
Afstudeerrapport

Een innovatieve methode tegen piping onder dijken



Afstudeeronderzoek bij
Gebroeders De Koning

Remco Vermaas

	Naam	Email	
Auteur Student nummer	Remco Vermaas 0824433	0824433@hr.nl Per 07-2016: remco.vermaas@gmail.com	Afstudeer student
Bedrijfsbegeleider	Leo van Dijk	leo.v.dijk@gebrdekoning.nl	Adjunct directeur bij Gebr. De Koning
Docentbegeleider	Peter Blommaart	p.j.l.blommaart@hr.nl	Docent
Docentbegeleider 2	William Kuppen	w.j.j.m.kuppen@hr.nl	Docent
2e lezer	Leo van Gelder	l.a.van.gelder@hr.nl	Docent

Datum	14-6-2016
Versie	1.0

Afstuderen

CIVAFS40 Afstuderen (2015-2016)

Organisatie:	Civiele Techniek, Hogeschool Rotterdam
Auteur:	Remco Vermaas
Student nummer:	0824433
Vak code:	CIVAFS40
Docentbegeleiders:	P. Blommaart W. Kuppen
2 ^e docent lezer	L. van Gelder
Bedrijfsbegeleider:	L. van Dijk
Versie:	Versie 1.0
Plaats:	Papendrecht
Datum:	14-6-2016
Inleverdatum:	14-6-2016

Voorwoord

Lectori salutem,

Voor u ligt het verslag van het afstudeeronderzoek naar “Een innovatieve methode tegen Piping onder dijken”. Dit is het onderzoek van Remco Vermaas en heeft plaatsgevonden bij, en voor, Gebroeders de Koning, te Papendrecht. Dit onderzoek vindt plaats in de laatste 2 kwartalen van de 4-jarige opleiding Civiele Techniek aan de Hogeschool Rotterdam.

Gebroeders de Koning wil haar disciplines verleggen van damwandspecialist bij een dijkversterking, naar een gewilde onderaannemer die ook het ontwerp voor dijkversterkingen kan maken. Dit onderzoek komt voort uit de wens als bedrijf meer affiniteit met dijkversterking te ontwikkelen.

Binnen het bedrijf heb ik veel samengewerkt met Leo van Dijk, tevens mijn afstudeerbegeleider. Tijdens mijn sollicitatie gesprek heb ik samen met Leo van Dijk de ruwe kaders van mijn onderzoek vastgesteld. Ik kon mij goed vinden in de wensen van het bedrijf. Tijdens mijn afstuderen heb ik meerdere collega's geraadpleegd en ik wil hen allen bedanken voor de tijd en moeite die zij voor mij genomen hebben. Daarnaast is het niet meer dan gepast enkele daarvan in het bijzonder te bedanken, te weten:

Leo van Dijk, die ik wil bedanken voor het mogelijk maken van mijn wensen en ideeën, scherpe feedback en goede begeleiding, maar ook de vrijheid die ik kreeg over de invulling van mijn onderzoek.

Jörn Lankhorst, die zich altijd openstelde voor discussie, relevante informatie deelde, en mij een dag heeft meegenomen naar de cursusdag “Piping voor beginners” van de opleiding dijktechniek van de stichting wateropleidingen.

Andre Schijvenaars en Martijn de Koning, die mij hielpen bij het maken van een testopstelling, en mij begeleidde wanneer ik hulp nodig had. Daarnaast hebben zij zich in mijn onderwerp verdiept, om een zo goed mogelijke testopstelling te maken.

Ik wil ook mijn begeleider vanuit de Hogeschool Rotterdam bedanken, Peter Blommaart. Ik heb zelf gevraagd of dhr. Blommaart mijn begeleider wilde zijn vanwege zijn kennis van het onderwerp piping. Dankzij zijn begeleiding en kennis van het onderwerp heb ik de mogelijkheid gehad om de kwaliteit van het onderzoek naar een hoger niveau te brengen.

De heer Blommaart heeft mij in contact gebracht met kennisinstituut Deltares. Bij Deltares wordt onderzoek gedaan naar onder andere piping onder dijken. De heer Blommaart heeft mij via zijn netwerk in contact gebracht met mevrouw Vera van Beek. Haar wil ik bedanken voor de tijd en moeite die zij genomen heeft om mij te helpen met vragen over een testopstelling.

Verder rest mij nog mijn familie, vrienden en vriendin te bedanken voor hun steun maar ook de afleiding die zij boden. Ik merkte dat zij begaan waren met mijn studievoortgang en boden mij de middelen om mijn studie te volgen.

Remco Vermaas, 13-6-2016 te Papendrecht.

Inhoudsopgave

Voorwoord	iii
Inhoudsopgave	iv
Samenvatting (NL)	vii
Samenvatting (EN) - Summary	ix
Begrippenlijst.....	x
1. Inleiding	1
1.1 Hoofdaanleiding.	2
1.2 Secundaire aanleiding.	2
1.3 Doelstelling.....	2
1.4 Onderzoeksvraag.....	2
1.5 Deelvragen.....	2
1.6 Innovatieve ideeën.....	3
2. Oriëntatie op piping onder dijken	4
2.1 Piping uitgelegd	4
2.1.1. Definitie	4
2.1.2. Invloed van kwelwater op piping	4
2.1.3. Twee soorten dijken	4
2.1.4. Ontwikkelen van de Pipe	5
2.1.5. Open pipe	6
2.1.6. Falen van de waterkering	6
2.2. Toetsmethode om de kans op piping te voorspellen.....	6
2.3 Bestaande technieken tegen piping	8
2.3.1. Binnendijkse piping berm	8
2.3.2. Kleiïngraving in het voorland.....	8
2.3.3. Kwelscherm	9
2.4. Innovatieve technieken tegen piping.....	9
2.4.1.Drainage technieken tegen piping.	9
2.4.2. Piping stoppen met geotextiel	10
2.5 Marktkansen.....	11
2.5.1. Opbouw van de markt en toetsinstrumentarium	11
2.5.2. Kansen per watersysteem	12
2.5.3. Indicatie marktkans	12
2.5.4. Concurrentie.....	13

3.	Piping voorkomen	14
3.1.	Ideeën strategie.....	14
3.1.1.	Nieuwe methode door parameters te beïnvloeden	15
3.1.2.	D70-Percentielwaarde.....	15
3.1.3.	Kwelweglengte	16
3.1.4.	Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag	16
3.2.	Wegvallen van piping gevoeligheid.....	17
3.3	Ideeën piping maatregels.....	18
3.4	Keuzematrix.....	24
3.5	Uitkomst keuzematrix	24
4.	Piping maatregel testen	25
4.1.	Testopstelling	25
4.2.	Zand.....	27
4.3.	Testopstelling, test 1; Grofzandfilter.....	29
4.3.1.	Methode omschrijving	30
4.3.2.	Mengsel	31
4.3.3	Verstopt raken van het filter uitsluiten.	32
4.4	Testopstelling, test 2; minerale wol	32
5.	Piping maatregel grofzandfilter.....	33
5.1.	Testen met grofzandfilter.....	33
5.1.1	Uitkomst.	33
5.1.2.	Waarnemingen	34
5.1.2.1.	Filterwerking.....	34
5.1.2.2.	Pipe ontwikkeling langs het filter	35
5.1.2.3.	Toename kwelweglengte stopt de pipe	36
5.1.2.4.	Geen zichtbaar verschil tussen verschillende mengsels	36
5.1.3.	Conclusie piping maatregel grofzandfilter	37
6.	Piping maatregel zandremmend minerale wol	38
6.1.	Test:	38
6.1.1.	Uitkomst	39
6.1.2.	Waarnemingen	39
6.1.2.1.	Minerale wol is slecht waterdoorlatend	39
6.1.2.2.	Pipe groeide onder het filter door	40
6.1.2.3.	Pipe groeide langs het filter	40

6.1.2.4 Er ontwikkelden 3 pipe	40
6.1.2.5. Er ontstond een kleine ontgroning	41
6.2. Conclusie piping maatregel zandremmend minerale wol.....	41
7. Conclusie	42
8. Aanbeveling.....	43
9. Bibliografie	45
10. Bijlagen	47

Samenvatting (NL)

Nederland is een land dat grotendeels uit polders bestaat, deze polders zijn omringd door dijken die het water tegenhouden. Nederlanders staan bekend om hun kennis als het gaat om overstromingsproblematiek. Toch is er de laatste jaren een ontwikkeling gaande dat wij ons hebben verkeken op het gevaar van piping (terug schrijdende erosie) onder dijken.

De Waterkeringbeheerders in Nederland zijn anno 2016 druk op zoek naar het ei van Columbus; een oplossing tegen piping die voorziet in alle tekortkomingen van het huidige arsenaal aan maatregelen.

Met dit afstudeeronderzoek is de kans aangegrepen om een oplossing uit te werken tegen piping. Er is een traject doorlopen waarbij vanuit bedrijfsbelang naar een oplossing is gezocht. Om een beter beeld te krijgen van het faalmechanisme piping is er een concrete omschrijving gemaakt, gebaseerd op onderzoek en technische rapporten van voornamelijk kennisinstituten, zodat voor elke betrokkene en lezer van dit onderzoek duidelijk is wat piping is en hoe piping in dit onderzoek wordt benaderd.

Er zijn op dit moment een aantal oplossingen voor piping. Omdat het onderwerp hoog op de agenda staat zijn er ook veel ontwikkelingen gaande. Wat betreft het voorkomen van piping is een opsomming gemaakt van de populairste methoden tegen piping. Door deze verkenning is een goed beeld gecreëerd van de beschikbare oplossingen, nu en in de toekomst.

Om te kijken of er nog steeds vraag is naar oplossingen is eerst het aanbod dijken bekeken dat versterkt moet worden. Het blijkt dat met het nieuwe toetsinstrumentarium dat vanaf 2017 in gebruik genomen wordt een groot areaal dijken wordt afgekeurd sterk zal toenemen.

Het uiteindelijke doel van dit onderzoek is een nieuwe maatregel aan te bieden om piping te stoppen. Hierbij moet opgemerkt worden dat het een maatregel ná aanbrengen betreft. Hoewel de aanbrengmethode minstens zo belangrijk is, is er voor gekozen dit buiten beschouwing te laten. Dit was essentieel om het onderzoek binnen de beschikbare tijd af te ronden. Het ontbreken van een aanbrengmethode is ondervangen door op basis van de expertise van het bedrijf een inschatting te maken of een maatregel uitvoerbaar is.

Een methode tegen piping is eerst bedacht door middel van een ideeën strategie. Er zijn in totaal 9 ideeën bedacht. Sommige ideeën hebben overlap met bestaande innovaties en andere zijn helemaal nieuw. Met een keuzematrix is bepaald welke 2 ideeën het meest kansrijk zijn. Deze ideeën zijn verder uitgewerkt en getest.

De testen vonden plaats in een speciaal gemaakte testopstelling, die gebaseerd is op een bestaande testopstelling en theoretisch bepaalde testopstellingen. Het maken van de testopstelling was complexer dan ingeschat, maar het is gelukt piping op te laten treden. Volgens formules is de testopstelling geverifieerd, dit houdt in dat alle fenomenen optraden zoals verwacht en dat de berekeningen overeenkwamen met de praktijk.

Uit de testen is gebleken dat de oplossing grofzandfilter werkt om piping tegen te gaan. Het is aan de betrokken partijen om te beslissen of de ideeën genoeg kans van slagen hebben om verder te ontwikkelen. Als daar sprake van is, is het aan de partijen om onderzoek voort te zetten naar de betrouwbaarheid en naar een methode om de oplossing in de praktijk toe te passen.

De oplossing minerale wol bleek niet te werken. De voorspelling was dat het water zou doorlaten, maar zand niet. Het bleek dat het wol te fijn was en water ook slecht doorlaat.

Samenvatting (EN) - Summary

The Netherlands is a country that is covered in reclaimed land, these areas of reclaimed land are surrounded by dikes and levees that hold back the water. The Dutch are famous for their knowledge and experience about water problems. Despite that, they have underestimated the dangers of piping (backward erosion) under their dikes and levees.

The flood defence managers in the Netherlands are, anno 2016, trying to find the golden ticket. They are looking for a solution to prevent piping, which both excludes piping as a failure mechanism and appeals to the shortcoming of the current solutions.

This graduation research is used to find a new solution for the piping problem. It was approached by going through different stages in which both the piping problem and the companies' interest were kept central. To get a better understanding of the failure mechanism, the phenomenon is described according to literature from technical and research institutes. This was done to make sure that anyone who reads this research has a good understanding of piping, and how the problem is approached.

There are a couple of solutions for when piping is present, because of the urgency to find new solutions there are lots of new ideas in the making. A summary is made of all current and upcoming solutions against piping. This provides an overall picture of all solutions.

To assess whether or not a new solution is still much needed, the current and future demand for a new solution is researched. It turns out that new rules, that will apply to dikes and levees as of 2017, will increase the number of dikes and levees rejected because of piping. This will improve the amount of work needed to be done.

The primary goal of this research is to provide a new solution to stop piping. It should be noted that application of the solution is outside the scope of this research. This has been done to make the research possible in the given timeframe. The application of a new solution or method is covered by falling back on the expertise of the company. If the company claims they can apply a new solution/method, this is assumed true.

Through an idea-strategy new solutions have been conceived. A total of 9 ideas have come up. These ideas are sometimes based on existing solutions and some of them are completely new. A selection was made by using a selection matrix, out of which the 2 best ideas were derived. These ideas were panned out even further and are tested in a test set-up.

Testing took place in a set-up specifically made for the purpose of testing piping. It turned out that making a test set-up was more complex than was figured beforehand. But eventually producing a pipe according to the phenomena was achieved. The set-up was verified by comparing calculations with the results of the test set-up and all stages of piping were observed.

The results of the tests were that the coarse sand filter works against piping. Concerned parties should now decide if they find the solutions can succeed. If so, further research should be done to verify the reliability and to find a way to apply the solution in full scale.

The rockwool solution was proven to be inefficient against piping. It did not work as predicted.

Begrippenlijst

Alle definities die hier gegeven worden, gelden als de leidende definities in dit rapport. De definities die hier gegeven worden hebben geen afkomst en zijn omschreven zoals de schrijver de woorden hanteert. Bronnen zijn vermeld als er een definitie gegeven wordt uit een bron.

<i>Afsluitend pakket</i>	Een pakket dat een grondlaag afsluit. Vaak een slecht doorlatend pakket bovenop een watervoerend pakket.
<i>Cohesief</i>	De bindende kracht die een los materiaal samenhangend maakt.
<i>d10</i>	Korrel diameter waarbij 10% van het materiaal een kleinere diameter heeft en 90% een grotere diameter.
<i>d50</i>	Korrel diameter waarbij 50% van het materiaal een kleinere diameter heeft en 50% een grotere diameter.
<i>d60</i>	Korrel diameter waarbij 40% van het materiaal een kleinere diameter heeft en 60% een grotere diameter.
<i>d70</i>	Korrel diameter waarbij 30% van het materiaal een kleinere diameter heeft en 70% een grotere diameter.
<i>Dijk</i>	Waterkering opgebouwd uit cohesief materiaal, denk aan klei of veen.
<i>Drainage</i>	Het mogelijk maken van waterafvoer door een beter permeabel medium dan er aanwezig is.
<i>Geperforeerd</i>	Opening door een cohesief grondpakket
<i>Heave</i>	Verticaal uittredend water brengt losse korrels in beweging
<i>holoceen</i>	Onderdeel van de periode het Kwartair. Het bestrijkt de periode van 10.000 jaar geleden tot nu. In deze periode is laag Nederland (o.a. de Randstad) gevormd. Gevonden op http://www.digischool.nl/ak/onderbouw-vmbo/materiaal/begrip/b_stedge.htm
<i>Homogeen</i>	Een medium waarin geen onderlinge verschillen voorkomen en bij steekproeven altijd dezelfde waarden laat zien.
<i>Intredepunt</i>	De plek waar een volkomen/open pipe eindigd, dit is vaak in het voorland/rivierbed.
<i>Korrel</i>	Een materiaal dat in de grond voorkomt en niet cohesief is. Vaak zand of grind.
<i>Kruin</i>	bovenkant van een dijk, daar waar de dijk het hoogst is.
<i>Kwel</i>	Water dat door waterstandverschil over een waterkering naar het lager gelegen gebied sijpelt en daar op het maaiveld uittreedt.
<i>Kwelweg</i>	De afstand die een pipe minimaal moet overbruggen om tot een open pipe te ontwikkelen.
<i>Meanderen</i>	'slingeren' van een piping kanaal. Door erosie aan de wanden van een kanaal kan het profiel sterk veranderen.
<i>Morfologisch ontwerp</i>	Ontwerptechniek om verschillende ideeën te koppelen. Er wordt multidimensionaal gewerkt om verschillende aspecten van het probleem tegen alle andere aspecten te toetsen.

<i>Opbarstkanaal</i>	Een kanaal door een slecht waterdoorlatend pakket. Vaak het gevolg van opdrijven van een slecht waterdoorlatend pakket of als gevolg van penetratie van de slechtwaterdoorlatende laag.
<i>Opdrijving</i>	Negatieve balans van de grondspanning en de optredende waterdruk tegen een slecht permeabel pakket, zorgen dat het slecht permeabel pakket gaat drijven.
<i>Open pipe</i>	Een pipe onder een waterkering door die een in en uittredepunt heeft, waardoor er vrij water van punt A naar punt B kan stromen
<i>Permeabel</i>	Zegt iets over doorlatendheid, hoe beter permeabel, hoe beter water ergens door heen kan.
<i>Piping</i>	Piping, ook wel onderloopsheid, is een verzamelbegrip voor erosie onder een waterkering door kwelstroming, waardoor materiaal uitspoelt en een holte onder de waterkering kan ontstaan.
<i>Potentiaal</i>	Hoogte vanaf een referentiepunt
<i>Ruimen</i>	Eroderen van materiaal in een volkomen pipe
<i>Sellmeijer</i>	De grondlegger van de huidige pipingregel. In dit rapport wordt verwezen naar de rekenmethode en niet de persoon.
<i>Slecht doorlatend pakket</i>	Grondpakket dat slecht water doorlaat. ($k < 10.000$ milliDarcy). Denk aan klei en veen.
<i>suffosie</i>	Een grof korrelskelet blijft in stand maar fijne korrels stromen door dit grove korrelskelet. De sterkte wordt niet minder door het uitstromen.
<i>Suffusie</i>	Een grof korrelskelet blijft in stand maar fijne korrels stromen door dit grove korrelskelet. De sterkte neemt af door het uitstromen.
<i>Teen</i>	Het punt waar het talud van de dijk overgaat in het maaiveld.
<i>Testopstelling</i>	De afstudeerder heeft een testopstelling gemaakt. Deze opstelling wordt gebruikt om kunstmatig piping te laten optreden en heeft als doel maatregelen te testen.
<i>Uittredepunt</i>	De plek waar een pipe mogelijk kan ontstaan, en waar het geërodeerde materiaal wordt afgezet.
<i>Uniformiteit</i>	De spreiding van het korrelspectrum. Een uniform mengsel heeft korrels van veelal dezelfde grootte, een slecht uniform mengsel heeft een grote spreiding van korrelgroottes. Wordt berekend door d_{60}/d_{10} .
<i>Verhang</i>	Afgelegde afstand gedeeld door het verschil in hoogte
<i>Verval</i>	Hoogteverschil
<i>Volkomen pipe</i>	Een pipe onder een waterkering door die een in en uittredepunt heeft, waardoor er vrij water van punt A naar punt B kan stromen
<i>Watervoerend pakket</i>	Een grondlaag, vaak zand of grind, dat goede permeabiliteit heeft.
<i>Wel</i>	Plek waar grondwater (aangevoerd uit de ondergrond) uittreed

1. Inleiding

Piping is een actueel probleem in Nederland. Door de toename van waterafvoer vanuit het achterland, de stijgende zeespiegel en ontwikkeling van kennis is de waterproblematiek beter in beeld dan ooit. Piping is een van de faalmechanismen waardoor een waterkering kan bezwijken. Het kan optreden bij waterkeringen zoals dijken, sluizen en vele andere waterkerende constructies. Voor dit onderzoek is de scope gericht op piping onder dijken.

Piping is het uitspoelen van zand onder een waterkering. Dit gebeurt doordat er een hogere waterstand aan één kant van de waterkering optreedt waardoor kwelstroom ontstaat. De kwelstroom kan binnendijs uittreden, dit kan door een uittredekanaal door een cohesief pakket heen, dit gebeurt wanneer het pakket geperforeerd is. Het kan ook ontstaan aan het einde van een cohesief (dijk)lichaam dat op een korrelig pakket ligt, waarbij het uittredepunt aan de teen van de dijk ligt. Beide dijksoorten komen in Nederland voor. Het water dat vanuit de poriën van het korrelig materiaal uitspoelt kan de spanning die de korrel op zijn plek houdt overtreffen en de korrel in het water laten zweven. Door de kwelstroom kan een korrel dan meegenomen worden en ergens anders worden afgezet. Als dit proces lang genoeg duurt, kan het zand over grote lengtes in beweging komen en uitspoelen, dan is er sprake van een pipe. Hoewel een pipe zich meanderend verlengt, groeit hij altijd in de richting van de hogere waterstand (tegen de stroom in), waardoor een pipe tot in de rivier kan groeien. Als er sprake is van een open (pipe) verbinding tussen de polder en het rivierwater kunnen er grotere stroomsnelheden in de pipe optreden die de pipe ruimen, en daarmee de dijk ondermijnen. Door dit effect kan een dijk doorbreken omdat het cohesieve lichaam de ontgronding niet meer kan overspannen en het dijklichaam minder stabiel wordt. Er is vaak sprake van hoog water wanneer er piping optreedt. Gecombineerd met verlaagde stabiliteit versterkt dit faalmechanisme zichzelf door de omstandigheden die er voor nodig zijn.

Een dijk is dus piping gevoelig als het is opgebouwd uit een cohesief materiaal, maar op een korrelig materiaal ligt. Denk hierbij aan een kleidijk op zand. Dit onderzoek gaat over dijken in Nederland omdat in Nederland grote stukken dijk zijn met de juiste omstandigheden voor piping.

Daarnaast is voor Nederlandse omstandigheden gekozen om het onderzoek af te bakenen en omdat het bedrijf actief is in Nederland.

Dit onderzoek richt zich op het vinden van een oplossing tegen piping. Er is een sterke vraag vanuit de waterkeringbeheerders om betere maatregelen tegen piping toe te kunnen passen. Er is nu en in de toekomst een grote opgave als het gaat om dijkversterkingen tegen piping. Het streven was een oplossing te vinden die kan concurreren met huidige methoden en methoden die momenteel in ontwikkeling zijn.

1.1 Hoofdaanleiding.

Er zijn twee hoofdaanleidingen voor dit onderzoek.

Het bedrijf is bezig haar disciplines te verbreden, er is aanleiding voor dit onderzoek omdat zij meer kennis wil vergaren omtrent het onderwerp piping en de kansen voor nieuwe innovatieve oplossingen wil verkennen. Het bedrijf heeft de ambitie zich meer te profileren als een ambitieus, innovatief en meedenkend partner.

De student heeft aangegeven graag met innovatie en vernieuwing bezig te zijn. Dit is cruciaal voor een bedrijf in de huidige markt en de student wilt hier graag aan meewerken. Voor de motivatie, inzet en kwaliteit van het onderzoek speelt het mee dat de student met een onderwerp bezig is dat hij boeiend en interessant vindt, het bedrijf heeft samen met de student een passend onderwerp gevonden.

1.2 Secundaire aanleiding.

Er is vanuit de waterkeringbeheerders een sterke vraag naar nieuwe methoden tegen piping. Dit werd duidelijk tijdens de afstudeerperiode en verlegde de scope van het onderzoek enigszins. Er is gedurende de afstudeerperiode, naar aanleiding van dit onderzoek en op advies van de student en stagebegeleider, antwoord gegeven op de marktvraag voor een nieuwe methode tegen piping. Deze spin-off van het afstudeeronderzoek werkte motiverend en bood ook nieuwe kansen.

1.3 Doelstelling

De doelstelling was een nieuwe methode tegen piping te bedenken waarvan aangetoond is dat het werkt. Deze methode moet voor het bedrijf interessant zijn om verder te ontwikkelen, het toekomstige doel is deze methode toe te passen in dijkverzwaringen en moet daarom kunnen concurreren met huidige methoden. Gedurende de afstudeerperiode werden de onderzochte innovaties ook ingestuurd naar een marktvraag van de POV Piping naar een nieuwe oplossing tegen piping. Dit is een Project Overstijgende Verkenning van het hoogwaterbeschermingsprogramma, met als doel innovaties meer perspectief te bieden en ontwikkelaars te motiveren verder te ontwikkelen. Een neven doelstelling werd om ideeën die ingezonden zijn verder te concretiseren en te onderbouwen, dit had een grote overlap met het afstuderen.

1.4 Onderzoeksvraag

De onderzoeksvraag is vanuit de aanleidingen opgesteld;

“Wat voor nieuwe en innovatieve maatregel kan aantoonbaar werkend ingezet worden om piping onder dijken tegen te gaan, waarbij de methode concurrerend is op de huidige en toekomstige markt.”

1.5 Deelvragen

1. Wat gebeurt er bij piping onder dijken?
2. Welke maatregelen bestaan er tegen piping?
 - a. bestaand
 - b. Innovatief/nieuw
3. Waar moet een oplossing en/of maatregel aan voldoen om piping tegen te gaan?

4. Hoe wordt aangetoond dat een maatregel werkt?
5. Is er omtrent piping een vraag uit de markt naar nieuwe maatregelen?
6. Is er perspectief dat een nieuwe maatregel in de toekomst toegepast kan worden?

1.6 Innovatieve ideeën

Voor het bedenken van nieuwe innovatieve methodes zijn drie methoden gebruikt.

Met enkele collega's is een brainstormsessie geweest. Hierbij werd alle inbreng vastgelegd om op een later moment alle ideeën te analyseren.

De huidige toetsmethode, waarin het minimaal verval wordt berekend waarbij piping zal optreden, is ontleed om zo per meespelende factor te kijken wat de mogelijkheden zijn.

Er zijn veel ideeën omschreven, door middel van een morfologische ontwerp methode zijn er 9 ideeën geformuleerd. Door de beperkte tijd is er voor gekozen de afweging niet technisch te onderbouwen of alle ideeën verder uit te werken, maar is de afweging vooral gebaseerd op inschattingen en haalbaarheid en is de keuze gemaakt in de idee fase.

Om inzichtelijk te krijgen wat voor nieuwe innovatieve maatregel toegepast kan worden is er een oriëntatie en analyse rapport geschreven waarin piping, technieken tegen piping (zowel bestaande als innovatieve methodes) en de markt wordt beschreven. Dit rapport dient als onderbouwing en om op terug te vallen tijdens het lezen van dit rapport. Zie bijlage 1.

2. Oriëntatie op piping onder dijken

In dit hoofdstuk wordt onderzocht wat piping is en hoe het voorkomen wordt.

Er zijn 2 hoofdaspecten, er wordt ingegaan op het proces van piping, wat voor omstandigheden er voor nodig zijn, hoe een dijk getoetst wordt op piping. Daarnaast wordt er ingegaan op de huidige maatregelen, de innovatieve maatregelen die anno 2016 spelen en de kansen voor toepassing van een nieuwe maatregel in de toekomst. Dit hoofdstuk is gebaseerd op het oriëntatie en analyse verslag, dat als onderdeel van dit onderzoek is gemaakt. Zie hiervoor bijlage 1.

2.1 Piping uitgelegd

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het proces van piping. Er wordt antwoord gegeven op de deelvraag wat er gebeurt bij piping onder dijken.

2.1.1. Definitie

Vanuit verschillende marktpartijen, die verschillende definities geven voor piping, is een algemene definitie voor piping opgesteld, die geldt als leidende definitie binnen dit onderzoeksrapport.

“Piping, ook wel onderloopsheid, is een verzamelbegrip voor erosie onder een waterkering door kwelstroming, waardoor materiaal uitspoelt en een holte onder de waterkering kan ontstaan.”

2.1.2. Invloed van kwelwater op piping

In Nederland zijn veel dijken op een zandpakket gebouwd (DINO loket, 2016). Hierdoor is het mogelijk dat er kwelstroom ontstaat. Kwelstroom is het sijpelen van water door de ondergrond (dus door de waterkering) naar het binnendijkse. Hoe beter de permeabiliteit van de ondergrond, hoe meer kwelwater de polder instroomt.

2.1.3. Twee soorten dijken

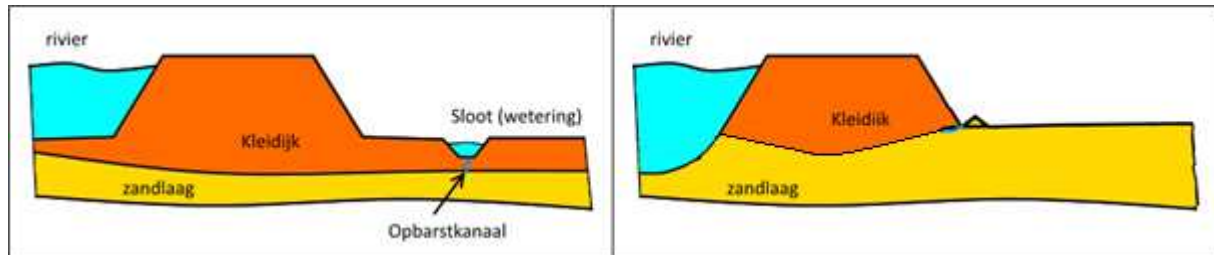
Piping kan optreden als kwelwater genoeg snelheid heeft om materiaal mee te voeren. Dit gebeurt doordat de kwelstroom geconcentreerd uitstroomt

Een geconcentreerde uitstroom is mogelijk als binnendijks de watervoerende laag is afgedekt met een slecht waterdoorlatende laag. Wanneer er sprake is van piping is de bovenlaag geperforeerd doordat het is gaan ‘drijven’ op het grondwater, maar een boomwortel of kabel kan ook de oorzaak zijn (Deltares, 2012). Van belang is dat er een open verbinding is tussen de watervoerende laag en het maaiveld. Uit waarnemingen blijkt dat vooral in een slootbodem, waar de afdekkende laag dunner is, wellen ontstaan (Deltares, 2015).

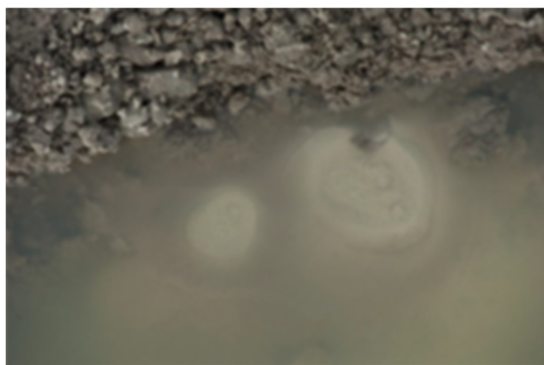
Bij kwelwater door een opbarstkanaal is er sprake van een wel. Een wel is de plek waar het water uitstroomt vanuit het opbarstkanaal naar het maaiveld. Indien water dat vanuit het zandpakket de wel instroomt en voldoende snelheid heeft om zand mee te voeren is er sprake van een zandmeevoerende wel. Vaak zijn die te herkennen door de zandspoortjes (lijken op wolkjes) in het slootwater. Als er een zandmeevoerende wel op het land is, is vaak een klein zandkratertje te zien (Deltares, 2015)(figuur 2 & 3).

Piping kan ook optreden bij cohesieve dijklichamen gelegen op zand, waarbij het zand achter de dijk direct op het maaiveld ligt. Dit soort dijk is kenmerkend voor het bovenrivierengebied (ing. H.T.J. de Bruijn, 2013). Vaak ligt het maaiveld binnendijks boven de gemiddelde rivierwaterstand. Bij hoog

water is er dan het risico dat er kwelwater bij de teen van de dijk uitstroomt. Ondanks dat er geen geconcentreerde uitstroom is, is ook hier het risico op uitspoelen van zand. Dit gebeurt waar de zandlaag voor het eerst tot het maaiveld rijkt (Deltares, 2015).



Figuur 1: 2 soorten dijk (dwarsdoorsnede) waarbij piping kan optreden.



Figuur 2: Kleine zandwolkjes in het water bij de IJkdijkproef. Bron: Invalid source specified.



Figuur 3: Een pipe is aan het ontstaan, zand stroomt via het uittredepunt naar het oppervlak. Bron: Invalid source specified.

2.1.4. Ontwikkelen van de Pipe

Bij beide gevallen van het ontstaan van piping zal een pipe zich ontwikkelen door de optredende hoge waterstand. Door het toegenomen verval over de kering zal er een waterstroom, kwel, via het uittredepunt van de pipe blijven stromen. Als de stroming van het water sterk genoeg is kan bij het uittreden van water uit het zandpakket, in de pipe, een zandkorrel in beweging komen ('t Hart, de Bruijn, & de Vries, 2015). De spanning als gevolg van het uittredend water overtreft dan de spanning die de korrel op zijn plek houdt.



Figuur 4: De korrel komt los door water dat uit de poriën de pipe instroomt. De korrel stroomt via de pipe weg naar het uittredepunt.

Bij een pipe is tijdens het ontwikkelen de watersnelheid nog niet groot genoeg om de bodem te eroderen. Er zal een klein, erg ondiep (vaak enkele millimeters (ing. H.T.J. de Bruijn, 2013)) kanaaltje vormen onder de dijk door.

2.1.5. Open pipe

Als een pipe zich ontwikkeld heeft tot aan de rivierzijde van de dijk zal zich daar een intredepunt vormen. Een intredepunt is een opening van de pipe door de rivierbodem heen naar het open water. Als dit gebeurt, spreekt men van een open pipe. In een open pipe hoeft water niet meer vanuit de poriën van het zandpakket de pipe in te stromen, maar wordt het water direct uit de rivier aangevoerd. Hierdoor ontstaan grotere stroomsnelheden die de pipe verder eroderen ('t Hart, de Bruijn, & de Vries, 2015).



Figuur 5: In de open pipe ontwikkelen zich grotere stroomsnelheden waardoor zand uit de pipe in beweging komt.

2.1.6. Falen van de waterkering

De stroomsnelheden als gevolg van het stromende water versneld het erosieproces en zorgt voor uitschuring van de zijkanten en de bodem van de pipe. De holle ruimte onder de dijk wordt hierdoor groter. Uit onderzoek en waarnemingen blijkt dat een pipe zich vanaf de rivierzijde vergroot en dit ruimen gaat verder in de richting van het achterland ('t Hart, de Bruijn, & de Vries, 2015). Vaak is dit een welles/niettes situatie waarbij de pipe zich constant verstopt en weer open groeit (Deltares, 2012).

Het valt niet te zeggen wanneer een dijk bezwijkt ten gevolge van piping (Deltares, 2012). Het ruimen van de pipe maakt de holte groter en daarmee de overspanning van het cohesieve dijklichaam. Op enig moment kan een dijk de holte niet meer overspannen en bezwijkt de dijk. Dit kan zijn door een verzakking of verschuiving (Deltares, 2012).

Hoe snel een pipe ruimt is niet goed in beeld. Bij proeven aan de IJkdijk duurde het een week voordat de dijk bezweek door piping (STOWA, 2010).

2.2. Toetsmethode om de kans op piping te voorspellen

Om een voorstel tegen piping te valideren wordt in dit hoofdstuk de toetsmethode tegen het licht gehouden. Het inzichtelijk maken van de berekeningsmethoden geeft antwoord op de deelvraag hoe piping benaderd wordt bij beoordeling van de dijk. Dit dient later als tool om oplossingen beter te kunnen beoordelen en een scherpere conclusie te vormen.

Om te bepalen of er sprake is van piping wordt de aangepaste methode van Sellmeijer gebruikt (Deltares, 2012). Het rekenmodel van Sellmeijer gaat uit van een krachtenevenwicht op een korrel op de bodem van een bestaand erosiekanaal. Om een korrel in beweging te krijgen wordt uitgegaan van

een minimaal benodigde stroomsnelheid. De stroomsnelheid is een direct gevolg van het verhang over de waterkering. In de aangepaste methode van Sellmeijer wordt een potentiaal berekend dat nodig is om de korrel in beweging te krijgen (Deltares, 2012).

De beoordeling met behulp van Sellmeijer gebeurt in een aantal stappen. Allereerst wordt de dijk geschematiseerd. De grondparameters en het profiel van de dijk wordt bepaald. Als er sprake is van een afsluitend pakket binnendijs wordt er eerst gecontroleerd op opdrijven. Er wordt een waterspanning bepaald aan de hand van de hydraulische randvoorwaarden. Het gewicht van het afsluitend pakket wordt bepaald. Er wordt een opbarst veiligheidsfactor in verwerkt om te bepalen of de waterspanning groter is dan de grondspanning van het afsluitend pakket (Deltares, 2012).

Met de aangepaste methode van Sellmeijer, zoals omschreven in het Technisch rapport zandmeevoerende wellen (TAW, 1999), wordt bepaald wat het kritieke verval is. Wanneer dit kritieke verval lager is dan het verval bij maatgevende omstandigheden wordt een dijk piping gevoelig geacht.

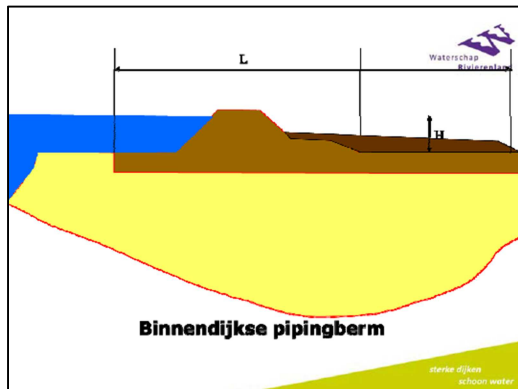
Na het beoordelen volgens Sellmeijer is goed inzichtelijk of een dijk piping gevoelig is. Om een nadere, meer nauwkeurige beschouwing van de situatie te maken, wordt er met grondwaterstromingsmodellen een betere benadering van de ondergrond gebruikt in het bepalen van het kritisch verval. Dit kan wenselijk zijn omdat Sellmeijer van een homogeen pakket uitgaat, terwijl in de praktijk vaak sprake is van heterogeniteit. Door een rekenprogramma te gebruiken wordt de kans op fouten door complexe berekeningen met heterogeen zand minder (Engering & Et al, 2007).

2.3 Bestaande technieken tegen piping

In dit hoofdstuk worden de meest gebruikte oplossingen tegen piping benoemd. Dit geeft inzicht in het huidige aanbod oplossingen en geeft antwoord op de deelvraag welke methoden er gebruikt worden om piping te voorkomen.

2.3.1. Binnendijkse piping berm

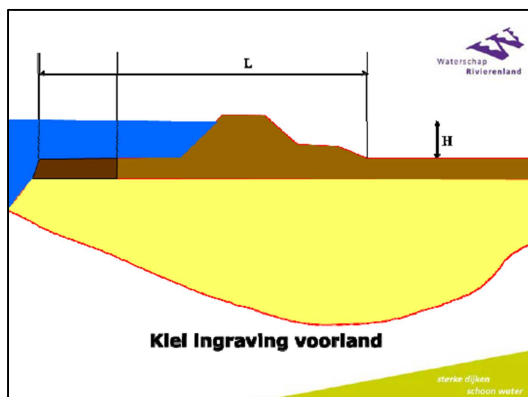
Een binnendijkse piping berm is een laag grond die binnendijs aangebracht wordt vanaf de teen richting het binnenland. Het doel van een piping berm is het gewicht van de deklaag vergroten. Hierdoor zal de deklaag niet gaan opdrijven als gevolg van hoog water en kan er geen opbarstkanaal ontstaan.



Figuur 6: Schematisatie van een binnendijkse piping berm. (Berg, 2013)

2.3.2. Kleiïngraving in het voorland

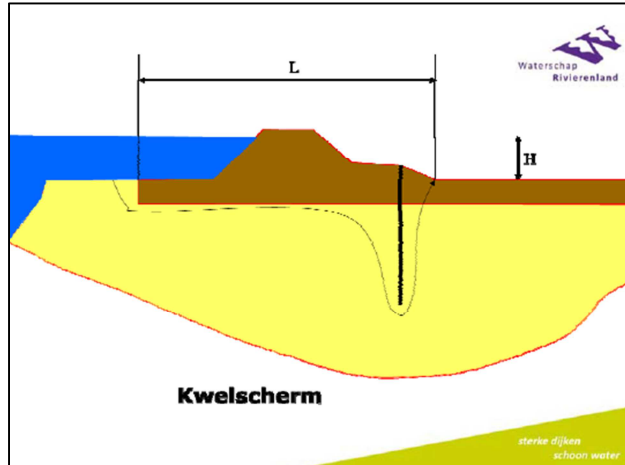
Kleiïngraving berust ten delen op hetzelfde principe als een piping berm. Toch is deze methode minder vaak toegepast. Ten eerste door optredende erosie, of dure erosieberscherming omdat het klei (een bepaalde tijd van het jaar) in een watergang ligt, of delen van de tijd door het water bereikt kan worden. Ten tweede is een klei ingraving in het voorland vaak uitvoeringstechnisch niet mogelijk door water. Het wordt bijvoorbeeld toegepast in het winterbed (uiterwaarden) van een rivier, die grote delen van de tijd toegankelijk is. Een klei ingraving in het voorland biedt wel uitkomst bij binnendijkse bebouwing omdat het geen consequenties heeft voor deze bebouwing.



Figuur 7: Schematisatie van een kleiïngraving. (Berg, 2013)

2.3.3. Kwelscherm

Een kwelscherm is een constructie die niet waterdoorlatend is. Dit is vaak een stalen, kunststof of betonnen damwand. Een kwelscherm wordt toegepast om de kwelweglengte te vergroten. De kwelweg loopt dan onder het kwelscherm door waardoor het verhang over de kering toeneemt.



Figuur 8: Voorbeeld van een kwelscherm. (Berg, 2013)

De in dit hoofdstuk genoemde oplossingen zijn de meest gebruikte oplossingen. Voor andere oplossingen die in de praktijk zelden gebruikt worden wordt verwezen naar bijlage 1.

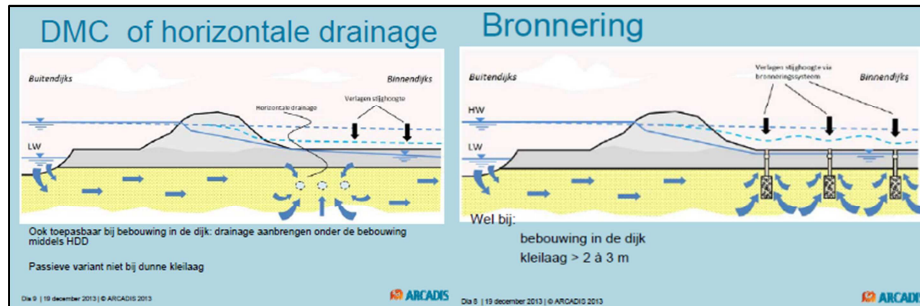
2.4. Innovatieve technieken tegen piping

In dit hoofdstuk worden een aantal innovatieve oplossingen tegen piping benoemd. Dit geeft inzicht in de oplossingen die hoogstwaarschijnlijk in de toekomst toegepast worden. De innovatieve methoden zijn herkenbaar doordat ze small-scale en lokaal het probleem oplossen. Er verandert niets aan het dijkprofiel en de oplossingen zijn zeer dynamisch, dat wil zeggen dat het geen grote/zware constructies zijn.

2.4.1. Drainage technieken tegen piping.

Een methode om de waterdruk onder het water afsluitende grondpakket te verminderen is drainage toepassen. Door drainage toe te passen wordt voorkomen dat een water afsluitende laag kan opbarsten.

De meest voorkomende technieken die berusten op draineren van de ondergrond zijn grindkoffers, de DMC horizontale drainage buizen en de waterontspanners. Bij DMC horizontale drainage buizen worden buizen horizontaal geboord. (Niemeijer, 2013) Bij waterontspanners worden gaten geboord tot aan het watervoerend pakket die gevuld worden met zand/grind. Hierdoor kan water uitstromen op het maaiveld en neemt de druk onder het afsluitend pakket af (M.S.Luijendijk, Deltares, 2011). Een vergelijkbaar principe zijn de grindkoffers die in de Spijkse dijk zijn toegepast (H. Senhorst, RWS-GPO, N.B.).

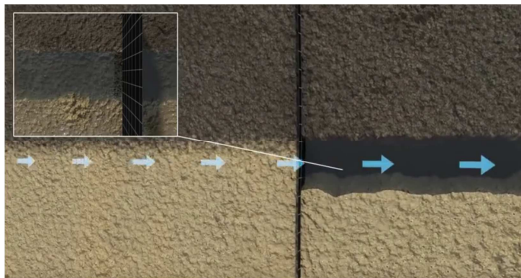


Figuur 9: Impressietekening van drainage technieken. In dit geval de DMC horizontale drainage buizen (Niemeijer, 2013).

2.4.2. Piping stoppen met geotextiel

Er is veel ontwikkeling gaande op het gebied van geotextiel toepassen tegen piping. Het geotextiel wordt gebruikt als een zandfilter dat het transport van water doorlaat maar zandtransport stopt (Waterschap rivierenland, 2014).

Geotextiel gebruiken als zandfilter is voor het eerst getest in 2012 bij het IJkdijk project. In 2015 werd geotextiel voor het eerst in een dijkversterkingsproject gebruikt (Quist, 2015). Verticaal zanddicht geotextiel wordt aangebracht met een freesmachine die het doek achter zich uitvouwt. Zo ontstaat er een aaneengesloten pipingscherm (Van Den Herik, 2015).



Figuur 10: (Waterschap rivierenland, 2014)

2.5 Marktkansen

Onderdeel van de afstudeervraag is een voorspelling doen over de marktkans van een nieuw innovatief idee tegen piping. Een voorwaarde voor het ontwikkelen van een innovatie is dat er perspectief is in de toekomst. In dit hoofdstuk wordt de toekomstige markt omschreven waarbinnen een product tegen piping te gebruiken is, en hoezeer er vraag is naar zo'n product. Er wordt antwoord gegeven of er vraag is naar en perspectief is voor een nieuwe methode tegen piping.

2.5.1. Opbouw van de markt en toetsinstrumentarium

Werk aan waterkeringen in Nederland gebeurt altijd in opdracht van waterschappen en in sommige gevallen van Rijkswaterstaat. In Nederland is het bij de wet vastgelegd dat een waterkering moet voldoen aan de geldende wetten op waterveiligheid. Door deze vorm van beheer is de markt zeer ongevoelig voor vraag en aanbod of een financiële crisis. In het Deltaprogramma van Nederland is onder andere vastgelegd hoe Nederland nu en in de toekomst beschermd moet worden tegen hoogwater. Andere onderwerpen van het deltaprogramma, zoals schoon water, vallen buiten de scope van dit onderzoek.

Het toetsen van waterkeringen geschied door landelijke toetsrondes. In het verleden is elke 5 jaar verslag aan de minister gedaan over de staat van alle waterkeringen in Nederland. De laatste toetsronde, die nu nog als leidend geldt, liep van 2006-2011. In navolging van deze (derde) toetsronde, is de verlengde derde toetsronde uitgevoerd die in 2013 is afgerond. Deze verlengde toetsronde was een aanvulling op de derde toetsronde en daarin zijn waterkeringen beoordeeld die in de derde toetsronde nog geen oordeel hadden.

Door een wetswijziging in 2013 is de periode van de landelijke rapportage van 5 naar 12 jaar opgeschroefd. Dit houdt in dat de volgende rapportage in 2011 begint en in 2023 eindigt. Om budget te krijgen voor een dijkversterking moet een waterschap haar project aanmelden bij het hoogwater beschermingsprogramma. Dit kan vanaf het beschikbaar komen van het Wettelijk Toets Instrumentarium van de vierde toetsronde, in 2017.

De resultaten van de derde toetsronde en verlengde derde toetsronde zijn bekend en verspreid. Uit deze resultaten blijkt al dat er veel waterkeringen afgekeurd zijn. Afkeur op piping en heave beslaat volgens het projectenboek 2016 177km (Programmadirectie Hoogwaterbescherming, 2015).

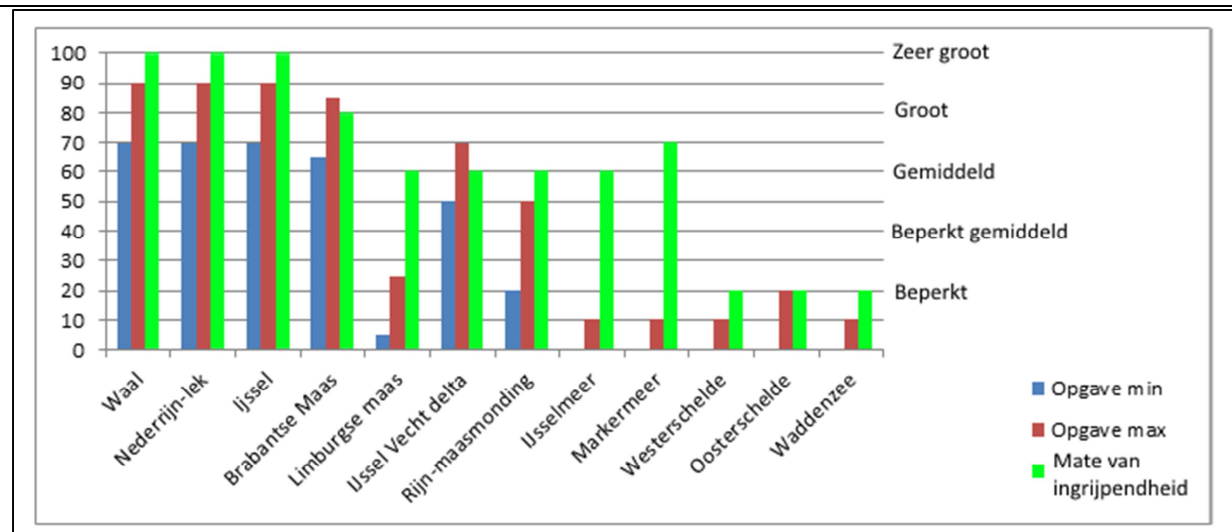
De verwachting is dat in de toekomst dit getal alleen maar toeneemt. De hydraulische randvoorwaarden voor het toetsen van keringen zijn onderhevig aan verandering door nieuwe bevindingen (Maaskant, Knoeff, & et al, 2016). In 2017 wordt met de nieuwe hydraulische randvoorwaarden gerekend en zal het aantal keringen afgekeurd op piping toenemen.

In de nieuwe toetsronde, waarin het toetsen vanaf 2017 van start gaat, zijn de rekenregels voor piping aangescherpt. In combinatie met de vernieuwde hydraulische randvoorwaarden is de verwachting dat de afgekeurde dijk lengte aan keringen afgekeurd op piping een veelvoud van de huidige lengte zal worden (Maaskant, Knoeff, & et al, 2016).

De veranderingen in de uitgangspunten en rekenmethoden heeft als gevolg dat er meer waterkeringen afgekeurd worden. In de Consequentie Analyse Nieuwe Normering & WBI2017 (Maaskant, Knoeff, & et al, 2016) zijn ruwe inschattingen gedaan over de gevolgen van het nieuwe wettelijk beoordeling instrumentarium.

2.5.2. Kansen per watersysteem

Voor het faalmechanisme piping wordt een toename aan afgekeurde dijken verwacht. In de consequentie analyse wordt onderscheid gemaakt tussen verschillende watersystemen in Nederland. De verwachte opgave wordt uitgedrukt in de verwachte afstand afgekeurde dijk tegenover de totale dijk lengte en de mate van afkeur, te interpreteren als het verschil tussen de situatie en de norm.



Figuur 11: Percentage van de waterkering dat niet voldoet en het verschil tussen de huidige en wenselijke situatie.

Bovenstaande gegevens zijn gebaseerd op de inschattingen uit het rapport "Landelijk beeld verschilanalyse hydraulische belastingen WBI2017" (Botterhuis, Stijnen, & Et al., 2016) en "Consequentieanalyse Nieuwe Normering & WBI2017" (Maaskant, Knoeff, & et al, 2016) Voor een nadere omschrijving is per watersysteem een kleine omschrijving van de opgave gemaakt. Zie hiervoor bijlage 2.

2.5.3. Indicatie marktkans

Op dit moment is er 177 kilometer dijk aangemeld bij het Hoogwaterbeschermingsprogramma die zijn afgekeurd op piping. Hoewel bovenstaande grafiek geen indicatie geeft over de verwachte afstanden die in de toekomst afgekeurd worden zijn er wel indicaties. Zo spreekt Rijkswaterstaat over een dijktraject van 940 kilometer dat is onderzocht, waarvan 540 kilometer is afgekeurd (Rijkswaterstaat, 2016). En presenteerde Waterschap Rivierenland in augustus 2013 al een onderzoek waarbij 267 van de 450 kilometer dijk werd afgekeurd op piping (van den Dikkenberg, 2013). Er komt dus een veelvoud van de huidige 177km aangemelde dijktraject in de toekomst waar piping opgelost moet worden.

Als gevolg van de aanwezige opgave, die in de toekomst toeneemt, is er een grote vraag naar betere methoden om piping te voorkomen. Er zijn budgetten vrijgemaakt voor het door ontwikkelen van innovatieve ideeën.

Vanuit deze opgave is de POV Piping ontstaan en loopt er een tender voor "Nieuwe oplossingen voor piping bij dijken" (POV Piping, 2016) (Rijkswaterstaat en de Nederlandse Waterschappen, 2016).

Er is een uitvraag gedaan naar nieuwe oplossingen voor piping bij dijken. Als bedrijf is een inschrijving een meer concrete stap om budget te krijgen voor het verder ontwikkelen van een innovatie. Verder

is de tender een zijstap vanuit de POV Piping, waarbij zelfs verwezen wordt naar de website van de POV Piping voor een nadere omschrijving.

De POV Piping is een Project Overstijgende Verkenning waarin een innovatie challenge is opgezet voor bedrijven, particulieren en studenten. De vraag vanuit de POV Piping is innovatieve oplossingen te bedenken voor 4 onderdelen van het piping probleem.

- Voorspellen van piping
- Betere karakterisering van wellen en pipes
- Oplossen van piping
- Servicen van een dijkvak

Van de website van de POV Piping. (POV Piping, 2016)

Er is vanuit de staat, het Deltaprogramma en het Hoogwaterbeschermingsprogramma voldoende vraag naar innovatie. Dit onderzoek streeft naar een nieuwe methode tegen piping en speelt dus in op het “oplossen van piping”. Door een methode te bedenken en te testen wordt ingespeeld op de vraag naar de markt en de tekortkoming van het huidige arsenaal aan maatregelen tegen piping.

Dat er voldoende wil is om te investeren in nieuwe maatregelen, werd in 2014 duidelijk toen er een budget vrijkwam van 3 miljoen om destijds ingediende ideeën verder te ontwikkelen (Redactie Bouwend Nederland, 2014).

2.5.4. Concurrentie

Uit gepubliceerde kansenscans van de POV Piping uit 2015 blijkt dat na een eerste scan 26 van de 31 ingediende ideeën de interesse hebben gewekt bij de POV Piping. 16 daarvan zijn oplossingen tegen piping, 10 hebben betrekking op de andere onderdelen van het piping vraagstuk. In bijlage 1 (Oriëntatie en Analyse) is meer te lezen over deze innovaties. Van de ingediende innovaties zijn er geen innovaties die met de precisie van de door Gebr. De Koning voorgestelde inbreng methode ingebracht kunnen worden. Toch is er wel een ingebracht idee dat erg veel overlap heeft wat betreft werkingsprincipe. Er is bij de POV het idee voor een grofzand barrière ingediend. Dit idee berustte op grof zand ingraven in de watervoerende laag via een sleuf (HWBP, 2015). Hoewel de werking bijna identiek is, hoeft het niet voor concurrentie te zorgen, daar de inbreng methode van Gebr. De Koning dit idee onderscheidend maakt.

3. Piping voorkomen

Het doel van het onderzoek is een maatregel tegen piping te bedenken. In dit hoofdstuk wordt het proces tot het bedenken van een nieuwe maatregel omschreven. Onder kop "3.1.1. Nieuwe methode door parameters te beïnvloeden" worden naar de parameter waar de maatregel op gebaseerd is, de bij behorende ideeën genoemd (dikgedrukt). Deze ideeën worden in "3.3 Ideeën" nader omschreven. Verder worden de criteria van de keuzematrix kort besproken en wordt de uitkomst van de keuzematrix uitgelegd.

3.1. Ideeën strategie

Het toetsen van dijken om te bepalen of er piping kan optreden gebeurt volgens de aangepaste formule van Sellmeijer. In 1988 heeft Sellmeijer (Sellmeijer, 1988) deze benaderingsformule opgesteld. In de loop der tijd is er door nieuwe inzichten een aangepaste vorm van deze formule ontstaan. In de afbeelding is de formule en haar variabelen omschreven. Dit was een van de uitgangspunten bij het bedenken van een nieuwe methode tegen piping. De ideeën die in dit hoofdstuk worden genoemd, worden in het hoofdstuk ideeën toegelicht.

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

Waarin:

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

En:

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

In deze formules is:

- ΔH_c het kritieke verval over de waterkering [m]
- γ_w het volumegewicht van water [kN/m³]
- γ_p het (schijnbaar) volumegewicht van zandkorrels onder water [= 17 kN/m³]
- θ de rolweerstandshoek van zandkorrels [°]
- η de sleepkrachtfactor (coëfficiënt van White) [-]
- K de intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag [m²]
- d_{70} 70-percentielwaarde van de korrelverdeling [m]
- D de dikte van de zandlaag
- L de lengte van de kwelweg (horizontaal gemeten) [m]

Figuur12: Formule van Sellmeijer. Uit het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen (Deltares, 2012).

3.1.1. Nieuwe methode door parameters te beïnvloeden

Alle parameters in deze formule zijn beschouwd, om te kijken of zij gebruikt kunnen worden bij het beïnvloeden van de uitkomst.

Hierbij vallen een aantal parameters al af, te weten:

- Volumieke massa van het water
- Schijnbaar volumegewicht van de zandkorrels onderwater
- Rolweerstandshoek van de zandkorrels
- Dikte van de zandlaag

De rede dat deze parameters afvallen is dat zij in een eerste beschouwing als niet beïnvloedbaar zijn beoordeeld. Er is specifiek gekeken naar de volgende parameters om met die eigenschappen een oplossing te bedenken:

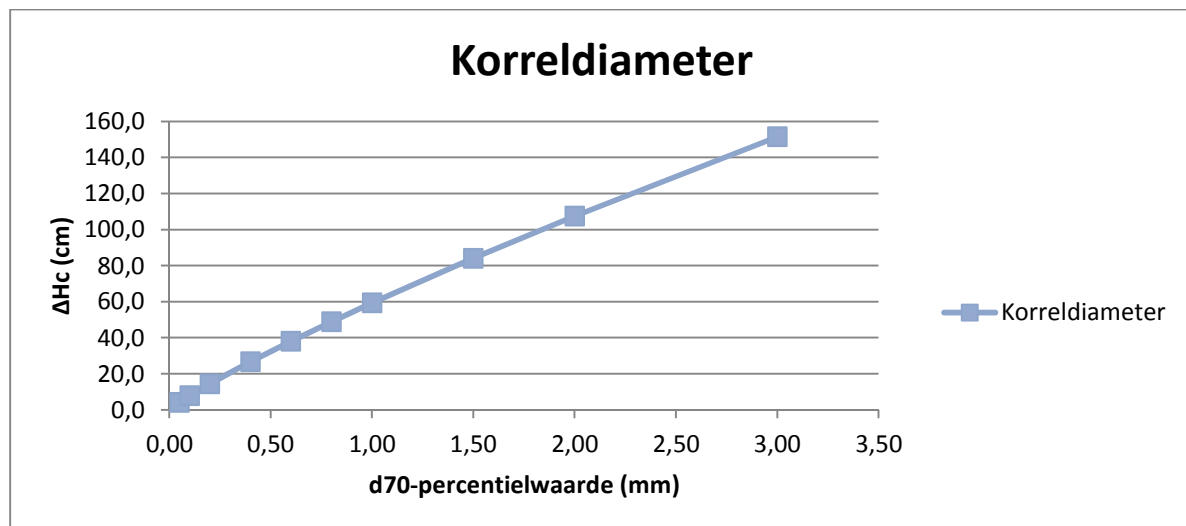
- D70-percentielwaarde van de korrelverdeling
- Lengte van de kwelweg
- Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag

Er werd voldoende mogelijkheid geacht deze parameters te kunnen gebruiken om een maatregel te bedenken.

Naast het beschouwen van de rekenmethode is er gekeken of het mogelijk is een randvoorwaarde voor piping weg te laten vallen, zodat een dijk niet meer als piping gevoelig aangemerkt wordt.

3.1.2. D70-Percentielwaarde

De d70-percentielwaarde van de korrelverdeling is nader beoordeeld. Uit de formule is te bepalen dat de d70 percentielwaarde van invloed is op de uitkomst van Sellmeijer.



Figuur 13: Invloed korreldiameter op de uitkomst van Sellmeijer. Uit rekenvoorbeeld I Onderzoeksrapport Zand meevoerende Wellen (Deltares, 2012) waarbij de waarde voor de d70-percentielwaarde gevarieerd is.

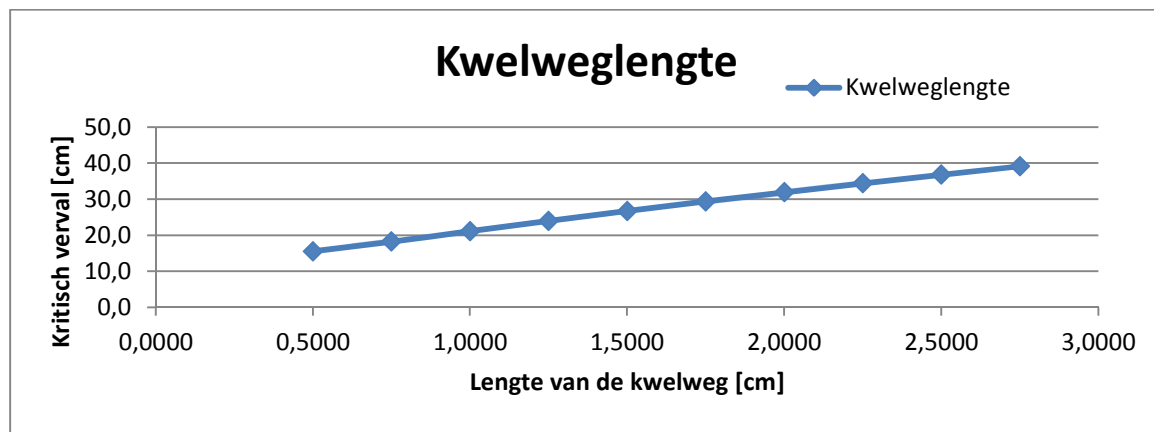
De uitkomst van deze benadering was dat de d70-percentielwaarde een goede basis is om een oplossing mee te bedenken. De uitkomsten hiervan waren **“zwaardere grondfractie in het watervoerend pakket”** en **“fulguriet”**.

Bij de **“zwaardere grondfractie in het watervoerend pakket”** is het idee dat er plaatselijk een doorgaand scherm van een grove grondfractie in de lengte van de dijk wordt gebracht.

Bij het **“fulguriet”** is het idee dat de materiaal eigenschappen aangepast kunnen worden door meerdere korrels samen te smelten tot 1 grotere korrel. Hiermee neemt de d70-percentielwaarde toe.

3.1.3. Kwelweglengte

Van de kwelweglengte is al bekend (huidige piping maatregelen zijn hier op gebaseerd) dat een verlenging positief werkt ter voorkoming van piping. Met de formule van Sellmeijer is dit bevestigd.



Figuur 14: Invloed van de kwelweglengte op het kritisch verval. Formule geplot naar de situatie in de testopstelling. Afstanden in centimeters.

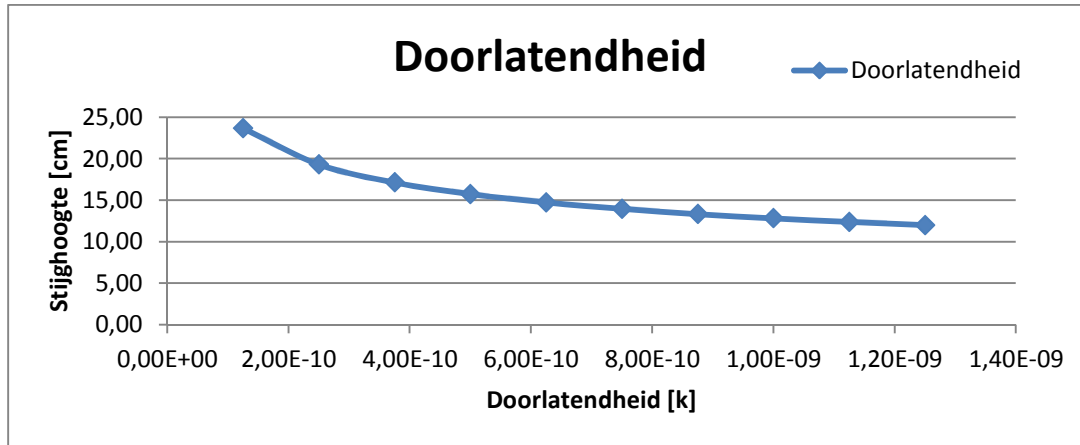
Tijdens de oriëntatie is gebleken dat er een aantal methoden op dit principe berusten. Dat wil zeggen dat een nieuwe methode erg onderscheidend moet zijn. De ideeën die volgden uit het verlengen van de kwelweg zijn **“kwelscherm door middel van hoog-viscoos, niet waterdoorlatend materiaal”** en de **“mini palenwand”**.

Bij het **“kwelscherm door middel van hoog-viscoos, niet waterdoorlatend materiaal”** is het idee dat er een vloeibaar medium geïnjecteerd wordt dat zich gedraagt als een niet permeabel scherm, waardoor het kwelwater onder dit scherm door moet, en de kwelweglengte toeneemt.

De **“mini palenwand”** is een kleine versie van bekende grote constructies zoals de overlappende palenwand, of de diepwand, die zich kenmerkt doordat er een grond verdringende constructie als beton geïnjecteerd wordt, waardoor de kwelweglengte toeneemt.

3.1.4. Intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag

De invloed van de doorlatendheid op het kritisch verval is ook te gebruiken als uitgangspunt voor een oplossing, immers wordt de stroomsnelheid van het water uitgedrukt in de doorlatendheid. In de formule van Sellmeijer is dit terug te zien.



Figuur 25: Invloed van de intrinsieke doorlatendheid van de watervoerende laag op het kritisch verval. Formule geplot naar de situatie in de testopstelling. Afstanden in centimeters.

Het idee dat volgt uit het beïnvloeden van de intrinsieke doorlatendheid van de zandlaag is **“Kwelreductie door middel van een slecht waterdoorlatend scherm”**. Het idee is dat door middel van een bindmiddel of ander medium minder open ruimtes in het zandpakket zitten, waardoor de intrinsieke doorlatendheid afneemt.

3.2. Wegvallen van piping gevoeligheid.

Er zijn duidelijke randvoorwaarden voor het mogelijk ontstaan van piping. Door een voorwaarde voor piping te laten wegvallen, zal een dijk niet meer piping gevoelig zijn. In dat geval moet de werking van het aangebrachte product gegarandeerd worden. De ideeën die hierop gebaseerd zijn worden in dit hoofdstuk beschreven. Een nadere omschrijving van de ideeën is terug te vinden in hoofdstuk “3.3 Ideeën”.

Draineren met damwand; Door te draineren met damwand is het mogelijk een opbarstkanaal te voorkomen. Dit komt doordat er geen sprake meer is van waterspanning dat het binnendijkse afsluitend pakket omhoog moet drukken en zo een opbarstkanaal creëert.

Damwand met filter; Door een waterdoorlatende, zanddichte damwand toe te passen kan er geen materiaal meer uitstromen wanneer de pipe tot aan de damwand is gegroeid. Dit voorkomt de ontwikkeling van de pipe. Met deze methode is een dijk niet meer piping gevoelig omdat er geen volkomen pipe kan ontstaan.

Horizontale drainage om verval te onderbreken; Doordat een pipe specifiek op de scheiding klei en zand voorkomt, is het mogelijk plaats gericht te draineren. Door drainage toe te passen valt het verhang plaatselijk weg, wat voorkomt dat een pipe voorbij de horizontale drainage kan groeien. Hierdoor is een dijk niet meer piping gevoelig.

Zanddicht mineraal wol; Door een zanddicht medium toe te passen, vergelijkbaar met de “damwand met filter” wordt zandtransport onmogelijk gemaakt. De verwachting is dat minerale wol wel water doorlaat, maar de juiste filter eigenschappen heeft om zand niet door te laten.

3.3 Ideeën piping maatregels

Dit hoofdstuk omschrijft alle ideeën die voor dit onderzoek zijn bedacht tegen piping. Het omschrijft de maatregel, de manier waarop piping mogelijk wordt opgelost en visie. In de schematisaties zijn dijken getekend met een afsluitend pakket binnendijks. Bij een zandlaag binnendijks, zoals omschreven in hoofdstuk “2.1.3 twee soorten dijken” is de maatregel toepasbaar onder de dijk. Uitzondering is de oplossing ‘draineren met damwand’.

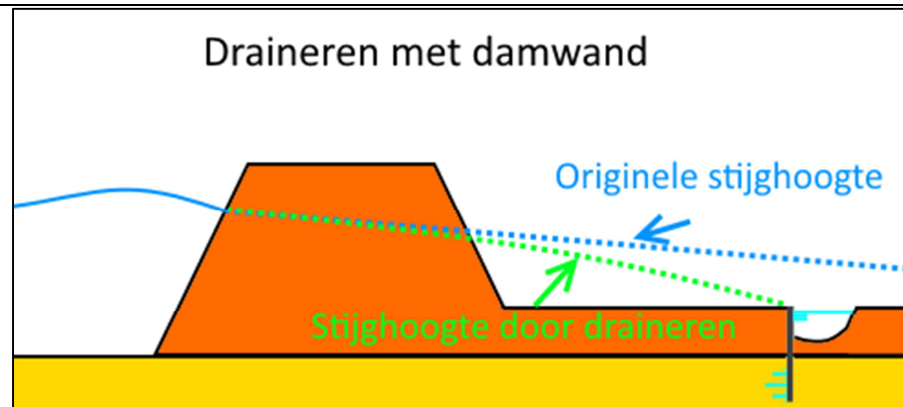
Alle ideeën komen voort uit de brainstormsessies en de ideeën strategie (vorig hoofdstuk).

Er zijn door middel van morfologisch ontwerpen een totaal van 9 ideeën uitgewerkt. Bij morfologisch ontwerpen probeer je alle facetten van een idee te ontleden en uit te wisselen met andere ideeën. In het geval van piping kan dat bijvoorbeeld zijn opdrijven voorkomen. Hierbij kijk je naar alles wat opdrijven veroorzaakt, hoe het voorkomen kan worden, en waarmee het voorkomen kan worden. Door alles op te schrijven kun je het probleem multidimensionaal benaderen. De visie van morfologisch ontwerpen is dat de ontwerper zich niet laat beperken door eerste ingeving, vermoedens en inlevingsvermogen.

Draineren met damwand

Door middel van drainage kan de stijghoogte onder een afsluitend pakket gereduceerd worden. Deze variant vindt zijn inpassing door damwand te gebruiken als beschoeiing. In of langs de damwand wordt verticale drainage gebruikt om water uit het watervoerend pakket af te nemen en naar de bakwetering te lozen.

Piping kan niet ontstaan zonder uittrede punt. Door het reduceren van de stijghoogte in het afsluitend pakket wordt opdrijven, en daardoor het ontstaan van een uittredepunt, voorkomen. Deze oplossing is een situatiegerichte oplossing. De oplossing is vrij risicoloos, maar kent een klein areaal waarbij het toepasbaar zal zijn. De locatie moet geschikt zijn, dat wil zeggen dat er een bakwetering bij de dijk ligt, waar de toepassing van drainerend damwand de stijghoogte naar wens reduceert. De verwachting is dat deze omstandigheden erg specifiek zijn en daarom niet vaak voorkomen.



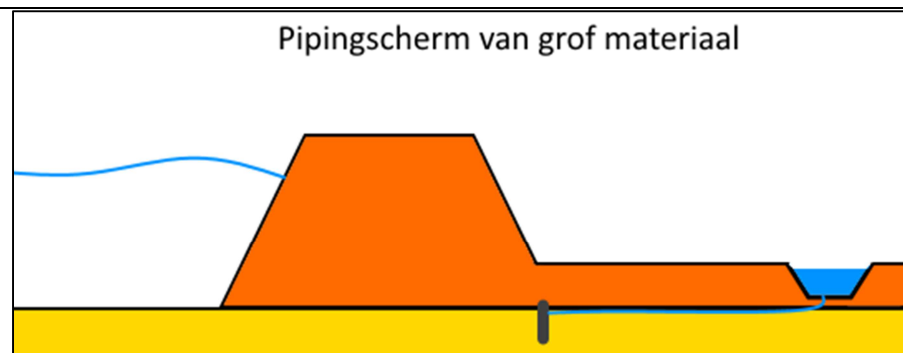
Figuur 16: Impressie hoe de oplossing wordt toegepast in een dijk.

Zwaardere grondfractie in watervoerend pakket

Een sluitend scherm van een grof materiaal, in de lengte van de dijk, kan piping voorkomen. Een pipe zal zich ontwikkelen tot aan dit scherm, waarna de pipe niet verder kan groeien in de richting van de rivier.

De gemiddelde korreldiameter neemt plaatselijk toe, waardoor, volgens Sellmeijer (Sellmeijer, 1988), een hoger verval nodig is. De grondfractie wordt gedimensioneerd op het aanwezig verval om zo uitspoeling te voorkomen.

Deze oplossing is een small-scale oplossing met veel potentieel. Het piping probleem wordt lokaal aangepakt en de oplossing is niet afhankelijk van de omstandigheden rond de dijk. Als een sluitend scherm aangebracht wordt zal elke pipe die zich ontwikkelt na verloop van tijd stilgelegd worden. In het vervolg wordt deze oplossing grofzandfilter genoemd.



Figuur 17: Impressie hoe de oplossing wordt toegepast in een dijk.

Kwelscherm door middel van een hoog viscoos, niet waterdoorlatend materiaal.

Piping voorkomen door de kwelweglengte toe te laten nemen is een bestaande techniek. Door middel van damwanden die in het watervoerend pakket steken wordt de lengte van de kwelweg groter.

Door een dikke vloeistof te injecteren zou de kwelweg ook kunnen toenemen. Als dit middel een sluitend scherm vanaf het afsluitend pakket vormt zal een pipe er onderdoor moeten. De dikke vloeistof zal niet meer stromen door de stroperigheid.

Deze oplossing berust op beproefde methodes. Een injectie zou betekenen dat er met veel kleinere hulpwerken een kwelscherm gemaakt kan worden. Op plekken met weinig ruimte zou dit een goede oplossing zijn.

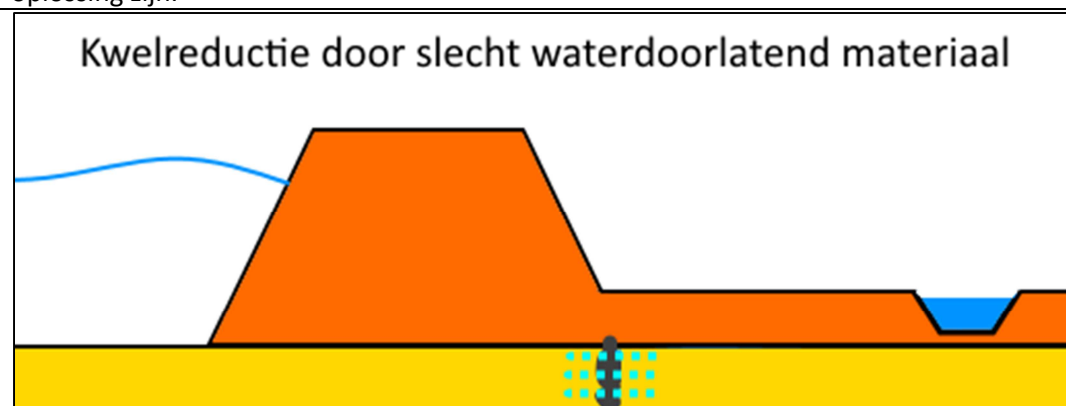


Figuur 18: Impressie hoe de oplossing wordt toegepast in een dijk.

Kwelreductie door middel van slecht waterdoorlatend scherm.

Deze methode berust op injectie. Door de waterdoorlatendheid te verkleinen zal een hoger verval nodig zijn om piping te laten optreden. Als er een piping gevoelige laag aanwezig is die, over de diepte, volledig geïnjecteerd kan worden, zal het benodigd verval volgens Sellmeijer (Sellmeijer, 1988) toenemen.

Deze oplossing berust op beproefde methodes. Een injectie zou betekenen dat er met veel kleinere hulpwerken een oplossing toegepast kan worden. Op plekken met weinig ruimte zou dit een goede oplossing zijn.

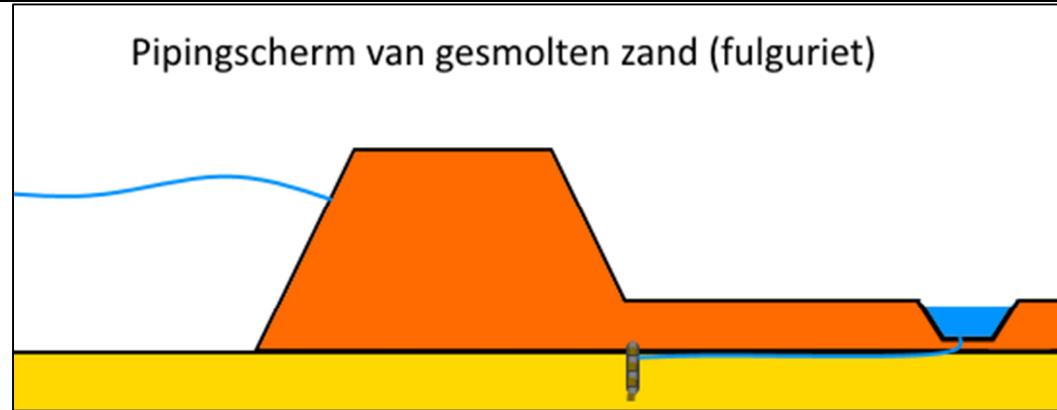


Figuur 19: Impressie hoe de oplossing wordt toegepast in een dijk.

Fulguriet

Fulguriet is een strook gesmolten zand dat ontstaat als gevolg van blikseminslag in een zandpakket. Dit is vaak waar te nemen in een woestijn. Het principe van zand smelten zou een mogelijke toepassing hebben in het tegengaan van piping.

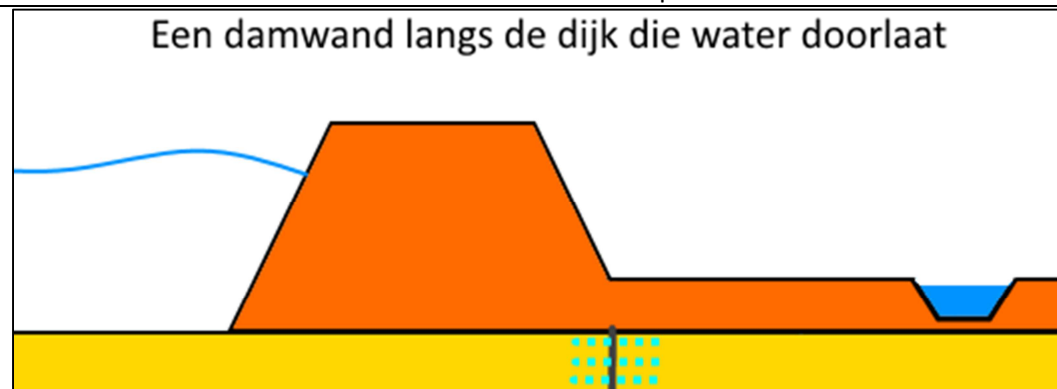
Door zandkorrels te smelten en daardoor aan elkaar te verbinden zou mogelijk een heel grofkorrelig, in elkaar hakend zandscherm gemaakt kunnen worden. Dit zand scherm is dan waterdoorlatend maar door de verhoogde korreldiameter en hoek van inwendige wrijving zal een hoger verval nodig zijn om piping te laten optreden.



Figuur 20: Impressie hoe de oplossing wordt toegepast in een dijk.

Damwand met filter

Door een damwand met een filter, is er mogelijk geen piping gevoeligheid doordat een filter toegepast kan worden dat water doorlaat en zand zal remmen. Op die manier kan een pipe niet verder ontwikkelen dan tot aan de damwand. Hierdoor wordt het piping proces stilgelegd. Een damwand toepassen tegen piping wordt al gedaan. Het waterdoorlatend maken is echter nog nooit toegepast. Het niet of minder beïnvloeden van de waterhuishouding kan positieve gevolgen hebben voor de omgeving en de polder. Een damwand zou ook multifunctioneel ingezet kunnen worden doordat het andere faalmechanismen kan aanpakken.



Figuur 21: Impressie hoe de oplossing wordt toegepast in een dijk.

Horizontale boring

Door een medium in te brengen op de scheiding tussen de afdekkende laag en het watervoerend pakket kan de ontwikkeling van een pipe stilgelegd worden. Dit medium moet zorgen dat het korreltransport wordt stilgelegd. Deze oplossing is een lokale oplossing die erg precies geplaatst moet worden. Als het lukt een medium te vinden dat het korreltransport stillegt, dat via horizontale boring op de scheiding tussen lagen te plaatsen is, kan deze oplossing op lastig te bereiken plekken aangebracht worden. Vanaf afstand kan een maatregel tegen piping ingebracht worden.

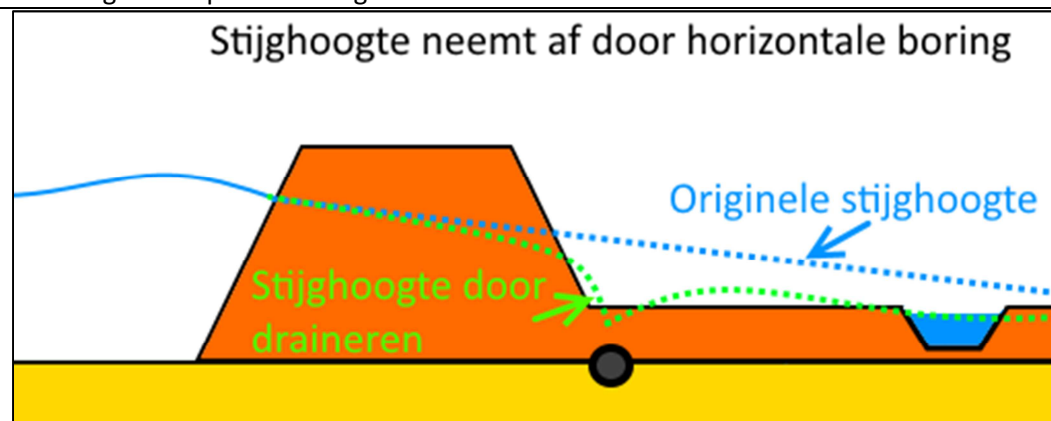


Figuur 22: Impressie hoe de oplossing wordt toegepast in een dijk.

Horizontale drainage boren.

Door de verhoogde stijghoogte in het watervoerend pakket te reduceren met horizontale drainage zal piping niet meer optreden. Vergeleken met de andere methode van horizontaal boren, verschilt deze methode sterk. Het berust op het verlagen van de stijghoogte en hoeft niet op de scheiding tussen 2 grondlagen aangebracht te worden.

Bij afname van water door horizontale drainage kan opbarsten voorkomen worden doordat de stijghoogte afneemt en het afsluitend pakket niet zal opdrijven. Op lastig bereikbare locaties biedt deze oplossing uitkomst doordat er niet boven de locatie gewerkt hoeft te worden. Tevens is het een oplossing die veel toegepast zou kunnen worden doordat het een bestaande techniek is die relatief goedkoop is en weinig overlast veroorzaakt.

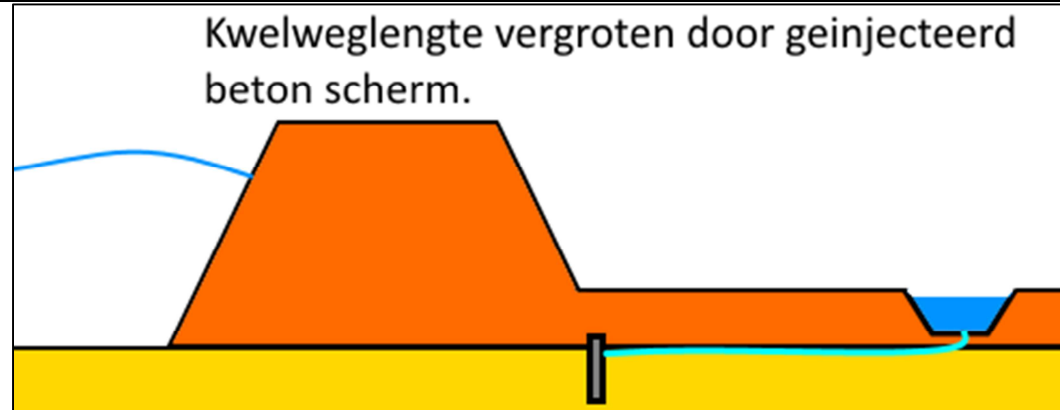


Figuur 23: Impressie hoe de oplossing wordt toegepast in een dijk.

Mini palenwand als kwelscherm

Door met injectielansen een sluitend kwelscherm te maken, ontstaat er een minipalenwand, van vrij in de bodem geïnjecteerd beton. Doordat de kwelweglengte toeneemt, zal het benodigd verval voor piping stijgen.

Door met injectielansen een sluitend scherm te maken zou met klein materieel een oplossing tegen piping aangebracht kunnen worden. Op deze manier zal op krappe locaties een oplossing toepasbaar zijn.

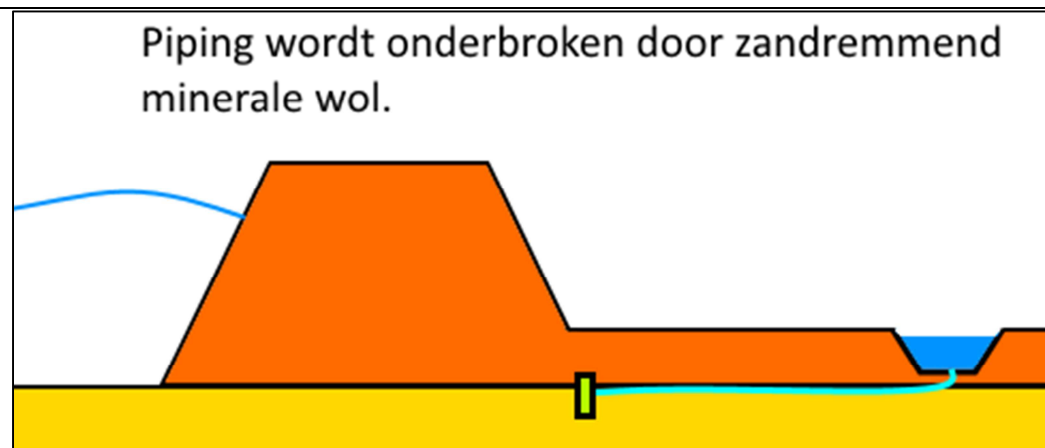


Figuur 24: Impressie hoe de oplossing wordt toegepast in een dijk.

Minerale wol als zand filter.

Door minerale wol als zand filter te gebruiken kan voorkomen worden dat zand uitspoelt in de pipe. Het piping proces zal worden stilgelegd. Hoewel de werking uit tests moet blijken is de verwachting dat minerale wol waterdoorlatend is maar zand zal tegenhouden.

Deze oplossing zal concurrerend zijn met het innovatieve verticaal zanddicht geotextiel. Mogelijk is door een varieerbare dikte van het minerale wol de intrinsieke doorlatendheid ook beïnvloedbaar.



Figuur 252: Impressie hoe de oplossing wordt toegepast in een dijk.

3.3 Keuzematrix

Om een keuze te maken tussen de oplossingsvarianten is een keuzematrix gemaakt. Door middel van een keuze systeem is beter te beoordelen welke oplossing het meeste potentie heeft.

De keuzematrix is opgebouwd uit vijf hoofdtakken, de belangrijkste stakeholders in dit onderzoek. Er is een aantal criteria opgesteld per stakeholder. Er is naar beste inzicht een waarde per criteria opgesteld. Bij het beoordelen aan de hand van de MCA is naar beste inzicht een deel van deze waarde toegekend als beoordelingswaarde. Aan de hand van de som van deze scores is er een keuze gemaakt welke twee ideeën uitgewerkt worden.

De criteria per belangenpartij worden in dit hoofdstuk toegelicht om een beeld te vormen van de uitgangspunten tijdens het keuzemoment. De individuele scores per idee, en een nadere omschrijving van de criteria zijn terug te vinden in bijlage 3.

- De criteria die namens het bedrijf gelden hebben voornamelijk betrekking op de kosten/baten. De praktische kant van een nieuwe oplossing wordt beschouwd om te zien of de maatregel gemakkelijk in het bedrijf te implementeren is.
- Er zijn een aantal milieucriteria opgesteld. Deze criteria hebben betrekking op de eigenschappen van het product en het gedrag over de levensduur. Hoe meer de maatregel weg valt in de bestaande situatie wegvalt, hoe beter de maatregel zal scoren.
- Er zijn criteria opgesteld voor de betrokkenen. Vaak zullen dit omwonenden en bedrijven zijn. De risico's voor het werken met de maatregel rondom bewoning wordt meegerekend en de overlast tijdens aanbrengen speelt mee in de beoordeling.
- Voor de haalbaarheid van het onderzoek worden de mogelijkheden van de student in de keuzematrix vertegenwoordigd. Zeer complexe maatregelen zullen aanzienlijk lager scoren dan maatregelen die vrij beschikbaar zijn, geen bewerking nodig hebben en gemakkelijk getest kunnen worden.

3.4 Uitkomst keuzematrix

De uitkomst van de keuzematrix was dat het grofzandfilter en de minerale wol oplossing het meeste potentie hebben. Dit komt vooral doordat zij inspelen op overlast eisen, aantoonbaarheid en omdat het concrete oplossingen zijn, verder speelde de laagdrempeligheid om te onderzoeken mee in een hoge score.

Deze oplossingen zijn verder uitgewerkt en zijn getest in de testopstelling.

4. Piping maatregel testen

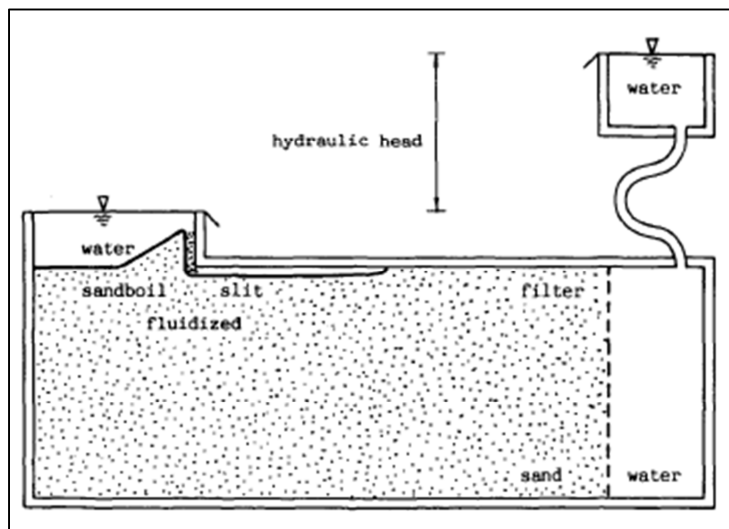
Om antwoord te geven op de vraag een aantoonbaar nieuwe methode te bedenken is een testopstelling gemaakt om te testen of een oplossing werkt.

Er is een testopstelling gemaakt waarin de 2 meest in aanmerking komende oplossingen getest kunnen worden. Door meerdere tests te doen kan beoordeeld worden of de oplossing werkt. Dit hoofdstuk beschrijft hoe het toepassen van de oplossing aangepakt is. In bijlage 4 is een beschrijving met illustraties over het maken van de testopstelling. Dit hoofdstuk beantwoordt de deelvragen waar een oplossing aan moet voldoen om piping tegen te gaan en hoe wordt aangetoond dat een maatregel werkt.

4.1. Testopstelling

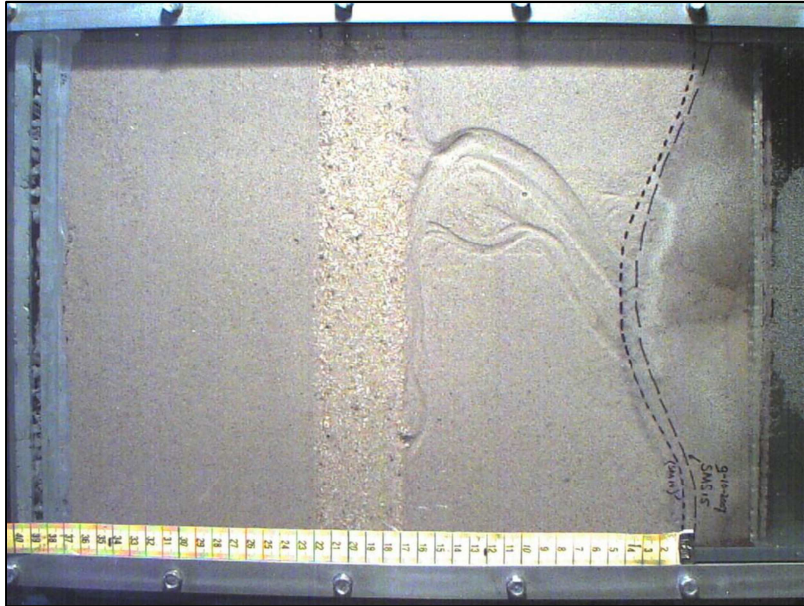
De testopstelling is gebaseerd op enkele gevonden opstellingen/voorstellen voor een opstelling, te weten;

In 1988 deed Sellmeijer (Sellmeijer, 1988) een voorstel om een zandpakket in een afgesloten bak met een doorzichtige plaat af te dekken. Aan één zijde moet het water uit kunnen stromen aan het oppervlak en aan één zijde moet het verval te variëren zijn om zo een verhoogde waterstand na te bootsen. De hoogte/lengthe verhouding van de testopstelling zijn hierop gebaseerd.



Figuur 26: Voorstel van een opstelling door Sellmeijer, 1988. (Sellmeijer, 1988)

In 2013 schreef ing.H.T.J. De Bruijn (ing. H.T.J. de Bruijn, 2013) het document 'Het pipingproces in stripvorm'. Hierin werd 2 keer een foto weergegeven waarop piping in een testopstelling te zien was, hierin lag het zandpakket onder talud tegen een schot in een bak. De bak is afgedekt met (plexi)glas om de pipevorming goed te kunnen zien. Het glas dient ook als 'dak' voor de pipe, om te voorkomen dat water boven het zandpakket gaat stromen, in de praktijk zou dit de dijk zijn.



Figuur27: Een testopstelling bij Deltares. (ing. H.T.J. de Bruijn, 2013)

De testopstelling die bij Gebr. De Koning gemaakt is, is op deze informatie gebaseerd. De afmetingen bedragen (LxBxH) 1.03m x 0,63m x 0,415m, de opstelling heeft een wand van betonplex met een dikte van 15mm, waardoor de binnenmaten 1m x 0,6m x 0,4m zijn. Het zandpakket, dat tussen een schot en een filter ligt, heeft een lengte van 0.7m. Omdat het met een talud tegen een schot aanligt, is het zandpakket dat tegen het glas komt 0.6m lang. Voor een uitgebreide beschrijving van de testopstelling wordt verwezen naar bijlage 4. Als aanvulling op het startontwerp is het ontwerp overlegd met ir. V. van Beek van Deltares. Zij werkt met testopstellingen voor piping.



Figuur 28: Testopstelling bij Gebr. De Koning. Rechts het resultaat van langere tijd een open pipe laten ontgronden.

4.2. Zand

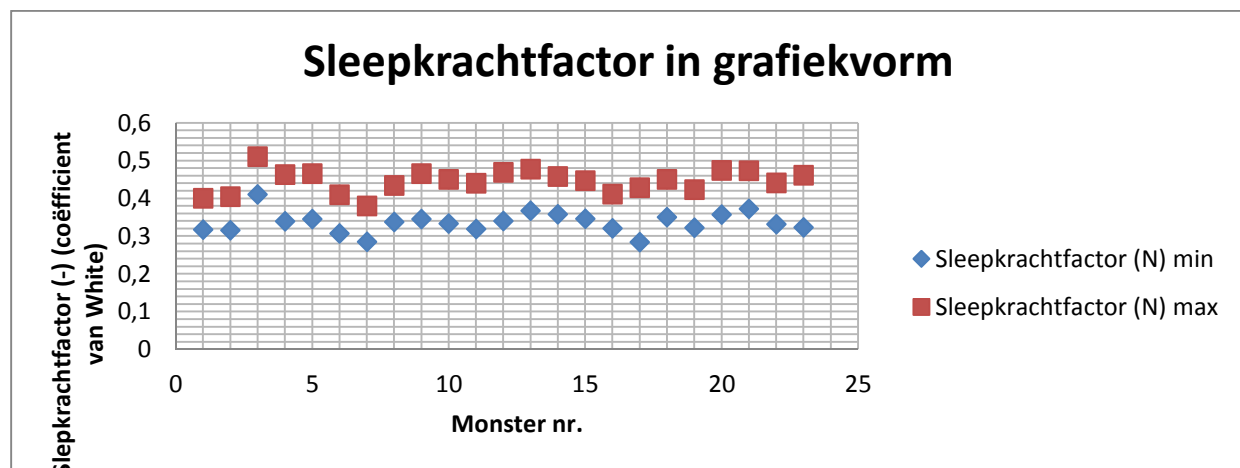
In dit subhoofdstuk worden de parameters van het zand bepaald. Later in de berekeningen zal altijd een afwijking tussen de theorie en praktijk liggen. Dit is mede te verklaren door de aannames en uitgangspunten die in dit hoofdstuk omschreven worden.

Het gebruikte zand in de testopstelling moet zo representatief mogelijk zijn voor Nederland. In 2015 heeft ir. V. van Beek (van Beek, 2015) een lijst gepubliceerd in haar promotieonderzoek waarin van 26 zandmonsters uit Nederland de d_{50} , d_{70} , gelijkmatigheidscoëfficiënt en minimale/maximale η (sleepkrachtfactor) zijn bepaald. In bijlage 5 zijn alle gegevens terug te vinden. De locatie van deze monsters is bekend. Monsters uit kustgebieden zijn weggelaten, deze gegevens zijn niet relevant voor onderzoek naar rivierdijken. Er is met deze gegevens een spectrum vastgesteld waar binnen een mengsel moet vallen dat representatief voor Nederland is. Uit de gegevens is ook een sleepkrachtfactor aangenomen omdat die niet bekend is van het gebruikte zand.

	D50	D70	D60/D10	$\eta_{\min}$ [-]	$\eta_{\max}$ [-]
Min	0.132	0.152	1.3	0.284	0.38
Max	0.4	0.6	3.17	0.41	0.51
Gemiddelde	0.23	0.3	1.92	0.34	0.44

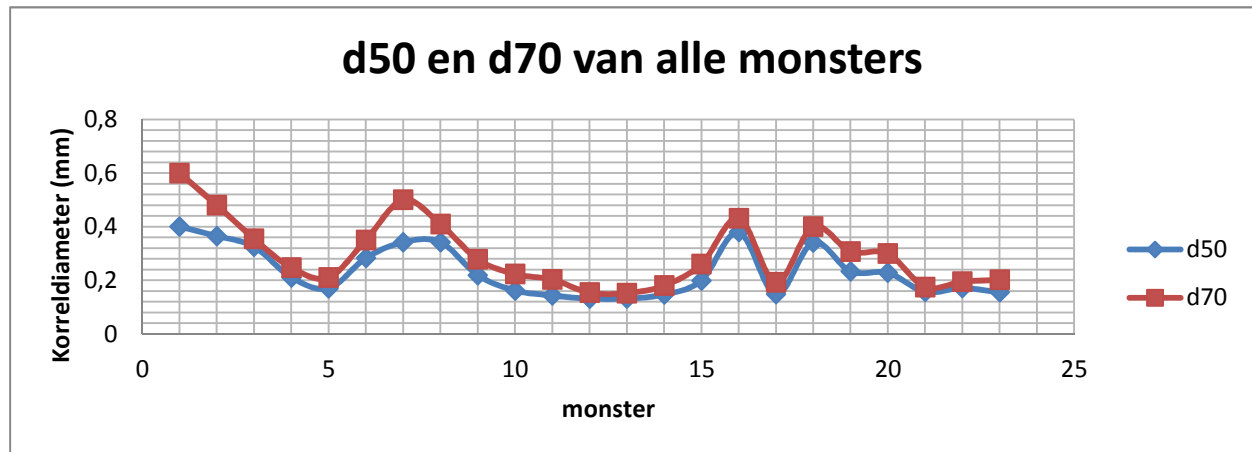
Figuur 29: Gevonden gemiddelden uit de zeefproefresultaten uit (van Beek, 2015)

De sleepkrachtfactor voor het zand is bepaald uit de gevonden waarden in de tabel. Het gebruikte zand voor de testopstellingen is niet bemonsterd om de sleepkrachtfactor te bepalen. In grafiek vorm is duidelijk een spectrum af te lezen waarin een sleepkrachtfactor gekozen wordt. Er is gekozen om bij bepaling van het kritisch verval een minimaal en maximaal verval te benoemen, gebaseerd op een grote en kleine sleepkrachtfactor.



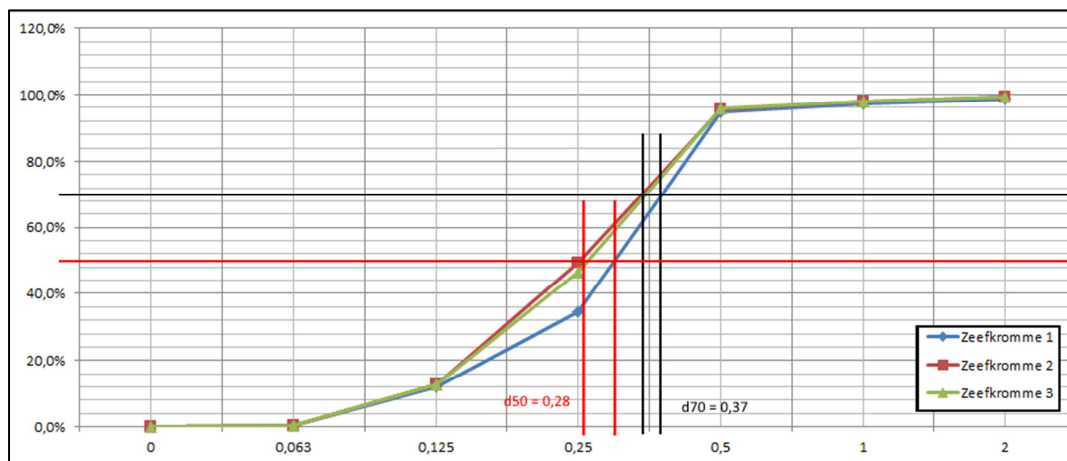
Figuur 30: Gevonden waarden van sleepkrachtfactor in grafiekvorm. (van Beek, 2015)

De resultaten van de zeefproeven (zie ook bijlage 5) laten in grafiek vorm een duidelijk spectrum zien.



Figuur 31: d50/d70 van de monsters uit de tabel van Vera van Beek. (van Beek, 2015)

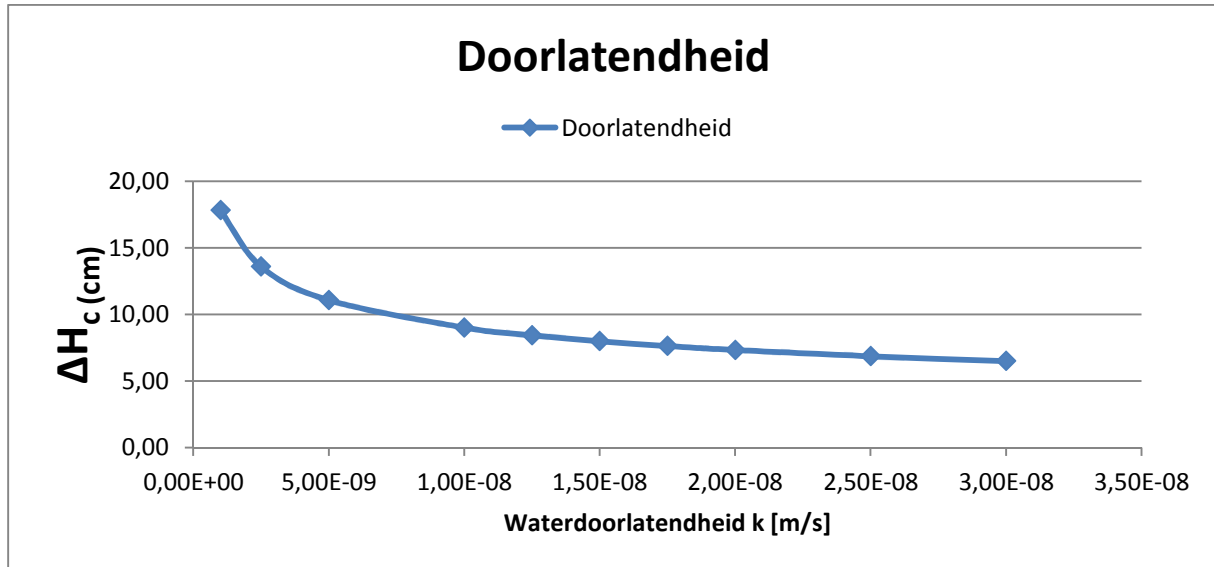
Om te bepalen of het gebruikte zand in de testopstelling binnen dit medium valt zijn 3 zeefproeven met monsters van circa 1 kg gedaan. De resultaten hiervan zijn uitgezet in zeefkrommen.



Figuur 32: Zeefresultaten van gebruikt zand. De lijnen geven de d50/d70 van de monsters aan.

De d50/d70 valt binnen het spectrum dat volgde uit de gegevens. De gemiddelde d70 van alle monsters uit (van Beek, 2015) is 0.3mm. De d70 van het gebruikte zand was 0,37mm. Om die rede voor gekozen om een zak van 25kg gezeefd zand toe te voegen aan het zandpakket, dit zand had een diameter van 0,125-0,25mm, hierdoor kwam de d70 uit op 0,33mm, en ligt de gebruikte d70 dichterbij de gemiddelde korreldiameter die representatief is voor Nederland.

De variabele die nog niet bekend is, is de waterdoorlatendheid. Uit tests bleek dat een verval van circa 12.5 cm nodig was. Als de bekende gegevens geplot worden blijkt dat voor circa 12.5 cm verval een waterdoorlatendheid van rond de 2.5×10^{-9} m/s.

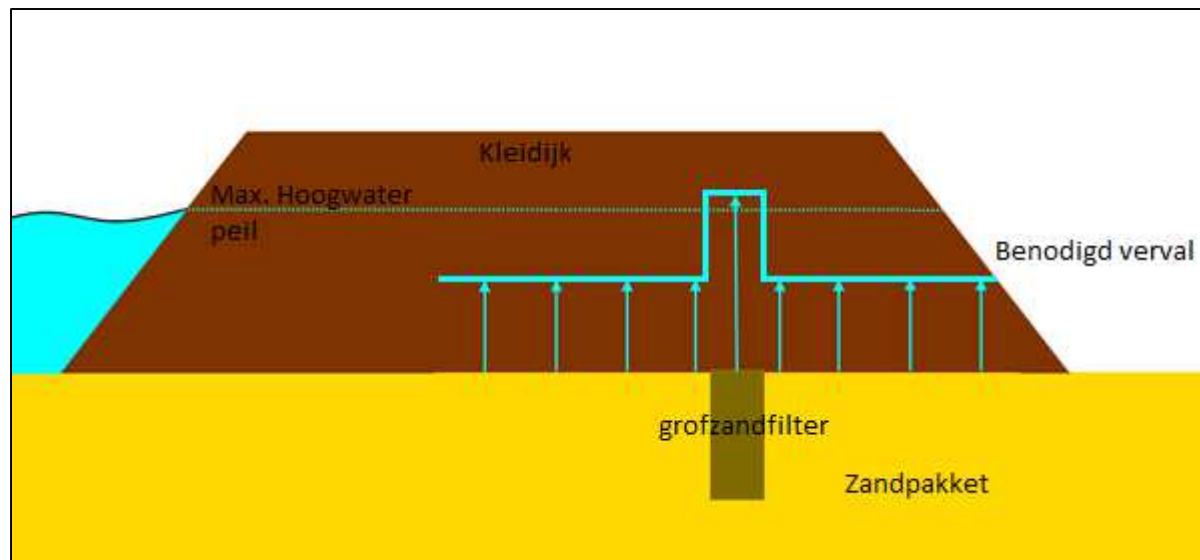


Figuur 33: Waterdoorlatendheid heeft direct invloed op het benodigd verval. Geplot met eigenschappen van de testopstelling en een afnemende waterdoorlatendheid.

Hierop gebaseerd wordt een aanname gedaan voor de waterdoorlatendheid van 2.5×10^{-9} m/s. Deze waarde wordt voortaan in alle berekeningen aangehouden.

4.3. Testopstelling, test 1; Grofzandfilter

Er wordt een mengsel van zand, met een aanzienlijk grotere d_{70} , als een afsluitend 'scherm' in de lengte van een dijk geïnjecteerd. Hierdoor moet een pipe door het grofzand filter heen om zich verder rivierwaarts te ontwikkelen. Het grofzandfilter heeft echter een groter potentiaal nodig om piping te laten optreden. De oplossing, gebaseerd op een zwaardere grondfractie in het watervoerend pakket had in de keuzematrix de beste score. Deze oplossing wordt het 'grofzandfilter' genoemd.

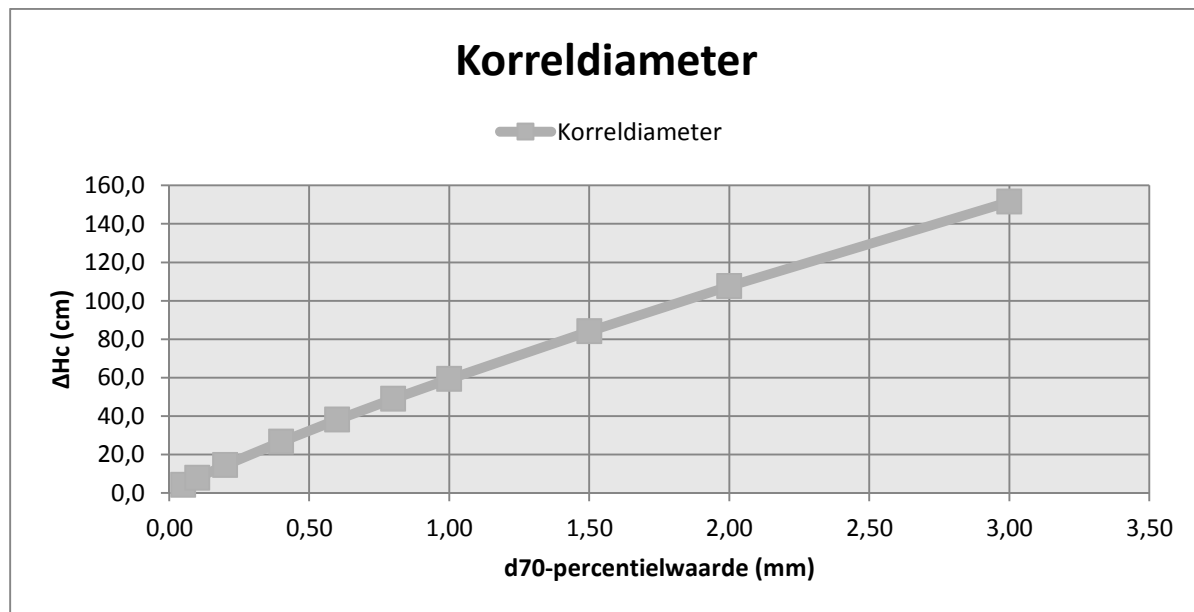


Figuur 34: Impressie van het zandfilter bij een dijk, het kritisch verval in het filter ligt hoger dan het optredend verval.

4.3.1. Methode omschrijving

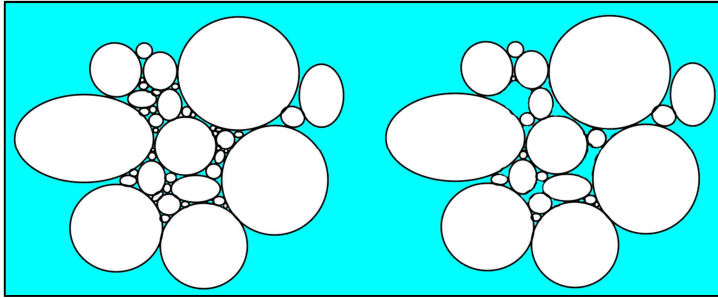
Deze oplossing berust op het principe dat de d_{70} van invloed is op het benodigde verval. Dit is terug te zien wanneer Sellmeijer geplot wordt met een toenemende d_{70} .

In het geval van een toenemende d_{70} , neemt het kritisch verval plaatselijk (in het grofzandfilter) toe. De verwachting is dat de pipe zich ontwikkelt tot aan de grofzandfilter. Het grofzandfilter voorkomt dat de pipe zich verder rivierwaarts ontwikkelt omdat het benodigde verval voor piping ter plaatse van het grofzandfilter niet gehaald wordt. Ondanks de locatie in bovenstaande figuur, is de beste locatie voor zo'n grofzandfilter dus zo dicht mogelijk bij de opbarstzone, maar niet erin, vaak de teen van de dijk.



Figuur 35: Stijghoogte neemt toe als gevolg van hogere d_{70} . Geplot met eigenschappen van de testopstelling en een toenemende d_{70} .

Het gevolg van plaatselijk de d_{70} aanpassen heeft ook als gevolg dat de intrinsieke doorlatendheid verandert. Het verhogen van de intrinsieke doorlatendheid werkt negatief voor het voorkomen van piping. In het aangebrachte 'scherm' van grofzand moeten de poriën goed gevuld zijn om de intrinsieke doorlatendheid te verminderen. Tevens moet de opbouw van korrels zodanig zijn dat er geen uitspoeling van lokaal zand door het korrelskelet van de grove korrel heen kan. Het is nodig om een ruime gelijkmatigheidscoëfficiënt toe te passen in het grofzand filter om zo een korrelskelet te creëren dat slechts de allerkleinste korrel kan doorlaten (dit is acceptabel), en om de waterdoorlatendheid zoveel mogelijk te verminderen. Dit is gedaan door een mengsel te maken waarvan de d_{70} groter is dan de d_{70} van het zandpakket en er toch een opbouw is van verschillende korrels. Het grofzandfilter werkt naar verwachting zand remmend. In de tests is een grofzandfilter toegepast dat niet diep is. Slechts 3-5cm diep wordt gehanteerd om te testen of het grofzandfilter niet dichtslibt en zo ook waterremmend wordt. In het geval van dichtslibben zal heave te zien zijn.



Figuur 36: Het is belangrijk een juiste korrelverdeling te hebben, om zo de waterdoorlatendheid niet te veel te beïnvloeden.

4.3.2. Mengsel

Er wordt een kunstmatig mengsel gebruikt om een grofzandfilter van te maken. De d_{70} van het grofzandfilter is een dynamische parameter en moet in de praktijk aangepast worden aan de omstandigheden van de locatie. Dit houdt in dat er een d_{70} bepaald moet worden waarbij een kritisch verval berekend wordt dat gelijk aan of hoger is dan het vanuit de hydraulische randvoorwaarden te hanteren verval.

Voor de testopstelling worden 3 verschillende mengsels gebruikt. Om een filterwerking te creëren zijn korrelgroottes gebruikt van tussen de 0,25 en 2mm. De kleinere korrels zijn gebruikt om de poriën van het grofzandfilter te vullen en suffusie te voorkomen.

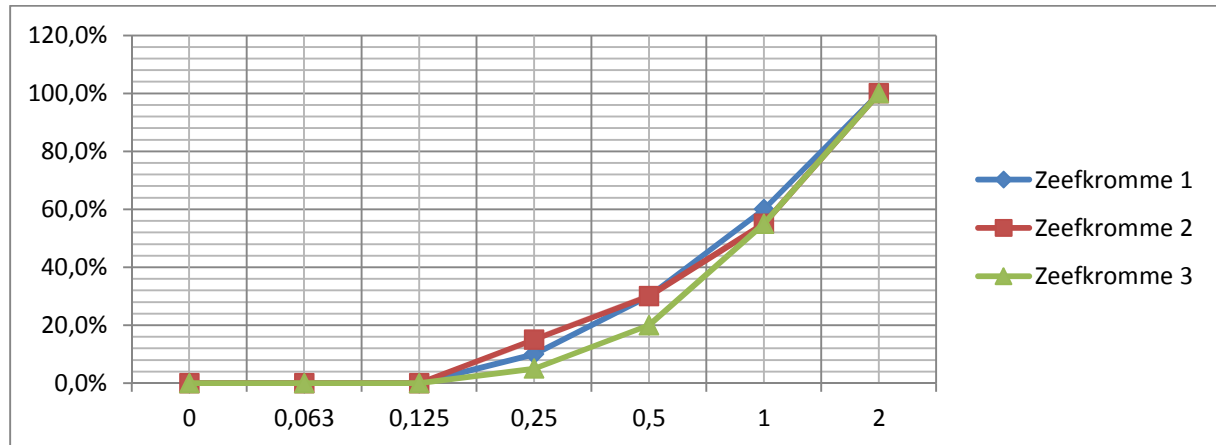
De kleinste korrel die gebruikt wordt is 0,25-0,5mm. Volgens eenvoudige benadering van filterlagen ($d_{50}/2,2 = d_{50}$ van de filter laag laag), waarbij uitstromen van korrels via de poriën van grovere korrels voorkomen wordt, is bepaald dat er korrels kleiner dan 0,13mm kunnen uitstromen. Het gewicht aandeel van korrels kleiner dan 0.13mm korreldiameter is minimaal (12-14%, zie zeefkromme). De verwachting is dat dit niet leidt tot instabiliteit van het korrelskelet of falen van het grofzandfilter.

De 3 mengsels zijn als volgt;

Mazen [mm]	Mengsel 1 Gewicht[g] Totaal: 1000	Gewicht aandeel	Mengsel 2 Gewicht[g] Totaal: 1000	Gewicht aandeel	Mengsel 3 Gewicht[g] Totaal: 1000	Gewicht aandeel
0	0,00	0,0%	0,00	0,00%	0,00	0,00%
0,063	0,00	0,0%	0,00	0,00%	0,00	0,00%
0,125	0,00	0,0%	0,00	0,00%	0,00	0,00%
0,25	100,00	10,0%	150,00	15,00%	50,00	5,00%
0,5	200,00	30,0%	150,00	30,00%	150,00	20,00%
1	300,00	60,0%	250,00	55,00%	350,00	55,00%
2	400,00	100,0%	450,00	100,00%	450,00	100,00%

Figuur 37: Zeefeigenschaften van de mengsels.

Waarbij de volgende zeefkrommen horen:



Figuur 38: Zeefkrommen van de mengsels.

De gelijkmatigheidscoëfficiënt van deze mengsels ligt tussen de 4 en 5. Dit is een grote gelijkmatigheidscoëfficiënt, die volgens de zeefproef gegevens van Van beek (van Beek, 2015) niet vaak voorkomt in Nederland. Samen met een hoge d_{70} is de verwachting dat dit een sterk korrelskelet geeft.

De d_{70} van de mengsels is 1mm, 1,1mm en 1,1mm. Volgens Sellmeijer wordt het verval, met een N variërend tussen 0,3 en 0.48, nu 25-30cm. Dit is ruim voldoende om een sterk verschil waar te nemen tussen het zand en het grofzandfilter. De verwachting is dat zich een pipe ontwikkelt tot aan het grofzandfilter.

4.3.3 Verstopt raken van het filter uitsluiten.

Als het grofzandfilter verstopt raakt door het vullen van alle poriën met steeds fijner materiaal is er kans dat de filterwerking vervalst en de waterstroom onder het grofzandfilter door gaat.

Als het grofzandfilter werkt om de pipeontwikkeling te stoppen wordt de test nog langer doorgezet om te controleren op verstopping. Na initiatie duurt het ontwikkelen van de complete pipe tussen de 2 en 4 minuten. De test wordt 30-45 minuten doorgezet. Hierdoor is er langere tijd een waterstroom door het zandfilter en moet blijken of het zandfilter verstopt. Als dit het geval is zal dit te zien zijn doordat de pipe verder groeit en/of er heave waar te nemen zal zijn. Als er geen aanleiding is de test te verlengen wordt de test nu afgebroken.

4.4 Testopstelling, test 2; minerale wol

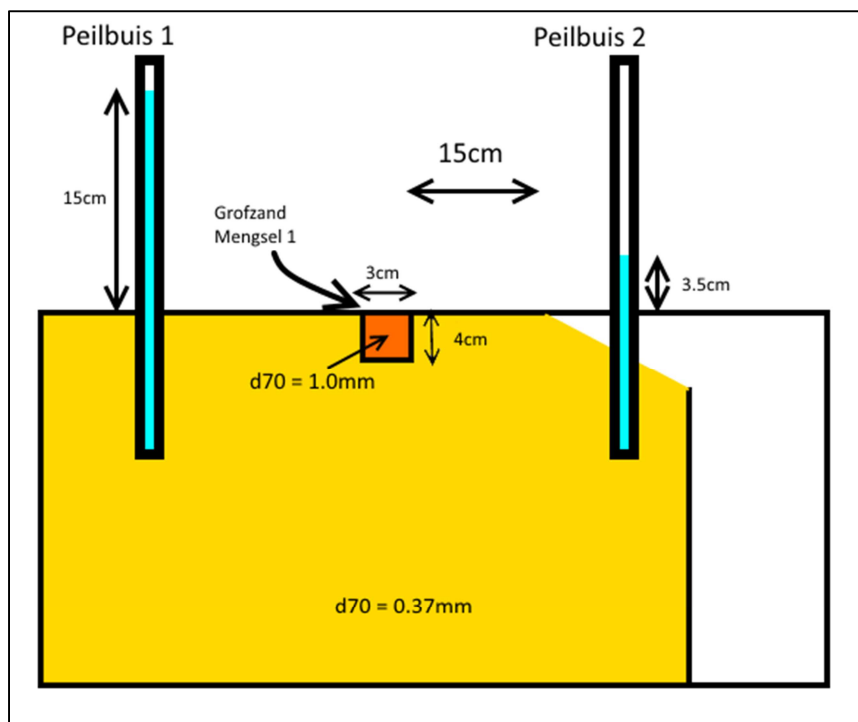
De oplossing met het minerale wol is gebaseerd op een zandfilter waar de innovatie verticaal zanddicht geotextiel ook op berust. Het idee is dat er geen piping meer kan optreden omdat er wel water kan stromen maar geen zand. Om dit te testen wordt er een dunne strook minerale wol in de testopstelling aangebracht. Deze strook loopt over de hele breedte van de testopstelling. De methode wordt getest door een pipe te laten ontwikkelen tot aan het minerale wol, waarna de pipe zal stoppen met groeien. Om uit te sluiten dat het minerale wol als kwelscherm werkt, en niet als zandfilter wordt het verval aanzienlijk verhoogd. Hoewel er geen concrete stap wordt ondernomen, wordt het verval met bijvoorbeeld 50% verhoogd om te zien of de pipe onder de minerale wol doorgroeit. Dit forceren van het piping proces gaat op gevoel.....

5. Piping maatregel grofzandfilter

5.1. Testen met grofzandfilter

Voor de test waarbij piping optrad waren de omstandigheden als volgt:

Verwacht verval (volgens Sellmeijer):	11.5 cm
Benodigd verval (volgt uit test 1, 2 en 3):	10.3 – 10.7 – 10,7 cm
Breedte grofzandfilter:	3 cm
Diepte grofzandfilter:	4 cm
Kwelweglengte over zandpakket:	60 cm
Kwelweglengte vanaf initiatiepunt (inkeping):	57 cm
Gemeten stijghoogte peilbuis 1:	15cm
Gemeten stijghoogte peilbuis 2:	3.5cm
Afstand tussen peilbuizen:	57 cm
ΔH (verschil tussenpeilbuizen):	0.2 cm/cm
Initiatie tot eerste contact grofzandfilter:	57 seconden
Ontwikkeling pipe langs grofzandfilter tot stilval:	1 minuut 43 seconden



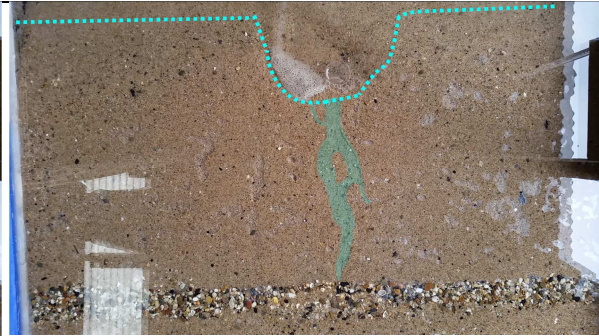
Figuur 39: Impressie van de testopstelling bij maatregel 1.

5.1.1 Uitkomst.

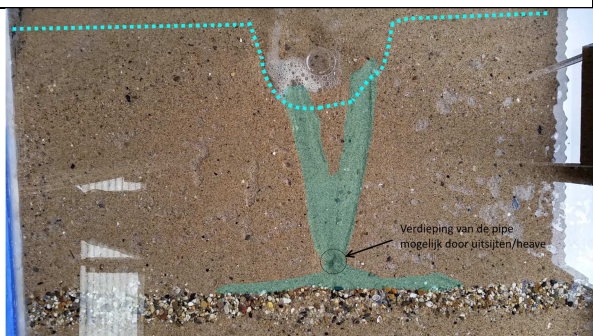
De uitkomst van de eerste test was dat het ontwikkelen van de pipe is gestopt. In de afbeeldingen is te zien dat de pipe zich ontwikkelt tot aan het grofzandfilter. Dit bewijst dat een grofzandfilter efficiënt werkt tegen pipeontwikkeling. Hierna is de test nog 30 minuten doorgegaan om verstopping uit te sluiten, er trad geen heave op als gevolg van verstopping en er is geen pipe vorming waargenomen achter het grofzandfilter.



Figuur 40: Bovenaanzicht; Beginsituatie.



Figuur 41: Bovenaanzicht; De pipe is geïnitieerd en heeft zich tot aan het grofzandfilter ontwikkeld. Nu is het moment aangebroken waaruit moet blijken dat de pipe zich niet door het filter heen ontwikkelt, maar erlangs/stilvalt.



Figuur 42: Bovenaanzicht; De pipe heeft zich ontwikkeld langs het grofzandfilter. De test is naar verwachting gegaan en dit is het gewenste resultaat.



Figuur 43: Bovenaanzicht; Foto van de pipe die uitgegroeid is. De lengte sporen zijn beter zichtbaar dan de sporen langs het grofzandfilter.



Figuur 44: Bovenaanzicht; Op deze foto, die dichterbij genomen is, is beter te zien dat de pipe zich langs het filter heeft ontwikkeld.

5.1.2. Waarnemingen

5.1.2.1. Filterwerking

Na het bereiken van het grofzandfilter was uitstroom van fijne korrels uit het grofzandmengsel waar te nemen. De korrels stromen uit, maar ook dit proces valt stil zodra de eerst 5-6mm van het grofzandmengsel uitgespoeld is. De conclusie is dat de verwachte filterwerking van het grofzandfilter werkt.



Figuur 45: Bovenaanzicht; Grofzandfilter voordat de pipe zich tot daar ontwikkelt. Zand in het grofzandfilter zit nog op zijn plek.



Figuur 46: Bovenaanzicht; Grofzandfilter nadat de pipe zich erlangs ontwikkeld heeft. fijne korrels zijn uitgestroomd, dit is waar te nemen doordat de grove korrels veel beter zichtbaar zijn.

5.1.2.2. Pipe ontwikkeling langs het filter

Er ontwikkelt zich een T-splitsing. Ter plaatse van de T-splitsing is een verdieping waar te nemen. Er is in de filmopnamen en tijdens de test, nadat de pipe is stilgelegd, erg kleinschalig zandtransport te zien van kleine korrels. Dit zand komt uit de verdieping in het zandbed. Hier zijn 2 mogelijke verklaringen voor.

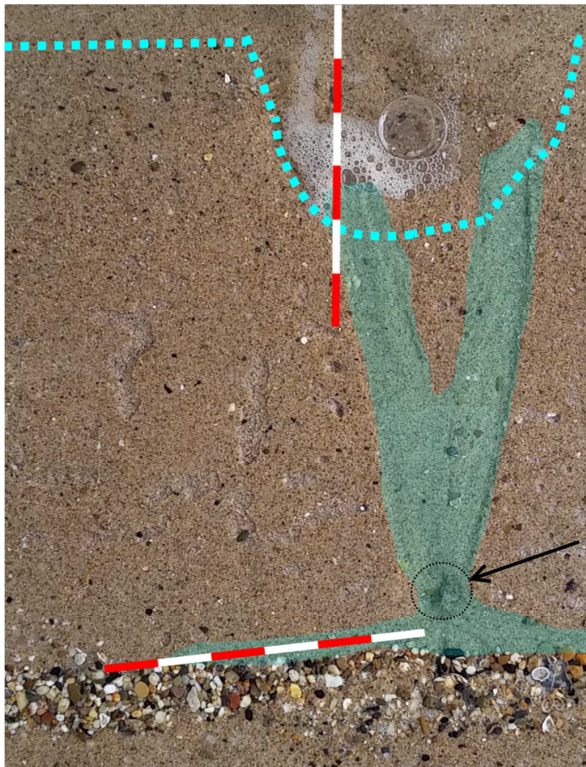
- De eerste is dat er heave optreedt en dat de kleinste korrels uitstromen. De verklaring voor heave komt omdat er in de verdieping steeds grovere korrels te zien zijn, wat doet vermoeden dat de kleinste korrels opwarrelen en uitstromen.
- De tweede verklaring is dat het water door het van richting veranderen een kolkwerking laat optreden. Hierdoor ontstaat een werveling in de T-splitsing en zal zand opwarrelen en wegspoelen.



Figuur 47: Bovenaanzicht; Verdieping ter plaatse van de T-splitsing in de pipe.

5.1.2.3. Toename kwelweglengte stopt de pipe

De pipe, die haaks op de stroomrichting ontwikkelt, is stil gevallen. De pipe is nog niet tot aan de wand ontwikkeld voordat dit gebeurt. Zoals in onderstaande afbeelding te zien is, blauw gearceerd, valt de pipe stil op enig moment langs het grofzandfilter. Aan beide zijden langs het grofzandfilter was deze lengte (+/- 1cm) hetzelfde. Dit is te verklaren door het toenemen van de kwelweg langs het grofzandfilter. Dit houdt in dat het water een langere afstand (kwelweg) moet afleggen. Er is een wit/rode streep getekend waardoor af te lezen valt dat de kwelweglengte dóór de pipe heen nu langer is dan de afstand van het grofzandfilter tot aan het einde van de pipe. Als de pipe in de stroomrichting zou lopen, loopt de kwelweg verder dan het zandpakket. De verwachting is dat bij een hoger verval de pipe zich verder langs het grofzandfilter zal ontwikkelen, of dat er een nieuwe pipe zal ontstaan waar het zandpakket langer is, op de afbeelding de blauwe, horizontaal lopende lijn.



Figuur 48: Bovenaanzicht; Pipe ontwikkelt zich niet verder langs het grofzandfilter.

5.1.2.4. Geen zichtbaar verschil tussen verschillende mengsels

Er is nauwelijks verschil waargenomen tussen de verschillende mengsels. Een mogelijke verklaring is dat de d70 vrijwel gelijk is, en dat de filterwerking erg flexibel is. De uitkomst is dat alle mengsels gelijkwaardig aan elkaar zijn.

5.1.3. Conclusie piping maatregel grofzandfilter

Het pipingproces valt stil in de fase 'ontwikkeling van de pipe'. Dit is de verwachte uitkomst en betekent dat de test geslaagd is. Een grofzandfilter voorkomt dat een pipe zich verder tegen de stroom in, door het zandpakket, ontwikkelt. In de praktijk houdt dit in dat een pipe zich niet verder rivierwaarts kan ontwikkelen en dat het pipingproces is stilgelegd. Bij een waterkering is het voorkomen dat de initiële pipe verder ontwikkelt het belangrijkste, de maatregel grofzand blijkt effectief.

De korrels in het grofzandfilter zijn zwaar genoeg om niet in beweging te komen met het huidige verval. De d_{70} in het grofzandfilter is iets minder dan 3 (2,7) keer zo groot als de d_{70} van het zandpakket, in dit mengsel vindt er minimale uitstroom van kleinere korrels uit het grofzandfilter plaats, wat betekent dat de filterconstructie (verschillende korrel groottes in het mengsel) werkt naar verwachting. Het grofzandfilter was 3 cm dik. Van de 3 cm dat het grofzandfilter dik is, is in de eerste 5-6mm uitstroom van kleine korrels waargenomen. Deze uitstroom vond plaats in de eerste 10 minuten na het bereiken van het grofzandfilter. Gedurende de resterende tijd (ruim 15 minuten) heeft er geen uitstroom plaats gevonden.

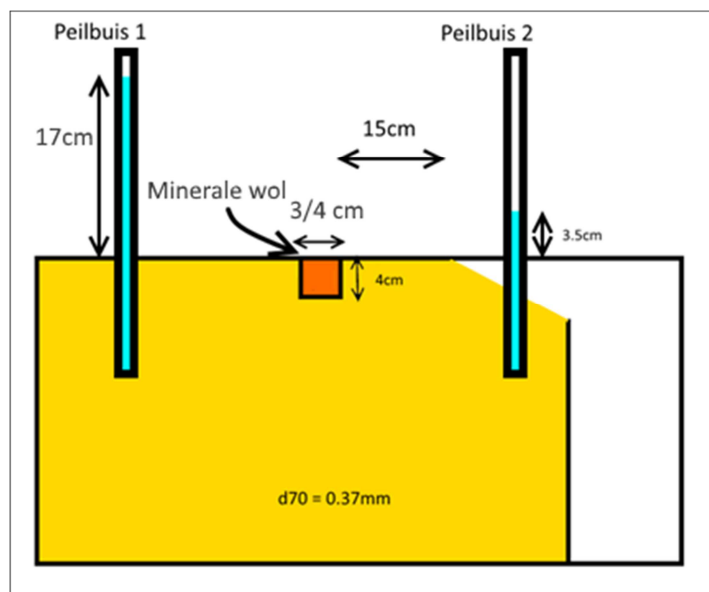
De verschillen in mengsels zijn nauwelijks waarneembaar. De variatie tussen de mengsels is niet groot genoeg. De gelijkmatigheidscoëfficiënt en d_{70} hadden meer moeten variëren om een betere conclusie te vormen over de filter eigenschappen.

6. Piping maatregel zandremmend minerale wol

Er wordt een scherm aangebracht van minerale wol, zoals die als isolatie gebruikt wordt in de woningbouw. Dit hoofdstuk omschrijft de resultaten.

6.1. Test:

Verwacht verval (volgens Sellmeijer):	10.3 -14,2 cm (afhankelijk van het werken van de maatregel, indien de waterdoorlatendheid te weinig is zal de verticale kwelweg toenemen)
Benodigd verval (volgt uit test 1):	12.5 cm
Breedte minerale wol:	3 á 4 cm
Diepte minerale wol:	4 cm
Kwelweglengte over zandpakket:	60 cm
Kwelweglengte vanaf initiatiepunt (inkeping):	56 cm
Gemeten stijghoogte peilbuis 1:	16 cm
Gemeten stijghoogte peilbuis 2:	3.5 cm
Afstand tussen peilbuizen:	57 cm
ΔH (verschil tussenpeilbuizen):	0.22 cm/cm
Initiatie tot eerste contact grofzandfilter:	1 minuut 44 seconden
Ontwikkeling pipe langs grofzandfilter tot stilval:	1 minuut 58 seconden
Stijghoogte peilbuis 1 waarbij piping aan de andere kant van het filter waarneembaar is:	21 cm



Figuur 4: Impressie van de testopstelling bij maatregel 2.



Figuur 50: startsituatie minerale wol test.

6.1.1. Uitkomst

De uitkomst van de test was dat het minerale wol niet werkte zoals eerst werd ingeschat. De minerale wol moest als zandfilter dienen en die werkte duidelijk niet. De minerale wol is zeer slecht waterdoorlatend. Aan het einde van de test waren er stukken minerale wol die nog niet verzadigd waren. Wanneer minerale wol als isolatie wordt toegepast, is het juist wenselijk dat er geen vocht in terecht komt. Het is zeker mogelijk dat minerale wol bewerkt wordt om het waterafstotend te maken. Dit kan een meespelende factor zijn in het falen van deze maatregel.



Figuur 51: Bovenaanzicht; Hoewel bijzonder slecht via illustraties te laten zien is dat de pipe onder het minerale wol doorging, is er op de voor en na foto wel een verschil te zien.

6.1.2. Waarnemingen

6.1.2.1. Minerale wol is slecht waterdoorlatend

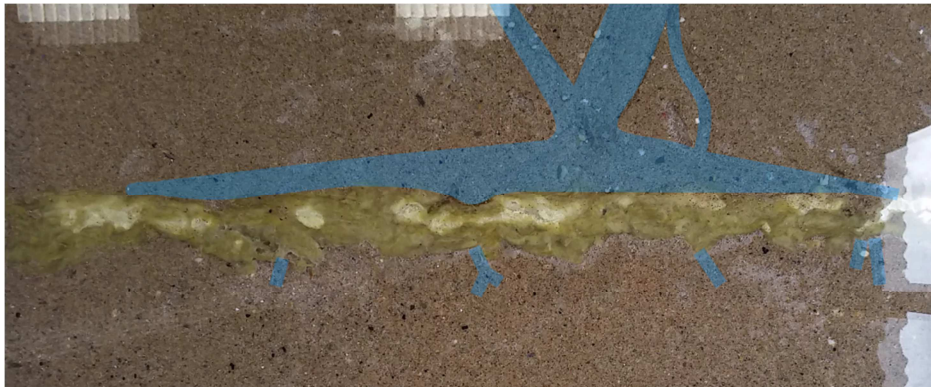
De gebruikte minerale wol heeft, tijdens en voor/na de test meer dan 1 uur in het water gezeten. Aan het einde, toen de test al lang klaar was, waren er nog steeds droge stukken te zien in het minerale wol. Dit betekent dat het niet waterdoorlatend genoeg is.

6.1.2.2. Pipe groeide onder het filter door

De pipe groeide langs het filter, maar schoot er ook onder door. Er is vele malen waar genomen dat de pipe circa 2 á 3 cm groeide, aan de andere kant van het filter, en dan weer stopte. Dit is te verklaren doordat de pipe die onder het filter doorloop weer dichtslibt.

6.1.2.3. Pipe groeide langs het filter

Bij het verhogen van het verval is de pipe verder gaan groeien langs het filter. Er zijn geen metingen gedaan bij welke lengte van de pipe/verval over de test, er piping onder het filter door ging. Dit had een mooie test kunnen zijn van de zogeheten verticale gradiënt. Een de lengte van een verticale pipe heeft in de literatuur een vergelijkbare horizontale lengte die drie keer langer is.



Figuur 52: Bovenaanzicht; De pipe is geaccentueerd. De pipe is zowel langs als onder het filter door ontwikkeld. Pipes die onder het filter doorgingen verstopten altijd en groeide nooit lang. Deze foto is aan het einde van de test genomen.

6.1.2.4 Er ontwikkelden 3 pipe

Voor het eerst zijn er meerdere pipes waargenomen. Hoewel dit voor de test bijzaak is, is bij alle voorgaande proeven altijd 1 initiële pipe waargenomen. Bij deze test zijn er maar liefsts 3 pipes waargenomen in de initiatie fase.



Figuur 53: Bovenaanzicht; Er zijn 3 kanalen ontwikkeld. Het minerale wol is nog steeds niet verzadigd. Dit is enkele seconden na het eerste contact met het minerale wol.

6.1.2.5. Er ontstond een kleine ontgronding

Net als bij de vorige test ontstond er een ontgronding. Er is een sterk vermoeden dat dit het gevolg is van de 2 water stromen uit 2 pipes die samen naar stroming in 1 pipe overgaan. Dit is bij het grofzandfilter ook al genoemd, maar door extra waarnemingen is dit vermoeden versterkt.

Bij deze test was er namelijk sprake van zeer korte stukken langs het minerale wol. Naarmate het verhang werd opgevoerd om piping onder het minerale wol door te laten gaan, nam de lengte van de pipe langs het filter ook toe, en verdiepte de ontgronding zich ook steeds meer.



Figuur 54: Ontgronding.

6.2. Conclusie piping maatregel zandremmend minerale wol

Minerale wol kan, zoals het op dit moment beschikbaar is als isolatiemateriaal, niet ingezet worden als zand filter. Minerale wol is wel water absorberend, maar is zeer slecht doorlatend. Hierdoor heeft het niet de eigenschappen die gewenst zijn.

Om een filter toe te passen dat wel water doorlatend genoeg is moet er een ander medium gevonden worden. Eventueel moet er vooraf literatuur studie gedaan worden naar de invloed van waterdoorlatendheid op het ontstaan van verticale pipes. Binnen dit onderzoek is hier geen tijd voor beschikbaar.

In alle gebruikte literatuur is zelden iets te vinden over het ontgronden van de splitsing in een T vormige pipe. Allicht is tot op heden dit probleem niet bekend geweest.

7. Conclusie

Piping is een actueel probleem. Op dit moment is er zo'n 200 kilometer dijk afgekeurd op piping en heave. Door de verscherpte hydraulische randvoorwaarden en de aangepaste rekenregels voor toetsen op piping die vanaf 2017 toegepast worden, zal dit getal alleen maar toenemen.

Investeren in een nieuwe maatregel tegen piping is zinvol. Het huidige aanbod aan oplossingen is niet zaligmakend. Met een nieuwe maatregel tegen piping is het zaak in te spelen op de tekortkomingen van het huidige aanbod. Er zijn vele zaken die verbeterd kunnen worden aan de huidige toegepaste methoden. In de huidige cultuur van aanbesteden waarin zaken als overlast, werksnelheid, bereikbaarheid van belendingen, ecologie en tal van andere meespelende factoren in fictieve korting worden uitgedrukt loont het een methode te gebruiken die hierop inspeelt. Het verschuiven van de druk om een scherpe prijs op te geven naar een economisch meest verantwoorde methode biedt mogelijkheden om een nieuwe methode te onderzoeken en ontwikkelen die beter in de tijdgeest van het aanbesteden past.

Het aantal dijkversterkingsprojecten zal de komende jaren toenemen en de verwachting is dat de markt verzadigd raakt. Dit brengt ook de realisatie met zich mee dat de regels voor het beoordelen van dijken erg dynamisch zijn. Er zal een behoefte ontstaan om dijken sneller te versterken en een meer dynamische maatregel toe te passen. Hiermee is een versterkingsmethode ingericht op de toekomst.

Piping onder dijken is een mechanisme dat heden ten dage nog steeds lastig te bevatten is. De theorie achter het probleem beperkt en er zijn vele tekortkomingen. Een piping toets heeft de kenmerken van een momentopname. Het is financieel niet haalbaar de juiste parameters te achterhalen (heterogeniteit van de bodem in kaart brengen), waardoor gewerkt wordt met parameters die steekproefsgewijs bepaald zijn.

Omdat het keuren van een dijk slechts een afspiegeling van de werkelijkheid is, is het gunstiger een piping maatregel toe te passen waarbij een dijk niet langer pipinggevoelig is. Dit houdt in dat één van de voorwaarden voor piping weggenomen moet worden. Hierdoor verschuift de bepaling van de sterkte van de dijk van sterkte tegen piping naar betrouwbaarheid van de maatregel. Dit was het geval bij de onderzochte methode met de toepassing van het minerale wol als zandfilter, en daardoor had de methode veel potentie. Het minerale wol blijkt hiervoor niet de juiste eigenschappen te hebben.

Minerale wol is een medium dat niet gebruikt wordt in de waterbouw om als filter te dienen. Er is weinig bekend over de eigenschappen van minerale wol in de ondergrond. De waterdoorlatendheid van minerale wol is niet voldoende om als 'waterdoorlatend, zandremmend' filter te dienen.

Met de huidige rekenregels is een grofzandfilter een goede methode tegen piping. Het proces van pipeontwikkeling richting de rivier wordt stilgelegd. Door met een injectie methode te werken is het lastig zekerheid te verkrijgen over de sluiting van een grofzand scherm. Wat zeker is, is dat de kwelweglengte desondanks toeneemt als er een openingen in een grofzand scherm zit. In het meest ongunstige geval zal een pipe aan een zijde van een grofzand scherm direct voor een opening in het grofzandfilter ontwikkelen waardoor de kwelweglengte minimaal toeneemt.

8. Aanbeveling

De toename van dijkversterking projecten is voor Gebroeders De Koning breder op te vatten dan alleen een nieuwe maatregel tegen piping ontwikkelen. In het verleden hebben zij al mee gewerkt aan dijkversterkingen. Aan de hand van dit onderzoek is het aan te bevelen te blijven investeren in kennis en kunde in de wereld van de dijkversterking.

De vraag naar betere methoden tegen piping brengt ontwikkelingsbudgetten met zich mee. Als het bedrijf de ambitie heeft een breder scala aan maatregelen voor dijkversterkingsprojecten te bieden voor hoofdaannemers in dijkversterkingen zijn er verschillende initiatieven om voor het ontwikkelen van nieuwe methoden budget te krijgen. Er is de mogelijkheid ideeën in te sturen naar de Project Overstijgende Verkenningen van het hoogwater beschermingsprogramma om een traject in te gaan om een nieuw product te ontwikkelen tegen piping. Tevens is er een vooraankondiging op www.tenderned.nl waar het bedrijf zich kan inschrijven op een aanbesteding om een kansrijke oplossing tegen piping bij dijken te ontwikkelen.

Om de methode van het grofzandfilter verder te ontwikkelen moet de aanbrengmethode verder gespecificeerd worden. Dit viel buiten de scope van dit onderzoek. De conclusie is dat de betrouwbaarheid van een grofzandfilter onder meer bepaald wordt door de aansluiting tussen meerdere geïnjecteerde schermen. De werking van het principe is theoretisch en in een schaalmodel aangetoond. De verdere ontwikkeling van de methode is mede afhankelijk van de betrouwbaarheid van de inbrengmethode.

Bij het testen van het grofzandfilter is de koppeling naar praktijkgevallen van piping gevoelige dijken niet in beschouwing genomen. Het effect van verscalen moet onderzocht worden. Concreet houdt dit in hoe groot de verschillen in aanwezige korrelgroottes zijn en wat er voor d70 in het grofzandfilter benodigd is.

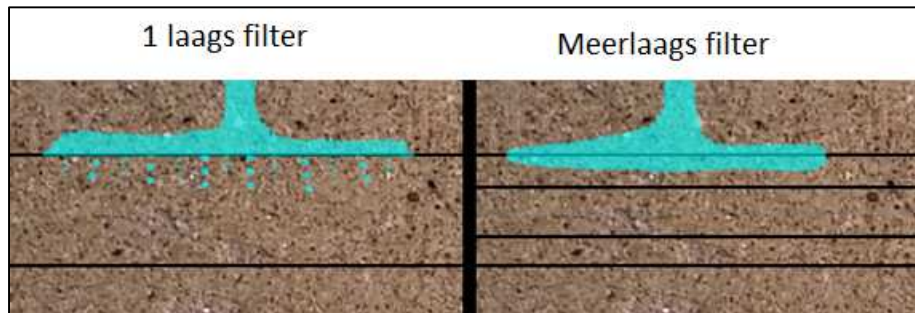
Bij het grofzandfilter is het verschil in korrelgrootte tussen het aanwezige zand en aan te brengen grofzandmengsel niet meegenomen. Er moet onderzocht worden of, of wanneer, er suffosie en suffusie optreedt. In de tests is er voor gekozen de d70 2.7x groter te nemen. Waar de grens ligt zal verder onderzocht moeten worden.

Tijdens de uitwerking van het idee grofzandfilter werd duidelijk dat het werkingsprincipe van een grofzandfilter tegen piping al is ingediend bij de POV Piping. Er wordt in een reactie op de omschrijving van de methode lovend over gesproken en het advies is de innovatie verder te ontwikkelen en totstandbrenging van de innovatie te begeleiden. Door de voorgenoemde aanbrengmethode onderscheidt Gebroeders De Koning zich. Door deze terugkoppeling van de POV Piping is het aan te bevelen de aanbrengmethode verder te specificeren om zo favoriet te worden deze methode verder te ontwikkelen.

Om te zorgen dat er helemaal geen korrels uit het grofzandfilter stromen moeten er meerdere lagen van een grofzandfilter toegepast worden. Dat wil zeggen dat er een filter constructie van verschillende korreldiameter moet worden opgebouwd. Op deze manier zal een pipe zich ontwikkelen tot in het grofzandfilter, maar zal er geen zand door het korrelskelet wegspoelen. Het zandfilter heeft met verschillende mengsels dezelfde resultaten laten zien. Dat er enigszins zand

wegspoelt is dus een zekerheid. Als dit niet gewenst is, wordt aanbevolen een meer-lagen filter te testen. Zie afbeelding onderaan de pagina.

Er is geconcludeerd dat een methode waardoor een dijk niet langer pipinggevoelig is, het meest potentie heeft. De minerale wol blijkt niet geschikt als zandfilter. Het advies is niet verder onderzoek te doen naar de minerale wol. Het is aan het bedrijf om te beslissen of een zandfilter nader onderzocht wordt, of dat onderzoek gestaakt wordt.



Figuur 55: 1 filter met minimale suffusie of 3 filters, waarbij een pipe zich in de filterlagen ontwikkelt. Beide varianten hebben voor- en nadelen. Echter is meerdere filterlagen toepassen in de praktijk aanzienlijk moeilijker.

Onderzoek instituut Deltares is bezig met ontwikkeling van een piping maatregel gebaseerd op korreldiameter. Hoewel dit na het keuzemoment pas aan het licht kwam, zijn zij waarschijnlijk de eerste bedenkers van een grofkorrelig filter. Het is aan te bevelen krachten te bundelen. Als aannemer zal de rol van het aanbrengen van de maatregel veel meer aanspreken. Het advies is een aanbrengmethode te onderzoeken.

9. Bibliografie

- Berg, S. v. (2013). *POV Piping*. Waterschap Rivierenland.
- Botterhuis, T., Stijnen, J., & Et al. (2016). *Landelijk beeld vershilanalyse hydraulische belastingen*. Rijkswaterstaat.
- Deltares. (2012). *Zandmeevoerende wellen*. N.b.: Deltares.
- Deltares. (2015). *Fenomenologische beschrijving Faalmechanismen*. Delft: Deltares.
- DINO loket. (2016). *Ondergrondgegevens*. Opgeroepen op 2 29, 2016, van www.dinoloket.nl: <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens>
- Engering, F., & Et al. (2007). *Module MPiping-VNK*. Delft: Rijkswaterstaat VNK.
- H. Senhorst, RWS-GPO. (N.B.). *Drainagetechnieken tegen piping*. N.B.: Rijkswaterstaat.
- HWBP. (2015). *Kansenscan 2015 publicatie*. Hoogwaterbeschermingsprogramma.
- ing. H.T.J. de Bruijn. (2013). *Het pipingproces in stripvorm*. Lelystad: Deltares.
- M.S.Luijendijk, Deltares. (2011). *Innovatieve oplossingen kweloverlast en piping*. Deltares.
- Maaskant, B., Knoeff, H., & et al. (2016). *Consequentie analyse Nieuwe Normering & WBI 2017*. Rijkswaterstaat.
- Niemeijer, H. (2013). *Drainagetechnieken tegen piping*. *Drainagetechnieken tegen piping* (p. 11). Arcadis.
- POV Piping. (2016). *Home*. Opgeroepen op 05 30, 2016, van www.pov-piping.nl: <http://www.pov-piping.nl/>
- POV Piping. (2016, 05 27). *Innovatie challenge*. Opgehaald van www.pov-piping.nl: <http://www.pov-piping.nl/content/innovatie-challenge.html>
- Programmadirectie Hoogwaterbescherming. (2015). *Projectenboek 2016*. Utrecht: Hoogwaterbeschermingsprogramma.
- Quist, J. (2015). Verticaal zanddicht geotextiel bestrijdt piping. *cobouw*, 1.
- Redactie Bouwend Nederland. (2014, 6 19). *Drie miljoen euro voor onderzoek naar piping*. Opgehaald van www.bouwendnederland.nl: <http://www.bouwendnederland.nl/nieuws/992458/drie-miljoen-euro-voor-onderzoek-naar-piping>
- Rijkswaterstaat. (2016, 2 4). *Gezocht: innovaties voor sterkere dijken*. Opgehaald van www.rws.nl: <http://rws.nl/over-ons/nieuws/nieuwsarchief/p2016/02/gezocht-innovaties-voor-sterkere-dijken.aspx>
- Rijkswaterstaat en de Nederlandse Waterschappen. (2016, 04 02). *Vooraankondiging :Vooraankondiging Nieuwe oplossingen voor piping bij dijken -Rijkswaterstaat Grote*

Projecten en Onderhoud (GPO) . Opgeroepen op 05 30, 2016, van www.tenderned.nl:
<https://www.tenderned.nl/tenderned-web/aankondiging/detail/samenvatting/akid/c5c46ab8425c60d9637b001280104406/pageId/D909C/huidigemenu/aankondigingen/cid/767823/cvp/join;jsessionid=47764D40BB139B9FB05885E0D6636009.node1>

Sellmeijer, J. (1988). *On the mechanism of piping under impervious structures*. Delft: Bibliotheek technische universiteit.

STOWA. (2010). IJkdijk: resultaten van het piping experiment; bruikbaarheid voor de beheerder. Arnhem: STOWa.

't Hart, R., de Bruijn, H., & de Vries, G. (2015). *Fenomenologische beschrijving faalmechanismen*. Delft: Deltares.

TAW. (1999). *Technisch rapport Zandmeevoerende Wellen*. n.b.: TAW.

van Beek, V. (2015). *Backward Erosion Piping Initiation and Progression*. Delft: van Beek.

van den Dikkenberg, B. (2013, 9 10). *Piping serieus probleem voor veiligheid rivierengebied*. Opgehaald van www.refdag.nl: http://www.refdag.nl/achtergrond/natuur-techniek/piping_serieus_probleem_voor_veiligheid_rivierengebied_1_689700

Van Den Herik. (2015). *Piping Control*. Opgeroepen op 06 05, 2016, van www.herik.nl: <http://herik.nl/nl/content/piping-control>

Waterschap rivierenland. (2014, 3 11). *Waterschap Rivierenland geotextiel* . Opgeroepen op 06 05, 2016, van www.youtube.com: https://www.youtube.com/watch?v=8-oZrG-Bi_E

10. Bijlagen

Er zijn enkele bijlagen geschreven om als extra naslagwerk en onderbouwing voor dit onderzoeksrapport te dienen. Deze bijlagen zijn aparte documenten die achter het rapport toegevoegd zijn.

Bijlage 1: Oriëntatie & analyse rapportage

Bijlage 2: Piping opgave per watersysteem

Bijlage 3: Keuzecriteria & ingevulde keuzematrix

Bijlage 4: Verslag van het maken en in gebruik nemen van de testopstelling

Bijlage 5: Zandmonsters uit promotie onderzoek van ir. V. Van Beek (van Beek, 2015)

Bijlage 6: Nadere omschrijving van alle piping maatregelen (ideeën)