

Steenstabiliteit in een turbulente stroming achter een afstap

September 1999

Mieke de Gunst



Beschadiging van de toplaag van het stortebed

Steenstabiliteit in een turbulente stroming achter een afstap

Afstudeerrapport
Mieke de Gunst

Delft, september 1999

De afstudeercommissie bestaat uit de volgende personen:

ir. P.K. Klok (DWW)
ir. H.J. Verheij (WL|Delft Hydraulics)
drs. R. Booij
ir. G.J. Schiereck
dr. ir. H.L. Fontijn
prof. ir. K. d'Angremond (afstudeerhoogleraar)

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen
Subfaculteit Civiele Techniek
Afdeling Waterbouwkunde
Sectie Waterbouwkunde

Voorwoord

Voor u ligt het rapport geschreven ter afsluiting van mijn studie aan de Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen. Verslag wordt gedaan van het onderzoek naar de invloed van turbulentie op de stabiliteit van bodemmateriaal, dat is uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft. Het onderzoek is opgezet in samenwerking met Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouw en WL|Delft Hydraulics in het kader van het samenwerkingsverband steenstabiliteit.

Bij deze wil ik mijn begeleiders van de DWW, WL|Delft Hydraulics en de Universiteit bedanken voor hun adviezen en begeleiding. Graag wil ik ook Rob Uittenbogaard bedanken voor de vele vrije uren die hij aan mijn onderzoek besteed heeft. Verder bedank ik het personeel van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica voor hun hulp bij het bouwen van de opstelling. Maar vooral voor de gezelligheid tijdens het werk en in de koffiepauzes. Een appeltaart doet wonderen!

Mieke de Gunst
Delft, september 1999

Samenvatting

Erosie van bodemmateriaal speelt een belangrijke rol bij waterbouwkundige constructies. Zolang de stabiliteit van de constructie niet in gevaar wordt gebracht, is enige erosie geen probleem. In veel gevallen wordt daarom een bodembescherming aangebracht om de erosie ver genoeg van de constructie te houden. Voor de situatie van uniforme stroming zijn ontwerpregels bekend voor de aanleg van bodembescherming. De meeste stromingen in de praktijk zijn echter niet uniform, waardoor de bestaande ontwerpregels niet zondermeer van toepassing zijn. Er wordt nu een belastingsfactor toegepast, die de verhouding geeft van de kritieke snelheid in uniforme stroming en de kritieke snelheid in niet-uniforme stroming.

Het onderwerp van deze studie is een niet-uniforme stroming waarin sprake is van een plaatselijk verhoogde aanval op het bodemmateriaal door de lokaal hogere turbulentie. Het doel van dit onderzoek is meer inzicht te verschaffen in de mechanismen die van invloed zijn op het begin van bewegen van bodemmateriaal in het geval van een niet-uniforme stroming. De turbulente structuren die ontstaan in een niet-uniforme stroming kunnen bijdragen aan de drukfluctuaties nabij de bodem en zo het transport van bodemmateriaal op gang brengen. Het is daarom van belang om de (lokale) turbulente snelheidsfluctuaties in een niet-uniforme stroming te relateren aan de drukfluctuaties nabij en in de bodem om zo een idee te krijgen welke structuren invloed hebben op het begin van bewegen.

In een 15 m lange stroomgoot met een breedte van 40 cm is door middel van een backward-facing step ofwel afstap een niet-uniforme stroming gecreërd. Om de schade aan de bodembescherming vast te stellen is gebruik gemaakt van een strokenpatroon van stenen met verschillende kleuren. Uit het verloop van het aantal verplaatste stenen bij een toenemend debiet is de kritieke snelheid voor het begin van bewegen bepaald. Dit is gedaan voor zowel een uniforme als de niet-uniforme stromingssituatie zodat door vergelijking van de twee situaties de invloed van een niet-uniforme stroming op de stabiliteit van bodemmateriaal bepaald kan worden.

Het begin van bewegen kan eenduidig vast gelegd worden door één enkele losliggende steen in een gefixeerd bed te plaatsen; de steen wordt verplaatst of blijft liggen terwijl bij een los bed van stenen een schadekriterium moet worden vastgesteld. Door in deze situatie de snelheden en drukken simultaan te meten en tegelijkertijd video-opnamen van de losse steen te maken, zijn de optredende fluctuaties te relateren aan de verschillende bewegingen en het verplaatsen van de losse steen. Op deze manier is het mogelijk om de bewegingen van stenen te relateren aan specifieke turbulente stromingssituaties. De verwachting is dat de grootte van de fluctuaties iets aangeeft over de manier waarop de steen beweegt. Een grote fluctuatie zou dan kunnen duiden op het verplaatsen van de steen.

Het blijkt dat het meeste transport van bodemmateriaal optreedt op ca. 6 à 12 maal de afstaphoogte achter de afstap, wat ook te verwachten was gezien de resultaten van eerder gedaan onderzoek naar stroming achter een backward-facing step (Nakagawa & Nezu, 1987). De belastingsfactor in het geval van een niet-uniforme stroming is goed te bepalen met behulp van de gemeten snelheden. Tevens levert de vergelijking om een waarde van deze belastingsfactor te berekenen, waarin de turbulentie-intensiteit wordt meegenomen, goede resultaten op. Voor een eerste ontwerp van een bodembescherming is de nauwkeurigheid van de zo verkregen belastingsfactor voldoende.

Uit vergelijking van de verschillende snelheden in de verschillende situaties blijkt dat de kritieke snelheid in het geval met een afstap ca. 15 à 17 % lager ligt dan in het geval zonder afstap. Dit geldt zowel voor het geval van een strokenpatroon als in het geval van een enkele losse steen. De kritieke snelheid waarbij verplaatsen optreedt in het geval van een enkele losse steen ligt ca. 30 % hoger dan in het geval van schade aan het strokenpatroon. Dit geldt zowel voor het geval met de afstap als in het geval van een vlakke bodem.

De verschillende bewegingen van de losse steen zijn niet zonder meer terug te vinden in het verloop van het patroon van de snelheids- en drukfluctuaties in de buurt van de steen. Tevens komt het verloop van de drukfluctuaties niet goed overeen met het verloop van de snelheidsfluctuaties. Dit kan betekenen dat het oplossend vermogen van de druksensoren niet voldoende is om de belangrijkste drukfluctuaties te meten, zeker als blijkt dat de hoogfrequente drukfluctuaties de belangrijkste fluctuaties zouden zijn voor het verplaatsen van een steen. Uitgaande van de verwachting dat ook structuren op een zekere afstand van de steen drukfluctuaties ter plaatse van de steen kunnen opleveren, welke kunnen leiden tot het verplaatsen van de steen, zijn kruiscorrelaties van snelheids- en drukfluctuaties bepaald. De kruiscorrelatie van de snelheids- en drukfluctuaties bij de bodem blijkt een kleine waarde op te leveren. De grootste correlatie wordt gevonden tussen de drukfluctuaties bij de bodem en de snelheidsfluctuaties gemeten op 12 cm boven het bed op een horizontale afstand van 10 cm van de druksensor. Dit voldoet aan de verwachting dat ook structuren elders in de stroming invloed hebben op de drukfluctuaties bij de bodem en bevestigt de door Uittenbogaard e.a. ontwikkelde theorie omtrent deze verwachting.

Lijst van Symbolen

Symbol	Betekenis	Dimensie
b	breedte van de goot	m
c, c_L , c_S , c_k	constanten	-
C	coëfficiënt van Chézy	$m^{1/2}/s$
d	steendiameter	m
d_n	nominale diameter van de steen	m
D	hoogte van de afstap t.o.v. het bodemniveau	m
F	kracht	$kgm/s^2 = N$
F_D	drukkracht	$kgm/s^2 = N$
F_L	liftkracht	$kgm/s^2 = N$
F_S	sleepkracht	$kgm/s^2 = N$
F_w	wrijvingskracht	$kgm/s^2 = N$
F_Z	zwaartekracht	$kgm/s^2 = N$
g	zwaartekrachtsversnelling (= 9.81 m ² /s)	m ² /s
h	waterdiepte	m
k	hydraulische bodemruwheid	m
K, K_t	belastingsfaktor	-
L	lengtemaat	m
M	steenmassa	kg
n	nummer van de proef	-
N	aantal proeven	-
$\frac{\partial p'}{\partial x}$	drukgradiënt	N/m ³
q_{ij}	Reynoldse spanningen	N/m ²
Q	debiet	m ³ /s
r	turbulentie-intensiteit	-
r_l	lokale turbulentie-intensiteit	-
r_u	turbulentie-intensiteit in een uniforme stroming	-
$R()$	correlatiecoëfficiënt	-
$R(\tau)$	autocorrelatiefunctie	-
Re_*	Reynoldsgetal betrokken op een steen	-
s	aantal verplaatste stenen	-
S_f	vormfactor van een steen	-
t	tijd	s
T	tijdsinterval	s
T_l	levensduur	s
T_p	passagetijd	s
u	sneldheidscomponent (langsrichting)	m/s
u_*	schuifspanningssnelheid	m/s
Δu	sneldheidsverschil	m/s
U	dieptegemiddelde snelheid	m/s
U_g	dieptegemiddelde snelheid in de nauwste doorsnede	m/s
U_l	lokale dieptegemiddelde snelheid	m/s
v	sneldheidscomponent (dwarsrichting)	m/s
x	coördinaat	m
y	coördinaat	m
z	coördinaat	m

Grieks

Symbol	Betekenis	Dimensie
Δ	Relatieve massadichtheid (≈ 1.7)	-
ε	constante	-
η	dynamische viscositeit	kg/ms
κ	von Kármán constante ≈ 0.4	-
ν	kinematische viscositeit	m ² /s
θ	constante	-
ρ	massadichtheid	kg/m ³
ρ_s	massadichtheid van steen ($\approx 2700 \text{ kg/m}^3$)	kg/m ³
ρ_w	massadichtheid van water ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$)	kg/m ³
σ	standaardafwijking	m/s
τ	schuifspanning	N/m ²
Ψ	Shieldsparameter	-
Ψ_c	kritieke Shieldsparameter	-

Onderschrift

$\cdot\cdot_b$	corresponderend met bodemturbulentie
$\cdot\cdot_c$	kritieke waarde
$\cdot\cdot_{i,j}$	component in i- of j-de richting
$\cdot\cdot_{\max}$	maximale waarde
$\cdot\cdot_r$	component in hoofdrichting

Bovenschrift

$\cdot\cdot^{(n)}$	waarde bij n-de meting
$\cdot\cdot'$	uitwijking van de gemiddelde waarde
$\cdot\cdot_{\bar{\cdot}}$	tijdsgemiddelde waarde

Inhoudsopgave

1.	Inleiding	1-1
1.1	Inleiding	1-1
1.2	Probleemstelling	1-1
1.3	Doel van het onderzoek	1-2
1.4	Opzet en aanpak van het onderzoek	1-2
1.5	Opbouw van het rapport	1-2
2.	Achtergronden	2-1
2.1	Inleiding	2-1
2.2	Krachtspeel op een steentje	2-1
2.3	Schuifspanningsconcept van Shields	2-3
2.3.1	Stabiliteitsrelatie	2-3
2.3.2	Shieldsparameter voor het begin van bewegen	2-4
2.3.3	Verandering van de stroming	2-4
2.4	Backward facing step	2-7
2.5	Turbulentie	2-8
2.5.1	Inleiding turbulentie	2-8
2.5.2	Stochastische beschrijving van de turbulentie	2-8
2.6	Drukgradiënten	2-10
3.	Experimenten	3-1
3.1	Inleiding	3-1
3.2	Doel van de experimenten	3-1
3.3	Proefopstelling	3-1
3.3.1	Inleiding	3-1
3.3.2	Inrichting van de stroomgoot	3-1
3.3.3	Keuze van de stenen en de bodemopbouw	3-2
3.4	Meetapparatuur	3-6
3.5	Opzet van de experimenten	3-9
4.	Analyse en interpretatie van de resultaten	4-1
4.1	Inleiding	4-1
4.2	Ligging van het aanligpunt achter de afstap	4-1
4.3	Begin van bewegen	4-7
4.4	Analyse van het bewegen van de steen	4-10
4.4.1	De bewegingen van de steen	4-10
4.4.2	Verschil in bewegen in een uniforme of verstoorde stroming	4-12
4.4.3	Bepaling van de kritieke snelheid	4-12
4.4.4	Snelheids- en drukfluctuaties	4-15
4.4.5	Verplaatsingsafstand	4-16
4.5	Simultane druk- en snelheidsmetingen nabij de bodem	4-19
5.	Conclusie en aanbevelingen	5-1

Literatuurlijst

Bijlage I	Bepaling van het bodemniveau
Bijlage II	Berekening van benodigde debiet om steensverplaatsing te garanderen
Bijlage III	Keuze van de losse steen
Bijlage IV	Meetwaarden van de proef “Bepaling van Ψ_c in een uniforme stroming”
Bijlage V	Meetwaarden van de proef “Bepaling van Ψ_c in een verstoorde stroming”
Bijlage VI	Meetwaarden van de proeven met een enkele losse steen in uniforme en verstoorde stroming
Bijlage VII	Meetwaarden van de proeven waarbij simultane snelheids- en drukmetingen zijn uitgevoerd
Bijlage VIII	Grafieken van de snelheids- en drukfluctuaties in een uniforme stroming
Bijlage IX	Grafieken van de snelheids- en drukfluctuaties in een verstoorde stroming
Bijlage X	Simultane druk- en snelheidsmetingen elders in de stroming
Bijlage XI	Verplaatsingsafstand

1. Inleiding

1.1 Inleiding

In het kader van de Samenwerkingsovereenkomst STEENSTABILITEIT tussen Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde en WL|Delft Hydraulics wordt de stabiliteit van steenachtig materiaal nabij constructies onderzocht via bureaustudies, experimenteel en numeriek onderzoek. Met behulp van rekenmodellen en stabiliteitsvoorspellers (parameter die de stabiliteit van een bodembescherming beschrijft/voorspelt) worden de verschijnselen die optreden achter een drempelconstructie in kaart gebracht. Daarbij wordt beoogd om geëigende stabiliteitsvoorspellers te ontwikkelen, die een goede beschrijving geven van de steenstabiliteit in termen van overschrijding van een zekere steenverplaatsing. Hierbij zal de verhoogde turbulentie, zoals die benedenstrooms van constructies optreedt, goed moeten worden ingebracht in de stabiliteitsvoorspellers. Omdat stroomaanval (nog) niet in alle gevallen goed door rekenmodellen kan worden voorspeld, zijn schaalmodellen hiervoor soms nog onontbeerlijk. De stabiliteitsvoorspeller zal dus, zo mogelijk, zowel aansluiting moeten vinden bij de mogelijke uitkomsten van rekenmodellen als bij die van schaalmodellen.

Het programma opgesteld binnen de samenwerkingsovereenkomst bevat een aantal onderdelen, waaronder onderzoek naar overstroomde constructies: relatief lage en hoge drempels, stroombrekers en overlaten. In het kader van het onderzoeksprogramma zijn inmiddels een literatuurinventarisatie van stabiliteitsvoorspellers en een gevoeligheidsonderzoek van enkele van die voorspellers (Akkerman en Verheij, 1998a&b; Uittenbogaard, Hoffmans en Akkerman, 1998) uitgevoerd. Uit de tot nu verkregen resultaten blijkt dat er weinig verificatiemateriaal beschikbaar is om stabiliteitsconcepten en turbulentieschematisatie te verifiëren. De moeilijkheid van de turbulentieschematisatie hangt af van de benodigde specifieke aspecten van de turbulentie. Er is daarom behoefte aan gerichte experimenten zoals b.v. onderzoek naar de steenstabiliteit in een turbulente stroming achter een drempelconstructie c.q. afstap, die in het kader van het samenwerkingsproject ook zijn voorzien.

1.2 Probleemstelling

Erosie van bodemmateriaal speelt een belangrijke rol bij waterbouwkundige constructies. Zolang de stabiliteit van de constructie niet in gevaar wordt gebracht, is enige erosie geen probleem. In veel gevallen wordt daarom een bodembescherming aangebracht om de erosie ver genoeg van de constructie te houden. De bodembescherming bestaat meestal uit een filterconstructie over de aanwezige zandlaag. De toplaag wordt gedimensioneerd op de maximaal te verwachten stroomaanval en moet stabiel zijn om zo beschadiging van het onderliggende bodemmateriaal te voorkomen. Empirisch bepaalde waarden van de belastingsfactor in een verstoorde stroming kunnen in de praktijk tot een voldoende veilige bodembescherming leiden, maar steunen niet op voldoende wetenschappelijk onderbouwde theorieën. Het probleem is dan ook dat voorspellingen voor een iets andere situatie op grond van de empirisch bepaalde waarden niet mogelijk is.

De Shieldsrelatie geeft een criterium voor het begin van bewegen van bodemmateriaal maar is alleen van toepassing op uniforme stroming. Bij veel constructies treedt een verstoring van de stroming op waardoor een menglaag ontstaat. Deze menglaag scheidt de hoofdstroming van de zone met recirculatiestroming en wordt gekarakteriseerd door een hoge mate van turbulentie en grote turbulente structuren. De verhoogde turbulentie in de menglaag zorgt voor een grotere aanval op het bed wat van invloed is op de stabiliteit van de bodemverdediging. Over de grootte van de stroomaanval in de menglaag op de toplaag van de bodembescherming is nog geen eenduidige theorie bekend. Om een criterium voor het begin van bewegen in een verstoorde stroming met behulp van de Shieldsrelatie te bepalen, wordt vaak gebruik gemaakt van een belastingsfactor. Deze factor geeft de verhouding van de stroomsnelheid in een uniforme stroming, waarbij schade aan het bed ontstaat en de stroomsnelheid in een verstoorde stroming. Voor de stabiliteit van het bed is het van belang om bij transport van bodemmateriaal de lokatie waar schade optreedt en het mechanisme dat verantwoordelijk is voor dit transport te kennen.

Hieruit volgt de probleemstelling van dit onderzoek. Wat is de invloed van de verstoring van een stroming op de stabiliteit van bodemmateriaal en op welke lokatie is deze invloed het grootst? Is het mogelijk de invloed van de verstoring te voorspellen met behulp van een belastingsfactor?

1.3 Doel van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is meer inzicht te verschaffen in de mechanismen die van invloed zijn op het begin van bewegen van bodemmateriaal in het geval van een niet-uniforme stroming. De turbulente structuren die ontstaan in een niet-uniforme stroming kunnen bijdragen aan de drukfluctuaties nabij de bodem en zo het transport van bodemmateriaal op gang brengen. Het is daarom van belang om de (lokale) turbulente snelheidsfluctuaties in een niet-uniforme stroming te relateren aan de drukfluctuaties nabij en in de bodem om zo een idee te krijgen welke structuren invloed hebben op het begin van bewegen.

Met behulp van een backward-facing step is een niet-uniforme stroming gecreëerd. Een backward-facing step is een abrupte verlaging van de bodem op een bepaalde plaats in de stroming en wordt ook wel afstap genoemd. De verstoring die op deze manier ontstaat, komt goed overeen met de verstoring van een stroming die in werkelijkheid kan ontstaan benedenstrooms van een drempel in een waterbouwkundige constructie. Deze manier van verstoren is redelijk te modelleren. Daarbij zijn uitgebreide metingen gedaan naar de turbulentie achter een afstap door b.v. Nakagawa & Nezu (1987). Dergelijke onderzoeken zijn te gebruiken als referentie.

Het begin van bewegen kan eenduidig vast gelegd worden door één enkele losliggende steen in een gefixeerd bed te plaatsen; de steen wordt verplaatst of blijft liggen terwijl bij een los bed van stenen een schadekriterium moet worden vastgesteld. Door in deze situatie simultane snelheids- en drukmetingen uit te voeren, is het mogelijk de optredende fluctuaties te relateren aan de verschillende bewegingen en het verplaatsen van de losse steen. Op deze manier is het mogelijk om de bewegingen van stenen te relateren aan specifieke turbulente stromingssituaties. De vraag is nu in hoeverre de situatie van een enkele losliggende steen in een gefixeerd bed overeenkomt met een geheel losliggend bed. Daarom zijn in beide situaties snelheids- en drukmetingen uitgevoerd en met elkaar vergeleken.

1.4 Opzet en aanpak van het onderzoek

Er wordt onderzoek uitgevoerd in een stroming over een vlakke bodem en een stroming achter een afstap zodat de invloed van de verstoorde stroming op de stabiliteit van het bodemmateriaal onderzocht kon worden. Door allereerst proeven te doen zonder afstap is de kritieke stroomsnelheid voor het vlakke stortebed te bepalen voor de gevallen van een losliggend strokenpatroon en een enkele losliggende steen. Deze kritieke stroomsnelheid is gedefinieerd als de snelheid waarbij een bepaalde hoeveelheid transport optreedt of de enkele steen is verplaatst. Met behulp van de Shieldsrelatie is nu de waarde van de kritieke Shieldsparameter voor het vlakke stortebed te bepalen. Deze proeven zonder afstap worden gebruikt als referentie. Vervolgens worden proeven uitgevoerd met een afstap om de kritieke stroomsnelheid achter de afstap te bepalen voor de gevallen van een losliggend strokenpatroon en een enkele losliggende steen. Met de kritieke snelheden in het geval van uniforme en niet-uniforme stroming kan vervolgens de belastingsfaktor voor het geval met afstap bepaald worden.

In de situatie met de enkele steen worden voor het geval zonder en met afstap de snelheden en drukken nabij de steen gemeten en tegelijkertijd video-opnamen gemaakt van de losse steen om zo het bewegen van de steen vast te leggen en te kunnen relateren aan de gemeten snelheden en drukken en de bijbehorende fluctuaties. De verwachting is dat de grootte van de fluctuaties iets aangeeft over de manier waarop de steen beweegt. Een grote fluctuatie zou dan kunnen duiden op het verplaatsen van de steen. Tenslotte worden er een aantal proeven uitgevoerd voor een vlakke bodem en met een afstap zonder de enkele losse steen. Bij de kritieke stroomsnelheid waarbij de enkele steen wordt verplaatst (bepaald uit voorgaande proef), worden simultane snelheids- en drukmetingen uitgevoerd waarbij de plaats waar de snelheden worden gemeten, gevarieerd wordt. Deze proevenreeks wordt nogmaals uitgevoerd waarbij de stand van de druksensoren ten opzichte van het bodemniveau wordt verlaagd tot een halve steendiameter onder het bodemniveau. Uit deze proeven is de samenhang tussen de drukfluctuaties nabij en in de bodem en de snelheidsfluctuaties elders in de stroming te bepalen.

1.5 Opbouw van het rapport

In hoofdstuk 2 worden allereerst de theoretische achtergronden van een stroming over een bodembescherming in een waterloop beschreven. De krachten op een steen worden beschouwd en uit het evenwicht tussen de verschillende krachten volgt de stabiliteitsrelatie van Shields. De turbulentie in een stroming komt aan de orde en het principe van een backward-facing step wordt toegelicht. Hoofdstuk 3 beschrijft de opzet van de gedane proeven, de uitgangspunten en de meetapparatuur die gebruikt is om de metingen uit te voeren. De analyse en interpretatie van de resultaten van de proeven zijn te vinden in hoofdstuk 4. Tenslotte volgen in hoofdstuk 5 de conclusies en aanbevelingen voor verder onderzoek.

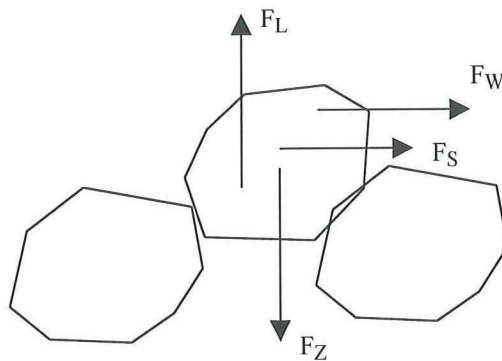
2. Achtergronden

2.1 Inleiding

In de volgende paragrafen wordt een korte theoretische verhandeling gegeven van de krachten op bodemverdedigingsmateriaal in een stroming. De krachten op een steen, het al dan niet in beweging komen van een steen, turbulentie en drukgradiënten komen aan de orde. In de theorie wordt uitgegaan van stroming in open waterlopen en veelal ook van een uniforme stroming. In dit onderzoek wordt naast een uniforme stroming ook een niet-uniforme stroming bekeken, en wel een verstoorde stroming achter een afstap.

2.2 Krachtenspel op een steen

Om iets te kunnen zeggen over het mechanisme dat de oorzaak is van het begin van bewegen van stenen die het bed vormen van een waterloop moeten de verschillende krachten op de individuele steen beschouwd worden (figuur 2.1). Bij deze beschouwing wordt het rapport “Erosie onder een geometrisch open filter” (Booij, 1998) gevolgd.



Figuur 2.1 Krachtenspel op een steen

Bij het begin van bewegen gaat het om momenten om het laatste steunpunt waar de steen om moet roteren om vrij te komen. Als de eroderende krachten (F_L , F_S en F_W) een groter moment uitoefenen dan de (relatieve) zwaartekracht, gaat de steen roteren om zijn steunpunt. Duurt deze situatie lang genoeg dan komt de steen vrij van zijn steunpunt. De kracht bestaat uit een gemiddelde en een afwijking van dit gemiddelde. De afwijking van het gemiddelde bepaalt de momentane grootte van de kracht, het gemiddelde van de kracht verandert niet. Het gaat er dus om dat de kracht plus de bijbehorende fluctuaties gedurende een voldoende lange periode van voldoende grootte is zodat de steen vrij kan komen van zijn steunpunt. De grootte van de kracht is afhankelijk van de vorm van de steen en de precieze ligging ten opzichte van zijn deuren. Maar voor een afweging van het belang van de verschillende krachten is een schatting van hun grootte voldoende.

We nemen aan dat de steen gedeeltelijk uitsteekt boven zijn buien en kan loskomen. Voor de eenvoud wordt hierbij uitgegaan van een bolvormige steen met diameter d . Het zal blijken dat de eroderende krachten uitgedrukt kunnen worden in de algemene evenredigheidsvorm:

$$F \propto d^2 \cdot c \cdot \rho_W \cdot u^2 \quad [2.1]$$

met c een constante die voor iedere kracht verschillend is. De snelheid, u , is per kracht anders gedefinieerd, afhankelijk van de richting waarin de kracht werkt.

De krachten bestaan uit drukverschillen en kunnen als volgt geschematiseerd worden:

- Zwaartekracht F_Z

$$F_Z = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3 \cdot \rho_S \cdot g \quad [2.2]$$

met $1/6 \pi d^3$ het volume van de steen, ρ_s de massadichtheid van de steen en g de versnelling van de zwaartekracht.

- Opwaartse kracht F_O
veroorzaakt door de opwaartse waterdruk aan de onderkant van de steen,

$$F_O = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3 \cdot \rho_W \cdot g \quad [2.3]$$

met ρ_W de massadichtheid van water.

De kracht F_O wordt vaak mee genomen in de zwaartekracht F_Z , die dan als volgt geschreven wordt:

$$F_Z = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3 \cdot (\rho_s - \rho_W) \cdot g \quad [2.4]$$

Deze schrijfwijze van de zwaartekracht wordt ook wel aangeduid als de relatieve zwaartekracht.

- Liftkracht F_L
ontstaan door het verschil in druk onder en boven de steen als gevolg van stuwdrukeffecten en stroombaankromming,

$$F_L = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot c_L \cdot \rho_W \cdot u^2 \quad [2.5]$$

Hierin is $1/4 \pi d^2$ het oppervlak van het bovenaanzicht van de steen en u de snelheid in langsrichting op het niveau van de bovenkant van de steen; c_L is een constante die afhangt van de optredende stuwdruk en daarmee van de precieze ligging van de steen tussen de omliggende stenen.

- Sleepkracht F_S
ontstaan door het verschil in druk voor en achter de steen,

$$F_S = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot c_S \cdot \rho_W \cdot u^2 \quad [2.6]$$

Hierin is $1/4 \pi d^2$ het aanstroomoppervlak en u de snelheid op het niveau van de bovenkant van de steen. De constante c_S is sterk afhankelijk van de ligging van de steen. Tenzij de steen vrij op de bodem ligt, zal de steen grotendeels buiten de stroming blijven en het verschil in druk voor en achter de steen over een belangrijk deel van het oppervlak gering zijn.

- Wrijvingskracht F_W
Ontstaan door de bodemwrijving τ_b ,

$$F_W = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \tau_b = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot c_w \cdot \rho_W \cdot u^2 \quad [2.7]$$

Uit het krachten- en momentenevenwicht tussen de eroderende krachten en het gewicht van de steen onder water volgt één evenredigheid:

$$\rho_W \cdot u^2 \cdot d^2 \propto (\rho_s - \rho_W) \cdot g \cdot d^3 \quad [2.8]$$

Instabiliteit treedt op als de snelheid een kritieke waarde u_c overtreft:

$$u_c \propto \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_W}{\rho_W} \cdot g \cdot d} = \sqrt{\Delta \cdot g \cdot d} \quad \Delta = \frac{\rho_s - \rho_W}{\rho_W} \quad [2.9]$$

Deze verhouding geldt bij alle stabiliteitsrelaties voor granulair materiaal.

2.3 Schuifspanningsconcept van Shields

2.3.1 Stabiliteitsrelatie

Een van de stabiliteitsrelaties die gebaseerd is op formule [2.9] is de relatie van Shields. In deze relatie wordt het verband gegeven tussen de dimensieloze schuifspanning en het Reynoldsgetal betrokken op een korrel. Shields (1936) heeft onderzoek gedaan naar de stabiliteit van loskorrelig materiaal in open waterlopen bij uniforme stroming. In uniforme stroming geldt voor de bodemschuifspanning

$$\tau_b = \frac{\rho_W \cdot g \cdot U^2}{C^2} \quad [2.10]$$

met U de dieptegemiddelde snelheid en C de Chézy-coëfficiënt. Per definitie geldt voor de schuifspanningssnelheid:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho_W}} \quad [2.11]$$

Met vergelijking [2.10] en [2.11] kan de schuifspanningssnelheid, die geen directe fysische betekenis heeft, nu ook geschreven worden als

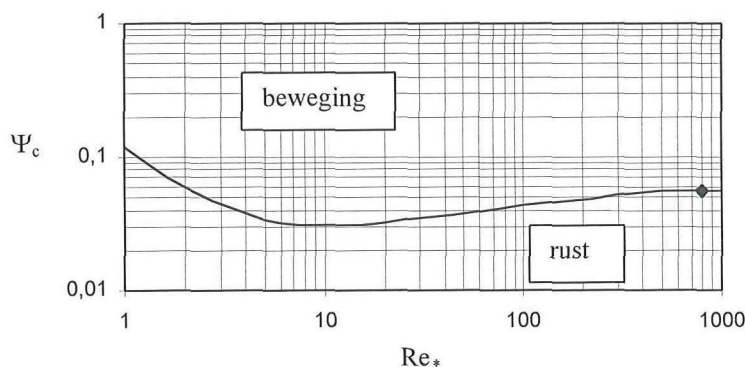
$$u_* = \frac{U \cdot \sqrt{g}}{C} \quad [2.12]$$

Shields koos ervoor om de kritieke schuifspanningssnelheid (u_{*c}) in de stabiliteitsrelatie (vergelijking [2.9]) te gebruiken

$$\Psi_c = \frac{u_{*c}^2}{\Delta \cdot g \cdot d} = \frac{\tau_c}{(\rho_S - \rho_W) \cdot g \cdot d} \quad [2.13]$$

Een waarde van Ψ boven de grenswaarde (Ψ_c) betekent een grote mobiliteit van het bodemmateriaal. Voor waarden onder een grenswaarde (Ψ_c) treedt geen transport op, zie figuur 2.2. Dit is de stabiliteitsbenadering. In werkelijkheid is er altijd enige mate van transport ook onder de grenswaarde. Hier is rekening mee te houden door te kiezen voor een transportbenadering, en dus een transport van een aantal stenen toe te staan. Deze kritieke Shieldsparameter blijkt afhankelijk te zijn van de stromingsconditie bij de bodem, die wordt weergegeven door het Reynoldsgetal betrokken op een korrel (steen).

$$Re_* = \frac{u_{*c} \cdot d}{\nu} \quad [2.14]$$



Figuur 2.2. Shieldsdiagram voor het begin van bewegen

Bij turbulente bodemstroming ($Re_* > ca. 500$) blijkt de kritieke Shieldsparameter (figuur 2.2) constant te zijn. De Re_* is een maat voor de ruwheid. Een waarde groter dan 500 betekent een hydraulisch zeer ruwe bodem. Dit betekent dat in deze situatie de waarde van de kritieke Shieldsparameter onafhankelijk is van de stromingscondities bij de bodem. Uit de vergelijking [2.14] en figuur 2.2 blijkt dat deze situatie bereikt wordt bij een steendiameter groter dan 7 mm. Met de kritieke Shieldsparameter en de vergelijking voor de schuifspanningssnelheid [2.12] geldt voor stenen met een diameter groter dan 7 mm de volgende relatie tussen U_c en Ψ_c :

$$U_c = C \sqrt{\Psi_c \cdot \Delta \cdot d} \quad [2.15]$$

De waarde van de Chézy-coëfficiënt is afhankelijk van de waterdiepte en de hydraulische bodemruwheid. Hoe gladder de bodem des te groter is de waarde van de Chézy-coëfficiënt. De definitie is (hydraulisch ruw):

$$C = 18 \cdot \log \frac{12 \cdot h}{k} \quad [2.16]$$

Wanneer de hydraulische ruwheid (k) van een vlakke bedding bestaande uit granulair materiaal met niet-uniforme diameter bepaald moet worden, dan zullen de relatief grote elementen de ruwheid bepalen. Ook bij een niet-gelijkmatige verdeling van het materiaal over de bodem ondervindt de stroming niet alleen weerstand van de stenen maar ook van de vorm van het bed. In de praktijk wordt vaak een hydraulische ruwheid van $2d_{n50}$ aangehouden. Op basis van experimenten van Lammers (1997) betreffende de stabiliteit van de toplaag van een bodembescherming mag een hogere waarde voor de hydraulische ruwheid worden aangehouden. In werkelijkheid geeft een vlakke bodem veelal een waarde van $6d_{n50}$ voor de hydraulische ruwheid.

2.3.2 Shieldsparameter voor het begin van bewegen

De waarde van de kritieke Shieldsparameter voor het begin van bewegen wordt bepaald door de mate van transport dat acceptabel wordt geacht. Bij een bepaalde kritieke waarde van de Shieldsparameter vindt er een overgang plaats tussen rust en bewegen. De overgang van rust naar continu transport van stenen vindt geleidelijk plaats. Naarmate een strenger criterium voor de mate van transport wordt gehanteerd, wordt een lagere waarde voor de kritieke Shieldsparameter gevonden. De overgang van rust naar continu transport van stenen kan via verschillende stadia gekarakteriseerd worden.

De definities voor de verschillende maten van transport zijn (DHL, 1972):

1. Eerste verplaatsingen
2. Verplaatsingen op enkele lokaties
3. Verplaatsingen van vrij veel steentjes
4. Verplaatsingen bijna overal
5. Verplaatsingen overal maar niet continu
6. Steentjes verplaatsen overal maar niet permanent
7. Begin opmars van de steentjes

Bij veel constructies zal een bepaalde mate van transport toelaatbaar zijn, maar wanneer het om een bodemverdediging gaat is de toelaatbare mate van transport aanzienlijk lager. De filterdikte van een granulaire bodembescherming is in vele gevallen maar een paar keer de steendiameter. Bij het verdwijnen van een paar stenen is de schade al relatief groot. In deze situatie wordt het strengste criterium voor de mate van transport gehanteerd, definitie 1: eerste verplaatsingen. De waarde die de kritieke Shieldsparameter hierbij heeft bedraagt ongeveer 0.03 (DHL, 1972).

2.3.3 Verandering van de stroming

De Shieldsrelatie is geldig voor een uniforme stroming. In de buurt van waterbouwkundige constructies zal de stroming niet meer uniform zijn doordat er vertragingen en versnellingen van de stroming in de tijd en ruimte op kunnen treden. Ook kunnen turbulentie en andere structuren b.v. wervelafschudding optreden. Doordat de snelheidsfluctuaties lokaal groter zijn dan in uniforme stroming, zal de belasting op het bed ook groter zijn. Dit kan het geval zijn bij een menglaag, dichtheidsstromingen of golven. In deze situaties is de Shieldsrelatie in haar oorspronkelijke vorm niet zonder meer bruikbaar. Shields gaat uit van één bepaalde turbulente situatie en maakt daarbij gebruik van één bepaalde kritieke waarde voor de snelheid.

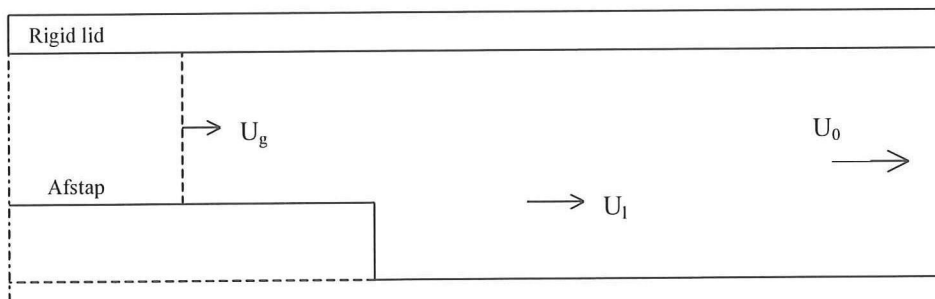
Deze kritieke waarde is in een niet-uniforme stroming echter afhankelijk van de stromingsconfiguratie en kan niet algemeen gesteld worden. Dit is in het bijzonder een probleem op plaatsen waar u_* nul is.

Bij het ontwerp van een bodembescherming wordt vaak gebruik gemaakt van een belastingsfactor K . Deze belastingsfactor representeert de verhouding van de snelheids- en turbulentieaanval op de stenen in de ongestoorde en de verstoorde situatie.

$$K = \frac{U_c \text{ uniforme stroming}}{U_c \text{ verstoorde stroming}} \quad [2.17]$$

In een uniforme stroming heeft de K -factor een waarde gelijk aan 1 en in een verstoorde stroming heeft de K -factor op een plaats met een verhoogde stroomaanval een waarde groter dan 1. Een waarde voor de belastingsfactor kan niet los gezien worden van zijn definitie en de situatie waarop hij van toepassing is. Afhankelijk van de definitie van de snelheid U_c in vergelijking [2.17] wordt een andere waarde voor de belastingsfactor gevonden. Mogelijkheden voor de definitie van de snelheid in het geval van een afstap (zie figuur 2.3) zijn:

- Gemiddelde snelheid in de nauwste doorsnede $U_g (= Q/A_g)$. De belastingsfactor (K_g) representeert de verhouding van de kritieke snelheid in uniforme stroming ten opzichte van de kritieke snelheid in de nauwste doorsnede.
- Maximale lokale snelheid U_l . De belastingsfactor (K_l) representeert de verhouding van de kritieke snelheid in uniforme stroming ten opzichte van de maximale lokale snelheid.
- Gemiddelde benedenstroomse snelheid $U_0 (= Q/A_0)$. De belastingsfactor (K_0) representeert de verhouding van de kritieke snelheid in uniforme stroming ten opzichte van de kritieke gemiddelde benedenstroomse snelheid in een verstoorde stroming.



Figuur 2.3 Mogelijkheden voor de definitie van de snelheid

Voor verschillende constructies zijn empirisch bepaalde waarden van K bekend. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van de laatste definitie van de snelheid, die van de gemiddelde benedenstroomse snelheid, U_0 . Dit om de vergelijking met de snelheid in het geval van uniforme stroming, waar uit gegaan wordt van de gemiddelde snelheid, zo goed en betrouwbaar mogelijk te kunnen maken.

In dit onderzoek worden proeven uitgevoerd met een enkele losse steen in een vastgelegd bed. De waarde van de belastingsfactor, K_{steen} , die hierbij hoort heeft een andere waarde dan de K_{bed} , die geldt in het geval van het losse bed (het strokenpatroon). Dit heeft te maken met de ligging van de enkele losse steen en de kans dat deze verplaatst wordt. Ligt de losse steen beschermd tussen de andere stenen (gunstige ligging) dan zal de steen minder makkelijk verplaatst worden dan in het geval waarin de losse steen meer boven op het bed ligt (ongunstige ligging). De kans dat juist die ene losse steen wordt verplaatst is kleiner dan de kans dat een willekeurige steen in het losse bed wordt verplaatst. Dit geldt zowel in de situatie met als zonder afstap waarin dezelfde losse steen wordt gebruikt. De invloed van de ligging en de kans is dan ook in beide situaties even groot en kan aangeduid worden als K_{up} .

De belastingsfactor, K , is afhankelijk van de mate van verstoring en daarmee van de turbulentie-intensiteit in de stroming. Als gevolg hiervan verschillen de waarden van K_{bed} voor de gevallen met en zonder afstap van elkaar. In het geval zonder de afstap is de waarde van de belastingsfactor gelijk aan 1 en in het geval met afstap is de waarde op te vatten als een functie van de hoeveelheid turbulentie.

De waarde van K_{steen} is gelijk aan de waarde van K_{bed} vermenigvuldigd met de waarde van K_{up} . In het geval zonder afstap is de waarde van K_{steen} dan gelijk aan de waarde van K_{up} .

Bovenstaande kan als volgt worden samengevat:

Situatie zonder afstap:

$$\begin{aligned} \text{Los bed} & K_{\text{bed}} = 1 \\ \text{Enkele steen} & K_{\text{steen}} = K_{\text{up}} \\ & K_{\text{up}} = f(\text{ligging, stroomaanval, kans}) \end{aligned} \quad [2.18]$$

Situatie met afstap:

$$\begin{aligned} \text{Los bed} & K_{\text{bed}} = f(\text{turbulentie}) \\ \text{Enkele steen} & K_{\text{steen}} = K_{\text{up}} \cdot K_{\text{bed}} = K_{\text{up}} \cdot f(\text{turbulentie}) \\ & K_{\text{up}} = f(\text{ligging, stroomaanval, kans}) \end{aligned} \quad [2.19]$$

Uit bovenstaande definitie van K_{bed} volgt dat de waarde van de belastingsfactor afhankelijk is van de turbulentie. In een verstoorde stroming is de invloed van de turbulentie groot, daarom moet in de stabiliteitsbeschouwing de snelheidsfluctuatie worden meegenomen. Een benadering van de maximale belasting op het bed kan gevonden worden door een sommatie van de tijdsgemiddelde snelheid ($\bar{u}$) en een aantal maal (α) de standaardafwijking σ , $\bar{u} + \alpha \sigma$. Als benadering van het stochastische karakter van u' kan ervan uit worden gegaan dat u' varieert tussen $u' = 0$ en $u' = \pm 3\sigma$.

Een veel gebruikte vergelijking voor de belastingsfactor, K , gebaseerd op bovenstaande, is de volgende:

$$K_l = \frac{1 + 3 \cdot r_l}{1 + 3 \cdot r_u} \quad [2.20]$$

waarin r_u de intensiteit in uniforme stroming is ($r_u \approx 0,1$), en r_l de lokale turbulentie-intensiteit. Voor deze lokale turbulentie-intensiteit r_l , achter een drempel in een niet-uniforme stroming geldt volgens Hoffmans (1993):

$$r_l = \sqrt{c_k \left(1 - \frac{D}{h}\right)^{-2}} \quad [2.21]$$

Hierin is c_k een faktor die afhangt van de geometrie van de drempel. Voor een afstap is de waarde van c_k ongeveer gelijk aan 0,0225. D is de hoogte van de drempel en h is de waterdiepte achter de drempel. In een uniforme stroming is de K_t -faktor gelijk aan 1 en in een verstoorde stroming is de K_t -faktor op plaatsen met een verhoogde stroomaanval groter dan 1.

In het WL-rapport "Probabilistische analyse stabiliteitsvoorspellers" (Akkerman, Verheij, 1998) is gebruik gemaakt van een vergelijking om in het geval van niet-uniforme stroming de snelheid te berekenen waarbij het bewegen van stenen begint. In deze vergelijking wordt een reductiefactor, R , gebruikt om de verstoring achter de afstap aan te geven. Deze reductiefactor R is afhankelijk van de verhouding van de afstaphoogte en de waterdiepte en kan bepaald worden uit een grafiek, waarin de reductiefactor R is uitgezet tegen deze verhouding. In het WL-rapport is de grafiek afgebeeld behorend bij de reductiefactor, R , die geldt bij een waarde van Ψ van 0,04 en is van een hydraulische ruwheid van $k = 2 d_{n50}$ uitgegaan:

$$\frac{u}{\sqrt{\Delta \cdot g \cdot d_{n50}}} = R_{0,04} \cdot 1,15 \cdot \log \left(\frac{6 \cdot h}{d_{n50}} \right) \quad [2.22]$$

In dit onderzoek is voor de kritieke Shieldsparameter een waarde van 0,03 aangehouden en is uitgegaan van een hydraulische ruwheid van $k = 6 d_{n50}$. Vergelijking [2.22] is dan niet bruikbaar en zal herleid moeten worden tot een vergelijking met een reductiefactor $R_{0,03}$.

Vergelijking [2.22] is uitgaande van de vergelijking van de Shieldsparameter als volgt af te leiden:

$$\Psi_c = \frac{u^2}{C^2 \cdot \Delta \cdot d_{n50}} \Rightarrow \frac{u^2}{g \cdot \Delta \cdot d_{n50}} = \frac{C^2 \cdot \Psi}{g} \quad [2.23]$$

$$\frac{u}{\sqrt{g \cdot \Delta \cdot d_{n50}}} = \frac{\sqrt{\Psi}}{\sqrt{g}} \cdot 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h}{k}\right) \quad [2.24]$$

met hierin u de uniforme snelheid ver benedenstrooms van de afstap en k de hydraulische ruwheid.

Voor een uniforme stroming met $\Psi_c = 0,03$ en $k = 6 d_{n50}$ is vergelijking [2.24] te schrijven als:

$$\frac{u}{\sqrt{g \cdot \Delta \cdot d_{n50}}} = 1,0 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot h}{d_{n50}}\right) \quad [2.25]$$

Voor een niet-uniforme stroming met $\Psi_c = 0,03$ en $k = 6 d_{n50}$ is vergelijking [2.24] te schrijven als:

$$\frac{u}{\sqrt{\Delta \cdot g \cdot d_{n50}}} = R_{0,03} \cdot 1,0 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot h}{d_{n50}}\right) \quad [2.26]$$

Door de vergelijkingen [2.25] en [2.26] aan elkaar gelijk te stellen en gebruik van de vergelijking [2.17] van de belastingsfaktor K volgt een verband tussen de reductiefactor $R_{0,03}$ en de belastingsfaktor K :

$$\frac{1}{R_{0,03}} \cdot u_{verstoord} \approx K \cdot u_{verstoord} \Rightarrow R_{0,03} = \frac{1}{K} \quad [2.27]$$

Om het nu mogelijk te maken een waarde voor $R_{0,03}$ en daarmee een waarde voor K te kunnen bepalen, moet een verband tussen de $R_{0,03}$ en de $R_{0,04}$ zoals die kan worden afgelezen uit de grafiek in het WL-rapport gevonden worden. Uit vergelijking [2.22] en [2.26] volgt:

$$R_{0,03} \cdot 1,0 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot h}{d_{n50}}\right) = R_{0,04} \cdot 1,15 \cdot \log\left(\frac{6 \cdot h}{d_{n50}}\right) \quad [2.28]$$

$$\Rightarrow R_{0,04} = \frac{R_{0,03} \cdot 1,0}{1,15} \cdot \frac{\log\left(\frac{2 \cdot h}{d_{n50}}\right)}{\log\left(\frac{6 \cdot h}{d_{n50}}\right)} = \frac{R_{0,03}}{1,15} \cdot 0,77 \quad [2.29]$$

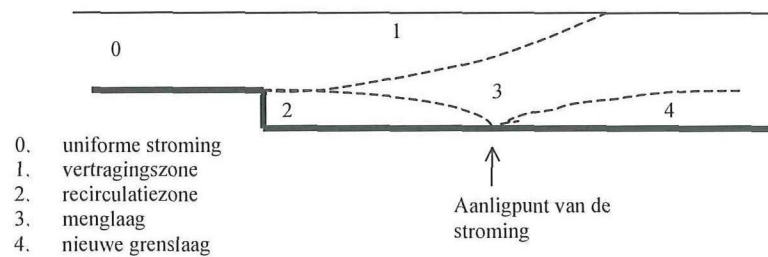
Door invullen van vergelijking [2.27] in [2.29] wordt een direct verband verkregen tussen de belastingsfaktor, K , en de reductiefactor, $R_{0,04}$, uit het WL-rapport:

$$\Rightarrow R_{0,04} = \frac{R_{0,03}}{1,15} \cdot 0,77 = \frac{0,77}{K \cdot 1,15} \quad [2.30]$$

2.4 Backward-facing step (afstap)

Een voorbeeld van een constructie die voor een verstoring van de stroming zorgt, is de backward-facing step, die in dit onderzoek gebruikt wordt om een verstoorde stroming te verkrijgen. Een backward-facing step wordt ook wel een afstap genoemd en zal als zodanig aangeduid worden in dit onderzoek. Een afstap zorgt voor een plotselinge toename van de waterdiepte in de richting van de stroming. Vóór de afstap is de stroming uniform en direct achter de afstap laat de stroming los. Het punt achter de afstap waar de stroming weer aanligt, is het reattachementpunt (ook wel aanligpunt genoemd).

Achter de afstap ontstaat tussen de menglaag en de bodem een zone met een recirculatiestroming. Vanaf het aanligpunt ontstaat er een nieuwe grenslaag en heeft de stroming de neiging om een nieuwe evenwichtssituatie te bereiken. Ver genoeg van de afstap wordt de stroming weer uniform. Voor een overzicht zie figuur 2.4.



Figuur 2.4 Dwarsdoorsnede van een backward-facing step

Het aanligpunt ligt ca. 5 à 7 maal de afstaphoogte achter de afstap wat ook zal blijken uit de metingen. In het gebied rond het aanligpunt en direct benedenstrooms daarvan treedt de grootste schade op. Voor steenstabiliteit en erosie is het belangrijk om te weten in welke mate de stroom zich herstelt na de afstap en welke afstand daarvoor nodig is. De verhoogde turbulentie achter de afstap zorgt voor zwaardere aanval op het stortbed. Dit heeft invloed op de stabiliteit van het bed.

De afstand van de ligplaats van de steen tot de afstap is van invloed op de kans dat de steen wordt verplaatst door een verstoring in de stroming. Ligt de steen dicht bij de afstap dan verplaatst de steen niet. Rond het aanligpunt is de aanval op de bodem groter en daarmee de kans dat de steen wordt verplaatst. Nakagawa & Nezu (1987) hebben stromingsmetingen gedaan in een stromingssituatie met een backward facing step met daarachter een gladde bodem. Deze metingen worden gebruikt ter vergelijking met de in dit experiment gedane metingen achter een afstap.

2.5 Turbulentie

2.5.1 Inleiding turbulentie

De verhoogde turbulentie achter een afstap zorgt voor een verhoogde aanval op het bed en is daarmee van belang voor de stabiliteit van het bodemmateriaal. De meeste stromingen die in de natuur voorkomen, zijn turbulent. Turbulentie zal slechts ontstaan in stromingen, waarin vanuit de hoofdstroming energieoverdracht aan de turbulente bewegingen kan plaatshebben. Hiervoor zijn snelheidsgradiënten nodig. Afhankelijk van de oorzaak van het ontstaan van deze snelheidsgradiënten onderscheiden we twee soorten turbulentie: wandturbulentie en vrije turbulentie. Bij wandturbulentie treedt de snelheidsgradiënt op doordat stroming in de buurt van een wand door de kleeftconditie aan de wand wordt afgeremd. Vrije turbulentie ontstaat daar waar twee aanliggende stromingen verschillende snelheden hebben. Door impulsoverdracht (schuifspanning) zal tussen de twee stromingen een aangroeiende laag ontstaan waarin een overgang tussen de snelheden van de twee lagen optreedt (menglaag). In een situatie met een afstap komen beide soorten turbulentie voor; de wandturbulentie uiteraard nabij de wanden en de vrije turbulentie direct achter de afstap waar de stroming loslaat.

2.5.2 Stochastische beschrijving van de turbulentie

Vanwege het onvoorspelbare gedrag van de turbulente bewegingen worden stochastische methoden gebruikt om de invloed van de turbulentie op bv. een stroming te kunnen beschrijven. Hiervoor is ensemblemiddeling een goede methode. Bij ensemblemiddeling geschiedt de middeling over een ensemble van mogelijke bewegingen. De optredende stroming is dan op te vatten als een toevallige realisering uit het ensemble. Bij een voldoende grote steekproef met een middelingsduur die lang genoeg is om de turbulente beweging effectief uit te middelen, wordt in geval van een stationaire stroming een tijdsgemiddelde waarde gevonden die het ensemblemiddelde benadert.

De over de steekproef gemiddelde snelheid is zo onafhankelijk van de tijd t_0 en kan op de plaats x_i geschreven worden als:

$$\bar{u}(x_i; N) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u^{(n)}(x_i) \quad [2.31]$$

Hierin is N het totale aantal meetsignalen (gelijk aan frequentie maal de meettijd in seconden) en n het nummer van het meetsignaal. De snelheid bij elke n -de bemonstering op plaats x_i is te splitsen in de gemiddelde snelheid $\bar{u}$ en de incidentele afwijking ervan $u'^{(n)}$, die het onvoorspelbare aandeel vertegenwoordigt,

$$u^{(n)}(x_i) = \bar{u}(x_i) + u'^{(n)}(x_i) \quad [2.32]$$

De incidentele afwijking $u'^{(n)}$ is dan te schrijven als

$$u'^{(n)}(x_i) = u^{(n)}(x_i) - \bar{u}(x_i) \quad [2.33]$$

In de beschrijving van turbulentie wordt gebruik gemaakt van een impulsbalansvergelijking en een massabalansvergelijking in de vorm van respectievelijk de Navier-Stokes vergelijking en de continuïteitsvergelijking, in principe voor drie onafhankelijke richtingen (1, 2 en 3).

Na invulling van vergelijking [2.32] in de Navier-Stokes vergelijking en ensemblemiddeling van de vergelijking, wordt de Reynoldsvergelijking verkregen, waarbij de middeling van de niet-lineaire termen in de Navier-Stokes vergelijking extra termen oplevert. Deze termen staan bekend als de Reynoldse spanningen,

$$q_{ij} = \overline{\rho u_i' u_j'} \quad [2.34]$$

De indices kunnen de waarden 1, 2 en 3 aannemen, welke staan voor de coördinaatrichtingen. Terwijl de Navier-Stokes vergelijkingen en de continuïteitsvergelijking een gesloten systeem vormen waaruit het snelheidsveld in principe is op te lossen, geldt dit niet meer voor de Reynoldsvergelijkingen samen met de continuïteitsvergelijking. De Reynoldse spanningen zijn extra onbekenden, zodat extra relaties opgesteld moeten worden om deze vergelijkingen op te kunnen lossen.

De Reynoldse spanningen zijn te onderscheiden in:

1. normale spanningen ($i = j$): q_{11} , q_{22} en q_{33}
2. schuifspanningen ($i \neq j$): q_{12} , q_{13} en q_{23} ($q_{ij} = q_{ji}$)

Deze moeten gemodelleerd worden en zijn op voorhand niet bekend. Om iets te kunnen zeggen over de grootte van de normaalspanningen is de intensiteit een veel gebruikte maat:

$$\text{intensiteit van } u_i' = \sqrt{u_i'^2} = (\text{root-mean-square } u_i') \quad [2.35]$$

Een andere soms bruikbare maat is de gemiddelde absolute waarde van de fluctuaties.

De vergelijking die in dit onderzoek wordt gebruikt voor de bepaling van de intensiteit uit de snelheid is als volgt:

$$\text{intensiteit} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (u^{(n)} - \bar{u})^2} \quad [2.36]$$

en geeft dezelfde uitkomst als vergelijking [2.35]. Vergelijking [2.36] wordt gebruikt omdat de snelheden worden gemeten, niet direct de fluctuaties. Voor de druk wordt echter formule [2.35] gebruikt omdat direct uit de drukmetingen door toepassing van een bandfilter de fluctuaties worden gehaald en opgeslagen.

Een andere belangrijke grootheid is de mate van samenhang tussen de variaties van twee snelheidscomponenten. De mate van samenhang wordt gegeven door de correlatiecoëfficiënt, dat is de genormeerde covariantie:

$$R_{u_i' u_j'} = \frac{\overline{u_i' u_j'}}{\sqrt{(\overline{u_i'^2}) \cdot (\overline{u_j'^2})}} \quad [2.37]$$

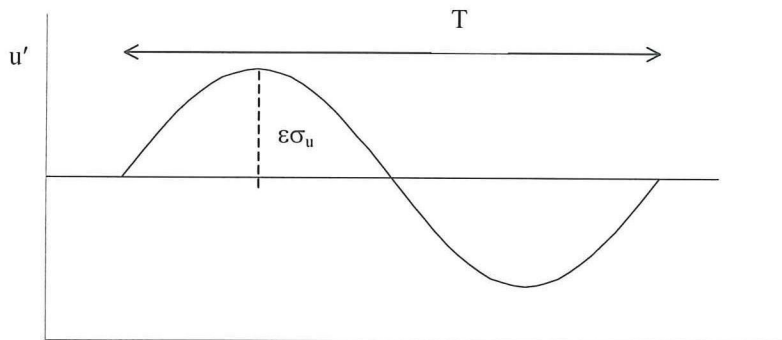
De correlatiecoëfficiënt is geschaald met de turbulentie-intensiteiten in beide richtingen. Twee sterk gecorreleerde snelheidsfluctuaties zijn een indicatie voor grote schuifspanningen en geven daarmee een zijwaarts transport aan.

2.6 Drukgradiënten

Drukgradiënten kunnen ontstaan door de omstroming van een steen door de gemiddelde stroming, en daarmee leiden tot het ontstaan van de lift- en sleepkrachten, die genoemd zijn in § 2.2. Daarnaast kunnen snelheidsfluctuaties samenhangend met de turbulente bewegingen langs de steen leiden tot fluctuerende drukgradiënten en fluctuerende lift- en sleepkrachten. Het is ook mogelijk dat drukgradiënten samenhangend met elders optredende turbulente bewegingen hun invloed direct doen gelden d.m.v. een drukkracht F_D op een steen. Dit laatste wordt nader toegelicht.

De eindigheid van de levensduur van turbulente wervels betekent dat de snelheidsuitwijking u' verandert in de tijd. Omdat de wervel wordt meegesleurd door de gemiddelde stroming is de meebewegende afgeleide $Du'/Dt \neq 0$ bepalend. Wanneer wordt uitgegaan van een sinusvormig in de tijd variërende sterkte van de wervel (figuur 2.5), dan is de meebewegende afgeleide te schatten met

$$\frac{D}{Dt} u' \cong \varepsilon \cdot \sigma_u \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t \quad [2.38]$$



Figuur 2.5 Sinusvormige sterkte van een wervel

Hierin is $\varepsilon \sigma_u$ de maximale grootte van de snelheidsuitwijking u' en T de levensduur van de wervel. Deze snelheidsverandering moet veroorzaakt zijn door een drukgradiënt over de wervel. De maximale grootte van deze fluctuerende drukgradiënt is dan met behulp van een met de gemiddelde stroming meebewegende impulsbalans te schatten:

$$\frac{\partial p'}{\partial x} = \rho_w \frac{D}{Dt} u' \cong \rho_w \varepsilon \sigma_u \frac{2\pi}{T} \quad [2.39]$$

De duur van de aanwezigheid van de drukgradiënt is afhankelijk van de passagetijd van de wervel. De passagetijd T_p is te berekenen uit de grootte van de wervel L en de snelheid waarmee de wervel geconvecteerd wordt; $T_p = L / \bar{u}$. Om de invloed van de fluctuerende drukgradiënt na te gaan is zowel de grootte van de drukgradiënt als de duur van de aanwezigheid van belang.

Een wervel vlak boven de bodem kan leiden tot een ongeveer constante drukgradiënt over de gehele steen, tenzij de wervel kleiner is dan de steen. Door volume-integratie van de drukgradiënt over de steen is de drukkracht F_D op de steen te berekenen. Het resultaat van de integratie is een formule voor de drukkracht:

$$F_D = \frac{1}{6} \pi \cdot d^3 \cdot \theta \cdot \rho_w \varepsilon \cdot \sigma_u \frac{2\pi}{T} \quad [2.40]$$

Hierin is $1/6\pi d^3$ het volume van een ronde steen. De constante θ geeft aan in hoeverre de drukgradiënt om de steen doordringt. Als de drukgradiënt constant is over de gehele steen, dan heeft de constante θ de waarde 1. Bij wervels die klein zijn ten opzichte van de steen is het gebied waarin de drukgradiënt aanwezig is relatief klein en daarmee is $\theta < 1$. De meest effectieve wervels zijn de wervels die naast een grote waarde van θ , een grote waarde van $\varepsilon \sigma_u$ koppelen aan een korte levensduur, dus een grote drukgradiënt (Booij, 1998).

3. Experimenten

3.1 Inleiding

In het Laboratorium voor Vloeistofmechanica zijn proeven uitgevoerd om de invloed van een verstoring van de stroming op de stabiliteit van een bodembescherming te onderzoeken. Het onderzoek richt zich hierbij vooral op het begin van bewegen van het bodemmateriaal en hiermee samenhangende turbulente snelheids- en drukfluctuaties.

3.2 Doel van de experimenten

Doel van de experimenten is het vinden van een relatie tussen het begin van bewegen van een enkele losliggende steen in een gefixeerd bed en de (lokale) turbulente snelheids- en drukfluctuaties achter een afstap. Het gaat hierbij om het fenomeen “begin van bewegen”. Bij het opvoeren van de stroomsnelheid worden de (lokale) turbulente snelheden en drukken in de buurt van de losse steen gemeten. Hieruit kunnen de fluctuaties bepaald worden en in verband gebracht worden met de manier van bewegen van de steen. Om een goed beeld te krijgen van de fluctuaties en de bewegingen van de steen worden deze proeven meerdere malen herhaald. Door ook in de situatie met een vlakke bodem te meten, kan de invloed van een verstoring op de stroming bepaald worden.

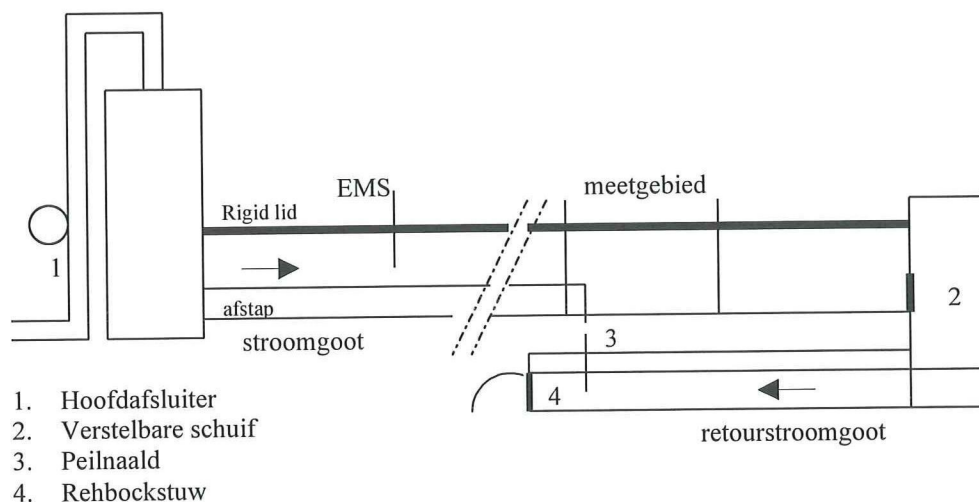
3.3 Proefopstelling

3.3.1 Inleiding

De experimenten zijn uitgevoerd in de lange kantonloop in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft.

3.3.2 Inrichting van de stroomgoot

De stroomgoot waarin de experimenten zijn uitgevoerd, heeft een lengte van 15 m en een breedte van 0.4 m, zie figuur 3.1. De maximaal mogelijke waterdiepte in de goot is 40 cm. Achter de afstap wordt de stroming vertraagd wat er voor zorgt dat de waterdiepte plaatselijk verandert. Om dit te voorkomen wordt het wateroppervlak begrensd door een rigid lid dat in de goot is aangebracht. De opstelling kan hierdoor geschematiseerd worden als tunnel. Door aanwezigheid van het rigid lid is de waterdiepte constant en staat er geen waterstandsverschil over de goot. Het modelleren wordt eenvoudig en de stroomsituatie is goed te definiëren. Het verloop van het snelheidsprofiel naar het wateroppervlak verschilt van het geval met een vrije waterspiegel doordat de stroming wrijving ondervindt van het rigid lid. De hoogte van het rigid lid boven de bodem hangt o.a. af van de gewenste stroomsnelheid in de goot. Dit zal verderop behandeld worden.



Figuur 3.1 Zij-aanzicht van de opstelling

3.3.3 Keuze van de stenen en de bodemopbouw

De afmetingen van de stenen dienen groot genoeg te zijn, zodat de kritieke Shieldsparameter onafhankelijk is van de grootte van de steen. Om hieraan te kunnen voldoen moeten de experimenten bij een turbulente bodemstroming worden uitgevoerd ($Re_* > 500$). Voor de afmetingen van de stenen houdt dit een minimale maat in van 7 mm (zie §2.3.1). De steensortering gebruikt in dit onderzoek is getoetst aan bovenstaande voorwaarde.

De cumulatieve massakromme van een steensortering is te bepalen door de massa van een aantal stenen (ongeveer 300) te rangschikken van klein naar groot en vervolgens de procentuele massabijdrage van ieder steentje ten opzichte van de totale massa te bepalen. Aan de hand van de cumulatieve massakromme kan de massa bepaald worden, die door 50% van het aantal stenen wordt onderschreden. De nominale steendiameter vergelijkt een steen van een willekeurige vorm en afmeting met een kubusvormige steen met hetzelfde massa (M) en volume. In formulevorm:

$$d_n = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho_s}} \quad [3.1]$$

De massadichtheid ρ_s is de massa van de stenen gedeeld door het volume. Door na het wegen van een handvol stenen deze in een maatbeker (500 ml) te leggen en het waterstandsverschil af te lezen om het volume te meten, kan de massadichtheid bepaald worden (tabel 3.1)

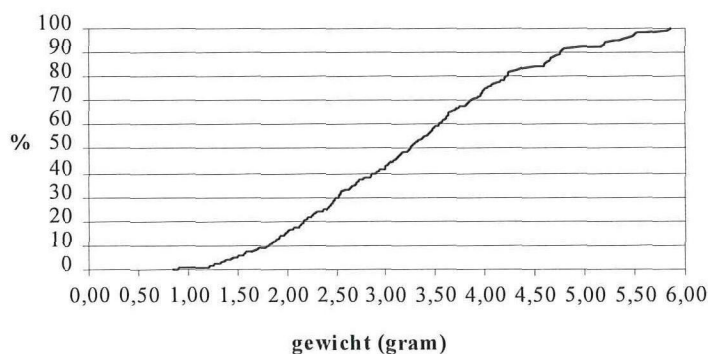
Massa (gram)	Volume (ml)	Massadichtheid (kg/m ³)
120.98	45	2688
230.55	85	2712
76.29	27	2826
218.30	80	2729

Tabel 3.1 Bepaling van de massadichtheid van de steensortering

De gemiddelde waarde van de massadichtheid bedraagt 2739 kg/m³ (≈ 2700). Uit de cumulatieve massakromme (figuur 3.2) zijn de massa's af te lezen waaruit de diameters berekend kunnen worden:

$$\begin{aligned} M_{15} &= 2,0 \text{ gram} & d_{n15} &= 9.20 \text{ mm} \\ M_{50} &= 3,2 \text{ gram} & d_{n50} &= 10.82 \text{ mm} \\ M_{85} &= 4,6 \text{ gram} & d_{n85} &= 12.13 \text{ mm} \end{aligned}$$

De wijdte van de steensortering (d_{n85}/d_{n15}) is ongeveer 1.32. Deze waarde ligt onder de maximale waarde van ca. 1,5 die in de praktijk wordt aangehouden.



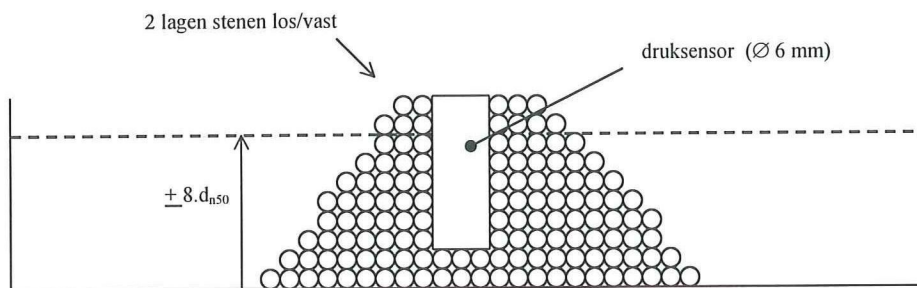
Figuur 3.2 Cumulatieve massakromme van de steensortering

In de literatuur wordt vaak gebruik gemaakt van een steensortering, die verkregen is door de stenen te zeven. Dit geeft echter een andere waarde voor de nominale diameter van de steensortering. Er zijn een aantal relaties voor het verschil tussen de diameters verkregen door wegen en zeven van een steensortering. Eén voorbeeld van zo'n relatie is die van Laan (1981) en is als volgt:

$$\frac{D_{n50}}{D_{50}} = 0,84 \text{ of } F_s = \left(\frac{D_{n50}}{D_{50}} \right)^3 = 0,60 \quad [3.2]$$

met D_{n50} de diameter verkregen uit het wegen van de steensortering en D_{50} de diameter verkregen uit het zeven van de steensortering. F_s is de vormfactor van de steensortering. Laan heeft verschillende soorten en afmetingen van steen gebruikt en concludeerden dat F_s waarden had tussen 0,32 en 0,72. De vormfactor van de steensortering in dit onderzoek ligt in de buurt van 0,6. Op deze manier is het mogelijk de in dit onderzoek gebruikte steendiameter om te rekenen, zodat vergelijking met resultaten uit de literatuur mogelijk is.

In de stroomgoot zijn de stenen aangebracht tot een laagdikte van ca. 8 maal d_{n50} . Dit is nodig om de druksensoren, die gebruikt worden om de drukfluctuaties in het stortebed te meten, in het stortebed te kunnen inbouwen, zie figuur 3.3. De stenen zijn op de bodem van de goot vastgelegd met siliconenkit. Buiten het meetgebied zijn de stenen tevens zodanig vastgelegd met siliconenkit, dat daar geen transport optreedt. Voor de eerste twee proeven is in het meetgebied een los strokenpatroon aangebracht met een dikte van ca. 2 maal d_{n50} . Na het uitvoeren van deze proeven is het losse bed vervangen door een vast bed eveneens met een dikte van ca. 2 maal d_{n50} , waarin één losse steen is geplaatst.

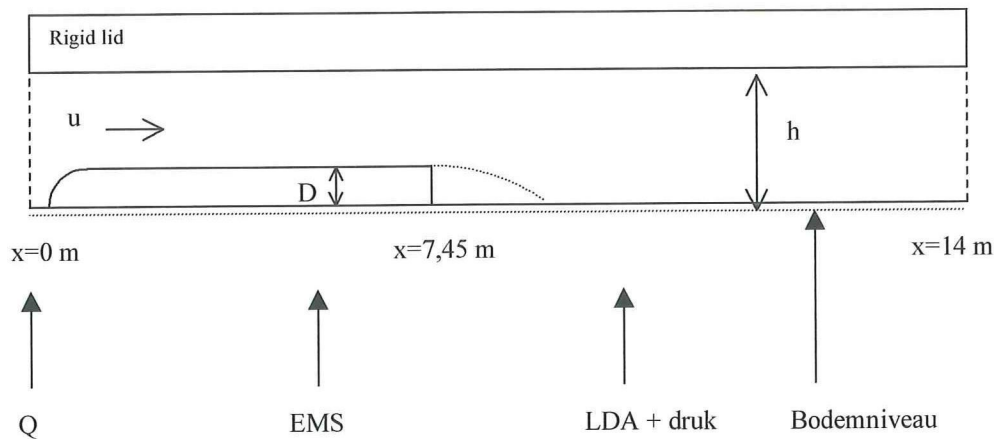


Figuur 3.3. Dwarsdoorsnede van de bodemopbouw met druksensor

Voor het bodemniveau is het gemiddelde genomen van 50 random metingen waarbij met een peilnaald het niveau werd gemeten van de bovenkant van de stenen. Deze stenen lagen verdeeld over de goot. De gemiddelde afwijking van de stenen in het stortebed van het bodemniveau is ca. $\frac{1}{2} d_{n50}$.

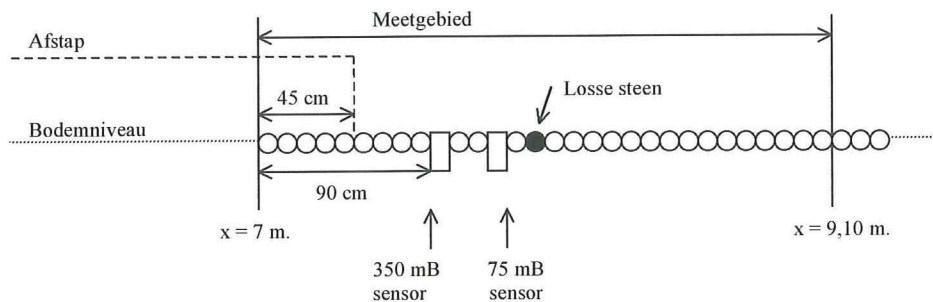
De waterdiepte is gelijk aan de hoogte van het rigid lid boven het bodemniveau, en heeft een waarde van 20 cm. Bij deze waterdiepte hangt het rigid lid op voldoende hoogte boven de bodem om een voldoende grote stroomsnelheid te garanderen. Dit is bepaald aan de hand van een proef waarbij bepaald is of het benodigde debiet haalbaar was (zie bijlage II). In eerste instantie was een grotere waterdiepte gewenst omdat dit gunstiger is voor de 2-dimensionale ontwikkeling van de stroming (kleinere breedte/diepte verhouding) achter de afstap.

Voor de hoogte van de afstap is gekozen voor een verhouding van afstaphoogte en waterdiepte van 0,345. Deze verhouding van $D = 0,345h$ is hetzelfde als in de metingen van Nakagawa & Nezu (1987, backward-facing step met daarachter een gladde bodem). Dit is gedaan om de uitgevoerde metingen met elkaar te kunnen vergelijken en zo na te kunnen gaan wat de invloed van de ruwheid op de neerstrooming is. Met een waterdiepte van 20 cm komt dit neer op een afstaphoogte van 6,9 cm.



Figuur 3.4. Langsdoorsnede van de stroomgoot ("tunnel")

Het meetgebied is het gebied in de stroomgoot waar de metingen verricht worden. In de situatie met een vlakke bodem hangt de ligging van het meetgebied af van de lengte die de stroming vanaf de instroomopening nodig heeft om uniform te worden. Voor deze lengte wordt ca. 40 maal de waterdiepte genomen. Dit betekent dat bij een waterdiepte van 20 cm een lengte nodig is van ca. 8 m. Het meetgebied mag niet te dicht bij de uitstroom liggen, omdat deze invloed heeft op de stroming. In de situatie met de afstap is het belangrijk dat de afstap lang genoeg is om boven de afstap een uniforme stroming te krijgen. Dit komt erop neer dat de afstap een lengte van ca. 7 à 8 m moet hebben. Er is gekozen voor een meetgebied dat loopt van 7 m benedenstrooms van de instroomopening tot ca. 9 m benedenstrooms van de instroomopening, zie figuur 3.5. In het geval met de afstap wordt hetzelfde meetgebied aangehouden en loopt de afstap 45 cm door in het meetgebied.



Figuur 3.5. Langsdoorsnede van het meetgebied met de druksensoren en de enkele losse steen

Om de schade aan het bed te kunnen vast stellen, is gebruik gemaakt van een strokenpatroon van stenen met verschillende kleuren, zie figuur 3.6. De omvang van het transport kan kwantitatief uitgedrukt worden door het tellen van het aantal verplaatste stenen. Een verplaatste steen dient in een strook met een andere kleur terecht te komen om als verplaatst aangemerkt te worden.

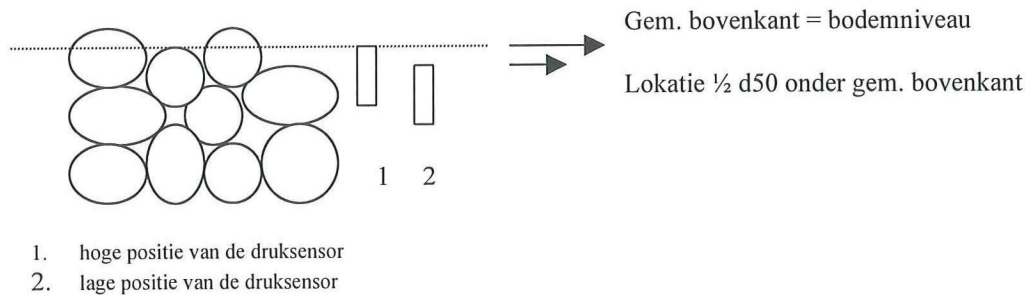


Figuur 3.6

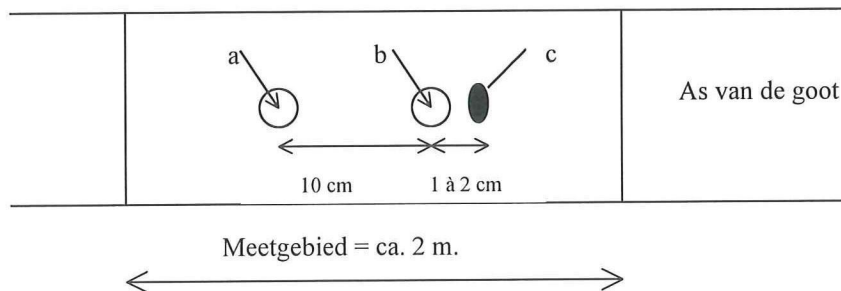
Gekleurd strokenpatroon in het meetgebied.
Bovenaan is een stuk van het rigid lid zichtbaar.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van een strookbreedte van 10 cm. Door het gebruik van 6 kleuren is de maximale verplaatsing die waargenomen kan worden 50 cm. In het geval van de vlakke bodem is het patroon aangebracht van 7.0 m tot 9.10 m, dus in totaal 21 stroken. In het geval met afstap is het patroon aangebracht direct achter de afstap tot 1.60 m benedenstrooms van de afstap, dus in totaal 16 stroken (7.45 tot 9.10m).

Voor de proeven met een enkele losse steen is een steen gekozen uit een selectie van honderd stenen waarvan de diameter en de vormfactor S_f (zie bijlage III) bepaald zijn. De losse steen heeft een vormfactor van 0,66 wat overeen komt met de gemiddelde waarde van de selectie en een diameter van 11,78 mm, dat is ca. 1 mm groter is dan de d_{n50} van het bed. Deze steen is gekozen vanwege zijn ronde vorm. In het geval van proeven met één enkele losliggende steen zijn de stenen in het meetgebied vastgelegd en wordt de enkele losse steen steeds in dezelfde positie en stand op dezelfde plaats in het stortebed gelegd. De losse steen wordt op een afstand van ca. 1 à 2 cm benedenstrooms van de meest gevoelige druksensor (75 mB) gelegd, zodanig dat de losse steen in het aanligpunt van de stroming ligt. De minder gevoelige druksensor (350 mB) ligt op een afstand van 10 cm bovenstrooms van de meest gevoelige druksensor (75 mB). Beide druksensoren hebben een diameter van 6 mm. Zie figuur 3.8 voor een overzicht. Het aanligpunt wordt als ligplaats van de losse steen gekozen omdat daar de grootste drukfluctuaties verwacht worden en het ligt dicht in de buurt van het gebied waar de grootste aanval op het bed optreedt. De druksensoren worden in de as van de goot in het bed geplaatst, zodanig dat ze in hoogte verstelbaar zijn om het mogelijk te maken de drukken in het stortebed te meten, zie figuur 3.7.



Figuur 3.7 Aanduiding bodemniveau



Figuur 3.8 Bovenaanzicht van het meetgebied met druksensoren (a en b, resp. de 350 mB sensor en de 75 mB sensor) en losse steen (c)

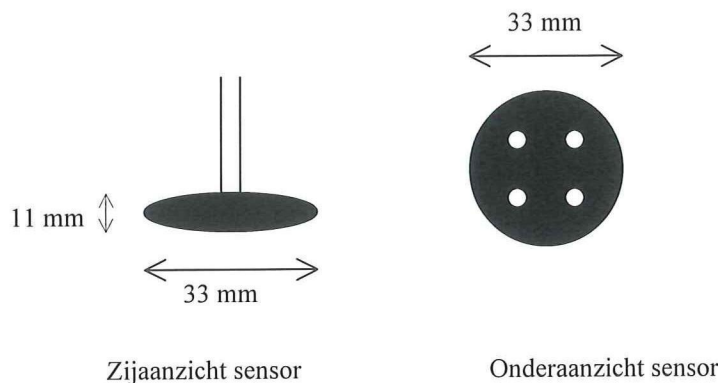
3.4 Meetapparatuur

Debietmeting:

Het debiet wordt globaal ingesteld met een vlinderklep die als hoofdafsluiter fungeert (zie figuur 3.1) en naderhand nauwkeurig bepaald via de gemeten waterstand in de retourgoot. Door het peilen van de waterstand bij de overlaat van de retourgoot kan het debiet zeer nauwkeurig bepaald worden (Rehbockstuw).

Snelheidsmetingen met EMS

De snelheid bovenstrooms van het meetgebied wordt in één vast punt gemeten met een electromagnetische snelheidsmeter (EMS). In het geval zonder afstap bevindt de EMS zich op een hoogte van 12 cm boven het gemiddeld bodemniveau. In het geval met afstap bevindt de EMS zich 2,5 m bovenstrooms van het eind van de afstap, op een hoogte van 5 cm boven de afstap.



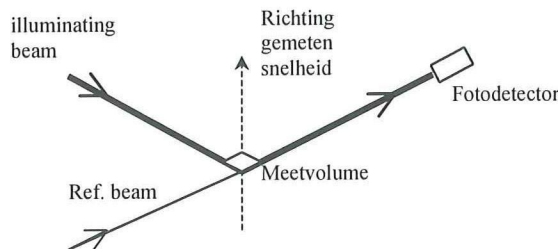
Figuur 3.9 Afmetingen van de EMS sensor

De EMS geeft van de snelheid in het horizontale vlak beide snelheidscomponenten (langs- en dwarsrichting). In dit onderzoek wordt alleen de langscomponent van de snelheid gebruikt. De hoofdafmetingen van de elliptische doorsnede van de sensor zijn 11x33 mm. De sensor is bevestigd op een staaf met een diameter van 10 mm. De electromagnetische snelheidsmeter meet continu de snelheidscomponenten en presenteert deze als analoge voltages. De dynamische responsie van dit systeem is maximaal 10 Hz, wat betekent dat de EMS enkel de signalen met een frequentie tot 10 Hz meet en maximaal 10 verschillende signalen per seconde registreert. Voor het meten van de snelheid van de stroming is deze frequentie voldoende omdat de verandering van de snelheid (afwijking van het gemiddelde) niet al te groot is.

Snelheidsmetingen met Laser Doppler Anemometer

De snelheidsmetingen in het meetgebied worden gedaan met een 2D Laser Doppler Anemometer (LDA). Er worden snelheidsprofielen in een aantal dwarsdoorsneden in het meetgebied en turbulente snelheidsfluctuaties vlakbij de losse steen mee gemeten. Bij de 2D LDA komen er drie lichtstralen uit de LDA. Tegenover de LDA staan twee fotodetectoren die twee van de drie lichtstralen, de reference beams, detecteren. De derde straal, de illuminating beam, wordt verstrooid en levert daarmee de snelheidsinformatie in de richting van de beide reference beams. Het meetvolume van de gebruikte LDA is 0.08 mm³. De dynamische responsie van de LDA wordt begrensd door de gebruikte bandfilters (hoog- en laagfrequent). De bandfilters zijn ingesteld op een minimum en maximum frequentie, wat betekent dat alleen de frequenties tussen het minimum en het maximum gemeten worden. De LDA wordt niet verstoord door invloeden van buiten de goot zoals bv. de netspanning en omgevingstrillingen.

De LDA werkt als volgt: Een reference beam passeert het meetvolume en wordt opgevangen in een detector die tegenover de LDA opgesteld staat. Een sterke straal, de illuminating beam, wordt gedeeltelijk verstrooid door kleine deeltjes, die altijd in het water aanwezig zijn, in de richting van de fotodetector. Hierbij verandert de frequentie van het verstrooide licht evenredig met de component van de snelheid van de kleine deeltjes in de in figuur 3.4 aangegeven richting. Door vergelijking met de frequentie van de, niet verstrooide, reference beam is deze component van de snelheid te meten.



Figuur 3.10 De 1D Laser Doppler Anemometer

De LDA bevindt zich op een plateau aan één zijde van de goot; aan de andere zijde van de goot bevinden zich de twee fotodetectoren eveneens op een plateau. Beide plateaus zijn opgehangen aan een liftconstructie, die zich op de goot bevindt. Deze constructie maakt het mogelijk om de LDA in hoogte te verstellen zonder het signaal van de detectoren te verliezen, zodat eenvoudig snelheidsprofielen in de verticaal gemeten kunnen worden. De liftconstructie zelf is over de goot in horizontale richting te verplaatsen, zodat ook op verschillende plaatsen in het meetgebied snelheidsprofielen gemeten kunnen worden.

Drukmetingen

Er wordt gemeten met twee druksensoren, ter beschikking gesteld door WL/Delft Hydraulics. Het bereik van de sensoren is resp. 75 en 350 mB. Beide zijn geijkt en afgeregeld op 30 mB. De sensoren meten de spanning op het half geleide materiaal, dat in de sensoren aanwezig is. Met behulp van een ijkingstabel kan deze spanning omgezet worden in een druk (in mB). Het signaal dat de beide druksensoren afgeven wordt gefilterd met een bandfilter waarbij het hoog doorlaatfilter ingesteld is op 1 Hz en het laag doorlaatfilter op 100 Hz om de invloeden van de hogere frequenties uit te sluiten. Het signaal van de 75 mB sensor is tevens gefilterd met een laag doorlaatfilter van 10 Hz. Op deze manier zijn er van de 75 mB sensor twee parallel gefilterde signalen beschikbaar. Dit is gedaan omdat bleek dat de 75 mB sensor gevoelig is voor de netspanning (50 Hz) en voor andere invloeden van buiten de goot. Het laagdoorlaatfilter van 10 Hz is geoorloofd omdat 85 % van de drukfluctuaties zich in het laagfrequente gebied tussen 0 en 10 Hz bevinden. Door het gebruik van het hoogdoorlaatfilter worden slechts de fluctuaties rondom het gemiddelde geregistreert. De dynamische responsie van de druksensoren wordt net als de LDA begrensd door de bandfilters. Het is belangrijk dat de sensoren voor elke proef goed geijkt worden want het verloop van de sensoren is behoorlijk. Het pompensysteem in het laboratorium geeft trillingen die door de 75 mB sensor gemeten worden.

Video opnamen

Er worden video-opnamen gemaakt voor het bepalen van het begin van bewegen en de manier van bewegen van het bodemmateriaal. Voor het maken van deze video-opname is gebruik gemaakt van een digitale camera. Deze camera slaat per seconde 25 beeldjes op. Met de juiste software kunnen de video opnamen beeld voor beeld worden bekeken. Om de video-beelden te kunnen koppelen aan de snelheids- en druksmetingen moet de displaytijd van de videocamera simultaan lopen met de meettijd. Dit is te bereiken door gebruik te maken van een Light Dependent Resistor (LDR) ofwel fotocel. Deze fotocel is voor het camera-loopt-lichtje geplakt. Als de camera gestart wordt, valt er licht op de fotocel waardoor de weerstand in de cel verlaagd wordt. Dit wordt in de vorm van een pulsverandering doorgegeven naar de computer.

Data-acquisitie

De data-acquisitie wordt uitgevoerd met een data-acquisitiesysteem, waarmee het mogelijk is simultaan te bemonsteren. Dit systeem bestaat uit:

- Een analoog-digitaal conversiekaart (AD-kaart)
- Een externe Sample & Hold kaart (S&H-kaart)
- Een personal computer
- Het bemonsteringsprogramma DasyLab

De S&H-kaart slaat de analoge signalen (die de meetapparatuur naar de AD convertor stuurt) in een buffer op. De AD-kaart verzorgt de conversie van analoog signaal naar een reeks binaire getallen. Deze kaart wordt aangestuurd door DasyLab via software. Met dit systeem is het mogelijk om 16 kanalen simultaan te bemonsteren. Dit is nodig om de correlatie tussen de snelheids- en drukmetingen te kunnen berekenen, en de video-starttijd via de startpuls met de metingen te vergelijken. In dit onderzoek worden 7 kanalen gebruikt waarvan één voor de puls van de videocamera. De andere zes worden per twee gebruikt voor resp. de EMS-, de LDA- en de druksignalen.

Meetduur

Om een betrouwbaar beeld te krijgen van de snelheids- en drukfluctuaties zijn zowel de meetduur als de sampletijd (= bemonsteringsfrequentie) van het data-acquisitiesysteem van belang. De sampletijd van het data-acquisitiesysteem bepaalt de frequentie van registratie. Voor het meten van turbulente snelheden is een veel hogere bemonsteringsfrequentie nodig dan voor metingen van gemiddelde snelheden. Voor de bepaling van turbulente transporten, zoals de turbulente schuifspanning, is de tijdschaal van de grote turbulente wervels maatgevend. In de turbulente schuifspanning spelen immers vrijwel alleen de grote, langzame wervels mee. Hierdoor is een bemonsteringsfrequentie van ca. 50 Hz vereist. Om ook een frequentiespectrum van de turbulentie te kunnen bepalen zijn veel hogere bemonsteringsfrequenties nodig (orde 100 Hz). In deze proeven wordt bemonsterd met een frequentie van 200 Hz. De meetduur voor de snelheids- en drukmetingen is gesteld op minimaal 5 minuten. Uit eerder gedane experimenten is gebleken dat deze meetduur lang genoeg is om de turbulente beweging effectief uit te middelen en statistische eigenschappen van de turbulentie te bepalen. Per proef is, afhankelijk van wat er gemeten wordt, een meetduur vastgesteld. Bij snelheidsprofielmetingen is een langere meetduur aangehouden dan bij snelheidsmetingen in de buurt van de losse steen, omdat het hier gewenst is om meer turbulente bewegingen vast te leggen.

3.5 Opzet van de experimenten

Voordat het begin van bewegen van een enkele losliggende steen onderzocht kon worden, zijn er proeven gedaan met een gekleurd strokenpatroon van losliggende stenen. Dit is gedaan in de situatie zonder en met afstap om een beeld te krijgen van de schadeontwikkeling aan het bed en om een vergelijking te kunnen maken met eerder gedane experimenten, bv de experimenten van Nakagawa & Nezu (1987), waarin metingen achter een backward-facing step met gladde bodem zijn gedaan om meer te weten te komen van de basis turbulente structuren in een openwaterstroming met afstap.

In het geval met afstap is de ligging van het aanligpunt van de stroming achter de afstap en de ligging van het grootste schadegebied bepaald om dit te kunnen vergelijken met de in de literatuur vermelde ligging van deze punten achter de afstap

In onderstaande tabel staan de uitgevoerde proeven samengevat.

Proef	Vast/los bed	Afstap
Bepaling U_c	Los strokenpatroon	Nee
Bepaling U_c	Los strokenpatroon	Ja
Bepaling U_c	Eén losse steen	Nee
Bepaling U_c	Eén losse steen	Ja
Simultaan snelheids- en drukmetingen	Eén losse steen	Nee
Simultaan snelheids- en drukmetingen	Eén losse steen	Ja

In detail komt dit neer op het volgende:

- *Bepaling van U_c in een uniforme stroming met een losliggend gekleurd strokenpatroon*

Het doel van deze proef is om de ontwikkeling van de erosie vast te leggen en hierbij een schadekriterium vast te stellen zodat een waarde voor de kritieke snelheid bepaald kan worden. Aan de hand van deze kritieke snelheid wordt een Ψ_c voor een uniforme stroming bepaald. Deze Ψ_c wordt vergeleken met de Ψ waarde behorend bij het eerste stadium van bewegen (§2.3.2).

Deze proef wordt uitgevoerd zonder afstap. In het meetgebied is een strokenpatroon van losliggende stenen aangebracht.

Het stortebed wordt belast met een aanvangsströmung, waarbij de stenen nog niet gaan bewegen. In 10 stappen wordt het debiet opgevoerd totdat er stenen gaan bewegen. Bij elke stap is het volgende gemeten:

- Het debiet (met de Rehbockstuw)
- De snelheid bovenstrooms van het meetgebied op 12 cm boven de bodem (met EMS)
- Het aantal verplaatste steentjes na 20 minuten stromen

Bij de derde en achtste stap waarbij het debiet is opgevoerd, is in de buurt van het grootste schadegebied een snelheidsprofiel over de verticaal gemeten met de Laser Doppler Anemometer, om zo een beeld te krijgen van het snelheidsverloop in de verticaal. Dit is gedaan door in een aantal punten in de verticaal boven de bodem gedurende een aantal minuten te meten.

- *Bepaling van U_c in een verstoorde stroming met een losliggend gekleurd strokenpatroon*

Het doel van deze proef is om de ontwikkeling van de erosie vast te leggen en een waarde voor de kritieke snelheid, U_c in een niet-uniforme stroming achter een afstap te bepalen. Deze U_c wordt vergeleken met de U_c in geval van uniforme stroming. Zo kan de waarde van de belastingsfactor K bepaald worden. Daarnaast wordt de ligging van het aanligpunt van de stroming en de plaats waar de grootste schade optreedt, bepaald.

Weer is in 10 stappen het debiet opgevoerd totdat er stenen gaan bewegen. Bij elke stap is het volgende gemeten:

- De afstand van de afstap tot het aanligpunt
- De snelheid op 5 cm boven de afstap, 2,5 m bovenstrooms van het eind van de afstap (met EMS)
- De snelheid op 56 cm achter de afstap (met LDA)
- Het aantal verplaatste stenen per strook na 20 minuten stromen
- De afstand van de afstap tot het punt met de grootste schade (visueel)

Het aanligpunt is zichtbaar te maken door aan de afstap een dun draadje vast te maken. Dit draadje volgt nagenoeg de stroming tot in het aanligpunt. Door video opname te maken, is naderhand de afstand van de afstap tot het aanligpunt te bepalen.

Bij de derde en achtste stap waarbij het debiet is opgevoerd, is een snelheidsprofiel over de verticaal gemeten met de LDA om te zien hoe het snelheidsveld zich ontwikkelt en hoe de turbulentie-intensiteiten veranderen met de snelheid. Dit is gedaan door op een vaste plaats achter de afstap in een aantal punten in de verticaal boven de bodem gedurende een aantal minuten de snelheid te meten.

• *Bepalen van U_c voor één enkele losse steen in een uniforme stroming*

Het doel van deze proef is het bepalen van de kritieke snelheid, U_c , in een uniforme stroming waarbij de enkele steen wordt verplaatst (referentieproef). En het koppelen van de snelheids- en drukfluctuaties rondom de losse steen aan de bewegingen van de losse steen.

Deze proef wordt uitgevoerd zonder afstap. Het stortebed ligt vast met daarin één enkel losliggend steentje. Tevens zijn de twee druksensoren in het stortebed aanwezig.

Het vastgelegde bed wordt belast met een aanvangsströmung, waarbij het losse steentje nog niet gaat bewegen. Deze aanvangsströmung is de stroming waarbij in de proef “Bepaling van Ψ_c in een uniforme stroming” bijna beweging optrad. Vervolgens wordt het debiet stapsgewijs opgevoerd totdat het steentje gaat bewegen en uiteindelijk verplaatst wordt. Gedurende het opvoeren van het debiet is er een video-opname gemaakt en is het volgende gemeten:

- De snelheid 2 m bovenstrooms van het meetgebied (met EMS)
- De snelheid op 1,5 cm boven de oorspronkelijke ligplaats van het steentje (met LDA)
- De druk t.p.v. beide druksensoren (simultaan met de snelheidsmeting van de LDA)

Dit geheel wordt een aantal malen herhaald om zo een gemiddelde snelheid te kunnen bepalen waarbij de steen wordt verplaatst.

• *Bepalen van U_c voor één enkele losse steen in een verstoorde stroming*

Het doel van deze proef is het bepalen van de kritieke snelheid, U_c , in een niet-uniforme stroming achter een afstap waarbij de enkele steen wordt verplaatst. En het koppelen van de snelheids- en drukfluctuaties rondom de losse steen aan de bewegingen van de losse steen.

Gedurende het opvoeren van het debiet is er een video-opname gemaakt en is het volgende gemeten:

- De snelheid op 5 cm boven de afstap, 2,5 m bovenstrooms van het eind van de afstap (met EMS)
- De snelheid op 1,5 cm boven de oorspronkelijke ligplaats van het steentje (met LDA)
- De druk t.p.v. beide druksensoren (simultaan met de snelheidsmeting van de LDA)

Dit geheel wordt een aantal malen herhaald om een gemiddelde snelheid te kunnen bepalen waarbij de steen wordt verplaatst.

- *Simultane snelheids- en drukmetingen in een uniforme stroming bij de snelheid waarbij de enkele losse steen wordt verplaatst.*

Het doel van deze proef is het vinden van een verband tussen de turbulente snelheids- en drukfluctuaties in geval van een vlakke bodem. Door de toepassing van bandfilters kunnen uit de gemeten snelheden en drukken de fluctuaties gefilterd worden.

Het strokenpatroon van losliggende stenen is vervangen door een gefixeerd stortebed. Tevens zijn de twee druksensoren in het stortebed aanwezig. Bij de stroomsnelheid waarbij het steentje wordt verplaatst, wordt vervolgens het volgende gemeten:

- De snelheid in de verticaal boven de oorspronkelijke ligplaats van het steentje, boven beide druksensoren en elders (met LDA)
 - De snelheden en drukken (simultaan i.v.m. correlaties) t.p.v. beide druksensoren, waarbij de snelheid op 1,5 cm boven de druksensoren is gemeten. Dit is gedaan voor de situatie dat de druksensoren ter hoogte van het bodemniveau lagen
- *Simultane snelheids- en drukmetingen in een verstoorde stroming bij de snelheid waarbij de enkele losse steen wordt verplaatst.*

Het doel van deze proef is het vinden van een verband tussen de turbulente snelheids- en drukfluctuaties achter een afstap.

Deze proef is uitgevoerd met één afstap met een hoogte van $D = 0,345 h$. Het strokenpatroon van losliggende stenen is vervangen door een gefixeerd stortebed. Tevens zijn de twee druksensoren in het stortebed aanwezig. De stroomsnelheid is ongeveer zo groot gekozen dat een individueel steentje wordt verplaatst (zie proef “Bepalen van Ψ_c voor één enkele losse steen in een verstoorde stroming”; er is voor gekozen om bij 2 stroomsnelheden te meten).

Hierbij wordt het volgende gemeten:

- Snelheid op 5 cm boven de afstap, 2,5 m bovenstrooms van het eind van de afstap (met EMS)
- Snelheden in de verticaal boven beide druksensoren en elders (met LDA)
- De snelheden en drukken (simultaan i.v.m. correlaties) t.p.v. beide druksensoren waarbij de snelheid op 1,5 cm boven de druksensoren is gemeten. Dit is gedaan voor de situatie dat de druksensoren ter hoogte van het bodemniveau lagen en ter hoogte van de lokatie $\frac{1}{2} d_{n50}$ onder het bodemniveau

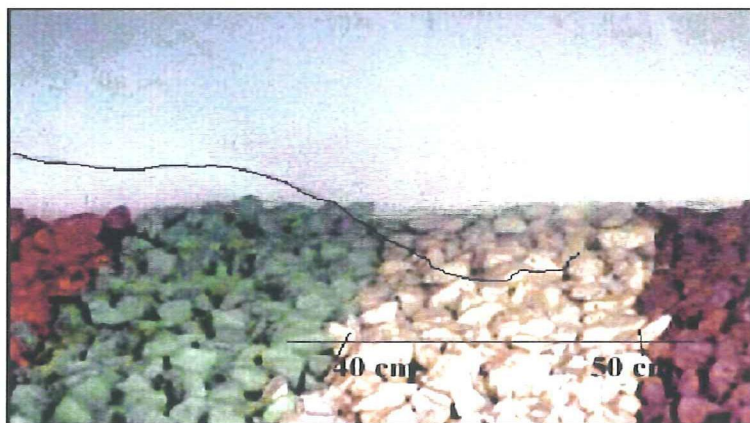
4. Analyse en interpretatie van de resultaten

4.1 Inleiding

In de volgende paragrafen worden de resultaten van de proeven besproken en wordt de vergelijking met de literatuur gegeven. De relevante meetwaarden van de proeven en de (bijbehorende) grafieken zijn te vinden in de bijlagen.

4.2 Ligging van het aanligpunt achter de afstap

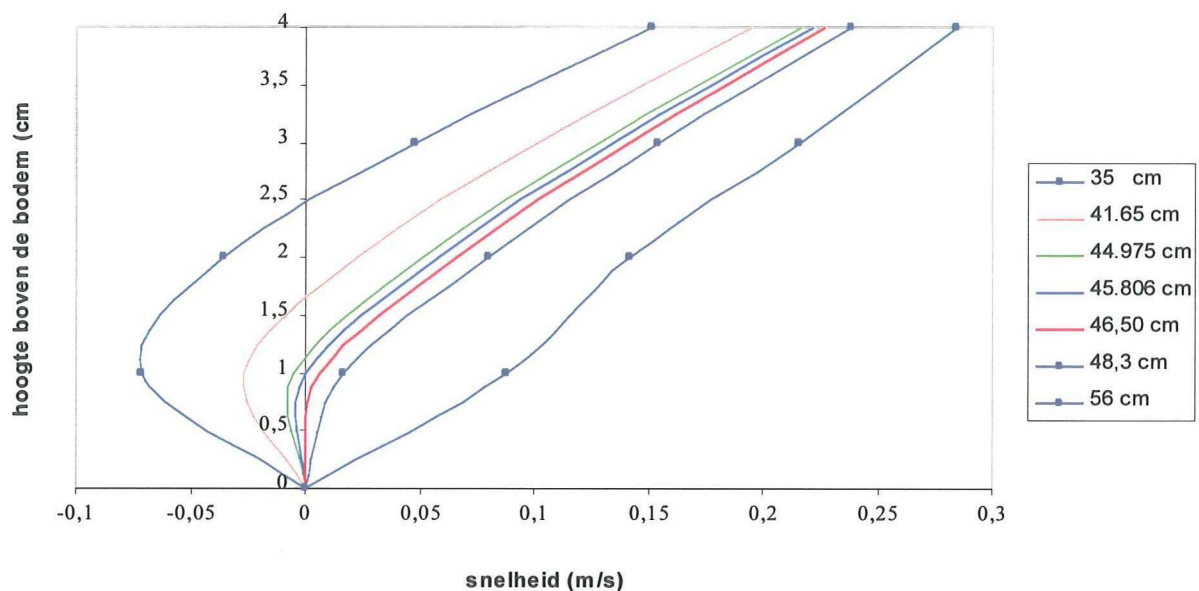
De stroming over een afstap laat los daar waar de afstap eindigt. De stroomlijn die loslaat aan het eind van de afstap “loopt” tot in het aanligpunt ter plaatse van de bodem, waar de stroomsnelheid gemiddeld nul is. De ligging van het aanligpunt achter de afstap is op een aantal manieren te bepalen. Een mogelijkheid is om een touwtje aan het eind van de afstap te bevestigen. Het touwtje (dun garen) volgt de stroming tot in het aanligpunt bij de bodem. Door het touwtje te volgen met een videocamera is de ligging van het aanligpunt aan de hand van de videobeelden te bepalen. Het aanligpunt is ook te bepalen door het meten van een aantal snelheidsprofielen achter de afstap. Het tellen van tegen de hoofdstroomrichting in verplaatste stenen in het strokenpatroon is eveneens een mogelijkheid om een schatting te maken van de ligging van het aanligpunt. Het aanligpunt ligt in de strook waaruit in beide richtingen (tegen de stroomrichting in en met de stroomrichting mee) stenen worden verplaatst.



*Figuur 4.1 Foto van de video-opname van touwtje achter de afstap.
De afstap bevindt zich links van de figuur en is hier niet afgebeeld.*

Uit figuur 4.1 blijkt dat het aanligpunt op ca. 45 cm achter de afstap ligt. Dit komt overeen met een afstand van ca. 6,5 maal de afstaphoogte achter de afstap.

In figuur 4.2 is een gedeelte van een aantal snelheidsprofielen op verschillende afstanden achter de afstap afgebeeld. Deze snelheidsprofielen zijn bepaald uit de snelheidsmetingen gedaan bij de proef “Bepaling van U_c in een verstoorde stroming (met een losliggend gekleurd strokenpatroon)”. De blauwe lijnen geven de profielen weer die daadwerkelijk zijn gemeten op 35, 48,3 en 56 cm achter de afstap. De meetpunten zijn aangegeven. De anders gekleurde lijnen zijn de profielen die bepaald zijn met behulp van lineaire interpolatie. Deze interpolatie is herhaald totdat een profiel werd verkregen waarbij het verloop in de buurt van de bodem verticaal is, wat betekent dat daar de stroomsnelheid ongeveer nul is, daarmee de ligging van het aanligpunt aangevend. Dit profiel benadert het profiel zoals in de verticaal door het aanligpunt gevonden zal worden en het aanligpunt wordt zo bepaald op 46,5 cm achter de afstap (rode lijn). Dit komt overeen met een afstand van ca. 6,7 maal de afstaphoogte achter de afstap.



Figuur 4.2 Bepaling van de ligging van het aanligpunt uit snelheidsprofielen

Bij de proef “Bepaling van U_c in een verstoorde stroming met een losliggend gekleurd strokenpatroon” is per keer dat de stroomsnelheid werd opgevoerd het aantal verplaatste stenen en waar deze vandaan kwamen bijgehouden. Dit is gedaan door per strook het aantal stenen met een andere kleur te tellen. Bij een voldoende grote stroomsnelheid verplaatsen er ook stenen tegen de richting van de stroming in. Dit gebeurt vanaf het aanligpunt en bovenstrooms daarvan.

In onderstaande tabel staat het aantal verplaatste stenen per strook vermeld. De dikgedrukte getallen geven het aantal stenen dat tegen de stroomrichting in is verplaatst. Een dik gedrukt getal in strook 4 betekent dat de stenen in ieder geval vanuit strook 5 naar strook 4 verplaatst zijn, etc. Er is te zien dat er vanuit strook 6 en daarvoor stenen tegen de stroomrichting in verplaatsen. Vanuit strook 4 en 5 komen de meeste stenen. Het aanligpunt ligt dus ongeveer tussen de 40 en 50 cm achter de afstap (strookbreedte 10 cm) wat overeenkomt met een afstand van ca. 6 à 7 maal de afstaphoogte achter de afstap.

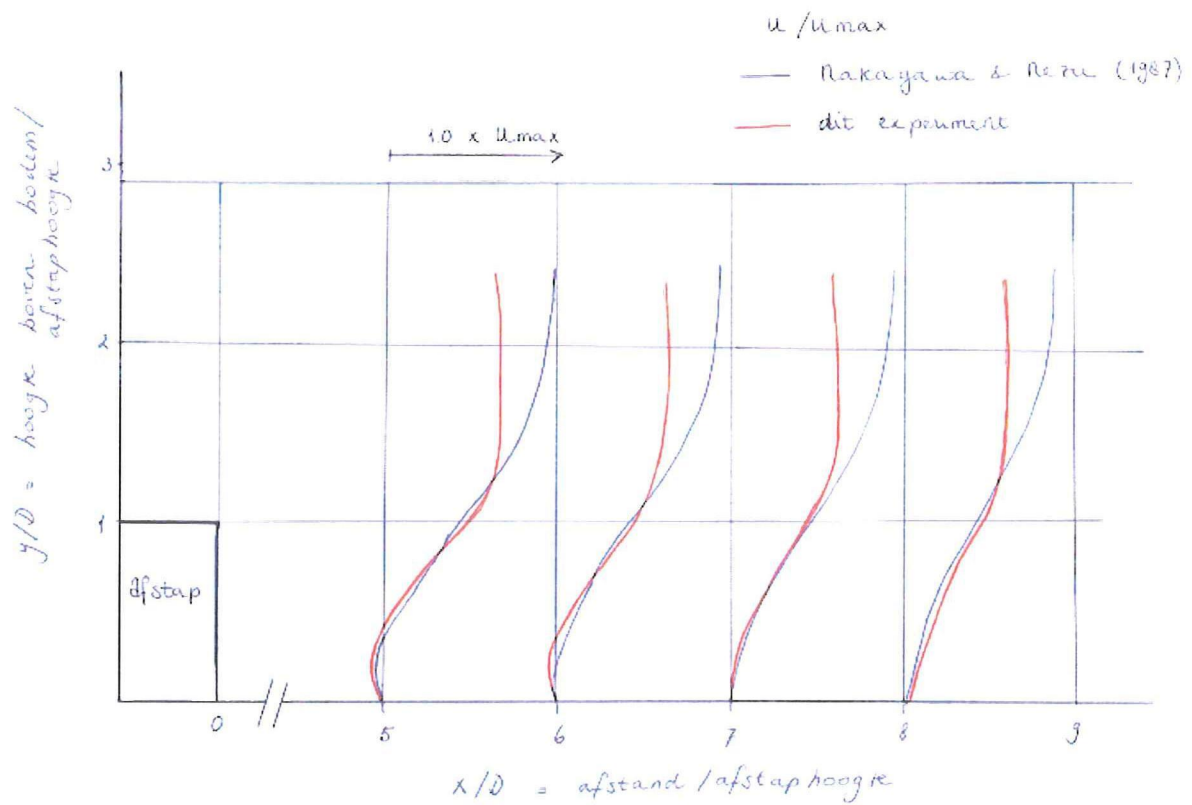
	strooknummer																				
proefnr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1			4	2	1	6	22	6	13	11	6	5	10	1	7	2		5	5		5
2			2		1	3	23	9	9	5	4	6	6	7	3	3	1	2	2		4
3			1	1		2	20	3	20	17	10	9	8	6	6	4	3	1	5	2	4
4			2	1		3	17	8	28	16	8	8	6	4	5	9		2	2	1	
5				1		4	18	8	17	14	6	8	9	5	3	7	1	4	4		2

Tabel 4.1 Het aantal verplaatste stenen per strook.

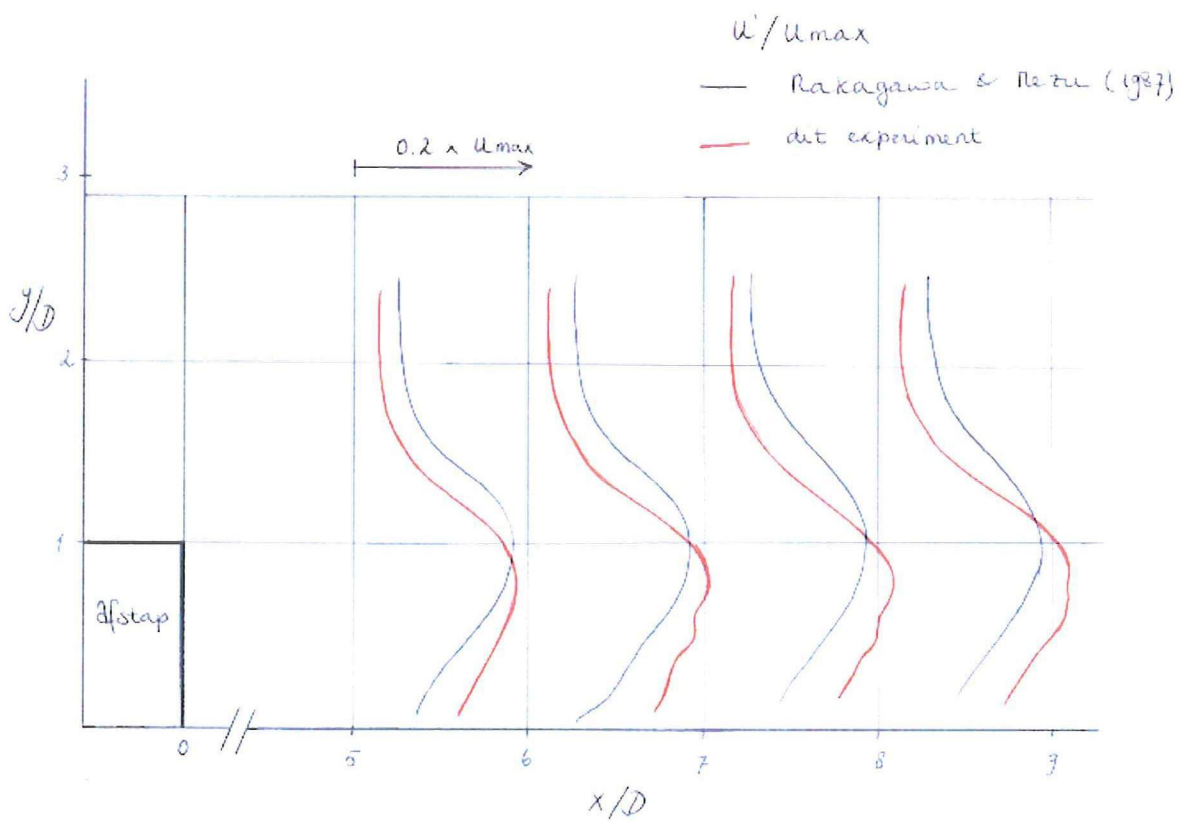
Uit bovenstaande volgt dat het aanligpunt op ca. 6 à 7 maal de afstaphoogte achter de afstap ligt. Dit komt goed overeen met de door Nakagawa & Nezu (1987) en Xingkui & Fontijn (1993) gevonden waarde voor de ligging van het aanligpunt (resp. $6,4D$ en $8D$). Voor de uitvoer van de experimenten is voor het aanligpunt een afstand van 6,7 maal de afstaphoogte achter de afstap aangehouden.

Snelheidsprofielen

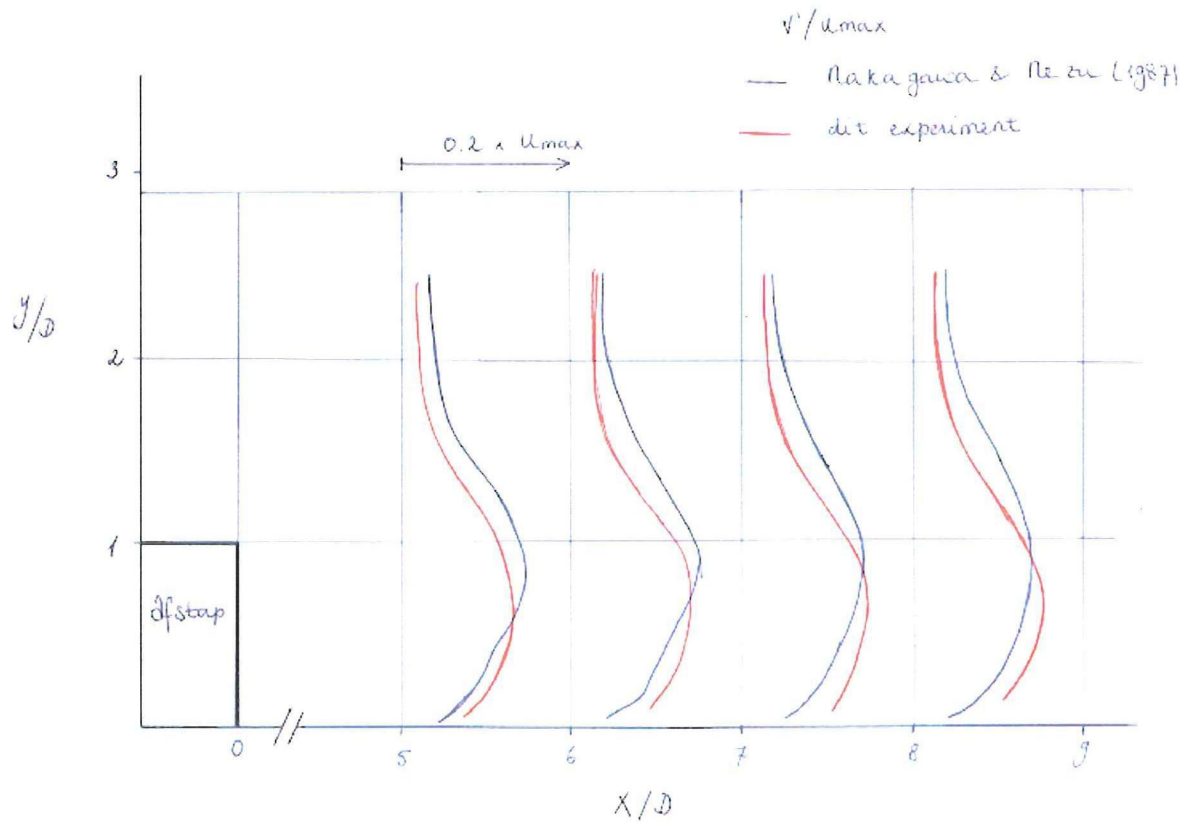
De gemeten snelheidsprofielen, de daaruit bepaalde turbulentie-intensiteiten u' en v' en de Reynoldse spanningen, $\overline{u'v'}$, zijn afgebeeld in de figuren 4.3 t/m 4.6 op de volgende bladzijden samen met de door Nakagawa & Nezu (1987) gevonden profielen. De profielen zijn genormaliseerd met de maximum gemiddelde snelheid, $u_{\max}$, ter plaatse van $x = 0$ (zie figuren 4.3 t/m 4.6). De keuze van normalisering is niet goed te maken maar het gaat er vooral om een goede indruk te krijgen van het verloop van de verschillende profielen. De afstand achter de afstap en de hoogte boven het bed zijn genormaliseerd met de afstaphoogte, D .



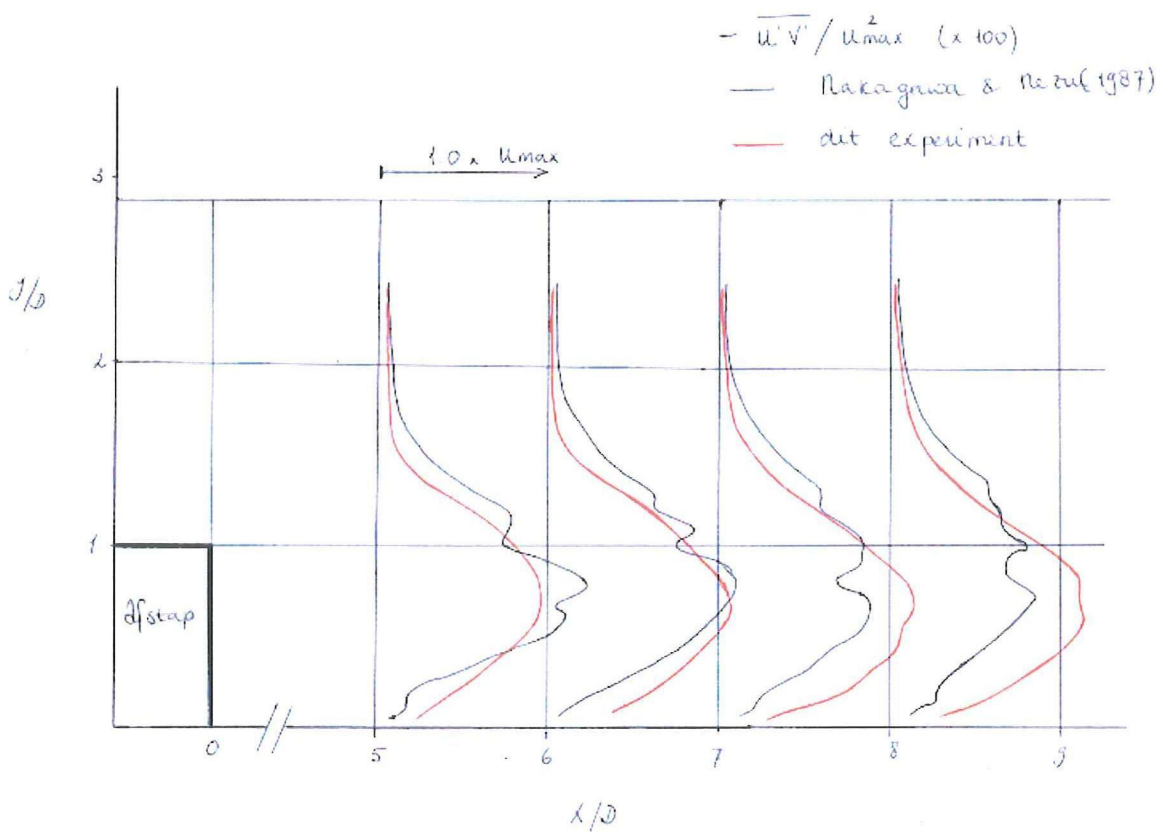
Figuur 4.3 Snelheidsprofielen gemeten op verschillende afstanden achter de afstap.



Figuur 4.4 Verloop van de turbulentie-intensiteit u' achter de afstap.



Figuur 4.5 Verloop van de turbulentie-intensiteit v' achter de afstap.



Figuur 4.6 Verdeling van de Reynoldse spanning $(u'v')_{\text{gem}}$ achter de afstap.

Uit de figuren 4.3 t/m 4.6 blijkt dat de gevonden profielen goed met elkaar overeenkomen.

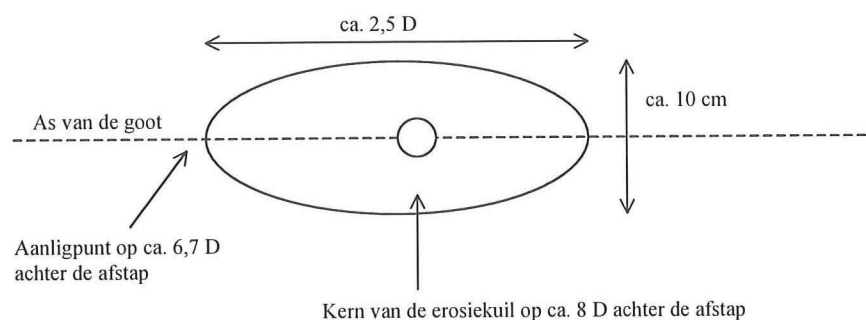
De snelheidsprofielen verschillen richting het wateroppervlak. Hier is een tweetal verklaringen voor te geven te weten de aanwezigheid van het rigid lid en het optreden van driedimensionale stroming in de goot. Nabij het rigid lid treden wandeffecten op waardoor de snelheid afneemt als gevolg van de wandwrijving. Zowel in het geval van Nakagawa & Nezu en dit experiment treedt er driedimensionale stroming op in de goot. Wat hierbij een rol speelt is de breedte/diepte verhouding (aspect ratio). In dit onderzoek is deze breedte/diepte verhouding (aspect ratio) kleiner dan in het onderzoek van Nakagawa & Nezu wat ervoor zorgt dat de wandinvloeden groter zijn en de de snelheid naar de wand toe sterker afneemt. Waarschijnlijk zorgt de combinatie van het rigid lid en het verschil van de breedte/diepte verhouding voor een afnemende snelheid in de verticaal naar het rigid lid. Aangezien er alleen in de as van de goot is gemeten, is de invloed van het effect van de driedimensionale stroming niet met zekerheid aan te tonen.

Nabij de bodem is het verloop van de snelheidsprofielen nagenoeg hetzelfde wat aangeeft dat de schuifspanningssnelheid, u_* , goed geschaald is en daardoor het ruwheidseffect zichtbaar wordt in de profielen van de turbulentie-intensiteiten en de Reynoldse spanningen.

Nabij de bodem neemt de intensiteit in dit experiment minder af dan bij Nakagawa & Nezu (1987) wat te verklaren is door het verschil in bodemruwheid. In het geval van een ruwe bodem ondervindt de stroming meer weerstand waardoor de stroming afgeremd wordt. Als gevolg hiervan groeit de turbulente grenslaag en is de intensiteit nabij de bodem daardoor groter dan in het geval van een gladde bodem. Het verloop van de Reynoldse spanningen is regelmatig dan het door Nakagawa & Nezu gevonden verloop. Bij beide is in de menglaag de grootste spanning zichtbaar, deze neemt af naar de bodem en het rigid lid cq. wateroppervlak. De spanning bij de bodem is in dit experiment groter dan bij Nakagawa & Nezu (1987), wat weer te verklaren is uit het verschil in bodemruwheid.

Plaats van grootste schade

Tevens is bepaald waar achter de afstap de grootste schade optreedt. Door het stortebed gedurende lange tijd te belasten met een debiet waarbij beweging van de stenen optreedt, wordt na verloop van tijd een schadebeeld zichtbaar. De grootste schade ontstaat in een gebied dat zich uitstrekt van het aanligpunt tot een afstand van ca. 2,5 maal de afstaphoogte benedenstrooms van dit punt. De ontwikkeling van de erosie begint op een afstand van ca. 8 maal de afstaphoogte achter de afstap. Daar ontstaat de kern van de erosiekuil, die zich uitbreidt in dwarsrichting en vervolgens in langsrichting. De erosiekuil heeft een ovale vorm (zie figuur 4.7); dit komt doordat de stroming niet volledig 2-dimensionaal is vanwege een te kleine aspect ratio d.w.z. dat de breedte/diepte-verhouding te klein is. Door deze kleine verhouding is de invloed van de wanden groot wat betekent dat de stroomsnelheid naar de wanden toe afneemt. De invloed van de wanden is merkbaar tot een afstand gelijk aan de waterdiepte vanuit de wanden, in dit geval is dat tot in de as van de goot. Door de afnemende snelheid naar de wanden toe is de stroomaanval langs de gootwanden kleiner waardoor het transport zich waarschijnlijk niet gelijkmatig over de breedte van de goot heeft verdeeld. Als de diepte van de erosiekuil zodanig groot is dat de snelheid in de buurt komt van de kritische waarde neemt de ontwikkeling van de erosie af. Wordt de snelheid kleiner dan de waarde van de kritieke snelheid dan stopt de erosie geheel. Verder benedenstrooms, op een afstand van ca. 11 à 12 maal de afstaphoogte achter de afstap, is een kleinere erosiekuil ontstaan. Of dit een oorzaak is van verhoogde aanval op het bed is de vraag. Op die plek in het bed bevond zich nl. een hobbel in het gaas onder de stenen. Dit zou wel eens de oorzaak van het verplaatsen van de stenen op die plek kunnen zijn, en niet een verhoogde aanval op het bed.



Figuur 4.7 Vorm van de erosiekuil in het grootste schadegebied

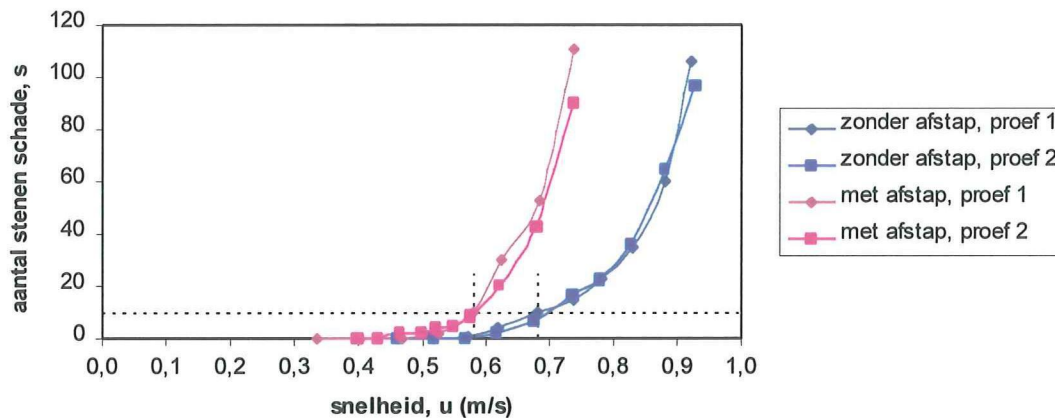


*Figuur 4.8 Foto van de video opname van het grootste schadepunt in het stortebed.
In de ovaal is het gaas zichtbaar dat oorspronkelijk bedekt was met twee
steenlagen. De afstap bevindt zich links van de figuur.*

In het gehele gebied vanaf het aanligpunt tot een afstand van ca. 18 maal de afstaphoogte achter de afstap is het steentransport groot. In dit gebied is de aanval op de bodem groter dan elders achter de afstap. Dit komt goed overeen met de bevindingen van Xingkui & Fontijn (1993). Zij vonden de grootste aanval op de bodem op 10 à 20 maal de afstaphoogte achter de afstap. In dit gebied blijven de fluctuaties van de liftkracht positief, dat wil zeggen in opwaartse richting. De fluctuaties van de lift- en sleepkracht hebben een orde van grootte gelijk aan de bijbehorende gemiddelde waarde van de kracht.

4.3 Begin van bewegen

In het geval van de toplaag van een bodembescherming kan het begin van bewegen aangeduid worden als het moment waarop de snelheid nog niet zo groot is dat de hoeveelheid verplaatste stenen schadelijk is voor het bed. De toegestane hoeveelheid schade aan het bed is afhankelijk van de soort bodembescherming en de lengte waarover deze bescherming aanwezig is. In veel gevallen is een bepaalde hoeveelheid transport van stenen zelfs wenselijk omdat dit de stabiliteit van het bed uiteindelijk ten goede komt. Als criterium wordt dan het eerste stadium van bewegen aangehouden (zie §2.3.2) waarbij de kritieke Shieldsparameter voor het begin van bewegen 0,03 bedraagt.



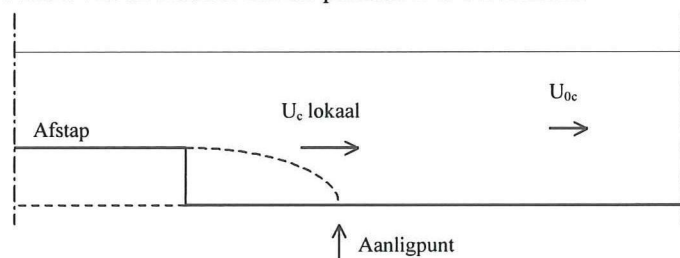
Figuur 4.9 Aantal stenen schade uit gezet als functie van de gemiddelde uniforme stroomsnelheid, u (ver benedenstrooms van het meetgebied).

Bij de proeven “Bepaling van U_c in een uniforme en verstoorde stroming met een losliggend strokenpatroon” is steeds het aantal stenen schade, s , na 20 minuten stromen bepaald door het tellen van de verplaatste stenen uit de gekleurde stroken in het meetgebied waarna de stroomsnelheid is opgevoerd. Dit is gedaan totdat het aantal stenen schade groter was dan 10 stenen. In de bovenstaande grafiek is per situatie (zonder en met afstap) voor twee uitgevoerde proeven het aantal stenen schade, s , uitgezet tegen de gemiddelde stroomsnelheid, u , ver benedenstrooms van het meetgebied. Om het begin van bewegen objectief te kunnen benaderen, is voor iedere situatie een eenduidige definitie aangehouden. De hoeveelheid transport die wordt aangehouden als schadelijk moet overeenkomen met de waarde van de kritieke Shieldsparameter. Het bleek dat in dit geval een transport van 10 stenen een goede benadering van deze waarde gaf. Het verloop van het aantal verplaatste aantal steentjes dat minimaal één strook is verplaatst, wordt in de grafiek gesneden met een horizontale lijn vanaf 10 stenen transport. De bijbehorende snelheid bepaalt de kritieke snelheid bij het begin van bewegen in een bepaalde situatie. De kritieke Shieldswaarde die bij dit transport van 10 stenen in het geval zonder afstap wordt gevonden ($\Psi_c = 0,032$), komt goed overeen met de kritieke Shieldswaarde van 0,03 die hoort bij het eerste stadium van bewegen. Daarom is de stroming bij een transport van 10 stenen in ca. 1½ uur als criterium voor het begin van bewegen gebruikt.

In tabel 4.2 staan de snelheden, gemeten bij een transport van 10 stenen. In het geval met afstap is de snelheid, U_{0c} , de over de verticaal gemiddelde snelheid benedenstrooms van het aanligpunt, zie figuur 4.10. Met vergelijking [2.15] kan de kritieke Shieldsparameter in het geval zonder afstap berekend worden. De Chézy-coëfficiënt is op basis van vergelijking [2.16] bepaald, waarbij voor de hydraulische ruwheid k een waarde is aangenomen van $6d_{n50}$. In het geval met afstap is er geen sprake meer van uniforme stroming en kan formule [2.15] niet zonder meer gebruikt worden om een waarde van de kritieke Shieldsparameter te berekenen..

Proef	U_{0c} (m/s)	C ($m^{1/2}/s$)	Ψ_c met [2.15]
Zonder afstap	0,68	28,2	0,032
Met afstap	0,58	28,2	-

Tabel 4.2 Kritieke snelheid bij een transport van 10 stenen.



Figuur 4.10 Definitie van de snelheid in het geval met afstap

Met vergelijking [2.17] is een waarde voor de belastingsfactor, K , te berekenen in het geval van een niet-uniforme stroming:

$$K = \frac{U_c \text{ uniforme stroming}}{U_c \text{ verstoorde stroming}} \quad [2.17]$$

met $U_{c, \text{verstoorde}}$ gelijk aan de verticaal gemiddelde snelheid benedenstrooms van de afstap (is de $U_{0,c}$ volgens figuur 4.10). Het betreft hier het losse bed dus kan de K aangeduid worden als K_{bed} , zoals in vergelijking [2.18] en [2.19]. Uit de snelheidsmetingen is een waarde voor de turbulentie-intensiteit, r_t , te berekenen. Door deze waarde in te vullen in de vergelijking [2.20] is eveneens een waarde voor de belastingsfactor, K_{bed} , te bepalen. Eveneens is een K -waarde te bepalen door in vergelijking [2.20], de turbulentie-intensiteit, r_t , uit vergelijking [2.21] in te vullen.

De reductiefactor $R_{0,03}$ die in de vergelijking [2.26] gebruikt is om de verstoring achter de afstap aan te geven, is afhankelijk van de verhouding van de afstaphoogte en de waterdiepte. Uit de genoemde grafiek uit het WL-rapport "Probabilistische analyse stabiliteitsvoorspellers" (Akkerman, Verheij, 1998) volgt voor de reductiefactor $R_{0,04}$ een waarde van 0,6. Met vergelijking [2.30] kan uit de waarde van $R_{0,04}$ een waarde voor de $R_{0,03}$ bepaald worden, maar ook direct de bijbehorende waarde voor de belastingsfactor, K :

$$\Rightarrow R_{0,04} = \frac{R_{0,03}}{1,15} \cdot 0,77 = \frac{0,77}{K \cdot 1,15} \quad [2.32]$$

Dit geeft een waarde voor de belastingsfactor, K_{bed} , gelijk aan 1,12.

In onderstaande tabel zijn de waarden voor de belastingsfactor K_{bed} weergegeven.

Proef	u_c (m/s)	K_{bed} met [2.17]	K_{bed} met [2.20] en r_t uit meting		K_{bed} met [2.20] en r_t uit [2.21]		K_{bed} met [2.30] met daarin reductiefactor R
			r_t	K	r_t	K	
Zonder afstap	0,68	1	0,1	1	0,1	1	1
Met afstap	0,58	1,17	0,18	1,18	0,23	1,30	1,12

Tabel 4.3 De verschillende waarden voor de belastingsfactor K_{bed}

Uit tabel 4.3 blijkt dat de waarden voor de belastingsfactor, K_{bed} , berekend met vergelijking [2.20] en [2.21] afwijkt van de overige waarden. Vergelijking [2.21] geeft een schatting van de grootte van de lokale turbulentie-intensiteit in een niet-uniforme stroming. Deze geschatte waarde ligt hoger dan de turbulentie-intensiteit die berekend is uit de gemeten snelheden. Beide intensiteiten zijn over de diepte gemiddelde waarden. Dit geeft een ca. 10 % hogere waarde voor de belastingsfactor. Ook de waarde van K_{bed} bepaald met behulp van vergelijking [2.30] waarin een reductiefactor R wordt gebruikt, wijkt enigszins af (ca. 5 % lagere waarde). De vergelijkingen [2.20] en [2.30] zijn afgeleid met de aanname dat de waarde van de hydraulische ruwheid gelijk is aan $2d_{n50}$. In dit onderzoek is er vanuit gegaan dat de werkelijk optredende hydraulische ruwheid groter is nl. $6d_{n50}$ zoals vermeld in §2.3.1. Dit kan de oorzaak zijn van de verschillen in de waarden voor de stabiliteitsfactor.

Belastingsfactor, K , voor stenen in de strook t.p.v. aanligpunt (proef met afstap)

In de strook ter plaatse van het aanligpunt (= aanlig-strook) wordt Ψ_c bepaald door het aantal stenen dat vanuit deze strook is verplaatst naar andere stroken. Uit de proef met afstap blijkt dat bij de kritieke snelheid voor het gehele meetgebied vanuit de aanlig-strook geen 10 stenen zijn verplaatst maar slechts 0 à 1 steen. Wordt voor de aanlig-strook hetzelfde schadekriterium aangehouden van 10 stenen, dan is er een grotere snelheid nodig om in deze strook een transport van 10 stenen te krijgen. Bij een (over de verticaal gemiddelde) snelheid van ca. 0,73 m/s werden vanuit de aanlig-strook ca. 10 stenen verplaatst. Met vergelijking [2.17] geeft dit een waarde voor de belastingsfactor, K , van 0,93.

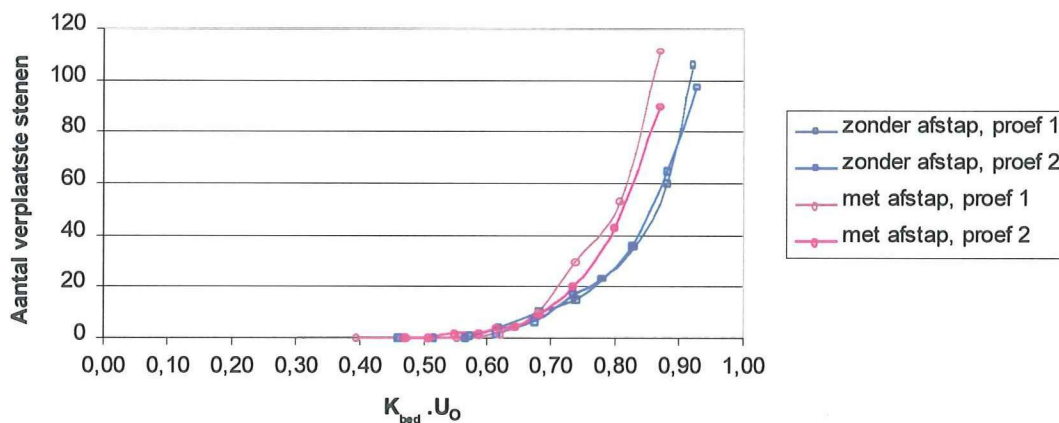
Steentransport als functie van de belastingsfaktor, K_{bed}

Na het berekenen van de belastingsfaktor, K_{bed} , voor het geval met afstap is het steentransport te vergelijken met de snelheid vergroot met de belastingsfaktor, K_{bed} . In figuur 4.11 is de grafiek gegeven van het steentransport tegen $(K_{bed} \cdot U_0)$. In principe zouden de lijnen in de grafiek voor de gevallen met en zonder afstap gelijk aan elkaar moeten zijn. In het kritieke geval, dus bij $(K_{bed} \cdot U_0) = 0,68$ m/s en een steentransport van 10 stenen geldt dat de lijnen voor het geval met en zonder afstap in de grafiek in één punt liggen. Bij een grotere waarde van $(K_{bed} \cdot U_0)$ is te zien dat bij dezelfde hoeveelheid steentransport in het geval met afstap de waarde van $(K_{bed} \cdot U_0)$ lager is dan in het geval met afstap. Dit betekent dat voor een grotere waarde dan de kritieke waarde een andere waarde voor de belastingsfaktor, K_{bed} , geldt.

Dit is ook te zien door bij b.v. een transport van 100 stenen de waarde van $(K_{bed} \cdot U_0)$ in het geval zonder afstap te bepalen. De $(K_{bed} \cdot U_0)$ heeft een waarde van ca. 0,92 m/s.

In het geval met afstap is bij het transport van 100 stenen een snelheid te bepalen. Met deze snelheid van 0,73 m/s en de waarde voor $(K_{bed} \cdot U_0)$ van 0,93 m/s is een waarde voor de belastingsfaktor, K_{bed} , te bepalen.

De waarde van de belastingsfaktor, K , is gelijk aan 1,26 wat groter is dan de waarde berekend voor het kritieke geval.



Figuur 4.11 Steentransport als functie van de belastingsfaktor K_{bed} maal de snelheid u

4.4 Analyse van het bewegen van de steen

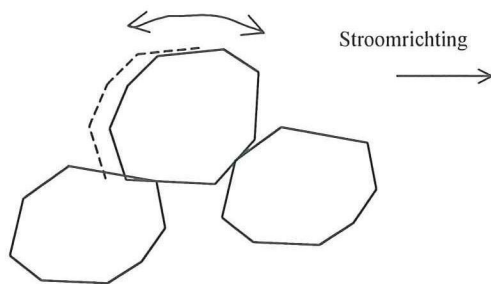
Bij het uitvoeren van proeven “Bepalen van U_c voor één enkele losse steen in een uniforme en verstoorde stroming” zijn gelijktijdig met de snelheids- en drukmetingen video-opnamen gemaakt van de stroming. Bij een bepaalde stroomsnelheid komt de steen in beweging. Uit een analyse van de gemaakte videobeelden blijkt dat bij een toename van de stroomsnelheid de bewegingen van de steen veranderen. Dat wil zeggen, de bewegingen wisselen elkaar sneller af en de uitwijkingen zijn groter. En uiteindelijk wordt de steen verplaatst.

4.4.1 De bewegingen van de steen

De volgende bewegingen zijn waarneembaar:

Het trillen van de steen op zijn plaats

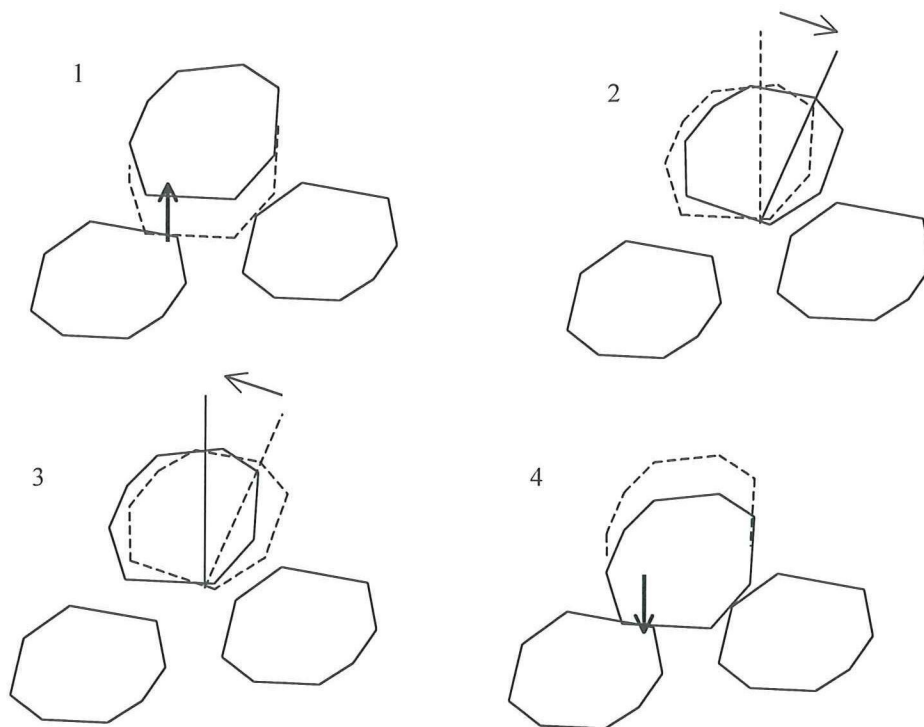
De steen trilt in langsrichting en blijft daarbij op zijn plaats, zie figuur 4.12. De trillingen zijn korte heen en weer gaande bewegingen (ca. 2 à 4 mm), die een aantal seconden aanhouden.



Figuur 4.12 Zij aanzicht van de steen, die trilt op zijn plaats

Het uitwijken van de steen om zijn as

Deze beweging is te vergelijken met het trillen van de steen. Alleen zijn de heen en weer gaande bewegingen groter. De steen wordt iets opgetild waardoor hij gemakkelijker te bewegen is. De steen wijkt vervolgens uit in langsrichting en valt weer op zijn plaats. Bij deze beweging blijft de onderkant van de steen nagenoeg op zijn plaats. Zie figuur 4.13 voor de opbouw van de beweging. De steen draait als het ware om zijn contactpunt met het bed. De uitwijking in de langsrichting is ca. 5 à 10 mm groot. Zo af en toe lijkt het erop dat de steen echt los komt van zijn steunpunt en wordt verplaatst. Dit gebeurt dan echter niet omdat de kracht nog niet groot of langdurig genoeg is. De uitwijkbeweging wordt bij lage stroomsnelheden afgewisseld met het trillen van de steen. Zodra de stroomsnelheid in de buurt komt van de snelheid waarbij uiteindelijk de steen wordt verplaatst, komt het trillen nagenoeg niet meer voor.

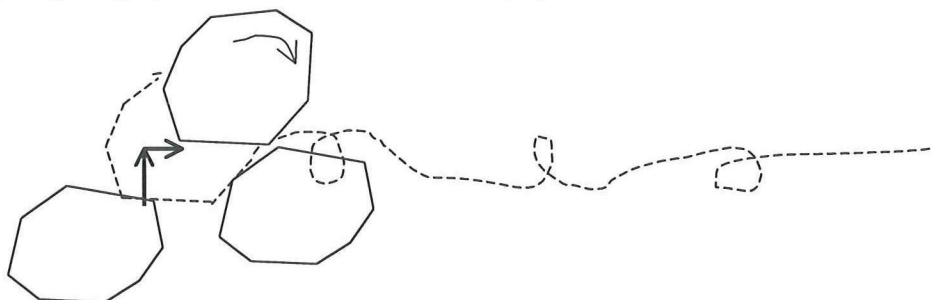


1. optillen van de steen (overdreven weergegeven)
2. zijwaartse beweging in de richting van de stroom
3. zijwaartse beweging terug naar oorspronkelijke plaats
4. neervallen van de steen

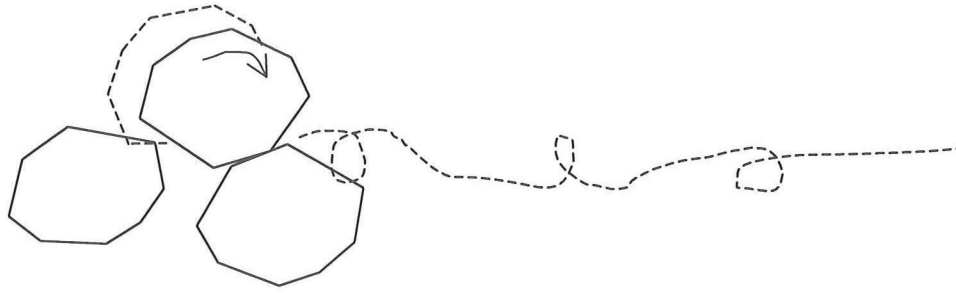
Figuur 4.13 Uitwijken van de steen om zijn as

Het verplaatsen van de steen

Bij een bepaalde waarde van de stroomsnelheid wordt de steen verplaatst. Dit gebeurt als de stroomsnelheid groot genoeg is waardoor de fluctuaties van de kracht op de steen groot genoeg zijn en tevens langdurig genoeg aanwezig zijn om de steen los te maken en te verplaatsen. In dit geval wordt de steen losgemaakt uit zijn positie (de steen komt los van zijn steunpunt op de bodem) en rolt snel weg. De manier waarop de steen wordt losgemaakt uit zijn positie hangt af van de ligging van de steen ten opzichte van de andere stenen in het bed. In het geval van een ongunstige ligging zal de steen eerst opgetild worden (zie figuur 4.14) en vervolgens weggrollen. In het geval van een gunstigere ligging is het mogelijk dat de steen in langsrichting opzij valt in plaats van dat hij opgetild wordt (zie figuur 4.15). De afstand waarover de steen weg rolt is ca. 15 a 20 cm; dit hangt mede af van de bodemopbouw. Het weggrollen van de steen gaat sneller dan het losmaken van de steen uit zijn positie; dit komt omdat het losmaken meer kracht kost. Als de steen eenmaal uit zijn positie is, kan hij gemakkelijk verplaatst worden. In de meeste gevallen is de steen al in beweging voordat hij uit zijn positie wordt losgemaakt. Dit lijkt een poging om de steen daadwerkelijk uit zijn positie los te maken, maar de kracht is nog niet groot genoeg. Het gebeurt ook dat de steen tot aan het moment waarop hij uit zijn positie wordt losgemaakt, stil ligt. Nadat de steen over een bepaalde afstand is weggerold, komt de steen op een nieuwe plek terecht. Zolang de steen op plekken komt die hoog liggen, zoals b.v. een hobbel of bult in het stortedbed, blijft de steen verder rollen. Zodra de steen in een kuil o.i.d. terecht komt, blijft hij stil liggen totdat de fluctuaties van de kracht weer groot genoeg zijn om de steen los te maken uit zijn positie.



Figuur 4.14 Het verplaatsen van de steen: de steen wordt op getild en rolt weg



Figuur 4.15 Het verplaatsen van de steen: de steen valt opzij en rolt weg

4.4.2 Verschil in bewegen in een uniforme en een verstoorde stroming

De bewegingen van de steen in een verstoorde stroming zijn anders dan in een uniforme stroming. Allereerst begint het bewegen bij een lagere dieptegemiddelde stroomsnelheid. In een verstoorde stroming maakt de steen veelal één uitwijkende beweging in de langsrichting. Dit kan in de richting van de stroom zijn of tegen de richting van de stroming in, afhankelijk van de ligging van de steen en de krachten rondom de steen. De uitgangspositie van de steen is bij elke proef dezelfde, maar de ontwikkeling van de turbulentie achter de afstap en daarmee de bewegingen van de steen zijn telkens anders. Dit zorgt ervoor dat de ligging van de steen tussen de bewegingen door verandert en zo dus invloed heeft op de richting van de beweging van de steen.

In een verstoorde stroming zijn de uitwijkingen van de steen groter en volgen elkaar sneller op. De steen wordt eerder verplaatst door de grotere aanval op de steen, die de oorzaak is van turbulentie-ontwikkeling achter de afstap. Doordat de stroomsnelheid achter de afstap niet uniform is maar lokaal momentaan hogere waarden kan hebben, is de eroderende kracht op de steen sneller groot genoeg om de steen uit zijn positie los te maken (de snelheid bij de bodem is lager, de turbulentie niet, maar dan gaat het om lokaal, momentaan hogere waarden). Het lijkt erop dat elke beweging de steen uit zijn positie probeert los te maken maar net niet genoeg kracht heeft. Dit gaat door totdat de kracht wel groot genoeg is en de steen wordt losgemaakt en vervolgens weggrolt.

4.4.3 Bepaling van de kritieke stroomsnelheid

Uniforme stroming

Uit de proef “Bepalen van U_c voor één losse steen in een uniforme stroming” is per keer dat de proef is uitgevoerd een gemiddelde snelheid, $U_{c, \text{uniform}}$ bepaald, waarbij de steen wordt verplaatst. Uit deze snelheden is vervolgens een gemiddelde bepaald dat aangehouden wordt als de kritieke snelheid waarbij de proef “Simultane snelheids- en drukmetingen in een uniforme stroming bij de snelheid waarbij de enkele losse steen wordt verplaatst” is uitgevoerd. In tabel 4.4 is per uitgevoerde proef de over de diepte gemiddelde snelheid waarbij verplaatsen van de steen optrad, gegeven.

Proefnr	$U_{c, \text{uniform}}$ (m/s)
1	0.93
2	0.87
3	0.92
4	0.88
5	0.86
6	0.91
7	0.92
8	0.86

Tabel 4.4 Gemiddelde snelheid waarbij verplaatsen optreedt op een vlakke bodem

Op grond van de verdeling van de snelheid (zie tabel 4.4) is gekozen om de proef “Simultane snelheids- en drukmetingen in een uniforme stroming bij de snelheid waarbij de enkele losse steen wordt verplaatst” (zie § 3.5) uit te voeren bij een stroomsnelheid van 0,89 m/s. Het blijkt dat de snelheid waarbij een enkele losse steen wordt verplaatst ca. 1,3 maal hoger ligt dan de snelheid waarbij schade aan het bed optreedt in het geval van een los strokenpatroon ($U_c = 0,68$ m/s). Dit komt doordat de kans dat juist de losse steen wordt verplaatst kleiner is dan de kans dat een willekeurige steen in het meetgebied wordt verplaatst bij dezelfde snelheid.

Hierbij moet opgemerkt worden dat de diameter van de losse steen ca. 1 mm groter is dan de d_{n50} van het stortebed wat invloed kan hebben op de grootte van de snelheid waarbij de losse steen wordt verplaatst. De snelheid wordt ook beïnvloed door de ligging van de steen ten opzichte van de stenen in het stortebed.

Verstoorde stroming

Uit de proef “Bepalen van U_c voor één losse steen in een verstoorde stroming” is per keer dat de proef is uitgevoerd een gemiddelde snelheid, $U_{c, \text{verstoord}} = U_{0c}$ bepaald waarbij de steen wordt verplaatst. Uit deze snelheden is vervolgens een gemiddelde snelheid bepaald die aangehouden wordt als de kritieke snelheid waarbij de volgende proef is uitgevoerd. In tabel 4.5 is per uitgevoerde proef de snelheid, $U_{c, \text{verstoord}}$, waarbij verplaatsen van de steen optrad, gegeven.

Proefnr	$U_{c, \text{verstoord}}$ (m/s)
1	0,72
2	0,73
3	0,73
4	0,73
5	0,74
6	0,73
7	0,70
8	0,75
9	0,64
10	0,66
11	0,75
12	0,75

Tabel 4.5 Gemiddelde snelheid ver benedenstrooms waarbij verplaatsen optreedt achter de afstap

Uit de tabel blijkt dat de gevonden snelheid bij proefnr 9 en 10 lager ligt dan bij de andere proeven. Dit kan het gevolg zijn van het te snel opvoeren van het debiet bij de uitvoering van de proef. Bij de proefnr's 1 en 2 lag de steen bij aanvang van de proef in een andere positie. Deze snelheden worden daarom niet meegenomen bij het bepalen van een gemiddelde snelheid voor de verplaatsing.

Er blijft dan over:

Proefnr	$U_{c, \text{verstoord}}$ (m/s)
3	0,73
4	0,73
5	0,74
6	0,73
7	0,70
8	0,75
11	0,75
12	0,75

Tabel 4.6 Gemiddelde snelheid ver benedenstrooms waarbij verplaatsen optreedt achter de afstap

Op grond van de verdeling van de snelheid (zie tabel 4.6) is gekozen om de proef “Simultane snelheids- en drukmetingen in een verstoorde stroming bij de snelheid waarbij de enkele losse steen wordt verplaatst” (zie § 3.5) uit te voeren bij twee stroomsnelheden, nl. 0,73 m/s en 0,75 m/s. Het blijkt dat in het geval met de afstap de snelheid waarbij een enkele losse steen wordt verplaatst ca. 1,3 maal hoger ligt dan de snelheid waarbij schade aan het bed optreedt in het geval van een los strokenpatroon ($U_c = 0,58$ m/s). Dit komt overeen met het geval zonder afstap. Dit komt weer doordat de kans dat juist de losse steen wordt verplaatst kleiner is dan de kans dat een willekeurige steen in het meetgebied wordt verplaatst bij dezelfde snelheid.

Eveneens moet hierbij opgemerkt worden dat de diameter van de losse steen ca. 1 mm groter is dan de d_{n50} van het stortebed wat invloed kan hebben op de grootte van de snelheid waarbij de losse steen wordt verplaatst. De snelheid wordt ook beïnvloed door de ligging van de steen ten opzichte van de stenen in het stortebed.

Verskil snelheid strokenpatroon/losse steen zowel met als zonder afstap

In de tabellen 4.7 en 4.8 staan de snelheden en waarden voor de belastingsfactor, K , per geval gegeven. De waarden voor de kritieke snelheden zijn terug te vinden in §4.3 en §4.4.3. De belastingsfactor, K , voor de losse steen bepaalt met vergelijking [2.17]. In onderstaande tabel is voor de situatie met afstap en de enkele losse steen het gemiddelde van de twee stroomsnelheden waarbij de proef “Simultane snelheids- en drukmetingen in een verstoorde stroming bij de snelheid waarbij de enkele losse steen wordt verplaatst” is uitgevoerd, genomen.

Proef met strokenpatroon	U_c (m/s)	K_{bed} met [2.17]
Zonder afstap	0,68	1
Met afstap	0,58	1,17

Tabel 4.7 Snelheden en belastingsfactor, K_{bed} , in het geval van een strokenpatroon

Proef met losse steen	U_c (m/s)	C ($m^{1/2}/s$)	K_{steen} met [2.17]
Zonder afstap	0,89	27,6	0,76
Met afstap	0,74	27,6	0,92

Tabel 4.8 Snelheden en belastingsfactor, K_{steen} , in het geval van een enkele losse steen

Met vergelijkingen [2.20] en [2.21] wordt dit:

Situatie zonder afstap:

$$\begin{aligned} \text{Los bed} & K_{bed} = 1 \\ \text{Enkele steen} & K_{steen} = K_{up} = 0,76 \end{aligned} \quad [2.20]$$

Situatie met afstap:

$$\begin{aligned} \text{Los bed} & K_{bed} = f(\text{turbulentie}) = 1,17 \\ \text{Enkele steen} & K_{steen} = K_{up} \cdot K_{bed} = K_{up} \cdot f(\text{turbulentie}) = 0,76 \cdot 1,17 = 0,90 \\ & K_{steen} = 0,92 \\ & K_{up} = 0,76 \end{aligned} \quad [2.21]$$

De waarde gevonden voor K_{steen} in het geval met de afstap (0,92) komt goed overeen met de uit vergelijking [2.21] berekende waarde van de K_{steen} gelijk aan 0,90. In § 4.3 is voor de strook ter plaatse van het aanligpunt van de stroming een waarde voor de belastingsfactor bepaald die gelijk is aan 0,93. Het blijkt dat deze waarde overeenkomt met de waarde van de belastingsfactor gevonden voor de enkele losse steen.

Bovenstaande volgt uit de vergelijking van de snelheden per situatie:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\text{snelheid, strokenpatroon, zonder afstap}}{\text{snelheid, strokenpatroon, met afstap}} &= \frac{0,68}{0,58} = 1,17 & = K_{bed} \text{ met } K_{up} = 1 \\ \frac{\text{snelheid, losse steen, zonder afstap}}{\text{snelheid, losse steen, met afstap}} &= \frac{0,89}{0,74} = 1,20 & = K_{bed} \text{ met } K_{up} \neq 1 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

Uit bovenstaande vergelijkingen blijkt dat de verhouding tussen de snelheden in het geval zonder afstap en het geval met afstap zowel voor het strokenpatroon als de enkele losse steen nagenoeg gelijk is. Dat wil zeggen dat de invloed van de verstoring constant aanwezig is en evenveel invloed heeft op het strokenpatroon als de enkele losse steen.

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\text{snellheid, zonder afstap, strokenpatroon}}{\text{snellheid, zonder afstap, losse steen}} &= \frac{0,68}{0,89} = 0,76 && = K_{\text{up}} \text{ met } K_{\text{bed}} = 1 \\
 \frac{\text{snellheid, met afstap, strokenpatroon}}{\text{snellheid, met afstap, losse steen}} &= \frac{0,58}{0,74} = 0,78 && = K_{\text{up}} \text{ met } K_{\text{bed}} \neq 1
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

Uit bovenstaande vergelijkingen blijkt dat de verhouding tussen de snelheden in het geval van een strokenpatroon en een enkele losse steen zowel voor het geval zonder afstap als het geval met afstap nagenoeg gelijk is. Wordt de enkele losse steen steeds op dezelfde plaats en in dezelfde positie in het bed geplaatst dan is de situatie met afstap goed vergelijkbaar met de situatie zonder afstap.

Uit bovenstaande vergelijking van de verschillende situaties blijkt dat de kritieke snelheid in het geval met een afstap ca. 15 à 17 % lager ligt dan in het geval zonder afstap. Dit geldt zowel voor het geval van een strokenpatroon als in het geval van een enkele losse steen. De kritieke snelheid waarbij verplaatsen optreedt in het geval van een enkele losse steen ligt ca. 30 % hoger dan in het geval van schade aan het strokenpatroon. Dit geldt zowel voor het geval met de afstap als in het geval van een vlakke bodem.

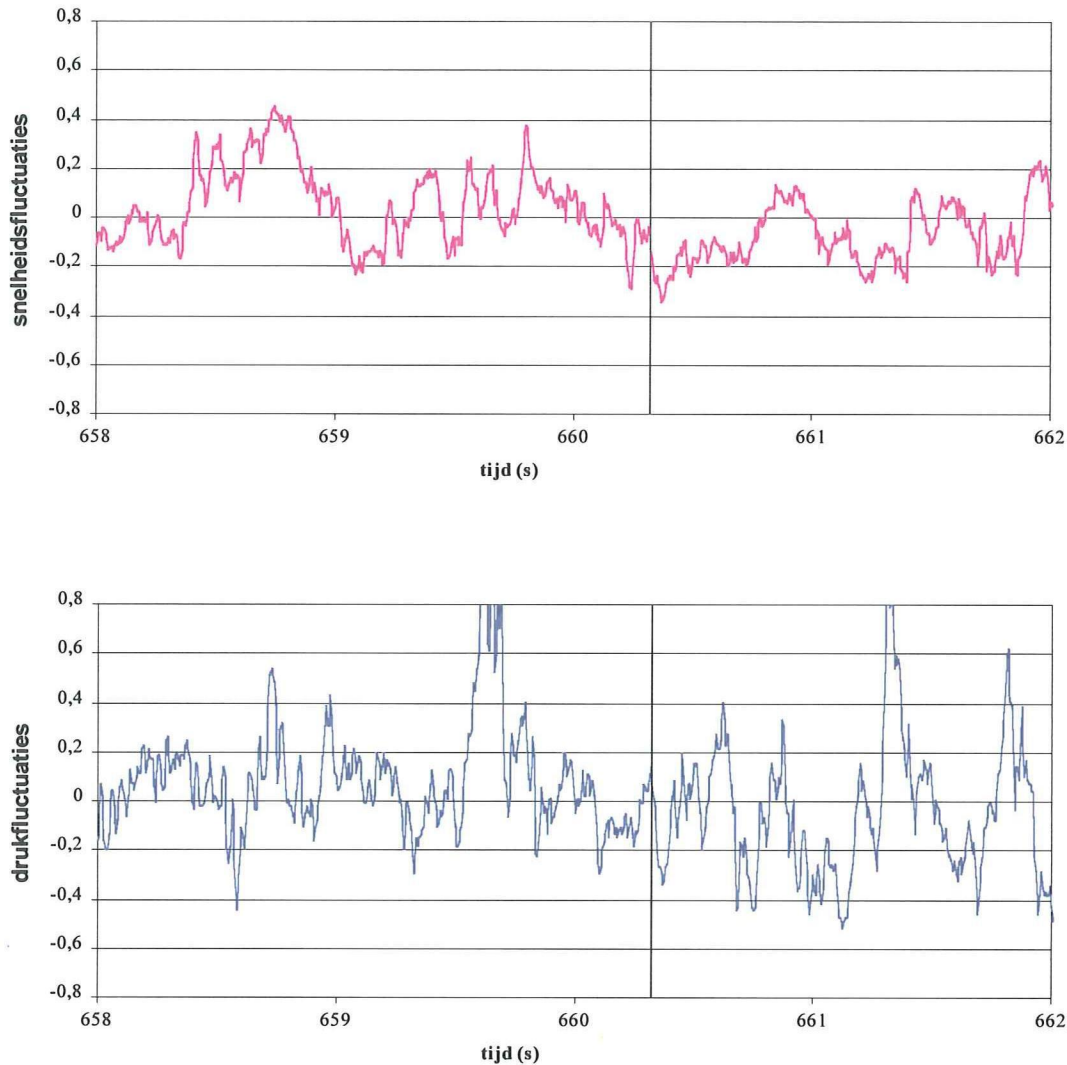
In het geval van een losliggend strokenpatroon is de kracht, die voor de verplaatsing van de stenen zorgt, over het gehele gebied aanwezig. De kans dat de kracht ergens in het gebied groot genoeg en langdurig genoeg aanwezig is en een willekeurige steen wordt verplaatst is hierdoor groter. Bij de enkele losse steen moet de kracht op een bepaalde plek, de ligplaats van de losse steen, groot genoeg en langdurig genoeg aanwezig zijn voordat de steen wordt verplaatst.

De diameter van de enkele losse steen is groter dan de nominale diameter van de steensortering, wat van invloed kan zijn op de waarde van de belastingsfactor, K . Alhoewel de steensortering natuurlijk uit grotere en kleinere stenen bestaat. Een steen met een grotere diameter wordt over het algemeen verplaatst bij een hogere snelheid. In vergelijking met de situatie van het strokenpatroon geeft dit dan een hogere waarde voor de belastingsfactor. Dat blijkt ook wel uit de waarde van de belastingsfactor (1,20 i.p.v. 1,18). Dit verschil ligt echter in de orde van 1 à 2 % wat niet echt de moeite waard is. Hierbij komt dat de positie en de ligging van de enkele steen achter de afstap ten opzichte van de stroming van belang zijn omdat dit invloed heeft op de kritieke snelheid. De steen ligt in het aanligpunt, waar de drukfluctuaties groot zijn maar de snelheid bij de bodem is nagenoeg nul. Er is een grotere en langdurigere kracht nodig om de steen te doen verplaatsen. Dit gaat gepaard met een hogere gemiddelde snelheid. Ligt de steen beschermd tussen de andere stenen in het bed dan zal het meer kracht kosten om de steen te verplaatsen. In een losliggend strokenpatroon liggen de stenen op verschillende manieren in het bed wat de kans dat ze worden verplaatst groter maakt.

4.4.4 Snelheids- en drukfluctuaties

Van de gedane proeven zijn grafieken van de snelheids- en drukfluctuaties gemaakt om uit het patroon van deze fluctuaties de bewegingen en het moment van verplaatsen van de losse steen te kunnen halen. Een piek of een bepaald patroon in de fluctuaties zou kunnen duiden op een bepaalde beweging en zou meer inzicht in het bewegingsgedrag kunnen verschaffen.

In figuur 4.16 zijn snelheids- en drukfluctuaties afgebeeld behorend bij het trillen van de enkele losse steen in geval van een vlakke bodem. Deze fluctuaties zijn bepaald uit de snelheids- en drukmetingen gedaan tijdens het trillen van de steen. De grafieken van de andere bewegingen van de steen zijn afgebeeld in de bijlagen VIII en IX. De fluctuaties zijn vergeleken met bewegingen op een aantal tijdstippen optredend. De verschillende bewegingen zijn niet duidelijk terug te vinden in het patroon van de snelheids- en drukfluctuaties. Er zijn geen duidelijke pieken in de grafieken aanwezig die zouden kunnen duiden op een beweging van de steen. Er zijn nl. zowel voor als na de beweging pieken in de fluctuaties te zien. Ook is er geen terugkerend patroon in de fluctuaties te ontdekken dat bij de bewegingen zou kunnen passen. Dit wil zeggen dat het verband tussen bewegen en de fluctuaties minder duidelijk is dan verwacht, en het bewegen in dit geval niet te voorspellen is door alleen naar het verloop van de fluctuaties te kijken. Dit kan echter het gevolg zijn van het “niet gevoelig” genoeg zijn van de druksensoren. Hiermee wordt bedoeld het niet gevoelig genoeg zijn om de gewenste drukfluctuaties, bv. als hoogfrequente drukfluctuaties belangrijk zijn, in de stroming te meten. De druksensoren bleken erg storingsgevoelig. Dit heeft invloed op de metingen van de drukfluctuaties. Natuurlijk kan het ook zo zijn dat het verband tussen het bewegen en de fluctuaties minder eenvoudig is dan aangenomen.



Figuur 4.16 Snelheids- en drukfluctuaties behorend bij het trillen van de steen

De steen begint te trillen op het tijdstip 660,320 seconden, de verticale lijn in de grafiek, en blijft trillen tot voorbij het tijdstip 662 seconden. Bij het begin van de beweging van de steen is zowel bij de snelheid als bij de druk een neergaande fluctuatie zichtbaar. Dit zou kunnen duiden op het begin van de beweging. Het verloop van de fluctuaties tijdens de beweging verschilt niet echt van het verloop van de fluctuaties voor de beweging (steen ligt dan stil).

4.4.5 Verplaatsingsafstand

Uit de analyse van de bewegingen van de losse steen blijkt dat de bewegingen klein zijn in tegenstelling van de afstand waarover de steen wordt verplaatst. Met het gegeven hoeveel stenen er verplaatst zijn en waar deze vandaan komen is de verplaatsingsafstand van de stenen afzonderlijk te bepalen tot op een strookbreedte nauwkeurig. Door het maken van een cumulatieve kansverdeling van de verplaatsingsafstand zijn de 50 % en 90 % overschrijdingsafstanden te vinden. Zie bijlage XI voor de uitwerking.

Dit is gedaan om een vergelijking te kunnen maken met de door de Boer (1998) opgestelde vergelijkingen voor deze overschrijdingsafstanden. Uit zijn waarnemingen blijkt dat de gemiddelde verplaatsingsafstand van een steen slechts een klein aantal maal zijn diameter bedraagt. Dit in tegenstelling tot de verplaatsingsafstand volgens de klassieke transportformules, die 1 à 100 maal de steendiameter bedraagt.

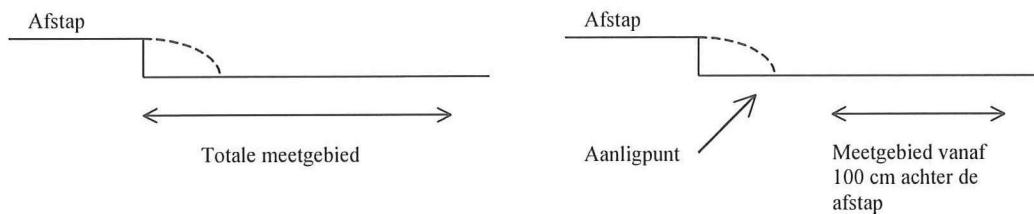
De 50% en 90% overschrijdingsafstanden zijn te berekenen met de vergelijkingen van de Boer:

$$X_{50\%} = 1 \cdot 10^8 \cdot \Psi^{5,90} \cdot D_{n50} \quad \text{voor } 0,04 < \Psi < 0,07 \quad [4.1]$$

$$X_{90\%} = 1 \cdot 10^6 \cdot \Psi^{3,55} \cdot D_{n50} \quad \text{voor } 0,04 < \Psi < 0,07 \quad [4.2]$$

Deze vergelijkingen zijn opgesteld uit metingen gedaan in een uniforme stroming.

Deze vergelijkingen zijn toegepast voor het geval met de afstap waarbij de steenverplaatsing in het gehele meetgebied is meegenomen. Tevens is een situatie genomen waarin de stenen die verplaatst zijn uit de eerste 100 cm van het meetgebied niet zijn meegeteld om een betere vergelijking met de situatie van uniforme stroming te kunnen maken (zie figuur 4.17). Vanaf 100 cm achter de afstap is de stroming nl. weer redelijk ongestoord.



Figuur 4.17 Aanduiding van het gebied waarin de verplaatste stenen geteld zijn.

De in dit onderzoek gevonden waarden zijn vergeleken met de waarden berekend met de vergelijkingen [4.1] en [4.2]. De vergelijkingen zijn, volgens de Boer formeel niet geldig voor waarden van $\Psi < 0,04$. Hier is toch een waarde van de $X_{50\%}$ en $X_{90\%}$ bepaald met vergelijking [4.1] en [4.2]. In onderstaande tabel staan de verschillende waarden per situatie gerangschikt:

Situatie	50 % overschrijdingsafstand (cm)		90 % overschrijdingsafstand (cm)	
	de Boer	Dit experiment	de Boer	Dit experiment
$\Psi = 0,043$ hele meetgebied	0,87	6 – 7	14	15 – 33
$\Psi = 0,043$ meetgebied vanaf 100 cm	0,87	5 – 6	14	12 – 21
$\Psi = 0,03$ hele meetgebied	0,10	5	4	9 – 11
$\Psi = 0,03$ meetgebied vanaf 100 cm	0,10	5	4	9

Tabel 4.9 De verschillende waarden van de overschrijdingsafstanden

Uit de tabel blijkt dat de waarden van de $X_{50\%}$ en $X_{90\%}$ berekend met de formule van de Boer voor het totale meetgebied en het meetgebied vanaf 100 cm dezelfde waarden geven. De uit de metingen bepaalde waarden van de $X_{50\%}$ en $X_{90\%}$ wijken af van de berekende waarden. Het verschil kan de oorzaak zijn van de aanwezigheid van de afstap. Maar ook het feit dat de verplaatsingsafstand die bepaald is door het tellen van verplaatste stenen slechts per 10 cm is bepaald.

De verplaatsingsafstand volgens de vergelijking (met $\Psi = 0,043$) ligt in de orde van één maal de steendiameter wat betekent dat de stenen “omvallen” of een klein sprongetje zullen maken i.p.v. ver weg rollen.

De verplaatsingsafstand volgens de vergelijking (met $\Psi = 0,03$) ligt in de orde van 1/10 maal de steendiameter wat betekent dat de bewegingen van de steen nauwelijks te zien zouden zijn. Deze uitkomsten komen welliswaar niet overeen met de uit de metingen bepaalde verplaatsingsafstanden maar zeggen wel iets over de bewegingen van de stenen. Terwijl de uit de metingen bepaalde waarden voor de verplaatsingsafstanden de orde van grootte waarover de steen wordt verplaatst, aangeven.

Uit § 4.4.1. blijkt dat de bewegingen van de enkele losse steen veelal bestaan uit kleine trillingen en uitwijkende bewegingen om de as van de steen. De uitwijkingen liggen in de orde van één steendiameter wat overeenkomt met de berekende verplaatsingsafstand bij $\Psi = 0,043$ met [4.1] en [4.2]. In § 4.4.4. zijn de snelheids- en drukfluctuaties in verband gebracht met de optredende bewegingen. Het bleek dat de bewegingen van de losse steen niet te zien zijn in het verloop van de fluctuaties. Uit de berekende verplaatsingsafstand bij $\Psi = 0,03$ met [4.1] en [4.2] volgt een waarde van 1/10 van de steendiameter wat betekent dat de bewegingen van de steen nauwelijks te zien zouden zijn. Dit komt overeen met de conclusie dat de bewegingen van de steen niet terug te vinden zijn in het verloop van de fluctuaties.

De door de Boer opgestelde vergelijkingen voor de verplaatsingsafstand geven een goede indicatie van de grootte van de optredende bewegingen van de losse steen. Dit ondanks dat de vergelijkingen formeel niet geldig zijn voor waarden van $\Psi < 0,04$.

4.5 Simultane druk- en snelheidsmetingen nabij de bodem

De simultane snelheids- en drukmetingen zijn uitgevoerd om de mate van samenhang tussen de snelheids- en drukfluctuaties nabij de bodem te kunnen bepalen. De samenhang tussen de twee signalen wordt bepaald met behulp van de kruiscorrelatie.

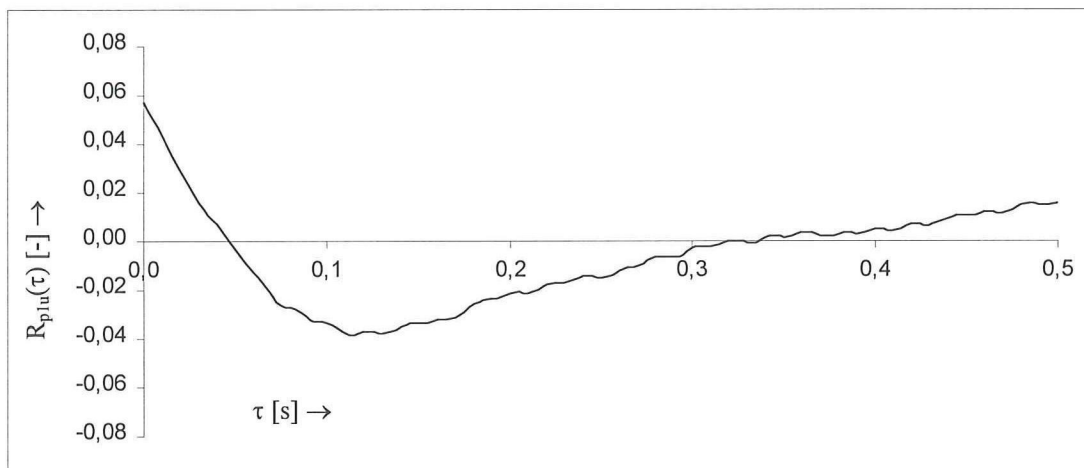
De kruiscorrelatie tussen de snelheidsfluctuatie u' en de drukfluctuatie p' wordt als volgt gedefinieerd:

$$R_{pu}(\tau) = \frac{\overline{p'(t, \vec{s}) u'(t + \tau, \vec{s} + \vec{\Delta s})}}{|p'| |u'|} \quad [4.3]$$

waarin $\vec{s}$ de positie op de bodem aangeeft en $\vec{s} + \vec{\Delta s}$ een zekere afstand $\vec{\Delta s}$ daar vandaan.

In dit onderzoek is uitgegaan van de verwachting dat de snelheids- en drukfluctuaties in de buurt van de steen iets zouden kunnen aangeven over de bewegingen van de steen. Daarbij is tevens de verwachting dat er een zekere correlatie tussen de twee signalen in de buurt van de steen bestaat. Deze verwachting komt voort uit het onderzoek van Xingkui & Fontijn (1993), waaruit blijkt dat de grootste correlatie tussen de snelheid en de lift- en sleepkracht gevonden wordt op een afstand van 0,15 maal de steendiameter boven het bed.

Allereerst is daarom gekeken naar de kruiscorrelatie van de snelheids- en drukfluctuaties in de buurt van de enkele losse steen. Het bleek van belang te zijn het drukfluctuatiesignaal te filteren omdat de correlatie wordt beïnvloed door aanwezige storingen in het niet gefilterde druksignaal. De netspanning (50 Hz) en een storing (waarschijnlijk veroorzaakt door trillingen van de pompinstallatie in het laboratorium) rond de 25 à 35 Hz zorgen voor een verlaging van de correlatie. Door het druksignaal af te kappen bij 20 Hz wordt de invloed van de netspanning en de storing weggefilterd en wordt een betrouwbaardere correlatie gevonden. In figuur 4.18 staat de kruiscorrelatie tussen $p(t, s)$ en $u(t + \tau, s + \Delta s)$ uitgezet tegen de tijdsverschuiving τ . De drukfluctuaties zijn gemeten ter plaatse van de 350 mB druksensor (sensor a) en de snelheid op 1,0 cm boven deze druksensor.



Figuur 4.18 Correlatie tussen $p'(t, s)$ en $u'(t + \tau, s + \Delta s)$

In de figuur is te zien dat de kruiscorrelatie tussen de snelheids- en drukfluctuaties het grootst is bij een tijdsverschuiving van $\tau = 0$ s. Het lokale maximum van de correlatie wordt gevonden bij een tijdsverschuiving $\tau = 0,135$ s. De waarden van de correlatie tussen de snelheids- en drukfluctuaties gemeten op korte afstand van elkaar zijn erg klein.

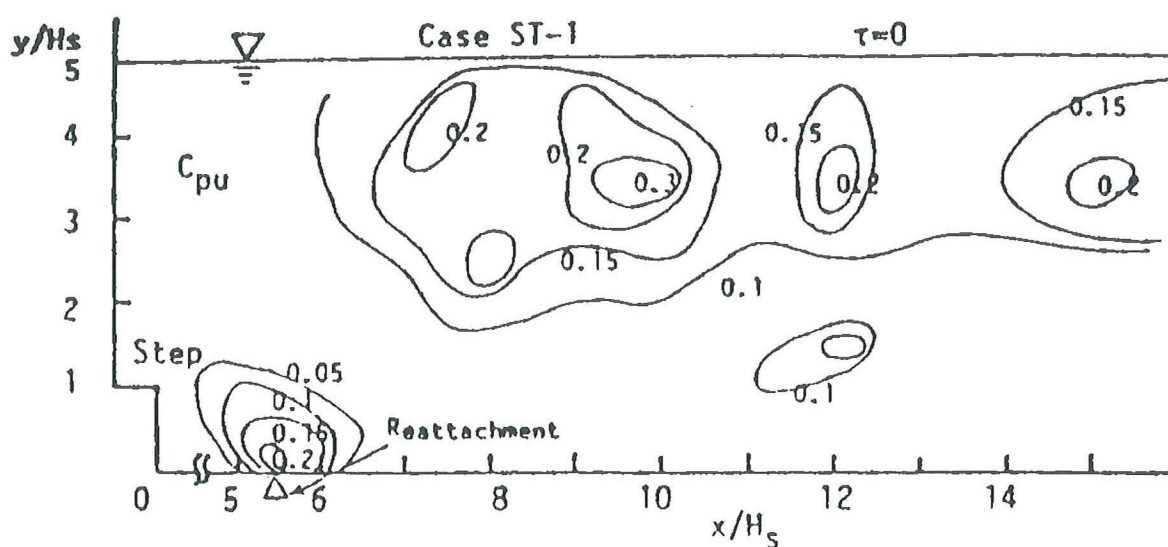
De verwachting is dan ook dat structuren op een zekere afstand van de steen drukfluctuaties ter plaatste van de steen kunnen opleveren, welke kunnen leiden tot het verplaatsen van de steen. De samenhang tussen deze structuren en de drukfluctuaties bij de bodem zal groter zijn dan de samenhang tussen de fluctuaties nabij de bodem. In dit onderzoek zijn daarom de snelheden zowel bij de bodem als elders in de stroming simultaan gemeten met de druk bij de bodem zodat de samenhang bepaald kan worden.

In Bijlage X komt de door Uittenbogaard e.a ontwikkelde theorie omtrent de samenhang van snelheidsfluctuaties elders in de stroming met de drukfluctuaties bij de bodem aan bod.

In het kort wordt uitgelegd waar deze theorie op gebaseerd is en worden enkele resultaten gegeven die verkregen zijn met de in dit onderzoek gedane metingen.

Conclusies

De gevonden correlatie tussen de snelheids- en drukfluctuaties nabij de bodem heeft een niet al te hoge waarde, dit in tegenstelling tot de door Nakagawa & Nezu (1987) gevonden waarden voor de correlatie rondom het aanligpunt van de stroming dichtbij de bodem, zie figuur 4.19. In deze figuur is eveneens te zien dat op grote afstanden van het aanligpunt op grote hoogte boven de bodem nog steeds correlatie aanwezig is tussen de snelheids- en drukfluctuaties. Xingkui & Fontijn (1993) concludeerden uit hun onderzoek dat de maximale correlatie tussen de lift- en sleepkrachten en de snelheid gevonden wordt op 0,15 maal de steendiameter boven de bodem.



Figuur 4.19 Contourlijnen van simultane correlatie tussen wanddruk en snelheids fluctuaties met een tijdsverschuiving $\tau = 0$. Volgens Nakagawa & Nezu (1987)

Het feit dat er in dit onderzoek nabij de bodem een lage waarde voor de correlatie wordt gevonden tussen de snelheids- en drukfluctuaties kan veroorzaakt zijn door de druksensoren zelf. De druksensoren bleken, zoals eerder vermeld, gevoelig voor storingen van buiten de opstelling. Daarbij komt dat de doorsnede van de sensor 6 mm bedraagt, wat van invloed is op de grootte van de te detecteren wervels. Wervels met een afmeting kleiner dan 12 mm kunnen niet door de druksensoren gedetecteerd worden, het signaal wordt uitgemiddeld.

Deze wervels worden niet meegenomen in de berekening van de correlatie terwijl ze er wel degelijk aan kunnen bijdragen in het geval ze wel gemeten kunnen worden. Dit zorgt voor lagere waarden van de correlatie tussen de druk- en snelheidsfluctuaties. Uit de resultaten verkregen met de theorie van Uittenbogaard e.a. blijkt inderdaad

dat de correlatie tussen de snelheidsfluctuaties elders in de stroming en de drukfluctuaties nabij de bodem hogere waarden geeft. De grootste correlatie wordt gevonden als de druk gemeten is t.p.v. druksensor a en de snelheid op 12 cm boven druksensor b (zie figuur 3.8).

5. Conclusies en aanbevelingen

In dit onderzoek is geprobeerd meer inzicht te verschaffen in de mechanismen die van invloed zijn op het begin van bewegen van bodemmateriaal. Het verband tussen de snelheids- en drukfluctuaties en het begin van bewegen is geanalyseerd aan de hand van experimenten met een enkele losse steen. Naar aanleiding van de uitgevoerde experimenten zijn er een aantal conclusies te trekken en daaruit aanbevelingen te doen voor verder onderzoek.

Conclusies:

- Betreffende het schadepatroon bij het begin van bewegen

Het aanligpunt ligt op een afstand van ca. 6 à 7 maal de afstaphoogte achter de afstap. Dit komt goed overeen met de door Nakagawa & Nezu (1987) gevonden afstand van het aanligpunt achter de afstap.

De grootste schade aan het bed wordt waargenomen op een afstand van ca. 8 maal de afstaphoogte achter de afstap. Rondom dit punt op een afstand van ca. 6 à 18 maal de afstaphoogte achter de afstap is het transport van stenen groter dan buiten dit gebied. Er kan gezegd worden dat in dit gebied de aanval op het stortebed het grootst is. Dit komt goed overeen met het door Xingkui/Fontijn gevonden gebied. Zij hebben in hun onderzoek de verschillende krachten op een steen onderzocht en concludeerden dat op een afstand van 10 à 20 maal de afstaphoogte achter de afstap de aanval op de bodem het grootst is.

- Betreffende de belastingsfaktor, K

De belastingsfaktor berekend met vergelijking [2.20] waarin de waarde voor de turbulentie-intensiteit is bepaald uit de snelheidsmetingen komt overeen met de waarde voor de belastingsfaktor bepaald uit de verhouding van de kritieke snelheid in een uniforme stroming en de kritieke snelheid in een verstoorde stroming, die beide bepaald zijn uit de gedane metingen. In geval van een verstoorde stroming is er bij een lage gemiddelde snelheid sprake van grotere fluctuaties dan in het geval van uniforme stroming. Deze grotere fluctuaties zorgen ervoor dat transport optreedt bij een lagere gemiddelde snelheid. Dit komt tot uiting in de belastingsfaktor. De belastingsfaktor berekend met vergelijking [2.20] waarin de waarde voor de turbulentie-intensiteit is berekend met vergelijking [2.21] geeft een enigszins hogere waarde. Dit komt doordat vergelijking [2.21] waarschijnlijk een bovengrens geeft voor de waarde van de turbulentie-intensiteit. Voor een eerste ontwerp van een bodembescherming is de nauwkeurigheid van de belastingsfaktor bepaald met vergelijking [2.20] en de turbulentie-intensiteit uit metingen voldoende. Zo zijn geen stabiliteitsmetingen nodig van een vergelijkbare situatie in een niet-uniforme stroming.

- Betreffende de stabiliteit van een enkele losse steen

Uit vergelijking van de verschillende snelheden in de verschillende situaties blijkt dat de kritieke snelheid in het geval met een afstap ca. 15 à 17 % lager ligt dan in het geval zonder afstap. Dit geldt zowel voor het geval van een strokenpatroon als in het geval van een enkele losse steen. De kritieke snelheid waarbij verplaatsen optreedt in het geval van een enkele losse steen ligt ca. 30 % hoger dan in het geval van schade aan het strokenpatroon. Dit geldt zowel voor het geval met de afstap als in het geval van een vlakke bodem.

Proeven met een enkele losse steen zijn erg afhankelijk van de ligging en de positie van de steen in de stroming, wat invloed heeft op het eerder of juist later verplaatsen van de steen. Er is een grotere en langdurigere kracht nodig om de steen te doen verplaatsen. Dit gaat gepaard met een hogere gemiddelde snelheid. Ligt de steen beschermd tussen de andere stenen in het bed dan zal het meer kracht kosten om de steen te verplaatsen.

In het geval van een losliggend strokenpatroon is de kracht, die voor de verplaatsing van de stenen zorgt, over het gehele gebied aanwezig. De kans dat de kracht ergens in het gebied groot genoeg en langdurig genoeg aanwezig is en een willekeurige steen wordt verplaatst is hierdoor groter. Bij de enkele losse steen moet de kracht op een bepaalde plek, de ligplaats van de losse steen, groot genoeg zijn en daarbij langdurig genoeg aanwezig zijn voordat de steen wordt verplaatst.

De enkele losse steen is bij het begin van de proeven steeds op dezelfde plaats en in dezelfde positie in het bed geplaatst zodat de invloed van de positie ten opzichte van de stroming op de snelheid waarbij de steen wordt verplaatst zoveel mogelijk vermeden is. De stroming in de buurt van de steen is echter van invloed op de positie van de steen waardoor het mogelijk is dat tegen de tijd dat de snelheid zo groot is dat deze in de buurt van de kritieke snelheid komt, de steen al iets gedraaid of verschoven is ten op zichte van de uitgangspositie. Dit heeft gevolgen voor de manier van bewegen van de losse steen. Daarbij komt dat het lastig blijkt te zijn om de steen steeds exact op dezelfde plaats en in dezelfde positie in het bed te plaatsen.

- Betreffende de snelheids- en drukfluctuaties

De verschillende bewegingen van de losse steen zijn niet terug te vinden in het verloop van het patroon van de snelheids- en drukfluctuaties in de buurt van de steen. Tevens komt het verloop van de drukfluctuaties niet goed overeen met het verloop van de snelheidsfluctuaties. Het bereik van de druksensoren is van de orde van grootte van de hoogfrequente drukfluctuaties en de sensoren zijn tevens zeer gevoelig voor storingen vanuit de omgeving, zoals bv. de netspanning. De doorsnede van de druksensoren bedraagt 6 mm wat betekent dat slechts wervels met een grootte minimaal in de orde van 12 mm gedetecteerd kunnen worden. Het signaal van wervels met een afmeting kleiner dan 12 mm wordt uitgemiddeld.

Dit kan betekenen dat het oplossend vermogen van de druksensoren niet voldoende is om de belangrijkste drukfluctuaties te meten, zeker als blijkt dat de hoogfrequente drukfluctuaties de belangrijkste fluctuaties zouden zijn voor het verplaatsen van een steen. Dit kan zeker ook van invloed zijn op de kruiscorrelatie van de snelheids- en drukfluctuaties nabij de bodem.

- Betreffende de correlatie tussen snelheid en druk

Uitgaande van de verwachting dat ook structuren op een zekere afstand van de steen drukfluctuaties ter plaatse van de steen kunnen opleveren, welke kunnen leiden tot het verplaatsen van de steen, zijn kruiscorrelaties van snelheids- en drukfluctuaties bepaald. De kruiscorrelatie van de snelheids- en drukfluctuaties bij de bodem blijkt een kleine waarde op te leveren. De grootste correlatie wordt gevonden tussen de drukfluctuaties bij de bodem en de snelheidsfluctuaties gemeten op 12 cm boven het bed op een horizontale afstand van 10 cm van de druksensor. Dit voldoet aan de verwachting dat ook structuren elders in de stroming invloed hebben op de drukfluctuaties bij de bodem en bevestigt de door Uittenbogaard e.a. ontwikkelde theorie omtrent deze verwachting.

Aanbevelingen voor verder onderzoek:

- Geavanceerdere druksensoren toepassen; mogelijkheid om kleinere wervels te detecteren, minder storingsgevoelig
- Op meer plaatsen in langs- en dwarsrichting (dan in dit onderzoek al gedaan is) gelijktijdig de snelheden meten, zodat er een uitgebreider snelheidsveld bepaald wordt.
Dit kan b.v. gedaan worden met PIV technieken
- Het uitvoeren van proeven met een enkele losse steen, waarbij de losse steen en de stenen in het bed uit een uniforme steensortering afkomstig zijn, bv. bolletjes of kubusjes zodat een eenduidiger bodemconfiguratie wordt verkregen. Het is zo gemakkelijker het geheel te modelleren en te berekenen.

Eventueel in een later stadium:

- Druk- en snelheidsmeetapparatuur in de losse steen aanbrengen.
- Uit de snelheidsmetingen de drukgradiënten bepalen en deze vergelijken met de drukmetingen.
Dit is alleen zinvol als de drukken gemeten kunnen worden met verbeterde meetapparatuur, die het mogelijk maakt de gewenste drukken te meten.
- De plaats van de losse steen achter de afstap variëren.
- Invloed van de waarde van de steendiameter van de losse steen t.o.v. de nominale steendiameter van de steensortering bepalen.

Literatuurlijst

- **Akkerman, G., Verheij, H.J., 1998**
Literatuurinventarisatie stabiliteitsvoorspellers en –gegevens
Bureaustudie Q2395.10, WL|Delft Hydraulics
- **Akkerman, G., Verheij, H.J., 1998**
Probabilistische analyse stabiliteitsvoorspellers
Bureaustudie Q2395.20, WL|Delft Hydraulics
- **Boer, G.M. de, 1998**
Transport van stenen van een granulaire bodemverdediging
Afstudeerverslag TU Delft
- **Booij, R., 1992**
Collegedictaat b82, Turbulentie in de waterloopkunde
Technische Universiteit Delft, Faculteit der Civiele Techniek
- **Booij, R., 1998**
Erosie onder een geometrisch open filter
Rapport 2-98, TU Delft
- **Breusers, H.N.C., Schukking, W.H.P., 1971**
Begin van bewegen van bodemmateriaal
Rapport Waterloopkundig Laboratorium, Delft
- **CUR/RWS, 1995**
Manual on the use of rock in hydraulic engineering
Report 169
- **Delft Hydraulics, 1972**
Systematic investigation of two and three-dimensional local scour
Rep.M648/M863/M847, Delft Hydraulics, Delft
- **Fontijn, H.L., Xingkui, W., 1993**
Experimental study of the hydrodynamic forces on a bed element in
an open channel with a backward facing step
Journal of Fluids and Structures (1993) 7, 299-318
- **Hoffmans, G., 1993**
A study concerning the influence of the relative turbulence intensity on local scour holes
Report W-DWW-93-251, RWS/DWW
- **Hoffmans, G., Akkerman, G., 1998**
Paper: Influence of turbulence on stone stability
DWW, WL|Delft Hydraulics
- **Lammers, J.C., 1997**
Shields in de praktijk
Afstudeerverslag TU Delft
- **Leeuwestein, W., 1996**
Ontwerp methodiek toplagen
W-DWW-96.040, RWS/DWW
- **Nakagawa, H., Nezu, I., 1987**
Experimental investigation on turbulent structure of backward-facing step flow in an open channel
Journal of Hydraulic Research, volume 25, 1987, no.1

- **Schiereck, G. J., 1998**
Collegedictaat CTwa4310, Introduction to bed, bank and shore protection
Delft University of Technology, Civil Engineering
- **Uittenbogaard, R., Hoffmans, G., Akkerman, G., 1998**
Turbulence schematisation for stone stability assessment
Bureaustudie Q2395.30, WL|Delft Hydraulics
- **Zuurveld, J., 1998**
Hoofdstroming contra menglaag
Afstudeerverslag TU Delft

Bijlagen

Bijlage I	Bepaling van het bodemniveau
Bijlage II	Berekening van benodigde debiet om steensverplaatsing te garanderen
Bijlage III	Keuze van de losse steen
Bijlage IV	Meetwaarden van de proef “Bepaling van U_c in een uniforme stroming”
Bijlage V	Meetwaarden van de proef “Bepaling van U_c in een verstoorde stroming”
Bijlage VI	Meetwaarden van de proeven met een enkele losse steen in uniforme en verstoorde stroming
Bijlage VII	Meetwaarden van de proeven waarbij simultane snelheids- en drukmetingen zijn uitgevoerd
Bijlage VIII	Grafieken van de snelheids- en drukfluctuaties in een uniforme stroming
Bijlage IX	Grafieken van de snelheids- en drukfluctuaties in een verstoorde stroming
Bijlage X	Simultane druk- en snelheidsmetingen elders in de stroming
Bijlage XI	Verplaatsingsafstand

Bijlage I: Bepaling van het bodemniveau

Met behulp van een peilnaald is op een 50-tal plaatsen in de as van de goot het niveau van het stortebed bepaald. Het verschil tussen het gemiddelde peilniveau en het niveau van de gootbodembodem is het bodemniveau.

Losse strokenpatroon:

meting	peilniveau (cm)	meting	peilniveau (cm)	meting	peilniveau (cm)	meting	peilniveau (cm)	meting	peilniveau (cm)
1	12.01	11	11.65	21	11.92	31	11.19	41	11.25
2	11.90	12	11.55	22	11.17	32	11.60	42	11.70
3	11.23	13	11.53	23	11.52	33	11.75	43	11.45
4	11.87	14	11.86	24	12.02	34	12.14	44	11.94
5	12.11	15	12.10	25	12.40	35	11.76	45	11.66
6	11.46	16	12.16	26	12.19	36	11.63	46	11.47
7	11.41	17	12.44	27	11.91	37	12.40	47	11.73
8	11.57	18	12.28	28	12.12	38	11.41	48	11.32
9	11.58	19	11.41	29	12.45	39	11.83	49	11.82
10	11.99	20	11.70	30	11.72	40	12.07	50	12.04

Gemiddeld: 11,79 cm
 Gootbodembodem: 3,45 cm –
 Bodemniveau: 8,34 cm

Vaste bodembodem:

meting	peilniveau (cm)	meting	peilniveau (cm)	meting	peilniveau (cm)	meting	peilniveau (cm)	meting	peilniveau (cm)
1	14.15	11	13.91	21	14.14	31	13.91	41	14.65
2	14.17	12	14.58	22	14.65	32	14.53	42	14.35
3	15.39	13	14.73	23	15.31	33	15.32	43	14.39
4	14.28	14	14.45	24	14.73	34	13.81	44	14.75
5	14.36	15	13.95	25	15.46	35	13.79	45	14.45
6	14.65	16	13.82	26	14.16	36	13.79	46	13.91
7	14.73	17	13.93	27	14.17	37	13.76	47	15.32
8	14.45	18	14.23	28	15.38	38	14.12	48	15.26
9	13.78	19	15.32	29	14.28	39	15.31	49	13.85
10	14.21	20	14.63	30	14.37	40	14.62	50	14.01

Gemiddeld: 14,45 cm
 Gootbodembodem: 6,44 cm –
 Bodemniveau: 8,01 cm

De gemiddelde afwijking van de stenen in het stortebed van het gemiddelde bodemniveau is $\frac{1}{2} d_{n50}$.

Bijlage II : Berekening van benodigd debiet om steenverplaatsing te garanderen.

De berekeningen zijn gebruikt om een idee te krijgen van het benodigde debiet in de goot om de stenen te laten verplaatsen. De hoogte van het rigid lid is zo gekozen dat het voor verplaatsing benodigde debiet haalbaar is.

Berekening:

De formules zijn afkomstig uit het rapport "Probabilistische analyse stabiliteitsvoorspellers" van WL|Delft Hydraulics

Aanname: $h = 0,25 \text{ m}$
 $d_{50} = 0,01 \text{ m}$
 $\Delta = 1,7$

- Zonder afstap

Voor de snelheid waarbij een steentje begint met bewegen geldt de formule:

$$u = C \cdot \sqrt{\Psi \cdot \Delta \cdot d} \quad (1)$$

met: $C = 18 \cdot \log\left(\frac{12 \cdot h}{k}\right) = 39,2 \text{ of } 36 \frac{\sqrt{\text{m}}}{\text{s}}$

$$k = 2 \text{ of } 3 \quad d_{50} = 0,02 \text{ of } 0,03 \text{ mm}$$

$$\Psi = 0,04$$

Invullen van de waarden in formule (1) geeft:

$$u = 39,2 \cdot \sqrt{0,04 \cdot 1,7 \cdot 0,01} = 1,02 \text{ m/s}$$

$$u = 36 \cdot \sqrt{0,04 \cdot 1,7 \cdot 0,01} = 0,94 \text{ m/s}$$

- Met afstap

Voor de snelheid waarbij een steentje begint met bewegen geldt de formule:

$$\frac{u}{\sqrt{\Delta \cdot g \cdot d_{50}}} = R \cdot 1,15 \cdot \log\left(\frac{6 \cdot h}{d_{50}}\right) \quad (2)$$

met: $\Psi = 0,04$

R = reductiefactor afhankelijk van de afstaphoogte,
 af te lezen uit de grafiek in het WL rapport Q2395.20 (Verheij/Akkerman)

Deze formule kan in dezelfde vorm als formule (1) geschreven worden (zie verderop).

Met $g \cdot \varphi = \Psi$ en $k = 2d_{50}$ wordt formule (2):

$$u = R \cdot C \cdot \sqrt{\Psi \cdot \Delta \cdot d} \quad (3)$$

Bij een afstap met $D = 0,345 h = 0,08625 \text{ m}$ hoort een R van 0,6.

Invullen in formule (3) geeft:

$$u = 0,60 \cdot 39,2 \cdot \sqrt{0,04 \cdot 1,7 \cdot 0,01} = 0,61 \text{ m/s}$$

De grootste snelheid bepaalt het debiet dat zeker nog in de goot haalbaar moet zijn.

In dit geval is dat de snelheid die gevonden wordt in het geval zonder de afstap nl. $u = 1,02 \text{ m/s}$.

Voor het debiet geldt:

$$Q = u \cdot A$$

Met:

$$A = 0,4 \times h = 0,10 \text{ m}^2$$

geeft dit een debiet van:

$$Q = 1,02 \times 0,10 = 0,102 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dat is gelijk aan 102,0 l/s.

Uit de proef blijkt dat dit niet haalbaar is met het rigid lid op 25 cm boven de bodem. Met het rigid lid op 20 cm boven de bodem is dit wel haalbaar. Natuurlijk worden de uitkomsten van de berekeningen anders door deze verlaging van het rigid lid en zal het benodigde debiet lager worden. Dat is verder niet van belang hier. Het benodigde debiet is nu in ieder geval haalbaar.

Bijlage III: Keuze van de losse steen

Om tot een goede keuze van het losse steentje te komen, moeten een aantal dingen beschouwd worden. Het is belangrijk dat het losse steentje een goede weergave is van de steensortering. De diameter moet ongeveer gelijk zijn aan de d_{n50} van de steensortering en de vorm mag niet te veel afwijken van die van de steensortering.

Met behulp van een vormparameter kan de vorm van een steen omschreven c.q. vastgelegd worden. Voor een gemiddelde vorm (rond) moet de parameter een bepaalde waarde hebben.

De vormfactor die hier gebruikt is:

$$S_f = \frac{c}{\sqrt{a \cdot b}}$$

met: a = maximale afmeting van de steen
b = middelste afmeting van de steen
c = minimale afmeting van de steen

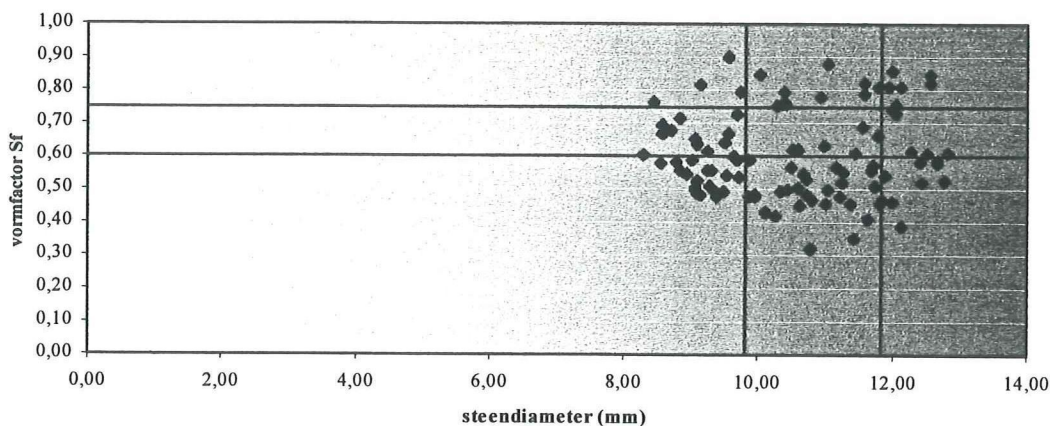
De waarde van deze vormfactor moet tussen de 0.60 en 0.75 liggen.

Van een honderdtal stenen uit de steensortering zijn de drie afmetingen a, b en c bepaald. In de onderstaande tabel is van de 100 stenen de vormfactor gegeven. Tevens is de diameter van de steen (in mm) gegeven. Hieruit kan de "ideale" steen gekozen worden. Dit is de steen met een vormfactor tussen de 0.60 en 0.75 en een diameter die ongeveer gelijk is aan d_{n50}

nr steen	Sf	dn50	nr steen	Sf	dn50	nr steen	Sf	dn50	nr steen	Sf	dn50
1	0,48	9,94	26	0,57	11,15	51	0,61	13,82	76	0,61	8,29
2	0,49	10,33	27	0,61	12,26	52	0,53	12,75	77	0,49	9,48
3	0,56	11,67	28	0,85	12,57	53	0,61	12,49	78	0,73	12,03
4	0,49	9,14	29	0,79	10,37	54	0,73	9,68	79	0,85	11,98
5	0,46	11,99	30	0,32	10,77	55	0,59	9,68	80	0,60	9,61
6	0,62	10,50	31	0,50	9,33	56	0,64	9,08	81	0,67	8,57
7	0,45	10,60	32	0,55	8,93	57	0,79	11,56	82	0,51	9,06
8	0,39	12,11	33	0,54	11,87	58	0,59	9,85	83	0,49	9,08
9	0,48	11,21	34	0,55	11,26	59	0,35	11,40	84	0,88	11,02
10	0,82	11,58	35	0,55	10,67	60	0,56	8,82	85	0,69	8,55
11	0,51	10,59	36	0,48	9,37	61	0,57	10,47	86	0,64	9,49
12	0,52	11,23	37	0,76	10,40	62	0,67	9,56	87	0,90	9,56
13	0,52	12,43	38	0,50	11,04	63	0,56	9,28	88	0,71	8,82
14	0,47	10,79	39	0,47	11,83	64	0,54	9,53	89	0,75	10,26
15	0,46	11,80	40	0,51	11,71	65	0,82	12,56	90	0,58	12,65
16	0,56	9,24	41	0,43	10,10	66	0,68	8,69	91	0,58	8,54
17	0,76	12,03	42	0,62	10,59	67	0,82	9,12	92	0,48	9,93
18	0,76	10,35	43	0,49	10,71	68	0,81	11,94	93	0,53	9,08
19	0,53	10,70	44	0,81	11,78	69	0,54	9,71	94	0,85	10,01
20	0,41	11,61	45	0,61	11,43	70	0,76	8,43	95	0,51	9,27
21	0,58	12,40	46	0,57	11,70	71	0,80	9,72	96	0,69	11,54
22	0,59	12,65	47	0,50	9,05	72	0,65	9,06	97	0,63	10,98
23	0,48	9,85	48	0,59	9,00	73	0,78	10,91	98	0,81	12,12
24	0,66	11,78	49	0,62	9,23	74	0,46	11,37	99	0,74	11,97
25	0,50	10,44	50	0,42	10,24	75	0,59	8,78	100	0,46	10,99

De stenen zijn getoetst aan de volgende voorwaarden:

- 1) De waarde van de vormfactor S_f moet tussen 0.60 en 0.75 liggen
- 2) De diameter van de steen moet tussen 9.82 en 11.82 mm liggen

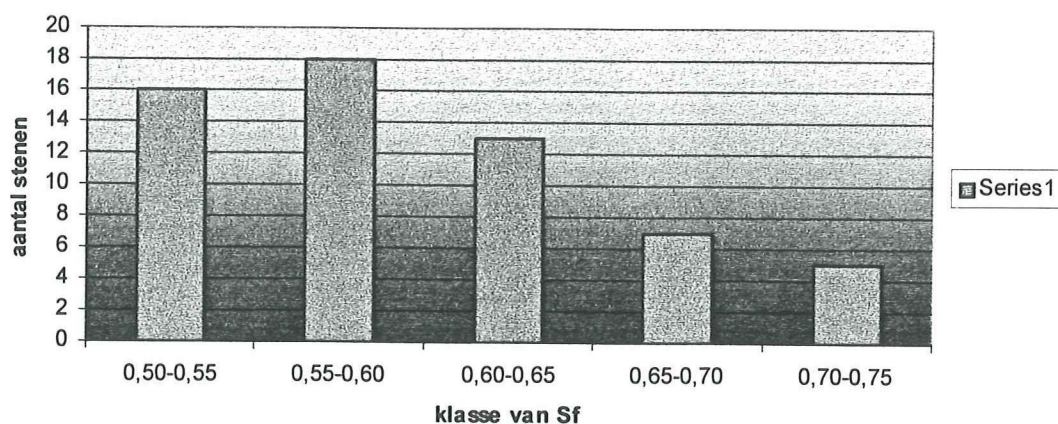


In bovenstaande grafiek zijn alle stenen aangegeven. De stenen die qua S_f -faktor en diameter aan de voorwaarden voldoen liggen in het vak tussen de vier lijnen in de grafiek.

De stenen die aan beide voorwaarden voldoen staan in onderstaande tabel:

Nr steen	S_f	d_{n50}
6	0.62	10.50
24	0.66	11.78
42	0.62	10.59
45	0.61	11.43
96	0.69	11.54
97	0.63	10.98

Gezien de verdeling in de grafiek voldoen maar weinig stenen aan de voorwaarden. In onderstaande grafiek staat de verdeling in klassen van de vormfactor. Er liggen 25 stenen in de klasse 0,60 tot 0,75.



Uit bovenstaande volgt dat er weinig stenen aan beide voorwaarden voldoen en er niet direct een representatieve steen te kiezen is. Daarom is op het oog uit de zes overgebleven stenen steen nr. 24 gekozen. Deze steen heeft een ronde vorm zonder uitstekende hoeken en is gemakkelijk in dezelfde positie in het bed te plaatsen.

Bijlage IV: Meetwaarden van de proef "Bepaling van U_c in een uniforme stroming"

In onderstaande tabellen staat per proefnummer de debietverhoging per meting vermeld. De daarbij behorende gemiddelde snelheid (u_{reh}) uit de Rehbockstuw, de Shieldswaarde en het aantal verplaatste stenen is eveneens gegeven.

Proef 0;nummer 1.

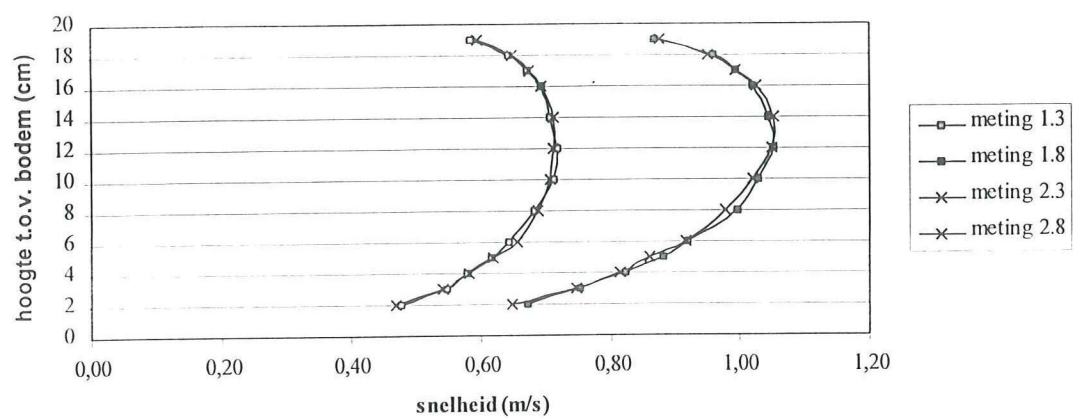
meting	Q (m ³ /s)	u_{reh} (m/s)	Ψ	s
1	0,037	0,46	0,0146	0
2	0,041	0,52	0,0182	0
3	0,046	0,57	0,0222	1
4	0,049	0,62	0,0260	4
5	0,054	0,68	0,0317	10
6	0,059	0,74	0,0370	15
7	0,062	0,78	0,0415	23
8	0,066	0,83	0,0470	35
9	0,071	0,88	0,0531	60
10	0,074	0,92	0,0581	106

Proef 0;nummer 2.

meting	Q (m ³ /s)	u_{reh} (m/s)	Ψ	s
1	0,037	0,46	0,0144	0
2	0,042	0,52	0,0184	0
3	0,045	0,57	0,0220	0
4	0,049	0,61	0,0258	2
5	0,054	0,68	0,0311	7
6	0,059	0,73	0,0367	17
7	0,062	0,78	0,0412	23
8	0,066	0,83	0,0465	36
9	0,070	0,88	0,0530	65
10	0,074	0,93	0,0586	97

Bij bovenstaande proef 0;nummer 1 en 2 is bij de metingen 3 en 8 een snelheidsprofiel gemeten. In onderstaande tabel staan de gemeten snelheden vermeld. Op de volgende pagina zijn de profielen weergegeven in een grafiek.

hoogte tov bodem (cm)	snelheid (m/s)			
	meting 1.3	meting 1.8	meting 2.3	meting 2.8
2	0,4775	0,6713	0,4694	0,6469
3	0,5466	0,7527	0,5424	0,7463
4	0,5785	0,8222	0,5819	0,8134
5	0,6171	0,8820	0,6176	0,8607
6	0,6442	0,9175	0,6576	0,9153
8	0,6820	0,9972	0,6887	0,9787
10	0,7120	1,0296	0,7081	1,0215
12	0,7185	1,0514	0,7130	1,0508
14	0,7072	1,0449	0,7114	1,0526
16	0,6933	1,0195	0,6925	1,0248
17	0,6721	0,9930	0,6762	0,9939
18	0,6428	0,9599	0,6491	0,9514
19	0,5829	0,8668	0,5944	0,8752



Bijlage V: Meetwaarden van de proef “Bepaling van U_c in een verstoorde stroming”

In onderstaande tabellen staat per proefnummer de debietverhoging per meting vermeld. De daarbij behorende gemiddelde snelheid (u_{reh}) uit de Rehbockstuw, de Shieldswaarde en het aantal verplaatste stenen is eveneens gegeven. De hier vermelde Shieldswaarde is berekend met de u_{reh} en zonder stabiliteitsfaktor. De waarden zijn daarom aan de lage kant.

Proef 1;nummer 1.

meting	Q (m ³ /s)	u_{reh} (m/s)	Ψ	s
1.1	0,027	0,34	0,0077	0
1.2	0,032	0,40	0,0111	0
1.3	0,037	0,47	0,0150	0
1.4	0,042	0,53	0,0188	2
1.5	0,046	0,58	0,0230	10
1.6	0,050	0,62	0,0266	30
1.7	0,055	0,68	0,0320	53
1.8	0,059	0,74	0,0372	111

Proef 1;nummer 2.

meting	Q (m ³ /s)	u_{reh} (m/s)	Ψ	s
2.1	0,032	0,40	0,0109	0
2.2	0,034	0,43	0,0126	0
2.3	0,037	0,47	0,0149	2
2.4	0,040	0,50	0,0169	2
2.5	0,042	0,52	0,0185	4
2.6	0,044	0,55	0,0204	5
2.7	0,046	0,58	0,0226	9
2.8	0,050	0,62	0,0264	20
2.9	0,054	0,68	0,0315	43
2.10	0,059	0,74	0,0371	90

Proef 1;nummer 3.

meting	Q (m ³ /s)	u_{reh} (m/s)	Ψ	s
3.1	0,037	0,47	0,0148	1
3.2	0,040	0,49	0,0167	1
3.3	0,042	0,52	0,0187	1
3.4	0,043	0,54	0,0202	4
3.5	0,046	0,57	0,0225	8
3.6	0,049	0,61	0,0258	25
3.7	0,054	0,68	0,0313	62
3.8	0,059	0,73	0,0368	122

Proef 1;nummer 4.

meting	Q (m ³ /s)	u _{reh} (m/s)	Ψ	s
4.1	0,037	0,47	0,0148	1
4.2	0,040	0,50	0,0168	2
4.3	0,042	0,52	0,0185	4
4.4	0,044	0,55	0,0205	8
4.5	0,046	0,58	0,0226	11
4.6	0,049	0,62	0,0260	25
4.7	0,054	0,68	0,0315	50
4.8	0,059	0,74	0,0371	120

Proef 1;nummer 5.

meting	Q (m ³ /s)	u _{reh} (m/s)	Ψ	s
5.1	0,035	0,43	0,0128	0
5.2	0,037	0,47	0,0150	1
5.3	0,040	0,50	0,0169	6
5.4	0,042	0,52	0,0184	10
5.5	0,044	0,55	0,0205	13
5.6	0,046	0,57	0,0225	21
5.7	0,049	0,62	0,0260	33
5.8	0,054	0,68	0,0316	57
5.9	0,058	0,73	0,0364	111

Ook bij deze proefnummers zijn snelheidsprofielen gemeten.
In dit geval op een aantal afstanden achter de afstap

snelheidsprofiel bij proef 1;nummer 1 t/m 4

Snelheid op afstand achter de afstap (m/s)

hoogte tov bodem (cm)	56 cm eting 1.3	56 cm eting 2.3	48,3 cm eting 3.1	35 cm meting 4.1
1	0,09	0,11	0,02	-0,07
2	0,14	0,15	0,08	-0,04
3	0,22	0,21	0,15	0,05
4	0,28	0,29	0,24	0,15
5	0,36	0,36	0,33	0,27
6	0,45	0,45	0,44	0,41
8	0,62	0,60	0,63	0,68
10	0,70	0,69	0,72	0,78
12	0,72	0,70	0,73	0,79
14	0,72	0,70	0,72	0,78
16	0,70	0,67	0,72	0,77
17	0,67	0,67	0,69	0,74
18	0,62	0,63	0,66	0,72
19	0,56	0,52	0,56	0,65

In de figuur 4.3 is het verloop van de snelheidsprofielen achter de afstap te zien.

Bijlage VI: Meetwaarden van de proeven met een enkele losse steen in uniforme en verstoorde stroming

In onderstaande tabellen staan de meetwaarden gegeven van de proeven “Bepaling van Ψ_c voor één enkele losse steen in een uniforme/verstoorde stroming”. Per meting is het debiet en de snelheid vermeld waarbij de enkele losse steen is verplaatst. Eveneens is de Shields waarde gegeven, die berekend is met de snelheid waarbij de steen wordt verplaatst.

Uniforme stroming

meting	Q (m ³ /s)	u _{reh} (m/s)	Ψ
1	0,074	0,93	0,0343
2	0,070	0,87	0,0303
3	0,074	0,92	0,0339
4	0,071	0,88	0,0309
5	0,069	0,86	0,0293
6	0,073	0,91	0,0328
7	0,074	0,92	0,0335
8	0,069	0,86	0,0297

Verstoorde stroming

meting	Q (m ³ /s)	u _{reh} (m/s)	Ψ
1	0,058	0,72	0,0205
2	0,059	0,73	0,0213
3	0,058	0,73	0,0209
4	0,058	0,73	0,0209
5	0,059	0,74	0,0217
6	0,058	0,73	0,0210
7	0,056	0,70	0,0192
8	0,060	0,75	0,0221
9	0,051	0,64	0,0164
10	0,053	0,66	0,0174
11	0,060	0,75	0,0222
12	0,060	0,75	0,0224

Bijlage VII: Meetwaarden van de proeven waarbij simultane snelheids- en drukmetingen zijn uitgevoerd

Uniforme stroming

Deze proef is uitgevoerd bij één snelheid van 0,89 m/s.
Het debiet was 0,071 m³/s

Verstoorde stroming

Deze proef is uitgevoerd bij twee snelheden:
0,73 m/s met een debiet van 0,058 m³/s
0,75 m/s met een debiet van 0,060 m³/s

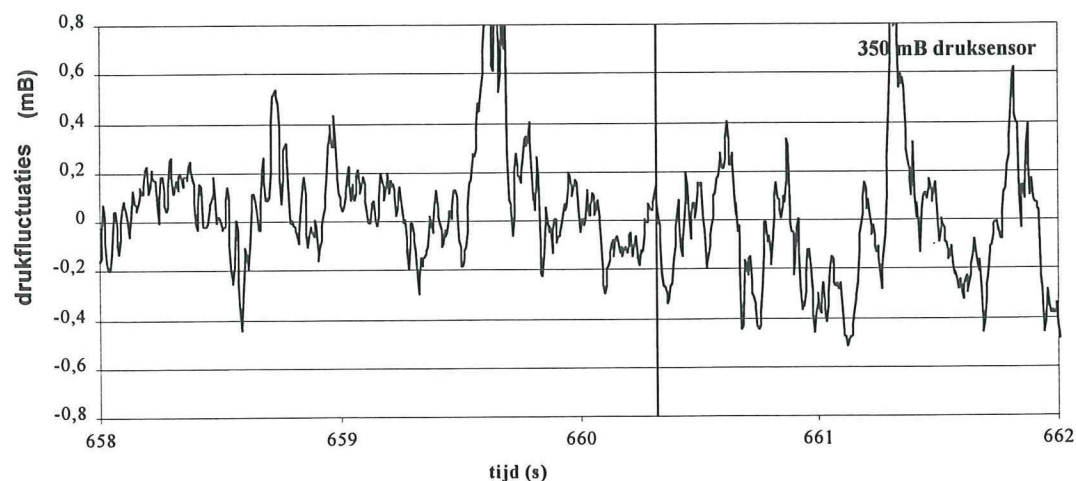
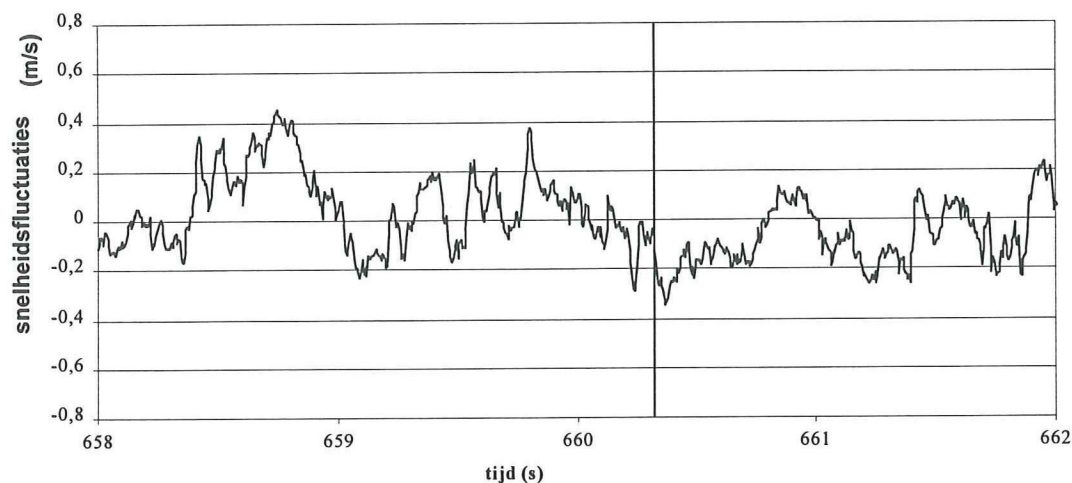
Bijlage VIII: Grafieken van de snelheids- en drukfluctuaties in een uniforme stroming

In de volgende grafieken zijn de snelheids- en drukfluctuaties afgebeeld die bij de bewegingen van de enkele losse steen horen. Deze fluctuaties zijn gemeten bij de proef “Bepalen van Ψ_c voor één enkele losse steen in een uniforme stroming” gedurende één meetcyclus. De stroomsnelheid is bij elke volgende beweging groter.

Trillen van de steen

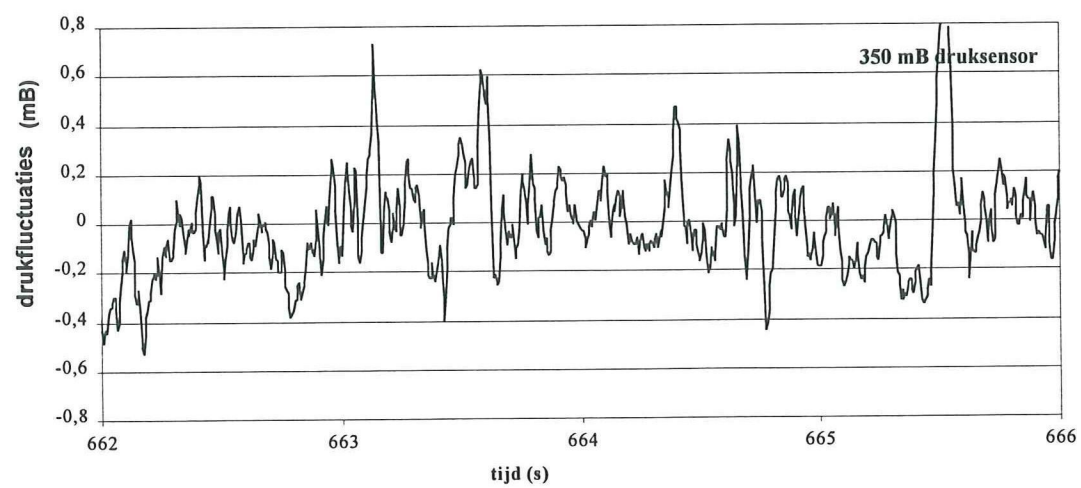
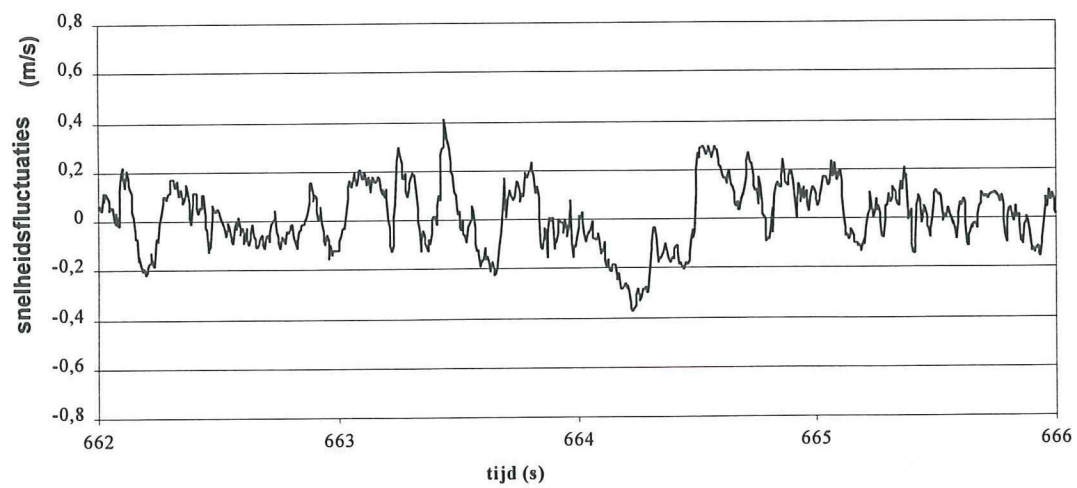
In onderstaande grafieken staan de snelheids – en drukfluctuaties afgebeeld behorend bij het trillen van de steen. De verticale lijn in de grafiek geeft het begin van de beweging aan. Op het tijdstip 660,320 seconden begint de steen te trillen. De triluitwijking is ca. 3 mm en de steen trilt in langsrichting. Het trillen houdt aan tot het tijdstip 666 seconden. Op deze pagina zijn de grafieken afgebeeld voor het tijdsbestek 658 tot 662 seconden. Op de volgende pagina zijn de grafieken afgebeeld voor het tijdsbestek 662 tot 666 seconden.

Bij het begin van de beweging van de steen is zowel bij de snelheid als bij de druk een neergaande fluctuatie zichtbaar. Dit zou kunnen duiden op het begin van de beweging. Het verloop van de fluctuaties tijdens de beweging verschilt niet echt van het verloop van de fluctuaties voor de beweging (steen ligt dan stil).



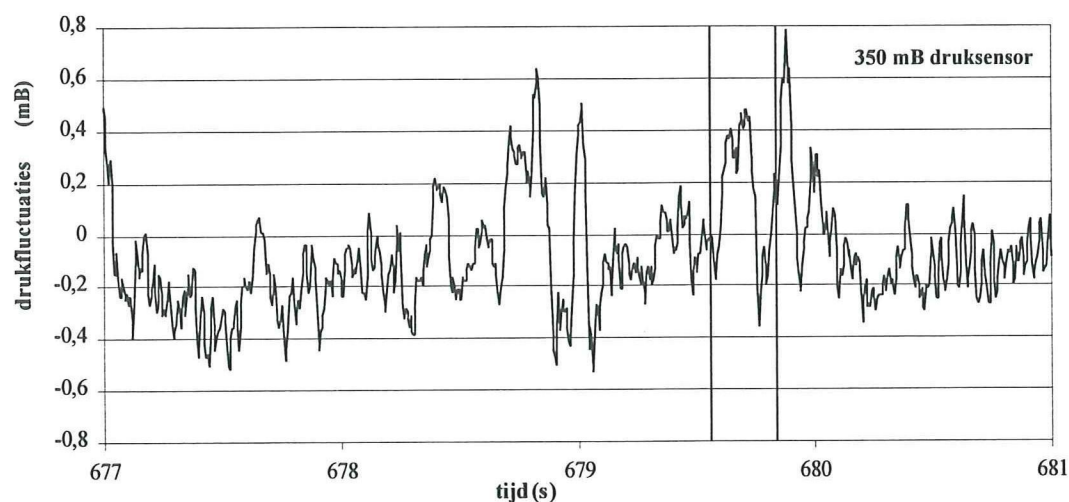
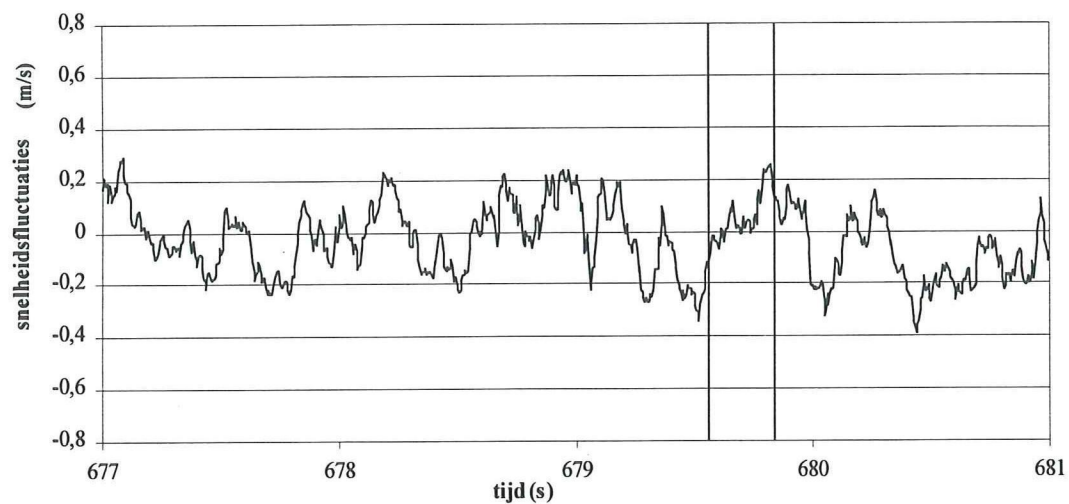
Trillen van de steen (vervolg)

De steen trilt gedurende het tijdsbestek 662 tot 666 seconden.



Uitwijken van de steen

In onderstaande grafieken staan de snelheids – en drukfluctuaties afgebeeld behorend bij het uitwijken van de steen. De verticale lijnen in de grafiek geven het begin en eind van de beweging aan. Op het tijdstip 679,560 seconden maakt de steen een uitwijkbeweging in de richting van de stroming. Deze uitwijking is ca. 5 mm groot. Op het tijdstip 679,760 seconden wijkt de steen weer terug en op het tijdstip 679,840 ligt de steen weer nagenoeg op zijn “oude” plek. Zijn positie is echter wel iets veranderd ten opzichte van de uitgangssituatie. De piek in de snelheidsfluctuaties nabij de rechter verticale lijn in de grafiek zou kunnen duiden op de terug gaande beweging van de steen. In de grafiek van de drukfluctuaties is een duidelijke terugval van de druk te zien. Maar voor en na de beweging vertoont de grafiek meer van dergelijke pieken. Dit is ook het geval bij de snelheidsfluctuaties.



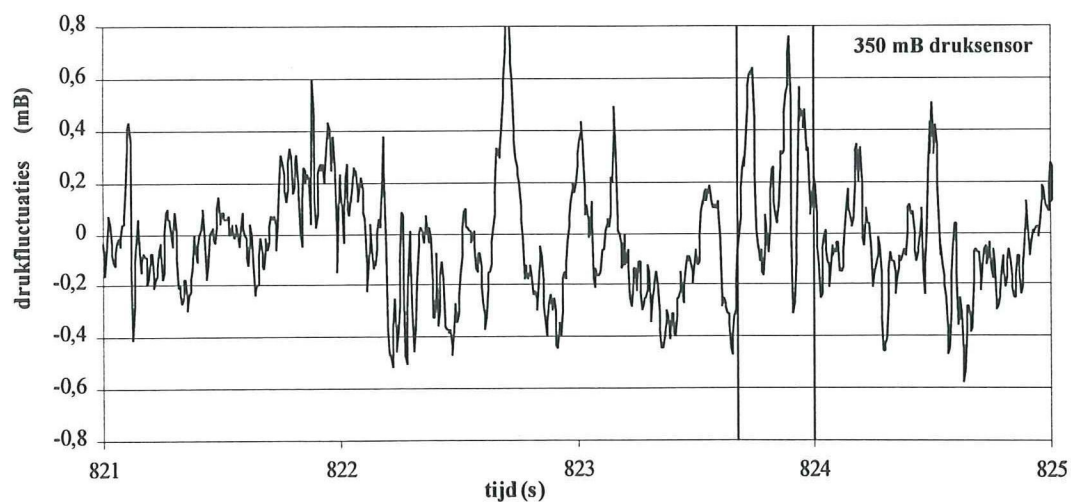
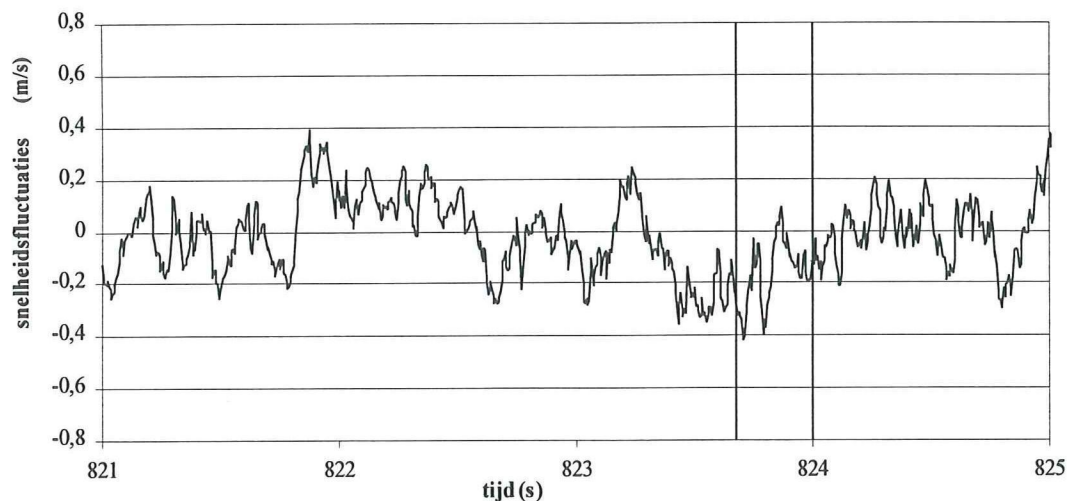
Uitwijken van de steen

In onderstaande grafieken staan de snelheids – en drukfluctuaties afgebeeld behorend bij het uitwijken van de steen.

De verticale lijnen in de grafiek geven het begin en eind van de beweging aan. Op het tijdstip 823,680 seconden maakt de steen een uitwijkbeweging in de richting van de stroming. Deze uitwijking is ca. 5 mm groot. Op het tijdstip 823,880 seconden wijkt de steen weer terug en op het tijdstip 824,000 ligt de steen weer nagenoeg op zijn “oude” plek. Zijn positie is echter wel iets veranderd ten opzichte van de uitgangssituatie.

De uitwijkbeweging wordt gevolgd door het trillen van de steen. De fluctuatie grafieken daarvan zijn afgebeeld op de volgende pagina.

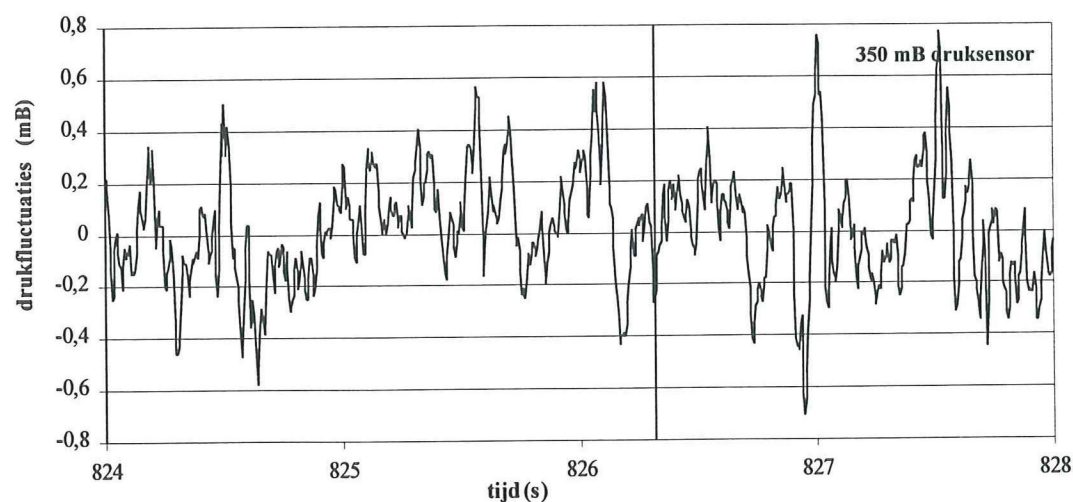
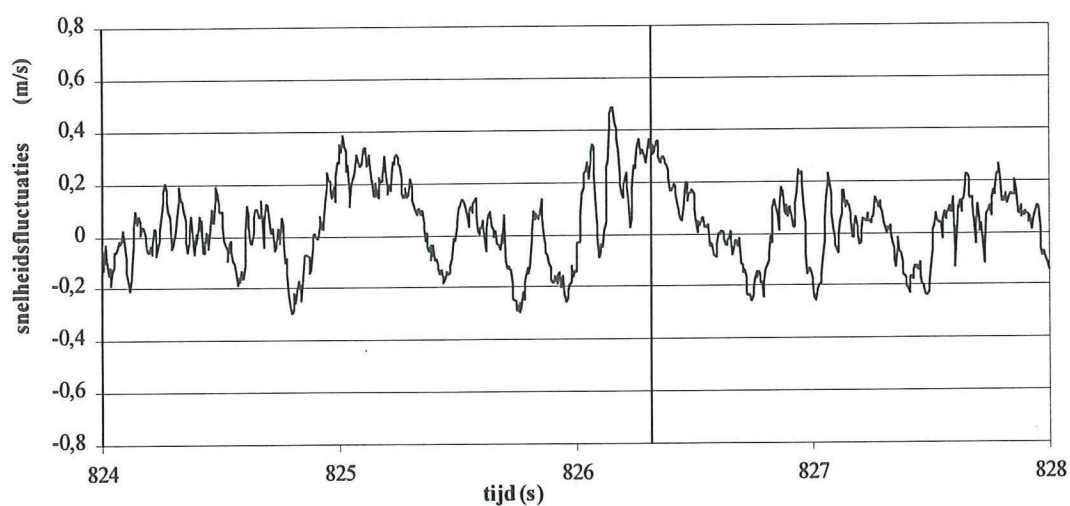
In de snelheidsfluctuaties nabij de rechter verticale lijn in de grafiek is een daling van de fluctuatie zichtbaar. Het verloop van de fluctuaties verschilt niet van het verloop voor en na de beweging. In de grafiek van de drukfluctuaties zijn tijdens de beweging een aantal grote pieken zichtbaar. Deze pieken volgen elkaar snel op. Dit zou kunnen duiden op de beweging van de steen. Maar de fluctuaties zijn niet uitzonderlijk. Voor en na de beweging komen ook dergelijke fluctuaties voor.



Trillen van de steen (op tijdstip 826/827)

In onderstaande grafieken staan de snelheids – en drukfluctuaties afgebeeld behorend bij het trillen van de steen. De verticale lijn in de grafiek geeft het begin van de beweging aan. Op het tijdstip 826,320 seconden begint de steen te trillen. De triluitwijking is ca. 4 mm en de steen trilt in langsrichting. Het trillen houdt aan tot voorbij het tijdstip 828 seconden.

Bij het begin van de trilbeweging is een piek te zien in de snelheidsfluctuaties. Er zijn echter ook pieken voor het begin van de beweging zichtbaar. In de drukfluctuatiefgrafiek is geen duidelijk patroon zichtbaar, wat zou kunnen duiden op de beweging van de steen. Wel zijn er twee pieken die hoger zijn dan vóór de beweging. Maar dit is waarschijnlijk random. Alleen bij het begin van de beweging is een daling zichtbaar in de drukfluctuatie.

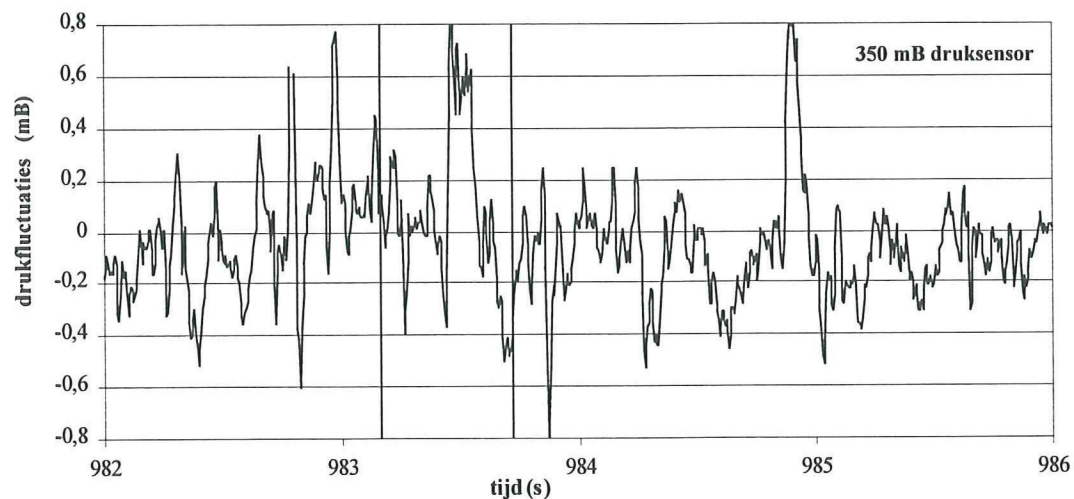
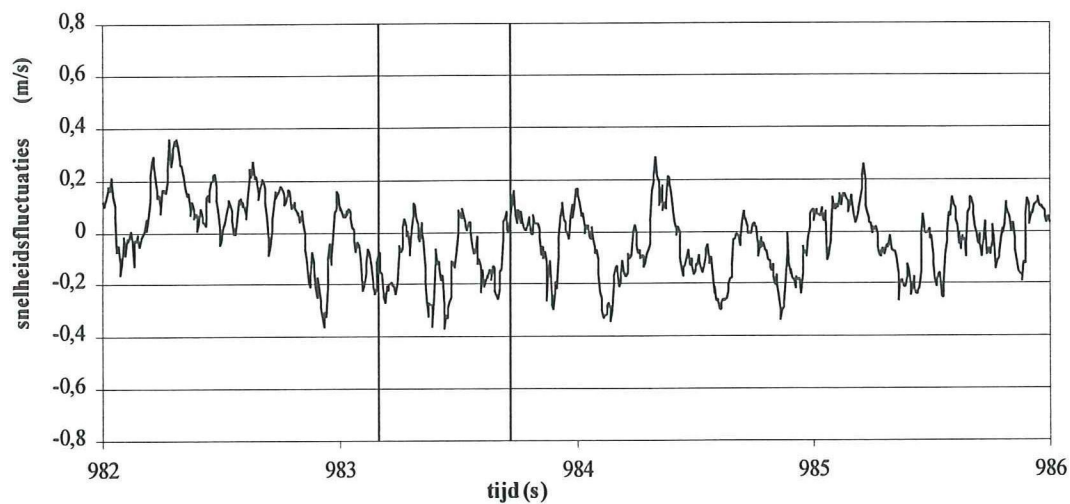


Verplaatsen van de steen

In onderstaande grafieken staan de snelheids – en drukfluctuaties afgebeeld behorend bij het verplaatsen van de steen.

De verticale lijnen in de grafiek geven het begin en het eind van de beweging aan. Op het tijdstip 983,160 seconden rolt de steen opzij. Daarna draait de steen iets zodat de steen gemakkelijker te verplaatsen is. Dit gebeurt op tijdstip 983,400. Op het tijdstip 983,640 komt de steen los van zijn steunpunt en rolt weg.

Tijdens het verplaatsen van de steen verandert het verloop van de fluctuaties niet echt. Er zijn wat pieken aanwezig, maar deze zijn niet frequenter dan daarvoor. In de drukfluctuaties is één grote piek aanwezig. Dit is ongeveer op het tijdstip dat de steen draait en daarna los komt van zijn steunpunt. In de snelheidsfluctuaties is op dat moment een daling zichtbaar.

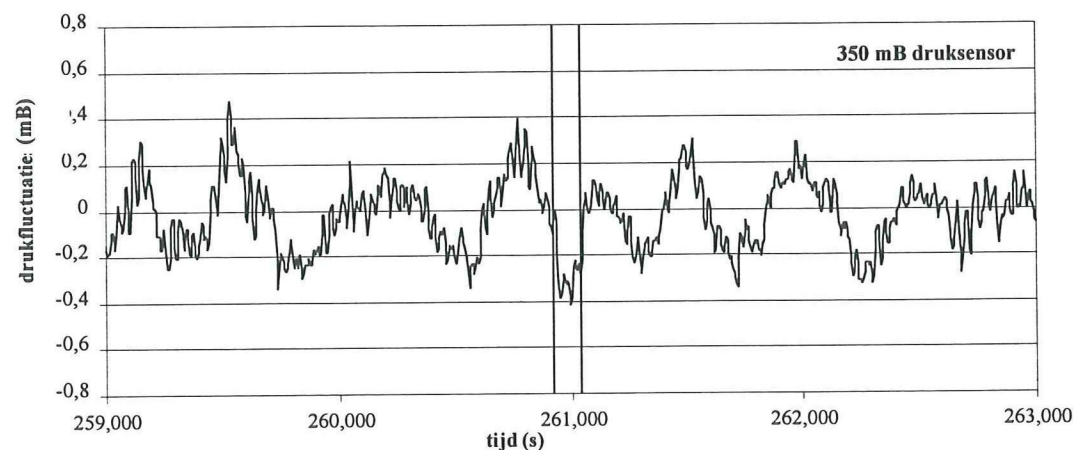
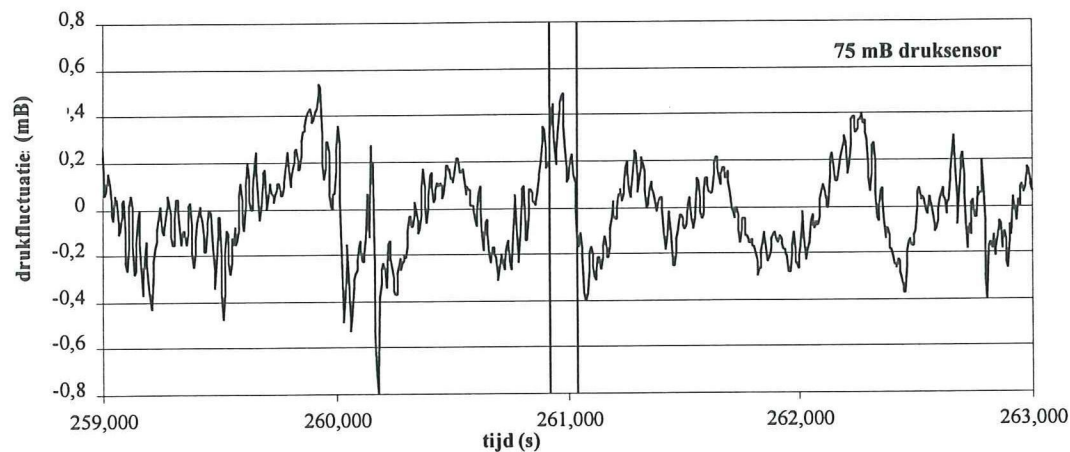
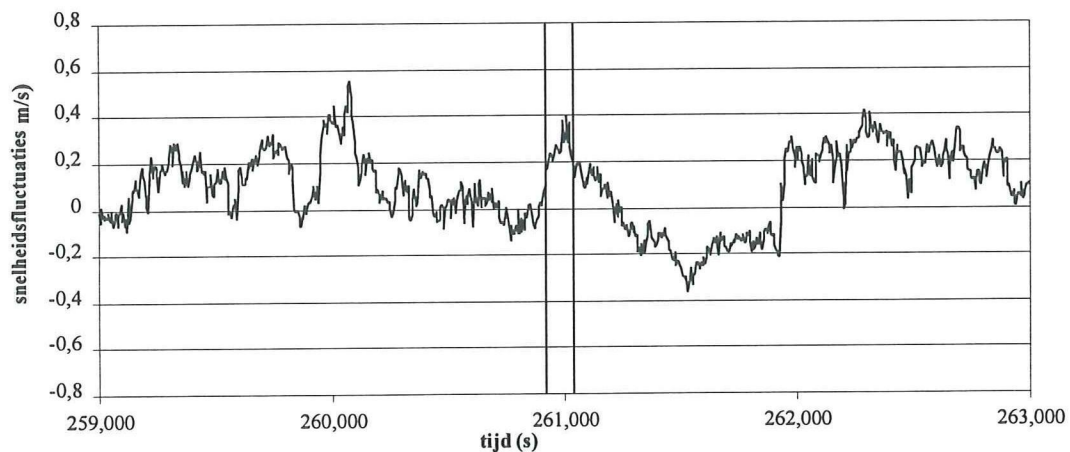


Bijlage IX: Grafieken van de snelheids- en drukfluctuaties in een verstoorde stroming

In de volgende grafieken zijn de snelheids- en drukfluctuaties te zien die bij de bewegingen van de enkele losse steen horen. Deze fluctuaties zijn gemeten bij de proef "Bepalen van Ψ_c voor één enkele losse steen in een verstoorde stroming" gedurende één meetcyclus. De stroomsnelheid is bij elke volgende beweging groter. De eerste grafiek geeft de snelheidsfluctuaties net boven de enkele losse steen. De tweede grafiek geeft de drukfluctuaties gemeten met de 75 mB druksensor op bodemniveau (t.p.v. de losse steen). De derde grafiek geeft de drukfluctuaties gemeten met de 350 mB druksensor op bodemniveau (10 cm voor de enkele losse steen). De verticale lijnen in de grafiek geven het begin en het eind van de beweging aan.

Verschuiven van de steen

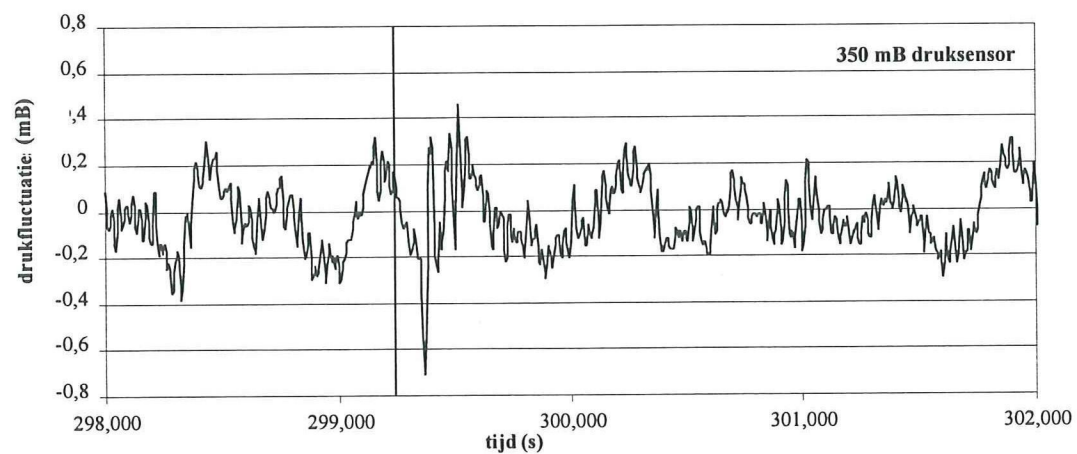
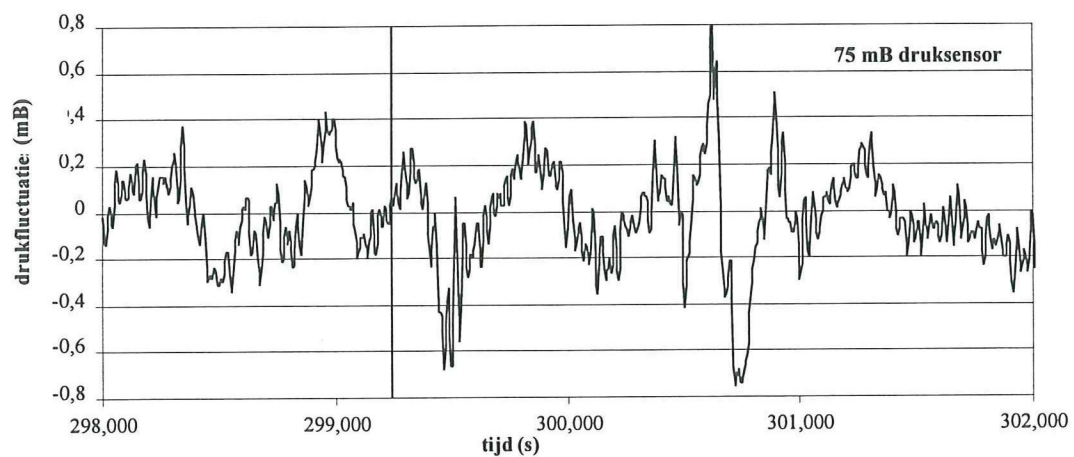
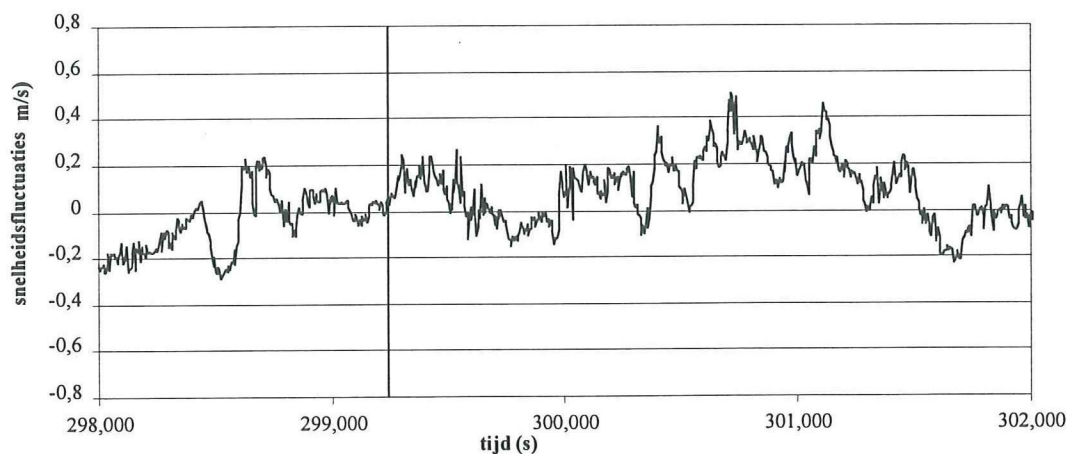
Tussen het tijdstip 260,920 en 261,040 seconden verschuift de steen ca. 2 cm in de richting van de stroming. In zowel de grafiek van de snelheids- als van de drukfluctuaties is een piek te zien bij verschuiven van de steen. Echter, eenzelfde soort pieken zijn ook voor en na de verschuiving van de steen in de grafiek aanwezig.



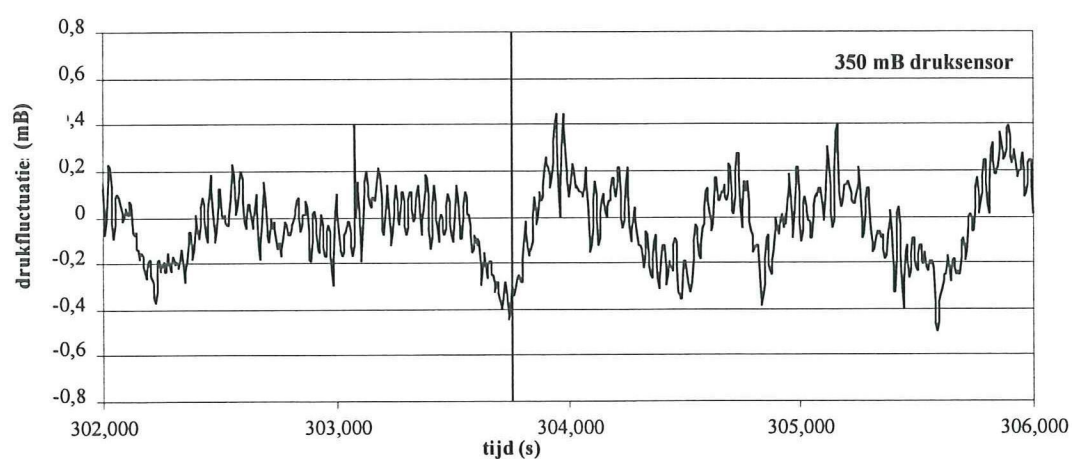
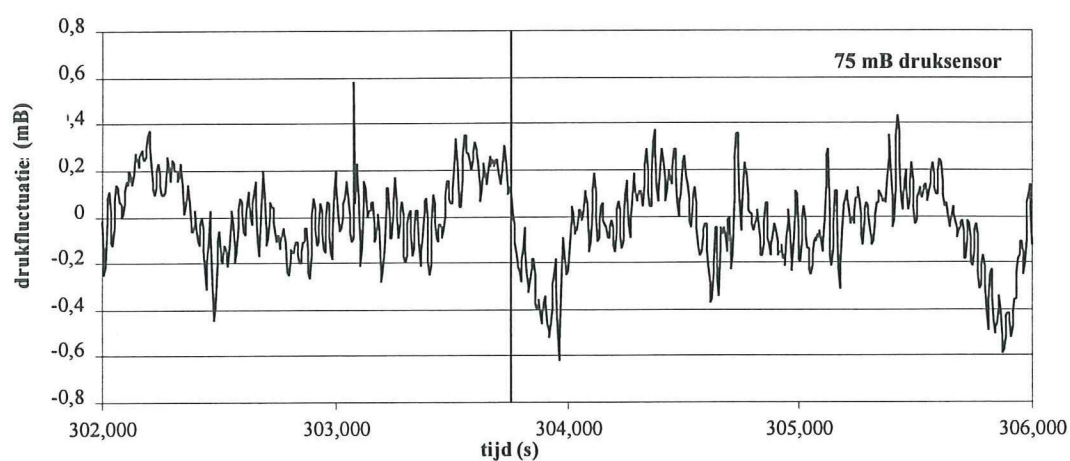
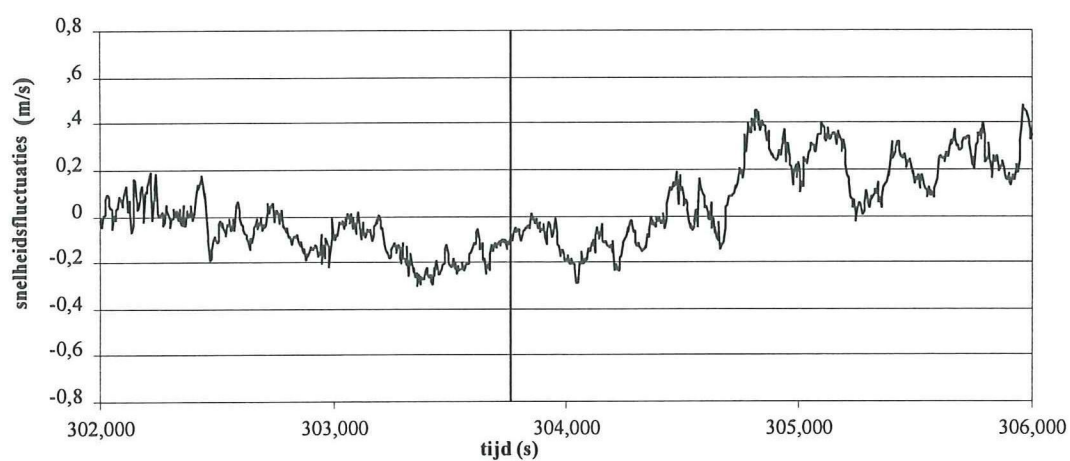
Trillen van de steen

Op het tijdstip 299,240 seconden begint de steen te trillen. Deze beweging houdt aan tot het tijdstip 304,760 seconden. Dat is te zien op de volgende pagina.

In de grafieken is geen duidelijke verandering van het verloop van de fluctuaties te zien zodra de steen begint te trillen. De drukfluctuaties gemeten bij de steen zijn iets onregelmatiger tijdens het trillen van de steen.



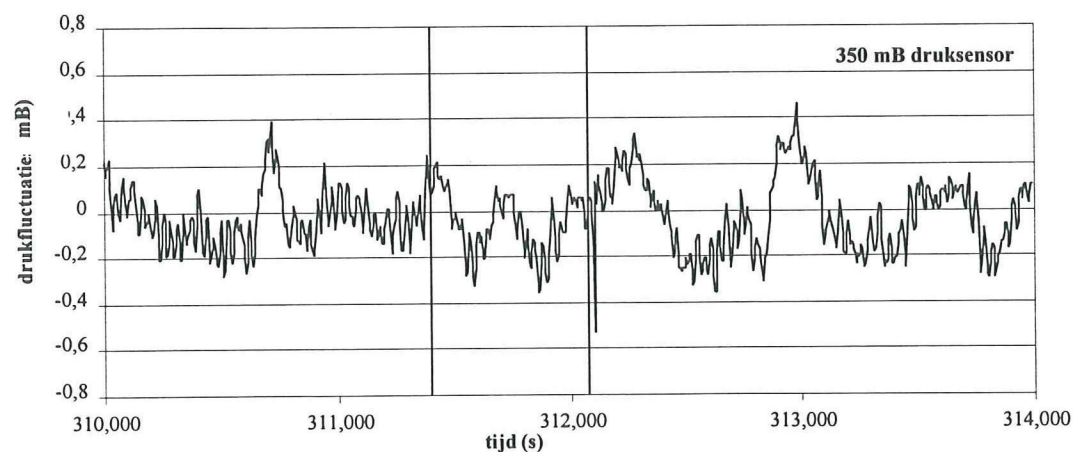
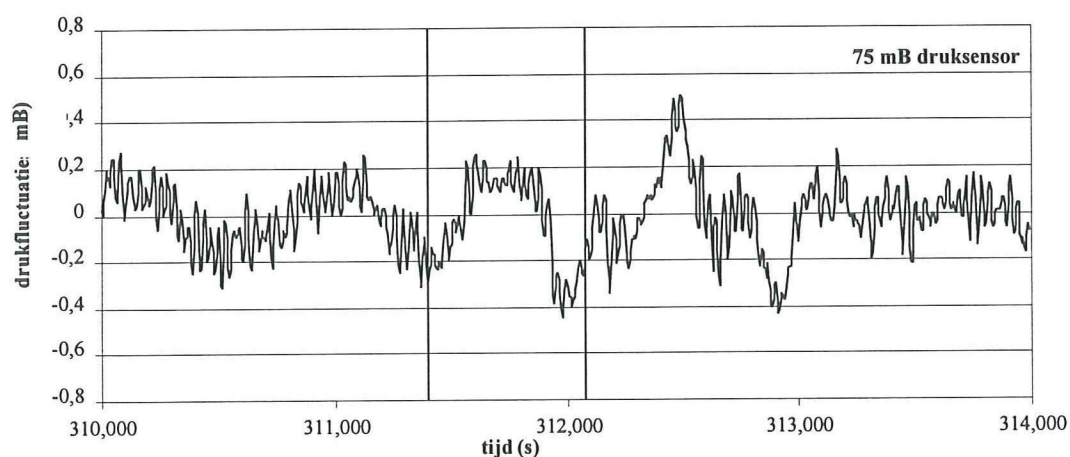
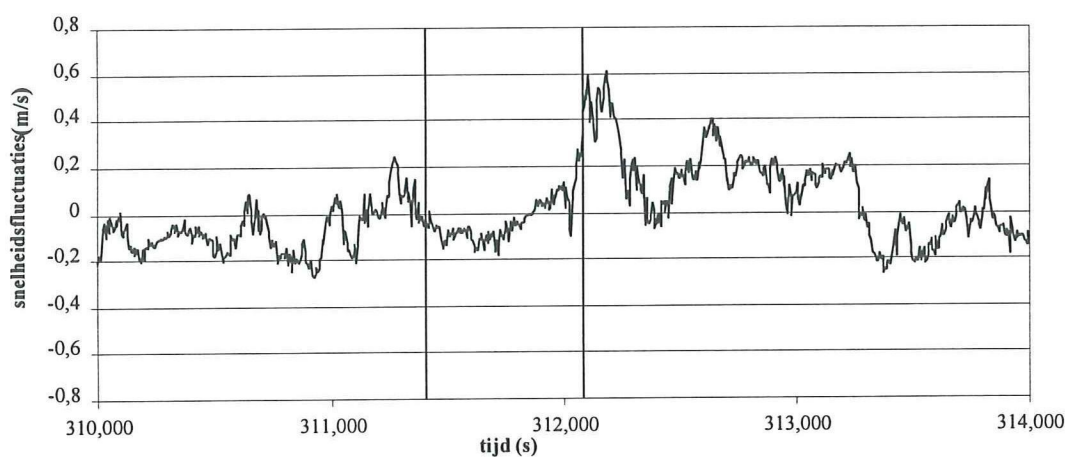
Trillen van de steen (vervolg)



Uitwijken van de steen

Tussen het tijdstip 311,400 en 312,080 seconden maakt de steen een uitwijkbeweging in de richting van de stroom. De grootte van de uitwijking is ca. 7 mm.

In de grafiek van de snelheidsfluctuaties is een stijging van de fluctuaties te zien terwijl de steen uitwijkt. In de drukfluctuatie-grafiek is een kleine stijging zichtbaar, waarna de druk redelijk constant fluctueert en vervolgens weer daalt (dal op ca. 312).

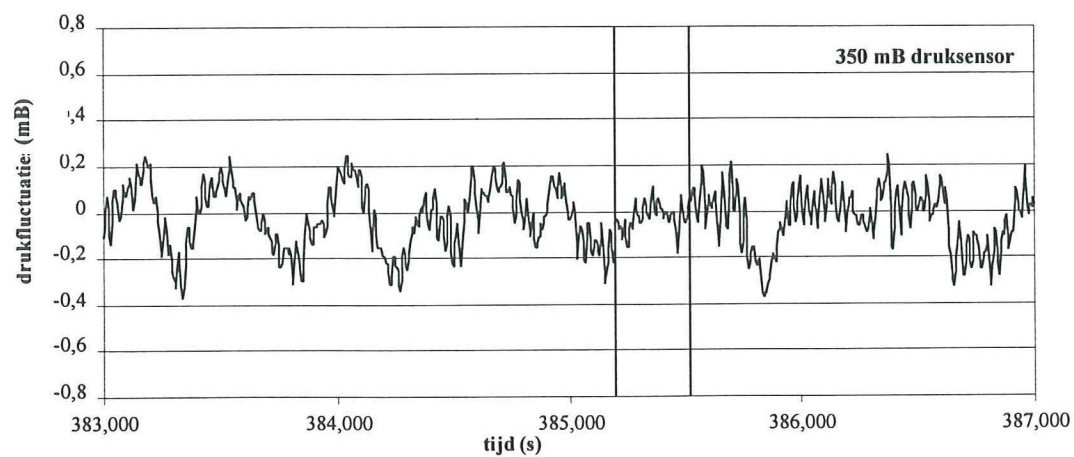
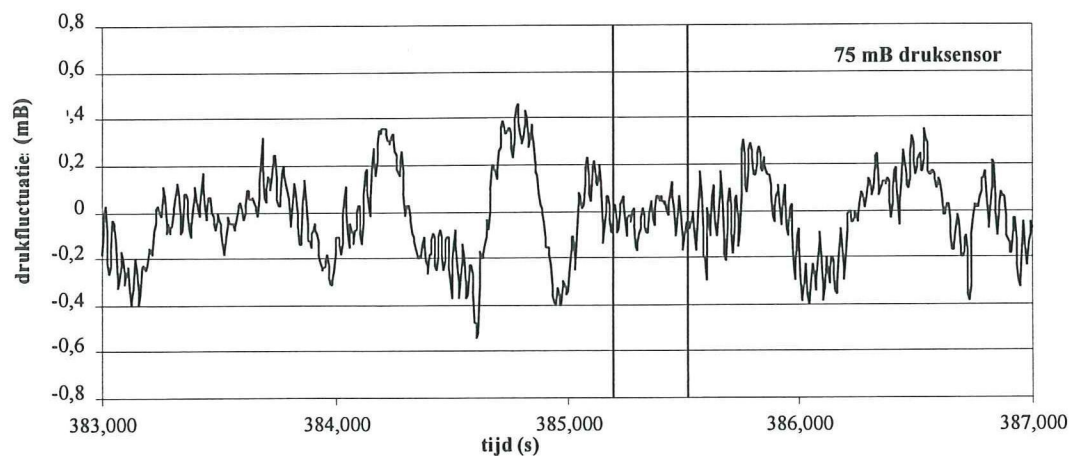
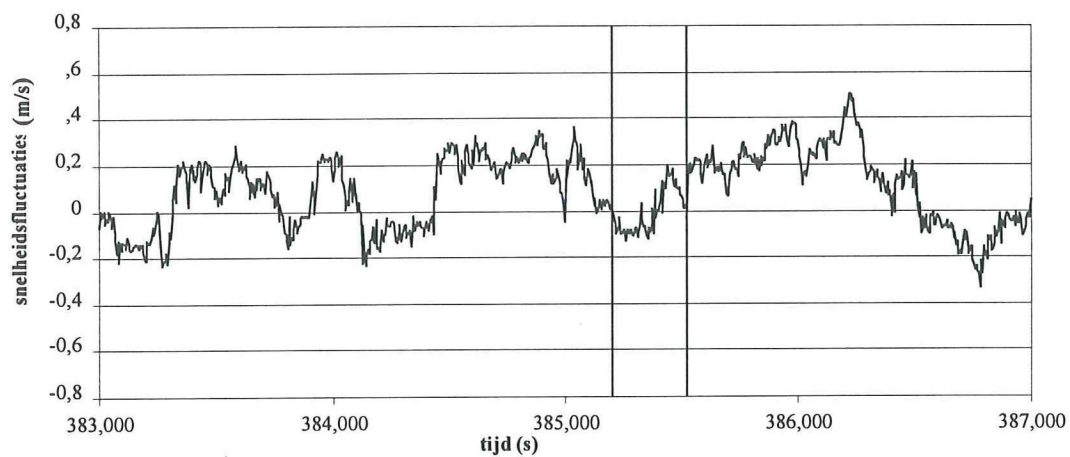


Verplaatsen van de steen

Op het tijdstip 385,200 seconden komt de steen los van zijn steunpunt en rolt weg. Amper een halve seconde later ligt de steen op een andere plaats in het bed.

Tijdens het verplaatsen zijn de snelheids- en drukfluctuaties lager dan er voor en er na.

De drukfluctuatie fluctueert redelijk constant. Kleine uitwijking.



Bijlage X: Drukfluctuaties nabij de bodem, snelheidsfluctuaties elders in de stroming

De simultane snelheids- en drukmetingen zijn mede uitgevoerd om een door Uittenbogaard e.a. (rapport Turbulence schematization for stone stability assessment, 1998) ontwikkelde theorie omtrent de samenhang van snelheids- en drukfluctuaties te kunnen toetsen. De verwachting is dat ook structuren op een zekere afstand van de steen drukfluctuaties ter plaatse van de steen kunnen opleveren, welke kunnen leiden tot het verplaatsen van de steen. Daarom zijn de snelheidsfluctuaties zowel bij de bodem als elders in de stroming simultaan gemeten met de drukfluctuaties bij de bodem zodat de (kruis-) correlatie tussen de twee signalen te bepalen is.

De kruiscorrelatie tussen de snelheidsfluctuatie u' en de drukfluctuatie p' wordt als volgt gedefinieerd:

$$R_{pu}(\tau) = \frac{\overline{p'(t, \vec{s}) u'(t + \tau, \vec{s} + \vec{\Delta s})}}{|\overline{p'}| |\overline{u'}|} \quad [4.2]$$

waarin $\vec{s}$ de positie op de bodem aangeeft en $\vec{s} + \vec{\Delta s}$ een zekere afstand $\vec{\Delta s}$ daar vandaan.

In deze theorie wordt de Navier-Stokes vergelijking voor niet-gelaagde stroming beschouwd met verwaarlozen van de Corioliskracht en inachtneming van de onsamendrukbaarheid van water. Gebruikmakende van de vector eigenschappen wordt dit:

$$\underline{u} \cdot \nabla \underline{u} = \nabla \frac{1}{2} (\underline{u} \cdot \underline{u}) + \underline{u} * \underline{\omega} \quad \underline{\omega} = \nabla * \underline{u}; \quad [4.3]$$

Hierin is de laatste uitdrukking de definitie van de wervelsterkte. Deze vergelijking kan herleid worden tot een vorm van de Poisson-vergelijking voor de druk:

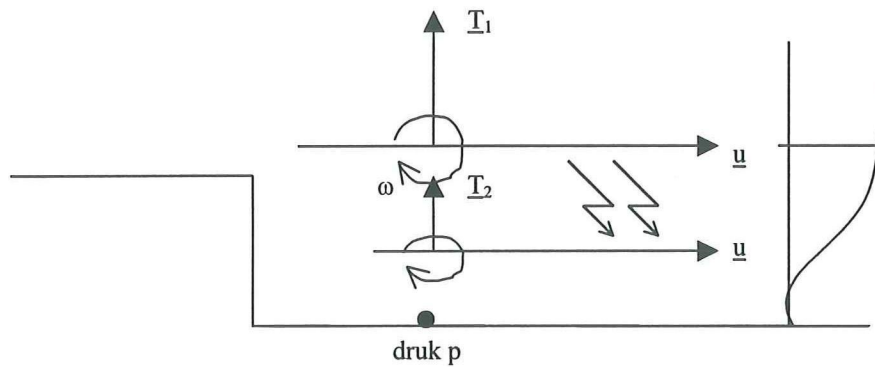
$$\nabla^2 \left\{ \frac{1}{\rho} \cdot p - g \cdot z + \frac{1}{2} (\underline{u} \cdot \underline{u}) \right\} = \nabla \cdot (\underline{u} * \underline{\omega}) \quad [4.4]$$

De hieruit voortkomende volume-integraal leidt tot de volgende uitgangspunten:

- Drukfluctuaties zijn niet per definitie een lokale eigenschap maar zijn afhankelijk van de hoofdstroming en turbulentie over de gehele waterdiepte en niet alleen van de bodemschuifspanning. Verder blijkt uit de gebruikte vergelijkingen dat de invloed op de druk afneemt naarmate de afstand tussen de drukbron en het punt waar de druk daadwerkelijk wordt gemeten, toeneemt.
- Rotatiebewegingen spelen een rol in de niet-lokale invloed op de drukfluctuaties. Hierbij is het van belang dat in een turbulente stroming wervelsterkte aanwezig is. Is de stroming rotatievrij dan is alleen de kinetische energie van belang en geldt Bernoulli. De kracht

$$\underline{T} = \underline{u} * \underline{\omega} \quad [4.5]$$

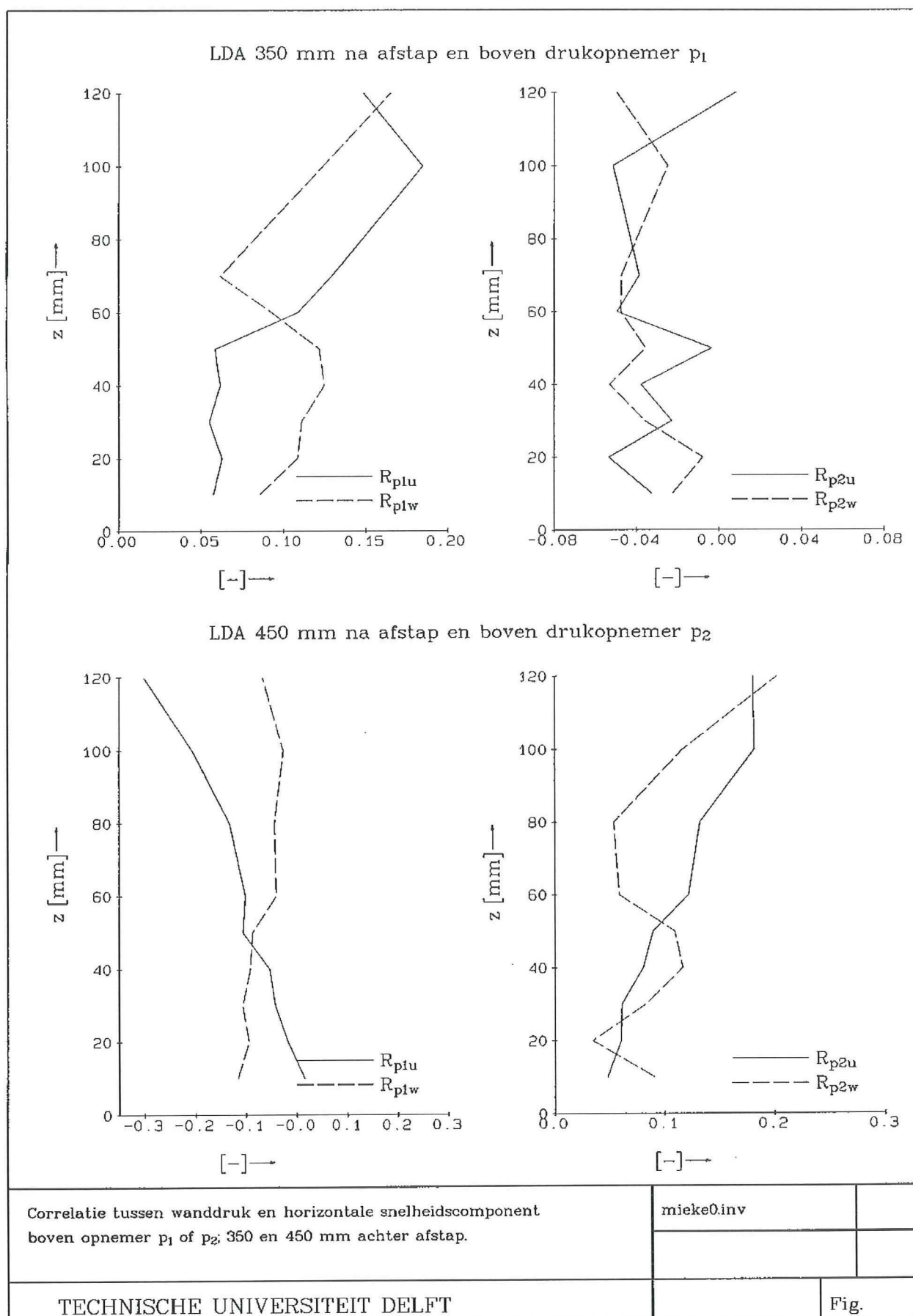
wordt de Lighthill vortex-kracht genoemd en haar ensemblagemiddelde is essentieel voor de turbulente bewegingen en de interne golven, die hier verwaarloosd worden. Het rotatievrije deel van de turbulente bewegingen kan geen drukfluctuaties veroorzaken en wordt daarom als het niet-actieve deel van de turbulentie beschouwd. De kracht $\underline{T}$ is het resultaat van de wervels in de stroming en heeft de neiging om de stroomlijnen samen te knijpen. Daar dit echter onmogelijk is door de onsamendrukbaarheid van het water, heeft de kracht $\underline{T}$ invloed op de drukfluctuaties bij de bodem.



Figuur 1 De Lighthill vortex-kracht in geval van wervels achter een afstap

- Rotatiebewegingen bepalen de drukfluctuaties bij de bodem.
Met de aanname dat de snelheid bij de bodem nul is, kan de fluctuatie p' zodanig gedefinieerd worden dat de gemiddelde waarde van de druk nul is. Hieruit volgt dat de drukfluctuaties bij de bodem gewogen gemiddelden zijn van het fluctuerende deel van de Lighthill vortex-kracht.

De in dit experiment uitgevoerde metingen betreffende de snelheids- en drukfluctuaties in geval van een vlakke bodem en in het geval van een afstap, zijn door Uittenbogaard bewerkt om deze theorie te kunnen toetsen. In het geval met afstap zijn de correlaties tussen de drukfluctuaties bij de bodem en de snelheidsfluctuaties in de verticaal boven beide druksensoren bepaald. Dit geeft de correlatiefiguren zoals afgebeeld in figuur 2 op de volgende bladzijde. Op de verticale as is de afstand boven het bed uitgezet, op de horizontale as staat de bijbehorende correlatie waarde. Drukopnemer p_1 is de 350 mB druksensor die zich op een afstand van 35 cm achter de afstap bevindt en drukopnemer p_2 is de 75 mB druksensor die zich op een afstand van 45 cm achter de afstap bevindt. De grootste correlatie die gevonden wordt betreft de correlatie waarbij de druk gemeten is t.p.v. drukopnemer p_1 en de snelheid op 12 cm boven de andere drukopnemer p_2 . Dit is te zien in de figuur links onder.



Figuur 2 Correlatie van snelheids- en drukfluctuaties

Bijlage XI: Verplaatsingsafstand

Bij de proef “Bepaling van U_c in een verstoorde stroming met een losliggend gekleurd strokenpatroon” is per keer dat de proef is uitgevoerd het aantal verplaatste stenen geteld en tevens is bijgehouden waar vandaan ze verplaatst zijn. Dit is gedaan door per strook het aantal anders gekleurde stenen te tellen. Met dit gegeven is de verplaatsingsafstand van de stenen afzonderlijk bekend tot op een strookbreedte nauwkeurig. Door het maken van een cumulatieve kansverdeling van de verplaatsingsafstand zijn de 50% en 90% overschrijdingsafstanden te vinden.

Allereerst is per uitgevoerde proef het aantal verplaatste stenen gerangschikt per afstand waarover ze verplaatst zijn. Vervolgens zijn de aantalen verplaatste stenen uitgedrukt in percentages van het totaal (cumulatief). Dit is gedaan voor twee situaties nl. voor de stenen verplaatst uit het hele meetgebied en uit het gebied dat loopt vanaf 100 cm achter de afstap tot het eind van het meetgebied. Vervolgens is een grafiek gemaakt van de cumulatieve kansverdeling van de verplaatsingsafstand.

Op de volgende bladzijden staan de tabellen met het aantal verplaatste stenen per verplaatsingsafstand en de grafieken van de cumulatieve kansverdeling voor de twee situaties; hele meetgebied en het gebied vanaf 100 cm achter de afstap.

Tabel met aantal verplaatste stenen vanuit het hele meetgebied:

proef 2	afstand waarover de steen is verplaatst(cm)					
Shields	10	20	30	40	50	60
0,0174	2					
0,0198	2					
0,0216	4					
0,0239	5					
0,0264	9					
0,0309	20					
0,0369	40	1	1		1	
0,0434	68	17	3	1	1	

proef 3	afstand waarover de steen is verplaatst(cm)					
Shields	10	20	30	40	50	60
0,0173	1					
0,0195	1					
0,0219	1					
0,0236	3	1				
0,0263	7	1				
0,0302	23	2				
0,0366	48	10	3			
0,0431	90	18	9	6		

proef 4	afstand waarover de steen is verplaatst(cm)					
Shields	10	20	30	40	50	60
0,0173	1					
0,0197	2					
0,0216	4					
0,0240	7	1				
0,0264	9	2				
0,0304	22	3				
0,0369	43	6		1		
0,0434	78	19	11	7	4	

proef 5	afstand waarover de steen is verplaatst(cm)					
Shields	10	20	30	40	50	60
0,0176	1					
0,0198	6					
0,0215	10					
0,0240	13					
0,0263	20	1				
0,0304	28	5				
0,0370	42	9	4	2		
0,0426	74	18	13	5	2	

Tabel met percentages van het aantal verplaatste stenen vanuit het hele meetgebied:

proef 2	afstand waarover de steen is verplaatst (cm)						
Shields	0	10	20	30	40	50	60
0,0174	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0198	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0216	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0239	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0264	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0309	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0369	0%	93%	95%	97%	97%	100%	100%
0,0434	0%	75%	95%	98%	99%	100%	100%

proef 3	afstand waarover de steen is verplaatst (cm)						
Shields	0	10	20	30	40	50	60
0,0173	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0195	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0219	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0236	0%	75%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0263	0%	88%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0302	0%	92%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0366	0%	79%	95%	100%	100%	100%	100%
0,0431	0%	74%	90%	97%	100%	100%	100%

proef 4	afstand waarover de steen is verplaatst (cm)						
Shields	0	10	20	30	40	50	60
0,0173	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0197	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0216	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0240	0%	88%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0264	0%	82%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0304	0%	88%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0369	0%	86%	98%	98%	100%	100%	100%
0,0434	0%	63%	80%	87%	96%	100%	100%

proef 5	afstand waarover de steen is verplaatst (cm)						
Shields	0	10	20	30	40	50	60
0,0176	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0198	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0215	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0240	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0263	0%	95%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0304	0%	85%	100%	100%	100%	100%	100%
0,0370	0%	74%	90%	97%	100%	100%	100%
0,0426	0%	66%	81%	93%	98%	100%	100%

Tabel met aantal verplaatste stenen vanuit het gebied vanaf 100 cm achter de afstap:

proef 2	afstand waarover steen is verplaatst (cm)					
Shields	10	20	30	40	50	60
0,0174						
0,0198						
0,0216						
0,0239						
0,0264	1					
0,0309	5					
0,0369	15					
0,0434	25	4	1		1	

proef 3	afstand waarover steen is verplaatst (cm)					
Shields	10	20	30	40	50	60
0,0173	1					
0,0195	1					
0,0219	1					
0,0236	1					
0,0263	3					
0,0302	9					
0,0366	21	2				
0,0431	36	5	2			

proef 4	afstand waarover steen is verplaatst (cm)					
Shields	10	20	30	40	50	60
0,0173						
0,0197						
0,0216						
0,0240	2					
0,0264	2					
0,0304	8					
0,0369	14	3				
0,0434	22	5	2	1		

proef 5	afstand waarover steen is verplaatst (cm)					
Shields	10	20	30	40	50	60
0,0176	1					
0,0198	1					
0,0215	2					
0,0240	3					
0,0263	6					
0,0304	11					
0,0370	18	1	1			
0,0426	29	4	3	1		

Tabel met percentages van het aantal verplaatste stenen vanuit het gebied vanaf 100 cm achter de afstap:

In de laatste kolom van de tabel is de dimensieloze verplaatsingsafstand gegeven, berekend met vergelijking [4.45] volgens de Boer (1998).

proef 2	afstand waarover steen is verplaatst (cm)							$X_{50\%}/D_{n50}$
Shields	0	10	20	30	40	50	60	
0,0174	0%							0,0042
0,0198	0%							0,0088
0,0216	0%							0,0151
0,0239	0%							0,0269
0,0264	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0492
0,0309	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,1230
0,0369	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,3486
0,0434	0%	81%	94%	97%	97%	100%	100%	0,9154

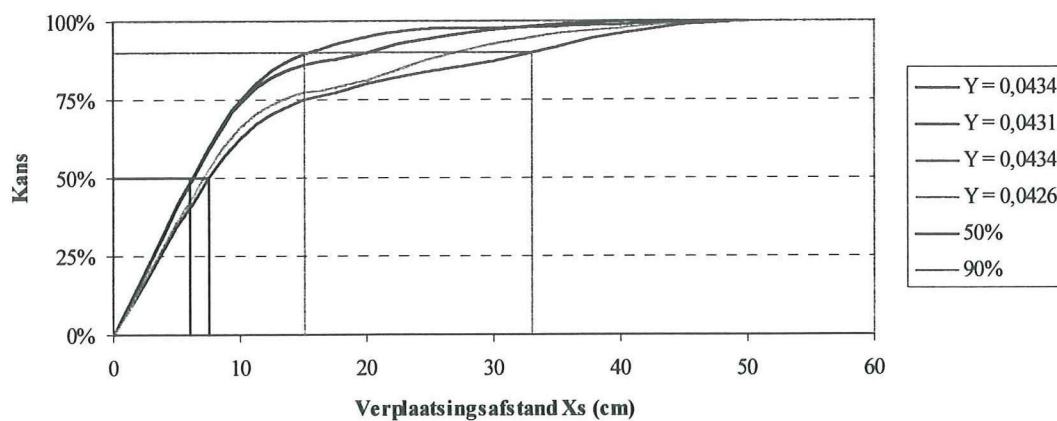
proef 3	afstand waarover steen is verplaatst (cm)							$X_{50\%}/D_{n50}$
Shields	0	10	20	30	40	50	60	
0,0173	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0040
0,0195	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0082
0,0219	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0161
0,0236	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0253
0,0263	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0479
0,0302	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,1074
0,0366	0%	91%	100%	100%	100%	100%	100%	0,3357
0,0431	0%	84%	95%	100%	100%	100%	100%	0,8726

proef 4	afstand waarover steen is verplaatst (cm)							$X_{50\%}/D_{n50}$
Shields	0	10	20	30	40	50	60	
0,0173	0%							0,0040
0,0197	0%							0,0085
0,0216	0%							0,0151
0,0240	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0276
0,0264	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0492
0,0304	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,1124
0,0369	0%	82%	100%	100%	100%	100%	100%	0,3486
0,0434	0%	73%	90%	97%	100%	100%	100%	0,9154

proef 5	afstand waarover steen is verplaatst (cm)							$X_{50\%}/D_{n50}$
Shields	0	10	20	30	40	50	60	
0,0176	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0044
0,0198	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0088
0,0215	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0146
0,0240	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0276
0,0263	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0479
0,0304	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,1124
0,0370	0%	90%	95%	100%	100%	100%	100%	0,3552
0,0426	0%	78%	89%	97%	100%	100%	100%	0,8181

Cumulatieve kansverdeling van de verplaatsingsafstand met $\Psi = 0,043$

Hele meetgebied

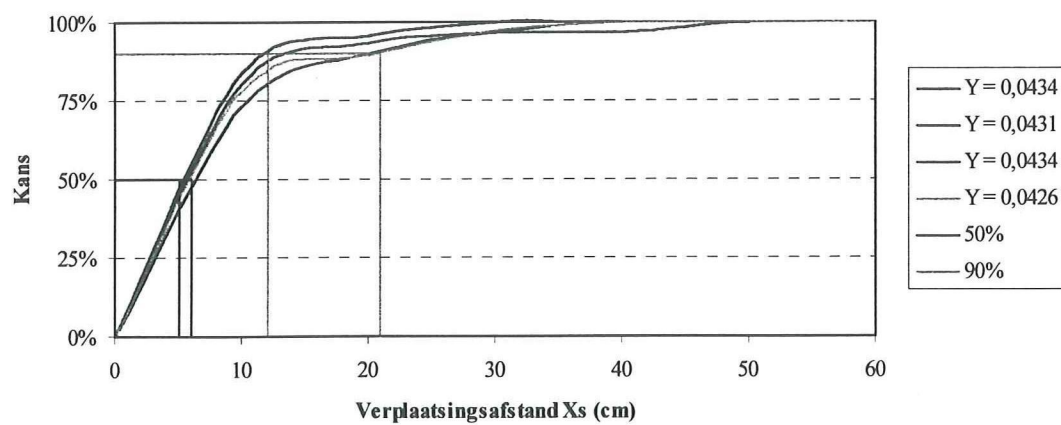


Uit de grafiek is af te lezen:

$$X_{50\%} = 6 - 7 \text{ cm}$$

$$X_{90\%} = 15 - 33 \text{ cm}$$

Gebied vanaf 100 cm achter de afstap



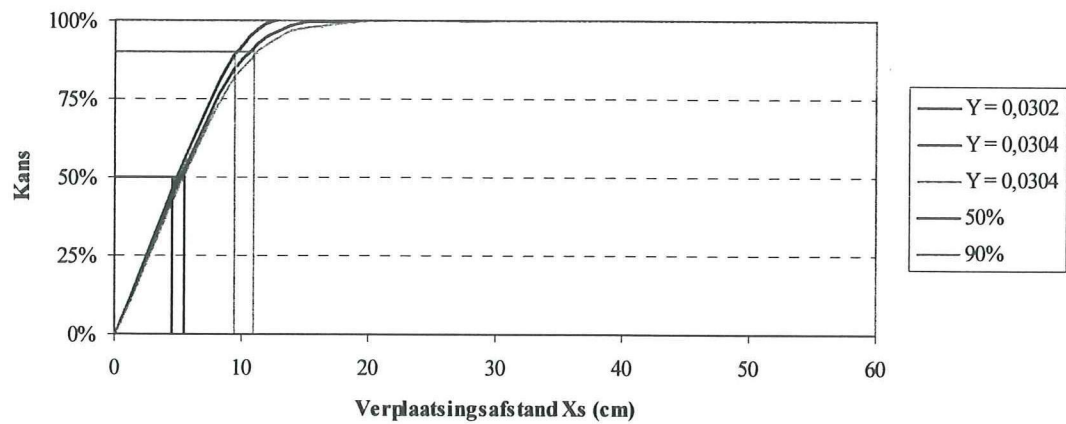
Uit de grafiek is af te lezen:

$$X_{50\%} = 5 - 6 \text{ cm}$$

$$X_{90\%} = 12 - 21 \text{ cm}$$

Cumulatieve kansverdeling van de verplaatsingsafstand met $\Psi = 0,03$

Hele meetgebied

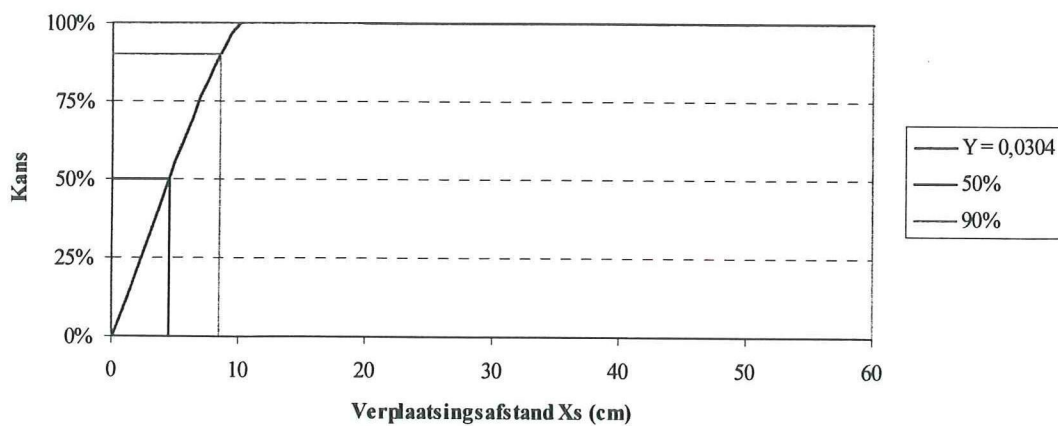


Uit de grafiek is af te lezen:

$$X_{50\%} = 5 \text{ cm}$$

$$X_{90\%} = 9 - 11 \text{ cm}$$

Gebied vanaf 100 cm achter de afstap



Uit de grafiek af te lezen:

$$X_{50\%} = 5 \text{ cm}$$

$$X_{90\%} = 9 \text{ cm}$$