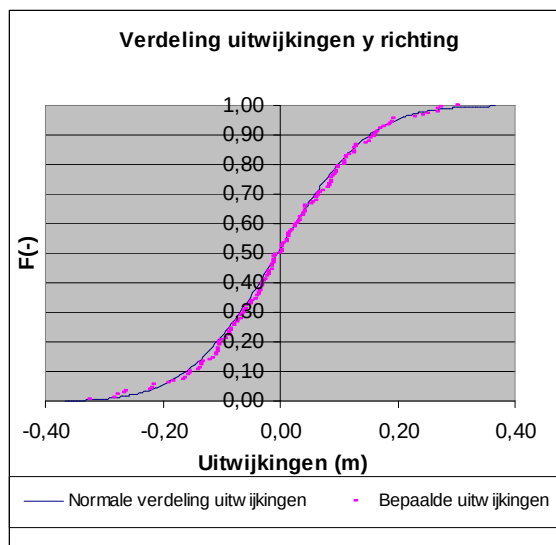
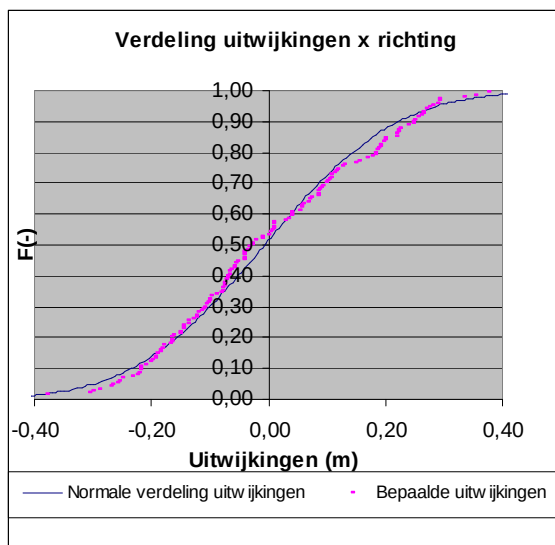
figuur M-38 Verdeling uitwijkingen 150stevs2u22



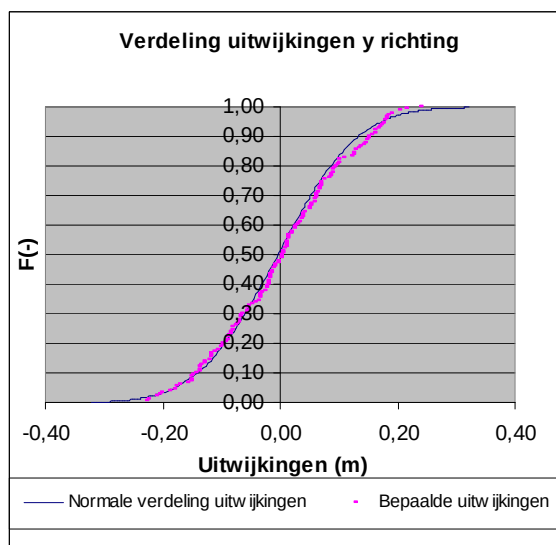
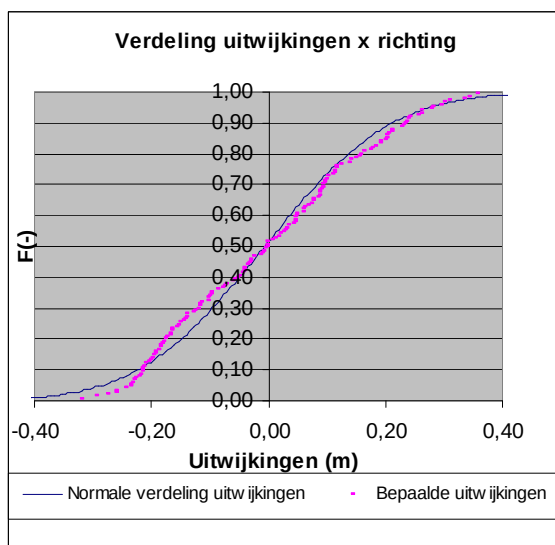
figuur M-39 Verdeling uitwijkingen 150stdws1u40



figuur M-40 Verdeling uitwijkingen 150stdws2u40

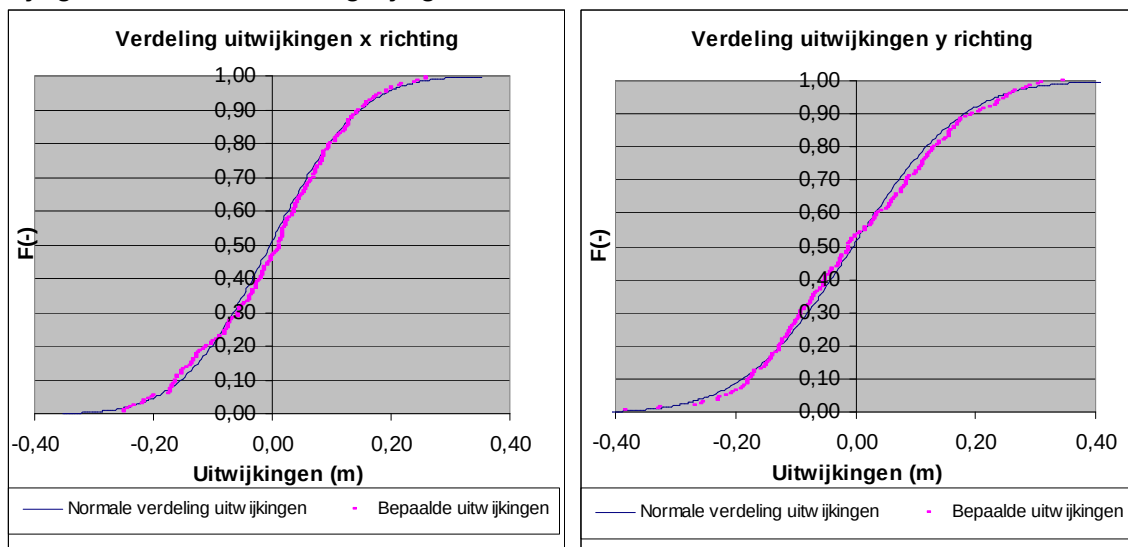


figuur M-41 Verdeling uitwijkingen 150stevs1u40

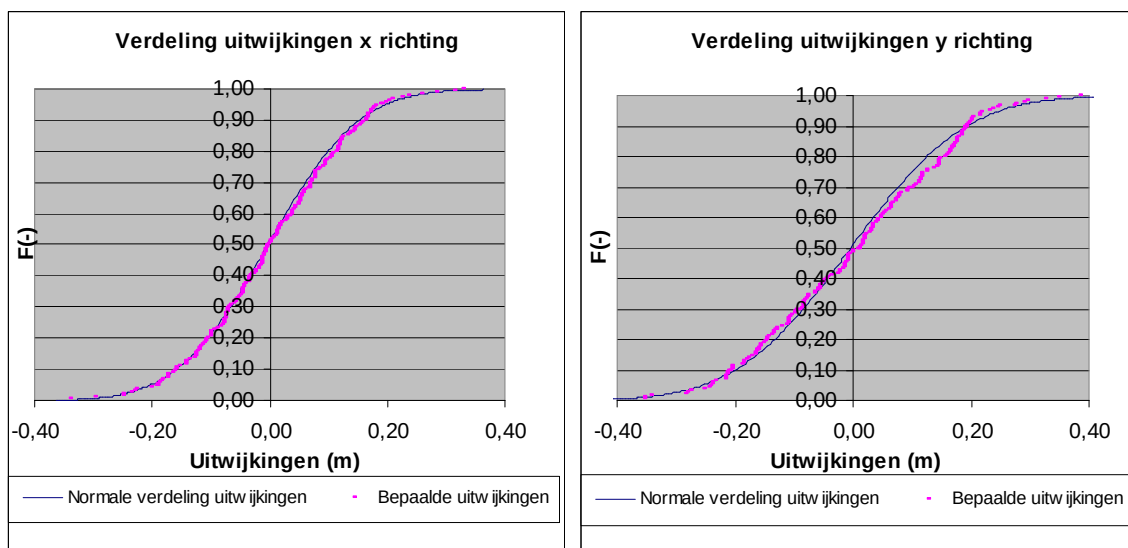


figuur M-42 Verdeling uitwijkingen 150stevs2u40

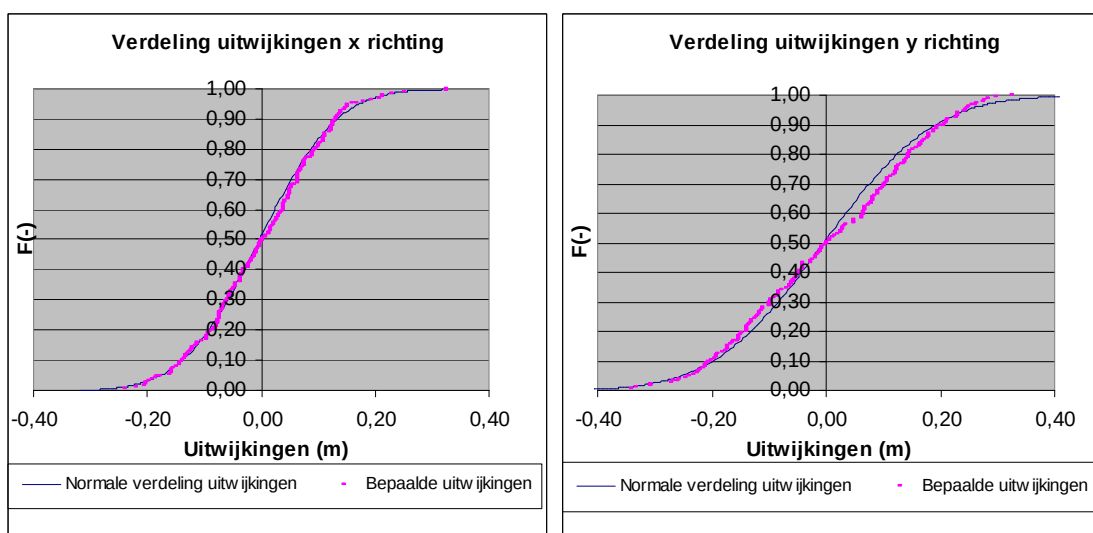
Bijlage M-4: 200 stuks tegelijk gestort



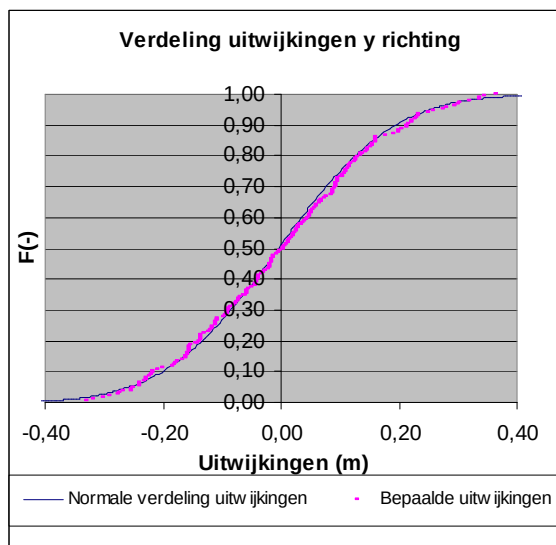
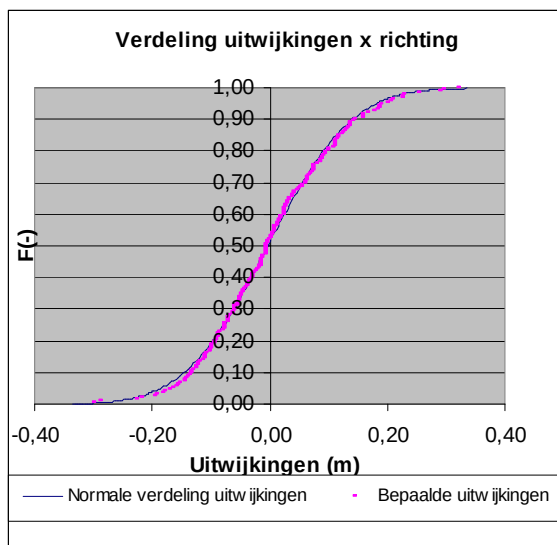
figuur M-43 Verdeling uitwijkingen 200sts1u00



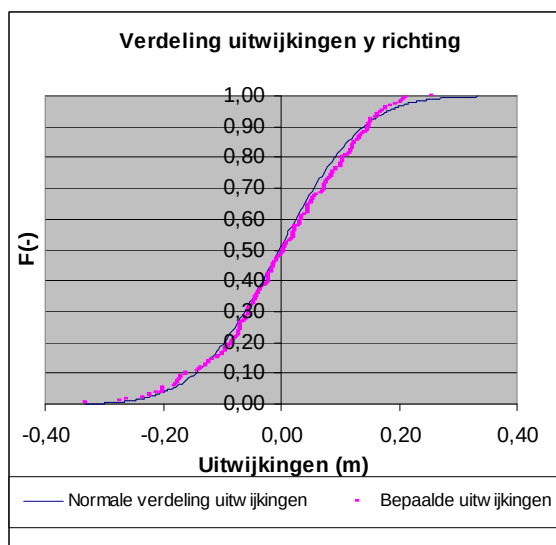
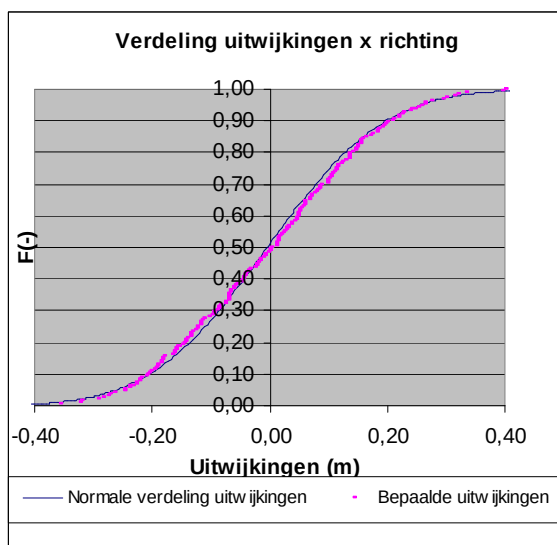
figuur M-44 Verdeling uitwijkingen 200sts2u00



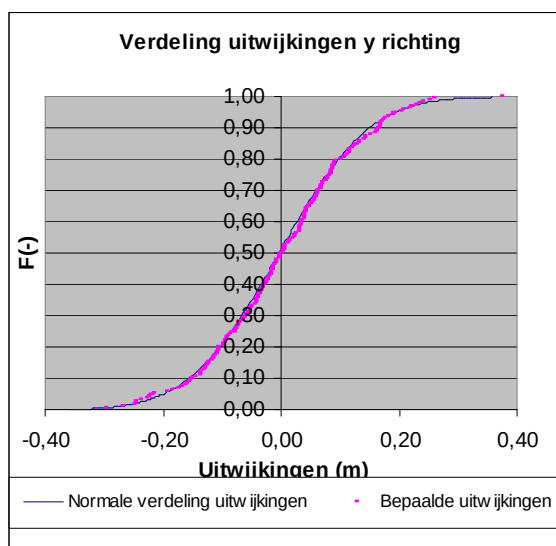
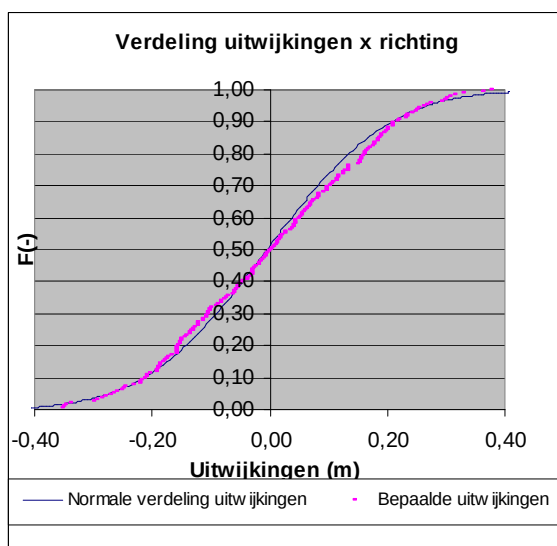
figuur M-45 Verdeling uitwijkingen 200stdws1u10



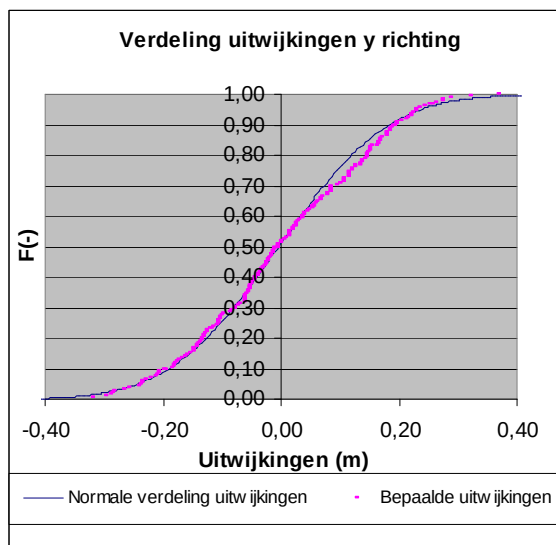
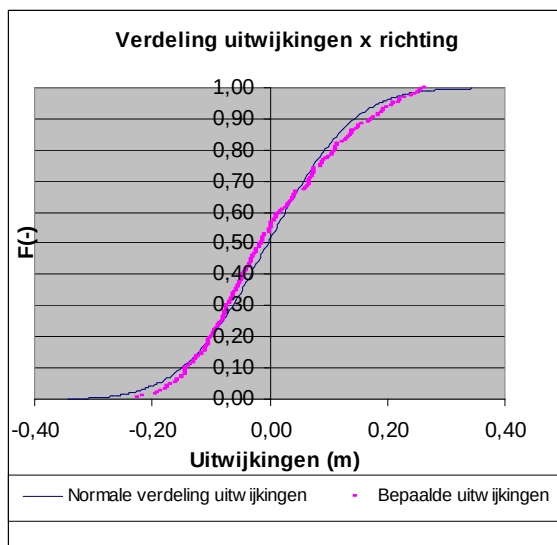
figuur M-46 Verdeling uitwijkingen 200stdws2u10



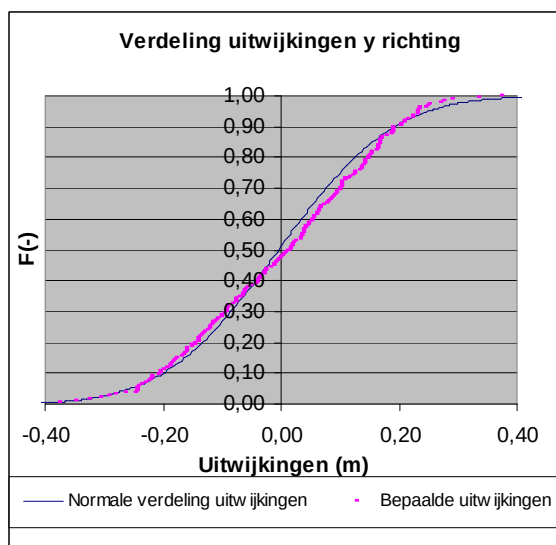
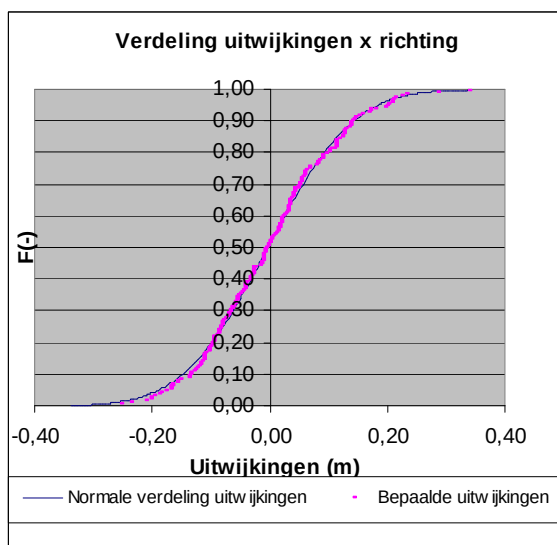
figuur M-47 Verdeling uitwijkingen 200stevs1u10



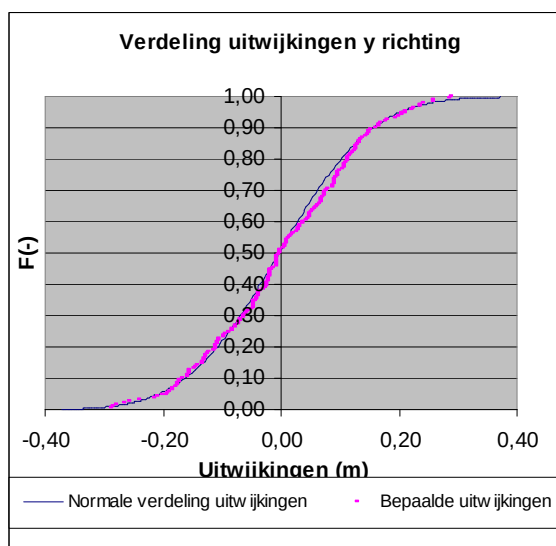
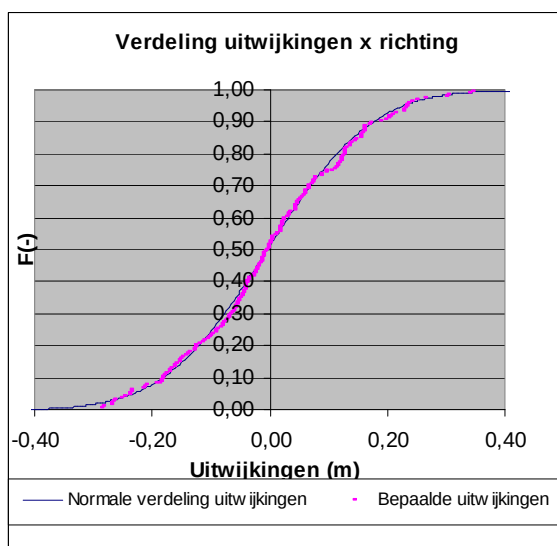
figuur M-48 Verdeling uitwijkingen 200stevs2u10



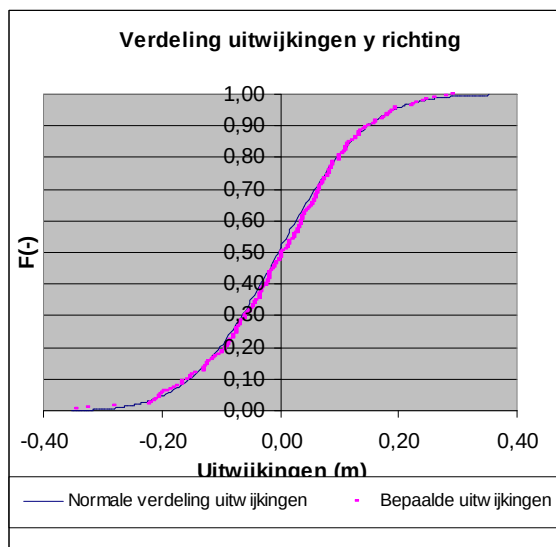
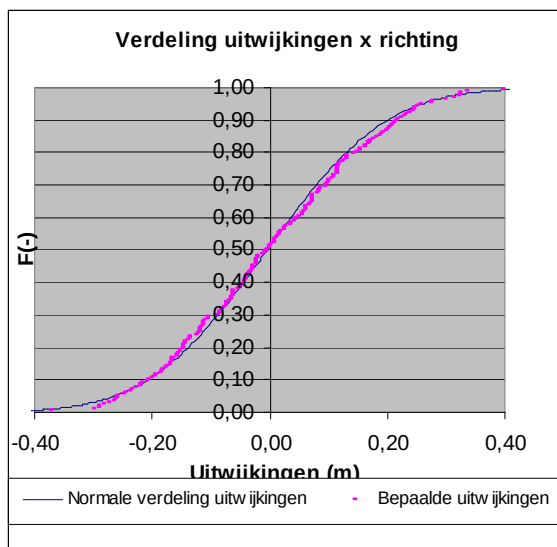
figuur M-49 Verdeling uitwijkingen 200stdws1u22



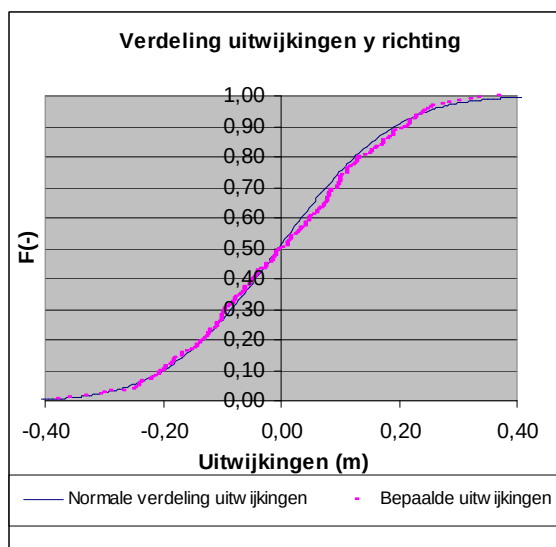
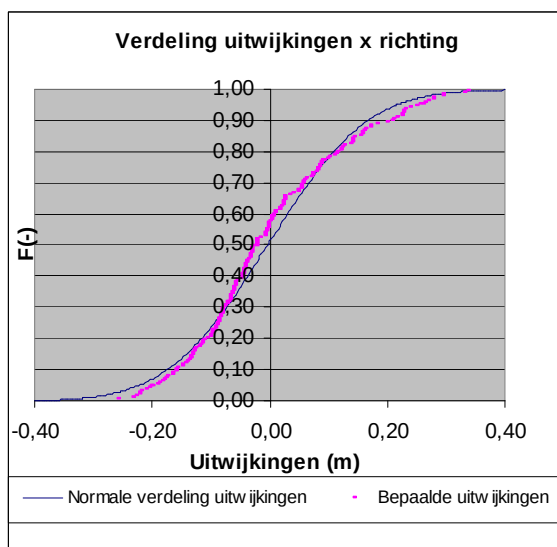
figuur M-50 Verdeling uitwijkingen 200stdws2u22



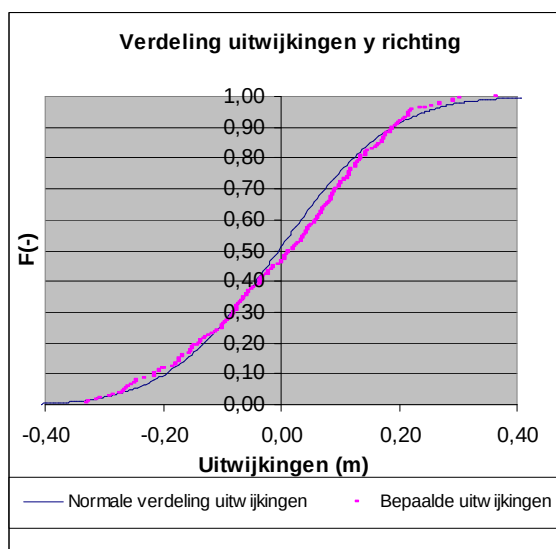
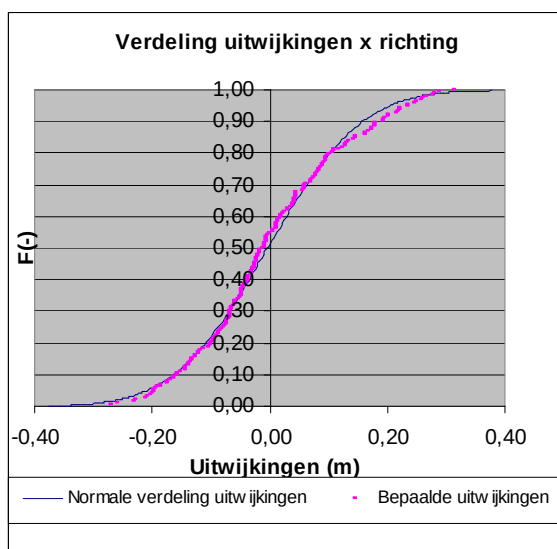
figuur M-51 Verdeling uitwijkingen 200stevs1u22



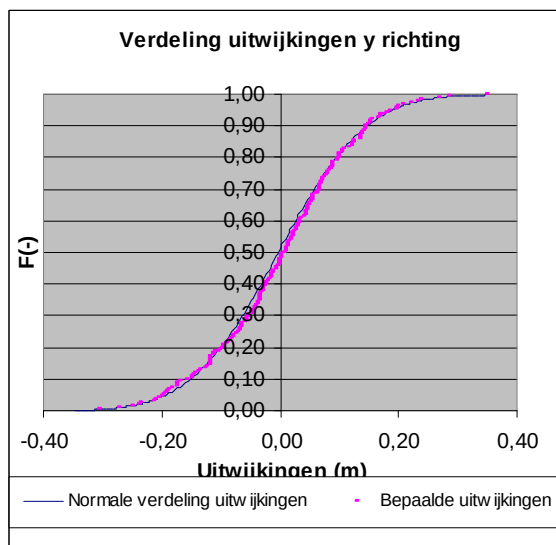
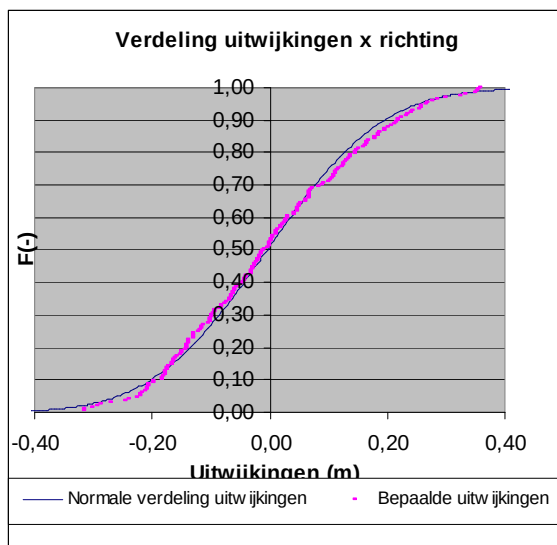
figuur M-52 Verdeling uitwijkingen 200stevs2u22



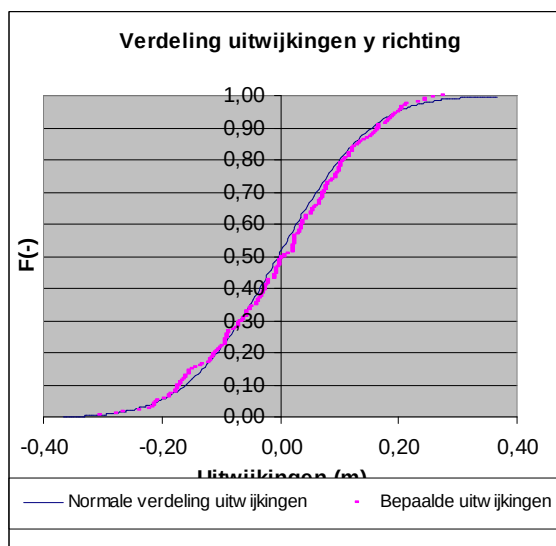
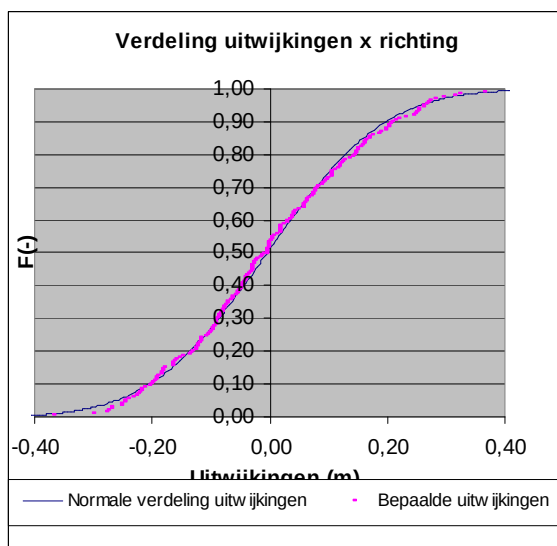
figuur M-53 Verdeling uitwijkingen 200stdws1u40



figuur M-54 Verdeling uitwijkingen 200stdws2u40



figuur M-55 Verdeling uitwijkingen 200stevs1u40



figuur M-56 Verdeling uitwijkingen 200stevs2u40

Bijlage N: Spreiding en KS toets uitwijkingen per stort bepaald

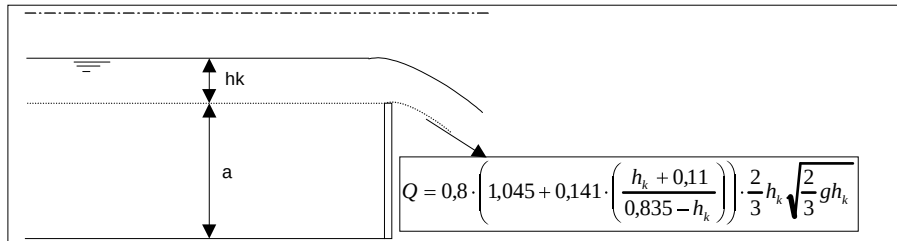
Codering	σ_x	σ_y	$\sigma_{Rayleigh}$	KS _x	KS _y	KS _{Rayleigh}	KS _{max}
Serie 1: 0 m/s	0,102	0,098	0,10	0,04	0,04	0,05	0,12
Serie 4: 0 m/s	0,093	0,097	0,10	0,03	0,04	0,05	0,12
Serie 1: 0,10 m/s	0,091	0,093	0,09	0,04	0,06	0,07	0,12
Serie 4: 0,10 m/s	0,096	0,098	0,10	0,07	0,04	0,06	0,12
Serie 1: 0,22 m/s	0,105	0,102	0,10	0,05	0,05	0,09	0,12
Serie 4: 0,22 m/s	0,098	0,093	0,10	0,03	0,05	0,09	0,12
Serie 1: 0,40 m/s	0,109	0,095	0,10	0,07	0,03	0,04	0,12
Serie 4: 0,40 m/s	0,115	0,113	0,11	0,03	0,05	0,05	0,12
50stdws1u00	0,101	0,124	n.v.t.	0,09	0,08	n.v.t.	0,23
50stdws2u00	0,080	0,122	n.v.t.	0,10	0,07	n.v.t.	0,23
50stdws1u10	0,094	0,162	n.v.t.	0,10	0,09	n.v.t.	0,23
50stdws2u10	0,094	0,114	n.v.t.	0,08	0,09	n.v.t.	0,23
50stevs1u10	0,170	0,097	n.v.t.	0,10	0,16	n.v.t.	0,23
50stevs2u10	0,153	0,088	n.v.t.	0,15	0,08	n.v.t.	0,23
50stdws1u22	0,108	0,150	n.v.t.	0,08	0,08	n.v.t.	0,23
50stdws2u22	0,088	0,160	n.v.t.	0,05	0,13	n.v.t.	0,23
50stevs1u22	0,165	0,095	n.v.t.	0,10	0,08	n.v.t.	0,23
50stevs2u22	0,153	0,098	n.v.t.	0,11	0,11	n.v.t.	0,23
50stdws1u40	0,097	0,151	n.v.t.	0,10	0,12	n.v.t.	0,23
50stdws2u40	0,114	0,149	n.v.t.	0,09	0,12	n.v.t.	0,23
50stevs1u40	0,154	0,087	n.v.t.	0,12	0,07	n.v.t.	0,23
50stevs2u40	0,181	0,082	n.v.t.	0,09	0,10	n.v.t.	0,23
100sts1u00	0,097	0,143	n.v.t.	0,06	0,06	n.v.t.	0,16
100sts2u00	0,108	0,153	n.v.t.	0,06	0,09	n.v.t.	0,16
100stdws1u10	0,092	0,146	n.v.t.	0,04	0,10	n.v.t.	0,16
100stdws2u10	0,088	0,153	n.v.t.	0,10	0,06	n.v.t.	0,16
100stevs1u10	0,151	0,097	n.v.t.	0,05	0,09	n.v.t.	0,16
100stevs2u10	0,131	0,097	n.v.t.	0,05	0,07	n.v.t.	0,16
100stdws1u22	0,107	0,144	n.v.t.	0,05	0,06	n.v.t.	0,16
100stdws2u22	0,111	0,131	n.v.t.	0,08	0,08	n.v.t.	0,16
100stevs1u22	0,152	0,108	n.v.t.	0,09	0,07	n.v.t.	0,16
100stevs2u22	0,139	0,112	n.v.t.	0,06	0,04	n.v.t.	0,16
100stdws1u40	0,105	0,143	n.v.t.	0,08	0,11	n.v.t.	0,16
100stdws2u40	0,111	0,155	n.v.t.	0,05	0,05	n.v.t.	0,16
100stevs1u40	0,136	0,107	n.v.t.	0,07	0,05	n.v.t.	0,16
100stevs2u40	0,155	0,109	n.v.t.	0,07	0,06	n.v.t.	0,16
150sts1u00	0,115	0,148	n.v.t.	0,05	0,04	n.v.t.	0,13
150sts2u00	0,111	0,130	n.v.t.	0,07	0,07	n.v.t.	0,13
150stdws1u10	0,104	0,148	n.v.t.	0,04	0,05	n.v.t.	0,13
150stdws2u10	0,107	0,163	n.v.t.	0,05	0,05	n.v.t.	0,13
150stevs1u10	0,148	0,110	n.v.t.	0,09	0,04	n.v.t.	0,13
150stevs2u10	0,157	0,105	n.v.t.	0,15	0,03	n.v.t.	0,13
150stdws1u22	0,119	0,151	n.v.t.	0,07	0,07	n.v.t.	0,13
150stdws2u22	0,108	0,152	n.v.t.	0,05	0,06	n.v.t.	0,13
150stevs1u22	0,178	0,122	n.v.t.	0,08	0,03	n.v.t.	0,13
150stevs2u22	0,162	0,102	n.v.t.	0,08	0,05	n.v.t.	0,13
150stdws1u40	0,133	0,164	n.v.t.	0,08	0,04	n.v.t.	0,13
150stdws2u40	0,133	0,146	n.v.t.	0,05	0,03	n.v.t.	0,13

150stevs1u40	0,178	0,122	n.v.t.	0,08	0,03	n.v.t.	0,13
Codering	σ_x	σ_y	$\sigma_{Rayleigh}$	KS_x	KS_y	$KS_{Rayleigh}$	KS_{max}
150stdws2u40	0,170	0,107	n.v.t.	0,10	0,05	n.v.t.	0,13
200sts1u00	0,118	0,144	n.v.t.	0,05	0,05	n.v.t.	0,12
200sts2u00	0,121	0,153	n.v.t.	0,02	0,05	n.v.t.	0,12
200stdws1u10	0,106	0,152	n.v.t.	0,04	0,06	n.v.t.	0,12
200stdws2u10	0,111	0,154	n.v.t.	0,04	0,05	n.v.t.	0,12
200stevs1u10	0,157	0,111	n.v.t.	0,05	0,04	n.v.t.	0,12
200stevs2u10	0,165	0,119	n.v.t.	0,06	0,02	n.v.t.	0,12
200stdws1u22	0,115	0,146	n.v.t.	0,09	0,05	n.v.t.	0,12
200stdws2u22	0,113	0,153	n.v.t.	0,05	0,05	n.v.t.	0,12
200stevs1u22	0,139	0,124	n.v.t.	0,05	0,04	n.v.t.	0,12
200stevs2u22	0,159	0,117	n.v.t.	0,05	0,03	n.v.t.	0,12
200stdws1u40	0,133	0,153	n.v.t.	0,11	0,04	n.v.t.	0,12
200stdws2u40	0,125	0,150	n.v.t.	0,07	0,04	n.v.t.	0,12
200stevs1u40	0,155	0,116	n.v.t.	0,06	0,02	n.v.t.	0,12
200stevs2u40	0,157	0,123	n.v.t.	0,05	0,05	n.v.t.	0,12

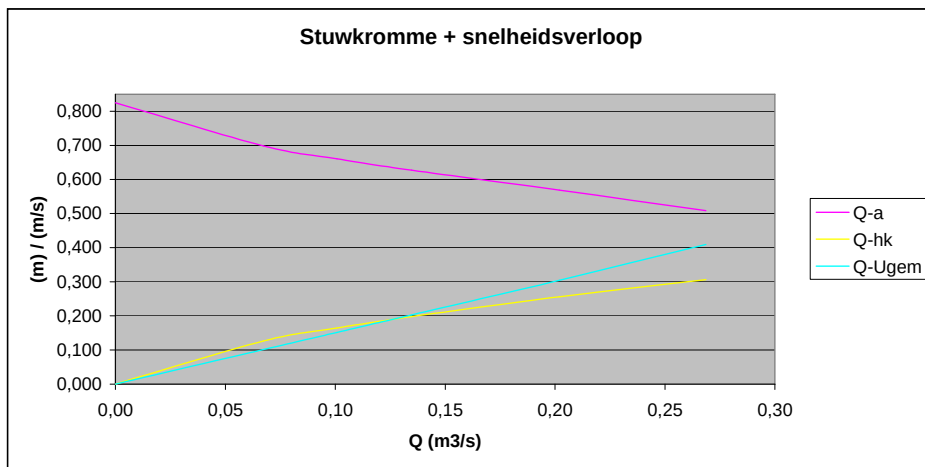
Bijlage O: Groepsindeling stenen

Groepsindeling stenen											
steen nr	massa (gr)	groep	steen nr	massa (gr)	groep	steen nr	massa (gr)	groep	steen nr	massa (gr)	groep
5	3,55	1	2	3,56	2	1	3,62	3	7	3,76	4
6	3,97	1	3	3,91	2	16	3,83	3	11	3,82	4
8	4,16	1	4	4,19	2	21	4,34	3	12	4,34	4
9	4,46	1	13	4,42	2	24	4,34	3	20	4,34	4
10	4,48	1	14	4,48	2	25	4,50	3	22	4,55	4
17	4,66	1	15	4,56	2	28	4,56	3	23	4,56	4
18	4,67	1	26	4,75	2	34	4,79	3	27	4,83	4
19	5,00	1	32	5,00	2	36	4,99	3	29	4,94	4
33	5,14	1	35	5,27	2	38	5,36	3	30	5,44	4
39	5,67	1	37	5,60	2	43	5,55	3	31	5,50	4
42	5,69	1	40	5,73	2	46	6,01	3	44	6,06	4
51	6,35	1	41	6,33	2	50	6,26	3	47	6,06	4
54	6,40	1	45	6,41	2	53	6,47	3	48	6,54	4
56	7,03	1	52	6,86	2	63	6,62	3	49	6,57	4
59	7,03	1	55	7,11	2	65	7,41	3	57	7,41	4
60	7,63	1	62	7,58	2	67	7,56	3	58	7,52	4
66	7,63	1	64	7,77	2	68	7,92	3	61	7,95	4
69	8,24	1	73	8,16	2	77	8,02	3	70	8,00	4
71	8,54	1	79	8,55	2	81	8,65	3	74	8,69	4
72	9,02	1	80	8,95	2	87	8,79	3	75	8,77	4
76	9,02	1	83	9,03	2	91	9,05	3	82	9,12	4
78	9,50	1	86	9,50	2	94	9,25	3	88	9,16	4
84	9,59	1	89	9,60	2	98	9,60	3	90	9,68	4
85	9,99	1	97	9,95	2	99	9,83	3	92	9,81	4
93	10,20	1	100	10,28	2	103	10,29	3	101	10,33	4
95	10,71	1	105	10,54	2	107	10,44	3	102	10,33	4
96	10,71	1	108	10,82	2	112	10,82	3	110	10,84	4
104	10,96	1	109	10,95	2	115	10,94	3	111	10,93	4
106	10,99	1	120	11,04	2	116	11,06	3	119	11,29	4
113	11,79	1	121	11,62	2	117	11,54	3	124	11,54	4
114	11,90	1	122	12,01	2	123	12,03	3	127	12,05	4
118	12,83	1	125	12,73	2	136	12,31	3	130	12,08	4
129	12,83	1	126	12,85	2	143	12,88	3	139	12,89	4
134	13,11	1	128	13,06	2	148	13,00	3	140	12,95	4
135	13,18	1	131	13,22	2	150	13,35	3	141	13,39	4
138	13,65	1	132	13,59	2	157	13,53	3	142	13,51	4
149	13,67	1	133	13,74	2	159	13,94	3	145	14,04	4
152	14,32	1	137	14,14	2	166	14,06	3	146	14,05	4
155	14,33	1	144	14,33	2	169	14,55	3	151	14,62	4
156	15,59	1	147	15,05	2	171	14,96	3	153	14,81	4
167	15,70	1	160	15,70	2	175	15,76	3	154	15,82	4
168	16,11	1	161	16,11	2	176	16,05	3	158	15,89	4
173	16,29	1	162	16,30	2	181	16,71	3	163	16,81	4
177	17,26	1	164	17,19	2	186	17,15	3	170	17,03	4
178	17,82	1	165	18,14	2	188	18,31	3	172	18,43	4
179	19,32	1	174	19,32	2	192	19,00	3	183	18,69	4
180	19,52	1	182	19,63	2	193	20,11	3	184	20,51	4
189	21,46	1	187	20,79	2	195	20,77	3	185	20,64	4
191	21,58	1	194	21,74	2	198	22,16	3	190	22,28	4
200	24,21	1	197	23,38	2	199	22,89	3	196	22,69	4
Totale groepsmassa	547,43	gr		545,50	gr		545,92	gr		545,85	gr
Totaalgewicht: 2184,69 gr											

Bijlage P: Stuweigenschappen

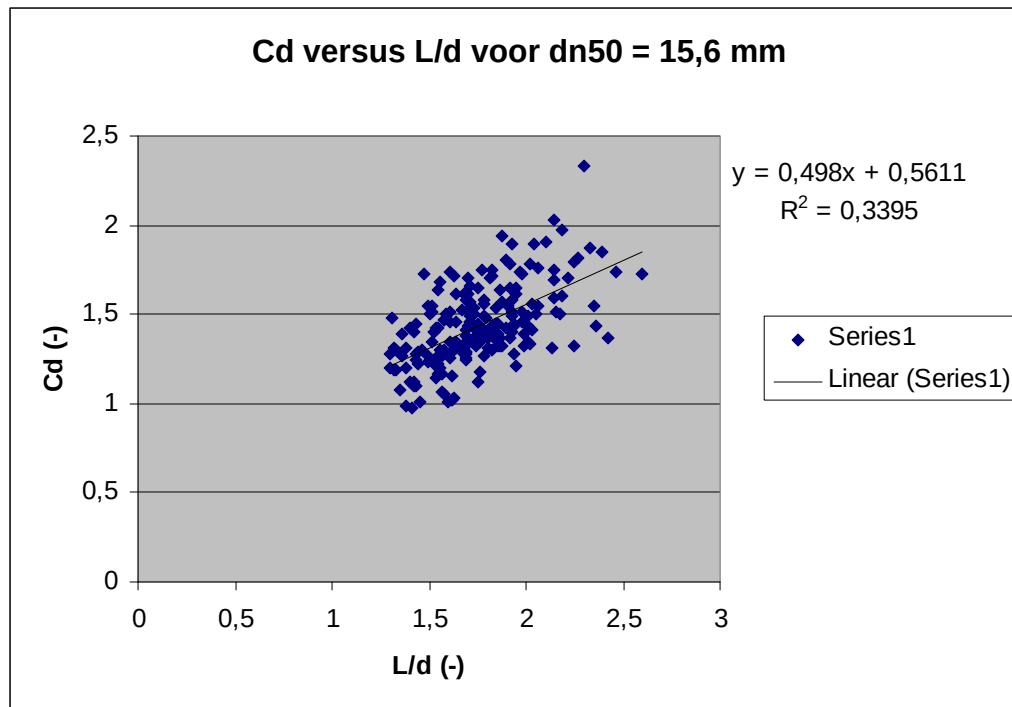


Q (l/s)	Q (m3/s)	Ugem (m/s)	h _k (m)	h _k +a (m)	a (m)	Q (m3/s)
269	0,27	0,41	0,307	0,815	0,508	0,27
202	0,20	0,30	0,256	0,825	0,569	0,20
135	0,13	0,20	0,198	0,825	0,627	0,13
101	0,10	0,15	0,164	0,825	0,661	0,10
67	0,07	0,10	0,126	0,825	0,699	0,07
0	0,00	0,00	0,000	0,825	0,825	0,00

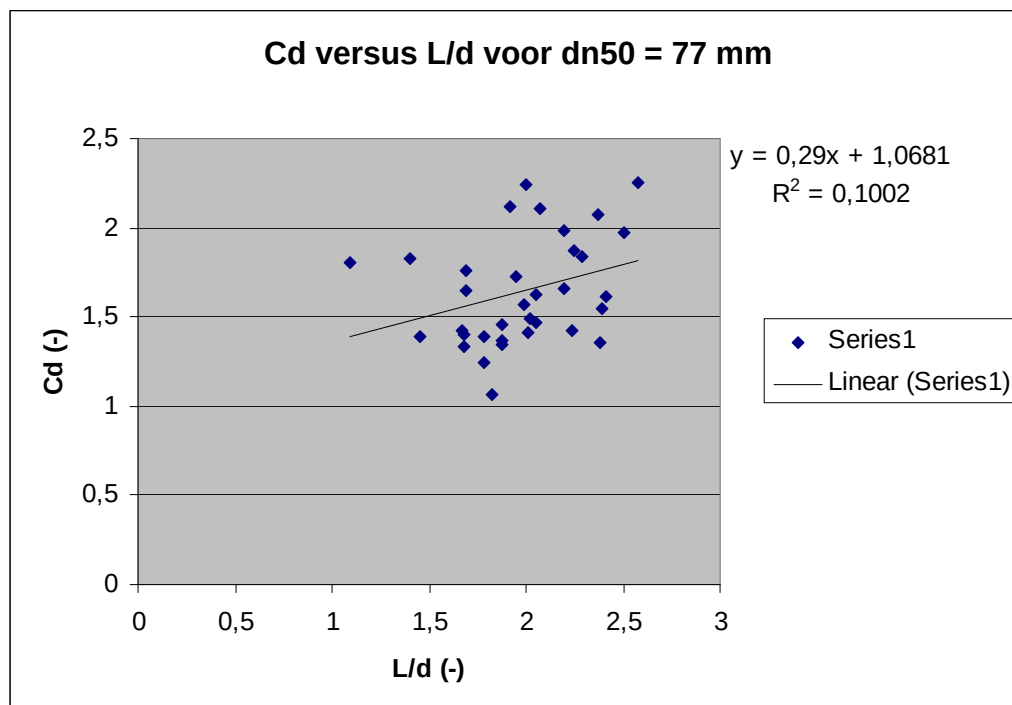


Bijlage Q: Weerstandscoefficienten

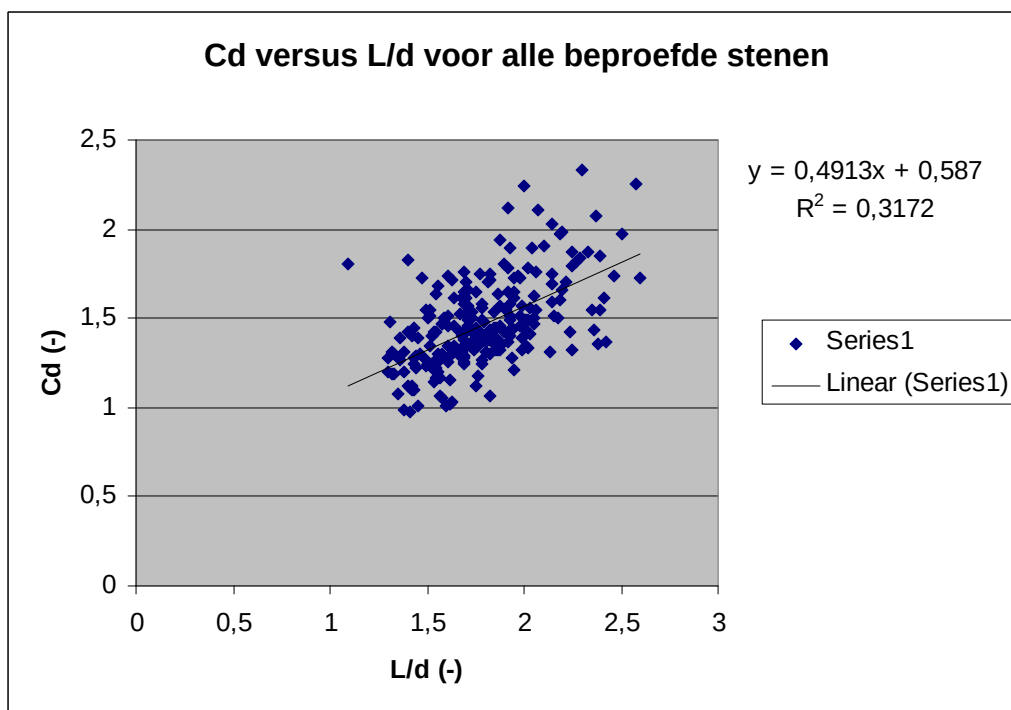
In deze bijlage worden de weerstandscoefficienten per sortering en totaal getoond.



figuur Q-1 Weerstandscoefficient stenen met een d_{n50} van 15,6 mm



figuur Q-2 Weerstandscoefficient stenen met een d_{n50} van 77 mm



figuur Q-3 Weerstandscoefficiënt alle stenen

Bijlage R: Afleiding van Mazijk

Afleiden traject voor de verticale snelheid

Uitgangspunten

- De steen bevindt zich juist onder water
- De beginsnelheid is 0 m/s
- Bolvormig lichaam met diameter D

Basisvergelijkingen

Krachten op een lichaam onder water:

De zwaartekracht: $F_g = \frac{1}{6} \pi \rho_s g D^3$ (R.1)

De opwaartse kracht $F_{opw} = \frac{1}{6} \pi \rho_w g D^3$ (R.2)

De weerstandskracht $F_w = \frac{1}{8} \pi C_d \rho_w U^2 D^2$ (R.3)

De bewegingsvergelijking:

$$F = ma \quad (R.4)$$

Ingevuld:

$$\frac{1}{6} \pi (\rho_s - \rho_w) g D^3 - \frac{1}{8} \pi C_d \rho_w U^2 D^2 = \frac{1}{6} \pi \rho_s D^3 \frac{dU}{dt} \quad (R.5)$$

Anders:

$$\frac{dU}{dt} + C_1 U^2 + C_2 = 0 \quad (R.6)$$

Waarin:

$$C_1 = \frac{3}{4} C_d \frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{1}{D} \quad (R.7)$$

$$C_2 = \frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_s} g \quad (R.8)$$

Analytische uitwerking

Er geldt:

$$\frac{dU}{dt} = U \frac{dU}{dx} \quad (\text{R.9})$$

Dus ook:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU}{dx} \frac{dx}{dt} \quad (\text{R.10})$$

Substitutie geeft:

$$\begin{aligned} U \frac{dU}{dx} + C_1 U^2 + C_2 &= 0 \\ \frac{dU^2}{dx} + 2(C_1 U^2 + C_2) &= 0 \\ \frac{1}{C_1} \frac{d(C_1 U^2 + C_2)}{dx} + 2(C_1 U^2 + C_2) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{R.11})$$

Scheiding van variabelen:

$$\frac{d(C_1 U^2 + C_2)}{C_1 U^2 + C_2} = -2C_1 dx \quad (\text{R.12})$$

Integreren:

$$\ln(C_1 U^2 + C_2) = -2C_1 x + \text{cst} \quad (\text{R.13})$$

Met beginwaarde $t = 0 : x = 0$ en $U = 0$ wordt de cst: $\ln C_2$

De oplossing van de differentiaalvergelijking wordt dus:

$$\ln \frac{C_1 U^2 + C_2}{C_2} = -2C_1 x \quad (\text{R.14})$$

$$U = \sqrt{\frac{C_2}{C_1} (e^{-2C_1 x} - 1)} \quad (\text{R.15})$$

Door $\frac{dU}{dt} = 0$ te stellen wordt de evenwichtssnelheid gevonden:

$$U_e = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g \frac{D}{C_d}} \quad (\text{R.16})$$

Hieruit volgt:

$$\frac{U}{U_e} = \sqrt{1 - e^{-\beta x}} \quad (\text{R.17})$$

$$\text{met } \beta = 1,5 \frac{C_d}{D} \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad (\text{R.18})$$

Anders geschreven:

$$x = -\frac{1}{\beta} \ln(1 - \alpha^2) \quad (\text{R.19})$$

Na integreren naar t en enig herschrijven volgt:

$$\frac{U}{U_e} = 1 - \frac{2}{e^{\beta U_e t} + 1} \quad (\text{R.20})$$

en

$$x = \frac{2}{\beta} \ln \frac{1}{2} (1 + e^{\beta U_e t}) - U_e t \quad (\text{R.21})$$

Bijlage S: Het enkele steen model

(Deze bijlage is tot stand gekomen met behulp van Vrijling et al [1995])

Een steen ondergedompeld in water zal een resulterende kracht hebben gelijk aan:

$$F_{res} = \nu \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot g \cdot D^3 \quad (S.1)$$

Waarin: ρ_s	massadichtheid van het voorwerp	[kg/m ³]
ρ_w	massadichtheid van het water	[kg/m ³]
g	versnelling van de zwaartekracht	[m/s ²]
D	kenmerkende afmeting, straal; ribbe	[m]
ν	vormfactor	[-]

Er werkt tijdens de val tevens een weerstandskracht:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \xi \cdot C_d \cdot \rho_w \cdot D^2 \cdot U^2 \quad (S.2)$$

Waarin: C_d	weerstandscoefficiënt	[-]
ξ	vormfactor	[-]
U	snelheidsverschil tussen water en lichaam	[m/s]

Na het bereiken van de evenwichtsvalsnelheid geldt de volgende vergelijking:

$$w = \sqrt{2 \cdot \frac{\nu}{\xi} \cdot D \cdot \Delta \cdot \frac{g}{C_d}} = cst \cdot \sqrt{D \cdot \Delta \cdot \frac{g}{C_d}} \quad (S.3)$$

Waarin: w	evenwichtsvalsnelheid	[m/s]
$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$		[-]
cst	vormfactor	[-]

Tijdens het vallen werkt er tevens een liftkracht op de steen, loodrecht op de bewegingsrichting:

$$F_l = \frac{1}{2} \cdot \varsigma \cdot C_l \cdot \rho_w \cdot U^2 \cdot D^2 \quad (S.4)$$

Waarin: C_l	weerstandscoefficiënt loodrecht op bewegingsrichting	[-]
U	snelheidsverschil tussen water en lichaam	[m/s]
ς	vormfactor	[-]

Als dit gecombineerd wordt met de 2^e wet van Newton geldt:

$$a = \frac{\varsigma \cdot \rho_w \cdot U^2 \cdot D^2 \cdot C_l}{\rho_s \cdot D^3} \quad (S.5)$$

Waarin: a	versnelling	[m/s ²]
-------------	-------------	---------------------

Door dit te combineren met vereenvoudigde vergelijking voor de evenwichtssnelheid wordt de volgende vergelijking verkregen:

$$a = \zeta \cdot cst^2 \frac{\rho_w \cdot C_l}{\rho_s \cdot C_d} \cdot g \cdot \Delta \quad (S.6)$$

Gegeven dat de richting van de horizontale versnelling wisselt volgens:

$$St = \frac{\varpi \cdot D}{U} = \frac{2\pi D}{T \cdot U} \quad (S.7)$$

Waarin: St getal van Strouhal [-]
 ϖ radiaalfrequentie [s⁻¹]
T wervelafschudperiode [s]

Indien aangenomen wordt dat het Strouhalgetal definieerbaar is voor 3 dimensionale stroming, wordt de volgende vergelijking m.b.v. de vereenvoudigde vergelijking voor de evenwichtsvalsnelheid opgesteld:

$$T = \frac{2 \cdot \pi \sqrt{D}}{cst \cdot St \cdot \sqrt{\Delta \frac{g}{C_d}}} \quad (S.8)$$

Indien de weerstand ten gevolge van de liftkracht wordt verwaarloosd, is de afgelegde horizontale afstand tussen 2 versnelling richtingswisselingen gelijk aan:

$$s = \frac{1}{2} a \cdot T^2 \quad (S.9)$$

Waarin: s horizontale verplaatsing [m]

Door nu de met de vereenvoudigde vergelijkingen voor de evenwichtsvalsnelheid gecombineerde vergelijkingen te substitueren volgt:

$$s = \frac{cste \cdot \rho_w \cdot C_l \cdot D}{St^2 \cdot \rho_s} \quad (S.10)$$

De evenwichtsvalsnelheid is bij benadering constant zodat voor de verticaal afgelegde afstand tussen 2 richtingswisselingen geldt:

$$s_{ver} = U \cdot T = \frac{2\pi D}{St} \quad (S.11)$$

Waarin: s_{ver} verticale verplaatsing [m]

Het aantal horizontale snelheidswisselingen N bedraagt dan:

$$N \approx \frac{h}{s_{ver}} \approx \frac{h \cdot St}{2\pi D} \quad (S.12)$$

Waarin: h waterdiepte [m]

Door de onregelmatige vorm en de veranderende oriëntatie van de steen zullen de wervels willekeurig van het oppervlakte van de steen loslaten. Hierdoor is de optredende verplaatsingsrichting per wisseling onafhankelijk van voorgaande verplaatsingsrichting en -

grootte. Hierdoor kan het proces omschreven worden als een diffusieproces, een zogenaamde Random Walk. Hierdoor is de som van N onafhankelijke verplaatsing normaal verdeelt met een gemiddelde 0 en een standaardafwijking van:

$$\sigma_n = s \cdot \sqrt{N} = \frac{cste \cdot \rho_w \cdot C_l \cdot D}{St^2 \cdot \rho_s} \sqrt{\frac{h \cdot St}{2\pi D}} = \frac{cst2}{\sqrt{St^3}} \cdot C_l \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} \sqrt{h \cdot D} \quad (S.13)$$

Aangenomen dat bovenstaande een correcte weergave is van de optredende processen, is de traagheidsstraal σ_n evenredig met de wortel uit de waterdiepte maal de steenafmeting:

$$\sigma_n \propto \sqrt{h \cdot D} \quad (S.14)$$

Uit verschillende onderzoeken is gebleken dat dit een redelijke mathematische weergave van het optredende fenomeen is.

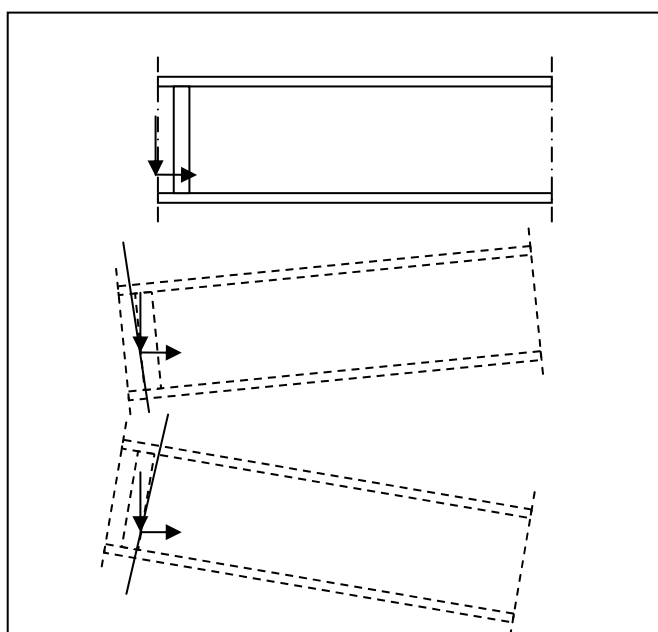
Bijlage T: Mogelijke oorzaken toename evenwichtsvalsnelheid

In deze bijlage wordt getracht een verklaring te zoeken voor het verloop van de evenwichtsvalsnelheden bij toenemende stroomsnelheid.

Er wordt hiervoor naar 3 hoofdzaken gekeken. Deze zullen in de subbijlagen worden behandeld.

Bijlage T-1: Scheefstand camera

Doordat de camera waarmee de opnames werden gemaakt elke dag aan het einde van de dag achter slot en grendel werd gezet, is de stand van de camera elke keer verschillend. Het is mogelijk dat de camera soms iets scheef, of met een andere hoek werd neergezet. Hierdoor is het mogelijk dat de resultaten beïnvloed zijn door de camerapositie en –opstelling. Er zal nu een klein rekenvoorbeeld gegeven worden om de invloed daarvan te bepalen.



In XXXX staat de mogelijke scheefstand van de camera overdreven uitgebeeld. Als er uitgaan wordt van een maximale scheefstand van a graden treedt het volgende beeld op:

De bepaalde verticale verplaatsing is x. De werkelijke verticale verplaatsing is L. Hierbij is de volgende vergelijking toepasbaar:

$$L = \cos(\alpha) \cdot z$$

De evenwichtsvalsnelheid wordt bepaald over de onderste helft van de goot. Dat is een tijdsduur van ongeveer 0,5 s.

De werkelijke

evenwichtsvalsnelheid wordt daarmee:

figuur T-1 Invloed scheefstand camera

$$w = \frac{dz}{0,5} \quad w_{\text{werk}} = \frac{\cos(\alpha) \cdot dz}{0,5}$$

In onderstaande tabel zullen bij enkele waarden van a de procentuele verschillen bekeken worden. Aangezien het een cosinusfunctie betreft, heeft een negatieve scheefstand dezelfde invloed.

w_{bep} (m/s)	a (°)	w_{werk} (m/s)	? (%)
0,60	0	0,600	0
0,60	5	0,598	0,33
0,60	10	0,591	1,5

tabel T-1 Invloed scheefstand camera

De afwijking bij een scheefstand van 10° zou dus voor afwijking van de evenwichtsvalsnelheid kunnen zorgen die wordt veroorzaakt door positionering van de camera. Bij de opstelling van de videocamera is de maximale scheefstand 2 a 3 graden. De hiermee geïnduceerde fout bedraagt dan beduidend minder dan 0,33 %.

Dit is dus niet de oorzaak van de optredende verschillen in evenwichtsvalsnelheid.

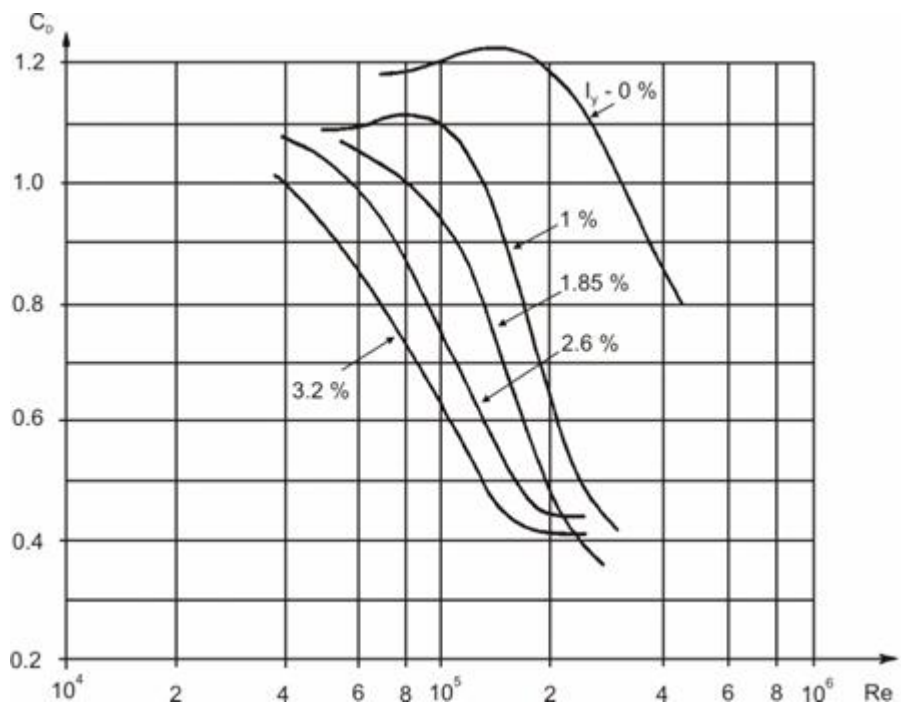
Bijlage T-2: De invloed van turbulentie

Bij de proeven om de evenwichtsvalsnelheden te bepalen in stilstaand water zijn de stenen met tussenpozen van ongeveer 15 – 20 seconden achter elkaar losgelaten. Dit opdat de ontstane turbulentie van de zogvorming enigszins uit kon dempen. Er is tevens een proef uitgevoerd met 100 individuele stenen met een tussentijd van 30 seconden. De verschillen tussen de gemiddelde weerstandscoefficienten van deze proeven (gemiddelden van dezelfde stenen) waren zeer klein. Zie tabel T-2 voor de waarden. Deze resultaten dienen met voorzichtigheid gehanteerd te worden, daar zij bepaald zijn aan de hand van een beperkt aantal metingen.

	Pauzes tussen stenen (s)	Gemiddelde weerstandscoefficiënt (-)
Serie 1	0,15-0,20	1,42
Serie 2	0,15-0,20	1,45
Serie 3	0,15-0,20	1,43
Serie 4	0,30	1,50

tabel T-2 Tijd tussen loslaten en optredende evenwichtsvalsnelheden

Uit deze tabel blijkt dus dat bij een langere periode van loslaten een hogere weerstandscoefficiënt hoort, waarschijnlijk omdat de steen door minder turbulent water valt en blijkbaar een lagere evenwichtsvalsnelheid heeft, dit komt ook naar voren in onderstaande figuur.



figuur T-2 Afname weerstandscoefficiënt cylinder bij toename turbulentie (Pirner [2002])

In Robertson et al [1972] is onderzoek gedaan naar het effect van turbulentie op de weerstandscoefficiënt van hoekige lichamen voor $5000 < Re < 70000$.

De conclusie in dat rapport was als volgt:

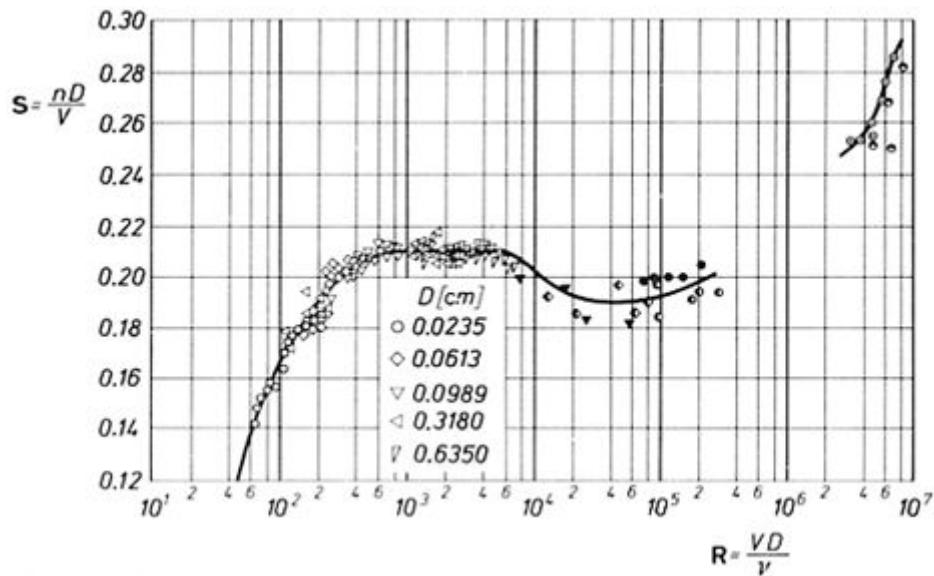
De aanwezige turbulentie zorgt voor een grotere menging van de vloeistof met een hoge snelheid aan de buitenkant van de loslating en een lage snelheid aan de binnenkant van de loslating. Hierdoor ontstaan 2 effecten:

1. de stroomlijnen worden dichter naar het lichaam getrokken
2. de schuifspanning langs het oppervlak van de loslating is groter

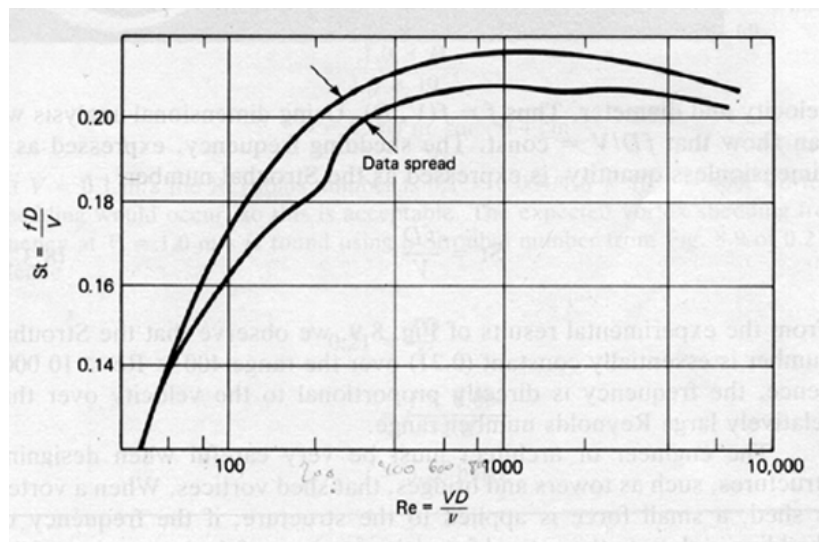
Bij lichamen waar het mogelijk is dat de stroming weer kan gaan aanliggen (in dit geval dus stortsteen waar na loslating de grenslaagstroming weer even kan aanliggen, zie random

walk) neemt de druk in het zog van een lichaam toe met een toename van de turbulentie. Hierdoor wordt het drukverschil tussen voor en achterkant kleiner en dus ook de weerstand. Hetzelfde effect treedt op bij formule 1 wagens, die wanneer ze zeer dicht achter elkaar gaan rijden, net even een hogere snelheid kunnen behalen. Lichamen zoals platen en schijven, waarbij de stroming niet meer kan gaan aanliggen vertonen een toename in de weerstandscoefficiënt, vanwege een afname van de druk in het zog waardoor het totale drukverschil groter wordt. Over het algemeen neemt de weerstandscoefficiënt af bij toenemende turbulentie. Dit fenomeen zou de toename van de evenwichtsvalsnelheid bij toenemende stroomsnelheid kunnen verklaren.

Bijlage T-3: De invloed van het getal van Strouhal



figuur T-3 Verloop Strouhal versus Reynolds (bron onbekend)



figuur T-4 Verloop Strouhal versus Reynolds (Potter and Wiggert [1991])

Ondanks de niet te achterhalen bron van figuur T-3, wordt deze figuur toch opgenomen in deze bijlage, gesterkt door het feit dat figuur T-4 gebruikt is om figuur T-3 te produceren en er grote overeenkomsten bestaan..

Uit figuur T-3 en figuur T-4 blijkt dat het getal van Strouhal niet constant is bij een toenemend Reynoldsgetal. Er is bij stroming in de goot sprake van 2 manieren om het Reynoldsgetal te bepalen. Het Reynoldsgetal gegeven door de evenwichtsvalsnelheid en de diameter van de steen en het Reynoldsgetal gegeven door de stroomsnelheid en de afmetingen van de goot.

U (m/s)	R	Re
0	0,268887	0
0,1	0,268887	20217,0374
0,22	0,268887	44477,4824
0,4	0,268887	80868,1498

tabel T-3 Reynoldsgetal goot

De in tabel T-3 gegeven waarden geven aan dat in de goot een turbulente stroming optreedt. In bijlage XXX zijn figuren opgenomen die het volgende beeld schetsen met betrekking tot de toename van turbulentie. Hieruit blijkt dat het Strouhal nummer afhankelijk is van de windsnelheid en de turbulentie.

Zie onderstaande samenvatting:

- Bij toenemende turbulentie neemt de weerstandscoefficiënt van een cilinder af
- Bij toenemende turbulentie neemt het getal van Strouhal gemeten bij een cilinder toe

Door dit te combineren met de resultaten van de experimenten kan het volgende worden geconcludeerd:

- De afname van de weerstandscoefficiënt bij toenemende stromingssnelheid zorgt voor een toename van de evenwichtsvalsnelheid. Dit kan de toename van de evenwichtsvalsnelheid verklaren
- De toename van de spreiding van de gestorte stenen is te wijten aan de afname van het getal van Strouhal. Dit komt overeen met de resultaten van de experimenten die laten zien dat de spreiding in zowel de x- als de y-richting toeneemt bij toenemende stroomsnelheid.

Indien het Reynoldsgetal berekend wordt aan de hand van de evenwichtsvalsnelheid en de nominale diameter worden de waarden in tabel T-4 verkregen.

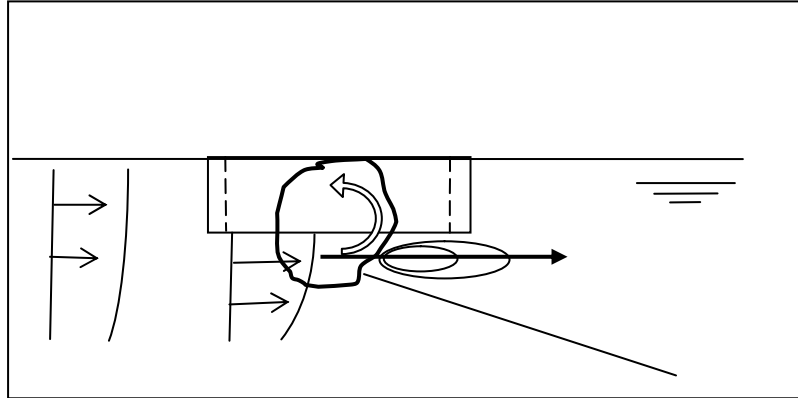
d_n (m)	w (m/s)	Re (-)
0,010	0,48	3634
0,022	0,72	11860

tabel T-4 Reynoldsgetalen volgens evenwichtsvalsnelheid en diameter

Indien men deze waarden vergelijkt met figuur T-4, blijkt dat er een kleine afname plaatsvindt van het getal van Strouhal. Deze afname is echter niet zo groot als de afname bij toenemende stroomsnelheid.

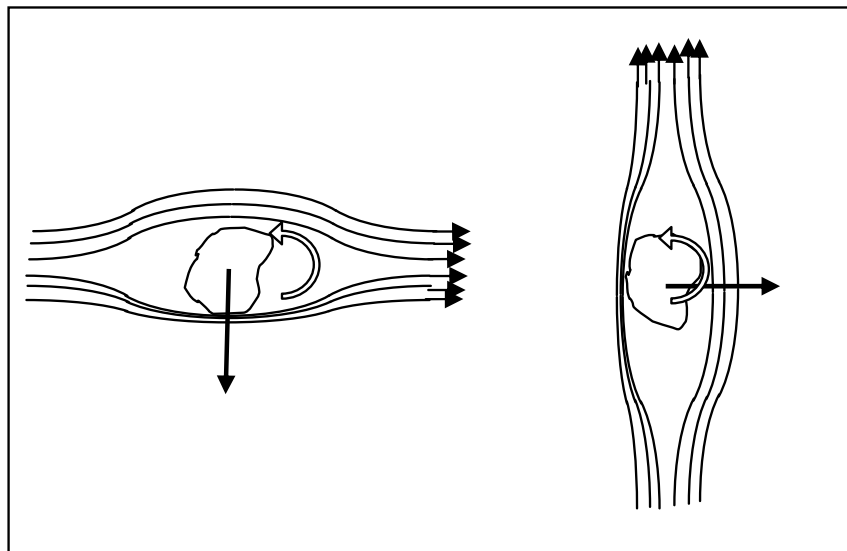
Bijlage T-4: Interpretatie volgens valbeweging

Doordat een steen in een min of meer gedwongen positie ondergedompeld wordt losgelaten in een ring stroomt het water tegen de onderzijde van de steen waardoor er onderdruk aan de luwte zijde ontstaat. Hierdoor ontstaat een moment waardoor een steen eerder zal gaan roteren.



figuur T-5 Oorzaak rotatie stenen

Een roterende steen heeft een grotere kans op een grotere uitwijking wat resulteert in een grotere spreiding.



figuur T-6 Richting van de kracht als gevolg van het in rotatie komen van een steen

Indien de steen inderdaad in rotatie komt gaat deze roteren met zijn as loodrecht op de stroomrichting. Het Magnus-effect gaat dan voor additionele krachten zorgen. In het geval beschreven in figuur T-6 zal er rotatie tegen de klok in plaatsvinden waardoor de steen een extra kracht naar beneden krijgt en dus een hogere evenwichtsvalsnelheid krijgt. Doordat de steen hetzelfde stroombeeld vertoont in verticale zin zal de extra kracht met de stroomrichting mee gaan werken.

De offset bij hogere stroomsnelheden minder is dan verwacht. Debet hieraan kan zijn dat de weerstandscoefficiënt kleiner wordt en dus de evenwichtsvalsnelheid groter.

Bijlage U: Numeriek Model

Bijlage U-1: Basisberekening model

De volgende vergelijking kan worden toegepast op een individuele steen die onder invloed van stroming door het water valt.

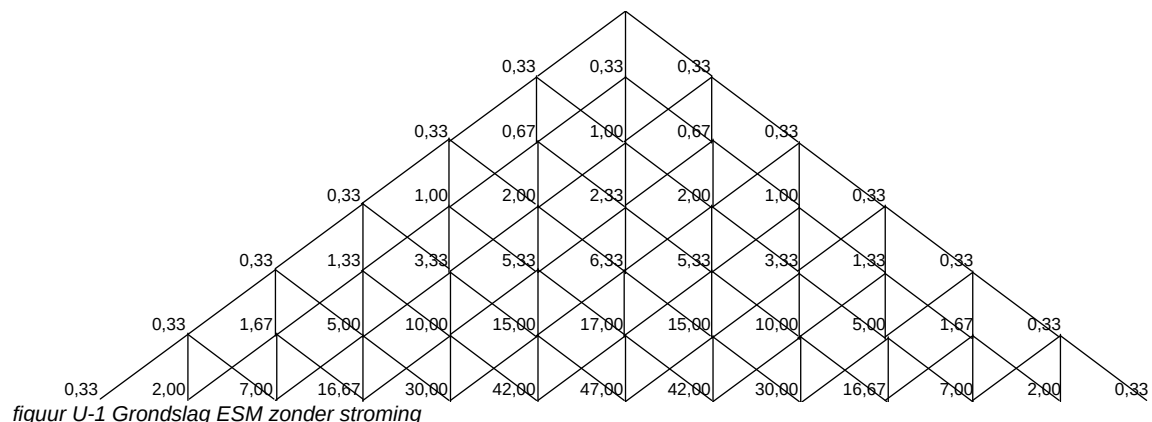
$$f_{\underline{x}}(x) = \frac{1}{c' \sqrt{2\pi \cdot h \cdot d_n}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - h \frac{C_b \cdot \bar{U}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}}{c' \sqrt{h \cdot d_n}} \right)^2}$$

Dit is een normale verdeling rond het punt $\mu = h \frac{C_b \cdot \bar{U}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}$ met een spreiding van $c' \sqrt{h \cdot d_n}$.

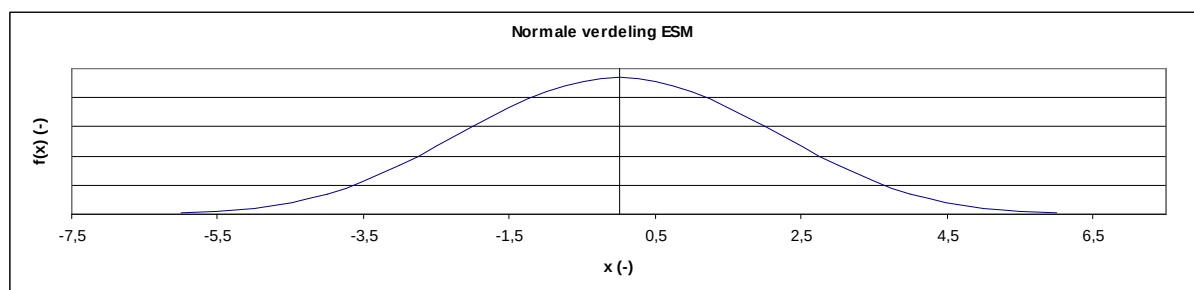
Als basis is het ESM model gebruikt.

Het Enkele Steen Model gaat er vanuit dat een steen steeds dezelfde kans heeft om naar links of naar rechts uit te wijken, onafhankelijk van de voorgaande beweging. Er volgt dus p_1

$= p_2 = p_3 = \frac{1}{3}$. Dit geldt voor stilstaand water. De loslating zorgt dan voor een kracht loodrecht op de verticaal.



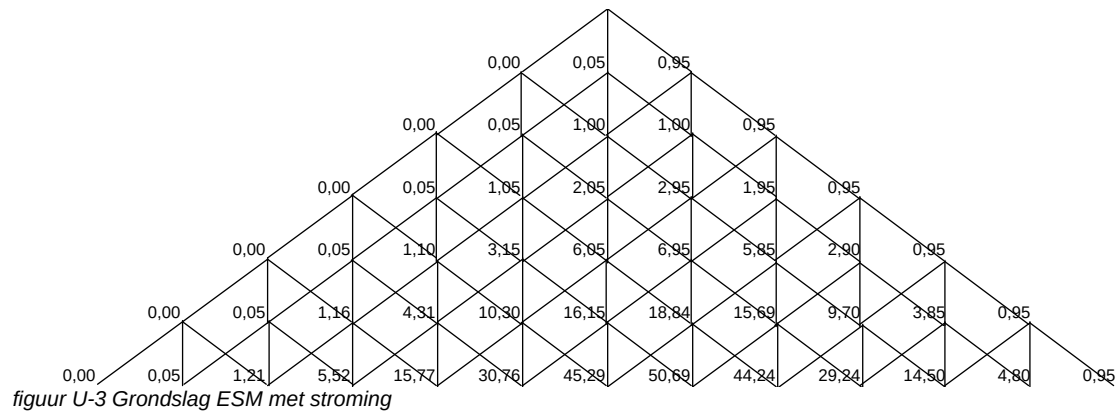
Hieruit volgt de normale verdeling volgens de Centrale Limiet Stelling. Uitgaande van het feit dat bij een steekproef waarvan n groot genoeg is de verdeling van de uitkomsten zich als normaal verdeelt gaat gedragen en de uitkomsten onafhankelijk van elkaar zijn.



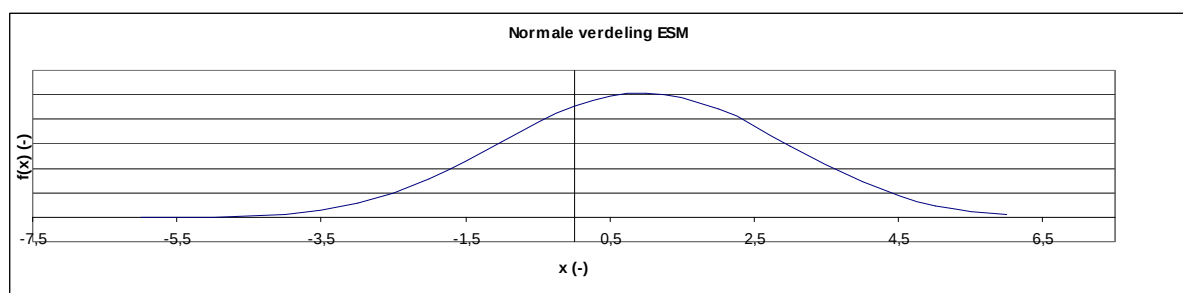
figuur U-2 Verdeling ESM zonder stroming

Indien een steen in stromend water valt zal de kans van een verplaatsing naar links kleiner worden en de kans op een verplaatsing naar rechts groter worden. Dit verandert echter niets

aan de verdeling van een groot aantal uitkomsten, die zich onafhankelijk van de uitgangsverdeling normaal verdeelt gedragen.



De kans dat een steen naar links beweegt is 0,001, naar beneden 0,049 en naar rechts 0,95. De verdeling van de uitkomsten is weer normaal verdeelt, maar het gemiddelde is verschoven. Zie ook:



Indien een sortering steen gedefinieerd wordt met een d_{n50} en een $\frac{d_{85}}{d_{15}}$ kan de zeefkromme worden berekend. Door de sortering op te vatten als een sortering van 200 stenen kan worden aangenomen dat de zeefkromme de praktijk goed representeert.

D_n / x	X_1	X_2	X_i	X_n
$D_{n0,5}$	$f(X_1, D_{n0,5})$	$f(X_2, D_{n0,5})$	$f(X_i, D_{n0,5})$	$f(X_n, D_{n0,5})$
D_{n1}	$f(X_1, D_{n1})$	$f(X_2, D_{n1})$	$f(X_i, D_{n1})$	$f(X_n, D_{n1})$
$D_{n1,5}$	$f(X_1, D_{n1,5})$	$f(X_2, D_{n1,5})$	$f(X_i, D_{n1,5})$	$f(X_n, D_{n1,5})$
D_{n2}	$f(X_1, D_{n2})$	$f(X_2, D_{n2})$	$f(X_i, D_{n2})$	$f(X_n, D_{n2})$
$D_{n,i}$	$f(X_1, D_{n,i})$	$f(X_2, D_{n,i})$	$f(X_i, D_{n,i})$	$f(X_n, D_{n,i})$
$D_{n,100}$	$f(X_1, D_{n,100})$	$f(X_2, D_{n,100})$	$f(X_i, D_{n,100})$	$f(X_n, D_{n,100})$
	$f(x_1) = \frac{1}{200} \sum_{j=0,5}^{100} f(x_1, d_{n,j})$	$f(x_2) = \frac{1}{200} \sum_{j=0,5}^{100} f(x_2, d_{n,j})$	$f(x_i) = \frac{1}{200} \sum_{j=0,5}^{100} f(x_i, d_{n,j})$	$f(x_n) = \frac{1}{200} \sum_{j=0,5}^{100} f(x_n, d_{n,j})$

tabel U-1 Rekenwijze numeriek model

Nu wordt voor elke steen de relevante $f(x)$ verdeling, $N\left(h \frac{\sqrt{\frac{1}{2} C_d \cdot \bar{U}}}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}}, c' \sqrt{h \cdot d_n}\right)$

berekend. De verwachting van de plek van neer komen van een individuele steen is dan bekend. Door de $f(x)$ waarde van alle stenen te middelen per x_i is de gesommeerde kansverdeling bekend. Deze verdeling gaat bij toenemende stroomsnelheid zorgen voor een toename van de bovenstroomse helling en een afname van de benedenstroomse helling. De uitwijkingen van een enkele steen blijven normaal verdeelt, vanwege de toepassing van de centrale limiet stelling.

Door toepassen van bovenstaande rekenwijze kan voor een stort van een sortering individueel losgelaten stenen in stromend water de verdeling van de uitwijkingen in de stromingsrichting worden bepaald.

Bijlage U-2: Visual Basic Source numeriek Excel model

De 'source' zoals die is gemaakt voor Excel visual basic staat op de hiernavolgende bladzijden

```
' Invoer variabelen.
Public Ugem As Double
Public Diepte As Double
Public Cb As Double
Public Csigma As Double
Public Rhow As Double
Public Rhos As Double
Public Dn15 As Double
Public Dn50 As Double
Public Dn85 As Double
Public B As Double
Public Aantal As Integer
Public G As Double

Public Sub Bereken1()
'master sub
    Setwaarden Dn15, Aantal, Dn50, B, Cb, Csigma, Ugem, Diepte, Rhos, Rhow, G
    Zeefkromme Dn15, Dn50, Dn85, B, Aantal
    Xbepaling Dn15, Dn50, B, Cb, Csigma, Ugem, Diepte, Rhos, Rhow, G
    tabelnormaal Dn15, Dn50, B, Cb, Csigma, Ugem, Diepte, Rhos, Rhow, G
    normaalberek Dn15, Dn50, B, Cb, Csigma, Ugem, Diepte, Rhos, Rhow, G
    Grafiek_Zeefkromme
    grafiekModel
    Call keuzemenu
End Sub

Function Setwaarden(Dn15 As Double, Aantal As Integer, Dn50 As Double, B As Double, Cb As Double, Csigma As Double, Ugem As Double, Diepte As Double, Rhos As Double, Rhow As Double, G As Double) As Double()
'invoer variabelen
    Ugem = InputBox("Wat is de dieptegemiddelde snelheid? >= 0 m/s (Decimalen invoeren met komma!)")

    While Ugem < 0 = True
        Ugem = InputBox("De dieptegemiddelde snelheid moet positief zijn! (Decimalen invoeren met komma!)")
    Wend

    Diepte = InputBox("Wat is de diepte? ( >= 0 m ) (Decimalen invoeren met komma!)")

    While Diepte <= 0 = True
        Diepte = InputBox("De diepte moet groter zijn dan 0 meter! (Decimalen invoeren met komma!)")
    Wend

    Cb = InputBox("Wat is de meeneemcoëfficiënt? ,5<= Cb <= 1,2 (Decimalen invoeren met komma!)")

    While Cb < 0.5 Or Cb > 1.2 = True
        Cb = InputBox("De meeneemcoëfficiënt moet groter zijn dan 0,5 of kleiner zijn dan 1,2! (Decimalen invoeren met komma!)")
    Wend

    Csigma = InputBox("Wat is de spreidingsconstante? ,5 <= Csigma <= 1,5 (Decimalen invoeren met komma!)")

    While Csigma < 0.5 Or Csigma > 1.5 = True
        Csigma = InputBox("De spreidingsconstante moet groter zijn dan 0,5 of kleiner zijn dan 1,5! (Decimalen invoeren met komma!)")
    Wend

    Rhow = InputBox("Wat is de dichtheid van de water? 800 <= rhos <= 1200 (Decimalen invoeren met komma!)")

    While Rhow < 800 Or Rhow > 1200 = True
        Rhow = InputBox("De dichtheid van het water moet groter zijn dan 800 of kleiner zijn dan 1200! (Decimalen invoeren met komma!)")
    Wend

    Rhos = InputBox("Wat is de dichtheid van het steen? 1500 <= rhow <= 3600 (Decimalen invoeren met komma!)")

    While Rhos < 1500 Or Rhos > 3600 = True
        Rhos = InputBox("De dichtheid van de steen moet groter zijn dan 1500 of kleiner zijn dan 3600! (Decimalen invoeren met komma!)")
    Wend
```

```

Dn50 = InputBox("Wat is de dn50? >= 0 m (Decimalen invoeren met komma!)")

While Dn50 < 0 = True
    Dn50 = InputBox("De nominale diameter moet groter zijn dan 0 m! (Decimalen invoeren met komma!)")
Wend

B = InputBox("Wat is de breedte van de gradering? 1,1 <= B <= 2,5")

While B < 1.1 Or B > 2.5 = True
    B = InputBox("De breedte van de gradering moet kleiner zijn dan 2,5!")
Wend

G = InputBox("Wat is de zwaartekrachtversnelling? 9 <= g <= 11")

While G < 9 Or G > 11 = True
    G = InputBox("De zwaartekrachtversnelling moet groter zijn dan 9 of kleiner zijn dan 11!")
Wend

Aantal = 200

End Function

Function Zeefkromme(Dn15 As Double, Dn50 As Double, Dn85 As Double, B As Double, Aantal As Integer) As Double()
    'Produceerd als normaal verdeeld beschouwde zeefkromme
    Dim NewSheet As Worksheet
    Dim I As Integer
    Dim Sigma As Double
    Dim Ksi As Double
    Dim Filenaam

    Ksi = 1.04
    Dn15 = ((2 / (1 + B)) * Dn50)
    Dn85 = Dn15 * B
    Sigma = ((Dn85 - Dn50) / Ksi)

    Filenaam = ("dn50 = " & Dn50 & " b = " & B & " Ugem = " & Ugem & ", diepte = " & Diepte & " Cb = " & Cb & "
    Csigma = " & Csigma)

    Set NewBook = Workbooks.Add
    With NewBook
        .SaveAs Filename:=Filenaam
    End With

    Set NewSheet = Worksheets.Add
    NewSheet.Name = "Zeefkromme"

    Range("A1").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "f(x)"
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select
    For I = 3 To Aantal - 1
        ActiveCell.FormulaR1C1 = (1 / Aantal) * I
        ActiveCell.Offset(0, 1).Select
        ActiveCell.FormulaR1C1 = Application.NormInv((1 / Aantal) * I, Dn50, Sigma)
        ActiveCell.Offset(1, -1).Select
    Next
    ActiveCell.Offset(2, 0).Select

    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Sigma Zeef"
    ActiveCell.Offset(0, 1).FormulaR1C1 = Sigma
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select

    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Dn15"
    ActiveCell.Offset(0, 1).FormulaR1C1 = Dn15
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select

    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Dn50"
    ActiveCell.Offset(0, 1).FormulaR1C1 = Dn50
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select

    ActiveCell.FormulaR1C1 = "B"
    ActiveCell.Offset(0, 1).FormulaR1C1 = B
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select

```

```

ActiveCell.FormulaR1C1 = "Ksi"
ActiveCell.Offset(0, 1).FormulaR1C1 = Ksi
ActiveCell.Offset(1, 0).Select

Worksheets("Sheet1").Delete
Worksheets("Sheet2").Delete
Worksheets("Sheet3").Delete

End Function

Function Xbepaling(Dn15 As Double, Dn50 As Double, B As Double, Cb As Double, Csigma As Double, Ugem As
Double, Diepte As Double, Rhos As Double, Rhow As Double, G As Double) As Double()
'bepaald tussen welke afstanden de grafiek geplot moet worden
Dim Xmax As Double
Dim Xmin As Double
Dim Xstart As Double
Dim Xeind As Double
Dim X85 As Double
Dim X15 As Double
Dim I2 As Integer
Dim dmin As Double
Dim dmax As Double

Range("b2").Select
dmin = ActiveCell

Range("b196").Select
dmax = ActiveCell

Xmax = (Diepte * Cb * Ugem) / Sqr(G * dmin * ((Rhos - Rhow) / Rhow))
Xmin = (Diepte * Cb * Ugem) / Sqr(G * dmax * ((Rhos - Rhow) / Rhow))

sigmaxmax = Csigma * Sqr(Diepte * dmin)
sigmaxmin = Csigma * Sqr(Diepte * dmax)

Xstart = Xmin - 4 * sigmaxmin
Xeind = Xmax + 4 * sigmaxmin

Range("D1").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "x-positie"
ActiveCell.Offset(0, 1).Select

For I2 = 1 To 100
ActiveCell.FormulaR1C1 = Xstart + ((Xeind - Xstart) / 100) * I2
ActiveCell.Offset(0, 1).Select
Next

End Function

Sub Grafiek_Zeefkromme()
'teken zeefkromme

Charts.Add
ActiveChart.ChartType = xlXYScatter
ActiveChart.SetSourceData Source:=Sheets("Zeefkromme").Range("D15")
ActiveChart.SeriesCollection.NewSeries
ActiveChart.SeriesCollection(1).XValues = "=Zeefkromme!R2C2:R198C2"
ActiveChart.SeriesCollection(1).Values = "=Zeefkromme!R2C1:R198C1"
ActiveChart.SeriesCollection(1).Name = ""Zeefkromme""
ActiveChart.Location Where:=xlLocationAsNewSheet, Name:= _
"Grafiek_zeefkromme"
With ActiveChart
.HasTitle = True
.ChartTitle.Characters.Text = "Zeefkromme"
.Axes(xlCategory, xlPrimary).HasTitle = True
.Axes(xlCategory, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text = "dn (m)"
.Axes(xlValue, xlPrimary).HasTitle = True
.Axes(xlValue, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text = "f(x) (-)"
End With
With ActiveChart.Axes(xlCategory)
.HasMajorGridlines = True
.HasMinorGridlines = False
End With
With ActiveChart.Axes(xlValue)

```

```

        .HasMajorGridlines = True
        .HasMinorGridlines = False
    End With
    ActiveChart.HasLegend = False
    ActiveChart.Axes(xlCategory).AxisTitle.Select
    Selection.Characters.Text = "dn (m)"
    Selection.AutoScaleFont = False
    With Selection.Characters(Start:=1, Length:=1).Font
        .Name = "Arial"
        .FontStyle = "Bold"
        .Size = 10
        .Strikethrough = False
        .Superscript = False
        .Subscript = False
        .OutlineFont = False
        .Shadow = False
        .Underline = xlUnderlineStyleNone
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    Selection.AutoScaleFont = False
    With Selection.Characters(Start:=2, Length:=1).Font
        .Name = "Arial"
        .FontStyle = "Bold"
        .Size = 10
        .Strikethrough = False
        .Superscript = False
        .Subscript = True
        .OutlineFont = False
        .Shadow = False
        .Underline = xlUnderlineStyleNone
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    Selection.AutoScaleFont = False
    With Selection.Characters(Start:=3, Length:=4).Font
        .Name = "Arial"
        .FontStyle = "Bold"
        .Size = 10
        .Strikethrough = False
        .Superscript = False
        .Subscript = False
        .OutlineFont = False
        .Shadow = False
        .Underline = xlUnderlineStyleNone
        .ColorIndex = xlAutomatic
    End With
    ActiveChart.ChartTitle.Select
    Selection.Font.Bold = True
    Selection.AutoScaleFont = True
    With Selection.Font
        .Name = "Arial"
        .Size = 12
        .Strikethrough = False
        .Superscript = False
        .Subscript = False
        .OutlineFont = False
        .Shadow = False
        .Underline = xlUnderlineStyleNone
        .ColorIndex = xlAutomatic
        .Background = xlAutomatic
    End With
End Sub

Function tabelnormaal(Dn15 As Double, Dn50 As Double, B As Double, Cb As Double, Csigma As Double, Ugem As Double, Diepte As Double, Rhos As Double, Rhow As Double, G As Double) As Double()
'normale verdeling per steen per x

    Range("A208").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Diepte"
    ActiveCell.Offset(0, 1).FormulaR1C1 = Diepte
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select

    ActiveCell.FormulaR1C1 = "Cb"
    ActiveCell.Offset(0, 1).FormulaR1C1 = Cb
    ActiveCell.Offset(1, 0).Select

```

```

ActiveCell.FormulaR1C1 = "Ugem"
ActiveCell.Offset(0, 1).FormulaR1C1 = Ugem
ActiveCell.Offset(1, 0).Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "g"
ActiveCell.Offset(0, 1).FormulaR1C1 = G
ActiveCell.Offset(1, 0).Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "delta"
ActiveCell.Offset(0, 1).FormulaR1C1 = ((Rhos - Rhow) / Rhow)
ActiveCell.Offset(1, 0).Select

ActiveCell.FormulaR1C1 = "Csigma"
ActiveCell.Offset(0, 1).FormulaR1C1 = Csigma
ActiveCell.Offset(1, 0).Select

End Function

Function normaalberek(Dn15 As Double, Dn50 As Double, B As Double, Cb As Double, Csigma As Double, Ugem
As Double, Diepte As Double, Rhos As Double, Rhow As Double, G As Double) As Double()
'normale verdeling berekenen per steen per x

Range("E2").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = _

"=+NORMDIST(R1C,(R208C2*R209C2*R210C2)/SQRT(R211C2*R212C2*RC2),R213C2*SQRT(R208C2*RC2),FAL
SE)"
Selection.AutoFill Destination:=Range("E2:CZ2"), Type:=xlFillDefault
Range("E2:CZ2").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("E2:CZ198"), Type:=xlFillDefault
Range("E2:CZ198").Select
ActiveWindow.LargeScroll ToRight:=-3
Range("E199").Select
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=SUM(R[-197]C:R[-1]C)/197"
Range("E199").Select
Selection.AutoFill Destination:=Range("E199:CZ199"), Type:=xlFillDefault
Range("E199:CZ199").Select

End Function

Sub grafiekModel()
'Modeluitkomst tekenen

Charts.Add
ActiveChart.ChartType = xlXYScatterSmoothNoMarkers
ActiveChart.SetSourceData Source:=Sheets("Zeefkromme").Range("E199:CZ199"), PlotBy:=xlRows
ActiveChart.SeriesCollection(1).XValues = "=Zeefkromme!R1C5:R1C104"
ActiveChart.SeriesCollection(1).Name = ""Model""
ActiveChart.Location Where:=xlLocationAsNewSheet, Name:="Modelverdeling"
With ActiveChart
.HasTitle = True
.ChartTitle.Characters.Text = "Model"
.Axes(xlCategory, xlPrimary).HasTitle = True
.Axes(xlCategory, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text = "x (m)"
.Axes(xlValue, xlPrimary).HasTitle = True
.Axes(xlValue, xlPrimary).AxisTitle.Characters.Text = "f(x)"
End With
ActiveChart.HasLegend = False
ActiveChart.Axes(xlValue).Select
With Selection.Border
.Weight = xlHairline
.LineStyle = xlAutomatic
End With
With Selection
.MajorTickMark = xlNone
.MinorTickMark = xlNone
.TickLabelPosition = xlNone
End With
ActiveChart.ChartTitle.Select
Selection.Font.Bold = True
Selection.AutoScaleFont = True
With Selection.Font
.Name = "Arial"
.Size = 12

```

```

        .Strikethrough = False
        .Superscript = False
        .Subscript = False
        .OutlineFont = False
        .Shadow = False
        .Underline = xlUnderlineStyleNone
        .ColorIndex = xlAutomatic
        .Background = xlAutomatic
    End With

End Sub

Sub keuzemenu()

    UsfKeuzemenu.Show 'toon keuzemenu

End Sub

Sub Printengrafiek()

    Worksheets("Zeefkromme").Select
    Range("A202:B213").Select
    Selection.PrintOut Copies:=1, Collate:=True
    Sheets("Modelverdeling").Select
    ActiveWindow.SelectedSheets.PrintOut Copies:=1, Collate:=True
    Sheets("Grafiek_zeefkromme").Select
    ActiveWindow.SelectedSheets.PrintOut Copies:=1, Collate:=True

End Sub

De Usf keuzemenu is een Userform met 3 buttons.
De achter de UsfKeuzemenu embedded source is:

Public Sub Cmdopnieuw_Click()
    UsfKeuzemenu.Hide
    Bereken1
End Sub

Sub Cmduitdraai_Click()
    Printengrafiek
End Sub

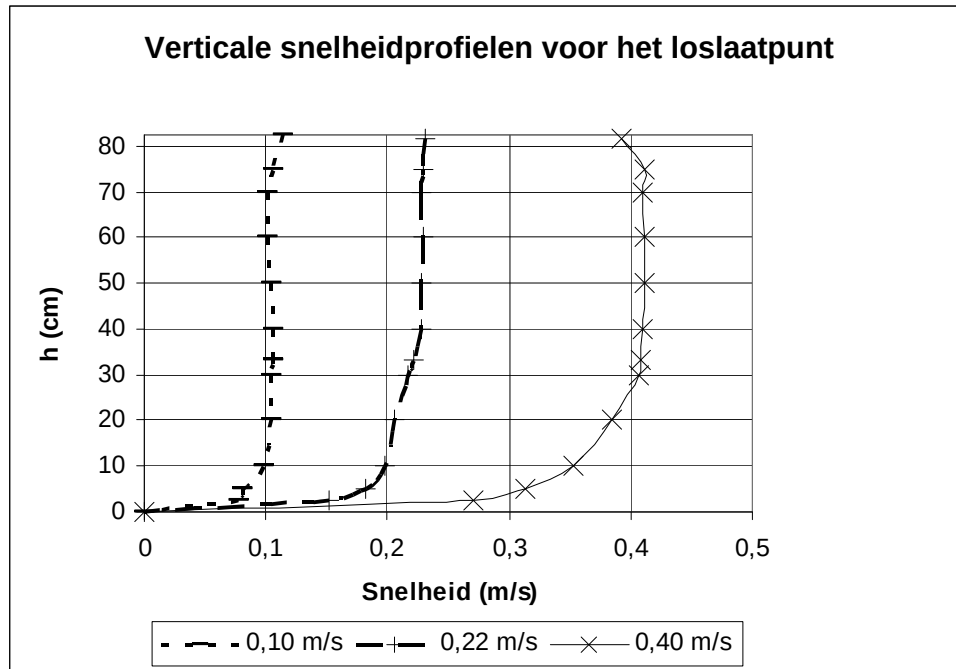
Private Sub CmdSluiten_Click()
    End
End Sub

Private Sub UserForm_Click()

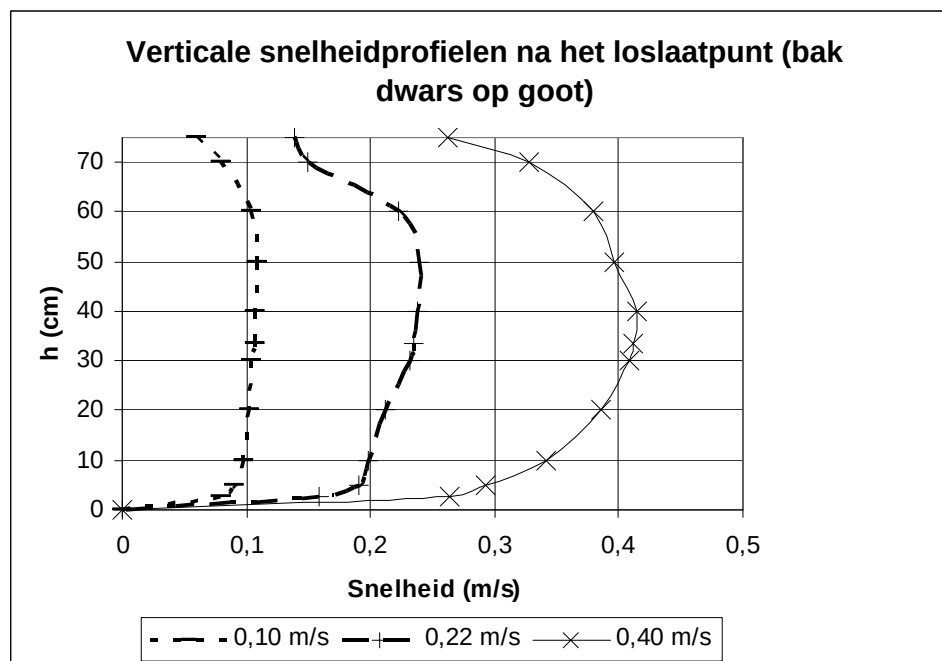
End Sub

```


Verticale snelheidsprofielen



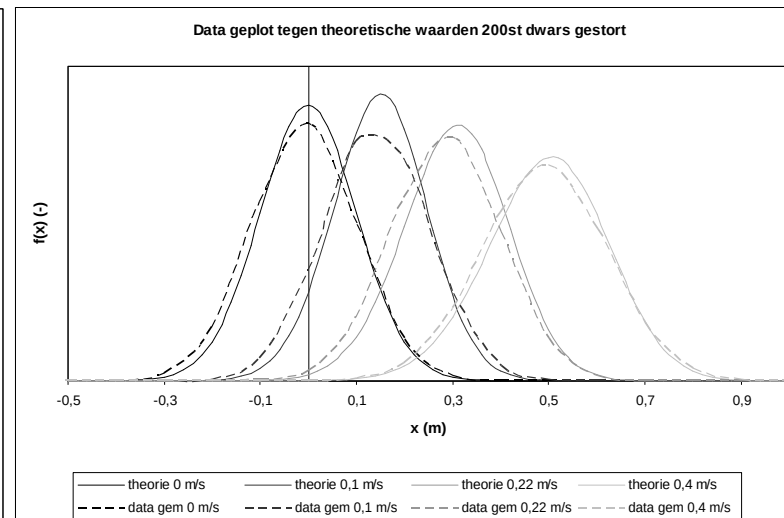
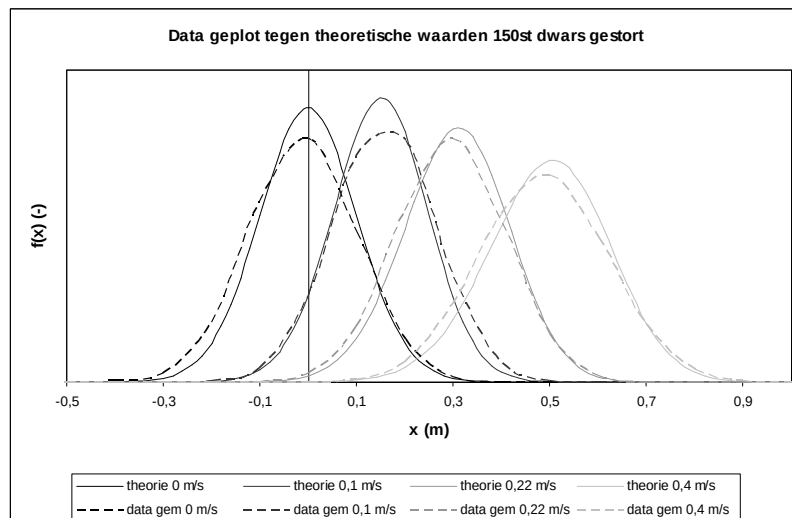
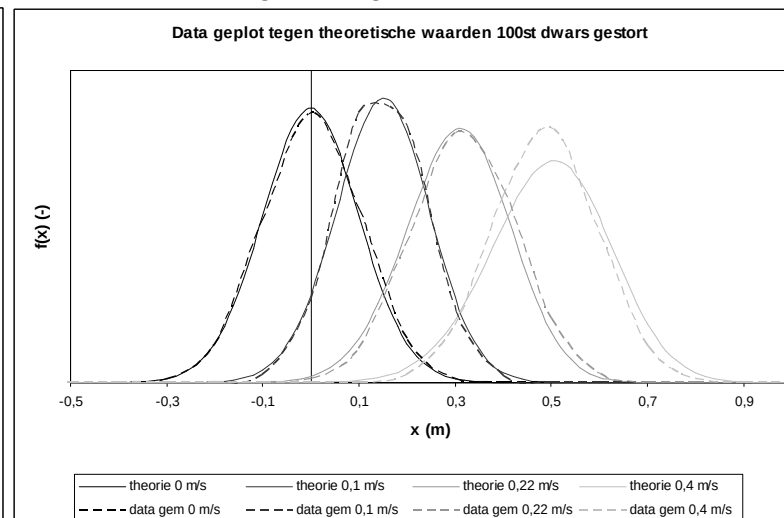
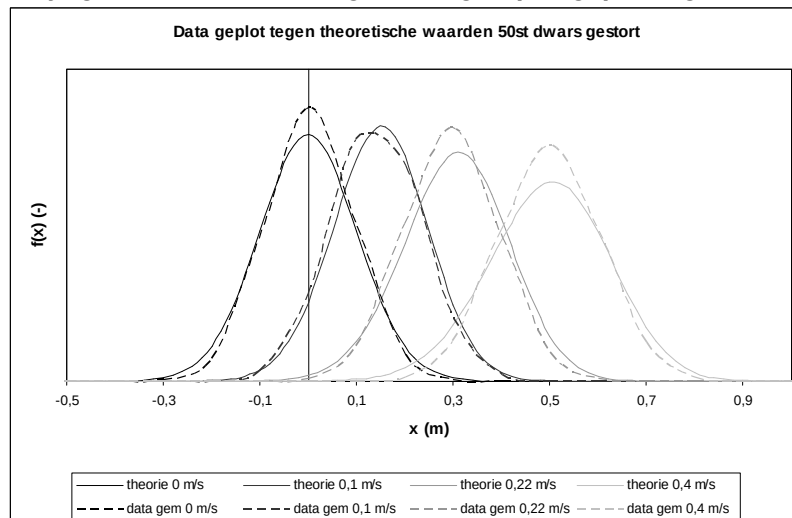
figuur 0-1 Snelheidsprofiel voor loslaatconstructie



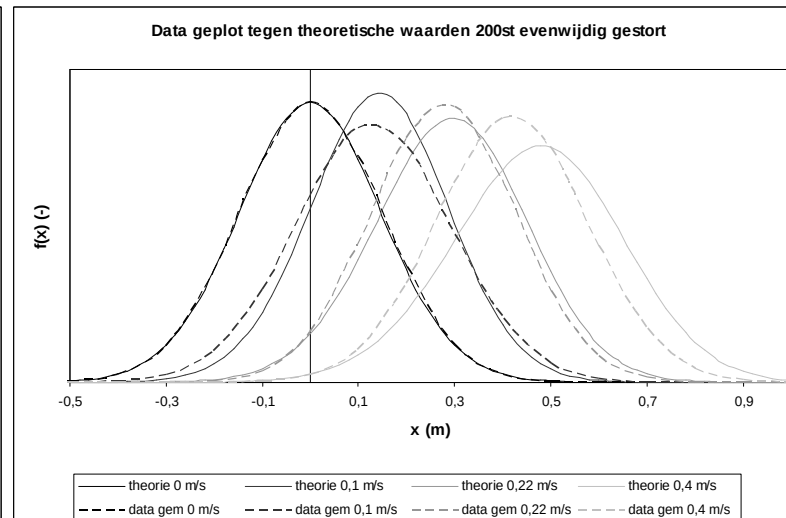
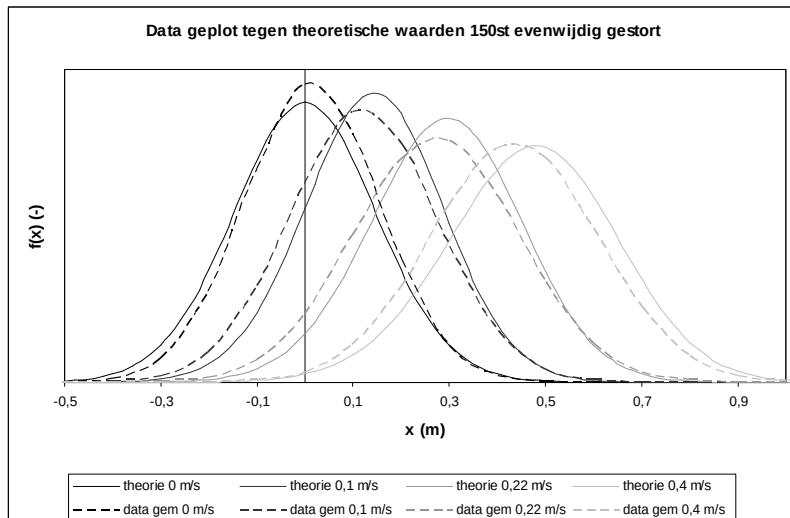
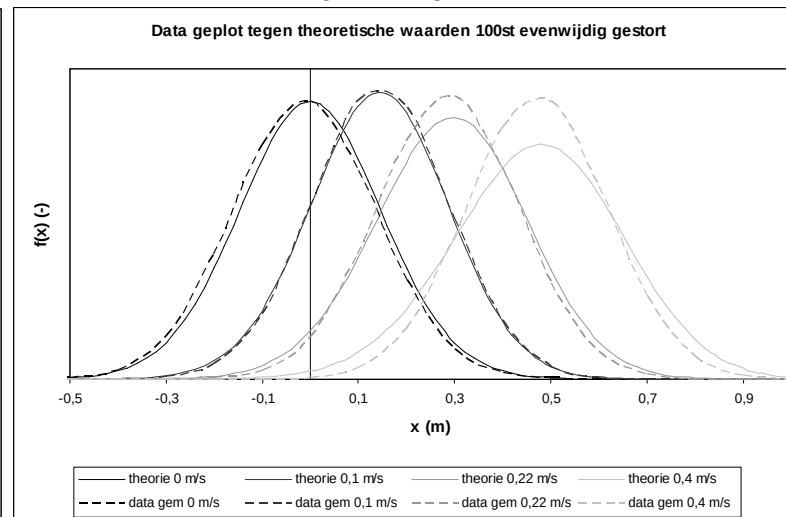
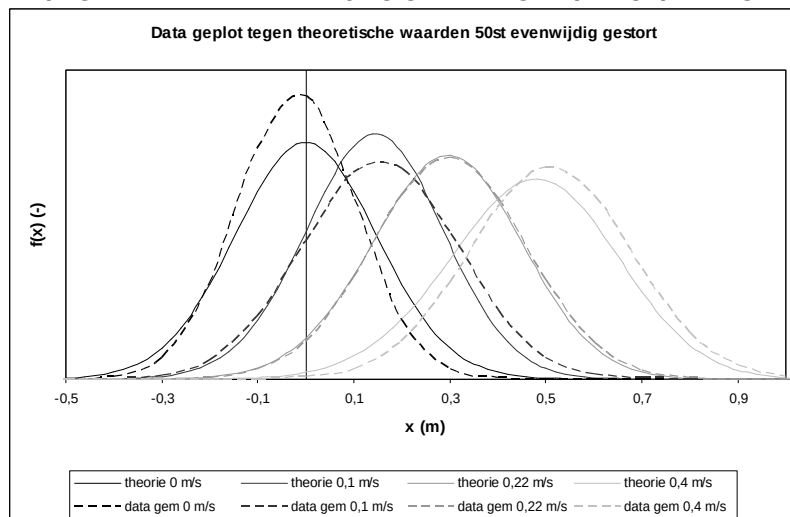
figuur 0-2 Snelheidsprofiel na loslaatconstructie

Bijlage V: Modeluitkomsten vergeleken met data

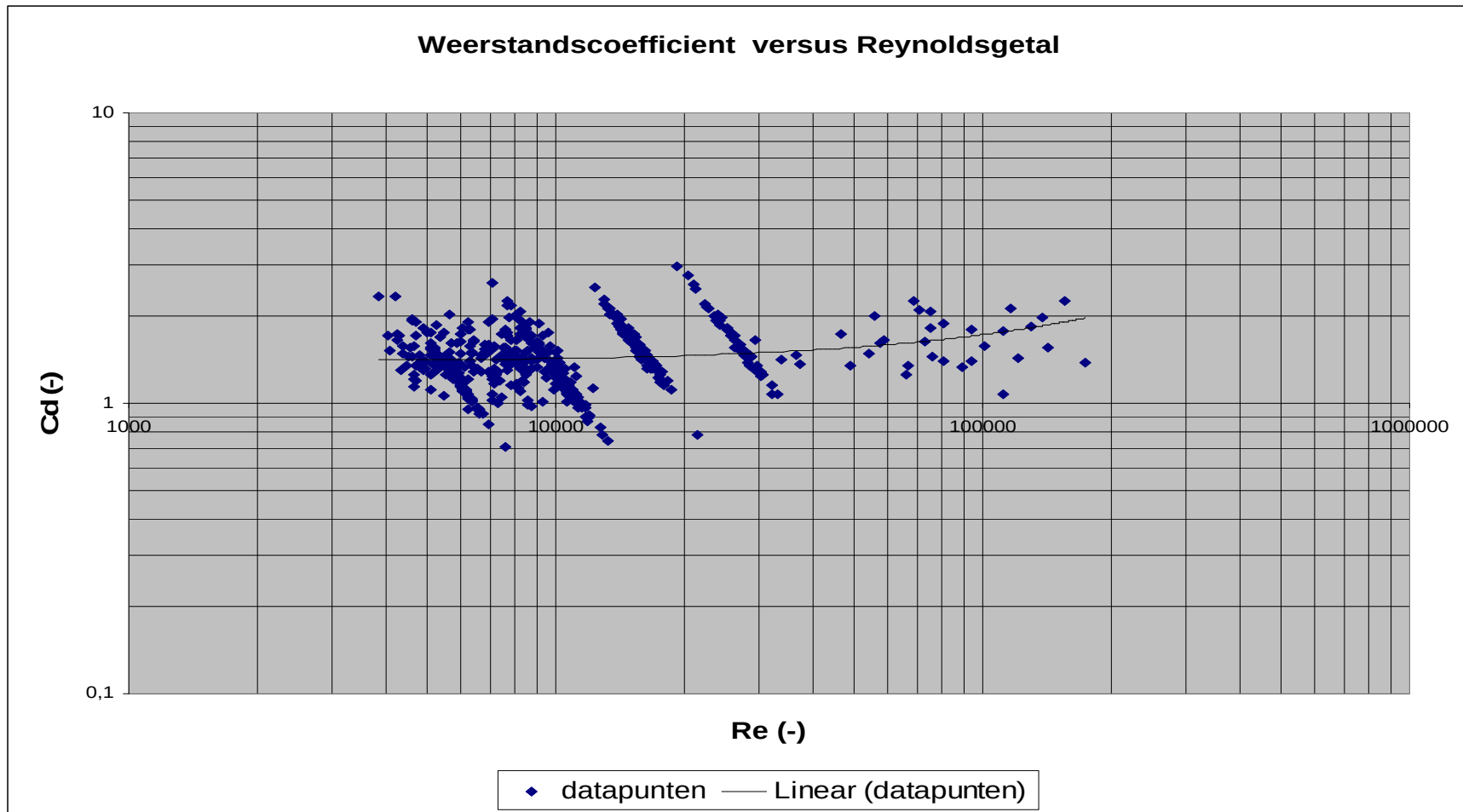
Bijlage V-1: Data dwars gestorte groepen geplot tegen theoretische waarden volgens uit gecombineerd ESM-WL model



Bijlage V-2: Data evenwijdig gestorte groepen geplot tegen theoretische waarden volgend uit gecombineerd ESM-WL model



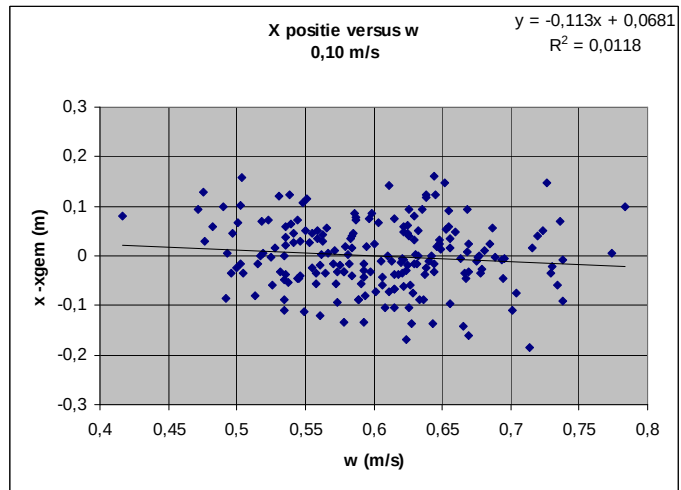
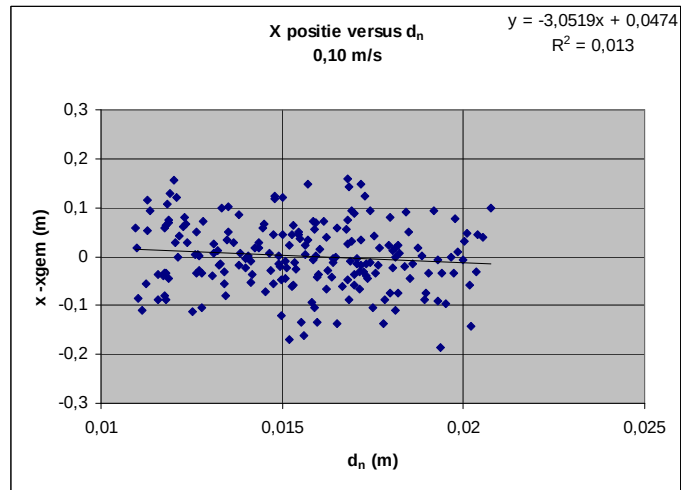
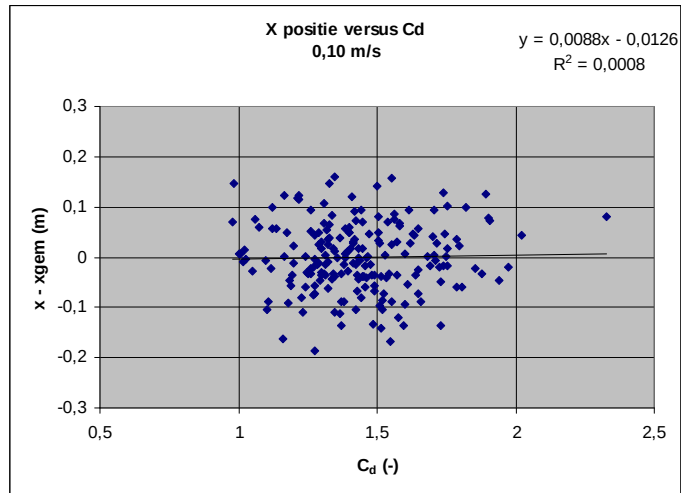
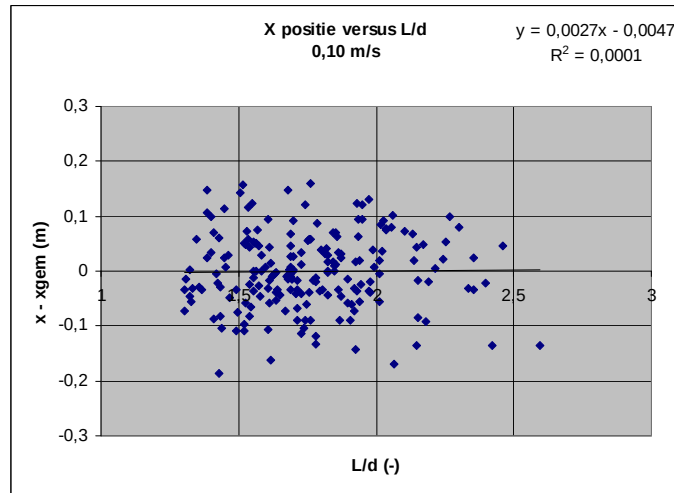
Bijlage W: Weerstandscoefficiënt versus Reynoldsgetal



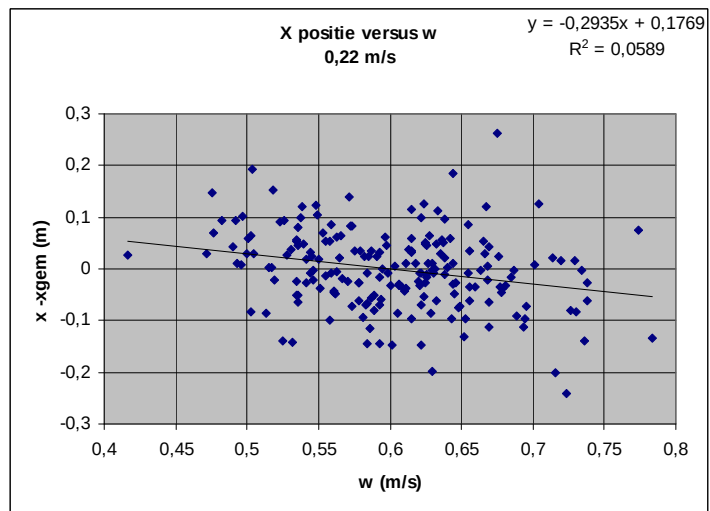
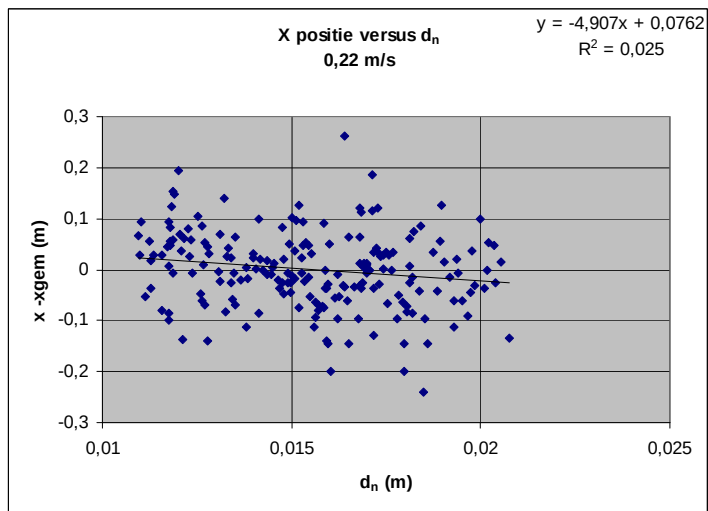
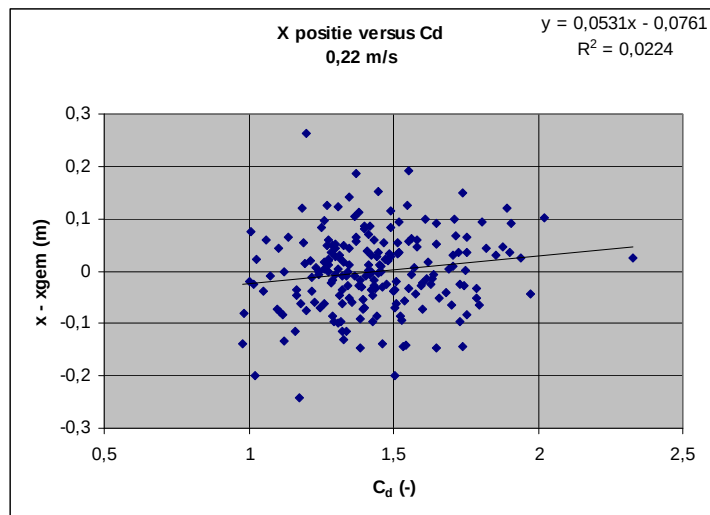
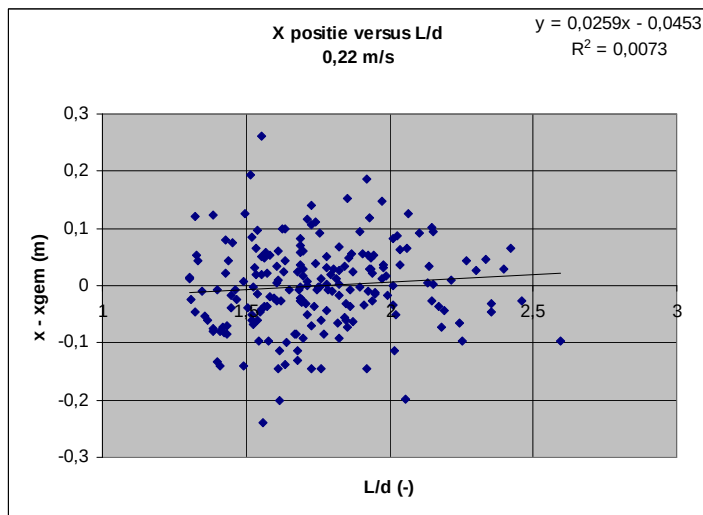
figuur W-1 Weerstand versus Reynolds breuksteen

Bijlage X: Parameters individueel gestorte stenen

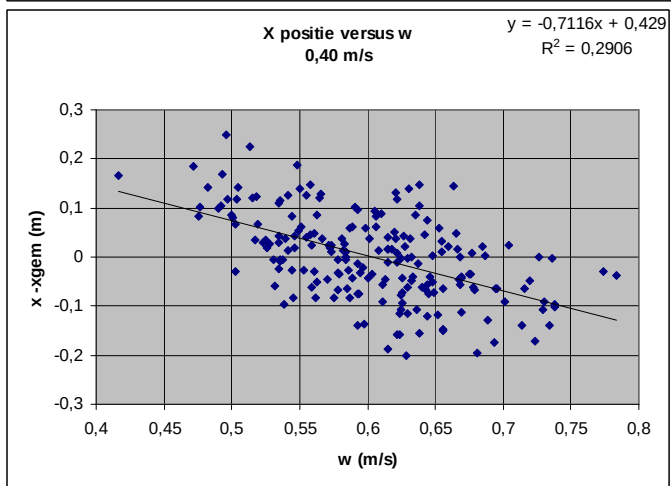
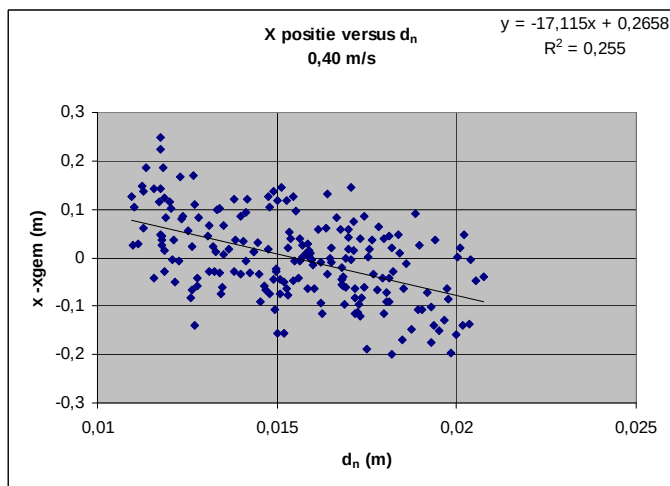
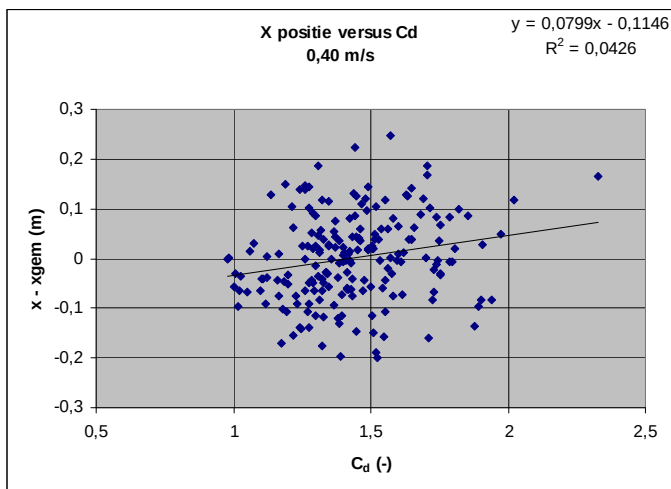
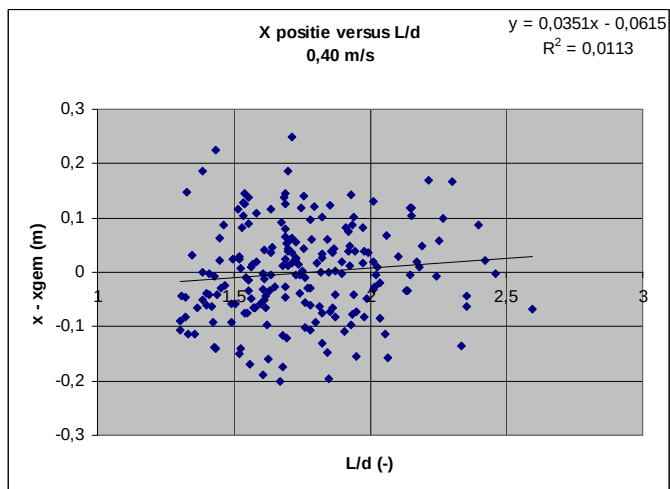
Bijlage X-1: 0,10 m/s.



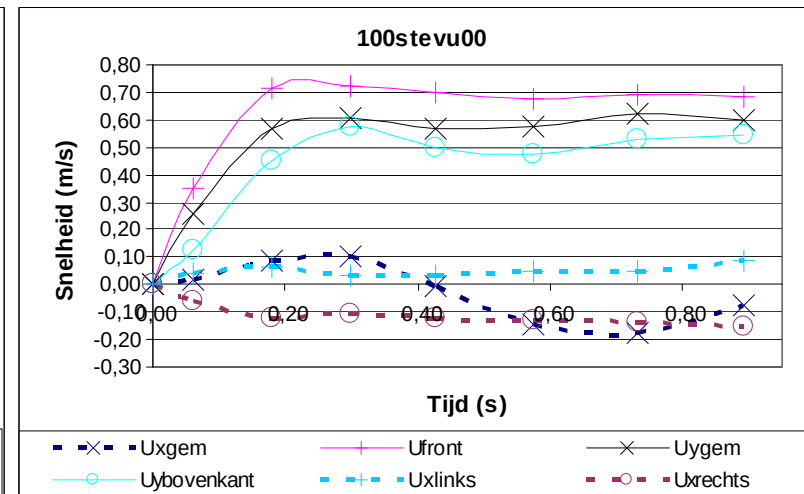
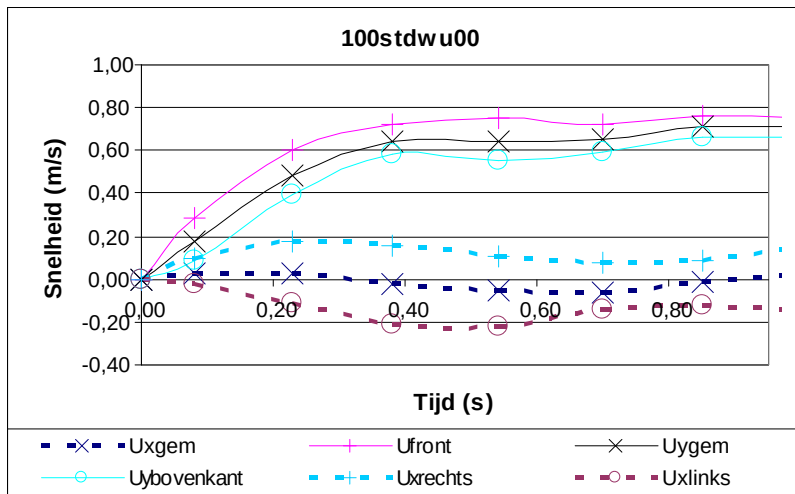
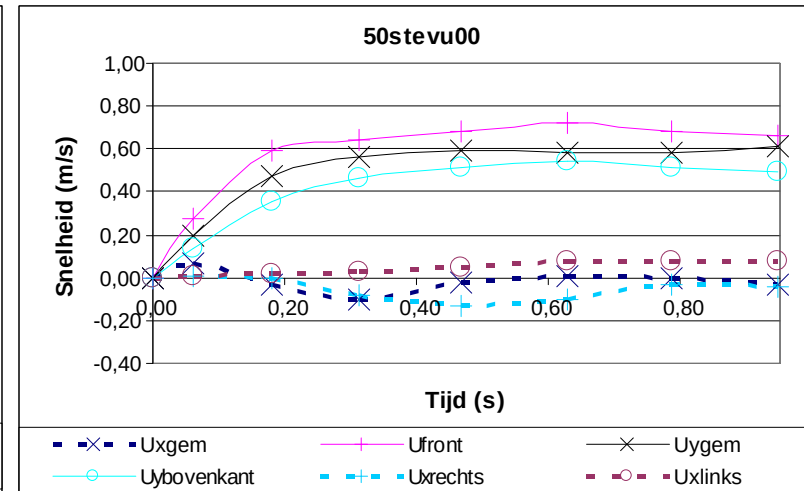
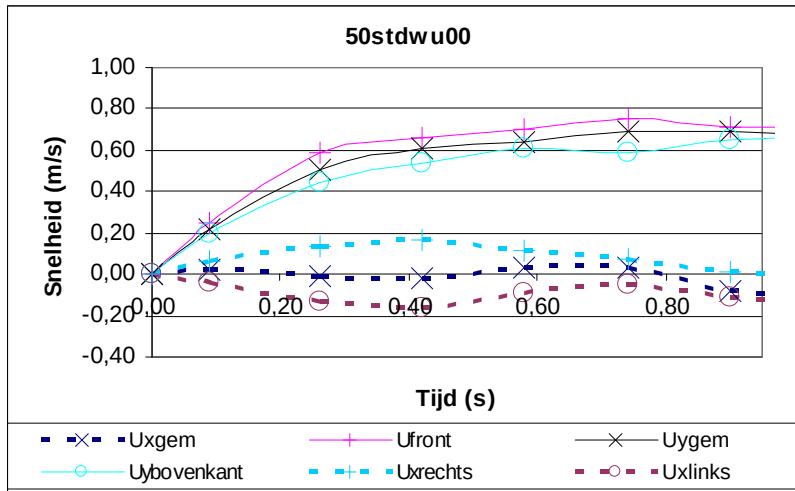
Bijlage X-2: 0,22 m/s.

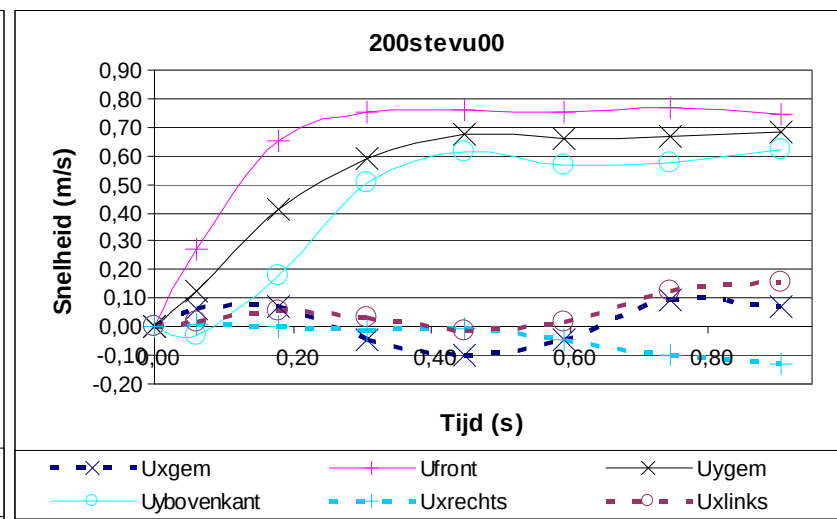
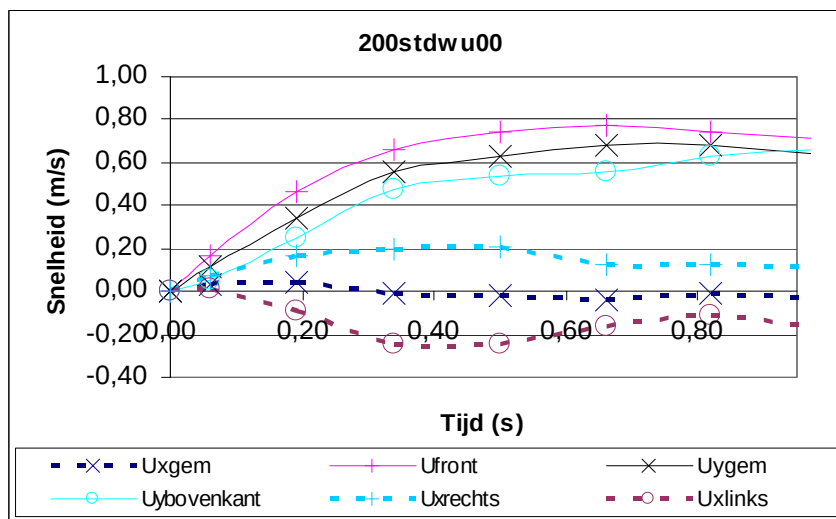
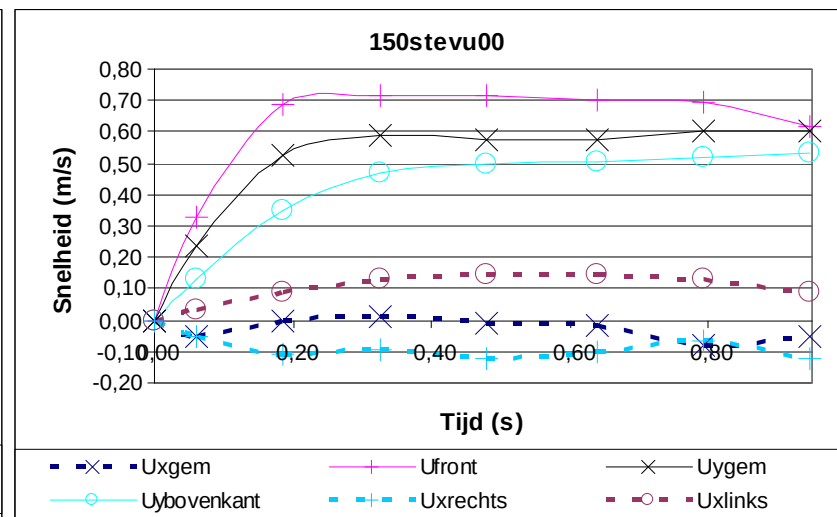
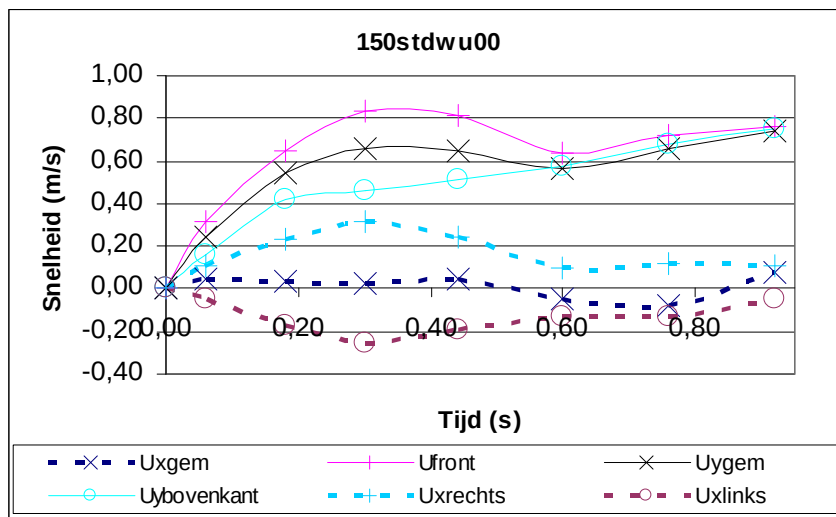


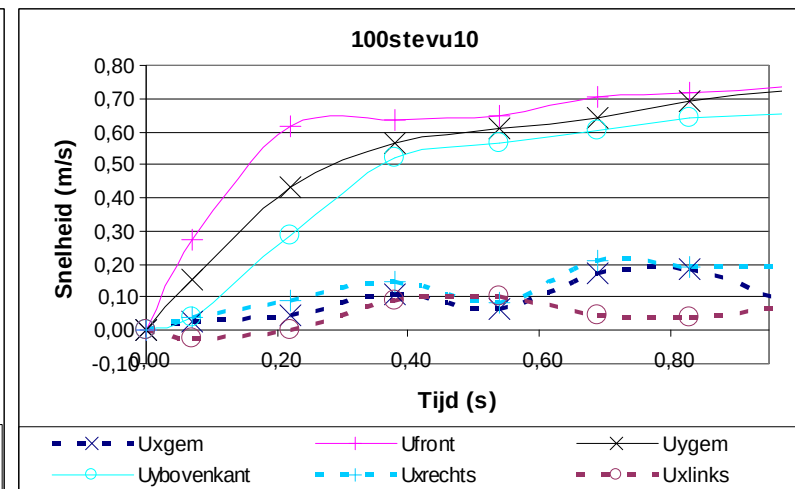
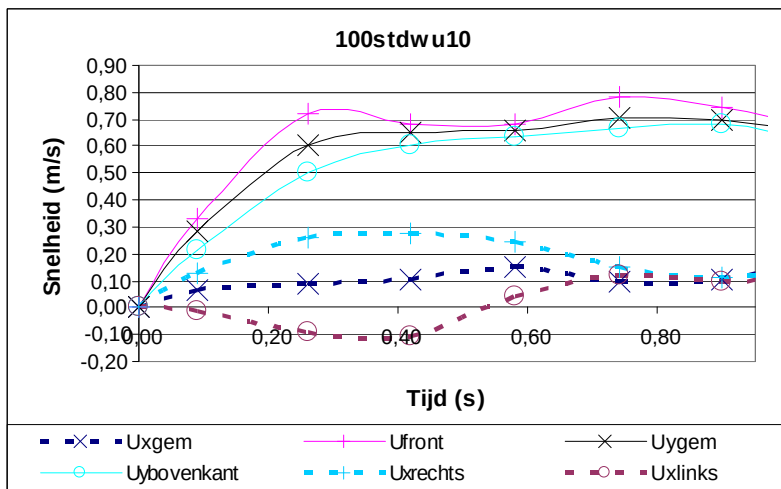
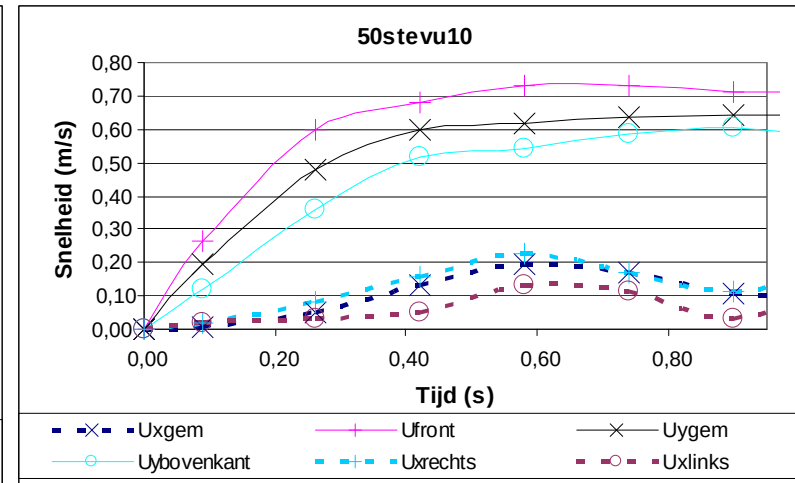
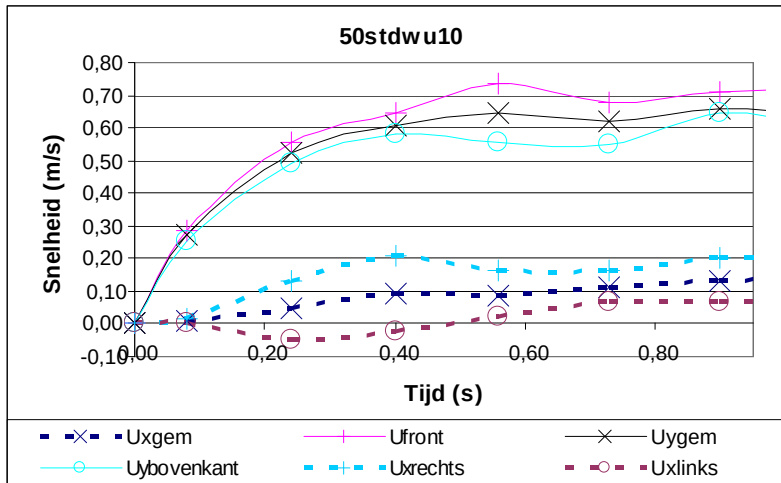
Bijlage X-3: 0,40 m/s.

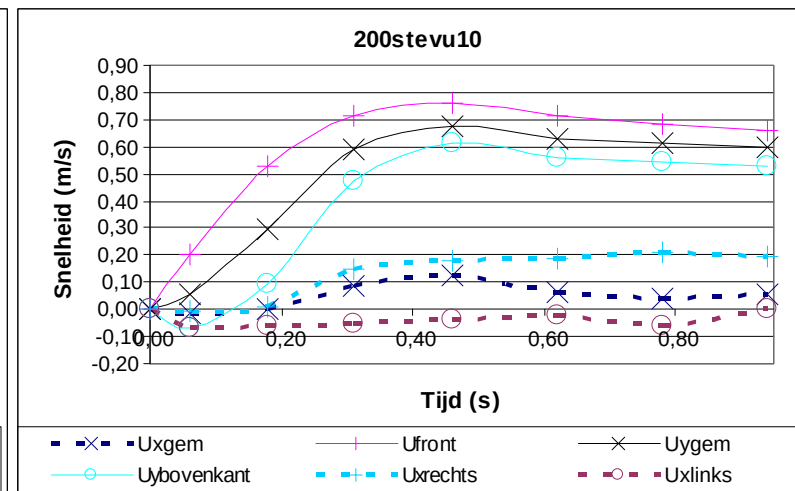
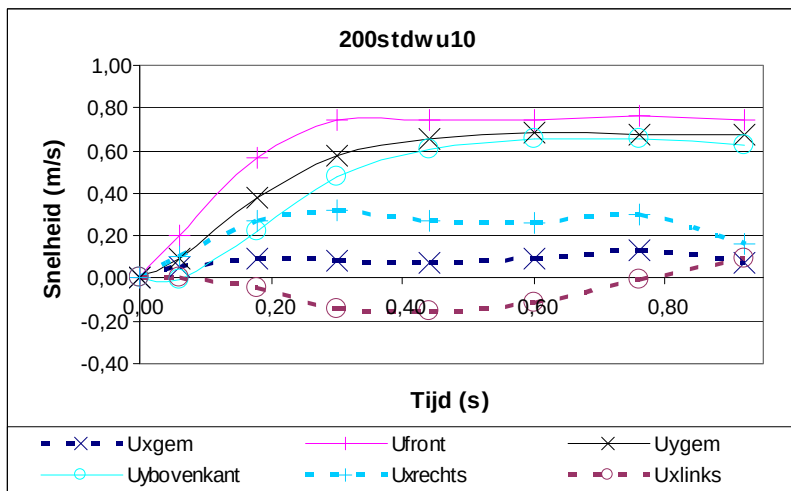
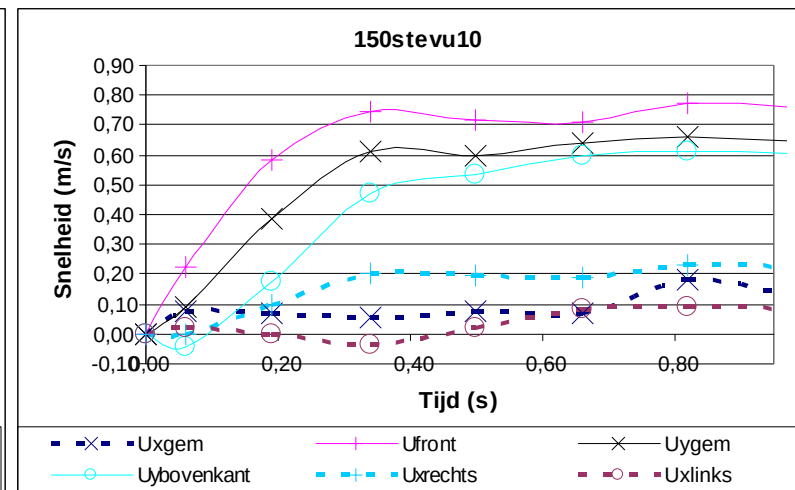
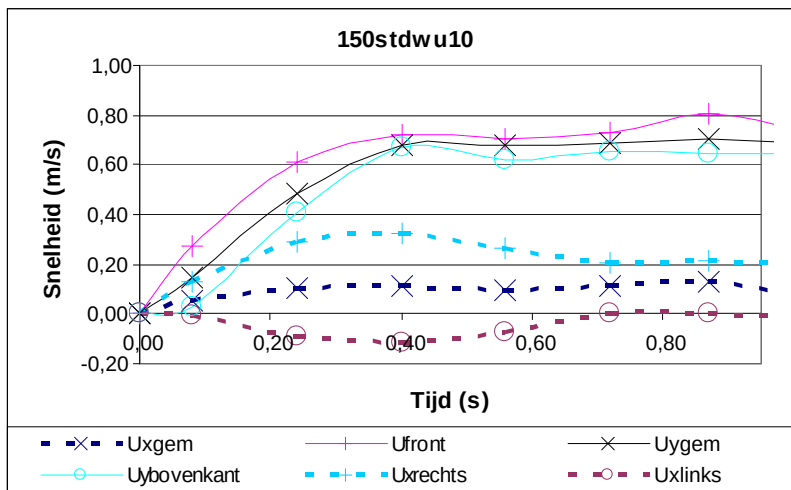


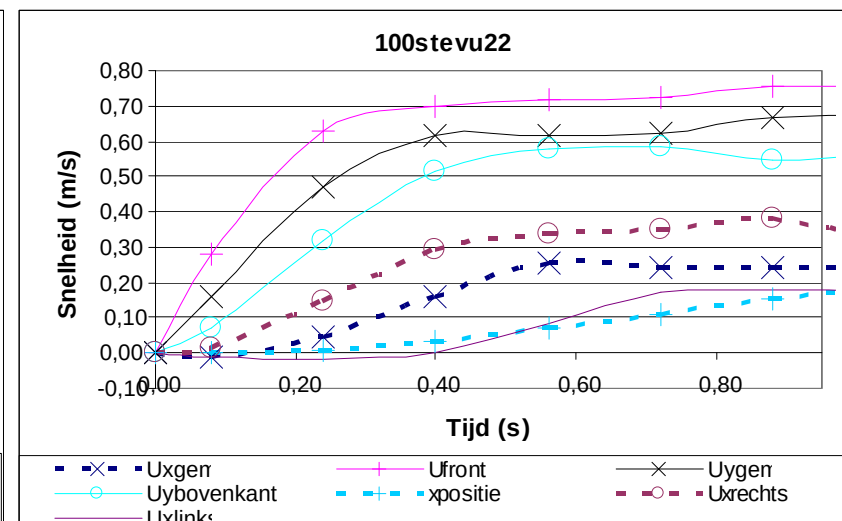
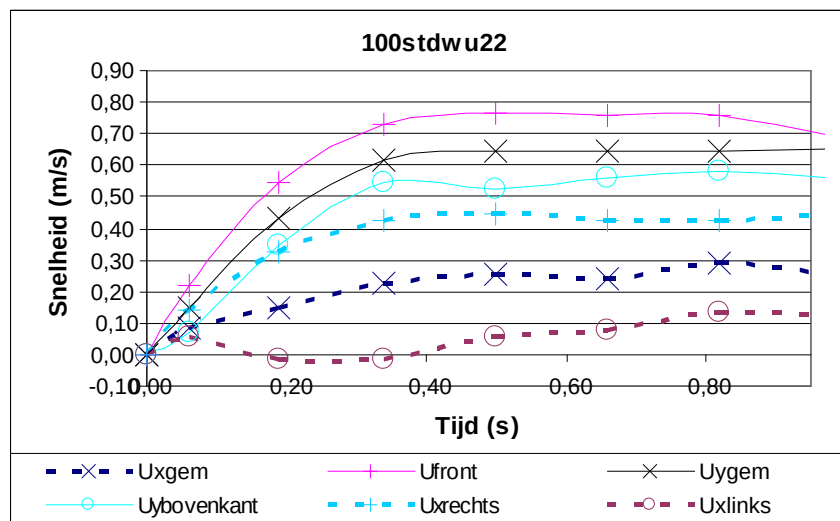
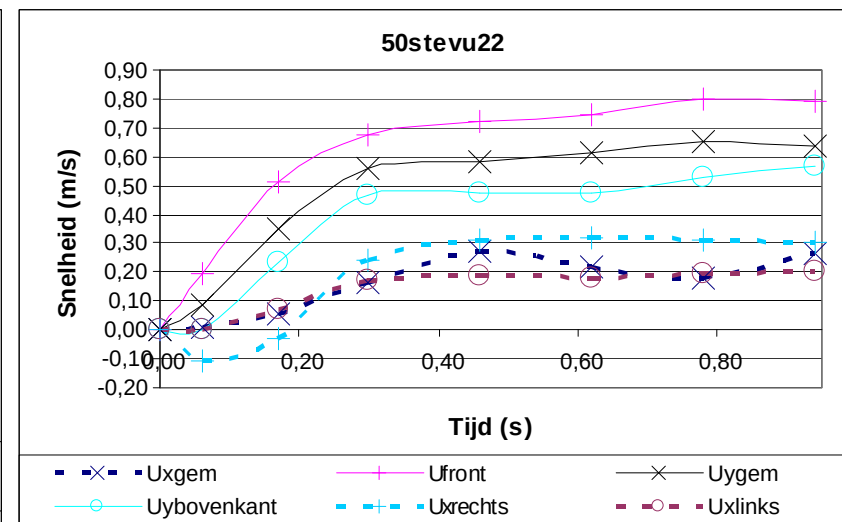
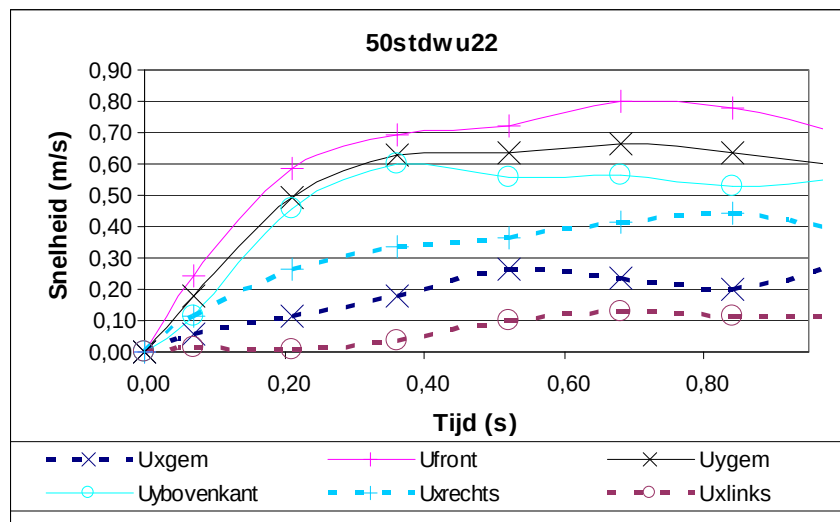
Bijlage Y: Gemiddelde groepssnelheden

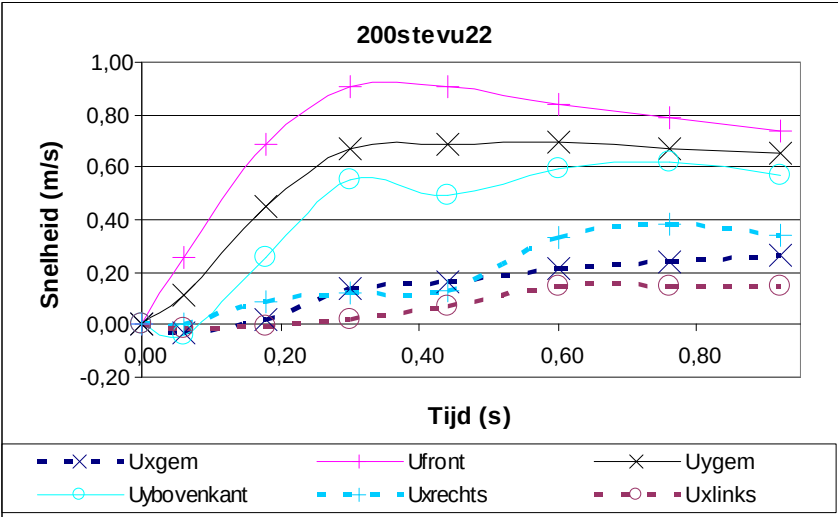
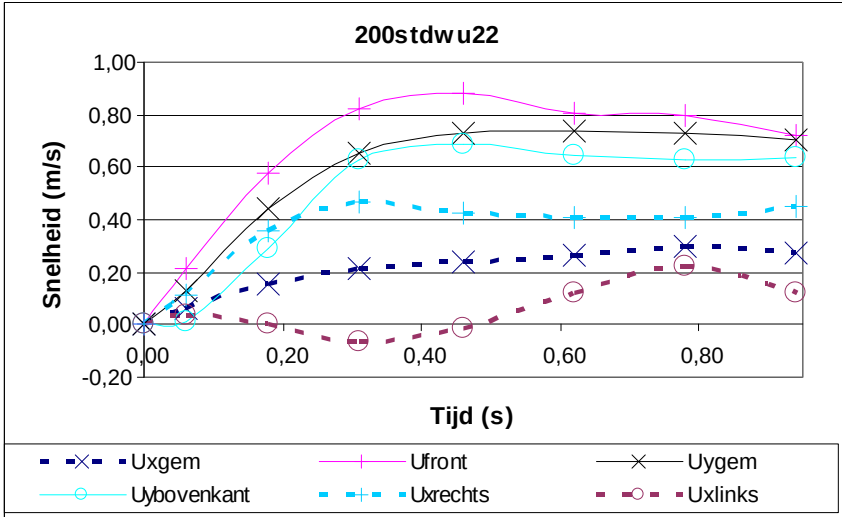
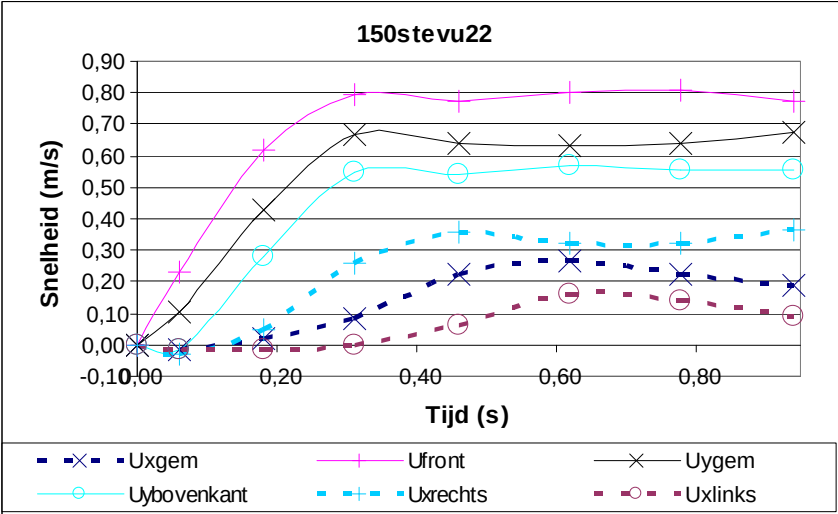
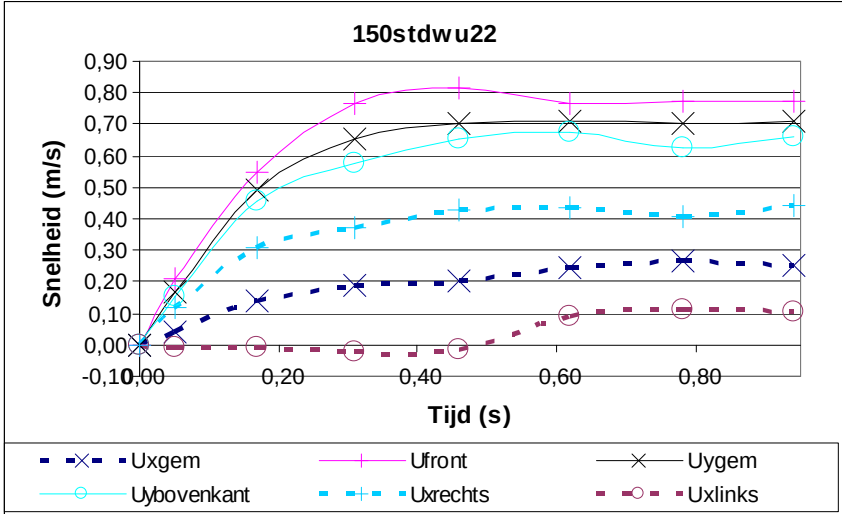


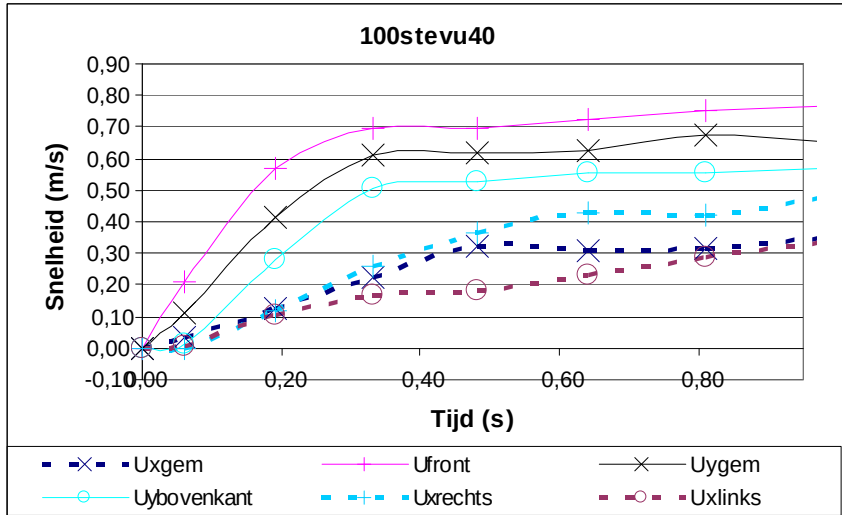
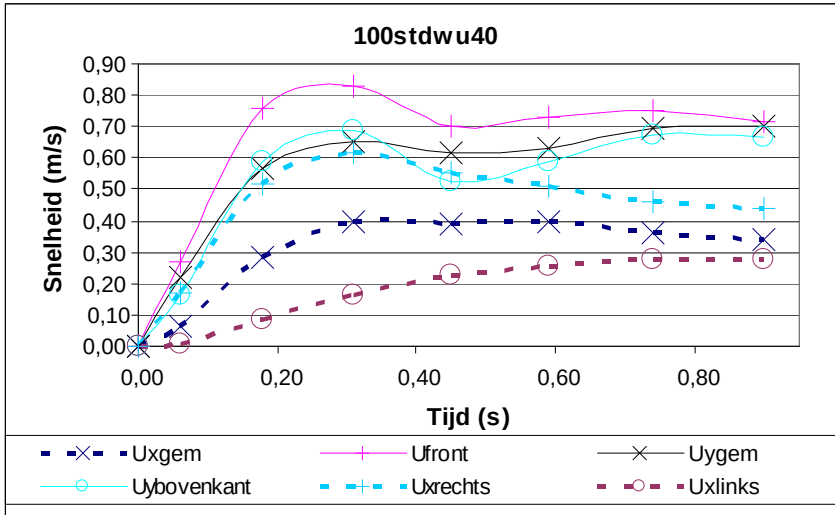
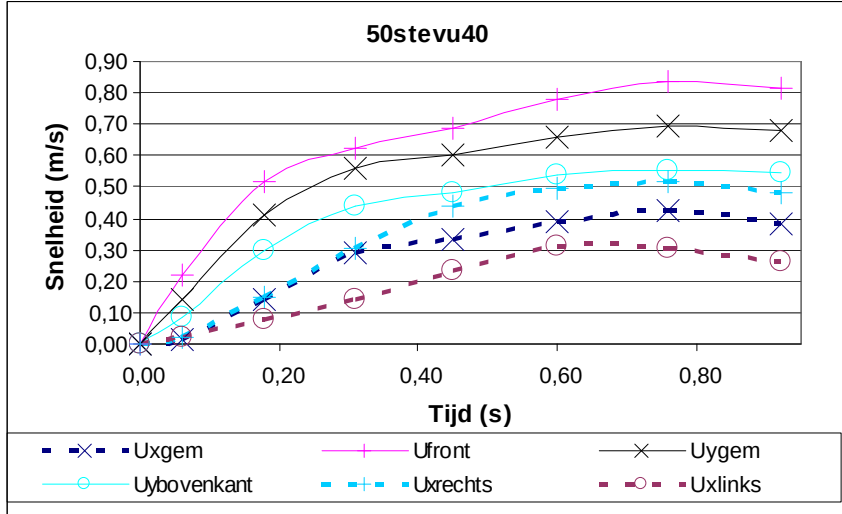
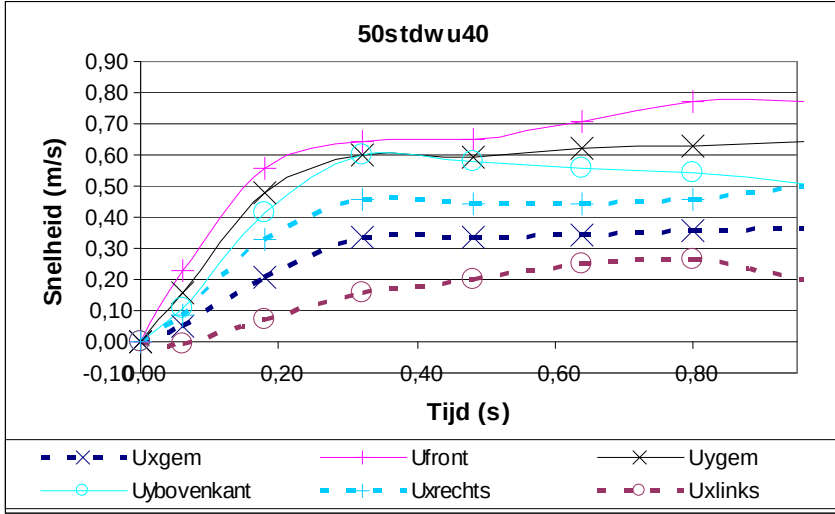


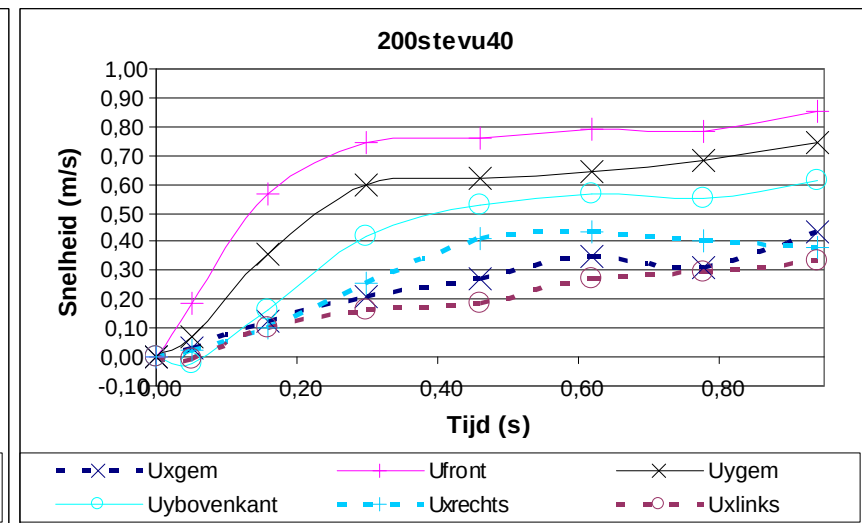
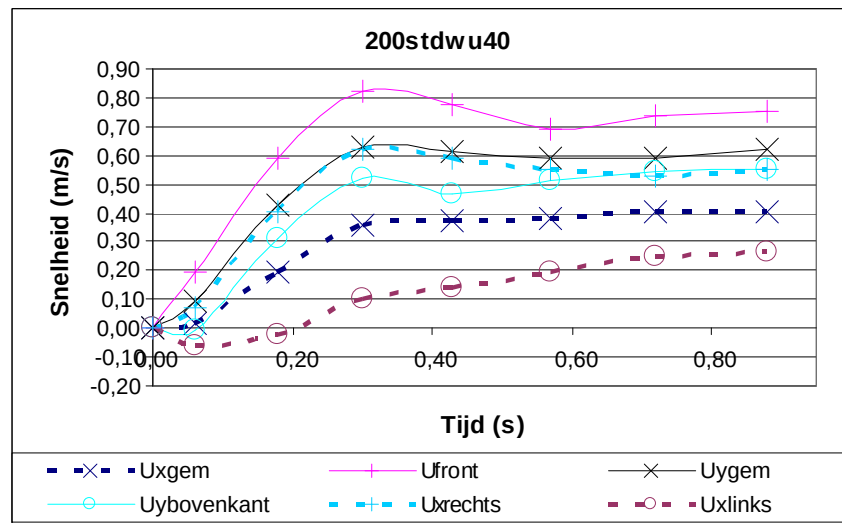
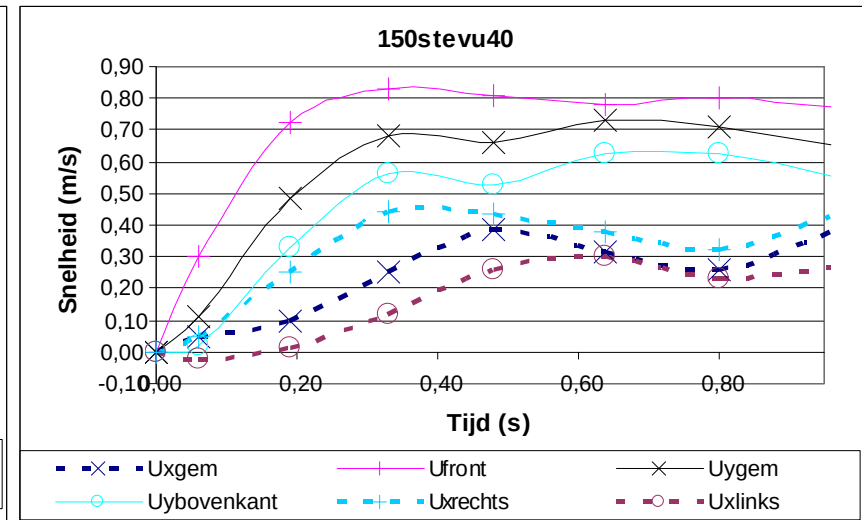
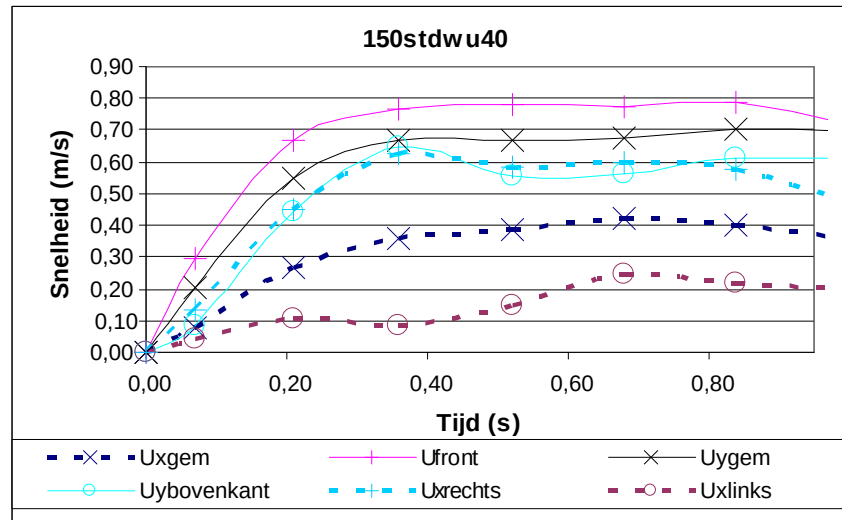








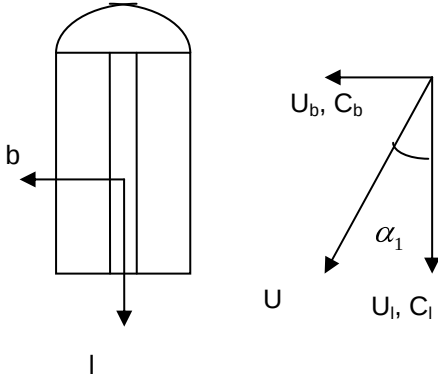




Bijlage Z: Afleiding verplaatsingen WL model met stroming

In deze bijlage wordt de meeneemcoëfficiënt C_d , gebruikt in WL [1983], vervangen door C_b om verwarring te voorkomen. De weerstandcoëfficiënt van een enkele steen wordt weergegeven door C_d .

Storten met kopse stroming:



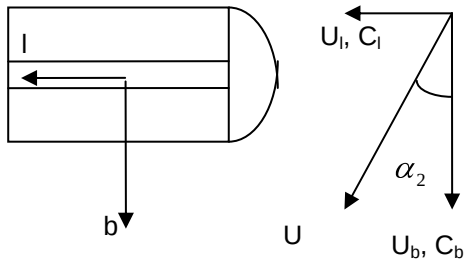
Hieruit kunnen de volgende formules worden afgeleid:

$$l_k = h \frac{U_{stro\ min\ g,l}}{w} = h \frac{C_l \cdot U}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}} \cos(\alpha_1)$$

$$b_k = h \frac{U_{stro\ min\ g,b}}{w} = h \frac{C_b \cdot U}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}} \sin(\alpha_1)$$

figuur Z-1 Storten met stroming op kop

Storten met zijwaartse stroming



Hieruit kunnen de volgende formules worden afgeleid:

$$l_b = h \frac{U_{stro\ min\ g,l}}{w} = h \frac{C_l \cdot U}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}} \sin(\alpha_2)$$

$$b_b = h \frac{U_{stro\ min\ g,b}}{w} = h \frac{C_b \cdot U}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}} \cos(\alpha_2)$$

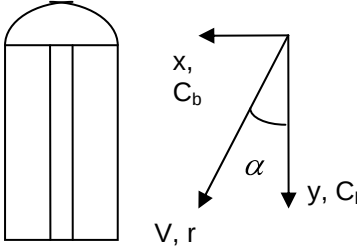
figuur Z-2 Storten met stroming opzij

Door nu te stellen dat $\alpha_2 = 90 - \alpha_1$, blijkt dat het verschil tussen bovenstaande figuren de oriëntering van de zijstorter op het assenstelsel is. Hierdoor kan volstaan worden met de volgende 2 vergelijkingen:

$$l = h \frac{U_{stro\ min\ g,l}}{w} = h \frac{C_l \cdot U}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}} \cos(\alpha_1) \text{ en } b = h \frac{U_{stro\ min\ g,b}}{w} = h \frac{C_b \cdot U}{\sqrt{g \cdot d_n \cdot \Delta}} \sin(\alpha_1)$$

Indien deze formules worden gecombineerd kan, aan de hand van figuur Z-3 de totale verplaatsing in x- en y-coördinaten ten opzichte van het schip worden berekend.

Door toepassing van bovenstaande formules om de resultante van de verplaatsing te bepalen ontstaat de volgende vergelijking:



$$r = \sqrt{l^2 + b^2} = \sqrt{\frac{h^2 U^2}{\Delta g d_n} (C_l \cos(\alpha))^2 + \frac{h^2 U^2}{\Delta g d_n} (C_b \sin(\alpha))^2}$$

$$= \frac{hU}{\sqrt{\Delta g d_n}} \sqrt{(C_l \cos(\alpha))^2 + (C_b \sin(\alpha))^2}$$

figuur Z-3 Storten met hoek stroming

De verplaatsing in de x-richting wordt dan:

$$x = \sin(\alpha) \cdot \frac{hU}{\sqrt{\Delta g d_n}} \sqrt{(C_l \cos(\alpha))^2 + (C_b \sin(\alpha))^2}$$

De verplaatsing in de y richting wordt dan:

$$y = \cos(\alpha) \cdot \frac{hU}{\sqrt{\Delta g d_n}} \sqrt{(C_l \cos(\alpha))^2 + (C_b \sin(\alpha))^2}$$

Lijst van figuren

figuur A-1 Kansdichtheidsring waarbij X en Y sommeren tot r (van Oord [1995])	- 9 -
figuur B-1 De opstelling van de videocamera bij het aquarium.....	- 12 -
figuur B-2 Weergave interlaced projectie bewegende steen.....	- 14 -
figuur B-3 Assenstelsel in aquarium.....	- 14 -
figuur B-4 Projectie horizontale uitwijkingen.....	- 15 -
figuur C-1 Assenstelsel in aquarium.....	- 17 -
figuur C-2 Projectie horizontale uitwijkingen	- 18 -
figuur E-1 Verdeling nominale diameters $d_{n50} = 15,6$ mm	- 28 -
figuur E-2 Verdeling L/d waardes $d_{n50} = 15,6$ mm	- 28 -
figuur E-3 Verdeling evenwichtsvalsnelheden $d_{n50} = 15,6$ mm	- 29 -
figuur E-4 Verdeling weerstandscoefficienten $d_{n50} = 15,6$ mm.....	- 29 -
figuur F-1 Verdeling nominale diameters $d_{n50} = 77$ mm	- 32 -
figuur F-2 Verdeling L/d waardes $d_{n50} = 77$ mm	- 32 -
figuur F-3 Verdeling evenwichtsvalsnelheden $d_{n50} = 77$ mm.....	- 33 -
figuur F-4 Verdeling weerstandscoefficienten $d_{n50} = 77$ mm.....	- 33 -
figuur G-1 Bovenanzichten storten zonder stroming.....	- 36 -
figuur G-2 Bovenanzichten van storten met 0,10 m/s	- 36 -
figuur G-3 Bovenanzichten van storten met 0,22 m/s	- 37 -
figuur G-4 Bovenanzichten van storten met 0,40 m/s	- 37 -
figuur H-1 Serie 1: 0 m/s.....	- 38 -
figuur H-2 Serie 2: 0 m/s.....	- 39 -
figuur H-3 Serie 1: 0,10 m/s.....	- 40 -
figuur H-4 Serie 2: 0,10 m/s.....	- 41 -
figuur H-5 Serie 1: 0,22 m/s.....	- 42 -
figuur H-6 Serie 2: 0,22 m/s.....	- 43 -
figuur H-7 Serie 1: 0,40 m/s.....	- 44 -
figuur H-8 Serie 2: 0,40 m/s.....	- 45 -
figuur I-1 Groepsstorten zonder stroming 50 stuks	- 46 -
figuur I-2 Groepsstorten zonder stroming 100 stuks	- 46 -
figuur I-3 Groepsstorten zonder stroming 150 stuks	- 47 -
figuur I-4 Groepsstorten zonder stroming 200 stuks	- 47 -
figuur J-1 Groepsstorten 50 stuks met 0,10 m/s	- 48 -
figuur J-2 Groepsstorten 100 stuks met 0,10 m/s	- 49 -
figuur J-3 Groepsstorten 150 stuks met 0,10 m/s	- 50 -
figuur J-4 Groepsstorten 200 stuks met 0,10 m/s	- 51 -
figuur K-1 Groepsstorten 50 stuks met 0,22 m/s.....	- 52 -
figuur K-2 Groepsstorten 100 stuks met 0,22 m/s.....	- 53 -
figuur K-3 Groepsstorten 150 stuks met 0,22 m/s.....	- 54 -
figuur K-4 Groepsstorten 200 stuks met 0,22 m/s.....	- 55 -
figuur L-1 Groepsstorten 50 stuks met 0,40 m/s	- 56 -
figuur L-2 Groepsstorten 100 stuks met 0,40 m/s	- 57 -
figuur L-3 Groepsstorten 150 stuks met 0,40 m/s	- 58 -
figuur L-4 Groepsstorten 200 stuks met 0,40 m/s	- 59 -
figuur L-5 Groepsstorten 200 stuks onder 45 graden met 0,40 m/s	- 60 -
figuur M-1 Verdeling uitwijkingen 50sts1u00.....	- 62 -
figuur M-2 Verdeling uitwijkingen 50sts2u00.....	- 62 -
figuur M-3 Verdeling uitwijkingen 50stdws1u10	- 63 -
figuur M-4 Verdeling uitwijkingen 50dws2u10	- 63 -
figuur M-5 Verdeling uitwijkingen 50stevs1u10.....	- 63 -
figuur M-6 Verdeling uitwijkingen 50stevs2u10.....	- 64 -
figuur M-7 Verdeling uitwijkingen 50stdws1u22	- 64 -
figuur M-8 Verdeling uitwijkingen 50stdws2u22	- 64 -
figuur M-9 Verdeling uitwijkingen 50stevs1u22.....	- 65 -
figuur M-10 Verdeling uitwijkingen 50stevs2u22.....	- 65 -
figuur M-11 Verdeling uitwijkingen 50stdws1u40	- 65 -
figuur M-12 Verdeling uitwijkingen 50stdws2u40	- 66 -
figuur M-13 Verdeling uitwijkingen 50stevs1u40	- 66 -
figuur M-14 Verdeling uitwijkingen 50stevs2u40	- 66 -

figuur M-15 Verdeling uitwijkingen 100sts1u00.....	- 67 -
figuur M-16 Verdeling uitwijkingen 100sts2u00.....	- 67 -
figuur M-17 Verdeling uitwijkingen 100stdws1u10	- 67 -
figuur M-18 Verdeling uitwijkingen 100stdws2u10	- 68 -
figuur M-19 Verdeling uitwijkingen 100stevs1u10.....	- 68 -
figuur M-20 Verdeling uitwijkingen 100stevs2u10.....	- 68 -
figuur M-21 Verdeling uitwijkingen 100stdws1u22	- 69 -
figuur M-22 Verdeling uitwijkingen 100stdws2u22	- 69 -
figuur M-23 Verdeling uitwijkingen 100stevs1u22.....	- 69 -
figuur M-24 Verdeling uitwijkingen 100stevs2u22.....	- 70 -
figuur M-25 Verdeling uitwijkingen 100stdws1u40	- 70 -
figuur M-26 Verdeling uitwijkingen 100stdws2u40	- 70 -
figuur M-27 Verdeling uitwijkingen 100stevs1u40.....	- 71 -
figuur M-28 Verdeling uitwijkingen 100stevs2u40.....	- 71 -
figuur M-29 Verdeling uitwijkingen 150sts1u00.....	- 72 -
figuur M-30 Verdeling uitwijkingen 150sts2u00.....	- 72 -
figuur M-31 Verdeling uitwijkingen 150stdws1u10	- 72 -
figuur M-32 Verdeling uitwijkingen 150stdws2u10	- 73 -
figuur M-33 Verdeling uitwijkingen 150stevs1u10.....	- 73 -
figuur M-34 Verdeling uitwijkingen 150stevs2u10.....	- 73 -
figuur M-35 Verdeling uitwijkingen 150stdws1u22	- 74 -
figuur M-36 Verdeling uitwijkingen 150stdws2u22	- 74 -
figuur M-37 Verdeling uitwijkingen 150stevs1u22.....	- 74 -
figuur M-38 Verdeling uitwijkingen 150stevs2u22.....	- 75 -
figuur M-39 Verdeling uitwijkingen 150stdws1u40	- 75 -
figuur M-40 Verdeling uitwijkingen 150stdws2u40	- 75 -
figuur M-41 Verdeling uitwijkingen 150stevs1u40.....	- 76 -
figuur M-42 Verdeling uitwijkingen 150stevs2u40.....	- 76 -
figuur M-43 Verdeling uitwijkingen 200sts1u00.....	- 77 -
figuur M-44 Verdeling uitwijkingen 200sts2u00.....	- 77 -
figuur M-45 Verdeling uitwijkingen 200stdws1u10	- 77 -
figuur M-46 Verdeling uitwijkingen 200stdws2u10	- 78 -
figuur M-47 Verdeling uitwijkingen 200stevs1u10.....	- 78 -
figuur M-48 Verdeling uitwijkingen 200stevs2u10.....	- 78 -
figuur M-49 Verdeling uitwijkingen 200stdws1u22	- 79 -
figuur M-50 Verdeling uitwijkingen 200stdws2u22	- 79 -
figuur M-51 Verdeling uitwijkingen 200stevs1u22.....	- 79 -
figuur M-52 Verdeling uitwijkingen 200stevs2u22.....	- 80 -
figuur M-53 Verdeling uitwijkingen 200stdws1u40	- 80 -
figuur M-54 Verdeling uitwijkingen 200stdws2u40	- 80 -
figuur M-55 Verdeling uitwijkingen 200stevs1u40.....	- 81 -
figuur M-56 Verdeling uitwijkingen 200stevs2u40.....	- 81 -
figuur Q-1 Weerstandscoefficiënt stenen met een d_{n50} van 15,6 mm	- 88 -
figuur Q-2 Weerstandscoefficiënt stenen met een d_{n50} van 77 mm.....	- 88 -
figuur Q-3 Weerstandscoefficiënt alle stenen.....	- 89 -
figuur T-1 Invloed scheefstand camera	- 98 -
figuur T-2 Afname weerstandscoefficiënt cylinder bij toename turbulentie (Pirner [2002])	- 99 -
figuur T-3 Verloop Strouhal versus Reynolds (bron onbekend)	- 100 -
figuur T-4 Verloop Strouhal versus Reynolds (Potter and Wiggert [1991]).....	- 100 -
figuur T-5 Oorzaak rotatie stenen	- 102 -
figuur T-6 Richting van de kracht als gevolg van het in rotatie komen van een steen.....	- 102 -
figuur U-1 Grondslag ESM zonder stroming	- 104 -
figuur U-2 Verdeling ESM zonder stroming	- 104 -
figuur U-3 Grondslag ESM met stroming	- 106 -
figuur U-4 Verdeling ESM met stroming.....	- 106 -
figuur V-1 Snelheidsprofiel voor loslaatconstructie	- 116 -
figuur V-2 Snelheidsprofiel na loslaatconstructie	- 116 -
figuur X-1 Weerstand versus Reynolds breuksteen	- 122 -
figuur AA-1 Storten met stroming op kop	- 136 -
figuur AA-2 Storten met stroming opzij.....	- 136 -

figuur AA-3 Storten met hoek stroming - 137 -

Lijst van tabellen

tabel D-1 Eigenschappen stenen met een d_n van 11 tot 21 mm	- 25 -
tabel E-1 Nominale diameters sortering $d_{n50} = 15,6$ mm	- 28 -
tabel E-2 L/d waardes sortering $d_{n50} = 15,6$ mm	- 28 -
tabel E-3 Evenwichtsvalsnelheden $d_{n50} = 15,6$ mm	- 29 -
tabel E-4 Weerstandscoefficienten sortering $d_{n50} = 15,6$ mm	- 30 -
tabel F-1 Nominale diameters sortering $d_{n50} = 77$ mm	- 32 -
tabel F-2 L/d waardes sortering $d_{n50} = 77$ mm	- 32 -
tabel F-3 Evenwichtsvalsnelheden $d_{n50} = 77$ mm	- 33 -
tabel F-4 Weerstandscoefficienten sortering $d_{n50} = 77$ mm	- 34 -
tabel T-1 Invloed scheefstand camera	- 98 -
tabel T-2 Tijd tussen loslaten en optredende evenwichtsvalsnelheden	- 99 -
tabel T-3 Reynoldsgetal goot	- 101 -
tabel T-4 Reynoldsgetallen volgens evenwichtsvalsnelheid en diameter	- 101 -
tabel U-1 Rekenwijze numeriek model	- 106 -

