

**Invloed van micro-schaal  
laminae op het pipingproces**





# **Invloed van micro-schaal laminae op het pipingproces**

Vera van Beek  
Ane Wiersma  
John van Esch

1210060-005



## Titel

Invloed van micro-schaal laminae op het pipingproces




<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
POV Piping	1210060-005	1210060-005-BGS-0001	79

## Trefwoorden

Piping, heterogeniteit, micro-schaal, gelaagdheid, laboratoriumproeven

## Samenvatting

In het dijkverbeteringsprogramma HWBP is een Project Overstijgende Verkenning (POV) opgenomen naar het bezwijkmechanisme piping. In dit programma is een project opgestart waarin onderzoek gedaan wordt naar het in rekening brengen van heterogeniteit voor dit faalmechanisme. De werktitel van de verkenning is: "Heterogeniteit, variatie in zandlagen nader onderzocht en aanzet voor het in rekening brengen van heterogeniteit" (hierna kortheidshalve aangeduid als verkenning "Heterogeniteit") en wordt uitgevoerd door Arcadis, Fugro, Universiteit Utrecht, Waterschap Rivierenland en Deltares. Het voorliggende rapport bevat de resultaten van twee van de bouwstenen die binnen deze verkenning zijn uitgevoerd, een onderzoek naar de invloed van heterogeniteit op het pipingproces, door middel van kleine-schaalproeven en de simulatie van deze proeven met DgFlow. In de proeven is een pakket gelaagd opgebouwd, waardoor er variaties in korrelgrootte en doorlatendheid ontstaan in het pad van de pipe. Er werd een hogere sterkte gevonden bij gelaagde opbouw bij een laagdikte van 20 mm. Bij een laagdikte van 5 mm is geen extra sterkte gevonden. De simulaties laten ook een hogere sterkte zien bij gelaagde opbouw: deze extra sterkte blijkt vooral te ontstaan door het effect van variatie in doorlatendheid. Om de extra sterkte door micro-schaal variatie in de baan van de pipe te kwantificeren is een 3D pipinganalyse benodigd, waarin ook de invloed van de erosie aan de kop van de pipe wordt beschouwd. Extra labonderzoek is benodigd om vast te stellen wat de invloed van grotere korrelgroottevariatie op grotere schaal (meso-schaal) op het pipingproces is. Voor de beoordeling in de praktijk is het daarnaast noodzakelijk om de ondergrond op meso-schaal te kunnen karakteriseren om het model van input te voorzien.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	feb. 2018	Vera van Beek		Esther Rosenbrand		Leo Voogt	
Ane Wiersma							
John van Esch							

## Status

definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>1</b>
1.1	Probleemomschrijving	1
1.2	Doelstelling	1
1.3	Leeswijzer	2
<b>2</b>	<b>Heterogeniteit en piping</b>	<b>3</b>
2.1	Van Beek et al. 2008	3
2.2	Dolphen 2013	5
2.3	Medium-schaalproef (Van Beek et al., 2015)	6
2.4	Negrinelli 2015	7
2.4.1	Micro-heterogeniteit	7
2.4.2	Barrière van grof zand	9
2.5	Conclusies	12
<b>3</b>	<b>Heterogeniteit in rivierafzettingen op verschillende schalen</b>	<b>13</b>
3.1	Micro-schaal variatie in korrelgrootte in meanderende rivierafzettingen	14
<b>4</b>	<b>Zandselectie</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Experimenteel onderzoek</b>	<b>19</b>
5.1	Opstelling	19
5.2	Proevenprogramma	20
5.3	Preparatiemethode	21
5.4	Proefuitvoering	22
5.5	Resultaten	22
5.5.1	Observaties van het pipingproces	22
5.5.2	Het kritiek verval	25
<b>6</b>	<b>DgFlow berekeningen</b>	<b>27</b>
6.1	Opzet berekeningen	28
6.2	Resultaten	29
6.2.1	Pipe ontwikkeling	29
6.2.2	Invloed van de mesh	33
6.2.3	Kritiek verval	34
<b>7</b>	<b>Discussie</b>	<b>37</b>
7.1	Betrouwbaarheid experimenteel werk	37
7.2	Discussie modelleren van heterogeniteit in de baan van de pipe in DgFlow	40
<b>8</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>43</b>
<b>9</b>	<b>Referenties</b>	<b>45</b>

## Bijlage(n)

<b>A Eigenschappen Deest zand</b>	<b>A-1</b>
A.1 Korrelverdeling	A-1
A.2 Minimum en maximum porositeit	A-4
<b>B Voorstudie preparatiemethode</b>	<b>B-1</b>
<b>C Factual reports piping experimenten</b>	<b>C-1</b>
C.1 De-184	C-1
C.2 De-185	C-8
C.3 De-186	C-11
C.4 De-187	C-16
C.5 De-201	C-19
<b>D Eigenschappen proefopstelling</b>	<b>D-1</b>
<b>E Berekeningen DgFlow</b>	<b>E-1</b>



# 1 Introductie

In het dijkverbeteringsprogramma HWBP is een Project Overstijgende Verkenning (POV) opgenomen naar het bezwijkmechanisme piping. In dit programma is een project opgestart waarin onderzoek gedaan wordt naar het in rekening brengen van heterogeniteit voor dit faalmechanisme. De werktitel van de verkenning is: "Heterogeniteit, variatie in zandlagen nader onderzocht en aanzet voor het in rekening brengen van heterogeniteit" (hierna kortheidshalve aangeduid als verkenning "Heterogeniteit") en wordt uitgevoerd door Arcadis, Fugro, Universiteit Utrecht, Waterschap Rivierenland en Deltares. Het voorliggende rapport bevat de resultaten van twee van de bouwstenen die binnen deze verkenning zijn uitgevoerd, een onderzoek naar de invloed van heterogeniteit op het pipingproces, door middel van kleine-schaalproeven en de simulatie van deze proeven met DgFlow.

## 1.1 Probleemomschrijving

Piping is een faalmechanisme voor dijken met zandige ondergrond. Als gevolg van hoogwater neemt de waterspanning onder de deklaag toe, waardoor deze kan opbarsten. De vrije uitstroom zorgt voor een geconcentreerde kwelstroom door de doorlatende ondergrond, welke zanddeeltjes mee kan nemen: er ontstaat een pipe. Bij voldoende waterstandsverschil kan de pipe doorgroeien naar de bovenstroomse zijde, waardoor de dijk kan bezwijken.

Met de huidige toetsregels voor piping (de regel van Sellmeijer), gebaseerd op een standaard dijk met homogene ondergrond, worden veel dijken afgekeurd. In werkelijkheid is de ondergrond niet homogeen, maar treedt variatie in korrelgrootte en doorlatendheid op, van micro-schaal (millimeter- tot centimeterschaal), mesoschaal (decimeter tot meterschaal) tot macro-schaal (tientallen meters tot honderden meters). Tijdens het proces van terugschrijdende erosie ontwikkelt de pipe zich van benedenstroomse naar bovenstroomse zijde. De pipe ontwikkelt zich altijd onder een cohesieve laag, de deklaag, die een dak voor de pipe vormt. In de natuurlijke zandafzettingen waardoor de pipe zich vormt komen variaties in korrelgrootte voor. Deze variatie kan ervoor zorgen dat de ontwikkeling van de pipe afbuigt of zelfs stopt, aangezien een grovere laag meer weerstand biedt tegen pipe-ontwikkeling dan een fijnere laag. Enkele laboratoriumproeven (e.g. Van Beek et al., 2008; Negrinelli, 2015) tonen aan dat variatie in korrelgrootte op cm tot dm schaal (d.w.z. variatie met een fluctuatieschaal van cm tot dm) tot grote toename van sterkte kan leiden, maar zijn onvoldoende om uitspraken te doen over de invloed op het kritiek verval. Bovendien is de geteste variatie niet typisch voor zandlichamen die voorkomen in de Nederlandse ondergrond.

In deze bouwsteen wordt onderzocht of het meenemen van variatie in korrelgrootte op millimeter tot centimeterschaal in de baan van de pipe tot optimalisering van de rekenregels kan leiden. Deze variatie is immers altijd aanwezig in de baan van een pipe.

## 1.2 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek beschreven in deze bouwsteen is om kwalitatief vast te stellen of het in rekening brengen van variatie van korrelgrootte in de baan van de pipe tot optimalisering van de rekenregels kan leiden en daarmee uiteindelijk tot een verkleining van de versterkingsopgave. Het einddoel is om een kwantitatief oordeel te kunnen geven over de invloed van variatie van korrelgrootte op het kritiek verval. Dit onderzoek vormt hierin een eerste verkenning. Het onderzoek vormt een eerste aanzet naar het verwerken van heterogeniteit in de rekenregel. Het huidige onderzoek richt zich op rivierafzettingen.

### 1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op bestaand onderzoek naar de invloed van heterogeniteit op het pipingproces. In hoofdstuk 3 wordt een beknopte toelichting gegeven op de micro-schaal heterogeniteit in rivierafzettingen. Voor het uitvoeren van de proeven, beschreven in H5, is zand opgehaald bij een uiterwaard, net onder de deklaag; dit is beschreven in H4. In H6 zijn de DgFlow berekeningen toegelicht. De resultaten van de proeven en berekeningen zijn bediscussieerd in hoofdstuk 7, gevolgd door een hoofdstuk met conclusies en aanbevelingen.

## 2 Heterogeniteit en piping

De invloed van zandeigenschappen op het pipingproces is in verschillende onderzoeken uitgebreid bestudeerd. De meeste onderzoeken hebben zich echter gericht op het bestuderen van het pipingproces in een homogeen zandpakket, terwijl het zand in een natuurlijke afzetting zelden homogeen is. In dit hoofdstuk worden de experimenten beschreven waarin variatie in zandeigenschappen in de baan van de pipe is aangebracht. Experimenten met heterogeniteit in verticale richting zijn ook in eerder onderzoek uitgevoerd, maar zijn hier niet beschreven. De ervaring leert dat deze proeven goed te modeleren zijn door de grondwaterstroming juist te simuleren.

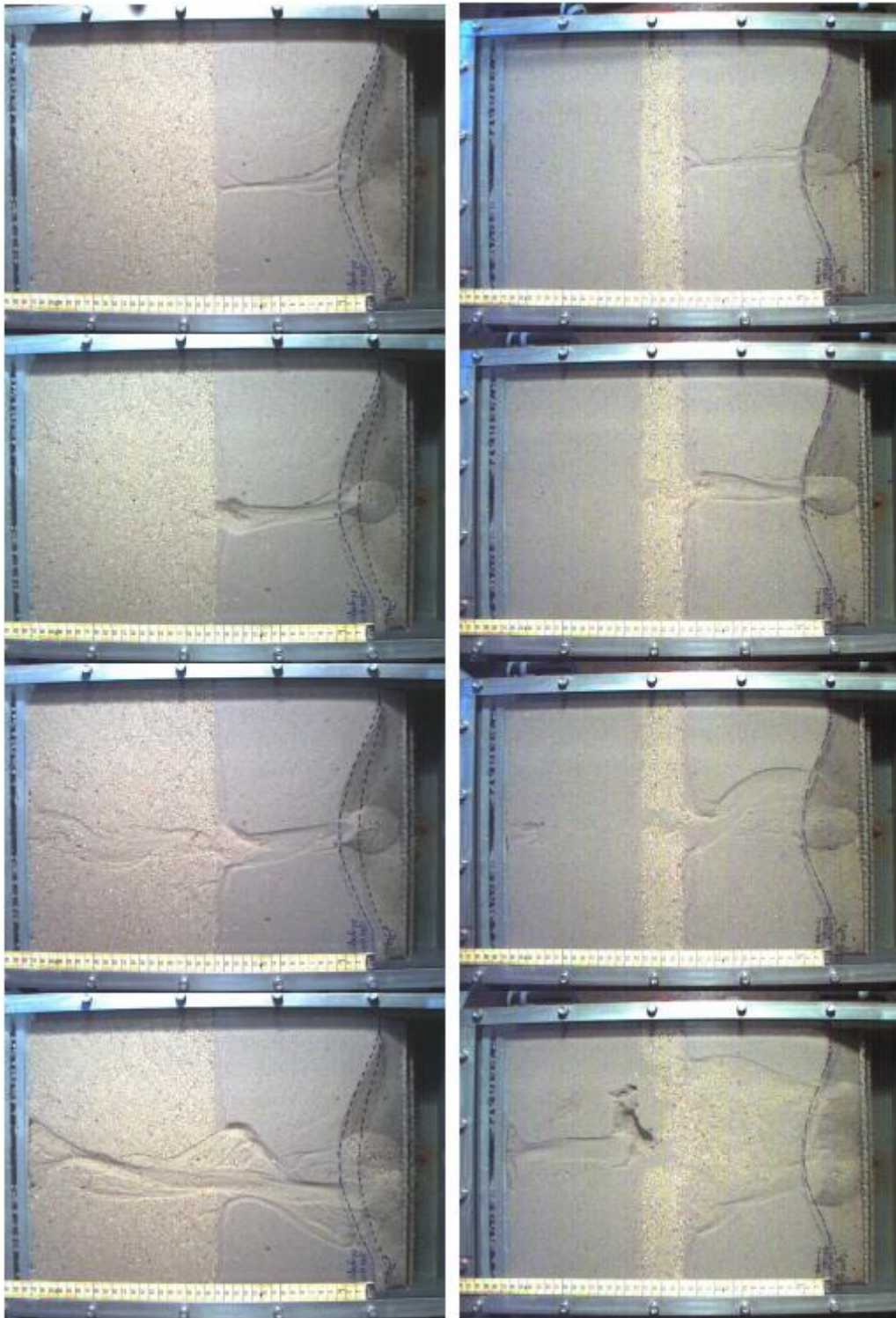
### 2.1 Van Beek et al. 2008

Een serie kleine-schaal kijkproeven is in 2007 uitgevoerd om vast te stellen wat het effect van variatie in korrelgrootte in de baan van de pipe op het pipingproces heeft (gepubliceerd in Van Beek et al., 2008). Hiertoe zijn proeven uitgevoerd met een combinatie van twee zandsoorten (homogeen, fijn zand benedenstrooms – grof bovenstrooms (CF), fijn met een band van grof (FCF). In Tabel 2.1 zijn de resultaten van de uitgevoerde proeven weergegeven.

In de proeven is waargenomen dat meer weerstand wordt ondervonden bij pipe-vorming in grover zand: bij het bereiken van het grovere zand ontwikkelde de pipe in dwarsrichting (Figuur 2.1). Het verval moest aanzienlijk vergroot worden om de pipe door het grovere zand te laten groeien. Uit de proeven bleek dat fijn zand met een band van grof zand tot zeer grote weerstand tegen piping leidt (i.e. het kritiek verval was ca. een factor 3 a 4 groter dan voor het homogene fijne zand). De oorzaak hiervoor kan worden gevonden in de combinatie van een relatief lage bulkdoorlatendheid van het gecombineerde pakket en een grovere korrel. Bij deze proeven was echter ook sprake van een hoge filterweerstand bovenstrooms van het zandpakket, waarvoor niet gecorrigeerd is en waardoor de factor van 3-4 kleiner wordt. Er kon echter wel geconcludeerd worden dat variatie in het zandpakket tot grote weerstand tegen piping kan leiden.

*Tabel 2.1 Proevenprogramma en resultaten Van Beek et al., 2008 – voor de verschillende experimenten CF (grof bovenstrooms, fijn benedenstrooms) en FCF (fijn zand met een band van grof zand) zijn het kritiek verval gegeven waarbij de pipe in het fijne zand naar het grove zand groeit, het kritiek verval waarbij de pipe door het grove zand groeit tot aan de interface van het fijne en grove zand en het kritiek verval waarbij de pipe door de interface volledig doorgroeit naar de bovenstroomse zijde.*

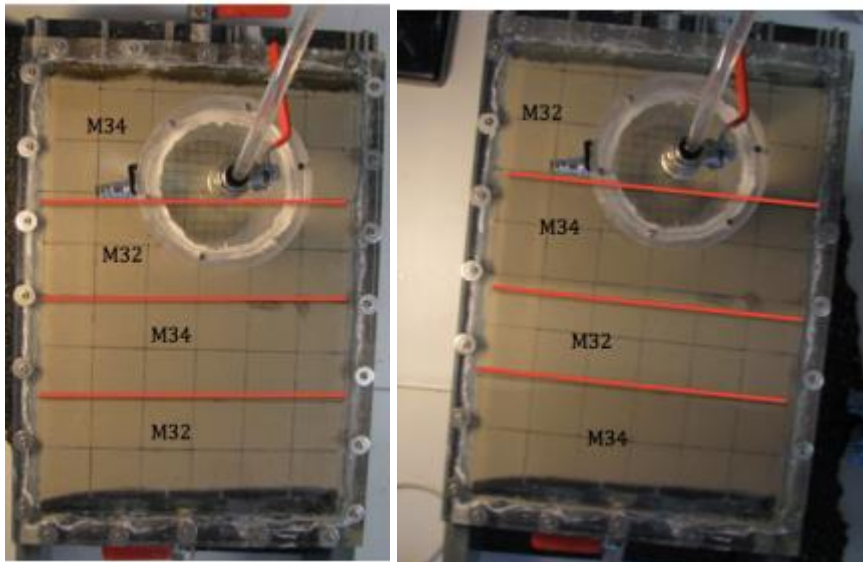
Test type	Critical head [cm] lower fine sand	Critical head [cm] coarse sand	Critical head [cm] combined sands
CF	12	-	51
CF	12	-	40
FCF	22	70	82
FCF	22	66	76



Figuur 2.1 Pipe-ontwikkeling in een combinatie van Speelzand (fijn) en Metselzand (grof)

## 2.2 Dolphen 2013

Dolphen (2013) heeft experimenten uitgevoerd in een vergelijkbare opstelling als beschreven in hoofdstuk 5.1. In de experimenten zijn lagen aangebracht bestaande uit twee zandsorten (M32 en M34). De eigenschappen van deze zandsorten zijn weergegeven in Tabel 2.3. Alle proeven zijn uitgevoerd met verdicht zand (Relatieve dichtheid (RD) ca. 90%).



Figuur 2.2 Links: configuratie in proef 1 en 3; Rechts: configuratie in test 2 en 4

In de proeven 1 en 3 ('fijn-grof-fijn-grof') was er aanvankelijk pipe vorming te zien in het fijnere zand M34, in dwarsrichting en naar achteren. Na verhoging van het verval groeide de pipe in het grovere M32 zand. Enkele verhogingen waren nodig om de pipe door het M32 zand te laten groeien, waarna de pipe tot aan de bovenstroomse zijde doorgroeide.

In de proeven 2 en 4 ('grof-fijn-grof-fijn') was er al bij een laag verval pipe vorming in bovenstroomse richting in het M34 zand. Bij het bereiken van het M32 zand stagneerde de pipegroei. In proef 2 groeide de pipe in dwarsrichting door het M34 zand, voor proef 4 is daar geen beschrijving van gegeven. Uiteindelijk groeide de pipe in het M32 zand en vervolgens door naar de bovenstroomse zijde.

De kritieke vervallen voor alle proeven uitgevoerd door Dolphen (2013) zijn weergegeven in Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Proefresultaten Dolphen (2013).  $H_c$  is het kritisch verval.

Proef no.	$H_c$ [cm]
1	11
2	14
3	11
4	10
Homogeen M32	8
Homogeen M32	8
Homogeen M34	7
Homogeen M34	6.5

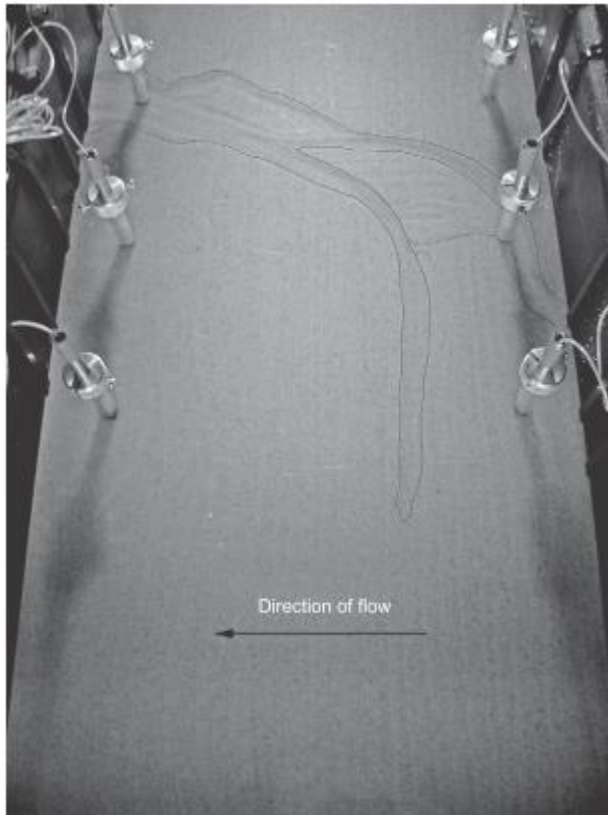
Tabel 2.3 Zandeigenschappen (Vandenboer et al., 2017)

	M34	M32
$d_{10}$ [mm]	0.128	0.172
$d_{30}$ [mm]	0.142	0.212
$d_{50}$ [mm]	0.155	0.251
$d_{60}$ [mm]	0.166	0.271
$d_{80}$ [mm]	0.209	0.311
$C_u$ [-]	1.29	1.58
$C_c$ [-]	0.94	0.96
$k$ [m/s] (at RD 80%)	1.03E-04	3.28E-04

In alle proeven met gelaagde opbouw is het kritiek verval hoger dan in de homogene proeven. Proef 2, waar de dwarsontwikkeling met name zichtbaar was, laat het hoogste kritieke verval zien. Deze proeven tonen aan dat de afwisseling van korrelgrootten zorgt voor een toename in het kritische verval. Deze extra weerstand ontstaat waarschijnlijk door de combinatie van lagere doorlatendheid in de pakketten met een fijne korrelgrootte, en moeilijker transporteren van korrels met grotere korreldiameter uit de grove pakketten. Als de weerstand erg hoog is treedt dwarsontwikkeling van de pipe op. Het is waarschijnlijk dat de dwarsontwikkeling ook nog een versterkend effect heeft omdat dit zorgt voor verspreiding van de stroming waardoor er minder druk op de pipe-kop ontstaat.

### 2.3 Medium-schaalproef (Van Beek et al., 2015)

Als onderdeel van het WBI-programma zijn in 2014 medium-schaalproeven uitgevoerd. In een van deze proeven verliep de preparatie niet goed, waardoor er laagvorming dwars op de stroomrichting zichtbaar was. De proef is daarop herhaald met homogene preparatie waardoor er een indruk kon worden verkregen van het effect van micro-schaal heterogeniteit op het pipingproces. Beide proeven zijn uitgevoerd met Itterbeck 0.330 mm zand ( $d_{50}=0.342$ ,  $d_{60}/d_{10}=1.60$ ). In de proef met lagen in het zandpakket was het kritiek verval aanzienlijk hoger (0.330-0.360m vs. 0.194m). De doorlatendheid was vergelijkbaar voor beide proeven, evenals de relatieve dichtheid.



Figuur 2.3 Detail opname van de proef met zichtbare lagen en de pipe die in dwarsrichting ontwikkelt (Van Beek et al., 2015) – bovenstroomse zijde is aan de rechterkant van de foto.

## 2.4 Negrinelli 2015

Negrinelli (2015) heeft als onderdeel van zijn afstudeerproject proeven uitgevoerd met gelaagde opbouw, zowel op micro-schaal (3 proeven op twee verschillende soorten zand met uniformiteitscoëfficiënt van 1.6 en 3.2) als op 'macro'-schaal (5 experimenten met een 5 cm brede band grover materiaal met fijner materiaal boven en benedenstrooms). De proeven zijn uitgevoerd in de opstelling beschreven in hoofdstuk 5.1.

### 2.4.1 Micro-heterogeniteit

Voor de proeven met micro-schaal variatie is één zandsort per proef toegepast, waarbij laagvorming is aangebracht door scheiding van korrelgroottes binnen de korrelverdeling. De toegepaste zandsorten zijn Enschede zand (1 proef), Itterbeck Mixture 2 (proeven). De eigenschappen van deze zandsorten zijn weergegeven in Tabel 2.5. Het zandpakket is in deze proeven laagsgewijs aangebracht. Er wordt daarbij een laag in water ingestrooid, waarna een aantal minuten wordt gewacht (3-10) om alle korrelgroottes te laten bezinken, waarbij een hoge dichtheid is nagestreefd door het aanstampen van het zand tijdens instrooien. Opgemerkt wordt dat het eerste gedeelte van een laag niet wordt aangestampd om de voorgaande laag niet te verstoren. De drie proeven zijn als volgt opgebouwd:



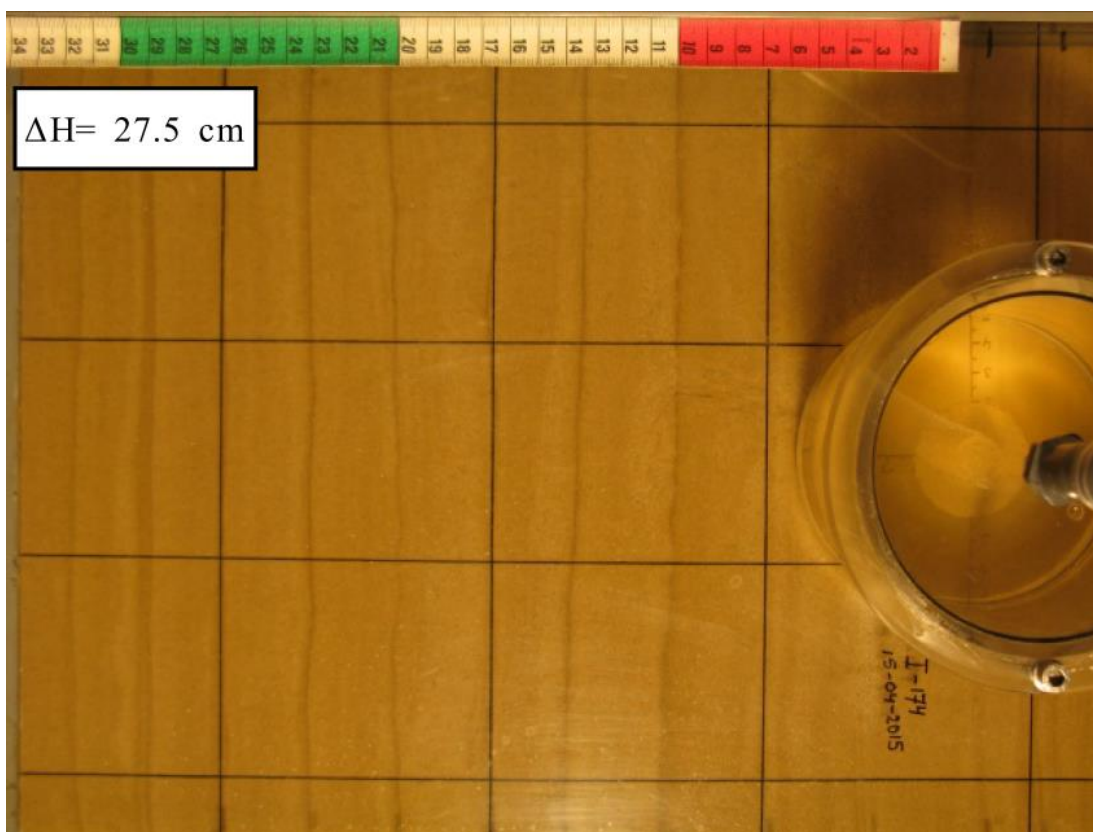
Tabel 2.4 Experimenten micro-heterogeniteit

Proef	Zandsoort	Laagdikte [cm]	Wachttijd [min]	RD [%]
E173	Enschede	4-5	10	90
I174	Itterbeck Mix 2	3	3	85
I175	Itterbeck Mix 2	3	3	87

Tabel 2.5 Zandeigenschappen proeven micro-heterogeniteit

Zandsoort	d50 [mm]	d60/d10 [-]
Enschede	0.380	1.6
Itterbeck Mix 2	0.143	3.2

Voor zowel Enschede zand als Itterbeck Mix 2 zijn al eerder pipingproeven uitgevoerd, die homogeen zijn opgebouwd. In onderstaande tabel zijn de resultaten van zowel de homogene en de heterogene proeven weergegeven. In proef E173 is het proces van pipevorming vergelijkbaar met die in een homogene proef. Drainage na afloop van de proef laat zien dat er laagvorming aanwezig was op micro-schaal (lagen van hooguit enkele mm).

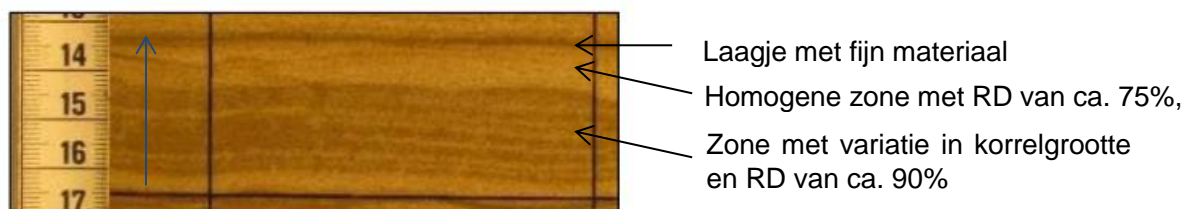


Figuur 2.4 Dwarsontwikkeling in pipe-vorming in proef I174 (Itterbeck Mix 2)

In de proeven I174 en I175 is de gelaagdheid goed zichtbaar, gekenmerkt door een laag van fijn materiaal (donker gekleurde banen). Door de wijze van aanbrengen is de structuur ontstaan zoals weergegeven in Figuur 2.5. Omdat de valhoogte beperkt was en de wachttijd vrij lang, is de opgebouwde heterogeniteit waarschijnlijk voornamelijk merkbaar in de laagjes



met fijne fractie (die pas na enkele minuten bezinkt) en variatie van relatieve dichtheid, veroorzaakt door de preparatiemethode, en in mindere mate in de variatie van korrelgrootte.



Figuur 2.5 Structuur binnen een laag van ca. 3 cm, waterstroming in de richting van de blauwe pijl

In proef I174 en proef I175 was het effect van de heterogeniteit ook merkbaar in de pipe vorming; de pipe ondervond geen weerstand bij de lagen met fijn materiaal (donkere lagen), maar wel bij de overgang tussen twee lagen en ontwikkelde hier in dwarsrichting (zie Figuur 2.4).

Tabel 2.6 Overzicht proeven micro-heterogeniteit

Test no	Zandsoort	Laagdikte [cm]	Kritiek verval [cm]	Relatieve dichtheid [%]	Bulk doorlatendheid [m/s]
E169	Enschede	n.v.t.	9	94	3.2E-4
E173	Enschede	4-5	11.5	90	4.8E-4
I167	Itterbeck Mix 2	n.v.t.	14.5	93	3.7E-5
I168	Itterbeck Mix 2	n.v.t.	20.5	89	2.7E-5
I174	Itterbeck Mix 2	3	28	85	2.5E-5
I175	Itterbeck Mix 2	3	41	87	2.2E-5

Tabel 2.6 illustreert dat het kritiek verval hoger is voor de proeven waarin het zandpakket gelaagd is opgebouwd, terwijl de bulk doorlatendheid en relatieve dichtheid niet veel verschillen. Uiteraard kunnen er lokaal wel verschillen zijn in doorlatendheid. Voor de proef op Enschede zand kan het gevonden verschil mogelijk toeschreven worden aan de natuurlijke spreiding in uitkomsten van laboratorium experimenten, maar voor het Itterbeck zand is het verschil dusdanig groot dat dit toegeschreven moet worden aan de gelaagdheid. Dit komt overeen met Figuur 2.4, waarin is te zien dat de dwarsontwikkeling ontstaat bij de laag met hoge relatieve dichtheid en meer gelaagdheid (zie ook Figuur 2.5), meer weerstand tegen pipevorming geven dan homogene lagen met lagere relatieve dichtheid.

#### 2.4.2 Barrière van grof zand

Om de invloed van heterogeniteit op grotere schaal te onderzoeken zijn experimenten uitgevoerd met een combinatie van zandsoorten: een barrière van grover zand van 5 cm dikte met als achtergrond een fijner zand. De lagen in het zandpakket zijn homogeen opgebouwd met hoge relatieve dichtheid. In Tabel 2.7 is een overzicht gegeven van uitgevoerde proeven.

Tabel 2.7 Overzicht proeven met barrière

Proef	Zandsoort - fijn	Zandsoort – grof (barrière)	Relatieve dichtheid [%]
B-SZ-B-176	Baskarp	Itterbeck fraction 431	ca. 90%
B-SZ-B-177	Baskarp	Itterbeck fraction 431	ca. 95%
B-SZ-B-178	Baskarp	Itterbeck fraction 431	ca. 90%
B-M3D-B-179	Baskarp	Itterbeck fraction 333	ca. 90%
B-M3D-B-180	Baskarp	Itterbeck fraction 333	ca. 90%

In onderstaande tabel 2.8 is een overzicht gegeven van de eigenschappen van de zandsoorten.

Tabel 2.8 Zandeigenschappen proeven macro-heterogeniteit

Zandsoort	d50 [mm]	d60/d10 [-]
Baskarp (B15)	0.123	1.5
Itterbeck fraction 431	0.342	2.6
Itterbeck fraction 333	0.333	2.1

In alle proeven is waargenomen dat een pipe ontstaat bij een vrij laag verval. Deze pipe ontwikkelt zich naar de barrière en groeit dan in dwarsrichting verder langs de barrière. Verdere verhoging van het verval leidt tot groei van de pipe in de barrière. Daar ondervindt de pipe opnieuw weerstand, zodat het verval verder verhoogd moet worden om voorbij de barrière te komen. In onderstaande tabel 2.9 zijn de vervallen weergegeven waarbij de pipe de barrière bereikt en waarbij de pipe voorbij de barrière groeit, ook voor twee eerder uitgevoerde homogene proeven op grof zand. Ook in de barrière komt de pipe nog in evenwicht.

Tabel 2.9 Overzicht resultaten proeven met barrière – voor de proeven zijn het kritiek verval gegeven voor fijn zand (het verval waarbij de pipe de barrière bereikt) en het kritiek verval voor grof zand, waarbij de pipe doorgroeit naar de bovenstroomse zijde.

Proef	Zandsoort - fijn	Zandsoort - grof	Hc_fijn zand [cm]	Hc_grof zand [cm]
B-142	Baskarp	-	8	-
B-171	Baskarp	-	8	-
B-SZ-B-176	Baskarp	Itterbeck fraction 431	12	27.5
B-SZ-B-177	Baskarp	Itterbeck fraction 431	7.5	37
B-SZ-B-178	Baskarp	Itterbeck fraction 431	7.5	40
B-M3D-B-179	Baskarp	Itterbeck fraction 333	7.5	32
B-M3D-B-180	Baskarp	Itterbeck fraction 333	9	49

Uit de proeven kan geconcludeerd worden dat het kritiek verval aanzienlijk hoger is voor zandpakketten met afwisseling in de korrelgrootte. Hierbij wordt opgemerkt dat er geen kleine-schaalproeven zijn uitgevoerd met alleen het grovere materiaal. Er zijn wel medium-schaalproeven uitgevoerd met deze zandsoorten (homogeen opgebouwd), welke vergeleken kunnen worden met medium-schaalproeven op Baskarp zand (homogeen opgebouwd); deze laten zien dat het kritiek verval voor deze drie zandsoorten niet veel verschillen wanneer deze homogeen beproefd worden. De verwachting is daarom dat de kritiek vervallen voor deze zandsoorten ook op kleine-schaal ongeveer hetzelfde zijn, wanneer ze homogeen worden opgebouwd, wat de hogere sterkte in de proeven met barrière bevestigt. De extra sterkte in

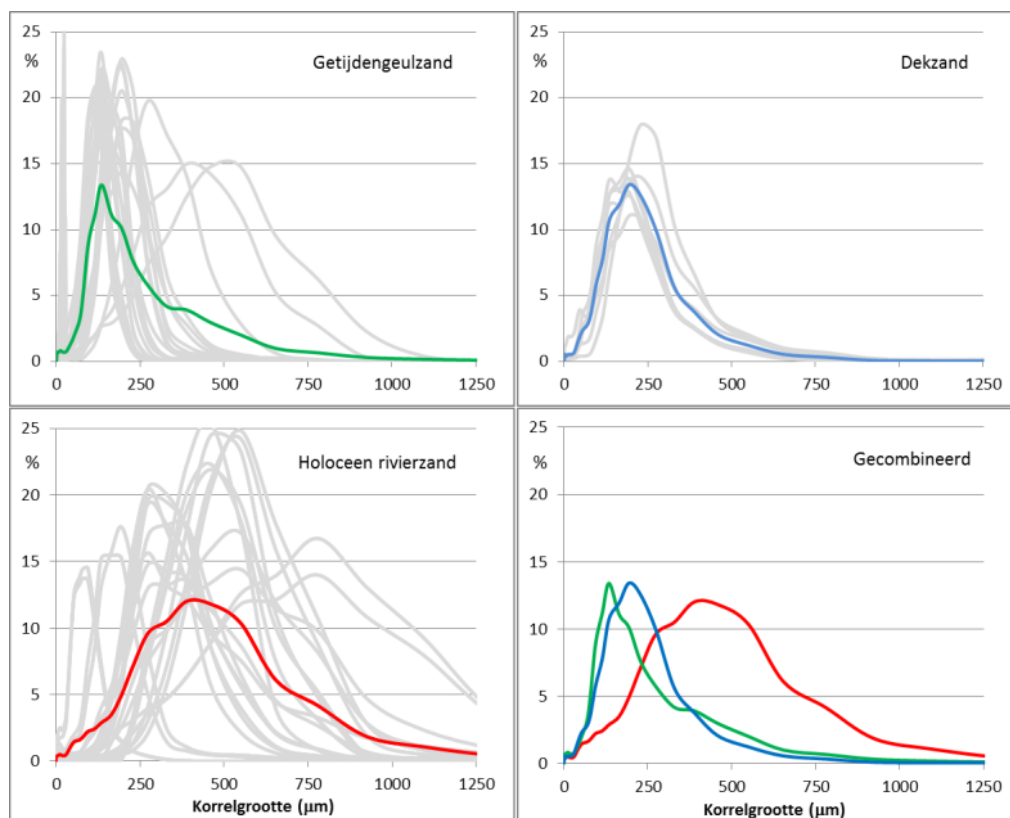
de proeven met barrière is vermoedelijk afkomstig uit de combinatie van een lage bulkdoorlatendheid en grote korreldiameter.

## 2.5 Conclusies

In alle proeven waarin variatie in korrelgrootte in het pad van de pipe is aangebracht is een hoger kritiek verval gevonden. De oorzaak van deze toename in sterkte is niet in alle proeven direct duidelijk. Waarschijnlijk wordt er extra sterkte gevonden door de combinatie van een relatief lage doorlatendheid in de fijnere lagen en de grote korreldiameter in de grovere lagen. De variatie in korreldiameter zorgt voor dwarsontwikkeling van de pipe bij de overgang tussen fijnere en grovere lagen. Ook dit zorgt voor een hogere sterkte (er ontstaat een groter uitstroomvlak: de stroming wordt verdeeld over de in dwarsrichting ontwikkelde pipe, waardoor de druk bij de kop van de pipe afneemt). Er zijn relatief veel proeven met variatie op grotere schaal (barrière) en relatief weinig proeven met variatie op micro-schaal. Hoewel het duidelijk is dat er extra sterkte is ten gevolge van heterogeniteit, is er nog te weinig kennis om vast te stellen hoe groot de sterkte precies is.

### 3 Heterogeniteit in rivierafzettingen op verschillende schalen

In de ondergrond van Nederland komen verschillende soorten zandafzettingen voor. Hierbij wordt onderscheid gemaakt in windafzettingen, rivierafzettingen en getijdenafzettingen. Bij alle typen afzettingen speelt heterogeniteit een rol. Dit onderzoek heeft zich gericht op rivierafzettingen, omdat de variatie van korrelgrootte binnen deze afzettingen heel groot is (Figuur 3.1), en er veel trajecten worden afgekeurd voor piping in het rivierengebied.



Figuur 3.1 Korrelgrootteverdelingen voor de drie belangrijkste afzettingstypes, gemaakt met behulp van de ruwe korrelgroottedata van TNO-GDN (2014). De grijze lijnen geven steeds één verdeling weer, de gekleurde lijnen het gemiddelde. Rechtsomder worden de drie gemiddelde korrelgrootteverdelingen getoond.

Wanneer deze afzettingen beschouwd worden, kan onderscheid gemaakt worden in de karakteristieke eigenschappen op micro- (mm-cm), meso- (dm-m) en macroschaal (>10 m) en zelfs op deltaschaal (> 10 km). Vooral op micro- en mesoschaal speelt hierbij het probleem dat de lokale variatie niet of zeer moeilijk te karteren is. Echter, voor verschillende afzettingstypes is er de te verwachten variatie op micro- en mesoschaal uit waarnemingen en uit de literatuur beschikbaar. De variatie op macroschaal is wel karteerbaar.

Voor meer informatie over de heterogeniteit van rivierafzettingen wordt verwezen naar het rapport “Korrelgroottes en heterogeniteit van rivierafzettingen in het licht van piping” van door Wiersma en Hijma (2017) dat binnen dezelfde projectoverstijgende verkenning is uitgevoerd

### 3.1 Micro-schaal variatie in korrelgrootte in meanderende rivierafzettingen

Zoals beschreven in Wiersma en Hijma (2017) treedt variatie zowel op micro-, meso en macro-schaal op. De variatie op micro-schaal bestaat uit millimeter dikke laminaties die ontstaan tijdens het transport en de afzetting van het zand in een rivier. De laminaties bestaan uit kleine gradaties in korrelgrootte, meestal van iets grover aan de basis van een lamina naar iets fijner aan de top (fining upward). Deze variatie op deze schaal is overal in het zandpakket aanwezig. Hierdoor kan er relatief eenvoudig rekening mee gehouden worden mits het invloed heeft op pipe-vorming.

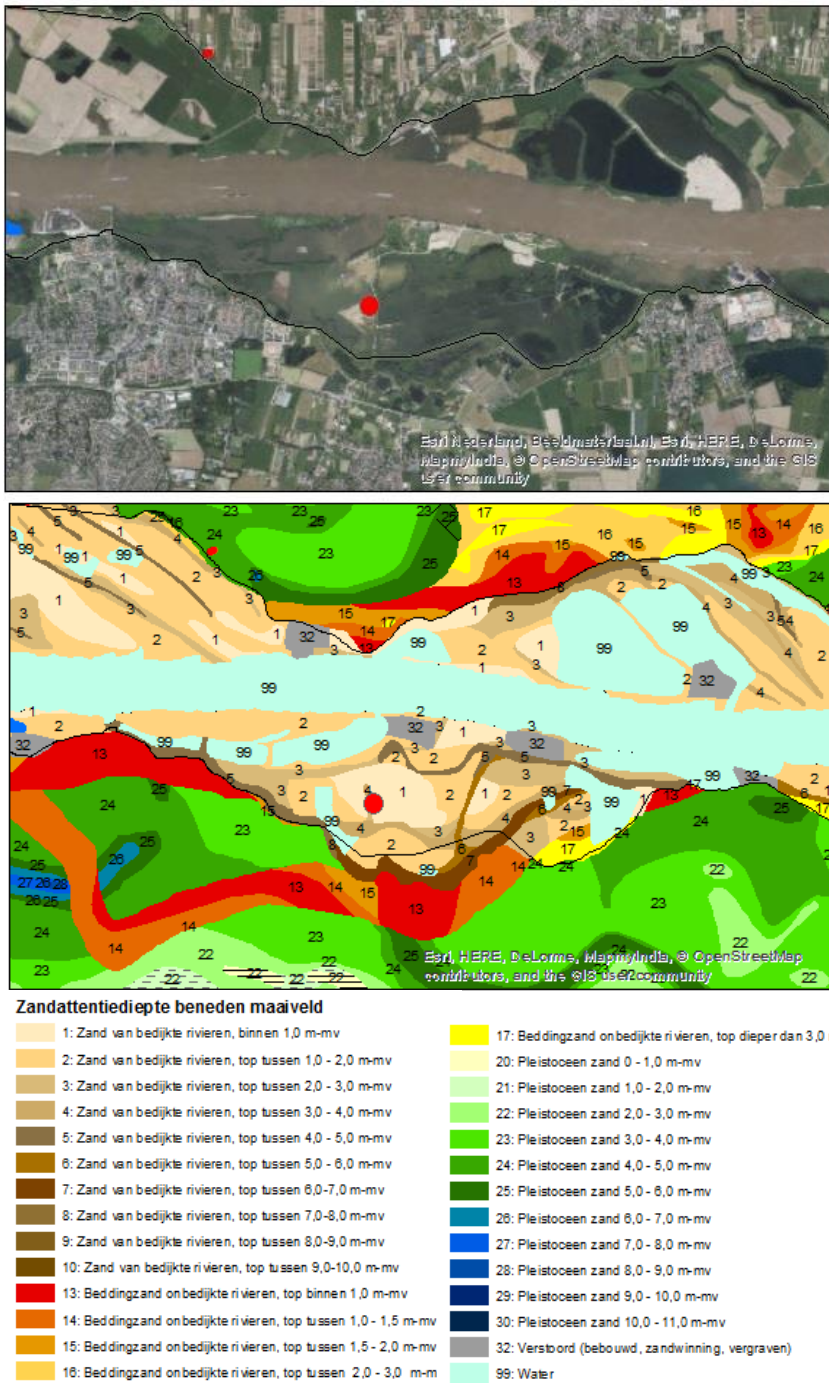
De variatie in korrelgrootte neemt toe van microschaal naar de deltaschaal. Dit betekent dat op mm schaal kleinere variaties te vinden zijn dan op mesoschaal, en op mesoschaal weer kleinere verschillen dan op macroschaal. In een klein zandmonster is millimeterschaal altijd aanwezig, en op een traject van een kwelweg onder een dijk zijn altijd mesoschaal afwisselingen in korrelgrootte aanwezig. Dit blijkt bijvoorbeeld uit proeftuinen waarin korrelgroottevariaties zijn bepaald. Tussen zandmonsters 5 m uit elkaar is grotere korrelgroottevariatie aanwezig dan in zandmonsters op cm schaal (Wiersma en Hijma, 2017). Korrelgroottevariatie is dus altijd aanwezig in een kwelweg, van kleine variaties op millimeterschaal tot grotere variatie op meterschaal. Hoewel bekend is dat er variatie is, is nader onderzoek nodig om deze variatie te kwantificeren en de invloed van de variatie vervolgens in rekening te brengen.

## 4 Zandselectie

Om het onderzoek naar de micro-gelaagdheid in zand zo goed mogelijk uit te voeren is zand gebruikt uit een top van een riviergeulafzetting langs de Waal. Dit zand is afkomstig van een zandwinning in de uiterwaarden bij Afferden en Deest, en is op 1 februari 2017 opgegraven met een graafmachine en meegenomen in twee “big-bags” (Figuur 4.1). Op locatie is er zorg voor gedragen dat het zand uit de bovenste halve meter onder de deklaag is gehaald.

Omdat het water tijdens het moment van bemonstering erg laag was, was de top van de zandlaag ook ontsloten in een steile wand langs de zandwinplas (Figuur 4.2). In de wand was duidelijk zichtbaar dat het zand horizontaal gelaagd was, en dat er lagen aanwezig waren met scheve millimeterschaal laminaties, zogenaamde crossbedding.

Het zand is niet voorberekt voor de proeven, dus de fijne fractie die van nature aanwezig is in het zand is ook meegenomen in de proeven. Op het zand zijn korrelgrootteanalyses gedaan. Deze zijn weergegeven in appendix A.



Figuur 4.1 Bovenste figuur: Locatie (grote rode stip) van de zandmonsters. Onderste figuur: locatie (grote rode stip) geplot op de zanddiepte kaart (Cohen et al., 2012). Het zand komt uit de top van een kronkelwaard, en voor de winning van het kleidek erboven lag het binnen 1m onder maaiveld.





*Figuur 4.2 lagen met crossbedding*





*Figuur 4.3 Crossbedding in laag*

## 5 Experimenteel onderzoek

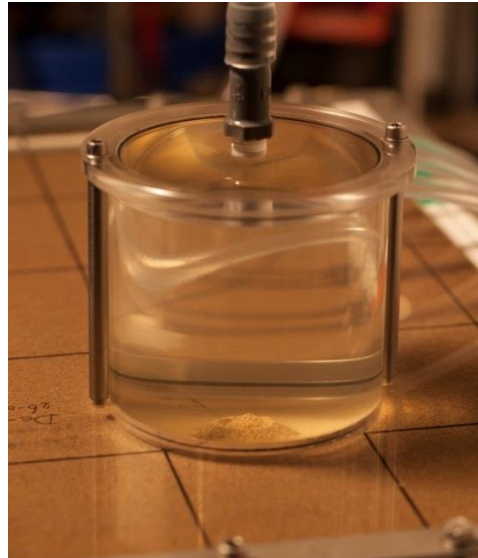
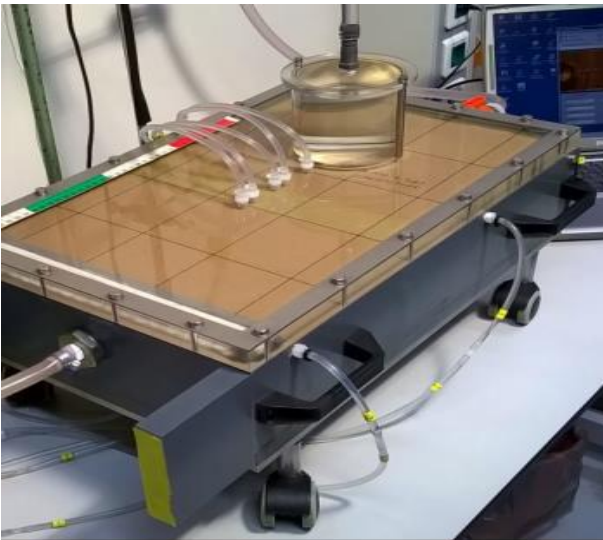
Het experimenteel onderzoek wordt uitgevoerd om de micro-schaal heterogeniteit op het pipingproces te onderzoeken. Hiertoe zijn 5 proeven uitgevoerd op Deest zand, met verschillende mate van heterogeniteit.

### 5.1 Opstelling

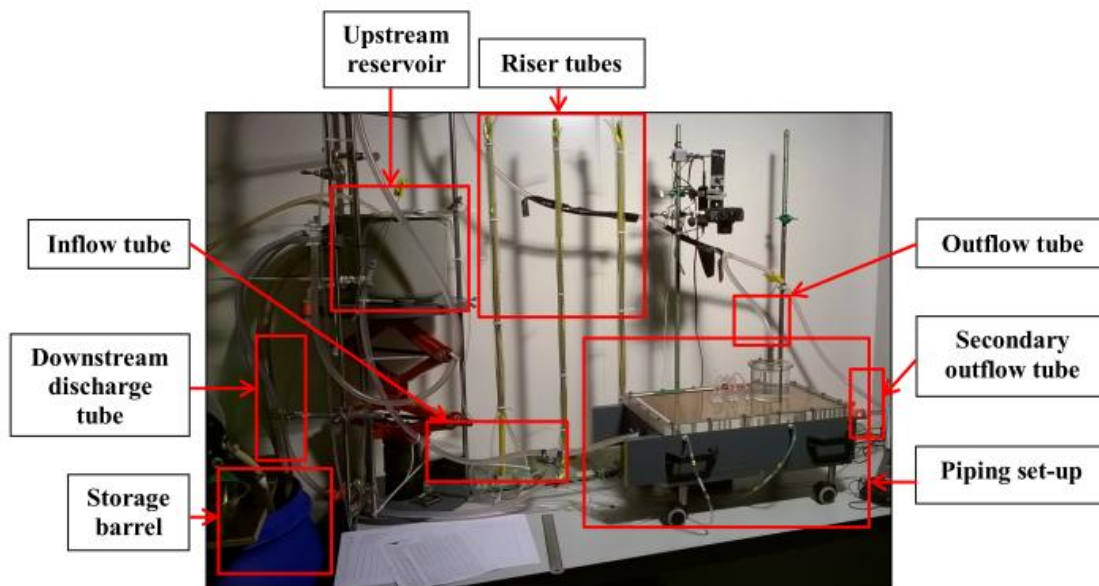
De proeven zijn uitgevoerd in de 'kleine schaal' opstelling die al eerder in piping onderzoek voor is toegepast (zie ook Van Beek et al., 2015). Deze opstelling bestaat uit een PVC box met acrylaat deksel (Figuur 5.1), waarin een zandpakket opgebouwd kan worden met afmetingen van 48.3x30x10 cm (LxBxD). De acrylaat plaat simuleert de dijk en de deklaag en er is een gat in aangebracht, dat als uittreepunt fungeert.

In het verleden werd vaak gewerkt met een opstelling waarbij de stroming voorafgaand aan pipe-ontwikkeling 2-dimensionaal was, zoals een helling, die zich over de hele breedte van de bak uitstrekt, een open uitstroomgebied zonder deklaag of een sloot die over de breedte van de bak aanwezig is. Het huidige model van Sellmeijer, dat ook gebaseerd is op 2D stroming, is gevalideerd met dergelijke proeven. Recent onderzoek met een '3D uitstroom', zoals bijvoorbeeld een gat in de deklaag, toont aan dat een 3D-configuratie tot veel lagere kritieke vervallen leidt dan een 2D configuratie (Van Beek et al., 2015). Dit heeft te maken met de meer geconcentreerde toestroming van water naar het midden van de opstelling. Een 3D configuratie zal ook in de praktijk veel voorkomen. In deze proevenserie is daarom ook met een gat in de deklaag gewerkt.

Over het uitstroompunt is een cilinder geplaatst voor het gecontroleerd afdalen van water en de opbouw van een krater. In de acrylaat plaat en in de box zijn stijghoogtebuisjes aangebracht (Figuur 5.2). In appendix D is een technische tekening van de pipingbox opgenomen. Bovenstrooms van het zandpakket bevindt zich een nylon filter met maaswijdte van 48  $\mu\text{m}$ , dat tegen een kunststof frame is geplakt om het water goed over het zandpakket te verspreiden. Het bovenstroomse vat zorgt voor een constant waterniveau. Er kan een waterstandsverschil worden aangebracht tussen in- en uitstroompunt door het verlagen van het niveau van het uitstroompunt. De camera registreert de voortgang van de pipe door iedere 10 s een foto te nemen. Debieten en waterspanningen worden eenmaal per 5 minuten met de hand gemeten.



Figuur 5.1 De kleine-schaal opstelling



Figuur 5.2 De volledige experimentele opstelling (Negrinelli, 2015)

## 5.2 Proevenprogramma

In totaal zijn 5 proeven uitgevoerd. In Appendix C zijn de rapporten van deze proeven opgenomen. In Tabel 5.1 is een overzicht van de proeven weergegeven.



Tabel 5.1 Overzicht uitgevoerde proeven

Proef no.	Beschrijving
De-184	5 mm lagen – testen preparatie
De-185	5 mm lagen
De-186	20 mm lagen
De-187	homogene opbouw
De-201	20 mm lagen

De eerste proef kon niet met succes geprepareerd worden: tijdens verdichten (voor toelichting zie de volgende paragraaf) kon het water niet goed afvloeien, waardoor het pakket opgetild werd en de gelaagdheid mogelijk aangetast. De tweede proef is daarom een herhaling van de eerste proef, met een optimalisatie in de preparatiemethode. Proef De-184 proef is wel meegenomen in de verdere analyse omdat het pakket niet dusdanig beschadigd is dat de proef volledig mislukt is.

### 5.3 Preparatiemethode

Voor het prepareren van zandpakketten zijn in het verleden verschillende methoden gehanteerd. In alle gevallen wordt de bak op zijn kant gezet, zodat de aansluiting van het zandpakket met de acrylaat deksel goed is. Voor een vaste pakking met homogene opbouw wordt het droge zand ingestrooid in water, onder continu verdichten met een stamper. Met deze methode wordt een zandpakket verkregen met een relatieve dichtheid van 90-100%. Door het continu instrooien bij relatief geringe waterhoogte wordt de laagvorming tot een minimum beperkt. Voor het prepareren van monsters met lagere relatieve dichtheid wordt een andere methode toegepast: het zand wordt continu ingestrooid in water tot de gehele box gevuld is, waarna verdichting bereikt wordt door het genereren van een drukgolf (d.m.v. liften en plaatsen). Door de drukgolf stort het pakket in en vloeit het overtollige water af. Met deze methode wordt doorgaans een relatieve dichtheid van maximaal 70% bereikt.

In het voorliggende onderzoek was het de wens om een zo realistisch mogelijk pakket op te bouwen met daarin micro-schaal gelaagdheid. Hierdoor is de tweede methode het meest geschikt, waarin het gehele pakket na instrooien verdicht wordt d.m.v. drukgolven, omdat daarin de verstoring van aangebrachte lagen beperkt is en een pakket van ca. 60% meer representatief is voor de praktijk dan een pakket van ca. 100%. Door het discontinu toevoegen van zand kan gelaagdheid gerealiseerd worden.

In het onderzoek van Negrinelli (2015) is deze methode toegepast om de micro-schaal gelaagdheid te onderzoeken. In dat onderzoek was de wachttijd echter vrij lang (3-10 minuten), waardoor ook de fijne fractie de gelegenheid had om te bezinken. Een laagje met fijne fractie komt echter in natuurlijke afzettingen niet voor. Het is daarom eerst onderzocht hoe de micro-schaal gelaagdheid zo optimaal mogelijk kan worden gesimuleerd. Dit is nader toegelicht in Appendix B. Uit dit vooronderzoek bleek dat een minimale valhoogte van 40 cm noodzakelijk was om de korrels goed te scheiden. Hiervoor is een opzetstuk gemaakt. De optimale wachttijd tussen twee lagen zand was 20 a 30 s. Bij deze wachttijd ontstond er geen menging tussen opeenvolgende scheppen en was er geen afzetting van de fijne fractie. Om een laag homogeen in te strooien werd een gootje gebruikt, waarbij een laag van 5 mm of 20 mm in een schep afgezet werd.

In proef 184 verliep het verdichten niet goed. Door de aanwezigheid van laagjes werd de verticale afstroming van water bemoeilijkt en bij het dissiperen van de wateroverspanning werd het pakket gelift, waardoor de gelaagdheid mogelijk verstoord is geraakt. Vanaf proef 185 is het water daarom bij het verdichten tweezijdig afgestroomd: dit leidde niet tot verstoringen van het pakket.

## 5.4 Proefuitvoering

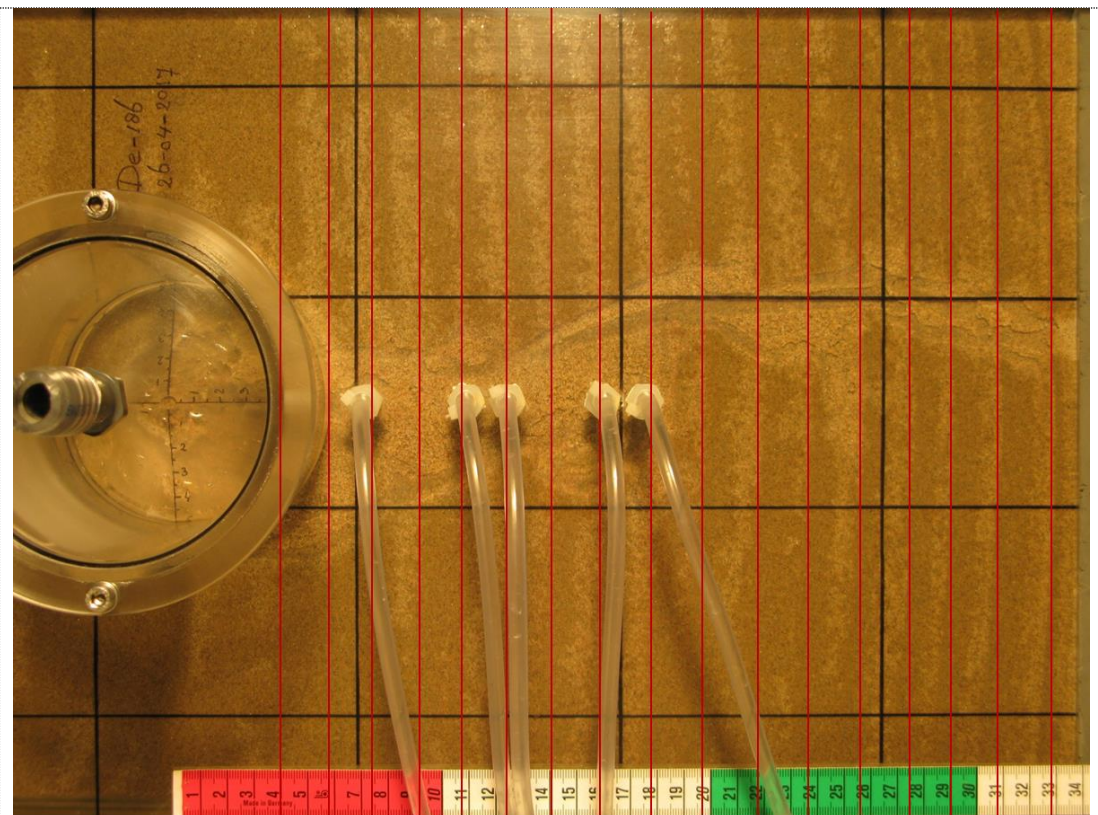
Tijdens de uitvoering van de proef wordt het verval over de zandbox verhoogd, door het waterniveau aan de benedenstroomse zijde te verlagen. Dit gebeurt stapsgewijs met een stapgrootte van 1 cm per 5 minuten, tenzij erosie optreedt: er wordt dan gewacht totdat er enkele minuten geen korreltransport meer zichtbaar is. Vanaf een verval van ca. 7 cm wordt de stapgrootte verkleind naar 0.5 cm om het kritiek verval nauwkeurig te bepalen. De proef wordt afgebroken wanneer de pipe de bovenstroomse zijde bereikt. Na de proef wordt het water langzaam uit de opstelling gelaten. Bij het capillair trekken van het zandpakket wordt de gelaagdheid zichtbaar: het water wordt relatief langer vastgehouden in de minder doorlatende lagen bij het verlagen van de waterhoogte.

## 5.5 Resultaten

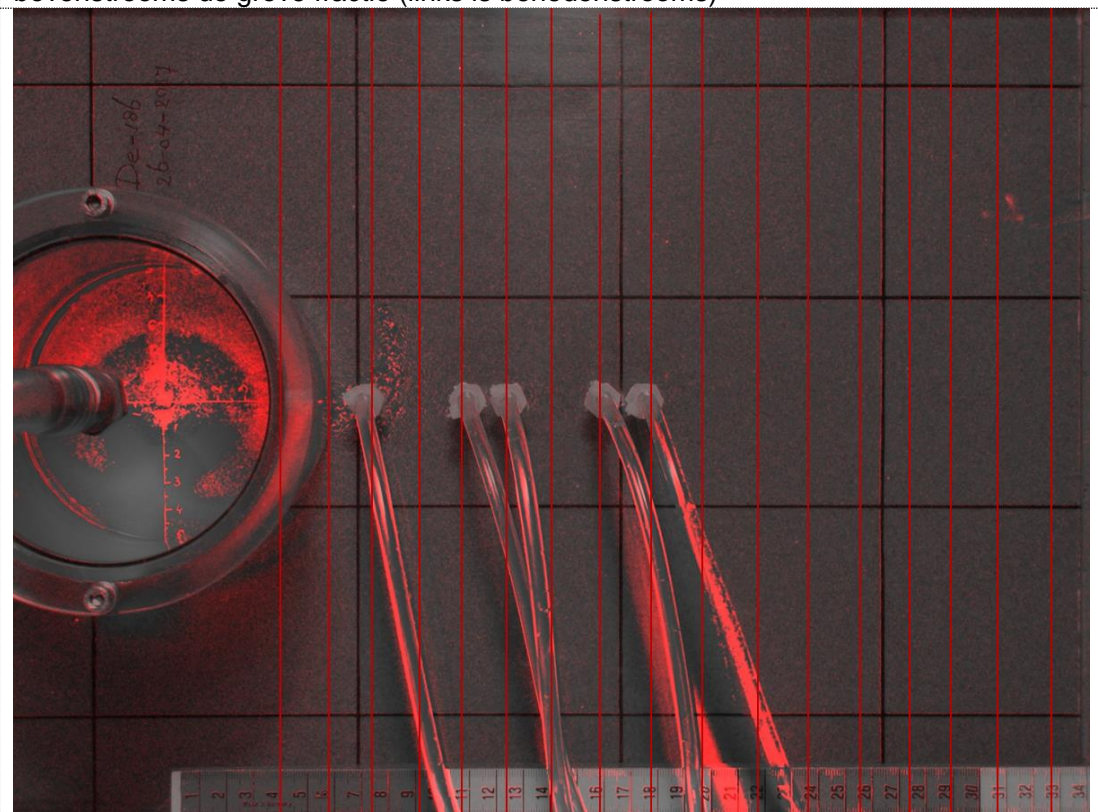
### 5.5.1 Observaties van het pipingproces

De observaties zijn vergelijkbaar voor de proeven met lagen van 5 mm dikte en de proef met homogene opbouw. In deze proeven ontstaat bij het verhogen van het verval eerst pipevorming in willekeurige richting rondom het gat. Na verloop van tijd ontwikkelt een van de pipes zich in bovenstroomse richting. Na enkele momenten van evenwicht en opvolgend verhogen van het verval ontwikkelt de pipe zich in bovenstroomse richting tot aan het bovenstrooms filter. Opvallend is dat bij de proef met homogene opbouw (De-187) een blokkade lijkt te bestaan bij een pipe-lengte van ca. 23 cm. Mogelijk is de dichtheid op deze locatie net iets anders. Uiteindelijk vindt de pipe een ander pad en wordt alsnog de bovenstroomse zijde bereikt.

In proef De-186 (Figuur 5.3) verloopt het proces iets anders. In deze proef zijn, net zoals in proef De-201 lagen van 2 cm dikte aangebracht. In deze proef ondervindt de pipe tweemaal duidelijk weerstand, bij een lengte van 9 cm en op een lengte bij 18 cm. Op basis van de beelden bij het capillair trekken, lijkt de weerstand veroorzaakt te worden door de grovere fractie binnen de laag. Hoewel een evenwicht op 9 cm ook bij homogene proeven voorkomt, ontwikkelt de pipe bij 9 cm ook wat in dwarsrichting, wat duidt op extra weerstand door heterogeniteit. Hetzelfde vindt plaats op een lengte van 18 cm, hoewel in dit laatste geval het verval niet veel verhoogd hoefde te worden om door de blokkade te breken. Ook bij een pipelengte van 23 cm ondervindt de pipe weerstand en is dwarsontwikkeling zichtbaar. Bij deze pipelengte hoefde het verval niet verhoogd te worden voor doorgaande erosie. In proef De-201 is er bij een pipelengte van 6 cm aanzienlijke weerstand te bemerken: na verschillende stappen van verhoging van het verval, waarbij de pipe slechts dwars op de stroming groeit, groeit de pipe pas door, direct tot aan de bovenstroomse zijde. Bij het doorgroeien zijn kleine dwarsontwikkelingen van de pipe zichtbaar.

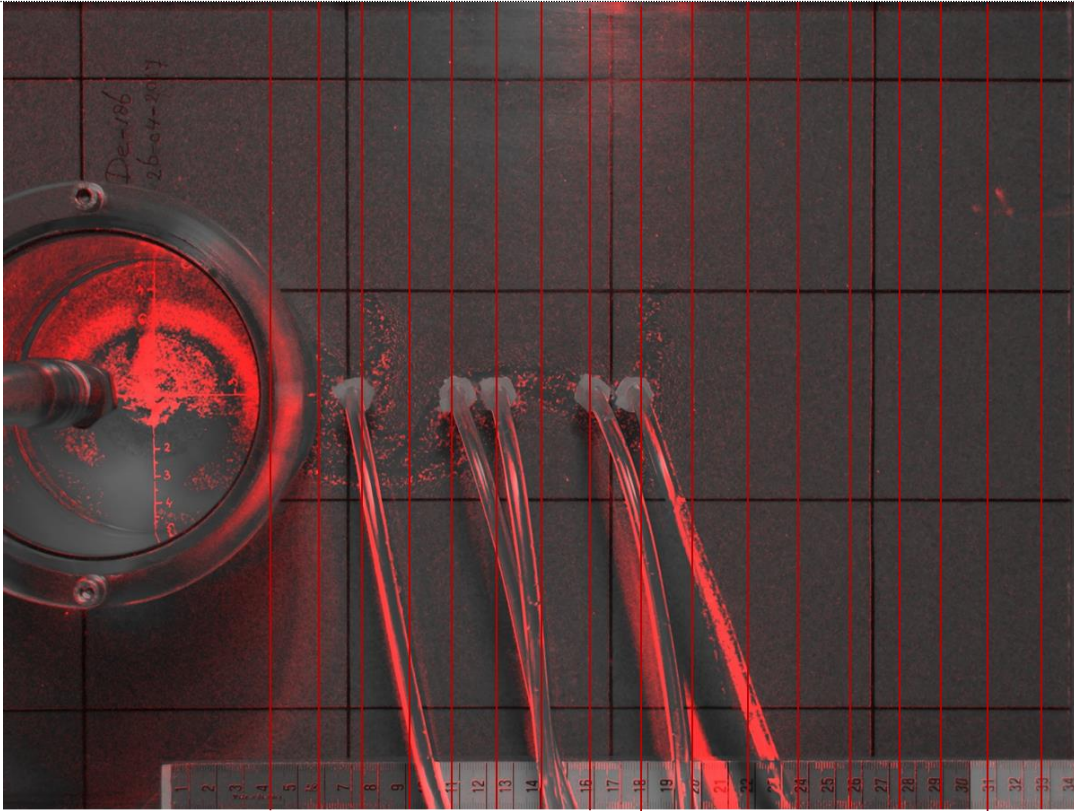


De-186: 20 mm gelaagdheid zichtbaar na capillair trekken – rode lijnen geven scheiding tussen lagen aan: binnen de laag benedenstrooms de fijne fractie en bovenstrooms de grove fractie (links is benedenstrooms)

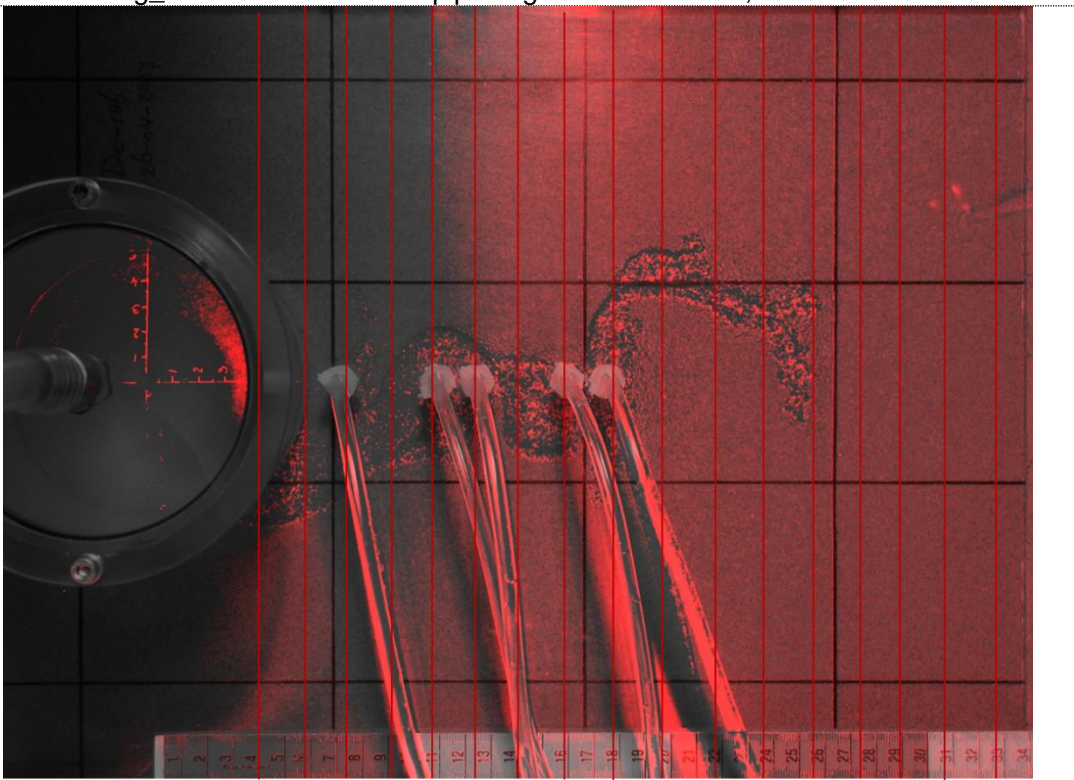




De-186 img\_581: 26-04-17 10:51 pipelengte 9 cm – H=9 cm



De-186 img\_811: 26-04-17 11:30: pipelengte 18 cm – H=10,5 cm

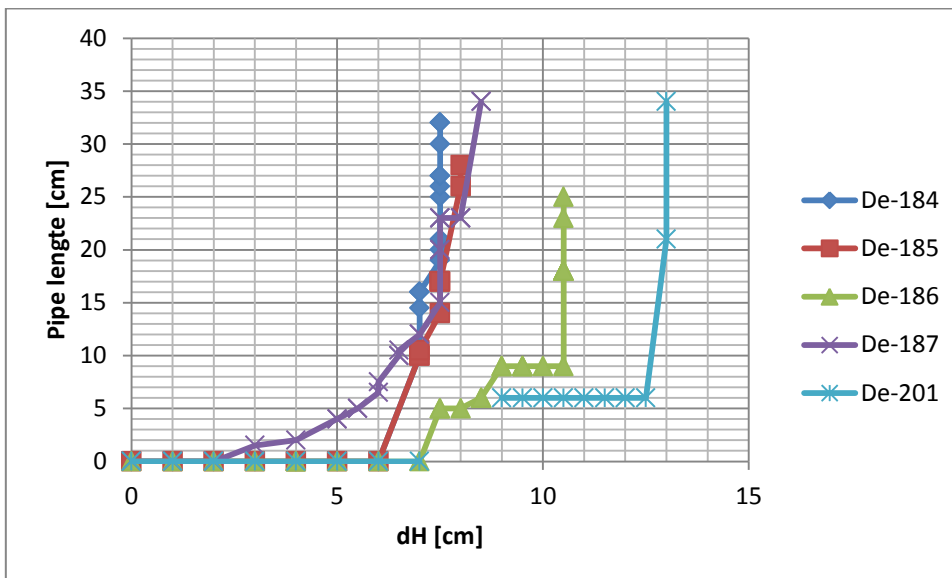


De-186 img\_901: 26-04-17 11:45: pipelengte 25 cm – H=10,5 cm

*Figuur 5.3 Ontwikkeling van de pipe in experiment De-186*



In Figuur 5.4 is de pipelengte, zoals waargenomen in de proef uitgezet tegen het aangebrachte (ongecorrigeerde) verval. Het is in deze figuur goed zichtbaar dat de pipe in de proeven met lagen van 2 cm dikte (DE-186 en DE-201) meer weerstand ondervindt dan in de overige proeven.



Figuur 5.4 Pipe lengte uitgezet tegen het aangebracht verval

### 5.5.2 Het kritiek verval

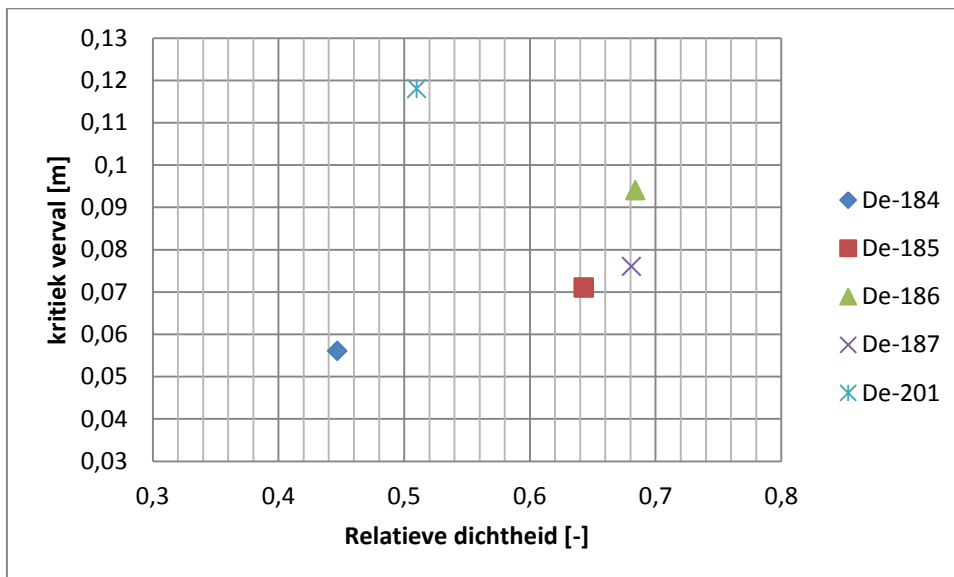
Tijdens de proeven wordt een verval aangebracht over de pipingopstelling, wat stapsgewijs verhoogd wordt totdat de pipe uiteindelijk tot aan het bovenstreams filter is gegroeid. Het aangebrachte verval is iets groter dan het verval dat over het zandpakket staat, omdat het bovenstreams filter ook weerstand biedt. Er is niet gecorrigeerd voor de weerstand van de zandmeevoerende wel, omdat de pipe niet altijd onder de meest benedenstreams gelegen stijghoogtebuis groeit, waardoor deze weerstand niet bepaald kan worden. Omdat de zandmeevoerende wel een beperkte omvang heeft bij het bereiken van het kritiek verval, wordt verondersteld dat de weerstand klein is. Het aangebracht verval ( $H_{c\_uncorr}$ ) wordt daarom gecorrigeerd ( $H_{c\_corr}$ ) op basis van de extrapolatie van de stijghoogtemetingen aan de onderkant van het zandpakket (stijghoogtebuisjes H3 en H4).

In Tabel 5.2 is een overzicht gegeven van de resultaten van de uitgevoerde proeven. De bulk doorlatendheid ( $k$ ), die bepaald is op basis van de stijghoogtemetingen (H3 en H4, in de bodem van de opstelling) en het gemeten debiet, is hoger voor proef 184 en proef De-201, die ook een iets lagere relatieve dichtheid hebben. De verschillen in doorlatendheid voor de andere drie proeven, met vergelijkbare relatieve dichtheid, zijn klein.

Tabel 5.2 Overzicht resultaten uitgevoerde proeven

Test no.	RD [-]	Hc_uncorr [m]	Hc_corr [m]	k [m/s]
De-184	0.45	0.075	0.056	2.7E-04
De-185	0.64	0.08	0.071	2.0E-04
De-186	0.68	0.105	0.094	1.9E-04
De-187	0.68	0.085	0.076	2.3E-04
De-201	0.51	0.130	0.118	3.2E-04

In Figuur 5.5 is het gecorrigeerde kritiek verval uitgezet tegen de relatieve dichtheid. Het kritiek verval neemt voor de proeven met homogene opbouw en 5 mm lagen duidelijk toe met de relatieve dichtheid, wat conform verwachting is (o.a. Robbins et al., 2015). De proeven met 5 mm lagen liggen in dezelfde lijn als het homogene zand, hoewel proef De-184 mogelijk niet geheel betrouwbaar is; de proeven met 20 mm lagen lijken een relatief hogere sterkte te hebben. De sterkte van proef De-201 is hoog ten opzichte van proef De-186. De oorzaak hiervoor is onduidelijk. Een mogelijke oorzaak zou kunnen zijn dat er in proef De-201 meer weerstand aangetroffen werd op relatief korte pipe-lengte, waardoor de extra sterkte ten gevolge van dwarsontwikkeling en weerstand optimaal werd benut. Het zou ook mogelijk zijn dat de lagere relatieve dichtheid van het pakket, resulterend in grotere poriën, migratie van fines toestaat, welke vervolgens afgevangen worden door minder doorlatende laagjes.



Figuur 5.5 Kritiek verval uitgezet tegen de relatieve dichtheid

## 6 DgFlow berekeningen

DgFlow is een numeriek grondwaterstromingsmodel waarin het criterium van Sellmeijer (begin van bewegen van zandkorrels) is geïmplementeerd (Van Esch et al., 2013) met modificatie aan de hand van Sellmeijer et al. (2011), zonder modelfactor. Met dit model kan worden vastgesteld bij welke waterstand een pipe kan doorgroeien. Voor een homogene ondergrond komen de uitkomsten van het model overeen met de rekenregel van Sellmeijer. In het model kan echter ook een meer complexe ondergrond gemodelleerd worden. Hierbij kan gedacht worden aan horizontaal meerlaagse pakketten. Recentelijk is D-Geo Flow beschikbaar gesteld: dit is de gebruikersschil rond een vastgelegde versie van DgFlow, voor 2D grondwaterstromingsberekeningen en piping berekeningen.

In dit hoofdstuk zijn de DgFlow simulaties van de proeven met Deest zand beschreven: in appendix E zijn de details van deze berekeningen weergegeven. Voor dit doel is DgFlow aangepast, om ook variatie in korrelgrootte en doorlatendheid in de baan van de pipe te simuleren. Vooralsnog is het in D-Geo Flow niet mogelijk om met variaties van zandeigenschappen in de baan van de pipe te rekenen.

De rekenregel van Sellmeijer waarmee gerekend wordt, houdt alleen rekening met erosie in de pipe zelf en bepaalt op basis van dit erosie-criterium de progressie. Omdat het Sellmeijer model gebaseerd is op erosie in de pipe en niet aan de kop van de pipe, kan het effect van een blokkade aan de kop van de pipe op de pipe vorming niet goed voorspeld worden. Hierdoor werkt het model voor homogeen zand vrij goed, maar voor heterogeen zand levert dit problemen op. Fysisch gezien is het namelijk meer correct om een afzonderlijk criterium voor progressie aan de kop van de pipe te hanteren, naast een criterium voor erosie in de pipe om te voorspellen wat de drukval in de pipe is. Daarmee zou variatie in de baan van de pipe mogelijk wel correct kunnen worden gemodelleerd. Verschillende onderzoekers werken aan dit doel (Robbins en Van Beek, 2017, Rotunno et al., 2017, Tran et al., 2017).

Desondanks is het nuttig om te kijken hoe het model reageert op variatie in korrelgrootte en of de resultaten vergelijkbaar zijn met de proeven. Er zijn proeven uitgevoerd met Deest zand met de volgende variaties:

- Opeenvolgende laagjes van 5 mm dikte.
- Opeenvolgende laagjes van 20 mm dikte.
- Homogene preparatie van Deest zand.

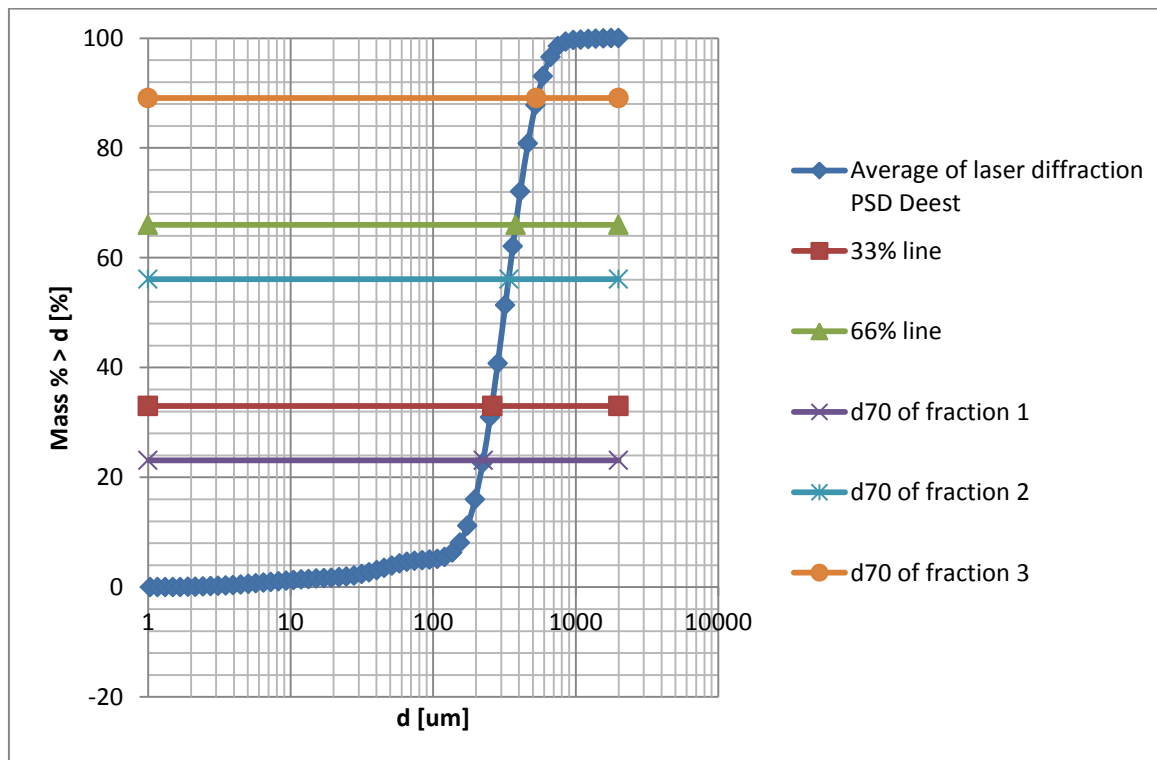
Het 2D model van Sellmeijer is gecalibreerd op basis van proeven met tweedimensionale uitstroom (sloot, helling etc). De proeven zijn uitgevoerd met een gat in de deklaag (3D-stroming). Uit eerder onderzoek is bekend dat proeven met 3D configuratie een factor 2 lager kritiek verval geven dan proeven met 2D configuratie (Van Beek et al., 2015). Er wordt daarom opgemerkt dat de predicties van het Sellmeijer model sowieso te hoog zijn ten opzichte van de kritieke vervallen in de proeven. Het is mogelijk om in DgFlow in 3D te rekenen, maar de 3D simulaties van homogeen opgebouwde proeven geven nog onvoldoende overeenkomst met de uitkomsten van de proeven om de overstap te maken naar 3D berekeningen met gelaagde opbouw van het zandpakket.

## 6.1 Opzet berekeningen

Om te beschouwen wat het effect is van variatie in korreldiameter volgens het Sellmeijer model, worden de volgende berekeningen uitgevoerd: De proeven worden in 2D gesimuleerd in DgFlow door lagen aan te brengen met een karakteristieke korrelgrootte. Iedere aangebrachte laag die naar boven toe fijner wordt, wordt verdeeld in 3 fracties, elk bestaande uit 33% van het totaal gewicht (Figuur 6.1) (0-260, 260-380 en >380  $\mu\text{m}$ ). Van elke fractie is de d70 bepaald als representatieve diameter (225, 340 en 530  $\mu\text{m}$ ).

De volgende situaties worden doorgerekend:

- Opeenvolgende lagen van 6 mm dikte met d70 van 225, 340 en 530  $\mu\text{m}$  (representatief voor de proef met lagen van 2 cm)
- Opeenvolgende lagen van 2 cm dikte met d70 van 225, 340 en 530  $\mu\text{m}$  (representatief voor lagen van 6 cm) (deze situatie is niet in het lab beproefd, maar is bedoeld om te beschouwen wat het effect van laagdikte is).
- Een homogene situatie met d70 van 400  $\mu\text{m}$ .



Figuur 6.1 Verdeling verschillende fracties Deest zand

Voor de doorlatendheid worden verschillende varianten aangehouden (Tabel 6.1):

- Doorlatendheid van de fractie op basis van Beyer (1964)
- Doorlatendheid op basis van best guess
- Homogene doorlatendheid op basis van Beyer (alleen variatie korrelgrootte)

Tabel 6.1 Overzicht eigenschappen van gesplitst Deest zand in 3 fracties

	d70 [mm]	k [m/s] – Beyer	k [m/s] – best guess
Deest homogeen	0.400	$2.8^E-4$	$2.8^E-4$
Deest fractie 1	0.225	$1.5^E-5$	$3.5E-05$
Deest fractie 2	0.340	$8.3^E-4$	$1.9E-04$
Deest fractie 3	0.530	$1.8^E-3$	$3.5E-04$

De berekeningen worden in 2D uitgevoerd met de eigenschappen zoals genoemd in Tabel 6.2 en  $g=9.81 \text{ m/s}^2$ .

Tabel 6.2 Overzicht eigenschappen materialen in DgFlow

Materiaal	d70 [mm]	visc. [Ns/m <sup>2</sup> ]	rho [kg/m <sup>3</sup> ]	$\beta$ [m <sup>2</sup> /N]	$\eta$ [-]	$\theta$ [degrees]
water	-	1.00E-03	1000	5.00E-10	-	-
Fractie 1	0.225	-	2650	0	0.25	37
Fractie 2	0.340	-	2650	0	0.25	37
Fractie 3	0.530	-	2650	0	0.25	37
4 - homogeen	0.400	-	2650	0	0.25	37

Voor deze berekeningen wordt gekeken naar:

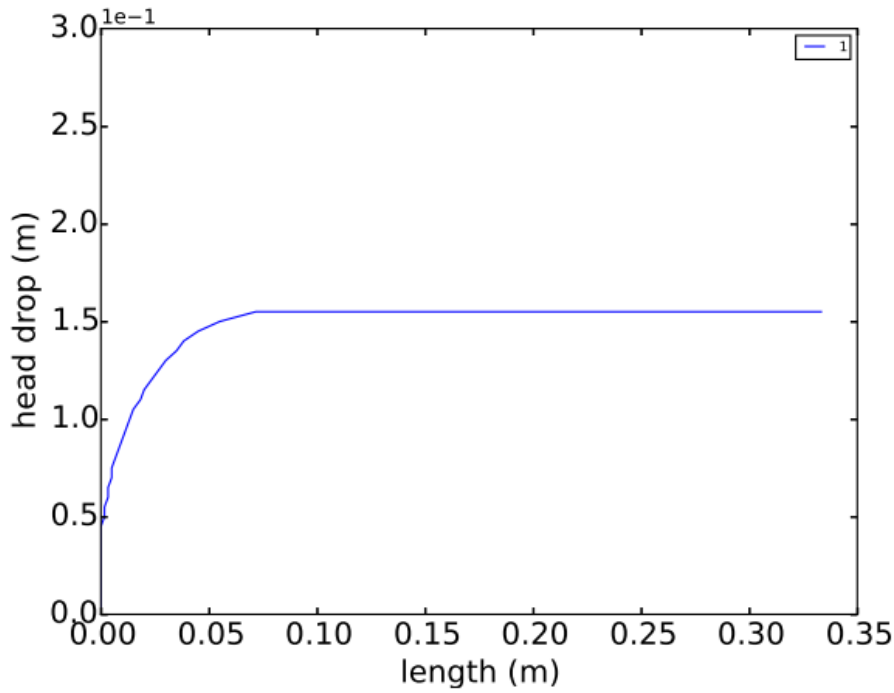
- Het kritiek verval
- Het verloop van de potentiaal langs het pipe pad
- Verloop van de pipe lengte als functie van het verval
- De invloed van de mesh op de berekeningen (zie Appendix E).

## 6.2 Resultaten

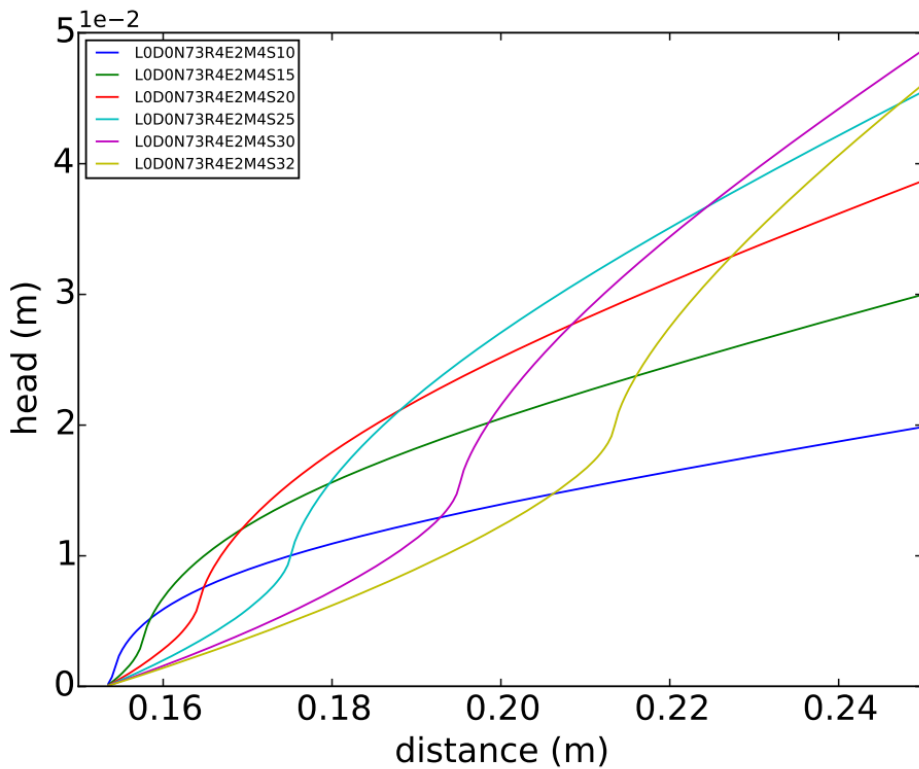
De gedetailleerde resultaten van de berekeningen zijn opgenomen in Appendix E. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van gevonden kritieke vervallen en van de gesimuleerde pipegroei.

### 6.2.1 Pipe ontwikkeling

De pipe-ontwikkeling met toename van verval verschilt voor de homogene en heterogene berekeningen. Figuur 6.2 en Figuur 6.3 laten een normale pipe-ontwikkeling zien, zoals gebruikelijk is voor een homogene berekening: met iedere toename van het verval neemt de pipelengte toe totdat de pipe volledig doorgroeit na het overschrijden van het kritieke verval. In Figuur 6.3 is het stijghoogteverloop langs de bovenkant van het zandpakket en in de pipe te zien voor verschillende aangebrachte vervallen (verschillende lijnen). De pipe is te herkennen aan het vlakke deel in het verloop van de stijghoogte (de pipe is immers meer doorlatend dan het zand). Ook in deze grafiek is te zien dat de pipe langer wordt met elke toename van het aangebrachte verval.

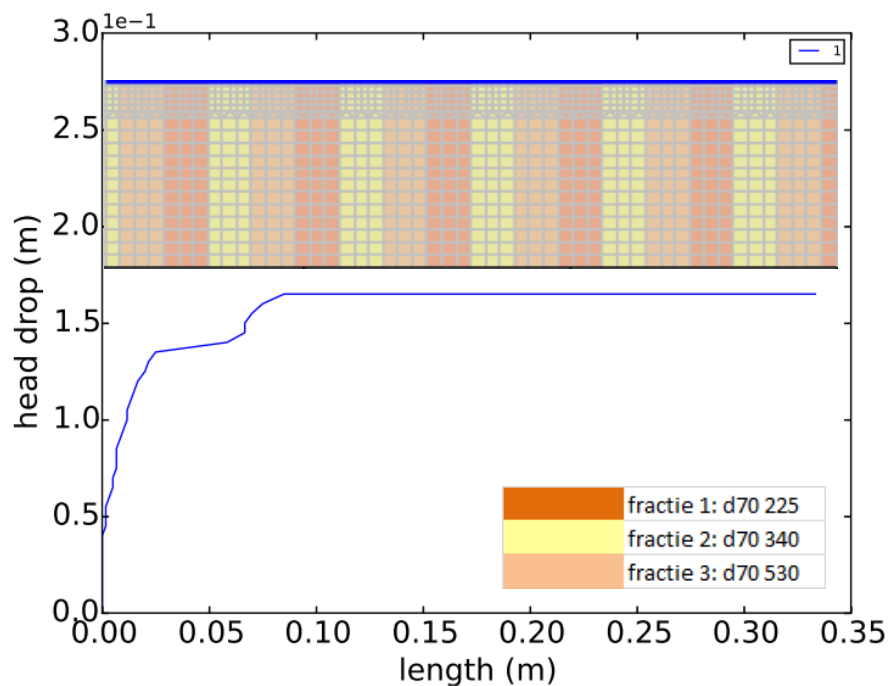


Figuur 6.2 Pipe ontwikkeling bij toenemend verval in de berekening met homogeen zand (gehele korrelverdeling), doorlatendheid volgens Beyer



Figuur 6.3 Stijghoogteverloop in de berekening met homogeen zand (4 gehele korrelverdeling), doorlatendheid volgens Beyer – de verschillende lijnen geven stappen bij toename van het verval aan: de pipe is herkenbaar door het vlakkere verloop van de lijn

In de berekeningen met heterogene monsters is onderscheid te maken in de berekeningen waarin zowel de doorlatendheid als de  $d_{70}$  is gevarieerd en die waarin alleen de  $d_{70}$  is gevarieerd. Wanneer alleen de  $d_{70}$  gevarieerd wordt en de doorlatendheid voor alle lagen hetzelfde wordt gehouden, is zoals verwacht de grootste weerstand te vinden in de lagen met grootste korreldiameter. Dit is goed te zien in Figuur 6.4: het verval moet toenemen voordat de pipe door de grovere (zalmkleurige) laag kan ontwikkelen.

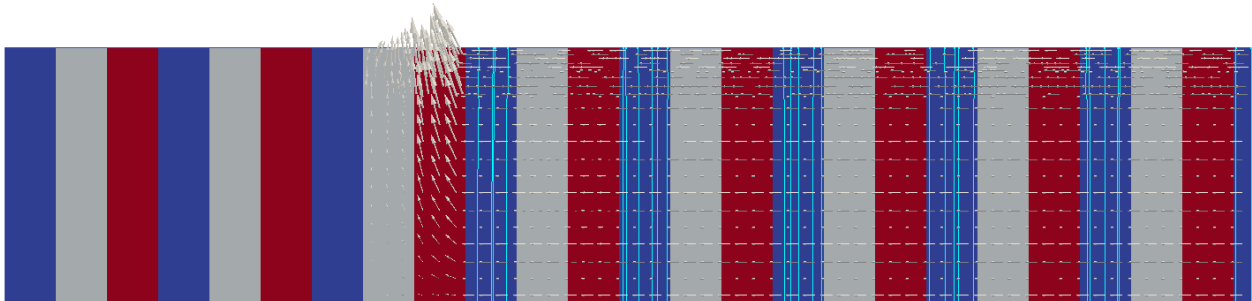


Figuur 6.4 Pipe ontwikkeling bij toenemend verval in de berekening met lagen van 2 cm dikte die in drie stappen grover worden met variatie in  $d_{70}$  en constante doorlatendheid volgens Beyer. N.B. mesh ter indicatie van de verschillende fracties – dit is niet de gehanteerde mesh in de berekeningen.

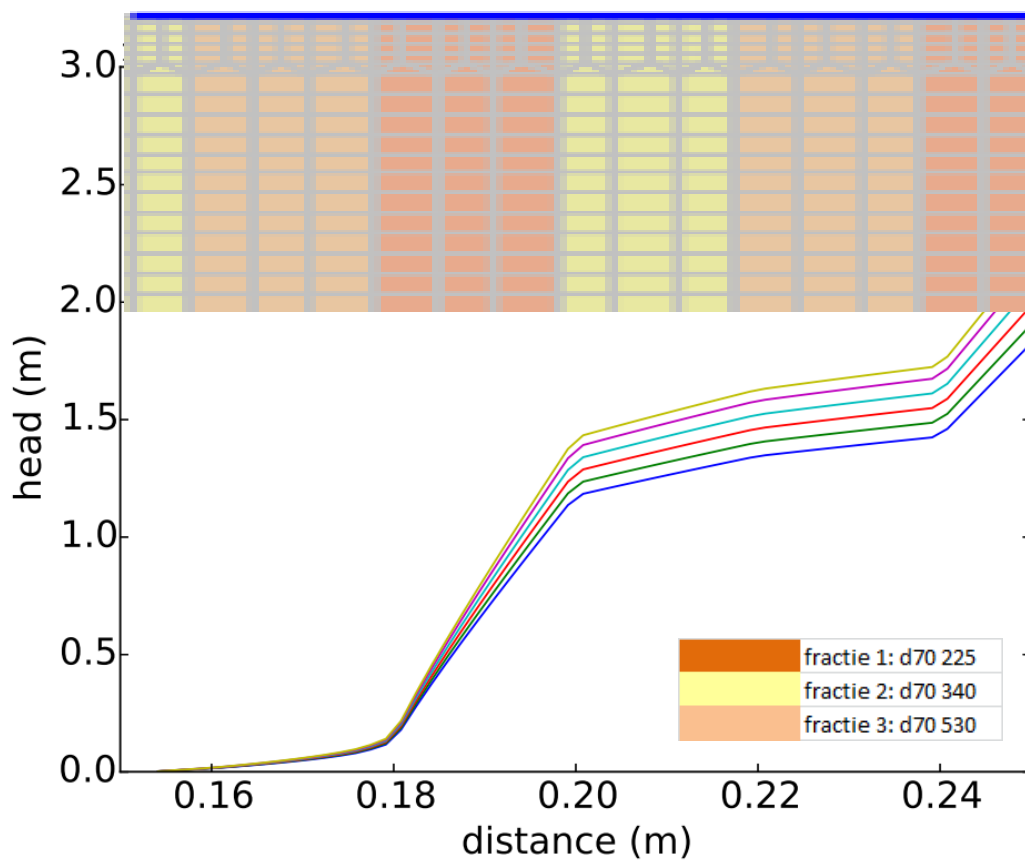
In de berekeningen van de heterogene monsters, waarin zowel doorlatendheid als  $d_{70}$  is gevarieerd, is een andere ontwikkeling te zien: de pipe ontwikkelt vrijwel onmiddellijk tot nagenoeg het einde van de eerste fijne laag (fractie 1), waarna het verval aanzienlijk verhoogd moet worden om de pipe verder te laten groeien in het laatste element voor de laag met fractie 1. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 6.6. Bij de berekeningen met dunnere lagen (drie lagen van 6.ca. 7 mm die opeenvolgend grover worden) is een vergelijkbaar verloop te zien. Bij deze berekeningen is de fijne laag echter dichterbij het uitstroompunt gelegen, waar de stroomsnelheden door de concentratie van stroomlijnen groter zijn, dan verder van het uitstroompunt. Hierdoor ontstaat een nieuw evenwicht nabij de tweede fijne laag, zoals te zien in Figuur 6.7.

De grotere weerstand voor het ingroeien van pipes in de fijne laag is te verklaren op basis van de grondwaterstroming (zie Figuur 6.5 voor een plot met snelheidsvectoren). De snelheid en stroming naar de pipe is hoog in het gebied waar de pipe al is ontwikkeld (fractie 3 - rood), maar blijft laag in het aangrenzende gebied door de lage doorlatendheid van fractie 1 (blauw). Hierdoor stroomt er weinig water naar de pipe in het gebied waar de pipe moet ontwikkelen. Dit gebrek aan stroming zorgt ervoor dat bij een laag verval niet aan het criterium voor

beweging van de korrels in de pipe kan worden voldaan, en dus zal er pas een pipe in het laatste element voor fractie 1 openen wanneer het verval zeer hoog is.

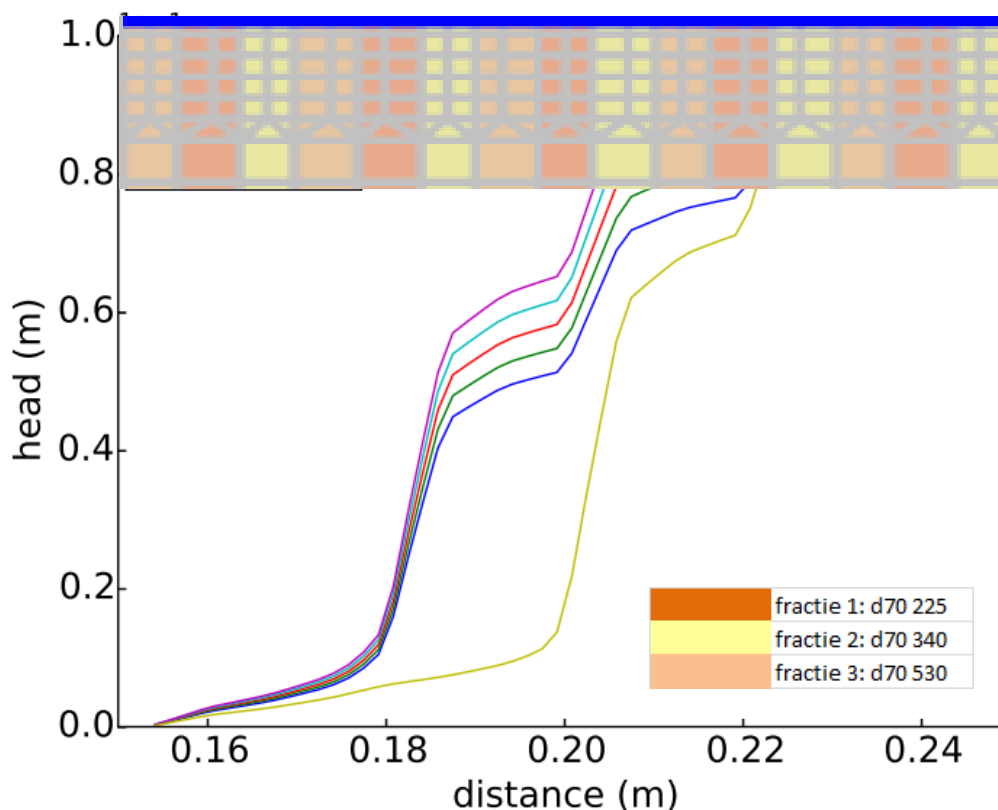


Figuur 6.5 Snelheidsvectoren voor configuratie met lagen van 2 cm dikte – doorlatendheden o.b.v. best guess



Figuur 6.6 Stijghoogteverloop in de berekening met periodieke lagen van 2 cm dikte (fining upward sequence van 6 cm) – met variatie van  $d_{70}$  en doorlatendheid (best guess) - de verschillende lijnen geven stappen bij toename van het verval aan: de pipe loopt voor alle lijnen tot  $x=0.18$  (lengte 3 cm). N.B. mesh ter indicatie van de verschillende fracties – dit is niet de gehanteerde mesh in de berekeningen.

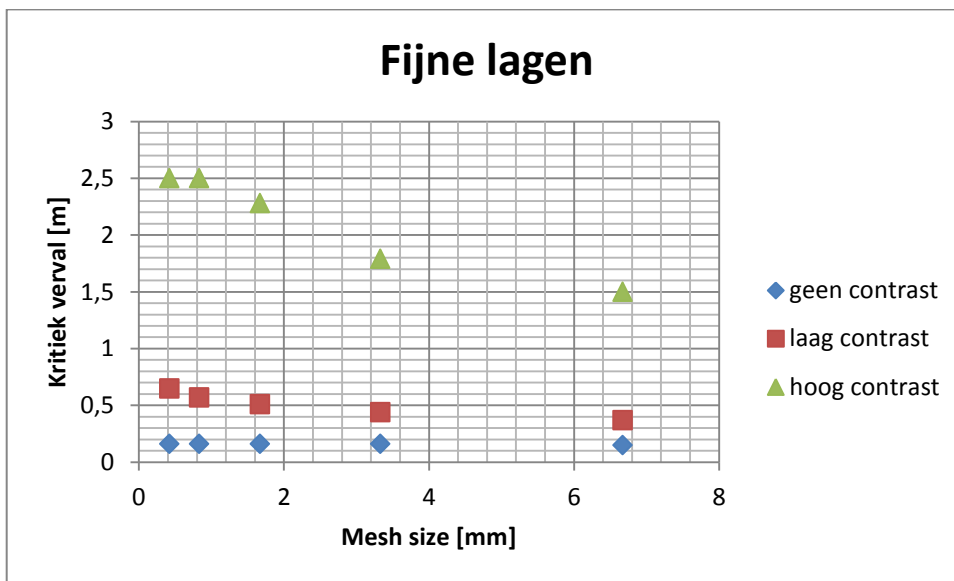




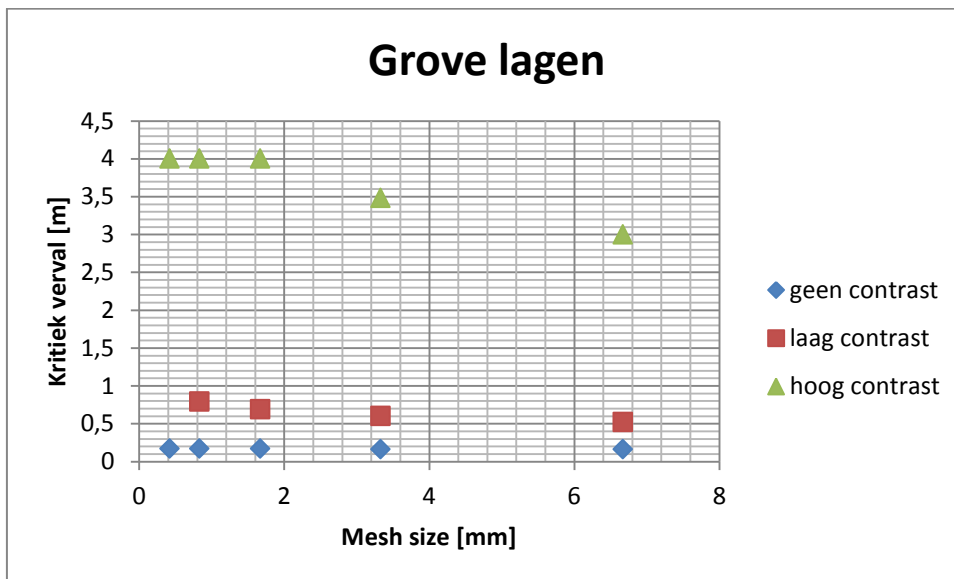
Figuur 6.7 Stijghoogteverloop in de berekening met periodieke lagen van 0.66 cm dikte (fining upward sequence van 2 cm) – met variatie van  $d_{70}$  en doorlatendheid (best guess) - de verschillende lijnen geven stappen bij toename van het verval aan: de pipe is te herkennen aan het vlakke verloop van de stijghoogte. N.B. mesh ter indicatie van de verschillende fracties – dit is niet de gehanteerde mesh in de berekeningen.

### 6.2.2 Invloed van de mesh

De mesh (het patroon van elementen) heeft invloed op het resultaat van de berekeningen. Het is daarom van belang om verder te verfijnen totdat het resultaat convergeert. In bijlage E is te zien dat de resultaten van de berekeningen met homogene ondergrond allemaal goed convergeren naar een constant kritiek verval. In de berekeningen van de gelaagde configuratie heeft de mesh meer invloed op het resultaat. Figuur 6.8 en Figuur 6.9 laten het berekende kritiek verval zien bij verschillende mate van verfijning van de mesh, voor de berekeningen zonder doorlatendheidscontrast ( $k$  – constant), laag doorlatendheidscontrast (Best guess variatie in doorlatendheid) en hoog contrast (doorlatendheid geschat op basis van Beyer). In deze figuren is te zien dat er voor de configuratie zonder doorlatendheidscontrast, vergelijkbaar met de homogene proeven, zonder sterke verfijning een constant verval behaald wordt. Bij hoog contrast is er echter vrij sterke verfijning noodzakelijk is om tot convergentie van het kritiek verval te komen. Bij de configuratie met laag contrast is deze verfijning niet voldoende om tot een convergentie in het verval te komen. Dit betekent dat er nog verdere verfijning noodzakelijk is om te kijken of dit punt dan wel bereikt wordt: het gevonden kritiek verval is daarmee niet nauwkeurig bepaald. De noodzaak tot verregaande mesh-verfijning en het gebrek aan convergentie vormt mogelijk zowel een probleem voor validatie als voor praktijktoepassing.



Figuur 6.8 Berekend kritiek verval voor verschillende mate van verfijning van de mesh voor de configuratie met lagen van 6.6 mm (fining upward sequence 2 cm).



Figuur 6.9 Berekend kritiek verval voor verschillende mate van verfijning van de mesh voor de configuratie met lagen van 2 cm (fining upward sequence 6 cm).

### 6.2.3 Kritiek verval

In onderstaande tabel 6.3 is een overzicht gegeven van de berekende kritieke vervallen. Op basis van de berekeningen met homogene ondergrond wordt duidelijk hoe de doorlatendheid en korreldiameter interacteren in een homogeen pakket (dit volgt ook uit de regel van Sellmeijer):

- wanneer alleen de korreldiameter gevarieerd wordt, en doorlatendheid constant gehouden, neemt het kritiek verval toe met toenemende korreldiameter;
- wanneer zowel doorlatendheid en kritiek verval gevarieerd wordt, neemt bij de gekozen verhoudingen tussen korreldiameter en doorlatendheid het kritiek verval af

met toenemende korreldiameter en doorlatendheid (het verlagende effect van doorlatendheid is groter dan het verhogende effect van de korreldiameter). Dit effect wordt sterker naarmate het contrast tussen  $d_{70}$  en doorlatendheid groter wordt gekozen. Hierbij wordt opgemerkt dat de invloed van relatieve dichtheid op het kritiek verval grotendeels verdisconteerd wordt via de doorlatendheid, die uiteraard verandert met de relatieve doorlatendheid. Het 'resterende' effect van relatieve doorlatendheid is relatief klein bevonden (Sellmeijer et al., 2001).

Bij de berekeningen met lagen is het kritiek verval met name afhankelijk van het doorlatendheidscontrast: wanneer er geen doorlatendheidscontrast is, wordt er wel meer weerstand gevonden in de lagen met grotere korreldiameter (zie paragraaf 6.2.1), maar dit heeft weinig effect op het kritiek verval. Het kritiek verval neemt sterk toe met toename van het doorlatendheidscontrast tot extreem hoge waarden. Zoals toegelicht in paragraaf 6.2.1 wordt de toename in kritiek verval veroorzaakt door de aanwezigheid van de minder doorlatende lagen: een pipe kan hier niet makkelijk in ontstaan, doordat de pipe nauwelijks gevoed wordt met water.

Tabel 6.3 Overzicht berekende kritiek vervallen

Berekening	Hc [m]
Homogeen fractie 1 – k1 Beyer	0.33
Homogeen fractie 2 – k2 Beyer	0.10
Homogeen fractie 2 – k3 Beyer	0.10
Homogeen 4 gehele KVD – k4 Beyer	0.16
Homogeen 1 – k1 Best Guess	0.25
Homogeen 2 – k2 Best Guess	0.17
Homogeen 3 - k3 Best Guess	0.17
Homogeen 1 – k4 Beyer	0.13
Homogeen 2 – k4 Beyer	0.15
Homogeen 3 – k4 Beyer	0.17
FU 6 cm - 3 lagen 2 cm (d70 en k-Best guess)	0.79*
FU 6 cm - 3 lagen 2 cm (alleen d70 en k-4 hom)	0.17
FU 6 cm - 3 lagen 2 cm (d70 en k-beyer)	4.00
FU 2 cm - 3 lagen 0.66 cm (d70 en k-Best guess)	0.65*
FU 2 cm - 3 lagen 0.66 cm (alleen d70 en k-4 hom)	0.16
FU 2 cm - 3 lagen 0.66 cm (d70 en k-beyer)	2.5

\*Convergeert niet



## 7 Discussie

### 7.1 Betrouwbaarheid experimenteel werk

In dit onderzoek is de invloed van micro-heterogeniteit op het pipingproces onderzocht. Uit de proeven en observaties blijkt dat micro-heterogeniteit binnen lagen van 5 mm geen effect heeft op het pipingproces of op het kritiek verval. Bij een laagdikte van 20 mm is er wel een effect gevonden op het proces – laterale ontwikkeling van de pipe, en ook een effect op het kritiek verval. De vraag is in hoeverre het hogere kritieke verval in de proeven met 20 mm lagen toegeschreven wordt aan de hogere weerstand tegen piping ten gevolge van laagvorming of dat de spreiding in resultaten dusdanig groot is dat de verhoging van het kritiek verval in deze proef slechts een uiting is van de natuurlijke spreiding. Om uit te sluiten of dit het geval is kan naar vijf aspecten gekeken worden:

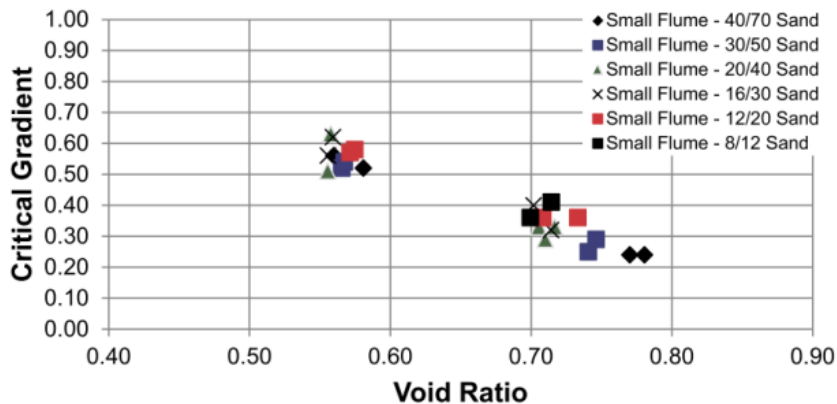
- Reproduceerbaarheid van de proef met 20 mm lagen
- Observaties: pipe-ontwikkeling
- Spreiding van resultaten in andere proeven
- Relatie tussen relatieve dichtheid en verval
- Theoretische onderbouwing

De proef met 20 mm lagen is tweemaal uitgevoerd: bij beide proeven is een relatief hoog kritiek verval gevonden ten opzichte van de overige proeven, maar er is wel veel spreiding in het gevonden kritiek verval.

Kijkend naar de pipe-ontwikkeling kan er gesteld worden dat er een duidelijk verschil is tussen de pipe-ontwikkeling in de proeven met 20 mm lagen en de overige proeven. In de eerste proef met 20 mm lagen is er bij drie pipe-lengtes dwarsontwikkeling van de pipe waargenomen. In de tweede proef was er ook bij meerdere pipe-lengtes dwarsontwikkeling te zien, alhoewel de meeste weerstand bij een pipe-lengte van 6 cm gevonden werd en geen toegevoegde weerstand bij grotere pipe-lengtes gevonden werd. Dwarsontwikkeling van de pipe wijst op de aanwezigheid van extra weerstand in het gebied bovenstrooms van de pipe: de pipe zoekt de weg van de minste weerstand. In de andere proeven is geen dwarsontwikkeling waargenomen. Uitgaande van dit aspect is de toename in kritiek verval toe te schrijven aan de heterogeniteit.

Spreiding in resultaten is inherent aan het uitvoeren van modelonderzoek voor piping. De mate van spreiding in kritiek verval is voor deze configuratie niet uitgebreid onderzocht: er zijn wel duplo proeven uitgevoerd, maar meestal is er dan ook een verschil in relatieve dichtheid. Onderzoek op Baskarp zand laat zien dat voor deze configuratie de spreiding in kritiek verval hooguit een aantal millimeter is voor proeven met gelijke relatieve dichtheid, maar deze spreiding zal waarschijnlijk toenemen voor zandsoorten met fijne fractie of met hogere uniformiteitscoëfficiënt. De twee proeven met 20 mm lagen laten wel een grote spreiding zien, ook wanneer de invloed van de relatieve dichtheid in acht genomen wordt.

Onderzoek uit de V.S. (Robbins et al., 2015) heeft uitgewezen dat er voor verschillende zandsoorten een lineaire relatie bestaat tussen kritiek verval en relatieve dichtheid (void ratio) (Figuur 7.1). Uitgaande van een lineair verband tussen relatieve dichtheid en kritiek verval, en ervan uitgaand dat proef De-184 niet dusdanig verstoord is dat deze geheel onbetrouwbaar is, lijken de proeven met 20 mm lagen een relatief hoog kritiek verval te hebben ten opzichte van de overige proeven (met name De-201).



Figuur 7.1 Relatie tussen kritiek verval en void ratio voor verschillende zandsorten (Robbins et al., 2015)

Op basis van de theorie zou het te verklaren zijn dat lagen van 20 mm meer effect hebben dan lagen van 5 mm. Immers bij een laag van 5 mm is de grofste fractie maar ca. 1 mm dik en bestaat daardoor slechts uit 1 of 2 korrels. Deze korrels rollen relatief makkelijk in de pipe, waarna de weerstand van de grovere laag verdwenen is bij de kop van de pipe, hoewel de korrels zouden dan nog wel op de bodem van de pipe voor meer weerstand kunnen zorgen. Bij lagen van 20 mm dikte zou dit effect minder kunnen spelen.

Op basis van bovenstaande argumenten lijkt het redelijk om aan te nemen dat het effect van heterogeniteit op het kritiek verval afhankelijk is van de dikte van de lagen en dat er vanaf een laagdikte tussen de 5 mm en 20 mm een invloed op het kritiek verval waar te nemen is: 5 mm dikke lagen hebben nog geen waarneembare invloed en 20 mm dikke lagen al wel. Een continue afwisseling van gegradeerde laagjes van 20mm dik dwars op een kwelweg is niet iets dat typisch van nature voorkomt in de top van rivierafzettingen: de laminaties daar hebben een typische dikte van hooguit enkele millimeters. Wel komen er binnen een kwelweg altijd afwisselingen in korrelgrootte voor, in de vorm van sedimentaire structuren zoals stroomribbels of duintjes. Deze hebben vaak een typische afmeting van decimeters tot meters. Deze opstelling was voornamelijk gericht om de invloed van lamina te bepalen, maar geeft ook informatie over het gedrag bij korrelgroottesprongen op de schaal van decimeters tot meters in een werkelijke kwelweg, hoewel voor het kwantificeren van piping op de mesoschaal meer onderzoek nodig zal zijn. Oorzaken toegenomen weerstand door heterogeniteit

De extra weerstand door heterogeniteit kan een aantal oorzaken hebben:

- Variatie in korreldiameter
- Variatie in doorlatendheid
- Het patroon van pipes

In de uitgevoerde proeven wordt de laagvorming pas goed zichtbaar na het capillair trekken van het zandpakket. Hieruit is een inschatting te maken van de locatie van de grovere fractie en de fijnere fractie binnen de lagen. Op basis van Figuur 5.3 lijkt het aannemelijk dat de grovere fractie meer weerstand tegen piping biedt dan de fijnere fractie. Omdat de lagen licht gekromd afgezet zijn en de exacte scheiding tussen fijn en grof niet heel duidelijk zichtbaar is waar de pipe zich al gevormd heeft, zoals onder andere te zien is in figuur 5.3, is het bewijs hiervoor niet sterk. Op basis van de proeven van Negrinelli (2015) kan echter gesteld worden dat ondoorlatende fijne (slib)lagen minder weerstand bieden dan zandlagen (Figuur 2.4). Immers, de pipe buigt af nadat een fijne laag is doorbroken.



Door de afbuiging van pipes langs een meer resistente laag verandert het stromingspatroon. Dit is duidelijk geïllustreerd in simulaties van Negrinelli (2015) (Figuur 7.2 en 7.3): de dwarsontwikkeling van de pipe zorgt voor een meer gespreide stroming naar de pipe. Hierdoor ontstaat een zelfversterkend effect. Dit effect zou dus voor heterogene ondergrond meegenomen kunnen worden.

Hierbij wordt wel opgemerkt dat de proeven uitgevoerd zijn met stroming naar 1 punt (3D configuratie). De configuratie met stroming naar een punt is ongunstiger dan een 2D situatie (uitstroom naar een lijn i.p.v. een punt). In de praktijk wordt op dit moment gerekend met het model dat gekalibreerd is met en uitgaat van 2D configuraties (zoals in de aanwezigheid van een sloot, in tegenstelling tot een gat in de deklaag). De dwarsontwikkeling verandert de grondwaterstromingssituatie gedeeltelijk van een 3D naar een 2D configuratie. M.a.w.:

- In de praktijk rekenen we met een 2D-configuratie en overschatten we de sterkte wanneer de configuratie in werkelijkheid 3D is.
- In de proef hebben we een 3D situatie: het verwachte kritieke verval is dus lager dan in een 2D situatie (rekenmodel). Als de pipe in dwarsrichting ontwikkelt in een 3D model, ontstaat er extra sterkte doordat de stroming meer 2D wordt.
- In een homogeen opgebouwde proef met 2D configuratie ontstaat er vaak een enkele pipe. Lokaal is er dus ook sprake van 3D stroming naar de kop van de pipe. In een heterogeen opgebouwde proef zal er in geval van dwarsontwikkeling van de pipe dus ook spreiding van grondwaterstroming plaatsvinden. Het is daarom de verwachting dat het versterkende effect van de dwarsontwikkeling van de pipe ook bij 2D configuraties een rol speelt.

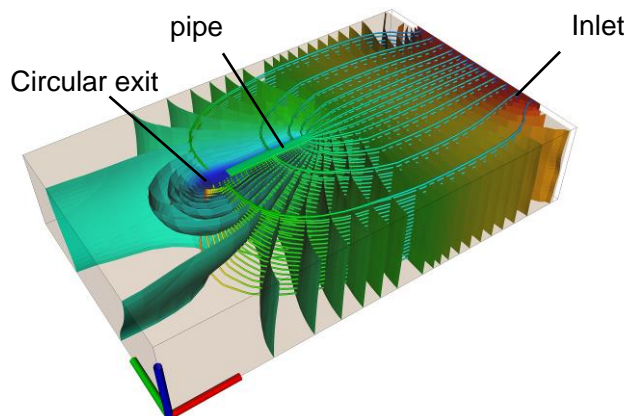


Figure 7.2 Simulation of a small-scale experiment: the pipe was modelled without transverse development (Negrinelli, 2015): the flow lines strongly concentrate towards the pipe tip

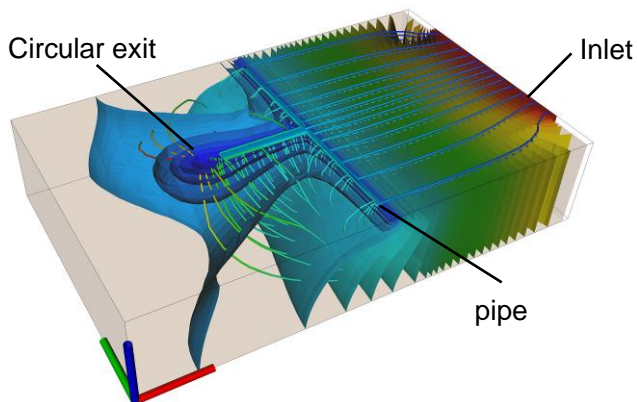


Figure 7.3 Simulation of a small-scale experiment: the pipe was modelled with full transverse development (Negrinelli, 2015): the flow lines are distributed over the full length of the barrier and are less concentrated.

## 7.2 Discussie modelleren van heterogeniteit in de baan van de pipe in DgFlow

De proeven zijn gesimuleerd met DgFlow om het effect van laagvorming op het berekende kritiek verval te bekijken. De opsplitsing in lagen heeft een groot effect op het berekende kritiek verval. De mate waarin is afhankelijk van hoe de lagen zijn opgesplitst. Hierbij speelt het doorlatendheidscontrast tussen de verschillende lagen een grote rol: het kritiek verval neemt sterk toe met toenemend doorlatendheidscontrast. Als er geen variatie in doorlatendheid wordt aangebracht, ondervindt de pipe weerstand bij het groeien door de grovere lagen. Het kritiek verval wordt hierdoor echter niet sterk beïnvloed.

Het model van Sellmeijer baseert de progressie van de pipe op de toestroming van water en het krachterevenwicht van de korrels. Wanneer een pipe vanuit een doorlatende laag richting een slecht doorlatende laag groeit, stroomt er nauwelijks water naar de kop van de pipe. Hierdoor ondervindt de pipe veel weerstand bij het benaderen van slecht doorlatende lagen.

Op dit moment sluiten de berekeningen van DgFlow nog niet goed aan bij de proefresultaten. Het opsplitsen van lagen in de ondergrond levert zeer hoge kritieke vervallen die in de proeven niet teruggevonden worden. Het is daarnaast moeilijk om de doorlatendheidscoëfficiënten van de afzonderlijke lagen juist te schatten, terwijl deze in het model een grote invloed hebben op het kritiek verval.

Bij de berekeningen moet opgemerkt worden dat er in de proeven een 3D configuratie met stroming naar een gat is toegepast, terwijl met DgFlow berekeningen in 2D zijn uitgevoerd. Uit onderzoek (Van Beek et al., 2015) is bekend dat een 3D configuratie in de laboratoriumopstelling tot aanzienlijk lagere kritieke vervallen leidt dan een 2D configuratie: op basis van het vergelijken van berekeningen en proeven voor verschillende schalen blijkt de factor tussen 2D berekening en 3D proef ongeveer een factor 2 te zijn (voor homogene proeven zal DgFlow dus een kritiek verval van een factor 2 hoger geven dan de proef). Hierdoor zijn de kritieke vervallen in de proeven lager dan de berekeningen. Omdat een 3D configuratie in de praktijk ook kan voorkomen, zou hier rekening mee gehouden moeten worden. In de praktijk is dit op dit moment nog niet gebruikelijk.

Het bovenstaande in beschouwing nemende wordt het nog niet aanbevolen om in de toets op maat met variatie van doorlatendheid in de baan van de pipe te werken. De variatie van korreldiameter, zonder micro-schaal variatie van doorlatendheid levert relatief weinig winst. Het wordt hierbij benadrukt dat het wel zinvol is grootschalige variaties in het watervoerend

pakket, zoals horizontale gelaagdheid in het watervoerend pakket op formatieschaal, lagen met dikten van enkel meters, met behulp van D-Geo Flow mee te nemen in de piping beoordeling. Het meenemen van deze gelaagdheid zorgt voor een nauwkeuriger inschatting van de toestroming van water naar de pipe, maar veronderstelt geen variatie in het pad van de pipe.



## 8 Conclusies en aanbevelingen

- Uit een review van uitgevoerde laboratoriumexperimenten met afwisselende korrelgrootten in een piping pad blijkt dat deze een veel hogere sterkte hebben tegen piping dan homogene experimenten
  - In deze studie zijn 5 proeven uitgevoerd waarin microschaal heterogeniteit is gesimuleerd, door verticale lagen aan te brengen met variërende korrelgrootte en doorlatendheid in de baan van de pipe, om het effect hiervan op het kritiek verval te onderzoeken. Er wordt geen extra sterkte gevonden bij in korrelgrootte graderende lagen van 5 mm. In proeven met lagen van 2 cm dikte graderend in korrelgrootte wordt 20%-80% extra sterkte gevonden ten opzichte van de overige proeven. De verschillen in sterkte in de overige proeven (lagen van 5 mm en homogene opbouw) worden vermoedelijk veroorzaakt door variatie in relatieve dichtheid.
  - Deze extra sterkte door variatie van korreldiameter wordt waarschijnlijk veroorzaakt door een combinatie van de afname van de doorlatendheid in de fijne lagen en het moeilijker meenemen van grove korrels uit de grove lagen.
  - Deze extra weerstand veroorzaakt een verandering van grondwaterstroming door de dwarsontwikkeling van pipes. Hierdoor is waarschijnlijk nog meer extra sterkte ontstaan: de stroming wordt meer gespreid zodat de waterdruk juist bovenstrooms van de pipe afneemt.
  - De proeven zijn gesimuleerd met DgFlow door de lagen op te splitsen in verschillende fracties. De invloed van doorlatendheidscontrast (het verschil in doorlatendheid tussen de verschillende lagen) op het kritiek verval blijkt zeer groot.
  - Uit eerder onderzoek is al gebleken dat de laboratoriumexperimenten met gat in de deklaag (3D) niet gereproduceerd kunnen worden met 2D berekeningen in DgFlow. Voor homogene zanden wordt een 2 maal zo hoge sterkte berekend dan uit de experimenten met gat in de deklaag blijkt. De oorzaak hiervan is dat het proces in de experimenten een 3D proces is, terwijl DgFlow uitgaat van een 2D situatie.
  - Ook de gelaagde simulaties in DgFlow laten een veel grotere sterkte zien dan blijkt uit laboratoriumexperimenten. De in laboratoriumexperimenten waargenomen toename in sterkte door gelaagdheid komt waarschijnlijk door verschillen in doorlatendheid en korrelgrootte. De verschillen in doorlatendheid zorgen ervoor in DgFlow de meeste weerstand wordt gevonden juist voor een relatief minder doorlatende zandlaag, met een kleinere  $d_{70}$ . Deze bevinding wordt niet ondersteund door de metingen.
  - Bij berekeningen met variatie van doorlatendheid in de baan van de pipe moet extra aandacht besteed worden aan de grootte van de elementen.
  - Het doorlatendheidscontrast van de afzonderlijke lagen is moeilijk te schatten in de praktijk, en daarom is het niet eenvoudig om hier rekening mee te houden in de berekeningen. Variatie in de baan van een pipe van 2cm komen niet typisch voor. Wel komen in de baan van een pipe zeker vele overgangen in korrelgrootte voor, van kleine variaties op millimeterschaal tot geleidelijk grotere variaties op decimeter, meter en tientallen meterschaal.
- Op basis van bovenstaande argumenten kan worden geconcludeerd dat het nog niet mogelijk is om de invloed van heterogeniteit op het proces piping te simuleren in DGFlow. Dit heeft meerdere redenen:
- Piping is een 3D proces, met name in heterogene ondergrond, en DGFlow gaat uit van een 2D situatie.

- Het criterium in de regel van Sellmeijer voor progressie van de pipe is zeer gevoelig voor variaties in doorlatendheid, wat niet eenvoudig te schatten is voor de praktijk.
- De variatie in doorlatendheid zorgt mogelijk voor convergentieproblemen in het model van Sellmeijer.
- De groei van een pipe wordt gedreven door erosie aan de kop: het is waarschijnlijk dat het Sellmeijer model de progressie van de pipe op basis van alleen erosie in de pipe dit niet goed kan voorspellen. Hierbij wordt opgemerkt dat voor homogene situaties deze tekortkoming waarschijnlijk minder erg is, omdat het model gekalibreerd is op meerdere schalen.

Om deze redenen kan er in de praktijk met DgFlow nog geen rekening worden gehouden met een toename van het kritieke verval door heterogeniteit. Om dit te bewerkstelligen zouden de volgende stappen ondernomen moeten worden die betrekking hebben op het rekenmodel en de input hiervan:

- Er zijn een aantal fundamentele vragen met betrekking tot het (2D) Sellmeijer model:
  - 3D analyse is noodzakelijk om het effect van een geconcentreerde uitstroom en (beperkte) dwarsontwikkeling van de pipe te simuleren. Wanneer dit succesvol is, kan mogelijk de overstap naar een 2D model worden gemaakt.
  - Het erosie-criterium is nu volledig gefocust op het evenwicht van korrels op de bodem van de pipe. De erosie aan de kop van de pipe kan worden toegevoegd wanneer meer informatie bekend is over het criterium dat hiervoor gehanteerd moet worden. Dit vergt zowel een aanpassing van het rekenmodel als calibratie met (deels reeds beschikbare) proeven.
- Uit het onderzoek blijkt dat het Sellmeijer model met name gevoelig is voor variaties in doorlatendheid: hoe groter het contrast in doorlatendheid tussen de verschillende lagen, hoe hoger het kritiek verval. Mogelijk speelt de korreldiameter een grotere rol dan nu wordt gevonden in het aangepaste Sellmeijer model, wanneer de erosie aan de kop van de pipe ook meegenomen wordt. De variatie in doorlatendheid en korreldiameter zouden op meso-schaal gekarakteriseerd moeten kunnen worden om het aangepaste model van invoer te voorzien. In Wiersma en Hijma (2018) wordt hier nader op ingegaan.



## 9 Referenties

Beyer, W. (1964). Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve, *Wassertechnik*, 14 (1964) 6, pp. 165-168.

Cohen, K.M., Stouthamer, E., 2012 Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta. DANS. <https://doi.org/10.17026/dans-x7g-sjtw>

Dolphen, L. (2013). Experimental research on different aspects of backward erosion piping in water retaining structures. MSc Thesis, Ghent University.

Tran, D. K., Prime, N., Froiio, F., Callari, C., & Vincens, E. (2017). Numerical modelling of backward front propagation in piping erosion by DEM-LBM coupling. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(7–8), 960–987. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1248794>

Negrinelli, G. (2015). *Investigation of the process of seepage and backward erosion piping under dikes in heterogeneous sands*. MSc thesis, Università degli Studi di Brescia.

Robbins, B. A., Sharp, M. K., & Corcoran, M. K. (2015). Laboratory Tests for Backward Erosion Piping. In *International Symposium on Geotechnical Risk and Safety*.

Robbins, B.A. and Van Beek, V.M. (2017). Physical measurements of the backward erosion piping process. *Proceedings 25th meeting European Working Group on Internal Erosion*.

Rotunno, Andrea Francesco, Callari, Carlo, Froiio, Francesco. (2017). Computational Modeling of Backward Erosion Piping. Models, *Simulation, and Experimental Issues in Structural Mechanics*, Springer Series in Solid and Structural Mechanics 8, M. Frémond et al. (eds.), Springer International Publishing DOI 10.1007/978-3-319-48884-4\_12.

Sellmeijer J.B., Lopez De La Cruz J., Beek V.M. van, Knoeff J.G., (2011), 'Fine-tuning of the piping model through small-scale, medium-scale and IJkdijk experiments', *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol 15, no. 8, 2011, p.1139-1154.

Van Beek, V.M., Koelewijn, A., Kruse, G., Sellmeijer, H., Barends, F. (2008). Piping phenomena in heterogeneous sands – experiments and simulations, *Proceedings of the 4th International Conference on Scour and Erosion*, p. 453-459, <http://scour-and-erosion.baw.de/conferences/icse4/>.

Van Beek, V.M., Van Essen, H.M., Vandenboer, K., Bezuijen, A. (2015). Developments in modelling of backward erosion piping. *Géotechnique* 65(9): 740-754.

K. Vandenboer, V.M. van Beek & A. Bezuijen (2017). Pipe depth measurement in small-scale backward erosion piping experiments. *Proceedings 25th meeting European Working Group on Internal Erosion*, pp 21-28.

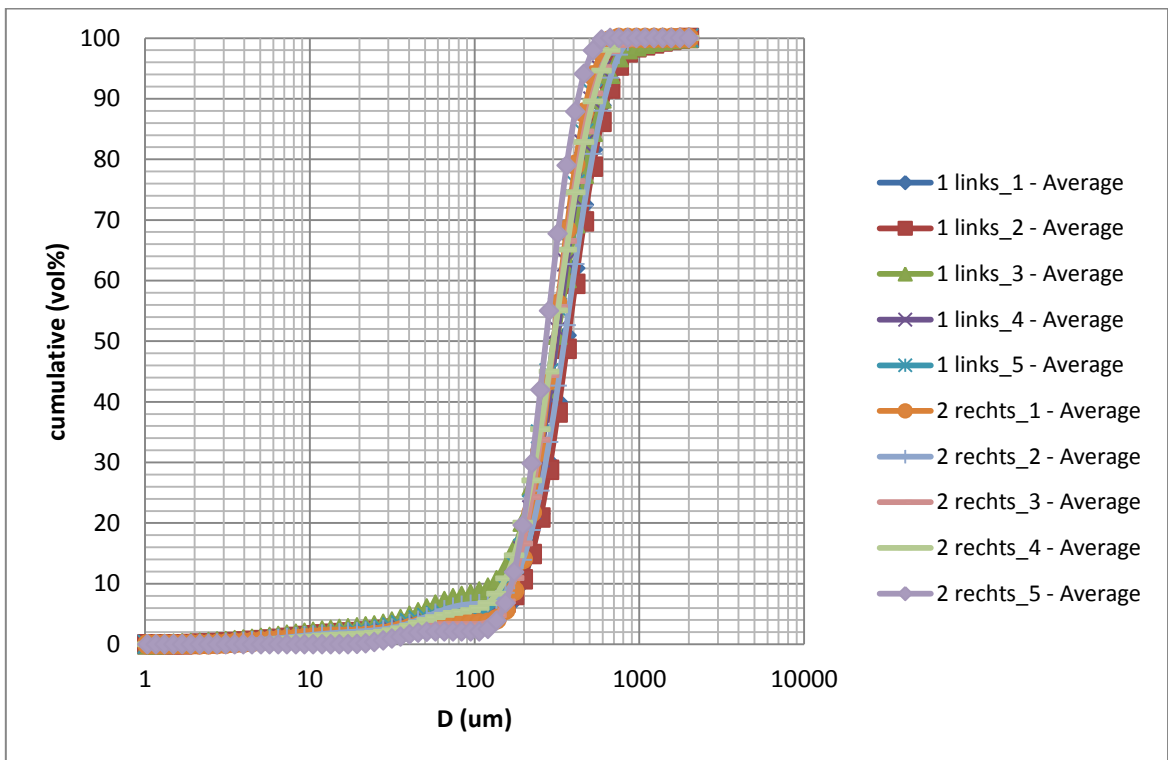
Van Esch, J.M., Sellmeijer, J.B., Stolle, D. (2013). Modeling transient groundwater flow and piping under dikes and dams. *Proceedings COMGEO III*, Krakow, Poland, International Centre for Computational Engineering.

Wiersma en Hijma (2018) *Korrelgroottes en heterogeniteit van rivierafzettingen in het licht van piping*. Deltares rapport 1210060-002-BGS-0001-I.

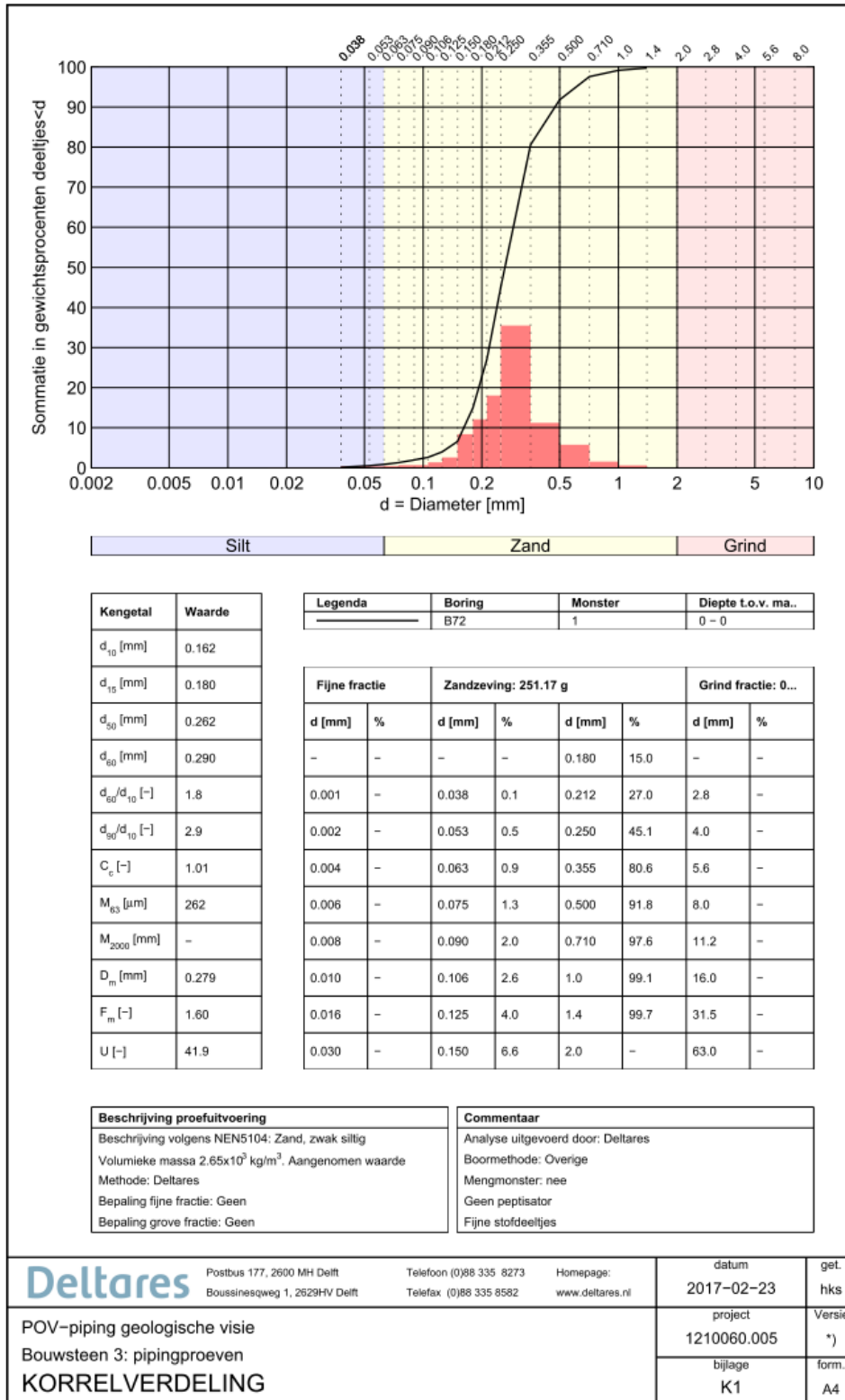
## A Eigenschappen Deest zand

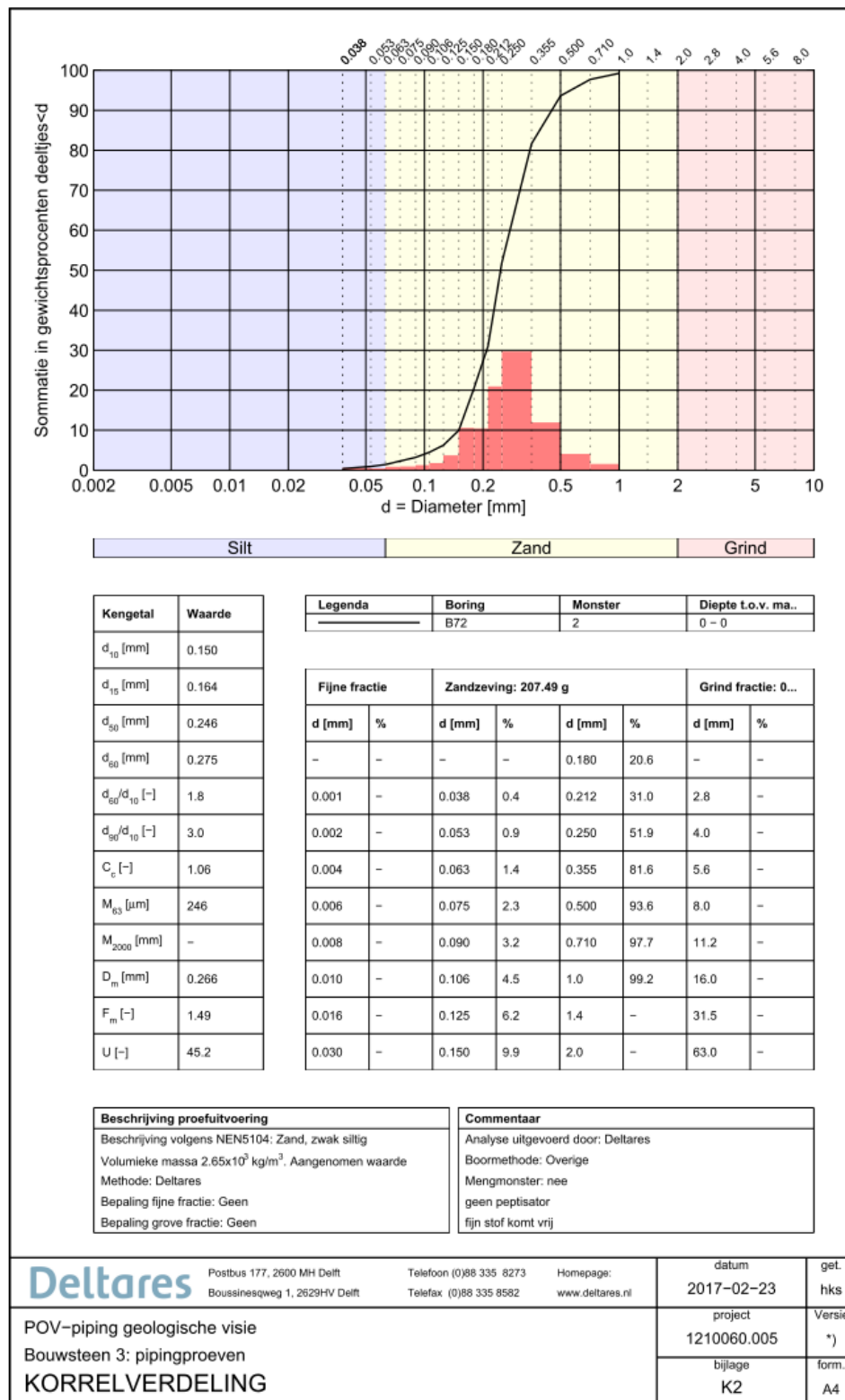
### A.1 Korrelverdeling

Er zijn twee zeefkrommes gemaakt van het Deest zand (van iedere bigbag één): de resultaten zijn vergelijkbaar. Daarnaast zijn er zijn 10 verschillende monsters genomen voor laser diffractie analyse met peptisator behandeling (Malvern) (Figuur A.1).



Figuur A.1 Korrelverdeling op basis van laserdiffractie





## A.2 Minimum en maximum porositeit

De minimum en maximum porositeit zijn in een kolommetje bepaald, waarbij het monster op dezelfde wijze is geprepareerd als de monsters voor een pipingproef (nat, homogene preparatie). Hierdoor is de porositeit van het zandpakket in de proef goed te relateren aan de minimum en maximum porositeit.

Tabel A.1 Minimum en maximum porositeit

Zandsoort	n_min [-]	n_max [-]
Deest	0.342	0.465



## B Voorstudie preparatiemethode

Het zand dat voor deze proeven gebruikt zal worden is afkomstig uit de uiterwaarden bij Afferden en Deest, juist onder de deklaag. Rivierzand wordt afgezet in lamina. Voor de beoogde pipingproeven is het de bedoeling om deze variatie in ondergrondeigenschappen te reproduceren in het lab.

De meest voor de hand liggende manier om een natuurlijke variatie van korrelgrootte in een zandpakket te creëren is door gebruik te maken van het onderscheid in valsnelheid. In deze appendix is het vooronderzoek toegelicht om te bekijken of dit bewerkstelligd kan worden.

Voor dit onderzoek is de grove fractie van het Deest zand ( $>d_{80}$ ) rood gekleurd. Dit zand is in een cilinder gestrooid met valhoogte van ca. 40 cm. Dit bleek tot een goede scheiding van de rode grove fractie en fijne ongekleurde fractie te leiden.



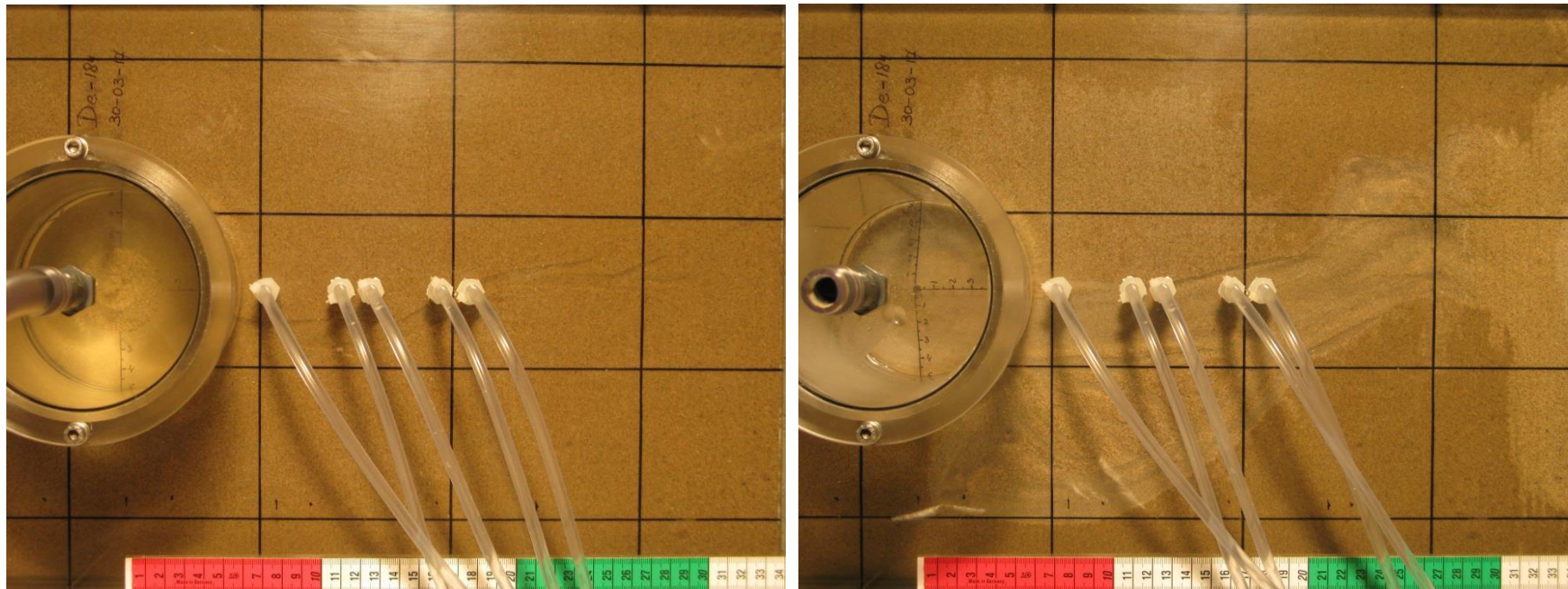
*Figuur B.1* Scheiding van grove en fijne fractie door verschillen in valsnelheid (waterhoogte ca. 43 cm bij aanvang).

## C Factual reports piping experimenten

### C.1 De-184

Tabel C.1 Overzicht proef

Proefnummer	De-184
Datum	30-03-2017
Zandsoort	Deest
Beschrijving	Fining upward lagen van 5 mm
Relatieve dichtheid [-]	0.447
Temperatuur water [graden C]	20



Figuur C.1 De-184: de pipe bereikt het einde van de bak (T=10:45) en rechts De-184Cap\_00142

Tabel C.2 Observaties en debietmeting

$\Delta p$ [cm]	Actual Time	stop watch		Flow [cc/m in]	Pipe length	Comments
0	9:00	00:00	00:05	0	0	
1	9:05	00:05	00:10	0	0	
2	9:10	00:10	00:15	16.04	0	
3	9:15	00:15	00:20	25.89	0	
4	9:20	00:20	00:25	34.88	0	
5	9:25	00:25	00:30	46.49	0	niks
6	9:30	00:30	00:35	55.2	0	niks
7	9:35	00:35	00:40	68.55	10	veel zand komt vanuit de wel, korrels rennen langs de pipe
7	9:40	00:40	00:45	77.1	14.5	geen korrels langs de pipe meer, korrels komen uit van de well
7	9:45	00:45	00:50	77.3	16	pipe wordt langer, soms korrels rennen langs de pipe
7	9:50	00:50	00:55	77.7	16	constant
7.5	9:55	00:55	01:00	87	19	korrels rennen langs de pipe
7.5	10:00	01:00	01:05	90.85	20	wel wordt iets groter, soms korrels langs de pipe
7.5	10:05	01:05	01:10	91.4	21	pipe wordt langer
7.5	10:10	01:10	01:15	95.8	25	
7.5	10:15	01:15	01:20	100.7	26	
7.5	10:20	01:20	01:25	101.7	27	
7.5	10:25	01:25	01:30	106.6 5	27	
7.5	10:30	01:30	01:35	109.0 4	30	veel korrels langs de pipe
7.5	10:35	01:35	01:40	114.4	32	
7.5	10:40	01:40	01:45	124.0 7	32	
7.5	10:45	01:45	01:50	143.8	till the end, maar duidelijk tot 28 cm	veel korrels langs de pipe, de pipe gaat tot het einde van de bak
7.5	10:50	01:50	01:55	159.6	till the end, maar duidelijk tot 28 cm	
7.5	10:55	01:55	02:00	179.5	till the end, maar duidelijk tot 28 cm	veel zand komt vanuit de wel, de pipe gaat tot het eind van de bak (wij zien de korrels die vanuit het einde van de bak komen)
7.5	11:00	02:00	02:05	184.4	till the end, maar duidelijk tot 28 cm	sommige zand korrels niet aanwezig ditchbij de filter, de korrels komen naar de

						oppervlak een paar cm ver van het einde van de bak (misschien heel dorlatend zand, de pipe zit eronder)
7.5	11:05	02:05	02:10	186.8	till the end, maar duidelijk tot 28 cm	
7.5	11:10	02:10	02:15	186.8	till the end, maar duidelijk tot 28 cm	stabiel
7.5	11:15	02:15	02:20		till the end, maar duidelijk tot 28 cm	stabiel
7.5	11:25	02:25	02:30	181.1 6	till the end, maar duidelijk tot 28 cm	stabiel: de proef kan nu gestopt worden maar wij willen de pipe wat meer duidelijk kunnen zien. Wij verhogen het drukverschil
7.5	11:30	02:30	02:35	193.1 4	till the end, maar duidelijk tot 28 cm	
8	11:35	02:35	02:40	198.1	till the end, maar duidelijk tot 28 cm	geen beweging meer, wij beslissen om verder te gaan met andere 50 cm
8	11:40	02:40	02:45	196.2	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
8	11:45	02:45	02:50	210.9	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	stabiel (bied en waterspanning)
8.5	11:50	02:50	02:55	216.9	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
8.5	11:55	02:55	03:00	222.6	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
8.5	12:00	03:00	03:05	228.1	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
8.5	12:05	03:05	03:10	225.3	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
8.5	12:10	03:10	03:15	242.6	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	debiet was iets gezakt: we beslissen om naar hoog te gaan
9	12:15	03:15	03:20	240.3	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
9	12:20	03:20	03:25	270.4	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
9.5	12:25	03:25	03:30	282.4	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	meerdere pipes zijn actief
9.5	12:30	03:30	03:35	280.7	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
9.5	12:35	03:35	03:40	280.6	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
9.5	12:40	03:40	03:45	310.3	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
10	12:45	03:45	03:50	325.1	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	2 pipes zijn actief
10	12:50	03:50	03:55	342.3	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
10	12:55	03:55	04:00	347.4	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
10	13:00	04:00	04:05	350.2	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	meerdere pipes zijn actief
10	13:05	04:05	04:10	348.3	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
10.5	13:10	04:10	04:15	380.2	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
10.5	13:15	04:15	04:20	381	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
10.5	13:20	04:20	04:21		till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
11	13:21	04:21	04:25	400.1	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	

11	13:25	04:25	04:10	403.1	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
11	13:30	04:30	04:20	404.8	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	fijne zand in de rand van de wel
11.5	13:35	04:35	04:30	418.8	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
11.5	13:40	04:40	04:40	420.9	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
12.5	13:45	04:45	04:50	462.8	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
12.5	13:50	04:50	05:00	473.6	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
12.5	14:00	05:00	05:10	479.3	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
13.5	14:10	05:10	05:15	528.9	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	turbulentie in het rode zand
13.5	14:15	05:15	05:20	543.8	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
13.5	14:20	05:20	05:25	540.4	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
14.5	14:25	05:25	05:30	576.6	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
14.5	14:30	05:30	05:35	581.2	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
15.5	14:35	05:35	05:40	614	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	water in de uitstroom cylinder wordt vies: het is fijn material die vanuit de pipe komt
15.5	14:40	05:40	05:45	672.4	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
15.5	14:45	05:45	05:50	656.8	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	water in de uitstroom cylinder is weer schoon (misschien werd de canal van de pipe breed en de fijn material werd weg gehald)
15.5	14:50	05:50	05:55	694	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
16.5	14:55	05:55	06:00		till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
16.5	15:00	06:00	06:05		till the end, maar duidelijk tot 30 cm	de pipe stopt rond 30 cm
17.5	15:05	06:05	06:10	731.1	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	de uitstroom cylinder is vol, misschien hij geeft druk tegen de pipe zodat de pipe niet snel kan ontwikkelen
17.5	15:10	06:10	06:15	726.4	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
18.5	15:15	06:15	06:20	770.8	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
18.5	15:20	06:20	06:25	767	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	de pipe blijft om 30 cm
19.5	15:25	06:25	06:30	776.2	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
19.5	15:30	06:30	06:35	827	till the end, maar duidelijk tot 30 cm	
23.5	15:35	06:35	07:00		till the end, maar duidelijk tot 30 cm	we beslissen om 4 cm verder te gaan (2 stappen van 2 cm), maar de pipe gaat niet door. Wij stoppen de proef want de critical H was al om 10.45 bereikt, wij wilden de pipe meer duidelijk zien maar wij konden niet: de pipe stopt rond 30 cm lengte.
		Einde Proef		0	0	

Table C.3 Head measurements in capillaries





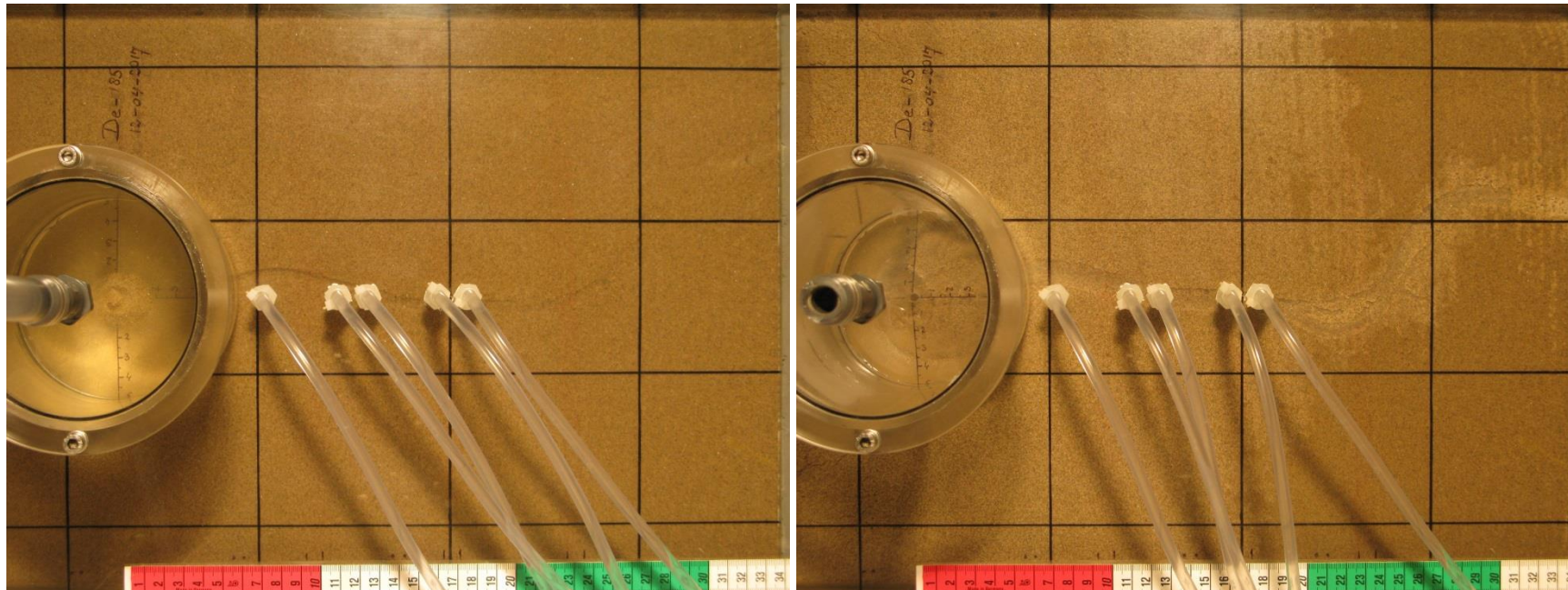
8	89.9	82.9	87.9	85.8	84.8	86.9	84.3	84.2	84	84.4	84.3	84.6	84.7
8	89.9	82.9	87.8	85.8	84.7	86.8	84.3	84.1	84	84.3	84.2	84.6	84.7
8	89.9	82.5	87.7	85.6	84.5	86.6	83.8	83.7	83.6	84.1	83.9	84.3	84.4
8.5	89.9	82.5	87.6	85.5	84.5	86.6	83.9	83.7	83.6	84.1	83.9	84.3	84.4
8.5	89.9	82.5	87.6	85.4	84.4	86.5	83.9	83.3	83.6	84	83.9	84.2	84.3
8.5	89.9	82.5	87.5	85.4	84.4	86.4	83.9	83.7	83.6	84	83.9	84.2	84.2
8.5	89.9	82.5	87.5	85.3	84.5	86.3	83.9	83.7	83.6	84	83.9	84.1	84.2
8.5	89.9	82	87.4	85.2	84.1	86.1	83.5	83.3	83.3	83.7	83.5	83.9	84
9	89.9	82	87.4	85.2	84.1	86.2	83.7	83.5	83.4	83.9	83.6	84	84.1
9	89.9	81.6	87.2	85	83.9	85.9	83.2	83	82.9	83.4	83.2	83.6	83.7
9.5	89.9	81.6	87.1	84.8	83.7	85.8	83.2	83	82.9	83.4	83.2	83.6	83.7
9.5	89.9	81.6	87.1	84.7	83.7	85.7	83.2	83	82.9	83.4	83.2	83.6	83.7
9.5	89.9	81.5	87	84.7	83.7	85.7	83.2	83	82.9	83.4	83.1	83.6	83.7
9.5	89.9	81.1	87	84.6	83.5	85.6	83	82.7	82.7	83.2	83	83.4	83.4
10	89.9	81.1	86.9	84.5	83.5	85.5	83	82.7	82.8	83.3	83	83.4	83.5
10	89.9	81.1	86.8	84.5	83.5	85.5	83.1	82.9	82.8	83.3	83	83.4	83.5
10	89.9	81.2	86.7	84.5	83.5	85.4	83	82.8	82.8	83.1	82.8	83.3	83.4
10	89.9	81.2	86.7	84.4	83.4	85.3	83	82.9	82.8	83	82.8	83.1	83.2
10	89.9	81.1	86.5	84.3	83.4	85.3	83	82.8	82.7	83	82.8	83.2	83.3
10.5	89.9	80.8	86.4	84.2	83.2	85	82.7	82.5	82.4	82.7	82.5	83	83.1
10.5	89.9	80.7	86.3	84	83.1	85	82.6	81.4	82.4	82.7	82.5	82.9	83
10.5	89.9	80.7	86.3	84	83.1	84.9	82.6	82.5	82.3	82.6	82.4	82.9	83
11	89.9	80.2	86.2	83.9	82.9	84.7	82.6	82.1	82.1	82.4	82.1	82.6	82.7
11	89.9	80.2	86.1	83.8	82.8	84.7	82.3	82.1	82.1	82.4	82.1	82.6	82.8
11	89.9	80.2	86.1	83.8	82.8	84.7	82.3	82.2	82.1	82.4	82.1	82.6	82.7
11.5	89.9	79.8	85.9	83.6	82.6	84.6	82.3	82	81.8	82.1	81.9	82.4	82.5
11.5	89.9	79.8	85.9	83.5	82.5	84.5	82.1	81.9	81.8	82.1	81.9	82.3	82.4
12.5	89.9	79	85.7	83.2	82.1	84.1	82.1	81.2	81.2	81.7	81.4	81.9	82
12.5	89.9	78.9	85.5	83.1	82.1	84.1	81.5	81.4	81.2	81.6	81.4	81.9	82
12.5	89.9	78.9	85.4	83	82.1	84	81.6	81.4	81.3	81.7	81.5	82	82.2
13.5	89.9	78	85.1	82.6	81.5	83.5	81.6	80.8	80.6	81.1	80.8	81.5	81.7
13.5	89.9	78	84.9	82.6	81.6	83.4	80.9	80.8	80.7	81.2	80.9	81.5	81.6

13.5	89.9	78	84.9	82.5	81.5	83.4	81	80.6	80.7	81.1	80.9	81.5	81.6
14.5	89.9	77	84.6	82.2	81	83	80.4	80	80	80.5	80.2	80.9	81
14.5	89.9	77	84.4	82	81	82.9	80.4	80	80	80.5	80.2	80.9	81.1
15.5	89.9	75.9	84.3	81.8	80.7	82.5	80	79.6	79.7	80.2	80.1	80.6	80.7
15.5	89.9	75.9	83.9	81.4	80.4	82	79.8	79.6	79.6	80.1	79.9	80.4	80.5
15.5	89.9	75.9	83.7	81.2	81.3	81.9	79.9	79.6	79.6	80.2	80	80.5	80.5
15.5	89.9	75.9	83.7	81.2	80.5	82	80.2	80	80	80.5	80.2	80.7	80.7
16.5	89.9	75	83.5	81.1	80.2	81.6	79.7	79.5	79.5	80	79.8	80.3	80.2
16.5	89.9	75	83.4	81	80.1	81.6	79.7	79.6	79.5	80	79.8	80.2	80.2
17.5	89.8	74.3	83.1	80.6	79.7	81.2	79.2	79	79	79.5	79.4	79.7	79.7
17.5	89.8	74.3	83	80.5	79.7	81.1	79.2	79	79	79.5	79.3	79.8	79.8
18.5	89.8	73.4	82.6	80.1	79.2	80.7	78.8	78.6	78.6	79.1	78.8	79.4	79.4
18.5	89.8	73.3	82.5	80	79.2	80.7	78.3	78.6	78.6	79	79.8	79.2	79.3
19.5	89.7	72.4	82.2	79.7	78.8	80.2	78.3	78.2	78.1	78.8	78.3	78.9	79
19.5	89.8	72.5	82.1	79.7	78.9	80.2	78.5	78.4	78.3	78.8	78.5	79	79.1
23.5	89.8	68.2	80.8	78.4	77	78.2	76.2	76	76	76.4	76.2	76.2	72

## C.2 De-185

Tabel C.4 Overzicht proef

Proefnummer	De-185
Datum	12-04-2017
Zandsoort	Deest
Beschrijving	Fining upward lagen van 5 mm
Relatieve dichtheid [-]	0.643
Temperatuur water [graden C]	19.2



Figuur C.2 links pipe ontwikkeling (De-185\_00492) en rechts capillair trekken (De-185\_cap\_00440)

Tabel C.5 Observaties en debietmeting

$\Delta p$ [cm]	Actual Time	stop watch		Flow [cc/min]	Pipe length	Comments
0	9:00	00:00	00:05	0	0	Geen zand rondom het gat bij aanvang proef
1	9:05	00:05	00:10	8.1	0	Geen beweging in het gat
2	9:10	00:10	00:15	17.1	0	Idem
3	9:15	00:15	00:20	23.51	0	Enkele korrels worden vanuit het zandpakket omhoog gevoerd bij het verhogen van het verval
4	9:20	00:20	00:25	32.8	0	Enkele korrels komen omhoog. Druk golf zichtbaar tijdens verhogen verval
5	9:25	00:25	00:30	39.7	0	Korrels blijven wervelen in gat. Enkele korrels afgezet rondom het gat
6	9:30	00:30	00:35	47.1	0	Actiever en meer continu wervelen van het zand in het gat. Zand wordt afgezet
7	9:35	00:35	00:40	61.52	10	Radiale toestroming van zand. Pipe vormt richting bovenstroomse zijde.
7	9:40	00:40	00:45	64.1	10	Enkele korrels bewegen nog.

7	9:45	00:45	00:50	63.1	10.5	Nog steeds wat transport. Smal kanaaltje ~ 0.5 cm breed
7.5	9:50	00:50	00:55	69.7	14	Pipe groeit weer iets verder: onder opnemer 3. Pipe ondiep en onduidelijk aan tip maar duidelijk en dieper aan het eind.
7.5	9:55	00:55	01:00	70.9	17	Pipe groeit nog steeds verder. Onder opnemer 4 en 5
0.5	10:00	01:00	01:05	72.2	17	Pipe groeit niet meer
7.5	10:05	01:05	01:10	74.7	17	Geen beweging. Debiet loopt nog iets op.
7.5	10:10	01:10	01:15	73	17	Enkele korrels bewegen. Pipe krijgt een duidelijkere vorm. Enkele korrels bewegen, debiet constant.
8	10:15	01:15	01:20	81.2	26	Pipe groeit weer, langzaam maar gestaag.
8	10:20	01:20	01:25	93.4	28	Pipe splitst, blijkbaar lokaal wat meer weerstand.
8	10:25	01:25	01:30	100.1	31	1 pipe buigt iets af maar groeit wel door.
8	10:30	01:30	01:35	106.2		Doorbraak t=1:34:11. Einde proef.

Table C.6 Head measurements in capillaries

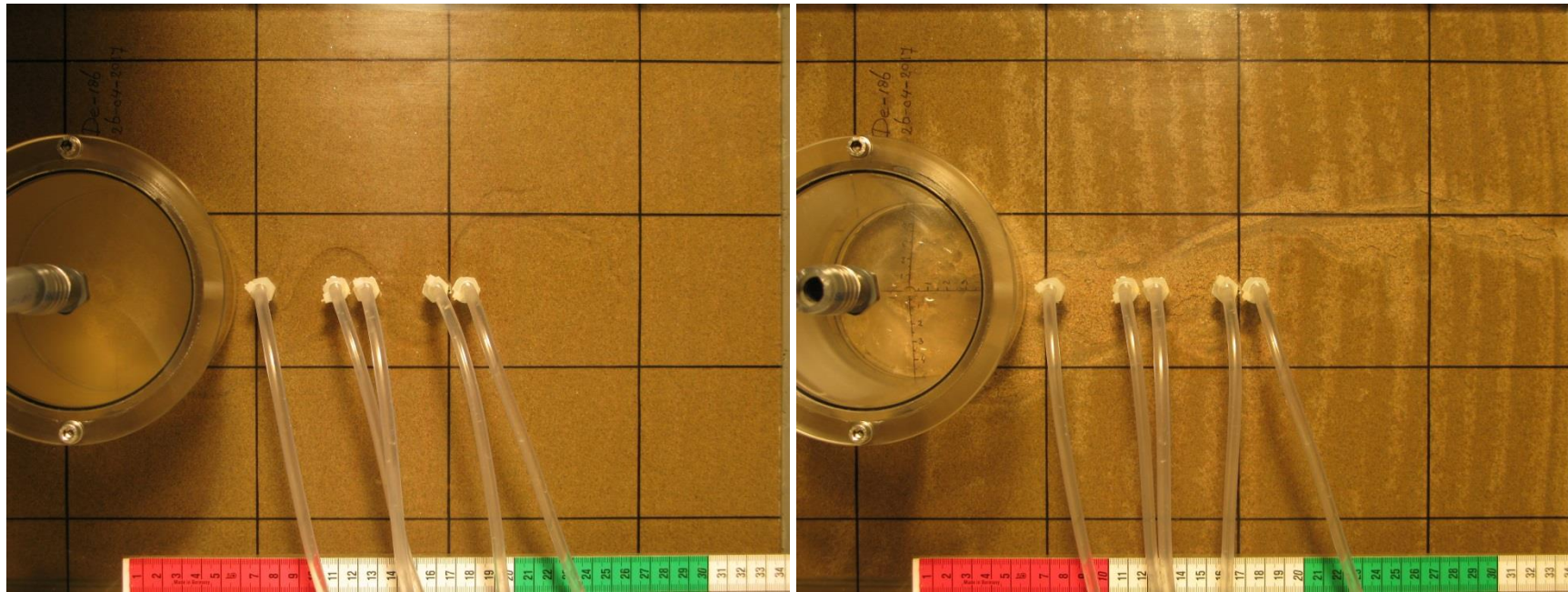
$\Delta p$ [cm]	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	h4 [mm]	h5 [mm]	h6 [mm]	h7 [mm]	h8 [mm]	h11 [mm]	h12 [mm]	h13 [mm]	h14 [mm]	h15 [mm]
0	89.8	89.7	89.5	89.5	89.5	89.5	89.5	89.4	89.4	89.7	89.5	89.8	89.8
1	89.9	89.2	89.5	89.4	89.3	89.5	89	88.9	89.2	89.3	89.2	89.4	89.5
2	89.9	88.2	89.5	89.2	88.7	89.4	88.3	88.2	88.4	88.8	88.8	88.9	89
3	89.9	87.4	89.5	89	88.3	89.3	87.7	87.6	87.9	88.2	88.1	88.4	88.6
4	89.9	86.4	89.4	88.7	87.7	89.1	87.1	86.9	87.2	87.6	87.5	87.9	88.1
5	89.9	85.7	89.4	88.4	87.4	89	86.6	86.3	86.6	87.1	87.1	87.5	87
6	90	84.7	89.3	88.1	86.8	88.8	85.7	85.2	85.6	86.3	86.2	86.8	87
7	89.9	83.4	89.2	87.6	86	88.6	84.7	84.25	84.2	85.3	85.3	85.9	86.2
7	89.9	83.4	89.2	87.4	85.7	88.6	84.65	84.2	84.1	85.05	85.2	85.9	86.2
7	89.9	83.35	89.15	87.3	85.7	88.6	84.6	84.2	84.1	84.9	85.1	85.8	86.1
7.5	89.9	82.8	89.1	87.2	85.4	88.5	84.2	83.8	83.6	84.4	84.4	85.3	85.7
7.5	89.9	82.8	89.1	87.1	85.3	88.45	84.1	83.75	83.55	84.1	84.15	85.2	85.6
0.5	89.9	82.8	89.05	87	85.2	88.4	84.15	83.75	83.55	84	84.05	84.8	85.2
7.5	89.9	82.8	89	86.9	85.1	88.35	84.05	83.7	83.5	84	84	84.7	85.1
7.5	89.9	82.8	89	86.9	85.1	88.35	84.1	83.7	83.5	83.95	84	84.7	85.1
8	89.9	82.3	89	86.8	84.85	88.2	83.75	83.3	83.15	83.7	83.6	84.3	84
8	89.9	82.3	88.9	86.4	84.5	88.1	83.6	83.3	83.2	83.6	83.5	84.1	84.2

8	89.9	82.3	88.9	86.25	84.4	87.9	83.6	83.25	83.1	83.5	83.4	83.8	84
8	89.9	82.3	88.8	86.1	83.35	87.75	83.6	83.25	83.2	83.6	83.6	84.2	84.55

### C.3 De-186

Tabel C.7 Overzicht proef

Proefnummer	De-186
Datum	26-04-2017
Zandsoort	Deest
Beschrijving	Fining upward lagen van 20 mm
Relatieve dichtheid [-]	0.684
Temperatuur water [graden C]	19.8



Figuur C.3 links pipe ontwikkeling (De-186\_00901) en rechts capillair trekken (De-186-cap\_00426)



Tabel C.8 Observaties en debietmeting

$\Delta p$ [cm]	Actual Time	stop watch		Flow [cc/min]	Pipe length [cm]	Comments
0	09:15	00:00	00:05	-	0	
1	9:20	00:05	00:10	3.3	0	
2	9:25	00:10	00:15	7	0	
3	9:30	00:15	00:20	10	0	zand komt uit
4	9:35	00:20	00:25	14.9	0	er in een wel
4	9:40	00:25	00:30		0	
4	9:45	00:30	00:35	14.55	0	
5	9:50	00:35	00:40	19.7	0	
6	9:55	00:40	00:45	26.6	0	
7	10:00	00:45	00:50	33.02	0	
7.5	10:05	00:50	00:55	38.7	5	begin: er is een pipe, die loopt tot het einde van de cylinder
7.5	10:10	00:55	01:00	39.1	5	pipe is stabiel
8	10:15	01:00	01:05	43.1	5	stil
8.5	10:20	01:05	01:10	52.2	6	loopt weer
8.5	10:25	01:10	01:15	52.8	6	stabiel
9	10:30	01:15	01:20	56.64	9	de pipe wordt langer
9	10:35	01:20	01:25	56.5	9	
9.5	10:40	01:25	01:30	62.2	9	de pipe buigt af: het blijkt dat de pipe geblokkeerd is
9.5	10:45	01:30	01:35	62	9	soms stabiel, soms lopen wat korrels in de pipe
9.5	10:50	01:35	01:40	63.1	9	er is een curve in de pipe: een paar cm voor de laatste rood zand laag, wordt de pipe geblokkeerd
10	10:55	01:40	01:45	67.3	9	weer stabile
10.5	11:00	01:45	01:50	72.6	9	de pipe slaat rechts af , naar een andere route
10.5	11:05	01:50	01:55	73.4	18	gaat weer door: om 10.07 is de pipe 14 cm laag, om 10.10 is hij 19 cm lang. De pipe ging snel door de rode lagen en goof zand komt vanuit de wel.
10.5	11:10	01:55	02:00	94.2	18	stabiel
10.5	11:15	02:00	02:05	100.3	18	de pipe stopt voor de laatste rode laag (groef) zand
10.5	11:20	02:05	02:10	104.4	18	wat korrels rennen langs de pipe
10.5	11:25	02:10	02:15	105.1	18	

10.5	11:30	02:15	02:20	105.6	18	de pipe slaat rechts af , naar een andere route
10.5	11:35	02:20	02:25	106.3	23	de pipe steekt de eerste rode laag van zand over
10.5	11:40	02:25	02:30	110.6	25	
10.5	11:45	02:30	02:35	121.6		de pipe gaat heel snel
10.5	11:50	02:35	02:40			EINDE VAN DE PROEF

Table C.9 Head measurements in capillaries

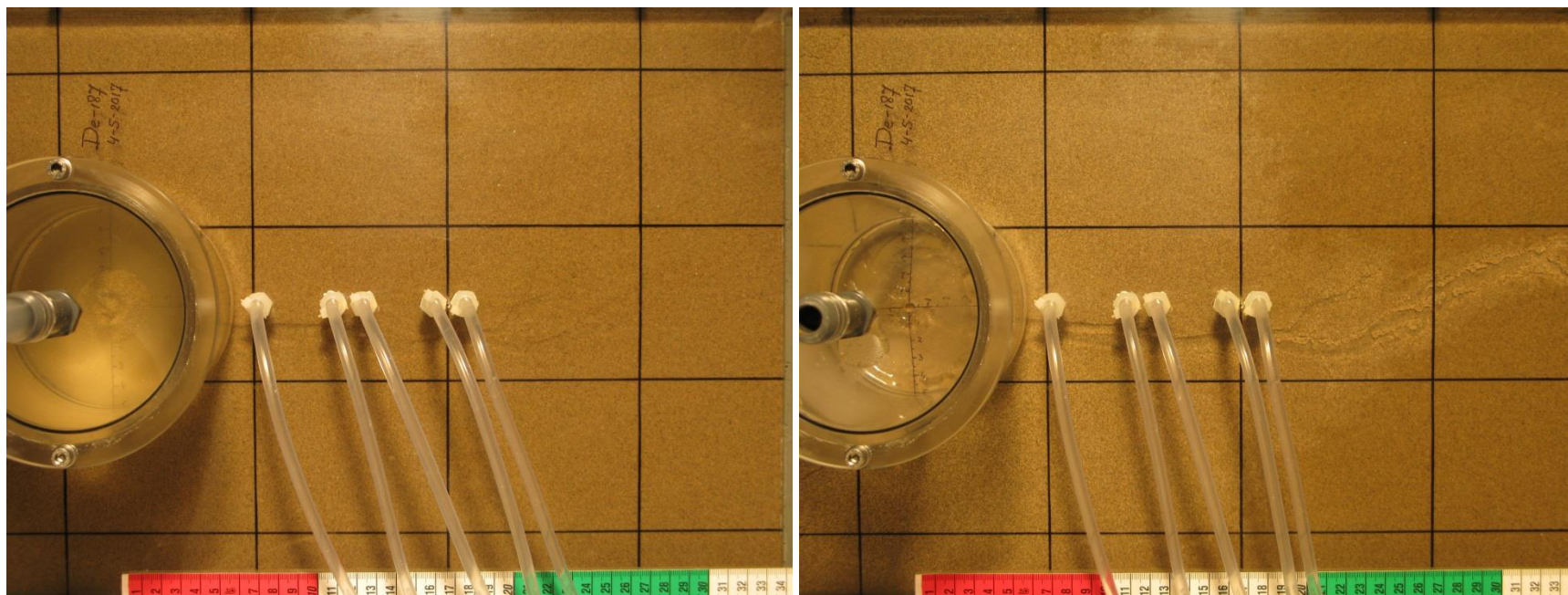
$\Delta p$	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8	h11	h12	h13	h14	h15
[cm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00	90.00
1	89.80	89.30	89.90	89.60	89.70	89.80	89.70	89.6	89.7	89.7	89.5	89.7	89.7
2	89.80	88.40	89.70	89.70	89.70	89.80	89.40	89.2	89.1	89.3	89.2	89.7	89.8
3	89.90	87.50	89.70	89.60	89.40	89.80	89.00	88.8	88.8	89.1	89	89.4	89.5
4	89.90	86.50	89.70	89.30	89.00	89.60	88.50	88.3	88.3	88.7	88.7	89.1	89.2
4	89.90	86.50	89.70	89.30	89.00	89.60	88.50	88.4	88.5	88.8	88.8	89.2	89.2
4	89.90	86.50	89.70	89.30	89.00	89.60	88.50	88.3	88.5	88.7	88.8	89.2	89.2
5	89.90	85.50	89.60	89.30	88.70	89.60	88.20	87.9	88.1	88.4	88.5	88.9	89
6	89.90	84.50	89.60	89.30	88.40	89.60	87.60	87.3	87.5	88	88.2	88.5	88.6
7	89.90	83.50	89.50	89.00	87.90	89.40	86.90	86.4	86.9	87.5	87.6	88.2	88.3
7.5	89.90	83.00	89.50	88.80	87.50	89.40	86.50	85.8	86.4	87.2	87.3	87.9	88
7.5	89.90	83.00	89.50	88.70	87.50	89.30	86.40	85.8	86.2	87	87.1	87.8	87.9
8	89.90	82.50	89.40	88.60	87.30	89.20	85.90	85.3	85.6	86.6	86.7	87.5	87.7
8.5	89.90	82.00	89.40	88.40	86.50	89.10	85.30	84.7	83.2	85.9	86	87	87.2
8.5	89.90	82.00	89.40	88.30	86.50	89.10	85.30	84.7	83.2	85.8	86	87	87.1
9	89.90	81.50	89.40	88.10	86.30	89.00	84.90	84.2	82.6	85.6	85.7	86.7	86.9
9	89.90	81.50	89.30	88.00	86.30	89.00	84.80	84.2	82.5	85.4	85.6	86.7	86.9
9.5	89.90	81.00	89.30	87.90	86.00	88.90	84.30	83.7	82	85.2	85.3	86.6	86.7
9.5	89.90	81.00	89.30	87.90	85.90	88.90	84.30	83.6	82	84.9	85.2	86.4	86.5
9.5	89.90	81.00	89.30	87.80	85.80	88.90	84.30	83.6	82	84.9	85.1	86.4	86.5
10	89.90	80.50	89.30	87.70	85.60	88.80	83.90	83.2	81.2	84.7	84.8	86.1	86.3
10.5	89.90	80.00	89.30	87.60	85.30	88.70	83.40	82.7	80.8	84.3	84.4	85.9	86
10.5	89.90	80.00	89.20	87.40	84.80	88.60	82.90	82.9	81	82.9	82.2	82.7	83

10.5	89.90	80.00	89.00	86.80	83.80	88.30	82.60	82	80.8	81.8	81.9	82.4	82.6
10.5	89.90	80.00	88.90	86.70	83.70	88.30	82.50	82	80.7	81.5	81.7	82.1	82.3
10.5	89.90	80.00	88.90	86.40	83.50	88.30	82.30	81.9	80.7	81.3	81.5	81.8	82
10.5	89.90	80.00	88.90	86.40	83.50	88.30	82.30	81.7	80.7	81.3	81.4	81.7	81.9
10.5	89.90	80.00	88.90	86.40	83.50	88.20	82.20	81.6	80.7	81.4	81.7	82	82.3
10.5	89.90	80.00	88.80	86.20	83.50	88.10	82.20	81.7	80.7	81.6	82.1	82.3	82.8
10.5	89.90	80.00	88.80	86.10	83.50	88.00	82.30	81.7	81	81.7	82.2	82.8	83
10.5	89.90	80.00					82.30						
10.5	89.90	80.00											

## C.4 De-187

Tabel C.10 Overzicht proef

Proefnummer	De-187
Datum	04-05-2017
Zandsoort	Deest
Beschrijving	Homogeen opgebouwd
Relatieve dichtheid [-]	0.681
Temperatuur water [graden C]	19.6



Figuur C.4 links pipe ontwikkeling (De-187\_00789) en rechts capillair trekken (De-187-cap\_00185)

Tabel C.11 Observaties en debietmeting

$\Delta p$ [cm]	Actual Time	stop watch		Flow [cc/min]	Pipe length [cm]	Comments
0	09:20	00:00	00:05	0	0	no movement
1	09:25	00:05	00:10	6.73	0	no movement
2	09:30	00:10	00:15	13.3	0	shock wave causes particles to move slightly. No sand in exit hole yet. Sand is moving underneath the exit hole, stabilizes.
3	09:35	00:15	00:20	20.9	1.5	Particles move in exit hole
4	09:40	00:20	00:25	27.7	2	First particles are being deposited. Increased activity of sand movement in hole. A small ring of particles is formed.
5	09:45	00:25	00:30	35.6	4	Shock wave visible in sand upon increase of head. Crater forms. Pipe increases in length.
5	09:50	00:30	00:35	37.7	4	Ferry touches the outlet tube: more particles move.
5.5	09:55	00:35	00:40	42.6	5	Pipe does not increase much
5.5	10:00	00:40	00:45	41.4	5	No further movement
6	10:05	00:45	00:50	47	6.5	Little elongation of pipe.
6	10:10	00:50	00:55	47.1	7.5	Ferry touches the outlet tube, resulting in more particle transport
6.5	10:15	00:55	01:00	52.7	10	Pipe elongates - not under riser tubes
6.5	10:20	01:00	01:05	54.7	10	Intermittent particle transport, pipe does not elongate much.
6.5	10:25	01:05	01:10	52.95	10.5	Still particles moving, very little transport, stabilizes
7	10:30	01:10	01:15	60.6	12	Pipe elongates. Few particles moving at the end of interval. Pipe is under ppt3
7	10:35	01:15	01:20	63.6	12	No more change.
7.5	10:40	01:20	01:25	66.2	15	Pipe elongates. Particles moving fast in pipe: about 10 cm/s?
7.5	10:45	01:25	01:30	69.4	20	After stable period, pipe starts moving again, slowly elongating.
7.5	10:50	01:30	01:35	78.3	20	Still particles moving, piping is rather slow and stabilizes
7.5	10:55	01:35	01:40	78.5	23	Still movement of a few particles visible.
7.5	11:00	01:40	01:45	82.4	23	idem
7.5	11:05	01:45	01:50	82.4	23	Few particles moving -> stable
8	11:10	01:50	01:55	88.3	23	Pipe seeks different path, but does not get past 23 cm
8	11:15	01:55	02:00	97.5	23	Stabilizes
8	11:20	02:00	02:05	94.6	23	No particles moving
8.5	11:25	02:05	02:10	103.6	34	Apparently a stronger zone is present: different pipes search for a path upstream. Suddenly pipe starts elongating towards the end. 2.12 end of test
8.5	11:30	02:10	02:15	113.2	34	

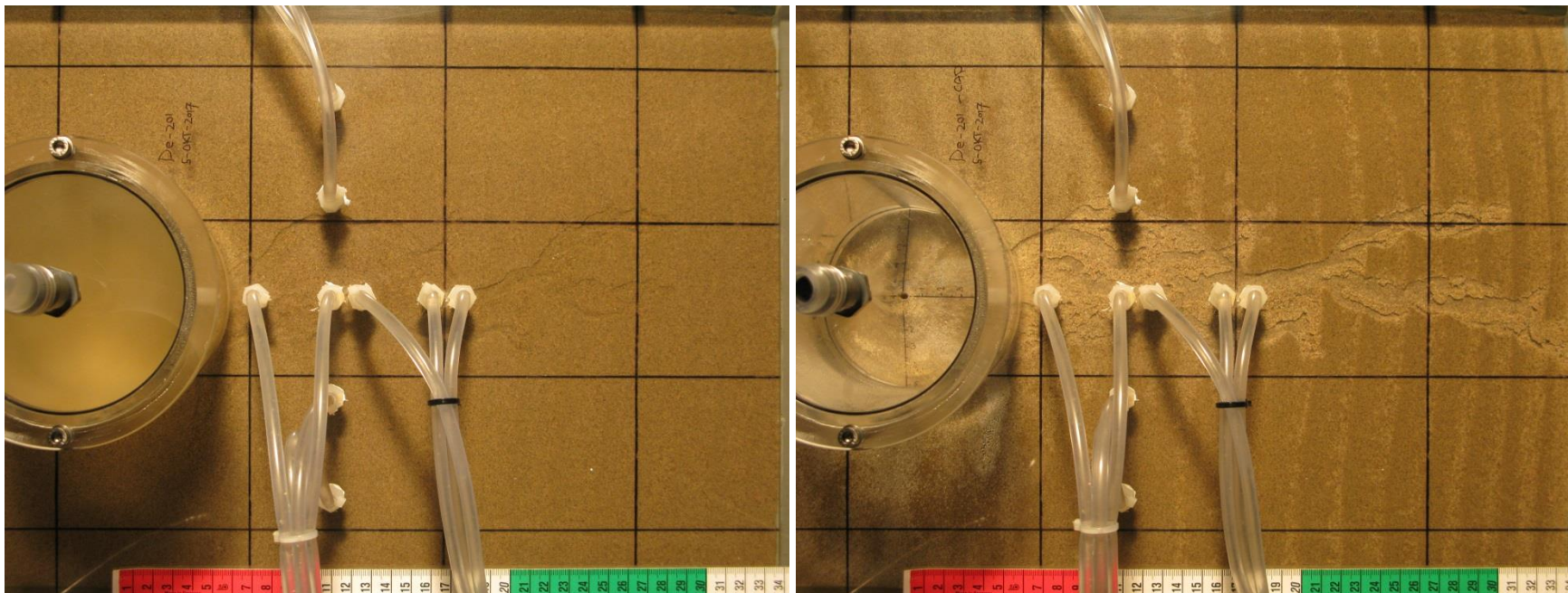
Table C.12 Head measurements in capillaries

$\Delta p$ [cm]	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	h4 [mm]	h5 [mm]	h6 [mm]	h7 [mm]	h8 [mm]	h11 [mm]	h12 [mm]	h13 [mm]	h14 [mm]	h15 [mm]
0	89.90	90.00	89.90	89.70	89.80	89.90	89.90	89.90	89.60	89.80	89.60	89.90	89.90
1	89.90	89.40	89.80	89.60	89.70	89.90	89.50	89.6	89.2	89.6	89.3	89.7	89.7
2	89.90	88.50	89.80	89.50	89.40	89.80	89.10	89.1	88.7	89.1	88.9	89.2	89.3
3	89.00	87.50	89.80	89.30	89.00	89.70	88.50	88.9	88.4	88.7	88.7	89	89
4	89.00	86.60	89.80	89.20	88.70	89.60	88.00	87.9	87.9	88.3	88.3	88.6	88.6
5	89.00	85.70	89.70	89.00	88.40	89.50	87.50	87.5	87.1	87.8	87.8	88.1	88.2
5	89.00	85.60	89.60	88.90	88.00	89.40	87.20	86.9	87	87.5	87.6	88	88.1
5.5	89.00	85.10	89.60	88.70	87.80	89.40	86.90	86.6	86.6	87.2	87.3	87.7	87.8
5.5	89.00	85.00	89.60	88.70	87.80	89.40	86.90	86.4	86.5	87.2	87.3	87.6	87.8
6	89.00	84.60	89.60	88.50	87.50	89.20	86.50	86.1	86.1	86.9	87	87.4	87.5
6	89.00	84.60	89.60	88.50	87.50	89.20	86.50	86	86	86.7	86.9	87.4	87.5
6.5	89.00	84.10	89.60	88.40	87.20	89.20	86.10	85.8	85.4	86.3	86.4	87	87.1
6.5	89.00	84.00	89.50	88.20	86.90	89.10	86.00	85.4	85.4	86.1	86.4	87	87.1
6.5	89.00	84.00	89.50	88.20	86.90	89.10	86.00	85.4	85.4	86.1	86.4	87	87.1
7	89.00	83.50	89.40	88.10	86.70	89.10	85.60	85.3	84.9	85.5	85.5	86.5	86.6
7	89.00	83.50	89.40	88.00	86.50	89.00	85.50	85	84.6	85.3	85.3	86.4	86.5
7.5	89.00	83.00	89.40	87.90	86.40	89.00	85.30	84.9	84.5	85	85	86	86.2
7.5	89.00	83.00	89.40	87.70	86.10	88.90	85.00	84.5	84.3	84.9	84.9	85.9	86
7.5	89.00	83.00	89.40	87.50	85.80	88.80	85.00	84.5	84.1	84.5	84.5	85.2	85.3
7.5	89.00	83.00	89.20	87.40	85.70	88.80	84.90	84.4	84.1	84.5	84.5	85.2	85.3
7.5	89.00	83.00	89.20	87.30	85.70	88.80	84.90	84.4	84	84.5	84.5	85.1	85.2
7.5	89.00	83.00	89.20	87.30	85.70	88.80	84.90	84.4	84	84.5	84.5	85.1	85.2
8	89.00	82.50	89.20	87.20	85.50	88.60	84.50	84.2	83.8	84.1	84	84.9	85
8	89.00	82.50	89.20	86.90	85.10	88.50	84.40	84	83.6	83.9	83.9	84.5	84.6
8	89.00	82.50	89.20	86.90	85.10	88.50	84.40	84	83.6	83.9	83.9	84.5	84.6
8.5	89.00	82.00	89.10	86.70	84.90	88.40	84.00	83.6	83.5	83.5	83.5	84.2	84.2
8.5	89.00	82.00	89.00	86.50	84.70	88.30	84.00	83.5	83.3	83.5	83.5	84.2	84.2

## C.5 De-201

Tabel C.13 Overzicht proef

Proefnummer	De-201
Datum	05-10-2017
Zandsoort	Deest
Beschrijving	Fining upward lagen van 20 mm
Relatieve dichtheid [-]	0.51
Temperatuur water [graden C]	20.0



Figuur C.5 links pipe ontwikkeling (De-201\_552) en rechts capillair trekken (De-201\_CAP\_01619)



Tabel C.14 Observaties en debietmeting

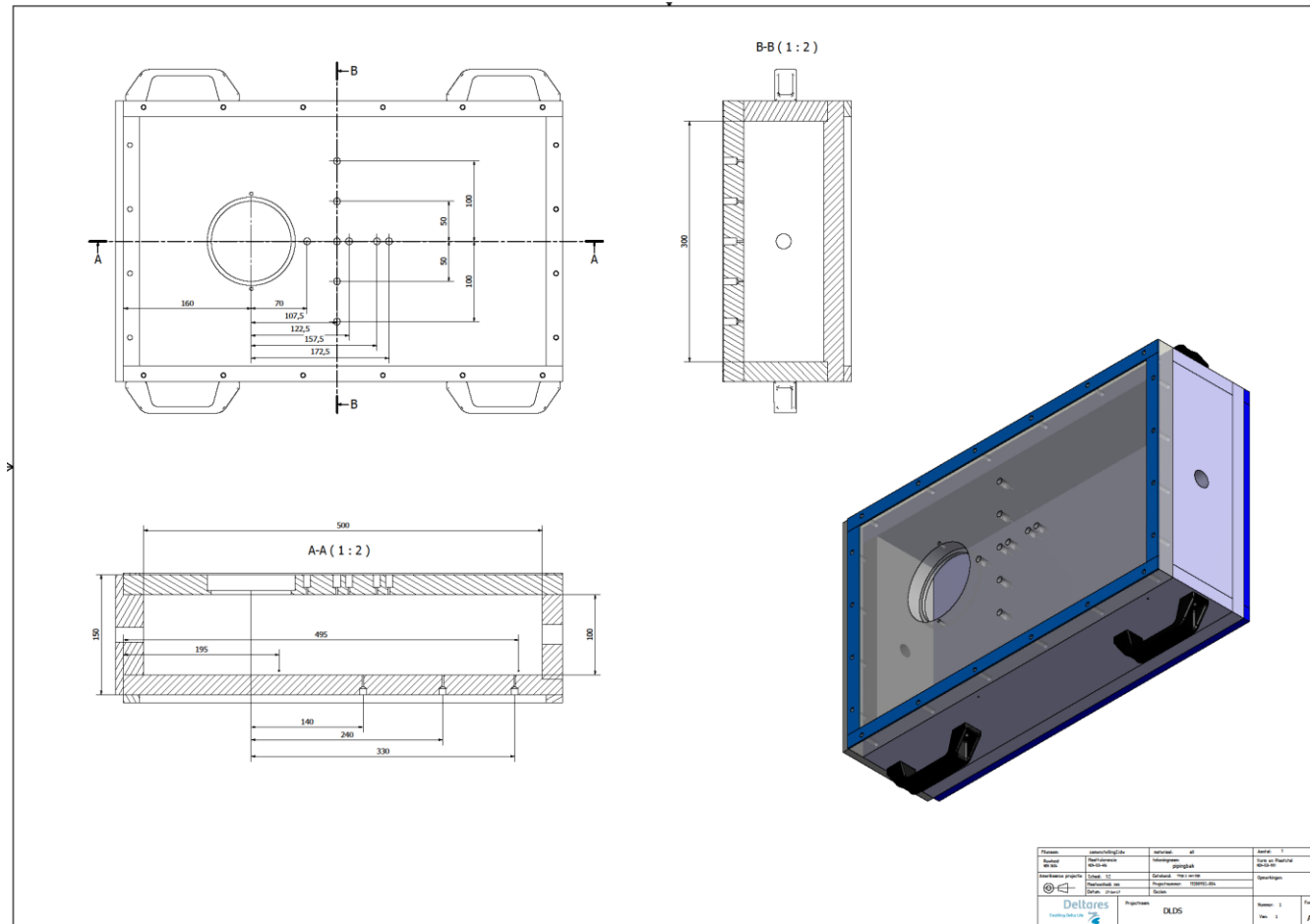
$\Delta p$ [cm]	Actual Time	stop watch		Flow [cc/min]	Pipe length [cm]	Comments
0	9:00	00:00	00:05	0	0	At the end of preparation, sand (boil) layer of about 1 cm is present.
1	9:05	00:05	00:10	2	0	
2	9:10	00:10	00:15	6.8	0	
3	9:15	00:15	00:20	11.20	0	
4	9:20	00:20	00:25	15.20	0	
5	9:25	00:25	00:30	20.00	0	
6	9:30	00:30	00:35	24.70	0	
7	09:35	00:35	00:40	31.20	0	
8	09:40	00:40	00:45	38.90		
9	09:45	00:45	00:50	47.80	6	Pipe growing in the N/W direction. Pipe is still only within the area of the cylinder. Pipe identified as swelling of the sand layer. No pipe erosion evident.
9.5	09:50	00:50	00:55	51.20	6	
10	09:55	00:55	01:00	54.50	6	
10.5	10:00	01:00	01:05	60.40	6	
11	10:05	01:05	01:10	64.10	6	
11.5	10:10	01:10	01:15	69.60	6	
12	10:15	01:15	01:20	74.20	6	
12.5	10:20	01:20	01:25	79.50	6	
13	10:25	01:25	01:30	95.30	~21	Pipe is growing fast from the beginning of this time interval. Direction of pipe: West. Erosion is evident. In general the direction of the pipe is parallel to the flow. Some indications of tranverse flow could be seen.
13	10:30	01:30	01:33	133.30		The pipe is growing continuously at constant head. Arriving upstream time: 10:33. End of test.

Table C.15 Head measurements in capillaries

$\Delta p$ [cm]	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	h4 [mm]	h5 [mm]	h6 [mm]	h7 [mm]	h8 [mm]	h11 [mm]	h12 [mm]	h13 [mm]	h14 [mm]	h15 [mm]
0	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1	0.3	0.2	0.2	0	0	0	0	0
1	0.6	1.1	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1
2	0.6	1.9	0.4	0.4	0.5	0.4	1	1	0.5	0.3	0.2	0.1	0.2
3	0.6	2.9	0.5	0.5	0.7	0.4	1.4	1.5	0.9	0.6	0.5	0.5	0.4
4	0.6	3.9	0.5	0.6	1	0.5	1.7	1.95	1.3	0.9	0.8	0.7	0.6
5	0.6	4.9	0.6	0.75	1.2	0.6	2.2	2.4	1.7	1.2	1.1	1	0.8
6	0.6	5.9	0.6	0.9	1.5	0.7	2.6	2.95	2.05	1.55	1.45	1.2	1
7	0.6	6.9	0.7	1	1.7	0.8	3.2	3.6	2.6	2	1.9	1.5	1.4
8	0.6	7.8	0.7	1.2	2	0.9	4	4.5	3.1	2.5	2.4	1.9	1.8
9	0.6	8.7	0.75	1.5	2.3	1.2	4.7	5.4	3.7	2.9	2.8	2.4	2
9.5	0.6	9.2	0.75	1.65	2.4	1.2	5	5.8	4.3	3.4	3.2	2.6	2.4
10.0	0.6	9.7	0.8	1.7	2.5	1.2	5.4	6.2	4.6	3.8	3.6	2.9	2.7
10.5	0.6	10.2	0.85	2	2.6	1.3	5.9	6.7	5.1	4.2	4	3.2	2.9
11.0	0.6	10.7	0.9	2.2	2.7	1.4	6.3	7.2	5.5	4.55	4.4	3.5	3.2
11.5	0.6	11.2	0.95	2.3	2.8	1.45	6.7	7.7	5.8	4.8	4.6	3.7	3.4
12.0	0.6	11.7	1	2.5	2.9	1.55	7.2	8.2	6.2	5.2	5	4	3.6
12.5	0.6	12.2	1.1	2.7	3	1.6	7.6	8.8	6.6	5.6	5.4	4.2	3.8
13.0	0.6	12.7	1.2	2.9	3.1	1.8	8.7	9.8	10.1	6.5	6	4.7	4.2
13.0	0.6	13.7	1.3	3.3	3.2	2.4	9.3	10.5	10.2	9.4	6.6	7.8	7.3



## D Eigenschappen proefopstelling



Tabel D.1 Coördinaten stijghoogte-metingen in mm vanaf centrum uitstroompunt

	<b>h1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
<b>x</b>	-348		-330	-240	-140	-340	-40	135	-70	-107.5	-122.5	-157.5	-172.5
<b>y</b>	150	150	150	150	150	0	0	150	150	150	150	150	150
<b>z</b>	50.5	101	0	0	0	100	100	50.5	101	101	101	101	101

## **E Berekeningen DgFlow**

# Memo

To  
Arcadis

Date  
Oktober 11 2017

Reference  
1210060-002-GEO-002

Number of pages  
35

From  
dr.ir. John van Esch

Direct line  
+31 (0)6 4655 2906

E-mail  
john.vanesch@deltares.nl

Subject  
heterogeneity

Copy to  
dr.ir. Vera van Beek

## 1 Piping through heterogeneous systems

DgFlow (Van Esch *et al.* (2013)) implements the original Sellmeijer's description of the erosion process without the use of a model factor. However, in this notation the modified form of Sellmeijer's rule is adopted (still without a model factor). gravitational acceleration  $g$   $9.81 \text{ ms}^{-2}$ , fluid viscosity  $\mu$   $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ Nsm}^{-2}$ , fluid density  $\rho$   $1.0 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ , porosity  $n$   $0.35$ , compressibility  $\alpha$   $5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2\text{N}^{-1}$ , compressibility of the soil skeleton  $\beta$   $0.0 \text{ m}^2\text{N}^{-1}$ , grain density  $\rho^s$   $2.65 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}$ , White's constant  $\nu$   $0.25$ , bedding angle  $\theta$   $37.0 \text{ deg}$ . Figure 3 sketches the laboratory layout and Table 3 gathers the parameter values.

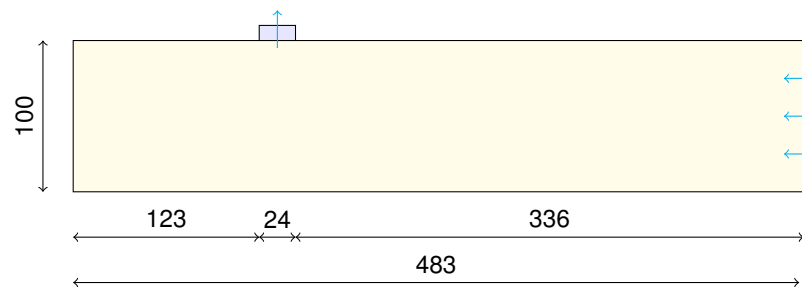


Figure 1: Laboratory setup.

Homogeneous experiments: Section 2.1 material 1 homogeneous, Section 2.2 material 2 homogeneous, Section 2.3 material 3 homogeneous, Section 2.4 material 4 homogeneous, Section 2.5 material 5 homogeneous, Section 2.6 material 6 homogeneous, Section 2.7 material 7 homogeneous.

Periodic coarse scale heterogeneous experiments for which  $\Delta l = 60\text{mm}$ :

- Section 3.1 material 1,2,3 heterogeneous diameter and heterogeneous permeability,  $H_{dg} = 0.79 \text{ m}$ , test did not converge.
- Section 3.2 material 1,2,3 heterogeneous diameter, material 4 constant permeability,  $H_{dg} = 0.17 \text{ m}$ .



*Table 1: Homogeneous experiments.*

nr	$\kappa \text{ (m}^2\text{)}$	$D_{70} \text{ (m)}$	$D_{70}^* \text{ (m)}$	$\Delta a \text{ (m)}$	$H_{dg} \text{ (m)}$
1	$4.64 \cdot 10^{-12}$	$2.25 \cdot 10^{-4}$	$2.15 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-6}$	0.25
2	$2.52 \cdot 10^{-11}$	$3.40 \cdot 10^{-4}$	$2.53 \cdot 10^{-4}$	$5.1 \cdot 10^{-6}$	0.17
3	$4.64 \cdot 10^{-11}$	$5.30 \cdot 10^{-4}$	$3.02 \cdot 10^{-4}$	$6.1 \cdot 10^{-6}$	0.17
4	$3.71 \cdot 10^{-11}$	$4.00 \cdot 10^{-4}$	$2.70 \cdot 10^{-4}$	$5.4 \cdot 10^{-6}$	0.16
5	$2.00 \cdot 10^{-12}$	$2.25 \cdot 10^{-4}$	$2.15 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-6}$	0.33
6	$1.10 \cdot 10^{-10}$	$3.40 \cdot 10^{-4}$	$2.53 \cdot 10^{-4}$	$5.1 \cdot 10^{-6}$	0.10
7	$2.40 \cdot 10^{-10}$	$5.30 \cdot 10^{-4}$	$3.02 \cdot 10^{-4}$	$6.1 \cdot 10^{-6}$	0.10

- Section 3.3 material 5,6,7 heterogeneous diameter and heterogeneous permeability  $H_{dg} = 4.00 \text{ m}$ , test did not converge.

Periodic fine scale heterogeneous experiments for which  $\Delta l = 20\text{mm}$ :

- Section 4.1 material 1,2,3 heterogeneous diameter and heterogeneous permeability,  $H_{dg} = 0.65 \text{ m}$ , test did not converge.
- Section 4.2 material 1,2,3 heterogeneous diameter, material 4 constant permeability,  $H_{dg} = 0.16 \text{ m}$ .
- Section 4.3 material 5,6,7 heterogeneous diameter and heterogeneous permeability,  $H_{dg} = 2.50 \text{ m}$ , test did not converge.

*Table 2: Reference computations.*

nr	$\kappa \text{ (m}^2\text{)}$	$D_{70} \text{ (m)}$	$D_{70}^* \text{ (m)}$	$\Delta a \text{ (m)}$	$H_{dg} \text{ (m)}$
1	$3.71 \cdot 10^{-11}$	$2.25 \cdot 10^{-4}$	$2.15 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-6}$	0.13
2	$3.71 \cdot 10^{-11}$	$3.40 \cdot 10^{-4}$	$2.53 \cdot 10^{-4}$	$5.1 \cdot 10^{-6}$	0.15
3	$3.71 \cdot 10^{-11}$	$5.30 \cdot 10^{-4}$	$3.02 \cdot 10^{-4}$	$6.1 \cdot 10^{-6}$	0.17
4	$3.71 \cdot 10^{-11}$	$4.00 \cdot 10^{-4}$	$2.70 \cdot 10^{-4}$	$5.4 \cdot 10^{-6}$	0.16

continuity of flux

$$q = k_1 \frac{\phi_1 - \phi_3}{l_1} = k_2 \frac{\phi_3 - \phi_2}{l_2} \tag{1}$$

provides

$$\phi_3 = \frac{l_2 k_1}{l_1 k_2 + l_2 k_1} \phi_1 + \frac{l_1 k_2}{l_1 k_2 + l_2 k_1} \phi_2 \tag{2}$$

## 2 Homogeneous experiment

Figure 2 homogeneous experiment setup.

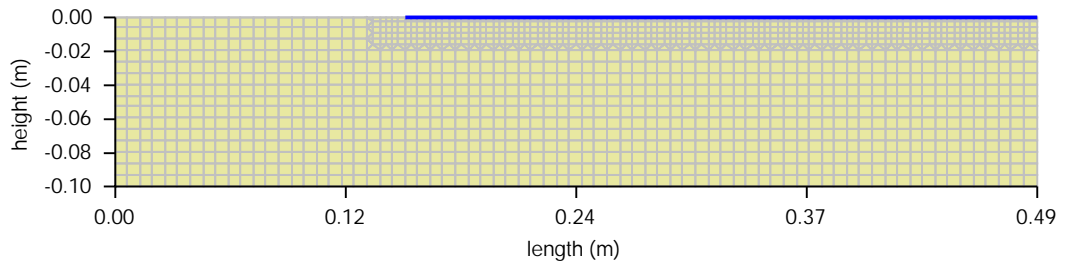


Figure 2: Homogeneous experiment setup.

- Section [2.1](#) material 1, Figure [3](#), Table [3](#) .
- Section [2.2](#) material 2, Figure [6](#), Table [4](#).
- Section [2.3](#) material 3, Figure [9](#), Table [5](#).
- Section [2.4](#) material 4, Figure [12](#), Table [6](#).
- Section [2.5](#) material 5, Figure [15](#), Table [7](#).
- Section [2.6](#) material 6, Figure [18](#), Table [8](#).
- Section [2.7](#) material 7, Figure [22](#), Table [9](#).

## 2.1 experiment 1

Experiment 1, homogeneous material 1,  $\Delta\phi = 5\text{mm}$ ,  $\Delta a = 4.3 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

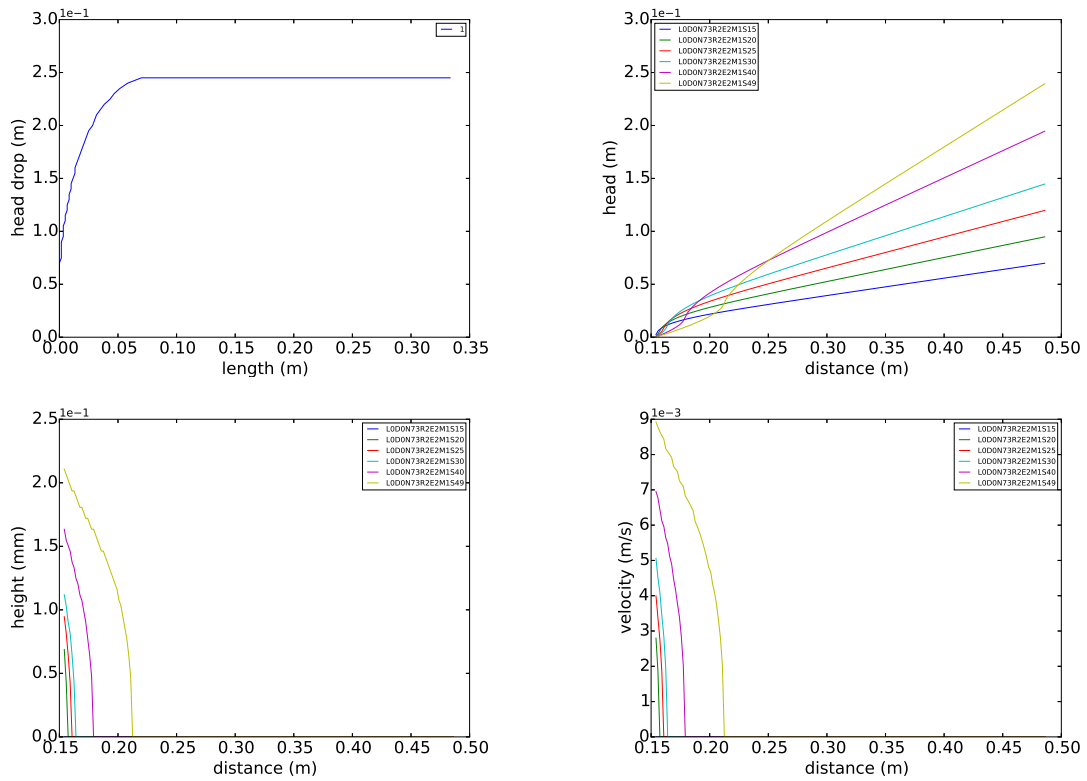


Figure 3: Experiment 1, 2588 nodes.

Table 3: Experiment 1.

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes	steps	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	49	0.24	0.07	48
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	50	0.24	0.09	142
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	50	0.24	0.07	405
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	50	0.24	0.07	1258
6.67	6.67	0.42	0.42	8042	51	0.25	0.08	4794

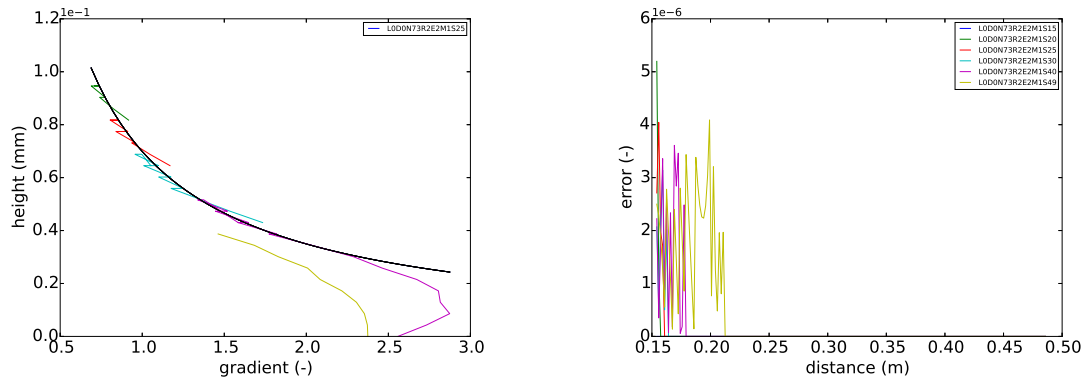


Figure 4: Experiment 1, 2588 nodes.

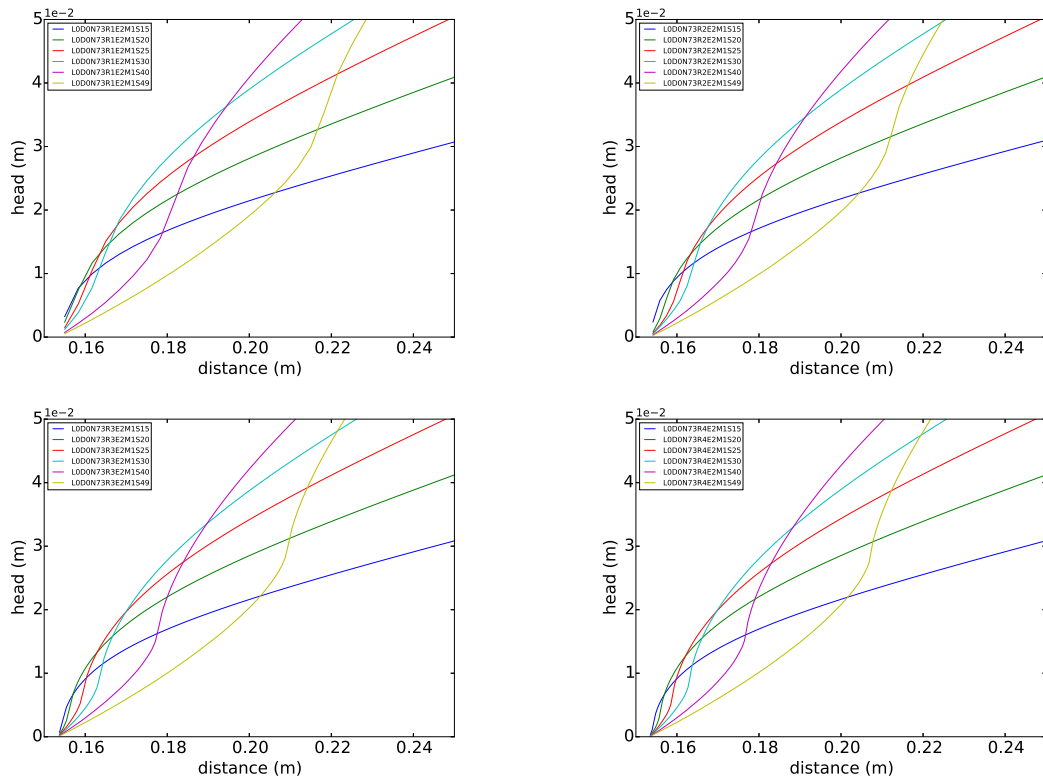


Figure 5: Experiment 1, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.

## 2.2 experiment 2

Experiment 2, homogeneous material 2,  $\Delta\phi = 5\text{mm}$ ,  $\Delta a = 5.1 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

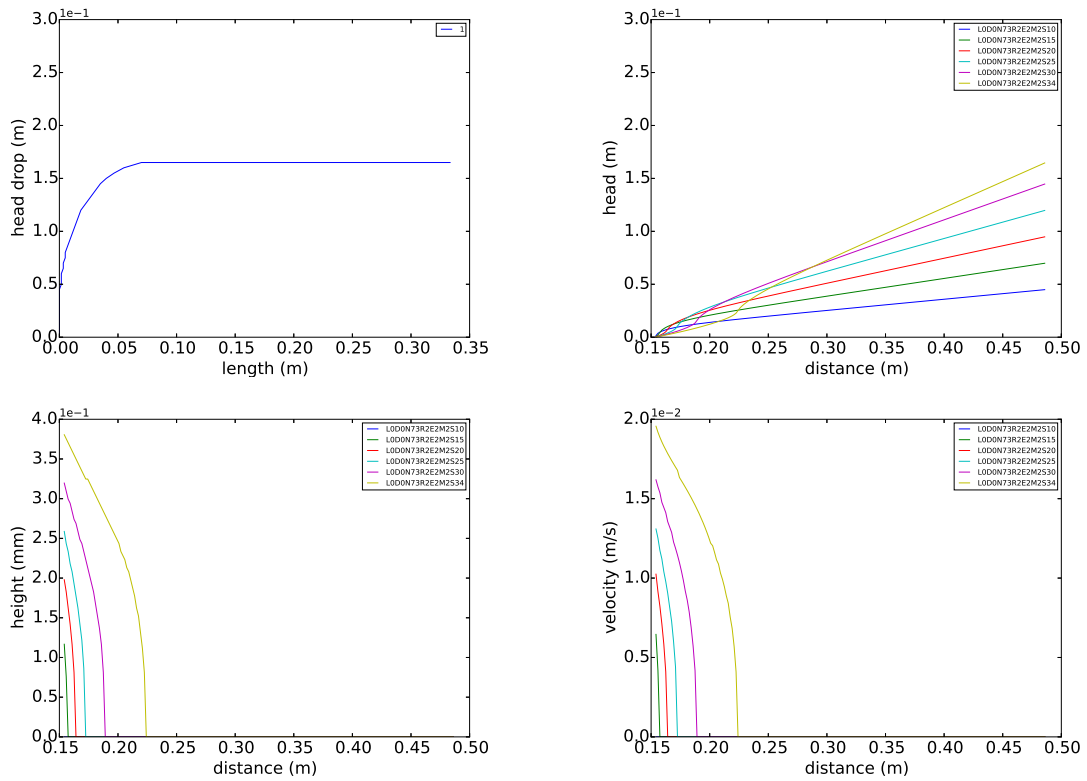


Figure 6: Experiment 2, 2588.

Table 4: Experiment 2.

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes (-)	steps (-)	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	33	0.16	0.07	76
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	34	0.17	0.08	185
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	34	0.17	0.07	558
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	34	0.17	0.06	1574
6.67	6.67	0.42	0.42	8042	34	0.17	0.06	6385

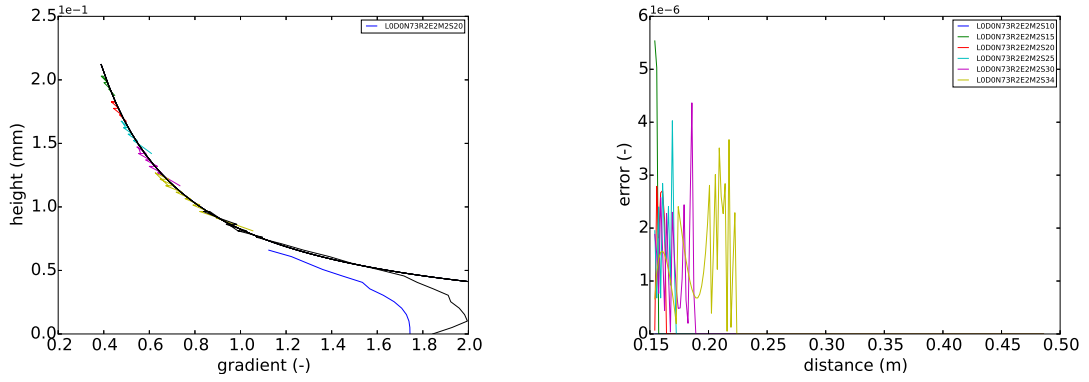


Figure 7: Experiment 2, 2588 nodes.

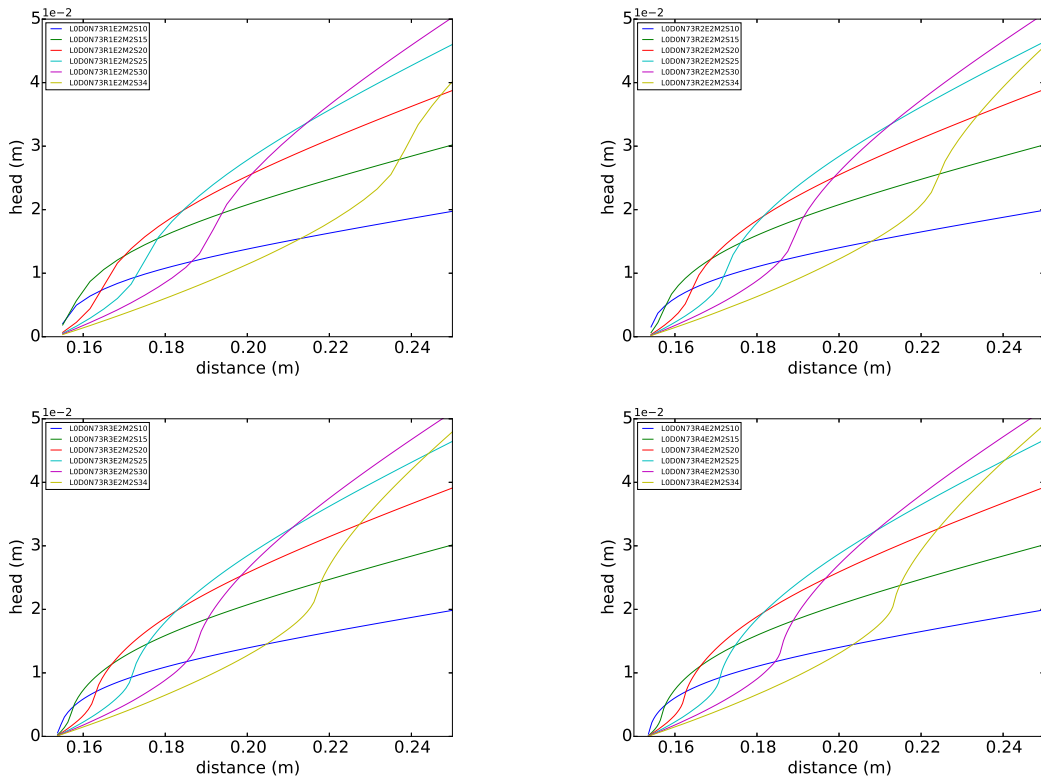


Figure 8: Experiment 2, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.

## 2.3 experiment 3

Experiment 3, homogeneous material 3,  $\Delta\phi = 5\text{mm}$ ,  $\Delta a = 6.1 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

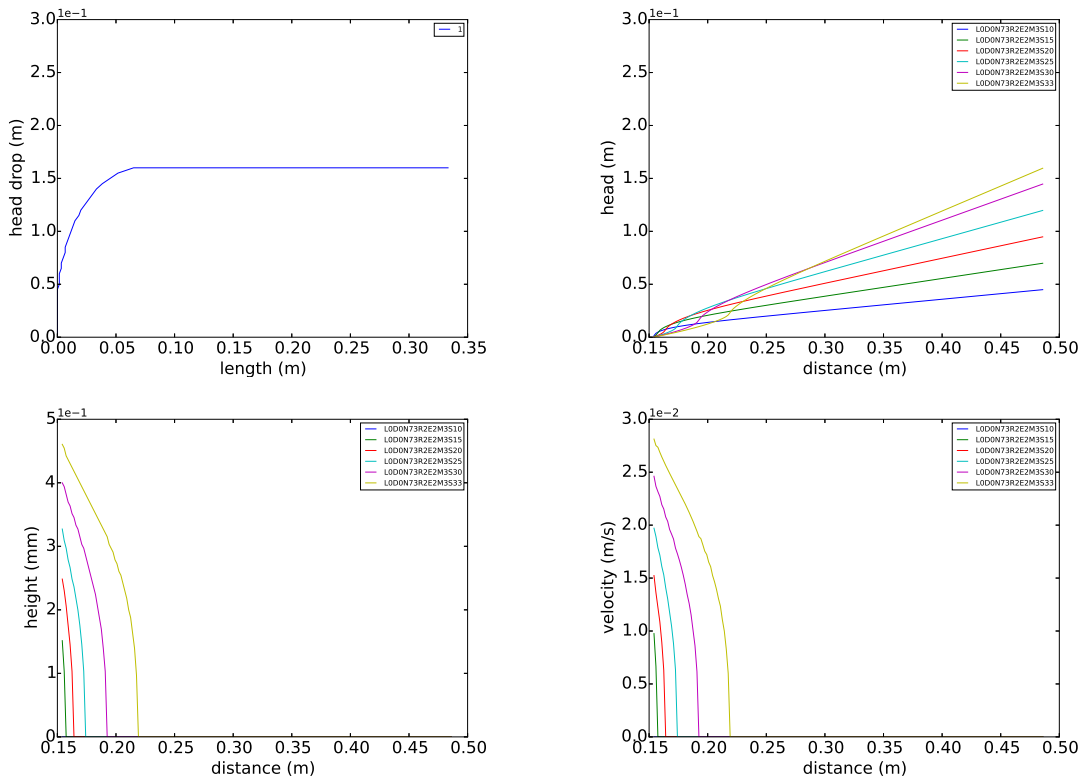


Figure 9: Experiment 3, 2588 nodes.

Table 5: Experiment 3.

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes (-)	steps (-)	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	32	0.16	0.07	78
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	33	0.16	0.08	189
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	33	0.16	0.07	571
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	33	0.16	0.06	1595
6.67	6.67	0.42	0.42	8042	34	0.17	0.08	6647

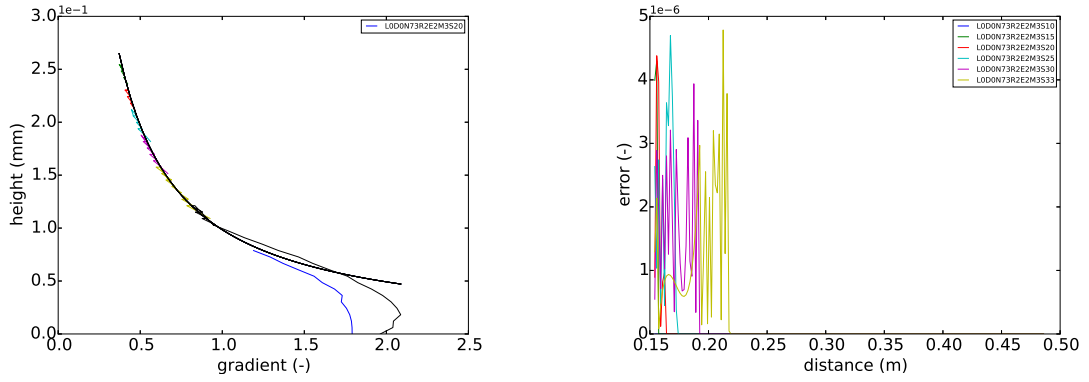


Figure 10: Experiment 3, 2588 nodes.

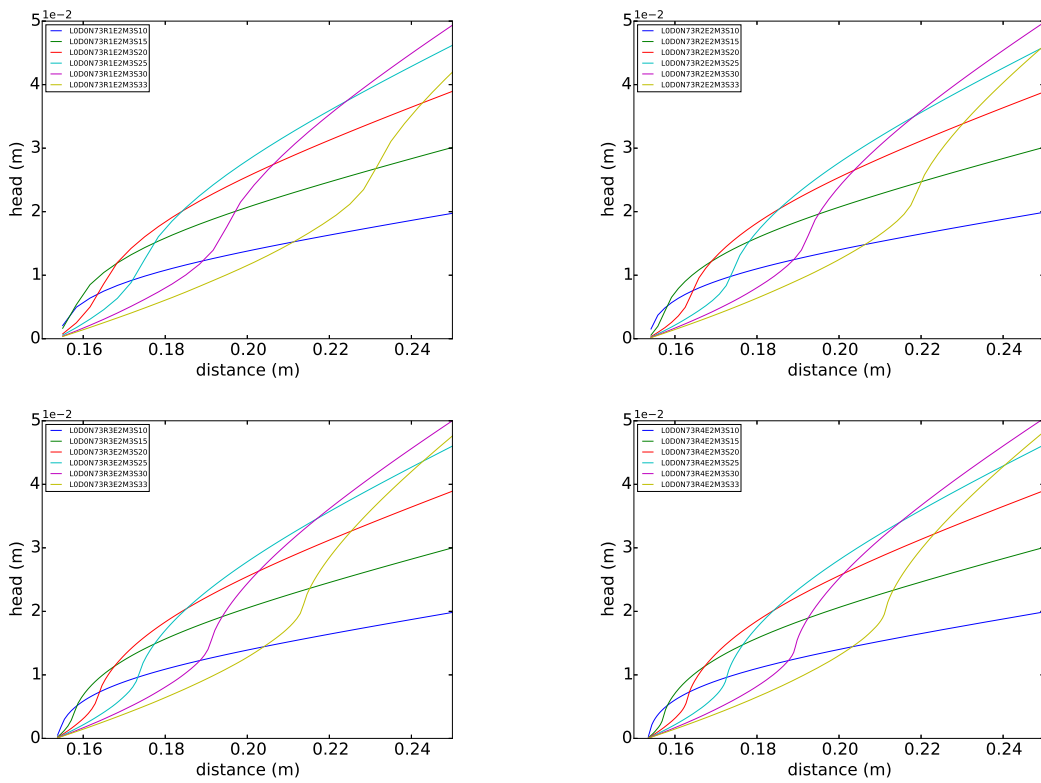


Figure 11: Experiment 3, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.



## 2.4 experiment 4

Experiment 4, homogeneous material 4,  $\Delta\phi = 5\text{mm}$ ,  $\Delta a = 5.4 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

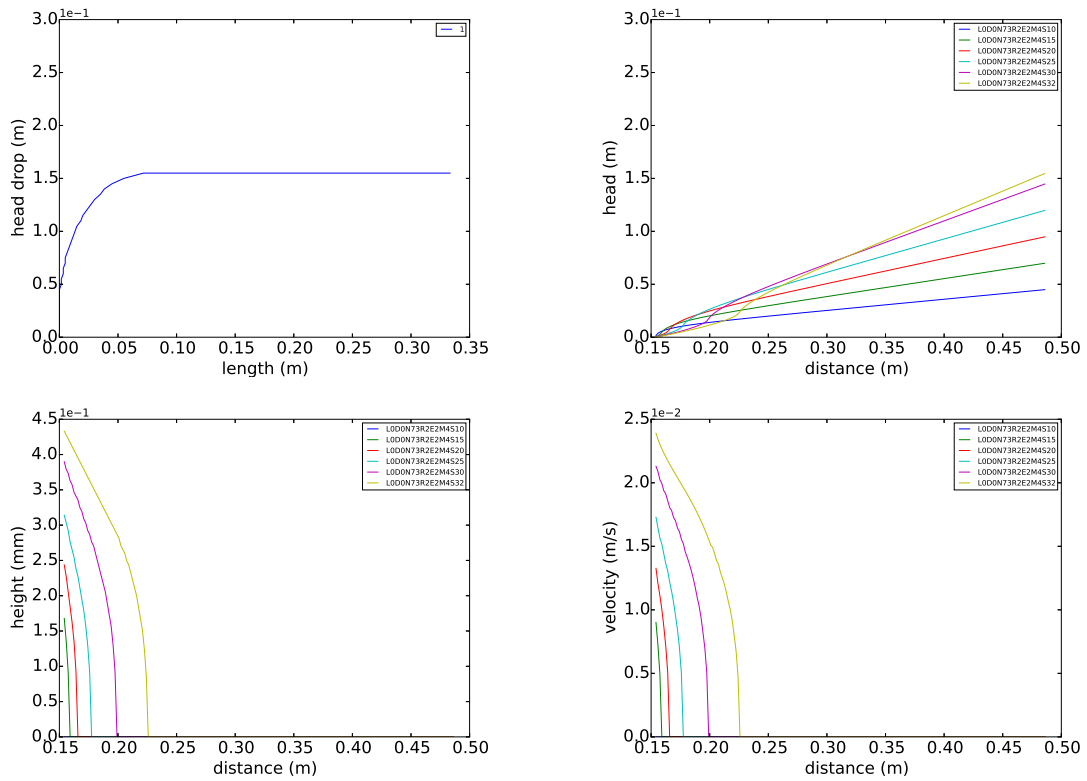


Figure 12: Experiment 4, 2588 nodes.

Table 6: Experiment 4.

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes (-)	steps (-)	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	31	0.15	0.07	65
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	32	0.16	0.08	172
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	32	0.16	0.07	526
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	32	0.16	0.06	1740
6.67	6.67	0.42	0.42	8042	32	0.16	0.06	6900

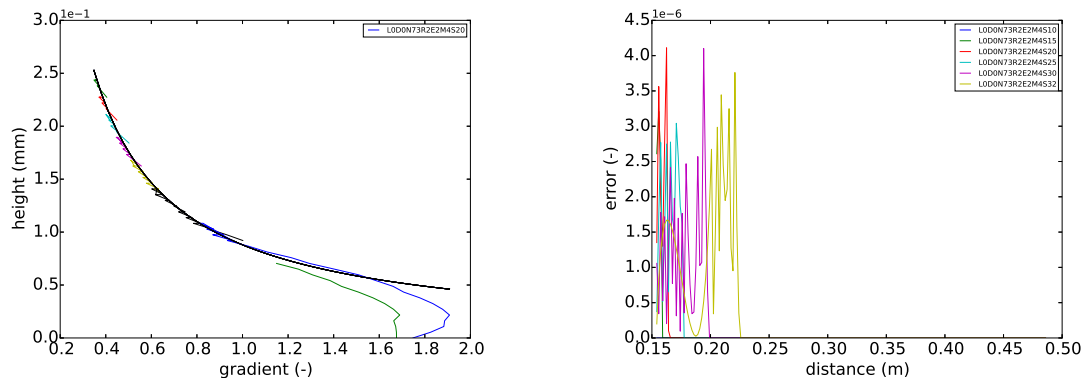


Figure 13: Experiment 4, 2588 nodes.

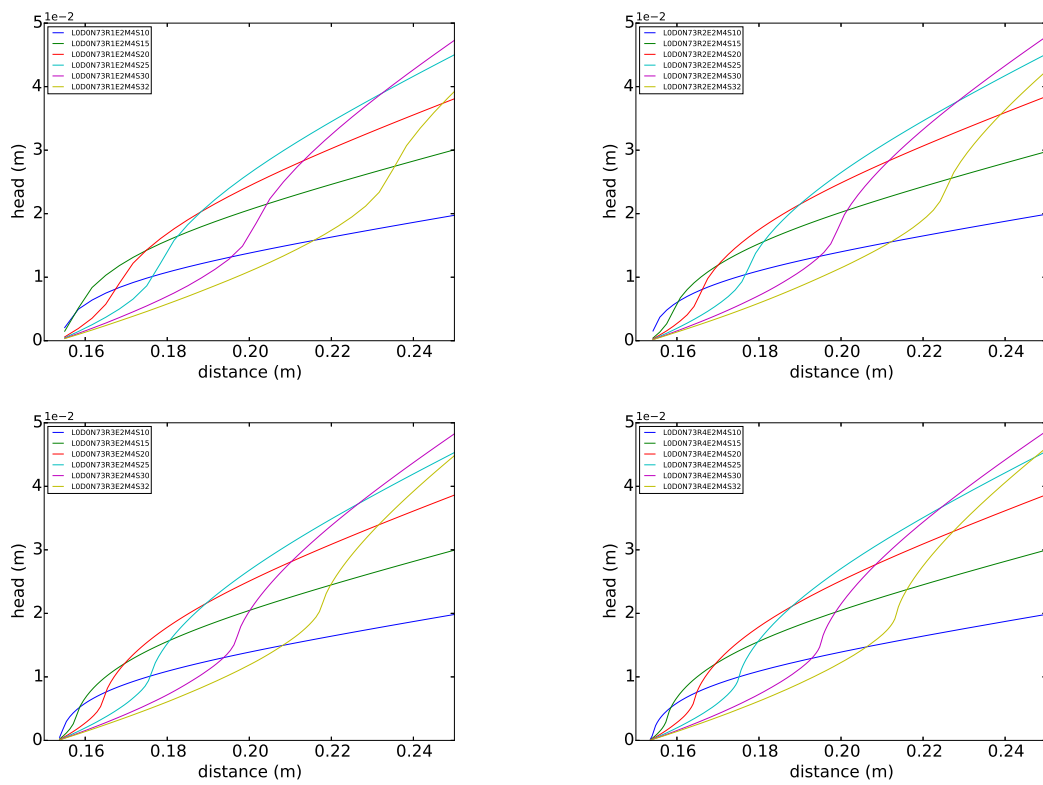


Figure 14: Experiment 4, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.

## 2.5 experiment 5

Experiment 5, homogeneous material 5,  $\Delta\phi = 5\text{mm}$ ,  $\Delta a = 4.3 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

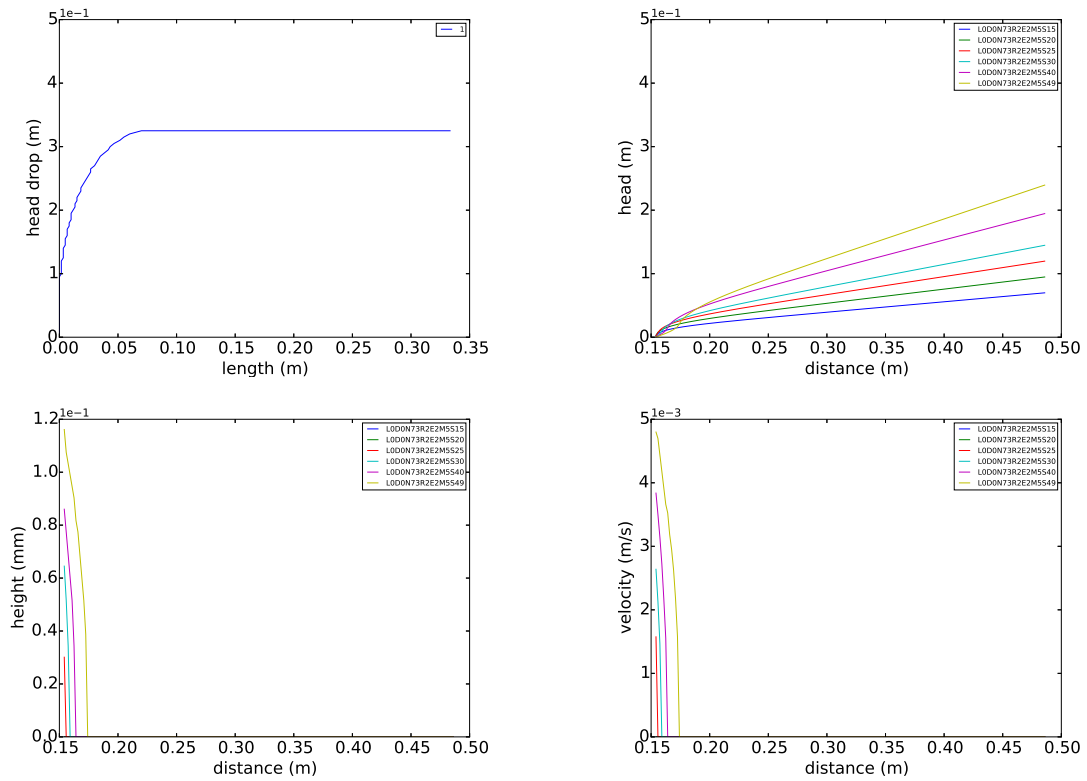


Figure 15: Experiment 5, 2588 nodes.

Table 7: Experiment 5.

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes (-)	steps (-)	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	64	0.32	0.07	44
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	65	0.32	0.07	104
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	66	0.33	0.07	301
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	66	0.33	0.07	1036
6.67	6.67	0.42	0.42	8042	66	0.33	0.07	4168

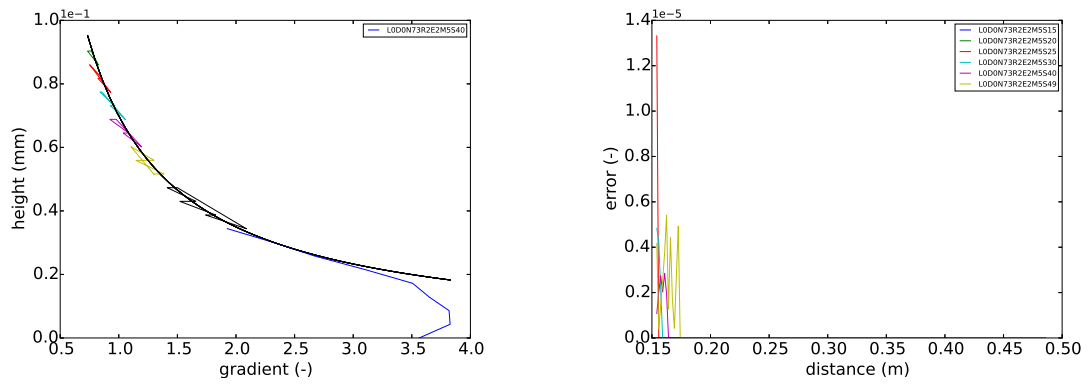


Figure 16: Experiment 5, 2588 nodes.

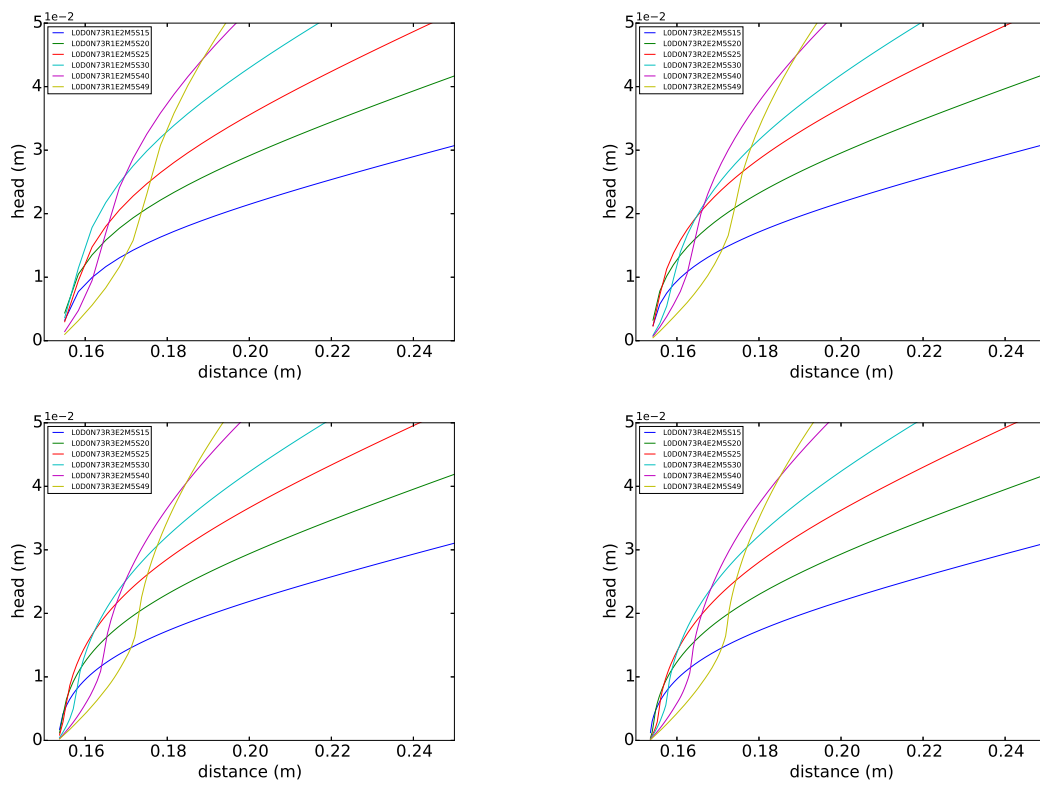


Figure 17: Experiment 5, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.

## 2.6 experiment 6

Experiment 6, homogeneous material 6,  $\Delta\phi = 5\text{mm}$ ,  $\Delta a = 5.1 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

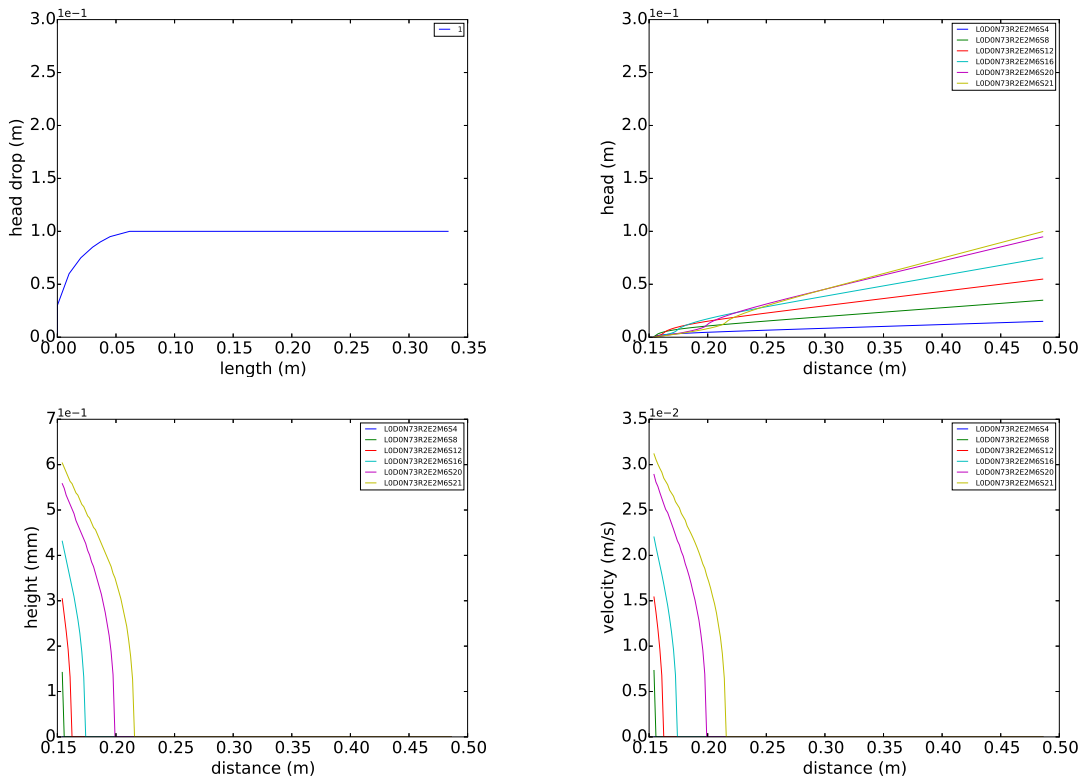


Figure 18: Experiment 6, 2588 nodes.

Table 8: Experiment 6.

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes (-)	steps (-)	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	20	0.10	0.05	88
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	21	0.10	0.07	239
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	21	0.10	0.06	728
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	21	0.10	0.06	2505
6.67	6.67	0.42	0.42	8042	21	0.10	0.05	9170

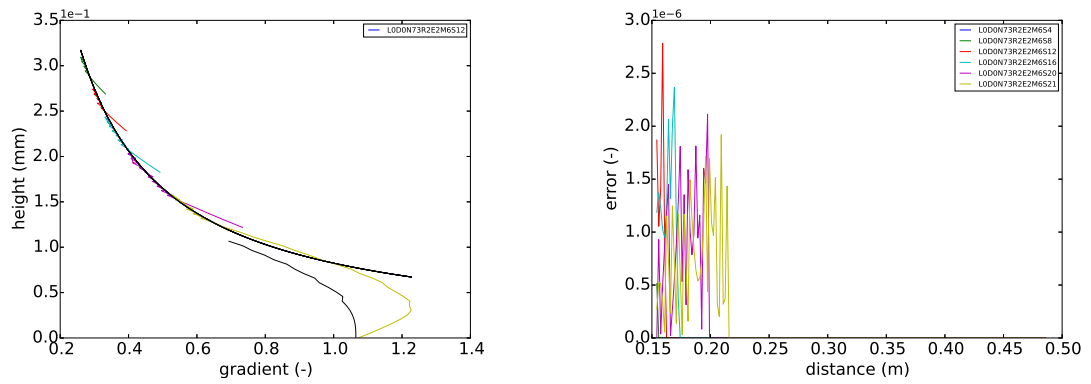


Figure 19: Experiment 6, 2588 nodes.

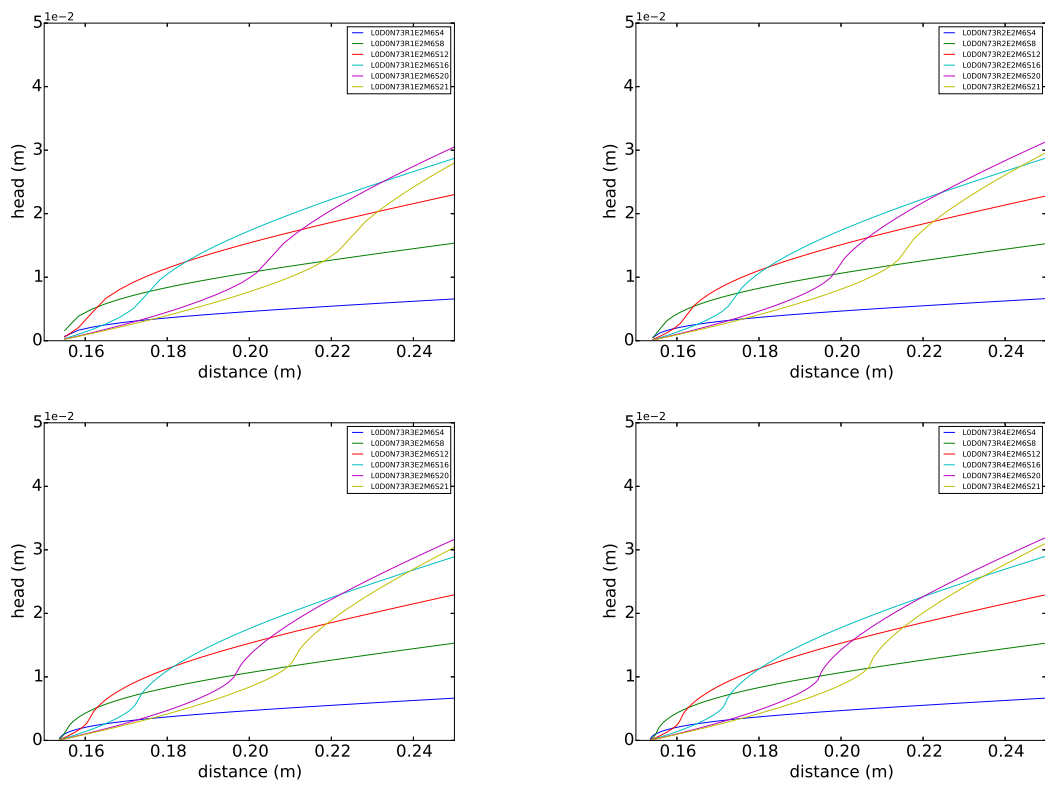


Figure 20: Experiment 6, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.

## 2.7 experiment 7

Experiment 7, homogeneous material 7,  $\Delta\phi = 5\text{mm}$ ,  $\Delta a = 5.3 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

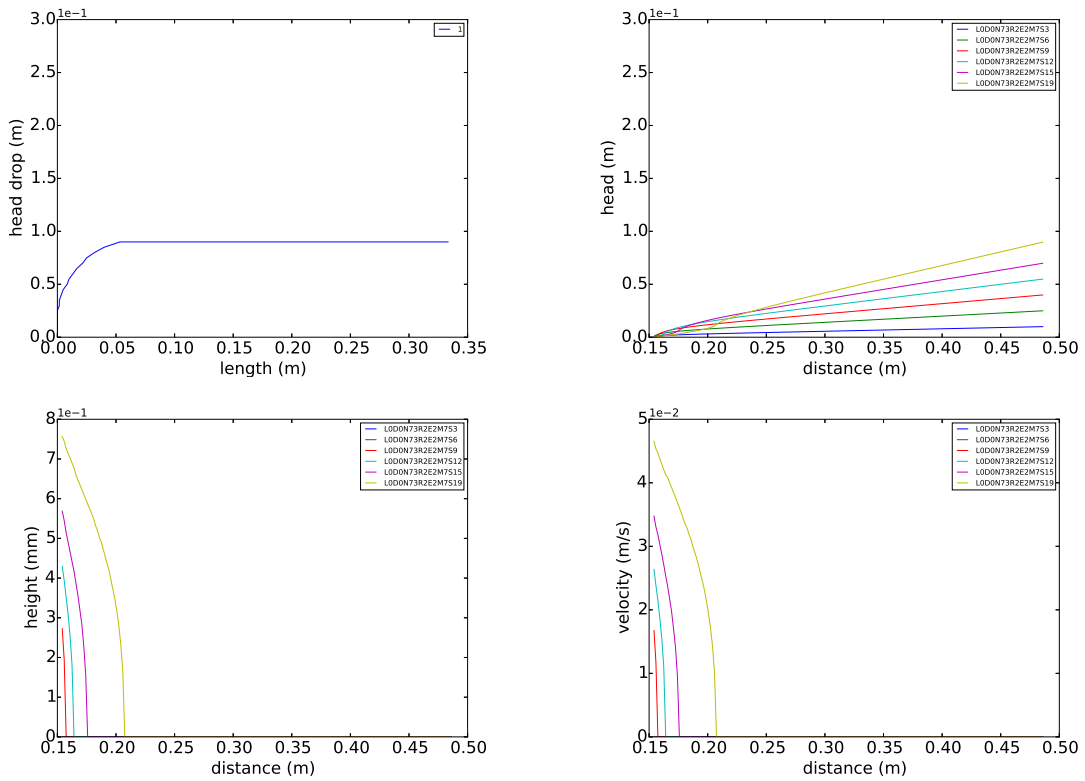


Figure 21: Experiment 7, 2588 nodes.

Table 9: Experiment 7.

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes (-)	steps (-)	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	19	0.09	0.07	77
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	19	0.09	0.06	197
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	19	0.09	0.05	653
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	20	0.10	0.07	2550
6.67	6.67	0.42	0.42	8042	20	0.10	0.07	10641

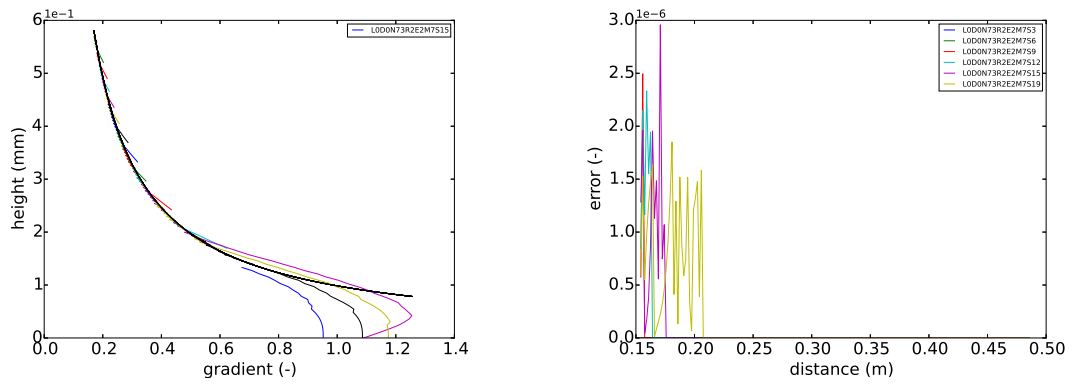


Figure 22: Experiment 7, 2588 nodes.

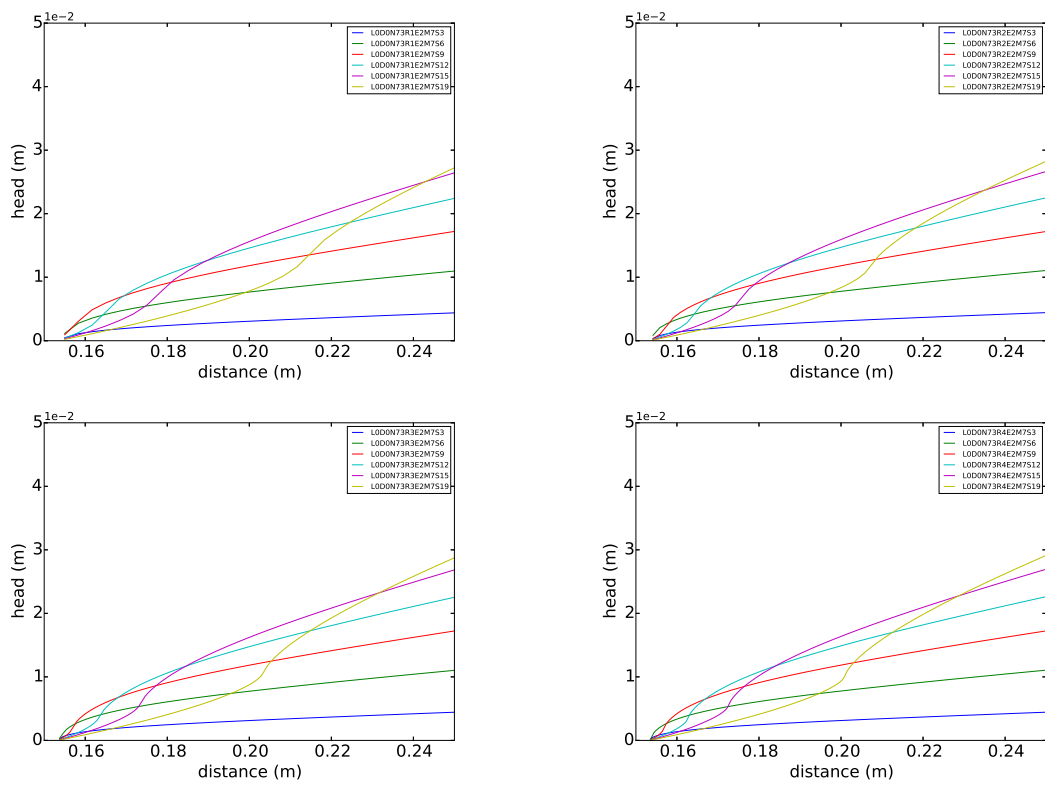
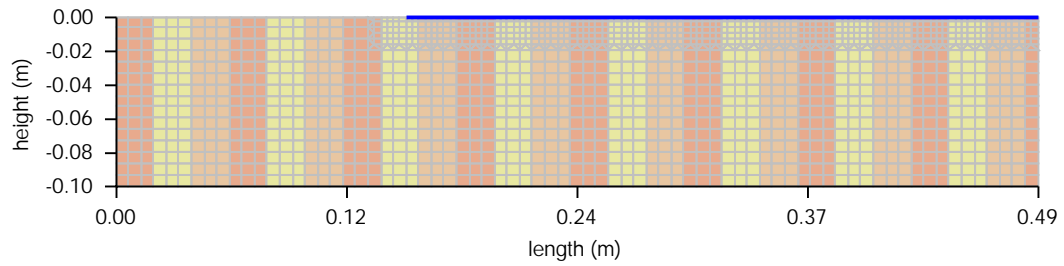


Figure 23: Experiment 7, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.



## 3 Coarse layering

Figure 24 coarse layering.



*Figure 24: Coarse layering.*

- Section 3.1 material 1,2,3 heterogeneous diameter and permeability, Figure 25, Table 10.
- Section 3.2 material 1,2,3 heterogeneous diameter, constant permeability, Figure 28, Table 11.
- Section 3.3 material 5,6,7 heterogeneous diameter and permeability, Figure 31, Table 12.

### 3.1 experiment 8

Experiment 8, periodic heterogeneous  $D_{70}$  and  $\kappa$  material 1,2,3  $\Delta\phi = 5\text{mm}$ ,  $\Delta a = 6.1 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

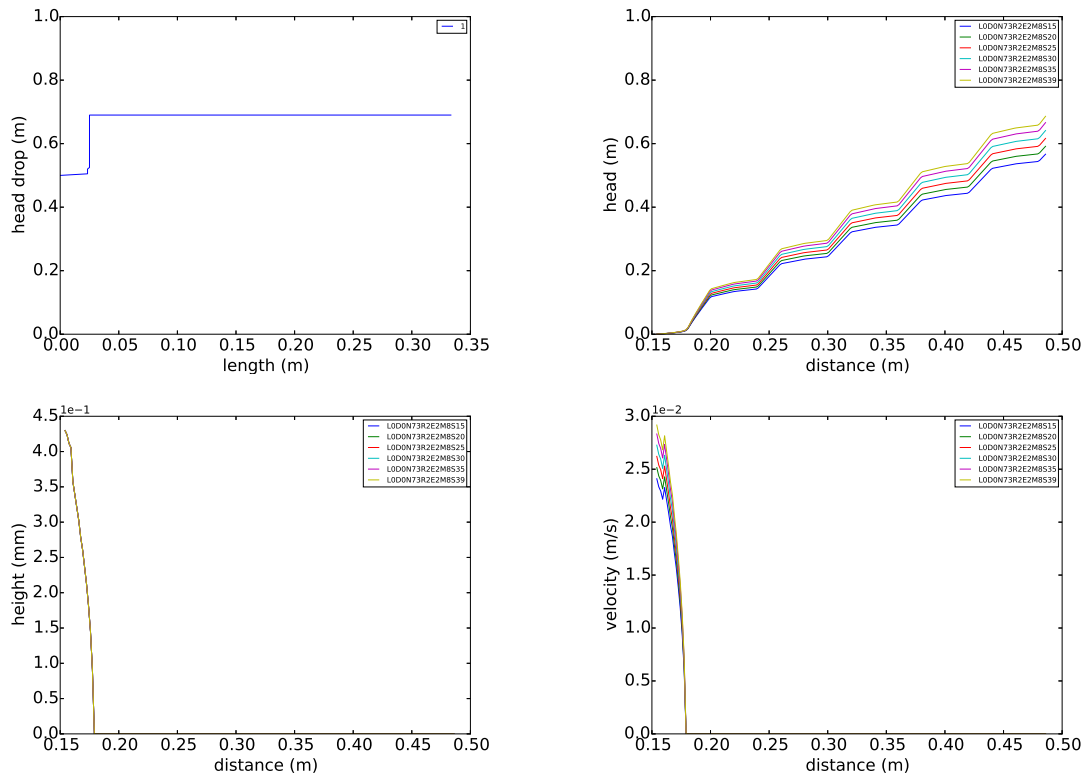


Figure 25: Experiment 8, 2588 nodes.

Table 10: Experiment 8

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes (-)	steps (-)	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	5	0.52	0.02	80
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	22	0.60	0.02	222
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	39	0.69	0.02	711
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	58	0.79	0.03	2284
6.67	6.67	0.42	0.42					

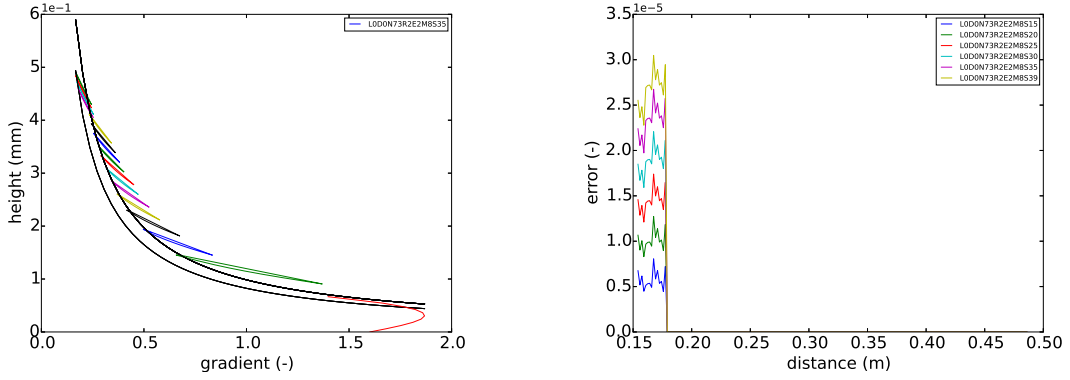


Figure 26: Experiment 8, 2588 nodes.

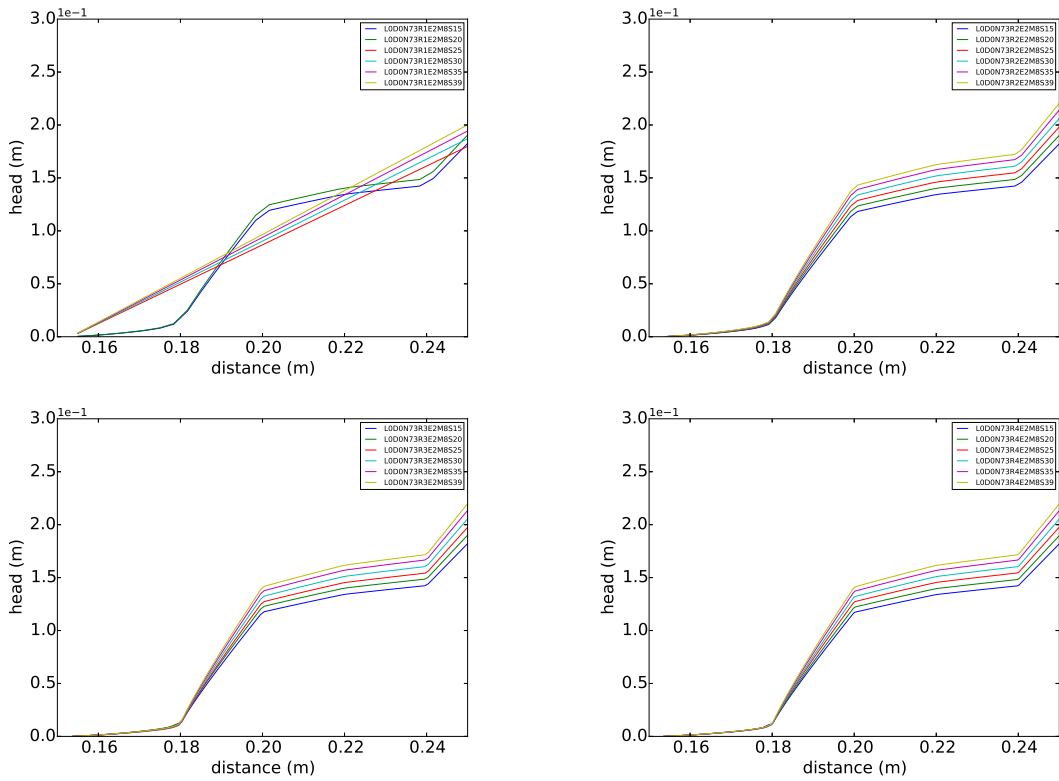


Figure 27: Experiment 8, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.

### 3.2 experiment 9

Experiment 9, periodic heterogeneous  $D_{70}$  material 1,2,3, constant  $\kappa$  material 4  $\Delta\phi = 5\text{mm}$ ,  $\Delta a = 6.1 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

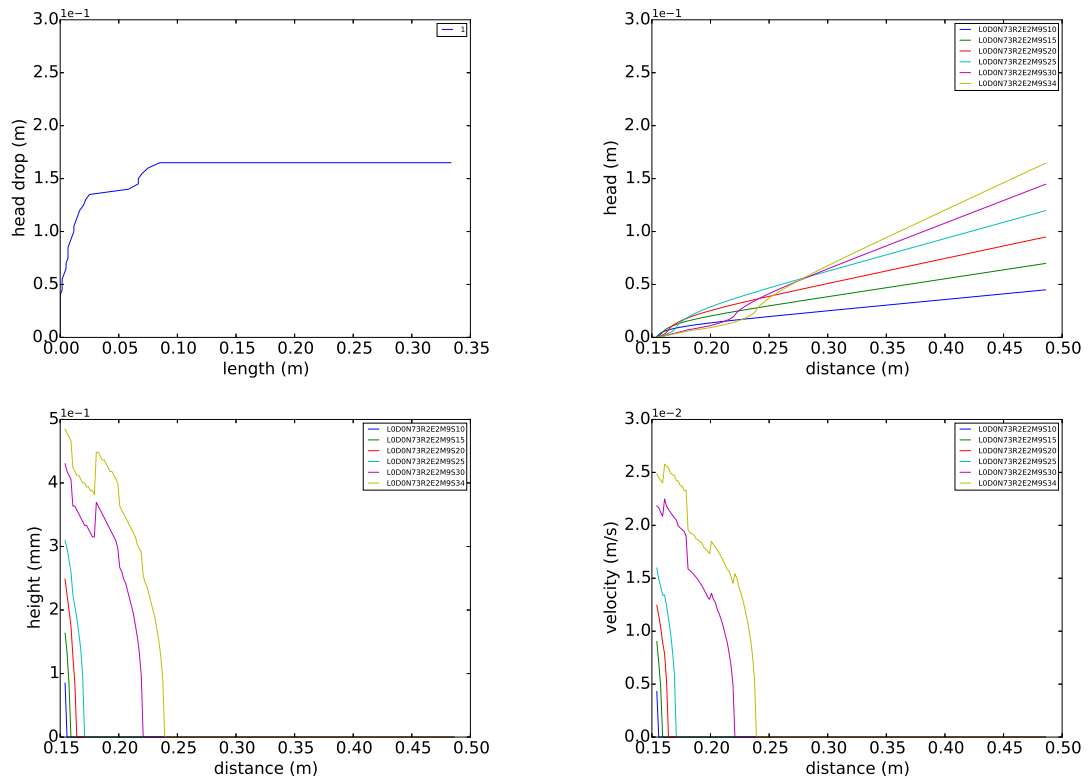


Figure 28: Experiment 9, 2588 nodes.

Table 11: Experiment 9.

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes (-)	steps (-)	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	32	0.16	0.07	68
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	33	0.16	0.08	169
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	34	0.17	0.08	523
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	34	0.17	0.08	174
6.67	6.67	0.42	0.42	8042	34	0.17	0.08	6922

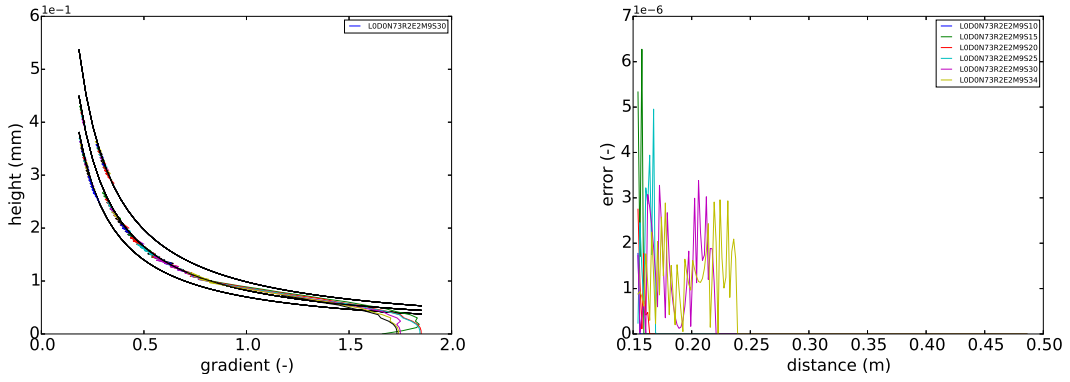


Figure 29: Experiment 9, 2588 nodes.

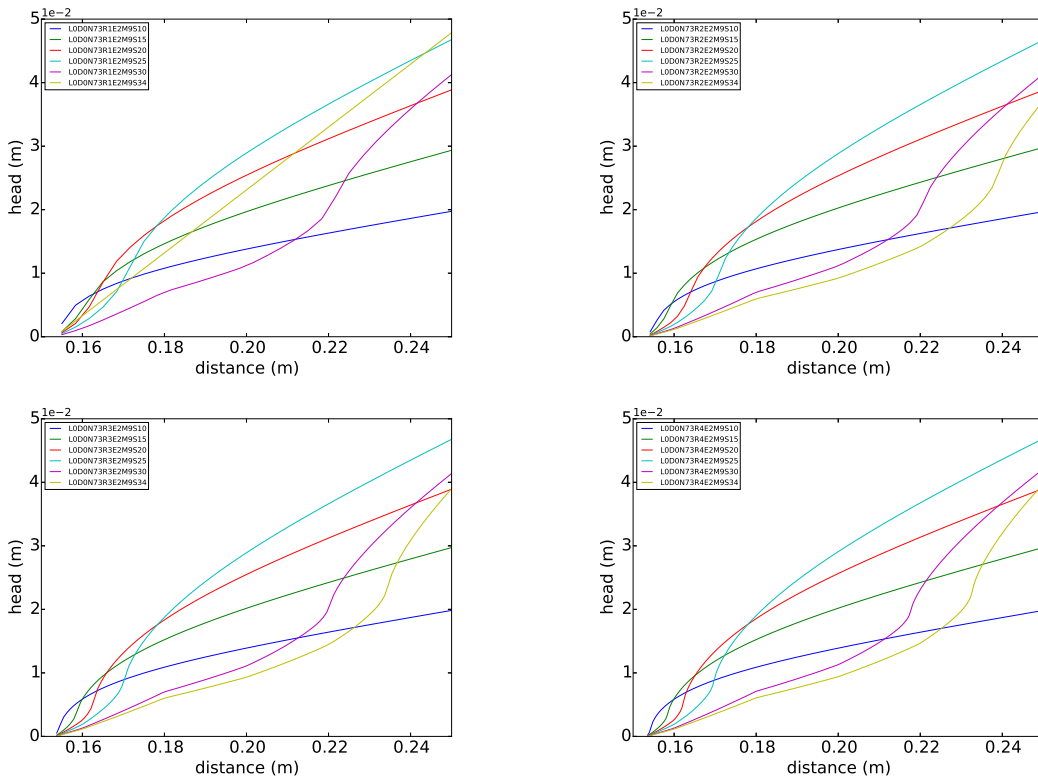


Figure 30: Experiment 9, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.

### 3.3 experiment 10

Experiment 10, periodic heterogeneous  $D_{70}$  and  $\kappa$  material 5,6,7  $\Delta\phi = 10\text{mm}$ ,  $\Delta a = 6.1 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

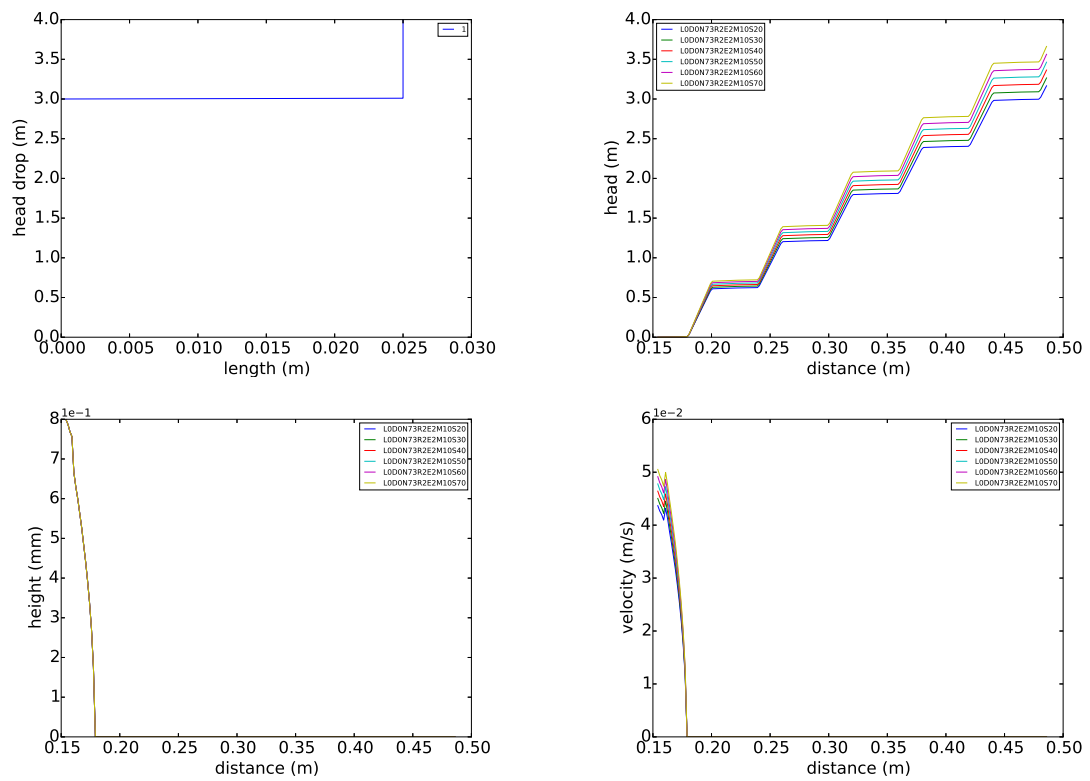


Figure 31: Experiment 10, 2588 nodes.

Table 12: Experiment 10.

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes (-)	steps (-)	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	1	3.00	0.00	162
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	49	3.48	0.02	455
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	101	4.00	0.02	143
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	101	4.00	0.03	360
6.67	6.67	0.42	0.42	8042	101	4.00	0.03	1148

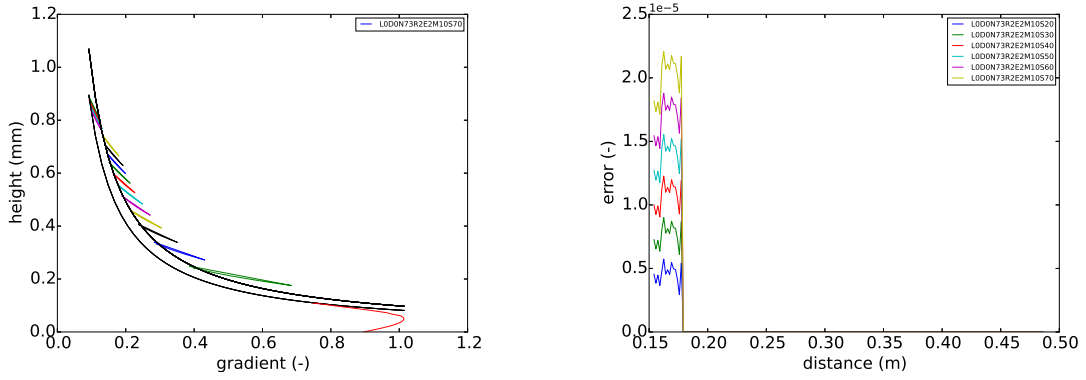


Figure 32: Experiment 10, 2588 nodes.

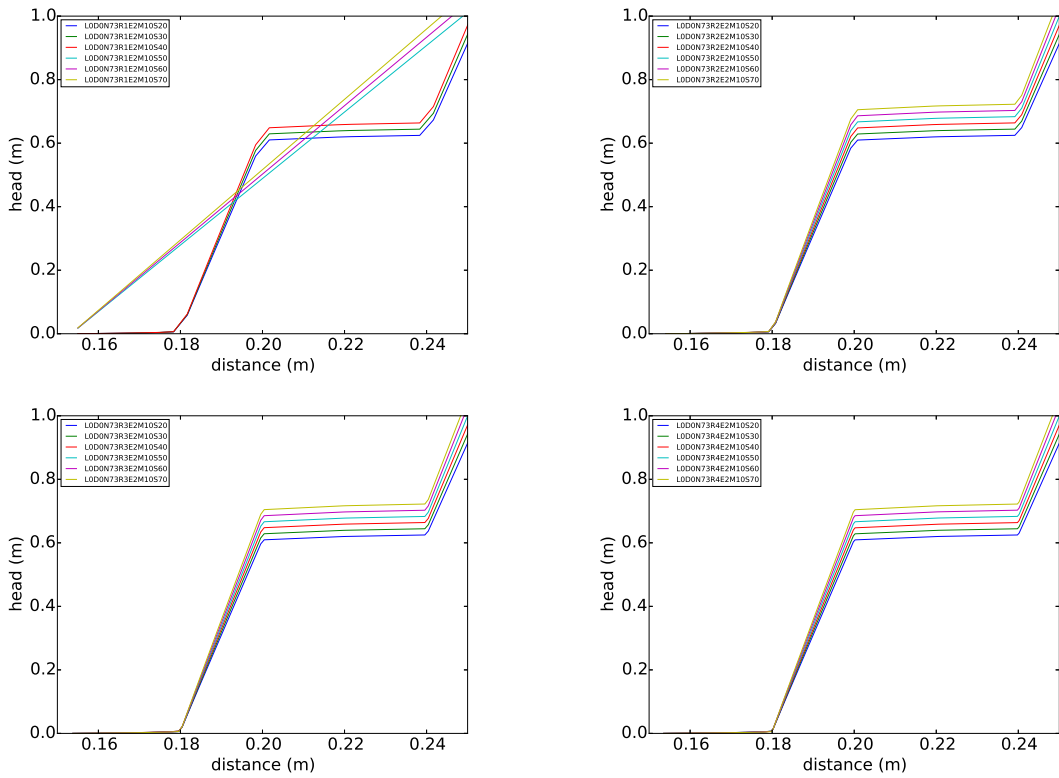
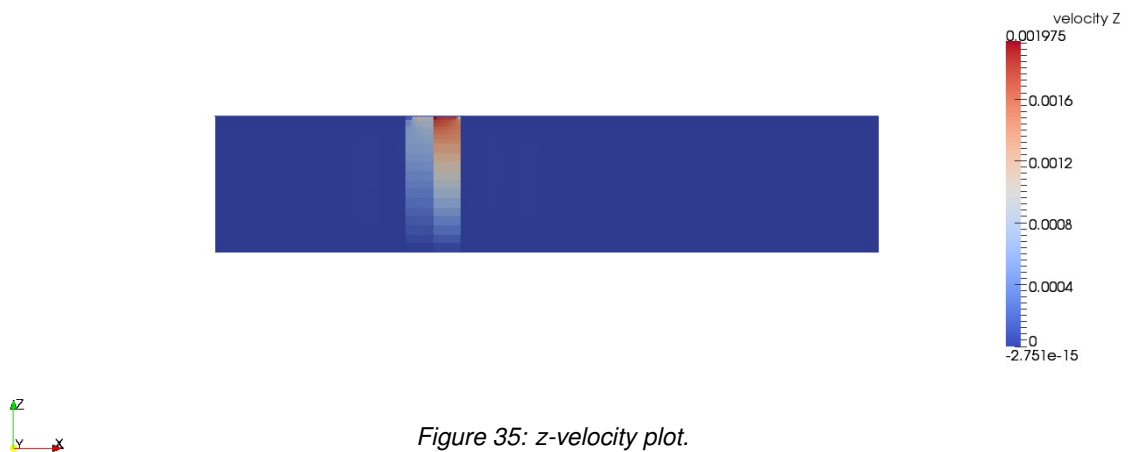
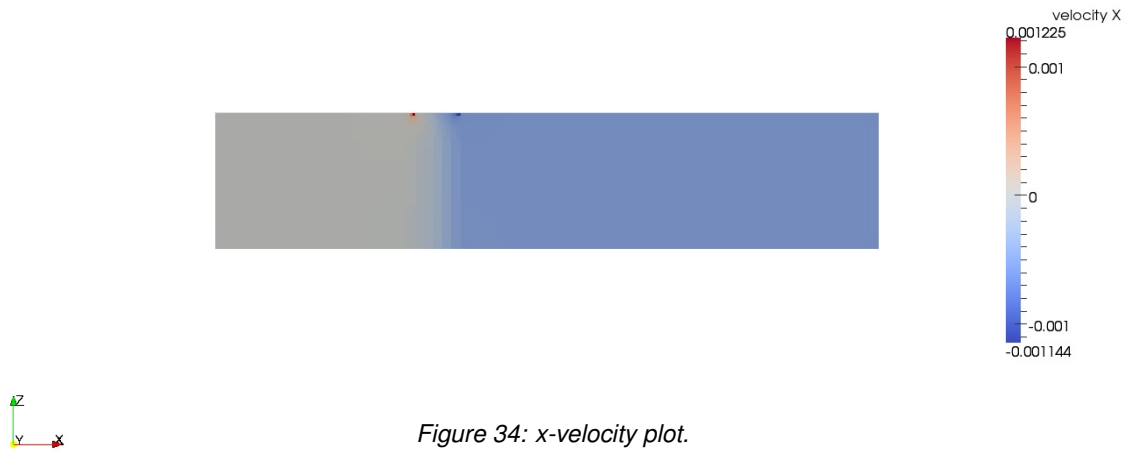
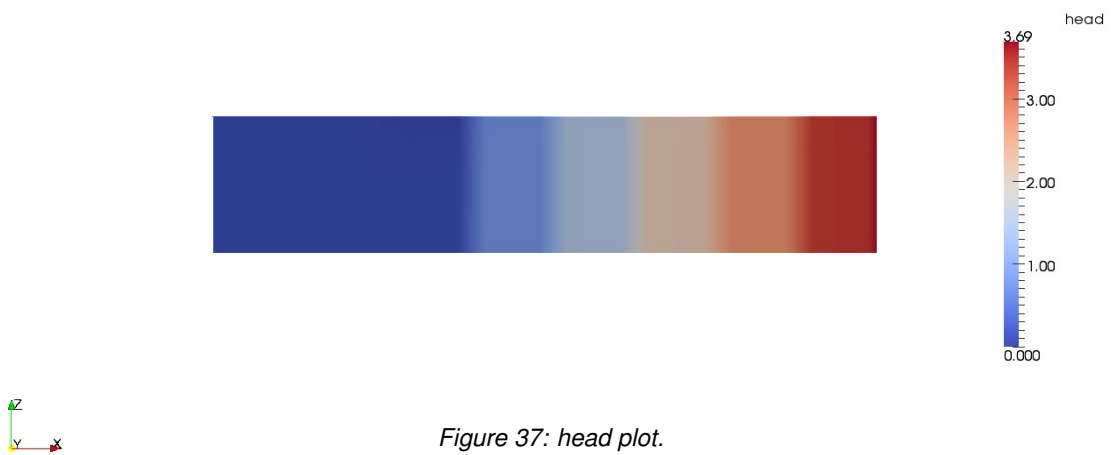
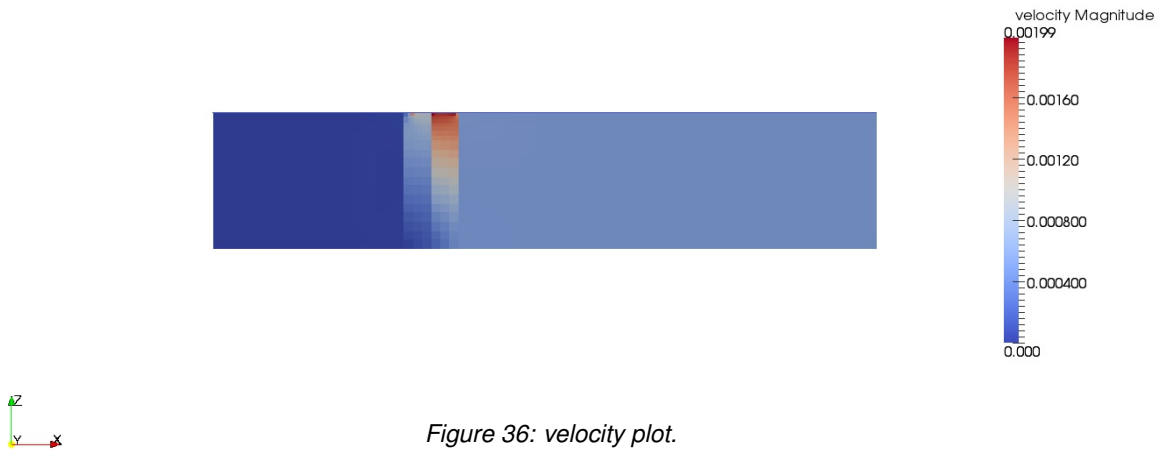


Figure 33: Experiment 10, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.







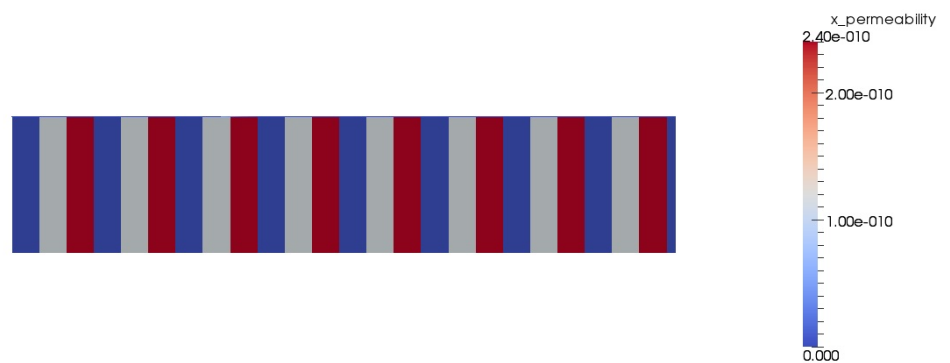


Figure 38: permeability plot.

## 4 Fine layering

Figure 39 fine layering.

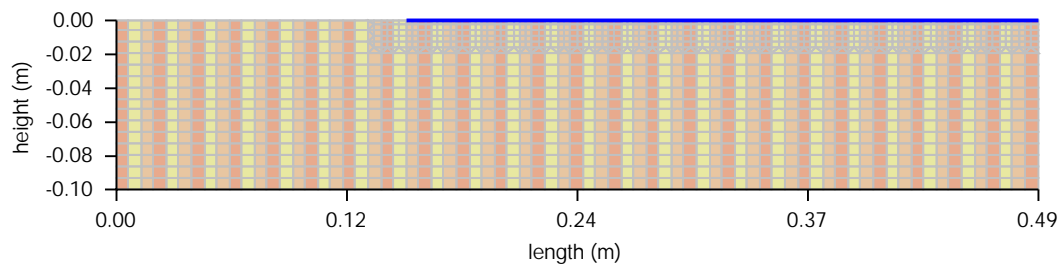


Figure 39: Fine layering.

- Section 4.1 material 1,2,3 heterogeneous diameter, heterogeneous permeability, Figure 40, Table 13.
- Section 4.2 material 1,2,3 heterogeneous diameter, constant permeability, Figure 43, Table 14.
- Section 4.3 material 5,6,7 heterogeneous diameter, heterogeneous permeability, Figure 46, Table 15.

## 4.1 experiment 11

Experiment 11, periodic heterogeneous  $D_{70}$  and  $\kappa$  material 1,2,3  $\Delta\phi = 5\text{mm}$ ,  $\Delta a = 6.1 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

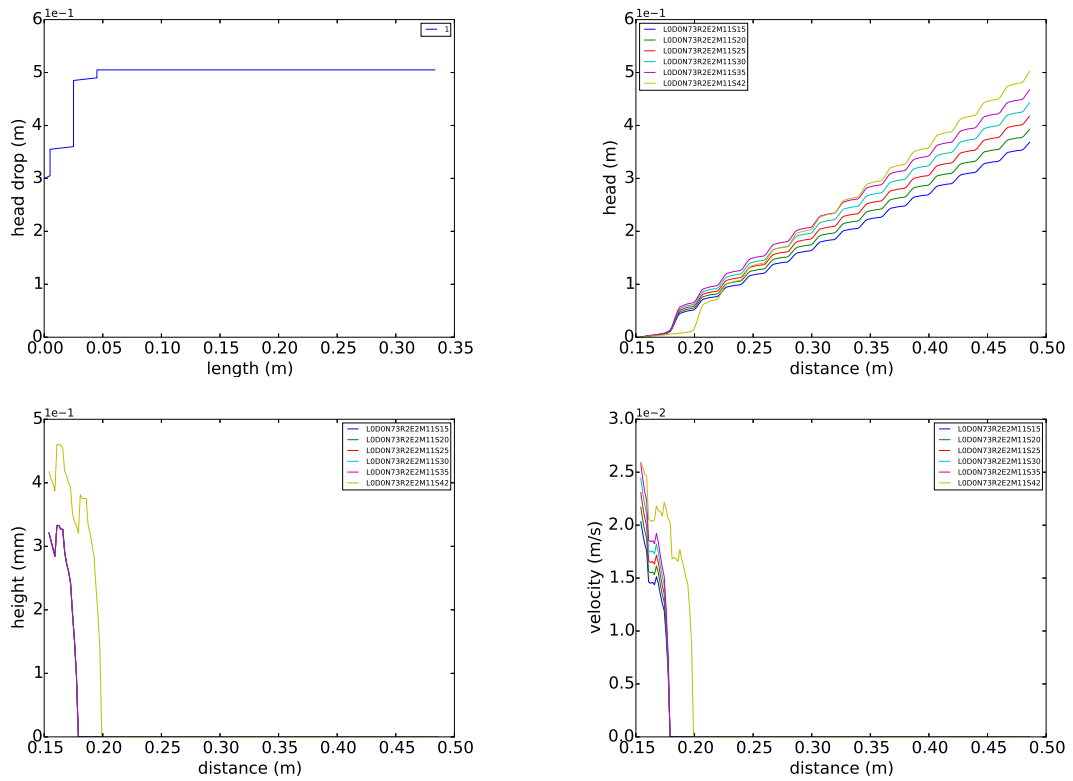


Figure 40: Experiment 11, 2588 nodes.

Table 13: Experiment 11.

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes (-)	steps (-)	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	15	0.37	0.04	68
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	29	0.44	0.04	182
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	42	0.51	0.04	587
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	56	0.57	0.05	2169
6.67	6.67	0.42	0.42	8042	71	0.65	0.05	9363

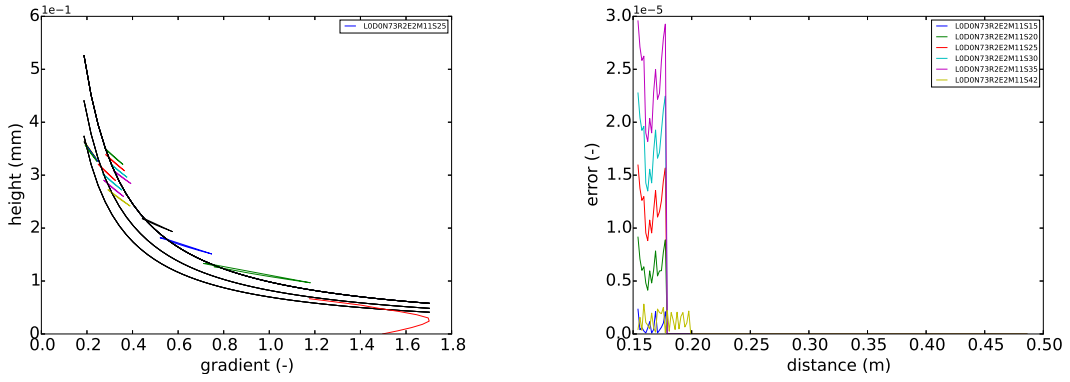


Figure 41: Experiment 11, 2588 nodes.

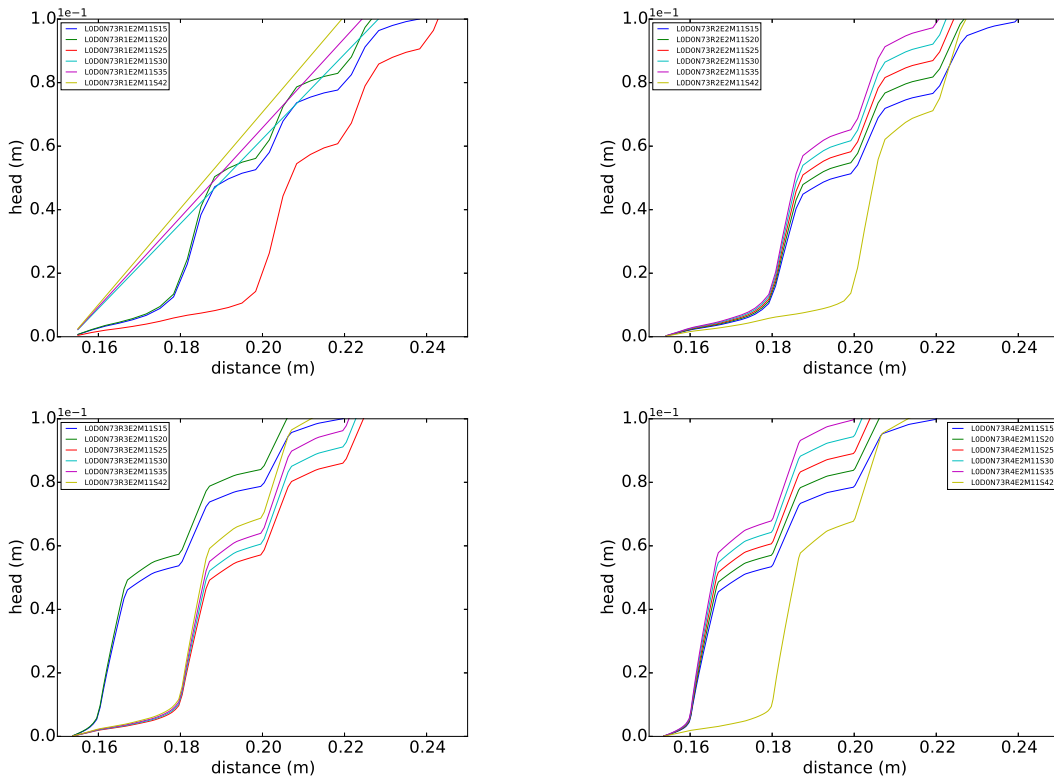


Figure 42: Experiment 11, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.

## 4.2 experiment 12

Experiment 12, periodic heterogeneous  $D_{70}$  material 1,2,3, homogeneous  $\kappa$  material 4  $\Delta\phi = 5\text{mm}$ ,  $\Delta a = 6.1 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

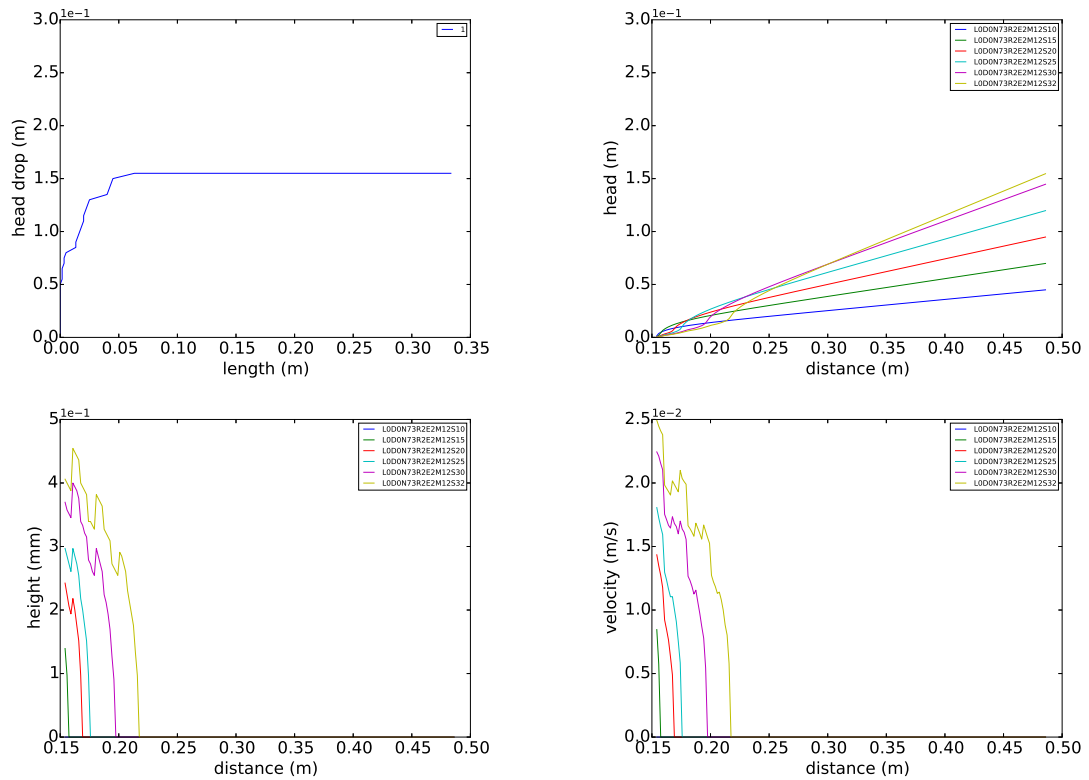


Figure 43: Experiment 12, 2588 nodes.

Table 14: Experiment 12.

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes (-)	steps (-)	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	31	0.15	0.06	72
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	32	0.16	0.08	187
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	32	0.16	0.06	566
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	33	0.16	0.08	1624
6.67	6.67	0.42	0.42	8042	33	0.16	0.07	6600

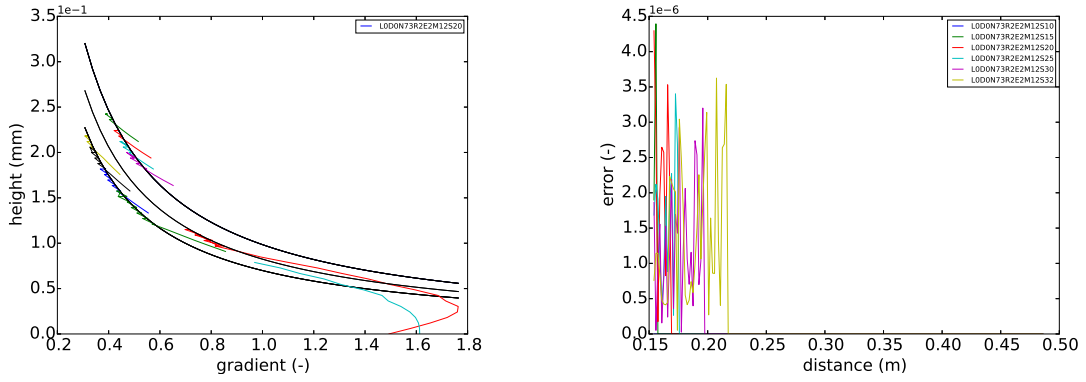


Figure 44: Experiment 12, 2588 nodes.

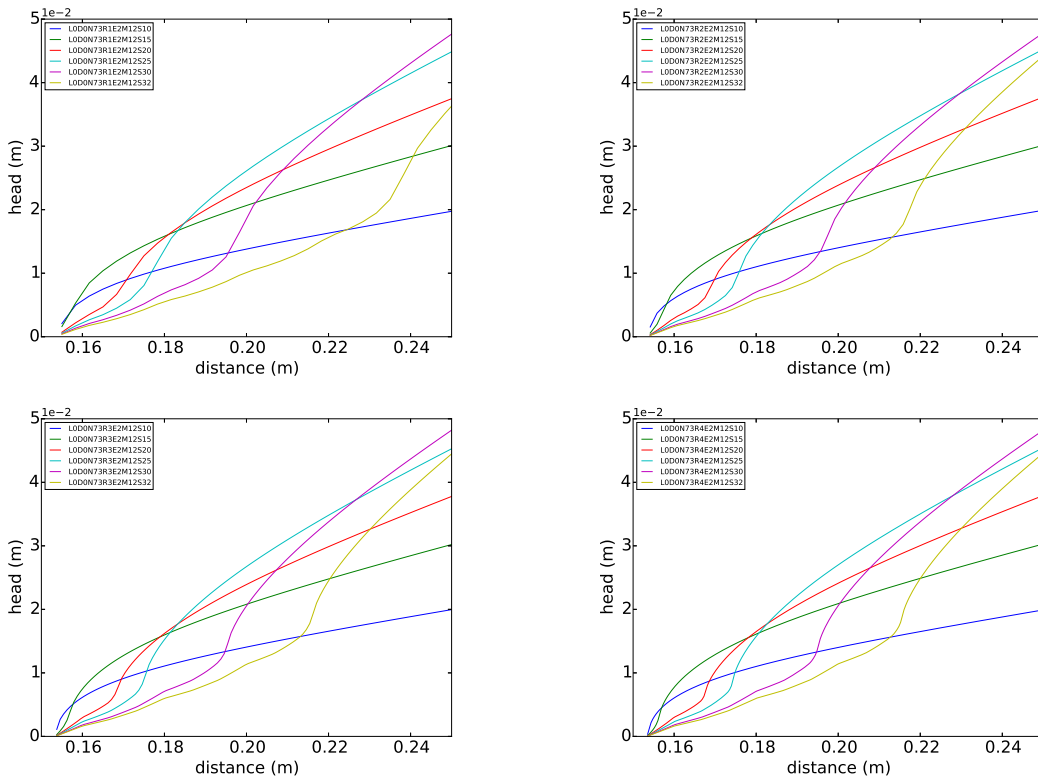


Figure 45: Experiment 12, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.

### 4.3 experiment 13

Experiment 13, periodic heterogeneous  $D_{70}$  and  $\kappa$  material 5,6,7  $\Delta\phi = 10\text{mm}$ ,  $\Delta a = 6.1 \cdot 10^{-3}\text{mm}$ .

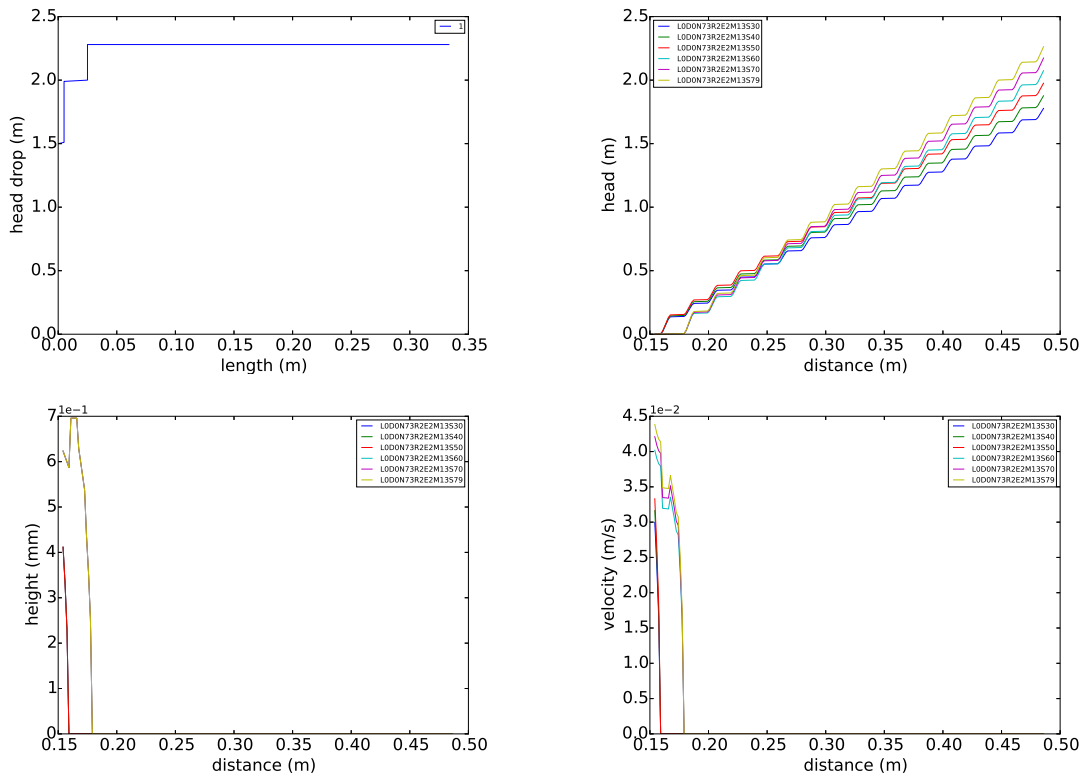


Figure 46: Experiment 13, 2588 nodes.

Table 15: Experiment 13.

$\Delta x$ (mm)	$\Delta y$ (mm)	$\delta x$ (mm)	$\delta y$ (mm)	nodes (-)	steps (-)	$H_{dg}$ (m)	$L_{dg}$ (m)	time (s)
6.67	6.67	6.67	6.67	1184	1	1.50	0.00	179
6.67	6.67	3.33	3.33	1661	30	1.79	0.02	472
6.67	6.67	1.67	1.67	2588	79	2.28	0.02	1549
6.67	6.67	0.83	0.83	4415	101	2.50	0.01	259
6.67	6.67	0.42	0.42	8042	101	2.50	0.01	568



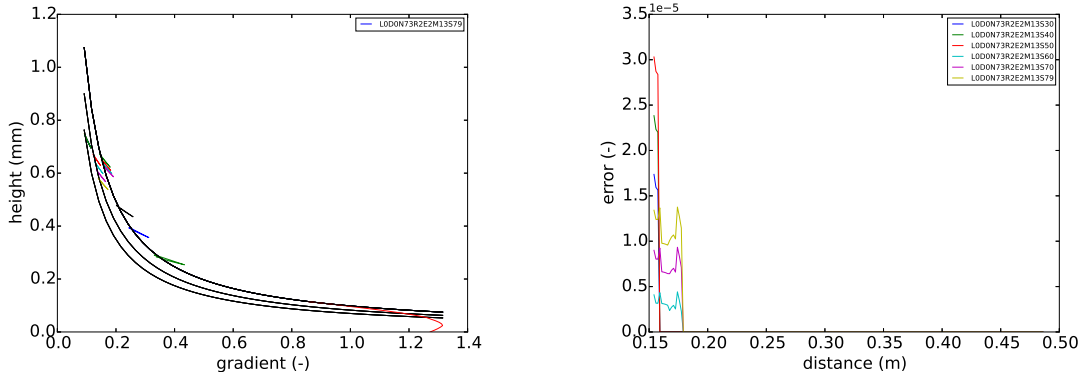


Figure 47: Experiment 13, 2588 nodes.

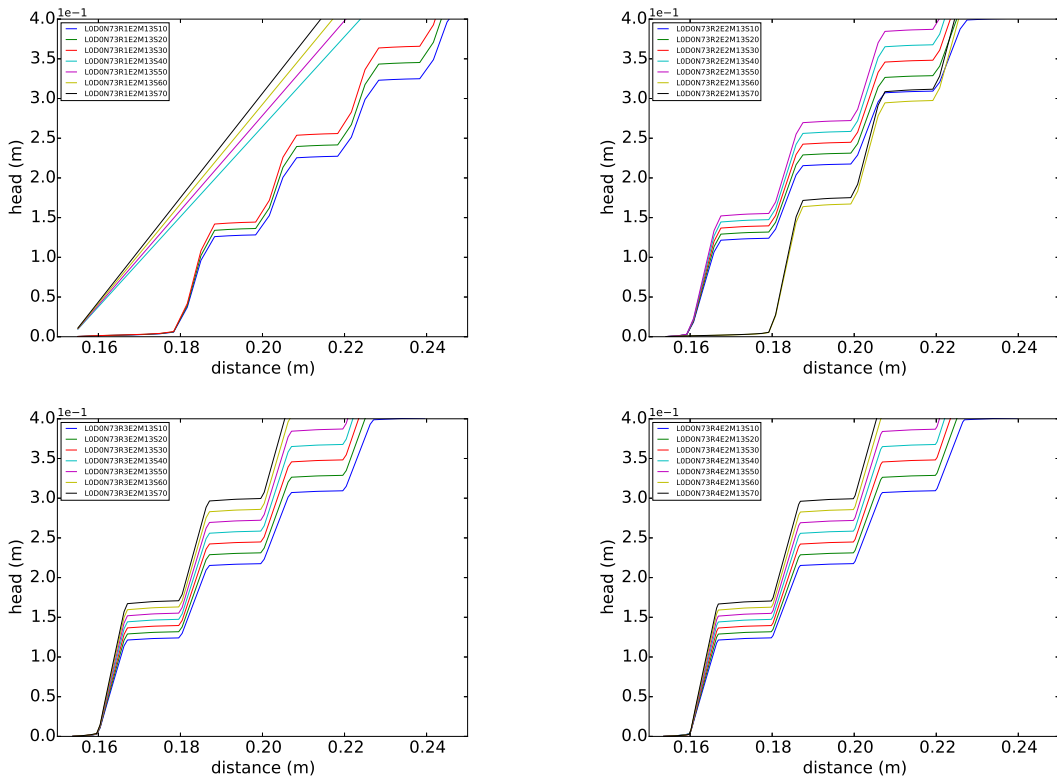


Figure 48: Experiment 13, 1661, 2588, 4415, 8042 nodes.

## **Bibliography**

Van Esch, J., J. Sellmeijer and D. Stolle, 2013. "Modeling transient groundwater flow and piping under dikes and dams." *Computational Geomechanics* .