

Analyserapport IJkdijk pipingproeven

Flood Control 2015

Huub De Bruijn
Vera van Beek
Han Knoeff
Andre Koelewijn

1200375-002

Titel

Analysrapport IJkdijk pipingproeven

Opdrachtgever

Flood Control 2015
p/a Keverling Buismanweg 4
2628 CL Delft

Project

1200375-002

Kenmerk

1200375-002-GEO-0002

Pagina's

66

Trefwoorden

IJkdijk, full-scale, piping, analyse

Samenvatting

Op de IJkdijk-locatie in het Oost-Groningse Booneschans zijn in het najaar van 2009 vier full-scale proeven uitgevoerd gericht op het faalmechanisme piping (zandmeevoerende wellen). Twee van deze proeven werden hoofdzakelijk uitgevoerd ten behoeve van het onderzoeksprogramma SBW van Rijkswaterstaat, de andere twee hoofdzakelijk ten behoeve van het IJkdijk-project: het onderzoeken van de bruikbaarheid op veldschaal van diverse meet- en monitoringstechnieken voor faalmechanismen van dijken.

De proeven zijn succesvol uitgevoerd, zowel ten aanzien van de meet- en monitoringstechnieken als ten aanzien van de doelstellingen van SBW. In deze rapportage wordt de eerste, zij het voorlopige, analyse gepresenteerd van alle vier proeven gezamenlijk.

Referenties

Flood Control 2015 project 2009.03 IJkdijk experiment piping

This research was carried out within the Flood Control 2015 program. For more information please visit <http://www.floodcontrol2015.com>.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	dec. 2009	Huub De Bruijn		Victor Hopman		Harm Aantjes	
		André Koelewijn					

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Introductie	1
1.1.1 IJkdijk onderzoeksprogramma	1
1.2 SBW Hervalidatie Piping	2
1.3 Doelstelling	4
1.4 Leeswijzer	5
2 Beschrijving full-scale proeven	7
2.1 Proefopstelling	7
2.1.1 Configuratie	7
2.1.2 Zandeigenschappen	7
2.2 Proevenprogramma en proefuitvoering	8
3 Beschrijving waargenomen verschijnselen en processen	13
3.1 Kwel	13
3.2 Pipevorming (terugschrijdende erosie)	14
3.2.1 Lengte van de pipingkanaaltjes	39
3.3 Pipevorming (ruimen)	41
3.4 Doorbraak	46
3.5 Conclusies	47
4 Monitoringstechnieken	49
4.1 Inleiding	49
4.2 Soorten referentiemonitoring	49
4.2.1 Waterspanningsmeters op het zand	50
4.2.2 Waterspanningsmeters in het zand	50
4.3 Glasvezel op het zand	57
4.4 Total station	57
4.5 Debietmetingen bovenstrooms en benedenstrooms	57
4.6 Temperatuurmetingen	58
5 Conclusies en aanbevelingen	63
5.1 Conclusies op basis van het proces	63
5.2 Conclusies op basis van de monitoring	63
5.3 Aanbevelingen	64
Referenties	65
Aanvullende case t.b.v. validatie 0,3d-regel	66

1 Inleiding

1.1 Introductie

In het project Veiligheid Nederland in Kaart I kwam piping als een dominant faalmechanisme naar voren, wat 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. Veel historische dijkdoorbraken zijn mogelijk veroorzaakt door piping. 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. Het IJkdijk project is gestart om de monitoringstechnieken voor waterkeringen te verbeteren. Beide worden hierna nader toegelicht, teneinde het kader van deze rapportage helder neer te zetten.

1.1.1 IJkdijk onderzoeksprogramma

In 2005 is het initiatief genomen tot de IJkdijk, nadat afschuivingen in Wilnis en Stein (weer) hadden laten zien dat de traditionele, hoofdzakelijk visuele, inspectiewijze van waterkeringen tekortkomingen kent en dat meer inzicht in waterkeringen noodzakelijk is om calamiteiten te kunnen voorkomen. De Stichting IJkdijk is opgericht door N.V. NOM, STOWA, Stichting IDL, Deltares en TNO. In de IJkdijk participeren verder enkele tientallen bedrijven, voornamelijk Nederlandse MKB'ers, maar ook grotere Nederlandse en buitenlandse bedrijven. Het onderzoeksprogramma van de IJkdijk is gericht op het verbeteren van het inzicht in het gedrag van waterkeringen en het ontwikkelen, testen en verbeteren van meet- en monitoringstechnologie voor waterkeringen.

In 2008 heeft de Stichting IJkdijk in samenwerking met Rijkswaterstaat Innovatie Test Centrum een speciaal gebouwde dijk van 100 meter lengte en 6 meter hoogte laten bezwijken op het faalmechanisme macrostabiliteit. Tijdens dit experiment werd aangetoond dat het gebruik van sensortechnieken een aanvulling vormt op de reguliere visuele inspectie van dijken om stabiliteitsproblemen tijdig te kunnen waarnemen. Bij deze proef is door 13 verschillende bedrijven een grote verscheidenheid aan innovatieve meet- en waarnemingsmethoden ingezet om alle gebeurtenissen in en om de dijk vast te leggen.

In het najaar van 2009 is in Groningen een volgende stap gezet qua schaal van dijkmonitoring – een tweetal bedrijven voert daar gedurende minimaal 2 jaar gezamenlijk metingen uit op de Westelijke Schermdijk van de Eemshaven.

De vier full-scale pipingproeven op de proeflocatie in Booneschans vormen de aanleiding voor uitgebreide, gedetailleerde metingen aan een ander faalmechanisme dat voor Nederlandse dijken zeer belangrijk wordt geacht, namelijk piping (terugschrijdende erosie van een zandlaag onder een kleidijk). Aan de eerste van deze proeven is deelgenomen door een elftal bedrijven, te weten 2M, Alert Solutions, Dike Survey, Fugro, GTC Kappelmeyer, Intech,

Inventec, ITC, Landustrie, Ten Cate en VW Telecom, waarbij de nadruk lag op de eerste en de vierde proef – de tweede en de derde proef zijn primair uitgevoerd voor het Rijkswaterstaat onderzoeksprogramma SBW Hervalidatie Piping.

1.2 SBW Hervalidatie Piping

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

In een inventariserende studie die voor dit onderzoek in 2007 is uitgevoerd [De 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 beschreven geschematiseerde proces van het bezwijken van een dijk door piping zijn echter nog een aantal aspecten en mechanismen onderbelicht. Zo is bijvoorbeeld het ontstaan van kanaaltjes onder een dijk onomstreden. Dit proces is vele malen geconstateerd bij klein- en grootschalige proeven. Welke mechanismen een rol spelen bij deze kanaalvorming en hoe deze kanaaltjes kunnen groeien en leiden tot een dijkdoorbraak is echter niet eenduidig vastgelegd en/of onvoldoende gevalideerd. Er is bijvoorbeeld onvoldoende informatie over de invloed van verschillende zandeigenschappen op het proces. Ook is weinig bekend 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.

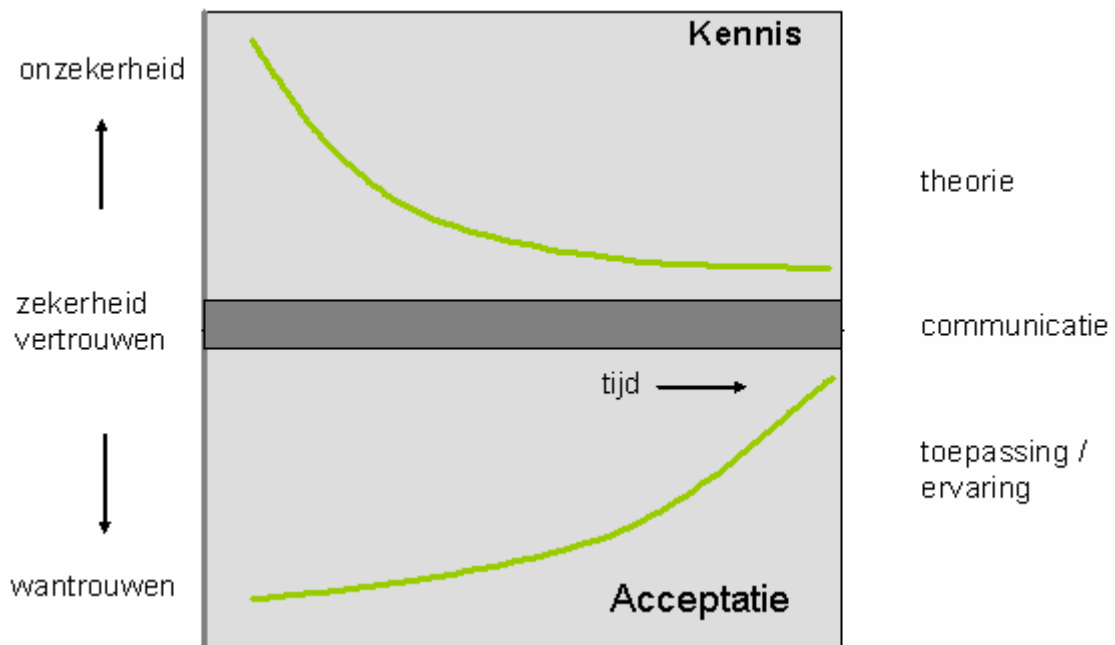
De rekenregel van Bligh [1910] is gebaseerd op empirie van bezweken en niet bezweken dammen, met name uit India. De rekenregel van Sellmeijer is gebaseerd op een mathematische beschrijving van de grondwaterstroming door het zandpakket en de pipe en de beschrijving van de stabiliteit van de zandkorrels in de pipe. De mathematische beschrijving is gefit aan enkele pipingproeven die zijn uitgevoerd in de Deltagoot. Het pipingproces wordt in de rekenregel van Sellmeijer vanuit een meer complete modellering beschreven dan in de regel van Bligh.

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

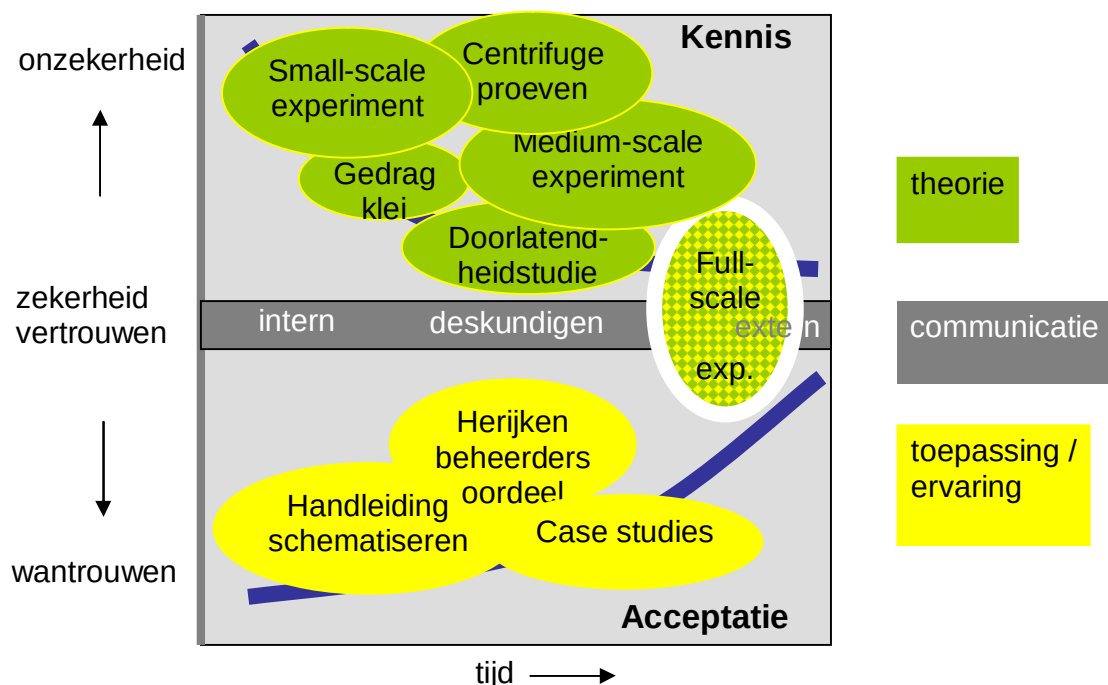
De rekenregels van Bligh en Sellmeijer houden geen rekening met de verticale stroming en zandtransport door een kanaal in de afdeklaag. In de praktijk wordt hiermee pragmatisch omgegaan door het verval over de kering te reduceren met 0,3 keer de dikte van de afdeklaag, de zogenoemde 0,3d rekenregel. Deze rekenregel is niet gevalideerd, een recente evaluatie ervan is gegeven in [Koelewijn, 2009]. Door onvoorziene omstandigheden ontstond tijdens proef 4 een situatie die als case kan bijdragen aan de validatie van deze rekenregel, zie hiervoor bijlage A van deze rapportage.

Het SBW onderzoek probeert de onzekerheden rondom de theorie en de toepassing van de rekenregel van Sellmeijer te verkleinen door de kennis te ontwikkelen (Figuur 1.1). In Figuur

1.2 zijn de belangrijkste deelonderzoeken uit het SBW Hervalidatie piping programma aangegeven.



Figuur 1.1 Ontwikkeling van kennis en acceptatie in de tijd



Figuur 1.2 Onderzoeksstrategie binnen SBW Hervalidatie piping

Voor de hervalidatie van het proces zijn inmiddels kleine schaalproeven, medium-scale proeven, centrifugeproeven en full-scale proeven uitgevoerd. In de kleine schaalproeven is de invloed van verschillende parameters op het pipingproces onderzocht. De relatie met de d_{70} ,

zoals opgenomen in de rekenregel van Sellmeijer, werd in deze proeven niet teruggevonden. Uit de regel van Sellmeijer volgt een toename van het kritiek verhang bij een grotere korreldiameter. In de kleine schaalproeven werd deze invloed niet of nauwelijks gevonden. Verder bleek de relatieve dichtheid van het zand van invloed te zijn op het type proces en op de grootte van het verhang. Enigszins onverwacht bleken er ook andere bezwijkmechanismen mogelijk dan het door de regel van Sellmeijer beschreven mechanisme. Niet altijd is er sprake van terugschrijdende erosie. Bij losgepakt zand traden andere erosiemechanismen op waarbij lagere kritieke verhangen werden gevonden. De invloed van de lengteschaal op het kritiek verhang werd goed voorspeld door de regel van Sellmeijer. Met behulp van een multi-variate analyse, uitgevoerd op deze proefresultaten, is een nieuwe hypothese opgesteld die als voorstel dient voor een aanpassing van de rekenregel. In de medium-scale proeven is een tweetal zanden beproefd bij verschillende relatieve dichtheden. De gevonden relatie tussen d_{70} en kritiek verval, zoals gevonden in de kleine schaalproeven, werd in deze proeven niet tegengesproken. De invloed van de lengteschaal werd ook in deze proeven goed voorspeld door het model van Sellmeijer.

De centrifugeproeven zijn uitgevoerd om een eerste indruk te krijgen hoe een dijk zou kunnen bezwijken onder invloed van piping. In een schaalmodel (1:80) is een kleidijk op een zandlaag gemodelleerd, welke bezweek na geleidelijke ophoging van het verval. De proeven toonden aan dat het bezwijken van een dijk in stappen kan verlopen. Periodes met veel zandtransport hoeven niet direct tot bezwijken te leiden, maar kunnen gevolgd worden door periodes met minder of geen transport, doordat de dijk gedeeltelijk inzakt. Op basis van deze proeven is de verwachting dat de dijk na het optreden van piping aan de benedenstroomse zijde steeds meer inzakt, totdat het water over de kruin gaat lopen (mits hiervoor het waterniveau hoog genoeg is). Verder zijn in deze proeven de schalingsregels getoetst voor hogere stroomsnelheden en zwaardere korrels (door het verhoogde g-niveau). Het bleek dat een hoger g-niveau (en dus een hogere stroomsnelheid) leidt tot een lager kritiek verhang, ondanks de door het hoge g-niveau zwaardere korrels. Dit is in overeenstemming met de gevonden relatie tussen grotere korrels en het kritieke verhang bij 1 g.

Een validatie van de via multivariate analyse bepaalde hypothese voor redelijk vastgepakt zand ($50\% < R_d < 80\%$) vindt plaats in een full-scale experiment. Voor losser en vaster gepakt zand lijken op basis van de kleine schaalproeven andere mechanismen te spelen.

De full-scale proeven zijn uitgevoerd op de locatie van de IJkdijk in het Oost-Groningse Booneschans. Om de grootste aanpassing in de rekenregel te kunnen valideren, namelijk de invloed van de korreldiameter, zijn twee soorten zand met verschillende korreldiameter tweemaal beproefd. Van elk van deze vier proeven zijn factual reports verschenen [Koelewijn et al., 2009a], [van Beek et al., 2009b], [Knoeff & De Bruijn, 2009] en [Koelewijn et al., 2009b]. Dit rapport bevat de voorlopige analyse van deze full-scale proeven.

1.3 Doelstelling

De full-scale proeven worden binnen SBW piping uitgevoerd vanwege de volgende redenen:

- Het primaire doel van de full-scale proeven is het valideren van de op basis van de eerdere schaalproeven aangepaste rekenregel (uitgangspunt is de rekenregel van Sellmeijer).
- De secundaire doelstelling van de full-scale proeven is het valideren van theorie- en procesbeschrijving vanaf het ontstaan van het begin van het zandtransport tot aan het ontstaan van een doorgaande pipe en het daadwerkelijk ontstaan van dijkfalen.

Omdat een full-scale proef inzicht geeft in het werkelijke proces van bezwijken van een dijk als gevolg van het faalmechanisme piping, draagt het hiermee als showcase bij aan de brede acceptatie van het fenomeen bij waterkeringbeheerders en burgers (Figuur 1.1).

De primaire doelstelling van de full-scale proeven is het verkrijgen van gegevens ter validatie van de hypothese, opgesteld op basis van de small- en medium-scale proeven zodat deze hypothese kan worden omgezet tot een verbeterde rekenregel. Er zijn vier proeven uitgevoerd, waarbij de eerste en de vierde proef zijn gebruikt om bedrijven binnen het IJkdijk-consortium de kans te geven aan te tonen dat zij met hun meetinstrumenten aan het pipingproces kunnen meten.

De eerste proef had vooral een verkennend karakter, waarbij vooral het systeem van meten, en de invloed van meters op het pipingproces worden geanalyseerd. Mede daarom was er in deze proef extra monitoring voorzien door bedrijven die deelnemen aan het IJkdijk project.

In de tweede en derde proef lag de nadruk op het verkrijgen van hoogwaardige data ten behoeve van het hierboven beschreven SBW onderzoek. Voor deze beide proeven is de behoefte aan monitoring afgewogen tegen het mogelijke storende effect van monitoringselementen in de zandlaag waar piping moet gaan optreden.

In de vierde proef lag de nadruk wederom op monitoring door de bedrijven. Voor beide typen vervolproeven waren de ervaringen uit deze eerste proef van groot belang.

Opgemerkt wordt dat de vierde proef vooralsnog slechts betrekkelijk summier is geanalyseerd, dit hoofdzakelijk vanwege de beperkte beschikbare tijd en het daarmee gepaard gaande gebrek aan feitelijke rapportages voor alle meetsystemen uitgezonderd de referentiemonitoring van Deltares. In 2010 is voorzien in een nadere analyse.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport omvat een beknopte analyse van de full-scale proeven. In hoofdstuk 2 is een korte beschrijving weergegeven van de proefopstelling en uitvoering van de proeven. Vervolgens zijn in hoofdstuk 3 de waargenomen verschijnselen en processen weergegeven. In hoofdstuk 4 is ingegaan op de monitoring en de mogelijkheid om het pipingproces middels monitoringstechnieken te volgen. Tenslotte zijn in hoofdstuk 5 de conclusies en aanbevelingen geformuleerd.

2 Beschrijving full-scale proeven

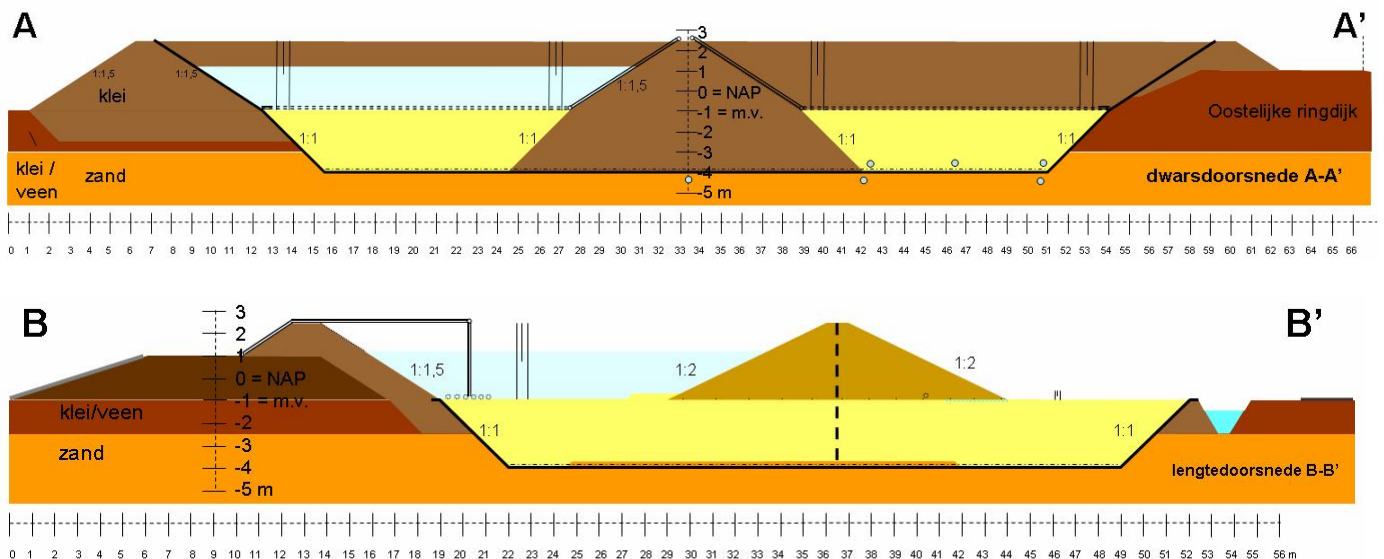
Voor een volledige beschrijving van de proefopstelling en de uitvoering van de proeven wordt verwezen naar het draaiboek [de Vries, 2009] en de factual reports van Deltares van de afzonderlijke proeven [Koelewijn et al., 2009a], [van Beek et al., 2009b], [Knoeff, de Bruijn, 2009] en [Koelewijn et al., 2009b].

2.1 Proefopstelling

Op de locatie van de IJkdijk zijn twee proefbakken gerealiseerd, bak A en bak B. Deze bakken zijn gevuld met twee soorten zand, matig grof IJkdijkzand (bak A) en fijn IJkdijkzand (bak B).

2.1.1 Configuratie

De afmetingen van beide bakken waren in principe gelijk. De bodem van de bak heeft een oppervlakte van 27x9m en de wanden lopen op onder een helling van 1:1. Door problemen met opbarsten is in bak A de bodem ondieper gemaakt. Hierdoor komt het zandpakket in bak A hoger te liggen dan in bak B en zijn de afmetingen van dit zandpakket iets anders. Het oppervlak van het doorstroomde zandlichaam is hierdoor groter. Vanwege deze problemen heeft de eerste proef in bak B plaatsgevonden, evenals de derde proef. De tweede en de vierde proef zijn in bak A uitgevoerd.



Figuur 2.1 Configuratie full-scale experimenten (lengte- en dwarsdoorsnede)

2.1.2 Zandeigenschaften

De eigenschappen van de twee in de full-scale proeven zanden toegepaste zanden, zoals bepaald op voorafgaand aan de bouw aangeleverde monsters, zijn weergegeven in Tabel 2.1. De minimum en maximum droge dichtheid zijn op twee manieren bepaald, zowel met de

droge methode als de verzadigde methode¹. De relatieve dichtheid wordt bepaald op basis van de droge dichtheid, die met de natte methode is bepaald.

	D ₇₀ [μm]	U [-]	ρ _{min_dry}	ρ _{min_nat}	ρ _{max_dry}	ρ _{max_nat}
Fijn IJkdijkzand	180	1,6	1,39	1,437	1,74	1,701
Matig grof IJkdijkzand	260	1,8	1,46	1,466	1,81	1,734

Tabel 2.1 Eigenschappen IJkdijkzanden

De doorlatendheid van het zandpakket is afhankelijk van de verzadigingsgraad en de relatieve dichtheid van het zand en is bepaald bij verschillende porositeiten (Tabel 2.2). Tijdens de proeven wordt de exacte doorlatendheid afgeleid uit het verval dat over de kering staat en het gemeten debiet dat onder de IJkdijk doorstroomt.

Fijn IJkdijkzand		Matig grof IJkdijkzand	
n [%]	k [m/s]	n [%]	k [m/s]
42.7	1.5E-4	40.6	2.1E-4
40.1	1.1E-4	37.4	1.4E-4
38.4	9.9E-5	36.0	1.2E-4

Tabel 2.2 Doorlatendheid IJkdijkzanden

2.2 Proevenprogramma en proefuitvoering

In totaal zijn 4 proeven uitgevoerd:

- Proef 1: participantenproef op fijn zand (systeemcheck voor proef 2 en 3);
- Proef 2: SBW proef op matig grof zand;
- Proef 3: SBW proef op fijn zand;
- Proef 4: participantenproef op matig grof zand.

De proeven 2 en 3 zijn uitgevoerd ten behoeve van de validatie van het rekenmodel. In proef 1 en proef 4 zijn meerdere meettechnieken in de interface tussen het zand en de kleidijk gelegd die vanwege de onderzoeksvraag voor SBW niet in proef 2 en 3 mochten. In proef 4 is eveneens geprobeerd om met de Luisterbuis (een geïnstrumenteerde drainagebuis) een aantal interventies te doen waarbij door water weg te draineren van onder de dijk is getracht het proces te doen stoppen.

In Tabel 2.3 zijn de exacte afmetingen en eigenschappen (bulkdoorlatendheid en relatieve dichtheid) van het zandpakket van de vier proeven weergegeven. In deze tabel en de navolgende tekst wordt met de breedte van het zandpakket de breedte parallel aan de teen van de dijk bedoeld. Met de lengte van het zandpakket wordt de kwelweglengte bedoeld.

1. De droge dichtheidsbepaling wordt uitgevoerd door droog zand te verdichten. De natte methode wordt uitgevoerd door zand in te strooien in water, waarbij gelijktijdig verdicht wordt. De dichtheid van het verzadigde zand wordt vervolgens teruggerekend naar een droge dichtheid.

Proef	Zandsoort	Dikte [m]	Breedte [m]	Lengte [m]	A [m ²]	k [m/s]*	RD [-]
1	Fijn zand	3	17	15	36.7	7.8E-5	0.6
2	Matig grof zand	2.85	19	15	41.8	1.35E-4	0.75
3	Fijn zand	3	17	15	36.7	8E-5	0.6
4	Matig grof zand	2.85	19	15	41.8	1.2E-4	0.7

* bulkdoorlatendheid bij 12 graden, niet gecorrigeerd voor eventuele in- uittredeweerstand

Tabel 2.3 Afmetingen en eigenschappen zandpakket

In de proeven is het peil aan de bovenstroomse zijde doorgaans opgehoogd met 10 cm/uur totdat er zandtransport werd waargenomen. Wanneer dit vervolgens weer stopte werd er opnieuw met 10 cm opgehoogd. Vanwege de maximale duur van iedere proef (1 week) is, nadat zandtransport had plaatsgevonden, het verval enkele malen opgehoogd om het proces te versnellen. In de hierna volgende figuren is een overzicht gegeven van het aangebrachte verval en het optreden van verschillende fasen van piping.

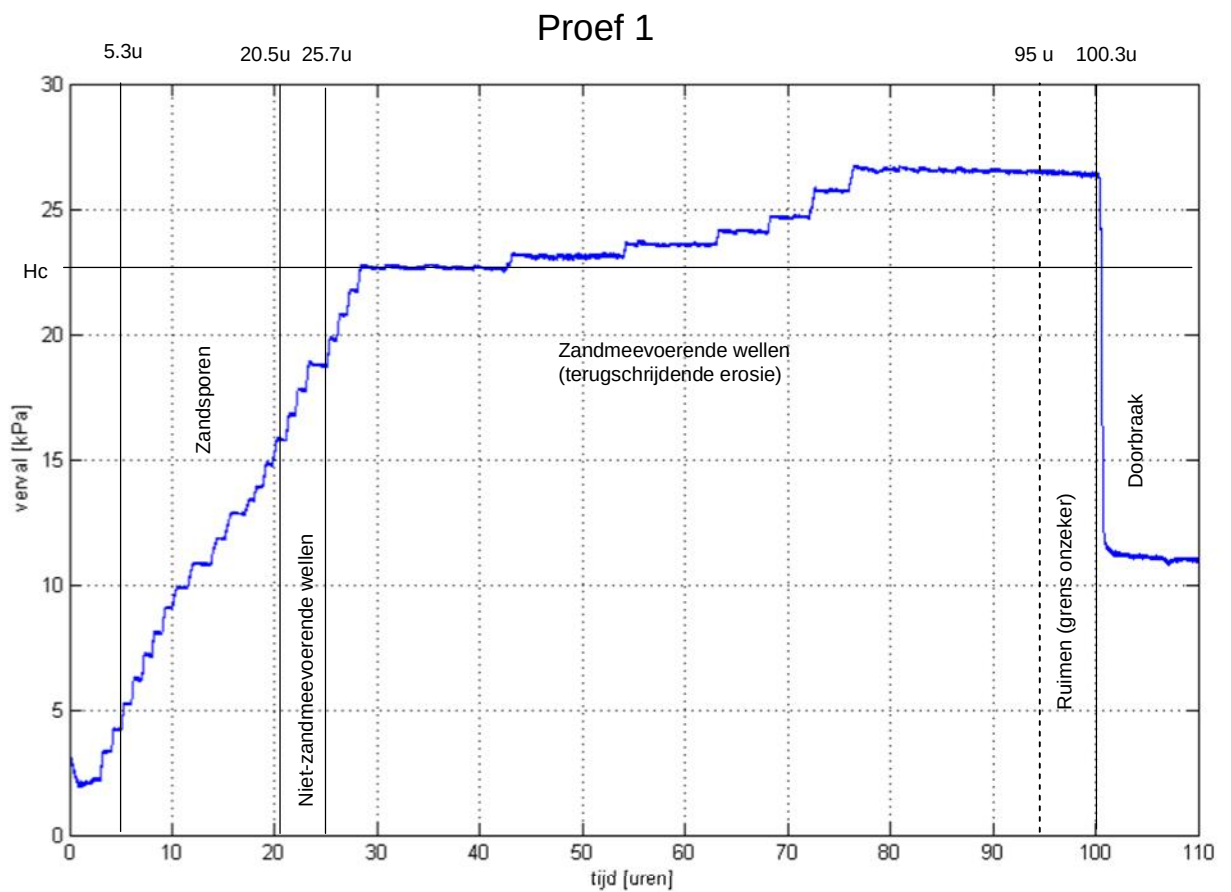
In de rest van dit hoofdstuk wordt het verloop van de proeven kort beschreven. Daarbij worden het verval in de tijd en de verschillende fasen van het pipingproces aangegeven. Onderscheid wordt gemaakt tussen de volgende processen:

- Zandsporen: Zandsporen worden aan de binnenteen van de dijk waargenomen zonder dat zandtransport zichtbaar is.
- Niet-zandmeevoerende wellen: In de stofwolkjes ontstaan kraters waarbij het zand niet over de rand wordt afgezet. Ook ontstaan welletjes waaromheen geen zandkrater zichtbaar is.
- Zandmeevoerende wellen en terugschrijdende erosie. Uit de wellen wordt zichtbaar zand afgevoerd. Waterspanningen geven aan dat kanaaltjes in bovenstroomse richting groeien
- Zandmeevoerende wellen en ruimen. Uit de wellen wordt nog steeds zand afgevoerd. Het kanaal heeft de bovenstroomse zijde bereikt. De waterspanningen nemen bovenstrooms sterk toe. De verhoging van druk beweegt richting benedenstrooms.
- Doorbraak. De dijk bezwijkt en kan niet meer goed aan zijn waterkerende functie voldoen.

Tijdens proef 1 (Figuur 2.2) is vanaf 25,7 uur een zandmeevoerende wel waargenomen. Vanaf 2,3 m verschil in niveau is er zandtransport op meerdere locaties. Er is in deze fase in verband met tijdsdruk en onzekerheid over het verloop van het proces verschillende keren opgehoogd, hoewel het zandtransport niet stagneerde.

Het verloop van het proces was niet gemakkelijk te volgen, doordat er geen waterspanningsmeters geplaatst waren in de gehele bovenstroomse helft van de dijk. De start van het ruimproces is om die reden niet goed waar te nemen.

Het kritiek verval wordt geschat op 2,30 m. Bij dit verval trad zodanig zandtransport op dat het aannemelijk is dat zich op den duur een doorgaande pipe zou vormen.

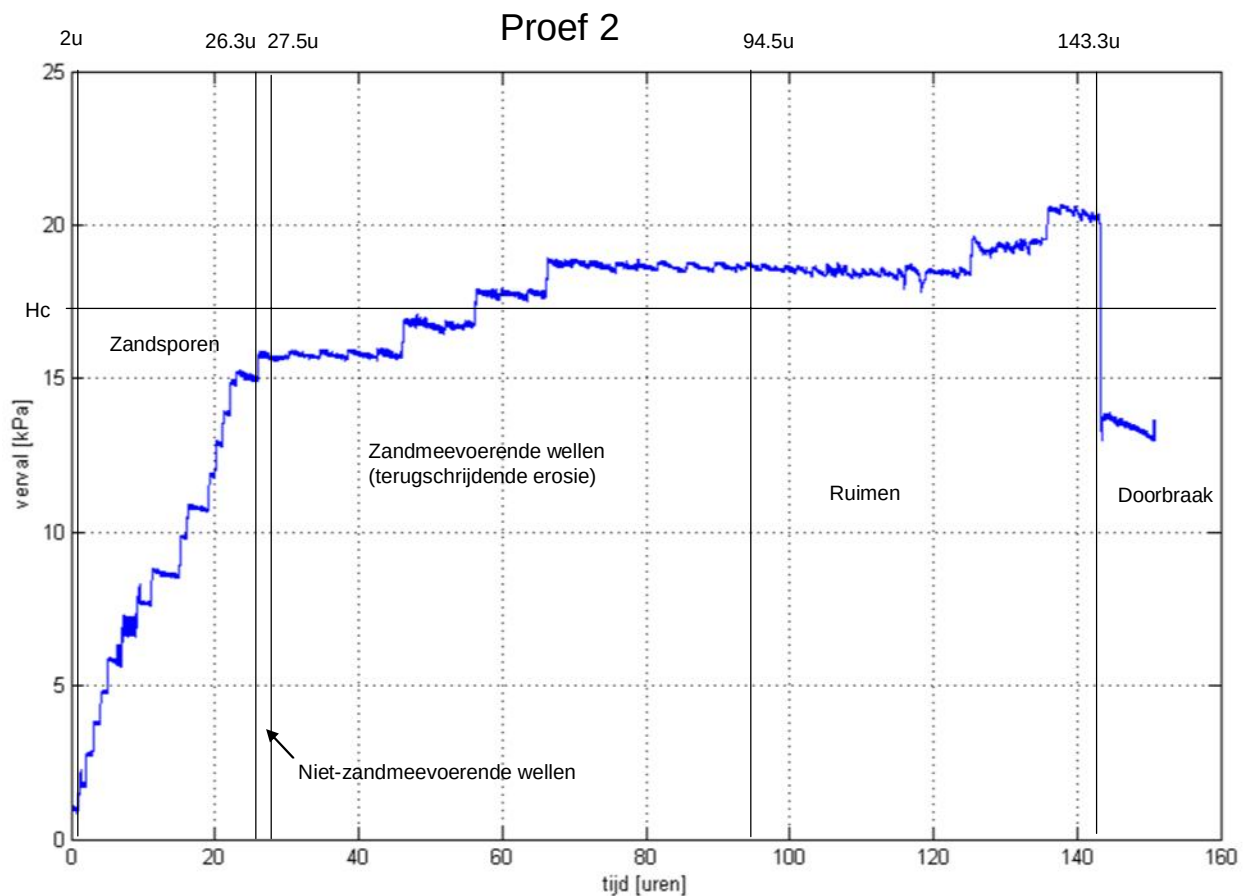


Figuur 2.2 Verloop van verval en waarnemingen voor proef 1

In proef 2 (Figuur 2.3) trad de eerste zandmeevoerende wel op na 27,5 uur. Het zandtransport was zeer gering, maar stabiliseerde niet. Uit tijdsoverwegingen is het verval geleidelijk opgehoogd van 1,6 m naar 1,9 m. Bij 1,9 m werd het kanaal voerend (verbinding tussen benedenstrooms en bovenstrooms).

Het kritiek verval wordt geschat op 1,75 m: de gemiddelde waarde tussen 1,6 m en 1,9 m.

Bij proef 3 (Figuur 2.4) is het optreden van zandtransport moeilijk vast te stellen in verband met het troebele water in het benedenstrooms bassin. De eerste zandmeevoerende wel is waargenomen bij een verval van 2,10 m. Op basis van de waterspanningsmetingen is vastgesteld dat er mogelijk al eerder zandtransport is opgetreden. Bij een verval van 2,10 m groeit het kanaal van benedenstrooms naar bovenstrooms. Het kritiek verval wordt daarom ook geschat op 2.1 m.

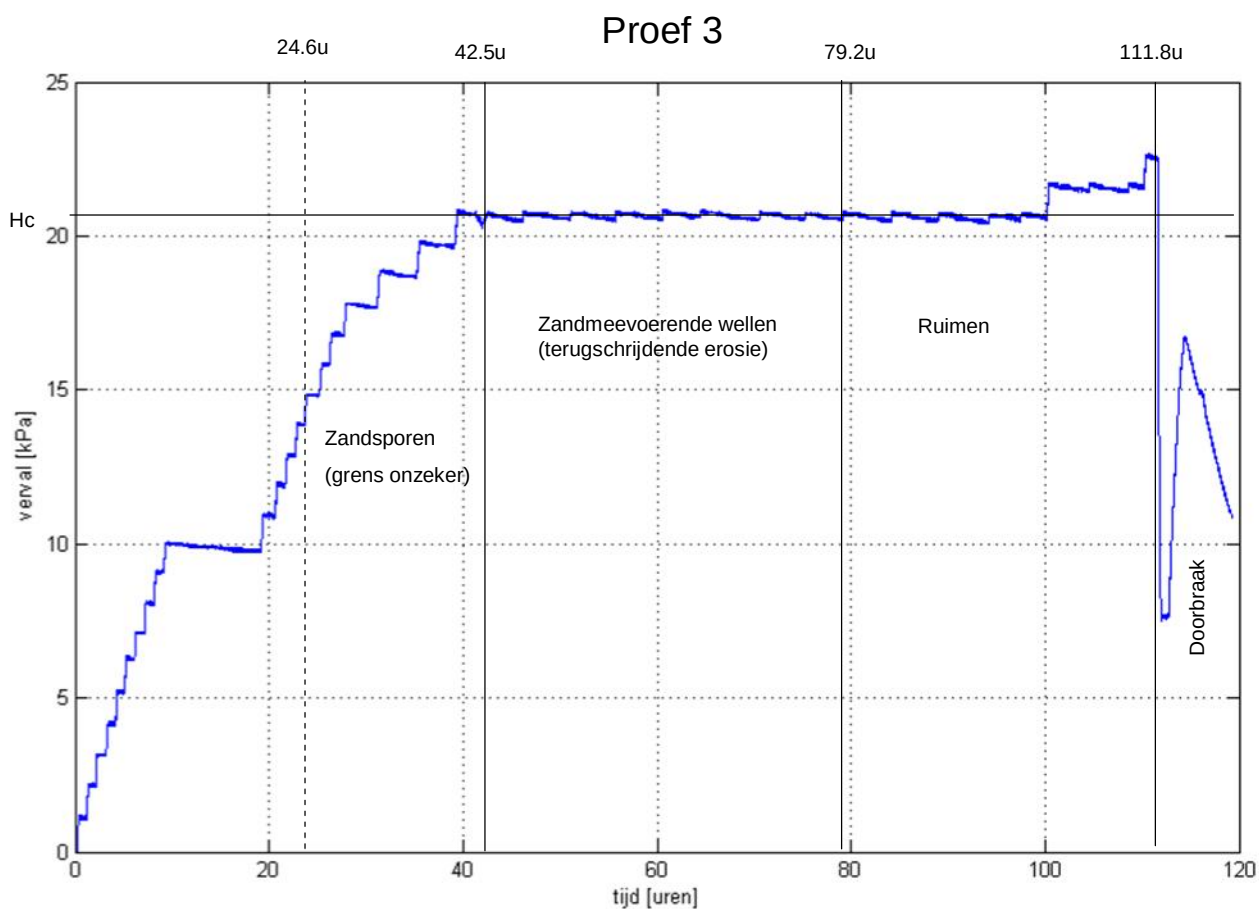


Figuur 2.3 Verloop van verval en waarnemingen voor proef 2

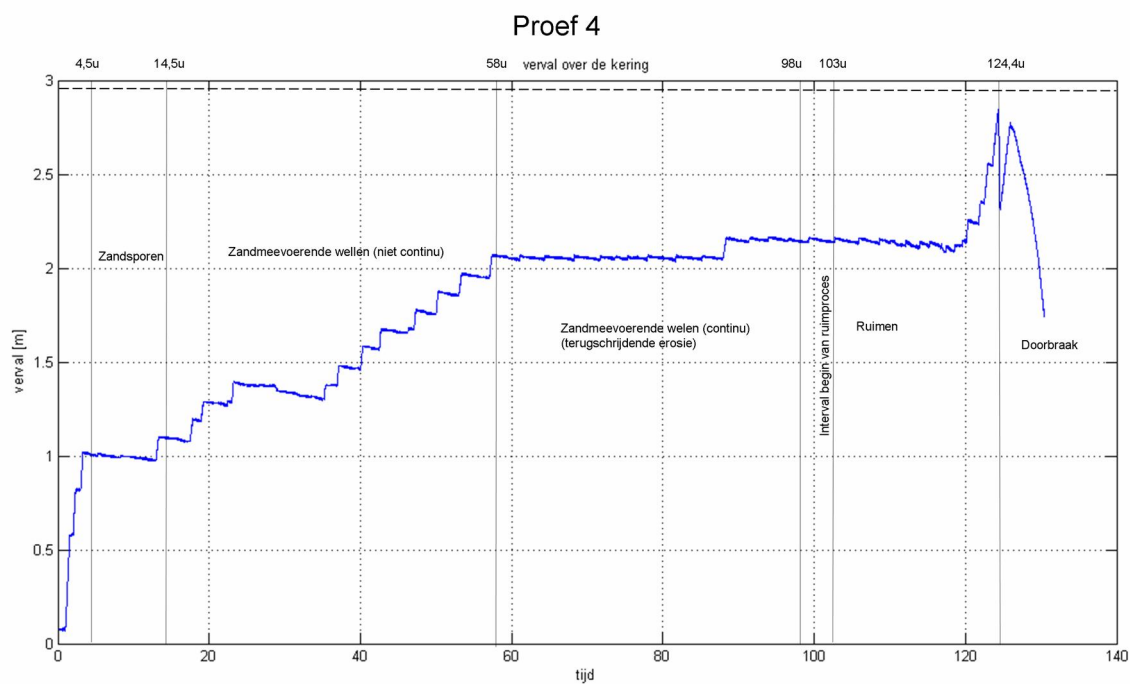
In proef 4 (Figuur 2.5) zijn de eerste zandmeevoerende wellen al bij een verval van 1,07 m waargenomen, dit was na 14,5 uur. Het zandtransport stopte echter al snel weer, om in enkele gevallen na een peilverhoging weer even op gang te komen. Vanaf een verval van 2,03 m, dat na 58 uur werd bereikt, stopte het zandtransport niet meer. Omwille van de tijd is na ruim een etmaal het verval met 10 cm verhoogd. Afgaande op de waarnemingen met de waterspanningsmeters op 3/4 van de afstand benedenstrooms – bovenstrooms is 98 tot 103 uur na de start van de proef het ruimproces begonnen, mogelijk kort voor $T = 101,5$ uur, zie daartoe ook Figuur 4.4. Daarna, voor het eerst rond 108 uur na de start van de proef, werd meermalen een zeer hoge waterdruk dicht bij de benedenstroomse teen van de dijk gemeten, hetgeen ook gepaard ging met grote volumes water en zand. Het kritisch verval bij deze proef wordt dan ook geschat op 2,13 m.

Tijdens de proef is zoals gepland drie maal de waterdruk midden onder de dijk verlaagd met behulp van de Luisterbuis (een geïnstrumenteerde drainagebuis). Daarvan is overigens alleen de middelste keer geheel volgens plan verlopen. Bij de laatste keer was het niet meer mogelijk om deze buis weer dicht te zetten, waarna besloten is om het verval versneld te verhogen. Bij een verval van 2,80 m trad uiteindelijk de doorbraak op.

Na de doorbraak ten gevolge van piping is het verval opnieuw opgezet, totdat overlopen van de kruin optrad – vandaar de tweede piek in het verval na de doorbraak. Merk overigens op dat de kruin toen inmiddels zodanig was verzakt dat het verval bij overlopen slechts 2,74 m bedroeg.



Figuur 2.4 Verloop van verval en waarnemingenvoor proef 3



Figuur 2.5 Verloop van verval en waarnemingen voor proef 4

3 Beschrijving waargenomen verschijnselen en processen

De beschrijving van waargenomen verschijnselen en processen is van belang voor het valideren van het rekenmodel. De validatie kan nooit alleen bestaan uit het vergelijken van de kritieke verhangen van vier proeven. Hiervoor is het proefaantal te gering. Het beschouwen van het proces geeft inzicht in de betrouwbaarheid en de onderlinge vergelijkbaarheid van de proeven. Daarnaast geeft het proces in het full-scale proeven een indruk van de betrouwbaarheid van de kleine- en medium-schaalproeven. Indien de kleine-schaalproeven en medium-schaalproeven een vergelijkbaar proces laten zien als de full-scale proeven, bieden deze proeven extra ondersteuning voor de validatie.

In dit hoofdstuk worden de processen en verschijnselen in de full-scale proeven beschreven. Het proces is hierbij in vier fasen opgedeeld: kwel, pipe-vorming (terugschrijdende erosie), pipevorming (ruimen) en doorbraak.

3.1 Kwel

Voorwaarde voor piping is een stroming onder de dijk door. Aan de binnenzijde van de dijk treedt kwelwater uit. Het debiet dat onder de dijk doorstroomt is afhankelijk van de dikte van de watervoerende zandlaag, de doorlatendheid van de watervoerende zandlaag en het verval dat over de dijk heen staat.

Bij de IJkdijkproeven wordt continu de kwel gemeten door het water dat over een overlaat benedenstrooms uit de bak weg stroomt. Bijzondere waarnemingen zijn in dit verband:

- Tijdens proef 1 loopt het debiet bij constant verval terug. Harken van het zand bovenstrooms leidt tot stijging van het debiet;
- Bij proef 3 neemt, wanneer het debiet achter blijft bij de verwachting, het debiet eveneens toe als het zand bovenstrooms wordt geharkt;
- Tijdens proef 1 en 3 blijkt dat het debiet (sterk) afhankelijk is van neerslag;
- Tijdens de tweede dag van proef 4 is het debiet hoger ten gevolge van de lekkage in het afvoerleidingsstelsel van de Luisterbuis.

Op bovengenoemde uitzonderingen na is het debiet lineair afhankelijk van het verval. Uit het debiet kan de bulkdoorlatendheid van het zandpakket worden afgeleid. Deze komt overeen met de gemiddelde doorlatendheid die is afgeleid uit falling-headproeven in peilbuizen die zijn uitgevoerd na verzadiging van het zandpakket. De falling-headproeven geven aan dat de doorlatendheid niet helemaal uniform is. De afwijkingen zijn echter klein. Tussen de grootste en laagste gemeten doorlatendheid zit in proef 1 een factor 5. In proef 2 en 3 is het verschil nog kleiner, zie Tabel 3.1. Van proef 4 zijn geen gegevens beschikbaar.

Proef 1	Proef 2	Proef 3
$k_{\text{falling head1}} = 1,2\text{E-}04 \text{ m/s}$	$k_{\text{falling head1}} = 2,2\text{E-}04 \text{ m/s}$	$k_{\text{falling head1}} = 1,4\text{E-}04 \text{ m/s}$
$k_{\text{falling head2}} = 8,7\text{E-}05 \text{ m/s}$	$k_{\text{falling head2}} = 1,4\text{E-}04 \text{ m/s}$	$k_{\text{falling head2}} = 1,2\text{E-}04 \text{ m/s}$
$k_{\text{falling head3}} = 2,4\text{E-}05 \text{ m/s}$	$k_{\text{falling head3}} = 6,5\text{E-}05 \text{ m/s}$	$k_{\text{falling head3}} = 1,5\text{E-}04 \text{ m/s}$
$k_{\text{falling head4}} = 1,0\text{E-}04 \text{ m/s}$	$k_{\text{falling head4}} = 1,1\text{E-}04 \text{ m/s}$	$k_{\text{falling head4}} = 1,2\text{E-}04 \text{ m/s}$
$k_{\text{falling head5}} = 7,1\text{E-}05 \text{ m/s}$		
$k_{\text{falling head6}} = 1,1\text{E-}04 \text{ m/s}$		
$k_{\text{falling head7}} = 9,3\text{E-}05 \text{ m/s}$		
$k_{\text{falling head8}} = 1,2\text{E-}04 \text{ m/s}$		
$k_{\text{bulk}} = 0,9\text{E-}0,4 \text{ m/s}$	$k_{\text{bulk}} = 1,3\text{E-}0,4 \text{ m/s}$	$k_{\text{bulk}} = 0,8^{\text{E-}}4$

Tabel 3.1 Vergelijking tussen doorlatendheid afgeleid uit debiet tijdens de proef (k_{bulk}), falling head testen in peilbuizen ($k_{\text{falling head}}$) voorafgaand aan de proef

Met name in proef 1 maar ook in proef 3 is geconstateerd dat het debiet toeneemt na harken van het zand in de bovenstroomse bak. Kleine deeltjes in het water, vermoedelijk afkomstig van de kleidijk, zorgen na bezinking voor een intreeweerstand van het water. De bulkdoorlatendheid die uit het debiet is afgeleid, is dan lager dan de werkelijke doorlatendheid.

Het debiet is zo klein dat neerslag in de bak achter de dijk (ca 150 m²) het debiet significant beïnvloedt. De invloed van de neerslag is groter dan de invloed van pipevorming zoals hierna wordt beschreven.

3.2 Pipevorming (terugschrijdende erosie)

Bij de IJkdijkexperimenten zijn de volgende waarnemingen gedaan. Deze waarnemingen worden in de navolgende alinea's nader toegelicht:

- Bij alle proeven zijn, na het aanbrengen van een gering verval, over de volledige breedte van de dijk zandsporen zichtbaar. Bij proef 2 en proef 4 zijn de sporen al snel zichtbaar. Bij proef 3 pas veel later.
- Na verloop van tijd verdwijnen zandsporen, behalve bij proef 4, waar deze aanwezig blijven in het gebied aan beide zijanten van de waterkering, waar gegraven is om de Luisterbuis aan te sluiten op afvoerleidingen.
- Bij grotere verhangen, enkele decimeters onder het kritieke verhang, worden schone wellen waargenomen.
- Bij proef 2 en 3 worden gaatjes aan de teen van de dijk waargenomen.
- Voordat zandtransport wordt waargenomen dalen de waterspanningen in benedenstroomse raaien.
- Bij proef 2 ontstaat één zandmeevoerende wel. Deze ontwikkelt zich niet uit een bestaande schone wel. Pas aan het eind van de proef, wanneer het verval om tijd te besparen wordt verhoogd, ontstaat een nieuwe zandmeevoerende wel.
- Bij proef 1 en 3 ontstaan meerdere zandmeevoerende wellen. Op één wel na zijn dit allemaal nieuwe wellen (dus geen ontwikkeling schone wel).
- Bij proef 4 wordt één zandmeevoerende wel dominant en ontwikkelt deze zich steeds verder. Andere wellen worden echter ook af en toe zandmeevoerend, om dan weer in een schone wel terug te veranderen.
- Als eenmaal zandmeevoerende wellen ontstaan, neemt het totale zandtransport niet meer af (uitgezonderd de perioden van experimenten met de Luisterbuis in proef 4). Langzaam groeit de pipe naar achteren (in bovenstroomse richting).

- Bij proef 1 en 3 verandert de activiteit van de verschillende wellen. Sommige wellen stoppen helemaal. Soms voert een wel tijdelijk wat minder zand af. De totale hoeveelheid zandtransport blijft echter constant bij gelijkblijvend verval en neemt toe bij toename van het verval.
- Het debiet neemt nauwelijks toe bij pipevorming
- Uit de waterspanningsmetingen kan worden afgeleid waar zich kanaaltjes onder de dijk bevinden.

De waarnemingen worden als volgt geïnterpreteerd:

Zandsporen

Na verhogen van het verval verschijnen in proef 2 al vrij snel stofwolkjes in het water en zandsporen aan de teen van de dijk. Zandsporen zijn zandplekken die aan de teen van de dijk verschijnen en waarbij geen wel wordt waargenomen waar het zand uitstroomt. Hoewel sommige sporen groter worden, wordt geen zandtransport waargenomen. De hoeveelheid zand in de sporen blijft beperkt tot één of enkele eetlepels. Ook bij proef 1 worden vanaf een verval over de kering van circa 0,5 m zandsporen gesignaleerd. Bij proef 3 worden deze verschijnselen pas veel later waargenomen. Doordat in het benedenstrooms bassin in deze proef circa 20 cm troebel water bevindt, is het mogelijk dat zandsporen wel aanwezig waren maar niet zijn gesignaleerd. Na verloop van tijd verdwijnen sommige zandsporen.

Proef	Waterdiepte benedenstrooms bassin [m]
1	0,1
2	0,05
3	0,2
4	0,1

Figuur 3.1 Waterdiepte benedenstrooms bassin



Figuur 3.2 Zandspootje begin proef 1

Proef	Waarnemingen
1	Tussen $H = 0,72$ m en $H = 1,6$ m zijn op een groot aantal locaties zandsporen gevonden.
2	Tussen $H = 0,18$ m en $H = 1,41$ m zijn over de volledige breedte van de dijk zandsporen de enige zichtbare tekenen van piping.
3	Troebel water waardoor de bodem van het benedenstroomse bassin niet zonder hulpmiddelen zichtbaar is. Tussen $H = 1,5$ m en $H = 1,8$ m zandsporen waargenomen.
4	Vanaf $H = 0,78$ m (na versneld ophogen in vergelijking met de eerdere proeven) worden over de hele breedte zandspoortjes waargenomen, aan de beide uiteinden blijft dit zo tot een half uur voor doorbraak, tot aan $H = 2,65$ m.

Tabel 3.2 Waarnemingen begin pipevorming

In proef 1 zijn zandsporen over de volledige breedte waargenomen. In proeven 2, 3 en 4 zijn de zandsporen geconstateerd in clusters. De gemiddelde hart op hartafstand tussen zandsporen bedraagt 1 m.

Het ontstaan van stofwolken en zandsporen heeft geen invloed op de hoeveelheid water dat onder de dijk doorstroomt en kan niet worden gecorreleerd aan waterspanningen die onder de dijk worden gemeten.

De stofwolken en zandsporen die aan de binnenteen van de waterkering worden waargenomen duiden op een lokale concentratie van stroming. Lokaal is een stromingsdruk aanwezig die stofwolken kan activeren en zandkorrels kan uitspoelen. De druk waaronder korrels uitspoelen is klein waardoor uitstroming van zand zo langzaam plaatsvindt dat geen zandtransport wordt waargenomen. Zandtransport is echter noodzakelijk voor de vorming van zandsporen. Concentratie van stroming kan door verschillende aspecten worden veroorzaakt. Ten eerste kunnen lokale inhomogeniteiten in het zandpakket ervoor zorgen dat stroming zich concentreert. Inhomogeniteiten kunnen optreden door verschillen in verdichtingsgraad, verzadigingsgraad, uittredeweerstand of in aansluiting tussen zandpakket en kleidijk.

Concentratie van stroming kan ook ontstaan doordat achter de zandsporen en stofwolken een zeer klein kanaaltje ontstaat. Er is onvoldoende verhang voor een continu transport van zandkorrels door deze kanaaltjes.

De laatste optie vertoont gelijkenis met het proces dat bij sommige kleinschalige proeven is waargenomen en waarbij zonder dat echt sprake is van korreltransport kanalen zichtbaar worden. Door het bewegen van individuele korrels ontstaan in deze proeven benedenstrooms onder de glasplaat 'schone' kanaaltjes (kanaaltjes waardoor geen continue korreltransport plaatsvindt). In de analyse van de kleine schaalproeven wordt dit proces craquelé genoemd. In de medium-scale proeven is het proces van craquelé niet beschreven. Door de dikkere glasplaat is dit proces – indien het zou optreden – minder goed zichtbaar.

Schone wellen

Na verloop van tijd gaan sommige zandsporen over in niet-zandmeevoerende wellen. Er is een duidelijke geconcentreerde uitstroom van water zonder dat het zandspoor zichtbaar groter wordt. Bij proef 2 en 3 zijn ook gaatjes zonder zandsporen in de teen van de dijk zichtbaar.

Proef	Waarnemingen
1	Vanaf $H = 1,1$ m worden schone wellen waargenomen.
2	Tussen $H = 1,50$ m en $H = 1,60$ m worden kleine 'wormgaatjes' aan de teen en schone wellen waargenomen.
3	Tussen $H = 1,80$ m en $H = 2,0$ m worden kleine 'wormgaatjes' en schone wellen waargenomen.
4	Vanaf $H = 1,05$ m (nadat er daarvoor al $H = 1,07$ m heeft gestaan) worden schone wellen waargenomen.

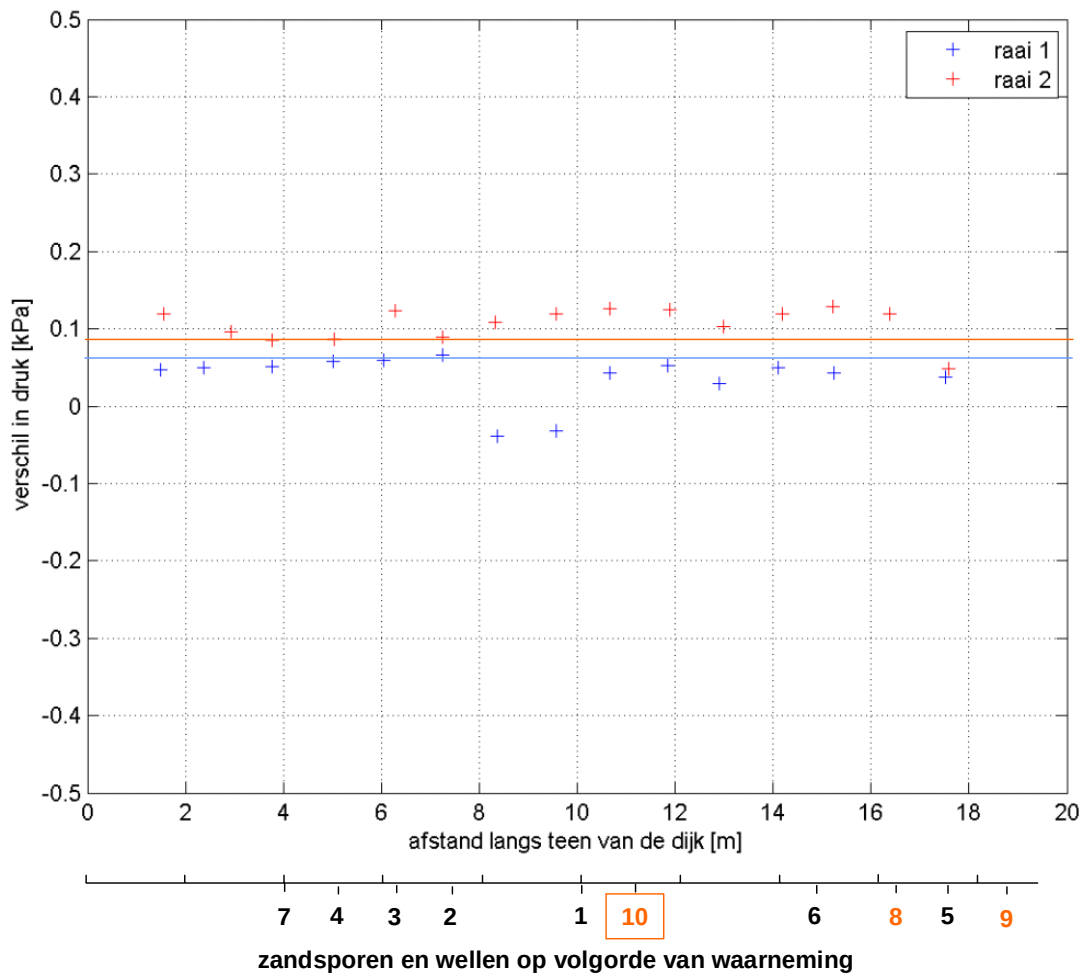
Tabel 3.3 Waarnemingen begin pipevorming- schone wellen

Niet-zandmeevoerende wellen ontstaan doordat lokaal meer water uit het zandpakket onder de dijk stroomt, mogelijk door een lokaal gat in een weerstandbiedende laag (bijvoorbeeld klei aan de binnenteen) of – meer waarschijnlijk - uit een lokaal kanaaltje. Bij een groot uitstroomdebiet is een krater zichtbaar en 'kookt' het water in de krater.

Bij het ontstaan van schone wellen neemt de stroming onder de dijk niet toe. Wel dalen de waterspanningen direct onder de kleidijk benedenstrooms (tot max. circa 2,5 m uit de binnenteen in proef 3). De waterspanningen dalen op locaties waar zich actieve wellen bevinden. Bij proef 1 is dat over de volledige breedte, met wat grotere dalingen bij de locaties van de wellen. Bij proef 2 en 4 dalen de waterspanningen op één locatie en bij proef 3 op twee locaties. Dieper in het zandpakket zijn geen dalingen van waterspanningen zichtbaar.

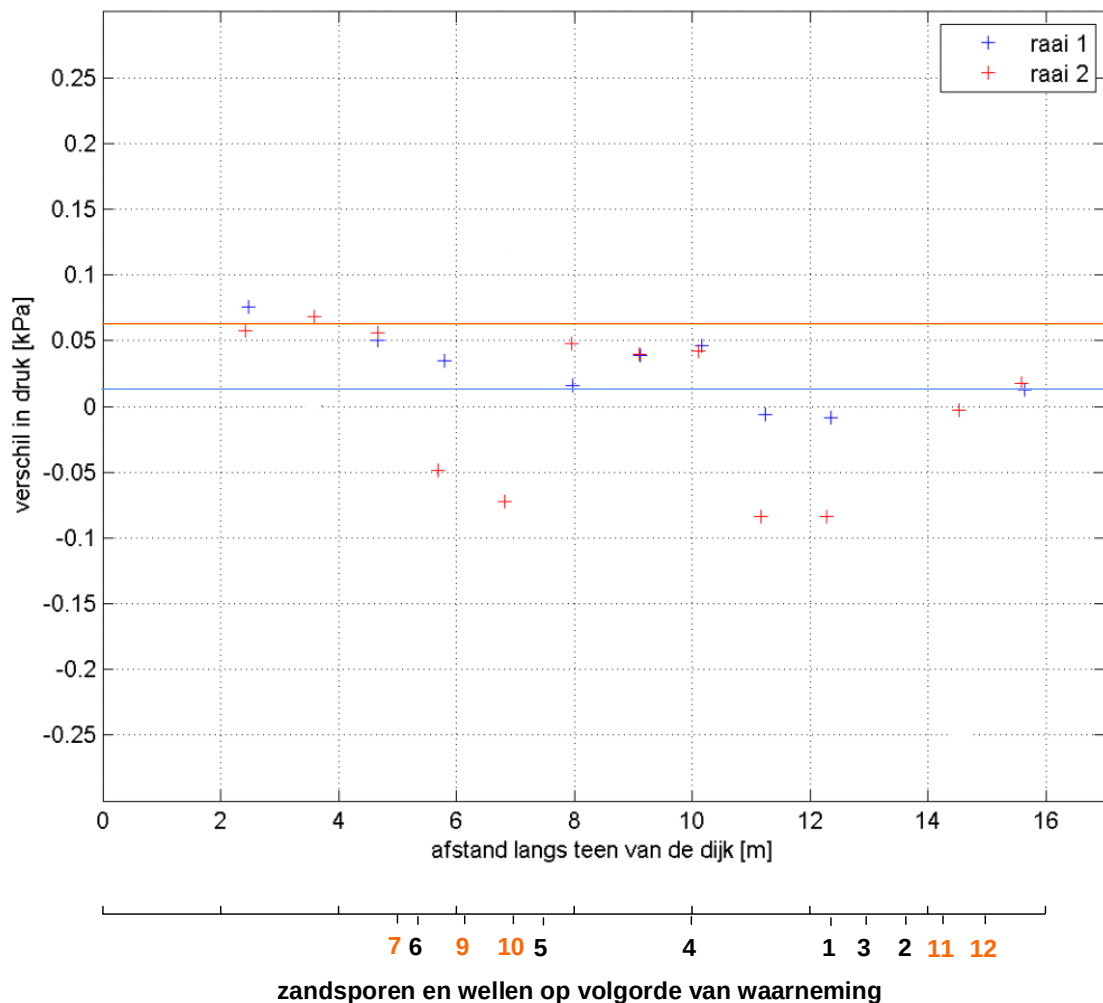
De daling van waterspanningen in de periode dat niet-zandmeevoerende wellen worden waargenomen is voor proef 2 en voor proef 3 grafisch weergegeven in Figuur 3.3 en Figuur 3.4. Op de horizontale as is de locatie evenwijdig aan de teen weergegeven. Onder de as zijn de locaties aangegeven waar zandsporen (zwart) en zandmeevoerende wellen (rood) zijn aangetroffen. Op de verticale as is het verschil in waterdruk uitgezet. Bij proef 2 betreft dit het verschil in waterdruk tussen de tijdstippen direct na verhogen verval tot 1,55 m en vlak voor het verhogen van het verval tot 1,60 m. Bij proef 3 betreft dit het verschil in waterdruk tussen de tijdstippen direct na verhogen verval tot 2,0 m en vlak voor het verhogen van het verval tot 2,1 m. Doordat de verhoging niet direct benedenstrooms voelbaar is, stijgt de waterdruk overal. De doorgetrokken lijn geeft de verwachting van deze stijging aan. Indien echter tussen deze tijdstippen een kanaaltje passeert daalt de waterdruk.

Uit Figuur 3.3 kan worden geconcludeerd dat gedurende de tijd dat in proef 1 een verval van 1,55 m wordt gehandhaafd één of meerdere kanaaltjes op $x = 9$ m raai 1 passeren. Op $x = 11$ m ontstaat bij een verval van 1,60 m een zandmeevoerende wel die uiteindelijk tot een dijkdoorbraak leidt.



Figuur 3.3 verschil waterspanningen proef 2 $H=1,55$ m

Uit Figuur 3.4 kan worden geconcludeerd dat gedurende de periode dat in proef 3 een verval over de kering van 2,0 m is gehandhaafd twee (groepen van) kanaaltjes raai 2 hebben gepasseerd. De locaties van deze groepen komen overeen met de locaties waar zandsporen zijn aangetroffen en later zandmeevoerende wellen ontstaan. Er zijn geen significante verlagingen in raai 1 zichtbaar. Blijkbaar hebben de kanaaltjes op genoemde twee locaties raai 1 al in een eerder stadium gepasseerd.



Figuur 3.4 verschil waterspanningen proef 3 $H=2,0$ m

Op de daling van waterspanningen en het vormen van kanaaltjes achter de wellen wordt later in dit hoofdstuk verder ingegaan.

Overigens kan niet onomstotelijk worden geconcludeerd dat kanaaltjes zich in het zand hebben gevormd. Het is ook mogelijk dat kanaaltjes ontstaan op locaties waar de aansluiting tussen zand en klei lokaal niet optimaal is.

Zandmeevoerende wellen

De eerste zandmeevoerende wellen worden bij proef 1 bij een verval van 2 m waargenomen. Een zandmeevoerende wel wordt daarbij gedefinieerd als een wel die continu zichtbaar zand meevoert. Bij respectievelijk proef 2 en 3 ontstaan de eerste zandmeevoerende wellen bij een kritiek verval van respectievelijk 1,60 m en 2,10 m. Bij proef 4 is dat bij een verval van 2,03 m.

Als eenmaal een zandmeevoerende wel ontstaat is bij proef 1, 2 en 3 niet waargenomen dat het pipingproces tot stilstand komt. Het zandtransport stopt niet. Bij proef 4 is dat wel het geval, óók buiten de experimenten met de Luisterbuis om. Daarbij wordt opgemerkt dat in alle proeven de kraters rondom zandmeevoerende wellen zijn afgeschept zodra ze

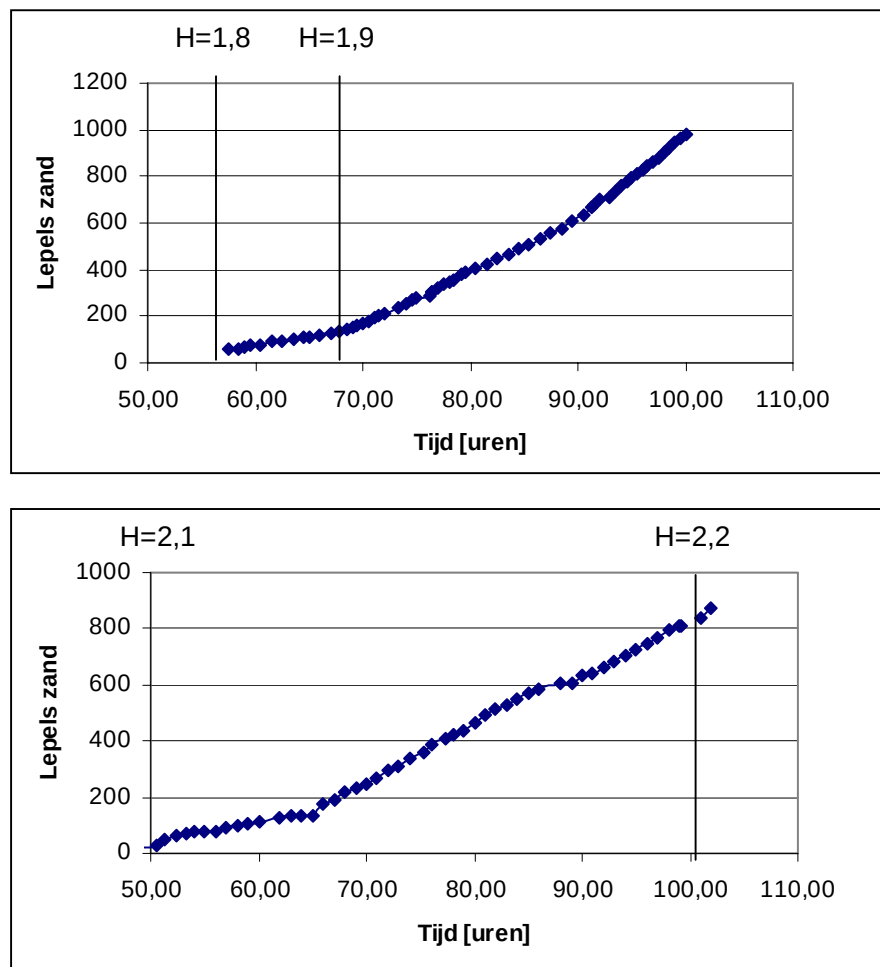
boven water dreigden te komen, dit om opkisting te voorkomen. Bij proef 3 was de waterdiepte in het benedenstrooms bassin hoger dan bij proef 1. Om een vergelijking met proef 1 te kunnen maken is de krater bij proef 3 op circa 10 cm onder water afgeschept. Bij proef 2 waren drie zandmeevoerende wellen aanwezig waarvan slechts één significant (meer dan 1 lepel per uur) zand meevoerde. Pas aan het eind van proef 2 werden op andere locaties relevante zandmeevoerende wellen geconstateerd. Bij proef 1 en 3 waren vanaf het begin meerdere zandmeevoerende wellen actief. De activiteit van de afzonderlijke wellen bij deze proeven wisselde in de loop van de tijd. Sommige wellen vielen zelfs stil. Ook ontstonden nieuwe zandmeevoerende wellen, bijna altijd vlakbij een bestaande zandmeevoerende wel. Het totale zandtransport van de wellen gezamenlijk is voor proef 2 en 3 uitgezet in Figuur 3.7. Bij een bepaald verval is het zandtransport telkens constant. Dit is ook geconstateerd in proef 4.



Figuur 3.5 Zandmeevoerende wel in proef 3 (T=71 uur)



Figuur 3.6 Zandmeevoerende wellen in proef 3 (T=94 uur)

**Proef 2**

Zandtransport begint bij $H=1m60$. zandtransport is constant echter heel klein. Na verhogen verval wordt zandtransport hoger. Bij een bepaald verval blijft het zandtransport constant. Op $t = 93$ uur begint het ruimproces (zie volgende paragraaf)

Proef 3

Zandtransport begint bij $H=2m10$. In het begin zijn alleen de wellen aan de rechterzijde actief. Later ook aan de linkerzijde. Op $t=67$ uur ontstaat een nieuwe actieve wel aan de linkerzijde. Daarna is het zandtransport constant. Aan de linkerzijde begint het ruimproces na ca 80 uur. Aan de rechterzijde na 110 uur.

Figuur 3.7 Zandtransport in de tijd

Het debiet neemt gedurende de pipevorming nauwelijks toe.

Zoals eerder aangegeven duidt verlaging van waterspanningen op kanaalvorming. De verandering van waterspanning ten gevolge van kanaalvorming kan weergegeven worden in contourplots. Op deze manier kan de locatie van het kanaal zichtbaar worden gemaakt. Hiertoe worden de gemeten waterspanningen gecorrigeerd met de verwachte waterspanning, de waterspanning die gemeten zou worden wanneer er geen kanaalvorming is opgetreden. De afwijkingen ten gevolge van kanaalvorming komen op deze manier extra duidelijk naar voren. Een positieve afwijking geeft aan dat de waterspanningen hoger zijn dan zonder kanaalvorming wordt verwacht. Een negatieve afwijking geeft aan dat de waterspanningen lager zijn dan zonder kanaalvorming in een homogeen pakket wordt verwacht.

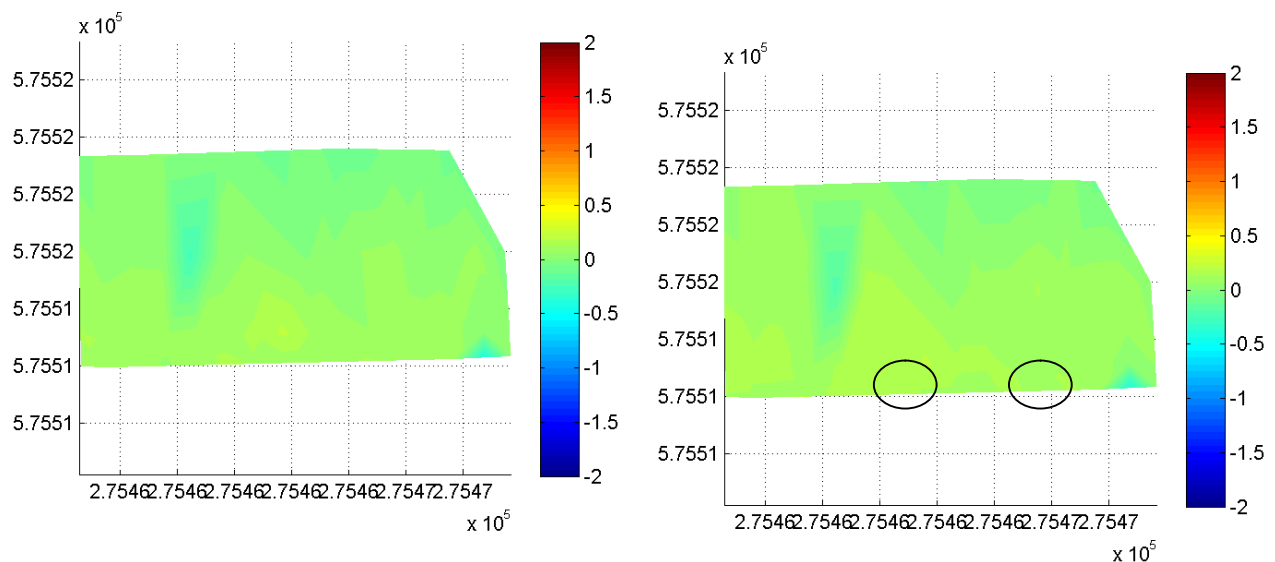
In Figuur 3.9 zijn van proef 3 voor zes tijdstippen contourplots weergegeven. De proeftijd alsmede een beschrijving van de fase is weergegeven onder de grafiek. De teen van de dijk loopt min of meer parallel aan de x-as. De stromingsrichting van het water is weergegeven met een pijl in de eerste contourplot. Uiteraard wordt alleen data weergegeven voor de

locaties waar sensoren aanwezig zijn (dit gebied beslaat dus niet de gehele basis van de dijk). Voor proef 1 en 2 zijn de contourplots weergegeven voor enkele kenmerkende tijdstippen in onderstaande figuren.

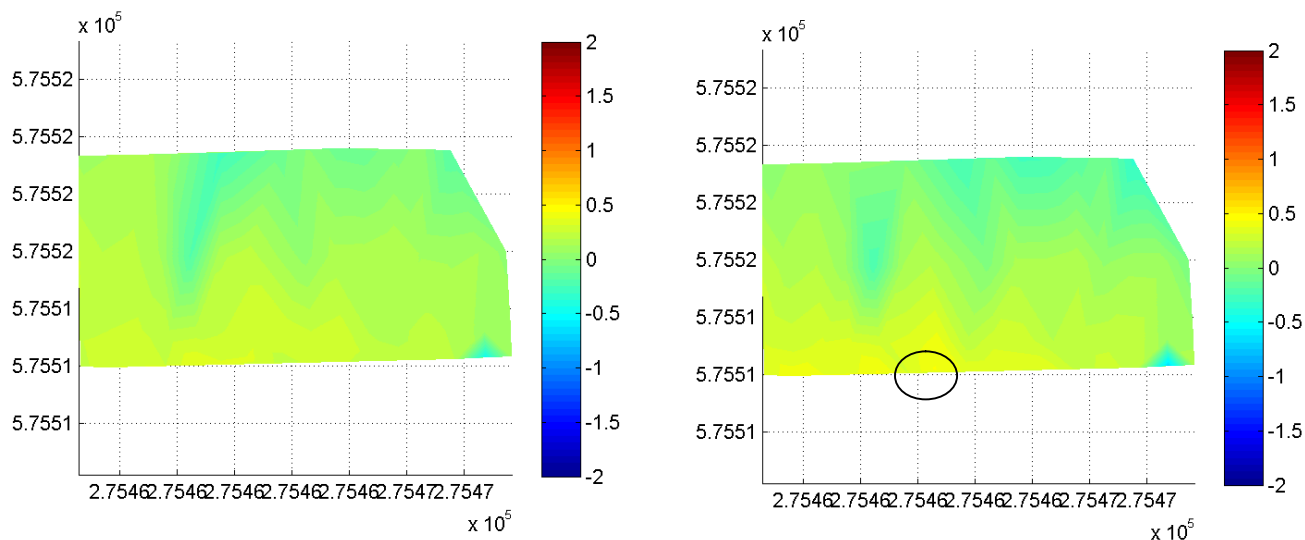
Afnemen van de waterspanning geeft het groeien van het kanaal vanaf benedenstrooms naar bovenstrooms weer. Het toenemen van de waterdrukken geeft het ruimen van de kanaaltjes van boven naar benedenstrooms weer.

De teenlijn van de dijk is onder in de contourplaatjes weergegeven, de metring is van west naar oost, van links naar rechts in de figuren.

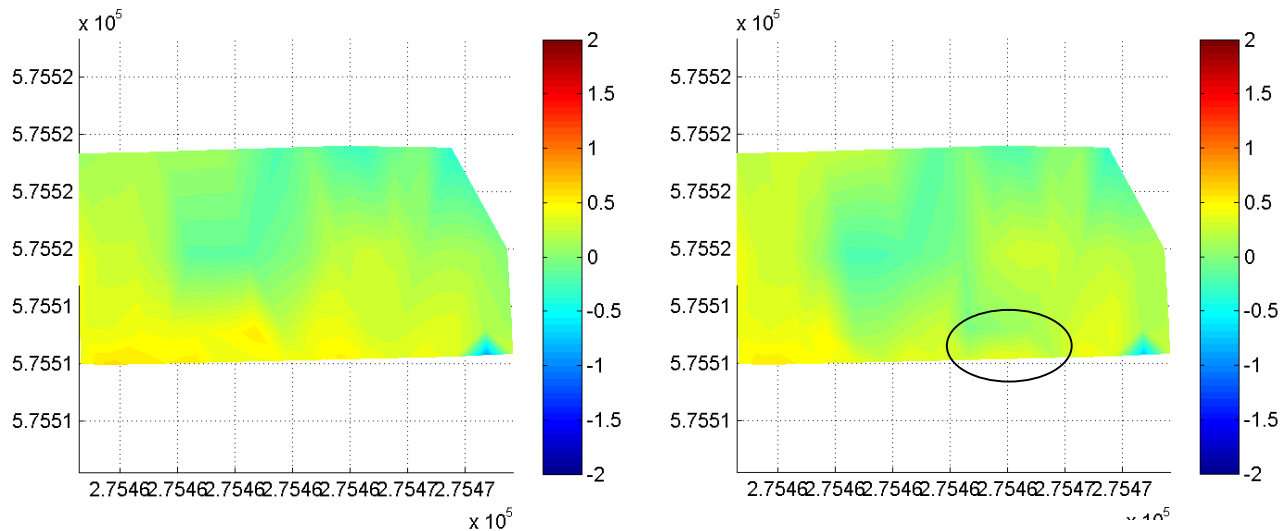
Contourplots proef 1



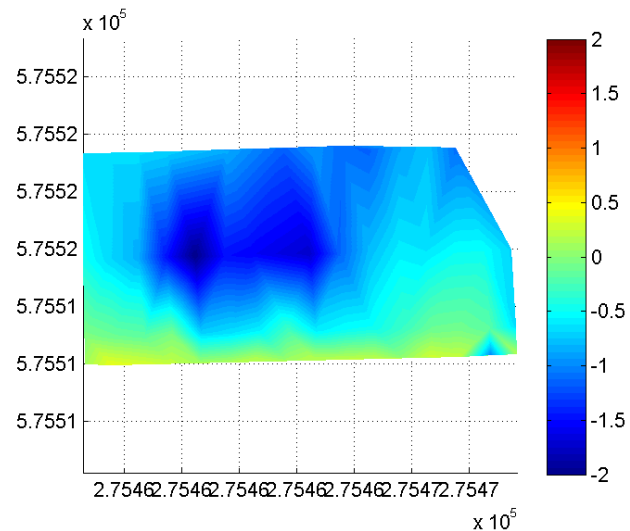
Waarnemingen 5000 en 6000, 29-09 2009 ca. 17 en 19 uur, kleine zandsporen worden zichtbaar.

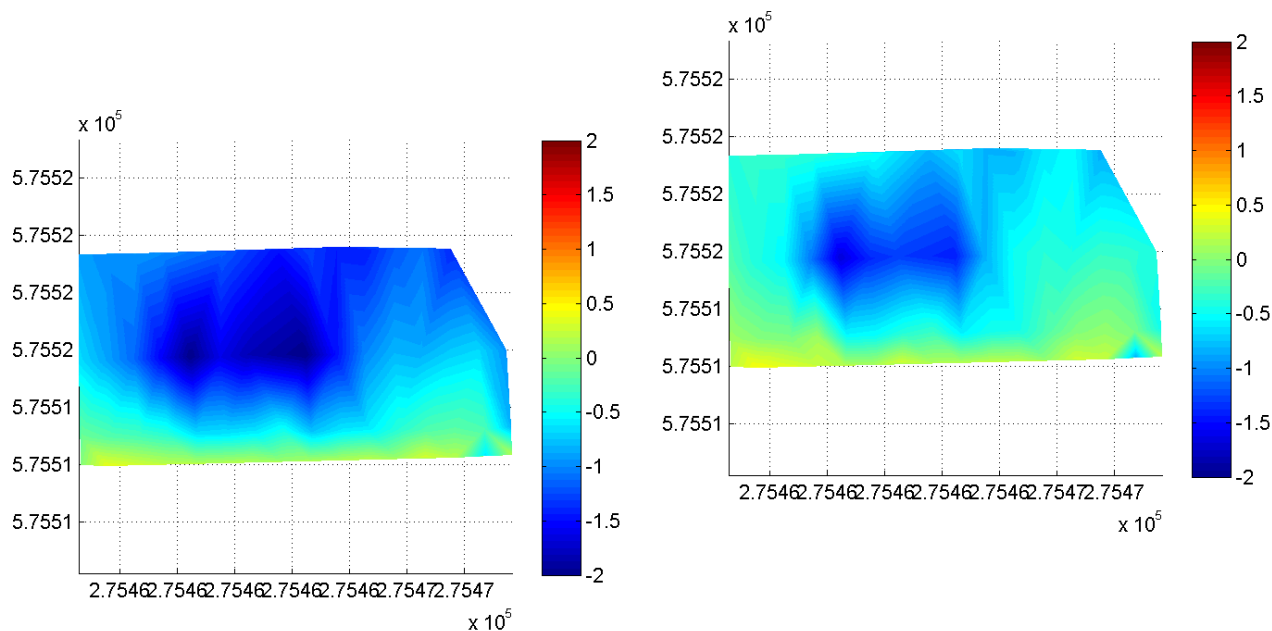


Waarnemingen 11000 en 18000, 30-09-2009 00:30 en 20:33 welvorming zichtbaar op 1/3 van de bakbreedte vanaf de linkerzijde van de plots (het omcirkelde gedeelte).

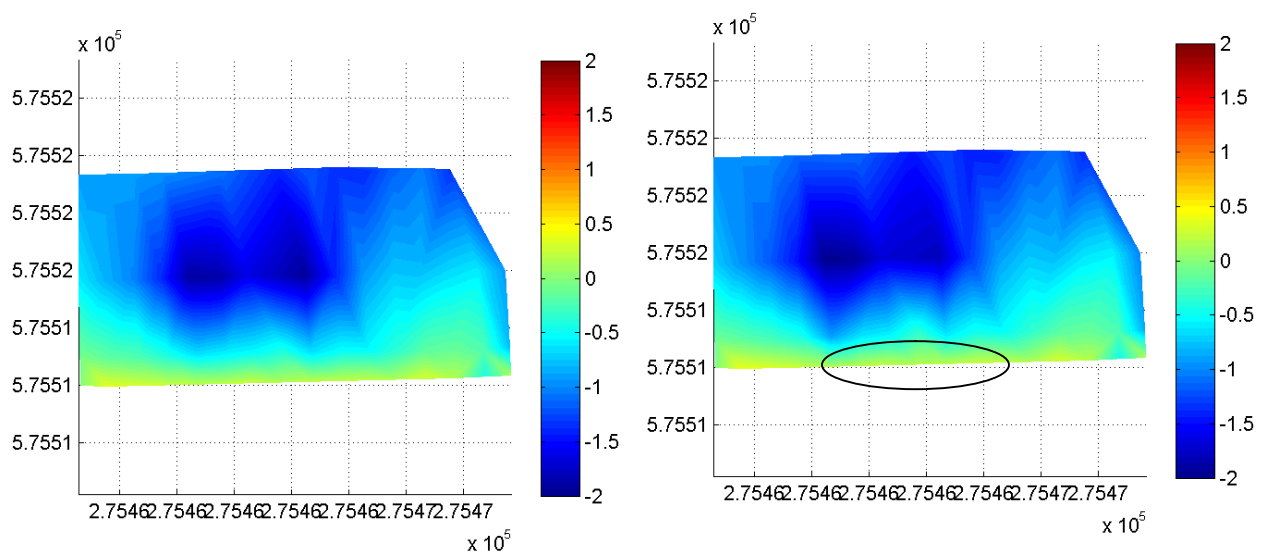


Waarnemingen 23000 en 27000, 30-09-2009 13:41 en 18:00. Om 18:00 wordt de eerste echte zandmeevoerende wel aangetroffen. De waterdrukken zijn lager dan verwacht op basis van een lineair verhang in het zand. De locatie aan de rechterzijde van bak, waar een afname van de waterdruk op de meters zichtbaar is, is niet in het veld waargenomen.

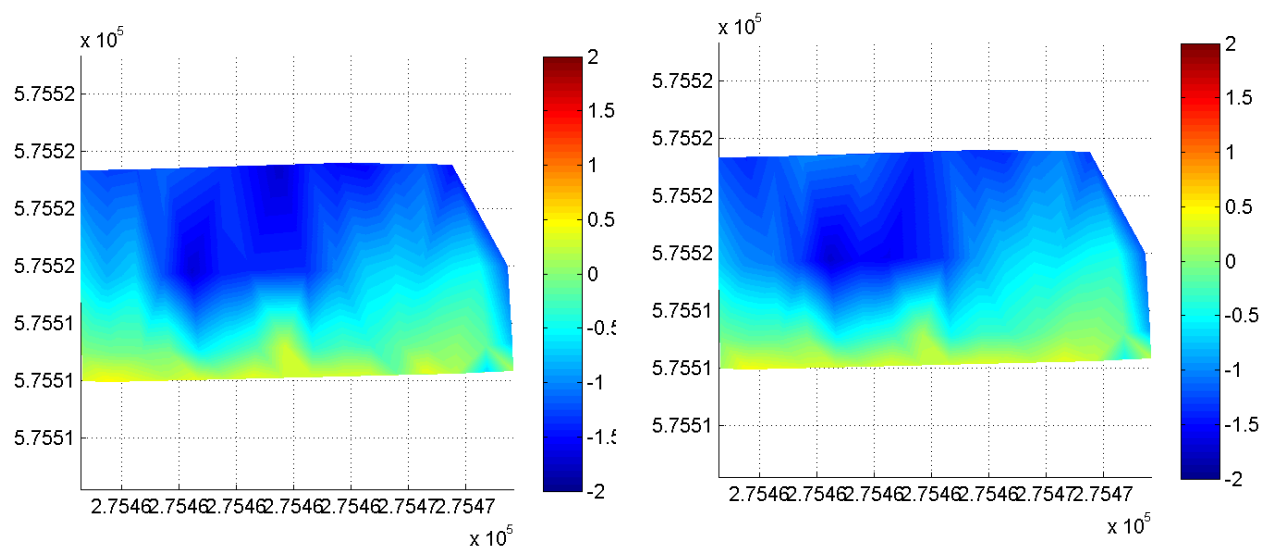




Waarnemingen 31000, 34000 en 38000, respectievelijk 30-09-2009 22:22 en 1-10-2009, 1:45 en 1:10 -2009, 06:10 uur. Zichtbaar is het teruggroeien van de kanaaltjes, tot respectievelijk 3,75 m en 7,5 m, de bovenrand van de plots. Doordat in proef 1 slechts 4 raaien waterspanningsmeters stonden tot aan halverwege de bak is het niet goed zichtbaar wat er met de waterdrukken gebeurt voorbij $L = 7,5$ m. Wel opvallend is de zeer snelle teruggroei van het kanaaltje in vergelijking tot de situatie van 30-09-2009 18:00. In 4,5 uur tijd is het kanaaltje zeker met 3,25 m teruggegroeid. Het lijkt daarna 3 uur later al halverwege de bak te zijn beland. 12 uur na het visueel waarnemen van de eerste zandmeevoerende wel (om 6:00) is het kanaaltje zeker teruggegroeid tot een 7,5 m.

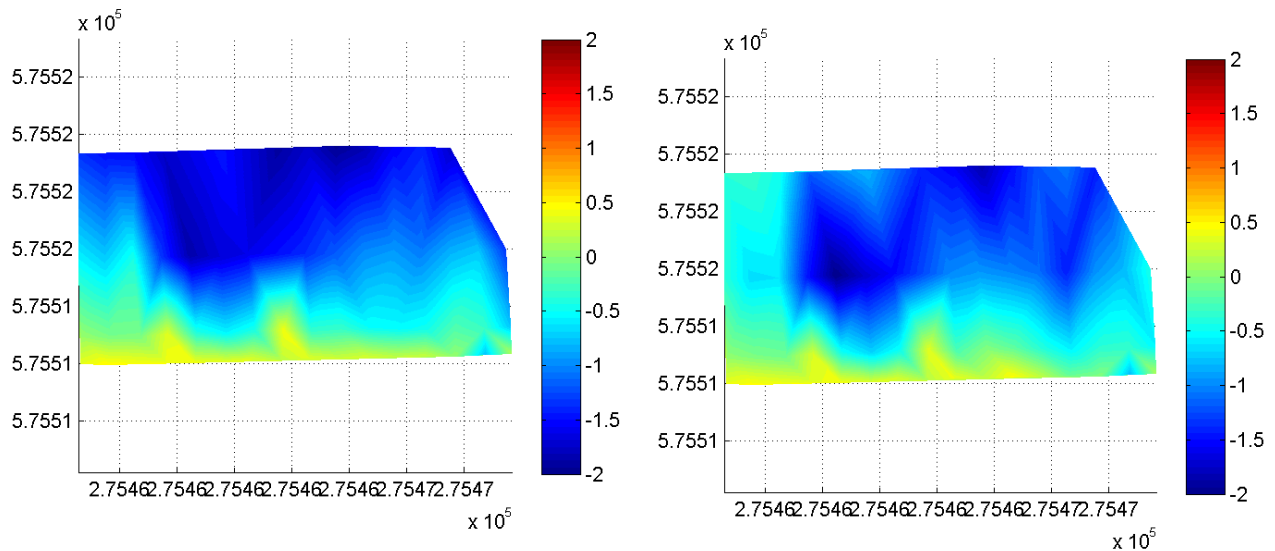


Waarnemingen 45000 en 50000 circa 1:10-2009 om 14:00 en 19:35 Waterdrukken blijven relatief constant. De welvorming is vooral zichtbaar in het omcirkelde gedeelte, terwijl de waterdrukken over de gehele breedte veranderen.

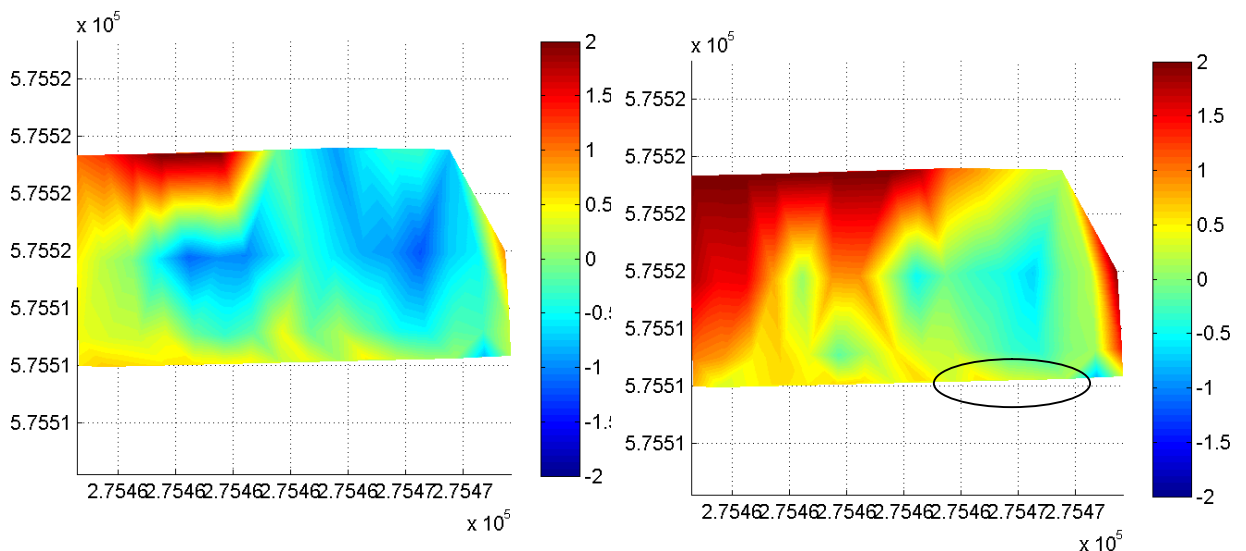


r

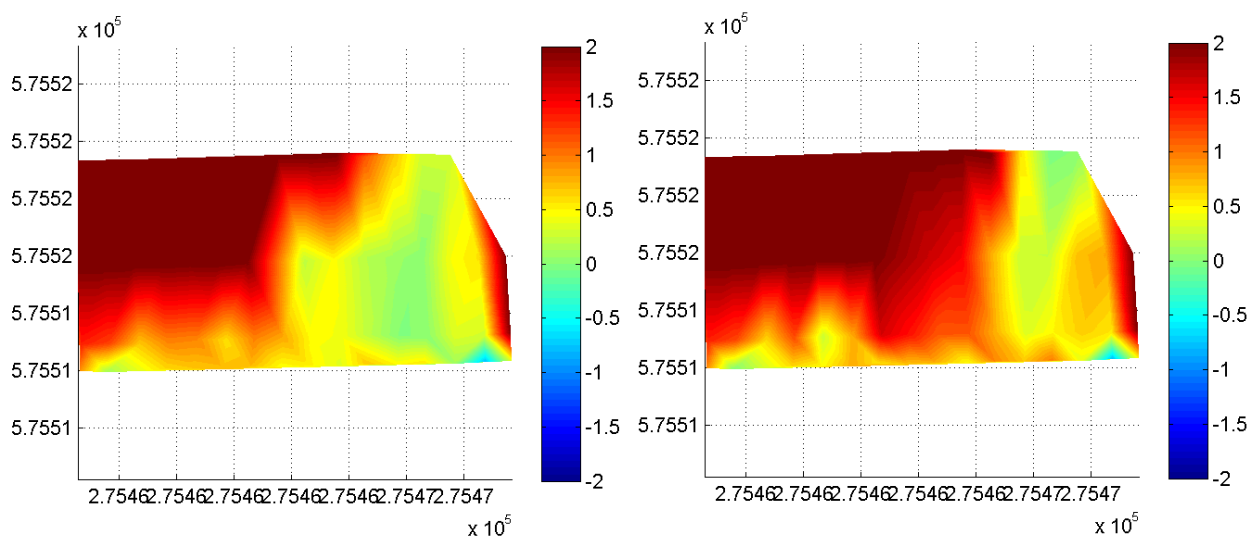
Waarnemingen 60000 en 70000 circa 2:10:2009 6:40 en 17:45: weinig verandering t.o.v. de vorige plots.



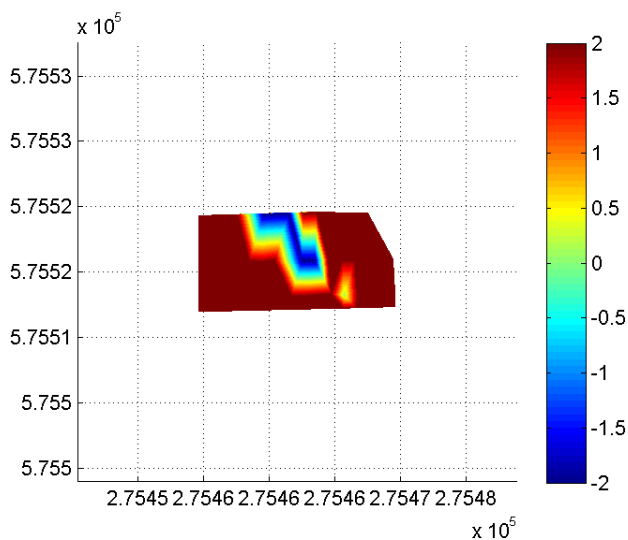
Waarnemingen 81000 en 85000, 3-10-2009 5:00 en 10:27. Op het beide figuren is zichtbaar dat de waterspanning t.o.v. de vorige situatie weer iets toeneemt. Dit duidt op het groter worden van de doorlatendheid van het zand bovenstrooms als gevolg van het ruimproces wat rondom dat moment bezig is.



Waarnemingen 87000 en 88000, 3-10-2009, 12:40 en 13:45 De waterdrukken nemen als gevolg van het ruimproces vanaf bovenstroomse zijde toe en lijken zeker langs de randen al doorgegroeid, dit is in het veld niet waargenomen. De echte welvorming concentreert zich in het cirkeltje.

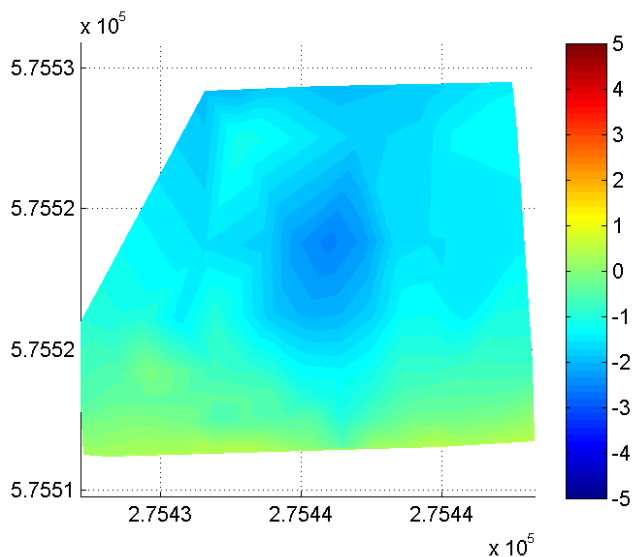
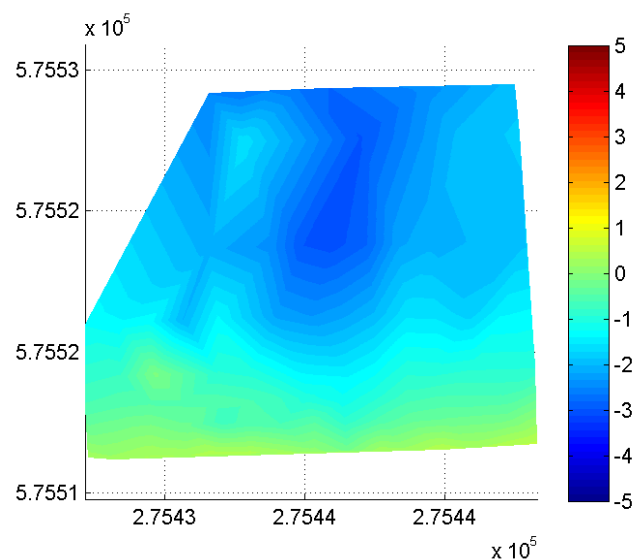
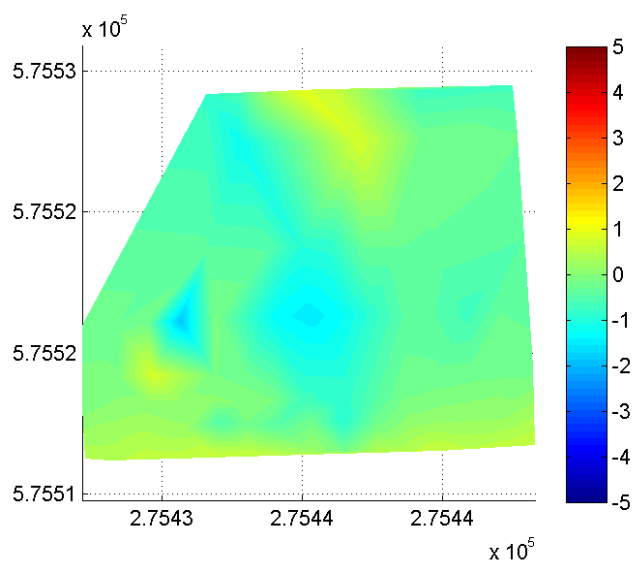
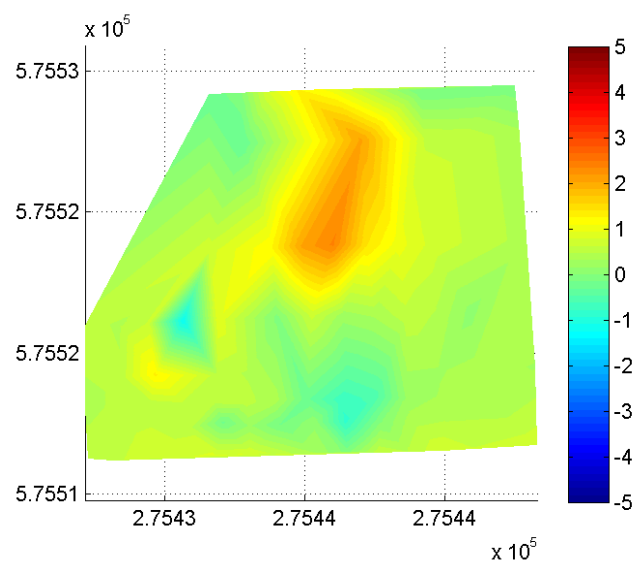


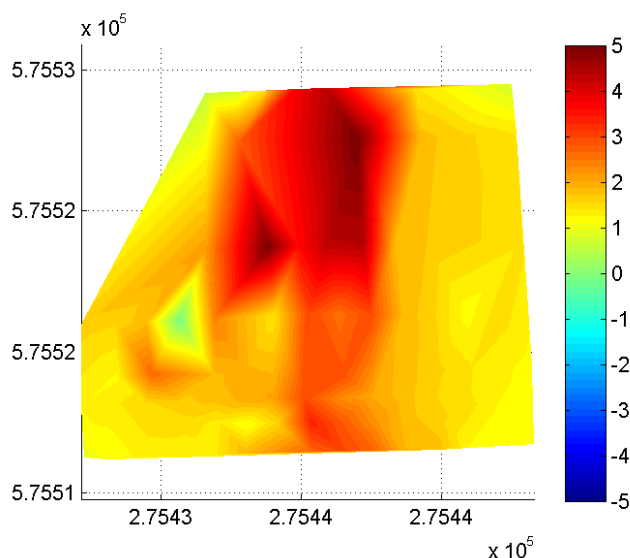
Waarnemingen 89000 en 90000 3-10-2009 14:55 en 16:00, vlak voor doorbraak, de waterdrukken onder de gehele dijk zijn fors toegenomen en maken inmiddels contact met de benedenstroomse zijde. Opvallend is op dat moment de welvorming aan de linkerkant van de bak, daar waar het kanaal als eerste de benedenstroomse zijde bereikt heeft. De doorbraak vond aan de rechterzijde plaats.



Waarneming 91000, 3-10-2009 16:50 Doorbraak, kanaalvorm is goed zichtbaar.

Contourplots proef 2

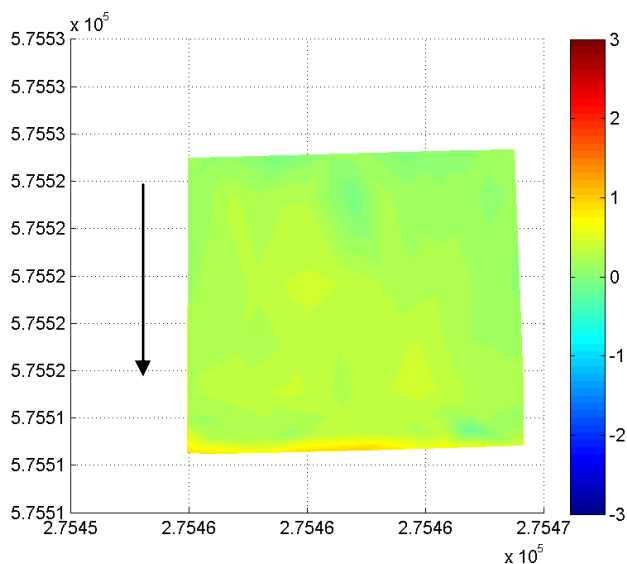
a) $n=70.000$, $T=77.8$ uurb) $n=80.000$, $T=89.5$ uurc) $n=86.000$, $T=96.5$ uurd) $n=89.000$, $T=100.1$ uur



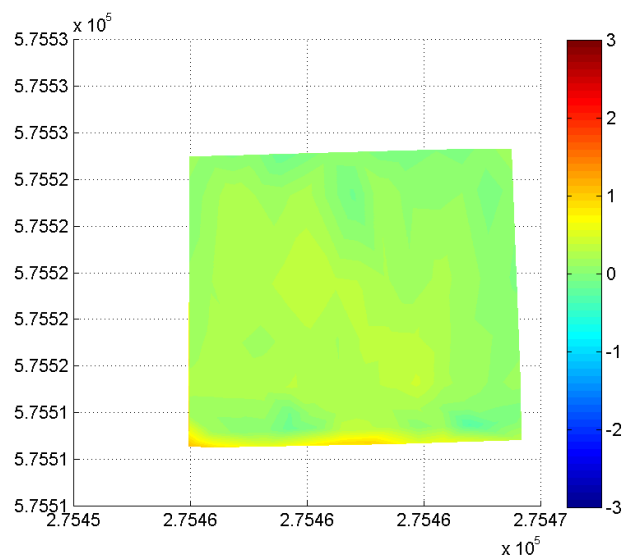
e) $n=104.000$, $T=118.0$ uur Doorbraak

Figuur 3.8 Contourplots van gecorrigeerde waterspanningen op verschillende tijdstippen in de proef

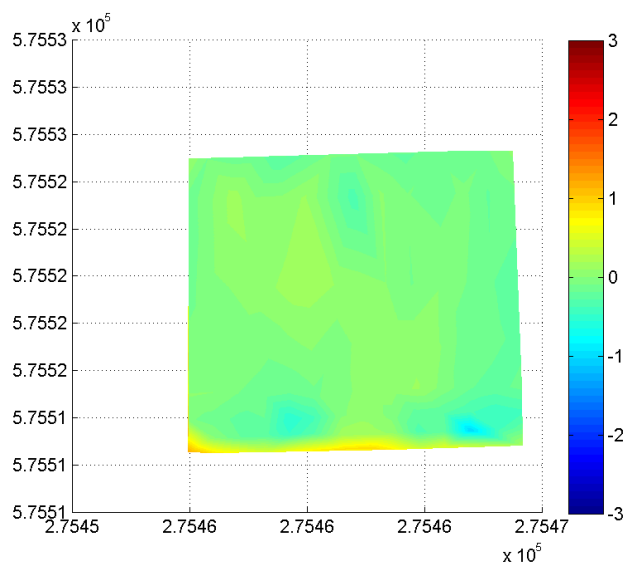
Contourplots proef 3



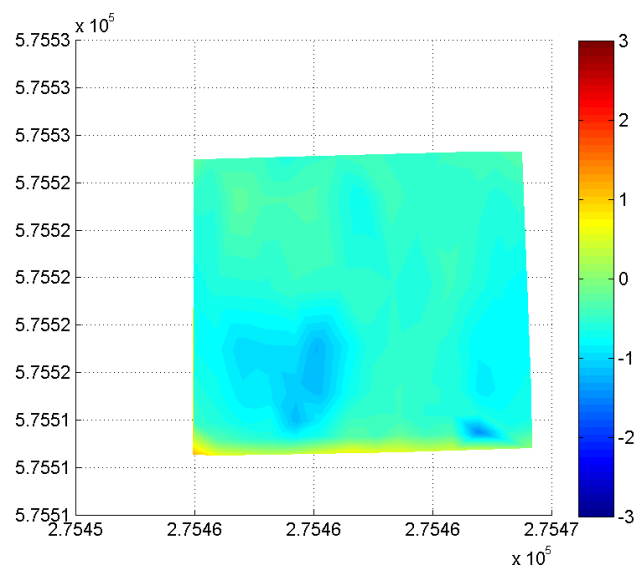
$T=28,9$ uur, net na verhogen naar $H=1,80$ m, niet zandmeevoerende wellen worden eerst aan de rechterzijde en daarna ook aan de linkerzijde waargenomen. Rechtsonder is al een daling van de waterspanningen zichtbaar



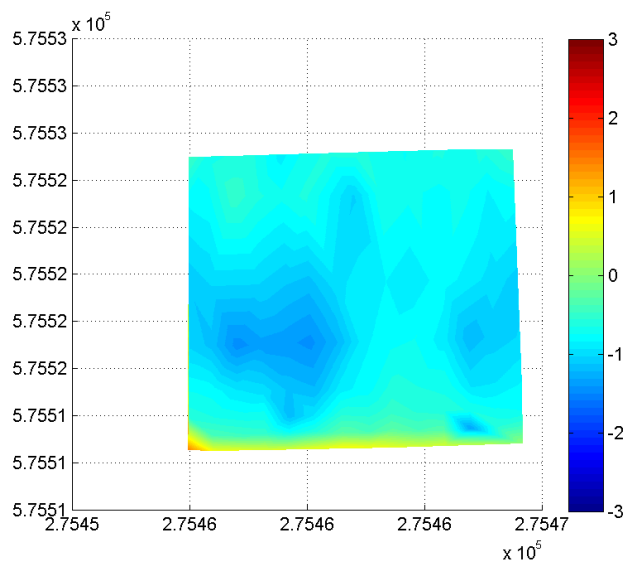
$T=34,6$ uur net voor verhogen naar $H=2,0$ m. Er zijn nog geen zandmeevoerende wellen waargenomen. Zowel aan de rechterzijde als aan de linkerzijde dalen de waterspanningen op de locaties waar 'schone' wellen worden waargenomen



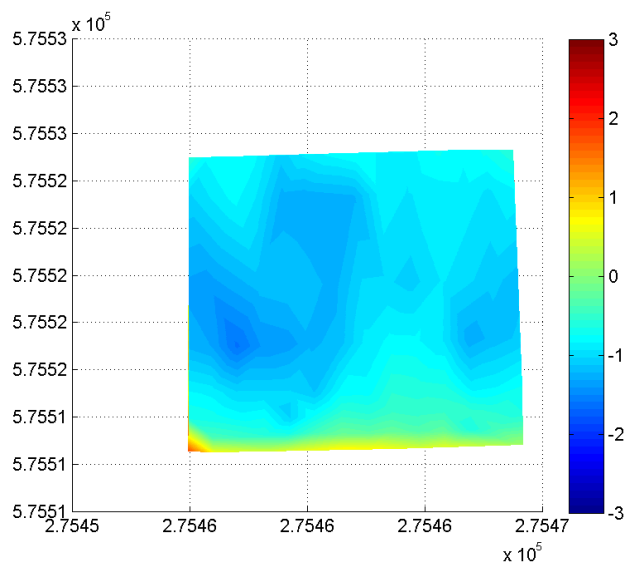
T=40,1 uur, net na verhogen tot H=2,1 m. Bij 2,1 m verval worden zandmeevoerende wellen waargenomen, eerst aan de rechterzijde en daarna aan de linkerzijde.



T= 51,2 uur. H=2,1 m. Wellen aan linkerzijde geven meer zand. Waterspanningen zijn hier ook langer laag. Kanalen groeien aan linkerzijde sneller dan aan rechterzijde.

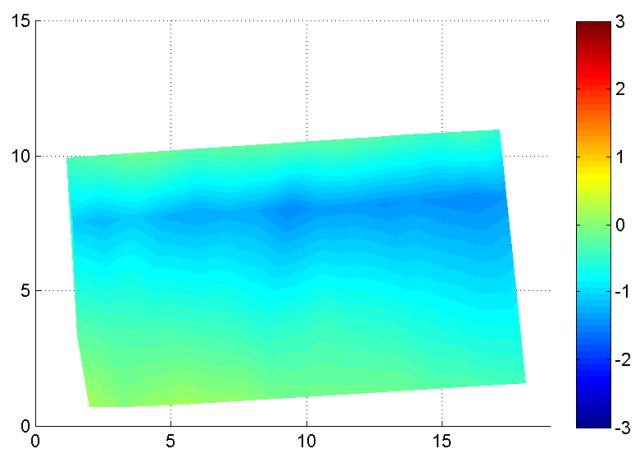


T=60,2 uur, H=2,1 m. Wellen aan linkerzijde leveren 3 keer zo veel zand als wellen aan rechterzijde.

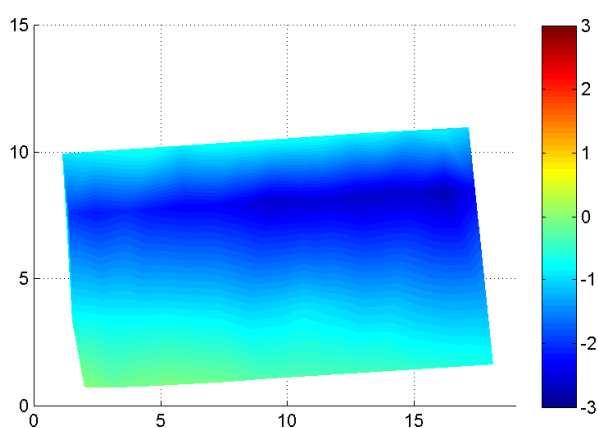


T=70,2 uur, H=2,1 m. Wellen aan rechterzijde zijn nauwelijks nog zandmeevoerend. Aan linkerzijde is één wel erg actief..

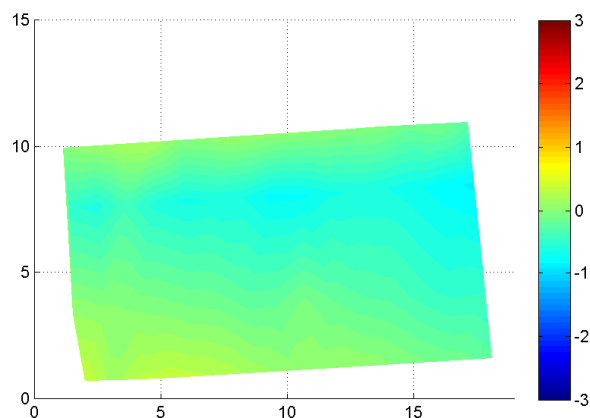
Figuur 3.9 Contourplots kanaalvorming proef 3

Contourplots proef 4

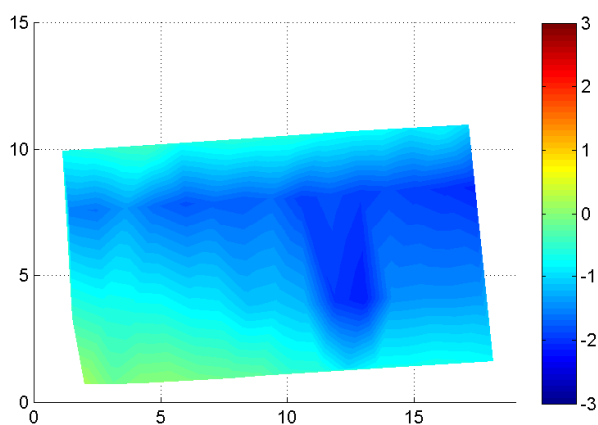
Waarneming 20700 – T = 23 uur, 1 december 9:00 uur. H = 1,26 m. Vlak voor verhoging naar H = 1,35 m, kennelijk al enige lekkage onder raai 3 via Luisterbuis.



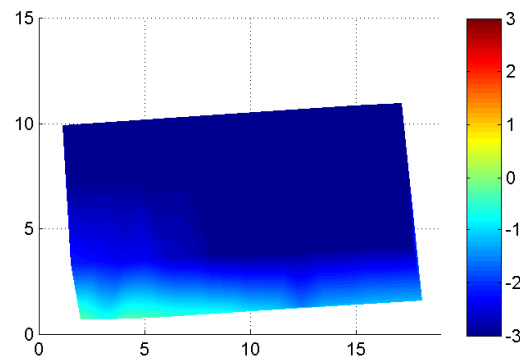
Waarneming 21600 – T = 24 uur, 1 december 10:00 uur. H = 1,35 m. Na ontdekking lekkage bij T-stuk afvoerleiding Luisterbuis.



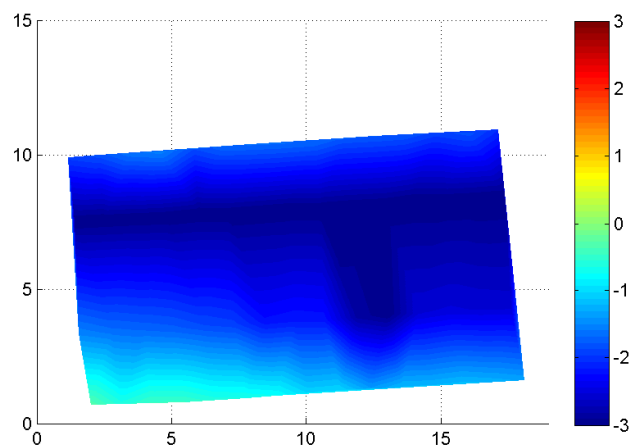
Waarneming 30600 – T = 34 uur, 2 december 20:00 uur. H = 1,29 m. Anderhalf uur na dichten lekkage T-stuk Luisterbuis. Bijna uniforme situatie.



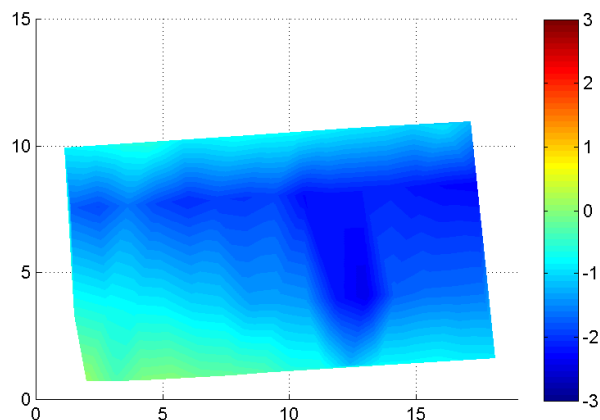
Waarneming 67500 – T = 75 uur, 3 december 13:00 uur. H = 2,02 m. Al 17 uur één blijvend-zandmeevoerende wel, positie is zichtbaar (12 m op horizontale as in figuur).



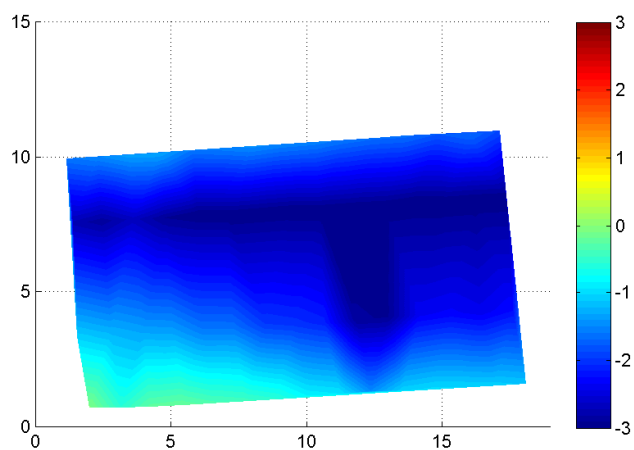
Waarneming 68400 – T = 76 uur, 3 december 14:00 uur. H = 2,03 m. Tweede, geheel geplande Luisterbuis-interventie is zojuist gestart. Gevolg: zeer sterke teruggang van vrijwel alle waterspanningen onder de dijk.



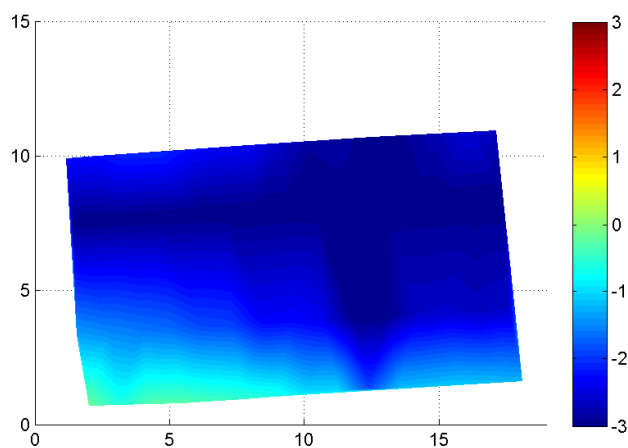
Waarneming 69300 – T = 77 uur, 3 december 15:00 uur. H = 2,02 m. Tweede Luisterbuis-interventie is weer voorbij, nadat alle wellen om 14:25 gestopt waren is de hiervoor zandmeevoerende wel weer water gaan voeren; is nog wel schoon (3 minuten later weer zandmeevoerend).



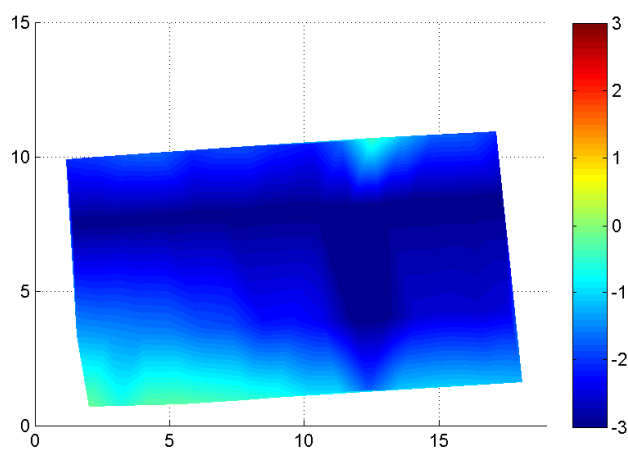
Waarneming 72000 – T = 80 uur, 3 december 18:00 uur. H = 2,02 m. Waterspanningen zijn weer grotendeels bijgetrokken, kanaal van zandmeevoerende wel blijft wel zichtbaar.



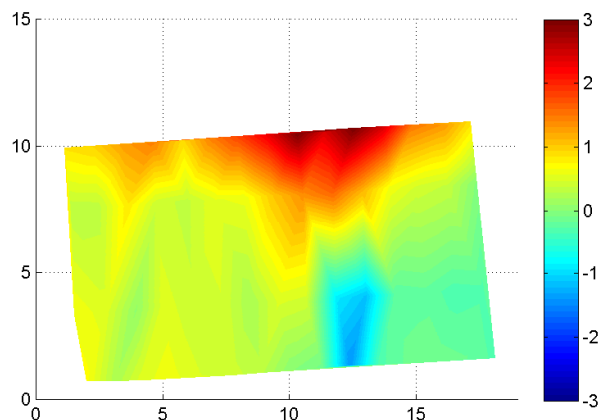
Waarneming 81000 – T = 90 uur, 4 december 4:00 uur. H = 2,12 m. Kanaal is duidelijker zichtbaar.



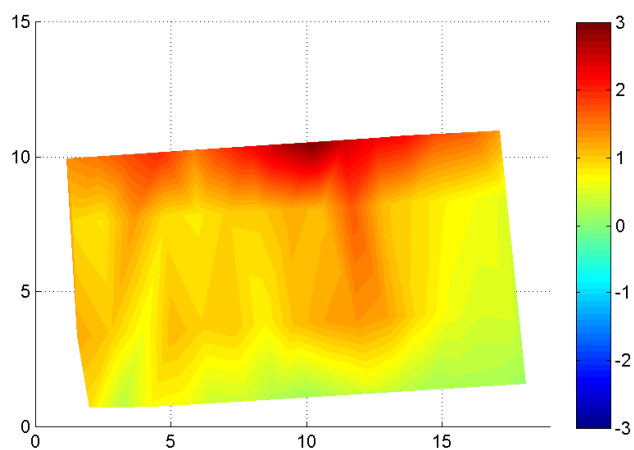
Waarneming 90900 – T = 101 uur, 4 december 15:00 uur. Kanaal is duidelijk zichtbaar, nu ook bovenstrooms van Luisterbuisraai, ruimen lijkt nog niet begonnen.



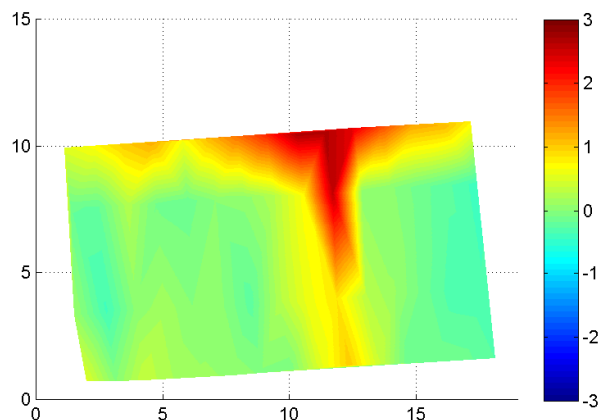
Waarneming 92700 – T = 103 uur, 4 december 17:00 uur. Bovenstrooms in het kanaal is een hogere waterspanning zichtbaar, dit wijst op het begin van ruimen.



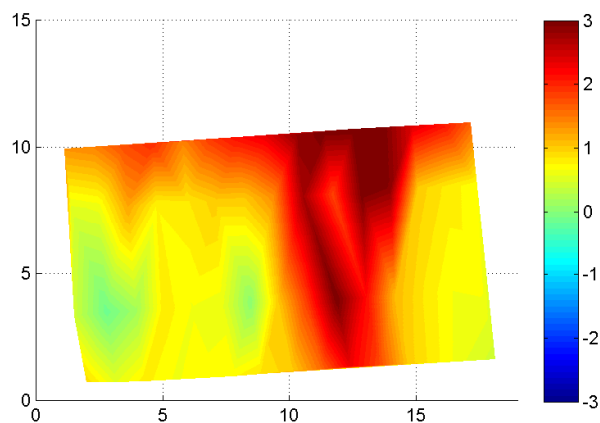
Waarneming 96300 – T = 107 uur, 4 december 21:00 uur. H = 2,12 m. Bijna overal een aanzienlijke verhoging van de waterspanningen tot boven het lineaire verloop, behalve in het benedenstroomse deel van het kanaal.



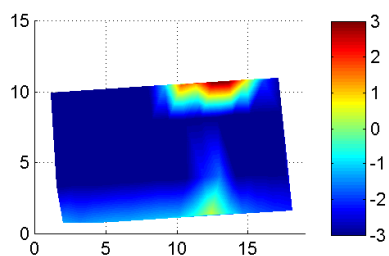
Waarneming 97200 – T = 108 uur, 4 december 22:00 uur. H = 2,11 m. Nu overal een (sterk) verhoogde waterspanning onder de dijk.



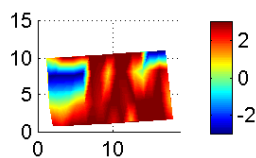
Waarneming 100800 – T = 112 uur, 5 december 2:00 uur. H = 2,09 m. Het zandmeevoerende kanaal onder de dijk is duidelijk zichtbaar.



Waarneming 105300 – T = 117 uur, 5 december 7:00 uur. H = 2,07 m. Opnieuw een grote hoeveelheid zand en water vanuit de wel, maar nog geen modderfontein of doorbraak.



Waarneming 107100 – T = 119 uur, 5 december 9:00 uur. H = 2,08 m. Derde Luisterbuis-interventie haalt weer vrijwel alle waterspanningen onder het midden van de dijk weg; het kanaal is nog maar zeer zwak.



Waarneming 111975 – T = 124,45 uur, 5 december 14:25 uur, H = 2,80 m. Ongeveer het moment van doorbraak van proef 4.

3.2.1 Lengte van de pipingkanaaltjes

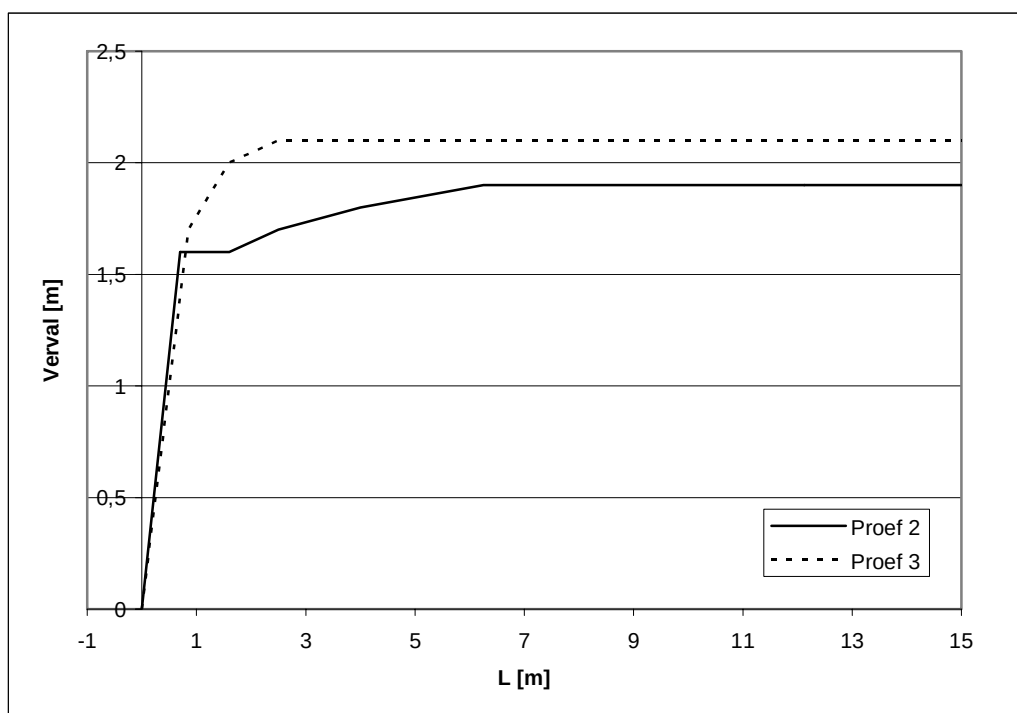
De lengte van de pipe kan uit de waterspanningsmetingen worden afgeleid.

Onderstaande grafieken geven de ontwikkeling van de lengte van de pipe in de tijd aan bij proef 1, 2 en 3 (van links naar rechts) op basis van de waterspanningsmetingen zoals deze is ingebouwd in FEWS. Voor proef 4 is een dergelijke analyse nog niet uitgevoerd.

Op de horizontale as staat een tijdseenheid (in duizenden waarnemingen, er is 1 waarneming gedaan per 4 seconden). Links op de verticale as staat de lengte van het kanaal, rechts op de verticale as staat het verval in meters waterkolom. De blauwe lijn stelt het verval over de kering voor. Het rode lijntje stelt de berekende lengte van het teruggegroeide kanaaltje voor. Goed zichtbaar is dat in proef 1 het kanaaltje bij een waterdruk van 2,30 m vrijwel direct van 0 m teruggroeit naar 3,20 m. Dit komt overeen met de contourplots, waarop eveneens het teruggroeien van het kanaaltje zeer snel gaat.

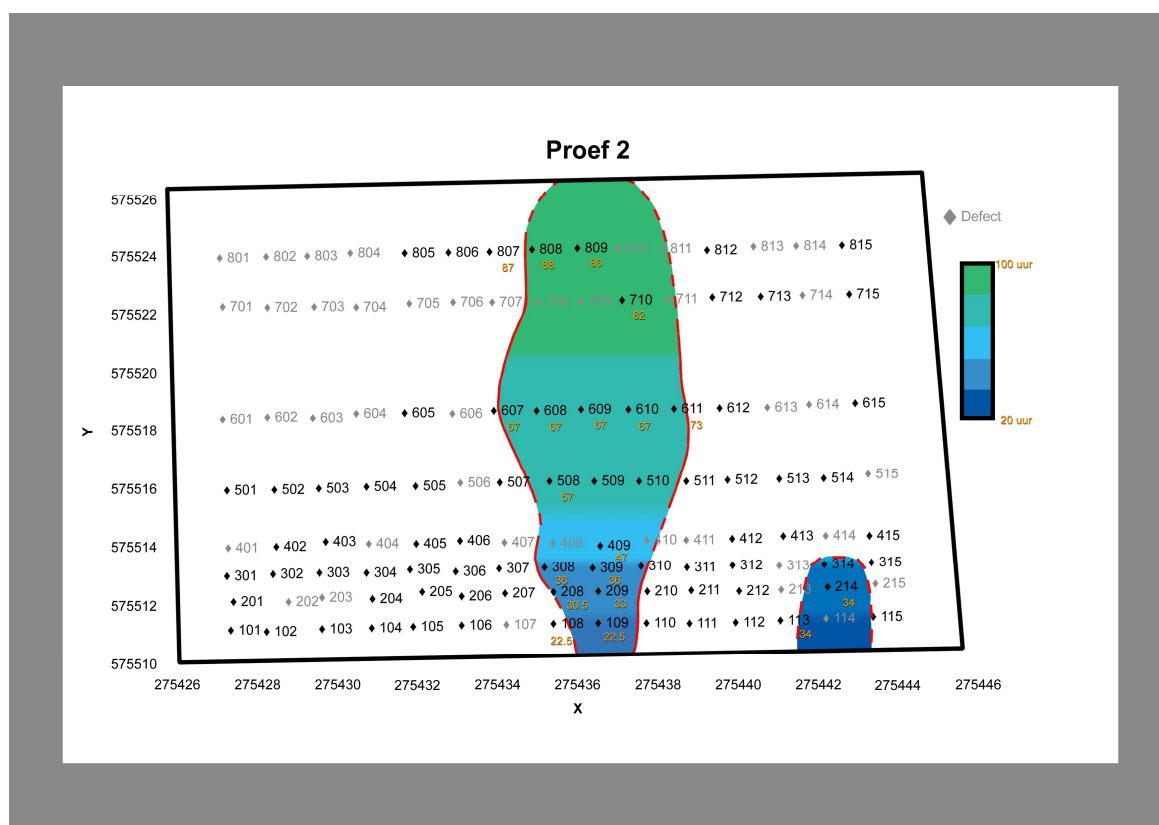
Voor proef 2 en 3 is in verband met de uitgebreidere analyse voor het Rijkswaterstaat SBW-programma (en de nauwkeuriger waarnemingen) de lengte van de pipe als functie van het kritiek grafisch weergegeven in onderstaande figuur. Opgemerkt wordt dat in proef 2 bij een verval van 1,6 m continu zandtransport wordt waargenomen. Omdat dit zandtransport zo klein is, is na 20 uur het verval alsnog verhoogd met 10 cm. Het verval is vervolgens gedurende 10 uur constant gehouden op respectievelijk 1,7 m en 1,8 m. Bij een verval van 1,9 m is de pipe doorgegroeid naar de bovenstroomse zijde. Mogelijk zou de pipe al bij een verval van 1,6 m zijn doorgegroeid en is de kanaalgroei door het verhogen van het verval versneld.

Bij proef 3 is het verval constant gehouden nadat zandmeevoerende wellen bij een verval van 2,1 m zijn geconstateerd. Mogelijk zou bij een lager verval – als dit verval maar lang genoeg constant zou worden gehouden – na verloop van tijd zandtransport zijn opgetreden.

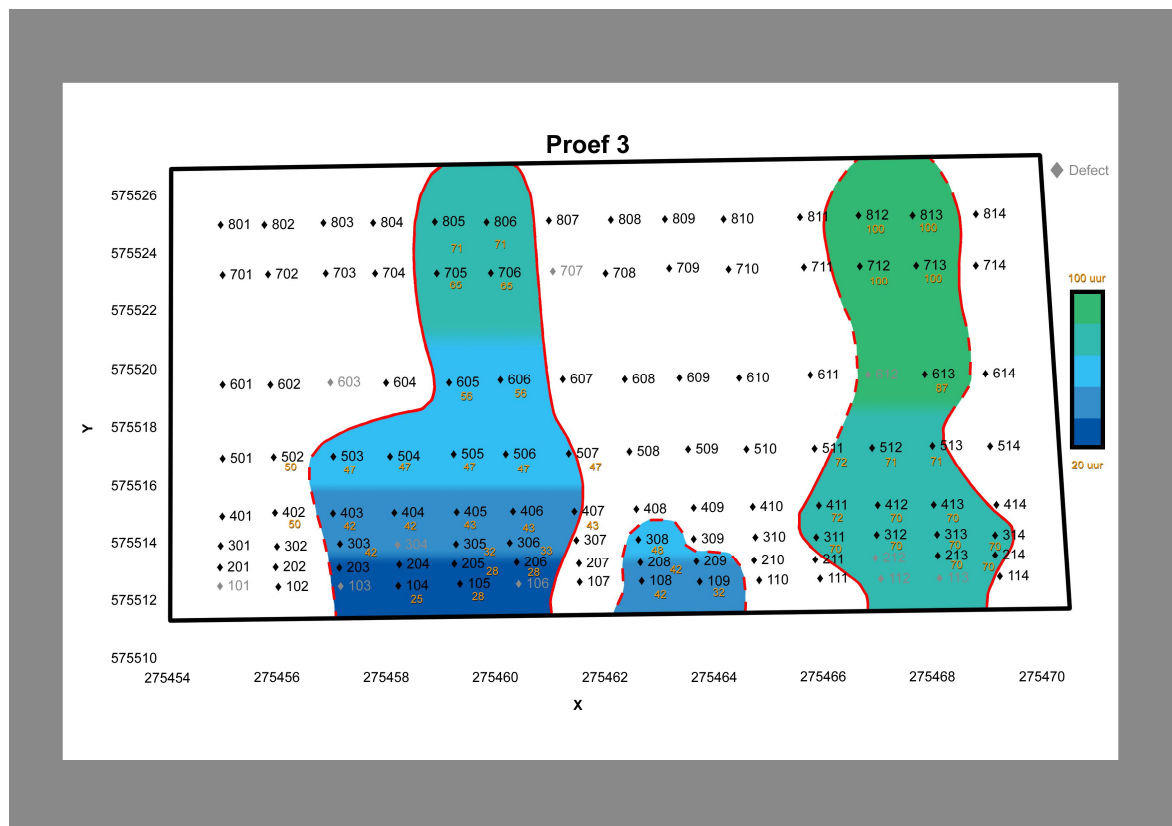


Figuur 3.10 Relatie verval en pipelengte

In onderstaande figuren is in bovenaanzichten de locatie van de pipes in de loop van de tijd weergegeven voor proef 2 en voor proef 3, gebaseerd op de veranderingen in de waterspanningen.



Figuur 3.11 Bovenaanzicht kanaalontwikkeling proef 2.



Figuur 3.12 Bovenaanzicht kanaalontwikkeling proef 3

Uit de figuren kan worden afgeleid dat de kanaalontwikkeling zich niet over de gehele breedte uitstrekt. Over een breedte van enkele meters groeien één of meerdere (meanderende) kanaaltjes naar achteren.

3.3 Pipevorming (ruimen)

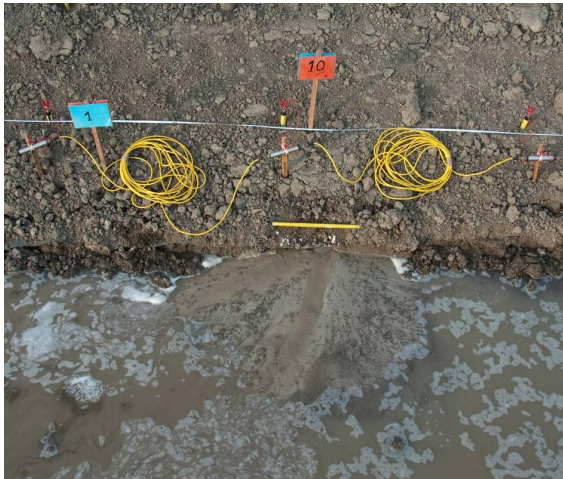
Als de kanaaltjes de bovenstroomse zijde hebben bereikt, treedt een ruimproces op. Onder ruimen wordt het proces verstaan waarbij het kanaaltje vanaf de bovenstroomse kant wordt schoongedrukt. De volgende waarnemingen worden gedaan, welke in de navolgende alinea's verder worden toegelicht:

- Zandtransport blijft bij proef 1 en 3 beperkt gedurende ruimen. Bij proef 2 en 4 wordt veel zand afgevoerd voordat de dijk bezwijkt.
- Debiet neemt toe, aan het eind van het ruimproces is de toename exponentieel
- Waterspanningen fluctueren sterk gedurende het ruimproces.
- Bij proef 3 worden luchtbellen waargenomen.

Aan het begin van het ruimproces neemt het zandtransport nauwelijks toe (zie Figuur 3.7). Bij proef 1 en 3 neemt het zandtransport pas aan het eind van het ruimproces toe, bij proef 2 en 4 neemt het eerder toe.

Bij proef 2 begint het ruimen na 93 uur. Na 100 proefuren, wanneer het 'schone' kanaal zich op circa 5 m uit de binnenteen bevindt, neemt het zandtransport sterk toe. Er ontstaat een krater van enkele meters in diameter. Er wordt continue zand weggeschept om de waterdruk bij de bron van de wel niet te laten toenemen (afvoergeulen). Gedurende een periode van ca. 20 uur blijft de wel grote hoeveelheden zand afvoeren, waarbij de zandafvoer soms wat

afneemt en later weer toeneemt. Er ontstaan grote scheuren in de dijk. Uiteindelijk is er een periode waarbij het zandtransport niet meer afneemt en wat leidt tot het bezwijken van de dijk.



a) Foto proef 2, T=100.5 uur



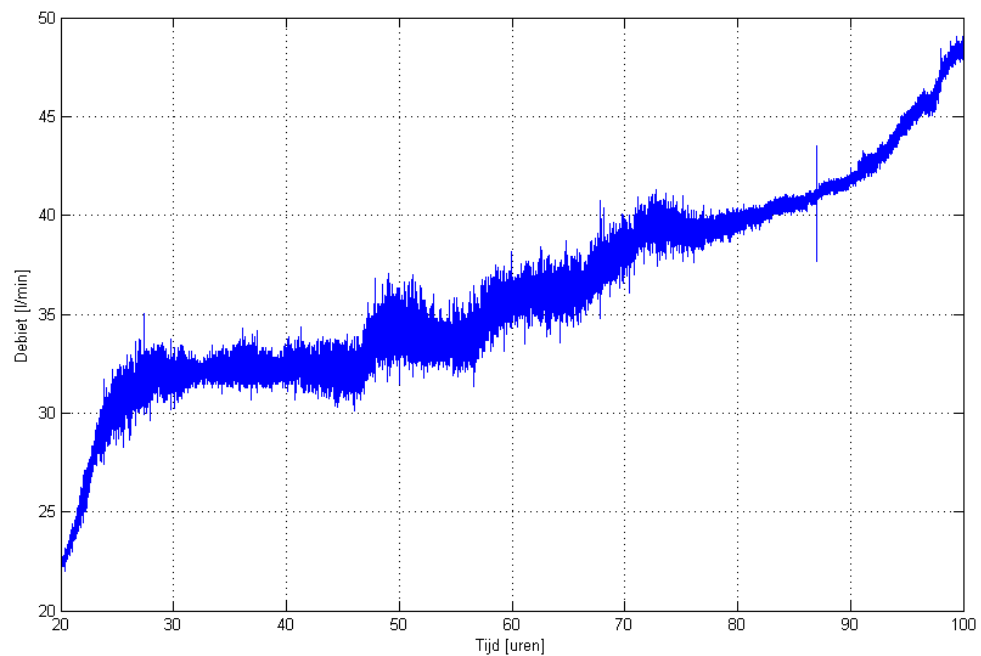
b) Foto proef 2, T=122 uur

Figuur 3.13 Zandmeevoerende wel proef 1

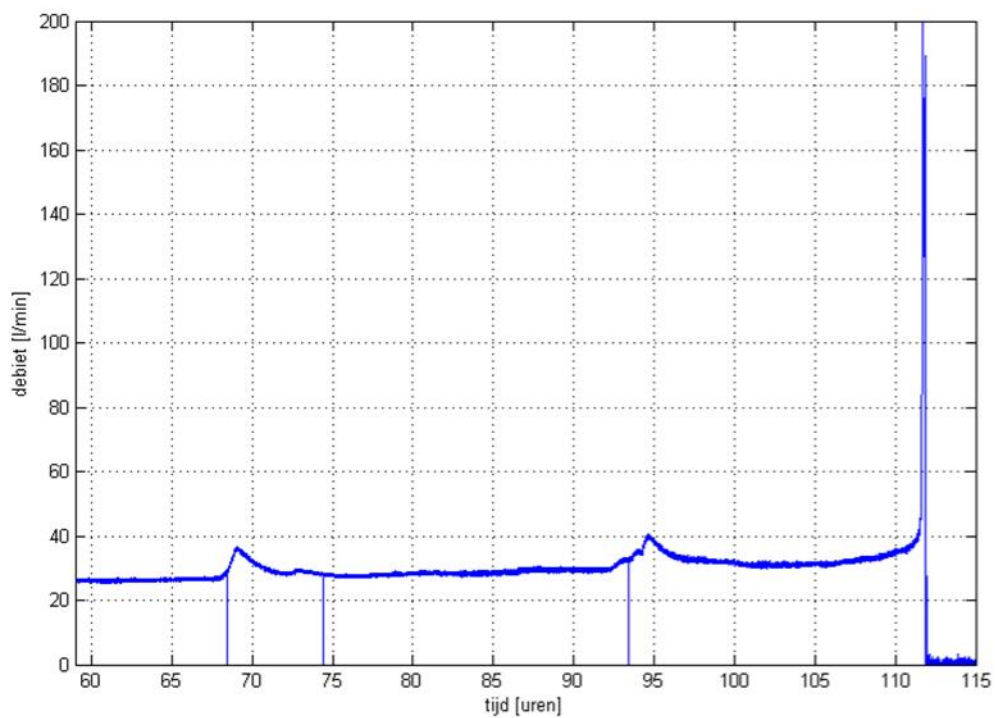
In Figuur 3.14 is het gemeten uitstroomdebiet in de tijd van proef 2 weergegeven. Tijdens het proces van terugschrijdende erosie, van 25 uur tot 93 uur neemt het uitstroomdebiet nauwelijks toe. Pas als het ruimproces op T=93 uur begint, loopt het uitstroomdebiet significant op.

In Figuur 3.15 is het gemeten uitstroomdebiet in de tijd van proef 3 weergegeven. Opvallend is hier dat pas aan het eind van het ruimproces een sterke toename van het debiet wordt gemeten.

Er lijkt een correlatie te bestaan tussen debiet en zandtransport. Vermoedelijk is bij proef 2 en 4 sprake van één of meerdere kanalen die in afmetingen groter worden waardoor zowel zandtransport als debiet toeneemt. Bij proef 4 is er bovendien het effect van de Luisterbuis halverwege de dijk, die daar en verder bovenstrooms tot een sterke nivellering van de waterspanningen leidt. Bij proef 1 en 3 groeien de afmetingen van de kanaaltjes pas in de laatste fase van het ruimproces en blijft het zandtransport en debiet door de kanalen lang constant.



Figuur 3.14 Gemeten uitstroomdebiet proef 2 vanaf 20 uur tot 100 uur



Figuur 3.15 Gemeten uitstroomdebiet proef 3 vlak voor bezwijken

De waarnemingen worden als volgt geïnterpreteerd:

Zodra het kanaaltje dat vanaf de benedenstroomse zijde stroomopwaarts is gegroeid contact maakt met de bovenstroomse zijde, loopt een drukgolf met de stroom mee door het kanaaltje. Door deze drukgolf komt een dusdanige hoeveelheid zand in beweging dat het kanaaltje op één of meerdere locaties verstopt raakt. Bovenstrooms van de verstoppingen is een 'schoon' kanaal zonder verstoppingen aanwezig. Het kanaal ligt niet vast op één locatie maar kan nog wel meanderen. Bij proeven 1, 2 en 4 nam het debiet en het zandtransport tijdens de drukgolven tijdelijk toe. Het zand in de verstoppingen wordt vervolgens in een proces van terugschrijdende erosie weer opgeruimd waarna opnieuw een drukgolf door het kanaaltjes loopt. Dit proces herhaalt zich twee of drie keer waarbij het 'schone' bovenstroomse kanaal steeds langer wordt. Als het schone bovenstroomse kanaal bijna de benedenstroomse zijde heeft bereikt neemt het zandtransport en het debiet exponentieel toe waarna de dijk bezwijkt of inzakt.

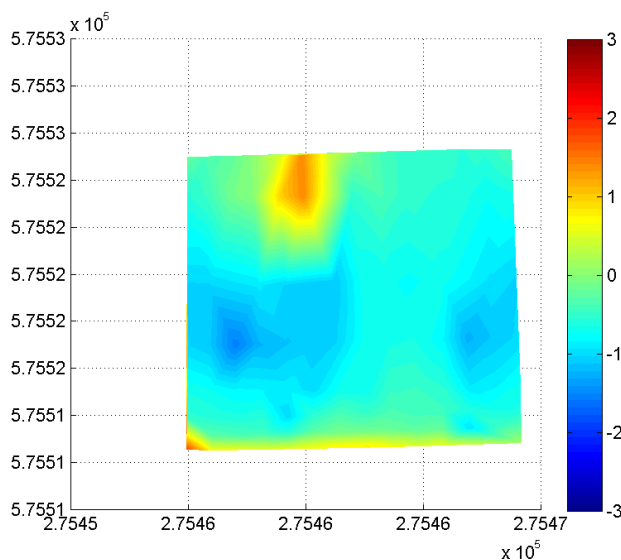
Deze theorie wordt bevestigd door de metingen van de waterspanningsmeters. In Figuur 3.16 zijn de waterspanningen in de tijd uitgezet voor rij 9 van proef 2. Rij 9 is de rij waarlangs de pipe zich heeft gevormd en waar uiteindelijk de dijkdoorbraak heeft plaatsgevonden. De nummering van de waterspanningsmeters geeft de locatie van de meter aan. Het eerste getal geeft de raai aan, de laatste twee getallen de rij.

Duidelijk zichtbaar is de sterke stijging van waterspanningen die vanaf 93 uur in de verschillende raaien zichtbaar is. Dit is het moment dat het ruimproces begint. Opvallend zijn de fluctuaties. Deze worden veroorzaakt door het ontstaan en opruimen van verstoppingen van het kanaaltje. Bij een piek is even sprake van een schoon kanaal bovenstrooms van de meting. Een dal geeft aan dat het kanaaltje bovenstrooms verstopt is.

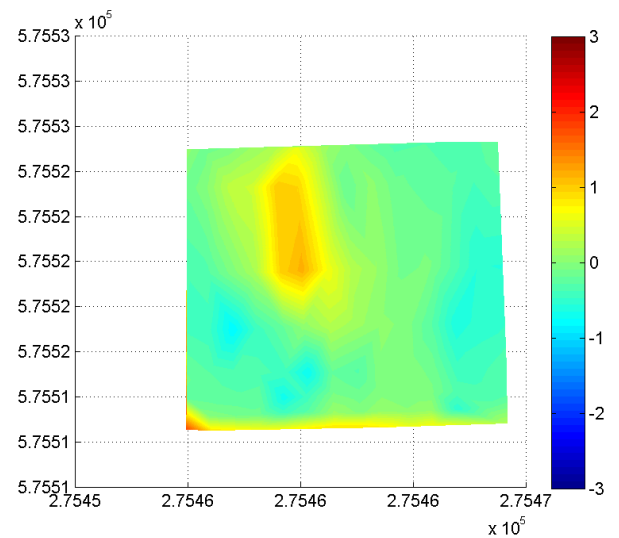


Figuur 3.16 Waterspanningen proef 2 nabij de uiteindelijke doorbraaklocatie

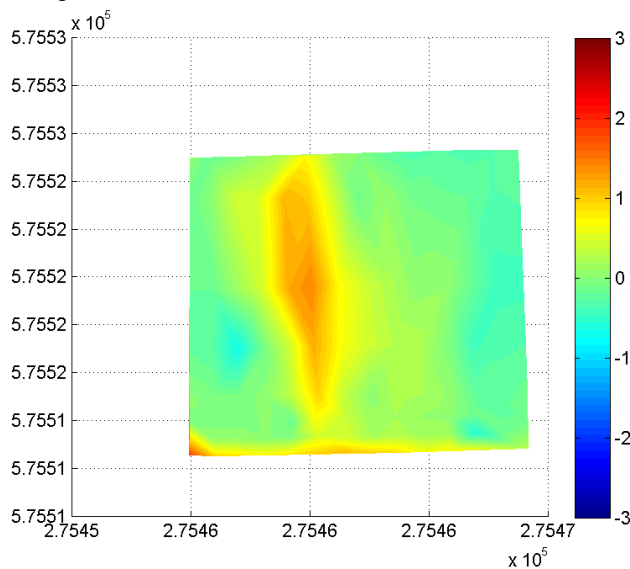
De contourplaatjes zoals in voorgaande paragraaf beschreven geven een goed beeld van het ruimproces in de tijd. In Figuur 3.17 zijn van contourplots van het ruimproces van proef 3 gegeven. De beschrijving onder de verschillende plots spreekt voor zich.



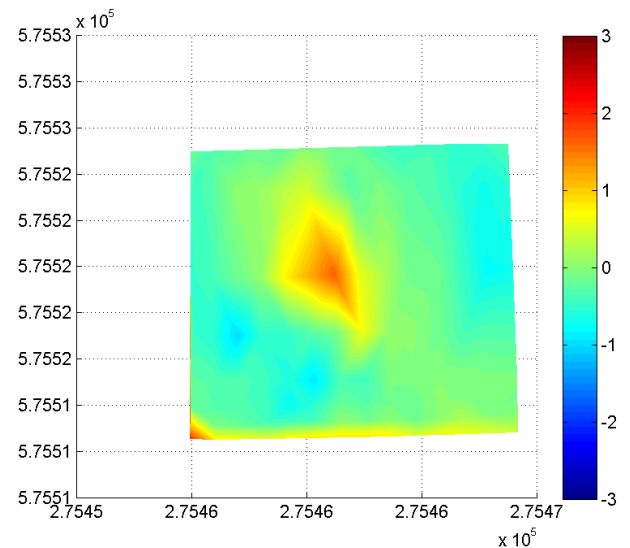
T=78,9 uur, H=2,1 m. Ruimproces duidelijk zichtbaar. Aan rechterzijde groeien de kanaaltjes nog in bovenstroomse richting.



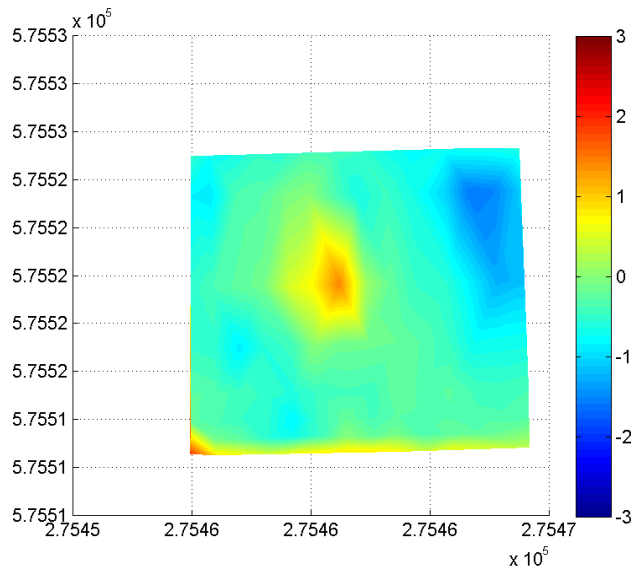
T=84,4 uur, H=2,1 m. Duidelijk zichtbaar is het ruimproces. Het zandtransport van de wellen aan de linker en rechterzijde blijft constant.



T=85,6 uur, H=2,1 m.

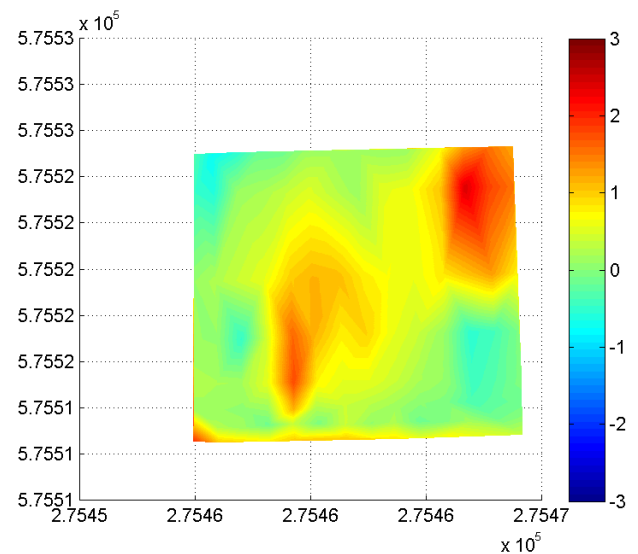


H=96,7 uur, H=2,1 m



T=103,3 uur, H=2,2 m. De rechter pipe bereikt de bovenstroomse zijde. In de linker pipe is het ruimproces nog steeds zichtbaar. Zandtransport neemt nog steeds niet toe

Figuur 3.17 Contourplaatjes ruimproces proef 3



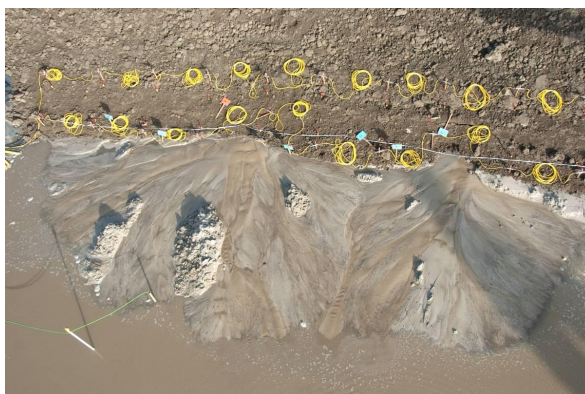
T=106,7 uur, H=2,2 m. Ook aan de rechterzijde wordt het kanaaltje geruimd. Even later vindt een kortsluiting tussen de beide pipes plaats en breekt de dijk door.

3.4 Doorbraak

De volgende waarnemingen worden gedaan:

- Zandtransport neemt plotseling fors toe
- Naast zand spoelt ook klei mee, er wordt wel gesproken over een modderfontein
- Water stroomt met geweld door het kanaal
- Dijk bezwijkt, scheurt en zakt in
- Aan bovenstroomse zijde zakt de dijk in
- Doorbraakproces duurt circa 20 minuten.

Na afloop van de eerste drie proeven zijn de proefdijken afgegraven en heeft een sporenonderzoek plaatsgevonden naar het piping en doorbraakproces. Het sporenonderzoek is nog niet geanalyseerd. Analyse van het doorbraakproces valt buiten het kader van dit onderzoek.



Figuur 3.18 Doorbraak proef 2 (toename zandtransport links en dijkdoorbraak rechts)

3.5 Conclusies

- De eerste waarnemingen van erosie-activiteit bestaan uit 'zandsporen', plekken waar geen zandtransport zichtbaar is, maar waar wel zand is afgezet. Deze zandsporen duiden mogelijk op de aanwezigheid van kanaaltjes, maar in ieder geval op een concentratie van lekstroming. Zandsporen zijn aanwezig over de gehele breedte van de dijk.
- Bij grotere verhangen, enkele decimeters onder het kritieke verhang, worden 'schone' wellen waargenomen, wellen die geen zand meevoeren. Bij proef 4 gebeurt dit al eerder.
- Voordat zandtransport wordt waargenomen dalen de waterspanningen in benedenstroomse raaien, duidend op kanaalvorming
- Bij proef 2 ontstaat, enkele decimeters onder het kritieke verhang, 1 zandmeevoerende wel, bij proef 4 gebeurt dat één decimeter onder het kritieke verhang. Bij proef 1 en 3 ontstaan er meerdere langs de teen van de dijk.
- Als eenmaal zandmeevoerende wellen ontstaan, neemt het totale zandtransport niet meer af. Langzaam groeit de pipe in bovenstroomse richting. In de proeven was de groeisnelheid van de pipe maximaal zo'n 0.6 m per uur.
- De doorlatendheid van het zandpakket inclusief de pipe neemt nauwelijks toe bij pipevorming (orde 5%).
- Tijdens terugschrijdende erosie zijn geen processen gezien die duidelijk anders waren dan de processen die zijn gezien in de small- en medium-scale proeven. Los van het lengte-effect waardoor de kritieke verhangen bij proeven op een grotere schaal kleiner zijn dan bij een proef op een kleinere schaal, lijken daarom de resultaten van kleine schaal proeven bruikbaar om invloed van parameters als korreldiameter, relatieve dichtheid, doorlatendheid, etc. te bepalen.
- Uit de waterspanningen kan afgeleid worden waar het kanaal zich bevindt. Nadat het kanaal de bovenstroomse zijde bereikt, start het ruimproces: het vergroten van het kanaal van de bovenstroomse zijde naar de benedenstroomse zijde. Dit is in de waterspanningen te zien als een sterke verhoging.
- Het ruimproces blijkt ingewikkelder te verlopen dan tot nu toe is aangenomen en is bij deze full-scale proeven ook ingewikkelder dan in de small- en medium-scale proeven. In de small- en medium-scale proeven is er een soort doorbraak wanneer de pipe de bovenstroomse zijde bereikt. Debiet en zandtransport nemen dan zeer sterk toe. In de full-scale proeven is het meest waarschijnlijke scenario dat het ruimproces aan de bovenstroomse zijde zoveel zand los maakt, dat er verder onder de dijk een verstopping optreedt van de pipe. Hierdoor treden er sterke fluctuaties op in debiet en zandtransport.
- Het bereiken van de benedenstroomse zijde resulteert in een forse toename van het zandtransport en het debiet.
- Er treden scheuren op in de dijk. Aan de bovenstroomse zijde zakt de dijk in.

4 Monitoringstechnieken

4.1 Inleiding

In het kader van het SBW onderzoek zijn de small-scale en medium-scale proeven uitgevoerd met een stijve, transparante afdekplaat bovenop het zand zodat het proces van rollende en schuivende korrels in de kanaaltjes alsmede het meanderen van kanaaltjes visueel kon worden waargenomen. Dit is ook gebeurd in de Deltagootproeven in de vorige eeuw. Enerzijds is dit een zeer gewenste situatie omdat dan goed kan worden waargenomen of er nog korrels in transport zijn, anderzijds was hier ook kritiek op omdat de interactie met een flexibele basis van de kleidijk niet aanwezig was. Bij de IJkdijk was vanwege de schaal een transparante plaat niet mogelijk zodat wel een kleidijk moest worden toegepast. Probleem werd dan wel hoe waar te nemen dat de kanaaltjes teruggroeien.

Hier ontmoet de onderzoeksvraag vanuit SBW de monitoringsdoelstelling vanuit Flood Control 2015. Immers, als we kunnen meten aan het ontstaan en aan de lengte van de kanaaltjes kunnen we ook detecteren of piping optreedt en aangeven in welke fase het pipingproces zich bevindt.

4.2 Soorten referentiemonitoring

De volgende referentiemonitoring is gebruikt:

1. Waterspanningsmeters op het zand

In proef 1 is een referentiemonitoring toegepast van 4 raaien waterspanningsmeters met elk 16 waterspanningsmeters op het zand. In de proeven 2 en 3 zijn zo'n 120 waterspanningsmeters geplaatst, verdeeld over 8 raaien in dwarsrichting op de dijk. In proef 4 zijn 4 raaien van 15 waterspanningsmeters geplaatst. De locatie van deze waterspanningsmeters varieert, voor de exacte locatie wordt verwezen naar de eerdergenoemde factual reports.

2. Waterspanningsmetingen in het zand

Naast waterspanning op het zand is ook op een niveau van 1/3 en 2/3 van de diepte van de bak bij elke proef in totaal een zestal meters geplaatst om de drukken in het zand te meten.

3. Peilmetingen

Deze worden uitgevoerd zowel bovenstrooms als benedenstrooms.

4. Glasvezel op het zand

Deze meting is ten behoeve van deformaties van het kleilichaam boven de kade. Bovendien kan temperatuur worden gemeten – het verloop van de temperatuur kan een maat zijn voor de stroomsnelheid.

5. Total station

Hiermee worden de deformaties van het oppervlak van het benedenstroomse talud van de dijk gemeten. De nauwkeurigheid is gelijk aan die van de macrostabiliteitsproef, minimaal 2 scans per belastingstap (per 20 min). Deze monitoring is alleen bij proef 1 toegepast; deformaties ten gevolge van de 'versheid' van de dijk bleken te overheersen.

6. Debietmetingen bovenstrooms en benedenstrooms

Op basis van de debietmeters op de pomp kan er gezien worden hoeveel water er toegevoegd wordt gedurende de belastingsperiode om het verval constant te houden. Dit debiet zal gelijk zijn aan het debiet wat door het zandpakket wordt geleid. Bij de benedenstroomse uitstroomopening zijn eveneens debietmeters geplaatst.

7. Camera's

In verband met de nauwkeurigheid van de camera's en de enorme hoeveelheid data die met een grote nauwkeurigheid gemoeid gaat is voorgesteld om met behulp van 2 camera's per bak, inzoombaar en richtbaar op afstand de proef te visualiseren. De aansturing van de camera's vond plaats op basis van visuele inspectie. Er zijn 2 terpen aanwezig om de proef visueel in de gaten te kunnen houden en bovendien een hoogwerker voor boven het benedenstroomse bassin.

8. Temperatuurmetingen

Om de kinematische viscositeit van het water te bepalen zal ook de temperatuur worden gemeten van het water in het bovenstroomse en benedenstroomse deel.

4.2.1 Waterspanningsmeters op het zand

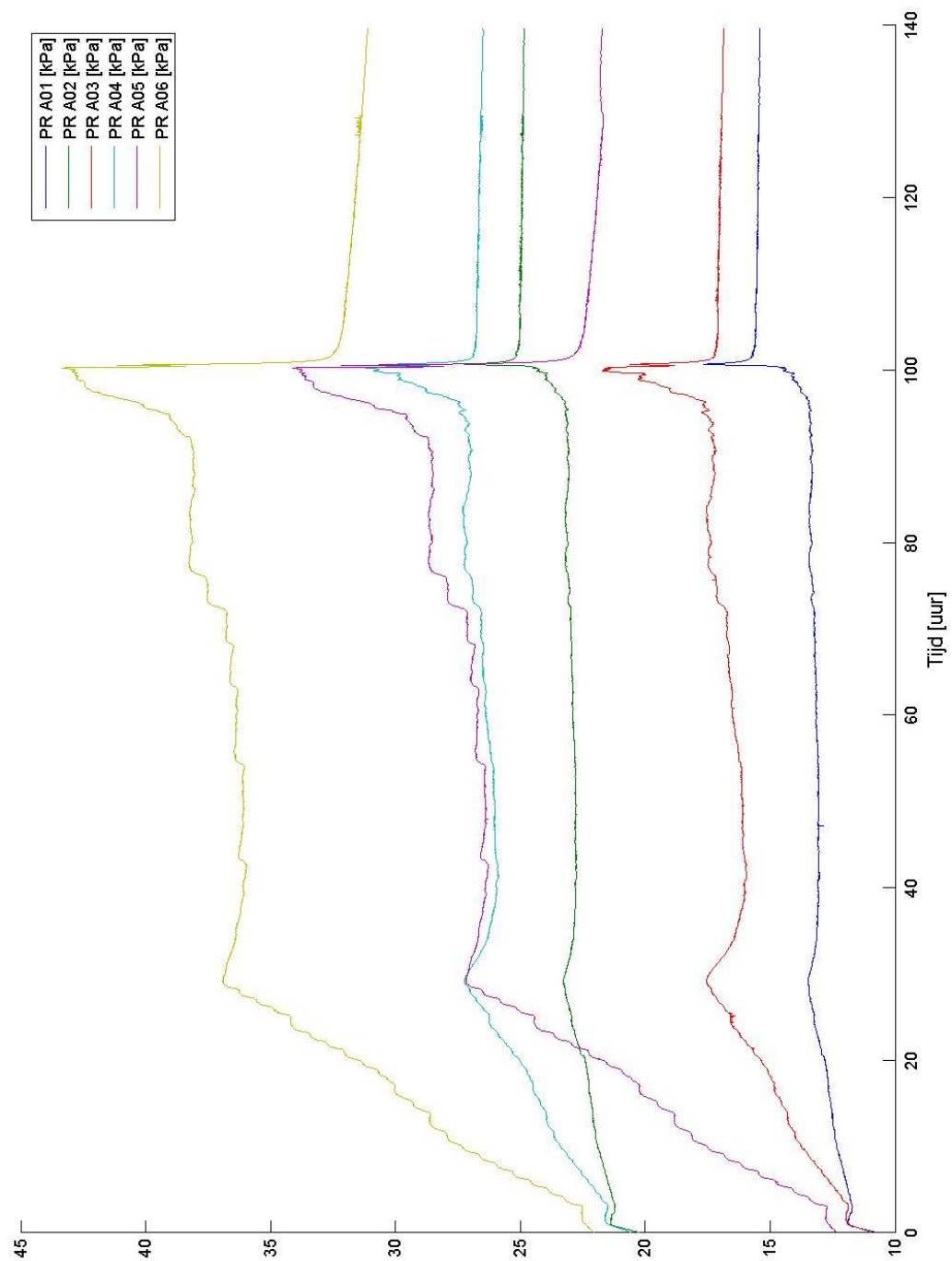
In de factual reports zijn de waterdrukken op het zand gepresenteerd. In de contourplots weergegeven in deze rapportage en in de factual reports is duidelijk waarneembaar of de gemeten verhangen constant blijven, afnemen of juist toenemen. Op basis hiervan kan worden achterhaald of er kanaaltjes aanwezig zijn. Eveneens kan bij aanwezigheid van meerdere raaien worden afgeleid met welke snelheid de kanaaltjes teruggroeien.

Door de waterspanningsmeters in FEWS of in MATLAB tools in te lezen kan nagenoeg realtime analyse worden uitgevoerd op basis van de verhanglijnen tussen de opeenvolgende raaien. Hiermee is het gehele pipingproces, vanaf het ontstaan van de eerste zandmeevoerende wellen tot aan doorbraak goed te volgen.

4.2.2 Waterspanningsmeters in het zand

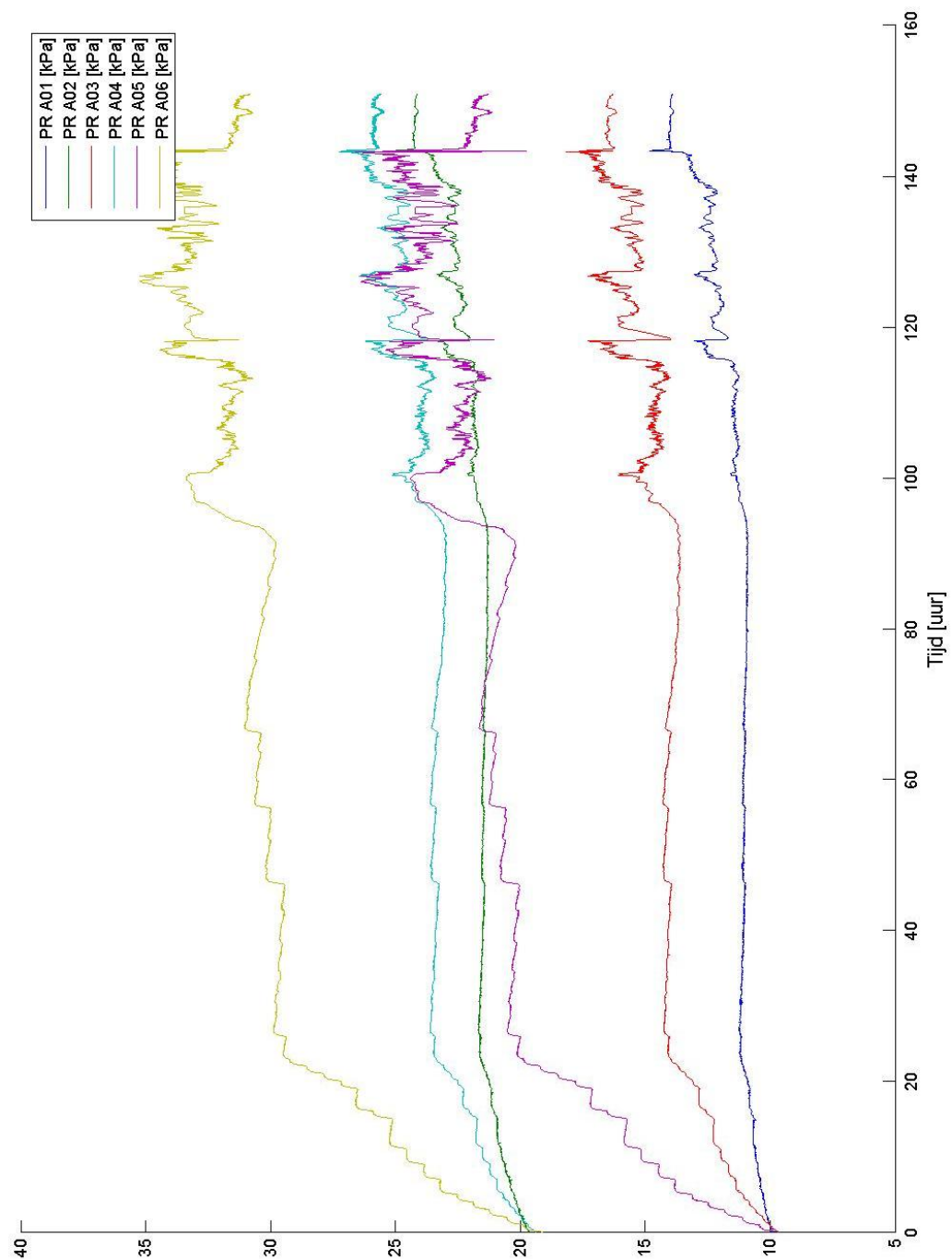
In alle 4 de proeven hebben een 6-tal PR-waterspanningsmeters het proces. In Figuur 4.1 zijn de meetdata weergegeven van proef 1. PR01 en 02 staan nabij de teen van de dijk. Op een afstand van 3,75 m uit de binnenteenlijn staan meters 03 en 04 en op een afstand van 11,25 m uit de binnenteenlijn de meters 05 en 06. De oneven meters staan op 1 m diepte, de even meters op 2 m diepte.

Op deze meters in het zand is de teruggang van waterspanning na het ontstaan van de kanaaltjes nog goed waarneembaar op een diepte van 1 m van in het zand (pr01-03 en 05). Op een diepte van 2 m is de teruggang nog steeds waarneembaar echter wel minder sterk dan op 1,0 m diepte.



Figuur 4.1 PR- waterspanningsmeters proef 1

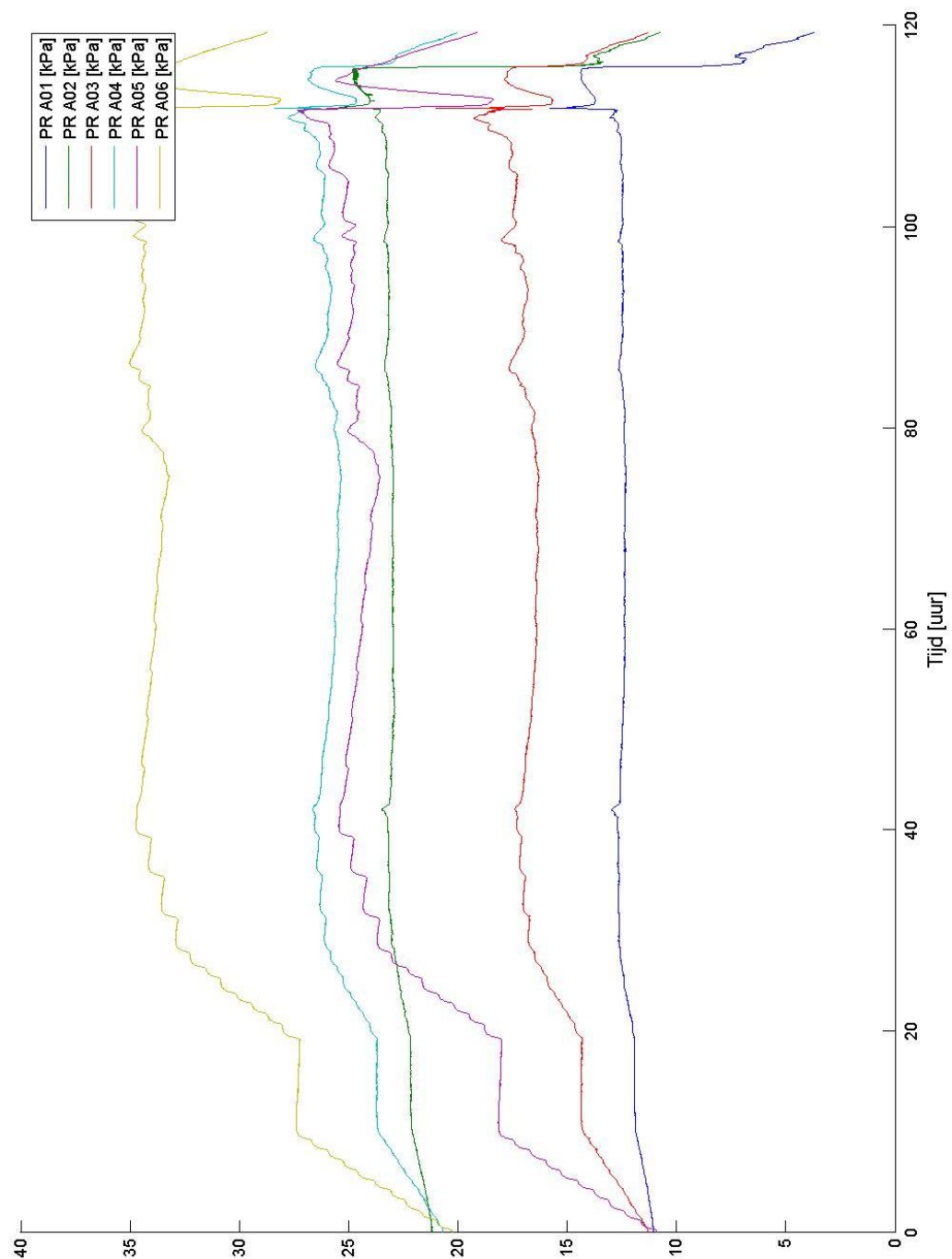
In de volgende grafieken staat de waterdrukken gemeten in het zand bij proef 2. Op deze metingen is kanaalgroei nauwelijks waarneembaar. Proef 2 kenmerkt zich overigens door het ontstaan van slechts 1 wel in de eerste fase van de proef die teruggroeide en uiteindelijk leidde tot doorbraak. Bij proeven 1, 3 en 4 waren meerdere wellen aanwezig, waardoor de doorlatendheid van het benedenstroomse zandpakket met name bij proef 1 en 3 over de volledige breedte is beïnvloed. In proef 2 was op de waterspanningsmeters op het zand de welvorming eveneens slechts waarneembaar op enkele meters (zie voorgaande hoofdstuk).



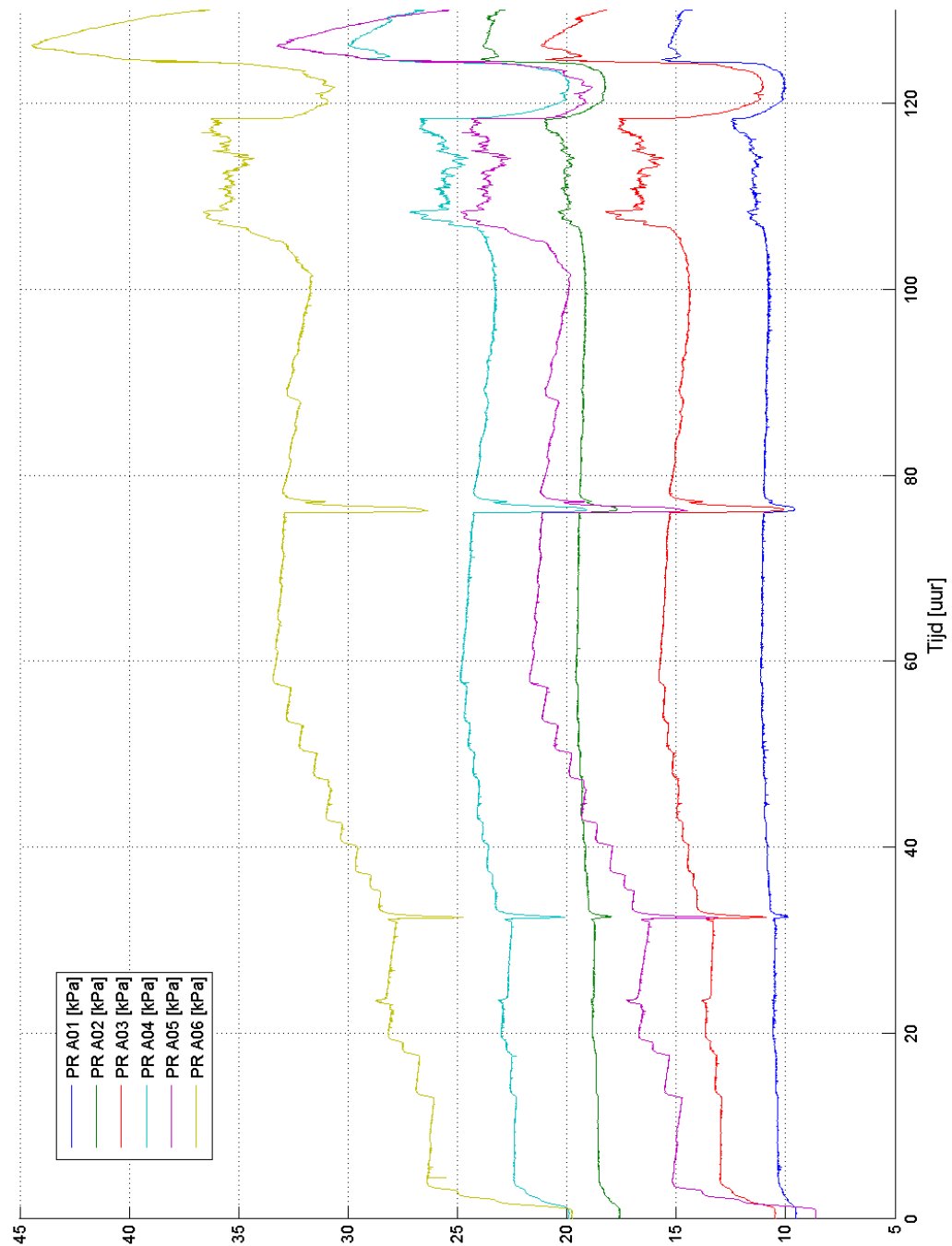
Figuur 4.2 Pr waterspanningsmeters in het zand in proef 2

In proef 3 was eveneens sprake van een groter aantal wellen in de teen van de kering, overeenkomstig proef 1. Ondanks het feit dat proef 3 leek op proef 1, is in deze proef de kanaalvorming op de waterspanningsmeters in het zand veel minder goed waarneembaar dan op de waterspanningsmeters op het zand, zie Figuur 4.3.

In proef 4 is in de figuur van de PR-metingen (Figuur 4.4) de invloed van de experimenten met de Luisterbuis overduidelijk aanwezig. Daarnaast is echter ook van $T=101,5$ uur in de meest bovenstroomse instrumenten een stijging waarneembaar, vermoedelijk vanwege de start van het ruimproces (zie ook Figuur 2.5).



Figuur 4.3 Waterspanningsmeters in het zand in proef 3



Figuur 4.4 PR-waterspanningsmeters proef 4

4.3 Glasvezel op het zand

Deze meting is ten behoeve van deformaties van het kleilichaam boven de kade. Bovendien kan temperatuur worden gemeten. De meting (Ten Cate) is uitgevoerd vanaf proef 2. In het kader van deze rapportage wordt daar niet nader op ingegaan. Verwezen wordt naar het factual report van proef 2 en 3 en de aparte rapportage van Ten Cate over proef 4.

4.4 Total station

Hiermee worden de deformaties van de dijk gemeten. Nauwkeurigheid is gelijk aan die van de macrostabiliteit proef, minimaal 2 scans per belastingstap (per 20 min). In het factual report van proef 1 zijn de resultaten van deze metingen weergegeven.

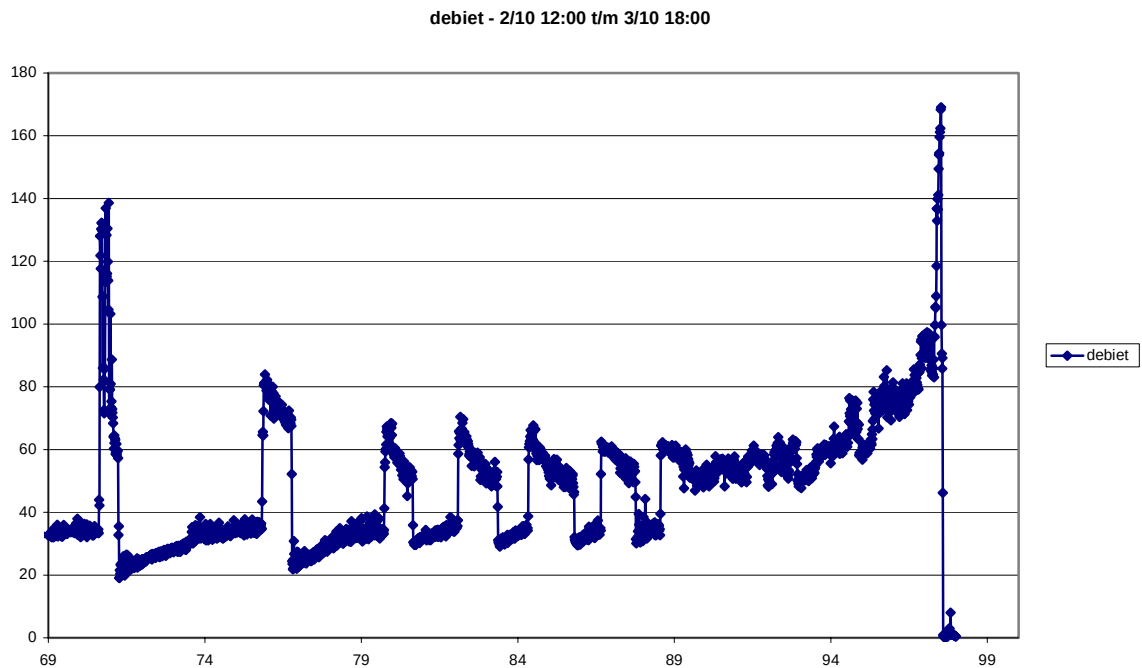
Doordat de prisma's in dit geval op een pas aangelegde en aan klink onderhevige kleilichaam staan is wel een deformatie waarneembaar van de prisma's, maar kan deze niet aan kanaalvorming worden gerelateerd. Voor deze proef was deze meting niet geschikt.

4.5 Debietmetingen bovenstrooms en benedenstrooms

In de factual reports zijn de resultaten van het uitstroomdebiet weergegeven. De bovenstroomse debietmeter is bijgehouden in het veld om te kunnen beoordelen hoeveel water werd toegevoegd en of er mogelijk lekkage van de pipingbak waarneembaar was. Dit laatste is niet waargenomen.

De debietmeters zijn hoofdzakelijk gebruikt om de doorlatendheid van het zand te bepalen. De resultaten hiervan zijn gepresenteerd in de factual reports en in het SBW analyse rapport. Opvallens is overigens dat in proef 3 het debiet erg laag bleef tot vlak voor doorbraak en nauwelijks was opgelopen als gevolg van de kanaaltjes. De toename van het debiet als gevolg van de kanaaltjes bedraagt circa 10%.

In proef 1 trad ruim 20 uur voor doorbraak een afwijkende patroon in de debietmeting op. Het debiet nam plotseling toe en bleef dan een tijdje constant en nam daarna weer af. Dit heeft zich een zestal keren herhaald. Na de zevende toename bleef het debiet hoog en bleef het toenemen. De toename van het debiet in de laatste fase van de proef (laatste 24 uur) is hier 100%, zie ook Figuur 4.5. In proef 2 bedraagt de toename in de aanloop na de eerste vorm van bezwijken (ruim 40 uur voor doorbraak) ruim 20 %. Toename in het debiet als gevolg van de kanaalvorming in de pipingfase (eerste zandmeevoerende wel) is eigenlijk niet waarneembaar.

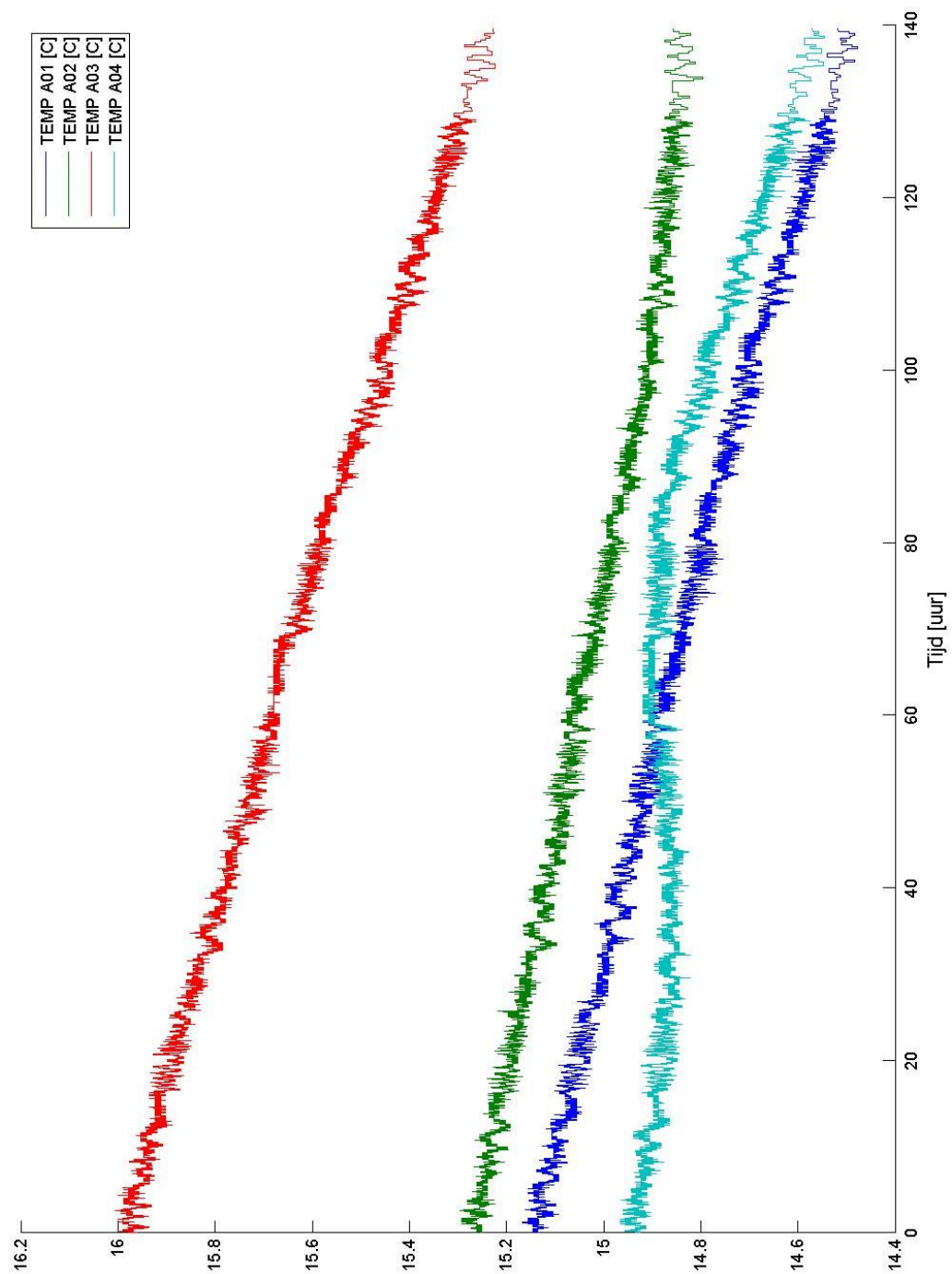


Figuur 4.5 Debiet benedenstrooms in de laatste fase van proef 1

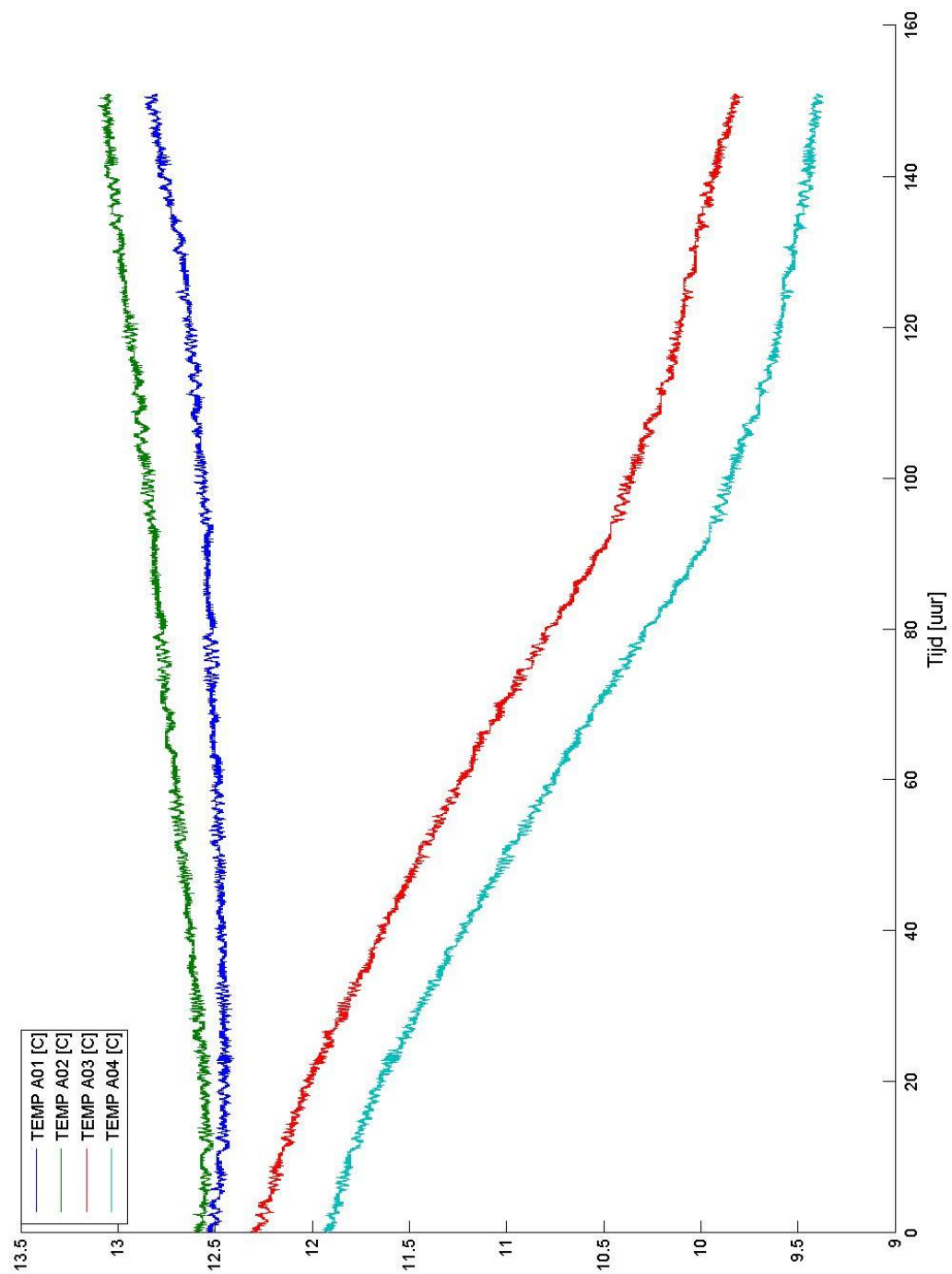
4.6 Temperatuurmetingen

In de referentiemonitoring zaten eveneens een aantal temperatuurmetingen. In de volgende grafieken zijn deze in de tijd uitgezet. De temperatuurmeters staan in het zand, 2 bovenstrooms (03 en 04) en 2 benedenstrooms (01 en 02).

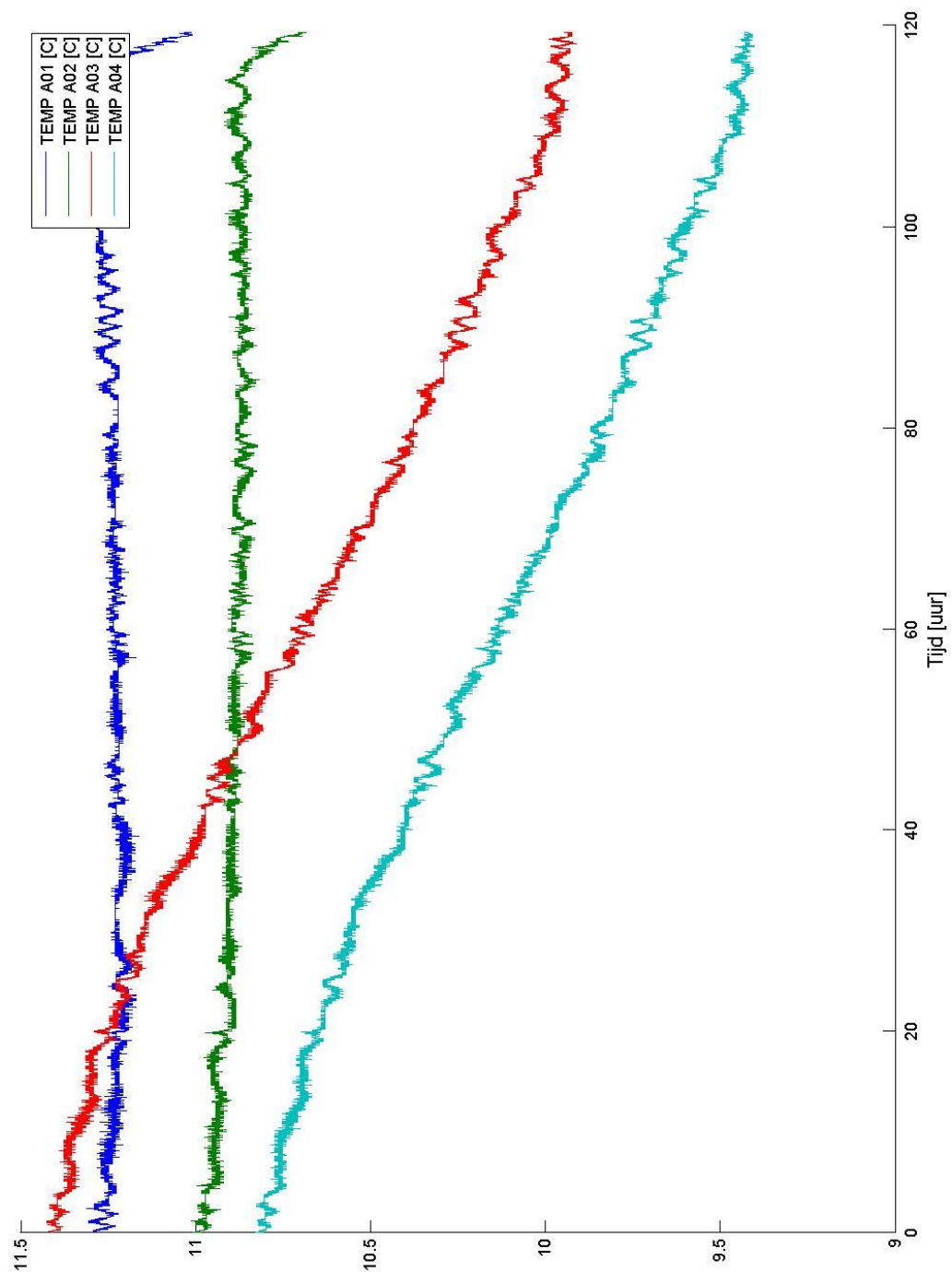
De veranderingen in de temperatuurmetingen lijkt hoofdzakelijk te worden veroorzaakt doordat het water in de zandbak een andere starttemperatuur heeft dan het water dat wordt ingelaten vanuit het kanaal. Ook wordt het bij iedere proef kouder.



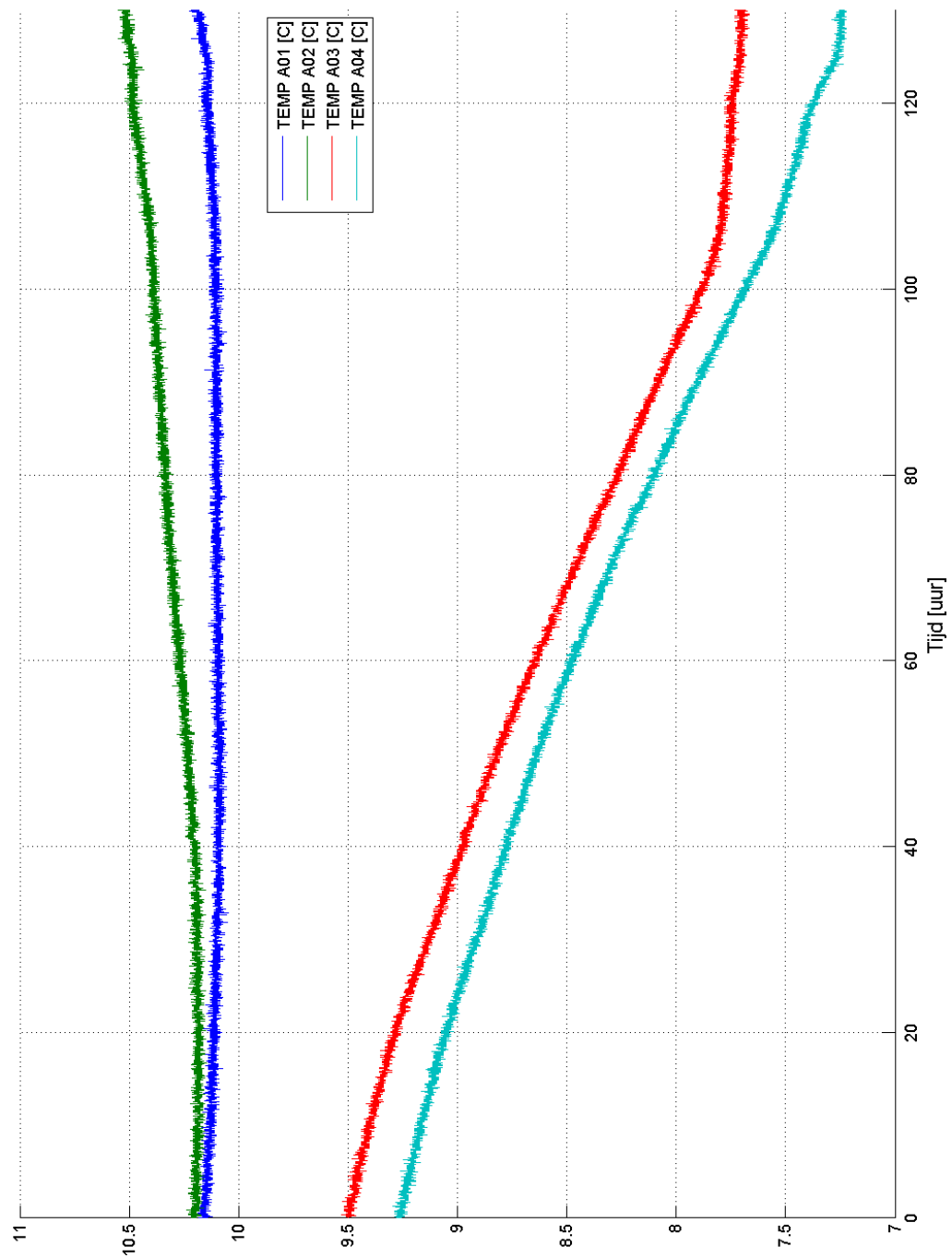
Figuur 4.6 Temperatuur proef 1



Figuur 4.7 Temperatuur proef 2



Figuur 4.8 Temperatuur proef 3



Figuur 4.9 Temperatuur proef 4

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies op basis van het proces

Tijdens de proeven zijn de volgende waarnemingen gedaan:

- De eerste waarnemingen van erosie-activiteit bestaan uit 'zandsporen', plekken waar geen zandtransport zichtbaar is, maar waar wel zand is afgezet. Deze zandsporen duiden mogelijk op de aanwezigheid van kanaaltjes, maar in ieder geval op concentratie van lekstroming. Zandsporen zijn aanwezig over de gehele breedte van de dijk.
- Bij grotere verhangen, enkele decimeters onder het kritieke verhang, worden 'schone' wellen waargenomen, wellen die geen zand meevoeren.
- Voordat zandtransport wordt waargenomen dalen de waterspanningen in benedenstroomse raaien, duidend op kanaalvorming.
- Bij proef 2 ontstaat, enkele decimeters onder het kritieke verhang, 1 zandmeevoerende wel. Bij proef 4 gebeurt dit één decimeter onder het kritieke verhang. Bij proef 1 en 3 ontstaan er meerdere langs de teen van de dijk.
- Als eenmaal zandmeevoerende wellen ontstaan, neemt het totale zandtransport niet meer af. Langzaam groeit de pipe in bovenstroomse richting.
- Het debiet neemt nauwelijks toe bij pipevorming.
- Uit de waterspanningen kan afgeleid worden waar het kanaal zich bevindt. Nadat het kanaal de bovenstroomse zijde bereikt, start het ruimproces: het vergroten van het kanaal van de bovenstroomse zijde naar de benedenstroomse zijde. Dit is in de waterspanning te zien als een sterke verhoging van de waterspanning.
- Het bereiken van de benedenstroomse zijde resulteert in een forse toename van het zandtransport en het debiet.
- Er treden scheuren op in de dijk. Aan de bovenstroomse zijde zakt de dijk in.
- De dijk bezwijkt.

5.2 Conclusies op basis van de monitoring

Op basis van meerdere waterspanningsmeters met in dwarsrichting op de dijk bekende onderlinge afstanden kan het pipingproces worden gevolgd vanaf het ontstaan van de eerste zandmeevoerende wel. Hiervoor dienen de meters onder het scheidingsvlak tussen de watervoerende zandlaag en het dijklichaam. Uit de PR waterspanningsmeters volgt dat de diepte van de meters t.o.v. het scheidingsvlak in hooguit 1 m moet zijn, maar liefst minder.

In drie van de vier beschouwde proeven nam de doorlatendheid over de gehele benedenstroomse zijde toe bij het ontstaan van kanaaltjes en was dit op een groot aantal waterspanningsmeters per raai zichtbaar. In proef 2 was dit alleen zichtbaar in een strook van 2 m (in dwarsrichting op de dijk gemeten). Aan weerszijde van de strook was de kanaalvorming niet goed zichtbaar. Dit geeft aan dat vanuit de monitoring een hoge meetdichtheid noodzakelijk is om enige zekerheid te hebben dat het kanaal niet gemist wordt.

Met behulp van FEWS kunnen de waterspanningsmetingen realtime worden geanalyseerd en kan het proces worden gevolgd. Met de mogelijkheid om op basis van de waterspanningsmetingen ook de pipe-lengte uit te rekenen kan worden geanalyseerd hoe ver het proces inmiddels is gevorderd.

5.3 Aanbevelingen

Momenteel ontbreekt de tijd en het overzicht om de overige monitoring technieken naast de waargenomen processen te leggen om zo te kijken of er nog meer technieken dan waterspanningsmeters zijn die het proces van kop tot teen kunnen volgen.

Gezien de ontwikkeling van de proeven zijn interventies vooral zinvol in de fase van het proces van terugschrijdende erosie. Dit proces moet dus goed kunnen worden gemonitord.

Het ruimproces is eveneens nuttig om te monitoren, echter vooralsnog is dat een stap te ver. Deze fase laat een veel onzekerder verloop in de tijd zien dan het teruggroeiende proces. Voorspellingen geven over de reststerkte van de dijk (een aspect wat overigens nog niet is geanalyseerd) is op dat moment onzeker en daarmee gevaarlijk.

Referenties

[van Beek et al., 2009]

V.M. van Beek, H.T.J. De Bruijn & J.G. Knoeff, 'SBW Piping: Hervalidatie Piping, HP5.4b Full-scale proeven (factual report proef 2)', Deltares rapport 1200690-005-GEO-0005, Deltares, Delft november 2009.

[Bligh, 1910]

Bligh, W.G., 'Dams, barrages and weirs on porous foundations', Engineering News, 64(26):708-710, 1910.

[De Bruijn & Knoeff, 2008]

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

[Knoeff & De Bruijn, 2009]

J.G. Knoeff & H.T.J. De Bruijn, 'SBW Piping: Hervalidatie Piping, HP5.4b Full-scale proeven (factual report proef 3)', Deltares rapport 1200690.005-GEO-0005, Deltares, Delft november 2009.

[Koelewijn, 2009]

A.R. Koelewijn, 'Evaluatie 0,3d-regel, SBW Piping bureauwerkzaamheden', Deltares rapport 433384, versie 3, Deltares, Delft april 2009.

[Koelewijn et al., 2009a]

A.R. Koelewijn, H.T.J. De Bruijn & V.M. van Beek, 'SBW Piping: Hervalidatie Piping, HP5.4b Full-scale proeven (factual report proef 1)', Deltares rapport 1200690-000-GEO-0023, Deltares, Delft november 2009.

[Koelewijn et al., 2009b]

A.R. Koelewijn, V.M. van Beek & H.T.J. De Bruijn, 'IJKdijk Full Scale Pipingproeven najaar 2009, Factual report proef 4', Deltares rapport 1200375-002-GEO-001, Deltares, Delft december 2009.

[de Vries, 2009]

G. de Vries, 'SBW Hervalidatie Piping, HP5.1 Draaiboek IJKdijk full-scale piping proef', Deltares rapport 1200690-000-GEO-0004, Deltares, Delft 2009.

[TAW, 1999]

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

A Aanvullende case t.b.v. validatie 0,3d-regel

In [Koelewijn, 2009] is een evaluatie beschreven van de zogeheten '0,3d-regel' uit het Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen [TAW, 1999], die bepaalt dat bij pipinganalyses voor situaties met aan de benedenstroomse zijde een deklaag boven het watervoerend pakket een waarde van 0,3 maal de dikte van die deklaag van het verval mag worden afgetrokken alvorens te bepalen of het kritisch verval overschreden is. De gedachte daarbij is dat het zand dat in een watervoerende scheur in deze deklaag aanwezig is voor extra weerstand zorgt. De onderbouwing van deze regel bleek betrekkelijk zwak te zijn en er werd dan ook voor gepleit om meer cases te verzamelen om in de toekomst deze regel wél te kunnen onderbouwen danwel aan te passen.

De eerste calamiteit met de Luisterbuis bij de vierde proef biedt een welhaast ideale case in dit verband. Hierbij trad lekkage op in het T-stuk in de afvoerleidingen van de Luisterbuis in het benedenstroomse bassin, met een bekende dikte van het bovenliggende zandpakket, een bekende waterdruk bovenaan de wel (namelijk het waterniveau in het benedenstroomse bassin) en een bekende waterdruk aan de andere kant, namelijk de waterdruk in de waterspanningsmeters vlak boven de Luisterbuis, gelet op de grote diameter van de afvoerbuizen, de betrekkelijk geringe afvoer en de betrekkelijk geringe afstanden is de stromingsweerstand daartussen verwaarloosbaar.

Toen de calamiteit optrad was de druk in waterspanningsmeters vlak boven de Luisterbuis 6 kPa hoger dan bij de start van de proef en eveneens 6 kPa hoger dan het waterpeil in het benedenstrooms bassin. De lekkage heeft ruim 8 uur geduurd, tijdens het grootste deel van deze tijd bedroeg het waterdrukverschil 5 kPa. Het logboek van de proef vermeldt een gemeten (zand)dikte boven het lek van 60 tot 65 cm. Uitgaande van het maximale drukverschil en de minimale deklaagdikte volgt hieruit een waarde van 1,0d, en uitgaande van het evenwichtsdrukverschil en de maximale deklaagdikte volgt hieruit een waarde van 0,77d. Overigens ligt het het meest voor de hand om uit te gaan van de evenwichtswaarde voor het drukverschil en (veiligheidshalve) de minimale deklaagdikte, dit levert een waarde van **0,83d**. Dit is een behoorlijk hoge waarde in vergelijking met de waarden vermeldt in [Koelewijn, 2009].

Voor nadere details omtrent de geometrie en de drukken wordt verwezen naar [Koelewijn et al., 2009b].