

Spreiding van steen in het stortproces van schuifstorters
modelproeven ter verificatie van het Enkele Steen Model

December 1996

G. van Oord



Spreiding van steen in het stortproces van schuifstorters

modelproeven ter verificatie van het Enkele Steen Model

Datum: December 1996

Student: G. van Oord

Afstudeercommissie: prof. drs. ir. J.K. Vrijling
ir. W. Meermans
ir. P. Visser
ir. M. van der Doef (RWS)

In samenwerking met: Bouwdienst Rijkswaterstaat, Utrecht

Technische Universiteit Delft,
Faculteit Civiele Techniek,
Vakgroep Waterbouwkunde,
Sectie Waterbouwkunde.

G. van Oord
Ambachtstraat 11
3512 ER Utrecht
studienr. 623089

For those who like stone

Voorwoord

Dit afstudeerverslag, getiteld "Spreiding van steen in het stortproces van schuifstorters", vormt de afronding van mijn doctoraalstudie aan de faculteit Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft.

In dit onderzoek, dat is uitgevoerd in samenwerking met de Bouwdienst Rijkswaterstaat, Hoofdafdeling Waterbouw, is een model dat de spreiding van steen in water beschrijft, het Enkele Steen Model, geverifieerd. Hiertoe zijn modelproeven uitgevoerd met verschillende stortmaterialen in het Laboratorium van Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft. De uitkomsten van deze modelproeven worden beschreven in het voor u liggende verslag en grafisch weergegeven in de bijbehorende bijlagen.

Mijn dank gaat uit naar allen die mij gedurende het afgelopen jaar met raad en daad hebben bijgestaan. Dit geldt in het bijzonder de leden van mijn afstudeercommissie; prof. drs. ir. J.K. Vrijling, ir. M. van der Doef, ir. P. Visser en ir. W. Meermans, die de dagelijkse begeleiding heeft verzorgd. Verder wil ik ir. P.H.A.J.M. van Gelder bedanken voor zijn hulp bij het uitwerken van de meetgegevens.

Bijzonder erkentelijk ben ik de Bouwdienst Rijkswaterstaat, Hoofdafdeling Waterbouw, voor het beschikbaar stellen van de middelen om de modelproefopstelling te bouwen en de modelproeven uit te voeren. Ook een woord van dank gaat uit naar alle medewerkers van het Laboratorium van Vloeistofmechanica van wie de hulp onmisbaar was bij het uitvoeren van de modelproeven.

Waardevolle discussies over "wat die stenen en schuifstorters nu eigenlijk wel of niet doen" heb ik gevoerd met ing. P.J.W.J. van der Aa, ir. D. Heijboer, H.C. van Leeuwenstein, ir. M.H. Lindo en L.A. Mol, allen werkzaam bij Van Oord ACZ B.V. en met ing. D.P. de Wilde, werkzaam bij de Bouwdienst Rijkswaterstaat, Hoofdafdeling Waterbouw. Tenslotte dank ik alle anderen die op welke wijze dan ook een bijdrage aan dit afstudeerproject hebben geleverd.

G. van Oord
Utrecht, december 1996

Inhoudsopgave

Voorwoord	i
Samenvatting	vi
1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond van het onderzoek	1
1.2 Probleem- en doelstelling	1
1.3 Gebruik van steen in de waterbouwkunde	1
1.4 Indeling van het verslag	3
2 Stortproces van een schuifstorter	5
2.1 Inleiding	5
2.2 Vaargedrag en positiebepaling van de schuifstorter	5
2.2.1 Plaatsbepalingssystemen	6
2.2.2 Stortmethoden	8
2.2.3 Vrijheidsgraden van een schuifstorter	9
2.3 Bresgedrag van steen	11
2.3.1 Eigenschappen van het stortmateriaal	13
2.3.2 Schuifsnelheid van de hydraulische schuiven	14
2.3.3 Belading van de schuifstorter	16
2.3.4 Scheepsbewegingen	16
2.3.5 Initiële verplaatsing	16
2.4 Spreiding van steen in water	17
2.5 Verplaatsing van steen als gevolg van stroming	18
2.6 Bodemgedrag van steen	20
2.6.1 Wegspringen van stenen	21
2.6.2 Afrollen van stenen	22
2.6.3 Afschuiven van het talud	22
2.7 Methoden om de stortnauwkeurigheid te verbeteren	23
3 Valproces van een enkele steen in water	25
3.1 Inleiding	25
3.2 Fysische beschrijving van het valproces	25
3.2.1 Stroming rondom een steen	25
3.2.2 Vereenvoudigingen van het stortproces van een schuifstorter	28
3.3 Wiskundige modellering van de valbeweging	28
3.3.1 Krachten op de vallende steen	28
3.3.2 Vortex-shedding	30
3.3.3 Random Walk Model	32
3.4 Opbouw van het stortprofiel bij grote storthoeveelheden	34
3.5 Storten vanaf een schuifstorter	37
4 Schaalears bij proeven met steen	41
4.1 Inleiding	41
4.2 Gelijkvormigheid	41
4.3 Getal van Froude	44

4.4	Getal van Reynolds	45
4.5	Getal van Strouhal	48
4.6	Invloed van schaalfactoren bij de uitgevoerde modelproeven	48
5	Ontwerp van de modelproeven	49
5.1	Inleiding	49
5.2	Rayleigh verdeling	49
5.3	Maximum-likelihood schatter	51
5.4	Kolmogorov-Smirnov toets	52
6	Uitvoering van de modelproeven	53
6.1	Inleiding	53
6.2	Modelproefopstelling	53
6.3	Gebruikte stortmaterialen	53
6.4	Wijze van uitvoeren en uitwerken	55
6.5	Nauwkeurigheid van de resultaten	57
6.5.1	Modelproefonnauwkeurigheden	57
6.5.2	Statistische onnauwkeurigheden	59
7	Modelproeven met onregelmatige, hoekige vormen	61
7.1	Inleiding	61
7.2	Overzicht van de uitgevoerde modelproeven	61
7.3	Modelproeven met individueel gestorte stenen	62
7.3.1	Uitkomsten met betrekking tot de stralen van de gestorte stenen	62
7.3.2	Toetsing van de modelproefresultaten aan de gefitte Rayleigh verdeling	62
7.3.3	Waarden van de constante c	64
7.3.4	Verband tussen spreiding en waterdiepte	65
7.4	Modelproeven met tegelijk gestorte stenen	66
7.5	Modelproeven met betrekking tot de opbouw van stortprofielen	68
7.5.1	Maximale hellingshoek van het stortmateriaal	68
7.5.2	Opbouw van het stortprofiel bij een toenemende storthoeveelheid	69
7.6	Valsnelheid en weerstandscoefficiënt	72
8	Modelproeven met onregelmatige, afgeronde vormen	73
8.1	Inleiding	73
8.2	Overzicht van de uitgevoerde modelproeven	73
8.3	Modelproeven met individueel gestorte stenen	73
8.3.1	Uitkomsten met betrekking tot de stralen van de gestorte stenen	73
8.3.2	Toetsing van de modelproefresultaten aan de gefitte Rayleigh verdeling	74
8.3.3	Waarden van de constante c	75
8.4	Modelproeven met tegelijk gestorte stenen	75
8.5	Modelproeven met betrekking tot de opbouw van stortprofielen	77
8.5.1	Maximale hellingshoek van het stortmateriaal	77
8.5.2	Opbouw van het stortprofiel bij een toenemende storthoeveelheid	77
8.6	Valsnelheid en weerstandscoefficiënt	79
9	Modelproeven met regelmatige, hoekige vormen (scherpe randen)	81
9.1	Inleiding	81
9.2	Overzicht van de uitgevoerde modelproeven	81
9.3	Modelproeven met individueel gestorte aluminium kubussen	82

9.3.1	Uitkomsten met betrekking tot de stralen van de gestorte kubussen	82
9.3.2	Toetsing van de modelproefresultaten aan de gefitte Rayleigh verdeling . .	83
9.3.3	Verband tussen spreiding en waterdiepte	86
9.4	Modelproeven met tegelijk gestorte aluminium kubussen	87
9.5	Modelproeven met aluminium kubussen die zijn afgeschoven	88
9.6	Valsnelheid en weerstandscoefficiënt	89
10	Modelproeven met regelmatige, hoekige vormen (afgeronde randen)	91
10.1	Inleiding	91
10.2	Overzicht van de uitgevoerde modelproeven	91
10.3	Modelproeven met individueel gestorte betonnen kubussen	91
10.3.1	Uitkomsten met betrekking tot de stralen van de gestorte kubussen	91
10.3.2	Toetsing van de modelproefresultaten aan de gefitte Rayleigh verdeling .	92
10.3.3	Verband tussen spreiding en waterdiepte	94
10.4	Modelproeven met betonnen kubussen die zijn afgeschoven	94
10.5	Valsnelheid en weerstandscoefficiënt	95
11	Modelproeven met regelmatige, ronde vormen	97
11.1	Inleiding	97
11.2	Overzicht van de uitgevoerde modelproeven	97
11.3	Modelproeven met individueel gestorte glazen bollen	97
11.3.1	Uitkomsten met betrekking tot de stralen van de gestorte bollen	97
11.3.2	Toetsing van de modelproefresultaten aan de gefitte Rayleigh verdeling .	98
11.3.3	Verband tussen spreiding en waterdiepte	99
11.4	Modelproeven met glazen bollen die zijn afgeschoven	100
11.5	Valsnelheid en weerstandscoefficiënt	101
12	Modelproeven met regelmatige, platte vormen	103
12.1	Inleiding	103
12.2	Overzicht van de uitgevoerde modelproeven	103
12.3	Modelproeven met individueel gestorte platte vormen	103
12.3.1	Uitkomsten met betrekking tot de stralen van de gestorte platte vormen .	103
12.3.2	Toetsing van de modelproefresultaten aan de gefitte Rayleigh verdeling .	104
12.3.3	Waarden van de constante c	105
12.4	Valsnelheid en weerstandscoefficiënt	106
13	Toetsing en toepassing van de modelproefresultaten	109
13.1	Uitkomsten van eerder uitgevoerd onderzoek	109
13.2	Toepassingen in de praktijk	111
14	Conclusies en aanbevelingen	115
14.1	Conclusies	115
14.2	Aanbevelingen	116
	Literatuurlijst	117
	Figuren	119
	Tabellen	121

Uitgevoerde modelproeven	123
Bijlagen	125

Samenvatting

Voor het storten van steen in water wordt gebruik gemaakt van schuifstorters. Hierbij wordt de steen zijdelings van het dek afgeschoven. Het stortproces van schuifstorters bestaat uit vijf fasen; vaargedrag en positiebepaling van de schuifstorter, bresgedrag van steen, spreiding van steen, verplaatsing van steen als gevolg van stroming en bodemgedrag van steen. Dit onderzoek vormt een studie naar de derde fase, de spreiding van steen in water.

Het Enkele Steen Model (ESM) is een model dat het spreidingsgedrag van steen in water beschrijft. Dit model veronderstelt dat individueel vallende stenen in water zijdelingse verplaatsingen ondergaan als gevolg van het, tijdens de valbeweging, willekeurig loslaten van wervels over het oppervlak van de steen. Volgens het ESM zal een dwarsdoorsnede van een hoeveelheid gestorte steen (het stortprofiel) een Gaussprofiel vertonen. Het stortprofiel wordt bij een toenemende storthoeveelheid opgebouwd volgens een Gaussprofiel, totdat het talud van de berg gestorte stenen de maximale hellingshoek van het stortmateriaal overschrijdt. Hierna zal, als gevolg van afschuiving van het talud van de berg gestorte stenen, het stortprofiel langzaam overgaan in een driehoeksprofiel.

Om het ESM te verifiëren zijn modelproeven uitgevoerd met twee verschillende sorteringen van natuursteen; hoekig stortmateriaal (breuksteen) en afgerond stortmateriaal (grind). Om de hoeveelheid parameters die het stortproces beïnvloeden te beperken, zijn ook modelproeven uitgevoerd met "stenen" die wat betreft vorm en afmeting zeer geringe onderlinge verschillen vertonen. Hiertoe is, uitgaande van een met natuursteen overeenkomende massadichtheid, gebruik gemaakt van aluminium kubussen, betonnen kubussen, glazen bollen, vierkante aluminium plaatjes en ronde schijfjes (guldens en rijksdaalders).

Met de verschillende stortmaterialen zijn bij een viertal waterdiepten modelproeven uitgevoerd. Allereerst zijn willekeurig georiënteerde stenen, individueel gestort en is de waargenomen verdeling van de stralen van de gestorte stenen, ten opzichte van de projectie van het loslaatpunt op de bodem, vergeleken met de verdeling volgens het ESM.

Om te bepalen of vallende stenen elkaar tijdens de valbeweging onderling beïnvloeden en of dit invloed heeft op de spreiding, zijn vervolgens modelproeven uitgevoerd waarbij stenen zoveel mogelijk tegelijk zijn gestort. De resultaten zijn vergeleken met die van de proeven met de individueel gestorte stenen. Ook zijn in dit kader proeven uitgevoerd waarbij stenen op een rij zijn gelegd en zijdelings zijn afgeschoven.

Tenslotte is gekeken of de opbouw van het stortprofiel overeenkomt met die zoals beschreven door het ESM. Hiertoe zijn proeven uitgevoerd waarbij een grote hoeveelheid steen in gedeelten is gestort. Door na het storten van ieder gedeelte twee aanzichten van de gestorte berg stenen vast te leggen, is het stortprofiel bepaald.

Uit de modelproeven blijkt dat het ESM een goede beschrijving geeft van de wijze waarop stenen uit een breuksteen- en grindsortering, individueel en tegelijk gestort, in water vallen en van de wijze waarop het stortprofiel wordt opgebouwd. De spreiding van het stortmateriaal neemt hierbij toe met de wortel van de waterdiepte. Aanvullend onderzoek is

nodig om het verband tussen de spreiding en de karakteristieke steenafmeting van het stortmateriaal te verifiëren. Bij het tegelijk storten van stenen uit een breuksteen- en grindsortering is meer spreiding waargenomen dan bij individueel gestorte stenen.

Als tijdens de valbeweging rotatie van het stortmateriaal optreedt, geeft het ESM geen goede beschrijving van het valgedrag van stortmaterialen. De spreiding neemt in dit geval evenredig toe met de waterdiepte en wordt niet bepaald door de karakteristieke steenafmeting.

Het ESM geeft een goede beschrijving van de valbeweging van gestorte platte vormen (rechthoekige plaatjes en ronde schijfjes). Hierbij treedt door verschillen in vorm een groot verschil in spreiding op.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond van het onderzoek

Het mathematische model STORTSIM is in 1990 in opdracht van Rijkswaterstaat ontwikkeld om het inzicht in het storten van stenen vanaf een schuifstorter te vergroten. Met behulp van STORTSIM is het mogelijk om te berekenen welke hoeveelheid steen benodigd is om, gegeven de stortomstandigheden, te voldoen aan een vereiste minimale dikte van een laag te storten steen.

Tijdens de ontwikkeling van STORTSIM bleken de onduidelijkheden rondom de optredende processen tijdens het storten van steen dusdanig groot dat een juiste modellering niet goed mogelijk was. Hieruit voortvloeiend is in 1991, onder leiding van prof. drs. ir. J.K. Vrijling, een onderzoek begonnen door ir. R.J. Manni met als titel: "Steenstorten. Voorspelling van de stort bij storten met een schuifstorter". Van dit onderzoek is in november 1995 het eindrapport (lit.[8]) verschenen. Het afstudeerverslag van H.J. Cregten (lit.[6]), getiteld: "Het gebruik van probabilistische methoden bij het beoordelen van het stortresultaat van een zijstorter" (augustus 1995), behandelt grotendeels dezelfde materie. In beide onderzoeken is een theoretisch model ontwikkeld, het Enkele Steen Model (ESM), dat de spreiding van steen in water beschrijft. Met behulp van meetgegevens, afkomstig uit eerder uitgevoerde modelproeven met steen, is vervolgens geprobeerd om te controleren of het ontwikkelde model op de juiste wijze de spreiding van steen in water beschrijft. Het gebrek aan op het spreidingsmodel toegesneden meetgegevens vormt de oorsprong van dit afstudeeronderzoek.

1.2 Probleem- en doelstelling

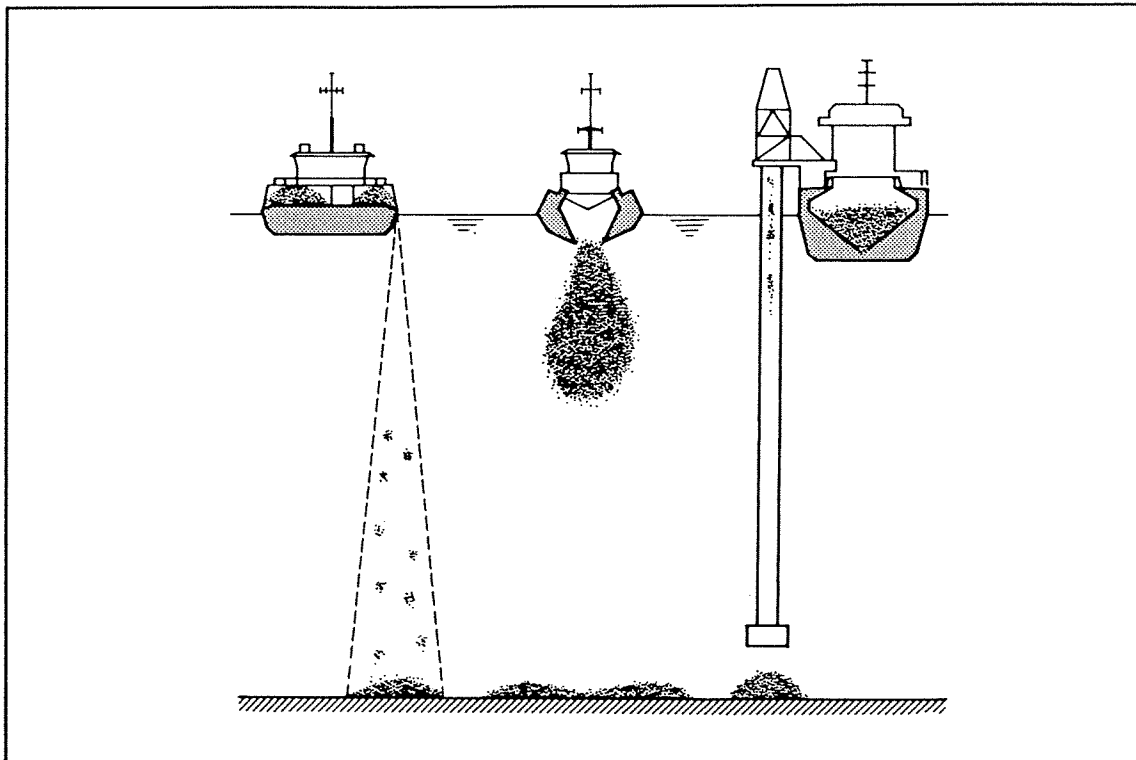
Om te controleren of het ontwikkelde spreidingsmodel voor stortsteen op de juiste wijze is gemodelleerd, zijn onvoldoende adequate meetgegevens beschikbaar. Het doel van dit afstudeeronderzoek is het ontwikkelen, uitwerken en uitvoeren van een reeks modelproeven om de juistheid van het ontwikkelde spreidingsmodel voor stortsteen te verifiëren.

1.3 Gebruik van steen in de waterbouwkunde

Al tientallen jaren is steen een veel toegepast constructiemateriaal in de waterbouwkunde. De hoge soortelijke massa en de relatief makkelijke verkrijgbaarheid in soorten en maten, maken steen tot een zeer veelzijdig en bruikbaar materiaal. Vele waterbouwkundige constructies bestaan dan ook geheel of gedeeltelijk uit steen. Voorbeelden hiervan zijn:

- afsluitdammen
- beschermingsconstructies voor pijpleidingen en tunnels
- bodem- en oeververdedigingsconstructies in rivieren, zeearmen en bij afsluitingswerken
- funderingen onder en naast waterbouwkundige constructies zoals bijvoorbeeld sluisen en stuwen
- golfbrekers

Het toepassingsgebied van steen bevindt zich vaak geheel of gedeeltelijk onder water, waarbij het in veel gevallen noodzakelijk is om de steen met behulp van schepen aan te brengen. Er zijn drie veelgebruikte methoden om steen met een schip aan te brengen; met behulp van een schuifstorter, een splijtbak of een Flexible Fall Pipe Vessel (F.F.P.V.). Deze worden weergegeven in figuur 1.1.



Figuur 1.1 *Schuifstorter, splijtbak en F.F.P.V. (lit.[5])*

Een schuifstorter stort de lading steen door deze over de twee zijkanten van het schip te schuiven. Dit wordt gedaan door middel van hydraulische schuiven die vanuit de scheepsas, over de volle lengte van het laadruim, naar de zijkant van het schip bewegen.

Een splijtbak bestaat uit twee gescheiden scheepshelften die scharnierend met elkaar verbonden zijn. Tijdens het lossen worden de twee scheepshelften uit elkaar gedrukt en kan het stortmateriaal via de onderkant het schip verlaten. Met een splijtbak is het mogelijk om in korte tijd grote hoeveelheden materiaal te storten. Hierdoor is het storten met een splijtbak een relatief goedkope methode. Een groot nadeel van deze methode is dat het stortproces slecht beheerst kan worden met veel verlies van steen tot gevolg.

Het storten van steen met een F.F.P.V. is begin tachtiger jaren voor het eerst toegepast als antwoord op de vraag van de oliemaatschappijen, die in steeds diepere gedeelten van de Noordzee olie en gas gingen winnen, om op grotere waterdiepten (tot 500 meter) steen te kunnen storten. Bij deze stortmethode wordt de steen gelost via een flexibele "tuinslang" die aan de zijkant van de bulkcarriers, die bij deze methode veelal gebruikt worden, tot de bodem wordt neergelaten.

In gevallen waar een nauwkeurige plaatsing van grote, losse steeneenheden vereist is, bijvoorbeeld bij het aanbrengen van de toplaag van een in aanbouw zijnde golfbreker, wordt veelal gebruik gemaakt van een ponton met een grijpkraan erop.

1.4 Indeling van het verslag

In hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van de verschillende fasen van het stortproces van een schuifstortter. Het valproces van een enkele steen in water wordt in hoofdstuk 3 besproken. Hoofdstuk 4 gaat in op de rol van schaaleffecten bij het uitvoeren van modelproeven met steen. In hoofdstuk 5 worden vervolgens een aantal theoretische achtergronden gegeven die van belang zijn bij het uitwerken en interpreteren van de resultaten uit de modelproeven. De wijze waarop de verschillende modelproeven zijn uitgevoerd en de resultaten zijn uitgewerkt wordt in hoofdstuk 6 besproken. Ook wordt in dit hoofdstuk een overzicht gegeven van de bij de modelproeven gebruikte stortmaterialen. In de hoofdstukken 7 tot en met 12 worden de resultaten uit de modelproeven gepresenteerd. Achtereenvolgens worden de modelproeven besproken die zijn uitgevoerd met een breuksteensortering (hoofdstuk 7), een grindsortering (hoofdstuk 8), aluminium kubussen (hoofdstuk 9), betonnen kubussen (hoofdstuk 10), glazen bollen (hoofdstuk 11) en platte vormen (hoofdstuk 12). In hoofdstuk 13 worden de resultaten van de modelproeven vergeleken met resultaten van eerder uitgevoerd onderzoek naar de spreiding van steen in water. Tenslotte worden in hoofdstuk 14 de belangrijkste conclusies van dit afstudeeronderzoek samengevat en worden aanbevelingen voor verder onderzoek gedaan.

2 Stortproces van een schuifstorter

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk vormt een samenvatting van het literatuuronderzoek dat is uitgevoerd als voorbereiding op het uitvoeren van modelproeven ter verificatie van het Enkele Steen Model. Het stortproces van een schuifstorter kan in vijf fasen worden onderverdeeld:

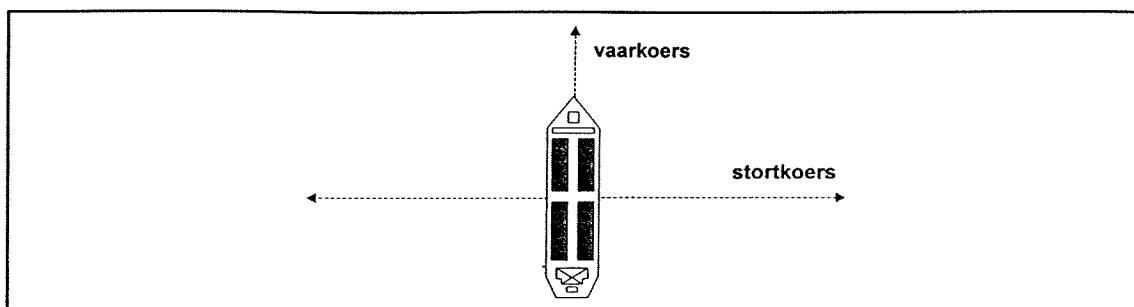
- 1) Vaargedrag en positiebepaling van de schuifstorter. Centraal staat in deze fase de nauwkeurigheid waarmee de positie van de schuifstorter kan worden bepaald tijdens het storten en de mate waarin het schip kan worden bijgestuurd wanneer deze afwijkt van de gewenste stortkoers.
- 2) Bresgedrag van de steen. Deze fase omvat de werking van de stenen ten opzichte van elkaar door onderlinge wrijving wanneer de stenen overboord worden geschoven. Als gevolg van de onderlinge wrijving tussen de stenen, schuiven ze met wisselende hoeveelheden op onregelmatige tijdstippen van het dek af.
- 3) Spreiding van de steen. Na het verlaten van het dek van de schuifstorter bereikt de steen de waterlijn en wordt het traject naar het (zee-)bed in het water vervolgd. De spreiding van steen wordt ondermeer veroorzaakt door het effect van wervelloslating rondom de steen.
- 4) Verplaatsing als gevolg van stroming. De aanwezigheid van stroming(en) heeft een additioneel effect op de plaats waar de steen op het (zee-)bed zal neerkomen. Dit effect is afhankelijk van de verhouding tussen de valsnelheid van de steen en de stroomsnelheid, waarbij ook de waterdiepte een rol speelt.
- 5) Bodemgedrag. Eenmaal aangekomen op de bodem zal de steen waarschijnlijk niet direct stilliggen. De steen zal mogelijk wegspringen en/of afrollen langs de bodem. Ook het afschuiven van het talud van het stortprofiel is mogelijk.

De vijf fasen van het stortproces van een schuifstorter worden achtereenvolgens in de paragrafen 2.2 tot en met 2.6 besproken. Tot slot gaat paragraaf 2.7 in op de diverse mogelijkheden om de stortnauwkeurigheid te verbeteren.

2.2 Vaargedrag en positiebepaling van de schuifstorter

Van grote invloed op de uiteindelijk ligging van een stort is de nauwkeurigheid waarmee de positie van de schuifstorter kan worden bepaald tijdens het storten en de mate waarin het schip kan worden bijgestuurd wanneer dit afwijkt van de gewenste koers als gevolg van stromingen en golven.

De schuifstorter stort in bijna alle gevallen de lading steen, terwijl het zich met een constante snelheid, de verhaalsnelheid, zijdelings verplaatst langs een uitgezette stortkoers. De vaarkoers staat loodrecht op de stortkoers en is de richting waarin de boeg van de schuifstorter wijst. De stortkoers en vaarkoers worden weergegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1 *Stort- en vaarkoers van een schuifstortter*

2.2.1 Plaatsbepalingssystemen

Een plaatsbepalingssysteem wordt gebruikt om de exacte positie, door middel van een x- en y-coördinaat, van een (stort)schip te bepalen. Er worden twee soorten plaatsbepalingssystemen onderscheiden, optische en radiografische, die afhankelijk van de vereiste nauwkeurigheid en de opstel mogelijkheden van de meetapparatuur worden ingezet.

Optische plaatsbepalingssystemen worden veel toegepast bij stortwerkzaamheden in de directe nabijheid van de kust, dat wil zeggen maximaal 5 tot 10 km uit de kust. De gewenste stortkoers wordt zichtbaar gemaakt door laserapparatuur die een smalle bundel laserlicht uitzendt. Zodra het stortschip van de stortkoers afwijkt is het laserlicht niet meer te zien en moet worden bijgestuurd. Met behulp van een range-finder kan de afstand van het stortschip tot de wal zeer nauwkeurig (tot op enkele centimeters) worden bepaald. Deze gegevens, gecombineerd met die van het gyrokompas (koers van het schip), en inclinometer (slagzij van het schip), kunnen worden gekoppeld aan de boordcomputer en on-line op het stortschip worden gepresenteerd. Een nadeel van optische plaatsbepalingssystemen is de afhankelijkheid van goed zicht.

De betrouwbaarheid en nauwkeurigheid van radiografische systemen is de laatste jaren enorm verbeterd. Dit is vooral het gevolg van de opkomst van het Global Positioning System (GPS). Dit systeem is door het Amerikaanse leger ontwikkeld voor militaire doeleinden en wordt nu ook gebruikt voor civiele toepassingen. Het GPS-systeem maakt gebruik van satellieten die in een baan om de aarde draaien. Door een berekening van de afstand van een willekeurig meetpunt op aarde tot de verschillende satellieten kan de positie van het meetpunt met een nauwkeurigheid van ongeveer 100 meter worden bepaald. Om de gewenste positie met deze nauwkeurigheid te bepalen is het noodzakelijk dat er minstens vier satellieten binnen bereik van het meetpunt zijn. Het aantal satellieten dat binnen bereik van het meetpunt ligt is afhankelijk van de positie van het meetpunt op aarde ten opzichte van de banen van de satellieten om de aarde.

Hoe meer satellieten binnen bereik van het meetpunt liggen, hoe groter de nauwkeurigheid van het GPS-systeem. Een nauwkeurigheid van 50-100 m is meer dan voldoende voor de positiebepaling van schepen maar voor toepassing bij civiele werken in de kustwaterbouwkunde, zoals bijvoorbeeld bij het storten van steen, is een veel grotere nauwkeurigheid vereist. Hiertoe is het Differential GPS-systeem (DGPS) ontwikkeld. Dit systeem omvat de plaatsing van een GPS ontvanger op een meetpunt waarvan de positie exact bekend is. Door vergelijking van de actuele door de GPS ontvanger doorgegeven positie met de exact bekende positie, ontstaat een indicatie van de actuele fout op dat

tijdstip. Met deze actuele fout worden correctiefactoren berekend die door de mobiele DGPS ontvangers in het gebied worden gebruikt om de nauwkeurigheid van de positie van het schip te verbeteren tot ongeveer 2,5 m. De nauwkeurigheid van een plaatsbepalingssysteem wordt mede bepaald door het verversingsinterval van de berekende positie, dat wil zeggen de frequentie waarmee steeds een positie op basis van nieuwe correctiefactoren wordt doorgegeven.

Er worden drie verschillende soorten DGPS-systemen toegepast bij schuifstorters:

- Short Range Differential GPS
- Long Range Differential GPS
- Real Time Kinematic OTF (RTK)

Short Range Differential GPS systemen zijn er in verschillende modellen en uitvoeringen en worden gekenmerkt door een vrij hoog verversingsinterval, elke seconde wordt een positie op basis van vernieuwde correctiefactoren doorgegeven. Een nadeel van deze systemen is dat de afstand van de schuifstorter tot een vast referentiepunt met een bekende positie maximaal ongeveer 20 km mag bedragen, afhankelijk van de frequentie waarop de signalen worden uitgezonden.

Wanneer het bereik groter moet zijn dan 20 km, kan gebruik worden gemaakt van een Long Range Differential GPS. Bij dit systeem is het verversingsinterval van de doorgegeven positie 2 tot 5 seconden.

Een nieuw en veelbelovend plaatsbepalingssysteem is het Real Time Kinematic OTF. Met dit systeem wordt de nauwkeurigheid van de plaatsbepaling, bij een verversingsinterval van minder dan één seconde, met een factor 50-100 verbeterd. De eerste proeven met dit nieuwe systeem zijn inmiddels succesvol afgerond en de verwachting is dat in de toekomst in toenemende mate met dit systeem zal worden gewerkt. Een nadeel van het RTK-systeem is dat de afstand tot het vaste referentiepunt, op de wal of bijvoorbeeld op een boorplatform, maximaal 10 km mag bedragen. Tabel 2.1 geeft een overzicht van de nauwkeurigheden voor de diverse DGPS-systemen zoals die zijn gemeten bij testen met een vast referentiepunt. In de tabel worden percentages gegeven van het aantal DGPS-metingen dat, afhankelijk van het gebruikte systeem, aan een bepaalde nauwkeurigheid voldoet.

Verskil tussen exacte positie en met DGPS bepaalde positie	Short Range Differential GPS (Deltafix DNS-12 system)	Long Range Differential GPS (DGPS 8000 / MBX-2/00 Marine Beacon Receiver)	Real Time Kinematic OTF (Ashtech Z-12 system)
< 0,5 m (RTK-systeem: < 0,5 cm)	41,0 %	13,5 %	12,4 %
< 1,0 m (RTK-systeem: < 1,0 cm)	79,1 %	41,9 %	48,2 %
< 1,5 m (RTK-systeem: < 1,5 cm)	92,5 %	68,3 %	59,9 %
< 2,0 m (RTK-systeem: < 2,0 cm)	97,1 %	84,8 %	86,7 %
< 2,5 m (RTK-systeem: < 2,5 cm)	98,8 %	93,3 %	92,0 %

Tabel 2.1 *Percentage DGPS-metingen dat voldoet aan gegeven nauwkeurigheid*

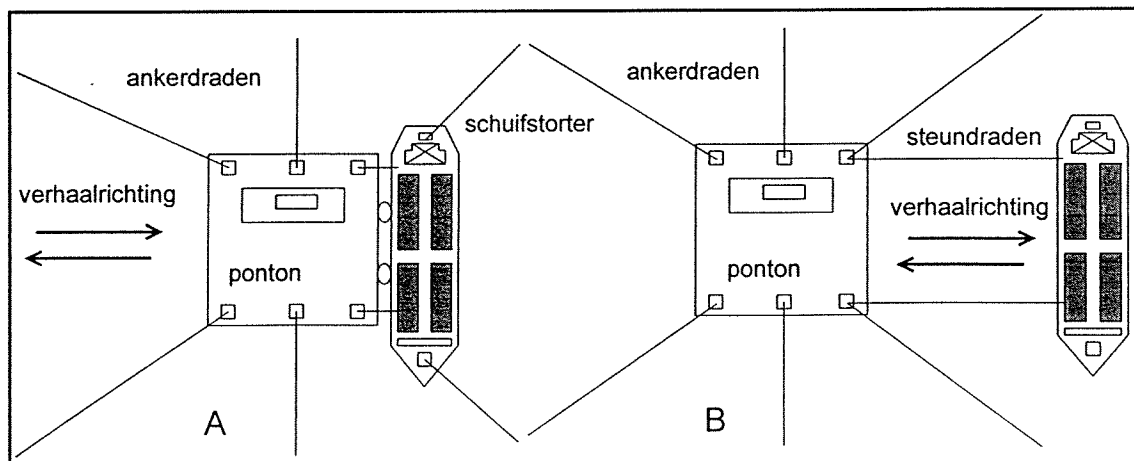
Het gebied dat door een DGPS-netwerk gedekt wordt, wordt in snel tempo uitgebreid. In bijna alle Europese landen worden vaste referentiepunten op de wal geïnstalleerd zodat positiebepaling van schepen in de Europese kustwateren met DGPS-nauwkeurigheid kan plaatsvinden.

2.2.2 Stortmethoden

Nadat de schuifstorter is gepositioneerd kan het stortproces aanvangen. Er zijn twee veel gebruikte stortmethoden: het storten met behulp van een ponton en het storten met behulp van een Dynamic Positioning System.

Storten met behulp van een ponton

Bij deze stortmethode, die veelal wordt gebruikt wanneer steen moet worden gestort op een zinkstuk, wordt de schuifstorter gekoppeld aan een verankerd ponton door middel van twee lieren. De lading steen kan vervolgens op twee manieren worden gestort. In het eerste geval worden de lierdraden onder spanning gezet met behulp van de eigen voortstuwing van de schuifstorter en de lieren met een bepaalde verhaalsnelheid afgevierd terwijl de steen wordt gestort. Het ponton doet in dit geval dienst als afmeer- en positioneerponton. In het tweede geval wordt het ponton gebruikt als afmeer-, positioneer- en verhaalponton, doordat de steen wordt gestort terwijl het ponton, met de daaraan gekoppelde schuifstorter, wordt verhaald door de eigen ankerdraden, onder spanning gezet met behulp van de eigen voortstuwing van de schuifstorter, in te nemen en uit te vieren. In figuur 2.2 worden de twee manieren waarbij wordt gestort met behulp van een verhaal- en/of afmeerponton geïllustreerd.



Figuur 2.2 Storten met behulp van een verankerd verhaal- en/of afmeerponton (lit.[4])

Door het gebruik van ankerdraden en lieren is het mogelijk de schuifstorter nauwkeurig op zijn positie te houden, waardoor deze stortmethode geschikt is om nauwkeurig steen te storten. Een nadeel is dat het koppelen van de geladen schuifstorter aan het afgemeerde ponton relatief veel tijd kost. Bij gebruik van oudere, niet gesynchroniseerde lieren kunnen afwijkingen optreden in de afviersnelheden van de lieren waardoor de nauwkeurigheid van de stort vermindert, omdat de schuifstorter als gevolg van twee verschillende afviersnelheden een ongewenste rotatie ten opzichte van de stortkoers ondergaat.

Storten met behulp van een Dynamic Positioning System

In toenemende mate wordt het tijdrovende gebruik van een verankerd ponton vermeden door de schuifstorter te voorzien van een Dynamic Positioning System (DP-systeem). Met een DP-systeem kan de schuifstorter zich met behulp van eigen voortstuwing zelfstandig positioneren op de gewenste stortlocatie en zich al stortend zijdelings verplaatsen. De informatie die door het plaatsbepalingssysteem wordt doorgegeven, wordt verwerkt in het DP-systeem van de schuifstorter. In dit systeem is de gewenste stortkoers van de schuifstorter voorgeprogrammeerd. Het DP-systeem verwerkt de informatie over de positie en het vaargedrag van het schip en stuurt het schip indien nodig bij, na vergelijking van de exacte gegevens (vaargedrag en positie van het schip) met de ingeprogrammeerde stortkoers. Geheel automatisch bestuurt het DP-systeem de schroeven en roeren van het schip om het binnen de toegestane bandbreedten (onnauwkeurigheden) van de stortkoers te houden. Het DP-systeem geeft de mogelijkheid om in te stellen wat de geaccepteerde bandbreedten van de stortkoers zijn. De bandbreedte wil men enerzijds zo klein mogelijk houden om zo nauwkeurig mogelijk te kunnen storten, anderzijds is er meer motorvermogen nodig om aan kleinere bandbreedten te voldoen en vormt ook de altijd aanwezige reactietijd vanwege de traagheid van het schip een beperkende factor. De uiteindelijke bandbreedte is dus een optimalisatievraagstuk: de kosten van meer motorvermogen en snellere en meer nauwkeurige DP-systemen ten opzichte van de kosten van extra te storten steen vanwege afwijkingen van de stortkoers tijdens het stortproces. De uiteindelijk gerealiseerde stortkoers wordt in belangrijke mate bepaald door de invloed van golven, wind en stromingen. Voor iedere schuifstorter met een DP-systeem zijn "Vessel Capability Plots" aanwezig die aangeven bij welke windrichtingen en windsnelheden en onder welke stromingscondities de schuifstorter genoeg motorvermogen heeft om een bepaalde ingestelde stortkoers af te leggen zonder herhaaldelijk de ingestelde bandbreedte te overschrijden. Een voorbeeld van Vessel Capability Plots, waarbij ervan wordt uitgegaan dat de hoek van inval van wind, golven en stroming gelijk is, wordt gegeven in bijlage 2.1.

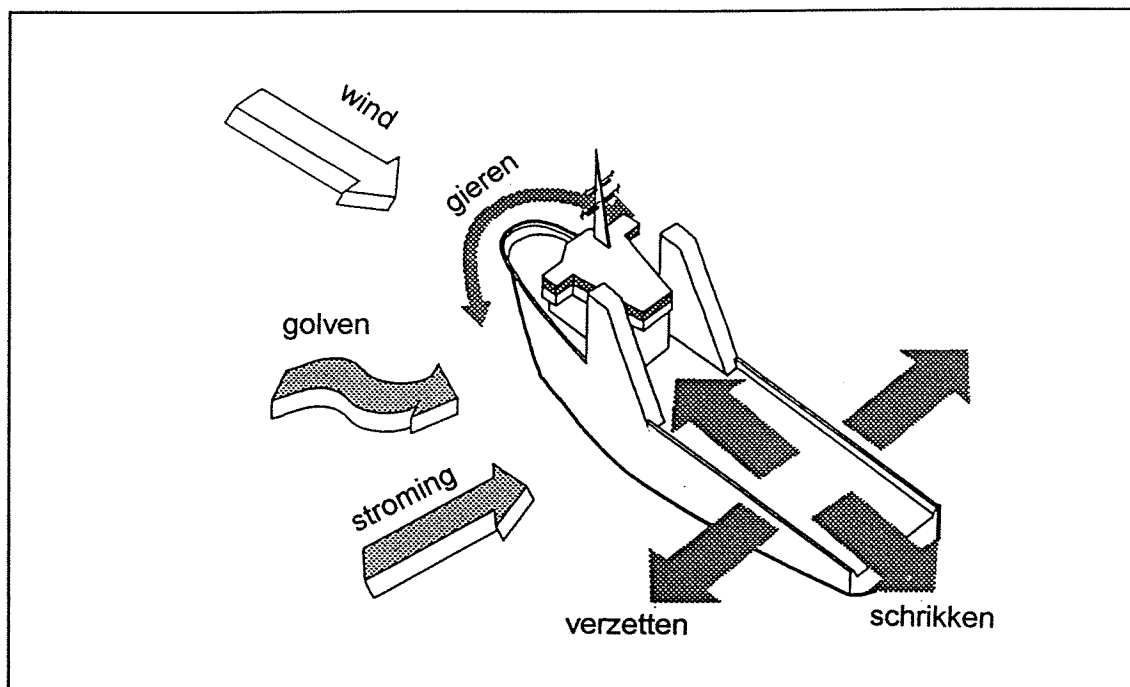
Een nadeel van DP-systemen is dat in sommige gevallen de schroefstroom van één van de schroeven van de schuifstorter, die door het DP-systeem worden aangestuurd, een extra onnauwkeurigheid van het stortresultaat tot gevolg heeft doordat de gestorte steen in de schroefstroom terecht komt en een extra horizontale verplaatsing meekrijgt.

2.2.3 Vrijheidsgraden van een schuifstorter

Wind, golven en stromingen zijn er de oorzaak van dat de schuifstorter tijdens het stortproces bewegingen ondergaat en zo van de stortkoers afwijkt. Ieder schip heeft zes vrijheidsgraden:

- horizontale verplaatsing in de lengterichting van het schip (schrikken)
- horizontale verplaatsing loodrecht op de lengterichting van het schip (verzetten)
- verticale verplaatsing van het schip (dompen)
- rotatie om een horizontale as loodrecht op de lengterichting van het schip (stampen)
- rotatie om een horizontale as in lengterichting van het schip (rollen)
- rotatie van de schuifstorter om de verticale as (gieren)

Drie vrijheidsgraden (schrikken, verzetten en gieren) hebben afwijkingen van de schuifstorter van de stortkoers tot gevolg hebben. Deze worden weergegeven in figuur 2.3.



Figuur 2.3 *Vrijheidsgraden die van invloed zijn op het stortproces*

Horizontale verplaatsing in de lengterichting van het schip (schrikken)

Als gevolg van het schrikken treden afwijkingen op van de stortkoers (zie aanduiding A in figuur 2.4) en wordt de steen gestort in een groter stortvak dan gewenst. De laagdikte in het stortvak zal als gevolg hiervan afnemen. Bij gebruik van een schuifstorter die is uitgerust met een DP-systeem blijken deze afwijkingen in de praktijk beperkt tot 2 à 3 m aan weerskanten van het stortvak. Bij het storten met behulp van een verankerd ponton blijken deze afwijkingen iets kleiner te zijn, namelijk 1 à 2 m.

Horizontale verplaatsing loodrecht op de lengterichting van het schip (verzetten)

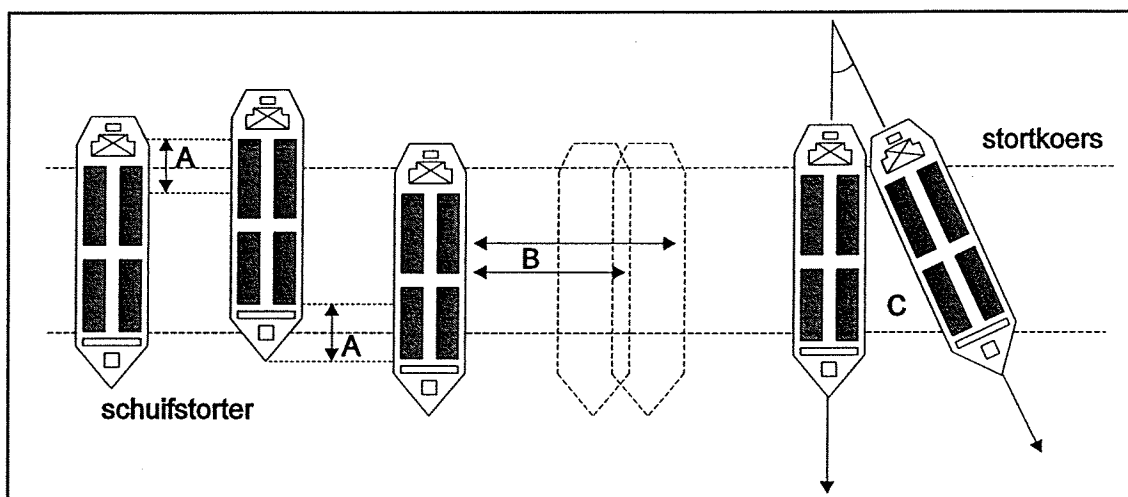
Als gevolg van de wind, golven en stromingen is de verhaalsnelheid nooit constant, waardoor de schuifstorter in een willekeurige periode Δt een steeds wisselende afstand over het stortvak aflegt. Dit wordt in figuur 2.4 (aanduiding B) geïllustreerd. Uitgaande van een constante storthoeveelheid steen per tijdseenheid, leidt het verzetten tot een ongelijkmatige verdeling van de steen over het stortvak.

Bij aanvang van het stortproces moet de schuifstorter versnellen totdat de constante verhaalsnelheid is bereikt. De door de schuifstorter tijdens het versnellen van 0 m/s tot aan de constante verhaalsnelheid afgelegde weg, wordt de "run-in" genoemd. Deze dient zo opgebouwd te worden dat wanneer de constante verhaalsnelheid is bereikt, de schuifstorter boven het stortvak is aangekomen en meteen met het storten van de lading kan worden begonnen. De run-in bedraagt afhankelijk van de stortomstandigheden (wind, golven en stromingen) tussen de 10 en 20 m. Wanneer de constante verhaalsnelheid is bereikt dan blijven verdere afwijkingen van die verhaalsnelheid in de praktijk voor de beide besproken

stortmethoden beperkt tot 5 à 10 procent van de verhaalsnelheid, afhankelijk van de stortomstandigheden.

Rotatie van de schuifstorter om de verticale as (gieren)

In figuur 2.4 (aanduiding C) wordt de werking van het gieren geïllustreerd. Als gevolg van de rotatie van de schuifstorter in een willekeurige periode Δt , wordt een over de lengte van de schuifstorter niet constante afstand over het stortvak afgelegd. Ervan uitgaande dat er een constante hoeveelheid steen per tijdseenheid wordt gestort, heeft dit een ongelijkmatige verdeling van de stortsteen over het stortvak tot gevolg. In de praktijk blijkt dat, wanneer gestort wordt met behulp van een verankerd ponton, de maximale te verwachten gierhoek beperkt blijft tot enkele graden. Bij gebruik van een schuifstorter die is uitgerust met een DP-systeem, blijft de rotatie beperkt tot minder dan één graad onder de voorwaarde dat wordt gewerkt binnen de marges zoals aangegeven door de Vessel Capability Plots (zie ook paragraaf 2.2.2).

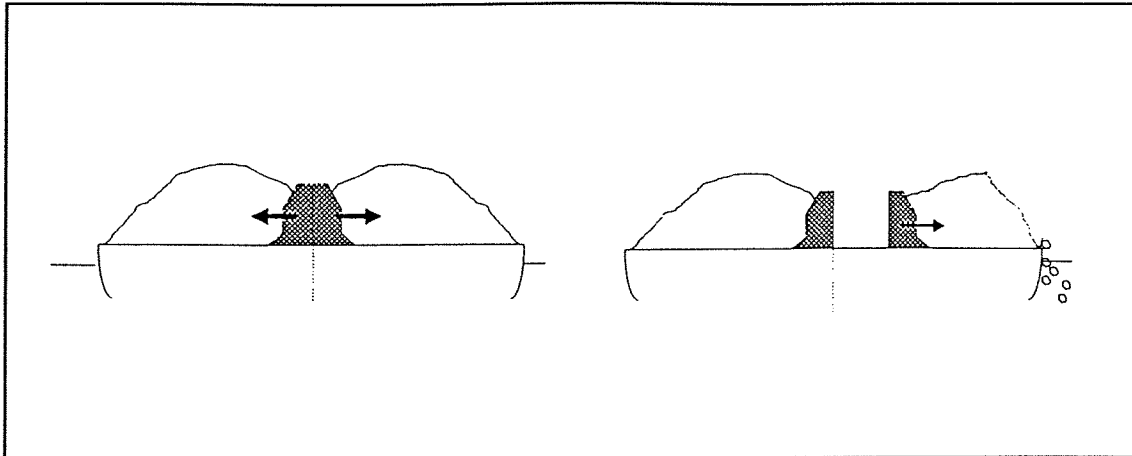


Figuur 2.4 Afwijkingen van de stortkoers door schrikken, verzetten en gieren

2.3 Bresgedrag van steen

In lit.[4] wordt ingegaan op het bresgedrag van steen. Dit gedrag wordt gedefinieerd als de onregelmatigheid in de hoeveelheid materiaal die, per tijdseenheid en per gedeelte van het laaddek van de schuifstorter, gedurende het stortproces over boord wordt gezet (het bressen) als gevolg van de zijdelingse verplaatsing van de hydraulische schuiven op de schuifstorter (zie figuur 2.5). Het bresgedrag is onder andere afhankelijk van de:

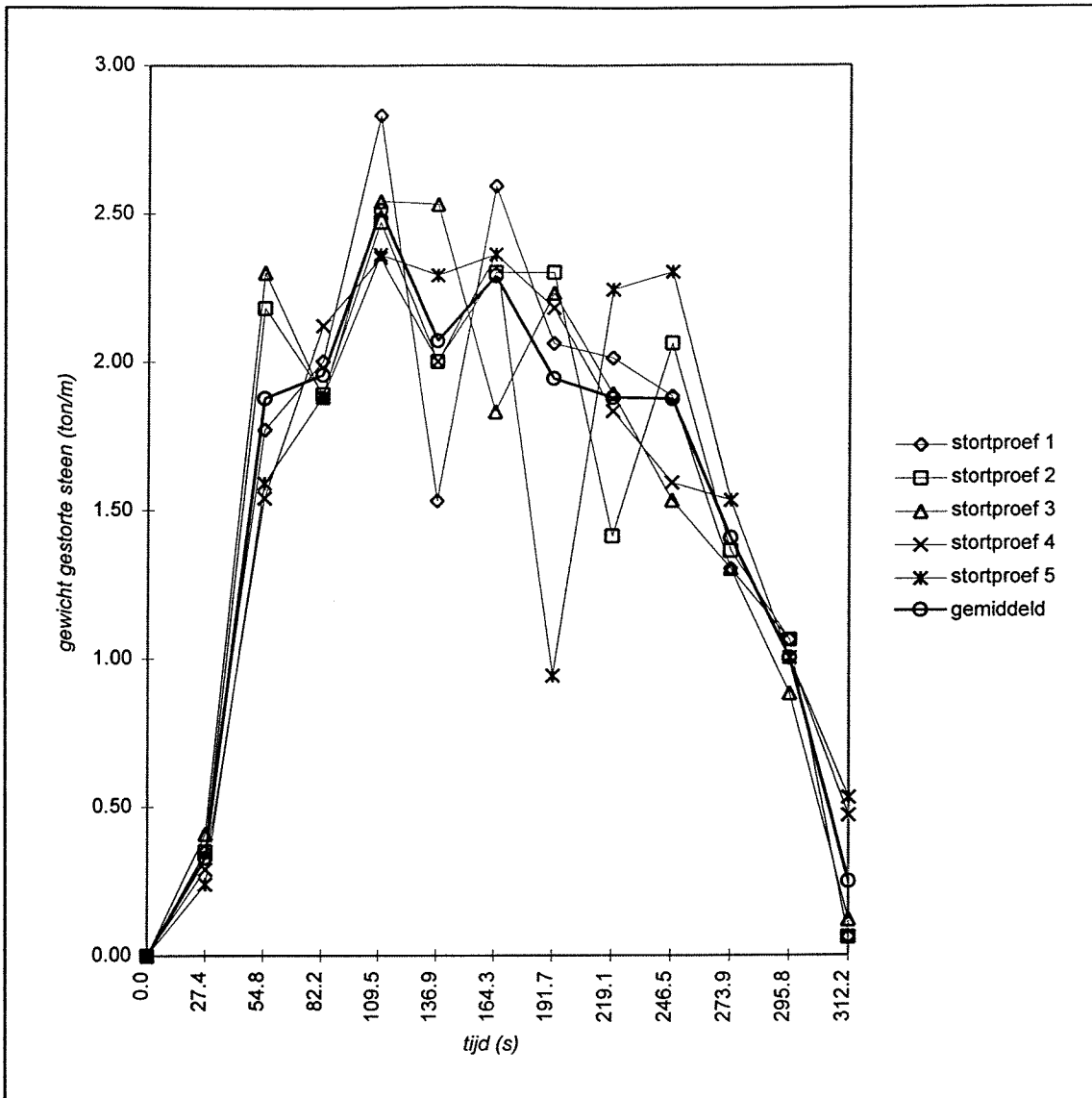
- eigenschappen van het stortmateriaal
- schuifsnelheid van de hydraulische schuiven
- wijze van belading van de schuifstorter
- scheepsbewegingen onder invloed van golven of doordat een gedeelte van de steenlading plotseling van het dek af schuift



Figuur 2.5 *Werkingsprincipe van een schuifstorter (lit.[6])*

Bij aanvang van het stortproces bewegen de hydraulische schuiven met de ingestelde schuifsnelheid naar de zijkanten van de schuifstorter en wordt de stortlading eerst in elkaar geschoven alvorens het eerste materiaal overboord valt. Bij dit proces, dat de begin-onregelmatigheid wordt genoemd, vindt een verdichting van de te storten steenmassa plaats waarbij het poriënvolume afneemt. Tijdens het verdichten bouwt het talud aan de stortzijde (buitentalud) zich op totdat stenen overboord beginnen te vallen en het stortproces op gang komt. Wanneer stenen het dek van de schuifstorter verlaten neemt de hellingshoek van het buitentalud af en zal de hoeveelheid steen die het dek van de schuifstorter verlaat weer afnemen. De steenlading schuift met de hydraulische schuiven mee naar de zijkant van de schuifstorter waardoor de hellingshoek van het buitentalud, die is afgenomen doordat stenen overboord zijn gevallen, weer toeneemt totdat de stenen weer van het dek afschuiven en het beschreven proces zich herhaalt. De schuifsnelheid dient zo te worden ingesteld dat de per tijdseenheid gestorte hoeveelheid steen zo constant mogelijk is gedurende het stortproces. Aan het einde van het stortproces wanneer de schuifstorter bijna geheel leeg is neemt de storthoeveelheid af, de zogenaamde eind-onregelmatigheid, als gevolg van de kleine hoeveelheid steen die nog aanwezig is op het dek van de schuifstorter.

In lit.[22] wordt verslag gedaan van modelproeven die zijn uitgevoerd om het bresgedrag van stortsteen te onderzoeken. In de figuren 2.6 en 2.7 wordt het gemeten bresgedrag van breuksteen 40-250 mm gegeven voor twee verschillende gangbare schuifsnelheden, namelijk 0,55 m/min en 1,10 m/min. Het bresgedrag wordt in de figuren 2.6 en 2.7 (gemiddeld per meter deklengte van de schuifstorter) weergegeven voor 5 individuele stortproeven. Daarnaast wordt in deze figuren ook het over de 5 stortproeven gemiddelde bresgedrag gegeven. Duidelijk is te zien dat de per tijdseenheid gestorte hoeveelheid steen sterk varieert. De variaties vinden in zeer korte tijd plaats en zijn zelf-corrigerend; nadat er een extra grote hoeveelheid steen is gevallen wordt dit gecompenseerd doordat er in een korte periode daarna relatief weinig steen valt. Het gevolg is dat de totale gestorte hoeveelheid steen (per tijdseenheid en gemiddeld per meter deklengte) gemiddeld over een aantal stortgangen relatief constant is wanneer het stortproces eenmaal op gang is gekomen (tussen de begin- en eindonregelmatigheid). Dit is goed te zien in figuur 2.8 waarin de cumulatieve stortkarakteristiek, gemiddeld per meter deklengte van de schuifstorter, is uitgezet. De stortkarakteristiek vertoont een nagenoeg rechtlijnig verloop, behoudens de begin- en eind-onregelmatigheid. De begin-onregelmatigheid is duidelijker waarneembaar



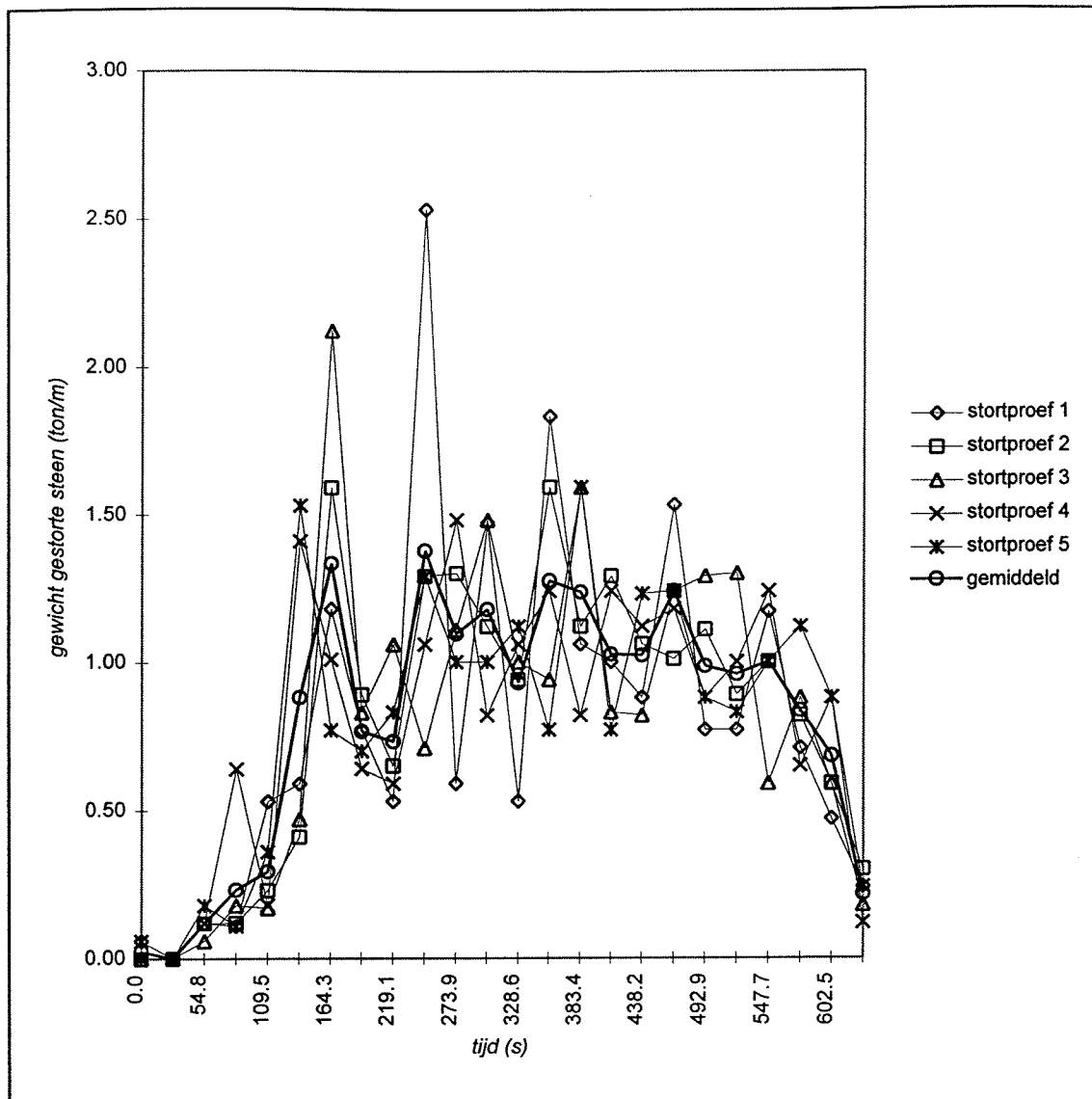
Figuur 2.6 *Bresgedrag van breuksteen (schuifsnelheid: 1,10 m/min) (lit.[22])*

dan de eind-onregelmatigheid en varieert van ongeveer een halve minuut bij een schuifsnelheid van 1,10 m/min tot ongeveer anderhalve minuut bij een schuifsnelheid van 0,55 m/min.

Een zwakte in de bovenstaande analyse is dat het bresgedrag steeds wordt gemiddeld per meter deklengte van de schuifstorter, terwijl het bresen van de steen in werkelijkheid niet tegelijk over de volle laaddeklengte van de schuifstorter plaatsvindt maar telkens in delen daarvan.

2.3.1 Eigenschappen van het stortmateriaal

Uit figuur 2.8 kan worden afgeleid dat het soort stortmateriaal (grind in plaats van breuksteen) geen invloed heeft op het bresgedrag. Het is onwaarschijnlijk dat dit een algemeen geldige conclusie is. In de praktijk is gebleken dat het bresgedrag onregelmatiger

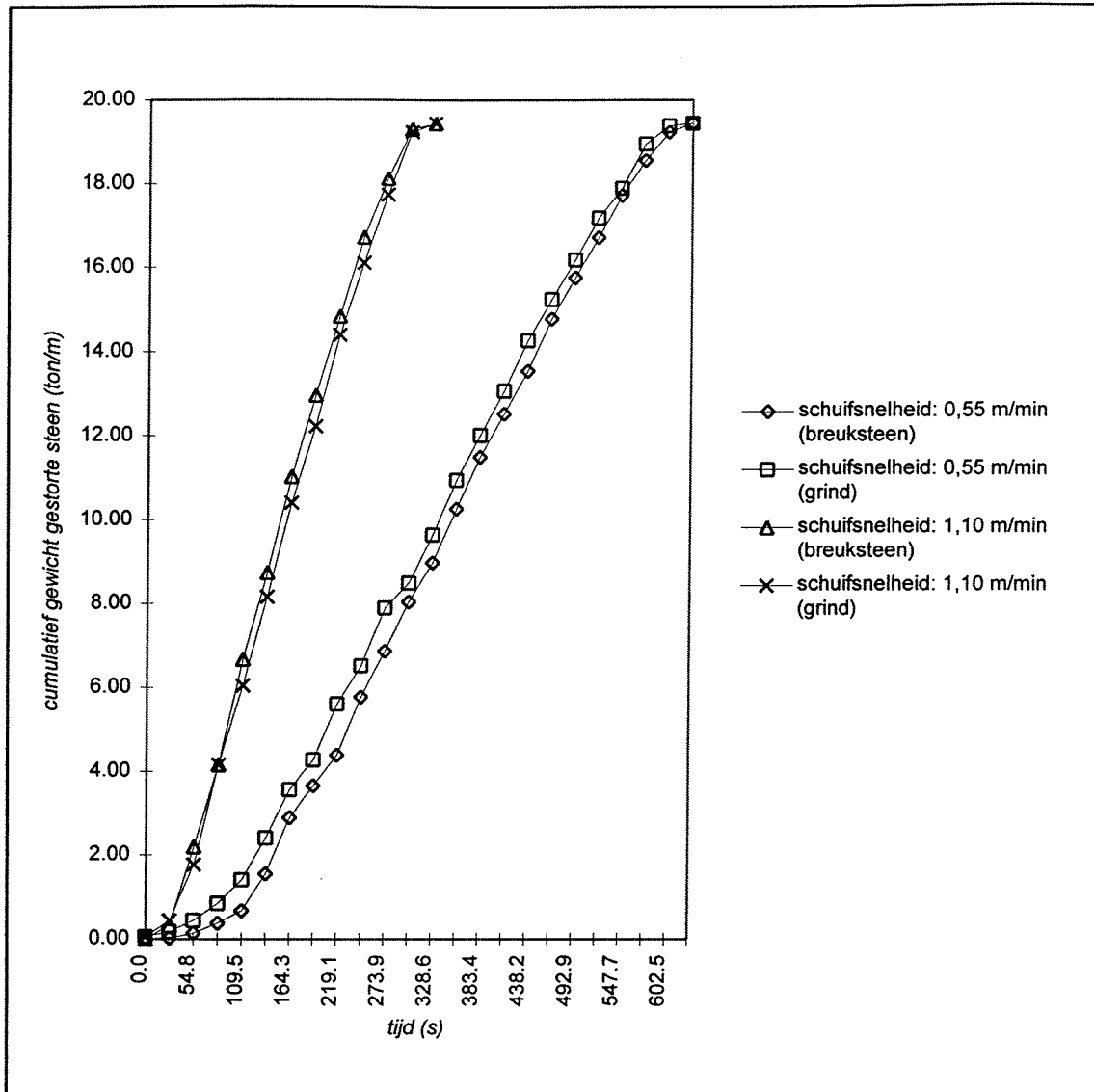


Figuur 2.7 *Bresgedrag van breuksteen (schuifsnelheid: 0,55 m/min) (lit.[22])*

wordt, wanneer er bijvoorbeeld klei aanwezig is in de te storten lading. Verschillende stortmaterialen kunnen overeenkomstig bresgedrag vertonen wanneer de haakweerstand van beide stortmaterialen gelijk is. De haakweerstand wordt bepaald door de weerstand tussen de stenen onderling die afhankelijk is van de vorm en ruwheid van de stenen. De veronderstelling is dat een onregelmatige en hoge haakweerstand de oorzaak is van uiteenlopend bresgedrag. Tot op dit moment is er zeer weinig en enkel experimenteel onderzoek gedaan naar bresgedrag. Het theoretisch modelleren van bresgedrag wordt bemoeilijkt door een gebrek aan eenduidige definiëring van het begrip haakweerstand enerzijds en inzicht in de weerstand tussen stenen onderling anderzijds.

2.3.2 Schuifsnelheid van de hydraulische schuiven

Uit de figuren 2.6 en 2.7 kan worden afgeleid dat het bresgedrag regelmatiger is naarmate de schuifsnelheid hoger ligt, een standaardafwijking van 0,50 ton/m bij een schuifsnelheid



Figuur 2.8 Gemiddelde stortkarakteristieken over 5 stortproeven (lit.[22])

van 0,55 m/min ten opzichte van 0,42 ton/m bij een schuifsnelheid van 1,10 m/min (op basis van een vergelijking met dezelfde gemiddelde hoeveelheid gestorte steen per tijdseenheid). Het meer regelmatige bresgedrag kan worden verklaard door ervan uit te gaan dat bij een hogere schuifsnelheid zich, als gevolg van die schuifsnelheid, een minder steil buitentalud kan ontwikkelen voordat het talud instort en de steen in het water valt. Wanneer gekeken wordt naar de uiteindelijke stortresultaten (zie figuur 2.8) dan valt op dat een hogere schuifsnelheid, en dus een regelmatiger bresgedrag, niet in een significant beter stortresultaat resulteert. Hieruit kan de voorzichtige conclusie worden getrokken dat de gevolgen van een, per tijdseenheid, niet-constante storthoeveelheid als gevolg van het bresgedrag kennelijk beperkt zijn. De onnauwkeurigheden in het bresgedrag worden stochastisch uitgemiddeld doordat bij bijna alle stortwerkzaamheden meerdere lagen steen, aangeduid als stortgangen, op elkaar worden aangebracht.

2.3.3 Belading van de schuifstorter

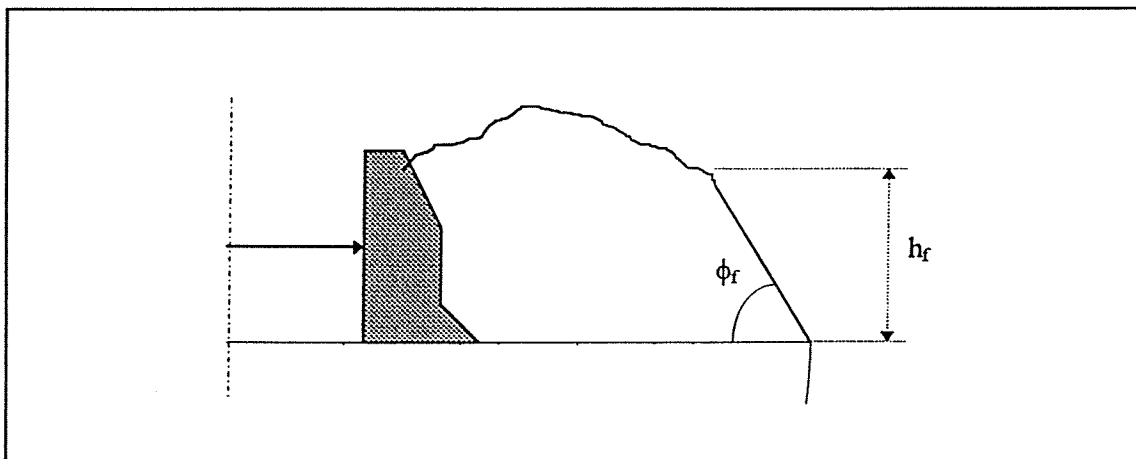
De gelijkmatigheid van de belading van de schuifstorter is van grote invloed op het bresgedrag. Om een zo gelijkmatig mogelijk stortproces te creëren is het van belang dat de hoeveelheid stortmateriaal gelijkmatig over de dwarsdoorsnede en langsdoorsnede van het dek van de schuifstorter is verdeeld. Bij voorkeur dient de lading steen zo verdicht mogelijk te worden aangebracht op het dek van de schuifstorter zodat de begin-onregelmatigheid tijdens het lossen van de steen wordt beperkt. In de praktijk is het moeilijk om de lading steen gelijkmatig over het gehele laaddek te verdelen.

2.3.4 Scheepsbewegingen

Wanneer een talud wordt opgebouwd aan de buitenzijde van het dek van een schuifstorter en het talud de maximale hellingshoek van de steen benadert (zie figuur 2.9), kan een al dan niet periodieke scheepsbeweging genoeg zijn om de "zwakste schakel" in het talud in beweging te krijgen en daarmee het hele talud. Scheepsbewegingen door windgolven of deining hebben dus invloed op het bresgedrag van steen alhoewel het effect hiervan op het uiteindelijke stortresultaat klein is doordat het veelal wordt uitgemiddeld door opeenvolgende stortgangen.

2.3.5 Initiële verplaatsing

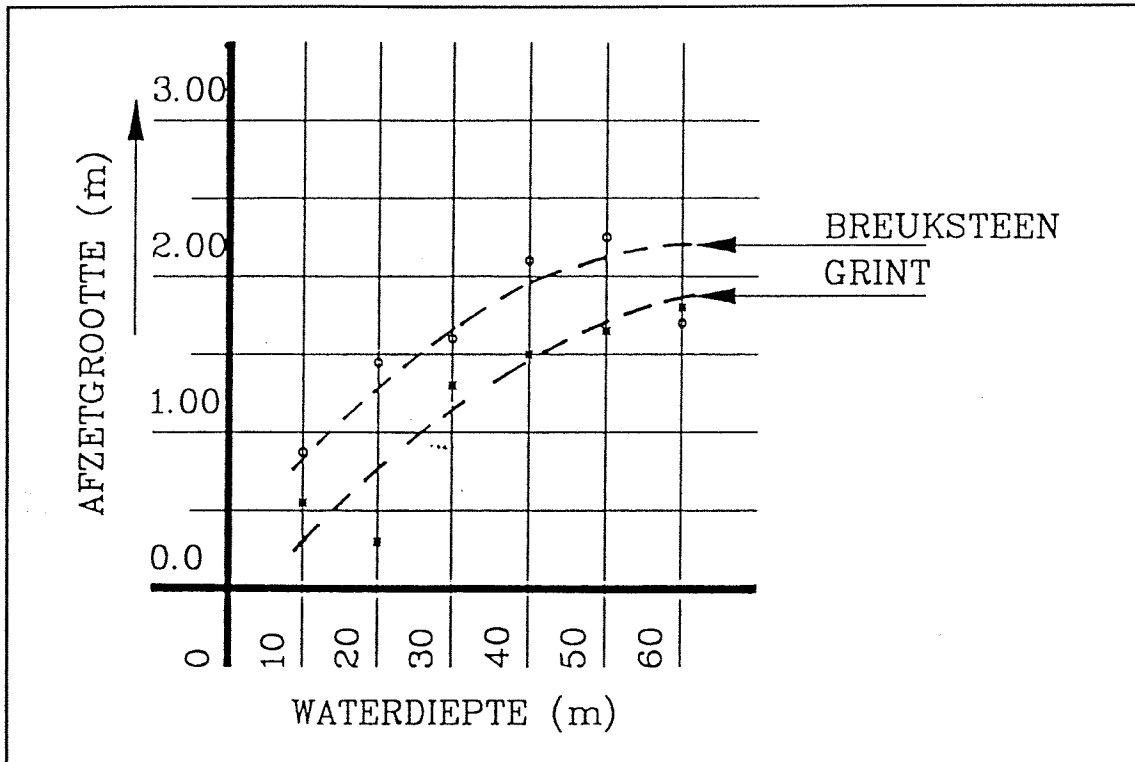
Wanneer de steen van het dek afschuift, heeft deze een horizontale en een verticale beginsnelheid die afhankelijk is van de hoek van het valfront ϕ_f en de hoogte van het valfront h_f . Dit wordt in figuur 2.9 weergegeven. De afzet zorgt voor een additionele horizontale verplaatsing van de steen tijdens de val van de steen naar de bodem. De uiteindelijke horizontale afstand tussen de kruin van de gestorte berg steen op de zeebodem en het dek van de schuifstorter wordt de "afzetgrootte" genoemd.



Figuur 2.9 Weergave van het valfront (lit.[6])

In lit.[22] wordt verslag gedaan van modelonderzoek naar de invloed van de waterdiepte en de vorm van de steen op de afzetgrootte. De resultaten worden samengevat in figuur 2.10 waarin een verband tussen de afzetgrootte en de waterdiepte wordt gegeven. Een grotere waterdiepte zorgt voor een langduriger valtraject en dus een grotere afzetgrootte.

Uit figuur 2.10 blijkt dat de afzetgrootte voor onregelmatige, hoekige vormen (breuksteen) iets groter is dan voor onregelmatige, afgeronde vormen (grind). Het lijkt waarschijnlijk dat er ook een verband is tussen de afzetgrootte en de steenafmeting. In modelproeven (lit.[21]) is dit echter niet eenduidig vastgesteld.



Figuur 2.10 Afzetgrootte als functie van de waterdiepte (lit.[4])

2.4 Spreiding van steen in water

Met betrekking tot de valbeweging van een steen in water wordt onderscheid gemaakt tussen de spreiding als gevolg van de valbeweging van de steen zelf en de spreiding van steen ten gevolge van golven. Op de spreiding van de steen tijdens de valbeweging naar de bodem wordt in hoofdstuk 3 ingegaan. De spreiding van steen ten gevolge van de aanwezigheid van golven wordt in deze paragraaf besproken.

Op bijna iedere stortlocatie is sprake van de aanwezigheid van golven aan het wateroppervlak. In lit.[23] wordt geconcludeerd dat het effect van golven op de verplaatsing van stenen verwaarloosbaar is. Dit is het gevolg van de met de diepte sterk afnemende invloed van de orbitaalbeweging van de waterdeeltjes in golven. Omdat de golfbeweging periodiek van aard is, is de additionele verplaatsing van de vallende stenen gemiddeld gelijk aan nul. De verticale evenwichtssnelheid van vanaf het wateroppervlak naar de zeebodem vallende stenen wordt in lit.[13] gegeven door vergelijking 2.1 (zie ook paragraaf 3.3.1).

$$w = \sqrt{\frac{4}{3} g \Delta D_{bol}} \quad (2.1)$$

waarin: w = verticale valsnelheid van een bolvormige steen (m/s)
 g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)
 Δ = relatieve dichtheid (-)
 D_{bol} = diameter van de steen (m)

De aanwezigheid van golven kan een rolbeweging van de schuifstorter tot gevolg hebben. Dit zou mogelijkwijs de valbeweging van stenen die net het dek van de schuifstorter hebben verlaten, kunnen beïnvloeden. In de praktijk blijkt de rolbeweging van schuifstorters onder de omstandigheden waaronder kan worden gestort, als gevolg van de grote massa van het schip, beperkt tot enkele graden. De invloed hiervan op de valbeweging van gestorte stenen kan worden verwaarloosd.

2.5 Verplaatsing van steen als gevolg van stroming

Bij veel stortwerkzaamheden is er sprake van stromend water, zoals in rivieren, getijdegeulen en estuaria. Als gevolg van stromingen in het water ondergaan stenen tijdens de valbeweging additionele verplaatsingen. De grootte van deze verplaatsing is afhankelijk van de volgende factoren:

- waterdiepte
- steendiameter
- stroomsnelheid
- stroomrichting (ten opzichte van de uitgezette stortkoers)
- weerstandscoefficiënt van het materiaal
- relatieve dichtheid van het materiaal onder water

In lit.[23] wordt verslag gedaan van onderzoek naar de invloed van stroming op de verplaatsing van een vallende steen in water. De kracht die in horizontale richting op de steen werkt wordt gegeven door vergelijking 2.2.

$$F_u = \frac{1}{2} \rho_w A_s C_d (U_{stroming} - U_{steen})^2 \quad (2.2)$$

waarin: F_u = kracht op steen in horizontale richting (N)
 ρ_w = soortelijk gewicht van het water (kg/m^3)
 A_s = oppervlak dwarsdoorsnede steen in horizontale richting (m^2)
 C_d = weerstandscoefficiënt van de steen in horizontale richting (-)
 $U_{stroming}$ = stroomsnelheid van het water (m/s^2)
 U_{steen} = horizontale snelheid van de steen (m/s^2)

Met de tweede Wet van Newton volgt:

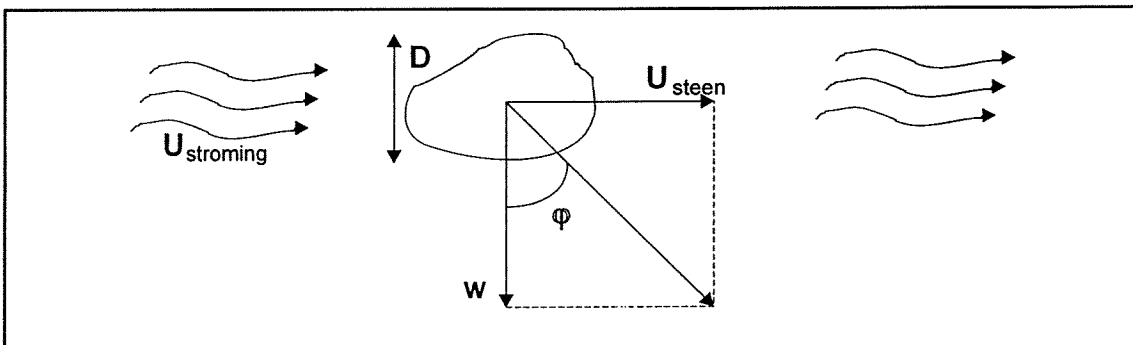
$$F=ma=m\frac{dU_{steen}}{dt}=V_s(\rho_s-\rho_w)\frac{dU_{steen}}{dt} \quad (2.3)$$

waarin: F = kracht (N)
 m = massa (kg)
 a = versnelling (m/s²)
 V_s = volume van steen (m³)
 ρ_s = massadichtheid van de steen (kg/m³)

Gelijkstellen van vergelijking 2.2 en 2.3 geeft:

$$\frac{dU_{steen}}{dt} = \frac{A_s}{2V_s} \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} C_d (U_{steen} - U_{stroming})^2 \quad (2.4)$$

Uitgaande van een bolvormige steen ($A_s = 1/4\pi D_{bol}^2$ en $V_s = 1/6\pi D_{bol}^3$), $C_d = 1$, $\rho_s = 2650$ kg/m³ en $\rho_w = 1000$ kg/m³, kan door het oplossen van (differentiaal-)vergelijking 2.4 worden berekend dat in relatief korte tijd ten opzichte van de totale tijdsduur van de valbeweging naar de zeebodem, de horizontale snelheid van de steen (U_{steen}) de stroomsnelheid van het water ($U_{stroming}$) zal benaderen. Op basis hiervan wordt de horizontale snelheid van de steen tijdens de valbeweging gelijkgesteld aan de stroomsnelheid van het water en ontstaat de in figuur 2.11 weergegeven schematisatie van een vallende steen onder invloed van stroming.



Figuur 2.11 Schematisatie van de valbeweging van een steen in stromend water

De beweging van een vallende (bolvormige) steen wordt gegeven door vergelijking 2.5.

$$\tan\phi = \frac{U_{steen}}{w} = \frac{U_{stroming}}{w} \quad (2.5)$$

Met vergelijking 2.1 voor de verticale valsnelheid van een (bolvormige) steen en een bekende waterdiepte, kan de maximale te verwachten verplaatsing door meevoering met het stromende water worden berekend.

Tijdens het storten moet rekening worden gehouden met de optredende stroming, waarbij de hoek tussen de stromingsrichting van het water en de uitgezette stortkoers van groot belang is. In de praktijk wordt in stromend water op slechts twee manieren gestort; met de "kop op stroom", de schuifstorter ligt dan evenwijdig aan de stromingsrichting, en "dwars

op stroom", de schuifstorter ligt dan dwars op de stromingsrichting. Bij het storten met de kop op stroom zijn de verplaatsingen van de steen ongeveer drie maal zo klein als bij het storten dwars op stroom. Dit kan worden verklaard doordat de uiteinden van het laaddek van de schuifstorter bij het storten met de kop op stroom evenwijdig aan de stromingsrichting liggen, waardoor stenen die aan de voorkant van het dek gestort worden als het ware de stroming "opvangen" en zo de overige stenen die meer benedenstrooms worden gestort afschermen voor de stroming. Bij het storten met de kop dwars op de stroom is dit niet mogelijk omdat de stromingsrichting loodrecht op het uiteinden van het dek van de schuifstorter staat. Iedere gestorte steen komt dan vol in de stroming terecht met een grotere spreiding als resultaat.

Volgens vergelijking 2.1 wordt de verticale valsnelheid van een steen onder andere bepaald door de diameter van de steen. Kleinere stenen hebben een lagere verticale valsnelheid dan grotere stenen. Het gevolg is een langduriger valbeweging van het wateroppervlak naar de bodem waardoor de kleinere stenen over een grotere afstand worden meegevoerd door de stroom. Zodoende zal het grovere gestorte materiaal (met een karakteristieke afmeting groter dan de gemiddelde karakteristieke afmeting van het stortmateriaal) zich veelal bevinden aan de bovenstroomse kant van de stort en het fijnere materiaal (met een karakteristieke afmeting kleiner gemiddeld) meer aan de benedenstroomse kant van de stort terechtkomen. Dit verschijnsel wordt uitzeeving van het stortmateriaal genoemd. In de praktijk is de maximale stroomsnelheid waarbij door schuifstorters nog steen wordt gestort 0,50 à 0,75 m/s.

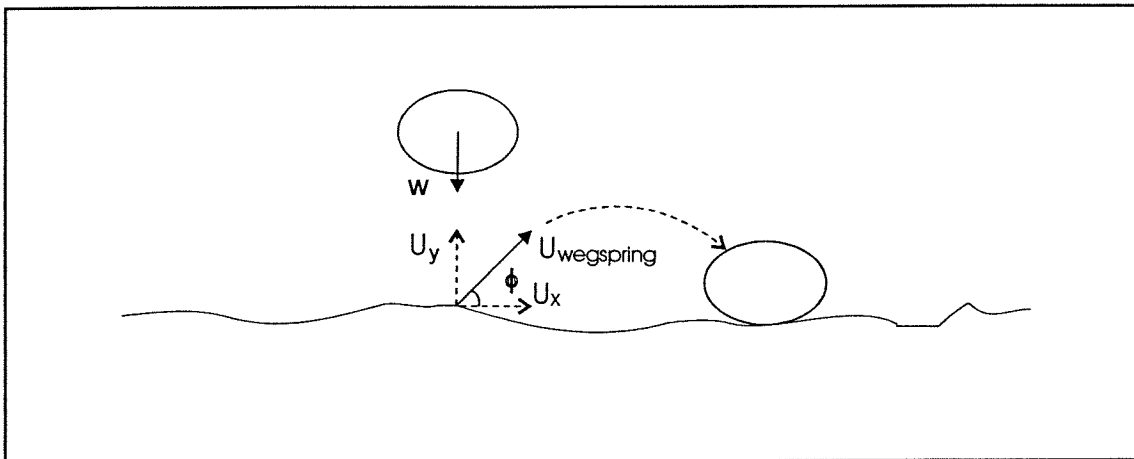
In estuaria is veelal sprake van over de diepte niet-constante stromingen. Rondom de kentering van het tij, wanneer vaak gestort wordt, kunnen zelfs stromingen optreden die over de diepte een tegengestelde stromingsrichting hebben. Om in deze gebieden nauwkeurig te kunnen storten is het van belang nauwkeurige, en op het moment van storten actuele, stromingsgegevens over de totale stortdiepte te hebben, om zo te kunnen bepalen vanaf welk punt de steen moet worden gestort. Ook kunnen in deze gebieden dichtheidsstromen optreden als bijvoorbeeld een zoete rivier uitstroomt in de zoute zee. Dichtheidsstromen zijn stromingen in het water die worden veroorzaakt door dichtheidsverschillen in verschillende lagen in het water. Deze kunnen additionele verplaatsingen van steen veroorzaken hetgeen de stortnauwkeurigheid vermindert.

2.6 Bodemgedrag van steen

Wanneer stenen op de bodem aankomen kunnen ze op die plek blijven liggen, afrollen en/of wegspringen. Ook kan het gehele buitentalud van een stort steen in z'n geheel afschuiven. Wegspringen van de steen is afhankelijk van de mate waarin de kinetische energie die de steen tijdens de val van het wateroppervlak naar de bodem bezit kan worden gedissipeerd. Afrollen speelt alleen een belangrijke rol in het geval de stenen terecht komen op een helling. Dit kan het geval zijn omdat de zeebodem een helling vertoont of omdat de steen terecht komt op het talud van het stortprofiel van de eerder gestorte stenen. Afrollen heeft dus betrekking op individuele stenen terwijl afschuiven betrekking heeft op het vervormen van het gehele stortprofiel.

2.6.1 Wegspringen van stenen

In deze paragraaf wordt berekend wat de maximale afstand is die een steen kan wegspringen. Er wordt verondersteld dat een steen met een constante verticale snelheid naar de bodem valt. Uitgaande van behoud van energie, wordt de maximale afstand bepaald die de steen bij een vlakke en stijve bodem en niet gehinderd door het water of andere objecten, bij een sprong kan afleggen. Hiertoe wordt aangenomen dat de steen na het aanraken van de bodem wegspringt onder een wegspringhoek (ϕ) met een snelheid ($U_{\text{wegspring}}$) die gelijk is aan de verticale valsnelheid (w). Dit wordt weergegeven door figuur 2.12. Vergelijking 2.6 geeft het verband tussen de verticale snelheid (U_y) en de horizontale snelheid (U_x) van de wegspringende steen als functie van de snelheid van de wegspringende steen en de wegspringhoek.



Figuur 2.12 Schematisatie wegspringen van een steen

$$U_{\text{wegspring}} = \frac{U_y}{\sin(\phi)} = \frac{U_x}{\cos(\phi)} \quad (2.6)$$

waarin: $U_{\text{wegspring}}$ = snelheid van de wegspringende steen (m/s)
 U_y = verticale snelheid van de wegspringende steen (m/s)
 U_x = horizontale snelheid van de wegspringende steen (m/s)
 ϕ = wegspringhoek (°)

De steen ondergaat een parabolische beweging met een constante horizontale wegspringsnelheid en een verticale snelheid die varieert. De voor de wegspringbeweging benodigde tijd t wordt bepaald met vergelijking 2.7.

$$t = \frac{U_y}{2g} = \frac{U_{\text{wegspring}} \sin(\phi)}{2g} \quad (2.7)$$

waarin: t = tijdsduur van de wegspringbeweging (s)

Met vergelijking 2.6 en 2.7 wordt in vergelijking 2.8 de maximale horizontale verplaatsing (S_x) bepaald.

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

waarin: S_x = maximale horizontale verplaatsing (m)

De maximale horizontale verplaatsing van een wegspringende steen doet zich voor bij een wegspringhoek (ϕ) van 45° . Uitgaande van een snelheid van de wegspringende steen gelijk aan de verticale valsnelheid volgens vergelijking 2.1 en Δ gelijk aan 1,65, kan vergelijking 2.8 worden vereenvoudigd tot $S_x = 2,2 D_{\text{bol}}$. Een steen kan, uitgaande van de bovenstaande veronderstellingen, dus nooit meer dan ongeveer 2,2 maal zijn eigen steenafmeting wegspringen.

2.6.2 Afrollen van stenen

Er is nog zeer weinig onderzoek gedaan naar het afrolgedrag van stenen in water. Afrollen doet zich voor wanneer de component van de zwaartekracht groter is dan de wrijvingskracht die de steen ondervindt ten gevolge van de bodem en de andere aanwezige stenen. Het is echter zeer gecompliceerd om afrollen te modelleren omdat er geen eenduidige methode is om de ruwheid van stenen te beschrijven. Ieder gedeelte van een steen heeft een afwijkende ruwheid waarbij het uiteindelijke wel of niet afrollen in sterke mate wordt bepaald door de ruwheidsinteractie (haakweerstand) tussen de zeebodem (waarop in veel gevallen al eerder gestorte stenen zullen liggen) en het gedeelte van de steen dat de bodem raakt. Het dynamische karakter van nog in het water aanwezige turbulentie en/of losgelaten wervels ten gevolge van de valbeweging van gestorte stenen heeft mogelijk eveneens invloed op het wel of niet afrollen van stenen.

2.6.3 Afschuiven van het talud

Bij de opbouw van een stortprofiel wordt er impliciet van uitgegaan dat een steen die de bodem raakt op die positie zal blijven liggen. Deze aanname is alleen gerechtvaardigd wanneer de taluds van de stort zeer flauw zijn. Al zeer spoedig in de opbouw van het stortprofiel gaan de verschijnselen wegspringen en afrollen een rol spelen. Het stortprofiel wordt opgebouwd totdat het talud van de stort een zekere steilheid overschrijdt die wordt bepaald door de maximale hellingshoek (ϕ_m) van het stortmateriaal, waarna het talud instabiel wordt en er afschuiving zal optreden.

Het wel of niet optreden van afschuiving van het talud is voornamelijk afhankelijk van de steilheid van het talud maar er dient ook rekening te worden gehouden met de hoek waaronder vallende stenen het talud benaderen, met de snelheid van de vallende stenen, met de ruwheid en vorm van die gedeelten van de vallende stenen die het talud als eerste raken en met de plaatselijke ruwheid en vorm van die gedeelten van het talud waar de stenen als eerste neerkomen. Tot op heden is er zeer weinig onderzoek gedaan naar het optreden van afschuiving bij de taluds van een stortprofiel.

2.7 Methoden om de stortnauwkeurigheid te verbeteren

In de vorige paragrafen is vastgesteld dat een zeer groot aantal effecten een ongelijkmatige verdeling van de steen over het stortvak veroorzaakt. De onnauwkeurigheden van de verschillende fasen van het stortproces worden in de onderstaande beschouwing besproken:

- Met de nieuwste plaatsbepalingssystemen kunnen positiegegevens met een verversingsinterval van minder dan 1 seconde en een positienauwkeurigheid van ongeveer 2,5 cm berekend worden. Een grotere nauwkeurigheid is, gelet op de overige onnauwkeurigheden in het stortproces, voornamelijk niet gewenst.
- Het vaargedrag van de schuifstorters heeft een niet onbelangrijk effect op het uiteindelijke stortresultaat. DP-systemen worden steeds verder ontwikkeld, maar de hoge kosten die gemoeid zijn met het installeren van zeer nauwkeurige DP-systemen hinderen een algemene toepassing ervan op alle schuifstorters.
- Het bresgedrag lijkt in eerste instantie een belangrijke oorzaak van stortonnauwkeurigheden. Gemiddeld over een aantal stortgangen blijkt het effect hiervan echter zeer mee te vallen. Dit wordt vanuit de praktijk bevestigd onder voorwaarde dat de te storten steenlading niet teveel klei bevat. Het effect van de initiële verplaatsing die de steen meekrijgt bij het verlaten van het dek en dat bepalend is voor de afzetgrootte, is bekend en heeft geen grote stortonnauwkeurigheden tot gevolg indien hier tijdens het storten rekening mee wordt gehouden.
- De spreiding van steen in water is op dit moment het voornaamste onderwerp van onderzoek met betrekking tot het stortproces van schuifstorters en vormt ook het onderwerp van studie van dit afstudeeronderzoek. Het effect van golven op de spreiding van steen in water kan worden verwaarloosd.
- Het effect van stroming tijdens het stortproces is moeilijk te beheersen en heeft uitzeving van het stortmateriaal tot gevolg. Meer aandacht zou moeten worden besteed aan het continu in de tijd en over de totale stortdiepte, meten van de stroomsnelheid tijdens het storten.
- Over het bodemgedrag van steen en de opbouw van het stortprofiel op de bodem is weinig bekend. De invloed van de verschijnselen: wegspringen, afrollen en afschuiven dient nader te worden onderzocht om uitspraken te kunnen doen over het effect van deze verschijnselen op het stortresultaat.

Teneinde de kans op overschrijding van de minimaal vereiste laagdikte in het stortvak te beperken kunnen de volgende maatregelen worden genomen:

- Gebruik een nauwkeurig plaatsbepalingssysteem.
- Zorg voor een gelijkmatige verdeling van de steen over het dek van de schuifstorters.
- Verdicht de te storten lading steen zoveel mogelijk om de onregelmatigheid in het bresgedrag te beperken.
- Beperk de gradatie van het stortmateriaal (D_{90}/D_{10}) om uitzeving van de steen door stroming tijdens het storten te voorkomen.
- Beperk de aanwezigheid van klei in de storten lading steen.
- Stort de steen in zoveel mogelijk lagen zodat de kans op ongelijkmatigheden in de uiteindelijke stort beperkt blijft als gevolg van stochastische uitmiddeling van de onnauwkeurigheden bij verschillende stortgangen.
- Gebruik eventueel reibalken om het stortprofiel na afloop te egaliseren.
- Hou rekening met overlapzones aan de randen van het stortvak.

3 Valproces van een enkele steen in water

3.1 Inleiding

In hoofdstuk 2 zijn de verschillende fasen van het stortproces van een schuifstorter besproken. In dit hoofdstuk wordt de beweging van een enkele vallende steen beschouwd ten behoeve van de modellering van de derde fase van dit stortproces; de spreiding van steen in water. Paragraaf 3.2 geeft een fysische beschrijving van de valbeweging van een steen in water. Ook worden vereenvoudigingen ten opzichte van het stortproces van een schuifstorter besproken. In paragraaf 3.3 wordt een wiskundig model uitgewerkt dat de optredende fysische verschijnselen van de valbeweging beschrijft. De opbouw van het stortprofiel bij het storten van grote hoeveelheden, individueel vallende, stenen staat centraal in paragraaf 3.4. Tenslotte wordt in paragraaf 3.5 het ontwikkelde model toegepast op het stortproces van een schuifstorter.

3.2 Fysische beschrijving van het valproces

Wanneer een steen in water valt zal deze ten gevolge van de zwaartekracht een versnelling ondergaan en zal de valsnelheid van de steen toenemen. Naarmate de valsnelheid toeneemt, ondervindt de vallende steen een steeds grotere weerstand die wordt veroorzaakt door de wrijving tussen de steen en het water. De toenemende weerstand heeft tot gevolg dat de versnelling van de steen afneemt en uiteindelijk gelijk wordt aan nul zodat de valbeweging dan eenparig is.

3.2.1 Stroming rondom een steen

De in deze paragraaf behandelde theorie geeft een korte beschrijving van de stroming rondom een vallende steen. Voor een meer uitvoerige beschrijving wordt verwezen naar lit.[2].

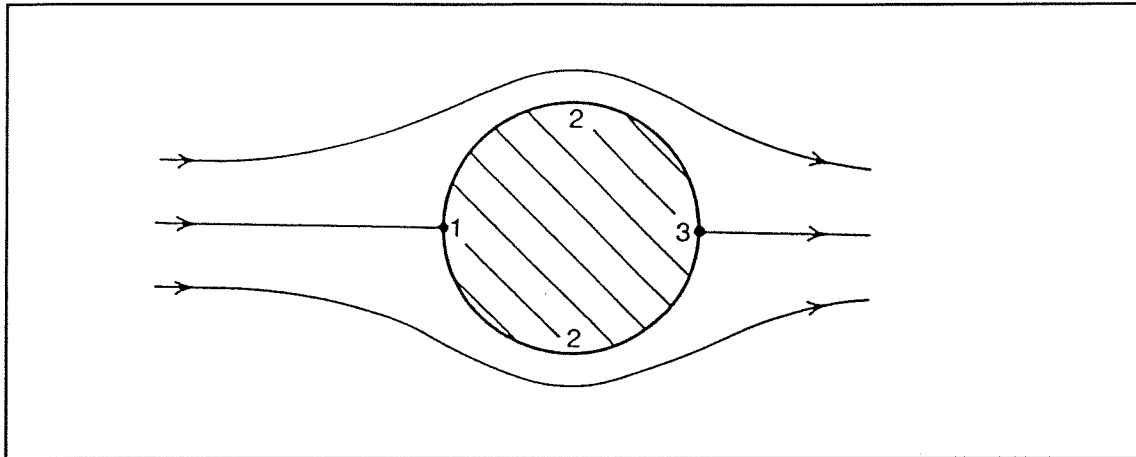
Voor de wisselwerking tussen een vallende steen en de watermassa, is de onderlinge beweging ten opzichte van elkaar van belang. Er is dan ook geen wezenlijk onderscheid tussen een "stilstaande" steen in stromend water en een vallende steen in stilstaand water.

De stroming rond de vallende steen wordt volledig bepaald door de volgende grootheden:

- (dynamische) viscositeit van het water
- massadichtheid van het water
- momentane snelheid van de steen
- kenmerkende afmeting van de steen
- vorm en ruwheid van de steen
- aanstromingsoriëntatie van de steen

In het geval van een ideale vloeistof heeft de stroming een uniforme energie. Er wordt geen energie gedissipeerd door wrijving tussen de stroming en de vallende steen waardoor de stroming de vorm van de steen volgt. Er is sprake van een zogenaamde potentiaalstroming die is geschetst in figuur 3.1. Het stroombeeld van een

potentiaalstroming is omkeerbaar: het stroombeeld verandert niet bij een omkering van de stromingsrichting. Volgens deze theorie, beter bekend als de paradox d'Alembert, ondervindt de vallende steen geen (weerstand)kracht door de stroming rondom de steen.

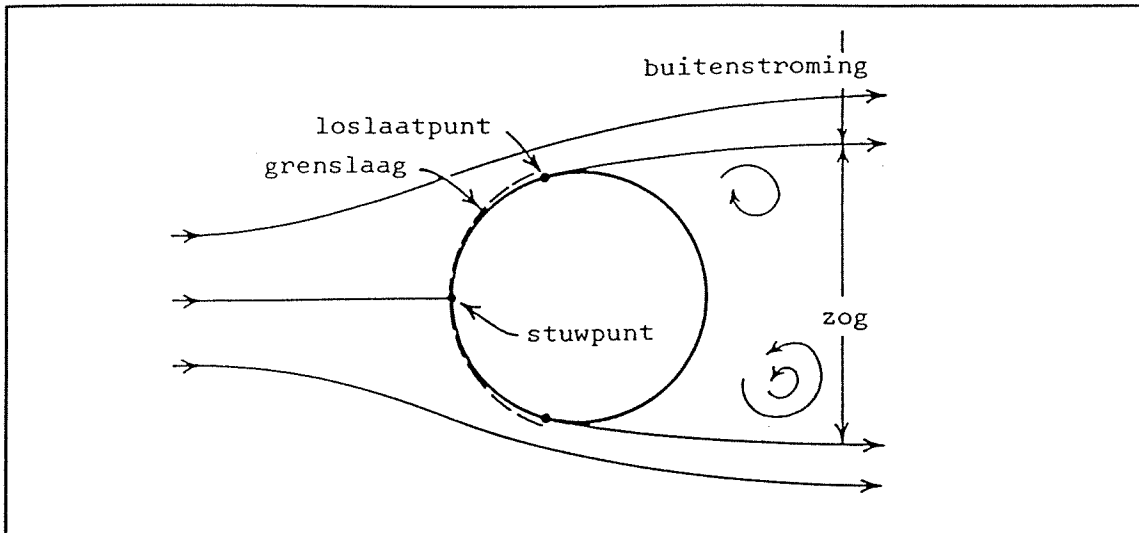


Figuur 3.1 *Potentiaalstroming rond een cirkelcilinder (lit.[2])*

Door de invloed van wrijving zal bij vallende stenen de stroming niet de vorm van de steen volgen vanaf het bovenstroomse stuwpunt (punt 1) tot aan het stuwpunt benedenstrooms (punt 3), maar zal de stroming loslaten zoals is weergegeven in figuur 3.2. Bij een niet-ideale vloeistof zoals water zorgt de viscositeit van het water voor wrijving tussen de niet-gestroomlijnde steen en het water, waardoor stromingsenergie wordt gedissipeerd. Er is sprake van een dunne laminaire grenslaag rondom de steen. De snelheid in deze laag varieert, in dwarsrichting op de steen, van nul aan het oppervlak van de steen tot de stroomsnelheid in de buitenstroming aan de buitenzijde van de laminaire grenslaag. Hoe geringer de viscositeit, hoe dunner de laminaire grenslaag. Als gevolg van de wandweerstand neemt de snelheid van de waterdeeltjes die dicht langs de steen stromen, af in de stromingsrichting. Deze deeltjes remmen vervolgens de vloeistof op wat grotere afstand van het oppervlak af. Dit leidt ertoe dat de dikte van de laminaire grenslaag toeneemt terwijl de snelheidsgradiënt in dwarsrichting en de wandspanning afnemen.

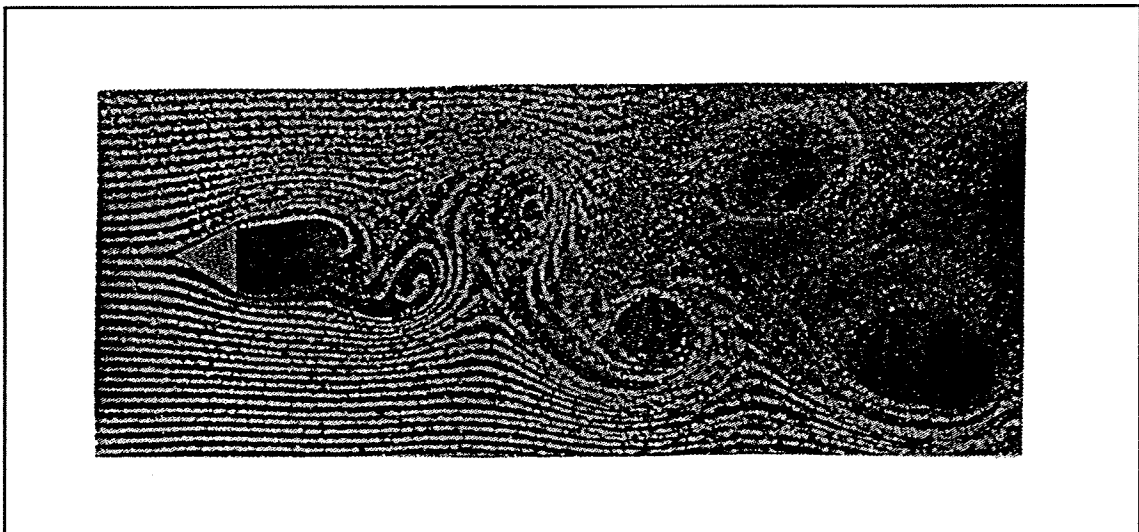
De groei van de laminaire grenslaag wordt eveneens beïnvloed door de drukgradiënt in de stromingsrichting. Tussen punt 1 en 2 in figuur 3.1, versnelt de buitenstroom als gevolg van de dwarsafmeting van de steen waardoor de druk afneemt en een negatieve drukgradiënt ontstaat in de stromingsrichting. Dit compenseert voor een deel de invloed van de wandweerstand zodat de stroming minder wordt vertraagd en de grenslaag minder snel groeit.

Aan de benedenstroomse zijde, vanaf punt 2 in figuur 3.1, vertraagt de buitenstroom en neemt de druk weer toe. Nu veroorzaakt de positieve drukgradiënt een extra vertraging van de stromingssnelheid en daardoor een extra groei van de laminaire grenslaag. Loslaten van de stroom gebeurt wanneer de grenslaagstroming, als gevolg van de wandweerstand en een (te sterke) vertragende drukgradiënt, op het traject van punt 2 tot 3, tot stilstand komt. Het loslaten van de stroom treedt op, tweedimensionaal gezien, in twee loslaatpunten waarvan de exacte positie wordt bepaald door de vorm en aanstromingsoriëntatie van de steen, voordat punt 3 in figuur 3.1 is bereikt. Bij hoekige profielen is er veelal sprake van gefixeerde loslaatpunten zoals wordt geïllustreerd in figuur 3.3. Voorbij de loslaatpunten,



Figuur 3.2 Loslating bij niet-gestroomlijnde vormen (lit.[2])

op het traject van punt 2 tot 3, veroorzaakt de drukgradiënt zelfs een stroom tegen de oorspronkelijke richting in, ook wel het zog genoemd. Ter plaatse van de twee loslaatpunten vormen zich voortdurend wervels die groeien, loslaten en daarna stroomafwaarts worden meegevoerd in het gebied tussen zog en buitenstroming. Dit verschijnsel wordt vortex-shedding genoemd. Vanaf de twee loslaatpunten zullen wervels afwisselend loslaten, waardoor zich twee wervelstraten voordoen die versprongen liggen ten opzichte van elkaar. Dit is in figuur 3.3 goed te zien. Uit onderzoek van Von Karman is gebleken dat er bij asymmetrische wervelstraten, sprake is van één stabiele configuratie.



Figuur 3.3 Wervelstraat van Von Karman (lit.[2])

Het afwisselend loslaten van wervels, waarvoor het getal van Strouhal in het tweedimensionale geval een maat is, leidt tot asymmetrische druk- en snelheidsprofielen rondom een vallend voorwerp, die een versnelling van dat voorwerp in de richting loodrecht op de valrichting tot gevolg hebben. Een zwakheid in de bovenstaande beschrijving is echter dat de besproken verschijnselen geldig zijn voor een

tweedimensionale stroming. Bij het storten van steen is sprake van driedimensionale omstandigheden. Het optreden van principieel andere stromingsverschijnselen in een driedimensionale situatie, ten opzichte van een tweedimensionale situatie, is in de literatuur niet beschreven. Er wordt aangenomen dat de in deze paragraaf besproken theorie ook geldig is voor het driedimensionale geval.

3.2.2 Vereenvoudigingen van het stortproces van een schuifstorter

In paragraaf 3.2.1 is een fysische beschrijving gegeven van de stroming rondom een vallende steen. Van deze beschrijving wordt in het vervolg van dit hoofdstuk uitgegaan om te komen tot een wiskundige beschrijving van het gedrag van individueel vallende stenen in water. De modellering is echter bedoeld om te worden toegepast op het stortproces van schuifstorters waarbij altijd meerdere stenen tegelijk vanaf het schip in het water worden afgeschoven en er dus geen sprake is van individueel vallende stenen.

De vraag doet zich voor in hoeverre tegelijk gevallen stenen elkaar beïnvloeden tijdens de valbeweging en wat de gevolgen hiervan zijn voor de optredende fysische verschijnselen en zo voor de spreiding van de steen in water. Afwijkingen van het valproces van individueel vallende stenen kunnen ontstaan doordat stenen elkaar raken tijdens het vallen of doordat ze vallen in elkaars zog en daardoor een verschillende weerstand van het water ondervinden.

Bij de fysische beschrijving van het valproces wordt impliciet verondersteld dat de stenen vallen in een stilstaande watermassa. Dit is niet een erg realistische aanname; wanneer een hoeveelheid stenen binnen een kort tijdsbestek moet worden gestort, zal turbulentie in de watermassa worden opgewekt door de valbeweging van de eerste vallende stenen. De turbulentie blijft vervolgens enige tijd in de watermassa aanwezig omdat alleen interne wrijving (viscositeit) deze uitdempt. Mogelijkerwijs kan de aanwezigheid van turbulentie in de watermassa invloed hebben op de valbeweging van de steen en zo op de spreiding.

3.3 Wiskundige modellering van de valbeweging

Aan de in paragraaf 3.2.1 beschreven valbeweging van een enkele steen in water is de laatste jaren veel aandacht besteed met als doel om te komen tot een wiskundig model dat de spreiding van steen in water beschrijft (zie lit.[6], [7], [8] en [18]). De resultaten worden in de paragrafen 3.3 tot en met 3.5 samengevat.

3.3.1 Krachten op de vallende steen

Na het verlaten van de schuifstorter ondergaat de steen een versnelling ten gevolge van de zwaartekracht. In water zal de steen een kracht ondervinden die een resultante is van de zwaartekracht en de opwaartse kracht volgens de Wet van Archimedes. Dit wordt beschreven door vergelijking 3.1.

$$F_z = (\rho_s - \rho_w) V_s g \quad (3.1)$$

waarin: F_z = verticale kracht als gevolg van de zwaartekracht en de opwaartse kracht van de Wet van Archimedes (N).
 ρ_s = massadichtheid van de steen (kg/m^3)
 ρ_w = massadichtheid van water (kg/m^3)
 V_s = volume van de steen (m^3)
 g = zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)

Tijdens de valbeweging ondervindt de steen een opwaarts gerichte weerstandskracht:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_w w^2 C_d A_s \quad (3.2)$$

waarin: F_w = weerstandskracht in de valrichting (N)
 w = momentane snelheid van de steen (m/s)
 C_d = weerstandscoefficiënt voor de kracht in de valrichting (-)
 A_s = oppervlak van de steen loodrecht op de valrichting (m^2)

Na een korte tijd houden de twee krachten (F_z en F_w) elkaar in evenwicht en is een constante evenwichtsnelheid (w) bereikt. Deze evenwichtsnelheid volgt uit gelijkstelling van F_z en F_w in vergelijking 3.3:

$$w = \sqrt{2 \frac{V_s}{A_s} \Delta \frac{g}{C_d}} \quad (3.3)$$

met:

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad (3.4)$$

waarin: Δ = relatieve dichtheid (-)

De verhouding V_s/A_s is een maat voor de afmeting van de steen. Deze verhouding is voor een bolvormige steen ($A_s = 1/4\pi D_{\text{bol}}^2$ en $V_s = 1/6\pi D_{\text{bol}}^3$) gelijk aan $0,67D_{\text{bol}}$. Uitgaande van een bolvormige steen en een weerstandscoefficiënt C_d gelijk aan 1, is vergelijking 3.3 gelijk aan vergelijking 2.1. In het vervolg van dit hoofdstuk wordt uitgegaan van de karakteristieke steenafmeting D van een kubusvormige steen ($A_s = D^2$ en $V_s = D^3$) en wordt de verhouding V_s/A_s in vergelijking 3.3 gelijkgesteld aan D .

De weerstandscoefficiënt C_d is afhankelijk van de vorm van het lichaam in de aanstromingsrichting. In figuur 4.2 worden waarden voor de weerstandscoefficiënt C_d gegeven.

Tijdens de valbeweging werkt er een liftkracht loodrecht op de valrichting van de steen. Omdat de valrichting bij benadering verticaal is, is de richting van de liftkracht, die wordt weergegeven door vergelijking 3.5, bij benadering horizontaal.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho_w w^2 C_L A_s \quad (3.5)$$

waarin: F_L = liftkracht (loodrecht op de valrichting) (N)
 C_L = weerstandscoefficiënt voor een kracht loodrecht op de valrichting (-)

De weerstandscoefficiënt C_L is afhankelijk van de aanstromingsrichting en van de vorm en de hoekigheid van de steen.

Door substitutie van de massa m van een steen ($m = V_s \rho_s$) en vergelijking 3.5 in de tweede Wet van Newton ($F = ma$), volgt de versnelling in de richting van de liftkracht:

$$a = \frac{\frac{1}{2} \rho_w w^2 C_L A_s}{V_s \rho_s} \quad (3.6)$$

waarin: a = horizontale versnelling ten gevolge van de liftkracht (m/s^2)

Met vergelijking 3.3 volgt:

$$a = \frac{\rho_w C_L}{\rho_s C_d} \Delta g \quad (3.7)$$

Hieruit kan worden geconcludeerd dat de versnelling in de richting van de liftkracht onafhankelijk is van de steenafmeting.

3.3.2 Vortex-shedding

In paragraaf 3.2.1 (zie ook lit.[9], [10] en [11]) wordt ingegaan op het verschijnsel van vortex-shedding; het op onregelmatige wijze loslaten van stromingswervels als gevolg van het turbulente karakter van die stroming. Het getal van Strouhal is een maat voor het verschijnsel van vortex-shedding bij een tweedimensionaal stroombeeld:

$$St = \frac{\omega D}{w} \quad (3.8)$$

waarin: St = getal van Strouhal (-)
 ω = radiaalfrequentie ($2\pi/T$) (rad/s)
 D = karakteristieke steenafmeting (m)
 w = momentane snelheid van de steen (m/s)

In het geval dat er bij een driedimensionale stroming ook een getal van Strouhal kan worden gedefinieerd, is bij een constante valsnelheid het getal van Strouhal constant. Wanneer dan vergelijking 3.3, uitgaande van een kubusvormige steen, wordt gesubstitueerd in vergelijking 3.8, ontstaat de in vergelijking 3.9 weergegeven uitdrukking voor de periode van wervelafschudding.

$$T = \frac{2\pi}{St \sqrt{2\Delta \frac{g}{C_d}}} \sqrt{D} \quad (3.9)$$

waarin: T = periode van wervelafschudding (vortex-shedding) welke gelijk is aan de periode van richtingswisseling van de versnelling in de liftkrachtrichting (s)

Uit vergelijking 3.9 kan worden geconcludeerd dat de tijd die verloopt tussen twee richtingswisselingen van de versnelling loodrecht op de valrichting, evenredig is met de wortel uit de karakteristieke steenafmeting.

Bij verwaarlozing van de weerstand loodrecht op de valrichting, is de horizontale afstand, die in de tijd tussen twee (bij benadering) horizontale richtingswisselingen van de versnelling wordt afgelegd, gelijk aan vergelijking 3.10 (waarin de vergelijkingen 3.6 en 3.9 zijn gesubstitueerd):

$$S_{hor} = \frac{1}{2} a T^2 = \frac{\pi^2}{St^2} \frac{\rho_w}{\rho_s} C_L D \quad (3.10)$$

waarin: S_{hor} = horizontale afstand die de steen aflegt tussen twee richtingswisselingen van de versnelling, loodrecht op de valrichting (m)

De verticale afstand die wordt afgelegd tussen twee richtingswisselingen van de versnelling wordt gegeven door vergelijking 3.11, waarin tevens de vergelijkingen 3.3 en 3.9 zijn gesubstitueerd.

$$S_{ver} = wT = \frac{2\pi D}{St} \quad (3.11)$$

waarin: S_{ver} = verticale afstand die de steen aflegt tussen twee, loodrecht op de valbeweging optredende, richtingswisselingen van de versnelling (m)

Uit de vergelijkingen 3.10 en 3.11 wordt geconcludeerd dat de horizontale en de verticale afstand die wordt afgelegd in de tijd tussen twee richtingswisselingen van de versnelling, beide evenredig zijn met de steenafmeting. Hieruit volgt dat de hoek tussen de valrichting en de horizontaal onafhankelijk is van de grootte van de vallende steen.

Het aantal horizontale richtingswisselingen van de versnelling die de steen tijdens de valbeweging ondergaat bedraagt:

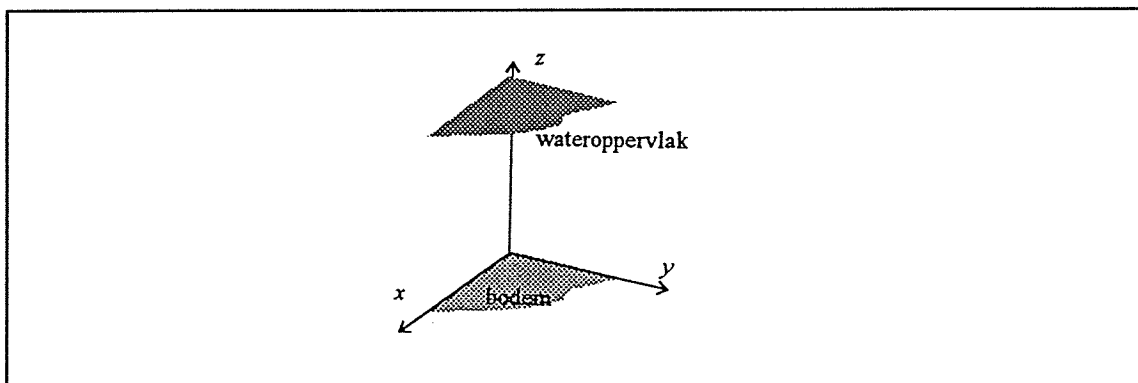
$$N = \frac{h}{S_{ver}} = \frac{h}{2\pi D} St \quad (3.12)$$

waarin: N = aantal horizontale richtingswisselingen van de versnelling (-)

Omdat een steen onregelmatig van vorm en ruwheid is en omdat de aanstromingsoriëntatie van de steen tijdens de valbeweging steeds verandert, zal vortex-shedding willekeurig over het oppervlak van de steen plaatsvinden. Daardoor zal de richting van de verplaatsing loodrecht op de valrichting in een volgende tijdstap onafhankelijk zijn van de verplaatsing in de beschouwde tijdstap. Er kan worden gesproken van een "random walk" van de steen in de tijd.

3.3.3 Random Walk Model

Het Random Walk Model is een statistische beschrijving van de valbeweging van een enkele steen zoals die in de voorgaande drie paragrafen is afgeleid. De centrale limietstelling (lit.[17]) stelt dat wanneer een groot aantal onafhankelijke stochastische variabelen, waarvan geen enkele domineert, bij elkaar worden opgeteld, een normale verdeling ontstaat ongeacht de uitgangsverdelingen van die variabelen. Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat de kansdichtheidsfunctie van de bodempositie van een enkele in water vallende steen wordt beschreven door de normale verdeling. De kansdichtheidsfunctie van de normale verdeling in x-richting, op basis van het in figuur 3.4 gedefinieerde assenstelsel, wordt weergegeven door vergelijking 3.13.



Figuur 3.4 Assenstelsel (lit.[6])

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

waarin: \underline{X} = stochastische horizontale verplaatsing in x-richting
 x = lopende variabele in x-richting
 σ_N = standaardafwijking van de totale horizontale verplaatsing
 μ_x = gemiddelde van de stochast \underline{X} die gelijk is aan het vertrekpunt van de steen aan het wateroppervlak

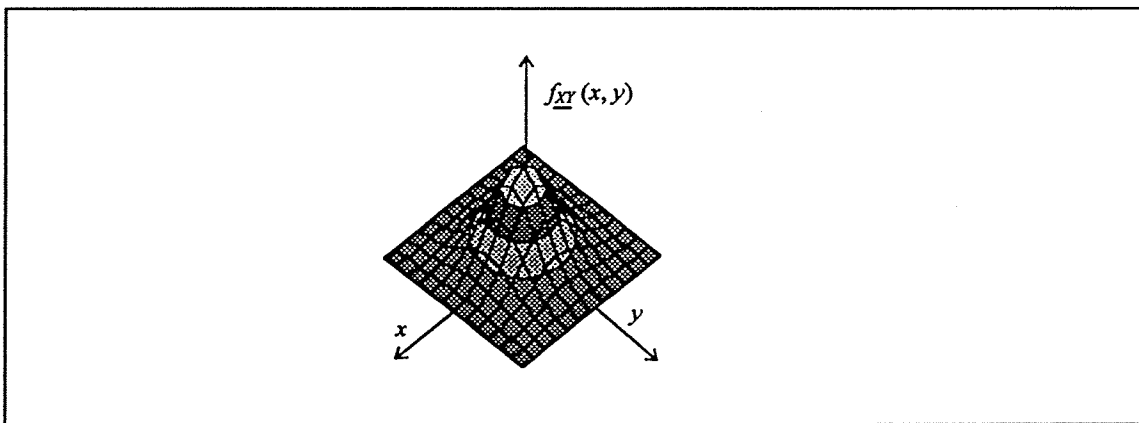
Er wordt aangenomen dat de verplaatsingen in y-richting onafhankelijk zijn van de verplaatsingen in x-richting. De kansdichtheidsfunctie van de normale verdeling in y-richting wordt weergegeven door vergelijking 3.14.

$$f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_N}\right)^2} \quad (3.14)$$

waarin: \underline{Y} = stochastische horizontale verplaatsing in y-richting
 y = lopende variabele in y-richting
 σ_N = standaardafwijking van de totale horizontale verplaatsing
 μ_y = gemiddelde van de stochast \underline{Y} die gelijk is aan het vertrekpunt van de steen aan het wateroppervlak

Uitgaande van de onafhankelijkheid van de variabelen in x- en y-richting, is de tweedimensionale kansdichtheidsfunctie het product van vergelijking 3.13 en 3.14. Vergelijking 3.15 wordt geïllustreerd door figuur 3.5.

$$f_{XY}(x,y) = f_X(x)f_Y(y) = \frac{1}{2\pi\sigma_N^2} e^{-\frac{1}{2}\frac{(x-\mu_x)^2+(y-\mu_y)^2}{\sigma_N^2}} \quad (3.15)$$



Figuur 3.5 *Kansdichtheidsfunctie van steen volgens de normale verdeling (lit.[6])*

De standaardafwijking van de totale horizontale verplaatsing van een gestorte steen in water wordt gegeven door vergelijking 3.16.

$$\sigma_N^2 = n\sigma_i^2 \quad (3.16)$$

waarin: σ_N = standaardafwijking van de totale horizontale verplaatsing
 n = aantal stappen
 σ_i = standaardafwijking van horizontale verplaatsing per stap

Het aantal stappen (n) in vergelijking 3.16 is gelijk aan het aantal horizontale richtingswisselingen van de versnelling (N) die de vallende steen ondergaat. De traagheidsstraal van de horizontale verplaatsing van de gestorte steen per stap is gelijk aan het product van de horizontale afstand (S_{hor}), die in de tijd tussen twee horizontale richtingswisselingen van de versnelling door de steen wordt afgelegd, en een evenredigheidsconstante α . Substituëring van de vergelijkingen 3.10 en 3.12 in vergelijking

3.16 geeft in vergelijking 3.17 de uitdrukking voor de traagheidsstraal van de totale horizontale verplaatsing van een vallende steen.

$$\sigma = \alpha S_{hor} \sqrt{N} = \alpha \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\pi^3}{St^3} \frac{\rho_w}{\rho_s} C_L \sqrt{Dh}} \quad (3.17)$$

waarin: σ = traagheidsstraal (m)

Indien de veronderstellingen met betrekking tot het in deze paragraaf besproken rekenmodel juist zijn, kan vergelijking 3.17 worden vereenvoudigd tot vergelijking 3.18.

$$\sigma = c \sqrt{D_{n50} h} \quad (3.18)$$

waarin: c = constante (-)
 D_{n50} = karakteristieke steenafmeting van een equivalente kubusvormige steen (m)
 h = waterdiepte (m)

3.4 Opbouw van het stortprofiel bij grote storthoeveelheden

Uitgaande van de in paragraaf 3.3.3 afgeleide kansdichtheidsfunctie van de plaats waar één steen terecht komt, wordt in de volgende paragrafen ingegaan op de omstandigheid dat er een hoeveelheid individueel vallende stenen wordt gestort. Hiertoe worden de volgende aannamen gedaan:

- de kansdichtheidsfunctie van de plaats waar één steen terecht komt, zoals weergegeven door vergelijking 3.15, is voor elke steen gelijk hetgeen impliceert dat de valbeweging van een steen niet door andere vallende stenen wordt beïnvloed
- er wordt een groot aantal stenen gestort
- er is sprake van stilstaand water
- de waterdiepte is constant
- zodra de stenen contact maken met de bodem (of met al aanwezige stenen), blijven ze op die plaats liggen en ondergaan geen verplaatsing meer

Vanaf een punt op het wateroppervlak (met coördinaten: $x = 0$ en $y = 0$) wordt een hoeveelheid steen met een volume V gestort. In het volume V van de steen is het volume van de poriën tussen de stenen inbegrepen. De hoogte van de berg stenen op een bepaald punt is het product van de kansdichtheid op dit punt, volgens vergelijking 3.15, en het volume V van de hoeveelheid steen.

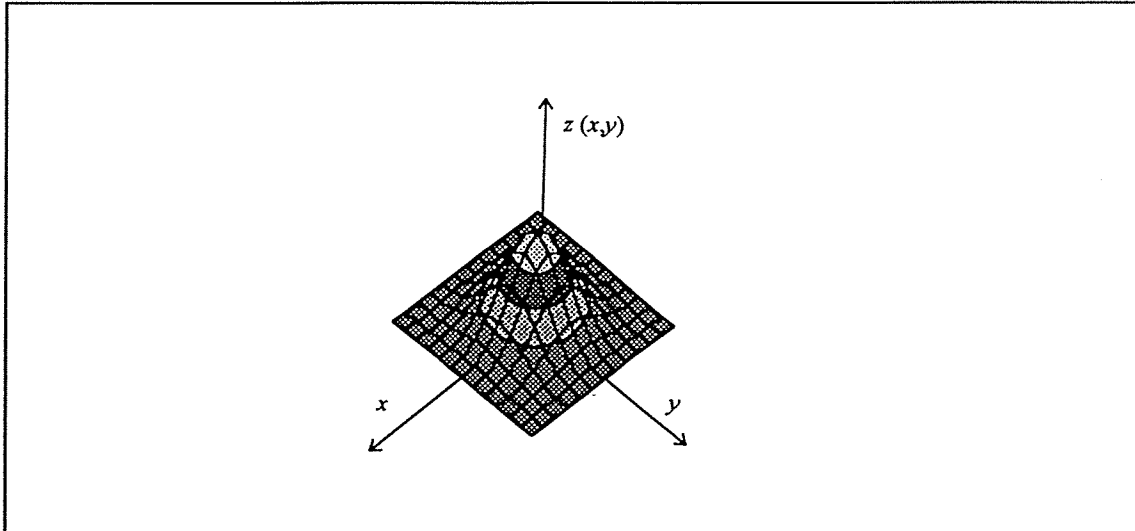
$$z(x,y) = f_{XY}(x,y) V \quad (3.19)$$

waarin: z = hoogte van het stortprofiel op bodempositie (x,y) (m)

Substitutie van vergelijking 3.15 in vergelijking 3.19 geeft de opbouw van het stortprofiel. Omdat gestort wordt vanaf het punt $(0,0)$ is zowel μ_x als μ_y gelijk aan 0. Daarom zijn

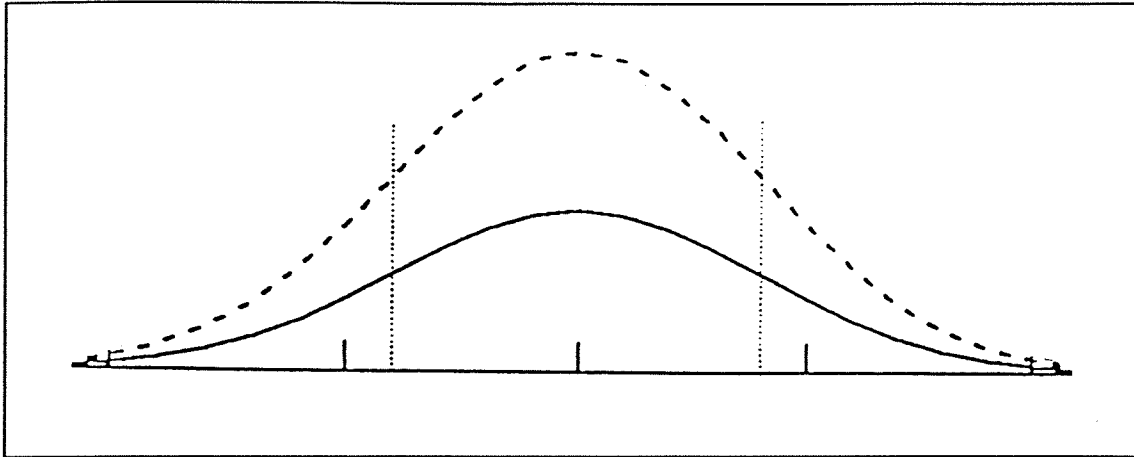
beide termen weggeven in vergelijking 3.20. Vergelijking 3.20 wordt geïllustreerd in figuur 3.6.

$$z(x,y) = \frac{V}{2\pi\sigma_N^2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2+y^2}{\sigma_N^2}\right)} \quad (3.20)$$

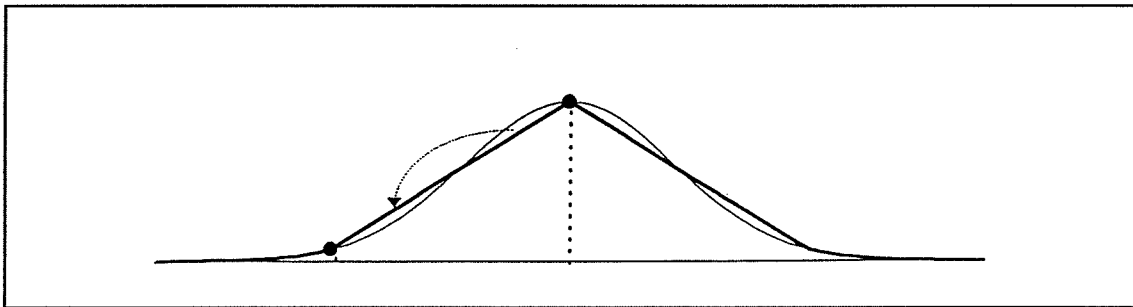


Figuur 3.6 *Stortresultaat bij het storten vanaf een punt (lit.[6])*

Een dwarsdoorsnede van het stortprofiel volgens vergelijking 3.20, dat wordt aangeduid als het Gaussprofiel, wordt gegeven in figuur 3.7. In deze figuur is duidelijk te zien dat het stortprofiel bij een toenemende storthoeveelheid wordt opgebouwd met een constante traagheidsstraal volgens vergelijking 3.18. Het stortprofiel wordt volgens het Gaussprofiel opgebouwd totdat het talud van de stort de maximale hellingshoek van het stortmateriaal overschrijdt. Als gevolg van afschuiving van het talud zal het stortprofiel, via een overgangsprofiel, langzaam overgaan naar een driehoeksprofiel. Dit is weergegeven in figuur 3.8.



Figuur 3.7 Gaussprofiel



Figuur 3.8 Overgang van een Gaussprofiel naar een driehoeksprofiel (lit.[6])

De traagheidsstraal van het driehoeksprofiel wordt weergegeven in vergelijking 3.21.

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{A}{6 \tan \phi_m}} \quad (3.21)$$

waarin: σ_{Δ} = traagheidsstraal van het driehoeksprofiel (m)
 A = oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het stortprofiel (m²)
 ϕ_m = maximale hellingshoek van het stortmateriaal (°)

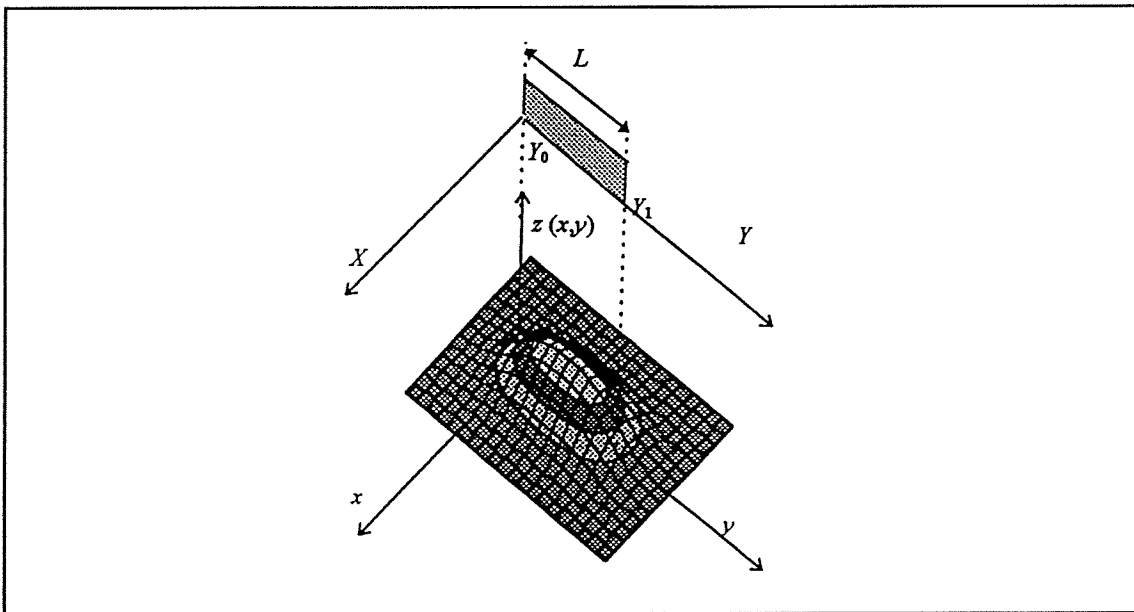
In lit.[6] wordt uitgebreid ingegaan op de overgang van het Gaussprofiel, via een overgangsprofiel, naar het driehoeksprofiel. Hierbij is, op basis van het verband tussen de traagheidsstraal van het stortprofiel en de waterdiepte, geconcludeerd dat wanneer het overgangsprofiel wordt verwaarloosd en zodoende wordt aangenomen dat het Gaussprofiel direct overgaat in het driehoeksprofiel, een maximale fout van 6 procent in de bepaling van de traagheidsstraal van het stortprofiel kan optreden.

De in de paragrafen 3.3 en 3.4 gegeven modellering van de valbeweging van enkele stenen in water en de wijze waarop het stortprofiel op de bodem wordt opgebouwd, wordt aangeduid als het Enkele Steen Model (ESM).

3.5 Storten vanaf een schuifstorter

Het storten van steen vanaf een schuifstorter kan worden geschematiseerd als het storten vanaf een lijnstuk, het uiteinde van het dek van de schuifstorter. Dit is een eenvoudige uitbreiding van het in de vorige paragraaf besproken storten vanaf een punt. Hiertoe wordt in figuur 3.9 een tweede assenstelsel ingevoerd om de stortpositie van de stenen weer te geven. De stenen vertrekken van een punt in het X-Y assenstelsel en komen op een plaats op de bodem terecht waar het x-y assenstelsel geldt. Ervan uitgaande dat de stenen homogeen verdeeld zijn over het uitgezette lijnstuk L , dat loopt van Y_0 naar Y_1 , kan de analytische oplossing worden bepaald door vergelijking 3.20 met de daaraan toegevoegde lopende variabele Y te integreren van Y_0 naar Y_1 . Deze integraal wordt weergegeven door vergelijking 3.22 en de uitkomst geïllustreerd in figuur 3.9.

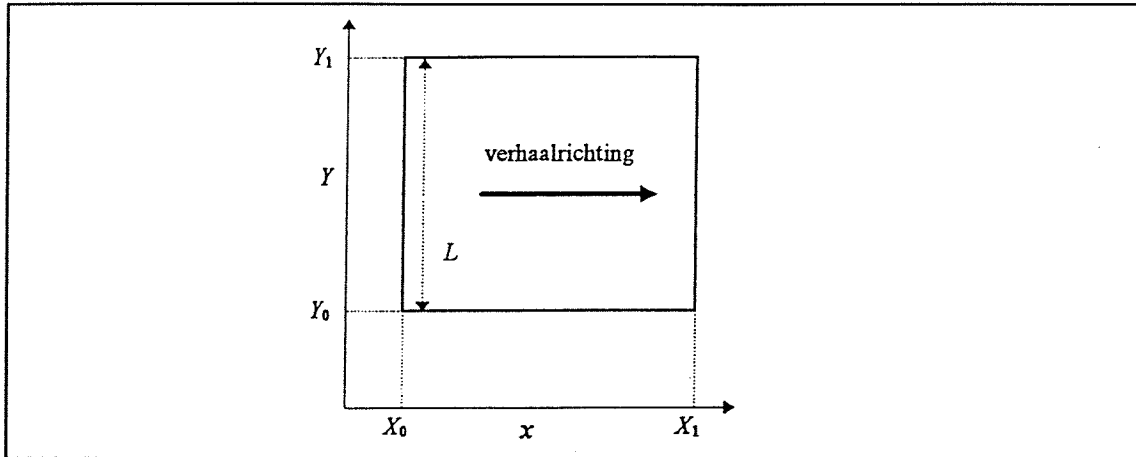
$$z(x,y) = \frac{V}{L\sqrt{2\pi}\sigma_N} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma_N}\right)^2} \int_{Y_0}^{Y_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_N} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-Y}{\sigma_N}\right)^2} dY \quad (3.22)$$



Figuur 3.9 *Stortresultaat bij het storten vanaf een lijnstuk (lit.[6])*

Bij de modellering van het stortresultaat bij het storten vanaf een lijnstort moet een kanttekening worden geplaatst. Als uitgangspunt is aangenomen dat de stenen elkaar tijdens de valbeweging niet beïnvloeden. Dit uitgangspunt is strijdig met het feit dat voor de geldigheid van vergelijking 3.22 de stenen homogeen over het lijnstuk verdeeld moeten zijn, zodat de stenen elkaar wel zullen beïnvloeden tenzij ze stuk voor stuk vallen. Gelet op de aard van het stortproces van een schuifstorter is het onontkoombaar dat de vallende stenen elkaar zullen beïnvloeden. De vraag is wat het effect van deze onderlinge invloed is op de spreiding van de steen en zo op het uiteindelijke stortresultaat, en in hoeverre, als gevolg van deze onderlinge invloed van de vallende stenen op elkaar, het ESM onjuistheden vertoont.

Bij veel stortwerkzaamheden dient steen te worden gestort in een stortvak. Indien dit het geval is, zal de schuifstortor zich tijdens het storten van de lading steen met een zekere verhaalsnelheid over het stortvak verplaatsen. Er wordt aangenomen dat de verhaalsnelheid van het schip en de hoeveelheid steen die per tijdseenheid het schip verlaat constant zijn. Het vlak van waaraf de steen wordt gestort, wordt weergegeven in figuur 3.10. De stortlijn loopt in de richting van de Y-as, van Y_0 naar Y_1 . De verhaallijn loopt in de richting van de X-as, van X_0 naar X_1 .

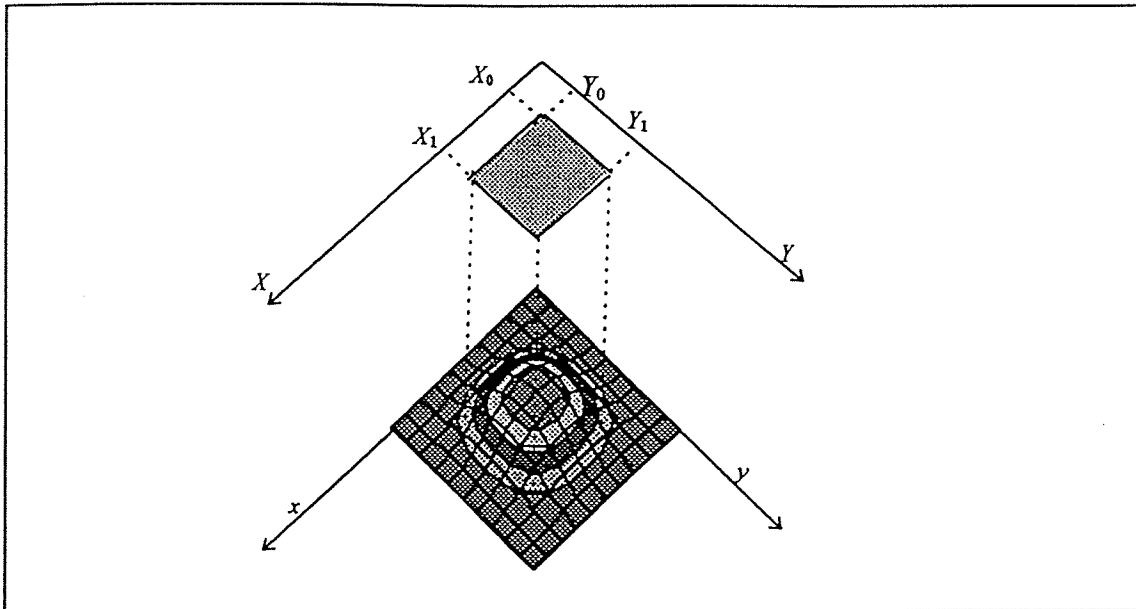


Figuur 3.10 Weergave van het vlak waar vanaf de steen wordt gestort (lit.[6])

Vergelijking 3.20 wordt nu geïntegreerd naar twee lopende variabelen X en Y. De hoogte van de berg stenen op de bodem wordt weergegeven door vergelijking 3.23. Het uiteindelijke stortresultaat wordt weergegeven in figuur 3.11.

$$z(x,y) = \frac{V}{(X_1 - X_0)(Y_1 - Y_0)} \int_{X_0}^{X_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_N} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-X}{\sigma_N}\right)^2} dX \int_{Y_0}^{Y_1} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_N} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y-Y}{\sigma_N}\right)^2} dY \quad (3.23)$$

Voor een oplossingsmethodiek ten aanzien van de integralen in de vergelijkingen 3.22 en 3.23 wordt verwezen naar lit.[6], waar uitgebreid wordt ingegaan op de opbouw van stortprofielen.



Figuur 3.11 Stortresultaat bij het storten vanaf een vlak (lit.[6])

4 Schaalearsfecten bij proeven met steen

4.1 Inleiding

Modelproeven bieden de mogelijkheid om op relatief eenvoudige en goedkope wijze de werkelijkheid (het prototype) in het schaalmodel na te bootsen. Dit laatste is echter ook het kritieke probleem bij het uitvoeren van proeven op schaal; worden de processen en omstandigheden die zich in werkelijkheid afspelen op de juiste wijze in het schaalmodel weergegeven, oftewel is er sprake van gelijkvormigheid van de bestudeerde verschijnselen in model en prototype? Op deze centrale vraag wordt in dit hoofdstuk ingegaan. Allereerst wordt in paragraaf 4.2 de gelijkvormigheid van schaalmodellen besproken. Daarnaast wordt in deze paragraaf op basis van een inspectionele analyse afgeleid aan welke algemene voorwaarden moet worden voldaan om schaalearsfecten in de modelproeven uit te sluiten. Paragraaf 4.3 gaat in op een in de waterbouwkunde veelgebruikt schaalmodel dat is gebaseerd op het getal van Froude. In paragraaf 4.3 en 4.4 worden de in paragraaf 4.2 geformuleerde algemene voorwaarden, om schaalearsfecten in de modelproeven uit te sluiten, nader uitgewerkt. Paragraaf 4.5 gaat tenslotte in op de vraag welke rol schaalearsfecten spelen bij de modelproeven in dit afstudeeronderzoek. Op het gebruik van schaalmodellen en de invloed van schaalearsfecten bij het uitvoeren van modelproeven wordt uitgebreid ingegaan in lit.[15], lit.[16] en lit.[19].

4.2 Gelijkvormigheid

De kwaliteit van modelonderzoek hangt af van de betrouwbaarheid van de resultaten, die wordt bepaald door de mate van gelijkvormigheid van de bestudeerde verschijnselen in model en prototype. Deze gelijkvormigheid wordt gekarakteriseerd door schaalregels, die zijn gebaseerd op fysische wetten. Afwijkingen van schaalregels geven verschillen tussen model en prototype, zogenaamde schaalearsfecten. De volgende drie vormen van gelijkvormigheid worden onderscheiden:

1) Geometrische gelijkvormigheid

Twee systemen zijn geometrisch gelijkvormig wanneer de verhouding van overeenkomstige parameters onderling gelijk zijn. Geometrische grootheden zijn onder andere oppervlakte en inhoud.

2) Kinematische gelijkvormigheid

Twee systemen zijn kinematisch gelijkvormig indien overeenkomstige afstanden in overeenkomstige tijdsintervallen worden afgelegd. Afgeleide grootheden zijn bijvoorbeeld snelheid en versnelling.

3) 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 bijvoorbeeld dichtheid, kracht, energie en vermogen. Deze gelijkvormigheid is gebaseerd op de tweede Wet van Newton ($F=ma$).

Bij het bepalen van de invloed van de verschillende parameters in een model is de methode van de inspectionele analyse een goed hulpmiddel (zie lit.[15]). In een inspectionele analyse worden de voor gelijkvormigheid benodigde schaalregels afgeleid door een analyse van de vergelijkingen die de optredende processen beschrijven. Voor een beschrijving van de vloeistofstroming worden de vergelijkingen van Navier-Stokes gebruikt. Deze worden in drie onderling loodrechte richtingen als volgt weergegeven:

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}\right) + \rho \vec{u}(\nabla \vec{u}) = -\nabla p + \rho \vec{f} + \eta \nabla^2 \vec{u} \quad (4.1)$$

waarin: ρ = massadichtheid van het water (kg/m^3).
 η = dynamische viscositeit van het water (Pa.s)
 p = waterdruk (Pa)
 f = versnelling ten gevolge van de externe kracht (m/s^2).
 u = de component van de snelheid in de x_1 -richting (m/s).

Invoering van de maten U voor de snelheid, L voor de lengte, T voor de tijd, P_0 voor de druk, met de zwaartekracht als externe kracht en geeft de volgende dimensieloze grootheden:

$$\vec{u}_d = \frac{\vec{u}}{U} \quad (4.2)$$

$$t_d = \frac{t}{T} \quad (4.3)$$

$$p_d = \frac{p}{P_0} \quad (4.4)$$

$$\vec{g}_d = \frac{\vec{g}}{g} \quad (4.5)$$

$$\nabla_d = L \cdot \nabla \quad (4.6)$$

$$\nabla_d^2 = L^2 \cdot \nabla^2 \quad (4.7)$$

Invulling van de vergelijkingen 4.2 tot en met 4.7 in vergelijking 4.8 geeft:

$$\left(\frac{\rho U}{T}\right) \frac{\partial \vec{u}_d}{\partial t} + \left(\frac{\rho U^2}{L}\right) \vec{u}_d (\nabla_d \vec{u}_d) = -\left(\frac{P_0}{L}\right) \nabla_d p_d + g \rho \vec{g}_d + \left(\frac{\eta U}{L^2}\right) \nabla_d^2 \vec{u}_d \quad (4.8)$$

Deling van vergelijking 4.8 door $\rho U^2 L^{-1}$ geeft:

$$\left(\frac{L}{UT}\right) \frac{\partial \vec{u}_d}{\partial t} + \vec{u}_d (\nabla_d \vec{u}_d) = - \left(\frac{P_o}{\rho U^2}\right) \nabla_d p_d + \left(\frac{gL}{U^2}\right) \vec{g}_d + \left(\frac{\eta}{\rho UL}\right) (\nabla_d^2 \vec{u}_d) \quad (4.9)$$

In vergelijking 4.9 zijn vier dimensieloze kentallen te onderscheiden; het getal van Strouhal, het getal van Euler, het getal van Froude en het getal van Reynolds.

Het getal van Strouhal (St), dat voor de beweging van een in water vallende steen reeds is gedefinieerd in paragraaf 3.3.2, geeft de verhouding tussen de stationaire ($\rho U^2 L^2$) en instationaire traagheidskrachten ($\rho U L^3 / T$), hetgeen een maat is voor het optreden van vortex-shedding.

$$St = \frac{L}{UT} \quad (4.10)$$

Het getal van Euler (Eu) geeft de verhouding tussen de drukkracht ($P_o L^2$) en de stationaire traagheidskracht ($\rho U^2 L^2$).

$$Eu = \frac{\rho U^2}{P_o} \quad (4.11)$$

Het getal van Froude (Fr) geeft de verhouding tussen de zwaartekracht ($\rho g L^3$) en de stationaire traagheidskracht ($\rho U^2 L^2$).

$$Fr = \frac{U^2}{gL} \quad (4.12)$$

Het getal van Reynolds geeft de verhouding tussen de viskeuze kracht ($\eta UL / \rho$) en de stationaire traagheidskracht ($\rho U^2 L^2$).

$$Re = \frac{\rho UL}{\eta} \quad (4.13)$$

Dit resulteert in vergelijking 4.14:

$$(St) \frac{\partial \vec{u}_d}{\partial t} + \vec{u}_d (\nabla_d \vec{u}_d) = - \left(\frac{1}{Eu}\right) \nabla_d p_d + \left(\frac{1}{Fr}\right) + \left(\frac{1}{Re}\right) \nabla_d^2 \vec{u}_d \quad (4.14)$$

In het algemeen kan worden gesteld dat twee verschillende systemen alleen dan gelijkvormig aan elkaar zijn (dynamisch, geometrisch en kinematisch), wanneer elke relevante dimensieloze parameter dezelfde waarde heeft in model en prototype.

Omdat er, zoals beschreven in hoofdstuk 3, geen wezenlijk onderscheid is tussen een "stilstaande" steen in stromend water en een vallende steen in stilstaand water, wordt de Navier-Stokes vergelijking met de daarbij van invloed zijnde kentallen toegepast op de valbeweging van een steen zoals deze in paragraaf 3.3 is beschreven. Hiertoe gaan we uit van de volgende veronderstellingen:

- de steen is onvervormbaar en ondoorlatend
- de massadichtheid en de viscositeit van de watermassa zijn in model en prototype gelijk
- de watermassa strekt zich in alle richtingen zo ver uit dat de stroming om de steen geen invloed ondervindt van eventuele andere begrenzingen anders dan die van de steen
- de steen heeft een constante verticale valsnelheid waardoor er sprake is van een stationaire stroming

De kracht die de vallende steen op de stroming uitoefent is gelijk aan de in vergelijking 3.2 gedefinieerde weerstandskracht. De weerstandscoefficiënt C_d is afhankelijk van de in vergelijking 4.14 bepaalde dimensieloze kentallen. Deze afhankelijkheid wordt weergegeven door vergelijking 4.15.

$$\frac{F_w}{\frac{1}{2} \rho_w w^2 A_s} = C_d(St, Eu, Fr, Re) \quad (4.15)$$

Om schaafeffecten in de modelproeven uit te sluiten moeten de in vergelijking 4.15 gegeven kentallen in model en prototype aan elkaar gelijk zijn.

Het getal van Euler speelt alleen een rol bij compressibele of cavitierende stromingen. Deze verschijnselen doen zich niet voor bij de valbeweging van een steen in water waardoor het getal van Euler in model en prototype per definitie gelijk is en de verschijnselen gelijkvormig zijn.

4.3 Getal van Froude

De schaalfactor n bij een bepaalde grootte i is per definitie:

$$n_i = \frac{i_{prototype}}{i_{model}} \quad (4.16)$$

Bij modelproeven in de waterbouwkunde worden veelal schaalmodellen gebruikt op basis van het getal van Froude. De gebruikte schaalregels worden gebaseerd op een voor model en prototype gelijke waarde van het getal van Froude. Op basis van vergelijking 4.12 worden, met een willekeurige variabele x , de volgende schaalregels afgeleid voor het Froude-model.

lengteschaal:	$n_l = x$
snelschaal:	$n_u = x^{1/2}$
gewichtsschaal:	$n_m = x^3$
tijdschaal:	$n_t = x$

Schaafeffecten in een schaalmodel op basis van het getal van Froude worden alleen uitgesloten indien ook de getallen van Reynolds en Strouhal in model en prototype gelijkvormig zijn.

4.4 Getal van Reynolds

Om de invloed van stenen van verschillende vorm en ruwheid op de weerstandcoëfficiënt C_d te bepalen wordt een dimensieloze vormfactor S.F. (Shape Factor) geïntroduceerd.

$$S.F. = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (4.17)$$

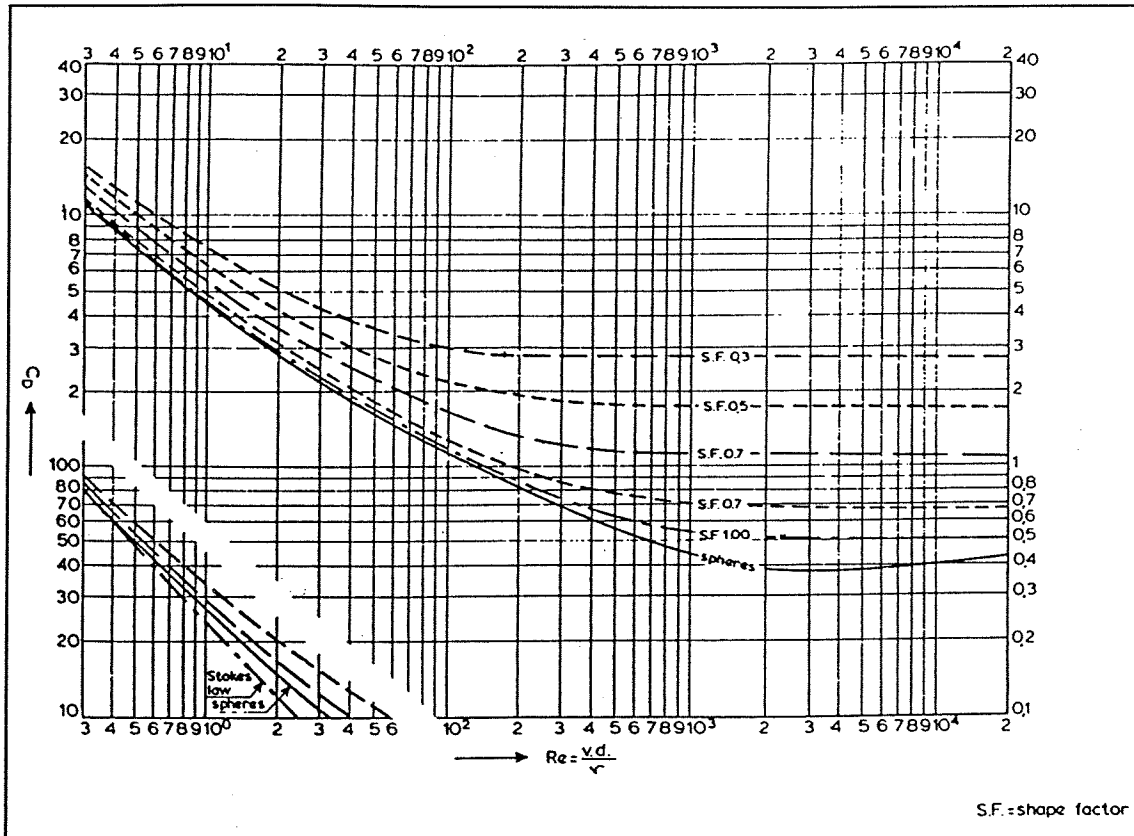
In vergelijking 4.17 stellen a, b en c respectievelijk de grootste, middelste en kleinste afmeting van de steen, in drie onderling loodrechte richtingen voor. Hierbij worden de drie onderling loodrechte richtingen vastgelegd door te veronderstellen dat a de lengte van de grootst mogelijke lichaamsdiagonaal van de steen voorstelt en dat deze lichaamsdiagonaal de normaalvector vormt van een vlak V dat het massamiddelpunt van de steen snijdt. Afmeting c is gelijk aan de lengte van het kleinste lijnstuk van de steen L_1 dat in vlak V ligt en door het massamiddelpunt van de steen gaat. Afmeting b is gelijk aan de lengte van het lijnstuk L_2 van de steen dat in vlak V ligt en loodrecht op L_1 staat.

In het algemeen geldt voor stortsteen een vormfactor van $S.F. = 0,7$. Voor een volledig symmetrische vorm als een bol geldt uiteraard een $S.F. = 1,0$. Met behulp van de vormfactor S.F., het getal van Reynolds, dat in vergelijking 4.18 op een aangepaste wijze wordt gepresenteerd, en figuur 4.1 is het mogelijk om de weerstandcoëfficiënt C_d te bepalen.

$$Re = \frac{wD}{\nu} \quad (4.18)$$

waarin: w = momentane snelheid van de steen (m/s)
 D = karakteristieke steenafmeting (m)
 ν = kinematische viscositeit van water (m^2/s)

Schaaleffecten in de modelproeven met betrekking tot het getal van Reynolds worden uitgesloten wanneer het getal van Reynolds geen invloed heeft op de weerstandcoëfficiënt C_d . Uit figuur 4.1 is af te leiden dat dit, afhankelijk van de vormfactor S.F, het geval is voor een waarde van het getal van Reynolds groter dan ongeveer 1000. Dit wordt veroorzaakt doordat de invloed van de viscositeit van het water op de stromingstoestand rondom de vallende steen verwaarloosbaar is geworden door de toegenomen invloed van de stationaire traagheidskracht van de vallende steen met als gevolg de overgang van het karakter van de stroming rondom de steen van laminair naar turbulent. Wanneer als ondergrens bij de bepaling van de toelaatbare kleinste afmeting van de gebruikte stortsteen in het schaalmodel een waarde van 1000 voor Reynolds wordt aangenomen en voor de valsnelheid van de steen vergelijking 2.1 wordt ingevuld, dan ontstaat de in vergelijking 4.19 weergegeven eis voor de minimale grootte van de in de modelproeven te gebruiken stenen.



Figuur 4.1 C_d als functie van de vormfactor S.F. en Re (lit.[24])

$$D^{\frac{3}{2}} > \frac{1000v}{\sqrt{\frac{4}{3} \Delta \frac{g}{C_d}}} \quad (4.19)$$

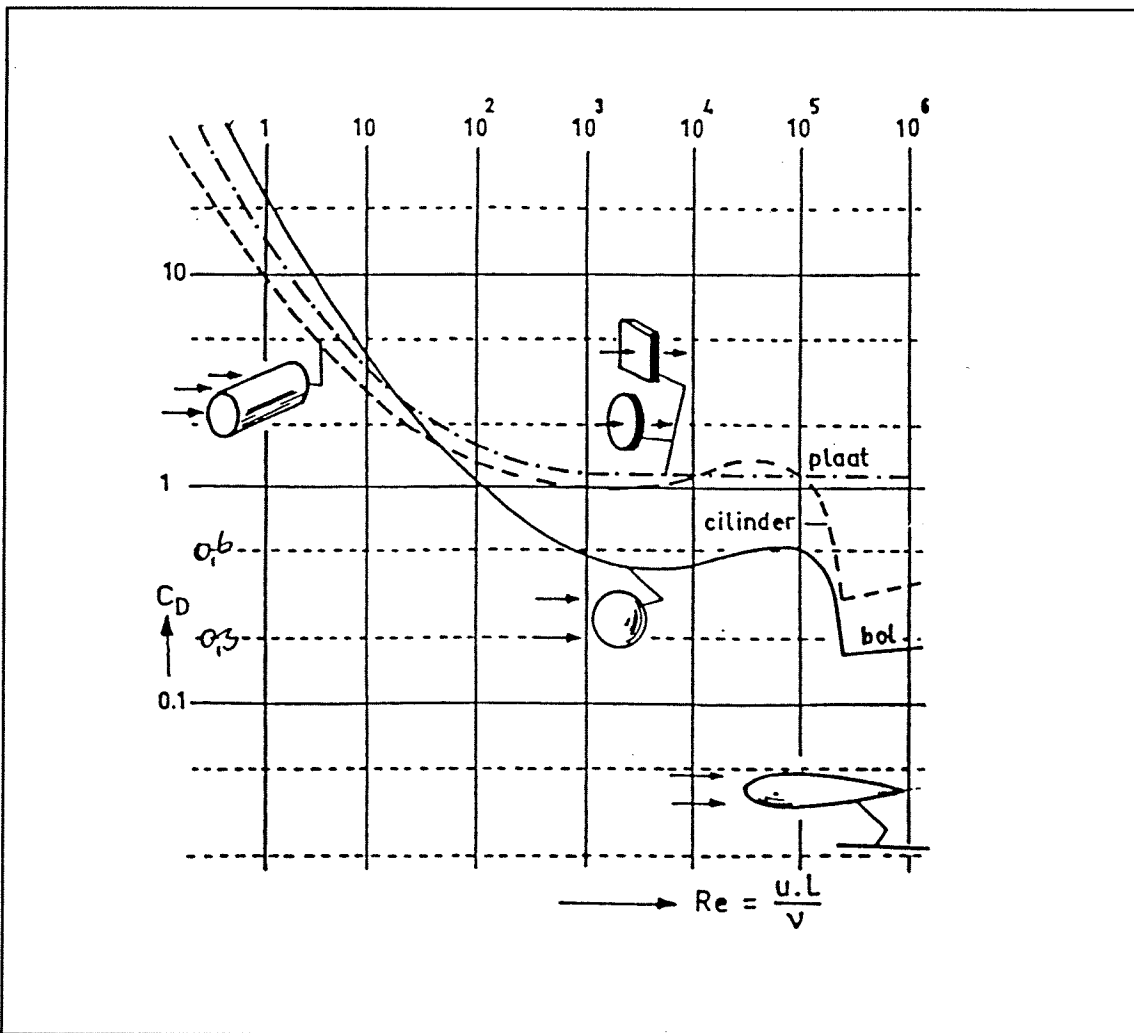
We nemen een aantal gebruikelijke waarden voor de parameters in vergelijking 4.19 aan: $v = 1,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\Delta = 1,65$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $C_d = 1,0$. Uit vergelijking 4.19 volgt dat de karakteristieke steenafmeting groter moet zijn dan 4,4 mm.

Twee factoren bepalen gezamenlijk de netto-ruwheid van een willekeurige steen; de hoekigheid van de vorm (vorm-ruwheid) en de plaatselijke ruwheid van het oppervlak (oppervlak-ruwheid). Een maat voor de hoekigheid van de vorm wordt verkregen door het oppervlak van een willekeurige steen te delen door de inhoud van die steen. Hoe groter dit quotiënt, hoe groter de hoekigheid van de vorm en hoe groter de vorm-ruwheid. De oppervlak-ruwheid is door Nikuradse gekwantificeerd door middel van de equivalente zandruwheid k (lit.[2]). Profielen met een lage vorm-ruwheid zijn bollen en cilinders. Materialen met een lage oppervlakte-ruwheid zijn glas, pvc en aluminium. In het algemeen heeft stortsteen een hoge vorm-ruwheid en een hoge oppervlak-ruwheid.

Bij profielen met een lage vorm-ruwheid en een lage oppervlak-ruwheid, doet zich, naast de overgang van een laminaire naar een turbulente stroming, binnen het turbulente gebied nog een overgangsfase voor. Bij Reynolds-waarden tussen $2 \cdot 10^5$ en $3 \cdot 10^5$ vindt de

overgang van een turbulente, hydraulisch gladde stroming naar een turbulente, hydraulisch ruwe stroming plaats, zie figuur 4.2. In het turbulente, hydraulisch gladde gebied is de stroming rondom de bol of cilinder wel turbulent maar is de stroming in de grenslaag nog laminair. In het turbulente, hydraulisch ruwe gebied is de stroming in de grenslaag eveneens turbulent geworden en wordt geen grenslaag meer onderscheiden.

Bij stortsteen en andere profielen met een grote netto-ruwheid is er geen sprake van een turbulente, hydraulisch gladde fase. De oorzaak hiervan moet gezocht worden in het feit dat de netto-ruwheid bij Reynolds-waarden groter dan 1000 de dikte van de laminaire grenslaag overschrijdt, hetgeen resulteert in gefixeerde loslaatpunten. De laminaire grenslaag kan niet worden gevormd waardoor er voor stortsteen, bij Reynolds-waarden groter dan 1000, alleen sprake is van een turbulente, hydraulisch ruwe stroming.



Figuur 4.2 C_d als functie van Re

4.5 Getal van Strouhal

Op het optreden van vortex-shedding is in hoofdstuk 3 ingegaan. Het getal van Strouhal, dat een dimensieloze maat is voor het loslaten van wervels, is voor een tweedimensionaal stroombeeld gegeven in vergelijking 3.8. De vorm- en oppervlakte-ruwheid in combinatie met het zeer grillige karakter van de aanstromingsoriëntatie van de gestorte stenen dragen bij aan de onregelmatigheid van het loslaten van wervels van de steen tijdens de valbeweging naar de bodem. De veroorzaakte liftkrachten hebben een spreiding van steen in water tot gevolg. Uitgaande van een driedimensionale toepassing van het getal van Strouhal, is er sprake van gelijkvormigheid in model en prototype wanneer in de modelproeven de wervels, tijdens de valbeweging, op vergelijkbare onregelmatige wijze loslaten. De eis die hieruit volgt is dat de in de modelproeven te gebruiken stortmaterialen een met natuursteen overeenkomstige massadichtheid, vorm- en oppervlakteruwheid moet hebben.

4.6 Invloed van schaalfactoren bij de uitgevoerde modelproeven

In de uitgevoerde modelproeven zijn stenen met een karakteristieke afmeting D gestort in een modelproefopstelling met een waterdiepte h . De verhouding h/D vormt hierbij, uitgaande van overeenkomstige overige variabelen (massadichtheid, vorm- en oppervlakteruwheid), de schaalfactor waarmee de modelproefresultaten kunnen worden opgeschaald tot een benadering van de werkelijke situatie. Dit wordt aan de hand van een voorbeeld uitgelegd. Stel dat de verhouding h/D gelijk is aan 15. Wanneer men nu de modelproefresultaten wil toepassen op een waterdiepte van 30 meter, dan zijn deze geldig voor stenen met een karakteristieke lengte van 2 meter. Evenzo kan men de modelproefresultaten toepassen op andere waterdiepten zolang de verhouding h/D onveranderd blijft.

5 Ontwerp van de modelproeven

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden een aantal theoretische achtergronden besproken die van belang zijn bij het uitwerken en interpreteren van de modelproefresultaten.

5.2 Rayleigh verdeling

In paragraaf 3.3 wordt wiskundig afgeleid dat de kansdichtheidsfunctie van een willekeurige dwarsdoorsnede van het stortprofiel wordt weergegeven door een normale verdeling. Uitgaande van het in figuur 3.4 weergegeven assenstelsel wordt deze verdeling in x- en y-richting beschreven door vergelijking 3.13 en 3.14. In deze paragraaf is ten behoeve van de modelproeven afgeleid dat de tweedimensionale kansdichtheidsfunctie van de bodempositie van een gestorte steen in x- en y-richting wordt weergegeven door een Rayleigh verdeling. Deze afleiding is afkomstig uit lit.[1].

Met de vergelijkingen 3.13 en 3.14, $\sigma_N = \sigma$ en $\mu_x = \mu_y = 0$ geldt:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2} \quad (5.1)$$

$$f_Y(y) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma}\right)^2} \quad (5.2)$$

Omdat \underline{x} onafhankelijk is van \underline{y} geldt:

$$f_{X,Y}(x,y) = f_X(x)f_Y(y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (5.3)$$

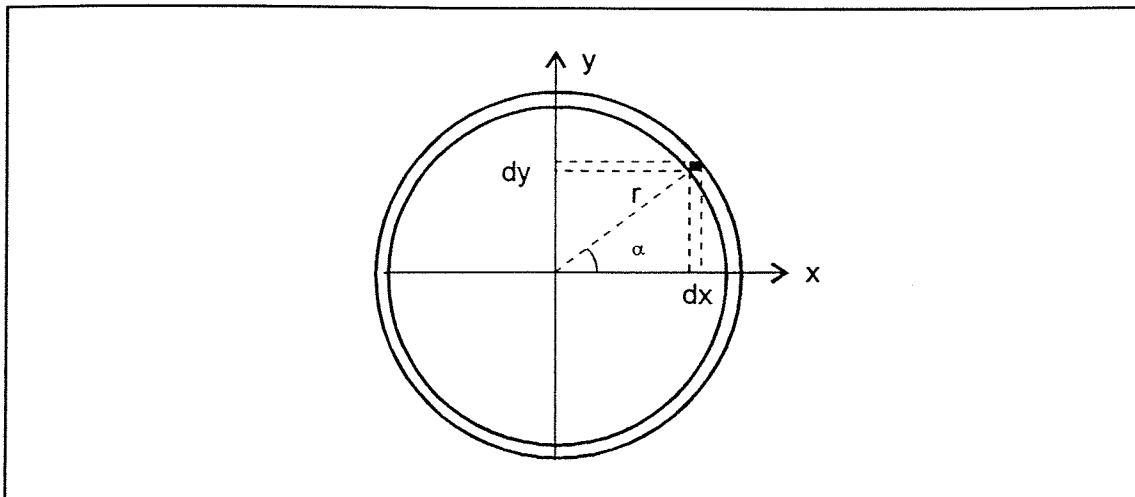
Uit de in vergelijking 5.3 gegeven kansdichtheidsfunctie van \underline{X} en \underline{Y} wordt nu de verdeling van \underline{r} afgeleid: $\underline{r} = (\underline{X}^2 + \underline{Y}^2)^{1/2}$. De kansdichtheidsfunctie $f_{\underline{r},\underline{x}}(x,y)$ is per definitie:

$$f_{\underline{r},\underline{x}}(x,y) = \text{kans}[x < \underline{X} < x+dx \cap y < \underline{Y} < y+dy] \quad (5.4)$$

Stel de verdelingsfunctie van \underline{r} is:

$$F_{\underline{r}}(r) = \text{kans}[r < r] = \text{kans}[\sqrt{\underline{X}^2 + \underline{Y}^2} < r] \quad (5.5)$$

Dit is de kans dat de resultante kleiner is dan een bepaalde lengte. De kans dat \underline{X} en \underline{Y} juist sommeren tot \underline{r} is de sommatie van de kansen binnen de ring die in figuur 5.1 is weergegeven.



Figuur 5.1 Kansdichtheidsring waarbinnen \underline{X} en \underline{Y} juist sommeren tot \underline{r}

De kans $[(\underline{X}^2 + \underline{Y}^2)^{1/2} < r]$ stelt het volume onder een driedimensionaal Gaussprofiel (zie figuur 3.5) voor, dat wordt begrensd door de cilinder met een straal r .

We gaan nu over op cilindercoördinaten: $x = r \cos\alpha$, $y = r \sin\alpha$.
Met $dx dy = r dr d\alpha$ volgt:

$$F_r(r) = \text{kans}[\sqrt{\underline{X}^2 + \underline{Y}^2} < r] = \int_{\underline{X}^2 + \underline{Y}^2 < r^2} f_{\underline{X}, \underline{Y}}(x, y) dx dy \quad (5.6)$$

$$F_r(r) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^r \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} r dr d\alpha = \int_0^r e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} dr \int_{-\pi}^{\pi} \frac{d\alpha}{2\pi\sigma^2} = \frac{1}{\sigma^2} \int_0^r e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} dr \quad (5.7)$$

Oplossing van de integraal in vergelijking 5.7 geeft de verdelingsfunctie van Rayleigh.

$$F_r(r) = 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (5.8)$$

Verificatie van het ESM in de modelproeven kan dus geschieden door te controleren of de straal van elke gestorte steen, de afstand van de steen tot de projectie van het loslaatpunt op de bodem van de modelproefopstelling, voldoet aan de Rayleigh verdeling. Indien dit het geval is, zal een willekeurige doorsnede van de stort voldoen aan het Gaussprofiel (zie figuur 3.7). Het in vergelijking 3.18 gegeven verband voor de traagheidsstraal van dit profiel kan worden geverifieerd door in vergelijking 5.8 de waarde van de straal r gelijk te stellen aan de traagheidsstraal (σ) van het Gaussprofiel. Het resultaat wordt weergegeven in vergelijking 5.9.

$$F_r(r) = 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} = 1 - e^{-\frac{\sigma^2}{2\sigma^2}} = 1 - e^{-0,5} \approx 0,3935 \quad (5.9)$$

Uit vergelijking 5.9 volgt dat de straal r die in de Rayleigh verdeling wordt onderschreden door 39,35 procent van de stralen van de in de modelproef gestorte stenen, gelijk is aan de traagheidstraal (σ) van het Gaussprofiel volgens vergelijking 3.18.

5.3 Maximum-likelihood schatter

Om de Rayleigh verdeling te bepalen dient een schatting te worden gemaakt van de parameter (σ) in vergelijking 5.8. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de maximum-likelihood methode. Bij deze methode wordt de dichtheid van een gerealiseerde steekproef van gemeten afstanden (r_1, \dots, r_n) gemaximaliseerd als functie van de variantie (σ_r^2). Het uitgangspunt is hierbij de kansdichtheidsfunctie van de Rayleigh verdeling zoals weergegeven in vergelijking 5.10.

$$f_r(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (5.10)$$

Vergelijking 5.10 wordt nu aangepast voor de gerealiseerde steekproef ($i = 1, \dots, n$) en cilindercoördinaten. Dit resulteert in vergelijking 5.11.

$$L = \prod_{i=1}^n \frac{r_i}{\sigma^2} e^{-\frac{r_i^2}{2\sigma^2}} \quad (5.11)$$

Door het nemen van de logaritme volgt:

$$\log L = \sum_{i=1}^n (\log(r_i) - (2n)\log(\sigma) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum r_i^2) \quad (5.12)$$

Differentiëren van vergelijking 5.12 naar σ en gelijkstellen aan nul geeft vergelijking 5.13.

$$\frac{\partial \log L}{\partial \sigma} = -\frac{2n}{\sigma} + \frac{1}{\sigma^3} \sum r_i^2 = 0 \quad (5.13)$$

Uitwerken van vergelijking 5.13 geeft in vergelijking 5.14 de maximum-likelihood schatter voor de parameter (σ) van de Rayleigh verdeling.

$$\sigma_{ML} = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{2n}} \quad (5.14)$$

waarin: σ_{ML} = maximum-likelihood schatter van de parameter (σ) van de Rayleigh verdeling (m)
 r_i = de straal van de gestorte steen (m)
 n = aantal in de modelproef gestorte stenen (-)

De spreiding van de maximum-likelihood schatting in vergelijking 5.14 kan verondersteld worden normaal verdeeld te zijn en wordt gegeven door vergelijking 5.15 (zie lit.[3]).

$$\sigma_{spreiding;ML} = \frac{1}{2\sqrt{n}} \sigma_{ML} \quad (5.15)$$

waarin: $\sigma_{spreiding;ML}$ = de standaardafwijking van de maximum-likelihood schatter van de standaardafwijking van de Rayleigh verdeling (m)

Als boven- en ondergrens voor de maximum-likelihood schatter wordt een afwijking van de schatter (σ_{ML}) van 2,6 maal de standaardafwijking ($\sigma_{spreiding;ML}$) aangenomen. Dit geeft betrouwbaarheidsgrenzen van 99 procent. Door het invullen van vergelijking 5.15 in vergelijking 5.8 ontstaan de twee in vergelijking 5.16 weergegeven verdelingsfuncties voor de boven- en ondergrens van de Rayleigh verdeling.

$$F_L(r) = 1 - e^{-\frac{r_i^2}{2(\sigma_{ML} \pm 2,6\sigma_{spreiding;ML})^2}} \quad (5.16)$$

5.4 Kolmogorov-Smirnov toets

Om te bepalen of er sprake is van gelijkheid tussen de waargenomen verdelingsfunctie en de met behulp van de maximum-likelihood schatting gefitte Rayleigh verdeling wordt de toets van Kolmogorov-Smirnov (de K.S.-toets) gebruikt. De K.S.-toets wordt uitgebreid besproken in lit.[20]. Uitgaande van een betrouwbaarheidsdrempel van één procent geldt dat er sprake is van gelijkheid wanneer het maximale verschil tussen de verdelingen kleiner is dan het maximale verschil ($\Delta_{K.S.-toets}$) volgens vergelijking 5.17.

$$\Delta_{K.S.-toets} = \frac{1,63}{\sqrt{n}} \quad (5.17)$$

6 Uitvoering van de modelproeven

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden verschillende facetten behandeld die betrekking hebben op de praktische uitvoering van de modelproeven. In paragraaf 6.2 wordt de modelproefopstelling besproken. Vervolgens gaat paragraaf 6.3 in op de stortmaterialen die zijn gebruikt bij het uitvoeren van de modelproeven. De wijze waarop de modelproeven zijn uitgevoerd en de resultaten zijn uitgewerkt tot bruikbare gegevens wordt in paragraaf 6.4 besproken. Tenslotte gaat paragraaf 6.5 in op de nauwkeurigheid van de uit de modelproeven afkomstige resultaten.

6.2 Modelproefopstelling

Voor het uitvoeren van de modelproeven is gebruik gemaakt van een rechthoekige bakconstructie die speciaal voor deze modelproeven is gebouwd. De bakconstructie bestond uit een vierkante stalen bodemplaat van 2,5 m bij 2,5 m waarop vier 2,0 m hoge, aan elkaar grenzende, opstaande wanden waren bevestigd. Twee van deze wanden waren stalen platen en de andere twee waren glasplaten van 6 cm dikte. De twee aan elkaar grenzende glasplaten, rustten op de stalen bodemplaat en waren waterdicht aan de rest van de gelaste constructie vastgekit. De gehele bakconstructie werd rondom ondersteund door een stalen frame die de constructie van stijfheid voorzag. In de stalen bakconstructie was een extra bodemplaat van aluminium geplaatst. Deze extra bodemplaat kon op hoogte worden ingesteld door het opstapelen van tegels of blokken op de vaste stalen bodemplaat. De stalen wanden en beweegbare aluminium bodem van de modelproefopstelling waren van een zwarte kleur voorzien om het contrast ten opzichte van het lichtgekleurde stortmateriaal zo groot mogelijk te maken. Een illustratie van de modelproefopstelling wordt gegeven in figuur 6.1.

6.3 Gebruikte stortmaterialen

Het in hoofdstuk 3 besproken ESM dient als uitgangspunt voor de uit te voeren modelproeven. Op basis van de in dat hoofdstuk beschouwde fysica en de daaruit afgeleide vergelijking 3.18, wordt de constante c onafhankelijk verondersteld van de waterdiepte h en de karakteristieke steenafmeting D_{n50} , zodat het verband kan worden bepaald door modelproeven uit te voeren voor een aantal verschillende waterdiepten en steenafmetingen. Als uitgangspunt in dit onderzoek worden vier verschillende waterdiepten ($h = 0,70$ m, $1,10$ m, $1,50$ m en $1,90$ m) en twee verschillende sorteringen van natuursteen aangenomen.

Het ESM is de beschrijving van een stochastisch proces. Alle van invloed zijnde parameters zijn dus stochasten met een gemiddelde waarde en een bijbehorende spreiding. Door ook modelproeven uit te voeren met "stenen" die wat betreft grootte en vorm zeer geringe onderlinge verschillen vertonen, kan de invloed van een aantal parameters op de meetresultaten worden beperkt. Op deze wijze wordt geprobeerd om de reproduceerbaarheid van de modelproeven te verbeteren en de eenduidigheid van de resultaten te vergroten. Op basis hiervan is ervoor gekozen om, naast de modelproeven



Figuur 6.1 Modelproefopstelling

met een tweetal sorteringen van natuursteen, ook modelproeven uit te voeren met "stenen" die zijn gemaakt van aluminium, beton en glas. Deze materialen hebben een met natuursteen overeenkomende massadichtheid. Hierbij zijn regelmatige gevormde kubussen en bollen toegepast. Ook is een klein aantal modelproeven uitgevoerd met afwijkende vormen; platte, vierkante aluminium plaatjes en platte ronde schijfjes waarvoor guldens en rijksdaalders zijn gebruikt.

De twee gebruikte natuursteensorteringen zijn gezeefd over zeven met een maaswijdte van respectievelijk 0,011 m en 0,023 m. Door het wegen van 100 stenen, of van 30 stenen voor de twee sorteringen met de grootste karakteristieke afmeting, is van iedere gebruikte sortering een massaverdeling vastgesteld. De massaverdelingen worden samen met illustraties van het gebruikte stortmateriaal, weergegeven in de bijlagen van hoofdstuk 6. Op basis van de massa (W_{50}) die door 50 massaprocent van de overige aanwezige stenen wordt onderschreden is vervolgens met behulp van vergelijking 6.1 de karakteristieke afmeting van de equivalente kubusvormige steen (D_{n50}) vastgesteld.

$$D_{n50} = \sqrt[3]{\frac{W_{50}}{\rho_s}} \quad (6.1)$$

waarin: D_{n50} = karakteristieke steenafmeting (m)
 W_{50} = mediane steenmassa (kg)
 ρ_s = massadichtheid van het stortmateriaal (kg/m^3)

Een overzicht van alle gebruikte stortmaterialen wordt gegeven in tabel 6.1. Hierin wordt tevens aangegeven in welk hoofdstuk van dit afstudeerverslag de modelproeven met het betreffende stortmateriaal worden uitgewerkt.

stortmateriaal	massadichtheid	karakteristieke afmeting	omschrijving van de vorm	hoofdstuk
natuursteen	3000 kg/m ³	$D_{n50} = 0,0104$ m	onregelmatig, hoekig.	7
	2500 kg/m ³	$D_{n50} = 0,0127$ m	onregelmatig, afgerond.	8
aluminium kubussen	2700 kg/m ³	$D_{n50} = 0,0145$ m $D_{n50} = 0,0249$ m $D_{n50} = 0,0500$ m	regelmatig, hoekig, scherpe randen.	9
betonnen kubussen	2400 kg/m ³ 2000 kg/m ³	$D_{n50} = 0,0150$ m $D_{n50} = 0,0516$ m	regelmatig, hoekig, afgeronde randen.	10
glazen bollen	2500 kg/m ³	$D_{bol} = 0,0156$ m ($D_{n50} = 0,0126$ m)	regelmatig, afgerond	11
overig	2700 kg/m ³ (≈ 7000 kg/m ³) (≈ 7000 kg/m ³)	$D_{plaatje} = 0,025$ m $D_{gulden} = 0,025$ m $D_{rijksd.} = 0,029$ m	regelmatig, vierkant, plat. regelmatig, rond, plat. regelmatig, rond, plat.	12

Tabel 6.1 Overzicht van het in de modelproeven gebruikte stortmateriaal

6.4 Wijze van uitvoeren en uitwerken

Verskillende soorten modelproeven zijn uitgevoerd. Er wordt een onderverdeling gemaakt in vier categorieën:

- 1) individueel gestorte stenen
- 2) tegelijk gestorte stenen
- 3) afgeschoven stenen
- 4) opbouw stortprofielen

De keuze welke proeven uit te voeren met welke stortmaterialen is gemaakt op basis van een afweging tussen enerzijds het verwachte belang van de te behalen resultaten en anderzijds de praktische mogelijkheden om de modelproeven met de verschillende stortmaterialen uit te voeren.

1) Individueel gestorte stenen

Op verschillende waterdiepten, zijn steeds individuele stenen gestort door ze, één voor één en willekeurig georiënteerd, met ruime tussenpozen door een trechter te laten vallen die was bevestigd boven het middelpunt van de modelproefopstelling. De trechter had ter hoogte van de minimale doorsnede, afhankelijk van het stortmateriaal, een diameter van 0,0261 m, 0,0276 m of 0,043 m. Bij de sorteringen met de grootste aluminium en betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0500$ m en $D_{n50} = 0,0516$ m) is vanwege de afmetingen van de kubussen geen gebruik gemaakt van een trechter. Deze kubussen zijn direct vanaf het loslaatpunt gestort. De gestorte stenen vielen naar de bodem van de modelproefopstelling en bleven daar liggen. Er werd doorgedaan met storten totdat de mogelijkheid om de verschillende individuele gestorte stenen visueel te onderscheiden sterk verminderde doordat de stenen op elkaar begonnen te vallen. Vervolgens werd het water uit de modelproefopstelling verwijderd en werd een video-opname van het bovenaanzicht van de gestorte stenen gemaakt. Hiertoe werden, om de horizontale en verticale schaal in de video-opname te markeren, eerst op de bodem van de modelproefopstelling twee, onderling loodrechte, meetbaken aangebracht en ook werd de projectie van het loslaatpunt (de trechter) op de bodem van de modelproefopstelling gemarkeerd door via de trechter een lijn met een schietloodje tot de bodem neer te laten.

2) Tegelijk gestorte stenen

Om te bepalen of vallende stenen elkaar mogelijkwijs beïnvloeden wanneer zij tegelijk worden gestort en of dit invloed heeft op de te verwachten spreiding zijn modelproeven met tegelijk gestorte stenen uitgevoerd. Deze proeven zijn op dezelfde wijze uitgevoerd als de modelproeven met individueel gestorte stenen met dien verstande dat de te storten stenen in een zo kort mogelijke tijd door de trechter zijn gestort.

3) Afgeschoven stenen

Het mogelijke effect van het onderling beïnvloeding van stenen van de valbeweging wanneer zij tegelijk worden gestort is verder onderzocht door met een aantal stortmaterialen modelproeven uit te voeren waarbij steeds vijftien stenen op een rij zijn gelegd en tegelijk zijdelings vanaf een houten plankje zijn afgeschoven. Om het stortresultaat te kunnen vergelijken met een situatie van individueel gestorte stenen zijn de proeven herhaald waarbij de vijftien stenen steeds op een rij zijn gelegd en vanaf die positie met ruime tussenpozen één voor één zijn afgeschoven. In bijlage 6.10 worden twee illustraties gegeven van het houten plankje dat is gebruikt om de stenen af te schuiven.

4) Opbouw stortprofielen

Tenslotte is onderzoek gedaan naar de opbouw van het stortprofiel wanneer grote hoeveelheden steen worden gestort. Hiertoe werd in een aantal stappen een grote hoeveelheid stenen door een trechter gestort. Bij iedere stap werden video-opnamen gemaakt van twee onderling loodrechte zijaanzichten van de berg gestorte stenen.

Na uitvoering van de modelproeven zijn de gemaakte video-opnamen van de bodemplaat en de zijaanzichten ingelezen in een grafisch bewerkingsprogramma waarna de verschillende referentiepunten en schalen zijn gemarkeerd. De schaal is gemarkeerd door de in het video-beeld aanwezige meetbaken als referentie te nemen. Bij de opnamen met een bovenaanzicht van het stortmateriaal, is vervolgens het x- en y-coördinaat ten opzichte van de projectie van het loslaatpunt op de bodem in een datafile vastgelegd. Bij de opnamen van de proeven met betrekking tot de opbouw van stortprofielen is steeds de dwarsdoorsnede (breedte- en hoogte-coördinaat) van het gemiddelde stortprofiel bepaald en

eveneens in een datafile vastgelegd. Deze datafiles zijn vervolgens in een spreadsheetprogramma ingelezen waarna de resultaten verder zijn uitgewerkt. De resultaten worden gepresenteerd in hoofdstuk 7 tot en met hoofdstuk 12 van dit afstudeerverslag.

6.5 Nauwkeurigheid van de resultaten

In deze paragraaf wordt aandacht besteed aan de nauwkeurigheid van de uit de modelproeven afkomstige resultaten. Het is hierbij van belang om onderscheid te maken tussen onnauwkeurigheden die worden veroorzaakt door de wijze waarop de modelproeven zijn uitgevoerd en de resultaten zijn uitgewerkt en onnauwkeurigheden die een statistische achtergrond hebben. In paragraaf 6.5.1 wordt ingegaan op de modelproef-onnauwkeurigheden. De statistische onnauwkeurigheden staan centraal in paragraaf 6.5.2.

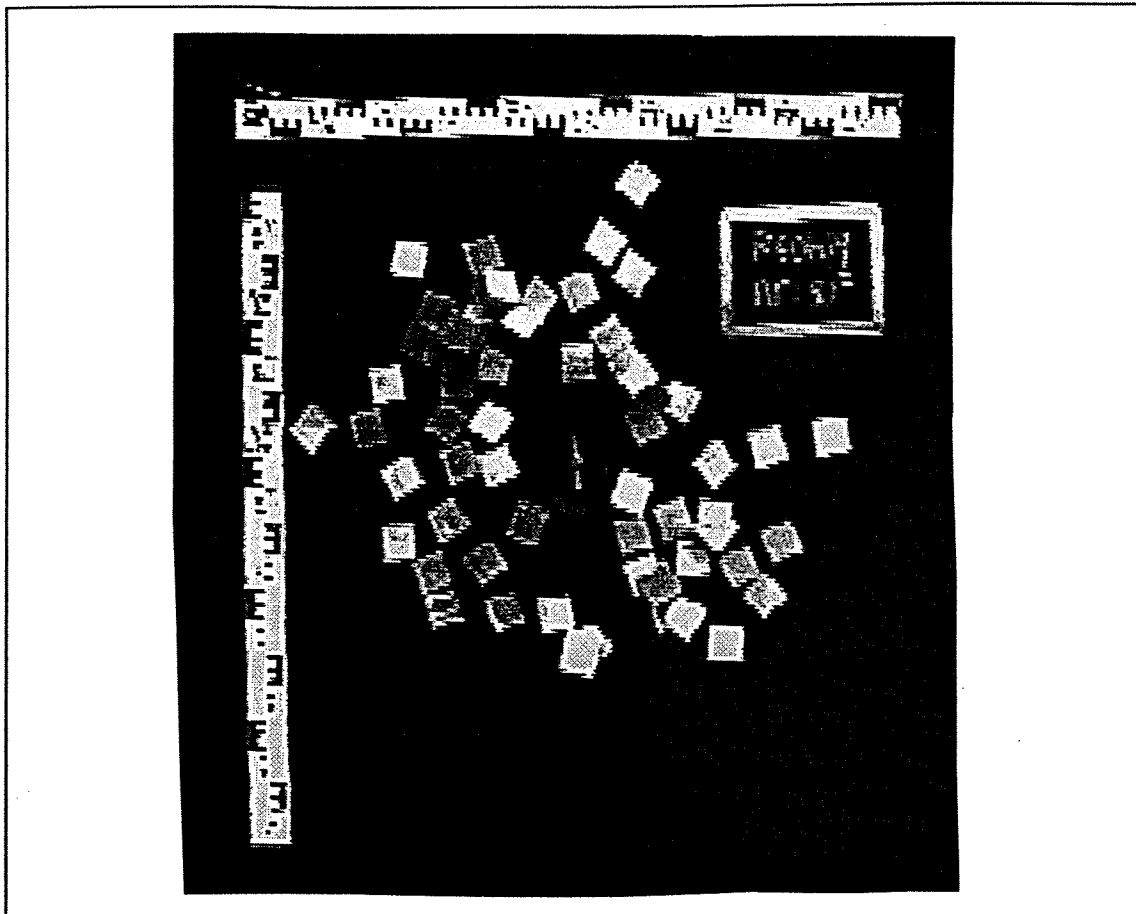
6.5.1 Modelproefon nauwkeurigheden

Bij alle uitgevoerde modelproeven is met behulp van video-opnamen (boven- en zijaanzichten) het stortresultaat vastgelegd. De video-opnamen zijn ingelezen in een grafisch bewerkingsprogramma waarin het stortmateriaal op het beeldscherm wordt weergegeven door pixels. Hoewel een pixel altijd wordt omschreven als "een punt op een beeldscherm" representeert het in feite een klein rechthoekje van het beeldscherm. De positie van een steen (x- en y-coördinaat) wordt bepaald door het aanklikken van één van de pixels. De gemiddelde x- en y-waarde van het vlakje dat door de aangeklikte pixel wordt weergegeven, wordt dan toegekend als het x- en y-coördinaat van de steen. Door ook de coördinaten van de twee in de video-opname aanwezig meetbaken (met een bekende schaal) te bepalen, wordt het mogelijk de x- en y-coördinaten van de stenen om te schalen naar meters.

Als gevolg van de wijze waarop de resultaten van de modelproeven uit de video-opnamen worden afgeleid doen zich een drietal onnauwkeurigheden voor; de schietloodfout, de meetbaakfout en de aanklikfout.

De schietloodfout is de fout in de positie van het punt op de bodem van de modelproefopstelling van waaraf de stralen van de gestorte stenen worden bepaald. Het punt, dat in de modelproeven (zie figuur 6.2) met een vleugelmoer is aangegeven, is de projectie van het loslaatpunt van de gestorte stenen op de bodem van de modelproefopstelling. De schietloodfout wordt gemaakt doordat niet het exacte midden van de moer in figuur 6.2 wordt aangeklikt en/of doordat de moer niet ligt op de exacte positie van de verticale projectie van het loslaatpunt op de bodem van de modelproefopstelling.

De meetbaakfout is de fout die wordt gemaakt in het aflezen van de referentieschalen in de video-opnamen. Zoals te zien in figuur 6.2 zijn twee meetbaken van 1 meter lengte, één in x-richting en één in y-richting, op de bodem van de modelproefopstelling neergelegd. De meetbaakfout wordt gemaakt wanneer de twee uiteinden van de meetbaken worden vastgelegd door het aanklikken van een pixel. Het aangeklikte pixel zal zelden exact overeenkomen met het uiteinde van de meetbaak. Er is dus altijd een afwijking die tot gevolg heeft dat de aangenomen referentieschaal ook een afwijking vertoont.

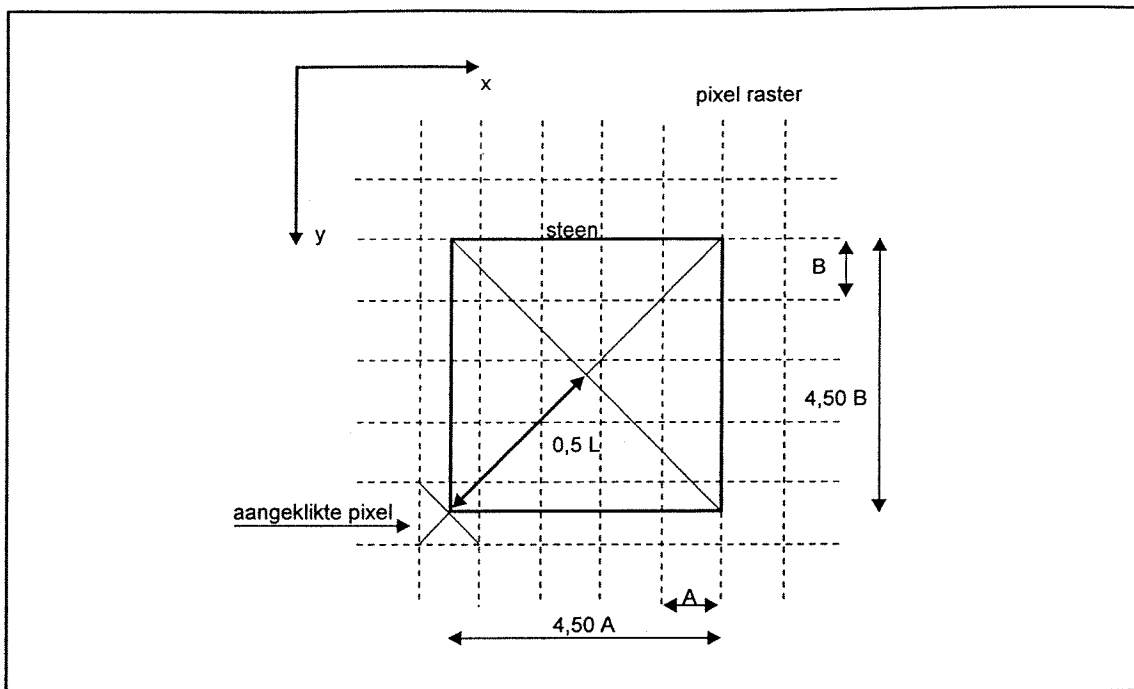


Figuur 6.2 *Bovenaanzicht van een stort*

De aanklikfout is de fout die wordt gemaakt bij het bepalen van de positie van de gestorte stenen op de bodem van de modelproefopstelling. Wanneer een steen niet precies de afmeting heeft van een aantal pixels zal het scherm het aantal pixels dat de steen op het scherm representeert afronden. Stel dat één pixel een oppervlak van het beeldscherm representeert met een lengte A in x -richting en een hoogte B in y -richting. In het geval een steen $4,5 A$ lang en $4,5 B$ hoog is dan wordt deze, omdat het aantal pixels wordt afgerond, weergegeven door 5 pixels in x -richting en 5 pixels in y -richting. Dit wordt geïllustreerd in figuur 6.3 die kan worden gezien als een denkbeeldig scherm van een monitor waarop een video-opname van een gevallen, tot kubus geschematiseerde, steen is te zien.

Wanneer een pixel wordt aangeklikt is er in bijna alle gevallen een afwijking tussen de gemiddelde x - en y -waarde van dat pixel en het massamiddelpunt van de steen. De grootste fout in het bepalen van de x - en y -coördinaten van de steen wordt nu gemaakt wanneer dat pixel wordt aangeklikt (zie figuur 6.3) dat de grootste (diagonaal)afstand tot het middelpunt van de steen geeft.

Van groter belang voor de interpretatie van de modelproefresultaten dan de maximale onnauwkeurigheid is de verwachtingswaarde (μ_e) van de onnauwkeurigheid en de bijbehorende standaardafwijking (σ_e). Van de aanklikfout mag worden verwacht dat deze gemiddeld over het grote aantal gestorte stenen gelijk is aan nul. De verwachtingswaarde van de schietloodfout en de meetbaakfout zal eveneens, gemiddeld over het aantal



Figuur 6.3 Schematisatie van een gestorte steen in een videobeeld

uitgevoerde proeven, gelijk zijn aan nul. De standaardafwijking van de genoemde fouten wordt verondersteld normaal verdeeld te zijn en is geschat op basis van de ervaringen bij het uitwerken van de modelproefresultaten.

De aanklikfout:	$\sigma_e = 0,002 \text{ m}$
De schietloodfout:	$\sigma_e = 0,001 \text{ m}$
De meetbaakfout:	$\sigma_e = 0,005 \text{ m}$

6.5.2 Statistische onnauwkeurigheden

Het storten van steen in water is een stochastisch proces met een zeer groot aantal van invloed zijnde variabelen. De belangrijkste hiervan zijn: de waterdiepte, de massadichtheid van het water, de steenafmeting, de vorm van de steen en de massadichtheid van de steen. Alle van invloed zijnde variabelen zijn stochastisch hetgeen tot gevolg heeft dat ook bij het herhaaldelijk uitvoeren van dezelfde modelproef een spreiding in de resultaten te verwachten is.

7 Modelproeven met onregelmatige, hoekige vormen

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de modelproeven die zijn uitgevoerd met onregelmatige, hoekige vormen. Hierbij is gebruik gemaakt van een breuksteensortering met een massadichtheid van 3000 kg/m^3 en een D_{n50} gelijk aan $0,0104 \text{ m}$.

In paragraaf 7.2 wordt een overzicht gegeven van de modelproeven die zijn uitgevoerd met de breuksteensortering. In paragraaf 7.3 tot en met paragraaf 7.6 worden de resultaten van de uitgevoerde modelproeven gepresenteerd en nader uitgewerkt. Hierbij staat verificatie van het in hoofdstuk 3 beschreven Enkele Steen Model (ESM) centraal. In paragraaf 7.3 wordt, per modelproef, de verdeling van de stralen van een hoeveelheid gestorte stenen vergeleken met een Rayleigh verdeling die is gefit op basis van de stralen van de gestorte stenen. In paragraaf 7.4 wordt ingegaan op de te verwachten extra spreiding van de stenen wanneer deze niet individueel worden gestort maar, in tegenstelling tot het ESM, zoveel mogelijk tegelijk. Het verband tussen het oppervlak en de traagheidsstraal van een gemiddelde dwarsdoorsnede van een stortprofiel, bij een toenemende storthoeveelheid, staat centraal in paragraaf 7.5. In paragraaf 7.6 wordt tenslotte, op basis van de in de modelproeven gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte stenen, de gemiddelde valsnelheid en weerstandscoefficiënt van het stortmateriaal bepaald.

7.2 Overzicht van de uitgevoerde modelproeven

De serie modelproeven met breuksteen, aangeduid als modelproefserie A, bestaat uit 11 afzonderlijke proeven die wordt onderverdeeld in drie categorieën:

- individueel gestorte stenen
- tegelijk gestorte stenen
- opbouw stortprofielen

Een overzicht van de uitgevoerde modelproeven met de bijbehorende modelproefnummers wordt gegeven in tabel 7.1.

Modelproefserie A	waterdiepte $h = 0,70 \text{ m}$	waterdiepte $h = 1,10 \text{ m}$	waterdiepte $h = 1,50 \text{ m}$	waterdiepte $h = 1,90 \text{ m}$
individueel gestort	nr.1 nr.1bis	nr.2	nr.3	nr.4 nr.4bis
tegelijk gestort	–	–	–	nr.5 nr.5bis
opbouw stortprofiel	–	–	–	nr.6 nr.7 nr.8

Tabel 7.1 *Uitgevoerde modelproeven met breuksteen ($D_{n50} = 0,0104 \text{ m}$)*

7.3 Modelproeven met individueel gestorte stenen

7.3.1 Uitkomsten met betrekking tot de stralen van de gestorte stenen

Van de gestorte stenen in de vier modelproeven (nr.1, nr.2, nr.3 en nr.4) en de twee herhalingsproeven (nr.1bis en nr.4bis) is voor iedere proef de gemiddelde straal ($r_{\text{gemiddeld}}$), ten opzichte van de projectie van het loslaatpunt op de bodem, en de bijbehorende standaardafwijking (σ_r) bepaald. Ook is de verdelingsfunctie ($F_r(r)$) van de stralen bepaald en zijn per modelproef de kwantielen ($r_{25\%}$, $r_{50\%}$, $r_{75\%}$ en $r_{100\%}$) van de stralen afgeleid. De waarde $r_{50\%}$ is de mediaan van een verzameling stralen van gestorte stenen in een uitgevoerde modelproef; 50 procent van de stralen in de verzameling is kleiner of gelijk dan $r_{50\%}$. Evenzo geldt dat respectievelijk 25, 75 en 100 procent van de stralen in de verzameling kleiner of gelijk zijn dan $r_{25\%}$, $r_{75\%}$ en $r_{100\%}$. De resultaten worden per modelproef weergegeven in tabel 7.2. Een overzicht van alle verdelingsfuncties van de stralen van gestorte stenen uit de breuksteensortering en van de bovenaanzichten van de storten wordt gegeven in bijlage 7.1. Per modelproef worden de verdelingsfuncties van de stralen van de gestorte stenen en het bovenaanzicht van de stort gegeven in de bijlagen 7.2 tot en met 7.7.

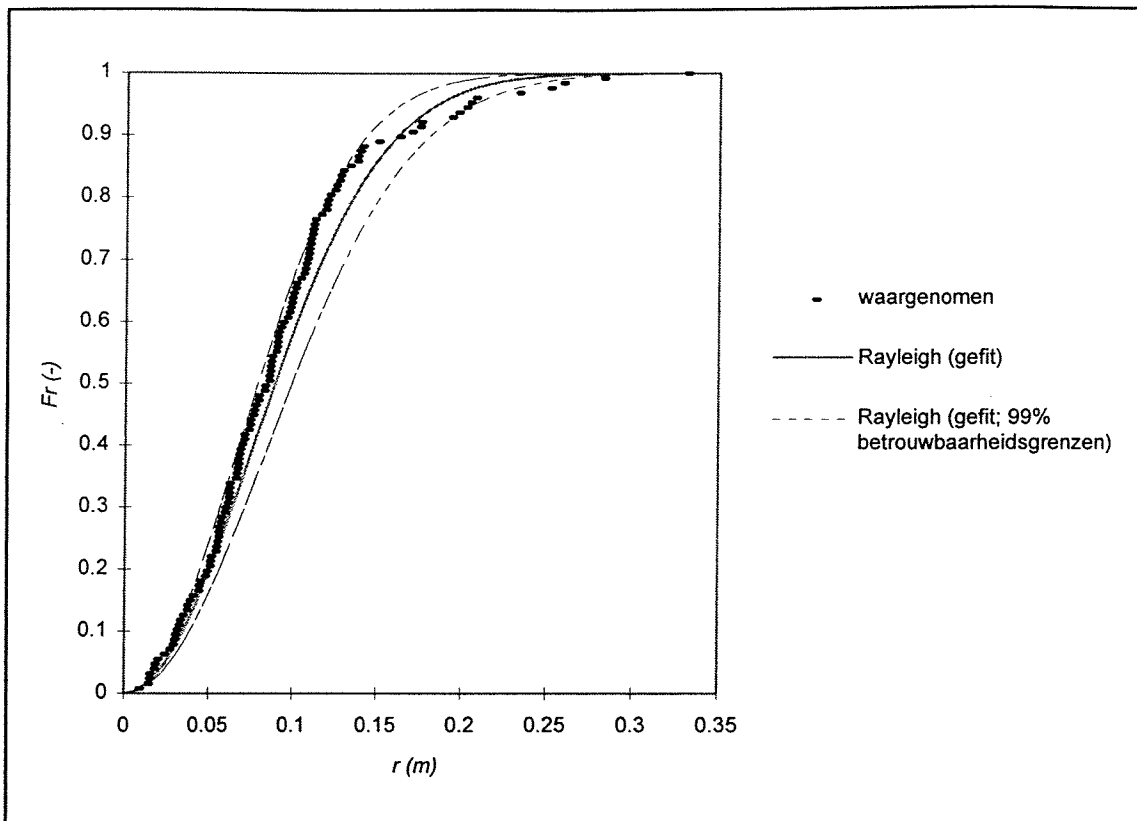
	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
nr.1	0,054 m	0,084 m	0,110 m	0,330 m	0,091 m	0,057 m
nr.1bis	0,051 m	0,082 m	0,116 m	0,244 m	0,086 m	0,045 m
nr.2	0,051 m	0,083 m	0,136 m	0,338 m	0,101 m	0,067 m
nr.3	0,063 m	0,103 m	0,172 m	0,547 m	0,124 m	0,091 m
nr.4	0,064 m	0,121 m	0,198 m	0,476 m	0,139 m	0,090 m
nr.4bis	0,069 m	0,102 m	0,210 m	0,553 m	0,144 m	0,102 m

Tabel 7.2 Resultaten van de stralen van individueel gestorte stenen

7.3.2 Toetsing van de modelproefresultaten aan de gefitte Rayleigh verdeling

In paragraaf 5.2 is afgeleid dat de inhoud van een tweedimensionale kansdichtheidsfunctie van een normale verdeling binnen een cilinder met straal r kan worden weergegeven door een Rayleigh verdeling. De Rayleigh verdeling wordt weergegeven door vergelijking 5.8. Indien de stralen van de gevallen stenen in de uitgevoerde proeven voldoen aan de Rayleigh verdeling is er dus sprake van een Gaussprofiel. In deze paragraaf worden de verdelingsfuncties van de stralen zoals bepaald uit de modelproefresultaten (de waargenomen verdeling) en die van een, op basis van de stralen van de gestorte stenen met een maximum-likelihood schatting, gefitte Rayleigh verdeling met elkaar vergeleken. In figuur 7.1, die gelijk is aan bijlage 7.2b, wordt als voorbeeld de waargenomen verdeling en de hierop gefitte Rayleigh verdeling voor de eerste modelproef (nr.1) gegeven. De boven- en ondergrens van de gefitte Rayleigh verdeling (99% betrouwbaarheids grenzen) worden in deze figuur eveneens (gestippeld) aangegeven.

De verdelingsfuncties uit de verschillende modelproeven met breuksteen hebben allemaal dezelfde vorm; een waargenomen verdeling die voor de kleinste 70-90 procent van de



Figuur 7.1 Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.1)

stralen een kleinere straal geeft dan de gefitte Rayleigh verdeling (bij een gelijke kans). De verdelingen kruisen elkaar bij de bovenste 10-30 procent van de stralen. Er is echter één uitzondering en dat is bij modelproef nr.1bis. Bij deze proef komen de waargenomen verdeling en de gefitte Rayleigh verdeling zeer sterk overeen. Bij nadere analyse blijkt dat bij modelproef nr.1bis de 10 procent grootste waargenomen stralen, in tegenstelling tot bij de andere modelproeven, relatief weinig in grootte van elkaar verschillen. Dit kan ook worden afgeleid uit tabel 7.2. Modelproef nr.1 heeft een verhouding $r_{100\%}/r_{75\%}$ gelijk aan ongeveer 2,0 terwijl deze verhouding bij modelproef nr.1bis gelijk is aan ongeveer 1,1. Dit verschil is met name van belang omdat de maximum-likelihood schatter, die bepalend is voor de gefitte Rayleigh verdeling, in relatief grote mate wordt bepaald door het kleine aantal gestorte stenen met de grootste stralen. Immers, mede bepalend voor de maximum-likelihood schatter is de kwadratensom van de stralen (zie vergelijking 5.14).

Door middel van de K.S.-toets, waarop in paragraaf 5.4 is ingegaan, wordt nagegaan of er sprake is van gelijkheid tussen de verdelingsfuncties. In tabel 7.3 wordt per modelproef met n gestorte stenen, het maximale verschil gegeven tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling (Δ_{\max}). Ook wordt het maximale verschil gegeven uitgaande van de 99 procent betrouwbaarheidsgrenzen van de gefitte Rayleigh verdeling ($\Delta_{\max;\text{ondergrens}}$ en $\Delta_{\max;\text{bovengrens}}$). De waarde van $\Delta_{\text{K.S.-toets}}$ vormt het maximale toegestane verschil tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling, op basis van vergelijking 5.17, waarbij er nog sprake is van gelijkheid tussen beide verdelingen. In de tabel 7.3 zijn tussen haakjes de genormeerde waarden van Δ_{\max} , $\Delta_{\max;\text{ondergrens}}$ en $\Delta_{\max;\text{bovengrens}}$ gegeven ten opzichte van de waarde van $\Delta_{\text{K.S.-toets}}$ die, per modelproef, is genormeerd op 100. Op deze wijze kunnen de waarden in tabel 7.3 eenvoudig worden afgelezen als procentuele verschillen.

	n	$\Delta_{K.S.-toets}$	$\Delta_{max,ondergrens}$	Δ_{max}	$\Delta_{max;bovengrens}$
nr.1	127	0,145 (100)	0,062 (43)	0,104 (72)	0,185 (128)
nr.1bis	101	0,162 (100)	0,154 (95)	0,058 (36)	0,101 (64)
nr.2	145	0,135 (100)	0,086 (64)	0,144 (106)	0,189 (140)
nr.3	152	0,132 (100)	0,094 (71)	0,151 (114)	0,212 (161)
nr.4	194	0,117 (100)	0,089 (76)	0,117 (100)	0,156 (133)
nr.4bis	194	0,117 (100)	0,116 (99)	0,169 (144)	0,213 (182)

Tabel 7.3 *Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling*

Op basis van de K.S.-toets kan worden geconcludeerd dat de gefitte Rayleigh verdeling een redelijke aansluiting geeft tot de in de modelproeven waargenomen verdeling. Hierbij dient in overweging te worden genomen dat het uitvoeren van modelproeven met een sortering van steen nooit een perfecte Rayleigh verdeling zal geven. Immers, het ESM veronderstelt volgens vergelijking 3.18 dat de gestorte stenen wat betreft afmeting, massadichtheid, oppervlakte- en vormruwheid (zie paragraaf 4.4) allen identiek zijn. Bij gebruik van een sortering van steen mag worden verwacht dat de waargenomen verdelingsfunctie voor de kleinere steenafmetingen een kleinere straal zal geven dan de gefitte Rayleigh verdeling bij gelijke kans, terwijl voor de grotere steenafmetingen het omgekeerde geldt. De waargenomen verdelingen uit de modelproeven met breuksteen bevestigen deze verwachting.

7.3.3 Waarden van de constante c

Uit vergelijking 5.9 volgt dat de straal r die in een Rayleigh verdeling wordt onderschreden door 39,35 procent van de stralen van de in de modelproef gestorte stenen, gelijk is aan de traagheidsstraal (σ) van het Gaussprofiel volgens vergelijking 3.18. In deze paragraaf wordt per uitgevoerde modelproef een viertal waarden van de constante c bepaald. De constante c wordt op basis van de verdelingsfuncties bepaald voor: de waargenomen verdeling, de op basis van de stralen van de gestorte stenen met een maximum-likelihood schatting gefitte Rayleigh verdeling en de boven- en ondergrens van de gefitte Rayleigh verdeling bij betrouwbaarheidsgrenzen van 99 procent. Allereerst is hiertoe voor de vier verdelingen de waarde van de straal ($r_{39,35\%}$) bepaald die wordt onderschreden door 39,35 procent van de stralen in die verdeling. Vervolgens is door het invullen van deze waarde in vergelijking 3.18, met een bekende karakteristieke steenafmeting en waterdiepte, de waarde van de constante c bepaald.

De uitkomsten worden weergegeven in tabel 7.4 waarbij de waarden van de constante c , per uitgevoerde modelproef, zijn genormeerd ten opzichte van de waarde van de constante c in de gefitte Rayleigh verdeling (normcijfer = 100).

type verdelingsfunctie		straal $r_{39,35\%}$	constante c	
nr.1	waargenomen	0,067 m	0,781	(88)
	Rayleigh (gefit)	0,075 m	0,885	(100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,067 m	0,783	(88)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,084 m	0,986	(112)
nr.1bis	waargenomen	0,074 m	0,862	(107)
	Rayleigh (gefit)	0,069 m	0,807	(100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,060 m	0,703	(87)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,078 m	0,912	(113)
nr.2	waargenomen	0,067 m	0,624	(78)
	Rayleigh (gefit)	0,086 m	0,804	(100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,077 m	0,717	(89)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,095 m	0,890	(111)
nr.3	waargenomen	0,083 m	0,665	(76)
	Rayleigh (gefit)	0,109 m	0,870	(100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,097 m	0,778	(89)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,120 m	0,962	(111)
nr.4	waargenomen	0,099 m	0,702	(84)
	Rayleigh (gefit)	0,117 m	0,836	(100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,107 m	0,758	(91)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,128 m	0,914	(109)
nr.4bis	waargenomen	0,094 m	0,667	(75)
	Rayleigh (gefit)	0,125 m	0,888	(100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,113 m	0,805	(91)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,136 m	0,971	(109)

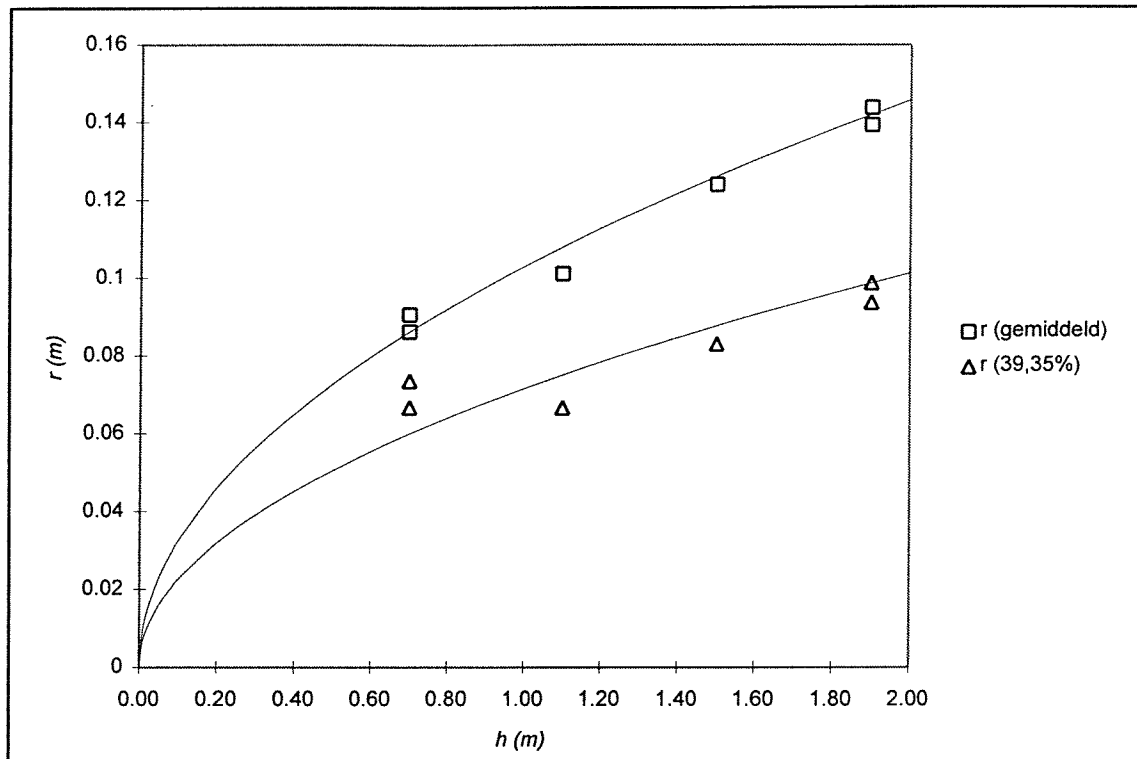
Tabel 7.4 *Uitkomsten voor de evenredigheidsconstante c*

Volgens het ESM zou de waarde van c bij proeven met hetzelfde stortmateriaal constant moeten zijn en onafhankelijk van de waterdiepte. De uitgevoerde modelproeven nr.1 tot en met nr.4bis zouden allemaal dezelfde waarde van c moeten geven indien de waargenomen verdeling exact gelijk zou zijn aan de gefitte Rayleigh verdeling. Omdat dit, om de reden die is besproken in paragraaf 7.3.2 niet mogelijk is, wordt een gemiddelde theoretische waarde van c en een gemiddelde waargenomen waarde van c over alle zes de uitgevoerde proeven berekend. Deze kunnen dienen als boven- en ondergrens voor de waarde van de constante c bij de gebruikte breuksteensortering. Uit tabel 7.4 kan worden berekend dat de gemiddelde waargenomen waarde van c gelijk is aan 0,716 en de gemiddelde theoretische waarde van c gelijk is aan 0,848, een verschil van ongeveer 18 procent.

7.3.4 Verband tussen spreiding en waterdiepte

In het ESM wordt verondersteld dat de spreiding van steen in water evenredig toeneemt met de wortel van de waterdiepte. In deze paragraaf zal worden gecontroleerd of de resultaten van de uitgevoerde proeven dit bevestigen. Hiertoe wordt enerzijds uitgegaan

van de traagheidsstraal van het Gaussprofiel, welke gelijk is aan de straal die door 39,35 procent van de stralen in de waargenomen verdeling wordt onderschreden ($r_{39,35\%}$), en anderzijds van de gemiddelde straal ($r_{\text{gemiddeld}}$) van de gestorte stenen tot de projectie van het loslaatpunt op de bodem. Beide parameters vormen een maat voor het verband tussen spreiding en waterdiepte. De waarden van $r_{\text{gemiddeld}}$ en $r_{39,35\%}$ zijn voor de verschillende uitgevoerde proeven uitgezet in figuur 7.2. Een indicatie van de nauwkeurigheid van de waarden kan worden verkregen door de resultaten van de herhalingsproeven te vergelijken met de oorspronkelijke proeven.



Figuur 7.2 Verband tussen spreiding en waterdiepte (breuksteen, $D_{n50} = 0,0104$ m)

Op basis van de uit de modelproef afkomstige metingen is het verband zoals dat door de getrokken lijnen wordt weergegeven een goede weergave van de werkelijkheid. De conclusie van het ESM dat de spreiding van materialen in water evenredig toeneemt met de wortel van de waterdiepte komt overeen met de uitkomsten van de modelproeven met de breuksteensortering.

7.4 Modelproeven met tegelijk gestorte stenen

Op een waterdiepte van 1,90 m zijn twee modelproeven (nr.5 en nr.5bis) uitgevoerd om te verifiëren in hoeverre de onderlinge beïnvloeding van stenen tijdens de valbeweging in water een effect heeft op de spreiding van de steen. Het is van belang te onderkennen dat de twee uitgevoerde modelproeven een gebrekkige nabootsing zijn van het tegelijk storten van steen zoals dat in werkelijkheid bij het stortproces van schuifstorters plaatsvindt. Dit wordt enerzijds veroorzaakt door het relatief kleine aantal stenen (196 stuks) dat in de modelproeven is gestort en anderzijds door de uitvoeringswijze van de modelproeven

waarbij alle te storten stenen worden gestort via een trechter. Als gevolg van het storten door een trechter is het wel mogelijk om stenen als een stroom, kort na elkaar, te storten, maar is het, door de afmetingen van de trechter, niet mogelijk om veel stenen op exact hetzelfde tijdstip door de trechter te storten. In het geval er sprake is van een additionele spreiding bij tegelijk gestorte stenen dan zal dit effect duidelijker waarneembaar worden naarmate er meer stenen tegelijk worden gestort.

De uitkomsten van de modelproeven worden weergegeven in de tabellen 7.5, 7.6 en 7.7. Uitleg over de inhoud van de verschillende tabellen wordt gegeven in respectievelijk paragraaf 7.3.1, 7.3.2 en 7.3.3. Per modelproef worden de verdelingsfuncties van de stralen van de tegelijk gestorte stenen en het bovenaanzicht van de stort gegeven in de bijlagen 7.8 en 7.9.

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
nr.5	0,075 m	0,130 m	0,183 m	0,653	0,146 m	0,100 m
nr.5 bis	0,071 m	0,126 m	0,208 m	0,754	0,147 m	0,105 m

Tabel 7.5 Resultaten van de stralen van tegelijk gestorte stenen

	n	$\Delta_{\text{K.S.toets}}$	$\Delta_{\text{max;ondergrens}}$	Δ_{max}	$\Delta_{\text{max;bovengrens}}$
nr.5	196	0,116 (100)	0,098 (85)	0,142 (122)	0,193 (166)
nr.5bis	196	0,116 (100)	0,065 (56)	0,112 (97)	0,177 (152)

Tabel 7.6 Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling

type verdelingsfunctie		straal $r_{39,35\%}$	constante c
nr.5	waargenomen	0,105 m	0,744 (84)
	Rayleigh (gefit)	0,125 m	0,888 (100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,136 m	0,805 (91)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,113 m	0,970 (109)
nr.5bis	waargenomen	0,100 m	0,708 (78)
	Rayleigh (gefit)	0,128 m	0,909 (100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,116 m	0,824 (91)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,140 m	0,993 (109)

Tabel 7.7 Uitkomsten voor de evenredigheidsconstante c

De resultaten bij de modelproeven met tegelijk gestorte stenen komen sterk overeen met die van individueel gestorte stenen. Ook geeft de gefitte Rayleigh verdeling in dezelfde mate aansluiting op de in de modelproeven waargenomen verdeling.

Wanneer de uitkomsten ($r_{39,35\%}$) uit modelproeven nr.5 en nr.5bis worden vergeleken met die uit modelproeven nr.4 en nr.4bis, is er sprake van enige toename in de spreiding. De toename is gemiddeld 6 procent voor de waargenomen verdeling en gemiddeld 5 procent voor de gefitte Rayleigh verdeling. Bij de gemiddelde stralen ($r_{\text{gemiddeld}}$) is er bij de tegelijk gestorte stenen een gemiddelde toename van 4 procent ten opzichte van de individueel

gestorte stenen. Opvallend is dat de verhouding $r_{100\%}/r_{75\%}$ bij de tegelijk gestorte stenen gelijk is aan ongeveer 3,5 terwijl deze verhouding voor de individueel gestorte stenen (modelproef nr.4 en nr.4bis) ongeveer 2,5 bedraagt. Er zijn dus grotere stralen waargenomen bij tegelijk gestorte stenen dan bij de individueel gestorte stenen alhoewel dit, vanwege de gebrekkige wijze van nabootsing van het tegelijk storten van stenen in de modelproeven, nauwelijks tot uitdrukking komt in de waarden van de gemiddelde straal die uit de modelproeven zijn bepaald.

7.5 Modelproeven met betrekking tot de opbouw van stortprofielen

In drie modelproeven (nr.6, nr.7 en nr.8) is een hoeveelheid stenen gestort bij een waterdiepte van 1,90 m. De totale hoeveelheid stenen is gestort in een aantal gelijke gedeelten, aangeduid als "stappen". Na iedere stap is een opname gemaakt van twee, onderling loodrechte, aanzichten van de op de bodem van de modelproefopstelling aanwezige berg stenen. Bij modelproef nr.6 is steen gestort in vijf stappen, bij de overige twee modelproeven in tien stappen. Van de twee, onderling loodrechte, aanzichten zijn de gemiddelde dwarsdoorsneden (zijkant, voorkant) van het stortprofiel bepaald. Vervolgens zijn de oppervlakten (A_{zijkant} , A_{voorkant}) en de traagheidsstralen (σ_{zijkant} , σ_{voorkant}) van deze dwarsdoorsneden bepaald. Het oppervlak (A_{gem}) en de traagheidsstraal (σ_{gem}) van de gemiddelde dwarsdoorsnede van de berg gestorte stenen is berekend door de waarden van de twee aanzichten (zijkant en voorkant) te middelen.

In de praktijk is het moeilijk gebleken om te bepalen waar een gemiddelde dwarsdoorsnede van het stortprofiel ophoudt. Het stortprofiel kan aan de uiteinden namelijk nog vrij lang doorlopen met een kleine laagdikte. Als oplossing is gekozen om de gemiddelde dwarsdoorsneden van de stortprofielen uit te werken op twee manieren die in het vervolg worden aangeduid als het "volledige stortprofiel" en het "gereduceerde stortprofiel". Bij het volledige stortprofiel dragen alle gestorte stenen bij aan de gemiddelde dwarsdoorsnede van het stortprofiel. Bij het gereduceerde stortprofiel worden alleen die stenen tot de gemiddelde dwarsdoorsnede van het stortprofiel gerekend, die zich bevinden in het gebied waar de berg stenen een hoogte van minimaal 1,5 maal $D_{n,50}$ heeft.

7.5.1 Maximale hellingshoek van het stortmateriaal

Volgens de theorie van het ESM wordt de opbouw van het stortprofiel bij het storten van een hoeveelheid steen in beginsel beschreven door een Gaussprofiel. Naarmate de storthoeveelheid toeneemt, nemen de hellingen van het Gaussprofiel toe tot dat een maximale hellingshoek (ϕ_m) van het stortmateriaal wordt bereikt. Na het bereiken van de maximale hellingshoek gaat het Gaussprofiel, via het overgangsprofiel, geleidelijk over in een driehoekprofiel met hellingen gelijk aan de maximale hellingshoek.

De maximale hellingshoek van de gebruikte breuksteensortering is bepaald voor het stortprofiel waarbij de totale hoeveelheid steen is gestort. Per modelproef zijn twee aanzichten (zijkant, voorkant) van het stortprofiel gebruikt. Ieder aanzicht heeft een linkerhelling en een rechterhelling zodat, op basis van de voortschrijdende gemiddelde hellingshoek, in totaal 12 maximale hellingshoeken zijn gemeten. Deze worden weergegeven in tabel 7.8. Op basis van de maximale hellingshoeken in tabel 7.8 kan een gemiddelde maximale hellingshoek voor de gebruikte breuksteensortering worden

berekend: $\phi_m = 40,7^\circ$. De standaardafwijking van de maximale hellingshoek (σ_s) is gelijk aan $2,12^\circ$. De maximale hellingshoek komt sterk overeen met gangbare waarden (lit.[6]) voor de maximale hellingshoek van breuksteensorteringen .

	maximale hellingshoeken (in graden)
nr.6	44,24 / 39,93 / 41,55 / 40,64
nr.7	38,27 / 39,93 / 41,29 / 37,24
nr.8	40,45 / 41,55 / 38,86 / 44,24

Tabel 7.8 Maximale gemeten hellingshoeken (ϕ_m)

7.5.2 Opbouw van het stortprofiel bij een toenemende storthoeveelheid

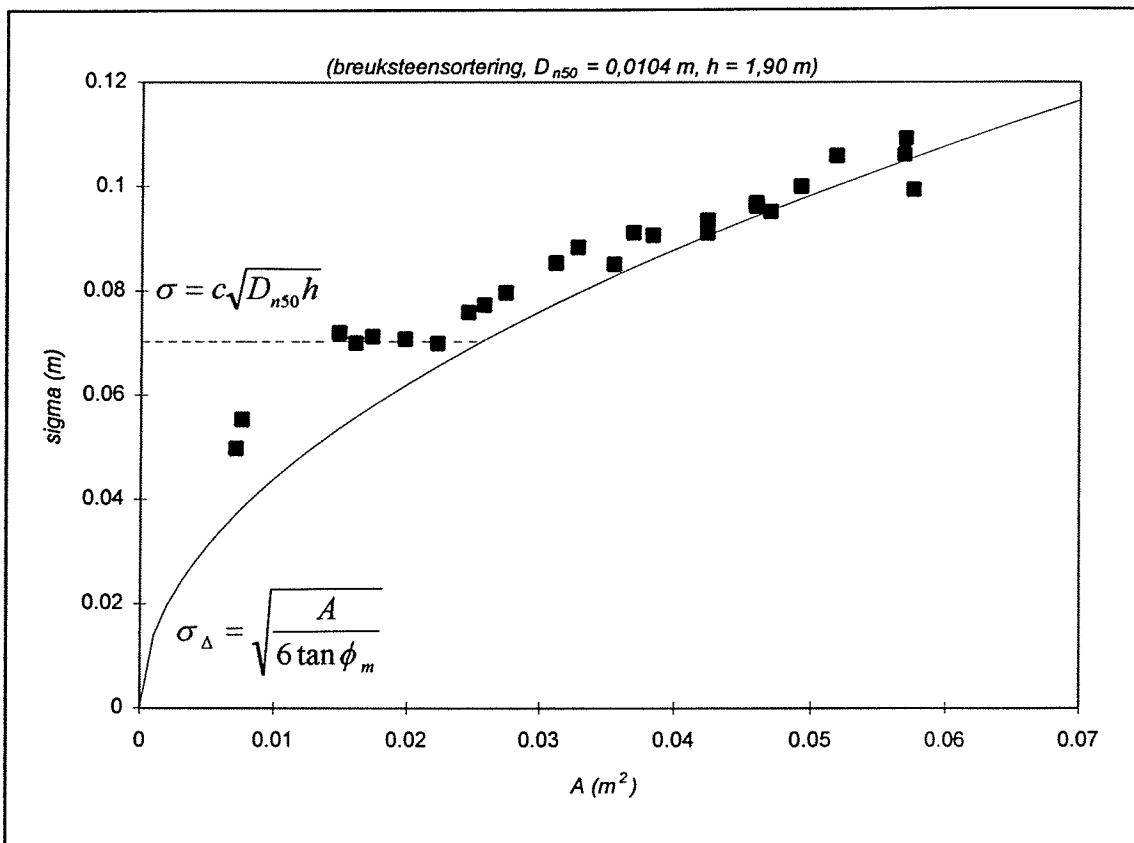
In tabel 7.9 worden de resultaten van de berekeningen uit de uitgevoerde modelproeven gepresenteerd voor het gereduceerde en het volledige stortprofiel.

stapnr.	$A_{gem,gereduceerd}$	$\sigma_{gem,gereduceerd}$	$A_{gem,volledig}$	$\sigma_{gem,volledig}$	
nr.6	1	0,017 m ²	0,071 m	0,021 m ²	0,097 m
	2	0,026 m ²	0,077 m	0,030 m ²	0,096 m
	3	0,038 m ²	0,091 m	0,042 m ²	0,104 m
	4	0,047 m ²	0,095 m	0,051 m ²	0,111 m
	5	0,057 m ²	0,106 m	0,060 m ²	0,116 m
nr.7	1	0,007 m ²	0,050 m	0,010 m ²	0,083 m
	2	0,015 m ²	0,072 m	0,016 m ²	0,082 m
	3	0,022 m ²	0,070 m	0,024 m ²	0,085 m
	4	0,027 m ²	0,080 m	0,029 m ²	0,091 m
	5	0,032 m ²	0,088 m	0,035 m ²	0,101 m
	6	0,037 m ²	0,091 m	0,038 m ²	0,098 m
	7	0,042 m ²	0,094 m	0,044 m ²	0,102 m
	8	0,046 m ²	0,097 m	0,049 m ²	0,108 m
	9	0,049 m ²	0,100 m	0,051 m ²	0,108 m
	10	0,057 m ²	0,109 m	0,059 m ²	0,115 m
nr.8	1	0,008 m ²	0,055 m	0,009 m ²	0,076 m
	2	0,016 m ²	0,070 m	0,019 m ²	0,090 m
	3	0,020 m ²	0,071 m	0,023 m ²	0,090 m
	4	0,024 m ²	0,076 m	0,028 m ²	0,092 m
	5	0,031 m ²	0,085 m	0,034 m ²	0,098 m
	6	0,035 m ²	0,085 m	0,038 m ²	0,095 m
	7	0,042 m ²	0,091 m	0,045 m ²	0,098 m
	8	0,046 m ²	0,096 m	0,048 m ²	0,100 m
	9	0,052 m ²	0,106 m	0,054 m ²	0,113 m
	10	0,057 m ²	0,100 m	0,061 m ²	0,108 m

Tabel 7.9 Verband tussen A_{gem} en σ_{gem}

Uit tabel 7.9 kan worden geconcludeerd dat voor een toenemende storthoeveelheid het verschil tussen de uitkomsten bij het gereduceerde en het volledige stortprofiel afneemt.

De gegevens uit tabel 7.9 zijn uitgezet in figuur 7.3 voor het gereduceerde stortprofiel en in figuur 7.4 voor het volledige stortprofiel. Ook zijn in deze figuren de verbanden voor de traagheidsstraal gegeven zoals deze bekend zijn voor het Gaussprofiel en het driehoeksprofiel. Voor het Gaussprofiel wordt deze gegeven door vergelijking 3.18 die, met de bekende parameters $D_{n50} = 0,0104$ m en $h = 1,90$ m en een gefitte waarde van de constante c (c_{gefit}), in figuur 7.3 en figuur 7.4 als een gestippelde horizontale lijn is uitgezet. De opbouw van het driehoeksprofiel wordt gegeven door vergelijking 3.21. Waarden voor de oppervlakte van de dwarsdoorsnede (A) in vergelijking 3.21 worden gegeven in tabel 7.9 en als maximale hellingshoek (ϕ_m) van het stortmateriaal wordt de in paragraaf 7.5.1 bepaalde waarde van $40,7^\circ$ gebruikt.

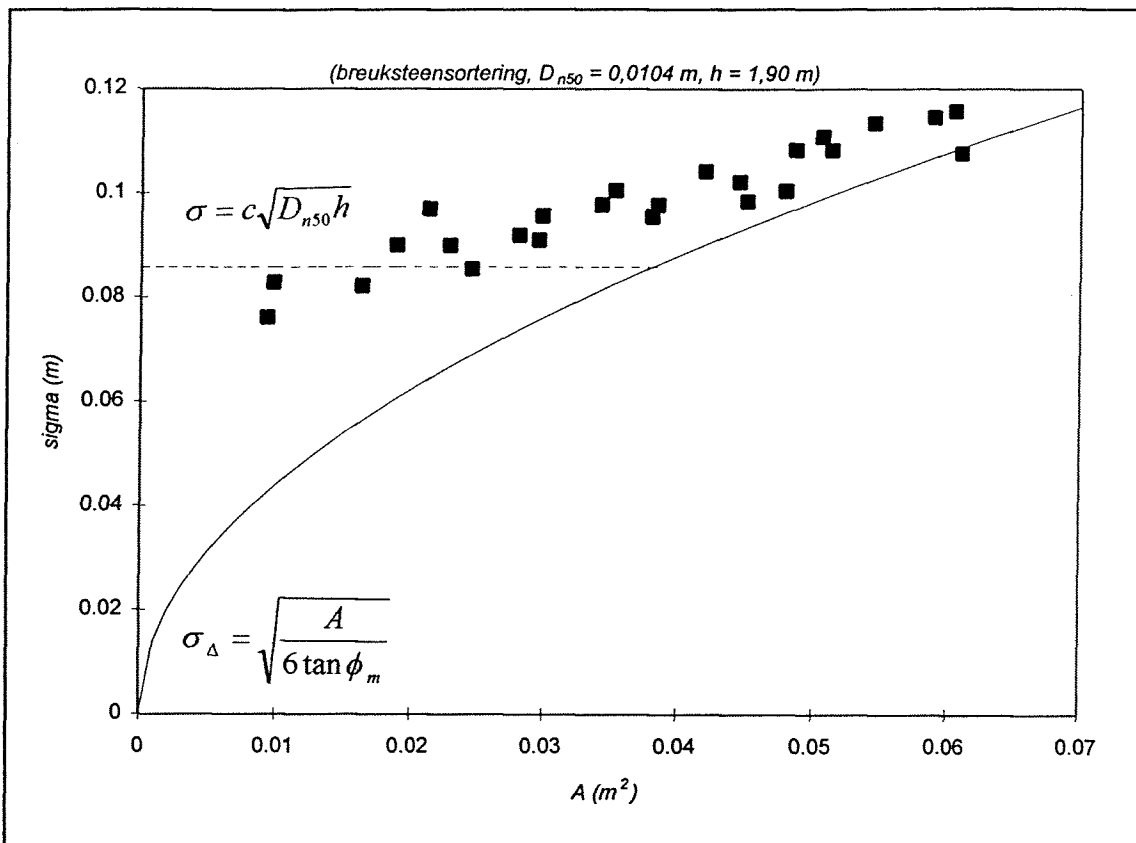


Figuur 7.3 Verband tussen A_{gem} en σ_{gem} (gereduceerd stortprofiel)

De figuren 7.3 en 7.4 bevestigen de ontwikkeling van het stortprofiel zoals beschreven in het ESM. Bij het gereduceerde stortprofiel is duidelijk te onderscheiden dat er sprake is van een overgang van het Gaussprofiel naar het driehoeksprofiel (zie knik in figuur 7.3).

Er dient rekening mee te worden gehouden dat bij kleine stortprofielen het verschil tussen het gereduceerde en het volledige stortprofiel het grootst is. Omdat het stortprofiel zich in deze gevallen net begint op te bouwen en dus nog een geringe hoogte heeft, is het aannemelijk dat het gereduceerde stortprofiel relatief onnauwkeurig is. Immers, als gevolg van de eis van een minimale hoogte van het stortprofiel van 1,5 maal D_{n50} wordt een

relatief groot gedeelte van het stortprofiel niet meegenomen in de bepaling van het oppervlak van de gemiddelde dwarsdoorsnede van het stortprofiel. Dit verklaart de lage ligging van de eerste twee punten in figuur 7.3.



Figuur 7.4 Verband tussen A_{gem} en σ_{gem} (volledig stortprofiel)

De gemiddelde waarde van de waargenomen constante c bij de individueel gestorte stenen ($c = 0,716$, zie paragraaf 7.3.3) is ongeveer 43 procent groter dan de gefitte waarde van de constante c voor het gereduceerde stortprofiel ($c_{gefit} = 0,50$, zie figuur 7.3) en ongeveer 17 procent groter dan de gefitte waarde van de constante c voor het volledige stortprofiel ($c_{gefit} = 0,61$, zie figuur 7.4). De verschillen worden verklaard door de onnauwkeurigheden in de bepaling van het werkelijke stortprofiel van de berg gestorte stenen en ook is mogelijk het bodemgedrag van gestorte stenen (zie paragraaf 2.6) van invloed.

Uit figuur 7.3 kan worden afgeleid dat de oppervlakte van de gemiddelde doorsnede van het stortprofiel wordt beschreven door het Gaussprofiel (volgens vergelijking 3.18) tot een waarde gelijk aan: $0,022 \text{ m}^2$. Boven deze waarde wordt het stortprofiel steeds beter beschreven door het driehoeksprofiel volgens vergelijking 3.21. Vergelijking 3.21 kan worden gezien als een ondergrens van de ontwikkeling van het driehoeksprofiel. Wanneer we het overgangsprofiel verwaarlozen en veronderstellen dat de waarde van $0,022 \text{ m}^2$ een ondergrens van het driehoeksprofiel vormt dan kan, uitgaande van een maximale hellingshoek van breuksteen gelijk aan $40,7^\circ$ en een D_{n50} gelijk aan $0,0104 \text{ m}$, worden berekend dat het Gaussprofiel de opbouw van het stortprofiel op de juiste wijze beschrijft tot een hoogte van het stortprofiel gelijk aan ongeveer 13 maal D_{n50} .

7.6 Valsnelheid en weerstandscoefficiënt

In bijlage 7.10 wordt voor een aantal, in een waterdiepte van 1,90 m, gestorte stenen ($D_{n50} = 0,0104$ m) uit de gebruikte breuksteensortering de tijdsduur van de valbeweging gegeven. Hieruit is de gemiddelde tijdsduur (t_{gem}) van de valbeweging en de bijbehorende standaardafwijking (σ_t) berekend: $t_{gem} = 4,5$ s en $\sigma_t = 0,662$ s. Met een waterdiepte van 1,90 m leidt dit tot een gemiddelde valsnelheid van 0,42 m/s. Met vergelijking 3.3 (waarin: $V_s/A_s = D_{n50}$), $\Delta = 2,0$ en $g = 9,81$ m/s² kan worden berekend dat de gemiddelde weerstandscoefficiënt ($C_{d,gem}$) gelijk is aan 2,3.

8 Modelproeven met onregelmatige, afgeronde vormen

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de modelproeven die zijn uitgevoerd met onregelmatige, afgeronde vormen. Hierbij is gebruik gemaakt van een grindsortering met een massadichtheid van 2500 kg/m^3 en een D_{n50} gelijk aan $0,0127 \text{ m}$. De modelproeven die zijn uitgevoerd met de grindsortering worden aangeduid als modelproefserie B.

8.2 Overzicht van de uitgevoerde modelproeven

Modelproefserie B bestaat uit een serie van 5 afzonderlijke proeven die wordt onderverdeeld in drie categorieën:

- individueel gestorte steen
- tegelijk gestorte steen
- opbouw stortprofielen

Een overzicht van de uitgevoerde modelproeven met de bijbehorende modelproefnummers wordt gegeven in tabel 8.1.

Modelproefserie B	waterdiepte $h = 0,70 \text{ m}$	waterdiepte $h = 1,10 \text{ m}$	waterdiepte $h = 1,50 \text{ m}$	waterdiepte $h = 1,90 \text{ m}$
individueel gestort	–	–	–	nr.9 nr.9bis
tegelijk gestort	–	–	–	nr.10 nr.10bis
opbouw stortprofiel	–	–	–	nr.11

Tabel 8.1 *Uitgevoerde modelproeven met grind ($D_{n50} = 0,0127 \text{ m}$)*

8.3 Modelproeven met individueel gestorte stenen

8.3.1 Uitkomsten met betrekking tot de stralen van de gestorte stenen

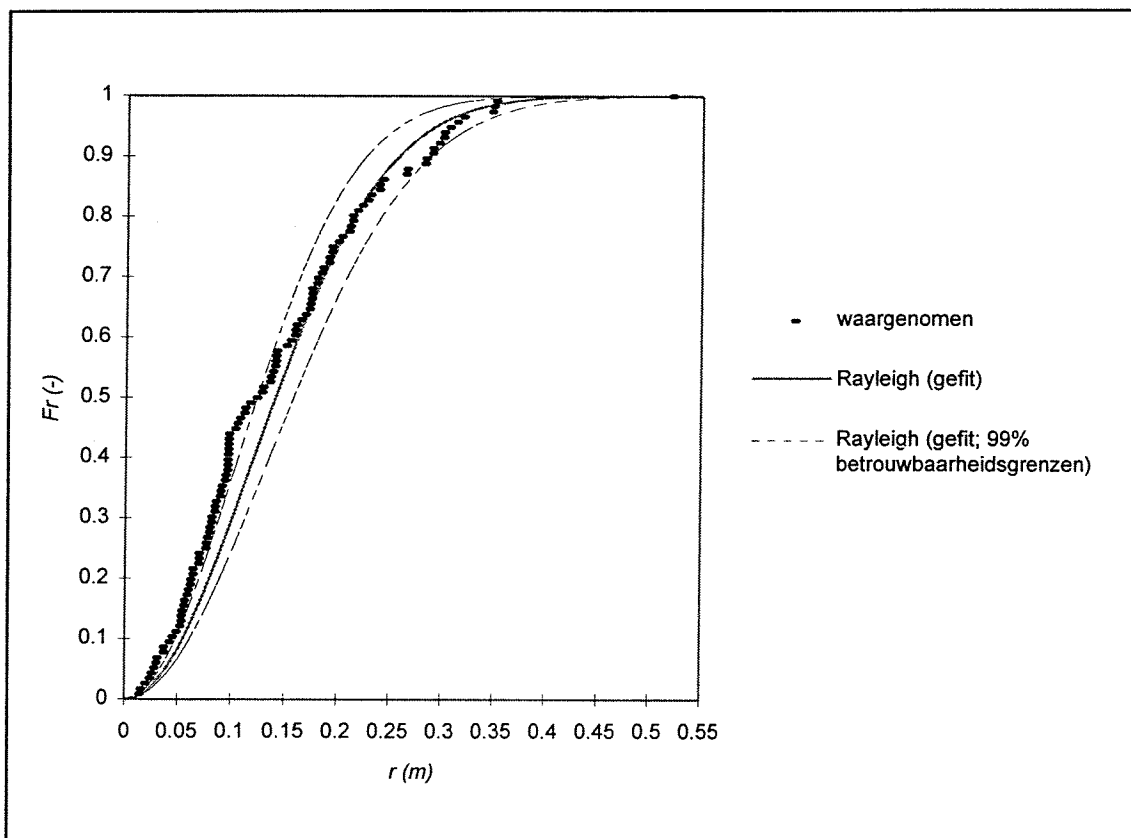
De resultaten van de stralen van de gestorte stenen uit de grindsortering worden per modelproef weergegeven in tabel 8.2. Uitleg over de inhoud van tabel 8.2 wordt gegeven in paragraaf 7.3.1. Een overzicht van alle verdelingsfuncties van de stralen van gestorte stenen uit de grindsortering en van de bovenaanzichten van de storten wordt gegeven in bijlage 8.1. Per modelproef worden de verdelingsfuncties van de stralen en het bovenaanzicht van de stort gegeven in de bijlagen 8.2 en 8.3.

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
nr.9	0,074 m	0,123 m	0,192 m	0,518 m	0,142 m	0,092 m
nr.9bis	0,062 m	0,120 m	0,187 m	0,482 m	0,142 m	0,102 m

Tabel 8.2 Resultaten van de stralen van individueel gestorte stenen

8.3.2 Toetsing van de modelproefresultaten aan de gefitte Rayleigh verdeling

De verdelingsfuncties van de modelproeven die zijn uitgevoerd met een grindsortering komen goed overeen met die van de modelproeven met breuksteen (zie paragraaf 7.3.2). Opnieuw geeft de waargenomen verdeling voor de kleinste 70-90 procent van de stralen een kleinere straal dan de, op basis van de stralen van de gestorte stenen met een maximum-likelihood schatting, gefitte Rayleigh verdeling (bij gelijke kans). De gefitte Rayleigh verdeling geeft een grotere straal dan de waargenomen verdeling (bij gelijke kans) bij de bovenste 10-30 procent van de stralen. Dit wordt weergegeven in figuur 8.1, die gelijk is aan bijlage 8.2b.



Figuur 8.1 Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.9)

In tabel 8.3 worden de resultaten van de K.S.-toets, die in paragraaf 5.4 is besproken, gegeven. Uitleg over de inhoud van de tabel wordt gegeven in paragraaf 7.3.2.

	n	$\Delta_{K.S.-toets}$	$\Delta_{max;ondergrens}$	Δ_{max}	$\Delta_{max;bovengrens}$
nr.9	116	0,151 (100)	0,105 (69)	0,169 (112)	0,218 (144)
nr.9bis	116	0,151 (100)	0,118 (78)	0,163 (108)	0,212 (140)

Tabel 8.3 *Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling*

Op basis van de K.S.-toets wordt geconcludeerd dat de gefitte Rayleigh verdeling evenals bij de modelproeven met een breuksteensortering een redelijke aansluiting geeft op de waargenomen verdeling bij modelproeven met een grindsortering.

8.3.3 Waarden van de constante c

Uit vergelijking 5.9 volgt dat de straal ($r_{39,35\%}$) die in een Rayleigh verdeling wordt onderschreden door 39,35 procent van de stralen van de gestorte stenen in een modelproef, gelijk is aan de traagheidsstraal van het Gaussprofiel volgens vergelijking 3.18. In tabel 8.4 worden per uitgevoerde modelproef een viertal waarden van de constante c bepaald voor de waargenomen verdeling, de daarop gefitte Rayleigh verdeling en de boven- en ondergrens van de gefitte Rayleigh verdeling (bij 99 procent betrouwbaarheidsgrenzen). Dit wordt gedaan door, per modelproef, voor de vier genoemde gevallen eerst $r_{39,35\%}$ te bepalen en deze vervolgens als σ in vergelijking 3.18 in te vullen. Met $h = 1,90$ m en $D_{n50} = 0,0127$ m volgen uit vergelijking 3.18 de waarden van de constante c. De uitkomsten van de bepaling van de constante c worden weergegeven in tabel 8.4.

	type verdelingsfunctie	straal $r_{39,35\%}$	constante c
nr.9	waargenomen	0,094 m	0,603 (78)
	Rayleigh (gefit)	0,120 m	0,769 (100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,105 m	0,677 (88)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,134 m	0,862 (112)
nr.9bis	waargenomen	0,091 m	0,586 (74)
	Rayleigh (gefit)	0,123 m	0,795 (100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,109 m	0,699 (88)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,138 m	0,891 (112)

Tabel 8.4 *Uitkomsten voor de evenredigheidsconstante c*

Uit tabel 8.4 worden de waarden van de gemiddelde waargenomen en theoretische constante c bepaald als gemiddelde van de waarden van de proeven nr.9 en nr.9bis. Deze zijn respectievelijk: 0,595 en 0,782.

8.4 Modelproeven met tegelijk gestorte stenen

Op een waterdiepte van 1,90 m zijn twee proeven (nr.10 en nr.10bis) uitgevoerd om te verifiëren in hoeverre de onderlinge beïnvloeding van stenen tijdens de valbeweging in water een effect heeft op de spreiding van de steen. De uitkomsten worden weergegeven in de tabellen 8.5, 8.6 en 8.7. Uitleg over de inhoud van de tabellen wordt gegeven in

paragraaf 7.3.1, 7.3.2 en 7.3.3. Per modelproef worden de verdelingsfuncties van de stralen en het bovenaanzicht van de stort gegeven in de bijlagen 8.4 en 8.5.

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
nr.10	0,091 m	0,157 m	0,237 m	0,720 m	0,183 m	0,132 m
nr.10 bis	0,071 m	0,122 m	0,226 m	0,665 m	0,165 m	0,131 m

Tabel 8.5 Resultaten van de stralen van tegelijk gestorte stenen

	n	$\Delta_{\text{K.S.-toets}}$	$\Delta_{\text{max;ondergrens}}$	Δ_{max}	$\Delta_{\text{max;bovengrens}}$
nr.10	116	0,151 (100)	0,080 (53)	0,131 (86)	0,203 (134)
nr.10bis	116	0,151 (100)	0,166 (110)	0,222 (147)	0,273 (180)

Tabel 8.6 Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling

type verdelingsfunctie		straal $r_{39,35\%}$	constante c
nr.10	waargenomen	0,129 m	0,830 (83)
	Rayleigh (gefit)	0,159 m	1,025 (100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,140 m	0,090 (88)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,179 m	1,149 (112)
nr.10bis	waargenomen	0,096 m	0,619 (62)
	Rayleigh (gefit)	0,149 m	0,959 (100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,131 m	0,843 (88)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,167 m	1,075 (112)

Tabel 8.7 Uitkomsten voor de evenredigheidsconstante c

Wanneer de uitkomsten ($r_{39,35\%}$) uit modelproeven nr.10 en nr.10bis worden vergeleken met die uit modelproeven nr.9 en nr.9bis, is er sprake van een duidelijke toename in de spreiding. De gemiddelde toename is 22 procent voor de waargenomen verdeling en 26 procent voor de gefitte Rayleigh verdeling. Bij de gemiddelde stralen ($r_{\text{gemiddeld}}$) is er bij de proeven met tegelijk gestorte stenen een gemiddelde toename van 22 procent waarneembaar. De verhouding $r_{100\%}/r_{75\%}$ vertoont bij de tegelijk gestorte stenen een gemiddelde toename van 13 procent ten opzichte van de individueel gestorte stenen. Dit leidt tot de conclusie dat, evenals in hoofdstuk 7, bij tegelijk gestorte stenen grotere stralen worden waargenomen dan bij individueel gestorte stenen.

De gefitte Rayleigh verdeling geeft bij de proeven met tegelijk gestorte, onregelmatige, afgeronde stenen (modelproef nr.10 en nr.10bis), een mindere aansluiting dan bij de proeven met de individueel gestorte, onregelmatige, afgeronde stenen (modelproef nr.9 en nr.9bis) en de proeven met de onregelmatige, hoekige stenen (zie hoofdstuk 7) het geval was.

8.5 Modelproeven met betrekking tot de opbouw van stortprofielen

In modelproef nr.11 is in tien stappen een hoeveelheid stenen gestort in een waterdiepte van 1,90 m. De wijze waarop de modelproef is uitgevoerd en de resultaten zijn uitgewerkt is hetzelfde als bij de modelproeven, met betrekking tot de opbouw van stortprofielen, in hoofdstuk 7. Uitleg over de verschillende in deze paragraaf gehanteerde aanduidingen en over de inhoud van de tabellen wordt gegeven in paragraaf 7.5.

8.5.1 Maximale hellingshoek van het stortmateriaal

De maximale hellingshoek van de gebruikte grindsortering is bepaald uit de twee aanzichten (zijkant, voorkant) van het stortprofiel waarbij de totale hoeveelheid steen is gestort. Ieder aanzicht heeft een linkerhelling en een rechterhelling zodat in totaal 4 maximale hellingshoeken zijn gemeten. Deze worden weergegeven in tabel 8.8.

	maximale hellingshoeken (in graden)
nr.11	34,11 / 36,02 / 33,50 / 34,33

Tabel 8.8 Maximale gemeten hellingshoeken (ϕ_m)

Op basis van de maximale hellingshoeken in tabel 8.8 kan een gemiddelde maximale hellingshoek voor de gebruikte grindsortering worden berekend: $\phi_m = 34,5^\circ$. De standaardafwijking van de maximale hellingshoek (σ_ϕ) is gelijk aan $1,08^\circ$. De maximale hellingshoek komt sterk overeen met gangbare waarden (lit.[6]) voor de maximale hellingshoek van grindsorteringen.

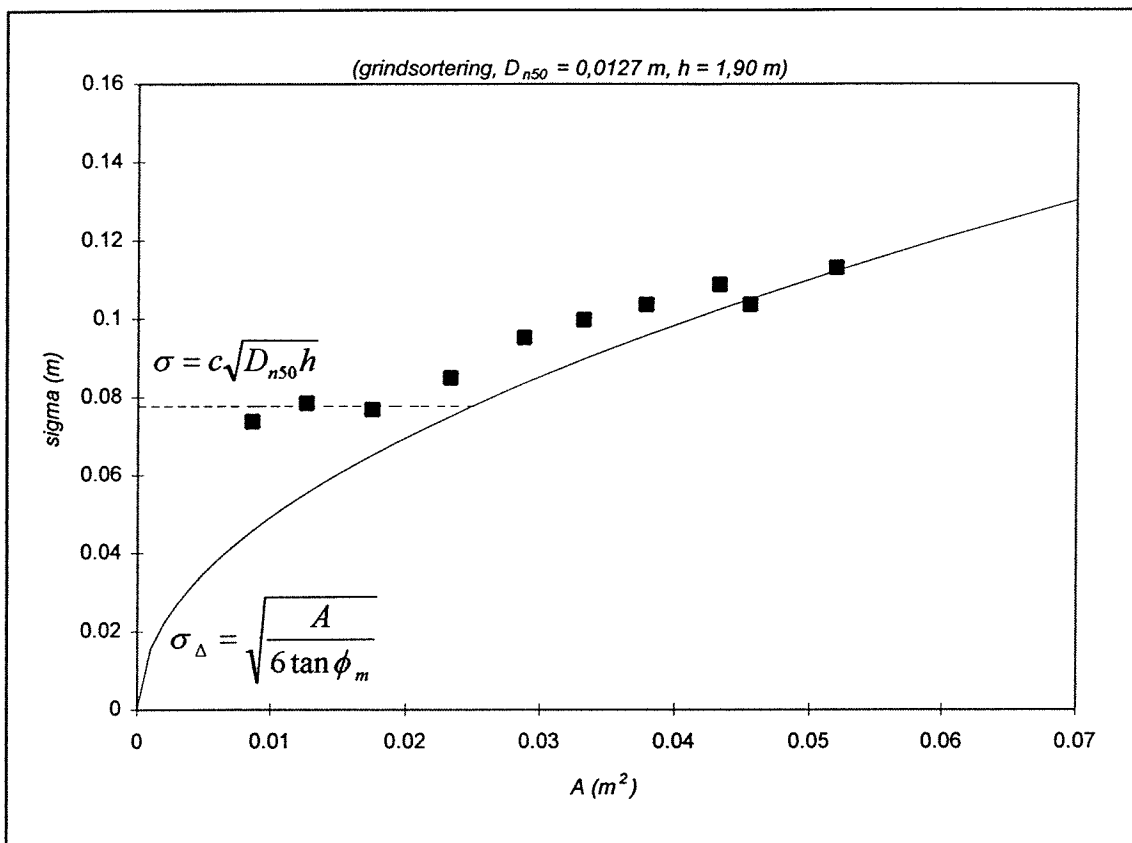
8.5.2 Opbouw van het stortprofiel bij een toenemende storthoeveelheid

In tabel 8.9 worden de resultaten van de berekeningen uit de uitgevoerde modelproeven gepresenteerd voor het gereduceerde en het volledige stortprofiel. Uit tabel 8.9 kan worden geconcludeerd dat voor een toenemende storthoeveelheid het verschil tussen de uitkomsten bij het gereduceerde en het volledige stortprofiel evenals in hoofdstuk 7 afneemt.

stapnr.	$A_{gem;gereduceerd}$	$\sigma_{gem;gereduceerd}$	$A_{gem;volledig}$	$\sigma_{gem;volledig}$	
nr.11	1	0,009 m ²	0,074 m	0,012 m ²	0,126 m
	2	0,013 m ²	0,079 m	0,017 m ²	0,134 m
	3	0,017 m ²	0,077 m	0,022 m ²	0,121 m
	4	0,023 m ²	0,085 m	0,031 m ²	0,120 m
	5	0,029 m ²	0,095 m	0,034 m ²	0,131 m
	6	0,033 m ²	0,100 m	0,038 m ²	0,129 m
	7	0,038 m ²	0,104 m	0,043 m ²	0,138 m
	8	0,043 m ²	0,109 m	0,049 m ²	0,136 m
	9	0,045 m ²	0,104 m	0,049 m ²	0,126 m
	10	0,052 m ²	0,113 m	0,057 m ²	0,139 m

Tabel 8.9 Verband tussen A_{gem} en σ_{gem}

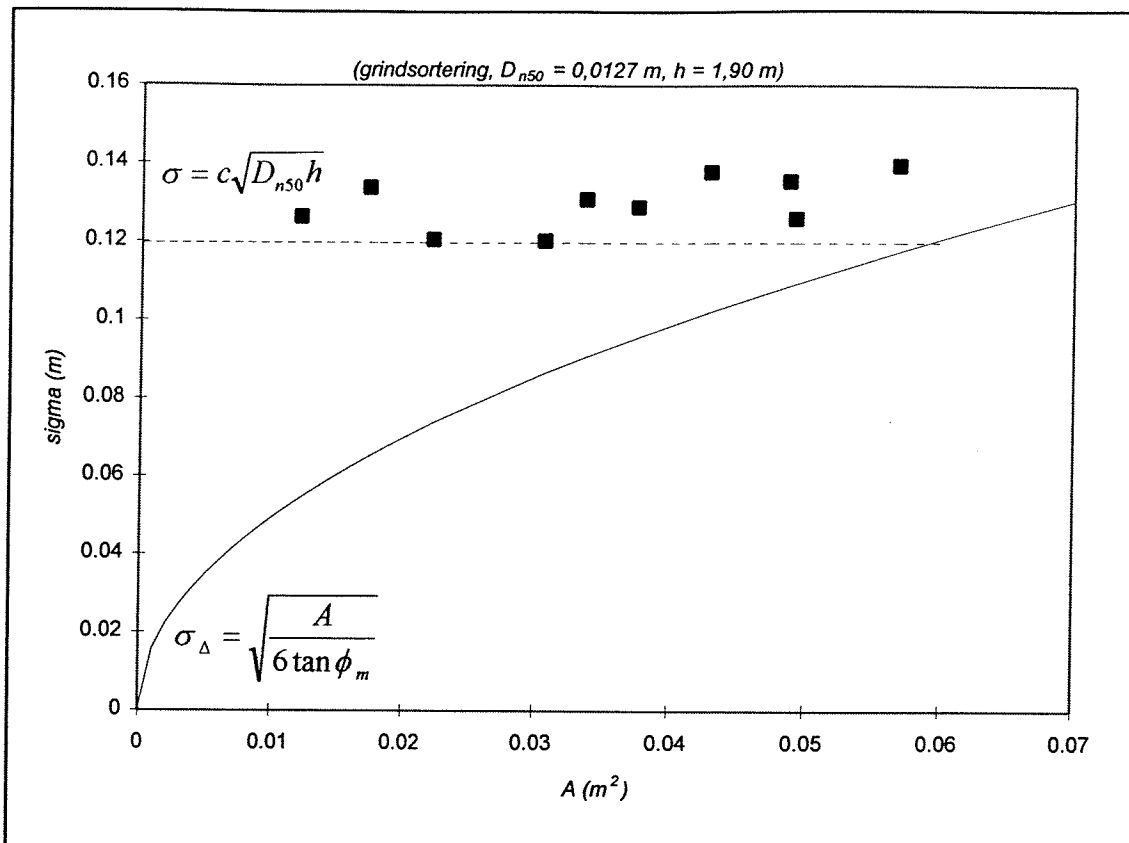
De gegevens uit tabel 8.9 zijn uitgezet in figuur 8.2 voor het gereduceerde stortprofiel en in figuur 8.3 voor het volledige stortprofiel. Ook zijn in deze figuren de vergelijkingen 3.18 en 3.21 aangegeven die de opbouw van het stortprofiel volgens het ESM beschrijven. In figuur 8.2 en 8.3 geeft vergelijking 3.18 het verband tussen de traagheidsstraal van het Gaussprofiel, de waterdiepte en de karakteristieke steenafmeting bij een gefitte waarde van de constante c (c_{gefit}). Vergelijking 3.21 geeft het verband tussen de traagheidsstraal van het driehoeksprofiel, de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het stortprofiel en de maximale hellingshoek van het stortmateriaal. De waarden voor de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het stortprofiel (A) zijn gegeven in tabel 8.9 en voor de maximale hellingshoek (ϕ_m) van het stortmateriaal wordt de in paragraaf 8.5.1 bepaalde waarde van $34,5^\circ$ gebruikt.



Figuur 8.2 Verband tussen A_{gem} en σ_{gem} (gereduceerd stortprofiel)

De figuren 8.2 en 8.3 komen sterk overeen met de figuren 7.2 en 7.3 en bevestigen opnieuw de ontwikkeling van het stortprofiel zoals beschreven in het ESM. De overgang van het Gaussprofiel naar het driehoeksprofiel is met een knik (bij een waarde van de oppervlakte van de gemiddelde doorsnede gelijk aan ongeveer $0,020 \text{ m}^2$) duidelijk zichtbaar bij het gereduceerde stortprofiel in figuur 8.2. De gemeten waarden bij het gereduceerde stortprofiel komen, naarmate de oppervlakte van de gemiddelde doorsnede groter wordt, sterker overeen met het verband van vergelijking 3.21, dat kan worden gezien als een ondergrens van de ontwikkeling van het driehoeksprofiel.

De gemiddelde waarde van de waargenomen constante c bij de individueel gestorte stenen ($c = 0,595$, zie paragraaf 8.3.3) is ongeveer 19 procent groter dan de gefitte waarde van de



Figuur 8.3 Verband tussen A_{gem} en σ_{gem} (volledig stortprofiel)

constante c voor het gereduceerde stortprofiel ($c_{gefit} = 0,5$, zie figuur 8.2) en ongeveer 23 procent kleiner dan de gefitte waarde van de constante c voor het volledige stortprofiel ($c_{gefit} = 0,77$, zie figuur 8.3). Een verklaring voor de verschillen wordt gegeven in paragraaf 7.5.2.

Uit figuur 8.2 kan worden afgeleid dat het Gaussprofiel een geldigheid heeft tot een oppervlakte van de gemiddelde dwarsdoorsnede van het stortprofiel gelijk aan ongeveer $0,020 \text{ m}^2$. Boven deze waarde gaat het stortprofiel langzaam over van een Gaussprofiel naar een driehoeksprofiel. Wanneer we veronderstellen dat de waarde van $0,020 \text{ m}^2$ een ondergrens van het driehoeksprofiel vormt dan kan, met $\phi_m = 34,5^\circ$ en $D_{n50} = 0,0127 \text{ m}$, worden berekend dat het Gaussprofiel de opbouw van het stortprofiel op de juiste wijze beschrijft tot een hoogte van het stortprofiel gelijk aan ongeveer 9 maal D_{n50} .

8.6 Valsnelheid en weerstandscoefficiënt

In bijlage 8.6 wordt voor een aantal, in een waterdiepte van $1,90 \text{ m}$, gestorte stenen uit de grindsortering ($D_{n50} = 0,0127 \text{ m}$) de tijdsduur van de valbeweging gegeven. Hieruit is de gemiddelde tijdsduur van de valbeweging en de bijbehorende standaardafwijking van de valbeweging berekend: $t_{gem} = 3,67 \text{ s}$ en $\sigma = 0,979 \text{ s}$. In een waterdiepte van $1,90 \text{ m}$ leidt dit een gemiddelde valsnelheid van $0,52 \text{ m/s}$. Met vergelijking 3.3 ($V_s/A_s = D_{n50}$), $\Delta = 1,5$

en $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ kan worden berekend dat de gemiddelde weerstandscoefficiënt ($C_{d,gem}$) gelijk is aan 1,4.

9 Modelproeven met regelmatige, hoekige vormen (scherpe randen)

9.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de modelproeven die zijn uitgevoerd met regelmatige, hoekige vormen met scherpe randen. Hierbij is gebruik gemaakt van aluminium kubussen, met een massadichtheid van 2700 kg/m^3 , in drie verschillende afmetingen ($D_{n50} = 0,0145 \text{ m}$, $0,0249 \text{ m}$ en $0,0500 \text{ m}$). De modelproeven die zijn uitgevoerd met aluminium kubussen worden aangeduid als modelproefserie C.

9.2 Overzicht van de uitgevoerde modelproeven

Modelproefserie C bestaat uit een serie van 19 afzonderlijke proeven die wordt onderverdeeld in drie categorieën:

- individueel gestorte kubussen
- tegelijk gestorte kubussen
- afgeschoven kubussen

Modelproefserie C	waterdiepte $h = 0,70 \text{ m}$	waterdiepte $h = 1,10 \text{ m}$	waterdiepte $h = 1,50 \text{ m}$	waterdiepte $h = 1,90 \text{ m}$
individueel gestort				
$D_{n50} = 0,0145 \text{ m}$	nr.12	nr.13	nr.14	nr.15
$D_{n50} = 0,0249 \text{ m}$	nr.16 nr.16bis	nr.17	nr.18	nr.19 nr.19bis nr.20 nr.20bis nr.21 nr.21bis
$D_{n50} = 0,0500 \text{ m}$	–	–	–	nr.22 nr.22bis
tegelijk gestort				
$D_{n50} = 0,0145 \text{ m}$	–	–	–	nr.23
$D_{n50} = 0,0249 \text{ m}$	–	–	–	nr.24
afgeschoven				
$D_{n50} = 0,0145 \text{ m}$	–	–	–	nr.25

Tabel 9.1 *Uitgevoerde modelproeven met aluminium kubussen*

Een overzicht van de uitgevoerde modelproeven met de bijbehorende modelproefnummers wordt voor de verschillende groottes van de gebruikte aluminium kubussen gegeven in tabel 9.1. Hieruit is af te lezen dat op een waterdiepte van 1,90 m de individueel gestorte modelproef met kubussen van $D_{n50} = 0,0249$ m zes maal is uitgevoerd. De kubussen in de modelproeven nr.19 en nr.19bis zijn, zoals die in alle andere modelproeven, willekeurig georiënteerd (random) door de trechter losgelaten. Ter vergelijking zijn in de modelproeven nr.20(bis) en nr.21(bis), de kubussen door de trechter losgelaten met respectievelijk steeds een vlak en een punt naar beneden georiënteerd.

9.3 Modelproeven met individueel gestorte aluminium kubussen

9.3.1 Uitkomsten met betrekking tot de stralen van de gestorte kubussen

De resultaten van de stralen van de gestorte aluminium kubussen worden per modelproef en afhankelijk van de kubusafmeting gegeven in de tabellen 9.2, 9.3 en 9.4. Uitleg over de inhoud van de tabellen wordt gegeven in paragraaf 7.3.1. Een overzicht van alle verdelingsfuncties van de stralen van gestorte aluminium kubussen en van de bovenaanzichten van de storten wordt gegeven in bijlage 9.1. Per modelproef worden de verdelingsfuncties van de stralen en het bovenaanzicht van de stort gegeven in de bijlagen 9.2 tot en met 9.17.

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
nr.12	0,124 m	0,152 m	0,181 m	0,258 m	0,150 m	0,043 m
nr.13	0,210 m	0,244 m	0,278 m	0,350 m	0,241 m	0,052 m
nr.14	0,288 m	0,333 m	0,375 m	0,476 m	0,324 m	0,075 m
nr.15	0,337 m	0,421 m	0,489 m	0,645 m	0,403 m	0,117 m

Tabel 9.2 Resultaten van de stralen van individueel gestorte kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m)

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
nr.16	0,094 m	0,126 m	0,158 m	0,217 m	0,126 m	0,041 m
nr.16bis	0,085 m	0,127 m	0,164 m	0,216 m	0,126 m	0,049 m
nr.17	0,203 m	0,243 m	0,282 m	0,359 m	0,239 m	0,059 m
nr.18	0,300 m	0,352 m	0,395 m	0,478 m	0,345 m	0,069 m
nr.19	0,377 m	0,439 m	0,496 m	0,633 m	0,430 m	0,089 m
nr.19bis	0,382 m	0,443 m	0,492 m	0,609 m	0,431 m	0,087 m
nr.20	0,351 m	0,406 m	0,455 m	0,595 m	0,398 m	0,082 m
nr.20bis	0,354 m	0,400 m	0,458 m	0,590 m	0,399 m	0,079 m
nr.21	0,375 m	0,432 m	0,482 m	0,599 m	0,427 m	0,080 m
nr.21bis	0,358 m	0,412 m	0,467 m	0,603 m	0,409 m	0,082 m

Tabel 9.3 Resultaten van de stralen van individueel gestorte kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m)

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
nr.22	0,183 m	0,231 m	0,281 m	0,381 m	0,231 m	0,079 m
nr.22bis	0,199 m	0,256 m	0,298 m	0,440 m	0,251 m	0,079 m

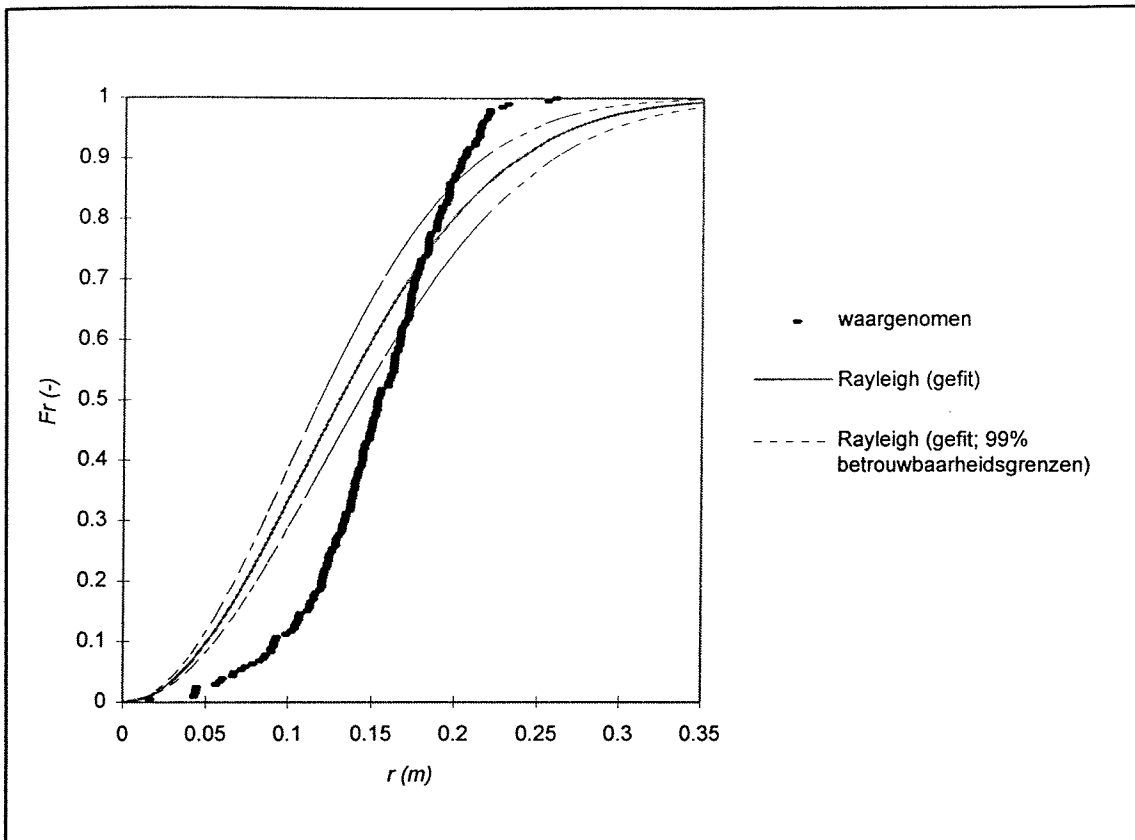
Tabel 9.4 Resultaten van de stralen van individueel gestorte kubussen ($D_{n50} = 0,0500 \text{ m}$)

Uit tabel 9.3 kan worden berekend dat de gemiddelde straal ($r_{\text{gemiddeld}}$) van de random gestorte kubussen gemiddeld 8 procent hoger is dan de gemiddelde straal bij de kubussen die zijn losgelaten met een vlak naar beneden. De gemiddelde afwijking van de gemiddelde straal van de random gestorte kubussen in vergelijking met de kubussen die zijn losgelaten met een punt naar beneden is geringer: 3 procent.

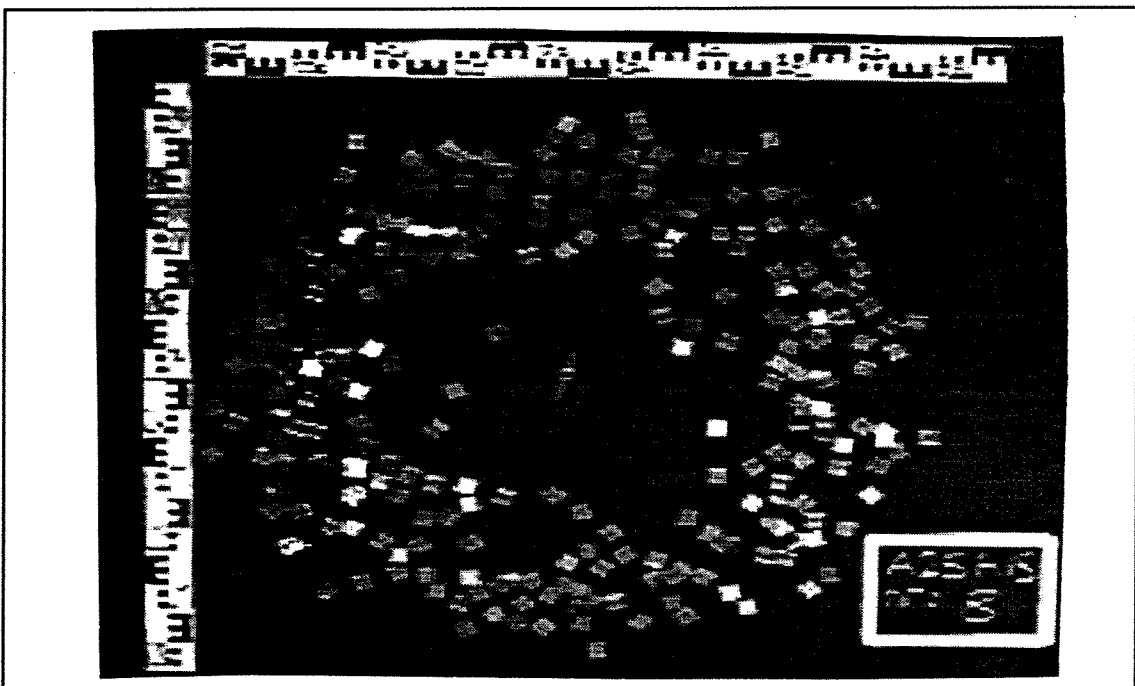
9.3.2 Toetsing van de modelproefresultaten aan de gefitte Rayleigh verdeling

In figuur 9.1, die gelijk is aan bijlage 9.2b, worden de verdelingsfuncties van modelproef nr.12 gegeven. Figuur 9.1 is karakteristiek voor de resultaten van de overige modelproeven met aluminium kubussen. Opvallend is dat de waargenomen verdeling een volledig andere vorm heeft ten opzichte van de gefitte Rayleigh verdeling, dan de verdelingsfuncties van de stralen bij de modelproeven met breuksteen (hoofdstuk 7) en grind (hoofdstuk 8). De waargenomen verdeling geeft voor de onderste 70 procent van de stralen een grotere straal dan de gefitte Rayleigh verdeling (bij gelijke kans). Daarna kruisen de verdelingen elkaar en geeft de waargenomen verdeling voor de bovenste 30 procent van de stralen een kleinere straal dan de gefitte Rayleigh verdeling. Het verschil in de vorm van de waargenomen verdelingen bij de aluminium kubussen wordt verklaard doordat tijdens het uitvoeren van de modelproeven een effect is waargenomen dat niet is waargenomen bij de modelproeven met breuksteen en grind. De gestorte aluminium kubussen gaan, enige tijd na het begin van de valbeweging, kantelen en roteren. Wanneer rotatie van de vallende kubus is begonnen, dan wordt deze gedurende de rest van de valbeweging voortgezet.

Als gevolg van het roteren van de gestorte kubussen, doet zich een effect voor dat in de literatuur (lit.[12] en lit.[14]) bekend staat als het "Magnus-effect". Aan de zijde waar de kubus met de stromingsrichting mee roteert is het snelheidsverschil van het water, relatief ten opzichte van de roterende kubus, kleiner dan aan de andere zijde van de kubus waar de kubus tegen de stromingsrichting in roteert. Als gevolg hiervan ontstaat een verschil in snelheidsgradiënt tussen beide zijden van de vallende en roterende kubus waardoor een extra kracht op de vallende en roterende kubus wordt uitgeoefend. Deze kracht heeft een zijdelingse verplaatsing tot gevolg die bepalend is voor het stortresultaat. Als gevolg van het Magnus-effect is er geen sprake van een "random walk" van de vallende steen (of kubus) in de tijd zoals wordt verondersteld in het ESM (zie paragraaf 3.3.2). In figuur 9.2 is het bovenaanzicht van de stort gegeven voor modelproef nr.18. Hierin is duidelijk te zien dat door rotatie van de kubus er altijd een zijdelingse verplaatsing plaatsvindt die het stortresultaat een "ringachtige" structuur geeft.



Figuur 9.1 Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.12)



Figuur 9.2 Bovenaanzicht van de stort na optreden van rotatie (modelproef nr.18)

Door middel van de K.S.-toets wordt nagegaan of er nog sprake kan zijn van aansluiting tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling. De resultaten worden gegeven in de tabellen 9.5, 9.6 en 9.7. Uitleg van de inhoud van de tabellen wordt gegeven in paragraaf 7.3.2.

	n	$\Delta_{K.S.-toets}$	$\Delta_{max;ondergrens}$	Δ_{max}	$\Delta_{max;bovengrens}$
nr.12	205	0,114 (100)	0,194 (170)	0,248 (218)	0,311 (273)
nr.13	265	0,100 (100)	0,271 (271)	0,318 (318)	0,374 (374)
nr.14	465	0,076 (100)	0,266 (350)	0,305 (401)	0,348 (458)
nr.15	556	0,069 (100)	0,204 (296)	0,239 (346)	0,277 (401)

Tabel 9.5 *Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling*
($D_{n50} = 0,0145 m$)

	n	$\Delta_{K.S.-toets}$	$\Delta_{max;ondergrens}$	Δ_{max}	$\Delta_{max;bovengrens}$
nr.16	63	0,205 (100)	0,178 (87)	0,209 (102)	0,339 (165)
nr.16bis	82	0,180 (100)	0,149 (83)	0,132 (73)	0,243 (135)
nr.17	133	0,141 (100)	0,238 (169)	0,304 (216)	0,384 (272)
nr.18	259	0,101 (100)	0,272 (269)	0,319 (316)	0,374 (370)
nr.19	296	0,095 (100)	0,271 (285)	0,316 (333)	0,368 (387)
nr.19bis	258	0,101 (100)	0,267 (264)	0,312 (309)	0,368 (364)
nr.20	294	0,095 (100)	0,255 (268)	0,298 (314)	0,350 (368)
nr.20bis	294	0,095 (100)	0,279 (294)	0,324 (341)	0,377 (397)
nr.21	294	0,095 (100)	0,293 (308)	0,338 (356)	0,390 (411)
nr.21bis	287	0,096 (100)	0,271 (282)	0,316 (329)	0,368 (387)

Tabel 9.6 *Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling*
($D_{n50} = 0,0249 m$)

	n	$\Delta_{K.S.-toets}$	$\Delta_{max;ondergrens}$	Δ_{max}	$\Delta_{max;bovengrens}$
nr.22	55	0,220 (100)	0,182 (83)	0,195 (89)	0,336 (153)
nr.22bis	55	0,220 (100)	0,198 (90)	0,199 (90)	0,329 (150)

Tabel 9.7 *Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling*
($D_{n50} = 0,0500 m$)

Op basis van de K.S.-toets dient te worden geconcludeerd dat de waargenomen verdeling bij de uitgevoerde modelproeven in bijna alle gevallen geen enkele aansluiting geeft op de gefitte Rayleigh verdeling. De extra kracht die als gevolg van het roteren van de kubussen wordt uitgeoefend op de vallende kubussen heeft een grote invloed op de valbeweging en zo op het uiteindelijke stortresultaat. Bij een drietal modelproeven (nr.16, nr.22 en

nr.22bis) is wel sprake van aansluiting tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling. Dit wordt verklaard doordat de kubussen enige tijd vallen voordat ze beginnen te roteren. De afstand die de kubussen afleggen in het water voordat rotatie begint is uit de modelproeven bepaald en bedraagt ongeveer 8 tot 15 maal de karakteristieke afmeting van het stortmateriaal (D_{n50}). Het lijkt waarschijnlijk dat na aanvang van het roteren het nog enige tijd duurt voordat de roteerbeweging van de kubus ook een daadwerkelijke zijwaartse verplaatsing van de vallende kubus tot gevolg heeft. Doordat de grote kubussen ($D_{n50} = 0,0500$ m) een grote valsnelheid hebben zijn ook bij het stortresultaat van de modelproeven nr.22 en nr.22bis op een waterdiepte van 1,90 m, hetgeen 38 maal de karakteristieke steenafmeting is, nog "sporen" van de gefitte Rayleigh verdeling zichtbaar. Ondanks dat de gefitte Rayleigh verdeling op basis van de K.S.-toets nog redelijk aansluit bij de waargenomen verdeling voor de drie modelproeven (nr.16, nr.22 en nr.22bis), is bij de verdelingsfuncties van de stralen van deze drie modelproeven al duidelijk dezelfde vorm zichtbaar als bij de overige modelproeven.

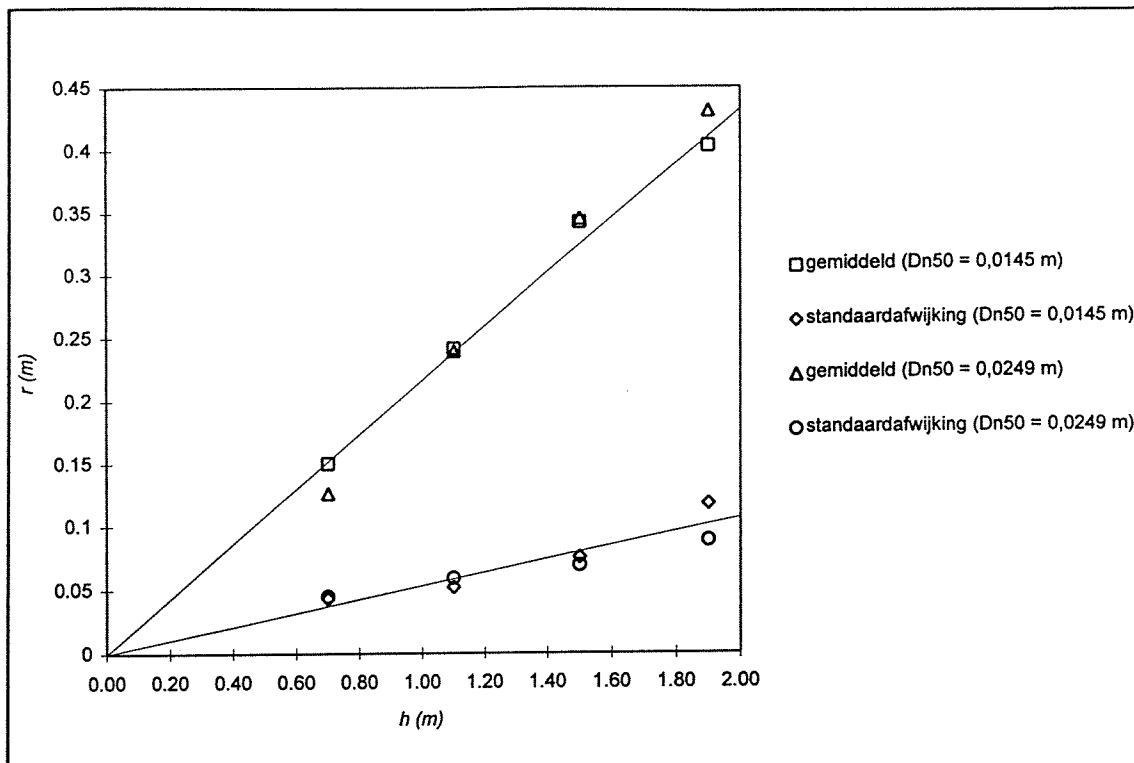
Gelet op het feit dat voor de gestorte aluminium kubussen de waargenomen verdeling niet aansluit bij de gefitte Rayleigh verdeling, wordt het niet zinvol geacht om, zoals in hoofdstuk 7 en 8, uitgaande van het Gaussprofiel de waarde van de constante c in vergelijking 3.18 te bepalen.

9.3.3 Verband tussen spreiding en waterdiepte

In figuur 9.3 is het verband tussen de spreiding van de gestorte aluminium kubussen en de waterdiepte weergegeven.

Als maat voor de spreiding is gebruik gemaakt van de gemiddelde straal ($r_{\text{gemiddeld}}$) van de gestorte kubussen en de bijbehorende standaardafwijking (σ_r). De getrokken lijnen in figuur 9.3 geven een gefit verband tussen de gemiddelde straal van de gestorte kubussen en de waterdiepte enerzijds en de standaardafwijking van de stralen en de waterdiepte anderzijds. Op basis hiervan lijkt te kunnen worden geconcludeerd dat daar waar rotatie van gestorte materialen plaatsvindt, de gemiddelde zijdelingse verplaatsing van het stortmateriaal evenredig toeneemt met de waterdiepte.

Opvallend is verder het geringe verschil in de waarden van de gemiddelde straal tussen de kleine ($D_{n50} = 0,0145$ m) en de grote ($D_{n50} = 0,0249$ m) kubussen. Hierbij moet in aanmerking worden genomen dat bij de grote kubussen op een waterdiepte van 0,70 m de gevolgen van rotatie nog niet tot uitdrukking komen in de waarde van de gemiddelde straal. Kennelijk is de steenafmeting in geval van optreden van rotatie van het stortmateriaal niet bepalend voor de zijdelingse verplaatsing.



Figuur 9.3 Verband tussen spreiding en waterdiepte voor aluminium kubussen

9.4 Modelproeven met tegelijk gestorte aluminium kubussen

In een waterdiepte van 1,90 m zijn twee modelproeven uitgevoerd met tegelijk gestorte aluminium kubussen in twee afmetingen; modelproef nr.23 ($D_{n50} = 0,0145$ m) en modelproef nr.24 ($D_{n50} = 0,0249$ m). De resultaten worden gepresenteerd in de tabellen 9.8 en 9.9. Per modelproef worden de verdelingsfuncties van de stralen en het bovenaanzicht van de stort gegeven in de bijlagen 9.18 en 9.19.

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
nr.23	0,310 m	0,393 m	0,453 m	0,604 m	0,377 m	0,104 m
nr.24	0,346 m	0,411 m	0,465 m	0,637 m	0,400 m	0,094 m

Tabel 9.8 Resultaten van de stralen van tegelijk gestorte kubussen

	n	$\Delta_{\text{K.S.-toets}}$	$\Delta_{\text{max, ondergrens}}$	Δ_{max}	$\Delta_{\text{max, bovengrens}}$
nr.23	561	0,069 (100)	0,207 (300)	0,237 (343)	0,272 (394)
nr.24	303	0,094 (100)	0,248 (264)	0,293 (312)	0,345 (367)

Tabel 9.9 Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling

In vergelijking met de individueel gestorte aluminium kubussen (tabel 9.2 voor modelproef nr.23 en tabel 9.3 voor modelproef nr.24), is er bij de tegelijk gestorte kubussen, in tegenstelling tot bij de modelproeven met breuksteen en grind, sprake van een afname in de spreiding. De afname van de gemiddelde straal ($r_{\text{gemiddeld}}$) bedraagt bij beide modelproeven ongeveer 8 procent. Een afname van de gemiddelde straal kan worden verklaard door de veronderstelling dat de kubussen die tegelijk worden gestort elkaar hinderen in de valbeweging met als gevolg dat de kubussen een langere afstand vallen voordat ze beginnen te roteren. Dezelfde verschijnselen vinden dus plaats maar doordat rotatie later inzet, is de uiteindelijke zijdelingse verplaatsing kleiner. Dit beeld wordt bevestigd door de verdelingsfuncties van de stralen van beide modelproeven (zie bijlage 9.18b en 9.19b) die overeenkomen met die van de individueel gestorte kubussen.

9.5 Modelproeven met aluminium kubussen die zijn afgeschoven

Met de aluminium kubussen van $D_{n50} = 0,0145$ m is in een waterdiepte van 1,90 m een modelproef uitgevoerd (nr.25) waarbij 15 kubussen op een rij zijn gelegd en tegelijk zijdelings zijn afgeschoven. Teneinde de resultaten te vergelijken zijn in het tweede gedeelte van de modelproef de kubussen opnieuw vanaf dezelfde lijn afgeschoven echter nu individueel.

Doordat er 15 kubussen op een rij, evenwijdig aan de y-as, worden gelegd is er feitelijk geen sprake van storten vanaf een punt maar van storten vanaf een lijnstuk (zie paragraaf 3.4). Het gevolg is dat de stort niet meer symmetrisch is waardoor de er onderscheid zou moeten worden gemaakt tussen stralen in x-richting (r_x) en stralen in y-richting (r_y). Teneinde de resultaten uit de modelproeven met de afgeschoven kubussen te kunnen vergelijken met die uit de tegelijk gestorte kubussen en omdat 15 kubussen op een rij wel een zeer minimale lijn vormen, wordt bij de uitwerking van de resultaten aangenomen dat er sprake is van een puntstort en wordt het onderscheid in x- en y-richting verwaarloosd.

De stralen van de afgeschoven kubussen zijn bepaald ten opzichte van de projectie, op de bodem van de modelproefopstelling, van het midden van de lijn die wordt gevormd door de 15 kubussen op de positie waar ze van het gebruikte houten plankje (zie bijlage 6.10) afschuiven. De resultaten van de stralen van afgeschoven kubussen worden weergegeven in tabel 9.10, de bovenaanzichten van de storten worden in bijlage 9.20 gepresenteerd.

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
tegelijk	0,295 m	0,381 m	0,483 m	0,722 m	0,380 m	0,131 m
individueel	0,310 m	0,394 m	0,470 m	0,734 m	0,385 m	0,121 m

Tabel 9.10 Resultaten van de stralen van kubussen die zijn afgeschoven

Uit tabel 9.10 kan worden afgeleid dat de gemiddelde straal bij de tegelijk afgeschoven kubussen iets kleiner is dan bij de individueel afgeschoven kubussen.

	tegelijk afgeschoven	individueel afgeschoven
gemiddelde x-coördinaat	- 0,060 m	- 0,063 m

Tabel 9.11 Gemiddelde x-coördinaat van de stort

In de bijlagen 9.20a en 9.20b worden de bovenaanzichten van de storten van de tegelijk en individueel afgeschoven kubussen weergegeven. Bij het uitvoeren van de modelproef was de afschuifrichting van de kubussen gelijk aan de positieve richting van de x-as. De y-as kan worden gezien als de lijn waar het plankje ophield en de kubussen in het water zijn afgeschoven. Tabel 9.11 geeft het gemiddelde x-coördinaat van de storten van de afgeschoven kubussen ten opzichte van de projectie, op de bodem van de modelproefopstelling, van het midden van de lijn die wordt gevormd door de 15 kubussen op de positie waar ze van het plankje afschuiven. De negatieve waarden zijn het gevolg van de, door de wijze van afschuiven vanaf het plankje, opgelegde rotatierichting van de afgeschoven kubussen. Het gemiddelde x-coördinaat van de stort is bij de tegelijk afgeschoven kubussen iets kleiner dan bij de individueel afgeschoven kubussen.

9.6 Valsnelheid en weerstandscoefficiënt

In bijlage 9.21 wordt voor een aantal gestorte aluminium kubussen de tijdsduur van de valbeweging bij een waterdiepte van 1,90 m gegeven. Hieruit is de gemiddelde tijdsduur (t_{gem}) van een valbeweging en de bijbehorende standaardafwijking (σ_t) berekend. Met de bekende waterdiepte is vervolgens de gemiddelde valsnelheid (w_{gem}) bepaald. Tenslotte is met vergelijking 3.3 ($V_s/A_s = D_{n50}$), $\Delta = 1,7$ en $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ de gemiddelde weerstandscoefficiënt ($C_{d,gem}$) berekend. De resultaten worden weergegeven in tabel 9.12.

	t_{gem}	σ_t	w_{gem}	$C_{d,gem}$
$D_{n50} = 0,0145 \text{ m}$	3,450 s	0,100 s	0,55 m/s	1,6
$D_{n50} = 0,0246 \text{ m}$	2,685 s	0,104 s	0,71 m/s	1,6
$D_{n50} = 0,0500 \text{ m}$	1,860 s	0,088 s	1,02 m/s	1,6

Tabel 9.12 Parameters van de valbeweging

10 Modelproeven met regelmatige, hoekige vormen (afgeronde randen)

10.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de modelproeven die zijn uitgevoerd met regelmatige, hoekige vormen met afgeronde randen. Hierbij is gebruik gemaakt van betonnen kubussen in twee afmetingen: $D_{n50} = 0,0150$ m (massadichtheid: 2400 kg/m^3) en $D_{n50} = 0,0516$ m (massadichtheid: 2000 kg/m^3). De modelproeven die zijn uitgevoerd met betonnen kubussen worden aangeduid als modelproefserie D.

10.2 Overzicht van de uitgevoerde modelproeven

Modelproefserie D bestaat uit een serie van 7 afzonderlijke proeven die wordt onderverdeeld in twee categorieën:

- individueel gestorte kubussen
- afgeschoven kubussen

Een overzicht van de uitgevoerde modelproeven met de bijbehorende modelproefnummers voor de verschillende groottes van de gebruikte betonnen kubussen wordt in tabel 10.1 gegeven.

Modelproefserie D	waterdiepte $h = 0,70$ m	waterdiepte $h = 1,10$ m	waterdiepte $h = 1,50$ m	waterdiepte $h = 1,90$ m
individueel gestort				
$D_{n50} = 0,0150$ m	nr.26	nr.27	nr.28	nr.29
$D_{n50} = 0,0516$ m	–	–	–	nr.30 nr.30bis
afgeschoven				
$D_{n50} = 0,0150$ m	–	–	–	nr.31

Tabel 10.1 *Uitgevoerde modelproeven met betonnen kubussen*

10.3 Modelproeven met individueel gestorte betonnen kubussen

10.3.1 Uitkomsten met betrekking tot de stralen van de gestorte kubussen

De resultaten worden per uitgevoerde modelproef en afhankelijk van de kubusafmeting gegeven in de tabellen 10.2 en 10.3. Uitleg over de inhoud van de tabellen wordt gegeven in paragraaf 7.3.1. Een overzicht van alle verdelingsfuncties van de stralen van de gestorte betonnen kubussen en van de bovenaanzichten van de storten wordt gegeven in bijlage

10.1. Per modelproef worden de verdelingsfuncties van de stralen en het bovenaanzicht van de stort gegeven in de bijlagen 10.2 tot en met 10.7.

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
nr.26	0,125 m	0,156 m	0,181 m	0,255 m	0,151 m	0,042 m
nr.27	0,206 m	0,261 m	0,302 m	0,508 m	0,251 m	0,071 m
nr.28	0,247 m	0,335 m	0,405 m	0,543 m	0,317 m	0,112 m
nr.29	0,254 m	0,393 m	0,488 m	0,669 m	0,372 m	0,150 m

Tabel 10.2 Resultaten van de stralen van individueel gestorte kubussen ($D_{n50} = 0,0150 \text{ m}$)

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
nr.30	0,148 m	0,295 m	0,403 m	0,568 m	0,286 m	0,142 m
nr.30bis	0,182 m	0,279 m	0,372 m	0,496 m	0,281 m	0,123 m

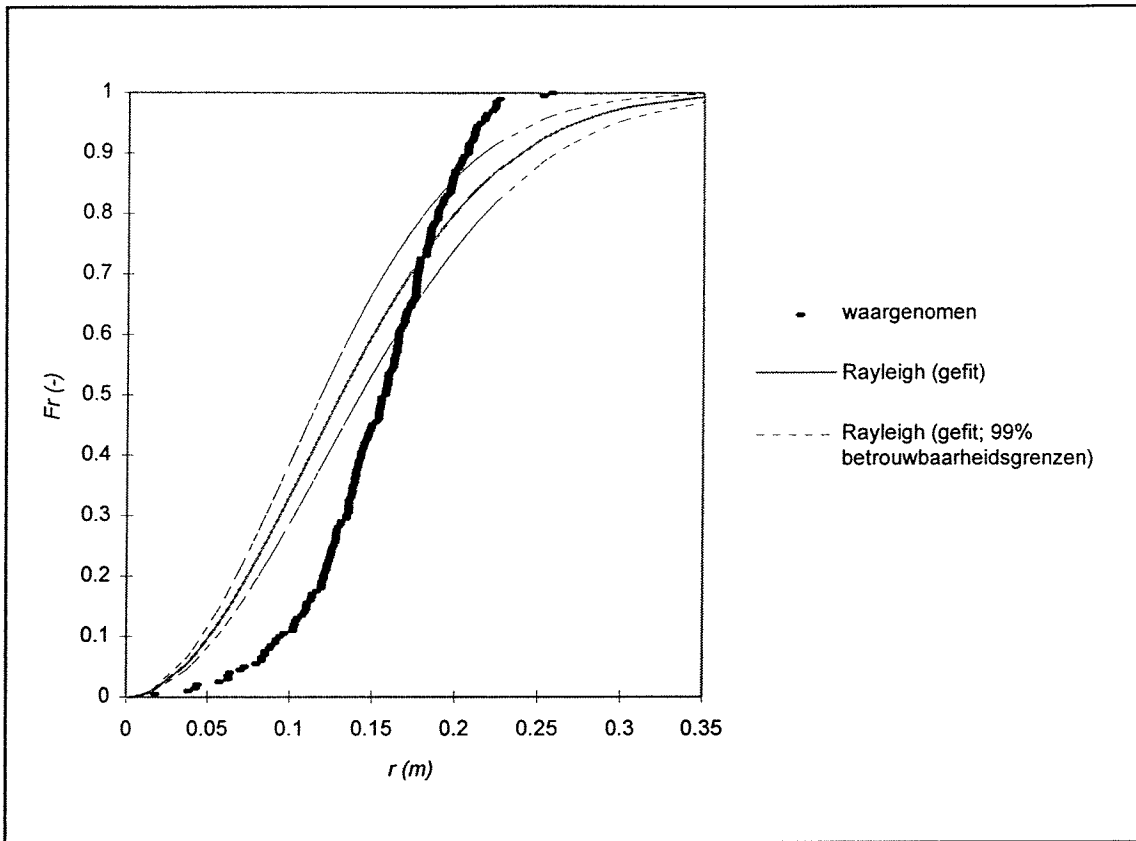
Tabel 10.3 Resultaten van de stralen van individueel gestorte kubussen ($D_{n50} = 0,0516 \text{ m}$)

Uit tabel 10.2 kan worden geconcludeerd dat de gemiddelde stralen van de kleine betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150 \text{ m}$) veel overeenkomsten vertonen met die van de aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,145 \text{ m}$; zie tabel 9.2).

10.3.2 Toetsing van de modelproefresultaten aan de gefitte Rayleigh verdeling

In figuur 10.1, die gelijk is aan bijlage 10.2b, worden voor de uitgevoerde modelproef nr.26 de verdelingsfuncties van de stralen gegeven. Tijdens het uitvoeren van de modelproeven is, evenzo als bij de aluminium kubussen, waargenomen dat de betonnen kubussen na enige tijd gaan roteren. Het optreden van dit zogenaamde Magnus-effect bij de betonnen kubussen lijkt te worden bevestigd door de verdelingsfuncties van de gestorte betonnen kubussen die dezelfde vorm vertonen als die van de aluminium kubussen in hoofdstuk 9.

Op basis van de K.S.-toets, waarvan de resultaten worden weergegeven in de tabellen 10.4 en 10.5, moet worden geconcludeerd dat de waargenomen verdeling niet aansluit op de gefitte Rayleigh verdeling. Desondanks is er, evenals bij de grootste kubussen in hoofdstuk 9 (zie paragraaf 9.3.2), wel aansluiting tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling bij de grote betonnen kubussen. Uit de modelproeven is afgeleid dat de betonnen kubussen gaan roteren bij ongeveer 8-15 maal de karakteristieke afmeting van het stortmateriaal (D_{n50}). Evenals in hoofdstuk 9 zijn bij de resultaten van de modelproeven van de grootste betonnen kubussen (modelproef nr.30 en nr.30bis), als gevolg van de hoge valsnelheid van de kubussen, nog "sporen" van de gefitte Rayleigh verdeling zichtbaar.



Figuur 10.1 Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.26)

	n	$\Delta_{K.S.-toets}$	$\Delta_{max;ondergrens}$	Δ_{max}	$\Delta_{max;bovengrens}$
nr.26	200	0,115 (100)	0,198 (172)	0,250 (217)	0,316 (275)
nr.27	453	0,077 (100)	0,191 (248)	0,228 (296)	0,270 (351)
nr.28	582	0,068 (100)	0,139 (204)	0,173 (254)	0,210 (309)
nr.29	592	0,067 (100)	0,101 (151)	0,136 (203)	0,176 (263)

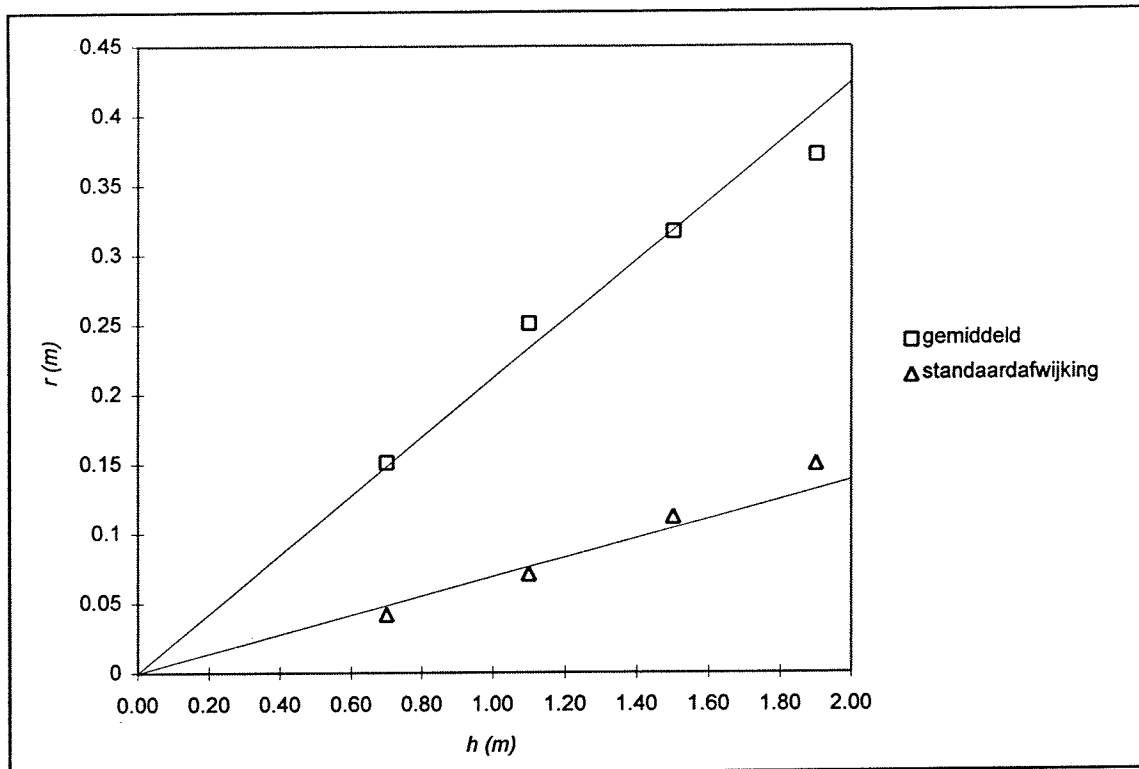
Tabel 10.4 Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling ($D_{n50} = 0,0150$ m)

	n	$\Delta_{K.S.-toets}$	$\Delta_{max;ondergrens}$	Δ_{max}	$\Delta_{max;bovengrens}$
nr.30	66	0,201 (100)	0,127 (63)	0,120 (60)	0,237 (118)
nr.30bis	67	0,199 (100)	0,143 (72)	0,129 (65)	0,255 (128)

Tabel 10.5 Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling ($D_{n50} = 0,0516$ m)

10.3.3 Verband tussen spreiding en waterdiepte

Het verband tussen de spreiding en de waterdiepte wordt, uitgaande van de gemiddelde straal ($r_{\text{gemiddeld}}$) van de gestorte betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m) en de bijbehorende standaardafwijking (σ_r), weergegeven in figuur 10.2.



Figuur 10.2 *Verband tussen spreiding en waterdiepte (betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0150$ m)*

De getrokken lijnen in figuur 10.2 geven, op dezelfde wijze als bij de gestorte aluminium kubussen in hoofdstuk 9, het gefitte verband tussen de spreiding van de gestorte kubussen en de waterdiepte. De uitkomsten onderschrijven de in hoofdstuk 9 getrokken conclusie dat daar waar rotatie van gestorte materialen plaatsvindt, de gemiddelde zijdelingse verplaatsing van het stortmateriaal evenredig toeneemt met de waterdiepte.

10.4 Modelproeven met betonnen kubussen die zijn afgeschoven

De resultaten van modelproef nr.31 waarbij, op dezelfde wijze als in hoofdstuk 9 (zie paragraaf 9.5), 39 maal een rij van 15 betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m) tegelijk en individueel, is afgeschoven worden weergegeven in tabel 10.6. De bovenaanzichten van de stortten worden in bijlage 10.8 gepresenteerd.

Uit tabel 10.6 kan worden afgeleid dat de gemiddelde straal bij de tegelijk afgeschoven betonnen kubussen iets kleiner is dan die bij de individueel afgeschoven betonnen kubussen. Het gemiddelde x-coördinaat van de stort in tabel 10.7 is voor de tegelijk afgeschoven kubussen 72 procent kleiner dan voor de situatie de individueel afgeschoven kubussen.

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
tegelijk	0,252 m	0,373 m	0,486 m	0,744 m	0,365 m	0,158 m
individueel	0,261 m	0,386 m	0,484 m	0,738 m	0,372 m	0,150 m

Tabel 10.6 Resultaten van de stralen van kubussen die zijn afgeschoven

	tegelijk afgeschoven	individueel afgeschoven
gemiddeld x-coördinaat	- 0,023 m	- 0,082 m

Tabel 10.7 Gemiddelde x-coördinaat van de stort

10.5 Valsnelheid en weerstandscoefficiënt

In bijlage 10.9 wordt voor een aantal, in een waterdiepte van 1,90 m, gestorte kubussen de tijdsduur van de valbeweging gegeven. Hieruit is de gemiddelde tijdsduur (t_{gem}) van een valbeweging en de bijbehorende standaardafwijking (σ_t) bepaald. Met de bekende waterdiepte is vervolgens de gemiddelde snelheid van de gestorte kubussen bepaald. Tenslotte is met vergelijking 3.3 ($V_s/A_s = D_{n50}$), $\Delta = 1,4$ of $1,0$, en $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ de gemiddelde weerstandscoefficiënt ($C_{d,\text{gem}}$) berekend. De resultaten worden voor de verschillende afmetingen van gebruikte betonnen kubussen gegeven in tabel 10.8.

	t_{gem}	σ_t	w_{gem}	$C_{d,\text{gem}}$
$D_{n50} = 0,0150 \text{ m}$	3,315 s	0,163 s	0,57 m/s	1,3
$D_{n50} = 0,0516 \text{ m}$	2,092 s	0,116 s	0,91 m/s	1,2

Tabel 10.8 Parameters van de valbeweging

11 Modelproeven met regelmatige, ronde vormen

11.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de modelproeven die zijn uitgevoerd met regelmatige, ronde vormen. Hierbij is gebruikt gemaakt van glazen bollen met een massadichtheid van 2500 kg/m^3 en een equivalente boldiameter D_{bol} gelijk aan $0,0156 \text{ m}$. De modelproeven die zijn uitgevoerd met glazen bollen worden aangeduid als modelproefserie E.

11.2 Overzicht van de uitgevoerde modelproeven

Modelproefserie E bestaat uit een serie van 5 afzonderlijke proeven die wordt onderverdeeld in twee categorieën:

- individueel gestorte bollen
- afgeschoven bollen

Een overzicht van de uitgevoerde modelproeven met de bijbehorende modelproefnummers wordt gegeven in tabel 11.1.

Modelproefserie E	waterdiepte $h = 0,70 \text{ m}$	waterdiepte $h = 1,10 \text{ m}$	waterdiepte h $= 1,50 \text{ m}$	waterdiepte $h=1,90 \text{ m}$
individueel gestort	nr.32	nr.33	nr.34	nr.35
afgeschoven	–	–	–	nr.36

Tabel 11.1 *Uitgevoerde modelproeven met glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156 \text{ m}$)*

Om te voorkomen dat de gestorte glazen bollen op de bodem van de modelproefopstelling zouden gaan rollen, is tijdens het uitvoeren van de modelproeven een stalen raster met vierkante vakjes (met afmetingen overeenkomstig de diameter van de glazen bollen) op de bodem geplaatst.

11.3 Modelproeven met individueel gestorte glazen bollen

11.3.1 Uitkomsten met betrekking tot de stralen van de gestorte bollen

De resultaten worden per uitgevoerde modelproef weergegeven in tabel 11.2. Uitleg over de inhoud van tabel 11.2 wordt gegeven in paragraaf 7.3.1. Een overzicht van de verdelingsfuncties van alle uitgevoerde modelproeven met glazen bollen en van de bovenaanzichten van de storten wordt gegeven in bijlage 11.1. Per modelproef worden de verdelingsfuncties van de stralen van de gestorte bollen en het bovenaanzicht van de stort gepresenteerd in de bijlagen 11.2 tot en met 11.5. Bij de interpretatie van de resultaten is het van belang te onderkennen dat de stromingstoestand van de gestorte bollen, op basis van de beschouwde theorie in hoofdstuk 4, zich bevond in het turbulente, hydraulisch

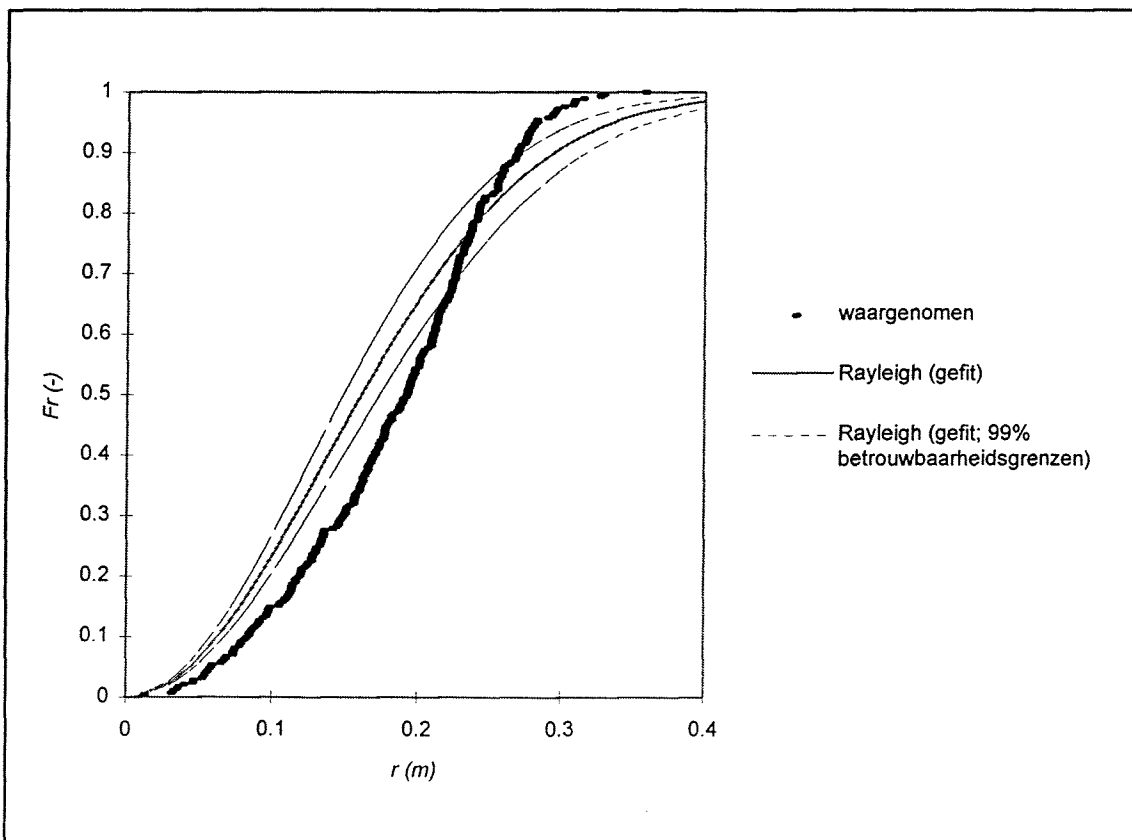
gladde gebied. Dit in tegenstelling tot bij alle andere gebruikte stortmaterialen waar de stromingstoestand zich bevond in het turbulente, hydraulisch ruwe gebied.

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
nr.32	0,131 m	0,191 m	0,231 m	0,356 m	0,181 m	0,069 m
nr.33	0,201 m	0,301 m	0,386 m	0,566 m	0,288 m	0,123 m
nr.34	0,202 m	0,343 m	0,455 m	0,662 m	0,334 m	0,158 m
nr.35	0,241 m	0,435 m	0,601 m	0,869 m	0,423 m	0,217 m

Tabel 11.2 Resultaten van de stralen van individueel gestorte bollen

11.3.2 Toetsing van de modelproefresultaten aan de gefitte Rayleigh verdeling

In figuur 11.1, die gelijk is aan bijlage 11.2a, worden voor de uitgevoerde modelproef nr.32 de verdelingsfuncties van de stralen gegeven.



Figuur 11.1 Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.32)

De opbouw van de verdelingsfuncties vertoont grote overeenkomsten met die van de aluminium en betonnen kubussen. Dit zou er op kunnen duiden dat er ook bij de glazen bollen, ondanks een lage vorm- en oppervlakte ruwheid (zie paragraaf 4.4), sprake is

geweest van roteren van de bollen tijdens de valbeweging. Rotatie zou mogelijkwijs kunnen zijn veroorzaakt doordat de gestorte glazen bollen, vlak na te zijn losgelaten, de trechterwand hebben geraakt. Als gevolg van de vorm en doorzichtige kleur van de gestorte bollen, is rotatie van de bollen niet waargenomen tijdens het uitvoeren van de modelproeven. Wanneer naar de overige verdelingsfuncties van de gestorte bollen wordt gekeken, dan lijkt het of bij toenemende waterdiepte (zie bijlage 11.4b en 11.5b) de waargenomen verdelingsfuncties de gefitte Rayleigh verdelingsfuncties beter gaan benaderen. Dit beeld wordt gedeeltelijk bevestigd door de uitkomsten van de K.S.-toets die worden weergegeven in tabel 11.3.

	n	$\Delta_{K.S.-toets}$	$\Delta_{max;ondergrens}$	Δ_{max}	$\Delta_{max;bovengrens}$
nr.32	284	0,097 (100)	0,120 (124)	0,151 (156)	0,206 (212)
nr.33	358	0,086 (100)	0,109 (127)	0,118 (137)	0,167 (194)
nr.34	444	0,077 (100)	0,070 (91)	0,082 (106)	0,128 (166)
nr.35	579	0,068 (100)	0,067 (99)	0,091 (134)	0,132 (194)

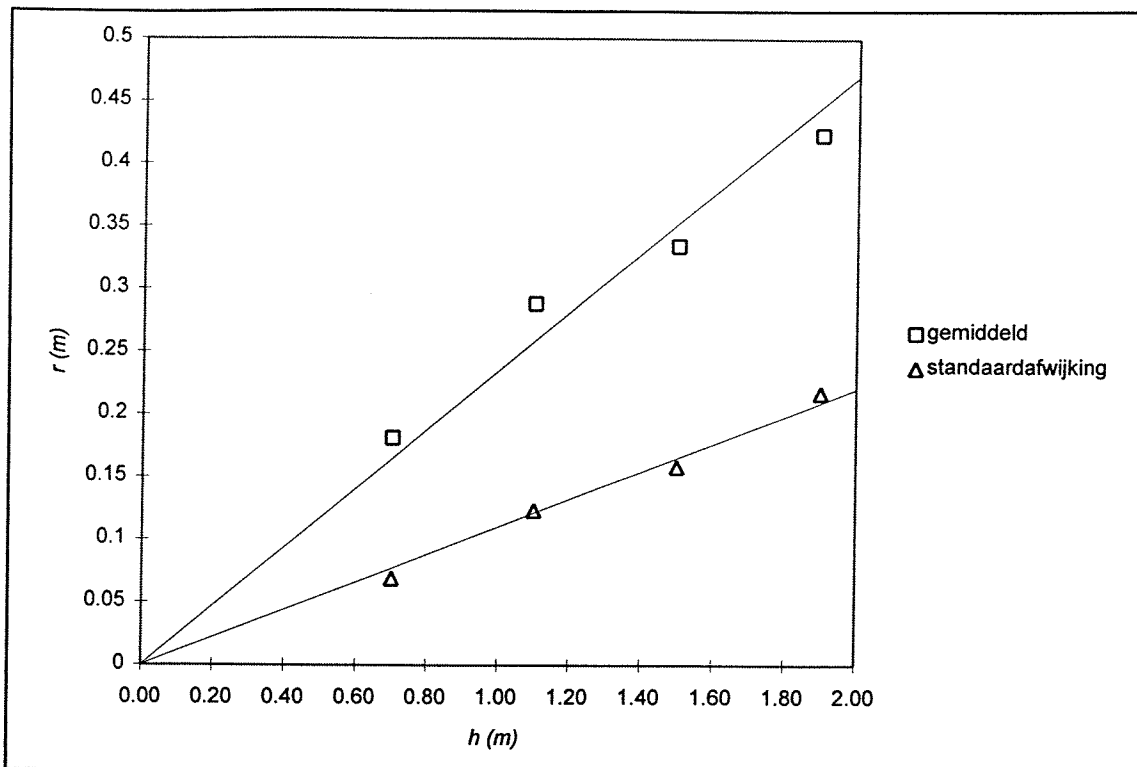
Tabel 11.3 *Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling*

Op basis van de K.S.-toets wordt geconcludeerd dat er geen sprake is van gelijkheid tussen de waargenomen verdeling en de gefitte Rayleigh verdeling bij modelproeven met glazen bollen. Desondanks zijn de maximale verschillen tussen de verschillende waargenomen en gefitte Rayleigh verdelingen een stuk kleiner dan bij de modelproeven met kubussen.

11.3.3 Verband tussen spreiding en waterdiepte

In figuur 11.2 is het verband tussen de gemiddelde straal van de gestorte bollen en de waterdiepte enerzijds en de standaardafwijking van de stralen en de waterdiepte anderzijds, uitgezet.

De resultaten komen overeen met die van de gestorte aluminium en betonnen kubussen, hetgeen het in paragraaf 11.3.2 geuite vermoeden dat ook de gestorte glazen bollen tijdens de valbeweging gaan roteren bevestigt. De in hoofdstuk 9 getrokken conclusie dat de spreiding van gestorte materialen evenredig toeneemt met de waterdiepte in het geval bij gestorte materialen tijdens de valbeweging rotatie optreedt wordt door de modelproefresultaten met de gestorte glazen bollen niet weerlegd.



Figuur 11.2 Verband tussen spreiding en waterdiepte (glazen bollen, $D_{bol} = 0,0156$ m)

11.4 Modelproeven met glazen bollen die zijn afgeschoven

In modelproef nr.36 zijn glazen bollen tegelijk en individueel afgeschoven. In totaal zijn 25 rijen van 15 bollen tegelijk afgeschoven, en 22 rijen van 15 bollen individueel afgeschoven. De resultaten worden weergegeven in de tabellen 11.4 en 11.5. De bovenaanzichten van de stortingen worden gepresenteerd in bijlage 11.6.

Uit tabel 11.4 kan worden afgeleid dat de gemiddelde straal bij de tegelijk afgeschoven glazen bollen kleiner is dan bij de individueel afgeschoven bollen. Ook het gemiddelde x-coördinaat van de stort in tabel 11.5 is voor de stort van de tegelijk afgeschoven bollen kleiner dan die voor de stort van de individueel afgeschoven bollen. De resultaten zijn overeenkomstig met die van de modelproeven met afgeschoven aluminium en betonnen kubussen. Het lijkt mogelijk dat de rotatiebeweging van gestorte materialen kan worden gehinderd door onderlinge beïnvloeding van de valbeweging van de materialen zelf hetgeen leidt tot een vermindering van de spreiding.

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
tegelijk	0,161 m	0,259 m	0,347 m	0,657 m	0,256 m	0,121 m
individueel	0,281 m	0,347 m	0,419 m	0,628 m	0,348 m	0,108 m

Tabel 11.4 Resultaten van de stralen van bollen die zijn afgeschoven

	tegelijk afgeschoven	individueel afgeschoven
gemiddeld x-coördinaat	- 0,167 m	- 0,294 m

Tabel 11.5 Gemiddelde x-coördinaat van de stort

11.5 Valsnelheid en weerstandscoefficiënt

In bijlage 11.7 wordt voor een aantal, in een waterdiepte van 1,90 m, gestorte glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m) de tijdsduur van de valbeweging gegeven. De gemiddelde tijdsduur (t_{gem}) van een valbeweging is gelijk aan 2,47 s. De bijbehorende standaardafwijking (σ_t) is gelijk aan 0,270 s. Met een waterdiepte van 1,90 m kan de gemiddelde valsnelheid (w_{gem}) van de glazen bollen worden bepaald: 0,77 m/s. Met vergelijking 3.3 ($V_s/A_s = 0,67D_{bol}$), $\Delta = 1,5$ en $g = 9,81$ m/s² kan worden berekend dat de gemiddelde weerstandscoefficiënt ($C_{d,gem}$) gelijk is aan 0,5.

12 Modelproeven met regelmatige, platte vormen

12.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op modelproeven die zijn uitgevoerd met regelmatige, platte vormen. Hierbij is gebruik gemaakt van vierkante (0,025 m bij 0,025 m) aluminium plaatjes met een dikte van 0,005 m. Daarnaast is, ter vergelijking, ook een tweetal proeven uitgevoerd met ronde schijfjes. Hierbij is gebruik gemaakt van guldens ($D_{\text{gulden}} = 0,025$ m, dikte = 0,0015 m) en van rijksdaalders ($D_{\text{rijks.}} = 0,029$ m, dikte = 0,002 m). De guldens en rijksdaalders hebben een veel grotere massadichtheid (≈ 7000 kg/m³) dan de aluminium plaatjes (2700 kg/m³), maar de karakteristieke afmetingen zijn vergelijkbaar.

12.2 Overzicht van de uitgevoerde modelproeven

Modelproefserie F bestaat uit een serie van 4 afzonderlijke proeven die wordt onderverdeeld in één categorie:

- individueel gestorte plaatjes en schijfjes

Een overzicht van de uitgevoerde modelproeven met de bijbehorende modelproefnummers wordt gegeven in tabel 12.1.

Modelproefserie F	waterdiepte h = 0,70 m	waterdiepte h = 1,10 m	waterdiepte h = 1,50 m	waterdiepte h=1,90 m
individueel gestort				
aluminium plaatjes	—	—	—	nr.37 nr.38
gulden	—	—	—	nr.39
rijksdaalders	—	—	—	nr.40

Tabel 12.1 *Uitgevoerde modelproeven met platte vormen*

In modelproef nr.37 en nr.38 zijn de aluminium plaatjes door de trechter losgelaten met steeds respectievelijk een punt en een (groot) vlak naar beneden georiënteerd.

12.3 Modelproeven met individueel gestorte platte vormen

12.3.1 Uitkomsten met betrekking tot de stralen van de gestorte platte vormen

De resultaten worden per uitgevoerde modelproef weergegeven in tabel 12.2. Uitleg over de inhoud van tabel 12.2 wordt gegeven in paragraaf 7.3.1. Een overzicht van alle verdelingsfuncties van de stralen van de gestorte platte vormen en van de bovenaanzichten

van de storten wordt gegeven in bijlage 12.1. Per modelproef worden de verdelingsfuncties van de gestorte platte vormen en het bovenaanzicht van de stort gegeven in de bijlagen 12.2 tot en met 12.5.

	$r_{25\%}$	$r_{50\%}$	$r_{75\%}$	$r_{100\%}$	$r_{\text{gemiddeld}}$	σ_r
nr.37	0,028 m	0,050 m	0,081 m	0,169 m	0,061 m	0,040 m
nr.38	0,019 m	0,031 m	0,039 m	0,054 m	0,030 m	0,011 m
nr.39	0,275 m	0,445 m	0,602 m	1,073 m	0,471 m	0,240 m
nr.40	0,247 m	0,571 m	0,893 m	1,434 m	0,607 m	0,371 m

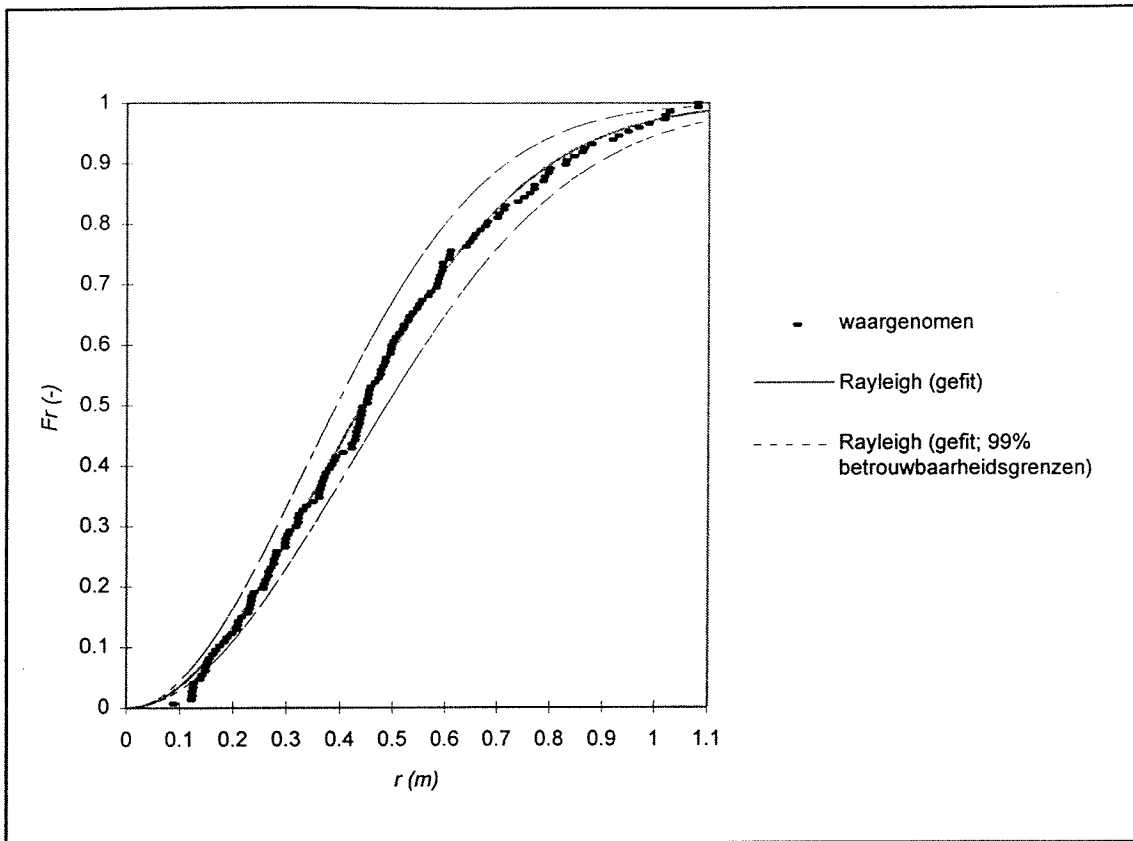
Tabel 12.2 *Resultaten van de stralen van individueel gestorte platte vormen*

Wanneer de gemiddelde stralen (r_{gem}) uit tabel 12.2 met elkaar worden vergeleken, dan valt op dat deze voor de modelproef met guldens een factor 7-15 maal groter is dan bij de modelproeven met de aluminium plaatjes. De gemiddelde straal ($r_{\text{gemiddeld}}$) van de gestorte rijksdaalders is 48 procent groter dan die van de gestorte guldens. Opvallend is ook dat de gemiddelde straal van de plaatjes die zijn losgelaten met een punt naar beneden georiënteerd (modelproef nr.37), ruim twee maal zo groot is als die van de plaatjes die zijn losgelaten met een groot vlak naar beneden georiënteerd (modelproef nr.38). Bij het uitvoeren van de modelproeven is waargenomen dat de plaatjes die op een punt worden losgelaten bij intreding in het water zich eerst richten zodanig dat één van de twee grote vlakken naar beneden georiënteerd is. Dit heeft een beweging tot gevolg waarbij de steen als het ware zijdelings wegschiet. Het gevolg is dat er vanaf het begin van de valbeweging al een additionele zijdelingse verplaatsing heeft plaatsgevonden bovenop de spreiding die nog plaatsvindt tijdens het vallen naar de bodem.

Tijdens het uitvoeren van de modelproeven met guldens en rijksdaalders is waargenomen dat deze tijdens het vallen herhaaldelijk complete cirkels ("loopings") maakten. Hierbij was sprake van rotatie van de guldens en rijksdaalders rondom een punt op enige afstand in het water.

12.3.2 Toetsing van de modelproefresultaten aan de gefitte Rayleigh verdeling

In figuur 12.1, die gelijk is aan bijlage 12.4b, worden de verdelingsfuncties van de stralen van de gestorte guldens gegeven. Duidelijk is hieruit af te lezen dat de waargenomen verdeling zeer goed aansluit bij de gefitte Rayleigh verdeling. Ook de verdelingsfuncties van de gestorte aluminium plaatjes en de gestorte rijksdaalders sluiten zeer goed aan bij de gefitte Rayleigh verdeling. Deze waarnemingen worden bevestigd door de resultaten van de K.S.-toets die worden weergegeven in tabel 12.3.



Figuur 12.1 Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.39)

	n	$\Delta_{K.S.}$ -toets	Δ_{max} ;ondergrens	Δ_{max}	Δ_{max} ;bovengrens
nr.37	30	0,298 (100)	0,172 (58)	0,171 (57)	0,286 (96)
nr.38	16	0,408 (100)	0,329 (81)	0,205 (50)	0,476 (117)
nr.39	147	0,134 (100)	0,101 (75)	0,040 (30)	0,118 (88)
nr.40	39	0,261 (100)	0,202 (77)	0,167 (64)	0,224 (86)

Tabel 12.3 Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling

Op basis van de K.S.-toets wordt geconcludeerd dat er gelijkheid is tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling bij de gestorte regelmatige, platte vormen en dat het ESM een goede beschrijving geeft van het spreidingsgedrag van regelmatige platte vormen in water.

12.3.3 Waarden van de constante c

Op dezelfde wijze als in hoofdstuk 7 (zie paragraaf 7.3.3) wordt, per modelproef, de straal r bepaald die wordt onderschreden door 39,35 % van de stralen van de in die modelproeven gestorte plaatjes, guldens of rijksdaalders. Deze straal ($r_{39,35\%}$) is gelijk aan de traagheidsstraal van het Gaussprofiel. Met vergelijking 3.18 worden vervolgens de waarden van de constante c berekend. Hierbij wordt als karakteristieke afmeting van de

plaatjes, de guldens en de rijksdaalders respectievelijk: 0,025 m, 0,025 m en 0,029 m aangenomen. De waterdiepte is gelijk aan 1,90 m. De resultaten worden weergegeven in tabel 12.4.

type verdelingsfunctie		straal $r_{39,35\%}$	constante c
nr.37	waargenomen	0,041 m	0,187 (80)
	Rayleigh (gefit)	0,051 m	0,235 (100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,039 m	0,179 (76)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,063 m	0,291 (124)
nr.38	waargenomen	0,027 m	0,122 (117)
	Rayleigh (gefit)	0,023 m	0,104 (100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,015 m	0,070 (67)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,030 m	0,138 (133)
nr.39	waargenomen	0,372 m	1,706 (100)
	Rayleigh (gefit)	0,374 m	1,714 (100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,334 m	1,530 (89)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,414 m	1,898 (111)
nr.40	waargenomen	0,424 m	1,807 (84)
	Rayleigh (gefit)	0,503 m	2,142 (100)
	Rayleigh (gefit;ondergrens)	0,398 m	1,696 (79)
	Rayleigh (gefit;bovengrens)	0,608 m	2,588 (121)

Tabel 12.4 *Uitkomsten voor de evenredigheidsconstante c*

Ondanks dat zowel de gestorte guldens als ook de gestorte plaatjes goed worden beschreven door de gefitte Rayleigh verdeling is er, bij gelijke karakteristiek afmeting, een zeer groot verschil in spreiding. Dit zou op basis van het ESM mogelijkwijs kunnen worden verklaard door het verschil in massadichtheid tussen de guldens en de plaatjes. Echter, volgens vergelijking 3.17 leidt een grotere massadichtheid (ρ_s) juist tot een kleinere spreiding van het stortmateriaal. Een grotere spreiding (factor 7-15) bij een grotere massadichtheid (factor 2,6) is dus alleen mogelijk volgens het ESM in geval dit door één van de andere variabelen in vergelijking 3.17 wordt gecompenseerd. Hiervoor in aanmerking komen de liftcoëfficiënt en het getal van Strouhal, waarvan in paragraaf 3.2.1 is aangenomen dat deze ook driedimensionaal mag worden toegepast. Omdat de liftcoëfficiënt bij guldens en de aluminium plaatjes wel zal verschillen maar van dezelfde orde van grootte is, moet worden geconcludeerd dat het getal van Strouhal in grote mate wordt beïnvloed door verschillen in de vorm van stortmaterialen en dat dit tot grote verschillen in de spreiding van stortmaterialen kan leiden.

12.4 Valsnelheid en weerstandscoefficiënt

In bijlage 12.6 wordt voor een aantal, in een waterdiepte van 1,90 m, gestorte aluminium plaatjes ($D_{\text{plaatje}} = 0,025$ m) de tijdsduur van de valbeweging gegeven. Hieruit is de gemiddelde tijdsduur (t_{gem}) van de valbeweging en de bijbehorende standaardafwijking (σ)

berekend: $t_{gem} = 5,97$ s, $\sigma_t = 0,306$ s. Met een waterdiepte van 1,90 m is gemiddelde valsnelheid (w_{gem}) van de gestorte aluminium plaatjes gelijk aan 0,32 m/s. Met vergelijking 3.3 ($V_s/A_s = D_{plaatje}$), $\Delta = 1,7$ en $g = 9,81$ m/s² kan worden berekend dat de gemiddelde weerstandscoefficiënt ($C_{d,gem}$) gelijk is aan 8,1.

13 Toetsing en toepassing van de modelproefresultaten

13.1 Uitkomsten van eerder uitgevoerd onderzoek

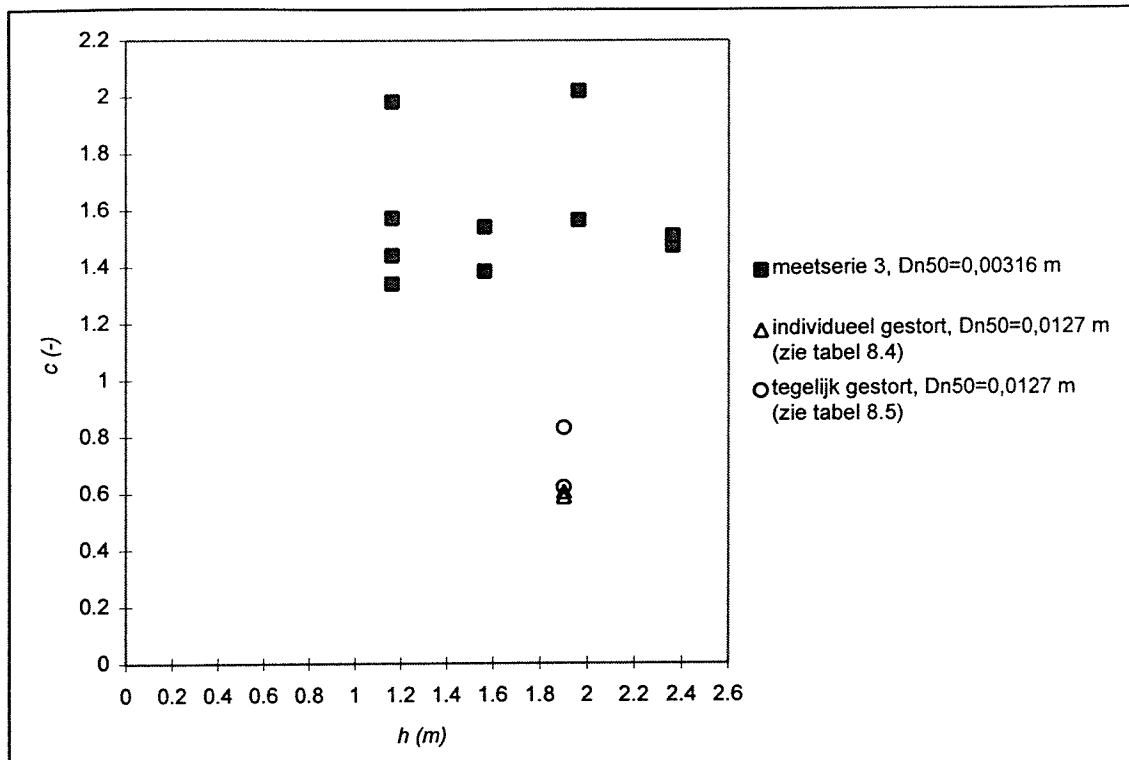
In deze paragraaf worden de resultaten van de modelproeven met breuksteen (hoofdstuk 7) en grind (hoofdstuk 8) vergeleken met de meetgegevens van modelproeven (Q 673) die zijn uitgevoerd in het Waterloopkundig Laboratorium in Delft en waarvan verslag wordt gedaan in lit.[22]. Bij de modelproeven Q 673 zijn, in stilstaand water, stenen gestort vanaf een vaste lijn. De profielen die hierbij op de bodem ontstonden zijn bepaald door stapsgewijs de hoogte van de gemiddelde dwars- en langsdoorsnede van de stort te meten. Er zijn vier series proeven gedaan: twee met grind (meetserie 1 en 3) en twee met breuksteen (meetserie 2 en 4). De proeven zijn uitgevoerd in een viertal waterdiepten.

In lit.[6] zijn de meetgegevens van de modelproeven (Q 673) bewerkt teneinde ze geschikt te maken voor gebruik uitgaande van het Enkele Steen Model. Hierbij is onder andere de oppervlakte (A) en de traagheidsstraal (σ) van de gemiddelde dwarsdoorsnede van de stort bepaald. Ook is aangegeven of de modelproefresultaten, uitgaande van een aangenomen maximale hellingshoek van het stortmateriaal van: $\phi_m = 35^\circ$ (voor grind) en $\phi_m = 43^\circ$ (voor breuksteen), betrekking hebben op het Gaussprofiel of op het driehoeksprofiel.

In deze paragraaf worden de waarden van de constante c (volgens vergelijking 3.18) zoals bepaald uit de meetgegevens die betrekking hebben op het Gaussprofiel van de hierboven beschreven modelproeven (Q 673), en die van dit afstudeeronderzoek, met elkaar vergeleken. Hiertoe zijn in bijlage 13.1 de van toepassing zijnde gegevens uit lit.[6] overgenomen. Achtereenvolgens zijn dit: het experimentnummer (zie lit.[22]), de traagheidsstraal van de gemiddelde dwarsdoorsnede van de stort ($\sigma = \text{sigma}$), de karakteristieke steenafmeting (D_{n50}) en de waterdiepte (h). Met de bekende waarden van σ , D_{n50} en h, is vervolgens, per uitgevoerde proef, de waarde van de constante c volgens vergelijking 3.18 berekend. Deze wordt in bijlage 13.1 in de laatste kolom, cursief, weergegeven.

De waarden van de constante c uit bijlage 13.1 zijn uitgezet in de figuren 13.1 (meetserie 2 en 4, breuksteen) en 13.2 (meetserie 3, grind). Van meetserie 1 zijn geen resultaten beschikbaar die betrekking hebben op het Gaussprofiel. Ook zijn in beide figuren de waargenomen waarden van de constante c zoals bepaald uit de modelproeven van dit afstudeeronderzoek (voor de individueel en tegelijk gestorte stenen) weergegeven. In de legenda van de figuren 13.1 en 13.2 wordt aangegeven uit welke tabellen van dit afstudeerverslag de waargenomen waarden van de constante c afkomstig zijn.

In figuur 13.1 is te zien dat de resultaten van de modelproeven in dit afstudeeronderzoek goed overeen komen met die van de uitgevoerde modelproeven Q 673 voor de gebruikte breuksteensorteringen. De gemiddelde waarde van de constante c uit de modelproeven Q 673 (meetserie 2 en 4) is gelijk aan 0,830, die van de modelproeven uit dit afstudeeronderzoek is voor de individueel gestorte stenen gelijk aan 0,716 (zie paragraaf 7.3.3). Het verschil van 16 procent wordt enerzijds verklaard door de effecten van het wegspringen en afrollen en afschuiven van stenen bij de opbouw van de berg gestorte stenen bij de modelproeven Q 673 en anderzijds doordat er, ondanks dat beide sorteringen "breuksteen" worden genoemd, mogelijk verschillen tussen de karakteristieke



Figuur 13.2 Waarden van de constante c voor grind

Er dient te worden opgemerkt dat, in tegenstelling tot bij de gestorte breuksteensorteringen, er een groot verschil is in de karakteristieke steenafmeting van de gestorte grindsortering bij de modelproeven Q 673 ($D_{n50} = 0,00316$ m) en die bij dit afstudeeronderzoek ($D_{n50} = 0,0127$ m). Op basis van het ESM wordt de invloed van de karakteristieke steenafmeting op de spreiding van het stortmateriaal verdisconteerd volgens vergelijking 3.18 en wordt zodoende de waarde van de constante c onafhankelijk verondersteld van de karakteristieke steenafmeting. Deze onafhankelijkheid is echter tot op heden niet geverifieerd en gelet op de modellering van het ESM, waarbij een driedimensionale toepassing van het getal van Strouhal wordt verondersteld, bestaat er mogelijk een correlatie tussen de waarde van de constante c en de karakteristieke steenafmeting.

13.2 Toepassingen in de praktijk

In deze paragraaf wordt gekeken in hoeverre de uitkomsten van dit afstudeeronderzoek zich verhouden tot een bestaande vergelijking voor de spreiding van steen in water. Hiertoe wordt uitgegaan van vergelijking 13.1, die afkomstig is uit de "Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering" (lit.[5]).

$$y = a\sqrt{h} \quad (13.1)$$

waarin:

- y = totale breedte van het stortprofiel (m)
- a = coëfficiënt (-)
- h = waterdiepte (m)

Voor de coëfficiënt a in vergelijking 13.1 wordt voor hoekig stortmateriaal een waarde gelijk aan 1,9 gebruikt, voor afgerond stortmateriaal geldt: a = 2,1.

De traagheidsstraal is een maat voor de breedte van het stortprofiel in het ESM. Het verband tussen de traagheidsstraal, de karakteristieke steenafmeting en de waterdiepte wordt gegeven door vergelijking 13.2, die gelijk is aan vergelijking 3.18.

$$\sigma = c\sqrt{D_{n50}h} \quad (13.2)$$

waarin: σ = traagheidsstraal van het stortprofiel (m)
 c = constante (-)
 D_{n50} = karakteristieke steenafmeting (m)

Voor de constante c in vergelijking 13.2 wordt, evenals in paragraaf 13.1, een waarde van 0,716 aangenomen. Dit is de gemiddelde waargenomen waarde van de constante c die in paragraaf 7.3.3 is bepaald uit de resultaten van de modelproeven met, individueel gestort, hoekig stortmateriaal (breuksteen). Voor de totale breedte van het stortprofiel volgens het ESM wordt 5,2 maal de waarde van de traagheidsstraal in vergelijking 13.2 aangenomen. Op deze wijze maakt 99 procent van de gestorte stenen deel uit van het stortprofiel. Vergelijking 13.2 wordt nu worden omgeschreven tot vergelijking 13.3.

$$y_{ESM} = 5,2c\sqrt{D_{n50}h} = 3,7232\sqrt{D_{n50}h} \quad (13.3)$$

waarin: y_{ESM} = totale breedte van het stortprofiel volgens het ESM (m)

De totale breedte van het stortprofiel volgens vergelijking 13.3 kan worden geïnterpreteerd als een ondergrens voor de totale breedte van het stortprofiel bij het storten met een schuifstorter. Immers, de aangenomen waarde van de constante c is geldig voor individueel gestorte stenen en bij het storten met een schuifstorter mag extra spreiding worden verwacht omdat de steen veelal tegelijk wordt gestort. In tabel 13.1 wordt een overzicht gegeven van de meest gangbare (breuk)steensorteringen (zie ook lit.[4]).

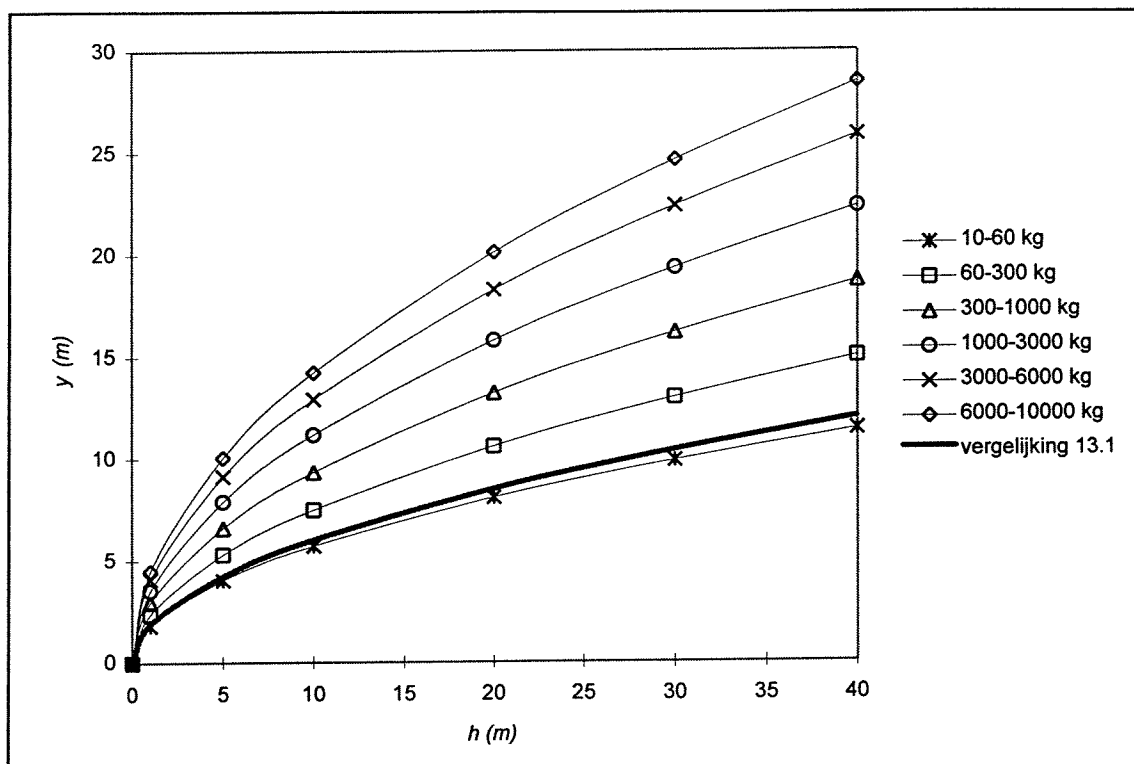
sortering	D_{n50} (gemiddeld)
10 - 60 kg	0,235 m
60 - 300 kg	0,405 m
300 - 1000 kg	0,630 m
1000 - 3000 kg	0,900 m
3000 - 6000 kg	1,205 m
6000 - 10000 kg	1,460 m

Tabel 13.1 Gebruikte breuksteensorteringen

In figuur 13.3 is vergelijking 13.2 uitgezet voor de verschillende sorteringen uit tabel 13.1. Ook is in deze figuur vergelijking 13.1, die niet afhankelijk is van de karakteristieke steenafmeting, uitgezet voor een waarde: a = 1,9. De waterdiepte h is uitgezet tot 40 m omdat dit globaal de maximale waterdiepte is waarop schuifstorters nog worden ingezet.

Wanneer de resultaten uit figuur 13.3 met elkaar worden vergeleken is het opvallend dat bij de sortering 10-60 kg de spreiding van het stortmateriaal volgens vergelijking 13.1

overeenkomstig is met die volgens het ESM. Bij zwaardere sorteringen dan 10-60 kg geeft het ESM als gevolg van de invloed van de karakteristieke steenafmeting in vergelijking 13.2, een veel grotere spreiding dan vergelijking 13.1. Bij de interpretatie van de resultaten dient er rekening mee te worden gehouden dat bij de uitgevoerde modelproeven, het verband tussen de spreiding en de karakteristieke afmeting van het stortmateriaal niet is onderzocht en dat er mogelijk een correlatie is tussen de constante c en de karakteristieke steenafmeting van het stortmateriaal in vergelijking 13.2.



Figuur 13.3 Spreiding van steen volgens het ESM

14 Conclusies en aanbevelingen

14.1 Conclusies

In deze paragraaf worden de belangrijkste conclusies van dit afstudeeronderzoek samengevat. Tussen haakjes is aangegeven uit welke paragrafen van dit afstudeerverslag de conclusies afkomstig zijn.

- Het Enkele Steen Model (ESM) geeft een goede beschrijving van de wijze waarop stenen uit een breuksteen- en grindsortering in water vallen en het stortprofiel van gestorte stenen op de bodem wordt opgebouwd. Hierbij neemt de spreiding van het stortmateriaal toe met de wortel van de waterdiepte. (zie paragraaf 7.3 en 7.5 voor breuksteen, paragraaf 8.3 en 8.5 voor grind). Bij de modelproeven is geen onderzoek gedaan naar het verband tussen de spreiding en de karakteristieke afmeting zoals beschreven in het ESM.
- Bij het tegelijk storten van stenen uit een breuksteen- en grindsortering is meer spreiding te verwachten dan bij individueel gestorte stenen. De toename in spreiding lijkt groter naarmate het stortmateriaal meer afgerond is. Als indicatie van de toename van de spreiding in het stortproces van een schuifstorter als gevolg van het tegelijk storten van materiaal kan 10 tot 40 procent bovenop de door het ESM voorspelde spreiding worden aangenomen. Gelet op de gebrekkige wijze van nabootsen van het tegelijk storten van stenen is verder onderzoek op dit gebied gewenst. (paragraaf 7.4 voor breuksteen, paragraaf 8.4 voor grind).
- De opbouw van het stortprofiel wordt door het Gaussprofiel beschreven tot een dikte van de laag te storten steen van ongeveer 13 maal D_{n50} voor breuksteensorteringen en 9 maal D_{n50} voor grindsorteringen. Hierbij is uitgegaan van de maximale in de modelproeven gemeten hellingshoek van het stortmateriaal breuksteen: $\phi_m = 40,7^\circ$, grind: $\phi_m = 34,5^\circ$. (paragraaf 7.5 voor breuksteen, paragraaf 8.5 voor grind).
- Het ESM geeft geen goede beschrijving van het valgedrag van stortmaterialen wanneer tijdens de valbeweging rotatie van de stortmaterialen optreedt. Als gevolg van rotatie is er geen sprake van een "random walk" van de vallende steen in de tijd (zie paragraaf 3.3.2), hetgeen is aangenomen bij het ESM. Rotatie is waargenomen bij aluminium en betonnen kubussen. (paragraaf 9.3 voor aluminium kubussen, paragraaf 10.3 voor betonnen kubussen).
- De afstand die tijdens de valbeweging van de gestorte kubussen in het water wordt afgelegd voordat rotatie optreedt is 8 tot 15 maal D_{n50} . Na aanvang van rotatie duurt het nog enige tijd voordat de rotatiebeweging resulteert in een daadwerkelijke zijdelingse verplaatsing. (paragraaf 9.3.2 voor aluminium kubussen, paragraaf 10.3.2 voor betonnen kubussen).
- Indien rotatie optreedt, dan neemt de spreiding van het stortmateriaal, voor de bij deze modelproeven gehanteerde omstandigheden, evenredig toe met de waterdiepte. Hierbij is de karakteristieke steenafmeting niet bepalend voor de grootte van de spreiding. (paragraaf 9.3.3 voor aluminium kubussen, paragraaf 10.3.3 voor betonnen kubussen).

- In het geval rotatie optreedt, is de spreiding bij het tegelijk storten en/of afschuiven van het stortmateriaal niet groter dan bij het individueel storten en/of afschuiven. (paragraaf 9.4 en 9.5 voor aluminium kubussen, paragraaf 10.4 voor betonnen kubussen).
- Het ESM geeft een goede beschrijving van de valbeweging van gestorte dunne rechthoekige plaatjes en ronde schijfjes. Het grote verschil in de spreiding bij deze twee gestorte vormen wordt verklaard uit de grote invloed die de vorm van het stortmateriaal heeft op het getal van Strouhal binnen het ESM. (paragraaf 12.3).

14.2 Aanbevelingen

Uit dit afstudeeronderzoek is naar voren gekomen dat het ESM een goede beschrijving geeft van het valgedrag van stortmaterialen zolang aan de voorwaarde wordt voldaan dat de stortmaterialen niet gaan roteren tijdens de valbeweging. Het Magnus-effect dat deze rotatie tot gevolg heeft is niet gemodelleerd binnen het ESM. De exacte omstandigheden die leiden tot rotatie van stortmaterialen zijn tot dusver onbekend. Belangrijke parameters lijken hierbij: de afmetingen van het stortmateriaal (en de verhoudingen tussen deze afmetingen), de massadichtheid van het stortmateriaal en de vorm- en oppervlakteruwheid van het stortmateriaal.

De resultaten van de modelproeven met breuksteen laten zien dat het ESM niet alleen de valbeweging van onregelmatige stortmaterialen als breuksteen en grind op een juiste wijze beschrijft maar ook een goede beschrijving geeft voor regelmatige platte stortmaterialen. Hierbij kan een groot verschil in spreiding optreden.

Om te komen tot een juiste toepassing van het ESM ter beschrijving van de spreiding van steen in water als onderdeel van het stortproces van een schuifstorter is verder onderzoek noodzakelijk. Hiertoe worden vier opdrachten geformuleerd die kunnen dienen als basis voor verder onderzoek:

- 1) Verifieer het verband tussen de spreiding en de karakteristieke afmeting van het stortmateriaal zoals beschreven door het ESM.
- 2) Ontwerp een modelproefopstelling waarin het effect, op de spreiding van steen, van het tegelijk storten en/of afschuiven van steen zoals dat plaatsvindt in het stortproces van schuifstorters kan worden onderzocht en onderzoek door het uitvoeren van modelproeven het belang van dit effect.
- 3) Onderzoek welke omstandigheden bepalend zijn voor het wel of niet optreden van rotatie bij gestorte materialen tijdens de valbeweging in water.
- 4) Onderzoek wat de karakteristieke eigenschappen zijn van in de praktijk gebruikte sorteringen van natuursteen met betrekking tot de afmetingen (en de verhoudingen van de afmetingen) en de vorm- en oppervlakteruwheid, afhankelijk van het soort materiaal (graniet, basalt, enz) en de wijze waarop de natuursteen wordt gewonnen in de steengroeve. Maak op basis van deze eigenschappen, en wellicht na het uitvoeren van modelproeven, een classificatie van de verwachte spreiding voor de verschillende in de praktijk gebruikte sorteringen van natuursteen.

Literatuurlijst

Theoretische literatuur

- [1] Battjes, J.A., Windgolven, collegedictaat b78, T.U.-Delft, aantekeningen bij het college, 1970.
- [2] Battjes, J.A., Vloeistofmechanica, collegedictaat b70, T.U.-Delft, 1990.
- [3] Benjamin, J.R. en Cornell, C.A., Probability statistics and decision theory for Civil Engineers, McGraw-Hill Inc., 1970.
- [4] Bouwdienst Rijkswaterstaat, Handboek uitvoering bodemverdedigingsconstructies van losgestorte granulaire materialen, 1991.
- [5] CUR/RWS, Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering, 1995.
- [6] Cregten, H.J., Het gebruik van probabilistische methoden bij het beoordelen van het stortresultaat van een zijstorter, afstudeerverslag, T.U.-Delft, 1995.
- [7] Manni, R.J. en Vrijling, J.K., Analyse van schaalmodelmetingen naar de zijdelingse verplaatsing van stenen bij een lijnbestorting, T.U.-Delft, 1993.
- [8] Manni, R.J. en Vrijling, J.K., Steenstorten. Voorspelling van de stort bij storten met een schuifstorter, T.U.-Delft, 1995.
- [9] Matsumi, Y., A fundamental study on construction scheme for rubble foundation of deep water breakwater from hopper barges, Proceedings ICCE 1990, Delft.
- [10] Matsumi, Y. en Kimura, A., Hydraulic approach to determining optimum interval of discharge sites of barge in constructing rubble foundation of deep water breakwater, Proceedings ICCE 1992, Venetië.
- [11] Oda, K., Higuchi, T. en Iwata, K., Studies on deposition-mound configurations of rubble discharged from a split-hull barge, Proceedings ICCE 1990, Delft.
- [12] Robinson, J.A. en Crowe, C.T., Engineering Fluid Mechanics (5th edition), Houghton Mifflin Company, 1993.
- [13] Schiereck, G.J., Introduction to bed, bank, and shore protection, collegedictaat f4, T.U. Delft, 1995.
- [14] Streeter, V.L., Fluid Dynamics, McGraw-Hill Inc., 1948.
- [15] Vossers, G, Inleiding tot de theorie van modellen en modelwetten, De Ingenieur (jrg. 78, nr. 48), 1966.
- [16] Vries, M. de, Waterloopkundig onderzoek, collegedictaat b80, T.U. Delft, 1977.

- [17] Vrijling, J.K. en Vrouwenvelder, A.C.W.M., Probabilistisch ontwerpen, collegedictaat b3, T.U.-Delft, 1984.
- [18] Vrijling, J.K., Manni, R.J., T.U.-Delft en De Wilde, D.P., Bouwdienst Rijkswaterstaat, Prediction of the deposition mound of dumped rubble, 1995.
- [19] Waterloopkundig Laboratorium, Waterloopkundig onderzoek, Fysische verschijnselen, schaalregels, kengetallen, curses 1975/1976.
- [20] Zijp, W.I., Handleiding voor statistische toetsen, H.D. Tjeenk Willink, Groningen.

Verslagen van modelproeven

- [21] Rijkswaterstaat, Van den Hoek, K.A., Spreiding van steen bij storten in water, verslag onderzoek in de stroomgoot te Lith, 1985.
- [22] Waterloopkundig Laboratorium, Onderzoek naar het stortresultaat van een steenstorter, verslag modelonderzoek Q 673, deel I en deel II, 1989.
- [23] Waterloopkundig Laboratorium, Stormvloedkering Oosterschelde, Stortmethoden voor drempel en overgangsconstructie, verslag modelonderzoek M 1768, 1983.
- [24] Waterloopkundig Laboratorium, Dumping of stones by means of a side-stone-dumping vessel, report on investigation R 785, 1983.

Figuren

- Figuur 1.1 *Schuifstorter, splijtbak en F.F.P.V. (lit.[5])*
- Figuur 2.1 *Stort- en vaarkoers van een schuifstorter*
- Figuur 2.2 *Storten met behulp van een verankerd verhaal- en/of afmeerponten (lit.[4])*
- Figuur 2.3 *Vrijheidsgraden van invloed zijn op het stortproces*
- Figuur 2.4 *Afwijkingen van de stortkoers door schrikken, verzetten en gieren*
- Figuur 2.5 *Werkingsprincipe van een schuifstorter (lit.[6])*
- Figuur 2.6 *Bresgedrag van breuksteen (schuifsnelheid: 1,10 m/min) (lit.[22])*
- Figuur 2.7 *Bresgedrag van breuksteen (schuifsnelheid: 0,55 m/min) (lit.[22])*
- Figuur 2.8 *Gemiddelde stortkarakteristieken over 5 stortproeven (lit.[22])*
- Figuur 2.9 *Weergave van het valfront (lit.[6])*
- Figuur 2.10 *Afzetgrootte als functie van de waterdiepte (lit.[4])*
- Figuur 2.11 *Schematisatie van de valbeweging van een steen in stromend water*
- Figuur 2.12 *Schematisatie wegspringen van een steen*
- Figuur 3.1 *Potentiaalstroming rond een cirkelcilinder (lit.[2])*
- Figuur 3.2 *Loslating bij niet-gestroomlijnde vormen (lit.[2])*
- Figuur 3.3 *Wervelstraat van Von Karman (lit.[2])*
- Figuur 3.4 *Assenstelsel (lit.[6])*
- Figuur 3.5 *Kansdichtheidsfunctie van steen volgens de normale verdeling (lit.[6])*
- Figuur 3.6 *Stortresultaat bij het storten vanaf een punt (lit.[6])*
- Figuur 3.7 *Gaussprofiel*
- Figuur 3.8 *Overgang van een Gaussprofiel naar een driehoeksprofiel (lit.[6])*
- Figuur 3.9 *Stortresultaat bij het storten vanaf een lijnstuk (lit.[6])*
- Figuur 3.10 *Weergave van het vlak waar vanaf de steen wordt gestort (lit.[6])*
- Figuur 3.11 *Stortresultaat bij het storten vanaf een vlak (lit.[6])*
- Figuur 4.1 *C_d als functie van de vormfactor $S.F.$ en Re (lit.[24])*
- Figuur 4.2 *C_d als functie van Re*
- Figuur 5.1 *Kansdichtheidsring waarbinnen \underline{X} en \underline{Y} juist sommeren tot \underline{r}*
- Figuur 6.1 *Modelproefopstelling*
- Figuur 6.2 *Bovenaanzicht van een stort*
- Figuur 6.3 *Schematisatie van een gestorte steen in een videobeeld*
- Figuur 7.1 *Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.1)*
- Figuur 7.2 *Verband tussen spreiding en waterdiepte (breuksteen, $D_{n50} = 0,0104$ m)*
- Figuur 7.3 *Verband tussen A_{gem} en σ_{gem} (gereduceerd stortprofiel)*
- Figuur 7.4 *Verband tussen A_{gem} en σ_{gem} (volledig stortprofiel)*
- Figuur 8.1 *Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.9)*
- Figuur 8.2 *Verband tussen A_{gem} en σ_{gem} (gereduceerd stortprofiel)*
- Figuur 8.3 *Verband tussen A_{gem} en σ_{gem} (volledig stortprofiel)*
- Figuur 9.1 *Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.12)*
- Figuur 9.2 *Bovenaanzicht van de stort na optreden van rotatie (modelproef nr.18)*
- Figuur 9.3 *Verband tussen spreiding en waterdiepte voor aluminium kubussen*
- Figuur 10.1 *Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.26)*
- Figuur 10.2 *Verband tussen spreiding en waterdiepte (betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0150$ m)*
- Figuur 11.1 *Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.32)*
- Figuur 11.2 *Verband tussen spreiding en waterdiepte (glazen bollen, $D_{bol} = 0,0156$ m)*
- Figuur 12. 1 *Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.39)*
- Figuur 13.1 *Waarden van de constante c voor breuksteen*
- Figuur 13.2 *Waarden van de constante c voor grind*
- Figuur 13.3 *Spreiding van steen volgens het ESM*

Tabellen

Tabel 2.1	<i>Percentage DGPS-metingen dat voldoet aan gegeven nauwkeurigheid</i>
Tabel 6.1	<i>Overzicht van het in de modelproeven gebruikte stortmateriaal</i>
Tabel 7.1	<i>Uitgevoerde modelproeven met breuksteen ($D_{n50} = 0,0104$ m)</i>
Tabel 7.2	<i>Resultaten van de stralen van individueel gestorte stenen</i>
Tabel 7.3	<i>Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling</i>
Tabel 7.4	<i>Uitkomsten voor de evenredigheidsconstante c</i>
Tabel 7.5	<i>Resultaten van de stralen van tegelijk gestorte stenen</i>
Tabel 7.6	<i>Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling</i>
Tabel 7.7	<i>Uitkomsten voor de evenredigheidsconstante c</i>
Tabel 7.8	<i>Maximale gemeten hellingshoeken (ϕ_m)</i>
Tabel 7.9	<i>Verband tussen A_{gem} en σ_{gem}</i>
Tabel 8.1	<i>Uitgevoerde modelproeven met grind ($D_{n50} = 0,0127$ m)</i>
Tabel 8.2	<i>Resultaten van de stralen van individueel gestorte stenen</i>
Tabel 8.3	<i>Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling</i>
Tabel 8.4	<i>Uitkomsten voor de evenredigheidsconstante c</i>
Tabel 8.5	<i>Resultaten van de stralen van tegelijk gestorte stenen</i>
Tabel 8.6	<i>Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling</i>
Tabel 8.7	<i>Uitkomsten voor de evenredigheidsconstante c</i>
Tabel 8.8	<i>Maximale gemeten hellingshoeken (ϕ_m)</i>
Tabel 8.9	<i>Verband tussen A_{gem} en σ_{gem}</i>
Tabel 9.1	<i>Uitgevoerde modelproeven met aluminium kubussen</i>
Tabel 9.2	<i>Resultaten van de stralen van individueel gestorte kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m)</i>
Tabel 9.3	<i>Resultaten van de stralen van individueel gestorte kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m)</i>
Tabel 9.4	<i>Resultaten van de stralen van individueel gestorte kubussen ($D_{n50} = 0,0500$ m)</i>
Tabel 9.5	<i>Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling ($D_{n50} = 0,0145$ m)</i>
Tabel 9.6	<i>Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling ($D_{n50} = 0,0249$ m)</i>
Tabel 9.7	<i>Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling ($D_{n50} = 0,0500$ m)</i>
Tabel 9.8	<i>Resultaten van de stralen van tegelijk gestorte kubussen</i>
Tabel 9.9	<i>Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling</i>
Tabel 9.10	<i>Resultaten van de stralen van kubussen die zijn afgeschoven</i>
Tabel 9.11	<i>Gemiddelde x-coördinaat van de stort</i>
Tabel 9.12	<i>Parameters van de valbeweging</i>
Tabel 10.1	<i>Uitgevoerde modelproeven met betonnen kubussen</i>
Tabel 10.2	<i>Resultaten van de stralen van individueel gestorte kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m)</i>
Tabel 10.3	<i>Resultaten van de stralen van individueel gestorte kubussen ($D_{n50} = 0,0516$ m)</i>
Tabel 10.4	<i>Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling ($D_{n50} = 0,0150$ m)</i>
Tabel 10.5	<i>Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling ($D_{n50} = 0,0516$ m)</i>
Tabel 10.6	<i>Resultaten van de stralen van kubussen die zijn afgeschoven</i>
Tabel 10.7	<i>Gemiddelde x-coördinaat van de stort</i>
Tabel 10.8	<i>Parameters van de valbeweging</i>
Tabel 11.1	<i>Uitgevoerde modelproeven met glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m)</i>
Tabel 11.2	<i>Resultaten van de stralen van individueel gestorte bollen</i>
Tabel 11.3	<i>Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling</i>
Tabel 11.4	<i>Resultaten van de stralen van bollen die zijn afgeschoven</i>
Tabel 11.5	<i>Gemiddelde x-coördinaat van de stort</i>
Tabel 12.1	<i>Uitgevoerde modelproeven met platte vormen</i>
Tabel 12.2	<i>Resultaten van de stralen van individueel gestorte platte vormen</i>
Tabel 12.3	<i>Verschillen tussen de waargenomen en de gefitte Rayleigh verdeling</i>
Tabel 12.4	<i>Uitkomsten voor de evenredigheidsconstante c</i>
Tabel 13.1	<i>Gebruikte breuksteensorteringen</i>

Uitgevoerde modelproeven

nr.1	Breuksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.1bis	Breuksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.2	Breuksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)
nr.3	Breuksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)
nr.4	Breuksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.4bis	Breuksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.5	Breuksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)
nr.5bis	Breuksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)
nr.6	Breuksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, opbouw stortprofiel)
nr.7	Breuksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, opbouw stortprofiel)
nr.8	Breuksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, opbouw stortprofiel)
nr.9	Grindsortering ($D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.9bis	Grindsortering ($D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.10	Grindsortering ($D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)
nr.10bis	Grindsortering ($D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)
nr.11	Grindsortering ($D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, opbouw stortprofiel)
nr.12	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.13	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)
nr.14	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)
nr.15	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.16	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.16bis	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.17	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)
nr.18	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)
nr.19	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.19bis	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.20	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; vlak)
nr.20bis	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; vlak)
nr.21	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; punt)
nr.21bis	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; punt)
nr.22	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0500$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.22bis	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0500$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.23	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)
nr.24	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)
nr.25 deel 1	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk afgeschoven)
nr.25 deel 2	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, individueel afgeschoven)
nr.26	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.27	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)
nr.28	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)
nr.29	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.30	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0516$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.30bis	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0516$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.31 deel 1	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk afgeschoven)
nr.31 deel 2	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,90$ m, individueel afgeschoven)
nr.32	Glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.33	Glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)
nr.34	Glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)
nr.35	Glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.36 deel 1	Glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk afgeschoven)
nr.36 deel 2	Glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,90$ m, individueel afgeschoven)
nr.37	Aluminium plaatjes ($D_{plaatje} = 0,025$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; punt)
nr.38	Aluminium plaatjes ($D_{plaatje} = 0,025$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; vlak)
nr.39	Guldens ($D_{gulden} = 0,025$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.40	Rijksdaalders ($D_{rijks.} = 0,029$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlagen

Bijlage 2.1	Vessel Capability Plots
Bijlage 6.1a	Onregelmatige, hoekige vormen (breuksteensortering)
Bijlage 6.1b	Massaverdeling van het stortmateriaal (breuksteensortering)
Bijlage 6.2a	Onregelmatige, afgeronde vormen (grindsortering)
Bijlage 6.2b	Massaverdeling van het stortmateriaal (grindsortering)
Bijlage 6.3a	Regelmatige, hoekige vormen met scherpe randen (aluminium kubussen)
Bijlage 6.3b	Massaverdeling van het stortmateriaal (aluminium kubussen)
Bijlage 6.4a	Regelmatige, hoekige vormen met scherpe randen (aluminium kubussen)
Bijlage 6.4b	Massaverdeling van het stortmateriaal (aluminium kubussen)
Bijlage 6.5a	Regelmatige hoekige vormen met scherpe randen (aluminium kubussen)
Bijlage 6.5b	Massaverdeling van het stortmateriaal (aluminium kubussen)
Bijlage 6.6a	Regelmatige, hoekige vormen met afgeronde randen (betonnen kubussen)
Bijlage 6.6b	Massaverdeling van het stortmateriaal (betonnen kubussen)
Bijlage 6.7a	Regelmatige, hoekige vormen met afgeronde randen (betonnen kubussen)
Bijlage 6.7b	Massaverdeling van het stortmateriaal (betonnen kubussen)
Bijlage 6.8a	Regelmatige, afgeronde vormen (glazen bollen)
Bijlage 6.8b	Massaverdeling van het stortmateriaal (glazen bollen)
Bijlage 6.9a	Regelmatige, vierkante, platte vormen (aluminium plaatjes)
Bijlage 6.9b	Massaverdeling van het stortmateriaal (aluminium plaatjes)
Bijlage 6.10a	Gebruikte houten plankje bij tegelijk afgeschoven stortmaterialen
Bijlage 6.10b	Gebruikte houten plankje bij individueel afgeschoven stortmaterialen
Bijlage 7.1a	Overzicht van de bovenaanzichten van de storten (modelproeven met breuksteen)
Bijlage 7.1b	Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met breuksteen)
Bijlage 7.2a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.1)
Bijlage 7.2b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.1)
Bijlage 7.3a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.1bis)
Bijlage 7.3b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.1bis)
Bijlage 7.4a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.2)
Bijlage 7.4b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.2)
Bijlage 7.5a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.3)
Bijlage 7.5b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.3)
Bijlage 7.6a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.4)
Bijlage 7.6b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.4)
Bijlage 7.7a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.4bis)
Bijlage 7.7b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.4bis)
Bijlage 7.8a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.5)
Bijlage 7.8b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.5)
Bijlage 7.9a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.5bis)
Bijlage 7.9b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.5bis)
Bijlage 7.10	Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte stenen uit een breuksteensortering (in seconden)
Bijlage 8.1a	Overzicht van de bovenaanzichten van de storten (modelproeven met grind)
Bijlage 8.1b	Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met grind)
Bijlage 8.2a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.9)
Bijlage 8.2b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.9)
Bijlage 8.3a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.9bis)
Bijlage 8.3b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.9bis)
Bijlage 8.4a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.10)
Bijlage 8.4b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.10)
Bijlage 8.5a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.10bis)
Bijlage 8.5b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.10bis)
Bijlage 8.6	Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte stenen uit een grindsortering (in seconden)
Bijlage 9.1a	Overzicht van de bovenaanzichten van de storten (modelproeven met aluminium kubussen)
Bijlage 9.1b	Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met aluminium kubussen)

Bijlage 9.2a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.12)
Bijlage 9.2b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.12)
Bijlage 9.3a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.13)
Bijlage 9.3b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.13)
Bijlage 9.4a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.14)
Bijlage 9.4b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.14)
Bijlage 9.5a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.15)
Bijlage 9.5b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.15)
Bijlage 9.6a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.16)
Bijlage 9.6b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.16)
Bijlage 9.7a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.16bis)
Bijlage 9.7b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.16bis)
Bijlage 9.8a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.17)
Bijlage 9.8b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.17)
Bijlage 9.9a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.18)
Bijlage 9.9b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.18)
Bijlage 9.10a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.19)
Bijlage 9.10b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.19)
Bijlage 9.11a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.19bis)
Bijlage 9.11b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.19bis)
Bijlage 9.12a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.20)
Bijlage 9.12b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.20)
Bijlage 9.13a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.20bis)
Bijlage 9.13b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.20bis)
Bijlage 9.14a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.21)
Bijlage 9.14b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.21)
Bijlage 9.15a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.21bis)
Bijlage 9.15b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.21bis)
Bijlage 9.16a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.22)
Bijlage 9.16b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.22)
Bijlage 9.17a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.22bis)
Bijlage 9.17b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.22bis)
Bijlage 9.18a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.23)
Bijlage 9.18b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.23)
Bijlage 9.19a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.24)
Bijlage 9.19b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.24)
Bijlage 9.20a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.25, deel 1)
Bijlage 9.20b	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.25, deel 2)
Bijlage 9.21	Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte aluminium kubussen (in seconden)
Bijlage 10.1a	Overzicht van de bovenaanzichten van de storten (modelproeven met betonnen kubussen)
Bijlage 10.1b	Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met betonnen kubussen)
Bijlage 10.2a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.26)
Bijlage 10.2b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.26)
Bijlage 10.3a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.27)
Bijlage 10.3b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.27)
Bijlage 10.4a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.28)
Bijlage 10.4b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.28)
Bijlage 10.5a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.29)
Bijlage 10.5b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.29)
Bijlage 10.6a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.30)
Bijlage 10.6b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.30)
Bijlage 10.7a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.30bis)
Bijlage 10.7b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.30bis)
Bijlage 10.8a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.31, deel 1)
Bijlage 10.8b	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.31, deel 2)
Bijlage 10.9	Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte betonnen kubussen (in seconden)
Bijlage 11.1a	Overzicht van de bovenaanzichten van de storten (modelproeven met glazen bollen)
Bijlage 11.1b	Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met glazen bollen)
Bijlage 11.2a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.32)

Bijlage 11.2b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.32)
Bijlage 11.3a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.33)
Bijlage 11.3b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.33)
Bijlage 11.4a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.34)
Bijlage 11.4b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.34)
Bijlage 11.5a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.35)
Bijlage 11.5b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.35)
Bijlage 11.6a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.36, deel 1)
Bijlage 11.6b	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.36, deel 2)
Bijlage 11.7	Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte glazen bollen (in seconden)
Bijlage 12.1a	Overzicht van de bovenaanzichten van de stort (modelproeven met aluminium plaatjes, guldens en rijksdaalders)
Bijlage 12.1b	Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met aluminium plaatjes, guldens en rijksdaalders)
Bijlage 12.2a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.37)
Bijlage 12.2b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.37)
Bijlage 12.3a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.38)
Bijlage 12.3b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.38)
Bijlage 12.4a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.39)
Bijlage 12.4b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.39)
Bijlage 12.5a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.40)
Bijlage 12.5b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.40)
Bijlage 12.6	Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte aluminium plaatjes (in seconden)
Bijlage 13.1	Resultaten afkomstig uit eerder uitgevoerde modelproeven met steensorteringen (zie lit.[6] en lit.[22])

Spreiding van steen in het stortproces van schuifstorters
modelproeven ter verificatie van het Enkele Steen Model

December 1996

G. van Oord

Bijlagen

Spreiding van steen in het stortproces van schuifstorters
modelproeven ter verificatie van het Enkele Steen Model

Datum: December 1996

Student: G. van Oord

Afstudeercommissie: prof. drs. ir. J.K. Vrijling
ir. W. Meermans
ir. P. Visser
ir. M. van der Doef (RWS)

In samenwerking met: Bouwdienst Rijkswaterstaat, Utrecht

Technische Universiteit Delft,
Faculteit Civiele Techniek,
Vakgroep Waterbouwkunde,
Sectie Waterbouwkunde.

G. van Oord
Ambachtstraat 11
3512 ER Utrecht
studienr. 623089

Uitgevoerde modelproeven

nr.1	Breksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.1bis	Breksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.2	Breksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)
nr.3	Breksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)
nr.4	Breksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.4bis	Breksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.5	Breksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)
nr.5bis	Breksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)
nr.6	Breksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, opbouw stortprofiel)
nr.7	Breksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, opbouw stortprofiel)
nr.8	Breksteensortering ($D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, opbouw stortprofiel)
nr.9	Grindsortering ($D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.9bis	Grindsortering ($D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.10	Grindsortering ($D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)
nr.10bis	Grindsortering ($D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)
nr.11	Grindsortering ($D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, opbouw stortprofiel)
nr.12	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.13	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)
nr.14	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)
nr.15	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.16	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.16bis	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.17	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)
nr.18	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)
nr.19	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.19bis	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.20	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; vlak)
nr.20bis	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; vlak)
nr.21	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; punt)
nr.21bis	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; punt)
nr.22	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0500$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.22bis	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0500$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.23	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)
nr.24	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)
nr.25 deel 1	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk afgeschoven)
nr.25 deel 2	Aluminium kubussen ($D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, individueel afgeschoven)
nr.26	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.27	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)
nr.28	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)
nr.29	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.30	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0516$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.30bis	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0516$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.31 deel 1	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk afgeschoven)
nr.31 deel 2	Betonnen kubussen ($D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,90$ m, individueel afgeschoven)
nr.32	Glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)
nr.33	Glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)
nr.34	Glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)
nr.35	Glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.36 deel 1	Glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk afgeschoven)
nr.36 deel 2	Glazen bollen ($D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,90$ m, individueel afgeschoven)
nr.37	Aluminium plaatjes ($D_{plaatje} = 0,025$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; punt)
nr.38	Aluminium plaatjes ($D_{plaatje} = 0,025$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; vlak)
nr.39	Guldens ($D_{gulden} = 0,025$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)
nr.40	Rijksdaalders ($D_{rijks} = 0,029$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlagen

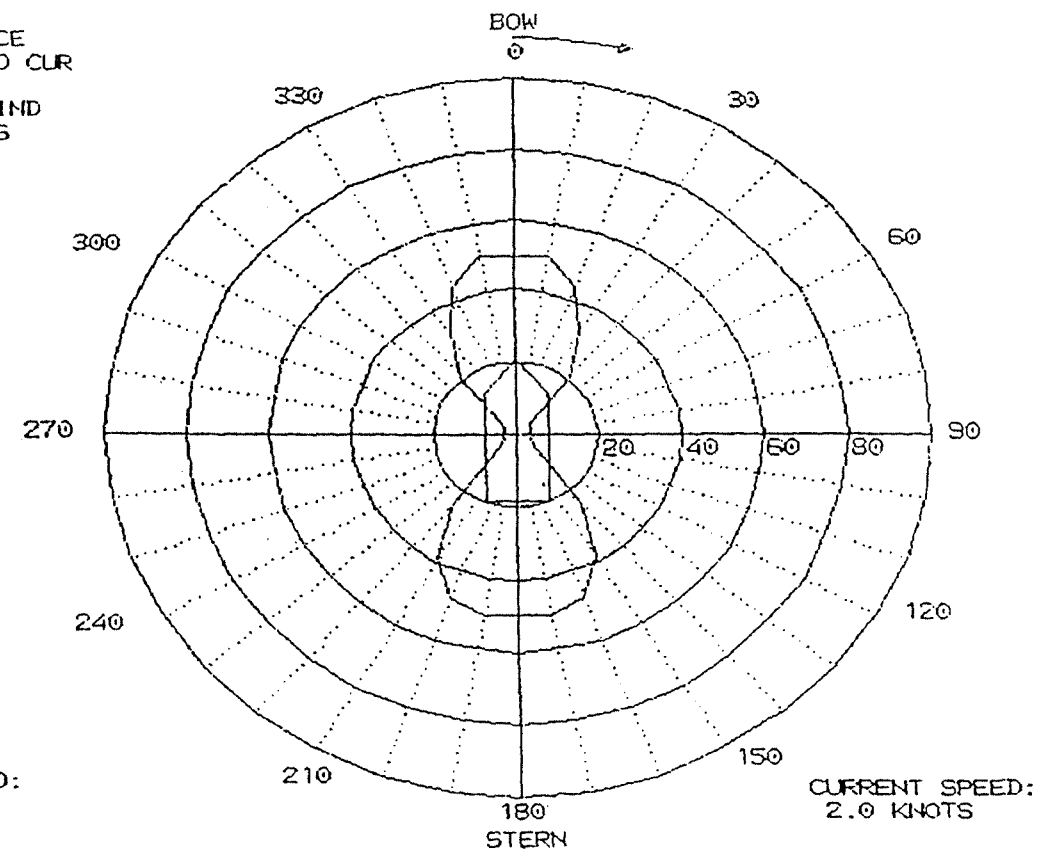
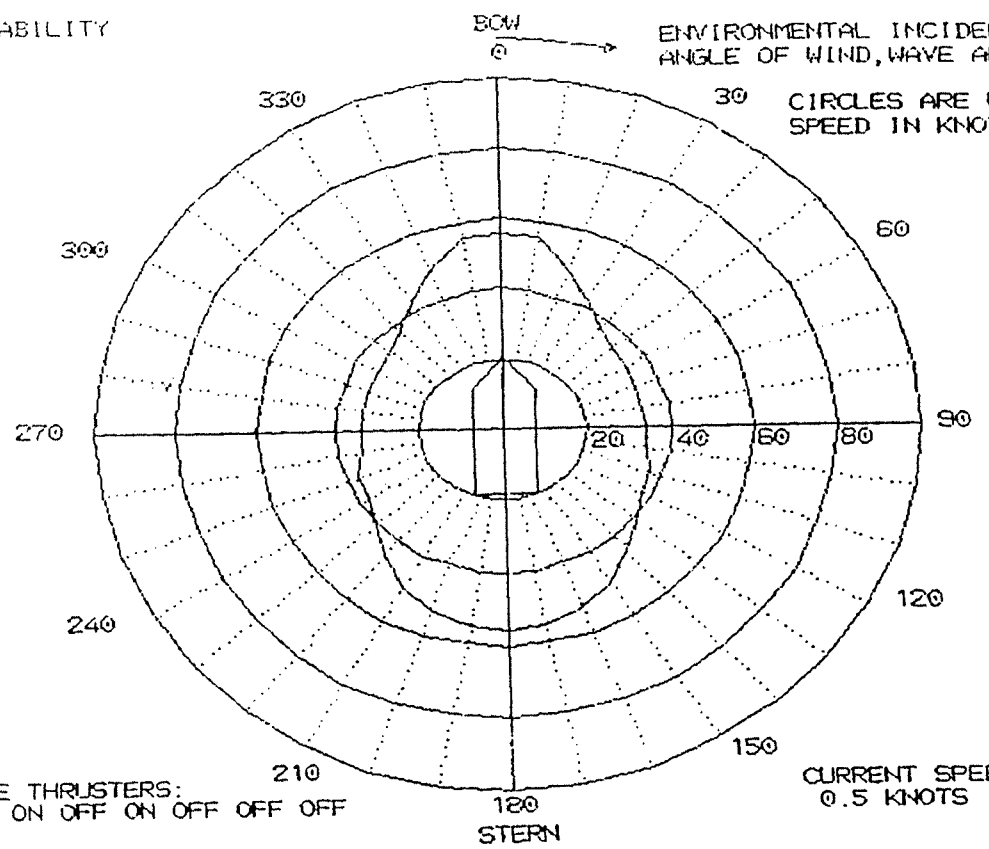
Bijlage 2.1	Vessel Capability Plots
Bijlage 6.1a	Onregelmatige, hoekige vormen (breuksteensortering)
Bijlage 6.1b	Massaverdeling van het stortmateriaal (breuksteensortering)
Bijlage 6.2a	Onregelmatige, afgeronde vormen (grindsortering)
Bijlage 6.2b	Massaverdeling van het stortmateriaal (grindsortering)
Bijlage 6.3a	Regelmatige, hoekige vormen met scherpe randen (aluminium kubussen)
Bijlage 6.3b	Massaverdeling van het stortmateriaal (aluminium kubussen)
Bijlage 6.4a	Regelmatige, hoekige vormen met scherpe randen (aluminium kubussen)
Bijlage 6.4b	Massaverdeling van het stortmateriaal (aluminium kubussen)
Bijlage 6.5a	Regelmatige hoekige vormen met scherpe randen (aluminium kubussen)
Bijlage 6.5b	Massaverdeling van het stortmateriaal (aluminium kubussen)
Bijlage 6.6a	Regelmatige, hoekige vormen met afgeronde randen (betonnen kubussen)
Bijlage 6.6b	Massaverdeling van het stortmateriaal (betonnen kubussen)
Bijlage 6.7a	Regelmatige, hoekige vormen met afgeronde randen (betonnen kubussen)
Bijlage 6.7b	Massaverdeling van het stortmateriaal (betonnen kubussen)
Bijlage 6.8a	Regelmatige, afgeronde vormen (glazen bollen)
Bijlage 6.8b	Massaverdeling van het stortmateriaal (glazen bollen)
Bijlage 6.9a	Regelmatige, vierkante, platte vormen (aluminium plaatjes)
Bijlage 6.9b	Massaverdeling van het stortmateriaal (aluminium plaatjes)
Bijlage 6.10a	Gebruikte houten plankje bij tegelijk afgeschoven stortmaterialen
Bijlage 6.10b	Gebruikte houten plankje bij individueel afgeschoven stortmaterialen
Bijlage 7.1a	Overzicht van de bovenaanzichten van de storten (modelproeven met breuksteen)
Bijlage 7.1b	Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met breuksteen)
Bijlage 7.2a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.1)
Bijlage 7.2b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.1)
Bijlage 7.3a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.1bis)
Bijlage 7.3b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.1bis)
Bijlage 7.4a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.2)
Bijlage 7.4b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.2)
Bijlage 7.5a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.3)
Bijlage 7.5b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.3)
Bijlage 7.6a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.4)
Bijlage 7.6b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.4)
Bijlage 7.7a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.4bis)
Bijlage 7.7b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.4bis)
Bijlage 7.8a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.5)
Bijlage 7.8b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.5)
Bijlage 7.9a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.5bis)
Bijlage 7.9b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.5bis)
Bijlage 7.10	Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte stenen uit een breuksteensortering (in seconden)
Bijlage 8.1a	Overzicht van de bovenaanzichten van de storten (modelproeven met grind)
Bijlage 8.1b	Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met grind)
Bijlage 8.2a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.9)
Bijlage 8.2b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.9)
Bijlage 8.3a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.9bis)
Bijlage 8.3b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.9bis)
Bijlage 8.4a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.10)
Bijlage 8.4b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.10)
Bijlage 8.5a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.10bis)
Bijlage 8.5b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.10bis)
Bijlage 8.6	Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte stenen uit een grindsortering (in seconden)
Bijlage 9.1a	Overzicht van de bovenaanzichten van de storten (modelproeven met aluminium kubussen)
Bijlage 9.1b	Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met aluminium kubussen)
Bijlage 9.2a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.12)

Bijlage 9.2b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.12)
Bijlage 9.3a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.13)
Bijlage 9.3b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.13)
Bijlage 9.4a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.14)
Bijlage 9.4b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.14)
Bijlage 9.5a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.15)
Bijlage 9.5b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.15)
Bijlage 9.6a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.16)
Bijlage 9.6b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.16)
Bijlage 9.7a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.16bis)
Bijlage 9.7b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.16bis)
Bijlage 9.8a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.17)
Bijlage 9.8b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.17)
Bijlage 9.9a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.18)
Bijlage 9.9b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.18)
Bijlage 9.10a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.19)
Bijlage 9.10b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.19)
Bijlage 9.11a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.19bis)
Bijlage 9.11b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.19bis)
Bijlage 9.12a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.20)
Bijlage 9.12b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.20)
Bijlage 9.13a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.20bis)
Bijlage 9.13b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.20bis)
Bijlage 9.14a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.21)
Bijlage 9.14b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.21)
Bijlage 9.15a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.21bis)
Bijlage 9.15b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.21bis)
Bijlage 9.16a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.22)
Bijlage 9.16b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.22)
Bijlage 9.17a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.22bis)
Bijlage 9.17b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.22bis)
Bijlage 9.18a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.23)
Bijlage 9.18b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.23)
Bijlage 9.19a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.24)
Bijlage 9.19b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.24)
Bijlage 9.20a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.25, deel 1)
Bijlage 9.20b	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.25, deel 2)
Bijlage 9.21	Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte aluminium kubussen (in seconden)
Bijlage 10.1a	Overzicht van de bovenaanzichten van de stort (modelproeven met betonnen kubussen)
Bijlage 10.1b	Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met betonnen kubussen)
Bijlage 10.2a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.26)
Bijlage 10.2b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.26)
Bijlage 10.3a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.27)
Bijlage 10.3b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.27)
Bijlage 10.4a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.28)
Bijlage 10.4b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.28)
Bijlage 10.5a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.29)
Bijlage 10.5b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.29)
Bijlage 10.6a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.30)
Bijlage 10.6b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.30)
Bijlage 10.7a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.30bis)
Bijlage 10.7b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.30bis)
Bijlage 10.8a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.31, deel 1)
Bijlage 10.8b	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.31, deel 2)
Bijlage 10.9	Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte betonnen kubussen (in seconden)
Bijlage 11.1a	Overzicht van de bovenaanzichten van de stort (modelproeven met glazen bollen)
Bijlage 11.1b	Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met glazen bollen)
Bijlage 11.2a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.32)
Bijlage 11.2b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.32)

Bijlage 11.3a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.33)
Bijlage 11.3b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.33)
Bijlage 11.4a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.34)
Bijlage 11.4b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.34)
Bijlage 11.5a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.35)
Bijlage 11.5b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.35)
Bijlage 11.6a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.36, deel 1)
Bijlage 11.6b	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.36, deel 2)
Bijlage 11.7	Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte glazen bollen (in seconden)
Bijlage 12.1a	Overzicht van de bovenaanzichten van de storten (modelproeven met aluminium plaatjes, guldens en rijksdaalders)
Bijlage 12.1b	Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met aluminium plaatjes, guldens en rijksdaalders)
Bijlage 12.2a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.37)
Bijlage 12.2b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.37)
Bijlage 12.3a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.38)
Bijlage 12.3b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.38)
Bijlage 12.4a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.39)
Bijlage 12.4b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.39)
Bijlage 12.5a	Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.40)
Bijlage 12.5b	Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.40)
Bijlage 12.6	Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte aluminium plaatjes (in seconden)
Bijlage 13.1	Resultaten afkomstig uit eerder uitgevoerde modelproeven met steensorteringen (zie lit.[6] en lit.[22])

Bijlage 2.1 Vessel Capability Plot

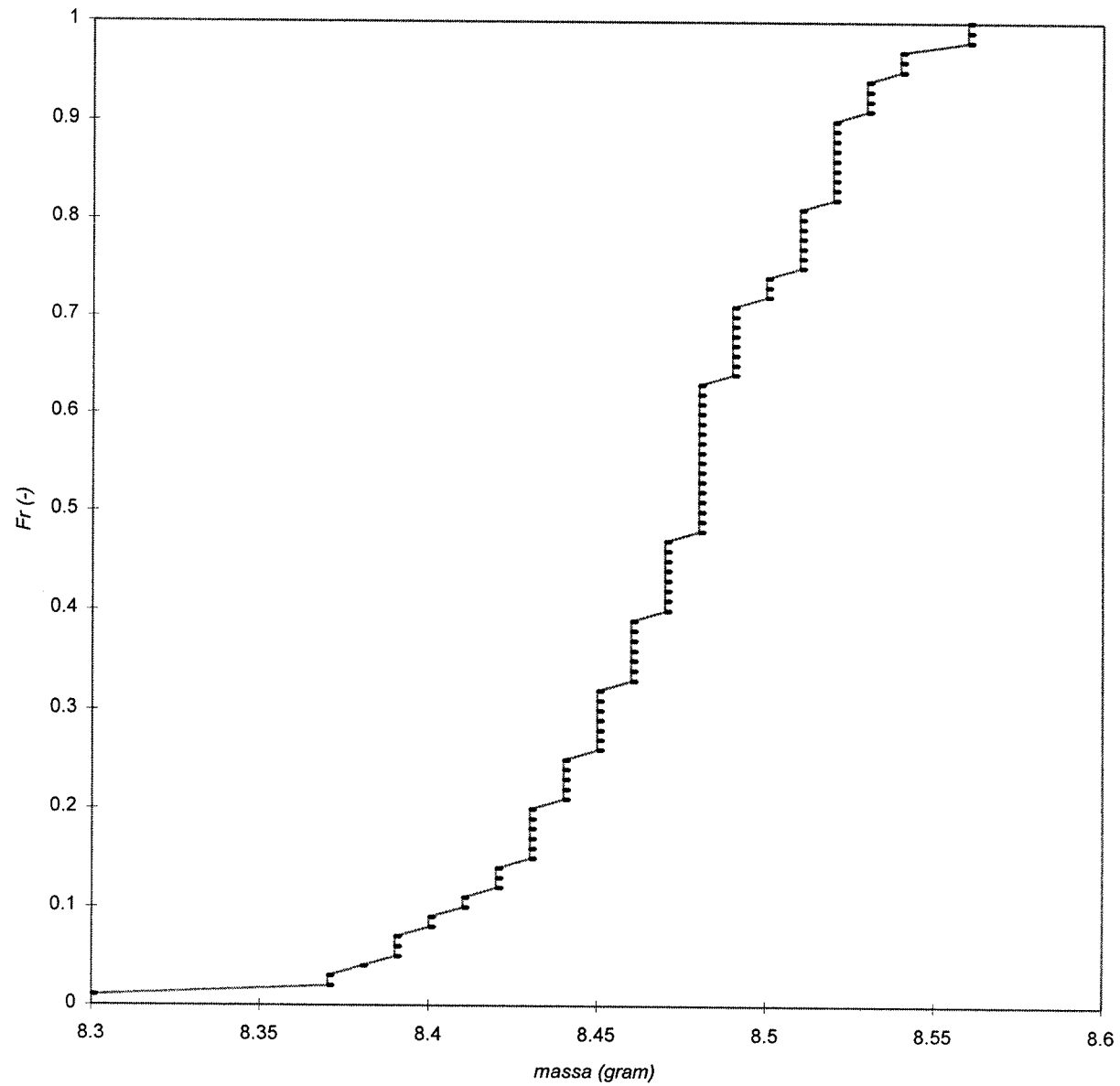
DE CAPABILITY PLOT



Bijlage 6.9a *Regelmatige, vierkante, platte vormen (aluminium plaatjes)*



Bijlage 6.9b Massaverdeling van het stortmateriaal (aluminium plaatjes)



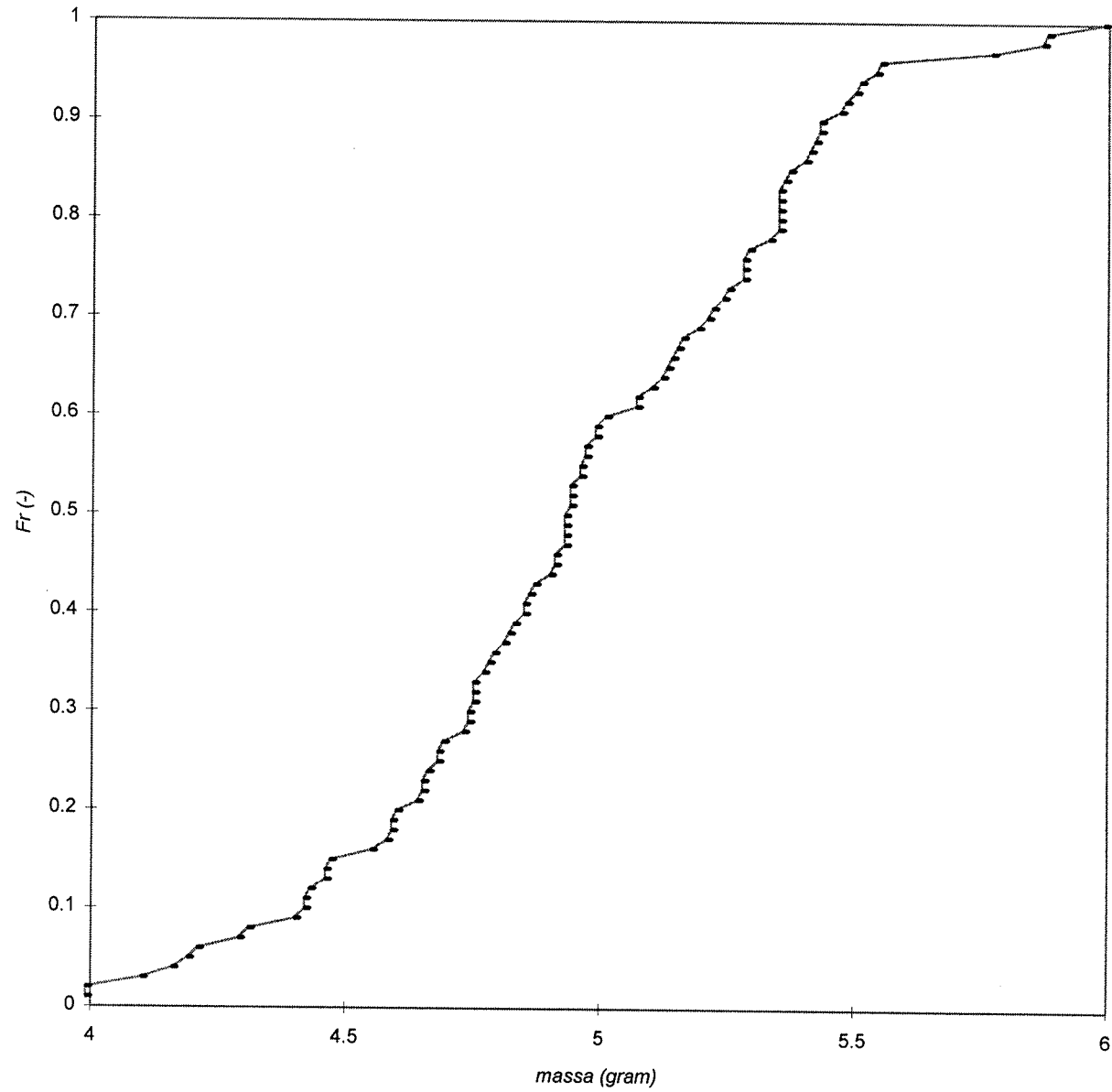
($D_{plaatje} = 0,025\text{ m}$)

Bijlage 6.8a *Regelmatige, afgeronde vormen (glazen bollen)*



(afmetingen zijn afgerond: $D = D_{\text{bol}} = 0,0156 \text{ m}$)

Bijlage 6.8b Massaverdeling van het stortmateriaal (glazen bollen)



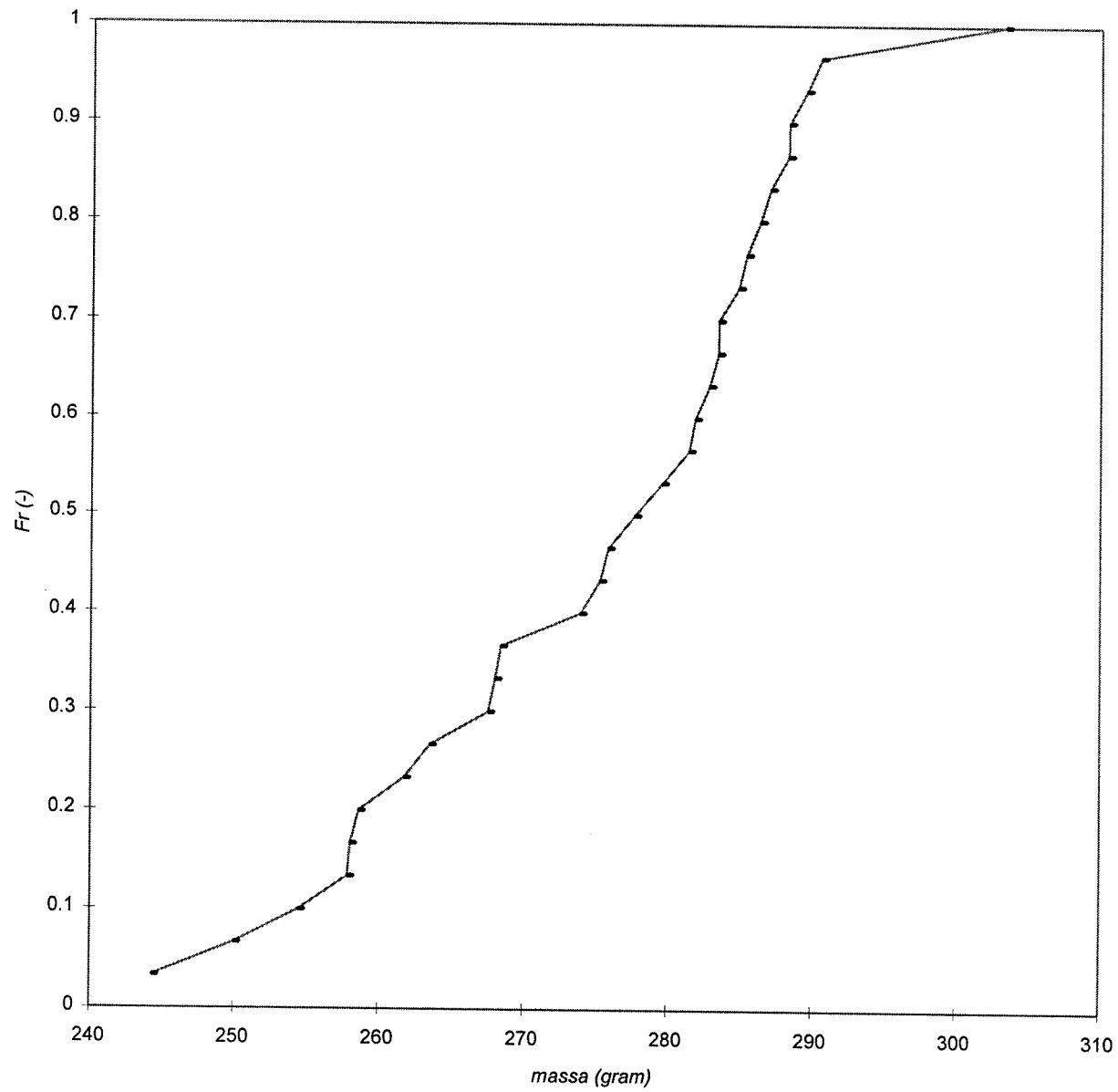
$(D_{bol} = 0,0156 m)$

Bijlage 6.7a *Regelmatige, hoekige vormen met afgeronde randen (betonnen kubussen)*



(afmetingen zijn afgerond: $D = D_{n50} = 0,0516$ m)

Bijlage 6.7b Massaverdeling van het stortmateriaal (betonnen kubussen)

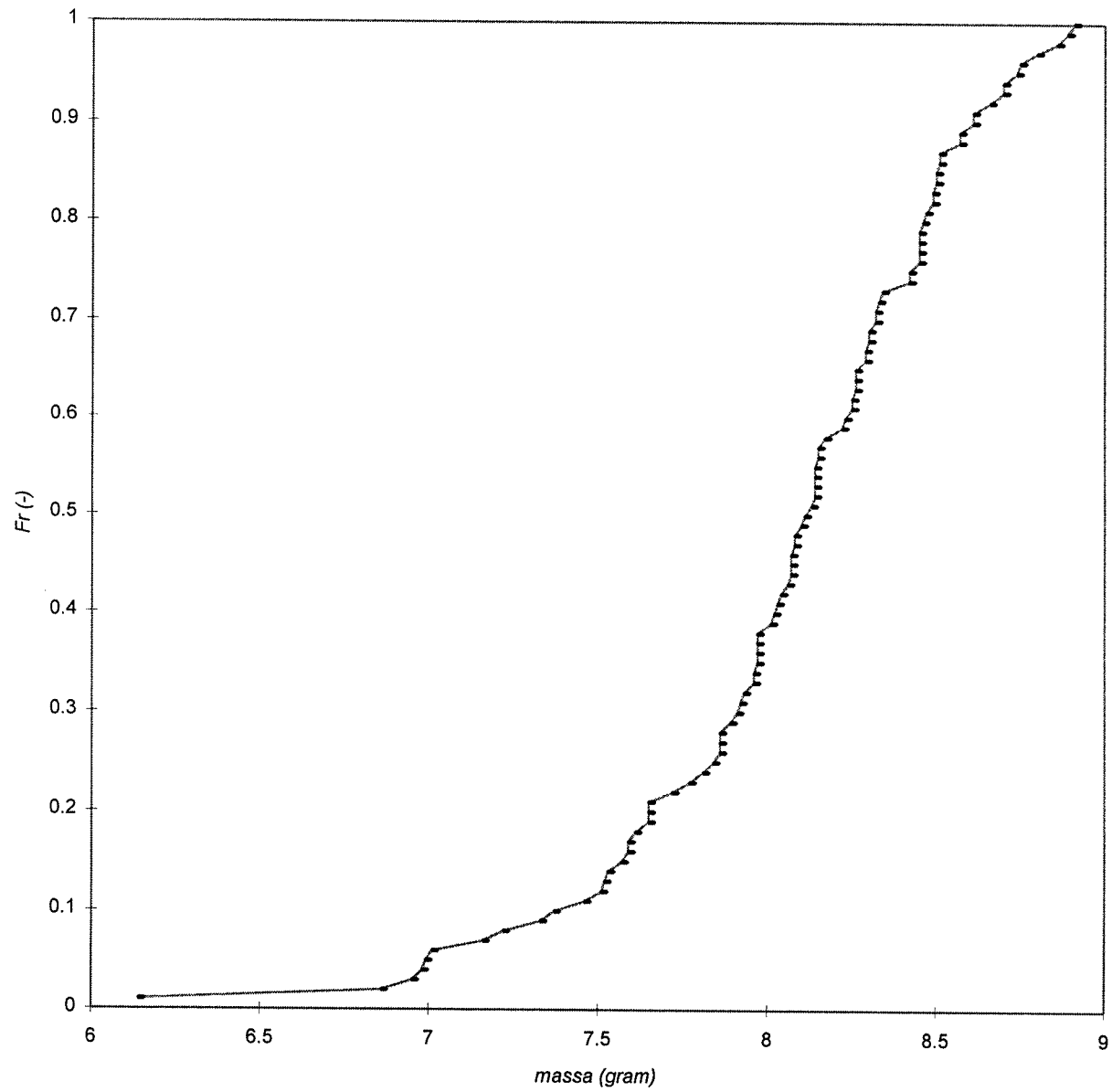


$(D_{n50} = 0,0516 \text{ m})$

Bijlage 6.6a *Regelmatige, hoekige vormen met afgeronde randen (betonnen kubussen)*

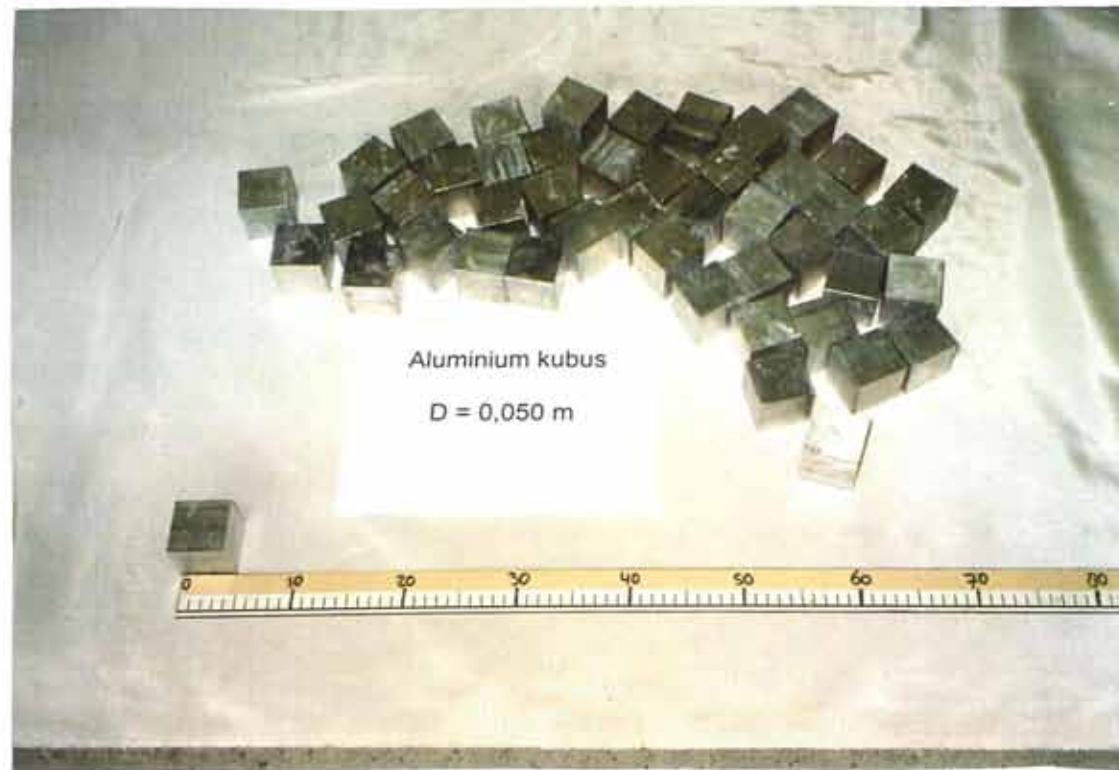


Bijlage 6.6b Massaverdeling van het stortmateriaal (betonnen kubussen)



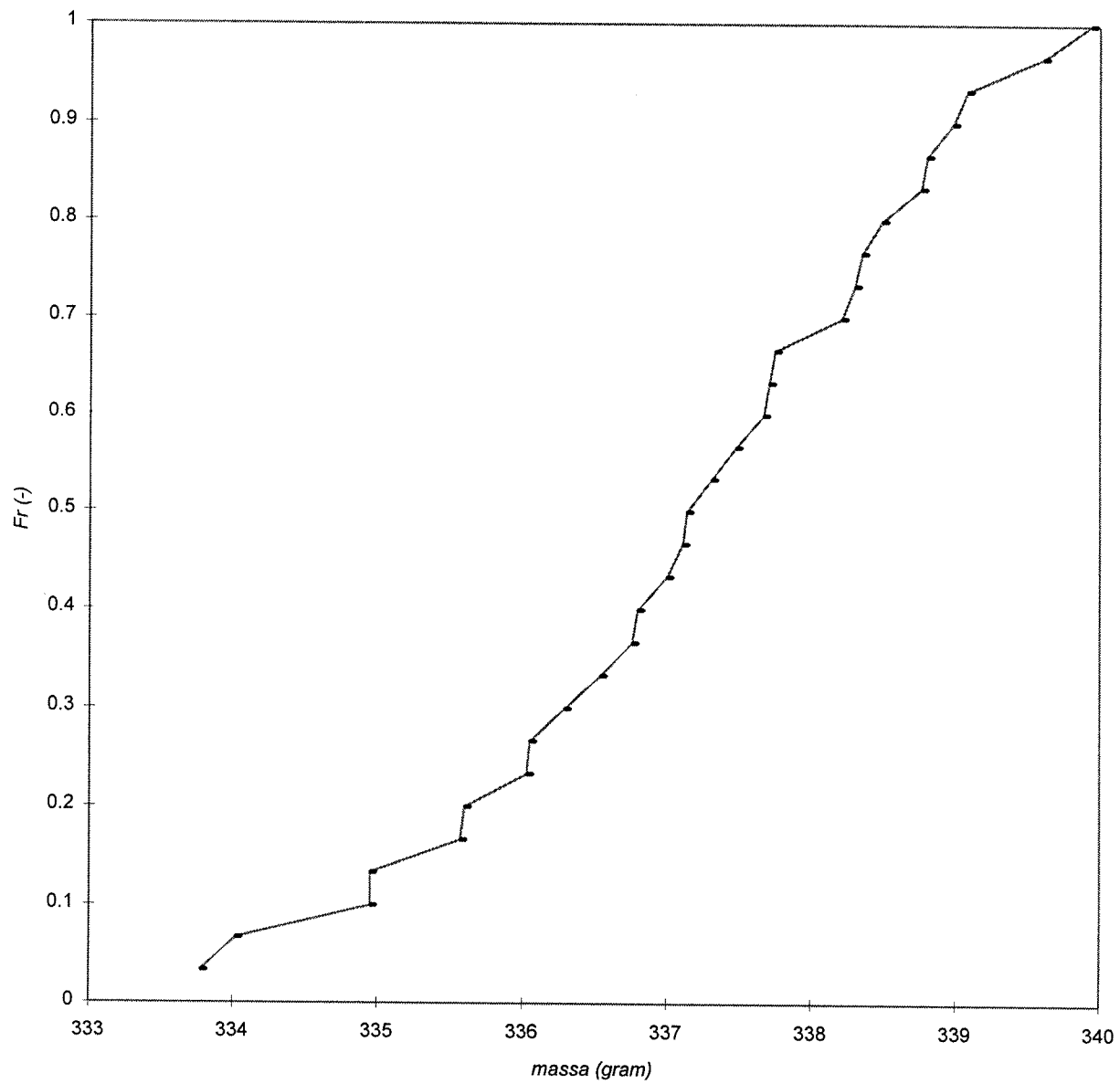
($D_{n50} = 0,0150$ m)

Bijlage 6.5a *Regelmatige, hoekige vormen met scherpe randen (aluminium kubussen)*



(afmetingen zijn afgerond: $D = D_{n50} = 0,0500$ m)

Bijlage 6.5b *Massaverdeling van het stortmateriaal (aluminium kubussen)*



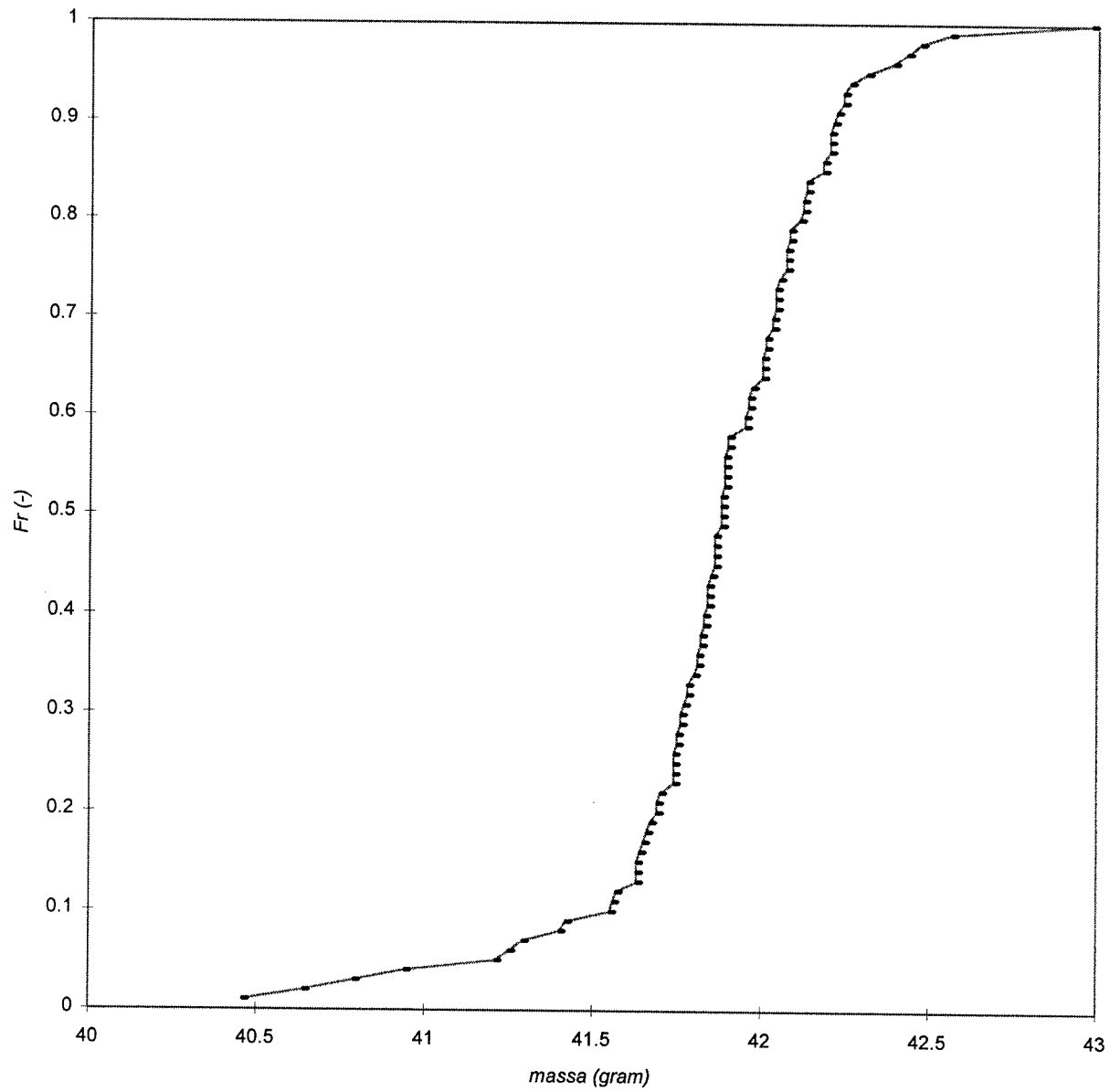
$(D_{n50} = 0,0500 \text{ m})$

Bijlage 6.4a *Regelmatige, hoekige vormen met scherpe randen (aluminium kubussen)*



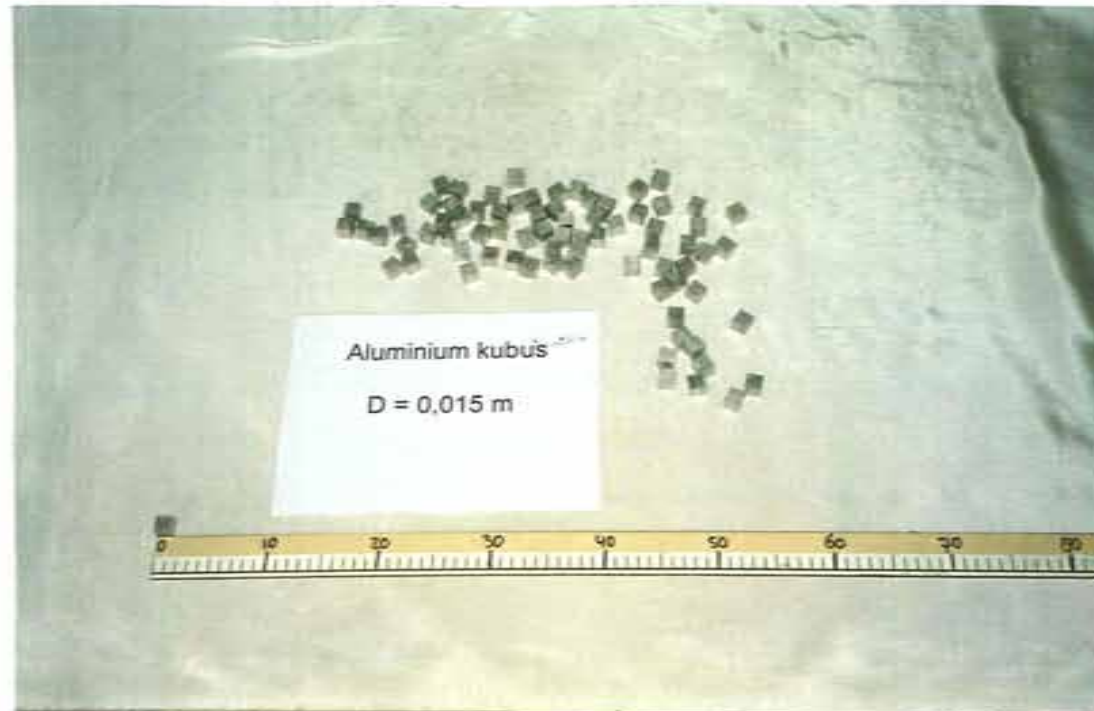
(afmetingen zijn afgerond: $D = D_{n50} = 0,0249 \text{ m}$)

Bijlage 6.4b Massaverdeling van het stortmateriaal (aluminium kubussen)



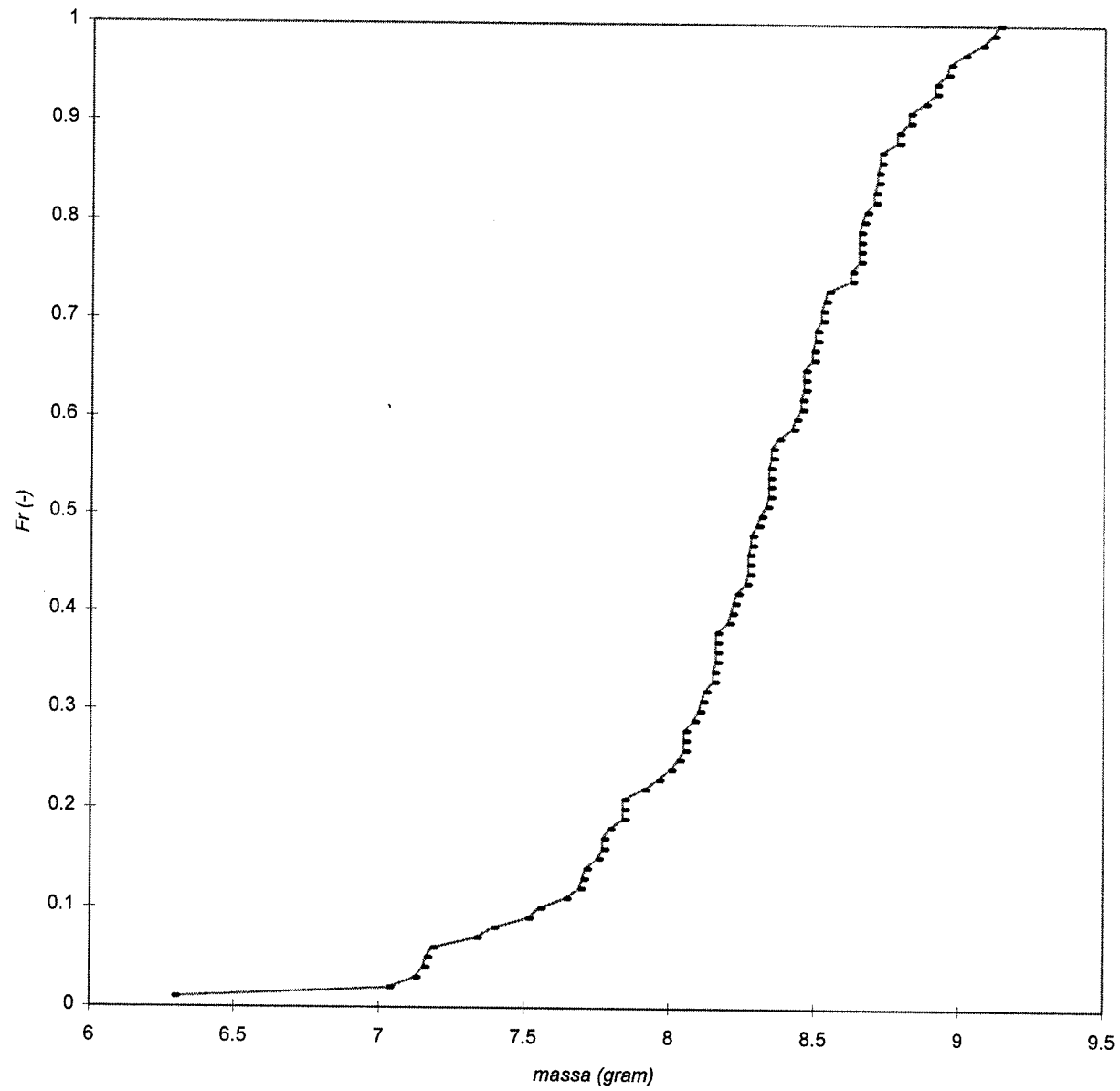
$(D_{n50} = 0,0249 \text{ m})$

Bijlage 6.3a *Regelmatige, hoekige vormen met scherpe randen (aluminium kubussen)*



(afmetingen zijn afgerond: $D = D_{n50} = 0,0145 \text{ m}$)

Bijlage 6.3b Massaverdeling van het stortmateriaal (aluminium kubussen)



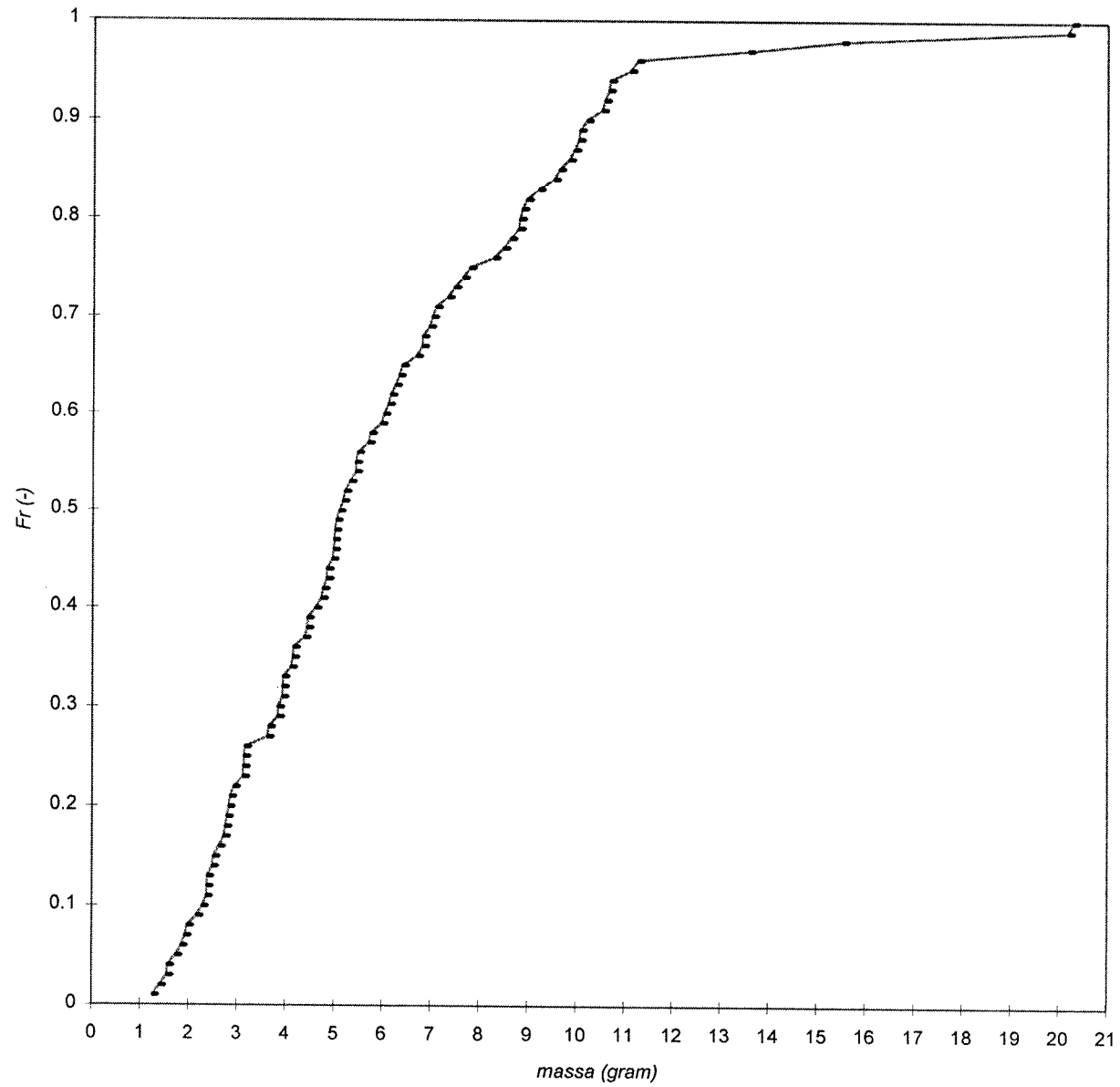
$(D_{n50} = 0,0145 m)$

Bijlage 6.2a Onregelmatige, afgeronde vormen (grindsortering)



(afmetingen zijn afgerond: $D = D_{n50} = 0,0127 \text{ m}$)

Bijlage 6.2b *Massaverdeling van het stortmateriaal (grindsortering)*

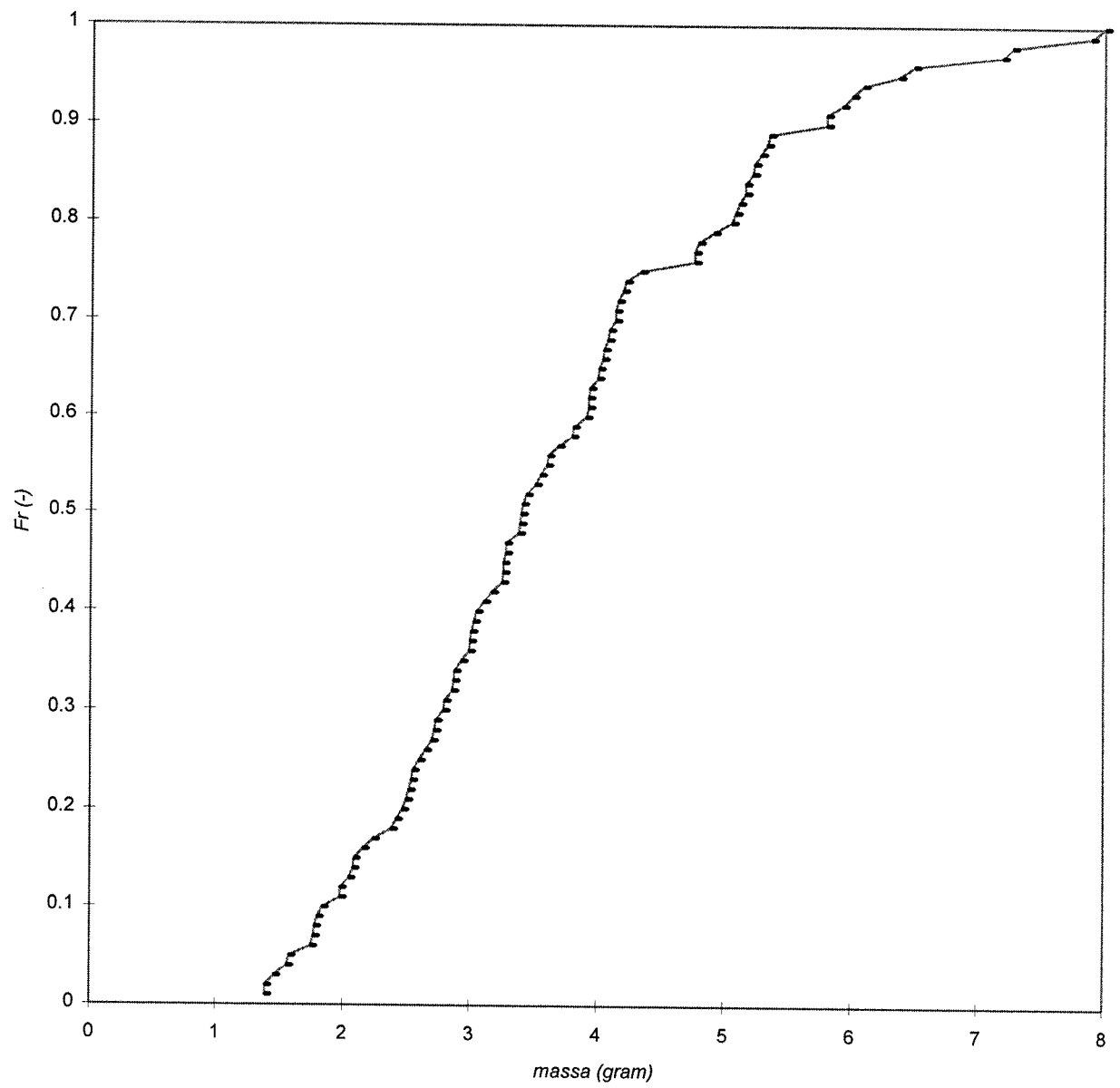


$(D_{n50} = 0,0127 \text{ m})$

Bijlage 6.1a Onregelmatige, hoekige vormen (breuksteensortering)

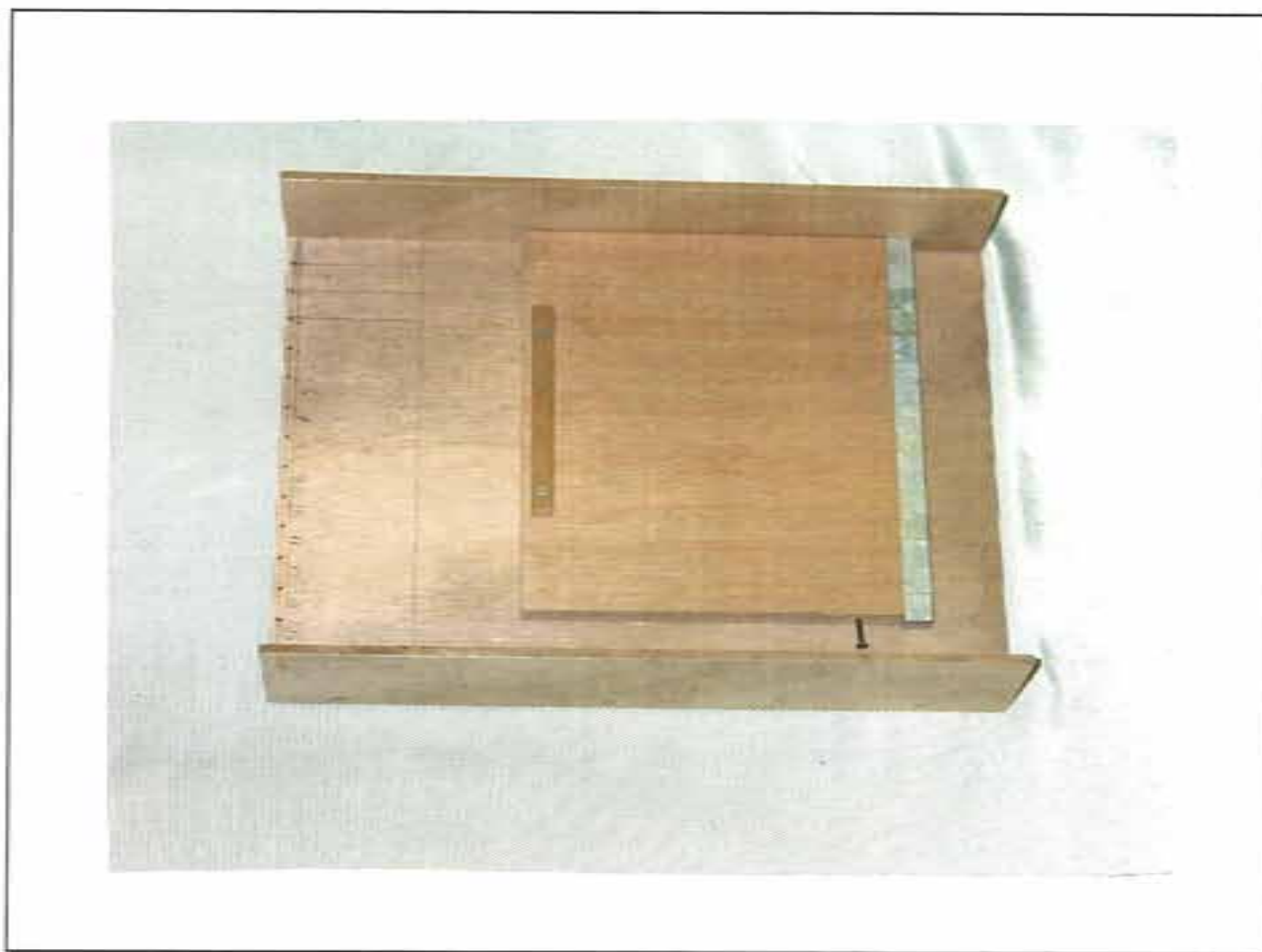


Bijlage 6.1b Massaverdeling van het stortmateriaal (breuksteensortering)

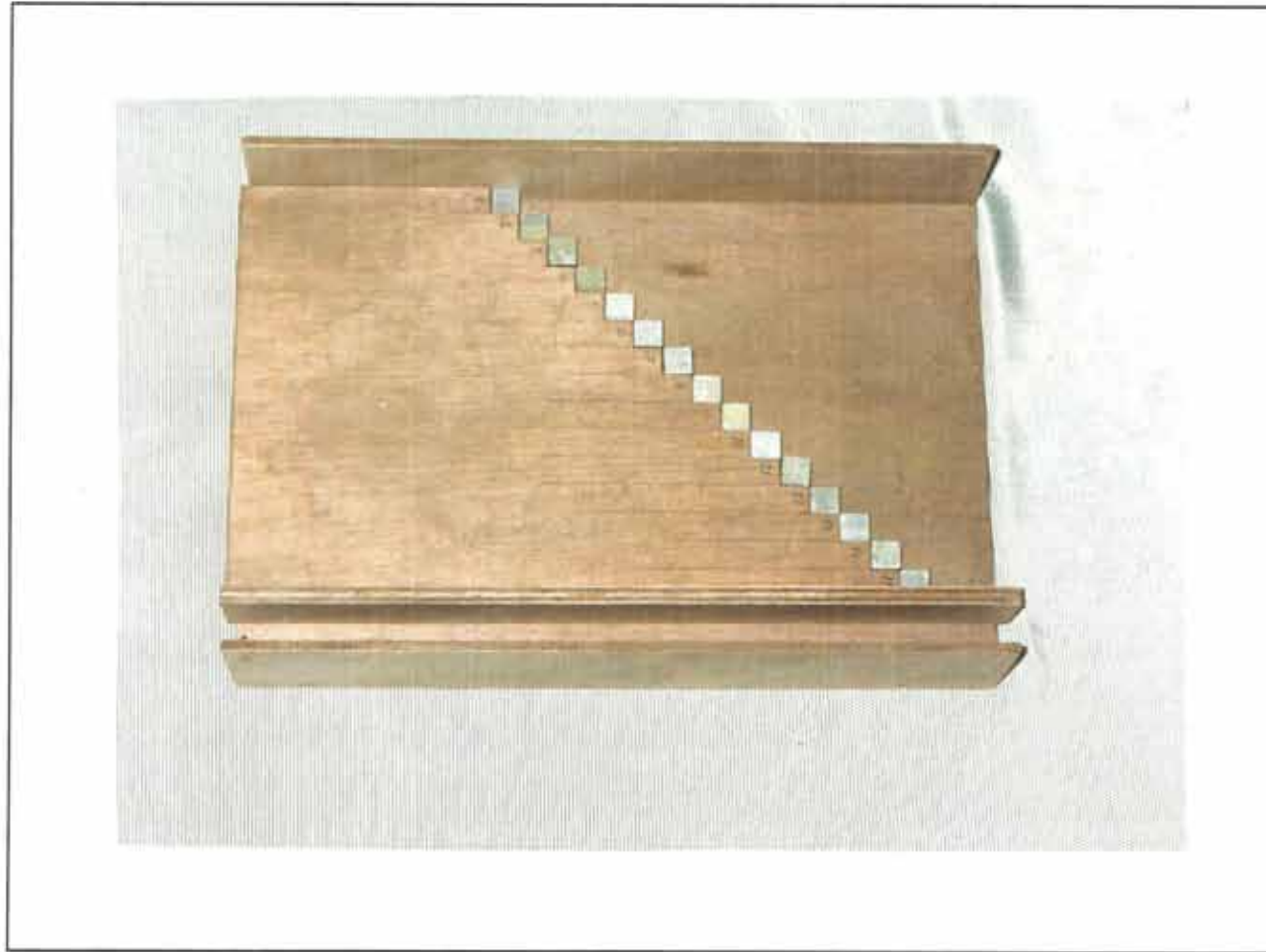


$(D_{n50} = 0,0104 \text{ m})$

Bijlage 6.10a *Gebruikte houten plankje bij tegelijk afgeschoven stortmaterialen*

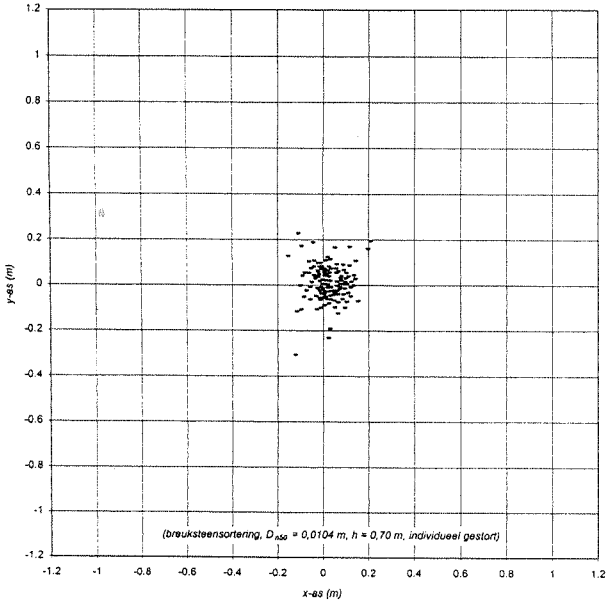


Bijlage 6.10b *Gebruikte houten plankje bij individueel afgeschoven stortmaterialen*

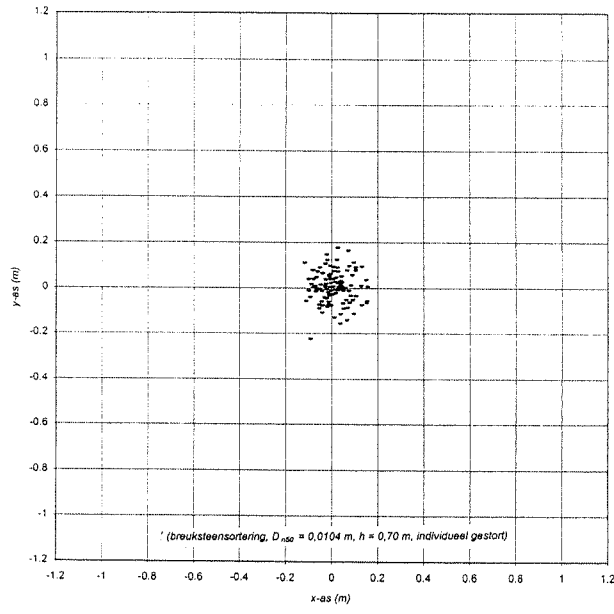


Bijlage 7.1a Overzicht van de bovenaanzichten van de stort (modelproeven met breuksteen)

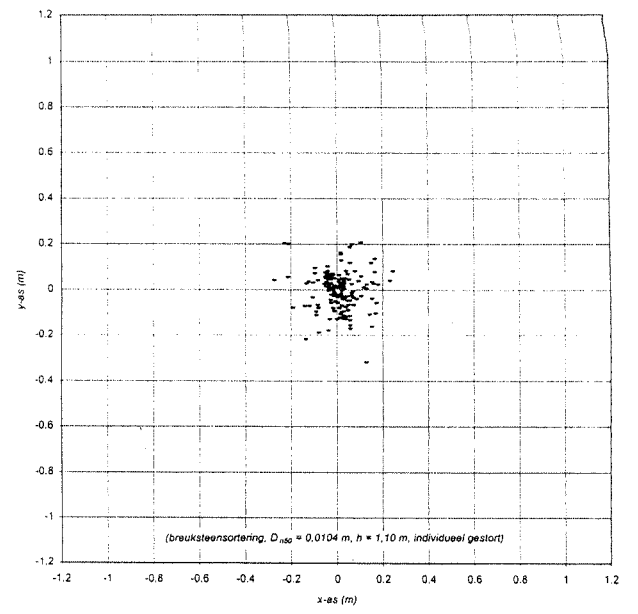
Bijlage 7.2a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.1)



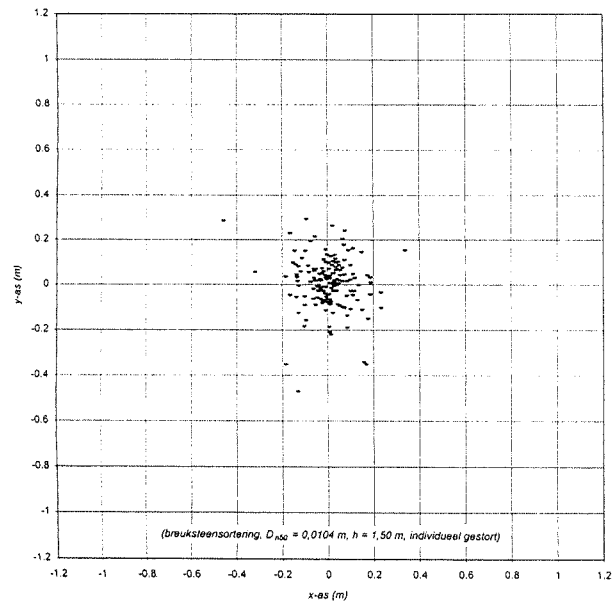
Bijlage 7.3a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.1bis)



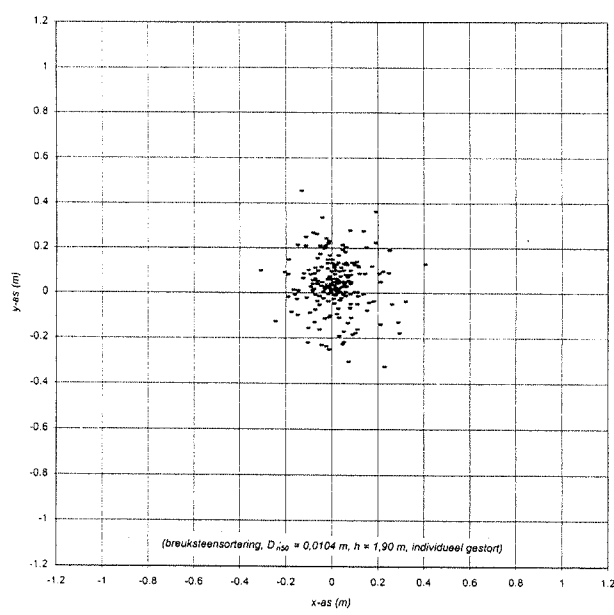
Bijlage 7.4a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.2)



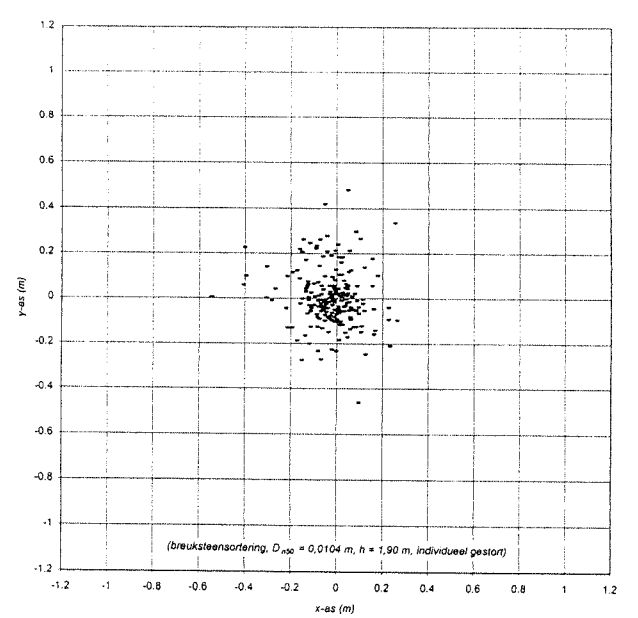
Bijlage 7.5a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.3)



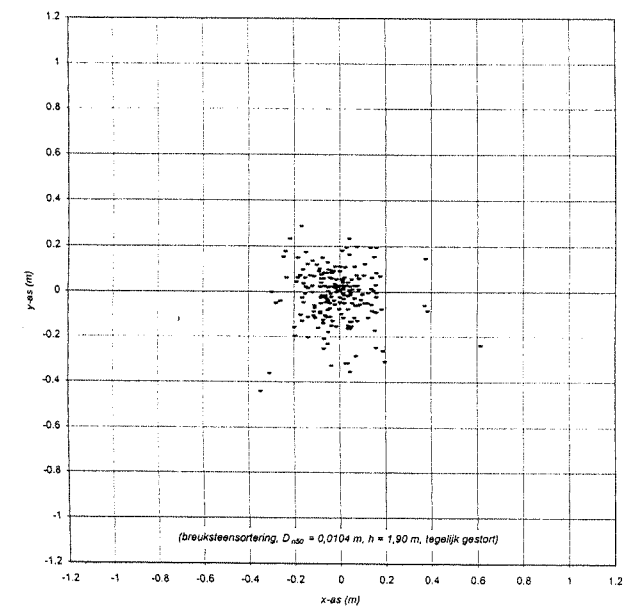
Bijlage 7.6a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.4)



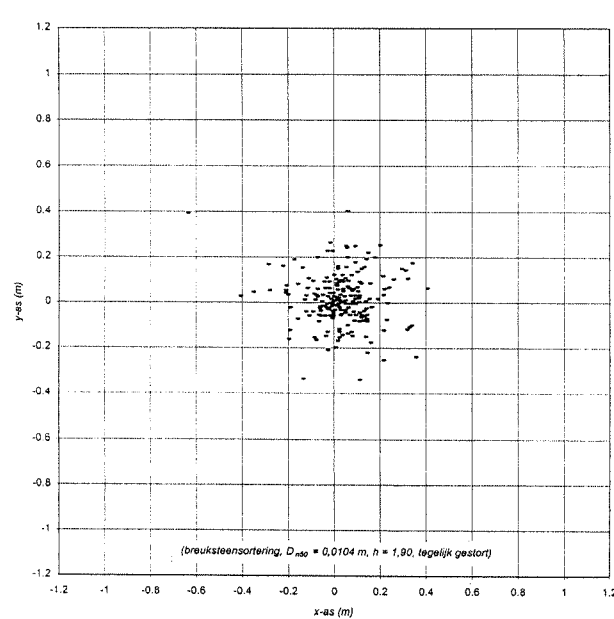
Bijlage 7.7a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.4bis)



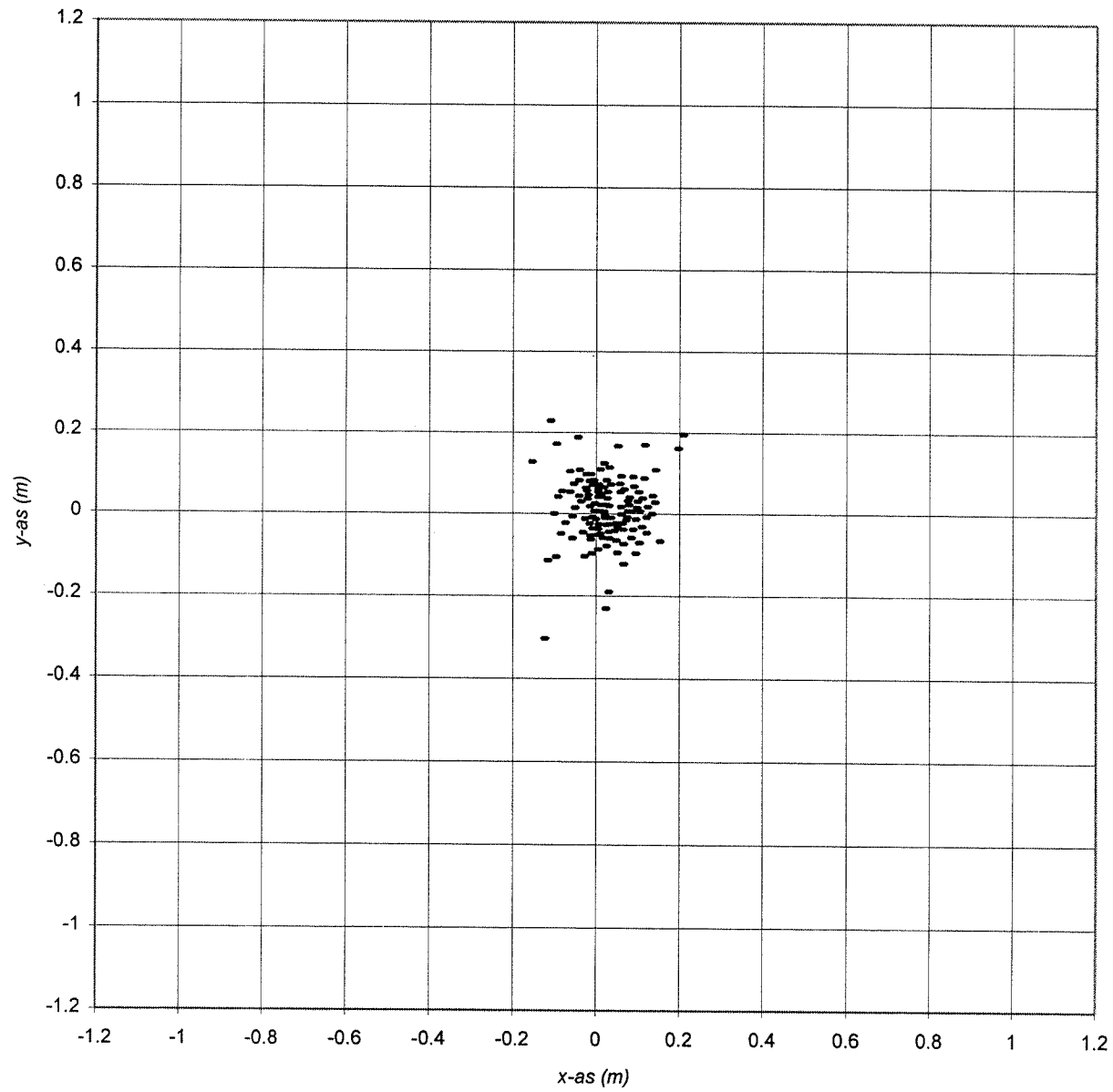
Bijlage 7.8a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.5)



Bijlage 7.9a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.5bis)

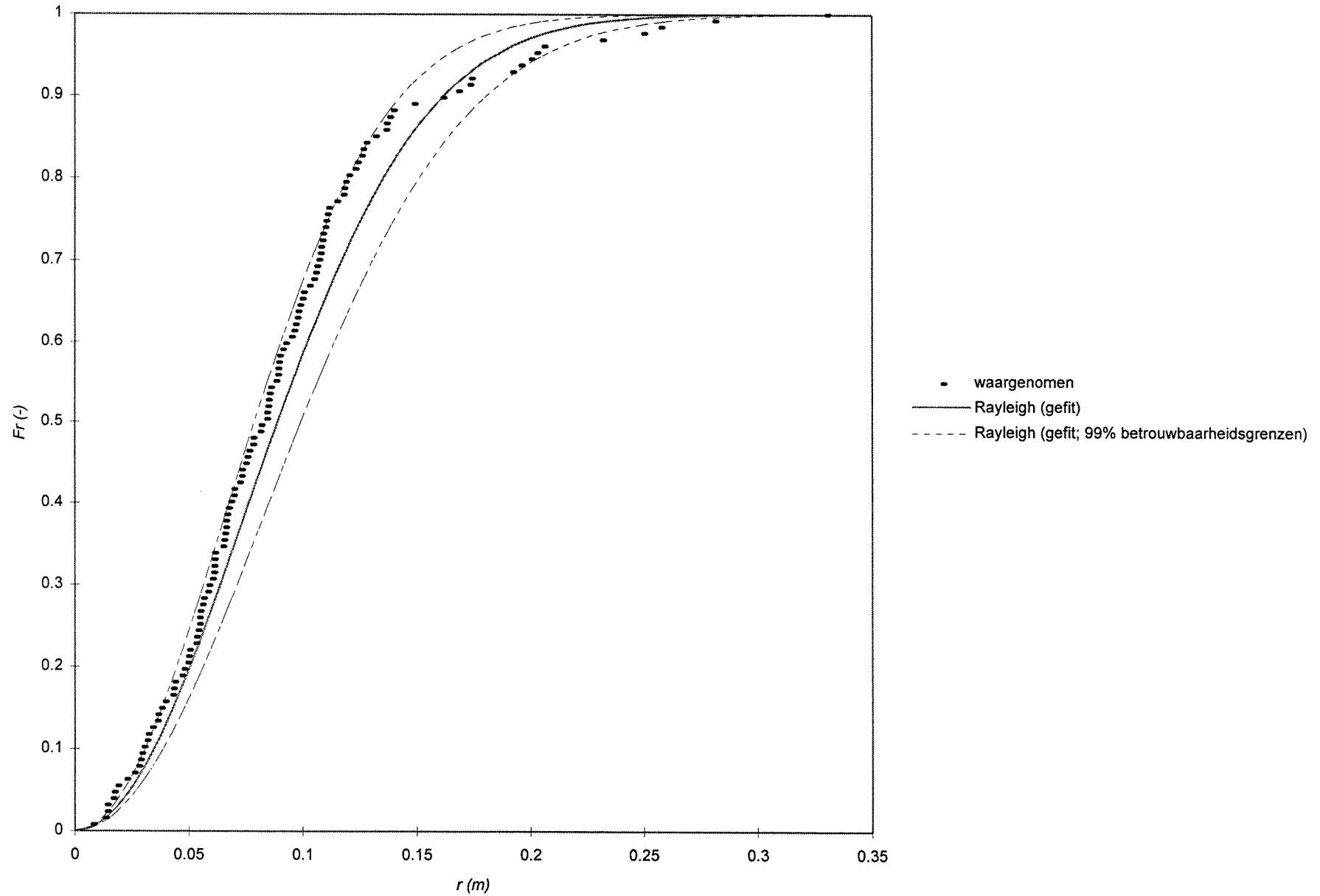


Bijlage 7.2a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.1)*



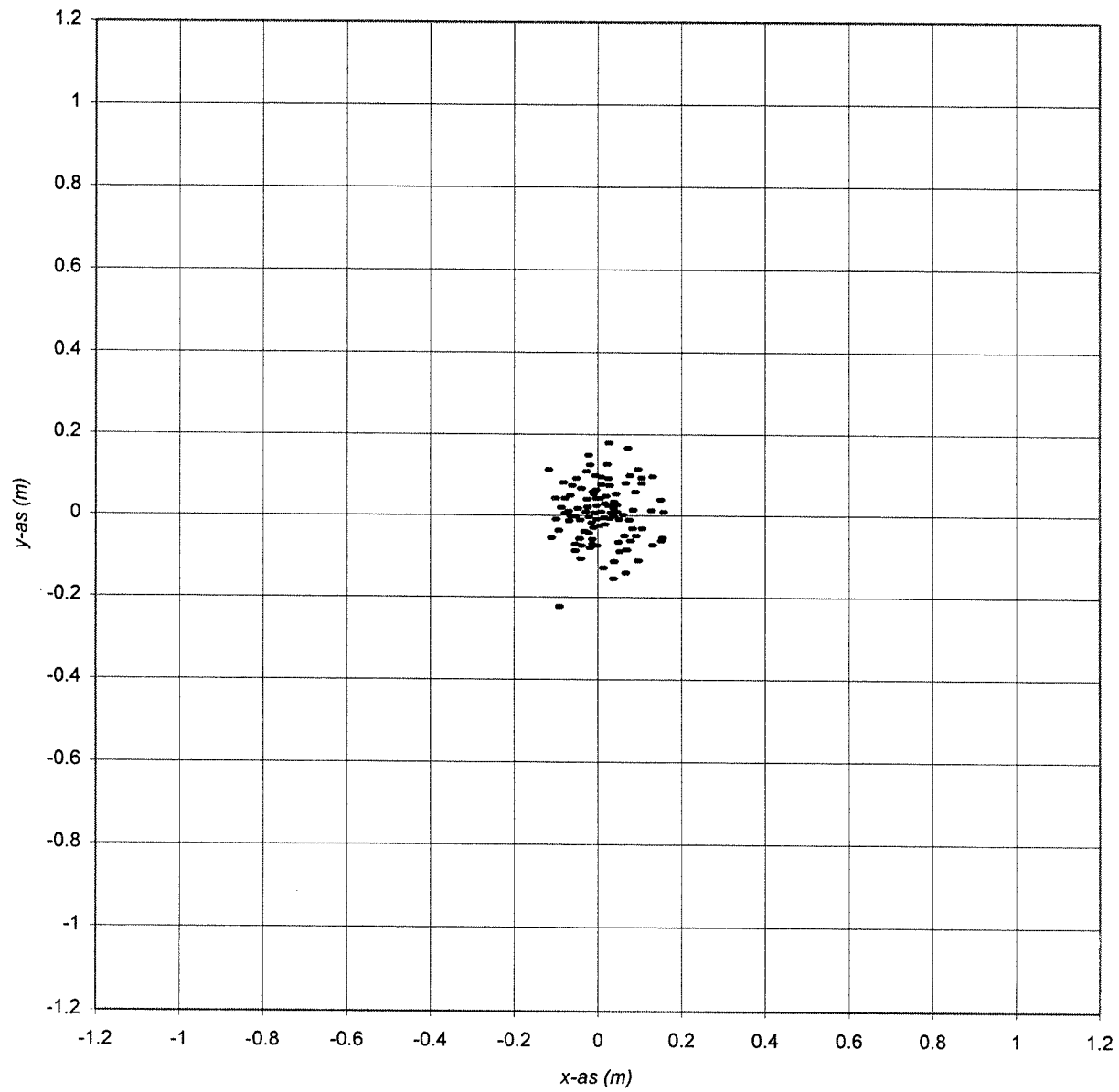
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.2b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.1)



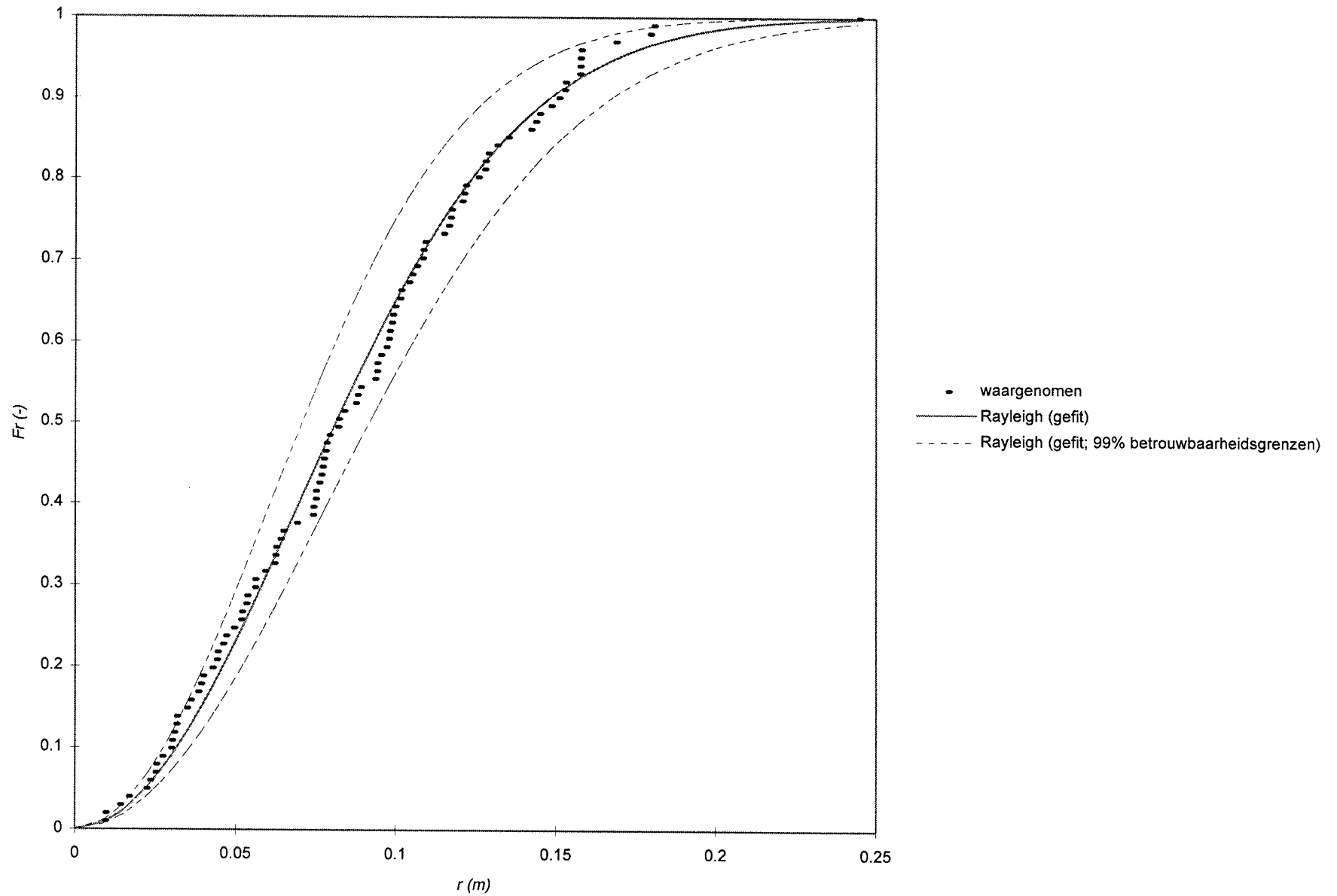
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.3a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.1bis)*



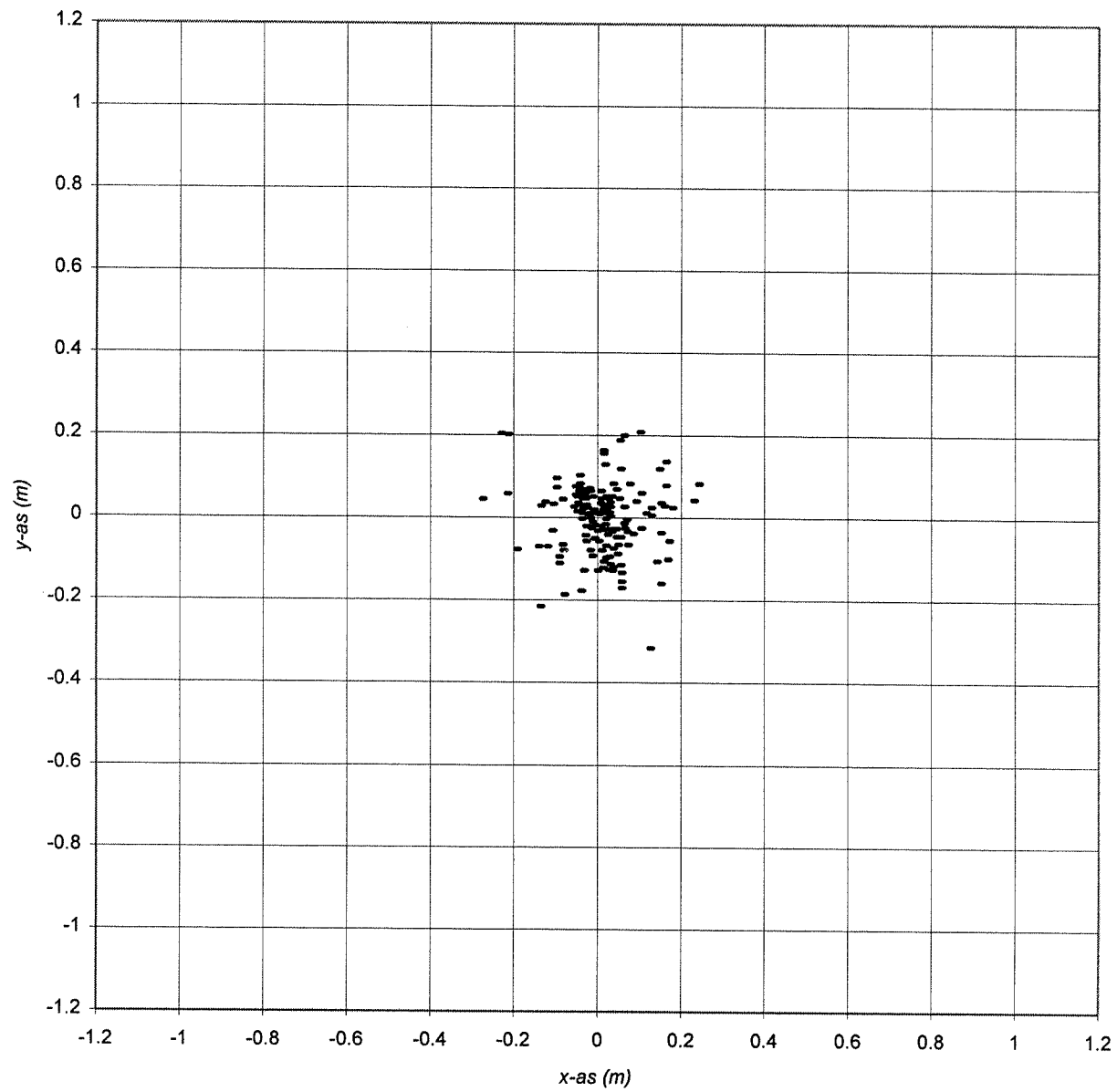
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.3b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.1bis)



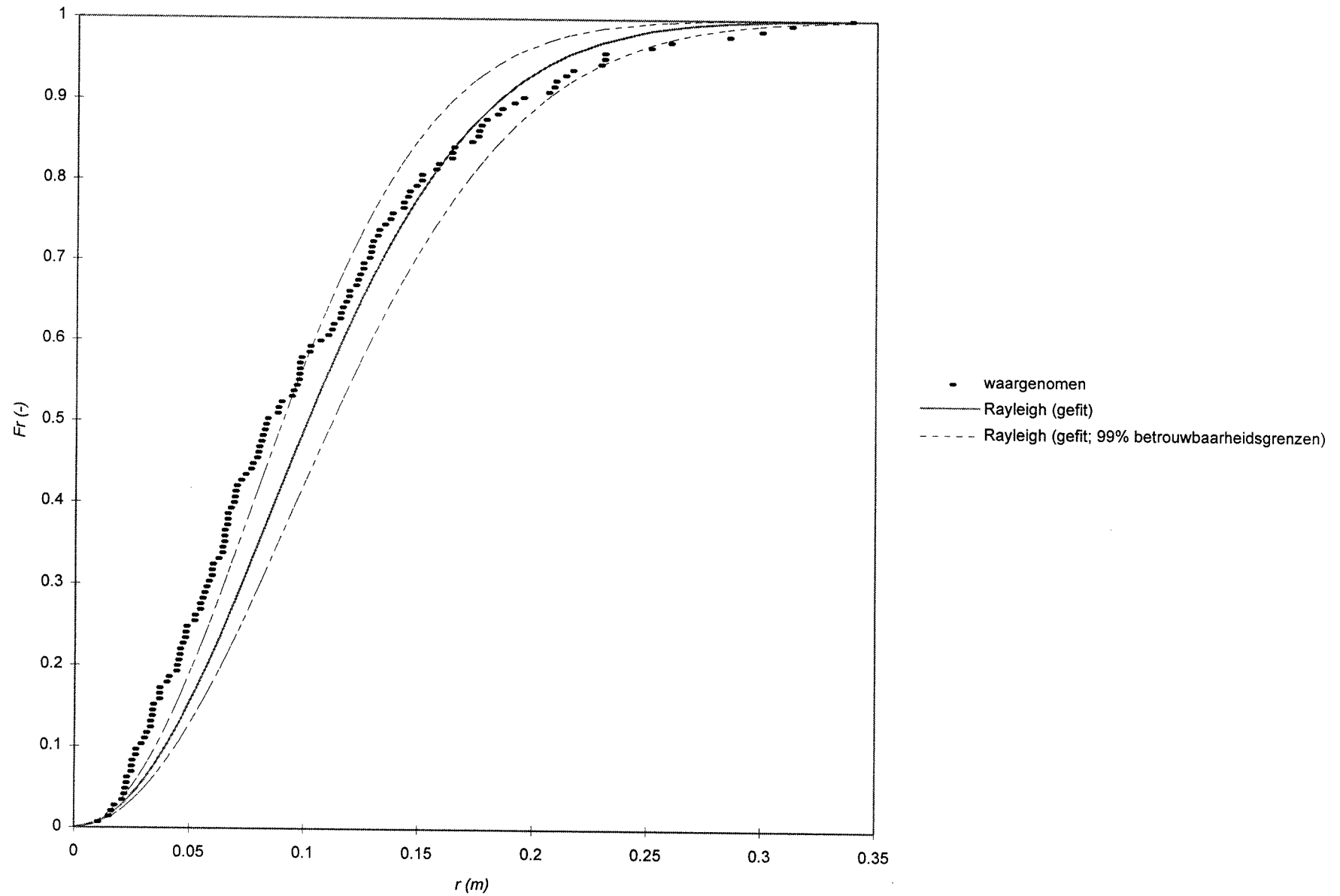
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.4a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.2)*



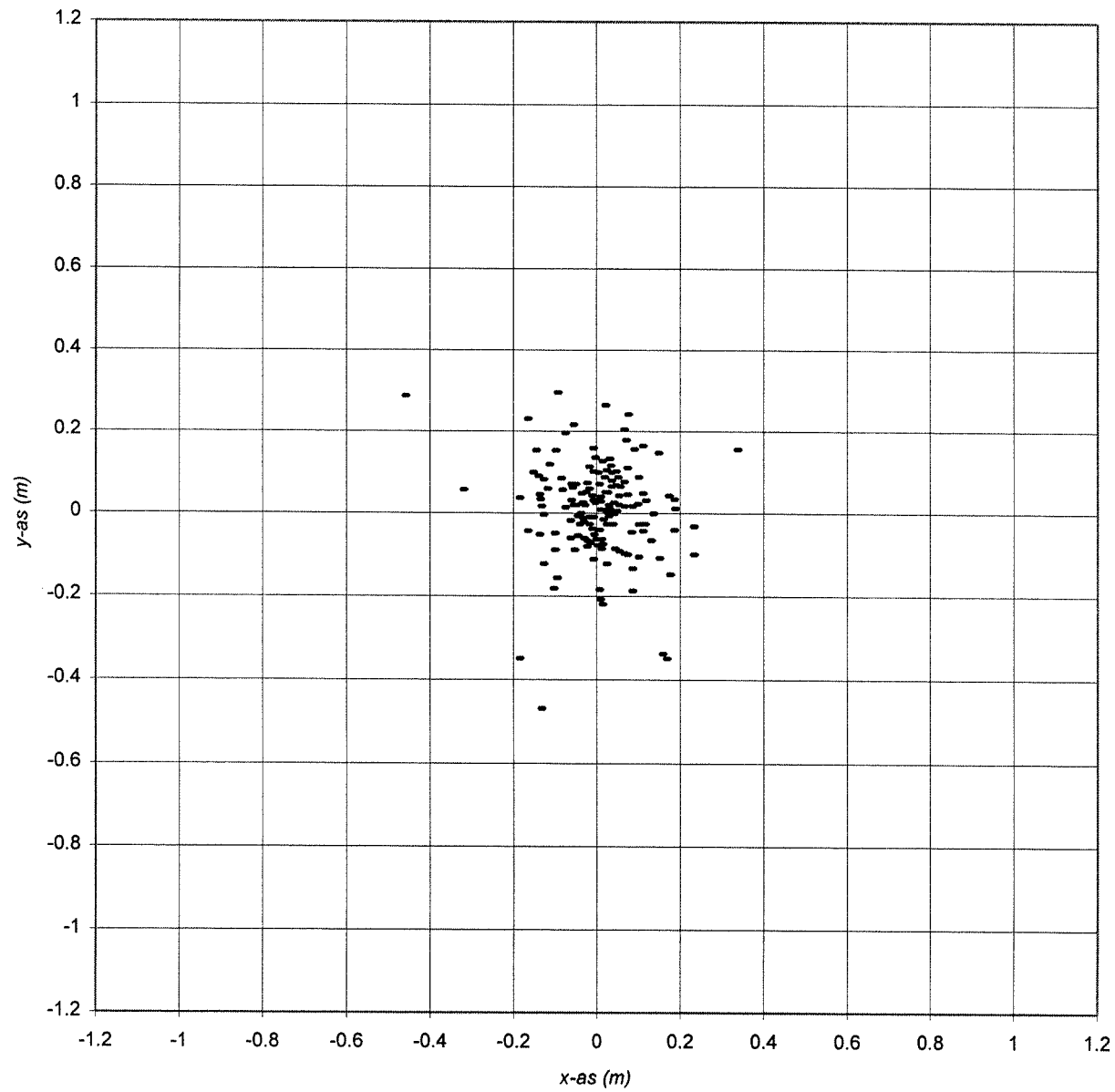
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.4b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.2)



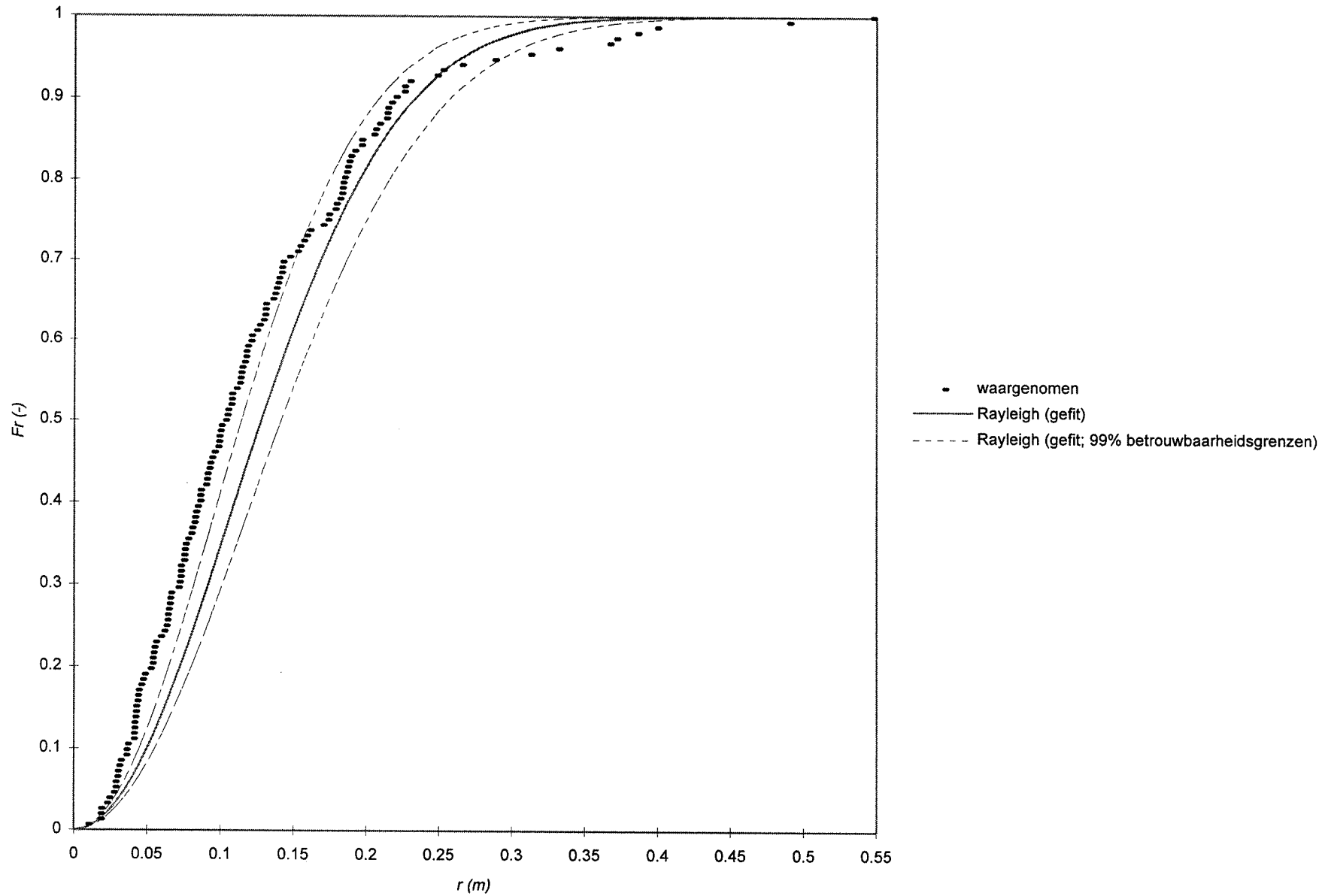
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.5a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.3)*



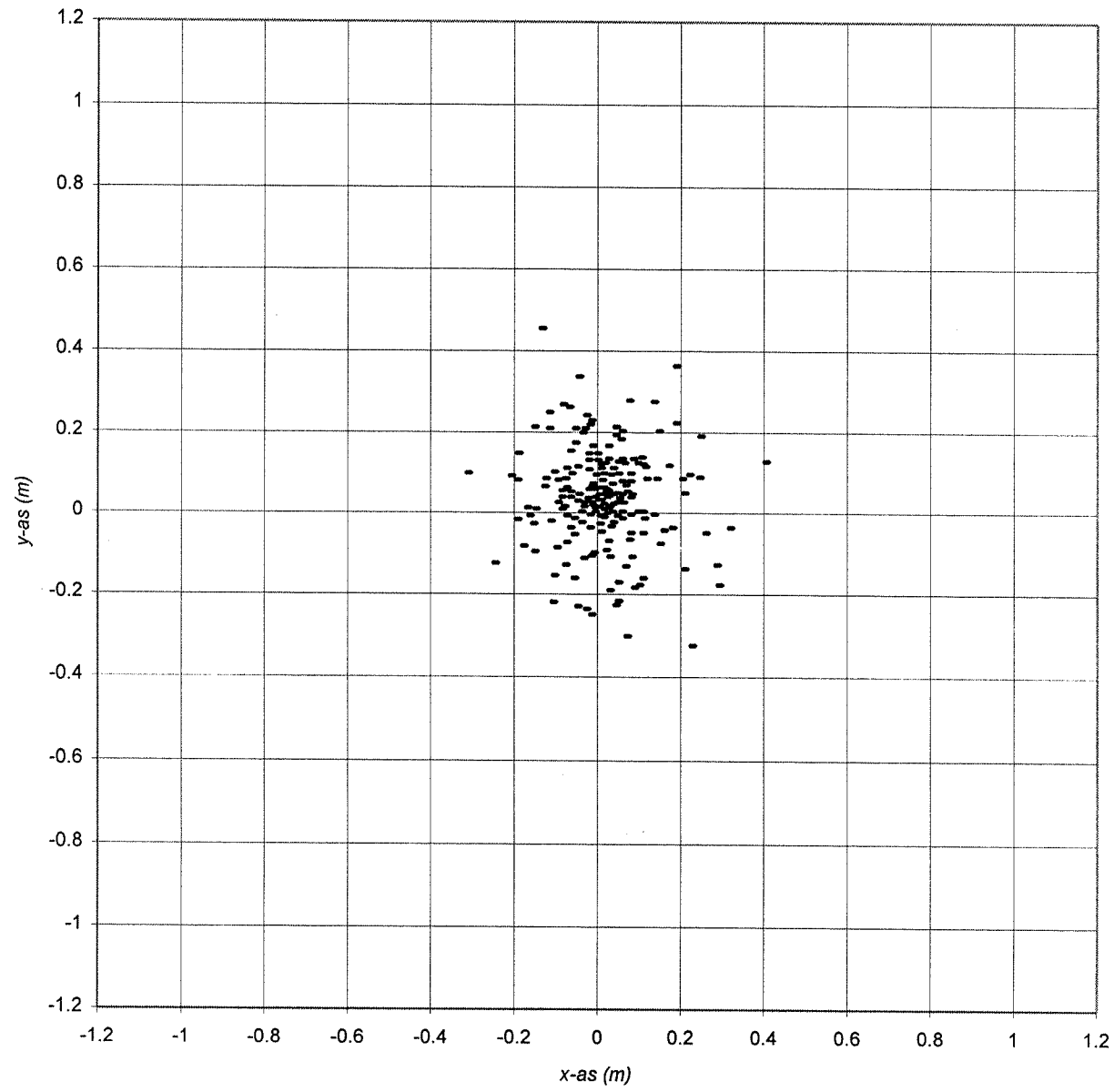
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.5b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.3)



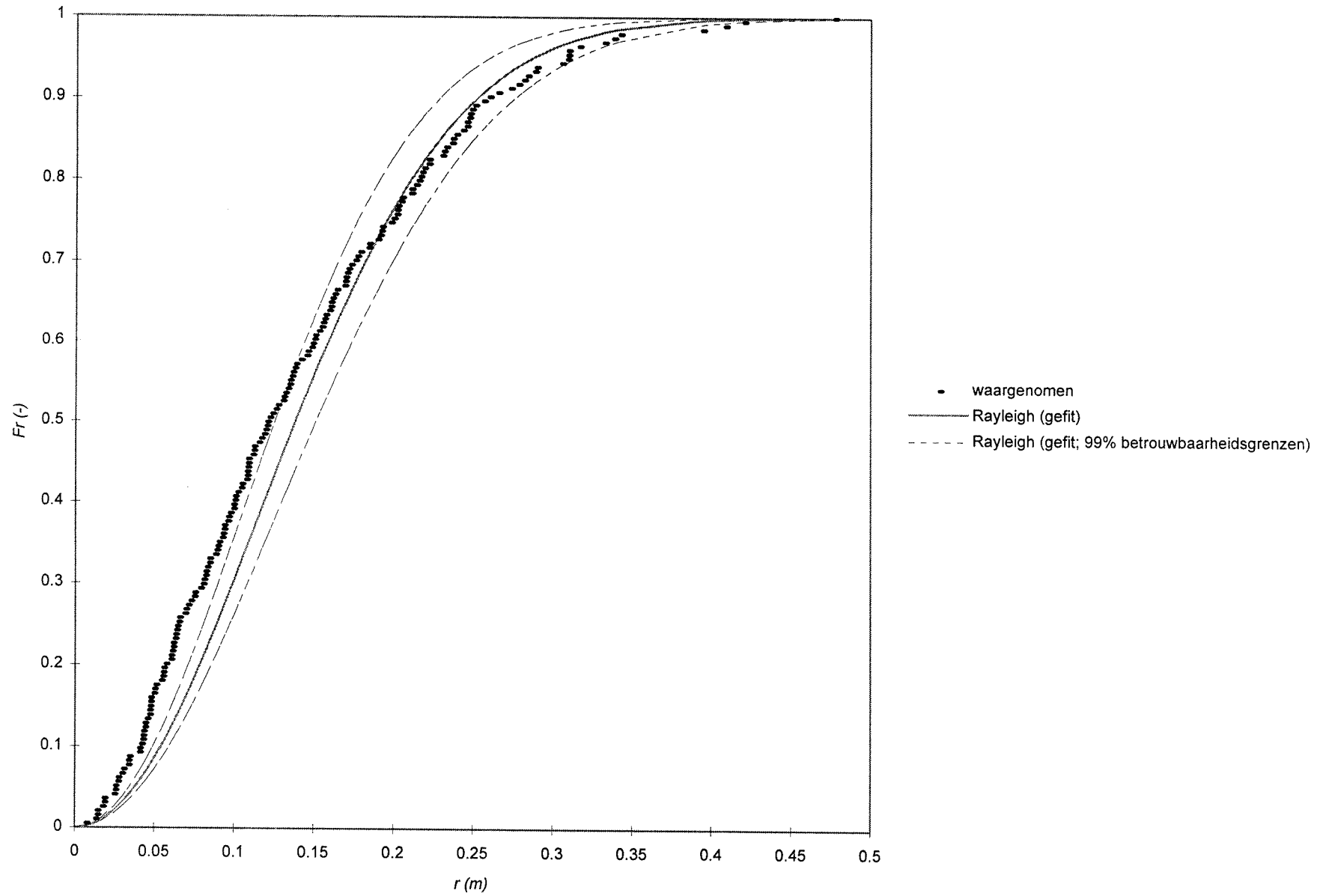
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.6a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.4)



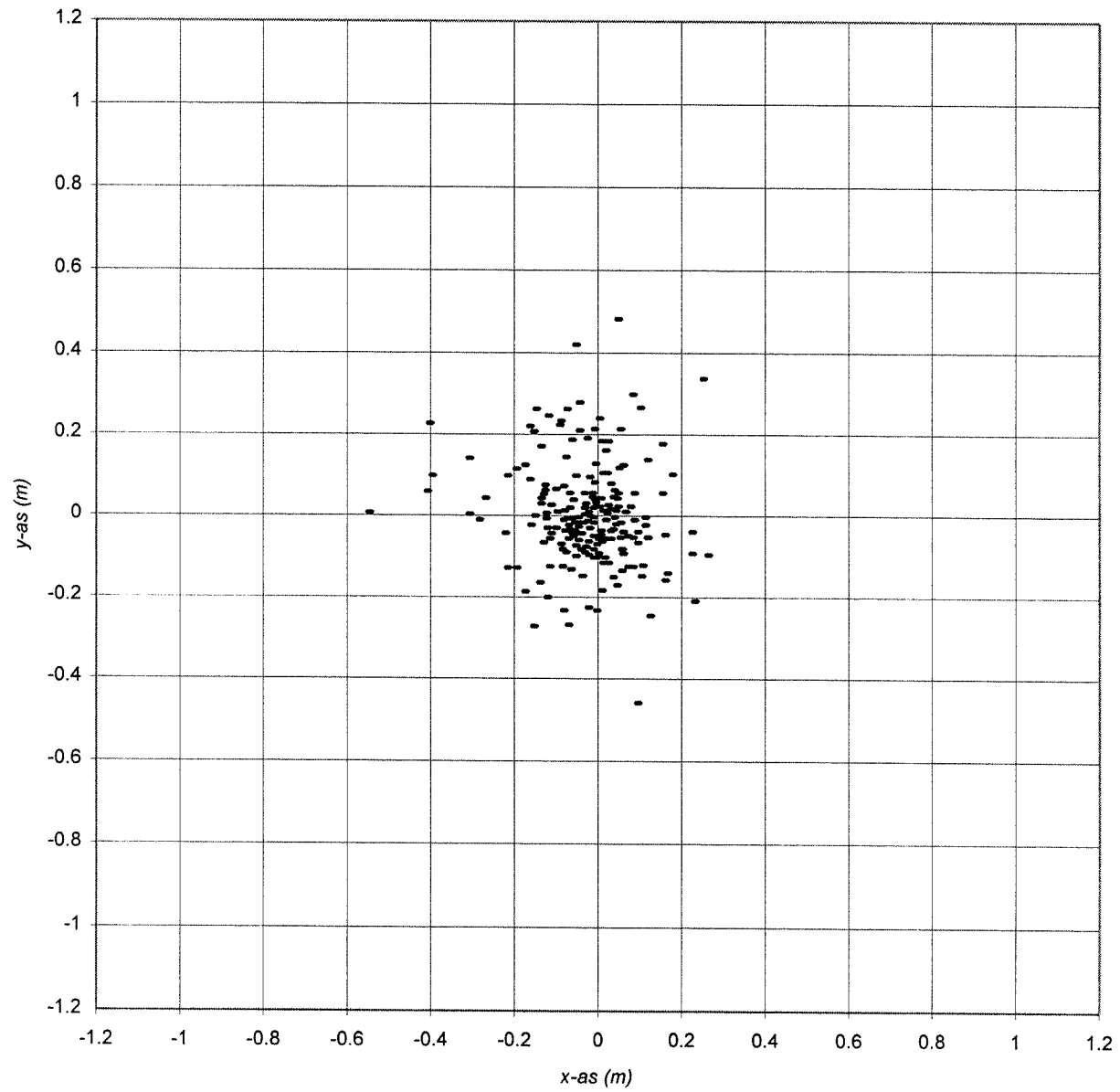
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.6b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.4)



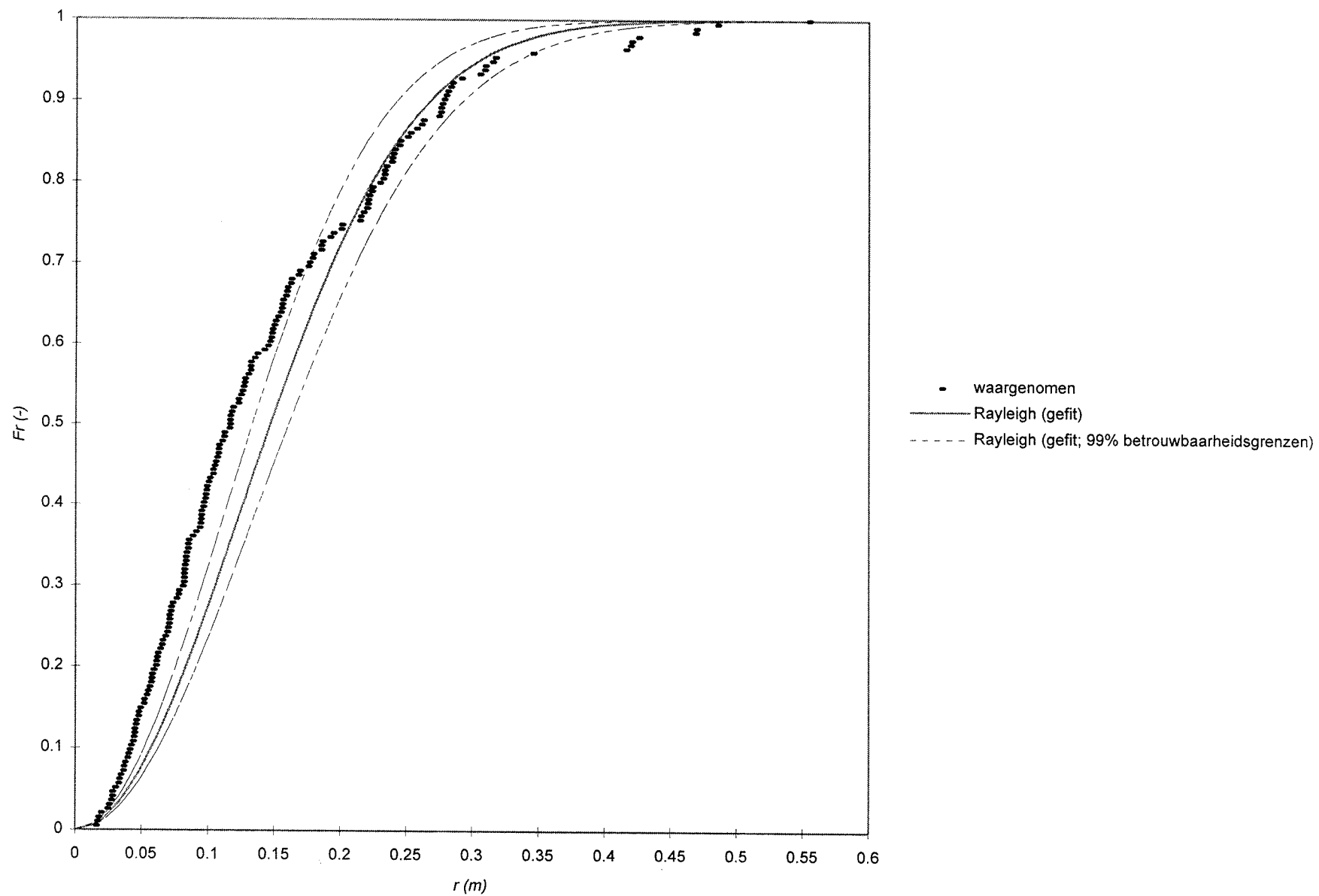
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.7a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr. 4bis)



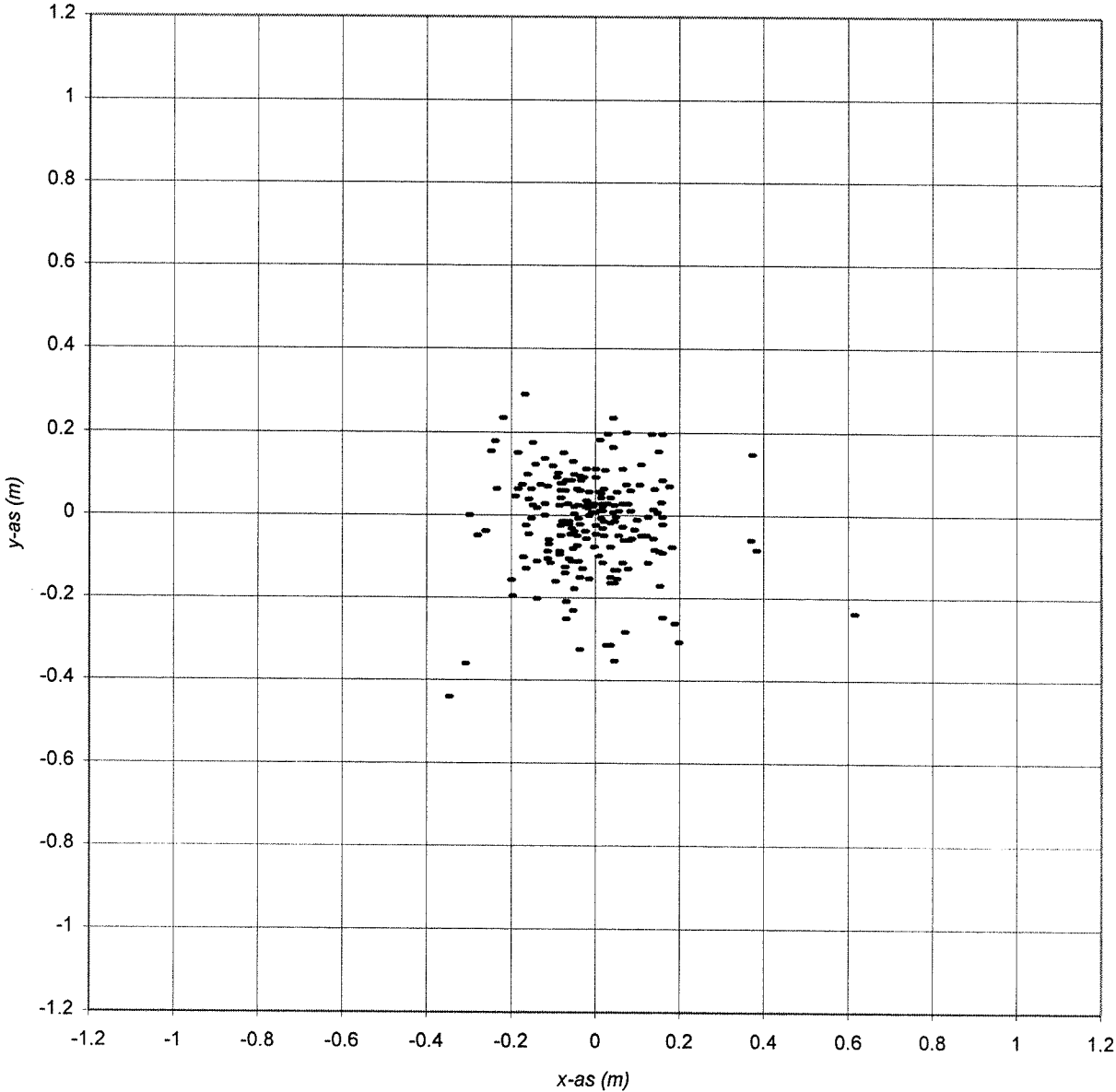
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.7b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.4bis)



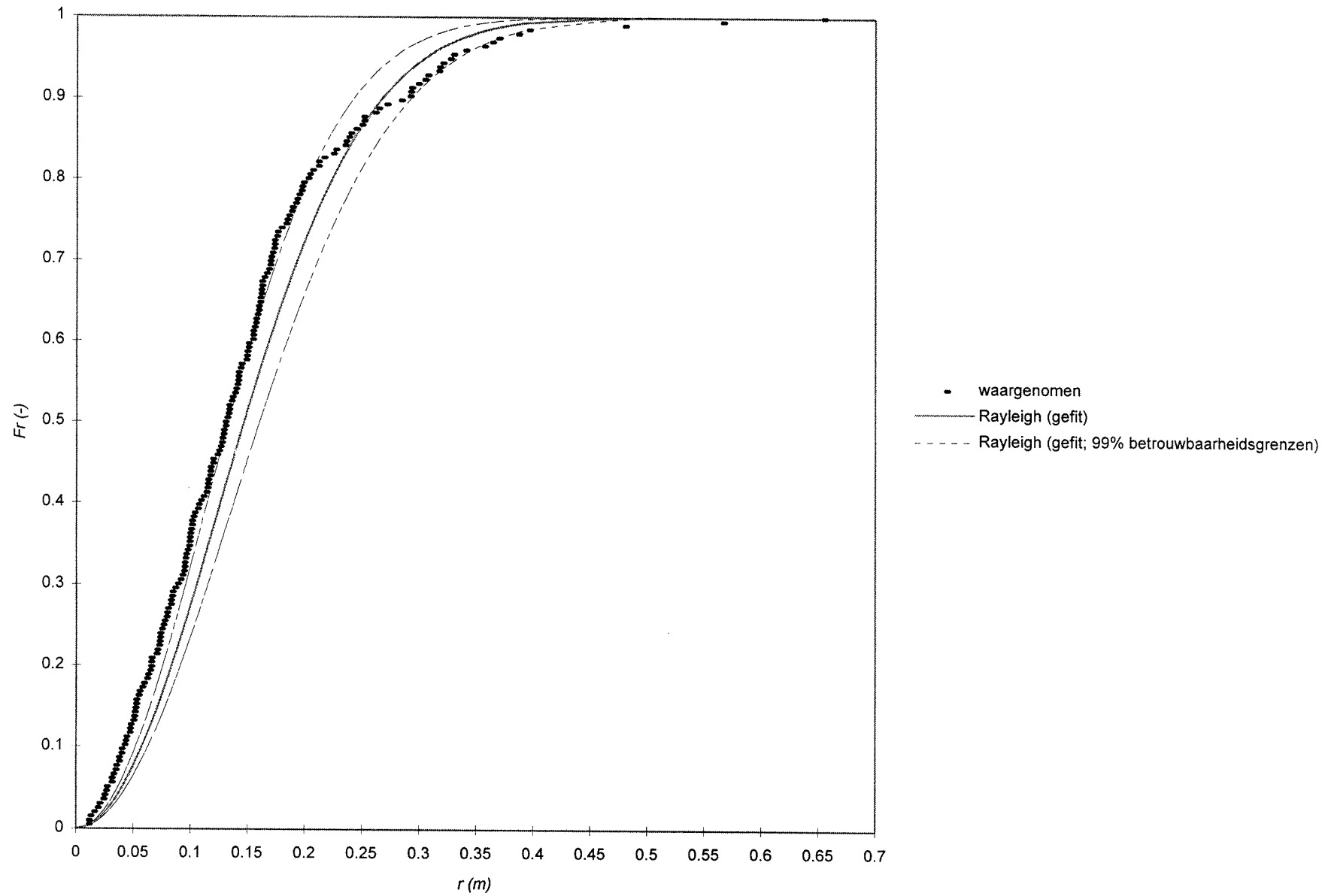
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.8a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.5)



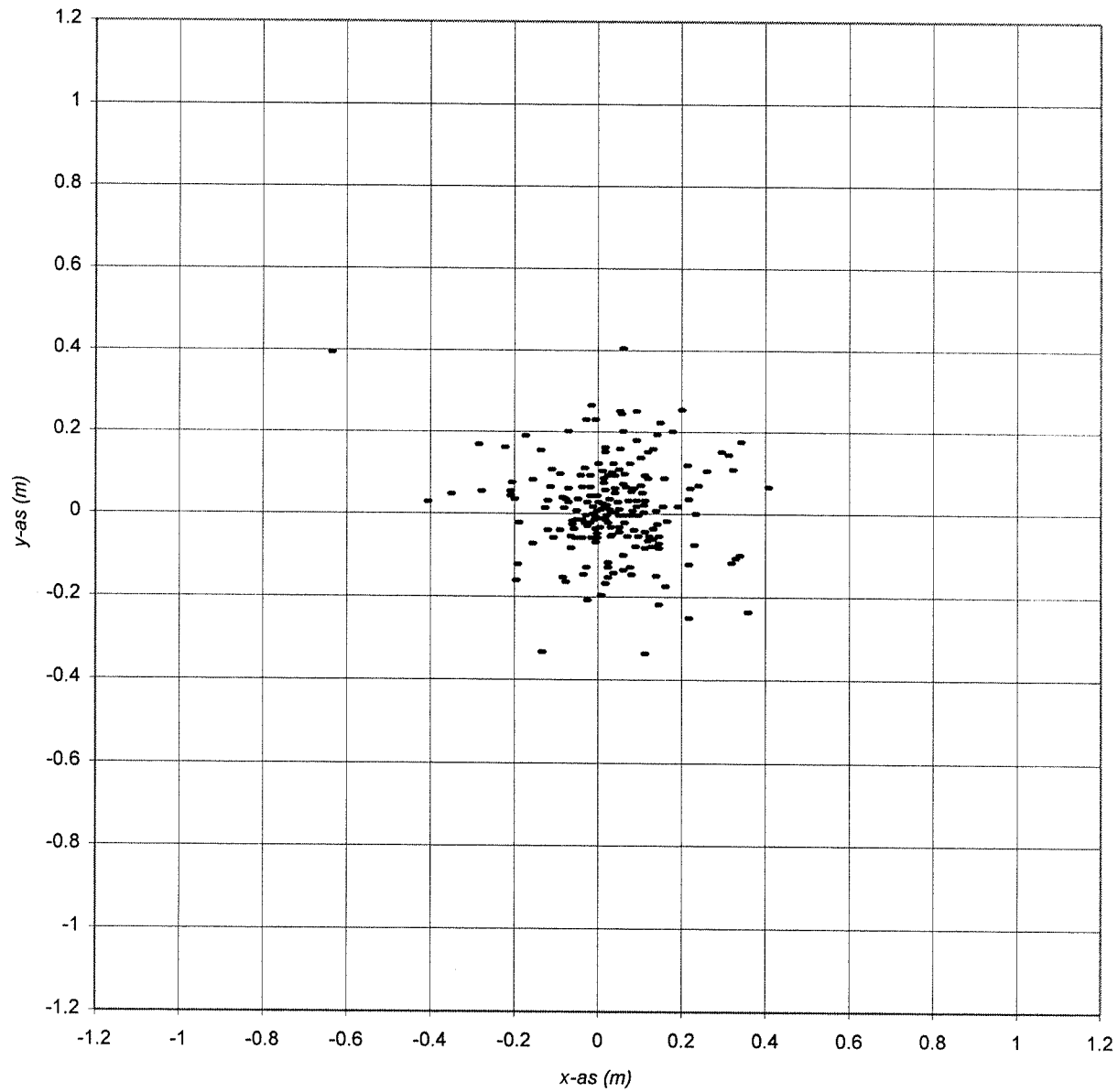
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)

Bijlage 7.8b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.5)



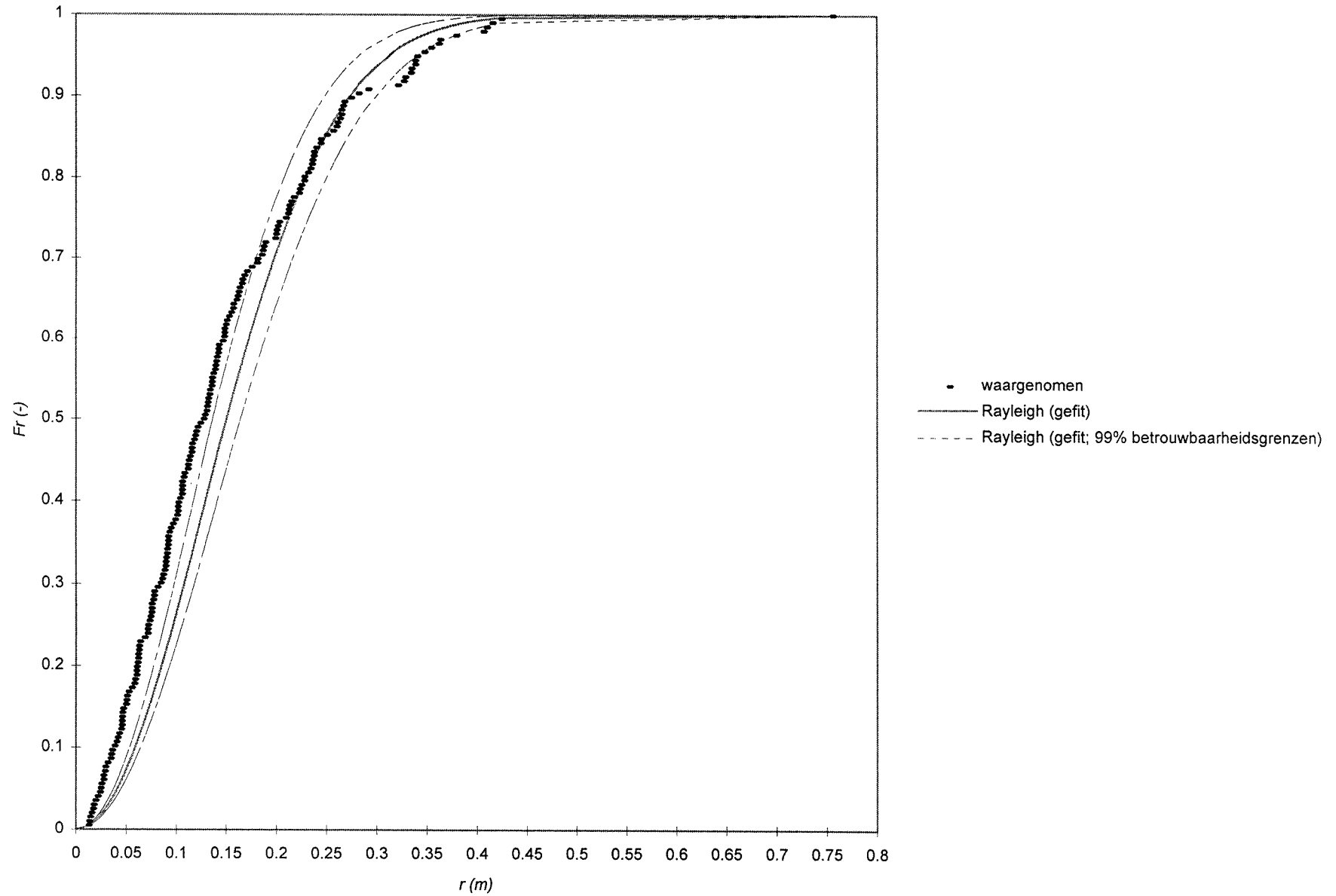
(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)

Bijlage 7.9a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.5bis)*



(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$, tegelijk gestort)

Bijlage 7.9b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.5bis)



(breuksteensortering, $D_{n50} = 0,0104$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)

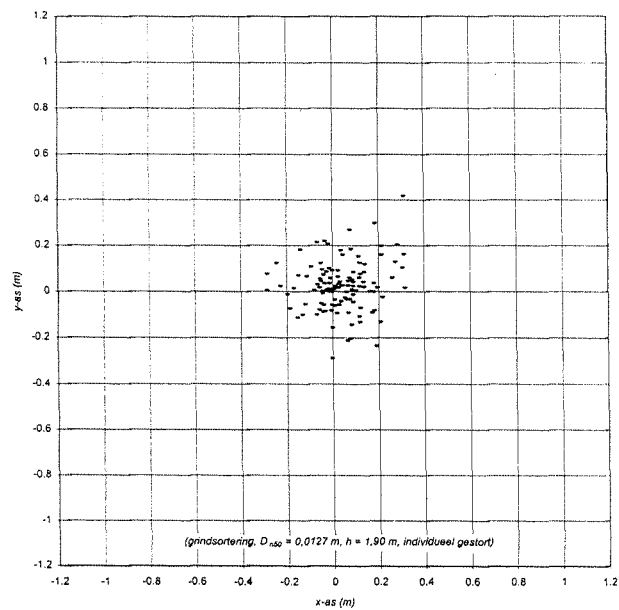
Bijlage 7.10 *Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte stenen uit een breuksteensortering (in seconden)*

3,6 s	3,7 s	3,9 s	4,1 s	4,2 s	4,6 s	4,8 s	4,8 s	5,2 s	5,3 s
3,7 s	3,9 s	4,0 s	4,1 s	4,3 s	4,7 s	4,8 s	4,9 s	5,3 s	6,1 s

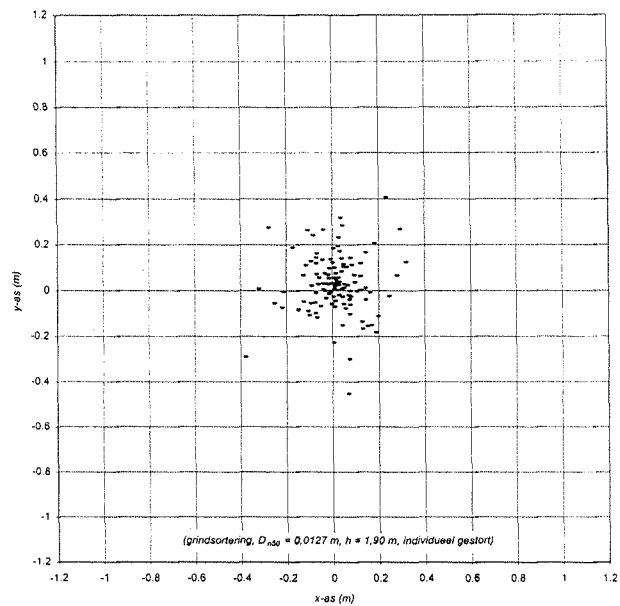
$(D_{n50} = 0,0104 \text{ m}, h = 1,90 \text{ m})$

Bijlage 8.1a Overzicht van de bovenaanzichten van de stort (modelproeven met grind)

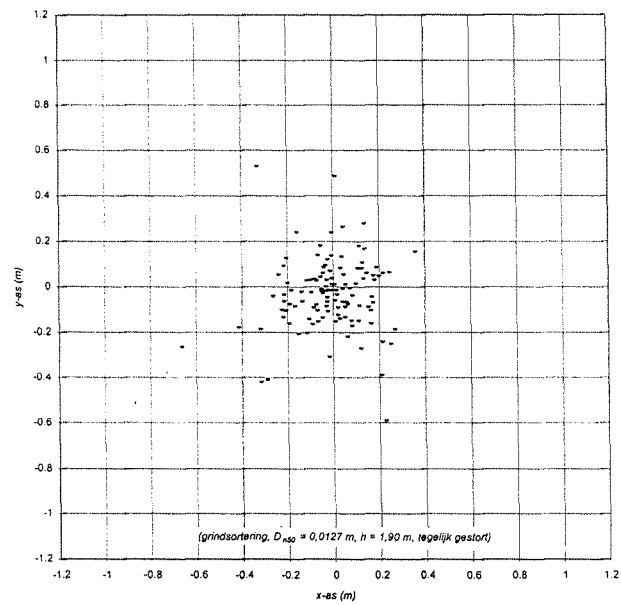
Bijlage 8.2a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.9)



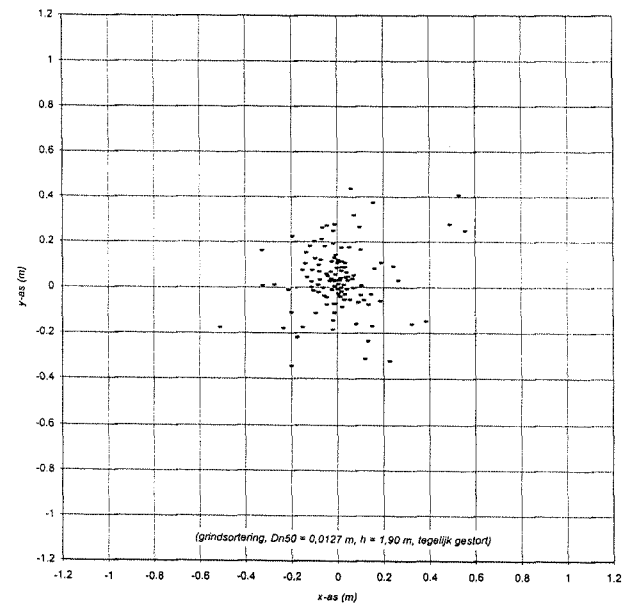
Bijlage 8.3a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.9bis)



Bijlage 8.4a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.10)

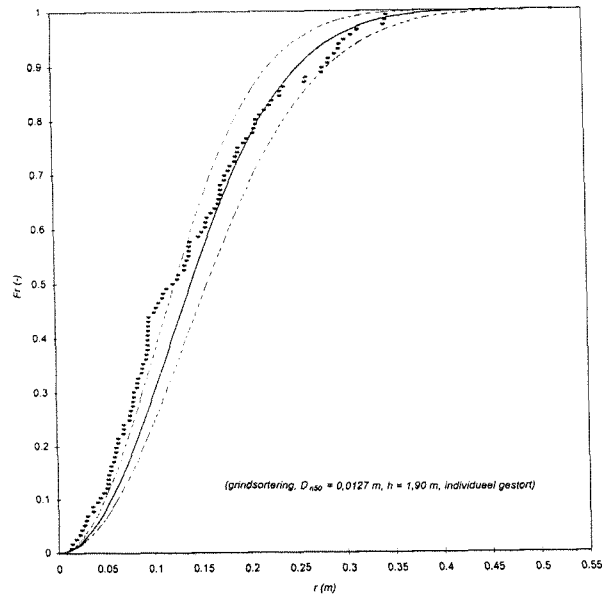


Bijlage 8.5a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.10bis)

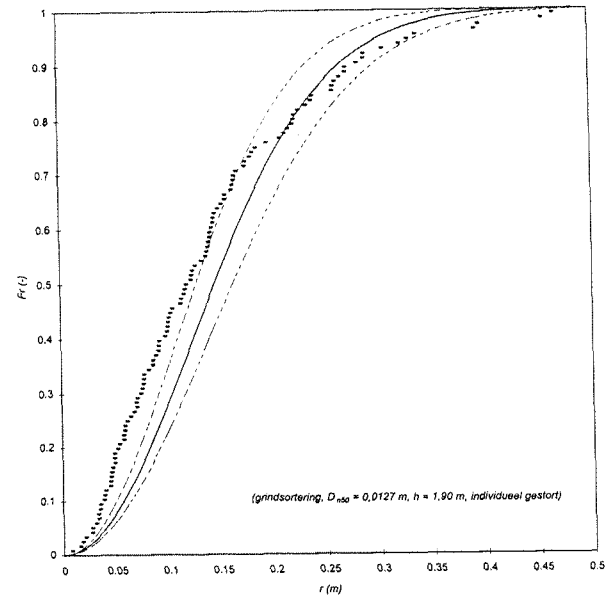


Bijlage 8.1b Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met grind)

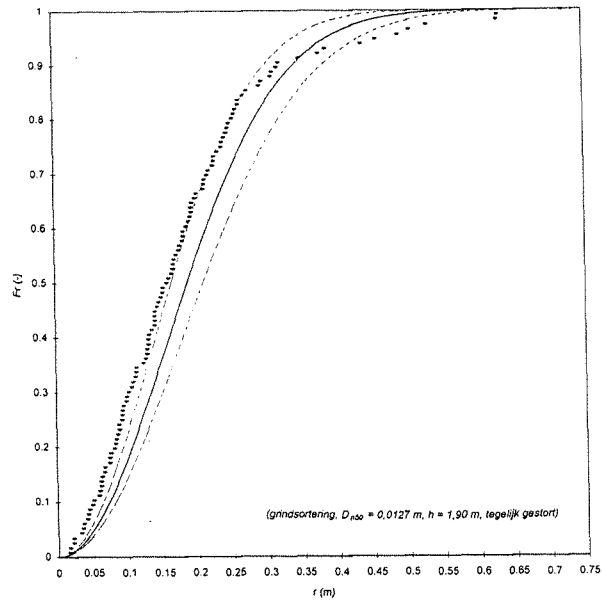
Bijlage 8.2b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.9)



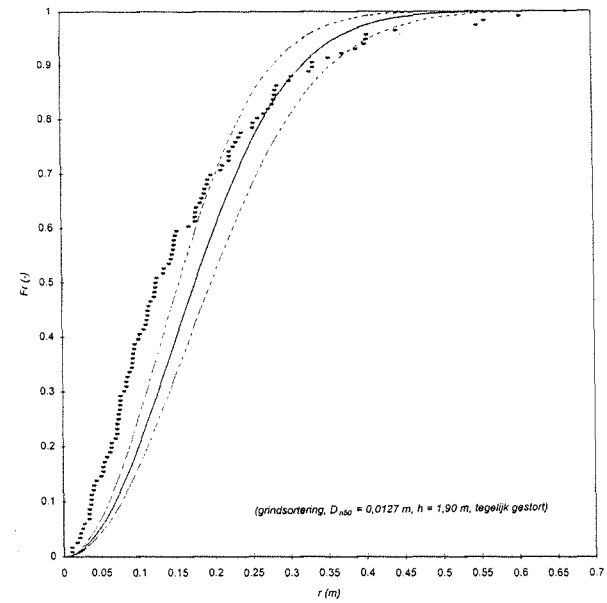
Bijlage 8.3b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.9bis)



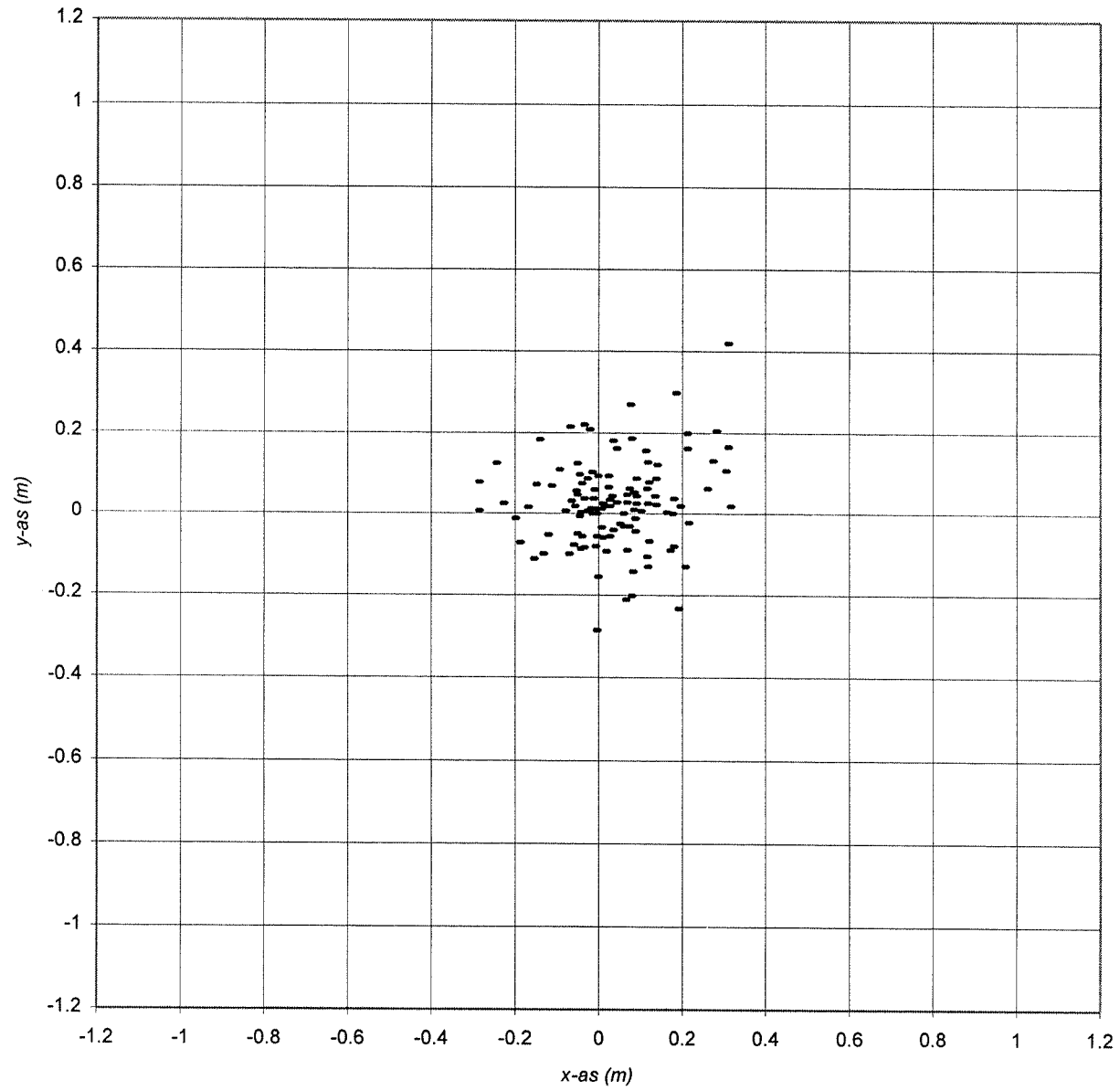
Bijlage 8.4b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.10)



Bijlage 8.5b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.10bis)

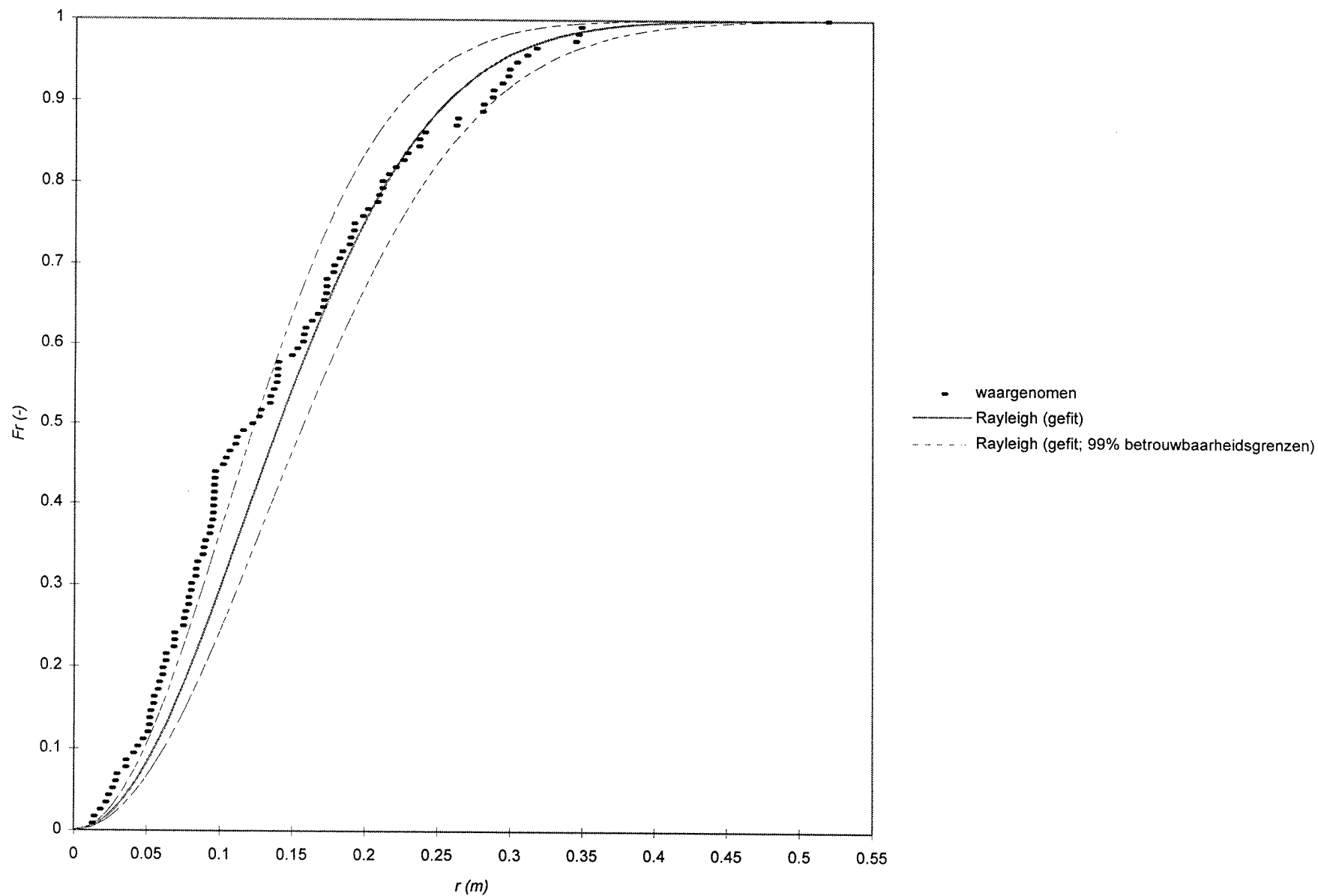


Bijlage 8.2a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.9)*



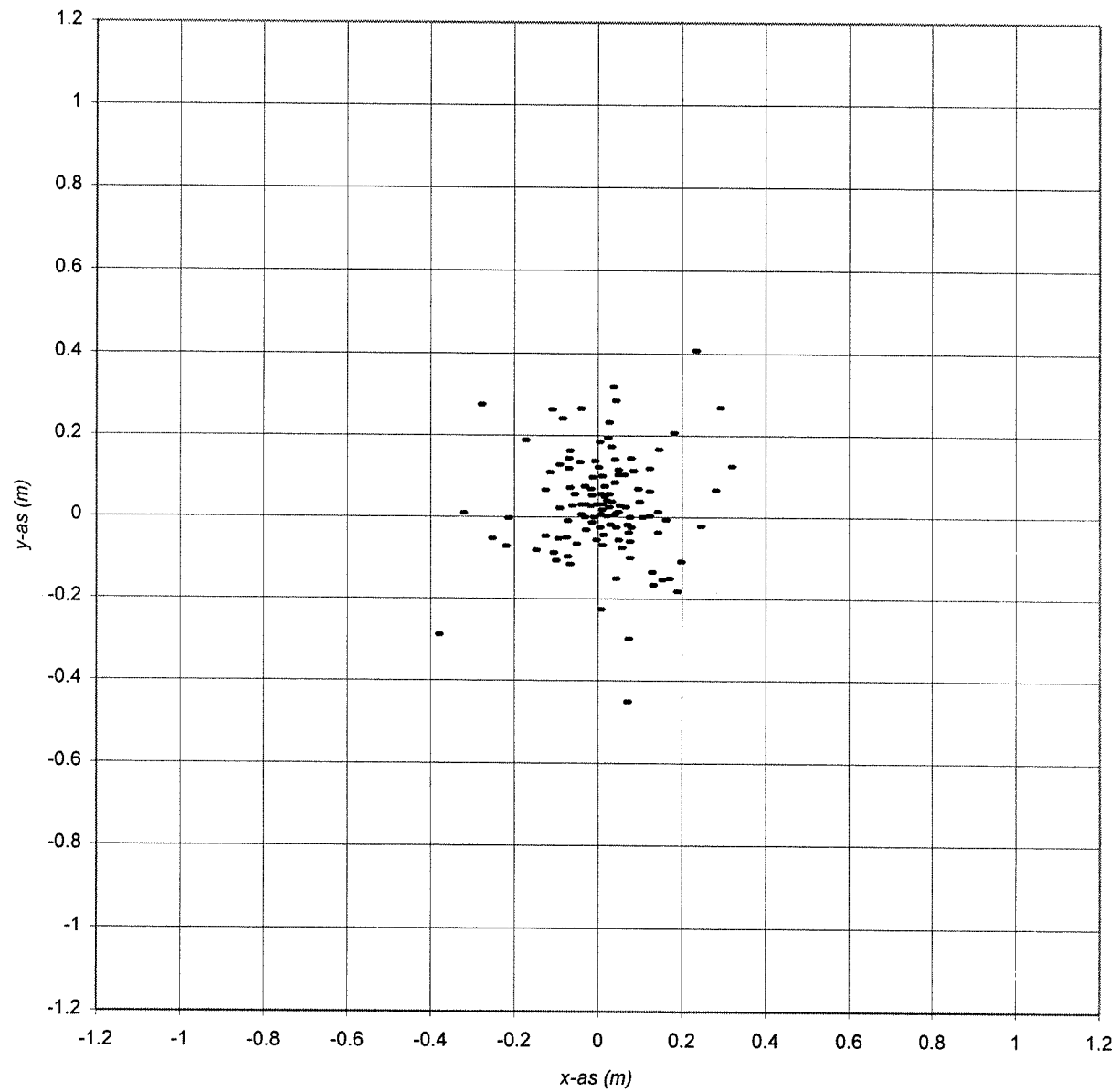
(grindsortering, $D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 8.2b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.9)



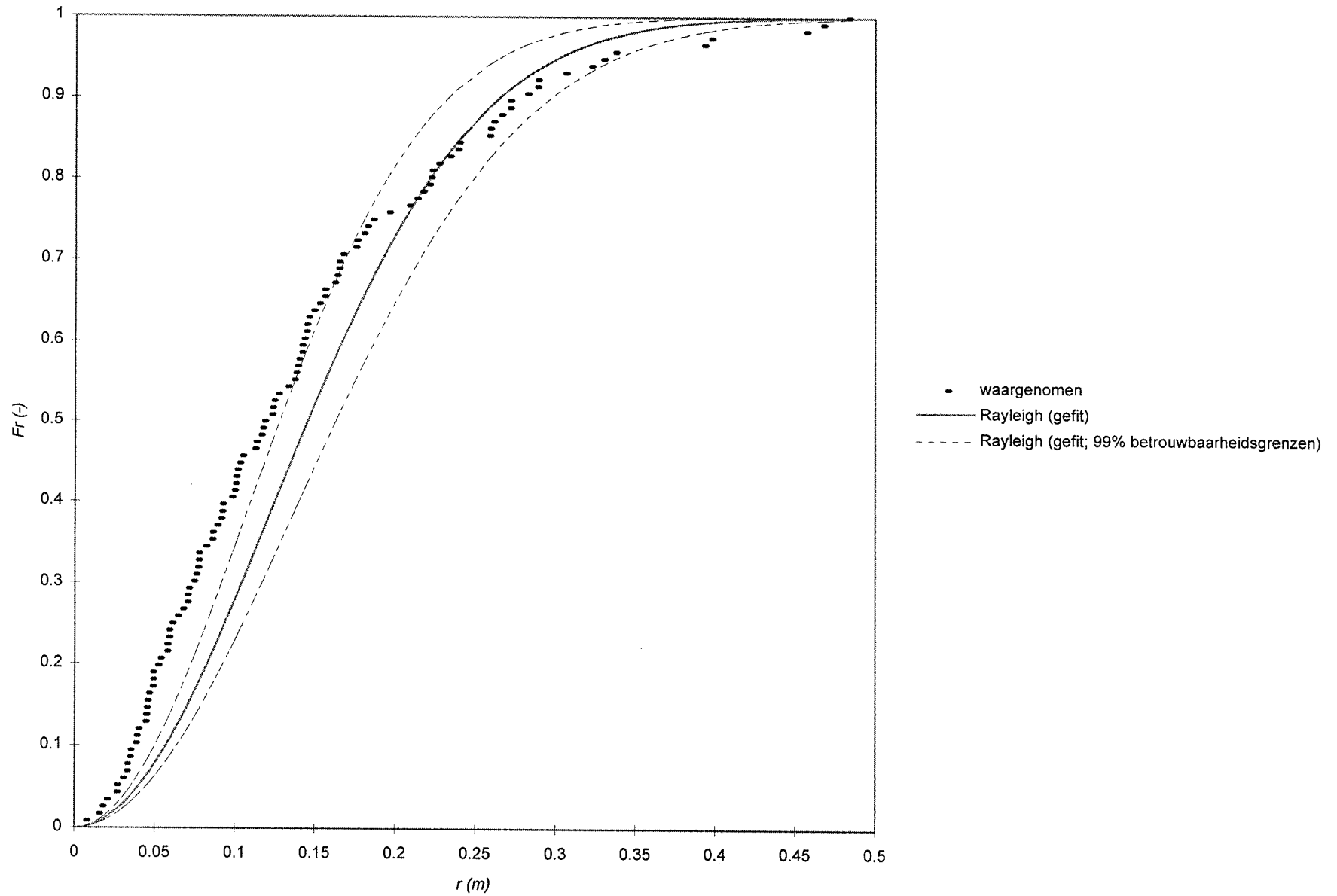
(grindsortering, $D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 8.3a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.9bis)*



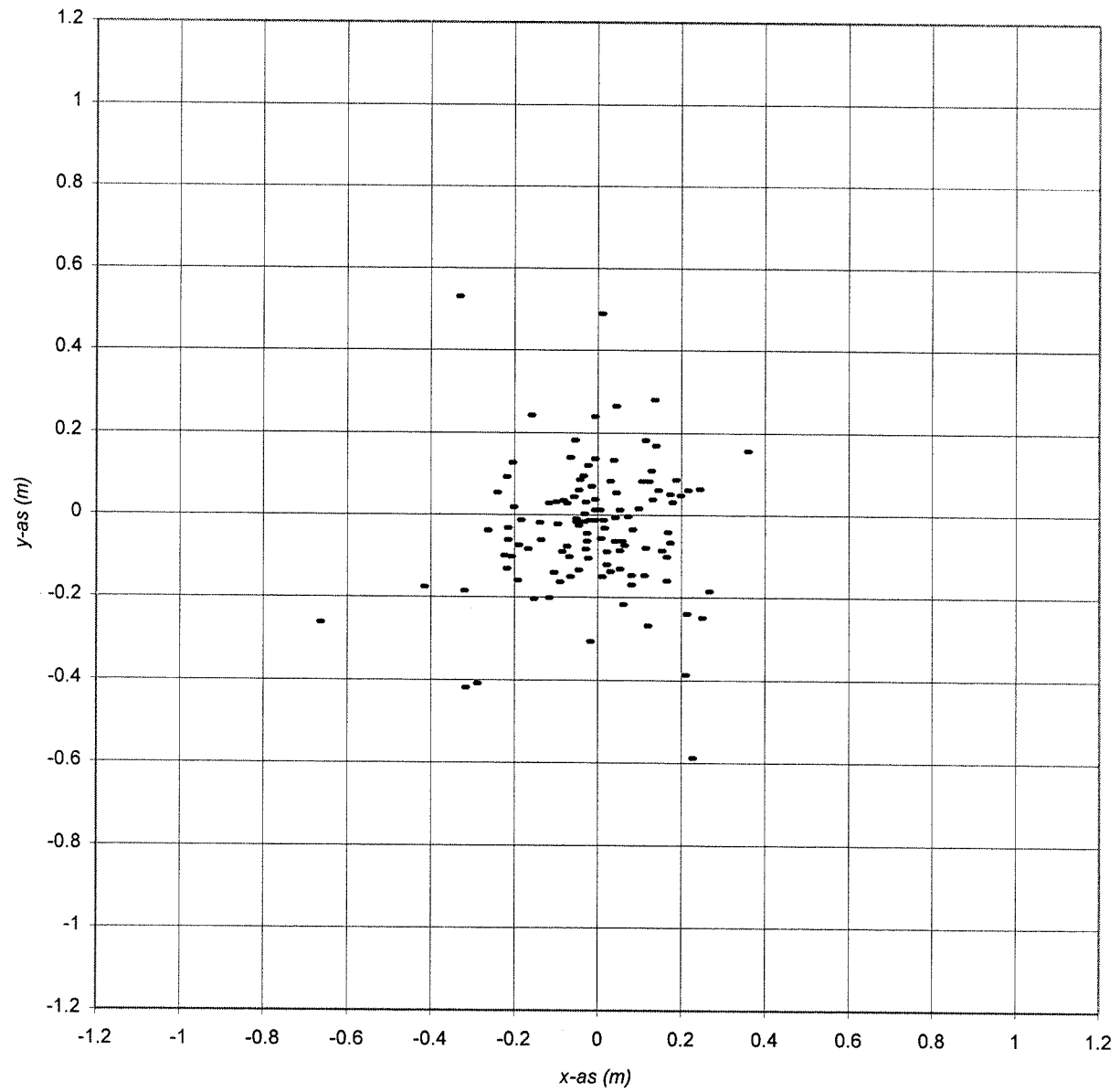
(grindsortering, $D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 8.3b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.9bis)



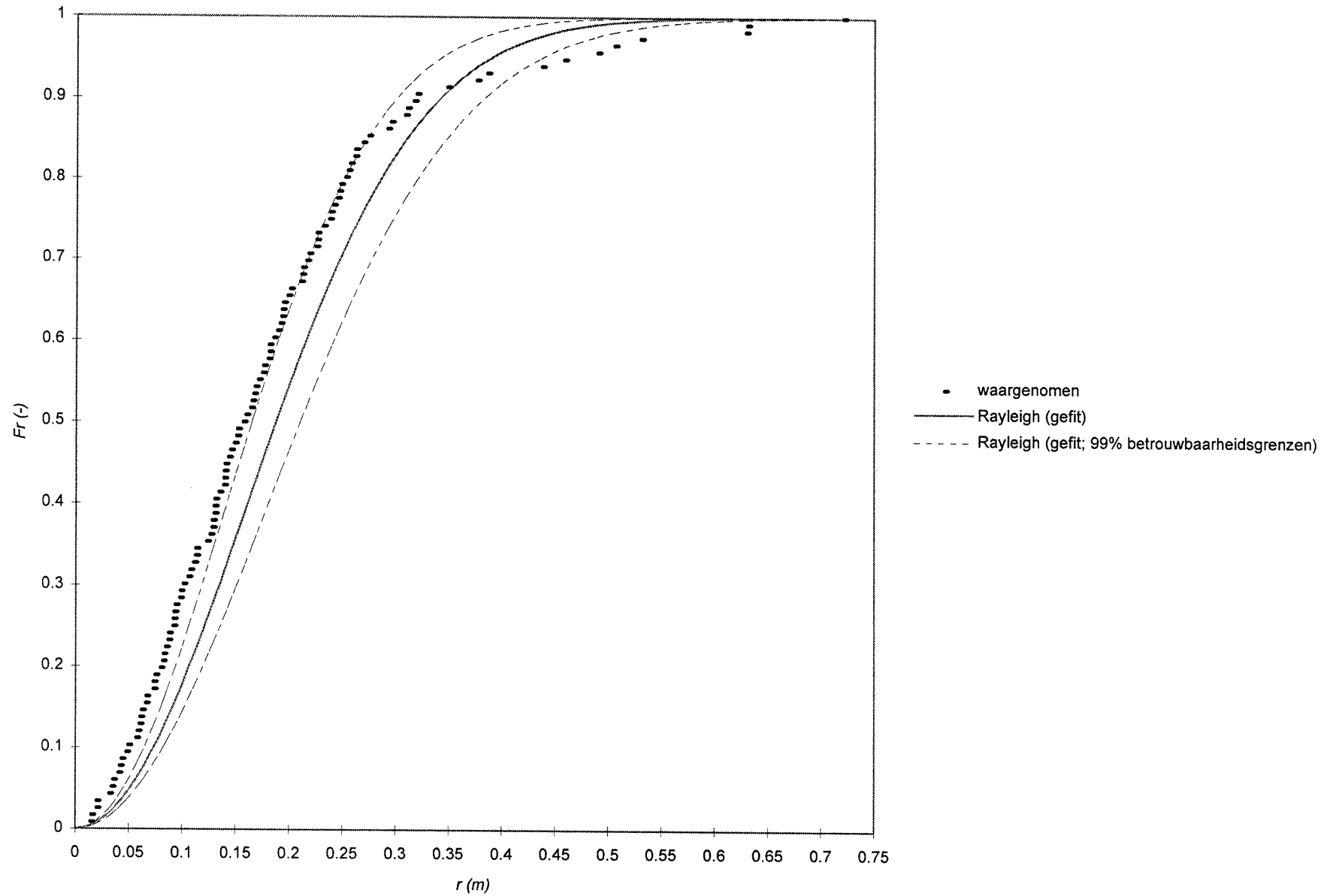
(grindsortering, $D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 8.4a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.10)*



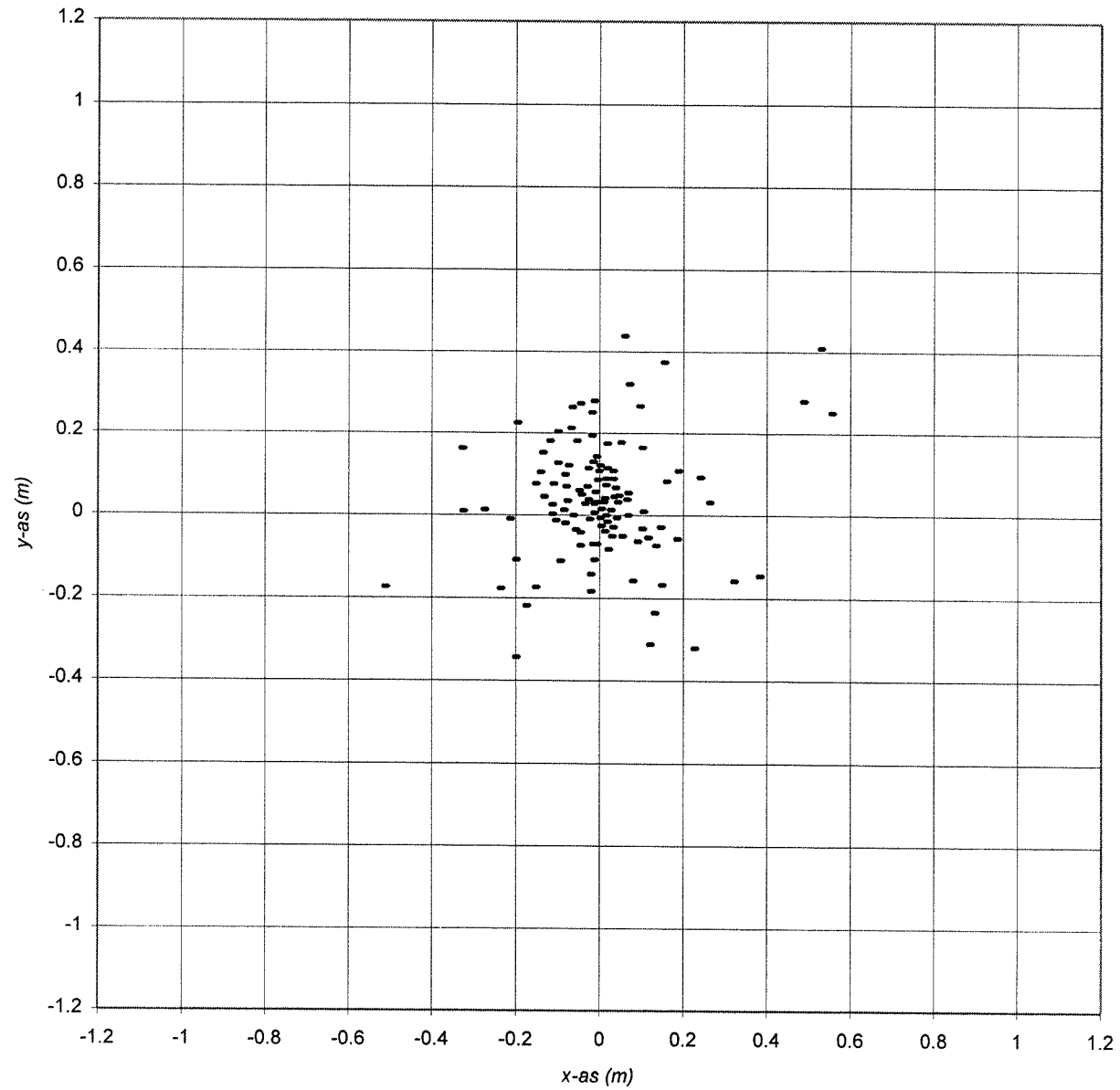
(grindsortering, $D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)

Bijlage 8.4b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.10)



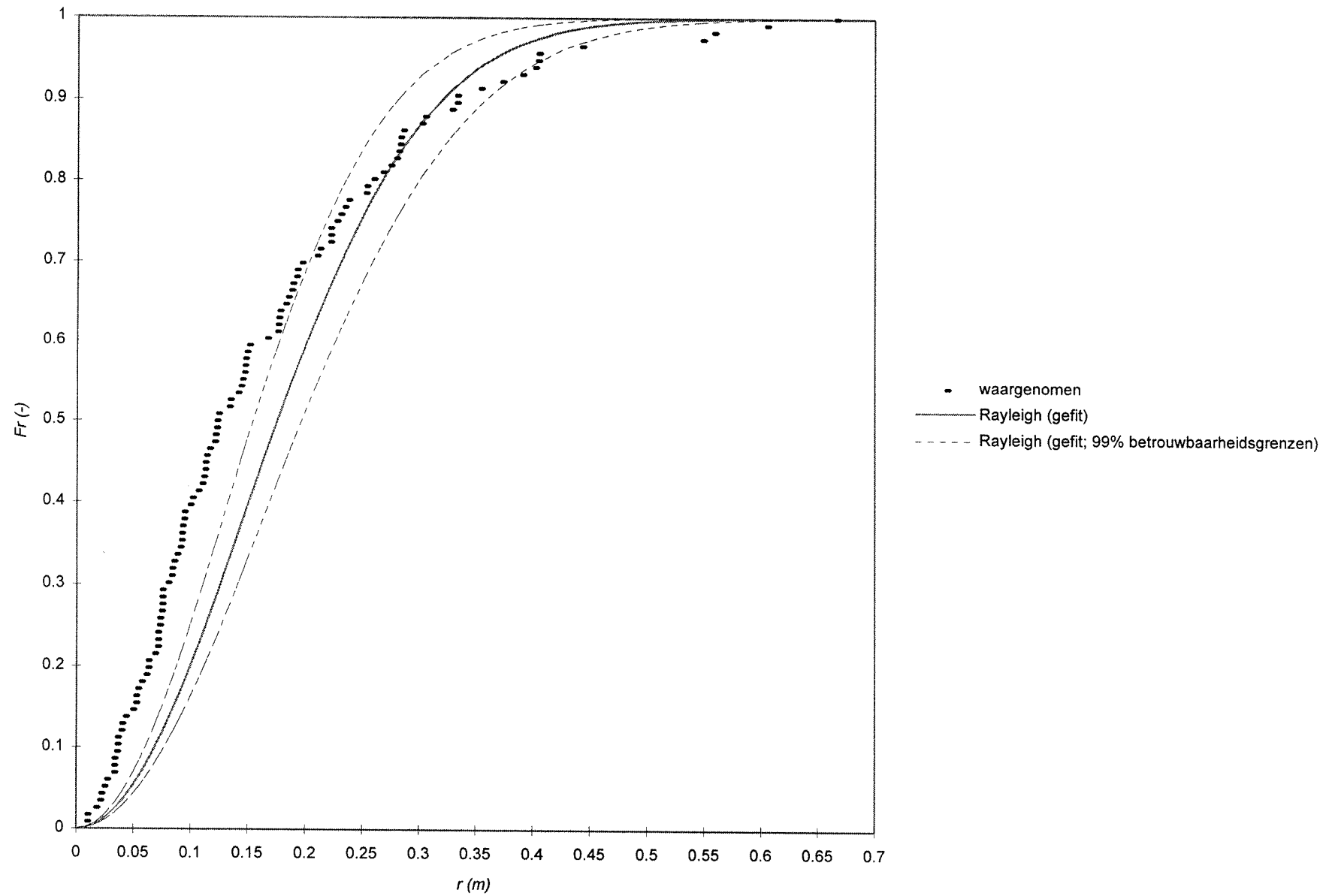
(grindsortering, $D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)

Bijlage 8.5a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.10bis)



(grindsortering, $D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)

Bijlage 8.5b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.10bis)



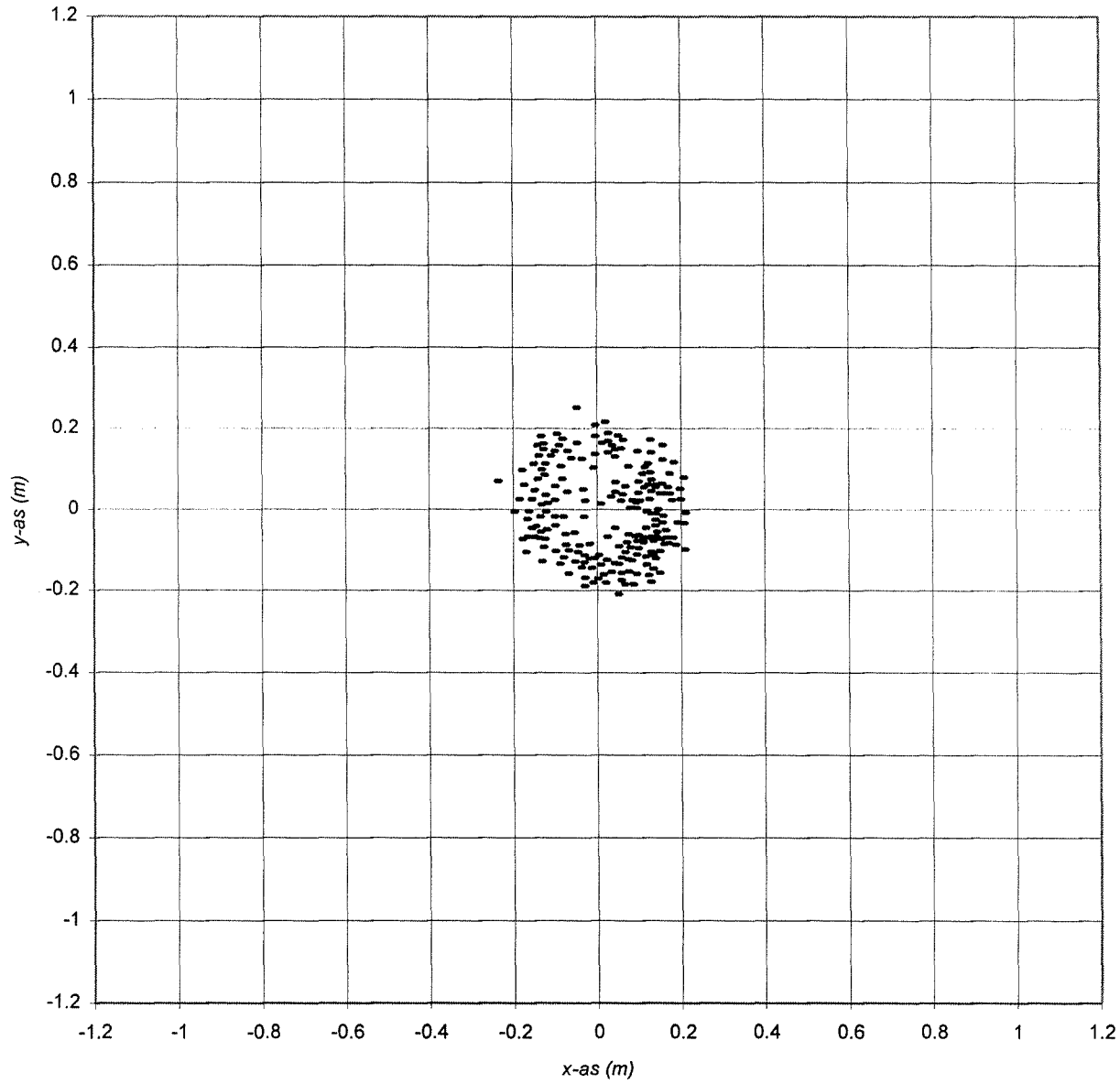
(grindsortering, $D_{n50} = 0,0127$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)

Bijlage 8.6 *Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte stenen uit een grindsortering (in seconden)*

2,6 s	2,9 s	3,1 s	3,2 s	3,3 s	3,5 s	3,6 s	3,9 s	4,1 s	4,6 s
2,7 s	3,0 s	3,2 s	3,3 s	3,4 s	3,5 s	3,7 s	4,1 s	4,6 s	7,1 s

$(D_{n50} = 0,0127 \text{ m}, h = 1,90 \text{ m})$

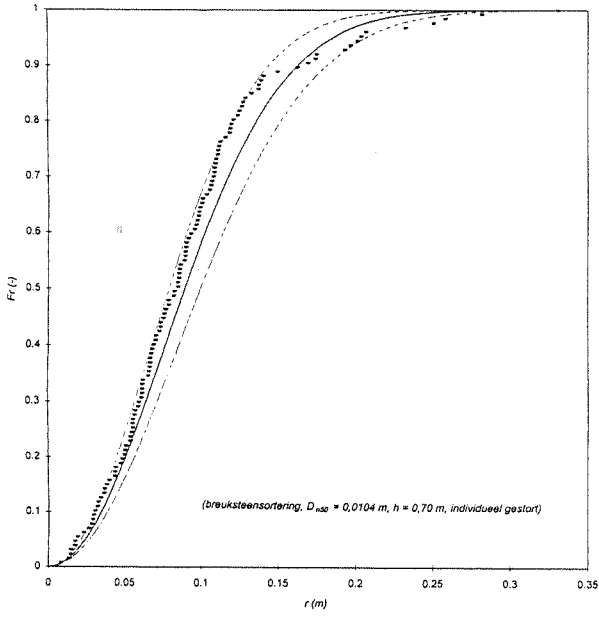
Bijlage 9.2a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.12)*



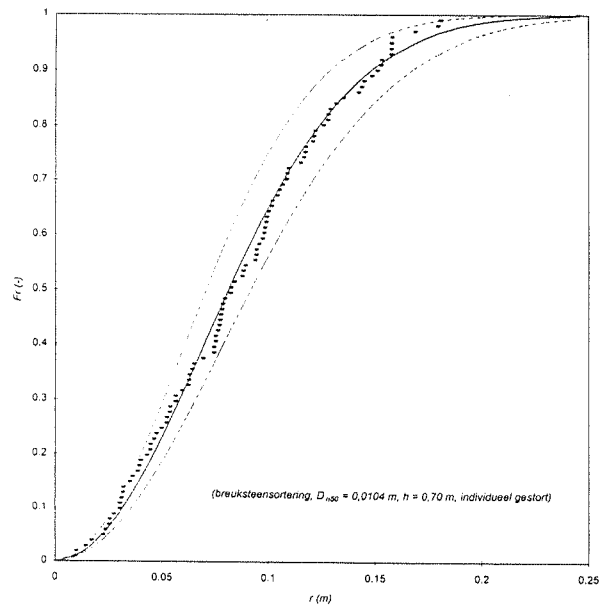
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 7.1b Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met breuksteen)

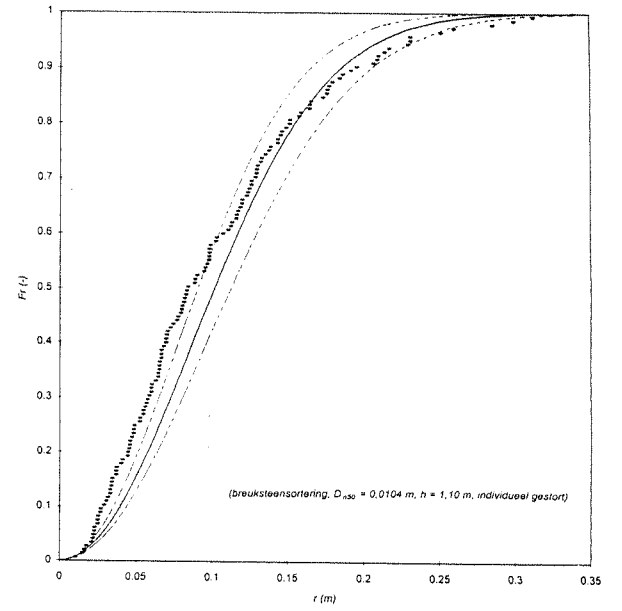
Bijlage 7.2b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.1)



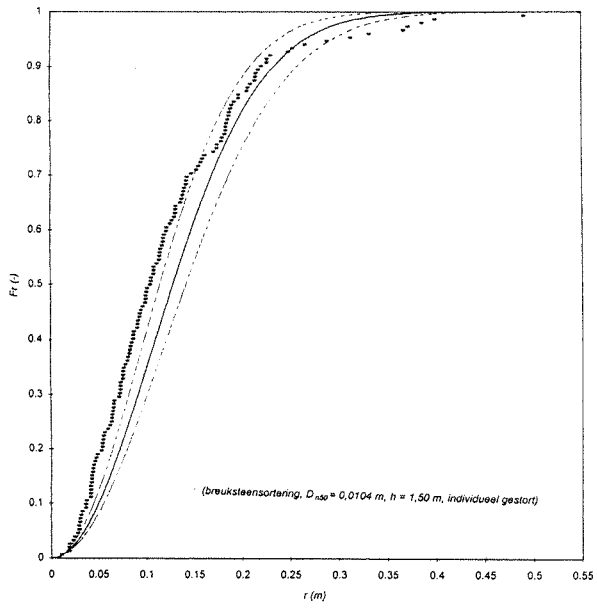
Bijlage 7.3b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.1bis)



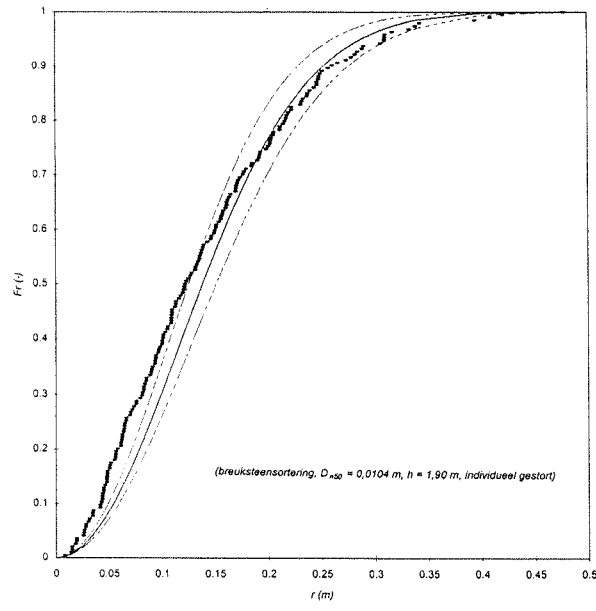
Bijlage 7.4b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.2)



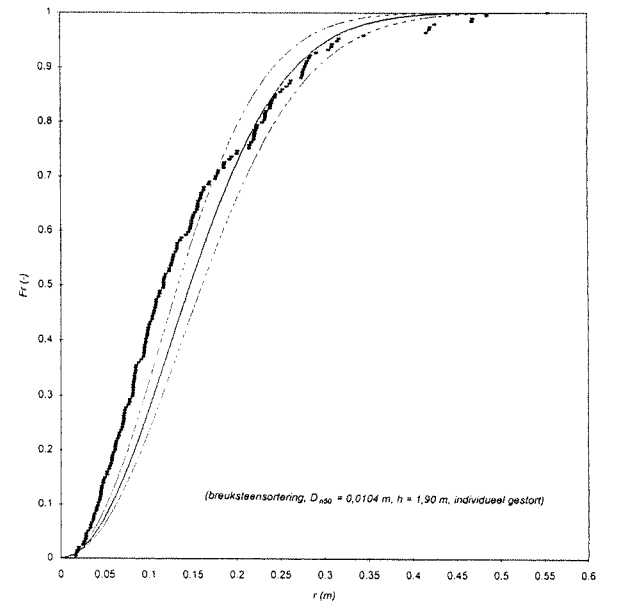
Bijlage 7.5b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.3)



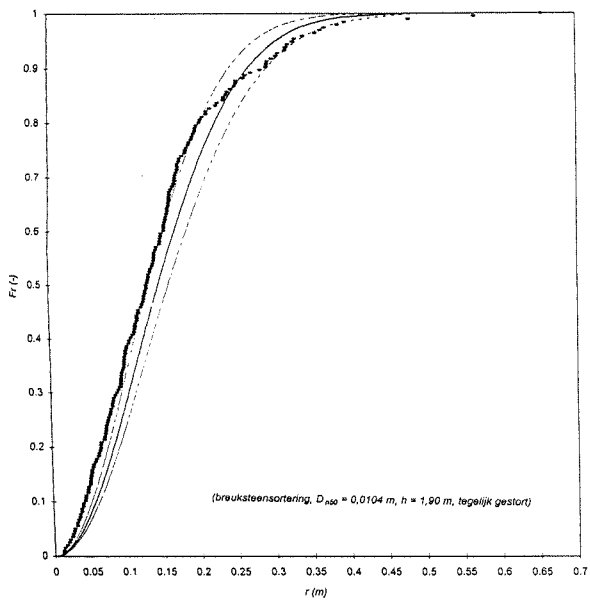
Bijlage 7.6b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.4)



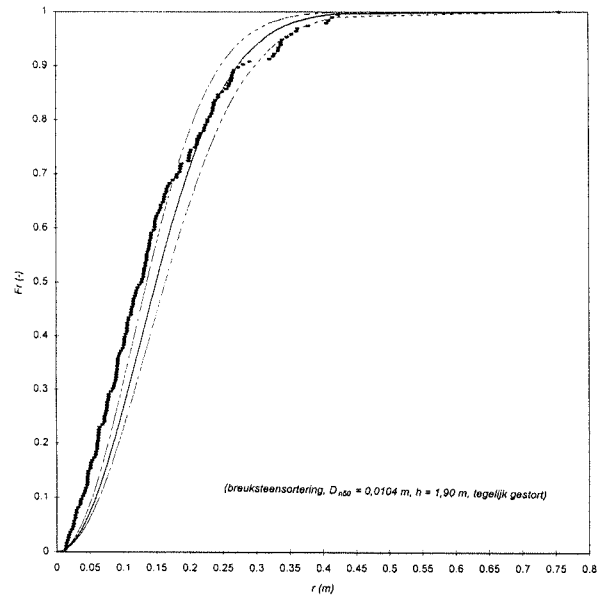
Bijlage 7.7b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.4bis)



Bijlage 7.8b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.5)

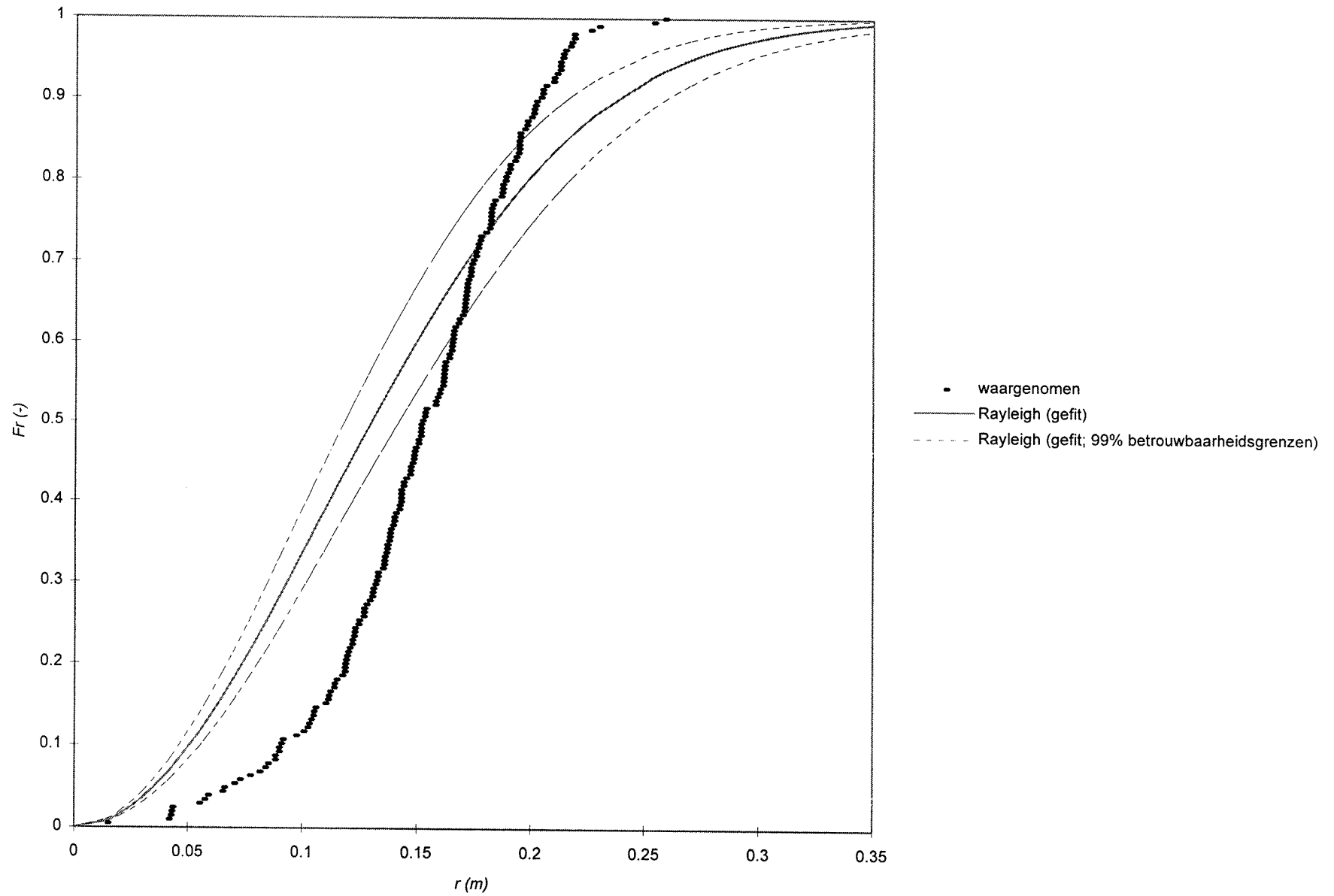


Bijlage 7.9b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.5bis)



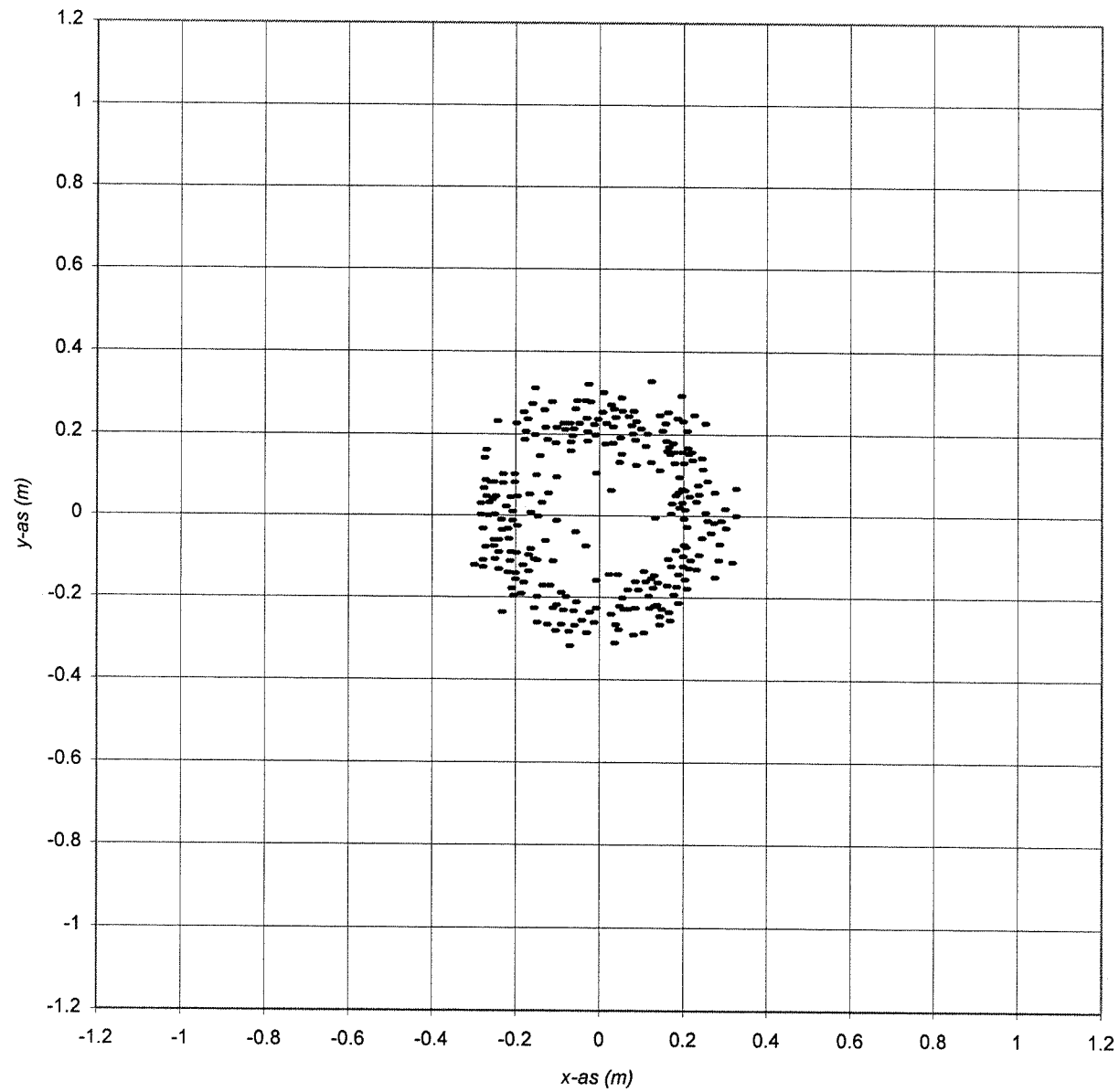
- waargenomen
 - Rayleigh (gefit)
 - - - Rayleigh (gefit, 99% betrouwbaarheidsgrenzen)

Bijlage 9.2b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.12)



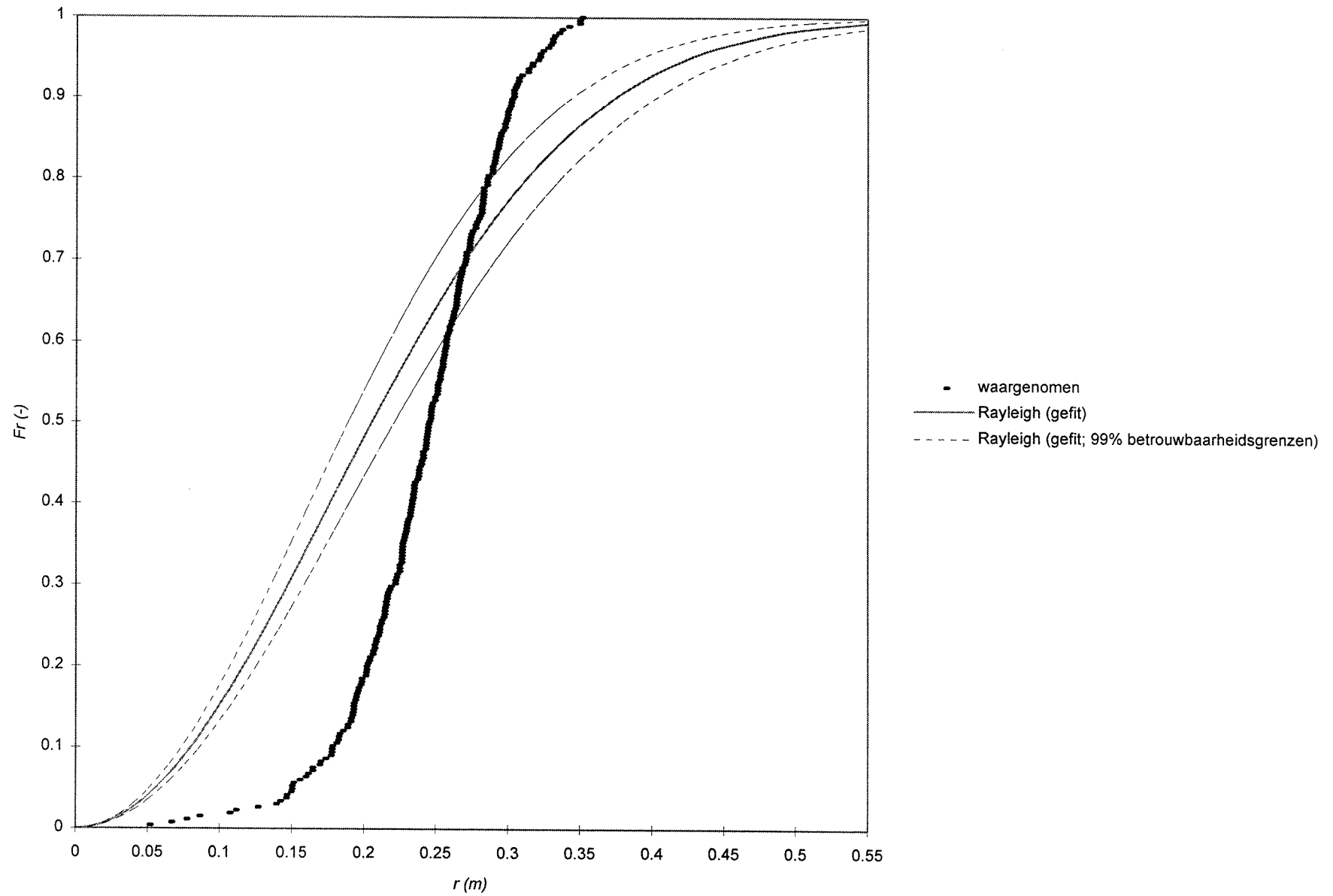
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.3a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr. 13)*



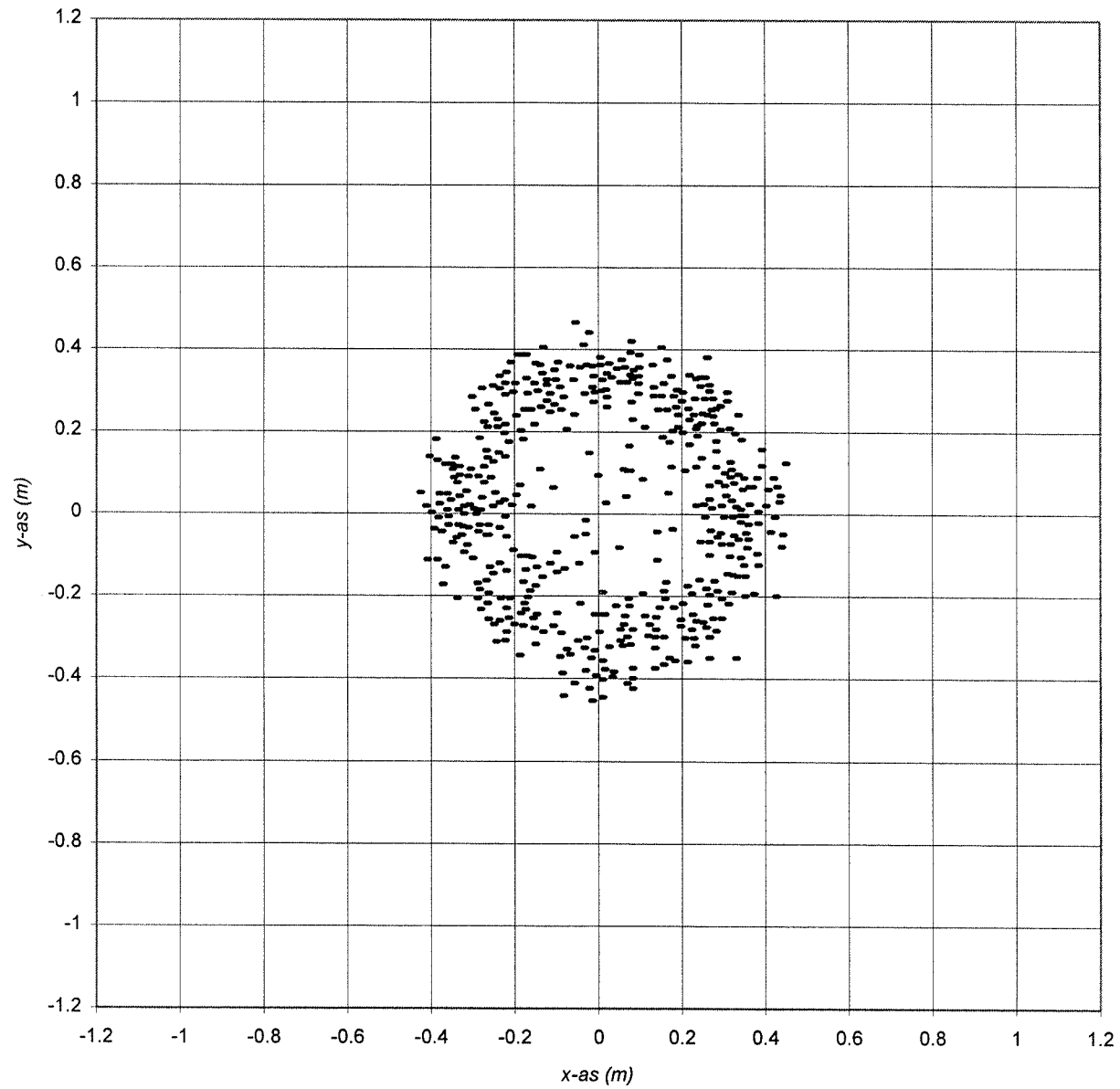
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.3b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.13)



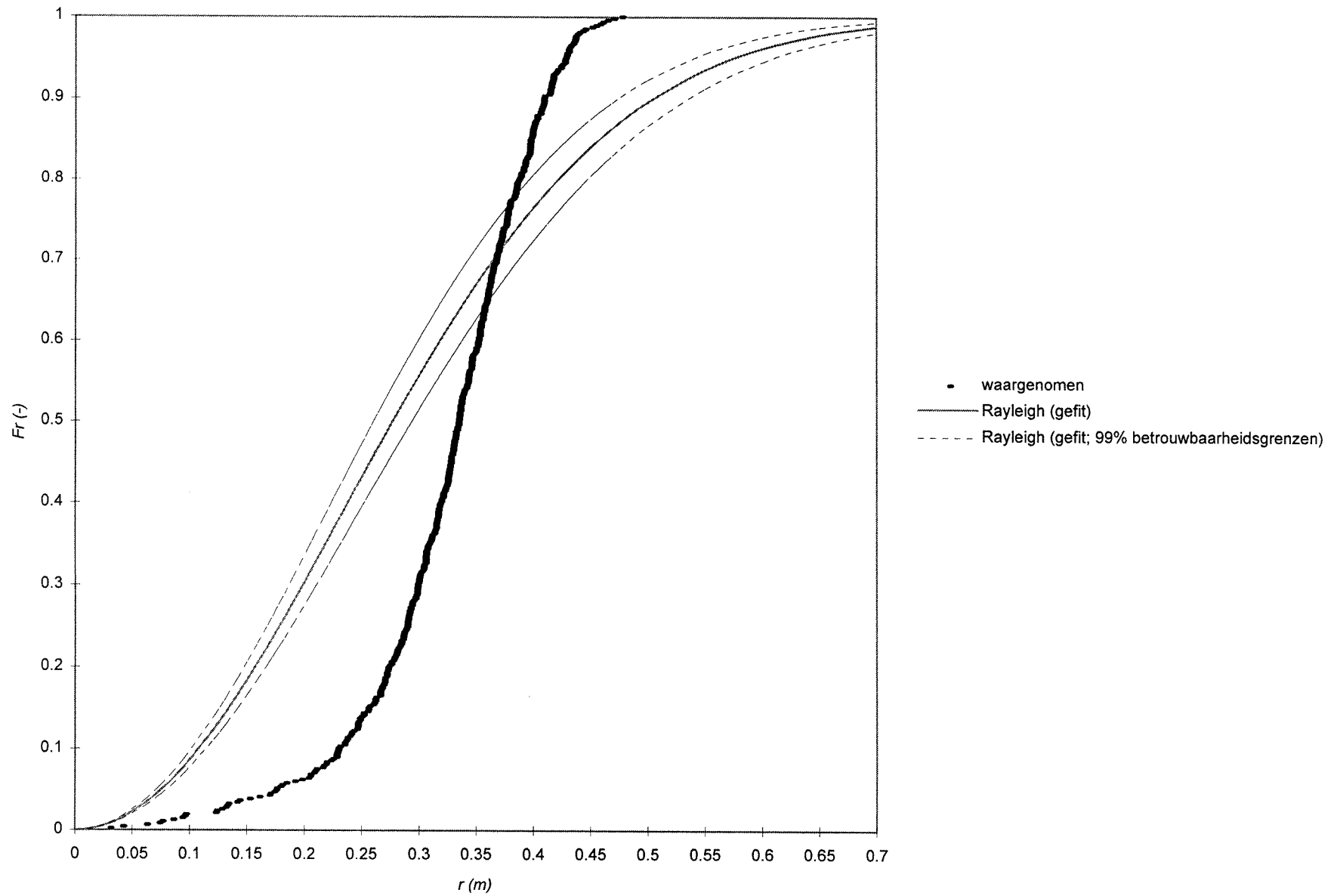
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.4a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr. 14)



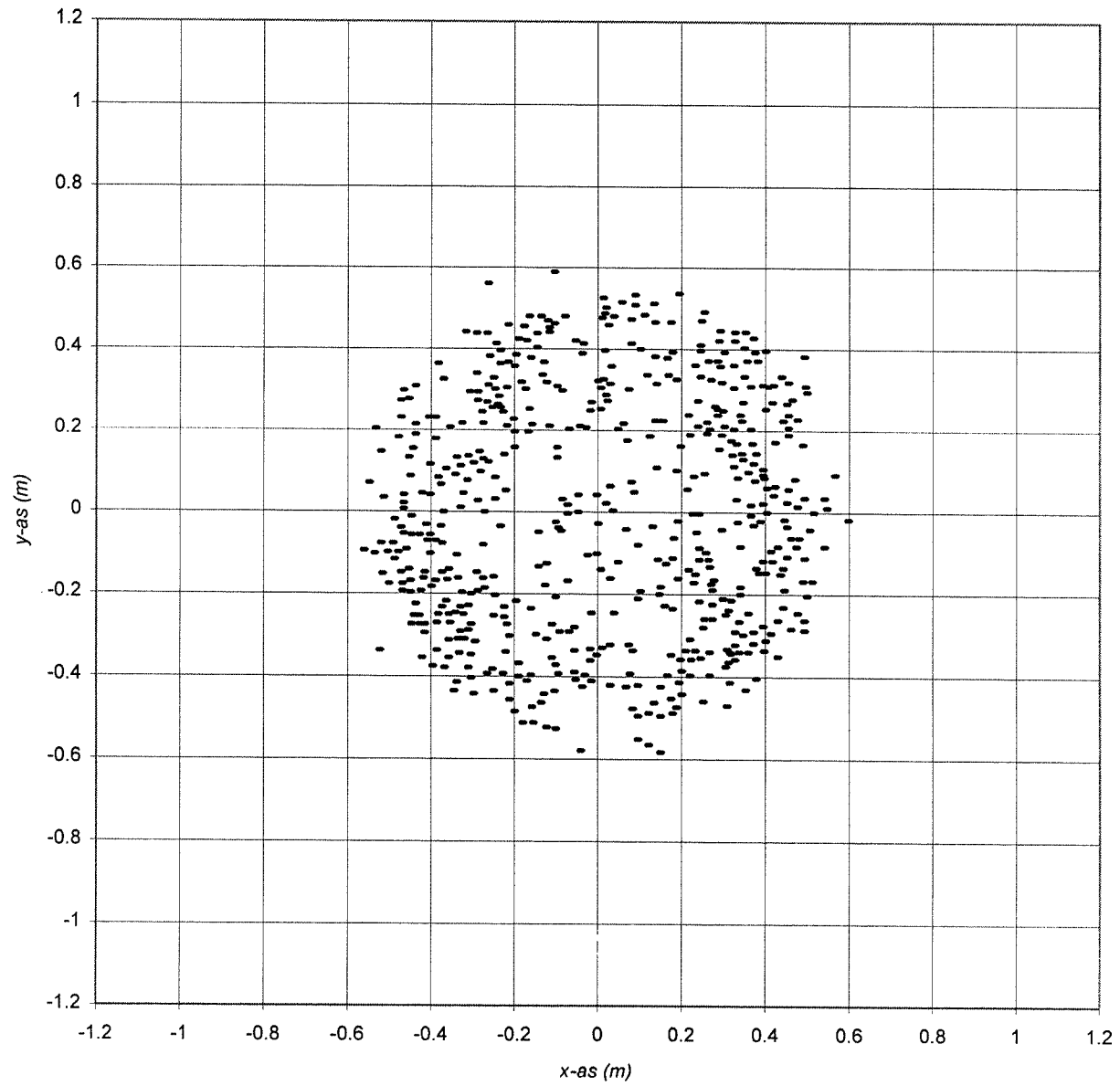
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.4b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr. 14)



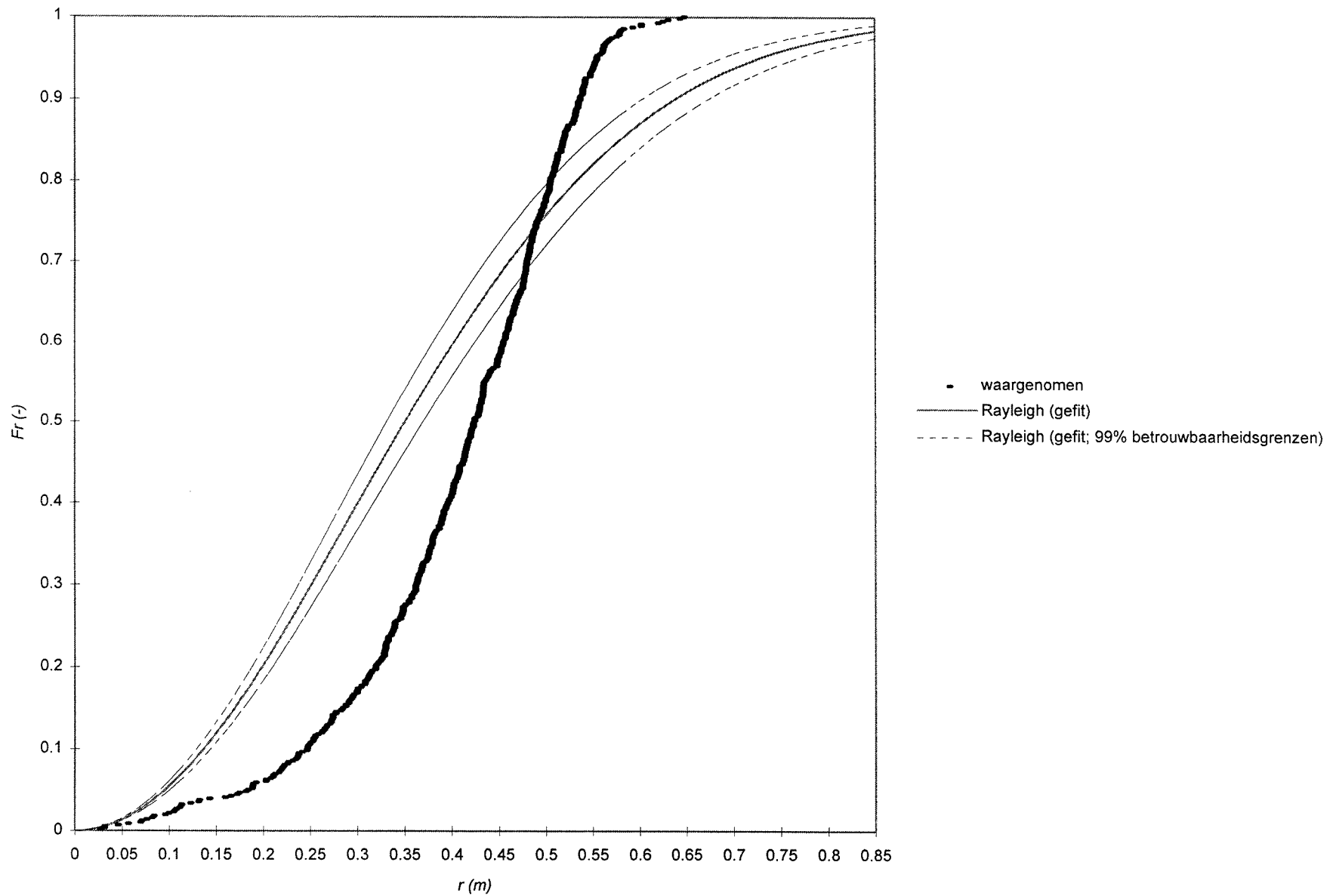
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.5a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.15)*



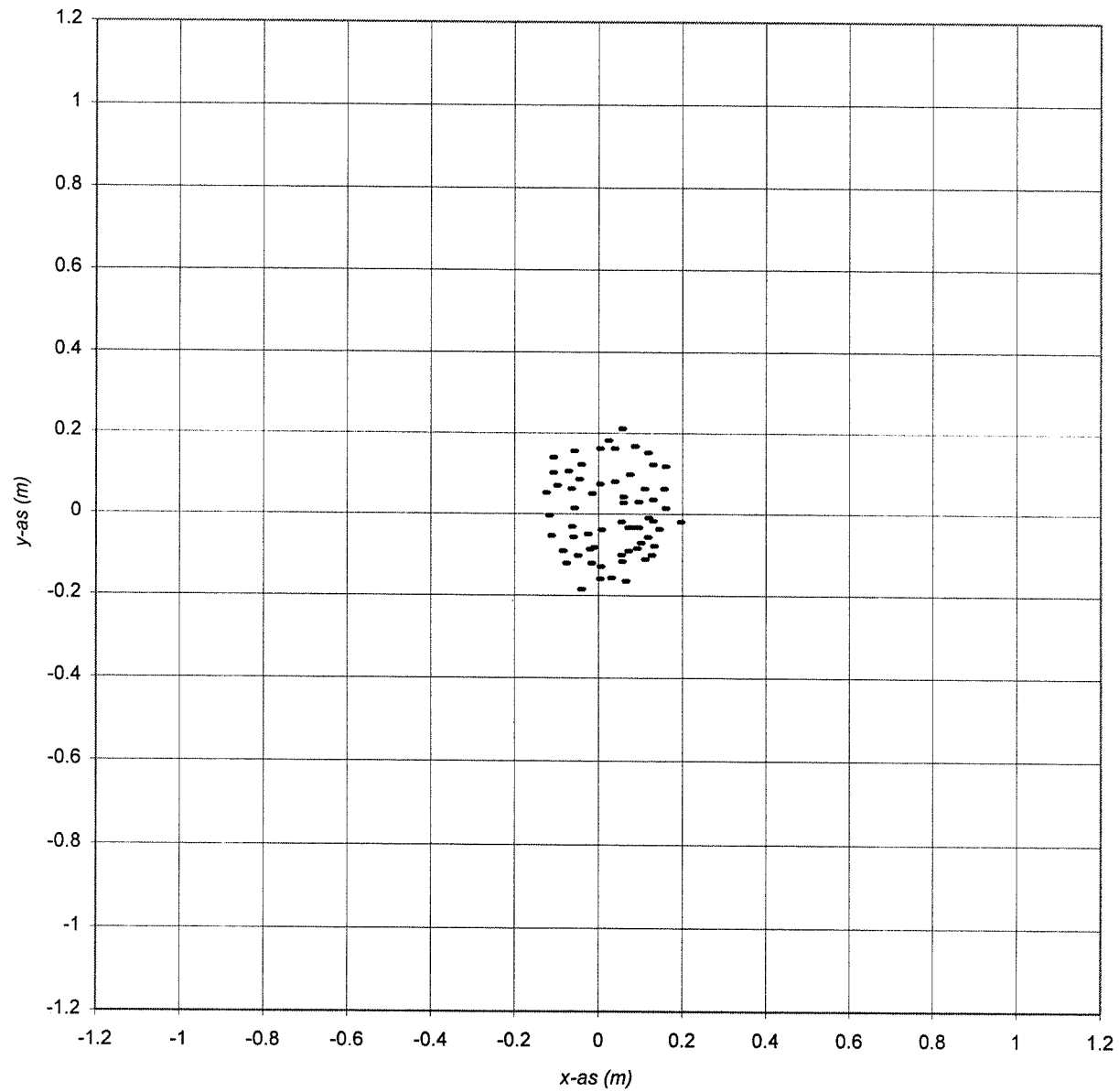
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.5b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr. 15)



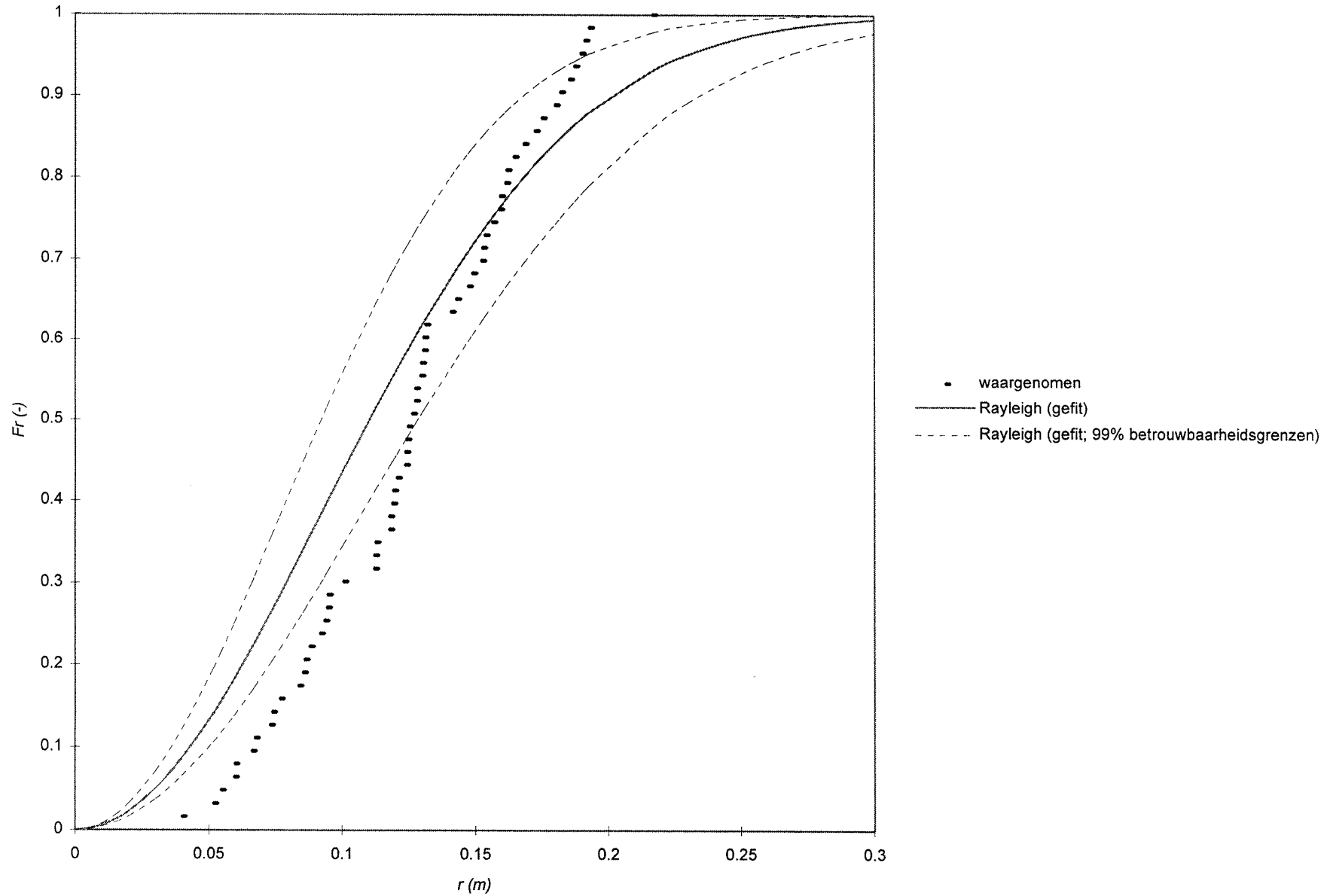
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.6a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.16)*



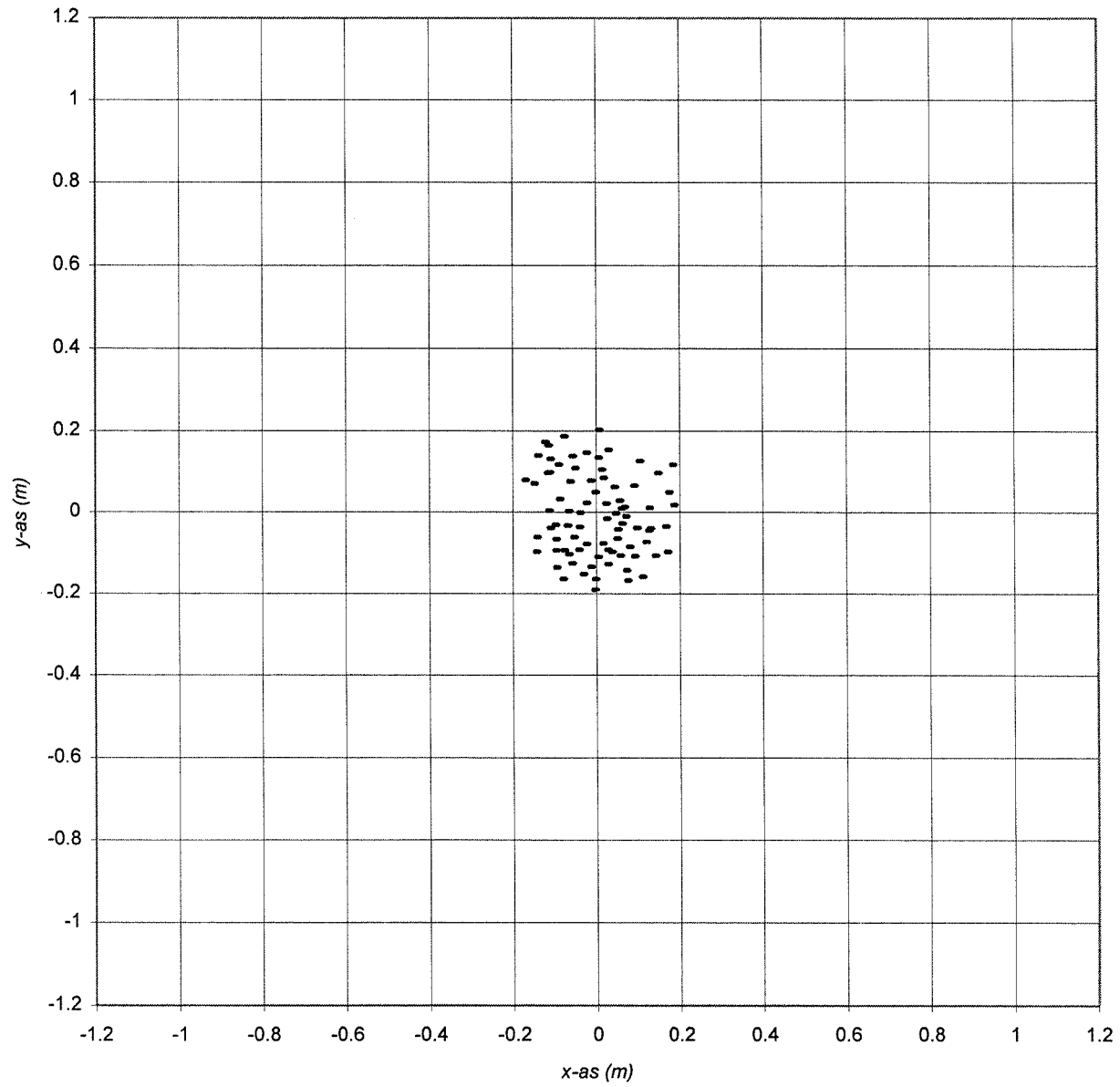
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.6b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.16)



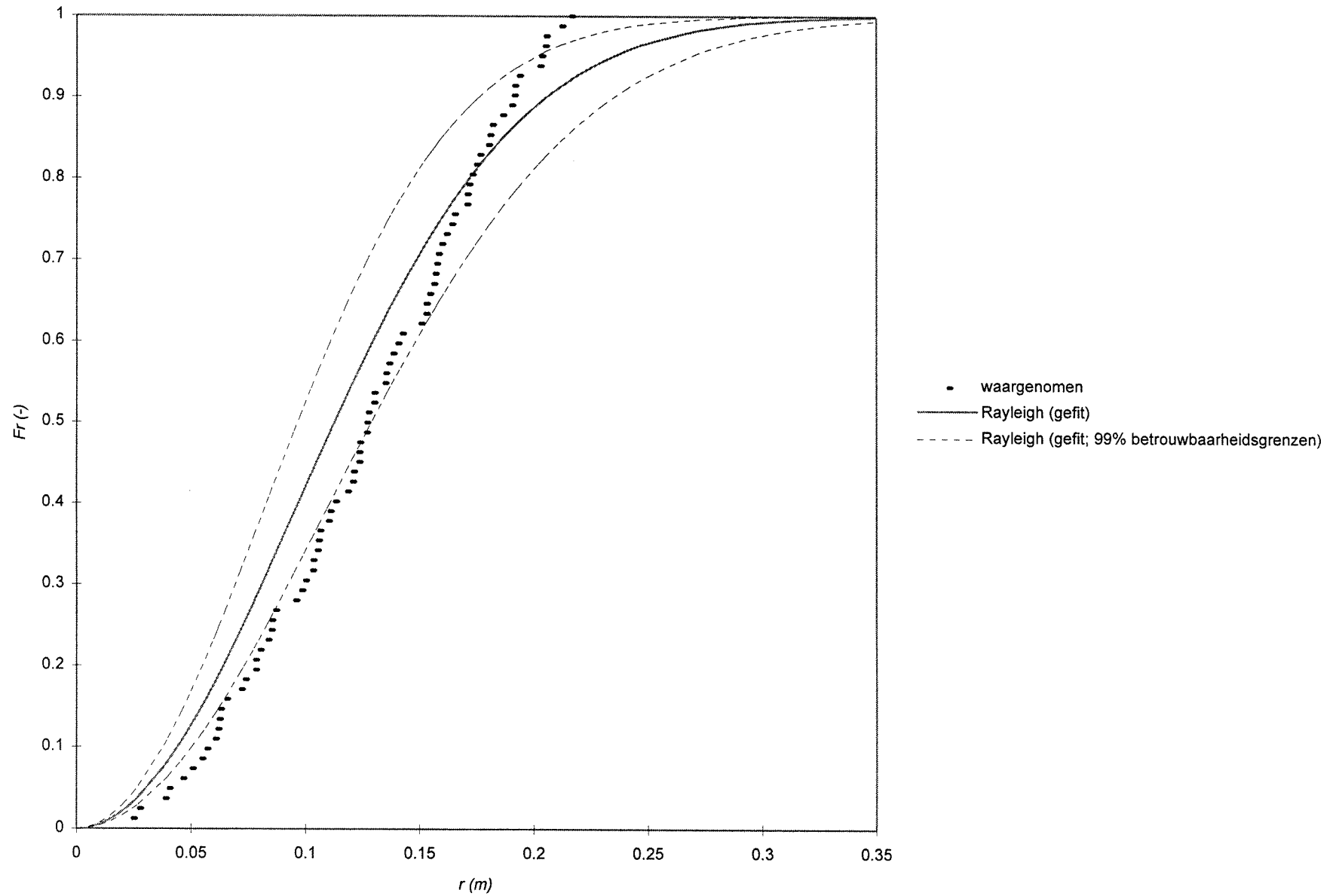
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.7a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.16bis)*



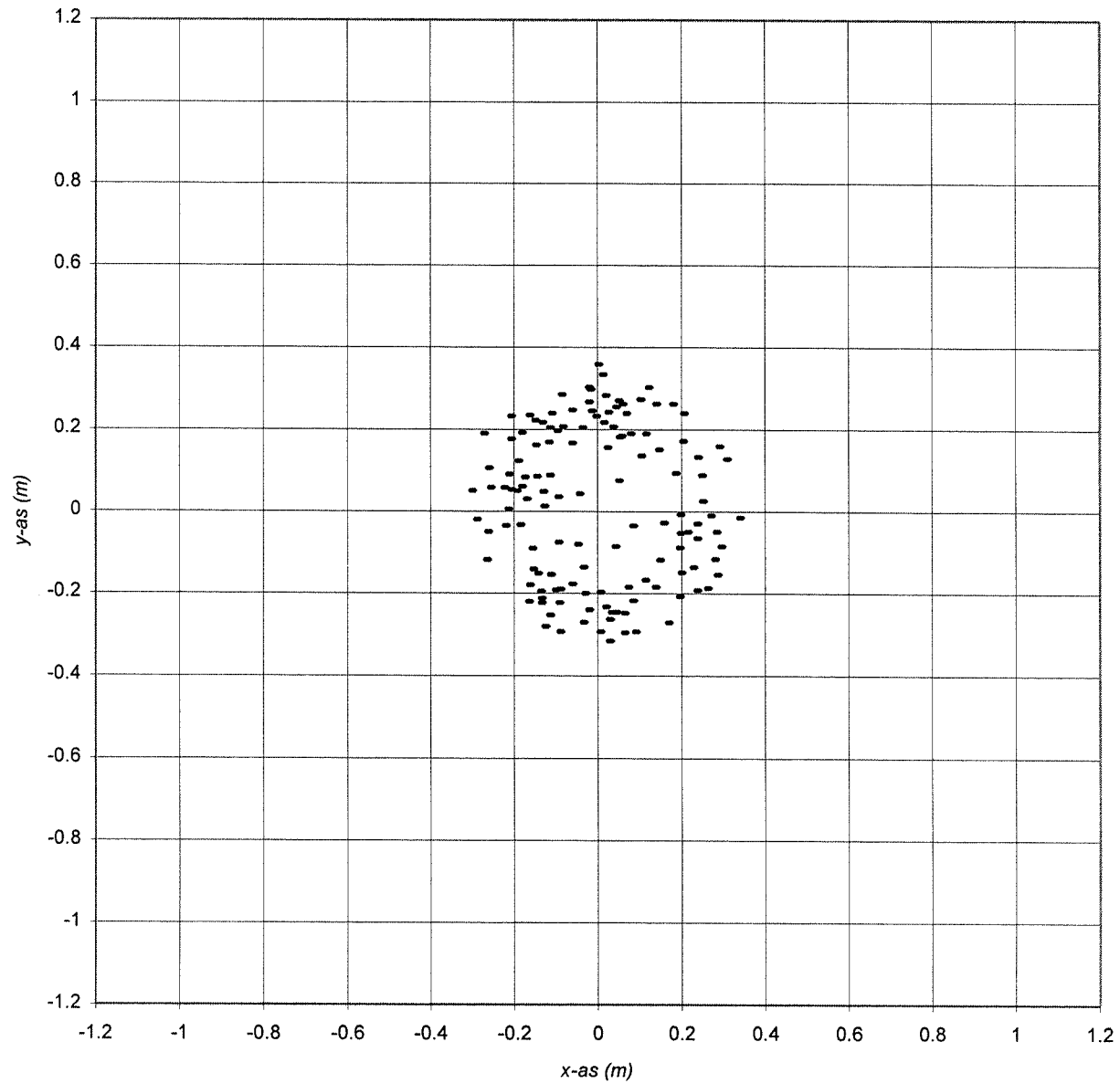
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.7b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.16bis)



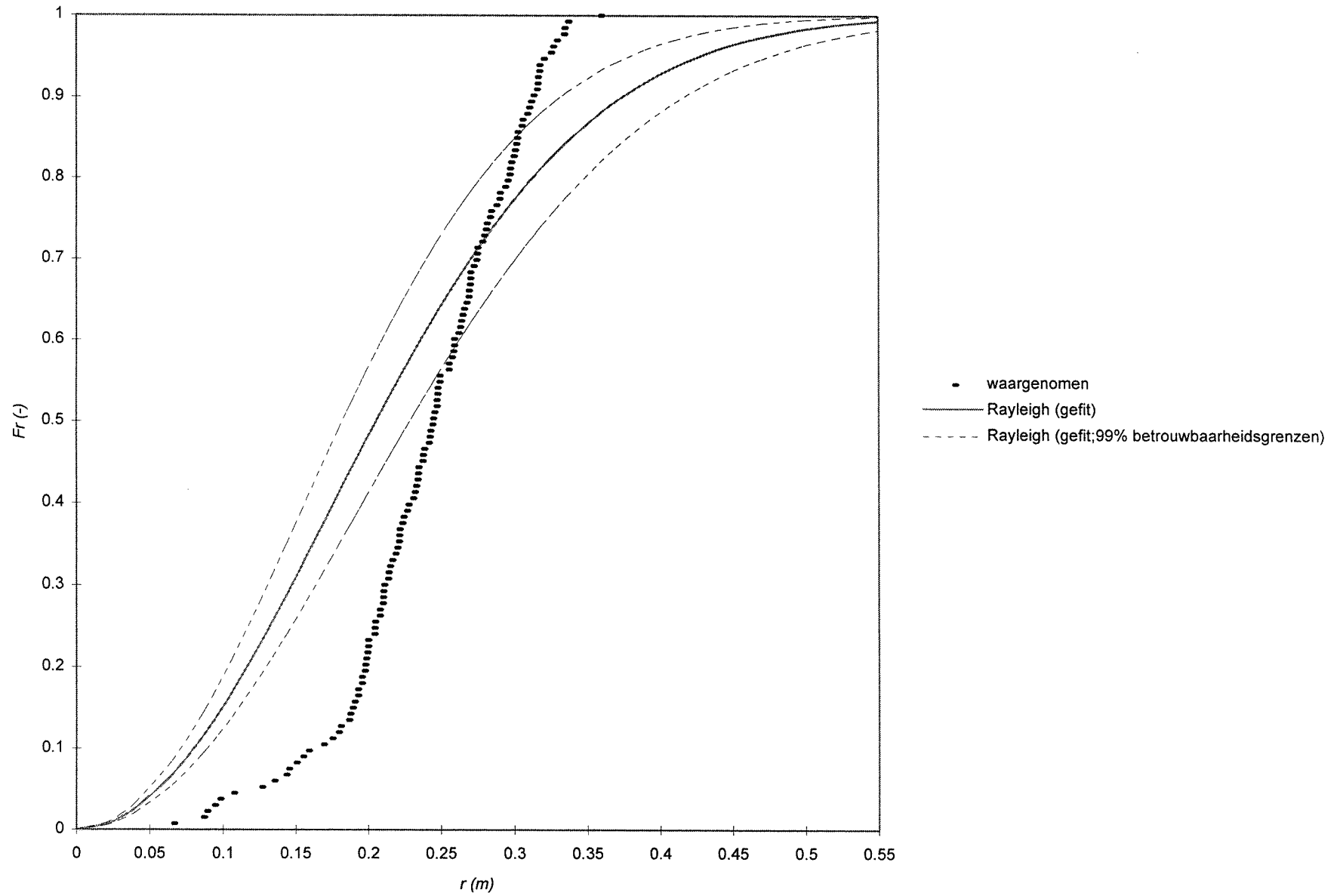
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.8a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.17)*



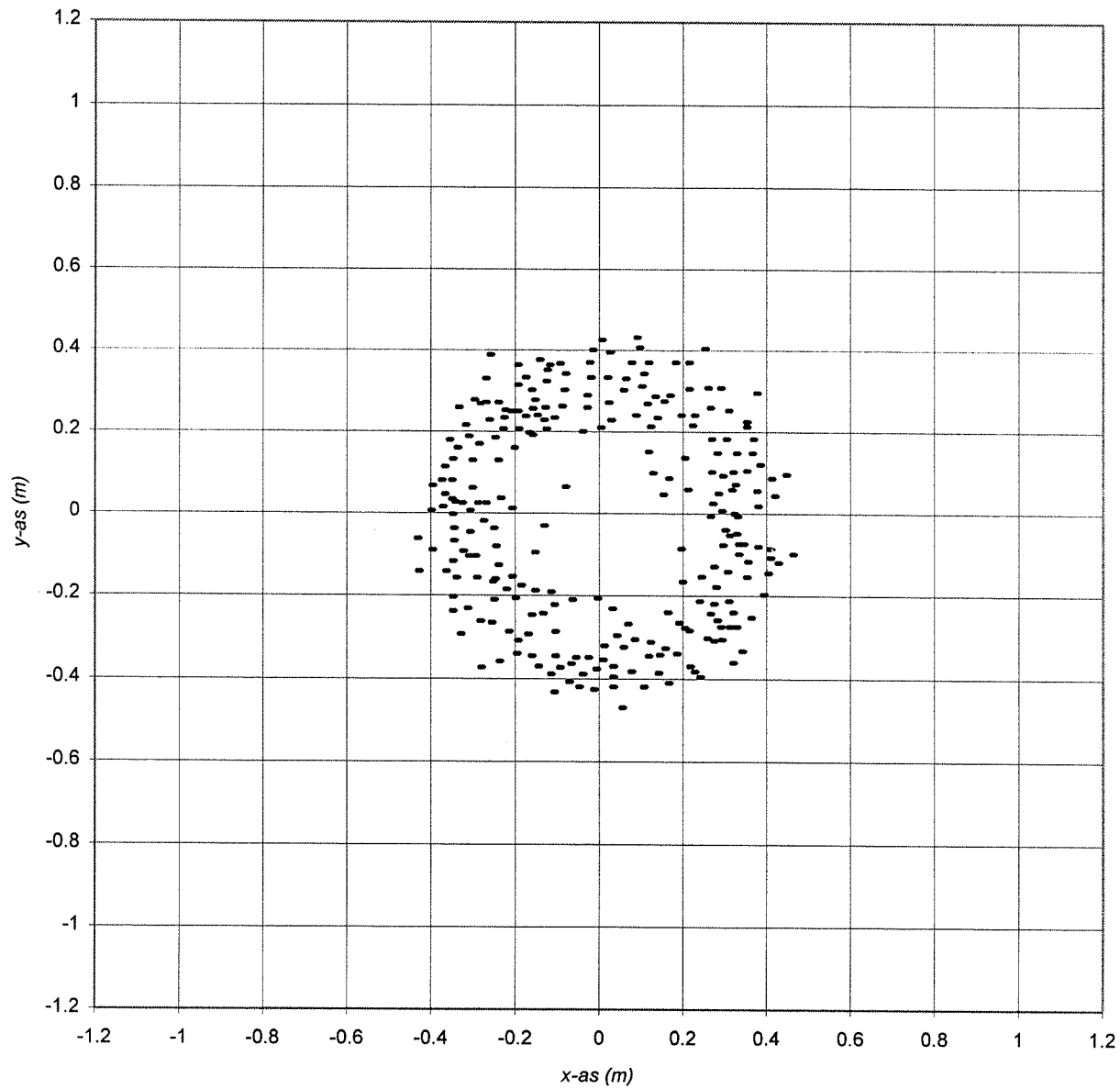
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.8b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.17)



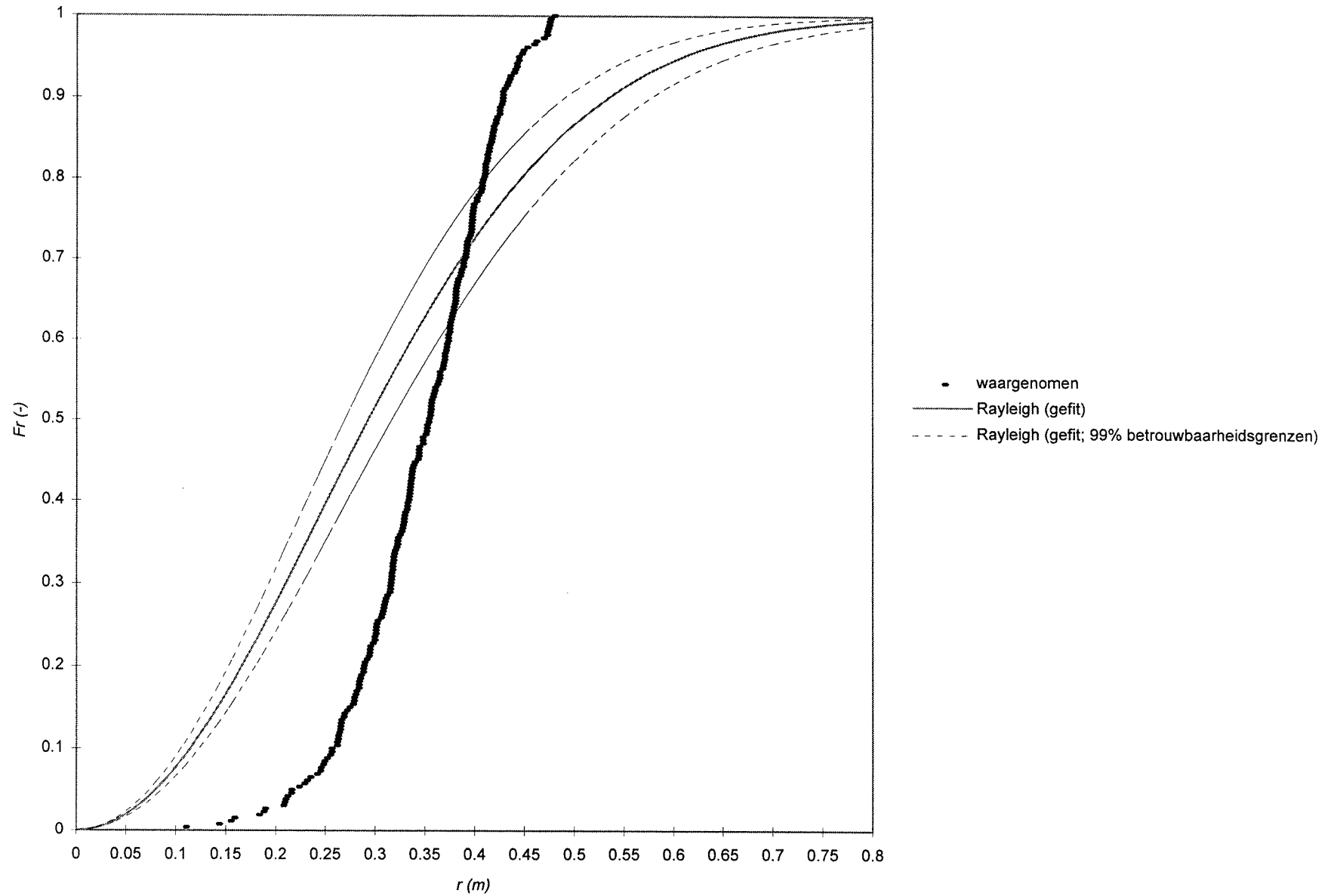
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.9a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.18)*



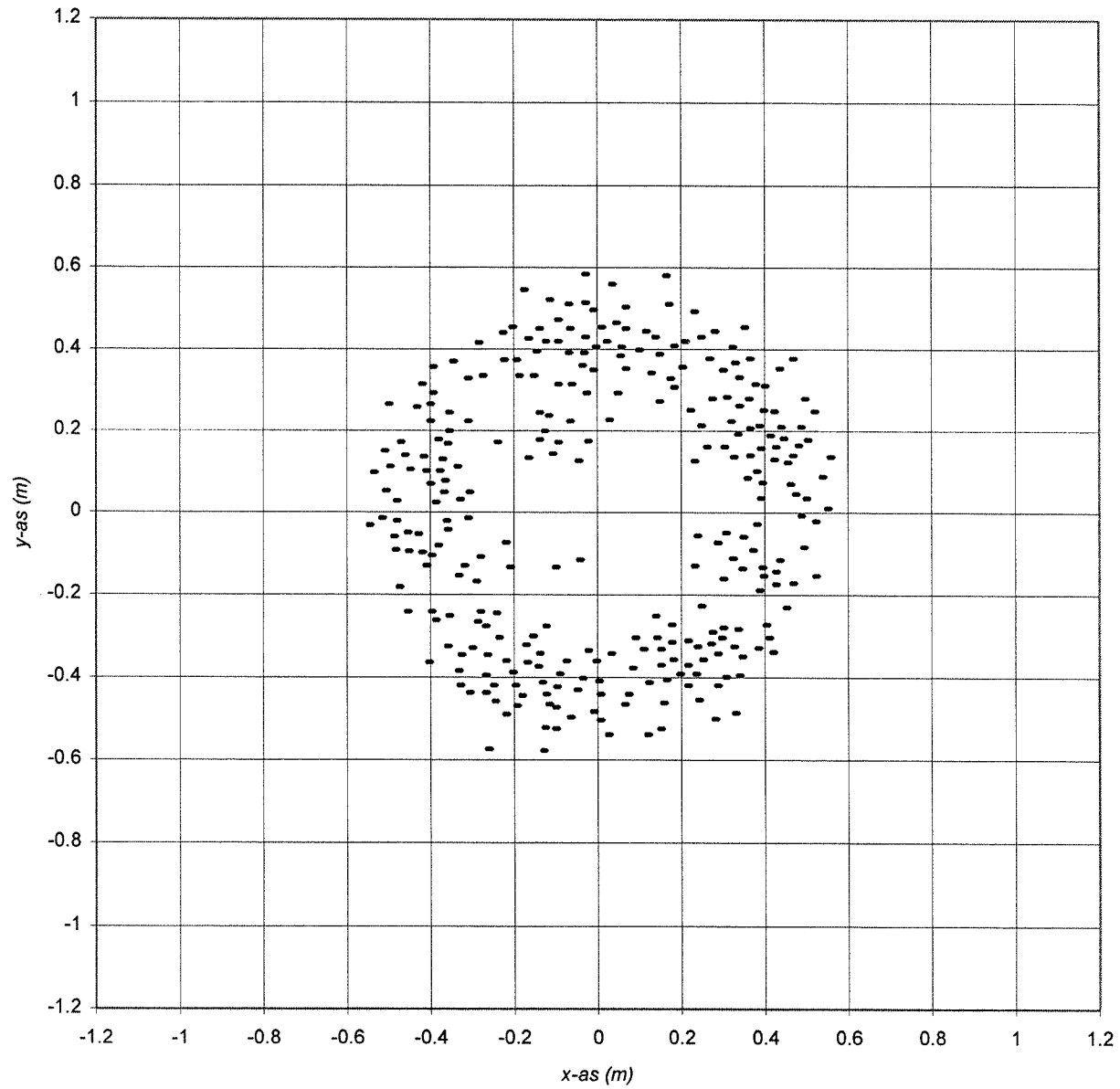
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.9b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.18)



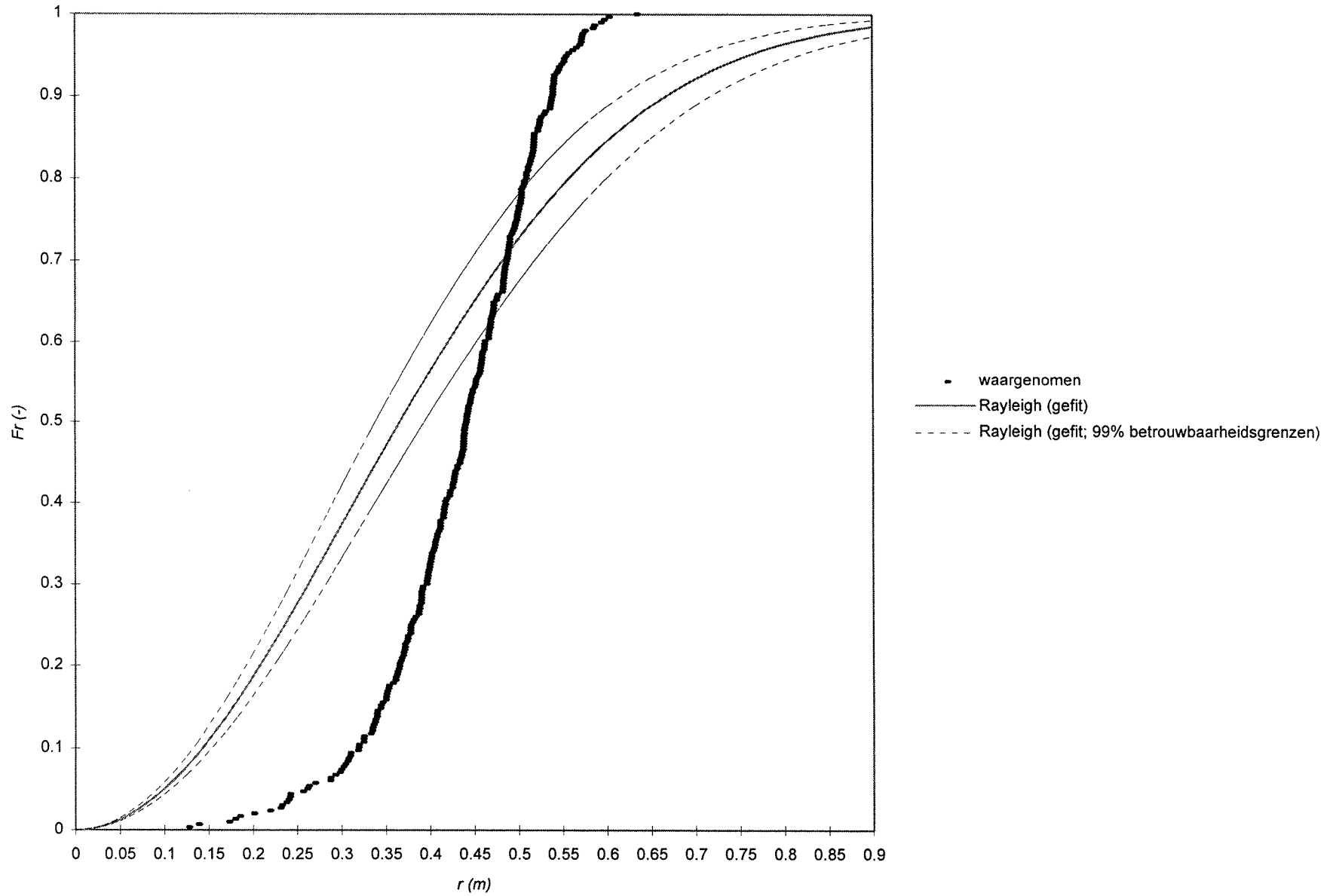
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.10a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.19)*



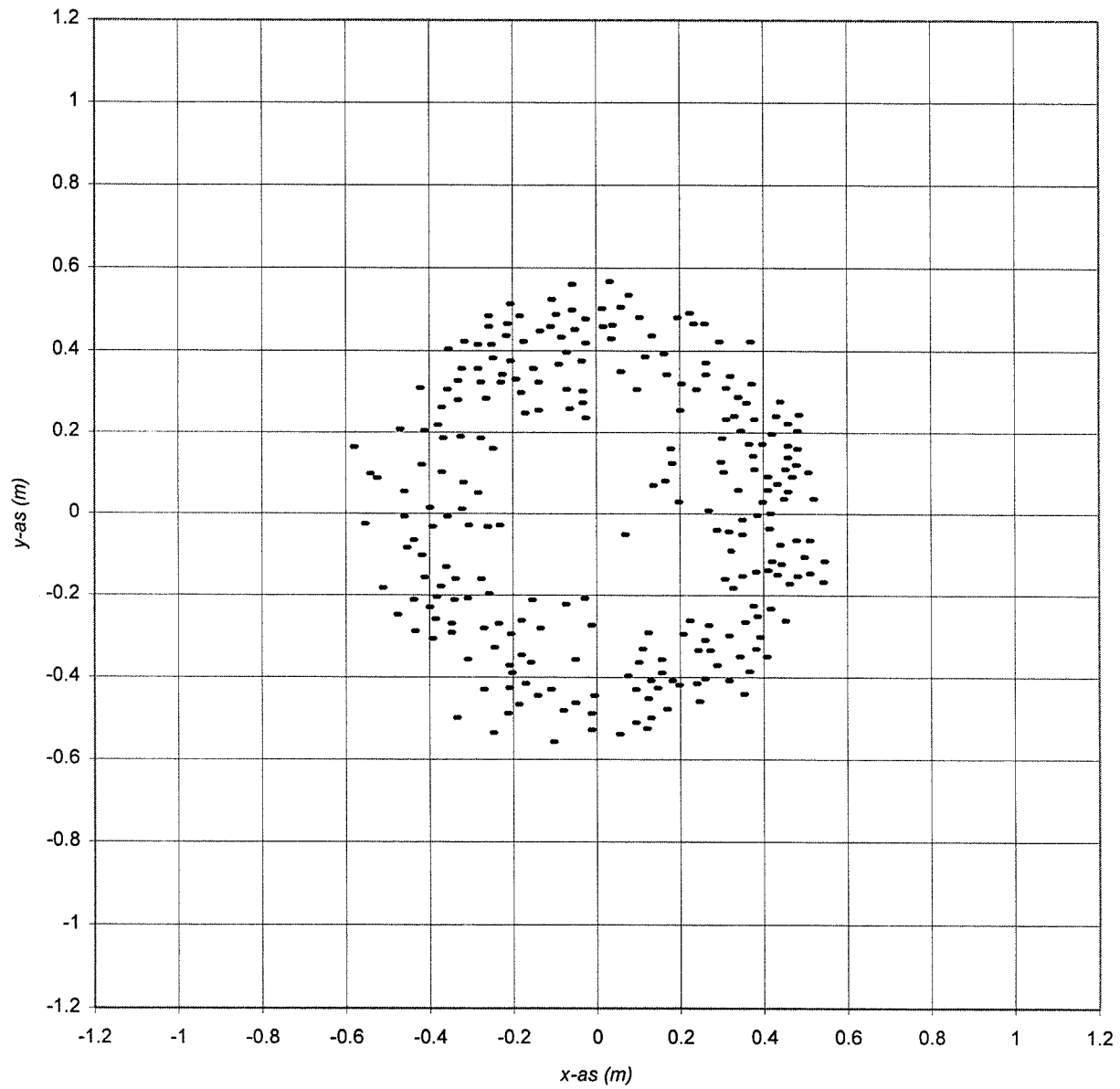
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.10b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.19)



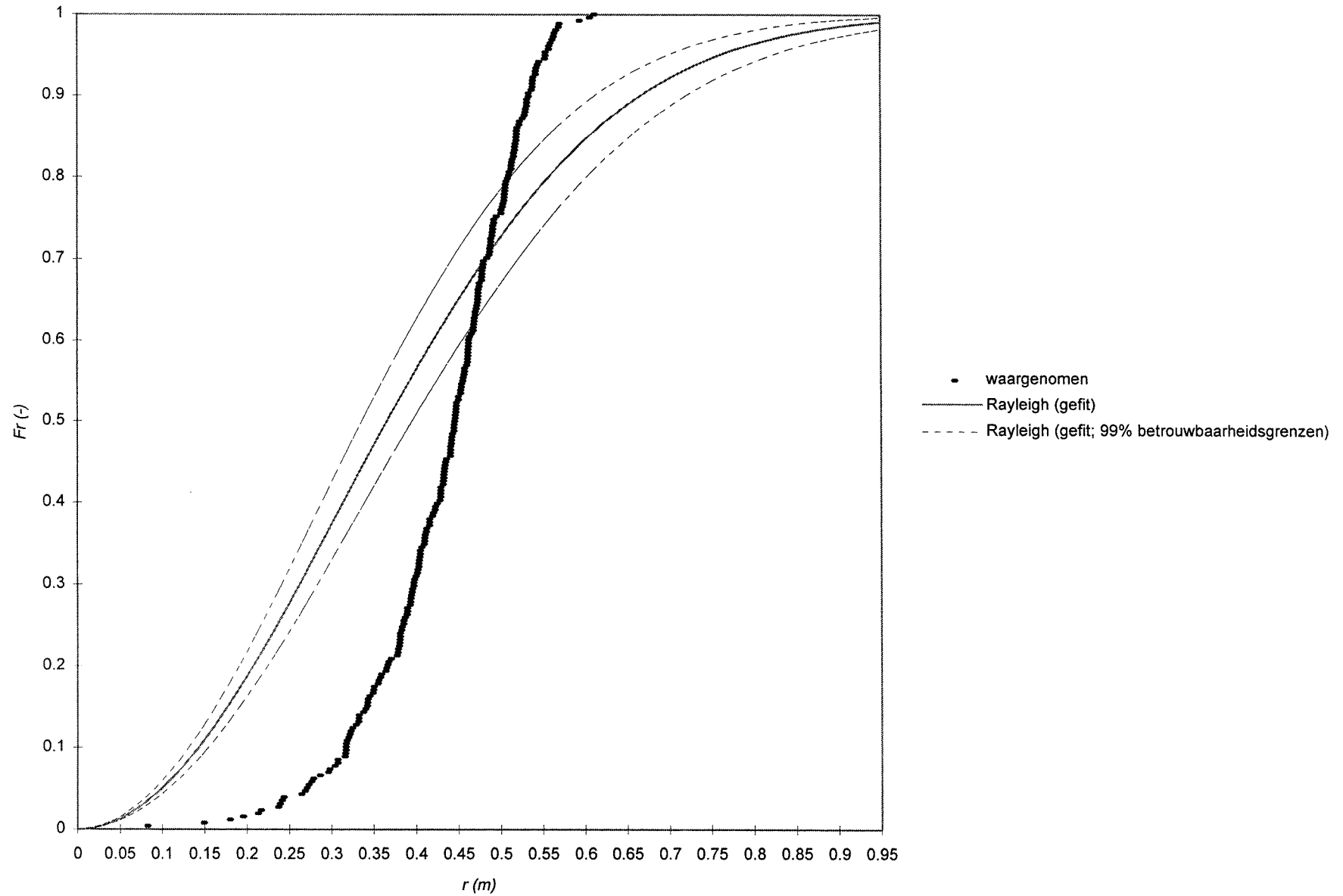
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.11a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr. 19bis)



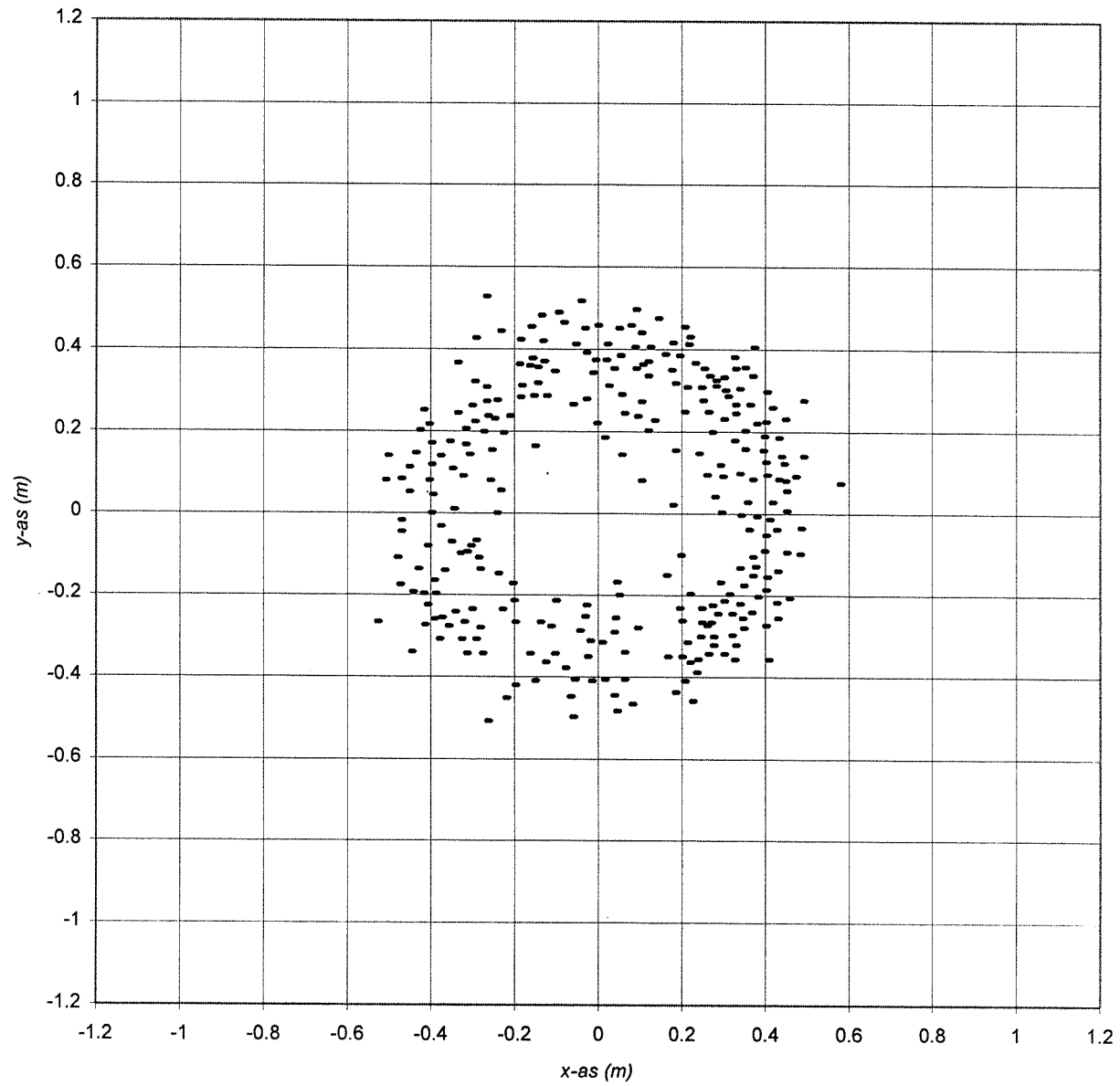
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.11b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.19bis)



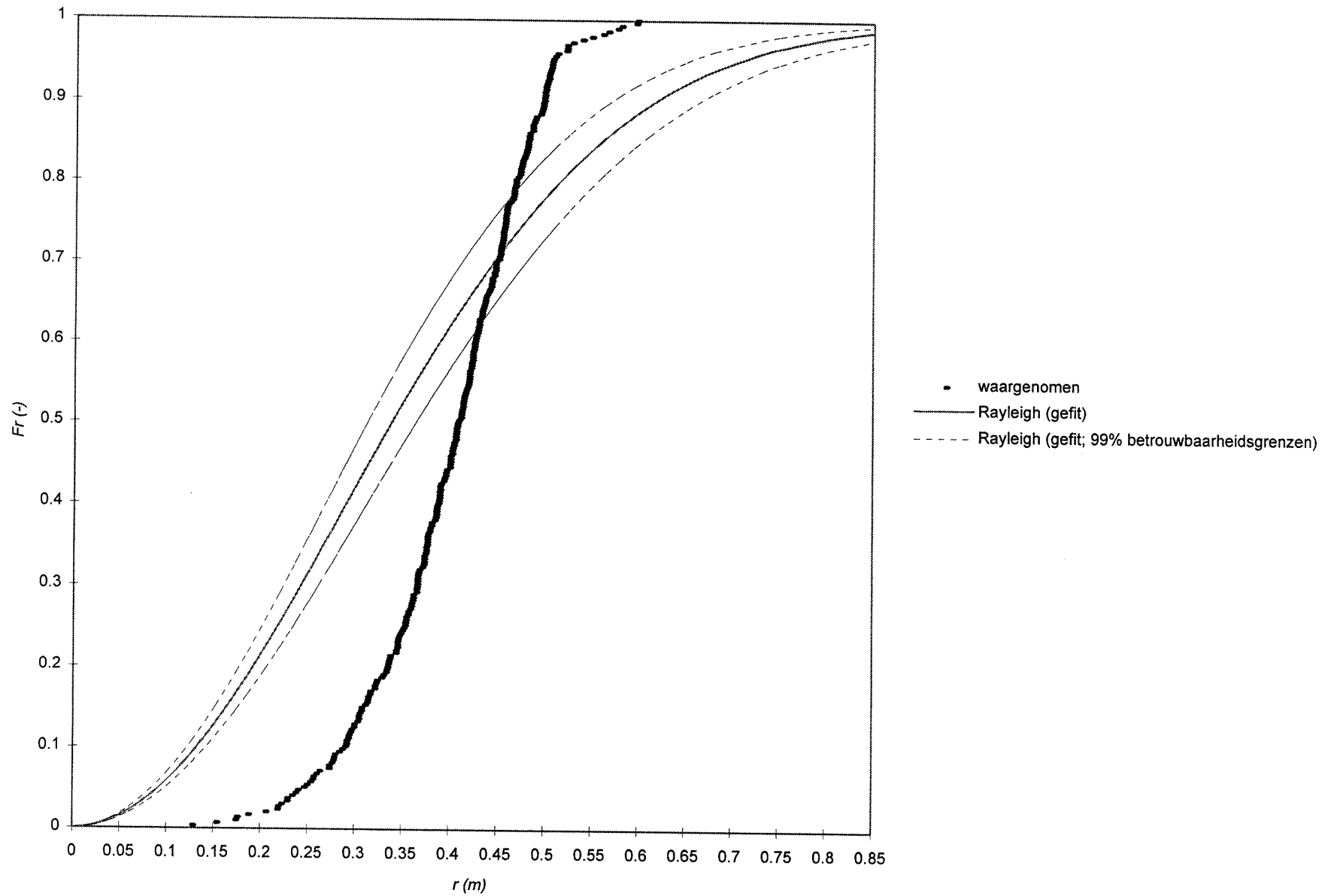
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.12a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.20)*



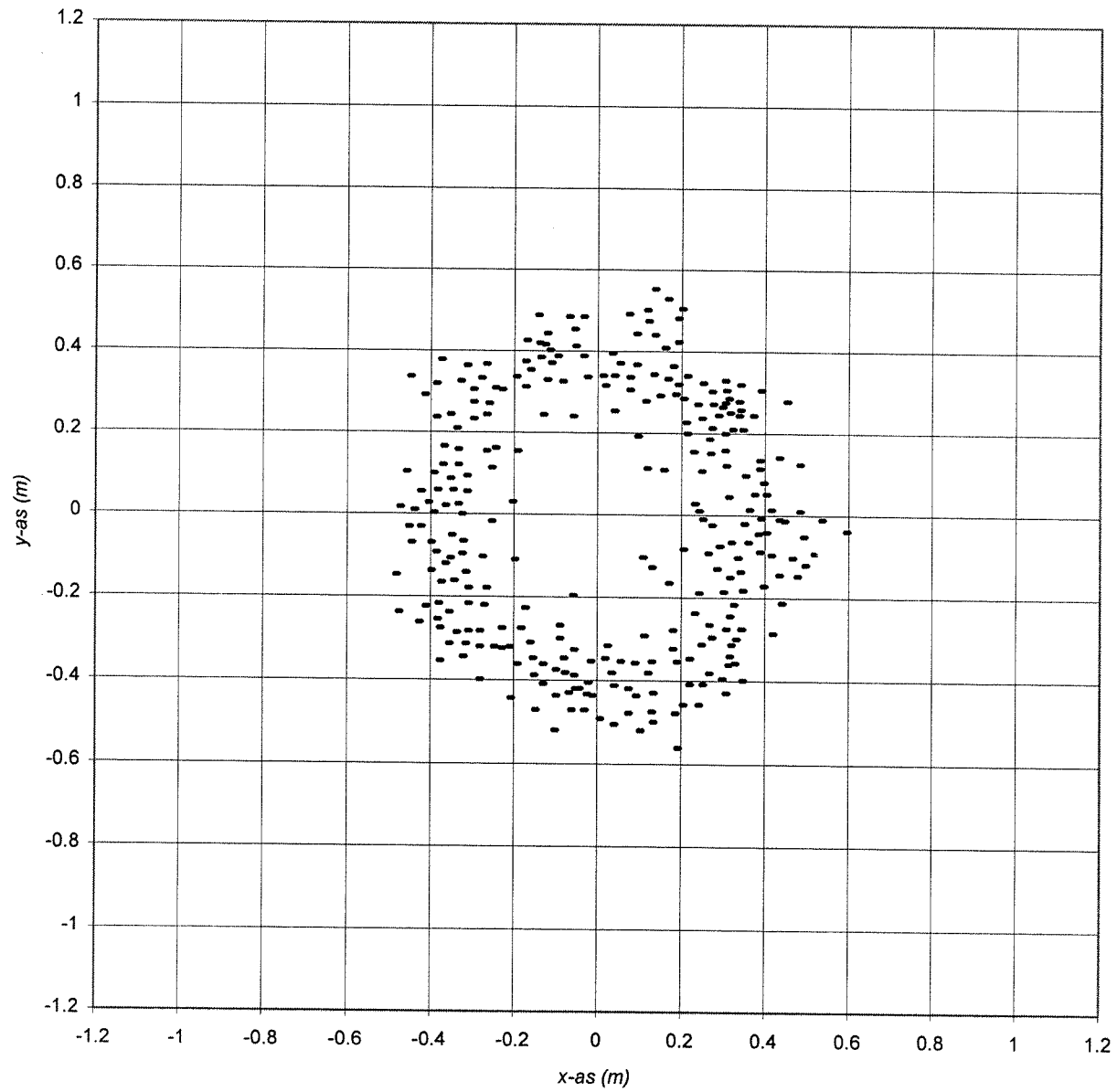
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; vlak)

Bijlage 9.12b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.20)



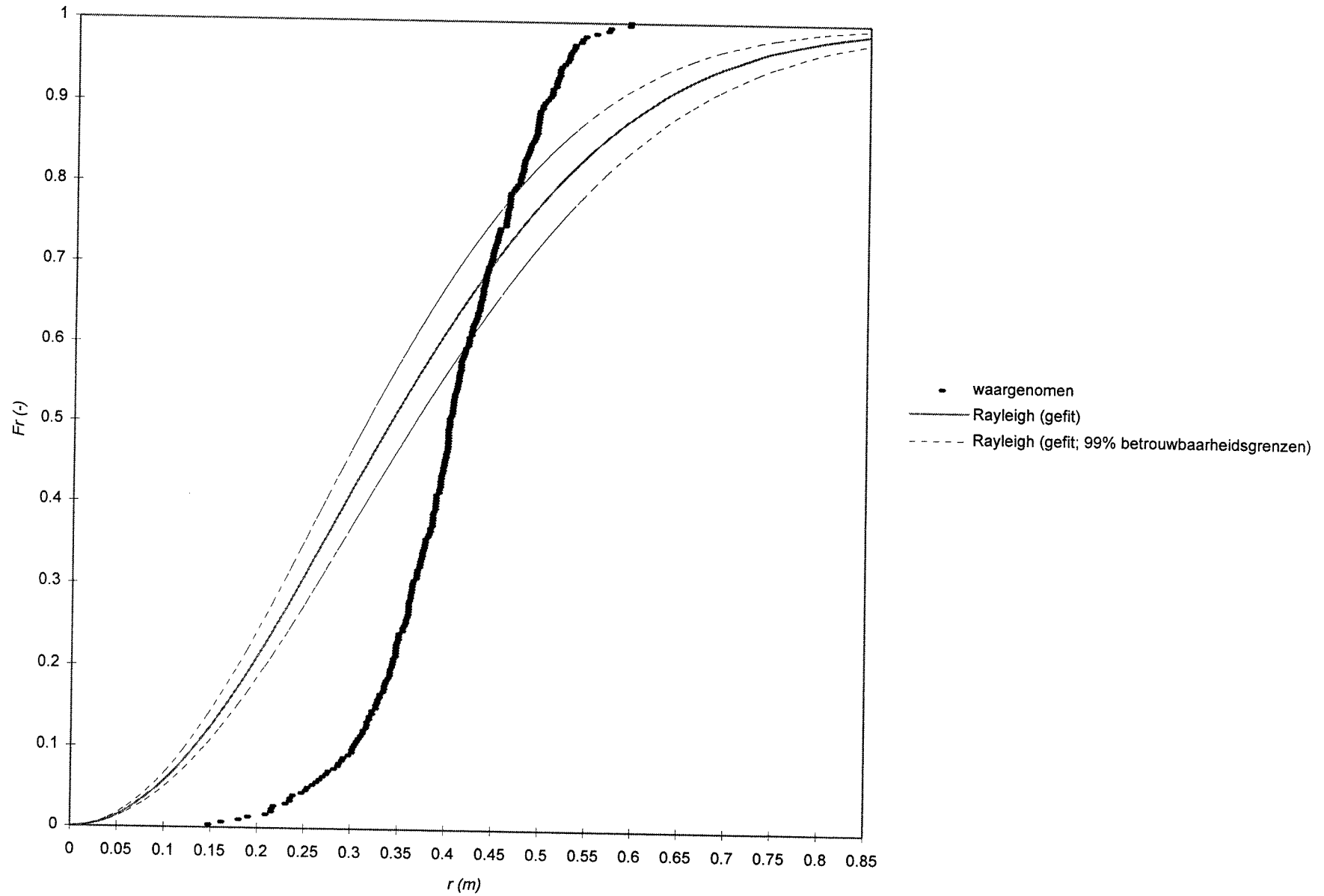
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; vlak)

Bijlage 9.13a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.20bis)



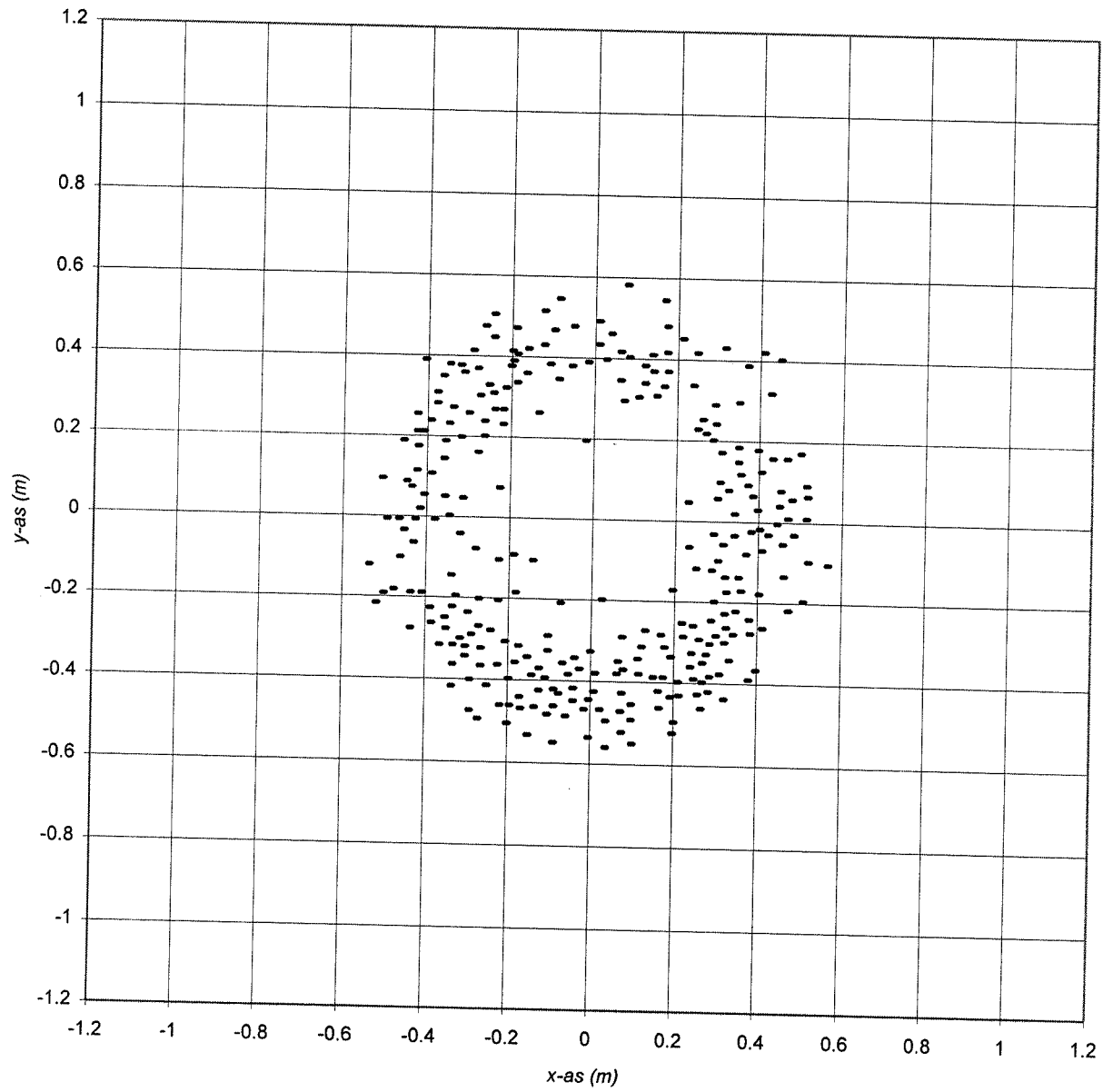
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; vlak)

Bijlage 9.13b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.20bis)



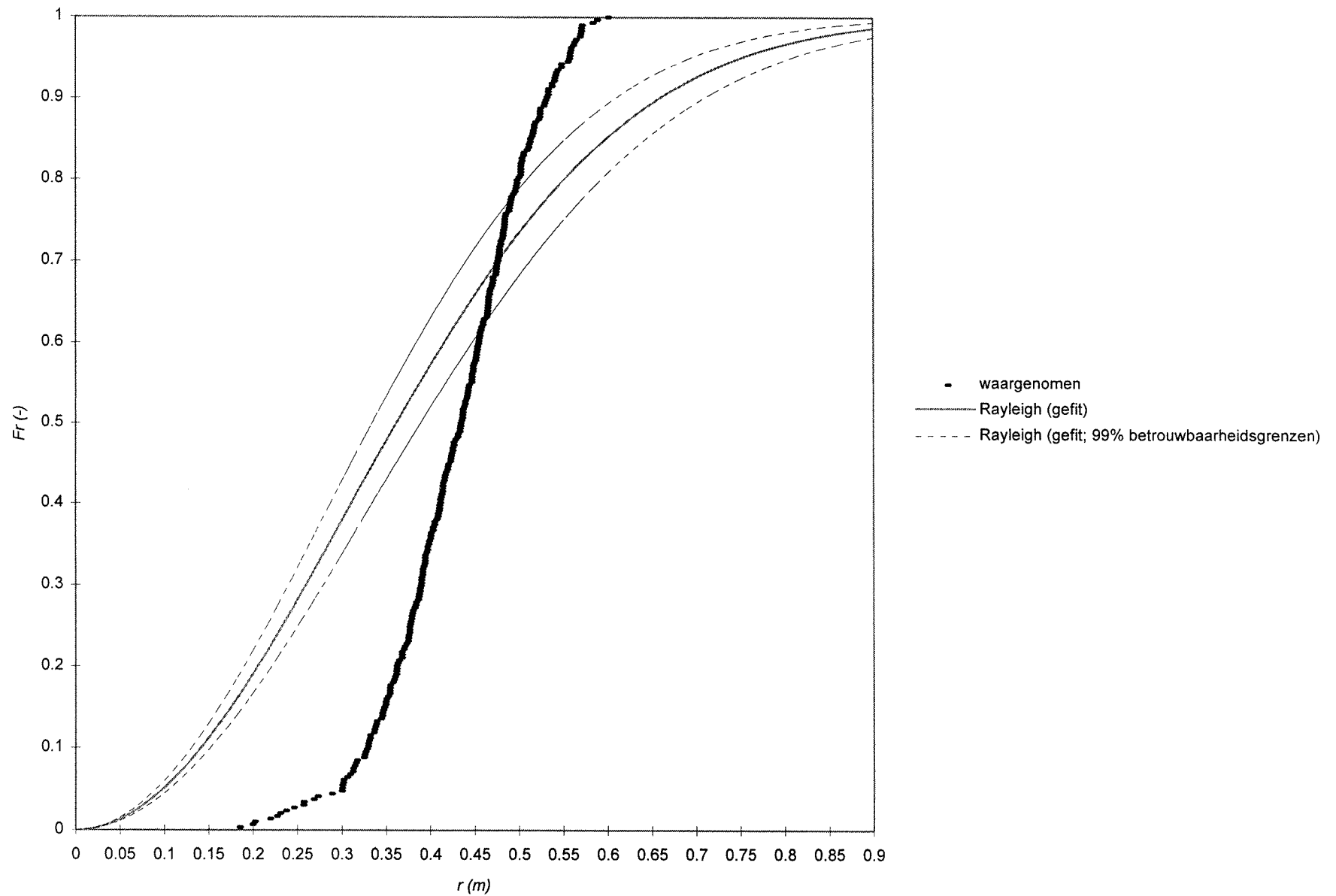
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; vlak)

Bijlage 9.14a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.21)*



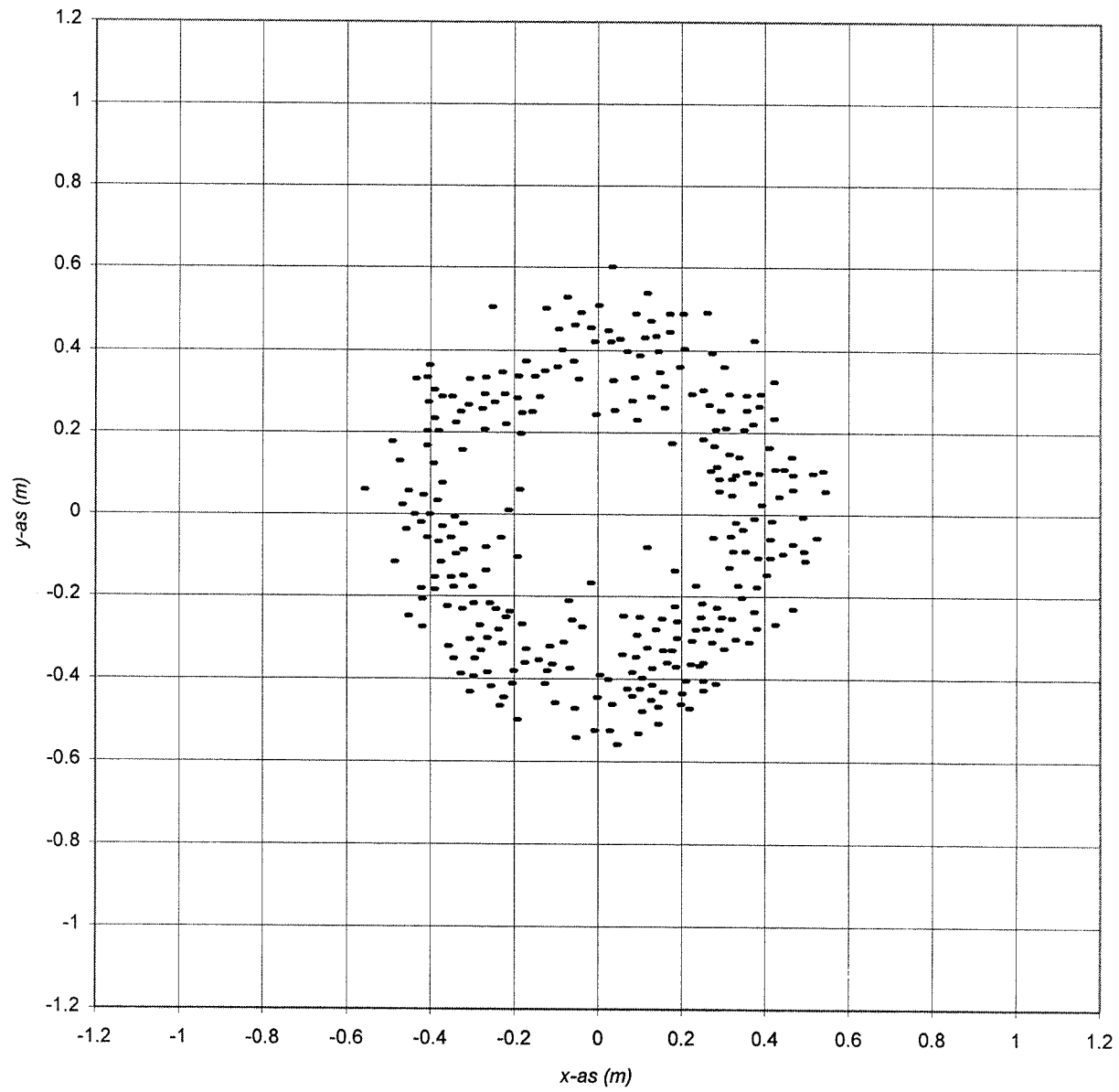
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; punt)

Bijlage 9.14b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.21)



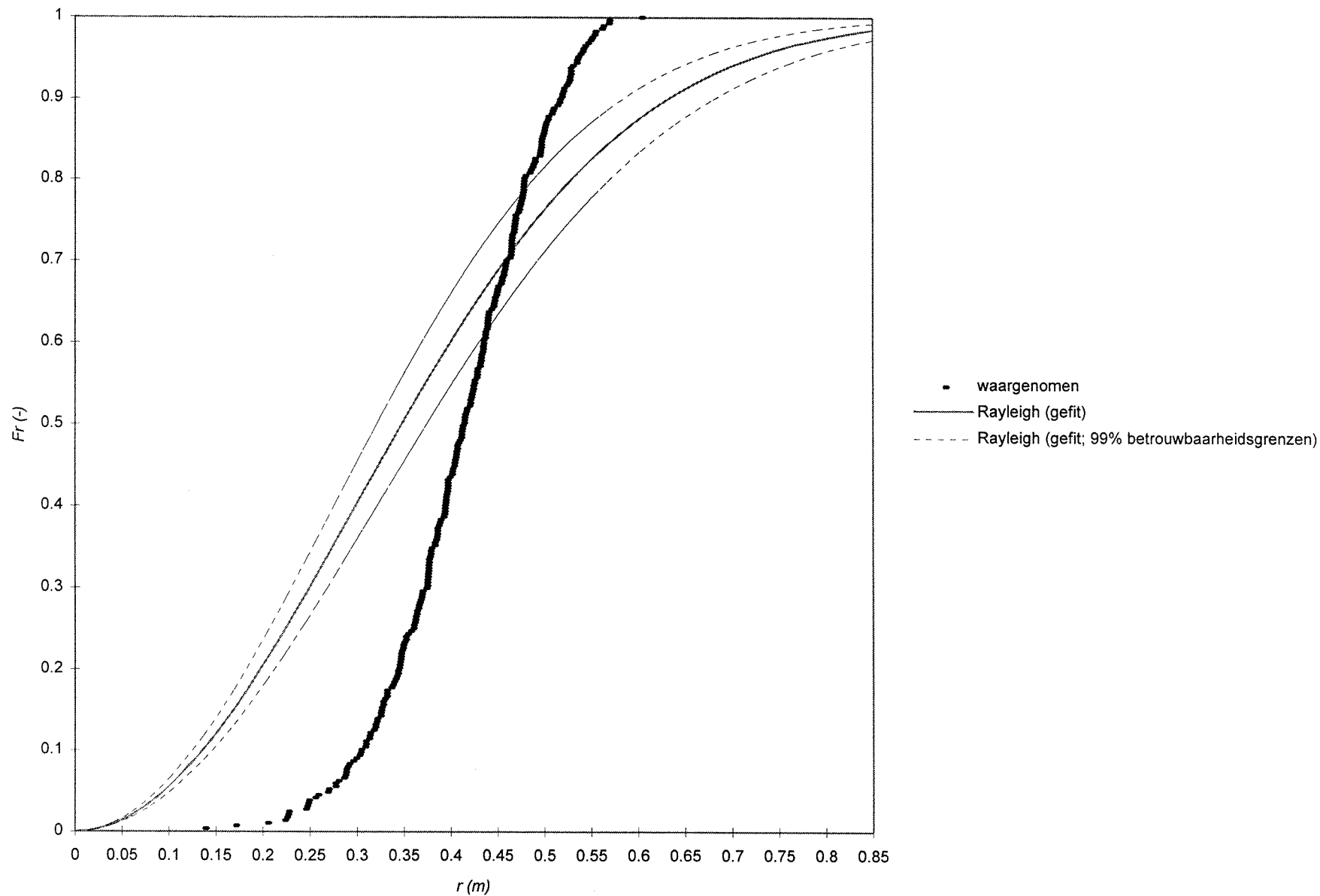
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; punt)

Bijlage 9.15a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.21bis)



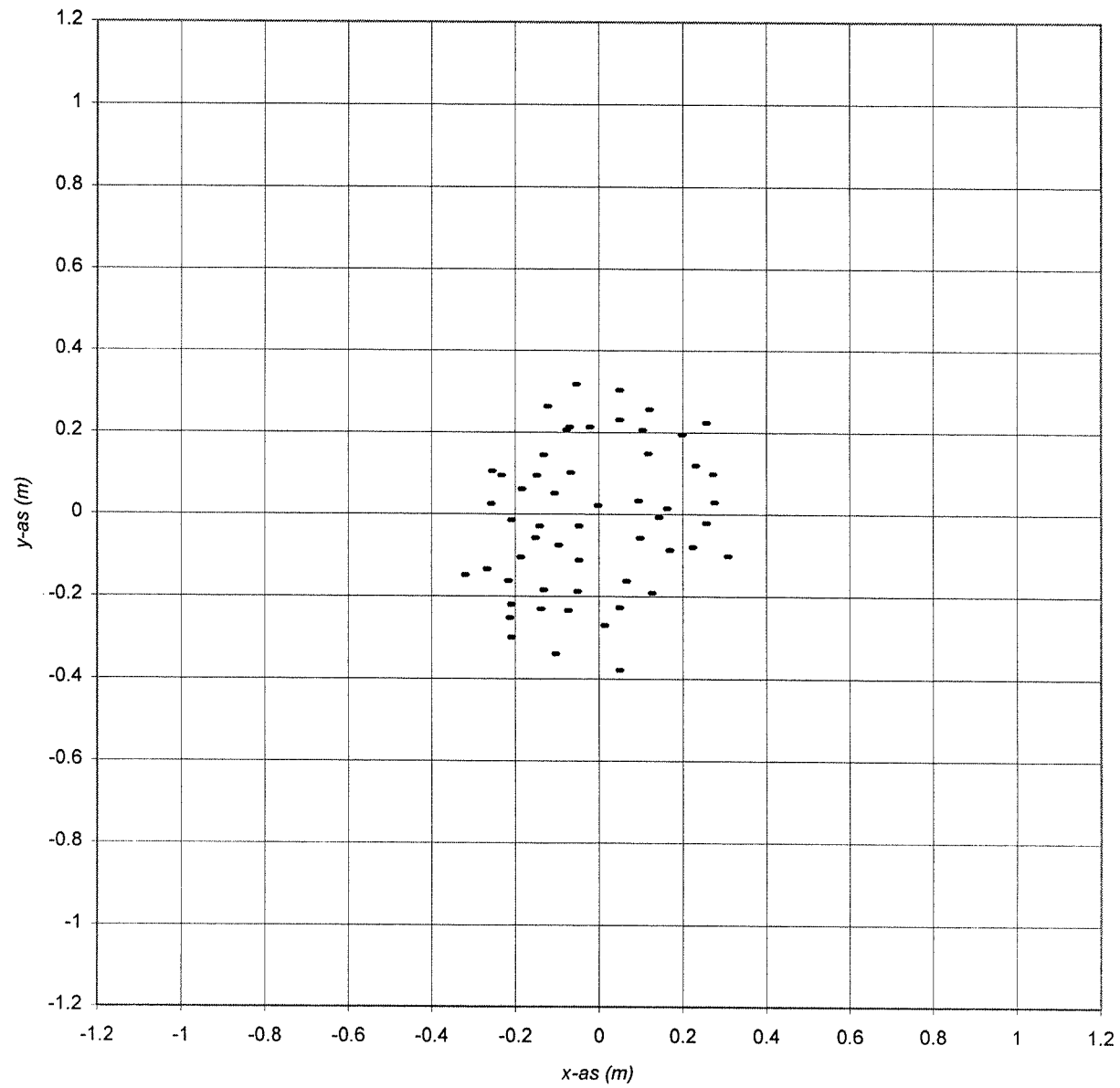
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; punt)

Bijlage 9.15b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.21bis)



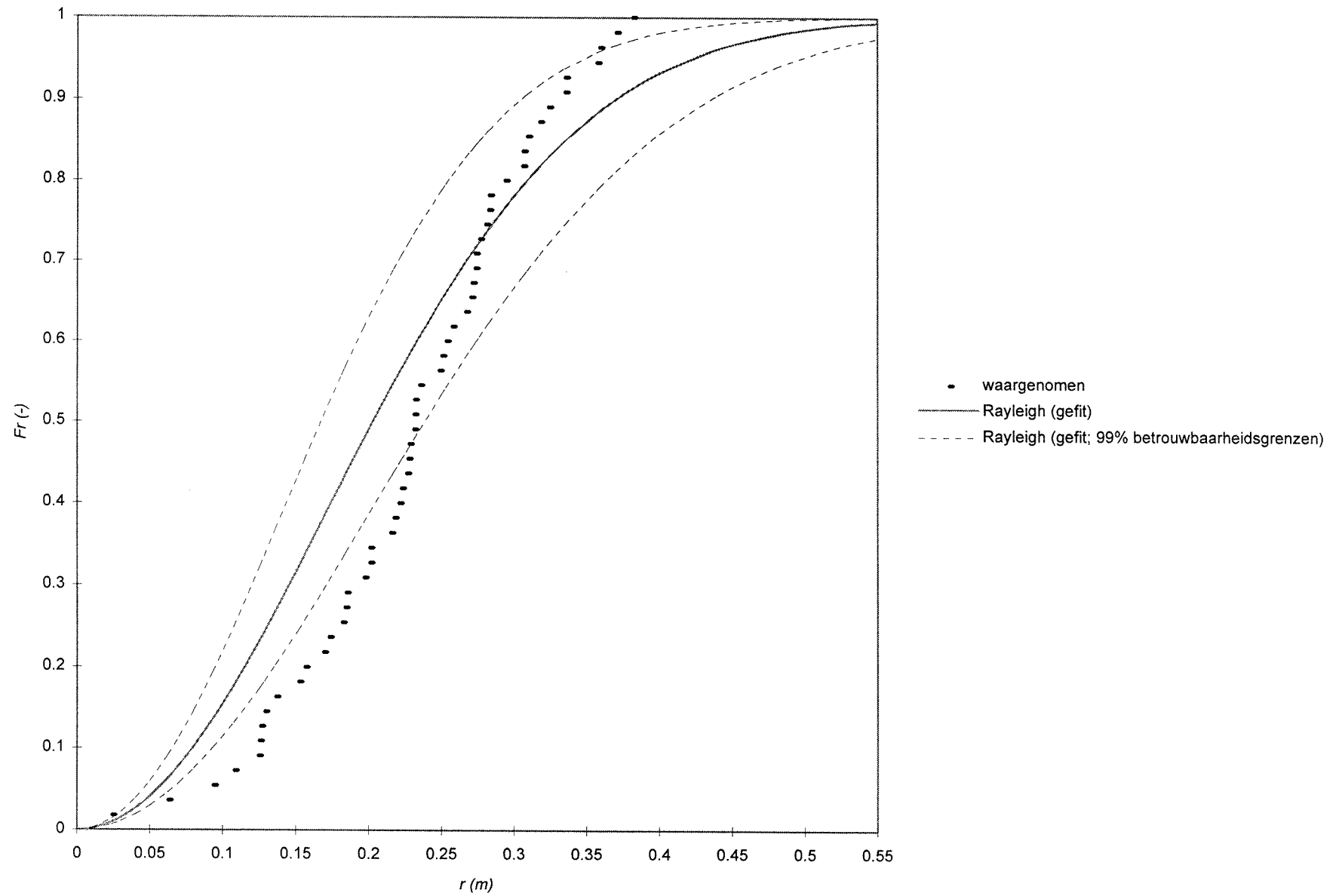
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; punt)

Bijlage 9.16a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.22)*



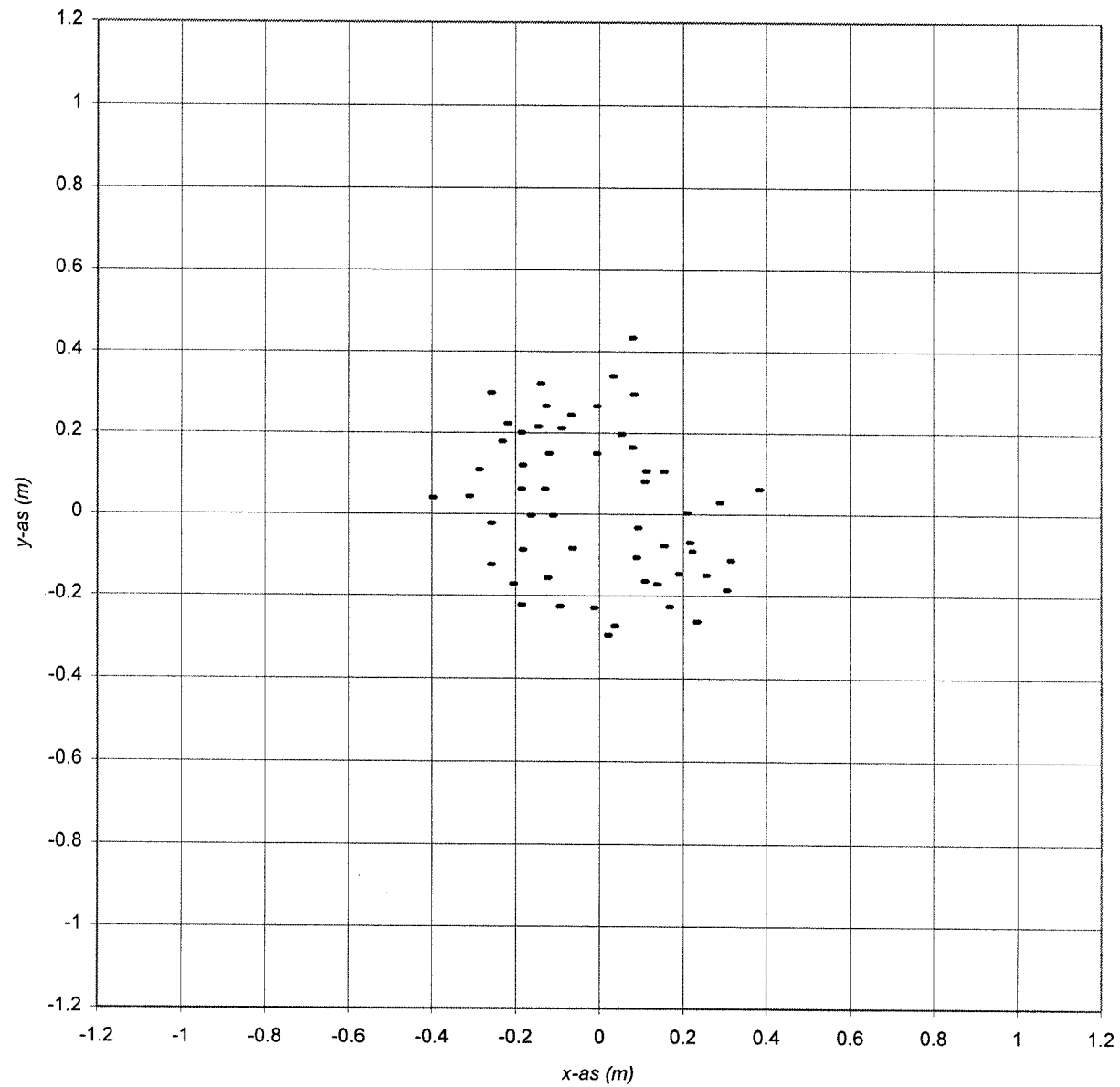
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0500$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.16b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.22)



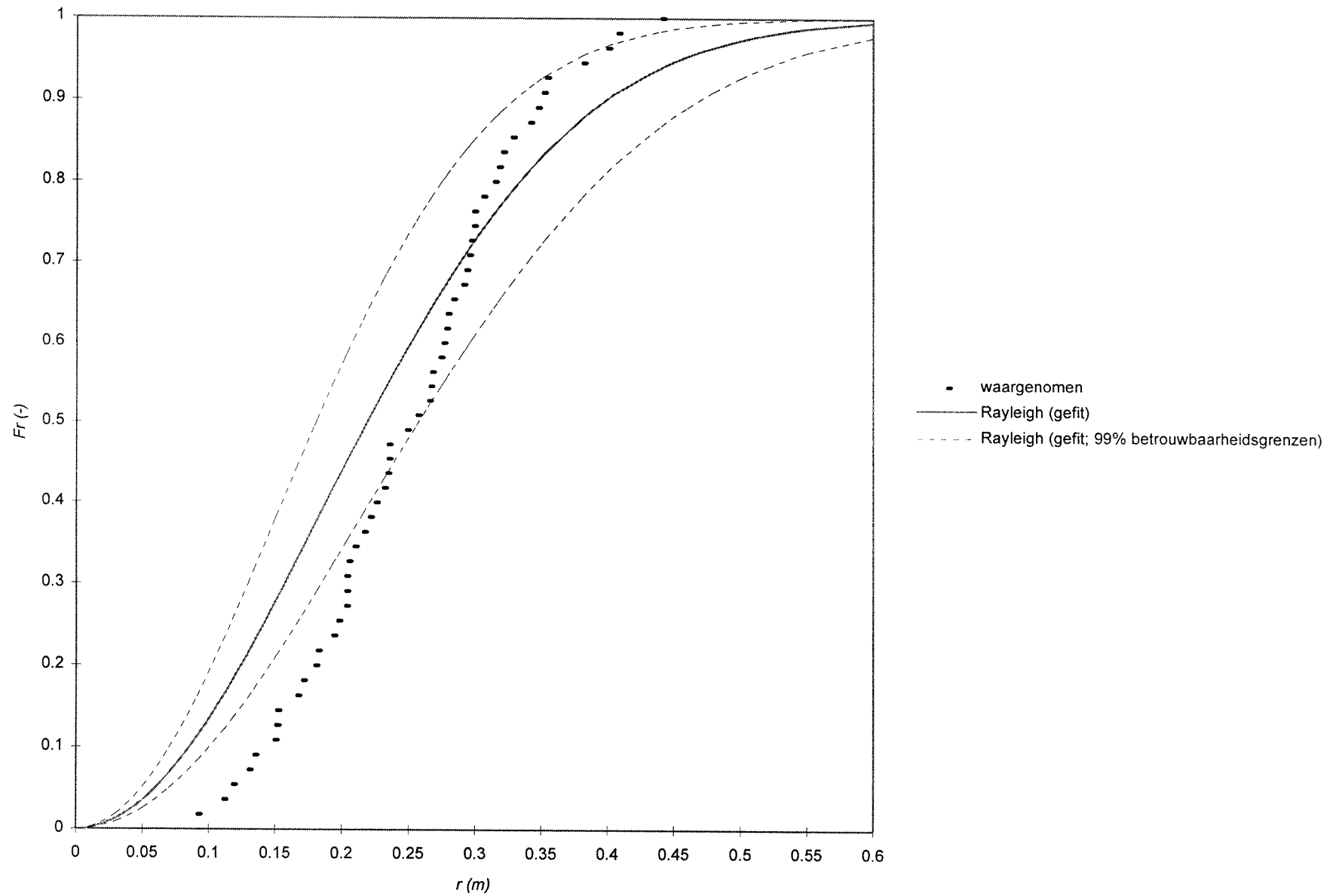
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0500$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.17a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.22bis)*



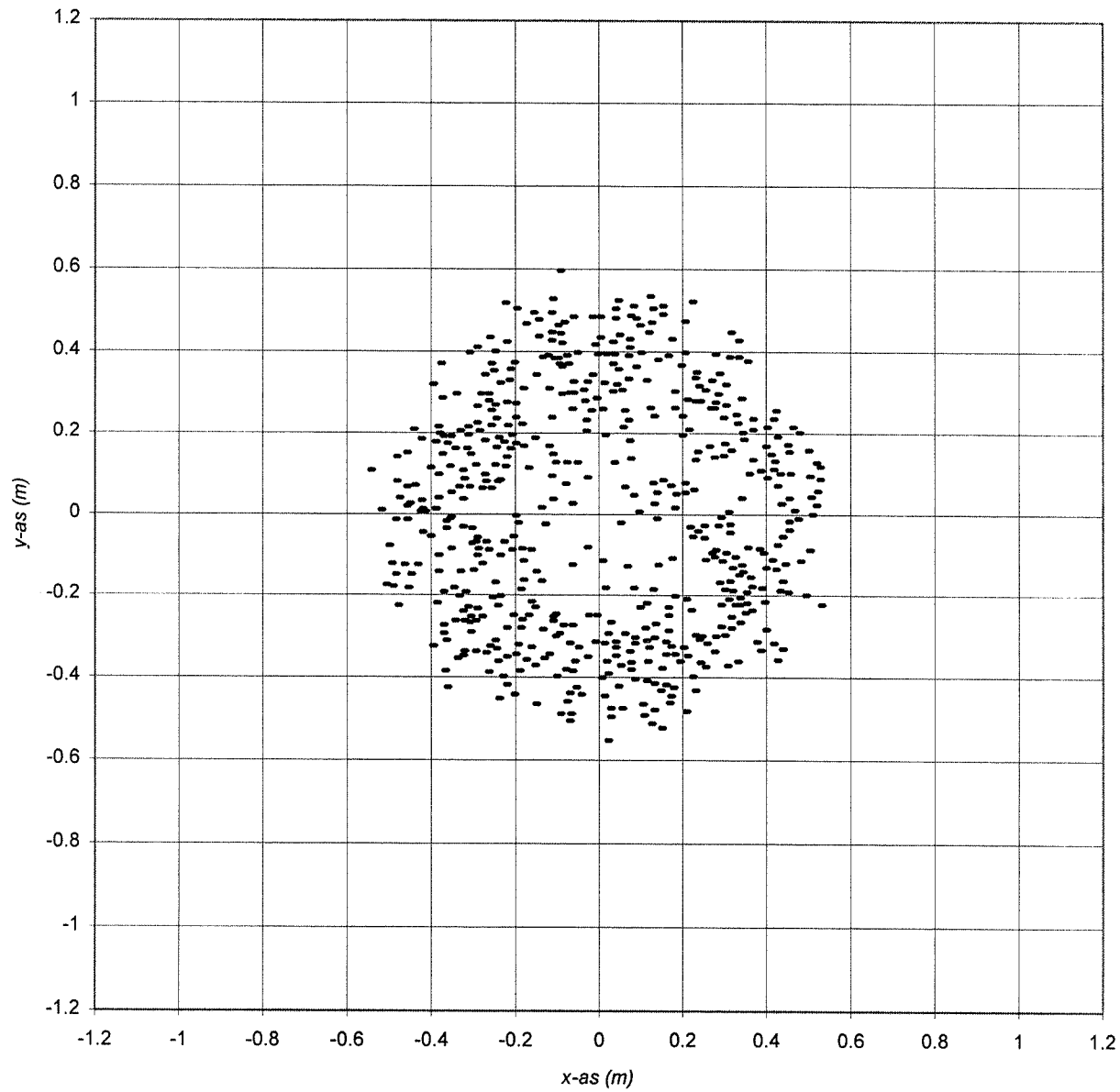
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0500$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.17b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.22bis)



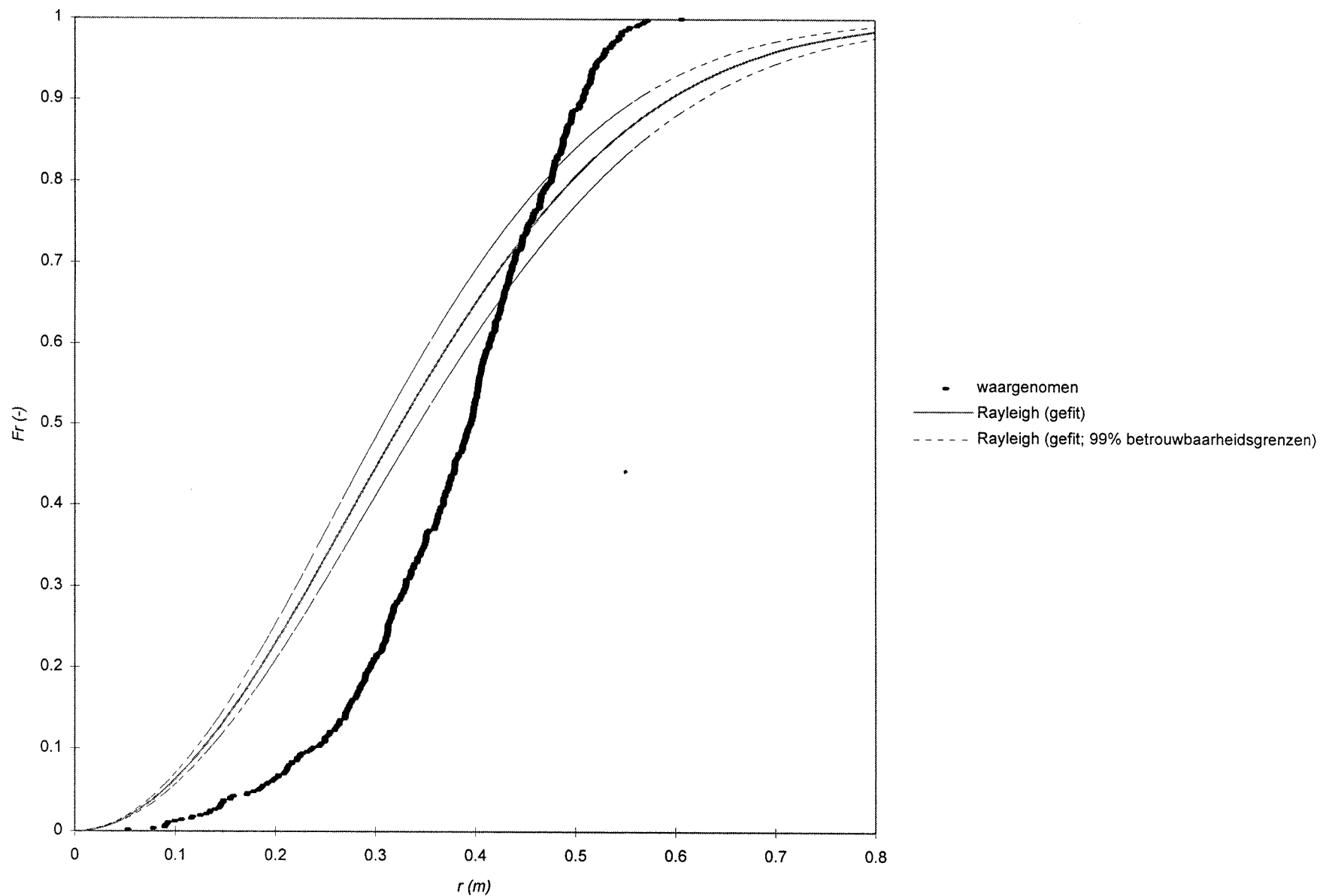
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0500$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 9.18a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.23)*



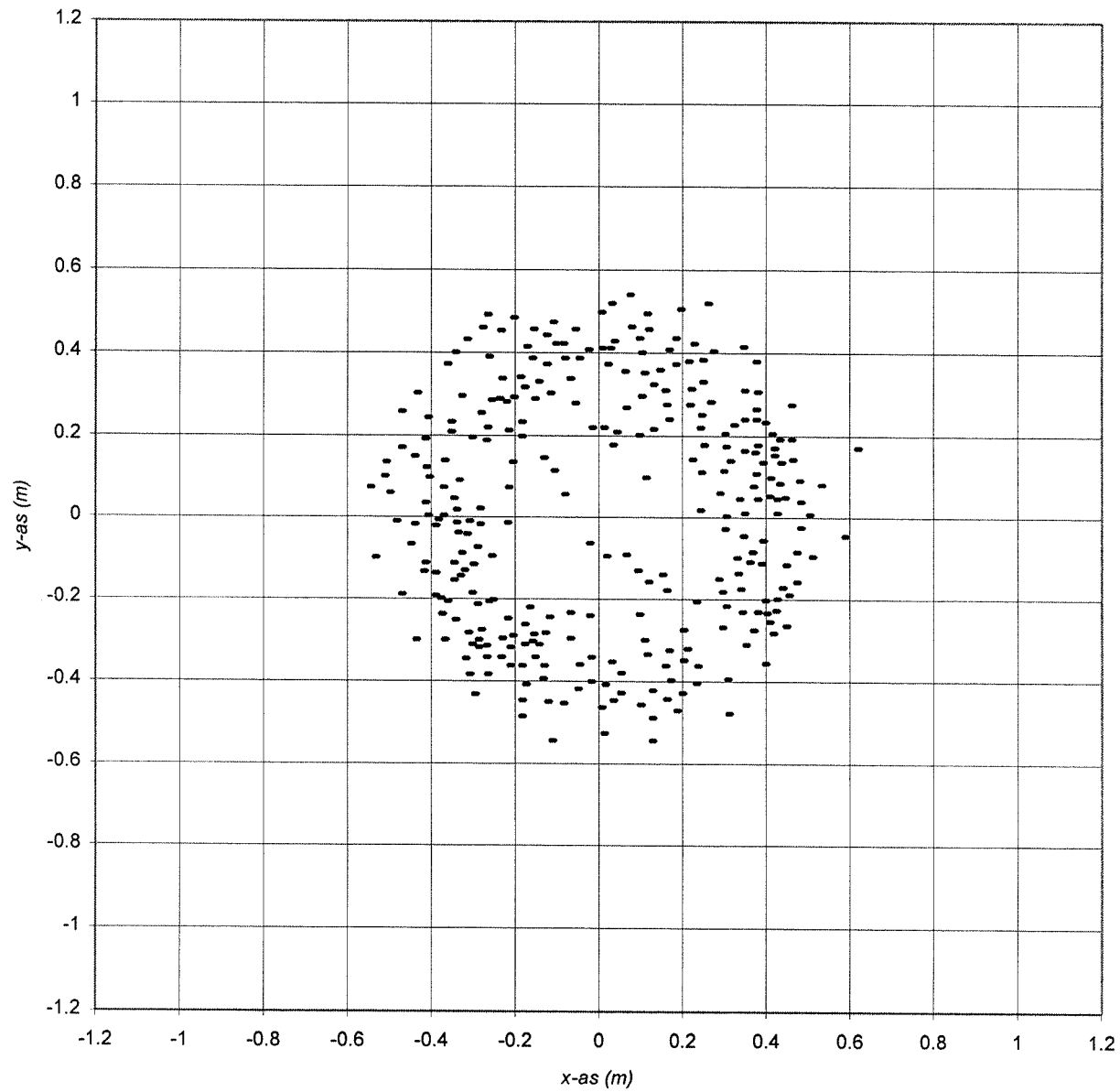
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)

Bijlage 9.18b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.23)



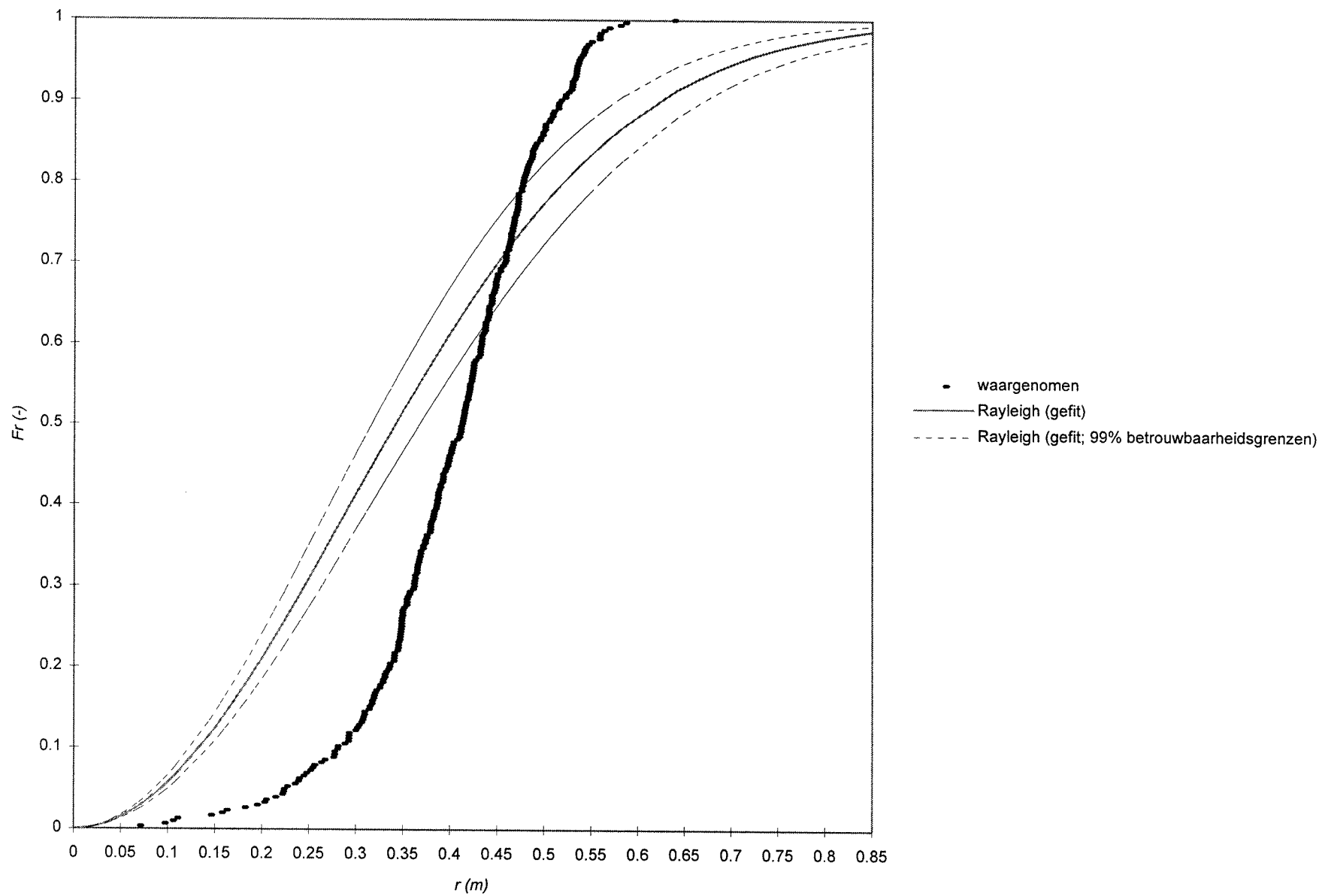
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)

Bijlage 9.19a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.24)*



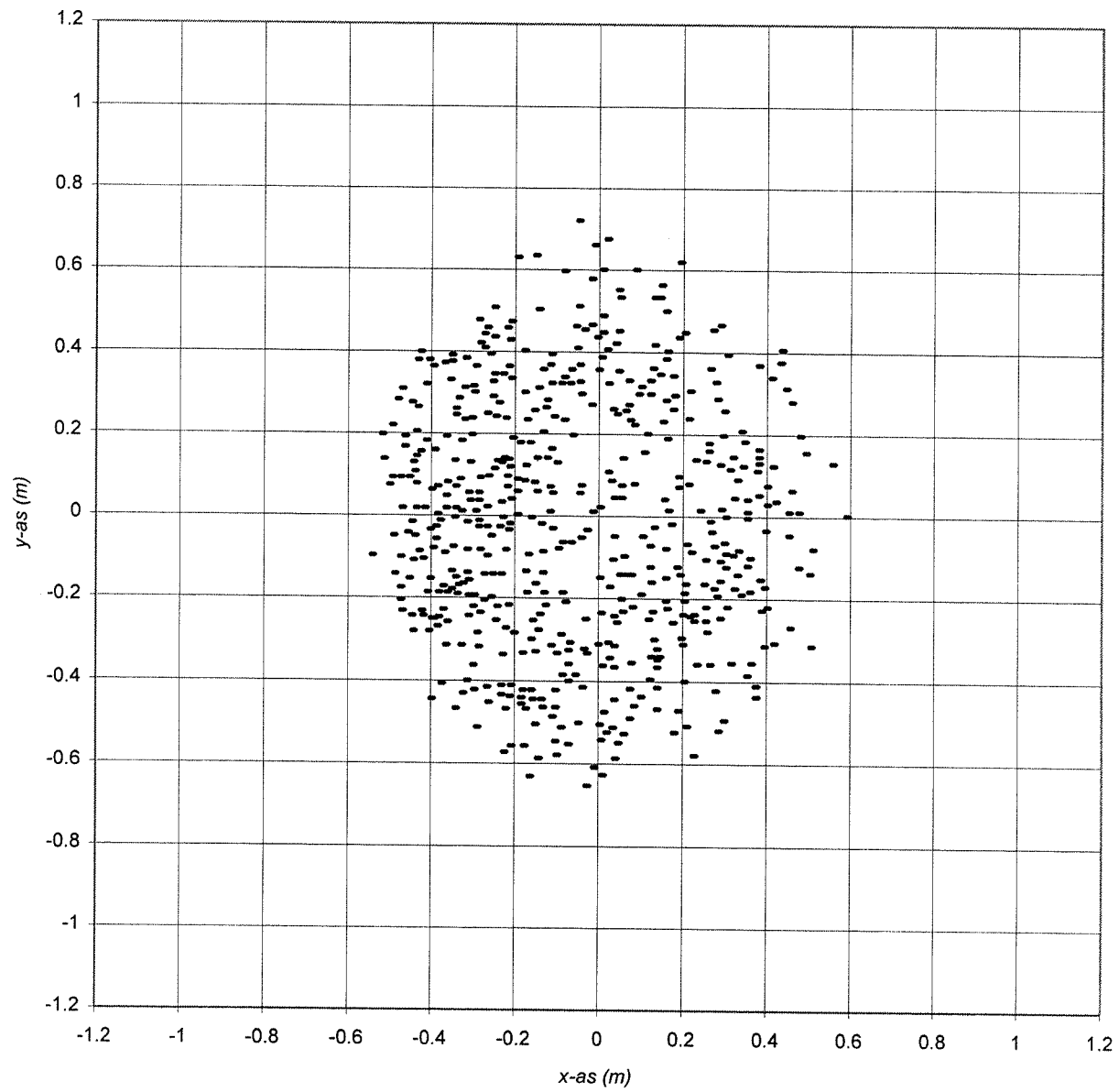
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)

Bijlage 9.19b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.24)



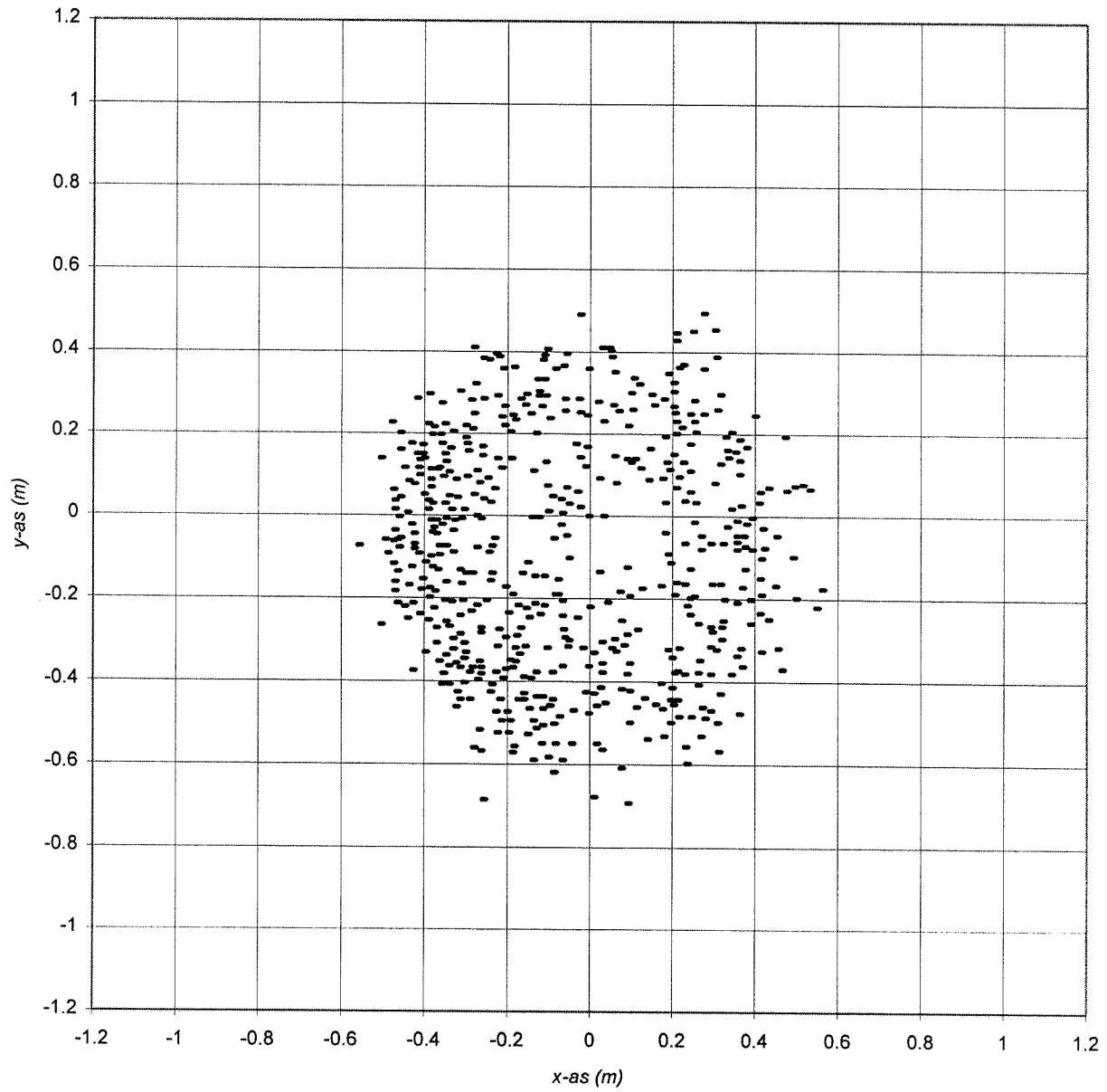
(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0249$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk gestort)

Bijlage 9.20a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.25, deel 1)*



(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk afgeschoven)

Bijlage 9.20b *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.25, deel 2)*



(aluminium kubussen, $D_{n50} = 0,0145$ m, $h = 1,90$ m, individueel afgeschoven)

Bijlage 9.21 Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte aluminium kubussen (in seconden)

3,3 s	3,3 s	3,4 s	3,4 s	3,4 s	3,5 s	3,5 s	3,5 s	3,5 s	3,6 s
3,3 s	3,3 s	3,4 s	3,4 s	3,5 s	3,5 s	3,5 s	3,5 s	3,6 s	3,6 s

$(D_{n50} = 0,0145 \text{ m}, h = 1,90 \text{ m})$

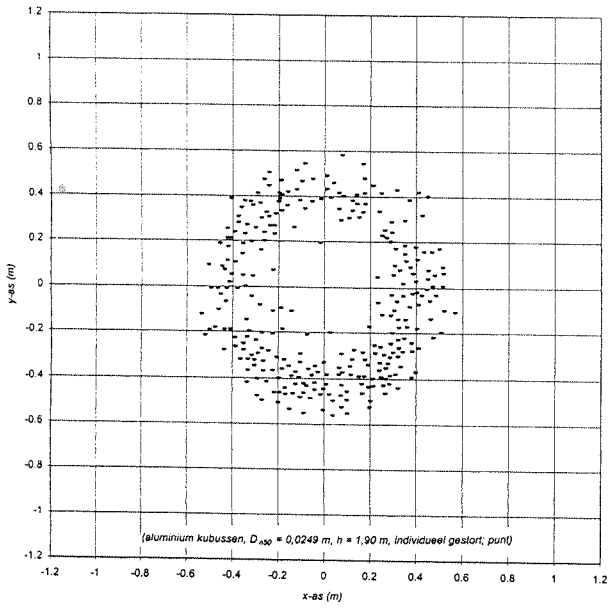
2,5 s	2,5 s	2,6 s	2,7 s	2,7 s	2,7 s	2,7 s	2,8 s	2,8 s	2,8 s
2,5 s	2,6 s	2,6 s	2,7 s	2,7 s	2,7 s	2,7 s	2,8 s	2,8 s	2,8 s

$(D_{n50} = 0,0249 \text{ m}, h = 1,90 \text{ m})$

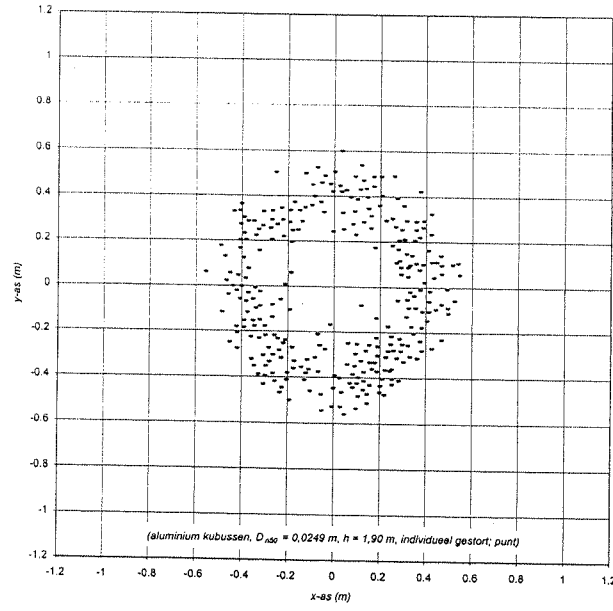
1,7 s	1,8 s	1,8 s	1,8 s	1,8 s	1,9 s	1,9 s	1,9 s	1,9 s	2,0 s
1,7 s	1,8 s	1,8 s	1,8 s	1,9 s	1,9 s	1,9 s	1,9 s	2,0 s	2,0 s

$(D_{n50} = 0,0500 \text{ m}, h = 1,90 \text{ m})$

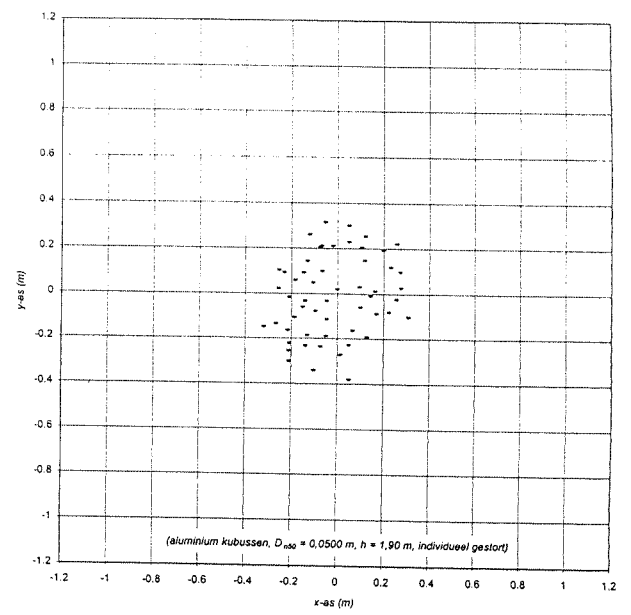
Bijlage 9.14a Bovenanzicht van de stort (modelproef nr.21)



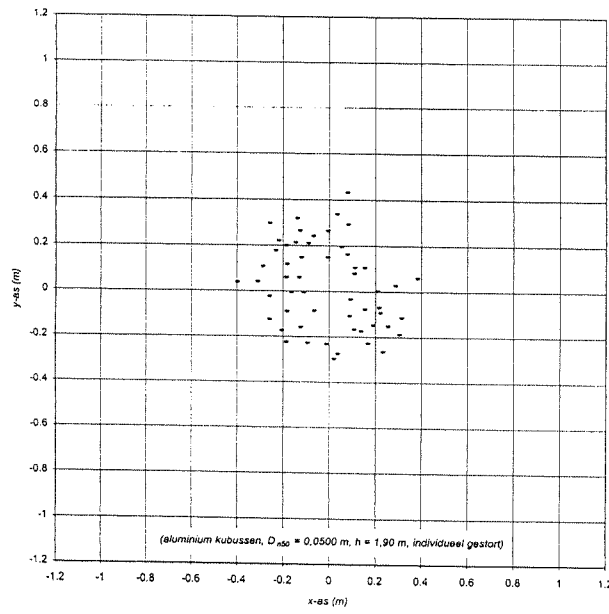
Bijlage 9.15a Bovenanzicht van de stort (modelproef nr.21bis)



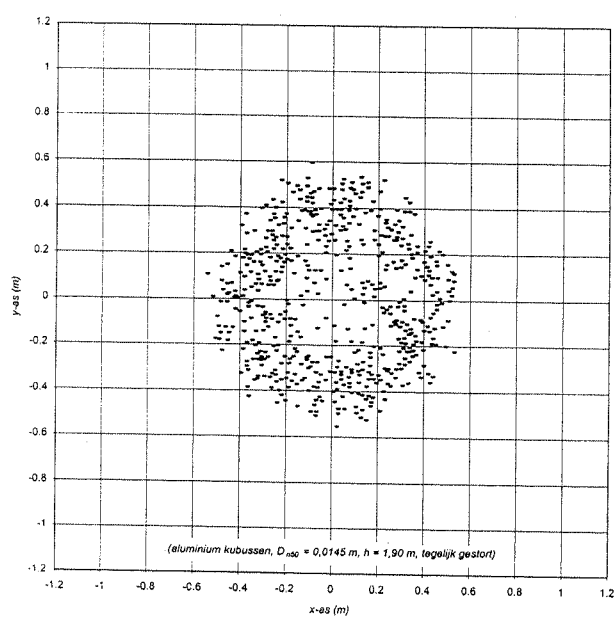
Bijlage 9.16a Bovenanzicht van de stort (modelproef nr.22)



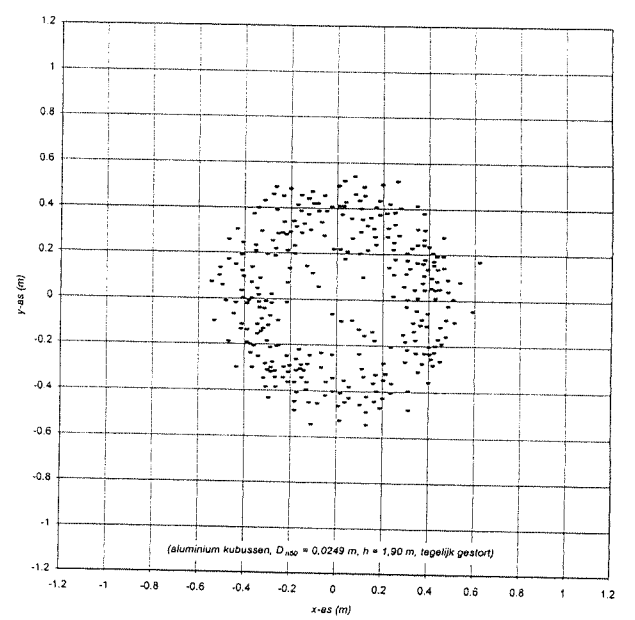
Bijlage 9.17a Bovenanzicht van de stort (modelproef nr.22bis)



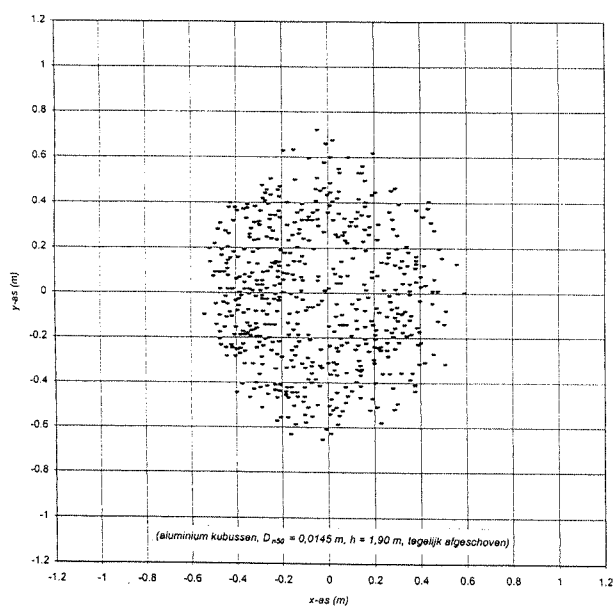
Bijlage 9.18a Bovenanzicht van de stort (modelproef nr.23)



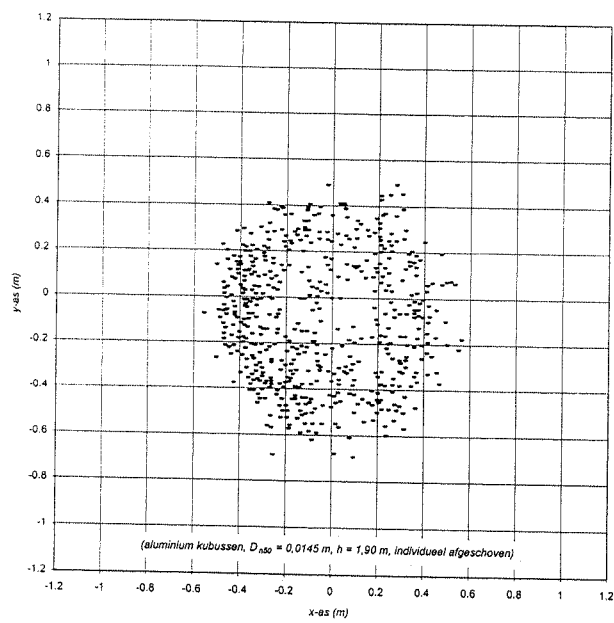
Bijlage 9.19a Bovenanzicht van de stort (modelproef nr.24)



Bijlage 9.20a Bovenanzicht van de stort (modelproef nr.25, deel 1)

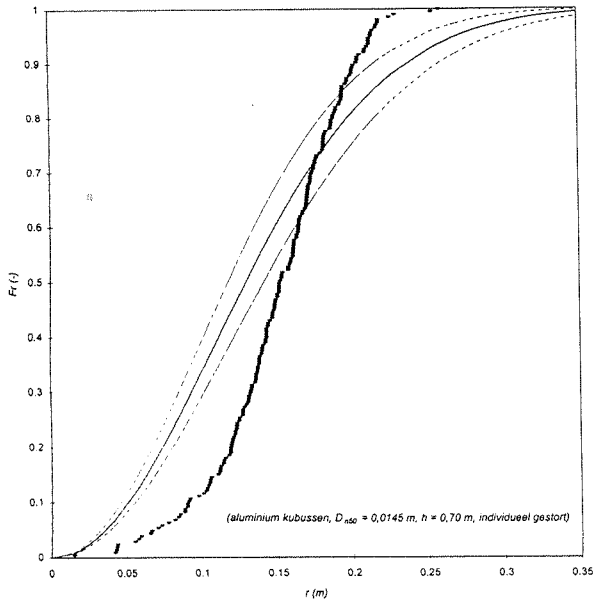


Bijlage 9.20b Bovenanzicht van de stort (modelproef nr.25, deel 2)

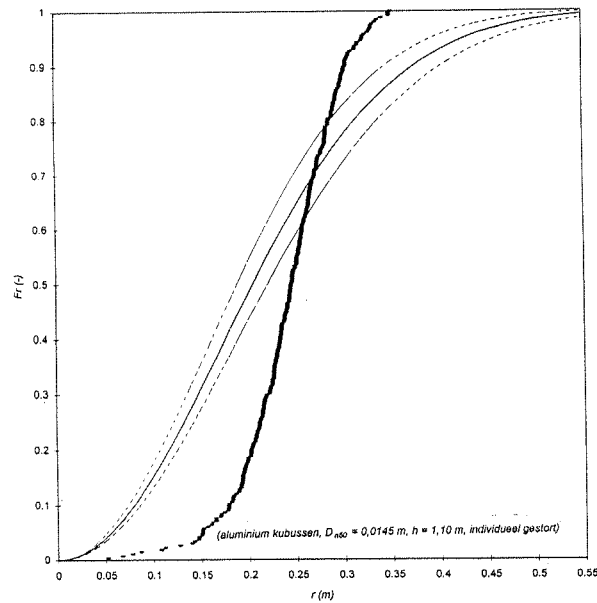


Bijlage 9.1b Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met aluminium kubussen)

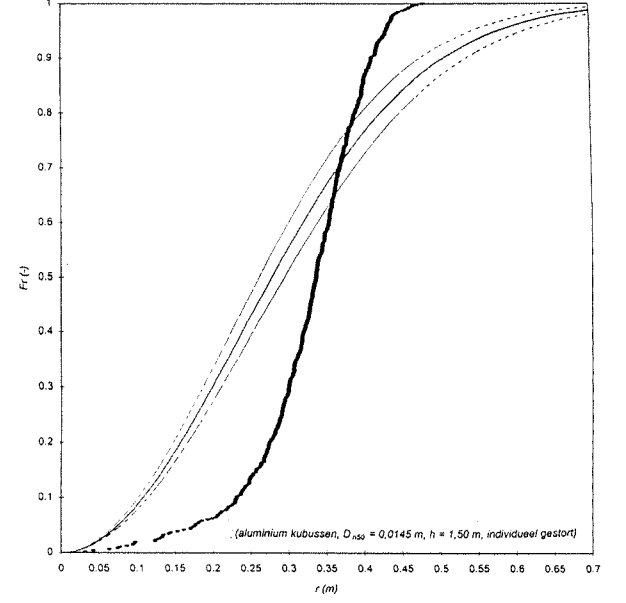
Bijlage 9.2b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.12)



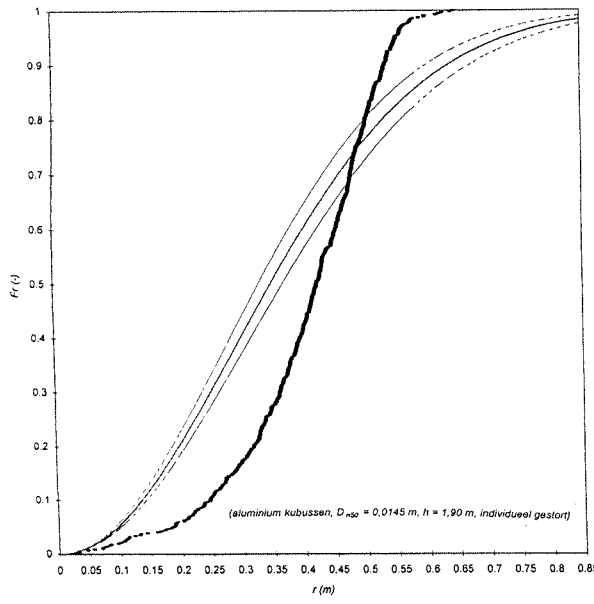
Bijlage 9.3b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.13)



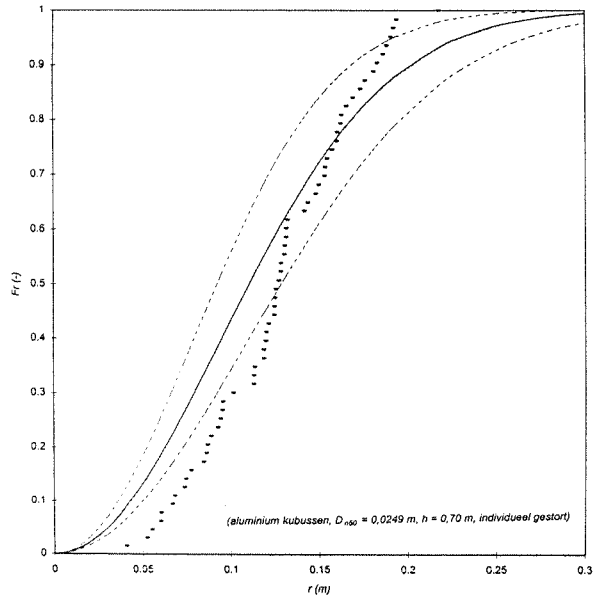
Bijlage 9.4b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.14)



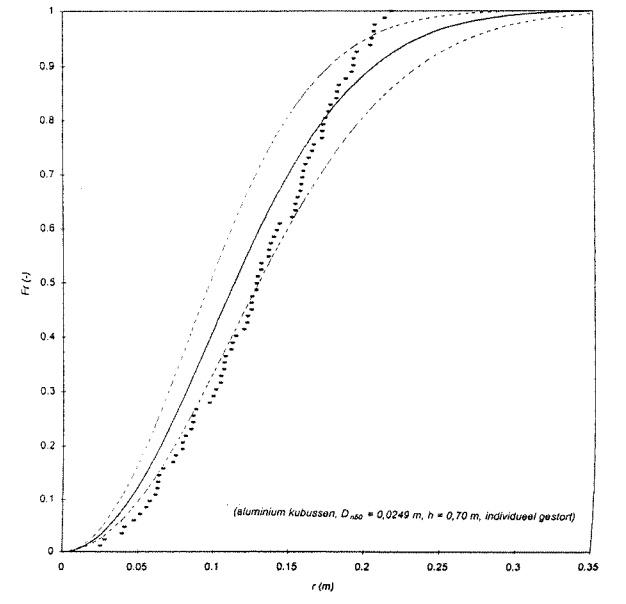
Bijlage 9.5b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.15)



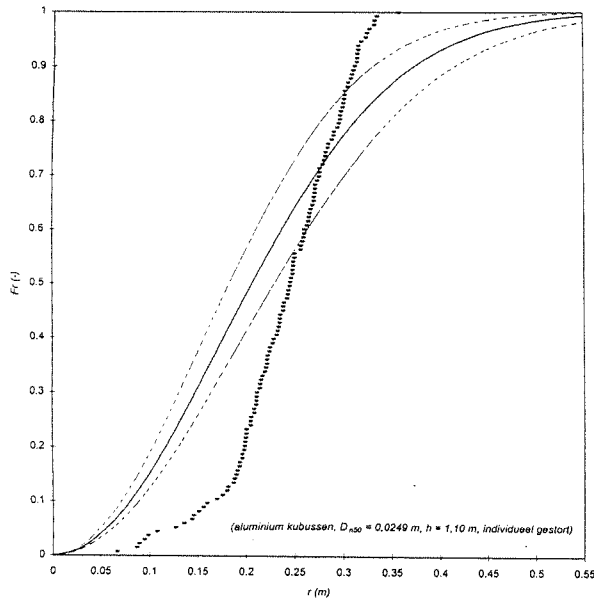
Bijlage 9.6b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.16)



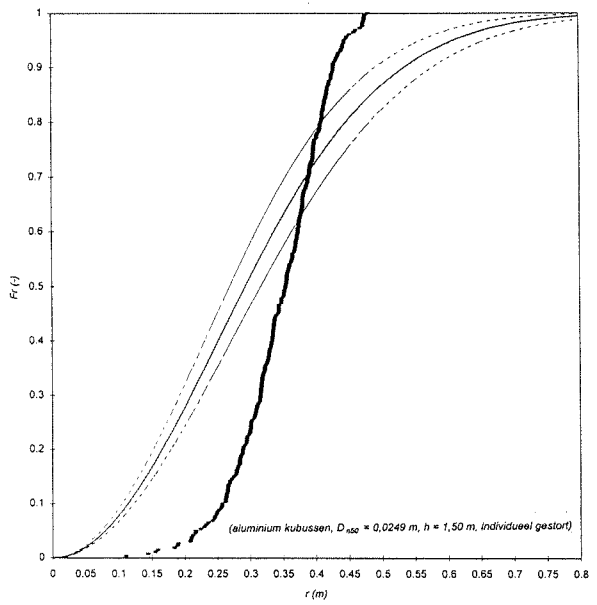
Bijlage 9.7b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.16bis)



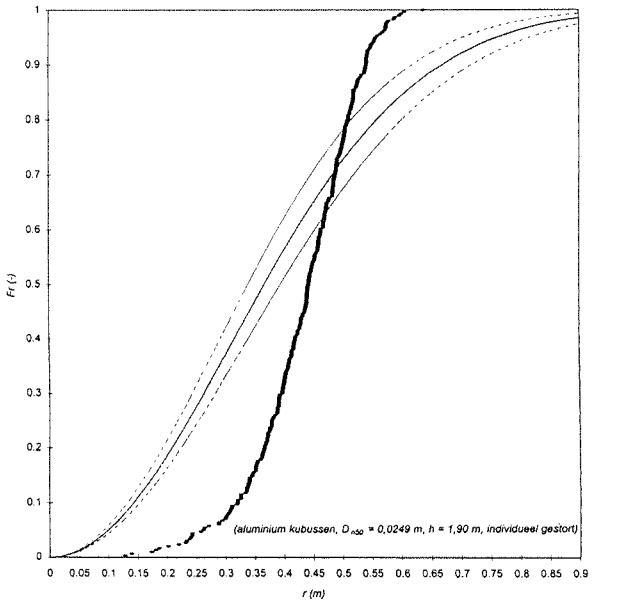
Bijlage 9.8b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.17)



Bijlage 9.9b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.18)

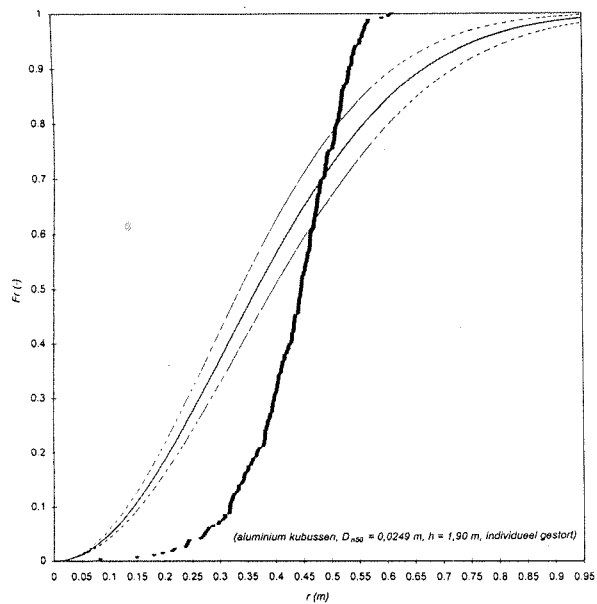


Bijlage 9.10b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.19)

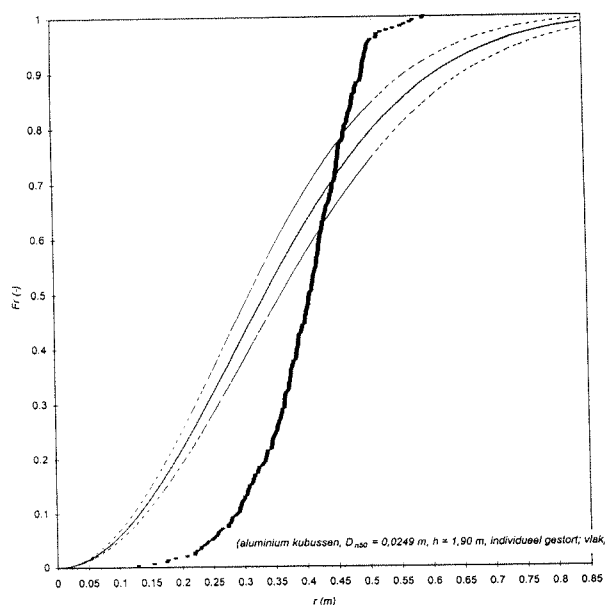


- waargenomen
 — Rayleigh (geft)
 - - - Rayleigh (geft; 99% betrouwbaarheidsgrenzen)

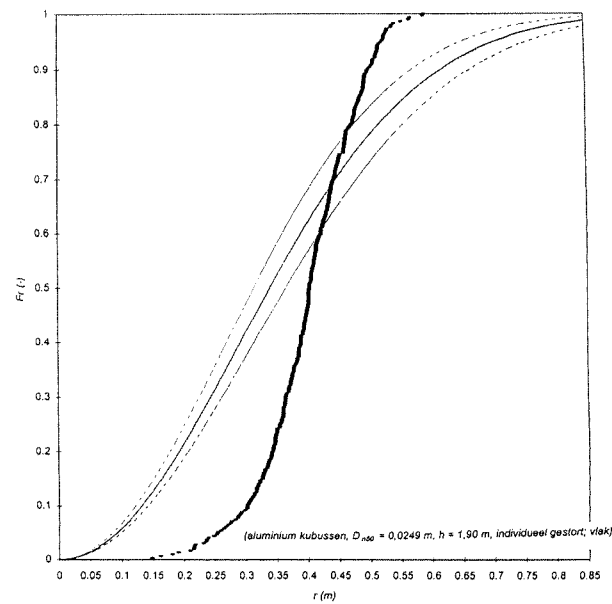
Bijlage 9.11b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.19bis)



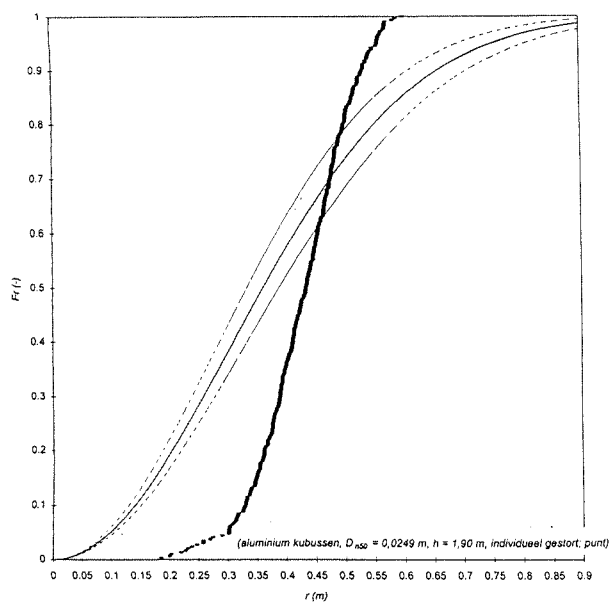
Bijlage 9.12b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.20)



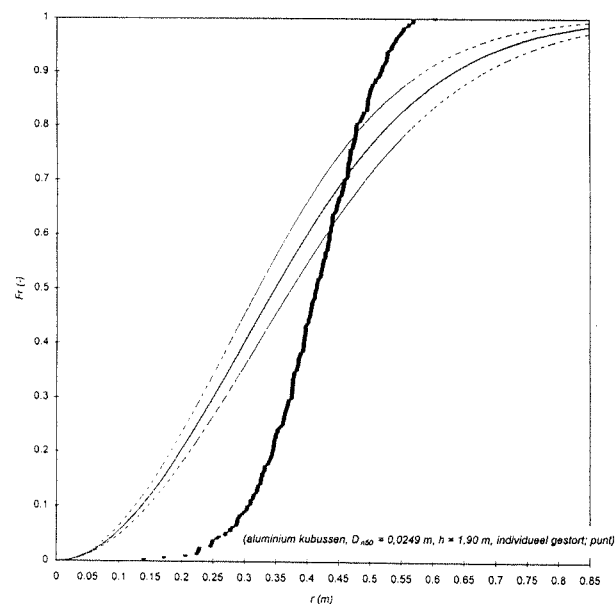
Bijlage 9.13b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.20bis)



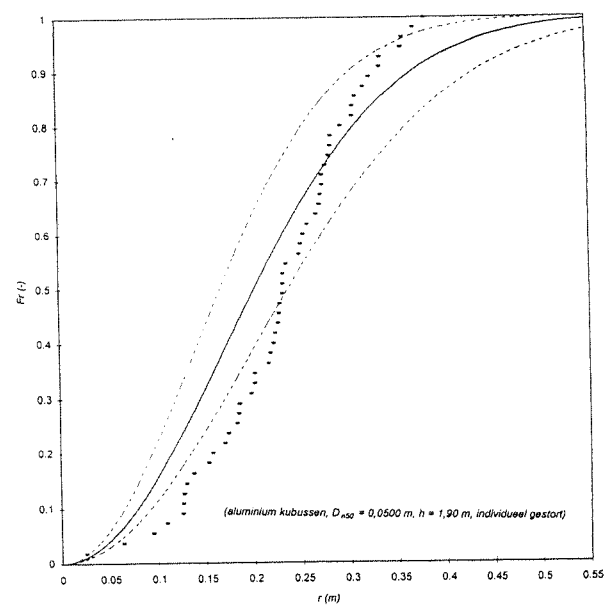
Bijlage 9.14b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.21)



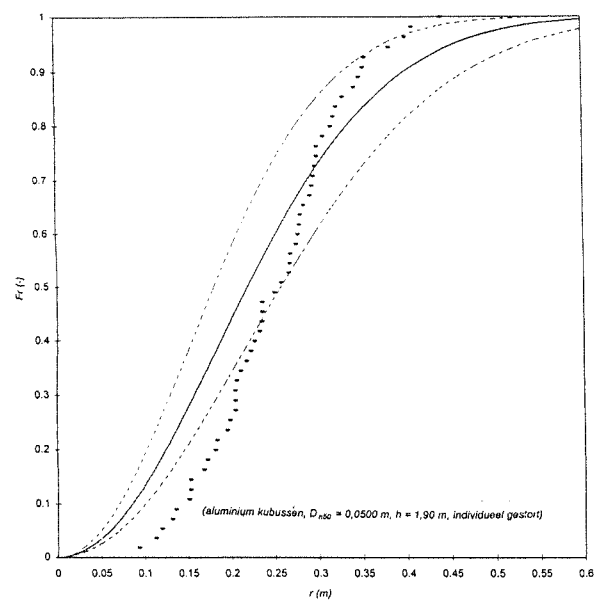
Bijlage 9.15b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.21bis)



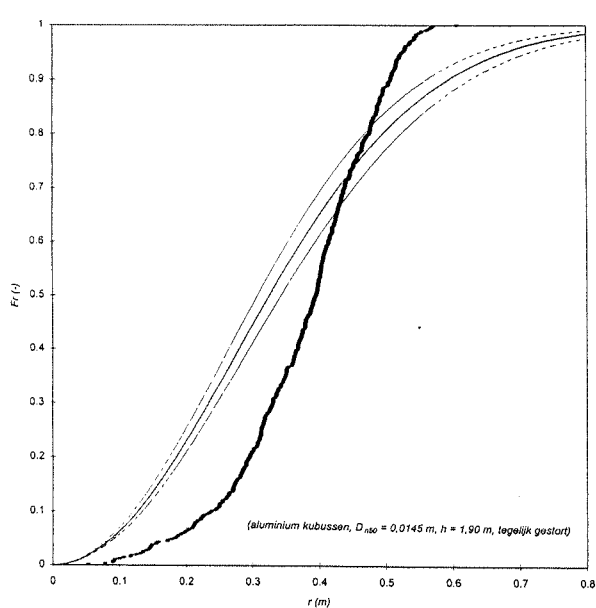
Bijlage 9.16b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.22)



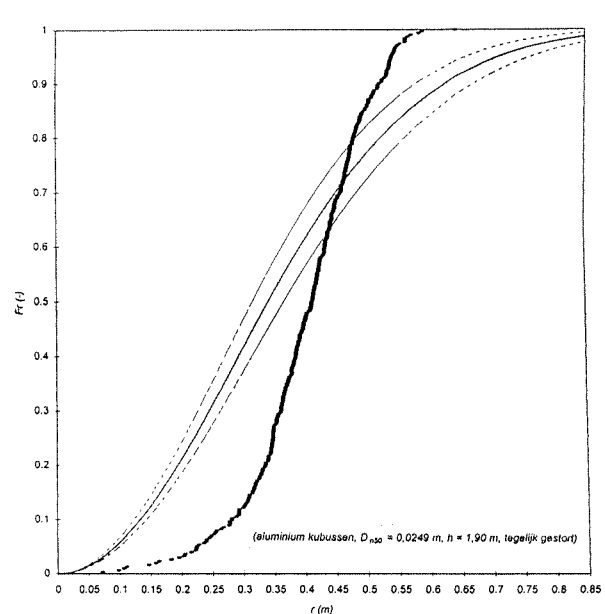
Bijlage 9.17b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.22bis)



Bijlage 9.18b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.23)



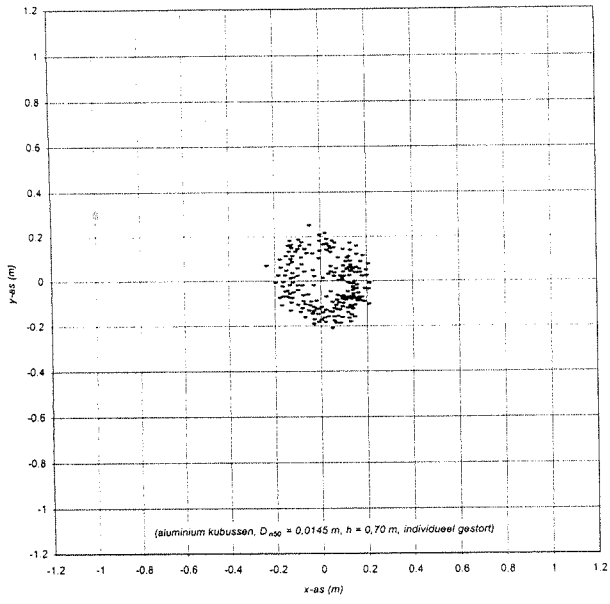
Bijlage 9.19b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.24)



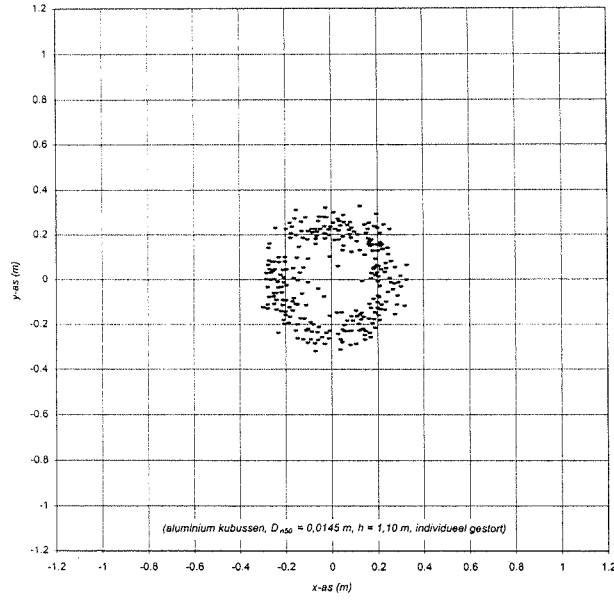
- waargenomen
 — Rayleigh (geft)
 - - - Rayleigh (geft; 99% betrouwbaarheids grenzen)

Bijlage 9.1a Overzicht van de bovenaanzichten van de stort (modelproeven met aluminium kubussen)

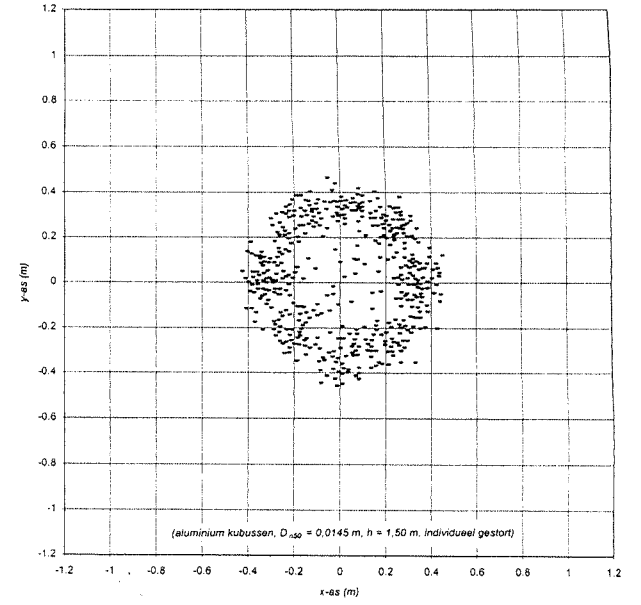
Bijlage 9.2a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.12)



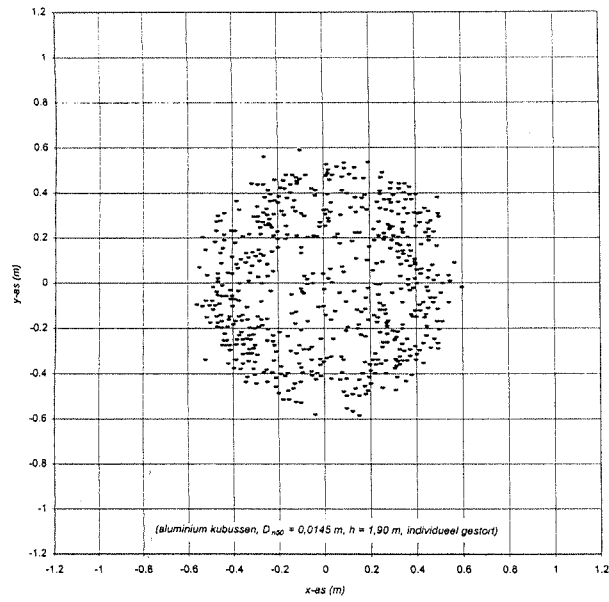
Bijlage 9.3a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.13)



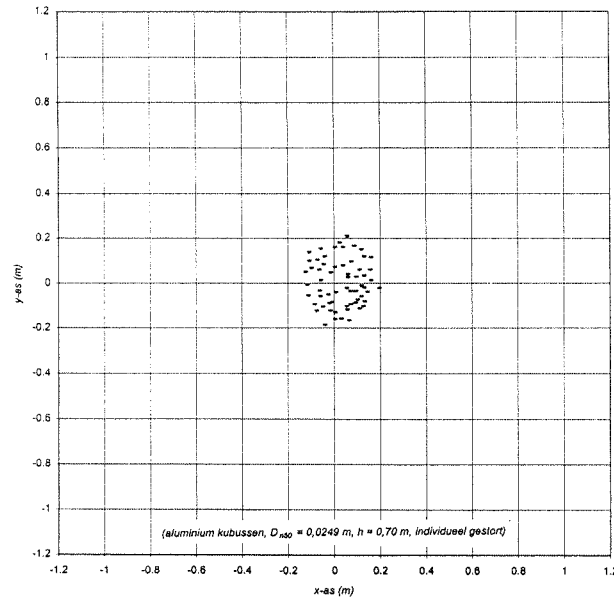
Bijlage 9.4a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.14)



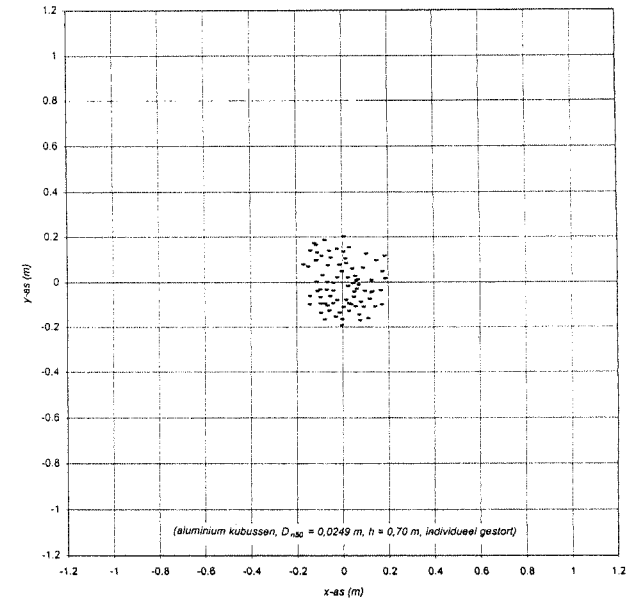
Bijlage 9.5a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.15)



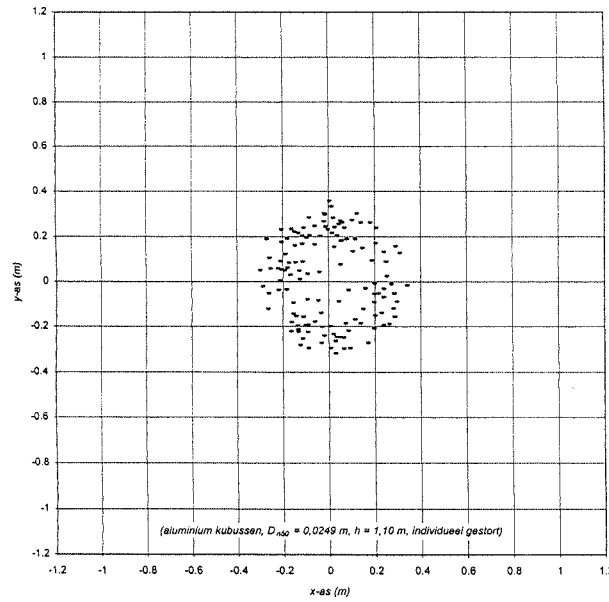
Bijlage 9.6a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.16)



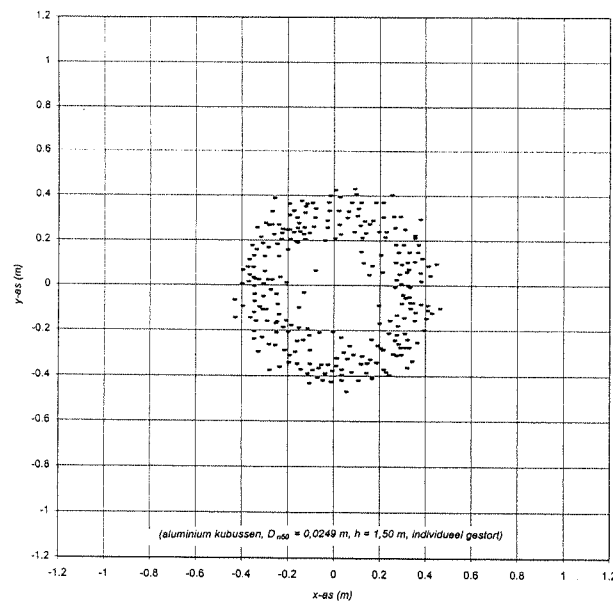
Bijlage 9.7a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.16bis)



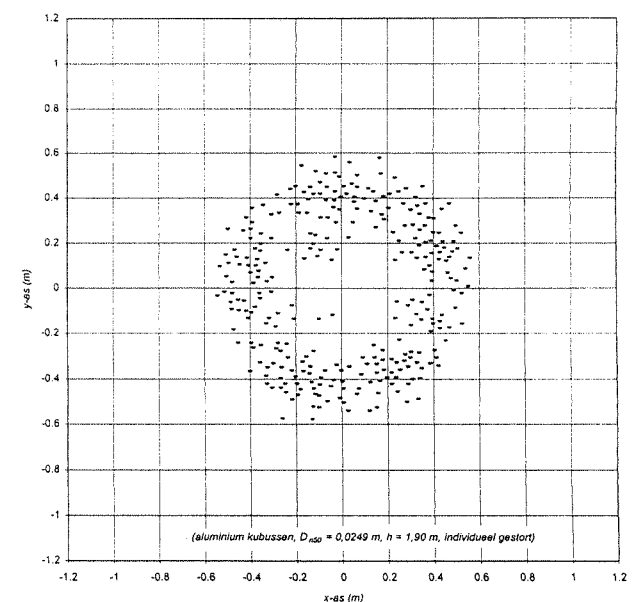
Bijlage 9.8a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.17)



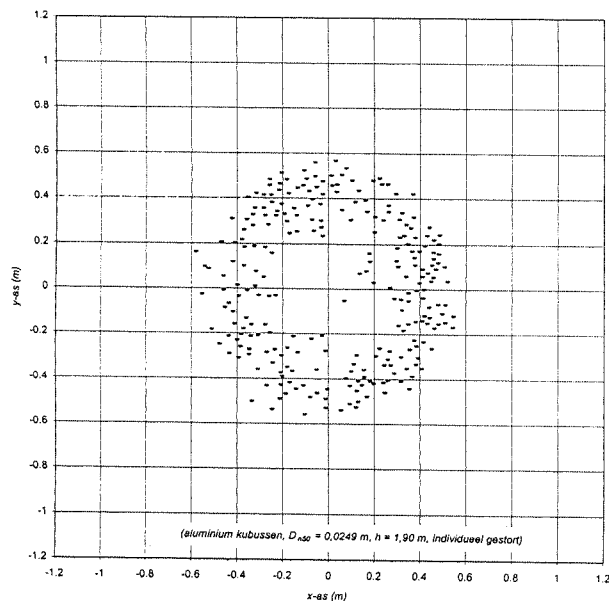
Bijlage 9.9a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.18)



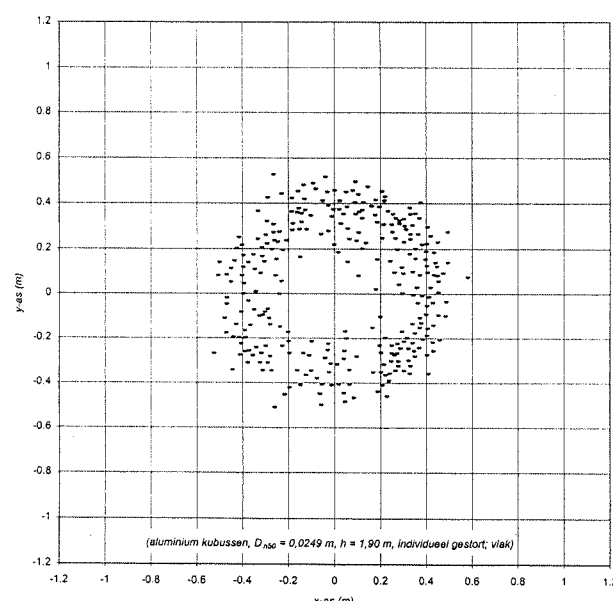
Bijlage 9.10a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.19)



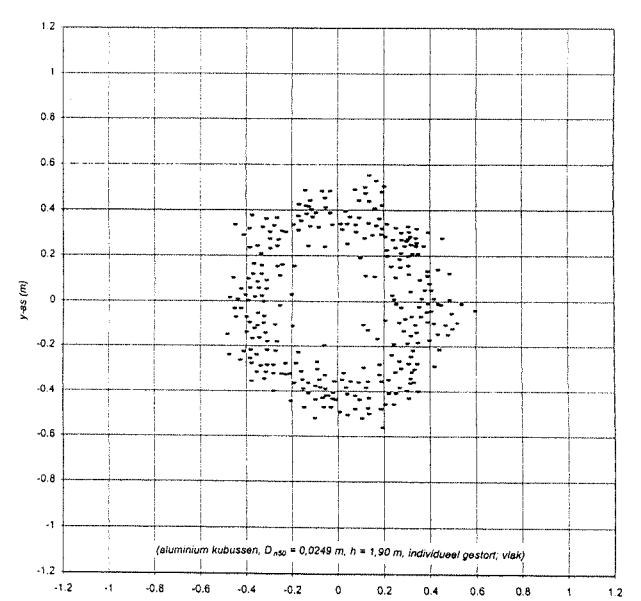
Bijlage 9.11a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.19bis)



Bijlage 9.12a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.20)

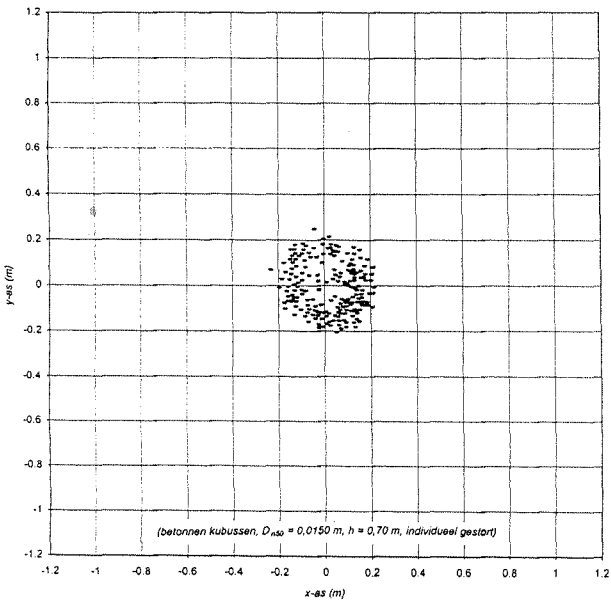


Bijlage 9.13a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.20bis)

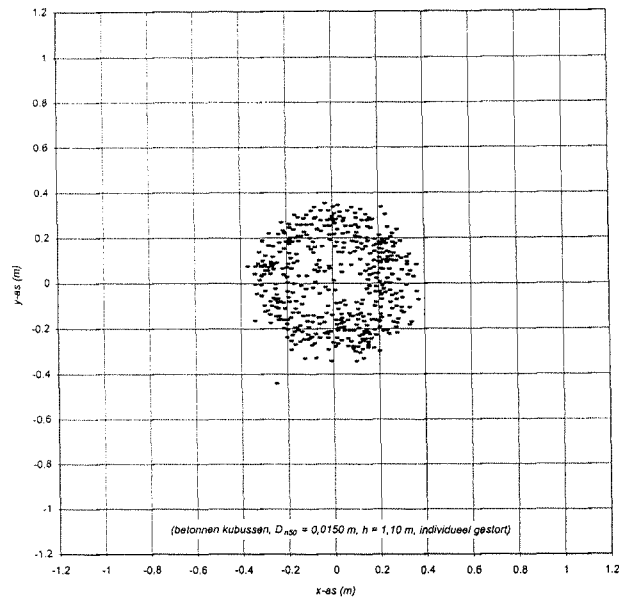


Bijlage 10.1a Overzicht van de bovenaanzichten van de stort (modelproeven met betonnen kubussen)

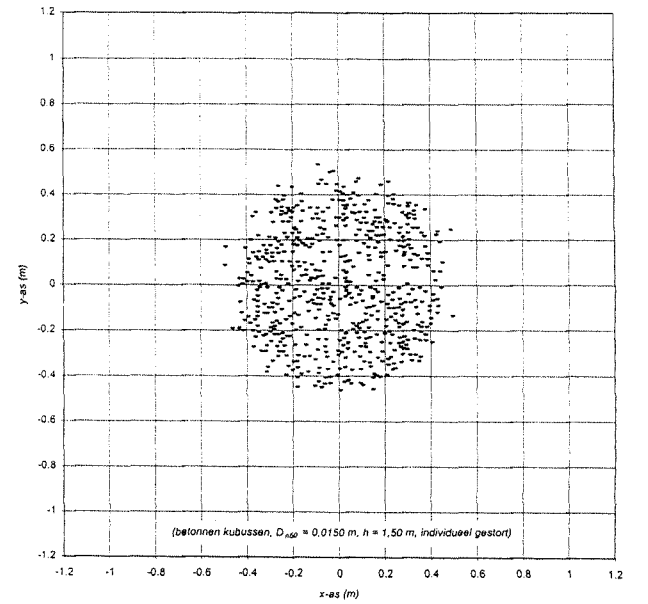
Bijlage 10.2a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.26)



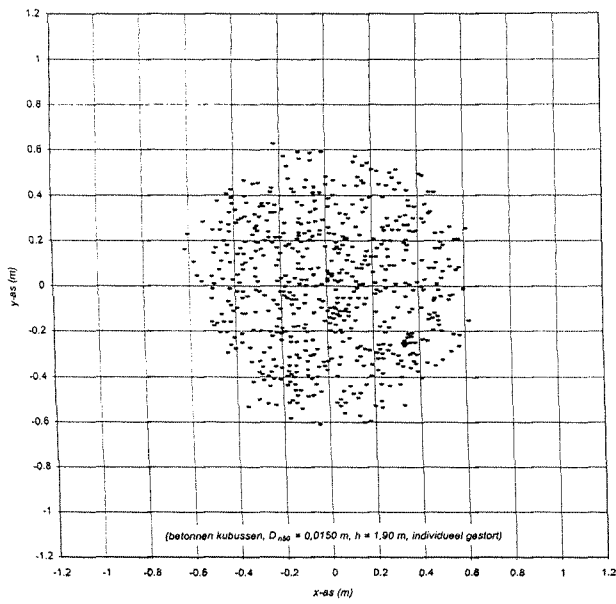
Bijlage 10.3a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.27)



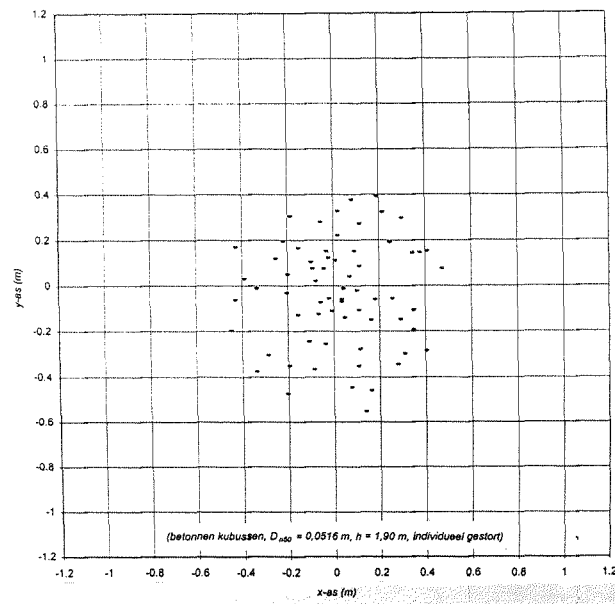
Bijlage 10.4a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.28)



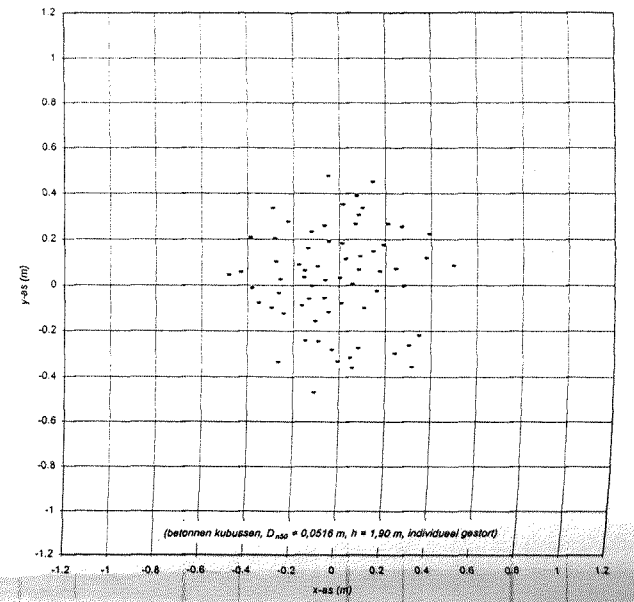
Bijlage 10.5a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.29)



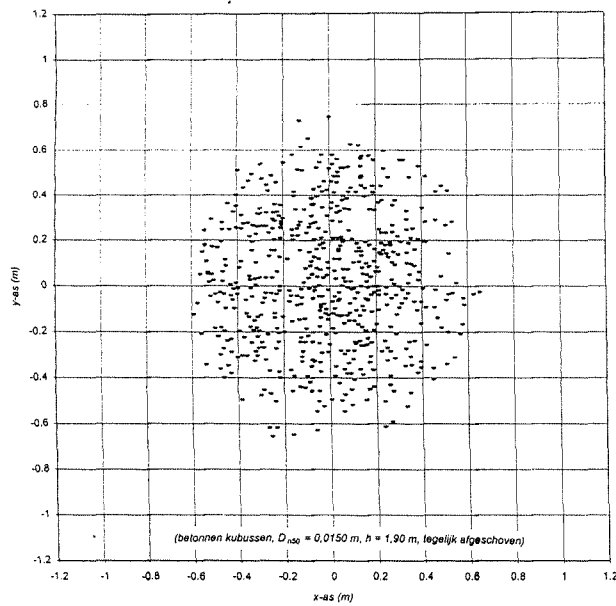
Bijlage 10.6a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.30)



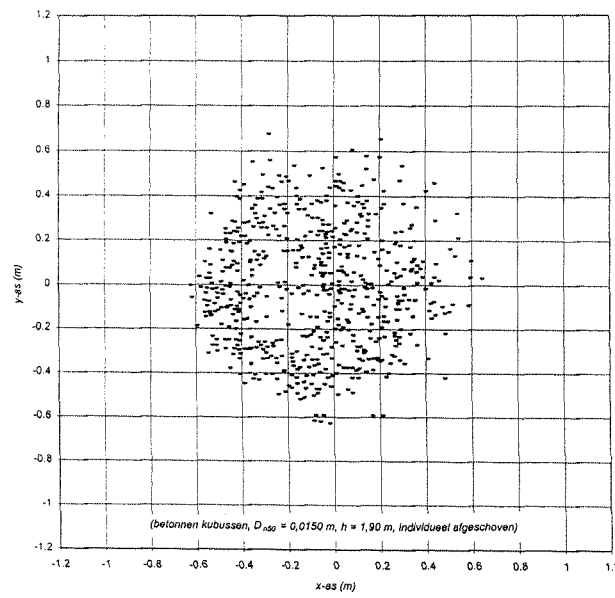
Bijlage 10.7a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.30bis)



Bijlage 10.8a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.31, deel 1)

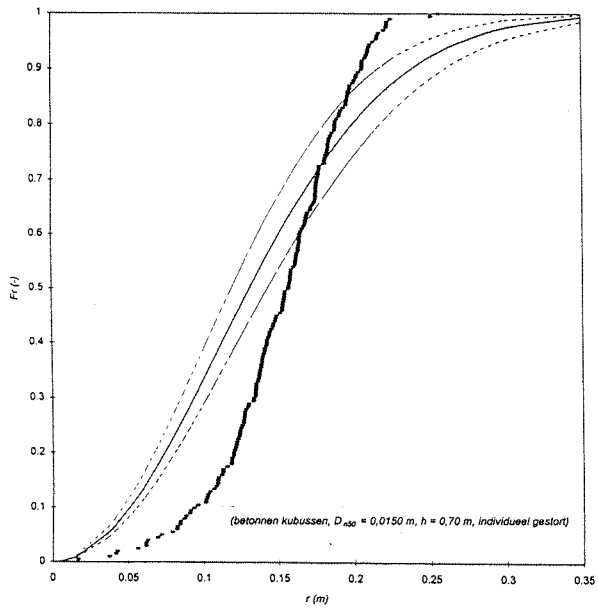


Bijlage 10.8b Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.31, deel 2)

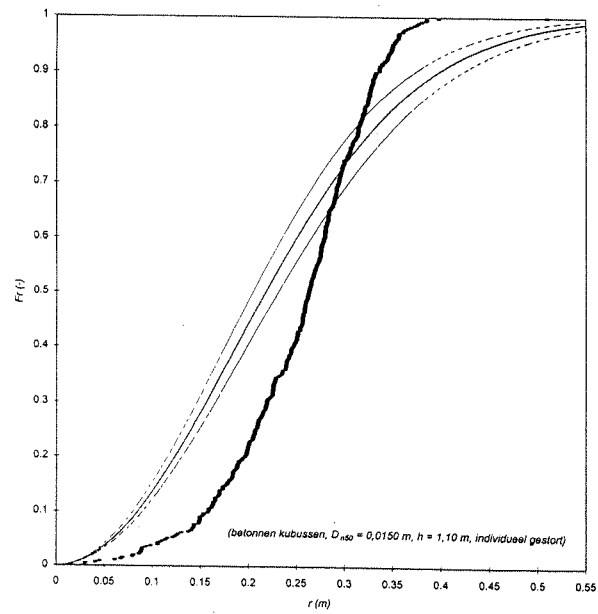


Bijlage 10.1b Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met betonnen kubussen)

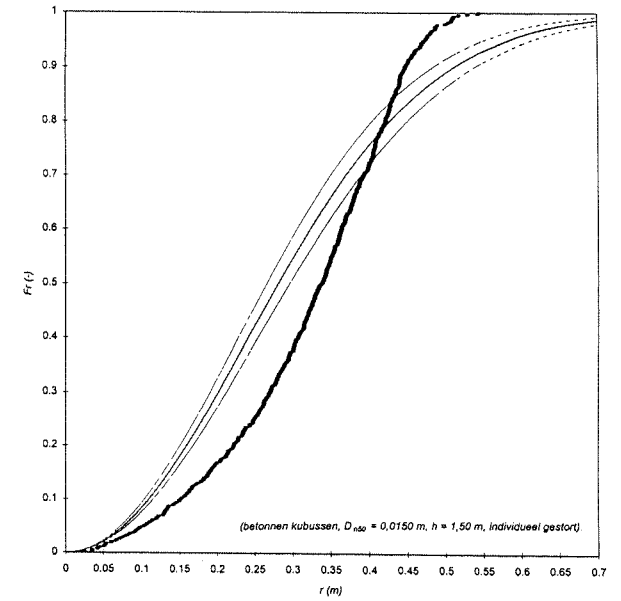
Bijlage 10.2b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.26)



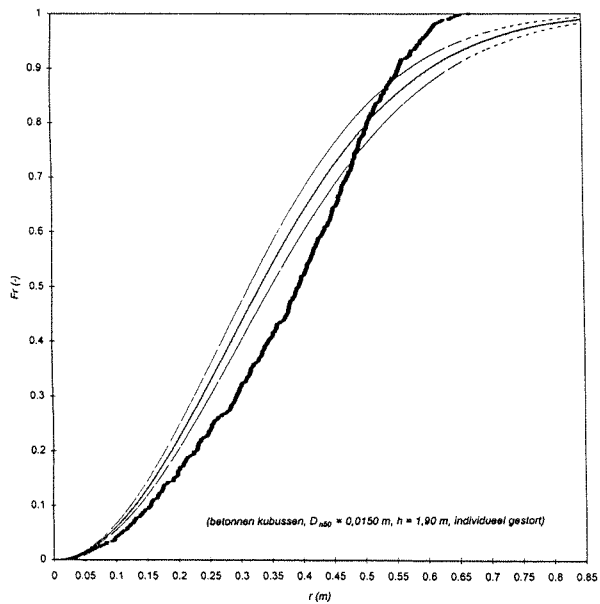
Bijlage 10.3b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.27)



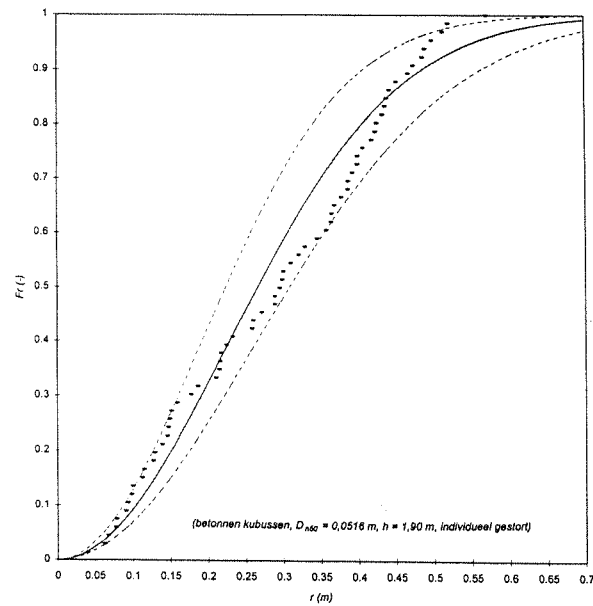
Bijlage 10.4b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.28)



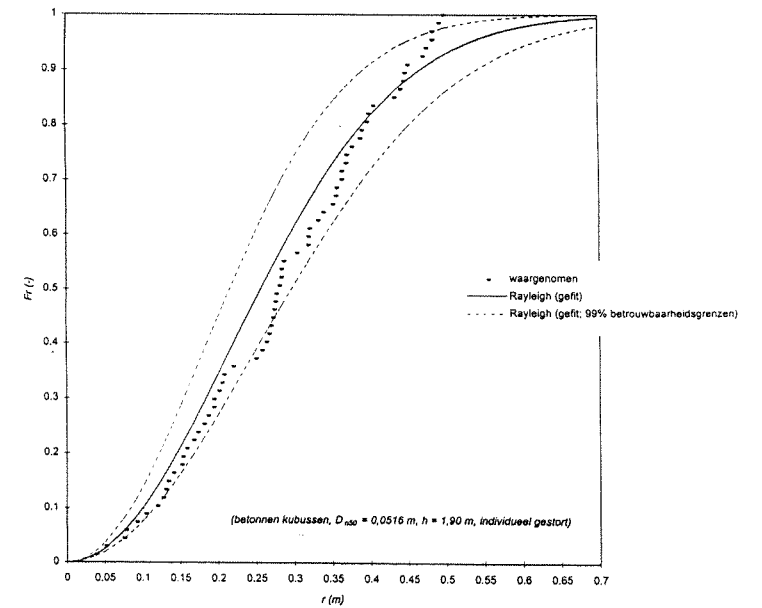
Bijlage 10.5b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.29)



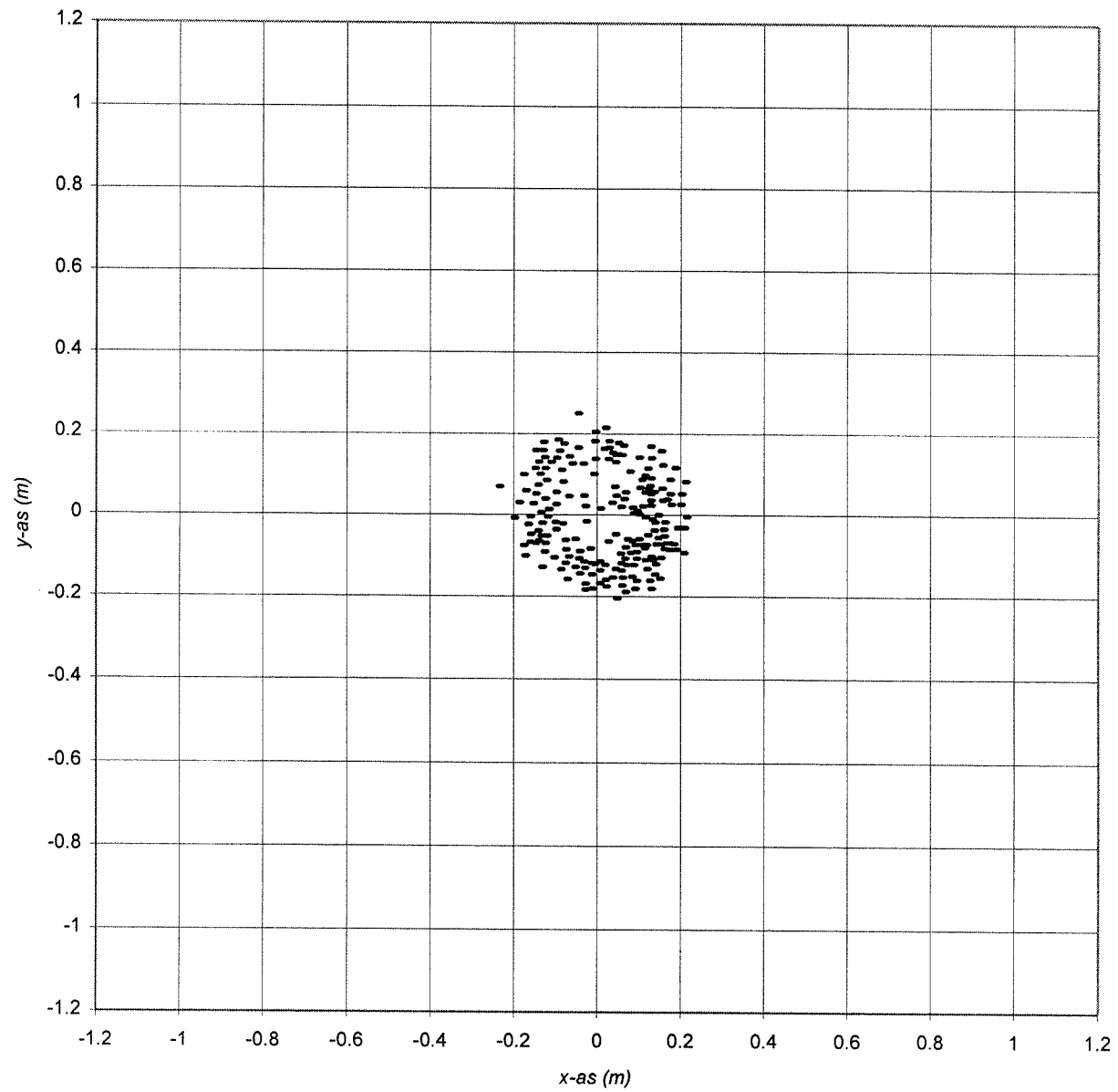
Bijlage 10.6b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.30)



Bijlage 10.7b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.30bis)

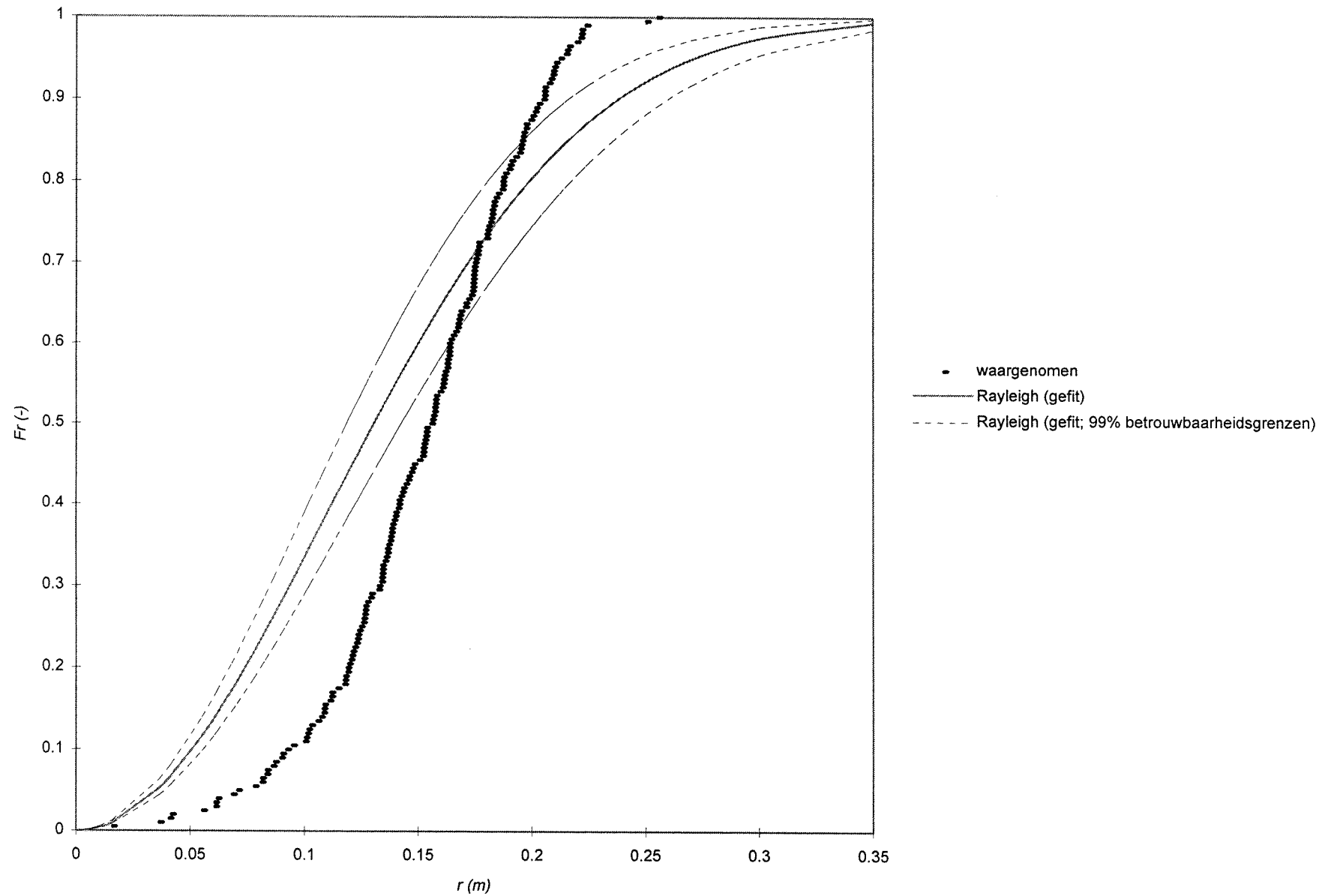


Bijlage 10.2a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.26)*



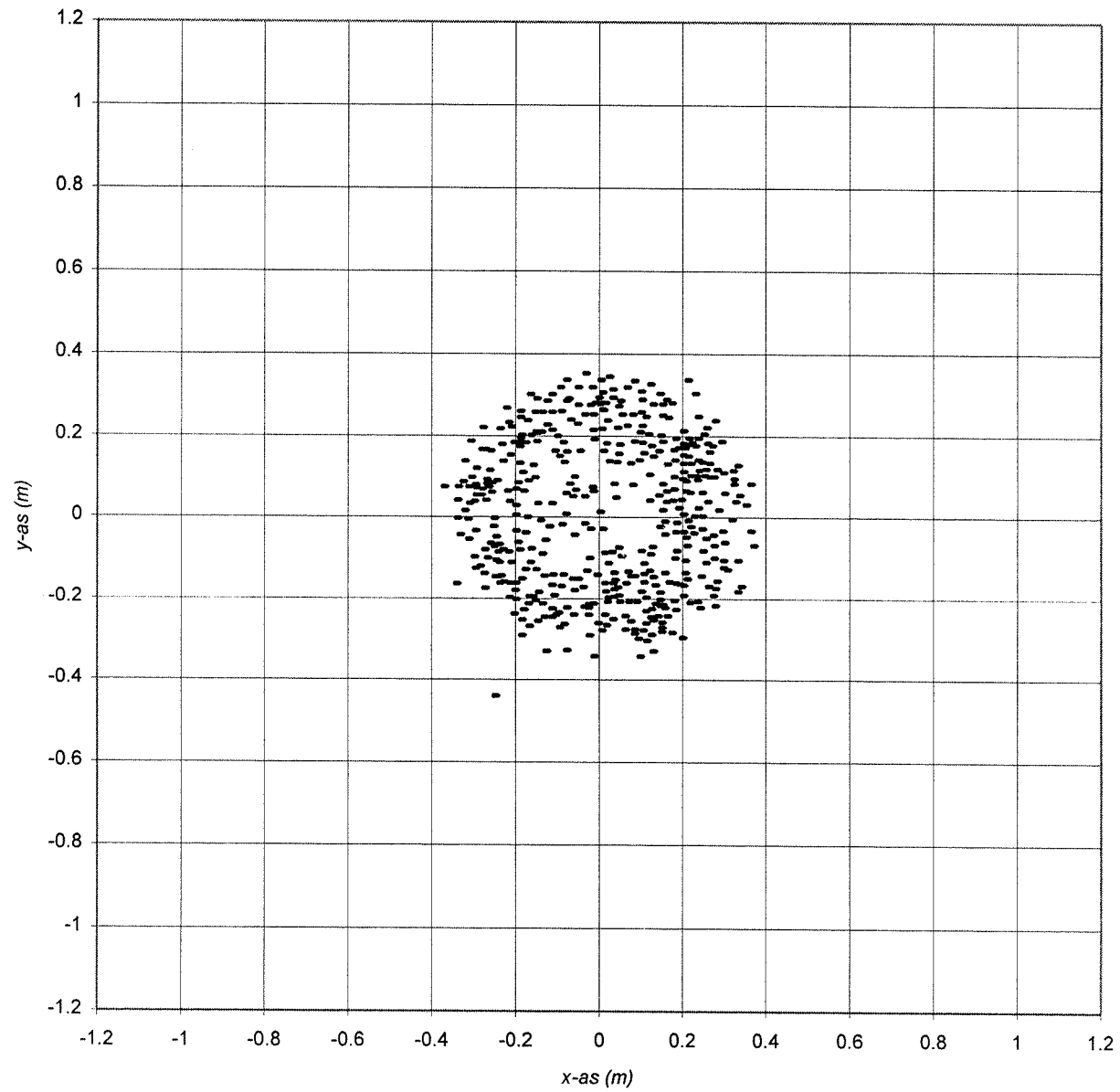
(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 10.2b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.26)



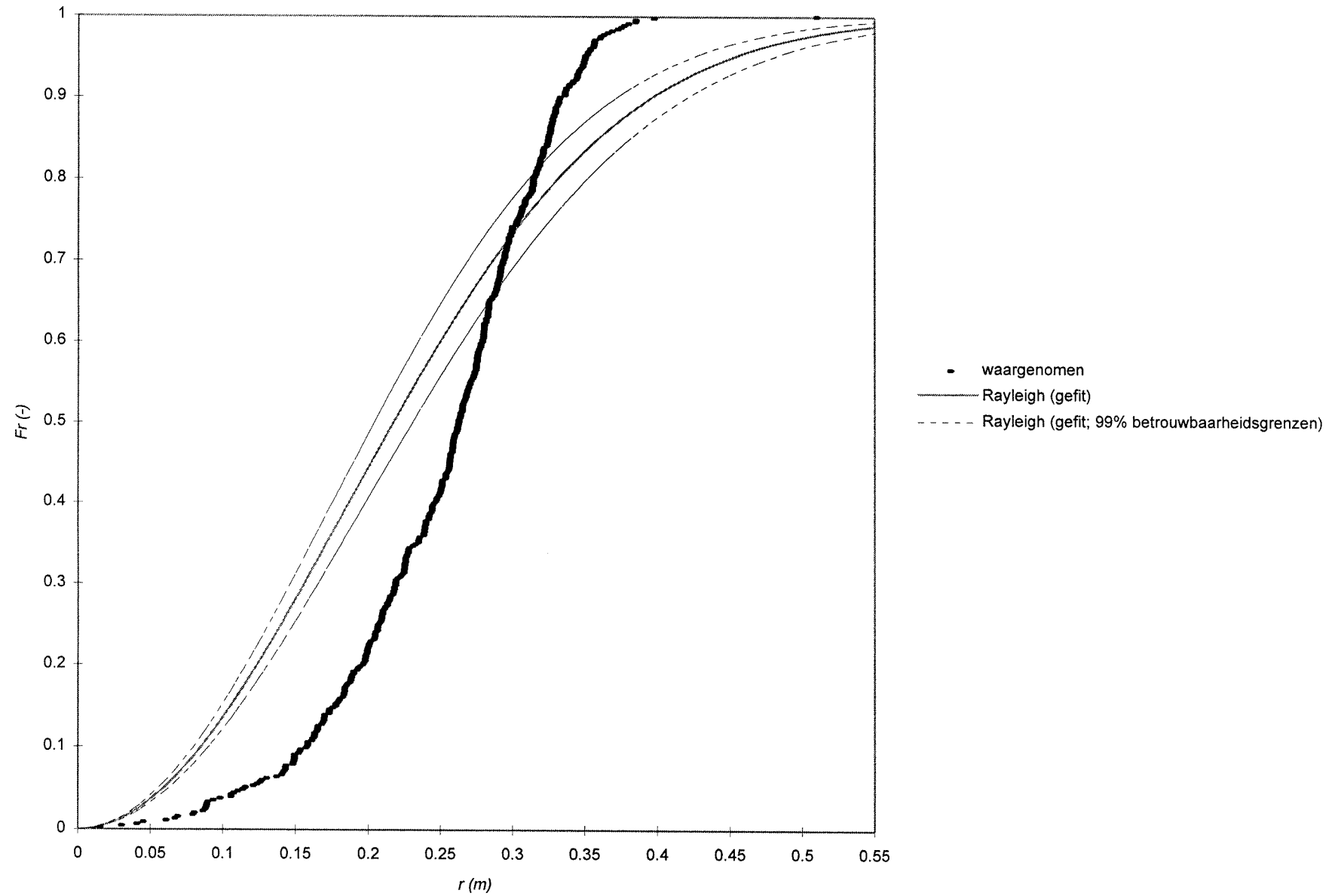
(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 10.3a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.27)*



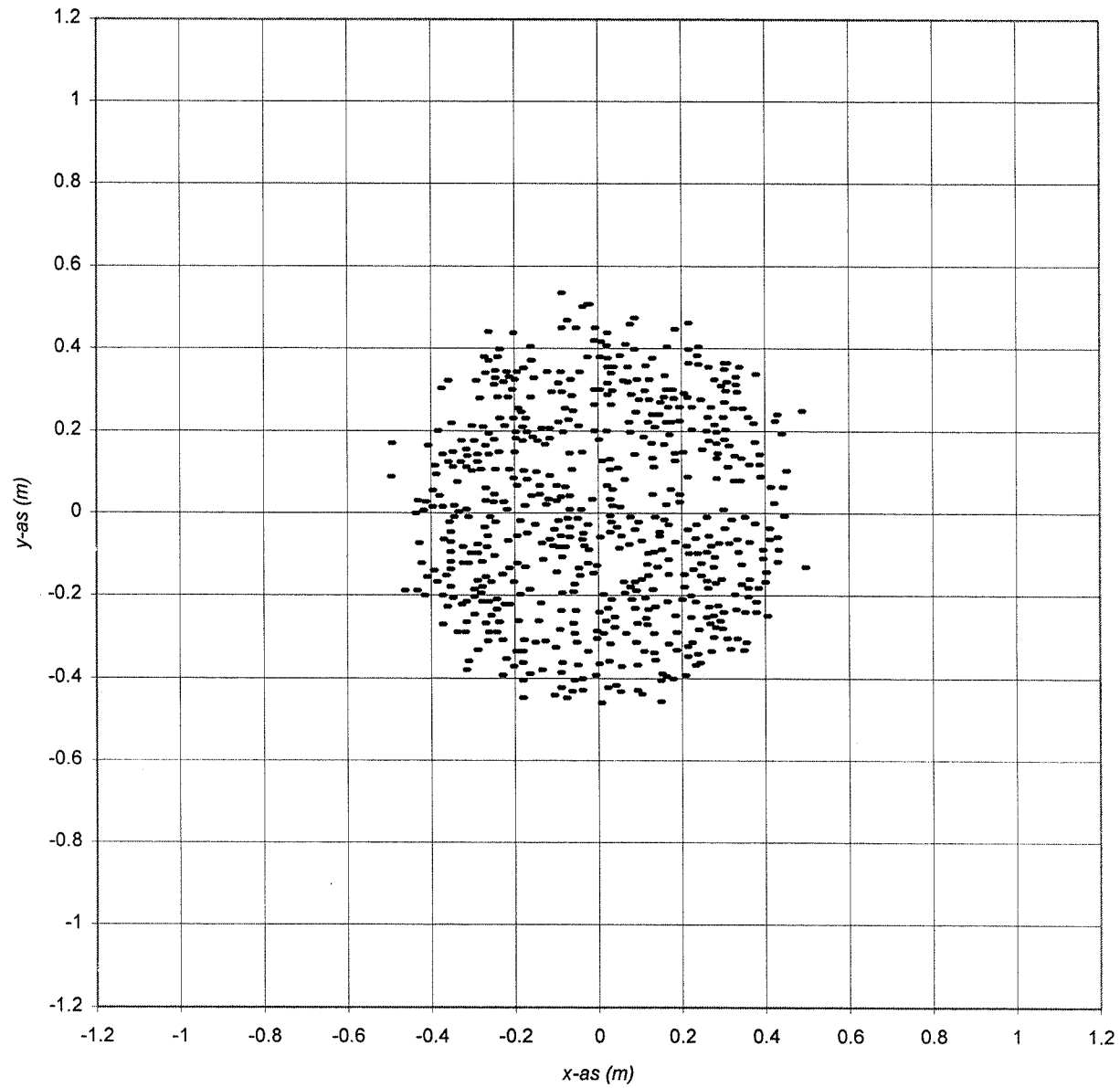
(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)

Bijlage 10.3b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.27)



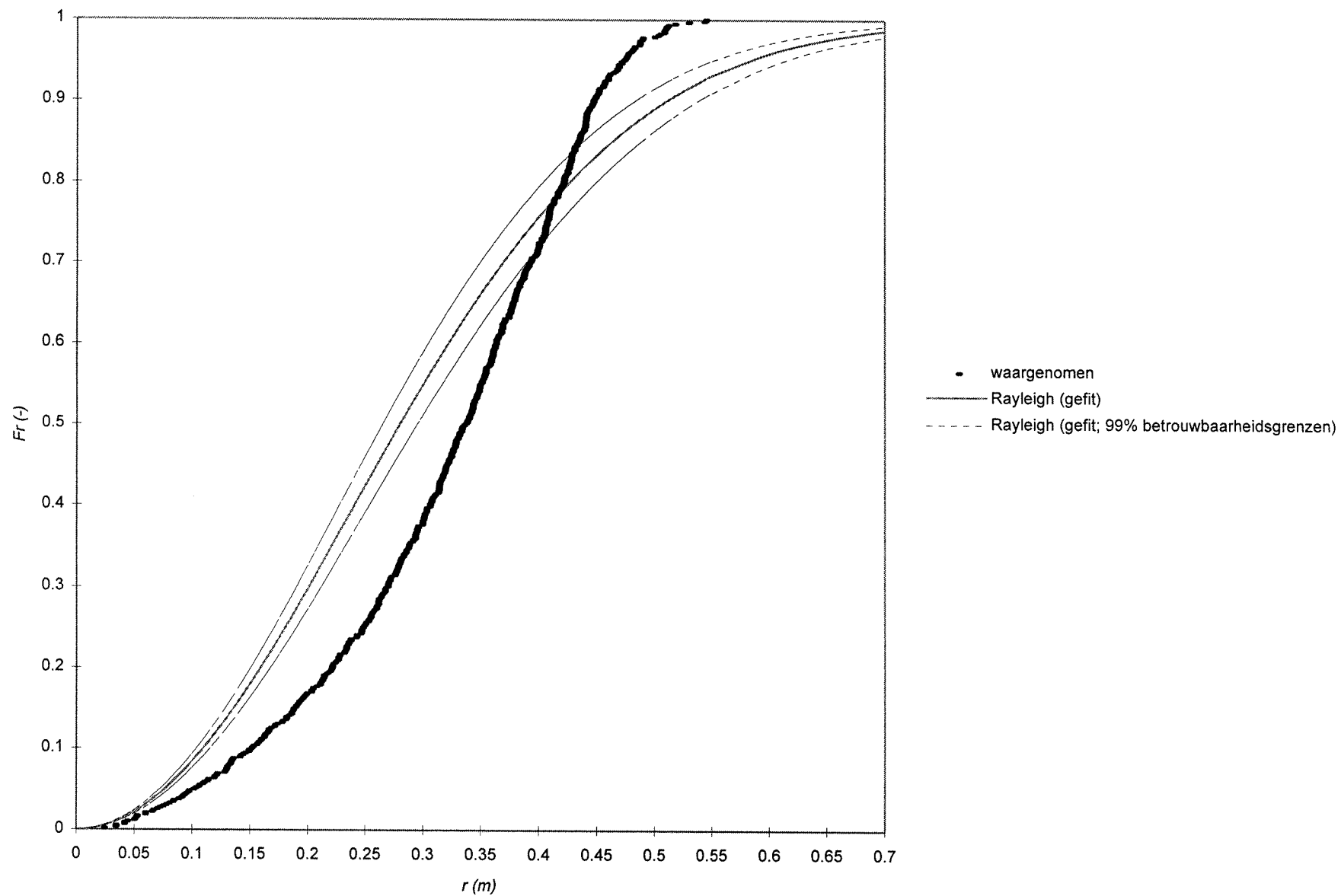
(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)

Bijlage 10.4a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.28)*



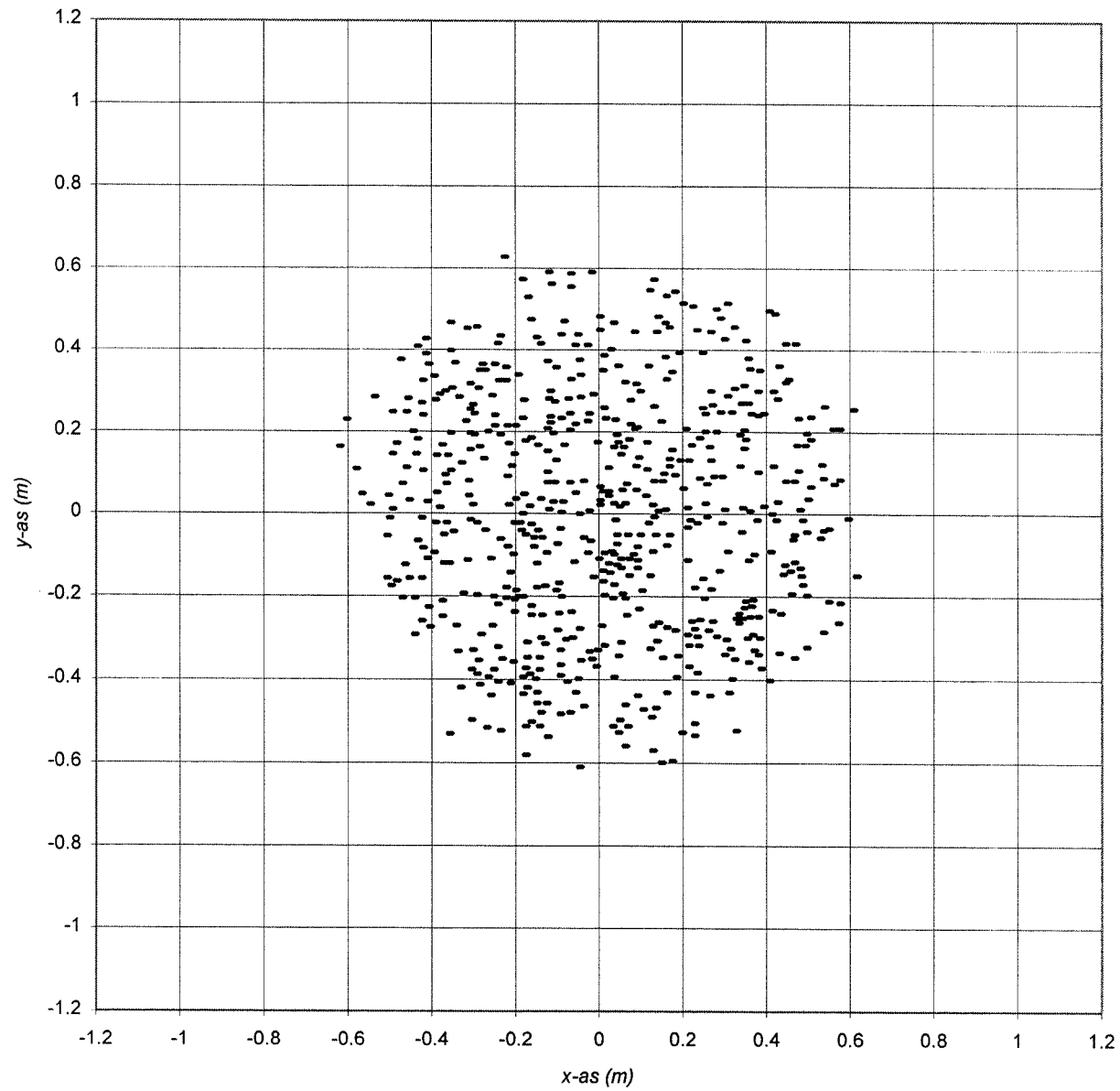
(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)

Bijlage 10.4b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.28)



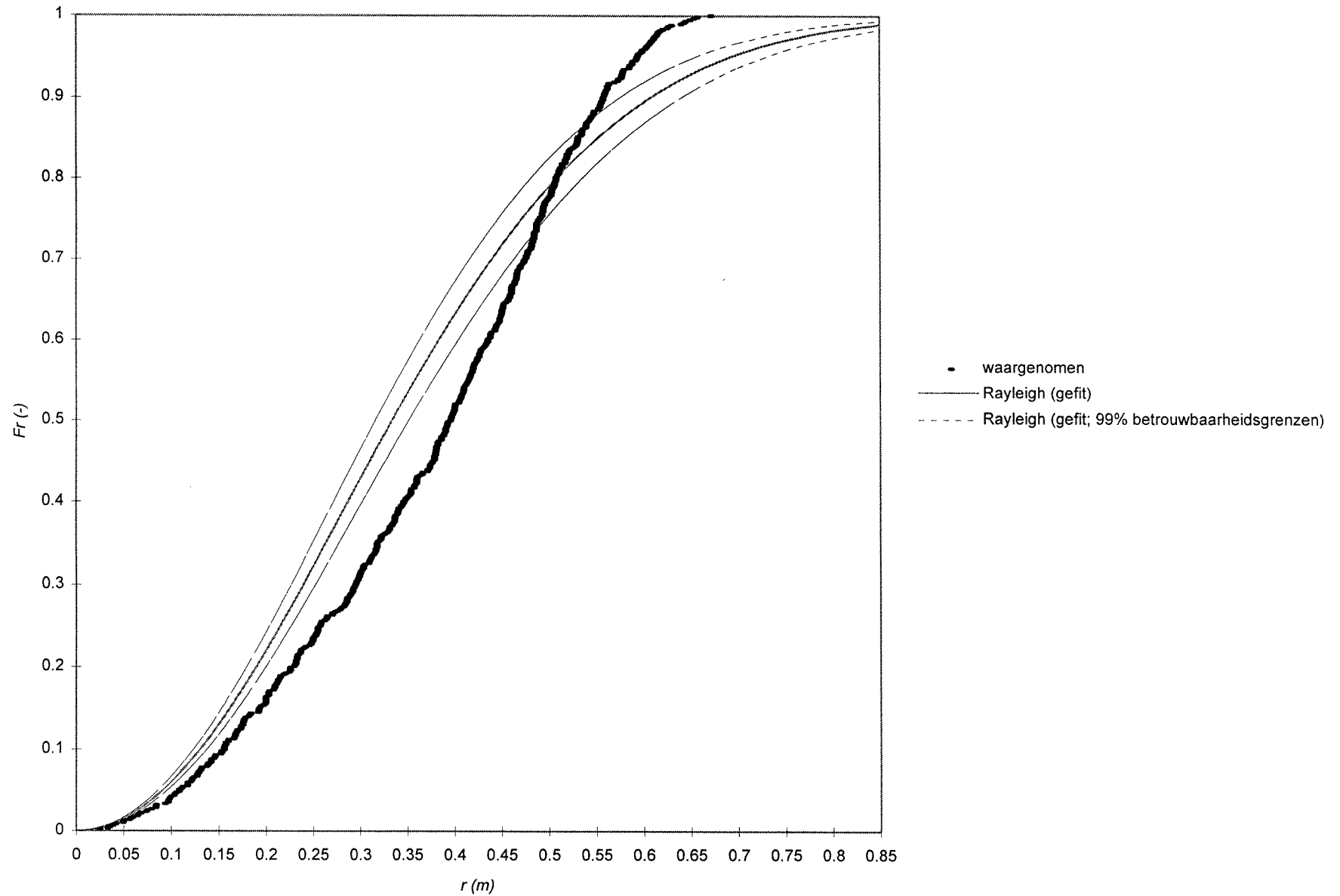
(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)

Bijlage 10.5a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.29)*



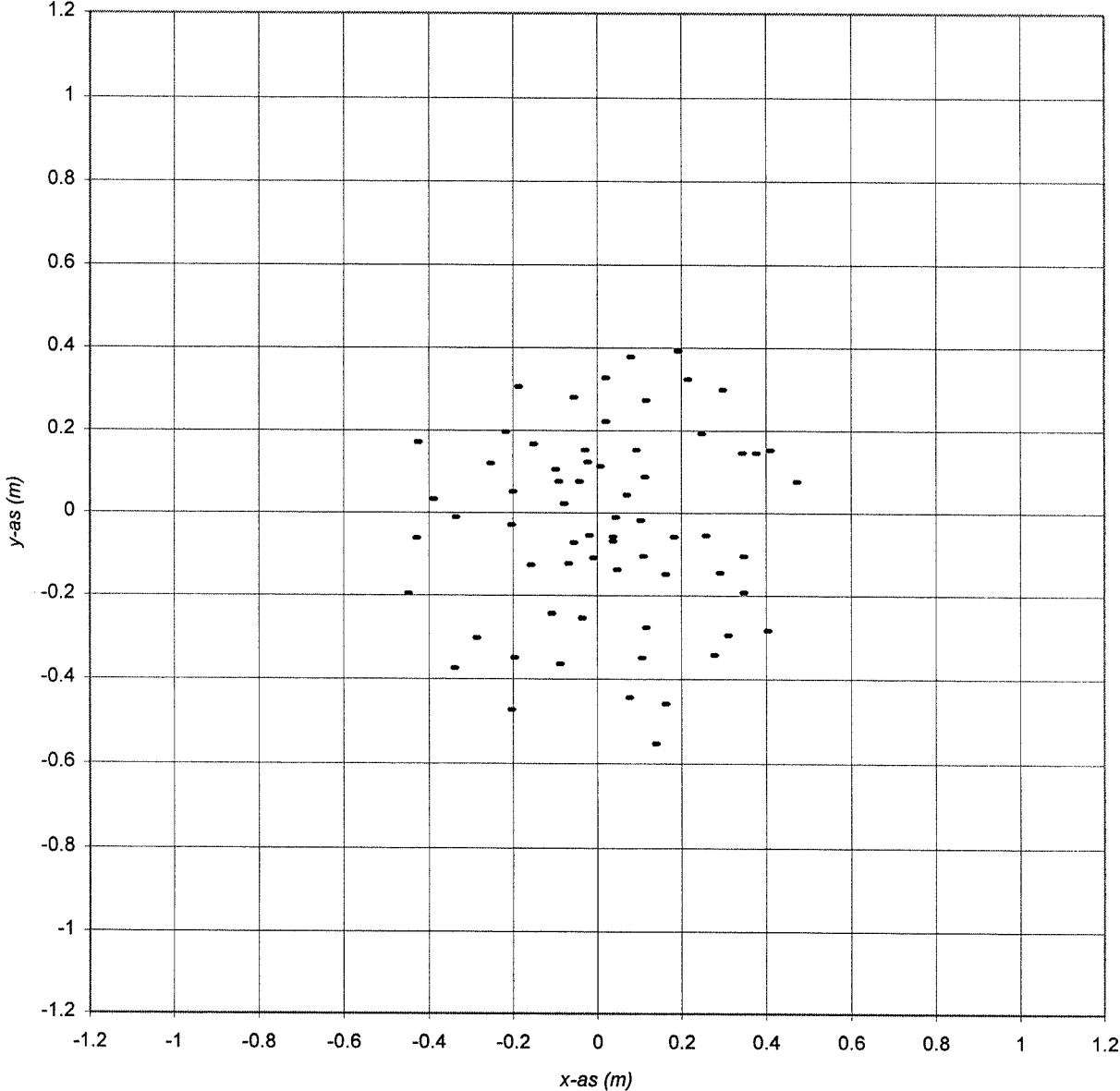
(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 10.5b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.29)



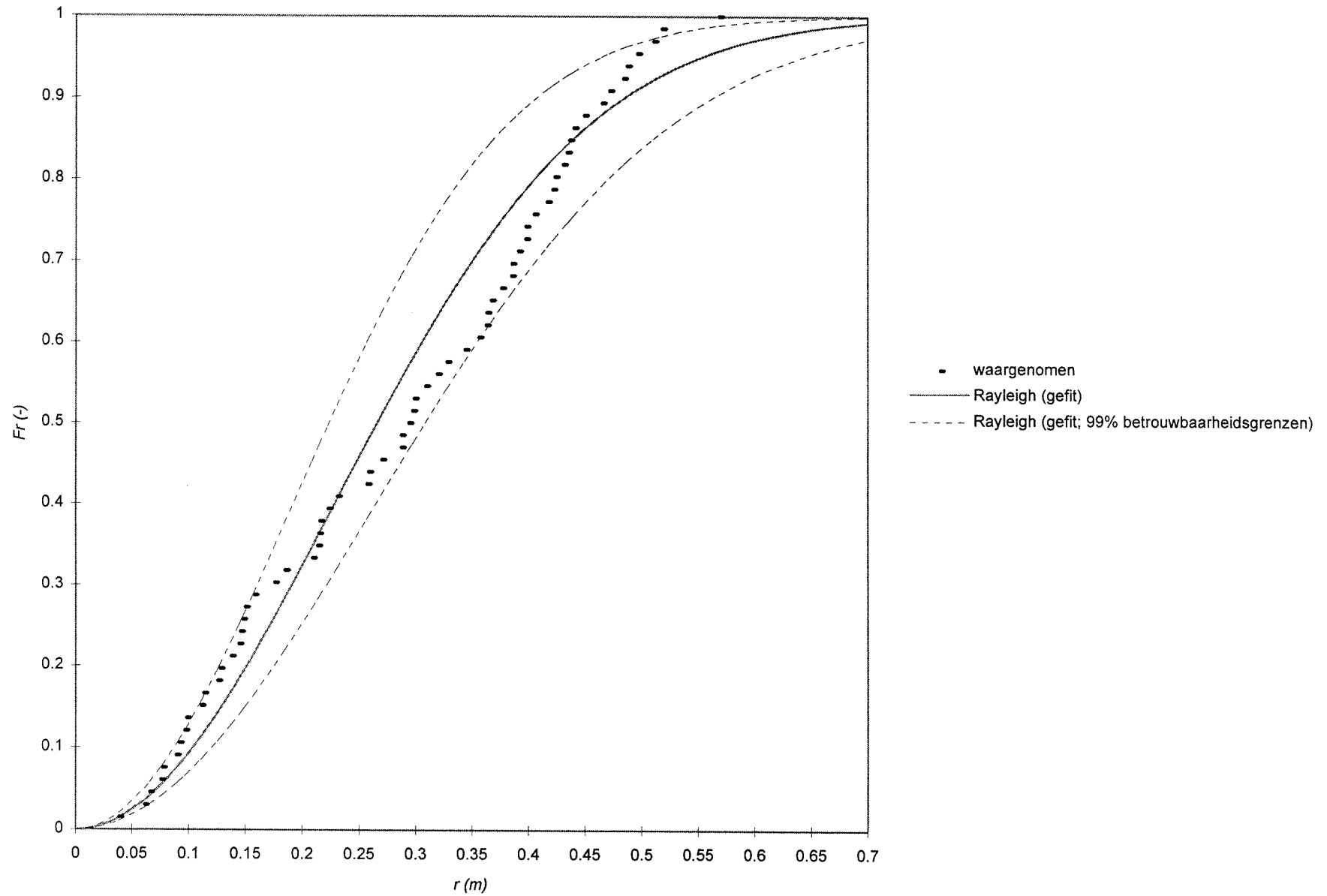
(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 10.6a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.30)



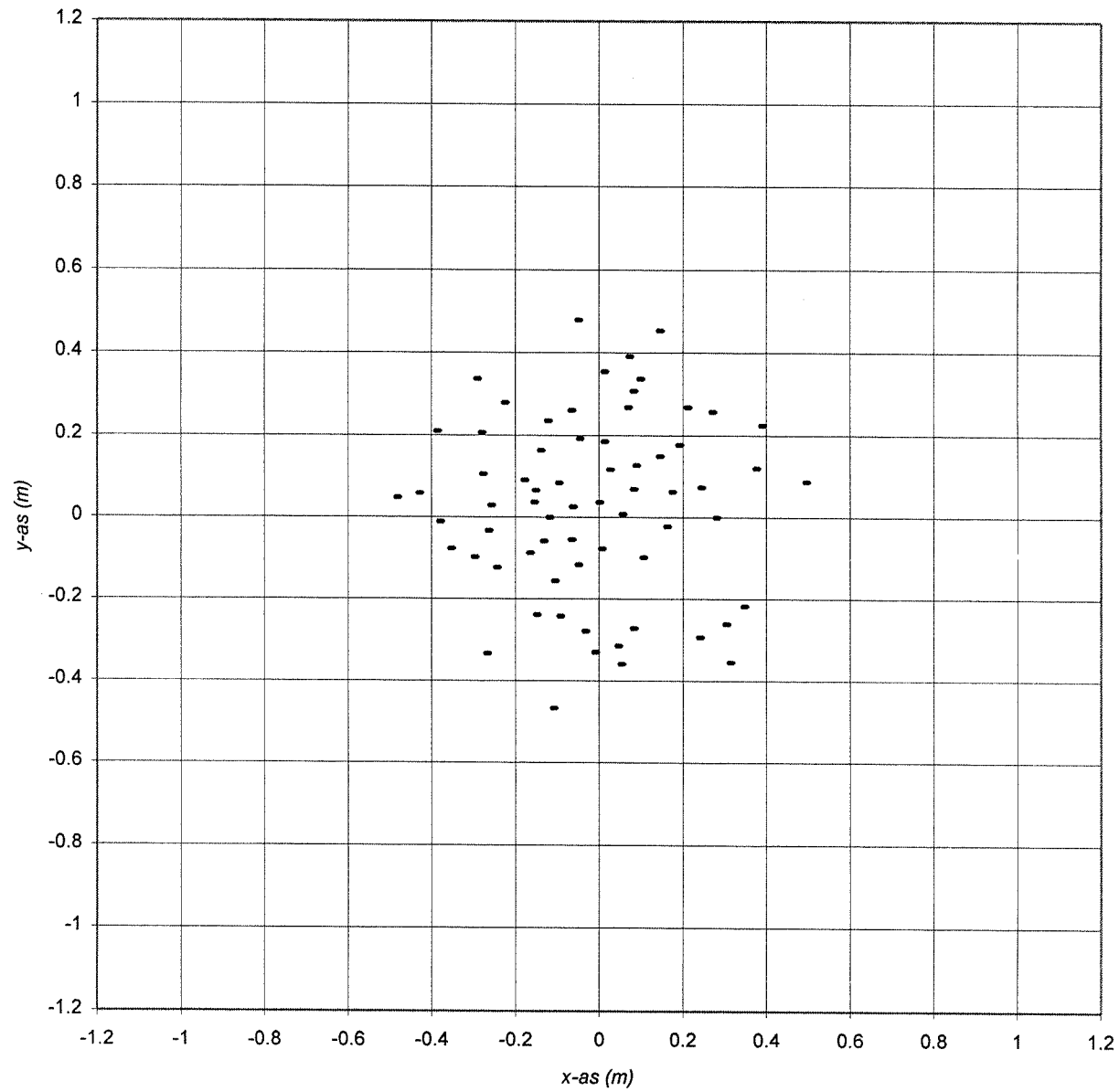
(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0516$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 10.6b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.30)



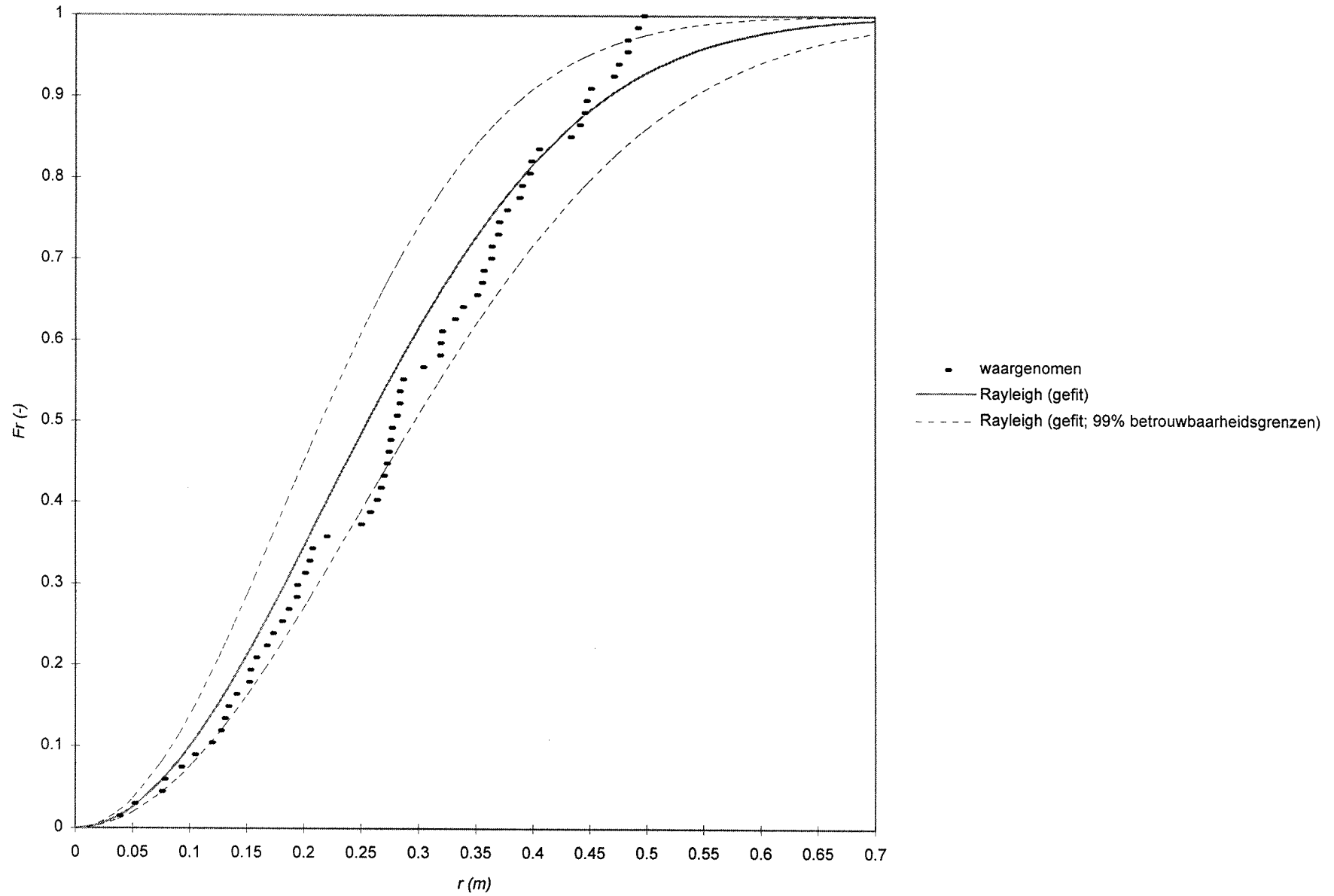
(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0516$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 10.7a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.30bis)



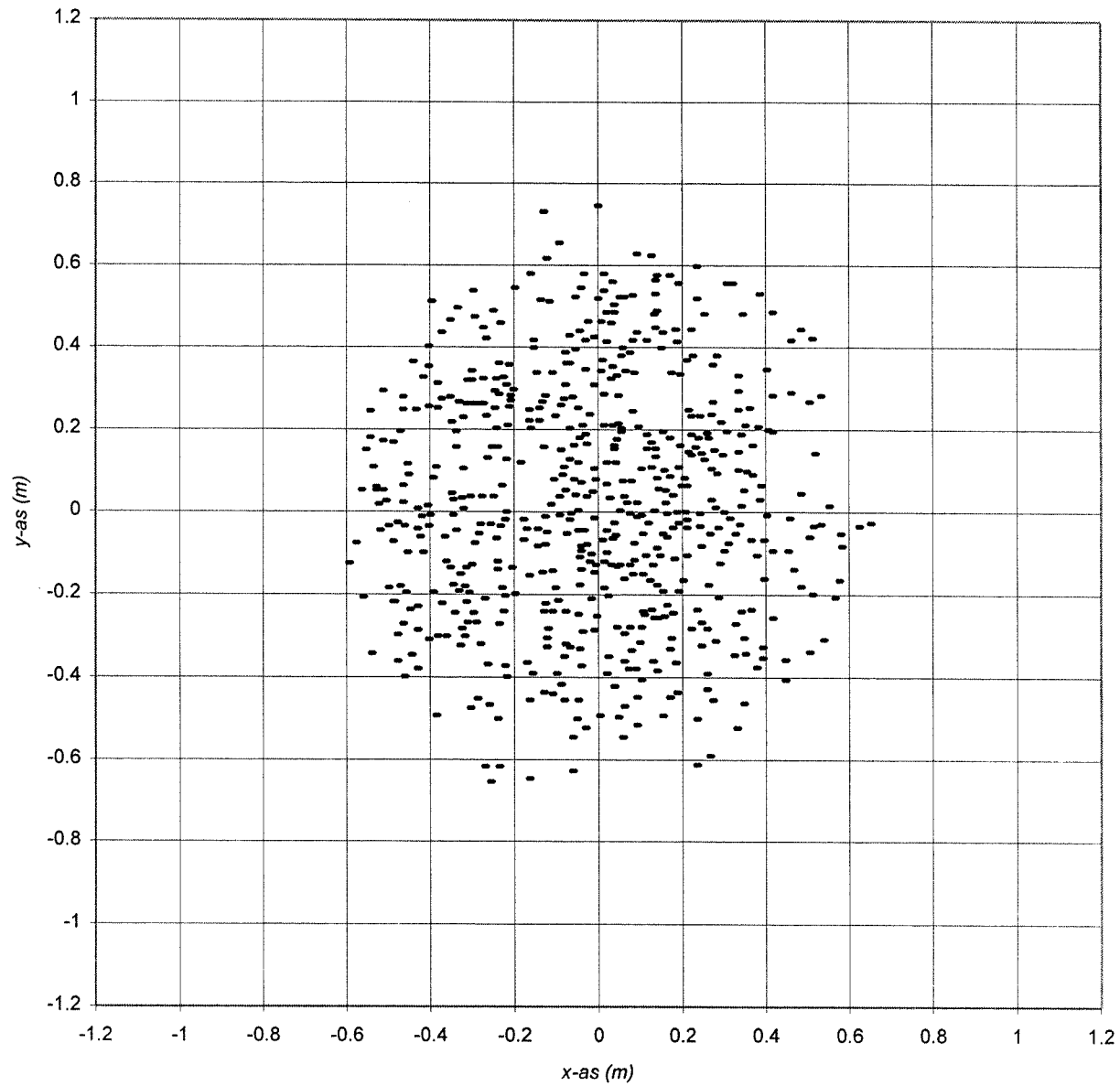
(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0516$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 10.7b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.30bis)



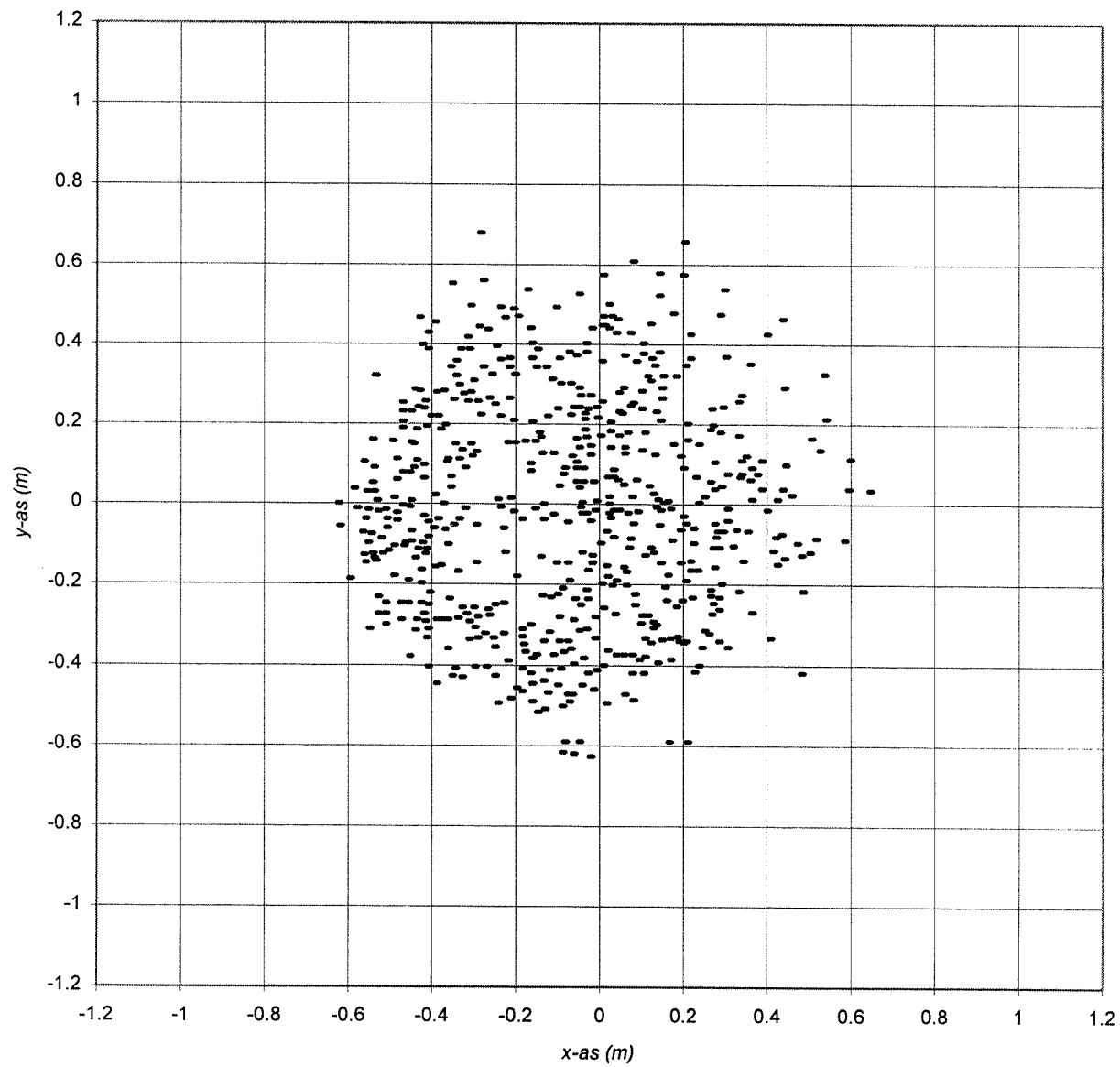
(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0516$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 10.8a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.31, deel 1)*



(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk afgeschoven)

Bijlage 10.8b *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.31, deel 2)*



(betonnen kubussen, $D_{n50} = 0,0150$ m, $h = 1,90$ m, individueel afgeschoven)

Bijlage 10.9 Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte betonnen kubussen (in seconden)

2,9 s	3,2 s	3,2 s	3,3 s	3,3 s	3,3 s	3,4 s	3,4 s	3,4 s	3,5 s
3,1 s	3,2 s	3,2 s	3,3 s	3,3 s	3,4 s	3,4 s	3,4 s	3,4 s	3,7 s

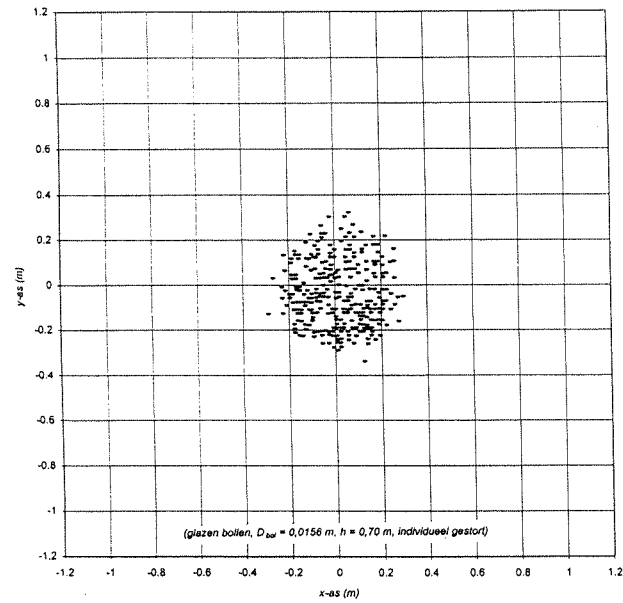
$(D_{n50} = 0,0150 \text{ m}, h = 1,90 \text{ m})$

		1,9 s	2,0 s	2,0 s	2,1 s	2,2 s	2,2 s		
		2,0 s	2,0 s	2,0 s	2,1 s	2,2 s	2,3 s		

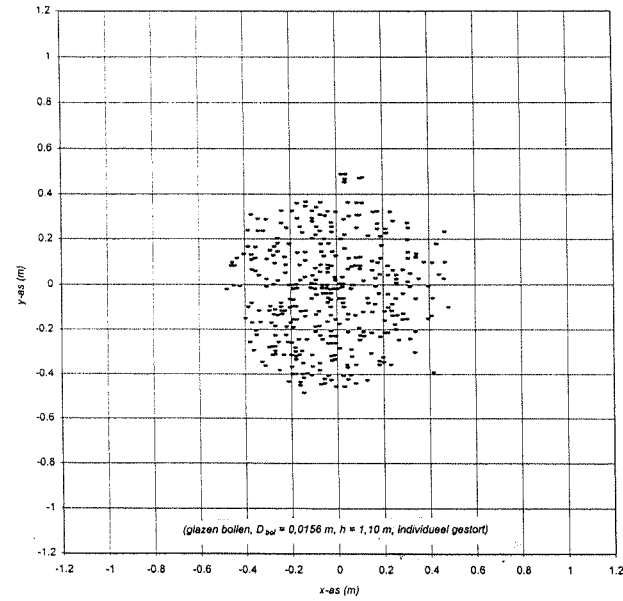
$(D_{n50} = 0,0516 \text{ m}, h = 1,90 \text{ m})$

Bijlage 11.1a Overzicht van de bovenaanzichten van de stort (modelproeven met glazen bollen)

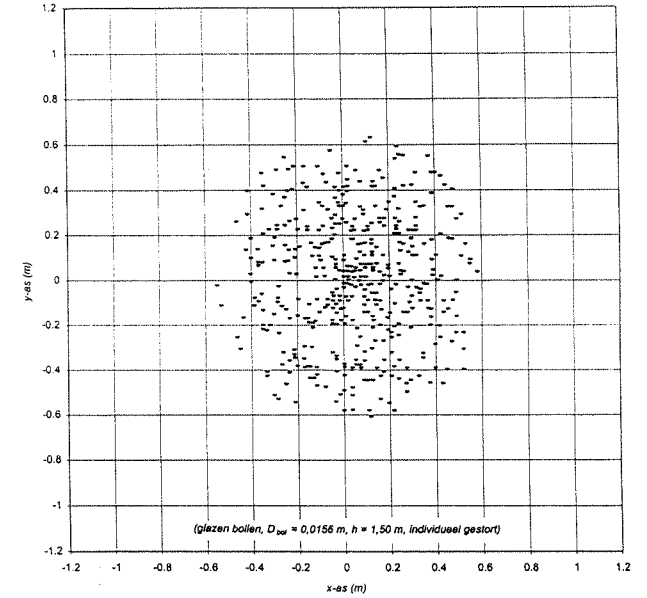
Bijlage 11.2a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.32)



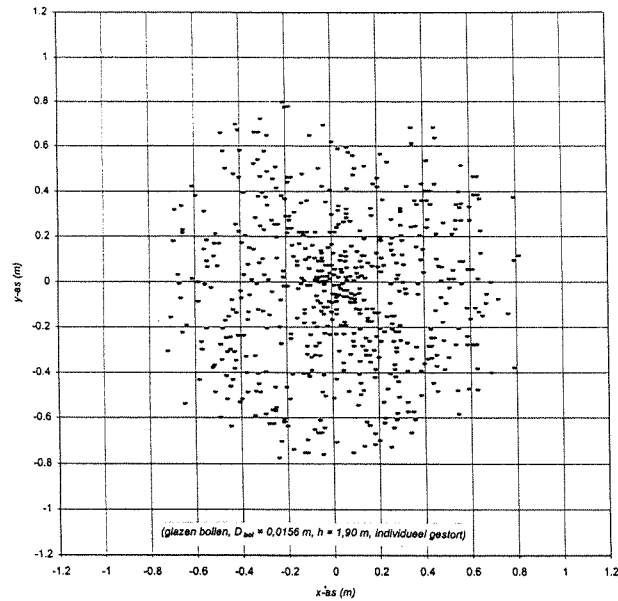
Bijlage 11.3a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.33)



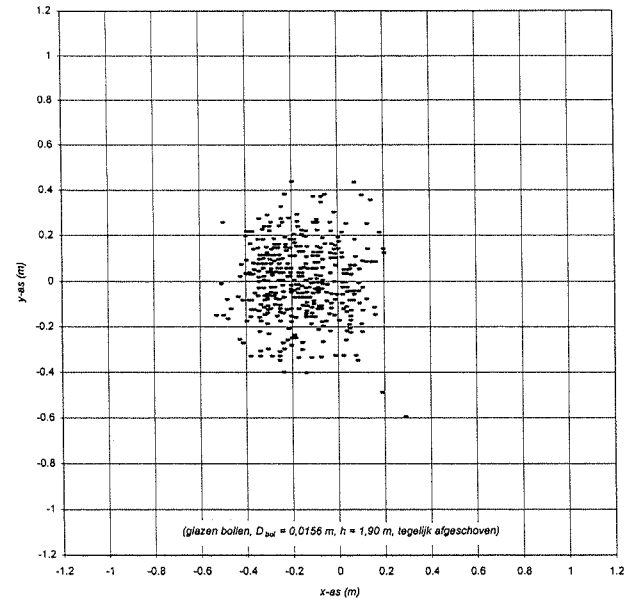
Bijlage 11.4a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.34)



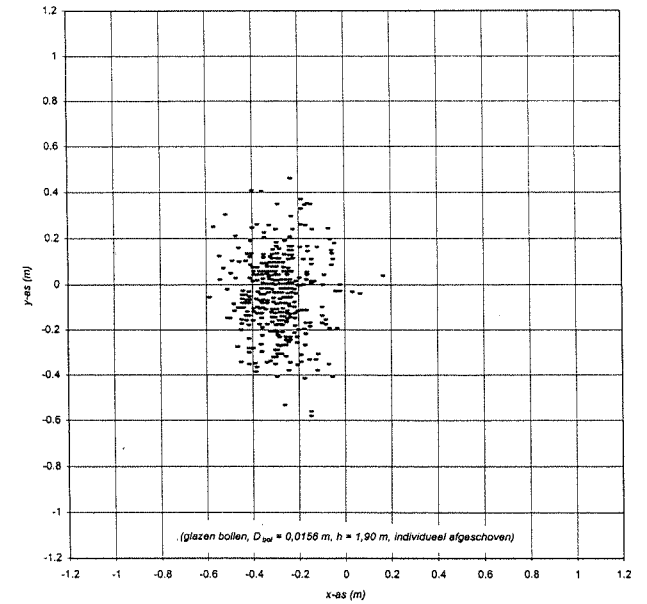
Bijlage 11.5a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.35)



Bijlage 11.6a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.36, deel 1)

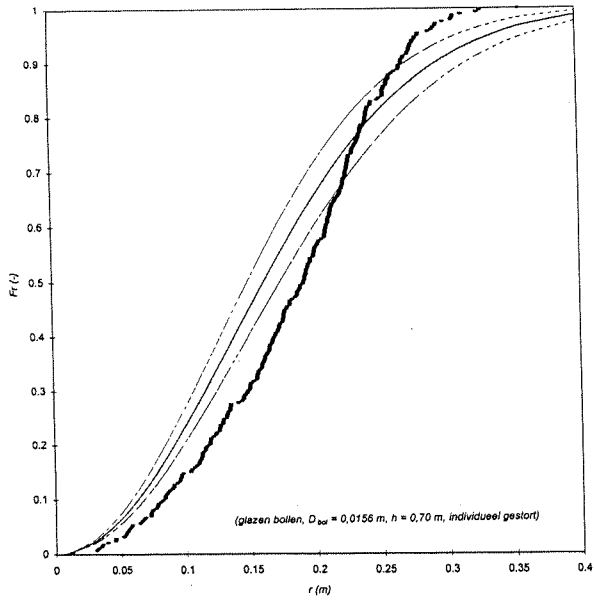


Bijlage 11.6b Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.36, deel 2)

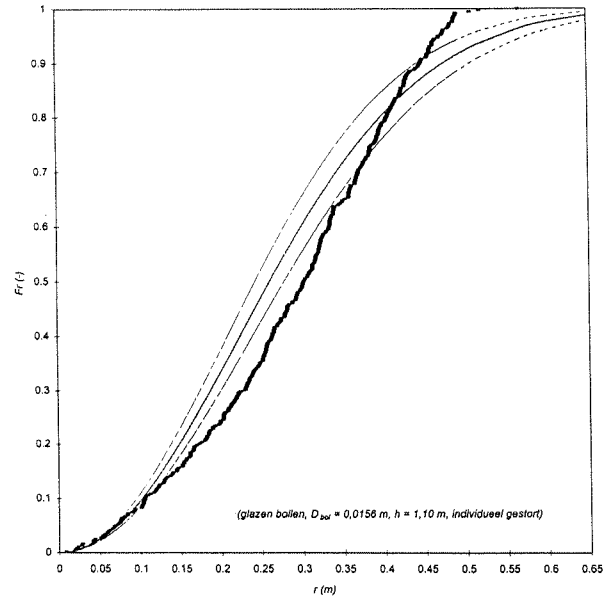


Bijlage 11.1b Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met glazen ballen)

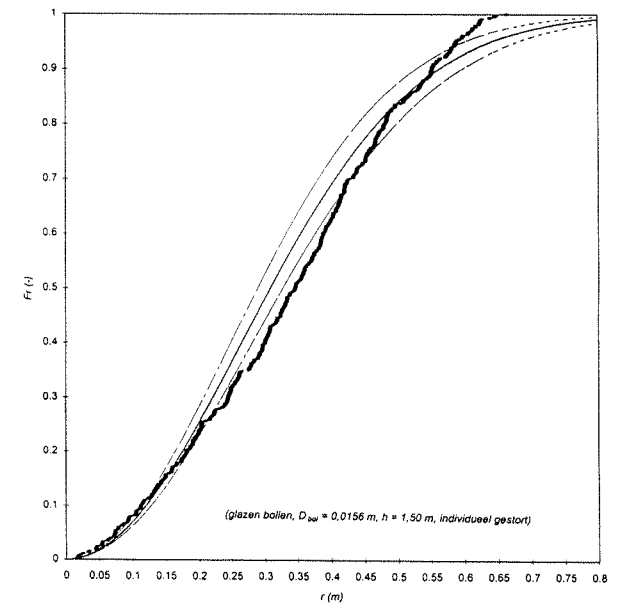
Bijlage 11.2b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.32)



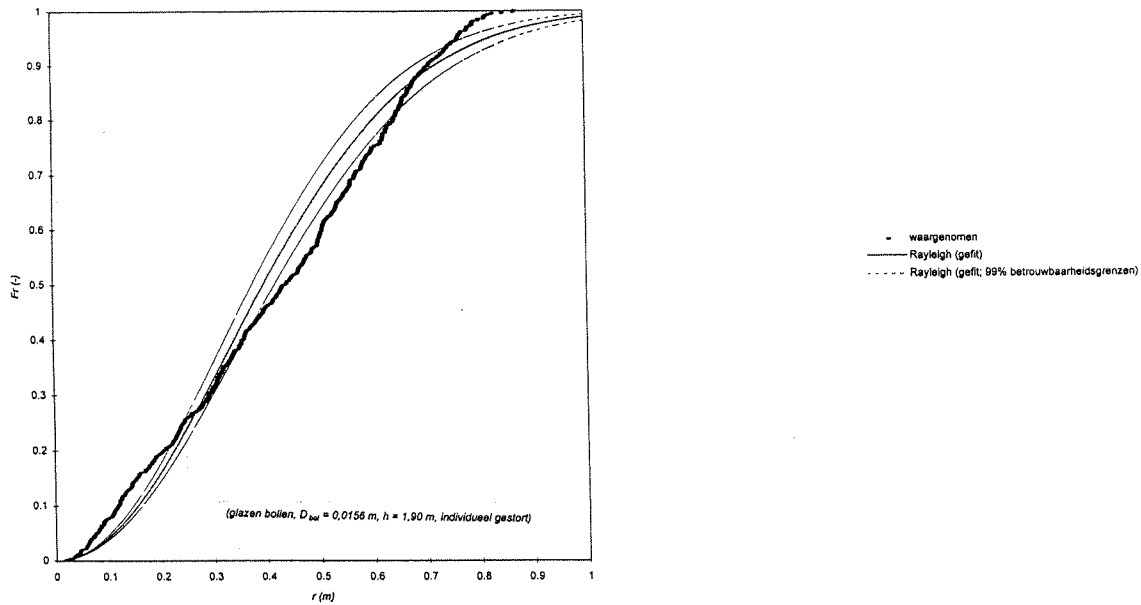
Bijlage 11.3b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.33)



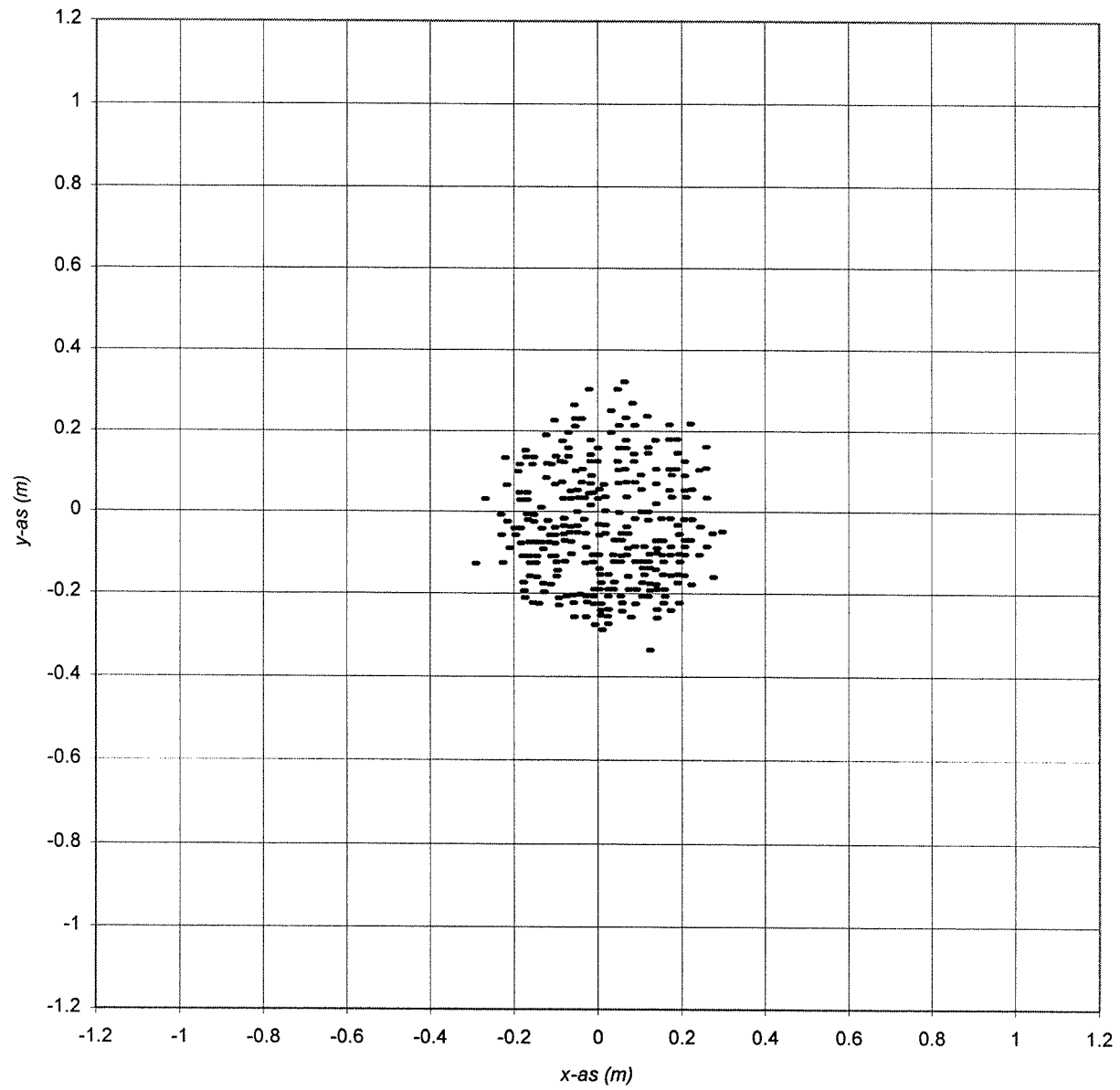
Bijlage 11.4b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.34)



Bijlage 11.5b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.35)

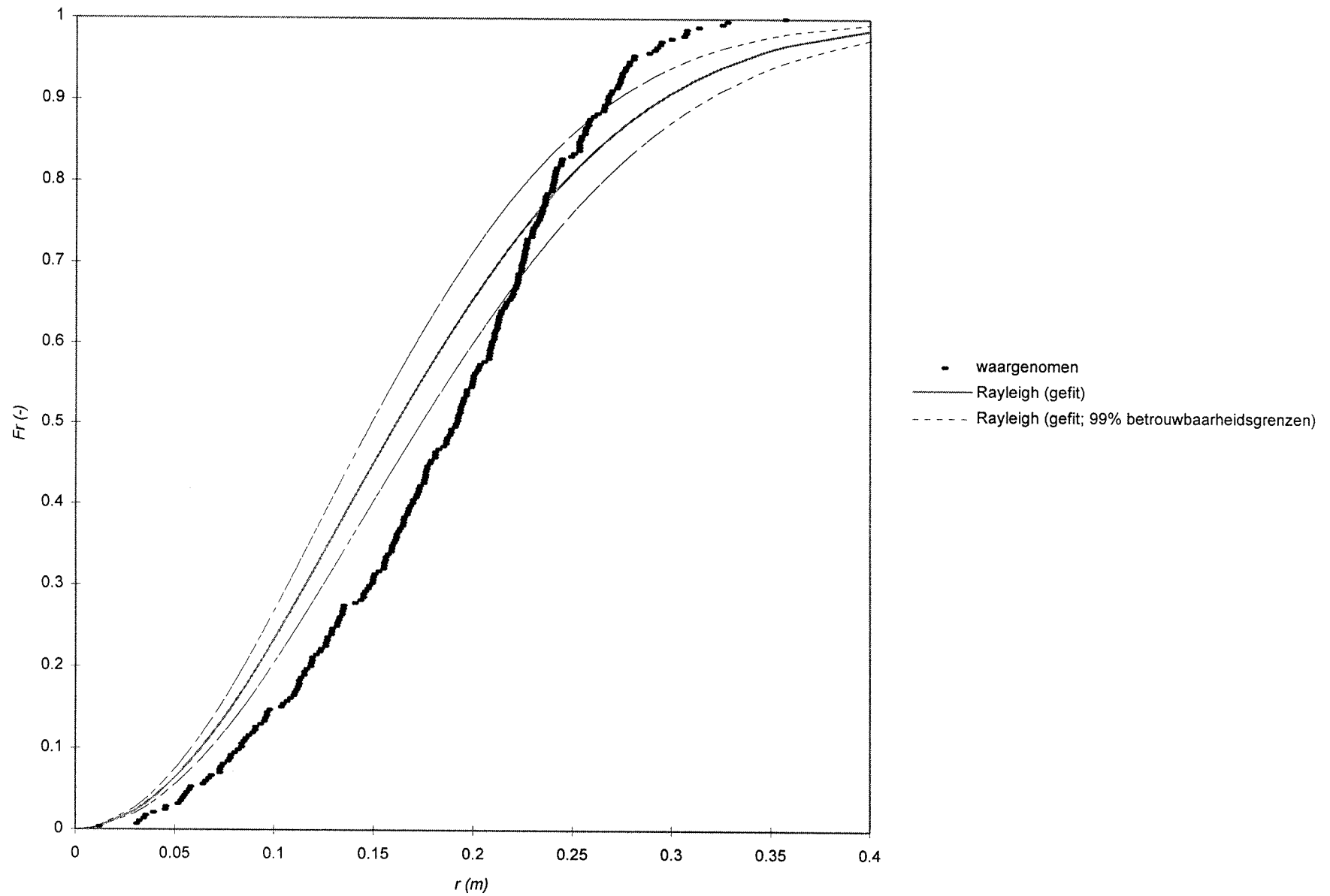


Bijlage 11.2a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.32)*



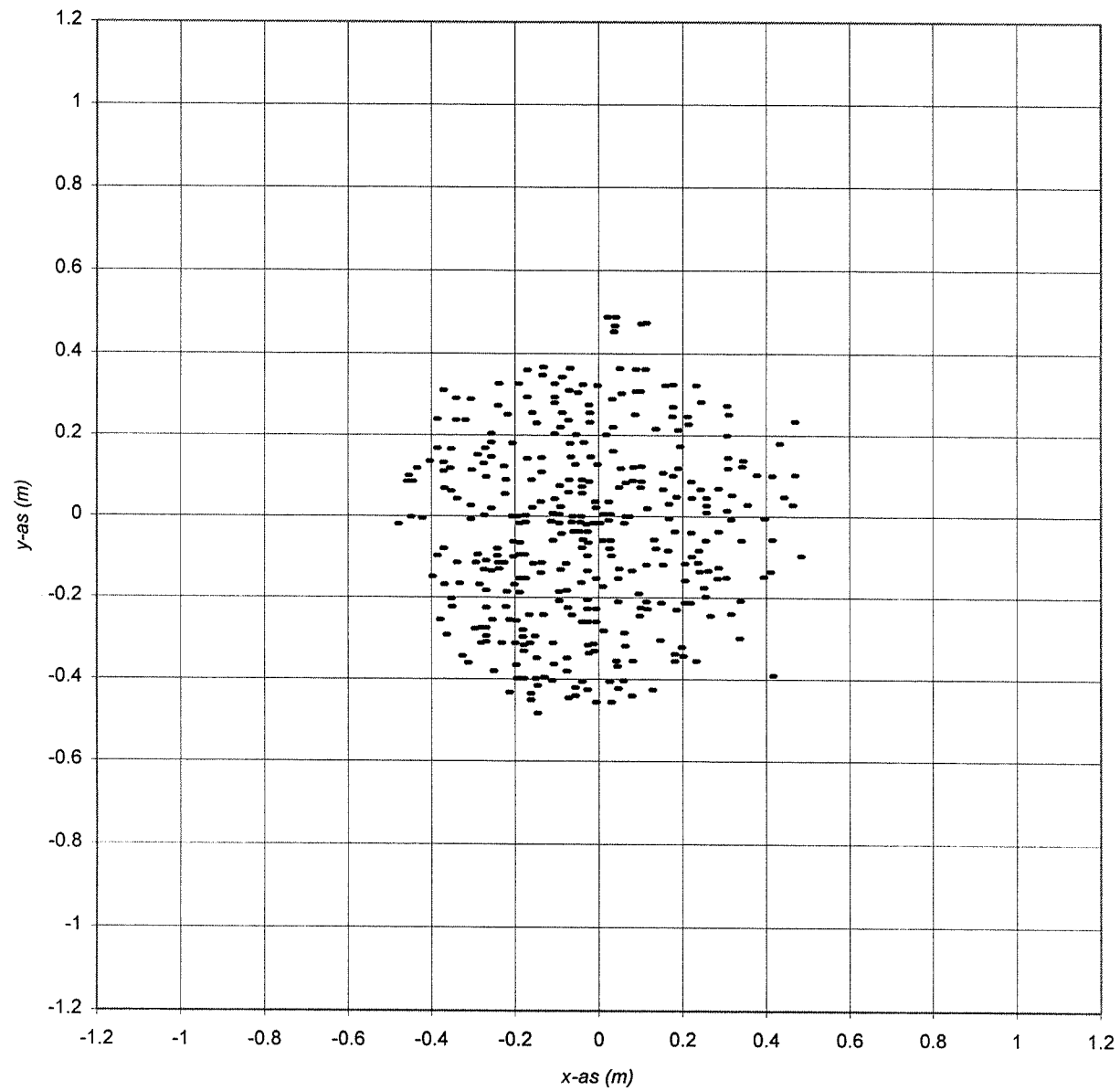
(glazen bollen, $D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 11.2b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.32)



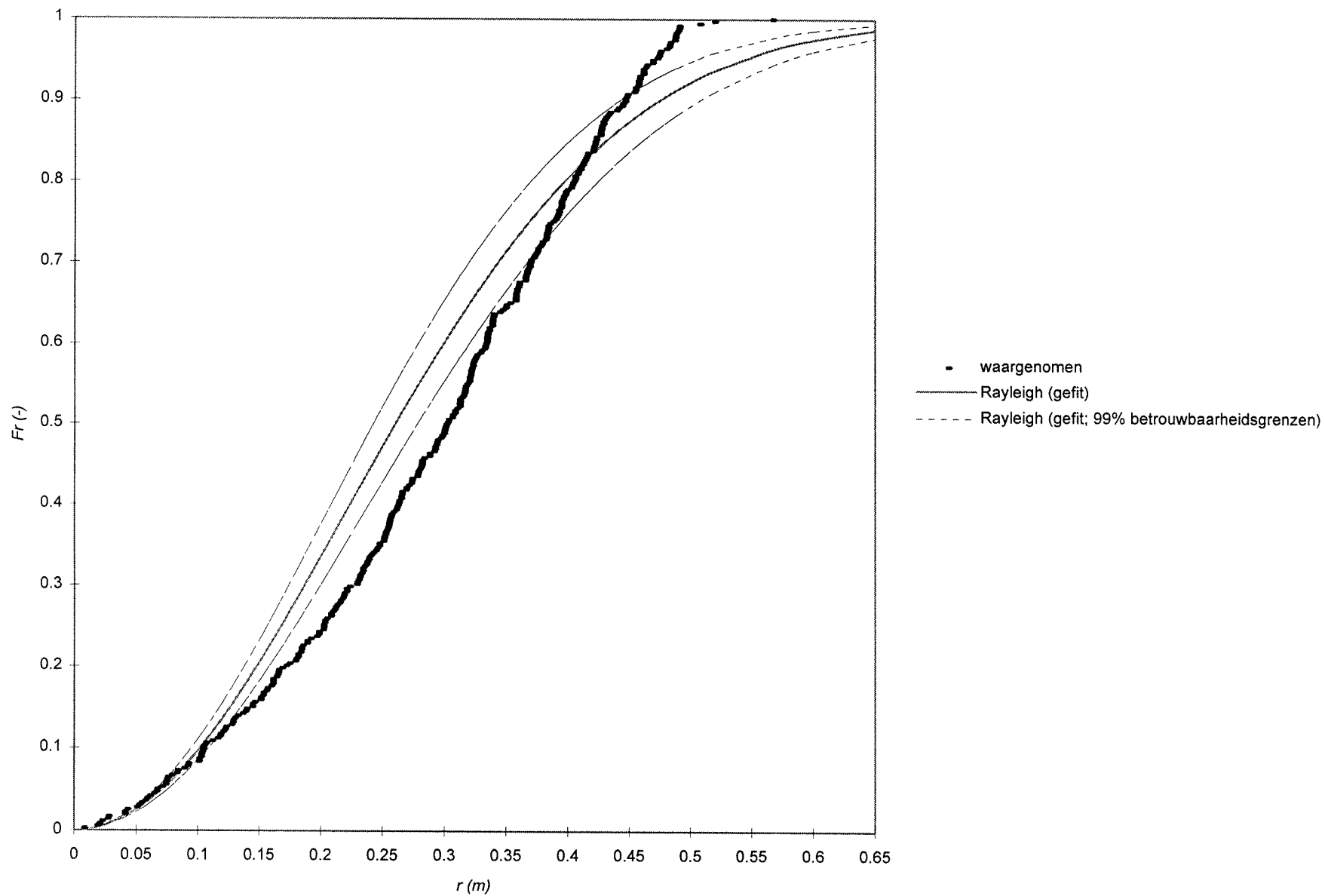
(glazen bollen, $D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 0,70$ m, individueel gestort)

Bijlage 11.3a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.33)*



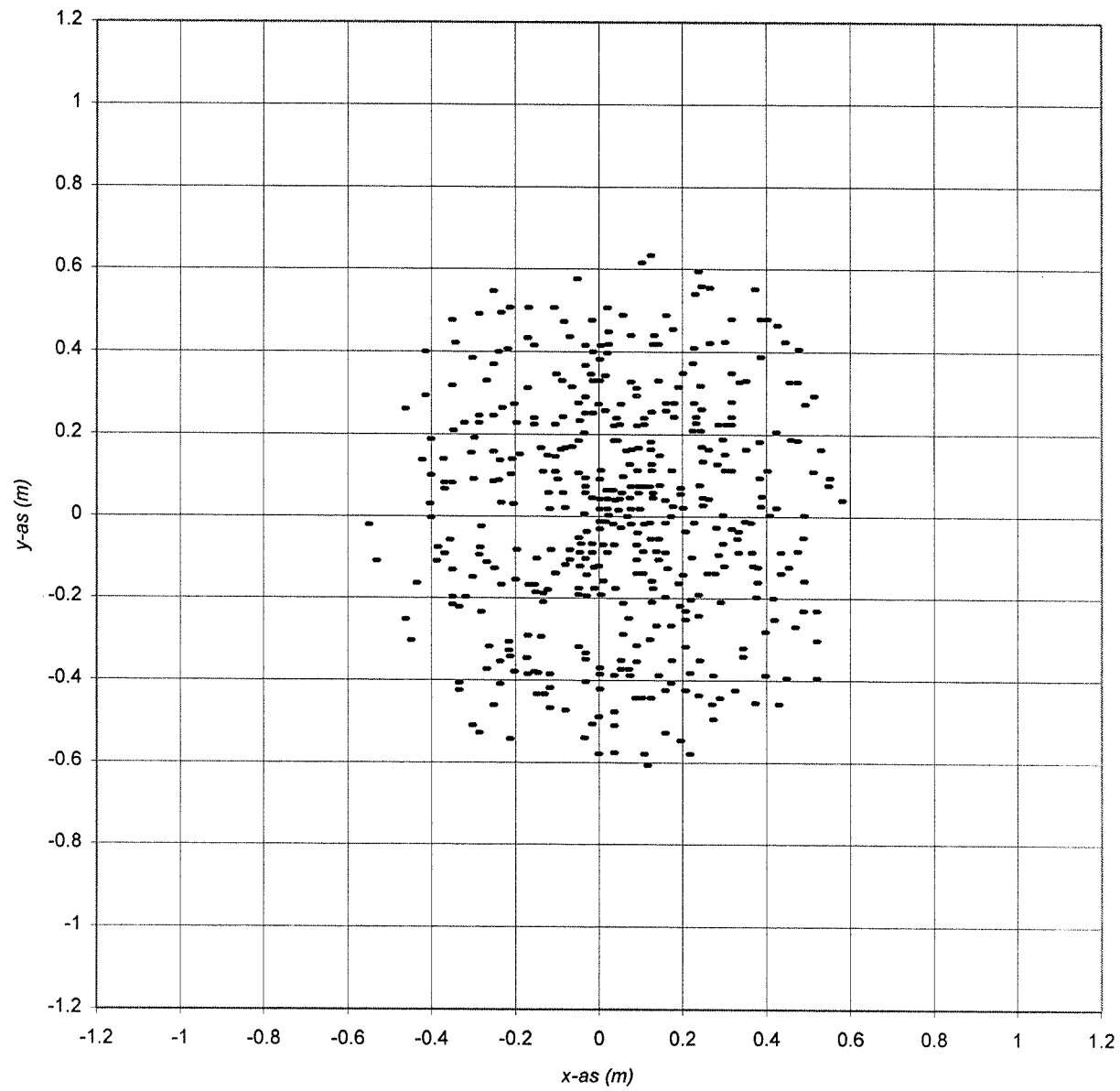
(glazen bollen, $D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)

Bijlage 11.3b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.33)



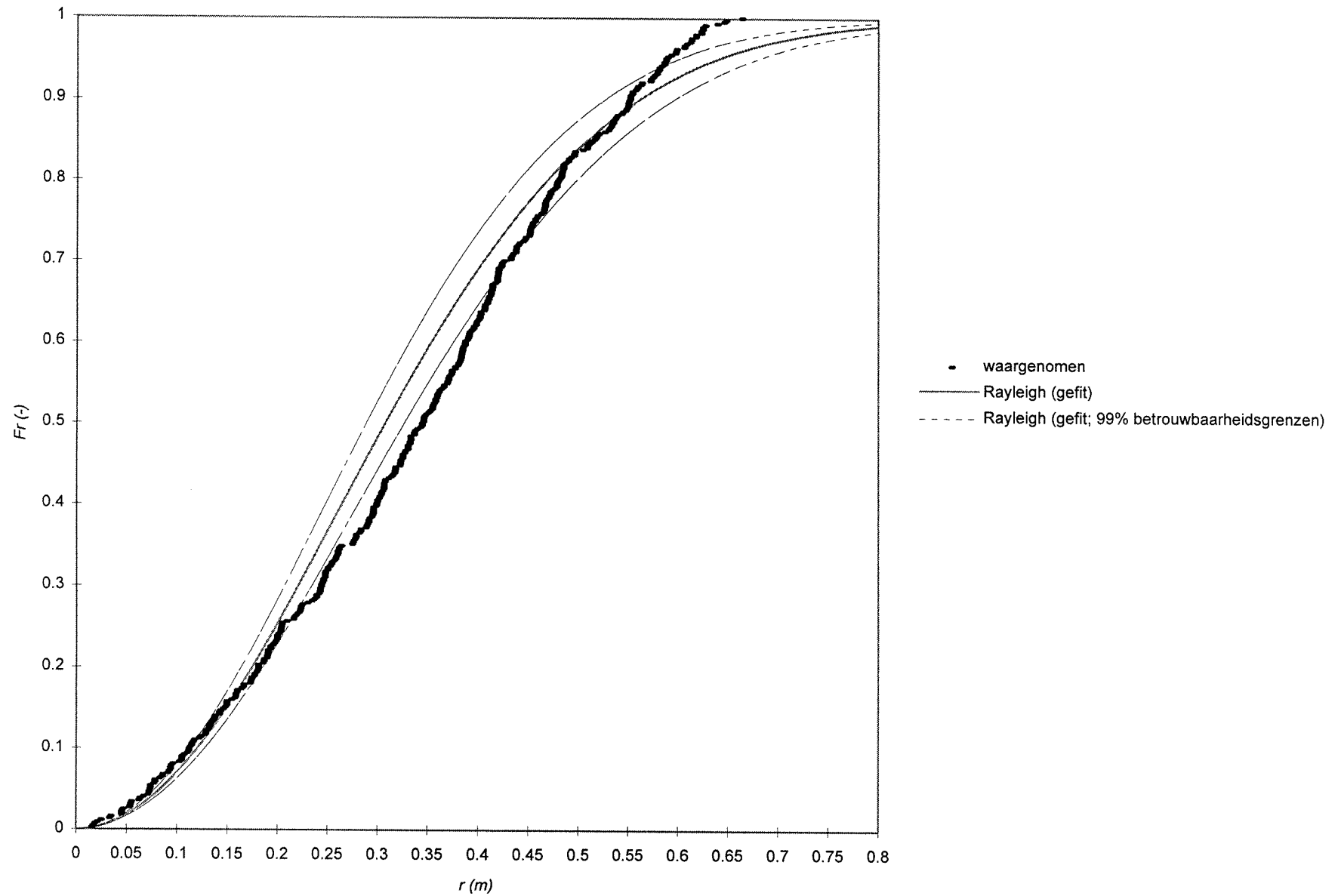
(glazen bollen, $D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,10$ m, individueel gestort)

Bijlage 11.4a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.34)*



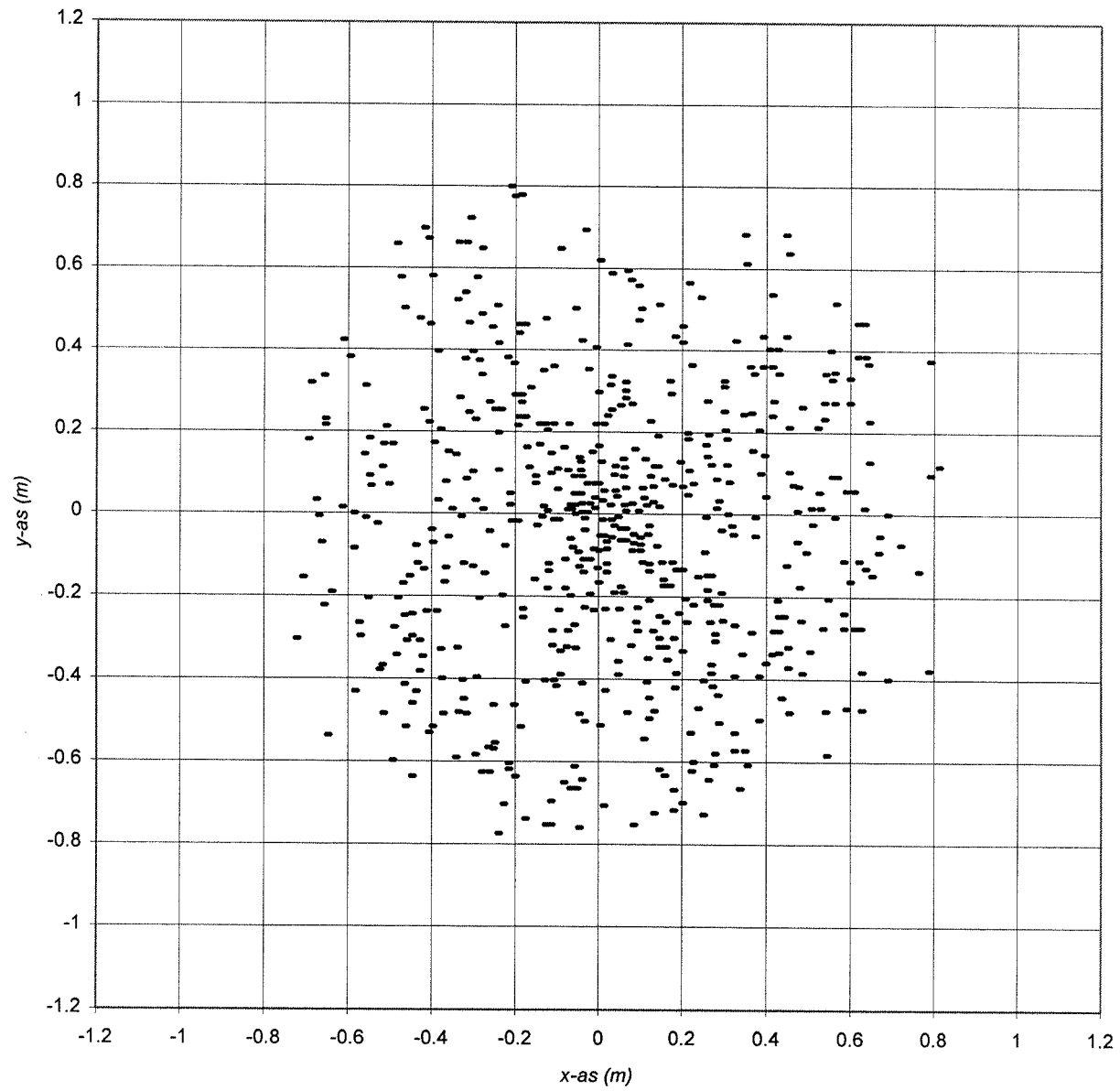
(glazen bollen, $D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)

Bijlage 11.4b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.34)



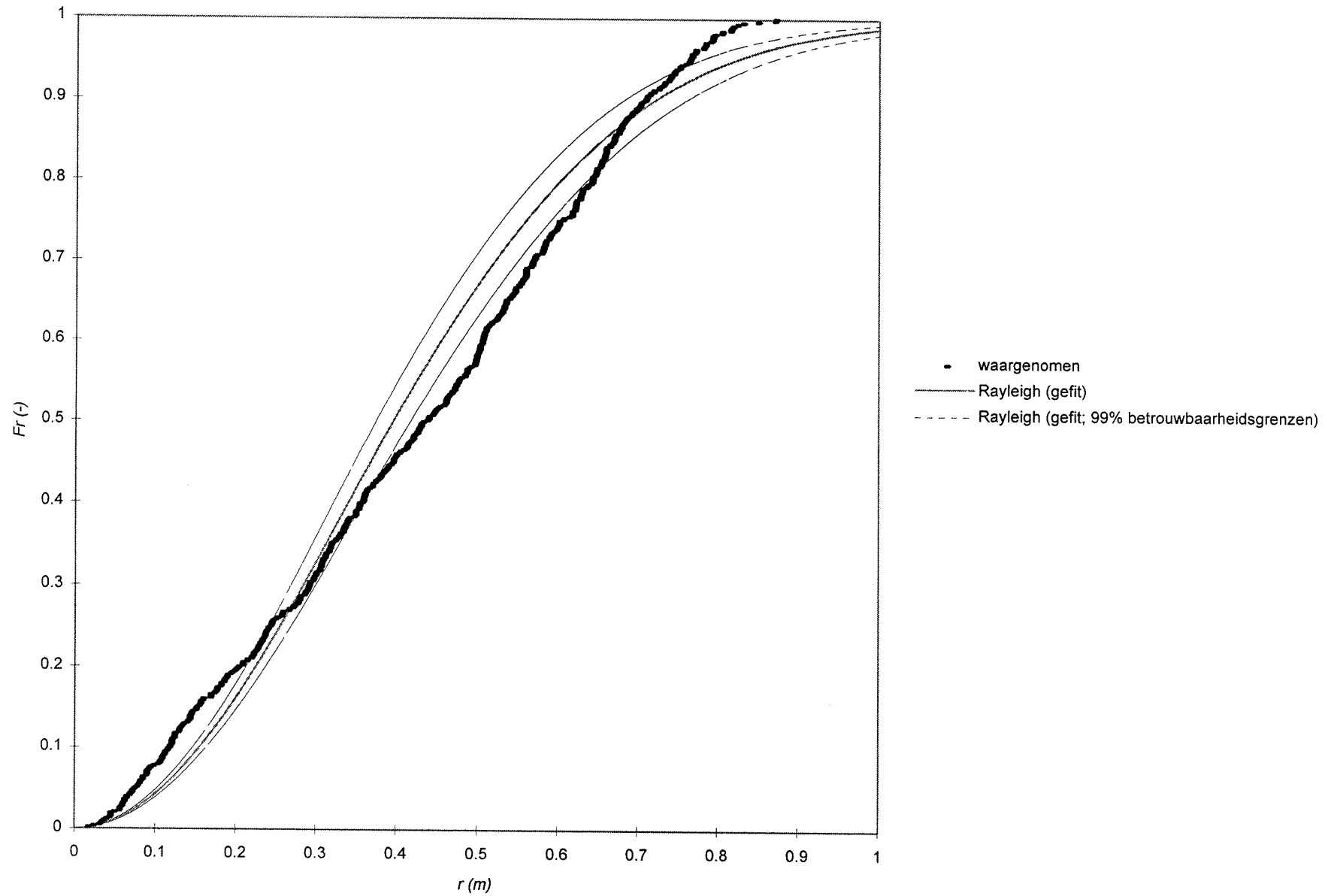
(glazen bollen, $D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,50$ m, individueel gestort)

Bijlage 11.5a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.35)*



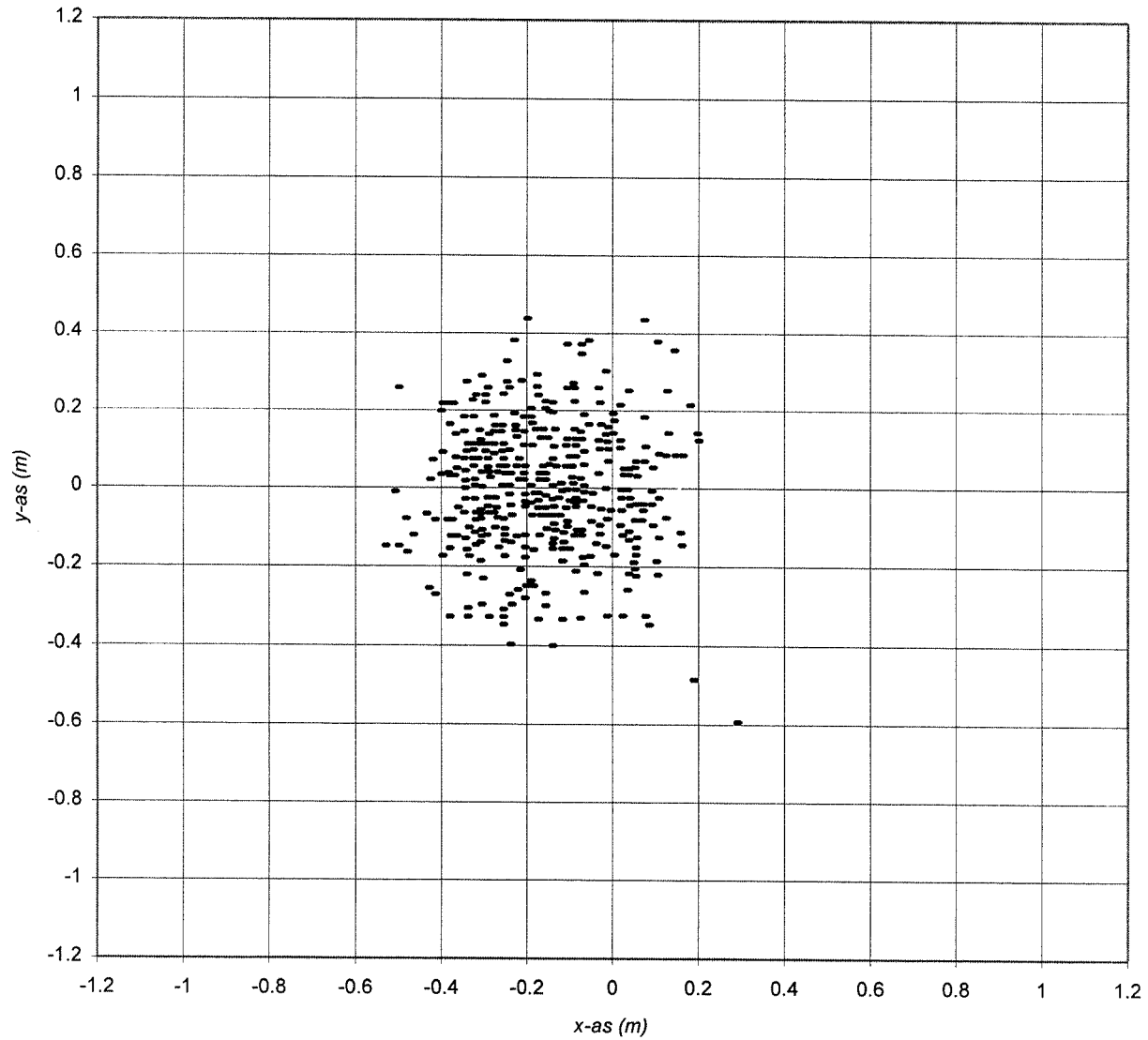
(glazen bollen, $D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 11.5b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.35)



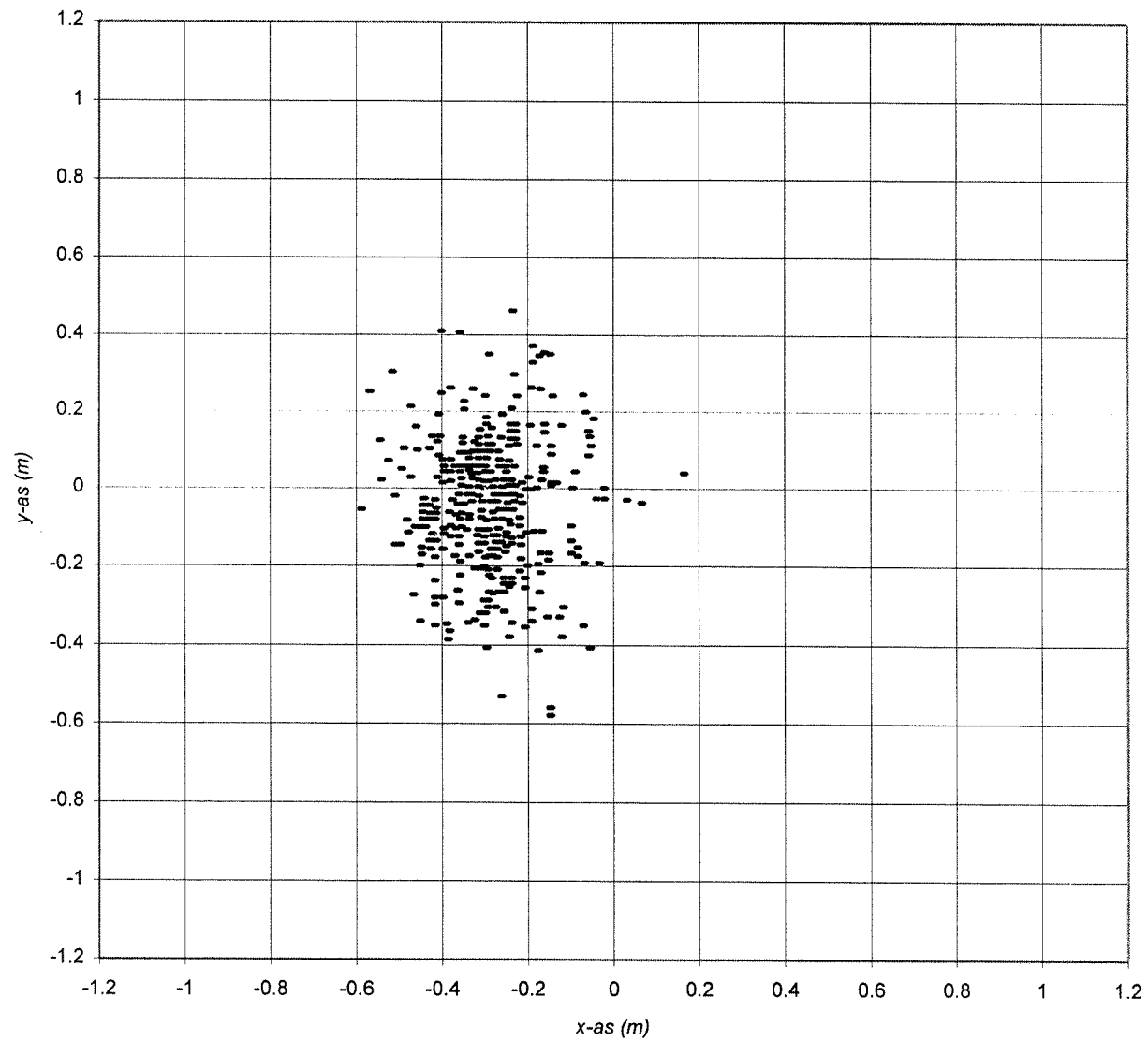
(glazen bollen, $D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 11.6a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.36, deel 1)*



(glazen bollen, $D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,90$ m, tegelijk afgeschoven)

Bijlage 11.6b *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.36, deel 2)*



(glazen bollen, $D_{bol} = 0,0156$ m, $h = 1,90$ m, individueel afgeschoven)

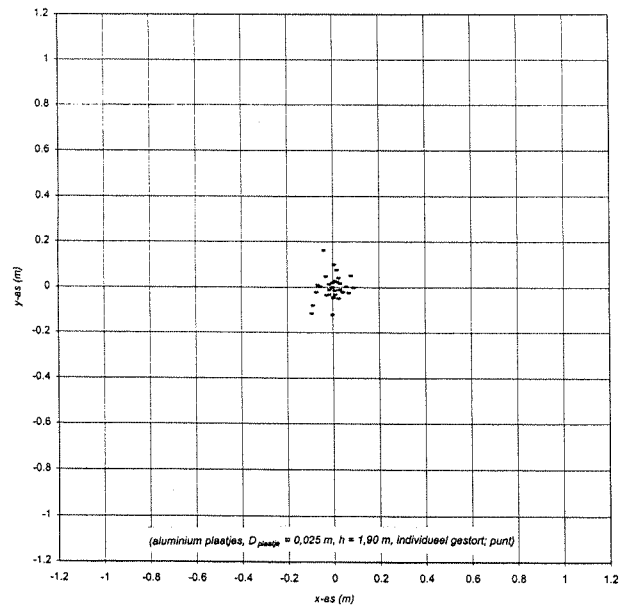
Bijlage 11.7 *Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte glazen ballen (in seconden)*

2,0 s	2,1 s	2,4 s	2,4 s	2,4 s	2,5 s	2,5 s	2,6 s	2,7 s	2,9 s
2,0 s	2,2 s	2,4 s	2,4 s	2,4 s	2,5 s	2,5 s	2,7 s	2,8 s	3,0 s

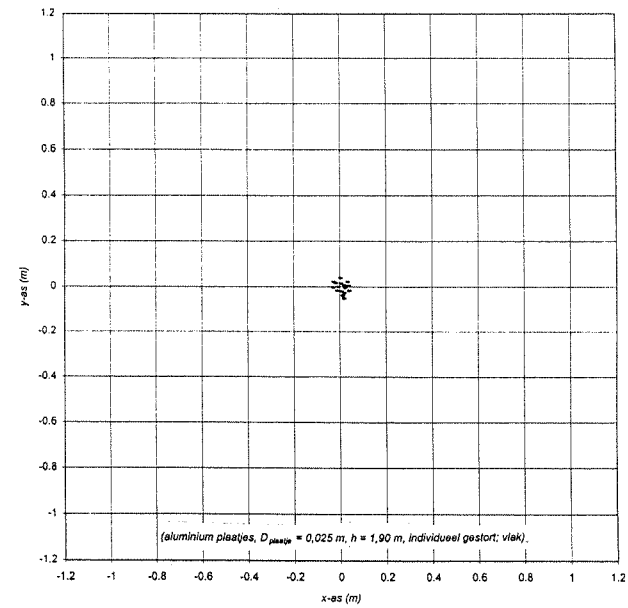
$(D_{bol} = 0,0156 \text{ m}, h = 1,90 \text{ m})$

Bijlage 12.1a Overzicht van de bovenaanzichten van de stort (modelproeven met aluminium plaatjes, guldens en rijksdaalders)

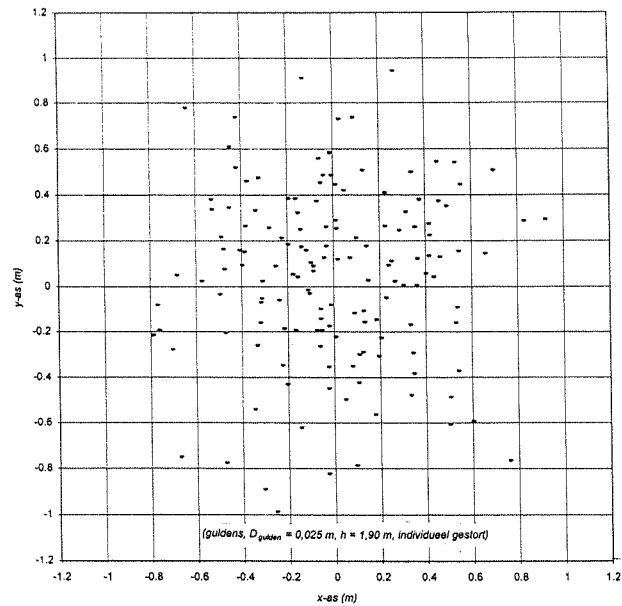
Bijlage 12.2a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.37)



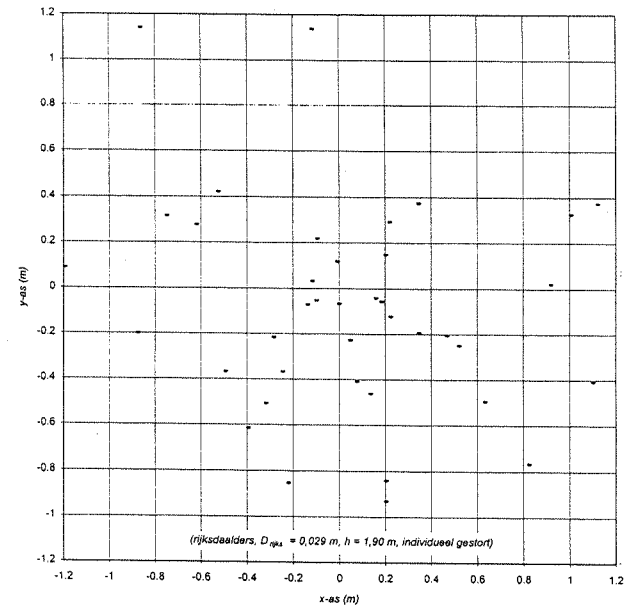
Bijlage 12.3a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.38)



Bijlage 12.4a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.39)

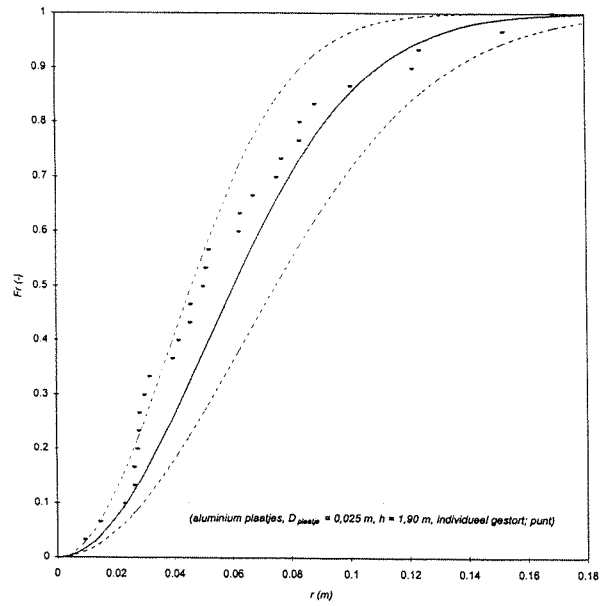


Bijlage 12.5a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.40)

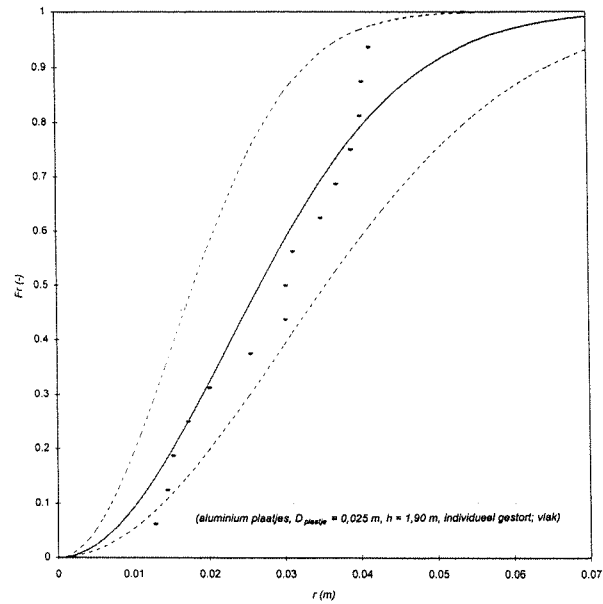


Bijlage 12.1b Overzicht van de verdelingsfuncties van de stralen (modelproeven met aluminium plaatjes, guldens en rijksdaalders)

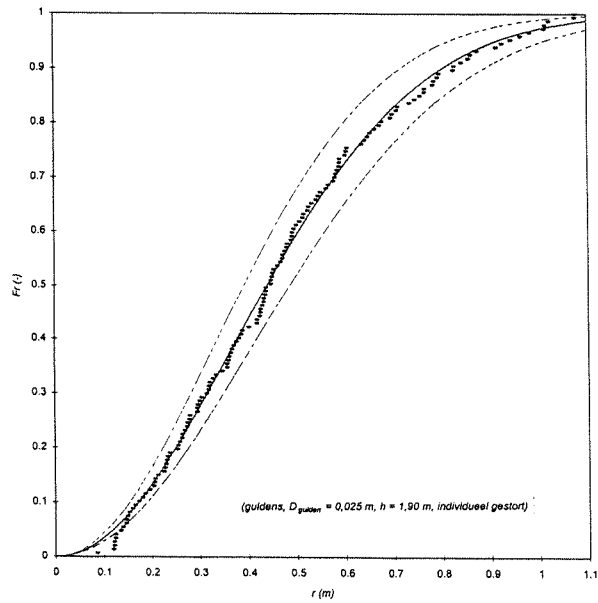
Bijlage 12.2b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.37)



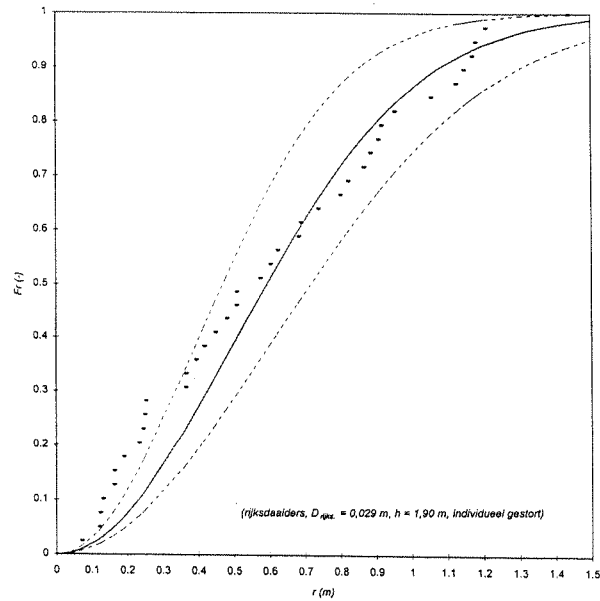
Bijlage 12.3b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.38)



Bijlage 12.4b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.39)

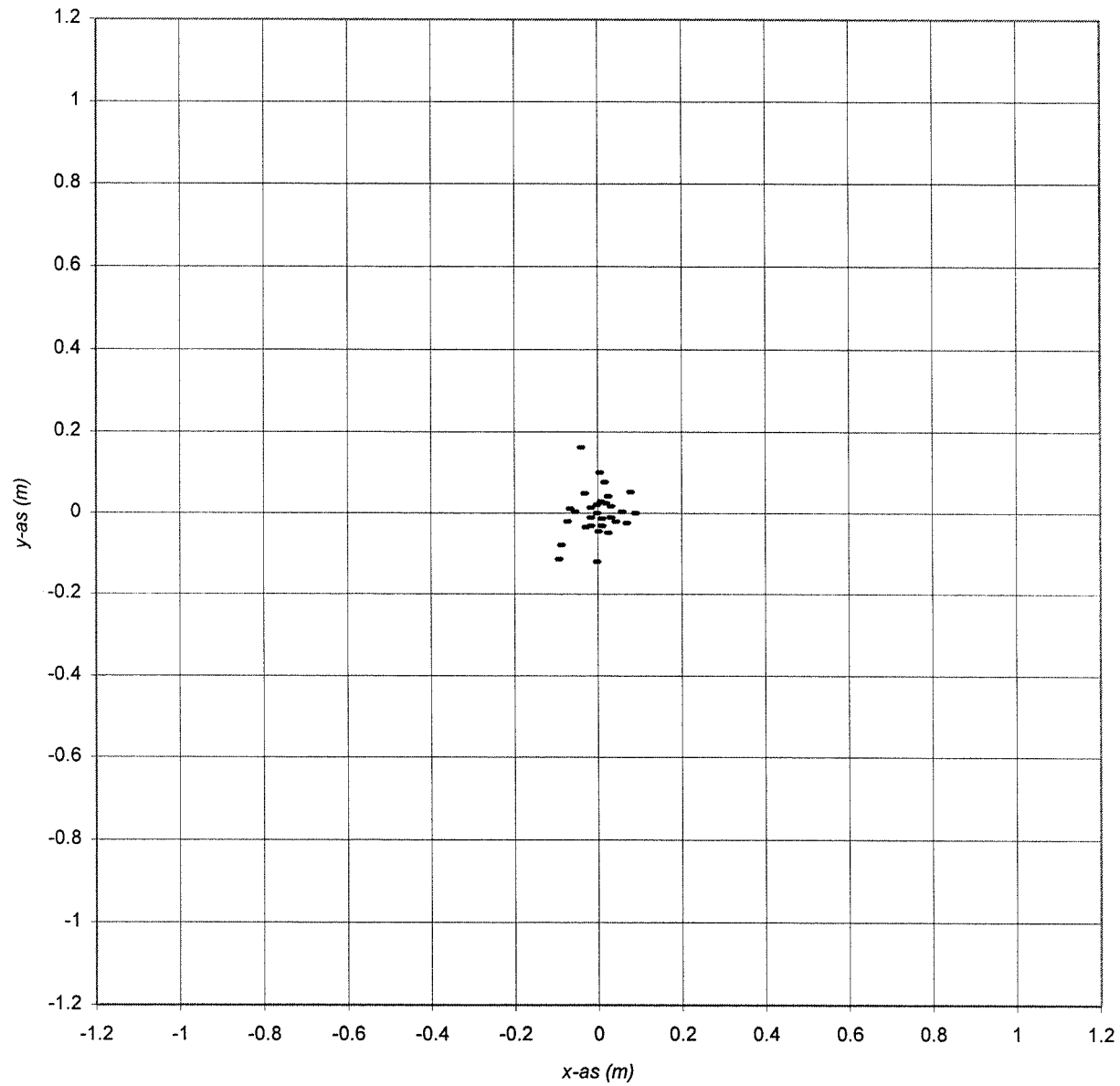


Bijlage 12.5b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.40)



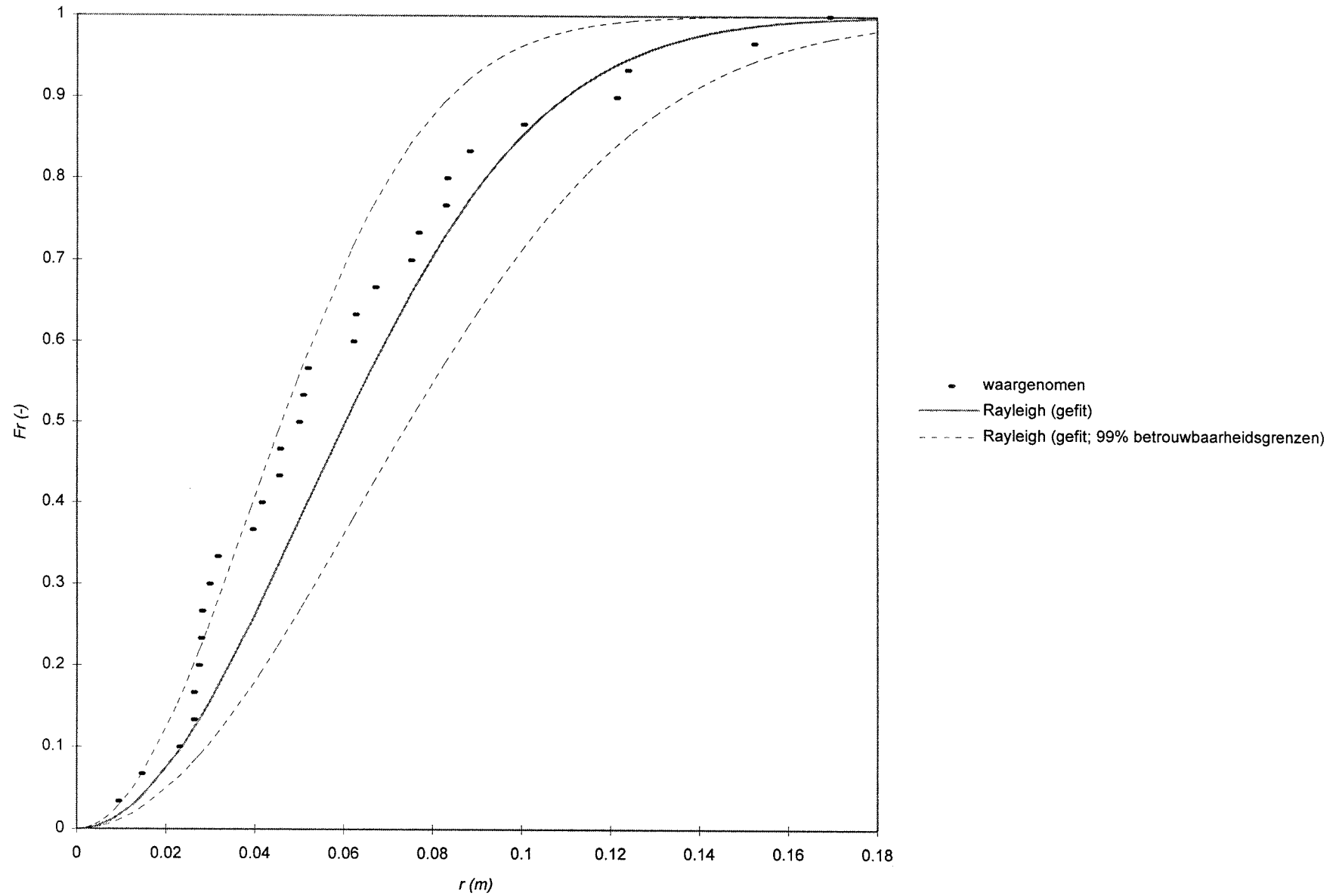
- waargenomen
 — Rayleigh (gefit)
 - - - Rayleigh (gefit; 99% betrouwbaarheidsgrenzen)

Bijlage 12.2a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.37)*



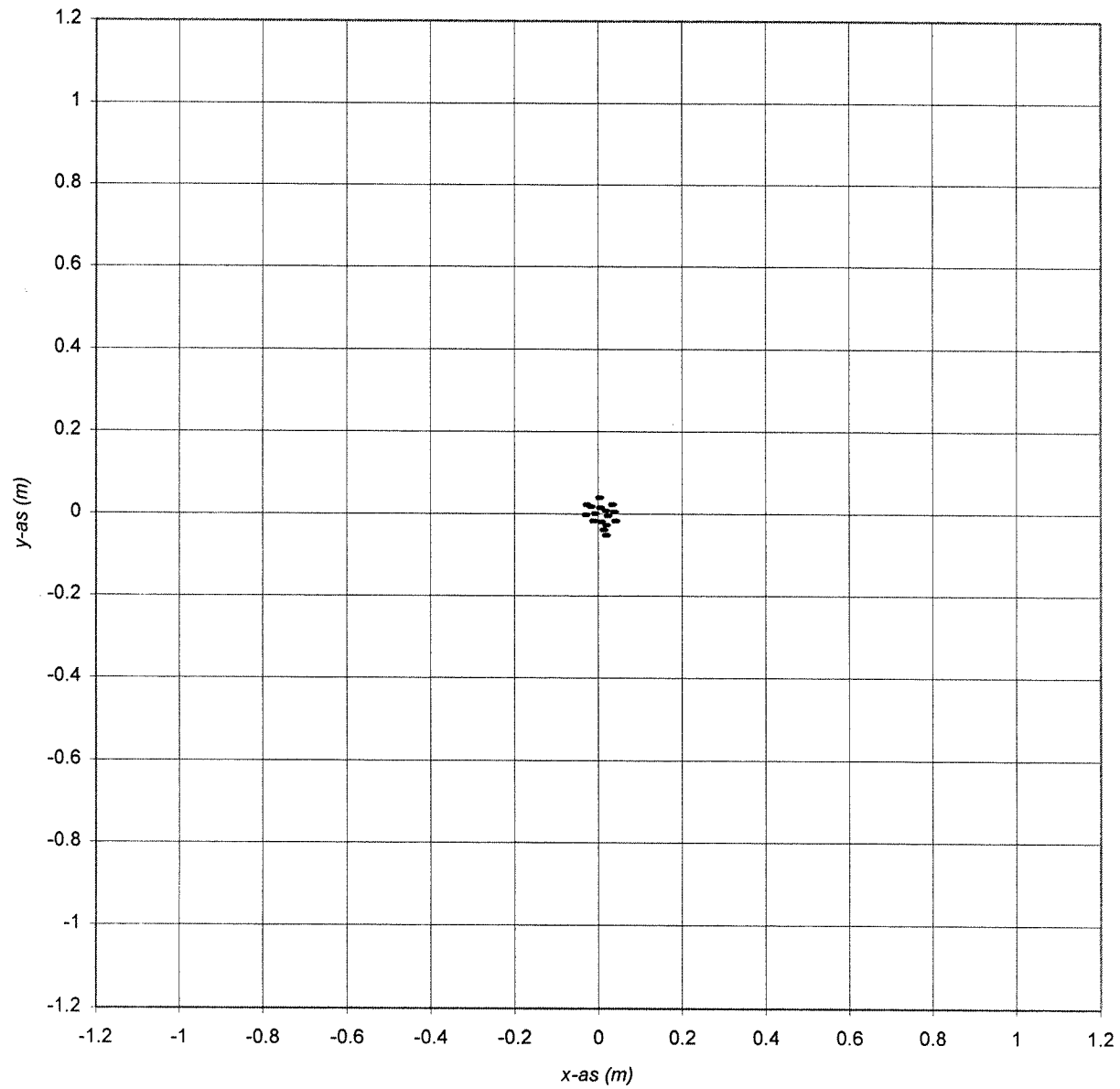
(aluminium plaatjes, $D_{plaatje} = 0,025$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; punt)

Bijlage 12.2b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.37)



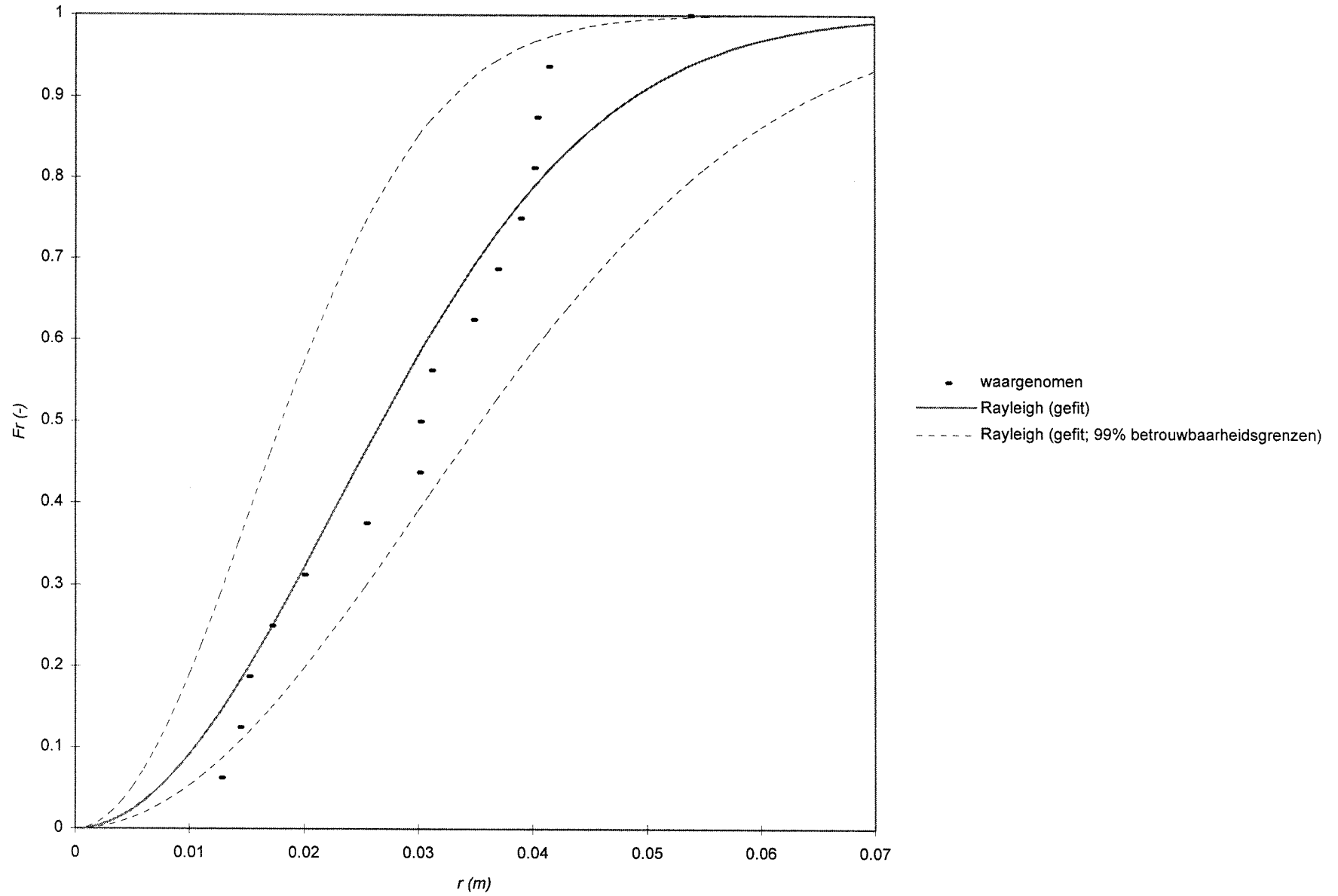
(aluminium plaatjes, $D_{plaatje} = 0,025$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; punt)

Bijlage 12.3a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.38)*



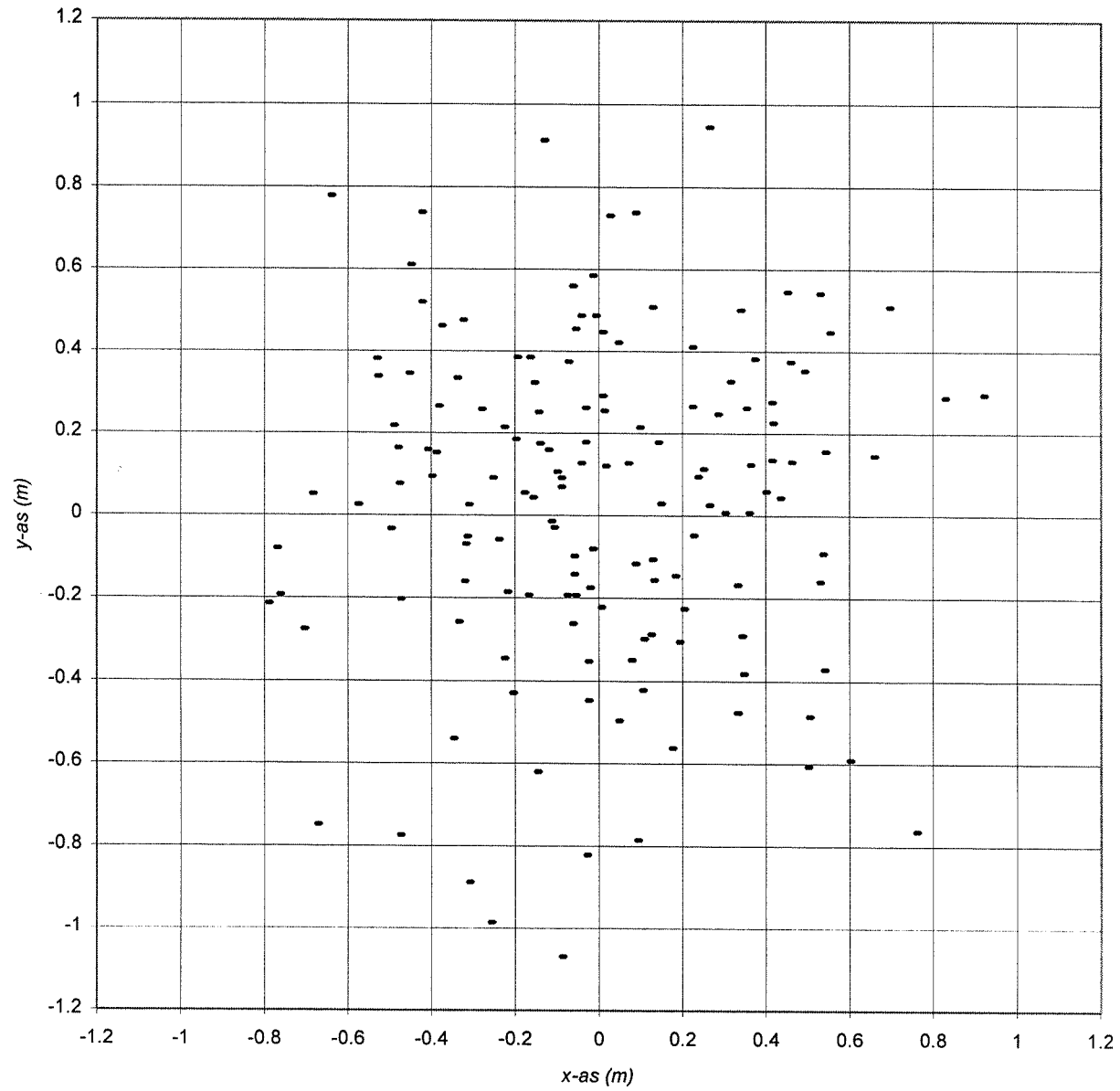
(aluminium plaatjes, $D_{plaatje} = 0,025$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; vlak)

Bijlage 12.3b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.38)



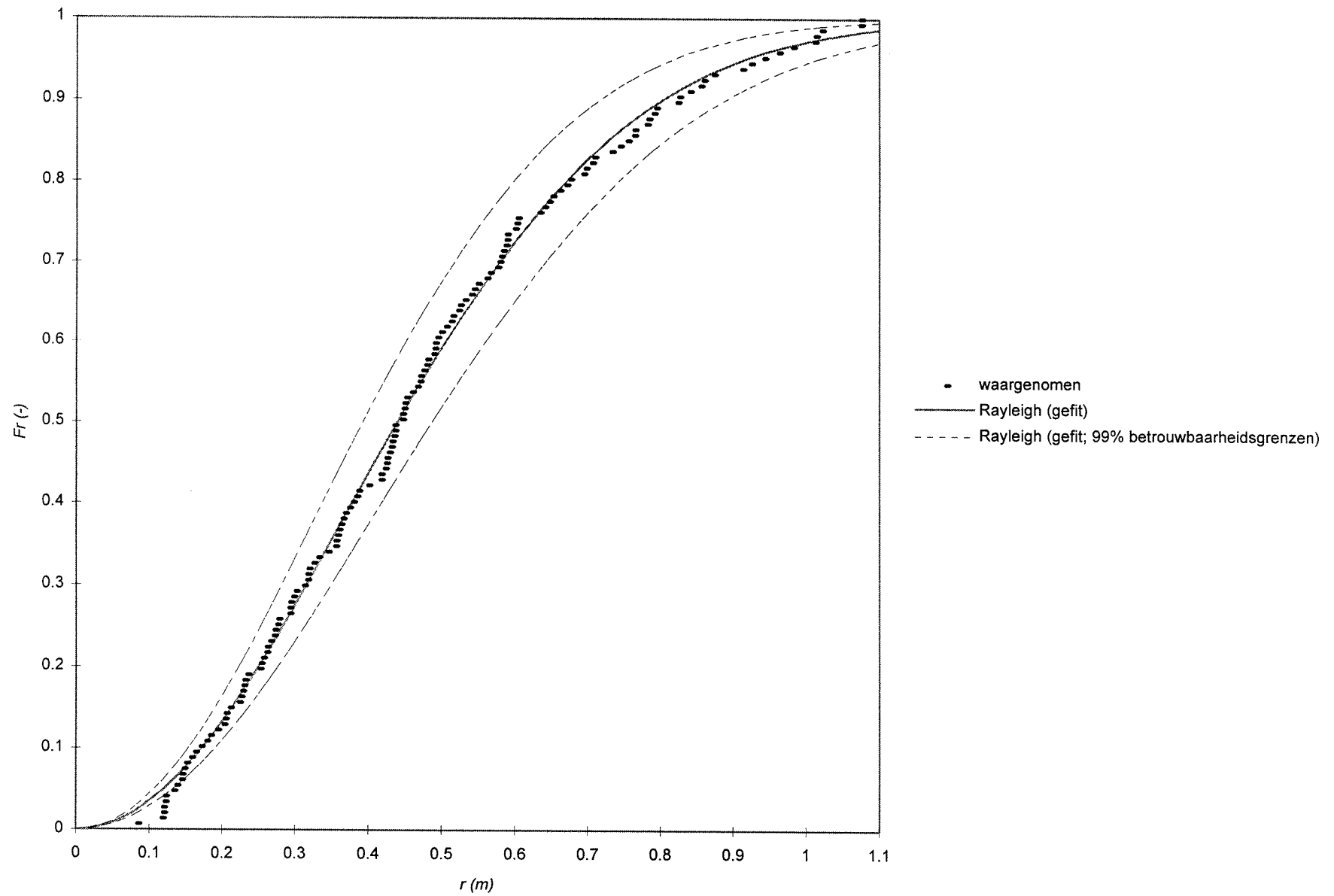
(aluminium plaatjes, $D_{plaatje} = 0,025$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort; vlak)

Bijlage 12.4a *Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.39)*



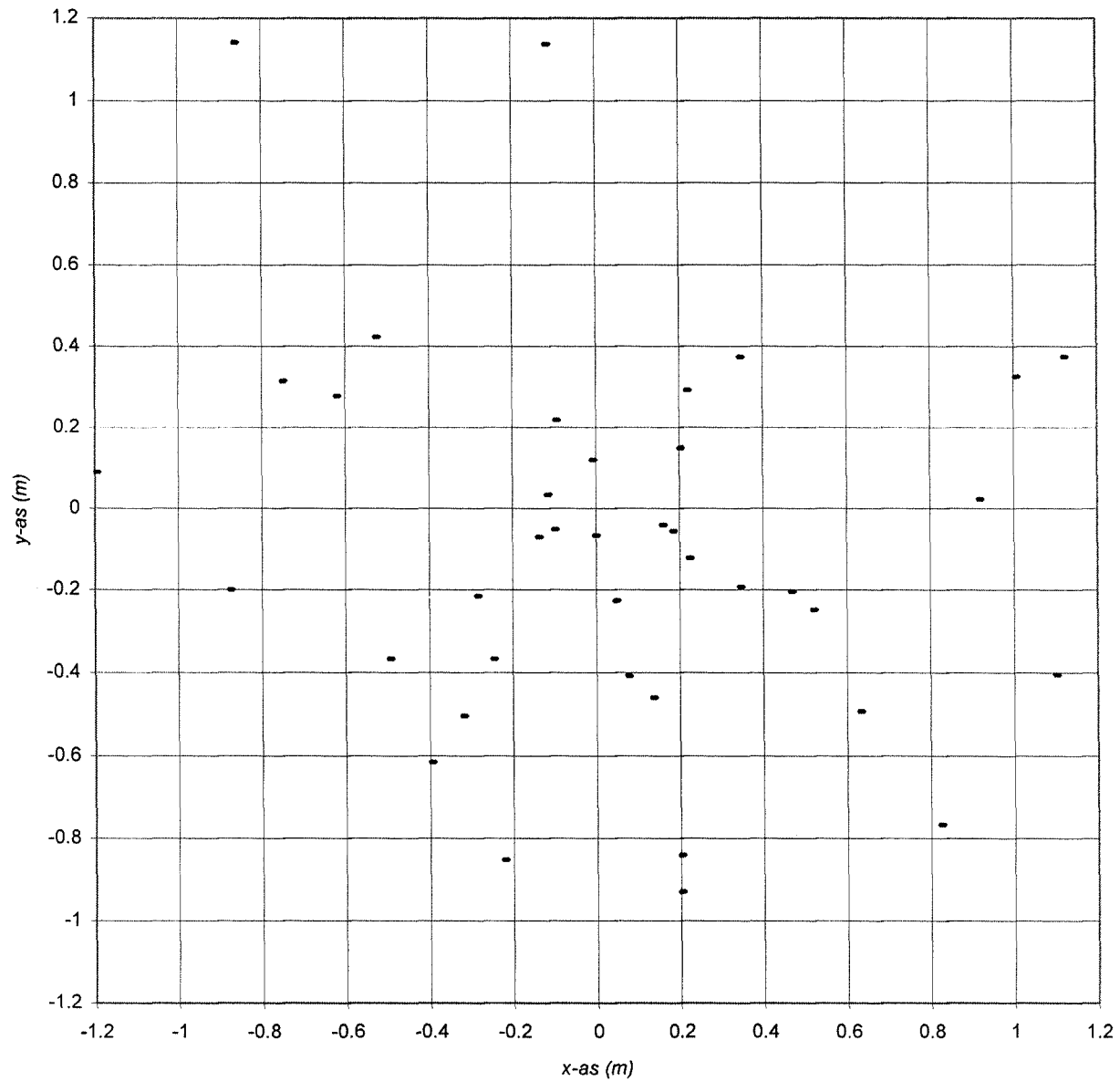
(guldens, $D_{guldens} = 0,025$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 12.4b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.39)



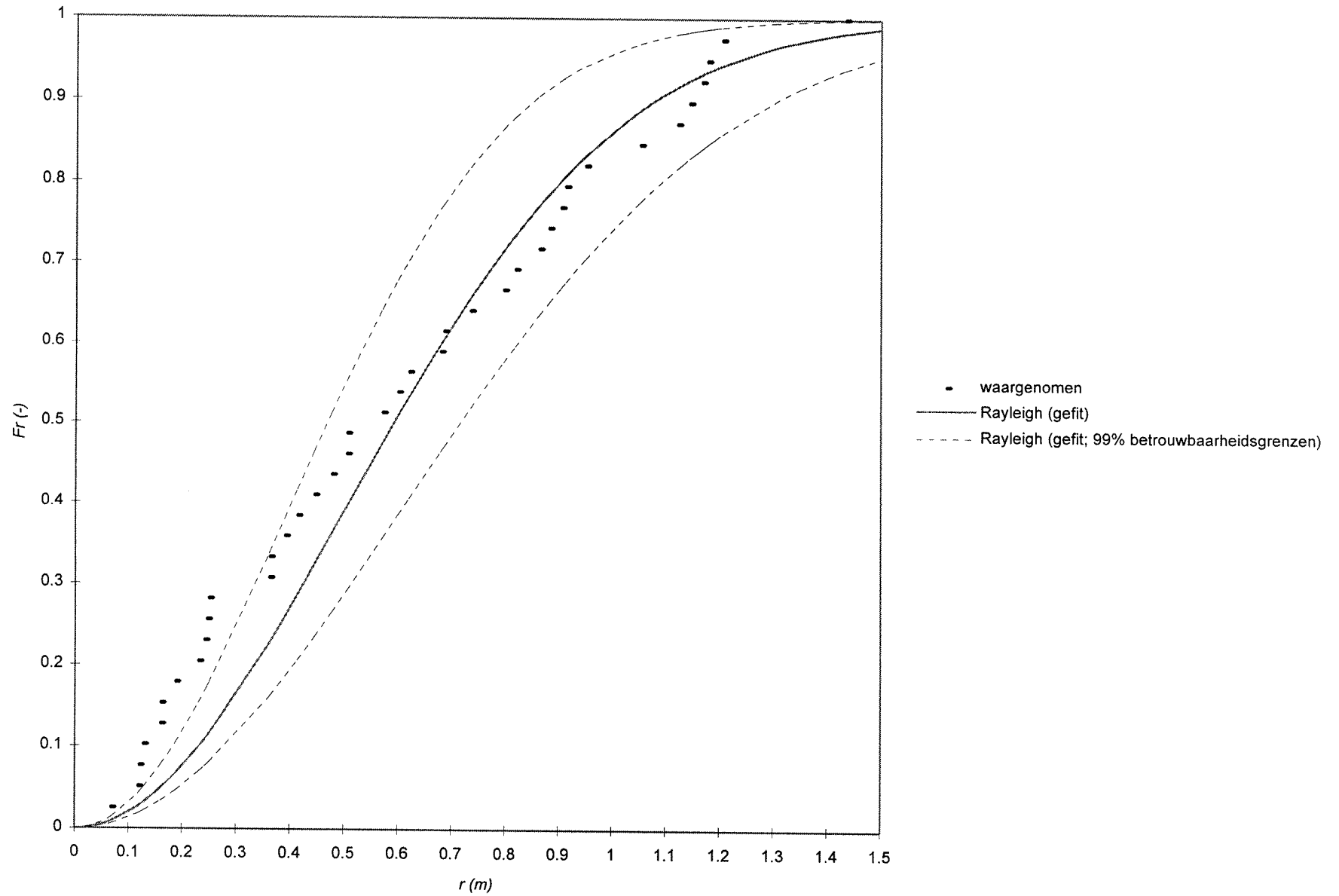
(guldens, $D_{guldens} = 0,025$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 12.5a Bovenaanzicht van de stort (modelproef nr.40)



(rijksdaalders, $D_{rijks} = 0,029$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 12.5b Verdelingsfuncties van de stralen (modelproef nr.40)



(rijksdaalders, $D_{rijks.} = 0,029$ m, $h = 1,90$ m, individueel gestort)

Bijlage 12.6 Gemeten tijdsduur van de valbeweging van gestorte aluminium plaatjes (in seconden)

5,4 s	5,5 s	5,8 s	5,9 s	6,0 s	6,1 s	6,1 s	6,2 s	6,2 s	6,4 s
5,4 s	5,6 s	5,8 s	5,9 s	6,0 s	6,1 s	6,1 s	6,2 s	6,3 s	6,4 s

$(D_{\text{plaatje}} = 0,025 \text{ m}, h = 1,90 \text{ m})$

Bijlage 13.1 Resultaten afkomstig uit eerder uitgevoerde modelproeven met steensorteringen (zie lit.[6] en lit.[22])

meetserie 2 (breuksteen)

experimentnummer	traagheidsstraal (sigma)	karakteristieke steenafmeting (Dn50)	waterdiepte (h)	constante c (volgens vergelijking 3.18)
33	0,158 m	0,01416 m	2,36 m	0.864
38	0,137 m	0,01416 m	2,36 m	0.749

meetserie 3 (grind)

experimentnummer	traagheidsstraal (sigma)	karakteristieke steenafmeting (Dn50)	waterdiepte (h)	constante c (volgens vergelijking 3.18)
41	0,120 m	0,00316 m	1,16 m	1.982
42	0,081 m	0,00316 m	1,16 m	1.338
43	0,095 m	0,00316 m	1,16 m	1.569
44	0,087 m	0,00316 m	1,16 m	1.437
45	0,108 m	0,00316 m	1,56 m	1.538
46	0,097 m	0,00316 m	1,56 m	1.382
47	0,159 m	0,00316 m	1,96 m	2.02
48	0,123 m	0,00316 m	1,96 m	1.563
50	0,130 m	0,00316 m	2,36 m	1.505
51	0,127 m	0,00316 m	2,36 m	1.471
52	0,130 m	0,00316 m	2,36 m	1.505

meetserie 4 (breuksteen)

experimentnummer	traagheidsstraal (sigma)	karakteristieke steenafmeting (Dn50)	waterdiepte (h)	constante c (volgens vergelijking 3.18)
55	0,095 m	0,00980 m	1,16 m	0.891
56	0,091 m	0,00980 m	1,16 m	0.853
57	0,094 m	0,00980 m	1,16 m	0.882
58	0,100 m	0,00980 m	1,56 m	0.809
59	0,106 m	0,00980 m	1,56 m	0.857
60	0,092 m	0,00980 m	1,56 m	0.744
61	0,127 m	0,00980 m	1,96 m	0.916
62	0,123 m	0,00980 m	1,96 m	0.887
63	0,110 m	0,00980 m	1,96 m	0.794
65	0,130 m	0,00980 m	2,36 m	0.855
66	0,116 m	0,00980 m	2,36 m	0.763
67	0,120 m	0,00980 m	2,36 m	0.789
68	0,119 m	0,00980 m	2,36 m	0.782
69	0,130 m	0,00980 m	2,36 m	0.855
70	0,125 m	0,00980 m	2,36 m	0.822