Deltares

SBW Piping - Hervalidatie piping

HP1. Ontwikkeling nieuwe rekenregel
HP1.2 Uitbreiding en aanpassing van de pipingregel

Han Knoeff
Hans Sellmeijer
Juliana Lopez
Sophia Luijendijk

© Deltares, 2009

Deltares

Titel

SBW Piping - Hervalidatie piping
HP1 Ontwikkeling nieuwe rekenregel
HP1.2 Uitbreiding en aanpassing van de pipingregel

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Rijkswaterstaat Waterdienst	1200187-015	1200187-015-GEO-0004	47

Trefwoorden

Piping, waterkeringen, toetsen, ontwerpen

Samenvatting

Doel van het project SBW Piping is het identificeren van onzekerheden binnen de huidige piping toetsingsregels en deze eventueel te verkleinen of elimineren. Het programma is gestart met kleine-schaalproeven om invloeden van verschillende zandkarakteristieken te bestuderen. Uit deze proeven volgt de invloed van de verschillende zandkarakteristieken op het pipingproces. Medium-scale proeven zijn vervolgens uitgevoerd om de gevonden invloed te bevestigen en om de invloed van lengteschaal te onderzoeken. De doelstelling van deze studie is het afleiden van een aangepaste rekenregel op basis van een multivariate analyse op de resultaten van de kleine-schaalexperimenten. Deze rekenregel zal getoetst worden met de resultaten van de medium-scale proeven en gevalideerd worden in een full-scale proef.

Dit document stelt een aangepaste rekenregel voor piping voor. De resultaten van 38 small-scale experimenten en 7 medium-scale proeven zijn gebruikt voor aanpassing en uitbreiding van de bestaande rekenregel van Sellmeijer.
Door de uitbreiding van de rekenregel kan rekening worden gehouden met de zandeigenschappen die in de small-scale experimenten als relevant zijn geïdentificeerd. De invloed van de verschillende zandeigenschappen is met behulp van een multivariate analyse gekwantificeerd. Met de aanpassing in de rekenregel kan rekening worden gehouden met de waargenomen niet-lineaire relatie van de d70 met het kritieke verval. Daarnaast is de vorm van de bestaande pipingregel gewijzigd om meer inzicht te geven in de verschillende factoren die rondom piping een rol spelen. Onderscheid wordt gemaakt tussen een *resistance*, een *scale* en een *geometry* factor.
Voor toepassing van de voorgestelde rekenregel in de praktijk zijn full-scale proeven vereist. Daarnaast wordt meer theoretisch onderzoek aanbevolen en zijn meer medium-scale proeven noodzakelijk.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
02	06-10-2009	Ir. Han Knoeff Dr. Juliana Lopez Ir. Sophia Luijendijk Dr. Hans Sellmeijer Ir. Vera van Beek		Ir. Ed Calle		Ing. Harm Aantjes	

Status

definitief

Inhoud

Lijst van Tabellen i

Lijst van Figuren ii

1 Inleiding 3
1.1 Introductie 3
1.2 Doelstelling 4
1.3 Werkwijze en opbouw van het rapport 4

2 Geselecteerde proeven 5

3 Aangepaste rekenregel van Sellmeijer 9
3.1 Theoretische pipingregel 9
3.2 Empirische pipingregel 11
3.3 Aangepaste pipingregel 11

4 Betrouwbaarheid rekenregel 14
4.1 Kwaliteit empirische rekenregel 14
4.2 Medium-scale proeven 15
4.3 Deltagootproeven 17
4.4 Full-scale proeven 18

5 Conclusies en aanbevelingen 20

6 Referenties 22

Bijlage(n)

A Extra kleine-schaalproeven ten behoeve van relatieve dichtheid 24
A.1 Inleiding 24
A.2 Beschrijving small-scale experimenten 24
A.3 Uitgevoerde proeven 26
A.4 Analyse extra small-scale proeven 26
A.5 Conclusies 28

B Applied multivariate analysis to piping 30
B.1 Introduction 30
B.2 Statistical Analyses 31
B.2.1 Statistical correlation 31
B.2.2 Regression analysis 32
B.3 Analysis of the experimental results 34
B.3.1 Correlation results 35
B.3.2 Multivariate regression 36
B.3.3 Remarks 40

C Comparison between the experimental values for grain size D70 and uniformity 42

Lijst van Tabellen

Tabel 2.1 Geselecteerde small-scale experimenten 6
Tabel 2.2 Geselecteerde medium- scale proeven 7
Tabel 4.1 Resultaten multivariate analyse op 5 deelverzamelingen 14
Tabel 4.2 Resultaten multivariate analyse op medium-scale experimenten 16
Tabel 4.3 Validatie van aangepaste rekenregel met medium-scale proeven 16
Tabel 4.4 Vergelijking van rekenregels 17

Tabel A.1 Overzicht resultaten extra small-scale experiments 27
Tabel B.1 Correlation coefficient interpretation 31
Tabel B.2 Linear correlation coefficients of the experimentally measured parameters for the small scale piping experiments 35
Tabel B.3 Linear correlation coefficients of the experimentally measured parameters for the medium scale piping experiments 36
Tabel B.4 Small scale piping experiments regression coefficients with 38 data points 36
Tabel B.5 Small scale piping experiments regression coefficients excluding KAS from the analysis 38
Tabel B.6 Small scale piping experiments regression coefficients excluding the permeability ‘U’ from the analysis 38
Tabel B.7 Small scale piping experiments regression coefficients excluding the density ‘D70’ from the analysis 39
Tabel B.8 Small scale piping experiments regression coefficients excluding the permeability ‘k’ from the analysis 39
Tabel B.9 Medium scale piping experiments regression coefficients with 5 data points 39
Tabel C.1 Ascending sorted data with respect to the D70 to observe the variations of the uniformity for different values of grain size D70 43

Lijst van Figuren

Figuur 1.1 Overzicht plan van aanpak SBW Hervalidatie Piping 3
Figuur 4.1 Vergelijking tussen experimentele en berekende verhangen van de kleine-schaalproeven 15
Figuur 4.2 Vergelijking tussen experimentele en berekende verhangen van de medium-scale proeven 17
Figuur 4.3 Vergelijking tussen experimentele en berekende verhangen van de deltagootproeven 18

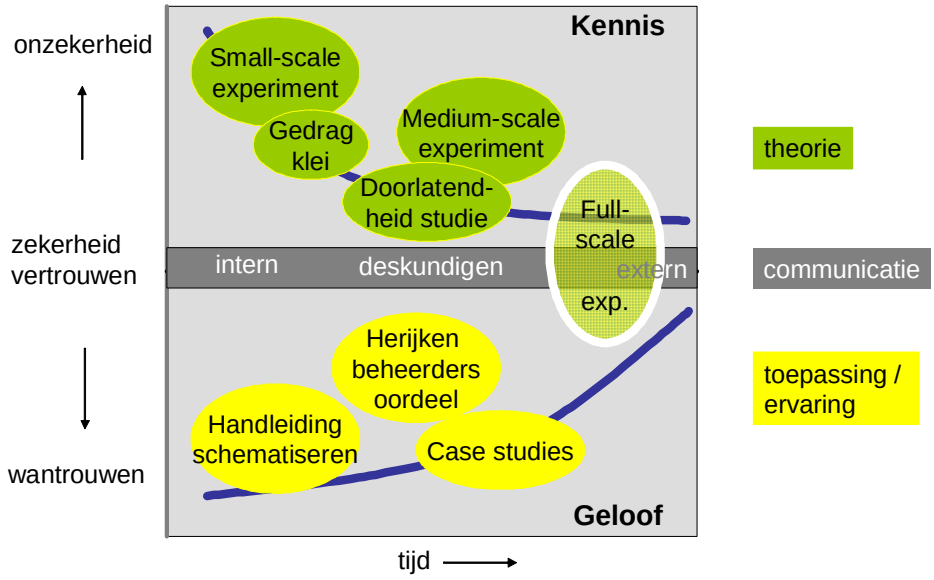
Figuur A.1 Illustratie van de doorstroombak 24
Figuur A.2 Overzicht proefopstelling 25
Figuur A.3 Bovenaanzicht doorstroombak 26
Figuur A.4 Relatie relatieve dichtheid en verval bij doorgaande pipe 27
Figuur A.5 Relatie pipingproces en relatieve dichtheid 28
Figuur B.1 Data points corresponding to the outliers of the experimental results for the small scale piping experiments 34
Figuur B.2 Multivariate regression model plotted against the experimentally measured critical head for the small scale piping experiments 37
Figuur B.3 Small scale piping experiments plotted against the estimated values with the Sellmeijer rule. 37
Figuur C.1 D70 and uniformity for the small scale piping experiments with 52 data points 43

1 Inleiding

1.1 Introductie

In het project Veiligheid Nederland in Kaart I kwam piping als een dominant faalmechanisme naar voren, hetgeen niet aansluit bij het beheerdersoordeel. Nader onderzoek naar de betrouwbaarheid van de resultaten van de pipinganalyses binnen VNK wees uit dat de kans op piping, bij een betere schematisatie, kleiner zou worden maar nog steeds groter is dan verwacht. Ook vanuit de historie zijn aanwijzingen dat het pipingmechanisme relevanter kan zijn dan tot nu toe gedacht. Het is niet uit te sluiten dat de kans op piping is onderschat en onveilige procedures rondom het schematiseren en voorschrijven van rekenmodellen zijn opgesteld. Nadere validatie van rekenmodellen is nodig.

Teneinde de onzekerheden binnen de huidige piping toetsingsregels in beeld te krijgen en deze te verkleinen of te elimineren is het onderzoeksspoor SBW Hervalidatie Piping opgestart. Het onderzoeksspoor kent twee deelsporen. Een theoretisch en praktisch spoor.
In het theoretische spoor worden de kenmerken die bij piping een rol spelen door laboratorium- en bureauonderzoek geïdentificeerd en zo mogelijk gekwantificeerd. Het theoretisch spoor leidt tot meer kennis van het pipingmechanisme en uiteindelijk tot bevestiging of aanpassing van de bestaande rekenregel. Het praktisch spoor leidt tot handvatten om de (aangepaste) rekenregel op een juiste manier te kunnen toepassen. De handvatten moeten het vertrouwen in de rekenregels vergroten. Het plan van aanpak van SBW Hervalidatie Piping is schematisch in Figuur 1.1 weergegeven. In deze figuur is weergegeven hoe de onzekerheid over de theorie door het uitvoeren van experimenten en berekeningen afneemt in de tijd. Het vormen van pipingkanalen is zowel bestudeerd in kleine-schaalexperimenten en in medium-scale exerimenten, waarin de kwelweglengten respectievelijk 0.35 m en 1.5 m zijn. De kleine-schaalexperimenten zijn beschreven in [van Beek, Knoeff, 2009]. De medium-scale experimenten zijn beschreven in [van Beek, Bezuijen, 2009].



Figuur 1.1 Overzicht plan van aanpak SBW Hervalidatie Piping

Uit de kleine-schaalexperimenten is gebleken dat het kritieke verval zoals berekend met de bestaande rekenregel van Sellmeijer niet voor alle zandsoorten overeenkomt met het experimenteel gevonden verval bij doorbraak (het verval waarbij het terugschrijdende kanaal de bovenstroomse zijde bereikt).

Dit document stelt een aangepaste rekenregel voor die op basis van een multivariate analyse op de resultaten van de small- en medium-scale experimenten is afgeleid. Validatie van de aangepaste rekenregel vindt plaats met full-scale proeven in de IJkdijkfaciliteit.

De ontwikkeling van een aangepaste rekenregel is onderdeel van het kennisspoor, welke is weergegeven in Figuur 1.1. Het aanpassen van de regel volgt uit de resultaten van kleine- en medium-scale proeven en gaat vooraf aan de full-scale proef. Voor het overzicht van het totale project wordt verwezen naar het projectplan 2009 [Förster et al., 2009].

1.2 Doelstelling

De doelstelling van SBW hervalidatie piping is, zoals de naam al zegt, een hervalidatie van de rekenregel van Sellmeijer. De hervalidatie leidt in 2010 tot een hernieuwde versie van het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen (TRZW). In dit rapport zijn de nieuwe inzichten met betrekking tot het pipingproces beschreven en wordt een toetsmethode voorgeschreven.

De doelstelling van de onderhavige rapportage is het onderzoeken van de invloed van zandparameters door middel van een multivariate analyse op de resultaten van de small- en medium-scale experimenten. Op basis van de resultaten van de multivariate analyse wordt een aangepaste rekenregel afgeleid.

1.3 Werkwijze en opbouw van het rapport

Niet alle small- en medium-scale proeven kunnen worden gebruikt voor de analyse van de bestaande rekenregel. Na dit inleidende hoofdstuk wordt in hoofdstuk 2 een overzicht gegeven van de laboratoriumproeven die zijn gebruikt voor het aanpassen van de bestaande rekenregel. In hoofdstuk 3 wordt op basis van een multivariate analyse, die op de geselecteerde proeven is uitgevoerd, de bestaande rekenregel uitgebreid en aangepast. De multivariate analyse zelf is beschreven in Appendix B. Hoofdstuk 4 bevat enkele beschouwingen over de kwaliteit van de aangepaste rekenregel. In het laatste hoofdstuk worden de conclusies en aanbevelingen samengevat.

Naar aanleiding van de resultaten van de small-scale experimenten is een zestal extra small-scale experimenten uitgevoerd, omdat de invloed van relatieve dichtheid niet met zekerheid vastgesteld kon worden op basis van de oorspronkelijke set van small-scale experimenten . Een korte analyse van deze zes experimenten is in Appendix A gegeven.

2 Geselecteerde proeven

Op basis van de uitgevoerde small- en medium-scale experimenten wordt in dit rapport een voorstel gedaan om de rekenregel van Sellmeijer aan te passen. Dit hoofdstuk bevat een overzicht van de proeven die voor de achterliggende analyse zijn gebruikt.

Small-scale proeven
In 2008 is een groot aantal small-scale experimenten proeven uitgevoerd. Deze proeven geven inzicht in de dominante eigenschappen en processen rondom erosie en zandtransport bij pipevorming. De proeven zijn gerapporteerd in factual reports [Knoeff et al, 2009], [Knoeff, van Beek, 2009], [van Beek et al., 2009]. De analyse van de proeven is beschreven in [van Beek, Knoeff, 2009].

Uit de kleinschalige laboratoriumproeven is geconcludeerd dat kleine kanaaltjes in zand onder een afdichting op meer dan één manier kunnen ontstaan en groeien. Met andere woorden, er worden meerdere piping processen waargenomen. De experimenten waarbij het proces van 'backward erosion' opgetreden en geen significante invloed van luchtbellen is waargenomen, worden gebruikt voor aanpassing van de bestaande pipingregel. De proeven waarbij pipingkanalen zijn waargenomen die aan de bovenstroomse zijde beginnen kunnen niet gebruikt worden voor de hervalidatie van het model van Sellmeijer, omdat dit model terugschrijdende erosie verondersteld. In Tabel 2.1 zijn de eigenschappen (type zand, relatieve dichtheid, doorlatendheid, d70, uniformiteit en KAS-waarde) van de geselecteerde kleine-schaalproeven weergegeven.

Proef nummer	Zand	RD [%]	K [m/s]	d_{70} [μm]	U [-]	KAS [-]
O43	Oostelijke rivierenzand	75,3	1,87E-04	307	2,1	51
I45	Boxtel Ringstraat Itterbecke	71,6	5,72E-05	202	2,2	45
I46	Boxtel Ringstraat Itterbecke	70	6,80E-05	202	2,2	45
I47	Enschede Ringstraat Itterbecke	74,7	2,58E-04	431	1,6	69
I48	Enschede Ringstraat Itterbecke	75,7	3,10E-04	431	1,6	69
I49	Hoherstall Waalre	76	2,70E-04	400	1,6	46
I50	Hoherstall Waalre	73	3,72E-04	400	1,6	46
I51	Ringstrasse Itterbecke Sandr	70	9,85E-05	195	1,5	52
I52	Hoherstall Waalre	71	2,50E-04	400	1,6	46
I53	Sandr	73,6	7,10E-05	195	1,5	52
b54	Baskarp	79	4,89E-05	154	1,6	50
b55	Baskarp	71,3	5,64E-05	154	1,6	50
I56	Schemda Itterbecke	69,3	8,18E-05	175	1,3	38
b57	baskarp	75	5,69E-05	154	1,6	50
b58	Baskarp	70	6,78E-05	154	1,6	50
b61	Baskarp	73	6,11E-05	154	1,6	50
I62	Schemda Itterbecke	63,3	1,12E-04	175	1,3	38
s63	Sterksel	75,2	1,32E-04	232	2,2	35
s64	Sterksel	75,2	9,87E-05	232	2,2	35
b28	baskarp	37	1,42E-04	154	1,6	50

d33	dekzand	34	1,14E-04	192	2,6	54
b19	baskarp	64	9,17E-05	154	1,6	50
b35	baskarp	65	7,54E-05	154	1,6	50
b36	baskarp	63	7,04E-05	154	1,6	50
d31	dekzand	65	5,13E-05	192	2,6	54
d32	dekzand	65	6,61E-05	192	2,6	54
b23	baskarp	98	4,07E-05	154	1,6	50
b24	baskarp	97	4,61E-05	154	1,6	50
d37	dekzand	98	2,66E-05	192	2,6	54
d38	dekzand	92	3,96E-05	192	2,6	54
d39	dekzand	92	3,66E-05	192	2,6	54
b40	baskarp	91	3,63E-05	154	1,6	50
b41	baskarp	92	4,88E-05	154	1,6	50
B82	baskarp	85	5,23E-05	154	1,6	50
B83	baskarp	85	5,22E-05	154	1,6	50
B84	baskarp	53	8,49E-05	154	1,6	50
B85	baskarp	53	6,77E-05	154	1,6	50
B86	baskarp	43	8,94E-05	154	1,6	50

Tabel 2.1 Geselecteerde small-scale experimenten

Om een relatie tussen het verval bij doorbraak en de relatieve dichtheid te kunnen vaststellen bij een initieel proces van terugschrijdende erosie zijn in 2009 een zestal extra kleinschalige proeven uitgevoerd. In de eerste set kleine-schaalproeven zijn twee soorten zand beproefd bij 35%, 65% en 95%. Op basis van deze proeven was het echter niet mogelijk om uitspraak te doen over de invloed van relatieve dichtheid op terugschrijdende erosie. Er zijn om die reden aanvullende experimenten in duplo uitgevoerd met een relatieve dichtheid (RD) van circa 45%, 55% en 85%. De proeven zijn gerapporteerd in het factual report met Deltares kenmerk 1200187.0015. De analyse van de proeven staat in Appendix A.

Medium-scale proeven

Uit de resultaten van de small-scale proeven is afgeleid dat de invloed van korreldiameter mogelijk geringer is dan verwacht wordt op basis van de rekenregel van Sellmeijer. Daarnaast blijkt de relatieve dichtheid van belang. In het volgende hoofdstuk wordt de bestaande rekenregel aangepast door bestaande theorie te combineren met de resultaten van de Multi-variate analyse. De medium-scale proeven geven de mogelijkheid om de gevonden rekenregel beter te kwantificeren. In totaal zijn een 8-tal medium-scale proeven uitgevoerd waarvan 7 experimenten zijn geanalyseerd. In één medium-scale experiment is een pomp uitgevallen en wijkt de doorlatendheid sterk af van de verwachte waarde, waardoor het resultaat onbruikbaar is voor hervalidatie.

In Tabel 2.2 zijn de eigenschappen (type zand, d70, relatieve dichtheid en doorlatendheid) van de geselecteerde medium-scale proeven weergegeven. De proeven zijn uitgevoerd op Baskarp en Itterbeck zand. Beide zandsoorten zijn goed verkrijgbare modelzanden met een verschillende d70. De uniformiteit en KAS-waarde zijn vrijwel gelijk voor deze zandsoorten. Voor nadere omschrijving van de zanden wordt verwezen naar het factual report van de medium-scale proeven [Rietdijk, 2009].

Proefnummer	Zand	d_{70} [µm]	RD [%]	k [m/s]
Bms1	Baskarp	154	65	$1{,}15^{E}$-4
Bms2	Baskarp	154	60	$1{,}37^{E}$-4
Ims3	Itterbeck	210	70	$1{,}88^{E}$-4
Ims4	Itterbeck	210	45	$3{,}44^{E}$-4
Ims5	Itterbeck	210	65	$2{,}10^{E}$-4
Bms7	Baskarp	154	60	$1{,}37^{E}$-4
Bms8	Baskarp	154	45	$2{,}37^{E}$-4

Tabel 2.2 Geselecteerde medium- scale proeven

Full-scale proeven

De bestaande rekenregel is het vertrekpunt voor de aangepaste rekenregel. Deze bestaande rekenregel wordt beschreven in het huidige Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen [TAW, 1999]. De parameters voor de bestaande rekenregel zijn min of meer afgeijkt aan de 'Deltagootproeven' [Silvis, 1991]. De aangepaste rekenregel zal worden gevalideerd op full-scale proeven in de IJkdijkfaciliteit.

3 Aangepaste rekenregel van Sellmeijer

Op basis van de resultaten uit de small-scale experimenten is de bestaande rekenregel aangepast en uitgebreid. De aangepaste regel is daarom slechts een experimentele fit, die met grote-schaalproeven getoetst moet worden voordat toepassing ervan in de praktijk plaats kan vinden. Dit hoofdstuk beschrijft de aangepaste rekenregel.

Daartoe wordt in paragraaf 3.1 eerst de bestaande rekenregel herschreven zodat:

- rekening kan worden gehouden met de zandeigenschappen die in de small-scale experimenten als relevant zijn geïdentificeerd;
- rekening kan worden gehouden met de waargenomen niet lineaire relatie van de d_{70} met het kritieke verval.

De invloed van de zandeigenschappen is met behulp van een multivariate analyse gekwantificeerd. De multivariate analyse leidt in paragraaf 3.2 tot een empirische relatie tussen de verschillende zandeigenschappen en het verval bij een doorgaande pipe. De multivariate analyse is uitgebreid beschreven in Appendix B.

Het combineren van de empirische relatie en de bestaande rekenregel leidt tot de aangepaste rekenregel in paragraaf 3.3.

3.1 Theoretische pipingregel

De regel van Sellmeijer zoals opgenomen in het Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen [TAW, 1999], is afgeleid uit het model van Sellmeijer [Sellmeijer, 1988] voor het berekenen van het kritiek verval in de situatie van een standaarddijk. Deze rekenregel luidt als volgt:

$$H_c = \alpha \cdot c \cdot \frac{\gamma_p}{\gamma_w} \tan(\theta)(0.68 - 0.10\ln(c)) \cdot L \tag{3.1}$$

met:

$$\alpha = \left(\frac{D}{L}\right)^{\left(\frac{0.28}{\left(\frac{D}{L}\right)^{2.8}-1}\right)} \tag{3.2}$$

en:

$$c = \eta d_{70} \left(\frac{1}{\kappa L}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{3.3}$$

Waarin:
H_c = kritieke verval over de waterkering
γ_p = (schijnbaar) volumegewicht van de zandkorrels onder water (17 kN/m^3)
γ_w = volumegewicht van water [kN/m^3]
θ = rolweerstandshoek van de zandkorrels [°]

η = coëfficiënt van White [-]
κ = intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag [m^2]
d_{70} = 70-percentielwaarde van de korrelverdeling [m]
D = dikte van de zandlaag [m]
L = lengte van de kwelweg (horizontaal gemeten) [m]

Deze rekenregel is gebaseerd op een vier-krachtenevenwicht. In de loop van de jaren is het krachtenmodel verbeterd tot een twee-krachtenmodel. Voor een twee-krachtenevenwicht geldt vergelijking (3.4) in geval van een standaard dijkconfiguratie:

$$H_c = \alpha \cdot c \cdot \frac{\gamma_p}{\gamma_w} \tan(\theta) \cdot 0.87 \cdot \left(\frac{D}{L} \right)^{\left(\frac{0.28}{\left(\frac{D}{L} \right)^{2.8} - 1} + 0.04 \right)} \cdot L \tag{3.4}$$

Uit de kleine-schaalexperimenten volgt dat de d_{70} een minder grote invloed heeft op het pipingproces dan aangenomen in de bestaande rekenregel van Sellmeijer. Kennis ontbreekt om voor deze gereduceerde invloed een theoretische verklaring te geven. Het is duidelijk dat grootte en gewicht van de korrel essentieel zijn voor het erosieproces in de pipes. Andere factoren, bijvoorbeeld het meanderen van de pipes, hebben ook invloed op het groeien van de pipe. Deze factoren kunnen ertoe bijdragen dat de invloed van de korreldiameter op het pipingproces kleiner is dan aangenomen in de bestaande rekenregel.

In de pipingregel kunnen drie factoren worden onderscheiden: een *resistance*, een *scale* en een *geometry* factor. De regel kan als volgt worden beschreven:

$$\frac{H_c}{L} = \underbrace{\left[\frac{\pi}{3} \eta \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \tan(\theta) \right]}_{F_{resistance}} \underbrace{\left[\frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L}} \right]}_{F_{scale}} \underbrace{\left[F(G) \right]}_{F_{geometry}} \tag{3.5}$$

De eerste factor beschrijft het grensevenwicht van zandkorrels op de bodem van de pipe. De tweede term reflecteert de verhouding tussen de processchaal van het mechanisme dat voor korreltransport zorgt en de processchaal van de grondwaterstroming die dit transportmechanisme aandrijft. Voor schaalproeven is dit een belangrijke verhouding. De laatste term beschrijft de invloed van de geometrie van de ondergrond op de grondwaterstroming. Deze is afhankelijk van de verhouding tussen dikte en lengte van de aanwezige zandlagen. In geval van een meerlagensysteem is deze factor ook afhankelijk van het doorlatendheidscontrast tussen de zandlagen. De *geometry* factor is situatie-afhankelijk en moet worden bepaald met MSeep. Voor een standaard dijkconfiguratie wordt de factor benaderd door:

$$F(G) \overset{\text{standarddike}}{=} 0.87 \cdot \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0.28}{\left(\frac{D}{L} \right)^{2.8} - 1}}$$

3.2 Empirische pipingregel

Voor de multivariate analyse is verondersteld dat de parameters relatieve dichtheid (RD), uniformiteit (U), rondheid (KAS), intrinsieke doorlatendheid en korrelgrootte mogelijk invloed hebben op het proces. Een empirische formule in de volgende vorm is daarom gebruikt als input voor de analyse:

$$\frac{H_c}{L} = \left(\frac{RD}{RD_{\mathrm{m}}}\right)^{\alpha}\left(\frac{U}{U_{\mathrm{m}}}\right)^{\beta}\left(\frac{KAS}{KAS_{\mathrm{m}}}\right)^{\chi}\left(\frac{\kappa}{\kappa_{\mathrm{m}}}\right)^{\delta}\left(\frac{d_{70}}{d_{70\mathrm{m}}}\right)^{\varepsilon}\left(\frac{H_c}{L}\right)_{\mathrm{m}} \qquad (3.6)$$

Alle variabelen zijn in deze relatie dimensieloos gemaakt door te delen door de gemiddelde waarde van deze variabele uit de proeven. Dit is aangegeven met het subscript m. De invloed van de vijf dimensieloze componenten kan bepaald worden met de multivariate analysis, door de machten $\alpha, \beta, \chi, \delta$ en ε te bepalen.

Op basis van een multivariate analyse van de resultaten van de kleine-schaalexperimenten kan de volgende empirische relatie worden afgeleid:

$$\frac{H_c}{L} = \left(\frac{RD}{RD_{\mathrm{m}}}\right)^{0.35}\left(\frac{U}{U_{\mathrm{m}}}\right)^{0.13}\left(\frac{KAS}{KAS_{\mathrm{m}}}\right)^{-0.02}\left(\frac{\kappa}{\kappa_{\mathrm{m}}}\right)^{-0.35}\left(\frac{d_{70}}{d_{70\mathrm{m}}}\right)^{0.39}\left(\frac{H_c}{L}\right)_{\mathrm{m}} \qquad (3.7)$$

Uit de analyse volgt dat de invloed van korreldiameter inderdaad niet lineair is in de kleine-schaalexperimenten. De invloed van de doorlatendheid strookt met de verwachting: in de huidige regel is de intrinsieke doorlatendheid aanwezig als: $\kappa^{-0.33}$.

3.3 Aangepaste pipingregel

Op basis van de resultaten van de multivariate analyse wordt de bestaande rekenregel van Sellmeijer aangepast. De invloed van korreldiameter zou hierbij gereduceerd moeten worden. Opgemerkt wordt dat de aanpassing van de rekenregel geen geldigheid heeft in de praktijk, totdat de regel bevestigd wordt in een grote-schaalproef. De invloed van de korreldiameter is op kleine schaal mogelijk anders dan op grote schaal.

Onder de veronderstelling dat de huidige regel gemiddeld genomen een correcte voorspelling geeft voor de kleine schaalproeven, kunnen de resultaten van de multivariate analyse als een uitbreiding verwerkt worden in de rekenregel. De correctheid van deze aanname dient echter geverifieerd te worden door de regel toe te passen op zowel kleineschaal-, medium scale als de deltagootproeven.

De aangepaste rekenregel luidt na uitbreiding met de componenten als volgt:

$$\frac{H_c}{L} = \frac{\pi}{3}\frac{\gamma'_p}{\gamma_w}\left\{\eta\tan(\theta)\right\}\left(\frac{RD}{RD_{\mathrm{m}}}\right)^{0.35}\left(\frac{U}{U_{\mathrm{m}}}\right)^{0.13}\left(\frac{KAS}{KAS_{\mathrm{m}}}\right)^{-0.02}\frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa L}}\left(\frac{d_{70}}{d_{70\mathrm{m}}}\right)^{0.39} F_{geom} \qquad (3.8)$$

De verminderde invloed van d70 is verwerkt als een aparte factor, zodat het schaaleffect, bepaald door $\frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa L}}$, intact blijft. De korrelgrootte in de schaalfactor is vervangen door een constante waarde. De invloed van doorlatendheid was al goed verwerkt in de regel. De invloed van relatieve dichtheid, uniformiteit en KAS kunnen als een uitbreiding toegevoegd worden aan de bestaande regel.

De multivariate analyse geeft echter alleen een experimentele fit weer. De invloed van uniformiteit en KAS is zo beperkt, dat deze nauwelijks invloed hebben op het resultaat. Bovendien valt de invloed van deze parameters niet buiten de foutmarge van de experimenten. Aanbevolen wordt om deze parameters niet mee te nemen in de rekenregel.

De uniformiteit speelt mogelijk wel een rol, maar de invloed van deze parameter is op dit moment onvoldoende gekwantificeerd. De invloed van relatieve dichtheid lijkt significant. Voor de praktijk wordt daarom de volgende experimentele fit voorgesteld.

$$\frac{H_c}{L} = \frac{\pi}{3}\frac{\gamma_p'}{\gamma_w}\left\{\eta\tan(\theta)\right\}\left(\frac{RD}{RD_{\mathrm{m}}}\right)^{0.35}\frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa L}}\left(\frac{d_{70}}{d_{70\mathrm{m}}}\right)^{0.39}F_{geom} \qquad (3.9)$$

Voor gebruik van de regel voor een standaard dijkconfiguratie wordt bovenstaande voorgestelde pipingregel omgeschreven tot:

$$\frac{H_c}{L} = F_{resistance}\,F_{scale}\,F_{geometry}$$

$$F_{resistance} = \frac{\pi}{3}\frac{\gamma_p'}{\gamma_w}\left\{\eta\tan(\theta)\right\}\left(\frac{RD}{RD_{\mathrm{m}}}\right)^{0.35}$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa L}}\left(\frac{d_{70}}{d_{70\mathrm{m}}}\right)^{0.39}$$

$$F_{geometry} \overset{\text{MSeep}}{=} F(G) \overset{\text{standarddike}}{=} 0.87\cdot\left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{0.28}{\left(\frac{D}{L}\right)^{2.8}-1}+0.04} \qquad (3.10)$$

De voorgestelde rekenregel is op dit moment nog niet geldig voor een praktijksituatie. De regel kan pas toegepast worden na validatie op grote schaal. De regel is alleen afgeleid voor Nederlandse zanden waarbij de relatieve dichtheden groter zijn dan 50% en de uniformiteit varieert tussen 1.5 en 2.5.

Opgemerkt wordt dat bovenstaande bewerkingen van de bestaande rekenregel niet berusten op een verbeterd inzicht van het fysische proces. Voor toepassing van de rekenregel in de praktijk is beter begrip van de fysica noodzakelijk en zijn full-scale experimenten vereist voor validatie.

4 Betrouwbaarheid rekenregel

4.1 Kwaliteit empirische rekenregel

Het resultaat van de multivariate analyse is goed. In Bijlage B is een vergelijking gemaakt tussen de huidige regel en de fit op basis van de multivariate analyse, waaruit blijkt dat een verbetering is gemaakt met de multivariate analyse, de afwijking van de curve fit is afgenomen.

De afwijking van de curve fit, die beschreven is in bijlage B, zegt niets over de gevoeligheid van de gevonden coëfficiënten. Deze beschrijft slechts de afwijking van de data met hun mathematische beschrijving. Om enig inzicht in de gevoeligheid van de verschillende coëfficiënten te krijgen zijn 5 deelverzamelingen beschouwd waarin telkens 6 à 8 experimenten niet worden meegenomen. Van elke deelverzameling is een curve fit gemaakt. De coëfficiënten voor de verschillende zandeigenschappen staan in onderstaande tabel. Van de coëfficiënten van de verschillende zandeigenschappen is de gemiddelde waarde en de standaardafwijking bepaald.

eigenschap	verzameling					gem	std
	1	2	3	4	5		
RD	0.48	0.35	0.39	0.38	0.37	0.40	0.05
k	-0.25	-0.36	-0.48	-0.43	-0.34	-0.37	0.09
d_{70}	0.31	0.38	0.34	0.49	0.33	0.37	0.07
U	0.16	0.10	0.12	0.22	0.11	0.14	0.05
KAS	0.08	-0.06	-0.03	0.03	0.02	0.01	0.05

Tabel 4.1 Resultaten multivariate analyse op 5 deelverzamelingen

De resultaten zijn afhankelijk van de grootte van de deelverzameling. Hoe kleiner de deelverzameling hoe kleiner de overeenkomsten en andersom. Een curve fitting op slechts enkele proeven heeft weinig waarde evenals een curve fitting op een verzameling waarbij slechts een enkele proef niet wordt meegenomen.

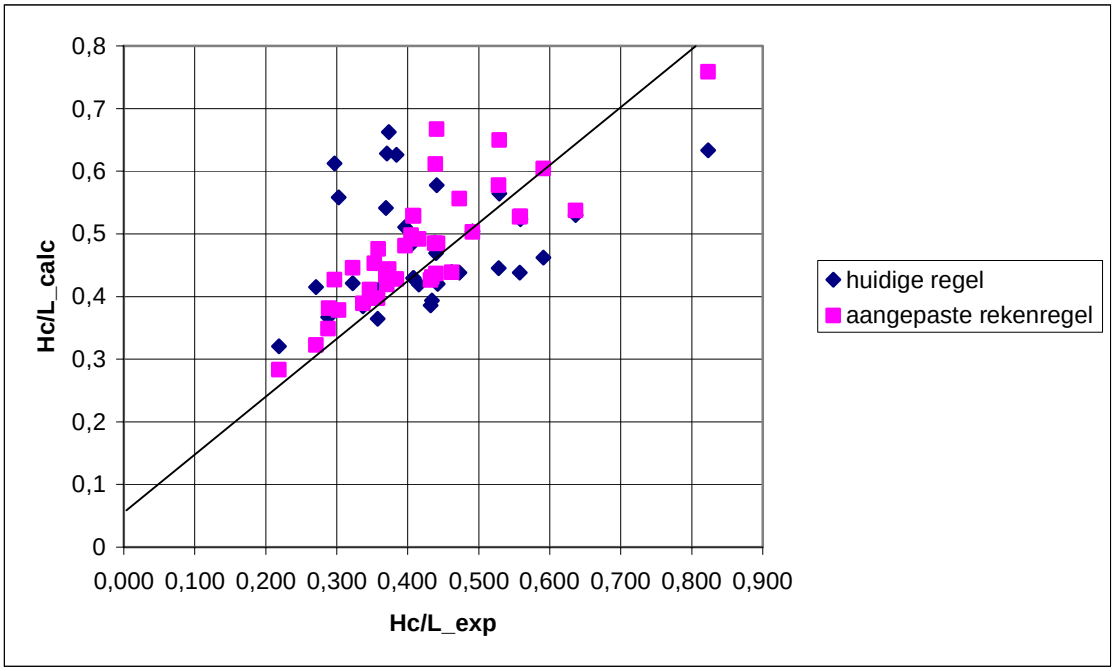
Op basis van de gekozen grootte van de deelverzamelingen wordt geconcludeerd dat de spreidingen van de empirische coëfficiënten in de aangepaste pipingregel klein zijn. De coëfficiënten zullen veranderen als meer proefresultaten worden meegenomen in de multivariate analyse. Verwacht wordt dat de grootte van de veranderingen beperkt is.

Geconcludeerd wordt dat de empirische rekenregel en daarmee ook de aangepaste rekenregel voor de small-scale proeven van hoge kwaliteit is.

Tevens zijn de kleine-schaalproeven herberekend met de aangepaste rekenregel. De kleine-schaalproeven hebben echter niet de vorm van een standaard dijk, omdat het voor en achterland ontbreekt. De geometriefactor is daarom voor deze configuratie opnieuw berekend in MSeep (zie vergelijking 4.1, waarin de factor 0.87 is vervangen door 0.83).

$$F_{geometry}^{\text{MSeep}} = 0.83 \cdot \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0.28}{\left(\frac{D}{L}\right)^{2.8}-1}+0.04} \qquad (4.1)$$

In onderstaande grafiek zijn de experimenteel bepaalde verhangen van de kleine-schaalproeven vergeleken met de berekende verhangen (huidige en aangepaste rekenregel)



Figuur 4.1 Vergelijking tussen experimentele en berekende verhangen van de kleine-schaalproeven

4.2 Medium-scale proeven

De empirische rekenregel, en daarmee de aangepaste rekenregel zijn gebaseerd op small-scale experimenten. Mogelijk spelen op grotere schaal andere factoren een rol. Voor gebruik in de praktijk is verificatie van de resultaten van de multivariate analyse en de aangepaste rekenregel op full-scale noodzakelijk.

Om op basis van de small-scale proeven direct een full-scale proef uit te voeren is niet verstandig. Piping is namelijk een complex proces dat ook na uitvoering van de small-scale experimenten nog niet volledig wordt begrepen. De aangepaste rekenregel gaat uit van een geschematiseerde werkelijkheid en is gebaseerd op zowel theorie als empirie. Om meer kennis van het mechanisme te verkrijgen en voor een eerste verificatie van de aangepaste rekenregel zijn in het SBW onderzoek 8 medium-scale proeven uitgevoerd. Bij de medium-scale proeven is gevarieerd met de representatieve korreldiameter en de relatieve dichtheid.

Hoewel 8 proeven onvoldoende zijn voor een multivariate analyse, geeft een dergelijke analyse wel een beeld van de toepasbaarheid van de aangepaste rekenregel voor de medium-scale proeven. De resultaten van de multivariate analyse op de medium-scale proeven is in onderstaande tabel weergegeven.

eigenschap	small-scale	medium-scale
RD	0.35	0.17

k	-0.35	-0.20
d_{70}	0.39	-0.37
U	0.13	nvt
KAS	-0.02	nvt

Tabel 4.2 Resultaten multivariate analyse op medium-scale experimenten

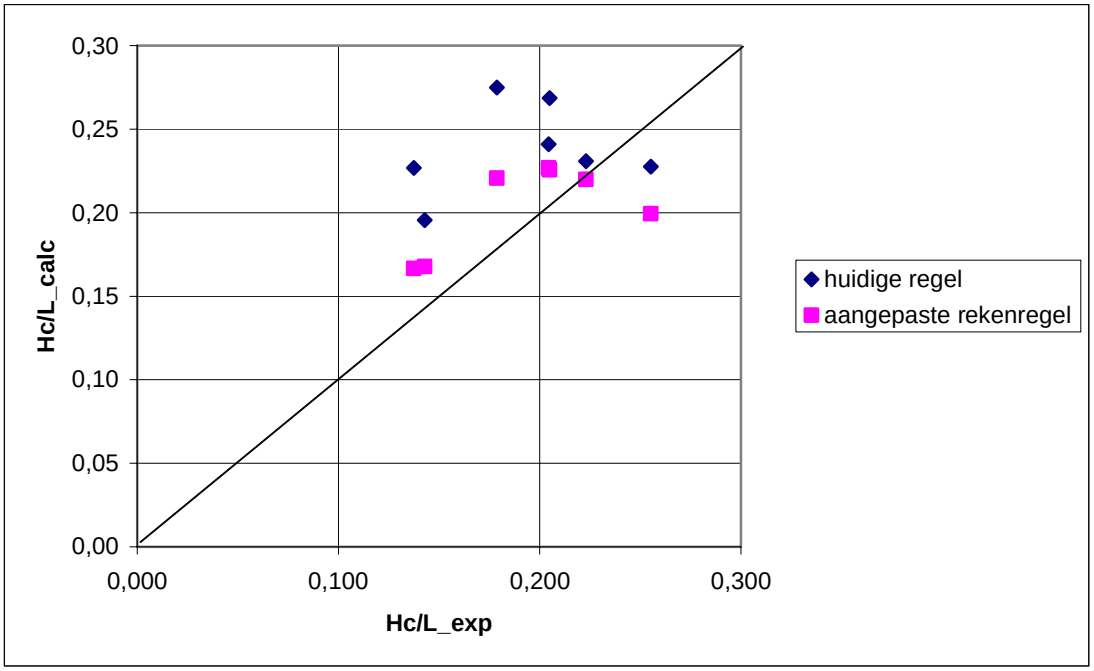
Voor de uniformiteit en KAS waarde zijn geen coëfficiënten weergegeven omdat deze niet in de medium-scale proeven zijn gevarieerd. Er zijn onvoldoende medium-scale proeven uitgevoerd om te concluderen dat de medium-scale proeven de aangepaste rekenregel onderschrijven.

Hoewel er onvoldoende medium-scale proeven zijn om een goede multivariate analyse uit te voeren, kunnen de proeven wel nagerekend worden met de aangepaste rekenregel. In Tabel 4.3 is het experimenteel bepaalde verhang bij doorbraak (Hc/L_exp) van de medium-scale proeven vergeleken met het kritiek verhang op basis van de huidige rekenregel (Hc/L_sel) en de aangepaste rekenregel (Hc/L_aangepast).

Proefnummer	Zandsoort	Relatieve dichtheid [-]	Hc/L_exp [-]	Hc/L_sel [-]	Hc/L_aangepast [-]
Bms1	Baskarp	65	0,20	0,24	0,23
Bms2	Baskarp	60	0,26	0,23	0,20
Ims3	Itterbeck	70	0,18	0,27	0,22
Ims4	Itterbeck	45	0,14	0,23	0,17
Ims5	Itterbeck	65	0,20	0,27	0,23
Ims7	Baskarp	60	0,22	0,23	0,22
Ims8	Baskarp	45	0,14	0,20	0,17

Tabel 4.3 Validatie van aangepaste rekenregel met medium-scale proeven

In Figuur 4.2 zijn de in Tabel 4.3 weergegeven verhangen tegen elkaar uitgezet.



Figuur 4.2 Vergelijking tussen experimentele en berekende verhangen van de medium-scale proeven

In Tabel 4.4 zijn voor beide rekenregels het gemiddelde en de standaarddeviatie van de afwijking tussen experiment en predictie weergegeven. De afwijking is gedefinieerd als:

$$\frac{H_c}{L}_{\exp} - \frac{H_c}{L}_{calc}$$

Ook is de standaard deviatie van de afwijking weergegeven. Hieruit blijkt dat de gemiddelde afwijking hoger is bij de huidige rekenregel dan bij de aangepaste rekenregel. De standaard deviatie is voor beide rekenregels hoog, wat betekent dat de afwijking per proef sterk varieert.

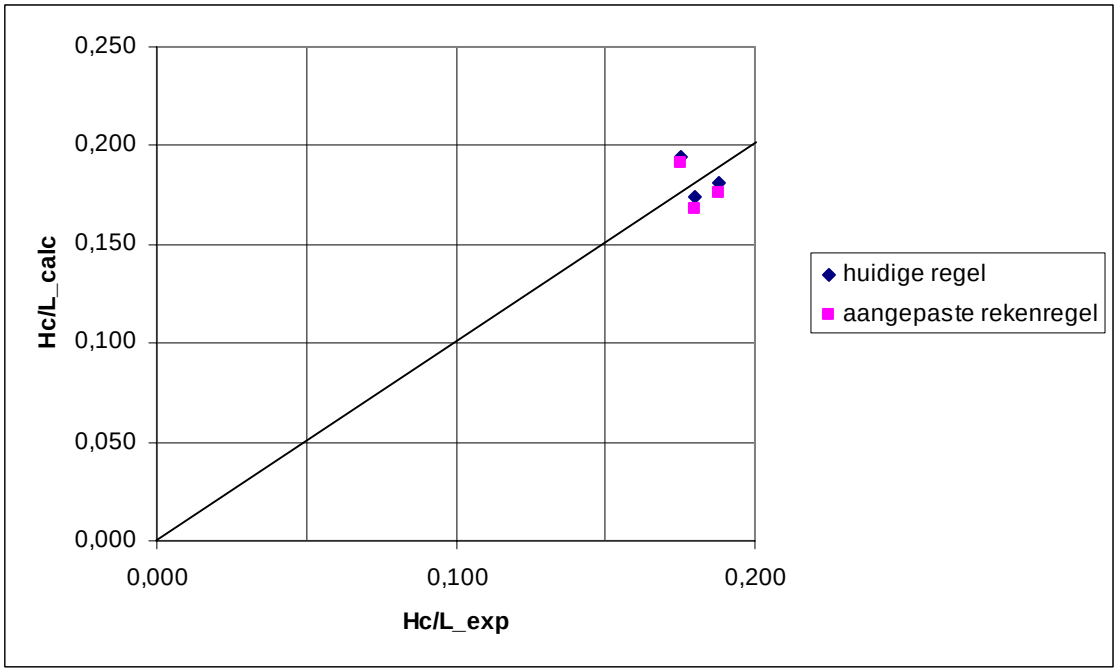
	Gemiddelde afwijking	Standaard deviatie van de afwijking
Huidige rekenregel	0,045	0,044
Aangepaste rekenregel	0,009	0,033

Tabel 4.4 Vergelijking van rekenregels

Hieruit kan geconcludeerd worden dat de op basis van de aangepaste rekenregel beter overeenkomt met de experimentele data dan de huidige rekenregel, maar dat er nog grote spreiding in de data is. Aanbevolen wordt om de medium-scale-proevenserie uit te breiden met meerdere zanden. De gekozen zandsoorten in de medium-scale proef hebben bij toeval dezelfde verhouding tussen korrelgrootte en doorlatendheid. Deze verhouding lijkt van belang te zijn voor de bepaling van het kritiek verval. Ook hebben beide zandsoorten dezelfde uniformiteit. Het toetsen van andere zandsoorten kan daarom tot een bredere toetsing van de rekenregel leiden.

4.3 Deltagootproeven

De huidige rekenregel is gefit op de Deltagootproeven [Silvis,1991]. Uiteraard moet de aangepaste rekenregel ook voor deze proeven een goede fit geven. In Figuur 4.3 zijn de berekende en experimenteel bepaalde verhangen tegen elkaar uitgezet voor zowel de huidige als de aangepaste rekenregel. Beide regels leiden tot een geringe afwijking.



Figuur 4.3 Vergelijking tussen experimentele en berekende verhangen van de deltagootproeven

4.4 Full-scale proeven

Voor validatie van de aangepaste rekenregel is meer theoretisch onderzoek nodig en zijn grote schaalproeven vereist. De aangepaste regel is geheel gebaseerd op kleine-schaalproeven. Het is mogelijk dat de aanpassingen (zoals de invloed van d70) niet geldig zijn op grote schaal. In het SBW onderzoek zijn de volgende 4 full-scale proeven voorzien:

- 2 proeven om sensoren te testen;
- 2 proeven voor validatie aangepaste rekenregel.

Het minimum aantal proeven voor validatie van de rekenregel is drie. Drie goede proeven zijn nodig omdat de resultaten van grote schaalexperimenten nooit exact zijn te voorspellen. Voor een goede interpretatie van de resultaten zijn dus meerdere proeven nodig en is de extra informatie van tenminste één duplo proef noodzakelijk.

5 Conclusies en aanbevelingen

De resultaten van 38 kleine-schaalexperimenten en 7 medium-scale experimenten zijn gebruikt voor aanpassing en uitbreiding van de bestaande rekenregel van Sellmeijer. Daarnaast is ervoor gekozen de vorm van de regel te wijzigen.

De volgende regel is door middel van een experimentele fit op basis van de kleine-schaalproeven afgeleid:

$$\frac{H_c}{L} = F_{resistance} F_{scale} F_{geometry}$$

$$F_{resistance} = \frac{\pi}{3}\frac{\gamma'_p}{\gamma_w}\{\eta \tan(\theta)\}\left(\frac{RD}{RD_{\mathrm{m}}}\right)^{0.35}$$

$$F_{scale} = \frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa L}}\left(\frac{d_{70}}{d_{70\mathrm{m}}}\right)^{0.39}$$

$$F_{geometry}^{\mathrm{MSeep}} = F(G)^{\mathrm{standarddike}} = 0.87\cdot\left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{0.28}{\left(\frac{D}{L}\right)^{2.8}-1}+0.04} \qquad (5.1)$$

Door de uitbreiding van de rekenregel kan rekening worden gehouden met de zandeigenschappen die in de small-scale experimenten als relevant zijn geïdentificeerd. De invloed van de zandeigenschappen is met behulp van een multivariate analyse gekwantificeerd. Het resultaat van de multivariate analyse is goed.

Met de aanpassing van de rekenregel kan rekening worden gehouden met de waargenomen niet lineaire relatie van de d_{70} met het kritieke verval..

Door de vorm van de rekenregel te wijzigen wordt meer inzicht gegeven in de verschillende factoren die rondom piping een rol spelen. Onderscheid wordt gemaakt tussen een *resistance*, een *scale* en een *geometry* factor. De eerste factor beschrijft het grensevenwicht van zandkorrels op de bodem van de pipe. De tweede term reflecteert de verhouding tussen de processchaal van het mechanisme dat voor korreltransport zorgt en de processchaal van de grondwaterstroming die dit mechanisme aandrijft. De invloed van de korreldiameter op het kritieke verval is in de rekenregel gereduceerd zonder de schalingsfactor te beïnvloeden. De laatste term beschrijft de invloed van de geometrie van de ondergrond op de grondwaterstroming.

De rekenregel geeft voor de kleine-schaalexperimenten een goede relatie tussen zandeigenschappen en het verval bij een doorgaande pipe. De spreidingen van de empirische coëfficiënten in de aangepaste pipingregel zijn klein. De resultaten van de medium-scale proeven zijn gebruikt ter controle van de rekenregel. Het verschil tussen de

waargenomen en berekende verhangen is kleiner bij de aangepaste rekenregel dan bij de huidige rekenregel.

De medium-scale experimenten zijn echter onvoldoende voor validatie van de aangepaste rekenregel voor ontwerp- en toetsregels. Hiervoor zijn meer medium-scale proeven nodig en zijn full-scale proeven vereist. Het minimum aantal full-scale proeven voor bevestiging van de rol van de d_{70} in de rekenregel is drie. Drie goede proeven zijn nodig omdat de resultaten van grote schaalexperimenten nooit exact zijn te voorspellen. Voor een goede interpretatie van de resultaten zijn dus meerdere full-scale proeven nodig en is de extra informatie van tenminste één duplo proef noodzakelijk.

Uit de kleine-schaalexperimenten is geconcludeerd dat de d_{70} een minder grote invloed heeft op het pipingproces dan aangenomen in de bestaande rekenregel van Sellmeijer. Kennis ontbreekt om voor deze gereduceerde invloed een theoretische verklaring te geven. Het is duidelijk dat grootte en gewicht van de korrel essentieel zijn voor het erosieproces in de pipes. Andere factoren, bijvoorbeeld het meanderen van de pipes, hebben ook invloed op het groeien van de pipe. Deze factoren kunnen ertoe bijdragen dat de invloed van de korreldiameter op het pipingproces kleiner is dan aangenomen in de bestaande rekenregel. Theoretisch onderzoek wordt aanbevolen.

6 Referenties

[van Beek, Knoeff, 2009], V.M. van Beek, J.G. Knoeff, 'SBW Hervalidatie Piping, B3. Analyse kleinschalige laboratoriumproeven', Rapport 1001449.008-GEO-0001, Deltares.

[van Beek, Bezuijen, 2009], V.M. van Beek, A. Bezuijen, 'SBW Hervalidatie Piping, HP2.2. Medium-schaalproeven (Analyserapport)' Rapport 1200648-004-GEO-0001, Deltares

[Förster et al., 2009], V.M. van Beek, H.T.J. de Bruijn, U. Förster, G.A. van den Ham, 'SBW Piping (TO), Projectplan 2009 (TO)', Rapport 1200187-000-GEO-0002, Deltares

[Luijendijk, 2009], M.S. Luijendijk, 'SBW Hervalidatie Piping, HP1 Ontwikkelen nieuwe rekenregel, HP1.1 Kleine schaalproeven: Relatieve dichtheid (factual reports)', Rapport 1200187-015-GEO-0001, Deltares

[Knoeff, 2008], J.G. Knoeff, 'SBW Piping, Vooronderzoek kleine schaal laboratoriumproeven', Rapport CO-433380.0011, Deltares

[Knoeff et al, 2009], J.G. Knoeff, H.T.J. de Bruijn, V.M. van Beek, M.S. Luijendijk, 'SBW Piping, A2 Kleinschalige laboratoriumproeven (Factual Reports, deel 1, Relatieve dichtheid)', Rapport CO-433380-0015, Deltares

[Knoeff, van Beek, 2009], V.M. van Beek, J.G. Knoeff, 'SBW Piping, A2 Kleinschalige laboratoriumproeven (Factual Reports, deel 2, Transport/Erosie)', Rapport CO-433380-0013, Deltares

[van Beek et al., 2009], V.M. van Beek, H.T.J. de Bruijn, J.G. Knoeff, 'SBW Piping, A2 Kleinschalige laboratoriumproeven (Factual Reports, deel 3, Waterspanningen)', Rapport CO-433380-0014, Deltares

[Rietdijk, 2009], J. Rietdijk, 'SBW Hervalidatie Piping, Medium-schaalproeven, Factual Reports', Rapport 1200648-004-GEO-0002, Deltares

[Sellmeijer, 1988], J.B. Sellmeijer, 'On the mechanism of piping under impervious structures', Proefschrift, Technische Universiteit Delft.

[Silvis, 1991], F. Silvis. 'Verificatie Piping Model; Proeven in de Deltagoot. Evaluatierapport', CO317710/7, Rapport Grondmechanica Delft

[TAW, 1999] Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 'Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen', Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft, maart 1999.

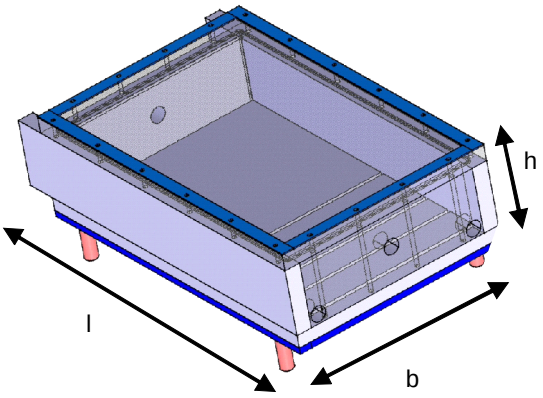
A Extra kleine-schaalproeven ten behoeve van relatieve dichtheid

Om een relatie tussen het verval bij doorbraak en de relatieve dichtheid te kunnen vaststellen bij een initieel proces van terugschrijdende erosie zijn een zestal extra kleinschalige proeven uitgevoerd. In de eerste set kleine-schaalproeven zijn twee soorten zand beproefd bij 35%, 65% en 95%. Op basis van deze proeven was het echter niet mogelijk om uitspraak te doen over de invloed van relatieve dichtheid op terugschrijdende erosie. Er zijn om die reden aanvullende experimenten in duplo uitgevoerd met een relatieve dichtheid RD van circa 45%, 55% en 85%. De proeven zijn gerapporteerd in het factual report met Deltares kenmerk 1200187.0015.

A.1 Inleiding

Voor het identificeren van relevante zandeigenschappen van het pipingproces is een doorstroombak gemaakt van PVC materiaal met een perspex bovenplaat. In deze bak kan het pipingmechanisme worden bestudeerd op een kleine schaal, in een homogene of heterogene omgeving. Experimenten in de doorstroombak worden kleine-schaalexperimenten genoemd.

De afmetingen van de bak zijn: (lxbxh) 55 x 35 x 15cm zonder het onderstel. De binnenmaten hebben de volgende afmetingen (lxbxh) 50,21 x 29,95 x 9,95cm (Figuur A.1).



Figuur A.1 Illustratie van de doorstroombak

A.2 Beschrijving small-scale experimenten

In 2008 zijn een groot aantal kleine-schaalproeven uitgevoerd. De modelopstelling is uitgebreid omschreven in [Knoeff, 2008]. Deze paragraaf bevat een samenvatting hiervan.

In de staande positie van de doorstroombak kan (ontlucht) water worden toegevoegd. Ook kunnen in deze positie verschillende patronen in het zand worden aangebracht. Vlak achter

de inlaat zijde is een filter aanwezig (29,9 x 9,95cm). Dit filter bestaat uit geotextiel met aan twee kanten grof geperforeerd staal. Dit filter wordt aan weerszijden afgeplakt, zodat het water niet langs de rand van de bak kan stromen. De grootte van de opening in dit filter kan naar wens aangepast worden. Aan de uitstroomzijde is een ander filter aanwezig, deze heeft echter een kleinere hoogte (ca. 8cm), om zandafvoer toe te staan en is niet afgeplakt.

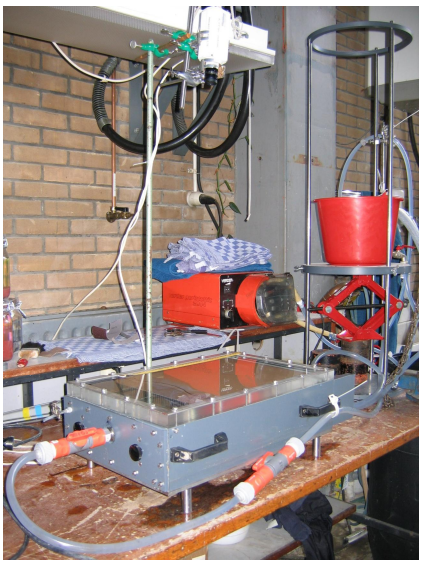
De inlaat is verbonden met een emmer, welke op hoogte verstelbaar is, door middel van slangen. Zo kan het aan te brengen verval worden gevarieerd. De emmer is via een overloop verbonden met een reservoir, gevuld met ontlucht water. Via een slang en een pomp wordt het waterniveau in de emmer constant gehouden. Een kraan is aan de uitstroom zijde aangebracht om water uit te laten stromen. Ook een kleine nippel met een slangetje, dat afsluitbaar is, is aangebracht aan de uitstroom zijde om eventuele aanwezige lucht uit de doorstroombak te laten stromen.

Boven de doorstroombak hangt een camera, zodat het proces van de vorming van pipingkanalen later nogmaals kan worden bestudeerd en de resultaten gepresenteerd kunnen worden. Voor het beste resultaat van de camerabeelden staat er een bouwlamp gericht op de doorstroombak.

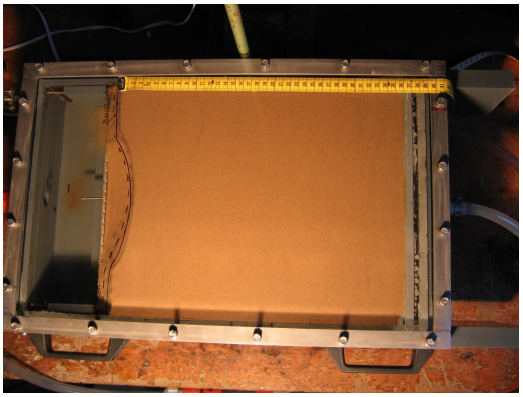
Reproduceerbaarheid van de experimenten speelt een grote rol. Zo wordt gebruik gemaakt van een zandpreparatietechniek die zich heeft bewezen bij meerdere GeoCentrifuge onderzoeken, waarbij de homogeniteit en reproduceerbaarheid (van de dichtheid) zijn aangetoond.

Losse tot zeer losse pakkingen zijn met deze techniek met hoge nauwkeurigheid en reproduceerbaarheid te maken. Tevens is het voordeel van deze techniek dat het zand volledig verzadigd is, dit in tegenstelling tot droge preparatie technieken, waarbij vaak de nodige complicaties optreden bij het verzadigen van droog zand.

Overzicht van de gehele proefopstelling. De doorstroombak ligt op de tafel met daarboven een camera. De rode emmer bevat een kraantje onderin, welke is verbonden met een slang dat naar de instroomzijde van de bak leidt. De uitstroomzijde is verbonden via slangen naar achter de emmer. Het waterniveau in de emmer wordt constant gehouden door de pomp (die links van de emmer staat) die in verbinding staat met een reservoir. Het verval (de waterdruk over het zandpakket) wordt hoger gemaakt door de uitstroom slang te verschuiven.



Figuur A.2 Overzicht proefopstelling



Figuur A.3 Bovenaanzicht doorstroombak

Bovenaanzicht doorstroombak. De holle lijn aan de benedenstroomse zijde van het zandpakket is aangebracht om op deze manier de kwelweg lengte te verkorten, zodat piping zich in het midden van de bak afspeelt.

A.3 Uitgevoerde proeven

In 2008 een groot aantal kleine-schaalproeven uitgevoerd. Deze proeven geven inzicht in de dominante eigenschappen en processen rondom erosie en zandtransport bij pipevorming. De proeven zijn gerapporteerd in factual reports met Deltares kenmerken 433380.0011, 433380.0012, 433380.0013, 433380.0014. De analyse van de proeven is beschreven in [Van Beek, Knoeff, 2009].

Uit de kleinschalige laboratoriumproeven is geconcludeerd dat kleine kanaaltjes in zand onder een afdichting op meer dan één manier kunnen ontstaan en groeien. Met andere woorden, er worden meerdere piping processen waargenomen. De relatie tussen het kritiek verval en de korreldiameter is niet zo groot als op voorhand werd verwacht. Andere zandkarakteristieken, zoals de rondheid van de korrel geven zijn, zoals verwacht, niet bepalend voor het kritieke verval. Wel volgt uit de kleinschalige proeven dat de relatieve dichtheid een grote rol speelt bij piping.

Om een relatie tussen het verval bij doorbraak en de relatieve dichtheid met meer zekerheid te kunnen vaststellen bij een initieel proces van terugschrijdende erosie is in 2009 een zestal extra kleinschalige proeven uitgevoerd. Het betreft experimenten in duplo met een relatieve dichtheid van circa 45%, 55% en 85%. De proeven zijn gerapporteerd in het factual report [Luijendijk, 2009]. De analyse van de proeven wordt in het vervolg van deze bijlage gerapporteerd.

A.4 Analyse extra small-scale proeven

In Tabel A.1 is een overzicht weergegeven van de resultaten. Hierin valt op dat het kritiek verval en de doorlatendheid van proef B87 veel lager zijn. Tijdens de duplo proef van B86, proef B87, is waargenomen dat het begin van de groei van interne kanaaltjes aan de zijkant vlakbij de bovenstroomse zijde zijn ontstaan. De korrelherschikking was niet of slecht zichtbaar. Deze kanaaltjes zijn achterwaarts gegroeid naar het uiteinde van de bovenstroomse zijde en vervolgens vond de groei plaats in benedenstroomse richting. Omdat het pipingproces in proef B87 aan de rand begon wordt deze niet verder meegenomen in de analyse.

Proef	Dr [%]	Hc_cor [cm]	k [m/s]	proces
B82	85	14	5.23E-05	classic backward erosion
B83	85	14	5.22E-05	classic backward erosion

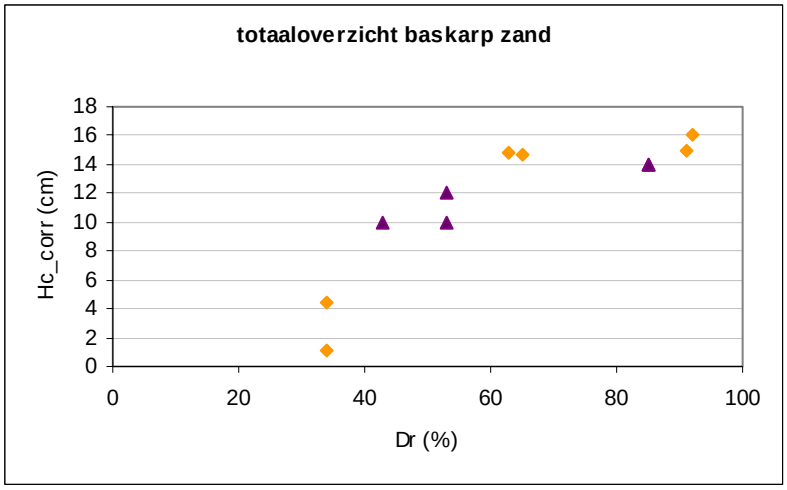
B84	53	10	8.49E-05	straight backward erosion
B85	53	12	6.77E-05	classic backward erosion
B86	43	10	8.94E-05	straight backward erosion
B87	42	5	1.57E-05	forward erosion

Tabel A.1 Overzicht resultaten extra small-scale experiments

Bij proef B86 begon de vorming van interne kanaaltjes nabij de benedenstroomse rand plaats. Korrelherschikking was goed zichtbaar. De kanaaltjes groeien benedenstrooms en vervolgens - nadat er contact is met de benedenstroomse rand – in bovenstroomse richting. Nadat het kanaal de bovenstroomse zijde bereikt, begint het ruimen. Het gehele proces is te classificeren als *straight backward erosion* (voor terminologie wordt verwezen naar [van Beek, Knoeff, 2009].

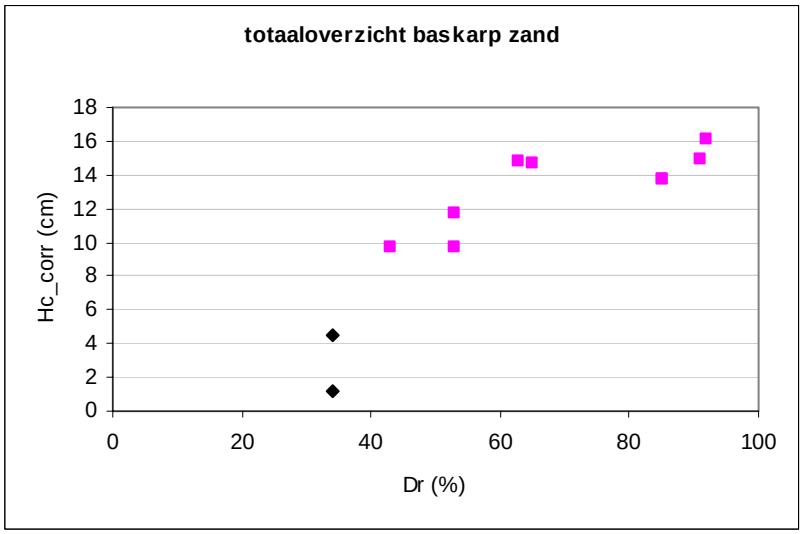
In de proeven B82 t/m B83 ontstaan interne kanaaltjes aan benedenstroomse zijde die in bovenstroomse richting groeien. Proeven B82, B83 en B85 zijn volgens een *classic backward erosion* proces verlopen, terwijl proef B84 en B86 volgens een *straight backward erosion* proces is verlopen.

In Figuur A.5 is voor alle proeven die op Baskarpzand zijn uitgevoerd de relatieve dichtheid (Dr) uitgezet tegen het verval waarbij een doorgaande pipe ontstaat (Hc). De proeven die in 2008 zijn uitgevoerd zijn in deze figuur weergegeven met oranje driehoekjes. De resultaten van de proevenserie uit 2009 zijn met paarse driehoekjes aangegeven. De resultaten van de proeven in 2009 geven geen afwijkend beeld ten opzichte van de proeven uit 2008. Er is een duidelijke relatie tussen relatieve dichtheid en verval bij doorgaande pipe zichtbaar.



Figuur A.4 Relatie relatieve dichtheid en verval bij doorgaande pipe

In Figuur A.4 is in dezelfde figuur de relatie met het waargenomen pipingproces weergegeven. De paarse vierkantjes geven de experimenten weer waarbij een terugschrijdend pipingproces is waargenomen. De zwarte ruitjes geven de experimenten weer waarbij het pipingproces aan de bovenstroomse zijde begint. Uit de figuur kan worden afgeleid dat bij Baskarpzand een pipingproces waarbij kanaalvorming bovenstrooms alleen plaatsvindt bij relatieve dichtheden lager dan 45 %. Daarbij wordt opgemerkt dat in de experimenten de korrelspanning in het zand direct onder de perspexplaat laag is. De korrelspanning heeft mogelijk een grote invloed op het pipingproces. Aanbevolen wordt om de invloed van de korrelspanning op het pipingproces te onderzoeken.



Figuur A.5 Relatie pipingproces en relatieve dichtheid

A.5 Conclusies

De doelstelling van de extra kleinschalige proeven is het verkrijgen van inzicht in de relatie tussen relatieve dichtheid en het verval bij doorgaande kanalen bij terugschrijdende erosie.

De resultaten geven aan dat er voor baskarpzand bij relatieve dichtheden hoger dan 45 % het pipingproces terugschrijdend is. Bij relatieve dichtheden lager dan 45% begint het pipingproces aan de bovenstroomse zijde.

Bij het terugschrijdende pipingproces, is een duidelijke relatie tussen het verval bij doorgaande pipe en relatieve dichtheid zichtbaar. Deze zal nader worden gekwantificeerd met een multivariate analyse. Deze analyse wordt in Appendix B beschreven

In de experimenten de korrelspanning in het zand direct onder de perspexplaat laag is. De korrelspanning heeft mogelijk een grote invloed op het pipingproces. Aanbevolen wordt om de invloed van de korrelspanning op het pipingproces te onderzoeken.

B Applied multivariate analysis to piping

B.1 Introduction

Under the SBW piping project, controlled experiments are performed at different scales to identify the relevance of the involved parameters in the critical head (H_c) measurements. The results of this analysis are used as *correction* factors for the Sellmeijer rule in order to perform more reliable predictions.

In this report, the analyzed data corresponds to the small-scale and medium-scale experiments. The experimental data is analyzed by means of statistical and mathematical models in order to identify the relation between the parameters and their influence in the measured values of H_c.

In the experiments, three different piping processes are observed. According to the place where piping begins, the processes are classified as downstream (benedenstroom), middle-stream (midden) and upstream (bovenstroom). Since one of the objectives of these experiments is to improve the predictions of the theoretical piping formula developed by Sellmeijer (Sellmeijer, 1988), only the piping experiments classified as downstream (benedenstroom) are used in the statistical analyzes. In the same way, the experimental data located far from the average (outliers) is left aside for the analyses as their inclusion can introduce undesirable biases in the results.

The statistical analyses provide a strong tool to identify the level of influence of each parameter in the measured values of the critical head. The results obtained can be used to predict the impact of each parameter in the dependent variable (H_c) in a factorial form from where each factor can be introduced in the Sellmeijer rule to improve the predictions.

In section 2, the description of each statistical method is presented as well as the formulas applied in the analyses of the experiments. In Section 3, the results obtained with the different methods are presented and conclusion and remarks over the outcome are formulated. Section 4 introduces the correction to the actual piping rule with the inclusion of the multivariate factors founded in Section 3.

B.2 Statistical Analyses

In this report, two different statistical methods are applied in the analysis of the small and medium scale piping experiments. The *statistical correlations* and the *multivariate regression* are used as an indication of the relevance of each parameter in the critical head.

B.2.1 Statistical correlation

Correlation is a measure that indicates the strength and direction of the *linear* relationship between two variables. The correlation coefficient takes values within the interval [-1, 1]. Two variables whichare completely independent have a correlation coefficient equal to *zero* but a correlation coefficient of zero does not mean that the variables are independent. That is, correlation measures 'only' linear dependence so two variables can be strongly dependent (quadratic or cubic) and still have a correlation coefficient of zero. Correlation is computed as,

$$\rho(X,Y) = \frac{\mathrm{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E((X-\mu_X)(Y-\mu_Y))}{\sigma_X \sigma_Y} \qquad (0.1)$$

where E is the expected value operator, μ is the expected or mean value of the variable and σ the standard deviation.

The correlation of a sample of experiments is computed in the same way as,

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x-\overline{x})(y_i-\overline{y})}{(n-1)s_x s_y} \qquad (0.2)$$

where $\overline{x}$, $\overline{y}$ are the sample means of X,Y and s_x, s_y are the sample standard deviations.

The interpretation of the correlation coefficient is somewhat arbitrary as it depends on the quality, quantity and the techniques used to gather the data. However, an indication how large is the relation between the variables can be interpreted as shown in Tabel B.1.

	Negative	**Positive**
Small	-0.3 to -0.1	0.1 to 0.3
Medium	-0.7 to -0.3	0.3 o 0.7
Large	-1.0 to -0.7	0.7 to 1.0

Tabel B.1 Correlation coefficient interpretation

B.2.2 Regression analysis

Regression analysis is a statistical technique to model numerical data that consists of a dependent variable (H_c) and one or more independent variables (parameters). The dependent variable in the regression equation is modelled as a function of the independent variables times a constant and an error term. The error term represents the variation in the dependent variable that cannot be captured by the independent variables. The independent variables constants are estimated to give the best fit of the data which is usually evaluated applying the least squares method or a similar method.

Some of the assumptions that are made when running a multivariate regression are:

1) The sample must be representative of the population for the inference prediction.
2) The independent variables are error-free.
3) The independent variables must be linearly independent (i.e. it must not be possible to express any of the variables as a linear combination of the others).

The regression equation deals with a set of variables. The unknown variables are the constants of the parameters denoted as **β** which can be a scalar or a vector with length *k***.** The independent variables or measured variables (experimentally) are denoted as **X.** The dependent variable (H_c) is denoted as **Y.** Thus, the regression equation is a function of variables **X** and constants **β** and is expressed as,

$$Y = f(X, \beta) \qquad (0.3)$$

Since the number of measurements *n* is larger than the number of unknowns (**β**), the regression analysis can be performed as there are more equations than unknowns in the system. The regression analysis is used to find the solution for the unknown parameters **β** that will minimize the distance between the measured and predicted values of the dependent variable *Y*.

The linear equation is expressed as

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + ... + \beta_n X_{in} + e_i \qquad i = 1, ..., n \qquad (0.4)$$

where e stands for the error of the fit.

The matrix notation of this formula is given by,

$$\mathrm{Y} = \mathrm{X}\beta + e \qquad (0.5)$$

where **Y** is a column vector that includes the observed values of $\mathrm{Y}_1 ... \mathrm{Y}_n$, e includes the unobserved stochastic components and the matrix **X** the observed values of the parameters written as,

$$X=\begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ 1 & x_{21} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \cdots & x_{nn} \end{pmatrix}$$

The matrix **X** includes a constant column, that is, a column that does not vary across observations, which is used to represent the term β_0.

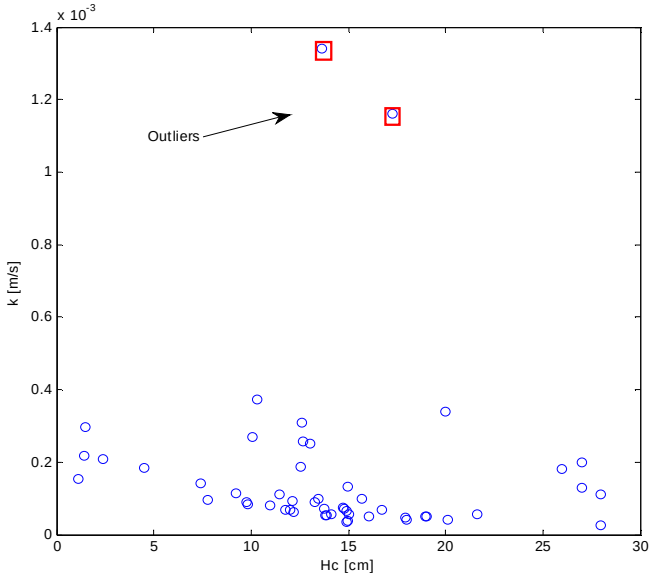
The error in the fit is computed applying the formula,

$$error = \max |Y - \hat{Y}| \qquad (0.6)$$

where Y is the measurements vector and $\hat{Y}$ is the vector of the predicted values with equation (0.4).

B.3 Analysis of the experimental results

The combination of the medium and small scale piping experiments produced a total of 52 data points for the analysis. From the 52 data points, 5 belong to the medium scale experiments and 47 to the small scale.
Prior to the statistical analysis, the outliers (data points that are faraway from the observed mean value) and the points corresponding to the upstream mechanism are excluded from the study of the small scale experiments. In Figuur B.1, the two outliers in the small scale experiments are illustrated.
This action is taken in order to avoid biases in the results as the upstream mechanism corresponds to a different mechanism than the one described by the Sellmeijer rule and the outliers can distort the direction of the results.



Figuur B.1 *Data points corresponding to the outliers of the experimental results for the small scale piping experiments*

Hereafter, the analysis for the small scale experiments is performed for 38 data points instead than 47 since 7 data points correspond to the upstream mechanism and two data points are the outliers in Figuur B.1.

The analysis for the medium scale experiments is performed with the 5 data points. However, the results of the medium scale experiments might not be representative of the real process in the practice as not sufficient and reliable information can be extracted from a sample of only 5 data points. Therefore, the results obtained for the medium scale experiments must be seen just as indications and the values should not be used as quantitative data in further analyses or calculations.
In this Section, the two statistical methods explained in Section 2 are applied to the measured data. Again, these statistical methods measure only the degree of linear dependence, thus the natural logarithms of the data are used in both analyses.

B.3.1 Correlation results

As mentioned in Section 2, the correlation only measures the linear relationship between the variables. The natural logarithm of the measured parameters will deliver a more reliable information of the real relationship.

The correlation results for the small scale piping experiments are presented in Tabel B.2. The variables from left to right are: Critical head (Hc), density (RD), permeability (k), grain size of 70 µm (D70), uniformity (U) and roundness of the grain (KAS). The diagonal of the matrix is composed by ones as the correlation of one variable with itself is one. From Tabel B.2, it can be seen that the critical head shows a high correlation with the permeability and the density. The negative value in the correlation coefficient indicates an inverse relation which means that when one increases the other decreases and vice versa.
The results show as well that the critical head has a medium correlation with the uniformity and low correlation with the D70 and KAS. From these results, it is interesting to remark that the correlation of the permeability with the D70 is very high which shows a high dependence among these variables. Other interesting aspect is the low relationship between the density and the uniformity.

Correlations	Hc	RD	k	D70	U	KAS
Hc	1.000	0.693	-0.620	0.156	0.390	0.085
RD	0.693	1.000	-0.344	0.105	0.033	0.001
k	-0.620	-0.344	1.000	0.800	0.250	-0.0009
D70	0.156	0.105	0.800	1.000	0.098	0.1559
U	0.390	0.033	-0.250	0.098	1.000	0.093
KAS	0.085	0.017	-0.0009	0.155	0.093	1.000

Tabel B.2 Linear correlation coefficients of the experimentally measured parameters for the small scale piping experiments

In Tabel B.3 the correlation coefficients for the medium scale experiments are presented.
From these result, almost no information can be extracted about the relationship between the data. The only observation that can be made is that the permeability is the only parameter that seems to be explaining the variation in the critical head in this set of data.

The results in Tabel B.3 are a consequence of the input data given to the model. Specifically, six parameters are entered into the model. Five data points corresponding to five experimental measurements compose each parameter. Most of the values of each parameter do not change in each experiment (remain constant) but paradoxically the measured critical head changes each time. Therefore, it is advisable not to use these numerical results to infer something about the process as the amount of data is not significant to infer something of the population.

Correlations	Hc	RD	k	D70	U	KAS
Hc	1.000	-0.003	-0.795	-0.715	-0.715	-0.715
RD	-0.003	1.000	-0.356	0.166	0.166	0.166
k	-0.795	-0.356	1.000	0.822	0.822	0.822
D70	-0.715	0.166	0.822	1.000	1.000	1.000
U	-0.715	0.166	0.822	1.000	1.000	1.000
KAS	-0.715	0.166	0.822	1.000	1.000	1.000

Tabel B.3 Linear correlation coefficients of the experimentally measured parameters for the medium scale piping experiments

B.3.2 Multivariate regression

The correlation coefficients computed in the previous section provide an idea of the relationship among the variables but it does not provide a *weight* coefficient for each parameter such that a linear combination of the weights times the parameters can characterize the dependent variable, H_c.

A multivariate regression is performed to the small and medium scale piping experiments. The results for the small scale piping experiments are illustrated in Tabel B.4.

Regression coefficients	
constant	-0.713
RD	0.354
k	-0.357
D70	0.398
U	0.132
KAS	-0.021

Tabel B.4 Small scale piping experiments regression coefficients with 38 data points

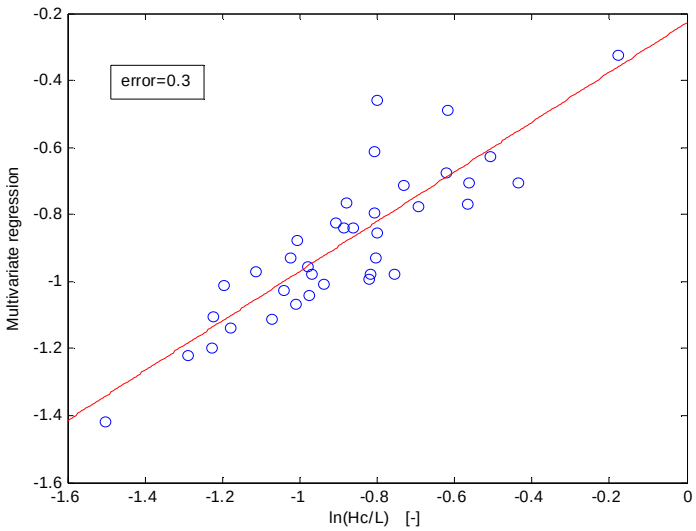
The results in Tabel B.4 are found after the natural logarithm of the parameters is taken in order to identify their linear relationship. Thus, the linear relationship with the critical head H_c is

$$\ln\left(\frac{H_c}{L}\right) = -0.713 + 0.354\ln\left(RD\right) - 0.357\ln\left(k\right) + 0.398\ln\left(D70\right) + 0.132\ln\left(U\right) - 0.021\ln\left(KAS\right) \tag{3.1}$$

which can be expressed as the product of the parameters as,

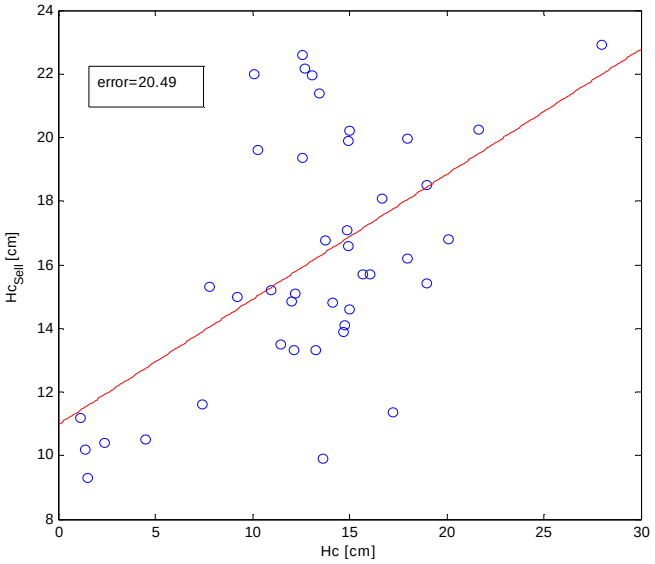
$$\frac{H_c}{L} = \exp\left(-0.713\right)\cdot RD^{0.354}\cdot k^{-0.357}\cdot D70^{0.398}\cdot U^{0.132}\cdot KAS^{-0.021} \tag{3.2}$$

The goodness of the fit is presented in Figuur B.2 where the estimated critical head (equation (3.2) is plotted against the actual measured values.



Figuur B.2 *Multivariate regression model plotted against the experimentally measured critical head for the small scale piping experiments*

A perfect fit will deliver a straight diagonal line but in this case it can be observed that the points are in a relatively close distance to the diagonal line. The error produced by this fit is 0.3 which is a relatively small error.



Figuur B.3 *Small scale piping experiments plotted against the estimated values with the Sellmeijer rule.*

Figure B.3 illustrates the goodness of fit to the small scale piping experiments with the Sellmeijer formula. The results show that the data points are disperse around the diagonal line which is described by a total error of 20.49. The latter shows that a correction of 20.19

can be achieved by a correction obtained with the multivariate analysis since a better understanding of the influence of each parameter is achieved. However, this correction is only based on the small scale piping experiments therefore further analysis is required.
The multivariate regression results show that the density, permeability and grain size D70 have a strong influence in the critical head. The uniformity and the roundness of the grains (KAS) seem to have a weak influence in the results. However, since some of the parameters have a strong connection among themselves it is important to remark that the analysis will record this connection giving more weight to one of the parameters and less to the other. For example, it can be the case that the values of k, D70 and uniformity are very close related (the corresponding measured values for D70 and U are almost exact, see appendix I), then, a high coefficient is assigned to the k or D70 and a small to the uniformity or vice versa since one is already represented by the others.

In order to observe the influence of each parameter in the final estimate of the critical head, the regression analysis is performed once again each time without one of the parameters. Tabel B.5, shows the results obtained when the roundness of the grains, KAS, is not taken into account. Here, it can be seen that the coefficients of the parameters and the error remain almost the same as in Tabel B.4. These results show that the importance of this parameter in the final estimation of the critical head is not significant.

Regression coefficients	
Constant	-0.840
RD	0.361
K	-0.351
D70	0.386
U	-0.137
Error	0.3

Tabel B.5 Small scale piping experiments regression coefficients excluding KAS from the analysis

Tabel B.6 shows the results of the regression excluding the uniformity. This time, the change in the parameter's coefficients is more significant. The value assigned to D70 and k increases while all other coefficients decrease. The error of the fit also increases for this case.

Regression coefficients	
Constant	-0.072
RD	0.260
K	-0.440
D70	0.544
KAS	-0.055
Error	0.4

Tabel B.6 Small scale piping experiments regression coefficients excluding the permeability 'U' from the analysis

In Tabel B.7 the results of the regression are shown after the grain size D70 is excluded from the analysis. The constant, density, uniformity, KAS and the error values increase in comparison to the values reported in Tabel B.4. The value of the permeability decreases which indicates the relationship between the D70 and permeability.

Regression coefficients	
Constant	-2.584
RD	0.603
K	-0.143
U	0.345
KAS	0.09
Error	0.42

Tabel B.7 Small scale piping experiments regression coefficients excluding the density 'D70' from the analysis

Tabel B.8 presents the results of the analysis without the permeability. The results show that all the values increase except for the D70 which decreases. The error here is higher than the error reported in Tabel B.4. The latter illustrates the strong dependence between the critical head and the permeability.

Regression coefficients	
Constant	-3.34
RD	0.763
D70	-0.217
U	0.481
KAS	-0.15
Error	0.45

Tabel B.8 Small scale piping experiments regression coefficients excluding the permeability 'k' from the analysis

Finally, the density is taken out of the regression analysis. The results show a significant increase in the results of the permeability k and the grain size D70 and a decrease in the coefficient of the uniformity.

The results in the different tables suggest that the variables that have the highest impact in the critical head are the density, the permeability and the D70.The latter is also confirmed by the correlation coefficients reported in Tabel B.1 However, it is recommended a further revision of the relationship between the experimental values for the uniformity and the D70.

The same analysis performed in the small scale piping experiments is carried out for the medium scale experiments. Tabel B.9 presents the results of the analysis.

Regression coefficients	
Constant	0
RD	-0.178
k	-0.202
D70	0.374
U	0
KAS	-0.701

Tabel B.9 Medium scale piping experiments regression coefficients with 5 data points

Again, it is important to remark that few conclusions can be extracted from an analysis with five data points where several parameters remain constant. From Tabel B.9, it can be seen that the coefficients of the permeability and the grain size D70 show a similar tendency as in Tabel B.4. The other values show higher variations specially the constant, uniformity and KAS. Conclusions cannot be extracted either from these results as there is not sufficient statistical evidence to support any theory.

B.3.3 Remarks

The results of the small scale piping experiments show that the density, permeability and D70 have a strong influence in the measured critical head. The results also show that the experimental KAS values have almost no influence in the critical head. This might be a consequence of biases introduced by a poor approximation in the grain roundness, as the mean and the standard deviation are 49.7 and 6.6 respectively, which means that the majority of the values are near a KAS value of 50, and low variation is observed through the experiments.

The results for the medium scale experiments are not conclusive. The lack of data leaves little room for trustworthy conclusions. Therefore, the results presented in this report should be used as an indication rather than quantitative data.

C Comparison between the experimental values for grain size D70 and uniformity

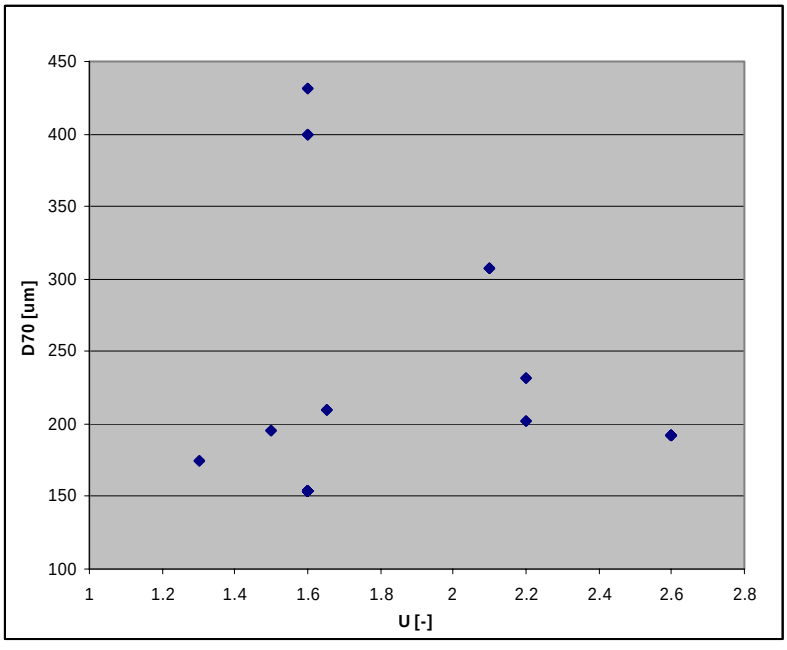
In the experimental results for the small scale piping experiments some of the parameters exhibit a high relationship that sometimes a linear correlation cannot describe. This might be the case for the observed values of the grain size D70 and the uniformity. Table C.1, illustrate the sorted uniformity data with respect to the D70.

D70	U
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
154	1.6
175	1.3
175	1.3
192	2.6
192	2.6
192	2.6
192	2.6
192	2.6
192	2.6
192	2.6
195	1.5

195	1.5
202	2.2
202	2.2
210	1.654
210	1.654
210	1.654
232	2.2
232	2.2
307	2.1
307	2.1
307	2.1
400	1.6
400	1.6
400	1.6
431	1.6
431	1.6

Tabel C.1 *Ascending sorted data with respect to the D70 to observe the variations of the uniformity for different values of grain size D70*

From Table C.1, it can be seen a perfect correspondence between the measured data. For each different value of D70, the same value is always measured for the uniformity. This is better seen in Figure C.1, where the 52 data points of D70 and uniformity are plotted against each other and only 10 points appear in the graph which corresponding to the 10 different measured values of D70.



Figuur C.1 *D70 and uniformity for the small scale piping experiments with 52 data points*