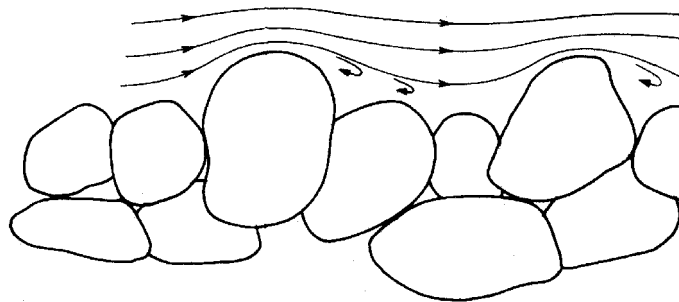

Transport van granulair bodemmateriaal

Een onderzoek naar transport bij lage hydraulische belasting

Afstudeerverslag, P. Forschelen, December 1999



Transport van granulair bodemmateriaal

Een onderzoek naar transport bij lage hydraulische belasting

Paul Forschelen

Technische Universiteit Delft

Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen

Afstudeerrichting Waterbouwkunde

Voorwoord

Voor u ligt het rapport van een afstudeeronderzoek dat is uitgevoerd in de laatste fase van de ingenieursopleiding, bij de sectie Waterbouwkunde van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen van de Technische Universiteit Delft. Dit onderzoek is gericht op het transport van granulair bodemmateriaal bij lage hydraulische belasting en is uitgevoerd in samenwerking met Hydronic, de ingenieursafdeling van Koninklijke Boskalis Westminster nv. Er zijn voor dit onderzoek experimenten uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Technische Universiteit Delft en er is literatuuronderzoek verricht. Dit heeft geleid tot het eindwerk zoals het hier ligt.

Dit onderzoek is in maart 1999 begonnen met een literatuuronderzoek. In april en mei is de meettechniek ontwikkeld waarmee opnamen van metingen kunnen worden verwerkt. In juni tot september zijn de experimenten uitgevoerd en is vervolgens het rapport geschreven.

Graag wil ik de mensen bedanken die hebben bijgedragen aan mijn afstudeerwerk. In de eerste plaats gaat mijn dank uit naar mijn afstudeercommissie, waarin zitting hebben prof. ir. K. d'Angremond, dr.ir. H. Fontijn, ir. G. Schiereck en ir. J. Olthof. Daarnaast wil ik de medewerkers van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica, de sectie Waterbouwkunde en Hydronic bedanken. Door hun interesse en nuchtere kijk op het onderzoek hebben ze me flink op weg geholpen. Vooral wil ik daarbij Goos de Boer bedanken; in dit rapport worden meerdere malen onderdelen uit zijn onderzoek besproken waarbij er soms kritische kanttekeningen zijn geplaatst. Het staat echter buiten kijf dat zijn afstudeeronderzoek kennis en inzicht heeft opgeleverd over het verschijnsel transport van bodemmateriaal.

Paul Forschelen
Delft, december 1999

Samenvatting

Bij civieltechnische kunstwerken worden vaak bodemverdedigingen aangelegd om erosie op afstand te houden. Bodemverdedigingen zijn doorgaans opgebouwd uit meerdere lagen van granulair materiaal; de onderlagen worden hierbij beschermd door de bovenliggende laag. De bovenste laag van de bodemverdediging bestaat ook uit granulair materiaal en moet stabiel zijn bij de maatgevende hydraulische belasting om erosie van de onderlagen te voorkomen.

Door de toplaag van de bodemverdediging dikker te dimensioneren, is het toegestaan dat beperkte hoeveelheden granulair materiaal van de bodemverdediging verplaatsen. De verdediging zal namelijk niet falen zolang de onderlagen afgedekt blijven door de toplaag. Het granulaire materiaal kan hierdoor lichter worden gedimensioneerd. Het granulair materiaal hoeft namelijk niet altijd stabiel zijn maar er mag een beperkte hoeveelheid granulair materiaal verplaatsen. Om deze methode van ontwerpen te kunnen hanteren, moet het transport van materiaal van de bovenste laag van de bodembescherming bekend zijn. Er zijn enkele onderzoeken uitgevoerd naar transport van bodemmateriaal bij lage hydraulische belastingen, Paintal (1969) en De Boer (1998). De resultaten van deze onderzoeken verschillen echter; in het interessegebied (mobiliteitsparameter 0,050 tot 0,060) verschilt het transport van volume bodemmateriaal een factor 50 tot 100. Het is hierdoor niet duidelijk welke formule het transport van bodemmateriaal het meest nauwkeurig beschrijft. Door een onderzoek uit te voeren, is het mogelijk om een verklaring te vinden tussen de verschillen in de resultaten van de onderzoeken van Paintal (1969) en De Boer (1998). Het transport van bodemmateriaal door hydraulische belasting zal hierdoor nauwkeuriger kunnen worden voorspeld. Dit kan worden toegepast in het ontwerp van bodembeschermingen waardoor mogelijk kosten kunnen worden bespaard.

De doelstelling van dit onderzoek is het verklaren van de verschillen tussen de resultaten van de onderzoeken van Paintal (1969) en De Boer (1998). Verder wordt gekeken naar twee invloeden op het transport van bodemmateriaal, namelijk:

- Invloed van de vorm van het bodemmateriaal op het transport
- Invloed van de tijd op transport van het bodemmateriaal

Voor dit afstudeeronderzoek zijn experimenten uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft. De experimenten zijn uitgevoerd onder gelijke condities als bij de onderzoeken van Paintal (1969) en De Boer (1998). Bij de onderzoeken is dezelfde bodemopbouw, hetzelfde bodemmateriaal en dezelfde aanleg van het testbed gebruikt. De meettechnieken waren bij de onderzoeken verschillend, maar hadden als uitgangspunt dezelfde definitie van transport: het volume bodemmateriaal dat door een raai verplaatst per eenheid van breedte en per tijdseenheid. De experimenten die in dit onderzoek zijn uitgevoerd leveren informatie op over de oorzaken van de verschillen tussen de resultaten van onderzoeken van Paintal (1969) en De Boer (1998).

Resultaten van onderzoeken naar transport van bodemmateriaal worden gebruikelijk uitgedrukt in enkele parameters. De mobiliteitsparameter (Ψ) is een maat voor de hydraulische belasting en de eigenschappen van het bodemmateriaal. Bij een hoge waarde van de mobiliteitsparameter verplaatst er meer bodemmateriaal dan bij een lage waarde van de mobiliteitsparameter. De transportparameter is een maat voor de hoeveelheid bodemmateriaal die verplaatst. Hoe hoger de waarde van de transportparameter, des te groter de hoeveelheid bodemmateriaal die is verplaatst.

De resultaten van de experimenten van dit onderzoek leiden tot de volgende conclusies over de invloedsfactoren:

- De vorm van het bodemmateriaal heeft geen invloed op het transport bij de hydraulische belastingen en het bodemmateriaal die in dit onderzoek zijn toegepast ($\Psi = 0.040 - 0.045$).
- Gedurende een meting verandert de hoeveelheid transport in de tijd, er treedt een rijpingsproces op. Het bed stelt zich in op de belasting waardoor geleidelijk het transport daalt tot een constante waarde. Bij de experimenten van dit onderzoek was in 90% van de gevallen het transport tijdens het rijpingsproces één tot zes keer hoger dan na het rijpingsproces.

De resultaten van de verschillende onderzoeken zijn vervolgens vergeleken. Dit heeft geleid tot de volgende conclusies:

- De mobiliteitsparameter is in het onderzoek van Paintal (1969) en het onderzoek van De Boer (1998) verschillend gedefinieerd. De hydraulische belasting op het bodemmateriaal is in de mobiliteitsparameter verwerkt met de bodemschuifspanning (τ_b). De schuifspanning die door de stroming op de bodem wordt uitgeoefend is afhankelijk van de ruwheid van de bodem. Deze ruwheid kan vervolgens worden gesplitst in de ruwheid van het bodemmateriaal en de ruwheid van de vorm van het bed. Bij het onderzoek van Paintal is alleen de schuifspanning in de mobiliteitsparameter verwerkt die afhankelijk is van de ruwheid van het bodemmateriaal. Bij het onderzoek van De Boer is de schuifspanning in de mobiliteitsparameter verwerkt van de bodem. Het verschil in transport kan worden verminderd door dezelfde schuifspanning te verwerken in de mobiliteitsparameter.
- De transportparameter is in het onderzoek van Paintal (1969) en het onderzoek van De Boer (1998) gelijk gedefinieerd: het volume bodemmateriaal dat door een raai verplaatst per eenheid van breedte en eenheid van tijd. Bij het onderzoek van De Boer wordt echter het transport onderschat door het transport te meten over bijna de gehele breedte van de goot. De experimenten zijn bij het onderzoek van De Boer uitgevoerd in een smalle kantelgoot ($B/h=2$). De invloed van de wanden op de stroming is niet te verwaarlozen; de snelheid van de stroming is bij de wanden lager dan in de as van de goot. Het transport van bodemmateriaal is sterk afhankelijk van de snelheid van de stroming. De mobiliteitsparameter wordt in het onderzoek gerelateerd aan het snelheidsprofiel in de as van de goot; hierdoor wordt minder transport gemeten dan representatief is bij de mobiliteitsparameter.

Dit leidt tot de volgende hoofdconclusie:

De verschillen tussen de resultaten van de onderzoeken van Paintal (1969) en De Boer (1998) zijn te verklaren met de verschillen in meettechnieken en definities. De resultaten van het onderzoek van De Boer onderschatten het transport en kunnen hierdoor niet worden gebruikt om het transport van bodemmateriaal te voorspellen. Met de resultaten van de onderzoeken van Paintal en Forschelen (1999) kan het transport van bodemmateriaal wel worden voorspeld. De resultaten van de onderzoeken van Paintal en van Forschelen verschillen afhankelijk van de gebruikte definitie van de mobiliteitsparameter. Bij een mobiliteitsparameter gerelateerd aan de bodemschuifspanning komen de resultaten van de onderzoeken van Paintal en van Forschelen overeen. Bij een mobiliteitsparameter gerelateerd aan de korrelschuifspanning (schuifspanning gerelateerd aan de ruwheid van de korrels) komen de resultaten niet overeen; het transport van volume bodemmateriaal is factor twee tot vijf lager bij metingen van het onderzoek van Paintal ten opzichte van de metingen van het onderzoek van Forschelen.

Het wordt aanbevolen om meer onderzoek te verrichten naar de definitie van de mobiliteitsparameter. In de literatuur worden meerdere definities aanbevolen waardoor de resultaten van de onderzoeken verschillend kunnen worden geïnterpreteerd. Het transport van bodemmateriaal kan nauwkeuriger worden voorspeld wanneer de mobiliteitsparameter nauwkeuriger is gedefinieerd.

Inhoudsopgave

VOORWOORD	V
SAMENVATTING	VII
LIJST VAN SYMBOLEN.....	XI
LITERATUURLIJST	XIII
HOOFDSTUK 1 INLEIDING	1
1.1 ALGEMEEN	1
1.2 PROBLEEMBESCHRIJVING	2
1.3 STRUCTUUR VAN HET RAPPORT	3
HOOFDSTUK 2 STROMING IN OPEN WATERLOPEN.....	5
2.1 INLEIDING.....	5
2.2 STROMINGSBELASTING	5
2.2.1 <i>Schuifspanning berekend met de gemiddelde snelheid over de diepte</i>	5
2.2.2 <i>Schuifspanning berekend met het snelheidsprofiel</i>	6
2.3 TURBULENTIE	7
2.4 RUWHEID.....	8
2.5 WANDINVLOEDEN	9
2.6 ONDERZOEKSPUNTEN.....	13
HOOFDSTUK 3 TRANSPORT VAN BODEMMATERIAAL.....	15
3.1 INLEIDING.....	15
3.2 VOORSPELLEN VAN TRANSPORT OP MICRO NIVEAU	16
3.3 VOORSPELLEN VAN TRANSPORT OP MACRO NIVEAU	17
3.4 BESTAANDE BODEMTRANSPORTFORMULES.....	19
3.4.1 <i>Paintal (1969)</i>	20
3.4.2 <i>De Boer (1998)</i>	25
3.4.3 <i>Engelund en Hansen (1967)</i>	27
3.4.4 <i>Meyer-Peter & Müller (1949)</i>	28
3.5 ONDERZOEKSPUNTEN.....	29
HOOFDSTUK 4 OPZET VAN DE EXPERIMENTEN	31
4.1 INLEIDING.....	31
4.2 STRUCTUUR VAN DE EXPERIMENTEN.....	31
4.3 PROEFOPSTELLING	32
4.3.1 <i>Indeling stroomgoot</i>	32
4.3.2 <i>Bodemmateriaal</i>	33
4.3.3 <i>Meetinstrumenten</i>	34
4.4 UITVOERINGSPROCEDURE	36
4.4.1 <i>Vorbereiden en uitvoeren metingen</i>	36
4.4.2 <i>Genoteerde gegevens verplaatsen van korrels</i>	36
4.4.3 <i>Berekenen van parameters en coëfficiënten</i>	38
HOOFDSTUK 5 INTERPRETATIE VAN DE EXPERIMENTEN.....	41
5.1 INLEIDING.....	41
5.2 TIJDSAFHANKELIJKHEID.....	42
5.2.1 <i>Rijpsingsproces</i>	42
5.2.2 <i>Inspeeltijd</i>	42
5.2.3 <i>Transport tijdens en na het rijpsingsproces</i>	44
5.3 TRANSPORT VAN GRIND EN BREUKSTEEN.....	46
5.3.1 <i>Inleiding</i>	46
5.3.2 <i>Transport grind</i>	46
5.3.3 <i>Transport breuksteen</i>	47
5.3.4 <i>Verschillen in transport bij grind en breuksteen; een vormfactor</i>	48

5.4	TRANSPORTVERDELING OVER DE BREEDTE VAN DE GOOT	49
5.4.1	<i>Verdeling transport in de wandgebieden en het middengebied</i>	49
5.4.2	<i>Transport tussen verschillende stroken</i>	50
5.5	BETROUWBAARHEID MEETRESULTATEN	52
HOOFDSTUK 6 RESULTATEN VERSCHILLENDE ONDERZOEKEN.....		55
6.1	INLEIDING.....	55
6.2	MOBILITEITSPARAMETER.....	55
6.3	TRANSPORTPARAMETER.....	58
6.4	EVALUATIE.....	59
HOOFDSTUK 7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....		65
7.1	CONCLUSIES.....	65
7.2	AANBEVELINGEN.....	67
BIJLAGEN		71
BIJLAGE I ONTWIKKELING MEETTECHNIEK : VERWERKEN DATA		73
I.1	INLEIDING.....	73
I.2	METHODIEK	73
I.3	OMZETTEN VAN BEELDMATERIAAL.....	74
I.4	METHODE VAN ANALYSE MET BEHULP VAN <i>LOOKANDC</i>	74
I.5	ANALYSE DATA LICHTINTENSITEITEN.....	75
I.6	EVALUATIE.....	80
BIJLAGE II ONTWIKKELING MEETTECHNIEK: INSTELLEN BEELDKWALITEIT		83
II.1	INLEIDING.....	83
II.2	BELICHTING VAN DE MEETRAAI.....	83
II.2.1.	<i>Inleiding</i>	83
II.2.2.	<i>Belichting van boven</i>	83
II.2.3.	<i>Belichting van opzij</i>	84
II.2.4.	<i>Evaluatie</i>	84
II.3	PLAATS EN RICHTING VAN DE MEETRAAI	85
II.4	AANPASSINGEN VAN HET BED.....	86
II.5	EVALUATIE.....	88
BIJLAGE III GEGEVENS ONDERZOEK FORSCHELEN.....		89
BIJLAGE IV GEGEVENS ONDERZOEK PAINTAL (1969)		97
BIJLAGE V GEGEVENS ONDERZOEK DE BOER (1998)		99
BIJLAGE VI FIGUREN ONDERZOEKEN FORSCHELEN, PAINTAL EN DE BOER.....		101
BIJLAGE VII VISUELE SPECIFICATIE STEENVORM.....		105

Lijst van symbolen

Symbool	Betekenis	Dimensie
A	stroomvoerend oppervlak	[m ²]
A _b	representatieve stroomvoerende doorsnede van de bodem	[m ²]
A _m	representatieve stroomvoerende doorsnede deel m	[m ²]
A _w	representatieve stroomvoerende doorsnede van de wand	[m ²]
B	breedte stroomgoot	[m]
b	breedte raai in strook in het midden van de goot	[m]
C	Chézy-coëfficiënt	[m ^{1/2} /s]
C _e	afvoercoëfficiënt Rehbockstuw	[-]
d	korreldiameter	[m]
d*	dimensieloze korreLPARAMETER	[-]
d ₅₀	diameter van de korrel die de 50%-waarde van de zeefkromme overschrijdt	[m]
d ₉₀	diameter van de korrel die de 90%-waarde van de zeefkromme overschrijdt	[m]
d _m	minimum axiale lengte van een korrel (de minimum afstand tussen twee punten van de korrel)	[m]
d _n	nominale korreldiameter	[m]
F _D	hydraulische kracht door drukverschillen	[N]
F _L	liftkracht	[N]
F _R	reactiekracht	[N]
F _S	schuifkracht	[N]
g	gravitatieversnelling	[m/s ²]
h	waterdiepte	[m]
i _b	bodemverhang	[-]
i _e	energieverhang	[-]
k	Nikuradse-ruwheid	[m]
k _b	Nikuradse-ruwheid van de bodem	[m]
k _s	Nikuradse-ruwheid van de wand	[m]
L	maximale axiale lengte van een korrel (de maximale afstand tussen twee punten van de korrel)	[m]
n _g	Manning-coëfficiënt van de korrels op de bodem	[m ^{1/3} /s]
n _m	Manning-coëfficiënt van gedeelte m	[m ^{1/3} /s]
n _w	Manning-coëfficiënt van de wand	[m ^{1/3} /s]
P	natte omtrek	[m]
P _b	natte omtrek van de bodem	[m]
P _m	natte omtrek van gedeelte m	[m]
P _R	vormfactor	[-]
P _w	natte omtrek van de wand	[m]
Q	debiet	[m ³ /s]
q _s	transport van korrels	[m ³ /m/s]
q _{s*}	dimensieloos transport van korrels	[-]
r	turbulentie-intensiteit	[-]
R	hydraulische straal van de stroomgoot	[m]
R _b	hydraulische straal van de bodem	[m]
R' _b	hydraulische straal van de korrels op de bodem	[m]
R _m	hydraulische straal van gedeelte m	[m]
R _w	hydraulische straal van de wand	[m]
s	aantal stenen verplaatst tijdens de meting	[-]
$\bar{u}$	gemiddelde snelheid	[m/s]
u'	turbulente snelheidsfluctuatie	[m/s]
u*	schuifspanningssnelheid	[m/s]
u _z	gemiddelde snelheid in de z richting	[m/s]
W	gewicht van de korrel	[N]

Δ	relatieve dichtheid van bodemmateriaal in water	[-]
μ	ribbelfactor	[-]
ν	kinematische viscositeit	[m ² /s]
ρ_s	dichtheid van steen	[kg/m ³]
ρ_w	dichtheid van water	[kg/m ³]
σ_τ	standaard deviatie van schuifspanning	[N/m ²]
τ	schuifspanning van wand en bodem	[N/m ²]
τ_0	schuifspanning op de bodem	[N/m ²]
τ'_b	schuifspanning gerelateerd, aan de korrels	[N/m ²]
τ''_b	schuifspanning gerelateerd, aan de vorm van de bodem	[N/m ²]
τ_c	kritieke schuifspanning	[N/m ²]
τ_s	schuifspanning van de wand	[N/m ²]
Ψ	mobiliteitsparameter gerelateerd aan schuifspanning van gehele bed	[-]
Ψ_c	stabiliteitsparameter of kritieke mobiliteitsparameter	[-]
Ψ_k	mobiliteitsparameter gerelateerd aan schuifspanning van de korrels	[-]

Literatuurlijst

- Ackers, P. & White, W.R. 'Sediment transport: new approach and analysis', 1973, proc. ASCE 99(HY11); Page 2041-2061
- Anderson, A.G. 'Tentative design procedure for riprap lined channels', juni 1968, project report no. 96, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Minneapolis
- Boer, G.M. de 'Transport van stenen van een granulaire bodemverdediging', Augustus 1998, Afstudeerverslag
- Booij R. 'Turbulentie in de waterloopkunde', 1992, Collegedictaat B82, Civil Engineering, Delft University of Technology
- Boutovski, A. 'Stabiliteit van gestorte steen', Februari 1998, Afstudeerverslag
- Buffington, J.M. 'The legend of A.F. Shields', 1999, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No. 4, Page 376-387
- Buffington, J.M. & Montgomery, D.R. 'A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers', 1997, Water resources research, Vol. 33, No. 8
- Einstein, H.A. 'Formulas for the transportation of bedload', 1942, Trans ASCE, Vol 107, Page 561-573
- Einstein, H.A. 'Hydrodynamic forces on a rough wall', july 1949, Review of modern physics, Vol. 21, Page 1-67
- Einstein, H.A. & Barbarossa, N.L. 'River channel roughness', Proc. ASCE 77. Separate No. 78, Trans. ASCE 117; Page 1121-1146
- Engelund, F. & Hansen, E. 'A monograph on sediment transport in alluvial streams', 1967, Technical University of Denmark.
- Frijlink, H.C. 'Discussion of bedload movement formulas of Kalinske, Einstein, and Meyer-Peter and Müller', 1952, Delft, Waterloopkundig Laboratorium
- Hey, R.D. 'Flow resistance in gravel-bed rivers', Proc. ASCE 105(HY4); Page 365-379
- Jansen et al 'Principles of River Engineering', 1979, Pitman, Londen, 509 pp.
- Kennedy J.F. 'The Albert Shields story', 1995, Journal of Hydraulic engineering, Vol. 121, No. 11, Page 766-772
- Lammers, J.C. 'Shields in de praktijk', Maart 1997, Afstudeerverslag
- Lavalle, J.W. & Mofjeld, H.O. 'Do critical stresses for incipient motion and erosion really exist?', 1987, Journal of Hydraulic Engineering, No 3, Page 370-385
- Mahmood, K. 'Flow in sandbed channels', 1971, Colorado Stat Univ., Fort Collins, Water Management Tech. Rep. No. 11.
- Meyer-Peter, E & Müller, R. 'Formulas for bed-load transport', 1948, Proc. 3rd Congress IAHR, Stockholm; Page 39-64
- Nezu, I. and Nakagawa, H. 'Turbulence in open-channels flows', 1993, IAHR Monograph.
- Paintal, A.P. 'The probabilistic characteristics of bed load transport in alluvial channels', 1969, University of Minnesota, Ph.D., Engineering, Hydraulic

- | | |
|---------------------------------|--|
| Paintal, A.P. | 'Concept of critical shear stress in loose boundary open channels', 1971, Journal of Hydraulic Research, Vol. 9 (1), Page 91-113 |
| Rijn, L.C. van | 'Sediment transport, Part I: Bed load transport', 1984, Journal of Hydraulic Engineering No 10., Page 1431-1455 |
| Rodi | 'Turbulence models and their application in Hydraulics', 1980, Association of Hydraulic Research, Delft, the Netherlands |
| Schiereck, G.J. | 'Introduction to bed, bank and shore protection', 1998, Collegedictaat f4, Civil Engineering, Delft University of Technology |
| Shields, A. | 'Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung', 1936, Mitt. Preuss. Versuchsansst. Wasserbau und Schiffbau |
| Ven Te Chow | 'Open channel hydraulics', 1959, McGraw-Hill Book company |
| Visser, P.J. | 'Wave basin experiments on bottom friction due to current and waves', 1986, Proc. 20 th Conf. Coastal Eng., Tapei, Page 807-821 |
| Vriend, H.J. de | 'rivierwaterbouwkunde', 1997, Collegedictaat WA 3340 , Civil Engineering, University of Technology Delft |
| Waterloopkundig
Laboratorium | 'Begin van beweging van bodemmateriaal', 1971, rapport S159-I |
| Waterloopkundig
Laboratorium | 'Begin van beweging van bodemmateriaal', 1976, rapport S159-II |
| Waterloopkundig
Laboratorium | 'Low-mobility transport of Coarse-grained material', October 1998, Q2395.40 |
| Yalin, M.S. | 'River Mechanics', 1992, Pergamon press |

Hoofdstuk 1 Inleiding

1.1 Algemeen

De hoofdfunctie van een bodemverdediging is het op afstand houden van erosie bij een civiel-technisch kunstwerk. Erosie van de bodem kan de stabiliteit van het kunstwerk ondermijnen waardoor het kunstwerk zijn functie verliest en de constructie faalt. Op afstand houden van erosie is mogelijk door een bodemverdediging te plaatsen tot de plaats waar erosie ongevaarlijk is voor het kunstwerk.

Een bodemverdediging is doorgaans opgebouwd uit meerdere lagen van granulair materiaal, een filterconstructie. Bij een filterconstructie wordt elke onderlaag afgedekt door de bovenliggende laag. De bovenste laag van de bodemverdediging bestaat ook uit granulair materiaal en wordt aangeduid als de toplaag. Bij het ontwerpen van een bodemverdediging moet worden gelet op twee verschijnselen. Deze ontstaan doordat de bodemverdediging hydraulisch wordt belast (stroming en golven) en kunnen leiden tot het falen van de constructie. Deze verschijnselen zijn het uitspoelen van onderlagen en het verplaatsen van materiaal van de toplaag.

- Het uitspoelen van de onderlagen betekent dat het materiaal van de onderlagen niet voldoende wordt afgedekt door de toplaag. De stabiliteit van het kunstwerk kan hierdoor verloren gaan doordat de onderlagen niet meer de bodem voldoende afdekken en de bodem erodeert. De onderlagen kunnen worden beschermd tegen uitspoelen door te dimensioneren volgens de filterwetten. De filterwetten schrijven voor dat de verhouding van de korreldiameters van twee opeenvolgende lagen aan voorwaarden moet voldoen.
- Wanneer materiaal van de toplaag verplaatst zal de onderlaag niet geheel worden afgedekt. Het materiaal van de onderlaag en vervolgens de bodem zal kunnen eroderen waardoor de stabiliteit van het kunstwerk wordt ondermijnd. Het materiaal van de toplaag van de bodemverdediging moet hierom stabiel zijn bij de maatgevende hydraulische belasting. De maatgevende hydraulische belasting is de hoogste stroming waarbij de bodemverdediging zijn functie moet kunnen blijven vervullen. Afhankelijk van de dikte van de bovenste laag is het echter toegestaan dat een beperkte hoeveelheid van het granulair materiaal van de toplaag verplaatst. Dit tweede verschijnsel, het verplaatsen van materiaal van de toplaag, zal in dit onderzoek verder worden onderzocht.

De bovenste laag wordt in de praktijk gedimensioneerd met een dikte van enkele keren de afmetingen van het granulaire materiaal. Slechts weinig tot geen materiaal mag hierbij verplaatsen door de maatgevende hydraulische belasting. Wanneer materiaal van de toplaag verplaatst, wordt de onderlaag namelijk niet meer geheel beschermd door de toplaag. Dit komt overeen met falen van de constructie. Als de bovenste laag wordt overgedimensioneerd door een dikte te gebruiken van meerdere keren de afmetingen van het granulaire materiaal, zal de constructie niet falen wanneer beperkte hoeveelheden materiaal van de toplaag verplaatsen. Het voordeel van overdimensioneren van de bovenste laag is dat het materiaal van de toplaag lichter mag worden gedimensioneerd. Hierbij moet echter bekend zijn hoeveel materiaal verplaatst bij de maatgevende hydraulische belasting. Dit is noodzakelijk omdat een minimum dikte van de toplaag aanwezig moet blijven om de onderlagen af te dekken.

Er zijn diverse formules opgesteld die transport beschrijven van bodemmateriaal onder hydraulische belasting. De meeste formules voorspellen echter alleen transporten bij een hoge belasting. Hiermee worden hoge transporten van bodemmateriaal voorspeld; dit is niet van toepassing voor een bodemverdediging. Bij een bodemverdediging met een dikte van meerdere keren de afmetingen van het granulair materiaal mogen er slechts beperkte hoeveelheden materiaal verplaatsen. Er bestaat een transportformule die een indicatie geeft over lage transporten bij gegeven hydraulische belastingen. Deze formule is ontwikkeld door Paintal (1969) en is afgeleid uit experimenten met granulair materiaal met een ronde vorm, grind. Met deze formule kan transport worden voorspeld tot zeer lage hydraulische belastingen. In het onderzoek van Paintal is geconcludeerd dat er altijd transport van bodemmateriaal voorkomt tenzij het water stil staat.

Resultaten van onderzoeken naar transport van bodemmateriaal worden gebruikelijk uitgedrukt in enkele parameters. De mobiliteitsparameter (Ψ) is een maat voor de hydraulische belasting en de eigenschappen van het bodemmateriaal. Bij een hoge waarde van de mobiliteitsparameter verplaatst er meer bodemmateriaal dan bij een lage waarde van de mobiliteitsparameter. De transportparameter is een maat voor de hoeveelheid bodemmateriaal die verplaatst. Hoe hoger de waarde van de transportparameter, des te groter de hoeveelheid bodemmateriaal die is verplaatst.

Aan de TU Delft is een afstudeeronderzoek uitgevoerd (De Boer, 1998), waarbij experimenten zijn gedaan in een stroomgoot. Deze experimenten hadden ten doel om een relatie te verkrijgen voor het transport van bodemmateriaal door hydraulische belasting, waarbij onder andere de invloed van de vorm werd bestudeerd. De invloed van de vorm op het transport van bodemmateriaal is onderzocht door experimenten uit te voeren met grind en breuksteen. De resultaten van dit onderzoek komen niet overeen met de resultaten van het onderzoek van Paintal (1969). Bij beide onderzoeken is een bodemtransportformule opgesteld. Het transport dat in een deel van het interessegebied (mobiliteitsparameter van 0.050 tot 0.060) met de formule van De Boer wordt voorspeld is circa honderd maal lager dan het transport dat met de bodemtransportformule van Paintal wordt voorspeld.

1.2 Probleembeschrijving

De Boer (1998) heeft een afstudeeronderzoek verricht naar het transport van bodemmateriaal bij lage hydraulische belasting. In dit onderzoek werd aanzienlijk minder transport van bodemmateriaal gemeten dan met de formule van Paintal werd voorspeld. In een deel van het interessegebied (mobiliteitsparameter van 0.050 tot 0.060) is het bodemtransport een orde honderd kleiner dan volgens Paintal. Een belangrijk verschil tussen de onderzoeken van De Boer en Paintal zijn de meetmethoden. De meetmethode die door Paintal is gehanteerd, bestond uit het tellen van de korrels in een sedimentvang. De Boer heeft het transport van granulair materiaal gemeten met behulp van gekleurde vakken, waarbij uit de vakken verplaatste stenen werden geteld. Vooralsnog is niet aangetoond welke formule de werkelijkheid het best benaderd. Er zijn significante verschillen tussen de resultaten van de onderzoeken van de Boer en Paintal.

De doelstelling van dit onderzoek luidt als volgt:

Verklaren van de verschillen tussen de onderzoeken van Paintal (1969) en De Boer (1998). Verder zal er worden gekeken naar twee invloeden op het transport van bodemmateriaal namelijk:

- Invloed van de vorm van het bodemmateriaal op het transport,
- Invloed van de tijd op transport van het bodemmateriaal.

In een onderzoek naar invloedsfactoren op het transport van bodemmateriaal zijn experimenten noodzakelijk. Met de meetgegevens van deze experimenten kunnen empirische relaties worden opgesteld. Uit deze relaties kunnen vervolgens verbanden worden afgeleid tussen de verschillende invloeden op het transport. De experimenten zijn in dit onderzoek uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft. Het doel van de experimenten is meetgegevens te verkrijgen over transport van bodemmateriaal bij dezelfde condities als in het onderzoek van Paintal (1969). Door vergelijkbare omstandigheden te scheppen bij de experimenten zullen de meetgegevens van transport overeen moeten komen.

De meettechniek die in dit onderzoek wordt gebruikt, moet dezelfde hoeveelheden transport meten als bij het onderzoek van Paintal (1969). Er wordt bij dit onderzoek echter geen gebruik gemaakt van een sedimentvang zoals in het onderzoek van Paintal. Bij een sedimentvang wordt de stroming lokaal beïnvloed. Het meten van hoeveelheid transport wordt hierdoor minder nauwkeurig. In dit onderzoek zal worden gewerkt met een meettechniek die de stroming niet beïnvloed. Het transport van bodemmateriaal kan hiermee nauwkeuriger worden bepaald.

Door een vervolgonderzoek uit te voeren, kan een verklaring worden gevonden tussen de verschillen in de resultaten van de onderzoeken van Paintal (1969) en De Boer (1998). Het transport van bodemmateriaal door hydraulische belasting zal hierdoor nauwkeuriger voorspeld kunnen worden. Dit kan worden toegepast in het ontwerp van bodembeschermingen waardoor mogelijk kosten kunnen worden bespaard.

1.3 Structuur van het rapport

In hoofdstuk 2 worden de theoretische achtergronden van de stroming beschreven die relevant zijn voor dit onderzoek, de methode waarmee de belasting door de stroming op de bodem wordt bepaald en de invloed van de turbulentie op de belasting op de bodem. Verder worden de ruwheid van de bodem beschreven en de invloed van de wanden op de stroming. In Hoofdstuk 3 wordt beschreven hoe het transport van bodemmateriaal wordt geanalyseerd en voorspeld. De hydraulische krachten op de korrels worden beschreven en het evenwicht wordt afgeleid. De bestaande bodemtransportformules hebben telkens dezelfde structuur. Deze structuur wordt beschreven en vervolgens worden enkele bodem-transportformules toegelicht waaronder de formules die in het onderzoek van Paintal en De Boer zijn ontwikkeld. De proefopstelling en de structuur van de experimenten van dit onderzoek zijn uitvoerig beschreven in Hoofdstuk 4. De procedure die bij elk experiment is gehanteerd is vervolgens toegelicht.

In Hoofdstuk 5 worden de metingen van de experimenten geïnterpreteerd. Er wordt gekeken naar de veranderingen van transport in de tijd. Er zijn experimenten uitgevoerd met bodemmateriaal in de vorm van grind en breuksteen. De verschillen in gemeten transport bij deze experimenten zijn direct afhankelijk van de vorm van het bodemmateriaal. De experimenten zijn onderzocht met betrekking tot de verdeling van het transport van bodemmateriaal over de breedte van de goot. Het transport is gemeten in de as van de goot en bij de wanden. In Hoofdstuk 6 worden de resultaten van dit onderzoek vergeleken met de resultaten van de onderzoeken van Paintal en De Boer. De conclusies en aanbevelingen zijn te vinden in Hoofdstuk 7.

Bij dit afstudeerwerk staan de experimenten die zijn uitgevoerd in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft centraal. Om de meetgegevens van het transport van korrelmateriaal geautomatiseerd te kunnen verwerken, is een meettechniek bedacht. Deze geautomatiseerde meettechniek is tijdens dit onderzoek ontwikkeld maar echter niet toegepast. De betrouwbaarheid van de geautomatiseerde meettechniek is wegens tijdgebrek onvoldoende onderzocht om tijdens dit onderzoek te kunnen gebruiken. Alle metingen zijn visueel geanalyseerd. De ontwikkeling van de geautomatiseerde meettechniek is beschreven in Bijlage I en II.

Hoofdstuk 2 Stroming in open waterlopen

2.1 Inleiding

Om inzicht te krijgen in het verschijnsel van 'transport van korrelvormige vaste stoffen door een vloeistofstroom' moet er kennis zijn van de relevante theoretische achtergronden. Het transport van bodemmateriaal is sterk afhankelijk van de condities van stroming en bed. In dit hoofdstuk zullen de condities van de stroming worden besproken zoals die in dit onderzoek voorkomen. In dit onderzoek zijn de condities van de stroming gelijk als bij het onderzoek van De Boer (1998) en vergelijkbaar met de condities van de stroming bij het onderzoek van Paintal (1971). De experimenten worden uitgevoerd in een kantelgoot met een rechthoekig profiel. De bodem van de goot ($B=0,4$ m) wordt bedekt met een granulair bed en de wanden zijn van glas. Bij de experimenten wordt gemiddeld een waterdiepte gebruikt van $h=0,20$ m.

In experimenteel onderzoek naar transport van bodemmateriaal wordt de hydraulische belasting vaak ingesteld als een eenparige stroming. Een eenparige stroming heeft als kenmerk dat de snelheidsverdeling in de verticaal in tijd en plaats gelijk is. De waterdiepte bij een eenparige stroming is hierdoor constant; het verhang van de bodem is gelijk aan het energieverhang. Dit geldt in een twee-dimensionale situatie. Wanneer de stroming drie-dimensionaal moet worden beschouwd door bijvoorbeeld invloed van de wanden. Dan is het bodemverhang niet altijd gelijk aan het energieverhang. Hierover zal verder worden uitgeweid in paragraaf 2.5. Voorlopig wordt gewerkt met een stroming die twee dimensionaal kan worden beschreven.

De belasting die een eenparige stroming uitoefent op de bodem kan worden bepaald met diverse methoden. De nauwkeurigheid van bepalen van de belasting is daarbij afhankelijk van de verstoringende invloed op de stroming van bijvoorbeeld de wanden. In paragraaf 2.2 zullen twee methoden worden beschreven namelijk een methode met de gemiddelde snelheid en een methode met het profiel van de snelheidsverdeling. Er komen in de stroming snelheidsfluctuaties voor; deze fluctuaties hebben invloed op het transport van bodemmateriaal, zie paragraaf 2.3. De ruwheid van de bodem wordt in de literatuur gesplitst in de ruwheid van de korrels en de ruwheid van de vorm van het bed. Dit wordt toegelicht in paragraaf 2.4. De verhouding van de ruwheden van de wand en de bodem bepaalt de invloed van de wanden op de stroming. De invloed van de wanden op de stroming en de secundaire stroming zal worden beschreven in paragraaf 2.5. Dit hoofdstuk zal met enkele onderzoekspunten worden afgesloten. In deze punten zal worden toegelicht hoe met deze theoretische achtergrond in het vervolg van het onderzoek zal worden omgegaan.

2.2 Stromingsbelasting

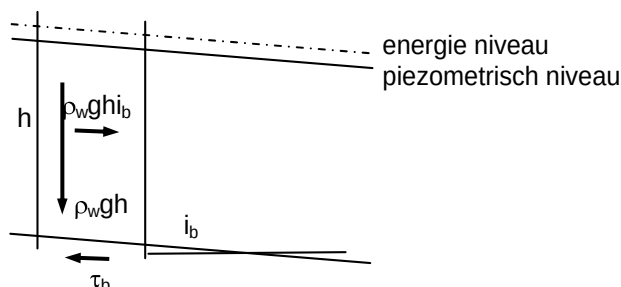
De belasting die een eenparige stroming uitoefent op de bodem, kan worden uitgedrukt in de schuifspanning die door de stroming wordt uitgeoefend op de bodem; de bodemschuifspanning. In deze paragraaf zullen twee relaties worden beschreven waarmee de bodemschuifspanning kan worden berekend wanneer de stroming kan worden opgevat als twee dimensionaal. In paragraaf 2.6 zal een afweging worden gemaakt welke relatie in het vervolg van dit onderzoek, aangepast voor een stroming die drie dimensionaal moet worden beschreven, zal worden gebruikt.

2.2.1 Schuifspanning berekend met de gemiddelde snelheid over de diepte

Bij een stroming die twee-dimensionaal kan worden beschouwd, kan de bodemschuifspanning worden berekend met een component van het gewicht van de vloeistof (zie figuur 2-1); dit is uitgedrukt in formule (2-1).

$$\tau_b = -\rho_w g h_i b \quad (2-1)$$

τ_b :	bodemschuifspanning [N/m ²]
ρ_w :	dichtheid water [kg/m ³]
g :	gravitatieversnelling [m/s ²]
h :	waterdiepte [m]
i_b :	bodemverhang [m/m]



Het energieverhang is bij een eenparige stroming gelijk aan het bodemverhang ($i_e = i_b$). Afhankelijk van de invloed van de wanden moet de stroming echter als drie-dimensionaal worden beschouwd. De waterdiepte (h) moet hierbij worden vervangen door de hydraulische straal (R). Dit wordt beschreven in paragraaf 2.5.

$$\bar{u} = C\sqrt{hi_b} \quad (2-2)$$

$$C = 18 \log \frac{12h}{k} \quad (2-3)$$

$\bar{u}$: gemiddelde snelheid [m/s]
 C : Chézy-coëfficiënt [$\text{m}^{1/2}/\text{s}$]
 k : Nikuradse-ruwheid [m]

$$\tau_b = -\rho_w g h_{ib} = \frac{-\rho_w g \bar{u}^2}{C^2} \quad (2-4)$$

De bodemschuifspanning kan worden bepaald aan de hand van de schuifspanningssnelheid. De schuifspanningssnelheid wordt lokaal vastgesteld en is hierdoor alleen lokaal geldig tenzij de stroming eenparig is. Bij een eenparige stroming is het snelheidsprofiel in tijd en plaats gelijk waardoor de schuifspanningssnelheid over de bodem gelijk is.

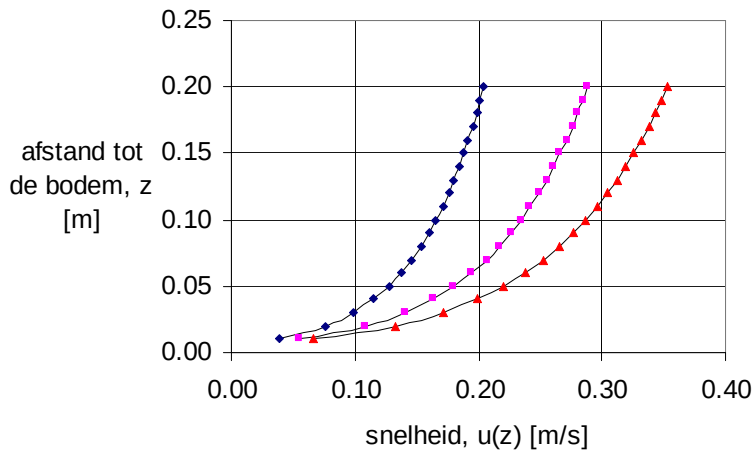
$$\tau_h = -\rho_w u_*^2 \quad (2-5)$$

De schuifspanningssnelheid is te bepalen met het snelheidsprofiel en de 'log-wet' (2-6). Het snelheidsprofiel kan worden bepaald door op verschillende hoogten boven het bed de snelheid te meten, zie figuur 2-2.

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = -\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2-6)$$

waarbij

- κ : von Karmans-coëfficiënt [-]
 z_0 : lengtemaat voor de ruwheid van de bodem [m]
 z : afstand tot de bodem [m]



Figuur 2-2 snelheidsprofiel bij een eenparige stroming

Met relatie (2-5) kan de bodemschuifspanning worden bepaald wanneer er versturende invloeden zijn op de stroming door bijvoorbeeld de wanden. Door de invloed van de wanden op de stroming moet deze drie-dimensionaal worden beschouwd. Als er geen versturende invloeden zijn op de stroming komt de bodemschuifspanning bepaald met de verschillende relaties (2-1) en (2-5) overeen. In paragraaf 2.5 zal de versturende invloed van de wanden op de stroming worden besproken. Vervolgens zal een afweging worden gemaakt welke relatie in dit onderzoek zal worden gebruikt om de schuifspanning op de bodem te bepalen. Voor meer informatie wordt verwezen naar Nezu et al (1993).

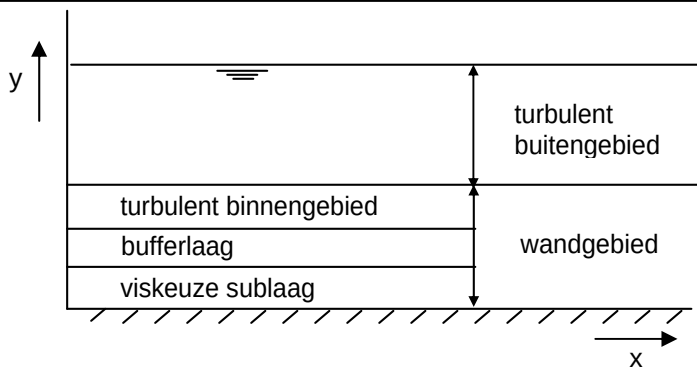
2.3 Turbulentie

Bijna alle stromingen die in de civiele praktijk voorkomen, zijn turbulent. Laminaire stromingen komen zelden voor. Turbulentie in een stroming wordt gekenmerkt als een warrige driedimensionale beweging van de waterdeeltjes. Een ander kenmerk van turbulentie is dat door de onregelmatigheid (randomness), een deterministische aanpak niet mogelijk is. Turbulentie kan alleen worden beschreven met een statistische aanpak.

De invloed van de turbulentie in de stroming is alleen met statistische methoden te schatten; hiervoor wordt een middeling in de tijd of op een plaats gebruikt. Bij een ensemblemiddeling geschiedt de middeling over een ensemble van mogelijke bewegingen. De stroming kan vervolgens worden opgevat als een toevallige realisering uit de middeling. De snelheid kan worden geschreven als een tijdsgemiddelde waarde ($\bar{u}$) en een in de tijd fluctuerende snelheidscomponent (u'). De stroomsnelheid wordt dan geschreven als (2-7).

$$u = \bar{u} + u' \quad (2-7)$$

Bij een turbulente stroming is het dwarsprofiel op te splitsen in twee gebieden waarvoor verschillende stromingscondities gelden namelijk het wandgebied en het turbulente buitengebied (figuur 2-3).



Figuur 2-3 gebieden in de turbulente stroming langs een wand

In het wandgebied wordt de stroming bepaald door de wandcondities en in het turbulente buitengebied door de configuratie van de stromingssituatie. Het wandgebied kan worden gesplitst in drie gebieden:

- viskeuze sublaag, de viskeuze schuifspanningen overheersen in deze laag.
- turbulent binnengebied, de turbulente schuifspanningen overheersen in dit gebied.
- bufferlaag, overgangsg gebied tussen viskeuze sublaag en turbulent binnengebied.

Afhankelijk van de ruwheid van de wand, wordt de gelaagde opbouw van het wandgebied verstoord. Dit kan worden gekenmerkt als de volgende gevallen

- hydraulisch glad, kleine ruwheidselementen worden geheel afgeschermd door de viskeuze sublaag,
- volledig hydraulisch ruw, grote ruwheidselementen steken boven de viskeuze sublaag en zelfs boven de bufferlaag uit,
- Overgangsg gebied, de ruwheidselementen steken slechts weinig boven de viskeuze sublaag uit,

Bij een hydraulisch ruwe bodem ontstaat er door de plotselinge verwijding van de stroming een neer achter de ruwheidselementen. De stroming laat los achter deze ruwheidselementen, waardoor de impulsoverdracht vanaf de bodem plaatsvindt door drukkrachten en niet door viskeuze schuifspanningen. Gezien het onregelmatige karakter van de turbulente snelheidsfluctuaties moet het optreden van een bepaalde stoot op een korrel worden beschouwd als een statistische kans.

2.4 Ruwheid

De ruwheid van de bodem en de wanden kan met diverse coëfficiënten worden beschreven. In paragraaf 2.2.1. werd de Chézy-coëfficiënt (2-3) gebruikt in formule (2-4). Deze coëfficiënt is afhankelijk van de waterdiepte (h) en de Nikuradse-ruwheid (k) en mag alleen worden gebruikt bij een hydraulisch ruwe wand. De Nikuradse-ruwheid is gerelateerd aan de korreldiameter d_{50} of d_{90} (diameter van de korrel die de 50%- of 90%-waarde van de zeefkromme overschrijdt) en wordt uitgedrukt als formule (2-8).

$$k = n d_x \quad (2-8)$$

- k : Nikuradse-ruwheid [m]
 n : coëfficiënt [-]
 d_x : diameter van de korrel die de x %-waarde van de zeefkromme overschrijdt [m]

Coëfficiënt n is hierbij afhankelijk van de vorm en opbouw van de bovenste laag. Bij een ruw bed heeft k een hoge waarde ($3 d_{90}$), bij een vlak bed heeft k een lage waarde ($2 d_{50}$), zie Schiereck (1998). Dit verband wordt vaak gebruikt om de ruwheid van een bodem te voorspellen.

Bij een geribbeld of ruw bed van zand wordt meestal aangenomen dat de ruwheid in twee termen kan worden gesplitst. De ruwheid op kleine schaal is die van de sedimentkorrels aan het oppervlak van de ribbels of de duinen. De ruwheid op grotere schaal is die van de gehele ribbel als een macroscopische ruwheid, de ruwheid door de vorm. Bij een vlak bed kan de vormruwheid van het bed worden verwaarloosd en bestaat de ruwheid van het bed uit alleen de korrelruwheid. Gebruikelijk wordt er ook aangenomen dat de schuifspanning kan worden gesplitst in een korrelschuifspanning (τ'_b) en een bedvormschuifspanning (τ''_b), zie formule (2-9). Deze aannamen worden ook bij grind en breuksteen gebruikt.

$$\tau_b = \tau'_b + \tau''_b \quad (2-9)$$

waarbij

τ'_b : schuifspanning gerelateerd aan de ruwheid van de korrels van het bed
 τ''_b : schuifspanning gerelateerd aan de ruwheid van de vorm van het bed

In de transportformules die door Meyer-Peter & Müller (1948), Engelund en Hansen (1967) en Paintal (1969) zijn opgesteld, is alleen de korrelschuifspanning (τ'_b) in relatie gebracht met het transport van het bodemmateriaal. Ten grondslag hieraan ligt de volgende redenering (Frijlink, 1952 bladzijde 7)

"It is well known that the bedloadtransport is obstructed by the ripples on the bed or by the dunes. A part of the energy is expended by overcoming the resistance of the form of the ripples, since, behind the ripples, the current is detached from the bed, and her vortices are formed, with the consequent transformation of energy into turbulence and, finally, into heat. This transformation of energy takes place at such a distance from the bed in which the transport considered is produced. Therefore, it is considered to contribute little or nothing to that transport."

Het is echter niet duidelijk in welke mate de energie die door de vormruwheid wordt gedissipeerd kan worden verwaarloosd. Als voorbeeld kan worden gegeven dat de energie die wordt omgezet in de neer achter de ribbel, toch sedimenttransport kan veroorzaken. De invloed van de vorm van het bed wordt bij diverse transportformules verschillend bepaald en verwaarloosd.

Bij een vlak bed zou de gehele schuifspanning overeen komen met de effectieve schuifspanning die moet worden gebruikt om transport te voorspellen. Dit wordt echter niet bij alle transportformules eenduidig toegepast. In paragraaf 3.4 zullen vier bodem-transportformules worden besproken die de maatgevende ruwheid telkens verschillend bepalen.

2.5 Wandinvloeden

Wanneer een smalle stroomgoot wordt gebruikt ($B/h \approx 2$), kan de invloed van de wanden op de stroming niet worden verwaarloosd en moet de stroming drie-dimensionaal worden beschouwd. Dit komt door de wrijving met de wand waardoor een grenslaag ontstaat. De weerstand die de stroming ondervindt van de wanden kan een relatief groot gedeelte van de totale weerstand zijn die door de stroming wordt ondervonden. De schuifspanning kan worden gesplitst in de schuifspanning aan de bodem en een schuifspanning aan de wand, zie formule (2-10).

$$\tau_t = \tau_b + \tau_w \quad (2-10)$$

waarbij

τ_t : schuifspanning gerelateerd aan de bodem en de wand
 τ_b : schuifspanning gerelateerd aan de bodem
 τ_w : schuifspanning gerelateerd aan de wand

Relatie (2-1) tussen de bodemschuifspanning en de gemiddelde snelheid kan echter ook worden gebruikt wanneer de stroming drie-dimensionaal moet worden beschouwd. De waterhoogte (h) moet hierbij worden vervangen door de hydraulische straal (R). De relaties kunnen vervolgens als (2-11) en (2-12) worden gedefinieerd:

$$\tau_t = -\rho_w g R i_b = \frac{-\rho_w g \bar{u}^2}{C^2} \quad (2-11)$$

$$C = 18 \log \frac{12R}{k} \quad (2-12)$$

Met relatie (2-11) wordt echter niet de schuifspanning op de bodem berekend maar de totale schuifspanning (de schuifspanning aan de bodem én de schuifspanning aan de wand). De potentiële energie wordt gedissipeerd door de wrijving aan de bodem én aan de wanden. Wanneer de stroming globaal als eenparig wordt ingesteld, dan is het verhang van de bodem gelijk aan het energieverhang. In relatie (2-11) kan hierdoor het bodemverhang wordt gebruikt om de totale schuifspanning te berekenen.

De verhouding van de schuifspanning van bodem en wanden is afhankelijk van het oppervlak van de wanden ten opzichte van de oppervlak en de ruwheid van de wanden. De verhouding van de oppervlakten van de bodem en de wanden kan worden uitgedrukt in de breedte/hoogte verhouding, (B/h , de lengte van de wanden en de bodem is gelijk en kan worden geëlimineerd).

De hydraulische straal moet worden gebruikt wanneer de stroming drie-dimensionaal moet worden beschouwd, de breedte/hoogte verhouding van de stroomvoerende doorsnede is hoog. De hydraulische straal (2-13) is gedefinieerd als de stroomvoerende doorsnede gedeeld door de natte omtrek.

$$R = \frac{A}{P} \quad (2-13)$$

waarbij

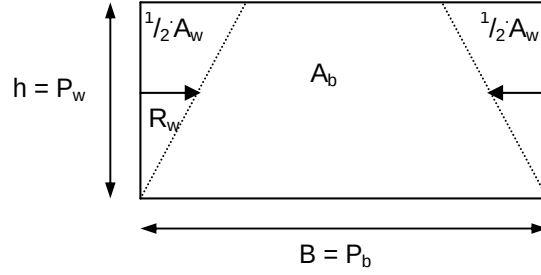
- R : hydraulische straal [m]
 A : stroomvoerende doorsnede [m²]
 P : gehele natte omtrek [m]

Wanneer de hydraulische straal echter in formules (2-11) en (2-12) wordt gebruikt, wordt aangenomen dat de gehele natte omtrek dezelfde ruwheid heeft. Dit is echter niet altijd van toepassing; de wanden kunnen veel gladder zijn dan de bodem, bijvoorbeeld in een kantelgoot met glazen zijwanden. Dit heeft gevolgen want de ruwheid heeft invloed op de schuifspanning die door de stroming wordt uitgeoefend.

Einstein (1942) heeft een methode opgesteld waarbij de invloeden van de verschillende ruwheden van de natte omtrek kunnen worden verwerkt in de berekende schuifspanning. Om deze methode te kunnen gebruiken moeten twee aannamen worden gehanteerd:

- De stroomvoerende doorsnede van de stroming kan worden gesplitst in meerdere gedeelten met elk een natte omtrek. De gedeelten van de stroomvoerende doorsnede zijn representatief voor de potentiële energie die wordt omgezet in turbulentie energie in het betreffende gedeelte. De turbulente wervelingen hebben alleen effect in het representatieve oppervlak van de stroomvoerende doorsnede.
- Voor elk vlak is dezelfde weerstandsvergelijking geldig ondanks dat de ruwheid van de verschillende vlakken verschilt.

Voor elk gedeelte van de natte omtrek (P_m) waarbij de ruwheid verschilt, kan een representatieve doorsnede (A_m) worden opgesteld, zie figuur 2-4.



Figuur 2-4 Voorbeeld van een stroomvoerende doorsnede van een stroming met een natte omtrek met verschillende ruwheden. De ruwheid van de wanden verschilt met de ruwheid van de bodem. De stroomvoerende doorsnede is gesplitst in 2 soorten representatieve doorsneden: de representatieve doorsnede van de bodem (A_b) en de representatieve doorsnede van de wand (A_w).

Hieruit kan de representatieve hydraulische straal (R_m) voor elk gedeelte van de natte omtrek worden opgesteld ($R_m = A_m/P_m$). De ruwheid van het gedeelte van de natte omtrek wordt beschreven met de Manning-coëfficiënt. Het wrijvingsverhang en de gemiddelde snelheid zijn gelijk voor alle representatieve doorsneden.

Als er N doorsneden worden gebruikt, kunnen $N+2$ vergelijkingen worden opgesteld; hierbij zijn N vergelijkingen in de vorm van (2-14). Vergelijkingen (2-15) en (2-16) laten zien dat de som van de hydraulische stralen van alle representatieve doorsneden gelijk is aan de totale hydraulische straal van de stroomvoerende doorsnede.

$$\bar{u} = f_m(i_b, n_m, R_m) = \frac{R_m^{2/3} i_b^{1/2}}{n_m} \quad (2-14)$$

$$A = \sum_{m=1}^N A_m \quad (2-15)$$

$$P = \sum_{m=1}^N P_m \quad (2-16)$$

Bij dit onderzoek hebben de wanden en bodem verschillende ruwheden, de hydraulische straal wordt hierom gesplitst in een hydraulische straal van de wand (R_w) en een hydraulische straal van de bodem (R_b). Deze stralen zijn als (2-17) en (2-18) gedefinieerd:

$$R_w = \frac{A_w}{P_w} = \left(\frac{\bar{u} \cdot n_w}{\sqrt{i_b}} \right)^{3/2} \quad (2-17)$$

$$R_b = \frac{A_b}{P_b} = h \cdot \left(1 - \frac{2R_w}{B} \right) \quad (2-18)$$

waarbij

$$A_w = 2hR_w \quad (2-19)$$

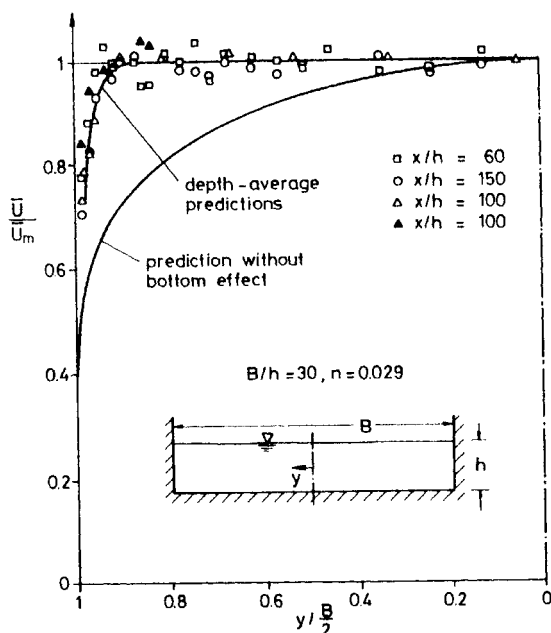
$$A_b = h(B - 2R_w) \quad (2-20)$$

- A_b : representatieve stroomvoerende doorsnede van de bodem [m^2]
- A_m : representatieve stroomvoerende doorsnede van gedeelte m [m^2]
- A_w : representatieve stroomvoerende doorsnede van de wand [m^2]
- B : breedte bed [m]
- h : waterdiepte [m]
- i_b : bodemverhang [-]
- n_w : Manning-coëfficiënt voor de wand [$m^{1/3}/s$]
- n_m : Manning-coëfficiënt voor gedeelte m [$m^{1/3}/s$]
- P_b : natte omtrek van de bodem [m]

P_m :	natte omtrek van gedeelte m [m]
P_w :	natte omtrek van de wand [m]
R_b :	hydraulische straal van de bodem [m]
R_m :	hydraulische straal van gedeelte m [m]
R_w :	hydraulische straal van de wand [m]
$\bar{u}$:	gemiddelde snelheid [m/s]

Bij deze methode wordt de invloed van de ruwheid van de wanden verrekend in de hydraulische straal van de bodem. Naarmate de wanden ruwer zijn, wordt de hydraulische straal van de bodem lager. De schuifspanning die wordt berekend door de hydraulische straal van de bodem te gebruiken is een gemiddelde schuifspanning over de gehele bodem: bij de wanden en in de as op de bodem. Deze methode geeft dus een benadering van de schuifspanning die de bodem ondervindt in de as van de goot. Met de methode van Einstein worden echter nauwkeurigere waarden berekend dan bij gebruik van de waterdiepte of de gehele hydraulische straal.

Om een beeld te krijgen van de invloed van de wanden op de stroming kan worden gekeken naar figuur 2-5.

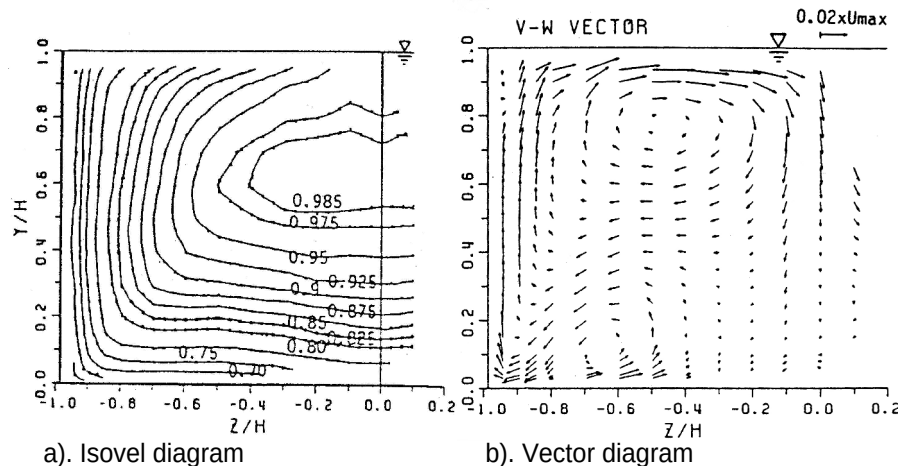


Figuur 2-5 horizontale snelheidsverdeling in ontwikkelde stroming met vrij wateroppervlak (figuur uit Rodi, 1980)

In deze figuur zijn de verhoudingen gemiddelde snelheid / maximale gemiddelde snelheid uitgezet tegen de plaats in de goot. De gemiddelde snelheid is de snelheid gemiddeld over de verticaal. De maximale gemiddelde snelheid is de maximale waarde van de gemiddelde snelheid over de verticaal die voorkomt over de breedte van de goot. Wanneer de stroming niet door de wand wordt beïnvloed, dan is de gemiddelde snelheid over de verticaal gelijk over de gehele breedte. Het blijkt dat de gemiddelde snelheid over de diepte weinig afwijkt ten opzichte van de maximale gemiddelde snelheid over de diepte vanaf de halve waterdiepte afstand tot de wanden. Alleen dicht bij de zijwanden ($1/2 h$ of $y/B/2 = 0.9$) is de gemiddelde snelheid door de wandinvloeden beduidend lager dan de gemiddelde snelheid in de as van de goot.

Door de invloeden van de zijwanden wordt ook een secundaire stroming opgewekt. De richting en snelheid van deze secundaire stroming is moeilijk nauwkeurig te voorspellen. Bij benadering is de richting en snelheid aan te geven met behulp van vector en isovel diagrammen. In figuur 2-6 zijn een isovel en vector diagram te zien van een vergelijkbare situatie in de stroomgoot als bij dit onderzoek. Deze diagrammen geven een beeld van de stromingssituatie zoals die in dit onderzoek voorkomt. De stromingssituatie kan echter niet kwantitatief worden gebruikt. De

diagrammen zijn samengesteld met behulp van eenvoudige analytische functies, hierdoor ontstaan onnauwkeurigheden.



Figuur 2-6 diagram van stroomgoot met $B/h=2$ en een sub-kritische stroom met vrij wateroppervlak bij een ruwe bodem en ruwe wand. a) Isovel diagram. b) Vector diagram (figuur uit Nezu et al, 1993).

Met behulp van de isovel en vector diagrammen is een indruk te krijgen van de invloed van de zijwanden op de snelheid. In de as van de goot (0.10 m) is de invloed van de zijwanden op de snelheid te verwaarlozen, de snelheid in de goot kan als eenparig worden beschouwd met uitzondering van bij de wanden. De secundaire stroming is maximaal bij de hoeken (ongeveer 3% van de snelheid in de hoofdrichting) en rond de as van de goot te verwaarlozen.

2.6 Onderzoekspunten

De schuifspanning op de bodem die door de stroming wordt uitgeoefend in dit onderzoek kan met de methode van Einstein (1942) worden berekend. Hiervoor moet de waterdiepte worden vervangen door de hydraulische straal van de bodem in de relatie tussen de bodemschuifspanning en het component van het gewicht (2-21). Voor de ruwheid van de wand wordt de Manning-coëfficiënt gehanteerd die in de literatuur is aanbevolen (Ven te Chow, 1959): $n_w = 0.009 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. De methode van Einstein wordt gebruikt om wandinvloeden te elimineren bij onderzoeken met een stroomgoot met hoge breedte/hoogte verhouding van de stroomvoerende doorsnede.

$$\tau_b = -\rho_w g R_b i_b \quad (2-21)$$

Er zijn twee verschillen bij dit onderzoek ten opzichte van de situatie bij figuur 2-5:

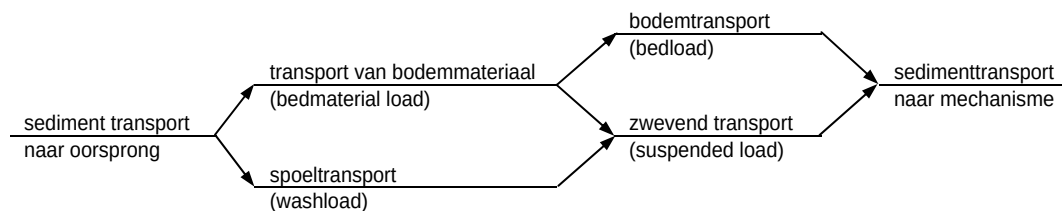
1. De zijwanden van de goot zijn veel gladder dan bij de situatie zoals in de figuur. De wanden zijn in dit onderzoek hydraulisch glad terwijl de ruwheid van de wanden in de figuur gelijk zijn aan de ruwheid van de bodem, hydraulisch ruw. In dit onderzoek is de verhouding wandruwheid/bodemruwheid erg groot ($k_b/k_w \approx 0.5 \cdot 10^3$). De invloed van de wanden zal hierdoor minder zijn dan aangegeven in figuur 2-4.
2. De breedte / hoogte verhouding is veel lager dan bij de situatie zoals in de figuur. De breedte/hoogte verhouding is in dit onderzoek $B/h=2$ en bij de situatie zoals in de figuur is de $B/h=30$.

Uit paragraaf 2.5 blijkt dat de wanden niet verwaarloosbare invloed uitoefenen op de stroming zoals die in dit onderzoek wordt toegepast. Door alleen in de as van de goot (0.10 m) het transport te meten wordt het transport niet verstoord door secundaire stroming. In de as van de goot kan de stroming als eenparig worden beschouwd. In dit onderzoek worden geen snelheidsmetingen uitgevoerd in de as van goot. De bodemschuifspanning kan nauwkeurig worden bepaald met gebruik van de methode van Einstein (1942). Relatie (2-5) tussen de bodemschuifspanning en het snelheidsprofiel zal in het vervolg van het onderzoek niet worden gebruikt.

Hoofdstuk 3 Transport van bodemmateriaal

3.1 Inleiding

Met de theoretische achtergronden die zijn besproken in Hoofdstuk 2 kan het transport van sediment door hydraulische belasting worden onderzocht. Sediment kan kwalitatief in een aantal typen worden onderscheiden naar oorsprong en aard van het transport, zie figuur 3-1. In dit onderzoek zal alleen worden gelet op transport van bodemmateriaal. Alleen transport van bodemmateriaal is relevant bij het dimensioneren van een bodembescherming. Transport van bodemmateriaal is het transport van sediment met een korrelgrootte die in het bodemmateriaal aanwezig is. Zwevend transport zal in dit onderzoek niet voorkomen, de korrels komen niet in suspensie vanwege te lage hydraulische belastingen en te grote korrelafmetingen.



Figuur 3-1 classificatie sedimenttransport (figuur uit Jansen et al, 1979, p. 90)

Het verschijnsel van transport van bodemmateriaal kan op twee niveaus worden voorspeld, micro- en macro-niveau. Het transport van bodemmateriaal kan worden voorspeld op micro niveau door het krachtenevenwicht op elke steen afzonderlijk te bekijken. Hoeveel belasting ondervindt de korrel en wat is de benodigde tijdsduur van de belasting? Dit is beschreven in paragraaf 3.2.

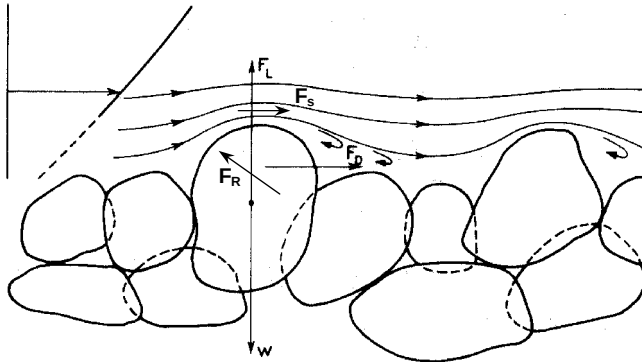
De analyse van het krachtenevenwicht op een korrel is ook de basis voor het voorspellen van transport van bodemmateriaal op macro-niveau. Het transport wordt voorspeld met een representatieve maat voor de hydraulische belasting op de korrels en enkele eigenschappen van de korrels. Deze maat voor de belasting en de korrels wordt vervolgens gerelateerd aan een maat voor transport aan de hand van een transportformule. Dit is beschreven in paragraaf 3.3.

In paragraaf 3.4 worden enkele bodemtransportformules beschreven. De formules worden beknopt beschreven om een beeld te geven van de opbouw van de relatie belasting - transport. In sub-paragraaf 3.4.1 is de bodemtransportformule van Paintal (1969) beschreven. Deze formule is bruikbaar bij lage hydraulische belastingen, waarmee lage transporten kunnen worden berekend. In sub-paragraaf 3.4.2 is het resultaat beschreven van het onderzoek van De Boer (1998), de belangrijkste conclusies die zijn getrokken en de relatie tussen transport van breuksteen en hydraulische belasting. De bodemtransportformules van Meyer-Peter & Müller (1949) en Engelund & Hanssen (1967) worden beschreven in sub-paragraaf 3.4.3 en 3.4.4. Deze formules zijn niet bruikbaar bij lage belastingen maar worden in de praktijk vaak toegepast om hoge transporten te voorspellen. Bij deze formules zal vooral worden gelet op de gebruikte maatgevende ruwheid van het bed.

Het hoofdstuk wordt afgesloten met paragraaf 3.5. Hierin worden de onderdelen beschreven die worden toegepast in het vervolg van het onderzoek.

3.2 Voorspellen van transport op micro niveau

Transport van bodemmateriaal kan op micro niveau worden voorspeld met een analyse van het krachten spel, waar de korrels in het bed aan onderhevig zijn. Wanneer je de stroming en het bed tweedimensionaal beschouwt, dan is dit krachten spel te schematiseren als in figuur 3-2. In deze figuur zijn hydraulische krachten te zien, die de stroming op de korrel uitoefent. De hydraulische krachten bestaan uit de liftkracht (F_L) op de korrel, de sleepkracht door de drukverschillen voor en achter de korrel (F_D) en de kracht van de bodemschuifspanning aan de bovenkant van de korrel (F_S). De stabiliserende krachten bestaan uit de relatieve zwaartekracht (W) door het verschil in massadichtheid van korrel en water, en de resulterende reactiekracht (F_R) door de omliggende korrels op de beschouwde korrel uitgeoefend.



Figuur 3-2 krachten op een steen

De hydraulische krachten op de korrel kunnen als volgt worden uitgedrukt in formules:

$$\text{Sleepkracht: } F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w u^2 A_D \quad (3-1)$$

$$\text{Liftkracht: } F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w u^2 A_L \quad (3-2)$$

$$\text{Schuifkracht: } F_S = \frac{1}{2} C_F \rho_w u^2 A_S \quad (3-3)$$

De krachten kunnen algemeen worden geformuleerd als:

$$F \propto \rho_w u^2 d^2 \quad (3-4)$$

Wanneer de resulterende hydraulische kracht klein is, kunnen de geschetste hydraulische en stabiliserende krachten in evenwicht zijn en verkeert de korrel in rust. Wanneer echter de resulterende kracht groter wordt en de stabiliserende kracht gelijk blijft, wordt het evenwicht verbroken. De korrel zal het contact met de ondergrond verliezen en in beweging komen; de beweging kan een rollende of een glijdende zijn, of eventueel een combinatie van beide. Voor de stabiliteit van een korrel kan de volgende relatie worden opgesteld, namelijk:

$$\rho_w u_c^2 d^2 \propto (\rho_s - \rho_w) g d^3 \quad (3-5)$$

Wanneer de resulterende hydraulische kracht niet constant is maar een fluctuerend karakter heeft, zoals bij turbulente stroom het geval is, maakt dit voor het resultaat van de evenwichtsverstoring verschil. De beweging van de korrel houdt namelijk zolang aan totdat er weer een krachtenevenwicht tot stand is gekomen. Dan zal de korrel weer een evenwichtsstand opzoeken, afhankelijk van de inmiddels verkregen snelheid, de verkregen positie en de traagheid van zijn eigen en van de eventueel daaraan toe te voegen massa van het meebewegende water. Duurt de evenwichtsverstoring slechts kort, dan is de kans groot dat de korrel in zijn oorspronkelijke ligging terugkeert. Houden de versturende condities echter langer aan, dan neemt de kans toe dat de beweging in een verplaatsing resulteert.

In de praktijk is het niet mogelijk om bij een bodemverdediging de belasting bij elke steen afzonderlijk te bepalen. Om deze reden is het van belang om op macro-niveau een nauwkeurige voorspelling te kunnen maken. In het vervolg van dit onderzoek wordt het transport van sediment onderzocht op macro-niveau.

3.3 Voorspellen van transport op macro niveau

Transport van bodemmateriaal kan op macro-niveau worden voorspeld met relaties tussen parameters die een indicatie geven over de karakteristieke eigenschappen. De bestaande bodemtransportformules, waarvan enkele in paragraaf 3.4 worden beschreven, hanteren telkens dezelfde parameters namelijk: mobiliteits-, stabiliteits- en transportparameter. Deze parameters worden beschreven in deze paragraaf. De relaties tussen deze parameters zijn de bodemtransportformules; deze worden beschreven in paragraaf 3.4.

• Mobiliteitsparameter

Een maat voor de hydraulische belasting die op de bodem wordt uitgeoefend, kan algemeen worden geformuleerd als (3-6). Deze maat voor de hydraulische belasting, de mobiliteitsparameter (Ψ), is gerelateerd aan de bodemschuifspanning. De bodemschuifspanning is daarbij dimensieloos gemaakt met de korreldiameter, gravitatieversnelling en de relatieve dichtheid van de korrels in water. De bodemschuifspanning is afgeleid in Hoofdstuk 2.

$$\Psi = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho_w)gd_{50}} = \frac{R_b i_b}{\Delta d_{50}} \quad (3-6)$$

waarbij

d_{50} :	diameter van de korrel die de 50%-waarde van de zeefkromme overschrijdt [m]
g :	gravitatieversnelling [m/s^2]
i_b :	bodemverhang [m/m]
R_b :	hydraulische straal van de bodem [m]
Δ :	relatieve dichtheid van bodemmateriaal in water [-]
ρ_w :	dichtheid water [kg/m^3]
ρ_s :	dichtheid steen [kg/m^3]
τ_b :	bodemschuifspanning [N/m^2]
Ψ :	mobiliteitsparameter [-]

De hydraulische belasting is gerelateerd aan de schuifspanning; dit betekent echter niet dat alleen de schuifspanning invloed heeft op het transport van bodemmateriaal. De schuifspanning is alleen een representatieve maat in relatie tot de belasting op de korrels. Het transport van sediment door hydraulische belasting, kan niet alleen worden beschreven door de invloed van de schuifspanning, de gravitatieversnelling, de korreldiameter en de relatieve dichtheid te verwerken in een parameter. De stroming en het bed hebben meer karakteristieke eigenschappen die invloed hebben op het transport van sediment door hydraulische belasting. Als voorbeeld kan worden gekeken naar de onregelmatigheid van het bodemmateriaal in drie opzichten.

- De vorm van elke korrel is onregelmatig.
- De afmetingen en de vorm van de korrels zijn verschillend.
- De ligging op/in het bed is voor elke korrel verschillend.

De eigenschappen die niet in de mobiliteitsparameter zijn verwerkt hebben echter minder invloed op het transport. Enkele eigenschappen die minder invloed hebben op het transport van sediment zijn bijvoorbeeld de vorm van het sediment, de pakking van het bed en de gradering van het sediment. Voor een uitgebreide beschrijving van deze eigenschappen wordt verwezen naar W.L. (1971).

- **Stabiliteitsparameter of kritieke mobiliteitsparameter**

In diverse onderzoeken waarbij het transport van sediment is onderzocht, is een grens van de hydraulische belasting gehanteerd. Er werd aangenomen dat bij een hydraulische belasting lager dan de grenswaarde (de stabiliteitsparameter Ψ_c) geen sediment zou worden verplaatst of de hoeveelheid zou kunnen worden verwaarloosd. Deze grens is kunstmatig en afhankelijk van de definitie die wordt gebruikt. In werkelijkheid zal bij elke hydraulische belasting transport van sediment kunnen optreden (Paintal, 1969). De stabiliteitsparameter kan worden beschreven als (3-7):

$$\Psi_c = \frac{u_{*c}^2}{\Delta g d_{50}} \quad (3-7)$$

waarbij

Ψ_c : stabiliteitsparameter of kritieke mobiliteitsparameter [-]

u_{*c} : kritieke schuifspanningsnelheid [m/s]

Een voorbeeld van een definitie van een ondergrens is de stabiliteitsparameter volgens Shields (1936). De waarde van de stabiliteitsparameter is bepaald door metingen van bodemtransport tegen de mobiliteitsparameter uit te zetten. Vervolgens werd een extrapolatie gemaakt van bodemtransport naar een lage waarde of waarde nul. De waarde van de mobiliteitsparameter waarbij geen bodemtransport zou optreden volgens de extrapolatie, is de waarde van de stabiliteitsparameter. Deze definitie is gevoelig voor fouten door gewaagde extrapolaties, zie Buffington et al. (1997 en 1999).

- **Transportparameter**

Transport kan worden gedefinieerd als de hoeveelheid granulair materiaal dat door een raai verplaatst per eenheid van breedte en per tijdseenheid (q_s). In het algemeen wordt de hoeveelheid transport van granulair materiaal uitgedrukt in het (bulk) gewicht of volume. De eenheid van transport is hierdoor echter niet altijd gelijk. Door de transportparameter dimensieloos te maken kunnen meetgegevens van verschillende onderzoeken worden vergeleken. Er zijn echter meerdere methoden om transport dimensieloos te maken. In dit onderzoek zal de dimensieloze transportparameter als (3-8) worden gedefinieerd:

$$q_{s*} = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}} \quad (3-8)$$

waarbij

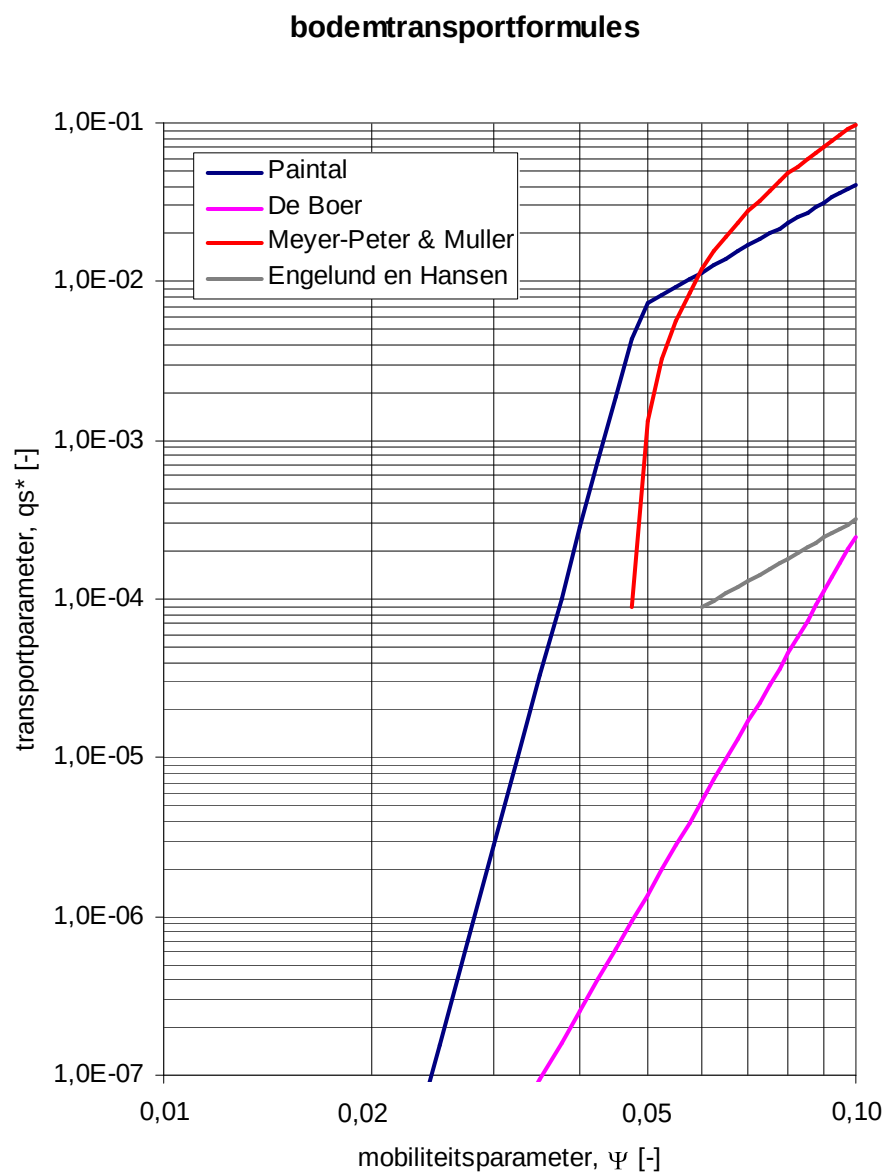
q_{s*} : transportparameter [-]

q_s : volume korrelmateriaal verplaats door raai per eenheid van breedte en tijd [m³/m/s]

3.4 Bestaande bodemtransportformules

Bodemtransportformules zijn relaties die zijn opgesteld tussen de mobiliteitsparameter en de transportparameter. In deze paragraaf worden vier transportformules beschreven. Deze formules zijn vergelijkbaar opgebouwd uit een mobiliteitsparameter die wordt gerelateerd aan de transportparameter zoals beschreven in paragraaf 3.3.

Er worden twee onderzoeken beschreven waarbij formules zijn ontwikkeld die transport van bodemmateriaal voorspellen bij lage hydraulische belastingen: Paintal (1969) en De Boer (1998). Deze onderzoeken worden uitgebreid beschreven en de resultaten worden in Hoofdstuk 6 vergeleken met de resultaten van dit onderzoek. Vervolgens worden twee formules kort toegelicht die transport voorspellen vanaf een ondergrens (Meyer-Peter & Müller (1949) en Engelund & Hansen (1967)). Deze formules voorspellen alleen hoge transporten maar zijn interessant vanwege de manier van bepalen van de maatgevende ruwheid. Deze vier bodemtransportformules zijn empirische relaties en te zien in figuur 3.3.



Figuur 3-3 bodemtransportformules beschreven in paragraaf 3.4

3.4.1 Paintal (1969)

In het promotie-onderzoek van Paintal (1969) is een formule ontwikkeld voor bodemtransport. Er is aangenomen dat de kansdichtheid van verplaatsen van stenen afhankelijk is van de stromingsbelasting en de fluctuaties van de hydrodynamische krachten die op de stenen worden uitgeoefend. Verder is er gekeken naar de verplaatsingsafstand van stenen

Uit het onderzoek zijn de volgende conclusies getrokken:

1. 'The experiments reported herein indicate that a distinct condition for the beginning of movement does not exist'.
2. 'A bed load expression can be derived on the basis of a stochastic analysis which considers that the particle exposures are uniformly distributed, turbulence is normally distributed, and the length of steps by particles follow a negative exponential distribution.'

De formule die door Paintal is opgesteld luidt als volgt:

$$q_{s*} = 6.56 \cdot 10^{18} \Psi^{16} \quad \text{voor } \Psi < 0.050 \quad (3-9)$$

$$q_{s*} = 13\Psi^{2.5} \quad \text{voor } \Psi > 0.050 \quad (3-10)$$

Het bodemtransport is zeer sterk gerelateerd aan de snelheid ($q_{s*} \propto u^{32}$). De mobiliteits- en transportparameter zullen in deze sub-paragraaf uitgebreid worden beschreven. De meetgegevens zijn door het Waterloopkundig Laboratorium aangepast en gebruikt voor een nieuwe transportformule; deze zijn ook beschreven in deze sub-paragraaf. Voor meer informatie over de transportformule wordt verwezen naar Paintal (1969 en 1971).

• Mobiliteitsparameter

De bodemschuifspanning is in het onderzoek van Paintal bepaald met relatie (3-11). De waterdiepte (h) is vervangen door de hydraulische straal (R_b) van de bodem. Met de methode van Einstein (1942) is de hydraulische straal bepaald voor wand en voor bodem; dit komt overeen met de bepaling van de bodemschuifspanning zoals in dit onderzoek, zie paragraaf 2-5.

$$\tau_b = -\rho g R_b i_b \quad (3-11)$$

De mobiliteitsparameter wordt berekend door de bodemschuifspanning dimensieloos te maken. Met deze methode wordt de ruwheid van het gehele bed gebruikt, de ruwheid van de vorm van het bed en de ruwheid van de korrels. Volgens Einstein en Paintal moet de mobiliteitsparameter echter worden gerelateerd aan alleen de schuifspanning die kan worden gerelateerd aan de ruwheid van de korrels van het bed en niet aan de schuifspanning die kan worden gerelateerd aan de ruwheid van het gehele bed. De bodemschuifspanning kan worden gesplitst als (3-12).

$$\tau_b = \tau'_b + \tau''_b \quad (3-12)$$

waarbij

- τ'_b : schuifspanning gerelateerd aan de ruwheid van de korrels van het bed
 τ''_b : schuifspanning gerelateerd aan de ruwheid van de vorm van het bed

De schuifspanning van de korrels is te berekenen door de representatieve hydraulische straal te gebruiken van de korrels van het bed in plaats van de hydraulische straal van het gehele bed. Met de methode van Einstein (1942) kan de representatieve hydraulische straal van de korrels van het bed (3-13) en de representatieve hydraulische straal van de vorm van het bed (3-14) worden berekend. De ruwheid van de korrels op de bodem wordt berekend met een Strickler-achtige formule die is bepaald door Anderson (3-15).

$$R'_b = \frac{A'_b}{P_b} = \left(\frac{\bar{u} \cdot n_g}{\sqrt{i_w}} \right)^{3/2} \quad (3-13)$$

$$R''_b = \frac{A''_b}{P_b} = R_b - R'_b \quad (3-14)$$

$$n_g = 0,0395d^{1/6} \quad (3-15)$$

waarbij

- A'_b : representatieve stroomvoerende doorsnede van de korrels op de bodem [m^2]
- A''_b : representatieve stroomvoerende doorsnede van de vorm op de bodem [m^2]
- d : korreldiameter [m]
- n_g : Manning-coëfficiënt van de korrels op de bodem [$m^{1/3}/s$]
- P_b : natte omtrek van de bodem [m]
- R'_b : hydraulische straal van de korrels op de bodem [m]
- R''_b : hydraulische straal van de vorm van de bodem [m]

Paintal verwerkt alleen de representatieve hydraulische straal van de korrels van het bed in de mobiliteitsparameter en niet de hydraulische straal van het gehele bed. De volgende redenering van Einstein (1949, pagina 6), die wordt overgenomen door Paintal, ligt hier aan ten grondslag:

"This entire procedure of division may appear to be rather artificial since both actions occur along the same perimeter. The significance of this division becomes apparent, however, when one recalls that the transmission of shear to the boundary is accompanied by a transformation of flow energy into energy of turbulence. This energy transformation caused by the rough wall occurs at the grains themselves. This newly created turbulence stays at least for a short time in the immediate vicinity of the grains and, as will be shown later, has a great effect on the bed-load motion. The part of the energy which corresponds to the shape resistance is transformed into turbulence at the interface between wake and free stream flow, or at a considerable distance away from the grains. This energy does not contribute to the bed-load motion of the particles, therefore, and may be largely neglected in the entire sediment picture. This may explain why the division of the shear into the two parts u'_* and u''_* is of first importance."

waarbij

- u'_* : schuifspanningsnelheid voor de korrels op de bodem
- u''_* : schuifspanningssnelheid voor de vorm van de bodem

Bij het onderzoek van Paintal is de mobiliteitsparameter als (3-16) gedefinieerd. Deze mobiliteitsparameter is geldig in de gehele goot.

$$\Psi_{\text{Paintal}} = \frac{\tau'_b}{(\rho_s - \rho_w)gd} = \frac{\rho_w g R'_b i}{(\rho_s - \rho_w)gd_{50}} = \frac{R'_b i}{\Delta d_{50}} \quad (3-16)$$

waarbij

- ρ_s : dichtheid korrel [kg/m^3]
- τ'_b : schuifspanning gerelateerd aan de korrels [N/m^2]
- Δ : relatieve dichtheid van bodemmateriaal in water [-]

• Transportparameter

De transportparameter is gedefinieerd als het volume korrelmateriaal dat per eenheid van breedte en tijd wordt getransporteerd, zie formule (3-17).

$$q_{s*} = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}} \quad (3-17)$$

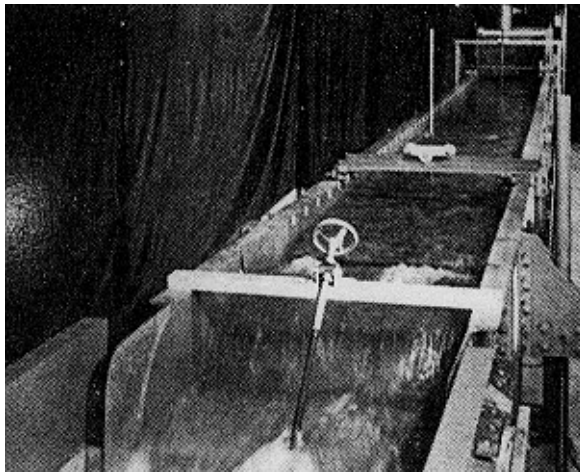
waarbij

q_s : volume korrelmateriaal verplaatst door raai per eenheid van breedte en tijd
[m³/m/s]

q_{s*} : dimensieloze transportparameter [-]

De metingen zijn uitgevoerd in een kantelgoot (zie figuur 3-4), waarvan de wanden als hydraulisch glad kunnen worden beschouwd. De goot heeft een rechthoekige doorsnede en de volgende afmetingen: lengte 15,20 m, breedte 0,91 m, hoogte 0,38 m. Alle experimenten zijn uitgevoerd met een bed van granulair materiaal met een dikte van ongeveer 10 cm. Het oppervlak van deze laag is glad gestreken met een houten vorm over afrijlatten.

Aan het bovenstroomse en benedenstroomse uiteinde van de goot waren houten drempels op hoogte geplaatst. De onderkant van de houten vorm kwam overeen met de hoogte van de houten drempels. Vóór de meting werd het bed op hoogte aangelegd door de houten vorm herhaaldelijk over het bed te strijken, totdat een glad oppervlak met een uniforme helling was ontstaan. Er werd op gelet dat er geen afzonderlijk groot deeltje op het oppervlak lag bij het begin van het experiment ('Care was taken that no isolated large particle remain on the surface'). Uit dit citaat blijkt dat het bed telkens zeer zorgvuldig was aangelegd.



Figuur 3-4 kantelgoot van onderzoek Paintal

Het transport van steen en gravel is gemeten door een sedimentvang te gebruiken. Deze sedimentvang was geplaatst aan het stroomafwaartse einde van de stroomgoot en bestond uit een abrupte vergroting van het profiel. Het bed in de sedimentvang lag 13 cm lager dan het bed van het meetgebied. Er zijn experimenten uitgevoerd met 5 bodemmateriaal, zie tabel 3-1.

series	bed- materiaal	afmeting [mm]	stand. deviatie [mm]	sferische coëfficiënt [-]	vorm	relatieve dichtheid [-]
A	I	22.2	1.07	0.40	sub-rounded	1.65
B	II	22.2	1.57	0.42	to sub angular	1.65
C	III	22.2	2.7	0.44	„	1.65
D	IV	7.95	1.1	0.41	„	1.65
E	V	2.5	1.08	0.45	„	1.65

Tabel 3-1 kenmerken granulair materiaal onderzoek Paintal (1969)

• Correcties Waterloopkundig Laboratorium

Het Waterloopkundig Laboratorium heeft in een onderzoek de meetgegevens van Paintal gecorrigeerd op viskeuze effecten. De metingen van de experimenten met bedmateriaal V zijn aangepast omdat de bodem niet hydraulisch ruw was. De bodemtransportformule luidt na correctie als volgt:

$$q_{s*} = 1.64 \cdot 10^{10} \Psi^{10.86} \quad \text{voor } \Psi < 0.085 \quad (3-18)$$

In figuur 3-5 is deze formule uitgezet, de formule is aangeduid als correctie W.L. 1. Voor meer informatie over deze correctie wordt verwezen naar rapport M1115.

In rapport Q2395.40 van het Waterloopkundig Laboratorium wordt de formule van Van Rijn (1987) gefit op de meetdata van Paintal. Deze formule luidt als volgt:

$$q_{sb*} = \alpha d_*^{-0.3} \bar{T}^{2.1} \quad (3-19)$$

$$d_* = d_{50} \left(\frac{g\Delta}{\nu} \right)^{1/3} \quad (3-20)$$

$$\bar{T}^{2.1} = \left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right)^{2.1} = \left(\frac{\sigma_\tau}{\tau_c} \right)^{2.1} \left[- \int_{-\infty}^{-\tau_c} \left(\frac{\tau - (-\tau_c)}{\sigma_\tau} \right)^{2.1} F(\tau) d\tau + \int_{\tau_c}^{\infty} \left(\frac{\tau - \tau_c}{\sigma_\tau} \right)^{2.1} F(\tau) d\tau \right] \quad (3-21)$$

$$F(\tau) = \frac{1}{\sigma_\tau \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\tau - \bar{\tau}}{\sigma_\tau} \right)^2 \right\} \quad (3-22)$$

$$\bar{\tau}_c = \bar{\Psi}_c \rho g \Delta d \quad (3-23)$$

$$\tau_c = 1.5 \bar{\tau}_c \quad (3-24)$$

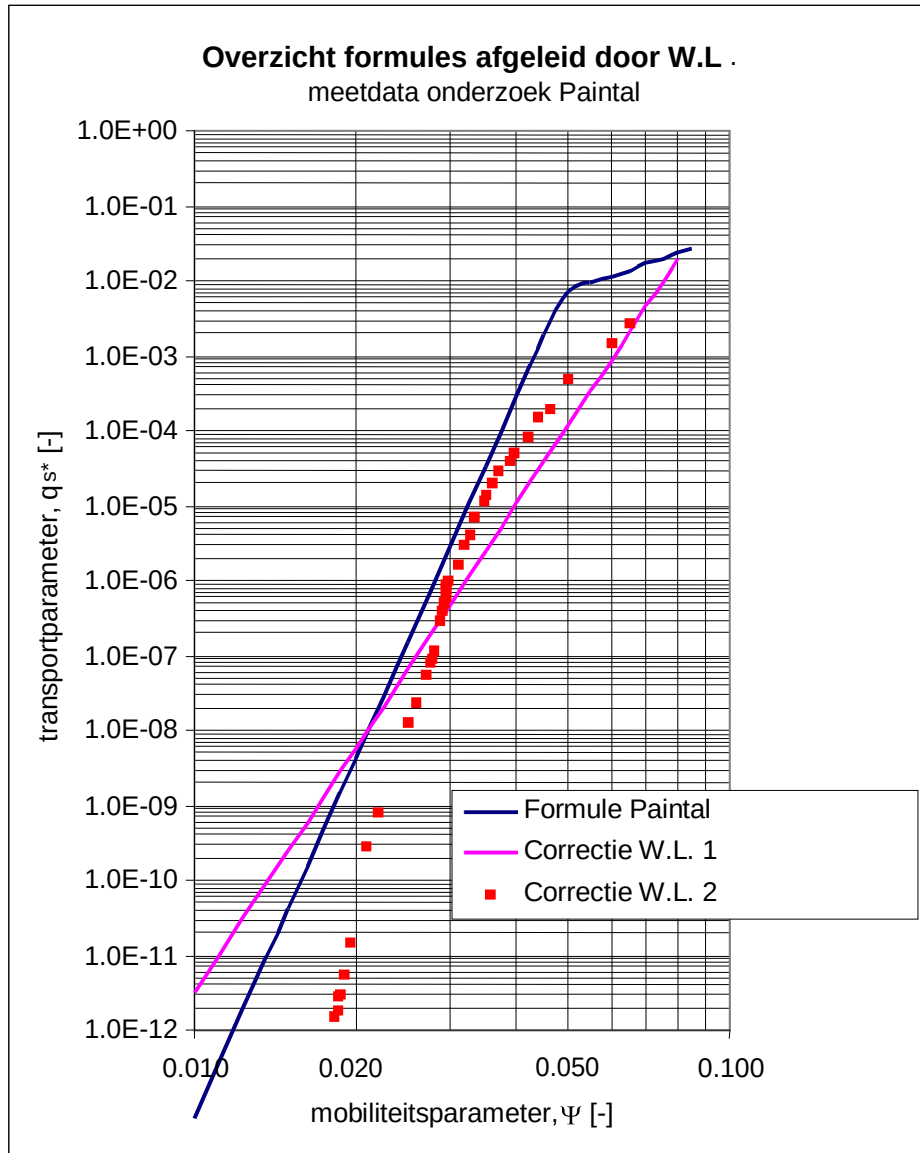
$$\sigma_\tau = 0.4 \bar{\tau} \quad (3-25)$$

waarbij

q_{sb*}	: dimensieloze bulkvolume transport [-]
α	: calibratie parameter [-]
d_*	: dimensieloze korrelparameter [-]
$F(\tau)$	: kansverdeling van schuifspanning [-]
T	: instantane transport stage parameter van Van Rijn [-]
ν	: kinematische viscositeit van water [m ² /s]
τ	: instantane schuifspanning [N/m ²]
τ_c	: kritieke instantane schuifspanning [N/m ²]
$\bar{\tau}$	: tijdsgemiddelde schuifspanning [N/m ²]
$\bar{\tau}_c$	: tijdsgemiddelde kritieke schuifspanning [N/m ²]
σ_τ	: standaarddeviatie van instantane schuifspanning [N/m ²]

Afhankelijk van de mobiliteitsparameter wordt een waarde voor α en $\bar{\Psi}_c$ ingesteld.

De meetgegevens van serie D van dit onderzoek zijn te vinden in Bijlage IV. De resultaten van deze experimenten zullen worden vergeleken met de resultaten van dit onderzoek en het onderzoek van De Boer (1998). De verschillende formules afgeleid uit de meetgegevens van Paintal zijn te zien in figuur 3-5. In figuur 3-5 is de formule van Van Rijn, gefit met de meetgegevens van Paintal, uitgezet. De formule is aangeduid als correctie W.L. 2.



Figuur 3-5 formules samengesteld uit meetdata Paintal (1969)

3.4.2 De Boer (1998)

Bij het afstudeeronderzoek van De Boer (1998) is gekeken naar de geldigheid van de bestaande bodemtransportformules voor breuksteen en invloedsfactoren op het transport van stenen. Er zijn experimenten uitgevoerd in een stroomgoot van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft. De experimenten hadden als doel de kennis te vergroten omtrent het transport van stenen van een eindige granulaire bodemverdediging. Aandacht is besteed aan de invloedsfactoren van het transport van stenen en de ontwikkeling van schade van een eindige bodemverdediging bij transport van stenen. De volgende invloedsfactoren zijn tijdens de experimenten onderzocht:

- steenvorm
- tijdsduur van de belasting
- stapeling

De volgende conclusies zijn in het onderzoek van De Boer getrokken:

1. 'De huidige bodemtransportformules zijn niet vanzelfsprekend bruikbaar voor een stortstenen bodemverdediging'
2. 'De resultaten van de experimenten uitgevoerd voor dit onderzoek geven de volgende bodemtransportformule voor breuksteen:'

$$q_{s*} = 7.8 \cdot 10^3 \Psi^{7.5} \quad \text{voor } \Psi < 0.1 \quad (3-26)$$

Het bodemtransport is sterk gerelateerd aan de snelheid ($q_{s*} \propto u^{15}$). De mobiliteitsparameter en de transportparameter worden hieronder beschreven.

• Mobiliteitsparameter

De mobiliteitsparameter is in het onderzoek van De Boer bepaald met weerstandsrelatie (3-27). De schuifspanningssnelheid (u_*) is bepaald met de log-wet (3-28). De snelheid is bij elke meting op meerdere afstanden van de bodem bepaald in de as van de goot. Uit deze schuifspanningsnelheden werd een gemiddelde schuifspanningsnelheid berekend (3-29). De mobiliteitsparameter is als (3-30) gedefinieerd.

$$\tau_b = -\rho_w u_*^2 \quad (3-27)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = -\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (3-28)$$

$$\bar{u}_* = \frac{(u_{*1} + u_{*2} + \dots + u_{*m})}{m} \quad (3-29)$$

$$\Psi_{\text{DeBoer}} = \frac{\bar{u}_*^2}{\Delta g d_{50}} \quad (3-30)$$

waarbij

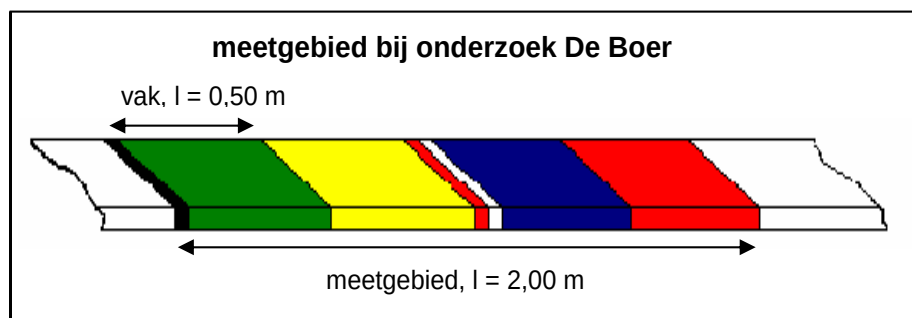
- | | | |
|-------------|---|---|
| m | : | aantal metingen snelheid [-] |
| $\bar{u}$ | : | gemeten gemiddelde snelheid [m/s] |
| $\bar{u}_*$ | : | gemiddelde schuifspanningssnelheid [m/s] |
| z_0 | : | lengtemaat voor de ruwheid van de bodem [m] |
| z | : | afstand tot de bodem [m] |
| κ | : | von Karmans-coëfficiënt [-] |

• Transportparameter

De transportparameter is gedefinieerd als het volume korrelmateriaal dat per eenheid van breedte en tijd wordt getransporteerd, zie formule (3-31).

$$q_{s*} = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta g d_{n50}^3}} \quad (3-31)$$

Tijdens dit onderzoek is gebruik gemaakt van de volgende meetmethode. De hoeveelheid transport van stenen is bepaald door middel van het tellen van het aantal verplaatste stenen. De telling is vereenvoudigd door de stenen in het meetgebied een kleur te geven. Elk vak heeft een aparte kleur in het testbed. Een voorbeeld van een gekleurd testbed staat in figuur 3-6. In deze figuur zijn 4 vakken te onderscheiden



Figuur 3-6 testbed De Boer (1998)

Na een stroombelasting werden de stenen die naar een ander vak zijn verplaatst geteld en per kleur geregistreerd. Vervolgens werd met deze gegevens bepaald hoeveel stenen een denkbeeldige raai waren gepasseerd. De vier denkbeeldige raaien in figuur 3-6 zijn de grenzen tussen twee vakken:

- Raai 1: grens groen vak - geel vak
- Raai 2: grens geel vak - blauw vak
- Raai 3: grens blauw vak - rood vak
- Raai 4: grens rood vak - uitloopgebied

Er zijn twee bodemmateriële gebruikt: grind en breuksteen, de afmetingen zijn te vinden in tabel 3-2, de parameters zijn als volgt gedefinieerd:

d_{n50} : nominale diameter van de korrel die de 50%-waarde van de zeefkromme overschrijdt [mm].

L : maximale axiale lengte van een korrel (de maximale afstand tussen twee punten van de korrel) [m].

d_m : minimale axiale lengte van een korrel (de minimum afstand tussen twee punten van de korrel) [m].

	Grind	Breuksteen
d_{n50} [mm]	10.0	9.9
d_{n15} [mm]	8.5	8.5
d_{n85} [mm]	13.0	11.0
d_{n85}/d_{n15} [-]	1.5	9.9
ρ_s [kg/m ³]	2675	2600
$L/d_m < 2$ [%]	50	44
$2,0 < L/d_m \leq 2,5$ [%]	24	20
$2,5 < L/d_m \leq 3,0$ [%]	12	16
$3,0 < L/d_m \leq 4,0$ [%]	11	15
$4,0 < L/d_m \leq 5,0$ [%]	2	3
$5,0 < L/d_m$ [%]	1	2

Tabel 3-2 kenmerken granulair materiaal onderzoek van De Boer (1998)

Bij dit onderzoek zijn ook experimenten uitgevoerd om de verplaatsingsafstand van korrels te bestuderen bij een granulair bed. De verplaatsingsafstand van een korrel van een granulair bed is afhankelijk van de stromingsbelasting en de vlakheid van het bed. De relatie tussen de dimensieloze verplaatsingslengte en de stromingsbelasting voor een los gestort granulair bed is als volgt:

$$\frac{X_{s,50}}{d_{n50}} = 1 \cdot 10^8 \Psi^{5.90} \quad \text{voor } 0.04 < \Psi < 0.07 \quad (3-32)$$

$$\frac{X_{s,90}}{d_{n50}} = 1 \cdot 10^6 \cdot \Psi^{3.55} \quad \text{voor } 0.04 < \Psi < 0.07 \quad (3-33)$$

Een vlakker bed levert grotere verplaatsingsafstanden op dan een ruwer bed. In Bijlage V zijn de meetgegevens van dit onderzoek te vinden die zullen worden vergeleken met de resultaten van dit onderzoek en het onderzoek van Paintal (1967). Voor meer informatie wordt verwezen naar De Boer (1998).

3.4.3 Englund en Hansen (1967)

Englund en Hansen (1967) hebben aan de hand van experimenten een bodemtransportformule opgesteld. Het transport kan worden berekend met de volgende stappen:

Neem de diepte (h') van de grenslaag door de korrelweerstand en bereken de effectieve mobiliteitsparameter (de mobiliteitsparameter die alleen bestaat uit de effectieve schuifspanning (Ψ')).

$$\Psi' = \frac{h' i}{\Delta d_{50}} \quad (3-34)$$

waarbij

h' : waterdiepte van de grenslaag t.g.v. de korrelweerstand

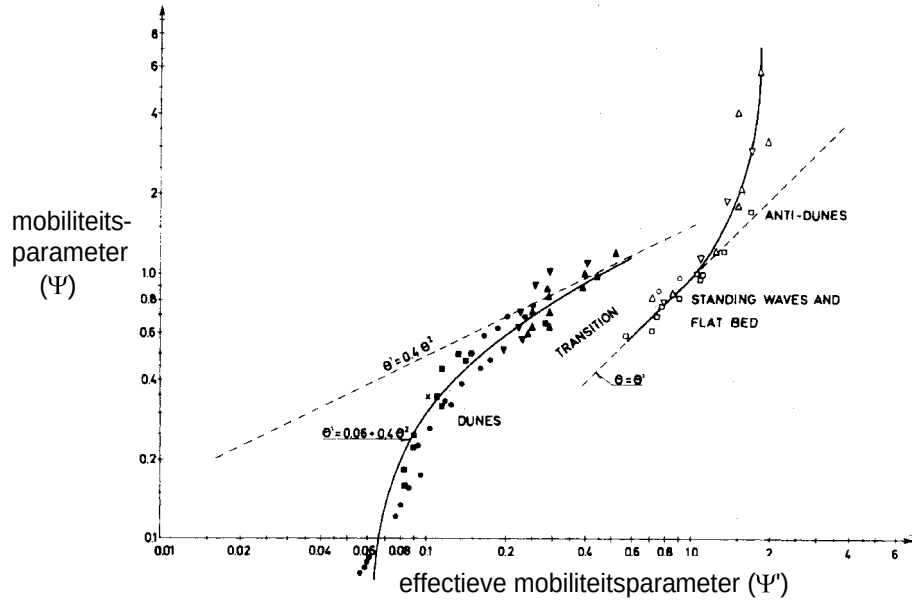
Bepaal de mobiliteitsparameter (Ψ) met figuur 3-7 of met formule (3-35).

$$\Psi' = \Psi_c + 0.4 \cdot \Psi^2 \quad (3-35)$$

De stabiliteitsparameter heeft de waarde $\Psi_c = 0.06$. Door de mobiliteitsparameter in de transportformule (3-36) te vullen kan het dimensieloos transport worden berekend.

$$q_{s*} = 0.1 \cdot \Psi^{5/2} \quad (3-36)$$

De maatgevende ruwheid die bij deze formule wordt gebruikt komt overeen met $k = 2d_{65}$. Het bodemtransport is bij deze formule sterk gerelateerd aan de snelheid ($q_{s*} \propto u^5$). In de praktijk wordt deze formule gebruikt met de gehele waterdiepte. De formule geeft dan goede resultaten wanneer vooral veel sediment in suspensie wordt getransporteerd. Dit is opvallend omdat deze transportformule is opgesteld voor transport aan de bodem en niet voor transport van sediment in suspensie.



Figuur 3-7 empirische relatie effectieve mobiliteitsparameter - mobiliteitsparameter van Engelund en Hansen (1967)

3.4.4 Meyer-Peter & Müller (1949)

Meyer-Peter and Müller (1949) hanteren een ribbelcoëfficiënt die de mobiliteitsparameter corrigeert. Deze ribbelcoëfficiënt wordt berekend uit de verhouding van de coëfficiënt van Chézy met de waarde van Nikuradse van het gehele bed en de coëfficiënt van Chézy met de waarde van Nikuradse van de zeefdiameter waarvoor 90% van de korrels kleiner zijn. De formule voor bodemtransport Meyer-Peter en Müller en de ribbelcoëfficiënt zijn respectievelijk als volgt gedefinieerd:

$$q_{s*} = (\mu \Psi - \Psi_c)^{3/2} \quad (3-37)$$

$$\mu = \frac{C}{C_{90}} = \frac{18 \log\left(\frac{12 \cdot h}{k}\right)}{18 \log\left(\frac{12 \cdot h}{k_{90}}\right)} \quad (3-38)$$

waarbij geldt:

$$\Psi = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho_w)gd} = \frac{\rho_w ghi}{(\rho_s - \rho_w)gd} = \frac{hi}{\Delta d} \quad (3-39)$$

$$q_{s*} = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta gd^3}} \quad (3-40)$$

μ : ribbelcoëfficiënt [-]
 k_{90} : Nikuradse-ruwheid met waarde d_{90} [m]

Uit formule (3-37) blijkt dat Meyer-Peter & Müller het transport van sediment verwaarlozen bij een gecorrigeerde mobiliteitsparameter lager dan 0.047 (de stabiliteitsparameter is $\Psi_c = 0.047$). Deze formulering is dus niet bruikbaar om transporten te voorspellen bij een lage mobiliteitsparameter. Het bodemtransport is bij deze formule sterk gerelateerd aan de snelheid ($q_{s*} \propto u^3$). Bij deze transportformule wordt gebruik gemaakt van twee ruwheden. De ruwheid van het gehele bed (korrelruwheid en vormruwheid) wordt gebruikt in de coëfficiënt van Chézy. De ruwheid van de korrel wordt direct verwerkt in k_{90} ($k_{90} = d_{90}$). Op deze manier wordt de waarde van de totale schuifspanning aan de bodem gecorrigeerd voor vormschuifspanning. Voor meer informatie wordt verwezen naar Frijlink (1952).

3.5 Onderzoekspunten

De bodemtransportformules die zijn besproken in paragraaf 3.4 bevatten een mobiliteitsparameter en een transportparameter. Deze definities zullen ook worden gebruikt bij dit onderzoek. De bodemtransportformules van Meyer-Peter & Müller (1949) en Engelund & Hansen (1967) verwaarlozen daarbij de lage transporten, de ondergrens wordt daarbij stabiliteitsparameter of kritieke mobiliteitsparameter genoemd. Dit wordt niet gebruikt bij dit onderzoek.

De ruwheid van een alluviaal bed wordt gebruikelijk gesplitst in een ruwheid van de korrel en een ruwheid van de vorm van het bed. Als maatgevende ruwheid voor het transport wordt alleen de ruwheid van de korrels gebruikt. In de literatuur zijn meerdere waarde gevonden voor de ruwheid van de korrel. De aanbevolen ruwheid varieert van $k=1.25d_{35}$ (Ackers and White 1973) tot $k = 5.1d_{84}$ (Mahmood 1971). Einstein and Barbarossa (1952) gebruikten $k=d_{65}$, Engelund en Hansen (1967) $k = 2d_{65}$, Hey (1979) $k = 3.5d_{65}$ etc. De mobiliteitsparameter waarbij alleen de ruwheid van de korrels wordt gebruikt heet effectieve mobiliteitsparameter. Wanneer transport wordt voorspeld van een vlak bed komt de mobiliteitsparameter overeen met de effectieve mobiliteitsparameter. In dit onderzoek zal alleen transport worden gemeten bij een vlak bed, zoals bij het onderzoek van Paintal. Het is dus niet nodig om de ruwheid van het bed te splitsen in een ruwheid van de korrels van het bed en een ruwheid van de vorm van het bed. De ruwheid van de vorm van het bed is verwaarloosbaar. De mobiliteitsparameter en de transportparameter zijn respectievelijk als (3-41) en (3-42) gedefinieerd.

$$\Psi = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho_w)gd_{50}} = \frac{R_b i_b}{\Delta d_{50}} \quad (3-41)$$

$$q_{s*} = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}} \quad (3-42)$$

Hoofdstuk 4 Opzet van de experimenten

4.1 Inleiding

Door experimenten uit te voeren wordt informatie verkregen over de invloed van de eigenschappen van het materiaal en de hydraulische belasting op het transport van bodemmateriaal. Het doel van de experimenten is om meetgegevens te verkrijgen van transport van bodemmateriaal bij dezelfde omstandigheden als in het onderzoek van Paintal. Door dezelfde omstandigheden te scheppen bij de experimenten zullen de meetgegevens van transport ongeveer overeen moeten komen. De verschillen tussen de resultaten van de onderzoeken van Paintal en De Boer kunnen hiermee worden verklaard. Op onderstaande vragen leveren de experimenten informatie op:

- Hoeveel transport van stenen vindt er plaats voor verschillende stromingsbelastingen en komt dit overeen met de huidige transportformules?
- Welke invloed heeft de vorm van de stenen op de stabiliteit?
- In welke mate verandert het transport in de tijd bij een eenparige stroming?

Het bodemmateriaal heeft bij de verschillende onderzoeken ongeveer dezelfde afmetingen en vorm en het bed werd telkens met dezelfde procedure aangelegd. Het transport van bodemmateriaal werd gemeten met verschillende methoden. De methode van meten is in deze onderzoeken verschillend maar het transport van bodemmateriaal is eenduidig gedefinieerd. 'Het bodemmateriaal dat door een raai verplaatst'.

De structuur van de experimenten is beschreven in paragraaf 4.2. De experimenten zijn uitgevoerd in de lange kantelgoot van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft. In deze kantelgoot is een granulair bed aangelegd dat hydraulisch werd belast. De opbouw en het bodemmateriaal zijn beschreven in paragraaf 4.3. De methode van aanleggen van het bed in de stroomgoot, de methode van meten van transport en het noteren en verwerken van meetgegevens zijn beschreven in paragraaf 4.4. De interpretatie van de metingen van het transport in de experimenten is beschreven in Hoofdstuk 5.

4.2 Structuur van de experimenten

De structuur van de experimenten is in de loop van het onderzoek ontwikkeld. Afhankelijk van de resultaten in het onderzoek zijn nieuwe experimenten opgesteld en uitgevoerd. De experimenten kunnen worden onderverdeeld naar de te bestuderen invloed.

Invloed vorm van bodemmateriaal op transport

Er zijn experimenten uitgevoerd met verschillend bodemmateriaal: grind en breuksteen. De invloed van de vorm van het materiaal is onderzocht door voor beide materialen dezelfde experimenten uit te voeren. De afmetingen en de vorm van het grind komen overeen met het bodemmateriaal dat bij het onderzoek van Paintal is gebruikt. Experiment 1 tot en met 4 is uitgevoerd met grind en experiment 5 tot en met 8 is uitgevoerd met breuksteen.

Invloed tijdsduur van belasten op transport

Bij alle experimenten die zijn uitgevoerd kan de verandering van het transport in de tijd bij constante belasting worden onderzocht. Er zijn 2 extra experimenten uitgevoerd met een langdurige belasting. Tijdseffecten na langere duur kunnen met experiment 3 en 7 worden onderzocht.

Invloed verhouding waterdiepte en korreldiameter

Er zijn twee experimenten uitgevoerd met een andere verhouding waterdiepte/korreldiameter dan bij de andere experimenten. De verhouding waterdiepte/korreldiameter is bij deze experimenten, experiment 4 en 8, hetzelfde als bij het onderzoek van Paintal.

De tijdsduur van de metingen is gekoppeld aan de periode die nodig is om een statistisch eenduidige meting te krijgen. Bij elk experiment zijn zes metingen van één uur uitgevoerd. In de experimenten waarbij het transport van sediment is onderzocht in de tijd zijn telkens drie metingen achtereenvolgens uitgevoerd waarbij de stromingsbelasting constant werd gehouden.

De meetgegevens van de experimenten die zijn uitgevoerd met grind kunnen als referentie dienen voor de meetgegevens die door Paintal zijn verkregen. In tabel 4.1 is een overzicht gegeven van de experimenten met de afzonderlijke doelstelling van elk experiment. De interpretatie van de metingen zijn te vinden in Hoofdstuk 5.

Exp. nr.	bodem materiaal	doel van het experiment
1	grind	relatie van hydraulische belasting en transport van grind verkrijgen; referentie met Paintal.
2	grind	relatie van hydraulische belasting en transport van grind verkrijgen; referentie met Paintal en reproduceerbaarheid.
3	grind	invloed van lange duur belasten op relatie hydraulische belasting en transport van grind.
4	grind	invloed van verschillende stroming met vergelijkbare hydraulische belasting op de bodem; referentie met Paintal
5	breuksteen	relatie van hydraulische belasting en transport van breuksteen verkrijgen referentie met experiment 1 en 2.
6	breuksteen	relatie van hydraulische belasting en transport van breuksteen; referentie met experiment 1 en 2 en reproduceerbaarheid.
7	breuksteen	invloed van lange duur belasten op relatie hydraulische belasting en transport van breuksteen verkrijgen; referentie met experiment 3.
8	breuksteen	invloed van verschillende stroming met vergelijkbare hydraulische belasting op de bodem; referentie met experiment 4

Tabel 4-1 overzicht experimenten

4.3 Proefopstelling

4.3.1 Indeling stroomgoot

De stroomgoot waarin de experimenten zijn uitgevoerd, is een constructie van staal met glazen zijwanden. De stroomgoot heeft een rechthoekige doorsnede en kan in de lengterichting worden gekanteld. De stroomgoot heeft een lengte van 15,0 m, een breedte van 0,40 m en een hoogte van 0,40 m. In figuur 4-1 is de kantelgoot geschematiseerd weergegeven.

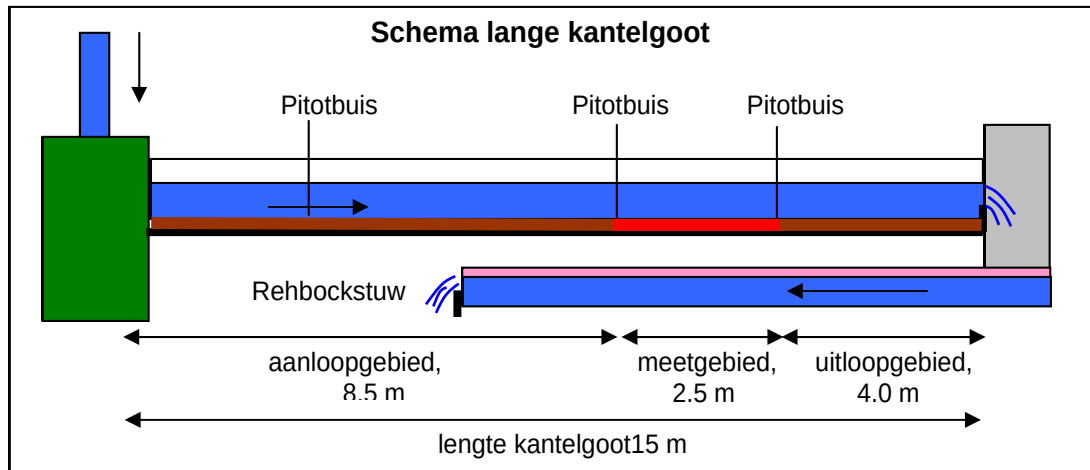
De bodem is tijdens de experimenten bedekt met stortsteen en is op te delen in een aan- en uitloopgebied en een meetgebied. De bodem bestaat uit een vaste basis met bovenop losse stenen. De basis is opgebouwd uit zand en afgedekt met stenen die met cement zijn vastgezet. De stenen, die met cement zijn vastgezet, beletten dat stenen gaan schuiven doordat de ondergrond ruw is. Het aan- en uitloopgebied bestaat uit een basislaag van 5 cm dik en een laag losse stenen van 1 cm dik. Het meetgebied bestaat uit een basislaag van 2 cm dik en een laag losse stenen van 4 cm dik. Een laag losse stenen van 4 cm dik heeft alleen een functie in het meetgebied. Om deze reden hebben de andere gebieden een dunnere laag stenen die los liggen.

In het aanloopgebied ontwikkelt de stroming zich tot een uniforme stroming. Om de stroming als uniform te kunnen beschouwen is een stroomlengte van ca. 40 keer de waterdiepte vereist. Het aanloopgebied heeft een lengte van 8,5 m (de maximale waterdiepte is ongeveer 0,2 m).

Het meetgebied ligt van 8,5 m tot 11,0 m afstand vanaf het begin van de goot en is verdeeld in twee typen stroken.

- De middenstrook: deze strook ligt in de lengteas van de goot en heeft een breedte van 0,10 m. In deze strook is er geen invloed van de zijwanden op de stroming.
- De wandstroken: deze stroken liggen aan de wanden van de kantelgoot en hebben een breedte van 0,15 m. In deze stroken hebben de zijwanden invloed op de stroming. Vanwege de invloed van de wanden op de stroming, worden de stenen die door de raai verplaatsen vanuit de stroken bij de wand niet meegenomen in het gemeten transport.

De minimum lengte van het meetgebied is afhankelijk van de verplaatsingsafstanden van de korrels. Om te voorkomen dat te weinig transport wordt gemeten doordat het meetgebied te kort is, moet het meetgebied minimaal enkele keren de verplaatsingsafstand van de korrels zijn. De verplaatsingsafstand kan echter niet nauwkeurig worden berekend. Als de formulering van De Boer (3-38) voor verplaatsingsafstand wordt gebruikt is de verplaatsingsafstand $X_{s,90} = 1 \cdot 10^6 \cdot \Psi^{3.55} \cdot d_{n50} = 0.63$ m. De lengte van het meetgebied is 2,5 m zodat aan deze voorwaarde wordt voldaan zelfs wanneer de verplaatsingsafstand enkele keren wordt onderschat.



Figuur 4-1 schema van de lange kantelgoot

De laag van losse stenen is twee keer aangelegd, één keer met grind en één keer met breuksteen. De laag van losse stenen in de verschillende gebieden bestaan telkens uit dezelfde type stenen. De breuksteen in het meetgebied is geverfd. De stroken in het meetgebied hebben verschillende kleuren; het transport van stenen tussen de verschillende stroken kan hiermee worden bepaald. Het uitloopgebied ligt op 11,0 m afstand van de bovenstroomse rand van de goot. De invloed van de stuw is alleen in dit gebied merkbaar.

4.3.2 Bodemmateriaal

Voor de experimenten zijn twee granulaire materialen gebruikt met verschillende vorm: grind (very round) en breuksteen (irregular). Voor een overzicht van de verschillende vormfactoren wordt verwezen naar Bijlage VII. De afmetingen van het granulaire materiaal komen overeen met de afmetingen van het bedmateriaal bij experimenten (serie D) van het onderzoek van Paintal (1969, $d_{50} = 7.95$ mm). In het onderzoek van Paintal zijn vijf verschillende soorten bodemmateriaal gebruikt. De resultaten van dit onderzoek worden slechts met de resultaten van de experimenten met één bodemmateriaal vergeleken.

De ondergrens van de korreldiameter wordt bepaald door viskeuze effecten; de bodem moet hydraulisch ruw zijn. De bovengrens van de korreldiameter is afhankelijk van het benodigde transport van bodemmateriaal. De kenmerken van de gebruikte materialen zijn in figuur 4-2 en tabel 4-2 te zien. Voor bodemmateriaal van breuksteen kan de mediaan van de nominale korreldiameter worden omgerekend naar de mediaan van de korreldiameter met formule (4-1). Bij gebrek aan een relatie tussen de mediane korreldiameters bij grind, zal deze relatie hier ook voor worden gebruikt.

$$d_{n50}/d_{50} = 0.84 \quad (4-1)$$

In tabel 4-2 zijn de parameters als volgt gedefinieerd:

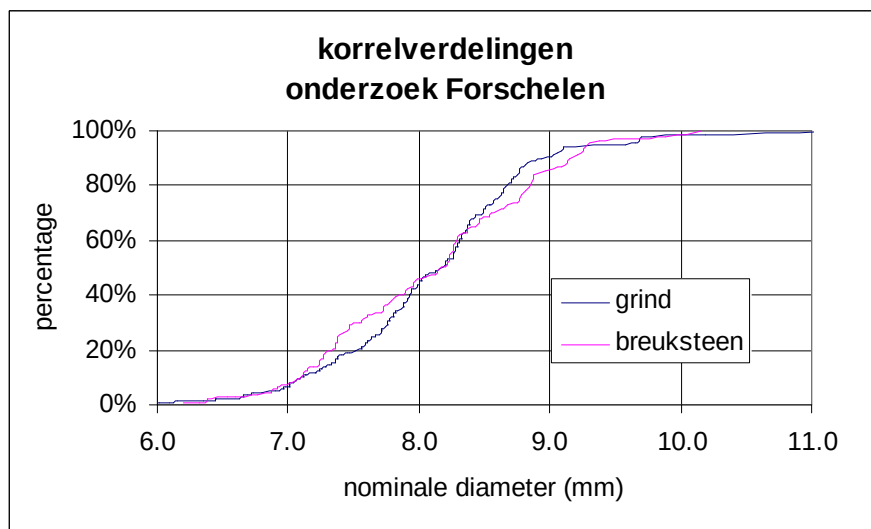
d_{n50} : nominale diameter van de korrel die de 50%-waarde van de zeefkromme overschrijdt [m].

L : maximale axiale lengte van een korrel (de maximale afstand tussen twee punten van de korrel) [-].

d_m : minimale axiale lengte van een korrel (de minimum afstand tussen twee punten van de korrel) [-].

bodemmateriaal		grind	breuksteen
d_{n50}	[mm]	8.2	8.2
d_{n15}	[mm]	7.3	7.2
d_{n85}	[mm]	8.8	9.0
d_{n85}/d_{n15}	[-]	1.2	1.25
ρ_s	[kg/m ³]	2625	2675
$L/d_m < 2$	[%]	53	41
$2,0 < L/d_m \leq 2,5$	[%]	29	27
$2,5 < L/d_m \leq 3,0$	[%]	10	17
$3,0 < L/d_m \leq 4,0$	[%]	6	15
$4,0 < L/d_m \leq 5,0$	[%]	1	0
$5,0 < L/d_m$	[%]	1	0

Tabel 4-2 kenmerken granulair materiaal



Figuur 4-2 korrelverdelingen gebruikt bodemmateriaal

4.3.3 Meetinstrumenten

Tijdens elk experiment zijn de waarden van de volgende parameters gemeten:

- Waterdiepte
- Debiet
- Bodemverhang
- Steentransport

Om de waarden van de parameters te meten die de uniforme stroming in de kantelgoot karakteriseren (zie paragraaf 2.2), zijn de volgende meetinstrumenten gebruikt:

Pitotbuizen

Met een pitotbuis kan de stijghoogte en/of de energiehoogte in een punt worden gemeten. Voor dit onderzoek is alleen gebruik gemaakt van het meten van de stijghoogte. Door een pitotbuis in de vloeistof te plaatsen, kan door het principe van communicerende vaten, de waterhoogte worden afgelezen. Wanneer de opening in de pitotbuis die in de vloeistof hangt, klein is, worden de snelle schommelingen van de waterstand niet gemeten. Hierdoor is het mogelijk om met een pitotbuis nauwkeurige metingen te verrichten. De nauwkeurigheid van de stijghoogtemeting, wordt geschat op 0,5 mm. De pitotbuizen zijn op 2,5 m, 8,5 m en 11,5 m afstand van de bovenstroomse rand geplaatst.

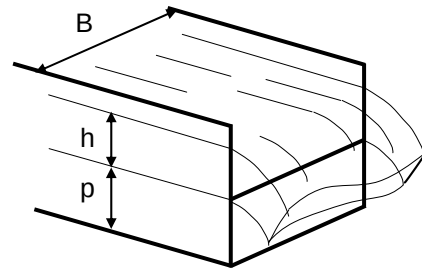
Rehbockstuw :

Het debiet in de goot werd bepaald met de Rehbockstuw in de retourgoot (figuur 4-3). Door de waterstand vóór de Rehbockstuw te meten met behulp van een peilnaald en deze vervolgens in de Rehbockvergelijking in te vullen, kan het debiet nauwkeurig bepaald worden. De Rehbockvergelijking, formule (4-2) is als volgt gedefinieerd:

$$Q = \frac{2}{3} C_e b h_e^{3/2} \sqrt{2g} \quad (4-2)$$

waarbij geldt:

- Q : debiet door de stroom- en retourgoot (m^3/s)
- C_e : afvoercoëfficiënt ($0.602 + 0.083h/p$)
- h : gemeten waterhoogte t.o.v. de stuwhoogte (m)
- p : hoogte van de stuw ten opzichte van de bodem van de retourgoot (0.25 m)
- b : breedte van de retourgoot (0.44 m)
- h_e : evenwichtswaterhoogte ($h + 0.0012 \text{ m}$)



Figuur 4-3 schema Rehbockstuw

Peilnaalden

De peilnaald is gebruikt voor het bepalen van de waterhoogte voor de Rehbockstuw. De meetfout van een peilnaald wordt geschat op 0.5 mm.

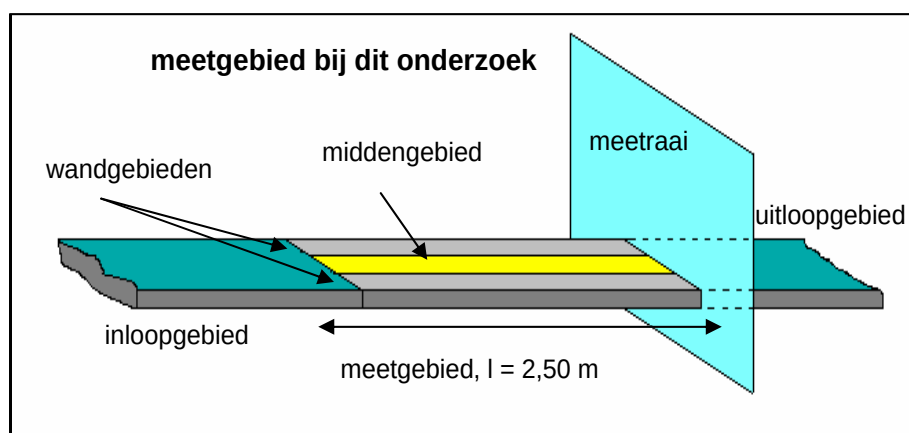
Meting verhang

Het bodemverhang kan worden afgelezen op de goot aan de hand van een geschaalde meetlat. Het bereik van het bodemverhang is van $+2 \cdot 10^{-3}$ tot $-1 \cdot 10^{-2}$. De nauwkeurigheid van instellen van het bodemverhang is geschat met een standaard deviatie van $3 \cdot 10^{-5}$.

Steentransport

Het transport van granulair materiaal is gemeten aan de hand van het tellen van stenen die door een verticaal vlak verplaatsen. Dit verticale vlak, oftewel raai genoemd, wordt belicht met diaprojectoren. Wanneer een steen door de raai verplaatst, dan wordt deze steen belicht. Het is mogelijk onderscheid te maken tussen stenen die door de raai verplaatst worden en stenen die niet door de raai verplaatst worden. Door het aantal stenen te noteren die door de raai werden verplaatst, kan het transport worden berekend. Bij deze methode van meten wordt de stroming in de goot niet beïnvloed. In figuur (4-4) is de raai te zien in de stroomgoot

In verband met de wandwrijving in de goot wordt alleen het gebied gebruikt in de lengte van de goot, als maatgevend transport bij de ingestelde hydraulische belasting. De raai die door het gebied loopt, in de as van de goot, was 0,10 m breed.



Figuur 4-4 meetgebied en raai bij onderzoek Forschelen

4.4 Uitvoeringsprocedure

4.4.1 Voorbereiden en uitvoeren metingen

Het bed is bij elke meting op hoogte aangelegd door met een plank over afrijlatten te strijken. De afrijlatten zijn tegen de wanden geplaatst, op de gewenste hoogte van het bed. Voor elke meting is met een plank herhaaldelijk heen en weer gestreken over het bed totdat er een vlak bed was aangelegd. De afstrijkplank had een verhoogde onderkant boven het bed zodat alleen de stenen die 4 mm boven de afstrijkplatten uitstaken, werden weggeduwd. Na het op hoogte brengen van het bed, wordt het bed korte tijd voorbelast. Tijdens het voorbelasten moeten er opnamen worden gemaakt van het lichtscherm samen met de meetstok. Op de meetstok staat de afstand ten opzichte van de wand aangegeven. Om in de opnamen achteraf de raai te kunnen indelen in verschillende gebieden, middenstrook en wandstroken, moet de afstand in de raai bekend zijn. Na de opname van de meetstok in het lichtscherm wordt de voorbelasting opgevoerd tot de vereiste grootte, waarna de meting kan worden uitgevoerd.

Tijdens de meting worden met een digitale camera opnamen gemaakt van het lichtscherm. Het lichtscherm wordt gemaakt door met twee diaprojectoren een vlak te verlichten. De positie van de camera moet exact gelijk zijn aan de positie van de camera tijdens de opname met de meetstok. Op deze manier is het transport van stenen in te delen in verschillende stroken. Tijdens de gehele meting wordt er een klok in beeld gehouden, zodat het verplaatsen van een steen aan een tijdstip kan worden gekoppeld.

4.4.2 Genoteerde gegevens verplaatsen van korrels

Na afloop van de meting worden de opnamen bekeken en wordt het aantal verplaatste stenen geteld. Bij de analyse van de beelden is het lichtscherm ingedeeld in 3 gebieden (linker wandstrook (l), middenstrook (m) en rechter wandstrook(r)). Het tijdstip van verplaatsen en de strook worden genoteerd, zie tabel 4-3.

Tijdstip van verplaat sen (s)	Gebied						
5	l	116	r	287	m	411	r
10	m	129	r	295	m	418	m
15	m	130	r	305	m	467	m
36	m	131	m	305	m	586	m
59	m	132	r	310	m	593	m
76	m	162	m	314	l	596	m
77	r	203	l	353	l	672	m
81	m	221	m	359	r	674	r
84	m	242	m	402	m	678	m
95	r	248	l	405	l	713	m

Tabel 4-3 voorbeeld genoteerde gegevens van meting

waarbij

l : linker strook (bij de wand)
m : middenstrook (in de as van de goot)
r : rechter strook (bij de wand)

Na afloop van de metingen van experiment 6 tot en met 8, zijn ook alle stenen in de goot geteld, die door het lichtscherm zijn verplaatst. Er is gelet op de kleur van de stenen (wit of groen) en de plaats (linker wandgebied, middengebied of rechter wandgebied). De kleur kan niet duidelijk worden waargenomen tijdens de analyse van de opnamen vanwege de felle belichting. In tabel 4-4 staat een voorbeeld van gegevens die zijn genoteerd van een meting.

van: naar:	stenen van strook in het midden			stenen van stroken bij de wanden		
	linker wand- strook	midden- strook	rechter wand- strook	linker wand- strook	midden strook-	rechter wand- strook
exp. 8.1	1	6	0	3	1	2
exp. 8.2	0	8	0	7	12	4
exp. 8.3	1	28	1	10	8	18
exp. 8.4	4	17	3	23	7	25
exp. 8.5	3	16	4	15	8	9
exp. 8.6	47	150	56	102	52	82

tabel 4-4 genoteerde stenen

Door het aantal stenen te noteren dat naar een aanliggende strook is verplaatst, is het mogelijk aan te geven hoe groot het transport is dwars op de hoofdstroomrichting. Het transport dwars op de richting van de stroom heeft invloed op de hoeveelheid transport die wordt gemeten door de raai in de middenstrook. In paragraaf 5.3 zullen de resultaten van deze metingen worden beschreven. In figuur 4.5 is een afbeelding te zien van stenen die naar een ander gebied zijn verplaatst.



Figuur 4-5: afbeelding van bed na de meting

4.4.3 Berekenen van parameters en coëfficiënten

Voor elke meting worden uit de gemeten gegevens het transport, de stromingsbelasting en de ruwheid berekend, uitgedrukt in respectievelijk de transportparameter, de mobiliteitsparameter en de coëfficiënt van Chézy. Deze parameters werden berekend aan de hand van de volgende schema's:

Transportparameter (q_{s*})

stap 1	volume transport per eenheid van breedte en tijd, q_s [$m^3/m/s$]	
	gemeten	aantal stenen verplaatst door de raai tijdens de meting, s [-] mediaan korreldiameter, d_{50} [m] tijd, t [s] breedte van de raai, b [m]
	formule	$q_s = \frac{s \cdot d_{50}^3}{b \cdot t}$
stap 2	dimensieloze transportparameter, q_{s*} [-]	
	gemeten	mediaan korreldiameter, d_{50} [m] relatieve dichtheid, Δ [-] gravitatieversnelling, g [m/s^2]
	constante formule	$q_{s*} = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}}$

Hydraulische straal van de bodem, R_b [m]

stap 1	gemiddelde snelheid, $\bar{u}$ [m/s]	
	gemeten	waterdiepte, h [m] debiet, Q [m^3/s] breedte goot, B [m]
	formule	$\bar{u} = \frac{Q}{B \cdot h}$
stap 2	hydraulische straal van de wand, R_w [m]	
	gemeten bepaald	verhang, i [-] manning-coëfficiënt wandruwheid, n_w [$m^{1/3}/s$] gemiddelde snelheid, $\bar{u}$ [m/s]
	formule	$R_w = \left(\frac{\bar{u} n_w}{\sqrt{i}} \right)^{3/2}$
stap 3	hydraulische straal van de bodem, R_b [m]	
	gemeten	waterdiepte, h [m] breedte goot, B [m]
	bepaald formule	hydraulische straal van de wand, R_w [m] $R_b = h \left(1 - \frac{2 \cdot R_w}{B} \right)$

Mobiliteitsparameter, Ψ [-]

gemeten	verhang, i [-] relatieve dichtheid, Δ [-] mediaan korreldiameter, d_{50} [m]
bepaald	hydraulische straal van de bodem, R_b [m]
formule	$\Psi = \frac{R_b i}{\Delta d_{50}}$

Coëfficiënt van Chézy, C [$m^{1/2}/s$]

gemeten	verhang, i [-]
bepaald	hydraulische straal van de bodem, R_b [m] gemiddelde snelheid, $\bar{u}$ [m/s]
formule	$C = \frac{\bar{u}}{\sqrt{R_b i}}$

Hoofdstuk 5 Interpretatie van de experimenten

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de experimenten besproken die bij dit onderzoek zijn uitgevoerd. De meetgegevens van de experimenten zijn te vinden in Bijlage III.

In elke paragraaf van dit hoofdstuk worden één of meerdere verbanden beschreven die zijn afgeleid uit de empirische gegevens van de experimenten. De volgende verbanden worden behandeld:

- tijdsafhankelijkheid
- transport van grind en breuksteen
- transportverdeling over de breedte van de goot

In paragraaf 5.2 wordt het transport van bodemmateriaal bekeken in de loop van de meting. Wanneer een bed wordt belast, verandert het transport van bodemmateriaal in de tijd. Bij begin van belasten wordt veel bodemmateriaal verplaatst en na verloop van tijd wordt dit minder. Dit verschijnsel wordt in de praktijk onderschreven en kan worden verklaard door de opbouw van de toplaag te bekijken. Het is echter niet duidelijk in welke mate het transport afneemt; hoeveel daalt het transport van bodemmateriaal tijdens belasten?

De invloed van de vorm van het bodemmateriaal op het transport wordt beschreven in paragraaf 5.3. Er zijn experimenten uitgevoerd met bodemmateriaal van grind en breuksteen onder dezelfde omstandigheden, gelijke hydraulische belastingen, korrelverdelingen, bodemopbouw etc. De verschillen in waarden van transport kunnen rechtstreeks worden toegeschreven aan de invloed van de vorm van het bodemmateriaal. De resultaten van deze experimenten worden in Hoofdstuk 6 gebruikt als referentie met de resultaten van de onderzoeken van Paintal (1969) en De Boer (1998).

In paragraaf 5.4 wordt de verdeling van het transport in de goot beschreven. De stroming in de goot kan niet over de gehele breedte van de goot worden beschouwd als eenparig. Het snelheidsprofiel bij de wanden verschilt met het snelheidsprofiel in de as van de goot en door de wrijving met de wanden wordt er ook secundaire stroming opgewekt in de goot. Dit heeft echter geen invloed op de resultaten van de experimenten van dit onderzoek. In dit onderzoek is alleen het transport verwerkt dat is gemeten in de binnenste 10 cm van de as van de goot. Het snelheidsprofiel kan in dit deel van de goot als eenparig worden beschouwd; de secundaire stroming kan in de as van de goot ook worden verwaarloosd. De secundaire stroming is maximaal in de hoeken van de stroomgoot: 3% van de snelheid in de hoofdrichting (zie paragraaf 2.5).

Het is toch interessant om te kijken hoe het transport van bodemmateriaal is verdeeld over de breedte van de stroomgoot om twee redenen. Mocht het transport hoofdzakelijk in de as van de goot voorkomen, dan is de verdeling van transport over de breedte niet uniform. Dit heeft invloed op het resultaat van onderzoeken waarbij wel de gehele breedte van de goot is gebruikt om transport te onderzoeken. Een andere reden is de invloed op het verwerken van het transport in alleen de as van de goot. Het transport is in dit onderzoek alleen gemeten door een raai, vanuit een meetgebied in de as van de goot. Wanneer er bodemmateriaal verplaatst dwars op de hoofdrichting kan hierdoor het transport worden over- of onderschat. Er wordt meer of minder transport gemeten doordat er stenen dwars op de hoofdrichting verplaatsen en daardoor onterecht (niet) worden meegenomen in de hoeveelheid transport bij een constante hydraulische belasting.

In paragraaf 5.5 worden de resultaten van de gevoeligheidsanalyse besproken die is toegepast om de betrouwbaarheid van de resultaten te kunnen aangeven. Het is in elk onderzoek onvermijdelijk dat er meetfouten worden gemaakt. Deze meetfouten hebben invloed op de resultaten. De invloeden van deze meetfouten op de betrouwbaarheid van de resultaten zijn afhankelijk van de gevoeligheid van het resultaat voor de nauwkeurigheid van de verschillende parameters.

5.2 Tijdsafhankelijkheid

5.2.1 Rijpingsproces

De methode van aanleggen van het bed heeft veel invloed op het transport bij begin van belasten. Bij de aanleg worden namelijk de pakking en de ruwheid bepaald. Om tijdens een onderzoek telkens dezelfde invloed te kunnen meten, moet de pakking en de ruwheid van het bed bij elk experiment gelijk zijn. Door steeds dezelfde methode te hanteren van aanleggen van het bed worden de resultaten van de metingen weliswaar eenduidiger maar er is telkens toch een grote spreiding van gemeten transport. Ondanks het gebruik van één methode varieert het transport bij vergelijkbare hydraulische belasting. Dit kan worden verklaard door te kijken naar de afzonderlijke stenen.

Bij de aanleg van de toplaag worden de korrels willekeurig op een onderliggende laag stenen geplaatst. Bij het beschrijven van de stabiliteit van een laag wisselt de hydraulische belasting per korrel. Dit kan als volgt worden verklaard. Ten eerste zijn de krachten die op een steen worden uitgeoefend niet constant maar fluctueren ze. Ten tweede, de krachten die de steen verplaatsen zijn afhankelijk van de vorm en de ligging van de steen. Stenen die verder boven het bed uitsteken, zullen meer belasting ondervinden. Deze stenen zullen eerder verplaatsen.

Wanneer een bed hydraulisch wordt belast, worden vooral stenen verplaatst, die veel belasting ondervinden doordat ze meer boven het bed uit steken. Na verloop van tijd zijn deze stenen echter verplaatst, waardoor de resterende stenen in het bed ongeveer dezelfde ligging hebben. Dit wordt aangeduid als een ingesteld bed. Een bed rijpt bij een stromingsbelasting, doordat stenen die ver boven het bed uit steken verplaatsen en stenen die minder boven het bed uit steken niet verplaatsen. Het bed wordt hierdoor versterkt; het aantal stenen dat per tijdseenheid verplaatst is lager na de rijpingstijd dan tijdens de rijpingstijd. Tijdens de rijpingstijd verplaatsen hoofdzakelijk de stenen die ver boven het bed uit steken.

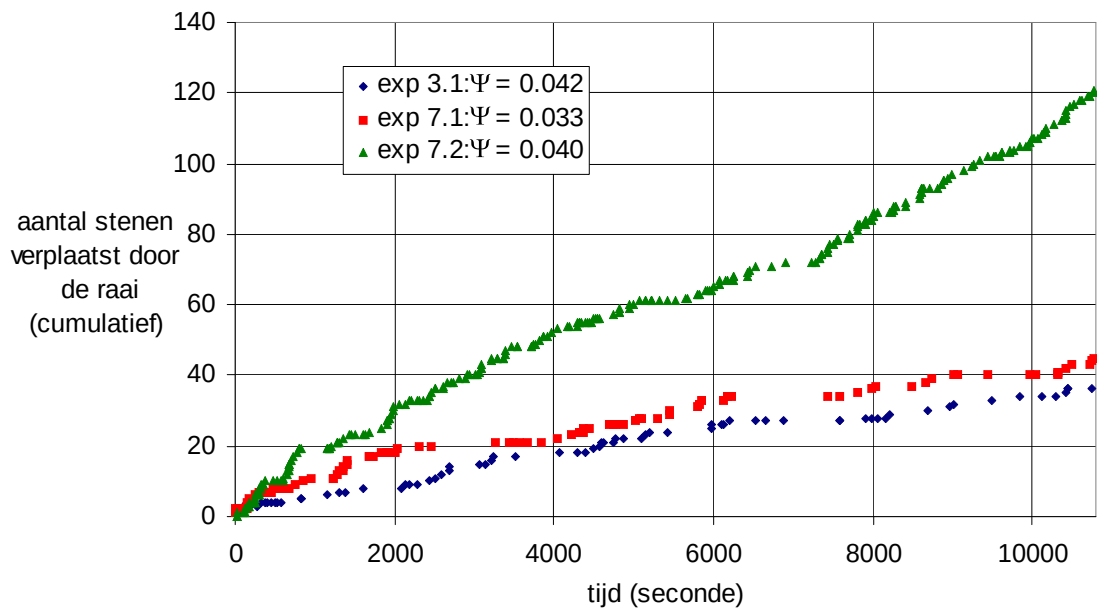
In een fase van belasten is de rijpingstijd te onderkennen door de hogere waarden van transport, waarna de waarde daalt en vervolgens constant blijft. Afhankelijk van het interessegebied is het hierbij van belang welk transport maatgevend is. Bij korte tijd van belasten is de beginsituatie representatief. Er kunnen hoge transporten voorkomen ten opzichte van een bed dat al is ingesteld. Bij een lange duur van belasten is de situatie van een bed dat is ingesteld van belang; het extra transport van stenen die ver boven het bed uitsteken is daarbij verwaarloosbaar ten opzichte van de hoeveelheid getransporteerd materiaal na de inspeeltijd. Door de ruwe manier van aanleggen van het bed (aantal stenen dat veel boven het bed uitsteekt is onbekend), kan het transport sterk variëren onder dezelfde hydraulische belasting. Dit maakt een nauwkeurige voorspelling lastig.

5.2.2 Inspeeltijd

Het transport tijdens het rijpingsproces van de toplaag verschilt van het transport na het rijpingsproces. De overgang tussen deze twee transporten is echter lastig aan te geven. Het transport heeft bij begin van belasten een hoge waarde die geleidelijk daalt naar een constante waarde.

De experimenten 3 en 7 zijn opgesteld om tijdens een langere duur van belasten het transport te onderzoeken. Tijdens experiment 3 en 7 werd het bed telkens twee keer drie uur belast, bij de andere experimenten werd het bed telkens zes keer één uur belast. In figuur 5-1 is een grafiek te zien waarin het transport is uitgezet tegen de tijd; in deze figuur is het transport van experimenten 3 en 7 uitgezet. Het onderkennen van een trend in het transport vergt meerdere meetpunten (stenen die zijn verplaatst). Wanneer bij metingen weinig stenen zijn verplaatst (laag transport), kan hier geen trend in worden onderkend. Bij experiment 3.2 werd weinig transport gemeten, het transport van dit experiment is hierom niet in de figuur uitgezet.

Experiment 3 en 7



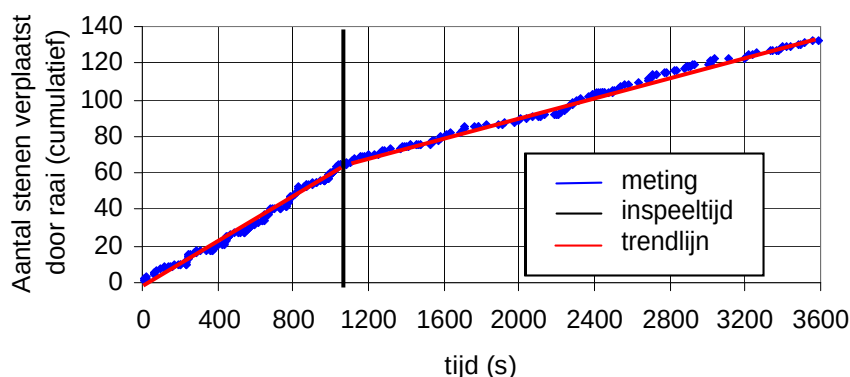
Figuur 5-1 experiment 3 en 7: experimenten met lange duur belasten

In figuur 5.1 is te zien dat bij begin van belasten in sommige gevallen meer stenen verplaatsen dan na een zekere tijd van belasten. Er is sprake van een trendbreuk na verloop van tijd. Bij experimenten 7.1 en 7.2 is een trendbreuk te onderkennen, bij experiment 3.1 is er geen trendbreuk te onderkennen. Het tijdstip waarop de trendbreuk optreedt is niet gelijk en zal variëren afhankelijk van de opbouw van het bed, en van de duur en intensiteit van belasten. Na de trendbreuk blijft het transport nagenoeg constant. Het tijdstip waarop de trendbreuk voorkomt is bij deze experimenten telkens binnen één uur van belasten. Dit betekent dat de trendbreuk ook in de andere experimenten te onderkennen zou kunnen zijn. Bij experimenten 1,2,3 t/m 6 en 8 is het bed telkens één uur belast bij elke meting. In figuur 5-2 is experiment 6.6 uitgezet tegen de tijd: er is duidelijk een trendbreuk te zien.

Het blijkt dat ook bij de experimenten waarbij het bed telkens één uur is belast de trendbreuk aan te geven is. De tijd tot aan de trendbreuk zal voortaan worden aangeduid als de inspeeltijd: het tijdstip waarbij de invloed van de rijpingstijd niet meer te onderkennen is. De inspeeltijd is echter niet bij alle metingen duidelijk te herkennen. Wanneer geen duidelijke inspeeltijd is te vinden, wordt aangenomen dat de inspeeltijd al is verstreken voordat de meting is begonnen. Het bed is bij elke meting namelijk al voorbelast.

De inspeeltijd is bepaald voor alle metingen waarbij een transport is gemeten van minimaal 10 stenen per meting (één meting duurt één uur). Bij een transport lager dan 10 stenen per uur per breedte van de raai, kan niet nauwkeurig een trend worden afgeleid. In tabel 5-1 zijn de transporten tijdens en na het rijpingsproces gegeven. In bijlage III zijn de figuren te vinden van de metingen met trendlijnen.

Experiment 6.6



Figuur 5-2 transport uitgezet tegen de tijd, experiment 6.6

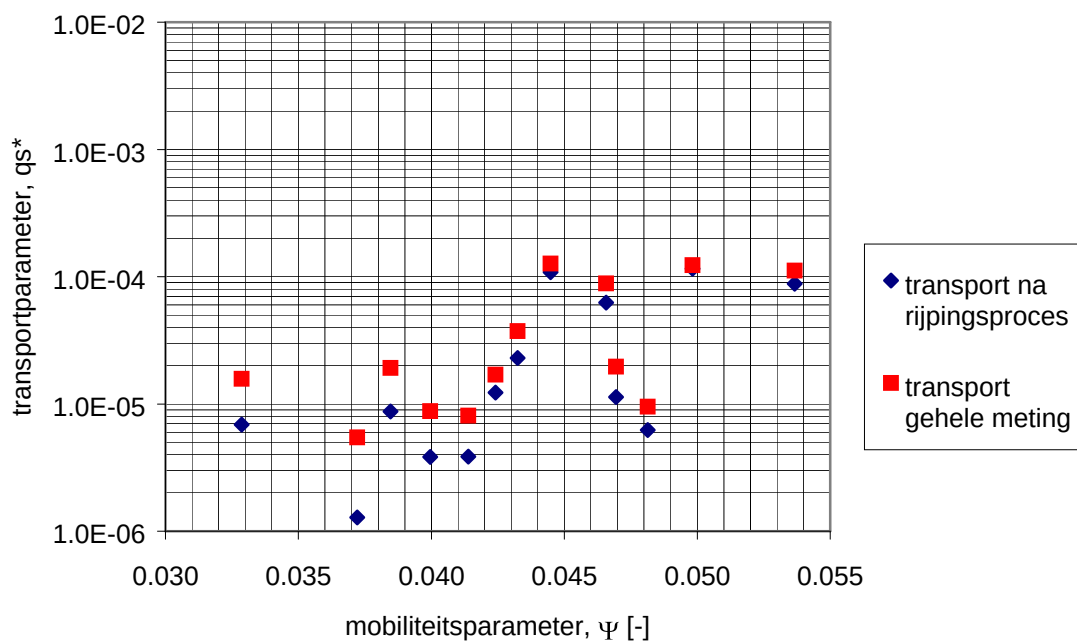
5.2.3 Transport tijdens en na het rijpingsproces

Het blijkt dat het transport van korrelmateriaal tijdens het rijpingsproces bij de metingen enkele keren hoger is dan na het rijpingsproces. Het transport tijdens het rijpingsproces is in 90% van de metingen een tot zes keer hoger dan na het rijpingsproces. Dit betekent dat het rijpingsproces een grote bijdrage kan leveren aan het totale transport wanneer wordt gelet op hydraulische belastingen met een korte tijdsduur.

Wanneer het bed gedurende een lange tijdsduur wordt belast, kan het extra transport van het rijpingsproces worden verwaarloosd. De grens tussen korte en lange duur belasten is hierbij afhankelijk van de mate waarin het bed is aangelegd en gerijpt. Wanneer een bed ruw is aangelegd zullen veel stenen een hoge protrusie hebben, veel stenen zullen ver boven het bed uitsteken. Het bed zal in dat geval langer rijpen dan wanneer een bed vlak is aangelegd. De invloed van het rijpingsproces op het transport is tijdens dit onderzoek beperkt. Het bed is telkens een lange tijd belast. Dit is te zien in figuur 5-3 waarin enkele metingen zijn uitgezet: de transportparameter na het rijpingsproces en de transportparameter van de gehele meting. Het figuur kan als volgt worden afgelezen. Het transport van een meting is telkens twee keer in de grafiek uitgezet. één keer als het transport van de gehele meting (■) en één keer als het transport na het rijpingsproces/ na de insteltijd (◇). De mobiliteitsparameter (Ψ) is tijdens de gehele meting constant. De transporten (■) en (◇) van dezelfde meting liggen telkens op dezelfde verticaal. Het verschil in hoogten tussen de verschillende transporten tijdens de meting kan worden verklaard door het rijpingsproces. Bij het transport van de gehele meting is het rijpingsproces er bij inbegrepen en bij het transport na rijpingsproces niet. De verschillen tussen de twee verschillende transporten (■ en ◇) zijn groter bij een lage mobiliteitsparameter dan bij hogere mobiliteitsparameter. Hieruit kan het volgende worden geconcludeerd:

Het rijpingsproces heeft meer invloed op het transport tijdens een meting bij lage hydraulische belastingen. De invloed van het rijpingsproces is groter doordat tijdens het rijpingsproces nog enkele stenen verplaatsen, maar na het rijpingsproces weinig tot geen.

Invloed rijpingsproces op transport bij experimenten



Figuur 5-3 invloed rijpingsproces op transport bij de experimenten; Er zijn enkele metingen uitgezet met verschillende waarden van mobiliteitsparameters. Van elke meting is het transport uitgezet van de gehele meting en het transport na het rijpingsproces.

experiment	mobilitets- parameter.	Inspeeltijd	transport- parameter na rijpingstijd	transport- parameter tijdens rijpingstijd	verhouding transport tijdens/na rijpingstijd
	[-]	[s]	[-]	[-]	[-]
1.1	0.031	-	-	-	-
1.2	0.035	-	-	-	-
1.3	0.037	1600	$1.3 \cdot 10^{-06}$	$1.1 \cdot 10^{-05}$	8.3
1.4	0.041	450	$3.9 \cdot 10^{-06}$	$3.8 \cdot 10^{-05}$	9.8
1.5	0.043	-	$1.2 \cdot 10^{-05}$	-	-
1.6	0.046	610	$2.9 \cdot 10^{-04}$	$3.5 \cdot 10^{-04}$	1.2
2.1	0.031	-	-	-	-
2.2	0.035	-	-	-	-
2.3	0.038	990	$8.7 \cdot 10^{-06}$	$4.7 \cdot 10^{-05}$	5.4
2.4	0.040	720	$7.0 \cdot 10^{-06}$	$3.0 \cdot 10^{-05}$	4.3
2.5	0.042	300	$6.2 \cdot 10^{-05}$	$1.2 \cdot 10^{-04}$	2.0
2.6	0.045	1460	$2.8 \cdot 10^{-04}$	$3.5 \cdot 10^{-04}$	1.2
3.1	0.042	2680	$7.0 \cdot 10^{-06}$	$1.3 \cdot 10^{-05}$	1.8
3.2	0.035	-	-	-	-
4.1	0.038	-	-	-	-
4.2	0.042	-	-	-	-
4.3	0.043	1490	$4.8 \cdot 10^{-06}$	$9.8 \cdot 10^{-06}$	2.0
4.4	0.045	500	$1.3 \cdot 10^{-05}$	$3.9 \cdot 10^{-05}$	3.0
4.5	0.047	585	$1.1 \cdot 10^{-05}$	$6.2 \cdot 10^{-05}$	5.5
4.6	0.050	360	$1.2 \cdot 10^{-04}$	$1.9 \cdot 10^{-04}$	1.6

experiment	mobiliteits- parameter.	Inspeeltijd	transport- parameter na rijpingstijd	transport- parameter tijdens rijpingstijd	verhouding transport tijdens/na rijpingstijd
	[-]	[s]	[-]	[-]	[-]
5.1	0.031	-	-	-	-
5.2	0.034	-	-	-	-
5.3	0.037	290	$1.3 \cdot 10^{-05}$	$4.1 \cdot 10^{-05}$	3.3
5.4	0.040	1000	$3.8 \cdot 10^{-06}$	$2.2 \cdot 10^{-05}$	5.6
5.5	0.043	1030	$4.9 \cdot 10^{-05}$	$8.1 \cdot 10^{-05}$	1.7
5.6	0.044	1350	$1.1 \cdot 10^{-04}$	$1.6 \cdot 10^{-04}$	1.5
6.1	0.030	-	-	-	-
6.2	0.034	-	-	-	-
6.3	0.037	640	$1.5 \cdot 10^{-05}$	$1.1 \cdot 10^{-05}$	0.7
6.4	0.040	40	$6.1 \cdot 10^{-06}$	$1.8 \cdot 10^{-04}$	29.7
6.5	0.043	790	$2.3 \cdot 10^{-05}$	$8.8 \cdot 10^{-05}$	3.8
6.6	0.047	1120	$6.2 \cdot 10^{-05}$	$1.5 \cdot 10^{-04}$	2.3
7.1	0.033	2000	$6.9 \cdot 10^{-06}$	$2.3 \cdot 10^{-05}$	3.3
7.2	0.040	760	$2.4 \cdot 10^{-05}$	$5.4 \cdot 10^{-05}$	2.2
8.1	0.034	-	-	-	-
8.2	0.040	-	-	-	-
8.3	0.042	570	$1.2 \cdot 10^{-05}$	$4.2 \cdot 10^{-05}$	3.4
8.4	0.048	810	$6.2 \cdot 10^{-06}$	$2.1 \cdot 10^{-05}$	3.3
8.5	0.047	770	$8.1 \cdot 10^{-06}$	$3.4 \cdot 10^{-05}$	4.2
8.6	0.054	390	$8.8 \cdot 10^{-05}$	$3.1 \cdot 10^{-04}$	3.5

Tabel 5-1 transporten tijdens en na het rijpingsproces

5.3 Transport van grind en breuksteen

5.3.1 Inleiding

In voorgaande onderzoeken is diverse malen gezocht naar de invloed van de vorm van het bodemmateriaal op het transport. De onderzoeken verschillen ten aanzien van de conclusies: wel of geen vormfactor. Er is in dit onderzoek ook gekeken naar verschillen in transport bij lage belastingen door de vorm van het bodemmateriaal. In sub-paragrafen 5.3.2 en 5.3.3 worden achtereenvolgens de meetresultaten van de experimenten met grind en breuksteen besproken. In sub-paragraaf 5.3.4 worden de resultaten vergeleken.

5.3.2 Transport grind

De metingen van de experimenten met bodemmateriaal grind zijn tegen de mobiliteitsparameter uitgezet in figuur 5-4. In deze figuur is te zien dat er een aanzienlijke spreiding is tussen de resultaten van de verschillende metingen.

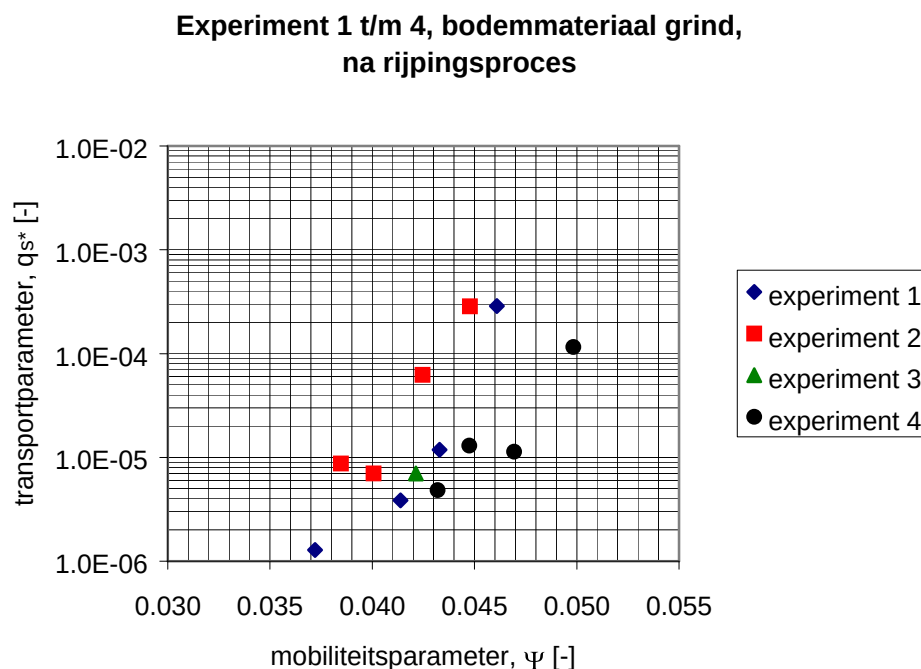
Experiment 1 en 2 zijn uitgevoerd onder gelijke condities; gelijke waterhoogte, verhang, ruwheid. De resultaten van de experimenten verschillen echter beduidend. Dit kan worden verklaard met de volgende argumenten:

- Er is spreiding in de resultaten door meetfouten; de meetfouten zijn berekend in paragraaf 5.4. De spreiding van het transport door de meetfouten is geschat op 1 a 2 keer het transport. De spreiding wordt dus beperkt verklaard door de meetfouten.
- De mobiliteitsparameter is ten dele de representatieve maat voor het transport; niet alle invloeden op het transport worden door de mobiliteitsparameter verwerkt. De mobiliteitsparameter geeft een benadering van de belasting en niet de exacte belasting op het bed.

De benadering van de hydraulische belasting met de mobiliteitsparameter is ook af te leiden uit de experimenten van Paintal, zie bijlage VI figuur VI-3. De spreiding van de resultaten van de experimenten is bij een mobiliteitsparameter van 0,01 tot 0,03 erg groot

Experiment 4 is uitgevoerd met een kleinere waterdiepte dan de experimenten 1 tot en met 3. De verhouding tussen de waterdiepte en de korrel diameter is gelijk als bij het onderzoek van Paintal (1969). De resultaten van experiment 4 wijken voor 2 belastingen (mobiliteitsparameter van 0,054 en 0,0575) af. Door de spreiding van de resultaten van de experimenten die onder gelijke condities zijn uitgevoerd, kunnen de resultaten worden geïnterpreteerd als gelijk. Het verlagen van de waterdiepte heeft geen invloed op het transport wanneer de mobiliteitsparameter gelijk blijft.

Door de spreiding en het beperkt bereik van de mobiliteitsparameter (0.044 tot 0.058) is het niet mogelijk een nauwkeurige relatie op te stellen tussen de mobiliteitsparameter en de transportparameter voor grind.



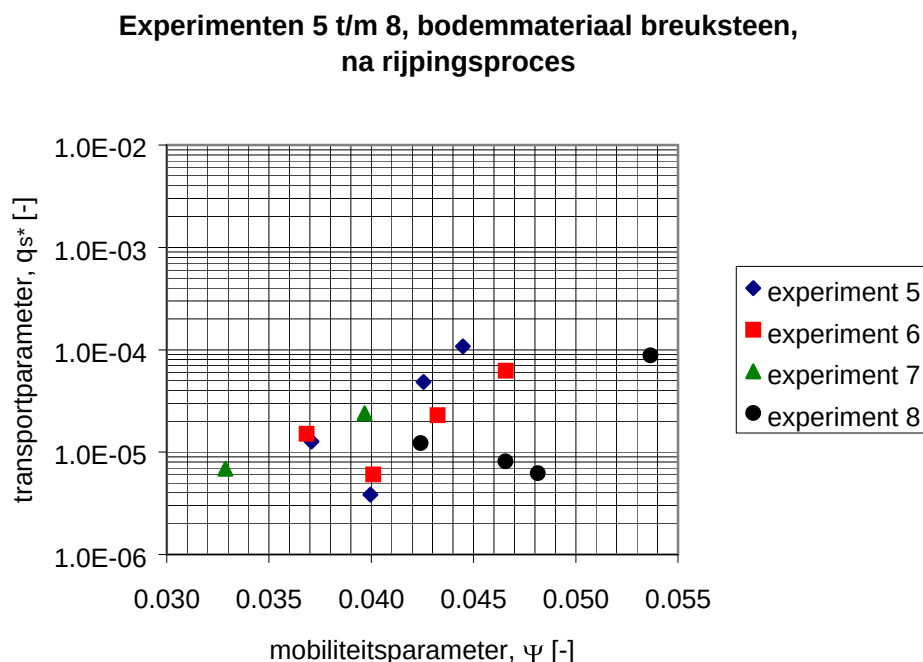
Figuur 5-4 transport van grind na het rijpingsproces

5.3.3 Transport breuksteen

De metingen van de experimenten met bodemmateriaal breuksteen zijn tegen de mobiliteitsparameter uitgezet in figuur 5-5. De spreiding van de resultaten van de verschillende experimenten is kleiner dan bij de resultaten van de experimenten met bodemmateriaal grind. De spreiding bij experimenten met breuksteen is alleen groot bij hoge belastingen (mobiliteitsparameter hoger dan 0.055). De spreiding van de resultaten worden bij deze experimenten ook verklaard door de meetfouten en de benadering van de belasting door de mobiliteitsparameter.

Experiment 8 is uitgevoerd met een kleinere waterdiepte dan in de experimenten 5 tot en met 7. De verhouding tussen de waterdiepte en de korrel diameter is gelijk aan die bij het onderzoek van Paintal (1969). De resultaten van experiment 8 wijken voor lage belastingen niet af ten opzichte van de resultaten van de andere experimenten.

Door de spreiding en het beperkte bereik van de mobiliteitsparameter (0.039 - 0.057) is het niet mogelijk een nauwkeurige relatie op te stellen tussen de mobiliteitsparameter en de transportparameter voor breuksteen.



Figuur 5-5 transport van breuksteen na het rijpingsproces

5.3.4 Verschillen in transport bij grind en breuksteen; een vormfactor

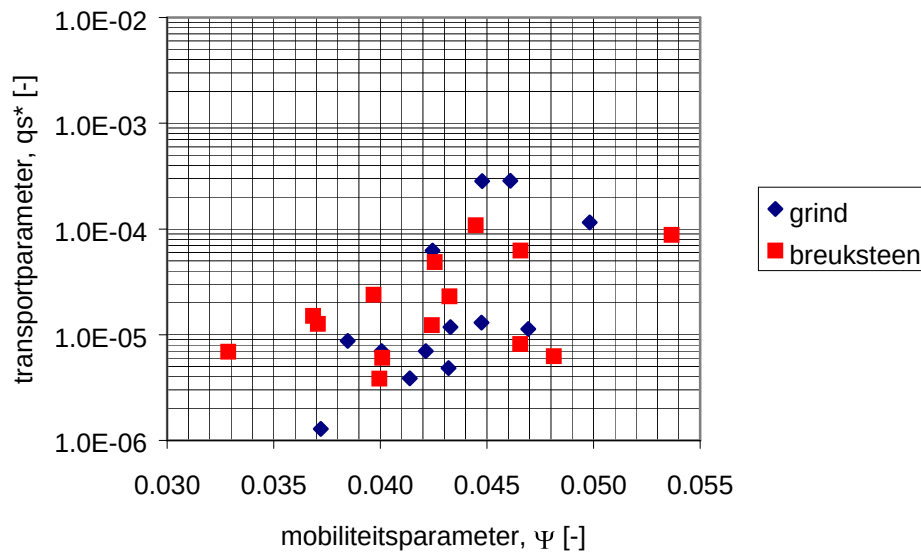
In figuur 5-7 zijn de resultaten van de experimenten met grind en breuksteen uitgezet. Er zijn geen verschillende trends te onderkennen in de resultaten van de experimenten met gelijke een bodemmateriaal. Bij deze conclusie moeten echter enkele kanttekeningen worden gezet:

De mobiliteitsparameter is in dit onderzoek beperkt gevarieerd. Deze beperking komt door de methode van meten en de proefopstelling. Lage transporten zijn bij deze meetmethode niet goed te meten. Door de beperkte breedte in de goot, moet lange tijd worden gemeten voordat er bodemmateriaal verplaatst door de raai. Hoge transporten zijn bij deze proefopstelling ook niet goed meetbaar. Door hoge transporten verandert de bodem waardoor de stromingssituatie verandert; dit heeft invloed op de belasting.

De spreiding van de resultaten van de experimenten is erg groot. Dit kan worden verklaard door de invloed van de meetfouten en de benadering van de hydraulische belasting met de mobiliteitsparameter. Verschil in transport van grind en breuksteen is hierdoor moeilijk aan te geven. Er zijn meer meetgegevens nodig om een nauwkeurige relatie te kunnen afleiden.

Er kan worden geconcludeerd dat de invloed van de vorm op het transport bij een mobiliteitsparameter van 0.045 te verwaarlozen is. De experimenten geven dezelfde resultaten bij een verschillende vorm van bodemmateriaal, grind en breuksteen. Dit betekent dat de invloed van de vorm voldoende is verwerkt in de mobiliteitsparameter. De vorm wordt in de mobiliteitsparameter geëlimineerd door de korrel diameter te gebruiken. Het is aannemelijk dat de vorm invloed heeft op het transport van bodemmateriaal. Bij een mobiliteitsparameter van 0,045 is dit echter niet van toepassing.

Experimenten, bodemmateriaal grind en breuksteen, na rijpingsproces



Figuur 5-6 experimenten, bodemmateriaal grind en breuksteen, na het rijpingsproces

5.4 Transportverdeling over de breedte van de goot

5.4.1 Verdeling transport in de wandgebieden en het middengebied

Bij experiment 2 tot en met 8 is het aantal stenen genoteerd dat vanuit verschillende stroken door de raai is getransporteerd (Bij experiment 1 is alleen het aantal stenen genoteerd dat vanuit de middenstrook door de raai werd verplaatst). Door de hoeveelheid korrelmateriaal te vergelijken die vanuit de verschillende stroken door de raai is verplaatst, kan een verdeling worden gegeven van het transport over de breedte van de goot. Dit is interessant vanwege de beperkte mogelijkheid tot meten van transport van bodemmateriaal in de goot.

Het meten van transport in de goot wordt beperkt door invloeden van de wanden. De stroming in de goot is niet eenparig over de gehele breedte door de invloed van de wanden. In dit onderzoek is gesteld dat de stroming in de goot eenparig is in het midden van de goot (binnenste 10 cm rond de as van de goot, de middenstrook). Door het bed te belasten kan een transportrelatie worden afgeleid. (mobiliteitsparameter en transportparameter zijn gelijk over het gehele gebied). Wanneer de middenstrook te groot wordt gekozen, is de stroming over de meetstrook niet eenparig. Dit is merkbaar in het transport; de transportparameter zal dan in de breedte niet gelijk zijn.

De breedte waarover de stroming in de as van de goot als eenparig kan worden beschouwd is afhankelijk van de invloed van de wanden. Bij veel invloed van de wanden zal een kleinere breedte van de stroming als eenparig kunnen worden beschouwd dan bij weinig invloed. De invloed van wanden is zowel afhankelijk van de ruwheid van de wanden als van het oppervlak van de wanden. Het oppervlak van de wanden wordt meestal uitgedrukt in de verhouding breedte/hoogte van de stroomvoerende doorsnede. De lengterichting is voor de bodem en de wand gelijk; deze kan dus worden geëlimineerd.

Bij een lage breedte/hoogte verhouding heeft de wandwrijving meer invloed op de stroming in de as van de goot dan bij een hoge breedte/hoogte verhouding. Bij de experimenten is de breedte/hoogte verhouding gevarieerd, de verhouding van de ruwheid van de wanden en de bodem is telkens ongeveer gelijk gebleven. De verhoudingen van het transport zoals verdeeld over de gootbreedte in dit onderzoek zijn te zien in tabel 5-2.

Strook:	experiment 1-3 en 5-7 ($B/h=\pm 2$)	experiment 4 en 8 ($B/h=\pm 4$)
linkerwand (0,14 m)	26%	35%
midden (0,10 m)	50%	31%
rechterwand (0,14 m)	24%	34%

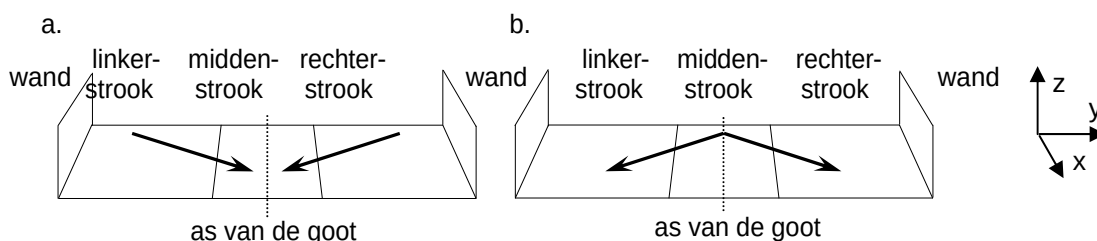
Tabel 5-2 verhouding van aantal stenen dat vanuit een gebied door de raai is getransporteerd

Bij een breedte/hoogte verhouding van twee blijkt 50% van het bodemmateriaal door de raai te verplaatsen vanuit de middenstrook. Dit is opmerkelijk omdat de middenstrook maar 25% van de breedte is van de gehele goot. De wanden hebben dus veel invloed op het transport in de stroken bij de wanden. Bij een breedte/hoogte verhouding van vier blijkt 31% van het bodemmateriaal door de raai te worden getransporteerd vanuit de middenstrook. De invloed van de wanden is dus duidelijk minder dan bij een breedte/hoogte verhouding van twee.

Hieruit blijkt dat de invloed van de wanden op de stroming niet over een groot gedeelte van de breedte van de goot te verwaarlozen is. Slechts de stroming in een smalle strook in as van de goot kan worden beschouwd als eenparig. Als de stroming niet geheel eenparig is over de breedte heeft dit grote invloed op het transport. Zoals bleek uit paragraaf 3.4 is het transport zeer sterk gerelateerd aan de snelheid van de stroming (Engelund en Hansen : $q_{s*} \propto u^5$ en Paintal : $q_{s*} \propto u^{32}$). Een kleine afwijking in de stroomsnelheid heeft hierdoor veel invloed op het transport van bodemmateriaal.

5.4.2 Transport tussen verschillende stroken

Bij experiment 6 tot en met 8 is het aantal stenen genoteerd, dat vanuit een strook door de raai is verplaatst naar een aanliggende strook, bijvoorbeeld vanuit een strook aan de wand naar de strook in de as van de goot. Wanneer er stenen naar een aanliggend strook verplaatsen, is er sprake van transport in de dwarsrichting. Door de stenen in de stroken een kleur te geven, is het transport in de dwarsrichting te noteren. In figuur 5-7 zijn twee voorbeelden gegeven van transport van bodemmateriaal dwars op de hoofdstroomrichting. In werkelijkheid worden niet alleen stenen vanuit de strook in het midden naar de stroken aan de wanden verplaatst of vice versa, maar komen beide transporten voor.



Figuur 5-7 dwarstransport in de stroomgoot a. dwarstransport naar middenstrook b. dwarstransport naar wandstroken

In dit onderzoek is het transport gemeten van bodemmateriaal dat door de raai verplaatst in een strook in de as van de goot. Er is daarbij aangenomen dat alle stenen verplaatsen vanuit de strook in de as van de goot, en door de raai verplaatsen in de strook rond de as van de goot. Dit is echter niet altijd het geval. Wanneer er transport van bodemmateriaal is in dwarsrichting van de goot dan moet op het volgende worden gelet: niet alle stenen die in de buurt van de raai verplaatsen vanuit de middenstrook, zullen door de raai verplaatsen in de middenstrook.

Wanneer er wordt gelet op het transport vanuit de middenstrook, dan moet ook rekening worden gehouden met stenen die uit de middenstrook verplaatsen en via de wandstroken door de raai worden getransporteerd. Dit kan leiden tot een onderschatting van het netto-transport. In tabel 5-3 zijn de verhoudingen te zien van het aantal stenen dat door de raai is verplaatst vanuit de verschillende stroken.

Bodemmateriaal verplaatst:		vanuit beide wandstroken:		de middenstrook:
Naar het	linker wandstrook:	43%		16%
	middenstrook:	21%		66%
	rechter wandstrook:	36%		18%

Tabel 5-3 verdeling transport vanuit verschillende gebieden voor experiment 6 en 7

Het blijkt dat er meer stenen vanuit de middenstrook naar beide wandstroken verplaatsen dan vanuit beide wandstroken naar de middenstrook. Er is een netto dwarstransport op de hoofdstroomrichting vanuit de strook in het midden van de goot naar de stroken bij de wanden. Dit is te verklaren met twee argumenten met betrekking tot de verdeling van de snelheid in de goot:

1. De turbulente wervelingen in de as van de goot zijn groter dan bij de wanden. Hierdoor worden meer stenen verplaatst in de as van de goot dan bij de wanden. Er verplaatsen vervolgens ook meer stenen in de richting loodrecht op de stroming bij de as dan bij de wanden (turbulente wervelingen zijn driedimensionaal).
2. Bij de bodem is de snelheid in de as van de goot hoger dan bij de wanden. Hierdoor verplaatsen meer stenen in de as van de goot dan bij de wanden. Stenen die worden verplaatst, komen vervolgens weer terecht op de bodem. Hierbij kaatsen ze tegen ander bodemmateriaal. Door deze reactiekracht, kan de richting waarin de steen verplaatst wordt veranderd. Doordat meer stenen in de as van de goot worden getransporteerd dan aan de wanden, buigen ook meer stenen af naar de wanden toe dan naar de as van de goot.

Het netto-dwarstransport en de onder- of overschatting van het transport kan worden berekend uit de gegevens van tabel 5-3 en 5-4, zie formule (5-1) en (5-2).

$$\text{netto-dwarstransport} = U - I \quad (5-1)$$

$$\text{onder-/overschatting transport} = \frac{U - I}{T} \times 100\% \quad (5-2)$$

waarbij

- U : aantal stenen verplaatst vanuit middenstrook naar wandstroken
 I : aantal stenen verplaatst vanuit wandstroken naar middenstrook
 T : totaal aantal stenen verplaatst door de raai vanuit de middenstrook

Het transport van bodemmateriaal wordt 15% onderschat door alleen het transport te meten van bodemmateriaal dat door de raai verplaatst via de strook in de as van de goot. De resultaten van dit onderzoek zijn niet aangepast.

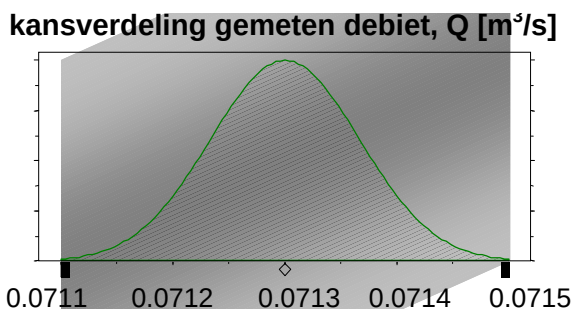
5.5 Betrouwbaarheid meetresultaten

In elk onderzoek is het onvermijdelijk dat er meetfouten voorkomen in de metingen. Deze meetfouten kunnen ontstaan door onnauwkeurigheden van de meetinstrumenten en van de onderzoeker. Uiteraard probeert elke onderzoeker deze fouten tot een minimum te beperken. De invloeden van deze meetfouten op de betrouwbaarheid van de resultaten zijn afhankelijk van de gevoeligheid van het resultaat voor de nauwkeurigheid van de verschillende parameters.

In dit onderzoek zijn de volgende parameters gemeten:

d_{n50}	: mediaan van de nominale korrel diameter [m]
Δ	: relatieve dichtheid [-]
i	: verhang [-]
h	: waterdiepte [m]
Q	: debiet in goot [m^3/s]
q_s	: volume transport van korrelmateriaal per eenheid van breedte en tijd [$\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$]

Door voor elke parameter die is gemeten een marge aan te geven waarbinnen de exacte waarde kan liggen, is het mogelijk de betrouwbaarheid van de resultaten uit te drukken. De marges zijn bepaald, geschat of afgeleid uit vorige onderzoeken en worden uitgedrukt in de standaard deviatie. De standaard deviatie van parameter q_s is gesteld op $8,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$ (dit komt overeen met het volume van ± 4 stenen per eenheid van breedte en per tijdseenheid, dit is een geschatte waarde). Vanwege de relatief hoge onnauwkeurigheid bij transporten bij een lage mobiliteitsparameter, zullen deze waarden niet worden meegenomen in de resultaten.



Figuur 5-8 kansverdeling gemeten debiet

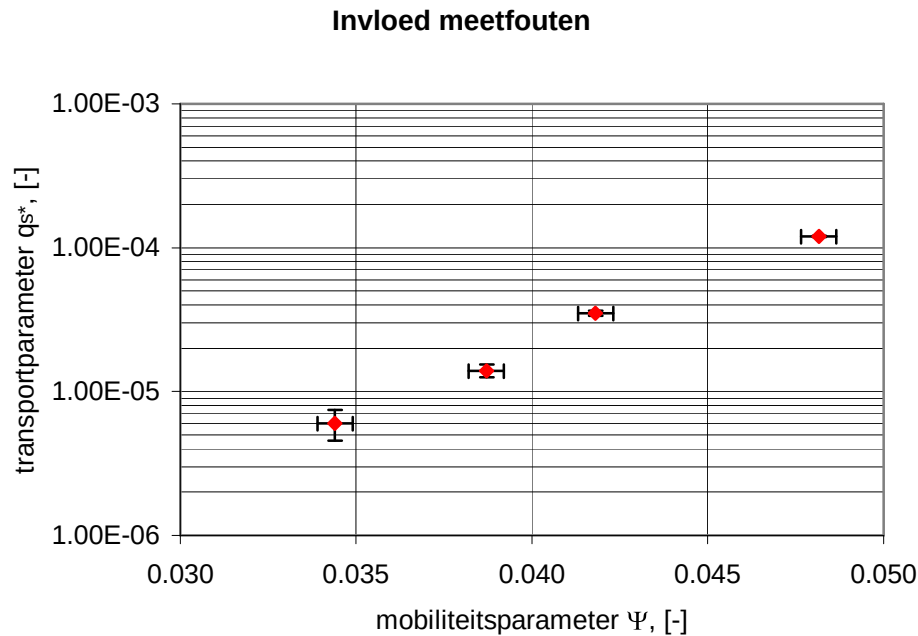
De resultaten die uit dit onderzoek voortkomen zijn uitgedrukt in een mobiliteitsparameter en een transportparameter. De standaard deviatie van de gemeten parameters, waarmee deze parameters zijn berekend, zijn gegeven in tabel 5-4.

gemeten parameter	standaard deviatie	gemiddelde waarde
d_{50} [m]	$6 \cdot 10^{-5}$	$9,8 \cdot 10^{-3}$
Δ [-]	$9 \cdot 10^{-3}$	1,65
i [-]	$3 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-3} - 9 \cdot 10^{-3}$
Q [m^3/s]	$7,3 \cdot 10^{-5}$	0,0771 - 0,209
q_s [$\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$]	$8,9 \cdot 10^{-7}$	0 - $1,2 \cdot 10^{-6}$
h [m]	$3 \cdot 10^{-4}$	0,090 of 0,200

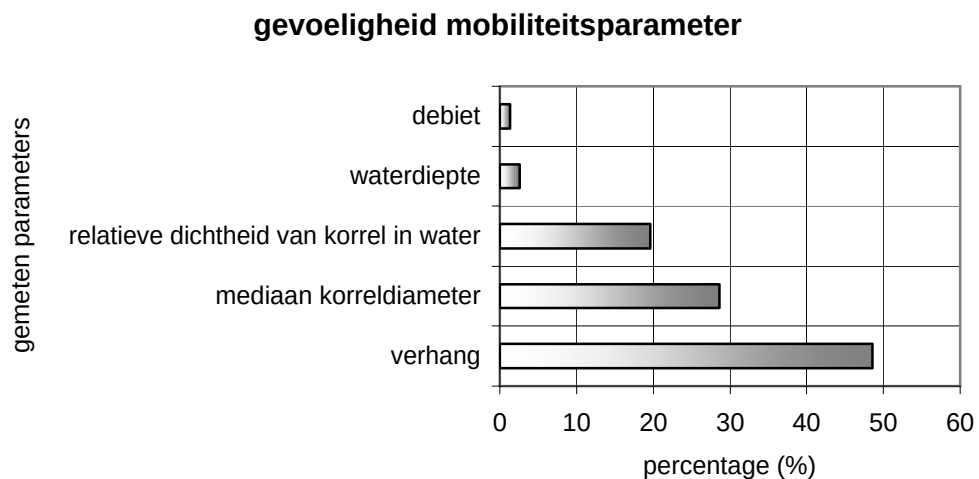
Tabel 5-4 parameters en geschatte meetfout

De onnauwkeurigheid door de meetfouten in de gemeten parameters heeft invloed op het voorspelde transport. De gevoeligheid van de parameters is onderzocht met het computerprogramma 'Crystal Ball'. Door aan elke gemeten parameter een kansverdeling toe te kennen, is de kansverdeling te berekenen van de mobiliteitsparameter en de transportparameter. Er is aangenomen dat elke gemeten parameter een normale verdeling heeft.

Er is een Monte Carlo simulatie gebruikt. Bij deze simulatie worden willekeurige waarden genomen uit de verdelingen van de gemeten parameters; hier wordt vervolgens de mobiliteitsparameter en transportparameter uit berekend. Door deze stap meerdere malen uit te voeren is het mogelijk een verdeling aan te geven van de waarde van de mobiliteitsparameter en de transportparameter. Deze parameters hebben een normaalverdeling, de standaard afwijking van de mobiliteitsparameter varieert van 1,3% tot 2,0%. De standaarddeviatie van de transportparameter varieert van 1% tot 16%. De invloed van de meetfouten op de mobiliteitsparameter en de transportparameter is te zien in figuur 5-9 en de gevoeligheid van de meetfouten op de mobiliteitsparameter is te zien in figuur 5-10.



Figuur 5-9 invloed meetfouten



Figuur 5-10 gevoeligheid transportparameter

Hoofdstuk 6 Resultaten verschillende onderzoeken

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de experimenten, die zijn besproken in Hoofdstuk 5, vergeleken met de resultaten van de onderzoeken van Paintal (1969) en De Boer (1998). Zoals in Hoofdstuk 3 is beschreven kan het transport van bodemmateriaal op macro-niveau worden voorspeld door een mobiliteitsparameter en een transportparameter op te stellen. De relatie tussen deze parameters wordt aangeduid als de transportformule. Door de meetmethoden en de definities van de parameters van de onderzoeken te vergelijken, kunnen de verschillen in resultaten worden bepaald.

In paragraaf 6.2 worden de definities en de meetmethoden van de mobiliteitsparameter kort herhaald. De mobiliteitsparameter blijkt telkens verschillend te zijn gedefinieerd en de waarde verschillend bepaald. De transportparameter is bij de onderzoeken eenduidig gedefinieerd. De meetmethode verschilt echter bij de onderzoeken. Hierdoor verschillen de resultaten van de onderzoeken. Dit is beschreven in paragraaf 6.3. De resultaten van de onderzoeken zijn in paragraaf 6.4 uitgezet met eenduidig gedefinieerde parameters. Afhankelijk van de gebruikte definities komen de resultaten van de onderzoeken overeen. Er zal in dit hoofdstuk vaak worden verwezen naar de verschillende onderzoeken. Voortaan zullen de onderzoeken worden aangeduid met alleen de naam van de onderzoeker.

6.2 Mobiliteitsparameter

De mobiliteitsparameter is bij de onderzoeken verschillend gedefinieerd. In paragraaf 3.3 en 3.4 zijn de mobiliteitsparameters van de onderzoeken uitgebreid besproken, in deze paragraaf zullen ze kort worden herhaald.

• Forschelen

Uit de onderzoekspunten van Hoofdstuk 3 is de volgende mobiliteitsparameter afgeleid (6-1). Deze parameter is bepaald voor gebruik over de gehele breedte van de goot.

$$\Psi_{\text{Forschelen}} = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho_w)gd_{50}} = \frac{\rho_w g R_b i_b}{(\rho_s - \rho_w)gd_{50}} = \frac{R_b i_b}{\Delta d_{50}} \quad (6-1)$$

waarbij

d_{50}	: mediaan van de korreldiameter [m]
g	: gravitatieversnelling [m/s^2]
i_b	: bodemverhang [m/m]
R_b	: hydraulische straal van het bed [m]
Δ	: relatieve dichtheid van bodemmateriaal in water [-]
ρ_s	: dichtheid bodemmateriaal [kg/m^3]
ρ_w	: dichtheid water [kg/m^3]
τ_b	: bodemschuifspanning [N/m^2]

• Paintal

Bij het onderzoek van Paintal is de mobiliteitsparameter als (6-2) gedefinieerd. Deze mobiliteitsparameter is bepaald voor gebruik over de gehele breedte van de goot.

$$\Psi_{\text{Paintal}} = \frac{\tau'_b}{(\rho_s - \rho_w)gd_{50}} = \frac{R'_b i_b}{\Delta d_{50}} \quad (6-2)$$

waarbij

τ'_b	: bodemschuifspanning van de korrels [N/m^2]
R'_b	: representatieve hydraulische straal van de korrels op het bed [m]

- **De Boer**

De mobiliteitsparameter is in het onderzoek van De Boer als formule (6-3) gedefinieerd. Deze parameter is bepaald voor de situatie in de as van de goot en gebruikt voor het gehele meetgebied (30 cm in het midden van de goot).

$$\Psi_{\text{DeBoer}} = \frac{\tau_b}{(\rho_s - \rho_w)gd_{50}} = \frac{\rho_w \bar{u}_*^2}{(\rho_s - \rho_w)gd_{50}} = \frac{\bar{u}_*^2}{\Delta gd_{50}} \quad (6-3)$$

waarbij

$\bar{u}_*$: gemiddelde schuifspanningssnelheid [m/s]

De mobiliteitsparameters bij de onderzoeken van Paintal, De Boer en Forschelen zijn verschillend gedefinieerd en de waarden zijn verschillend bepaald. De verschillen tussen de mobiliteitsparameters kunnen als volgt worden getypeerd.

Bedschuifspanning versus korrelschuifspanning

Bij de onderzoeken van Forschelen en De Boer wordt de mobiliteitsparameter gerelateerd aan de schuifspanning van het bed. Bij het onderzoek van Paintal wordt de mobiliteitsparameter gerelateerd aan alleen de schuifspanning van de korrels van het bed. De schuifspanning van het bed kan direct worden gerelateerd aan de ruwheid van het bed. De mobiliteitsparameters verschillen hierdoor in waarden afhankelijk van de ruwheid van het bed. Bij een vlak bed bestaat de schuifspanning van het bed hoofdzakelijk uit de schuifspanning van de korrels; de verschillen in waarden zullen hierbij niet groot zijn. Bij een geribbeld bed bestaat de schuifspanning van het bed hoofdzakelijk uit de schuifspanning van de vorm van het bed; de waarden van de mobiliteitsparameters zullen hierbij veel verschillen.

In de onderzoeken van Forschelen en De Boer wordt telkens gebruik gemaakt van een vlak bed, de schuifspanning van het bed zal dus hoofdzakelijk bestaan uit de schuifspanning van de korrels. De ruwheid van het bed is bij het onderzoek van De Boer niet berekend. Bij het onderzoek van Forschelen zijn telkens ruwheden van de bodem bepaald van $k/d_{50} = 1.6$ tot 4.2 , zie bijlage III. Het bed dat bij het onderzoek van Paintal telkens is belast, had een ruwheid van $k/d_{50} = 0.6$ tot 2.0 . De ruwheid van de korrel werd berekend met vergelijking (6-4) en had waarden $k/d_{50} = 0.9$ tot 1.1 , zie bijlage IV. Ondanks dat het bed bij het onderzoek van Paintal telkens erg vlak was, is de schuifspanning gecorrigeerd voor invloeden van de vorm van het bed.

$$n_g = 0.0395d^{1/6} \quad (6-4)$$

waarbij

d : korreldiameter [m]

n_g : Manning-coëfficiënt voor de korrels van de bodem [$m^{1/3}/s$]

Het bed is bij deze onderzoeken steeds met dezelfde procedure aangelegd. Ondanks dezelfde procedure van aanleggen blijkt dat het bed bij het onderzoek van Paintal vlakker was dan bij het onderzoek van Forschelen. Een verklaring is hier niet voor te geven. De invloed van de ruwheid van de vorm van het bed is hierdoor groter bij het onderzoek van Forschelen dan bij het onderzoek van Paintal. Het is niet duidelijk of dit kan worden toegeschreven naar de ruwheid van de vorm van het bed of naar een lage ruwheid van de korrel. De waarde van de ruwheid van de korrel wordt in de literatuur vaak verschillende aanbevolen. Deze waarden verschillen van $k=1.25d_{35}$ (Ackers and White 1973) tot $k = 5.1d_{84}$ (Mahmood 1971).

Lokale mobiliteitsparameter versus globale mobiliteitsparameter

Bij het onderzoek van De Boer is de mobiliteitsparameter bepaald met snelheidsmetingen in de as van de goot. Deze mobiliteitsparameter is alleen geldig als het snelheidsprofiel gelijk is aan het snelheidsprofiel in de as van de goot. Het snelheidsprofiel is echter niet in de gehele goot hetzelfde als in de as van de goot. De mobiliteitsparameter mag hierdoor slechts lokaal worden gebruikt. Bij het onderzoek van Paintal en dat van Forschelen wordt de mobiliteitsparameter bepaald aan de hand van een relatie waarbij de invloed van de wanden (en de invloed van de vorm van het bed bij het onderzoek van Paintal) wordt geëlimineerd. De mobiliteitsparameter die hiermee wordt berekend is geldig voor de gehele goot.

De waarden van de mobiliteitsparameters verschillen afhankelijk van de verstorende invloed op de stroming. Zonder verstorende invloeden op de stroming zouden de waarden van de verschillende mobiliteitsparameters gelijk zijn. Wanneer de wanden grote invloed hebben op de stroming zal bij gebruik van de mobiliteitsparameter volgens De Boer de mobiliteitsparameter worden overschat. De mobiliteitsparameter wordt overschat ten opzichte van de stromingsbelasting die gemiddeld in de goot geldig is. Dit is te vinden in de resultaten van de onderzoeken van Paintal en De Boer.

Opmerking:

Bij het onderzoek van De Boer is een transformatievergelijking opgesteld die de relatie geeft tussen de mobiliteitsparameter bepaald met de gemiddelde snelheid en de mobiliteitsparameter bepaald met het snelheidsprofiel. Zonder verstorende invloed op de stroming zouden de waarden van de mobiliteitsparameters overeen moeten komen:

$$\Psi_{\text{gem. snelh.}} = \Psi_{\text{snelh. profiel}}$$

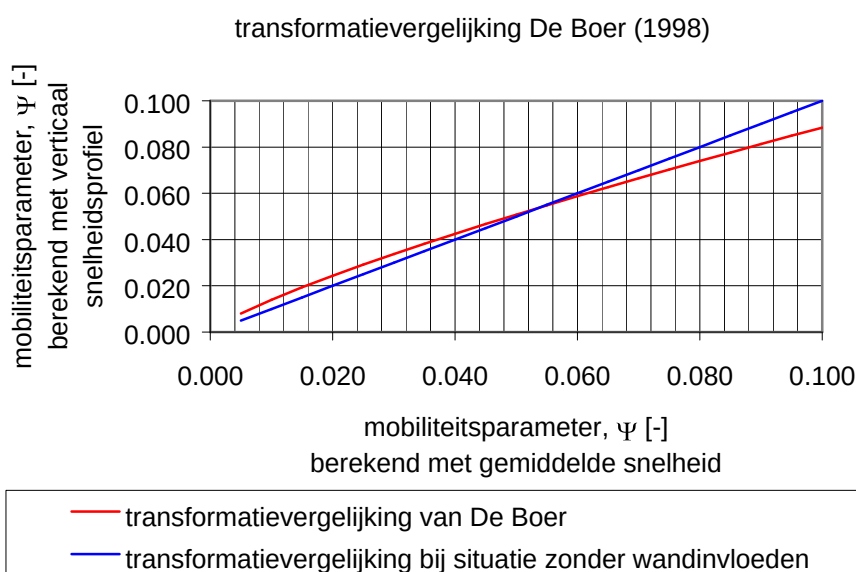
De stroming wordt echter beïnvloed door de wanden; dit is niet te verwaarlozen (zie paragraaf 2.5). De stromingsbelasting wordt hierdoor in de as van de goot onderschat wanneer de mobiliteitsparameter is bepaald met de gemiddelde snelheid. De stromingsbelasting bepaald met het snelheidsprofiel geeft lokaal (in de as van de goot) de correcte waarde weer, oftewel:

$$\Psi_{\text{gem. snelh.}} < \Psi_{\text{snelh. profiel}}$$

De transformatievergelijking bepaald door De Boer geeft bij hoge belastingen echter een overschatting van de mobiliteitsparameter bepaald met de gemiddelde snelheid, ten opzichte van de mobiliteitsparameter bepaald met het verticaal snelheidsprofiel.

$$\Psi_{\text{gem. snelh.}} > \Psi_{\text{snelh. profiel}}$$

Dit is niet mogelijk, de mobiliteitsparameter bepaald met de gemiddelde snelheid kan niet hoger zijn dan de mobiliteitsparameter bepaald met het snelheidsprofiel. Dit afwijkend resultaat moet worden toegeschreven aan meetfouten in de snelheid en een onnauwkeurige trendlijn. De transformatievergelijking is te zien in figuur 6-1.



Figuur 6-1 transformatievergelijking De Boer (1998)

6.3 Transportparameter

Het transport van bodemmateriaal is bij de onderzoeken van Forschelen, Paintal en De Boer gelijk gedefinieerd maar op verschillende manieren bepaald.

Definitie transport

Het transport van bodemmateriaal is als volgt gedefinieerd: het volume korrelmateriaal dat per eenheid van breedte loodrecht op de stromingsrichting en per eenheid van tijd wordt verplaatst. Dit kan worden opgevat als het volume korrelmateriaal dat door een denkbeeldig vlak wordt getransporteerd per tijdseenheid, zie formule (6-5). (Bij het onderzoek van De Boer wordt gewerkt met de mediaan van de nominale korreldiameters en niet met de mediaan van de korreldiameters).

$$q_{s*} = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}} \quad (6-5)$$

In rapport Q2395.40 van het Waterloopkundig Laboratorium wordt het verschil in transport van de formules van De Boer en Paintal toegeschreven aan een verschil in definitie van transport. Volgens het W.L. is het transport bij het onderzoek De Boer gedefinieerd als het volume aan korrelmateriaal dat in een vak verplaatst. De lengte van de vakken is meerdere malen groter dan de verplaatsingsafstand van de stenen, zodat het transport wordt onderschat wanneer het aantal stenen wordt geteld dat uit het vak verplaatst.

De redenering van het W.L. zal met een voorbeeld worden toegelicht. Dit citaat is afkomstig uit een E-mail die door een schrijver van het betreffende rapport, H. Verheij is verstuurd:

'Stel de gemiddelde spronglengte is 0.10 m en de vaklengte is ook 0.1 m. Alle verplaatste stenen tussen de boven- en benedenstroomse begrenzing van het vak zullen dan een raai passeren (de raai valt samen met de benedenstroomse begrenzing van het vak). Als de vakgrootte 0.20 m is, dan geldt dit alleen voor de stenen in een strook van 0.10 m direct bovenstrooms van de raai. Alle meer bovenstrooms gelegen verplaatste stenen blijven in het vak (de afstand tot de raai is immers groter dan de gemiddelde spronglengte), m.a.w. deze stenen tellen niet mee bij het transport, want zij zijn niet te onderscheiden. Bij nog grotere vakafmetingen neemt het geregistreerde deel van het transport af, dus is er sprake van een toenemende onderschatting.'

Deze redenering is echter niet van toepassing op het onderzoek van De Boer. Het transport bij het onderzoek van De Boer is gedefinieerd als het volume bodemmateriaal dat door een raai verplaatst. Het aantal stenen dat naar een ander vak verplaatst werd genoteerd; hiermee kan het transport worden berekend per tijdseenheid volgens de definitie.

Meettechniek bepalen transport

Bij de onderzoeken zijn verschillende meettechnieken gebruikt. Deze meettechnieken zijn beschreven in hoofdstuk 3 en 4, maar worden hier kort samengevat:

- **Forschelen**

In de stroomgoot is een verticaal vlak verlicht. Tijdens een meting werden alle stenen verlicht die door de raai werden verplaatst. Het aantal stenen werd genoteerd. Alleen het bodemmateriaal dat in de binnenste 10 cm van de goot door het vlak werd verplaatst, werd verwerkt in de resultaten.

- **Paintal**

Bij dit onderzoek was een sedimentvang in de goot geplaatst. Het materiaal dat na de meting in de sedimentvang lag, was verplaatst gedurende de meting. Het transport is gemeten over de gehele breedte van de stroomgoot en komt overeen met de hoeveelheid korrelmateriaal dat door een vlak is verplaatst. Het vlak zou zich dan aan de bovenstroomse rand van de sedimentvang bevinden.

- **De Boer**

Er zijn gekleurde vakken gebruikt in de stroomgoot loodrecht op de stroomrichting. Het transport werd bepaald door na de meting het aantal stenen te noteren dat naar een ander vak was verplaatst. Dit komt overeen met het transport door een raai gedurende de meting. De grenzen tussen de vakken kunnen worden beschouwd als raaien. Bij het onderzoek van De Boer is het transport van bodemmateriaal gemeten in de middelste 30 cm van de goot, het transport van bodemmateriaal langs de wanden (5 cm) is niet gemeten.

De volgende conclusie kan uit het onderzoek van Forschelen worden getrokken:

Uit paragraaf 5.4 blijkt dat 50% van het bedmateriaal wordt getransporteerd in de as van de goot (10 cm). Dit is het geval bij een stromingssituatie waarbij de verhouding breedte/hoogte van de stroomvoerende doorsnede ongeveer twee is. Bij het onderzoek van De Boer is de breedte/hoogte verhouding van de stroomvoerende doorsnede ongeveer twee; dit betekent dat de stroming buiten de as van de goot bij dit onderzoek ook beduidend lager moet zijn dan in de as van de goot (binnenste 10 cm). Het transport van bedmateriaal is gemeten over 30 cm breedte in de goot. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het transport bij het onderzoek van De Boer is onderschat. Er is minder transport gemeten dan bij de vastgestelde mobiliteitsparameter in de as van de goot. Het transport in de as van de goot komt overeen met de mobiliteitsparameter. De mate waarin het transport bij het onderzoek van De Boer is onderschat kan niet worden aangegeven uit de resultaten van het onderzoek van Forschelen. Het is erg gewaagd om een voorspelling te maken van het transport vanwege de zeer sterke relatie tussen de snelheid en het transport stroming (Engelund en Hansen : $q_{s*} \propto u^5$ en Paintal : $q_{s*} \propto u^{32}$). Dit blijkt ook uit de spreiding van de resultaten van de experimenten in dit onderzoek. De resultaten van het onderzoek van De Boer kunnen hierdoor niet worden meegenomen in het vervolg van dit onderzoek.

Bij het onderzoek van Paintal is telkens een lagere breedte/hoogte verhouding gebruikt bij de stroomvoerende doorsnede (de breedte/hoogte verhouding van de stroomvoerende doorsnede is telkens ongeveer negen). De invloed van de wanden was hierdoor veel lager waardoor Het transport niet is onderschat bij het onderzoek van Paintal.

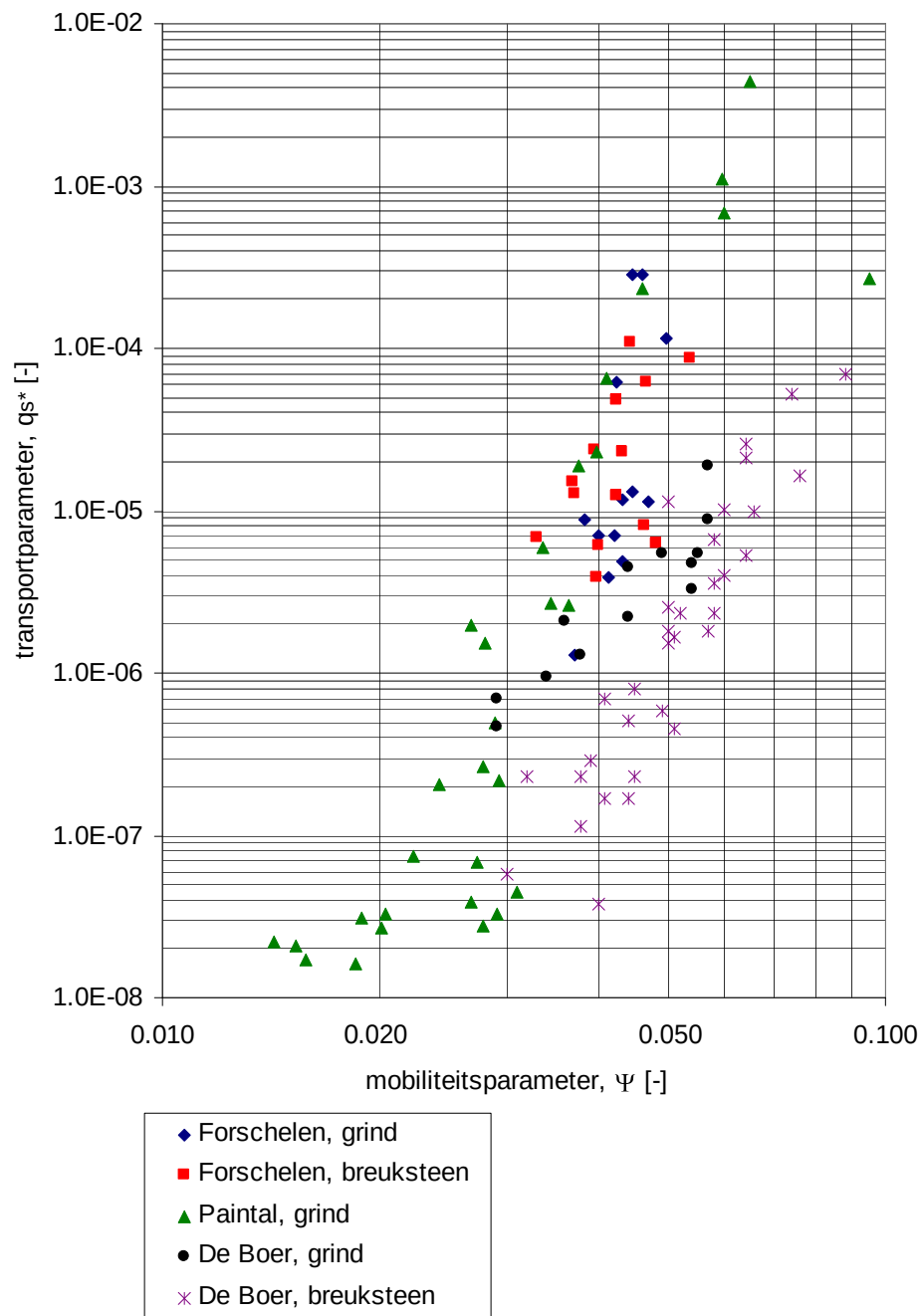
6.4 Evaluatie

Met gebruik van eenduidige definities kunnen de resultaten van de verschillende onderzoeken worden vergeleken. Ondanks dat dezelfde omstandigheden zijn gecreëerd bij de onderzoeken, verschillen de resultaten beduidend. Dit moet worden veroorzaakt door het verschil in bepalen van de mobiliteitsparameter en de transportparameters en de verschillende meettechnieken. De mobiliteitsparameters zijn bij de onderzoeken als volgt bepaald:

- Forschelen: globaal bepaald uit de schuifspanning door het bed
- Paintal: globaal bepaald uit de schuifspanning door de korrels
- De Boer: lokaal bepaald uit snelheidsprofiel en toegepast voor gehele goot

Uit figuur 6-2 (zie pagina 60) blijkt dat het transport niet eenduidig wordt voorspeld door de mobiliteitsparameters te gebruiken die door de onderzoekers zijn voorgeschreven. De resultaten in figuur 6-2 hebben geen waarde, de mobiliteitsparameter is niet eenduidig gedefinieerd.

Experimenten Forschelen, Paintal en De Boer, oorspronkelijke mobiliteitsparameter van elk onderzoek



Figuur 6-2 experimenten Forschelen, Paintal en De Boer, met oorspronkelijke mobiliteitsparameter volgens elk onderzoek

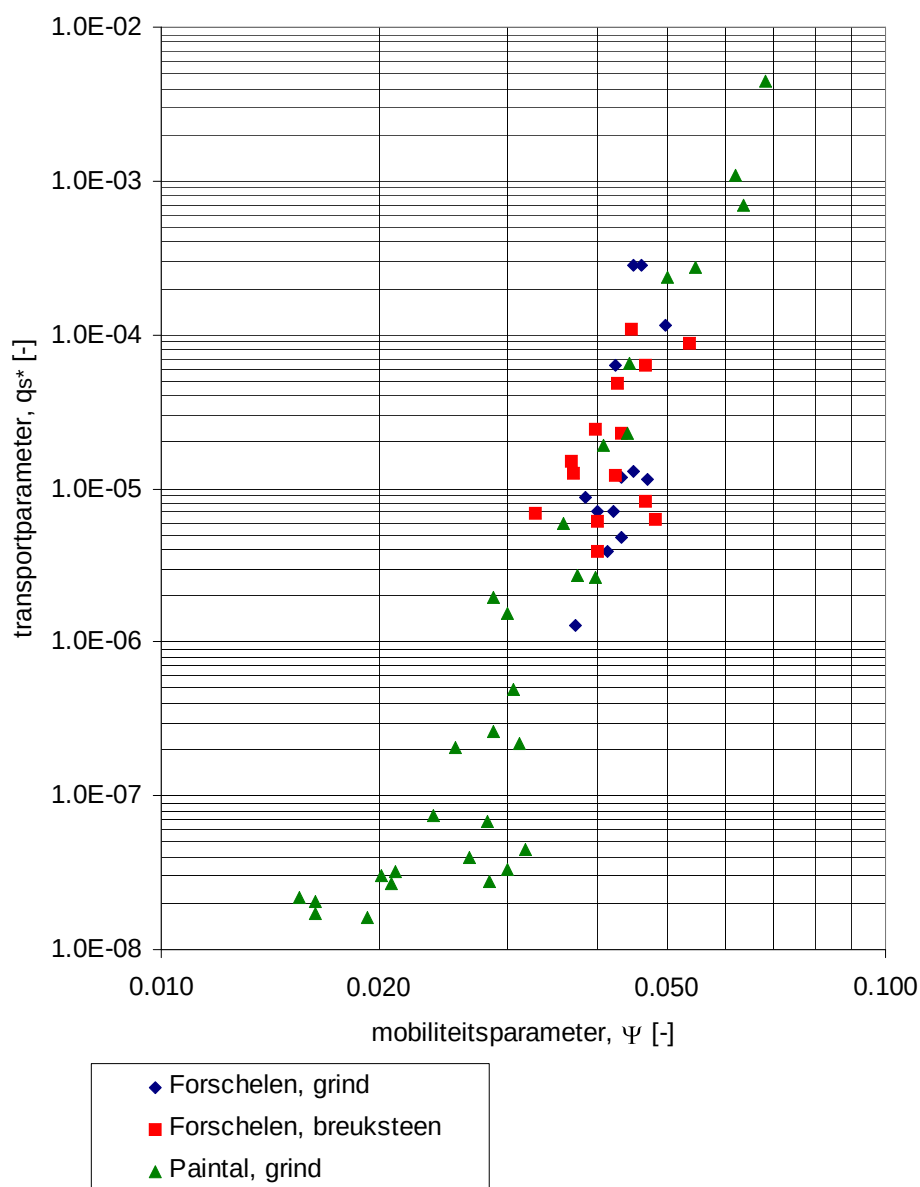
De mobiliteitsparameter is in het onderzoek De Boer lokaal bepaald, in de as van de goot. De stroomsnelheid is in de as van de goot maximaal, hierdoor wordt ook een hoge mobiliteitsparameter afgeleid. Het transport is bepaald over de binnenste 30 cm van de goot, slechts 5 cm aan de wanden is niet benut om transport van bodemmateriaal te meten. De stroming is bij de wanden lager dan in de as van de goot; dit heeft twee consequenties:

- De mobiliteitsparameter wordt bij de wanden overschat want de stroomsnelheid is lager.
- Er is minder transport bij de wanden van de goot want er is een lagere stroomsnelheid.

Het gemeten transport van bodemmateriaal is hierdoor niet representatief voor de bepaalde mobiliteitsparameters of vice versa. De resultaten kunnen hierdoor niet worden vergeleken met de andere onderzoeken. Voortaan zullen alleen de onderzoeken van Forschelen en Paintal worden vergeleken.

In figuur 6-3 zijn de resultaten van de onderzoeken van Forschelen en Paintal uitgezet tegen de mobiliteitsparameter gerelateerd aan de schuifspanning van het gehele bed. De resultaten van de onderzoeken liggen dicht bij elkaar. De spreiding van het transport bij een gegeven mobiliteitsparameter is echter hoog en is bij beide onderzoeken ongeveer gelijk.

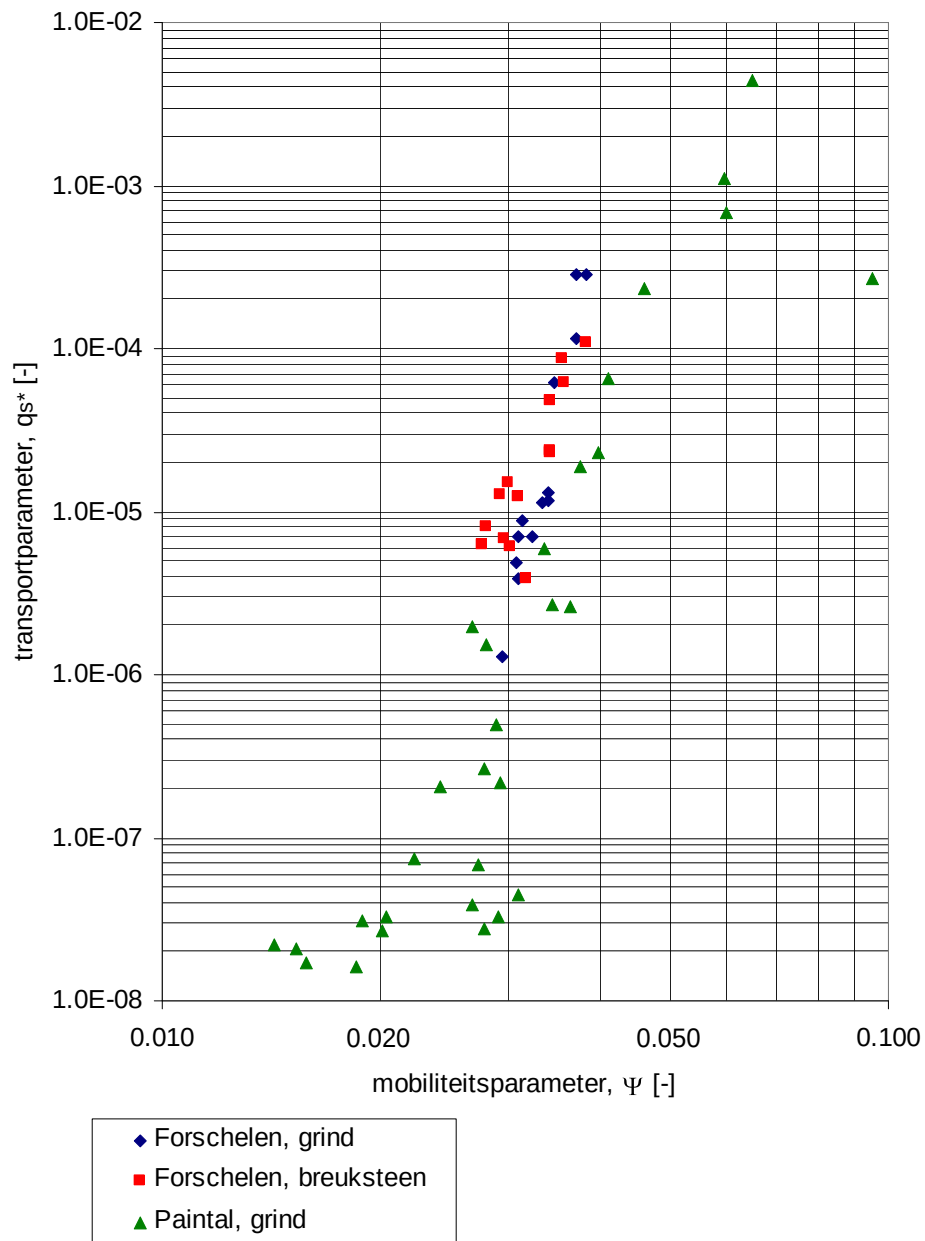
Experimenten Forschelen en Paintal, mobiliteitsparameter met schuifspanning van gehele bed



Figuur 6-3 experimenten Forschelen en Paintal, mobiliteitsparameter gerelateerd aan schuifspanning door het bed

In figuur 6-4 zijn de resultaten van de onderzoeken van Forschelen en Paintal uitgezet tegen de mobiliteitsparameter gerelateerd aan de schuifspanning van alleen de korrels. De resultaten van de onderzoeken komen nu minder overeen. De spreiding van de resultaten is echter lager ten opzichte van de spreiding in figuur 6-2 en 6-3.

**Experimenten Forschelen en Paintal,
mobiliteitparameter met schuifspanning van alleen korrels**



Figuur 6-4 experimenten Forschelen en Paintal, mobiliteitsparameter gerelateerd aan schuifspanning door de korrels

Door figuren 6-2, 6-3 en 6-4 te vergelijken kunnen de volgende opmerkingen worden gemaakt:

Maatgevende schuifspanning

De resultaten van de experimenten van de verschillende onderzoeken komen beter overeen wanneer Ψ_{bed} (de mobiliteitsparameter van de schuifspanning van het gehele bed) wordt gebruikt dan wanneer Ψ_{korrel} (de mobiliteitsparameter van alleen de schuifspanning van de korrels) wordt gebruikt. De spreiding van de resultaten is echter bij beide onderzoeken telkens erg hoog (de resultaten van de metingen variëren bij een mobiliteitsparameter factor vijf tot tien). De spreiding van de resultaten bij een mobiliteitsparameter gerelateerd aan de korrelschuifspanning is lager dan bij een mobiliteitsparameter gerelateerd aan de bodemschuifspanning. Dit geldt niet voor de resultaten van de experimenten van het onderzoek Paintal. De spreiding is bij beide mobiliteitsparameters ongeveer gelijk.

In het onderzoek van Paintal is de mobiliteitsparameter gerelateerd aan de ruwheid van de korrels met $k = d_{65}$. Bij het onderzoek van Forschelen is telkens een vlak bed aangelegd en de ruwheid afgeleid, $k = 2$ a $4d_{50}$. Bij een vlak bed is de ruwheid van het bed gelijk aan de ruwheid van de korrels (de ruwheid van de vorm van het bed is te verwaarlozen). De waarde van de ruwheid die in het onderzoek van Forschelen is afgeleid komt overeen met de resultaten van andere onderzoeken zoals Visser (1986) en Yalin (1992). Yalin maakt de aanbeveling om het transport van sediment te relateren aan de ruwheid van de korrels, de korrelruwheid is $k = 2d_{50}$. De waarde die aan de ruwheid van de korrels wordt toegeschreven is in de literatuur echter niet eenduidig.

Bij de onderzoeken van Forschelen en Paintal is in de stroomgoot telkens met dezelfde methode een vlak bed aangelegd. Bij het onderzoek van Paintal worden er echter telkens lagere ruwheden afgeleid voor het bed ($k/d_{50} = 0.6$ tot 2.0) dan bij het onderzoek van Forschelen ($k/d_{50} = 1.6$ tot 4.3). Het lijkt dat in het algemeen het bed in het onderzoek van Forschelen ruwer is dan bij het onderzoek van Paintal. Het verschil in mobiliteitsparameter gerelateerd aan de korrelschuifspanning of aan de bodemschuifspanning heeft hierdoor ook meer invloed in het onderzoek van Forschelen dan het onderzoek van Paintal wanneer een korrelruwheid wordt gehanteerd met waarde $k/d_{50} = 0.9$ tot 1.1 .

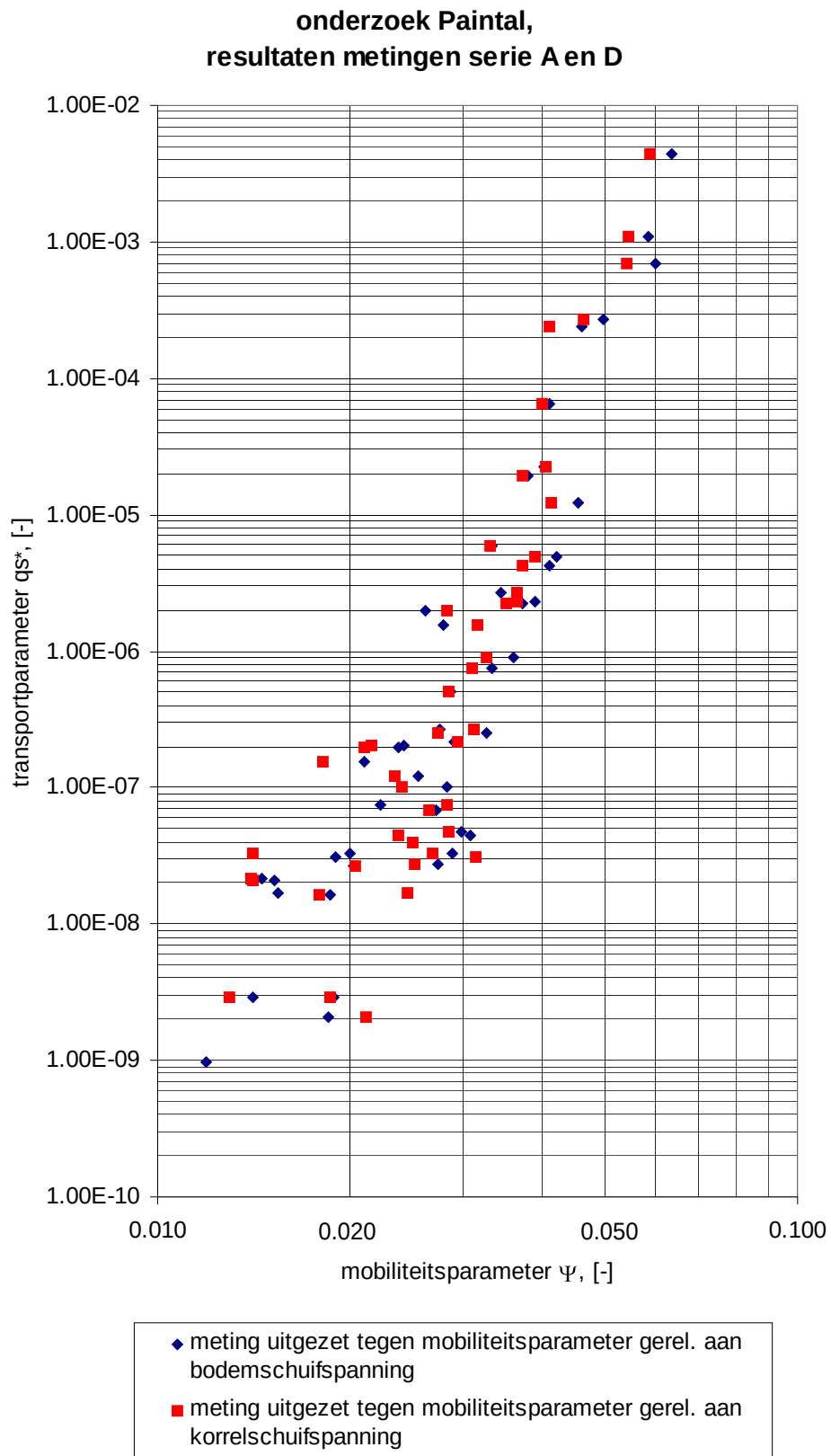
Verklaring verschillen onderzoeken Paintal en De Boer

De verschillen tussen de resultaten van de onderzoeken van Paintal en van De Boer kunnen met de volgende argumenten worden verklaard:

- De mobiliteitsparameter is bij het onderzoek van De Boer gerelateerd aan de snelheid van de vloeistof in de as van de goot. In de as van de goot is de snelheid van de vloeistof echter hoger dan elders in de goot. Het transport is gemeten over bijna de gehele breedte van de goot waardoor minder transport wordt gemeten dan maatgevend is voor de stromingsbelasting in de as van de goot.
- De mobiliteitsparameter verschilt bij de onderzoeken. Bij het onderzoek van De Boer wordt de mobiliteitsparameter gerelateerd aan de schuifspanning van het gehele bed en bij Paintal wordt de mobiliteitsparameter gerelateerd aan alleen de schuifspanning van de korrels in het bed.
- Het bodemmateriaal wordt bij de onderzoeken van Paintal en De Boer met verschillende diameters gekarakteriseerd. Bij beide onderzoeken wordt de mobiliteitsparameter berekend met de mediaan van de korreldiameter. De transportparameter wordt echter bij het onderzoek van De Boer berekend met de mediaan van de nominale korreldiameter en bij het onderzoek van Paintal met de mediaan van de korreldiameter.

Bodemtransportformule Paintal

Wanneer de formule van Paintal wordt gebruikt om met een mobiliteitsparameter het transport te voorspellen, moet de mobiliteitsparameter niet worden gerelateerd aan de schuifspanning van het gehele bed. De formule van Paintal is afgeleid met een mobiliteitsparameter gerelateerd aan de schuifspanning van alleen de korrels. Dit leidt tot een overschatting van het transport. De formule van Paintal kan worden herschreven in een relatie tussen de mobiliteitsparameter gerelateerd aan de schuifspanning van het gehele bed en de transportparameter. Zo wordt voorkomen dat het transport wordt overschat, zie figuur 6.5.



Figuur 6-5 onderzoek Paintal, resultaten metingen serie A en D

Dit moet echter worden gezien tegenover de nauwkeurigheid van voorspellen van transport. De spreiding bij de experimenten van het onderzoek van Paintal is erg hoog (het transport varieert bij een mobiliteitsparameter van 0.02 van factor 10 tot 100). De invloed van de correctie is hierdoor beperkt.

Hoofdstuk 7 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de conclusies gepresenteerd die uit het onderzoek zijn getrokken. De doelstelling van dit onderzoek is:

'Verklaren van de verschillen tussen de formules van De Boer en Paintal. Verder wordt gekeken naar twee invloeden op het transport van bodemmateriaal, namelijk:

- de invloed van de vorm van het bodemmateriaal op het transport
- de invloed van de tijd op het transport van het bodemmateriaal.'

De conclusies zijn afgeleid uit literatuuronderzoek en de experimenten die zijn uitgevoerd in het laboratorium.

7.1 Conclusies

1. De verschillen tussen de resultaten van de onderzoeken van Paintal (1969) en De Boer (1998) zijn hoofdzakelijk te verklaren uit de verschillen in meettechnieken en definities.

ad. 1: De resultaten zijn uitgedrukt in twee parameters: de mobiliteitsparameter en de transportparameter. Beide parameters zijn bij de onderzoeken verschillend bepaald en de mobiliteitsparameter is bij beide onderzoeken verschillend gedefinieerd. Hierdoor ontstaan de verschillen in de resultaten. Bij conclusies 2 en 3 worden de verschillen uitgewerkt.

2. De mobiliteitsparameter is in het onderzoek van Paintal (1969) en het onderzoek van De Boer (1998) verschillend gedefinieerd. Het verschil in transport kan worden verminderd door dezelfde definitie voor de mobiliteitsparameter te gebruiken.

ad. 2: Paintal (1969) gebruikt in zijn onderzoek een mobiliteitsparameter die is gerelateerd aan de korrelschuifspanning. De korrelschuifspanning komt overeen met de schuifspanning die door de stroming wordt uitgeoefend op de korrels bij een zeer vlak bed. In het onderzoek van De Boer (1998) wordt de mobiliteitsparameter gerelateerd aan de korrel- én de vormschuifspanning; dit is gelijk aan de schuifspanning van het bed. Door de resultaten van de onderzoeken tegen dezelfde mobiliteitsparameter uit te zetten om het transport te voorspellen, worden de verschillen in transport verminderd, zie paragraaf 6.2.

3. De transportparameter is in het onderzoek van Paintal en het onderzoek van De Boer gelijk gedefinieerd. Bij het onderzoek van De Boer wordt echter het transport onderschat door het transport te meten over bijna de gehele breedte van de goot.

ad. 3: De mobiliteitsparameter wordt in het onderzoek gerelateerd aan het verticale snelheidsprofiel in de as van de goot. Hierdoor wordt minder transport gemeten dan representatief is bij de mobiliteitsparameter. Verder wordt in het onderzoek van Paintal de mediaan van de korreldiameter gebruikt en bij het onderzoek van Paintal wordt de mediaan van de nominale korreldiameter gebruikt om het volume bodemmateriaal te berekenen, zie paragraaf 6.3

4. Afhankelijk van de definitie van de mobiliteitsparameter verschillen de resultaten van het onderzoek van Forschelen en Paintal (1969). Bij een mobiliteitsparameter gerelateerd aan de schuifspanning van het gehele bed is het transport bij het onderzoek van Forschelen gelijk aan het transport bij het onderzoek van Paintal (1969).

ad. 4: Bij een mobiliteitsparameter gerelateerd aan de schuifspanning van de korrels verschilt het transport (het transport wordt in het onderzoek van Paintal ongeveer factor 2 tot 5 onderschat ten opzichte van de resultaten van de experimenten van dit onderzoek), zie paragraaf 6.4.

5. Wanneer een bed hydraulisch wordt belast, zal het zich daar op instellen. Bij het begin van belasten treedt er een rijpingsproces op. Het bed versterkt zich gedurende de belasting. Het transport van bodemmateriaal is bij dit onderzoek in 90% van de gevallen één tot zes keer hoger dan na het rijpingsproces. Nadat het bed zich heeft ingesteld op de stroming, blijft het transport van bodemmateriaal gelijk per tijdseenheid per eenheid van breedte.

ad. 5: Dit kan worden verklaard door te kijken naar de opbouw van het bed. Bij begin van belasten van het bed zijn er korrels aanwezig die veel belasting ondervinden doordat ze relatief ver boven het bed uitsteken. Deze korrels zullen na korte tijd van belasten zijn verplaatst. Na deze korte tijd van belasten bestaat het bed alleen nog uit korrels die minder ver boven het bed uitsteken. Dit is een ingesteld oftewel gerijpt bed. Bij een gerijpt bed zijn er minder korrels die boven het bed uitsteken waardoor het transport vermindert. Nadat het bed zich heeft ingesteld blijft het aantal korrels dat verplaatst per tijdseenheid en eenheid van breedte gelijk. Dit kan worden verklaard door te kijken naar de hydraulische belasting. De hydraulische belasting die de korrels moet ondervinden om te verplaatsen is afhankelijk van de snelheid van de stroom. Bij een hydraulisch ruwe bodem varieert de snelheid door turbulente wervelingen. De turbulente wervelingen zijn normaal verdeeld waardoor de kans dat korrels verplaatsen per tijdseenheid gelijk is. Wanneer de bodemsituatie en de belasting gelijk blijven, verplaatsen er per tijdseenheid en per eenheid van breedte dezelfde hoeveelheid bodemmateriaal na de insteltijd, zie paragraaf 5.2.

6. Bij een mobiliteitsparameter gerelateerd aan de schuifspanning door het bed, met waarde 0.040 - 0.045, heeft de vorm van het bodemmateriaal geen invloed op het transport per tijdseenheid per eenheid van breedte (zie paragraaf 5.3).
7. De verhouding waterdiepte/korrel diameter heeft bij een waarde van 10 en 25 geen verschillende invloed op het transport van bodemmateriaal.

ad.7: Bij de experimenten van dit onderzoek is de waterdiepte gevarieerd; de waarde van de mobiliteitsparameter en de korrelverdeling zijn hierbij constant gehouden. Dit had geen invloed op het transport. Bij een verhouding waterdiepte/korrel diameter van ongeveer 10 en 25 werden bij een gelijke mobiliteitsparameter dezelfde hoeveelheden transport gemeten, zie paragraaf 5.3.

8. Wanneer de stroomvoerende doorsnede in de goot een lage breedte/diepte verhouding heeft, moet er rekening worden gehouden met invloed van de zijwanden op het transport van bodemmateriaal. Bij een hoge breedte/diepte verhouding is er minder invloed van de zijwanden op het transport van bodemmateriaal.

ad. 8: Uit de experimenten van dit onderzoek blijkt dat bij een breedte/diepte verhouding van de stroomvoerende doorsnede van $B/h=2$, het transport in het middengebied (10 cm ter plaatse van de as van de goot) beduidend hoger is dan in de wandgebieden (beide zijden 14 cm). Bij een hogere breedte/diepte verhouding is de invloed van de zijwanden lager. Dit is te verklaren uit de invloed van de wanden op de stroming, zie paragraaf 5.4.

9. Bij een stroming in een smalle goot, die in de as van de goot als eenparig kan worden beschouwd, is er een netto-dwarstransport vanuit de as van de goot naar de zijwanden van de goot.

ad. 9: Het netto-dwarstransport is te verklaren door de verdeling van de stroomsnelheden te bekijken. De stroomsnelheid is hoger in de as van de goot dan bij de wanden. Hierdoor wordt meer bodemmateriaal verplaatst in de as van de goot dan aan de wand. De turbulente fluctuaties bij de as van de goot zijn ook groter dan bij de wanden. De turbulente fluctuaties zijn drie-dimensionaal waardoor meer stenen in de dwarsrichting verplaatsen in de as van de goot dan bij de wanden, zie paragraaf 5.4.

7.2 Aanbevelingen

De aanbevelingen kunnen in twee delen worden gesplitst: de aanbevelingen met betrekking tot de opzet van de bodemtransportformules en de parameters en aanbevelingen met betrekking tot het onderzoek naar transport van bodemmateriaal.

Bodemtransportformules en parameters

De mobiliteitsparameter wordt in de literatuur met meerdere methoden bepaald. Englund en Hansen (1967) bepalen de mobiliteitsparameter met behulp van experimentele relaties. Meyer-Peter en Müller (1947) vermenigvuldigen een dimensieloze ribbelcoëfficiënt met de dimensieloze schuifspanning en Paintal (1969) berekent de mobiliteitsparameter met een gereduceerde ruwheid. Deze methoden zijn opgesteld om een voorspelling te doen van het transport van bodemmateriaal veroorzaakt door een uniforme stroming. Er zijn echter nog onduidelijkheden over de maatgevende schuifspanning die moet worden gebruikt om de mobiliteitsparameter te berekenen. In de literatuur wordt aangenomen dat de schuifspanning van de korrel kan worden gerelateerd aan verschillende ruwheden van de korrels ($k = d_{65}$ en $k = 2d_{65}$). Hierdoor wordt een lage mobiliteitsparameter gerelateerd aan hoge transporten van bodemmateriaal. Deze aanname wordt echter maar ten dele beargumenteerd zodat meer onderzoek is gewenst.

Uit dit onderzoek volgt dat bij gebruik van de formule van Paintal, het transport wordt overschat, wanneer de mobiliteitsparameter van de totale schuifspanning wordt ingevoerd. Ook de bodemruwheid die bij de experimenten van het onderzoek van Paintal is gemeten is niet representatief voor de ruwheid die in de praktijk wordt gevonden. Hierdoor zal in de praktijk minder bodemmateriaal verplaatsen dan door Paintal is voorspeld. Het is praktisch om de transportformule van Paintal om te schrijven tot een relatie tussen de mobiliteitsparameter van de schuifspanning van het vlakke bed en de transportparameter.

Onderzoek naar transport van bodemmateriaal

In dit onderzoek is een meettechniek ontwikkeld om het transport van bodemmateriaal door een raai te kunnen tellen. Deze techniek is niet toegepast, omdat de betrouwbaarheid nog te wensen over laat. Bij volgende onderzoeken kan het echter nuttig zijn om het transport van bodemmateriaal geautomatiseerd te verwerken nadat de betrouwbaarheid van de techniek is verbeterd door bijvoorbeeld de kwaliteit van het beeldmateriaal te verbeteren. Op deze manier kan de data efficiënt worden verwerkt en tijd worden bespaard. De meetmethode van verlichten van een raai en visueel analyseren van de beelden is erg arbeidsintensief en niet aan te bevelen.

Een alternatief voor het meten van transporten is de methode die bij het onderzoek van De Boer (1998) is gebruikt. Het aanleggen van strokenpatronen in de dwarsrichting van de stroomgoot en na afloop van de meting het tellen van het aantal verplaatste stenen. Deze methode van meten is minder arbeidsintensief en kan ook bij lagere hydraulische belastingen worden gebruikt. Door een bredere kantelgoot te gebruiken in volgende onderzoeken is het mogelijk om transporten te meten bij lagere hydraulische belastingen. De kantelgoot die bij dit onderzoek is gebruikt, heeft de beperking dat alleen het transport van bodemmateriaal in de as van de goot kan worden gebruikt als referentie. Bij een bredere goot kan een groter oppervlak worden benut voor de metingen waardoor de kans dat er stenen verplaatsen in de goot groter is (de kans dat stenen verplaatsen in de goot bij lage belasting is afhankelijk van de breedte van de goot). De metingen kunnen hierdoor nauwkeuriger worden en er kunnen lagere transporten worden gemeten.

Bijlagen

Bijlage I	:	Ontwikkelen meettechniek : verwerken meetdata
Bijlage II	:	Ontwikkelen meettechniek : instellen beeldkwaliteit
Bijlage III	:	Data onderzoek Forschelen
Bijlage IV	:	Data onderzoek Paintal (1969)
Bijlage V	:	Data onderzoek De Boer (1998)
Bijlage VI	:	Figuren onderzoeken Forschelen, Paintal en De Boer
Bijlage VII	:	Specificatie vorm bodemmateriaal

Bijlage I Ontwikkeling meettechniek : verwerken data

I.1 Inleiding

De ontwikkeling van de meettechniek is een proces waarbij afwisselend aan de data analyse en de beeldkwaliteit is gewerkt. Het verwerken van de data is een facet waarbij software en hardware zijn afgesteld. Bij het facet van ontwikkelen van de beeldkwaliteit is geëxperimenteerd met de proefopstelling. Om een duidelijke scheiding aan te geven tussen de twee verschillende facetten van de meettechniek zijn ze apart beschreven in opeenvolgende bijlagen. In Bijlage I is de data-analyse beschreven en in Bijlage II de beeldkwaliteit.

Om een beeld te krijgen van de methodiek van de data-analyse, is deze in paragraaf I.2 kort beschreven. Enkele onderdelen hiervan zoals het omzetten van beeldmateriaal, de methode van analyse met *LookandC* en de analyse van de data-lichtintensiteit, zijn in paragraaf I.3, I.4 en I.5 toegelicht. In de laatste paragraaf van deze bijlage wordt de methode van verwerken van data geëvalueerd en worden aanbevelingen gedaan.

I.2 Methodiek

De methode van verwerken van data bestaat uit vier stappen die de methodiek aangeven, volgens welke de data worden verwerkt. Deze stappen zijn in deze paragraaf kort beschreven.

Stap 1: maken van beeldmateriaal.

Voor het verkrijgen van beeldmateriaal van de raai tijdens de meting moet een digitale camera worden gebruikt, die loodrecht op de raai staat gericht. De digitale camera moet tijdens de meting opnamen maken van de raai waar de stenen door verplaatsen. De stenen die tijdens het verplaatsen door de raai worden verlicht, worden dan aangeduid als het transport per afstand per tijdseenheid.

Om er voor te zorgen dat alle stenen die door de raai transporteren in beeld komen, is het nodig dat de camera loodrecht op het vlak van de raai is gericht. Zo wordt voorkomen dat door het perspectief stenen in de raai het zicht op andere stenen, die ook door de raai verplaatsen, blokkeren. Dit zou betekenen dat minder transport wordt gemeten dan in werkelijkheid plaats vindt. De ligging van de raai zal in paragraaf II.3 worden beschreven.

Stap 2: omzetten van beeldmateriaal.

Voordat het beeldmateriaal kan worden verwerkt, moet het worden omgezet van video naar bitmap-bestanden. Het gebruik van een beeldverwerkingpakket is hierbij noodzakelijk. Een pakket dat gebruikt kan worden is Sony DV capture of MIRO capture. De nauwkeurigheid is afhankelijk van het gebruikte systeem waarmee het beeldmateriaal wordt omgezet. In paragraaf I.3 zal het omzetten van het beeldmateriaal worden beschreven.

Stap 3: analyse aan de hand van *LookandC*

Bij deze stap is gebruik gemaakt van het programma *LookandC* geschreven door A. den Toom in opdracht van het Laboratorium voor Vloeistofmechanica. Dit programma is ontworpen voor het verwerken van beeldmateriaal. Om dit programma te kunnen gebruiken voor dit onderzoek zijn enkele aanpassingen gemaakt. Dit programma verwerkt de bitmap-bestanden tot data-bestanden. Door een gedeelte van het beeld te selecteren in de vorm van een rechthoek, wordt in dit gebied de totale waarde van alle pixels, die in dit gebied liggen, opgeteld. In deze data-bestanden zijn de totale waarden van de lichtintensiteit per geselecteerde rechthoek opgeslagen. Aan de hand van deze data- bestanden worden in de volgende stap de beeldmaterialen geanalyseerd. In paragraaf I.4 zal de methode worden beschreven waarmee dit programma de bitmap bestanden verwerkt.

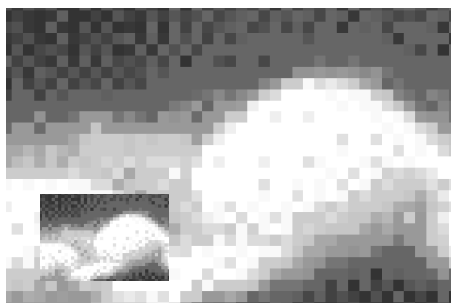
Stap 4: interpreteren van de verschillen in lichtintensiteit

In de laatste stap van deze meettechniek wordt het aantal stenen bepaald die per tijdseenheid door de raai worden verplaatst. Dit kan door patronen te herkennen bij verschillen in totale waarden van pixels (voortaan lichtintensiteiten genoemd) in de rechthoek van opeenvolgende beelden. In paragraaf I.5 wordt een procedure hiervoor beschreven.

I.3 Omzetten van beeldmateriaal

Bestanden van het type bitmap zijn vergelijkbaar met tekeningen die zijn opgebouwd uit een raster waarin de vlakjes wel of niet zijn gevuld. Elke vlakje vormt een puntje van de tekening en wordt pixel genoemd. Hoe meer pixels op een gegeven oppervlakte, hoe meer detail er op de illustratie zichtbaar is. Dit wordt de resolutie van de afbeelding genoemd. De resolutie is tijdens de ontwikkeling van de meettechniek gevarieerd, maar heeft weinig invloed op de betrouwbaarheid. In het onderzoek is voortaan een standaard resolutie gebruikt van 640 bij 480 pixels. In figuur I-1 is een gedeelte van een vergroting te zien van een bitmap bestand.

De bitmap-afbeelding die wordt gemaakt, bestaat uit 640 bij 480 pixels. Dit is gebruikelijk wanneer je gebruik maakt van een digitale camera. Het is echter voor dit onderzoek niet nodig om het gehele beeld te gebruiken. In dit onderzoek is alleen beeldmateriaal nodig van een gedeelte van de raai net boven de bodem. De stenen die door de raai transporteren, verplaatsen namelijk net boven de bodem tot maximaal enkele steenhoogten boven de bodem. Door alleen dit beeldmateriaal te gebruiken en het overige materiaal niet te bewaren, is het mogelijk de ruimte van het geheugen efficiënter te gebruiken. Zo wordt het dus mogelijk om voor langere tijd metingen te analyseren.



Figuur I-1 voorbeeld bitmap tekening vergroot

I.4 Methode van analyse met behulp van LookandC

Met behulp van het programma *LookandC* is het mogelijk om de waarde te berekenen die overeenkomt met de totale waarde van alle pixels in een geselecteerde rechthoek in het beeld van de raai. De waarde van de pixel komt overeen met de kleur die het puntje in de tekening laat zien. Deze waarde kan variëren van 0 (zwart) tot 255 (wit). Lage waarden van pixels komen overeen met donkere kleuren en hoge waarden met lichte kleuren. Op deze manier is een overgang gedefinieerd van donker naar licht in 256 stappen. Door de totale waarde te berekenen van alle pixels die in de geselecteerde rechthoek liggen, kan een uitspraak worden gedaan over de gemiddelde kleur die in de desbetreffende rechthoek voorkomt.

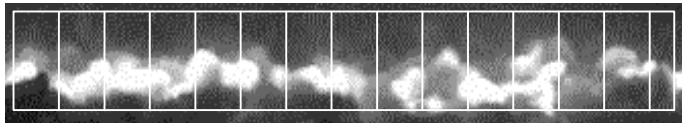
Deze methode is bij dit onderzoek gehanteerd om een uitspraak te kunnen doen over het aantal stenen dat per tijdseenheid de raai passeert. Er is een rechthoek gedefinieerd juist boven de bodem, zodat alle stenen die door de raai verplaatsen ook door de rechthoek verplaatsen. Wanneer in een bitmap-bestand een steen door de raai wordt verplaatst is dit te zien, omdat de steen fel wordt verlicht. Hierdoor verandert de totale waarde van de pixels in de rechthoek. Door de totale waarde van de pixels van achtereenvolgende beelden met elkaar te vergelijken, is het mogelijk aan te geven wanneer een steen door de raai verplaatst. In figuur I-2 is een beeld te zien waarbij stenen in de raai zijn verlicht.



Figuur I-2 beeld met verlichte stenen

Het is ook mogelijk met dit programma om meerdere rechthoeken te definiëren die naast elkaar zijn geplaatst. Dit is mogelijk tot maximaal 50 rechthoeken. Door meerdere rechthoeken te

gebruiken, is het mogelijk nauwkeuriger aan te geven waar de steen door de raai verplaatst. Dit heeft als voordeel dat stenen die op hetzelfde moment door de raai verplaatsen, beter kunnen worden onderscheiden. In figuur I-3 is een beeld te zien waarbij meerdere rechthoeken zijn gebruikt.



Figuur I-3 beeld waarbij meerdere rechthoeken zijn geselecteerd

I.5 Analyse data lichtintensiteiten

Door de lichtintensiteiten van opeenvolgende beelden te bekijken, is het mogelijk een voorspelling te maken van het aantal stenen dat door de raai is getransporteerd. Hinderlijk bij deze methode van bepalen van transport is het voorkomen van ruis. Als ruis wordt opgevat: de veranderingen in lichtintensiteit zonder dat er stenen zijn verplaatst.

Er zijn verschillende oorzaken voor ruis te geven, namelijk:

Het verschuiven van de verlichte raai: wanneer een methode van belichten wordt gebruikt, waarbij de verlichte raai continu van plaats verschuift, worden telkens andere stenen die op de bodem liggen, verlicht. Elke steen weerkaatst het licht verschillend waardoor telkens een andere lichtintensiteit wordt gemeten.

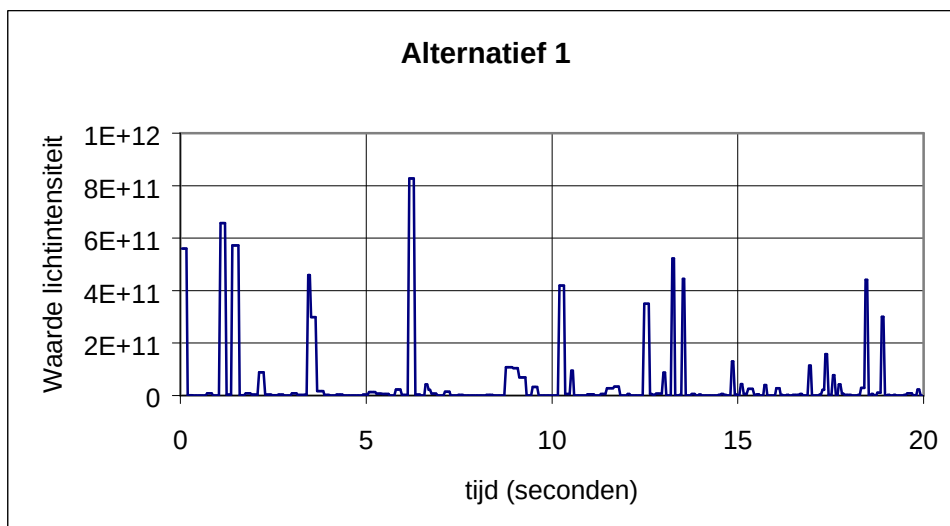
Bewegen van stenen maar niet verplaatsen: de stenen die continu worden verlicht, omdat ze in de raai liggen, bewegen soms zonder te verplaatsen. Het licht wordt hierdoor voortdurend verschillend weerkaatst en de lichtintensiteit varieert voortdurend.

Onregelmatige belichting van de raai: wanneer de raai niet constant scherp wordt belicht, varieert het licht dat wordt weerkaatst. Dit is merkbaar in de metingen van de lichtintensiteit.

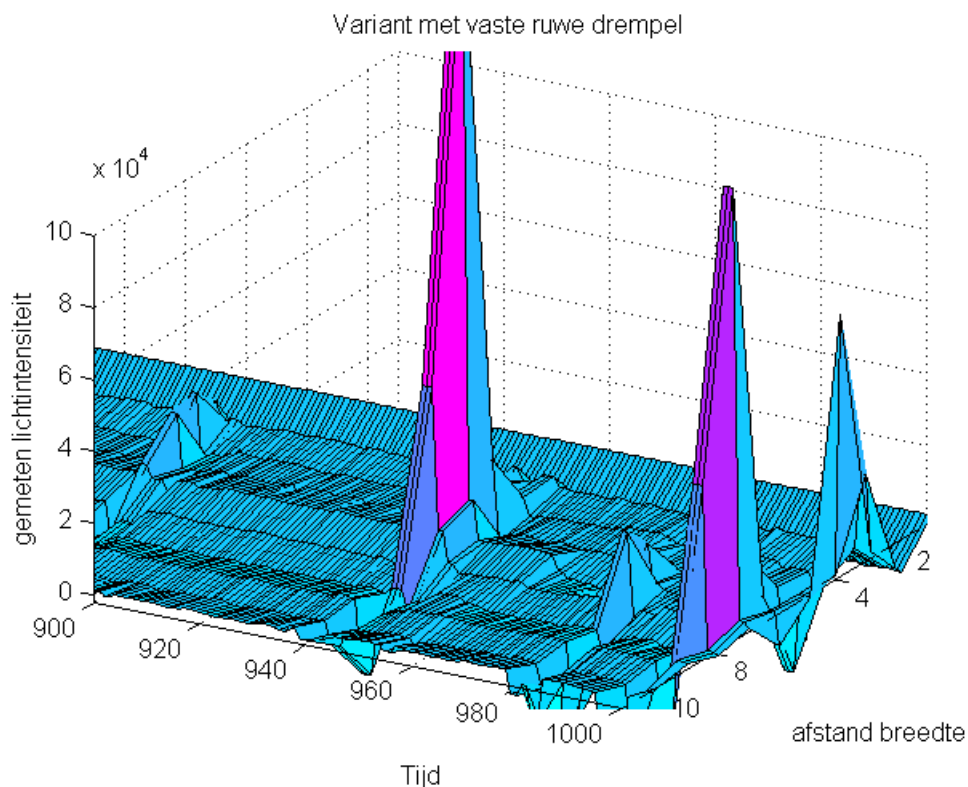
De ongewenste invloed van de ruis is op meerdere manieren te verminderen. De beeldkwaliteit kan worden verhoogd door de opstelling te verbeteren of aan te passen. Dit is beschreven in Bijlage II. De invloed van de ruis is ook te verminderen door meerdere rechthoeken te gebruiken. Op deze manier wordt de ruis niet minder, maar wordt de invloed minder, doordat de ruis per gedeelte wordt verspreid. Dit kan als volgt worden uitgelegd. Wanneer één rechthoek wordt gebruikt om de lichtintensiteit aan te geven, dan worden alle waarden van de pixels bij elkaar opgeteld. Deze waarde van de lichtintensiteit bestaat dan uit de extra waarde van de pixels door de verplaatste steen die wordt belicht, maar ook uit de ruis van de gehele breedte. De ruis komt namelijk over de gehele breedte van de raai voor. Dit kan een grote hoeveelheid zijn ten opzichte van de extra lichtintensiteit van één verlichte steen. Bij gebruik van meerdere rechthoeken wordt de ruis verdeeld over alle rechthoeken, terwijl de extra lichtintensiteit van een verlichte steen die door de raai verplaatst maar over enkele rechthoeken wordt verdeeld. Het relatieve verschil tussen de verandering van de lichtintensiteit door ruis en de verandering van de lichtintensiteit door het verplaatsen van een steen ten gunste van de raai wordt hierdoor vergroot.

In figuur I-4 is een grafiek gegeven waar de lichtintensiteit tegen de tijd is uitgezet voor één rechthoek, in figuur I-5 voor tien rechthoeken. Door deze grafieken met elkaar te vergelijken komen de voor- en nadelen van het gebruik van één of tien rechthoeken in beeld.

Wanneer meerdere stenen op hetzelfde moment door de raai verplaatsen, kan dit bij gebruik van één rechthoek worden geïnterpreteerd als het transport van één steen. De kans dat deze fout bij gebruik van meerdere rechthoeken voorkomt is kleiner. Meerdere rechthoeken vereisen echter meer capaciteit van hardware (de benodigde geheugenruimte is afhankelijk van het aantal gebruikte rechthoeken).



Figuur I-4 lichtintensiteit van één rechthoek in de tijd



Figuur I-5 lichtintensiteit uitgezet met tien rechthoeken in de tijd

Om het aantal stenen te kunnen tellen aan de hand van de lichtintensiteit, is een algoritme geschreven, dat is verwerkt in een daarvoor geschreven computerscript. In dit algoritme is een aantal aannamen gedaan, die van invloed zijn op de betrouwbaarheid van de voorspelling

Aanname 1: er kan een grenswaarde van de lichtintensiteit worden aangegeven die het verschil aangeeft tussen ruis en een steen die door de raai verplaatst. Wanneer ruis voorkomt in de lichtintensiteit, varieert de lichtintensiteit weinig en wanneer een steen door de raai verplaatst, varieert de lichtintensiteit veel. Het verschil tussen veel en weinig variëren van de lichtintensiteit moet worden aangegeven aan de hand van een grenswaarde. Deze grenswaarde kan worden bepaald door een gedeelte van de meting visueel te analyseren en te vergelijken met de analyse door het algoritme. Aan de hand van deze vergelijking moet een voorspelling worden gemaakt van de grenswaarde. De nauwkeurigheid waarmee de voorspelling van de grenswaarde is gemaakt, beïnvloedt de betrouwbaarheid van de voorspelling van het transport. De grenswaarde moet zijn vastgesteld voordat het algoritme wordt toegepast.

Aanname 2: de waarden van de lichtintensiteit van het beginbeeld dienen als referentie voor de volgende beelden. Door de waarden van het beginbeeld van elk volgend beeld af te trekken, blijven de absolute verschillen tussen de lichtintensiteiten gelijk, maar veranderen de relatieve verschillen in lichtintensiteit. Op deze manier wordt de grenswaarde beter vergelijkbaar voor verschillende metingen.

Het algoritme dat is opgesteld, maakt gebruik van meerdere rechthoeken naast elkaar. De rechthoeken zijn genummerd in tijd en plaats: rechthoek(x,t). Hierbij geldt x voor de plaats, van links (1,t) naar rechts (50,t) en t voor het nummer van het beeld, bijvoorbeeld beeld 1 (x,1) en beeld 432 (x,432).

Aanname 3: wanneer in meerdere rechthoeken die naast elkaar liggen waarden boven de grenswaarde worden gedetecteerd, is het aantal stenen dat hiermee overeenkomt afhankelijk van het laatste beeld waarin deze waarden voorkomen. Het is mogelijk dat meerdere stenen op hetzelfde moment door de raai verplaatsen. Wanneer de stenen door dezelfde of een aanliggende rechthoek transporteren, kan niet exact worden vastgesteld of er één of meerdere stenen door de raai transporteren. Door alleen naar het laatste beeld te kijken, waar de stenen gezamenlijk voorkomen, wordt bepaald of één steen is verplaatst, of meerdere. Wanneer in het laatste beeld een rechthoek voorkomt met alleen maar ruis (waarde lager dan de grenswaarde) tussen twee rechthoeken met waarden hoger dan de grenswaarde, dan wordt dit geteld als twee stenen. In alle andere gevallen wordt dit als één steen meegenomen. Hierbij is aangenomen dat de kans op een situatie, waarbij op deze manier stenen niet worden geteld, kan worden verwaarloosd om twee redenen:
De kans dat twee stenen op hetzelfde moment door de raai transporteren is zeer klein, vooral bij een lage mobiliteitsparameter
De kans dat twee stenen op hetzelfde moment door de raai transporteren, naast elkaar, is nog een factor kleiner dan de vorige kans.

Het algoritme kan als volgt worden geschematiseerd:

- Lees de data van de lichtintensiteiten
- Verminder de waarde van de rechthoeken met de laagste waarde van de rechthoek die in de meting voorkomt.
- Verander voor alle rechthoeken die een waarde hebben kleiner dan de grenswaarde de waarde in nul, en voor alle rechthoeken die een waarde hebben groter dan de grenswaarde de waarde in één
- Reduceer alle rechthoeken die een aangrenzende rechthoek hebben met waarde één tot één rechthoek met waarde één.
- Tel het aantal vakjes met waarde één; dit komt overeen met het aantal stenen dat door de raai is getransporteerd.

Het algoritme zal verder worden toegelicht aan de hand van een voorbeeld dat bij elke stap van het algoritme wordt aangepast.

- Lees de data van de lichtintensiteiten

Er wordt een matrix gelezen waarin de verschillende rechthoeken in de kolommen zijn aangegeven en de beelden in de rijen, zie tabel I-1. In deze matrix is gewerkt met tien rechthoeken, dit aantal is alleen gebruikt voor dit voorbeeld. Het algoritme kan worden gebruikt tot maximaal 50 rechthoeken.

Beeld nr.	Rechthoek nr:									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10552	17017	17476	6339	7049	10844	9801	24108	10594	5922
2	8967	15474	15974	4754	5630	9176	8175	22189	9009	4254
3	9927	16350	16809	5630	6798	10052	9009	23691	9927	5338
4	9843	16350	16767	5589	7049	10093	8967	23399	10010	5172
5	9676	15974	16350	5297	7466	9635	8634	23190	9551	4796
6	9593	16016	16558	5380	8550	9760	8675	23315	9676	4921
7	9509	15974	16392	5172	9718	9676	8425	23149	9509	4754
8	8800	15057	15683	4463	13889	8717	7716	22481	8717	4045
9	9635	15933	16517	5380	26027	9009	8550	23232	9509	4838
10	10427	16642	17142	6214	37455	8967	8967	23858	10177	5505

Tabel I-1 voorbeeld matrix van data lichtintensiteiten

- Verminder de waarde van de rechthoeken met de waarde van die rechthoek die het laagste is.

De waarde van alle rechthoeken wordt verminderd, zodat de verschillen relatief groter zijn, zie tabel I-2. Deze stap zorgt ervoor dat de laagste waarde die voorkomt in de matrix gelijk of groter is dan nul.

Beeld nr.	Rechthoek nr:									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1752	1960	1793	1876	1419	2127	2085	1919	1877	1877
2	167	417	291	291	0	459	459	0	292	209
3	1127	1293	1126	1167	1168	1335	1293	1502	1210	1293
4	1043	1293	1084	1126	1419	1376	1251	1210	1293	1127
5	876	917	667	834	1836	918	918	1001	834	751
6	793	959	875	917	2920	1043	959	1126	959	876
7	709	917	709	709	4088	959	709	960	792	709
8	0	0	0	0	8259	0	0	292	0	0
9	835	876	834	917	20397	292	834	1043	792	793
10	1627	1585	1459	1751	31825	2377	1251	1669	1460	1460

Tabel I-2 voorbeeld matrix van data lichtintensiteiten

- Verander voor alle rechthoeken die een waarde hebben kleiner dan de grenswaarde de waarde in 0 en voor alle rechthoeken die een waarde hebben groter dan de grenswaarde de waarde in 1.

Bij deze stap wordt de ruis verwijderd. Alle waarden die lager zijn dan de grenswaarde worden veranderd in de waarde 0. Alle waarden die hoger zijn dan de grenswaarde worden veranderd in waarde 1. In het voorbeeld is de grenswaarde 5000, zie tabel I-3.

Beeld nr.	Rechthoek nr:									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Tabel I-3 verwijderen van alle waarden die alleen uit ruis bestaan

- Reduceer alle rechthoeken die een aangrenzende rechthoek hebben met waarde 1, tot één rechthoek met waarde 1.

Bij deze stap wordt het aantal beelden waarin dezelfde steen voorkomt gereduceerd tot één beeld, zie tabel I-4.

Beeld nr.	Rechthoek nr:									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0

Tabel I-4 veranderen van alle rechthoeken met waarde 1 in waarde 0 tot één rechthoek met waarde 1 overblijft

- Tel het aantal vakjes met waarde 1; dit komt overeen met het aantal stenen dat door de raai is getransporteerd, zie tabel I-4.

In het voorbeeld is nog maar één rechthoek overgebleven met waarde 1; dit komt overeen met het verplaatsen van 1 steen door de raai tijdens het voorbeeld.

In tabel I-5 is een voorbeeld te zien van een situatie waarbij aanname 3 moet worden gehanteerd. Dit voorbeeld is fictief en heeft weinig kans van voorkomen bij een kleine tijdsduur zoals hier in dit voorbeeld is gebruikt. Tijdens een meting van enkele uren en een hoge mobiliteitsparameter is het mogelijk dat meerdere stenen op hetzelfde moment door de raai verplaatsen. Dit voorbeeld kan worden geplaatst tussen stap 3 en 4 van het algoritme.

Beeld nr.	Rechthoek nr:									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
3	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
9	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel I-5 voorbeeld waarbij meerdere stenen op hetzelfde moment door de raai verplaatsen

In dit voorbeeld zijn meerdere stenen te herkennen. De eerste steen verplaatst in de raai bij beeldnummer 2 in rechthoek 6 en 7. De steen verplaatst hierbij door 2 rechthoeken; het is ook mogelijk dat er meerdere stenen door deze rechthoeken verplaatsen, dit is niet hieruit af te leiden. Vervolgens wordt gelet op het beeld waarbij voor het laatst de steen voorkomt in een aanliggende rechthoek. Dit komt voor in beeld 3, rechthoek 6. In dit beeld komt maar één rechthoek voor met waarde 1 die aansluit bij de vorige rechthoek. Deze waarde wordt gekenmerkt als één steen.

De tweede steen die kan worden herkend in het voorbeeld, verplaatst in de raai bij beeldnummer 3 en in rechthoek 2. Wanneer deze steen wordt gevolgd tot het laatste beeld waarin deze rechthoek of een aanliggende rechthoek met waarde 1 ligt, dan wordt rechthoek 2 in beeld 5 gevonden. Deze steen wordt aangeduid als steen nummer 2. Alhoewel steen 1 en steen 2 tegelijk door de raai verplaatsten, in beeld nummer 3, is het mogelijk om met dit algoritme onderscheid te maken tussen de verschillende stenen. Dit is mogelijk door de afstand tussen de stenen waardoor ertussen rechthoeken voorkomen, met waarde 0.

De derde steen die kan worden herkend in het voorbeeld verplaatst in de raai bij rechthoek 5 en 6 en in beeld nummer 7. Wanneer deze steen weer wordt gevolgd tot het laatste beeld waarin deze of een aansluitende rechthoek de waarde 1 heeft, dan komen we bij rechthoek 4 en 6 in beeld nummer 9. Hierbij is het opvallend dat rechthoek 5 in beeld nummer 9 de waarde nul heeft. Dit kan alleen voorkomen indien er in deze rechthoek van dit beeld geen steen wordt verplaatst. Aangezien er 2 rechthoeken voorkomen met waarde 1 die niet aansluiten, worden er 2 stenen geteld. Het totale aantal stenen dat in het voorbeeld door de raai is getransporteerd, is volgens deze algoritme vier.

I.6 Evaluatie

De meettechniek die in dit onderzoek is ontwikkeld, bepaalt het aantal stenen die door een verlichte raai transporteren. Bij deze meettechniek kan in elke stap die wordt uitgevoerd (beschreven in paragraaf I.2), een onnauwkeurigheid voorkomen waardoor de betrouwbaarheid van de meettechniek wordt verminderd. In deze paragraaf zal per stap worden besproken waar de onnauwkeurigheid ontstaat en of er mogelijke verbeteringen zijn.

Stap 1: maken van beeldmateriaal.

De beeldkwaliteit kan worden verhoogd door de opstelling te verbeteren. Door de kwaliteit van het beeldmateriaal te verhogen, komt er minder ruis voor in de waarden van de lichtintensiteiten. Dit betekent dat stenen, wanneer deze door de raai verplaatsen, beter kunnen worden herkend. Het is echter niet mogelijk de ruis geheel te elimineren. Afhankelijk van de opstelling en de gebruikte apparatuur kan de beeldkwaliteit hierbij worden ingesteld. Mogelijke verbeteringen zullen in Bijlage II worden beschreven.

Stap 2: omzetten van beeldmateriaal.

De nauwkeurigheid van deze stap is afhankelijk van de gebruikte apparaten en de software. Door beperkte capaciteit kan de nauwkeurigheid verminderen. Het is bij voldoende capaciteit mogelijk een nauwkeurigheid te hebben van 100%. Een verbetering is een digitale camera te gebruiken die automatisch de beelden verwerkt als bitmap- bestanden; hierdoor wordt een mogelijke bron van onnauwkeurigheid vermeden. Deze stap bestaat dan alleen nog uit het reduceren van de grootte van het beeldmateriaal.

Stap 3: analyse aan de hand van LookandC

Het computerprogramma werkt uiteraard exact zoals de methode is geprogrammeerd. De methode die is gehanteerd, kan worden aangepast. Dit is noodzakelijk wanneer grote transporten moeten worden gemeten. Bij het verplaatsen van veel stenen door de raai op hetzelfde moment, is aanname 3 niet geldig. Deze aanname stelt namelijk dat de kans op voorkomen van meerdere stenen die op hetzelfde moment door de raai verplaatsen, zeer gering is. Het gebruik van deze methode is echter bij onderzoek bij lage mobiliteitsparameter gerechtvaardigd; aanname 3 mag hierbij worden toegepast. Een methode waarbij aanname 3 niet wordt gebruikt, is particle tracking. Dit is het apart volgen van stenen in de raai. Er wordt hierbij niet alleen gelet op de plaats waar de steen door de raai wordt verplaatst maar ook op de richting. Er wordt geschat dat de onnauwkeurigheid van de methode die bij dit onderzoek is gebruikt ten opzichte van de onnauwkeurigheid die in stap 1 voorkomt, te verwaarlozen is.

Stap 4: interpreteren van de verschillen in lichtintensiteit

De nauwkeurigheid waarmee deze stap wordt uitgevoerd heeft veel invloed op de betrouwbaarheid van de meettechniek. Om de betrouwbaarheid te kunnen kwantificeren zijn meerdere metingen nodig. In dit onderzoek zijn twee meting van 3 minuten uitgevoerd (De capaciteit van de hardware werd in 3 minuten volledig benut). Deze metingen zijn vervolgens visueel geanalyseerd aan de hand van de meettechniek. De grenswaarde die door de meettechniek wordt gebruikt, is voorspeld door 10% van de meting visueel te analyseren. De resultaten van deze tests zijn als volgt:

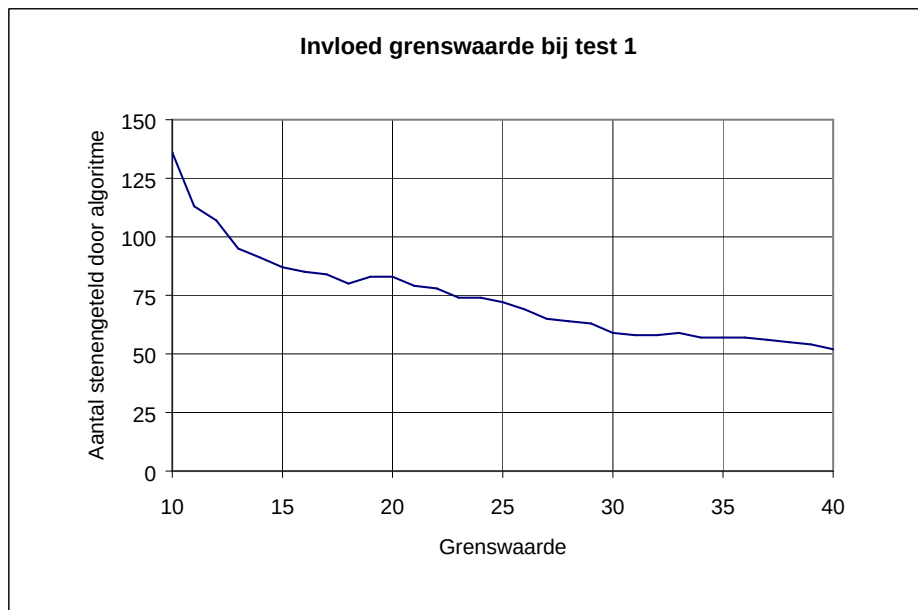
	Meting 1	Meting 2
Grenswaarde	24	19
Aantal stenen door Algoritme geteld	74	83
Aantal stenen visueel geteld	73	73
Aantal stenen onterecht door algoritme geteld	6	13
Aantal stenen onterecht niet door algoritme geteld	5	3

Tabel I-6 overzicht metingen

Het voorspellen van de grenswaarde blijkt van grote invloed te zijn op de betrouwbaarheid van de meetmethode. Door een klein gedeelte van de meting te bekijken en de stenen die door de raai verplaatsen te tellen, is het mogelijk een voorspelling te doen van de grenswaarde. De invloed van de grenswaarde op het aantal stenen dat door de algoritme wordt voorspeld bij test 1 is te zien in figuur I-6.

Uit deze tests blijkt dat de verhouding tussen het aantal stenen dat door het algoritme en dat visueel is geteld, hoog is. Dit geeft aan dat de meettechniek betrouwbaar lijkt. Om echter de betrouwbaarheid te kunnen garanderen, is nodig dat meerdere tests worden uitgevoerd. Dit is echter niet mogelijk in dit onderzoek. Vanwege de onbekende betrouwbaarheid is tijdens dit onderzoek niet verder gewerkt met deze meettechniek. Het transport van stenen is voortaan visueel geanalyseerd.

Het algoritme dat in deze stap wordt gebruikt, maakt gebruik van de drie aannamen die in paragraaf I.5 zijn beschreven. Door andere aannamen te gebruiken kan een algoritme worden opgesteld dat nauwkeurigere voorspellingen maakt. Gedacht kan worden aan het herkennen van patronen in de verschillen in lichtintensiteit van opeenvolgende beelden.



Figuur I-6 aantal stenen voorspeld door algoritme uitgezet tegen de grenswaarde

Bijlage II Ontwikkeling meettechniek: instellen beeldkwaliteit

II.1 Inleiding

Om beeldmateriaal van de metingen te krijgen, waar het transport van korrelmateriaal zo duidelijk mogelijk uit kan worden afgeleid, is geëxperimenteerd met de opstelling. Er is onderzocht hoe op een efficiënte manier beeldmateriaal te krijgen is, waarbij het beeldmateriaal een hoge kwaliteit had en er weinig aanpassingen van de proefopstelling nodig waren.

Er is geëxperimenteerd met verschillende methoden van belichten van de meetraai, dit is beschreven in paragraaf II.2. De plaats en de richting van de meetraai zijn beperkt te variëren door de constructie van de stroomgoot en de methode van belichten. Dit is beschreven in paragraaf II.3. Verder is onderzocht of er aanpassingen aan het bed mogelijk zijn, zodat het beeldmateriaal eenvoudiger te verwerken is, zie paragraaf II.4.

II.2 Belichting van de meetraai

II.2.1. Inleiding

Om het aantal stenen te bepalen dat door een raai verplaatst, moet de raai worden verlicht. De stenen die door de raai verplaatsen, worden hierdoor verlicht en contrasteren met de omgeving. Het verlichten van een raai is mogelijk met behulp van diaprojectoren. Door een lichtondoorlatende dia te gebruiken, waar een kerf in is gemaakt, zodat het licht alleen door de kerf kan vallen, is het mogelijk een vlak te creëren waarbij alles wat er doorheen verplaatst, wordt verlicht. Om het contrast te verhogen tussen de stenen die worden verlicht en de omgeving, moet de stroomgoot worden afgedekt. Bij dit onderzoek is dit gebeurd door een tent over de kantelgoot te zetten.

De kwaliteit van de belichting is afhankelijk van de richting waarin de diaprojectoren staan. Er zijn twee richtingen mogelijk, van waaruit de raai wordt verlicht, namelijk: belichting van boven of belichting van opzij. Deze richtingen zullen in de volgende sub-paragrafen worden beschreven.

II.2.2. Belichting van boven

Bij het belichten van de meetraai van boven naar beneden moet het licht via het wateroppervlak naar de bodem worden gericht. Door de verschillen in dichtheid tussen water en lucht, breken de lichtstralen op de overgang tussen lucht en water. Afhankelijk van de hoogte van de waterkolom wordt het licht op de bodem van de stroomgoot op een plaats gereflecteerd. Door de waterdiepte constant te houden, blijft de plaats waar het licht wordt gereflecteerd op de bodem van de stroomgoot, oftewel de plaats van de raai op de bodem, gelijk. Om te zorgen dat het aantal stenen wordt gemeten dat door één raai verplaatst, en niet door meerdere raaien, is het noodzakelijk dat de raai exact op de aangegeven plaats blijft. Dit komt overeen met een constante waterdiepte.

De methode waarbij van boven naar beneden wordt belicht, heeft nadelen. Bij het stromen met hoge snelheden (getal van Froude > 0.6), zijn er oppervlaktegolven. Door deze variaties in waterhoogte, verandert de ligging van de meetraai bij de bodem voortdurend. Om te voorkomen dat de plaats van de raai steeds verschuift, is het nodig om boven de gewenste ligging van de meetraai, een perspex bakje in het water te hangen. In figuur II-1 is een afbeelding van het perspex bakje te zien dat tijdens deze analyse is ontwikkeld. Het bakje houdt de afstand die de lichtstraal moet afleggen door het water gelijk, zodat de plaats van de raai niet verschuift. Het is hierbij noodzakelijk dat het bakje alleen lokaal de stroming beïnvloedt. Wanneer niet alleen lokaal de stroming wordt beïnvloed, dan zijn de stromingscondities boven het meetgebied niet gelijk.

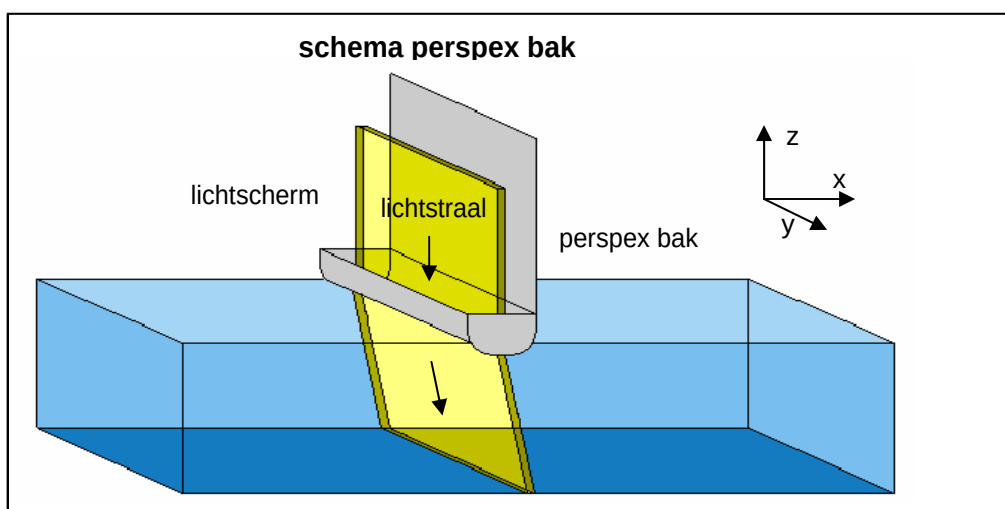
Doordat het perspex bakje lokaal de stroming verstoort, ontstaat vóór het bakje een 'boeggolf' (de situatie is vergelijkbaar met bij het ontstaan van een boeggolf bij een schip). Deze 'boeggolf' veroorzaakt bij hoge snelheden luchtbelletjes in het water.

Deze luchtbellens worden vervolgens met het water getransporteerd, onder het bakje door. Dit beïnvloedt de beeldkwaliteit in grote mate. De luchtbellens die onder het perspex bakje terecht komen, reflecteren en buigen het licht af. Het reflecteren en afbuigen van lichtstralen beïnvloedt de raai doordat deze niet constant wordt belicht en er lokaal donkere zones voorkomen.

Bij deze methode van belichten, daalt de beeldkwaliteit sterk, als de snelheid wordt verhoogd. De luchtbellens die door de boeggolf in het water worden gebracht en onder het bakje door worden getransporteerd, zijn hiervan de oorzaak.

II.2.3. Belichting van opzij

De diaprojectoren zijn naast de stroomgoot geplaatst bij deze methode van belichten. Een raai wordt door de glazen wanden verlicht vanaf beide zijden van de goot. Door de diaprojectoren naar elkaar te richten, is het mogelijk een raai te verlichten. De afstand tussen de projectoren en de raai die wordt verlicht, is niet constant, waardoor niet de gehele lijn scherp is te stellen. In verband met de beperkte lengte van de raai in de stroomgoot brengt dit een verwaarloosbaar verlies van beeldkwaliteit met zich mee.



Figuur II-1 schema perspex bakje

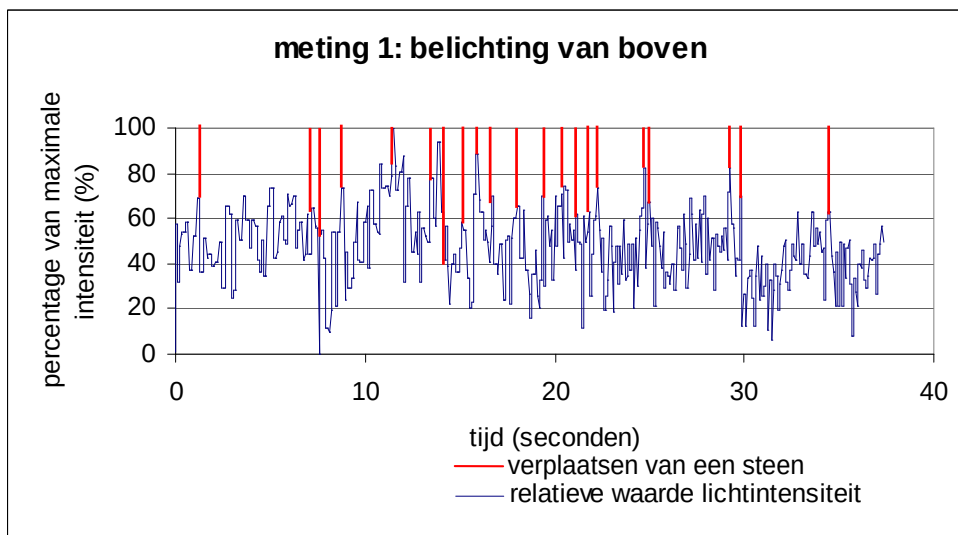
Een nadeel van deze methode van belichten is het ontstaan van schaduw achter stenen die worden verplaatst. Het licht wordt namelijk gereflecteerd door de steen die door de raai verplaatst. Wanneer op hetzelfde moment, meerdere stenen door de raai verplaatsen, kan het voorkomen dat niet alle stenen worden belicht, doordat stenen door het vlak transporteren in de schaduw van andere stenen. Dit geval zal alleen voorkomen wanneer vaak meerdere stenen op hetzelfde moment door de raai verplaatsen. Dit komt alleen voor bij hoge transporten. In dit onderzoek is alleen geëxperimenteerd bij lage transporten waardoor hiermee geen rekening hoeft te worden gehouden. De kans op stenen die niet worden belicht bij transport door de raai, kan ook worden verminderd, door de projectoren niet alleen horizontaal te richten maar ook gedeeltelijk naar beneden te richten. Op deze manier wordt de schaduw verplaatst naar een klein gedeelte van de bodem.

II.2.4. Evaluatie

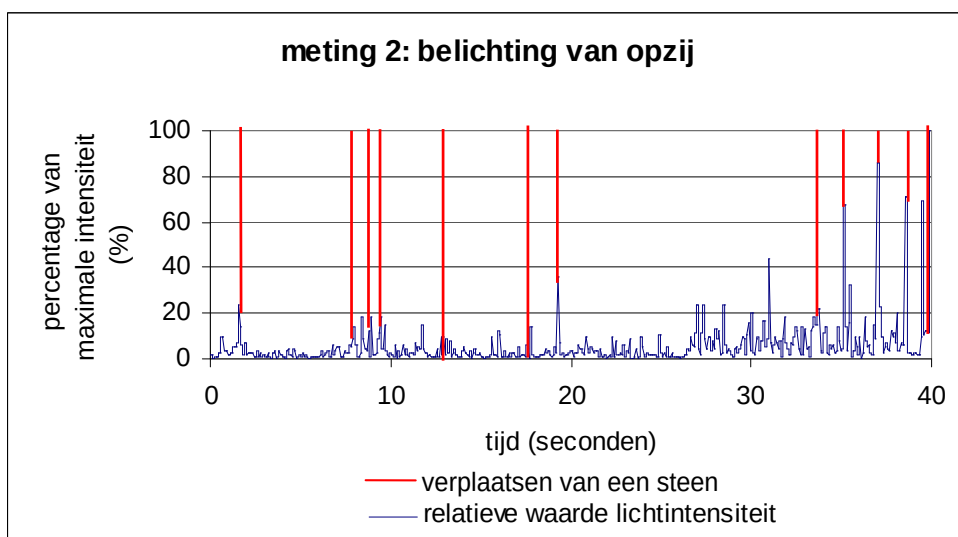
Om een keuze te kunnen maken tussen beide methodes van belichten zijn metingen verricht. Het beeldmateriaal van deze metingen is verwerkt met de meettechniek die in Bijlage I is beschreven. Door te letten op de overeenkomst tussen de hoeveelheid stenen die door de raai worden getransporteerd en de hoge lichtintensiteiten, kan een uitspraak worden gedaan over het verschil in kwaliteit van het beeldmateriaal bij gebruik van verschillende methodes van belichten. Voor de methode van belichten van boven zijn in figuur II-2 de lichtintensiteit en het aantal stenen dat door de raai verplaatst uitgezet tegen de tijd. Voor de methode van belichten van opzij is dit gedaan in figuur II-3. De meettechniek is ingesteld voor het berekenen van de lichtintensiteit met behulp van één rechthoek (de lichtintensiteit komt overeen met de opgetelde waarde van alle pixels).

Voor beide methoden van belichten is het lastig een grenswaarde in te stellen waarmee een redelijke voorspelling kan worden gemaakt. Bij meting 1 overheerst de ruis boven de extra intensiteit van een steen die door de raai verplaatst. Bij meting 2 zijn de stenen al beter te herkennen maar komen er veel hoge intensiteiten voor in de meting die niet overeen komen met het verplaatsen van stenen.

Er is gekozen voor de methode van belichten van opzij vanwege de hogere beeldkwaliteit. Er komen geen luchtbellen voor in de raai en de stroming wordt niet lokaal beïnvloed. Voortaan zal met de methode van belichten van opzij worden gewerkt.



Figuur II-2 meting 1 met belichting van boven



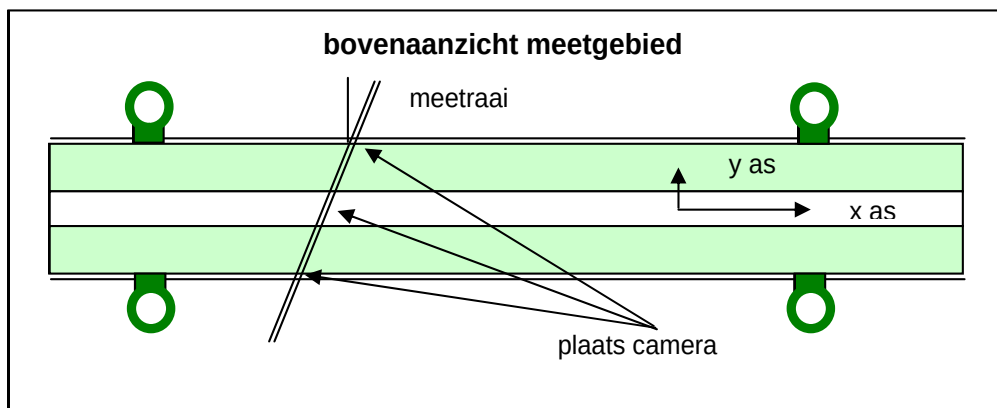
Figuur II-3 meting 2 met belichting van opzij

II.3 Plaats en richting van de meetraai

Afhankelijk van de richting van de meetraai moet de camera worden geplaatst. Om te voorkomen dat een steen die door de raai verplaatst het zicht op een andere steen blokkeert, moet de camera loodrecht op de richting van de raai zijn gericht. Om te voorkomen dat de beelden door het wateroppervlak moeten worden opgenomen of de camera in de stuw moet worden gebouwd, is besloten om de richting van de raai niet loodrecht op de stroomgoot te plaatsen. Er is gewerkt met een hoek tussen de richting van de meetraai en de stroomrichting van 60 graden. De richting van de meetraai heeft geen invloed op het aantal stenen dat per tijdseenheid door de raai transporteert. De lengte van de meetraai loodrecht op de richting van de stroomgoot blijft namelijk gelijk. Verder zijn er ook geen effecten merkbaar van de rand van

het meetgebied; de lengte van het meetgebied is 250 keer de nominale korreldiameter. De camera moet verder loodrecht op de richting van de meetraai zijn gericht om een vertekening door het perspectief te voorkomen.

De constructie van de stroomgoot blokkeert het zicht bij enkele gedeelten van de goot. De zijwanden van de constructie bestaan uit glasplaten met een lengte van 1,5 m. Tussen elke glasplaat is een metalen kolom geplaatst die het zicht blokkeert op het bodembed. Het is hierdoor niet mogelijk de meetraai overal in de stroomgoot te plaatsen. In figuur II-4 is een schema gegeven van het bovenaanzicht van de stroomgoot. De afstand tussen de meetraai in de as van de goot en het begin van de goot is 11,5 meter.



Figuur II-4 schema bovenaanzicht van het meetgebied

II.4 Aanpassingen van het bed

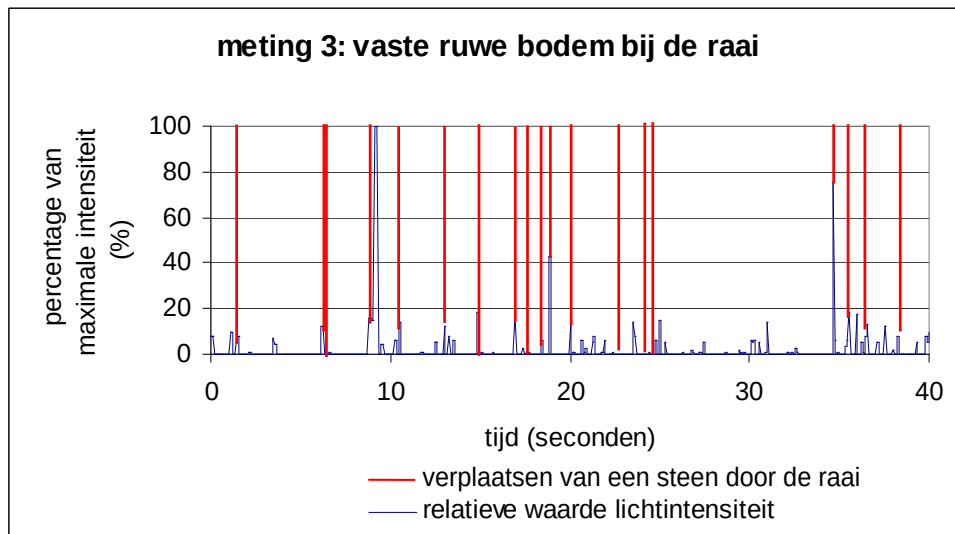
De beeldkwaliteit kan worden verhoogd door de ruis te verminderen. De ruis ontstaat doordat licht verschillend wordt weerkaatst in de tijd, bijvoorbeeld door een steen die beweegt in de verlichte raai maar niet verplaatst. Dit kan voorkomen worden door de stenen die op de bodem liggen in de verlichte raai vast te maken aan de bodem. Deze stenen kunnen ook worden vervangen door een oppervlak dat aan de bodem is vastgemaakt. Om te bepalen hoe groot de invloed is van deze bewegende (maar niet verplaatsende) stenen, zijn twee metingen verricht. Bij meting 1 zijn de stenen die worden verlicht door de meetraai, vastgemaakt aan de bodem. Bij meting 2 zijn deze stenen vervangen door een glad oppervlak, hiervoor is een houten lat gebruikt. Het beeldmateriaal van deze metingen is vervolgens verwerkt met de meettechniek. Hierbij is gebruik gemaakt van één rechthoek (de lichtintensiteit heeft de waarde van alle pixels bij elkaar opgeteld).

In figuur II-5 is de lichtintensiteit uitgezet in de tijd voor de meting waarbij de stenen in de raai aan de bodem zijn vastgemaakt. In figuur II-6 is de lichtintensiteit uitgezet in de tijd voor de meting waarbij de stenen in de raai zijn vervangen door een glad oppervlak dat is vastgemaakt aan de bodem. In beide figuren zijn ook de stenen aangegeven die door de raai verplaatsen in de tijd.

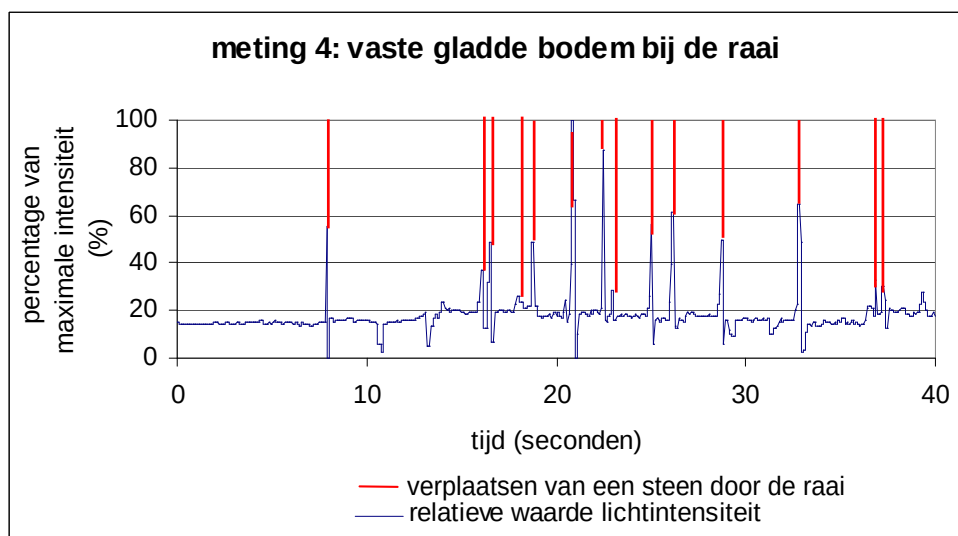
De metingen in figuur II-5 en II-6 zijn vergelijkbaar met de meting in figuur II-3. Bij deze metingen is dezelfde methode van belichten gebruikt. Uit de figuren blijkt dat de ruis sterk is afgenomen wanneer de stenen die in de meetraai liggen zijn vastgemaakt aan de bodem of zijn vervangen door een glad oppervlak. De overeenkomsten in figuur II-5 en II-6 tussen de hoge lichtintensiteiten en het verplaatsen van een steen door de raai is in vergelijking met figuur II-2 zeer groot.

Gelet op de kwaliteit van het beeldmateriaal is het aan te bevelen de stenen die in de raai op de bodem liggen, vast te maken aan de bodem of te vervangen door een glad oppervlak. De beeldkwaliteit wordt hierdoor verhoogd. Een nadeel van het vastmaken van de stenen is de invloed op het transport. Het transport wordt beïnvloed, wanneer de vastgemaakte stenen een obstakel vormen voor de stenen die door de raai verplaatsen. Dit geldt ook voor de situatie waarbij de stenen juist minder weerstand geven doordat ze te laag zijn vastgemaakt. Het is

hierdoor mogelijk dat meer of minder stenen door de raai verplaatsen dan wanneer deze stenen niet waren vastgemaakt.



Figuur II-5 meting 3 met een vaste bodem bij de raai



Figuur II-6 meting 4 met een vaste gladde bodem bij de raai

II.5 Evaluatie

De beeldkwaliteit varieert afhankelijk van de gebruikte methode van belichten en afhankelijk van de manier waarop de stenen die op de bodem liggen in de raai zijn vastgemaakt. Wanneer het beeldmateriaal de hoogste kwaliteit heeft, is het mogelijk redelijke voorspellingen te doen. Hierbij moet wel worden gelet op de invloed die wordt uitgeoefend op het transport. Om een voorspelling te kunnen maken van de betrouwbaarheid is het nodig dat meerdere metingen worden geanalyseerd.

Uitgangspunt in dit onderzoek is dat het transport niet door de meetmethode mag worden beïnvloed. Er is gekozen om de stenen die op de bodem in de raai liggen niet vast te maken aan de bodem of te vervangen door een glad oppervlak. De methode van belichten die verder in dit onderzoek zal worden gebruikt is de methode waarbij de raai wordt belicht vanaf de zijkanten.

Bijlage III Gegevens onderzoek Forschelen

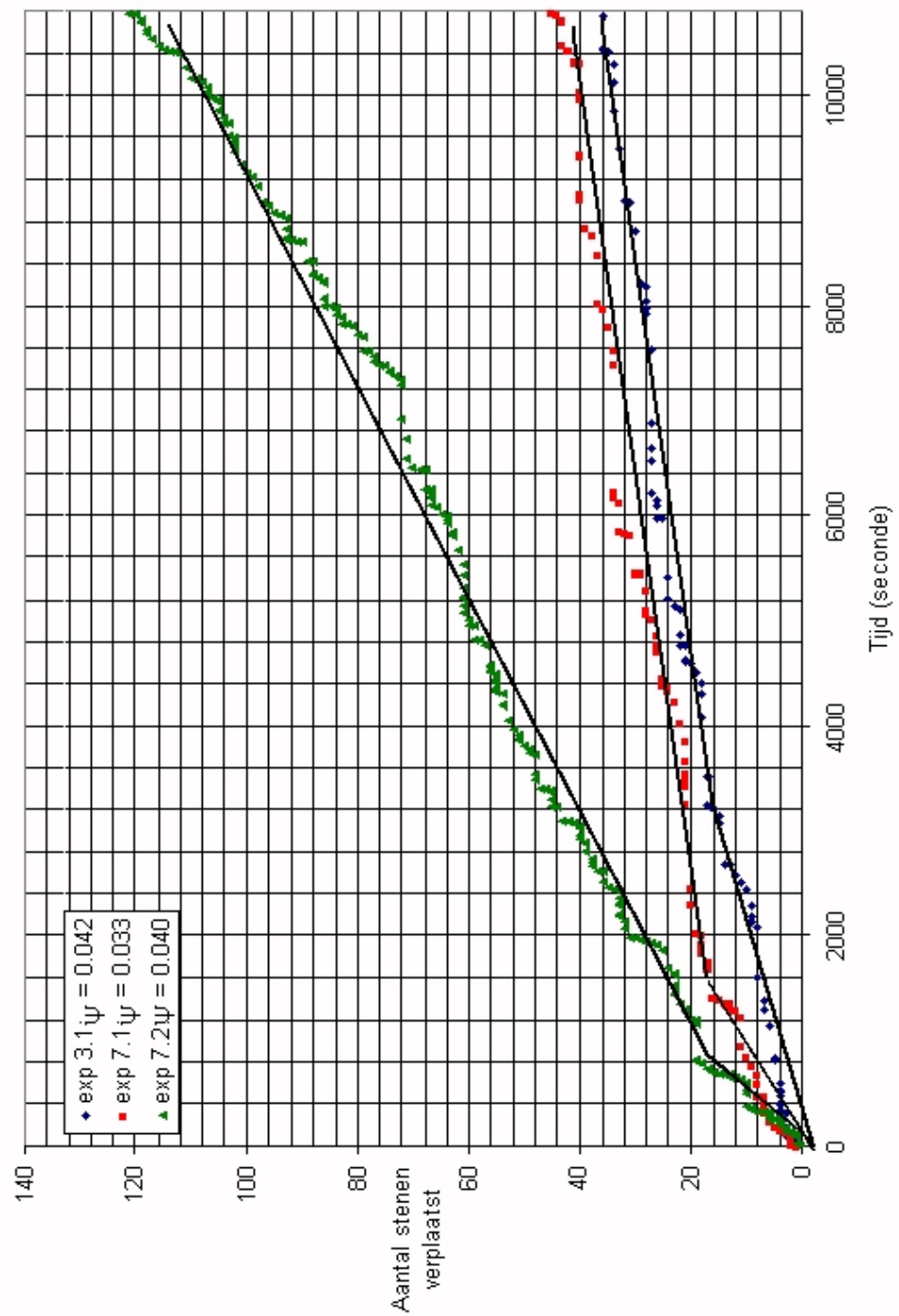
exp	i [mm/m]	h [m]	Q [m ³ /s]	$\bar{u}$ [m/s]	R _w [m]	R _b [m]	C _{bed} [m ^{1/2} /s]	k _{bed} /d ₅₀ [-]	Ψ _{bed} [-]
1.1	3.06	0.200	0.0598	0.747	0.042	0.158	34.0	2.49	0.031
1.2	3.38	0.203	0.0620	0.775	0.042	0.161	32.7	3.05	0.035
1.3	3.70	0.200	0.0663	0.829	0.043	0.157	34.4	2.38	0.037
1.4	4.05	0.201	0.0678	0.847	0.041	0.159	33.2	2.82	0.041
1.5	4.30	0.200	0.0713	0.891	0.043	0.157	34.3	2.41	0.043
1.6	4.60	0.202	0.0771	0.964	0.046	0.156	35.6	2.03	0.046
2.1	3.12	0.200	0.0629	0.786	0.045	0.155	35.8	1.96	0.031
2.2	3.50	0.200	0.0649	0.810	0.043	0.157	34.6	2.29	0.035
2.3	3.85	0.200	0.0687	0.858	0.044	0.156	35.0	2.17	0.038
2.4	4.00	0.200	0.0696	0.869	0.043	0.157	34.8	2.25	0.040
2.5	4.25	0.200	0.0722	0.903	0.044	0.156	35.0	2.17	0.042
2.6	4.50	0.200	0.0750	0.937	0.045	0.155	35.5	2.05	0.045
3.1	4.16	0.198	0.0666	0.841	0.040	0.158	32.8	2.94	0.042
3.2	3.47	0.200	0.0634	0.801	0.043	0.157	33.9	2.55	0.035
4.1	7.55	0.085	0.0209	0.662	0.018	0.077	25.3	3.77	0.038
4.2	8.03	0.090	0.0250	0.693	0.018	0.082	27.1	3.13	0.042
4.3	8.50	0.088	0.0262	0.743	0.020	0.079	28.7	2.50	0.043
4.4	8.95	0.087	0.0274	0.787	0.020	0.078	29.8	2.13	0.045
4.5	9.43	0.086	0.0266	0.772	0.019	0.078	28.6	2.48	0.047
4.6	9.95	0.087	0.0286	0.823	0.020	0.078	29.5	2.22	0.050
5.1	3.20	0.200	0.0629	0.786	0.044	0.156	35.2	2.12	0.031
5.2	3.50	0.201	0.0660	0.821	0.044	0.157	35.1	2.17	0.034
5.3	3.80	0.200	0.0671	0.840	0.043	0.157	34.3	2.39	0.037
5.4	4.10	0.200	0.0699	0.873	0.043	0.157	34.4	2.35	0.040
5.5	4.40	0.199	0.0725	0.911	0.043	0.156	34.8	2.24	0.043
5.6	4.67	0.199	0.0774	0.973	0.046	0.153	36.3	1.81	0.044
6.1	3.20	0.200	0.0652	0.815	0.047	0.153	36.8	1.70	0.030
6.2	3.53	0.200	0.0672	0.840	0.045	0.155	36.0	1.91	0.034
6.3	3.80	0.200	0.0681	0.850	0.044	0.156	34.9	2.20	0.037
6.4	4.10	0.198	0.0669	0.845	0.041	0.157	33.2	2.76	0.040
6.5	4.40	0.202	0.0734	0.909	0.043	0.158	34.4	2.38	0.043
6.6	4.75	0.200	0.0741	0.926	0.042	0.158	33.8	2.57	0.047
7.1	3.47	0.200	0.0686	0.858	0.047	0.153	37.3	1.60	0.033
7.2	4.15	0.200	0.0735	0.918	0.046	0.154	36.3	1.81	0.040
8.1	7.60	0.080	0.0210	0.659	0.018	0.073	27.9	2.53	0.034
8.2	7.93	0.090	0.0250	0.693	0.019	0.082	27.3	3.06	0.040
8.3	8.45	0.090	0.0274	0.760	0.020	0.081	29.1	2.40	0.042
8.4	8.93	0.095	0.0266	0.699	0.017	0.087	25.1	4.28	0.048
8.5	9.40	0.087	0.0244	0.700	0.017	0.080	25.6	3.71	0.047
8.6	9.90	0.097	0.0316	0.815	0.020	0.087	27.7	3.10	0.054

Tabel III-1 metingen van experimenten onderzoek Forschelen

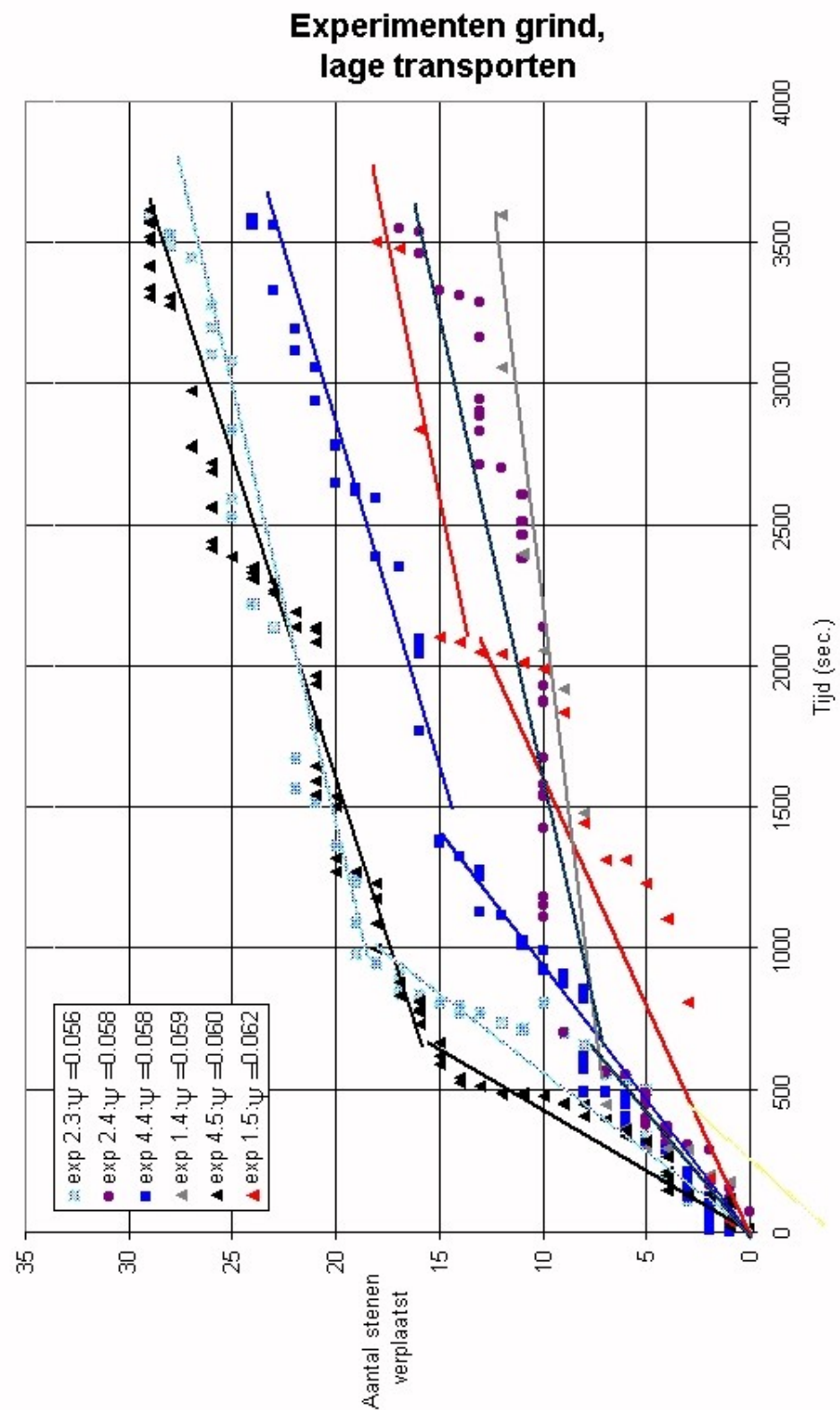
experiment	mobilitéits- parameter, Ψ_{bed} [-]	Insteltijd, t [s]	transportparameter q_s (*), na insteltijd		transportparameter q_s (*), tijdens insteltijd	
			[m ³ /m/s]	[-]	[m ³ /m/s]	[-]
1.3	0.037	1600	$4.9 \cdot 10^{-9}$	$1.3 \cdot 10^{-06}$	$4.1 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-05}$
1.4	0.041	450	$1.5 \cdot 10^{-8}$	$3.9 \cdot 10^{-06}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	$3.8 \cdot 10^{-05}$
1.5	0.043		$4.5 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-05}$		-
1.6	0.046	610	$1.1 \cdot 10^{-6}$	$2.9 \cdot 10^{-04}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$3.5 \cdot 10^{-04}$
2.3	0.038	990	$3.3 \cdot 10^{-8}$	$8.7 \cdot 10^{-06}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$	$8.7 \cdot 10^{-06}$
2.4	0.040	720	$2.7 \cdot 10^{-8}$	$7.0 \cdot 10^{-06}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$7.0 \cdot 10^{-06}$
2.5	0.042	300	$2.4 \cdot 10^{-7}$	$6.2 \cdot 10^{-05}$	$4.7 \cdot 10^{-7}$	$6.2 \cdot 10^{-05}$
2.6	0.045	1460	$1.1 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-04}$	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$2.8 \cdot 10^{-04}$
3.1	0.042	2680	$2.7 \cdot 10^{-8}$	$7.0 \cdot 10^{-06}$	$4.9 \cdot 10^{-8}$	$7.0 \cdot 10^{-06}$
4.3	0.043	1490	$1.8 \cdot 10^{-8}$	$4.8 \cdot 10^{-06}$	$3.7 \cdot 10^{-8}$	$4.8 \cdot 10^{-06}$
4.4	0.045	500	$5.0 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-05}$	$1.5 \cdot 10^{-7}$	$1.3 \cdot 10^{-05}$
4.5	0.047	585	$4.3 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-05}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-05}$
4.6	0.050	360	$4.4 \cdot 10^{-7}$	$1.2 \cdot 10^{-04}$	$7.2 \cdot 10^{-7}$	$1.2 \cdot 10^{-04}$
5.3	0.037	290	$4.9 \cdot 10^{-8}$	$1.3 \cdot 10^{-05}$	$1.6 \cdot 10^{-7}$	$4.1 \cdot 10^{-05}$
5.4	0.040	1000	$1.5 \cdot 10^{-8}$	$3.8 \cdot 10^{-06}$	$8.4 \cdot 10^{-8}$	$2.2 \cdot 10^{-05}$
5.5	0.043	1030	$1.9 \cdot 10^{-7}$	$4.9 \cdot 10^{-05}$	$3.2 \cdot 10^{-7}$	$8.1 \cdot 10^{-05}$
5.6	0.044	1350	$4.2 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-04}$	$6.1 \cdot 10^{-7}$	$1.6 \cdot 10^{-04}$
6.3	0.037	640	$5.9 \cdot 10^{-8}$	$1.5 \cdot 10^{-05}$	$4.4 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-05}$
6.4	0.040	40	$2.4 \cdot 10^{-8}$	$6.1 \cdot 10^{-06}$	$7.0 \cdot 10^{-7}$	$1.8 \cdot 10^{-04}$
6.5	0.043	790	$8.9 \cdot 10^{-8}$	$2.3 \cdot 10^{-05}$	$3.4 \cdot 10^{-7}$	$8.8 \cdot 10^{-05}$
6.6	0.047	1120	$2.4 \cdot 10^{-7}$	$6.2 \cdot 10^{-05}$	$5.6 \cdot 10^{-7}$	$1.5 \cdot 10^{-04}$
7.1	0.033	2000	$2.7 \cdot 10^{-8}$	$6.9 \cdot 10^{-06}$	$8.8 \cdot 10^{-8}$	$2.3 \cdot 10^{-05}$
7.2	0.040	760	$9.3 \cdot 10^{-8}$	$2.4 \cdot 10^{-05}$	$2.1 \cdot 10^{-7}$	$5.4 \cdot 10^{-05}$
8.3	0.042	570	$4.8 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-05}$	$1.6 \cdot 10^{-7}$	$4.2 \cdot 10^{-05}$
8.4	0.048	810	$2.4 \cdot 10^{-8}$	$6.2 \cdot 10^{-06}$	$8.0 \cdot 10^{-8}$	$2.1 \cdot 10^{-05}$
8.5	0.047	770	$3.2 \cdot 10^{-8}$	$8.1 \cdot 10^{-06}$	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$3.4 \cdot 10^{-05}$
8.6	0.054	390	$3.4 \cdot 10^{-7}$	$8.8 \cdot 10^{-05}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$3.1 \cdot 10^{-04}$

Tabel III-2 transporten bij experimenten onderzoek Forchelen

Experiment 3 en 7, Lange duur

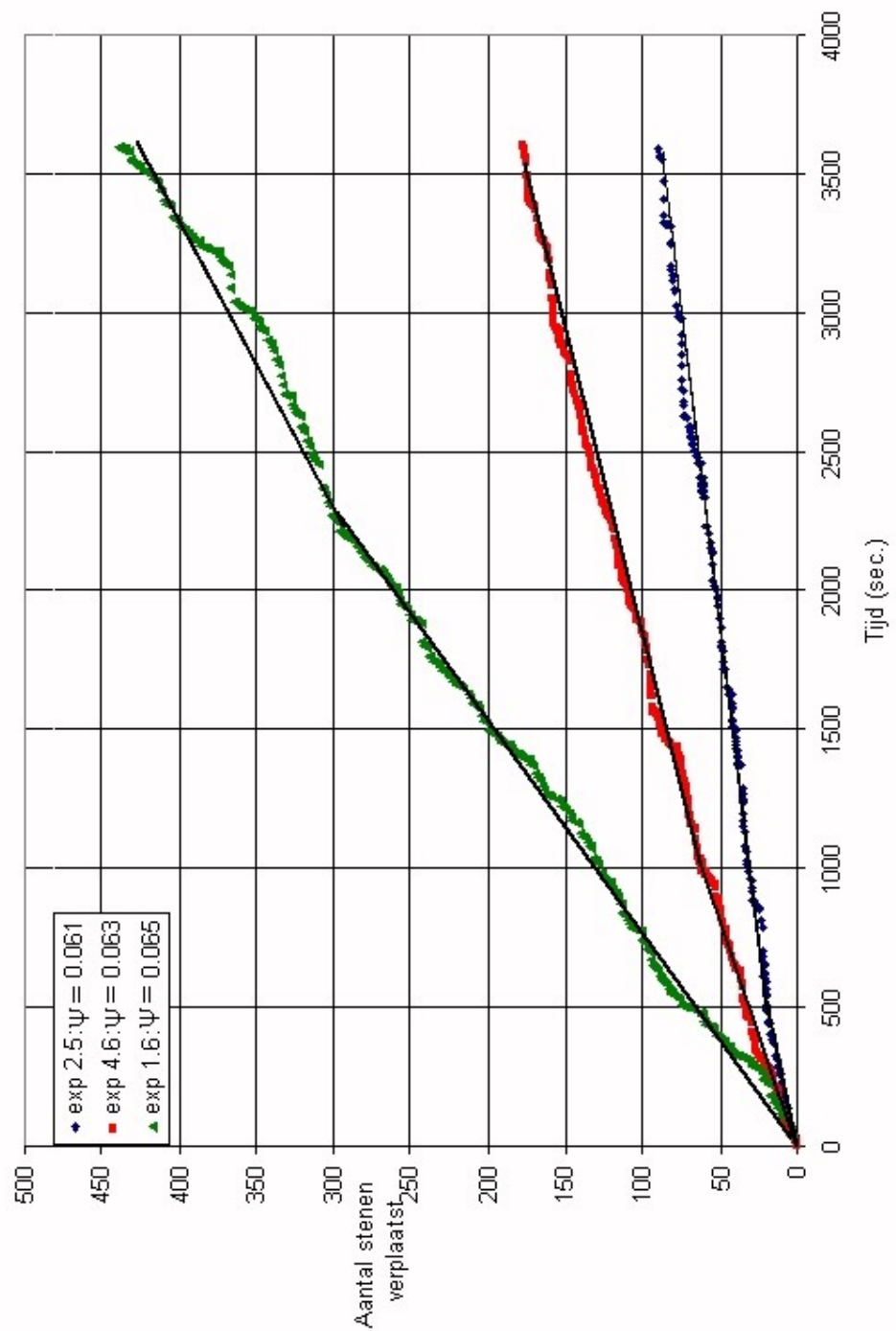


Figuur III-1 experimenten 3 en 7, lange duur belasten

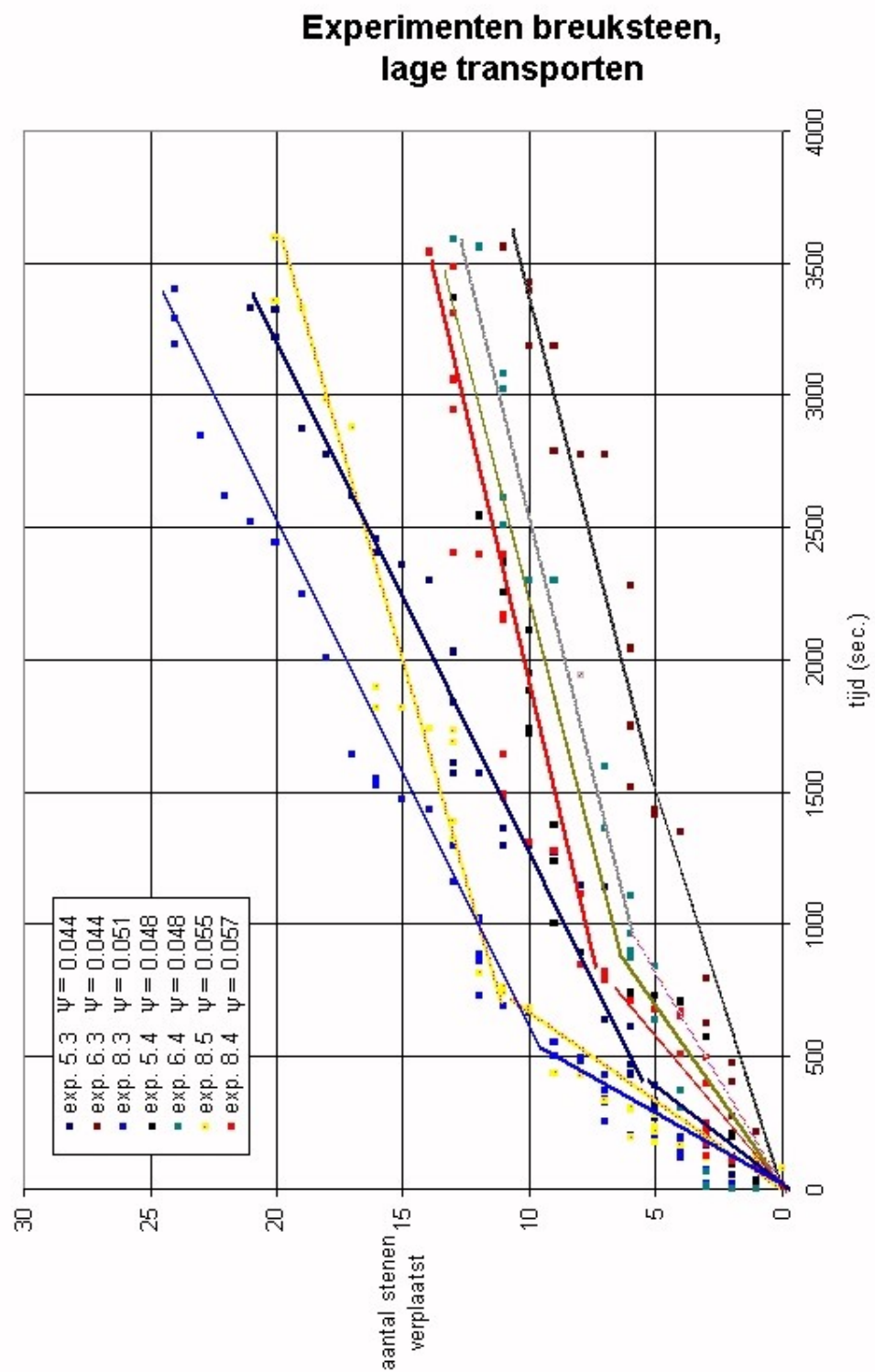


Figuur III-2 experimenten bodemmateriaal van grind, lage transporten

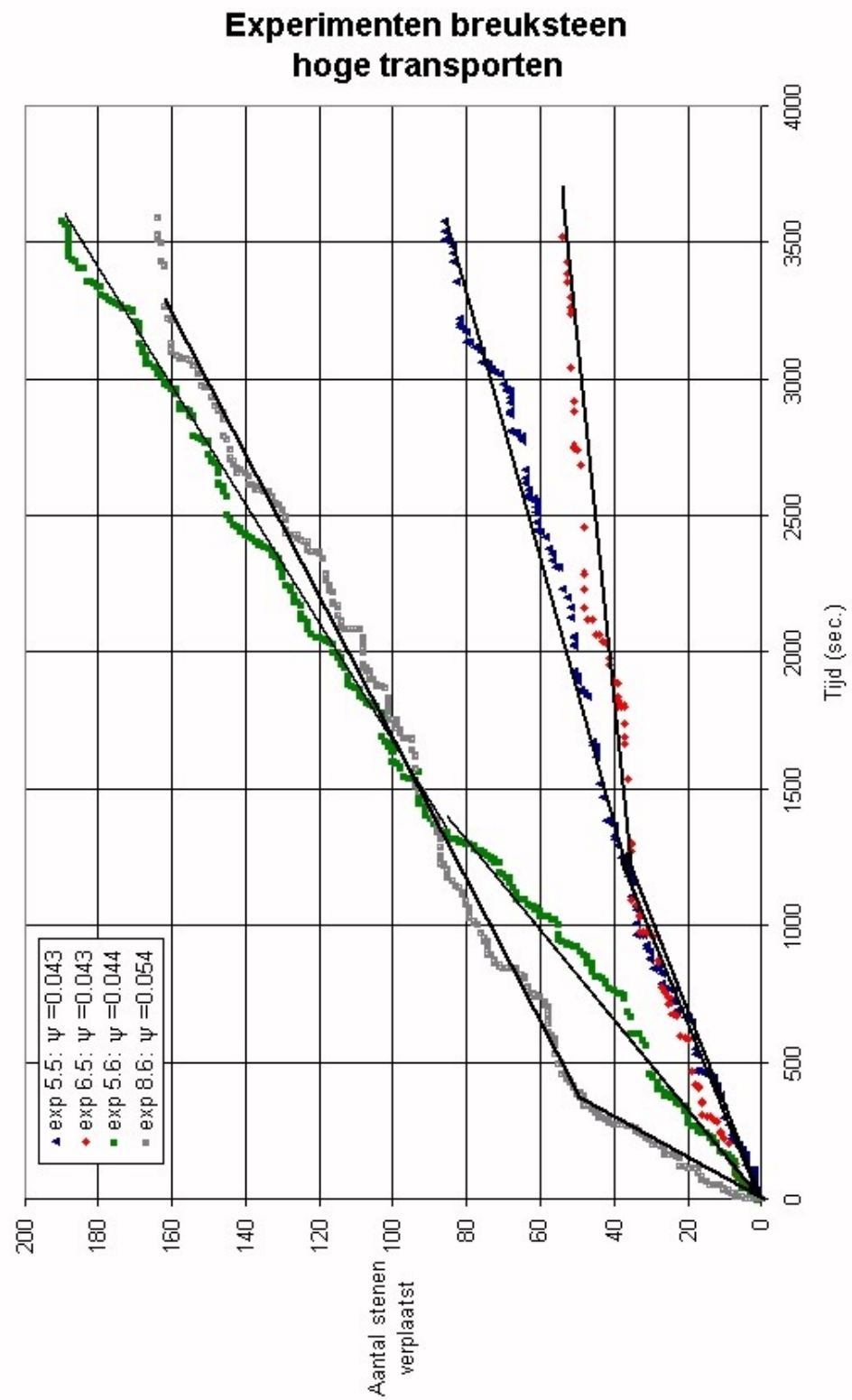
Experimenten grind, hoge transporten



Figuur III-3 experimenten bodemmateriaal van grind, hoge transporten



Figuur III-4 experimenten bodemmateriaal van breuksteen, lage transporten



Figuur III-5 experimenten bodemmateriaal van breuksteen, hoge transporten

Bijlage IV Gegevens onderzoek Paintal (1969)

experiment	i_{totaal}	h	Q	$\bar{u}$	C_{bed}	k_{bed}/d_s^0	Ψ_{bed}	Ψ_{korrel}
	[mm/m]	[m]	[m ³ /s]	[m/s]	[m ^{1/2} /s]	[-]	[-]	[-]
1	4.87	0.081	0.057	0.762	38.3	0.9	0.030	0.028
2	4.70	0.054	0.026	0.527	33.1	1.2	0.019	0.019
3	4.68	0.086	0.057	0.725	36.1	1.3	0.031	0.029
4	4.90	0.068	0.037	0.595	32.6	1.6	0.025	0.024
5	4.80	0.098	0.071	0.792	36.5	1.4	0.036	0.034
6	4.87	0.044	0.026	0.646	44.1	0.2	0.016	0.016
7	4.80	0.065	0.042	0.707	40.0	0.6	0.024	0.022
8	3.52	0.107	0.074	0.756	39.0	1.1	0.029	0.027
9	4.53	0.109	0.085	0.853	38.4	1.2	0.038	0.034
10	4.53	0.077	0.047	0.668	35.8	1.2	0.027	0.027
11	4.55	0.090	0.061	0.741	36.6	1.3	0.031	0.029
12	5.20	0.103	0.079	0.839	36.3	1.5	0.041	0.038
13	5.20	0.112	0.091	0.889	36.8	1.5	0.044	0.041
14	4.70	0.123	0.102	0.907	37.7	1.5	0.044	0.040
15	4.50	0.116	0.091	0.858	37.6	1.4	0.040	0.037
16	5.72	0.046	0.031	0.737	45.4	0.2	0.020	0.019
17	5.29	0.124	0.102	0.900	35.1	2.1	0.050	0.046
18	5.35	0.134	0.119	0.971	36.3	2.0	0.055	0.095
19	4.78	0.057	0.03	0.576	34.9	1.0	0.021	0.020
20	4.87	0.053	0.026	0.536	33.4	1.1	0.020	0.019
21	9.60	0.085	0.076	0.978	34.2	1.6	0.062	0.059
22	9.60	0.093	0.088	1.035	34.6	1.7	0.069	0.065
23	9.60	0.087	0.078	0.980	33.9	1.7	0.064	0.060
24	8.60	0.043	0.024	0.610	31.7	1.1	0.028	0.027
25	8.10	0.046	0.025	0.594	30.8	1.4	0.028	0.028
26	8.03	0.049	0.028	0.625	31.5	1.3	0.030	0.029
27	7.90	0.053	0.028	0.578	28.2	2.2	0.032	0.031
28	8.60	0.029	0.014	0.528	33.4	0.6	0.019	0.018
29	8.58	0.044	0.028	0.696	35.8	0.7	0.029	0.028
30	2.32	0.092	0.042	0.499	34.2	1.8	0.016	0.015
31	2.51	0.081	0.037	0.500	35.1	1.4	0.016	0.014
32	2.07	0.079	0.028	0.388	30.3	2.5	0.013	0.012
33	2.26	0.087	0.038	0.478	34.1	1.7	0.015	0.014
34	2.74	0.101	0.045	0.487	29.3	3.6	0.021	0.020

Tabel IV-1 metingen bij experimenten onderzoek Paintal (1969)

experiment	C_{bed}	k_{bed}/d_{50}	Ψ_{bed}	C_{korrel}	k_{korrel}/d_{50}	Ψ_{korrel}	q_s	q_{s^*}
	[$m^{1/2}/s$]	[-]	[-]	[$m^{1/2}/s$]	[-]	[-]	[$m^3/m/s$]	[-]
1	38.3	0.9	0.030	37.30	1.0	0.028	$4.4 \cdot 10^{-9}$	$1.5 \cdot 10^{-6}$
2	33.1	1.2	0.019	34.80	1.0	0.019	$4.7 \cdot 10^{-11}$	$1.6 \cdot 10^{-8}$
3	36.1	1.3	0.031	37.60	1.1	0.029	$1.4 \cdot 10^{-9}$	$5.0 \cdot 10^{-7}$
4	32.6	1.6	0.025	36.20	1.0	0.024	$5.9 \cdot 10^{-10}$	$2.1 \cdot 10^{-7}$
5	36.5	1.4	0.036	38.50	1.1	0.034	$1.7 \cdot 10^{-8}$	$5.9 \cdot 10^{-6}$
6	44.1	0.2	0.016	33.70	0.9	0.016	$4.9 \cdot 10^{-11}$	$1.7 \cdot 10^{-8}$
7	40.0	0.6	0.024	35.90	1.0	0.022	$2.1 \cdot 10^{-10}$	$7.5 \cdot 10^{-8}$
8	39.0	1.1	0.029	39.00	1.1	0.027	$5.6 \cdot 10^{-9}$	$2.0 \cdot 10^{-6}$
9	38.4	1.2	0.038	39.20	1.1	0.034	$7.8 \cdot 10^{-9}$	$2.7 \cdot 10^{-6}$
10	35.8	1.2	0.027	37.00	1.0	0.027	$1.1 \cdot 10^{-10}$	$3.9 \cdot 10^{-8}$
11	36.6	1.3	0.031	37.90	1.1	0.029	$6.2 \cdot 10^{-10}$	$2.2 \cdot 10^{-7}$
12	36.3	1.5	0.041	38.80	1.1	0.038	$5.5 \cdot 10^{-8}$	$1.9 \cdot 10^{-5}$
13	36.8	1.5	0.044	39.30	1.1	0.041	$1.9 \cdot 10^{-7}$	$6.5 \cdot 10^{-5}$
14	37.7	1.5	0.044	40.00	1.1	0.040	$6.5 \cdot 10^{-8}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$
15	37.6	1.4	0.040	39.60	1.1	0.037	$7.6 \cdot 10^{-9}$	$2.6 \cdot 10^{-6}$
16	45.4	0.2	0.020	33.90	0.9	0.019	$8.8 \cdot 10^{-11}$	$3.1 \cdot 10^{-8}$
17	35.1	2.1	0.050	40.00	1.1	0.046	$6.8 \cdot 10^{-7}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$
18	36.3	2.0	0.055	40.50	1.1	0.095	$7.8 \cdot 10^{-7}$	$2.7 \cdot 10^{-4}$
19	34.9	1.0	0.021	35.20	1.0	0.020	$7.6 \cdot 10^{-11}$	$2.7 \cdot 10^{-8}$
20	33.4	1.1	0.020	34.70	0.9	0.019	$8.3 \cdot 10^{-12}$	$2.9 \cdot 10^{-9}$
21	34.2	1.6	0.062	37.60	1.1	0.059	$3.1 \cdot 10^{-6}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
22	34.6	1.7	0.069	38.10	1.1	0.065	$1.3 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$
23	33.9	1.7	0.064	37.70	1.1	0.060	$2.0 \cdot 10^{-6}$	$6.9 \cdot 10^{-4}$
24	31.7	1.1	0.028	33.50	0.9	0.027	$2.7 \cdot 10^{-10}$	$6.8 \cdot 10^{-8}$
25	30.8	1.4	0.028	33.90	0.9	0.028	$1.1 \cdot 10^{-10}$	$2.8 \cdot 10^{-8}$
26	31.5	1.3	0.030	34.30	0.9	0.029	$9.5 \cdot 10^{-11}$	$3.3 \cdot 10^{-8}$
27	28.2	2.2	0.032	34.70	0.9	0.031	$1.3 \cdot 10^{-10}$	$4.4 \cdot 10^{-8}$
28	33.4	0.6	0.019	31.40	0.8	0.018	$5.9 \cdot 10^{-12}$	$2.1 \cdot 10^{-9}$
29	35.8	0.7	0.029	33.70	0.9	0.028	$7.6 \cdot 10^{-10}$	$2.6 \cdot 10^{-7}$
30	34.2	1.8	0.016	38.10	1.1	0.015	$6.0 \cdot 10^{-11}$	$2.1 \cdot 10^{-8}$
31	35.1	1.4	0.016	37.30	1.0	0.014	$6.2 \cdot 10^{-11}$	$2.2 \cdot 10^{-8}$
32	30.3	2.5	0.013	37.10	1.0	0.012	$2.8 \cdot 10^{-12}$	$9.8 \cdot 10^{-10}$
33	34.1	1.7	0.015	37.70	1.1	0.014	$8.4 \cdot 10^{-12}$	$2.9 \cdot 10^{-9}$
34	29.3	3.6	0.021	38.70	1.1	0.020	$9.4 \cdot 10^{-11}$	$3.3 \cdot 10^{-8}$

Tabel IV-2 transportgegevens van experimenten onderzoek Paintal (1969)

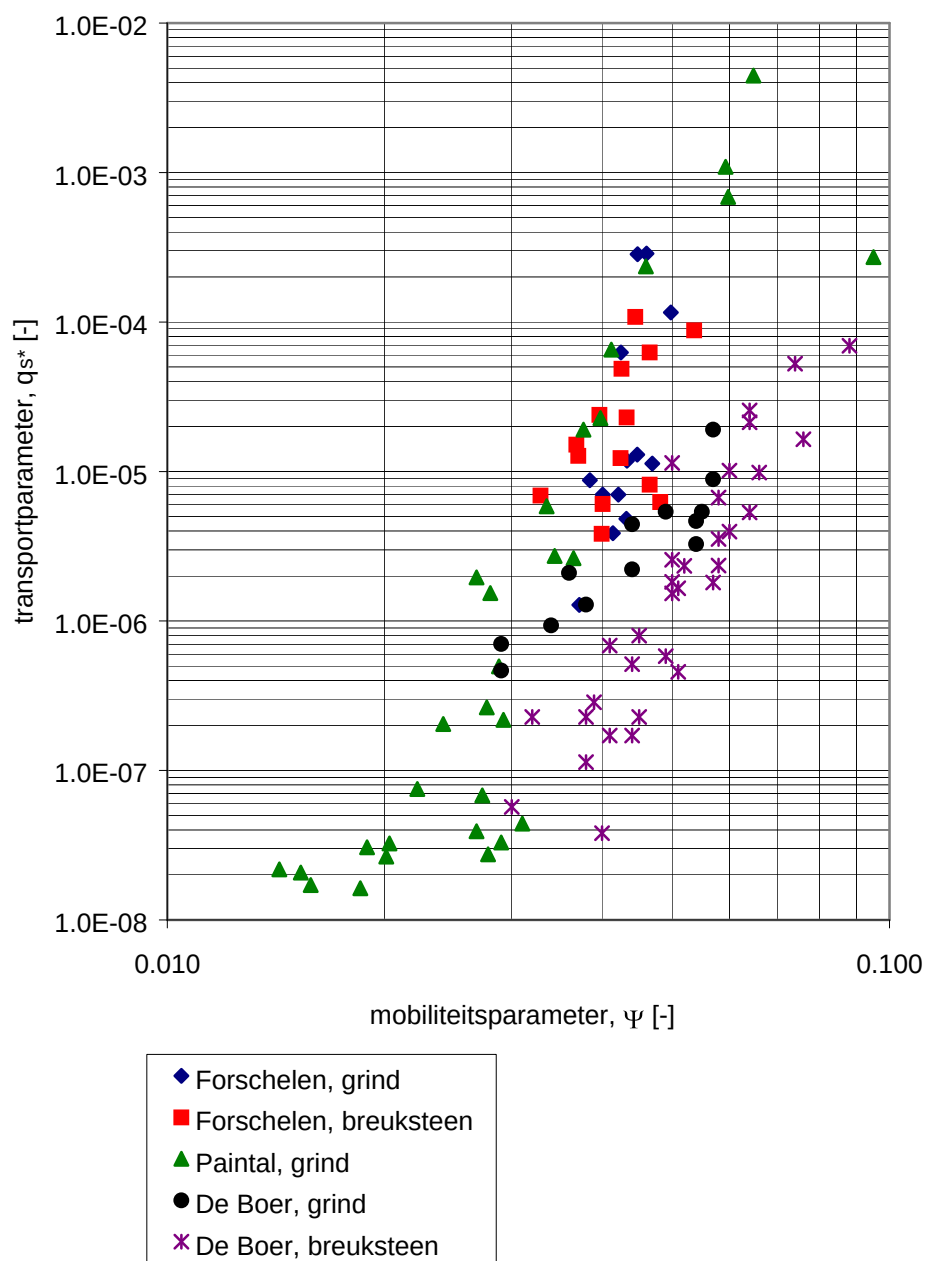
Bijlage V Gegevens onderzoek De Boer (1998)

exp.	i [mm/m]	h [m]	Q [m ³ /s]	$\bar{u}$ [m/s]	$\Psi_{\text{snelh.profiel}}$ [-]	q _s * [-]
1,1	2,68	0,20	0,049	0,61	-	-
1,2	3,43	0,20	0,056	0,70	0,038	1,14·10 ⁻⁰⁷
1,3	4,08	0,20	0,064	0,80	0,044	5,14·10 ⁻⁰⁷
1,4	5,00	0,20	0,068	0,85	0,051	1,66·10 ⁻⁰⁶
1,5	5,80	0,20	0,074	0,93	0,058	6,70·10 ⁻⁰⁶
1,6	6,20	0,21	0,086	1,02	0,064	2,56·10 ⁻⁰⁵
2,1	2,55	0,20	0,048	0,60	0,030	5,71·10 ⁻⁰⁸
2,2	3,52	0,20	0,056	0,70	0,038	2,28·10 ⁻⁰⁷
2,3	4,11	0,20	0,063	0,79	0,045	7,99·10 ⁻⁰⁷
2,4	5,05	0,20	0,068	0,85	0,052	2,34·10 ⁻⁰⁶
2,5	5,74	0,20	0,076	0,95	0,058	3,54·10 ⁻⁰⁶
2,6	6,30	0,21	0,085	1,01	0,064	2,13·10 ⁻⁰⁵
3,1	2,55	0,20	0,049	0,61	-	-
3,2	3,70	0,20	0,055	0,69	0,041	1,71·10 ⁻⁰⁷
3,3	4,80	0,20	0,064	0,80	0,049	5,82·10 ⁻⁰⁷
3,4	4,95	0,20	0,068	0,85	0,051	4,57·10 ⁻⁰⁷
3,5	5,90	0,19	0,072	0,95	0,058	2,35·10 ⁻⁰⁶
3,6	6,57	0,20	0,076	0,95	0,064	5,34·10 ⁻⁰⁶
5,1	3,70	0,20	0,060	0,75	0,039	2,86·10 ⁻⁰⁷
5,2	4,15	0,20	0,066	0,83	0,045	2,28·10 ⁻⁰⁷
5,3	5,00	0,20	0,072	0,90	0,050	2,57·10 ⁻⁰⁶
5,4	5,60	0,20	0,075	0,94	0,057	1,81·10 ⁻⁰⁶
5,5	6,15	0,20	0,081	1,01	0,066	9,85·10 ⁻⁰⁶
5,6	7,00	0,20	0,085	1,06	0,076	1,64·10 ⁻⁰⁵
5,7	8,20	0,20	0,089	1,11	0,088	6,93·10 ⁻⁰⁵
6,1	2,81	0,20	0,060	0,75	0,032	2,28·10 ⁻⁰⁷
6,2	3,63	0,20	0,066	0,83	0,041	6,85·10 ⁻⁰⁷
6,3	4,60	0,20	0,073	0,91	0,050	1,83·10 ⁻⁰⁶
6,4	6,02	0,21	0,083	0,99	0,060	1,01·10 ⁻⁰⁵
6,5	8,00	0,20	0,090	1,13	0,074	5,27·10 ⁻⁰⁵
7,1	5,02	0,20	0,075	0,94	-	-
7,2	2,62	0,20	0,057	0,71	0,040	3,81·10 ⁻⁰⁸
7,3	3,53	0,20	0,065	0,81	0,044	1,71·10 ⁻⁰⁷
7,4	4,65	0,20	0,072	0,90	0,050	1,53·10 ⁻⁰⁶
7,5	5,00	0,20	0,077	0,96	0,060	3,96·10 ⁻⁰⁶
7,6	5,90	0,20	0,083	1,04	0,050	1,14·10 ⁻⁰⁵
8,1	2,52	0,21	0,055	0,65	0,029	4,67·10 ⁻⁰⁷
8,2	3,21	0,20	0,063	0,79	0,034	9,35·10 ⁻⁰⁷
8,3	4,04	0,20	0,072	0,90	0,038	1,29·10 ⁻⁰⁶
8,4	4,41	0,20	0,076	0,95	0,044	2,22·10 ⁻⁰⁶
8,5	4,42	0,20	0,082	1,03	0,054	4,67·10 ⁻⁰⁶
8,6	5,11	0,21	0,083	0,99	0,055	5,38·10 ⁻⁰⁶
8,7	5,84	0,21	0,088	1,05	0,057	1,90·10 ⁻⁰⁵
9,1	2,51	0,23	0,054	0,59	0,029	7,01·10 ⁻⁰⁷
9,2	3,22	0,20	0,064	0,80	0,036	2,10·10 ⁻⁰⁶
9,3	4,05	0,20	0,073	0,91	0,044	4,44·10 ⁻⁰⁶
9,4	4,47	0,22	0,083	0,94	0,049	5,38·10 ⁻⁰⁶
9,5	4,69	0,23	0,086	0,93	0,054	3,27·10 ⁻⁰⁶
9,6	5,85	0,23	0,088	0,96	0,057	8,88·10 ⁻⁰⁶

Figuur V-1 metingen van experimenten onderzoek De Boer (1998)

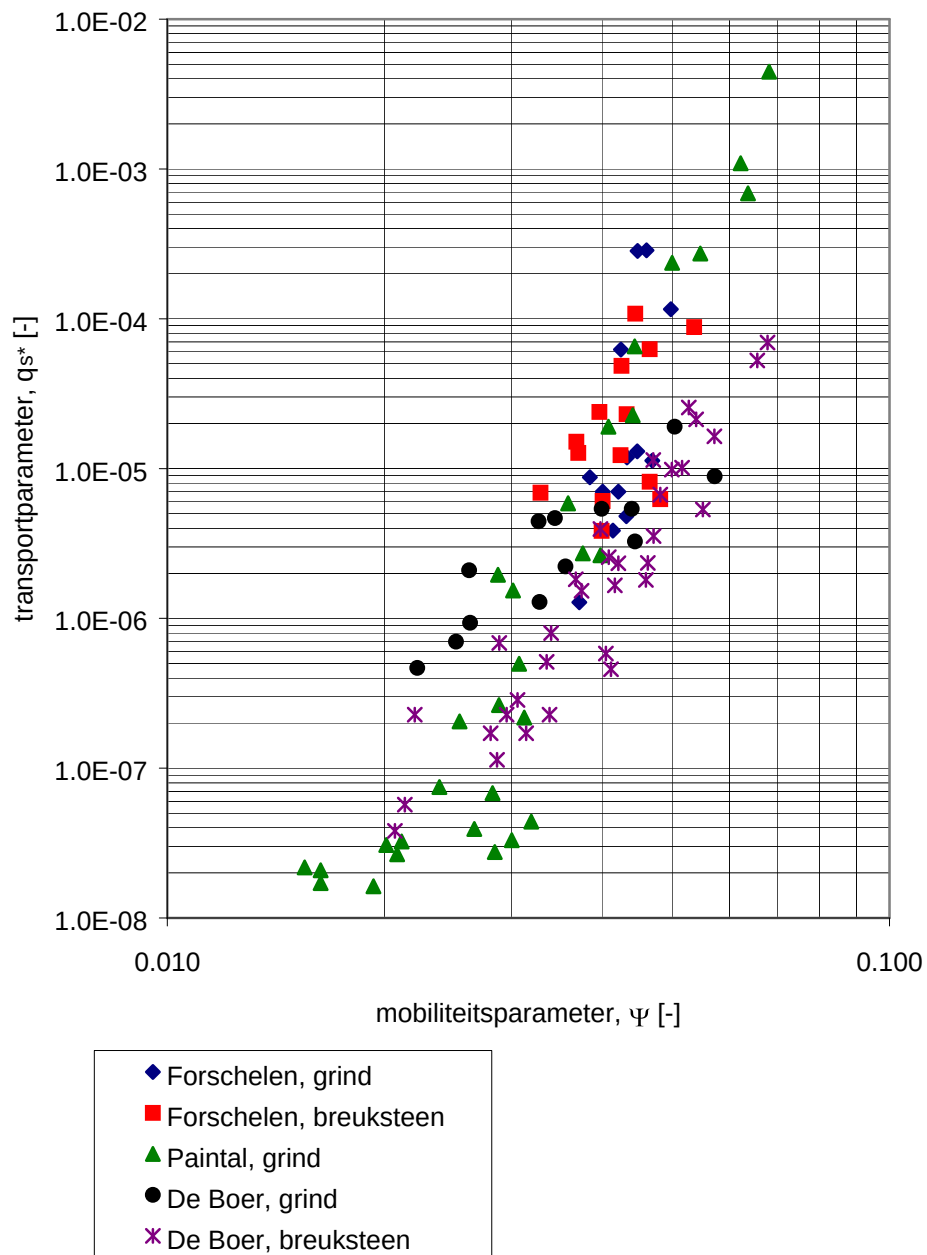
Bijlage VI Figuren onderzoeken Forschelen, Paintal en De Boer

Experimenten Forschelen, Paintal en De Boer, oorspronkelijke mobiliteitsparameter van elk onderzoek

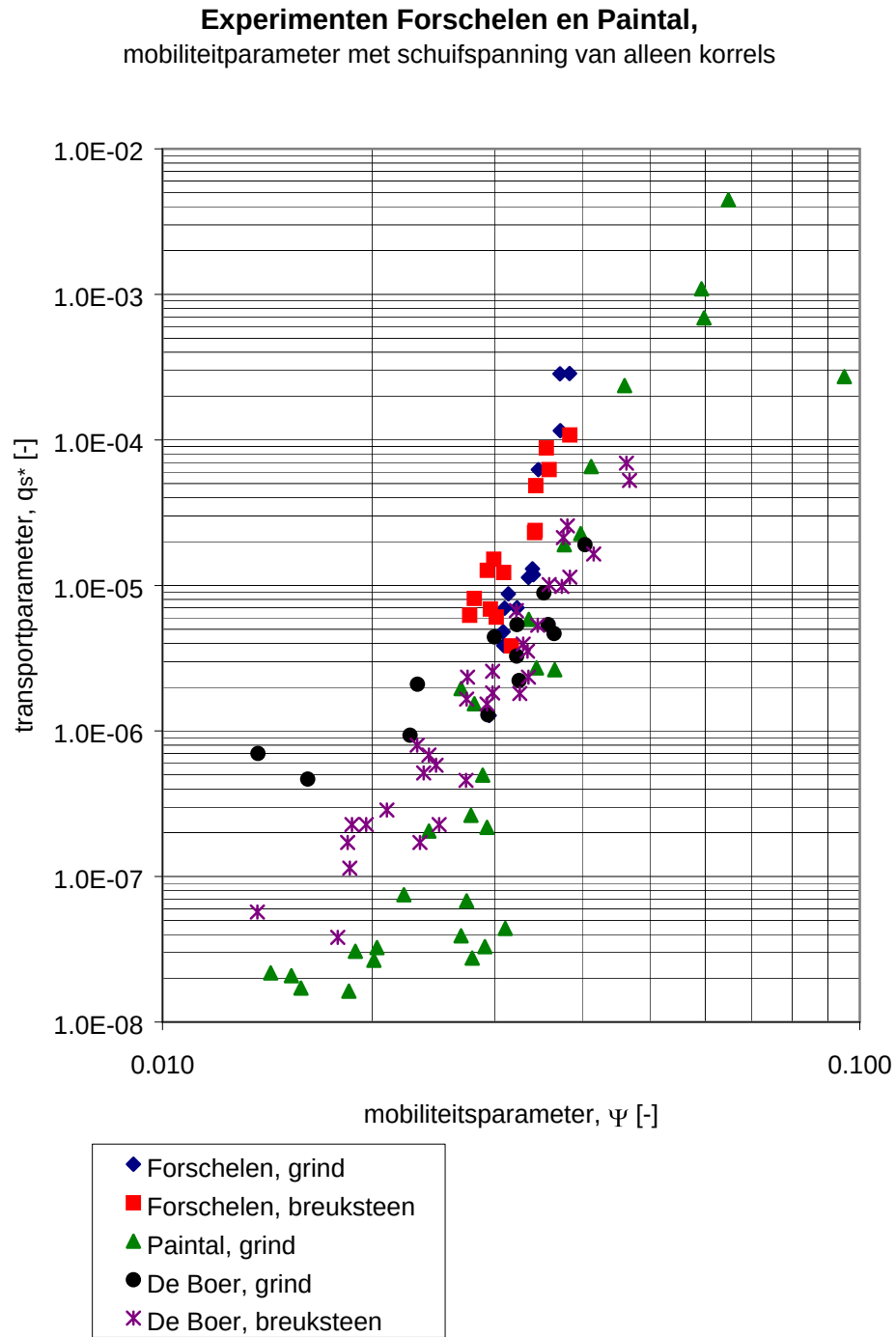


Figuur VI -1 grafiek met onderzoeken, oorspronkelijke mobiliteitsparameter van elk onderzoek

Experimenten Forschelen en Paintal,
mobiliteitsparameter met schuifspanning van gehele bed



Figuur VI -2 resultaten onderzoeken, mobiliteitsparameter gerelateerd aan bedschuifspanning



Figuur VI -3 resultaten onderzoeken, mobiliteitsparameter gerelateerd aan de korrelschuifspanning

Bijlage VII Visuele specificatie steenvorm

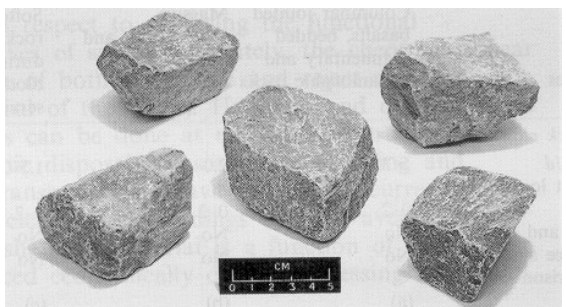
- (a) Elongate/tabular (ET)
 $P_R > 0.015$



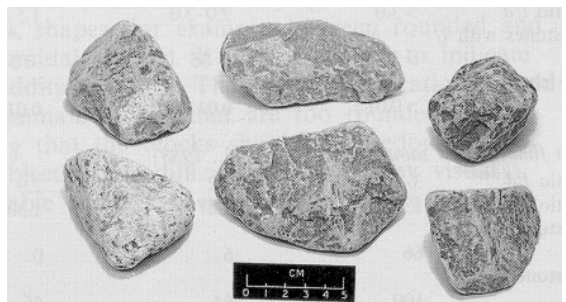
- (b) Irregular (IR)
 $P_R = 0.0013 - 0.015$



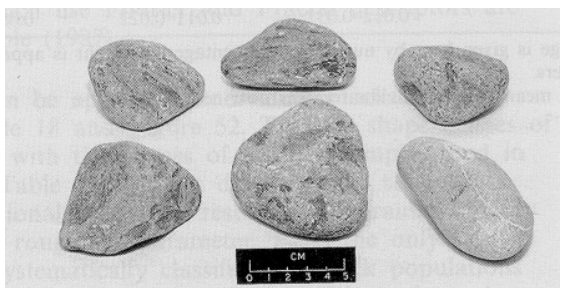
- (c) Equant (EQ)
 $P_R = 0.011 - 0.013$



- (d) Semi-round (SR)
 $P_R = 0.009 - 0.011$



- (e) Very round (VR)
 $P_R < 0.009$



Figuur VII-1 Visuele specificatie steenvorm (figuur 52, CUR Report 154)