

# **SBW Piping - Hervalidatie piping**

## **B3. Analyse kleinschalige laboratorium proeven**

ir. Vera van Beek  
ir. Han Knoeff

**Titel**

SBW Piping - Hervalidatie piping: B3. Analyse kleinschalige laboratorium proeven

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Rijkswaterstaat Waterdienst	1001449-008	1001449-008-GEO-0001	92

**Trefwoorden**

Piping, experiment, kleine schaal, analyse

**Samenvatting**

Doel van het SBW piping project is het identificeren van onzekerheden binnen de huidige piping toetsingsregels en deze eventueel te verkleinen of elimineren. Een veertigtal kleinschalige laboratoriumproeven op 9 verschillende zanden zijn uitgevoerd om inzicht te krijgen in de processen van kanaalvorming die uiteindelijk tot bezwijken van een waterkering leiden.

Op basis van de kleine schaalproeven wordt geconcludeerd dat piping zich niet eenvoudig laat beschrijven. Meer dan 10 verschillende processen worden waargenomen die zich niet met één model zullen laten beschrijven. Voor hervalidatie van de rekenregel van Sellmeijer is het noodzakelijk het geldigheidsgebied van de rekenregel af te bakenen.

Uit de proeven volgt een sterke relatie tussen de pakking en het pipingproces. Hoe losser de pakking is, hoe sneller het pipingproces optreedt. Daarnaast volgt uit de kleinschalige proeven dat bij een losse pakking het pipingproces vaak aan de bovenstroomse zijde begint. Bij een vaste pakking begint het proces meestal aan de benedenstroomse zijde. Tussen korrelgrootte en pipingproces wordt eveneens een relatie waargenomen. Deze relatie is anders dan in de huidige pipingmodellen wordt aangenomen. Er wordt geen relatie waargenomen tussen pipingproces, uniformiteit en hoekigheid van het zand.

Uit de proeven volgt verder dat het meten van waterspanningen inzicht geeft in het pipingmechanisme. Met waterspanningsmetingen kan het pipingproces ook onder een ondoorzichtige kleilaag worden gevolgd.

De belangrijkste aanbevelingen voor hervalidatie van de rekenregel van Sellmeijer zijn:

- Resultaten van kleinschalige proeven te vergelijken met de veronderstellingen uit de klassieke modellen van Bligh, Lane en Sellmeijer. Dit onderzoek geeft inzicht in de waarde van de kleinschalige proeven.
- Meer laboratoriumproeven uit te voeren op grove zanden en zanden met variërende relatieve dichtheid. Dit leidt tot een afbakening van het geldigheidsgebied van de rekenregel.
- Met laboratoriumproeven de invloed van belasting op het vormen van kanaaltjes bij een losse pakking te onderzoeken. Dit geeft inzicht in de relevantie van het proces waarbij piping aan de bovenstroomse zijde begint.
- Een aangepaste rekenregel van Sellmeijer op te stellen waarbij voor het korrelevenwicht niet uit wordt gegaan van 'rollende' maar van 'schuivende' korrels. Hiermee kunnen de inzichten uit de kleinschalige proeven worden verwerkt in een nieuwe rekenregel.
- Proeven op medium schaal uit te voeren zodat meer zekerheid wordt verkregen over extrapolatie van schaaffect naar de werkelijkheid en de waarde van de (nieuwe) rekenregel van Sellmeijer verder worden onderzocht.
- Een proef op grote schaal uit te voeren om hypothesen die naar aanleiding van de kleinere en medium schaal proeven zijn opgesteld te valideren en processen die tot grootschalige doorbraak leiden te onderzoeken
- Invloed van gedrag van klei op het groeien van kanaaltjes te onderzoeken om handvatten voor gebruik van rekenregel te ontwikkelen.
- Invloed van gedrag van heterogeniteit van het zand op het groeien van kanaaltjes te onderzoeken om handvatten voor gebruik van rekenregel te ontwikkelen.

**Titel**

SBW Piping - Hervalidatie piping: B3. Analyse kleinschalige laboratorium proeven

**Opdrachtgever**



Rijkswaterstaat Waterdienst 1001449-008

**Project****Kenmerk**

1001449-008-GEO-0001

**Pagina's**

92

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	2009-03-17	ir. Vera van Beek	B	ir. Ed Calle		ing. Harm Aantjes	<sup>b/c</sup> 

**Status**

concept

Dit document is een concept rapport, niet een definitief rapport, en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Introductie	1
1.2 SBW Hervalidatie piping	1
1.3 Doelstelling	3
1.4 Opbouw van het rapport	3
<b>2 Beschrijving laboratoriumproeven</b>	<b>4</b>
2.1 Proefopstelling	4
2.1.1 Beschrijving	4
2.2 Uitgevoerde proeven	4
2.2.1 Relatieve dichtheid	5
2.2.2 Korreleigenschappen	5
2.2.3 Waterspanningen	6
<b>3 Beschrijving waargenomen verschijnselen en processen</b>	<b>7</b>
3.1 Algemeen	7
3.2 Procesbeschrijvingen	7
3.2.1 Initiele fase proces	7
3.2.2 Vervolg processen	11
3.2.3 Eindfase kanaalvorming	15
3.3 Procesketens	18
3.4 Bijzondere waarnemingen	21
3.4.1 Lucht	21
3.4.2 Cracking	21
3.4.3 Overig	22
<b>4 Relatie processen en zandeigenschappen</b>	<b>23</b>
4.1 Relatie processen en zandeigenschappen	23
4.1.1 Relatieve dichtheid	23
4.1.2 Korrelgrootte	25
4.1.3 Korrelvorm	30
4.1.4 Uniformiteit	31
4.1.5 Doorlatendheid	32
4.2 Waterspanningen	33
4.2.1 Kleine kanaaltjes	35
4.2.2 Terugschrijdende erosie	36
4.2.3 Forward erosie en interne erosie (kanalen vanaf 0.5 cm)	39
4.2.4 Ruimen	40
4.3 Samenvatting en conclusies	42
<b>5 Kwantitatieve analyse</b>	<b>44</b>
5.1 Model van Sellmeijer	44
5.2 Begin van bewegen, kanaalvorming	46
5.2.1 Begin van bewegen bij proeven met lage relatieve dichtheid	47
5.2.2 Begin van bewegen bij proeven met hoge relatieve dichtheid	47
5.3 Kanaalvorming, leidend tot doorbraak	48
5.3.1 Spleet vs. vertakt patroon	48

5.3.2	Stabiliteit van de kanaalwand	49
5.3.3	Weerstand in het kanaal	49
5.3.4	Schaaleffecten	52
5.3.5	Invloed van kleidek en heterogeniteit	52
5.4	Invloed van schaling	52
5.5	Samenvatting en conclusies	53
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>55</b>
6.1	Conclusies en aanbevelingen met betrekking tot proeven	55
6.1.1	Piping processen	55
6.1.2	Zandeigenschappen	55
6.1.3	Waterspanningen	56
6.2	Conclusies en aanbevelingen voor hervalidatie rekenregel van Sellmeijer	57
6.2.1	Begin van bewegen	57
6.2.2	Kanaalvorming	57
6.2.3	Schaling	58
<b>7</b>	<b>Literatuur</b>	<b>60</b>

# 1 Inleiding

## 1.1 Introductie

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

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

## 1.2 SBW Hervalidatie piping

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

In een inventariserende studie die voor dit onderzoek in 2007 is uitgevoerd [Bruijn, Knoeff, 2008], is geconcludeerd dat er geen redenen zijn om aan te nemen dat de algemene procesbeschrijving van piping in het genoemde technische rapport onjuist is. In het geschematiseerde proces van het bezwijken van een dijk door piping zijn echter nog een aantal mechanismen die zeer globaal worden beschreven. Zo is bijvoorbeeld het ontstaan van kanaaltjes onder een dijk onomstreden. Dit proces is vele malen geconstateerd bij klein- en grootschalige proeven. De schematisatie van het proces van kanaalvorming is echter niet eenduidig vastgelegd en / of onvoldoende gevalideerd. Er is onvoldoende informatie over de wijze waarop de hooguit enkele centimeters brede en enkele millimeters diepe geultjes de grondwaterstroming beïnvloeden en hoe de waterdrukgradiënten om en nabij de geul samenhangen met het groeien ervan. Verbetering van de beschrijving hiervan leidt tot een beter inzetbaar en onderbouwd rekenmodel.

De meest gebruikte rekenregels om het risico op piping te bepalen zijn de regel van Bligh en de regel van Sellmeijer. De rekenregel van Bligh wordt internationaal het meest gebruikt.

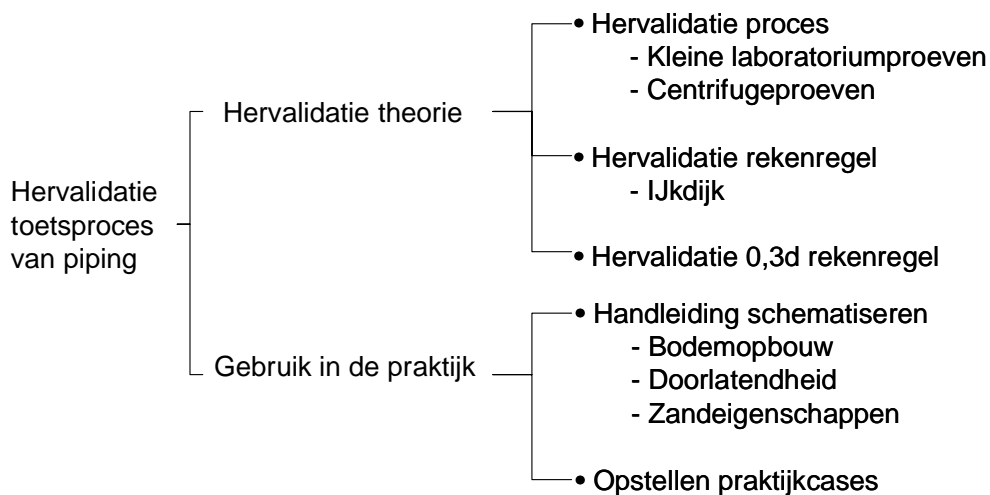
De rekenregel van Bligh is gebaseerd op empirie, uit met name India, van bezweken en niet bezweken dammen. De rekenregel van Sellmeijer is gebaseerd op een mathematische beschrijving van de grondwaterstroming door het zandpakket en de pipe en de beschrijving van de stabiliteit van de zandkorrels in de pipe. Het pipingproces wordt in de rekenregel van Sellmeijer vanuit een meer complete modellering benaderd dan in de regel van Bligh.

Zoals elk rekenmodel is ook de rekenregel van Sellmeijer een mathematische schematisatie van de werkelijkheid. Voor een betrouwbaar resultaat van de regel van Sellmeijer dient de werkelijkheid op de juiste manier te worden geschematiseerd. Een praktische beschrijving van het geldigheidsgebied van de regel van Sellmeijer en de wijze waarop de werkelijkheid binnen dit geldigheidsgebied moet worden geschematiseerd ontbreekt in de literatuur.

De rekenregels van Bligh en Sellmeijer houden geen rekening met de verticale stroming en zandtransport door een kanaal in de afdeklaag. In de praktijk wordt hier pragmatisch mee

omgegaan door het verval over de kering te reduceren met 0,3 keer de dikte van de afdeklaag, de zogenoemde 0,3 d rekenregel. Deze rekenregel is niet gevalideerd.

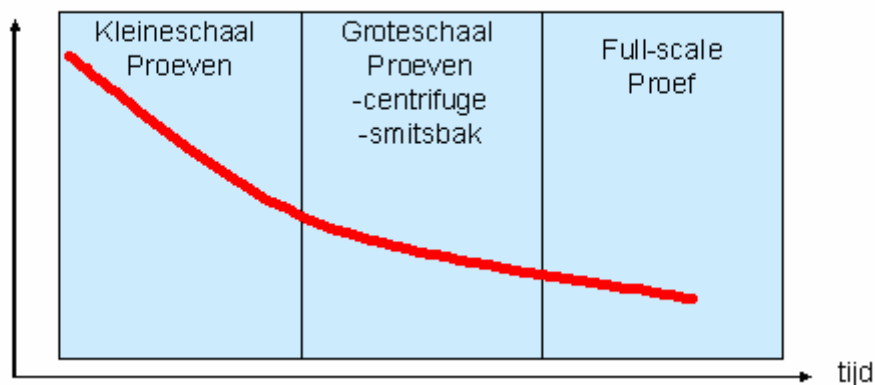
Het SBW onderzoek probeert de onzekerheden rondom de theorie en de toepassing van de rekenregel van Sellmeijer te verkleinen. In Figuur 1.1 zijn de belangrijkste deelonderzoeken uit het SBW Hervalidatie piping programma aangegeven.



Figuur 1.1 Opbouw SBW Hervalidatie piping

In dit document worden de kleine laboratoriumproeven geanalyseerd. Door middel van een groot aantal kleine schaalproeven zijn maatgevende pipingprocessen en zandeigenschappen geïdentificeerd. Op basis van een nadere beschouwing van deze processen en eigenschappen in de grote schaalproeven zal een voorstelling voor verbetering van de regel van Sellmeijer worden gedaan. Deze verbeterde regel van Sellmeijer wordt in een full-scale proef gevalideerd (zie Figuur 1.2).

onzekerheid



Figuur 1.2 Relatie experimentele onderzoeken SBW hervalidatie Piping

### 1.3 Doelstelling

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

Doelstellingen van het uitvoeren en analyseren van kleine schaalproeven zijn:

- > het verkrijgen van inzicht in de processen van kanaalvorming die uiteindelijk tot bezwijken van een waterkering leiden
- > en het geven van handvatten voor nadere invulling van het SBW pipingonderzoek in 2009.

### 1.4 Opbouw van het rapport

Na dit inleidende hoofdstuk wordt kort ingegaan op de proefopstelling en de uitgevoerde proeven. De opstelling is uitgebreid omschreven in het literatuuronderzoek [Knoeff, 2008]. De proeven zijn beschreven in de factual reports (A2., Beek, 2008). Hoofdstuk 3 bevat een beschrijving van de waargenomen processen. Deze worden verder uitgewerkt in hoofdstuk 4, waar processen en experimenten met elkaar gekoppeld worden. De analyse is weergegeven in hoofdstuk 5 en de conclusies zijn in hoofdstuk 6 opgenomen. Tenslotte bevat hoofdstuk een literatuuroverzicht.



## 2 Beschrijving laboratoriumproeven

### 2.1 Proefopstelling

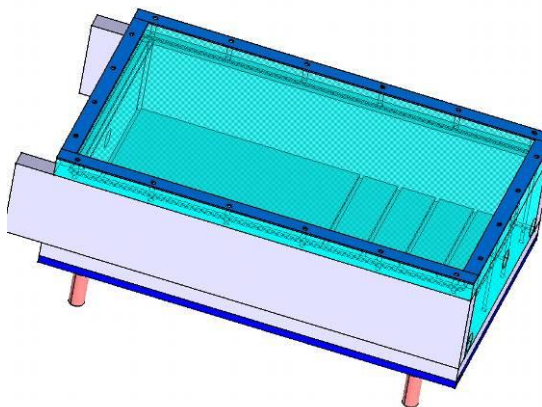
#### 2.1.1 Beschrijving

Voor de kleinschalige proeven rondom piping wordt een waterdichte platte bak lxbxh 0.50x0.30x0.10m geconstrueerd van PVC met perspex bovenkant, zie Figuur 2.1. Aan de inlaatzijde is een gaas aanwezig afgedekt met geotextiel om de waterdruk over het zandpakket te verdelen. Aan de uitlaatzijde is eveneens een gaas met geotextiel aanwezig die niet tot de hele hoogte van de bak reikt, in verband met het toelaten van zandafvoer. Het gaasje kan op meerdere afstanden geplaatst worden om verschillende zandhoeveelheden en lengtes van pipingkanalen toe te staan.

De inlaat is verbonden met een emmer, welke op hoogte verstelbaar is. Via een slang en een pomp wordt het waterniveau in de emmer constant gehouden. De uitlaat is verbonden met een slang. De hoogte van het einde van de slang bepaalt het verval over de bak. Door de uistroomopening van de slang te verlagen wordt het verval verhoogd. Boven de doorstroombak hangt een camera.

Het verval over de bak wordt elke 5 minuten met 1 cm verhoogd. Indien zandtransport wordt waargenomen wordt het verval niet verhoogd.

Voor het bepalen van de waterdrukken rondom de pipes is een nieuw perspex deksel gemaakt, dat verschillende aansluitingen voor waterdrukmeters bevat. Doordat kanalen meanderen zullen kanaaltjes vanzelf langs waterdrukmeters lopen. De relevante metingen kunnen worden geanalyseerd.



Figuur 2.1 Schets bak voor kleine schaal proeven

Een uitgebreide beschrijving van de proefopstelling en de uitvoering van de proeven is in (Knoeff, 2008) gegeven.

### 2.2 Uitgevoerde proeven

Om de invloed van de zandeigenschappen op het pipingproces te onderzoeken zijn twee series proeven uitgevoerd waarbij is gevarieerd met de achtereenvolgens de relatieve dichtheid van het zand en korreleigenschappen (korrelgrootte, korrelvorm en uniformiteit). Een derde serie proeven is uitgevoerd waarbij waterdrukken zijn gemeten. Een overzicht van de uitgevoerde proeven is in bijlage 1 gegeven. Factual reports van de verschillende zijn beschreven in (Beek, 2008).

### 2.2.1 Relatieve dichtheid

Om de invloed van de relatieve dichtheid van het zandpakket op het piping proces te onderzoeken zijn een aantal experimenten (in duplo) uitgevoerd. De pakking is gevarieerd van los tot vast met relatieve dichtheden van circa 35%, 65% en 95%. Deze variatie in relatieve dichtheden komt onder dijklichamen in Nederland voor.

De experimenten zijn uitgevoerd op Baskarpzand en Nunspeet Dekzand. De eigenschappen van Baskarp zand zijn goed bekend en door de uniforme eigenschappen kan dit zand homogeen opgebouwd worden bij verschillende relatieve dichtheden. Het gecontroleerd opbouwen van zandproefstukken is nodig voor het testen van methoden en voor het reproduceerbaar maken van de proefstukken in de proefopstelling. Daarnaast zijn experimenten met een iets minder fijn zand (dekzand, Formatie van Boxtel,  $d_{70}190\mu\text{m}$ ) uitgevoerd. Dit zand is meer representatief voor de Nederlandse ondergrond dan Baskarp zand.

### 2.2.2 Korreleigenschappen

Naast Baskarpzand en Nunspeetzand zijn op 9 andere zandsoorten proeven uitgevoerd om inzicht te krijgen in de relatie tussen korreleigenschappen en pipingproces.

De zanden voor de monsters zijn geselecteerd met het oog op het verkrijgen van een relevant bereik van waarden voor relevant geachte eigenschappen. Er is getracht met de zandsoorten het bereik in karakteristieken van in Nederland veel voorkomende zanden te vatten. De korrelgrootteverdelingen en de afronding van de zanden bestrijken het gebied dat voorkomt voor natuurlijke zanden onder Nederlandse waterkeringen op de voor het pipingproces relevant geachte schaal

De gebruikte zanden zijn met uitzondering van Bascarp-, en Enschede zand uit een winput bij Zwolle, afkomstig uit ontsluitingen. De namen van de zanden refereren naar de geologische Formatie waaruit de zanden afkomstig zijn en naar de winlocatie en betreffen getijdezand afzetting, rivierzand afzettingen en een zogenaamd fluvioglaciaal afgezet zand.

Een overzicht van de karakteristieke eigenschappen van de verschillende zanden is in tabel 2.1 gegeven.

parameter		zand soort								
		Dekzand Nunspeet	Enschede winput Zwolle	Waalre Hoherstall	Sterksel Hoherstall	Scheemda wegonstluiting Ifterbecke	Enschede Ringstrasse groeve Ifterbecke	Sandr Ringstrasse groeve Ifterbecke	Dekzand Ringstrasse groeve Ifterbecke	Baskarp
d50	µm	148	233	341	200	157	380	171	155	
d60	µm	168	262	372	218	166	408	184	180	
d70	µm	192	307	400	232	175	431	195	202	154
U	-/-	2.6	2.1	1.6	2.2	1.3	1.6	1.5	2.2	1.6
Rondheid visueel	-	54	51	46	35	38	69	52	45	50
Rondheid beeld an.	-/-	1.41	1.48	1.35	1.32	1.46	1.29	1.62	1.44	
Min. porositeit nat	%	28.4	32.2	35.0	37.9	37.2	32.0	33.1	32.3	34.6
Max. porositeit nat	%	42.8	42.3	45	50.4	47.3	41.1	44.1	46.1	45.8

Tabel 2.1 Zandeigenschappen

### 2.2.3 Waterspanningen

In totaal zijn vier proeven uitgevoerd waarbij de waterspanningen gemeten zijn. Allen zijn uitgevoerd op Baskarp zand. Bij twee van de proeven is een bovenstreams filter gebruikt dat uit geotextiel bestaat met een opening van 8 cm breed in het midden van het filter. Dit filter is ook gebruikt bij alle andere proeven (relatieve dichtheid en zandkarakteristieken). De twee andere proeven met waterspanningsmeters zijn uitgevoerd met een 20cm breed filter, bestaande uit Nylon. Dit filter is meer doorlatend.

## 3 Beschrijving waargenomen verschijnselen en processen

### 3.1 Algemeen

Dit hoofdstuk bevat een beschrijving van de waargenomen verschijnselen en processen tijdens de kijkexperimenten.

Paragraaf 3.2 bevat beschrijvingen van waargenomen verschijnselen en processen. Van de verschillende waarnemingen en processen wordt een beschrijving, een foto en schematische weergave gegeven. Voor een makkelijke communicatie bij de analyse is aan de verschillende processen een naam gegeven.

In paragraaf 3.3 worden drie dominante procesketens beschreven. Een procesketen geeft weer welke verschijnselen na elkaar kunnen optreden.

Paragraaf 3.4 tenslotte bevat een aantal bijzondere waarnemingen die van invloed zijn op het waargenomen pipingproces.

### 3.2 Procesbeschrijvingen

#### 3.2.1 Initiele fase proces

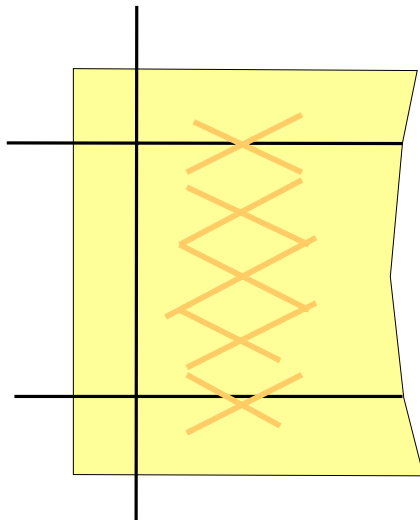
De volgende initiele processen zijn in de experimenten waargenomen:

- Craquelé
- Korrelverplaatsing
- Enkelvoudig klassiek
- Meervoudig klassiek
- Front-instabiliteit

In navolgende alinea's worden de verschillende processen kort beschreven en geïllustreerd met een foto en schematisatie. In de figuren stroomt het water van rechts naar links. Met rasterlijnen wordt de relatieve positie van de waarnemingen in de bak weergegeven.

#### *Craquelé*

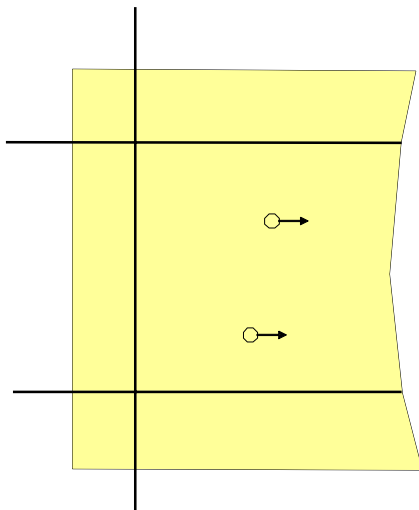
Onder craquelé wordt het ontstaan van een ruitpatroon met diagonale kanaaltjes verstaan. De kanaaltjes zijn één tot enkele korrels breed en diep en verschijnen zonder dat zandtransport zichtbaar is. Af en toe wordt een glinstering waargenomen dat aangeeft dat individuele korrels bewegen. Het ruitpatroon bevindt zich meestal op 2 à 5 cm uit de benedenstroomse rand. Verder bovenstrooms is het patroon ook waargenomen. Het betreft een zeer geleidelijk proces waarbij, als het patroon eenmaal zichtbaar is, je jezelf afvraagt of het patroon al de hele tijd aanwezig was.



Figuur 3.1 Craquele

### Korrelverplaatsing

Onder korrelverplaatsing wordt het proces verstaan dat individuele korrels aan het oppervlak in benedenstroomse richting bewegen. De korrels bewegen zich niet door de kanaaltjes maar door het korrelskelet. Het verplaatsen van de korrels veroorzaakt geen kanaalvorming. Dit proces wordt vooral aan de benedenstroomse zijde van de bak waargenomen maar is soms ook verder bovenstrooms zichtbaar. Indien waargenomen is het proces vaak direct na verhogen verval zichtbaar.



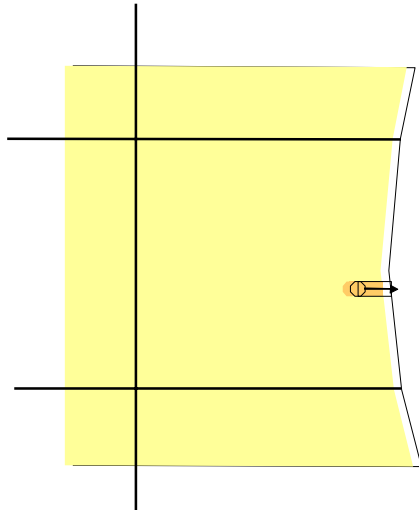
[ Verplaatsing van individuele korrels is niet zichtbaar op een foto ]

Figuur 3.2 Korrelverplaatsing

### Enkelvoudig klassiek

Na verhogen van verval ontstaat één enkel kanaaltje. Het kanaaltje ontstaat aan de benedenstroomse rand en groeit in bovenstroomse richting. Het kanaaltje is één tot enkele korrels breed en één tot enkele korrels diep. Het kanaaltje groeit doordat aan bovenstroomse zijde van kanaal individuele korrels in beweging komen. De individuele korrels rollen achter elkaar (in treintjes) door het kanaaltje naar de benedenstroomse rand. Het proces is direct na

verhogen van verval zichtbaar en komt daarna soms tot stilstand. In sommige proeven ontstaat na begin van bewegen bij hetzelfde verval een doorgaande pipe.

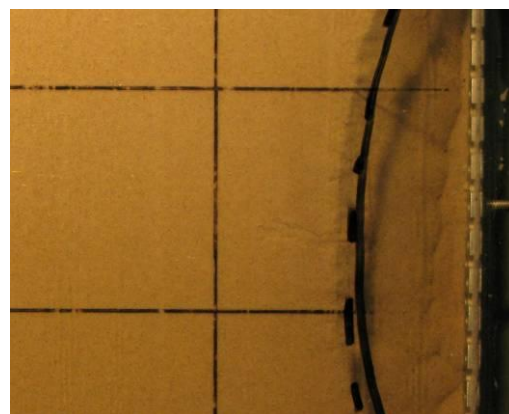
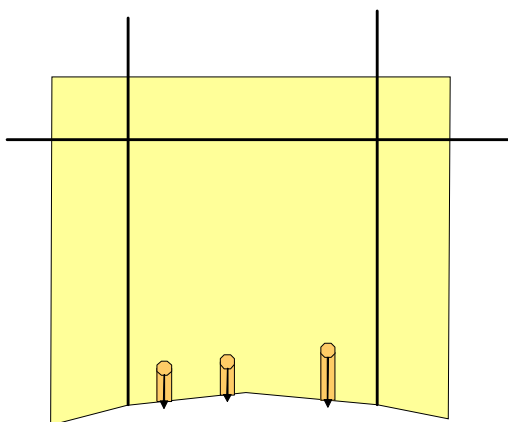


Figuur 3.3 Enkelvoudig klassiek

#### Meervoudig klassiek

Na verhogen van het verval ontstaan meerdere kanaaltjes. De kanaaltjes ontstaan zoals beschreven onder 'enkelvoudig klassiek'.

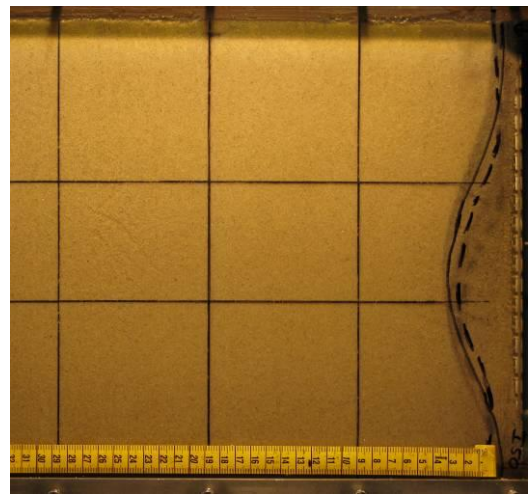
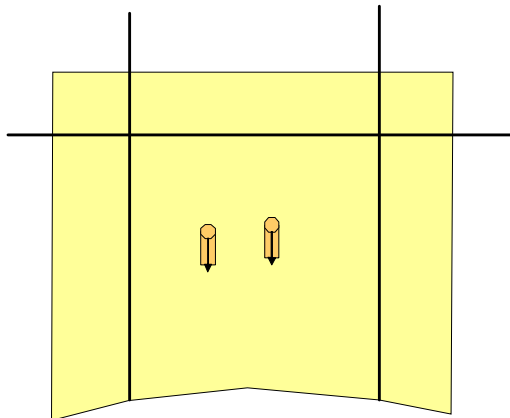
De kanaaltjes groeien niet allemaal in dezelfde mate. Sommige kanaaltjes groeien na verloop van tijd helemaal niet meer. Soms ontstaat na verloop van tijd een nieuw kanaaltje. De snelheid waarmee de verschillende kanaaltjes groeien is niet constant in de tijd. Ook verschilt de snelheid van de kanaaltjes ten opzichte van elkaar. Zoals bij enkelvoudig klassiek beschreven is ook bij meervoudig klassiek waargenomen dat bij een bepaald verval een evenwichtssituatie ontstaat waarbij kanaaltjes niet meer groeien. Bij verhogen van het verval groeien de kanaaltjes verder.. Uiteindelijk groeit één kanaaltje door. Welk kanaaltje doorgroeit, is op voorhand niet te voorspellen.



Figuur 3.4 Meervoudig klassiek

*Interne kanaalvorming*

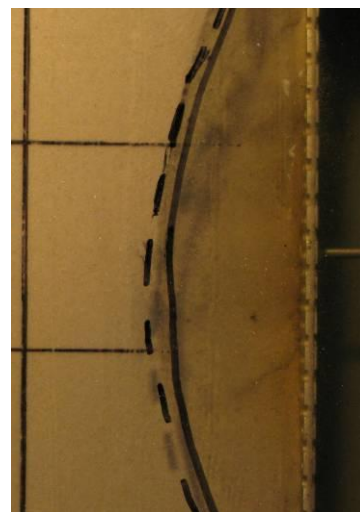
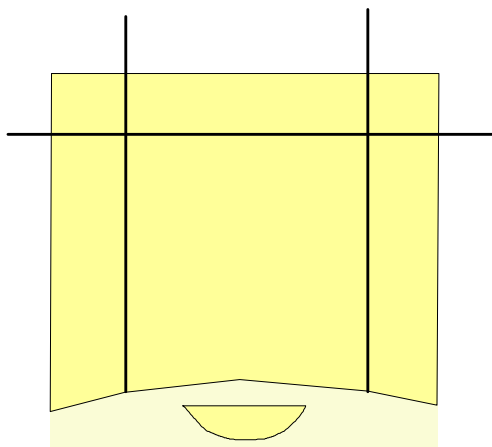
Midden in het zandpakket ontstaat één of ontstaan meerdere kanaaltjes. Aan de bovenstroomse zijde raken individuele korrels los uit het korrelskelet. De korrels rollen naar de benedenstroomse zijde en drukken zich daar weer in het korrelskelet. Het transport is vergelijkbaar als beschreven onder 'enkelvoudig klassiek'. Het kanaaltje groeit zowel in benedenstroomse- als in bovenstroomse richting. Het proces treedt direct na verhogen van verval op en komt meestal tot stilstand (idem aan enkelvoudig klassiek). Bij verhogen van verval gaat het proces verder. Het proces is over de hele lengte van het zandpakket waargenomen.



Figuur 3.5 *Frontinstabiliteit*

*Frontinstabiliteit*

Afschuiving van front van zand. Hierbij wordt de rand van het zandpakket meestal niet aangetast. In één proef met kleurstof is waargenomen dat de kleurstof eerder uit het front komt dan langs de bovenzijde het front bereikt.



Figuur 3.6 *Frontinstabiliteit*

### 3.2.2 Vervolg processen

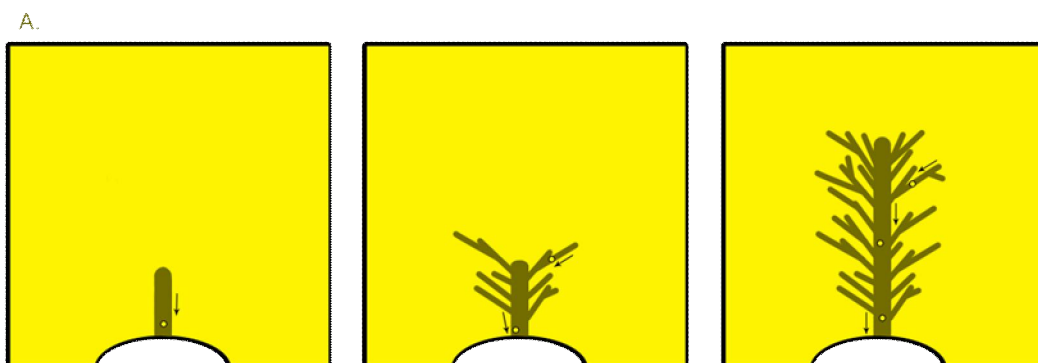
De initiële kanaaltjes kunnen op verschillende manieren groeien. Onderscheid wordt gemaakt tussen:

- Straight backward erosion
- Classic backward erosion
- Forward erosion
- Waaivorming
- Verstopping

In navolgende alinea's worden de verschillende processen beschreven.

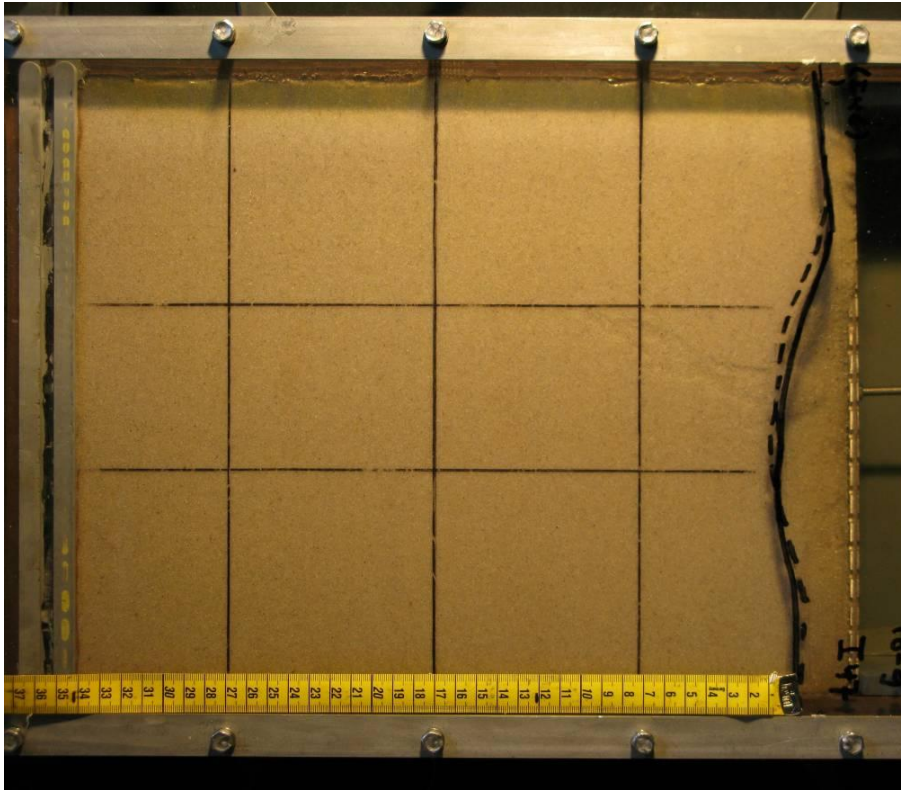
#### *Straigth backward erosion*

Erosie in bovenstroomse richting proces van brede kanalen. Een initieel kanaaltje groeit in bovenstroomse richting en wordt daarbij snel breder, tot 0,5 à 1 cm. Bij de brede kanalen eroderen in de bovenstroomse hoeken continue korrels waarna het middenstuk er tussenuit vloeit. en het proces weer opnieuw begint. De kanaaltjes groeien meestal recht naar achteren. De kanalen zijn meerdere korrels diep. De korrels stromen meestal met het water mee. Alleen enkele grote korrels rollen (hebben minder snelheid dan de rest). Indien te veel korrels in transport komen kan dit leiden tot verstopping. Bij gelijkblijvend verval leidt dit proces altijd tot doorgaande pipe



Figuur 3.7 *Straight backward*



Foto 3.1 *Staight backward (147\_540)*

### *Classic backward erosion*

De klassieke beschrijving van het piping beschrijft een proces waarbij kanaaltjes in bovenstroomse richting groeien. Bovenstrooms raken individuele korrels los uit het korrelskelet en rollen door het kanaaltje met de stroom mee. De kanaaltjes vertakken waardoor een boomstructuur ontstaat. Niet alle takken blijven groeien. Soms ontstaat een evenwicht in een tak waarna een tak geen zand meer afvoert. De kanaaltjes worden in benedenstroomse richting breder en dieper. Benedenstrooms is geen sprake meer van rollende korrels maar van korrels die springen of gewoon door de stroom worden meegevoerd.

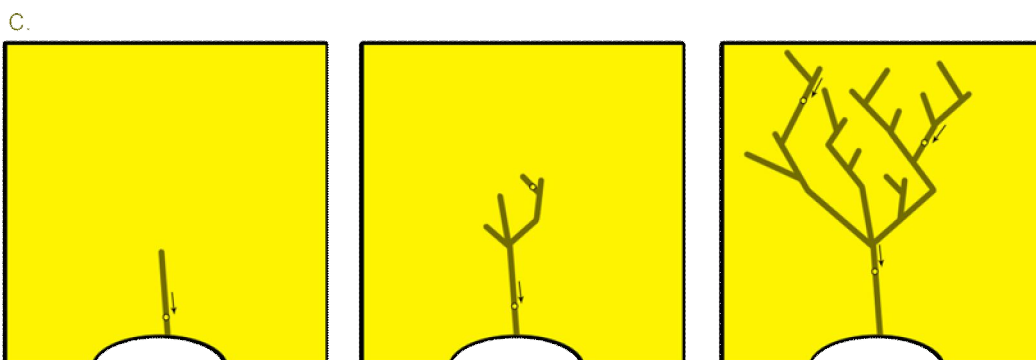
Figuur 3.8 *Classic backward*

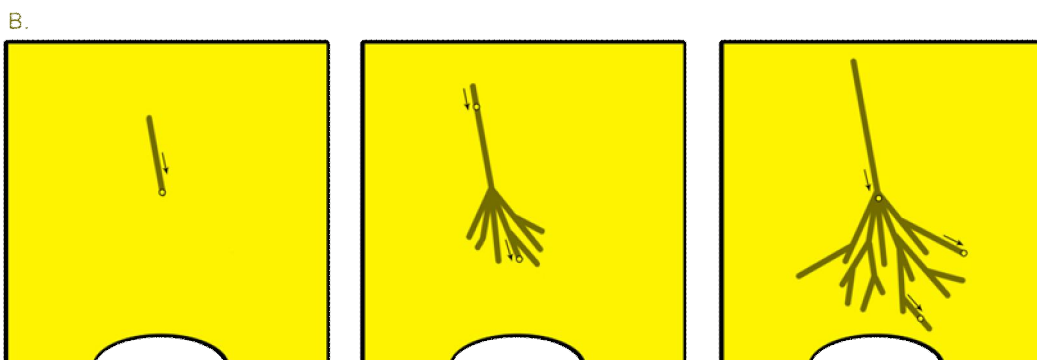


Foto 3.2 Classic backward (B54\_670)

Na verhogen van het verval neemt de lengte van de kanaaltjes toe. Er ontstaat daarna soms een evenwicht. In de meeste gevallen groeien de kanaaltjes gewoon door, soms nadat minutenlang geen korrelbeweging is waargenomen.

#### *Forward erosion*

Een kanaaltje dat door herschikken van korrels (craquelé) ontstaat kan zo breed en diep worden dat aan de bovenstroomse kant van het kanaal korrels uit het skelet los kunnen raken. Het kanaaltje groeit in bovenstroomse richting. De zandkorrels worden door het kanaaltje afgevoerd en aan de benedenstroomse zijde weer afgezet (zie beschrijving interne kanaalvorming). De korrels komen niet tot stilstand aan de benedenstroomse zijde van het kanaal maar 'duwen' zich in het bestaande korrel skelet. Het geultje goeit ook in benedenstroomse richting. Bij het groeien in benedenstroomse richting treden vertakkingen op.



Figuur 3.9 Forward erosion



Foto 3.3 Forward erosion

### *Verstopping*

Indien, bij het backward erosion proces te veel korrels bovenstrooms in transport komen kan het kanaal verder benedenstrooms verstopt raken. Bovenstrooms komt erosie tot stilstand en aan de benedenstroomse zijde van de verstopping begint het erosieproces opnieuw. Dit kunnen nieuwe kanaaltjes zijn maar kan ook in de vorm van vlak- of massiefstroming plaatsvinden.

Nieuwe kanaaltjes groeien niet altijd door de verstopping heen. Vaak groeien deze kanaaltjes juist om de verstopping heen. Er is niet waargenomen dat het pipingproces stopt na verstopping van het kanaal. In alle gevallen is verdere kanaalgroei waargenomen.

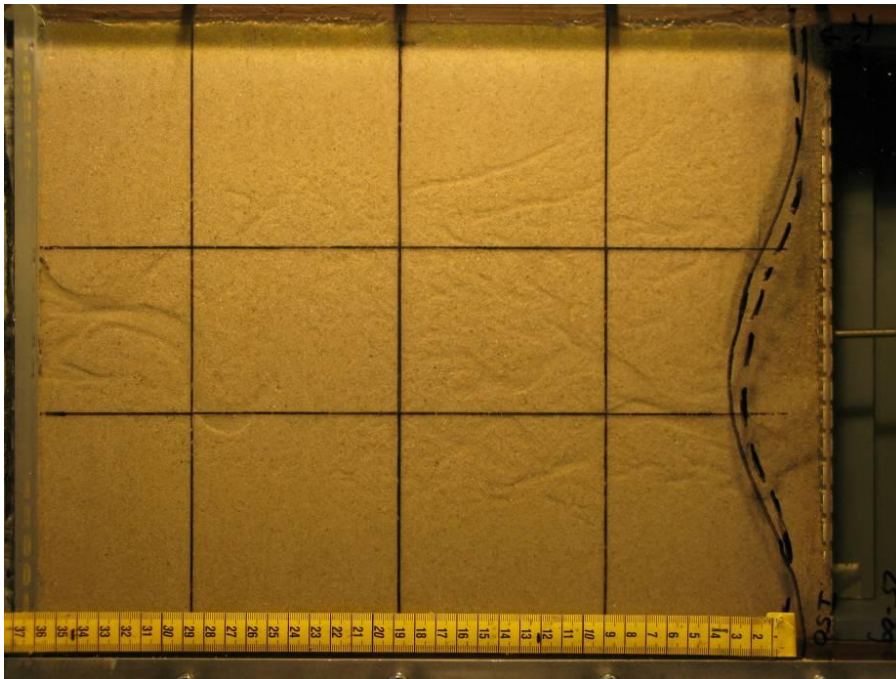


Foto 3.4 Verstopping

### 3.2.3 Eindfase kanaalvorming

Tijdens de eindfase van het proces zijn verschillende processen waargenomen. Onderscheid wordt gemaakt tussen:

- Vlakstroming
- Massiefstroming
- Deltavorming
- Waaivorming
- Meanderen
- Ruimen

#### *Vlakstroming en massiefstroming*

Nadat een kanaal is verstopt is een aantal keer waargenomen dat een plak zand van enkele  $\text{cm}^2$  in beweging komt. Wanneer de korrels in de plak ten opzichte van elkaar bewegen spreken we van vlakstroming. Als de korrels in het zand niet ten opzichte van elkaar bewegen spreken we van massiefstroming.

#### *Deltavorming en waaivorming*

Deltavorming en waaivorming treedt op na interne en/of forward erosie. Het betreft een soort inverse proces van het vertakken van kanaaltjes dat bij classic backward erosie is waargenomen. Bij deltavorming en waaivorming vertakt het kanaal zich in benedenstroomse richting. De kanaaltjes groeien eveneens in benedenstroomse richting.

Bij waaivorming worden korrels aan de benedenstroomse zijde van de kanaal in het zandmassief weggedrukt. Hiermee wordt ruimte gemaakt voor een volgende korrel die zich weer iets verder benedenstrooms in het massief wegdukt.

Bij deltavorming ontstaat aan de benedenstroomse van de kanaaltjes een ruimte tussen zandpakket en perspexplaat waarop zand wordt afgezet. Bij deltavorming lijkt de

afzettingvorm meer op een delta met deltalobben, zoals ook in rivieren wordt waargenomen. Bij waaivorming gelijkt het proces meer op inverse vertakking van piping.

Omdat zand niet kan worden afgevoerd is zowel waaivorming als deltavorming een zeer langzaam proces. Er is niet waargenomen dat het proces bij een gelijkblijvend verval stopt.

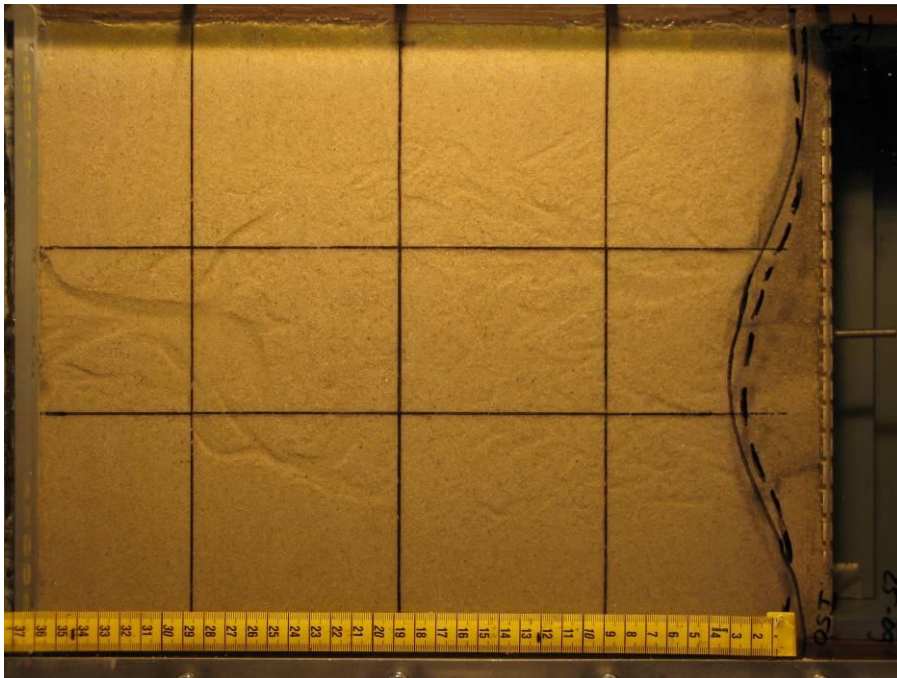


Foto 3.5 Vlakstroming (I50\_487)

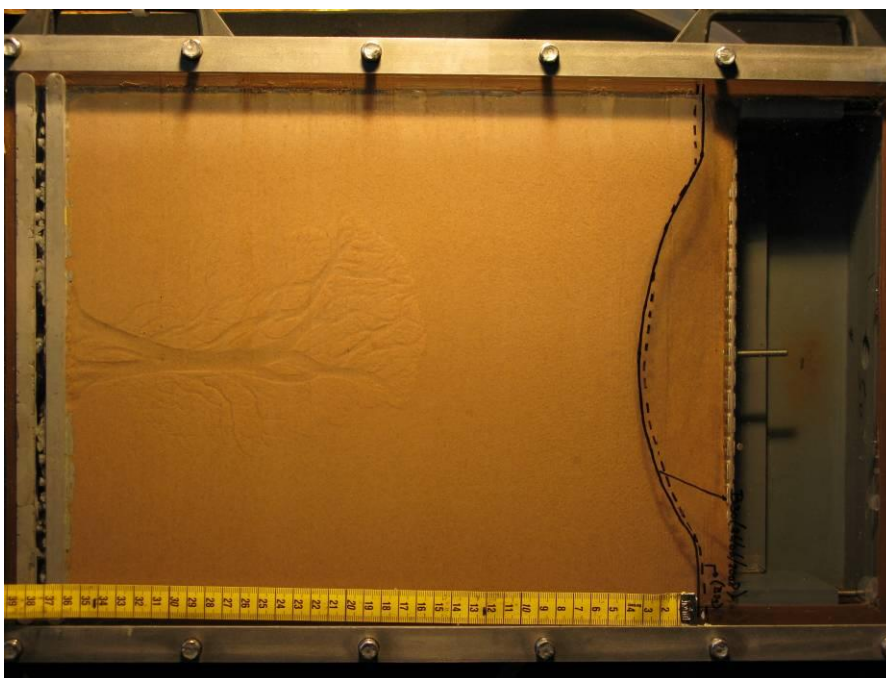


Foto 3.6 Deltavorming (B30\_360)

### *Meanderen*

Onder meanderen wordt het verplaatsen van een kanaal verstaan. Het proces vertoont overeenkomsten met het proces dat ook bij rivieren wordt waargenomen. Aan de buitenzijde van kanaalbochten wordt zand afgezet terwijl aan de binnenzijde van deze kanalen zand erodeert.



Foto 3.7 *Waaivorming*

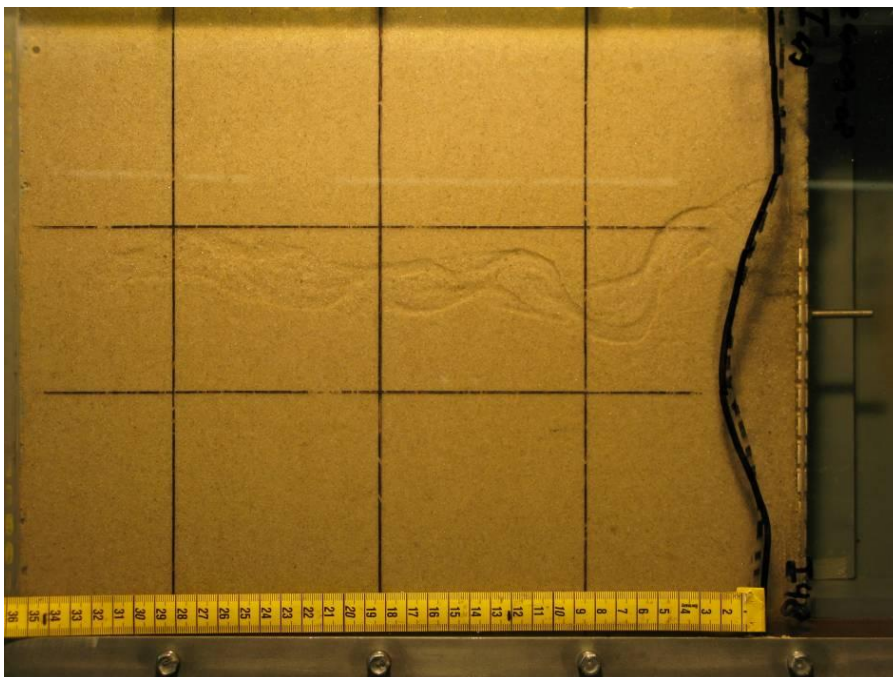


Foto 3.8 *Meanderen (149\_473)*

### *Ruimen*

Ruimen is het proces dat wordt waargenomen nadat een doorgaand kanaaltje is ontstaan. Vanaf de bovenstroomse zijde ontstaat een 'schoon' kanaal. Aan de voorzijde van dit schone kanaal wordt zand als het ware weggedrukt door het doorgaande kanaaltje dat snel breder wordt.

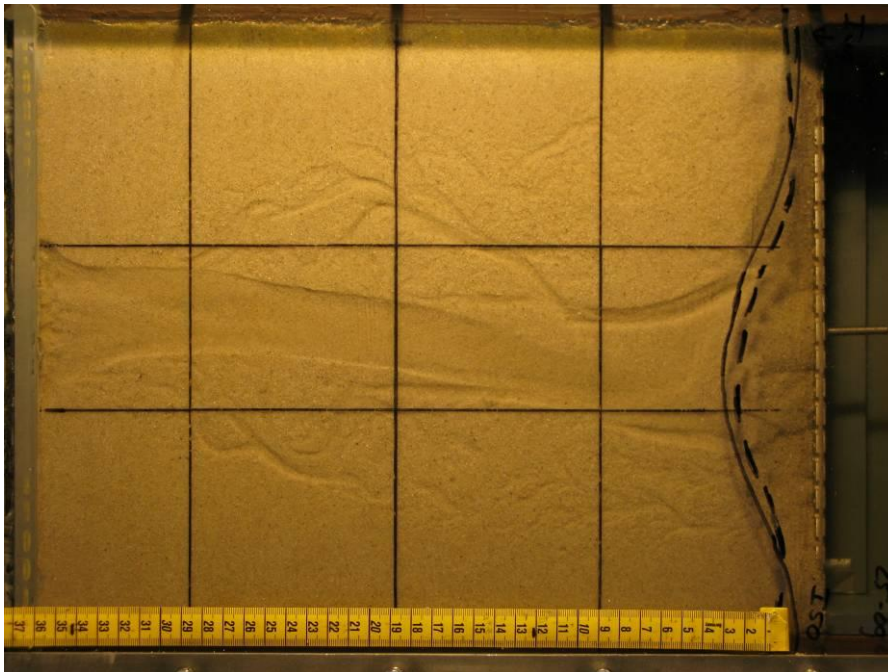
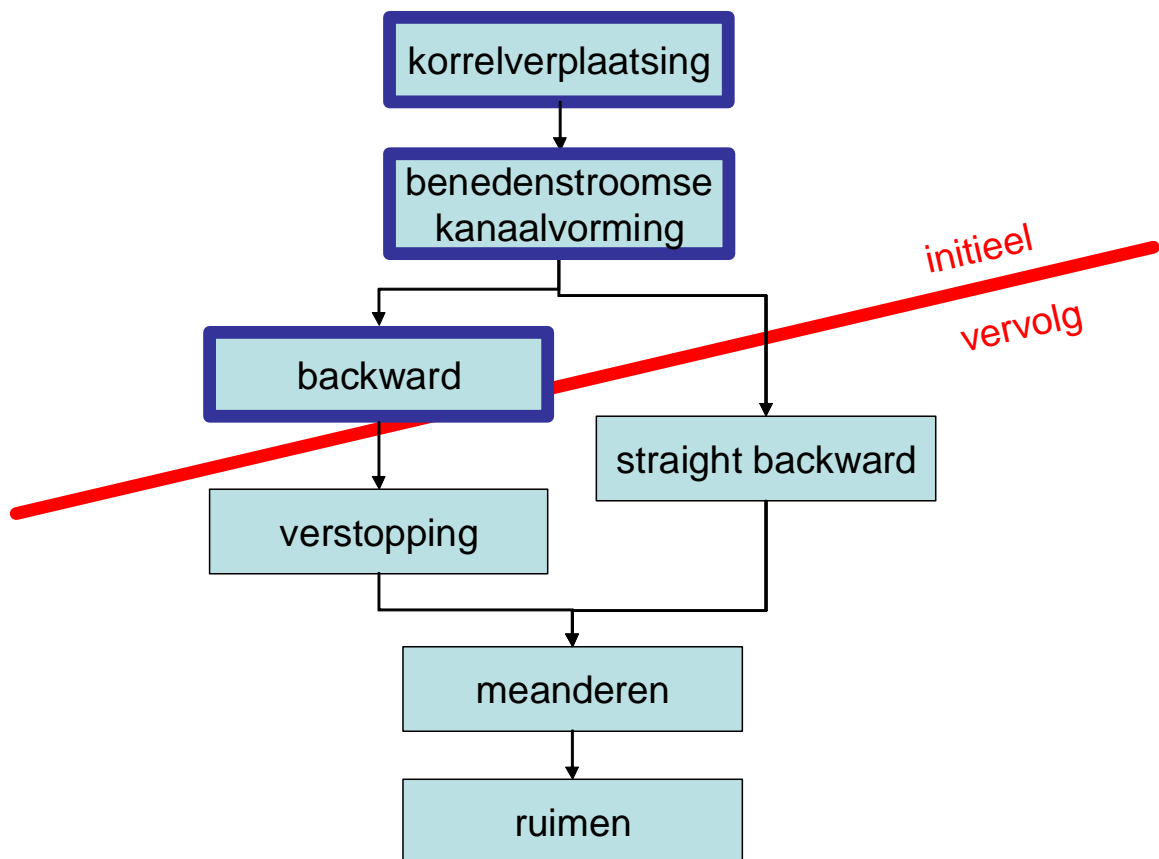


Foto 3.9 Ruimen (I50\_491)

### 3.3 Procesketens

Drie procesketens worden onderscheiden. Deze worden in navolgende alinea's beschreven. Een procesketen geeft de volgorde aan van de verschijnselen uit de voorgaande paragraaf.

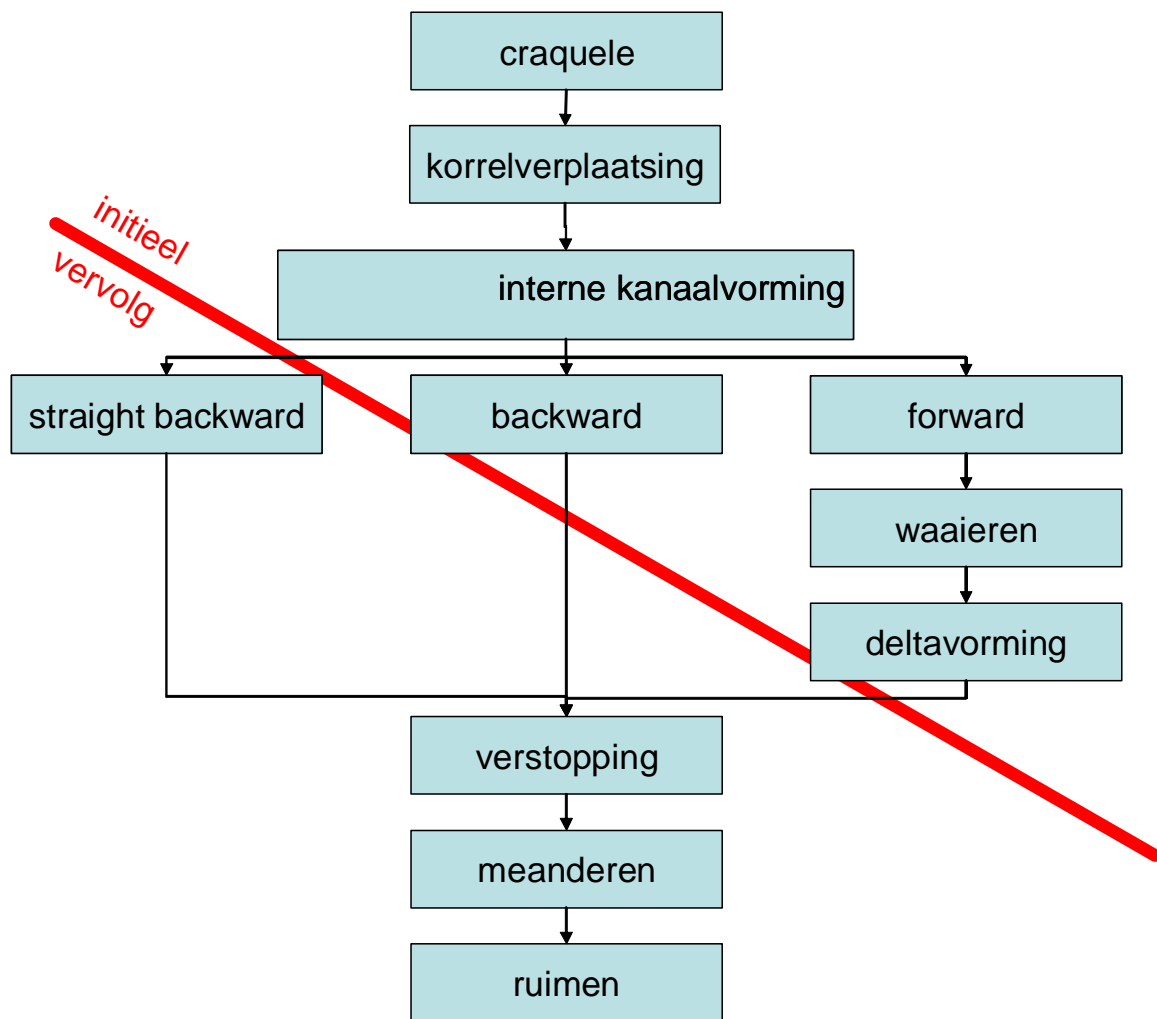
De eerste procesketen begint met korreltransport en kanaalvorming aan de benedenstroomse zijde (Figuur 3.10). Het kanaaltje vertakt zich op de 'klassieke' wijze of wordt breder en loopt 'straight' naar de bovenstroomse zijde.



Figuur 3.10 Procesketen 1

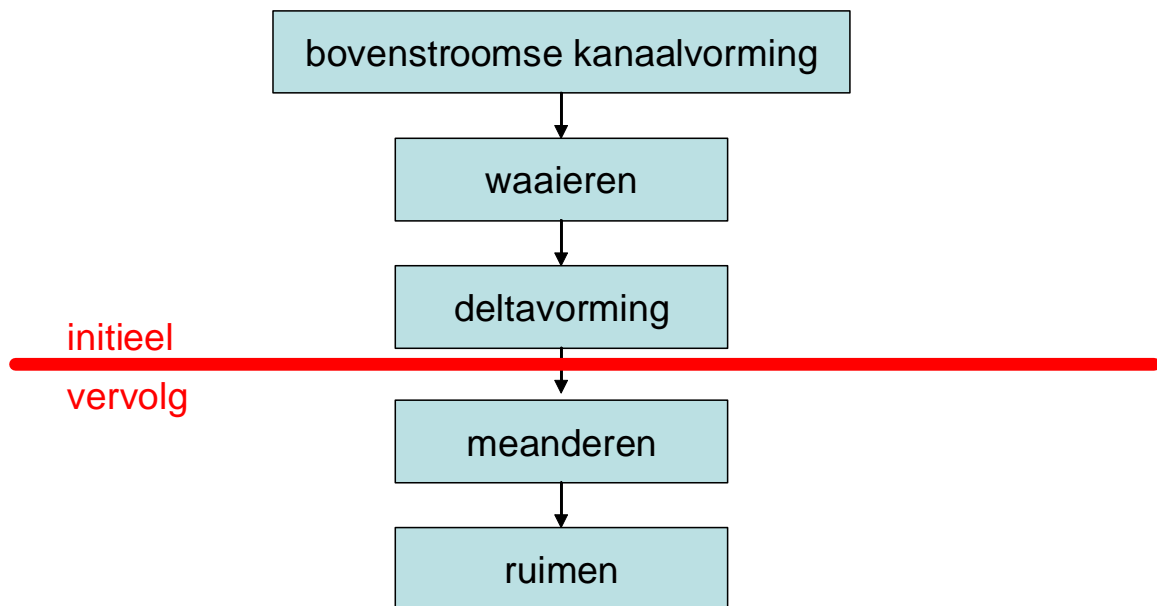
Bij de tweede procesketen begint het pipingproces in het midden met craquele. Na verloop van tijd vindt korreltransport door de scheurtjes plaats en vindt zowel forward als backward erosie plaats. Het proces van forward erosie gaat wel veel langzamer dan de backward erosie. Soms gaat de backward erosie zo snel dat het kanaaltje aan de benedenstroomse zijde verstopt raakt. Of de benenstroomse rand of de bovenstroomse rand als eerste wordt bereikt is niet op voorhand te zeggen. Wel blijkt dat als de benednstreamse rand wordt bereikt de snelheid van het pipingproces sterk toeneemt. Het debiet door het massief neemt pas significant toe bij het ruimen, als een doorgaande pipe is ontstaan.





Figuur 3.11 Procesketen 2

Bij de derde proces keten begint het pipingproces aan de bovenstroomse zijde van het kanaal. In een continu proces van waaieren en deltavorming bereikt het kanaaltje de benedenstroomse rand. Dit proces is een zeer langzaam proces. Als het kanaaltje eenmaal de benedenstroomse rand heeft bereikt wordt het kanaal geruimd en neemt het debiet door het kanaal sterk toe.



Figuur 3.12 Procesketen 3

### 3.4 Bijzondere waarnemingen

#### 3.4.1 Lucht

Ondanks het feit dat lucht in het monster zoveel mogelijk wordt voorkomen is tijdens de meeste proeven belvorming waargenomen. Bij sommige proeven zijn luchtbellens in het monster zichtbaar. De hoeveelheid lucht in het monster heeft een grote invloed op het pipingproces.

Ten eerste wordt de doorlatendheid van het monster door lucht in het monster kleiner. Als het lucht niet uniform over het monster verdeeld is, is de doorlatendheid van het monster niet uniform. Hierdoor is het potentiaalverloop over het monster niet lineair en treden lokaal grotere drukverschillen op. Tijdens proef S64 is een kleurvloei-stof geïnjecteerd. Aan de benedenstroomse zijde trad de kleurstof uit het talud voordat deze langs de plaat de benedenstroomse rand had bereikt. De doorlatendheid bovenin het pakket was hier kleiner dan onderin het pakket.

Ten tweede zijn luchtbellens groter dan zandkorrels en kunnen vaak niet door kanaaltjes worden afgevoerd. In enkele proeven is waargenomen, dat kanaalvorming bij luchtbellens in het monster stopt of dat luchtbellens kanaaltjes verstoppen.

#### 3.4.2 Cracking

Luchtbellens verzamelen zich ter plaatse van discontinuïteiten in het oppervlak van de plaat. Door de wijze van aanbrengen van de siliconenkit op de deksel van de bak ontstaan evenwijdig aan het filter kleine drempeltjes. Hierachter kan lucht zich verzamelen.

Cracking is het verschijnsel dat vanaf de rand van de bak plotseling een scheur in het monster ontstaat. Deze scheur is het gevolg van lucht(belletjes) achter een siliconendrempel dat zich samenvoegt tot één lange luchtbel.

Bij proef s62 ontstond een afwijkende crack doordat een luchtbel uit het monster omhoog borrelde tot tegen de plaat. Hierdoor ontstond een crack gelijk aan scheuren op een ruit wanneer deze wordt getroffen door een steen.

#### 3.4.3 Overig

Veel kanaaltjes ontstaan op 1 of enkele centimeters uit de benedenstroomse rand. Snelheid van verhogen.

Bij 1 proef is besloten versneld te verhogen (meer frequent aanbrengen van vervalstappen). Dit blijkt niet tot een sneller erosieproces te leiden.

## 4 Relatie processen en zandeigenschappen

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op relaties tussen zandeigenschappen, de waargenomen processen en het verval (4.1). Daarnaast worden de waargenomen processen gerelateerd aan de waterspanningen in en rondom de pipe (paragraaf 4.3).

In het hoofdstuk worden de volgende aanduidingen voor het verval gebruikt:

$\Delta H$	verval
$\Delta H_{\text{exp}}$	verval in experiment waarbij een doorgaande pipe ontstaat. verval is gecorrigeerd voor de weerstand van de laboratorium opstelling. Bij lage relatieve dichtheden is de correctie gemiddeld 50% van het oorspronkelijke verval. Bij hogere dichtheden is de correctie gemiddeld 20%. De correctie is sterk afhankelijk van de initiële doorlatendheid.
$\Delta H_c$	kritiek verval berekend volgens het model van Sellmeijer (dit model wordt in paragraaf 5.1 beschreven). Dit is het verval waarbij, bij een kleine overschrijding ervan, een doorgaande pipe zal ontstaan.

### 4.1 Relatie processen en zandeigenschappen

In [Kruse 2008] wordt aangegeven dat de verwachting is dat de volgende zandkarakteristieken in belangrijke mate het pipingproces bepalen:

- de pakking van het zand, gekarakteriseerd door de relatieve dichtheid
- de korrelgrootte van het zand
- de hoekigheid van het zand
- de gradatie van het zand
- de doorlatendheid van het zand

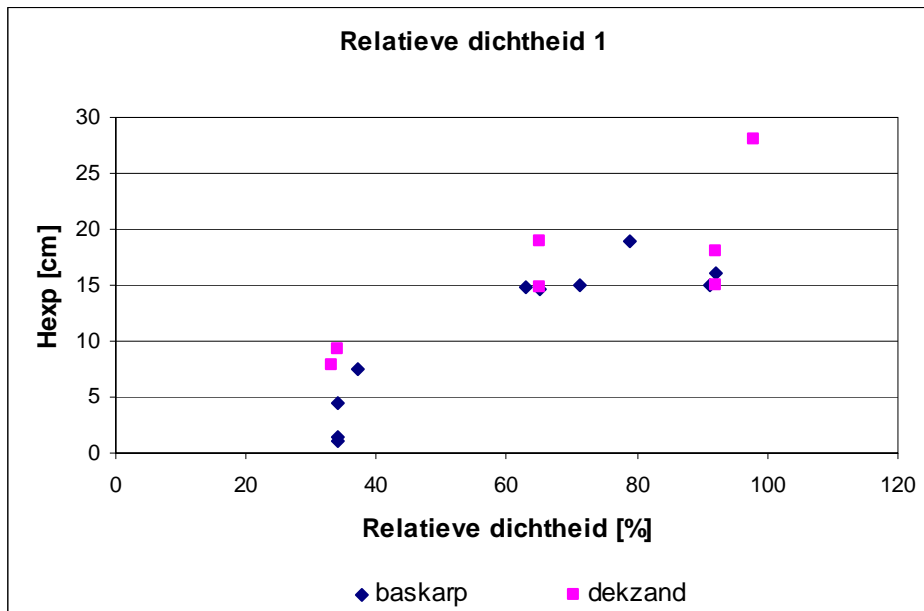
Deze eigenschappen hebben in de rekenregel van Sellmeijer direct of indirect een plaats. In deze paragraaf wordt de relatie tussen genoemde eigenschappen, de waargenomen processen,  $\Delta H_{\text{exp}}$  en  $\Delta H_c$  en het kritieke verval gegeven.

In de discussie over relatieve dichtheid wordt een andere proevenserie beschouwd dan in de discussie over de overige zandeigenschappen.

#### 4.1.1 Relatieve dichtheid

In Figuur 4.1 is de relatieve dichtheid uitgezet tegen het kritiek verval voor twee soorten zand, Baskarp zand en dekzand, welke bij verschillende relatieve dichtheden zijn beproefd. Er is geen onderscheid gemaakt tussen de verschillende waargenomen processen die in hoofdstuk 3 zijn beschreven. Het blijkt dat hoe hoger de relatieve dichtheid is hoe hoger  $\Delta H_{\text{exp}}$ . Dit betekent dat hoe lossier de pakking is, hoe sneller het pipingproces optreedt.

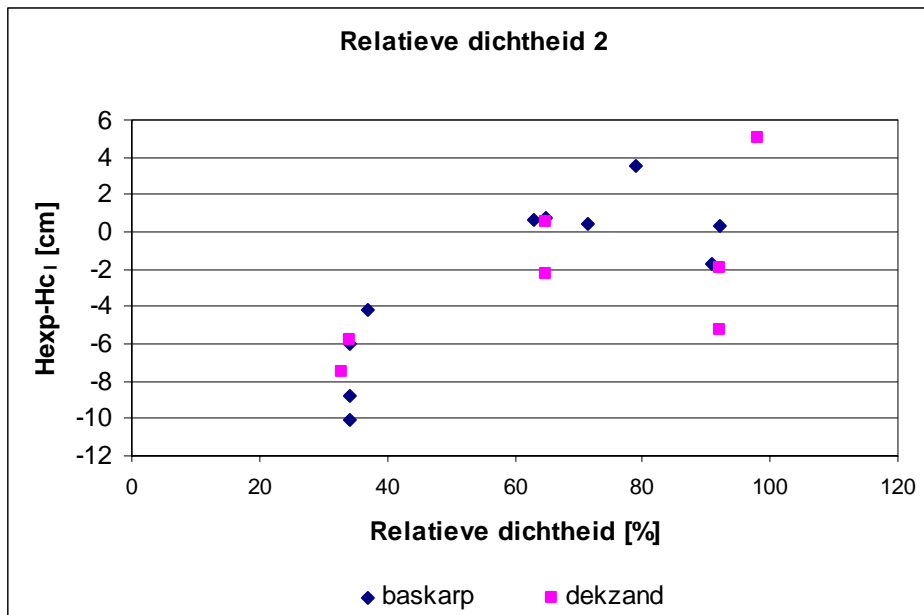
Bij lage relatieve dichtheden wordt een kleine  $\Delta H_{\text{exp}}$  gemeten. Hierbij is de doorlatendheid van het zandpakket groter en is de weerstand van het zandpakket niet veel groter dan de weerstand van het systeem (slangen / pompen / filters). In de figuur is de gecorrigeerde  $\Delta H_{\text{exp}}$  gegeven. Dit betekent dat de gemeten waarden zijn gecorrigeerd voor een geschatte weerstand van het systeem. Afhankelijk van de exacte weerstand van het systeem kan  $\Delta H_{\text{exp}}$  zowel groter als kleiner worden, echter nooit groter dan de gemeten waarde voor  $\Delta H_{\text{exp}}$ . De maximaal gemeten waarde is 11 cm.



Figuur 4.1 Relatie kritiek verval en relatieve dichtheid

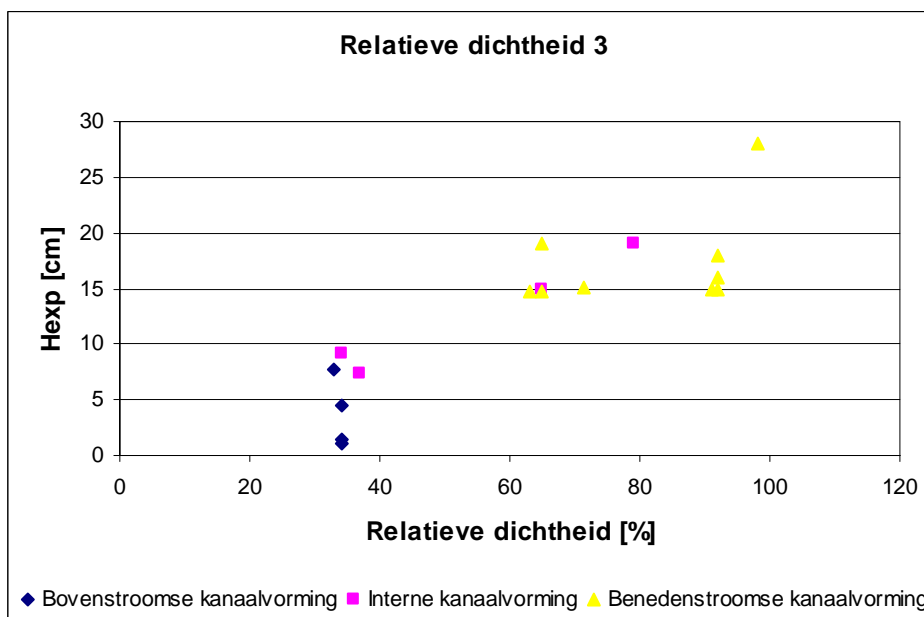
De proeven zijn uitgevoerd op twee verschillende soorten zand. Uit de figuur blijkt dat de relatie tussen relatieve dichtheid en kritiek verval van deze zandsorten gelijk is.

In het rekenmodel van Sellmeijer wordt op dit moment niet expliciet rekening gehouden met de pakking van het zand (m.u.v. de invloed ten gevolge van doorlatendheid). Dit zou wel gedaan kunnen worden door de rolweerstandshoek aan te passen. Hiervoor zijn echter geen gevalideerde relaties beschikbaar. Indien het gemeten verval  $H_{exp}$  wordt vergeleken met  $H_c$  blijkt dat  $H_c$  bij lage relatieve dichtheden met de regel van Sellmeijer wordt overschat. Dat wil zeggen dat piping al bij een lager verval wordt waargenomen dan op basis van het model van Sellmeijer wordt berekend. Rondom de 70% komen de proeven redelijk goed overeen met de voorspelling van het model. Bij hoge relatieve dichtheden komt de voorspelling van het model gemiddeld genomen goed overeen met de proeven, maar zijn de afwijkingen aanzienlijk.



Figuur 4.2 Relatie gemeten en berekend kritiek verval bij verschillende pakkingen

Een mogelijke oorzaak waardoor het verschil tussen berekeningen en waarnemingen kan worden verklaard is het type proces zoals in hoofdstuk 3 beschreven. Uit figuur 4.3 blijkt dat bij lage relatieve dichtheden het pipingproces vaak aan de bovenstroomse zijde (forward erosion) begint. Dit is een andersoortig erosieproces op dan het proces wat de basis vormt voor het rekenmodel van Sellmeijer. Dit rekenmodel lijkt bij die relatieve dichtheden het verval, wat nodig is om een doorgaande pipe te laten ontstaan, te overschatten.



Figuur 4.3 Relatie kritiek verval, initieel pipingproces en relatieve dichtheid

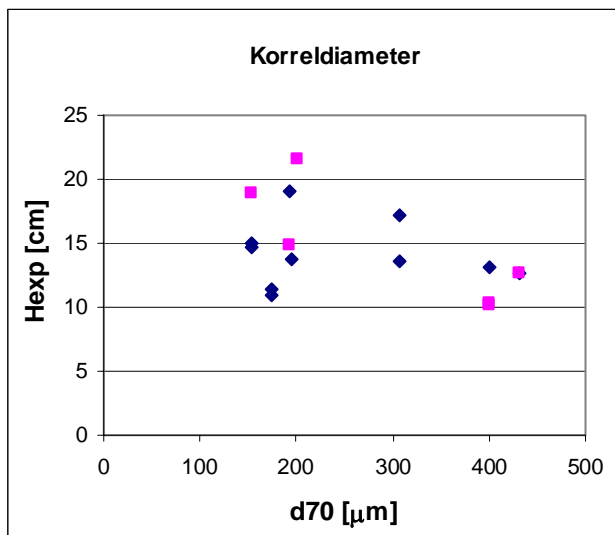
#### 4.1.2 Korrelgrootte

Bij de zandeigenschap korrelgrootte is de proevenset beschouwd met zes typen zand, die beproefd zijn bij een relatieve dichtheid van 65 à 75 %. Bij deze dichtheid treedt geen forward erosie op.

In het model van Sellmeijer wordt de korrelgrootte in het model meegenomen als een van de bepalende parameters voor piping. Omdat er voor een berekening maar 1 soort zand kan worden meegenomen, betekent dit dat alle korrels voor de berekening even groot, even hoekig en even zwaar zijn. Als karakteristiek voor de korrelgrootte heeft Sellmeijer aangegeven dat de  $d_{70}$  een redelijke keuze is. De reden hiervoor is dat erosie van kleinere korrels geen invloed heeft op het korrelskelet. De  $d_{70}$  heeft in het model van Sellmeijer een dominante invloed. Hoe groter de  $d_{70}$  hoe hoger het kritiek verval.

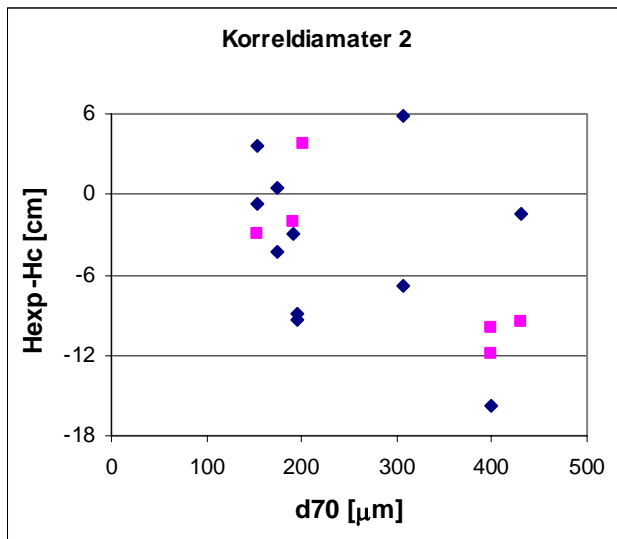
In Figuur 4.4 is de relatie tussen de  $d_{70}$  en het gemeten doorbraakverval (gecorrigeerd voor de weerstand van het systeem) gegeven. De verwachte relatie, op basis van zowel het model van Sellmeijer als klassieke empirie van Bligh en Lane, waarbij het kritiek verval toeneemt met de korreldiameter wordt niet gevonden voor deze typen zand in deze opstelling. Integendeel, in deze proeven lijkt het er juist op dat het kritiek verval afneemt bij grotere korrels.

De rode punten representeren de proeven waarbij het pipingproces niet direct aan de rand begint maar een aantal centimeters van de benedenstroomse rand.



Figuur 4.4 relatie korreldiameter en kritiek verval

In Figuur 4.4 is geen rekening gehouden met het feit dat de korreldiameter ( $d_{70}$ ) één van de eigenschappen is die van belang zijn voor het pipingproces. Als een ander zand wordt beproefd veranderen alle zandeigenschappen en niet alleen de  $d_{70}$ . In navolgende figuur is het verschil in gemeten en berekend (model Sellmeijer) verval uitgezet tegen de  $d_{70}$ . Bij een correct model en correcte representatieve laboratoriumproeven zal het verschil tussen gemeten en berekend kritiek klein en niet afhankelijk zijn van de korreldiameter.



Figuur 4.5 Relatie korrel diameter en kritiek verval 2

Uit Figuur 4.5 blijkt dat het verschil tussen gemeten en berekend kritiek verval aanzienlijk is en dat bij in de proeven bij grotere korrel diameters lagere vervallen worden gemeten dan op basis van het model van Sellmeijer kan worden verwacht. Dat wil zeggen dat het kritieke verval kleiner is in de proeven dan uit de berekening volgt.

Het valt op dat het pipingproces relatief vaak niet aan de benedenstroomse zijde begint bij grotere d70. Het is echter niet waarschijnlijk dat dit de oorzaak is van de gemeten lage doorbraakvervallen (ten opzichte van het model van Sellmeijer) bij doorbraak.

De resultaten gevonden in de proeven zijn zeer opvallend, omdat afhankelijkheid van de d70 al zeer lang is verondersteld in zowel empirische regels, zoals Bligh en Lane, maar ook in het analytische model van Sellmeijer ([TAW, 1999], [Wit, 1982], [Wit, 1984]). Het is onduidelijk waarom de proeven afwijken van deze klassieke veronderstelling. Opgemerkt wordt dat in deze proeven maar een klein gedeelte van de in het buitenland beschouwde zanden wordt beproefd (de Nederlandse zanden zijn vrij fijn).

Hoewel de resultaten sterk afwijken van de vigerende ideeën, kunnen deze niet zomaar aan de kant geschoven worden. Er is daarom gezocht naar verklaringen voor het ontbreken van een relatie tussen het gemeten doorbraakverval en de d70. Omdat dit rapport een hervalidatie van het model van Sellmeijer betreft, wordt niet meer ingegaan op Bligh en Lane.

Mogelijke verklaringen zijn:

- 1 Aannamen in het piping model van Sellmeijer zijn incorrect
  - a. Sellmeijer heeft in zijn model twee manieren van korreltransport beschreven, schuiven en rollen. Mogelijk komt schuiven (waarbij de korrelgrootte een kleinere rol speelt) beter overeen met de resultaten uit de proeven dan rollen.
  - b. De d70 is niet de juiste karakteristiek voor de korrelgrootte
  - c. Andere aannamen in het pipingmodel zijn niet correct of representatief
- 2 De laboratoriumproeven zijn niet correct of representatief

Ad 1a

Het model van Sellmeijer is gebaseerd op korrelevenwicht in het bed van het kanaal. Dit korrelevenwicht veronderstelt rollen van de korrel. Sellmeijer heeft echter ook het schuiven



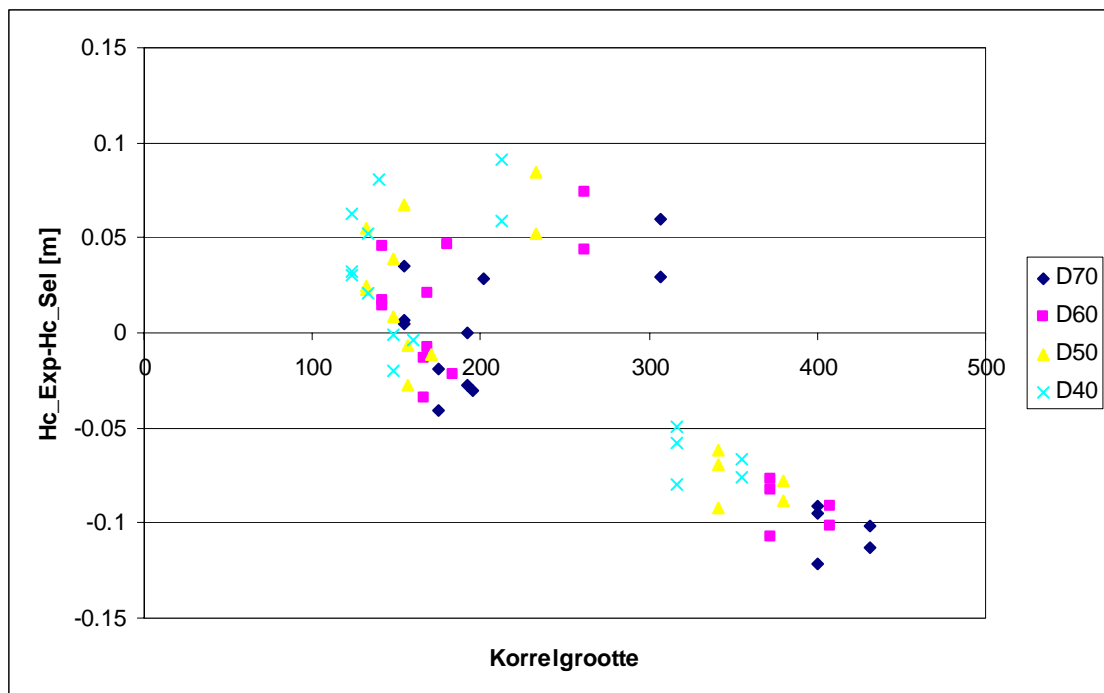
van de korrel beschouwd. Het is mogelijk dat het schuiven van korrels een betere overeenkomst geeft met de proeven, aangezien de grootte van de korrel hierbij een veel kleinere rol speelt.

#### Ad 1b

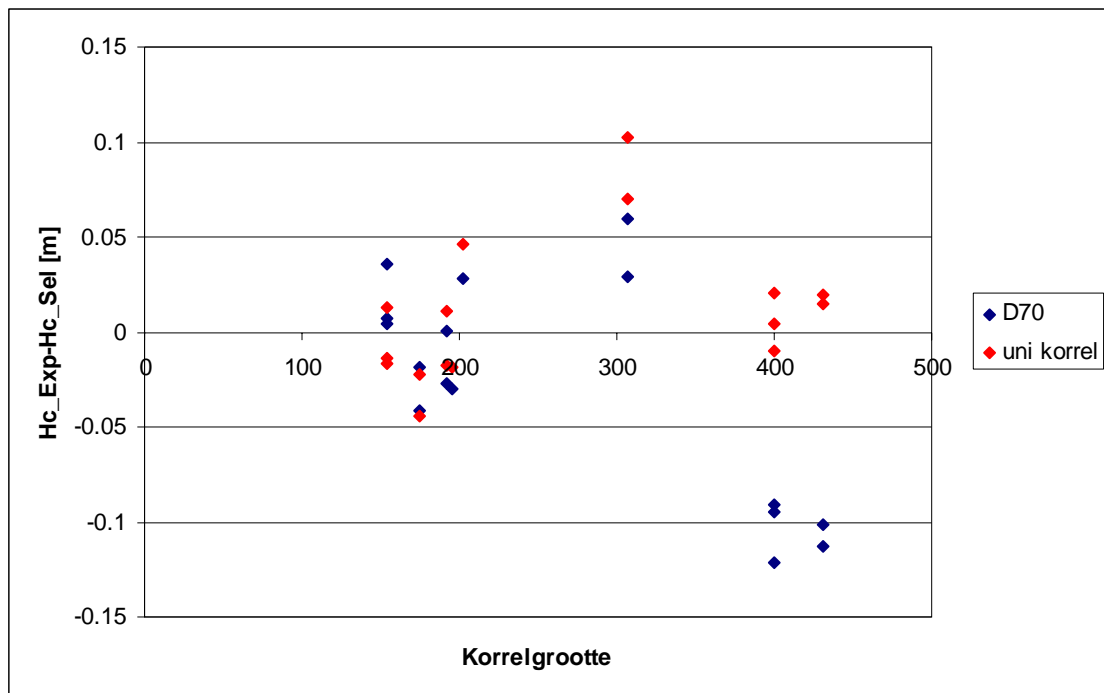
In het rekenmodel van Sellmeijer wordt uitgegaan van een uniforme korrel. Als karakteristieke waarde voor de korreldiameter is gekozen voor de  $d_{70}$ . In werkelijkheid hebben korrels in een pakket verschillende diameters met verschillende volumieke gewichten.

Om te controleren wanneer de proefresultaten en de berekende waarden wel in overeenstemming zouden zijn is in Figuur 4.6. is de relatie tussen korrelgrootte en  $\Delta H_{exp} - \Delta H_c$  voor verschillende karakteristieke korreldiameters weergegeven. Uit de figuur wordt afgeleid dat gebruik van een andere karakteristieke waarde voor de korreldiameter voor niet leidt tot een betere relatie tussen korrelgrootte en  $\Delta H_{exp} - \Delta H_c$ .

Indien met een constante waarde voor de  $d_{70}$  wordt gerekend is dat wel het geval. Bij een korreldiameter van ca 200  $\mu\text{m}$  is het verschil tussen de gemeten en berekende kritieke verval het kleinst. Dit is weergegeven in Figuur 4.7.



Figuur 4.6 Relatie korrelgrootte en kritisch verval: verschillende representatieve diameters



Figuur 4.7 Relatie korrelgrootte en kritisch verval: d70 en uniforme korrel

Geconcludeerd wordt dat de relatie tussen  $H_c$  en korreldiameter uit de regel van Sellmeijer niet wordt waargenomen in de kleine laboratoriumproeven voor deze zandsorten. Integendeel, uit de resultaten van de kleine laboratoriumproeven blijkt een betere fit met een constante waarde van de korreldiameter. Dit is niet in overeenstemming met de verwachting op basis van het model van Sellmeijer.

#### Ad 1c

Een derde oorzaak voor het niet vinden van een relatie tussen de korreldiameter en het pipingproces kan zijn dat het andere aspecten in het mechanisme waarvan het pipingmodel uitgaat niet correct is bijvoorbeeld doordat:

Een onbekende zandkarakteristiek is dominant in pipingproces. Het rekenmodel gaat uit van individuele korreleigenschappen. Mogelijk gaat het om de korrel in zijn omgeving. Er zijn in de kijkproeven mechanismen waargenomen, die niet opgenomen zijn in het model. Het lijkt zo te zijn dat er niet altijd individueel korreltransport optreedt. Soms bewegen korrels als groep (vervloeiing). Het is onduidelijk of dit proces invloed heeft op het doorbraakverval.

#### Ad 2

Een andere mogelijkheid is dat de laboratoriumproeven niet representatief zijn. De laboratoriumopstelling betreft een sterke schematisatie van de werkelijkheid.

Bovenstaande aspecten uit een eerste inventarisatie van mogelijke onvolkomenheden in laboratoriumproeven en pipingmodel van Sellmeijer worden in hoofdstuk 5 verder uitgewerkt.

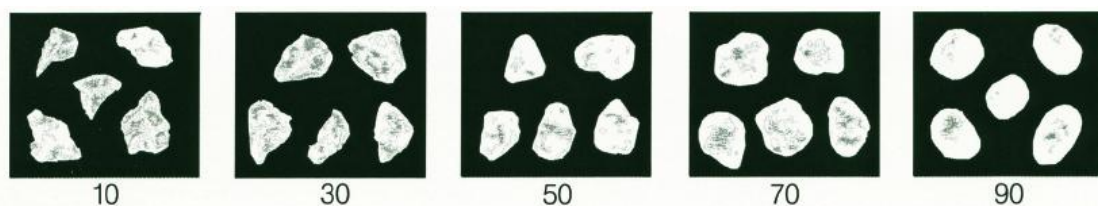
Het wordt in ieder geval aanbevolen verder uit te zoeken waarom resultaten afwijken van de vigerende ideeën.

#### 4.1.3 Korrelvorm

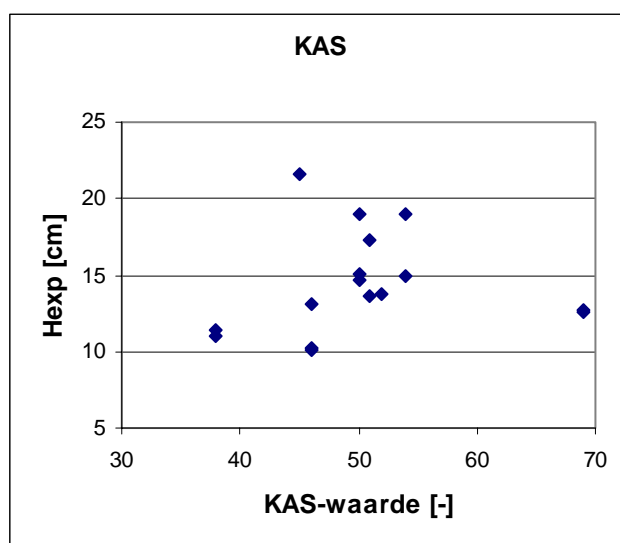
Bij de zandeigenschap korrelvorm is de proevenset beschouwd met zes typen zand, die beproefd zijn bij een relatieve dichtheid van 65 à 75 %. Bij deze dichtheid treedt geen forward erosie op.

Het pipingmodel van Sellmeijer gaat ervan uit dat de korrelvorm invloed heeft op het in bewegen komen van de korrels. De korrelvorm bepaalt de sleepkracht, de kracht die moet worden uitgeoefend om de korrel in beweging te laten rollen. Daarnaast bepaald de korrelvorm hoeveel kracht het langstromende water op de korrel kan uitoefenen (weerstand van de korrel). De parameters die de invloed van de korrelvorm op het pipingproces aangeven zijn als constante in de regel van Sellmeijer opgenomen.

De rondheid van de korrels van de verschillende zanden die in de kleine bak zijn beproefd, is visueel geschat en met een beeldanalyse bepaald. Een beschrijving van dit zogenaamde KAS onderzoek is gegeven in [Kruse, 2008]. In Figuur 4.9 wordt de relatie tussen de KAS waarde en  $\Delta H_{exp}$  gegeven. De KAS-waarde is een indicatie voor de rondheid. Hoe hoger de KAS-waarde hoe ronder de korrel, hoe lager de KAS-waarde hoe hoekiger en elleptisch de korrel. In onderstaande figuur is de relatie tussen KAS-waarde en rondheid weergegeven.

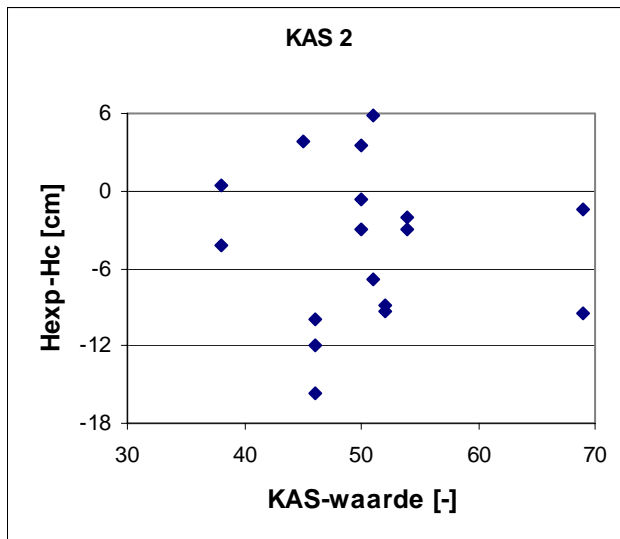


Figuur 4.8 Definitie van KAS-waarde



Figuur 4.9 Relatie korrelvorm en kritiek verval

Uit figuur 4.8 kan geen significant verband tussen  $H_{exp}$  en KAS waarde worden afgeleid. Ook als  $\Delta H_{exp}$  gecorrigeerd wordt voor de invloed van andere eigenschappen kan geen relatie tussen KAS waarde en pipingproces worden afgeleid (zie figuur 4.9).



Figuur 4.10 Relatie korrelvorm, berekend en gemeten kritiek verval

Redenen voor de zwakke relatie tussen  $\Delta H_{exp}$  en korrelvorm kunnen zijn:

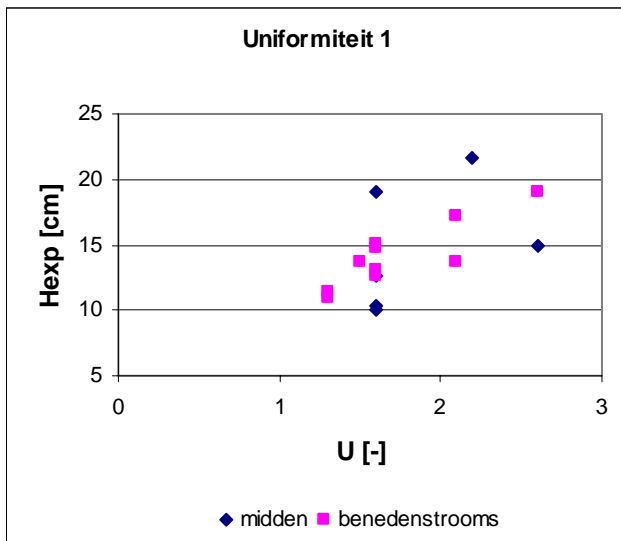
Sleepkracht en weerstand rondom de korrel heffen elkaar mogelijk op. Een hoekige korrel (hoge KAS waarde) haakt beter in het zandpakket, maar ondervindt ook een grotere sleepkracht omdat de weerstand dat het water ondervindt om langs deze korrel te stromen groter is. Een ronde korrel (lage KAS waarde) daarentegen ondervindt door zijn ronde vormen weinig sleepkracht, maar is ook relatief makkelijk los te maken uit zijn omgeving.

In de proeven is waargenomen dat korrels niet alleen door rollen worden getransporteerd, maar ook door andere mechanismen, zoals vloeien en door opname in de stroom. In het model van Sellmeijer is verondersteld dat korrels getransporteerd worden via rollen of translatie. De gedefinieerde rolweerstandshoek geeft de weerstand tegen rollen en translatie aan. In dit licht zou de hoekigheid van de korrel zeker van invloed moeten zijn, aangezien een zand dat meer ellipsoïde van vorm is minder makkelijk rolt dan een zand dat rond is. In de experimenten zijn echter meer transportprocessen opgetreden, zoals het vloeien van zand. Bij dit proces is het goed denkbaar dat de hoekigheid van minder belang is.

Gezien deze redenen en de zeer zwakke relatie tussen korrelvorm en  $\Delta H_{exp}$  wordt geconcludeerd dat er voor de Nederlandse situatie geen redenen zijn om de relatie tussen korrelvorm en  $\Delta H_c$  in de regel van Sellmeijer te wijzigen.

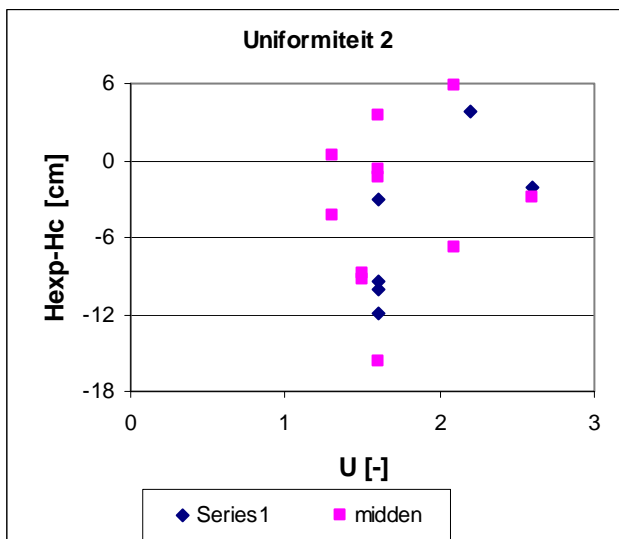
#### 4.1.4 Uniformiteit

De gradatie van het zand wordt uitgedrukt in de uniformiteitscoëfficiënt, gedefinieerd als de  $d_{60}/d_{10}$ . Hoe groter de gradatie in het zand (en dus hoe groter de uniformiteitscoëfficiënt) hoe groter het kritiek verval. Deze relatie kan ook uit Figuur 4.11 worden afgeleid. Opgemerkt wordt dat genoemde relatie sterker is als alleen wordt gekeken naar de proeven waarbij het proces aan de benedenstroomse rand begint.



Figuur 4.11 Relatie uniformiteit en kritiek verval

In Figuur 4.12 staat het verschil tussen het berekende en gemeten kritieke verval uitgezet tegen de uniformiteitscoëfficiënt. Uit de figuur wordt geconcludeerd dat berekende vervallen vaak ver afdigen van de gemeten vervallen.



Figuur 4.12 Relatie Uniformiteit, gemeten en berekend kritiek verval

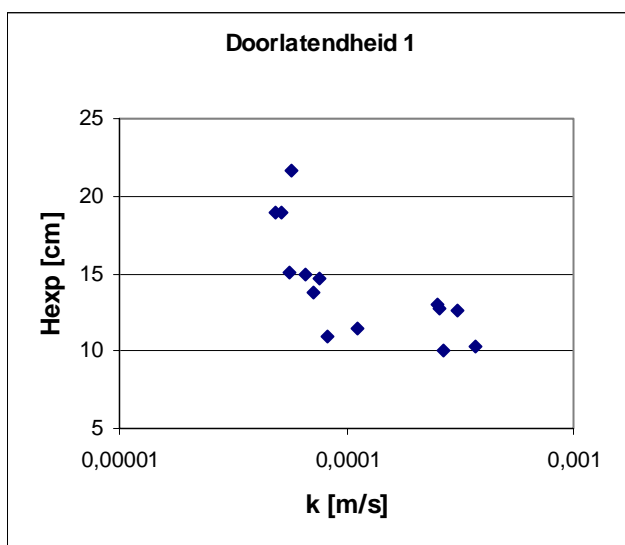
Het verschil tussen proeven en theorie van Sellmeijer is niet afhankelijk van de uniformiteit. Voorzichtig kan geconcludeerd worden dat de theorie van Sellmeijer eenzelfde afhankelijkheid laat zien als in figuur 4.11. Opgemerkt wordt dat de ruis in de theorie van Sellmeijer groot is. Uit voorgaande vergelijkingen blijkt dat deze ruis voor een deel wordt veroorzaakt door de proeven met zanden met grote  $d_{70}$ .

#### 4.1.5 Doorlatendheid

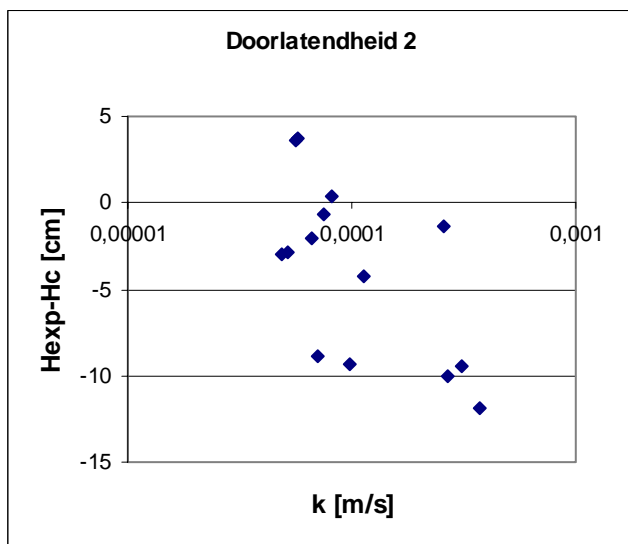
De doorlatendheid is een afgeleide parameter. De doorlatendheid heeft voor veel Nederlandse zanden een goede relatie met de korreldiameter. Hoe groter de korreldiameter, hoe groter de doorlatendheid.

Hoe lager de doorlatendheid hoe hoger  $\Delta H_c$ . Deze relatie kan ook uit figuur 4.13 worden afgeleid.

Uit figuur 4.14 volgt dat voor grote doorlatendheden  $\Delta H_c$  hoger is dan  $\Delta H_{exp}$ . Dit komt doordat het hier zanden met een hoge  $d_{70}$  betreft (zie paragraaf 4.1.2).



Figuur 4.13 Relatie doorlatendheid en gemeten kritisch verval



Figuur 4.14 Relatie doorlatendheid, gemeten en berekend kritisch verval

## 4.2 Waterspanningen

Naast de kijkproeven is ook een serie proeven uitgevoerd waarbij de waterspanningen op 40 locaties in de bovenplaat zijn gemeten. Inzicht in de relatie tussen waterspanningen en pipingproces is om twee redenen belangrijk. Ten eerste kunnen de resultaten worden gebruikt om meer kennis over het pipingmechanisme te genereren. Ten tweede geven de

proeven informatie of het pipingproces door het meten van waterspanningen kan worden gemonitord. Dit is van belang voor de geplande grootschalige experimenten waarbij het zand niet is afgedekt met een ondoorzichtige perspexplaat maar met een ondoorzichtige kleilaag.

In onderstaande figuur is de configuratie van de waterspanningsmeters weergegeven. In totaal zijn er 6 rijen met waterspanningsmeters aangebracht in de plaat met in totaal 40 opnemers. De rijen zijn van benedenstrooms naar bovenstrooms genummerd als 1 t/m 6.



Figuur 4.15 Aangebrachte opnemers in de plaat

In de proeven met waterspanningsmeters zijn verschillende van de eerder beschreven processen opgetreden, waaronder craquelé, interne kanaalvorming, forward erosie, backward erosie en ruimen.

Of en hoe kanaaltjes terug te zien zijn in de waterspanningen hangt van een aantal factoren af, met name de grootte van het kanaaltjes en of de erosie forward of backward is. Grofweg kan de invloed op de waterspanningen verdeeld worden in vier groepen:

- > Kleine kanaaltjes (ca. kleiner dan 0.5 cm)
- > Terugschrijdende kanaaltjes (kanalen vanaf 0.5 cm)
- > Forward erosie en interne erosie (kanalen vanaf 0.5 cm)
- > Ruimen

Hier zal in onderstaande paragrafen in meer detail op ingegaan worden.

Of de invloed van kanaaltjes zichtbaar is in de waterspanningsmeters kan op verschillende manieren bepaald worden. Ten eerste kan gekeken worden naar de absolute waarden van

de waterspanningen. Er is echter een fors verschil aanwezig tussen de waterspanningsmeters in verband met het aangebrachte verval en kleine afwijkingen. In een contourplot kunnen de kleine spanningsverschillen ten gevolge van kanaaltjes op deze wijze niet goed weergegeven worden. In een grafiek met waterspanningen tegen de tijd zijn wel verschillen te zien, maar is het lastig om te bepalen waar er veranderingen plaatsvinden.

Een betere benadering is om de verandering (in de ruimte en de tijd) van waterspanning ten opzichte van een bepaalde referentie te beschouwen. Voor de relatieve waarden zijn de waterspanningen afgetrokken van een gemiddelde van de waterspanningen bij hetzelfde aangebrachte verval, waarbij nog geen kanaalvorming is opgetreden. De verschillen die optreden ten gevolge van de kanaalvorming worden daardoor duidelijker en kunnen in een contourplot worden weergegeven.

Daarnaast is het verhang is berekend over het gemiddelde van rijen. Bijvoorbeeld, van rij 1, bestaande uit opnemers 1 t/m 8, wordt het gemiddelde genomen en het verhang wordt berekend tussen rij 1 en rij 2.

Tenslotte kan de verandering in debiet worden beschouwd als aanvullende informatie.

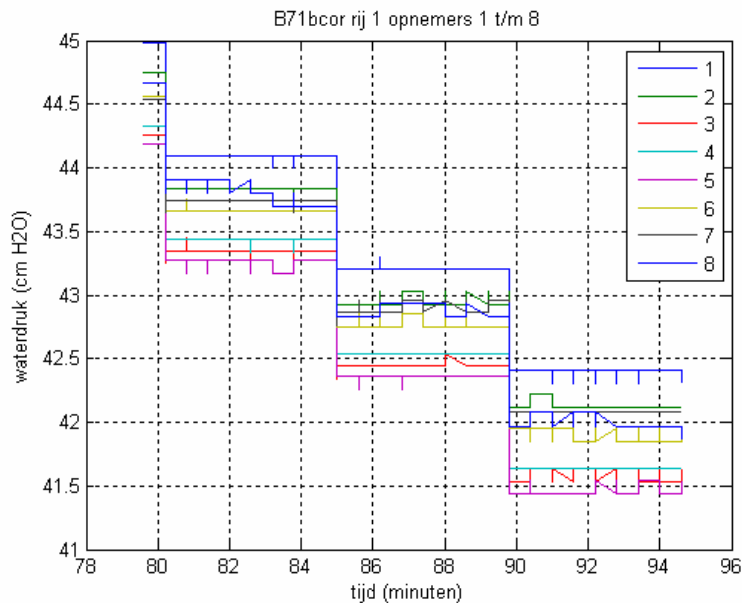
#### 4.2.1 Kleine kanaaltjes

Onder de kleine kanaaltjes vallen fenomenen als craquelé en interne erosiekanaaltjes. In proef B71b is craquelé opgetreden. De resultaten van deze proef zijn daarom gebruikt om de invloed van dit type kanaaltjes weer te geven.

In onderstaande grafiek zijn de waterspanningen voor rij 1 (opnemers 1 t/m 8) tegen de tijd uitgezet voor de periode dat craquelé optrad bij opnemers 4, 5 en 6. Er zijn verschillende stappen van verhoging van het verval te zien, resulterend in een afname van de waterspanning (verval wordt aangebracht d.m.v. verlaging van het uitstroompunt).

Er is geen verschil te zien in opnemers 4, 5 en 6 dat niet optreedt bij de overige opnemers. Ook bij de relatieve waarden en in het verhang zijn geen veranderingen te zien. Het debiet neemt niet toe.





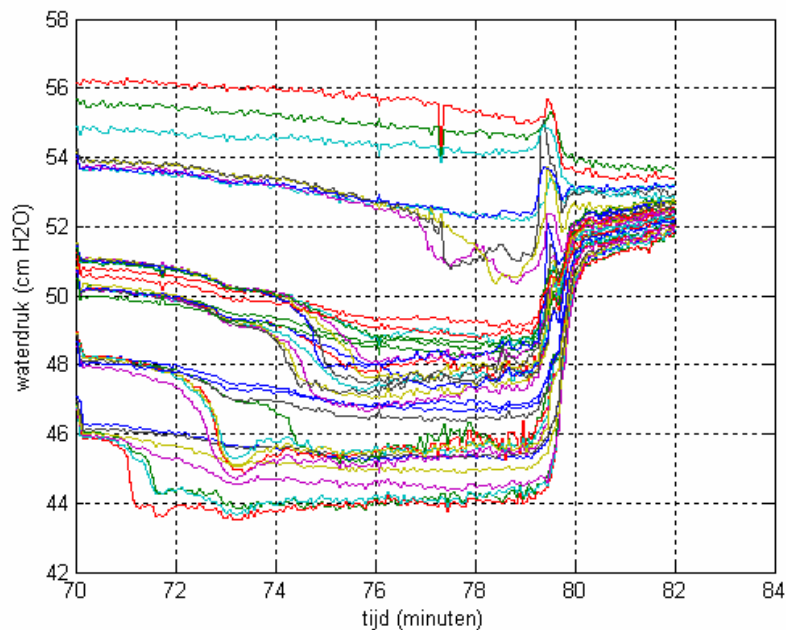
Figuur 4.16 Waterspanningen in rij 1 (proef B71b)

Uit deze informatie wordt geconcludeerd dat kleine kanaaltjes niet zichtbaar zijn in de waterspanningsmeters. De invloed van deze kanaaltjes op de waterspanningen ligt in de ordegrootte van 1/10e millimeter waterkolom, waardoor deze verschillen even groot zijn als de ruis in de meetdata.

#### 4.2.2 Terugschrijdende erosie

Het terugschrijdende proces is in meerdere proeven waargenomen, proef B74b is hier als voorbeeld genomen. Van deze proef zijn de absolute waterdruk, de verandering in waterdruk en het verhang beschouwd (tijdens kanaalvorming).

In onderstaande grafiek is de absolute waterdruk in alle waterspanningsmeters uitgezet tegen de tijd (alleen de laatste stap van het aanbrengen van verval is weergegeven). Het verschil tussen de verschillende rijen opnemers is duidelijk zichtbaar, naarmate de opnemers verder bovenstrooms zijn is de waterdruk hoger. Bij proef B74b zijn vanaf 71 minuten duidelijk veranderingen in de absolute waterspanningen waargenomen. Deze treden eerst op bij de opnemers die aan de benedenstroomse zijde geplaatst zijn en later bij de opnemers die verder bovenstrooms staan. De waterspanningen nemen ongeveer 2 tot 3 cm waterkolom af. Opvallend is dat alle waterspanningsmeters een afname vertonen, alhoewel niet alle even veel en ook is de afname niet overal even abrupt.



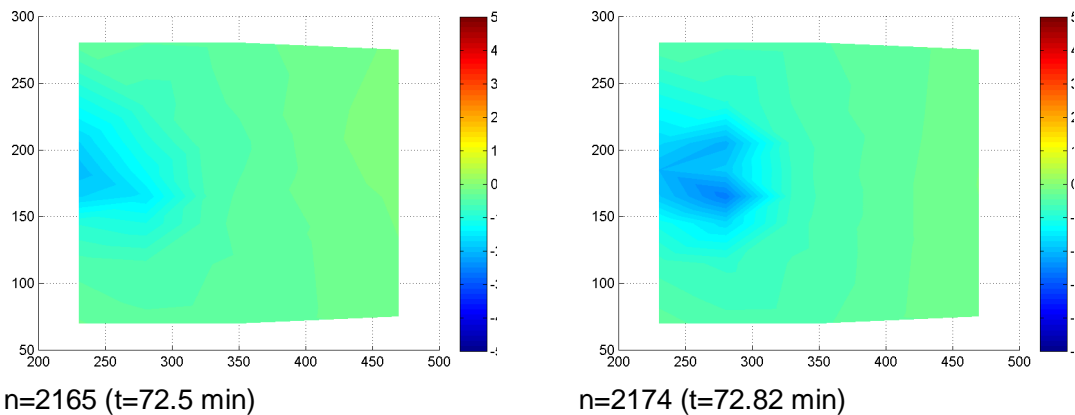
Figuur 4.17 Waterdruk gedurende kanaalvorming (proef B74b)

De afname van waterspanning komt overeen met de periode van kanaalvorming. Uit het feit dat alle opnemers een (geringe) afname vertonen kan geconcludeerd worden dat de invloed van het kanaal over de gehele breedte merkbaar is.

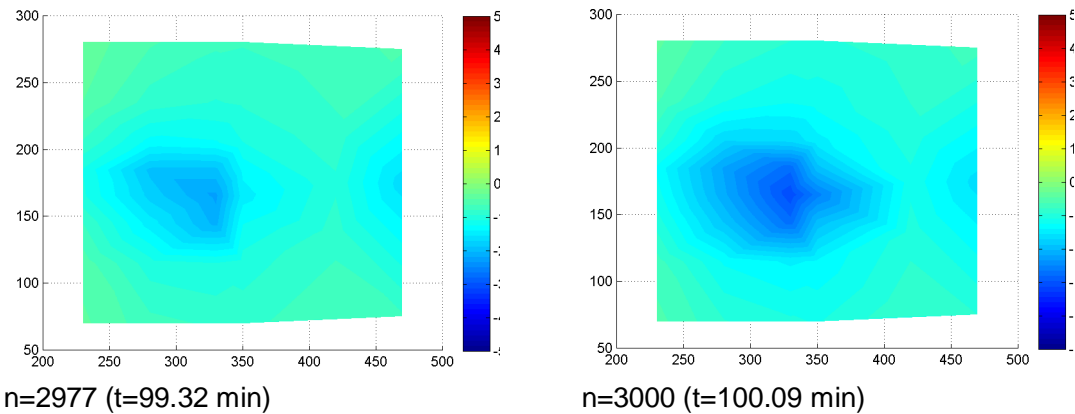
Het feit dat een afname gemeten wordt geeft aan dat de doorlatendheid van het kanaal groter is dan zijn omgeving.

Naast de absolute waterdruk is ook naar de verandering in waterdruk t.g.v. kanaalvorming gekeken. De waarden van alle waterspanningsmeters zijn gecorrigeerd voor de initiële waterdruk (voor kanaalvorming), waardoor verschillen goed zichtbaar zijn. Deze relatieve waterdruk is uitgezet in contourplots en geven daarmee een goed beeld van de ruimtelijke spreiding van de verandering in druk. Om een indruk te geven van verandering van spanningen in de tijd zijn van meerdere momenten contourplots gemaakt. Een contourplot is dus als het ware een bovenaanzicht van het zandpakket, met rechts de bovenstroomse zijde en links de benedenstroomse zijde.

In de contourplots met relatieve waarden is een lokale verlaging van de waterdruk te zien. Er ontstaan twee gebieden waar de waterdruk lager is dan de omgeving. Later in de tijd is de verlaging van waterspanning niet meer aan de benedenstroomse zijde te zien, maar alleen in het midden van de bak.



Figuur 4.18                      *Contourplots van waterspanningsverschillen tijdens kanaalvorming (proef B74b)*

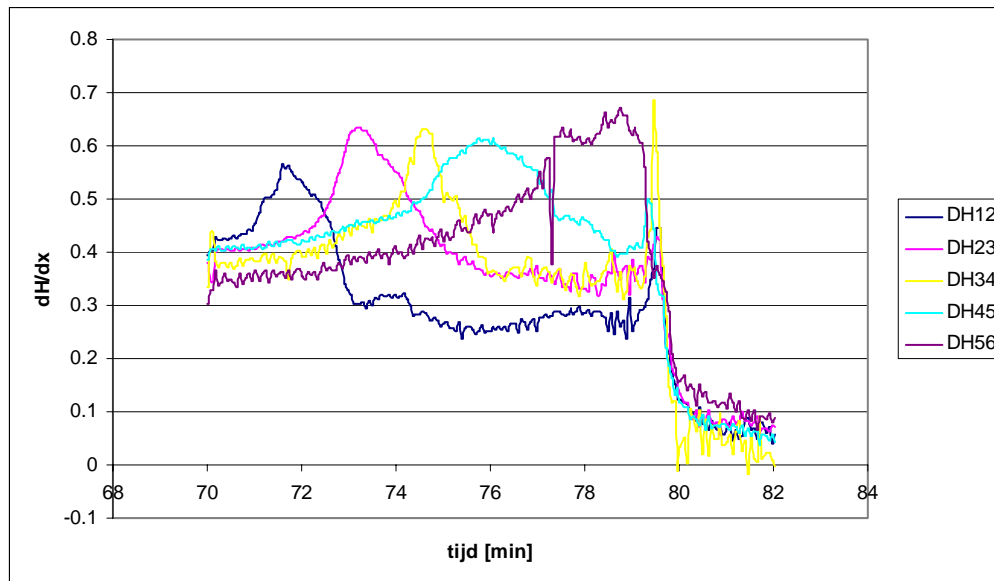


Figuur 4.19                      *Contourplots van waterspanningsverschillen tijdens doorgaand zandtransport (proef B73b)*

Wanneer de visuele waarnemingen worden vergeleken met de waterspanningen, blijken de lokale verlagingen overeen te komen met de locatie van het terugschrijdende kanaal.

Het feit dat de waterspanningsverlaging na verloop van tijd alleen nog aan de groeizijde van het kanaal te zien is, geeft aan dat er aan de benedenstroomse zijde van het kanaal geen instroom meer is vanuit de zijwanden.

Tenslotte is het verhang berekend. Om het overzicht te bewaren is het verhang tussen twee rijen berekend en niet tussen twee opnemers. Hierbij is uitgegaan van de gemiddelde absolute waterdruk per rij. Het verloop van het verhang in de tijd is weergegeven in Figuur 4.20. In deze grafiek is te zien dat opeenvolgend in de tijd vindt er een verhoging en verlaging van het verhang plaats in iedere rij. In de grafiek is duidelijk te zien dat deze verhoging opeenvolgend de rijen 1 t/m 6 bereikt, van benedenstrooms naar bovenstrooms. Vervolgens neemt het verhang af naar een waarde lager dan de initiële waarde.



Figuur 4.20 Gemiddeld verhang gedurende kanaalvorming (proef B74b)

Wanneer deze waarnemingen met de foto's worden vergeleken is het duidelijk dat het vormen van het kanaal een verhoging van het verval veroorzaakt gevolgd door een verlaging. De verhoging van het verhang vindt plaats bij de kop van het kanaal, veroorzaakt door een verhoogde toestroom van water. De verlaging van het verval na de piek duidt erop dat de weerstand van het kanaal kleiner is dan de omgeving.

Het debiet neemt pas sterk toe na het ruimen (na 80 minuten).

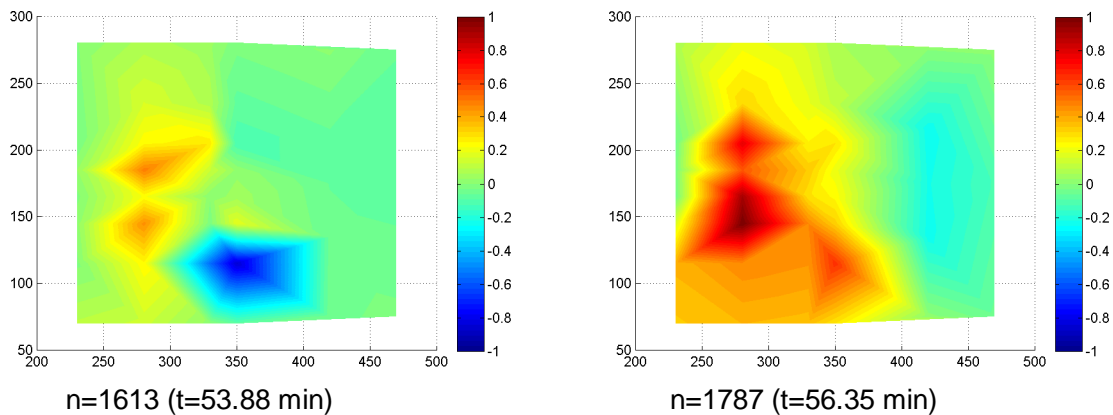
Samengevat kan gesteld worden dat terugschrijdende kanaaltjes, welke via vertakkingen direct doorgroeien naar de bovenstroomse zijde zijn goed zichtbaar in de metingen, zowel in de absolute waarden als in relatieve waarden en in het verhang.

#### 4.2.3 Forward erosie en interne erosie (kanalen vanaf 0.5 cm)

In een van de proeven (B75b) is forward erosie opgetreden, zowel in kleine kanaaltjes als op grotere schaal. In deze proef is ook naar de verandering van waterspanningen gekeken.

Net als bij de terugschrijdende erosie is de verandering van waterdruk ten opzichte van een beginsituatie, waarbij het verval aanwezig was, maar geen kanaalvorming is opgetreden geplot in een contourplot, om de spreiding van verandering goed weer te geven.

Naast lokale verlagingen, die eerder geobserveerd waren bij de terugschrijdende erosie, zijn in deze proef ook lokale verhogingen van waterspanningen aanwezig (rode gebieden).



Figuur 4.21                      Contourplots van verschil in waterdruk t.o.v. 50 min

Bij het vergelijken van de visuele waarnemingen met de waterspanningen is geconcludeerd dat forward erosie resulteert in lokale toename van waterdruk, terwijl terugschrijdende erosie resulteert in een lokale afname van waterdruk. Dit kan verklaard worden doordat de weerstand in het kanaaltje lager is dan de omgeving, waardoor de hoge waterdruk van de bovenstroomse zijde zich verder verspreidt in het kanaal dan in de omgeving.

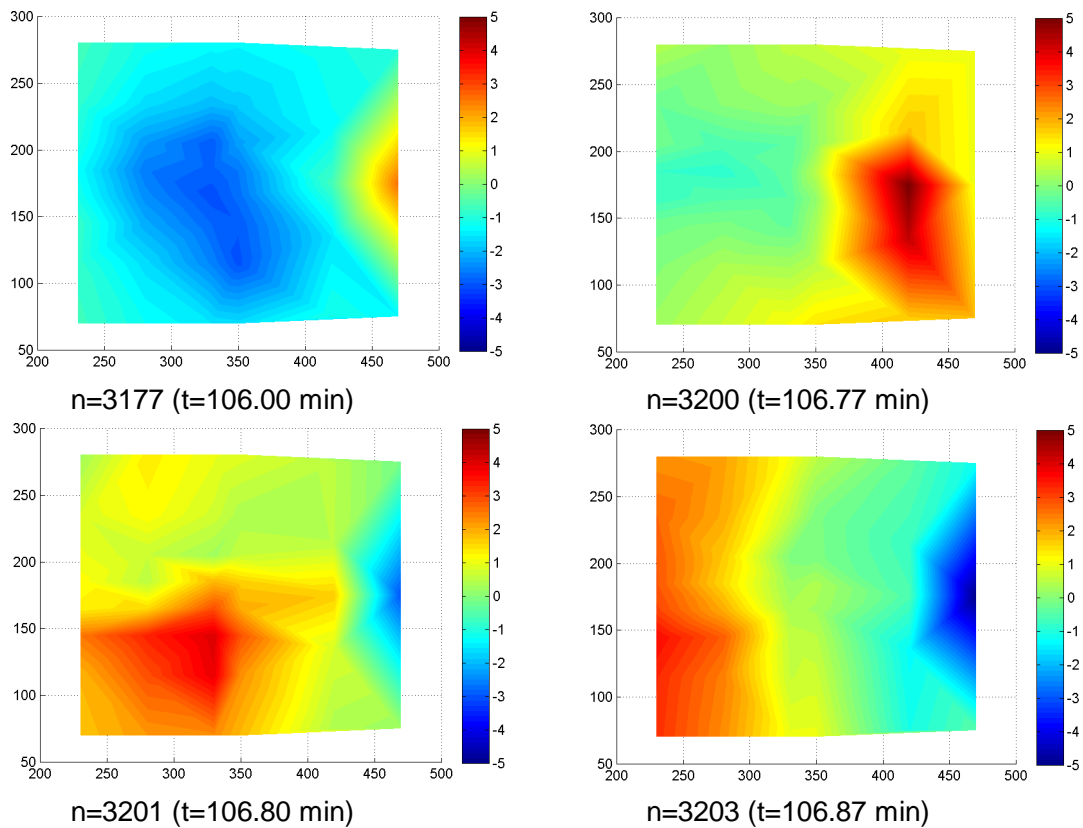
#### 4.2.4 Ruimen

Het ruimen is een forward gericht proces, dat aan het einde van iedere proef optreedt. Het ruimen treedt zowel op na een forward gericht proces als na een terugschrijdend proces. De invloed van beide ruimprocessen op de waterspanningen wordt hier geïllustreerd.

In proef B73b is een terugschrijdend proces waargenomen. Nadat het kanaal de bovenstroomse zijde bereikt heeft, begint het ruimproces (visuele waarnemingen).

In de absolute waterdrukken is te zien dat bij sommige waterspanningsmeters een piek te zien is, in andere is dit niet te zien. Alle waterspanningsopnemers verlagen of verhogen uiteindelijk naar min of meer dezelfde waarde (zie Figuur 4.17). De waterspanningen nemen bovenstrooms af en benedenstrooms toe. Het verval neemt hierbij af tot een zeer lage waarde (Figuur 4.20).

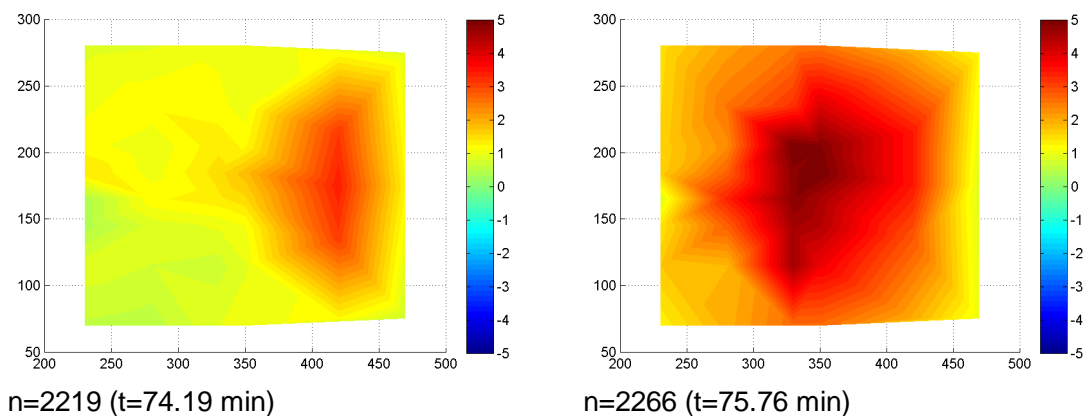
In de contourplots, die weer gemaakt zijn van de relatieve waterspanningen (verandering t.o.v. waterspanning voor kanaalvorming), zijn in het begin lokale verlagingen te zien. Na verloop van tijd ontstaat een verhoging van de waterspanning aan de bovenstroomse zijde. Deze lokale verhoging verschuift binnen enkele seconden richting de benedenstroomse zijde.

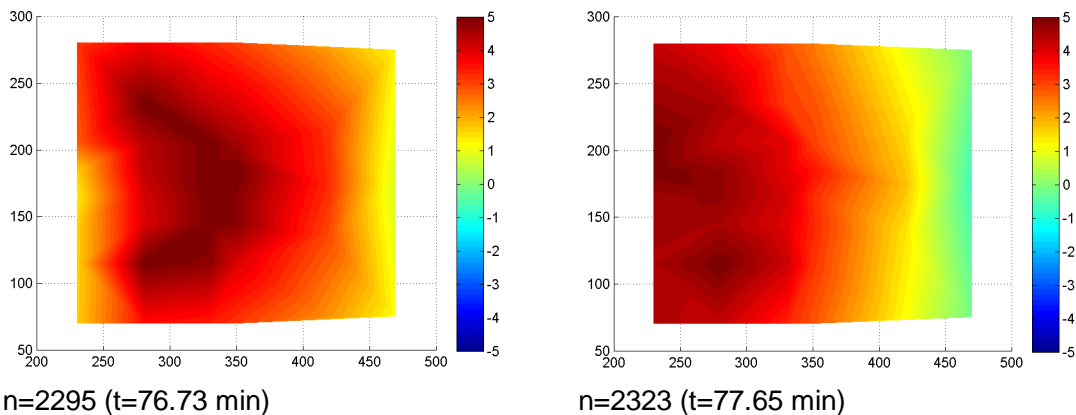


Figuur 4.22 Contourplots van waterspanningsverschillen tijdens ruimen (proef B73b)

Het debiet vertoont een sterke toename tijdens het proces van ruimen.

Bij een ruimproces dat voorafgegaan wordt door een terugschrijdend proces wordt een min of meer hetzelfde patroon waargenomen. De contourplots van proef B75b, tijdens de periode dat ruimen is waargenomen, zijn weergegeven in onderstaande figuur.





Figuur 4.23                      Contourplots van verschil in waterdruk, forward erosion gaat over in ruimen (B75b)

De waargenomen verschijnselen kunnen als volgt verklaard worden:

De sterke verlaging van het verval over het zand wordt veroorzaakt doordat de weerstand van het systeem (filter, slangen, kranen) dominant wordt bij grote doorlatendheid van het kanaal

De verhoging van druk duidt op een lage weerstand vanaf de bovenstroomse zijde. Hierdoor kan de bovenstroomse hoge waterdruk in het kanaal verder verspreid worden ten opzichte van de omgeving.

Samengevat is het proces van ruimen goed zichtbaar in zowel de absolute waterspanningen, de relatieve waterspanningen, het verhang en het debiet. Het zorgt voor een verhoogde waterdruk die doorgevoerd wordt naar de benedenstroomse zijde. Aan het einde van het proces daalt het verval over het zandpakket.

### 4.3 Samenvatting en conclusies

Doelstellingen van het uitvoeren en analyseren van kleine schaalproeven zijn:

- > het verkrijgen van inzicht in de processen van kanaalvorming die uiteindelijk tot bezwijken van een waterkering leiden
- > en het geven van handvatten voor nadere invulling van het SBW pipingonderzoek in 2009.

In paragraaf 4.1 is de relatie tussen verschillende zandeigenschappen en het pipingproces beschreven zoals deze bij de laboratoriumproeven zijn waargenomen.

Tussen de pakking en het pipingproces bestaat een sterke relatie. Hoe hoger de relatieve dichtheid hoe hoger  $\Delta H_{exp}$ . Dit betekent dat hoe losser de pakking is, hoe sneller het pipingproces optreedt. Daarnaast volgt uit de kleinschalige proeven dat bij een losse pakking een ander pipingproces wordt waargenomen. Bij een losse pakking begint het pipingproces vaak aan de bovenstroomse zijde. Bij een vaste pakking begint het proces meestal aan de benedenstroomse zijde.

Tussen korrelgrootte en pipingproces wordt in de kleine laboratoriumproeven een relatie waargenomen. Deze relatie is anders dan in de huidige pipingmodellen wordt aangenomen. Bij voor Nederlandse omstandigheden relatief grote korreldiameter begint

het pipingproces relatief vaak niet aan de benedenstroomse zijde. Aanbevolen wordt om uit te zoeken waarom de proeven afwijken van de bestaande modellen.

Er wordt geen relatie waargenomen tussen pipingproces, uniformiteit en hoekigheid van het zand. Deze eigenschappen kunnen in proeven niet onafhankelijk worden gevarieerd. Buiten een indirecte invloed van de uniformiteit in de doorlatendheid zijn deze eigenschappen niet als variabele opgenomen in de huidige pipingmodellen.

In paragraaf 4.2 is op de mogelijkheid om het pipingproces te monitoren aan de hand van waterspanningsmetingen. Geconcludeerd kan worden dat het meten van waterspanningen inzicht geeft in het pipingmechanisme. Dit inzicht kan worden gebruikt voor hervalidatie van de regel van Sellmeijer. Hierop zal in het volgende hoofdstuk worden ingegaan.

Geconcludeerd is verder dat bij grootschalige proeven, waarbij het zandpakket is afgedekt door een onzichtbare kleilaag, het pipingproces met waterspanningsmeters kan worden gevolgd. De vorming van kleine interne kanaaltjes kan niet worden waargenomen met waterspanningsmeters. Het proces van terugschrijdende kanaaltjes, forward erosion en ruimen daarentegen is goed zichtbaar zowel door het meten van absolute waterspanningen, relatieve waterspanningen, het verhang en het debiet.

Mogelijk kan het meten van waterspanningen worden gebruikt voor monitoring van het pipingmechanisme in de praktijk.



## 5 Kwantitatieve analyse

In hoofdstuk 3 zijn de waargenomen verschijnselen en processen beschreven. In hoofdstuk 4 is de relatie tussen deze processen en karakteristieke zandeigenschappen en waterspanningen beschreven. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen waarnemingen en mogelijke verklaringen. Om te komen tot een hervalidatie van de rekenregel van Sellmeijer wordt in dit hoofdstuk een eerste analyse van de beschreven waarnemingen en verklaringen verder geanalyseerd. De analyse dient als input voor het vervolg van het SBW piping project in 2009.

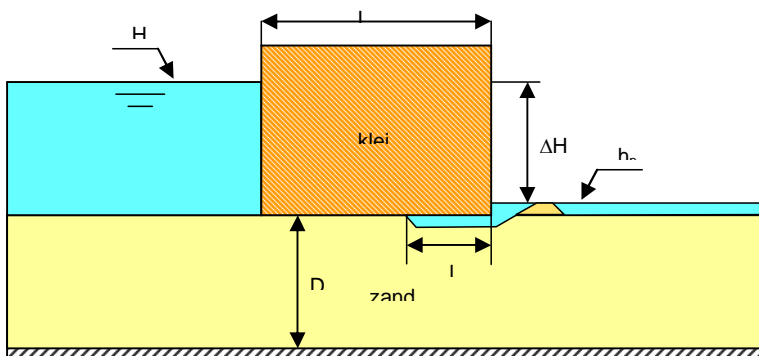
Hiertoe is dit hoofdstuk verdeeld in verschillende onderdelen. Eerst zal in paragraaf 5.1 het model van Sellmeijer worden beschreven [Sellmeijer, 1988], om het model en de aannamen in dit model duidelijk te maken. Vervolgens wordt ingegaan op verschillende fasen in het ontstaan van piping:

- Het begin van bewegen en het ontstaan van kanaalvorming (paragraaf 5.3)
- Kanaalvorming leidend tot doorbraak (paragraaf 5.4)
- Verval bij doorbraak, kritiek verval en schalingseffecten (paragraaf 5,5)

### 5.1 Model van Sellmeijer

Op dit moment is het model van Sellmeijer de meest geavanceerde methode om het optreden van piping vast te stellen. Het model van Sellmeijer beschrijft de situatie tot progressieve erosie optreedt. Het vormen van diepere kanalen ten gevolge van progressieve erosie is er niet in opgenomen.

De eerste aanpak, die dateert van eind jaren tachtig van de vorige eeuw, is gebaseerd op analytische grondwaterstromingsberekeningen bij een dijk op homogene zandlaag, de zogenaamde standaardconfiguratie. Deze standaardconfiguratie is geschetst in .De resultaten zijn dan ook alleen maar geldig voor deze geometrie. Hiervoor is een vereenvoudigde formule ontwikkeld die aangeduid wordt als de rekenregel van Sellmeijer. De vorm van de formule lijkt op de formule van Bligh. Het verschil is dat de invloed van een aantal kenmerken van de watervoerende zandlaag zoals bijvoorbeeld de doorlatendheid meegenomen wordt via specifieke kwantitatieve parameters in plaats van de kwalitatieve kenmerken die bij de regel van Bligh een rol spelen.



Figuur 5.1 Modelleringsrekenmodel Sellmeijer

- > grondwaterstroming door het zand (Darcy).
- > waterstroming door het erosiekanaal. berekend met Navier-Stokes vergelijkingen (gelijkend op Poiseuille)

Zij zijn gekoppeld door de voorwaarden van continuïteit van debiet en stijghoogte.

Voorts is nog een voorwaarde vereist om het kritieke verval over de constructie vast te leggen. Deze volgt uit de toestand van grensevenwicht van de korrels op de bodem van het erosiekanaal.

Het maximale verval over de constructie wordt berekend als de zandkorrels nog net in evenwicht zijn. Dit verval is afhankelijk van de verhouding  $l/L$ , tussen de lengte van het pipe kanaaltje en de lengte van de constructie, de doorlatendheid van het zand, de sleepkracht coëfficiënt (White coëfficiënt), de korreldiameter en de rolweerstand van de zandkorrels. Het verval bij de grootste verhouding van  $l/L$  waarbij nog net evenwicht wordt gevonden is het kritieke verval. Als het verval groter wordt dan het kritieke verval zal het pipe kanaaltje progressief groeien.

Het pipingmodel van Sellmeijer is gekalibreerd op enkele in de Deltagoot van WLJ Delft Hydraulics uitgevoerde proeven.

Met dit analytische model zijn door Sellmeijer voor een groot aantal combinaties van verschillende parameters berekeningen van het kritieke verval uitgevoerd. Samen met de validatieproeven in de Deltagoot is een benaderende analytische formule afgeleid, de rekenregel van Selmeijer. Deze rekenregel kan voor de standaardconfiguratie worden toegepast. Voor meer complexe geometrieën kan een grondwaterstromingsmodel gebruikt worden, waarin het model van Sellmeijer is verwerkt.

De rekenregel van Sellmeijer is als volgt:

$$\Delta H_c = \alpha c (\gamma_p / \gamma_w) \tan(\theta) (0,68 - 0,10 \ln(c)) L \quad (5.1)$$

met:

$$\alpha = \left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{0,28}{\left(\frac{D}{L}\right)^{2,8} - 1}} \quad (5.2)$$

en:

$$c = \eta d_{70} \{1 / (\kappa L)\}^{1/3} \quad (5.3)$$

Waarin:

$\Delta H_c$  = kritieke verval over de waterkering

$\gamma_p$  = (schijnbaar) volumegewicht van de zandkorrels onder water (17 kN/m<sup>3</sup>)

$\gamma_w$  = volumegewicht van water [kN/m<sup>3</sup>]

$\theta$  = rolweerstandshoek van de zandkorrels [°]

$\eta$  = coëfficiënt van White [-]

$\kappa$  = intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag [m<sup>2</sup>]

$d_{70}$  = 70-percentielwaarde van de korrelverdeling [m]

$D$  = dikte van de zandlaag [m]

$L$  = lengte van de kwelweg (horizontaal gemeten) [m]

De grondwaterstroming in het model is berekend volgens Darcy. De intrinsieke doorlatendheid van het zand wordt hier als belangrijkste zandkarakteristiek ingevoerd.

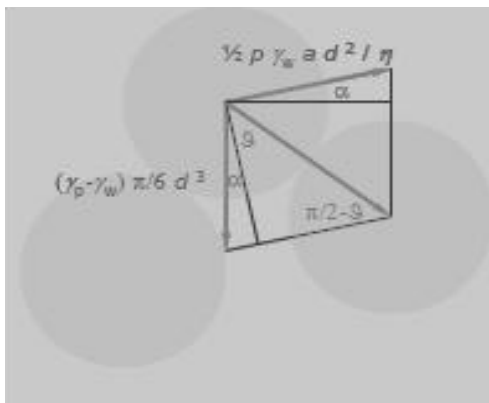
Het model van Sellmeijer is een 2D-model, waarbij het kanaal als oneindig brede spleet wordt gemodelleerd. De aanname van een spleet is gebaseerd op het idee dat er veel verschillende vertakkingen van het kanaal plaatsvinden, en dat er verschillende punten zijn waar het kanaal zou kunnen starten.

Het model gaat uit van korrelevenwicht van de zandkorrels in het bed van het kanaal en berekent het verval waarbij korrels nog juist in evenwicht zijn. Het model is gebaseerd op individueel korreltransport. Hierin is verondersteld dat de  $d_{70}$  van een zand maatgevend is voor het transport. De korrels worden dus niet gelijk van grootte verondersteld, maar de uniformiteit wordt niet beschouwd in het model. Tevens wordt verondersteld dat de korrels rond zijn. Met behulp van de rolweerstandshoek kunnen aanpassingen gemaakt worden om grotere weerstand in te bouwen, zoals ten gevolge van korrelvorm.

Het krachtenevenwicht op de korrel wordt bepaald door vier krachten:

- > De zwaartekracht op de korrel en de verticale stromingsgradiënt (verticale krachten)
- > Sleepkracht ten gevolge van stroming en de horizontale gradiënt (horizontale krachten)

Voordat deze krachten tot beweging kunnen leiden is een rollende beweging nodig of een verplaatsing, omdat korrels omringd worden door andere korrels, die voor weerstand zorgen.



Figuur 5.2 Krachtenevenwicht in het model van Sellmeijer

In de berekening van dit krachtenevenwicht zijn de volgende parameters van belang: volumegewichten van de korrel, de  $d_{70}$  (als maatgevende korreldiameter), de rolweerstandshoek en de coëfficiënt van White.

## 5.2 Begin van bewegen, kanaalvorming

Het begin van bewegen wordt in de beschrijving van Sellmeijer wordt erosie beschreven als een terugschrijdend proces van migratie door individueel rollende korrels. In de proeven is echter waargenomen dat ook andere transportvormen een rol kunnen spelen.

Voor deze analyse wordt onderscheid gemaakt tussen de proeven uitgevoerd op zand met een lage relatieve dichtheid (<50%) en proeven uitgevoerd op zand met een hoge relatieve dichtheid (>50%).

### 5.2.1 Begin van bewegen bij proeven met lage relatieve dichtheid

Uit de proeven met een lage relatieve dichtheid blijkt dat kanalen niet aan de benedenstroomse zijde beginnen. Bij zeer losgepakt zand is kanaalvorming aan de bovenstroomse zijde waargenomen. De vraag is of dit mechanisme in werkelijkheid, bij hogere korrelspanningen, ook optreedt. Bij hogere korrelspanningen worden korrels immers sterker tegen elkaar gedrukt waardoor deze moeilijker uit het korrelskelet kunnen worden genomen. Omdat zand bij bovenstroomse of interne kanaalvorming niet door de kanaaltjes kan worden afgevoerd groeit het kanaal erg langzaam (proces van forward erosion). Als een kanaaltje echter aan de benedenstroomse zijde een uittreepunt vindt, is er direct sprake van een doorgaande pipe waarna minder tijd is om maatregelen te nemen dan bij benedenstroomse kanaalvorming het geval is.

Dit proces noemen we displacement piping, omdat een kanaal ontstaat door het verplaatsen van zandkorrels in het zandpakket.

Nader onderzoek is nodig om te bepalen onder welke omstandigheden displacement piping optreedt en wanneer dit mechanisme leidt tot een doorgaande pipe.

### 5.2.2 Begin van bewegen bij proeven met hoge relatieve dichtheid

Het begin van bewegen bij proeven met hoge relatieve dichtheid is overwegend terugschrijdend. Bij het vormen van een kanaal wordt vooral transport van groepen korrels of bezwijkende zandmassieven waargenomen.

Er lijkt sprake te zijn van vloeïing van zand, waardoor groepen korrels in zijn geheel worden afgevoerd. Uit de proeven met de waterspanningsmetingen (paragraaf 4.2) blijkt inderdaad dat aan het begin van de kanaaltjes (dus helemaal aan de bovenstroomse kant) een onderdruk in het kanaaltje is t.o.v. de omgeving, waardoor er vrij grote verhangen in het zand optreden. Op enige afstand van dit beginpunt is de druk in het kanaal gelijk aan die van het omringende zand. Er stroomt net zoveel water naar het kanaal toe tot die druk gelijk is. Bij een klein kanaaltje is dat relatief snel het geval.

Dit is tevens gezien in de proeven met kunstwerken (Van der Ham, 2008). In proeven met een richel onder de perspexplaat, wordt ruimte die benedenstrooms van de richel ontstaat door zandafvoer door een benedenstrooms kanaaltje gevuld met zand. Het vullen is alleen waar te nemen omdat die ruimte kennelijk steeds opgevuld wordt en niet door het zien bewegen van zandkorrels; er vloeit kennelijk zand naar toe. Onderdruk rondom kanaaltjes kan de oorzaak zijn van deze vloeïingen.

Hoewel het proces van erosie door Sellmeijer wordt beschreven als migratie van individuele korrels, wordt in het model uitgegaan van een grensevenwicht, waarbij geen transport optreedt. Het is de vraag in hoeverre de waargenomen transportvormen leiden tot andere (en mogelijk meer realistische) grensevenwichtdefinities. Het grensevenwicht van Sellmeijer bestaat uit de krachten die een omwenteling of translatie veroorzaken van de korrels in het bed in het kanaal. Het krachtenevenwicht aan de kop van het kanaal wordt niet beschouwd. Het is op dit moment onduidelijk of het krachtenevenwicht van het kanaalbed of het bezwijken van de kop van het kanaal maatgevend is.

De waargenomen transportvormen hoeven dus niet in tegenspraak te zijn met het model van Sellmeijer, maar bevestigen het model ook niet.

Indien dit proces van vloeïngen optreedt bij een sloot kan een vloeïing van grotere omvang optreden beginnend aan de uittreezijde. Hierdoor kan water en zand en water als verweekte massa gaan stromen of afschuiven. Op kleine schaal is dit proces waargenomen bij de kleine laboratoriumproeven, wat in dit rapport beschreven onder taludinstabiliteit.

Een nadere bureaustudie is nodig om na te gaan onder welke omstandigheden zand naar een open ruimte, of naar een niet open, maar weinig steun biedende ruimte kan gaan vloeien. De bureaustudie dient eventueel ondersteund te worden met laboratoriumproeven.

### 5.3 Kanaalvorming, leidend tot doorbraak

Tijdens de uitvoering van kleine schaal proeven vond geen doorgaande erosie van het kanaal plaats nadat doorgaande kanaaltjes waren ontstaan. Reden hiervoor is dat de weerstand van het systeem dominant is ten opzichte van de weerstand in het kanaal (Knoeff, 2008).

De vraag is onder welke omstandigheden kleine kanaaltjes tot doorgaande kanalen met catastrofale gevolgen kunnen uitgroeien. Sellmeijer heeft zich niet bezig gehouden met de progressieve erosie van een kanaal, nadat initieel een doorgaand kanaaltje is ontstaan. Hij heeft uitsluitend gekeken naar terugschrijdende uitbreiding van een spleet, om daarbij een grensevenwicht te zoeken waar die uitbreiding stopt. Bij doorgaande erosie zullen andere verschijnselen optreden, die niet beschreven zijn door Sellmeijer, maar die ook niet haaks staan op het model van Sellmeijer.

Een belangrijke consequentie van de aannamen in het model van Sellmeijer is het geleidelijk groeien van het kanaal bij toenemend verval. Boven een bepaald verval, het kritieke verval, treedt progressieve kanaalvorming op, waarbij de kanaalvorming niet meer stabiliseert. Een belangrijke constatering in de kleine schaalproeven is dat dit fenomeen niet of nauwelijks optreedt. In vrijwel alle gevallen is er bij kanaalvorming direct sprake van progressieve groei, d.w.z. het kanaal stabiliseert niet. In andere proeven, zoals in de Deltagootproeven, is dit fenomeen wel altijd waargenomen.

Daarnaast is het de vraag hoe de geobserveerde kanalen doorgroeien tot kanalen die tot bezwijken kunnen leiden.

Een eerste inventarisatie leidt tot de volgende aspecten die van belang zijn bij het ontstaan van doorgaande kanalen:

- Spleet vs. vertakt patroon
- Stabiliteit van de kanaalwand
- Weerstand van het kanaal
- Schaaleffecten
- Invloed van kleidek en heterogeniteit

Deze fenomenen zullen in onderstaande paragrafen verder worden geanalyseerd.

#### 5.3.1 Spleet vs. vertakt patroon

Het model van Sellmeijer gaat uit van een 2-dimensionale situatie. Het kanaaltje onder de dijk is oneindig breed. Deze situatie treedt in werkelijkheid niet op maar de aanname wordt

onderbouwd doordat in werkelijkheid sprake is van een vertakt systeem waardoor min of meer kan worden gesproken van een spleet onder de dijk.

De waterhuishouding (waterdrukken en stroomsnelheden) in een vertakt systeem is echter zeer afwijkend ten opzichte van de waterhuishouding in een spleet.

Voor korreltransport door deze kanalen is een bepaalde stroomsnelheid nodig. De stroming in het kanaal ontstaat doordat een bepaalde hoeveelheid water naar het kanaal toestroomt. Hoe kleiner een kanaaltje hoe makkelijker water door het kanaaltje wordt aangetrokken. De verhouding tussen hydraulische straal (waardoor het water naar het kanaal toestroomt) en oppervlak (waardoor het water wordt afgevoerd) is immers groot. Benedenstreams is het kanaal groter. De stroming wordt hier vooral bepaald door de hoeveelheid water die vanuit bovenstreams gelegen kanaaltjes toestroomt. Als de bovenstreams gelegen kanaaltjes onvoldoende water leveren vindt sedimentatie van de korrels benedenstreams in de kanalen plaats. Bovenstreams dienen de kanaaltjes dus constant te vertakken om voldoende aanvoer van water te garanderen zodat benedenstreams de individuele korrels in transport kunnen blijven. Onderzocht dient te worden of de kanaaltjes zich bovenstreams voldoende kunnen ontwikkelen (zonder dat ze elkaar in de weg gaan zitten) en voldoende water (debiet) aanleveren waardoor benedenstreams geen sedimentatie van korrels kan plaatsvinden en kanaaltjes werkelijk tot grote kanalen kunnen groeien.

Omdat een netwerk van kanaaltjes een grotere toestroom heeft dan een spleet, treden er ook grotere verhangen op, met name aan de kop van het kanaal. Het is mogelijk dat het vervloeien van de kop van het kanaal maatgevend is t.o.v. het grensevenwicht van de korrels in het zandbed en dit zou dit kunnen leiden tot een niet-stabiliserende situatie. Het verhang aan de kop van het kanaal neemt namelijk niet af naarmate de lengte van het kanaal groter wordt.

### 5.3.2 Stabiliteit van de kanaalwand

Met het toenemen van de lengte van het kanaal neemt over het algemeen ook de breedte toe. Dit lijkt plaats te vinden via geleidelijke vervloeiing, individueel korreltransport is niet zichtbaar. Voor grote kanalen zou dit betekenen dat de hellingen van het kanaal zeer flauw moeten zijn, ca. 4 graden. In de proeven lijkt dit bevestigd te worden door de brede ondiepe kanalen die waargenomen zijn. Mogelijk kan dit verder onderzocht worden om de kanaaldiepte en doorvoer beter te schatten.

Het vloeien van zand in het kanaal bestaat uit twee processen. Ten eerste moet het zand vloeien om in beweging te komen, ten tweede moet het zand afgevoerd kunnen worden via het kanaal. Het zand gedraagt zich als een dichte suspensie. Onderzocht moet worden hoe de vloeiing plaatsvindt en wat het effect is van dichte stromen op het doorgroeien van het kanaal.

### 5.3.3 Weerstand in het kanaal

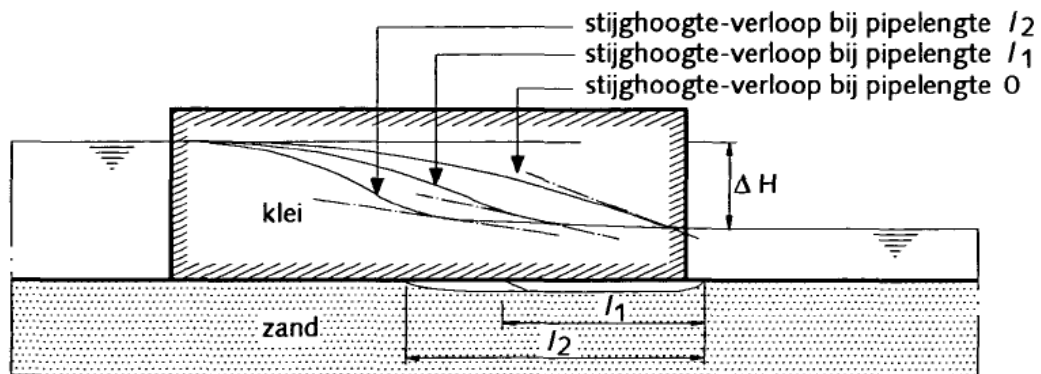
De weerstand in het kanaal is van groot belang in het model van Sellmeijer, omdat deze weerstand de stromingsgradient en daarmee het korrelevenwicht bepaalt. De weerstand van het kanaal wordt bepaald door:

Afmetingen van het kanaal (breedte, diepte)  
Vorm van het kanaal (meanderend of juist recht)

### Ruwheid van de wand

In het model van Sellmeijer is de weerstand van het kanaal relatief klein, wat gedeeltelijk veroorzaakt wordt doordat een 2D-model is gebruikt en gedeeltelijk doordat geen ruwheid van de wand is meegenomen.

In de proeven waarbij waterspanningen zijn gemeten in en om het kanaal is waargenomen dat de weerstand van het kanaal groter is dan aangenomen in het model van Sellmeijer. In de initiële situatie (nog geen kanaalvorming) verlopen de waterspanningen lineair over het zandpakket. Bij kanaalvorming met een lengte zoals aangegeven in de figuur, verloopt de waterspanning in het kanaal volgens Sellmeijer onder een flauwe vrijwel constante helling (klein verhang) (zie onderstaande figuur). Het verhang neemt sterk toe aan de kop van het kanaal en verloopt lineair naarmate verder van het kanaal gemeten wordt.



Figuur 5.3 Stijghoogteverloop volgens Sellmeijer

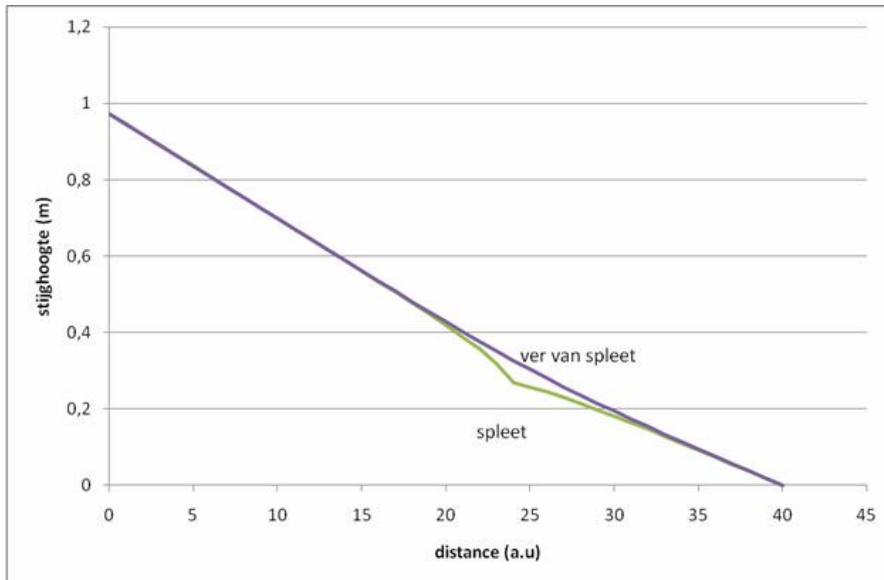
In de proeven is echter een ander patroon waargenomen. Omdat de kanalen zeer klein zijn, is alleen lokaal (aan de kop van het kanaal) een afwijking waargenomen van de  $t=0$ -lijn, zoals weergegeven in de rode lijn. De toestroming van water naar het kanaal is dus beperkt tot het gebied nabij de kop van het kanaal. De verhangen in het kanaal zijn hoger dan verwacht, wat invloed kan hebben op de berekening. Wellicht zal hierdoor eerder transport in het kanaal plaatsvinden dan berekend wordt met het model van Sellmeijer.

Om vast te stellen of de waarneming van zo een lokale verlaging van de waterspanning en het daarbij horende grote verhang in het kanaal ook berekend kan worden met grondwaterstromingsprogramma's is dit nagerekend.

De gemeten situatie is benaderd door een eindige elementen berekening. Daarbij is uitgegaan van een kanaal met een breedte van 5% van de breedte van de bak en een doorlatendheid van het kanaal dat een factor 10 groter is dan de doorlatendheid van het zandpakket.

In onderstaande figuur is het verloop van de stijghoogte uit deze berekening weergegeven door een kanaal heen en op enige afstand van het kanaal. Het kanaal heeft hier een doorlatendheid die 10x groter is dan de doorlatendheid van het zand. Het blijkt dat in de spleet een stijghoogtedip waar te nemen is, die na verloop van tijd weer toeneemt naar het niveau van de omgeving. Dit komt overeen met de proeven. Bij een doorlatendheid die een

factor 100 groter is, is deze dip veel dieper en is het verhang aan de benedenstroomse zijde geringer.



Figuur 5.4 Berekend verloop stijghoogte in dwarsdoorsnede door de spleet en op enige afstand van de spleet

Om te zien of de aanname (factor 10) realistisch is, is een eenvoudige handberekening uitgevoerd. De handberekening is weergegeven in navolgende tekstbox. Uit deze berekening volgt inderdaad dat de doorlatendheid van het kanaal in de proeven in de orde van 10 keer de doorlatendheid in het zandpakket ligt.

#### Handberekening doorlatendheid kanaal in kleine schaalproef

Afmeting geul (breedte x diepte) is 0,02 m x 0,002 m (geschat)  
 Afmeting bakje (breedte x diepte x lengte) is 0,3 m x 0,1 m x 0,4 m

$H_{\text{kritiek}}$  is 0,2 m  
 $Q_{\text{begin}}$  is 80 ml / min  
 $Q_{\text{kanaal halverwege}}$  is 81 ml/min

Indien  $Q = k \times A \times i$  dan kan uit de doorlatendheid van het zand uit  $Q_{\text{begin}}$  worden afgeleid.

$k_{\text{zand}}$  is  $6,7 \text{ E-}5 \text{ m/s}$ . Gedurende de kanaalvorming neemt het debiet met 1,25% toe. Dit betekent dat het verhang bovenstrooms 1,25 % toeneemt. Het totale verval blijft gelijk dus verhang benedenstrooms neemt met 1,25 % af.

Indien ervan wordt uitgegaan dat het verhang in het kanaal gelijk is aan het verhang in het zandpakket kan de verhouding tussen de doorlatendheid in het kanaal en in het zandpakket worden uitgerekend.  $Q_{\text{kanaal halverwege}}$  is immers gelijk aan  $Q_{\text{kanaal}} + Q_{\text{zand}}$ . Hieruit volgt dat  $k_{\text{kanaal}} = 1,33\text{E-}03 \text{ m/s}$ . De doorlatendheid van het kanaal is 20 keer groter dan de doorlatendheid zand van het zand.



De afmetingen van het bakje spelen een grote rol in bovenstaande analyse is. Wat verhoudingen van doorlatendheden in werkelijkheid is, is afhankelijk van de invloedszone van het kanaaltje in het zandpakket.

#### 5.3.4 Schaaleardeffecten

Het niet stabiliseren van het kanaal, zoals waargenomen in de proeven, kan ook nog een schaaleardeffect zijn. Er zijn niet eerder proeven gedaan op deze kleine schaal. Vrijwel alle proeven die in het verleden zijn uitgevoerd zijn uitgevoerd bij een grotere kwelweglengte. Er is echter nog geen valide verklaring die dit ondersteunt.

#### 5.3.5 Invloed van kleidek en heterogeniteit

Tenslotte wordt opgemerkt dat het gedrag van klei boven kanaaltjes onbekend is. Vervorming van klei kan invloed hebben op het groeien van kanaaltjes. In het extreme geval kan klei de kanaaltjes dichtdrukken waardoor het pipingproces tot stilstand kan komen. Dit zal in de centrifugeproeven nader bestudeerd worden.

Daarnaast zijn de laboratoriumproeven uitgevoerd op schoon en uniform zand. In werkelijkheid, onder een echte dijk kan het zand elke centimeter een andere korrelgrootteverdeling hebben, varieert de pakking van het zand en kan lokaal in het grensvlak onder de dijk waaronder de pipes ontstaan een reliëf in de orde van decimeters aanwezig zijn. Uit proeven met een klein richeltje onder het (gladde) oppervlak of met heterogeen zand blijkt dat kanaalvorming onder de perspexplaat anders verloopt en mogelijk eerder stagneert dan bij een uniform slibvrij zand (Van Beek, 2007) (Van der Ham, 2008).

### 5.4 Invloed van schaling

De kleine schaal proeven zijn uitgevoerd bij een kwelweglengte van ongeveer 30 cm. Bij deze kwelweglengte zijn de in de proeven gevonden doorbraakvervalen zeer hoog, met name voor relatief dichte pakkingen, variërend van 0.3 tot 0.6. Dit wijkt zeer sterk af van gangbare kritieke vervalven voor de praktijk (grote kwelweglengte), die in de orde van 0.1-0.03 zijn.

De invloed van schaling is dus zeer belangrijk om een goede inschatting te kunnen maken van het kritische verval in de praktijk en om een vertaling te maken van de kleine schaal proeven naar de praktijk. In de regel van Sellmeijer is deze schaling opgenomen.

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

en

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

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

Uit de formule kan afgeleid worden dat het schaaleardeffect vooral bepaald wordt uit de verhouding tussen de  $d_{70}$  en de derdemachtswortel van  $L$ :

$$\frac{H_c}{L} = (\dots) \frac{d_{70}}{\sqrt[3]{\kappa L}}$$

Deze schalingsfactor volgt uit de formule van Poiseuille die een relatie veronderstelt tussen de dikte van het kanaal  $a$  en de lengte van dit kanaal. Een kanaal van grotere lengte heeft een grotere dikte, met een relatief kleine weerstand, waardoor het kritieke verhang lager is.

De doorbraakverhagen in de kleine schaalproeven en berekende kritieke verhagen met het model van Sellmeijer komen qua ordegrrootte overeen. Hieruit kan gesteld worden dat voor deze schaal proeven het schalingseffect goed verwerkt is in het model. Ondanks de goede match met het model is het de vraag of dit op grotere schaal ook het geval is. Dit zal daarom nader onderzocht moeten worden bij grotere schaal proeven.

## 5.5 Samenvatting en conclusies

Doelstellingen van het uitvoeren en analyseren van kleine schaalproeven zijn:

- > het verkrijgen van inzicht in de processen van kanaalvorming die uiteindelijk tot bezwijken van een waterkering leiden
- > en het geven van handvatten voor nadere invulling van het SBW pipingonderzoek 'Hervalidatie rekenregel van Sellmeijer' in 2009.

In hoofdstuk 5 is vooral ingegaan op het tweede deel van de doelstelling. De volgende conclusies worden getrokken.

Bij een lage relatieve dichtheid wordt een ander pipingproces waargenomen dan bij een hoge relatieve dichtheid. Voor hervalidatie van de rekenregel van Sellmeijer is het noodzakelijk het geldigheidsgebied van de rekenregel af te bakenen.

Bij het vormen van een kanaal wordt in de proeven vooral transport van groepen korrels of bezwijkende zandmassieven waargenomen. Er lijkt sprake te zijn van vloeijing van zand. In het model van Sellmeijer wordt uitgegaan van een grensevenwicht voor het transport van zandkorrels.

Het verdient aanbeveling om na te gaan of een model van Sellmeijer waarbij voor het korrelevenwicht niet uit wordt gegaan van 'rollende' maar van 'schuivende' korrels beter overeenkomt met de waargenomen processen. In de proeven worden namelijk nauwelijks rollende korrels waargenomen. Bovendien wordt bij deze aanpassing de invloed van de korreldiameter op het pipingproces minder groot (zie hoofdstuk 4.1).

Uit de laboratoriumproeven met waterspanningsmeters volgt dat de weerstand van het kanaal groter is dan wordt aangenomen in het model van Sellmeijer. De weerstand heeft directe invloed op het potentiaalverloop in het kanaal en daarmee op het proces van kanaalvorming. De impact van deze conclusie op de rekenregel van Sellmeijer dient in 2010 nader te worden onderzocht.

De proeven zijn uitgevoerd onder laboratoriumomstandigheden. In werkelijkheid is het zandpakket onder een dijk niet homogeen en vormen de kanaaltjes zich niet onder een perspexplaat maar onder een slap en samendrukbaar klei/veen pakket. Deze 'real' omstandigheden kunnen een grote invloed hebben op het pipingproces. Aanbevolen wordt

om het gedrag van klei met EEM berekeningen eventueel aangevuld met laboratoriumproeven te onderzoeken. In 2010 wordt in een schematisatiestudie ingegaan op het schematiseren van de werkelijkheid. Beide studies hebben geen invloed op het model van Sellmeijer maar leveren praktische informatie over de toepassing van de rekenregel.

In de regel van Sellmeijer is een schaaleffect opgenomen. Het schaaleffect heeft een groot effect op het kritieke verhang. Ondanks dat voor de kleine schaalproeven het schalingseffect goed verwerkt is, wordt aanbevolen proeven op medium schaal uit te voeren zodat meer zekerheid wordt verkregen over extrapolatie van schaaleffect naar de werkelijkheid.

Het model van Sellmeijer beschrijft het pipingmechanisme tot de vorming van doorgaande kanalen. Het model veronderstelt dat als kanaaltjes tot circa halverwege de dijkbasis zijn ontstaan, de veiligheid niet meer kan worden gegarandeerd. Het is echter de vraag onder welke omstandigheden kleine kanaaltjes tot doorgaande kanalen kunnen uitgroeien. Indien onder bepaalde omstandigheden kanaaltjes niet tot een dijkdoorbraak kunnen leiden, dienen aanvullende criteria in de toetsingsregels te worden opgenomen. In paragraaf 5.3 wordt geconcludeerd dat nader onderzoek nodig is naar:

Kanaaltjes zich bovenstrooms voldoende kunnen ontwikkelen en voldoende water naar deze kanaaltjes kan worden aangevoerd voor een continu zandtransport.  
De stabiliteit van de kanaalwand

Gezien het fundamentele karakter van deze onderzoeken, en het feit dat deze onderzoeken niet direct zullen leiden tot een aanpassing van het model van Sellmeijer wordt aanbevolen het SBW project in 2009 niet met deze onderzoeken te belasten maar in een volgende SBW fase op te pakken.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies en aanbevelingen met betrekking tot proeven

Doel van het SBW piping project is het identificeren van onzekerheden binnen de huidige piping toetsingsregels en deze eventueel te verkleinen of elimineren. Een veertigtal kleinschalige laboratoriumproeven op 9 verschillende zanden zijn uitgevoerd om inzicht te krijgen in de processen van kanaalvorming die uiteindelijk tot bezwijken van een waterkering leiden.

#### 6.1.1 Piping processen

Op basis van de kleine schaalproeven wordt geconcludeerd dat piping zich niet eenvoudig laat beschrijven. Bij de bestaande piping modellen wordt uitgegaan van één initiërend mechanisme waarbij kanaalvorming bij een uitstroompunt aan de benedenstroomse zijde ontstaat. Bij de laboratoriumproeven zijn een viertal initiërende piping mechanismen waargenomen waarbij het pipingproces zowel aan de benedenstroomse zijde als aan de bovenstroomse zijde of ergens daar tussenin kan beginnen.

Na het initiële mechanisme zijn bij de kleinschalige proeven elf vervolgprouwen waargenomen die afhankelijk van het initiërend mechanisme optreden. In totaal worden drie procesketens onderscheiden. Een procesketen geeft de volgorde aan waarin de verschillende processen zijn waargenomen. Van elk van de procesketens is de locatie van het initiërend mechanisme verschillend. De eerste procesketen begint aan de benedenstroomse zijde, de tweede in het midden en bij de derde procesketen begint het pipingproces aan de bovenstroomse zijde.

Het zal niet mogelijk zijn om alle processen in een verschillend model te vangen. Wel dient er verder onderzoek gedaan te worden naar processen die sterk afwijken van het model van Sellmeijer, zoals het bovenstroomse proces. Daarnaast dient onderzoek te worden gedaan naar de relevantie van waargenomen afwijkingen van het proces.

#### 6.1.2 Zandeigenschappen

Bij piping zijn de volgende zandeigenschappen van belang:

- de pakking van het zand
- de korrelgrootte van het zand
- de hoekigheid van het zand
- de gradatie van het zand
- de doorlatendheid van het zand

In de rekenregel van Sellmeijer hebben al deze eigenschappen direct of indirect een plaats. De relatie tussen genoemde eigenschappen, de waargenomen processen,  $\Delta H_{exp}$  (verval waarbij in proeven doorgaande pipe ontstaat) en  $\Delta H_c$  (kritiek verval in regel van Sellmeijer) gegeven.

Met twee zandsoorten is in de kleinschalige laboratoriumproeven gevarieerd met de pakking. Tussen de pakking en het pipingproces bestaat een sterke relatie. Hoe hoger de relatieve dichtheid hoe hoger  $\Delta H_{exp}$ . Dit betekent dat hoe losser de pakking is, hoe sneller het pipingproces optreedt. Daarnaast volgt uit de kleinschalige proeven dat bij een losse pakking het pipingproces vaak aan de bovenstroomse zijde begint. Bij een vaste pakking begint het proces meestal aan de benedenstroomse zijde.

Er wordt aanbevolen meer onderzoek te doen naar de invloed van relatieve dichtheid. Het is duidelijk dat relatieve dichtheid van invloed is op het proces, bij lage dichtheden wordt zelfs een ander proces waargenomen (displacement piping). Er zijn echter een aantal extra proeven nodig om de afbakening van het terugschrijdende proces beter vast te stellen en om meer zekerheid te bieden bij die relatieve dichtheden die niet beproefd zijn.

Om de relatie tussen de overige zandeigenschappen en het pipingproces te onderzoeken is de invloed van de relatieve dichtheid bij de overige 7 zanden geminimaliseerd door alle proeven uit te voeren bij een relatieve dichtheid van ca 70 %. Bij deze dichtheid begint het pipingproces in 80% van de gevallen aan de benedenstroomse zijde.

Tussen korrelgrootte en pipingproces wordt in de kleine laboratoriumproeven een relatie waargenomen. Deze relatie is anders dan in de huidige pipingmodellen wordt aangenomen. Bij voor Nederlandse omstandigheden relatief grote korreldiameter begint het pipingproces relatief vaak niet aan de benedenstroomse zijde. Aanbevolen wordt om uit te zoeken waarom de proeven afwijken van de bestaande modellen.

Het wordt aanbevolen meer onderzoek te doen naar grove zanden. Op dit moment is vastgesteld dat het verval bij doorbraak niet sterk toeneemt bij zanden met een grotere korrel. Het is de vraag hoe dit patroon zich doorzet bij grovere zanden dan gebruikt in dit onderzoek.

Het verdient aanbeveling om na te gaan of een model van Sellmeijer waarbij voor het korrelevenwicht niet uit wordt gegaan van 'rollende' maar van 'schuivende' korrels beter overeenkomt met de waargenomen processen. In de proeven worden namelijk nauwelijks rollende korrels waargenomen. Bovendien wordt bij deze aanpassing de invloed van de korreldiameter op het pipingproces minder groot.

De relatie tussen doorlatendheid en pipingproces is vergelijkbaar met de relatie tussen korreldiameter en pipingproces.

Er wordt geen relatie waargenomen tussen pipingproces, uniformiteit en hoekigheid van het zand. De eigenschappen uniformiteit, hoekigheid, doorlatendheid en korrelgrootte kunnen in proeven niet onafhankelijk worden gevarieerd. Om meer zekerheid te krijgen over de invloed van deze parameters op het pipingproces wordt een multivariate analysis aanbevolen.

### 6.1.3 Waterspanningen

In een aantal proeven zijn de waterspanningen aan de bovenzijde van het zandpakket gemeten met 40 waterspanningsmeters, die in de perspex plaat geplaatst zijn.

De invloed van de kanaalvorming is afhankelijk van het type kanaal:

- > Kleine kanaaltjes (ca. kleiner dan 0.5 cm breedte): niet zichtbaar in waterspanningsmetingen.
- > Terugschrijdende kanaaltjes (kanalen vanaf 0.5 cm breedte): goed zichtbaar in de waterspanningsmetingen. Dit type kanaal veroorzaakt een verlaging van de waterspanning t.o.v. de omgeving. De verlaging is vooral waargenomen nabij de kop van het kanaal.
- > Forward erosie en interne erosie (kanalen vanaf 0.5 cm): goed zichtbaar in de waterspanningsmetingen. Forward gerichte kanalen veroorzaken een verhoging van de waterdruk t.o.v. de omgeving.

- > Ruimen: het ruimproces is zeer goed zichtbaar in de waterspanningsmetingen. Het ruimen is altijd een forward gericht proces, dat een verhoging in de waterspanningsmetingen veroorzaakt.

In deze proevenserie zijn waterspanningen gemeten bij de vorming van relatief kleine kanalen. Het is de vraag op welke afstand kanalen nog gemeten kunnen worden als deze groter worden. Dit zou onderzocht moeten worden voordat deze meettechniek in een praktijkgeval wordt toegepast.

## 6.2 Conclusies en aanbevelingen voor hervalidatie rekenregel van Sellmeijer

In het algemeen geldt dat de waargenomen processen en verschijnselen niet in tegenspraak hoeven te zijn met het model van Sellmeijer, maar dat deze het model ook niet altijd bevestigen. Op basis van de waargenomen processen en verschijnselen zijn enkele analyses uitgevoerd als input voor het vervolg van het SBW piping project in het algemeen en de werkzaamheden in 2009 in het bijzonder.

### 6.2.1 Begin van bewegen

Het begin van bewegen wordt in de beschrijving van Sellmeijer beschreven als een terugschrijdend proces van migratie door individueel rollende korrels. Het model gaat vervolgens uit van korrelevenwicht van de zandkorrels in het bed van het kanaal en berekent het verval waarbij korrels nog juist in evenwicht zijn.

Uit de proeven met een lage relatieve dichtheid blijkt dat kanalen niet aan de benedenstroomse zijde beginnen. Bij zeer losgepakt zand is kanaalvorming aan de bovenstroomse zijde waargenomen. De vraag is of dit mechanisme in werkelijkheid, bij hogere korrelspanningen, ook optreedt. Het is noodzakelijk om te weten of het waargenomen proces bij lage relatieve dichtheden ook in de praktijk plaatsvindt of dat dit proces alleen in een kleine bak optreedt. Indien dit niet wordt uitgezocht kan met behulp van een verbeterde regel van Sellmeijer niet worden aangetoond dat een dijk veilig is.

Voorgesteld wordt daarom om een onderzoek te doen naar de invloed van belasting op het zandpakket op het vormen van kanalen bij een losse pakking. Het is mogelijk dat het ontbreken van belasting in de kleine proeven tot niet-realistische situaties heeft geleid.

Bij hoge dichtheden vindt vooral een proces van terugschrijdende erosie plaats. Er lijkt daarbij sprake te zijn van vloeïing van zand waardoor groepen korrels tegelijk in beweging komen. Dit is een andere transportvorm waarvan Sellmeijer in zijn model is uitgegaan. Mogelijk leidt uitwerking van deze transportvorm tot een andere definitie van het grensevenwicht.

Als zand als verweekte massa kan vloeien naar een open ruimte, of naar een niet open, maar weinig steun biedende ruimte kan dit leiden tot bezwijken van een waterkering. De relevantie van dit aan piping gerelateerde bezwijkmechanisme dient nader te worden onderzocht.

### 6.2.2 Kanaalvorming

Het model van Sellmeijer is een 2D-model, waarbij het kanaal als oneindig brede spleet wordt gemodelleerd. Inherent aan het model is het stabiliseren van het kanaal voor het kritieke verval bereikt is. Dit is, in tegenstelling tot voorgaande proeven, zoals de proeven in de Deltagoot, in deze proeven niet waargenomen. Mogelijke oorzaken zijn:

- De kleine laboratoriumproeven zijn uitgevoerd op een kleine schaal (1:150). Er zijn niet eerder veel proeven gedaan op deze kleine schaal. Vrijwel alle proeven die in het verleden zijn uitgevoerd zijn uitgevoerd bij een grotere kwelweglengte. Onderzocht moet worden in hoeverre de schaal van de proeven de resultaten heeft beïnvloed.
- In het model van Sellmeijer wordt het vertakte pipingpatroon benaderd met een spleet. Onderzocht dient te worden of de kanaaltjes zich bovenstrooms voldoende kunnen ontwikkelen (zonder dat ze elkaar in de weg gaan zitten) en voldoende water (debiet) aanleveren waardoor benedenstrooms geen sedimentatie van korrels kan plaatsvinden en kanaaltjes werkelijk tot grote kanalen kunnen groeien.
- Met het toenemen van de lengte van het kanaal neemt over het algemeen ook de breedte toe. In de proeven worden brede ondiepe kanalen waargenomen. Deze lijken te zijn veroorzaakt door vloeïngen. Onderzocht moet worden hoe een vloeïng plaatsvindt en wat het effect is van dichte stromen op het doorgroeien van het kanaal.
- Uit de laboratoriumproeven is afgeleid dat de weerstand van het kanaal in werkelijkheid waarschijnlijk groter is dan in het model van Sellemijer wordt aangenomen. Het effect van de grotere weerstand op het pipingproces dient nader te worden onderzocht.
- Het gedrag van klei boven kanaaltjes is onbekend. Vervorming van klei kan invloed hebben op het groeien van kanaaltjes. In het extreme geval kan klei de kanaaltjes dichtdrukken waardoor het pipingproces tot stilstand kan komen.

### 6.2.3 Schaling

In de regel van Sellmeijer is een schaaleffect opgenomen. Het schaaleffect heeft een groot effect op het kritieke verhang. Ondanks dat voor de kleine schaalproeven het schalingseffect goed verwerkt is, wordt aanbevolen proeven op medium schaal uit te voeren zodat meer zekerheid wordt verkregen over extrapolatie van schaaleffect naar de werkelijkheid.

Daarnaast is het onbekend hoe de kanalen van kleine schaal uitgroeien naar grotere schaal. Een grotere schaal proef is daarom van belang. Met de grotere schaal proeven willen we de relatie tussen kritieke dichtheid en het pipingproces onderzoeken zonder de beperking dat alleen kleine kanaaltjes worden waargenomen.

Daarna is een validatie van een 1 op 1 proef nodig, om de waarde van de hypothese en toetsregel voor de werkelijkheid onder een dijk aan te tonen. Dit is de validatie stap. Hierna kan weer worden teruggegaan naar een om voor een aantal in Nederland veel voorkomende zanden en pakkingen op grotere schaal de validatie van de (aangepaste) rekenregels te doen.

Een grootschalige proef is noodzakelijk om:

- Hypothesen die naar aanleiding van de kleinere en middelgrote proeven zijn opgesteld te valideren.
- Onderzoeken van processen die tot grootschalige doorbraak leiden (ontstaan van zandverlies dat niet met eenvoudige maatregelen kan worden gestopt), teneinde een inschatting te kunnen maken van benodigde veiligheidsmarges.

- Indien blijkt dat in kleinschalige of grootschalige labproeven het pipingproces voldoende nauwkeurig wordt gereconstrueerd kunnen eventuele witte vlekken met deze proeven verder worden onderzocht.
- Tot dusver is de rekenregel van Sellmeijer gebaseerd op de validatie van een enkele Deltagootproef (eind jaren tachtig, begin jaren negentig). Een bredere validatie van de pipingregel is op basis van de kleinere schaalproeven noodzakelijk gebleken

Aanbevolen wordt de grootschalige proeven in de IJkdijkfaciliteit uit te voeren omdat in deze faciliteit het pipingproces goed gesimuleerd en gemonitord kan worden. Opgemerkt wordt dat er ook voor proeven in de Deltagoot gekozen kan worden, maar de voorkeur uitgaat naar de IJkdijk faciliteit omdat de afmetingen van het dijklichaam in de IJkdijk niet wordt beperkt, de proef tot en met bezwijken kan worden uitgevoerd en er minder een 2D effect vanwege de beperkte dwarse afmeting van de goot ontstaat. Daarnaast is in de IJkdijk een consortium van vele partijen en met name monitoringspartijen direct bij de proef aangesloten. Hierdoor worden de kosten door meerdere partijen en kunnen er ook meer partijen met de proeven meeliften waardoor de maatschappelijke meerwaarde van de proeven hoger zijn.



## 7 Literatuur

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

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

[Kruse, 2008], G.A.M. Kruse, J.G. Knoeff, 'SBW Hervalidatie Piping. Bureaustudie zandeigenschappen (factual report) (zandsoorten gebruikt in kleinschalige proeven)', Rapport CO-433380.0012, Deltares

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

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

[Wit, 1982] J.M. de Wit, 'Pipinggevaar: De waarde van de regels van Bligh en Lane en nieuwe inzichten', GeoDelft.

[Wit, 1984] J.M. de Wit, 'Onderzoek zandmeevoerende wellen. Rapportage Modelproeven', CO-220887/10, GeoDelft.

## Proevenoverzicht

### Deel 1: relatieve dichtheid

Proef nummer	Type zand	R [%]	k [m/s]	L [cm]	D70 [um]	d60/d10 [-]
b30	baskarp	34	1.84E-04	33	154	1.6
d31	dekzand	65	5.13E-05	33.2	192	2.6
d32	dekzand	65	6.61E-05	33.2	192	2.6
d34	dekzand	33	9.66E-05	33.2	192	2.6
b35	baskarp	65	7.54E-05	33.5	154	1.6
b36	baskarp	63	7.04E-05	33.4	154	1.6
d38	dekzand	92	3.96E-05	33.5	192	2.6
d39	dekzand	92	3.66E-05	33.1	192	2.6
b40	baskarp	91	3.63E-05	33.2	154	1.6
b41	baskarp	92	4.88E-05	33.4	154	1.6

### Deel 2: zandkarakteristieken

Proef nummer	Type zand	R [%]	k [m/s]	L [cm]	D70 [um]	d60/d10 [-]
O42	Oostelijke rivierenzand	74.5	1.16E-03	33.2	310	2.1
O43	Oostelijke rivierenzand	75.3	1.87E-04	33.2	310	2.1
O44	Oostelijke rivierenzand	72.9	1.34E-03	33	310	2.1
I45	Boxtel Ringstraat Itterbecke	71.6	5.72E-05	33.2	220	2.4
I46	Boxtel Ringstraat Itterbecke	70	6.80E-05	33.7	220	2.4
I47	Enschede Ringstraat Itterbecke	74.7	2.58E-04	34	427	1.6
I48	Enschede Ringstraat Itterbecke	75.7	3.10E-04	34	427	1.6
I49	Hoherstall Waalre	76	2.70E-04	34	396	2
I50	Hoherstall Waalre	73	3.72E-04	33.2	396	2
I51	Ringstrasse Itterbecke Sandr	70	9.85E-05	33.5	195	1.4
I52	Hoherstall Waalre		2.50E-04	33.1	396	2
I53	Sandr	73.6	7.10E-05	32.5	195	1.4
I56	Schemda Itterbecke	69.6	8.18E-05	33.5	177	1.4
b54	Baskarp				154	1.6
b55	Baskarp	71.3	5.64E-05	32.5	154	1.6
b58	Baskarp	70	6.78E-05	34.5	154	1.6
I62	Schemda Itterbecke	63.3	1.12E-04	32.5	177	1.4

### Deel 3: waterspanningsmetingen

Proef nummer	Type zand	R [%]	k [m/s]	L [cm]	D70 [um]	d60/d10 [-]
b71	Baskarp	74.6	5.4E-05	33.5	154	1.6
b73	Baskarp	74.6	4.7E-05	32.0	154	1.6
b74	Baskarp	69.8	5.6E-05	34.0	154	1.6
b75	Baskarp	72.5	1.12E-04	33.3	154	1.6

## Relatie experimenten en processen

### Zandeigenschappen en processen

O42 Oostelijk rivierzand	Proces	H
R=74,5 %	Instabiliteit front	19 cm
D70=310 $\mu\text{m}$	Meervoudig klassiek	20 cm
U=2,1	Straight Backward	20 cm
K=1,76 <sup>E</sup> -4 m/s	Ruimen / meanderen	20 cm
Opmerkingen:		
- geen verstopping / vlakstroming		
- luchtbelletjes ontstaan aan het einde van de straight backward erosion		
I45 Boxtel	Proces	H
R=71,6 %	Korrelverplaatsing	14-17 cm
D70=220 $\mu\text{m}$	Meervoudig klassiek	18cm
U=2,4	Straight Backward	23 cm
K=5,72 <sup>E</sup> -5 m/s	2 voudige straight Backward	23 cm
	Ruimen (geen meanderen)	23 cm
Opmerkingen:		
- veel luchtbellen in monster aanwezig		
I46 Boxtel	Proces	H
R=70 %	Craquelé	14 cm
D70=220 $\mu\text{m}$	Forward erosion	17 cm
U=2,4	Straight Backward	18 cm
K=6,8 <sup>E</sup> -5 m/s	Meanderen / vlechten / verstoppen	18 cm
	Ruimen (geen meanderen)	18 cm
Opmerkingen:		
- luchtbellen in monster ma ruimen		
I48 Enschede	Proces	H
R=75,7 %	Korrelverplaatsing	18 cm
D70=427 $\mu\text{m}$	Meervoudig interne kanaalvorming	20 cm
U=1,6	Forward erosion	21 cm
K=3,1E-4 m/s	Enkelvoudig backward erosion	21 cm
	Verstoppen / deltavorming	21 cm
	Straight backward / verstoppen	21 cm
	Verstoppen / meanderen	21 cm
	Ruimen	21 cm
Opmerkingen:		

		- geen lucht	
I49 Hoherstall Waalre	Proces		H
R=76 %	Interne kanaalvorming		14 cm
D70=396 $\mu\text{m}$	Forward erosion		15 cm
U=2	Straight Backward		15 cm
$K=^E-4$ m/s	Meanderen / verstoppen		15 cm
	Ruimen		15 cm
	Opmerkingen:		
	- geen lucht		
I50 Hoherstall Waalre	Proces		H
R=73 %	Korrelverplaatsing		10 -14 cm
D70=396 $\mu\text{m}$	Interne kanaalvorming		15 cm
U=2	Waaivorming/Backward erosion		16 - 17 cm
$K=^E-4$ m/s	Forward erosion / deltavorming		18 - 19 cm
	Meanderen / verstoppen /vlakstroming		20 cm
	Ruimen		20 cm
	Opmerkingen:		
	- geen lucht		
I51 Hoherstall Waalre	Proces		H
R= %			
D70= $\mu\text{m}$			
U=			
$K=^E$ m/s			
	Opmerkingen		
	- geen beeldmateriaal		
	- geen lucht		
I52 Hoherstall Waalre	Proces		H
R= %	Craquelé		9 cm
D70= $\mu\text{m}$	Meervoudig klassiek		15-16 cm
U=			
$K=^E$ m/s	Frontinstabiliteit		18 cm
	Straight Backward		18 cm
	Ruimen		18 cm
	Opmerkingen		

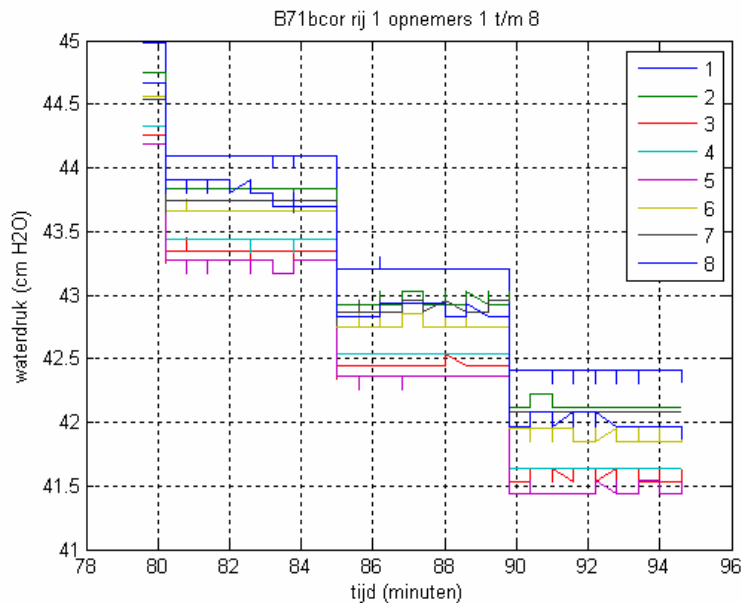
		- geen lucht	
<u>I53 Sandr</u>	Proces		H
R= %	Korrelverplaatsing		
D70= $\mu\text{m}$	Frontinstabiliteit		
U=	Enkelvoudig klassiek		
K= $\text{m}^{\text{E}}/\text{s}$	Straight backward		
	Ruimen		
	Opmerkingen		
	- Enige lucht		
<u>I56 Hoherstall Waalre</u>	Proces		H
R= %	Korrelverplaatsing		
D70= $\mu\text{m}$	Frontinstabiliteit		
U=	Straight Backward erosie		
K= $\text{m}^{\text{E}}/\text{s}$	Ruimen		
	Opmerkingen		
	- Enige lucht		

#### Waterspanningen en processen

##### B71b

In de eerste proef (B71bcor) is craquelé, terugschrijdende kanaalvorming en ruimen waargenomen.

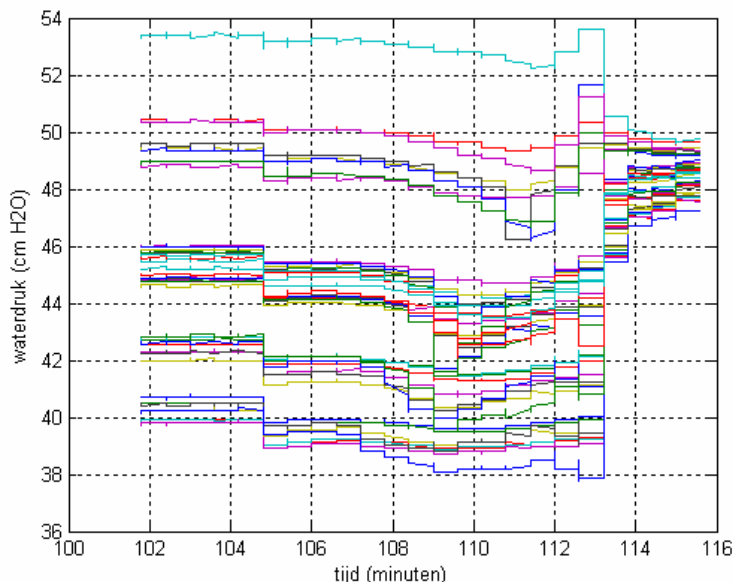
Craquelé is opgetreden van tijdstip 11.05 tot 11.20 overeenkomend met 80-95 minuten na start van de proef. Het craquelé ontstond ter plaatse van opnemer 4, 5 en 6. In onderstaande figuur zijn opnemers 1 t/m 8 weergegeven voor de bovengenoemde tijdsperiode en het is duidelijk dat de meters geen andere spanning meten ten gevolge van het craquelé.



Figuur 7.1 Waterspanningen in rij 1 (proef B71b)

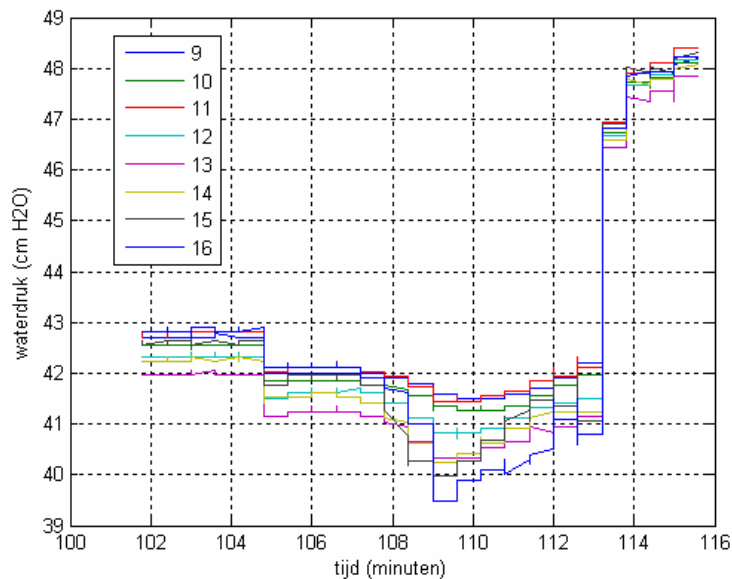
Vervolgens is na 106 minuten kanaalvorming opgetreden bij waterspanningsmeter 15 en 16. Binnen een paar minuten groeit dit kanaal uit tot een compleet kanaal. Vanaf 113 minuten wordt het zandpakket geruimd.

Het is de verwachting dat de kanaalvorming vanaf 106 minuten terug te zien is in de waterspanningsmeters.



Figuur 7.2 Waterspanningen gedurende kanaalvorming en doorbraak (proef B71b)

Meer specifiek kijkend naar wsm 15 en 16 kan gesteld worden dat deze opnemers ten opzichte van de andere opnemers pas vanaf 107 minuten een geringe afwijking laten zien. Vanaf 108 minuten wordt deze daling groter en tevens zichtbaar in andere waterspanningsmeters.



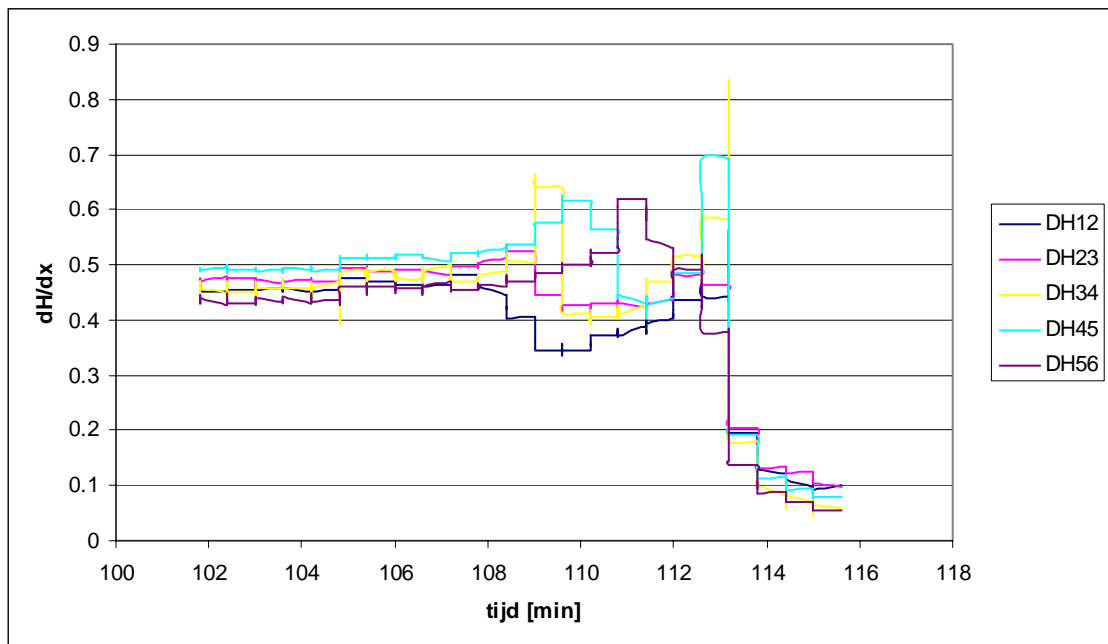
Figuur 7.3 Waterspanningen (opnemers 9-16) gedurende kanaalvorming en doorbraak (proef B71b)

Een significante stijging, gevolgd door een abrupte daling van het verhang is te zien na 113 minuten, op dit moment wordt het kanaal volledig vrijgemaakt van zand. Het proces van kanaalvorming is zichtbaar als een piek gevolgd door een daling in het verhang dat rij voor rij opschuift.

De toename van het verhang kan verklaard worden door een verhoogde toestroming net voor het kanaal. De daling van het verval wordt verklaard door het vormen van het kanaal. In het kanaal is het verhang naar verwachting laag. In de lengterichting is de locatie van het kanaal vast te stellen uit het veranderen van het verhang. Op  $t=110$  minuten bereikt het kanaal rij 3 en is een verhoging in het verhang te zien bij rij 4.

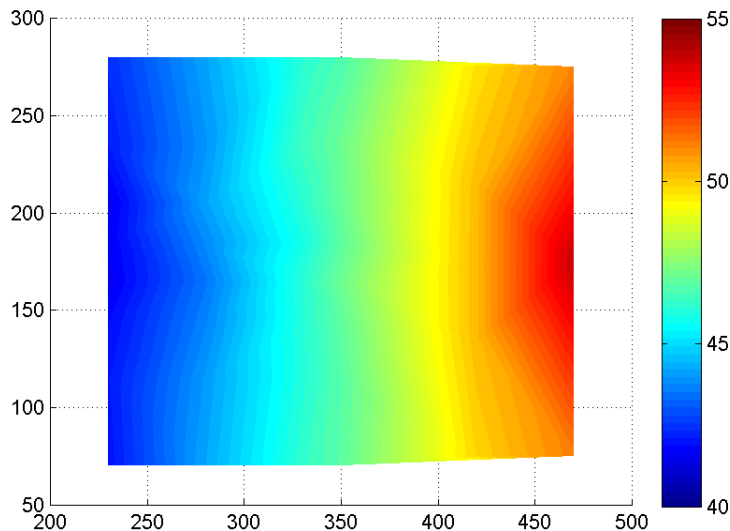


Figuur 7.4 Kanaalvorming  $t=110$  minuten, kanaal bereikt opnemer 22 en 23 (proef B71b)(foto 1312)



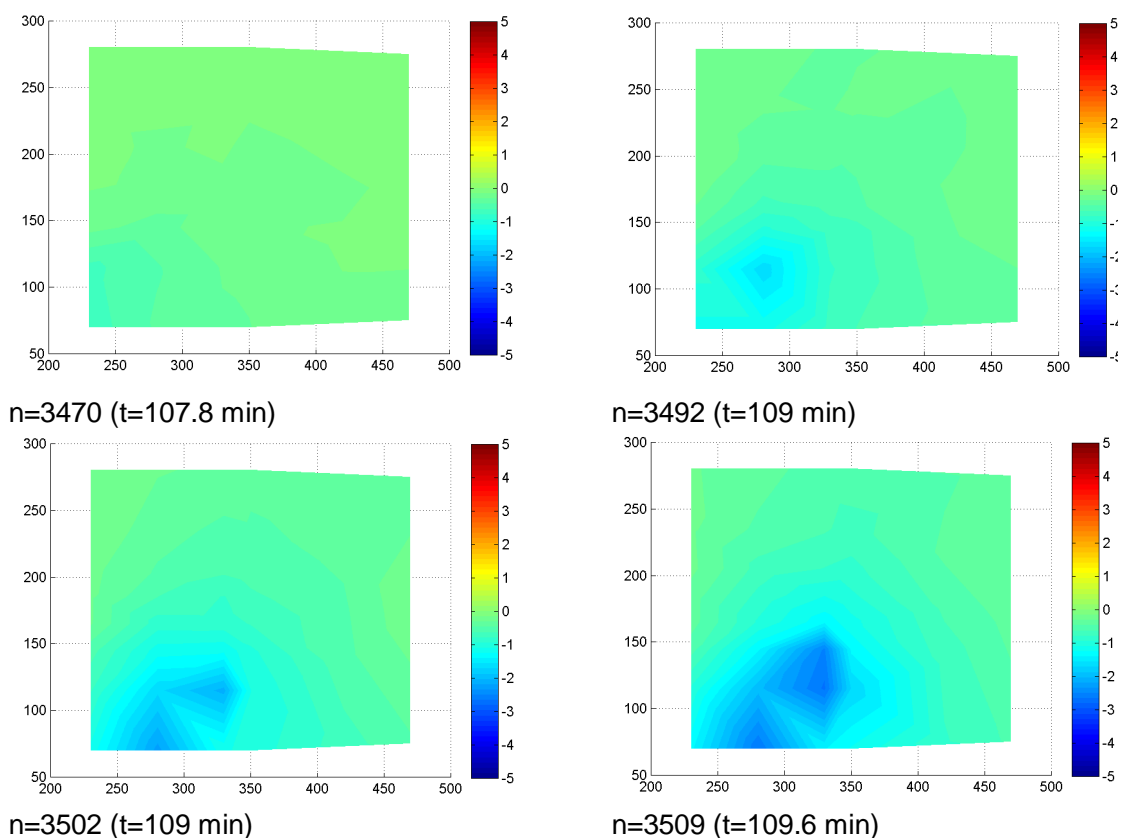
Figuur 7.5 Gemiddeld verhang per rij gedurende kanaalvorming en doorbraak (proef B71b)

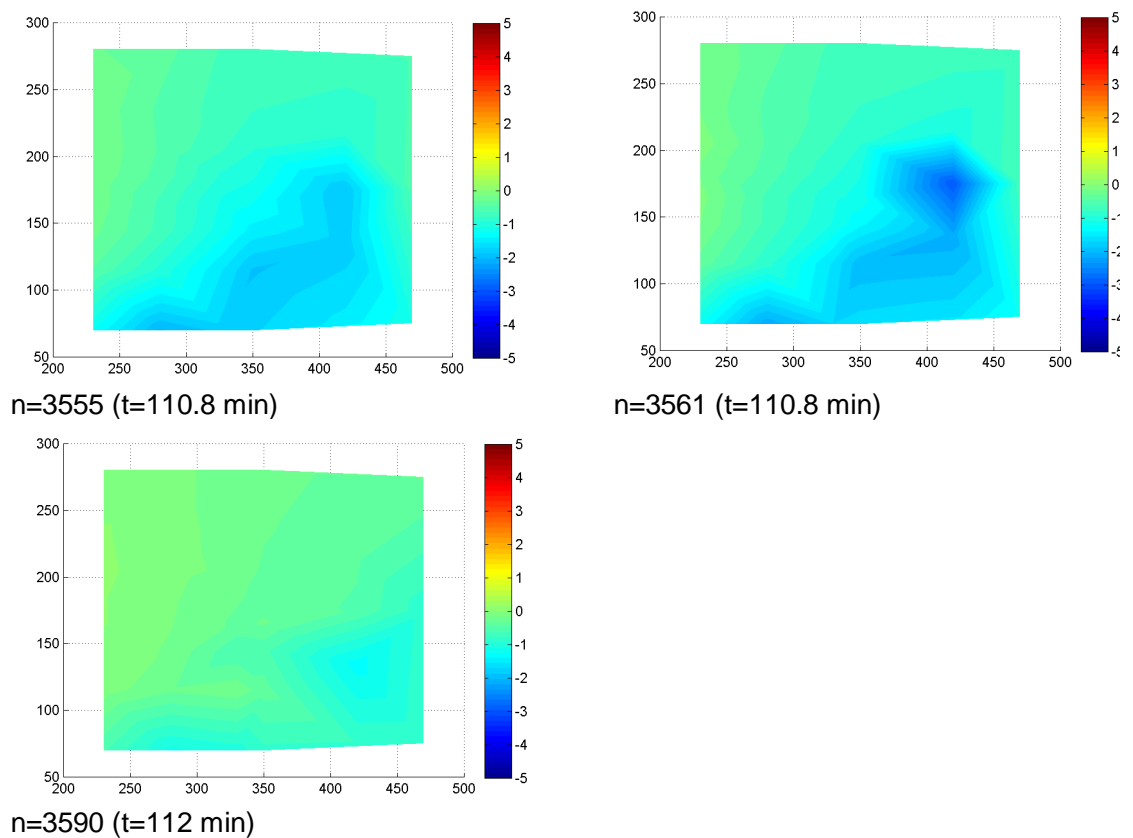




Figuur 7.6 Contourplaatje tijdens kanaalvorming (proef B71b)  $n=3055$  tijd 110 minuten

In de breedterichting is het kanaal minder duidelijk te zien in de absolute waterspanningen. De verschillen zijn vermoedelijk vrij klein. Om die reden is naast de absolute waarden ook gekeken naar de verandering van waterspanning ten opzichte van de spanning net voor kanaalvorming. Deze spanningsverschillen zijn in een contourplot gezet en de kanaalvorming is nu wel in de tijd zichtbaar.

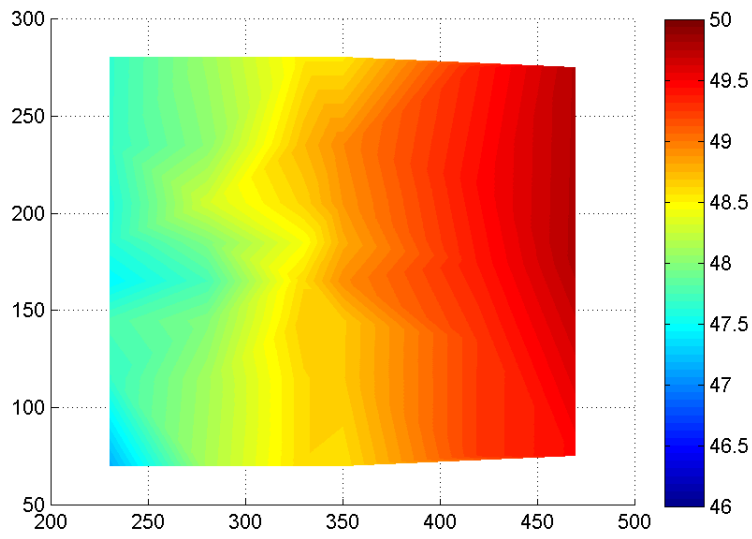




Figuur 7.7 Contourplots van waterspanningsverschillen tijdens kanaalvorming (proef B71b)

Opvallend is dat met name het vormen van het kanaal zichtbaar is. Zodra een kanaal is ontstaan verdwijnen de verschillen met de omgeving. Duidelijk is te zien dat de kanaalvorming niet helemaal benedenstrooms begint, maar bij opnemer 15 en 16. Vervolgens wordt het kanaal breder (meerdere takken) en groeit het kanaal naar de bovenstroomse kant. Als het kanaal de bovenstroomse zijde heeft bereikt is een 'overall' verlaging van het verval zichtbaar.

Na het ruimen is duidelijk een kanaal zichtbaar in de foto's. In de waterspanningen is dit kanaal echter niet terug te zien. In onderstaande figuur is de waterspanning in een contourplot weergegeven (na het ruimen).

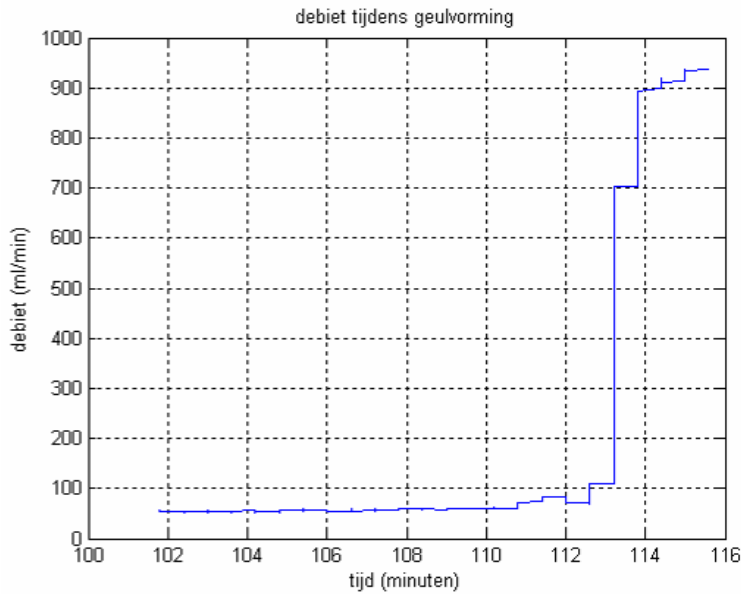


Figuur 7.8 Contourplaatje na ruimen (proef B71b) n=3680 tijd 115 minuten

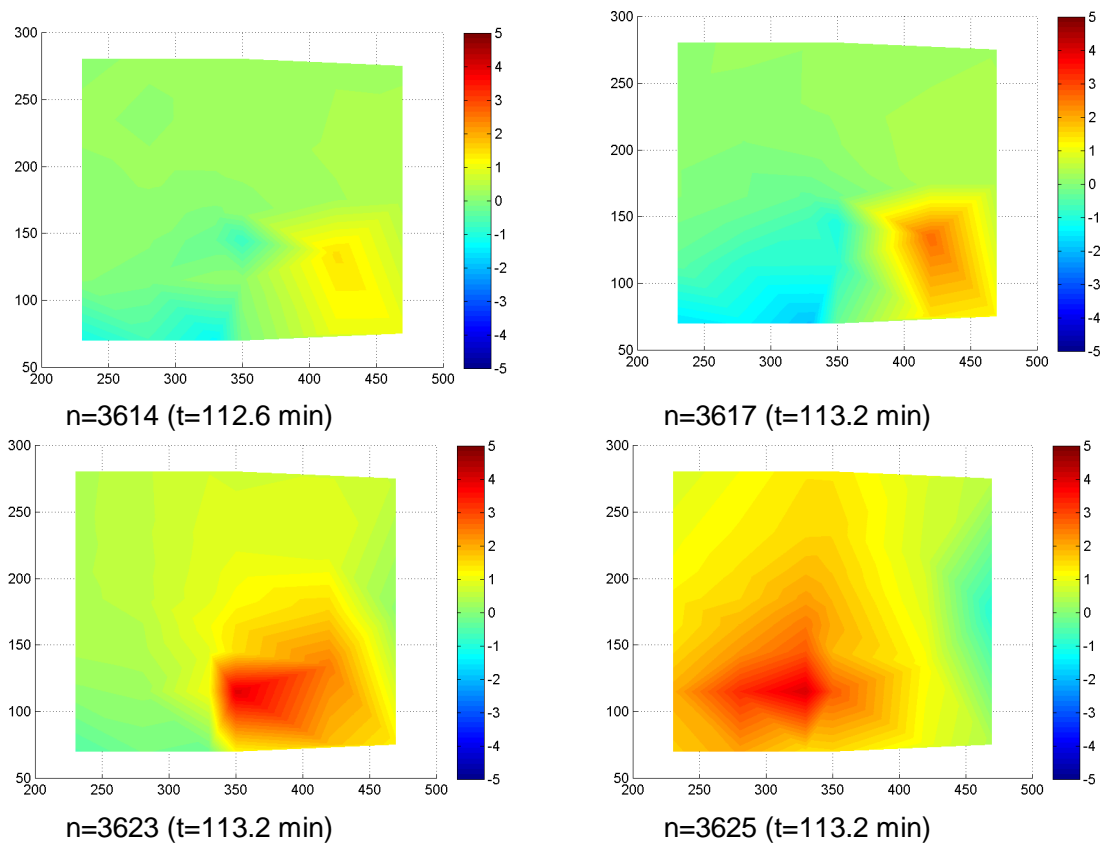


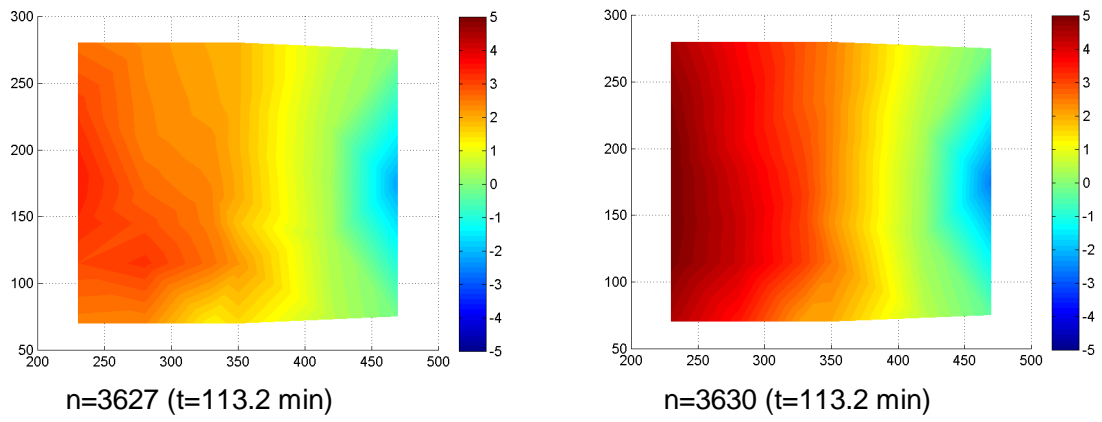
Figuur 7.9 Kanaal vlak na het ruimen (foto 1360) t=113minuten.

Het ruimen zorgt uiteindelijk voor een verhoging van het debiet. Hiervoor is nauwelijks verhoging van het debiet te bemerken.



Figuur 7.10 Debiet tijdens kanaalvorming





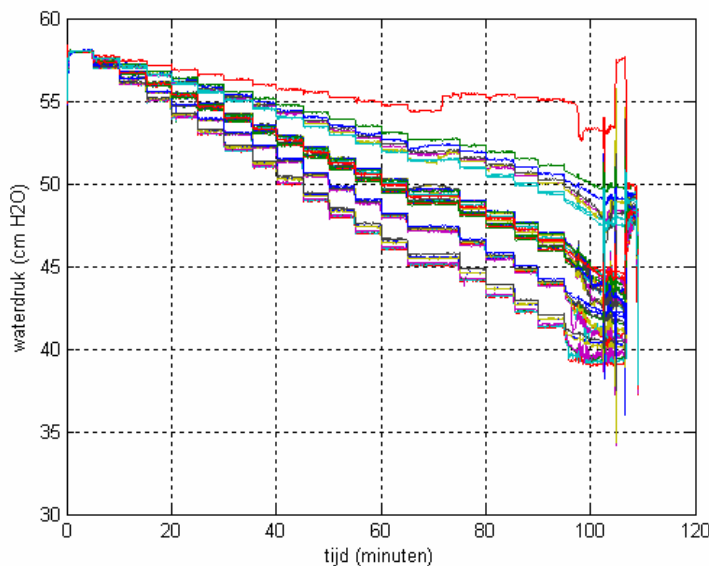
Figuur 7.11 Contourplots van waterspanningsverschillen tijdens ruimen (proef B71b)

## B73b

In de tweede proef (B73b) zijn enkele interne kanaaltjes ontstaan bij een verval van 14 cm. Deze kanaaltjes groeien 'forward' en backward afhankelijk van de locatie. Deze kanaaltjes stabiliseren na verloop van tijd. Deze kanaaltjes zijn niet terug te zien in de waterspanningen. Het verschil in waterspanning dat deze kanaaltjes veroorzaken is kleiner dan de ruis in de data (<1mm verschil).

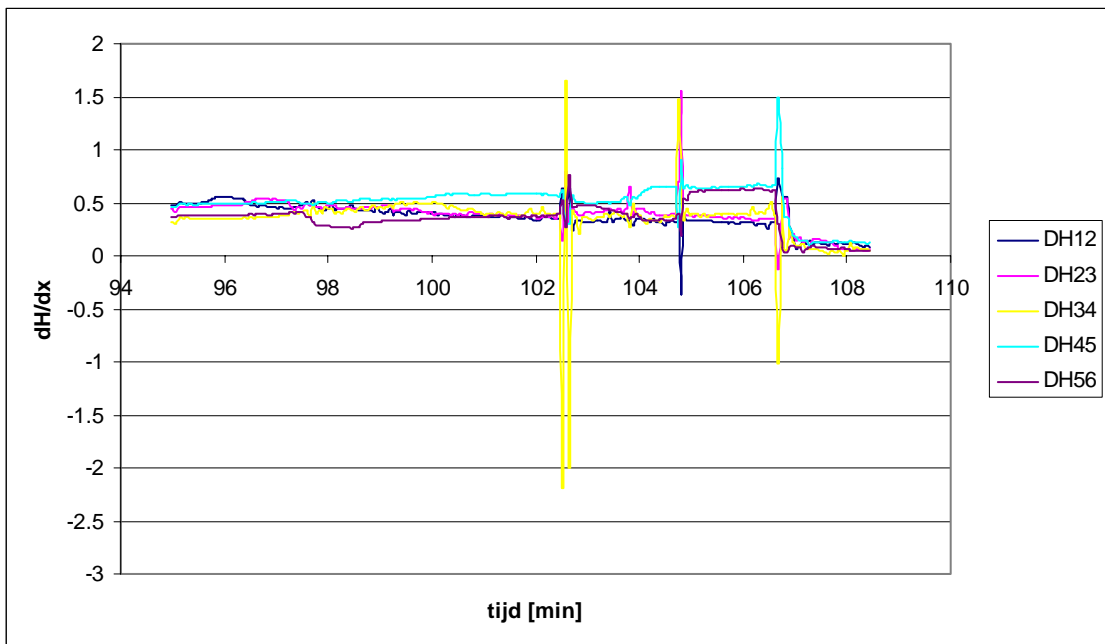
Bij een verval van 19cm treedt eveneens kanaalvorming op, welke terugschrijdend is en direct doorgroeit naar de bovenstroomse zijde, via opnemer 4-5, 28-29,35 en 39. Deze kanaalvorming is heeft plaatsgevonden tussen 97 en 98 minuten na het starten van de proef.

Deze kanaalvorming is wel terug te vinden in de waterspanningen. Het debiet neemt echter pas significant toe na het ruimen (na 106.5 min).

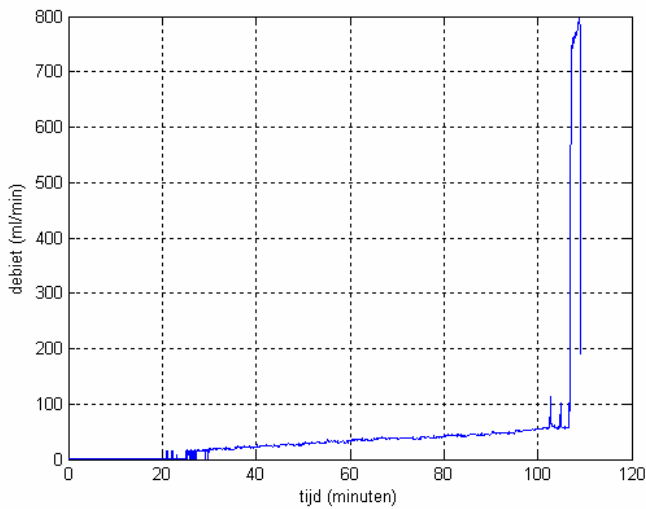


Figuur 7.12 Waterdruk gedurende proef B73b

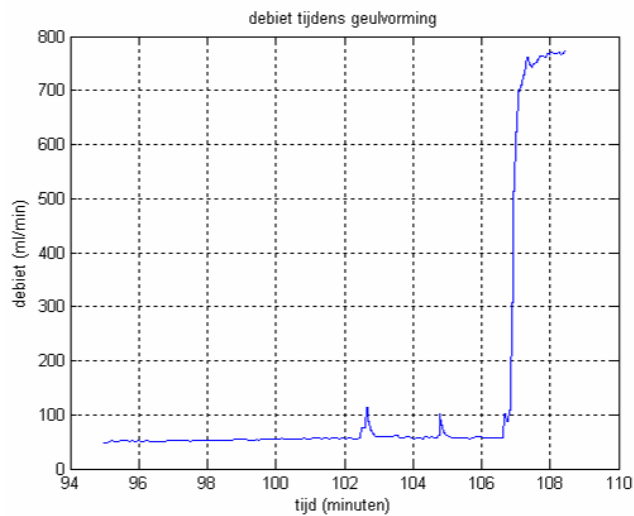
Opgemerkt wordt dat in deze proef een aantal momenten zijn geweest waarbij het verhang plotseling sterk stijgt (zie onderstaande figuur). De proef wordt daarom als onbetrouwbaar beschouwd met betrekking tot het kritisch verval. Ook het debiet geeft een piek als gevolg van deze verstoringen.



Figuur 7.13 Gemiddeld verhang gedurende kanaalvorming (proef B73b)

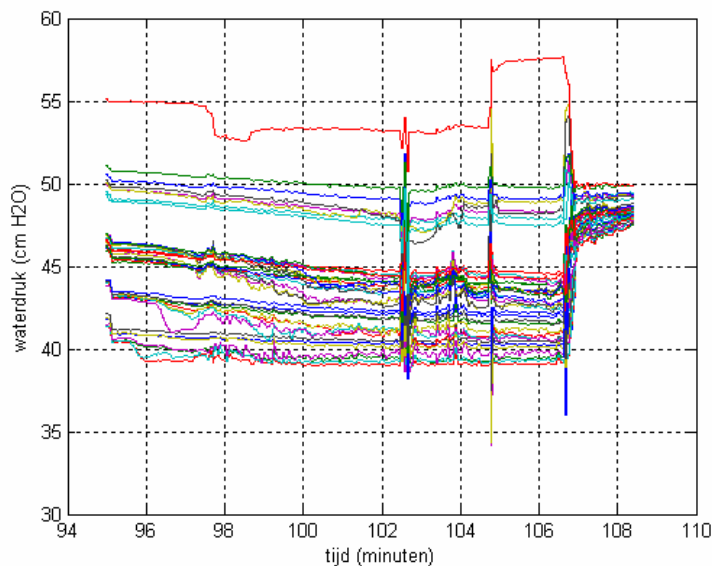


Figuur 7.14 Debiet gedurende de proef



Figuur 7.15 Debiet gedurende kanaalvorming (proef B73b)

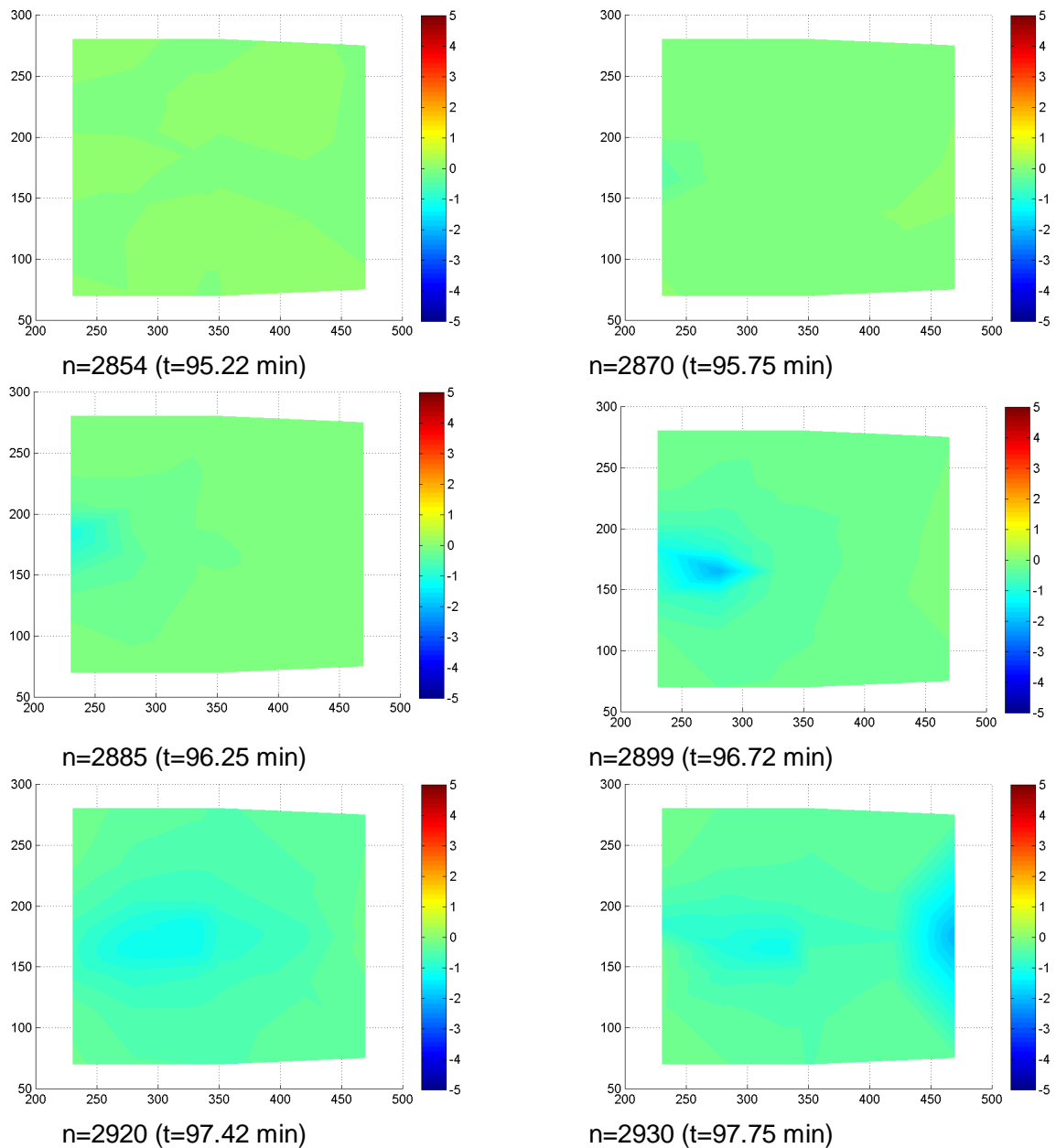
In onderstaande figuur is de invloed van de terugschrijdende erosie op de waterspanningen te zien voor alle waterspanningsmeters. De kanaalvorming start rond 97 minuten en bereikt de bovenstroomse zijde rond 98 minuten. Vervolgens vindt vergroting van het kanaal plaats totdat het zand geruimd wordt op ca. 107 minuten. De periode tussen 102 en 107 minuten wordt als onbetrouwbaar beschouwd in verband met genoemde fluctuaties in waterspanning.



Figuur 7.16 Waterdruk gedurende kanaalvorming (proef B73b)

Naast de absolute waterspanningen is ook gekeken naar de verandering van waterspanning ten opzichte van de spanning net voor kanaalvorming. Deze spanningsverschillen zijn in een contourplot gezet. De kanaalvorming blijkt minder goed zichtbaar dan in proef B71b.

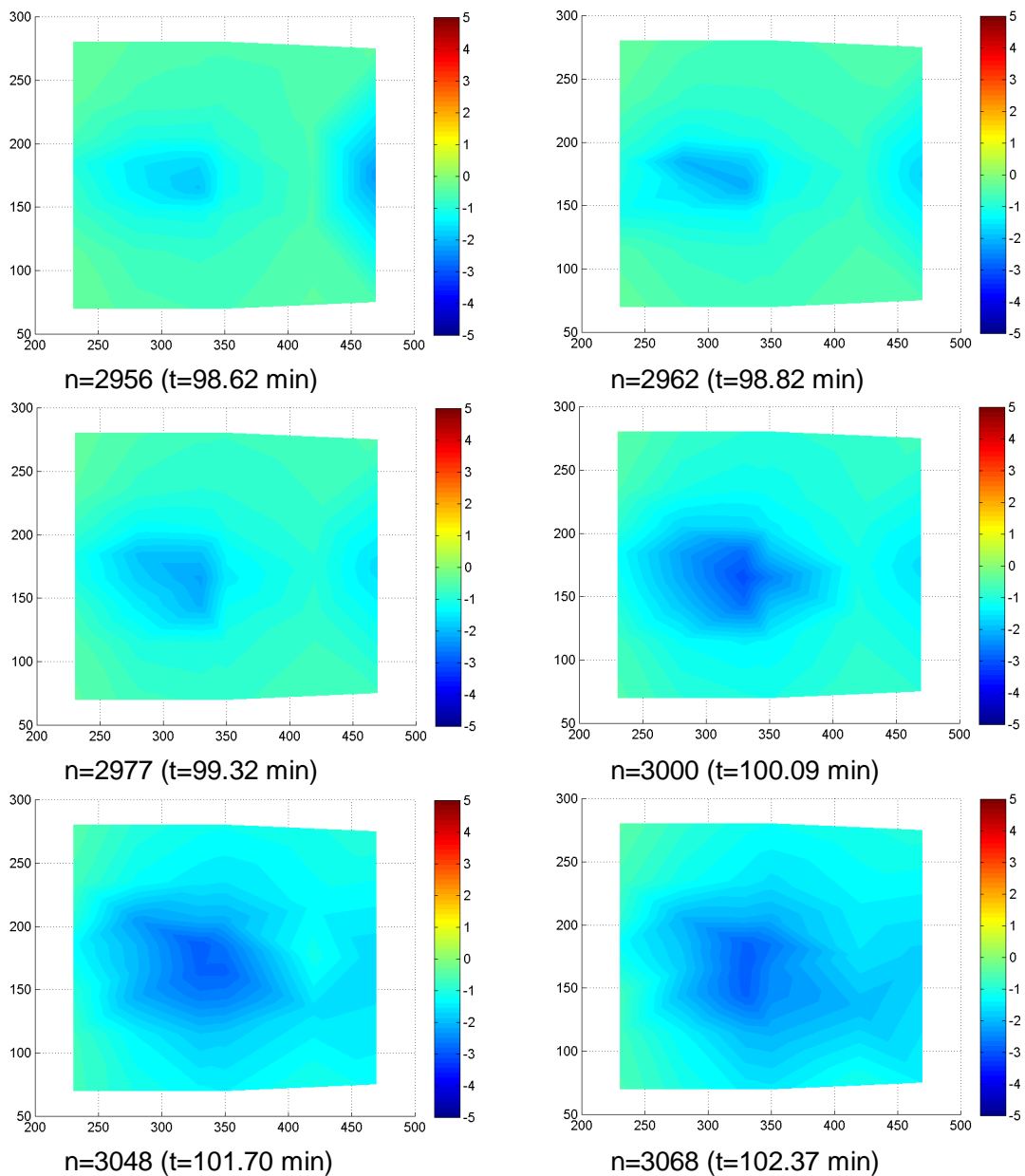




Figuur 7.17 Contourplots van waterspanningsverschillen tijdens kanaalvorming (proef B73b)

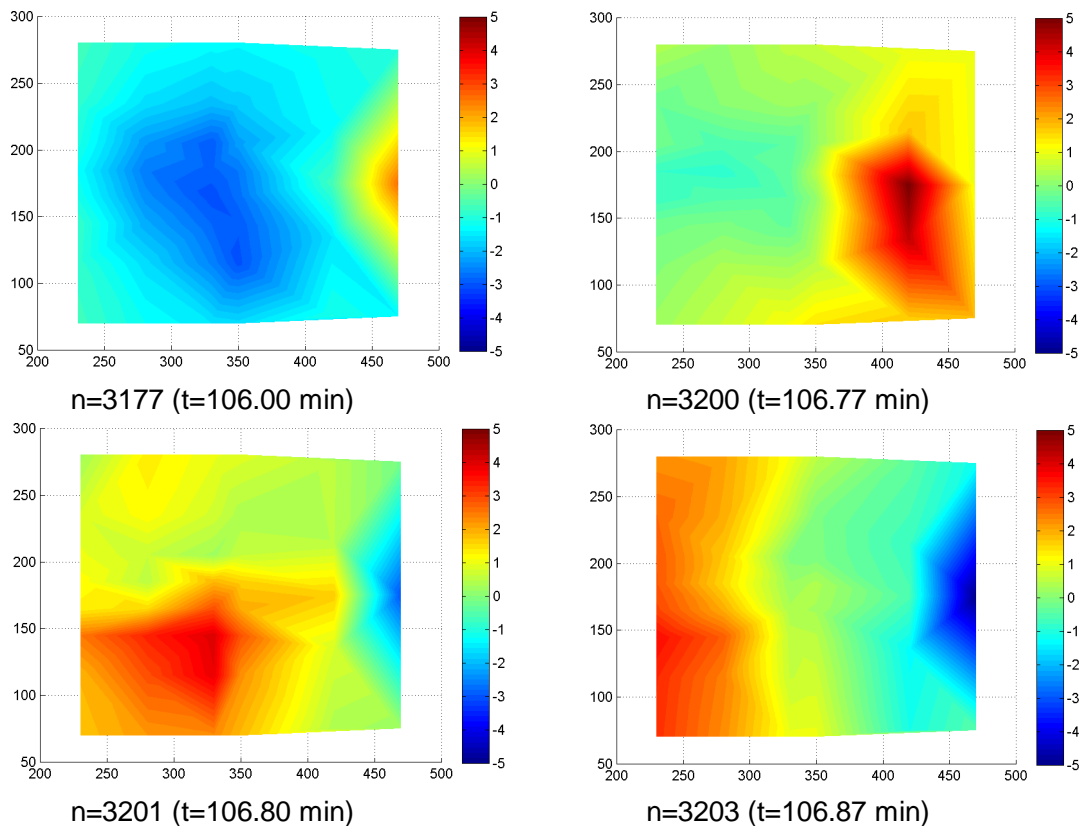
Nadat het kanaal de bovenstroomse zijde heeft bereikt groeit het kanaal verder uit. Dit is zichtbaar in onderstaande contourplots. Het stuk na 102 minuten tot ruimen zal niet worden beschouwd in verband met verstoringen.

Het doorgaande zandtransport is in de waterspanningen te zien als lokale waterspanningsverlagingen. Het kanaal dat al ontwikkeld is, is net als in proef B71b niet zichtbaar. In de loop van de tijd wordt de stijghoogtedip groter, vermoedelijk gerelateerd aan de grootte van het kanaal.



Figuur 7.18 Contourplots van waterspanningsverschillen tijdens doorgaand zandtransport (proef B73b)

Het ruimen vindt plaats vanaf ca. 106.5 minuten. Dit is een zeer snel proces dat van de bovenstroomse zijde naar de benedenstroomse zijde wordt ontwikkeld. Uiteindelijk is een sterke verlaging van het verhang zichtbaar.

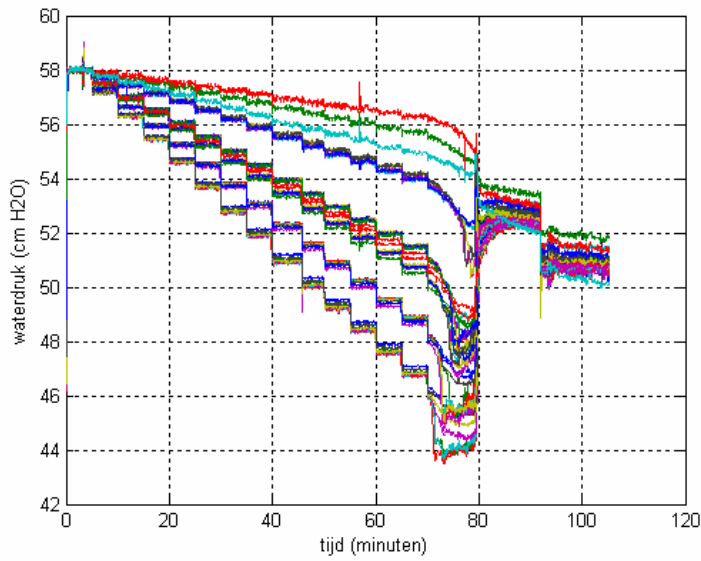


Figuur 7.19 Contourplots van waterspanningsverschillen tijdens ruimen (proef B73b)

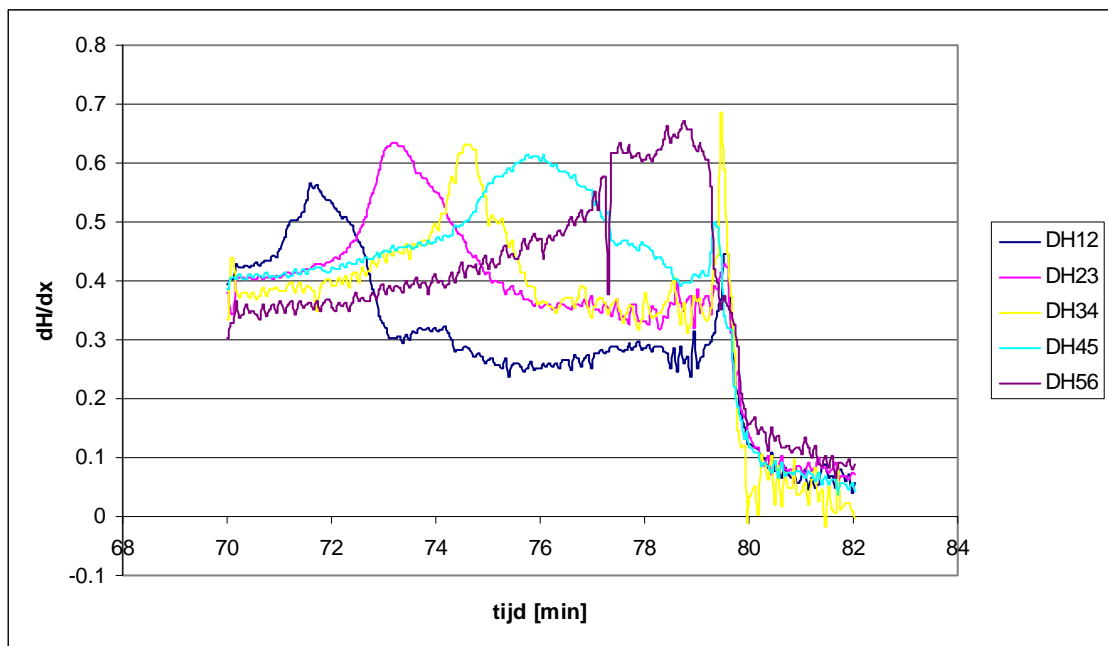
## B74b

In de derde proef (B74b) is een ander filter gebruikt. Dit filter is voor een kleiner gedeelte afgeplakt en bestaat uit nylon in plaats van geotextiel. De weerstand van het systeem die met name een rol gaat spelen zodra kanaalvorming plaats heeft gevonden is hierdoor kleiner.

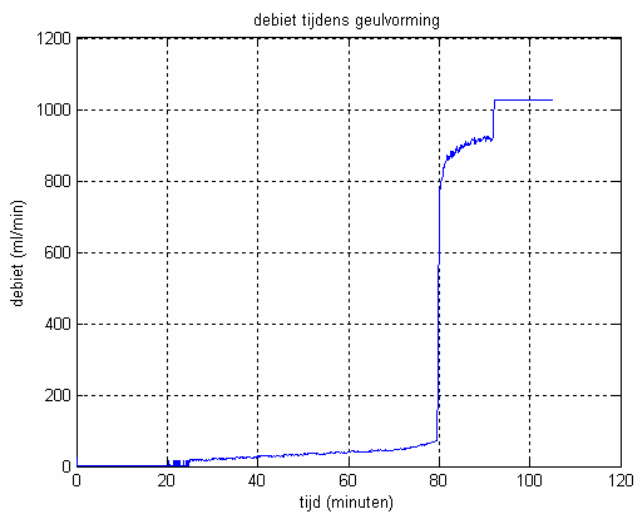
In deze proef vindt vanaf een verval van 15 cm (na 70 min) terugschrijdende kanaalvorming plaats. Het kanaal groeit via verschillende vertakkingen vrijwel direct door naar de bovenstroomse zijde. Het kanaal is direct vrij breed (ca. 2 cm). Deze kanaalvorming is te zien in de waterspanningen en de groei van het kanaal is zeer duidelijk te zien in het verhang. Opeenvolgend vindt er een verhoging en verlaging van het debiet plaats die naarmate het kanaal groeit naar de bovenstroomse zijde verschuift. Het debiet neemt echter pas significant toe na het ruimen (na 80 min).



Figuur 7.20 Waterdruk gedurende proef B74b

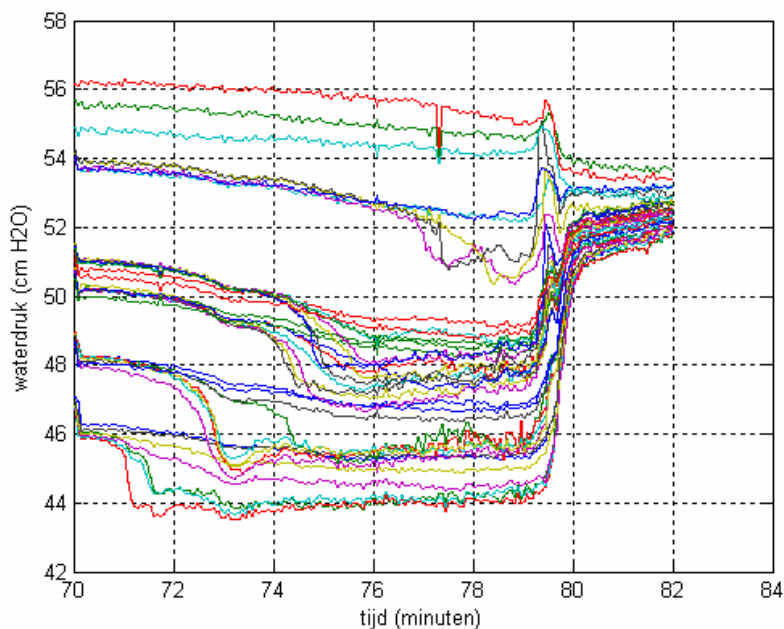


Figuur 7.21 Gemiddeld verhang gedurende kanaalvorming (proef B74b)



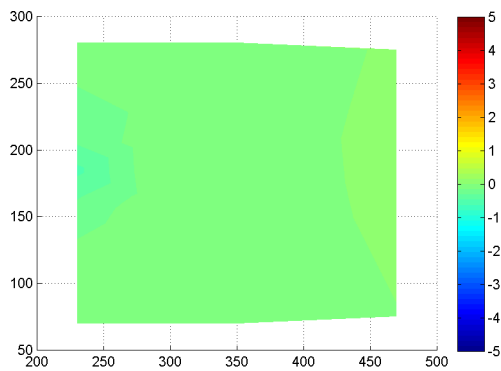
Figuur 7.22 *Debiet gedurende de proef*

In onderstaande figuur is de invloed van de terugschrijdende erosie op de waterspanningen te zien voor alle waterspanningsmeters. De kanaalvorming start rond 71 minuten en bereikt de bovenstroomse zijde rond 79 minuten. Vervolgens wordt het zandpakket geruimd op 80 minuten.

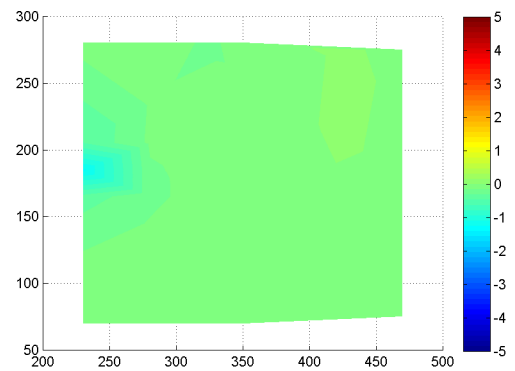


Figuur 7.23 *Waterdruk gedurende kanaalvorming (proef B74b)*

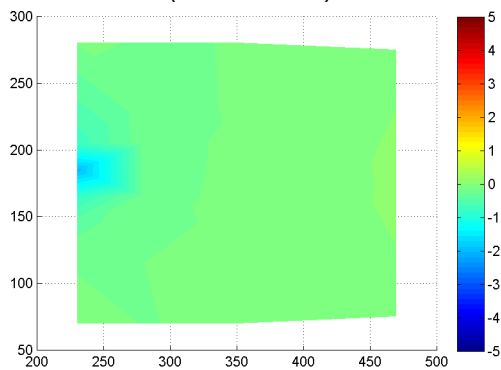
Naast de absolute waterspanningen is ook gekeken naar de verandering van waterspanning ten opzichte van de spanning net voor kanaalvorming. Deze spanningsverschillen zijn in een contourplot gezet.



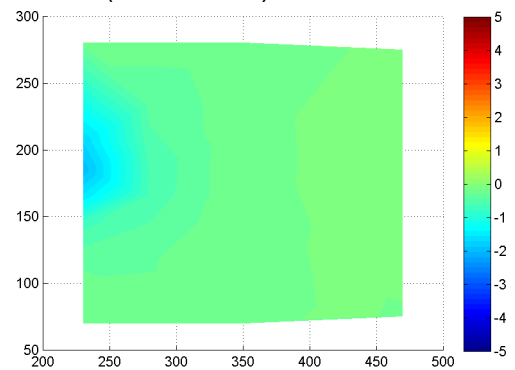
n=2120 (t=71.01 min)



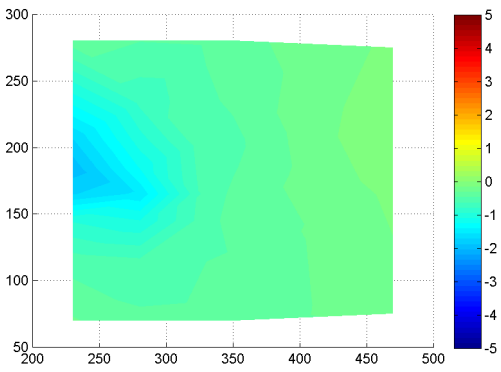
n=2122 (t=71.08 min)



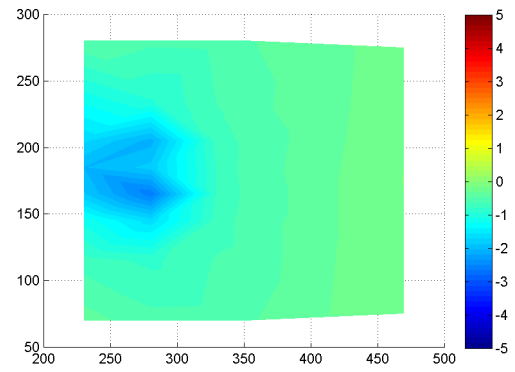
n=2132 (t=71.41 min)



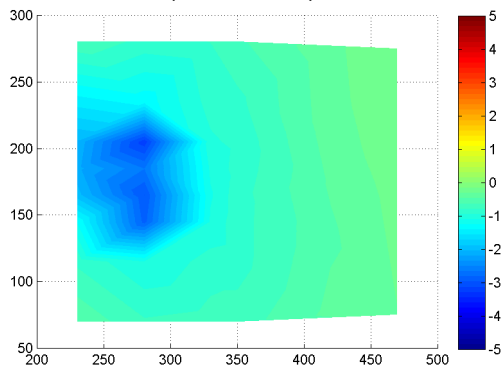
n=2149 (t=71.99 min)



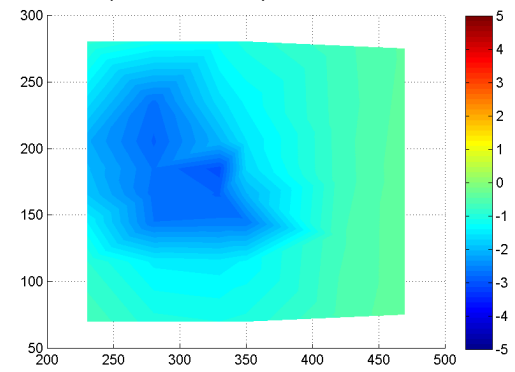
n=2165 (t=72.5 min)



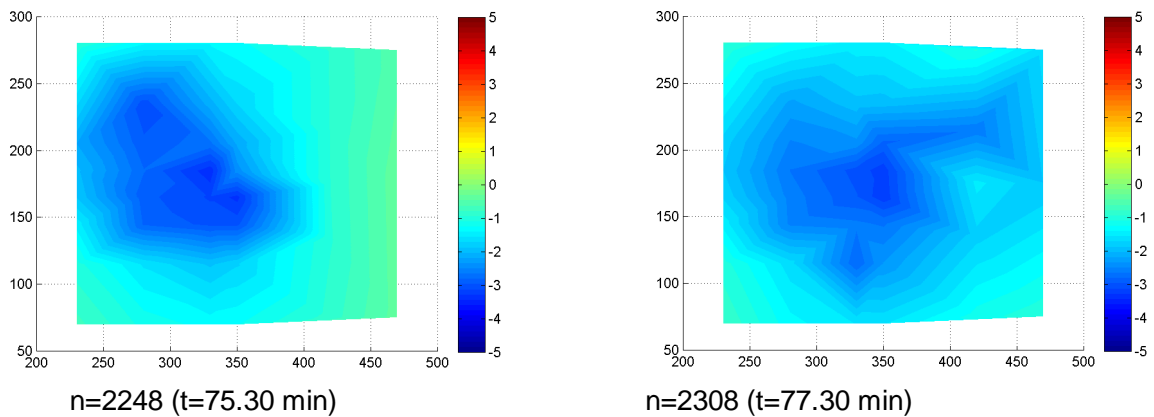
n=2174 (t=72.82 min)



n=2194 (t=73.49 min)



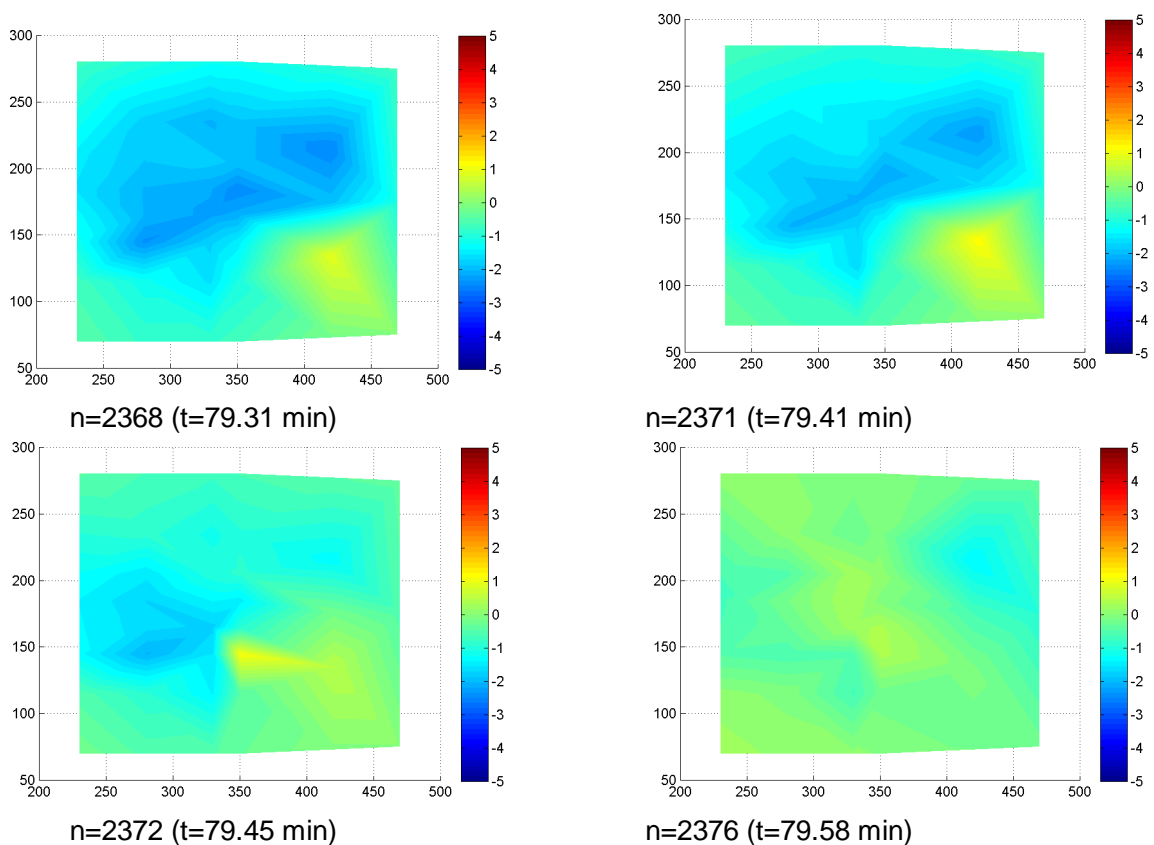
n=2233 (t=74.79 min)

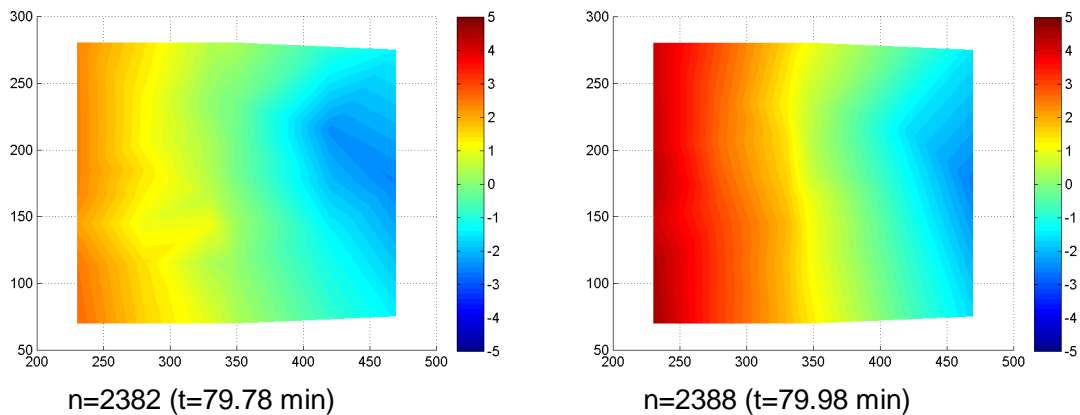


Figuur 7.24                      Contourplots van waterspanningsverschillen tijdens kanaalvorming (proef B74b)

De kanaalvorming verloopt gelijk aan de observaties. Na 71 minuten begint de kanaalvorming bij opnemer 4. Na 72 minuten bereikt het kanaal bijna opnemer 13. Omdat het kanaal op dit moment de tweede rij nog niet heeft bereikt, is dit nog niet zichtbaar in de waterspanningen. Na 72.5 minuten heeft het kanaal opnemer 13 bereikt. Na 72.8 minuten is een splitsing van het kanaal te zien. Na bijna 78 minuten bereikt het kanaal de meest bovenstroomse rij met opnemers.

Hierna begint vrij snel het proces van ruimen. Het ruimen vindt plaats vanaf ca. 79.5 minuten. Dit is een zeer snel proces dat van de bovenstroomse zijde naar de benedenstroomse zijde wordt ontwikkeld. Uiteindelijk is een sterke verlaging van het verhang zichtbaar.



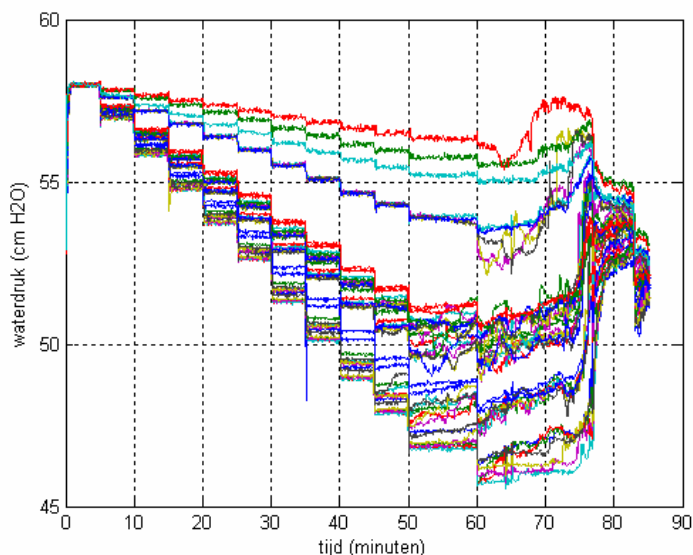


Figuur 7.25                      Contourplots van waterspanningsverschillen tijdens ruimen (proef B74b)

### B75b

De vierde proef (B75b) is op dezelfde wijze uitgevoerd als B74b. In deze proef zijn verschillende fasen van kanaalvorming te observeren:

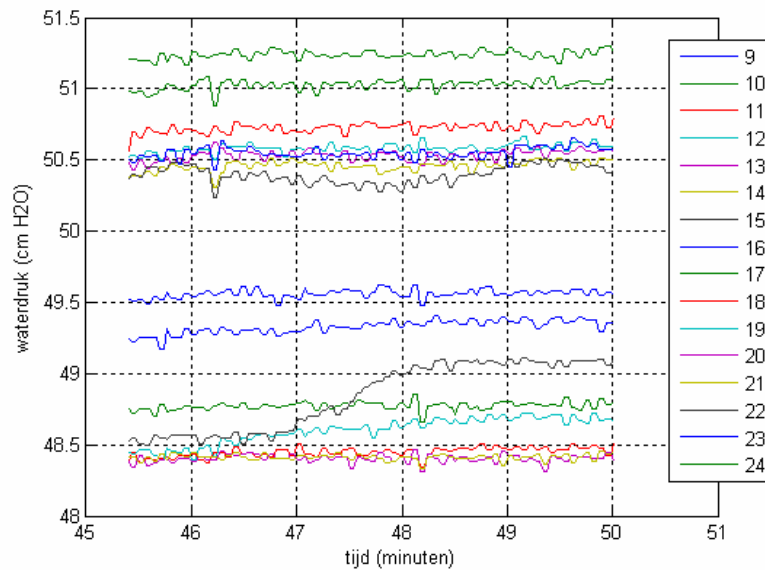
- > Bij een verval van 10 cm ontstaat een kanaaltje van opnemer 15 tot 23. Het kanaaltje stabiliseert.
- > Bij een verval van 11 ontstaan meerdere kanaaltjes (zowel forward als backward), welke allemaal stabiliseren.
- > Bij een verval van 12 cm vindt via een hoofdzakelijk forward gericht proces doorbraak plaats.



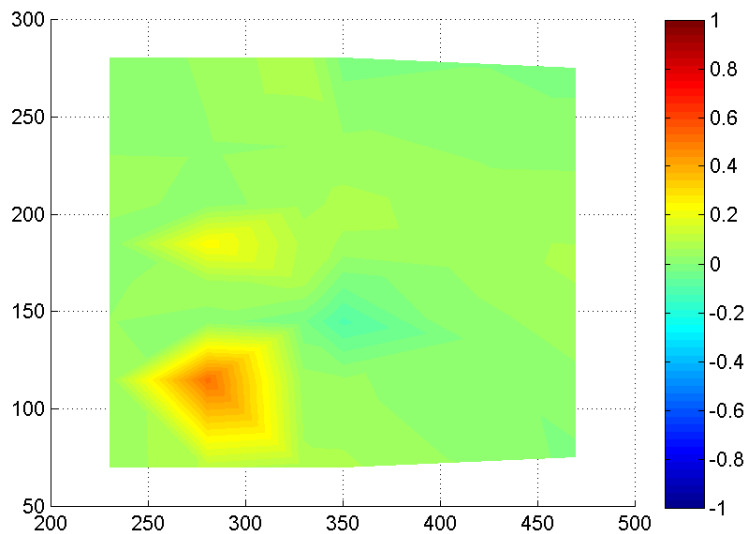
Figuur 7.26                      Waterdruk gedurende proef B75b

De kanaalvorming bij 10 cm terug te zien in opnemer 15. Opnemer 23 laat niet veel verandering zien, opnemer 22 wel. Ook in de contourplot, waar de verandering van waterspanning ten opzichte van de waterspanningen op t=45 minuten is geplot is het kanaal te zien. Opvallend is dat de waterdrukken ten gevolge van dit kanaaltje toenemen in plaats van afnemen, zoals in voorgaande proeven. Dit komt vermoedelijk omdat het een forward kanaaltje is, in plaats van een backward kanaaltje.



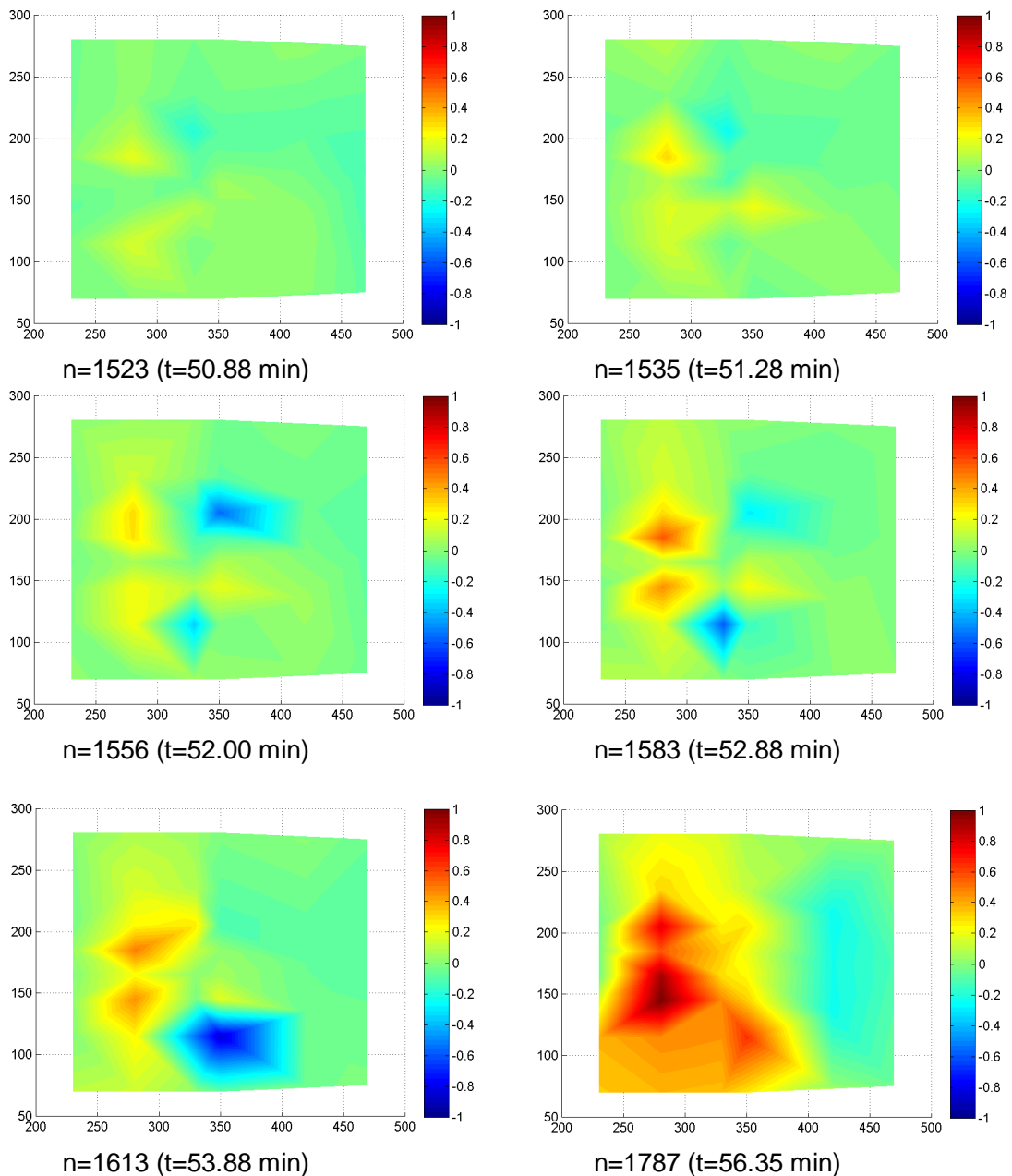


Figuur 7.27 Waterdruk in opnemers 9-24 gedurende proef B75



Figuur 7.28 Contourplot van verschil in waterdruk t.o.v. 45 min ( $n=1496$ ,  $t=50$  min)

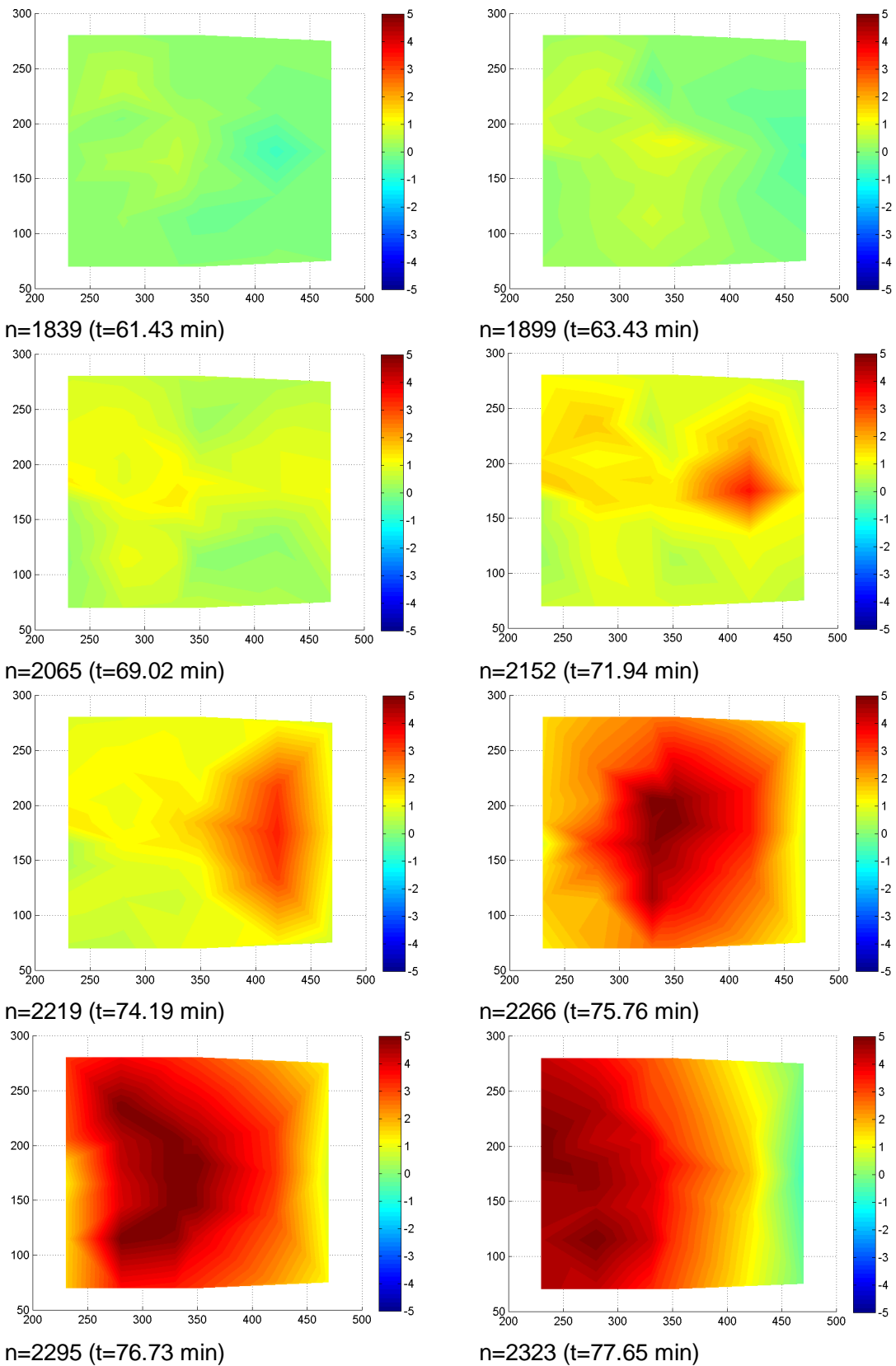
De kanaalvorming bij een verhoging van het verval na 11 minuten bestaat uit een forward kanaaltje dat van opnemer 23 naar 14 en 6 groeit en een backward kanaaltje dat van opnemer 14 naar opnemer 20 en 21 groeit. Het forward kanaaltje wordt mogelijk niet weergegeven, omdat deze al aanwezig was bij  $t=10$  minuten. In de contourplots zijn echter meerdere veranderingen te zien. Het is mogelijk dat deze kanaaltjes niet gezien tijdens de proef.



Figuur 7.29 Contourplots van verschil in waterdruk t.o.v. 50 min

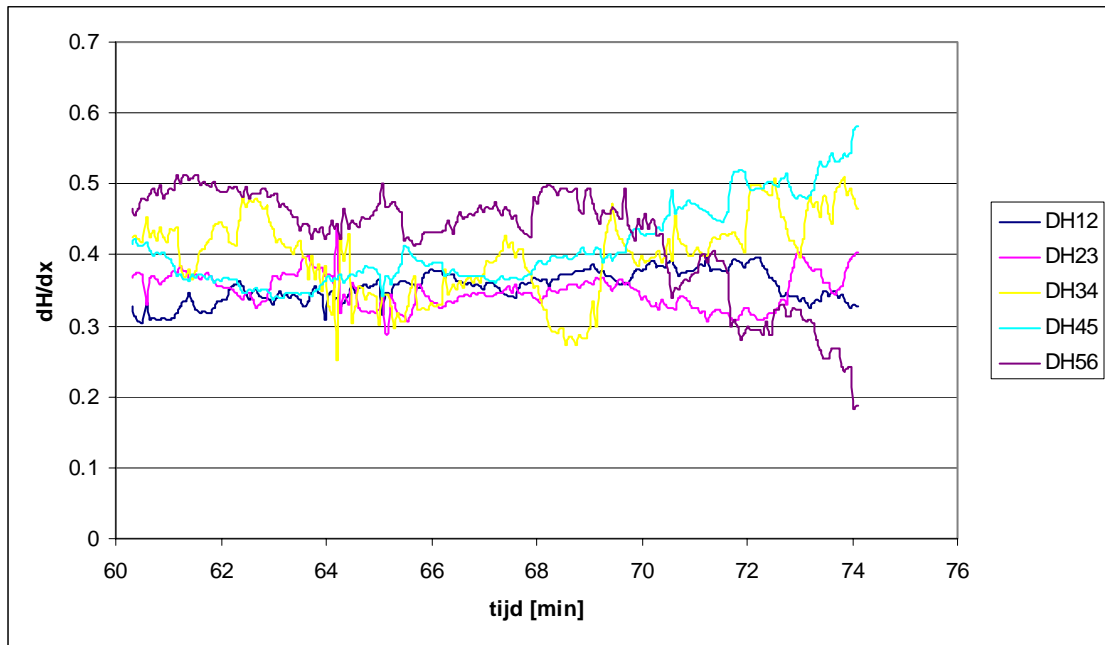
Het verhogen van het verval naar 12 cm leidt tot verschillende kanaaltjes.

- > 60 min: kanaaltje tussen 10-11 en 34
- > 63 min: het kanaaltje groeit door naar 36-37
- > 65 min: een dun kanaaltje groeit door naar de bovenstroomse rand
- > 68 min: forward proces, front van zand bereikt opnemer 3 en 4
- > 72 min: kanaal langs 39 en 35-36
- > 77 min: ruimen
- >
- > Zoals te zien in onderstaande contourplots, waarin de verschildrukken t.o.v. tijdstip 60 minuten is weergegeven, zijn de eerste vier processen niet zichtbaar. Vanaf 72 minuten vindt er duidelijk een forwards gericht proces plaats, dat zich ontwikkelt als een breed front.
- >

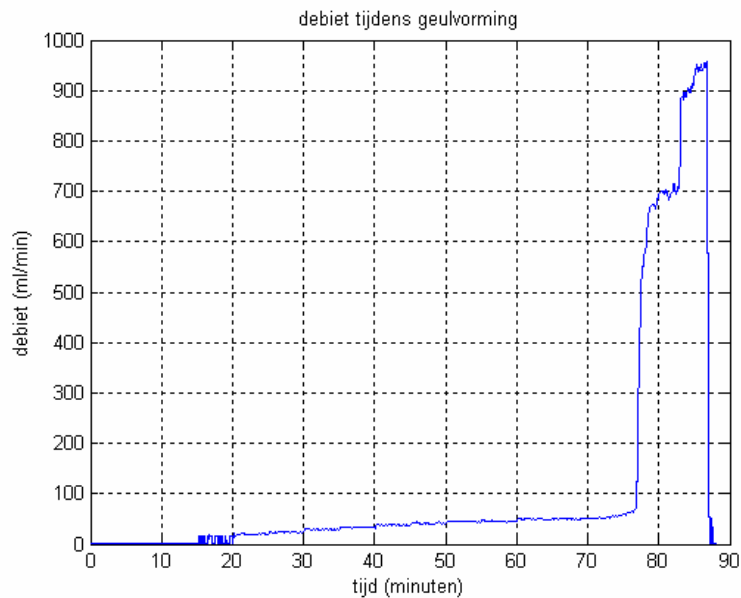


Figuur 7.30 Contourplots van verschil in waterdruk t.o.v. 60 min

Het verhang geeft geen duidelijk beeld met betrekking tot de vorming van het forward kanaal. De 'forward' gerichte kanaalvorming gaat bij ca. 77 minuten over in ruimen. Het debiet loopt vanaf dit moment op.



Figuur 7.31 Gemiddeld verhang gedurende kanaalvorming (proef B75b)



Figuur 7.32 Debit gedurende de proef (B75b)