Deltares

SBW Hervalidatie piping

HP2.2 Medium-schaalproeven (Analyserapport)

Vera van Beek
Adam Bezuijen

© Deltares, 2009

Deltares

Titel
SBW Hervalidatie piping

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Waterdienst	1200648-004	1200648-004-GEO-0001	66

Trefwoorden
Piping, experiment, schaaleffecten, monitoring

Samenvatting

Doel van het SBW piping project 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. Aan de hand hiervan wordt een nieuwe of aangepaste rekenregel opgesteld. Deze rekenregel wordt getoetst door het uitvoeren van medium schaal proeven en gevalideerd in een full-scale proef. In dit rapport is de analyse van medium-schaalproeven weergegeven. De doelstellingen van deze proeven zijn:

- Het verifiëren van de schaaleffecten;
- Het valideren van eerder waargenomen verschijnselen, zoals de invloed van korrelgrootte en relatieve dichtheid op het pipingproces;
- Het testen van monitoringsapparatuur ten behoeve van een eventuele full-scale proef.

De proeven zijn uitgevoerd op twee zanden (Baskarp en Itterbeck zand) bij verschillende relatieve dichtheden, bij een kwelweglengte van ca. 1.5m. Op basis van deze proeven is vastgesteld dat het schaaleffect zoals verwerkt in de regel van Sellmeijer goed voldoet voor de kleine-schaalproeven en de medium-schaalproeven. De invloed van relatieve dichtheid is nog onduidelijk. De proeven op Baskarp zand voldoen beter aan de regel van Sellmeijer dan de proeven op Itterbeck zand. Uit de proeven op Itterbeck zand volgt een lager verval bij doorbraak dan voorspeld met de rekenregel van Sellmeijer. Dit resultaat lijkt overeen te komen met de trends gevonden in de kleine-schaalproeven. Aanbevolen wordt om de resultaten uit de multivariate analyse te vergelijken met de in deze proeven gevonden data, en op basis hiervan een aanpassing van de rekenregel voor te stellen. In de opstelling zijn debiet, waterspanningen en temperatuur gemeten, waarvan de waterspanning een redelijke indicatie geeft voor de richting en locatie van het proces. De meting van temperatuur geeft vooral inzicht in het ruimproces.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	2009-06-16	Ir. Vera van Beek		Ir. Ed Calle		Ing. Harm Aantjes	
		Ir. Adam Bezuijen					
2	2009-10-26	Ir. Vera van Beek	VB	Ir. Ed Calle		Ing. Harm Aantjes	
		Ir. Adam Bezuijen					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding **1**
1.1 Introductie 1
1.2 SBW Hervalidatie Piping 1
1.3 Doelstelling 3
1.3.1 Verifiëren van schaaleffecten 3
1.3.2 Het valideren van eerder waargenomen verschijnselen 4
1.3.3 Het testen van monitoringstechnieken 4
1.4 Leeswijzer 4

2 Beschrijving laboratoriumproeven **5**
2.1 Proefopstelling 5
2.2 Uitvoering 6
2.3 Proevenprogramma 6

3 Beschrijving waargenomen verschijnselen en processen **9**
3.1 Processen 9
3.2 Procesketens 14
3.3 Bijzondere waarnemingen 15

4 Invloed van schaling en zandeigenschappen: theorie **17**
4.1 Lengteschaling 17
4.2 Korreldiameter 20
4.3 Relatieve dichtheid 20

5 Invloed van schaling en zandeigenschappen: vergelijking tussen experiment en theorie **23**
5.1 Lengteschaling 23
5.2 Invloed van zandeigenschappen op het pipingproces 25
5.2.1 Invloed van relatieve dichtheid 25
5.2.2 Korrelgrootte 30
5.3 Samenvatting 32

6 Monitoringstechnieken **35**
6.1 Debiet 35
6.2 Waterspanning 37
6.2.1 Absolute waterspanningen 37
6.2.2 Verhang 38
6.3 Sensoren Alert Solutions 40
6.3.1 Waterspanning 40
6.3.2 Temperatuur 43
6.4 Samenvatting 46

7 Conclusies en aanbevelingen **47**

8 Literatuur **50**

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. Aan de betrouwbaarheid van rekenmodellen wordt getwijfeld.

Teneinde de onzekerheden binnen de huidige piping toetsingsregels in beeld te krijgen en deze eventueel te verkleinen of elimineren is het onderzoeksspoor SBW Hervalidatie Piping opgestart.

1.2 SBW Hervalidatie Piping

In Nederland wordt voor aspecten rondom piping teruggegrepen naar het eind jaren negentig opgestelde Technisch Rapport Zandmeevoerende wellen van de TAW [1999]. In dit rapport wordt het pipingproces en bijbehorende rekenmodellen beschreven.

In een inventariserende studie die voor dit onderzoek in 2007 is uitgevoerd [Bruijn, Knoeff], is geconcludeerd dat er geen redenen zijn om aan te nemen dat de algemene procesbeschrijving van piping in het genoemde technische rapport onjuist is. In het geschematiseerde proces van het bezwijken van een dijk door piping zijn echter nog een aantal mechanismen die zeer globaal worden beschreven. Zo is bijvoorbeeld het ontstaan van kanaaltjes onder een dijk onomstreden. Dit proces is vele malen geconstateerd bij klein- en grootschalige proeven. De schematisatie van het proces van kanaalvorming is echter niet eenduidig vastgelegd en / of onvoldoende gevalideerd. Er is onvoldoende informatie over de wijze waarop de hooguit enkele centimeters brede en enkele millimeters diepe geultjes de grondwaterstroming beïnvloeden en hoe de waterdrukgradiënten om en nabij de geul samenhangen met het groeien ervan. Verbetering van de beschrijving hiervan leidt tot een beter inzetbaar en onderbouwd rekenmodel.

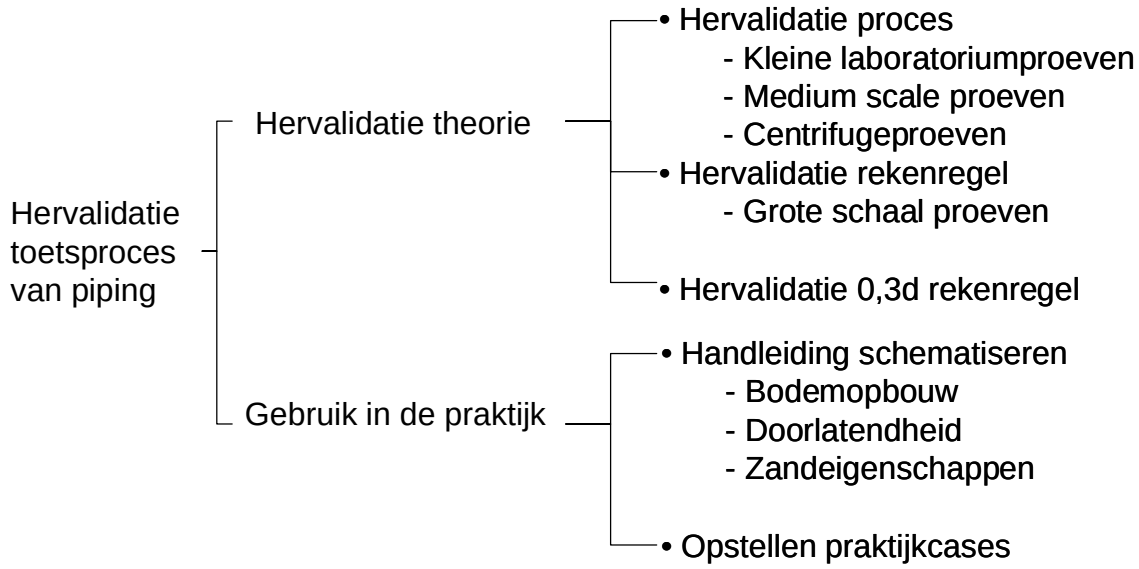
De meest gebruikte rekenregels om het risico op piping te bepalen zijn de regel van Bligh en de regel van Sellmeijer. De rekenregel van Bligh wordt internationaal het meest gebruikt.
De rekenregel van Bligh is gebaseerd op empirie, uit met name India, van bezweken en niet bezweken dammen. De rekenregel van Sellmeijer is gebaseerd op een mathematische beschrijving van de grondwaterstroming door het zandpakket en de pipe en de beschrijving van de stabiliteit van de zandkorrels in de pipe. De mathematische beschrijving is gefit aan enkele piping proeven die zijn uitgevoerd in de Deltagoot. Het pipingproces wordt in de rekenregel van Sellmeijer vanuit een meer complete modellering beschreven dan in de regel van Bligh.

Zoals elk rekenmodel is ook de rekenregel van Sellmeijer een mathematische schematisatie van de werkelijkheid. Voor een betrouwbaar resultaat van de regel van Sellmeijer dient de werkelijkheid op de juiste manier te worden geschematiseerd. Een praktische beschrijving

van het geldigheidsgebied van de regel van Sellmeijer en de wijze waarop de werkelijkheid binnen dit geldigheidsgebied moet worden geschematiseerd ontbreekt in de literatuur.

De rekenregels van Bligh en Sellmeijer houden geen rekening met de verticale stroming en zandtransport door een kanaal in de afdeklaag. In de praktijk wordt hier pragmatisch mee omgegaan door het verval over de kering te reduceren met 0,3 keer de dikte van de afdeklaag, de zogenoemde 0,3 d rekenregel. Deze rekenregel is niet gevalideerd.

Het SBW onderzoek probeert de onzekerheden rondom de theorie en de toepassing van de rekenregel van Sellmeijer te verkleinen. In Figuur 1.1 zijn de belangrijkste deelonderzoeken uit het SBW-hervalidatie piping programma aangegeven.

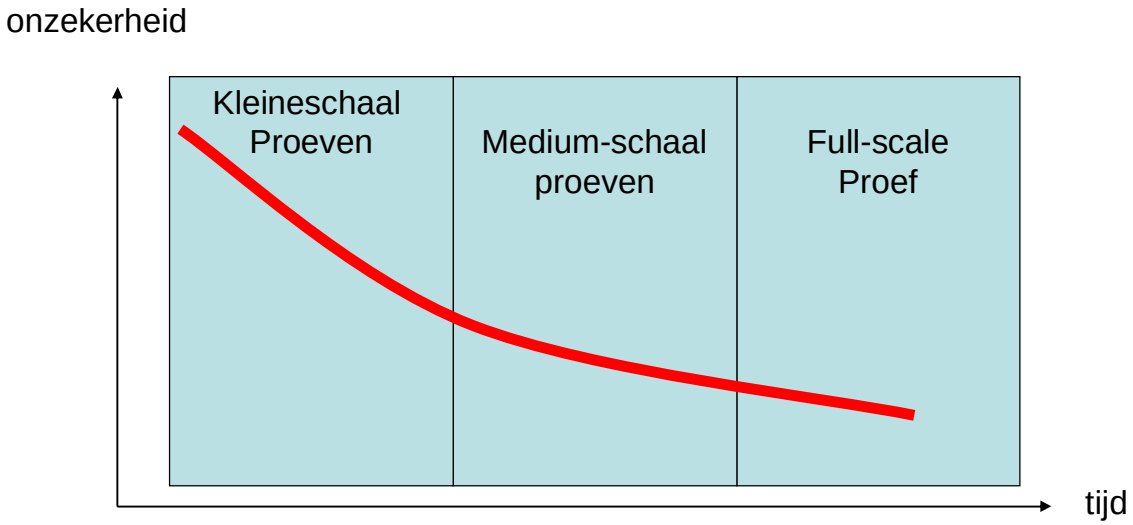


Figuur 1.1 Opbouw SBW – hervalidatie piping

Voor de hervalidatie van het proces zijn inmiddels kleine-schaalproeven en centrifugeproeven uitgevoerd. In de kleine-schaalproeven is de invloed van verschillende parameters op het pipingproces onderzocht. Uit deze proeven bleek dat de relatie met de d70, zoals opgenomen in de rekenregel van Sellmeijer niet wordt gevonden in deze proeven. Sellmeijer geeft een toename van het kritiek verhang bij een grotere korreldiameter. In de kleine-schaalproeven werd deze invloed niet of nauwelijks gevonden. Verder bleek de relatieve dichtheid van het zand van invloed op het type proces en op de grootte van het verhang. Enigszins onverwacht bleken er ook andere bezwijkmechanismen mogelijk dan het door de regel van Sellmeijer beschreven mechanisme. Niet altijd is er sprake van terugschrijdende erosie. Bij losgepakt zand traden andere erosie mechanismen op waarbij lagere kritieke verhangen werden gevonden. De invloed van de lengteschaal werd goed voorspeld door de regel van Sellmeijer. Met behulp van een multivariate analyse, uitgevoerd op deze proefresultaten, wordt een voorstel gedaan voor aanpassing van de rekenregel.

Validatie van deze regel voor redelijk vastgepakt zand (50%<R_d<80%, voor losser en vaster gepakt zand lijken op basis van de kleine-schaalproeven andere mechanismen te spelen) zou plaats kunnen vinden in een full-scale proef (zie Figuur 1.2). Hierbij wordt gedacht aan een proefopstelling in de IJkdijk. Het is echter niet mogelijk om de gevonden resultaten volledig te verifiëren in een full-scale proef. Het aantal proeven dat uitgevoerd kan worden op full-scale is beperkt, omdat dit soort proeven hoge kosten met zich meebrengen.

Het is daarom noodzakelijk om een tussenstap te maken, waarin het schaaleffect bestudeerd kan worden en waarin de gevonden verschijnselen bevestigd worden, om tot een meer betrouwbare aanpassing van de rekenregel te komen. Dit is de aanleiding geweest tot het uitvoeren van medium-schaalproeven. In dit rapport wordt de analyse van deze medium-schaalproeven beschreven. In de mediumproeven wordt alleen zand beproefd bij relatieve dichtheden van 50-75%, de range waarin de regel van Sellmeijer geldig is.



Figuur 1.2 Relatie experimentele onderzoeken SBW Hervalidatie Piping

1.3 Doelstelling

De doelstelling van SBW piping is het identificeren van onzekerheden binnen de huidige piping toetsingsregels en deze eventueel te verkleinen of elimineren.

De doelstelling van het uitvoeren en analyseren van medium-schaalproeven is het verkrijgen van inzicht in de schaaleffecten en processen van kanaalvorming die uiteindelijk tot bezwijken van een waterkering leiden. Het is noodzakelijk om een tussenstap te maken tussen de reeds uitgevoerde kleine-schaalproeven en een eventuele full-scale proef. De doelstelling van deze medium-schaalproef is als volgt:

- Het verifiëren van de schaaleffecten;
- Het valideren van de verschijnselen, die in de kleine-schaalproeven waargenomen zijn;
- Het testen van monitoringsapparatuur.

In de paragrafen 1.3.1, 1.3.2 en 1.3.3 worden deze doelstellingen nader uitgewerkt.

1.3.1 Verifiëren van schaaleffecten

Het schaaleffect kan zowel van belang zijn voor het pipingmechanisme, maar ook voor het verhang bij doorbraak.

Bij de kleine-schaalproeven worden zeer hoge kritieke verhangen (1:2 – 1:3) gevonden, die niet overeenkomen met waargenomen kritieke verhangen uit de praktijk (1:10 – 1:20). De regel van Sellmeijer beschrijft dit schaaleffect. Voordat de nieuwe rekenregel gevalideerd wordt in een full-scale proef is het van belang dit schaaleffect te onderzoeken.

Daarnaast zijn in de kleine-schaalproeven processen en mechanismen waargenomen, waarvan het onbekend is in hoeverre deze op grote schaal een rol spelen. In de kleine-schaalproeven is het stabiliseren van het kanaal niet opgetreden; zodra kanaalvorming optrad leidde dit meestal direct tot doorbraak. Ook is het onbekend hoe kanalen zich gedragen bij grotere lengte. Neemt de verhouding tussen breedte en lengte toe? Ontstaat er een netwerk van kanalen? Ten slotte is het mogelijk dat er op grote schaal fenomenen plaatsvinden die op kleine schaal niet optreden. Deze aspecten zijn van belang om de aannamen in het model van Sellmeijer hervalideren.

1.3.2 Het valideren van eerder waargenomen verschijnselen

Uit de resultaten van de kleine-schaalproeven is afgeleid dat de invloed van korreldiameter geringer is dan verwacht wordt op basis van de rekenregel van Sellmeijer. Daarnaast is de relatieve dichtheid van belang. Op basis van de resultaten van de kleine-schaalproeven kan een nieuwe rekenregel worden afgeleid. De medium-schaalproef geeft de mogelijkheid om de gevonden rekenregel beter te kwantificeren. De gevonden verschijnselen kunnen hiermee gedeeltelijk gevalideerd worden.

1.3.3 Het testen van monitoringstechnieken

Voor een full-scale proef is het van belang om over monitoringstechnieken te beschikken, waarmee het pipingproces gevolgd kan worden. In de beoogde full-scale proef zal het zand afgedekt zijn met klei in plaats van een Perspex plaat, waardoor het pipingproces niet visueel vastgelegd kan worden.

Voordat deze technieken in de full-scale proef toegepast worden, moet gevalideerd worden of ze geschikt zijn om te voorzien in informatie over het pipingproces. Waterspanningsmeters en temperatuursensoren zijn om die reden ingebouwd in de medium-schaalproef. In de kleine-schaalproeven is reeds vastgesteld dat op korte afstand (kleiner dan ca 5cm) van het kanaal significante verandering optreedt in de waterspanning. Bij een grotere proef is deze afstand mogelijk ook groter. Dit is echter niet bekend.

Specifieke vragen bij deze doelstelling zijn:

- Kan er een inschatting gemaakt worden van de locatie, afmetingen en beweegrichting van het kanaal?
- Op welke afstand van een opnemer is (de invloed van) een kanaal nog zichtbaar?

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de opstelling en uitvoering van de medium-schaalproeven beschreven. In hoofdstuk 3 wordt nader ingegaan op de waarnemingen tijdens de proeven. In hoofdstuk 4 en 5 worden de schaaleffecten en invloeden van zandkarakteristieken besproken. Ten slotte worden in hoofdstuk 6 de resultaten van monitoring besproken en worden in hoofdstuk 7 de conclusies en aanbevelingen uiteengezet.

2 Beschrijving laboratoriumproeven

In dit hoofdstuk wordt de opstelling en uitvoering van de medium-schaalproeven beschreven.

2.1 Proefopstelling

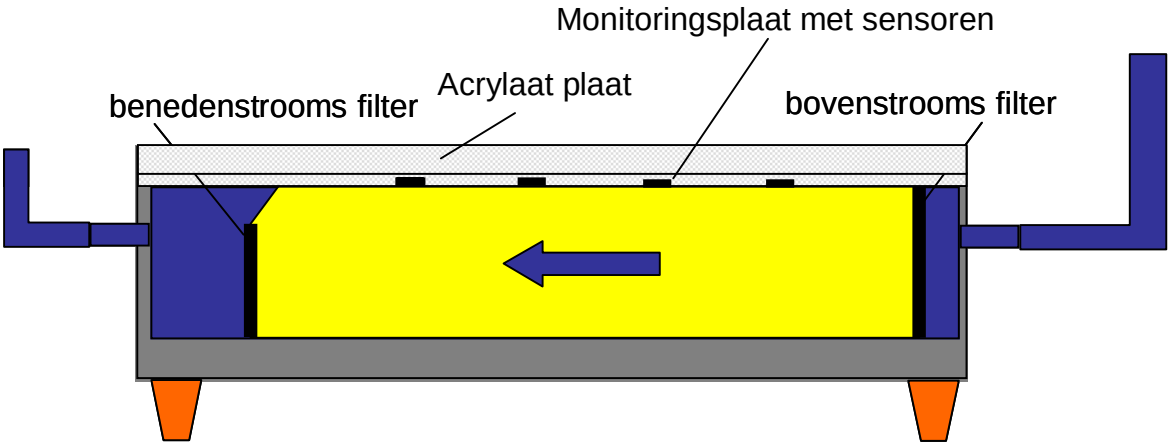


De laboratoriumproeven zijn in het factual report in detail beschreven [Rietdijk, 2009]. In dit hoofdstuk wordt de opzet en uitvoering van de proeven in het kort uiteengezet.

De proefopstelling die voor deze serie proeven is gebruikt, lijkt qua configuratie sterk op de opstelling van de kleine-schaalexperimenten [Knoeff, 2008], maar is een factor 4 groter in lengte, breedte en hoogte. De afmetingen van het zandpakket zijn ongeveer lxbxh=1.5x0.88x0.4 m.

Net als bij de kleine-schaalproeven is de bak afgedekt met een acrylaat deksel (zie Figuur 2.1). Aan de inlaatzijde is een gaas aanwezig afgedekt met nylon om de waterdruk over het zandpakket te verdelen. Aan de uitlaatzijde is eveneens een gaas met geotextiel aanwezig die niet tot de hele hoogte van de bak reikt, in verband met het toelaten van zandafvoer.

Er is geen bovenbelasting aangebracht op het zand. Het oppervlak van het acrylaat deksel is wel ruw gemaakt met siliconenkit. Bij de behoefte aan extra meetdata kan een extra (doorzichtige) plaat worden geplaatst tussen de acrylplaat en de container. Hierin zijn meetinstrumentaten geplaatst van Alert Solutions. Tevens zijn conventionele waterspanningsmeters geplaatst op verschillende locaties in de bodemplaat van de container. De locaties van de waterspanningsmeters zijn weergegeven in Appendix B. Met behulp van camera's wordt het pipingproces vastgelegd en een debietmeter is aangesloten op de uitstroom om het debiet te meten.



Figuur 2.1 Schematisatie van opstelling

De proefopstelling kan zowel horizontaal als verticaal gezet worden, zoals te zien is in Figuur 2.2. De container wordt in verticale positie gevuld met zand. Vervolgens wordt het zand verdicht. Op deze wijze wordt een zo homogeen mogelijk zandpakket bewerkstelligd. Deze verdichtingsmethode is heel vergelijkbaar met de methode die is gebruikt in de kleine-

schaalproeven, zodat er geen afwijkingen kunnen ontstaan door verschillen in zandbehandeling. De proef wordt uitgevoerd in horizontale positie.



Figuur 2.2 Horizontale en verticale positie van de container

2.2 Uitvoering

Gedurende de uitvoering van het experiment wordt het verval over het zand in stappen verhoogd. Het waterniveau aan in- en uitstroomzijde wordt tijdens iedere stap constant gehouden. Tijdens de proeven is er standaard uitgegaan van het volgende ophoogschema:

- een stap duurt vijf minuten;
- de eerste tien centimeter wordt aangebracht in stappen van 2cm;
- daarna wordt per centimeter opgehoogd;
- wanneer er kanaalvorming optreedt of zandtransport zichtbaar is wordt het verhang niet verder verhoogd.

Het verhang bij doorbraak is bereikt wanneer het zandtransport niet meer stopt en uiteindelijk over de gehele lengte van het zandpakket is gegroeid. De proef wordt gestopt als het maximale debiet is bereikt. Het maximale debiet wordt bereikt wanneer het kanaal nauwelijks weerstand meer levert. De weerstand van het systeem, ten gevolge van slangen, debietmeter en filters wordt dan maatgevend voor het maximale debiet.

2.3 Proevenprogramma

Naar aanleiding van de resultaten van de kleine-schaalproeven is gekozen om twee zandsoorten met verschillende d70 te beproeven bij twee verschillende dichtheden. De uniformiteit en hoekigheid zijn voor deze twee zanden ongeveer gelijk.

De beproefde zandsoorten zijn Baskarp zand en Itterbeck zand (125-250 µm). De eigenschappen van deze zanden zijn weergegeven in Tabel 2.1. De doorlatendheid is afhankelijk van de relatieve dichtheid en is om die reden per proef weergegeven in Tabel 2.2. In het factual report [Rietdijk, 2009] zijn de korrelverdelingen van deze twee zandsoorten weergegeven.

	d70 [µm]	U [-]	KAS [-]
Baskarp	154	1,6	50
Itterbeck (125-250)	210	1,65	52

Tabel 2.1 Zandeigenschappen

Van elke soort proef is ook een herhaalproef, een zgn. duploproef, uitgevoerd om de reproduceerbaarheid te verifiëren. In totaal zijn er dus acht proeven uitgevoerd:

- 2 x Itterbeck zand, relatieve dichtheid 75%;
- 2 x Itterbeck zand, relatieve dichtheid 50%;
- 2 x Baskarp zand, relatieve dichtheid 75%;
- 2 x Baskarp zand, relatieve dichtheid 50%.

Doordat het wegen van de opstelling niet goed is verlopen (zoals omschreven in het factual report [Rietdijk, 2009]) is op basis van expert judgement, het aantal klappen waarmee het zand is verdicht en vergelijking van doorlatendheden de relatieve dichtheid vastgesteld. Om deze redenen zijn de proeven niet exact bij een relatieve dichtheid van 50 en 75% uitgevoerd. Daarnaast is bij een tweetal proeven geconstateerd dat het zand niet helemaal goed aansloot nabij het uittredepunt. Hiervoor is een correctie gemaakt in de lengte van het zandpakket. In Tabel 2.2 zijn de eigenschappen van de proeven weergegeven.

Proefnummer	Type zand	D70	Beoogde Dr	Geschatte Dr	k	L	gecorrigeerde L
		[um]	[-]	[-]	[m/s]	[cm]	[cm]
Bms1	Baskarp	154	75	65	1,15E-04	137	137
Bms2	Baskarp	154	50	60	1,37E-04	145	145
Ims3	Itterbeck	210	75	70	1,88E-04	145,5	145,5
Ims4	Itterbeck	210	50	45	3,44E-04	145,5	145,5
Ims5	Itterbeck	210	75	65	2,10E-04	141,5	141,5
Ims6	Itterbeck	210	50	30	1,33E-03	146,5	146,5
Bms7	Baskarp	154	75	60	1,37E-04	144	130
Bms8	Baskarp	154	50	45	2,37E-04	142	133

Tabel 2.2 Overzicht van uitgevoerde proeven

Doordat de relatieve dichtheid moeilijk te reguleren was, zijn twee proeven op 45% uitgevoerd in plaats van 50%. Er is één proef (Ims6) die qua doorlatendheid zeer sterk afwijkt van de andere; deze proef is weggelaten uit de analyse. In deze proef is tevens de pomp uitgevallen. De resultaten van deze proef zijn om die redenen niet bruikbaar.

3 Beschrijving waargenomen verschijnselen en processen

In het analyserapport van de kleine-schaalproeven [van Beek, Knoeff, 2009] zijn verschillende processen en procesketens beschreven. In de beschrijving van de waargenomen processen in de medium-schaalproeven zal dezelfde terminologie worden aangehouden. In Appendix C zijn schematisaties weergegeven van alle processen die in de kleine-schaalproeven waargenomen zijn.

Tevens worden enkele beperkingen van de proeven besproken, waardoor een selectie gemaakt kan worden voor de geschikte proeven voor analyse.

3.1 Processen

In de kleine-schaalproeven zijn de volgende initiële processen waargenomen:
- Craquelé;
- Korrelverplaatsing;
- Enkelvoudig klassiek;
- Meervoudig klassiek;
- Interne kanaalvorming;
- Front instabiliteit.

In de medium-schaalproeven zijn craquelé, korrelverplaatsing en interne kanaalvorming waargenomen. In de meeste gevallen is de kanaalvorming begonnen aan de benedenstroomse zijde, alhoewel niet helemaal aan de benedenstroomse rand. In veel gevallen begon het proces ca. 10 cm uit de rand. In twee proeven (Ims6 en Bms8) begon het proces bovenstrooms.

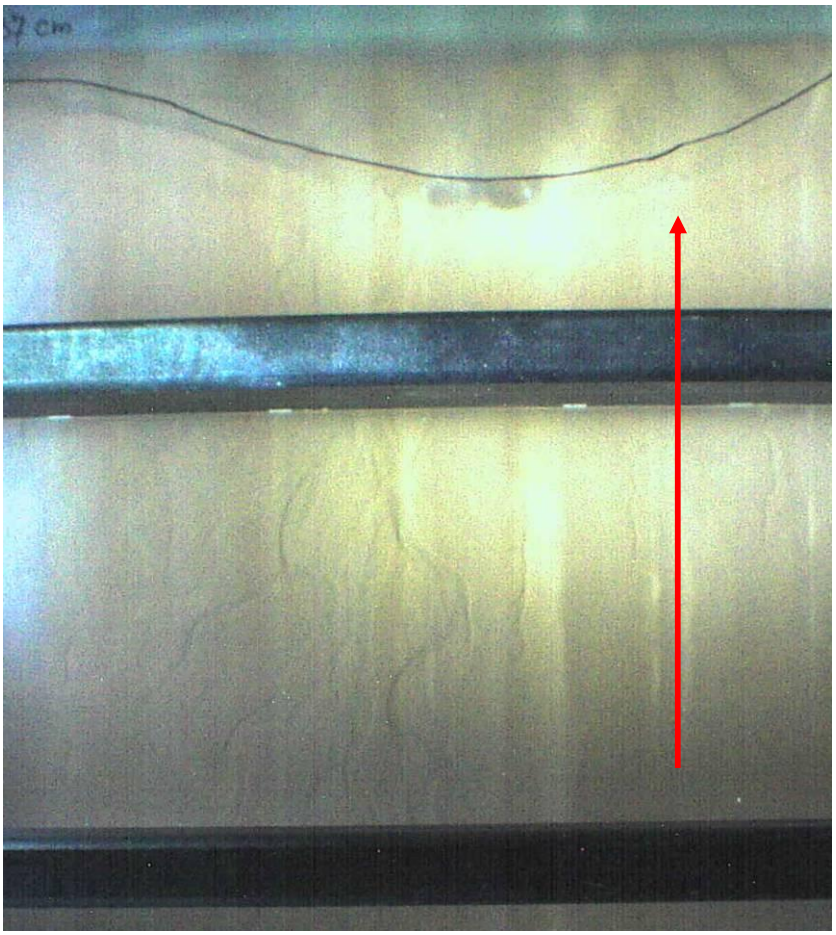
Het is mogelijk dat enkele initiële processen niet waargenomen zijn door de relatief geringe transparantie van de acrylaat plaat en de monitoringsplaat.

In de kleine-schaalproeven zijn de volgende vervolgprocessen waargenomen:
- Straight backward erosion.
- Classic backward erosion.
- Forward erosion/deltavorming.
- Waaiervorming.
- Verstopping.

In de medium-schaalproeven zijn al deze processen waargenomen, met uitzondering van straight backward erosion. Classic backward erosion is in vrijwel alle proeven waargenomen (Figuur 3.1). In tegenstelling tot de kleine-schaalproeven was er geen sprake van één kanaal dat zich vertakte, maar meerdere kanalen die soms op elkaar aansloten. In Figuur 3.5 is goed te zien hoeveel kanalen er in de loop van een proef gevormd kunnen worden. De gehele breedte van de opstelling wordt tijdens het vormen van kanalen benut.

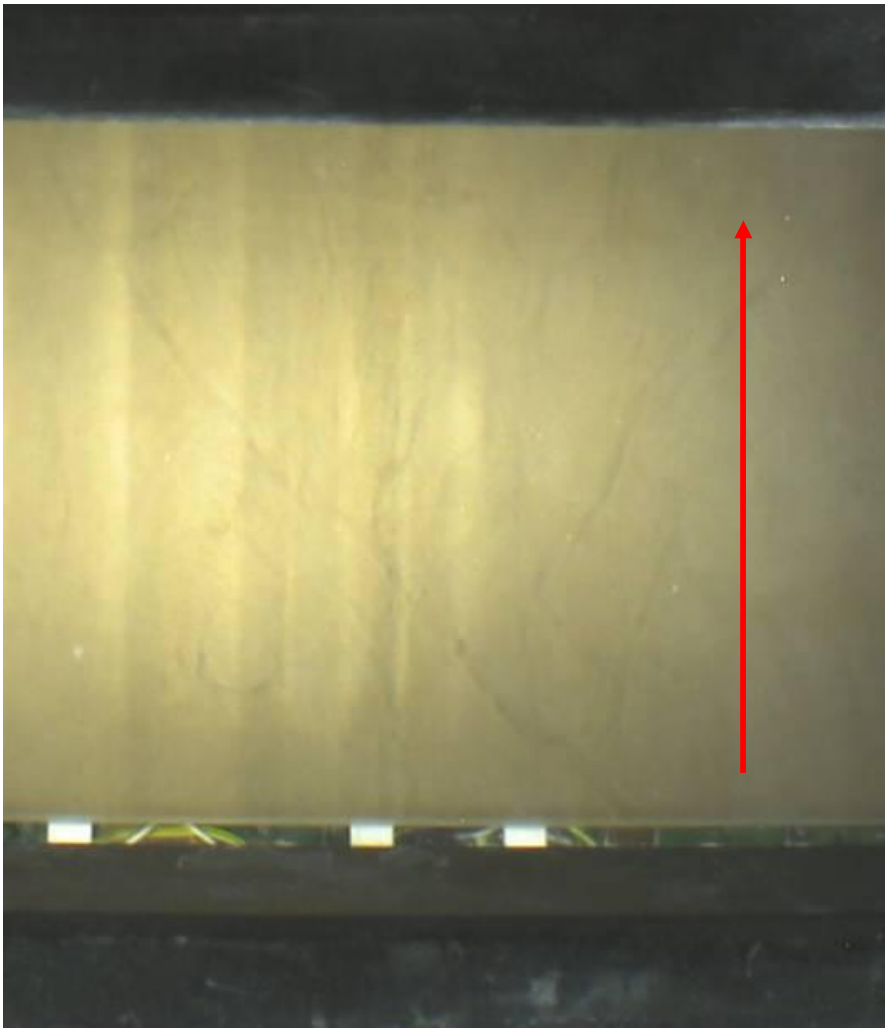
In veel proeven begon het proces enkele centimeters uit de benedenstroomse rand. Het kanaal groeide dan zowel forward als backward. Vaak vond dan verstopping plaats, omdat het kanaal het zand niet kon afvoeren. In een aantal proeven is na kanaalvorming, mogelijk door verstopping, stagnatie van zandtransport opgetreden.

De kanaalbreedte varieert in deze fase van het proces sterk, van 0.5cm tot enkele centimeters.

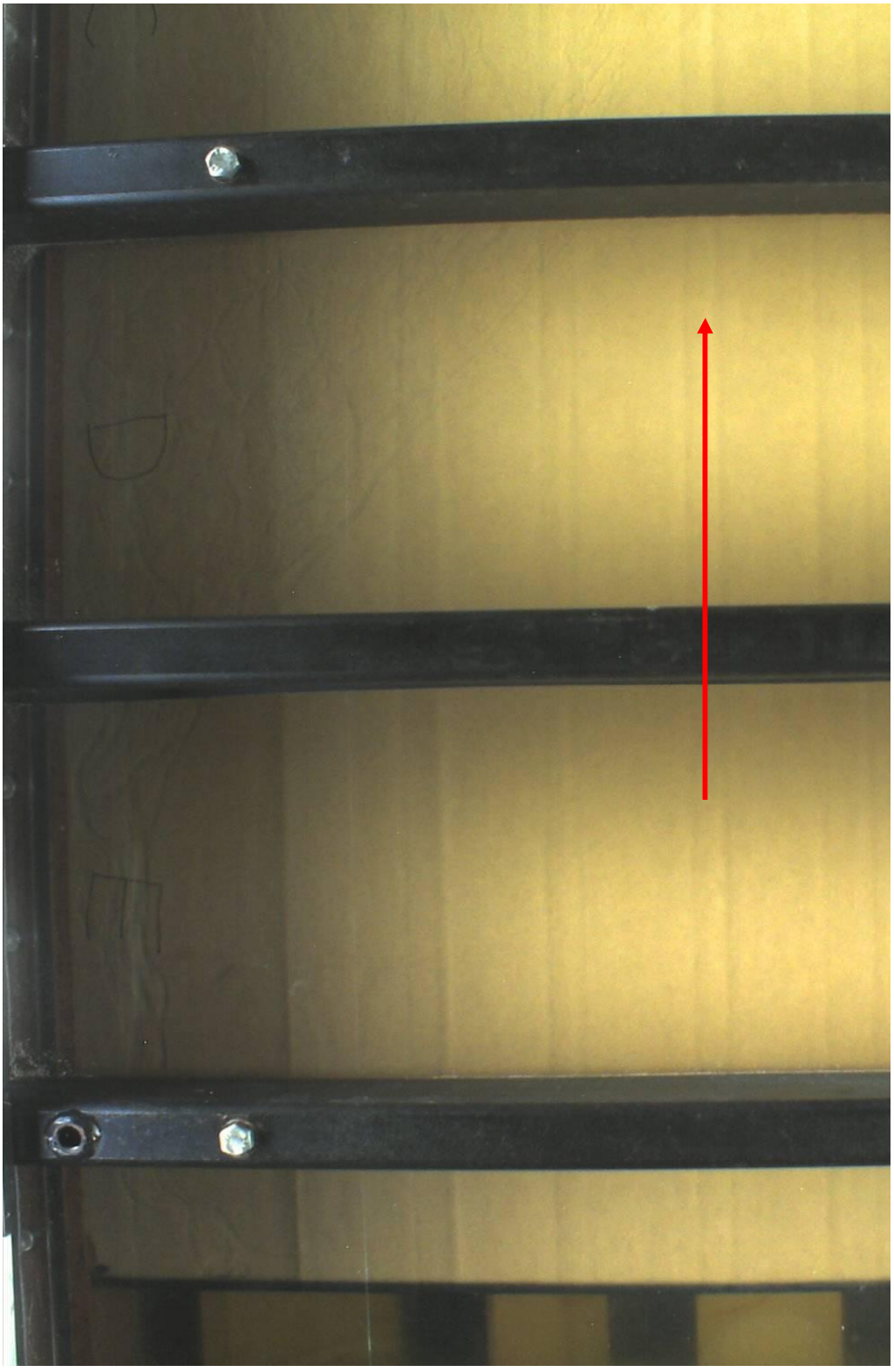


Figuur 3.1 Classic backward (stroming in de richting van de pijl)

In twee proeven (Ims6 en Bms8) is forward erosion opgetreden. Het proces startte in deze proeven bovenstrooms, maar niet helemaal aan de rand. Hierbij zijn twee soorten te onderscheiden, waaiervorming en deltavorming. Deltavorming, ook wel displacement piping genoemd, is opgetreden in één proef (Bms8). Het patroon groeide uit van bovenstrooms naar benedenstrooms en besloeg hierbij bijna de gehele breedte van de bak (Figuur 3.3). Waaiervorming is het ontstaan van kleine kanaaltjes, waarbij geen duidelijke afzetting van deltalobben plaatsvindt. Waaiervorming is (over kleine afstanden) in meerdere proeven waargenomen (Figuur 3.2). In 1 proef vond dit proces over grote afstand plaats. De processen van deltavorming en waaiervorming kunnen sterk op elkaar lijken.



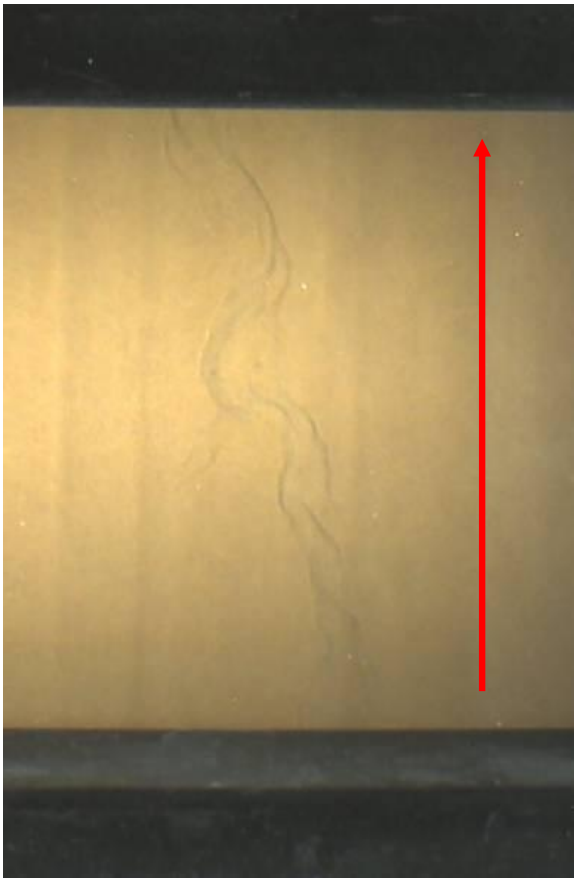
Figuur 3.2 Waaiervorming (stroming in de richting van de pijl)



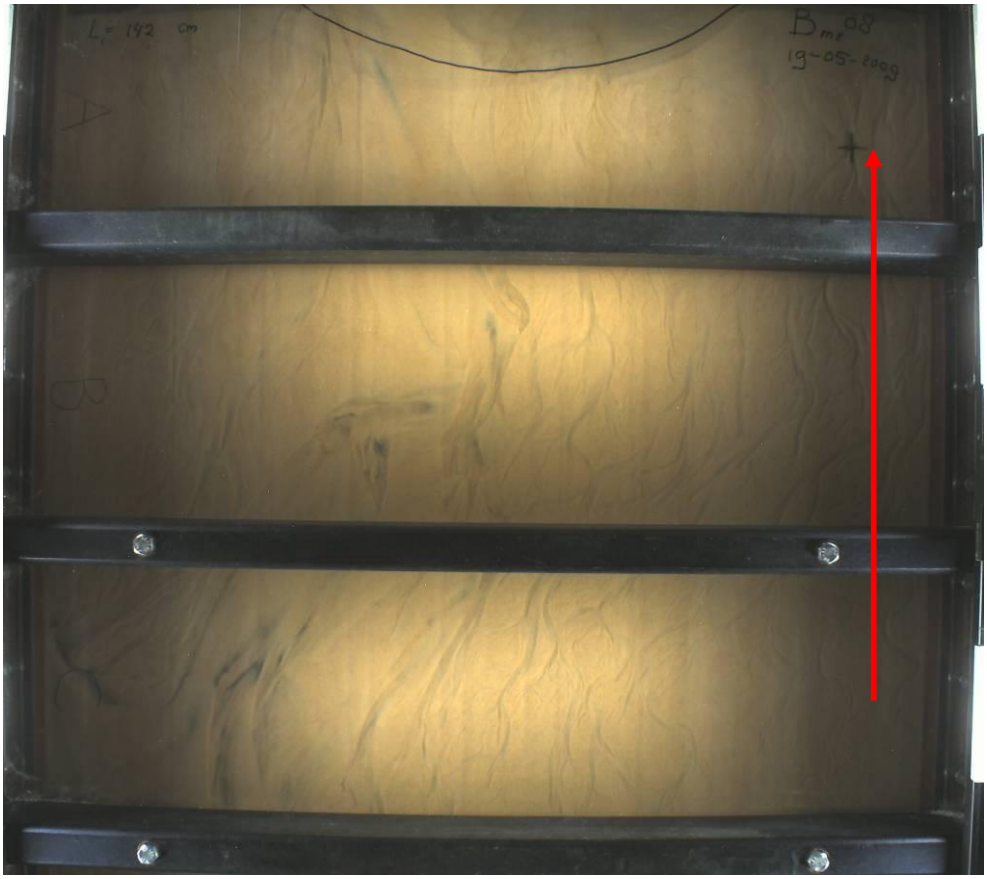
Figuur 3.3 Deltavorming (displacement piping) (stroming in de richting van de pijl)

De eindfase werd in de kleine-schaalproeven gekenmerkt door:
- Vlakstroming;
- Massiefstroming;
- Meanderen;
- Ruimen.

In de medium-schaalproeven is vlakstroming in veel proeven waargenomen. Meanderen en ruimen vindt in iedere proef plaats. Massiefstroming is in geen van de proeven waargenomen. Opmerkelijk is dat het eindproces, wat in de kleine proeven zeer snel plaatsvond, in de medium-schaalproeven vrij lang duurt. Bij de kleine-schaalproeven vindt vrijwel direct ruimen plaats, zodra het kanaal van de benedenstroomse zijde tot de bovenstroomse zijde gevormd is. Het ruimen gaat gepaard met een sterke toename van het debiet. De tijdsperiode tussen het bereiken van de bovenstroomse zijde en deze sterke toename van debiet duurt bij de kleine-schaalproeven meestal maar enkele minuten. Bij de medium-schaalproeven is dit een geleidelijk proces dat nog zeker een kwartier kan duren.



Figuur 3.4 Meanderen (stroming in de richting van de pijl)

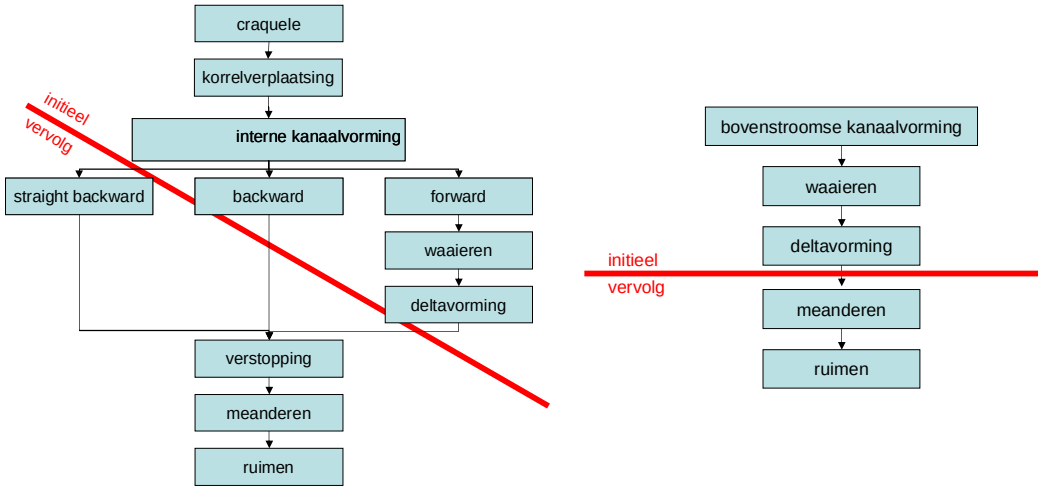


Figuur 3.5 Ruimen (stroming in de richting van de pijl)

3.2 Procesketens

In de kleine-schaalproeven zijn drie procesketens vastgesteld. In de medium-schaalproeven zijn deze ketens ook waargenomen. De meeste proeven voldoen aan procesketen 2, waarbij kanaalvorming start met interne kanaalvorming, backward en/ of forward erosion, gevolgd door verstopping, meanderen en ruimen.

Twee van de proeven voldoen aan procesketen 3, waarin bovenstroomse kanaalvorming wordt gevolgd door deltavorming, meanderen en ruimen. In Figuur 3.6 zijn beide ketens weergegeven.



a) Procesketen 2 b) Procesketen 3

Figuur 3.6 Procesketen 2 en 3 [van Beek, Knoeff, 2009]

3.3 Bijzondere waarnemingen

In de medium-schaalproeven zijn geen bijzonderheden als lucht, of cracking waargenomen. Net zoals bij een aantal kleine-schaalproeven ontstond het pipingkanaal niet helemaal aan de benedenstroomse rand, maar enkele tot enkele tientallen centimeters ervan af.

In enkele proeven is bij het kantelen van de opstelling ruimte ontstaan aan de benedenstroomse zijde tussen de plaat en het zand. Deze ruimte zorgt voor een verkorting van de kwelweglengte. Hier is in de analyse rekening mee gehouden.

4 Invloed van schaling en zandeigenschappen: theorie

In dit hoofdstuk wordt de theorie met betrekking tot schaaleffecten en invloed van zandeigenschappen beschreven. Het schalingseffect is opgenomen in het model van Sellmeijer. In paragraaf 4.1 zal hier nader op ingegaan worden.

Uit de kleine schaalproeven is gebleken dat de korreldiameter een geringere invloed heeft dan op basis van het model van Sellmeijer wordt verwacht. Ook is de verwachting dat de relatieve dichtheid een rol speelt in het pipingproces. In 4.2 en 4.3 zal dit nader toegelicht worden.

4.1 Lengteschaling

Als onderdeel van de validatie van de rekenregel wordt in de medium-schaalproeven de invloed van schaling van de afmetingen van het zandpakket onderzocht. Deze doelstelling is in paragraaf 1.3.1 in meer detail toegelicht. De invloed van lengteschaal is zeer belangrijk om de resultaten van op kleine schaal uitgevoerde proeven te kunnen relateren aan de praktijk. In het model van Sellmeijer [1988] is het schalingseffect opgenomen. In deze paragraaf wordt toegelicht hoe de schaling in het model van Sellmeijer aanwezig is en wat de oorzaak is van dit schaaleffect.

De regel van Sellmeijer luidt als volgt:

$$\Delta H_c = \alpha \cdot c \cdot \frac{\gamma_p}{\gamma_w} \tan(\theta)(0.68 - 0.10\ln(c)) \cdot L \tag{4.1}$$

met:

$$\alpha = \left(\frac{D}{L}\right)^{\left(\frac{0.28}{\left(\frac{D}{L}\right)^{2.8}-1}\right)} \tag{4.2}$$

en:

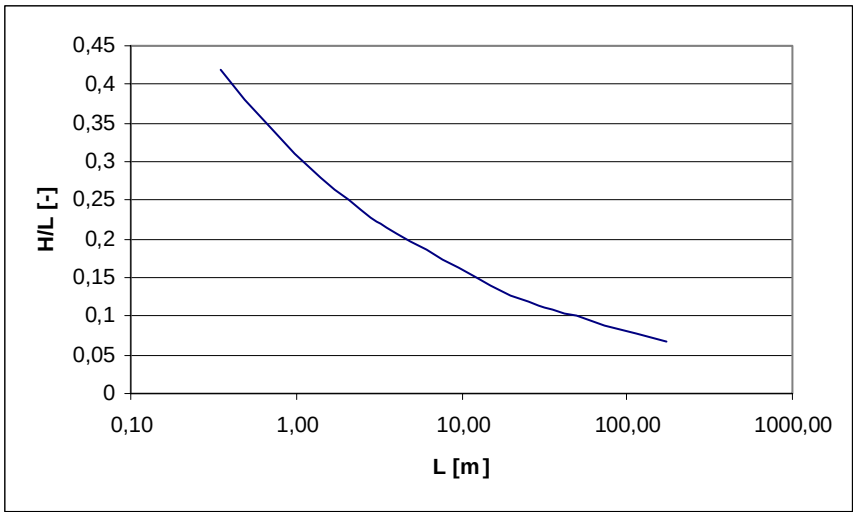
$$c = \eta d_{70} \left(\frac{1}{\kappa L}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{4.3}$$

Waarin:
ΔH_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]

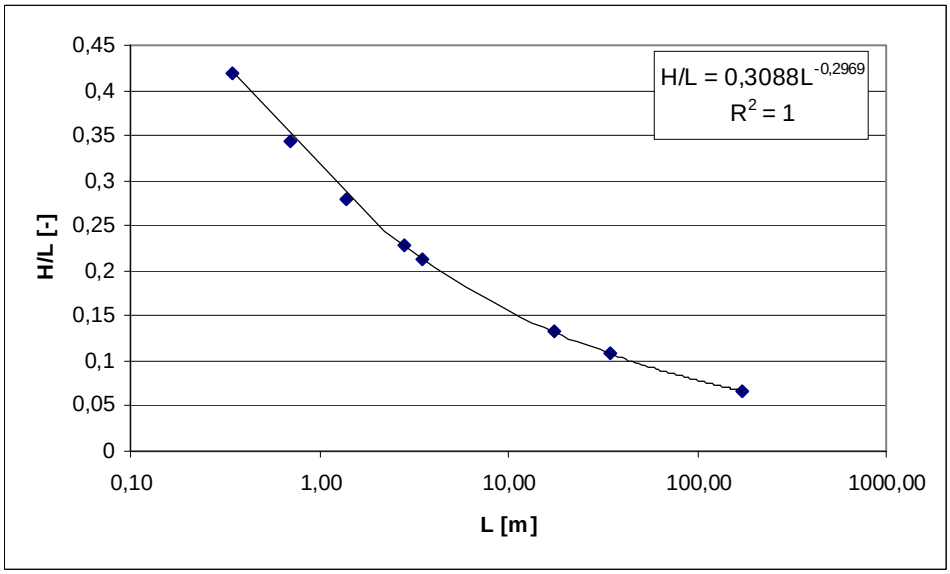
Met behulp van deze rekenregel kan voor een specifiek geval berekend worden wat de invloed van schaling is. In Figuur 4.1 is het effect van een grotere lengte en dikte van de

zandlaag op het kritiek verhang weergegeven, voor het specifiek geval van Baskarp zand, met constante doorlatendheid en geometrie. Uit de figuur kan worden afgelezen dat bij korte kwelweglengtes het kritiek verhang aanzienlijk hoger is dan voor lange kwelweglengtes.

Een mogelijke oorzaak van dit schaaleffect is de singulariteit in de oplossing van de stromingsvergelijking bij het uittredepunt. Vlak bij het uittredepunt is het verhang heel groot. Wanneer nu het gemiddeld verhang over een paar korrels bij het uittredepunt wordt berekend, blijkt dit verhang - bij gelijk verhang *H/L* over de dijk - veel groter bij een grotere *L*. Dit komt doordat de korrelgrootte gelijk blijft en een afstand van een paar korrels bij een grote *L* relatief veel dichter bij de singulariteit zit. In appendix E wordt dit aspect in meer detail besproken. Het optreden van een groter verval bij het uittredepunt van een dijk met grotere lengte zorgt ervoor dat het kanaal bij een lager 'overall' verval kan ontstaan dan bij een kleinere dijk. Na het vormen van het kanaal kan dit effect een rol blijven spelen, omdat bij het startpunt van het kanaal ook een singulariteit ontstaat. Hierdoor zou het schaaleffect deels verklaard kunnen worden. Het volledige effect is echter nog niet fysisch verklaard.



Figuur 4.1 Schalingseffect in formule van Sellmeijer uitgewerkt voor Baskarp zand



Figuur 4.2 Numeriek bepaald schalingseffect

Uitgaande van de verhouding tussen *L* en *D* die ook in de proeven is gebruikt, is door middel van niet-lineaire regressie op met de regel van Sellmeijer bepaalde kritieke verhangen, een relatie bepaald tussen het kritieke verhang H_c/L en de kwelweglengte *L* (figuur 4.2). Hierbij is gevonden dat H_c/L evenredig is met een macht van *L* van ongeveer -0.3.

Het schaaleffect volgt ook analytisch uit de regel van Sellmeijer. Om dit te herleiden kan de regel in een aantal dimensieloze componenten opgedeeld worden. Hiertoe is de formule vereenvoudigd door de factor $(0.68-0.10\ln(c))$ gelijk aan 1 te stellen. Deze factor is enigszins afhankelijk van de schaal, maar varieert nauwelijks (ca. 10%) bij verschillende lengtes. De formule met drie componenten, die volgt uit de bestaande rekenregel, is weergegeven in (4.4).

$$\frac{H_c}{L} = \underbrace{\left[\eta \frac{\gamma_p}{\gamma_w}\tan(\theta)\right]}_{F_{sterkte}} \underbrace{\left[\frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L}}\right]}_{F_{schaal}} \underbrace{\left[F(G)\right]}_{F_{geometrie}} \tag{4.4}$$

Een aantal parameters in de regel is gerelateerd aan de weerstand van het zandpakket tegen het rollen van korrels, zoals de coëfficiënt van white, de rolweerstandshoek en het gewicht van de korrels. Deze parameters vormen samen de component die de ‘sterkte’ van het zandbed reflecteert. De sterkte-component verandert niet bij het toenemen van de lengte.

$$\frac{H_c}{L} \propto \underbrace{\left[\frac{\pi}{3}\eta \frac{\gamma_p}{\gamma_w}\tan(\theta)\right]}_{F_{sterkte}} \tag{4.5}$$

Een tweede component heeft betrekking op de vorm, de geometrie, van het zandbed. Deze is in de regel opgenomen als α (4.2) en in (4.4) als F(G). De verhouding tussen D en L heeft invloed op het ontstaan van piping. De verhouding tussen D en L is in de kleine-schaalproeven en de medium-schaalproeven constant gehouden. Deze ‘geometrie’-component verandert dus niet bij het toenemen van de schaal.

Ten slotte is er nog een component die de invloed van de schaal bepaalt en waaruit volgt dat de verhouding tussen d70, en κ x L (intrinsieke doorlatendheid x kwelweglengte) maatgevend is voor het schalingseffect:

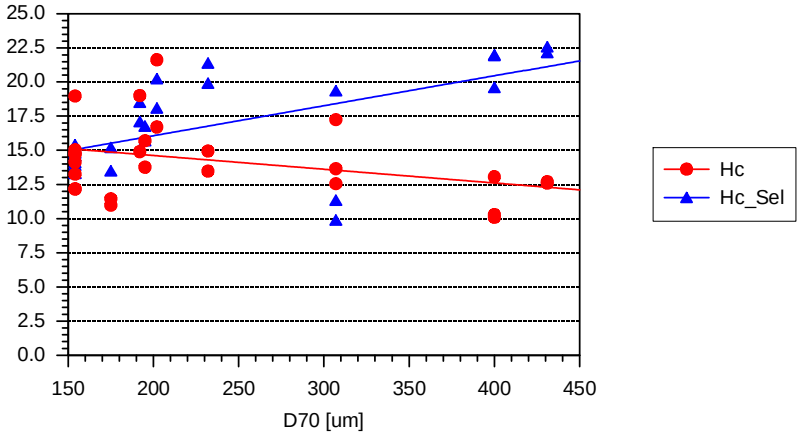
$$\frac{H_c}{L} \propto \underbrace{\left[\frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L}}\right]}_{F_{schaal}} \tag{4.6}$$

Op basis van deze (vereenvoudigde) formule kan gesteld worden dat de verhouding tussen d70 en de derdemachtswortel van de kwelweglengte bij gelijkblijvende geometrie en

zandeigenschappen leidend is voor de schaling. Dit komt dus redelijk overeen met de numeriek gevonden waarde (analytisch is H_c/L evenredig met $L^{-0.33}$, numeriek is dit $L^{-0.3}$). Hieruit blijkt inderdaad dat de factor $(0.68-0.10\ln(c))$ een geringe invloed heeft.

4.2 Korreldiameter

Uit formule (4.6) volgt ook hoe het kritiek verhang H_c/L zich verhoudt tot de korreldiameter d_{70}. Volgens (4.6) neemt H_c/L lineair toe met de d_{70}. Voor laminaire stroming neemt de intrinsieke doorlatendheid toe met de d_{15}^2. Uitgaande van een constante verhouding tussen de d_{70} en d_{15} volgt uit (4.6) dat het kritieke verhang H_c/L iets groter wordt bij toenemende korreldiameter (met de derdemachtswortel uit de korreldiameter). Dit komt niet overeen met de proeven op kleine schaal, waar een afname van het kritiek verhang wordt gevonden bij toenemende korreldiameter, zoals te zien is in Figuur 4.3.



Figuur 4.3 *Relatie tussen korreldiameter en gemeten en berekend kritiek verval in de kleine-schaalproeven [van Beek, Knoeff, 2009]*

Uit vergelijking van de proefresultaten met de resultaten van de multivariate analyse, uitgevoerd op de resultaten van de kleine-schaalproeven, moet blijken of de invloed van korrelgrootte in beide proeven hetzelfde is.

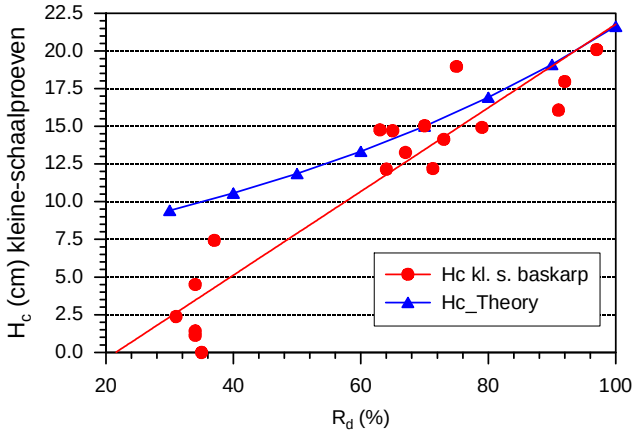
4.3 Relatieve dichtheid

In de formule van Sellmeijer is de relatieve dichtheid niet direct meegenomen. De relatieve dichtheid beïnvloedt de doorlatendheid, welke is opgenomen in het model, maar naar verwachting ook de rolweerstandhoek. Er is een schatting gemaakt naar de invloed van relatieve dichtheid op het kritieke verval. Aangenomen is dat bij een lagere porositeit de korrels dichter op elkaar gepakt zijn, en dat daardoor de korrels minder snel gaan rollen. De rolweerstandhoek neemt dus toe naarmate de relatieve dichtheid hoger is.

Met een berekening uitgaande van ronde korrel op basis van de door Rhee en Bezuijen [1989] beschreven theorie is de verandering van de rolweerstandhoek te berekenen uit de verandering van de wrijvingshoek. Deze is voor verschillende porositeiten met triaxiaalproeven bepaald. Volgens Adel (1988) is de doorlatendheid bij laminaire stroming evenredig met $n^3/(1-n)^2$.

De formule van Sellmeijer geeft aan dat het kritieke verval afneemt met de derdemachtswortel van de doorlatendheid (4.6). Uitgewerkt voor de kleine- schaalproeven

blijkt dit vergelijkbaar met de in de kleine-schaalproeven gevonden afhankelijkheid (Figuur 4.4). Voor zeer lage relatieve dichtheden is de gemeten afhankelijkheid wat sterker dan de berekende; dit heeft vermoedelijk te maken met het optreden van een ander proces.



Figuur 4.4 *Relatie tussen relatieve dichtheid en berekend kritiek verval en gemeten relatieve dichtheid*

Voordat de invloed van relatieve dichtheid verwerkt wordt in het model is het belang de bevindingen op een andere schaal te testen. In paragraaf 5.2.1 wordt hier nader op ingegaan.

5 Invloed van schaling en zandeigenschappen: vergelijking tussen experiment en theorie

In het voorgaande hoofdstuk is een overzicht gegeven van beschikbare theorie en resultaten van eerder uitgevoerde experimenten. In dit hoofdstuk worden de resultaten van de medium-schaalproeven vergeleken met de theorie, zowel voor de invloed van lengteschaal op het kritiek verval als de invloed van zandeigenschappen zoals relatieve dichtheid en korreldiameter.

5.1 Lengteschaling

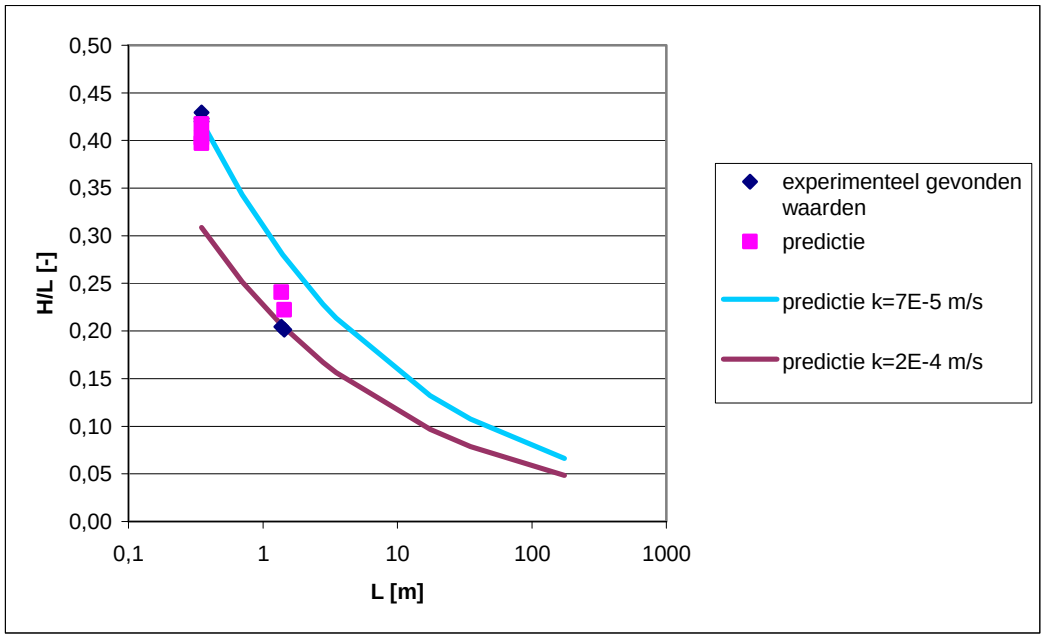
Voor de vergelijking tussen experiment en theorie, ten behoeve van analyse van het schaaleffect, worden de proeven op Baskarp zand beschouwd bij een relatieve dichtheid van 60-70%. In de medium-schaalproeven zijn dit proef 1 en 7. In beide proeven is terugschrijdende erosie opgetreden en zijn geen bijzonderheden te melden, waardoor het gevonden verval bij doorbraak onjuist zou kunnen zijn.

Baskarp zand is ook in de kleine-schaalproeven beproefd. In die proeven waren de vervallen bij doorbraak goed vergelijkbaar met het model van Sellmeijer. De proeven B35, B36 en B55 zijn geselecteerd als representatieve proeven uit deze proevenserie. In Tabel 5.1 zijn de eigenschappen van deze proeven weergegeven, waarbij H_exp het verval bij doorbraak is (het verval waarbij het kanaal de bovenstroomse en benedenstroomse zijde verbindt) en H_sel het kritieke verval volgens de regel van Sellmeijer. De gemeten doorlatendheid is hoger in de medium-schaalproeven dan in de kleine-schaalproeven (factor 2). Mogelijk wordt dit verschil veroorzaakt door verschil in weerstand in het systeem, onnauwkeurigheden in relatieve dichtheid, wandeffecten of benadering van doorstroomlengte.

Proef	Dr [-]	H_exp [cm]	H_sel [cm]	L [cm]	i_exp [-]	i_sel [-]	k [m/s]
B35	64	15	14	35	0,42	0,40	7,54E-05
B36	63	15	14	35	0,42	0,40	7,04E-05
B55	71.3	15	15	35	0,43	0,42	5,64E-05
Bms1	65	28	33	137	0,20	0,24	1,22E-04
Bms7	60	29	32	144	0,20	0,22	1,52E-04

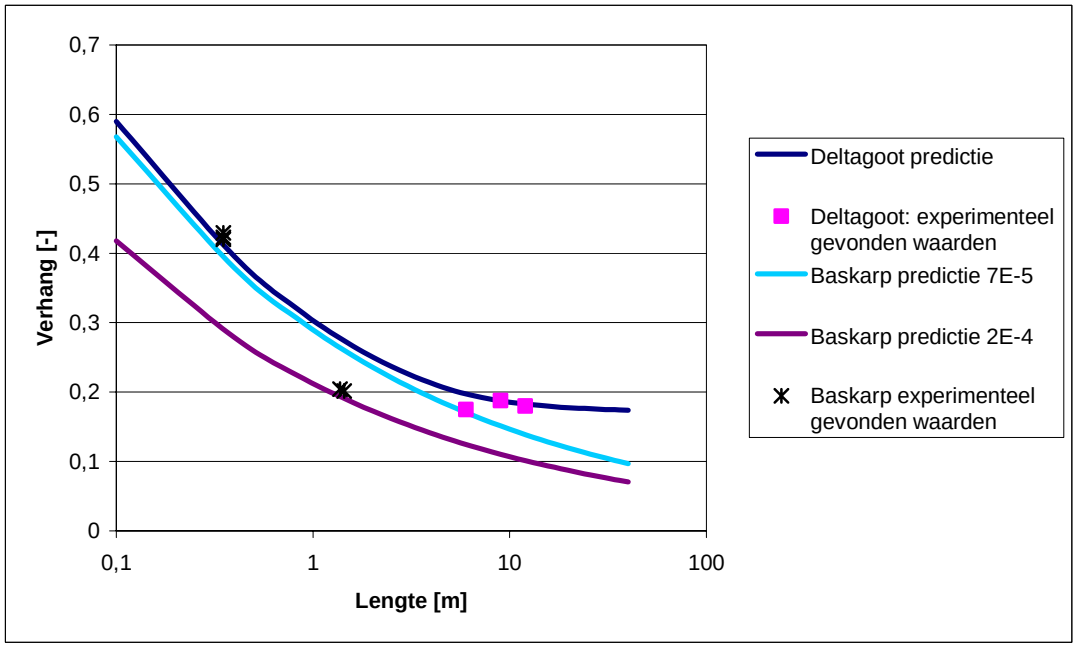
Tabel 5.1 Uitgevoerde proeven op Baskarp zand (Dr 60-75%)

Door het verschil in doorlatendheid is er een bandbreedte van mogelijke waarden van berekend kritiek verhang. In Figuur 5.1 zijn de experimenteel bepaalde verhangen bij doorbraak, de berekende kritieke vervallen op basis van de exacte doorlatendheid en de verwachte schalingslijn op basis van twee verschillende doorlatendheden (7E-5 m/s en 2E-4 m/s).



Figuur 5.1 *Vergelijking tussen experimentele data en theorie*

Uit de grafiek kan opgemaakt worden dat het model van Sellmeijer en de experimenten goed overeenkomen bij verschillende kwelweglengtes. Daarnaast kunnen als vergelijkingsmateriaal ook de Deltagootproeven [Silvis, 1991] toegevoegd worden om een beter idee te krijgen van schalingseffecten bij grotere lengtes. Opgemerkt wordt dat de regel van Sellmeijer gefit is op deze resultaten, wat betekent dat die resultaten per definitie kloppen met de regel van Sellmeijer. Hiertoe wordt nog een extra predictielijn van kritieke verhangen toegevoegd omdat de doorlatendheid en korrelgrootte van het zand in de Deltagoot afwijkt van de doorlatendheid en korrelgrootte van het zand in de kleine- en medium-schaalproeven.



Figuur 5.2 *Vergelijking tussen experimentele data (inclusief Deltagootproeven) en theorie*

De proeven in de Deltagoot hebben een andere geometrie dan de kleine- en medium-schaalproeven. De breedte- en dikteverhouding wijken af van de kleine- en medium-schaalproeven, maar deze verhouding is opgenomen in de regel, waardoor de predictielijn hiervoor is aangepast. Daarnaast hebben de proeven in de Deltagoot een sloot aan de benedenstroomse zijde, terwijl de medium-schaalproeven open zijn aan de uitstroomzijde. Er zijn daarom berekeningen gemaakt om vast te stellen of dit in afwijkingen resulteert met betrekking tot aanwezige verhangen (Appendix D).

Uit de berekeningen blijkt dat verschillen met name optreden bij het uittredepunt. Het verval bij het uittredepunt is hoger bij een situatie met sloot, dan bij een situatie zonder sloot. Echter zodra er een pipe gevormd is, nemen de verschillen tussen beide situaties af. Het begin van kanaalvorming is daarom niet vergelijkbaar, maar het kritiek verval zou wel vergelijkbaar moeten zijn voor beide proeven.

Op basis van de vergelijking tussen de berekende en gemeten kritieke vervallen in de proeven op Baskarp zand kan gesteld worden dat het schaaleffect op correct wijze is geïmplementeerd in het model. Voor zowel de kleine-schaalproeven als de medium-schaalproeven op Baskarp zand komt de voorspelling van het kritieke verhang goed overeen met de experimenteel gevonden waarde. Aangezien de rekenregel gefit is op de Deltagootproeven komt ook bij deze proef de voorspelde waarde goed overeen met de experimentele waarde.

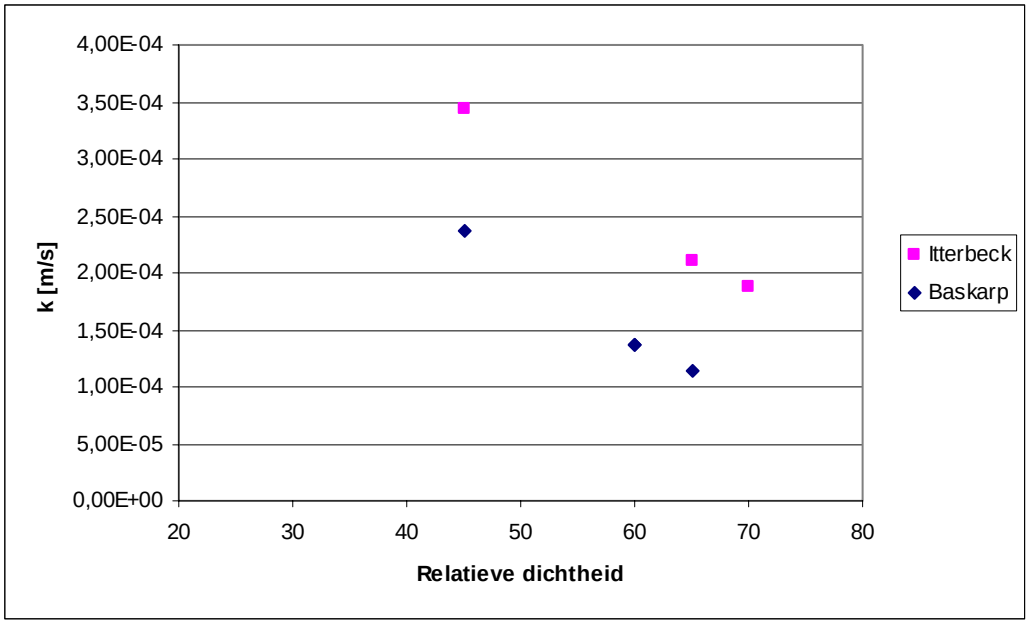
5.2 Invloed van zandeigenschappen op het pipingproces

Uit de kleine-schaalproeven is gebleken dat de relatieve dichtheid sterk van belang is voor het proces en dat de korrelgrootte juist minder van belang is dan op basis van het model van Sellmeijer wordt verwacht. Voordat een aanpassing in de rekenregel wordt gemaakt is het belangrijk dit op grotere schaal te toetsen. In de medium-schaalproeven zijn daarom proeven uitgevoerd op twee soorten zand, bij twee verschillende relatieve dichtheden.

5.2.1 Invloed van relatieve dichtheid

In de medium-schaalproeven zijn Baskarp zand en Itterbeck zand beproefd bij twee verschillende relatieve dichtheden, 50% en 75%. Doordat het wegen van de opstelling niet goed is verlopen (zoals omschreven in het factual report [Rietdijk, 2009]) is op basis van expert judgement, het aantal klappen waarmee het zand is verdicht en vergelijking met doorlatendheden de relatieve dichtheid vastgesteld. Om deze redenen zijn de proeven niet exact bij een relatieve dichtheid van 50 en 75% uitgevoerd. Zoals eerder vermeld zal proef Ims6 niet meegenomen worden in de analyse.

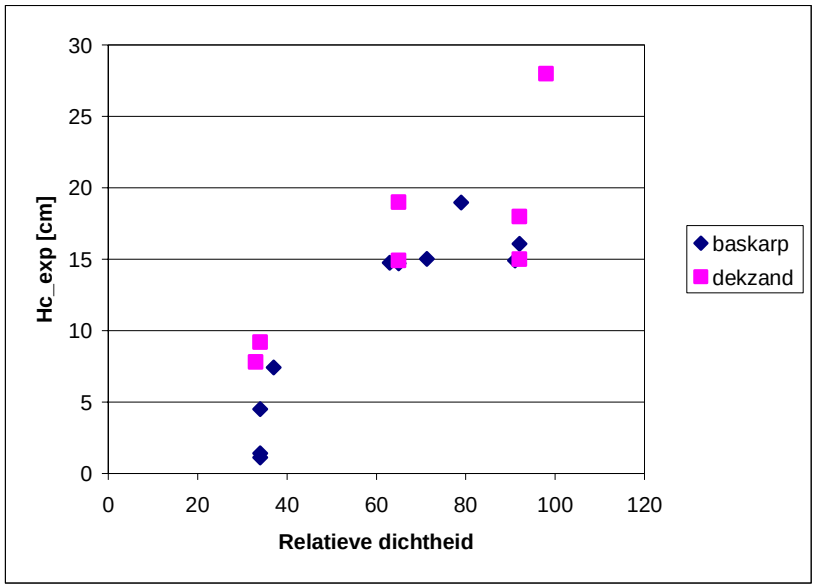
In Figuur 5.3 is de relatieve dichtheid uitgezet tegen de doorlatendheid voor beide zandsoorten.



Figuur 5.3 Relatieve dichtheid vs doorlatendheid

Doordat de relatieve dichtheid moeilijk te reguleren was, zijn twee proeven bij 45% relatieve dichtheid uitgevoerd in plaats van 50%. Bij de proef op Baskarp zand bij deze relatieve dichtheid (Bms8) begon het pipingproces aan de bovenstroomse zijde (displacement piping) (zie Tabel 2.2 voor het overzicht van proeven). Deze proef is om die reden niet bruikbaar voor de analyse voor de regel van Sellmeijer, omdat in deze fase alleen het terugtredende erosiemechanisme, zoals beschreven door de regel van Sellmeijer, wordt beschouwd (zie ook Paragraaf 1.2). Het ontbreken van bovenbelasting zou een oorzaak kunnen zijn voor het optreden van kanaalvorming aan de bovenstroomse zijde.

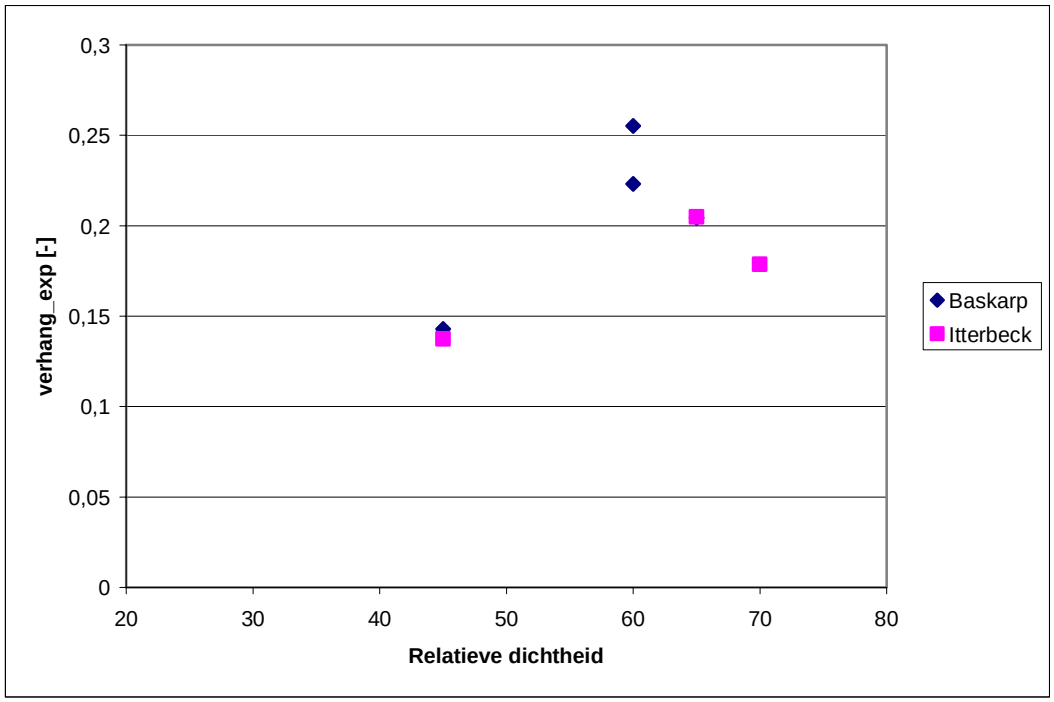
In de kleine-schaalproeven is gevonden dat de relatieve dichtheid invloed heeft op het proces dat op zou kunnen treden [Van Beek, Knoeff, 2009]. Bij middel- tot hoge relatieve dichtheid is terugschrijdende erosie gevonden. In deze proeven is geen eenduidige relatie gevonden tussen relatieve dichtheid en het kritiek verval. Bij lage relatieve dichtheden trad displacement piping op, waarbij zeer lage verhangen bij doorbraak werden gemeten. In Figuur 5.4 zijn de resultaten uit deze proevenserie nogmaals weergegeven. Wanneer de resultaten van de proeven bij zeer lage relatieve dichtheid niet in beschouwing worden genomen, is geen duidelijke trend zichtbaar.



Figuur 5.4 *Relatieve dichtheid uitgezet tegen het verval bij doorbraak in de kleine-schaalproeven [van Beek, Knoeff, 2009]*

In Figuur 5.5 zijn de experimentele verhangen bij doorbraak uitgezet tegen de relatieve dichtheid voor de twee zandsoorten uit de medium-schaalproeven. Het is opvallend dat de vervallen bij doorbraak voor de proeven bij 45% zeer laag zijn t.o.v. de vervallen bij hogere relatieve dichtheden. In de proef op Baskarp zand bij een relatieve dichtheid van 45% (Bms8) trad displacement piping op. In de proef op Itterbeck zand bij een relatieve dichtheid van 45% (Ims4) begon de kanaalvorming in het midden van de opstelling.

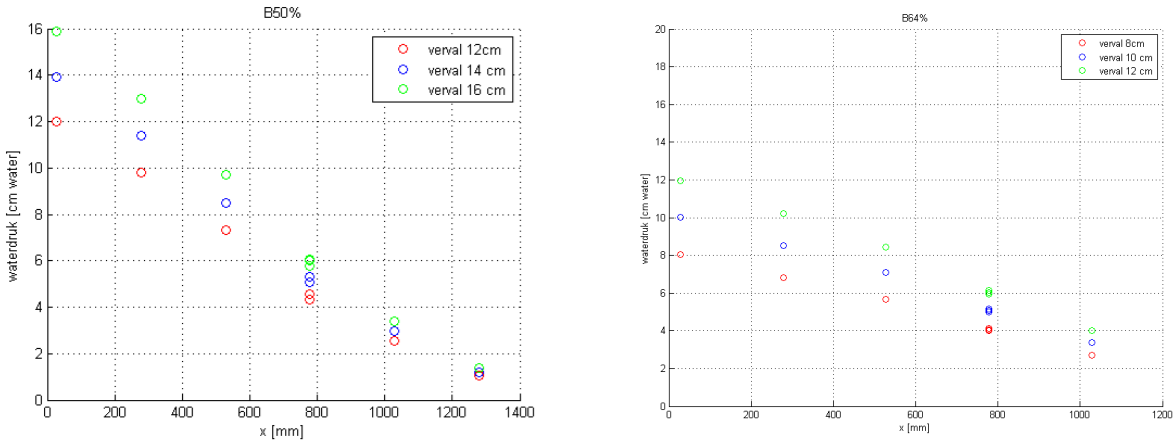
Zowel bij de kleine-schaalproeven als bij de medium-schaalproeven leidt het proces van forward erosion tot zeer lage verhangen bij doorbraak. In de medium-schaalproeven leidt ook het proces dat in het midden begint tot lage verhangen, dit was in de kleine-schaalproeven niet het geval.



Figuur 5.5 *Verhang bij doorbraak vs relatieve dichtheid voor beide zandsoorten*

Daarnaast is het opvallend dat er een groot verschil is in verhang bij doorbraak tussen de twee proeven uitgevoerd op Baskarp zand bij 60% relatieve dichtheid (Bms2 en Bms7), terwijl de bulk doorlatendheid van beide proeven gelijk is (zie Tabel 2.2 voor het overzicht van proeven).

Een mogelijke verklaring kan zijn dat de homogeniteit in proef Bms2 minder goed is dan in proef Bms7. Om de homogeniteit van de zanden te bekijken zijn de waterspanningen langs de lengte-as van de container uitgezet in een grafiek. Indien deze waterspanningen ongeveer op één lijn liggen, is het zandpakket homogeen. Bij een knik in de lijn zijn er verschillen in doorlatendheid of stromingspatroon. Er is een kleine knik te zien in de waterspanningen in proef Bms2, die niet te zien is in proef Bms7 (Figuur 5.6). Mogelijk zorgt de aanwezigheid van deze inhomogeniteit voor meer weerstand.

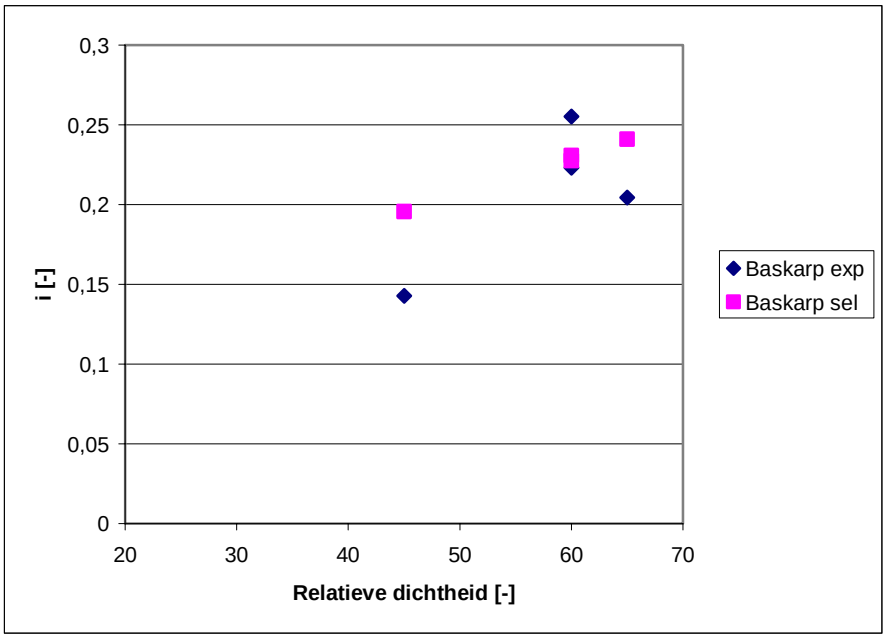


a) Bms2 b) Bms7

Figuur 5.6 *Waterspanningen uitgezet tegen de lengte-as van de container*

Wanneer de proeven bij een relatieve dichtheid van 45% buiten beschouwing worden gelaten, lijkt een negatieve trend te bestaan tussen het verhang bij doorbraak en de relatieve dichtheid. Vooralsnog is dit is echter niet logisch te verklaren. Een toename in relatieve dichtheid leidt tot een verlaging van de doorlatendheid en tot betere vastzetting van de korrels. Het is daarom niet logisch dat een verhoging van de relatieve dichtheid tot een verlaging van het verval leidt. Mogelijk is de nauwkeurigheid in het bereikte verval en de relatieve dichtheid niet groot genoeg om over zo een klein interval uitspraken te doen.

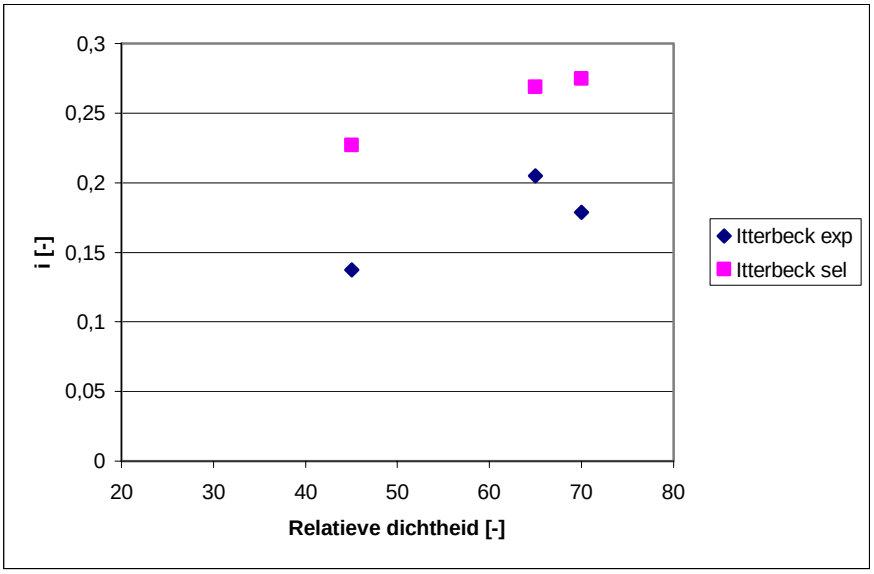
De resultaten van de experimenten zijn vergeleken met de predicties van het model van Sellmeijer. Doordat de doorlatendheid in het model van Sellmeijer is verwerkt, neemt het berekende kritiek verval toe met relatieve dichtheid. Wanneer proef Bms8 (proef bij 45% relatieve dichtheid) niet wordt beschouwd in de analyse, omdat in deze proef forward erosie is opgetreden, is deze relatie niet zichtbaar in de experimentele data Figuur 5.7). De verandering van beddinghoek ten gevolge van verandering van relatieve dichtheid is niet meegenomen in deze analyse.



Figuur 5.7 *Vergelijking verhang bij doorbraak en kritiek verhang voor Baskarp zand*

Bij de proeven op Itterbeck zand valt op dat alle experimenteel bepaalde verhangen bij doorbraak lager zijn dan de predicties. In de volgende paragraaf zal hier nader op ingegaan worden. Het is de vraag in hoeverre de proef bij 45% relatieve dichtheid in beschouwing moet worden genomen, omdat in deze proef de kanaalvorming in het midden begon, in plaats van (bijna) benedenstrooms, zoals in de overige proeven.

Wanneer deze proef wordt meegenomen, lijkt de trend van predictie enigszins overeen te komen met de experimentele waarden. Wanneer deze proef niet wordt meegenomen, komt net als bij de proeven op Baskarp zand, de trend van predictie niet helemaal overeen met de experimentele waarden.



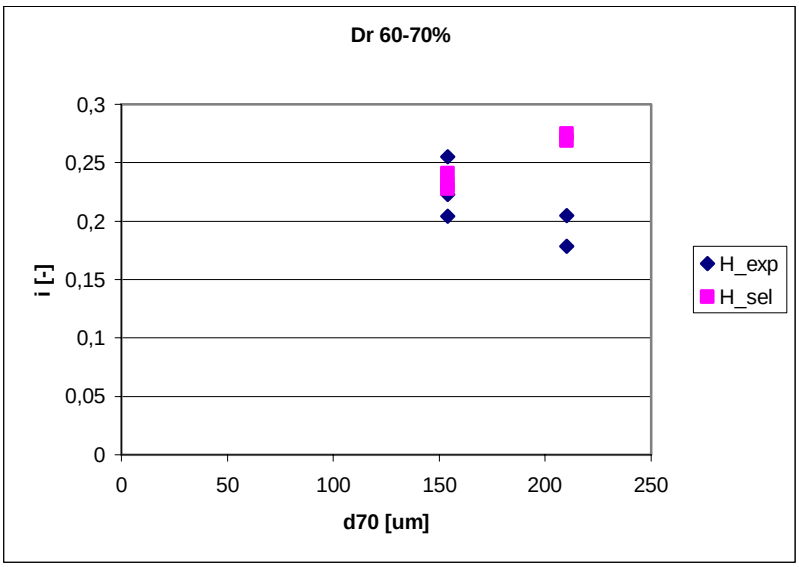
Figuur 5.8 Vergelijking verhang bij doorbraak en kritiek verhang voor Itterbeck zand

5.2.2 Korrelgrootte

De korrelgrootte, waarvoor de d70 als representatieve waarde is genomen in het model van Sellmeijer, is lineair aanwezig in de regel. In de kleine-schaalproeven is deze afhankelijkheid niet zo sterk teruggevonden.

De d70 van Baskarp en Itterbeck zand zijn respectievelijk 0.154 en 0.210mm. In Figuur 5.9 zijn de experimenteel gevonden verhangen bij doorbraak weergegeven voor de proeven tussen 60 en 75% relatieve dichtheid.

Het is opvallend dat de experimentele waarden en predicties beter overeenkomen voor Baskarp zand dan voor Itterbeck zand. Deze trend komt enigszins overeen met de bevindingen van de kleine-schaalproeven, waarbij grovere zanden sterker afwijken dan fijnere zanden.

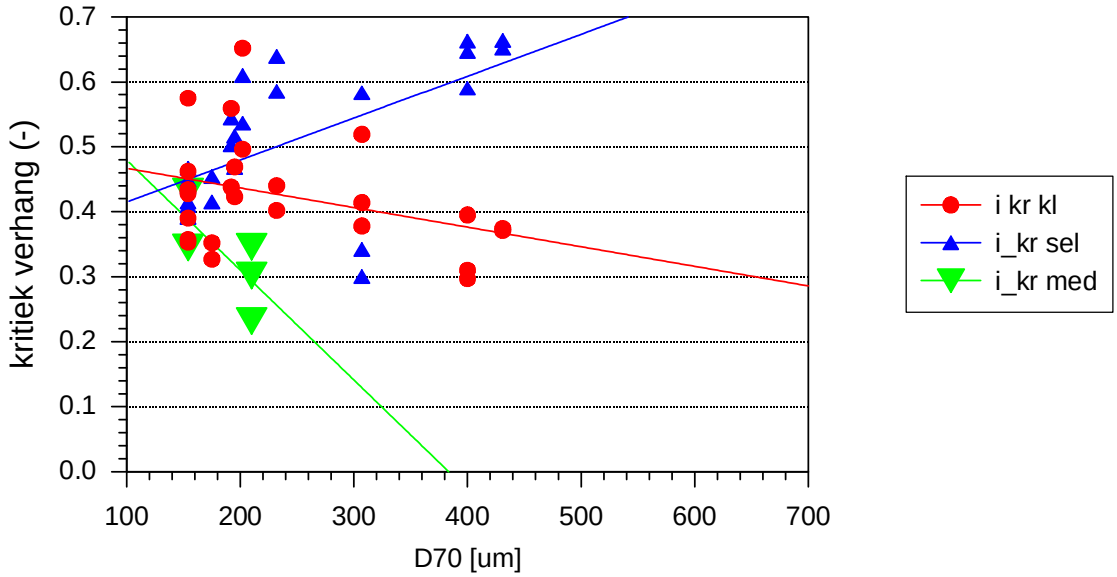


Figuur 5.9 *Vergelijking verhang bij doorbraak en kritiek verhang in relatie tot korrelgrootte*

Uit vergelijking van de medium-schaalproeven met de resultaten van de multivariate analyse, die uitgevoerd is op de resultaten van de kleine-schaalproeven [Knoeff, 2009], zal moeten blijken of de invloed van korreldiameter in beide proevenseries gelijk is. In deze multivariate analyse is de invloed van verschillende parameters, zoals korreldiameter, doorlatendheid en uniformiteit, op het pipingproces bepaald. Een aangepaste rekenregel is opgesteld naar aanleiding van deze analyse. Door de aangepaste rekenregel toe te passen op de resultaten van de medium-schaalproeven kan vastgesteld worden of de invloed van korreldiameter correct is verwerkt.

Op dit moment kan een vergelijking gemaakt worden tussen de trends in beide proevenseries, maar kan niet met zekerheid vastgesteld worden, wat de invloed van korreldiameter alleen is, omdat naast de korreldiameter ook de doorlatendheid varieert. Een zand zoals Itterbecke 125-250 is niet getest in de kleine-schaalproeven. De doorlatendheid van dit zand is relatief hoog, omdat het een gezeefde fractie betreft in de range 125-250 µm. Hierdoor heeft het zand geen fijne staart en een grotere uniformiteit dan natuurlijke zanden met dezelfde d70.

In Figuur 5.10 is voor beide proevenseries het verhang bij doorbraak uitgezet tegen de korreldiameter (i kr kl en i kr med), evenals het voorspelde kritieke verhang voor de kleine-schaalproeven (i kr sel). Hoewel geen goede vergelijking kan worden gemaakt tussen beide series is het opvallend dat beide proevenseries een negatieve trend laten zien, wat niet overeenkomt met huidige ideeën.



Figuur 5.10 *Kritiek verhang en verhang bij doorbraak van zowel medium-schaalproeven (i_kr med) als kleine-schaalproeven (i_kr kl), uitgezet tegen de korreldiameter*

5.3 Samenvatting

In dit hoofdstuk is een analyse gemaakt met betrekking tot de invloed van eerder relevant bevonden zandkarakteristieken op het pipingproces.

Samengevat kan gesteld worden dat:

- voor de proeven op Baskarp zand het schaaleffect, zoals aanwezig in het model van Sellmeijer, goed blijkt te kloppen. Voor zowel de kleine-schaalproeven als de medium-schaalproeven op Baskarp komt de voorspelling van het kritieke verhang goed overeen met de experimenteel gevonden waarde. Aangezien de rekenregel gefit is op de Deltagootproeven komt ook bij deze proef de voorspelde waarde goed overeen met de experimentele waarde.
- Bij lage relatieve dichtheden (45%) een ander proces optreedt, overeenkomstig met het proces gevonden in de kleine-schaalproeven bij lage relatieve dichtheden. Het ontbreken van bovenbelasting is hier mogelijk debet aan. De gevonden vervallen bij doorbraak in deze proeven zijn lager dan de predicties met de regel van Sellmeijer. Ook dat is in de proeven op kleine schaal waargenomen.
- er geen verklaring is gevonden voor de relatie tussen relatieve dichtheid en kritiek verval. Mogelijk is nauwkeurigheid van relatieve dichtheid en verval bij doorbraak onvoldoende om uitspraken te doen over deze relatie.
- De predicties en experimenteel gevonden verhangen meer afwijken voor Itterbeck zand dan voor Baskarp zand.
- In de kleine-schaalproeven is vastgesteld dat de relatie tussen korreldiameter en verval bij doorbraak anders is dan verwacht op basis van de regel van Sellmeijer. Waar Sellmeijer een positieve trend voorspelt: met toenemende korrelgrootte neemt ook het kritieke verhang toe, werd in de medium-proeven een negatieve trend gevonden: het verhang bij doorbraak neemt af met toenemende korreldiameter. Op basis van deze proeven lijkt de invloed van korrelgrootte kleiner te zijn dan verwacht. Mogelijk is dit ook bij de medium-schaalproeven het geval. In de medium-schaalproeven neemt ook het verhang bij doorbraak af met toenemende korreldiameter.

Uit vergelijking met de multi-variate analyse dient te worden vastgesteld of de invloed van korreldiameter in beide proeven gelijk is.

6 Monitoringstechnieken

Het is de intentie om de validatie van de nieuwe rekenregel plaats te laten vinden in een full-scale proef op de locatie van de IJkdijk. In deze full-scale proef zal het zandpakket niet afgedekt zijn met een transparante plaat, maar met een kleipakket. Het is ook in deze proef belangrijk om vast te stellen of piping optreedt en waar piping optreedt. Voor deze full-scale proef is het daarom van belang om over monitoringstechnieken te beschikken waarmee het pipingproces gevolgd kan worden. Er is echter weinig ervaring met het detecteren van pipingkanalen op basis van monitoringstechnieken.

In de medium-schaalproeven zijn daarom verschillende monitoringstechnieken beproefd. Specifieke vragen bij deze doelstelling zijn:

- Kan er een inschatting gemaakt worden van de locatie, afmetingen en beweegrichting van het kanaal?
- Op welke afstand van een sensor is (de invloed van) een kanaal zichtbaar?

In de opstelling zijn de volgende monitoringstechnieken toegepast:

- Debiet;
- waterspanning in de bodem van de container;
- Sensoren van Alert Solutions in de monitoringsplaat:;
  - Temperatuur;
  - Waterspanning.

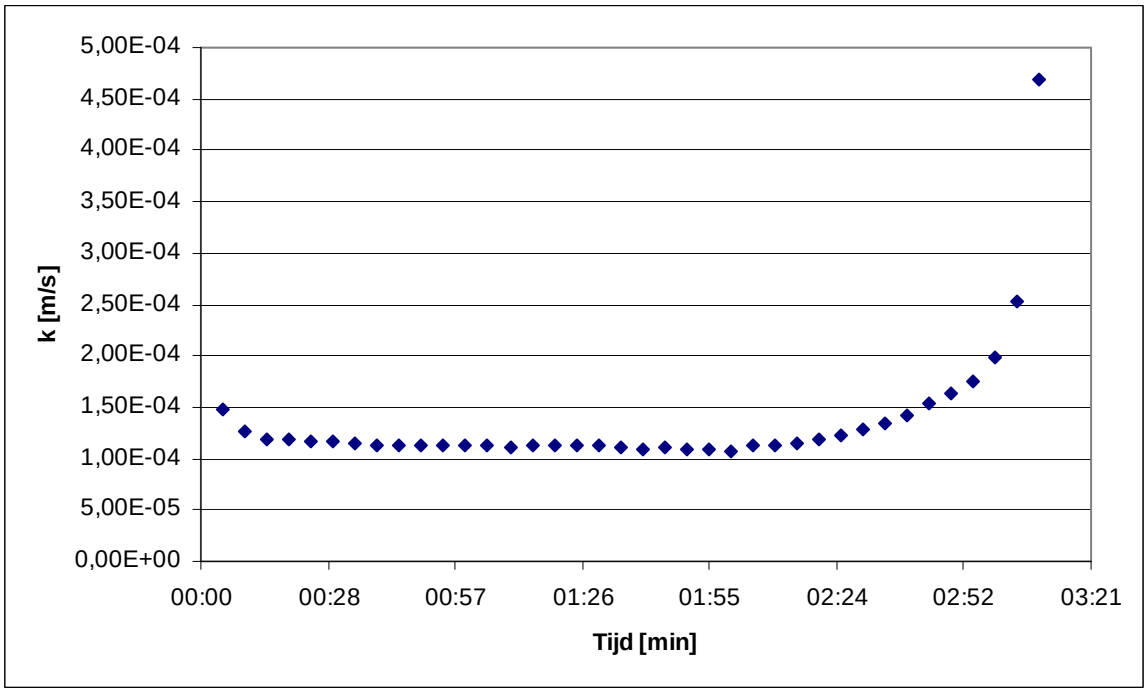
Uiteindelijk kunnen de resultaten van deze proeven en de full-scale proef leiden tot bepaling van geschiktheid van monitoringstechnieken voor preventie van falen ten gevolge van piping in de praktijk. Dit geldt met name voor de waterspanningsmetingen en de technieken van Alert Solutions.

6.1 Debiet

Tijdens de proeven is iedere vijf minuten een debietmeting uitgevoerd. Het is mogelijk dat ten gevolge van kanaalvorming de bulk-doorlatendheid toeneemt. Tijdens de beoogde full-scale proef kan het debiet ook gemeten worden. In de praktijk is dit echter niet haalbaar.

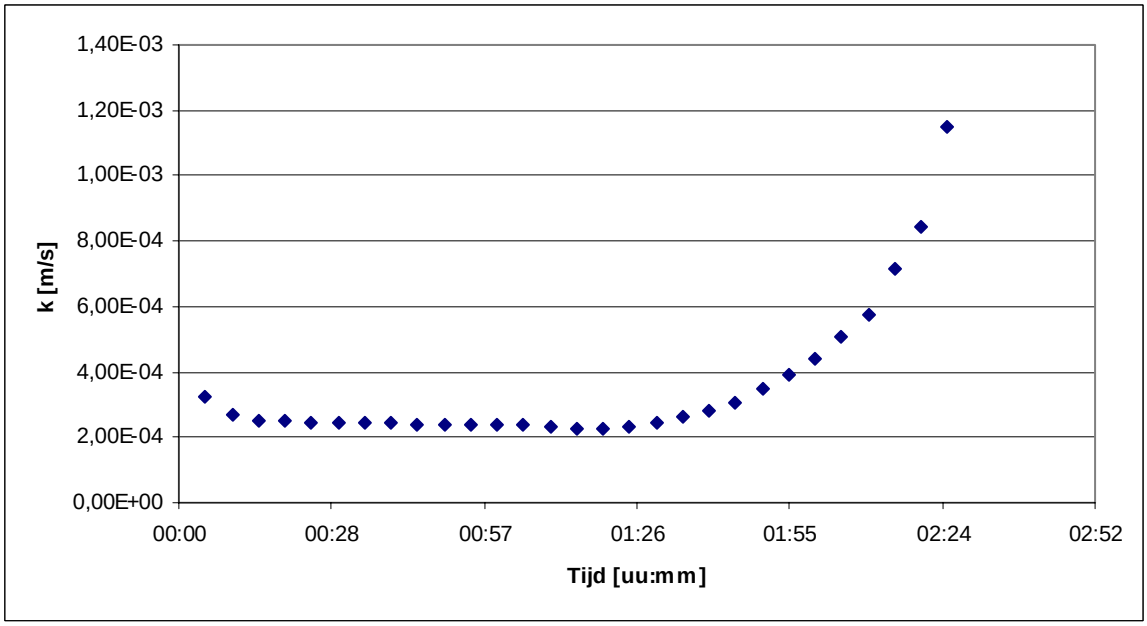
Op basis van de debietmetingen tijdens de medium-schaalproeven is de bulk doorlatendheid berekend, welke is weergegeven voor de eerste proef in Figuur 6.1. In deze figuur is te zien dat vanaf tijdstip 2.05u verandering in de doorlatendheid optreedt. Vanaf ongeveer 1 uur is er echter al kanaalvorming opgetreden. Vanaf 2.05u heeft het kanaal de benedenstroomse rand bereikt, waardoor het kanaal een connectie maakt met het uittreepunt. Op dit moment waren er echter al meerdere kanalen zichtbaar.

De daling van doorlatendheid aan het begin van de proef is te relateren aan kleine verschillen tussen aangebracht verval en werkelijk verval over het zand. Bij lage vervallen is deze meetfout van invloed op de doorlatendheid. Bij hoge vervallen wordt deze invloed steeds kleiner.



Figuur 6.1 Bulk doorlatendheid in de tijd (proef Bms01)

Om te vergelijken of een ander proces wel zichtbaar is in de doorlatendheid is dezelfde grafiek gemaakt voor proef Bms8. In proef Bms8 is forward erosion opgetreden. Aangezien dit proces bijna aan de bovenstroomse zijde begint, is er mogelijk al eerder verandering in doorlatendheid. In deze proef is er vanaf 1:25u verandering in doorlatendheid te zien. Om 1:10u is er echter al kanaalvorming waargenomen. Vanaf 1:20 heeft het kanaal de bovenstroomse zijde bereikt. Vanaf 2:00 is er sprake van kortsluiting tussen boven- en benedenstrooms.



Figuur 6.2 Bulk doorlatendheid in de tijd (proef Bms08)

Samengevat kan gesteld worden dat een kanaal zichtbaar wordt in het debiet zodra een kanaal van enige lengte de bovenstroomse of benedenstroomse zijde bereikt. Het debiet geeft echter geen informatie over de groeirichting.

6.2 Waterspanning

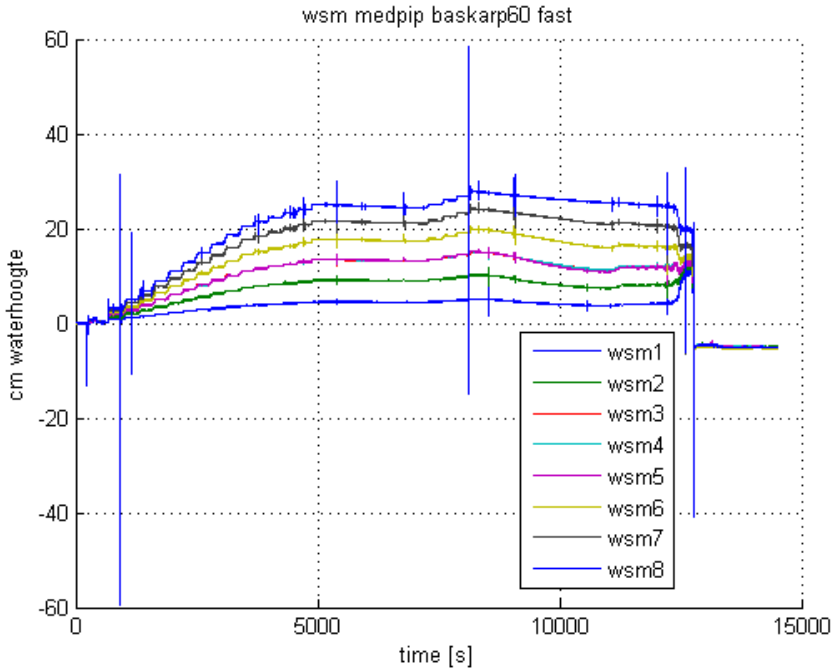
In de kleine-schaalproeven is al vastgesteld dat waterspanningen worden beïnvloed door kanaalvorming. De waterspanningen zijn met conventionele waterspanningsmeters gemeten op de bodem van de container. Aangezien de diepte van de container 0.40m is, wordt de invloed van de kanaalvorming op een minimale afstand van ca. 35 cm gemeten.

De waterspanningsmetingen kunnen op twee manieren geïnterpreteerd worden, als absolute waarden en als verhang. Voor een tweetal proeven is deze analyse uitgevoerd. Dit betreffen proef Bms1 en proef Bms8 (voor het overzicht van proeven, zie Tabel 2.2). In de laatste proef is forward erosion opgetreden. Deze proef is gekozen om de invloed van verschillen tussen beide processen op de waterspanning weer te geven.

6.2.1 Absolute waterspanningen

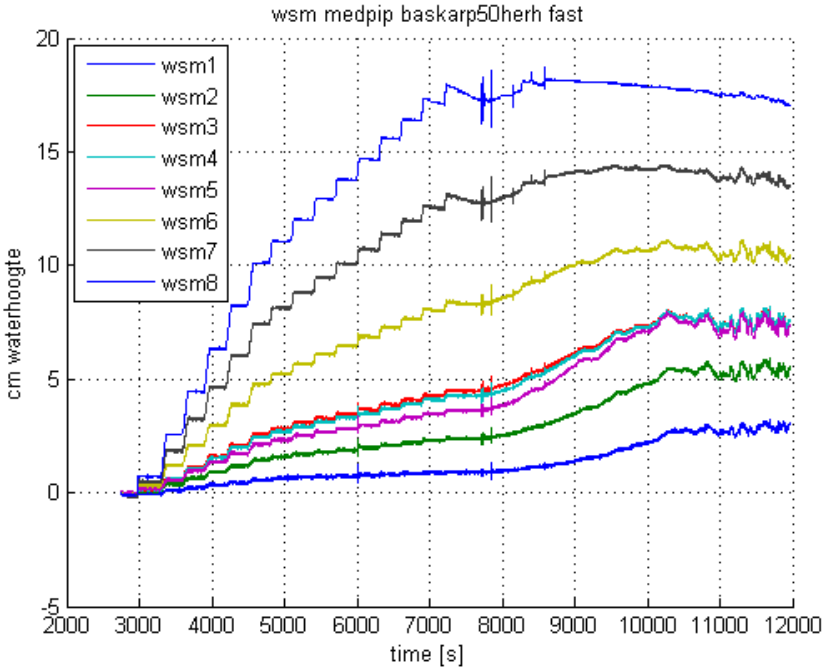
De absolute waterspanningen zijn uitgedrukt in cm water t.o.v. het uitstroomniveau (voor de locaties van waterspanningsmeters wordt verwezen naar Appendix B). In Figuur 6.3 en Figuur 6.4 zijn deze weergegeven voor proef Bms1 en proef Bms8. In deze grafieken is zeer goed te zien wanneer het verval verhoogd wordt.

In proef Bms1 startte de kanaalvorming na ca. 3700 s. Dit is echter niet te zien in de waterspanningen. Ook na verhoging van het verval, waarna opnieuw kanaalvorming optreedt, is geen verandering in de waterspanningen waar te nemen. Na verdere verhoging van het verval (na ca. 8000 s) treedt opnieuw kanaalvorming op, ditmaal echter op meerdere plekken in het zand. Dit is te zien als een algehele afname in alle waterspanningen. Het ruimproces is zeer goed zichtbaar, de waterspanningen worden ongeveer gelijk aan elkaar.



Figuur 6.3 Waterspanningen uitgezet tegen de tijd (proef Bms1)

In proef Bms8 is ook het aanbrengen van het verval zeer goed zichtbaar. Vanaf 7200 seconden is een afname in de waterspanningsmeters aan de bovenstroomse zijde (wsm 7 en 8) zichtbaar, overeenkomend met het moment dat een kanaal ontwikkelde die van de bovenstroomse naar de benedenstroomse zijde groeide. De fluctuaties aan het einde van de proef duiden mogelijk op drukop- en afbouw ten gevolge van zandtransport.



Figuur 6.4 Waterspanningen uitgezet tegen de tijd (proef Bms8)

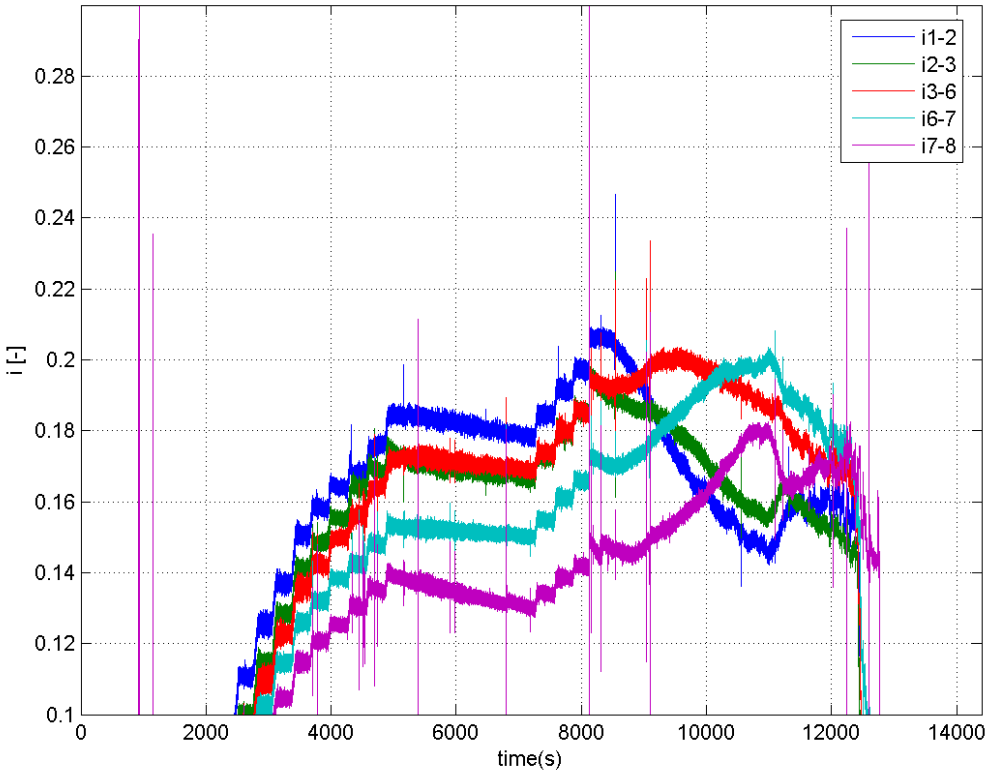
Samengevat kan gesteld worden dat kanalen niet altijd zichtbaar zijn als afwijkingen in de waterspanning. Een geleidelijke verandering in de waterspanning kan een indicatie zijn voor het groeien van (meerdere) kanalen.

6.2.2 Verhang

Op basis van de waterspanningsmetingen kan het verhang worden berekend over verschillende intervallen in het zandpakket. De verhangen zijn berekend over opnemer 1-2, 2-3, 3-6, 6-7 en 7-8. Voor de locaties van de opnemers wordt verwezen naar Appendix B. Opnieuw zijn proef Bms1 en Bms8 als te vergelijken proeven gekozen.

In Figuur 6.5 is het verhang uitgezet tegen de tijd voor proef Bms01. Net als bij de absolute waterspanningen is de kanaalvorming die optreedt vanaf 3700 s niet zichtbaar in de metingen. Alle opnemers vertonen een geleidelijke afname van verhang in deze periode, in het bijzonder aan de bovenstroomse zijde.

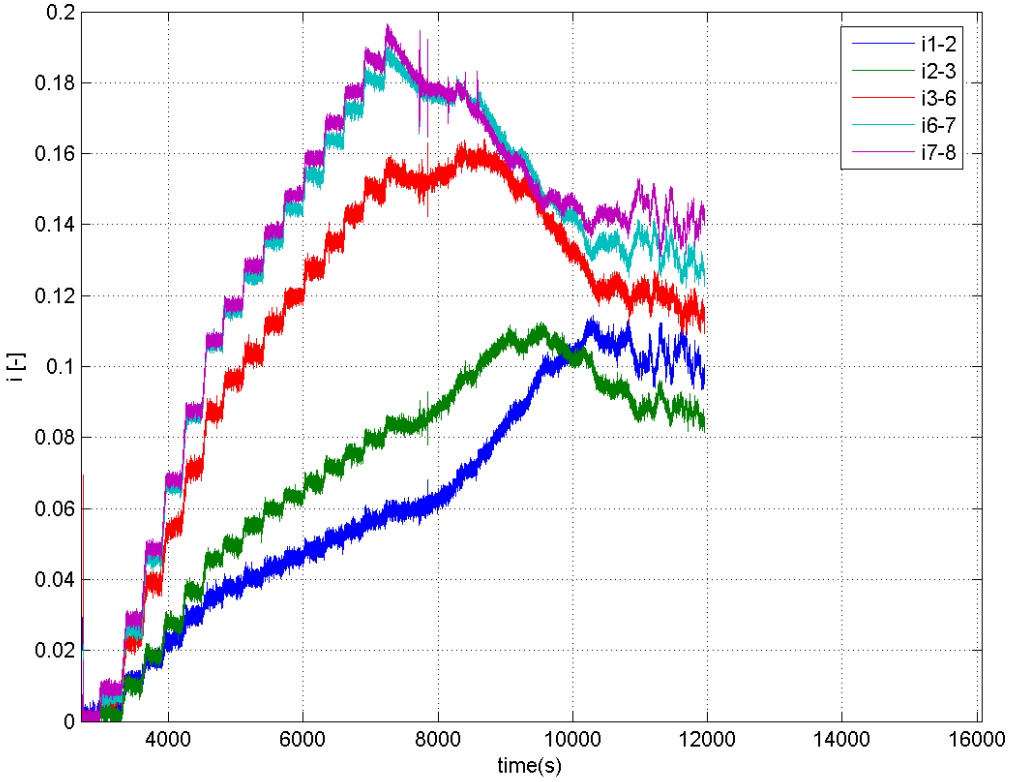
In de periode van 8000 tot 11000 s is wel duidelijk verandering in het verhang zichtbaar ten gevolge van kanaalvorming. Er vindt achtereenvolgens een toename en afname van verval plaats in de tijd. Deze toename en afname zijn eerst te zien bij opnemer 1-2 en 2-3, vervolgens bij opnemer 3-6 en ten slotte bij opnemer 6-7 en 7-8. De piek treedt in de tijd dus steeds verder bovenstrooms op. Visueel is in deze periode terugschrijdende kanaalvorming waargenomen. De richting van kanaalvorming en metingen lijken dus goed overeen te komen.



Figuur 6.5 Verhang uitgezet tegen de tijd (proef Bms1)

Voor proef Bms08 is ook het verhang geplot in de tijd (Figuur 6.6). In deze proef is een vrij groot verschil aanwezig tussen het verhang over de opnemers benedenstrooms en de opnemers bovenstrooms. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt door het niet geheel aanliggen van het zand tegen de plaat aan de benedenstroomse zijde.

In deze proef neemt het verhang af bij de bovenstroomse opnemers vanaf 7200 s, terwijl het verhang toeneemt bij de benedenstroomse opnemers. Een kleine piek in het verhang is achtereenvolgend te zien tussen opnemer 3-6, 2-3 en 1-2. Uit de visuele waarnemingen blijkt dat vanaf 7200 s een kanaal ontwikkelde die van de bovenstroomse naar de benedenstroomse zijde groeide. De volgorde van pieken in het verhang komt dus overeen met de groeirichting van het kanaal.



Figuur 6.6 Verhang uitgezet tegen de tijd (proef Bms8)

Samengevat kan gesteld worden dat kleine kanaaltjes langs de zijwand van de bak niet zichtbaar zijn in de waterspanningen. De afstand tot deze kanaaltjes bedraagt ca. 0.50 m. Wanneer er meerdere kanalen ontstaan, waardoor het stromingspatroon beïnvloed wordt is dit zichtbaar in de metingen, met name in het verhang. De groeirichting kan vastgesteld worden op basis van de waterspanningsmetingen.

6.3 Sensoren Alert Solutions

In het deksel van de opstelling is een extra plaat aangebracht om sensoren te testen die mogelijk ook in een full-scale proef gebruikt kunnen worden om het pipingproces te detecteren. Alert Solutions heeft temperatuursensoren en waterspanningsmetingen aangeleverd om de invloed van piping op temperatuur en waterdruk te testen.

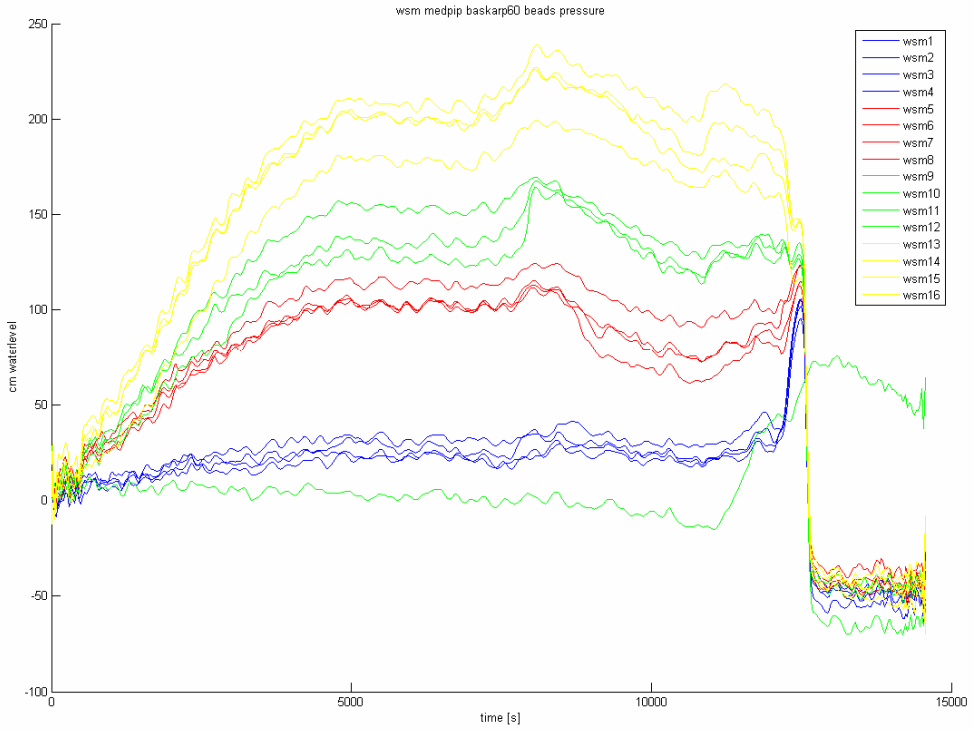
6.3.1 Waterspanning

In de eerste proef (Bms1) werkten alle opnemers goed. In de tweede proef is vocht bij de opnemers gekomen waardoor zowel waterspanningsmeters en temperatuurmeters niet allemaal meer werkten. Dit is veroorzaakt door lekkage bij de aansluiting op de Perspex plaat. In een veldsituatie worden opnemers ingegoten in epoxy, waardoor de kans op lekkage nihil is. In deze proef is dat echter niet gedaan om de opnemers te kunnen verwijderen in geval van schade.

De eerste proef is daarom als representatief genomen.

De locaties van de opnemers zijn weergegeven in Appendix B.

De ruwe data vertonen sterke fluctuaties. Dit heeft te maken met de korte uitleestijd die in deze proeven aangehouden is. De data is daarom bewerkt met een Bezier-fit (een filter, gelijkend op moving average), om de ruis te verwijderen. In Figuur 6.7 zijn de waterspanningen (van de bewerkte data) in de tijd weergegeven voor de eerste proef.

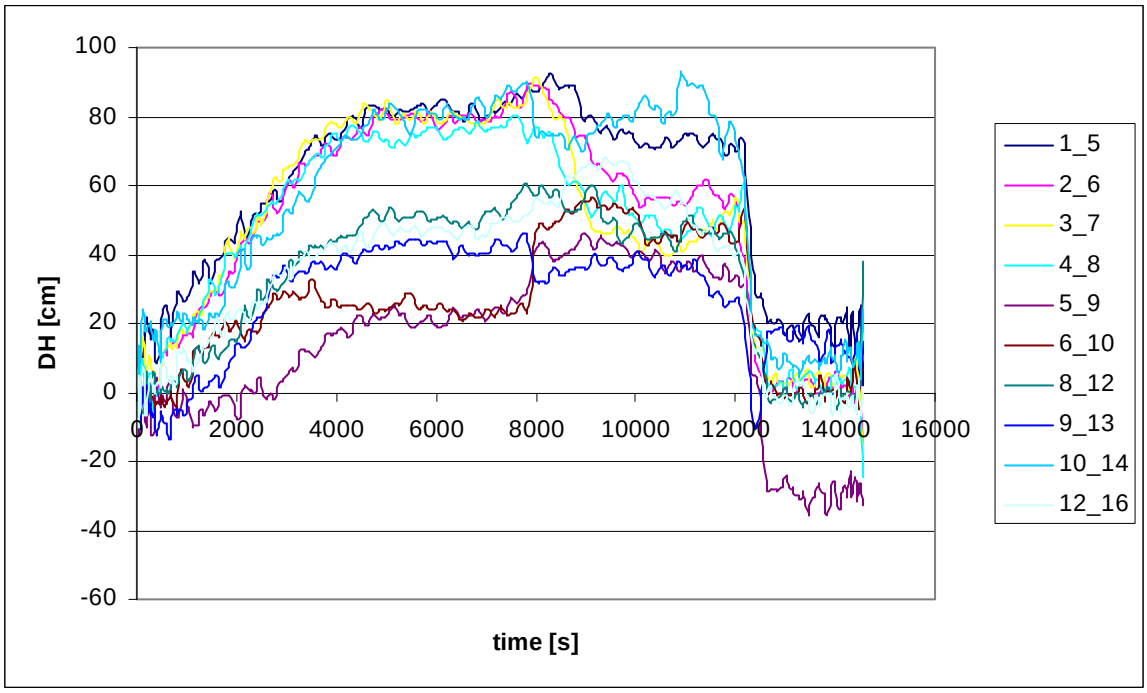


Figuur 6.7 Waterspanningen in de tijd (proef Bms1)

Door een combinatie van nauwkeurigheid van de opnemers, sterke fluctuaties en de bewerking zijn de verschillende stappen van ophoging niet duidelijk meer te zien. Wel is te zien dat opnemers in vier verschillende rijen zijn geplaatst en dat de waterdruk afneemt per rij. Opnemer 11 lijkt na verlijming in de perspex plaat niet meer goed te functioneren. Waarschijnlijk is tijdens montage lijm in de drukopnemer gevloeid, waardoor deze is afgedicht.

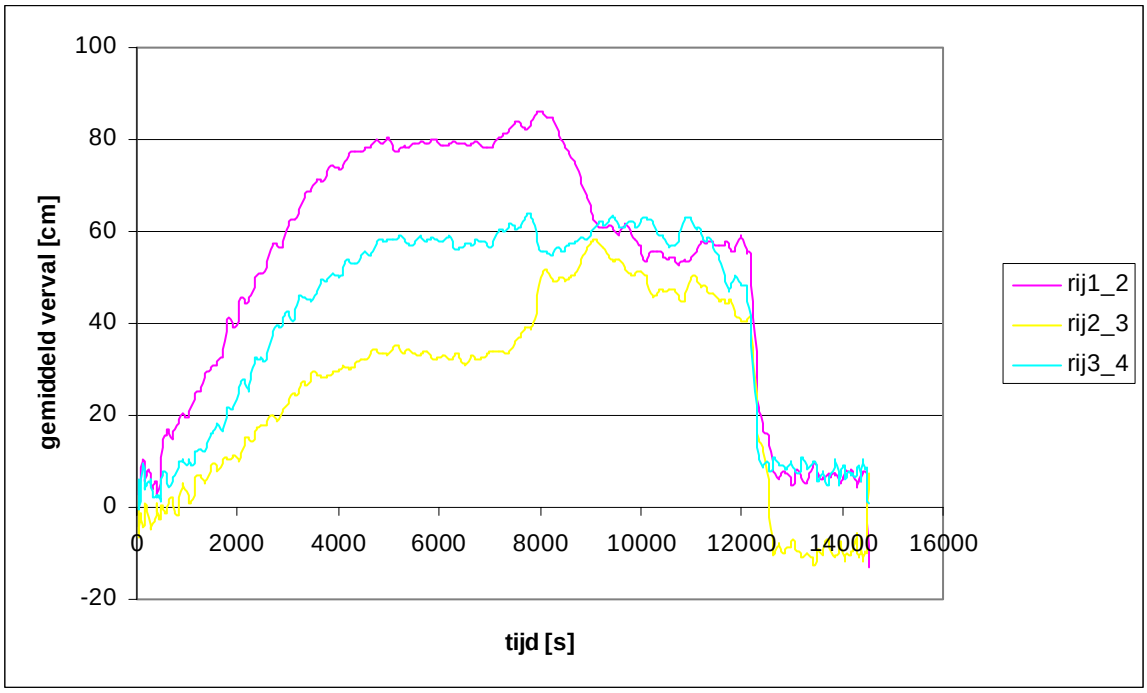
In de proef is waargenomen dat vanaf ca. 3700 s kanaalvorming optrad. Deze kanaalvorming is in geen van de opnemers zichtbaar. Vanaf ca. 7000 s is een verandering waar te nemen in de waterspanningsmeters, dit komt overeen met het aanbrengen van extra centimeters verval. Vervolgens nemen de waterspanningen af. Dit komt overeen met de visuele waarneming, er zijn vanaf ca. 8000 s verschillende kanalen waargenomen. Uit deze figuur is echter niet af te leiden waar de kanaalvorming plaatsvindt.

In Figuur 6.8 is het verval tussen de verschillende rijen geplot. Opnemer 11 is hierbij buiten beschouwing gelaten. Vanaf ca. 3000 s is er een afwijking in het verval te zien tussen opnemer 6 en 10. Dit komt echter niet overeen met het ontstaan van een kanaal. Vanaf 8000 s zijn er duidelijk veranderingen te zien in het verval, duidend op kanaalvorming.



Figuur 6.8 Verval uitgezet tegen de tijd (proef Bms1)

Om de data overzichtelijker weer te geven is ook het verval berekend tussen de gemiddelden per rij (Figuur 6.9). Deze middeling zorgt voor minder fluctuatie in de data. Uit deze data is af te leiden dat een piek, gevolgd door een daling van de waterspanning eerst tussen rij 1 en 2 (opnemer 1t/m4 en opnemer 5t/m9) optreedt, vervolgens tussen rij 2 en 3 (opnemer 5t/m8 en opnemer 9t/m12) en ten slotte tussen rij 3 en 4 (opnemer 9t/m12 en opnemer 13t/m16). In de proef is er in deze periode terugschrijdende erosie waargenomen. De veranderingen in het verhang en de groeirichting van het kanaal komen goed overeen. Het is de verwachting dat een grotere nauwkeurigheid van de waterspanningsmeters tot meer informatie kan leiden.



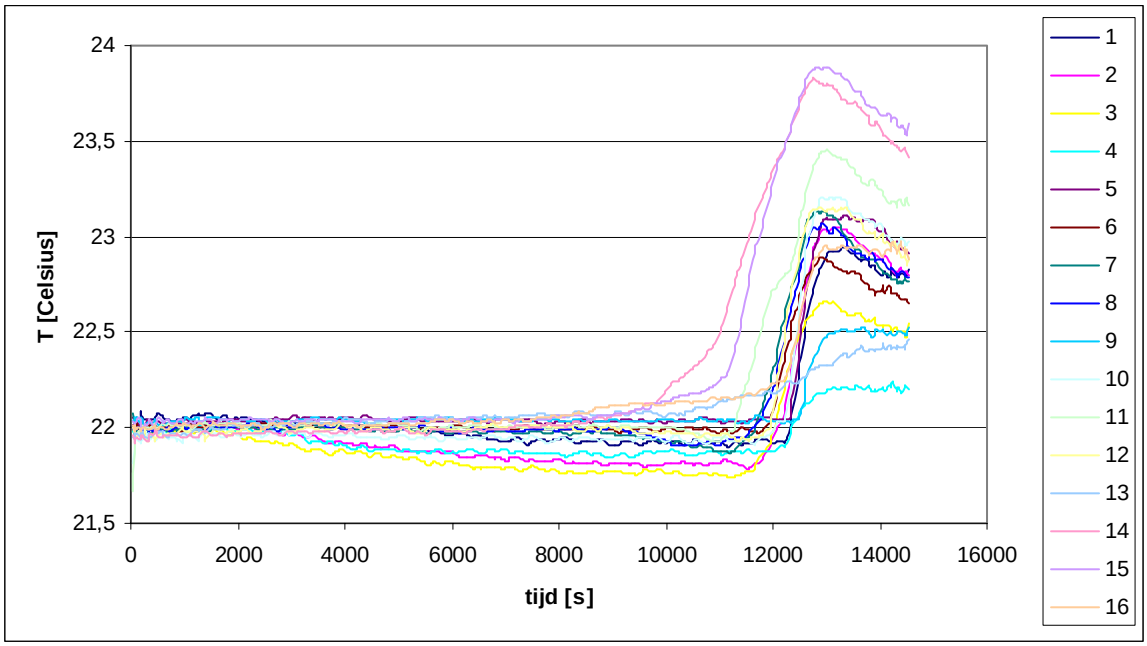
Figuur 6.9 Verval tussen rijen van opnemers

6.3.2 Temperatuur

Naast waterspanning is er ook temperatuur gemeten gedurende de proef. Temperatuur kan een indicatie zijn voor de vorming van kanalen indien er verschil aanwezig is tussen de temperatuur van het instromend water en het water in de poriën van het zand. Naar verwachting is de stroomsnelheid in een gevormd kanaal groter dan de stroomsnelheid door de poriën. Als het instromende water een hogere temperatuur heeft dan het aanwezige grondwater, dan kan, door de hogere stroomsnelheid in het kanaal, een temperatuurverschil ontstaan tussen het kanaal en zijn omgeving. Op deze manier kunnen kanalen zichtbaar worden gemaakt door het meten van temperatuur.

De locaties van de temperatuursensoren zijn vrijwel gelijk aan die van de waterspannings-meters (zie Appendix B). Omdat de data sterke fluctuaties vertoonden, is getracht om met een Bezier-fit (filtermethode vergelijkbaar met moving average) de ruis te verminderen. Tevens is de begintemperatuur voor alle opnemers gelijk gesteld, zodat veranderingen in temperatuur toegeschreven kunnen worden aan verschillen in stroomsnelheid.

In Figuur 6.10 is het verloop van de temperatuur in de tijd weergegeven voor proef Bms1. In deze proef is de temperatuur van het instromende water hoger dan de temperatuur van het water in het zand. De verschillen zijn in de ordegrootte van enkele graden. Dit verschil in temperatuur is niet bewust aangebracht.



Figuur 6.10 Temperatuur uitgezet tegen de tijd (proef Bms1)

Opvallend is het feit dat vanaf ca. 2000 s de temperatuur in de meest benedenstroomse rij begint af te nemen. In deze opnemers neemt de temperatuur gedurende de proef steeds verder af. Dit zou overeen kunnen komen met kanaalvorming wat volgens de visuele waarnemingen in deze proef inderdaad ongeveer bij deze rij begint. Het is echter onduidelijk hoe de vorming van kanalen tot een verlaging van de temperatuur kan leiden.

Een mogelijke verklaring voor de temperatuurverlaging zou te maken kunnen hebben met verschil in temperatuur in de diepte van het zandbed. Het is mogelijk dat het water in de container onderin iets kouder is dan aan het bovenoppervlak (tegen de acrylaat plaat). Zodra er kanaalvorming ontstaat is de stroming groter aan het bovenoppervlak dan beneden in de bak (waar deze enigszins beperkt wordt door het benedenstroomse filterschot). Ten gevolge hiervan wordt kouder water uit de bak omhoog gestuwd. Dit geeft aan het oppervlak een temperatuurverlaging. Bij een laag doorstroomvolume vloeit kouder water benedenstrooms weg en wordt warmer water aan de bovenstroomse zijde aangevoerd. Pas als er een doorlopend kanaal is gevormd langs het oppervlak, bereikt ook het warmere water de uitstroomzijde binnen afzienbare tijd. Deze mogelijke verklaring dient met meerdere metingen te worden ondersteund.

Vanaf ca. 8000 s begint de temperatuur in de meest bovenstroomse rij toe te nemen (rij 4, opnemers 13 t/m 16), met name bij opnemers 14 en 15. Dit is ook de periode waarin is waargenomen dat het kanaal doorgroeit van vak D naar vak F en de bovenstroomse zijde bereikt. Van 10000-12500 s loopt de temperatuur in alle opnemers sterk op. In deze periode is ruimen waargenomen.

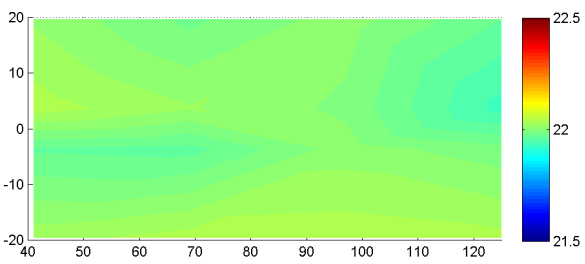
Om een beter beeld te krijgen van de verandering van temperatuur in relatie tot de locatie van de sensor zijn contourplots gemaakt. In Figuur 6.11 zijn deze contourplots voor verschillende tijdstippen weergegeven. Hierbij wordt opgemerkt dat de randen van de contourplots overeenkomen met de buitenste rand opnemers. De contourplots beslaan daarom niet het gehele zandoppervlak. De stroomrichting is in de richting van de positieve x-as. De eerste verandering in temperatuur is zichtbaar rond 2300-3150 s, aan de benedenstroomse zijde

(Figuur 6.11a en b), waar een geringe afname van temperatuur zichtbaar is. Het gebied waar de temperatuur lager is dan de omgeving breidt zich in de daaropvolgende 2000 s verder uit over de gehele breedte van de bak.

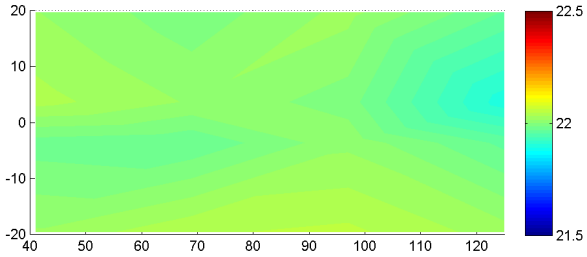
Uit de visuele waarnemingen blijkt dat na ca. 1 uur het eerste kanaal aan de benedenstroomse zijde ontstaat. De verlaging van temperatuur begint echter al iets eerder, namelijk bij ca. 2300-3150 s.

Na 4500 s zijn er drie pipes zichtbaar in vak A. De verlaging van temperatuur wordt in deze periode beter zichtbaar en verbreedt zich. Na 9780 s zijn er ‘sand boils’ zichtbaar tegen het bovenstroomse filter. Dit is zichtbaar in de contourplot als een verhoging van de temperatuur (Figuur 6.11f), aan de bovenstroomse zijde.

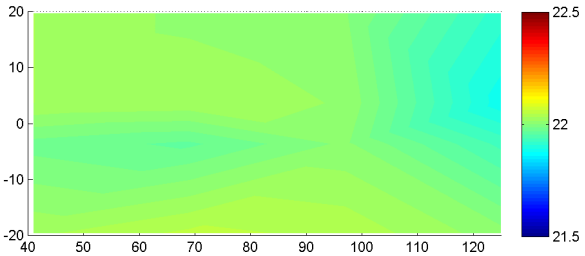
Na 10680 s hebben drie kanalen de bovenstroomse rand bereikt en na ca. 11300 s vindt ruimen plaats. Dit gaat gepaard met relatief grote veranderingen in de temperatuur. In Figuur 6.11 is te zien hoe de temperatuur verandert tijdens dit proces. De locatie van het hoofdkanaal bij ruimen en de locatie waar een sterke temperatuurstijging te zien is lijken overeen te komen met elkaar.



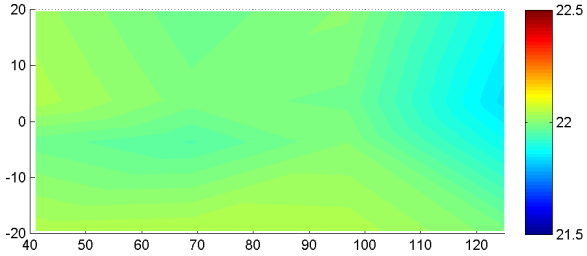
a) T=2300 s



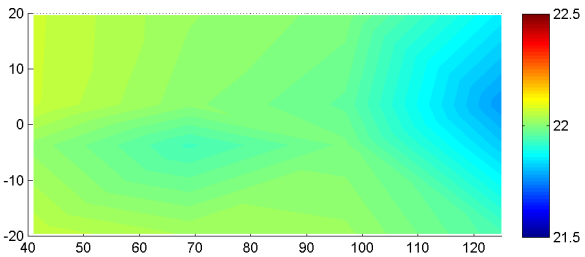
b) T=3150 s



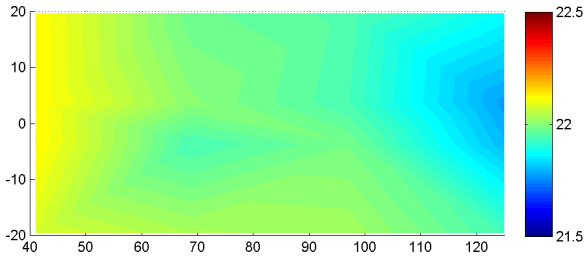
c) T=3870 s



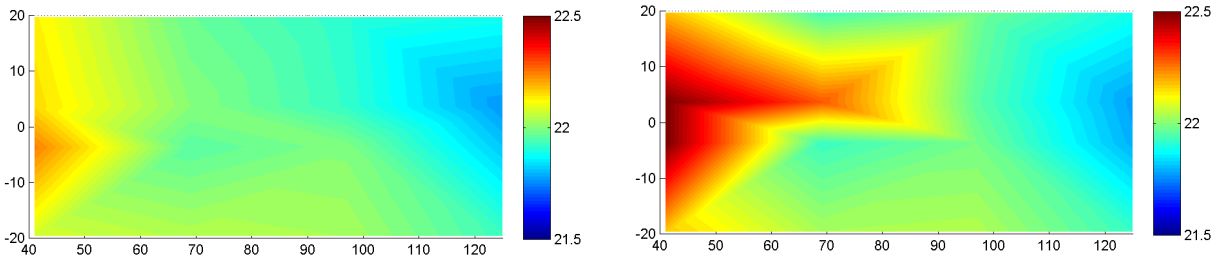
d) T=5350 s



e) T=8200 s



f) T=9750 s



g) T=10150 s h) T=11550 s

Figuur 6.11 Verandering van temperatuur in plaats en tijd

6.3.3 Samenvatting

Samengevat kan gesteld worden dat de waterspanningsmetingen van Alert Solutions niet nauwkeurig aangeven wat de waterdruk in het zandbed is. De fluctuaties zorgen voor veel ruis in de data. Op basis van het verval tussen de verschillende rijen kan wel globaal vastgesteld worden wanneer een significante hoeveelheid kanalen groeit en wat de groeirichting van kanalen is.

De verkregen informatie zou sterk verbeterd kunnen worden wanneer de opnemers een grotere nauwkeurigheid hebben. Dit is mogelijk met de bestaande apparatuur.

Het is nog onduidelijk of het begin van kanaalvorming vastgelegd kan worden met temperatuurmetingen. Indien er in de diepte temperatuurverschillen zijn, zou het kunnen dat het ontstaan van (zandmeevoerende) wellen (aan benedenstroomse zijde) in de praktijk vroegtijdig waar te nemen is door middel van temperatuurmetingen. Om hier meer zekerheid over te verkrijgen is meer onderzoek nodig.

Wel kan het (begin van het) ruimproces goed worden vastgelegd met temperatuurmetingen. Het hoofdkanaal is duidelijk zichtbaar als een verandering van temperatuur.

Als conclusie kan gesteld worden dat de waterspanningsmeters goed bruikbaar zijn voor indicatie van optreden van meerdere kanalen en de groeirichting van deze kanalen. Een grotere nauwkeurigheid van de opnemers kan tot nog meer informatie leiden. De temperatuursensoren bieden vooral veel informatie over het ruimproces. Indien het temperatuurverschil tussen instroomwater en grondwater nog verder vergroot wordt kunnen mogelijk ook eerder kanalen worden vastgesteld. Het wordt aanbevolen een voorstudie te doen naar de verwachte temperatuurverschillen bij de full-scale proef.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Ten aanzien van de opgetreden processen wordt het volgende geconcludeerd:

- De opgetreden processen in de medium-schaalproeven zijn sterk vergelijkbaar met de processen uit de kleine-schaalproeven.
- De processen zijn minder goed waar te nemen dan in de kleine-schaalproeven door de dikkere plaat, de balken en de grootte van de bak. Het is niet mogelijk om alle kanalen tegelijk te volgen en de foto's geven een onscherper beeld dan bij de kleine-schaalproeven.
- Stagnatie van kanalen is opgetreden, maar wordt mogelijk veroorzaakt door verstopping van het kanaal. In veel gevallen begon de kanaalvorming niet helemaal aan de benedenstroomse rand, waardoor het zand niet goed afgevoerd kon worden.
- Door de grote breedte van de bak ontstaan er meerdere kanalen. Dit geeft meer vertrouwen in de huidige benadering van het kanaal als een spleet.
- In twee proeven is, bij een laag verhang, forward erosion opgetreden. Mogelijk wordt dit veroorzaakt door het ontbreken van bovenbelasting.

Ten aanzien van de schaaleffecten wordt het volgende geconcludeerd:

- Het lengteschaaleffect, dat volgt uit de regel van Sellmeijer, is goed terug te vinden in de kleine-schaalproeven en de medium-schaalproeven. Dit geeft vertrouwen voor het voorspellen van het schalingseffect in de full-scale proef.

Ten aanzien van de validatie van trends uit de kleine-schaalproeven wordt het volgende geconcludeerd:

- Het wegen van de medium-schaalopstelling verliep niet goed. Hierdoor is een onnauwkeurigheid ontstaan in de relatieve dichtheid.
- De invloed van relatieve dichtheid is niet goed vastgesteld in deze proeven. Hierdoor is het niet (of maar beperkt) mogelijk gebleken de invloed van de relatieve dichtheid op het kritieke verhang te bepalen. De onzekerheid in relatieve dichtheid is hierdoor in de ordegrootte van +/- 5-10%.
- De proeven op Baskarp zand voldoen beter aan de regel van Sellmeijer dan de proeven op Itterbeck zand. Uit de proeven op Itterbeck zand volgt een lager verval bij doorbraak dan voorspeld. Dit komt overeen met de trend zoals gevonden in de kleine-schaalproeven, waarbij de korreldiameter minder invloed heeft dan op basis van de regel van Sellmeijer wordt verwacht. De resultaten bevestigen de noodzaak om meerdere zandsoorten (met verschillende d70) te beproeven in de full-scale proef.

Ten aanzien van de monitoring wordt het volgende geconcludeerd:

- Een kanaal wordt zichtbaar als een toename in het debiet zodra een kanaal van enige lengte de bovenstroomse of benedenstroomse zijde bereikt. Het debiet geeft echter geen informatie over de groeirichting. Het debiet is daarom geen goede indicator voor het optreden van piping in de full-scale proef. Het meten van debiet kan wel bevestigend werken naast andere methoden.
- In de gemeten verlopen van waterspanningen zijn kanalen niet altijd zichtbaar. Een geleidelijke verandering in de waterspanning kan een indicatie zijn voor het groeien van (meerdere) kanalen. Een enkel klein kanaal (ca. 10-20 cm lang en 1 cm breed) kan op basis van deze metingen gemakkelijk over het hoofd worden gezien. Dit

betekent dat een dergelijk klein kanaal nauwelijks invloed heeft op de totale doorlatendheid van het zandpakket.

- De vorming van meerdere kanalen en de groeirichting van deze kanalen is zichtbaar in het verhang. Een klein kanaal op een afstand van ca. 0.50m is niet zichtbaar. Op basis van de constatering dat er bij voldoende breedte meestal meerdere kanalen ontstaan, kan worden vastgesteld dat het meten van waterspanning en het uitzetten van het verval een goede manier is om het pipingproces globaal te volgen.
- De nauwkeurigheid en locatie van de waterspanningsmeting bepaalt of er globaal iets gezegd kan worden over groeirichting en locatie of dat er meer details zichtbaar zijn.
- Temperatuurmetingen kunnen een toevoeging zijn ten opzichte van meer conventionele technieken, zoals het meten van waterspanning. Met name het ruimproces is goed zichtbaar in de metingen.

7.2 Aanbevelingen

In het kader van het ontwikkelen van een nieuwe rekenregel (op korte termijn) wordt het volgende aanbevolen:

- Aanbevolen wordt om de invloed van de lengte schaal, zoals opgenomen in het model van Sellmeijer, over te nemen in de nieuwe rekenregel.
- Aanbevolen wordt om extra proeven uit te voeren bij een grotere range van relatieve dichtheden.
- Aanbevolen wordt om extra medium-schaalexperimenten te doen op het zand dat mogelijk beproefd wordt bij het IJkdijk-experiment om extra zekerheid te verkrijgen met betrekking tot het verval bij doorbraak bij deze proef..
- In de huidige proevenserie kon de relatieve dichtheid niet nauwkeurig worden bepaald. Aanbevolen wordt om dit in eventuele vervolgproeven te verbeteren. Dit kan gedaan worden door weging van het zand met behulp van een meetpalletwagen, voordat het zand in de container wordt verpompt. In deze proevenserie was deze aanpassing door tijdsdruk niet mogelijk.
- Aanbevolen wordt om de resultaten van de medium-schaalproeven te vergelijken met de uitkomsten van de multivariate analyse op de kleine-schaalproeven. Op basis hiervan kan de rekenregel aangepast worden.
- Hoewel het debiet geen directe indicator is voor het pipingproces, wordt aanbevolen om in de beoogde full-scale proef het debiet te meten. Het debiet geeft inzicht in de doorlatendheid van het zandpakket. Verder is het debiet van groot belang in de latere fasen van het piping proces dicht bij bezwijken van de dijk.
- Aanbevolen wordt om waterspanningen te meten in de full-scale proef. Op basis van het feit dat er meerdere kanalen verwacht worden in de breedterichting van de dijk, is de kans groot dat bij een afstand van 1m tussen twee waterspanningsmeters een kanaal gedetecteerd wordt. Om lokaal het verhang te kunnen bepalen wordt aanbevolen om de waterspanningsopnemers in dubbele rijen te plaatsen.

In het kader van toekomstig onderzoek naar het fenomeen piping wordt het volgende aanbevolen:

- Bij lagere dichtheden treedt een ander proces op. Aanbevolen wordt om dit proces nader te onderzoeken.
- Wanneer een verandering van de rekenregel nodig blijkt, is het van belang om ook in meer theoretisch onderzoek te achterhalen waarom deze verandering noodzakelijk is. Het model van Sellmeijer heeft een fysische achtergrond en de invloed van de korreldiameter op het kritiek verval volgt uit het krachtenevenwicht op de korrel. De nu uitgevoerde multivariate analyse geeft aan dat de invloed van korreldiameter op het kritiek verval in de

experimenten anders is dan in het rekenmodel. Er is nog geen verklaring voor deze afwijking. Aanbevolen wordt om de oorzaak voor deze afwijking te onderzoeken.

- Terzijde wordt opgemerkt dat de meting van temperatuur mogelijk een geschikte manier om het optreden van piping te monitoren. Er is echter nog niet voldoende informatie beschikbaar om dit als een conventionele methode voor het detecteren van piping te beschouwen. Nader onderzoek zou hier meer duidelijkheid over kunnen verschaffen.

8 Literatuur

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

[Bruijn, Knoeff, 2008], H.T.J. De Bruijn, J.G. Knoeff, 'SBW Hervalidatie Piping. Identificatie en plan van aanpak witte vlekken', Rapport CO-427070.0024, Deltares.

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

[Knoeff, 2009], J.G. Knoeff, J.B. Sellmeijer, J. Lopez De La Cruz, 'SBW Hervalidatie Piping, HP.1.2 Ontwikkeling, uitbreiding en aanpassing van de pipingregel', Rapport 1200187-015-GEO-0004, 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 Overzicht proefresultaten

Proefnummer	Bms01	Bms02	ITTms03	ITTms04
Type zand	Baskarp	Baskarp	Itterbeck	Itterbeck
Relatieve dichtheid	65% +/- 5%	60% +/- 5%	70% +/- 5%	45% +/- 5%
Doorlatendheid	1,15E-04	1,37E-04	1,89E-04	3,44E-04
Kwelweglengte	137 cm	145 cm	146,5 cm	145,5 cm
Verval bij eerste waarneming	22 cm	29 cm	20 cm	18 cm
Kritieke verval	28 cm	37 cm	26 cm	20 cm
Start van piping	Vak B, benedenstrooms	Vak B, benedenstrooms	Vak A/B, benedenstrooms	Vak C/D, in het midden
Bijzonderheden			Zandpakket beschadigd, “gat” in zand bij uitstroomzijde	Zandpakket veel beschadigingen, waarschijnlijk van siliconencoating
Proef bruikbaar voor methode Sellmeijer	ja	ja	ja	ja

Proefnummer	ITTms05 duplo	ITTms06 duplo	Bms07 duplo	Bms08 duplo
Type zand	Itterbeck	Itterbeck	Baskarp	Baskarp
Relatieve dichtheid	65% +/- 5%	30% +/- 10%	60% +/- 5%	45% +/- 5%
Doorlatendheid	2,10E-04	1,33E-03	1,37E-04	2,37E-04
Kwelweglengte	141,5 cm	146,5 cm	144 cm	142 cm
Verval bij eerste waarneming	16 cm	5 cm	14 cm	19 cm
Kritieke verval	29 cm	16 cm	29 cm	19 cm
Start van piping	Vak A/B, benedenstrooms	Vak F, bovenstrooms	Vak A/B, benedenstrooms	Vak D/E, midden/bovenstrooms
Bijzonderheden			Verstoring zandpakket door kantelen aan de benedenstroomse zijde, kleinere kwelweglengte is mogelijk	Verstoring zandpakket door kantelen aan de benedenstroomse zijde, kleinere kwelweglengte is mogelijk
Proef bruikbaar voor methode Sellmeijer	ja	nee	ja	nee

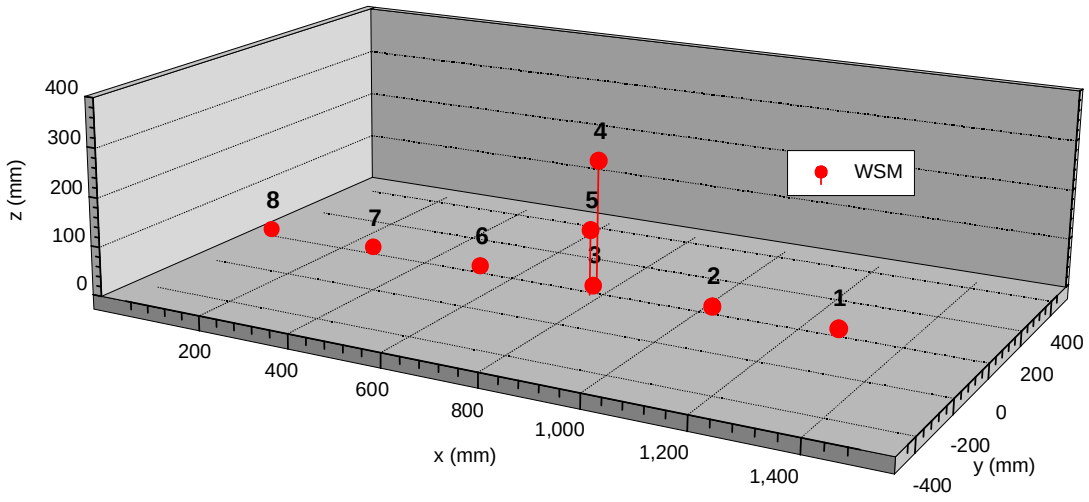
B Locaties waterspanningsmeters en temperatuursensoren

De conventionele waterspanningsmeters zijn op de bodem van de bak geplaatst. Twee opnemers zijn op stokjes geplaatst om het profiel in de diepte te meten. De positie in de bak is weergegeven in Tabel 8.1 en Figuur 8.1.

X coördinaat tov. Intree filter
Y coördinaat midden breedte bak
Z coördinaat tov. Bodem
maten in mm.

opnemer	X	y	z
1	1278	0	15
2	1028	0	15
3	778	0	15
4	778	15	266
5	778	-15	133
6	528	0	15
7	278	0	15
8	28	0	15

Tabel 8.1 Coördinaten conventionele waterspanningsmeters



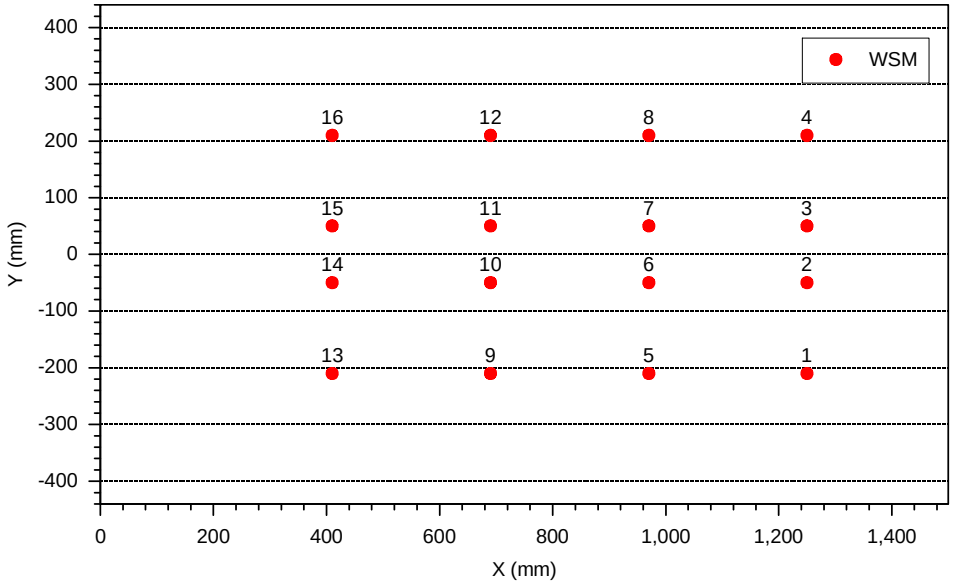
Figuur 8.1: posities van de WSM's in de medium scale setup. De grijze randen geven de afmetingen van de bak.

Naast de conventionele waterspanningsmeters die op de bodem van de bak zijn geplaatst, zijn in enkele proeven ook opnemers in het perspex deksel geplaatst. Deze opnemers, van Alert Solutions, meten waterspanning en temperatuur. De coördinaten en locatie van deze opnemers zijn weergegeven in Tabel 8.2 en Figuur 8.2/Figuur 8.3.

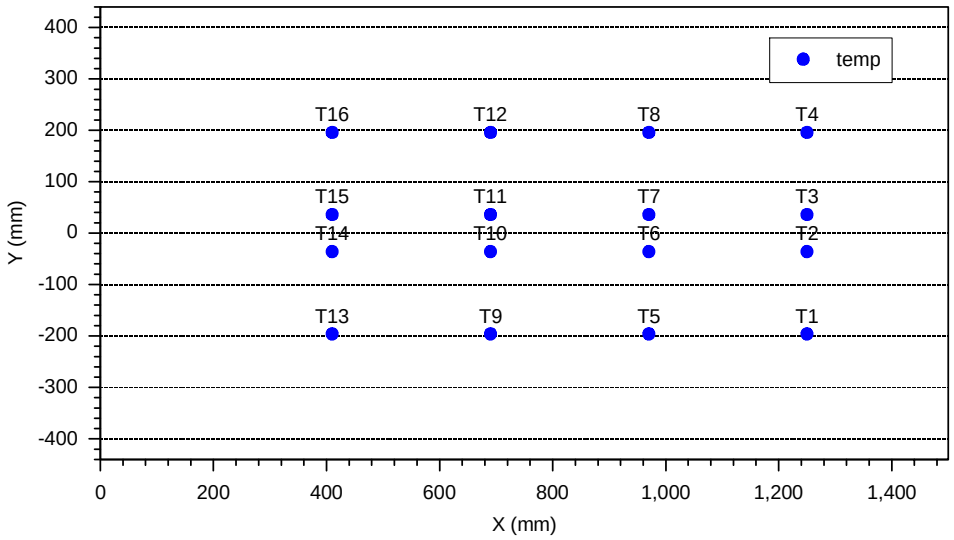
wsm	x	y	z
WSM1	125	-21	40
WSM2	125	-5	40
WSM3	125	5	40
WSM4	125	21	40
WSM5	97	-21	40
WSM6	97	-5	40
WSM7	97	5	40
WSM8	97	21	40
WSM9	69	-21	40
WSM10	69	-5	40
WSM11	69	5	40
WSM12	69	21	40
WSM13	41	-21	40
WSM14	41	-5	40
WSM15	41	5	40
WSM16	41	21	40

temp	x	y	z
T1	125	-19,6	40
T2	125	-3,6	40
T3	125	3,6	40
T4	125	19,6	40
T5	97	-19,6	40
T6	97	-3,6	40
T7	97	3,6	40
T8	97	19,6	40
T9	69	-19,6	40
T10	69	-3,6	40
T11	69	3,6	40
T12	69	19,6	40
T13	41	-19,6	40
T14	41	-3,6	40
T15	41	3,6	40
T16	41	19,6	40

Tabel 8.2 Coördinaten waterspanningsmeters en temperatuursensoren Alert Solutions



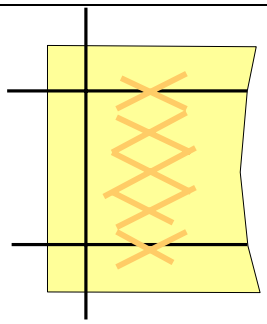
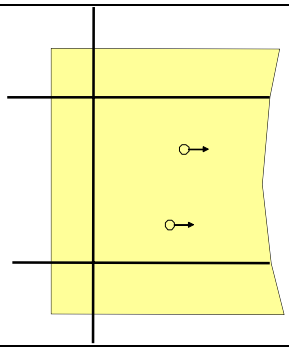
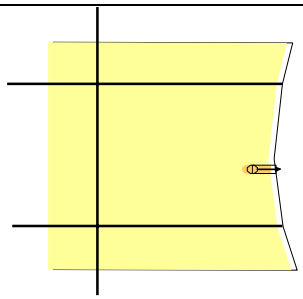
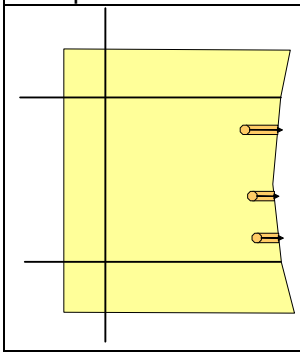
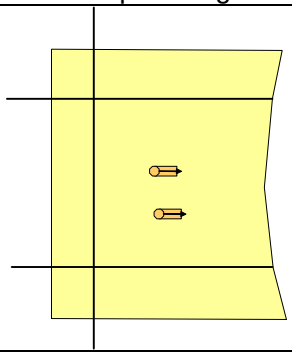
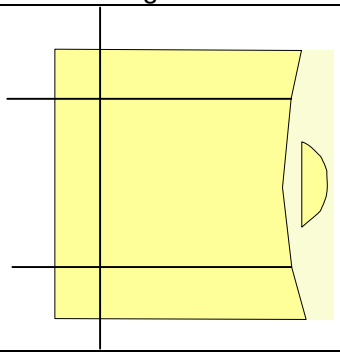
Figuur 8.2 locaties waterspanningsmeters



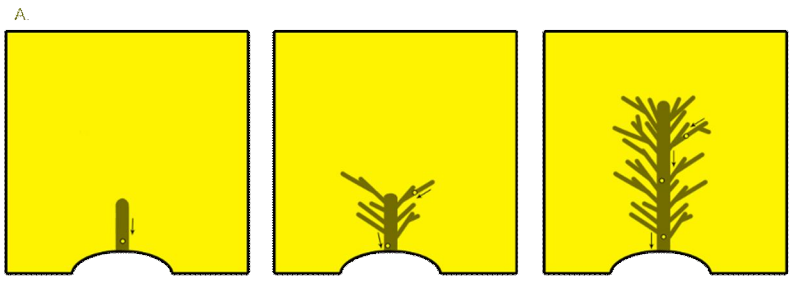
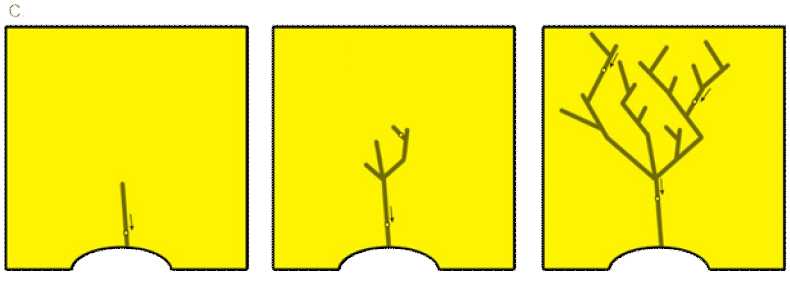
Figuur 8.3 locaties temperatuurmeters

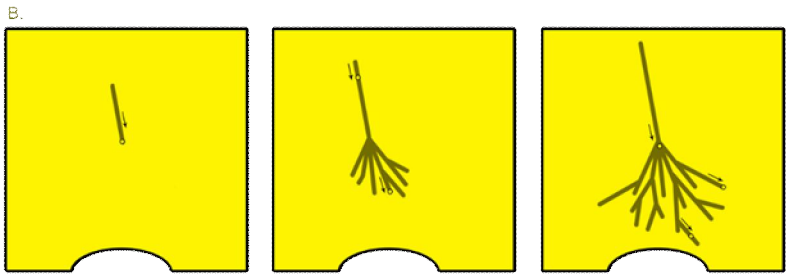
C Schematisaties en foto's van waargenomen processen in de kleine-schaalproeven [van Beek, Knoeff, 2009]

Initiële processen:

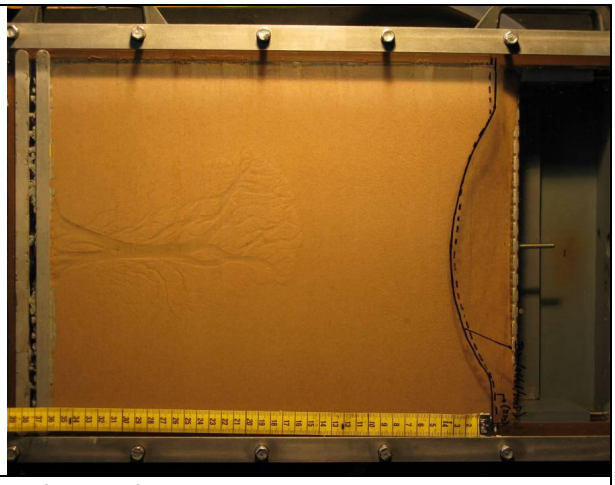
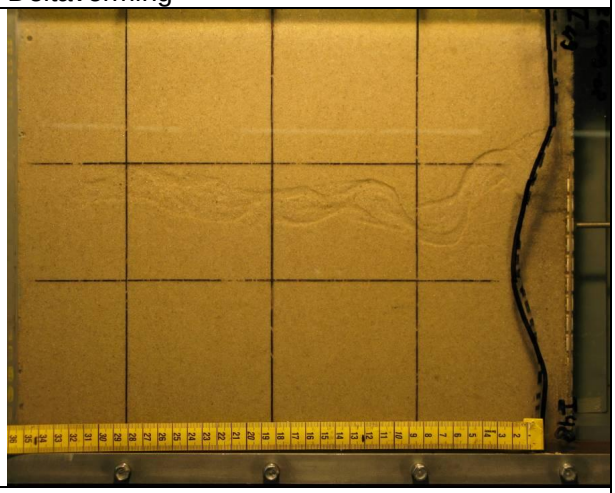
		
Craquelé	Korrelverplaatsing	Enkelvoudig klassiek
		
Meervoudig klassiek	Interne erosie	Front instabiliteit

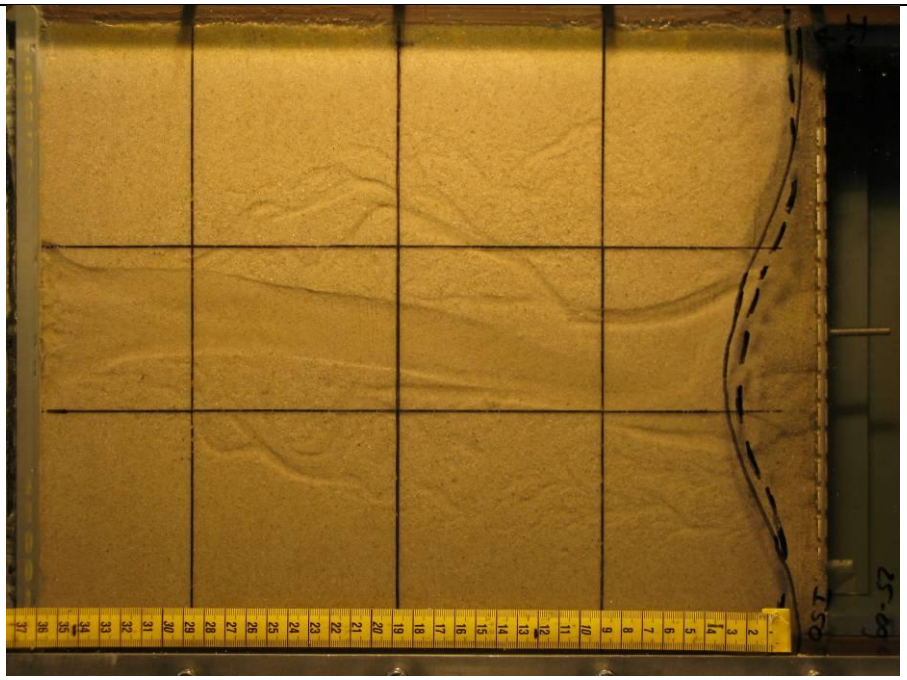
Vervolgprocessen:

Straight backward erosion	
Classic backward erosion	

Forward erosion	

Eindprocessen:

	
Vlakstroming	Deltavorming
	
Waaiervorming	Meanderen

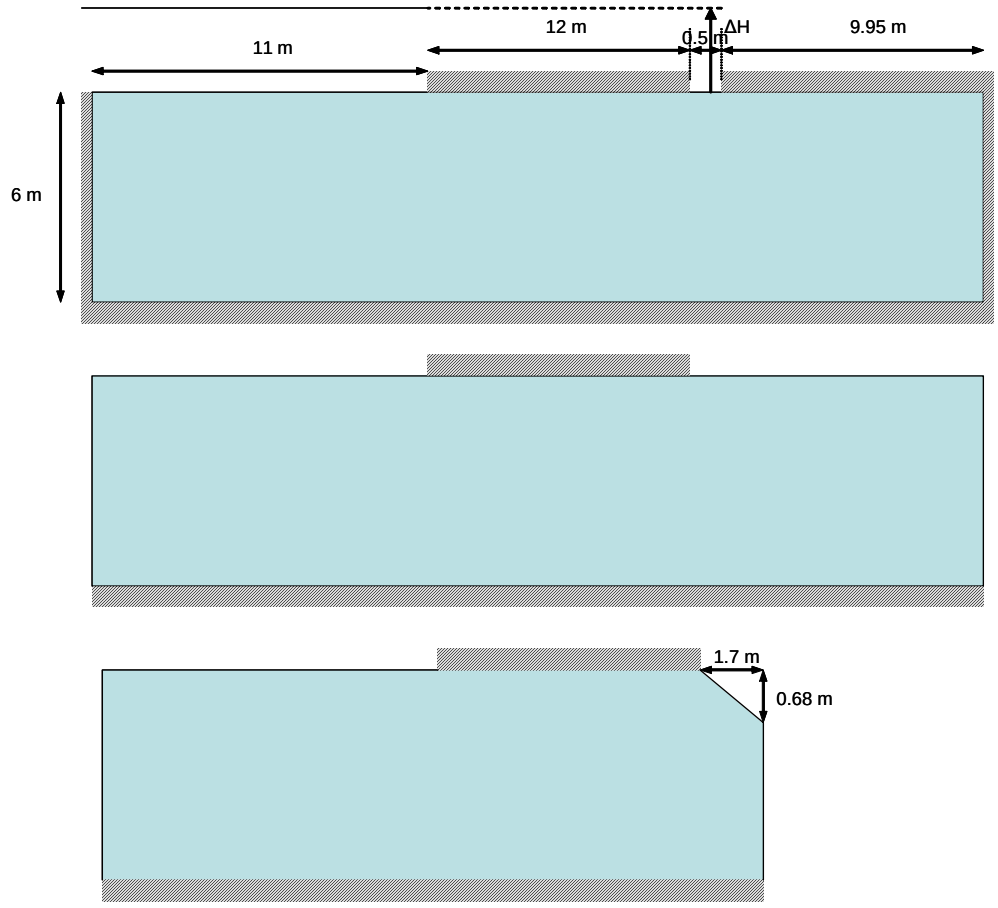


Ruimen

D Berekeningen grondwaterstroming

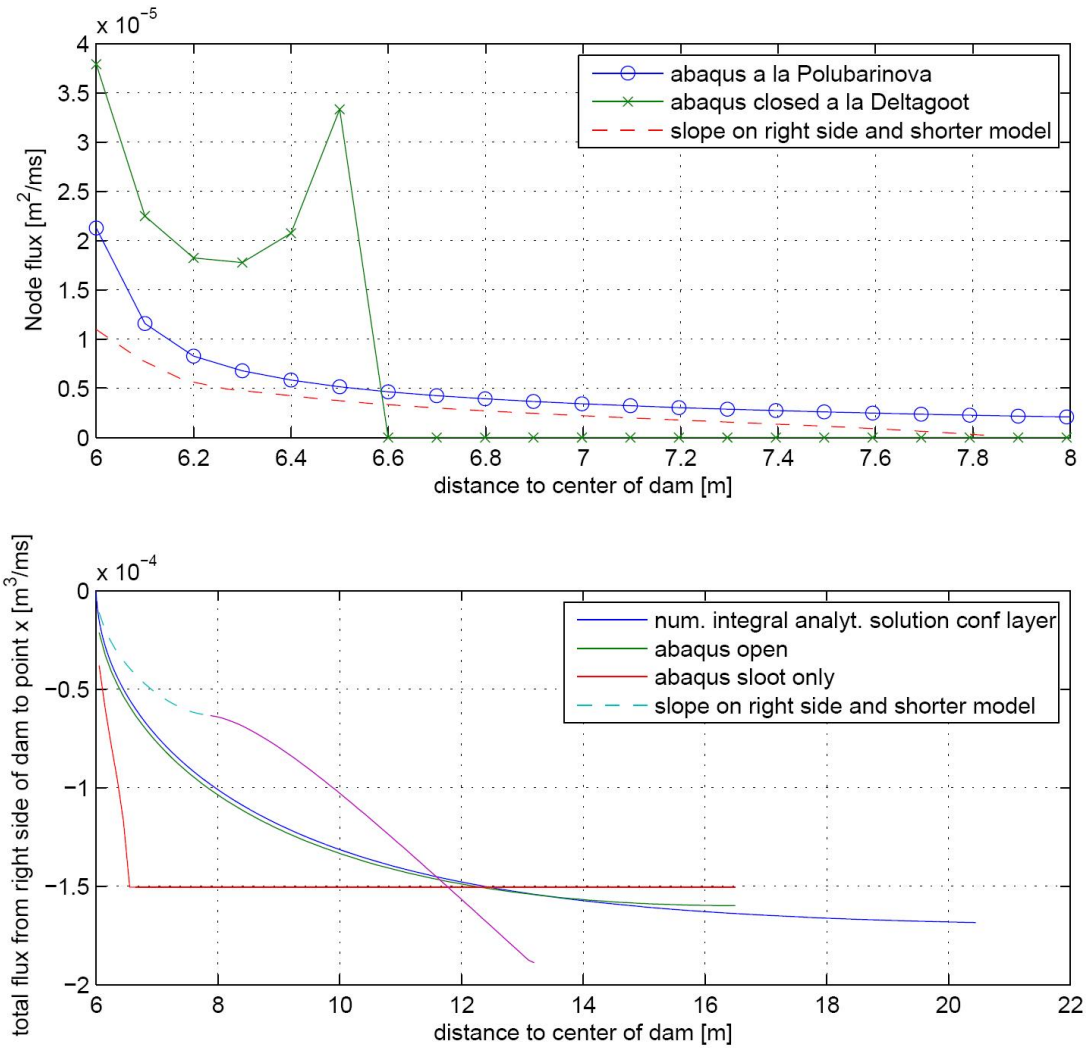
Er zijn grondwaterstromingsberekeningen uitgevoerd om de invloed van verschillen in geometrie op het pipingproces in kaart te brengen. De beschouwde geometrieën zijn de Deltagoot, de Deltagoot zonder sloot en open uitstroom, zoals in de medium- en kleine-schaalproeven

Figuur 8.4 laat drie geometrieën zien die zijn doorgerekend. De bovenste is de Deltagootproef T3 waar alleen rechts van de dijk alleen door de sloot water kan stromen, de tweede variant is open en symmetrisch en is de variant waarvoor ook een analytische oplossing bestaat. De derde variant is rechts van de dijk ingekort en afgeschuind en lijkt hiermee op de schaalproeven. Tussen links en rechts van de dijk is een stijghoogteverschil van ΔH=5m opgelegd. Doorlatendheid van het zandpakket is 1^{e}-4 m/s genomen.



Figuur 8.4 drie doorberekende geometrieën

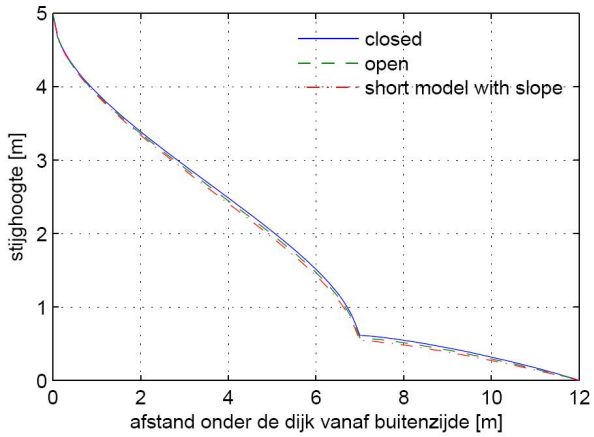
Resultaten simulaties zonder pipe

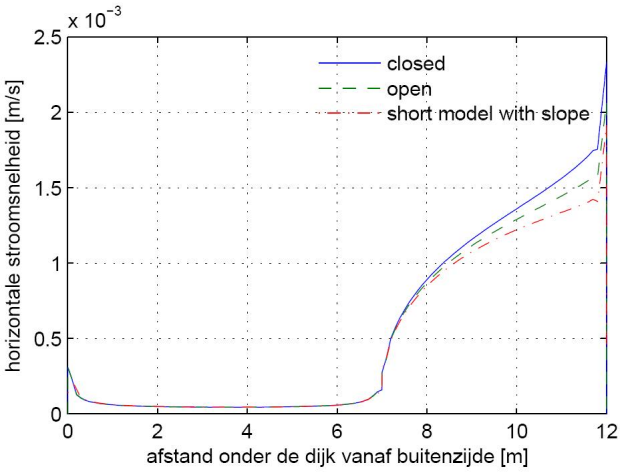


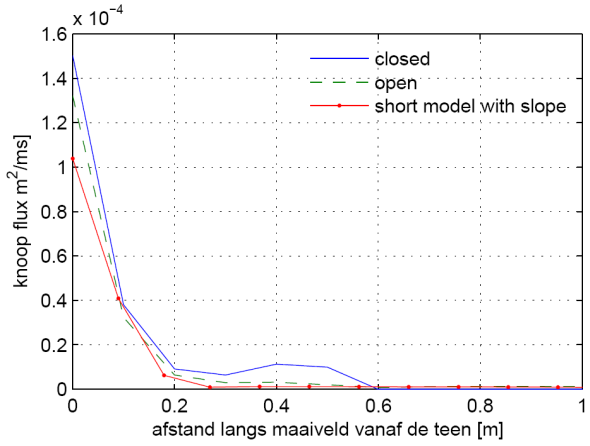
Figuur 8.5 Resultaten van simulaties zonder pipe

Simulaties met Pipe

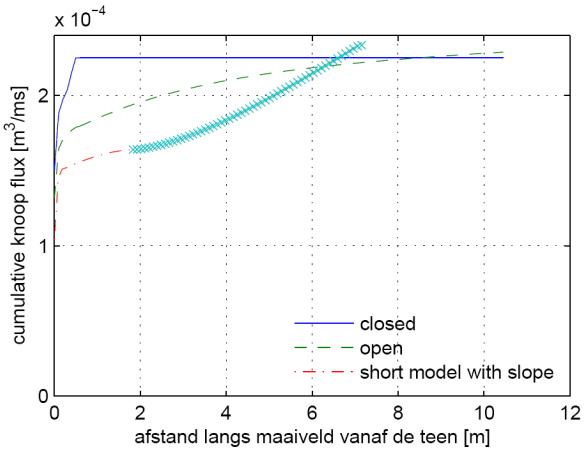
In de geometrie van de Deltagoot proef T3 is vervolgens een pipe gelegd van 5m lengte, de pipe heeft een hoogte van 10 cm in het model en de doorlatendheid is zodanig gemaakt dat de relatie tussen debiet en verhang die in de proef benadert. In de vierde figuur is te zien dat het totaaldebiet door de sloot (Deltagootgeometrie) 2.25^{e}-4 m^3/ms is. Aangezien de werkelijke goot 5 m breed is komt dit totaal op 1.125^{e}-3 m^3/s, ofwel 67.5 l/min. Het verhang in de proef bij deze pipe was ca 1.9 m en de resulterende Q=15 l/min. De doorlatendheid van de proef werd verder geschat op 5.11^{e}-4 m/s, het uit de berekening resulterend debiet moet dus nog vermenigvuldigd met 1.9/5=0.38 en5.11^{e}-4/1^{e}-4=0.511. Dan wordt het totaaldebiet 67.5* 0.38*0.11=13.1 wat in de buurt komt van dat uit de proef.







Figuur 8.6 Resultaten simulaties met pipe



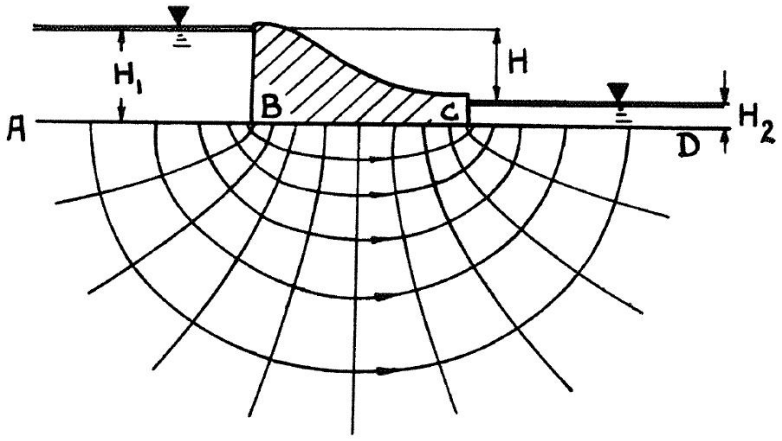
Figuur 8.7 Resultaten simulaties met pipe

Volgende conclusies kunnen worden getrokken:

1. Wanneer alleen de sloot doorlatend is, is het debiet in de sloot hoger dan wanneer er door het mv ernaast ook water kan stromen
2. Wanneer het model afgekapt wordt, zoals bij de schaalproeven, stroomt er horizontaal relatief veel water weg en het debiet door het “sloot” gedeelte is nog lager dan onder 1)
3. Er stroomt in zijn totaliteit meer debiet door het mv wanneer het mv open is, dan wanneer alleen water door de sloot stroomt en de rest afgesloten is. Verklaring is de algemeen lagere weerstand binnendijks. De verschillen zijn niet schokkend en het totaal debiet uit de analytische oplossing kan toch gebruikt worden als eerste schatting voor het totaal debiet door de sloot wanneer het mv afgesloten is.
4. De verschillen in debiet ter plaatse van de sloot tussen de drie geometrieën zijn kleiner voor de situatie met pipe (ca factor 1.5)dan voor de situatie zonder pipe (ca factor 3.5).

E Invloed van lengteschaal op stroming onder een dijk

Analytische oplossingen voor stroming onder een ondoorlatende dijk
Beschouw stroming onder een ondoorlatende dijk met breedte 2b, aangedreven door een stijghoogteverschil H. De dam is gelegen op een halfruimte met permeabiliteit k (Figuur 8.8).



Figuur 8.8 *stroming onder een ondoorlatende dam op een halfruimte met stijghoogte verschil H, uit Polybarinova-Kochina.*

De dam is zo gelegen dat het maaiveld is y=0 en x=0 is het centrum van de dam, begin en eindpunten van de dam zijn x=-b en x=b. De analytische oplossing voor de verticale stroomsnelheid aan het maaiveld (zie Polybarinova-Kochina) aan de rechterzijde is:

$$v = \frac{kH}{\pi\sqrt{x^2 - b^2}}$$

Te zien is dat dit oneindig wordt als x=b. Als het totaaldebiet uitgerekend wordt tussen het punt x=b en een punt x_0 met x_0>b dan is het resultaat:

$$Q = \frac{kH}{\pi}\ln\left(\frac{x_0 + \sqrt{x_0^2 - b^2}}{b}\right)$$

Als je deze laatste formule omschrijft naar een verhang i_b= *H/(2b)* en een klein stukje Δx beschouwd dat net iets groter is dan b dan is de formule te vereenvoudigen. Er wordt bijvoorbeeld gekeken naar het totale debiet dat volgens deze formule over een enkele korreldiameter buiten de teen met breedte *b*. De vereenvoudigde formule wordt dan:

$$Q = 2\frac{k\,i_b}{\pi}\sqrt{2\Delta x b}$$

Zo bezien is er dus een schalingseffect. Als *b* groter wordt en Δx blijft constant (enkele korrels) dan neemt het debiet toe. Dit komt omdat je bij een grotere *b* in feite nog dichter bij de singulariteit zit.

Het kritieke verhang (i_a) gemiddeld over Δx is gelijk aan $Q/(k\Delta x)$,let op dit is dus het gemiddeld verhang over een stukje aan de achterkant van de dijk en dus heel anders dan het verhang i_b, het gemiddeld verhang onder de dijk. Dit invullen in bovenstaande vergelijking geeft:

$$i_a = \frac{2 i_b}{\pi}\sqrt{\frac{2b}{\Delta x}} \text{ of } i_b = \frac{\pi i_a}{2}\sqrt{\frac{\Delta x}{2b}}$$

Wanneer *b* groter wordt (grotere schaal), bij gegeven i_a wordt i_b dus kleiner met de wortel van de schaal. Dit betekent dat er bij grotere schaal hogere uittreeverhangen optreden, waardoor piping gemakkelijker kan optreden.