

# Shields op de helling ?

Het ontwerpen van een steenbestorting op een oever  
onder stromingsaanval

Afstudeerrapport

mei 2000

Frank Wijgerse

---



F.M. Wijgerse: "Shields op de helling", Het ontwerpen van een steenbestorting op een oever onder stromingsaanval. TU Delft, 2000

# **Shields op de Helling?**

Het ontwerpen van een steenbestorting op een oever onder stromingsaanval

F.M Wijgerse

"If we knew what it was we were doing,  
it would not be called research, would it?"

A. Einstein

**mei 2000**  
**Faculteit der Civiele Techniek & Geowetenschappen**  
**Afdeling Waterbouwkunde en Geotechniek**  
**Sectie Waterbouwkunde**

---

# Inhoudsopgave

<b>INHOUDSOPGAVE</b>	<b>2</b>
<b>VOORWOORD</b>	<b>5</b>
<b>SAMENVATTING</b>	<b>7</b>
<b>LIJST VAN FIGUREN</b>	<b>10</b>
<b>LIJST VAN SYMBOLEN</b>	<b>12</b>
<b>HOOFDSTUK 1: PROBLEEMBESCHRIJVING</b>	<b>13</b>
1.1 INLEIDING	13
1.2 ONDERZOEKSVRAAG	15
1.2.1 Probleemstelling	15
1.2.2 Doelstelling	16
1.2.3 Methode van onderzoeken	16
<b>HOOFDSTUK 2: RELEVANTE THEORIE</b>	<b>17</b>
2.1 INLEIDING THEORIE	17
2.2 KRACHTENSPEL OP EEN STEEN	17
2.3 THEORIE VAN SHIELDS	19
2.4 TURBULENTIE	23
2.5 THEORIE STENEN OP EEN HELLING	25
2.6 HET SNELHEIDSPROFIEL IN EEN WATERLOOP MET OEVERS	28
2.7 BELASTING OP STENEN IN EEN WATERLOOP MET OEVERS	30
<b>HOOFDSTUK 3: ONDERZOEKSOPZET</b>	<b>33</b>
<b>HOOFDSTUK 4: MEETOPZET</b>	<b>35</b>
4.1 DE STROOMGOOT	35
4.2 DE OPBOUW VAN DE HELLING	35
4.3 KENMERKENDE GEGEVENS VAN DE GEBRUIKTE STENEN	36
4.3.1 Keuze stenen	36
4.3.2 Verven stenen	36
4.3.3 Soortelijk gewicht	37
4.3.4 Steengrootte	37
4.3.5 Steenvorm	38
4.3.6 Hoek van natuurlijk talud.	39
4.4 MEETAPPARATUUR	40
4.4.1 De ElektroMagnetische Snelheidsmeter (EMS)	40
4.4.2 Drijvers	41
4.4.3 Debietmeter	42
4.4.4 Overige meetinstrumenten	42
4.5 PROEFMETINGEN	43
4.5.1 Instellen EMS-en	43
4.5.2 Testen stroming in meetsectie op uniformiteit	44
4.5.3 Verticaal snelheidsprofiel	46
4.5.4 Invloed stenen op snelheidsmetingen	47
4.5.5 Aanpassing talud	48
<b>HOOFDSTUK 5: METINGEN</b>	<b>49</b>
5.1 MEETPROGRAMMA	49
5.2 MEETSERIE PER EXPERIMENT	50
5.2.1 Metingen verplaatste stenen	50

5.2.2	Snelheidsmetingen	51
5.2.3	Meting relatieve turbulentie-intensiteit	52
5.3	EXPERIMENT HELLING 1:1,5	53
5.3.1	Verplaatsing stenen	53
5.3.2	Snelheidsprofiel	55
5.3.3	Relatieve turbulentie-intensiteit	55
5.4	EXPERIMENT HELLING 1:2,5	57
5.4.1	Verplaatsing stenen	57
5.4.2	Snelheidsprofiel	58
5.4.3	Relatieve turbulentie-intensiteit	59
5.5	EXPERIMENT HELLING 1:3,5	60
5.5.1	Verplaatsing stenen	60
5.5.2	Snelheidsprofiel	61
5.5.3	Relatieve turbulentie-intensiteit	62
5.6	EXPERIMENTEN HORIZONTALE BODEM	63
5.6.1	Gladde bodem, volle breedte	63
5.6.1.1	<i>Verplaatsing stenen</i>	63
5.6.1.2	<i>Snelheidsprofiel</i>	64
5.6.1.3	<i>Relatieve turbulentie-intensiteit</i>	65
5.6.2	Gladde bodem, versmalde goot	65
5.6.2.1	<i>Verplaatsing stenen</i>	65
5.6.2.2	<i>Snelheidsprofiel</i>	67
5.6.2.3	<i>Relatieve turbulentie-intensiteit</i>	67
5.6.3	Ruwe Bodem, versmalde goot	68
5.6.3.1	<i>Verplaatsing stenen</i>	68
5.6.3.2	<i>Snelheidsprofiel</i>	69
<b>HOOFDSTUK 6: DISCUSSIE</b>		<b>71</b>
6.1	INLEIDING	71
6.2	FOUTEN	71
6.3	CORRELATIE TUSSEN STROOMBEELD BIJ LAAG DEBIET EN HOOG DEBIET	72
6.4	OMZETTEN $U_{\frac{1}{2}H}$ NAAR DIEPTEGEMIDDELDE SNELHEDEN	73
6.5	VERDELING VAN HET AANTAL VERPLAATSTE STENEN	74
6.6	BEPALEN RELATIE STROOMSNELHEID EN AANTAL VERPLAATSTE STENEN	75
6.6.1	Berekening met alle stenen	75
6.6.2	Analyse met alleen meest kritisch velden	79
6.6.3	Vergelijken van de waarden op horizontale bodem met andere experimenten	79
1.7	HELLINGCORRECTIEFACTOR	80
1.7.1	Gevonden resultaten	80
1.7.2	Reden voor afwijkende resultaten	81
1.7.3	Analyse met berekende "nul"-waarde	83
1.7.4	Hellingcorrectiefactor door andere onderzoekers	83
1.7.5	Vergelijking hellingcorrectiefactor uit dit onderzoek met dat uit andere	86
1.8	TOEPASSING IN DE PRAKTIJK	86
<b>HOOFDSTUK 7: CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN</b>		<b>91</b>
7.1	INLEIDING	91
7.2	CONCLUSIES	91
7.3	AANBEVELINGEN VOOR ONTWERP	91
7.4	AANBEVELINGEN VOOR NADER ONDERZOEK	92
<b>LITERATUUR</b>		<b>93</b>
<b>BIJLAGE I: STEENAFMETINGEN</b>		<b>95</b>
<b>BIJLAGE II: HOEK NATUURLIJK TALUD</b>		<b>97</b>
<b>BIJLAGE III: GEMETEN SNELHEDEN</b>		<b>98</b>
<b>BIJLAGE IV: SPECIFICATIES EMS</b>		<b>106</b>

---

---

# Voorwoord

Dit rapport is geschreven in het kader van mijn afstudeerwerk aan de Technische Universiteit Delft, faculteit Civiele techniek en Geowetenschappen. In een periode van 1½ jaar is een onderzoek gedaan naar steenstabiliteit op een helling. Dit onderzoek bestond uit literatuuronderzoek en laboratoriumproeven. De experimenten werden uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica. Hierbij wil ik graag de vele mensen bedanken die mij tijdens mijn onderzoek en het schrijven van dit rapport hebben gesteund.

F.M. Wijgerse





# Samenvatting

In 1936 deed Shields zijn beroemd geworden onderzoek naar steenstabiliteit. Sinds die tijd is Shields een begrip geworden in de civieltechnische wereld. De door hem opgestelde theorie wordt gebruikt voor het ontwerpen van beschermingsconstructies van steen belast door stroming. Voor het ontwerpen van een oever van stortsteen bestaat echter onzekerheid over de wijze hoe dit gedaan moet worden. Door het aldaar veranderende snelheidsprofiel, de afnemende diepte en de helling is niet duidelijk wat de maatgevende situatie is. Verschillende onderzoekers hebben formules opgesteld om de effecten van een helling op de steenstabiliteit te verdisconteren. Deze formules zijn echter allemaal van theoretische aard en vrij weinig onderzoek is gedaan naar de juistheid van deze formuleringen. In dit verslag wordt gepoogd meer duidelijkheid te scheppen in de vraag op welke wijze een steenbestorting op een oever, en in het algemeen op een helling, het beste kan worden ontworpen.

Om te evalueren wat de beste methode is om de effecten van een oever mee te nemen in het ontwerp van een bescherming door middel van stortsteen is een onderzoek gedaan.

Dit onderzoek is in 1999 uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. Het onderzoek omvatte laboratoriumexperimenten naar de stabiliteit van stortsteen op een helling en literatuuronderzoek naar het ontwerpen van een stortstenen bescherming op een oever.

## Steenstabiliteit

Voor de berekening van de stabiliteit van stenen moet een beschouwing worden gemaakt van de krachten welke werken op een steen in een stroming. Deze krachten zijn natuurlijk ten eerste het gewicht van de steen onder water en verder de kracht welke de stroming op de steen uitoefent.

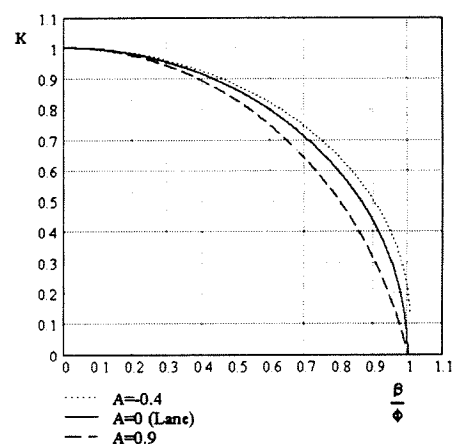
- De krachten door het water zijn evenredig met het kwadraat van de watersnelheid, met het oppervlak van de steen en de dichtheid van het water. Evenredig met het oppervlak van de steen houdt in evenredig met het kwadraat van de diameter van de steen.
- Het steengewicht is evenredig met de inhoud van de steen en daarmee met de steendiameter tot de derde macht. Verder is het natuurlijk evenredig met het verschil in steengewicht en het gewicht van het water.

Deze krachten dienen met elkaar in evenwicht te zijn voor een stabiele situatie. Dit houdt in:

$$d^3 \cdot (\rho_s - \rho_w) \cdot g \propto d^2 \cdot u^2 \cdot \rho_w$$

$$d \propto \frac{u^2}{g} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w}$$

De evenredigheidparameter werd door Shields in een iets andere vorm in zijn onderzoek  $\psi$  genoemd. Deze factor bleek nog afhankelijk te zijn van het Reynoldsgetal. Wanneer de theorie van Shields wordt toegepast op stenen op een oever is het de vraag welk punt op de helling maatgevend is. Dit kan zijn onder aan het talud of juist hoger op het talud. Onder aan het talud is de dieptegemiddelde stroomsnelheid hoog maar door de grotere diepte is de relatieve aanval op de stenen lager. Hoger op het talud is de dieptegemiddelde stroomsnelheid weliswaar lager, maar is de relatieve aanval op stenen door de geringere diepte juist lager



### Hellingcorrectiefactor uit literatuur

Voor de toepassing van deze theorie voor stenen die op een oever liggen wordt een correctiefactor toegepast. Deze factor K bepaalt de verhouding tussen de stroomsnelheid op een oever en die op een horizontale bodem waarbij steenverplaatsing begint. In de literatuur kan men twee uitdrukkingen voor deze correctiefactor vinden. Een welke is opgesteld door Lane (1955) en een formule welke is opgesteld door Ikeda (1982). De formule van Ikeda is een uitbreiding op de formule van Lane waarin ook het effect van de liftkracht op een steen is meegenomen. Indien de verticale kracht door de stroming op de steen wordt verwaarloosd zijn beide formules aan elkaar gelijk. In de formule van Ikeda bepaalt een factor (Hier A genoemd) mede de hellingscorrectiefactor. Deze factor A is gelijk aan de verticale liftkracht op een steen gedeeld door de horizontale krachten op een steen. In de literatuur vind men waarden voor A tussen de -0,4 en 0,9.

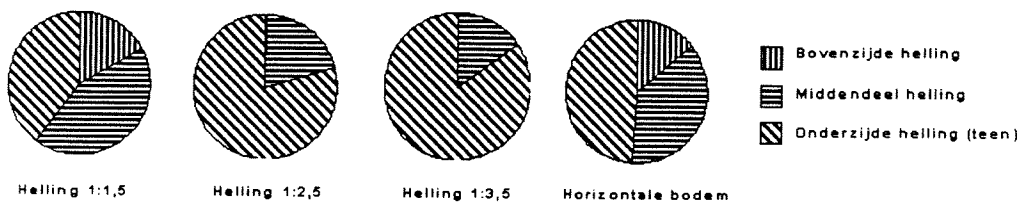
Deze formules zijn beide afgeleid aan de hand van theoretische beschouwingen over het gedrag van een steen op een helling. Er is vrij weinig onderzoek gedaan naar het gedrag van deze formules in de praktijk. Om dit gat op te vullen is besloten om enkele experimenten uit te voeren om de geldigheid van de formules te controleren.

### Onderzoek

In het onderzoek is door middel van een tweetal manieren uitgezocht hoe een steenbestorting op een oever gedimensioneerd moet worden. Ten eerste is een literatuurstudie verricht naar het onderzoek dat op dit terrein is gedaan. Ten tweede is een onderzoek uitgevoerd in een stroomgoot waarin een helling was geconstrueerd. Er werden experimenten gedaan bij een helling van 1v:3,5h, 1v:2,5h, 1v:1,5h en op een horizontale bodem. Alle experimenten werden uitgevoerd bij een waterdiepte van 25 cm en met stenen met een mediaan gewicht van 0,674 gr.

### Resultaten

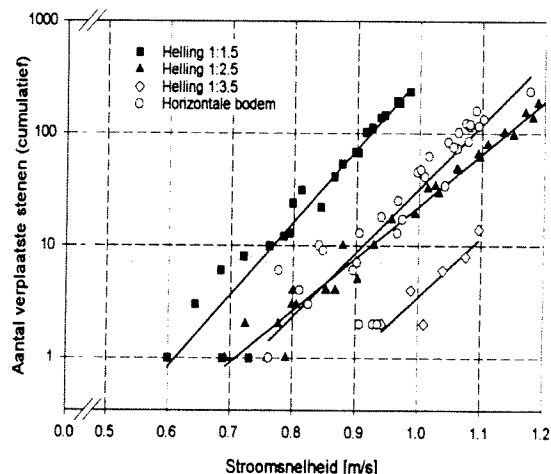
Uit onderzoek is gebleken dat de grootste aanval die een steenbestorting aan een oever te verduren krijgt altijd aan de teen van dat talud op zal treden. Bij ontwerp, beheer en inspectie moet dus goed rekening worden gehouden met het feit dat de eerste schade plaatsvindt op een plaats waar deze niet snel zichtbaar is. De eerste schade zal over het algemeen optreden aan de onderzijde van het talud en zal zich dus onder water bevinden. Dit maakt het dus zeer moeilijk dit vanaf de kant te zien. In de onderstaande figuur is de verdeling in het aantal verplaatste stenen op een oever goed te zien.



Verder is gebleken dat het stromingspatroon niet afhankelijk is van de snelheid. Bij een andere snelheid blijft het stromingsbeeld intact. De stromingsprofielen waarbij  $u/\bar{u}$  is uitgezet geven hetzelfde beeld bij verschillende gemiddelde snelheden.

Het verband tussen het aantal verplaatste stenen en de stroomsnelheid blijkt logaritmisch te zijn. Een kleine verhoging in de stroomsnelheid kan al een belangrijke vergroting geven van het aantal verplaatste stenen.

Om te bepalen wat de hellingcorrectiefactor geweest is in de proeven werden de resultaten uitgezet in een grafiek waarbij de K-waarde werd uitgezet tegen de



hellingshoek gedeeld door de hoek van natuurlijk talud.

Verschillende analyses werden toegepast, zowel met alle stenen als met alleen de stenen aan de teen van het talud. Vanwege onverklaarbare resultaten bij de horizontale bodem is ook nog een analyse uitgevoerd waarbij de kritieke snelheid van de horizontale bodem was vervangen door een berekende i.p.v. een gemeten snelheid.

Bij al deze analyses bleef overeind dat de gevonden K-waarden niet overeenkwamen met de theorie. De situatie op de helling was gunstiger dan de theorie voorspelde, en in sommige gevallen zelfs gunstiger dan de situatie op een horizontale bodem. Verschillende oorzaken hiervan werden bekeken waaronder een analyse met alleen de stenen bij de teen van het talud.

Het bleek dat er ook andere onderzoekers waren die resultaten voor de hellingcorrectiefactor hebben gevonden die niet in lijn liggen met de theorie zoals bijvoorbeeld Müller (1973).

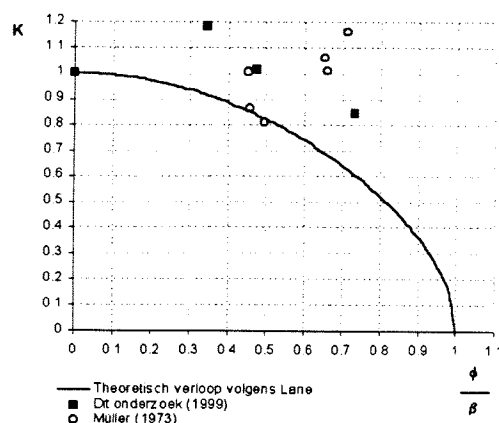
### Conclusie en aanbevelingen

De eerste conclusie die uit dit onderzoek kan worden getrokken is dat op een oever de situatie aan de teen altijd de maatgevende is. De hogere snelheden op het diepere gedeelte hebben duidelijk een groter effect dan de geringere diepte hoger op het talud.

De resultaten van dit onderzoek geven verder aan dat de hellingcorrectiefactoren volgens Lane (1955) en Ikeda (1982) waarden geven welke aan de voorzichtige kant liggen. Uit de resultaten zou men zelfs kunnen concluderen dat de bewering van Maylord (1989) die zegt dat een hellingcorrectiefactor niet nodig is voor hellingen flauwer dan 1:2,5 juist is. Voor praktische toepassingen is het echter aan te bevelen de hellingcorrectiefactor wel mee te nemen in de berekening. Dit vanwege de onzekerheden die in vele onderzoeken naar dit onderwerp naar voren komen. Er kan zonder problemen gewerkt worden met de eenvoudige formules van Lane omdat de afwijkingen van de formule van Ikeda met de gevonden waarden van A niet bijzonder groot zijn.

Bij het berekenen van het benodigd steengewicht aan de teen van een talud moet de snelheid aan de teen van het talud bekend zijn. Indien gewerkt wordt in een bestaande situatie kunnen de snelheden het beste in het veld gemeten worden, anders zal men stromingsmodellen moeten gebruiken.

De conclusie van dit rapport is dat de huidige gebruikelijke berekeningswijze met de methode van Shields met de hellingcorrectiefactor volgens Lane aan de veilige kant zit. Verder onderzoek is nodig om eventuele ontwerpnormen aan te scherpen.



---

# Lijst van figuren

Figuur 2.1:	Krachtspel op een steen	18
Figuur 2.2:	Wrijvingscoëfficiënt van een gladde bol in lucht	19
Figuur 2.3:	Shieldsgrafiek	20
Figuur 2.4:	van Rijn grafiek	21
Figuur 2.5:	Shields-diagram door Delft Hydraulics (1972)	23
Figuur 2.6a:	Laminaire stroming	24
Figuur 2.7a:	Hoogturbulente stroming	24
Figuur 2.8:	Kritieke snelheid stenen en optredende snelheden	25
Figuur 2.9 :	Krachten op een steen op een helling	26
Figuur 2.10:	Correctiefactor tegen helling	27
Figuur 2.11:	Snelheidsverdeling is een stroming met schuine oevers	28
Figuur 2.12:	Theoretisch dieptegemiddeld snelheidsprofiel boven een helling	29
Figuur 2.13 :	Steenbelasting op een helling	31
Figuur 4.1:	Schematische tekening stroomgoot	35
Figuur 4.2:	Schematische 3D tekening stroomgoot	36
Figuur 4.3:	Gewichtskromme stenen	37
Figuur 4.4 :	Vorm van de gebruikte stenen	38
Figuur 4.5:	Foto van de gebruikte stenen	39
Figuur 4.6:	Schematische tekening EMS	40
Figuur 4.7 :	Gemeten met werkelijke snelheden bij EMS-meter	41
Figuur 4.8 :	Data van EMS naar computer	41
Figuur 4.9:	Manometer (aflezing)	42
Figuur 4.10:	Verband tussen drukverval en debiet van de gebruikte meetflens (ijkgrafiek)	42
Figuur 4.11 :	Synchronisatie EMS	44
Figuur 4.12:	Signaal bij gesynchroniseerde meters	44
Figuur 4.13:	Signaal bij niet-gesynchroniseerde meters	44
Figuur 4.14 :	Snelheidsprofielen bij configuratie 1	45
Figuur 4.15 :	Snelheidsprofielen bij configuratie 2	45
Figuur 4.16 :	Snelheidsprofielen bij configuratie 3	45
Figuur 4.17a:	Snelheden bij helling 1:2,5, $Q=0.120\text{m}^3/\text{s}$	46
Figuur 4.18:	Snelheden in dwarsrichting bij helling 1:4,5, $Q=0.125\text{m}^3/\text{s}$	47
Figuur 4.19:	Afwijking EMS in nabijheid stenen (metingen in stilstaand water)	48
Figuur 5.1:	Ingegraven kanaal op rotsbodem	49
Figuur 5.2:	Steenpatroon	51
Figuur 5.3 :	Verplaatste stenen	51
Figuur 5.4:	Gemiddelde stroomsnelheid bij een bepaalde meetduur	52
Figuur 5.5 :	Opbouw van de helling 1:1,5	53
Figuur 5.6 :	Steenverplaatsingen bij helling 1:1,5	54
Figuur 5.7 :	Verdeling van aantal verplaatste stenen bij helling 1:1,5	54
Figuur 5.8:	Snelheden bij helling 1:1,5, debiet= $0,150\text{m}^3/\text{s}$	55
Figuur 5.9:	Snelheden bij helling 1:1,5, debiet= $0,221\text{m}^3/\text{s}$	55
Figuur 5.10:	Relatieve turbulentie-intensiteiten bij helling van 1:1,5, debiet= $0,150\text{m}^3/\text{s}$	56
Figuur 5.11:	Relatieve turbulentie-intensiteiten bij helling van 1:1,5, debiet= $0,221\text{m}^3/\text{s}$	56
Figuur 5.12 :	Opbouw van de helling 1:2,5	57
Figuur 5.13:	Steenverplaatsingen bij helling 1:2,5	58
Figuur 5.14:	Verdeling van aantal verplaatste stenen bij helling 1:2,5	58
Figuur 5.15:	Snelheden bij helling 1:2,5, debiet= $0,120\text{m}^3/\text{s}$	58
Figuur 5.16:	Snelheden bij helling 1:2,5, debiet= $0,220\text{m}^3/\text{s}$	59
Figuur 5.17:	Relatieve turbulentie-intensiteiten bij helling 1:2,5, debiet= $0,120\text{m}^3/\text{s}$	59
Figuur 5.18:	Relatieve turbulentie-intensiteiten bij helling 1:2,5, debiet= $0,220\text{m}^3/\text{s}$	59
Figuur 5.19 :	Opbouw van de helling 1:3,5	60
Figuur 5.20:	Steenverplaatsingen bij helling 1:3,5	61
Figuur 5.21:	Verdeling van aantal verplaatste stenen bij helling 1:3,5	61
Figuur 5.22:	Snelheden bij helling 1:3,5, debiet= $0,080\text{m}^3/\text{s}$	61
Figuur 5.23:	Relatieve turbulentie-intensiteiten bij helling 1:3,5, debiet= $0,080\text{m}^3/\text{s}$	62
Figuur 5.24:	Opbouw van de horizontale bodem met een glad gedeelte, stroming over de volle breedte van de goot.	63

Figuur 5.25:	Steenverplaatsingen bij horizontale bodem met glad gedeelte over de volle breedte van de goot	64
Figuur 5.26:	Verdeling van aantal verplaatste stenen bij horizontale bodem. met glad gedeelte, gehele stroomgoot	64
Figuur 5.27:	Snelheden bij horizontale bodem met glad gedeelte over de volle breedte van de goot, debiet=0,183 m <sup>3</sup> /s	64
Figuur 5.28:	Relatieve turbulentie-intensiteiten bij horizontale bodem met glad gedeelte bij een stroming over de volledige breedte van de goot, debiet=0,183 m <sup>3</sup> /s	65
Figuur 5.29:	Opbouw van de helling met een glad gedeelte, stroming in een versmalde stroomgoot	65
Figuur 5.30:	Steenverplaatsingen bij horizontale bodem met glad gedeelte bij een versmalde stroomgoot	66
Figuur 5.31:	Verdeling van aantal verplaatste stenen bij horizontale bodem met glad gedeelte bij een versmalde stroomgoot	66
Figuur 5.32:	Snelheden bij horizontale bodem met glad gedeelte bij een versmalde stroomgoot, debiet=0,150 m <sup>3</sup> /s	67
Figuur 5.33:	Relatieve turbulentie-intensiteiten bij horizontale bodem met glad gedeelte bij een versmalde stroomgoot, debiet=0,150 m <sup>3</sup> /s	67
Figuur 5.34:	Opbouw van de goot met volledig ruwe horizontale bodem, stroming in een versmalde stroomgoot	68
Figuur 5.35:	Steenverplaatsingen bij volledig ruwe horizontale bodem, stroming over de volle breedte van de goot	68
Figuur 5.36:	Verdeling van aantal verplaatste stenen bij volledig ruwe horizontale bodem, stroming over de volle breedte van de goot	69
Figuur 5.37:	Snelheden bij een volledig ruwe horizontale bodem en een versmalde stroomgoot, debiet=0,105 m <sup>3</sup> /s	69
Figuur 6.1:	Snelheden aan de teen van het talud, of op de overgang van ruwe bodem naar gladde bodem bij verschillende experimenten	74
Figuur 6.2:	Verdeling verplaatste stenen bij helling 1:1,5	74
Figuur 6.3:	Verdeling verplaatste stenen bij helling 1:2,5	74
Figuur 6.4:	Verdeling verplaatste stenen bij helling 1:3,5	74
Figuur 6.5:	Verdeling verplaatste stenen bij horizontale bodem	75
Figuur 6.6:	Bovenaanzichten snelheden bij verschillende hellingen	75
Figuur 6.7:	Verplaatste stenen voor alle series, lineaire schaal	76
Figuur 6.8:	Verplaatste stenen bij verschillende series bij een helling 1:2,5	76
Figuur 6.9:	Verplaatste stenen voor alle series, logaritmische schaal	77
Figuur 6.10:	Verplaatste stenen voor de verschillende hellingen, logaritmische schaal	78
Figuur 6.11:	Verplaatste stenen voor de verschillende hellingen met regressielijn, logaritmische schaal	78
Figuur 6.12:	Verplaatste rode en blauwe stenen voor de verschillende hellingen met regressielijn, logaritmische schaal.	79
Figuur 6.13:	Steenverplaatsingen uit dit onderzoek in relatie tot andere	80
Figuur 6.14:	Steenbekleding bij hellingen en horizontale bodem	80
Figuur 6.15:	Gevonden K-factor bij verschillende hellingshoeken	81
Figuur 6.16:	Relatieve turbulentie-intensiteiten gemeten aan de teen van het talud op ½ h bij verschillende hellingen	82
Figuur 6.17:	Snelheden in y-richting op horizontale bodem.	82
Figuur 6.18:	Correctiefactor volgens Lane	84
Figuur 6.19:	K-waarden zoals gevonden door Escameia en May (1992)	85
Figuur 6.20:	K-waarden zoals gevonden door Müller (1973)	85
Figuur 6.21:	Gevonden K-factor bij verschillende hellingshoeken	86
Figuur 6.22:	Snelheden boven de helling, theorie v. metingen	88

# Lijst van symbolen

Symbol	Betekenis	Eenheid	
$\beta$	hoek van een zijhelling	°	
$\psi$	Shields-parameter	-	-
$\psi_c$	kritieke Shields-parameter	-	-
$\theta_r$	hoek van natuurlijk talud	°	
A	doorstroomoppervlak	m <sup>2</sup>	L <sup>2</sup>
C	Chézy-waarde	$\sqrt{m/s}$	L <sup>1/2</sup> T <sup>-1</sup>
D <sub>xx</sub>	afmeting van de steen wiens gewicht door xx% van de verzameling onderschreden wordt	m	L
W <sub>xx</sub>	gewicht van de stenen dat door xx% van de verzameling onderschreden wordt	m	L
h	waterdiepte	m	L
F <sub>l</sub>	liftkracht	N = kg·m·s <sup>-2</sup>	MLT <sup>-2</sup>
F <sub>z</sub>	zwaartekracht	N	MLT <sup>-2</sup>
F <sub>s</sub>	sleepkracht	N	MLT <sup>-2</sup>
F <sub>d</sub>	drukkraft	N	MLT <sup>-2</sup>
k	ruwheidsconstante	-	-
K	correctiefactor voor invloed zijhelling	-	-
$\sigma$	standaardafwijking van een verdeling		
$\mu$	gemiddelde waarde van een verdeling		
l	liter	m <sup>3</sup> /1000	L <sup>3</sup>
m	meter	m	L <sup>3</sup>
P	natte omtrek van een profiel (perimeter)	m	L
Q	debiet	m <sup>3</sup> /s	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup>
R	hydraulische straal	m	L
Re	Reynoldsgetal	-	-
Re <sub>s</sub>	Reynoldsgetal betrokken op een steen	-	-
s	seconde	s	T
u	stroomsnelheid	m/s	LT <sup>-1</sup>
u <sub>c</sub>	kritieke stroomsnelheid	m/s	LT <sup>-1</sup>
u <sub>*</sub>	schuifspanningssnelheid	m/s	LT <sup>-1</sup>
u <sub>*c</sub>	kritieke schuifspanningssnelheid	m/s	LT <sup>-1</sup>
$\tau$	bodemschuifspanning	kg/m·s	ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup>
$\mu$	dynamische viscositeit	kg/m·s	ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup>
$\nu$	kinematische viscositeit (= $\mu / \rho$ )	m <sup>2</sup> /s	L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>
g	zwaartekrachtsversnelling ( $\approx 9.81 \text{ m/s}^2$ )	m/s <sup>2</sup>	LT <sup>-2</sup>
$\rho_w$	dichtheid van water ( $\approx 1000 \text{ kg/m}^3$ )	kg/m <sup>3</sup>	ML <sup>-3</sup>
$\rho_s$	dichtheid van stenen ( $\approx 2650 \text{ kg/m}^3$ )	kg/m <sup>3</sup>	ML <sup>-3</sup>
$\Delta$	$(\rho_w - \rho_s) / \rho_w (\approx 1.65)$	-	-
Ti	Relatieve turbulentie-intensiteit	-	-

Wiskundige symbolen

$\infty$  is evenredig met

---

# Hoofdstuk 1: Probleembeschrijving

## 1.1 Inleiding

Dit verslag heeft als titel gekregen "Shields op de helling". Shields (1908-1974) was een Amerikaans ingenieur die in de 30er jaren in Duitsland onderzoek heeft gedaan naar de stabiliteit van stenen in een stroming. Sinds die tijd is Shields een begrip geworden in de civieltechnische wereld. Daar dit onderzoek zich toespitst op steenstabiliteit op hellingen is voor een titel gekozen die op twee manieren te interpreteren valt. Of de figuurlijk betekenis terecht is zal uit dit rapport moeten blijken.

Overal waar een waterloop niet wordt vastgelegd in zijn bedding zal de loop zich op den duur verleggen. De snelheid waarmee dit gebeurt is o.a. afhankelijk van de bodem waarover de waterloop stroomt en de waterloop zelf, maar op den duur zal elke waterloop van ligging veranderen. Of dit een probleem is, is afhankelijk van de gevolgen die een erosie van de oever heeft. Als zich naast de waterloop geen infrastructuur of andere bebouwing bevindt kan de waterloop wellicht vrij worden gelaten. Dit zorgt dan natuurlijk wel voor een verhoogd sedimenttransport in de waterloop. Er moet dus ook bepaald worden of dit sediment stroomafwaarts niet voor problemen zorgt. Ook kan het niet gewenst zijn dat de waterloop zich verlegt als daarbij bochten ontstaan die problemen opleveren voor de scheepvaart of dat hierdoor de waterloop plaatselijk te ondiep wordt.

Vaak zal het dus nodig zijn de waterloop binnen bepaalde grenzen vast te leggen.

Om ervoor te zorgen dat de oevers van kanalen, rivieren e.d. in takt blijven wordt daarom vaak een oeverbescherming aangebracht. Met name op die plaatsen waar hoge stroomsnelheden optreden is dit noodzakelijk.

Op onderstaande foto\* is goed het nut van een deugdelijke oeverbescherming te zien.



**Gevolgen van een ondeugdelijke oeverbescherming**

---

\* Waterways Experiment Station, Coastal And Hydraulics Laboratory  
3909 Halls Ferry Road  
Vicksburg, Mississippi 39180  
<http://chl.wes.army.mil/research/hydrstruc/bankprotect/>

Doordat duidelijk een te lichte oeverbescherming werd gebruikt, is de weg links op de foto, naast het kanaal, volledig weggespoeld.

Om dergelijk situaties te voorkomen zal de oever gestabiliseerd moeten worden. Dit kan op verschillende manieren.

Een aantal mogelijke oplossingen om de oever te fixeren zijn hieronder genoemd.

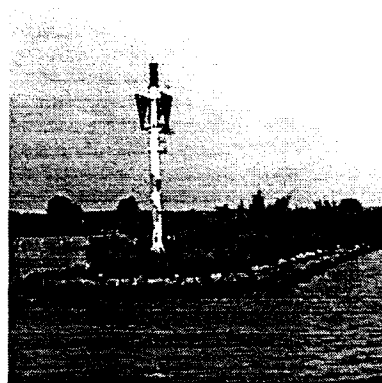
- Basaltblokken
- Betonblokken
- Begroeiing
- Damwand
- Gabions\*
- Steenbestorting

In dit onderzoek is de aandacht gericht op het beschermen van een oever door middel van een steenbestorting. Een steenbestorting bestaat in wezen uit niet meer dan een verzameling stenen die zo'n gewicht hebben dat zij niet door de stroming, die optreedt in de waterloop waar de bestorting zijn bescherming moet bieden, kunnen worden verplaatst.

Niet alleen bij een oever vind een stroming langs een schuine helling plaats. Ook bijvoorbeeld op de koppen van kribben langs de grote rivieren treft men deze situatie aan. Nog een ander geval waarbij rekening moet worden gehouden met de stroming van water langs een helling is de situatie waarbij een bres in een dam ontstaat of wanneer deze gedicht moet worden. Het water stroomt dan met vaak zeer hoge snelheden door het sluitgat en zal, indien de stenen van de dammen aan weerszijde van het gat niet voldoende zwaar zijn, deze in hoog tempo wegeroderen.



De sluiting van een dam ten zuiden van de oude sluis te Hansweert



Kribkop nabij Eck en Wiel langs de Lek

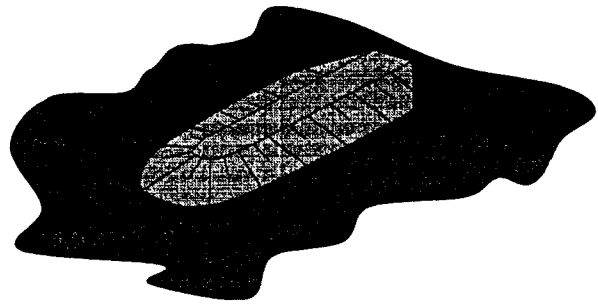
Een steenbestorting kan op verschillende manieren aangebracht worden: met behulp van drijvende pontons, door middel van graafmachines vanuit de oever of gestort vanaf schepen. Deze laatste optie is bij oevers vaak niet mogelijk, omdat de schepen door hun diepgang niet dicht genoeg bij de oever kunnen komen om de steenbestorting aan te brengen.

---

\* Een aantal stenen bijeengehouden door een net



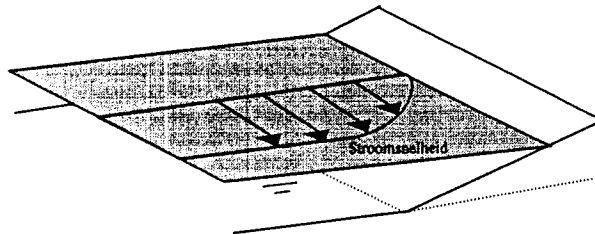
In de praktijk bestaat vaak nog twijfel over hoe een oeverbescherming het best kan worden ontworpen. Om deze vraag te kunnen beantwoorden wordt gekeken naar de relatie tussen de steilheid van een oever, de stroomsnelheid en de afmeting van de stenen die dan nodig is voor een deugdelijke bescherming.



Schematische tekening krib

Voor deze relatie zijn al verschillende theoretische modellen opgesteld en deze zijn ook in beperkte mate al in laboratoria onderzocht. Echter, er is echter niet eenduidig vastgesteld hoe men het beste een steenbestorting op een helling, kan ontwerpen.

Op een helling spelen een aantal factoren een rol die invloed hebben op de stabiliteit van een steen. Natuurlijk, in de eerste plaats, hebben stenen op een helling in meer of mindere mate de neiging om naar beneden te rollen. Deze zwaartekrachtcomponent wordt natuurlijk belangrijker naar mate de helling steiler wordt. Verder neemt vanuit het stroombed naar de waterkant de diepte geleidelijk af. Deze afname in diepte is potentieel slecht voor de stabiliteit van de stenen als men tenminste uitgaat van de dieptegemiddelde snelheid. Doordat de bodem hoger komt te liggen wordt de stroomsnelheid nabij de bodem groter bij een gelijke dieptegemiddelde stroomsnelheid. Echter, doordat de bodem hoger komt te liggen krijgt de stroming ook meer last van bodemwrijving en zal de stroomsnelheid in zijn geheel afnemen naar de waterkant.



Deze laatste twee, elkaar tegenwerkende, effecten zorgen ervoor dat het niet onmiddellijk duidelijk is welke situatie op een oever de maatgevende is voor de steenstabiliteit. In de praktijk wordt dan bijv. gewerkt met de gemiddelde diepte en stroomsnelheid.

Sinds Shields in 1936 onderzoek deed naar de stabiliteit van stenen, zijn er vele onderzoeken geweest, vrijwel allemaal van empirische aard. Ook dit onderzoek is hierop geen uitzondering.

## 1.2 Onderzoeksvraag

### 1.2.1 Probleemstelling

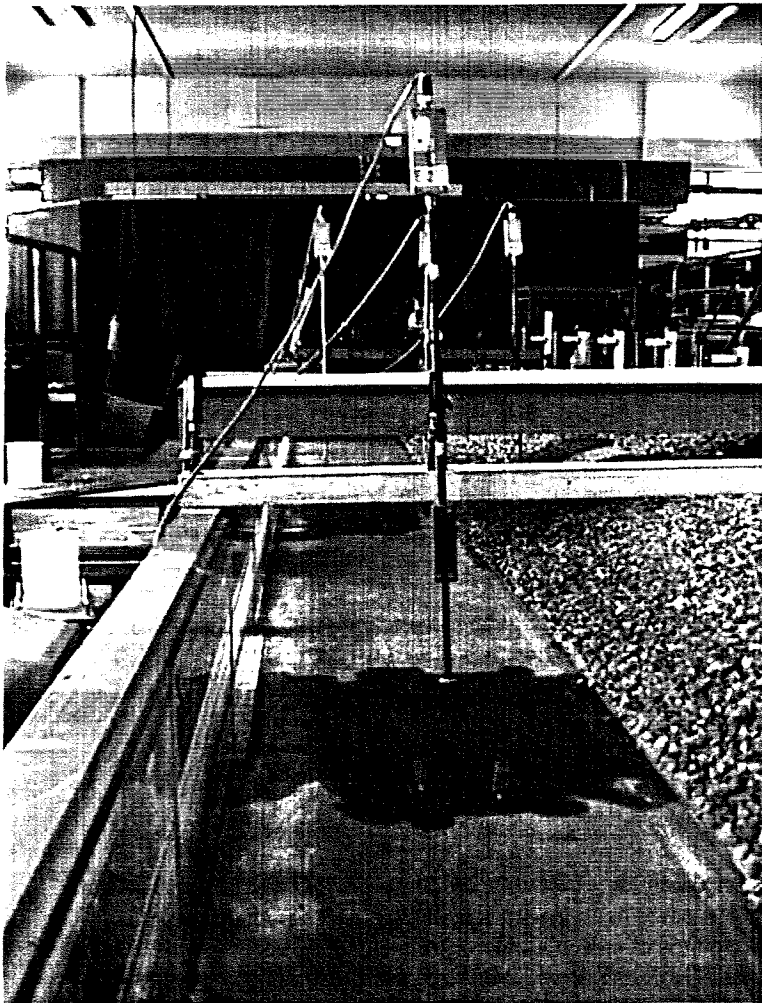
De invloed van een oever op de steenstabiliteit is niet volledig duidelijk. De twee factoren welke onder andere de steenstabiliteit op een oever beïnvloeden zijn de diepte en de stroomsnelheid. Boven een oever neemt de stroomsnelheid af en een kleinere stroomsnelheid zorgt ervoor dat stenen minder snel zullen worden verplaatst. De diepte neemt eveneens geleidelijk af op een oever. Een kleinere diepte bij een gelijke gemiddelde stroomsnelheid zorgt er echter weer voor dat stenen eerder zullen verplaatsen. In de civiele praktijk bestaat vaak onduidelijkheid over hoe het best met deze tegenstrijdige factoren kan worden omgegaan.

### 1.2.2 Doelstelling

De doelstelling van dit onderzoek is als volgt gedefinieerd: het inzicht krijgen in het verband tussen hellingshoek, stroomsnelheid, steendiameter en stabiliteit enerzijds en een manier vinden om hiermee op een efficiënte manier in de civieltechnische praktijk om te gaan anderzijds.

### 1.2.3 Methode van onderzoeken

In dit rapport zal getracht worden de doelstellingen te bereiken door het schrijven van een rapport op basis van metingen in een laboratorium en van literatuurstudie.



Goot met snelheidsmeter

---

# Hoofdstuk 2: Relevante theorie

## 2.1 Inleiding theorie

Om een goede bodembescherming van stortsteen te ontwerpen is kennis nodig van het gedrag van een steenbestorting onder de verschillende aanvallen waar een dergelijke bestorting aan blootstaat. Deze aanval bestaat uit verschillende factoren waarvan de onderstaande twee de belangrijkste zijn.

- Aanval door golven
- Aanval door stroming

Hierna zal verder alleen ingegaan worden op de stromingsaanval.

Op een steen die op de bodem van een stroom ligt werken een aantal krachten. Deze krachten worden veroorzaakt door de stroming om de steen en door het gewicht van de steen.

- Ten gevolge van de kromming van de stroomlijnen boven de steen, en de luwte waarin de onderzijde van de steen zich bevindt, ontstaat een hogere stroomsnelheid boven de stenen dan onder de stenen. Door de hogere snelheid boven de steen zal er een lagere druk optreden aan de bovenzijde van de steen dan aan de onderzijde. Door dit drukverschil zal een kracht naar boven opgewekt worden, de liftkracht.
- Door de wrijving van het water met het (ruwe) oppervlak van de steen ontstaat ook een kracht, de wrijvingskracht.
- Omdat een stroming in water in de praktijk nooit een potentiaalstroming is (zie ook paragraaf 2.4) blijven de stroomlijnen niet aanliggen achter de steen. Hierdoor ontstaat een drukverschil tussen de voorzijde en de achterzijde van de steen. De kracht die dit oproept wordt de sleepkracht genoemd.
- Tenslotte heeft de steen natuurlijk een gewicht. Deze zorgt voor een kracht naar beneden. Verder zorgt de opwaartse kracht van het water voor een naar boven gerichte kracht. Deze twee krachten worden echter vaak samen genomen door uit te gaan van het onderwatergewicht van de steen dat gedefinieerd is als: gewicht steen – gewicht verplaatste water.

Uitgaande van deze krachten zijn door verschillende onderzoekers modellen opgesteld om de steenstabiliteit te beschrijven. Van al deze modellen blijft de klassieke benadering van Shields (1936) nog steeds een van de meest gebruikte.

## 2.2 Krachtenspel op een steen

Als uitgangspunt worden de krachten genomen zoals die beschreven zijn in de vorige paragraaf.

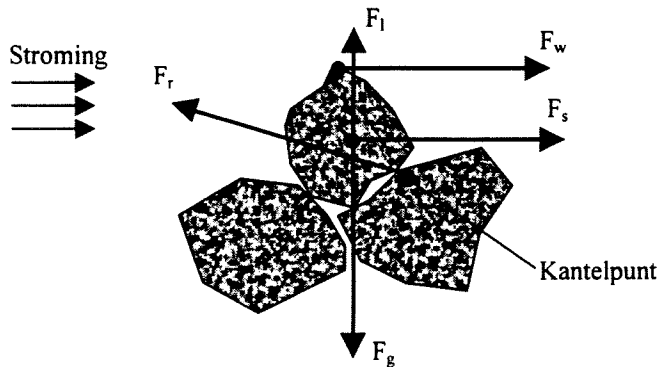
Hierbij is destabiliserende kracht het onderwatergewicht van de steen,  $F_g$ .

Als destabiliserende krachten zijn aanwezig de liftkracht ( $F_l$ ), de sleepkracht ( $F_s$ ) en de wrijvingskracht ( $F_w$ ).

Al deze krachten zorgen voor een moment op de steen om het kantelpunt.

Verder wekken bovengenoemde krachten ook een reactiekracht ( $F_r$ ) op, maar omdat deze kracht aangrijpt vanuit het kantelpunt komt deze kracht verder niet voor in de beschouwing van de stabiliteit van een steen.

Het kritieke punt wordt bereikt als het stabiliserend moment gelijk is aan het destabiliserend moment. Oftewel als  $T_g = T_w + T_s + T_l$



Figuur 2.1: Krachtenspel op een steen

Alle destabiliserende krachten zijn evenredig met  $d^2$ , de watersnelheid in het kwadraat ( $u_*^2$ ) en de dichtheid van het water ( $\rho_w$ ). De snelheid wordt hieraan aangeduidt met  $u_*$  om duidelijk te maken dat het hier de stroomsnelheid ter plaatse van de stenen betreft.

De wrijvingskracht is evenredig met het oppervlak van de steen waarlangs de stroming wrijving heeft met de steen. Dit oppervlak is natuurlijk evenredig met  $d^2$ . De sleepkracht is evenredig met het oppervlak van de steen geprojecteerd op de stromingsrichting, en de liftkracht tenslotte is evenredig met het oppervlak van de steen waarover het drukverschil tussen onderzijde en bovenzijde van de steen optreedt.\*

De evenredigheid met de watersnelheid in het kwadraat is het gevolg van de geldende weerstandswetten die zeggen dat bij een turbulente stroming de weerstand evenredig is met het kwadraat van de snelheid waarmee het voorwerp zich ten opzichte van de vloeistof beweegt.

De zwaartekracht is natuurlijk evenredig met de inhoud van de steen en dus met  $d^3$ . En verder natuurlijk met de zwaartekrachtsversnelling ( $g$ ) en het soortelijk gewicht van de steen ten opzichte van het water ( $\rho_s - \rho_w$ ).

Dit alles leidt tot onderstaande formulering voor de stabiliteit van een steen

$$\begin{aligned} F_r &\propto d^3 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_w) \\ F_w &\propto d^2 \cdot u_*^2 \cdot \rho_w \\ F_s &\propto d^2 \cdot u_*^2 \cdot \rho_w \\ F_l &\propto d^2 \cdot u_*^2 \cdot \rho_w \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_r &\propto F_r \cdot d \propto d^4 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_w) \\ T_d &\propto F_w \cdot d \propto d^3 \cdot u_*^2 \cdot \rho_w \\ T_s &\propto F_s \cdot d \propto d^3 \cdot u_*^2 \cdot \rho_w \\ T_l &\propto F_l \cdot d \propto d^3 \cdot u_*^2 \cdot \rho_w \end{aligned}$$

$$\text{Stabiliteit: } T_r > T_w + T_s + T_l$$

$$d^4 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_w) > d^3 \cdot u_*^2 \cdot \rho_w$$

$$d \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_w) > u_*^2 \cdot \rho_w$$

$$d > \frac{u_*^2 \cdot \rho_w}{g \cdot (\rho_s - \rho_w)} \Rightarrow d > \frac{u_*^2}{C_1 \Delta g}, \text{ met } \Delta = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad (2.1)$$

Deze formulering kan ook worden opgezet als men het horizontale krachterevenwicht in beschouwing neemt.

\* N.B. Ook in stilstaand water heerst er natuurlijk een drukverschil tussen de onderzijde en de bovenzijde van een steen. Dit verschil zorgt voor de opwaartse kracht volgens Archimedes. Deze kracht wordt echter al verrekend door te rekenen met het onderwatergewicht van de steen. Het drukverschil dat hier wordt bedoeld is het drukverschil dat afwijkt van de hydrostatische drukverdeling ten gevolge van de kromming van de stroomlijnen boven de steen.

In de analyse zit nog verwerkt een evenredigheidsparameter  $C_1$ . De parameter  $C_1$  is hier in de noemer gezet omdat deze dan overeenkomt met de parameter zoals deze wordt gebruikt in de theorie van Shields (1936). Shields is een van de eerste onderzoekers die zich heeft beziggehouden met de stabiliteit van stenen in een stroom. Ook door verschillende andere onderzoekers is geprobeerd een uitdrukking voor de constante  $C_1$  te vinden. Toch blijft de methode zoals deze door Shields is toegepast de meest bekende en meest toegepaste. In de volgende paragraaf zal deze methode beschreven worden zoals die door Shields is uitgewerkt.

## 2.3 Theorie van Shields

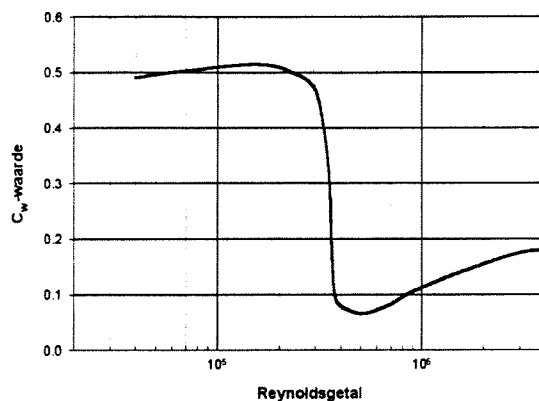
Shields deed zijn onderzoek naar steenstabiliteit in 1936 aan de Technische Hochschule Berlin. Hij deed dit om te kijken bij welke stroomsnelheid stenen verplaatsten onder stromingsaanval. Door naar de beweging van de stenen te kijken bepaalde hij het moment waarop transport van stenen begon. Shields keek in zijn onderzoek niet naar het begin van bewegen van steen, maar veel meer naar steentransporten. Bij de stroomsnelheden die hij als kritieke stroomsnelheden aangaf trad al een behoorlijk transport van stenen op.

Door Shields is de bepalende parameter ( $C_1$  uit de vorige paragraaf)  $\psi$  genoemd. Hierdoor volgt dan voor deze parameter:

$$\psi = \frac{u_{*c}^2}{\Delta \cdot g \cdot d} \quad (2.2)$$

Uit onderzoek van Shields bleek dat het verhaal zoals beschreven in paragraaf 2.2 niet compleet is. De parameter bleek namelijk nog afhankelijk is van de steendiameter. Verder is ook de viscositeit van een vloeistof van invloed op de steenstabiliteit zodat:  $\Psi = f(d, \nu)$

De invloed van de steengrootte en de viscositeit is te wijten aan verschillen in het stromingspatroon. Eenzelfde effect is te zien in de luchtwrijving bij een bol (zie Figuur 2.2). Bij een bepaalde waarde van het Reynoldsgetal (Zie ook paragraaf 2.4) verandert het stroombeeld rond de bol (of steen). De stroming gaat dan over van een laminaire naar een turbulente stroming. Bij bepaalde waarden van het Reynoldsgetal is het zog achter het object kleiner dan bij andere waarden. Het is bij deze waarden dat het object de minste wrijving heeft<sup>[XIV]</sup>.



Wrijvingskracht =  $\frac{1}{2} \cdot C_w \cdot \rho_1 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot v$   
 Reynoldsgetal gedefinieerd als in formule 2.3 met doorsnede bol als kenmerkende lengte

Figuur 2.2: Wrijvingscoëfficiënt van een gladde bol in lucht

Het Reynoldsgetal is een maat voor de stromings situatie. Shields zette zijn gevonden  $\psi$ -waarden om deze reden uit tegen het Reynoldsgetal.

Het Reynoldsgetal is in het algemeen gedefinieerd als:

$$\Re = \frac{L \cdot v}{\nu} \quad (2.3)$$

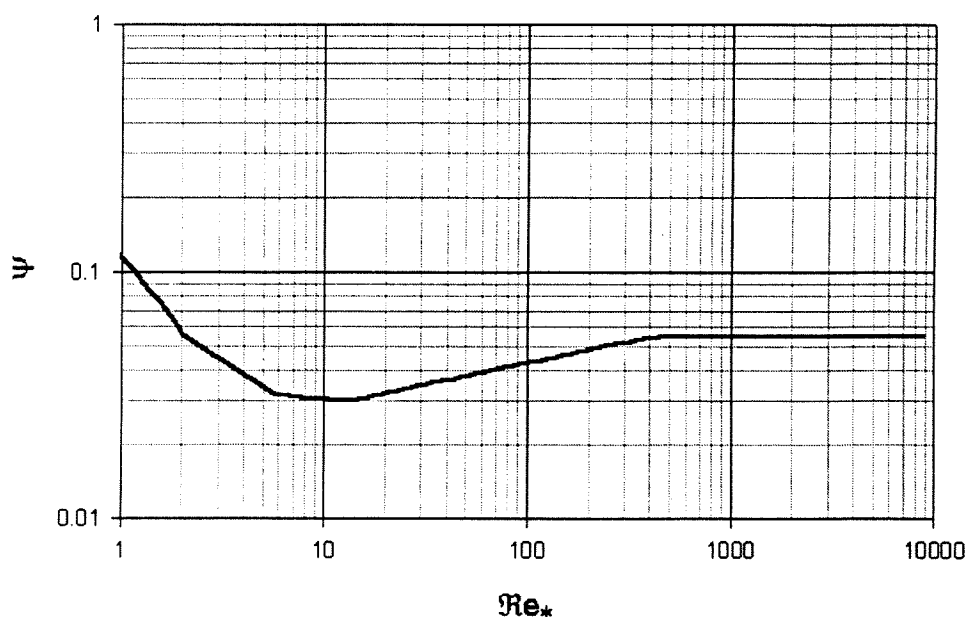
## Hoofdstuk 2: Relevante theorie

waarbij: L: kenmerkende lengte  
v: snelheid van vloeistof of gas t.o.v. voorwerp  
 $\nu$ : kinematische viscositeit

Shields gebruikte het Reynoldsgetal betrokken op de steen dus met kenmerkende lengte de steendiameter. Als stroomsnelheid nam hij de kritieke stroomsnelheid waarop transport begon en verder is natuurlijk de kinematische viscositeit van water in de formule opgenomen.

$$Re_* = \frac{u_{*c} \cdot d}{\nu} \quad (2.4)$$

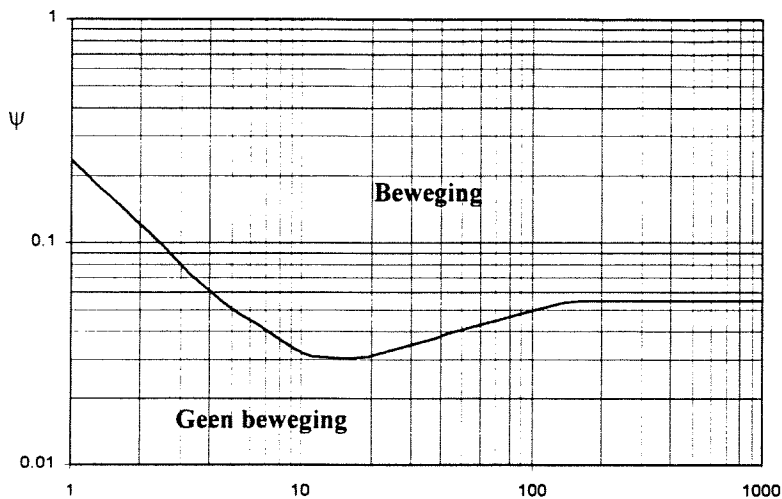
Shields presenteerde zijn gegevens in een grafiek waarbij bij de assen voorzien waren van een logaritmische schaalverdeling samen met gegevens van enkele andere onderzoekers. Hij trok geen lijn door deze punten maar tekende een gearceerd gebied rond deze punten om aan te geven dat de overgang van "niet-bewegen" naar "bewegen" niet scherp is te trekken.



Figuur 2.3: Shieldsgrafiek

In de Shields-grafiek komt  $u_c$  voor zowel op de horizontale as (In  $Re_*$ , zie formule 2.4), als op de verticale as (In  $\psi$ , zie formule 2.2). Hierdoor is bij de berekening van  $u_c$  iteratie nodig. De kritieke stroomsnelheid kan niet rechtstreeks uit de grafiek wordt gehaald. Er moet eerst een aanname voor  $u_c$  worden gedaan waar een  $Re_*$  uit volgt. Hierna wordt  $\psi$  afgelezen en moet hieruit een nieuwe schatting voor  $u_c$  worden verkregen. Dit moet herhaald worden tot de nieuwe  $u_c$  (nagenoeg) gelijk is aan de  $u_c$  ingevoerd in de iteratieslag.

Door van Rijn is later uit de originele Shields-grafiek de onderstaande grafiek afgeleid. Hier is op de horizontale as  $Re_*$  vervangen door  $d_*$  waarin de kritieke stroomsnelheid niet is verwerkt. Hierdoor heeft deze grafiek het voordeel dat hier geen iteratie nodig is om  $u_c$  te bepalen. Dit is mogelijk omdat elke steengrootte één  $u_c$  heeft.



Figuur 2.4: van Rijn grafiek

$$d_* = d \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{\Delta \cdot g}{\nu^2}\right)}$$

De van Rijn grafiek kan beschreven worden met:

$$\begin{aligned} d_* < 4 : & \quad \psi = 0.24 d_*^{-1} \\ 4 \leq d_* \leq 10 : & \quad \psi = 0.14 d_*^{-0.64} \\ 10 \leq d_* \leq 18 : & \quad \psi = 0.04 d_*^{-0.1} \\ 18 \leq d_* \leq 145 : & \quad \psi = 0.013 d_*^{0.29} \\ d_* > 145 : & \quad \psi = 0.055 \end{aligned}$$

Door Ikeda (1982)<sup>[X1]</sup> wordt aan de hand van een analyse over de grenslaagdikte een theoretische onderbouwing gegeven voor het verloop van deze grafiek.

Met behulp van Figuur 2.4 en formule 2.2 kan de kritieke stroomsnelheid voor een steen worden bepaald.

$$u_{*c} = \sqrt{d \cdot \Psi \cdot \Delta \cdot g} \quad (2.5)$$

Men heeft dan de kritieke stroomsnelheid voor de stenen. Voor praktische toepassingen moet die nog worden omgezet naar een dieptegemiddelde snelheid.

In een uniforme stroming is een verhangkracht aanwezig welke wordt veroorzaakt door de bodemhelling ( $i$ ) en het gewicht van het water. De wrijving over de bodem, veroorzaakt door deze verhangkracht, is gelijk aan:  $\rho_w \cdot g \cdot h \cdot \sin(i)$ . Bij de kleine bodemhelling waarover men meestal spreekt kan men stellen:  $i \approx \sin(i)$ .

$$\tau = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot i \quad (2.6)$$

De bodemwrijving is natuurlijk eveneens gelijk aan de kracht welke uitgeoefend wordt op de stenen. Deze kracht is al gedefinieerd door  $F_h = C_1 \cdot d^2 \cdot \rho_w \cdot u_*^2$ . Als men deze neemt per oppervlak krijgt men een spanning gelijk aan  $C_1 \cdot \rho_w \cdot u_*^2$ . Om deze reden wordt de snelheid in deze formulering ook vaak aangeduid als schuifspanningssnelheid aangeduid met  $u_*$ , omdat dit de snelheid is waarbij de schuifspanning ten gevolge van de verhangkracht in evenwicht is met de spanning op de stenen. Er geldt dus tevens:

$$\tau = C_1 \cdot \rho_w \cdot u_*^2 \quad (2.7)$$

Met de bekende formule voor uniforme stroming:

$$\bar{u} = C \cdot \sqrt{h \cdot i} \quad (2.8)$$

en de relatie,

$$u_* = \sqrt{g \cdot h \cdot i} \quad (2.9)$$

kan men onderstaande relatie tussen de schuifspanningssnelheid en de gemiddelde snelheid herleiden. Hierbij geldt dat de verhouding tussen de kritieke snelheid natuurlijk identiek is dan deze voor alle overige snelheden.

$$\frac{\bar{u}}{u_c} = \frac{u_{*c} \cdot C}{\sqrt{g}} \quad (2.10)$$

$\bar{u}$  : dieptegemiddelde kritieke stroomsnelheid in m/s

$g$  : zwaartekrachtversnelling in  $\text{m/s}^2$

$u_c$  : kritieke stroomsnelheid in m/s

$C$  : Chezy - waarde ( $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ )

De toegestane steendiameter bij een bepaalde dieptegemiddelde stroomsnelheid wordt dan gelijk aan:

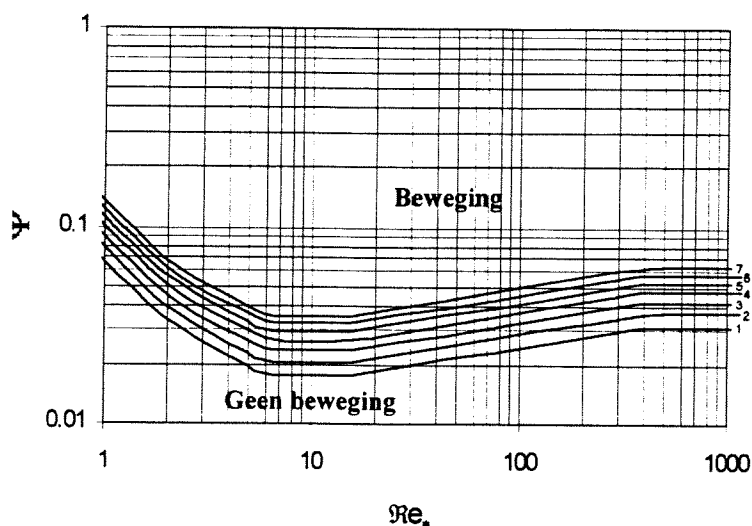
$$d = \frac{\bar{u}_c^2}{\psi \cdot \Delta \cdot C^2} \quad (2.11)$$

In werkelijkheid is de overgang tussen niet bewegen en bewegen echter niet zo duidelijk te leggen. Door Delft Hydraulics<sup>1</sup> is daarom de originele Shields-grafiek aangepast en voorzien van 7 stadia van bewegen oplopend van nauwelijks transport tot algeheel transport over het hele bed.

---

<sup>1</sup> : Delft Hydraulics, 1972, Systematical investigation of two and three dimensional local scour, Investigation M648/M863 (in Dutch)





Figuur 2.5: Shields-diagram door Delft Hydraulics (1972)

De 7 stadia waren hierin beschreven als:

- 1) af en toe een bewegende steen op sommige plaatsen
- 2) regelmatig een bewegende steen op sommige plaatsen
- 3) regelmatig een bewegende steen op vele plaatsen
- 4) bijna overal regelmatig een bewegende steen
- 5) overal, regelmatig bewegende stenen
- 6) overal, constant bewegende stenen
- 7) algeheel transport

## 2.4 Turbulentie

In een stroming speelt de turbulentie onder andere een rol in de stabiliteit van stenen. Turbulentie is het verschijnsel dat de stroomsnelheid niet altijd gelijk is maar fluctueert om de gemiddelde waarde. Turbulentie wordt veroorzaakt door de uitwisseling van pakketjes vloeistof in wervels. Deze wervels ontstaan door het snelheidsverschil tussen verschillende 'lagen' in een stroming. Of een stroming turbulent of laminair is kan beschreven worden met de waarde van het Reynoldsgetal. Dit Reynoldsgetal geeft de verhouding weer tussen de traagheid van de vloeistof en de viscositeit van de vloeistof. Het Reynoldsgetal is gedefinieerd als:

$$Re = \frac{L \cdot u}{\nu} \quad (2.12)$$

waarin L : kenmerkende lengte

u : snelheid van de vloeistof

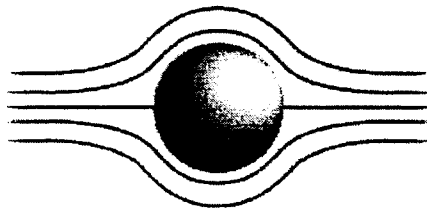
$\nu$  : kinematische viscositeit =  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (water,  $10^\circ \text{C}$ )

Voor de kenmerkende lengte wordt in de stroming met vrij oppervlak meestal de diepte genomen. Bij een Reynoldsgetal boven de 2000 gedraagt een stroming zich turbulent. Bij een Reynoldsgetal kleiner dan 500 gedraagt de stroming zich laminair. De overgang tussen laminaire en turbulent verloopt geleidelijk. Bij zeer kleine Reynoldsgetalen gaat de stroming zich als een potentiaalstroming gedragen. In de civiele praktijk zijn vrijwel alle stromingen in water met vrij oppervlak turbulent. (Zie Tabel 2.1)

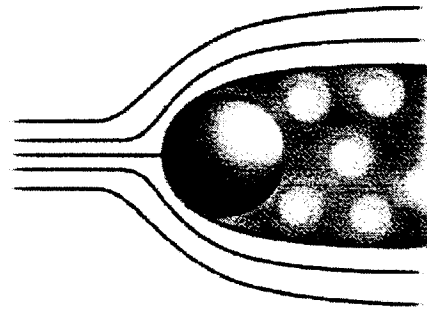
	Diepte	Snelheid	Reynoldsgetal
Laboratoriumgoot	0.25 m	0.1 m/s	25000
Kanaal	2 m	0.1 m/s	100000
Rivier	5 m	1.0 m/s	5000000
Getijdegeul	10 m	0.5 m/s	5000000

Tabel 2.1: Reynoldsgetal voor verschillende situaties

Of een stroming zich turbulent of laminair gedraagt komt onder andere tot uitdrukking in de wijze waarop het water rond een steen stroomt. Bij een turbulente stroming ontstaat achter een obstakel een zog. Hierdoor ontstaat een lagere druk achter het voorwerp, wat zorgt voor een netto kracht in de richting van de stroming.

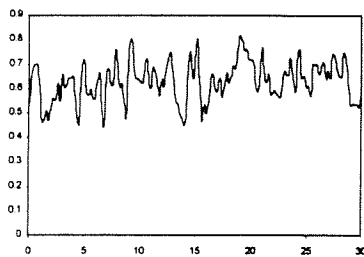


Figuur 2.6a: Laminaire stroming

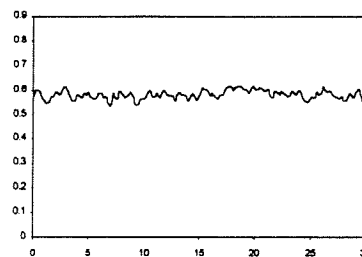


Figuur 2.6b: Turbulente stroming

Ook in de lokale metingen van de snelheid in een stroming is de turbulentie zichtbaar.



Figuur 2.7a: Hoogturbulente stroming



Figuur 2.7b: Laagturbulente stroming

De mate waarin het signaal fluctueert is een maat voor de turbulentie.

Om de turbulentie weer te geven kan men de relatieve turbulentie-intensiteit bepalen. Deze is in dimensieloze vorm gedefinieerd als:

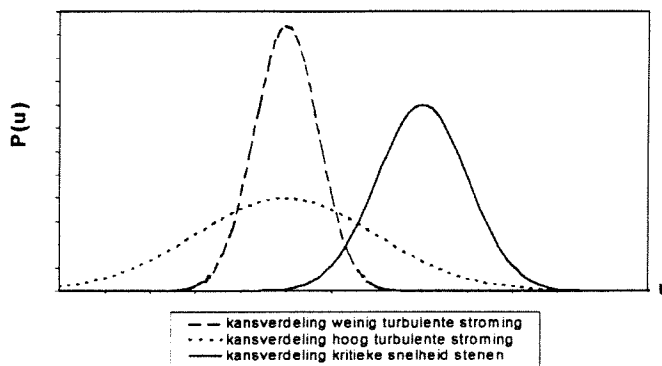
$$Ti = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (\bar{u} - u_n)^2}}{\bar{u}} = \frac{\sigma(u)}{\bar{u}} \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2.13)$$

waarbij:  $u_n$  = lokale instantane stroomsnelheid

$\bar{u}$  = lokale tijdsgemiddelde stroomsnelheid

Voor verschillende stenen geldt -al naargelang ligging, vorm, grootte e.d.- een andere kritieke snelheid. Een steen zal dan verplaatst als de lokale stroomsnelheid groter is dan de kritieke snelheid voor die steen, mits die snelheid lang genoeg blijft bestaan om de steen ook daadwerkelijk te verplaatsten. Als de kritieke snelheid maar gedurende een heel kleine tijd wordt overschreden, zal de steen slechts tijdelijk opgelicht worden en weer terugvallen als de snelheid weer onder de kritieke stroomsnelheid komt.

Bij een hoogturbulente stroming zullen dus meer stenen verplaatst, hoewel de gemiddelde stroomsnelheid gelijk kan zijn. Naar dit effect is o.a. onderzoek gedaan door Escarmeia en May (1992)<sup>[VIII]</sup>



Figuur 2.8: Kritieke snelheid stenen en optredende snelheden

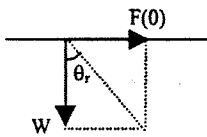
In Figuur 2.8 is het effect van een hogere relatieve turbulentie-intensiteit nog eens duidelijker gemaakt. De verdeling in de kritieke snelheden van de stenen is de rechtercurve in Figuur 2.8. De twee curven aan de linkerzijde van de grafiek zijn de curven van de verdelingen van de stroomsnelheid: de lage brede verdeling voor een hoogturbulente stroming en de hogere smallere verdeling voor een laagturbulente stroming. De oppervlakten onder deze grafieken zijn gelijk. De gemiddelde snelheid van beide stromingen is gelijk. Toch is de overlap van de hoogturbulente stroming met de verdeling van de kritieke snelheid van de stenen groter. In dit gebied is de stroomsnelheid groter dan de kritieke snelheid van een deel van de stenen. Dit gebied wordt groter bij toenemende turbulentie. Dit betekent dat meer stenen zullen verplaatst worden bij een hogere turbulentie.

## 2.5 Theorie stenen op een helling

Als stenen niet op een horizontale bodem liggen maar op een helling, wordt de stabiliteit beïnvloed. Om dit effect in de formules te verwerken wordt een correctiefactor ingevoerd. Deze correctiefactor wordt in de noemer van vergelijking 2.7 toegepast. Deze correctiefactor is gedefinieerd als de kritieke snelheid op een helling gedeeld door de kritieke snelheid op een horizontale bodem.

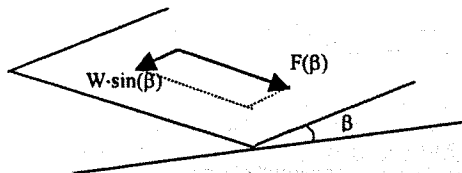


**De formule van Lane** is afgeleid uit het krachtenevenwicht van een steen op een helling. Op een horizontale bodem geldt voor het evenwicht van een steen



$F(0) = W \cdot \tan(\theta_r)$ , waarbij  $W$  het onderwatergewicht van de steen

Voor het evenwicht van een steen op een helling geldt de relatie:



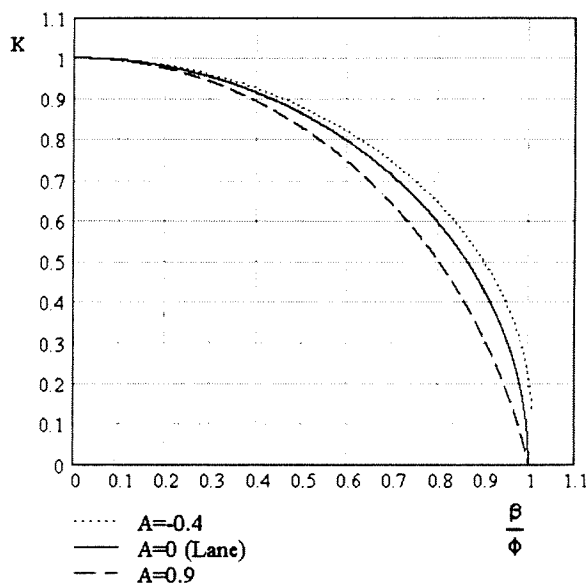
$$\sqrt{F(\beta)^2 + [W \cdot \sin(\beta)]^2} = W \cdot \cos(\beta) \cdot \tan(\theta_r)$$

Dit uitgewerkt voor  $K = F(\beta)/F(0)$  geeft de formule van Lane

**De formule van Ikeda** neemt in deze beschouwing van krachten ook de liftkracht mee. Deze liftkracht wordt veronderstelt te werken langs de normaal op de helling.

De normaalkracht veroorzaakt door de onderwatergewicht van de steen ( $W \cdot \cos(\beta)$ ) wordt dus in deze beschouwing verminderd met de liftkracht.

In de literatuur worden voor  $F_r/F_d$  waarden vermeld van -0.4 tot 0.9<sup>[xi]</sup>. Als men deze uiterste waarde en de waarde van  $A=0$  welke de formule van Lane geeft uitzet in een figuur waarbij de hellingcorrectiefactor  $K$  is uitgezet tegen de hellingshoek gedeeld door de hoek van natuurlijk talud van de stenen, volgt Figuur 2.10.

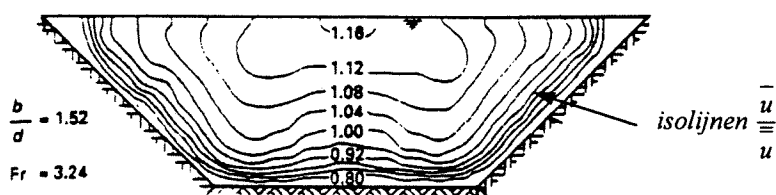


Figuur 2.10: Correctiefactor tegen helling

Hierin zijn de uiterste waarden natuurlijk bij een helling van 0 graden waarbij sprake is van een horizontale bodem en de reductiefactor gelijk is aan 1. Aan de andere zijde is de reductiefactor gelijk aan 0 bij de hoek van natuurlijk talud van de stenen. Dit betekent dat als de stenen gelegd worden onder hun natuurlijk talud, elke belasting zorgt voor bezwijken, hetgeen overeenkomt met de verwachting.

## 2.6 Het snelheidsprofiel in een waterloop met oevers

In een waterloop waarbij de wanden niet recht zijn maar een aflopend profiel hebben heeft dit invloed op het stromingsprofiel in de waterloop. Door verschillende onderzoekers zijn metingen gedaan in dergelijke stromingen. Hieronder staat een figuur zoals door Yuen (1988) is geconstrueerd.



Figuur 2.11: Snelheidsverdeling in een stroming met schuine oevers

In de figuur staan de isolijnen van de tijdsgemiddelde snelheid gedeeld door de tijds- en profielgemiddelde snelheid. In deze figuur ligt het gebied met maximale stroomsnelheid in het midden van het profiel nabij de waterlijn. Chadwick (1998) geeft dat dit niet noodzakelijkerwijs het geval is. Door secundaire stromingen is het mogelijk dat het gebied met maximale stroomsnelheid weliswaar in het midden van het profiel ligt maar op enige diepte onder de waterlijn.

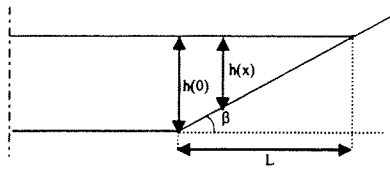
In deze paragraaf zal een beschrijving worden gegeven van één manier hoe men het snelheidsprofiel in de nabijheid van een helling kan berekenen.

Het snelheidsprofiel boven een helling kan wiskundig worden beschreven als aangenomen wordt dat het verhang boven de helling gelijk is aan het verhang in de hoofdstroming. Dit is over langere afstand altijd een vereiste, omdat anders een waterstandsverschil zou ontstaan tussen de hoofdstroming en de helling. Verder wordt uitgegaan van de bekende formules voor de relaties tussen diepte, ruwheid, verhang en snelheid.

Zowel de stroom boven de helling als de stroming in het stuk met een horizontale bodem voldoet aan de relatie:

$$u = C\sqrt{hi} \tag{2.17}$$

Voor men de snelheidsverdeling boven een helling kan bepalen moet eerst een assenstelsel worden gedefinieerd. Er wordt hier een assenstelsel gebruikt waarbij de oorsprong ligt aan de teen van het talud. De positieve x-as ligt in de richting van het talud, richting de waterlijn.



Met behulp van dit assenstelsel volgen bij bekende Chézy-waarde en verhang de snelheden volgens onderstaande analyse.

$$h(x) = \begin{cases} x < 0 : h(0) \\ x \geq 0 : h(0) - x \cdot \tan(\beta) \end{cases} \quad (2.18)$$

De Chezy-waarde is:

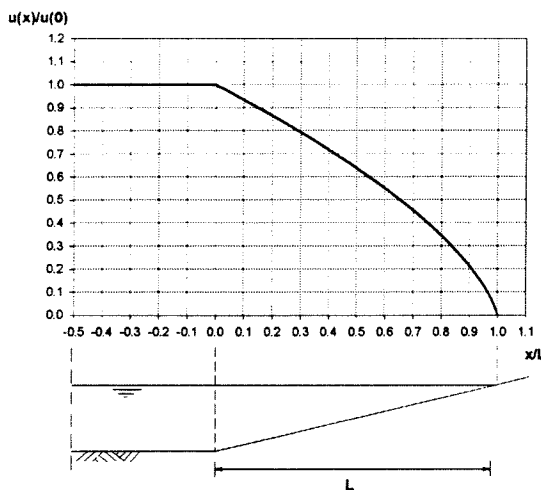
$$C(x) = 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h(x)}{k \cdot D}\right) \quad (2.19)$$

Hierin is  $k$  een dimensieloze constante welke een maat is voor de ruwheid van de bodem. De snelheid in een bepaald segment is dan via onderstaande formule te bepalen.

$$u(x) = C(x) \cdot \sqrt{h(x) \cdot i} \quad (2.20)$$

Indien men  $D$ ,  $i$  en  $k$  constant verondersteld volgt hieruit de snelheid.

De snelheid ziet er dan in bovenaanzicht uit als in Figuur 2.12



Figuur 2.12: Theoretisch dieptegemiddeld snelheidsprofiel boven een helling

De grafiek beeldt het snelheidsprofiel uit in bovenaanzicht waarbij de teen van de helling bij  $x=0$  ligt en de snijding van de helling met het wateroppervlak bij  $x = L = h(0) \cdot \tan(\beta)$ . Deze analyse is geldig als men in de Chézy-formule de diepte invoert als bepalende factor. Omdat op een helling ook het oppervlak bodem per eenheid van breedte (de perimeter) verandert verkrijgt men een iets ander resultaat indien men bovenstaande analyse uitvoert met de hydraulische straal ( $R$ ) in plaats van de diepte ( $h$ ).

## 2.7 Belasting op stenen in een waterloop met oevers

Met het snelheidsprofiel boven een helling zoals gevonden in paragraaf 2.6 kan ook de belasting op de stenen berekend worden. Hiervoor kan de methode van Shields toegepast worden op grote stenen ( $Re_s > 500$ ) en met een dieptegemiddelde snelheid. De beschouwing voor grote stenen betekent dat de  $\psi$ -waarde constant kan worden genomen, in de Shieldsgrafiek kan men namelijk zien dat de  $\psi$ -waarde constant wordt bij een  $Re_s > 500$ . Dit is al het geval bij stenen van meer dan 7 mm. In de praktijk zal men dus vrijwel altijd in dit gebied zitten bij het ontwerpen van een bescherming door middel van stortsteen.

De ruwheid van de bodem kan worden uitgedrukt als:

$$C = 18 \cdot \log \frac{12 \cdot h}{k \cdot D} \quad (2.21)$$

Als men er vanuit gaat dat  $k$  en  $D$  constant zijn volgt voor het gebied op de helling onderstaande evenredigheidsanalyse.

De hellingcorrectiefactor is 1 op het horizontale stuk. Op de helling is deze afhankelijk van de hellingshoek van het talud en van de hoek van natuurlijk talud van de stenen op het talud. Voor de hellingcorrectiefactor wordt hier de formule van Lane genomen.

$$K(x, \beta) = \begin{cases} x < 0 : 1 \\ x \geq 0 : \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\beta)}{\sin^2(\phi)}} \end{cases} \quad (2.22)$$

In onderstaande beschouwing worden alle waarden die niet direct afhankelijk zijn van een helling vervangen door constanten ( $C_x$ )

Met de bekende formule voor de Chezy-waarde volgt:

$$C = 18 \log \frac{12 \cdot h}{k \cdot D} \Rightarrow k \text{ en } D \text{ constant} \Rightarrow C = 18 \log(C_1 \cdot h) \quad (2.23)$$

$$u = C \sqrt{h \cdot i}; i = \text{constant} \Rightarrow u = C_2 \log(C_1 \cdot h) \cdot \sqrt{h \cdot C_3} \Rightarrow u = C_4 \cdot \log(C_1 \cdot h) \cdot \sqrt{h} \quad (2.24)$$

$\psi$  is volgens formule 2.2 afhankelijk van de kritieke snelheid. In deze paragraaf wordt  $\psi$  niet gebruikt als factor om aan te geven bij welke snelheid stenen gaan verplaatsen, maar als factor om aan te geven in welke mate stenen belast worden. Zoals in Figuur 2.5 is te zien is dit van invloed op het aantal stenen dat verplaatst.  $\psi$  wordt hier dus gebruikt in zijn vorm als mobiliteitsparameter. In analogie met formule 2.2 maar nu met de optredende snelheid in plaats van de kritieke stroomsnelheid volgt dan:

$$\Psi = \frac{u^2}{D \Delta C^2} \Rightarrow \Psi = \frac{(C_4 \cdot \log(C_1 \cdot h) \cdot \sqrt{h})^2}{C_5 \cdot (C_2 \cdot \log(C_1 \cdot h))^2} \Rightarrow \Psi = \frac{C_6 \cdot (\log(C_1 \cdot h))^2 \cdot h}{C_7 \cdot (\log(C_1 \cdot h))^2} \Rightarrow \Psi = C_8 \cdot h \quad (2.25)$$

Relatie tussen constanten:

$C_1 = \frac{12}{k \cdot D}$	$C_4 = \sqrt{C_3} \cdot C_2$	$C_7 = C_5 \cdot C_2^2$
$C_2 = 18$	$C_5 = D \cdot \Delta$	$C_8 = \frac{C_6}{C_7}$
$C_3 = i$	$C_6 = C_4^2$	

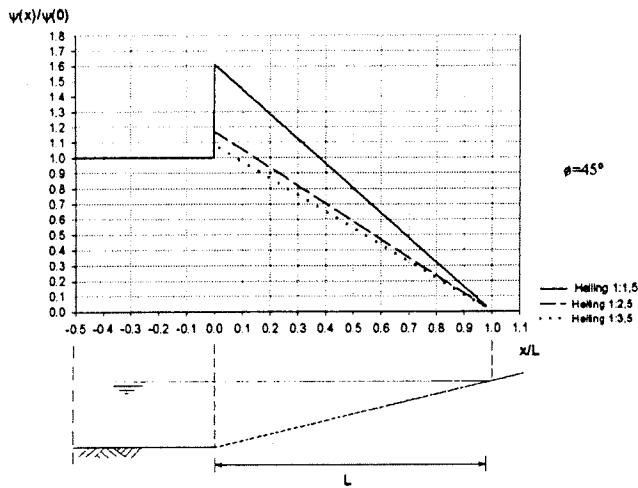
Dit houdt in dat, volgens deze vereenvoudigde theorie, op hellingen de steenstabiliteit evenredig is met de diepte.



Op overgangen van een horizontale bodem naar een helling gelden natuurlijk andere voorwaarden. Dit komt omdat op deze punten de hellingcorrectiefactor verandert. Op de overgang van de horizontale bodem naar de helling vindt er een verandering plaats in de perimeter per eenheid van breedte, omdat een horizontale bodem een kleinere perimeter heeft dan de bodem van een helling. Met inachtneming van formule 2.21 t/m 2.24 volgt:

$$\Psi(x, \beta) = \frac{[u(x, \beta)]^2}{D \cdot \Delta \cdot [C(x, \beta)]^2 \cdot K(x, \beta)} \quad (2.26)$$

De belastingcurve van stenen op een oever wordt dan als in Figuur 2.13



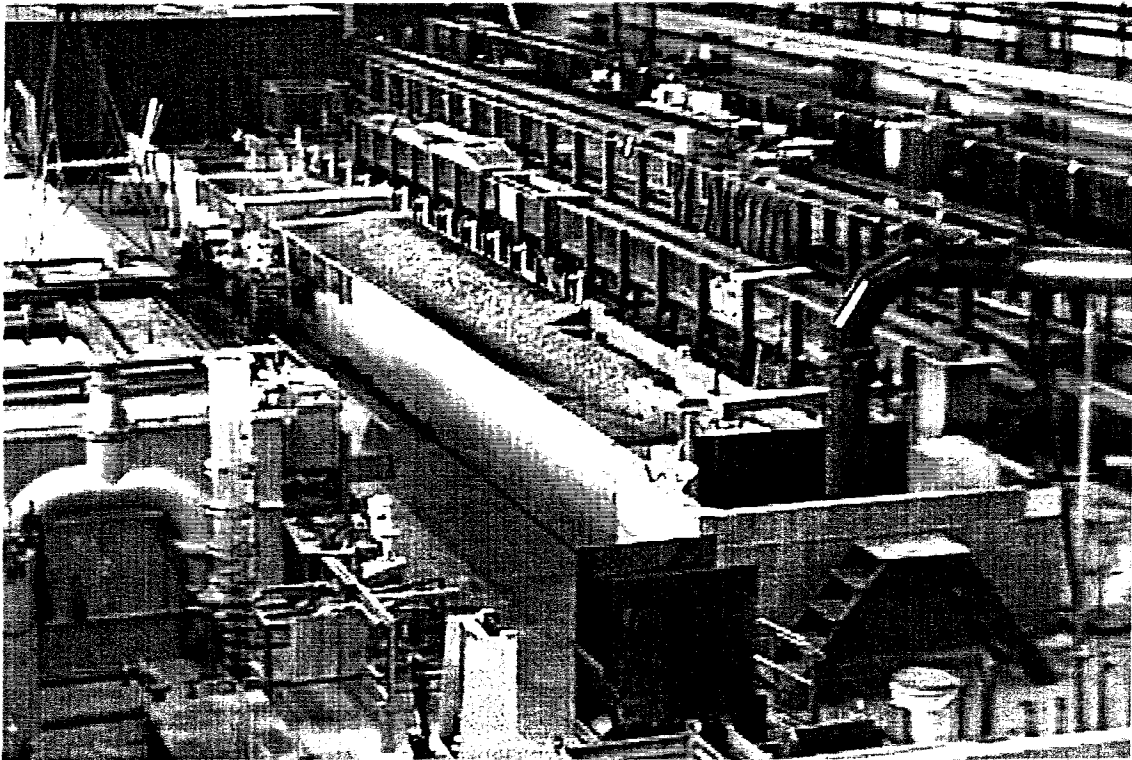
Figuur 2.13 :Steenbelasting op een helling

In bovenstaande figuur is te zien dat stenen op een helling altijd het meest belast worden aan de teen van de oever.

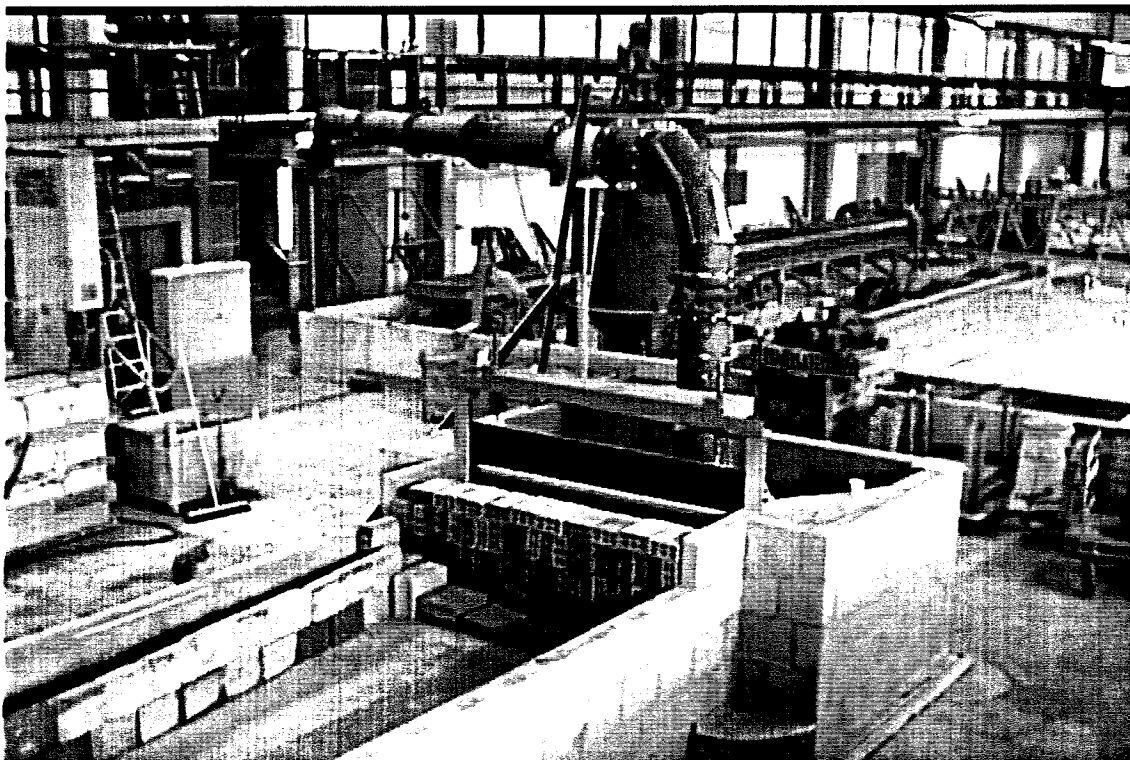
#### Nuancering

Hierbij moet natuurlijk worden aangetekend dat de scherpe overgang zoals gevonden in voorgaande analyses nooit in de praktijk zal worden gevonden.

Door turbulentie en viscositeit zullen de snelheidsprofielen en daarmee ook de belastingprofielen er veel "gladder" uitzien.



Overzicht goot



Instroming

---

## Hoofdstuk 3: Onderzoeksopzet

Om de doelstelling van dit rapport te bereiken is een plan gemaakt om de verschillende vragen die gerezen waren te beantwoorden. In de eerste plaats wordt een inventarisatie gemaakt van de huidige wijze waarop een oeverbescherming ontworpen wordt. Ten tweede speelt natuurlijk de vraag of dit verbeterd kan worden en tenslotte natuurlijk op welke manier dit dan zou moeten gebeuren.

### Huidige praktijk

Vrijwel alle handboeken over het ontwerpen van waterbouwkundige constructies geven de theorie van Shields. Hierin wordt meestal ook de correctiefactor voor schuine hellingen c.q. oevers gegeven volgens Lane. Vrijwel nooit wordt er echter een aanwijzing gegeven op welk punt van een oever de steenstabiliteit moet worden berekend. Het wordt geheel aan de lezer overgelaten om een keus te maken welke diepte en stroomsnelheid gebruikt dient te worden. Vaak wordt dan de situatie op het midden van het talud maar genomen.

### Literatuur

Er is een vrij klein aantal onderzoeken uitgevoerd naar steenstabiliteit op oevers. Er konden slechts 3 onderzoeken gevonden worden waarin verschillende hellingen onderzocht waren. In dit rapport worden de volgende onderzoeken genoemd.

- Müller (1973)<sup>[XV]</sup>
- Ikeda (1982)<sup>[XI]</sup>
- Escarameia & May (1992)<sup>[VII]</sup>

Dit wil natuurlijk niet zeggen dat er niet meer onderzoeken gedaan zijn. Zoals gezegd geven vrijwel alle handboeken voor het berekenen van de benodigde steendiameter op een oever alleen de hellingcorrectiefactor volgens Lane, zonder enige toevoeging op welke situatie (plaats op het talud) deze zou moeten worden toegepast.

### Validatie theorie

In dit onderzoek wordt gekeken of de theorie zoals beschreven in het vorige hoofdstuk ook overeenkomt met de werkelijkheid. Om dit te controleren is ervoor gekozen een aantal tests te doen in een laboratorium. Uit deze tests zou moeten blijken of deze theorie toepasbaar is voor praktische toepassingen of dat hier misschien aanpassingen nodig zijn. In het volgende hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de manier waarop deze tests waren opgezet.

### Experiment

De experimenten worden gedaan in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft. Deze experimenten zijn bedoeld om meer inzicht te krijgen in de relatie tussen de verschillende parameters die van invloed zijn op de steenstabiliteit op een oever. In dit experiment zullen een aantal verschillende hellingen beproefd worden. Om de hellingcorrectiefactor te isoleren moeten de overige parameters zoals waterdiepte en steengroote constant worden gehouden. Om echter te zien of de resultaten welke worden gevonden representatief zijn voor verschillende situaties zouden de tests natuurlijk meerdere malen uitgevoerd moeten worden waarbij men ook deze variabelen zou wijzigen. Men heeft dan echter snel een enorme hoeveelheid tests nodig. Daarom worden de factoren zoals waterdiepte en steengroote tijdens alle experimenten gelijk gehouden.

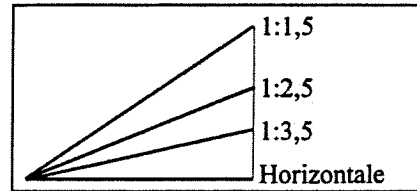
### Keuze hellingen

Gekozen is experimenten te gaan doen bij een aantal verschillende hellingen. De hellingen zijn zo gekozen dat zij het hele spectrum van zeer flauw tot zeer steil omvatten. Natuurlijk worden ook proeven gedaan op een horizontale bodem als referentie voor de andere proeven. Al met al worden er tests uitgevoerd bij de volgende hellingen:

### Hoofdstuk 3: Onderzoeksopzet

---

- 1:∞ horizontale bodem
- 1:3,5 redelijk flauwe helling
- 1:2,5 normale helling in de civiele praktijk
- 1:1,5 extreem steile helling voor stortsteen



#### Analyse

De resultaten zullen worden bekeken en getracht zal worden aan deze resultaten conclusies te verbinden. Tevens zullen de resultaten worden getoetst aan andere onderzoeken over steenstabiliteit welke gevonden zijn. Uit deze analyse moet dan een advies komen welke de doelstelling van dit rapport vervult.

# Hoofdstuk 4: Meetopzet

## 4.1 De stroomgoot

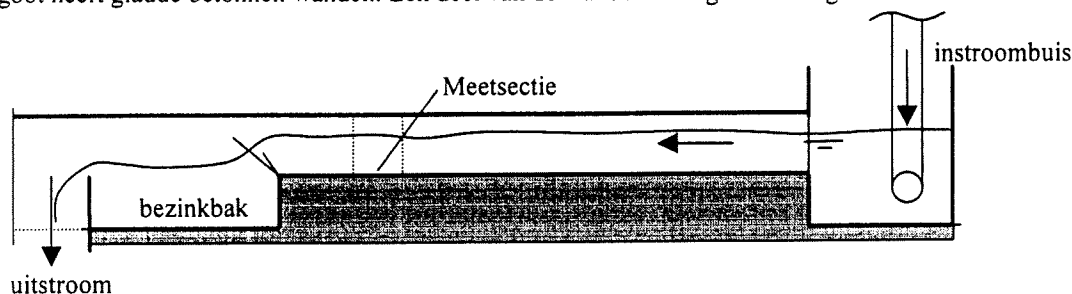
De experimenten zijn uitgevoerd in een stroomgoot in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de faculteit Civiele Techniek & Geowetenschappen van de Technische Universiteit te Delft.

De experimenten werden uitgevoerd in de zogenaamde "2-meter goot" in dit laboratorium. De benaming van 2 meter slaat op de breedte van deze goot.

De lengte van de goot bedraagt exclusief in- en uitstroombuizen zo'n 25 meter. In de goot kan een maximale waterstand van 40 cm worden gecreëerd.

Een overzicht van de goot is te vinden in Figuur 4.1 en Figuur 4.2; enkele foto's zijn te vinden in het rapport.

De goot heeft een vaste, niet kantelbare, horizontale betonnen bodem. Het eerste en laatste stuk van de goot heeft gladde betonnen wanden. Een deel van de wanden is uitgevoerd in glas.

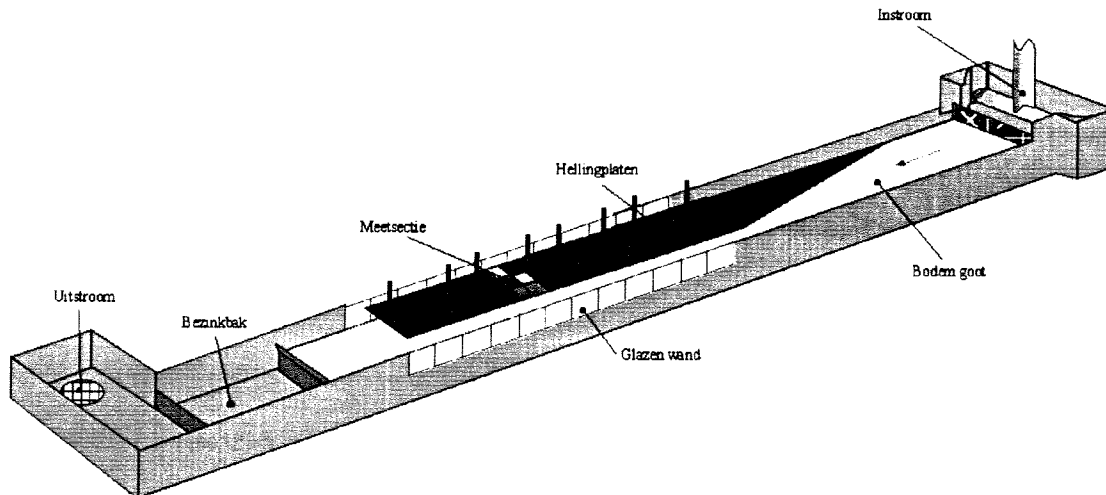


Figuur 4.1: Schematische tekening stroomgoot

## 4.2 De opbouw van de helling

De helling in de goot is geconstrueerd m.b.v. platen betonplex. Deze platen hadden een afmeting van 2.5 m × 1.25 m. Aan de rand van de goot zijn palen gemaakt waarop de platen op verschillende hoogten konden worden vastgemaakt. Op deze manier konden verschillende hellingshoeken verkregen worden.

Op deze platen zijn met behulp van lijm stenen geplakt. Deze stenen zijn in een laagdikte van ongeveer 1 steen aangebracht. Hiervoor zijn stenen genomen met gemiddeld gewicht van 7,53 gr. Meestal wordt voor de aanduiding van de grootte van stenen echter de  $D_{50}$  genomen (Zie ook paragraaf 4.3.4). Deze is gedefinieerd als de derdemachtswortel van het gewicht gedeeld door het soortelijk gewicht van de stenen. Deze bedroeg in dit geval  $(7,53 \text{ gr} / 2,575 \text{ gr/cm}^3)^{1/3} = 1.40 \text{ cm}$ . Hierdoor wordt een ruwheid verkregen die vrij groot is gezien de diepte van de stroming. Hierdoor zal de stroming zich hopelijk snel instellen naar een uniforme stroming. Een van de platen is iets verdiept aan gelegd, zodat het mogelijk was hierop een extra laag losse stenen te leggen die dan vrij konden verplaatsten. Deze plaat is zo'n 3 cm verdiept aangebracht. Op deze plaats werd de meetsectie (zie Figuur 4.1 en Figuur 4.2) geplaatst waar de steenverplaatsingen werden gemeten.



Figuur 4.2: Schematische 3D tekening stroomgoot

### 4.3 Kenmerkende gegevens van de gebruikte stenen

#### 4.3.1 Keuze stenen

Om de gewenste proeven uit te voeren moet een bepaald soort stenen gekozen worden, zodat in het model de werkelijkheid zo goed mogelijk wordt benaderd en de proeven in de goot kunnen worden uitgevoerd. Het moest dus mogelijk zijn steentransport te krijgen bij de stroomsnelheden die in de stroomgoot opgewekt kunnen worden.

De randvoorwaarden van de goot vereisen het gebruik van vrij kleine stenen, willen deze nog kunnen worden verplaatst door de stroming die in de goot kan worden verkregen.

De kleinste steen die in een schaalproef nog goed bruikbaar is, in verband met schaal-effecten, heeft een  $D_{50}$  van ongeveer 7 mm. Onder deze grootte verandert de stroming dusdanig dat de schaalproef geen goed beeld meer geeft van de werkelijkheid. De steen komt dan volledig te liggen in de viskeuze laag bij de bodem waar de stromingscondities wezenlijk anders zijn dan boven deze laag. In de Shields-grafiek is te zien dat de  $\psi$ -waarde bij stenen groter dan 7 mm een constante waarde bereikt. Hierboven treden geen veranderingen meer op in de manier waarop het water om de stenen stroomt en is de kritieke snelheid alleen nog maar afhankelijk van de steendiameter.

In het laboratorium waren een aantal verschillende maten stenen aanwezig. Van enkele steensorteringen is in eerste instantie grofweg de diameter bepaald. De stenen met de diameter het dichtste bij de 7 mm zijn toen gekozen om te gebruiken in de proeven. Deze stenen waren iets kleiner dan 7 mm, echter zo weinig dat ze toch nog gebruikt konden worden zonder schaalproblemen. De stenen van 6,3 mm bevinden zich al vrijwel in het horizontale deel van de Shieldsgrafiek.

#### 4.3.2 Verven stenen

Om de stenen te kunnen gebruiken voor het meten van steenverplaatsingen moesten zij onderling goed te onderscheiden zijn. Hiervoor zijn met behulp van kleurstof stenen in zes verschillende kleuren geverfd, buiten de basiskleur. Deze kleuren waren: wit, zwart, geel, groen, rood en blauw.

### 4.3.3 Soortelijk gewicht

Om het soortelijk gewicht van de stenen te bepalen zijn van zes keer 50 stenen het gewicht en het volume bepaald. (Zie Tabel 4.1). Dit werd gedaan bij de geveerde en gedroogde stenen die later zouden worden gebruikt in de proeven. Om het volume van de stenen te bepalen werd de volgende procedure gebruikt. Een hoeveelheid water van ongeveer 30 ml werd in een maatglas van 50 ml gedaan. De hoeveelheid water werd dan afgelezen. Vervolgens werden de stenen toegevoegd en werd het totale volume afgelezen. Hierbij werd er natuurlijk voor gezorgd dat de stenen volledig onder water stonden. Het volume aan stenen bedraagt dan het totale volume min het volume water.

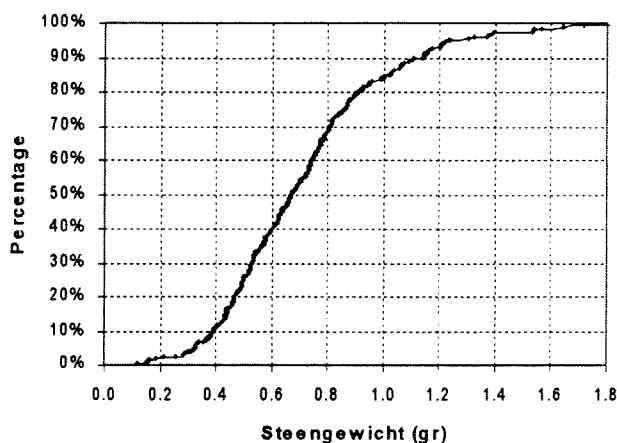
Proef	Volume zonder stenen	Volume met stenen (50 stuks)	Volume stenen (50 stuks)	Gewicht stenen (50 stuks)	Soortelijk gewicht
1	29,1 ml	42,6 ml	13,5 ml	35,260 gr	2612 kg/m <sup>3</sup>
2	29,5 ml	41,2 ml	11,7 ml	31,727 gr	2712 kg/m <sup>3</sup>
3	29,3 ml	42,0 ml	12,7 ml	32,936 gr	2593 kg/m <sup>3</sup>
4	29,3 ml	44,7 ml	15,4 ml	40,006 gr	2598 kg/m <sup>3</sup>
5	29,5 ml	44,1 ml	14,6 ml	38,014 gr	2604 kg/m <sup>3</sup>
6	29,9 ml	43,9 ml	14,0 ml	36,598 gr	2614 kg/m <sup>3</sup>

Tabel 4.1 : Meetgegevens soortelijk gewicht stenen

Het gemiddelde van het soortelijk gewicht van de stenen bedraagt: 2622 kg/m<sup>3</sup>  
De vaak gebruikte factor  $\Delta$  die vaak wordt gebruikt wordt dat gelijk aan: 1,62.

### 4.3.4 Steengrootte

Van 300 stenen is het gewicht bepaald. Hierdoor kan de gewichtskromme worden gemaakt zoals in Figuur 4.3.



Figuur 4.3: Gewichtskromme stenen

Uit deze grafiek kan dus  $W_{15}$ ,  $W_{50}$ ,  $W_{85}$  enz. worden bepaald. Hierbij is dan  $W_{15}$  dat steengewicht welk door 15% van de stenen onderschreden wordt.

Meestal wordt in formules echter niet gewerkt met het gewicht van een steen, maar met de afmeting van een steen. Om nu een steen van een bepaald gewicht om te rekenen naar een steen van een bepaalde diameter worden twee parameters gebruikt. De steengrootte van een equivalente kubus ( $D_K$ ) en die van een equivalente bol ( $D_B$ ). De  $D_K$  is de meest gebruikte en deze parameter zal dan ook verder worden aangehouden.

$D_K$  is gedefinieerd als de ribbe van een kubus die hetzelfde volume in zou nemen als de steen. De gemiddelde  $D_K$  van de stenen is dus de derdemachtswortel uit het volume.

Uit de figuur is af te lezen dat de  $W_{50}$  van de stenen gelijk is aan 0.674 gr. Met een dichtheid van 2622  $\text{kg/m}^3$  resulteert dat in een volume ( $V_{50}$ ) van  $2.57 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$

$$D_{k50} = \sqrt[3]{2.57 \cdot 10^{-7}} = 0.00635\text{m} = 6.35\text{mm} \quad (4.1)$$

**Wijdte**

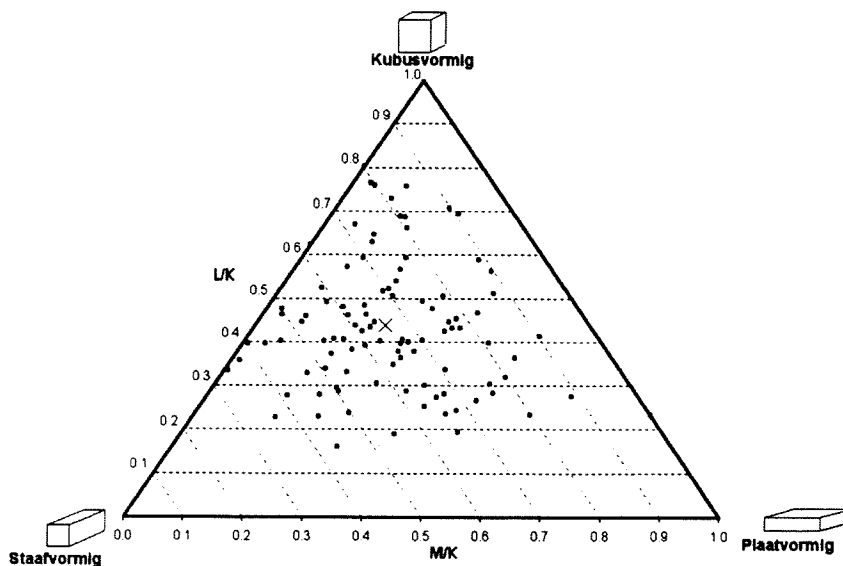
De wijdte van een verzameling stenen is een maat voor de spreiding van de steengroottes rond de gemiddelde waarde. De term wijdte wordt gebruikt omdat het een maat is voor de "breedte" van het histogram waarin alle steengewichten uit een sortering zijn uitgezet. Hoe kleiner de wijdte van een steengradering des te uniforme zijn de stenen van grootte. Bij een grootte waarde van de wijdte is er juiste een grote spreiding rond de mediaan van de verdeling. Deze is o.a. te definiëren als  $D_{85}/D_{15}$  wat equivalent is met  $\sqrt[3]{W_{85}/W_{15}}$

De  $W_{15}$  van de verdeling bedraagt 0.44 gr en de  $W_{85}$  1.03 gr, zodat de wijdte gelijk is aan 1.35 wat een vrij normale verdeling is voor steenklassen uit een steengroeve.

**4.3.5 Steenvorm**

De vorm van de stenen werd ook bepaald. Daartoe werd (op het oog) de langste as door het geschatte zwaartepunt genomen (L), de kortste as door het geschatte zwaartepunt (K), loodrecht op de langste, en de as loodrecht op deze twee (M). Deze maten werden gemeten met een schuifmaat en konden tot op tienden van millimeters worden afgelezen.

De verhoudingen tussen de langste as en de "middenas" (L/M) en de verhoudingen tussen de langste as en de kortse as (L/K) zijn uitgezet in Figuur 4.4. In dit diagram liggen de kubusvormige stenen bovenin, de plaatvormige stenen rechts-onderin en de staafvormige stenen links-onderin. De gemiddelde steen -aangegeven door een x- bleek een verhouding langste as:middenas:kortste as van ongeveer 2:1:1 te hebben. Overigens is de spreiding in vorm vrij groot.



Figuur 4.4 : Vorm van de gebruikte stenen



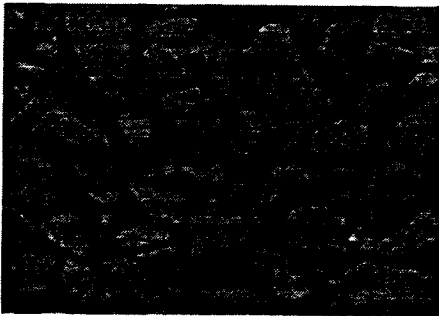
---

Uit deze gegevens kunnen ook de vormfactoren bepaald worden zoals die door vele onderzoekers gedefinieerd zijn. Een van deze factoren is bijvoorbeeld de factor zoals deze is gedefinieerd door Pilarczyk (1984).

$$S_f = \frac{K}{\sqrt{L \cdot M}} \quad (4.2)$$

Hierin is L, M en K respectievelijk de lengte van de langste, middelste en kortste as van de steen. De stenen hadden een gemiddelde vormfactor van 0.53 met een standaarddeviatie van 0.16.

Ook de oppervlaktestructuur van de stenen speelt een rol in de stabiliteit. Stenen met een ruw oppervlak hebben een hogere onderlinge wrijving dan gladde stenen. Dit kan vrijwel alleen op het oog worden geschat. De gebruikte stenen waren erg ruw qua oppervlakte.



Figuur 4.5: Foto van de gebruikte stenen

#### 4.3.6 Hoek van natuurlijk talud.

Voor het bepalen van de correctiefactor voor een steenhelling wordt gebruik gemaakt van de hoek van natuurlijk talud. Dit is de hoek ten opzichte van de horizontaal waarbij een helling van de stenen nog juist stabiel is.

Deze helling werd in proeven bepaald. Een van de platen die gebruikt werden bij het experiment met een laag stenen vastgeplakt op de plaat werd hiervoor gebruikt. De plaat werd, net als bij de eigenlijke experimenten, volgelegd met een laag stenen van ongeveer  $2 \cdot D_{50}$  dik. De plaat werd vervolgens steeds steiler gezet. De hoek met de horizontaal werd opgenomen op het punt dat de helling volledig en progressief faalde. Dit is het punt waarop niet alleen enkele stenen naar beneden rollen maar vrijwel alle stenen omlaag komen en er een nieuwe, veel flauwere helling gevormd wordt. De procedure werd 30 maal herhaald. (Zie bijlage II)

Als aangenomen wordt dat de waarden normaal verdeeld zijn kan ook een foutschatting gedaan worden.

Omdat maar een beperkt aantal metingen is gedaan moet de Z-waarde voor het 95% interval uit de Student-t verdeling worden gehaald. Deze is voor 30 tests gelijk aan 2.042 maal de standaarddeviatie.

Hier is het 95% betrouwbaarheidsinterval aangehouden. De hoek van natuurlijk talud van deze stenen bleekt  $46.2^\circ \pm 5.7^\circ$  te zijn.

Deze vrij hoge waarde kan worden verklaard door het hoekige karakter van de gebruikte stenen. Ook is mogelijk de beperkte laagdikte van de helling van invloed op de gevonden waarde. Hierdoor is een glijcirkel die meestal de oorzaak is van het falen van een helling niet mogelijk. Hierdoor wordt mogelijk een hogere waarde gevonden dan bij een berg stenen.

## 4.4 Meetapparatuur

### 4.4.1 De ElektroMagnetische Snelheidsmeter (EMS)

De EMS werkt volgens de wet van Faraday over elektromagnetische inductie. Deze wet zegt dat elk geleidend medium dat door een magnetische veld verplaatst een stroom opwekt. Bij de EMS is het water het geleidende medium en wordt het magnetisch veld opgewekt door een elektromagneet in de meter. De stroom die vervolgens ontstaat wordt door de EMS gemeten.

$$V = C_1 \cdot B \cdot L \cdot \bar{u} \quad (4.3)$$

waarin:

$V$  : opgewekte spanning in volt (V)

$C_1$  : constante

$B$  : magnetische inductie in tesla ( $T = \text{Wb m}^{-2} = \text{V s m}^{-2}$ )

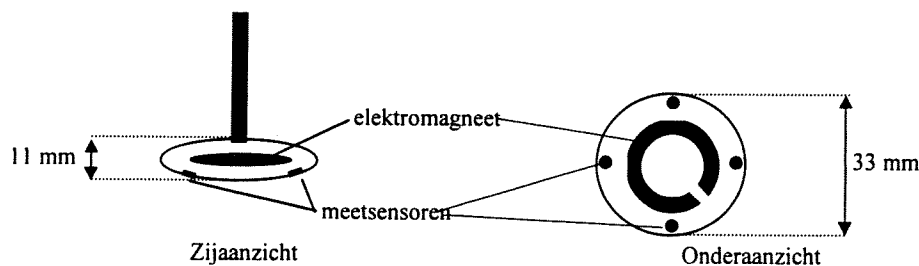
$L$  : weglengte waarover spanning gemeten wordt in meters (m)

$\bar{u}$  : gemiddelde watersnelheid in meter per seconde ( $\text{m s}^{-1}$ )

Het verband tussen snelheid en voltage is dus volstrekt lineair. Als de weglengte alsmede het magnetisch veld constant wordt gehouden reduceert de vergelijking tot:

$$V = C_2 \cdot \bar{u} \quad (4.4)$$

De snelheidsmeter beschikt over twee meetbereiken. Een bereik tot 1 m/s en een bereik tot 5 m/s. De constante  $C_2$  had in het 1 m/s bereik een waarde van 0.1 en in het 5 m/s bereik een waarde 0.5.

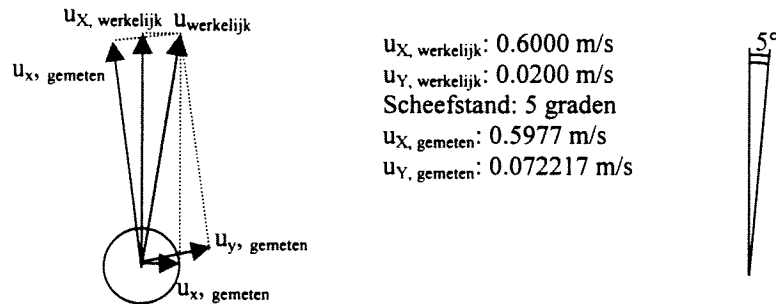


Figuur 4.6: Schematische tekening EMS

De fout in de EMS-meter is afhankelijk van het gebruikte meetbereik. De fout is in de orde van 1% van de volle schaal uitslag. Dit betekent dat bij de meters zoals deze zijn gebruikt de snelheden tot 1 m/s kunnen worden gemeten met een nauwkeurigheid van 1 cm/s. Bij snelheden boven de 1 m/s moet met 5 m/s meetbereik worden gebruikt en kan de fout oplopen tot 5 cm/s. Dit betekent in de praktijk dat deze fout al van belang is bij een tijdsgemiddelde snelheid van meer dan ongeveer 0.8 m/s omdat bij deze tijdsgemiddelde snelheid de snelheidspieken al boven de 1 m/s uitkomen en dus naar het hogere meetbereik moet worden omgeschakeld.

De verdere specificaties van de EMS zijn opgenomen in de bijlagen.

Bij het meten van snelheden in de y-richting met de EMS ontstaan wat problemen. Al bij een kleine scheefstand van de meter t.o.v. de richting waarin men de snelheid wil meten kunnen problemen ontstaan. Als de snelheid in x-richting veel groter is dan de snelheid in y-richting wordt dan een fout geïntroduceerd omdat een deel van de x-snelheid dan gezien wordt als een snelheid in (vermeende) y-richting. Hierdoor is het erg lastig om bijv. kleine secundaire stromingen te meten.

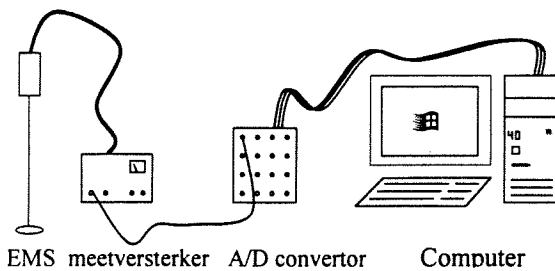


Figuur 4.7 : Gemeten met werkelijke snelheden bij EMS-meter

In Figuur 4.7 is dit nog eens grafisch uitgezet voor een geval dat representatief is voor de situaties zoals deze optreden. Bij een dergelijk reëel geval kan de gemeten snelheid in de y-richting al gemakkelijk een factor 3 afwijken van de werkelijke snelheid in y-richting

#### Data-acquisitie

Het opslaan van de gegevens van de EMS in de computer is gedaan met behulp van een analoog/digitaal converter en het computerprogramma DasyLab. In dit programma kan de data die wordt verkregen, worden verwerkt/bewerkt en opgeslagen.



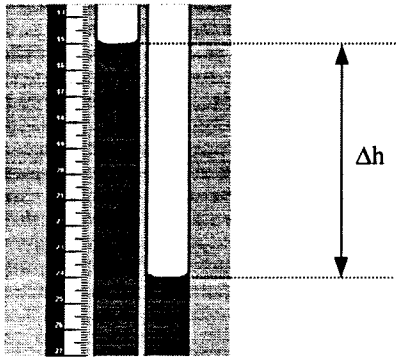
Figuur 4.8 : Data van EMS naar computer

In DasyLab is een programma geschreven, zodat niet alleen de ruwe meetwaarden, maar ook meteen de gemiddelde waarde en de standaarddeviatie van het signaal werden berekend en opgeslagen. Op die manier kon een snelere bewerking van de gegevens plaatsvinden.

#### 4.4.2 Drijvers

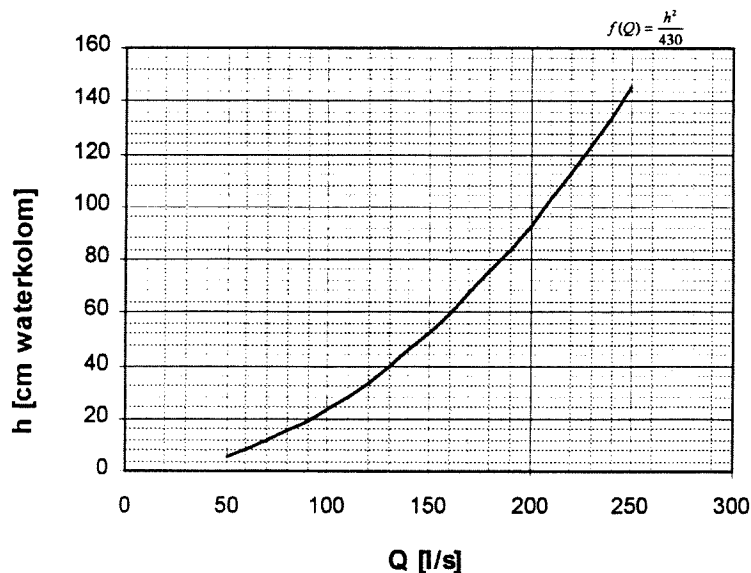
Om de snelheid in de goot te vergelijken met de waarden door de EMS gegeven, is gebruik gemaakt van drijvers. Dit waren houten oranje geverfde bollen van 4 cm doorsnede. Hiermee kon de watersnelheid aan het oppervlak worden gemeten.

4.4.3 Debietmeter



Figuur 4.9: Manometer (aflezing)

Het debiet door de stroomgoot is gemeten met behulp van een drukverschilmeter in de aanvoerbuis, een zogenaamde meetflens. Voor en na de meetflens liep een waterbuis naar buiten. De buizen waren naast elkaar op een paal gebonden en bovenin met elkaar verbonden zodat in beide buizen dezelfde luchtdruk heerste. Door het verschil in stijghoogte tussen de twee buizen af te lezen kan het debiet bepaald worden volgens Figuur 4.10. Dit aflezen kon met een nauwkeurigheid van ongeveer plus of min 0.5 centimeter in elke buis doordat de waterspiegel in de buizen enigszins fluctueerde.



Figuur 4.10: Verband tussen drukverval en debiet van de gebruikte meetflens (ijkgrafiek)

4.4.4 Overige meetinstrumenten

Verder is bij de experimenten nog gebruik gemaakt van verschillende meetinstrumenten, die geen verdere uitleg behoeven. De meetinstrumenten die verder zijn gebruikt waren:

- Stopwatch
- Meetlint
- Maatbekers
- Weegschaal
- Schuifmaat
- Kompas

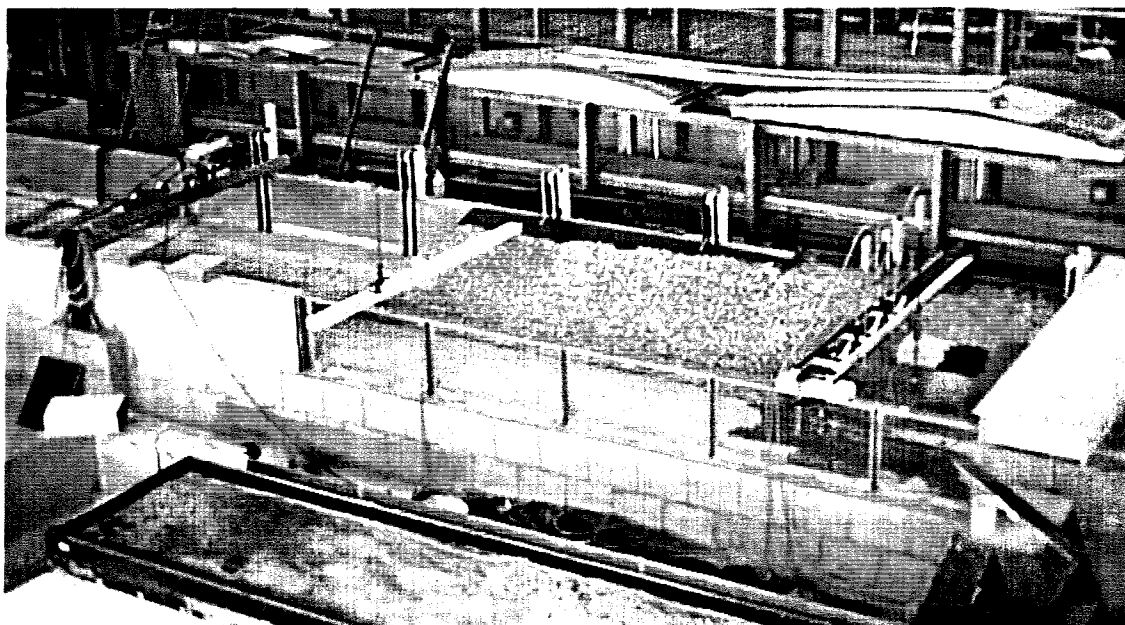
## 4.5 Proefmetingen

Om te controleren of alle meetapparatuur naar behoren functioneerde en of het stroombeeld in de goot aan de eis voldeed dat de stroming ter plaatse van de meetsectie nagenoeg uniform was geworden is voorafgaande aan de "echte" metingen een aantal testen uitgevoerd. De eis dat de stroming nagenoeg uniform moet zijn houdt in dat er geen instromingseffecten meer zijn ter plaatse van de meetsectie.

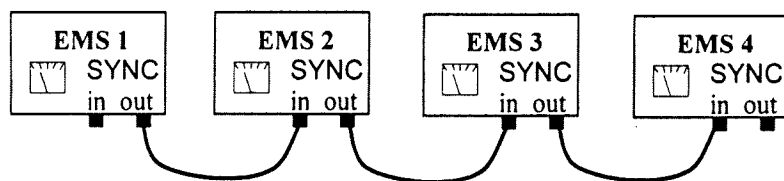
### 4.5.1 Instellen EMS-en

Een van die testen omvatte de ijking van de EMS-en. Deze zijn o.a. in stilstaande water getest om de stabiliteit te controleren. In het begin bleek dat de EMS-en ook in stilstaand water grote fluctuaties lieten zien.

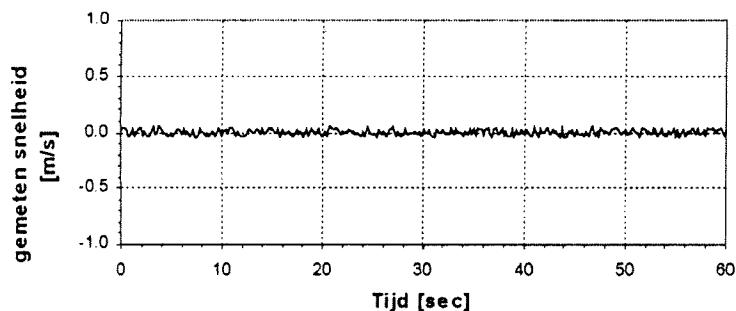
Er bleek dat de schommelingen te maken hadden met de onderlinge plaatsing van de meters. Dit bleek een vorm van interferentie tussen de verschillende meters te zijn. Bij navraag bleek dat de meters op dezelfde veldfrequentie moesten worden gezet om deze interferentie op te heffen. Nadat de meters m.b.v. kabels gesynchroniseerd waren volgens Figuur 4.11 waren deze problemen opgelost.



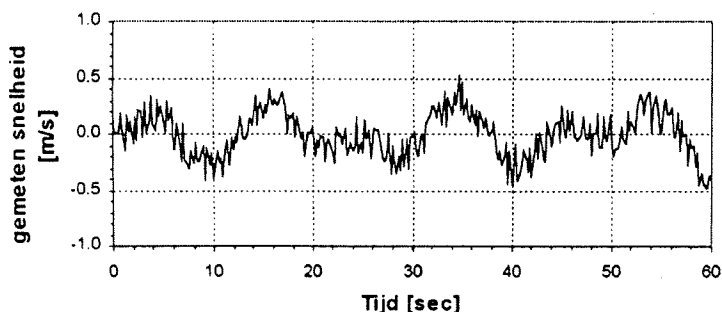
Overzicht uitstroomzijde goot



Figuur 4.11 : Synchronisatie EMS



Figuur 4.12: Signaal bij gesynchroniseerde meters

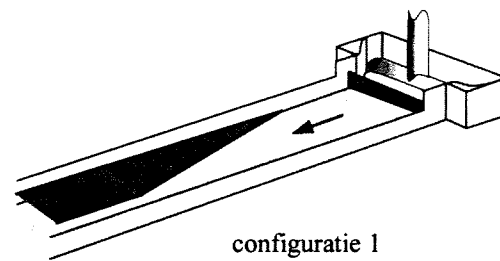
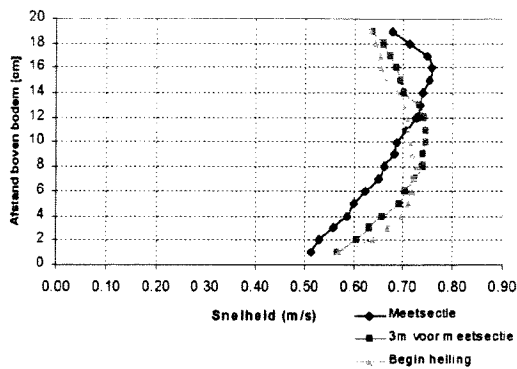


Figuur 4.13: Signaal bij niet-gesynchroniseerde meters

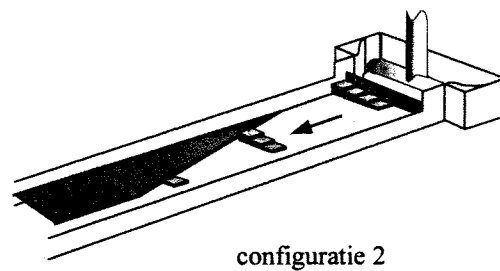
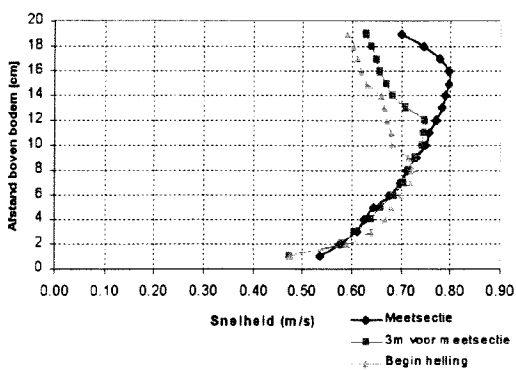
De EMS-en zijn echter wel gevoelig gebleken voor tal van omgevingsfactoren waarvan het wel of niet branden van de lampen in het laboratorium wel een van de opmerkelijkste was. Deze effecten waren echter klein genoeg om de metingen niet wezenlijk te storen.

#### 4.5.2 Testen stroming in meetsectie op uniformiteit

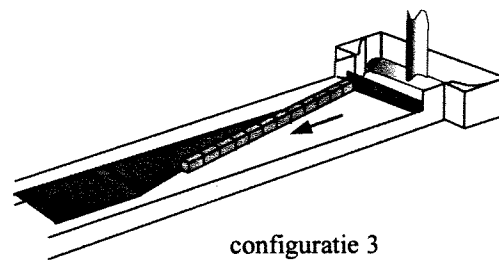
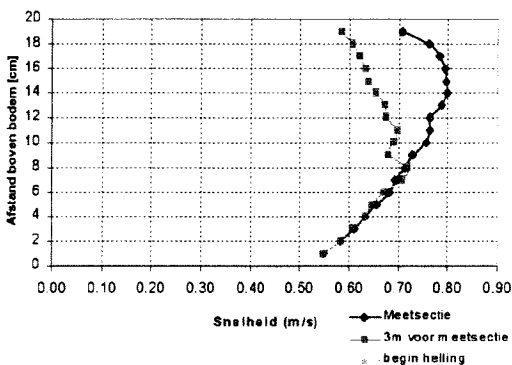
Om de overgang van de rechthoekige instroom naar het profiel met de helling zo soepel mogelijk te laten verlopen, zijn steenblokken geplaatst op deze overgang. Verschillende configuraties zijn geprobeerd om ter plaatse van de meetsectie de stroming zo goed mogelijk uniform te krijgen. Deze verschillende configuraties bestonden uit het op verschillende manieren plaatsen van een aantal blokken om de stroming te geleiden. Bij de verschillende configuraties is het snelheidsprofiel aan het begin van de helling, 3 meter voor de meetsectie en ter plaatse van de meetsectie bepaald. (Zie Figuur 4.14 t/m Figuur 4.16). De metingen werden gedaan in het midden van de "hoofdstroom". Dat wil zeggen in het midden van het deel waar de bodem vlak was.



Figuur 4.14 : Snelheidsprofielen bij configuratie 1



Figuur 4.15 : Snelheidsprofielen bij configuratie 2



Figuur 4.16 : Snelheidsprofielen bij configuratie 3

In de linker figuren zijn de snelheden te zien zoals deze zijn gemeten op verschillende plaatsen. Bij configuratie 3 was de meting aan het begin van de helling onjuist, waardoor deze niet in de figuur is opgenomen. In de rechter figuren is te zien bij welke configuratie van de instroming die gemeten is. Bij configuratie 1 waren er geen obstakels geplaatst tussen de instroming aan het begin van de goot en het begin van de helling. De overgang was wel, evenals in de andere configuratie, zo soepel mogelijk met een tetraëder-vormige "wig" van stenen. Bij configuratie 2 waren er stenen op de bodem gelegd die grofweg het profiel van de helling volgden. Bij configuratie 3 was er een muur geplaatst die de stroming in een nauwer profiel dwong.

Besloten werd om verder te meten met "configuratie 2", omdat hier de snelheidsprofielen in de meetsectie en die 3 meter voor de meetsectie het best overeen kwamen. Ondanks dat blijkt nog

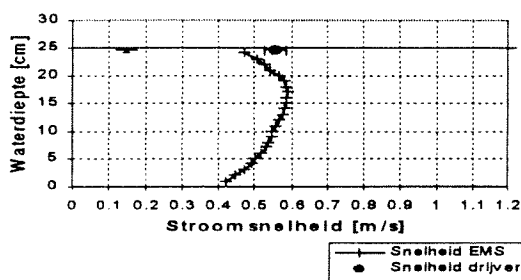
niet een geheel stationaire stroming was bereikt zijn de snelheidsprofiel daar, zeker aan de bodem, vrijwel gelijk.

#### 4.5.3 Verticaal snelheidsprofiel

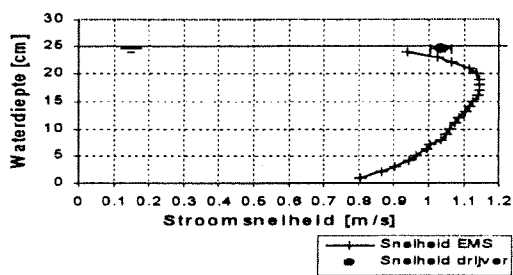
Al snel werd duidelijk dat het snelheidsprofiel dat in de goot werd gemeten een wat vreemd karakter had. In de onderste helft van het profiel werd het theoretische logaritmische snelheidsprofiel nog redelijk gevolgd. Hierboven begint het snelheidsprofiel echter een vreemde terugbuiging te vertonen. Er kunnen verschillende oorzaken voor dit effect zijn.

1. Doordat overgegaan wordt van een rechthoekig profiel in de goot naar een trapeziumvormig met het smalste deel onderin ten gevolg van de helling, wordt het water in de onderste laag gedwongen in een nauwere breedte te gaan stromen. Door de onsamendrukbaarheid van water is dit alleen mogelijk door een snellere stroming of door een uitwisseling van energie met de andere lagen. Door de grote turbulentie bij de stroomsnelheden waarbij werd gemeten en door de redelijke lengte van het begin van de helling tot de meetsectie (11 m) lijkt er voldoende gelegenheid voor de stroming om zich aan het "nieuwe" profiel aan te passen. Bovendien trad het effect ook op bij de proeven met de horizontale bodem zoals later bleek. Dit effect is dus niet alleen verantwoordelijk voor het vreemde snelheidsprofiel.
2. Een effect dat geen fysische basis heeft maar veroorzaakt wordt doordat de snelheidsmeters niet de juiste waarden geven dicht aan het oppervlak. Het effect treedt echter op tot zo'n diepte dat dit niet erg waarschijnlijk wordt geacht.
3. De stroming in de goot is niet in evenwicht. Doordat de bodem volkomen horizontaal is lopen waterspiegel en bodem niet evenwijdig. Er ontstaat een verhanglijn door de gehele stroomgoot. Mogelijk dat dit ook een beperkt effect heeft.
4. Wellicht dat de ontwikkelingslengte voor de stroming om een uniforme situatie te bereiken, van het begin van de goot tot de meetsectie, nog niet voldoende lang was. Dit lijkt bevestigd te worden door het feit dat het er in Figuur 4.15 op lijkt dat de stroming zich nog aan het aanpassen is. In ieder geval is dit het geval van 3 meter voor de meetsectie tot de meetsectie zelf. Het is aannemelijk dat de stroming daar nog niet geheel een uniforme toestand bereikt heeft. Overigens een uniforme stroming is ook niet mogelijk door het vermeldde in punt 3.
5. Mogelijk zit er een secundaire stroming in de goot. Dat wil zeggen een rotatie in de stroming loodrecht op de stroomrichting. Zo'n secundaire stroming wordt vaker waargenomen en kan uit een of meerder cellen bestaan.

Om te controleren of het effect dat werd gemeten nu wel "echt" was, of een effect dat alleen ontstond door het gebruik van de snelheidsmeters is een aantal metingen met drijvers uitgevoerd. In Figuur 4.17 is te zien wat bij twee verschillende situaties de snelheid was die werd gemeten met de EMS-en en met drijvers. De terugbuiging in het snelheidsprofiel lijkt echt op te treden, echter de metingen met de drijvers geven aan dat het effect waarschijnlijk minder extreem is dan de EMS-waarden doen vermoeden. En was helaas geen mogelijkheid om de hele verticaal nog eens met een ander meetinstrument door te meten, zodat de reden van deze vorm van het snelheidsprofiel niet met zekerheid vastgesteld kon worden.



Figuur 4.17a: Snelheden bij helling 1:2,5,  $Q=0.120\text{m}^3/\text{s}$

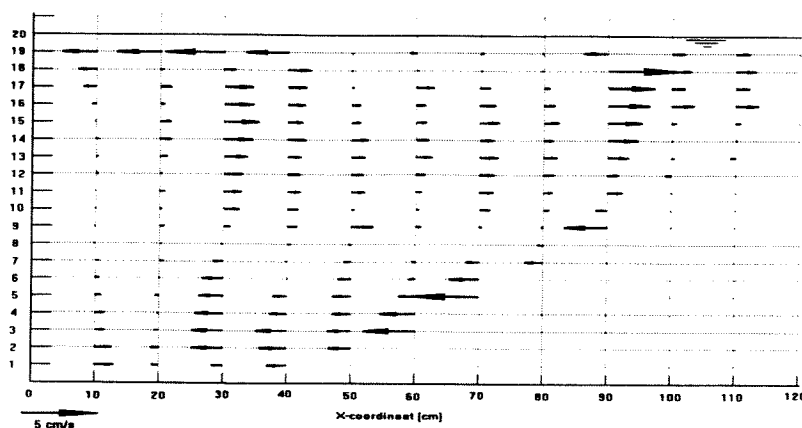


Figuur 4.17b: Snelheden bij helling 1:2,5,  $Q=0.220\text{m}^3$



Tijdens de snelheidsmetingen in de goot werden ook de snelheden in y-richting gemeten. Hierdoor kan worden gekeken of er eventueel een secundaire stroming in de goot aanwezig is. Bij meting in y-richting krijgt men wel te maken met het effect genoemd in paragraaf 4.4.1 dat de EMS meter een deel van de snelheid in x-richting aan zien als zij niet perfect loodrecht staat op de stroomrichting. Omdat de meter nooit helemaal exact goed gepositioneerd zullen staan moet men rekening houden met dit effect. Men kan echter wel aannemen dat in dwarsrichting de gemiddelde snelheid over de gehele verticaal vrijwel nul zal zijn. Ook was met behulp van aan het water toegevoegde kleurstof al geconcludeerd dat de secundaire stroming nooit erg groot kon zijn aangezien zij met die methode niet kon worden aangetoond. In Figuur 4.18 is te zien dat er een kleine secundaire stroming aanwezig is met de klok mee als men in de richting van de stroming kijkt. De meetwaarden van de snelheid in y-richting zijn hiervoor gemiddeld over de verticaal. De afwijking van de snelheden in y-richting ten opzichte van de verticaal gemiddelde snelheid in y-richting zijn hier uitgezet.

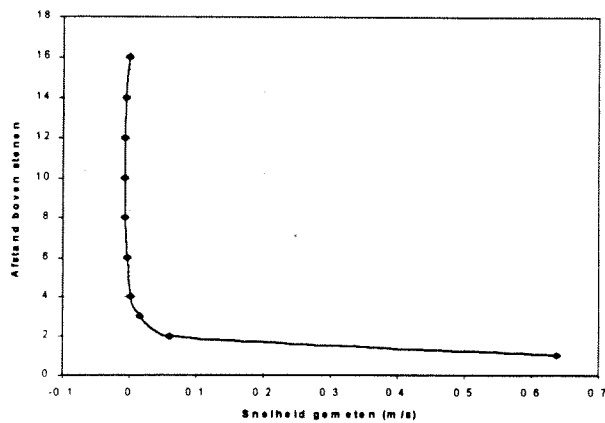
De secundaire stroming is overigens vrij klein (max zo'n 5 cm/s). Of deze stroming in haar geheel verantwoordelijk kan worden gesteld voor de afwijkingen in het verticale snelheidsprofiel is onzeker.



Figuur 4.18: Snelheden in dwarsrichting bij helling 1:4,5,  $Q=0.125 \text{ m}^3/\text{s}$

#### 4.5.4 Invloed stenen op snelheidsmetingen

Van de EMS was bekend dat wanden en voorwerpen in de buurt van de meter invloed konden hebben op de werking van de meter. Daarom is in stilstaand water een aantal proeven uitgevoerd om te kijken hoe sterk deze beïnvloeding was. In stilstaand water is de EMS op nul gesteld op 10 cm boven de bodem. Vervolgens is de tijdsgemiddelde snelheid die de EMS aangaf op verschillende punten in de verticaal gemeten. In Figuur 4.19 is hiervan het resultaat te zien. Als de EMS dichter dan ongeveer 4 cm in de buurt van de stenen komt gaat deze een steeds grotere afwijking vertonen. Op de gladde betonnen bodem trad dit effect niet op. De afwijking kan verklaard worden uit het feit dat het magnetisch veld om de EMS-en wordt verstoord. Waarom het effect op de gladde bodem niet optrad en boven stenen wel is niet geheel duidelijk. Het feit dat de stenen met zeer onregelmatig patroon inbreuk maken op het magnetisch veld van de EMS kan een reden zijn. De stenen hadden zelf geen magnetische eigenschappen wat met behulp van een kompas is vastgesteld. De kompasnaald vertoonde geen enkele afwijking als deze in de buurt van de stenen werd gehouden.



Figuur 4.19: Afwijking EMS in nabijheid stenen (metingen in stilstaand water)

### 4.5.5 Aanpassing talud

Bij de allereerste metingen werd duidelijk dat veel stenen aan de teen meegenomen werden over de glatte bodem. Omdat dit geen indicatie is van instabiliteit van de stenen maar meer van 'geen steun' is dit een effect dat men wil voorkomen. Hierom werd bij de teen van het talud een smalle strook stenen vastgeplakt om zo steun te kunnen verlenen aan de bovenliggende stenen.

# Hoofdstuk 5: Metingen

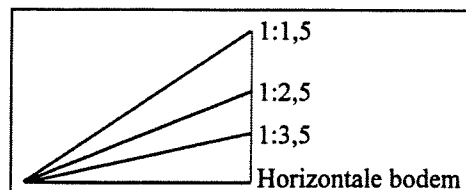
## 5.1 Meetprogramma

In deze paragraaf wordt het meetprogramma gegeven zoals dit is opgesteld. Tevens worden enkele keuzes verklaard of toegelicht.

### Keuze hellingen

Zoals ook al in Hoofdstuk 3 is gemeld, is ervoor gekozen experimenten te gaan doen bij een aantal verschillende hellingen. De gekozen hellingen worden hier nog eenmaal herhaald, omdat zij natuurlijk een zeer belangrijke factor zijn in het meetprogramma. De hellingen zijn zo gekozen dat zij het hele spectrum van zeer flauw tot zeer steil omvatten. Natuurlijk werden ook proeven gedaan op een horizontale bodem als referentie voor de andere proeven. Al met al werden er tests uitgevoerd bij de volgende hellingen:

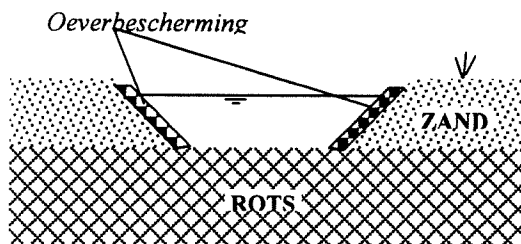
- 1:∞            horizontale bodem
- 1:3,5         redelijk flauwe helling
- 1:2,5         normale helling in de civiele praktijk
- 1:1,5         extreem steile helling voor stortsteen



In het begin zijn er wat proeven gedaan met een helling 1:4,5. Er is later besloten om deze helling uit het meetprogramma te halen. Dit omdat deze helling eigenlijk nooit in de praktijk wordt toegepast bij oeverbeschermingen en de verwachte hellingscorrectie zo klein was dat het de vraag was of deze helling wel genoeg zou afwijken van de situatie met een horizontale bodem om interessant genoeg te zijn

### Keuze gladde bodem

De meeste metingen zijn uitgevoerd zonder stenen op de bodem van de goot. De meetgoot bestond dus uit de horizontale betonnen bodem van de goot en de hellingplaten met stenen. Hierdoor ontstaat dus een andere ruwheid op het horizontale deel van het profiel en de helling. Hierdoor wordt een extra complicerende factor aan het stroombeeld toegevoegd. Toch is deze configuratie representatief voor bepaalde situaties die in de praktijk voorkomen. Bijvoorbeeld de situatie waarin een oeververdediging wordt aangebracht in een rivier. De oever zal dan bij het gebruik van een steenbestorting worden voorzien van tamelijk grote stenen, terwijl de bodem van de rivier vaak uit zand of grind bestaat. Een ander voorbeeld waarin de oevers een geheel andere wrijvingsweerstand kunnen hebben is het geval waarin een kanaal wordt uitgegraven in een gelaagde ondergrond. Als het bovenste gedeelte van de grond uit zand, klei of een ander zacht materiaal bestaat, zal deze relatief eenvoudig kunnen worden uitgegraven. Als onder deze laag een rotsbodem ligt zal men, als dit niet per se nodig is, niet verder graven en zal de bovenkant van de rotsbodem dienen als bodem van het kanaal.



Figuur 5.1: Ingegraven kanaal op rotsbodem

## Hoofdstuk 5: Metingen

In de volgende tabel staan de metingen aangegeven zoals deze zijn uitgevoerd, met de paragraaf waarin deze situaties worden behandeld.

	Bodem naast getest deel	Breedte goot	Waterdiepte [m]	Debiet [m <sup>3</sup> /s]	Doel	§	
<b>Proefmetingen (helling 1:4,5)</b>	glad beton	geen beperking (2,0 m)	0,20	Divers	Testen instroom / uniforme stroming	4.5.2	
					Bekijken secundaire stroming	4.5.3	
					Bekijken invloed van stenen op EMS-en	4.5.4	
<b>Helling 1:1,5</b>	glad beton	geen beperking (2,0 m)	0,25	Divers	Meten verplaatsingen stenen	5.3	
					0,150		Snelheidmeting
					0,221		Snelheidmeting
<b>Helling 1:2,5</b>	glad beton	geen beperking (2,0 m)	0,25	Divers	Meten verplaatsingen stenen	5.4	
					0,120		Snelheidmeting
					0,220		Snelheidmeting
<b>Helling 1:3,5</b>	glad beton	geen beperking (2,0 m)	0,25	Divers	Meten verplaatsingen stenen	5.5	
					0,080		Snelheidmeting
<b>Horizontale bodem</b>	glad beton	geen beperking (2,0 m)	0,25	Divers	Meten verplaatsingen stenen	5.6.1	
					0,183		Snelheidmeting
	glad beton	versmald (1,6 m)	0,25	Divers	Meten verplaatsingen stenen	5.6.2	
					0,150		Snelheidmeting
	stenen	versmald (1,6 m)	0,25	Divers	Meten verplaatsingen stenen	5.6.3	
					0,105		Snelheidmeting

Tabel 5.1: Meetseries

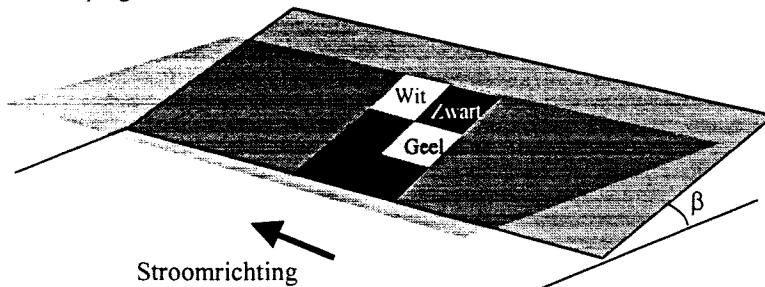
## 5.2 Meetserie per experiment

### 5.2.1 Metingen verplaatste stenen

De proeven worden per helling uitgevoerd.

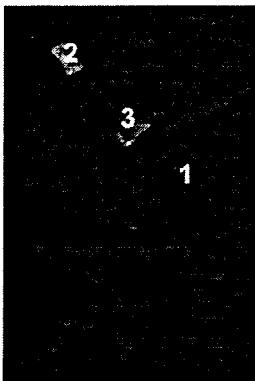
Bij een waarde van de zijhelling wordt het stenenpatroon op de helling gelegd. Hierbij wordt een patroon van in totaal 6 kleuren stenen gelegd. (Zie Figuur 5.2)

De gekleurde vakken hadden afmetingen van 20 cm × 20 cm, behalve bij hellingen waar de gekleurde stenen dan boven de waterspiegel zouden uitkomen. Hier werden alle kleuren in één richting zoveel kleiner gemaakt dat de gekleurde stenen precies het gebied van de teen van het talud tot de waterspiegel omvatten.



Figuur 5.2: Steenpatroon

Vervolgens wordt de snelheid langzaam opgevoerd van een waarde van  $\psi$  een waarde van ongeveer 0.02 (bij deze waarde verwacht men nog geen beweging) naar het punt waarop er zoveel stenen verplaatsten dat het aantal niet goed meer te bepalen viel of dat andere eigenschappen van de goot bepaalden dat er niet harder gestroomd kon worden (maximale afvoer of aanvoer bereikt).



Per snelheid wordt om het half uur gekeken naar de hoeveelheid stenen die verplaatst is. Deze stenen werden verzameld om later geteld te worden. Omdat het op de grens van twee kleuren, of op de grens van de gekleurde stenen en de grijze stenen, moeilijk te bepalen is welke stenen nu wel verplaatst zijn en welke niet, is hiervoor het volgende criterium genomen. Stenen die nog “verbonden” zijn via andere stenen met hun gekleurde veld worden NIET meegeteld. Alleen stenen die helemaal los van het gekleurde veld zijn worden geteld. Om dit nog wat duidelijker te maken is Figuur 5.3 opgenomen. Steen nummer 1 wordt dus NIET meegeteld, hoewel deze toch iets opgeschoven is, Steen 2 en steen 3 (in de foto kunstmatig lichter gekleurd) worden WEL geteld.

Figuur 5.3: Verplaatste stenen

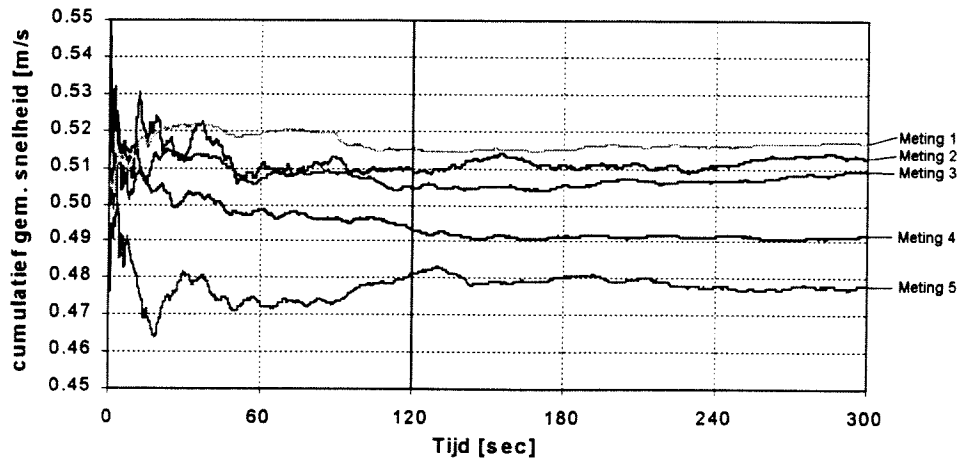
### 5.2.2 Snelheidsmetingen

Bij twee snelheden werden nauwkeurig de stroomsnelheden over een doorsnede loodrecht op de stromingsrichting bepaald. Uit deze metingen konden ook de relatieve turbulentie-intensiteiten worden bepaald. Dit gebeurde eenmaal bij een snelheid waarbij de stenen beginnen te bewegen en eenmaal een stuk hieronder. Ook werd de snelheid gecontroleerd met drijvers, en werd de snelheid aan de teen van het talud op 3 meter voor en drie meter achter de meetsectie gemeten.

De snelheden in de goot zijn bij de verschillende hellingen gemeten. Voor alle hellingen éénmaal bij die snelheid waarbij de gemiddelde stroomsnelheid bij de teen van het talud op de halve waterdiepte gelijk was aan 0,50 m/s. De plaats van deze meting is gekozen omdat dit een eenduidige plaats is voor alle hellingen. Deze snelheid is gekozen omdat bij deze snelheid er nog net geen stenen verplaatsten. Vervolgens werden ook nog voor enkele hellingen de snelheden gemeten bij dat debiet waarbij ongeveer 40 stenen per half uur verplaatsten.

Bij de snelheden waarbij het snelheidsprofiel over de breedte van de goot bepaald is, is gemeten in een grid waarbij verticaal om de centimeter werd gemeten en horizontaal om de 10 cm. De snelheden werden met behulp van drie EMS-en gemeten. Elke verticaal werd van boven naar beneden doorgemeten.

De snelheid werd gedurende twee minuten gemeten. Deze tijd is wat kort in vergelijking met wat gebruikelijk is bij dergelijke metingen maar leek zeker acceptabel aangezien de gemiddelde snelheden na deze twee minuten niet meer dan 0,5 cm/s veranderden. Het voordeel van deze kortere meetduur was dat in meer meetpunten kon worden gemeten. In Figuur 5.4 is de gemiddelde stroomsnelheid uitgezet die bereikt wordt na een bepaalde tijd meten voor 5 metingen.

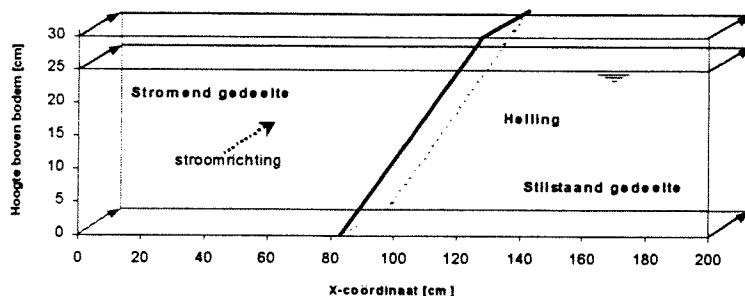


Figuur 5.4: Gemiddelde stroomsnelheid bij een bepaalde meetduur

### 5.2.3 Meting relatieve turbulentie-intensiteit

De relatieve turbulentie-intensiteit hoeft niet apart te worden gemeten maar kan rechtstreeks uit de snelheidsmetingen worden bepaald. Omdat de metingen maar met een frequentie van 5 Hz uitgevoerd zijn, kan niet gekeken worden naar echte turbulentie. Dat wil zeggen, naar die turbulente wervels waar energiedissipatie plaatsvindt van wervels naar warmte. Om toch een indruk te krijgen zal de standaarddeviatie moeten dienen als een maat voor de hoeveelheid turbulentie in de stroming.

### 5.3 Experiment Helling 1:1,5



Figuur 5.5 : Opbouw van de helling 1:1,5

In Figuur 5.5 is te zien hoe de helling 1:1,5 was gesitueerd in de goot. De figuur is een dwarsdoorsnede van de goot met hieraan een klein ruimtelijk effect toegevoegd om een betere indruk van de situatie te kunnen krijgen. De hoogte is overdreven ten opzichte van de breedte. De sectie is opgedeeld in twee stukken, het "stromende gedeelte" en het "stilstaande gedeelte". Dit laatste houdt in dat het water onder de hellingsplaten niet stroomt en dus ook niet bijdraagt aan het debiet. Dit is tijdens de proeven ook gecontroleerd door kleurstof in het water onder de hellingsplaten te spuiten. Het bleek dat het water onder de platen inderdaad nauwelijks stroomde. De stroomrichting van het water is in de figuur van voor naar achter. De teen van het talud bevond zich ongeveer 83 cm van de wand van de goot.

#### 5.3.1 Verplaatsing stenen

De metingen met de helling 1:1,5 zijn opgenomen in Tabel 5.2. Dezelfde data is ook nog eens grafisch afgebeeld in Figuur 5.6. De hellingshoek van het talud bedraagt bij deze helling  $34^\circ$ . Ondanks dat deze hoek nog zo'n  $10^\circ$  verwijderd is van de hoek van natuurlijk talud van de stenen, was bij het neerleggen geconstateerd dat deze eerder de neiging hadden omlaag te rollen.

De proef werd uitgevoerd in twee series waarbij binnen een serie van proef tot proef de stroomsnelheid steeds licht opgevoerd werd. Bij proef 1501 is de snelheid maar gedurende 2 minuten gemeten, in plaats van over de volle 30 minuten die de proef duurt, vanwege een verkeerde instelling van de snelheidsmeters. Dit is echter op de gemiddelde stroomsnelheid die wordt gevonden nauwelijks van invloed (Zie ook paragraaf 5.2.2)

## Hoofdstuk 5: Metingen

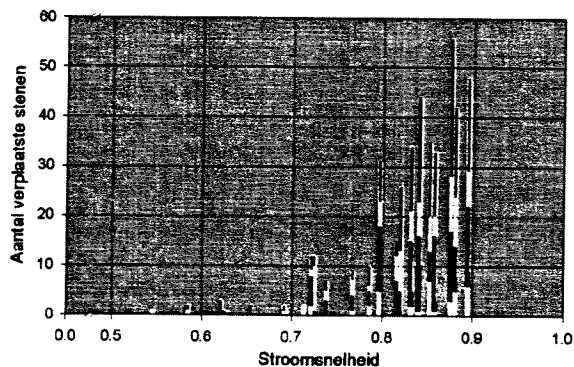
**Helling: 1:1,5**

Meetduur: 30 min

x-coördinaat teen: 0,83 m

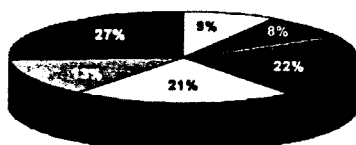
Proef	Serie	U teen, ¼h		Q	Aantal stenen verplaatst (per proef)						Opmerkingen
		[m/s]	[%]		Wk	Zwart	Groen	Geel	Blauw	Rood	
1501	1	0,4295	13,94%	114	0	0	0	0	0	0	Slechts 2 min. Snelheidsmeting
1502	1	0,4850	12,35%	124	0	0	0	0	0	0	
1503	1	0,5115	13,04%	133	0	0	0	0	0	0	
1504	1	0,5448	12,82%	141	0	0	0	1	0	0	
1505	1	0,5842	13,18%	150	1	0	0	0	0	1	
1506	1	0,6213	14,18%	157	0	0	0	0	0	3	
1507	1	0,6548	13,63%	168	0	0	2	0	0	0	
1508	1	0,6918	13,25%	182	0	0	0	1	0	1	
1509	1	0,7124	13,48%	190	1	0	0	1	0	0	
1510	1	0,7247	13,51%	199	0	0	1	9	2	0	
1511	1	0,7376	13,48%	208	0	0	3	2	0	2	
1512	1	0,7856	14,15%	220	2	0	3	1	0	4	
1513	1	0,8198	13,90%	229	0	0	5	8	2	11	
1514	1	0,8399	13,40%	236	1	9	6	7	3	18	
1515	1	0,8577	13,09%	244	1	2	13	4	6	7	
1516	1	0,8801	12,12%	256	5	3	6	10	4	14	
1517	1	0,8944	11,52%	261	6	3	13	7	9	10	
1518	2	0,5197	13,25%	131	0	0	0	0	0	0	
1519	2	0,5801	13,01%	150	0	0	0	0	0	0	
1520	2	0,6255	13,03%	158	0	0	0	0	1	0	
1521	2	0,6637	13,20%	175	0	0	0	0	0	0	
1522	2	0,7213	13,23%	190	2	3	3	1	2	1	
1523	2	0,7668	13,29%	206	1	0	3	3	1	1	
1524	2	0,7965	13,38%	221	5	3	10	5	2	6	
1525	2	0,8154	13,30%	231	0	2	5	5	1	2	
1526	2	0,8309	13,32%	243	2	3	10	6	6	7	
1527	2	0,8519	13,11%	254	7	1	5	7	6	9	
1528	2	0,8752	13,00%	261	3	6	8	11	12	16	

Tabel 5.2 : Gegevens bij helling 1:1,5



Figuur 5.6 : Steenverplaatsingen bij helling 1:1,5

In Figuur 5.6 is duidelijk te zien dat er meer stenen verplaatsten bij een hogere stroomsnelheid. Ook is te zien dat het aantal verplaatste stenen meer dan lineair stijgt met de stroomsnelheid. Bij een snelheid van ongeveer 0,60 m/s beginnen de eerste stenen te bewegen. De experimenten zijn uitgevoerd tot een stroomsnelheid van 0,90 m/s.



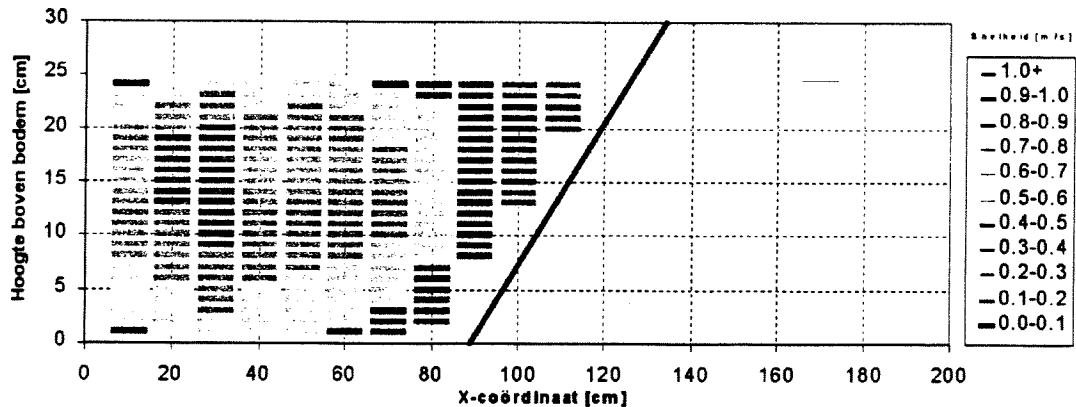
Figuur 5.7 : Verdeling van aantal verplaatste stenen bij helling 1:1,5

In bovenstaande figuur is te zien hoe de verdeling is van het aantal verplaatste stenen per kleur. Er is te zien dat uit vrijwel alle vakken stenen verplaatsten. Dit wil zeggen op alle plaatsen op het talud, van diep bij de teen van het talud, tot hoger, nabij de waterlijn.



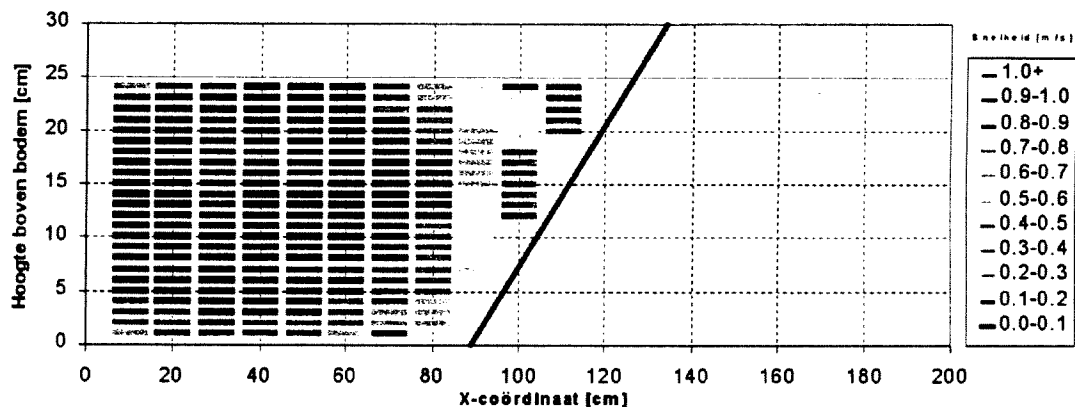
### 5.3.2 Snelheidsprofiel

Het snelheidsprofiel bij de helling 1:1,5 is gemeten bij twee verschillende debieten. Eenmaal bij een debiet van  $0,150 \text{ m}^3/\text{s}$ , waarbij de snelheid aan de teen van het talud zo was dat deze op de gemiddelde diepte gelijk was aan  $0,5 \text{ m/s}$ . Vervolgens ook bij een hoger debiet waar al duidelijk sprake was van transport. Hiervoor is een debiet genomen van  $0,221 \text{ m}^3/\text{s}$ . Tevens zijn bij beide debieten de relatieve turbulentie-intensiteiten bepaald.



Figuur 5.8: Snelheden bij helling 1:1,5, debiet= $0,150 \text{ m}^3/\text{s}$

In bovenstaande figuur is te zien dat de stroomsnelheid afneemt in de richting van het talud. Dit kan verwacht worden, omdat dit de plaats is waar de stroming weerstand ondervindt. Ook de afname van de snelheid aan de glazen zijwand van de goot (aan de linkerzijde van Figuur 5.8) kan hieruit worden verklaard. Ook in deze figuur is weer de afname van de stroomsnelheid naar de bovenkant van de stroming te zien, zoals dit al is uitgelegd in paragraaf 4.5.3.

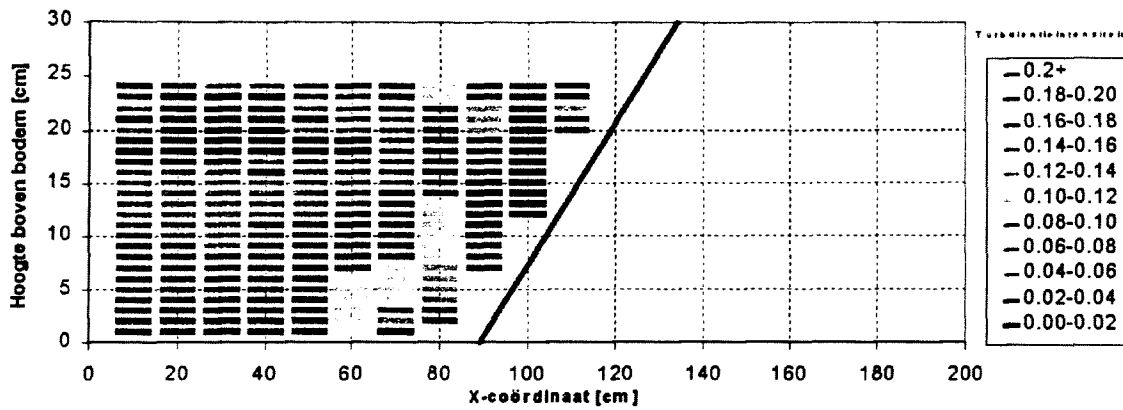


Figuur 5.9: Snelheden bij helling 1:1,5, debiet= $0,221 \text{ m}^3/\text{s}$

Als men Figuur 5.8 vergelijkt met Figuur 5.9 valt op dat de figuren niet veel van elkaar verschillen. Hoewel in Figuur 5.9 de snelheden overal wat hoger zijn dan in Figuur 5.8, is het beeld hetzelfde.

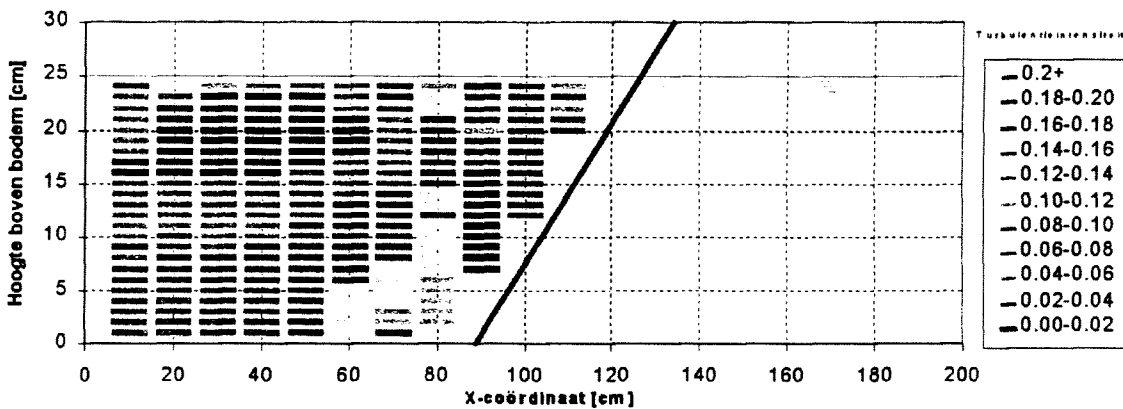
### 5.3.3 Relatieve turbulentie-intensiteit

In de hierna volgende figuren zijn de relatieve turbulentie-intensiteiten uitgezet zoals gedefinieerd in paragraaf 2.4. Deze relatieve turbulentie-intensiteiten zijn uitgezet voor de twee debieten waarvan het snelheidsbeeld is uitgezet in Figuur 5.10 en Figuur 5.11.



Figuur 5.10: Relatieve turbulentie-intensiteiten bij helling van 1:1,5, debiet=0,150 m<sup>3</sup>/s

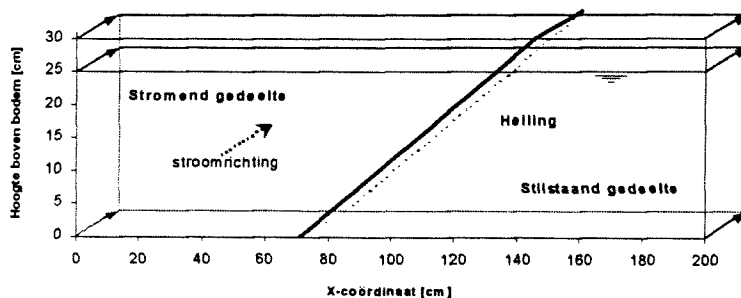
De relatieve turbulentie-intensiteiten zijn het hoogst vlak bij het talud wat natuurlijk te begrijpen is uit het feit dat hier de stenen liggen die de ruwheid veroorzaken op de helling. Hier wordt de turbulentie opgewekt. De glazen zijwand van de goot (Linkerzijde Figuur 5.10) zorgt niet voor extra turbulentie



Figuur 5.11: Relatieve turbulentie-intensiteiten bij helling van 1:1,5, debiet=0,221 m<sup>3</sup>/s

Figuur 5.11 is vrijwel identiek aan Figuur 5.10. De relatieve turbulentie-intensiteiten zijn dus nauwelijks afhankelijk van de gemiddelde stroomsnelheid.

## 5.4 Experiment Helling 1:2,5



Figuur 5.12 : Opbouw van de helling 1:2,5

De helling 1:2,5 is de eerste helling die beproefd werd. Om een wat logischere volgorde in het rapport aan te houden is echter besloten de helling 1:1,5, toch te plaatsen vóór deze helling. Bij de helling 1:2,5 maakt de helling een hoek van 21° met de horizontaal. Bij proef 2523 is de opmerking geplaatst “past niet in serie”. Dit omdat per serie de snelheid in principe steeds in stapjes wordt opgevoerd. Bij proef 2523 is de snelheid echter lager dan in de voorgaande proef. Ook is bij drie proeven (proef 2528, 2531 en 2533) het debiet niet gemeten, of niet genoteerd.

### 5.4.1 Verplaatsing stenen

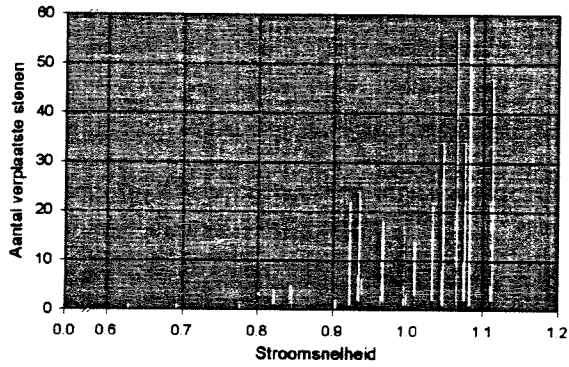
#### Helling: 1:2,5

Meetduur: 30 min

x-coördinaat teen: 0,71 m

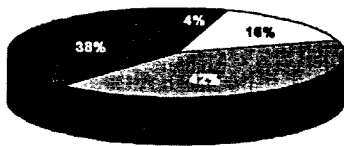
Proef	Serie	U teen, 1/h [m/s]	T1 teen, 1/h [%]	Q [l/s]	Aantal stenen verplaatst (per proef)					Opmerkingen	
					Wit	Zwart	Groen	Geel	Blauw		Rood
2501	1	0,6290	8,41%	147	0	0	0	0	1	0	
2502	1	0,7174	8,71%	172	0	0	0	0	0	0	
2503	1	0,8209	8,54%	197	0	1	0	1	1	1	
2504	1	0,8436	8,26%	199	0	0	1	0	4	0	
2505	1	0,9213	10,02%	202	0	0	1	3	10	8	
2506	1	1,0813	7,17%	255	0	0	1	32	61	58	
2507	2	0,6389	8,46%	148	0	0	0	0	0	0	
2508	2	0,6904	8,64%	158	0	0	0	0	1	0	
2509	2	0,7267	8,58%	168	0	0	0	0	1	2	
2510	2	0,7887	8,35%	182	0	0	0	0	0	0	
2511	2	0,8686	8,17%	197	0	0	0	0	5	8	
2512	2	0,9033	7,94%	202	0	0	0	0	2	0	
2513	2	0,9376	7,69%	210	0	1	2	3	2	2	
2514	2	0,9654	7,56%	217	0	0	2	4	9	3	
2515	2	0,9969	7,35%	225	0	0	1	2	7	4	
2516	2	1,0455	7,15%	236	0	0	1	7	19	7	
2517	2	1,0627	7,19%	246	0	0	0	0	21	36	
2518	3	0,5759	8,78%	131	0	0	0	0	0	0	
2519	3	0,6216	8,22%	139	0	0	0	0	0	0	
2520	3	0,6583	8,67%	147	0	0	0	0	1	1	
2521	3	0,7055	8,72%	154	0	0	0	0	0	0	
2522	3	0,7319	8,20%	163	0	0	0	0	0	1	
2523	3	0,7256	8,79%	170	0	0	0	0	0	0	Past niet in serie
2524	3	0,7749	8,46%	180	0	0	0	0	1	0	
2525	3	0,7986	8,52%	188	0	0	0	0	2	4	
2526	3	0,8434	8,30%	196	0	0	0	0	0	0	
2527	3	0,9325	7,58%	207	0	0	2	5	10	7	
2528	3	0,9632	7,46%	?	0	0	1	2	7	4	Geen debietmeting
2529	3	0,9940	7,56%	224	0	0	1	1	6	9	
2530	3	1,0079	7,32%	230	0	0	3	6	5	0	
2531	3	1,0316	7,35%	?	0	0	2	4	10	6	Geen debietmeting
2532	3	1,0738	7,09%	244	0	0	2	8	11	13	
2533	3	1,1109	6,85%	?	0	0	2	3	17	25	Geen debietmeting

Tabel 5.3 : Gegevens bij helling 1:2,5



Figuur 5.13: Steenverplaatsingen bij helling 1:2,5

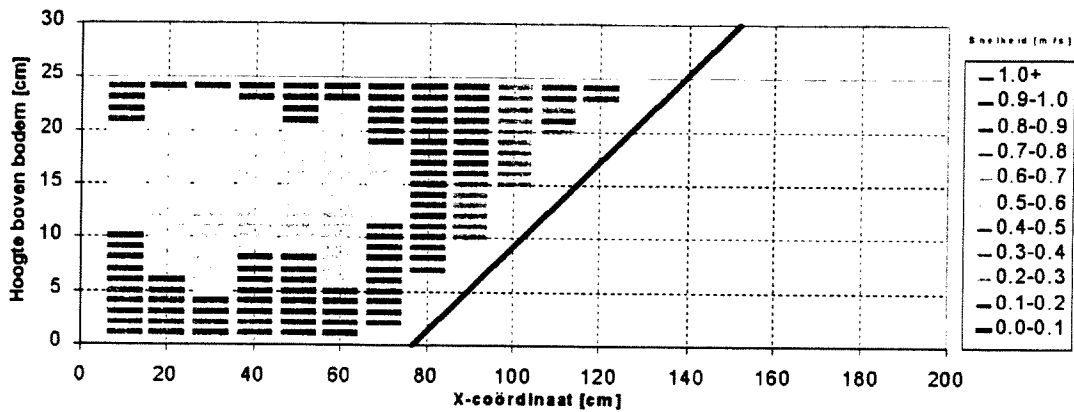
Ook bij deze helling zijn dezelfde figuren gemaakt als bij de helling 1:1,5. Bij deze helling zijn echter echter wat meer metingen gedaan dan bij de vorige helling. Hierdoor komen sommige metingen in de figuur erg dicht in elkaars buurt te liggen.



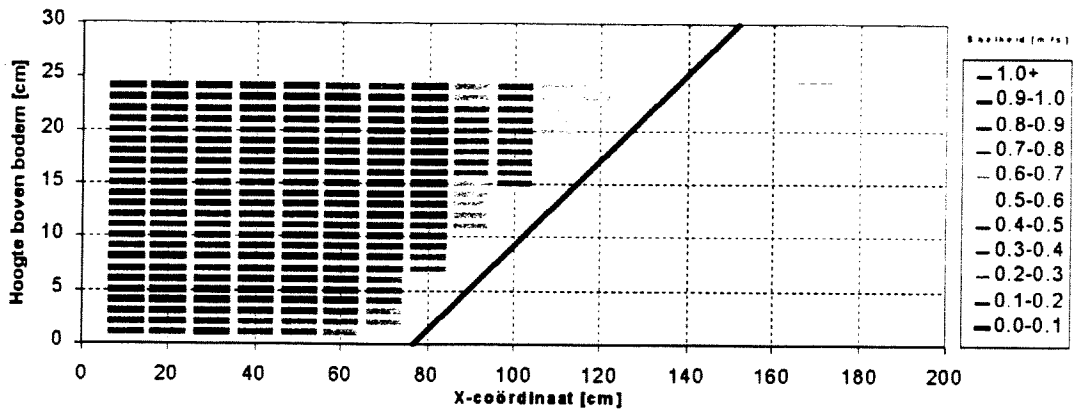
Figuur 5.14: Verdeling van aantal verplaatste stenen bij helling 1:2,5

In bovenstaand figuur is te zien dat er voornamelijk stenen verplaatsten nabij de teen van het talud (rood en blauw) en ook nog wat stenen halverwege het talud (groen en geel). Bovenaan het talud verplaatsten er helemaal geen stenen meer.

### 5.4.2 Snelheidsprofiel



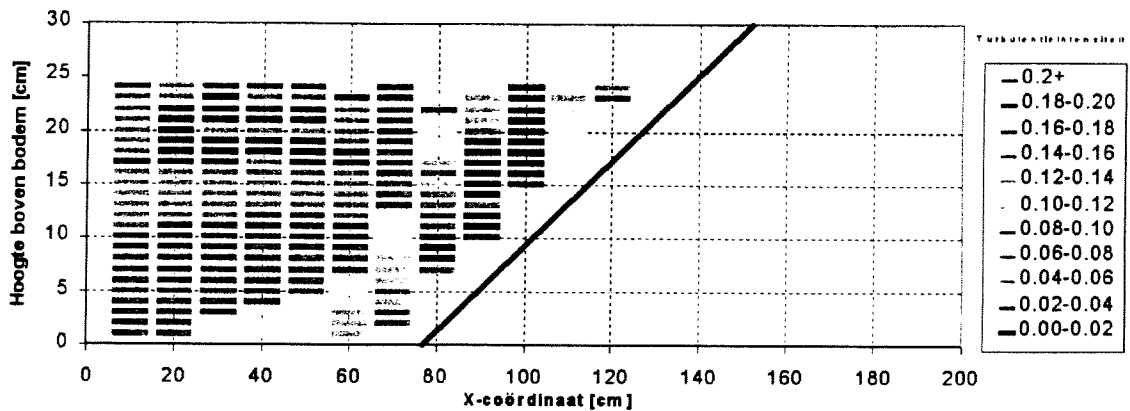
Figuur 5.15: Snelheden bij helling 1:2,5, debiet=0,120 m<sup>3</sup>/s



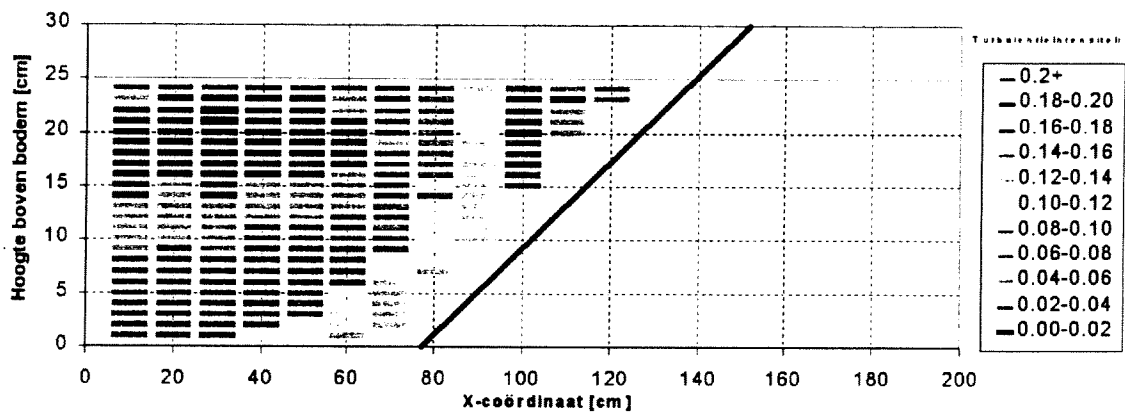
Figuur 5.16: Snelheden bij helling 1:2,5, debiet=0,220 m<sup>3</sup>/s

Bij de snelheidsdwarsprofielen is hetzelfde beeld te zien als bij de helling 1:1,5. Een hogere gemiddelde stroomsnelheid bij een groter debiet, maar het gevormde beeld is hetzelfde.

### 5.4.3 Relatieve turbulentie-intensiteit

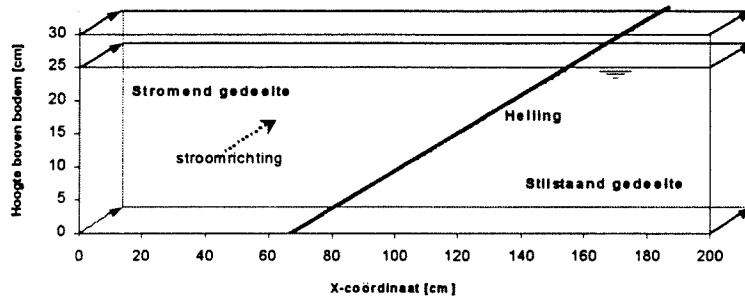


Figuur 5.17: Relatieve turbulentie-intensiteiten bij helling 1:2,5, debiet=0,120 m<sup>3</sup>/s



Figuur 5.18: Relatieve turbulentie-intensiteiten bij helling 1:2,5, debiet=0,220 m<sup>3</sup>/s

## 5.5 Experiment Helling 1:3,5



Figuur 5.19 : Opbouw van de helling 1:3,5

Bij het experiment met de helling 1:3,5 bleek het niet mogelijk door te meten tot er flink transport ontstond. Al bij laag transport kon het experiment niet verder worden uitgevoerd om dat het maximale debiet werd bereikt wat bij een waterstand van 25 cm nog door de goot kon worden afgevoerd. Toch was nog wel enig transport te meten. Echter, de nauwkeurigheid door het lage aantal meetwaarden is wel wat lager dan bij de overige experimenten.

Ondank dat de stroomsnelheid in dit experiment lager was dan bij de voorgaande test, zijn er toch nog stenen verplaatst. Dit betekent dat de stenen niet een bepaalde kritieke snelheid hebben waarboven zij altijd en onmiddellijk verplaatsten.

Omdat proef 3506 verder niet in de lijn van de overige proeven past, is dit experiment niet meegenomen in de uitwerking.

### 5.5.1 Verplaatsing stenen

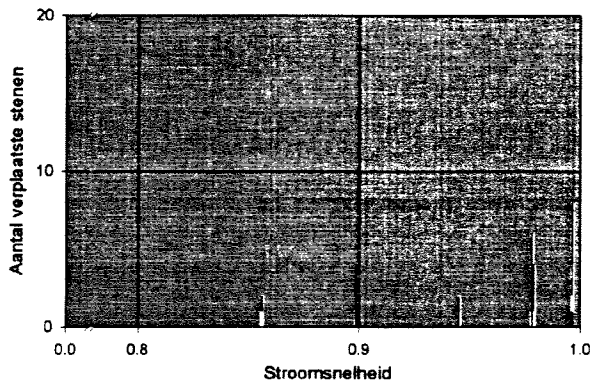
#### Helling: 1:3,5

Meetduur: 30 min

x-coördinaat teen: 0,63 m

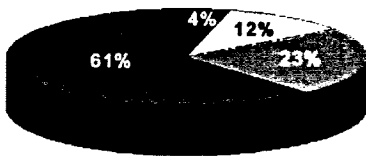
Proef	Serie	U teen, %h		T teen, %h		Q [l/s]	Aantal stenen verplaatst (per proef)					Opmerkingen	
		[m/s]	[%]	[%]	[%]		Wt	Zwart	Groen	Geel	Blauw		Rood
3501	1	0,7203	7,86%	141	7,86%	141	0	0	0	0	0	0	
3502	1	0,7957	7,65%	167	7,65%	167	0	0	0	0	0	0	
3503	1	0,8987	7,01%	188	7,01%	188	0	0	0	0	1	3	
3504	1	0,9448	6,99%	210	6,99%	210	0	0	0	0	1	1	
3505	1	0,9965	6,83%	233	6,83%	233	0	0	1	1	2	4	
3506	1	0,9788	6,89%	222	6,89%	222	0	0	0	1	1	2	Past niet in serie
3507	2	0,7321	7,62%	161	7,62%	161	0	0	0	0	0	0	
3508	2	0,8561	7,49%	?	7,49%	?	0	0	0	1	0	1	Geen debietmeting
3509	2	0,9181	7,10%	208	7,10%	208	0	0	0	0	0	0	
3510	2	0,9779	6,98%	234	6,98%	234	0	0	0	0	1	5	

Tabel 5.4: Gegevens bij helling 1:3,5



Figuur 5.20: Steenverplaatsingen bij helling 1:3,5

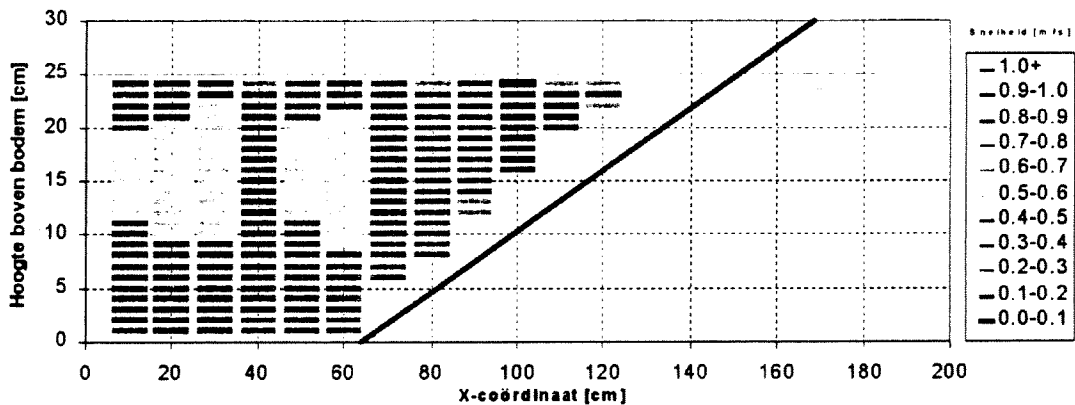
Ook in Figuur 5.20 is weer te zien dat bij de helling 1:3,5 relatief weinig metingen zijn uitgevoerd. Er zijn zelf maar 6 metingen gedaan waarbij ook daadwerkelijk een aantal stenen verplaatste.



Figuur 5.21: Verdeling van aantal verplaatste stenen bij helling 1:3,5

Door het kleine aantal verplaatste stenen bij de experimenten op de helling 1:3,5 betekent dit dat er natuurlijk nog wel wat onnauwkeurigheid kan zitten in de percentages verplaatste stenen. Zeker de grote afwijking tussen de rode en blauwe stenen is niet anders te verklaren dan uit de onnauwkeurigheid. Deze stenen lagen namelijk in een vrijwel gelijkwaardige positie op de helling. Beide kleuren lagen aan de teen van het talud, de rode stenen lagen alleen iets verder stroomafwaarts. Het is niet aan te nemen dat de stroming in de 20 cm welke het rode veld verder lag dan het blauwe zodanig verandert dat hierdoor opeens meer stenen verplaatsten. In absolute aantallen is het verschil in rode en blauwe stenen ook veel minder dramatisch. Het gaat hier om 5 verplaatste blauwe stenen en 14 verplaatste rode stenen. Een verschil van slechts 9 stenen.

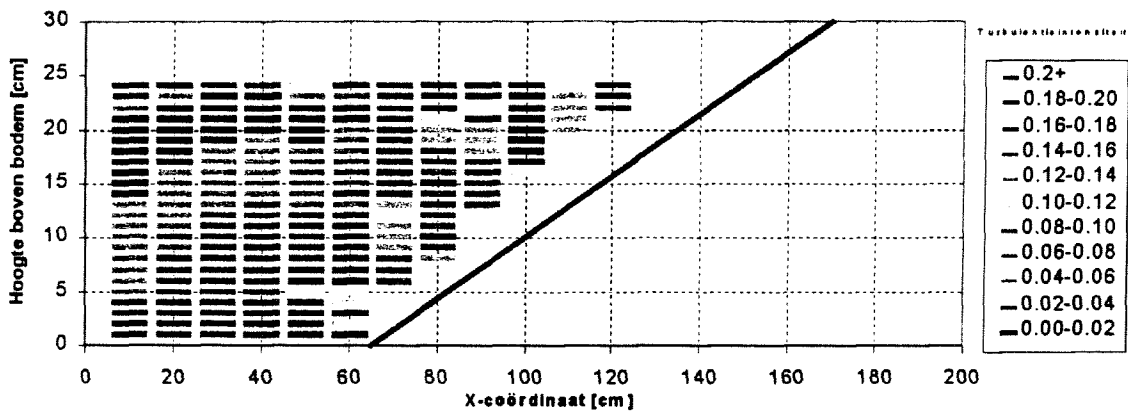
### 5.5.2 Snelheidsprofiel



Figuur 5.22: Snelheden bij helling 1:3,5, debiet=0,080 m<sup>3</sup>/s

In de snelheidsmeting bij de helling 1:3,5 lijkt iets vreemd aan de hand. Er zijn twee gebieden (rond x-coördinaat 20 en x-coördinaat 60 waar de snelheid wat hoger lijkt dan in het omringende gebied. Dit is waarschijnlijk een gevolg van het feit dat er met drie EMS-en tegelijk is gemeten. Het profiel bij x-coördinaat 10 is gemeten met een EMS met als nummer 3, x-coördinaat 20 met een EMS met als nummer 7 en x-coördinaat 30 met een EMS met als nummer 6. Deze profielen werden tegelijkertijd gemeten. Vervolgens werden de 3 EMS-en opgeschoven, zodat EMS 3 bij x-coördinaat 40 kwam te staan, EMS 7 bij x-coördinaat 50 en EMS 6 bij x-coördinaat 60. Gekeken naar het snelheidsveld in Figuur 5.22 lijkt het aannemelijk dat EMS 7 en EMS 6 een wat hogere waarde gaven dan EMS 3 bij eenzelfde werkelijke stroomsnelheid. Mogelijk is de nulstelling van de meters niet juist geweest. Dit zou het beeld dat ontstaat goed verklaren. In werkelijkheid is het snelheidsveld dus waarschijnlijk wat uniformer dan hier het geval lijkt te zijn.

5.5.3 Relatieve turbulentie-intensiteit



Figuur 5.23: Relatieve turbulentie-intensiteiten bij helling 1:3,5, debiet=0,080 m<sup>3</sup>/s



## 5.6 Experimenten horizontale bodem

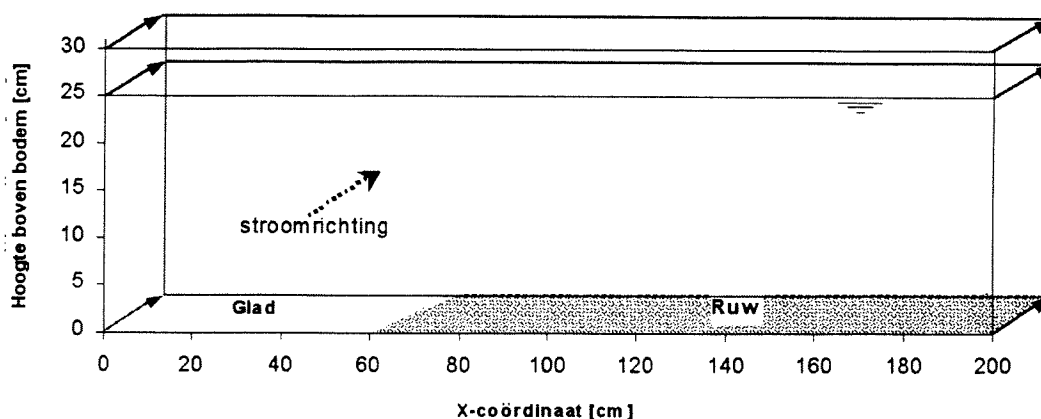
De experimenten op de horizontale bodem zijn opgedeeld in twee deelexperimenten.

De eerste serie experimenten is uitgevoerd met een gladde bodem. Dat wil zeggen dat een zijde van de goot niet volgelegd werd met stenen en een ander gedeelte wel. Deze serie is overigens ook nog opgesplitst in twee delen, eenmaal met gebruikmaking van de volledige breedte van de goot en eenmaal met een versmalde goot. Deze versmalling was noodzakelijk omdat niet voldoende water kon worden aangevoerd om voldoende stroomsnelheid te krijgen over de volledige breedte van de goot.

Op het gedeelte met stenen werd dan ook het strokenpatroon aangebracht waar uiteindelijk de steenverplaatsing van bepaald zou worden.

De tweede serie werd uitgevoerd met een volledig ruwe bodem, oftewel over de gehele bodem van de goot lagen stenen. Ook deze serie werd in een versmalde goot uitgevoerd.

### 5.6.1 Gladde bodem, volle breedte



Figuur 5.24: Opbouw van de horizontale bodem met een glad gedeelte, stroming over de volle breedte van de goot.

#### 5.6.1.1 Verplaatsing stenen

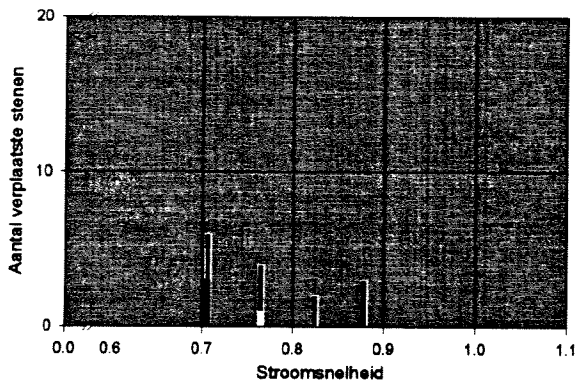
##### Helling: Bodem met glad gedeelte, volle breedte goot

Meetduur: 30 min

x-coördinaat overgang: 0,61 m

Proef	Serie	U-toon $V_h$ [m/s]	T-toon $V_h$ [%]	Q [l/s]	Aantal stenen verplaatst (per proef)					Opmerkingen	
					Wt	Zwart	Groen	Geel	Silauw		Rood
9901	1	0,5351	8,77%	199	0	0	0	0	0	0	
9902	1	0,6633	8,99%	235	0	0	0	0	0	0	
9903	1	0,6879	9,22%	255	0	0	0	0	0	0	
9904	1	0,7496	9,02%	275	0	0	0	0	0	0	
9905	1	0,8239	9,07%	302	0	0	0	0	1	1	
9906	1	0,8438	9,15%	?	0	0	0	0	0	0	Geen debietmeting
9907	1	0,8507	9,20%	303	0	0	0	0	0	0	Max. Debiet, slechts 2 pompen
9908	2	0,6783	9,18%	255	0	0	0	0	0	0	
9909	2	0,7058	9,32%	276	0	0	3	0	2	1	
9910	2	0,7644	8,90%	309	1	0	0	0	0	3	
9911	2	0,8775	8,67%	?	0	0	0	0	2	1	Max. Debiet pijp

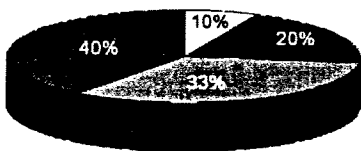
Tabel 5.5: Gegevens bij horizontale bodem, gedeeltelijk glad en bij volle breedte van de goot



Figuur 5.25: Steenverplaatsingen bij horizontale bodem met glad gedeelte over de volle breedte van de goot

In Figuur 5.25 is te zien dat in deze situatie slechts een zeer beperkt aantal metingen is uitgevoerd. Waar bij de helling 1:3,5 de capaciteit van de goot nog een probleem was. (Bij een waterdiepte van 0,25 m was maar een bepaalde afvoer mogelijk waarbij vrij weinig steenverplaatsingen optraden) was de horizontale bodem de aanvoer een probleem. De aanvoerbuis van de goot had maar een capaciteit van ongeveer 0,320 m<sup>3</sup>/s. Dit terwijl volgens de verwachting voor redelijke steenverplaatsingen er toch een stroomsnelheid van toch zeker 1 m/s benodigd was. Bij een breedte van de goot van 2 meter, een waterdiepte van 0.25 meter zou er dan een debiet van tegen de 0,500 m<sup>3</sup>/s benodigd zijn. Aangezien het technisch vrij lastig was om de aanvoer in de goot te vergroten is ervoor gekozen de goot te versmallen.

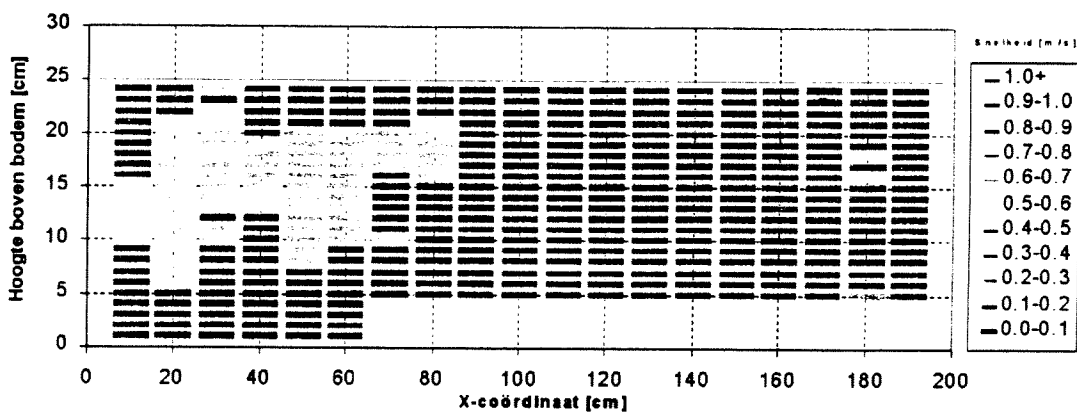
Dit versmallen is gedaan door het plaatsen een "muur" van betonblokken in de goot. Hiermee werd de goot versmald van 2 meter naar 1,6 meter.



Figuur 5.26: Verdeling van aantal verplaatste stenen bij horizontale bodem. met glad gedeelte, gehele stroomgoot

Zoals te zien in Figuur 5.25 zijn er in deze situatie relatief weinig experimenten gedaan. Hierdoor moet ook getwijfeld worden aan de betrouwbaarheid van Figuur 5.26.

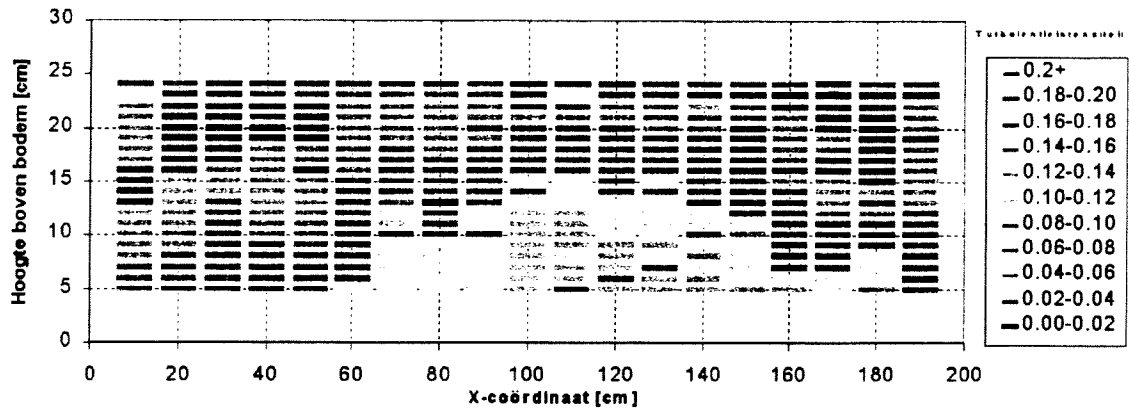
### 5.6.1.2 Snelheidsprofiel



Figuur 5.27: Snelheden bij horizontale bodem met glad gedeelte over de volle breedte van de goot, debiet=0,183 m<sup>3</sup>/s

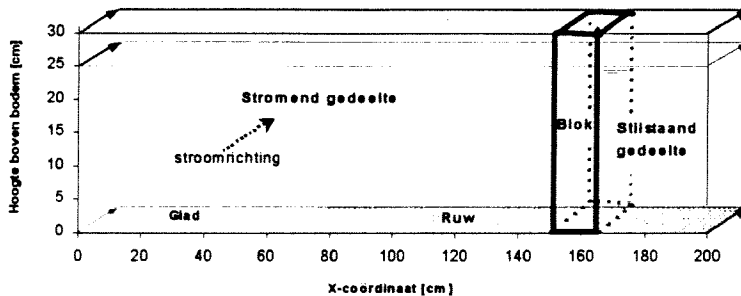
In Figuur 5.27 is de verdeling van de stroomsnelheid te zien bij een stroming over de volle breedte van de goot. Het gedeelte aan de linkerkzijde van de figuur bestond uit een horizontale betonnen bodem terwijl aan de rechterzijde (x-coördinaat 70 t/m 200) stenen op de bodem lagen. Hierdoor zijn dan ook de meetwaarden aan de bodem in dit gedeelte weggehaald. (Zie voor nadere uitleg paragraaf 4.4.1)

### 5.6.1.3 Relatieve turbulentie-intensiteit



Figuur 5.28: Relatieve turbulentie-intensiteiten bij horizontale bodem met glad gedeelte bij een stroming over de volledige breedte van de goot, debiet=0,183 m<sup>3</sup>/s

### 5.6.2 Gladde bodem, versmalde goot



Figuur 5.29: Opbouw van de helling met een glad gedeelte, stroming in een versmalde stroomgoot

#### 5.6.2.1 Verplaatsing stenen

Helaas bleek achteraf dat bij serie 3 een kraan in de buis van de debietmeter dicht stond. Hierdoor zijn de gemeten debieten onjuist en konden dus niet gebruikt worden.

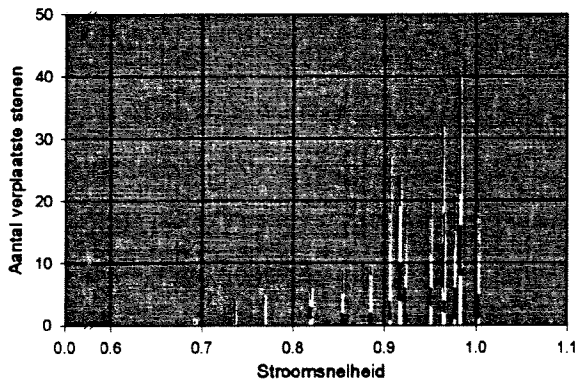
**Helling: Bodem met glad gedeelte, versmalde goot**

Meetduur: 30 min

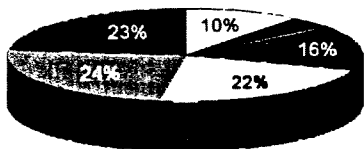
x-coördinaat overgang stenen/glad: 0,61 m

Proef	Serie	U teen, 1/h [m/s]	Tl teen, 1/h [%]	Q [l/s]	Aantal stenen verplaatst (per proef)					Roed	Opmerkingen
					Wit	Zwart	Groen	Geel	Blauw		
9913	3	0,5475	9,18%	?	0	0	0	0	0	0	Debietmeter onbetrouwbaar
9914	3	0,6359	9,34%	?	0	0	0	0	0	0	Debietmeter onbetrouwbaar
9915	3	0,7364	8,89%	?	0	0	0	0	2	2	Debietmeter onbetrouwbaar
9916	3	0,7699	8,72%	?	0	0	0	1	2	2	Debietmeter onbetrouwbaar
9917	3	0,8543	8,13%	?	0	1	1	3	0	4	Debietmeter onbetrouwbaar
9918	3	0,9059	7,97%	?	1	1	2	9	5	9	Debietmeter onbetrouwbaar
9919	3	0,9226	8,17%	?	0	2	4	2	5	4	Debietmeter onbetrouwbaar
9920	3	0,9505	8,35%	?	3	0	3	5	6	4	Debietmeter onbetrouwbaar
9921	3	0,9651	8,30%	?	2	0	2	1	9	4	Debietmeter onbetrouwbaar
9922	3	0,9762	8,43%	?	1	0	5	6	3	6	Debietmeter onbetrouwbaar
9923	4	0,5615	9,58%	195	0	0	0	0	0	0	
9924	4	0,6923	8,86%	227	0	0	0	0	1	0	
9925	4	0,8195	8,34%	?	1	0	2	1	1	1	
9926	4	0,8848	8,47%	289	0	2	0	4	2	2	
9927	4	0,9168	8,41%	310	4	1	5	9	2	3	
9928	4	0,9639	8,40%	?	6	2	5	6	7	6	
9929	4	0,9825	8,25%	321	8	1	7	5	9	10	
9930	4	1,0022	8,12%	?	1	0	4	5	8	2	

Tabel 5.6: Gegevens bij horizontale bodem, gedeeltelijk glad en bij een versmalde goot

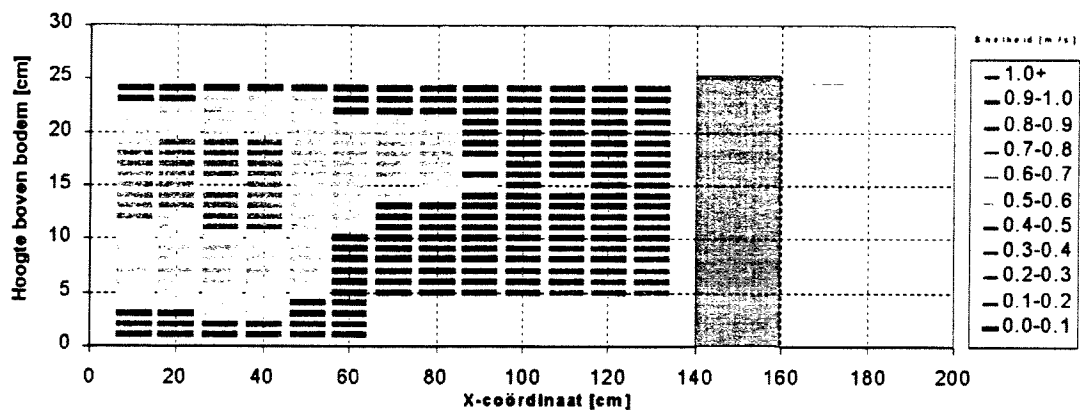


Figuur 5.30: Steenverplaatsingen bij horizontale bodem met glad gedeelte bij een versmalde stroomgoot



Figuur 5.31: Verdeling van aantal verplaatste stenen bij horizontale bodem met glad gedeelte bij een versmalde stroomgoot

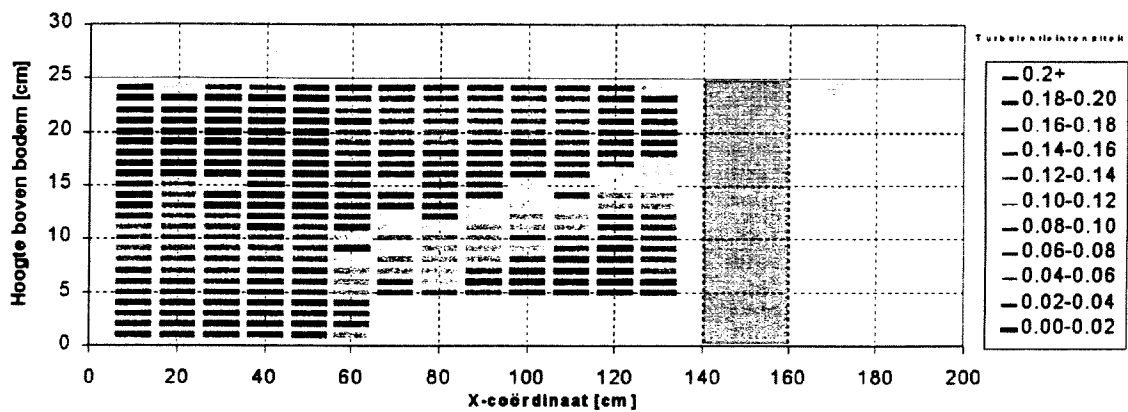
### 5.6.2.2 Snelheidsprofiel



Figuur 5.32: Snelheden bij horizontale bodem met glad gedeelte bij een versmalde stroomgoot, debiet=0,150 m<sup>3</sup>/s

In het snelheidsprofiel ontbreken op drie plaatsen de meetwaarden. Dit omdat deze punten per ongeluk zijn overgeslagen bij het meten. Dit betreft de punten (30,15), (70,15) en (110,15).

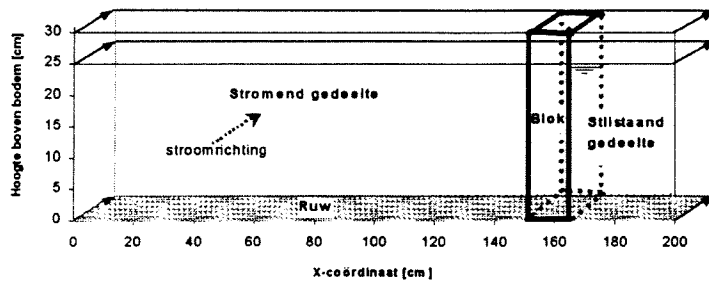
### 5.6.2.3 Relatieve turbulentie-intensiteit



Figuur 5.33: Relatieve turbulentie-intensiteiten bij horizontale bodem met glad gedeelte bij een versmalde stroomgoot, debiet=0,150 m<sup>3</sup>/s

## Hoofdstuk 5: Metingen

### 5.6.3 Ruwe Bodem, versmalde goot



Figuur 5.34: Opbouw van de goot met volledig ruwe horizontale bodem, stroming in een versmalde stroomgoot

#### 5.6.3.1 Verplaatsing stenen

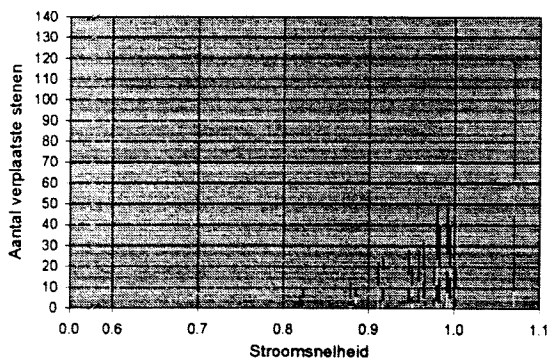
### Helling: Bodem met volledig ruwe horizontale bodem, versmalde goot

Meetduur: 30 min

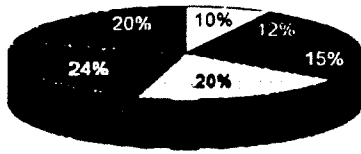
x-coördinaat overgang stenen/glad: n.v.t.

Proef	Serie	U teen, %h		Q [l/s]	Aantal stenen verplaatst (per proef)						Opmerkingen
		[m/s]	[%]		Wit	Zwart	Groen	Geel	Blaauw	Rood	
9931	5	0.5304	10.07%	?	0	0	0	0	0	0	
9932	5	0.6415	10.50%	?	0	0	0	0	0	0	
9933	5	0.7494	10.43%	?	0	0	0	2	1	0	
9934	5	0.8230	10.31%	250	1	1	2	1	2	3	
9935	5	0.8786	9.96%	205	1	0	3	1	3	4	Debiet onjuist??
9936	5	0.9112	10.20%	261	2	0	0	9	4	7	
9937	5	0.9584	9.50%	282	3	3	4	3	12	3	
9938	5	0.9948	9.96%	300	5	5	5	5	9	11	
9939	5	1.0699	10.06%	?	9	18	18	17	31	26	Lichte ontgrondingen
9940	6	0.5210	10.49%	121	4	13	10	17	5	9	
9941	6	0.5076	11.30%	121	0	0	0	0	0	0	
9942	6	0.5542	10.68%	159	0	0	0	0	0	0	
9943	6	0.5897	10.93%	178	0	0	0	0	0	0	
9944	6	0.7356	10.57%	?	0	0	0	0	0	0	
9945	6	0.8138	10.56%	238	0	0	3	2	0	1	
9946	6	0.9465	9.69%	261	3	2	5	6	8	4	
9947	6	0.9797	9.61%	?	4	1	6	13	13	13	
9948	6	0.9826	10.23%	300	3	4	7	7	7	7	
9949	6	0.9913	9.94%	308	8	6	4	8	19	3	
9950	6	1.0881	9.98%	?	TOTALE ONTGRONDING						

Tabel 5.7: Steenverplaatsingen bij volledig ruwe bodem, versmalde goot

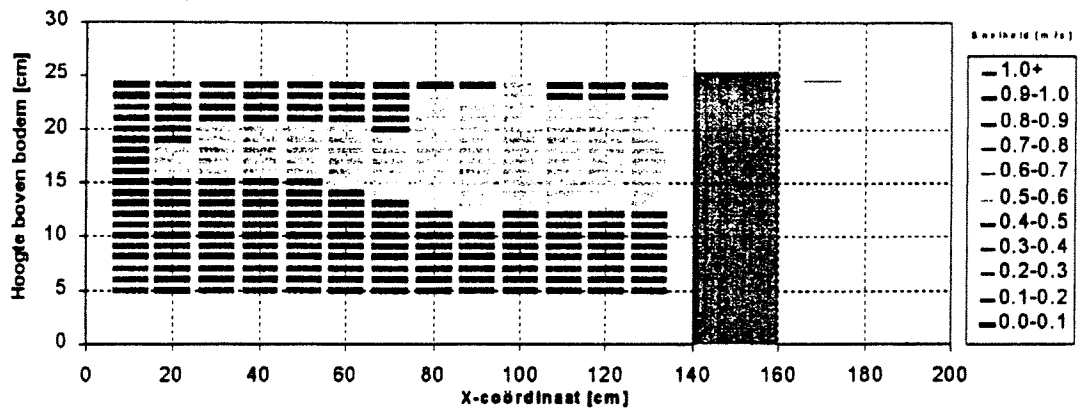


Figuur 5.35: Steenverplaatsingen bij volledig ruwe horizontale bodem, stroming over de volle breedte van de goot

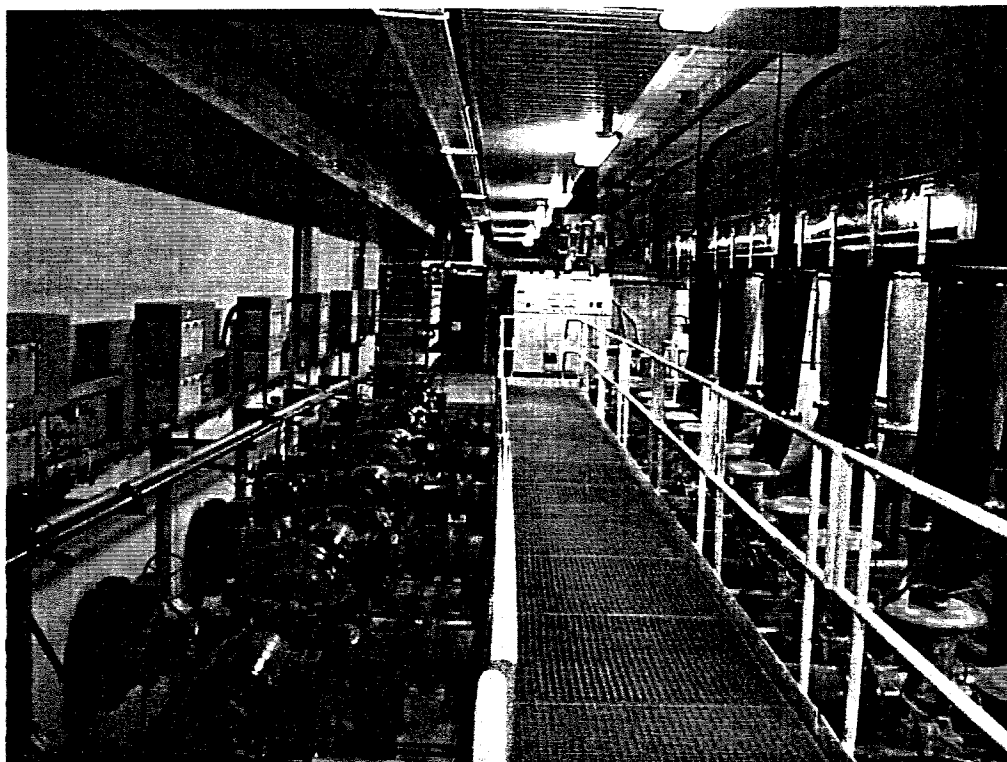


Figuur 5.38: Verdeling van aantal verplaatste stenen bij volledig ruwe horizontale bodem, stroming over de volle breedte van de goot

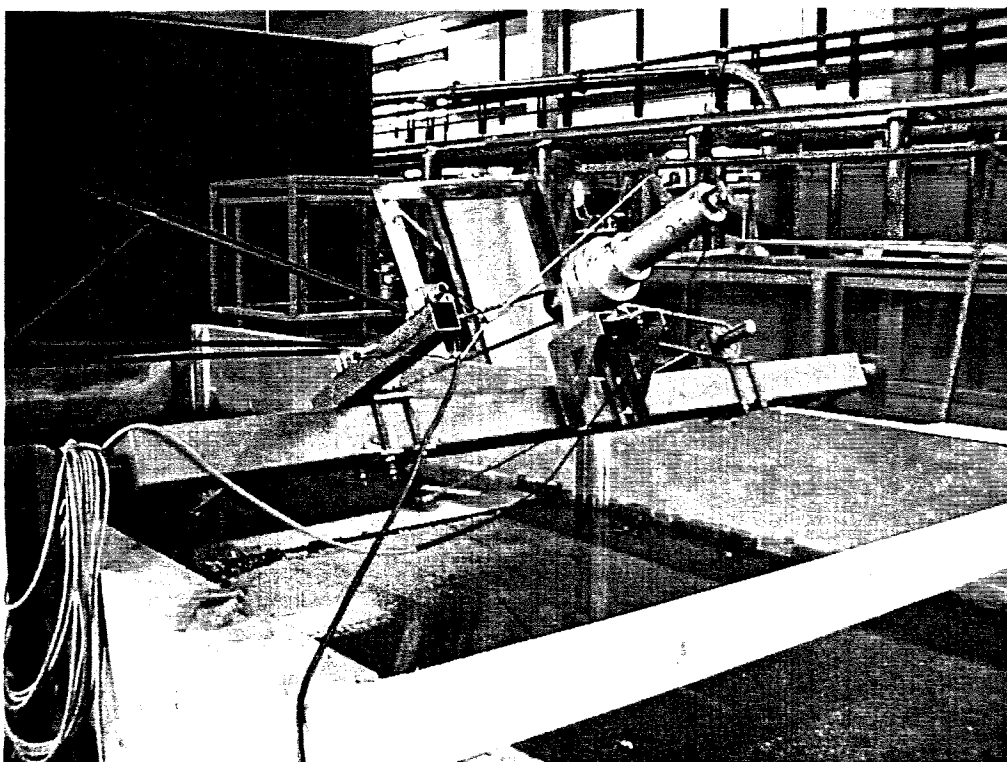
### 5.6.3.2 Snelheidsprofiel



Figuur 5.37: Snelheden bij een volledig ruwe horizontale bodem en een versmalde stroomgoot, debiet=0,105 m<sup>3</sup>/s



Pompenkamer



Regelklep achterzijde goot



---

# Hoofdstuk 6: Discussie

## 6.1 Inleiding

Deze paragraaf geeft een kleine opsomming van de wijze waarop de verkregen resultaten behandeld gaan worden. Er worden verschillende elementen behandeld welke naar voren zijn gekomen in het onderzoek.

- ▶ **Fouten:** er wordt een beschouwing gemaakt over de nauwkeurigheid van de metingen en daarmee ook over de betrouwbaarheid van de gegevens.
- ▶ **Correlatie tussen stroombeeld bij laag en hoog debiet:** In de analyse wordt de stroomsnelheid aan de teen van het talud op een diepte van de halve diepte ( $1/2h$ ) genomen als representatieve waarde. Dit is alleen goed mogelijk als alle snelheden in gelijke mate veranderen met deze snelheid. Dit houdt in dat bij een hogere gemiddelde snelheid aan de teen van het talud het snelheidsbeeld wel gelijk blijft. Gekeken wordt in hoeverre dit waar is.
- ▶ **Omzetten  $U_{\text{teen},1/2h}$  naar dieptegemiddelde snelheden:** De meeste formules voor steenstabiliteit gaan uit van een gemiddelde snelheid over de diepte. Deze is ook meestal gemakkelijker vast te stellen dan een snelheid boven de bodem of de schuifspanningssnelheid (via berekening). De snelheden welke gemeten zijn op een halve waterdiepte worden dan ook omgezet naar een dieptegemiddelde snelheid
- ▶ **Verdeling van het aantal verplaatste stenen:** In dit gedeelte wordt gekeken op welke deel van het talud de stenen eerst verplaatsen en op welk deel van de helling de meeste stenen verplaatsen, waar dus het talud de meeste kans op beschadiging heeft.
- ▶ **Bepalen relatie stroomsnelheid en aantal verplaatste stenen:** Om in een ontwerp te kunnen bepalen welke steengrootte gebruikt moet worden is de relatie nodig tussen de stroomsnelheid en de benodigde steengrootte.
- ▶ **Hellingcorrectiefactor:** In de berekening van beschermingen met behulp van stenen op een helling wordt meestal een hellingcorrectiefactor ingevoerd, welke meestal K wordt genoemd. Behandeld wordt welke waarden voor deze factor uit dit onderzoek naar voren lijken te komen. Deze waarden worden vergeleken met waarden zoals door andere onderzoekers zijn gevonden.
- ▶ **Toepassing in de praktijk:** Tot slot wordt in dit hoofdstuk besproken op welke wijze alle gevonden resultaten nu het beste verwerkt kunnen worden in het ontwerp van een oeverbescherming

## 6.2 Fouten

Bij de metingen worden natuurlijk meetfouten geïntroduceerd. Om een indruk te krijgen van de meetfout die in elk van de stappen gemaakt wordt zijn deze in onderstaande tabel op een rij gezet. Met deze gegevens kan men een indruk krijgen van de betrouwbaarheid van de verkregen resultaten.

De meetonnauwkeurigheid van de EMS-en komt uit de specificaties zoals deze zijn opgegeven door de fabrikant. Deze bedraagt 1% van de volle schaaluitslag. Aangezien de meters twee meetbereiken hebben, volgen hier ook twee verschillende nauwkeurigheden uit. De meters bezitten een meetbereik van 0 tot 1 m/s en van 0 tot 5 m/s. Bij een gemiddelde stroomsnelheid van rond de 0,8 m/s moet worden overgeschakeld naar het grotere meetbereik, omdat de snelheid dan al incidenteel boven de 1,0 m/s uit komt.

De meeton nauwkeurigheid in het aantal verplaatste stenen is een schatting. Dat een kleine minimale hoeveelheid stenen afwijkt, kan komen door onduidelijkheid welke stenen nu wel of niet zijn verplaatst, mogelijke stenen die uit de bak over de overlaat aan de achterzijde van de goot zijn getransporteerd en stenen die simpelweg over het hoofd worden gezien bij het tellen.

De onzekerheid waarmee de  $D_{50}$  van de stenen is bepaald kan worden gehaald uit de gewichtsmetingen van de stenen. Van 300 stenen is het gewicht bepaald. Uit de metingen kan dan met behulp van een statistische toets de onbetrouwbaarheid van de  $W_{50}$  bepaald worden; hieruit kan vervolgens de  $D_{50}$  worden berekend.

De hellingshoek die het talud heeft gekregen is nagemeten. Door lichte doorbuiging van de platen is de hellingshoek van de platen niet overal exact even groot. Dit is zoveel mogelijk gecorrigeerd bij het leggen van de stenen op de helling. Toch kan de doorbuiging nog een onnauwkeurigheid met zich meebrengen. Een fout van twee centimeter verticaal per meter horizontaal lijkt een redelijk schatting. Dit resulteert in een fouthoek van  $\arctan(1/50) = 1,15^\circ$ . Voor de veiligheid is dit afgerond tot  $2^\circ$

De fout in de hoek van natuurlijk talud van de stenen lijkt erg groot. Toch is deze fout realistisch gezien de data. Dit wordt veroorzaakt doordat het punt waarop de helling faalt subjectief is en sterk bepaald wordt door de toevallige ligging van de stenen op het talud.

Bij het debiet kan men de ijkgrafiek gebruiken. Door schommelingen in de manometer is hier aan beide buizen een fout van plus of min 0,5 cm toegekend. In het ergste geval lijdt dit tot een fout van 1 cm. Deze fout van 1 cm is erger naar mate men kleinere debieten wil meten. Natuurlijk heeft een bepaalde afwijking in absolute zin een grotere procentuele afwijking bij een kleinere waarde, maar de ijkgrafiek verloopt ook nog eens niet-lineair. Een afwijking is bij een kleiner debiet meer van invloed dan bij een groter debiet. Indien men een "best-fit" door de ijkgrafiek van de meetflens maakt kan men een functie voor het debiet in liter per seconde krijgen welk gelijk is aan:

$$Q = \sqrt{430 \cdot h} , Q \text{ in l/s, } h \text{ in cm}$$

Meetinstrument/ Meting	Fout
EMS	+/- 0.01 m/s bij $U_{gem} < 0.8 \text{ m/s}$ +/- 0.05 m/s bij $U_{gem} > 0.8 \text{ m/s}$
Aantal verplaatste stenen	5% met een minimum van 2
$D_{50}$ stenen	plus of min 0.0010 m (95% interval)
Gemeten hellingshoek	plus of min $2^\circ$
Nat.talud stenen	$46^\circ$ plus of min $7.6^\circ$ (95% interval van de metingen)
Debiet	< 2% bij $Q > 80 \text{ l/s}$

Tabel 6.1 : Meeton nauwkeurigheden

### 6.3 Correlatie tussen stroombeeld bij laag debiet en hoog debiet

Bij de hellingen 1:2,5 en 1:1,5 zijn de snelheden gemeten bij verschillende debieten. Hierdoor kan men zien of het stroombeeld wezenlijk verandert als de stroomsnelheid wordt opgevoerd. Om dit te kunnen bekijken kan de correlatie tussen de stroomsnelheden op elke plaats in het profiel bij de lage stroomsnelheid en bij de hoge stroomsnelheid worden bepaald. De correlatie tussen twee sets data is gedefinieerd als:

$$\rho_{x,y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad \text{met} \quad Cov(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y) \quad (6.1)$$

Dit kan worden uitgevoerd op de set data die alle meetpunten in de dwarsdoorsnede van de goot bevat. Dit is voor de hellingen 1:1,5 en de helling 1:2,5 gedaan. De set meetpunten bij het "lage" debiet is vergeleken met de set meetpunten bij het "hoge" debiet. De correlatiecoëfficiënt die dit oplevert is uitgezet in Tabel 6.2.

Een waarde in de buurt van de 1 geeft een hoge positieve correlatie aan, een waarde in de buurt van de 0 betekend weinig correlatie.

Helling 1:1,5 Q=0,150 m <sup>3</sup> /s versus Q=0,221m <sup>3</sup> /s	0,97563
Helling 1:2,5 Q=0,120 m <sup>3</sup> /s versus Q=0,220 m <sup>3</sup> /s	0,93562

Tabel 6.2: Correlatiecoëfficiënt tussen stromingen

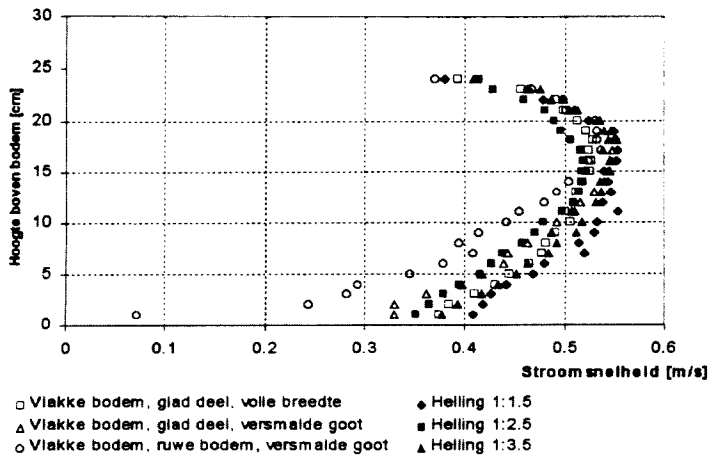
De waarden voor de correlatiecoëfficiënt zijn zodanig dat mag worden gesteld dat het stroombeeld niet wezenlijk verandert bij een toenemende stroomsnelheid.

## 6.4 Omzetten $U_{\frac{1}{2}h}$ naar dieptegemiddelde snelheden

Voor het vergelijken van de metingen is het veelal nodig om een dieptegemiddelde snelheid te hebben voor de verschillende metingen. Om dat te kunnen doen moeten de snelheden in x-richting die zijn verkregen aan de teen op de helft van de waterdiepte worden omgezet in dieptegemiddelde snelheden. Hiervoor dient het snelheidsprofiel aan de teen van het talud te worden meegenomen.

Voor de verschillende situaties zijn de onderstaande snelheidsprofielen bepaald.

Deze snelheden zijn allemaal bepaald bij een stroomsnelheid van 0,5 m/s op de halve waterdiepte. Ten eerste omdat dit een plaats is die goed gedefinieerd is ten opzichte van de oever. Ten tweede omdat verwacht wordt dat de situatie aan de teen van het talud maatgevend zal zijn voor de eerste steenverplaatsing. De keuze om op de halve diepte te meten is o.a. genomen omdat te verwachten is dat de snelheidsmeters hier de minste hinder ondervinden van zowel de oppervlakte als van de stenen op de bodem.. Echter, er is al gebleken dat het stroombeeld niet wezenlijk verandert bij een hogere stroomsnelheid. We kunnen dus aannemen dat de vorm van deze profielen gelijk blijft bij een hoger debiet. Hierdoor kan deze snelheid, met een kleine onzekerheid, altijd worden omgezet naar een verticaal snelheidsprofiel, gebruikmakend van het snelheidsprofiel dat bij een bepaald debiet gemeten is.



Figuur 6.1: Snelheden aan de teen van het talud, of op de overgang van ruwe bodem naar gladde bodem bij verschillende experimenten

Uit deze gegevens kan men halen dat een redelijke schatting van de “ware” dieptegemiddelde snelheid kan worden verkregen door de snelheid die is gemeten op 12,5 cm hoogte te vermenigvuldigen met een factor 0,9.

Het is natuurlijk niet eenduidig of men op deze manier de dieptegemiddelde snelheid moet bepalen, of door de punten nabij de bodem de lijn door te zetten door een logaritmische curve te trekken door de onderste punten. Op die manier zou wellicht een betere dieptegemiddelde snelheid kunnen worden verkregen die beter vergelijkbaar is met snelheden gevonden door andere onderzoekers.

### 6.5 Verdeling van het aantal verplaatste stenen

Ten eerste kan worden gekeken naar de verdeling van de verplaatste stenen. Hieruit kan een indruk worden verkregen van de meest kritieke plaats op het talud. De kleuren in de diagrammen komen overeen met de kleuren van de verplaatste stenen.



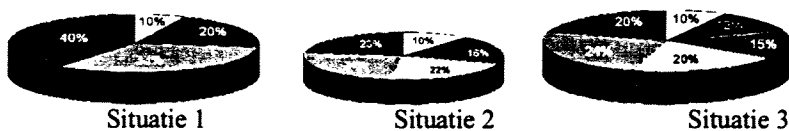
Figuur 6.2: Verdeling verplaatste stenen bij helling 1:1,5



Figuur 6.3: Verdeling verplaatste stenen bij helling 1:2,5



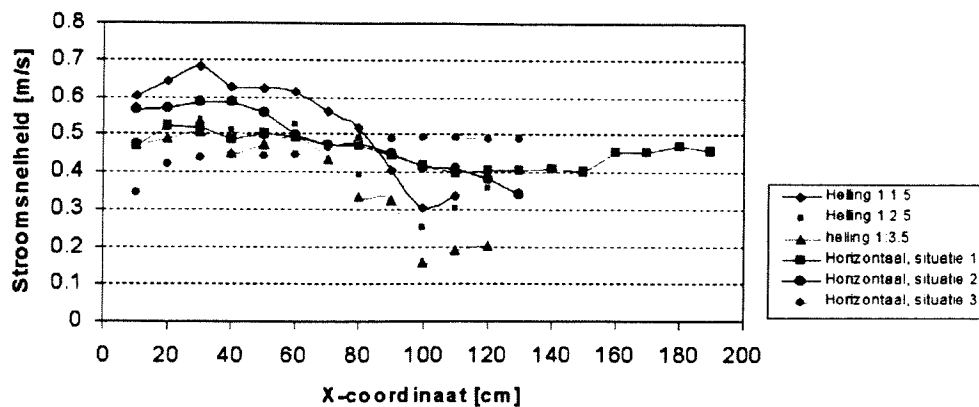
Figuur 6.4: Verdeling verplaatste stenen bij helling 1:3,5



Figuur 6.5: Verdeling verplaatste stenen bij horizontale bodem

Bij de laatste figuur (Figuur 6.5) is situatie 1 de situatie met de niet-versmalde goot. Deze is echter gebaseerd op slechts een beperkt aantal stenen en is dus niet erg representatief. Situatie 2 en 3 zijn dat wel. Het verschil tussen deze twee proeven, allebei uitgevoerd in een versmalde stroomgoot, is dat bij situatie 2 naast de meetsectie een stuk gladde bodem aanwezig was en bij situatie 3 de gehele bodem bedekt was met stenen

Naarmate de helling flauwer wordt, wordt het percentage stenen dat aan de teen van de helling wordt getransporteerd groter ten opzichte van dat op de rest van de oever. Dit is natuurlijk te verklaren uit het feit dat de snelheid vrij snel afneemt op de oever. Daarom is bij het experiment met de horizontale bodem dit effect ook nauwelijks meer aanwezig, omdat hier de snelheid overal vrijwel even groot is.

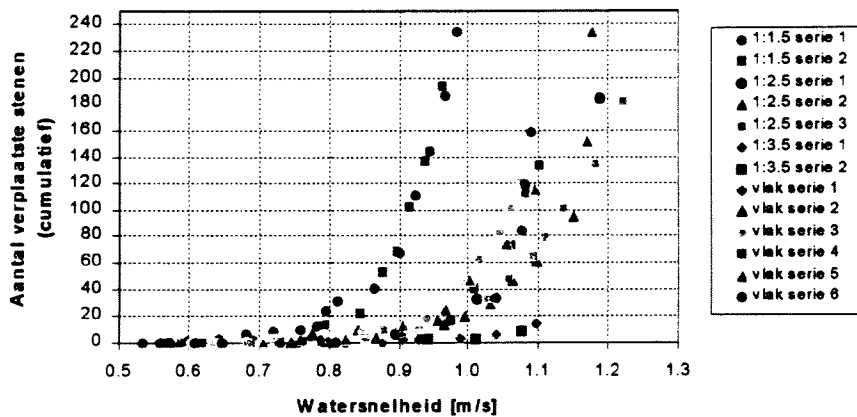


Figuur 6.6: Bovenaanzichten snelheden bij verschillende hellingen

## 6.6 Bepalen relatie stroomsnelheid en aantal verplaatste stenen

### 6.6.1 Berekening met alle stenen

Het aantal verplaatste stenen is voor de verschillende hellingen uitgezet in Figuur 6.7. De snelheden die gemeten zijn, zijn in deze figuur al omgezet naar dieptegemiddelde snelheden aan de teen van het talud.

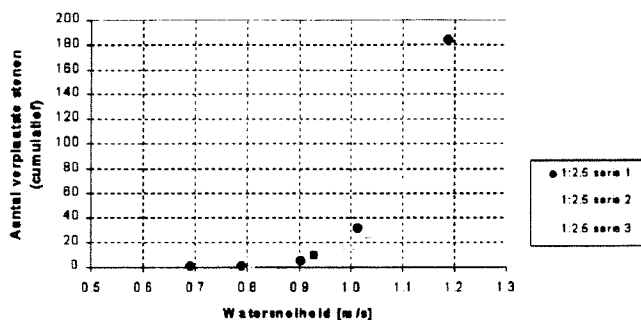


Figuur 6.7: Verplaatste stenen voor alle series, lineaire schaal

Hierbij is de cumulatieve hoeveelheid stenen genomen die verplaatst was in de voorafgaande proeven. Als men dit als criterium neemt voor het aantal verplaatste stenen en daarmee als een maatstaf voor het begin van bewegen, dan impliceert dit dat een aantal aannamen is gedaan.

- 1) Tijdens een half uur stromen worden alle stenen verplaatst die een  $u_c$  hebben kleiner dan de stroomsnelheid in die proef.
- 2) Het totale aantal stenen dat tot en met een bepaalde proef is verplaatst, is niet afhankelijk van het aantal proeven dat tot deze bepaalde snelheid is gedaan.

De eerste aanname is niet helemaal waar, zoals is gebleken uit experiment 3506. Toch is doorgewerkt met deze aanname omdat te verwachten valt dat de aanname toch in voldoende mate waar is om geen problemen is de analyse te geven.



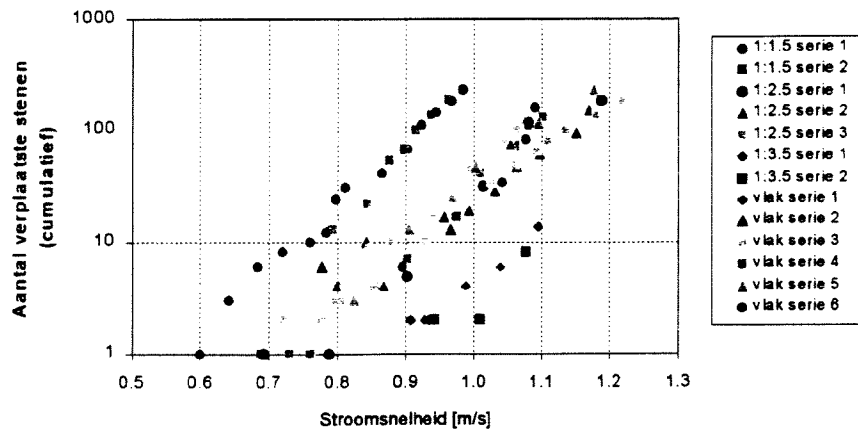
Figuur 6.8: Verplaatste stenen bij verschillende series bij een helling 1:2,5

De tweede aanname is te controleren door onder dezelfde omstandigheden de snelheid tweemaal op te voeren, echter de ene keer met veel kleinere stappen dan de tweede keer.

Dit is bij de helling 1:2,5 gedaan. In de eerste serie is de snelheid in grote stappen opgevoerd en werd een snelheid van 1,08 m/s bereikt na slechts 6 stappen. Hierbij was voornamelijk de laatste stap erg groot. Onder dezelfde condities is, nadat het steenbed opnieuw aangebracht was, de proef herhaald, echter nu met veel kleinere stappen. Zoals men kan zien in Figuur 6.8 is het totale aantal stenen dat na deze twee series proeven was verplaatst nagenoeg gelijk. Hieruit kan men concluderen dat aanname 2 in voldoende mate geldig is voor dit onderzoek.

Hiermee wordt aangenomen dat de voorafgaande belasting geen invloed heeft op het aantal stenen dat in een half uur verplaatst wordt.

Omdat uit Figuur 6.7 niet direct het verband duidelijk is tussen de stroomsnelheid en het aantal verplaatste stenen, zijn de meetwaarden uitgezet op een logaritmische schaal. Dit resulteert in Figuur 6.9.



Figuur 6.9: Verplaatste stenen voor alle series, logaritmische schaal

Er ontstaan nu "puntenrijen" die vrijwel op een lijn liggen. Hieruit mag men concluderen dat het verband tussen de stroomsnelheid en het aantal verplaatste stenen logaritmisch is.

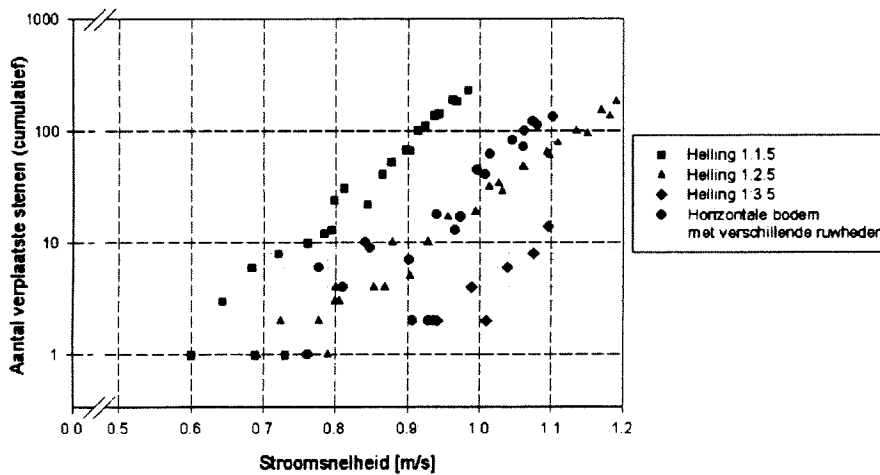
Zoals is te zien zijn de proeven bij de verschillende hellingen goed reproduceerbaar.

De enige uitzondering hierop is serie 1 voor de horizontale bodem. Dit zijn de drie meetpunten aangegeven met een ruitvorm rond het punt met een watersnelheid van 0,90 à 0,95 m/s en met 2 verplaatste stenen. Waarom deze serie zo duidelijk buiten het patroon valt is onduidelijk, maar is waarschijnlijk toe te schrijven aan toeval. De volgende serie (serie 2) is namelijk onder exact dezelfde omstandigheden uitgevoerd en ligt wel binnen het "normale". Men kan dan discussiëren of men deze serie niet uit de resultaten moet verwijderen. Aangezien er echter geen duidelijke reden is gevonden waarom deze metingen "fout" zouden zijn is besloten dit niet te doen.

Wat ook opvalt is dat er bijna geen verschil is te ontdekken in de series 3 en 4 enerzijds en 5 en 6 anderzijds bij de proeven met een horizontale bodem. Dit terwijl er toch een groot verschil is in de situatie waaronder deze series tot stand zijn gekomen. Bij de series 4 en 5 lag er vlak naast het deel waarop de steenverplaatsing werd bepaald een deel van de bodem van de goot bloot, die bestaat uit glad beton. Bij de series 5 en 6 was de gehele bodem voorzien van stenen.

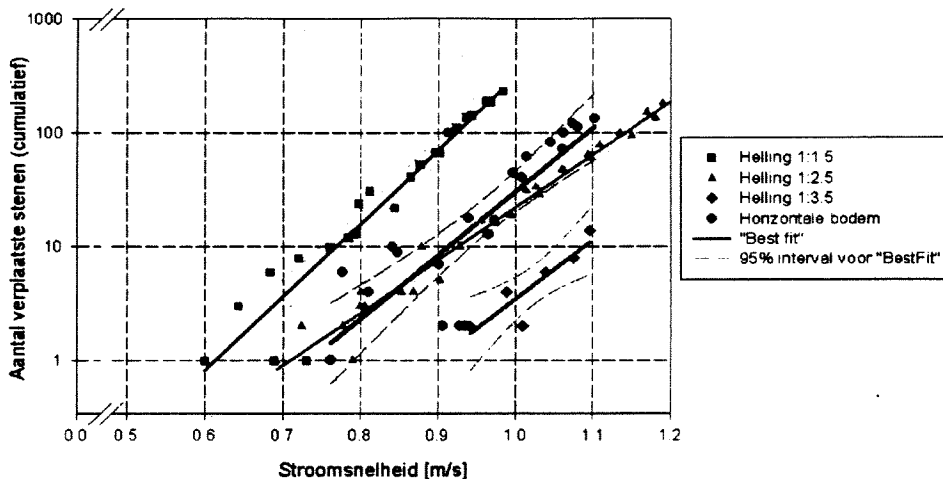
Figuur 6.9 bevat nog een grote hoeveelheid punten. Om een duidelijke beeld te krijgen kan men bepaalde series samen nemen omdat deze tot stand zijn gekomen onder exact dezelfde omstandigheden. Dit zijn de verschillende series van de helling 1:1,5 1:2,5 en 1:3,5. Voor de proeven met de horizontale bodem ligt de situatie iets gecompliceerder. Er zijn daar drie verschillende situaties. De situatie met de volledig ruwe bodem is duidelijk anders dan de situatie toegepast op de hellingen waarbij de bodem glad was. Deze situatie (series 5 en 6 horizontale bodem) worden dus verder niet meer in de analyse meegenomen.

Alle bovenstaande overwegingen resulteren in Figuur 6.10



Figuur 6.10: Verplaatste stenen voor de verschillende hellingen, logaritmische schaal

Door deze punten kunnen lijnen worden getrokken om duidelijker het verband tussen stroomsnelheid en het aantal verplaatste stenen te bepalen. Dit is gedaan met behulp van lineaire-regressie techniek. Ook het 95%-betrouwbaarheidsinterval van deze lijn is in de grafiek afgebeeld. Dit geeft een indruk van de betrouwbaarheid van de lijn. Het is zeker niet zo dat de getrokken lijn de juiste is. Alle lijnen die binnen het interval vallen zijn mogelijk. Een 95%-interval is natuurlijk een vrij willekeurige keuze. Toch wordt in de wetenschap vaak dit interval gekozen. Daar de techniek van lineaire regressie hier is toegepast op een grafiek met een logaritmische as is niet geheel zeker of dit geheel juist is. Wel kan echter gesteld worden dat, als hierdoor een fout wordt gemaakt in de onzekerheid van de lijn, deze altijd groter is dan de werkelijke fout. Ook is de mogelijke fout in de stroomsnelheid niet mee genomen. De fout die hierdoor op kan treden is behandeld in paragraaf 6.1. De lijn kan dus nog naar links of recht verschoven zijn.



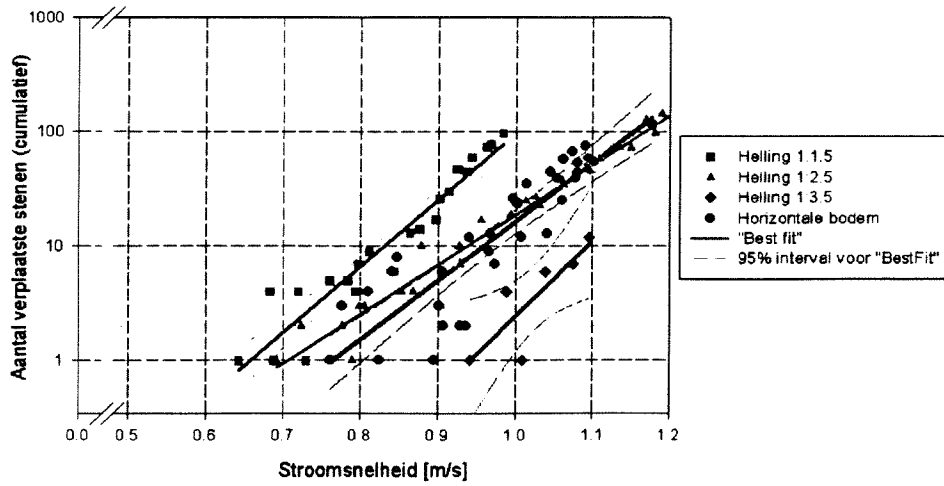
Figuur 6.11: Verplaatste stenen voor de verschillende hellingen met regressielijn, logaritmische schaal



### 6.6.2 Analyse met alleen meest kritisch velden

Uit Figuur 6.11 uit de vorige paragraaf lijkt men af te kunnen leiden dat de stenen het meest stabiel liggen op de helling 1:3,5 en minder stabiel op een horizontale bodem. Wellicht dat dit een oorzaak is van het feit dat bij de helling 1:3,5 nabij de waterlijn veel minder stenen verplaatst worden omdat hier de stroomsnelheid zeer laag is.

Om dit controleren of dit de oorzaak is kan de grafiek uit de vorige paragraaf nogmaals worden gemaakt maar nu met alleen de meest kritieke velden meegenomen. Dit zijn de rode en blauwe velden, die het dichtst bij de teen van het talud liggen. Als men weer, met dezelfde overwegingen die eerder genoemd zijn, Figuur 6.11 maakt, maar nu met alleen de rode en blauwe verplaatste stenen meegenomen, krijgt men Figuur 6.12.



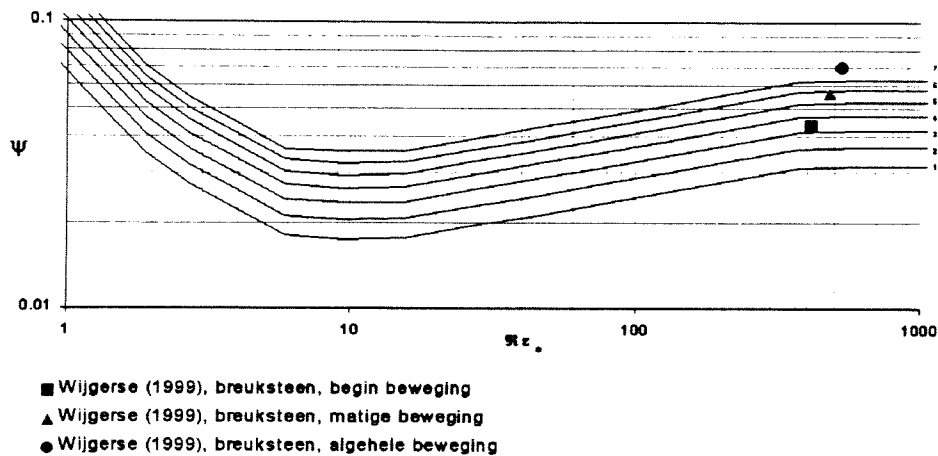
Figuur 6.12: Verplaatste rode en blauwe stenen voor de verschillende hellingen met regressielijn, logaritmische schaal.

Nog steeds verplaatsen er bij de helling 1:3,5 de minste stenen. Het verschil tussen de twee figuren is vrij klein.

### 6.6.3 Vergelijken van de waarden op horizontale bodem met andere experimenten

Nu de snelheden zoals deze zijn gemeten kunnen worden omgezet in dieptegemiddelde snelheden en er waarden zijn bij welke snelheid er een bepaald aantal stenen verplaatst, kan wat worden gezegd over de gevonden waarden in relatie tot andere experimenten. Dit is gedaan voor de stenen welke verplaatst zijn op een horizontale bodem. Hierin zijn alle gegevens van de horizontale bodem meegenomen. Op deze wijze kan vastgesteld worden of de gevonden waarden in lijn liggen met andere onderzoeken. Als basis voor de vergelijking wordt de theorie voor steenstabiliteit volgens Shields aangehouden. In deze formule speelt de factor  $\psi$  een belangrijke rol. Om deze te kunnen berekenen is een  $k_s$ -waarde nodig, zodat de dieptegemiddelde stroomsnelheid kan worden omgezet in een bodemschuifspanning. Voor deze  $k_s$  wordt vaak een waarde genomen van  $2 \cdot D_{50}$ . Bij de gebruikte stenen komt men dan op een  $k_s$ -waarde van  $2 \cdot 0,0063 \text{ m} = 0,0126 \text{ m}$ .

Als men in een de grafiek zoals deze door het Waterloopkundig Laboratorium is opgesteld de punten uitzet voor 10 (nauwelijks verplaatsing, 50 (matige verplaatsing) en 250 (zeer veel verplaatsing) stenen, krijgt men Figuur 6.13.



Figuur 6.13: Steenverplaatsingen uit dit onderzoek in relatie tot andere

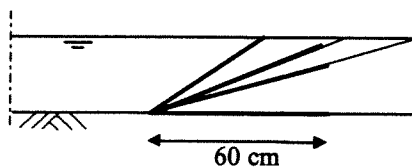
De steenverplaatsingen die op een horizontale bodem zijn gevonden komen dus redelijk overeen met de resultaten welke andere onderzoekers gevonden hebben. De gevonden verplaatsingen liggen aan de bovenkant van het gebied waarin de steenverplaatsing oploopt van vrijwel geen verplaatsing naar transport van stenen. Dit houdt in dat de stenen pas bij hogere snelheden bewegen op een vlakke bodem dan men wellicht zou verwachten.

## 6.7 Hellingcorrectiefactor

### 6.7.1 Gevonden resultaten

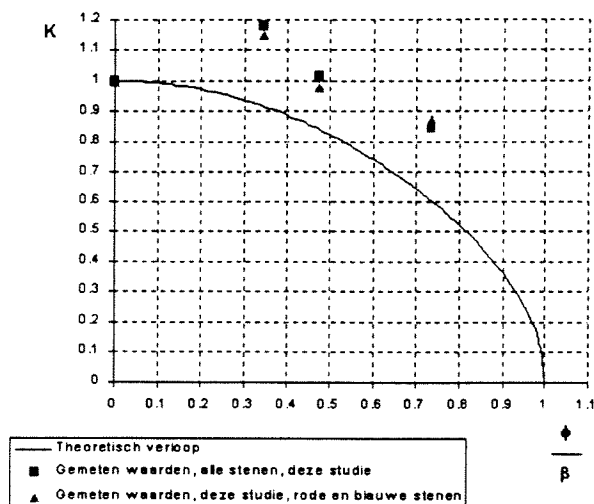
Een van de doelstellingen van dit rapport was het zoeken naar een verband tussen de hellingshoek van een talud en de steenstabiliteit. Omdat in de civiele praktijk bij een steenbestorting over het algemeen maar een heel erg kleine schade wordt geaccepteerd, lijkt een criterium van 10 verplaatste stenen in dit onderzoek een redelijke maatstaf.

Het probleem bij het vergelijken van de steenverplaatsingen op de helling met die op de horizontale bodem is de wat andere situatie. Op de hellingen werden simpelweg alle stenen geteld die zich op de helling verplaatst hadden. Het meetgebied was daar goed gedefinieerd, namelijk tussen de teen van het talud en de waterspiegel. Bij een horizontale bodem is dit wat lastiger. Hier moet met een bepaalde breedte kiezen waarover men de steenverplaatsing meet. In dit onderzoek is hier voor 60 cm gekozen wat 2.4 maal de waterdiepte was. Hierdoor werden de vakken met gekleurde stenen vierkant en werd ongeveer hetzelfde oppervlak aan stenen neergelegd als bij de andere situaties. (Zie Figuur 6.14)



Figuur 6.14: Steenbekleding bij hellingen en horizontale bodem

Dit is een arbitraire keuze en het is niet zeker of deze keuze de juiste is. Echter, een analyse met slechts de meest kritieke velden en daarmee effectief een testbreedte van 20 cm geeft eenzelfde beeld.



Figuur 6.15: Gevonden K-factor bij verschillende hellingshoeken

In Figuur 6.15 zijn de punten voor de horizontale bodem, de helling 1:3,5, de helling 1:2,5 en de helling 1:1,5 te zien. Deze waarden zijn de meetpunten die te zien zijn van links naar rechts in de figuur. Vrijwel alle punten liggen ver boven de theoretische waarde. Alleen het meetpunt van de horizontale bodem ( $\beta=0$ ) bevindt zich per definitie op de lijn en wel met een waarde  $K=0$ .

Deze grafiek lijkt sommige onderzoekers zeker te steunen die in het verleden gezegd hebben dat een extra hellingscorrectiefactor niet nodig is voor hellingen flauwer dan 1:2 (Maylord e.a., 1989).

### 6.7.2 Reden voor afwijkende resultaten

Ondanks dat is het erg vreemd dat meer transport lijkt plaats te vinden op flauwe hellingen dan op een horizontale bodem. De proeven op de helling lijken onderling wel redelijk te voldoen aan het theoretische verloop, zij liggen alle alleen een gelijke waarde boven de theoretische lijn. Het is de waarde voor de kritieke snelheid op de horizontale helling die afwijkt. Indien de waarde voor de kritieke stroomsnelheid op de horizontale bodem welke is gevonden te laag is zouden de punten wel voldoen aan de theorie. De waarde voor de horizontale bodem zou dan echt belangrijk moeten afwijken van de gevonden waarde.

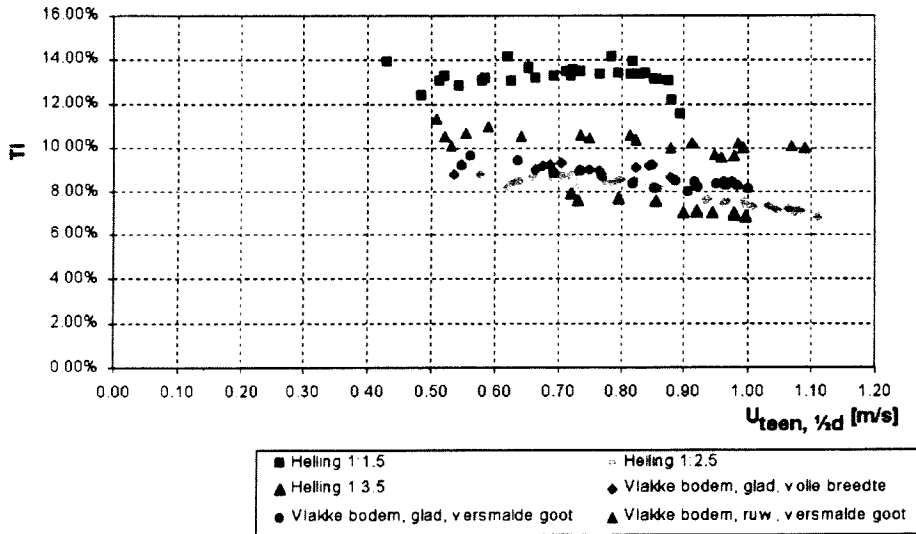
Er zijn een aantal mogelijke oorzaken voor de afwijkingen aan te wijzen:

- 1) De keuze om op de vlakke bodem te meten over een breedte van 60 cm is onjuist.
- 2) Bij de horizontale bodem gaven de snelheidsmeters andere waarden bij dezelfde werkelijke snelheid.
- 3) De turbulentie was bij de proeven met de horizontale bodem groter dan bij de proeven met de hellingen, mogelijk door de versmalling die in de goot was aangebracht bij sommige metingen op de horizontale bodem.
- 4) Bij de stroming over de horizontale bodem verandert de secundaire stroming in de goot ten opzichte van de situatie bij de verschillende hellingen.
- 5) (Grote) horizontale structuren beïnvloeden de stroming

ad 1) Deze keuze is natuurlijk niet noodzakelijkerwijs juist.. Echter, zeker bij het begin van bewegen kan hieruit niet verklaard worden waarom op een vlakke bodem de stenen eerder zouden verplaatsen. Verder blijkt uit de analyse met alleen de meest kritieke stenen nabij de teen van het talud -waar ook de snelheden werden gemeten - dat hieruit de afwijking niet te verklaren is.

ad 2) Er zijn geen aanwijzingen voor deze hypothese.

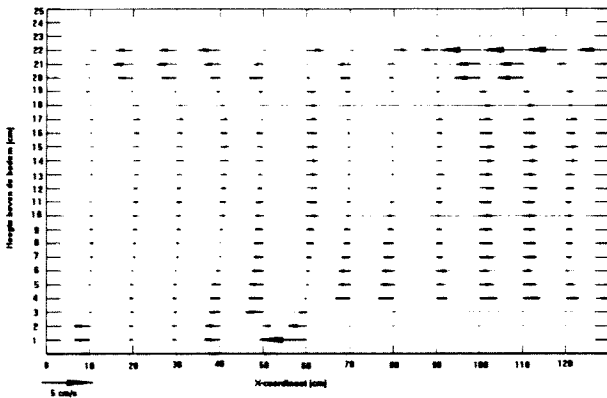
ad 3) Om dit te bekijken zijn de TI-waarden uit de verschillende proeven in één figuur uitgezet.



Figuur 6.16: Relatieve turbulentie-intensiteiten gemeten aan de teen van het talud op 1/2 h bij verschillende hellingen

De relatieve turbulentie-intensiteit is dus niet beduidend groter voor de horizontale bodem dan voor de hellingen. Alleen de stroming op de helling 1:1,5 heeft duidelijk een hogere relatieve turbulentie-intensiteit. Wellicht kan een deel van het extra transport op de helling 1:1,5 niet alleen verklaard worden uit het feit dat de stenen op deze helling instabieler liggen, maar ook uit de hogere turbulentie van de stroming. Hieruit kan echter nog niet worden verklaard waarom bij een horizontale bodem de stenen al verplaatst zijn bij een snelheid die veel lager is dan die op een flauwe helling.

ad 4) In de snelheden in dwarsrichting was bij de horizontale bodem geen duidelijk patroon te ontdekken. Ook hier (net zoals bij de situaties met wel een helling) blijven de snelheden in y-richting erg laag.



Figuur 6.17: Snelheden in y-richting op horizontale bodem.

ad 5) Dit zouden horizontale structuren moeten zijn met een periode veel groter dan 1 seconde. Deze zouden dan zichtbaar moeten zijn in het signaal van de snelheid. In dit signaal zijn echter alleen zeer hoog turbulente schommelingen te zien.

### 6.7.3 Analyse met berekende "nul"-waarde

Het feit dat op de horizontale bodem sommige punten in Figuur 6.10 sterke afwijkingen vertonen van de lijn waarmee de kritieke stroomsnelheid is bepaald, plus het feit dat in deze situatie de stroomgoot extra versmald moest worden geven reden tot twijfel over de betrouwbaarheid van deze waarden.

Om deze reden zijn de gevonden waarden voor de steenstabiliteit nog eens uitgezet, alleen nu tegen een "nul-waarde" oftewel een waarde op de horizontale bodem welke niet gemeten maar berekend is.

Hiervoor is een  $\psi$ -waarde van 0,03 aangehouden, omdat deze waarde vaak wordt geassocieerd met het allereerste begin van bewegen. Verder is voor de ruwheidsfactor  $k$  een waarde genomen van 2 maal  $D_{50}$ . Dit is een vrij gebruikelijke waarde voor een bodem zonder beddingvormen waar we hier mee van doen hebben. De steengrootte bedroeg 0,0063 m zoals in paragraaf 4.3.4 is vermeld. Voor de kinematische viscositeit wordt  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  wat de waarde is voor water van 10 °C. De factor  $\Delta$  was 1,62 en de waterdiepte 0,25 m.

Als we nu de kritieke stroomsnelheid bepalen volgens de Shields-methode volgt:

$$u_{*c} = \sqrt{d \cdot \psi \cdot \Delta \cdot g} = \sqrt{0,0063 \cdot 0,03 \cdot 1,62 \cdot 9,81} = 0,0548 \text{ m/s} \quad (6.2)$$

De Chezy-waarde is gelijk aan:

$$C = 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h}{k \cdot d}\right) = 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot 0,25}{2 \cdot 0,0063}\right) = 42,8 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1} \quad (6.3)$$

De dieptegemiddelde kritieke stroomsnelheid wordt dan gelijk aan:

$$\bar{u}_c = u_{*c} \cdot \frac{C}{\sqrt{g}} = 0,0548 \cdot \frac{42,8}{\sqrt{9,81}} = 0,749 \text{ m/s} \quad (6.4)$$

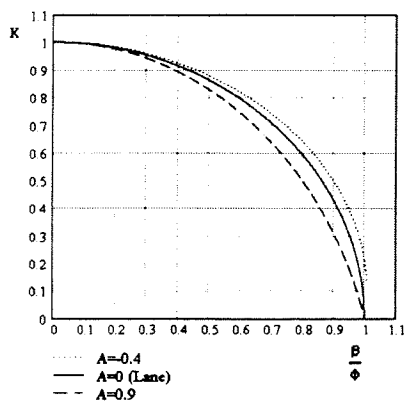
Deze waarde is lager dan in de experimenten wordt gevonden. Dit kon natuurlijk ook al afgeleid worden uit Figuur 6.13 waar de meetwaarden vrij hoog in de grafiek liggen.

### 6.7.4 Hellingcorrectiefactor door andere onderzoekers

Door verschillende onderzoekers is onderzoek gedaan naar de stabiliteit van stenen op een helling. Van enkele hiervan worden de resultaten kort besproken, zodat zij kunnen worden vergeleken met de resultaten zoals deze in dit rapport zijn gevonden.

#### Lane

Als men de formule van Lane voor een hellingcorrectiefactor uitzet in een grafiek krijgt men een figuur zoals deze ook al is afgebeeld in hoofdstuk 2, waarbij de grafiek van Lane de lijn is waarbij de verhouding tussen de liftkracht en de horizontale krachten gelijk aan 0 wordt genomen



Figuur 6.18: Correctiefactor volgens Lane

Deze grafiek is gebaseerd op theoretische overwegingen over hoe de krachten in een stroming op een steen werken en hoe een helling van invloed is op de stabiliteit van een steen. Er zijn verschillende onderzoekers geweest die metingen hebben verricht om te controleren of het model dat gebruikt is voor het opbouwen van deze grafiek op dit punt juist is. Hieronder zullen enkele onderzoeker worden behandeld zoals deze zijn uitgevoerd.

**Ikeda**

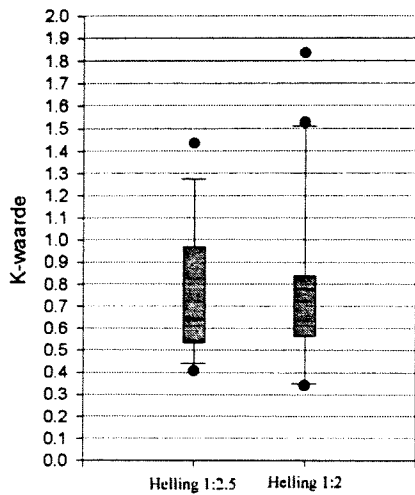
De formule van Ikeda is zoals al eerder genoemd een uitbreiding van de formule van Lane. Als de liftkracht ook wordt meegenomen verandert de hellingcorrectiefactor als functie van de verhouding tussen de liftkracht en horizontale krachten op een steen. De grafiek welke dan resulteert is dezelfde grafiek, maar dan met andere waarden van A.

**Escarameia & May**

Onder andere door Escarameia en May (1992) is onderzoek gedaan naar de stabiliteit van stenen op oevers. Zij hebben in hun onderzoek gebruikt gemaakt van stenen van dezelfde orde van grootte als gebruikt in dit onderzoek en ook van vergelijkbare waterdieptes.

Hieronder zijn hun experimenten uitgezet in een figuur. Vanwege het grote aantal metingen zijn de door hen gevonden K-waarden uitgezet in een boxplot. Deze K-waarden zijn berekend uit de gemiddelde stroomsnelheden die zij voor hun diverse proeven opgaven. Aangezien zij verzuimd hebben de hoek van natuurlijk talud van de door hen beproefde stenen te vermelden kunnen deze waarden niet uitgezet worden in een figuur als Figuur 6.18

**Boxplot:** In een boxplot staan een aantal statistisch waarden van een verdeling uitgezet in één figuur. Wat het eerste opvalt in een boxplot is de rechthoek in het midden van de figuur. Dit gebied stelt het gebied voor waarin de middelste helft van de waarden liggen. Oftewel, aan de ene zijde van de rechthoek vallen de 25% kleinste waarden buiten de rechthoek en aan de andere zijde vallen de 25% grootste waarden erbuiten. De lijn in de rechthoek geeft de mediaan van de verdeling aan. De "snorharen" aan de rechthoek omsluiten het 95% betrouwbaarheidsinterval van de verdeling. Elke waarde die buiten het 95% betrouwbaarheidsinterval ligt wordt weergegeven door losse punten.



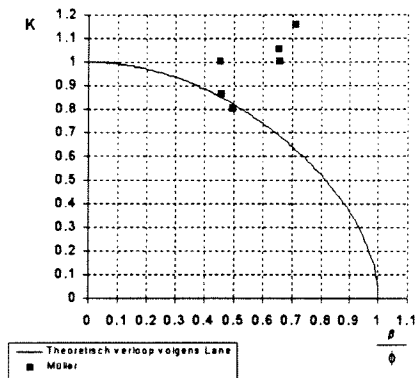
Figuur 6.19: K-waarden zoals gevonden door Escarameia en May (1992)

In de figuur is duidelijk te zien dat de spreiding in de proeven erg groot was.

#### Müller

Een ander onderzoek naar de stabiliteit van stenen is uitgevoerd door Müller (1973)

Dit onderzoek werd uitgevoerd op een horizontale bodem en verder werd een helling van 1:2 en een helling van 1:3 beproefd. Zijn meetwaarden zijn hieronder uitgezet in een figuur.



Figuur 6.20: K-waarden zoals gevonden door Müller (1973)

Zoals ook Müller al geconstateerd had, voldoen enkele waarden geheel niet aan de theorie, met name op de helling 1:2 (De rechter drie meetpunten). Het meest vreemde is dat de meetwaarden lijken te suggereren dat stenen stabielere liggen op steilere hellingen. Iets wat natuurlijk erg vreemd is. Müller gebruikte voor de berekening van zijn K-waarden de schuifspanning gedefinieerd als:

$$\tau = \rho_w \cdot h \cdot i \cdot g \quad (6.5)$$

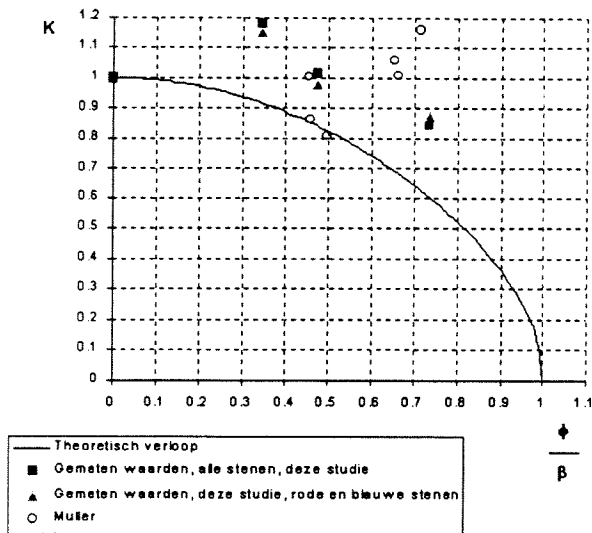
$\rho_w$  : dichtheid van water

$h$  : waterdiepte

$i$  : bodemhelling

6.7.5 Vergelijking hellingcorrectiefactor uit dit onderzoek met dat uit andere

Men kan nu de waarden welke zijn verkregen in dit onderzoek uitzetten tegen de verschillende waarden welke andere onderzoekers hebben gevonden. Men krijgt dan het beeld dat de situatie op een helling wellicht gecompliceerder ligt dan vaak wordt aangenomen. Zowel in dit onderzoek, als in dat van Müller werd in bepaalde situaties gevonden dat stenen die gelegd waren op een helling nog bij een hogere stroomsnelheid bleven liggen dan op een horizontale bodem. Ook in het onderzoek van E&M wordt dit in bepaalde gevallen gevonden. Zowel E&M als Müller geven geen duidelijker verklaring waarom dit het geval zou zijn. Ook in dit onderzoek is hiervoor geen goede verklaring gevonden.



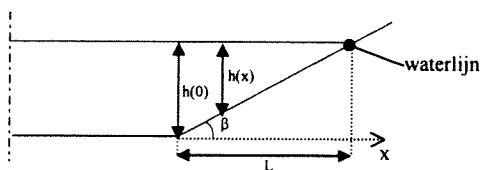
Figuur 6.21: Gevonden K-factor bij verschillende hellingshoeken

6.8 Toepassing in de praktijk

In de praktijk kampt men vaak met het probleem dat een oeverbeschermingsconstructie moet worden ontworpen in een situatie waarin de waterloop nog niet is aangelegd. Er moet dan een inschatting gemaakt worden van de benodigde sterke van de bescherming, zodat deze bestand is tegen de krachten die op de constructie werken. Men moet dan een aanname doen voor de snelheden die boven deze constructie op zullen treden om dan met de bekende formules van Shields, Izbach of anderszins de benodigde steengrootte te berekenen.

Bepalen snelheid

Ten eerste moet dus een schatting van de snelheden boven de helling worden gemaakt. Uit dit onderzoek blijkt dat de meest kritieke situatie optreedt aan de teen van het talud. Hier zal men dan ook de stroomsnelheid willen weten.



$$L = \tan(\beta) \cdot h(0) \tag{6.6}$$



Hierin is  $h(0)$  de diepte aan de teen van het talud, en ook in het horizontale deel van de waterloop,  $u(0)$  is de dieptegemiddelde snelheid op deze plaatsen.  $x=0$  is gedefinieerd aan de teen van het talud met de positieve  $x$ -as horizontaal, richting de waterlijn.

De diepte welke in een waterloop met bepaalde afmetingen optreedt kan gevonden worden door de formules toe te passen zoals deze in boeken over rivierwaterbouwkunde te vinden zijn.

Om het totale debiet te bepalen moet dit worden geïntegreerd van de teen van het talud tot de waterlijn. De waterlijn bevindt zich in deze definitie bij  $x = \tan(\beta) \cdot h(0)$

In het geval dat men uitgaat van een snelheid die evenredig is met de wortel van de diepte zoals in paragraaf 2.6 is gesteld is het verband tussen de snelheid boven de helling en de maximale snelheid gelijk aan:

$$u(x) = \sqrt{\frac{h(x)}{h(0)}} \cdot u(0) \quad (6.7)$$

Het totale debiet boven de helling wordt dan gelijk aan:

$$Q_{helling} = \int_0^L h(x) \cdot u(x) \, dx \quad (6.8)$$

$$Q_{helling} = \int_0^L h(x) \cdot \sqrt{\frac{h(x)}{h(0)}} \cdot u(0) \, dx \quad (6.9)$$

$$Q_{helling} = \left[ \frac{1}{\sqrt{h(0)}} \cdot \frac{2}{5} \cdot h(x)^{5/2} \cdot u(0) \right]_0^L \quad (6.10)$$

$$Q_{helling} = \frac{1}{\sqrt{h(0)}} \cdot \frac{2}{5} \cdot h(0)^{5/2} \cdot u(0) \quad (6.11)$$

Het totale gebied in een symmetrische stroom wordt nu gelijk aan:  $2 \cdot Q_{helling} + Q_{hoofdstroom}$ . (Twee maal  $Q_{helling}$  vanwege het feit dat zich aan weerszijden van de stroom een helling bevindt.).

$$Q_{totaal} = B \cdot h(0) \cdot u(0) + 2 \cdot Q_{helling} \quad (\text{oever aan beide zijde}) \quad (6.12)$$

Hierin is  $B$  de breedte van de horizontale bodem tussen de twee oevers.

Als men vergelijking 6.11 en 6.12 uitwerkt voor  $u(0)$  volgt dan:

$$u(0) = \frac{Q_{totaal}}{B \cdot h(0) + 2 \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{h(0)}} \cdot \frac{2}{5} \cdot h(0)^{5/2} \right]} \quad (6.13)$$

Als dan bekend is welk debiet moet worden afgevoerd door de waterloop en de dimensies zijn bepaald (hellingshoek, breedte, diepte), kan de snelheid worden berekend die in het midden van de stroming zal optreden, deze is in dit model vervolgens ook gelijk aan de snelheid ter plaatse van de teen van het talud.

Er moet natuurlijk gekeken worden of de formule overeenkomt met de waarden gevonden in dit onderzoek.

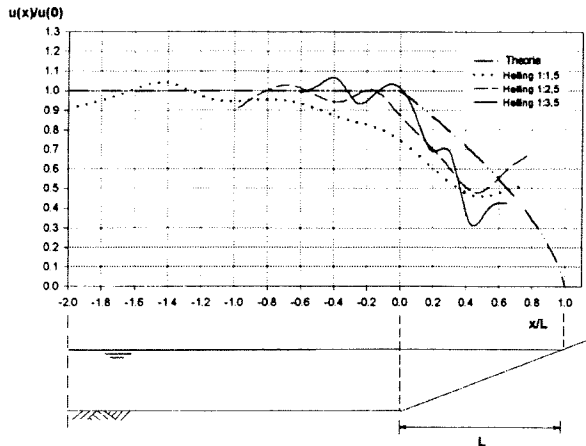
## Hoofdstuk 6: Discussie

Daarom is een aantal waarden uitgezet in de tabel hieronder.  
NB: In deze tabel maar één oever!

Helling	Debiet	B	d(0)	U(0), formule	U(0), gemeten	Afwijking [%]
1:1,5	0,150 m <sup>3</sup> /s	0,83 m	0,25 m	0,645 m/s	0,513 m/s	25.7%
1:1,5	0,221 m <sup>3</sup> /s	0,83 m	0,25 m	0,951 m/s	0,753 m/s	26.3%
1:2,5	0,120 m <sup>3</sup> /s	0,71 m	0,25 m	0,593 m/s	0,465 m/s	27.5%
1:2,5	0,220 m <sup>3</sup> /s	0,71 m	0,25 m	1,086 m/s	0,909 m/s	19.5%
1:3,5	0,083 m <sup>3</sup> /s	0,61 m	0,25 m	0,468 m/s	0,491 m/s	-4.7%

Tabel 6.3 :Verschil tussen berekende en gemeten snelheden

De afwijkingen zijn dus behalve bij de helling 1:3,5 behoorlijk groot. Dit kan voor een groot deel verklaard worden uit het feit dat er in de metingen sprake was van een geheel andere situatie op de helling dan op het horizontale deel naast de helling. Op de helling was de ruwheid vrij groot omdat dit volgelegd was met stenen, het deel naast de helling bestond uit glad beton. Hierdoor wordt een groter deel over dit gladdedeelte afgevoerd.



Figuur 6.22: Snelheden boven de helling, theorie v. metingen

De afwijking bij de helling 1:1,5 is goed te verklaren uit het feit dat de invloed van de hele helling nog doorwerkt aan de teen van het talud. Het snelheidsprofiel zal dus pas een eind voorbij de teen (gezien vanaf de waterlijn) de "normale" snelheid bereiken. Hierdoor meet men een wat lagere snelheid aan de teen.

De afwijking bij de helling 1:2,5 is minder goed te verklaren. Maar kan toch ook mogelijk door hetzelfde effect worden veroorzaakt.

Een andere wijze om het debiet vast te stellen is het integreren van alle snelheden. Als men de snelheidsmetingen uit bijlage II integreert over de doorsnede krijgt men de volgende tabel. Voor de berekening zijn de waarden te dicht bij de bodem vervangen door de eerste betrouwbare waarde hierboven. Dit leidt waarschijnlijk tot een kleine overschatting, omdat de snelheid aan de bodem lager zal zijn dan met deze methode wordt aangenomen.

Situatie	Q uit debietmeting	Q uit integratie	Vershil [%]
1:1,5	0.150	0.141	6.00%
1:1,5	0.221	0.208	5.88%
1:2,5	0.120	0.113	5.83%
1:2,5	0.220	0.219	0.45%
1:3,5	0.083	0.101	-21.69%

Tabel 6.4 :Verskil tussen op twee verschillende manieren bepaalde debieten

Hier is te zien dat bij de helling 1:3,5 het debiet uit de debietmeting aanzienlijk lager is dan het debiet dat volgt uit de integratie. Dit kan betekenen dat deze debietmeting onjuist is. Als men uit zou gaan van het debiet uit de integratie zou de "u(0), formule" uit Tabel 6.3 gelijk aan 0,421 m/s worden. Het verschil wordt dan 11,2 %.

Dit is natuurlijk een versimpelde voorstelling van zaken. In deze beschouwing heeft de helling geen enkele invloed op de stroming zodra het horizontale deel begint. Het is natuurlijk te verwachten dat dit wel het geval is.

Het logaritmische snelheidsprofiel in een "normale" waterloop wordt bepaald doordat de wrijving vanaf de bodem zich voorplant via wrijving in de vloeistof naar het wateroppervlak.

Op een helling mag men verwachten dat ook hier de bodem zijn invloed naar boven toe doet gelden, en wel via de kortste weg, in dit geval langs de normaal op de helling. Dit zou betekenen dat de invloed van de helling op de stroming nog verder merkbaar is. Het systeem is natuurlijk nog ingewikkelder als wordt meegenomen dat ook de invloed van niet alleen het punt op de bodem het dichtst bij het beschouwde punt van invloed is maar de gehele bodem, hoewel minder naar mate een punt verder weg zit.

Dergelijke beschouwingen liggen echter op het gebied van de driedimensionale stromingsmodellen die met behulp van een computer dienen te worden berekend.

Een verdere complicerende factor in de berekening van de snelheid in de nabijheid van een oever is het feit dat vrijwel geen enkele waterloop een volledig recht verloop heeft tenzij deze kunstmatig is aangelegd. De meeste waterlopen hebben een meanderend verloop. In een dergelijk verloop is de stroomsnelheid nog lastiger te bepalen, omdat de stroomsnelheid hier ook niet uniform over de breedte van de waterloop verdeeld is. In de buitenbocht zal het water sneller stromen dan in de binnenbocht. Met name in de buitenbocht zal dan vaak een oeververdediging nodig zijn omdat hier uitschuring (erosie) plaatsvindt.

Het voordeel is meestal dat in een dergelijke situatie waarin een oeverbescherming moet worden aangelegd, er een bestaande situatie is. De stroomsnelheden kunnen dan het best in het veld worden gemeten.

### Steengrootte

Uit dit rapport blijkt dat de maatgevende situatie optreedt aan de teen. De steengrootte moet dus hier worden bepaald met de hier optredende snelheid. Hoewel sommige onderzoeken (waaronder dit rapport) voorzichtige aanwijzingen geven dat bij flauwe hellingen een extra hellingcorrectiefactor niet noodzakelijk is, lijkt het zeker aan te raden dit wel te doen en hiervoor de bekende formule van Lane te gebruiken. Zoals uit dit rapport blijkt, is deze factor voor alle hellingen zeker voldoende veilig. Toepassing van de in sommige gevallen ongunstigere formule van Ikeda lijkt niet noodzakelijk, hoewel men natuurlijk wel altijd moet bedenken dat in de formule van Lane de liftkracht op de stenen verwaarloosd is.

Vaak wordt de teen van een talud echter al extra beschermd uit andere overwegingen. Als de bodem bestaat uit zand of licht grind dient de teen goed te worden beschermd om te voorkomen dat deze faalt omdat de teen ondermijnd wordt. Voor elke overgang van bijvoorbeeld teenconstructie naar rest van de helling moet dan opnieuw bekeken worden wat de benodigde steengrootte daar is.

De snelheid aan de teen van het talud kan in eerste instantie worden geschat met behulp van formule 6.13 Deze formule geeft altijd waarden hoger dan de werkelijke waarden. Dit leidt dus tot een te overschatting van de steengrootte, wat in ieder geval aan de veilige kant is.

---

# Hoofdstuk 7: Conclusies en aanbevelingen

## 7.1 Inleiding

De doelstelling van dit rapport was het bepalen van de wijze waarop een oeverbescherming door middel van stortsteen het beste kan worden ontworpen. Hiervoor worden aan de hand van dit onderzoek enkele aanbevelingen gedaan. Verder is ook tijdens dit onderzoek gebleken dat nog veel onderzoek nodig is om tot een beter begrip te komen van de stroming boven een helling en daarmee samenhangend de steenstabiliteit op een helling. Daarom zijn ook enkele aanbevelingen opgenomen ten aanzien van eventueel vervolgonderzoek.

## 7.2 Conclusies

Als algemene conclusie kan worden gesteld dat een oeverbescherming veilig kan worden ontworpen met de methode Shields en met de hellingcorrectiefactor volgens Lane. De situatie aan de teen van het talud blijkt in alle gevallen maatgevend te zijn. Echter, dit onderzoek geeft wel aanleiding tot nader onderzoek. Het lijkt dat een oeverbescherming wel efficiënter kan worden ontworpen indien men over meer kennis zou beschikken.

## 7.3 Aanbevelingen voor ontwerp

Puntsgewijs kunnen de volgende aanbevelingen gegeven worden.

- **Wees bewust van de beperkingen van de theorie.** Ontwerpers dienen zich te realiseren dat de meestal gebruikte formule van Lane voor de hellingcorrectiefactor een belangrijke kracht, welke van invloed is op de stabiliteit van stenen op de bodem, verwaarloost. Echter, voor ontwerpen is het niet echt noodzakelijk om de uitgebreide formule van Ikeda te gebruiken. De verschillen tussen de twee formules zijn vrij klein en de meeste onderzoeken geven aan dat de formules van Lane en Ikeda beide een overschatting van het benodigde steengewicht geven.
- **Het is aan te bevelen meer onderzoek te doen naar de invloed van oevers.** Hoewel oeverbeschermingen in de waterbouw veel voorkomen, is de hoeveelheid onderzoek naar deze situatie bescheiden. Dit terwijl enkele onderzoeken (waaronder dit onderzoek) toch op zijn minst de indruk wekken dat de situatie op een oever voor zowel de stroming als hiermee verbonden de steenstabiliteit veel complexer is dan de theoretische beschouwingen suggereren.
- **Voor de stabiliteit van stenen is de situatie aan de teen van een talud maatgevend.** Hier vinden de eerste verplaatsingen plaats. Aangezien voor de teen vaak een extra beschermende constructie wordt gebruikt kan men deze bewering uitbreiden. Voor elk afzonderlijk deel van de constructie is de situatie op het diepste gedeelte maatgevend. Niet alleen in het ontwerp maar zeker ook in de controle, het beheer en het onderhoud moet men hiermee rekening houden. De meeste (en grootste) schade vindt dus plaats op het deel waar men het slechtst zicht op heeft: ver onder water en ver van de waterlijn. Zeker in troebel water zal schade dan ook niet meteen opvallen.
- **Gebruik formule om snelheid aan de teen te schatten.** Voor een eerste schatting van de snelheid welke ingevoerd moet worden om de steenstabiliteit te berekenen kan de formule (6.13) worden gebruikt zoals deze in dit rapport is geformuleerd. Deze formule geeft wel een overschatting; voor een definitief ontwerp moet de snelheid dus met geavanceerdere modellen worden vastgesteld.

- **Gebruik bestaande situatie.** Als er een oeverbescherming gemaakt moet worden in een bestaande situatie, is het zeer aan te bevelen de snelheden in het veld te meten.
- **Extra teenbescherming.** De situatie aan de teen van het talud blijkt in alle gevallen maatgevend te zijn. Het is dan wellicht aan te bevelen juist de teen extra te verstevigen, wat overigens ook al vaak de praktijk is.

### 7.4 Aanbevelingen voor nader onderzoek

Haast onvermijdelijk luidt ook in dit onderzoek een van de conclusies dat nader onderzoek noodzakelijk is. Ten aanzien van een eventueel vervolgonderzoek kunnen enkele aanbevelingen worden gedaan.

- **Een vervolgonderzoek zou meerdere steengroottes moeten testen.** In dit onderzoek zijn alle experimenten uitgevoerd met dezelfde stenen. Er kan dus niet worden bepaald of de hellingcorrectiefactor nog beïnvloed wordt door de steengrootte. Wellicht dat dit wel het geval is. Dit zou onder andere het geval kunnen zijn bij een andere verhouding tussen de horizontale en verticale krachten op een steen.
- **Meer onderzoek bij flauwe hellingen.** In dit onderzoek kwam naar voren dat op flauwe hellingen de steenstabiliteit groter was dan op een horizontale bodem. Hopelijk kan een onderzoek met hellingen tussen een helling 1:3,5 en een horizontale bodem meer licht werpen op de mechanismen die een rol spelen bij afnemende diepte zoals dit bij een helling het geval is. Bij een flauwe helling is dit gebied groter en verloopt de diepte langzamer. Wellicht kan dan beter gekeken worden naar de processen op een helling.
- **Onderzoek met een gelijke ruwheid op helling en horizontaal deel.** Het gedeelte naast de helling bestond in dit onderzoek uit glad beton, in tegenstelling tot de helling die bekleed was met stenen. Indien de gehele bodem met stenen is volgelegd, krijgt men mogelijk een beter beeld van de invloed van de helling alleen.
- **Verder literatuuronderzoek.** In dit onderzoek bleek dat het aantal onderzoeken naar steenstabiliteit op hellingen vrij beperkt is. Zeker met die wetenschap is elk onderzoek dat uitgevoerd en beschreven wordt zeer waardevol. Het zal daarom waarschijnlijk de moeite zijn om nog eens gedegen te zoeken of er niet meer literatuur te vinden is over dit onderwerp.
- **Variatie in waterdiepte.** Nergens in de literatuur wordt melding gemaakt van een afhankelijkheid van de hellingcorrectiefactor van de waterdiepte. Het snelheidsprofiel wordt natuurlijk wel beïnvloed door een andere diepte. Ook in relatie met het testen van andere steengroottes is wellicht een andere verhouding steengrootte / waterdiepte van invloed op de steenstabiliteit.
- **Krachten op een steen afzonderlijk meten.** Hoewel dit praktische problemen met zich meebrengt is het zeker interessant om de verschillende krachten afzonderlijk te kennen. Dit zou ook meer informatie verschaffen over de verhouding tussen de liftkracht en de horizontale krachten op een steen.
- **Andere soorten stenen.** Men kan natuurlijk nog variëren in steenvorm en ruwheid. Mogelijk gedragen extreem platte stenen zich op een helling weer anders dan rondere stenen.
- **Computermodellen.** Het modelleren van allerlei zaken met behulp van een computer neemt natuurlijk de laatste jaren een zeer hoge vlucht. Wanneer computers zo krachtig worden dat de stroming om individuele stenen kan worden berekend en modellen geavanceerd genoeg raken, kan men natuurlijk met behulp van dergelijke modellen ook onderzoek doen naar stenen op een helling.

Al deze aanwijzingen voor verder onderzoek geven al aan dat dit onderzoek zeker niet het eindpunt is op dit gebied. Indien men al deze factoren zou willen testen heeft men genoeg materiaal voor nog vele jaren van experimenteren. De situatie op een helling is zeker nog niet volledig bekend en er kan op dit terrein nog veel onderzoek gedaan worden naar het efficiënter ontwerpen van een steenbestorting op een oever.

---

# Literatuur

- I. Aalst, W. van e.a.: The Closure of Tidal Basins. Delft University Press 1987. ISBN 90-6275-287-X
- II. Akkerman, G.J.: Literatuurinventarisatie stabiliteitsvoorspellers en – gegevens, Waterloopkundig Laboratorium, April 1998
- III. Booij, R.: Turbulentie in de waterloopkunde. T.U. Delft, faculteit der Civiele Techniek, december 1992
- IV. Brouwer, R.: Irrigatie en Drainage, T.U. Delft, faculteit der Civiele Techniek, september 1997
- V. Buffington, J.M.: The legend of A.F. Shields. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, April 1999 (Vol. 125, No. 4), p. 376-387. ISSN 0733-9429
- VI. Chadwick, A. & Morfett, J. Hydraulics in Civil and Environmental Engineering, Spon London, 1998. ISBN 0-419-22580-3
- VII. Escarameia, M. & May, R.W.P.: Channel Protection, Turbulence downstream of structures. Report SR 313, HR Wallingford, April 1992
- VIII. Escarameia, M., e.a.: Stability of riprap and concrete blocks in highly turbulent flows. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Maritime & Energy, September 1995 pag. 227-237. ISSN 0965-0903
- IX. Hemphill, R.W. and Bramley, M.W. Protection of River and Canal Banks. CIRIA 1989
- X. Hoffmans, G.J.C.M. & Akkerman, G. Influence of turbulence on stone stability, Delft Hydraulics, Delft
- XI. Ikeda, S.: Incipient Motion of Sands Particles on Side Slopes. Journal Hydraulic Division ASCE, January 1982, pag. 95-114. ISSN 0044-796X
- XII. Jansen, P.: Principles of River Engineering, Delftse Uitgevers Maatschappij 1979. ISBN 90-6562-146-6
- XIII. Kennedy, J.F. : The Albert Shields story. Journal of Hydraulic Engineering ASCE, November 1995 (Vol. 121, No. 11) p. 766-772. ISSN 0733-9429
- XIV. Moin, P. & Kim, J.: Tackling turbulence with super computers, Scientific American, Januari 1997.  
(<http://www.sciam.com/0197issue/0197moin.html>)
- XV. Müller, G. e.a.: Ausführungen über die Erosionbeständigkeit von Lockergesteinen in Wasserlaufbetten. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, Augustus 1973 pag. 279-283. ISSN 0043-0986
- XVI. Paintal, A.S.: Concept of critical shear stress in loose boundary open channels. Journal of Hydraulic Research, January 1971 p. 91-113. ISSN 0022-1686.
- XVII. Pilarczyk, K.W. e.a.: Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering. CUR 1994. ISBN 9037600603
- XVIII. Schiereck, G.J.: Introduction to bed, bank and shore protection. T.U. Delft, faculteit der Civiele Techniek, juli 1996
- XIX. Serway, R.A.: Physics for Scientists & Engineers. James Madison University 1992
- XX. Snedecor, G.W. & W.G Cochran Statistical methods, The Iowa state university press, 1972. ISBN 0-8138-1560-6
- XXI. Spizer, D.W. Flow measurement. Instrument Society of America, 1991. ISBN 1-55617-334-2
- XXII. Zuurveld, J.: Hoofdstroming contra menglaag, Afstudeerverslag T.U. Delft, faculteit der Civiele Techniek, oktober 1998





# BIJLAGE I: Steenafmetingen

No	Lanste as (mm)	Middenas (mm)	Kortste as (mm)	Gewicht (gr)	No	Lanste as (mm)	Middenas (mm)	Kortste as (mm)	Gewicht (gr)
1	17.9	11.3	7.8	1.539	51	19.0	6.5	6.4	1.154
2	12.0	10.8	6.8	0.857	52	20.1	10.8	7.5	2.188
3	13.3	7.8	6.5	0.559	53	13.0	11.8	5.4	1.219
4	14.4	7.8	4.8	0.990	54	12.9	10.1	6.5	0.875
5	15.1	10.1	6.1	1.061	55	12.5	10.0	9.5	1.158
6	13.6	10.6	5.9	1.000	56	9.3	6.3	3.5	0.217
7	11.3	10.0	6.6	0.785	57	14.4	11.0	4.4	0.836
8	16.9	9.4	6.9	1.145	58	9.4	8.5	6.5	0.561
9	20.3	8.4	5.6	1.109	59	15.4	7.6	7.1	1.172
10	22.4	9.9	5.1	1.395	60	16.1	7.0	6.4	0.736
11	10.8	10.8	2.5	0.494	61	17.6	6.5	4.0	0.500
12	14.0	10.8	6.3	1.203	62	16.1	8.1	4.6	0.732
13	18.9	9.5	9.0	1.883	63	8.5	6.9	3.4	0.186
14	18.6	11.9	8.6	1.715	64	15.3	11.4	8.6	1.391
15	7.0	5.6	4.6	0.158	65	15.5	10.3	6.1	1.025
16	16.3	10.6	4.9	0.805	66	12.3	9.8	9.4	1.143
17	12.0	4.9	4.8	0.623	67	15.1	10.3	4.3	0.768
18	12.8	9.3	6.9	0.922	68	11.6	7.5	5.6	0.512
19	15.3	11.5	7.3	1.221	69	15.1	7.9	6.8	0.924
20	13.8	8.9	5.0	0.785	70	11.4	7.5	6.5	0.662
21	16.4	8.1	3.9	0.578	71	14.9	7.5	4.4	0.627
22	7.6	4.8	4.8	0.168	72	15.1	10.0	4.1	0.785
23	12.1	8.8	8.1	0.904	73	11.4	8.8	6.8	0.953
24	15.6	9.4	6.1	0.873	74	13.0	9.1	5.3	0.566
25	14.0	8.8	4.9	0.674	75	13.3	10.4	6.0	0.746
26	17.8	9.0	6.0	0.867	76	11.5	8.6	4.9	0.408
27	16.0	10.9	3.9	0.699	77	11.6	9.4	8.0	1.004
28	11.1	10.0	7.9	0.922	78	15.8	5.9	5.6	0.650
29	12.8	7.8	6.1	0.654	79	17.5	11.5	3.4	0.494
30	13.9	8.8	3.5	0.473	80	14.0	8.5	6.1	0.719
31	10.6	8.6	7.8	0.770	81	14.5	10.3	4.9	0.674
32	13.9	7.6	2.6	0.367	82	11.5	9.5	5.4	0.742
33	11.1	8.1	7.0	0.613	83	12.6	8.9	6.4	0.777
34	13.8	11.5	5.0	0.705	84	10.8	8.8	7.4	0.797
35	11.0	7.8	5.8	0.521	85	19.4	8.5	3.1	0.730
36	15.4	10.1	3.6	0.820	86	14.0	9.0	6.3	1.033
37	13.9	9.0	5.3	0.910	87	13.9	8.0	4.3	0.463
38	15.0	8.0	6.9	1.018	88	14.8	9.0	6.3	0.818
39	14.0	6.5	5.6	0.529	89	14.4	8.9	4.1	0.574
40	13.9	6.5	3.9	0.492	90	12.6	7.5	6.6	0.654
41	10.6	7.4	6.3	0.453	91	12.1	8.4	6.3	0.738
42	15.1	8.6	6.1	1.145	92	13.8	7.9	5.3	0.773
43	8.9	7.1	7.1	0.641	93	12.5	10.0	4.0	0.631
44	11.5	8.8	3.3	0.328	94	12.0	10.5	6.1	0.502
45	13.0	7.9	6.0	0.553	95	9.3	7.9	7.0	0.586
46	11.5	7.3	4.6	0.313	96	10.6	7.9	6.9	0.590
47	10.4	7.8	5.1	0.441	97	13.6	9.9	3.6	0.617
48	12.1	6.5	4.9	0.439	98	15.6	7.4	5.1	0.754
49	10.1	7.8	4.4	0.367	99	10.0	8.9	2.8	0.377
50	16.3	11.0	6.5	1.539	100	11.8	9.4	2.8	0.486

## Bijlagen

No	Gewicht (gr)	No	Gewicht (gr)	No	Gewicht (gr)	No	Gewicht (gr)
101	0.736	151	1.438	201	2.809	251	5.486
102	0.842	152	1.644	202	3.211	252	6.272
103	1.369	153	2.674	203	5.223	253	10.201
104	0.729	154	1.423	204	2.779	254	5.428
105	0.764	155	1.492	205	2.913	255	5.690
106	0.818	156	1.598	206	3.122	256	6.097
107	1.379	157	2.693	207	5.260	257	10.274
108	0.666	158	1.301	208	2.541	258	4.962
109	0.855	159	1.671	209	3.263	259	6.374
110	0.590	160	1.152	210	2.250	260	4.395
111	0.803	161	1.568	211	3.062	261	5.981
112	0.543	162	1.060	212	2.071	262	4.045
113	0.625	163	1.221	213	2.384	263	4.657
114	0.623	164	1.217	214	2.377	264	4.642
115	1.031	165	2.014	215	3.934	265	7.683
116	0.732	166	1.431	216	2.794	266	5.457
117	0.576	167	1.125	217	2.198	267	4.293
118	0.666	168	1.301	218	2.541	268	4.962
119	0.703	169	1.373	219	2.682	269	5.239
120	1.320	170	2.579	220	5.037	270	9.837
121	1.646	171	3.216	221	6.281	271	12.267
122	1.162	172	2.270	222	4.433	272	8.658
123	1.568	173	3.063	223	5.983	273	11.685
124	0.258	174	0.504	224	0.983	274	1.921
125	0.811	175	1.583	225	3.092	275	6.039
126	1.070	176	2.090	226	4.083	276	7.974
127	0.303	177	0.591	227	1.155	277	2.256
128	1.211	178	2.365	228	4.619	278	9.022
129	0.707	179	1.381	229	2.697	279	5.268
130	0.609	180	1.190	230	2.325	280	4.540
131	0.768	181	1.499	231	2.928	281	5.719
132	0.121	182	0.237	232	0.462	282	0.902
133	0.535	183	1.045	233	2.041	283	3.987
134	0.475	184	0.927	234	1.810	284	3.536
135	0.475	185	0.927	235	1.810	285	3.536
136	0.729	186	1.423	236	2.779	286	5.428
137	0.428	187	0.835	237	1.632	287	3.187
138	0.871	188	1.701	238	3.323	288	6.490
139	0.633	189	1.236	239	2.414	289	4.715
140	0.822	190	1.606	240	3.137	290	6.126
141	0.846	191	1.652	241	3.226	291	6.301
142	0.436	192	0.851	242	1.661	292	3.245
143	0.465	193	0.908	243	1.773	293	3.463
144	0.701	194	1.369	244	2.675	294	5.224
145	0.459	195	0.896	245	1.751	295	3.420
146	0.160	196	0.313	246	0.611	296	1.193
147	0.330	197	0.645	247	1.259	297	2.459
148	0.416	198	0.813	248	1.587	298	3.100
149	0.500	199	0.977	249	1.907	299	3.725
150	0.693	200	1.354	250	2.645	300	5.166

---

## BIJLAGE II: Hoek natuurlijk talud

Proef	Hellingshoek	Proef	Hellingshoek	Proef	Hellingshoek
1	46,1°	11	45,0°	21	43,5°
2	51,7°	12	45,7°	22	46,4°
3	46,4°	13	49,6°	23	47,7°
4	43,2°	14	47,7°	24	45,0°
5	44,4°	15	45,7°	25	47,1°
6	47,7°	16	44,3°	26	49,0°
7	43,2°	17	41,3°	27	44,3°
8	47,7°	18	45,0°	28	47,7°
9	49,0°	19	53,1°	29	47,1°
10	40,0°	20	44,3°	30	46,4°

## **BIJLAGE III: Gemeten snelheden**

In deze bijlage zijn de snelheden opgenomen zoals die gemeten zijn met de ElektroMagnetische Snelheidsmeters. De waarden die gemeten zijn te dicht in de buurt van de stenen zijn echter onbetrouwbaar. Deze zijn in de tabellen cursief gedrukt. Voor de volledigheid zijn wel de volledige gegevens opgenomen.







**Bijlagen**

**Helling: 1:3.5**  
**Q: ???**

**Meetduur: 2 min**  
**Meetfrequentie: 10 Hz**  
**Gemiddelde snelheden in m/s**

run 1	EMS 3			EMS 7			EMS 6												
run 2	EMS 3			EMS 7			EMS 6												
run 3	EMS 6			EMS 7			EMS 6												
run 4										EMS 3			EMS 6						
run 5													EMS 6						
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
24	0.4331	0.4601	0.4356	0.2839	0.3121	0.4074	0.3949	0.2785	0.3176	0.0416	0.2004	0.2039							
23	0.3615	0.4328	0.4912	0.4372	0.4441	0.4751	0.4307	0.3323	0.3451	0.1751	0.1958	0.1988							
22	0.4425	0.4868	0.5185	0.4676	0.4708	0.4993	0.4442	0.3451	0.3595	0.1950	0.1889	0.2066							
21	0.4633	0.4985	0.5285	0.4743	0.4855	0.5124	0.4549	0.3457	0.3578	0.1948	0.1820	0.2518							
20	0.4886	0.5225	0.5463	0.4918	0.5029	0.5329	0.4581	0.3394	0.3462	0.1748	0.1865	0.5202							
19	0.5017	0.5306	0.5546	0.4965	0.5117	0.5399	0.4623	0.3335	0.3361	0.1721	0.2083								
18	0.5071	0.5346	0.5564	0.4970	0.5125	0.5442	0.4669	0.3246	0.3360	0.1614	0.4031								
17	0.5098	0.5354	0.5505	0.4958	0.5236	0.5387	0.4724	0.3130	0.3198	0.1550									
16	0.5098	0.5322	0.5483	0.4944	0.5132	0.5472	0.4659	0.3052	0.3100	0.1404									
15	0.5090	0.5263	0.5490	0.4899	0.5149	0.5438	0.4683	0.3048	0.3033	0.1465									
14	0.5080	0.5235	0.5407	0.4798	0.5170	0.5358	0.4665	0.3581	0.3050	0.1506									
13	0.5035	0.5179	0.5295	0.4736	0.5100	0.5369	0.4426	0.3511	0.2908	0.1520									
12	0.5032	0.5117	0.5244	0.4655	0.5028	0.5317	0.4372	0.3363	0.2844	0.1498									
11	0.4956	0.5039	0.5236	0.4613	0.4939	0.5096	0.4165	0.3416	0.3050										
10	0.4855	0.5005	0.5149	0.4573	0.4894	0.5176	0.4179	0.3338	0.3828										
9	0.4816	0.4961	0.4990	0.4428	0.4812	0.5123	0.3978	0.3319	0.7679										
8	0.4795	0.4899	0.4955	0.4462	0.4761	0.4923	0.3782	0.3272	1.8143										
7	0.4772	0.4758	0.4918	0.4447	0.4666	0.4833	0.3691	0.3803											
6	0.4627	0.4720	0.4774	0.4262	0.4578	0.4625	0.3618	0.5886											
5	0.4598	0.4629	0.4733	0.4187	0.4453	0.4516	0.3756	0.0532											
4	0.4521	0.4566	0.4657	0.4150	0.4307	0.4335	0.4119	2.3211											
3	0.4407	0.4486	0.4580	0.4004	0.4214	0.4158	0.7383												
2	0.4218	0.4370	0.4442	0.3958	0.4152	0.3921	2.4023												
1	0.3964	0.4135	0.4124	0.3813	0.3989	0.3767													

**Helling: vlakke bodem, gladde geul, volle breedte**  
**Q: ??? l/s**

**Meetduur: 2 min**  
**Meetfrequentie: 10 Hz**  
**Gemiddelde snelheden in m/s**

run 1	EMS 3			EMS 7			EMS 6														
run 2	EMS 3			EMS 7			EMS 6														
run 3	EMS 6			EMS 7			EMS 6														
run 4										EMS 3			EMS 7			EMS 6					
run 5													EMS 3			EMS 7			EMS 6		
run 6													EMS 6			EMS 7			EMS 6		
run 7																EMS 6			EMS 6		
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190		
24	0.4533	0.4880	0.5373	0.3770	0.3862	0.3919	0.4429	0.4645	0.4308	0.4498	0.4380	0.4463	0.3626	0.3583	0.3603	0.4215	0.4341	0.4578	0.4819		
23	0.3270	0.4066	0.4520	0.4384	0.4558	0.4553	0.4540	0.4648	0.4382	0.3991	0.3771	0.3777	0.4031	0.3982	0.3896	0.4376	0.4274	0.4341	0.4584		
22	0.3928	0.4851	0.5138	0.4810	0.4895	0.4911	0.4811	0.4959	0.4707	0.4382	0.4261	0.4230	0.4357	0.4377	0.4299	0.4711	0.4669	0.4674	0.4718		
21	0.4274	0.5066	0.5307	0.4902	0.4939	0.4994	0.4987	0.5092	0.4794	0.4578	0.4450	0.4432	0.4469	0.4551	0.4423	0.4807	0.4877	0.4807	0.4795		
20	0.4539	0.5273	0.5445	0.4963	0.5082	0.5130	0.5035	0.5147	0.4857	0.4564	0.4434	0.4506	0.4553	0.4584	0.4444	0.4910	0.4908	0.4899	0.4910		
19	0.4700	0.5492	0.5631	0.5137	0.5268	0.5219	0.5095	0.5162	0.4948	0.4594	0.4384	0.4497	0.4479	0.4534	0.4491	0.4863	0.4960	0.4966	0.4932		
18	0.4837	0.5575	0.5650	0.5168	0.5264	0.5286	0.5023	0.5119	0.4851	0.4582	0.4437	0.4411	0.4489	0.4536	0.4495	0.4936	0.4978	0.5024	0.4925		
17	0.4882	0.5592	0.5658	0.5164	0.5309	0.5236	0.5005	0.5102	0.4814	0.4533	0.4210	0.4400	0.4409	0.4574	0.4505	0.4843	0.4937	0.4999	0.4985		
16	0.4965	0.5604	0.5676	0.5160	0.5301	0.5269	0.4904	0.5026	0.4778	0.4459	0.4182	0.4290	0.4425	0.4415	0.4289	0.4766	0.4898	0.5006	0.4980		
15	0.5006	0.5559	0.5614	0.5120	0.5300	0.5262	0.4939	0.4846	0.4683	0.4376	0.4185	0.4296	0.4316	0.4290	0.4334	0.4839	0.4510	0.4986	0.4952		
14	0.5045	0.5463	0.5479	0.5107	0.5276	0.5166	0.4799	0.4884	0.4674	0.4427	0.4064	0.4231	0.4351	0.4388	0.4154	0.4684	0.4240	0.4895	0.4871		
13	0.5044	0.5497	0.5067	0.5052	0.5244	0.5121	0.4511	0.4656	0.4380	0.4287	0.4068	0.4098	0.4127	0.4206	0.4168	0.4697	0.4176	0.4784	0.4809		
12	0.5041	0.5445	0.4984	0.4948	0.5214	0.5089	0.4326	0.4801	0.4215	0.3978	0.3982	0.4079	0.4063	0.4031	0.4110	0.4611	0.4907	0.4673	0.4672		
11	0.5057	0.5424	0.5062	0.4887	0.5147	0.5011	0.4745	0.4627	0.3967	0.4039	0.3685	0.3849	0.3983	0.3996	0.3932	0.4586	0.4869	0.4511	0.4539		
10	0.5006	0.5304	0.5034	0.4906	0.5110	0.5057	0.5155	0.4638	0.4257	0.3826	0.3752	0.3848	0.3977	0.3988	0.3818	0.4445	0.4695	0.4313	0.4365		
9	0.4949	0.5260	0.4980	0.4858	0.5122	0.4909	0.4665	0.4400	0.4334	0.3824	0.3634	0.3709	0.3726	0.3635	0.3734	0.4387	0.4581	0.4237	0.4227		
8	0.4911	0.5138	0.4925	0.4791	0.5029	0.4809	0.4267	0.4298	0.4230	0.3690	0.3470	0.3731	0.3649	0.3689	0.3584	0.4214	0.4370	0.4001	0.4044		
7	0.4788	0.5072	0.4757	0.4714	0.4869	0.4761	0.4272	0.4082	0.4043	0.3649	0.3431	0.3473	0.3483	0.3675	0.3406	0.4124	0.4178	0.3868	0.3875		
6	0.4727	0.5041	0.4709	0.4653	0.4829	0.4642	0.4187	0.3991	0.4034	0.3472	0.3286	0.3342	0.3335	0.3541	0.3417	0.3897	0.3835	0.3894	0.3721		
5	0.4629	0.4873	0.4663	0.4606	0.4748	0.4444	0.4102	0.3782	0.3820	0.3406	0.3240	0.3135	0.3292	0.3318	0.3169	0.3674	0.3508	0.6236	0.3496		
4	0.4502	0.4860	0.4594	0.4553	0.4623	0.4308	0.3905	0.3632	0.3622	0.3157	0.3016	0.2898	0.3135	0.3240	0.3066	0.0029	0.3549	1.5037	0.3023		
3	0.4328	0.4741	0.4508	0.4386	0.4427	0.4094	0.3606	0.3129	0.3193	0.2869	0.2627	0.2393	0.2879	0.2983	0.2729	-0.522	1.6370	1.4439	0.2014		
2	0.4190	0.4571	0.4326	0.4300	0.4318	0.3846	0.2424	0.0818	0.5345	0.2487	0.1922	-0.021	0.2575	0.2274	0.1823	-1.742	2.2348	-2.835	0.1759		
1	0.4052	0.4306	0.4144	0.4101	0.4102	0.3736	2.7011	0.4471	-5.000	0.2258	0.2015	0.1805	0.2142	0.1016	0.1717	-1.735	1.7051	-2.653	4.9236		



---

Bijlagen

Helling: Vlakke bodem, gladde geul, versmalde goot  
 Q: ??? l/s

Meetduur: 2 min  
 Meetfrequentie: 10 Hz  
 Gemiddelde snelheden in m/s

run 1	EMS 3			EMS 7				EMS 6											
run 2	EMS 3			EMS 7				EMS 6											
run 3	EMS 3			EMS 7				EMS 6											
run 4	EMS 3			EMS 7				EMS 6											
run 5	EMS 6																		
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
24	0.3844	0.4539	0.4890	0.4580	0.4564	0.4112	0.4069	0.4321	0.4258	0.3559	0.3986	0.3581	0.3562						
23	0.4916	0.4961	0.5282	0.5134	0.5042	0.4639	0.4688	0.4766	0.4593	0.3925	0.4210	0.3780	0.3190						
22	0.5112	0.5421	0.5662	0.5489	0.5255	0.4864	0.4908	0.4967	0.4782	0.4162	0.4483	0.4095	0.3499						
21	0.5727	0.5571	0.5782	0.5653	0.5404	0.5050	0.5034	0.5072	0.4897	0.4256	0.4581	0.4284	0.3618						
20	0.5587	0.5769	0.5971	0.5873	0.5622	0.5350	0.5347	0.5356	0.4888	0.4672	0.4638	0.4385	0.3799						
19	0.5996	0.6111	0.6285	0.6106	0.5853	0.5465	0.5353	0.5388	0.4869	0.4676	0.4666	0.4469	0.3838						
18	0.6081	0.6199	0.6356	0.6158	0.5888	0.5525	0.5379	0.5416	0.4976	0.4707	0.4733	0.4435	0.3892						
17	0.6136	0.6233	0.6340	0.6193	0.5951	0.5475	0.5265	0.5314	0.5050	0.4711	0.4744	0.4404	0.3879						
16	0.6138	0.6214	0.6213	0.6219	0.5939	0.5449	0.5230	0.5293	0.4904	0.4757	0.4430	0.4351	0.3787						
15	0.6136	0.6128		0.6245	0.5912	0.5448		0.5194	0.5000	0.4626		0.4222	0.3718						
14	0.6131	0.6112	0.6145	0.6165	0.5916	0.5391	0.5101	0.5063	0.4830	0.4515	0.4504	0.4058	0.3674						
13	0.6092	0.6009	0.6085	0.6172	0.5836	0.5297	0.4920	0.4981	0.4762	0.4423	0.4336	0.4005	0.3500						
12	0.6011	0.5940	0.6033	0.6122	0.5784	0.5155	0.4773	0.4863	0.4544	0.4266	0.4092	0.3784	0.3385						
11	0.5959	0.5834	0.6040	0.6095	0.5739	0.5079	0.4594	0.4742	0.4430	0.4112	0.3923	0.3651	0.3282						
10	0.5935	0.5789	0.5915	0.5971	0.5707	0.4916	0.4470	0.4596	0.4313	0.3924	0.3857	0.3622	0.3173						
9	0.5768	0.5707	0.5874	0.5913	0.5617	0.4863	0.4395	0.4368	0.4066	0.3912	0.3642	0.3371	0.3050						
8	0.5712	0.5525	0.5874	0.5862	0.5502	0.4629	0.4136	0.4239	0.4082	0.3732	0.3445	0.3255	0.2937						
7	0.5509	0.5428	0.5668	0.5744	0.5341	0.4425	0.3943	0.4032	0.3736	0.3455	0.3240	0.3030	0.2881						
6	0.5472	0.5357	0.5577	0.5596	0.5180	0.4381	0.3784	0.3993	0.3508	0.3198	0.3112	0.2848	0.2713						
5	0.5244	0.5278	0.5438	0.5544	0.5091	0.4167	0.3620	0.3758	0.3400	0.3056	0.2921	0.2685	0.2541						
4	0.5073	0.5102	0.5375	0.5294	0.4857	0.3969	0.3322	0.3558	0.3166	0.2868	0.2719	0.2427	0.2099						
3	0.4862	0.4857	0.5186	0.5176	0.4268	0.3623	0.3122	0.3070	0.2301	0.2073	0.1667	0.1787	0.0629						
2	0.4650	0.4698	0.4941	0.4942	0.4097	0.3291	0.2341	0.2191	0.1933	-0.065	-0.655	0.2329	-1.000						
1	0.4325	0.4440	0.4681	0.4628	0.3775	0.3294	0.3399	0.1030	0.9995	0.9995	-1.000	0.9060	-1.000						

Helling: Vlakke bodem, volledig ruwe bodem, versmalde goot  
 Q: ??? l/s

Meetduur: 2 min  
 Meetfrequentie: 10 Hz  
 Gemiddelde snelheden in m/s

run 1	EMS 3			EMS 7				EMS 6											
run 2	EMS 3			EMS 7				EMS 6											
run 3	EMS 3			EMS 7				EMS 6											
run 4	EMS 3			EMS 7				EMS 6											
run 5	EMS 6																		
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190
24	0.1294	0.2252	0.2953	0.3564	0.3412	0.3498	0.3772	0.4736	0.4957	0.5062	0.4805	0.4664	0.4584						
23	0.1295	0.3079	0.4051	0.4397	0.4403	0.4467	0.4469	0.5009	0.5120	0.5131	0.4972	0.4880	0.4867						
22	0.2915	0.4235	0.4654	0.4738	0.4769	0.4793	0.4662	0.5053	0.5274	0.5348	0.5188	0.5147	0.5133						
21	0.3520	0.4487	0.4802	0.4885	0.4867	0.4822	0.4883	0.5136	0.5341	0.5391	0.5340	0.5324	0.5317						
20	0.3784	0.4768	0.5085	0.5062	0.5045	0.5107	0.4907	0.5665	0.5416	0.5458	0.5336	0.5317	0.5316						
19	0.4093	0.4995	0.5187	0.5340	0.5231	0.5131	0.5272	0.5303	0.5351	0.5487	0.5540	0.5583	0.5612						
18	0.4287	0.5031	0.5124	0.5137	0.5135	0.5129	0.5458	0.5647	0.5459	0.5525	0.5533	0.5534	0.5534						
17	0.4312	0.5038	0.5207	0.5249	0.5169	0.5163	0.5513	0.5570	0.5430	0.5482	0.5518	0.5553	0.5564						
16	0.4406	0.5062	0.5053	0.5043	0.5047	0.5037	0.5179	0.5454	0.5445	0.5470	0.5479	0.5479	0.5480						
15	0.4350	0.4842	0.4896	0.4944	0.4905	0.5009	0.5224	0.5237	0.5217	0.5554	0.5697	0.5740	0.5763						
14	0.4209	0.4815	0.4899	0.4951	0.4898	0.4845	0.5426	0.5553	0.5322	0.5381	0.5425	0.5444	0.5454						
13	0.4111	0.4690	0.4674	0.4679	0.4675	0.4719	0.4839	0.5095	0.5053	0.5129	0.5151	0.5153	0.5154						
12	0.3956	0.4543	0.4543	0.4541	0.4542	0.4598	0.4778	0.4956	0.5002	0.4912	0.4826	0.4795	0.4773						
11	0.3812	0.4388	0.4311	0.4292	0.4295	0.4336	0.4703	0.4781	0.4735	0.4856	0.4881	0.4903	0.4911						
10	0.3586	0.4200	0.4164	0.4130	0.4150	0.4216	0.4528	0.4538	0.4602	0.4618	0.4625	0.4628	0.4628						
9	0.3337	0.3894	0.3909	0.3959	0.3937	0.3931	0.4418	0.4477	0.4345	0.4424	0.4477	0.4485	0.4486						
8	0.3250	0.3704	0.3737	0.3759	0.3751	0.3735	0.4165	0.4181	0.4228	0.4105	0.4048	0.4006	0.3998						
7	0.2924	0.3620	0.3491	0.3501	0.3517	0.3878	0.3994	0.4048	0.4094	0.4105	0.4109	0.4111	0.4111						
6	0.2778	0.3443	0.3397	0.3390	0.3387	0.3592	0.3722	0.3976	0.3883	0.3717	0.3592	0.3496	0.3487						
5	0.2518	0.3273	0.2845	0.2939	0.2852	0.3247	0.3362	0.3599	0.3554	0.3622	0.3658	0.3670	0.3680						
4	0.2357	0.2815	0.2818	0.2817	0.2818	0.2930	0.3374	0.3788	0.3476	0.2972	0.2848	0.2800	0.2767						
3	0.2027	0.2638	0.2621	0.2598	0.2612	0.2823	0.2930	0.3102	0.3099	0.1598	0.0503	0.0134	-0.015						
2	0.1784	0.1929	0.2416	0.2459	0.2356	0.2441	0.4171	0.5553	0.5015	-1.000	-1.385	-1.733	-1.800						
1	0.1449	0.1042	0.1252	0.1415	0.1331	0.0715	-0.570	-1.115	-0.691	-0.246	-0.092	0.0549	0.0663						

---

## BIJLAGE IV: Specificaties EMS

Sensor: Electromagnetisch, 2 richtingen, 4 kwadranten.  
Afmetingen: 11\*33 mm elliptisch.  
Staafdiameter: 10 mm, lengte tot 850 mm  
Probe voorversterker: 65\*150\*35 mm  
Totale lengte probe: 1090 mm.  
Max. druk: 3 Bar.  
Kabellengte naar signaalverwerker: 10 m (max. 100m)  
Materialen in contact gebracht met de vloeistof:  
    Roestvrij staal 316  
    Ampco 45  
    Platina  
    PVC  
Te gebruiken vloeistoffen: Schoon en verontreinigd water  
Min. geleidbaarheid water: 0,2 mS/cm  
Max. temp.: 50 °C  
Uitgangsspanning signaalverwerker: -10 Volt tot +10 Volt  
Bereik: 0 tot 100 of 500 cm/s (omschakelbaar)  
Responsie: 1 Hz (omschakelbaar naar 5 Hz)  
Systeemnauwkeurigheid: 1% volle schaaluitslag  
Fouthoek: +/- 10 graden; +/- 0.5 cm/s  
Stabiliteit: <1 cm/s per 24 uur  
Invloed temp. vloeistof: 0.1 cm/s per graad C.  
Invloed omgevingstemp.: 0.03 cm/s per graad C.  
Invloed geleidbaarheid vloeistof: 0.02% per mS/cm

