



POSITIEVE KWEL?

Stan van den Broek
Otto Kuypers

Arnhem, mei 2015

Positieve kwel?

Afstudeerscriptie

Arnhem
Mei 2015

Auteurs

S.T.M. van den Broek
Peelstraat 2b
5446 PJ Wanroij
Tel 06 22342177
E-mail: stan_broek@hotmail.com
Studentnummer: 496138

O.J. Kuypers
Paul Krugerstraat 13
6861 CR Oosterbeek
Tel 06 42997600
E-mail: Ottokuypers@live.nl
Studentnummer: 500258

Begeleiders

Ir. E.H. Rob Hogeschool van Arnhem en Nijmegen - Instituut Built Environment
Ir. C. van der Giessen Hogeschool van Arnhem en Nijmegen - Instituut Built Environment
Ir. P.E.M. Schoonen Witteveen + Bos

Afbeelding op voorblad:
Erosiepatronen uit proef

Summary

Piping is a failure mechanism in which sand erodes from under a dike. This may result in weakening of the dike and eventually in collapsing. A lot of research has been done on piping. These researches focused on piping in one direction. Waterboard Vallei en Veluwe questioned the results of this classic research-approach when the hinterland elevated heavily. In this situation it is possible that groundwater flows from the hinterland to the river instead of the other way. This groundwater flow towards the river is called regional seepage. The influence of regional seepage on piping was unknown. To find out what the influence is laboratory experiments have been done. In this research, the fluctuations in erosion patterns and critical water height have been searched when regional seepage was added in the piping simulation.

The test setup is made so it is possible to build up water pressure from two sides. The test setup is made out of coated plywood tank (dimensions 200x60x40cm). The tank is filled with homogeneous sand. On the top of the sand a Perspex cover was placed. This cover fitted seamless on the tank, making a waterproof tank. In the middle of the cover, a hole has been drilled with a diameter of 20mm. This was the only hole in the tank for the water to get out. When water pressure was added on the sides, water only could come out of the well (the hole). The water pressure made sand grains move which came with the water out of the well. Erosion channels were formed this way and piping was simulated.

To measure the influence of regional seepage on piping, four different tests have been done. In the first two tests, piping was stimulated from the classic research approach (water pressure from one side). The results from these tests were compared with results from previous researches. The results have been used as reference values for the last two tests. In these last tests regional seepage was added, so a water pressure was built up from two sides of the tank. To validate the results all test are done twice.

The results showed a reduction of the critical water height in the tests where regional seepage was used. This means regional seepage has a negative influence on piping. Regional seepage had no visible influence on the erosion patterns.

This research showed an influence of regional seepage on piping. Further research is recommended for regional seepage. By varying with more different variables, more information will become available to simulate a realistic situation and make trials on scale.

Samenvatting

Piping is een faalmechanisme waarbij zand van onder een waterkering erodeert en hierdoor de waterkering verzwakt. Naar dit faalmechanisme is al veel onderzoek uitgevoerd. Deze onderzoeken belichtten piping met een waterdruk van één zijde. Door Waterschap Vallei en Veluwe en Witteveen+Bos is echter geconstateerd dat bij een hoog gelegen achterland, er een grondwaterstroming richting de rivier stroomt. Deze grondwaterstroming wordt regionale kweldruk genoemd en de verwachting is dat deze invloed heeft op het faalmechanisme piping. Om te onderzoeken of dit inderdaad invloed heeft, zijn laboratoriumproeven uitgevoerd. Er is hierbij onderzoek gedaan naar het kritiek verval en de erosiepatronen.

Er is een proefopstelling gerealiseerd waarbij het mogelijk was om vanaf 2 zijden een waterdruk op te bouwen. De proefopstelling bestaat uit een rechthoekige betonplex bak (afmetingen circa 200x60x40cm) met hierin een homogeen zandpakket. Op dit zandpakket werd een plexiglas deksel gelegd, welke naadloos aansloot op het zandpakket. Exact midden in deze deksel is een gat gecreëerd met een diameter van 20mm (wel). Dit was de enige opening waar het water uit de proefopstelling kon stromen. Wanneer een waterdruk op het zandpakket werd gezet kon het water alleen via de kunstmatige wel eruit en werd door de druk zandkorrels meegenomen. Op deze manier is piping nagebootst.

De invloed van de regionale kweldruk op het faalmechanisme piping is onderzocht met een viertal proeven. In de eerste twee proeven werd op de traditionele manier piping gecreëerd. Er is in deze proeven vanaf één zijde water aangevoerd. Het achterland speelde geen rol in deze proeven. De overige proeven hadden een regionale kweldruk, water stroomde toe vanaf twee zijden. De resultaten uit de eerste twee proeven golden als referentiewaarden, de resultaten konden worden vergeleken met resultaten uit eerder uitgevoerd onderzoek. Met deze 'nulmeting' konden de resultaten van de overige proeven worden vergeleken. Hierdoor werd inzichtelijk wat de invloed was van de regionale kweldruk. Ter validatie van de resultaten zijn alle proeven twee keer uitgevoerd.

Uit de proeven is gebleken dat de regionale kweldruk invloed heeft op het faalmechanisme piping. In de proeven met een regionale kweldruk werd het gemeten kritiek verval lager en trad er sneller piping op. De invloed van de regionale kweldruk op het fenomeen piping is daarmee negatief bevonden. Bij de erosiepatronen waren geen veranderingen waargenomen.

Met dit onderzoek is aangetoond dat regionale kweldruk invloed heeft op piping. Desondanks wordt aangeraden om dit onderzoek verder uit te werken. Door te variëren in zandsoort, weldiameter en kwelengte is het mogelijk dat er andere resultaten gevonden worden. Tevens is er ruimte voor verbetering van de proefopstelling zelf. Het is mogelijk dat de resultaten door lekkage van de proefopstelling beïnvloed zijn.

Voorwoord

Voor u ligt de afstudeerscriptie 'Positieve Kwel?'. Een onderzoek waarin de invloed van een hoge regionale kweldruk op het faalmechanisme piping wordt bepaald. Deze scriptie is geschreven binnen het afstudeertraject van de opleiding Civiele Techniek aan de HAN te Arnhem. Van februari 2015 tot en met mei 2015 hebben we aan dit onderzoek gewerkt.

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van Witteveen+Bos voor Project Overstijgende Verkenning 4 – Regionale kweldruk. We willen graag Witteveen+Bos, met in het speciaal Philippe Schoonen, bedanken voor het geven van alle vrijheid en mogelijkheden die we binnen dit onderzoek hebben gekregen. Verder willen we graag Vera van Beek van Deltares bedanken voor het delen van de kennis over piping en proefopstellingen. Daarnaast willen we graag de HAN, met daarin speciaal Paul Scholten bedanken voor het beschikbaar stellen van de kennis, materiaal en de openstelling van de laboratoria die wij verscheidene keren onder water hebben gezet.

Voor de bouw van onze proefopstelling hebben een aantal bedrijven materialen geschonken, wij willen hiervoor graag Bonar, Valewaard BV en Lasbedrijf Helldörfer bedanken.

Als laatste willen wij graag onze afstudeerbegeleiders Ernst Rob en Casper van der Giessen bedanken. We hebben elkaar niet erg vaak gesproken, maar wanneer we hulp nodig hadden stonden jullie altijd voor ons klaar.

Veel plezier met het lezen van deze scriptie!

Otto & Stan

Inhoudsopgave

Summary

Samenvatting

Voorwoord

1	Inleiding	13
1.1	Onderwerp.....	13
1.2	Aanleiding.....	13
1.3	Onderzoekskader.....	14
1.4	Leeswijzer.....	14
2	Onderzoeksaanpak.....	15
2.1	Beoogde resultaten	15
2.2	Proefopstelling.....	15
2.3	Proefprocedure.....	17
2.4	Uitgevoerde proeven.....	19
2.4.1	Proef 1: Traditionele piping – gesloten achterland.....	19
2.4.2	Proef 2: Piping met uitstroom – open achterland	20
2.4.3	Proef 3: Regionale kweldruk - meestijgend	20
2.4.4	Proef 4: Regionale kweldruk – 6cm.....	20
2.5	Hypothesen	21
2.5.1	Proef 1.....	21
2.5.2	Proef 2.....	21
2.5.3	Proef 3 en Proef 4.....	21
2.6	Risico's.....	22
3	Onderzoeksresultaten	25
3.1	Proef 1: Traditionele piping – Gesloten achterland.....	25
3.2	Proef 2: Traditionele piping – Open achterland.....	28
3.3	Proef 3: Regionale kweldruk – meestijgend	30
3.4	Proef 4: Regionale kweldruk – 6 cm	33
4	Conclusie	37
5	Discussie.....	39
6	Aanbeveling	43
7	Referenties	45

Bijlagen

Bijlage I – Literatuur onderzoek

Bijlage II – Ontwikkeling proefopstelling

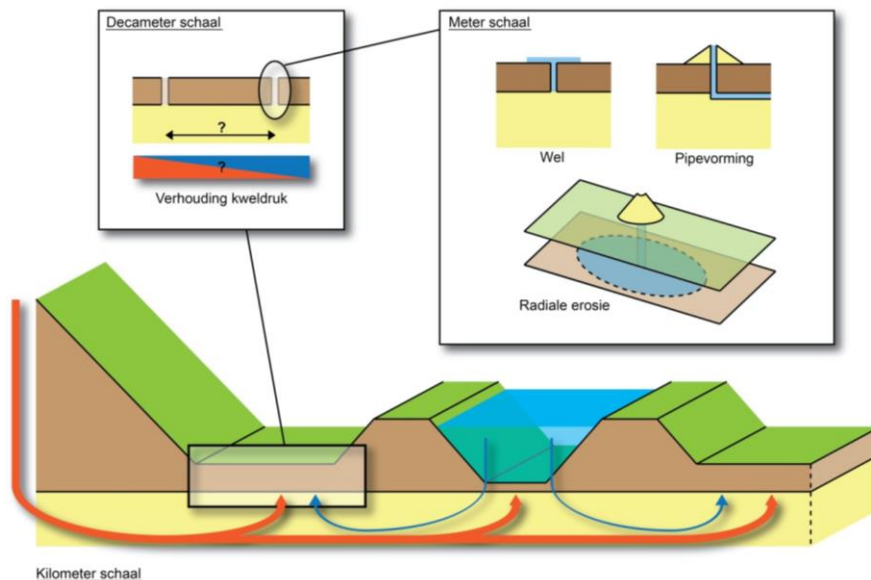
Bijlage III – Proeflogboek

1 Inleiding

1.1 Onderwerp

In dit onderzoek is onderzocht of regionale kweldruk invloed heeft op het faalmechanisme piping. Deze situatie treedt op in gebied met een hoger gelegen achterland. In Figuur 1 is dit schematisch weergegeven.

Bij hoogwater kan vanaf de rivier water onder de dijk doorlopen (blauwe pijl). Hierbij is het mogelijk dat er een wel ontstaat en erosie optreedt. Dit kan een verzwakte waterkering tot gevolg hebben. Wanneer op datzelfde moment regionaal kwelwater (rode pijl) vanaf het hooggelegen achterland naar de rivier stroomt, botsen de twee kwelstromen. Verwacht werd dat de regionale kweldruk invloed heeft op het erosieproces en het kritiek verval. Het hoogteverschil in de waterstanden binnen- en buiten de dijk wanneer piping ontstaat, is het kritiek verval. Wanneer de rivier een bepaalde hoogte heeft bereikt ontstaat piping. Voor meer informatie over het faalmechanisme piping en regionale kweldruk, zie bijlage I – Literatuuronderzoek.



Figuur 1 – Schematische weergave onderzoek (Witteveen+Bos, 2014a)

Op basis van deze gebiedspecifieke situatie is de volgende vraag opgesteld:

Kan met laboratoriumproeven de invloed van regionale kweldruk op het faalmechanisme piping zichtbaar gemaakt worden?

In dit onderzoek is aan de hand van deze vraag gezocht naar de invloed van de regionale kweldruk. In dit rapport staan de resultaten en conclusies beschreven.

1.2 Aanleiding

Bij de Grebbedijk te Wageningen zijn in periodes waarin geen hoogwater was, zandmeevoerende wellen geconstateerd. Op basis van deze constatering heeft Waterschap Vallei en Veluwe samen met een deelverkenning POV Piping opgesteld (Witteveen+Bos, 2014b). Hierin wordt gesuggereerd dat deze wellen ontstaan door de verhoogde grondwaterdruk (regionale kweldruk) vanuit de Veluwe en Utrechtse heuvelrug. Hierbij hebben zij een aantal hypothesen opgesteld. Eén hiervan luidt dat de regionale kweldruk als een tegendruk werkt, waardoor de

regionale kweldruk een positief effect heeft op het faalmechanisme piping. Wat als gevolg heeft dat piping niet tot stand kan komen of dat er alleen rondom de wel zandtransport plaats vindt.

De resultaten van dit onderzoek worden gebruikt voor de projectoverstijgende verkenning (POV) piping. Hierin worden verschillende deelverkenningen gedaan naar het fenomeen piping. Met deze verkenningen wordt getracht doelgericht oplossingen te vinden voor verschillende situaties waar piping optreedt.

1.3 Onderzoekskader

De invloed van een regionale kweldruk op piping is nog onbekend. Deze invloed kan zowel een positief, als negatief effect hebben op het erosieproces.

Om deze rede is dit onderzoek als voorverkenning opgestart. Er wordt getracht door middel van laboratoriumproeven de invloed van regionale kweldruk op de erosieprocessen te ontdekken. Hierbij wordt gevisualiseerd waarvandaan zandtransport optreedt.

De resultaten van dit onderzoek doelen op het achterhalen van de invloed van de regionale kweldruk op piping. Om deze reden is gekozen om niet diep in te gaan op de realistische waarden waarin regionale kweldruk voorkomt. Daardoor zijn de proeven niet op schaal uitgevoerd en zijn er geen analytische en numerieke berekeningen gedaan in het onderzoek.

1.4 Leeswijzer

Dit rapport is opgebouwd uit 6 hoofdstukken. In hoofdstuk 2 is de opzet van het onderzoek beschreven. Hierin is te vinden met welke proefopstelling gewerkt is, hoe de proeven in hun werk gaan en welke resultaten verwacht werden. Vervolgens zijn in hoofdstuk 3 de resultaten van de proeven te vinden. Op basis van deze resultaten is in hoofdstuk 4 antwoord gegeven op de hoofdvraag en hierna volgt in hoofdstuk 5 de discussie. Tot slot wordt in hoofdstuk 6 afgesloten met de aanbevelingen.

2 Onderzoeksaanpak

In de projectaanpak is de methodologie binnen het onderzoek duidelijk gemaakt. Allereerst is het doel van het onderzoek geformuleerd, daarbij is ook vermeld welke resultaten zijn gezocht en hoe dit heeft geholpen met het beantwoorden van de opgestelde onderzoeksvragen. Hierna is uitgelegd hoe de proefopstelling eruit komt te zien. Verder is stap voor stap omschreven hoe een proef in zijn werk is gegaan. Waarna is beschreven welke proeven uitgevoerd zijn en welke hypothesen hiervoor zijn opgesteld. Als laatste zijn de risico's in beeld gebracht.

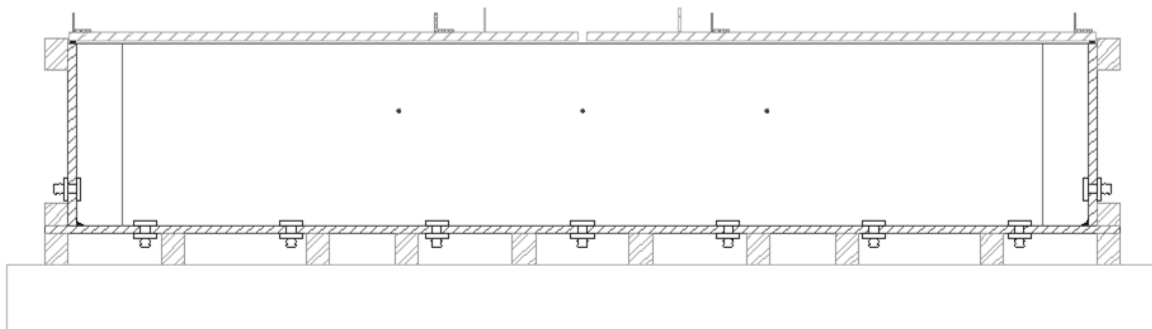
2.1 Beoogde resultaten

Het doel van het onderzoek was om met laboratoriumproeven de invloed van regionale kweldruk op het faalmechanisme piping zichtbaar te maken. Hieruit is het doel van de laboratoriumproeven op gemaakt. Deze was namelijk de invloed van de regionale kweldruk op het faalmechanisme piping zichtbaar maken. Er wordt in de proeven gekeken hoe verschillende hoogtes van de regionale kweldruk invloed hebben op het kritiek verval van de rivierwaterstand en op de erosiepatronen die hiermee ontstaan.

2.2 Proefopstelling

Het hoofddoel van de proefopstelling is, zoals hierboven staat beschreven is, het visualiseren van de erosiepatronen van een zandmeevoerende wel in een situatie waarbij de waterdruk zowel van de rivier (maatgevend hoog water), als het achterland (regionale kweldruk) komt. Deltares heeft in 2009 een proefopstelling gemaakt waarmee de rekenregel van Sellmeijer gevalideerd is. Deze proefopstelling heeft binnen dit onderzoek als inspiratie gediend bij het ontwerp van de proefopstelling (van Beek & Bezuijn, 2009). Meer informatie over deze proefopstelling is te vinden in Bijlage I – Literatuuronderzoek. De proefopstelling die in dit rapport is beschreven is de definitieve opstelling. In Bijlage II – Ontwikkeling proefopstelling is de ontwikkeling van de proefopstelling beschreven. Tevens bevat deze bijlage de ontwerptekeningen van de proefopstelling.

De basis van de proefopstelling bestaat uit een betonplex bak met binnen afmetingen: 2,20x0,60x0,40m. Deze maten zijn afgeleid van vergelijkbare proeven, uitgevoerd door Deltares (Van Beek & Bezuijn, 2009). De bak is rondom versterkt met houten balken. De bak heeft, zoals in Figuur 2 te zien is, aan beide kopse kanten een waterreservoir waar een waterdruk gelijkmatig over het zandpakket in werd gelaten. Tussen dit reservoir en het zandpakket is een stalen rooster met daarvoor een geotextiel aangebracht. Op deze manier bleef het zand op zijn plaats. Het zandpakket had lengte van 2,00m.



Figuur 2 - Langsdoorsnede proefopstelling

Om de waterdruk in het zandpakket te kunnen regelen is aan weerszijden een waterkolom gerealiseerd. Vanuit twee emmers stroomde, via een waterslang, water naar de waterreservoirs, zie Foto 1. De emmers konden tot een maximale hoogte van 2,0m boven de bodemplaat worden gehangen. Om de exacte stijghoogten te behouden tijdens de proeven konden de emmers op elke hoogte worden vastgezet. Door een overloop in de emmer werd een constant waterpeil gerealiseerd.

Deksel

Als deksel is gekozen voor een plexiglas plaat van 20mm dik. Doordat deze doorzichtig was, is het piping proces goed waarneembaar geworden. De deksel moest naadloos aansluiten op het onderliggende zandpakket om te voorkomen dat er lucht tussen zat waardoor het water over het zandpakket stroomde. Om een waterdichte proefopstelling te creëren, zaten er rubbers tussen de bak en de deksel. Onder deze rubbers is tape geplakt. Op tape plakten de rubbers beter dan op het hout. Daarnaast werden door de tape kieren afgesloten en daarmee lekkage voorkomen. Door middel van dwarsliggers en lijmklemmen werd de deksel goed op het zandpakket gedrukt.

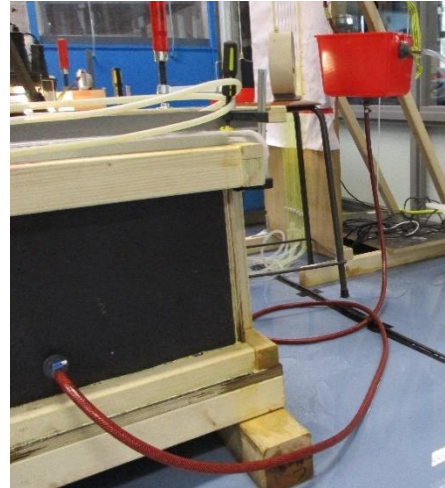


Foto 1 - Emmer met aanvoerslang

Wel

Midden in de deksel is een ronde opening gemaakt als uittreepunt voor het water, dit gat was de kunstmatige wel. De diameter hiervan was 20mm. Op dit gat is een blokje met een zelfde diameter gelijmd, hierdoor is de kwelweg verlengd. Dit blokje op de wel was bedoeld om het zand wat uit de wel komt direct opzij af te voeren en daarmee de wel minder snel te laten verstoppelen. Daarnaast is hierdoor een constante verticale kwelweg gerealiseerd. Bij ontbreken van dit blokje ontstond de mogelijkheid tot zand kratervorming, waardoor de verticale kwelweg verlengd werd en daarmee de resultaten beïnvloed werden. De totale hoogte van de wel was 50mm (30mm blokje + 20mm plexiglas).

Zand

Het zandpakket bestond uit een enkele homogene laag CZ68 zand. Dit zand was afkomstig van zand en grindwinning Valewaard B.V. Dit zand heeft de eigenschappen die gunstig zijn voor dit onderzoek, uitleg hierover is te vinden in het literatuuronderzoek. Dit zand had een uniforme zeefkromme. De d_{70} van het zand is ongeveer $400\mu\text{m}$. Deze korrel diameter is groter dan wat in eerdere proeven van Deltares is gebruikt, maar in het gesprek met Vera van Beek (Deltares) is duidelijk geworden dat zolang korrels een diameter tussen $200\mu\text{m}$ en $500\mu\text{m}$ hebben, dit weinig invloed heeft op de resultaten in dit onderzoek. De Valewaard BV heeft het zand beschikbaar gesteld. Dit zand viel binnen de gestelde voorwaarden en is om deze rede toegepast. In Bijlage II – Ontwikkeling proefopstelling zijn zeefkrommen te vinden van het zand.

Wandversterking

Na het uitvoeren van de eerste vier proeven bleek de bak in de lengte uit te wijken. De breedte was, in het midden van de bak, ongeveer 63cm geworden. Hierdoor sloten de rubber strips van de deksel en bak niet goed aan waardoor er veel lekkage was. Tevens was de kit losgekomen en was de gehele proefopstelling gaan lekken. Om deze redenen is besloten om een wandversterking toe te passen. Hierbij is de kit vervangen voor een sterkere en is meer kit toegepast. Daarnaast zijn er drie draadeinden in de bak geplaatst. Deze hebben ervoor gezorgd dat de bak niet meer opbult. In Foto 2 is de definitieve proefopstelling met de versterking te zien. In Foto 3 is de proefopstelling te zien wanneer deze in gebruik is.



Foto 2 - Uiteindelijke proefbak

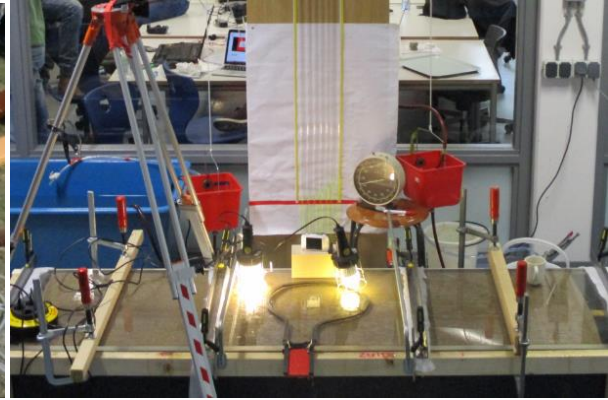


Foto 3 - Proefopstelling in gebruik

Meetopstelling

De meetopstelling was een van de belangrijkste onderdelen van de proefopstelling, hierop waren de peilbuizen bevestigd. In Foto 3 staat de meetopstelling achter de proefbak. Aan de meetopstelling zijn de emmers opgehangen waarmee de waterstanden individueel gereguleerd konden worden. De meetopstelling is vervaardigd uit een verticaal staande houten plaat met een hierop een wit ruitjes papier. Hierdoor was het mogelijk om de peilbuizen goed af te lezen. De rode lijn (foto 3) is de nul lijn, deze is op dezelfde hoogte gehangen als de bovenkant van de wel.

Overhoogte constructie

De overhoogte constructie is gebruikt om een extra laag zand op het zandpakket te realiseren. De constructie is gemaakt van betonplex met verstevigde hoeken. De hoogte van de constructie was 100mm. De overhoogte constructie had dezelfde afmetingen als de proefbak waardoor deze goed op de rubbers aansloot. Hierdoor was het mogelijk de waterstand in de bak tijdelijk te verhogen ten behoeve van het verdichten van het zandpakket.

2.3 Proefprocedure

Om eenduidige resultaten te krijgen zijn alle proeven volgens hetzelfde stappenplan uitgevoerd. In dit stappenplan is de voorbereiding en de afronding van de proeven uitgelegd. Tot slot is uitgelegd hoe de verhoging van de waterdruk is uitgevoerd. Welke proeven uitgevoerd zijn is in paragraaf 2.4 te vinden.

Stap 1 - Aanbrengen zandpakket

Eerst is de bak tot 15cm gevuld met water. Vervolgens is er zand in de bak gestrooid en gelijktijdig onderwater aangestampt. Doordat het zand direct verzadigd is, voorkomen dat er lucht opgesloten raakte in het zandpakket. Aanstampen is gedaan door over het zand te lopen.

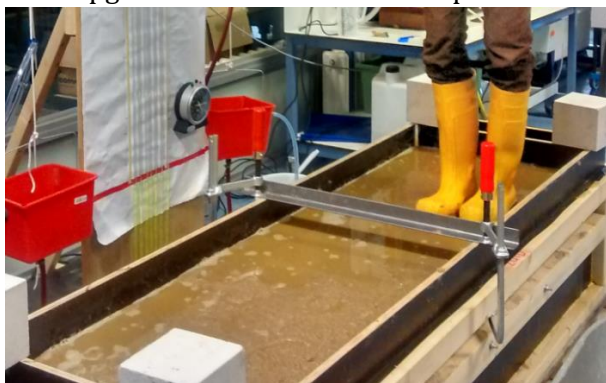


Foto 4 - Verdichting middels overhoogte

Met de overhoogte constructie is de waterstand tijdelijk ± 5 cm verhoogd en is er in het nat een overhoogte van het zand gerealiseerd. Deze overhoogte is zorgvuldig aangestampt en had een dikte van 1 à 2 cm. In Foto 4 is te zien hoe het verdichten in zijn werk gaat.

Stap 2 – Afrijden overhoogte

Nadat de waterstand verlaagd was tot circa 3cm onder de rand van de proefopstelling is de overhoogte constructie verwijderd. Vervolgens is de overhoogte afgereden met de afrijbalk, zie Foto 5. Het zandpakket bleef glad achter. Zand dat op de rubbers terecht kwam, is verwijderd zonder het zandpakket te verstoren.

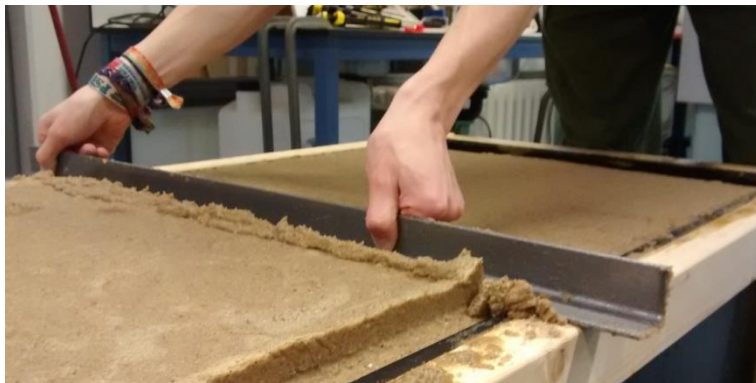


Foto 5 – Afrijden overhoogte

Stap 3 – Aanbrengen deksel

De deksel is aan een lange zijde van de bak gelegd. Zodra deze goed lag, is de overzijde op de juiste plek neer gelaten. Wanneer de deksel op het zandpakket lag, kon deze, door te verschuiven, nog minimaal gecorrigeerd worden zonder het zandpakket te verstoren.

Vervolgens zijn de dwarsbalken op de bak geplaatst. Als eerste zijn de middelste balken vastgemaakt, waarna de waterdruk opgevoerd werd. De lucht kon op nu nog ontsnappen tussen de rubbers waardoor de luchtreservoirs ook 'luchtvrij' werden. Hierna zijn ook de dwarsbalken boven deze reservoirs geplaatst. Daarna zijn alle dwarsbalken vastgezet met lijklemmen. Onder alle balken is geotextiel gelegd om krassen op het plexiglas te voorkomen.

Stap 4 – Verzadigen zandpakket

De waterkolommen zijn in stap 4 op dezelfde hoogte als de uitstroom opening van de wel gezet. Hierdoor verzadigde het hele zandpakket. Hierbij diende nog geen water uit de wel te treden.

Stap 5 – Camera's in positie zetten

Doormiddel van timelapse fotografie is vastgelegd hoe de erosiepatronen zich in het zandpakket vormden. Door het gebruik van timelapse is de videoduur van de proef tot 150 keer gereduceerd en was deze goed te analyseren. Daarnaast is een secundaire camera gebruikt om de stijghoogten in de peilbuisjes vast te leggen en overige foto's te maken.

Stap 6 – Uitvoeren en vastleggen proef

Tijdens de proeven zijn alle bevindingen vastgelegd op papier en/of camera. Hierbij is ook het tijdstip van de bevinding genoteerd, later zijn deze bevindingen (wanneer relevant) verwerkt in de onderzoeksrapportage.

Stap 7 – Einde proef

Een proef is ten einde wanneer er een doorgaande pipe ontstaat. Wanneer naar beide zijden een pipe aan het ontstaan is, is gewacht met beëindiging tot er een evenwicht optrad of de tweede pipe ook was doorgesloegen.

Stap 8 – Resultaten vastleggen

Op het moment van beëindiging van de proef zijn foto's van de erosiepatronen gemaakt om zo de resultaten vast te leggen. Vervolgens is de waterdruk verlaagd tot enkele centimeters onder de deksel. Dan zijn de klemmen verwijderd en achtereenvolgend de deksel.

Zodra de deksel verwijderd was, zijn met behulp van lampen, de erosiekanalen nogmaals vastgelegd. Door de schaduwvorming van deze lampen waren de kanaaltjes beter zichtbaar. Wanneer nodig, is gebruik gemaakt van een meetlint om lengtes of dieptes te bepalen.

Stap 9– Resetten proef

De bovenste laag van het zandpakket is omgewoeld. Hierna is het stappenplan opnieuw uitgevoerd, vanaf halverwege stap 1, bij het aanbrengen van de overhoogte.

Proces voor ophogen waterdruk

Tijdens de proeven werd gezocht naar het kritieke verval. Dit is het verschil in waterstand tussen de wel en de stijghoogte in peilbuis 1. Om dit verval te vinden werden de emmers volgens het volgende ophoogschema verhoogd.

- Elke 5 minuten is gekeken of het nodig was op te hogen
- Elke keer dat er werd opgehoogd, is de waterstand één centimeter verhoogd
- Wanneer er na 5 minuten nog zandtransport plaats vond, is er niet opgehoogd. Er is 5 minuten extra gewacht waarna opnieuw beoordeeld is of er opgehoogd moest worden.

Het proces voor ophogen van beide emmers was hetzelfde. Echter per proef verschilde het welke emmer werd opgehoogd.

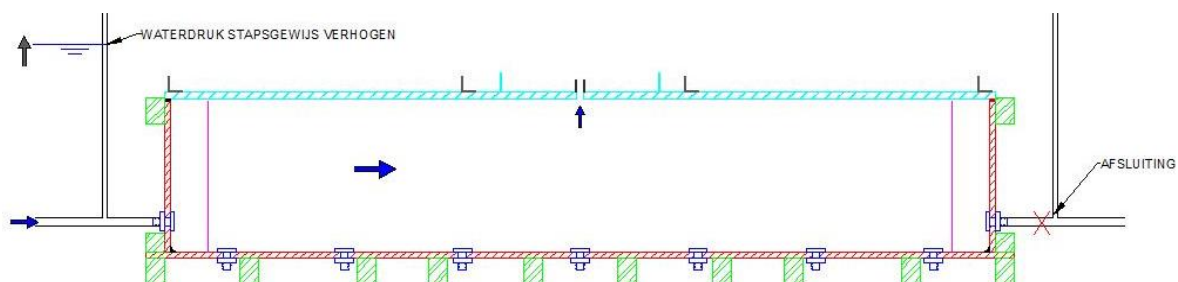
2.4 Uitgevoerde proeven

In deze paragraaf staat beschreven hoe de verschillende proeven in hun werk zijn gegaan. In totaal zijn er acht proeven uitgevoerd. Elke proef is twee maal uitgevoerd ter onderlinge controle van het resultaat uit de proeven. Er zijn dus vier verschillende proeven uitgevoerd.

2.4.1 Proef 1: Traditionele piping – gesloten achterland

Als eerste is het fenomeen piping in de bak nagebootst zonder regionale druk. Dit is gedaan om te testen of de proefopstelling werkte en om erachter te komen hoe het pipingproces er 'normaal' uitziet. Deze resultaten zijn vergeleken met die van Deltares (van Beek & Bezuijn, 2009) om te beoordelen of de behaalde resultaten reëel zijn. Daarnaast is dit de 0-meting voor de overige proeven geweest. Op basis van dit gevonden kritiek verval is in volgende proeven beoordeeld of de regionale kweldruk invloed heeft.

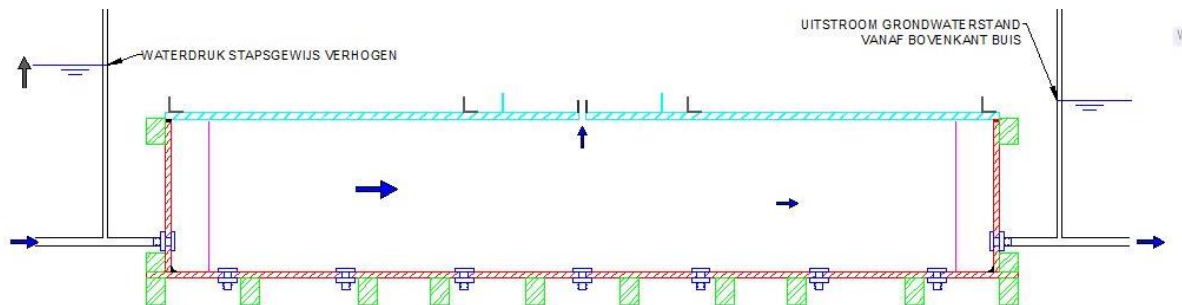
De 'waterstand' aan de rivierkant is volgens het Proces voor Ophogen opgehoogd. De regionale kweldrukzijde is in deze proef volledig afgesloten. De waterdruk in de hele bak liep op en de enige mogelijkheid voor het water om uit te treden was via de wel. De situatie is in Figuur 3 weergegeven.



Figuur 3 - Principe proef 1, één zijde is afgesloten

2.4.2 Proef 2: Piping met uitstroom – open achterland

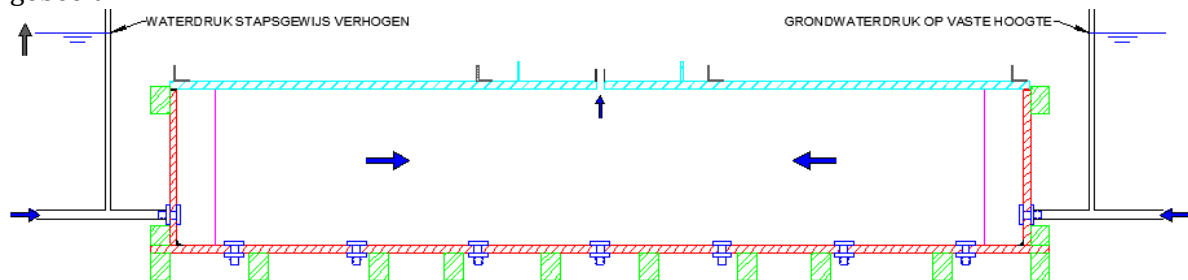
Deze proef is, net als proef 1, volgens het proces van ophoging uitgevoerd. Het enige verschil was dat de achterkant van de bak in deze proef niet was afgesloten, maar dat er water uit kon stromen (zie Figuur 4). Hierbij lag de afvoerhoogte op de bovenkant van de wel. Op deze manier is geprobeerd een vrije grondwaterstroom te creëren. Hierbij is een deel van de overdruk via het grondwater afgevoerd. De uitstroomhoogte is gekozen om te voorkomen dat de druk aan de achterzijde van de bak helemaal weg viel, waardoor er geen piping op zou treden. Op onderstaand figuur (Figuur 4) staan de waterstromen in de proef afgebeeld.



Figuur 4 – Principe proef 2, vrije uitstroom

2.4.3 Proef 3: Regionale kweldruk - meestijgend

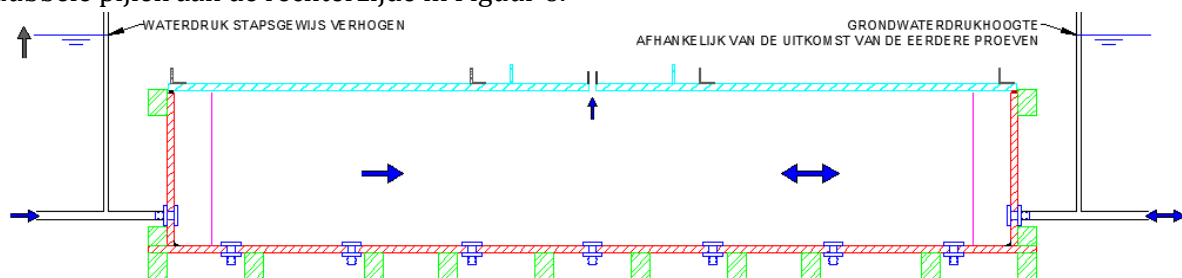
In proef 3 is er voor het eerst een regionale kweldruk toegepast. Bij deze proef is onderzocht of de regionale kweldruk enige invloed heeft. Door de druk aan weerszijde gelijktijdig op te hogen, is de maximale invloed nagebootst. In Figuur 5 is de schematische weergave van proef 3 afgebeeld.



Figuur 5 – principe proef 3, piping met gelijke regionale kweldruk

2.4.4 Proef 4: Regionale kweldruk – 6cm

Bij de proef 4 is een vaste waarde gekozen voor de regionale kweldruk. De waterdruk is aan beide zijden van de bak is gelijktijdig tot deze hoogte verhoogd. Hierna is de rivierzijde verder verhoogd tot piping ontstond en daarmee het kritieke verval gevonden is. De waarde waarop de regionale kweldruk is vastgezet, is vastgesteld aan de hand van de resultaten van proef 1, 2 en 3. Wanneer de rivierdruk de regionale kweldruk overschreed, stroomde het water de regionale kweldruk zijnde niet meer de bak in, maar kwam er juist water uit gestroomd. Vandaar de dubbele pijlen aan de rechterzijde in Figuur 6.



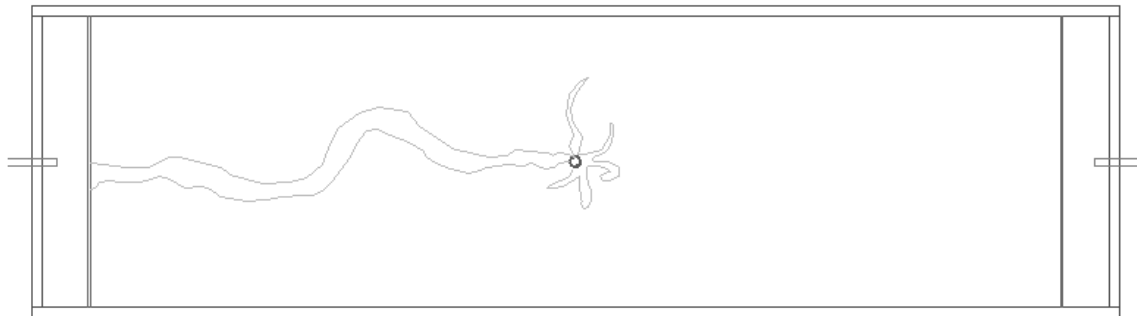
Figuur 6 – Principe proef 4, piping met vaste regionale kweldruk

2.5 Hypothesen

Het hoofddoel van de proeven was achterhalen of een regionale kweldruk invloed heeft op het faalmechanisme piping. Om hier antwoord op te kunnen geven zijn voor aanvang van het onderzoek hypothesen opgesteld. Hierin is beschreven hoe na verwachting de erosiepatronen zouden ontstaan. Tevens is bij de eerste proef beschreven welk kritieke verval werd verwacht.

2.5.1 Proef 1

De verwachting is, zoals in Figuur 7 weergegeven, dat de kanaalvorming hoofdzakelijk richting de rivierzijde plaatsvindt. Rondom de wel zijn in alle richtingen kleine kanaaltjes ontstaan. De doorgaande pipe erodeert meanderend in richting van de rivierdruk.



Figuur 7 - Hypothese proef 1

In eerdere proeven is een kritiek verhang van 1:2 / 1:3 gemeten (van Beek & Bezuijen, 2009). Er van uitgaande dat deze gegevens ook voor deze proefbak kloppen, wordt verwacht dat een doorgaande pipe bij een waterdruk tussen de 35cm en 50cm ontstaat.

2.5.2 Proef 2

Doordat de druk in deze proef ook via het achterland weg kon, zou de totale druk in de proefopstelling afnemen. Hierdoor is een hogere stijghoogte nodig zijn om een doorgaande pipe te creëren. Ook zijn de kanaalvormingen voornamelijk richting de rivierwaterkant verwacht.

2.5.3 Proef 3 en Proef 4

De invloed van de regionale kweldruk was bij aanvang van proef 3 nog onbekend. Hierom zijn er op dat moment een drietal hypothesen opgesteld voor de invloed van regionale kweldruk. Deze zijn zowel van proef 3 als proef 4 van betrekking.

Hypothese 1

Door de druk van de regionale kwel is er een hogere stijghoogte nodig om tot piping te komen. Het kritieke verval ligt dan hoger. In dit geval heeft regionale kweldruk een positieve werking. De erosiepatronen zullen zich langzamer vormen maar nog steeds richting één zijde.

Hypothese 2

Door de verhoogde grondwaterdruk staat er al een druk op de wel waardoor er een minder groot verval hoeft te komen vanuit de rivier. De waterdrukhoogtes tellen bij elkaar op waardoor ze samen tot een kritiek verval kunnen komen, zonder dat deze hoogte daadwerkelijk wordt gehaald. Er is dus een lagere stijghoogte nodig om tot piping to komen. In dit geval heeft regionale kweldruk een negatieve werking op het faalmechanisme piping.

Hypothese 3

De regionale kweldruk heeft geen invloed op het kritiek verval. De stijghoogte van de wel blijft hetzelfde, waardoor het kritiek verval voor de vorming van een volledige pipe hetzelfde blijft. De stijghoogten zijn nagenoeg hetzelfde als die van proef 1. Ook de erosiepatronen zouden dezelfde vorm krijgen als in eerdere proeven.

2.6 Risico's

In de proefopstelling zijn een aantal kritieke factoren aanwezig waardoor er proeven hadden kunnen mislukken. De grootste risico's zijn in onderstaande tekst benoemd met daarbij mogelijke maatregelen die genomen konden worden om het risico te beheersen.

Geen piping

Wanneer geen piping was ontstaan, was het onmogelijk om resultaten te verkrijgen voor beantwoording van de onderzoeksvraag. Om deze rede is een test proef uitgevoerd. Hieruit is geconcludeerd dat de proefopstelling naar behoren functioneerde.

Deksel aansluiten op zandpakket

Het strak aansluiten van de deksel op zandpakket bleek lastig. Wanneer er tussen het zand en de deksel gaten waren, zouden deze zich vullen met water en werd de kwelweg beïnvloed. De patronen die gevormd werden door de kwelwegen is een belangrijk aspect binnen de proeven, en de patronen worden sterk beïnvloed als de plaat niet recht ligt of er een luchtlaagje tussen het pakket en de plaat ligt.

Om de deksel goed aan te laten sluiten is deze direct na afrijden op de proefopstelling geplaatst. Daarna is deze aangedrukt met behulp van de staalprofielen en lijmklemmen.

Gelijk verdichten zandpakket

Een lagere verdichting van het zandpakket, zou de poriën vergroten. Als in de verdichting van het zandpakket variatie zit, beïnvloed dit de vorming van de erosiekanalen. De proeven zijn dan niet meer met elkaar vergelijkbaar. Ook zou bij een te lage verdichting voorwaartse erosie optreden. Dit is in dit onderzoek ongewenst en wanneer dit optreedt zou de proef als mislukt zijn beschouwd.

Tijdens het vullen van de bak zal constant op de bak worden gelopen daarmee het pakket verdicht. Hierdoor wordt het hele pakket maximaal verdicht. Verder is door de overhoogte de bovenste laag (welke het moeilijkst is om gelijk te verdichten) afgereden.

Bollen deksel

Een risico bij het dichtdrukken van de deksel op de bak is opbollen. Wanneer de bak alleen aan de zijkanten van de bak vastgeklemd, ontstaat de kans dat de plaat in het midden iets opbolt. Opbollen zou ervoor kunnen zorgen dat er ruimte kwam tussen de deksel en het zandpakket, wat weer zou resulteren in het eerst genoemde risico. Doormiddel van stalen profielen die over de breedte van de bak lopen, wordt getracht te voorkomen dat de deksel opbolt. Aangenomen is dat vier profielen voldoende is om opbollen te voorkomen. Toen dit niet voldoende bleek, zijn meer profielen toegepast.

Lekkage

Om te voorkomen dat de bak lekt, worden alle naden en gaten in het betonplex afgekit. Echter was de meest cruciale aansluiting die tussen deksel en bak. Om te voorkomen dat hier een lek zou ontstaan, is een rubberen strip op de bak bevestigd. Deze is indrukbaar en hiermee is een waterdichte verbinding gemaakt tussen deksel en bak.

Luchtopsluiting

Een risico dat in het gesprek met Vera van Beek naar voren kwam was luchtopsluiting in het zandpakket. Door 'luchtbellen' in het zandpakket zouden de erosiepatronen zich anders gaan vormen, en daarmee het resultaat beïnvloeden. Dit probleem is opgelost door het zand in water aan te brengen en te verdichten. Hierdoor kreeg de lucht uit het zandpakket ruimte om te ontsnappen. Verder is water uit de pompkelder van de HAN gebruikt, en niet vers uit de kraan. Kraanwater bevat veel zuurstof, waardoor alsnog luchtopsluiting plaats zou kunnen vinden.

Zandeigenschappen

De eigenschappen van het zand hebben invloed gehad op de wijze waarop de erosie op treedt. Er is gekozen voor een homogeen zand met een d_{70} van ongeveer $400\mu\text{m}$. Om te controleren of daadwerkelijk dit zand geleverd is, zijn zeefproeven uitgevoerd om de korreldiameter te achterhalen. Deze zeefproeven zijn te vinden in Bijlage II – Ontwikkeling proefopstelling.

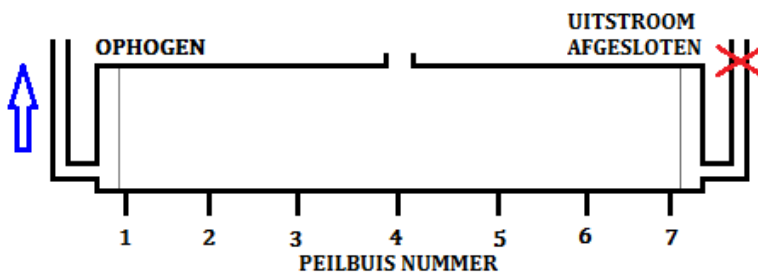
3 Onderzoekresultaten

In dit hoofdstuk is per proef benoemd welke resultaten er behaald zijn. De resultaten die in dit hoofdstuk zijn beschreven, zijn gemiddelde proefresultaten van de twee maal dat de proef is uitgevoerd.

Alle bevindingen per minuut van de proeven staan beschreven in Bijlage III - Proeflogboek. De ophoogzijde (oost/westkant van de bak) verschilt per proef, voor het overzicht en de duidelijkheid voor de resultaten wordt in de grafieken in peilbuis 1 altijd als ophoogzijde aangegeven. In de bijlage is echter peilbuis 1 de linkerzijde (westzijde) en peilbuis 7 de rechterzijde (oostzijde) van de bak, het kan dus zijn dat de stijghoogten gespiegeld in de bijlage staan, de resultaten blijven echter hetzelfde.

3.1 Proef 1: Traditionele piping – Gesloten achterland

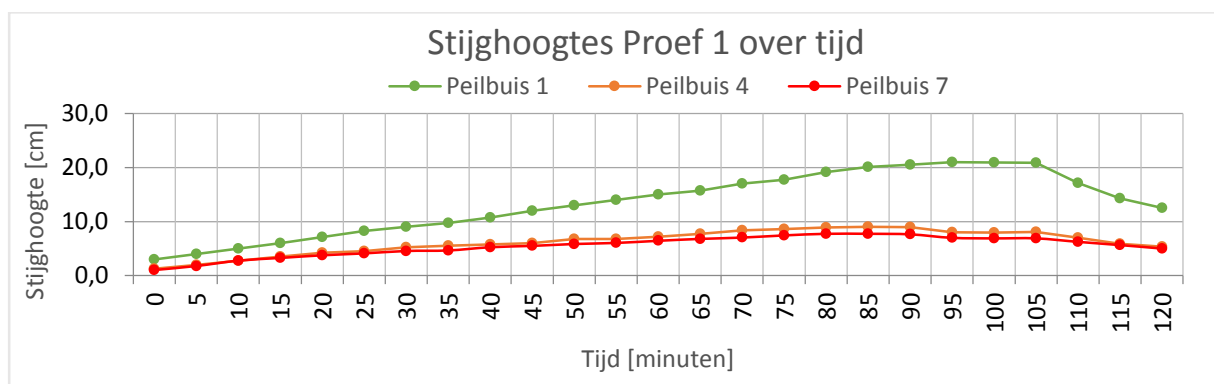
In proef 1 is aan één zijde (rivierzijde) de stijghoogte verhoogd terwijl de andere zijde (achterlandzijde) volledig afgesloten is, zie Figuur 8. Bij de sessie 2 zijn de zijdes omgewisseld. Met deze proef is getest op correcte werking van de proefopstelling. Tevens gold deze ter indicatie van wat er in de volgende proeven verwacht kon worden.



Figuur 8 – Situatie proef 1

Resultaten

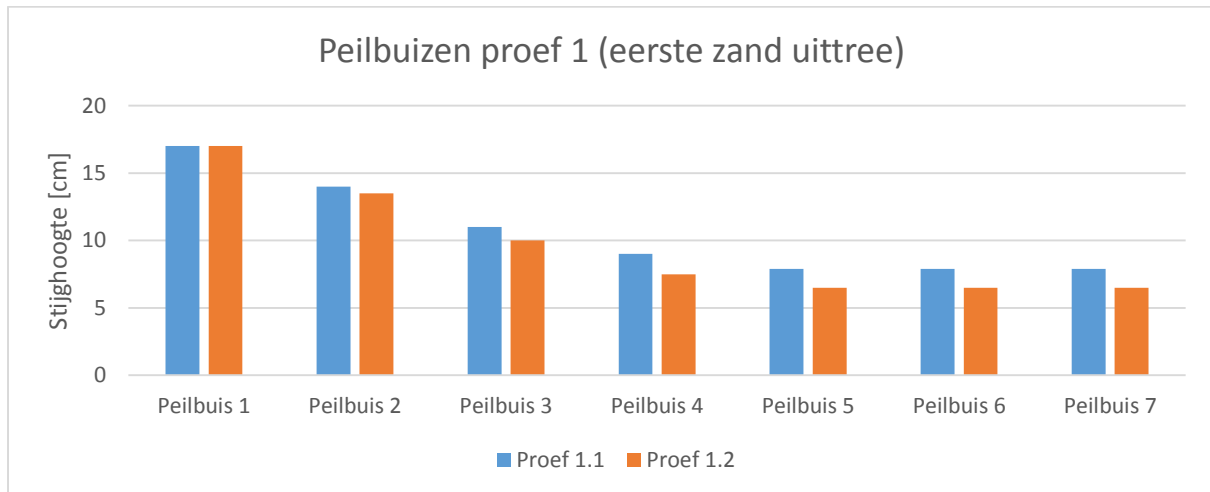
De proef is twee maal uitgevoerd zoals beschreven in onderzoeksrapport. Beide resultaten kwamen goed met elkaar overeen wat duidt op een correct resultaat en daarmee een goede eenduidige werking van de beide zijden van de proefopstelling. In Figuur 9 is een overzicht van de stijghoogtes van de buitenste peilbuizen (1 en 7) en middelste peilbuis (4) gegeven over het verloop van de proef (tijd).



Figuur 9 - Overzicht stijghoogtes proef 1 over tijd

Na 45 minuten (10cm stijghoogte peilbuis 1) zijn er luchtballen in het pakket waargenomen en heeft het eerste zandtransport plaats gevonden. Hiervoor is al woeling in de wel geconstateerd.

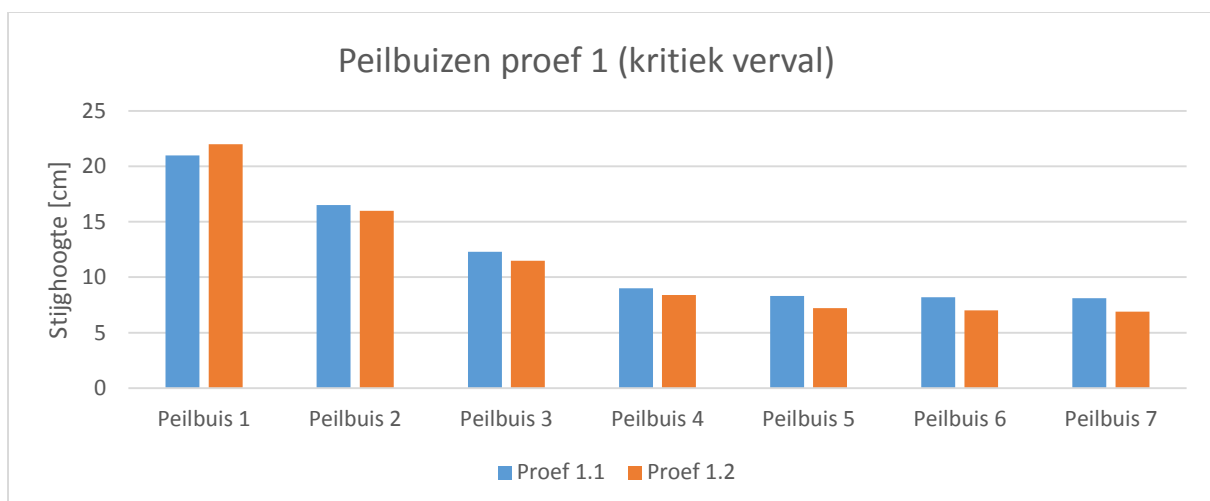
Na 80 minuten (17cm stijghoogte peilbuis 1) is er in alle richtingen zandtransport ontstaan en trad er zand uit de wel. In Figuur 10 is een overzicht van alle peilbuizen weergegeven met bijbehorende stijghoogten op het moment van eerste zand uittree.



Figuur 10 - Overzicht peilbuizen proef 1 bij eerste zand uittree

Na 90 minuten (± 20 cm stijghoogte peilbuis 1) bogen de kanaaltjes af richting kant van ophoging. De kanaaltjes werden goed zichtbaar en groeiden snel. Er is in beide sessies geen evenwicht bereikt na 5 minuten. Na 10 tot 15 minuten is de stijghoogte nog eenmaal verhoogd naar 21cm. Op dat moment is het kritiek verval bereikt en bleef het kanaal langzaam doorgroeien. De stijghoogten van de peilbuizen met het kritiek verval zijn in Figuur 11 weergegeven. De stijghoogte in de peilbuizen nam hierna af, ondanks dat de waterstand in de emmer gelijk is gehouden. Dit is te verklaren doordat de weerstand in het zandpakket afnam, daarmee de snelheid van het water in de bak omhoog ging en de druk hierdoor afnam. Het hoogst gemeten verval in peilbuis 1 wordt als kritiek verval aangehouden.

Na ± 120 minuten is een doorgaande pipe ontstaan, de lucht die zich nog in het waterreservoir bevond, baande zich een weg door de pipe waardoor de pipe direct een bredere vorm aannam. De druk nam langzaam af en het debiet in de wel steeg.



Figuur 11 - Overzicht peilbuizen proef 1 bij kritiek verval

Zoals in Figuur 11 is af te lezen was de stijghoogte in peilbuis 4, 5, 6 en 7 in beide sessies redelijk constant. Het water in dit gedeelte van de proefopstelling is 'aangedrukt' maar het kon er alleen ter plekke van peilbuis 4 (wel) uit. Hierdoor is de druk in het tweede gedeelte van de proefopstelling met peilbuis 4 meegegroeid.

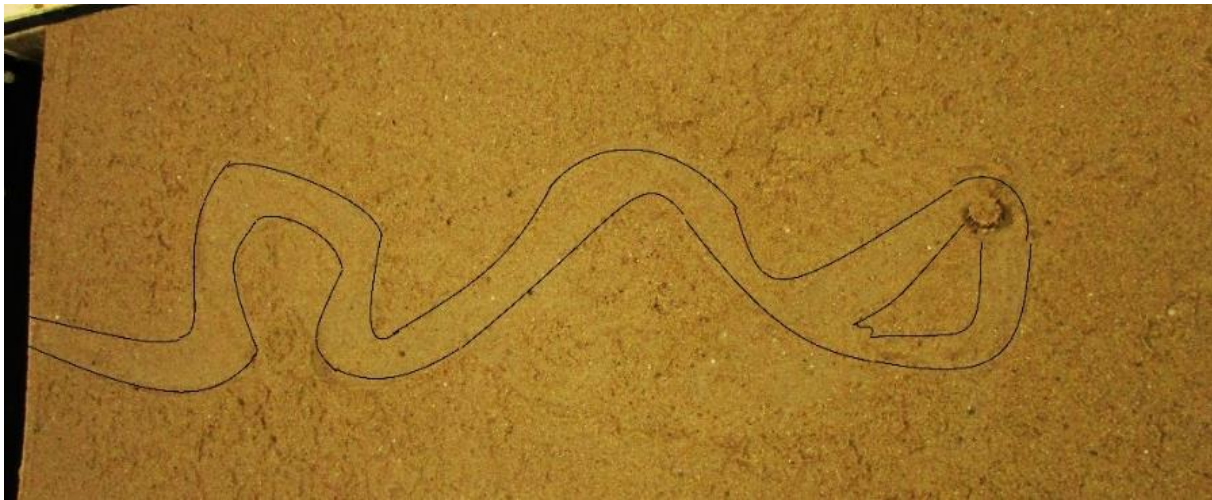


Foto 6 - Erosiepatroon proef 1.1 (vanwege slechte zichtbaarheid omrand)



Foto 7 - Erosiepatroon proef 1.2

De erosiepatronen zijn meanderend waargenomen. Proef 1.1 is direct na ontstaan van de doorgaande pipe stop gezet. Proef 1.2 heeft langer door gelopen. Hierdoor heeft het kanaal meer tijd kregen zich te ontwikkelen en is een rechte pipe ontstaan. Dit is duidelijk terug te zien in de erosiepatronen in Foto 6 (Proef 1.1) en Foto 7 (Proef 1.2).

Er is een erosiepatroon ontstaan waarin één mild meanderend kanaal de pipe vormde. In eerste instantie zijn de kanaaltjes in alle richtingen ontstaan. Na verloop van tijd zijn de meeste kanalen tot evenwicht gekomen en is het kanaal richting de ophoogzijde het hoofdkanaal en later de pipe geworden. Tijdens de proeven is de ligging van het kanaal constant veranderd.

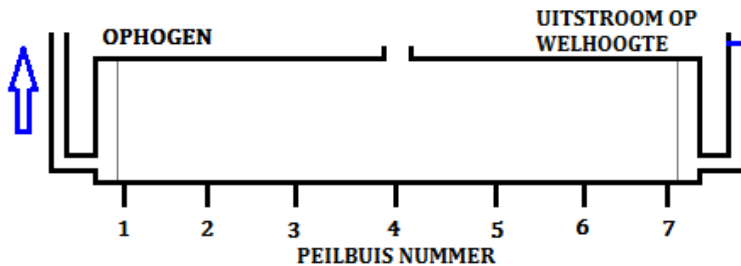
Bij 17cm stijghoogte (peilbuis 1) kwam de eerste zandkorrel uit de wel, maar de kanaaltjes groeiden nog erg langzaam. Op het betreffende moment had het kanaal een lengte van ± 20 cm, pas bij 21-22cm stijghoogte (peilbuis 1) is het kanaal in een keer door tot een doorgaande pipe doorgegroeid, zonder dat de stijghoogte nog verhoogd is. Verder is bij het optillen van de deksel een 'grindnest' zichtbaar geworden, zie Foto 8.



Foto 8 - Grindnest

3.2 Proef 2: Traditionele piping - Open achterland

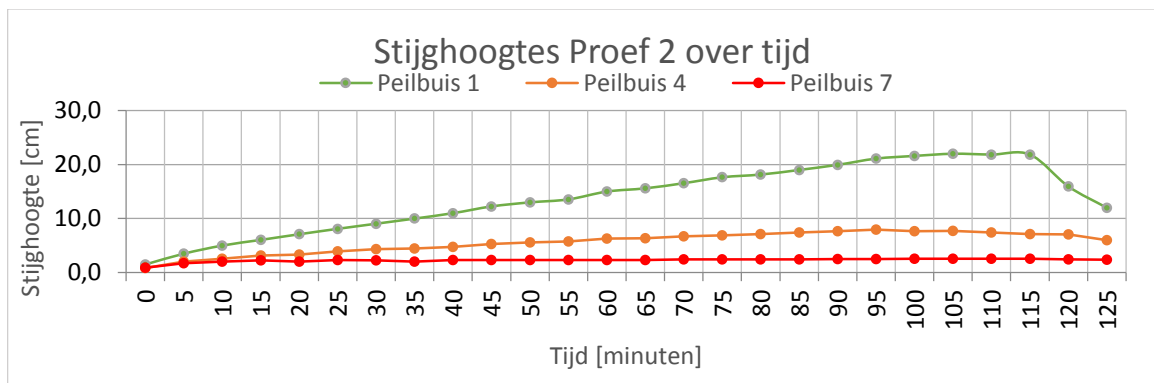
In proef 2 is een situatie is een 'standaard piping situatie' geschetst. Hierbij is de waterstand aan een zijde constant op bovenkant wel (maaiveldniveau) gehouden. Aan de andere kant is de waterstand opgehoogd (zie paragraaf 2.3), in Figuur 12 is de situatie schematisch weergegeven.



Figuur 12 - Situatie proef 2

Resultaten

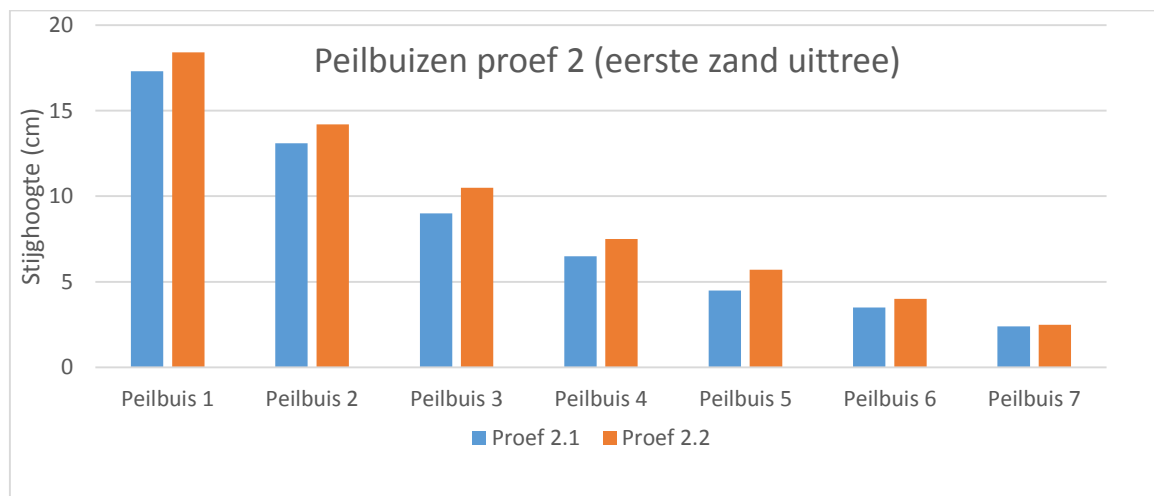
In Figuur 13 zijn de peilbuis gegevens van de buitenste en middelste peilbuizen gedurende de proef weergegeven.



Figuur 13 - Overzicht stijghoogtes proef 2 over tijd

Na 45 minuten (12cm stijghoogte peilbuis 1) is het eerste zandtransport waargenomen. De beweging is in alle richtingen rondom de wel gezien.

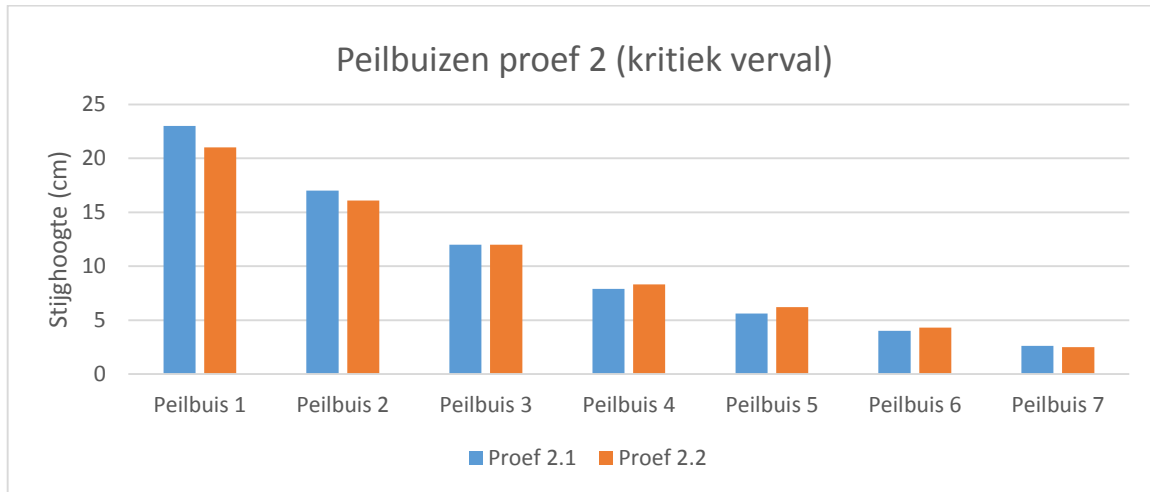
Na ±80 minuten (17cm stijghoogte peilbuis 1) is een duidelijk kanaal richting 'rivierzijde' zichtbaar geworden, tevens zijn op dit moment de eerste zandkorrels uit de wel gekomen, De stijghoogtes op dit moment zijn weergegeven in Figuur 14.



Figuur 14 - Overzicht peilbuizen proef 2 bij eerste zand uittree

Na 100 minuten is de stijghoogte in peilbuis 1 opgelopen tot ± 22 cm en groeide het gevormde kanaal gestaag. Na 10 minuten was nog steeds geen evenwicht bereikt en had het kanaal een lengte van ruim 50cm. Nog geen 5 minuten daarna had het kanaal een lengte van 85cm.

Na 120 minuten is een doorgaande pipe ontstaan (Stijghoogte nog steeds ± 22 cm). In Figuur 15 is een overzicht van de hoogste waarden van de peilbuizen weergegeven. Op dat moment is het kritiek verval bereikt.



Figuur 15 - Overzicht peilbuizen proef 2 bij kritiek verval

Net als in proef 1 zijn na 75 minuten duidelijke kanaaltjes waargenomen, waarbij er een zeer vlechtend patroon ontstond. Met een lengte van ongeveer 50cm is één hoofdkanaal zichtbaar geworden. Deze is langzaam doorgroeid tot er een doorgaande pipe is ontstaan (zonder de druk verder op te hogen). Ook hier is proef 2.1 eerder stopgezet dan proef 2.2, dit is goed te zien in de kaarsrechte pipe die in proef 2.2 is ontstaan. Beide kanalen hebben de wel aan de zuid- en noordkant van de proefopstelling bereikt. Beide patronen zijn weergegeven in Foto 9 en Foto 10 welke hieronder staan afgebeeld.



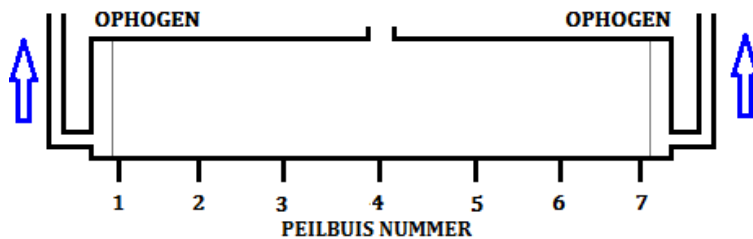
Foto 9 - Erosiepatroon proef 2.1



Foto 10 - Erosiepatroon 2.2

3.3 Proef 3: Regionale kweldruk – meestijgend

In proef 3 is de regionale kweldruk mee gestegen met de ‘rivierwaterstand’. Dit houdt in dat de waterdruk in beide zijden gelijk is opgehoogd, in Figuur 16 is dit op schematische wijze weergegeven.

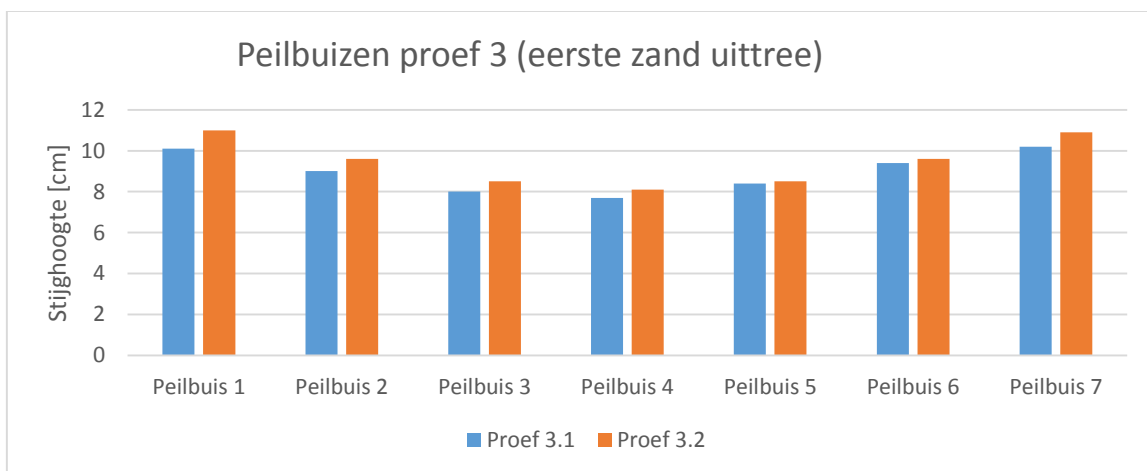


Figuur 16 - Situatie proef 3

Resultaten

Na 25 minuten (7cm stijghoogte peilbuis 1) is het eerste zandtransport waargenomen.

In de 45^e minuut (± 11 cm stijghoogte peilbuis 1) is het eerste zand uit de wel getreden. Een overzicht van de stijghoogtes in de peilbuizen op dat moment zijn weergegeven in Figuur 17.



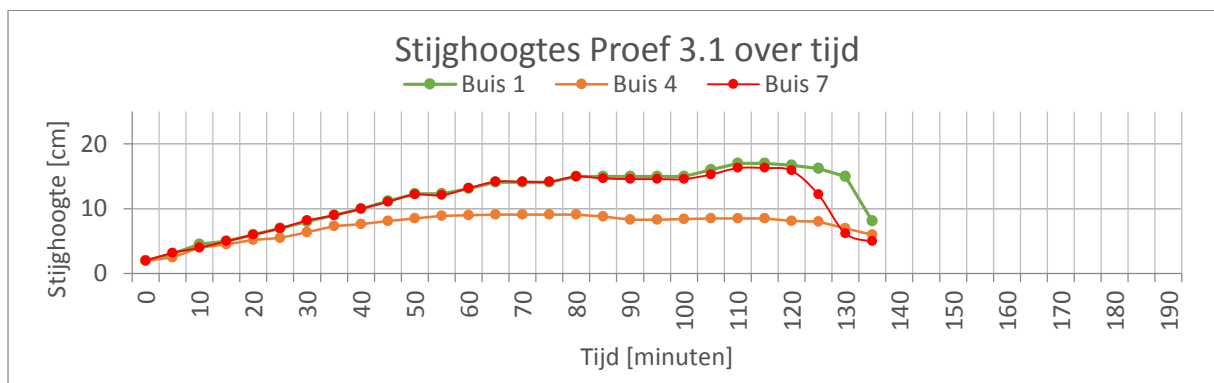
Figuur 17 - Overzicht peilbuizen proef 3 bij eerste zand uittree

Na 55 minuten (13cm stijghoogte peilbuis 1) hebben beide kanalen een lengte ± 10 cm bereikt. Deze groeiden redelijk gelijk door, maar er is telkens binnen 5 minuten evenwicht ontstaan. 10 minuten later is deze lengte verdubbeld (15cm stijghoogte peilbuis 1). Tot op dit moment waren de resultaten vrijwel gelijk. Echter na dit tijdstip zijn er duidelijke verschillen in de resultaten ontstaan, daarom zijn vanaf dit punt beide sessies apart behandeld.

Sessie 1

In sessie 1 zijn de kanalen redelijk gelijk gegroeid. Bij een stijghoogte van 15cm zijn de kanalen tot 30 en 45cm gegroeid en is pas na 20 minuten evenwicht bereikt. Eén kanaal groeide sneller dan het andere.

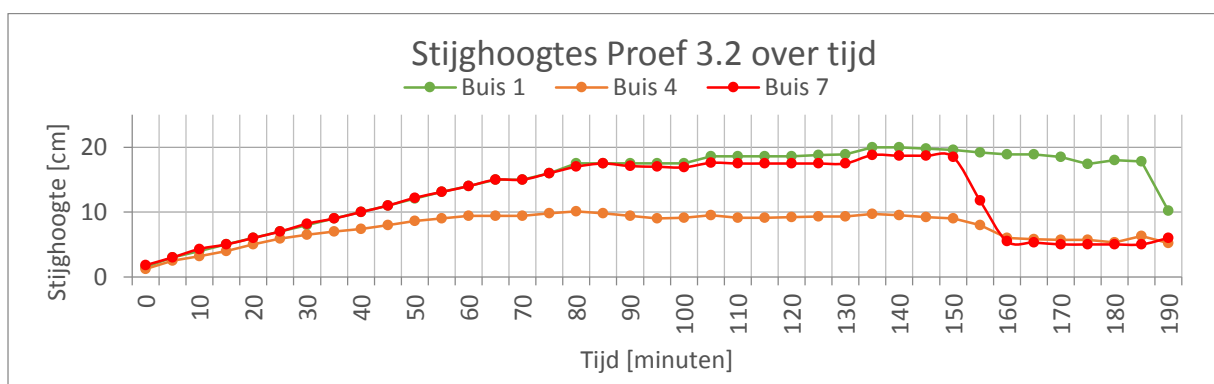
Na 120 minuten is de eerste doorgaande pipe gevormd (bij een stijghoogte van 16cm in peilbuis 7). 5 minuten later is ook aan de andere zijde een doorgaande pipe ontstaan (16cm stijghoogte peilbuis 1). Vanaf dit moment is het aanvoerdebiet hoger geworden en is een werveling in de wel ontstaan. Hierdoor zijn ook de grote korrels uit getreden. Na 135 minuten is de druk in de bak compleet weggezakt (± 6 cm stijghoogte in alle peilbuizen) en is de proef stopgezet. In Figuur 18 worden de stijghoogtes van de peilbuizen weergegeven over de tijd.



Figuur 18 - Overzicht stijghoogtes proef 3.1 over tijd

Sessie 2

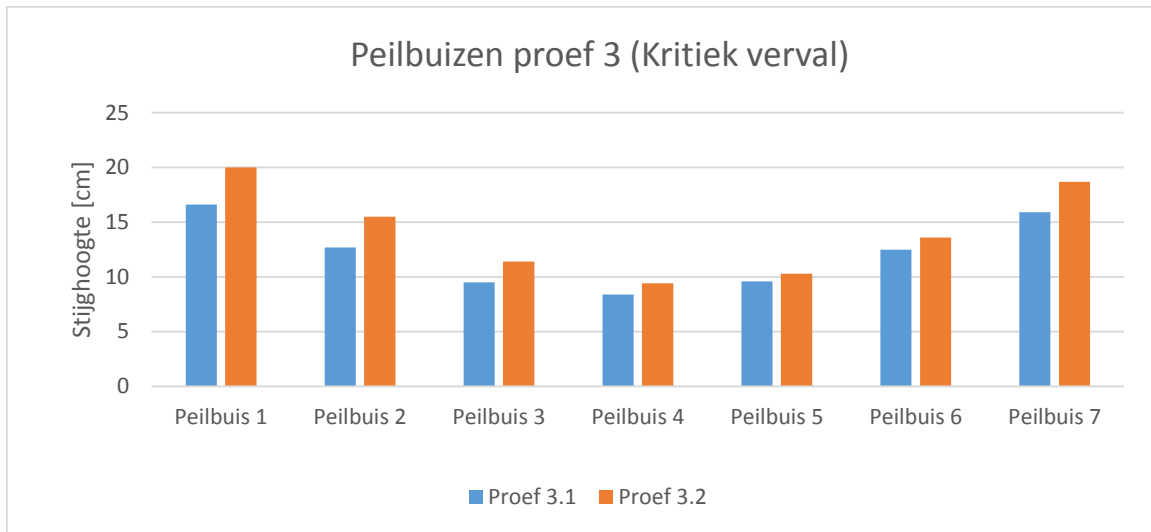
Nadat beide kanalen een lengte van 20cm hadden bereikt, is een van de kanalen abrupt gestopt met groeien. Het andere kanaal is langzaam door gegroeid tot 65cm in de 125^e minuut. Op dit moment is een evenwicht opgetreden en is de druk opgehoogd tot 19cm (in peilbuis 1). Op dat moment is er beweging ontstaan in het korte kanaal (nog steeds 20cm) en zijn beide kanalen doorgegroeid tot een lengte van 50cm en 90cm (145^e minuut).



Figuur 19 - Overzicht stijghoogtes proef 3.2 over tijd

In de 150^e minuut is een doorgaande pipe ontstaan (18,5cm stijghoogte peilbuis 7). De stijghoogte is vervolgens niet meer verhoogd. Echter heeft het nog een half uur (180^e minuut)

geduurd voordat het andere kanaal tot een doorgaande pipe is doorgegroeid (17cm stijghoogte peilbuis 1). In Figuur 20 is de stijghoogtes in de peilbuizen weergegeven van beide proeven (3.1 en 3.2). De waarden zijn de hoogst gemeten waarden.



Figuur 20 - Overzicht peilbuizen proef 3 bij kritiek verval

In de eindfase van proef 3.2 (aan één zijde was al piping ontstaan) is een werveling in de wel zichtbaar geworden. De snelheid hierin is zo hoog geweest dat de grote korrels, welke in eerdere proeven steeds achterbleven, uit de wel zijn geslingerd. Na verwijderen van de deksel is onder de wel een krater waargenomen met een straal van 7cm en een diepte van 4cm.

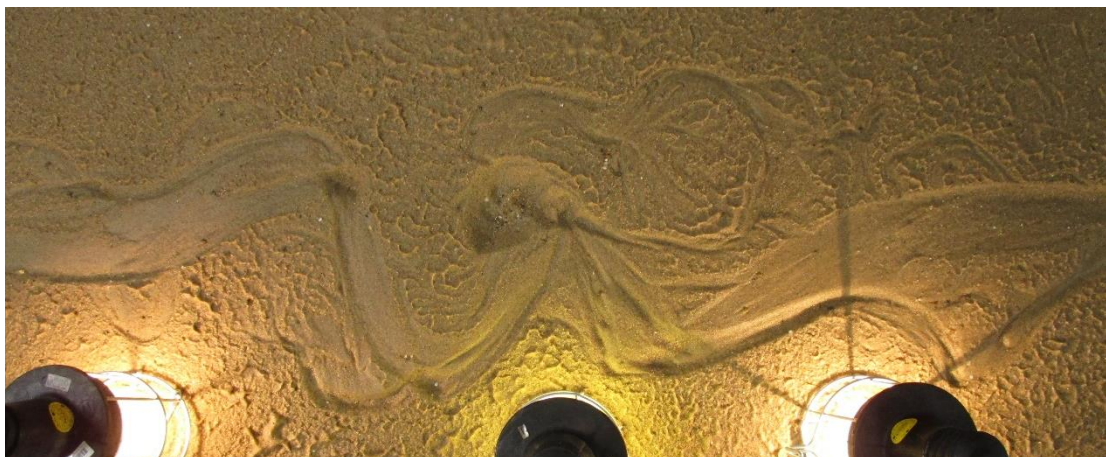


Foto 11 - Erosiepatroon proef 3.1



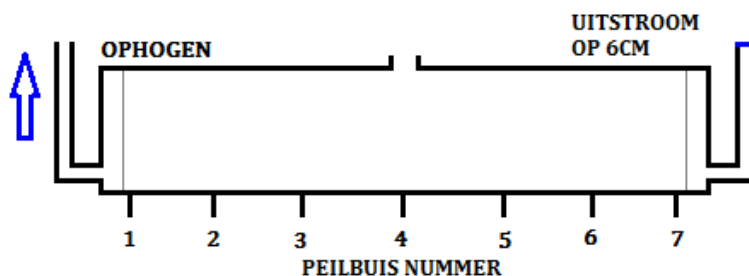
Foto 12 - Erosiepatroon proef 3.2

De kraters zijn duidelijk terug te zien in de erosiepatronen. Verder is te zien dat de kanalen dwars de wel benaderen, en daarmee niet de kortste weg kiezen.

Omdat het in proef 3.2 langer duurde voordat de tweede pipe was gevormd, had de eerste pipe tijd om de krater te creëren. Na 15 minuten werd de pipe niet meer groter en is evenwicht ontstaan.

3.4 Proef 4: Regionale kweldruk – 6 cm

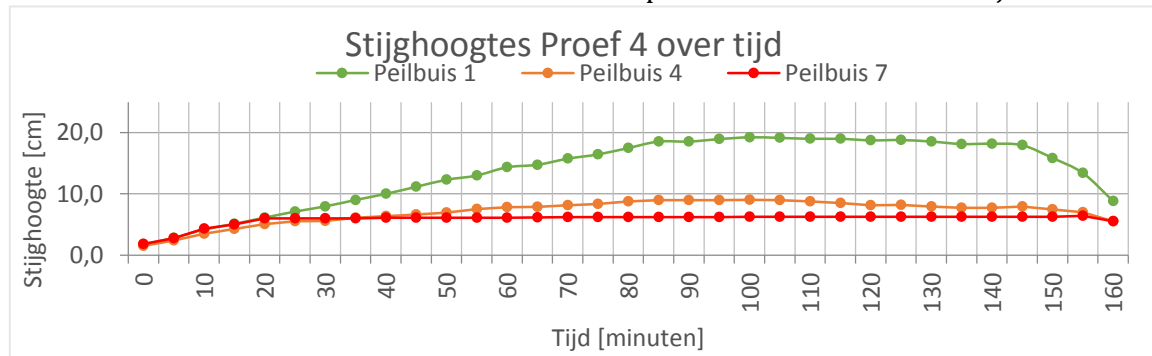
Proef 4 is de laatste proef binnen dit onderzoek. In proef 3 is aangetoond dat regionale kweldruk (bij een maximale hoogte) invloed heeft op het kritiek verval. In proef 4 is bekeken of een constante waterdruk vanuit het achterland (stijghoogte 6cm) invloed heeft op piping.



Figuur 21 - Situatie proef 4

Resultaten

In Figuur 22 is het verloop van de proef weergegeven. Zoals te zien is de druk bij peilbuis 7 constant 6 cm. Peilbuis 4 klimt net als de andere proeven tot 8 à 9 cm en blijft daarna stabiel.

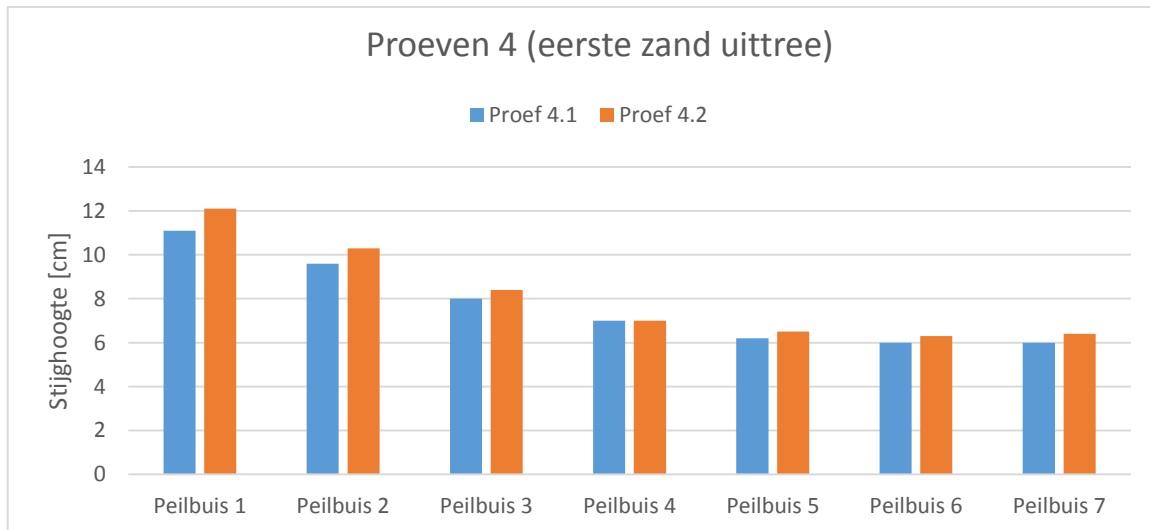


Figuur 22 - Overzicht stijghoogtes proef 4 over tijd

De eerste 20 minuten zijn beide kanten opgehoogd en gebeurde er weinig in de bak. De druk in de hele bak (peilbuis 4) is mee gestegen. Na 20 minuten had de regionale kweldruk een stijghoogte van 6cm en is deze vervolgens niet meer opgehoogd.

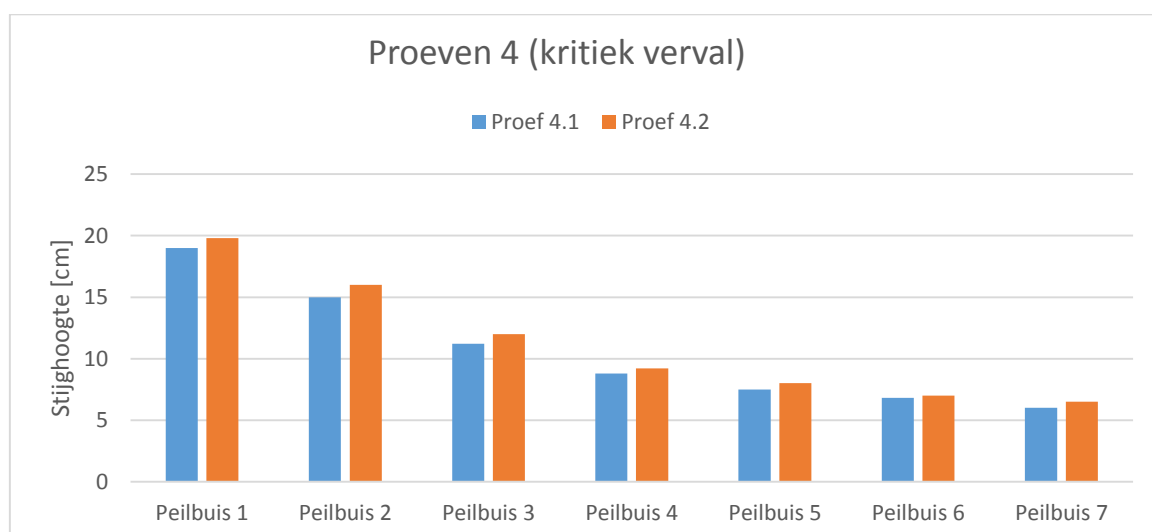
Na 35 minuten (9cm stijghoogte peilbuis 1) is het eerste zandtransport waargenomen. Dit zand was afkomstig vanuit alle richtingen rondom de wel.

Vanaf de 50^e minuut (12cm stijghoogte peilbuis 1) is het eerste zand uit de wel getreden. Ook is er zich een kanaal richting de ophoogzijde gevormd. In Figuur 23 zijn de stijghoogtes van alle peilbuizen in de proefopstelling op het moment van de eerste zand uittree weergegeven.



Figuur 23 - Overzicht stijghoogtes proef 4 bij eerste zand uittree

De groei van dit kanaal is door gegaan, wel is er binnen 5 minuten een evenwicht ontstaan. Hierna is opgehoogd tot wederom evenwicht is ontstaan. Dit ging door tot de 95^e minuut (19cm stijghoogte peilbuis 1). Het kanaal heeft op dat moment een lengte van 30cm bereikt. Nadat in de 95^e minuut is opgehoogd, is het kritiek verval bereikt en is er geen evenwicht meer ontstaan. De stijghoogten van dat moment zijn weergegeven in Figuur 24. Na 145 minuten is er een doorgaande pipe ontstaan en bedroeg de stijghoogte in peilbuis 1 ±19 cm.



Figuur 24 - Overzicht stijghoogtes proef 4 bij kritiek verval

De erosiepatronen die ontstaan zijn in de proef zijn vrijwel identiek aan die in proeven 1 en 2. Het eerste gedeelte is vlechtend en na ongeveer 50cm was er één kanaal gevormd dat zich voortzette. Op het moment dat er piping ontstond, was het kanaal zeer meanderend. Door deze bochten had het kanaal veel weerstand. Echter door uitschuring is het zandtransport hoog geweest. Na 10 minuten heeft het kanaal een directe weg gevonden naar de wel. Op dat moment zijn de proeven gestopt. In Foto 13 en Foto 14 staan foto's van de erosiepatronen die in de proeven (4.1 en 4.2) gevormd zijn.



Foto 13 - Erosiepatroon proef 4.1

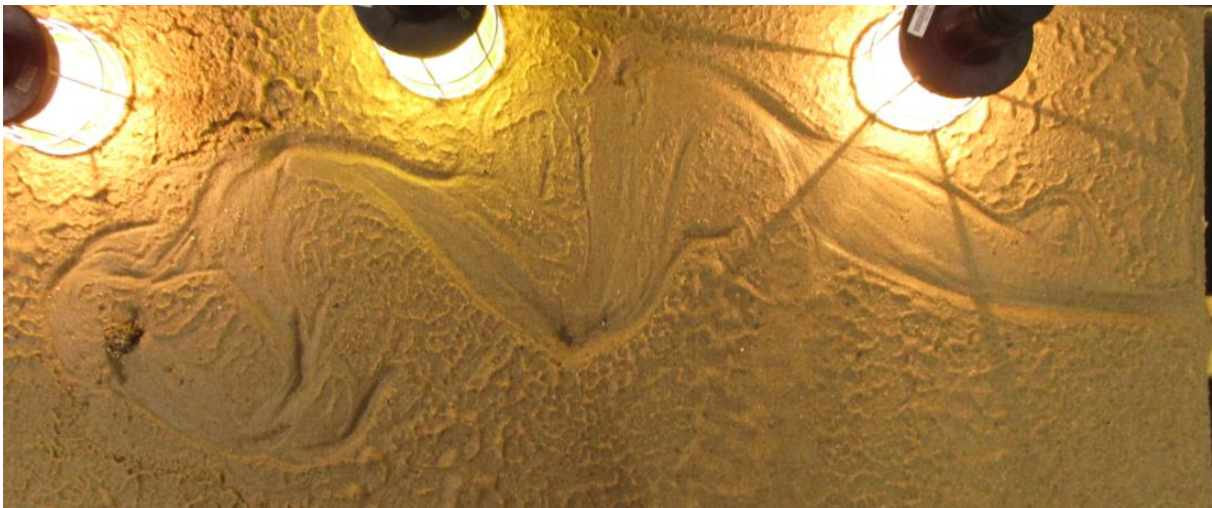


Foto 14 - Erosiepatroon proef 4.2

4 Conclusie

In de inleiding is de hoofdvraag van dit onderzoek beschreven. In dit hoofdstuk is deze vraag beantwoord. Allereerst is de vraag nogmaals genoemd, waarna deze direct beantwoord is. De hoofdvraag luidt:

Kan met laboratoriumproeven de invloed van regionale kweldruk op het faalmechanisme piping zichtbaar gemaakt worden?

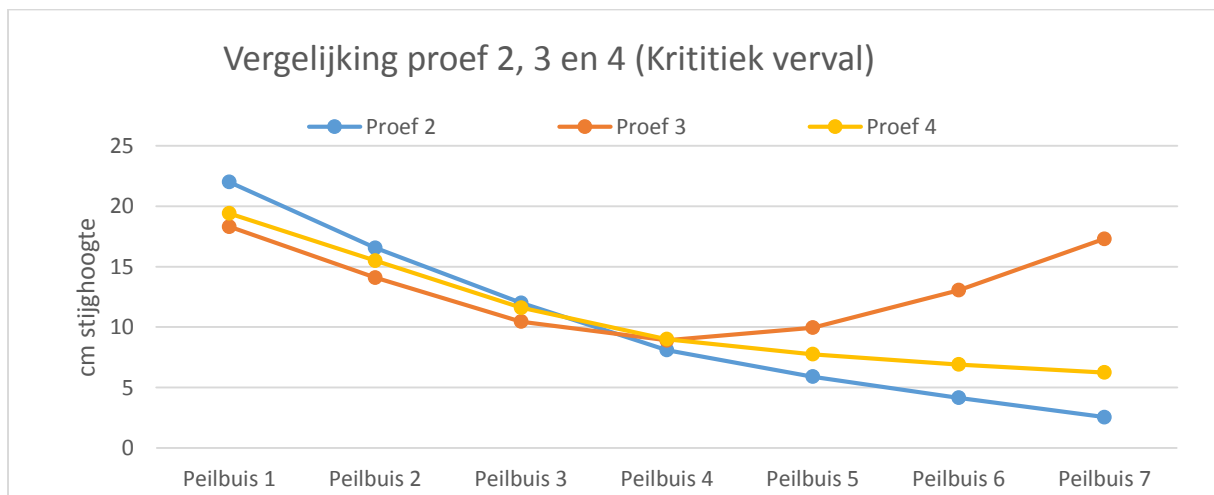
Ja, uit de resultaten die in de laboratoriumproeven van dit onderzoek zijn gehaald, is geconcludeerd dat regionale kweldruk een negatieve invloed heeft op het faalmechanisme piping. De zichtbaarheid van deze invloed is op twee manieren geregistreerd. Allereerst is een conclusie gegeven van de invloed van regionale kweldruk op de stijghoogten en het kritiek verval, waarna de erosiepatronen, welke gevonden zijn, zijn beschreven.

Stijghoogten

Er is na 4 verschillende proeven een eenduidig resultaat gevonden:
Hoe hoger de regionale kweldruk, hoe lager het kritiek verval.

Het effect van de regionale kweldruk is daarmee negatief. Dit houdt in dat door de regionale kweldruk, de druk ter plaatse van de wel hoger is. Hierdoor is er een lagere druk vanuit de rivier nodig en ligt het kritiek verval lager. In gebieden met regionale kweldruk ligt het risico hoger dat piping ontstaat

In Figuur 25 zijn van verschillende proeven de stijghoogtes weergegeven bij het kritieke verval. In proef 1 is de achterzijde dichtgehouden, waardoor een andere situatie ontstond. Proef 1 was een soort 0 meting voor de proefopstelling hierdoor zijn de resultaten niet meegenomen in de conclusie.



Figuur 25 - Vergelijking stijghoogten bij kritiek verval

In bovenstaande figuur is te zien dat de regionale kweldruk (peilbuis 7) invloed heeft op het kritiek verval (peilbuis 1). De invloed is bij deze proeven enkele centimeters.

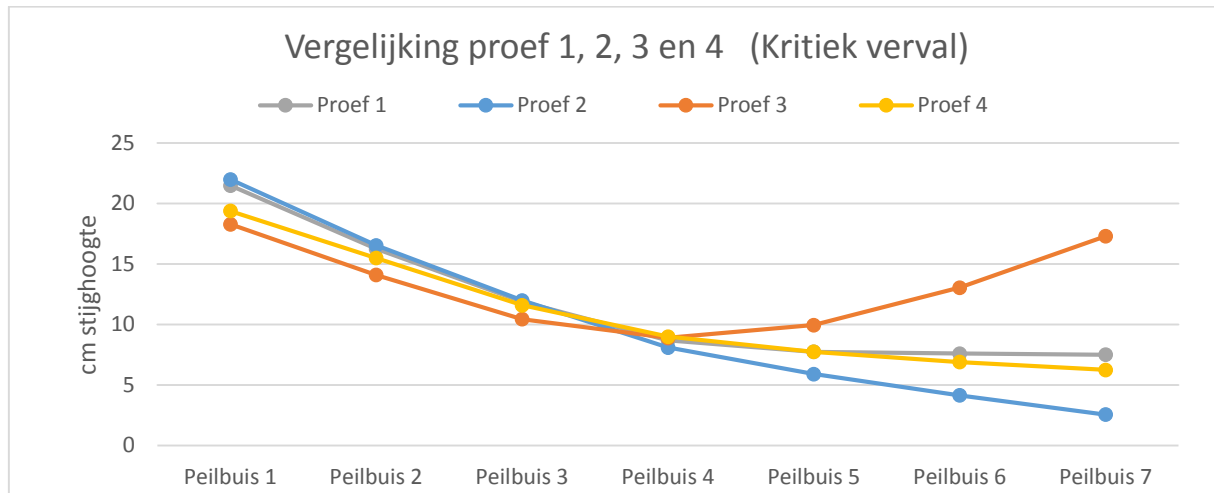
Erosiepatronen

Op de erosiepatronen lijkt een verhoogde regionale kweldruk geen invloed te hebben. De erosiepatronen zijn in alle proeven zeer vergelijkbaar.

5 Discussie

Het positief dat de resultaten beide sessies van de proeven sterk op elkaar lijken, dit betekent dat de bak recht evenredig functioneert.

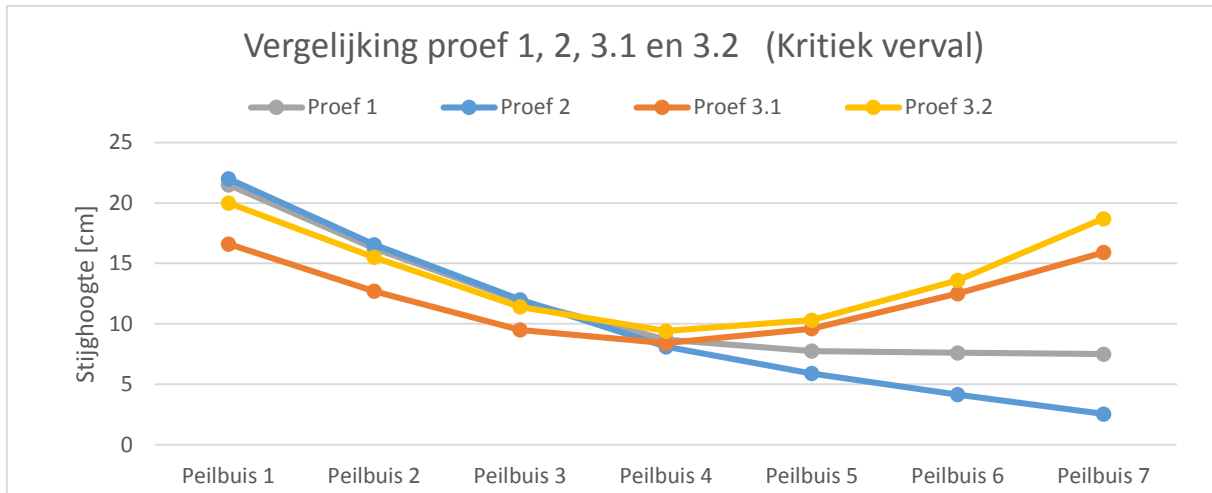
Daarnaast komen de resultaten van proef 1 goed overeen met de hypothese en zijn vergelijkbaar met de resultaten van de proeven van Deltares (van Beek & Bezuijen, 2009). Door dit resultaat in proef 1 en 2 lijkt de proefopstelling naar behoren te werken. In proef 3 en 4 is het effect van regionale kweldruk op piping onderzocht. De waarden werden, zoals in de conclusie is vermeld, lager naarmate er een hogere regionale kweldruk aanwezig werd (op moment van bereiken kritiek verval). In Figuur 26 zijn deze stijghoogtes weergegeven.



Figuur 26 - Overzicht peilbuizen kritiek verval verschillende proeven

Zoals verwacht lijken proef 1 en proef 2 zeer sterk op elkaar. In proef 1 was het achterland afgesloten, en in proef 2 werd het op wel hoogte gehouden. De waarden in de eerste 4 peilbuizen zijn nagenoeg identiek. Het lijkt er daarmee op dat de proeven naar piping, waarbij regionale kweldruk niet van belang is, het achterland niet mee hoeven te nemen.

In proef 3 zijn sterk verschillende resultaten gevonden. Zoals in Figuur 27 af te lezen is, zijn de waarden van het kritiek verval in proef 3 zeer verschillend. Ook is het zeer opmerkelijk dat proef 3.2 één uur langer duurde dan proef 3.1 (hoofdstuk 3.3). Dit is te wijten aan een verstopping van de wel aan een zijde, waarschijnlijk veroorzaakt door grove korrels of luchtopsluiting. Hierdoor duurde het langer totdat de pipe was doorgebroken. In Figuur 26 zijn de gemiddelde waarden genomen van proef 3.1 en 3.2. In de andere proeven kwamen de twee sessies veel beter overeen waardoor deze waarden gevalideerd zijn, voor proef 3 is dit niet het geval. Het is daardoor mogelijk dat het daadwerkelijk kritiek verval in Figuur 26 lager of hoger ligt dan weergegeven.

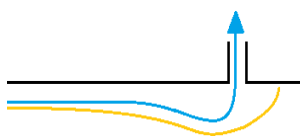


Figuur 27 - Overzicht kritiek verval proeven 1, 2, 3.1 en 3.2

In bovenstaande figuren kan worden afgelezen dat de stijghoogte in de wel in alle proeven rond de 8cm stond wanneer een kritiek verval was bereikt. De stijghoogte in peilbuis 4 steeg tijdens het ophogen al vrij snel naar deze 8cm en bleef (tot piping ontstond) constant. Er wordt verwacht dat dit te verwijten is aan de weerstand in de wel. In alle proeven is een constante woeling van grove korrels geconstateerd (en achteraf een grindnest). Wij denken dat dit, in combinatie met de verticale kwelweg, de grootte van de wel en de weerstand van het zandpakket een weerstand genereerde wat heeft geleid tot een constante stijghoogte van 8cm.

In de meeste proeven is de kritieke stijghoogte in de tweede sessie hoger bevonden dan de eerste sessie. Dit zou kunnen komen dat door een hogere mate van lekkage in de proefopstelling. Tussen de sessies (proef .1 en .2) heeft er geen revisie plaatsvonden aan de proefopstelling, waardoor het mogelijk is dat tussen de sessies meer lekkage plaats vond.

In proef 3 is na beëindiging van de proef in beide sessies een krater onder de wel aangetroffen bij het oplichten van de deksel. Deze kraters zijn naar verwachting te verklaren door de grote hoeveelheid water die ineens 90° de bocht om moesten. Om de bocht te kunnen nemen zou het water dus als het ware voor de wel een gat moeten creëren (Figuur 28) of er is een werveling ontstaan, waardoor de snelheid onder de wel behouden blijft en het water in een circulerende beweging omhoog wordt gedrukt (Figuur 29).



Figuur 28 - Uittrede water uit wel met uitschuring zand onder wel (zijaanzicht)



Figuur 29 - Uittrede water uit wel (bovenaanzicht) door werveling

Verder viel het op dat de pipe, wanneer deze gevormd was net voor de wel een hoek van 90° maakte en 'dwars' de wel bereikte. Een goed voorbeeld hiervan waren de erosiepatronen in proef 2.2 en proef 4.1, waar dit fenomeen duidelijk zichtbaar werd. Echter hebben wij hier geen verklaring voor. Het kan zijn dat door het meanderen deze vormen zijn ontstaan, maar het zou ook toeval kunnen zijn dat deze vormen zijn geconstateerd. Het zou eventueel ook kunnen dat de proef te snel is stopgezet waardoor er geen tijd meer was voor het kanaal om door te groeien tot een rechte pipe.

De proeven zijn uitgevoerd in een door de studenten zelf ontworpen en gefabriceerde proefopstelling. Enige lekkage in deze proefopstelling was niet te vermijden. Deze lekkage heeft ervoor kunnen zorgen dat de druk in de proefopstelling sneller afnam. Door deze afname is het mogelijk dat het gevonden kritiek verval te hoog is.

Daarnaast is er geprobeerd een maximale verdichting te creëren door er op te stampen en een overhoogte toe te passen. Er is tijdens de proeven niet meer getest of deze maximale verdichting daadwerkelijk is bereikt.

Verder was er in de proefopstelling (in zowel het zandpakket als in het waterreservoir) lucht aanwezig. Het bleek onmogelijk deze luchtopsluiting te voorkomen, waardoor er voor is gekozen om deze luchtbellen te zien als kiezels en daarmee door te gaan met proeven. De kanaaltjes moesten om deze bellen heen, wat als extra weerstand kan worden gezien. Maar de werkelijke invloed op de stijghoogte van deze luchtbellen is onbekend.

Als laatste zijn er vanwege de tijd een beperkt aantal proeven uitgevoerd (2x4 proeven). Dit aantal was het gewenste minimum vanuit de opdrachtgever. Echter is het gewenst meer proeven uit te voeren voor een betere validatie van de resultaten.

6 Aanbeveling

Vanwege de beperkte tijd zijn er acht proeven uitgevoerd. Om een beter beeld te krijgen van de invloed van regionale kweldruk zijn meer proeven nodig. Zo is het interessant wat er zou gebeuren als de regionale kweldruk op dezelfde druk wordt gehouden als de wel (8 cm). In proef 1, bij een dicht achterland kwam de druk in het achterland (peilbuis 7) ook op 8cm uit. De verwachting is dat de regionale kweldruk lager zou zijn, uitgaande van de gevonden resultaten in proef 2, 3 en 4.

Er zijn diverse mogelijkheden die invloed op piping met regionale kweldruk kunnen hebben, er zijn in dit onderzoek veel constante waarden aangehouden waarvan het niet zeker is of deze invloed hebben op de regionale kweldruk. Zo kunnen er in vervolgprouven de volgende variabelen mee worden genomen: er kunnen meerdere wellen toe worden gepast, de locatie van de wel kan worden veranderd, er kunnen verschillende grootte wellen worden gebruikt. Er kunnen verschillende zandlagen worden toegepast, er kan een druk van 4 zijden worden opgezet, er kan een onderstroom en een bovenstroom (meerdere grondwaterstromen) worden getest.

Daarnaast is het aan te raden om in de toekomst een stalen proefopstelling te gebruiken. Staal vervormt minder als hout en staal is beter te bewerken tegen lekkage. Hierdoor zullen de onderlinge resultaten beter te vergelijken zijn en wordt verwacht dat de resultaten minder variëren. Indien de huidige proefopstelling gebruikt zal worden, is het belangrijk deze te verbeteren en dus een nieuwe revisie uit te voeren.

7 Referenties

- van Beek, V., & Bezuijen, A. (2009). SBW Piping-Hervalidatie piping: HP2.2 Medium-schaalproeven (Analyserapport) Deltares.
- Witteveen+Bos. (2014a). Presentatie POV piping regionale kwelstroom, case Grebbedijk: Witteveen+Bos
- Witteveen+Bos. (2014b). PvA - POV piping regionale kwelstroom, case grebbedijk, kenmerk AP539-7/14-020.541: Witteveen+Bos.

Bijlagen

Bijlage I - Literatuur onderzoek

Positieve kwel?

Literatuuronderzoek

Arnhem
Mei 2015

Auteurs

S.T.M. van den Broek
Peelstraat 2b
5446 PJ Wanroij
Tel 06 22342177
E-mail: stan_broek@hotmail.com
Studentnummer: 496138

O.J. Kuypers
Paul Krugerstraat 13
6861 CR Oosterbeek
Tel 06 42997600
E-mail: Ottokuypers@live.nl
Studentnummer: 500258

Begeleiders

Ir. E.H. Rob	Hogeschool van Arnhem en Nijmegen - Instituut Built Environment
Ir. C. van der Giessen	Hogeschool van Arnhem en Nijmegen - Instituut Built Environment
Ir. P.E.M. Schoonen	Witteveen + Bos

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
2	Fenomeen piping.....	7
2.1	Vorming piping.....	7
2.2	Rekenmethodes.....	8
2.3	Methode Sellmeijer	8
2.4	Parameter invloed.....	10
3	Eerder uitgevoerde proeven.....	11
3.1	Onderzoek naar piping.....	11
3.2	Proefopstellingen.....	11
3.2.1	Kleinschalige proeven.....	11
3.2.2	Medium scale proeven.....	12
3.3	Resultaten piping proeven.....	12
3.3.1	Erosieprocessen.....	13
3.3.2	Zand	14
3.3.3	Relatieve dichtheid.....	14
3.3.4	Lucht.....	15
4	Regionale kweldruk.....	17
5	Conclusie	19
6	Referenties	21

1 Inleiding

Nederland leeft met water. Om ons te beschermen tegen overstromingen zijn waterkeringen aangelegd. De waterkeringen die ons direct beschermen tegen groot buitenwater (onder andere Maas, Rijn, Waal en Noordzee) worden primaire waterkeringen genoemd. Overige waterkeringen, zoals boezemkades en kades langs kanalen, worden regionale keringen genoemd. Het is ongewenst dat deze waterkeringen bezwijken. Om deze rede is door de overheid het Deltaprogramma ontwikkeld. Een onderdeel hiervan is het hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). In dit programma staan veiligheidsnormen beschreven waaraan primaire waterkeringen moeten voldoen, om voor nu en in de toekomst de veilig te kunnen waarborgen. Dit programma wordt door de waterschappen en het ministerie van Infrastructuur en Milieu (Rijkswaterstaat) uitgevoerd (Helpdesk Water, 2015).

Een onderdeel waarvoor normen staan beschreven in het HWBP is het faalmechanisme piping. Om per situatie de normen te bepalen is momenteel het rekenmodel van Sellmeijer(1988) in gebruik. Er is recentelijk een nieuw rekenmodel ontwikkeld, waardoor er naar verwachting veel waterkeringen die nu goedgekeurd worden door het nieuwe model afgekeurd zullen worden. Ook de mate waarin de dijken afgekeurd worden zal naar verwachting fors toenemen (Huijsmans, 2014).

Om een beter beeld te krijgen van het faalmechanisme piping, en betere passende oplossingen voor dit fenomeen te ontwikkelen, heeft het HWBP het programma Project overstijgende verkenning POV Piping opgericht. Binnen deze verkenning zijn veertien deelverkenningen opgesteld om meer kennis op te doen over het faalmechanisme piping. Binnen deze deelverkenningen wordt zowel gezocht naar meer kennis over piping in het algemeen, als naar specifieke gevallen met bepaalde kenmerken. Binnen deze verkenningen worden ook innovatieve en vernieuwende oplossingen gezocht. Op deze manier wordt bekeken of het wel echt nodig is om de betreffende waterkeringen te versterken of dat er andere factoren meespelen die piping kunnen beïnvloeden. Eén van deze factoren die piping beïnvloed is regionale kweldruk, een verhoogde grondwaterdruk door een sterk oplopend achterland (Griffioen, 2014).

Dit afstudeeronderzoek valt onder de deelverkenning 4: Regionale kweldruk. Waarin wordt onderzocht in welke mate regionale kweldruk invloed heeft op het faalmechanisme piping.

Binnen dit literatuuronderzoek is eerst het faalmechanisme piping beschreven. Hierna zijn de bestaande rekenmodellen toegelicht die momenteel worden gebruikt om piping te berekenen. Verder is beschreven welke (medium) schaalproeven er al zijn uitgevoerd met betrekking tot piping en welke resultaten deze proeven al hebben opgeleverd.

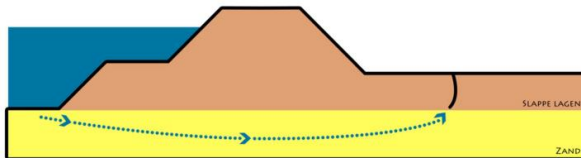
Als laatste is toegelicht wat het fenomeen regionale kweldruk is en in wat voor situatie (en locatie) het op kan treden.

2 Fenomeen piping

Bij piping vormt er een soort pijp (pipe) onder de waterkering. Deze holle ruimte onder de dijk verzwakt de dijk en hierdoor ontstaat de kans dat de dijk verzakt en uiteindelijk bezwijkt. Een belangrijke voorwaarde voor het optreden van piping is de grondsamenstelling. Piping kan alleen voorkomen bij een watervoerende laag die is afgedekt door een slecht doorlatende deklaag. Wanneer een hoge buitenwaterstand optreedt, stroomt water door de watervoerende laag en kan hier erosie optreden. Het hoogteverschil tussen de buitenwaterstand en de binnenzijde van de dijk (verval) is de belangrijkste parameter voor het ontstaan van piping. Wanneer deze situatie aanwezig is, is het mogelijk dat piping ontstaat. Als piping ontstaat, gaat dat altijd volgens het zelfde principe, deze staat in paragraaf 2.1 beschreven (TAW, 1999).

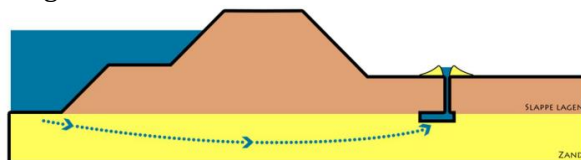
2.1 Vorming piping

- **Opdrijven afdeklaag.** Wanneer de waterdruk buitendijks hoog is, zal de waterspanning in de watervoerende laag onder de dijk toenemen. Zodra de waterspanning groter is dan het gewicht van de afdekkende laag aan de binnenzijde van de dijk, zal de afdeklaag gaan opdrijven. Dit fenomeen is visueel waarneembaar. Bij betreding van de afdeklaag zal deze zich als drijfzand gedragen.



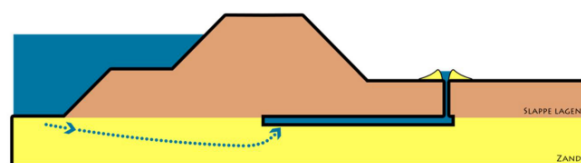
Figuur 1 - Opdrijven afdeklaag (de Bruijn, 2013)

- **Opbarsten afdeklaag, ontstaan wellen.** Door het opdrijven ontstaan scheurtjes in de deklaag. Door deze scheurtjes zoekt het kwelwater een weg naar het maaiveld. Door erosie ontstaat een verbinding tussen het maaiveld en de zandlaag; het opbarstkanaal. Het geërodeerde materiaal wordt rond de uitstroomopening van het opbarstkanaal afgezet.



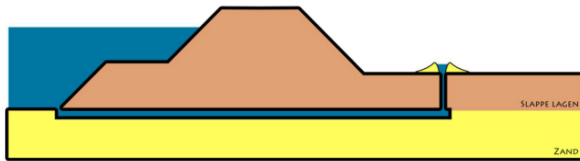
Figuur 2 - Ontstaan wellen (de Bruijn, 2013)

Eroderen zandlaag. Door de kwelstroom uit de zandlaag zal zand meegevoerd worden door het opbarstkanaal. Op dat moment kunnen twee verschijnselen optreden. (1) Het opbarstkanaal raakt verstopt met zand, de stroomsnelheid in het opbarstkanaal neemt af en de erosie stopt. (2) de stroomsnelheid in het opbarstkanaal neemt onvoldoende af waardoor het zand het maaiveld bereikt en wordt afgezet. Er komt een continu proces op gang waardoor steeds meer zand uit de zandlaag erodeert. Deze erosie breidt zich bovenstrooms uit waarbij pipes (kanaaltjes) ontstaan in de zandlaag.



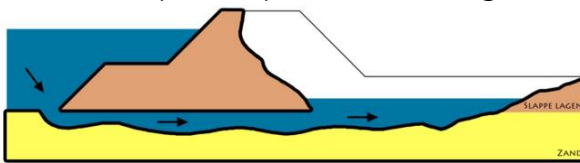
Figuur 3 - Eroderen zandlaag (de Bruijn, 2013)

- **Vorming doorgaande pipes.** Zolang er een hoge buitendijkse waterdruk is, zal de waterspanning ervoor zorgen dat de zandlaag blijft eroderen en dus de pipes groter worden. Zodra de pipes het intreepunt aan de buitenzijde van de dijk hebben bereikt, is de waterkering onderloops geworden. Vanaf dat moment is piping een feit.



Figuur 4 - Vorming doorgaande pipes (de Bruijn, 2013)

- **Bezwijken waterkering.** In de doorgaande pipes zal de stroomsnelheid omhoog gaan. Hierdoor eroderen de pipes sneller en worden dus groter. Er ontstaan holle ruimtes onder de waterkering die kunnen zorgen voor verzakking en bezwijking van de waterkering. Uiteindelijk bezwijkt de waterkering door overloop en erosie van het binnentalud.



Figuur 5 - Bezwijken waterkering (de Bruijn, 2013)

Het ontstaan van doorgaande pipes wordt gezien als uiterste grenstoestand. Ontstaan deze doorgaande pipes, is de kans op bezwijken van de waterkering groot en kan de veiligheid niet gegarandeerd worden. (TAW, 1999).

2.2 Rekenmethodes

Om een voorspelling te kunnen doen voor het optreden van piping zijn analytische en empirische formules beschikbaar. De empirische formules (Bligh, 1910; Lane, 1935) zijn bijna een eeuw geleden opgesteld en worden nog gebruikt voor het ruwe ontwerp van een waterkering of de simpele toetsing hiervan. Doordat de empirische regels niet altijd toereikend zijn, is de formule van Sellmeijer (1988) opgesteld. Doordat deze meer parameters heeft, kan een completer beeld van de situatie worden geschetst en hierdoor beter en gericht getoetst en ontworpen worden.

Naast piping zelf, spelen de mechanismen opbarsten en heave ook een rol in het gehele proces. In dit afstudeeronderzoek wordt er van uitgegaan dat opbarsten plaats heeft gevonden en er een opbarstkanaal is ontstaan. Om deze rede worden de mechanismen opbarsten en heave verder buiten beschouwing gelaten.

2.3 Methode Sellmeijer

Voor het onderzoek van de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW) heeft Sellmeijer (1988) op basis van waarnemingen van het optreden van piping, een mathematische rekenmethode ontwikkelt voor het fenomeen. Sellmeijer heeft hierbij de volgende onderdelen bij zijn model betrokken:

- De potentiaalvergelijking voor de beschrijving van grondwaterstroming in de zandlaag. Met hierbij de volgende eisen:

- De potentiaal $\Phi=H$ aan de bovenkant van de zandlaag aan de bovenstroomse zijde van de constructie
- Een ondoorlatende laag ter hoogte van de onderkant van de constructie
- De potentiaal $\Phi=H_p$ aan de bovenkant van het zand aan benedenstroomse zijde van de constructie
- Ter plaatse van de pipe is de potentiaal in het zand gelijk aan de potentiaal van het water in de pipe
- Een vergelijking voor laminaire stroming van het water door de spleet
- Een evenwichtsvergelijking van aanstroom- en sleepkrachten door de stroming in de spleet op de zandkorrels en de rolweerstand van deze korrels.

Deze onderdelen resulteren in een tweetal hulpparameters:

$$\alpha = \left(\frac{D}{L}\right) \left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{0.28}{2.8}-1} \quad c = \eta d_{70} \left(\frac{1}{\kappa L}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Hieruit volgt de formule van Sellmeijer:

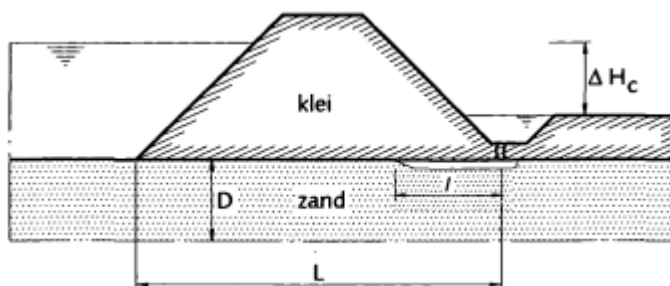
$$\Delta H_c = \alpha c \frac{\gamma_p}{\gamma_w} \tan(\theta) (0.68 - 0.10 \ln(c)) L$$

- ΔH_c , het kritieke verval [m]
- d , dikte watervoerend pakket [m]
- L , lengte horizontale kwelweg [m]
- D_{70} , korrelverdeling, [m]
- γ_w , volumegewicht water [kN/m³]
- γ_p , volumegewicht grond van de zandlaag onder water [kN/m³]
- κ , intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag [m²]
- θ , rolhoekweerstand [°]
- η , sleepkrachtfactor (coëfficiënt van White) [-]

De intrinsieke doorlatendheid kan worden bepaald aan de hand van de doorlatendheid (k), de kinematische viscositeit (ν) en de gravitatiekracht (g).

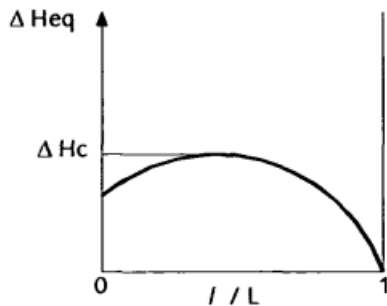
$$\kappa = (\nu/g) * k$$

De formule van Sellmeijer berekent het maximale verval, van de aanwezige zandlaag, waarbij de zandkorrels nog net in evenwicht zijn. De verhouding is afhankelijk van de pipe lengte (I) en de lengte van de kwelweg (L), zie Figuur 6. Wanneer deze verhouding $I/L \approx 0,5$ is het er nog net evenwicht wat ook wel het kritieke verval genoemd wordt. Wanneer de verhouding onder de 0,5 blijft zal er geen doorgaande pipe ontstaan. Als de verhouding boven de 0,5 komt zal de pipe blijven groeien tot er een doorgaande pipe ontstaan en daarmee piping (TAW, 1999).



Figuur 6 - Basis configuratie Sellmeijer (Sellmeijer, 1988)

In Figuur 7 is te zien dat wanneer het kritieke verval is bereikt, deze afneemt echter dat de verhouding van pipe lengte en kwelweglengte toe blijft nemen.



Figuur 7 - Verhouding kritieke verval en pipe lengte (Sellmeijer, 1988)

2.4 Parameter invloed

De parameters uit de formule van Sellmeijer hebben allen een andere invloed op het kritieke verval. Hieronder staat de invloed van deze parameters beschreven (Sellmeijer, 1988).

- Dikte zandlaag. Wanneer de dikte van de zandlaag toeneemt, neemt het kritieke af doordat er meer water kan toestromen.
- Lengte kwelweg. Een lange kwelweg heeft als gevolg dat het kritieke verval zal toenemen.
- Korrelverdeling. Kleine korrels komen sneller in beweging dus is hiervoor een lager kritiek verval nodig dan bij grotere korrels.
- Volumiegewicht. Wanneer het volumiegewicht laag is zullen de korrels sneller in beweging komen en is een laag kritiek verval nodig.
- Intrinsieke doorlatendheid wordt bepaald door de k van de zandlaag. Wanneer het doorlaatbare debiet in de zandlaag stijgt, daalt het kritieke verval.
- Rolhoekweerstand is een vaste waarde, deze is 41° .
- Sleepkrachtfactor is een vaste waarde van 0,25.

3 Eerder uitgevoerde proeven

In het verleden is al eerder onderzoek gedaan naar piping. In dit hoofdstuk zijn een aantal proeven van eerdere onderzoeken beschreven. Vervolgens zijn de proefopstellingen beschreven die hiervoor gebruikt zijn. Tot slot zijn relevante resultaten en bevindingen van deze proeven beschreven.

3.1 Onderzoek naar piping

Op basis van waarneming en analyses zijn de rekenregels van Bligh en Lane (1910; 1935) opgesteld. Zij beschouwden piping in hun berekening als een proces in een 1D vlak. Hierbij is de pipe dus een lineaire lijn. De Wit (1984) heeft kijkproeven uitgevoerd met betrekking tot vorming van de pipes. Door grote diversiteit in resultaten bleken deze niet goed toepasbaar in de praktijk en was verder onderzoek nodig. In het Waterloopkundig Laboratorium heeft de Rijke de rekenregel Sellmeijer (1988) verder onderzocht. Met als resultaat dat er onzekerheden waren over de coëfficiënt van White en de beddingshoek van het zand in de rekenregel. Daarnaast diende er een correctie te worden gemaakt in de voorspelling van het kritiek verval, doordat bij een heterogene grond niet overal dezelfde waterspanning aanwezig is. De conclusie hieruit was dat er meer zand kon eroderen dan uit het rekenmodel van Sellmeijer geconcludeerd werd (de Rijke, 1991).

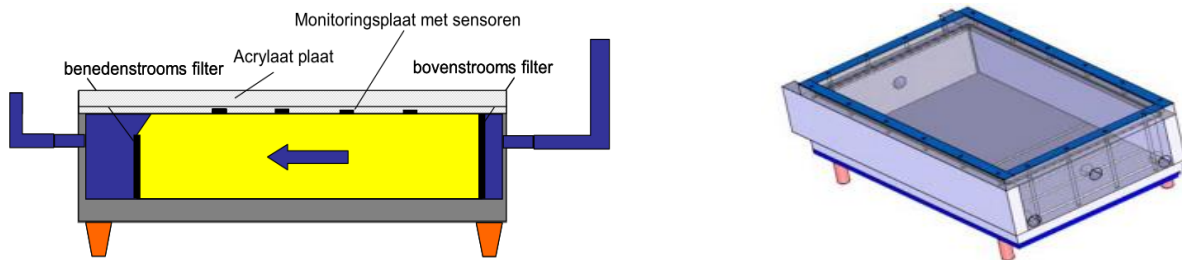
In opdracht van Rijkswaterstaat is het Sterkte & Belasting Waterkeringen (SBW) opgesteld. Deltares heeft voor het SBW de afgelopen jaren diverse (schaal)proeven uitgevoerd om het pipingproces beter te begrijpen en om de regel van Sellmeijer te hervalideren. Zo zijn, in het laboratorium van Deltares, kleine- en medium schaalproeven uitgevoerd (Luijendijk, 2008; van Beek & Bezuijn, 2009; van Beek & Knoeff, 2009). In paragraaf 3.2 is beschreven welke proefopstellingen hierbij gebruikt zijn. Deze proeven hebben input geleverd voor een fullscale experiment uitgevoerd bij IJkdijk, Booneschans. Hierbij zijn een viertal proeven uitgevoerd, twee om de diverse meetapparatuur te testen en twee proeven om onzekerheden bij de regel van Sellmeijer te valideren (de Bruijn, van Beek, Knoeff, & Koelewijn, 2009). Uit de resultaten van het onderzoek bleek dat er nog onduidelijkheid is over het verloop van het erosieproces en het moment van ontstaan van een doorlopende pipe. Wel is bevestigd dat bij een doorgaande pipe het debiet uit de wel stijgt.

3.2 Proefopstellingen

Deltares heeft verschillende laboratoriumproeven uitgevoerd. In onderstaande tekst staan de twee gebruikte proefopstellingen benoemd. Bij beide proeven was sprake van eenzijdige doorstroom. Het water stroomde van de ene zijde van de proefopstelling naar de andere zijde. Hierbij is een open uitstroom, over de gehele breedte van de bak aanwezig waardoor de pipes zich op de meest natuurlijke wijze konden ontwikkelen.

3.2.1 Kleinschalige proeven

De kleinschalige proeven maakten gebruik van een bak met een binnen afmeting van 0,5x0,3x0,1m. De bak is gemaakt van PVC. Om de erosiepatronen goed te kunnen zien, is een plexiglas deksel gebruikt. De proefopstelling is verdeeld in drie delen, instroom met waterreservoir, zandpakket en de uitstroom. De drie compartimenten zijn gescheiden door een filterconstructie. Het waterreservoir is gemaakt om de waterdruk gelijkmatig over het zandpakket te verdelen. In Figuur 8 is een schematische weergave van de proefopstelling te zien.



Figuur 8 – Schematische weergave proefopstelling (van Beek & Knoeff, 2009)

Het water is aangevoerd vanuit een op hoogte instelbare emmer. Hiermee werd de druk gelijkmatig opgevoerd tot de gewenste hoogte. Door een overloop in de emmer kon het waterniveau op de juiste hoogte worden gehouden. Het water is ontlucht om te voorkomen dat er lucht in het zandpakket terecht kon komen.

Door de proefopstelling op zijn kant te zetten, was het mogelijk om het zandpakket goed tegen de deksel aan te verdichten. De proefopstelling is eerst gevuld met water en vervolgens is het zand in de bak aangebracht. De verdichting van het zand vond onder water plaats. Dit om te voorkomen dat er lucht opgesloten raakte in het zandpakket (Luijendijk, 2008; van Beek & Knoeff, 2009).

3.2.2 Medium scale proeven

Op basis van de kleinschalige proeven zijn de medium scale proeven uitgevoerd. Hierbij is de proefopstelling bijna een factor 4 vergroot. Hierdoor heeft het zandpakket een afmeting gekregen van 1,5x0,88x0,4m. De indeling van de bak is hetzelfde als bij de kleinschalige proeven.

Deze proefopstelling is tevens kantelbaar voor het aanbrengen en de verdichting van het zand. Echter door de grootte van het zandpakket is een speciale constructie gebouwd en is de bak van staal gemaakt. De plexiglas deksel heeft een dikte van 60mm om vervorming te voorkomen. In Figuur 9 is het 3D ontwerp van deze opstelling weergegeven.



Figuur 9 – 3D ontwerp medium scale proeven (van Beek & Bezuijen, 2009)

In de proeven is gebruik gemaakt van waterspanningsmeters om de waterspanning in het zandpakket te meten. Daarnaast is een debietmeter gebruikt om het uitstroomdebiet te meten. Tijdens de proef is met een camera de erosiepatronen vastgelegd (van Beek & Bezuijen, 2009).

3.3 Resultaten piping proeven

Uit bovenstaande proeven zijn verschillende stadia van piping onderscheiden. Daarnaast is de invloed van de zandsoort onderzocht en of de verdichting hiervan invloed heeft op het piping

proces (van Beek & Knoeff, 2009). Belangrijke bevindingen uit deze onderzoeken zijn in de volgende paragrafen beschreven.

3.3.1 Erosieprocessen

De kanaalvorming is te onderscheiden in drie fases: initiële fase, vervolg fase en de eindfase. Bij het ontstaan van de erosiepatronen kunnen meerdere processen zichtbaar zijn binnen een enkele proef. Deze processen zijn waargenomen in de kleinschalige laboratorium proeven van Deltares (van Beek & Knoeff, 2009).

Initiële fase

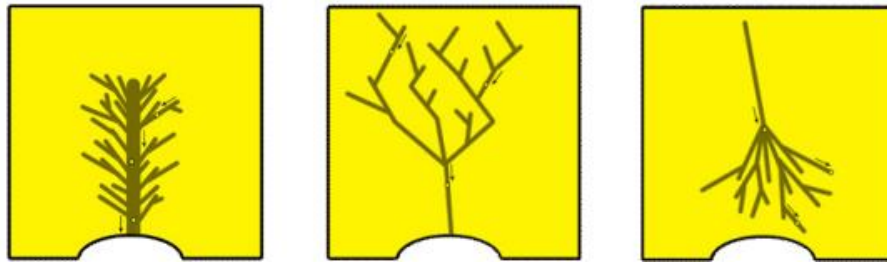
Tijdens proeven zijn de volgende processen waargenomen die kunnen leiden tot kanaalvorming:

- Craquelé, beschrijft het ontstaan van een ruitpatroon met diagonale kanaaltjes, met een breedte van één tot enkele korrels. Het ruitpatroon vormt zich voornamelijk in de buurt van de uitstroomopening maar ook bij de instroom zijn ruitpatronen waargenomen.
- Korrelverplaatsing, is een lastig waar te nemen proces waarbij korrels zich individueel verplaatsen aan het oppervlak. De korrels verplaatsen zich door het korrelskelet en daarbij worden geen kanaaltjes gevormd. Korrelverplaatsing is voornamelijk aan de benedenstroomse zijde waargenomen. Echter wanneer het proces is waargenomen kan, bij verhogen van het verval, het proces beter zichtbaar gemaakt worden.
- Enkelvoudig klassiek, hierbij ontstaat een enkel erosiekanaaltje die begint bij de uitstroomzijde. Dit kanaal heeft een breedte, lengte en diepte van een aantal korrels.
- Meervoudig klassiek, is een zelfde erosieproces als enkelvoudig klassiek. Echter in plaats van een enkel kanaal, vormen er meerdere kanaaltjes. De afmetingen hiervan verschillen onderling. Uiteindelijk groeit er één kanaal door tot een doorgaande pipe.
- Interne kanaalvorming. Hierbij vormen ergens in het zandpakket spontaan kanaaltjes. Deze vormen zich richting kopse kanten door zandkorrels in het zandskelet te drukken.

Vervolg fase

Na dat een of meerdere van de initiële processen opgang zijn gekomen, kunnen de volgende erosie processen optreden:

- Achterwaartse erosie, zie Figuur 10a, erodeert de zandlaag in een ondiep kanaal met een breedte tot 1 cm. Het kanaal groeit meestal recht naar achteren doordat de bovenstroomse zijde erodeert en vervolgens door het kanaal kan wegspoelen. Wanneer dit erosiepatroon optreedt, ontstaat altijd een doorgaande pipe, tenzij het verval verlaagd wordt.
- Klassieke achterwaartse erosie, zie Figuur 10b, is een erosieproces waarbij kanaaltjes zich bovenstrooms uitbreiden. Individuele korrels raken los van het zandpakket en rollen door het kanaaltje mee, waarbij een soort boomstructuur ontstaat. Doordat soms een evenwicht optreedt in een tak en er geen zand meer erodeert, groeien niet alle takken even ver door. Het hoofdkanaal is breder en dieper dan de takken, hierdoor is de stroomsnelheid hier hoger. In het hoofdkanaal stromen de zandkorrels dan ook in plaats van dat ze rollen.
- Voorwaartse erosie, zie Figuur 10c, beweegt zich van de bovenstroomse zijde richting de benedenstroomse zijde. Los gekomen korrels drukken zich een weg door het zandpakket en vormen daarmee een kanaaltje achter zich. Hierdoor ontstaan vertakkingen richting de benedenstroomse zijde. Een groot gevaar bij het optreden van dit erosiepatroon is dat er geen zandmeevoerende wel te zien is. Deze is pas zichtbaar wanneer een doorgaande pipe gecreëerd is.



Figuur 10 – a achterwaartse erosie, b klassieke achterwaartse erosie en c voorwaartse erosie (van Beek & Bezuijen, 2009)

Eindfase

Wanneer het kritiek verval bereikt is, en er geen evenwicht meer bereikt wordt, is de proef in de eindfase. Er kunnen vanaf dit moment de volgende processen worden geconstateerd:

- Vlak en massiefstroming. Deze processen lijken sterk op elkaar. Na verstopping kan een plak zand van enkele cm^2 in beweging komen. Bij massiefstroming bewegen de korrels van de plak niet ten opzichte van elkaar. Indien dat wel het geval is spreekt men van vlakstroming.
- Delta of waiervorming. Dit breidt zich in benedenstroomse richting uit en kan optreden bij voorwaartse erosie en interne kanaalvorming. Een waiervorm breidt zich uit doordat zandkorrels zich in het zandskelet drukken en hierdoor ruimte creëren voor de volgende korrel. Deze drukt vervolgens weer verder in het zandskelet. Bij deltavorming vormt een soort delta die te vergelijken is met de delta van rivier.
- Meanderen. Dit proces beschrijft het verplaatsen van een kanaaltje. Net als bij een rivier erodeert de buitenzijde van een bocht en wordt in de binnenbocht zand afgezet. Hierdoor verandert de loop van het kanaal.
- Ruimen. Het proces dat optreedt als een doorgaande pipe is ontstaan wordt ruimen genoemd. Hierbij wordt de pipe snel breder doordat de verhoogde watersnelheid in het kanaal veel zand meeneemt.

3.3.2 Zand

Sellmeijer (1988) maakt in zijn formule gebruik van verschillende parameters die met zandeigenschappen te maken hebben. De volgende zandeigenschappen hebben een invloed op het piping proces en daarmee op het kritieke verval:

- Korrelgrootte. Bij een hogere d_{70} stijgt het benodigd kritieke verval. In de medium-scale proeven van Deltares is gebruik gemaakt van zand met een d_{70} van $154\mu\text{m}$.
- Hoekigheid. Ook wel korrelvorm, bepaald de sleepkrachtfactor. Deze is als constante opgenomen in de formule Sellmeijer.
- Gradatie. De uniformiteitcoëfficiënt, d_{60}/d_{10} , heeft invloed op het benodigd kritieke verval. Indien de gradatie van het zand hoger wordt, zal het kritieke verval ook omhoog gaan.
- Doorlatendheid. Door een hoge doorlatendheid is er minder weerstand in het zandpakket. Er hoeft dus minder waterdruk nodig te zijn om de benodigde waterdruk in de wel te creëren. Daardoor daalt het kritieke verval.
- Pakking. De relatieve dichtheid komt niet direct terug in Sellmeijer, maar heeft wel degelijk invloed op het pipingproces. In paragraaf 3.3.3 is de invloed van de pakking nader uitgelegd.

3.3.3 Relatieve dichtheid

De dichtheid van het zandpakket is van invloed op het pipingproces. Om het proces zo min mogelijk te beïnvloeden, moet het zandpakket homogeen verdicht worden.

Een lage relatieve dichtheid zorgt voor een hoge doorlatendheid van het pakket, waardoor er maar een laag verval nodig is om het erosieproces in gang te zetten. Bij een lage dichtheid treedt echter voornamelijk voorwaartse erosie op. Doordat in er pas in een laat stadium zand meevoerende wellen ontstaan is het moeilijk om in te schatten of de regionale kweldruk invloed heeft. Daarnaast is het lastig om het zandpakket gelijk verdichten wanneer het niet volledig verdicht wordt.

Een hogere dichtheid resulteert in een lagere doorlatendheid en een hoger kritisch verval. Bij dichtheden vanaf 70% begint de erosie veelal bij de benedenstroomse zijde, voor het huidige onderzoek, is een dergelijke situatie positief (van Beek & Knoeff, 2009).

3.3.4 Lucht

Belangrijk is om te voorkomen dat er in de proefopstelling lucht opgesloten zit in het zandpakket. Opgesloten lucht zorgt ervoor dat de doorlatendheid van het zandpakket omlaag gaat en er lokaal drukverschil in het zandpakket optreedt. Daarnaast kunnen luchtbellens de erosiekanaaltjes verstoppen, of de kanaalvorm beïnvloeden (van Beek & Knoeff, 2009).

4 Regionale kweldruk

Bij de Grebbedijk bij Wageningen zijn, bij waterstanden ruim onder maatgevend niveau, zandmeevoerende wellen aangetroffen. De verwachting is dat grondwater uit het hoger gelegen achterland te maken hebben bij de vorming van deze wellen (Witteveen+Bos, 2014). Indien deze regionale kweldruk de wellen veroorzaken, betekend dit dat een zandmeevoerende wel niet direct door piping hoeft te zijn veroorzaakt. Het zand is namelijk niet van onder de dijk gekomen (Luijben, 2014).

5 Conclusie

Er zijn al diverse onderzoeken uitgevoerd naar het fenomeen piping. Hiervoor zijn onder andere formules gevalideerd, parameters onderzocht en erosiepatronen beschreven. De kleinschalige en medium scale proefopstellingen, die door Deltares zijn gebouwd, kunnen als inspiratiebron worden gebruikt voor het ontwerp van de proefopstelling in het huidige onderzoek. Met de resultaten uit de proeven die door Deltares zijn uitgevoerd (zowel, klein als medium) kunnen hypotheses worden opgesteld voor de te verwachte erosiepatronen. Daarnaast kunnen uit de bevindingen en resultaten van de proeven eisen en risico's worden opgesteld waarover moet worden nagedacht voor de definitieve proefopstelling en uitvoering van de proeven.

Er is nog zeer weinig informatie beschikbaar over piping met regionale kweldruk. Het model van Witteveen+Bos, wat meer informatie over regionale kweldruk zou kunnen geven is nog in ontwikkeling en is nog niet gereed voor gebruik.

6 Referenties

- Bligh, W. (1910). Dams, barrages and weirs on porous foundations. *Engineering News*, 64(26), 708-710.
- de Bruijn, H. (2013). Het pipingproces in stripvorm: Deltares.
- de Bruijn, H., van Beek, V., Knoeff, J., & Koelewijn, A. (2009). Analyserapport IJkdijk pipingproeven: Deltares.
- de Rijke, W. (1991). verificatie Piping model - proeven in de Deltagoot: Waterloopkundig Laboratorium, GeoDelft.
- de Wit, J. (1984). Onderzoek zandmeevoerende wellen-rapportage modelproeven: Rapport Grondmechanica Delft.
- Griffioen, C. (2014). Voortgang Programma Project overstijgende verkenning POV Piping (HWBP).
- Helpdesk Water. (2015). HWBP-2. Retrieved 8-4, 2015
- Huijsmans, A. (2014). Projectoverstijgende Verkenning Piping.
- Lane, E. (1935). Security from under-seepage-masonry dams on earth foundations. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 100(1), 1235-1272.
- Luijben, A. (2014). Notitie modeleren piping - ModFlow: Witteveen+Bos.
- Luijendijk, M. S. (2008). Zandmeevoerende wellen - piping op laboratorium schaal. Optimalisaties en relatieve dichtheid nader beschouwd Vrije Universiteit Amsterdam.
- Sellmeijer, J. (1988). *On the mechanism of piping under impervious structures*: Technische Universiteit Delft.
- TAW. (1999). Technisch rapport zandmeevoerende wellen: Rijkswaterstaat, DWW.
- van Beek, V., & Bezuijen, A. (2009). SBW Piping-Hervalidatie piping: HP2.2 Medium-schaalproeven (Analyserapport) Deltares.
- van Beek, V., & Knoeff, H. (2009). SBW Piping-Hervalidatie piping: B3. Analyse kleinschalige laboratorium proeven: Deltares.
- Witteveen+Bos. (2014). PvA - POV piping regionale kwelstroom, case grebbedijk, kenmerk AP539-7/14-020.541: Witteveen+Bos.

Bijlage II - Ontwikkeling proefopstelling

Positieve kwel?

Ontwikkeling proefopstelling

Arnhem
Mei 2015

Auteurs

S.T.M. van den Broek
Peelstraat 2b
5446 PJ Wanroij
Tel 06 22342177
E-mail: stan_broek@hotmail.com
Studentnummer: 496138

O.J. Kuypers
Paul Krugerstraat 13
6861 CR Oosterbeek
Tel 06 42997600
E-mail: Ottokuypers@live.nl
Studentnummer: 500258

Begeleiders

Ir. E.H. Rob	Hogeschool van Arnhem en Nijmegen - Instituut Built Environment
Ir. C. van der Giessen	Hogeschool van Arnhem en Nijmegen - Instituut Built Environment
Ir. P.E.M. Schoonen	Witteveen + Bos

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
2	Programma van Eisen.....	7
3	Proefopstelling	11
3.1	Afmetingen	11
3.2	Materiaal.....	11
3.3	Watertoevoer	11
3.4	De wel	12
3.5	Overhoogte.....	12
3.6	Zand.....	12
4	Alternatieven.....	13
4.1	Vastmaken deksel.....	13
4.2	Verdichtingmethode.....	14
5	Keuze afweging	15
5.1	Vastmaken deksel.....	15
5.2	Verdichtingstrategie.....	15
6	Definitieve proefopstelling.....	17
7	Bouw proefopstelling	19
7.1	Eerste versie proefopstelling.....	19
7.2	Meetopstelling.....	21
7.3	Revisie proefopstelling.....	21
8	Referenties	23

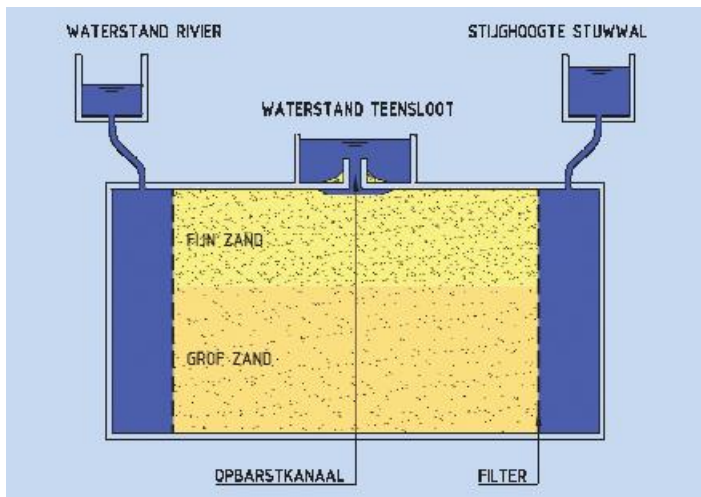
Bijlagen

Bijlage 1 - Zeefkromme Valewaard B.V

Bijlage 2 - Ontwerptekening proefopstelling

1 Inleiding

Witteveen+Bos heeft in het Plan van Aanpak voor de POV Piping een opzet voor de proefstelling gemaakt (Witteveen+Bos, 2014). Het principe van de proefopstelling is een waterdichte bak met transparante deksel. Deze bak is gevuld met zand. Vanaf twee zijden stroomt water de bak in, dat vervolgens door het zandpakket naar een gat (de wel) in de deksel stroomt. Bij uitstroming door de wel is de verwachting dat zand meegevoerd wordt en piping patronen worden waargenomen. In Figuur 1 is het principe ontwerp van de proefopstelling van Witteveen+Bos weergegeven.



Figuur 1 - Principe opstelling voorgeschreven door Witteveen+Bos (Witteveen+Bos, 2014)

Op basis van deze opzet is de proefopstelling verder uitgewerkt. Eerst is een programma van eisen (hoofdstuk 2) opgesteld. Vervolgens is de proefopstelling in concept vastgelegd (hoofdstuk 3) en zijn voor bepaalde onderdelen varianten bedacht (hoofdstuk 4). Hieruit is doormiddel van een keuzeafweging (hoofdstuk 5) een keuze gemaakt en is de definitieve proefopstelling beschreven (hoofdstuk 6). Tot slot is in hoofdstuk 7 het bouwproces te vinden.

2 Programma van Eisen

Om een degelijke proefopstelling te ontwerpen, is het programma van eisen (PvE) opgesteld. Dit PvE is onderverdeeld in een vijftal categorieën:

- Algemene eisen
- Functionele eisen
- Resultaatseisen
- Randvoorwaarden
- Wensen

In de onderstaande tabel 1 is het PvE weergegeven. Onder de eis staat een onderbouwing van de betreffende eis.

Tabel 1 - PvE

Algemene eisen	
A.1	De afmetingen van het zandpakket zijn: 2,0 x 0,6 x 0,4m <i>De afmetingen zijn gebaseerd op de medium schaalproeven uitgevoerd door Deltares (van Beek & Bezuijen, 2009)</i>
A.2	De bak moet waterdicht zijn <i>Indien de bak lekt kan dit de proefresultaten beïnvloeden</i>
A.3	De bak moet een maximale druk van 1,1 bar moeten kunnen weerstaan <i>De bak bevat minimaal een waterstand van 0,5m, het maximale verval is 0,5m. Dus de onderkant van de bak krijgt maximaal 1m waterdruk te verwerken</i>
A.4	De proefopstelling moet bestand zijn tegen vervormingen veroorzaakt door de grond en waterdruk <i>Door vervorming kan de bak gaan lekken, of is de kans aanwezig dat de deksel niet meer goed aansluit. Dit is ongewenst</i>
A.5	Alle openingen in de bak, behalve de wel, moeten zanddicht zijn <i>Om verstopping van aan-en afvoer buizen te voorkomen en om te zorgen dat er geen zand in de pomp terecht kan komen</i>
A.6	De deksel van de proefopstelling moet doorzichtig zijn <i>Om zichtbaar te maken wat er tijdens de proef met het zandpakket gebeurt en ten behoeve van vast leggen erosie patronen</i>
A.7	De deksel moet verwijderbaar zijn van de rest van de proefopstelling <i>Om het zandpakket opnieuw te kunnen prepareren voor de volgende proef. Om eventueel 3D snede te kunnen maken</i>
A.8	Het toestromende water moet gelijk over het zandpakket verdeeld worden (gebruik van waterreservoirs) <i>Komt het meest overeen met de werkelijke situatie</i>
A.9	De minimale kwelweglengte moet aan beide zijden van de proefopstelling gelijk zijn <i>Om te elimineren dat een kortere kwelweg invloed heeft op de resultaten</i>
A.10	Het verval dient voor beide zijden traploos instelbaar te zijn <i>Om alle waterstanden te kunnen nabootsen binnen het maximale verval, centimeters maken na verwachting al een verschil</i>
A.11	Direct na aanbrengen van de filters moet de stijghoogte gecontroleerd worden <i>Om de weerstand over de filters te meten en te verifiëren welke invloed zij daarop hebben</i>

A.12	Te allen tijde dient er minimaal één (1) student aanwezig te zijn bij een lopende proef <i>Vastleggen van cruciale momenten, controle en veilig verloop van de proeven</i>
A.13	Alle proeven dienen volledig gedocumenteerd te worden, van begin tot eind, met ondersteuning van foto en videomateriaal <i>Om een goed onderbouwde conclusie te genereren is het belangrijk om alle cruciale informatie terug te kunnen vinden, te vergelijken en te laten zien</i>
A.14	Er moet een vast polderpeil kunnen worden ingesteld <i>Om de proeven uniform te maken</i>
A.15	De diameter van de wel moet 20mm bedragen en een hoogte hebben van minimaal 25mm <i>De hoogte boven de plaat creëert ruimte voor zandafzetting zonder de wel direct te verstoppem. Daarnaast simuleert het een opbarstkanaal dat in werkelijke situaties ook voorkomt</i>

Functionele eisen

F.1	Het zandpakket dat gebruikt wordt moet een homogeen zandpakket zijn <i>Een enkele laag zand met een D70 tussen 200 - 500 µm</i>
F.2	De proef mag pas beginnen als de volledige proefbak vol met water zit (volledig verzadigd zandpakket) Met een gelijke stijghoogte tot bovenkant wel <i>Om een realistische situatie na te bootsen</i>
F.3	De deksel moet nauwsluitend zijn op het zandpakket, er mag geen open ruimte zijn tussen zandpakket en deksel <i>Wanneer de deksel niet goed aansluit, kan water over het zandpakket gaan stromen waardoor de proef mislukt</i>
F.4	Het zandpakket dient bij elke proef op dezelfde manier te worden verdicht <i>Om alle proeven zo uniform mogelijk uit te voeren. Wanneer blijkt dat de gekozen methode niet voldoende werkt dient de manier van verdichten te worden veranderd. Deze nieuwe methode moet vervolgens gebruikt worden bij navolgende proeven.</i>
F.5	Er moet voorkomen worden dat lucht opgesloten raakt in het zandpakket <i>Opgesloten lucht in het zandpakket kan de waterstroming beïnvloeden en daarmee de proefresultaten</i>

Resultaat eisen

R.1	Alle proeven zullen in duplo (twee maal) worden uitgevoerd <i>Hierdoor kan worden geïdentificeerd of de resultaten willekeurig zijn of dat ze vaker voorkomend zijn</i>
R.2	Om een proef succesvol af te ronden, dienen er erosie patronen zichtbaar te zijn <i>Dit is het doel van de proeven</i>
R.3	Een proef is tot einde wanneer er aan één (1) zijde een doorgaande pipe is ontstaan en in de rest van de proefopstelling evenwicht is <i>Wanneer eventuele andere kanaaltjes nog doorgroeien krijgen deze de mogelijkheid om ook door te groeien</i>

Randvoorwaarden

RV.1	De breedte van de opstelling mag niet meer dan 90cm bedragen <i>I.v.m. verplaatsbaarheid van de proefopstelling is het van belang dat deze door een deur kan</i>
------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

RV.2	De proefopstelling dient fabriceerbaar te zijn op de HAN te Arnhem <i>Wegens kosten en tijdsbesparing zullen de studenten zelf de proefopstelling fabriceren</i>
RV.3	De tijdsduur van één proef is maximaal 8 uur (1 werkdag). Dit is inclusief voorbereiding en afronding <i>Gebaseerd op een werkdag van 09:00 tot 17:00</i>

Wensen

W.1	Water tijdens de proeven hergebruiken <i>Om de proefopstelling duurzaam met water om te gaan, indien mogelijk dient het water hergebruikt te worden</i>
W.2	Zichtbaar maken van 3D piping patronen <i>Aantonen of 3D effecten eventueel ook een rol spelen in het onderzoek</i>
W.3	Toepassen peilbuizen in de bak <i>Zichtbaar maken van het verschil in stijghoogte in de proefbak</i>
W.4	Vastleggen van de erosiepatronen met een timelapse <i>Een timelapse is, vanwege de tijdsduur van de video, makkelijker te analyseren dan een video</i>

3 Proefopstelling

Een groot deel van de proefopstelling is ontworpen zonder dat er hiervoor alternatieven afweging is geweest. Voor deze onderdelen zijn dus geen alternatieven opgesteld. In dit hoofdstuk is te lezen hoe deze onderdelen zijn bepaald.

3.1 Afmetingen

Op basis van de medium scale proeven van Deltares (van Beek & Bezuijen, 2009), zijn de afmetingen van de proefopstelling vastgelegd. In die proeven is gebruikt gemaakt van een proefbak lxbxh 1,5x0,88x0,4m, deze is geschikt voor proeven op erosiepatronen van één kant. Bij dit onderzoek treden de erosiepatronen vanaf twee kanten op. De proefopstelling is om deze rede langer geworden. Om de proefopstelling hanteerbaar te houden is besloten om een zandpakket van 2,00m toe te passen. Door toevoeging van de zijkanten en waterreservoirs leidt dit tot een totale lengte van 2,20m. Doordat er één kleine uitstroom opening is, is de proefopstelling smaller dan die van Deltares, namelijk 0,60m. De verwachting is dan ook dat de erosiepatronen directer van wel naar waterreservoir zullen lopen en hierbij geen brede vorm aannemen. Daarnaast kan de proefopstelling met deze afmeting door een deur wat nodig is voor verplaatsen. De dikte van 0,40m is overgenomen om genoeg ruimte te houden om eventueel een secundaire (zand/grind)laag in de proefopstelling toe te passen.

3.2 Materiaal

Om de maakbaarheid van de proefopstelling te garanderen, is gekozen om deze van materiaal te maken die op de HAN kunnen worden verwerkt. Na inspiratie van betonbekistingen, is gekozen om de bak te vervaardigen uit betonplex. Dat bestaat uit een verlijming van dunne laagjes hout, waarbij de buitenkant is bewerkt met een epoxyhars. Hierdoor is betonplex waterdicht. Bij de aansluitingen en naden zal een kit gebruikt worden om de proefopstelling waterdicht te maken. Er wordt betonplex met een dikte van 18mm gebruikt. De bak moet namelijk de druk van het zandpakket en de waterdruk aan kunnen.

De deksel van de proefopstelling moet doorzichtig zijn. Dit om te kunnen zien of het zand in beweging komt, er erosiepatronen ontstaan en om te kunnen oordelen of de proef afgelopen is. Daarom is gekozen voor een plexiglas plaat. Deze krijgt een dikte van 20mm om te voorkomen dat er door de waterdruk opbollen optreedt.

3.3 Watertoevoer

Om de rivierwaterstand en de regionale kweldruk na te bootsen, moeten er twee waterkolommen (emmers) de druk in de proefopstelling kunnen verhogen. Uit de proeven van Deltares (van Beek & Bezuijen, 2009) blijkt dat het verhang dat optreedt maximaal 1:2 is. Voor de proefopstelling resulteert dit in een waterkolom van ongeveer 0,5m. Om te voorkomen dat er onvoldoende druk is tijdens de proeven, kan de waterkolom tot 1m worden verhoogd.

De druk wordt gecreëerd door een traploos instelbaar systeem. Dit bestaat uit een emmer en een serie waterslangen die in verbinding met de proefopstelling staan. Doordat er een overloop aanwezig is in de emmer, wordt het waterpeil in de emmer constant op niveau gehouden. Het water dat overloopt, wordt opgevangen en vervolgens opnieuw de emmers ingepompt.

3.4 De wel

Om een wel na te bootsen wordt in de plexiglas plaat een gat geboord. Deze krijgt een diameter van 20mm. Als de wel een kleinere diameter heeft is de kans aanwezig dat de wel verstopt raakt of dat er helemaal geen zand doorheen komt. Bij een te grote wel is de kans aanwezig dat het water zonder zandtransport uit kan stromen.

De lengte van het opbarstkanaal heeft invloed op het benodigd kritiek verval. Om te voorkomen dat het verval hierdoor vergroot wordt, wordt de lengte 50mm. De wel bestaat dan uit 20mm plexiglas en een blokje met een hoogte van 30mm. Indien blijkt dat een te groot verval nodig is, kan het blokje worden verwijderd. Doordat het zand niet op de wel blijft liggen maar direct wegstroomt, is het mogelijk om een vaste uitstroom waterstand te hanteren.

3.5 Overhoogte

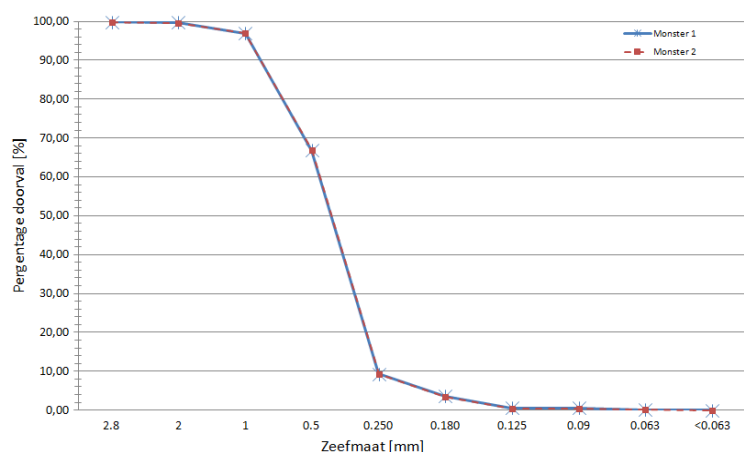
Het is belangrijk dat de proefopstelling volledig gevuld is en daarmee de deksel goed aansluit op het zandpakket. Om dit te bereiken wordt de rand van de bak tijdelijk verhoogd met een extra rand. Hierdoor kan een overhoogte op het zandpakket worden aangebracht en verdicht. Vervolgens wordt de rand verwijderd en het overtollige zand afgereden. Hierdoor ontstaat een vlak zandpakket dat goed aansluit op de deksel. Vanwege de vulmethode is gekozen voor rand van 10cm. Hier zal eerst water in komen te staan, waarna het zand hierin uitgestrooid wordt. Het zand zal tot 3cm in deze bak opgehoogd worden, anders geeft dit teveel weerstand tijdens het afrijden.

3.6 Zand

Uit het literatuuronderzoek is gebleken dat het zand invloed heeft op het benodigde kritieke verval. Bij een d_{70} van $170\mu\text{m}$ is een verval nodig van ongeveer 15cm (van Beek & Knoeff, 2009). Wanneer hier tegenover de regionale kweldruk wordt gezet, is het gewenst dat er een significant verschil is in de vervallen. Hierdoor is gekozen om een grover zand, met een hogere d_{70} , te nemen waardoor het kritieke verval ook hoger is.

Na overleg met Vera van Beek (Deltares) is duidelijk geworden dat de soort zand niet veel invloed heeft. Het belangrijkste is een zoveel mogelijk homogeen zandpakket te gebruiken. Dus zand met veel korrels van ongeveer dezelfde grootte. Zij heeft geadviseerd om een zand met een d_{70} tussen de $200\mu\text{m}$ en $500\mu\text{m}$ te gebruiken. Daarnaast is het belangrijk dat het zand gewassen is om te voorkomen dat er slib of leem deeltjes de proefopstelling vertroebelen.

Om een zand te verkrijgen met de juiste korrelgrootte is contact gezocht met zand en grindwinning Valewaard BV in de Steeg. Na uitleg van het onderzoek hebben zij één kubieke meter zand ter beschikking gesteld met een d_{70} van ongeveer $400\mu\text{m}$. In Figuur 2 is de korrelverdeling te vinden zoals deze in het lab is gevonden. In Bijlage 1 is de zeefkromme van Valewaard BV te vinden.



Figuur 2 – Zeeffkromme uit labonderzoek

4 Alternatieven

Binnen de proefopstelling zijn voor een aantal onderdelen alternatieven uitgewerkt. In dit hoofdstuk zijn de onderdelen toegelicht en is uitgelegd waarom dit alternatief een mogelijkheid is om toe te passen. In hoofdstuk 5 zijn de toetsingsmogelijkheden uitgelegd en is een alternatief gekozen.

4.1 Vastmaken deksel

De meest cruciale aansluiting is de verbinding van de bak met de deksel. Deze moet waterdicht zijn om te voorkomen dat ongewenste afstroming van water de proefresultaten beïnvloeden. Om deze afsluiting te maken, wordt gebruikt gemaakt van een rubberen profiel. Deze zal op de rand van het betonplex bevestigd worden. Wanneer de plaat hierop gelegd wordt, wordt het rubber ingedrukt en daarmee de waterdichte afsluiting gerealiseerd. Om vervolgens de plaat in zijn juiste positie vast te zetten, kan gebruik gemaakt worden van de volgende oplossingen:

Snelspanner

Snelspanners drukken, door een enkele hendel over te halen, een directe en constante druk uit. Hiermee zal de plaat op acht punten vast gedrukt worden. Voordeel van snelspanner is dat ze de direct uitgeoefende druk altijd exact het zelfde doen. De klem hoeft dus maar één keer te worden ingesteld. Dit is ook een nadeel want indien de druk onvoldoende is, moet de deksel eraf, het zandpakket opnieuw verdicht en moeten alle klemmen aangepast worden. Daarnaast is de uitgeoefende wel een puntdruk, wat nadelig is voor de plexiglas plaat. Door de beperkte grootte van de spanners is het lastig om gebruik te maken van constructie om deze puntdrukken te verdelen.

Lijmklemmen

Door lijmklemmen van bovenop de deksel tot onderaan de proefopstelling te klemmen, wordt de deksel op zijn plek gehouden. Het is echter lastig om de klemmen tegelijk even strak aan te draaien. Tussen de deksel en de lijmklemmen zullen staalprofielen komen om het opbollen van de deksel tegen te gaan. Verder is de oplossing goedkoop en eenvoudig aan te brengen.

Vastbouten deksel

De deksel wordt direct vast gebout op de bak. Bovenaan de zijkanten komt een balk met gaten evenals in de deksel. Hierdoor komen bouten die vervolgens aangedraaid worden. Hiermee kan per bout worden bepaald hoe strak deze moet worden aangedraaid. Nadeel van dit systeem zijn de gaten in de deksel. Op deze punten is de deksel namelijk verzwakt en is de kans aanwezig dat de deksel onder hoge druk scheurt. Daarnaast is het lastig om gaten in het glas te boren, dit brengt extra risico's met zich mee. Verder is het mogelijk dat de bak iets bolt, wat geen groot probleem is, behalve dat de bout dan niet meer past. Verder zijn de kosten wel laag.

Stalenklem constructie

Door twee horizontale stalen profielen verticaal met elkaar te verbinden wordt een omsloten klemconstructie gecreëerd. Hierdoor wordt de hele breedte van de deksel in één keer vastgezet. Nadeel van deze constructie is dat er onder de proefopstelling een profiel moet komen, waardoor in de bodemconstructie moet worden gezaagd. Dit kan de bodem van de bak verzwakken. Daarnaast is het lastig om alle klemmen even strak aan te draaien. De constructie is redelijk ingewikkeld en het kost tijd om de constructie gereed te maken. Daarnaast is deze oplossing niet erg goedkoop. Tegen opbollen van de deksel is dit alternatief zeer goed.

Vaste balk constructie

Door een aantal balken over de deksel te leggen en deze vast te schroeven, kan de deksel op de meest simpele wijze vastgelegd worden. Echter kunnen de balken niet bij elke proef op dezelfde

plek worden vastgeschroefd. Schroeven verzwakken het hout en hierdoor kan de deksel niet goed vastgezet worden. Het is ook erg moeilijk om de deksel waterpas te krijgen (door verschillende drukken van de balken). Verder is het niet handig om steeds in de bak te schroeven, hierdoor wordt de bak enigszins verzwakt. Qua kosten is deze oplossing wel de beste. Met resthout is dit alternatief al te realiseren.

4.2 Verdichtingmethode

Om vergelijkbare resultaten te krijgen moet elke proef een vergelijkbaar verdicht zandpakket krijgen. Hiervoor moet een verdichtingmethode ontwikkeld worden die bij elke proef hetzelfde is en dezelfde verdichtingsgraad oplevert. Uit de schaalonderzoeken van Deltares (van Beek & Knoeff, 2009) is gebleken dat voortschrijdende erosie snel optreedt bij een lage verdichting. Hierbij treedt pas in een laat stadium zand uit de wel. Hierbij is het lastig om te zien of de regionale kweldruk invloed heeft op de erosie patronen, voortschrijdende erosie en een lage verdichting is dus niet gewenst.

Zelfverdichting met water

Zand heeft in combinatie met water de eigenschap om zichzelf te verdichten. Door een volledig verzadigde situatie te creëren en vervolgens de waterstand langzaam weg te laten lopen, verdicht het zand zichzelf.

Rollen

Met een soort deegroller kan het onverzadigde zandpakket aangerold worden. Het is met een roller echter lastig om dezelfde druk uit te blijven oefenen.

Stampen/aandrukken

Met een plaat kan het onverzadigde zandpakket aangedrukt worden. Het is hierbij lastig om overal evenveel druk uit te oefenen. Door een drukmeter op de plaat te bevestigen kan er gecontroleerd worden of overal even hard verdicht is.

Trillen

Met een trilapparaat is het goed mogelijk om het zandpakket te verdichten. Echter dient hiervoor een eigengemaakte trilplaat te worden ontwikkeld, van bijvoorbeeld een schuurmachine. Het is belangrijk dat om overal even lang te trillen, anders is de verdichting niet gelijk. Trillen is alleen goed toepasbaar bij een onverzadigd zandpakket omdat onderwater trillen met een elektrische trilplaat niet gaat.

Onderwater verdichten

Eerst wordt de bak vol gezet met water. Vervolgens wordt het zandpakket aangebracht in doorlopend proces van strooien en onderwater aanstampen.

5 Keuze afweging

In het vorige hoofdstuk zijn de alternatieven beschreven. Deze alternatieven zijn in dit hoofdstuk getoetst. Als eerste is er een keuze gemaakt om de deksel vast te maken, hierna is besloten welke verdichtingstrategie geschikt is. In elk hoofdstuk zijn eerst de toetsingspunten uitgelegd waarna er getoetst is en een keuze voor een alternatief is gemaakt.

5.1 Vastmaken deksel

Een goede aansluiting van de deksel is van groot belang voor de proefopstelling. Wanneer deze niet aansluit gaat de bak lekken en dit beïnvloed de uitkomst van de proef. Daarnaast is het van belang dat de deksel niet gaat bollen. De plaat is dan weliswaar 2cm dik, maar het is nog steeds nodig om stalen profielen over de deksel heen te leggen ter preventie van dit fenomeen. Verder zijn de kosten natuurlijk een belangrijk meetpunt. Als laatste is eenvoud meegenomen, het is van groot belang dat de constructie werkt en dat er niet te veel fout kan gaan. Door een eenvoudige constructie te kiezen zullen tijdens de proeven minder risico's zijn waardoor de kans groter is dat de proef succesvol is. Er kan als score 0, 1 of 2 worden gegeven. 0 = slecht, 1 = matig, 2 = goed.

Tabel 2 Keuzematrix deksel

	Snelspanners	Lijmklemmen	Vastbouten deksel	Stalen klemconstructie	Vaste balk constructie
Waterdichtheid	0	2	2	2	1
Bolvorming	1	2	2	2	1
Kosten	0	1	1	1	2
Eenvoud	2	2	0	0	1
Totaal aantal punten:	3	7	5	5	5

De lijklemmen hebben overtuigend gewonnen. De eenvoud en doeltreffendheid van het alternatief maken het tot een goede oplossing. Dit alternatief zal eventueel nog worden geoptimaliseerd, waarna het verwerkt wordt in de definitieve proefopstelling.

5.2 Verdichtingstrategie

De gestelde alternatieven voor de verdichting bleken naar een gesprek met Vera van Beek (Piping-expert Deltares), niet meer relevant. De verdichting bleek geen probleem te gaan vormen. De mate van verdichting had weinig effect op piping, vooral omdat in de situatie tegendruk erg belangrijk is. Ze raadde aan om zoveel mogelijk te verdichten, waardoor er steeds eenzelfde verdichting te realiseren is.

Een probleem waar tot dat moment niet aan gedacht was, was lucht in het zandpakket. Lucht dat vast zou zitten in het pakket zou de kanaaltjes beïnvloeden waardoor de resultaten van de proeven niet meer kloppen.

Na gesprek met Vera vielen dus alle alternatieven af behalve het verdichten onder water. Door het verdichten onder water kan de lucht uit de poriën tijdens het aanbrengen. Vandaar dat ook deze methode is gekozen om het zandpakket aan te brengen en te verdichten.

6 Definitieve proefopstelling

Met de keuzes bekend is de definitieve proefopstelling ontworpen. Hiervoor is een ontwerp tekening gemaakt. Deze tekening bevat een aantal gedetailleerde doorsneden en aanzichten van de proefopstelling. De eerste versie van de proefopstelling (Foto 1) is vervolgens gebouwd, in hoofdstuk 7 is het bouwproces beschreven. De meetopstelling is alleen als impressie opgenomen in de tekening.

De blauwe bak aan de linkerzijde is de pompbak. Hierin zitten de pompjes die gebruikt zijn om de emmers te vullen.

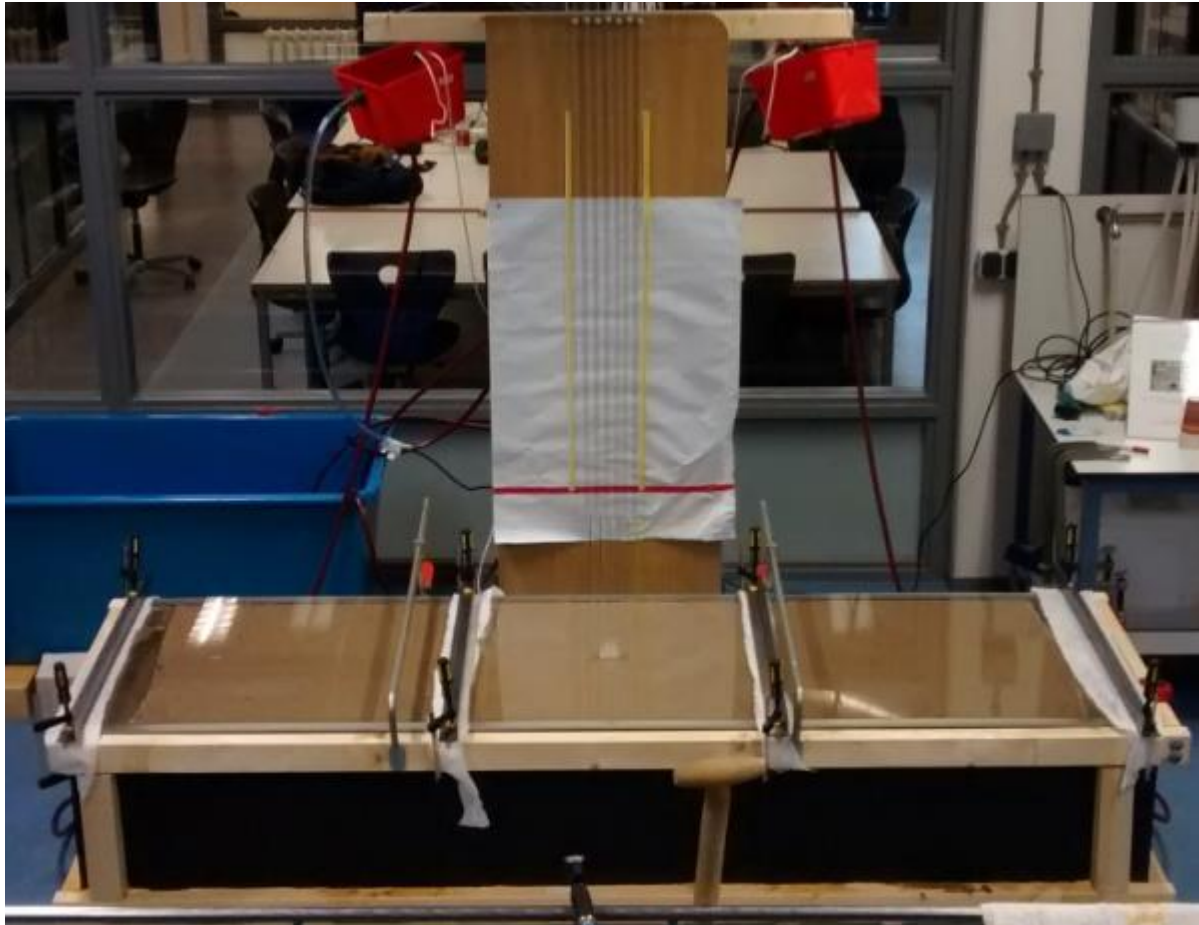


Foto 1 - Eerste versie proefopstelling

Tijdens het proeven is gebleken is dat de proefopstelling niet bestand was tegen de druk van het water en zandpakket. Daarnaast bleek de bak niet waterdicht te zijn. De proefbak is halverwege de proeven een revisie ondergaan. Hierbij is een versteviging toegevoegd van draadeinden om te voorkomen dat de bak uit kon vervormen. Tevens is de siliconen kit vervangen voor een sterkere rubberbevattende kit. De ontwerptekening in

Bijlage 2 – Ontwerptekening proefopstelling is de definitieve tekening van de uiteindelijke proefopstelling, met versteviging.

In Foto 2 is de definitieve proefopstelling met versteviging te zien. Tevens is hierin duidelijk te zien hoe de gekozen klemconstructie in zijn werk gaat. Doordat de proefopstelling op deze foto in gebruik is, zijn hier tevens de lampen en de camera te zien.



Foto 2 – Definitieve proefopstelling in werking

7 Bouw proefopstelling

Aan de hand van de ontwerp tekening is de proefopstelling gebouwd. In dit hoofdstuk is de bouw van de eerste versie van de proefopstelling worden toegelicht. Hierna is uitgelegd op welke wijze de revisie is uitgevoerd.

De materialen die gebruikt zijn voor de bouw zijn aangeschaft bij diverse bouwmarkten in de regio. Het betonplex is op maat gezaagd door de Praxis.

7.1 Eerste versie proefopstelling

Allereerst zijn in de bodemplaat de gaten voor de peilbuizen geboord en zijn de dwarsliggers op de juiste plekken vast geschroefd. Door gebruik te maken van de lijmklemmen en betonplex onderdelen konden vervolgens de langs balken langs de onderzijde vastgezet worden (Foto 3).



Foto 3 - Vastzetten balken onderzijde met betonplex onderdelen

Vervolgens zijn de zijkanten vastgelijmd en geschroefd. Ook hierbij is gebruik gemaakt van andere onderdelen om te zorgen dat alle onderdelen paste (Foto 4).



Foto 4 - Vastzetten zijkanten

De afrijbalk was lastig om op de juiste hoogte te bevestigen. Hiervoor is uiteindelijk een klosje gebruikt. Door wederom gebruik te maken van de lijmklemmen werd het mogelijk om de afrijbalk overal op dezelfde hoogte te bevestigen (Foto 5 en Foto 6).



Foto 5 - Gebruik van lijmklemmen

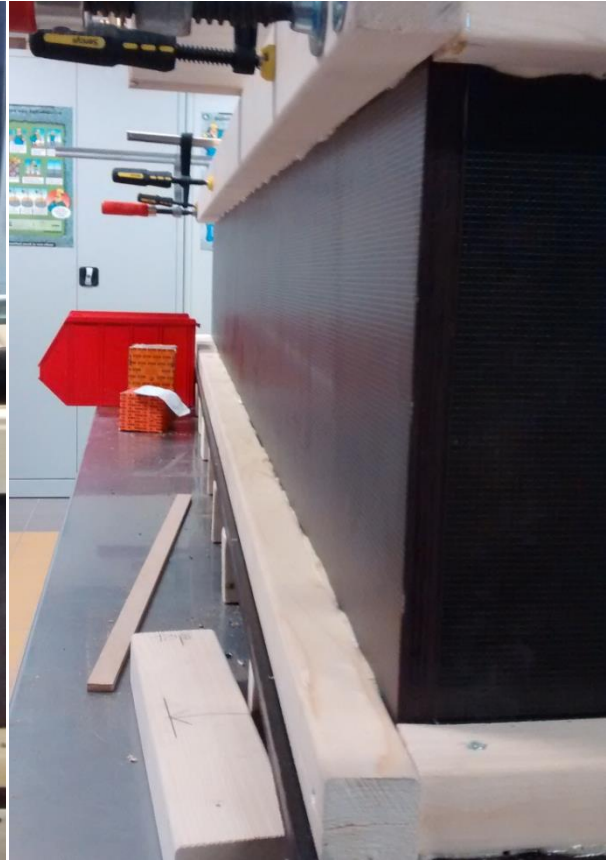


Foto 6 - Klos (links onder) voor hoogte bepaling

In de werkplaats van werktuigbouwkunde van de HAN zijn de roosters voor het geotextiel op maat gemaakt en gebogen, Foto 7. Daarnaast is de hele bak goed waterdicht gemaakt door alle naden af te kitten, de schroefgaten vol te smeren met kit en is de bovenzijde van het betonplex in gesmeerd met PVC-lijm, Foto 8. Hierna zijn de roosters geplaatst en afgekitt.

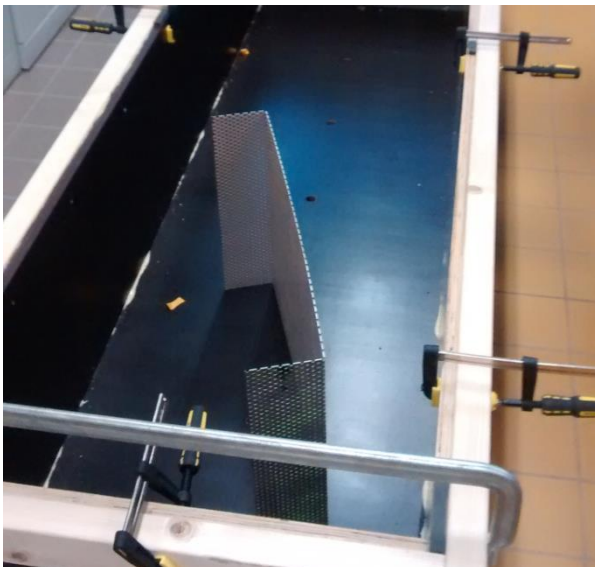


Foto 7 - Rooster voor geotextiel op maat



Foto 8 - Afkitten van naden en schroeven

In de volgende stap zijn de tankdoorvoeren geplaatst. Hierover is geotextiel geplakt. Dit is gedaan om te voorkomen dat de peilbuizen verstopt raken met zand. Om de overhoogte op het zandpakket te krijgen voor het verdichten, is vervolgens de overhoogte constructie gebouwd, Foto 9 en Foto 10.



Foto 9 - Tankdoorvoeren met geotextiel



Foto 10 - Overhoogte constructie op bak

Als laatste is er in de plexiglas deksel een gat geboord en is hierop het blokje geplakt. De binnenzijde van de wel is goed glad geschuurd om de invloed van de weerstand zo klein mogelijk te maken.

7.2 Meetopstelling

De meestopstelling met daarop de peilbuizen en daaraan de emmers, is op geïmproviseerde wijze gemaakt. Het bord is opgebouwd uit rest materialen. Het belangrijkste eisen aan het bord zijn dat het bord loodrecht komt te staan en dat deze niet bezwijkt onder het gewicht van de emmers.

7.3 Revisie proefopstelling

Nadat de proefopstelling is leeggehaald is deze naar buiten gebracht en schoon gespoten. Vervolgens is de siliconenkit verwijderd op plaatsen waar lekkage was geconstateerd. Na goed opschuren van deze plekken is nieuwe kit aangebracht.

Door middel van draadeinden door de bak heen is een trekconstructie gerealiseerd. Hierdoor kon de bak niet meer opbollen. Om de kracht die hierop kwam goed te verdelen, is een extra balk aan de zijkant gemaakt.

De pvc lijm die gebruikt is om het betonplex waterdicht te maken, bleek niet goed te werken. Hierdoor plakte de rubbers ook niet goed op het betonplex. Als oplossing is tape gebruikt. Door tape over de bovenkant te plakken, is een vlak oppervlak gecreëerd waar de rubbers goed op plakten.



Foto 11- Proefbak met trekversteving



Foto 12 - Rubbers met tape

8 Referenties

- van Beek, V., & Bezuijen, A. (2009). SBW Piping-Hervalidatie piping: HP2.2 Medium-schaalproeven (Analyserapport) Deltares.
- van Beek, V., & Knoeff, H. (2009). SBW Piping-Hervalidatie piping: B3. Analyse kleinschalige laboratorium proeven: Deltares.
- Witteveen+Bos. (2014). PvA - POV piping regionale kwelstroom, case grebbedijk, kenmerk AP539-7/14-020.541: Witteveen+Bos.

Bijlagen

Bijlage 1 - Zeefkromme Valewaard B.V.



VALEWAARD

Valewaard b.v.

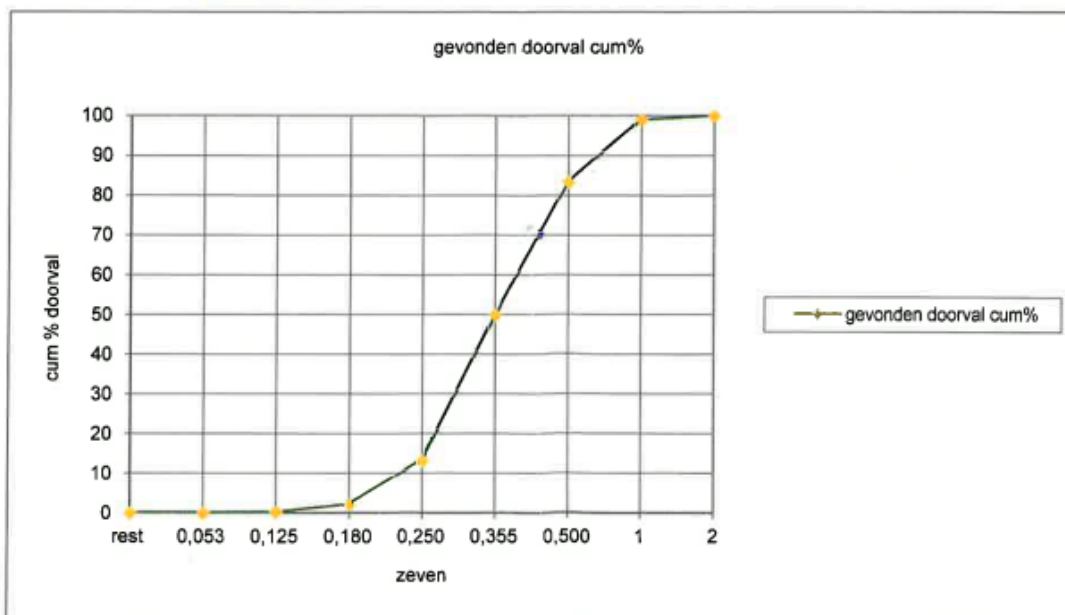
Havikerwaard 8a
6994 JD De Steeg
Kantoor : 0313-631746
Expeditie : 0313-631385
Fax : 0313-631586

zand: CZ68
datum:21-01-2015
lokatie:De Steeg

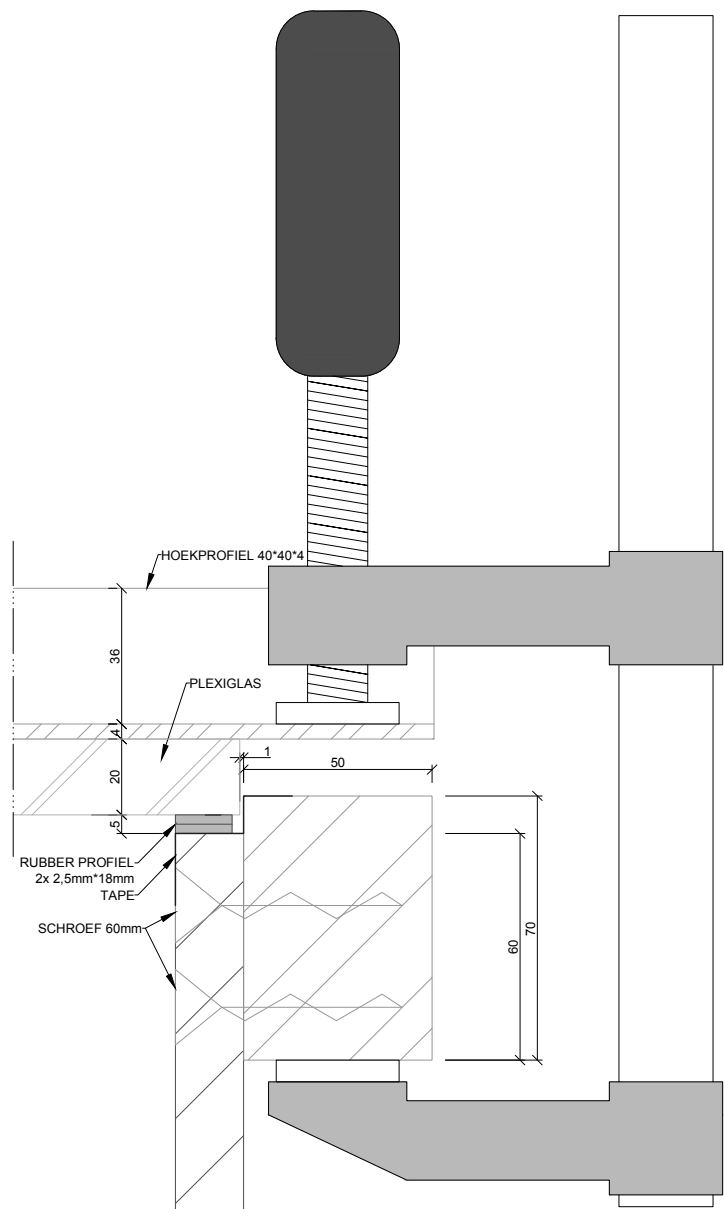
zeven	gram.	cum.gram	cum %	doorv.%
2	0	0	0,0	100,0
1	4	4	1,0	99,0
0,5	64	68	16,6	83,4
0,355	137	205	50,1	49,9
0,250	150	355	86,8	13,2
0,180	45	400	97,8	2,2
0,125	8	408	99,8	0,2
0,063	1	409	100,0	0,0
rest	0	409	100	0

gelijkm.coefficient **2**
Krom.coefficient **1**
M50 = **355**

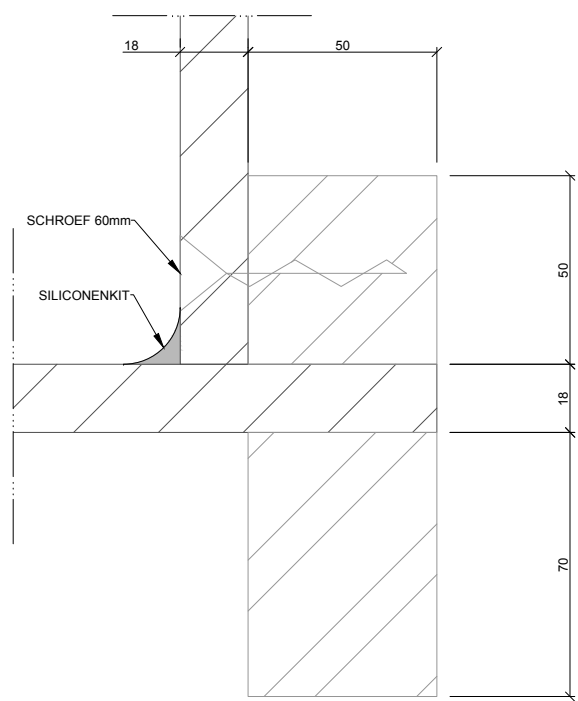
eisen: M3C: 180 < M50 < 330
M3D: 250 < M50 < 330



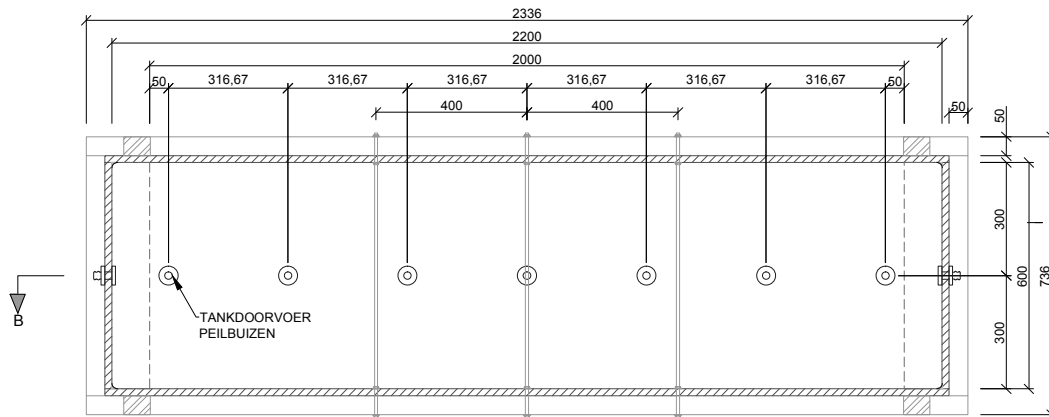
Bijlage 2 – Ontwerptekening proefopstelling



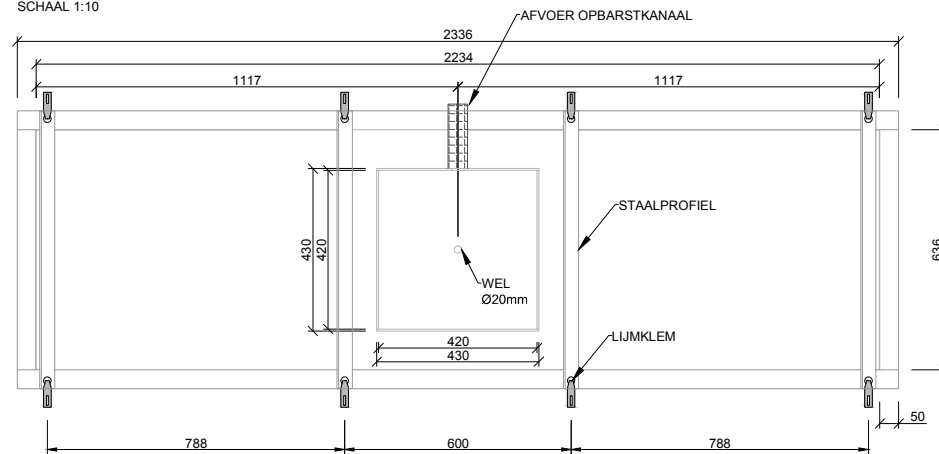
DETAIL 1: KLEMCONSTRUCTIE
LIJMKLEM TE INDICATIE
SCHAAL 1:1



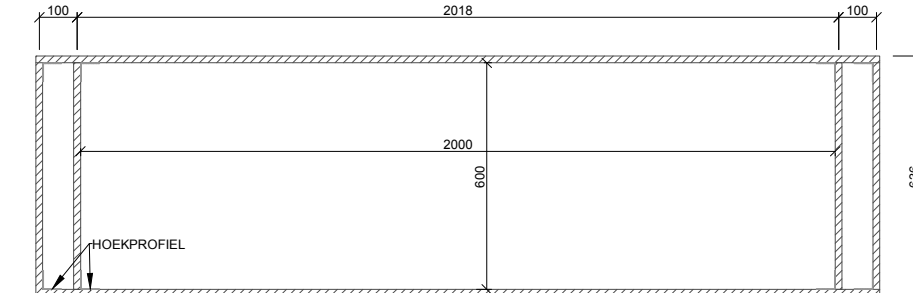
DETAIL 2 - BEVESTIGING ONDERKANT PROEFOPSTELLING
SCHAAL 1:1



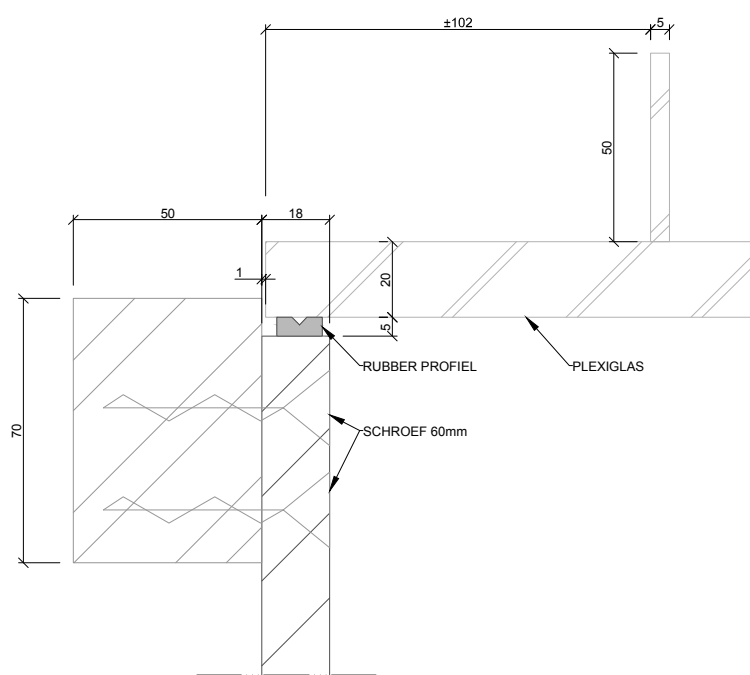
DOORSNEDE A-A
SCHAAL 1:10



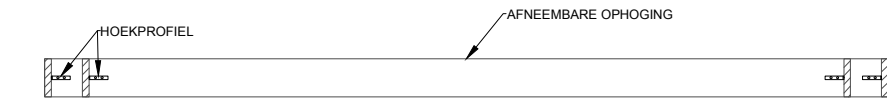
BOVENAANZICHT
SCHAAL 1:10



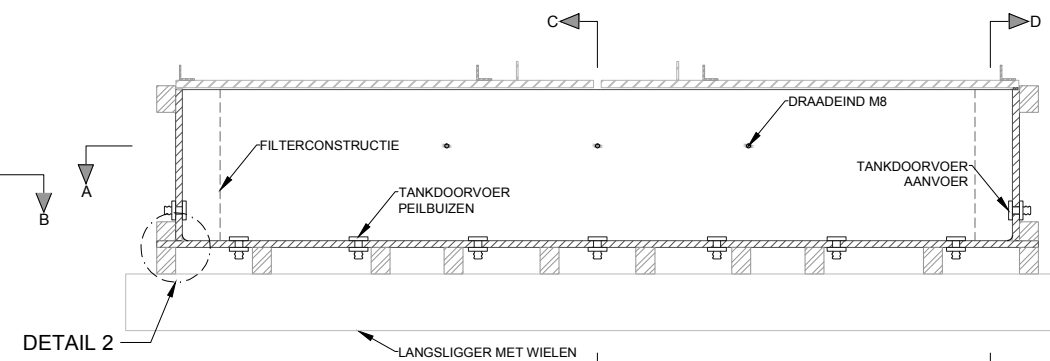
TIJDELIJKE OVERHOOGTE
SCHAAL 1:10



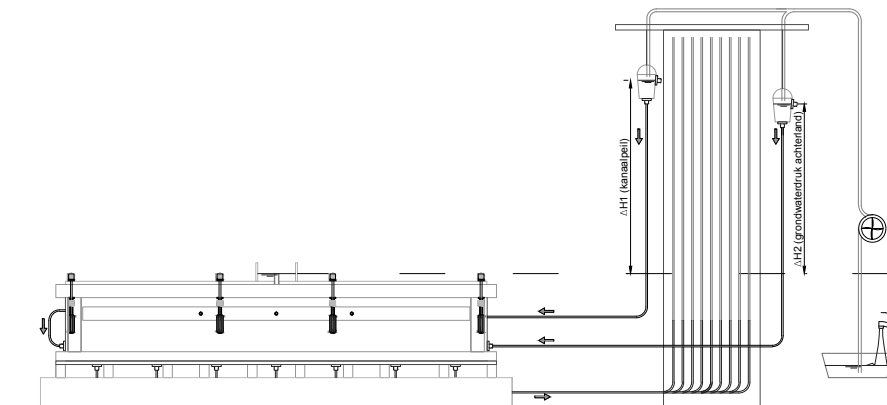
DETAIL 3: BOVENHOEK PROEFOPSTELLING
SCHAAL 1:1



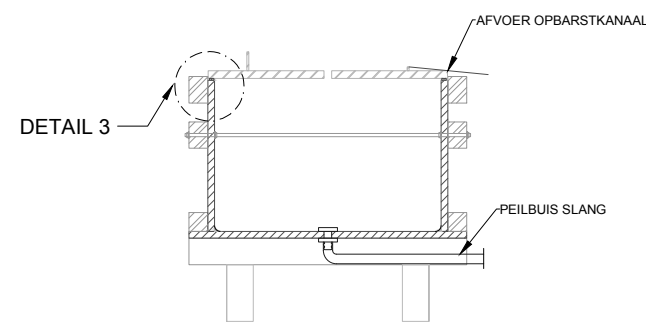
DOORSNEDE OVERHOOGTE CONSTRUCTIE
SCHAAL 1:10



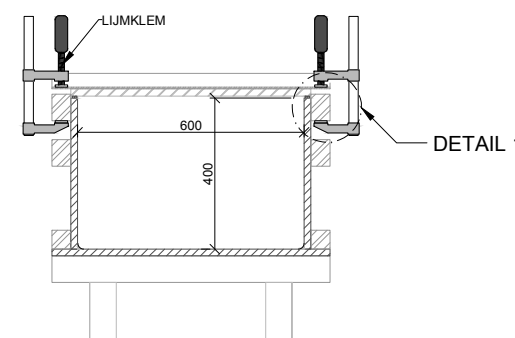
DOORSNEDE B-B
SCHAAL 1:10



SCHEMATISATIE PROEFOPSTELLING
SCHAAL 1:20



DOORSNEDE C-C
SCHAAL 1:10



DOORSNEDE D-D
SCHAAL 1:10

LEGENDA

- VURENHOUT
- BETONPLEX
- PLEXIGLAS
- STAAL
- FILTER

OPMERKINGEN

- MATEN IN MM
- ALLE NADEN DIENEN AFGEKIT TE WORDEN
- BIJ AFWIJKENDE HOUTAFMETINGEN IS BINNENMAAT PROEFOPSTELLING MAATGEVEND
- MATEN SCHROEF IS INDICATIE
- INSTRUMENTENBORD NADER TE ONTWERPEN

Witteveen + Bos Hogeschool van Arnhem en Nijmegen

Afstudeeronderzoek Positieve kwel
Proefopstelling

Ontwerptekening
Doorsnedes, details & aanzichten

Getekend	O. Kuypers	Par.	d.d. 10-03-2015
Gecontroleerd	S. vd Broek	Par.	d.d. 13-03-2015
Vrijgegeven		Par.	d.d.

Status: DEFINITIEF Revise: 2 Tek.nr: 1

Bijlage III - Proeflogboek

Positieve kwel?

Proeflogboek

Arnhem
Mei 2015

Auteurs

S.T.M. van den Broek
Peelstraat 2b
5446 PJ Wanroij
Tel 06 22342177
E-mail: stan_broek@hotmail.com
Studentnummer: 496138

O.J. Kuypers
Paul Krugerstraat 13
6861 CR Oosterbeek
Tel 06 42997600
E-mail: Ottokuypers@live.nl
Studentnummer: 500258

Begeleiders


Ir. E.H. Rob	Hogeschool van Arnhem en Nijmegen - Instituut Built Environment
Ir. C. van der Giessen	Hogeschool van Arnhem en Nijmegen - Instituut Built Environment
Ir. P.E.M. Schoonen	Witteveen + Bos

Inhoudsopgave

1	Algemene bevindingen.....	5
2	Proeven per minuut.....	11
2.1	Proef 1.1.....	11
2.2	Proef 1.2.....	12
2.3	Proef 2.1.....	13
2.4	Proef 2.2.....	14
2.5	Proef 3.1.....	15
2.6	Proef 3.2.....	17
2.7	Proef 4.1.....	18
2.8	Proef 4.2.....	19


1 Algemene bevindingen

Waarneming	Proef	Omschrijving	Conclusie/aanpassing
Kops hout splijt	Bouw	<ul style="list-style-type: none"> - Wanneer schroeven direct de kopse zijde van de vurenhouten balken worden geschroefd, splijt het hout. - Ook wanneer schroeven te ver in het hout geschroefd worden splijt het hout. 	<ul style="list-style-type: none"> - Door middel van voorboren kan worden voorkomen dat het hout splijt. - Gebruik van schroeven met ringen om de kracht op het hout meer te verdelen zodat het hout niet splijt.
Boven balk op gelijke hoogte bevestigen	Bouw	<ul style="list-style-type: none"> - Het bleek lastig om de boven balk aan beide zijden op de zelfde en juiste hoogte te bevestigen. Dit is van groot belang omdat hierover wordt afgereden. 	<ul style="list-style-type: none"> - maak gebruik van een klosje met één lengte om de hoogte te bepalen en zet tijdelijk vast met lijmklemmen.
Lekkage tankdoorvoeren (31-3)	Test fase	<ul style="list-style-type: none"> - Proefopstelling lekt bij aansluiting van peilbuis slangen. Huidige slang lijkt te stug en net niet aan te sluiten op tankdoorvoeren. - Slang sluit ook niet goed aan op peilbuisjes. - Slangklemmen de slang niet goed dichtknijpen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Gebruik van siliconen slang met kleinere diameter. Deze past goed om de peilbuisjes en om de tankdoorvoeren. Tevens kan deze wel door de slangklemmen worden dicht geknepen.
Verdichten (07-04)	Test fase	<ul style="list-style-type: none"> - Onder water verdichten lijkt goed te werken. 	<ul style="list-style-type: none"> - Stampen met een stamper is niet nodig. Door middel van belopen wordt het zandpakket goed genoeg verdicht
Overhoogte constructie (07-04)	Test fase	<ul style="list-style-type: none"> - Constructie is krom. Hierdoor kan het zandpakket niet gelijkmatig verdicht worden. of wordt het zandpakket verstoort wanneer de constructie wordt verwijderd - Overhoogte constructie lekt. 	<ul style="list-style-type: none"> - Door extra dwarsbalken toe te passen wordt de constructie verstevigd en is deze niet meer krom. - Het is niet erg dat er lekkage is doordat de constructie tijdelijk is. Wel is het mogelijk de overhoogte constructie met klemmen aan te drukken om lekken te verminderen.
Overhoogte zand (07-04)	Test fase	<ul style="list-style-type: none"> - Test met 1cm overhoogte. Dit was goed aangestampt. Afrijden was goed te doen. - Het zand was verzadigd maar niet doorweekt. Hierdoor bleek het goed af te rijden. 	<ul style="list-style-type: none"> - 1cm overhoogte is voldoende. Hoger dan 1cm is onverstandig omdat er dan te veel zand moet worden afgereden. - Waterstand dient iets onder zandpakket te staan tijdens afrijden.

Waarneming	Proef	Omschrijving	Conclusie/aanpassing
Afdichting deksel (07-04)	Test fase	- Lekkage bij de aansluiting van de deksel op de bak.	- Vervangen rubbers voor andere dikte zodat er geen lekkage meer optreedt. - Gebruik meer profielen met lijmklemmen om de deksel goed op de bak te drukken.
Uitstulping (07-04)	Test fase	- De bak staat een beetje bol door de druk van het zand en water	- Gebruik grote lijmklemmen over de breedte van de bak om te voorkomen dat de bak verder uitzet of bezwijkt.
Opleggen deksel (07-04)	Test fase	- Plexiglas buigt een beetje door wanneer deze wordt geplaatst.	- Door eerst één lange kan van de deksel goed op de rubbers te leggen en vervolgens de plaat te laten zakken op de andere zijde, zal de plaat in een keer goed aansluiten op het zandpakket
Aansluiting deksel op zandpakket (07-04)	Test fase	- Eigengewicht van de plaat drukt het zand een beetje aan, echter is het nodig om de plaat nog meer tegen het zand te drukken - Lichte lekkage bij rubbers	- Eerst worden de staalprofielen geplaatst. Achtereenvolgens worden deze vastgezet met lijmklemmen. Daarna worden de grote lijmklemmen over de bak geplaatst. Deze voorkomen dat de bak uitzet en drukken het zand van onderaf tegen de deksel aan. - Gebruik van extra klemmen en profielen
Luchtbelvorming (07-04)	Test fase	- Er bevinden zich ingesloten luchtbelletjes in het zandpakket tussen zand en deksel. - In de waterreservoirs zit veel lucht opgesloten. Deze lucht schiet door een doorgaande pipe wanneer deze tot stand komt.	- Het is onmogelijk om met deze proefopstelling te voorkomen dat er lucht tussen de deksel en het zandpakket zit. Echter is de lucht overal aanwezig en zal het dus na beide zijden gelijke invloed, zie Figuur 1. 
Aanvoer water (07-04)	Test fase	-Het aangevoerde water wordt door het t-stuk niet gelijk verdeeld	- Gebruik één pomp per emmer. De pomp dienen wel dezelfde capaciteit te hebben

Figuur 1 – Luchtbelvorming

- Gat boren in deksel boven lucht reservoir zodat lucht weg kan. Dit gat kan gedicht worden met een stop.

Waarneming	Proef	Omschrijving	Conclusie/aanpassing
Grindnest (07-04)	Test fase	- Grove zandkorrels waren bij een verhang van 25cm te zwaar om uit de wel te komen. Wel woude deze korrels in het opbarstkanaal waardoor er geen verstopping optreedt.	- Zolang de grove korrels geen verstopping veroorzaken is het niet nodig om hier iets aan te doen. In Figuur 2 is een dergelijk grindnest te zien wanneer de deksel verwijderd is. 
Lekkage proefopstelling (08-04)	Test fase	- De proefopstelling lekt. De exacte plek van lekkage is niet goed te achterhalen. Wel zijn de kopse kanten van het betonplex nat. Waarschijnlijk lekt de bak bij de naden.	-
Gaten is zandpakket (09-04)	Proef 1 sessie 1	- Tijdens het afrijden bleven soms gaten achter in het zandpakket terwijl er ruim voldoende zand aanwezig was.	- Wanneer er in een vloeiende bewegingen wordt afgereden, wordt dit voorkomen. - Zodra de balk verwijderd wordt moet dit onder een hoek geschieden.
Meetlint (09-04)	Proef 1 sessie 1	- Voor het meten van pipe lengte is het handig om meetlinten langs de bak te plaatsen	- Voordat de staalprofielen worden vastgezet dient eerst een meetlint over de bak geplaatst te worden.
Filter buigt door (09-04)	Proef 1 sessie 1	- De filter aan de rechterzijde is naar buiten verbogen. Hierdoor sluit het zand misschien minder goed aan.	- Plaatsen van een klosje in het waterreservoir om te voorkomen dat het filter verder buigt.
Lekkage proefopstelling (13-4)	Proef 1 sessie 2	De proefopstelling lekt flink aan de randen van de deksel.	- Maakt voor resultaten niet heel veel uit, daardoor nu nog geen aanpassing, maar houdt het in de gaten.
Ongelijke drukverdeling start (13-4)	Proef 1 sessie 2	Ongelijke drukverdeling bij start, langzame reactie peilbuisjes.	Uiteindelijk geen verschil in resultaten (i.v.m. Sessie1) maar probeer het gelijk te krijgen.
Tijd weergeven op foto's (13-4)	Proef 1 sessie 2	Door een bordje langs de peilbuisjes te houden met de tijd (5, 10, 15, 20 min. + voor/na ophoging) is het achteraf makkelijk te sorteren en gecontroleerd worden.	-

Figuur 2 – Grindnest in wel

Waarneming	Proef	Omschrijving	Conclusie/aanpassing
Peilbuisjes hoogtes allemaal opschrijven (13-4)	Proef 1 sessie 2	In de eerste proef waren de hoogtes van de laatste drie peilbuisjes gelijk en liep daarna lineair op. In de volgende proeven zal dit niet zo zijn.	- Schrijf elke 5 minuten, vòòr de peilbuisjes opgehoogd worden, de hoogte van alle peilbuisjes op.
Afvoerbuis rechter Emmer (13-4)	Proef 1 sessie 2	Het debiet door de afvoerbuis was zeer laag, hierdoor was het waterpeil in de emmer niet constant.	Afvoerbuis tijdens de proef vervangen en er een emmer onder gezet. Let wel op dat de slang niet in het water ligt, anders blijft er lucht opgesloten in de buis en stijgt de waterstand in de emmer weer.
Luchtbel- vorming (15-4)	Proef 2 sessie 1	Door twee maal afrijden ontstonden strepen in de bak, waardoor er veel luchtbelvorming was tijdens de proef	Rijdt maar één keer af of haal de bergjes zand meteen weg.
Lekkage (15-4)	Proef 2 sessie 1	Veel lekkage uit bak (zowel uit bak zelf als langs de deksel)	Evt. na proef 4 rubbers vervangen.
Klok (15-4)	Proef 2 sessie 1	Klok naast peilbuisjes zetten om tijd in foto weer te geven	Herhaal dit in de volgende proeven.
Rubbers laten los (16-4)	Proef 2 sessie 2	Rubbers laten los en gigantische lekkages.	Opgelost door siliconen slang langs deksel te klemmen, maar voor volgende proef nieuwe rubbers aanbrengen.
Bak zet uit (16-4)	Proef 2 sessie 2	Bak zet flink uit (circa 1 cm in midden bak) Hierdoor komen de rubbers niet meer tegen elkaar en sluit de deksel niet meer aan op zandpakket en op bak.	Bak leeghalen + schroefdraad door de bak heen halen. De lijmklemmen zouden dan overbodig worden en er zou een constante tegenkracht geboden worden.
Nog steeds lekkage (22-4)	Proef 3 sessie 1	Na revisie bak lekt de bak nog steeds, maar veel minder. Daarnaast zet de bak niet meer uit.	-
Uitvijlen hoekje wel (22-4)	Proef 3 sessie 1	Door in één zijde van de wel een hoekje (aan de buitenkant) weg te vijlen valt het water en zand hier uit de wel. Hierdoor blokkeert het zand de erosiepatronen minder.	-

Waarneming	Proef	Omschrijving	Conclusie/aanpassing
Luchtuitlaten (22-4)	Proef 3 sessie 1	Oplossing voor luchtopsluiting in de waterreservoirs.	Door eerst de binnenste staalprofielen met lijklemmen aan te draaien en daarna het waterpeil omhoog te brengen kan de lucht in de waterreservoirs wegvloeien langs de rubbers. Door meteen hierna de profielen aan te draaien ontstaat een bijna lucht vrij waterreservoir.
Tijdsduur (camera) (23-4)	Proef 3 sessie 2	De eerste 3 proeven duurde 2 uur, deze proef duurde 3 uur. Na 2,5 uur was de camera (peilbuisjes) en de timelapse camera leeg.	Houdt dit in de gaten en vervang de camera waardoor alsnog de peilbuisjes in beeld worden gebracht. De timelapse is niet anders.
Lekkage (woeling buitenkant) (23-4)	Proef 3 sessie 2	Er zat er welletje langs de deksel. Hier lekt de bak dus zodanig dat er ook een zandmeevoerende wel is ontstaan.	Nieuwe strip! (met tape dit keer) dit was de enige zijde, zonder.
Uren klok noteren (23-4)	Proef 3 sessie 2	Door dat we nu 3 uur bezig waren, en de klok alleen een uur kan noteren, is er op de foto niet te zien in welk uur de proef zich bevind	Uren bijschrijven op het moment dat de proef het tweede en derde uur in gaat.
Lekkage (28-4)	Proef 4 sessie 1	Na nieuwe strip blijkt bak nog steeds iets te lekken.	-
Slangklem (28-4)	Proef 4 sessie 1	Het debiet van pompen zijn te hoog, hierdoor moet de rechtse emmer vaak gewisseld worden	Door de slangklemmen toe te passen wordt de klem dichtgeklemd, er kan daardoor minder water door de slang waardoor het debiet daalt.

2 Proeven per minuut

2.1 Proef 1.1

Proef 1-1 Traditionele piping, regionale kweldruk afgesloten			
Tijd	Stijghoogte links	Stijghoogte rechts	Waarnemingen
[min]	[cm]	[cm]	
5	1	1	Langzame watervoerende wel
10	2	1,5	Idem
15	3	2,5	Idem
20	4	3	Idem
25	6	4	Zandtransport rond wel kleine woeling van zand in wel
30	7	4,2	Direct na verhoging kort zandtransport rond wel 1 kleine woel in wel
35	8	5	Kort zandtransport 2 kleine woelen in wel
40	9	5,2	Luchtbellen in zandpakket steeds duidelijker zichtbaar Kort zandtransport 2 kleine woelen in wel
45	10	5,5	3 woelen Kanaaltje noord tot 12 cm lang
50	11	5,8	Bijna geen zandtransport Wel woelt in geheel, tot 2.5 cm onder uitstroom Sporadisch zand op welbuisje Evenwicht na 4 min
55	12	6,3	Eerste zand uittree Nieuw kanaal noord tot 10cm Evenwicht na 3 min
60	13	6,6	Begin vorming kanaaltjes zuid Noord vrijwel geen zandtransport Evenwicht na 3 min
65	14	6,9	Zandtransport kanaaltjes noord en zuid Evenwicht na 3 min Zand woelt in wel tot 1,5cm onder uitstroom
70	15	7,3	Zandtransport noord en zuid Sporadisch uittree grote zandkorrels Woelt tot 1 cm onder uitstroom Na 4min evenwicht
75	16	7,6	Zand woelt tot uitstroom, zand blijft liggen op welbuisje Matig zandtransport Evenwicht na 4min
80	17	7,9	Zandtransport noord en zuid start en stop afwisselend Kanaaltje zuid, 17cm Luchtbellen ontsnappen uit kanaal noord

85	18	8	Constant zandtransport noord en zuid Na 2min evenwicht
90	19	7,8	Zandtransport en kanaalvorming vanaf west Kanaal zuid buigt richting west Kanaal noord geen zandtransport
95	19	7,8	Nog geen ophoging Evenwicht na 4 min
100	20	7	Veel lucht ontsnapt uit zandpakket Alleen zandtransport vanaf west, geen zandtransport vanaf noord en zuid
105	20	7	Lengte kanaal west ruim 30cm
110	20	7	Kanaal west blijft doorgroeien zonder verhoging verhang Stijghoogte is afgenomen, zandtransport blijft
115	19	6,5	Kanaal west lengte van 75cm
120	18,5	6,5	Ontstaan doorgaande pipe Door lucht in waterreservoir niet direct een grote toename in debiet in pipe, lucht ontsnapt door pipe
122	17	6,5	Vrijwel alle lucht uit waterreservoir ontsnapt Stijghoogte daalt Erosiesnelheid in pipe stijgt Meanderend erosiepatroon
123	16	6	Veel zandtransport Ruimen van pipe
124	13	6	Proef ten einde

2.2 Proef 1.2

Proef 1-2 Traditionele piping, West zijde afgesloten

Tijd [min]	Stijghoogte links [cm]	Stijghoogte rechts [cm]	Waarnemingen
0	1	4	Begin proef Lekkage langs deksel
5	2	5	Water komt uit wel
10	2	6	Alleen water
15	3	7	Alleen water
20	3	8	Alleen water
25	3,5	9	Water komt in afvoer emmer
30	4	10	Water in wel troebel
35	4	11	Eerste kleine zandtransport mini woeling in wel, west
40	5	12	Mini woeling in wel, west
45	5	13	Mini woeling in wel, west
50	5,5	14	Kort zandtransport rond wel Alle zijde woeling in wel

55	5,5	15	Kort zandtransport rond wel Alle zijde woeling in wel
60	6	16	Kort zandtransport rond wel Alle zijde woeling in wel
65	6,5	17	Kort zandtransport rond wel Alle zijde woeling in wel Kleine zanddeeltjes treden uit
70	7	18	Idem
75	7	19	Zandtransport met lucht vanaf oost Zandtransport vanaf oost /noordoost, evenwicht na 3 min.
80	7,5	20	Minimaal zandtransport
85	7,5	21	massief stroming waargenomen zandtransport vanaf overal Na 3min evenwicht
90	8	22	Sterk zandtransport oost
95		22	Nog steeds zandtransport oost
100	7	22	Nog steeds geen evenwicht Kanaal meanderend opwaarts
105	7	22	Lengte kanaal opgelopen tot 60cm
110	7	22	Ontsnappen veel lucht uit waterreservoir, langs zijkant en door kanaal Lengte kanaal 7-cm
115	7	22	Doorgaande pipe met veel verschillende kanalen Druk zakt weg, veel erosie pipe steeds breder, niet dieper
120	6,5	21	Druk zakt nog verder
125	5	10	EINDE PROEF

2.3 Proef 2.1

Proef 2.1 Traditionele piping met uitstroom

Tijd	Stijghoogte vlak voor ophogen links	Stijghoogte vlak voor ophogen rechts	Waarnemingen
[min]	[cm]	[cm]	
0	2	2	
5	2	3	Begin proef
10	2	4	-
15	2	5	-
20	2	6	-
25	2	7	-
30	2	8	Eerste zandtransport gespot Emmer links lijkt op niveau te blijven, water instroom?
35	2	9	Constant zeer lichte woeling in wel

40	2	10	Luchtontsnapping Constant woeling in wel van meerdere zijden
45	2	11	Alleen woeling
50	2	12	Klein zandtransport, diverse richtingen
55	2	13	Flinke luchtontsnapping, vervolgd door zandtransport uit meerdere richtingen
60	2	14	Kort zandtransport, na 3min evenwicht
65	2	15	Halverwege stap ontstaat zandtransport , wel voor eind evenwicht
70	2	16	Beetje zandtransport, Duidelijk klein kanaaltje zichtbaar
75	2	17	Zand uittree uit wel Duidelijk kanaal Oost zichtbaar Evenwicht op 79min
80	2	18	Alleen woeling
85	2	19	Kanaal lijkt geblokkeerd door lucht, erosie zoekt weg eromheen
90	2	20	Luchtblokkade doorbroken Zandtransport duidelijk verhoogd Evenwicht na 4min
95	2	21	Minimaal zandtransport Flinke lucht ontsnapping
100	2	22	Flink zandtransport, kanaal Oost groeit hard door
105	2	23	Geen ophoging Kanaal groeit vlechtend door
110	2	23	Geen ophoging Lengte kanaal 60cm
115	2	23	Geen ophoging Lengte kanaal ruim 75cm Vlechtend patroon door luchtbellen?
120	2	23	PIPE!
125	2	12	Druk valt snel weg, na 3 min op 12cm

2.4 Proef 2.2

Tijd	Stijghoogte vlak voor ophogen links	Stijghoogte vlak voor ophogen rechts	Waarnemingen
[min]	[cm]	[cm]	
0	2	3	Begin proef Veel lekkage uit bak langs deksel
5	2	4	-
10	2	5	Emmer links dient steeds aangevuld te worden om op peil te houden

15	2,5	6	Emmer links dient steeds aangevuld te worden om op peil te houden
20	2	7	-
25	2	8	Lichte woeling in wel
30	2	9	Lichte woeling in wel
35	2,5	10	Meer woeling
40	2,5	11	Heel klein beetje zandtransport rond wel
45	2,5	12	Zandtransport rondom wel vanaf
50	2,5	13	-
55	2,5	14	Emmer rechts blijft op hoogte (voert druppelend water af)
60	2,5	14	Zandtransport rondom wel vanaf
65	2,5	15	Kanaaltjes zichtbaar 5cmlang Emmer links drupt sneller
70	2,5	16	Zandtransport gaat verder Evenwicht na 4min
75	2,5	17	Na ophogen zandtransport weer verder Emmer links loopt over met stroompje
80	2,5	18	Nog geen ophoging want geen evenwicht Evenwicht na 3,5 min
85	2,5	18	Weinig zandtransport Eerste zanduittree
90	2,5	19	Zandtransport weer op gang Evenwicht na 4 min
95	2,5	20	Kanaaltje groeit goed door Lijkt door te groeien
100	2,5	21	Geen evenwicht, kanaal groeit door
105	2,5	21	Lengte ruim 50cm
110	2,5	21	Lengte ruim 70cm, meanderend en vlechtend patroon Veel lucht ontsnapping uit zandpakket Druk van alle peilbuisjes zakt beetje weg
115	2,5	21	Lengte ruim 85cm Van meanderend naar vlechtend benedenstreams
120	2,5	20	Doorgaande pipe ontstaan Bovenstreams deel erodeert vrij snel in een rechte pipe

2.5 Proef 3.1

Proef 3.1 Gelijke druk aan beide zijden

Tijd [min]	Stijghoogte vlak voor ophogen links [cm]	Stijghoogte vlak voor ophogen rechts [cm]	Waarnemingen
0	2	2	Begin proef Lekkage valt mee
5	3	3	Schone wel

10	4	4	Peilbuisjes doen het beter na 'knijpen' slangen Schone wel
15	5	5	Van alle kant hele lichte woeling in wel
20	6	6	Flinke woeling in wel noord
25	7	7	Eerste zandtransport west, lengte 5cm Klein beetje zandtransport oost, Evenwicht na 3 minuten
30	8	8	Zandtransport oost en west, West wel veel harder 4 min evenwicht
35	9	9	Zandtransport vanuit diverse richtingen Evenwicht na 3 minuten
40	10	10	Veel zandtransport vanuit West (15cm) Zand woelt bijna tot bovenkant wel evenwicht na 4,5 min.
45	11	11	Zowel transport vanuit west (22cm), noord (8cm), oost (17cm) debiet uit wel veel hoger dan in eerdere proeven Eerste zanduittree
50	12	12	nog geen evenwicht dus geen ophoging, na 8min evenwicht.
55	12	12	Zandtransport uit oost en west hele kleine zandkorrels blijven stromen
60	13	13	Zandtransport aan beide zijden (oost/west) Lijkt afwisselend van oost en west evenwicht te zoeken en zand te transporten
65	14	14	Geen evenwicht Kanaal oost 20cm Kanaal west 25cm
70	14	14	Geen evenwicht geen ophoging Kanalen groeien door Soort woeling onder wel/deksel
75	14	14	Veel zandtransport uit diverse kanaaltjes
80	15	15	Veel zandtransport uit diverse kanaaltjes (Oost 45cm, West 30cm) Druk rechts zakt beetje weg
85	15	15	West lijkt niet meer door te groeien Oost groeit hard door
90	15	14,4	West komt weer beetje op gang
95	15	14,4	98 -> evenwicht
100	15	14,4	Na ophogen zandtransport weer opgang, oost wel weer fanatieker dan west
105	16	15,3	Kanaal oost 76cm Kanaal west 50cm
110	17	16,3	Beide kanalen groeien hard door
115	17	16,3	Lengte oost 76cm Lengte west 55cm Druk beide zijden zakt langzaam

120	16,5	15,9	Doorgaande pipe Oost
125	16	13,9	Emmer geleege 10,5L Pipe west doorgaand Veel water stroming - weinig zand (wel grote korrels)
130	14,9	6,5	Tornado (werveling) in wel (hierdoor lijkt het alsof er weinig zand in de wel is, maar dit kan komen omdat de grote korrels niet meer circuleren)
135	6	5	Einde proef

2.6 Proef 3.2

Proef 3.2 Gelijke druk aan beide zijden

Tijd	Stijghoogte vlak voor ophogen links	Stijghoogte vlak voor ophogen rechts	Waarnemingen
[min]	[cm]	[cm]	
0	2	2	Begin proef Schone wel
5	3	3	Schone wel
10	4	4	Schone wel veel lekkage aan Zuid-zijde
15	5	5	Schone wel veel lekkage aan Zuid-zijde
20	6	6	Inimini woeling in wel
25	7	7	Woeling oost (en klein woelinkje in west) zandtransport oost (5cm) in combinatie met luchtbel
30	8	8	Even kort zandtransport in Oost
35	9	9	Zandtransport west
40	10	10	Zandtransport west (10cm) en oost (7cm) Flinke woeling in wel, lijkt vanuit Oost te komen
45	11	11	Flink zandtransport west Eerste zanduittree
50	12	12	Voornamelijk zandtransport west, oost doet vrijwel niks
55	13	13	Zandtransport vanuit Oost (8cm) en West (12cm) in west vertakkende structuur
60	14	14	Nieuw kanaal zuid - Veel zand vanuit oost en west
65	15	15	Geen evenwicht, geen ophoging van waterdruk L(W=20cm O=20cm) Doorgaand zandtransport van zowel oost als west - geen ophoging.
70	15	15	Zandtransport Oost west, Oost doet meer zijn best Woeste woeling, lijkt een gat onder wel te ontstaan (slecht te zien met deksel op de bak)

75	16	16	Flink zandtransport aan beide zijden
80	17	17	Oost groeit flink door (40cm)
85	17,5	17,5	Oost blijft groeien, west doet niks
90	17,5	17	Oost blijft groeien (50cm), west doet niks
95	17,5	17	Oost blijft groeien (53cm), west doet niks evenwicht in 97e minuut
100	17,5	16,5	-
105	18,6	17,5	-
110	18,6	17,5	Kanaal oost 60cm West doet nog steeds niks
115	18,6	17,5	-
120	18,6	17,5	Sporadisch zandtransport van west Oost is constant
125	18,6	17,5	-
130	18,6	17,5	Na verhoging begint west weer flink te eroderen Oost groeit nog steeds hard door
135	20	18,8	West knalt er in een keer doorheen wordt 10cm langer (is nu dus 30cm) Oost stagneert
140	19,6	18,7	Kanaal oost 70cm Kanaal west 40cm
145	19,6	18,7	Kanaal oost 90cm Kanaal west 50cm
150	19,6	18,5	PIPING OOST
155	19,2	12	Pipe oost wordt snel breder, komt beduidend meer zand en water uit wel, kanaal west groeit langzaam door.
160	18,9	5,5	Kanaal oost = door Kanaal west 60cm
165	18,9	5	Kanaal west = bijna 80cm kanaal oost is erodeert haast niet meer, wel lijkt schoon
170	17,8	5	
180	17	5	Kanaal west = door Druk zakt ook aan west zijde weg
190	11,2	5	Einde proef

2.7 Proef 4.1

Proef 4.1 Regionale kwel op 6 cm

Tijd	Stijghoogte vlak voor ophogen links	Stijghoogte vlak voor ophogen rechts	Waarnemingen
[min]	[cm]	[cm]	
0	2	2	Begin proef Proefbak lekt alweer beetje

5	3	3	-
10	4	4	-
15	5	5	1e mini woeling in wel
20	6	6	Geen verhoging regionale kweldruk Kleine woeling oost
25	6	7	-
30	6	8	Eerste kanaaltjes oost en noord,
35	6	9	Beetje zandtransport
40	6	10	Flink zandtransport kanaal oost (10cm)
45	6	11	Eerste zand op de deksel
50	6	12	Zandtransport oost
55	6	13	Veel luchtontsnapping, kanaal oost (15cm) Noord (5cm) druk in wel 8
60	6	14	geen ophoging, zandtransport oost blijft doorgaan (20cm)(59e minuut evenwicht)
65	6	14	
70	6	15	weinig zandtransport
75	6	16	Zandtransport komt weer op gang, kanaal vertakt weer op 20cm van wel
80	6	17	Kanaal oost zeker 25cm
85	6	18	geen ophoging, zandtransport oost blijft doorgaan (30cm)
90	6	18	Geen ophoging, evenwicht 94min
95	6	18	
100	6	19	Lengte kanaal is 50cm
105	6	18,8	Druk oost zakt klein beetje weg
110	6	18,5	
115	6	18,5	
120	6	18	Lengte kanaal is 70cm
125	6	18	
130	6	18	
135	6	18	Lengte kanaal is 90cm
140	6	18	Werveling in wel gesignaleerd.
145	6	18	PIPING! Middenstuk zeer vlechtend en veel last van opgesloten lucht, weerstand duurt even voordat deze minder word.
150	6	13,5	Einde proef

2.8 Proef 4.2

Proef 4.2 Regionale kwel op 6 cm

Tijd	Stijghoogte vlak voor ophogen links	Stijghoogte vlak voor ophogen rechts	Waarnemingen
------	----------------------------------------------	-----------------------------------------------	--------------

[min]	[cm]	[cm]	
0	2	2	Begin proef
5	3	3	-
10	4	4	-
15	5	5	Zeer kleine woeling in wel
20	6	6	Kweldruk op hoogte (6cm) dus geen ophoging meer aan kweldrukszijde Klein beetje zandtransport vanaf noord
25	6	7	Woelinkjes in de wel
30	6	8	Kanaaltje west en kanaaltje zuid
35	6	9	Zandtransport rondom wel vanaf alle zijden
40	6	10	Zandtransport voornamelijk vanaf zuid
45	6	11	Geen beweging gezien
50	6	12	Zandtransport vanaf Oost en deels vanaf zuid Zanduitree
55	6	13	Zandtransport vanaf oost Evenwicht na 3 min
60	6	14	Zandtransport vanaf oost Evenwicht na 3 min
65	6	15	Zandtransport vanaf oost Evenwicht na 3 min
70	6	16	Zandtransport vanaf oost, lengte +- 20cm Evenwicht na 4 min
75	6	17	Oost zandtransport
80	6	18	
85	6	19	Geen ophoging, zandtransport oost nog bezig Evenwicht na 4 min
90	6	19	
95	6,2	20	Geen ophoging, zandtransport oost nog bezig Lengte kanaal Oost 30cm
100	6,4	19,5	Lengte kanaal Oost 35cm
105	6,4	19,5	Kanaal oost groeit langzaam
110	6,5	19,5	lengte kanaal Oost 40cm
115	6,5	19,5	Druk zakt langzaam aan oostzijde
120	6,5	19	Lengte kanaal oost 55cm
125	6,5	19	
130	6,5	18,8	Lengte kanaal oost 65cm
135	6,5	18,5	Lengte kanaal oost 75cm
140	6,5	18,4	Lengte kanaal oost 85cm
145	6,5	18,3	Piping oost!
150	6,5	18,3	Druk valt niet direct weg Ruimen lijkt wat langzaam te gaan
155	5	12	EINDE PROEF

