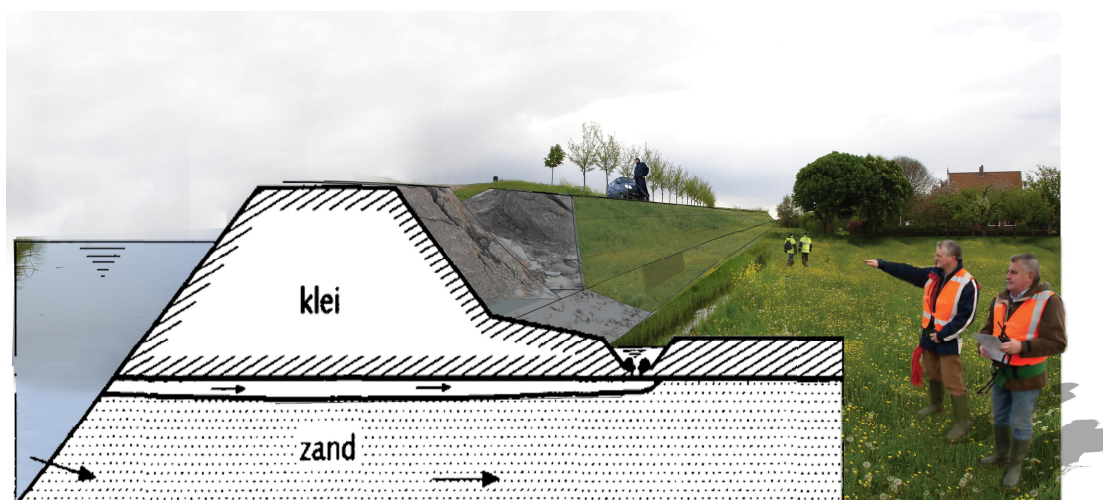


Afstudeeronderzoek

Pipingpreventiemaatregelen op de proef

*Welke resultaten worden verwacht van de preventiemaatregelen om het
dijkfaalmechanisme piping te voorkomen tijdens "Sensorvalidatietest" veldproeven
uitgevoerd door Deltares in 2012?*



Leeropdracht Van Hall-Larenstein

Auteurs:
Joris Broekman,
Wiebren Koers.

Datum:
6 juni 2012

Afstudeeronderzoek

Pipingpreventiemaatregelen op de proef

Welke resultaten worden verwacht van de preventiemaatregelen om het dijkfaalmechanisme piping te voorkomen tijdens "Sensorvalidatietest" veldproeven uitgevoerd door Deltares in 2012?

Auteurs:

Joris Broekman,
Wiebren Koers.

Hogeschool van Hall-Larenstein
Land en Watermanagement
Grond- Weg- en Waterbouw
Afstudeer scriptie
Jaar 4

Begeleiders:

Harrie van Rosmalen (docent van Hall-Larenstein)
André Koelewijn (Deltares)
Haike van Lottum (Deltares)

Datum:

6 juni 2012

Voorwoord

Dit rapport is bestemd voor Deltares, docenten van Van Hall-Larenstein en overige belangstellenden. Het is tot stand gekomen in samenwerking met de afdeling Dijktechnologie van Deltares. Wij hopen dat ons onderzoek en de resultaten ook in de toekomst dijkexperts zal inspireren. Deze afstudeeropdracht hebben wij gekozen, omdat wij een uitdaging niet uit de weg gaan en het onbekende deze opdracht ook spannend maakt. Na het eerste bezoek aan de test locatie zag ik (Wiebren) niet hoe het mogelijk was in een paar maanden toonaangevende proeven worden uitgevoerd. Een gebied aan de rand van Nederland in een haast onbevolkt gebied, maar na het maken van het afstudeeronderzoek weet ik, dat iedereen in de wereld van waterkeringen, dit stukje Nederland maar al te goed kent. Daarnaast had ik (Joris) veel verwondering over hoe er zo veel onbekend is over het (waarschijnlijk) meest dominante dijkfaalmechanisme in Nederland. Gezien wij (Wiebren Koers en Joris Broekman) beide mensen zijn die graag zoeken naar oplossingen, zagen wij de kans om een actueel onderwerp onder handen te nemen.

De enorme kennis binnen Deltares heeft ons enorm geholpen om het afstudeeronderzoek te kunnen schrijven. Naar aanleiding van literatuuronderzoek, interviews en een technische uitwerking van een piping preventiemaatregel (verticaal geotextiel) hopen wij een goed antwoord te hebben gegeven op de gestelde vraag.

Graag willen wij hierbij collega's van afdeling Dijktechnologie (Deltares), en docenten van Van Hall-Larenstein bedanken voor de begeleiding en het verstrekken van informatie tijdens het onderzoek. Daarnaast gaat onze speciale dank uit naar Haike van Lottum (projectleider IJkdijk), Goaitske de Vries (medior adviseur/onderzoeker Dijktechnologie Deltares), Vera van Beek (projectingenieur Deltares) en Andre Koelewijn (senior expert Dijktechnologie Deltares) voor de begeleiding, tijd, informatie en energie die zij in ons hebben geïnvesteerd.

Samenvatting

In het jaar 2000 heeft er een veiligheidstudie plaatsgevonden naar Nederlandse dijken. In deze studie werd voor het eerst gerekend met de rekenregel van Sellmeijer, het resultaat hiervan is dat veel dijken afgekeurd werden op het faalmechanisme piping. Door het groeiende ruimte tekort in Nederland wordt het steeds lastiger om piping bermen aan te brengen. Het antwoord hierop hebben verschillende bedrijven oplossingen ontwikkeld om piping te voorkomen.

In dit onderzoek wordt een antwoord gegeven op de hoofdvraag: welke resultaten worden verwacht van de preventiemaatregelen om het dijkfaalmechanisme piping te voorkomen tijdens de Sensorvalidatietest?

Piping is een fase van terugschrijdende erosie onder een waterkering. Door voldoende hoge waterstand aan de bovenstroomse zijde van een waterkering kan de afdekkende laag aan de binnenzijde van een dijk opdrijven en opbarsten. Wanneer de kwelstroom door deze barsten uittreedt ontstaan er wellen. Deze wellen kunnen zanddeeltjes meevoeren en deze worden afgezet rond de uitstroomopening. Bij voldoende groot verval zal dit leiden tot doorgaande kanaaltjes onder de dijk, piping, dit kan leiden tot bezwijken van de dijk.

Dijkbeheerders constateren bij hoogwater vaak wellen. Dit komt meestal voor op plekken waar de ondergrond gevoelig is voor piping. Om deze problemen op te lossen en om te voldoen aan de steeds scherpere veiligheidseisen, wordt de dijk verstevigd. Piping preventiemaatregelen bieden hier een uitkomst voor het groeiende ruimte gebrek. De wensen die beheerders hebben bij deze maatregelen zijn, mogelijkheid tot toetsing op locatie, geen extra kwel, betrouwbaarheid, robuustheid, duurzaamheid en een gemakkelijk te onderhouden systeem.

Preventiemaatregelen die tijdens de Sensorvalidatietest getest worden zijn DMC, een grindkoffer en als aanvullende proef een verticaal geotextiel. Tijdens de validatie van deze maatregelen zal er worden gekeken naar de werking en het optreden van ongewenste effecten door een grote waterdruk. Voor preventiemaatregelen met een filterende werking geldt dat een grotere diepte en een hogere doorlatendheid een positieve uitwerking hebben op de hoogte van de maximale buitenwaterstand.

De uitvoering van de validatie proeven zal plaatsvinden in de faciliteit die voor de pipingproeven in 2009 zijn gebruikt. Bij de huidige proeven kan de dijk naast piping ook door micro- of macro-instabiliteit bezwijken. Om het proces waar te nemen wordt de waterspanning in de dijk geregistreerd. Daarnaast worden er verschillende sensoren door participanten in de dijk aangebracht, deze zullen vroegtijdig het bezwijken van de dijk signaleren. Er zal een dijk opgebouwd worden met een preventiemaatregel onder de dijk en er zal door het verhogen van de buitenwaterstand van de dijk geprobeerd worden deze tot bezwijking te brengen. Als referentie zullen de resultaten van de proeven in 2009 gebruikt worden. De proef wordt als geslaagd beschouwd, wanneer de dijk met preventiemaatregel niet bezwijkt aan een door piping geïnitieerd proces.

De toepassing van pipingpreventiemaatregelen in het werkveld vindt nog niet veel plaats, dijkbeheerders zijn bijzonder kritisch over de nieuwe ontwikkelingen. Wanneer een dijkbeheerder er voor kiest om een preventiemaatregel toe te passen, moet deze zo veel mogelijk op hun wensen aansluiten. Voor de ontwikkelende bedrijven is het belangrijk om de werking van de maatregel aan te tonen. De verwachte uitkomsten van dit experiment zullen zich richten op de werking van de preventiemaatregelen.

In de berekeningen met gevarieerde parameters wordt een dijk met een verticaal geotextiel op bezwijking doorgerekend. Hieruit wordt geconcludeerd dat het plaatsen van een verticaal geotextiel of een vergelijkbare preventiemaatregel een positieve invloed heeft op de hoogte van de kritieke stijghoogte die de dijk kan weerstaan.

Inhoud

Voorwoord	3
Samenvatting	4
Inhoud.....	5
Begrippenlijst	7
1. Inleiding.....	9
1.1. Uitgangssituatie.....	9
1.2. Probleemstelling	10
1.3. Leeswijzer	11
2. Methodologie	12
2.1. Onderzoek.....	12
2.2. Methoden.....	13
2.3. Kader	13
2.4. Beperkingen onderzoek.....	13
3. Piping.....	14
3.1. Ontstaan piping.....	14
3.2. Fases piping.....	15
3.2.1. Opdrijven van de afdekkende laag aan de binnenzijde van de dijk.	15
3.2.2. Opbarsten van de afdekkende laag en het ontstaan van wellen.....	15
3.2.3. Het eroderen van de zandlaag.....	15
3.2.4. Het ontstaan van doorgaande pipes.....	16
3.2.5. Bezijken van de waterkering.....	16
4. Huidige situatie	18
4.1. Dijkfaalmechanismen	18
4.2. Werkwijze	18
4.3. Problemen	19
4.4. Ontwikkelingen	20
4.5. Kansen	20
5. Proefuitvoering preventiemaatregelen.....	21
5.1. Mogelijkheden tijdens Sensorvalidatietest	21
5.2. Pipingpreventiemaatregelen.....	23
5.2.1. BioGrout.....	23
5.2.2. DMC	24
5.2.3. Verticaal geotextiel.....	25
5.3. Proefopstelling preventiemaatregelen.....	25
5.4. Monitoringsplan.....	28
5.5. Definitie geslaagde proef.....	29
5.6. Proefuitvoering	30

6.	Toetsing pipingpreventiemaatregel	32
6.1.	Toelichting rekenmethode.....	32
6.2.	Rekenen met onderloopsheid.....	34
6.3.	Resultaten.....	35
6.3.1.	Nulsituatie	35
6.3.2.	Variatie in locatie preventiemaatregel.....	36
6.3.3.	Variatie in diepte en doorlatendheid.....	36
6.4.	Conclusie berekeningen.....	38
6.5.	Validatie preventiemaatregelen.....	38
7.	Conclusie en aanbevelingen	39
7.1.	Conclusie.....	39
7.2.	Aanbevelingen.....	40
	Bronnen	41
	Lijst met afbeeldingen	43

Bijlage 1: Uitvoeringsplan Sensorvalidatietest.

Bijlage 2: Interview waterschap Rivierenland, Rijn en IJssel + artikel en Groot Salland.

Bijlage 3: Detail tekening East- en Westdijk.

Bijlage 4: Resultaten berekeningen MSeep.

Begrippenlijst

Achterland	het gebied dat binnendijs - ligt
Achterloopsheid	vorming van kanaaltjes of holle ruimten aan de zijkant van een kunstwerk tengevolge van het uitspoelen van grond
Aquifer	watervoerende zandlaag
Binnen (-dijks, -teen)	aan de kant van het land of binnenwater
Buiten (-dijks, -teen)	aan de kant van het buitenwater
Grondbreuk	zie hydraulische grondbreuk
Grenspotential, grensstijgheogte	stijgheogte in de aquifer die bepaald wordt door het gewicht van het afdekkende pakket
Heave	in dit rapport wordt hiermee bedoeld de situatie waarbij verticale korrelspanningen in een zandlaag wegvallen onder invloed van een verticale grondwaterstroming; ook fluïdisatie of de vorming van drijfzand genoemd
Hydraulische grondbreuk	verlies van korrelcontact in de grond als gevolg van te hoge wateroverspanningen; in geval van een cohesieve afdekkende grondlaag leidt dit tot opdrijven en opbarsten, in geval van een niet-cohesieve grondlaag tot Heave
Intreepunt	(theoretisch) punt waar het buitenwater tot de watervoerende zandlaag toetreedt, als gevolg van het verval over de waterkering
Kritiek verval, c.q. kritieke kwelweglengte	waarde van het verval, c.q. de lengte van de maatgevende kwelweg, waarbij juist geen piping of Heave optreedt
Kwel	water dat door of onderdoor een waterkering stroomt, als gevolg van het te keren verval over de waterkering
Kwelkade	een in het direct aan de dijk grenzende achterland aangebrachte kade om afstromen van kwelwater te verminderen; daarmee wordt getracht het optreden van pipingverschijnselen te voorkomen alsmede wateroverlast binnendijs tijdens hoge rivierafvoeren te beperken
Kwelweg	mogelijk pad in de grond die het kwelwater aflegt, van het intreepunt naar het uitreepunt
Kwelweglengte	de afstand die het kwelwater in de grond aflegt
Kwelscherm	een waterdicht scherm dat verticaal in de grond wordt aangebracht, waardoor de kwelweglengte wordt vergroot
Kwelsloot	sloot aan de binnenzijde van de dijk die tot doel heeft kwelwater op te vangen en af te voeren
Onderloopsheid	zie piping
Opbarsten	scheuren van een afdekkende laag die is opgedreven
Opdrijven	vorm van hydraulische grondbreuk waarbij een cohesieve afdekkende laag tengevolge van wateroverspanning in de onderliggende aquifer wordt opgelicht
Piping	het ontstaan van holle ruimten onder een dijk of kunstwerk, tengevolge van een geconcentreerde kwelstroom waarbij gronddeeltjes worden meegevoerd; wordt ook onderloopsheid genoemd. In de feitelijke definitie is sprake van piping indien zich een doorgaand open kanaal heeft gevormd van intreepunt tot uitreepunt.
Potential	stijgheogte ten opzichte van een referentievlaak

Spreadingslengte	lengtemaat die de verhouding tussen de horizontale transmissiviteit van de aquifer (product van horizontale doorlatendheids-coëfficiënt en dikte van de aquifer, kD -waarde) en de verticale hydraulische weerstand van de afdekkende laag (quotiënt van dikte van deklaag en verticale doorlatendheid, d/k) weergeeft
Stijghoogte (in een punt in de grond)	niveau tot waar het water zou stijgen in een peilbuis met filter ter plaatse van het punt; wordt uitgedrukt in meters waterkolom ten opzichte van een referentievlak
Theoretische potentiaal	potentiaal in de aquifer indien deze niet wordt begrensd door bijvoorbeeld het gewicht van het afdekkende pakket
Uittreepunt	locatie waar kwelwater het eerst aan het oppervlak treedt
Uittreeverhang	verhang in het grondwater ter plaatse van het uittreepunt
Verhang	quotiënt van verschil in stijghoogte tussen twee punten en de afstand tussen die punten; wordt ook gradiënt genoemd
Verval	verschil in stijghoogte tussen twee punten, bijvoorbeeld de twee zijden van een waterkering
Voorland	Terrein buitendijks; terrein tussen de dijk en de rivier; specifiek in relatie tot piping: terrein aansluitend aan de dijk, waar een aaneengesloten kleilaag voorkomt
Waterover- /onderspanning	Verschil tussen de aanwezige waterspanning en de hydrostatische waterspanning
Wel	Geconcentreerde uitstroming van kwelwater, bijvoorbeeld door een opbarstkanaal of een gat in de afdekkende kleilaag
Zandmeevoerende wel	Wel die zand meevoert uit de ondergrond

De begrippenlijst afkomstig uit het Technisch Rapport: Zandmeevoerende Wellen [bron 12] is opgenomen om de vaktechnische termen die in dit rapport worden gebruikt toe te lichten.

1. Inleiding

1.1. Uitgangssituatie

Tijdens extreme weersomstandigheden, die calamiteiten tot gevolg kunnen hebben, wordt in Nederland dijkbewaking ingesteld. Dijkwachten inspecteren dan de dijk doormiddel van visuele inspectie en letten hierbij op onregelmatigheden van een dijk zoals piping, verzakking van de kruin van de dijk, macro-instabiliteit, afschuiving (afbeelding 1 en 2) etc. Dit blijkt echter niet meer toereikend, zo blijkt bij de dijkdoorbraak bij Wilnis, waar enkele weken voor de doorbraak nog een inspectie had plaatsgevonden. Daarnaast is na een grootschalige studie de formule van Sellmeijer gevalideerd. Deze wordt gebruikt om te kijken of dijken gevoelig zijn voor piping. Hiervan was de uitkomst, dat dijken eerder afgekeurd zullen worden op dit faalmechanisme. In stedelijke gebieden is het moeilijk om dijken nog te versterken in de breedte. Actuelere en uitgebreidere informatie over innovatieve preventiemaatregelen van de dijk is dus van belang. In 2011 heeft de Nederlandse afdeling van Economische Zaken en Landbouw en Innovatie hier een subsidie van drie miljoen euro voor gegarandeerd aan Stichting IJkdijk. Mede door deze



*Afbeelding 1:
zandmeevoerende wel.*



Afbeelding 2: verzakking van de kruin, macro-instabiliteit en afschuiving van de dijk.

subsidie zal in 2012 een test met verschillende pipingpreventiemaatregelen worden gehouden, binnen de zogenoemde "Sensorvalidatietest". De preventiemaatregelen voor deze proeven worden door verschillende bedrijven ontwikkeld en aangeboden om op deze locatie te testen. Door deze proeven kan de werking worden gevalideerd. Hierdoor kunnen dijkbeheerders gericht kiezen voor een maatregel. Ook kunnen leveranciers aantonen aan klanten, dat de producten werken [bron: 5]. De toepassing van

pipingpreventiemaatregelen voor het bezwijken van dijken zal bij nieuwe dijkversterkingen een belangrijk middel tegen piping gaan vormen in vergelijking met de aanleg van bermen die dit faalmechanisme bestrijden. Zo worden in de toekomst de dijken ook goed beschermd tegen piping. [bron: 2.¹]

¹ Volledige bronnen te vinden in hoofdstuk bronnen

1.2. Probleemstelling

In het jaar 2000 heeft er een veiligheidsstudie plaatsgevonden naar Nederlandse dijken, waarin ook piping werd onderzocht. Deze werd voor het eerst grootschalig uitgevoerd met de rekenregel van Sellmeijer. De resultaten van de veiligheidsstudie omvatten hoge faalkansen op het gebied van piping.

De betrouwbaarheid van de rekenregel van Sellmeijer werd door de resultaten uit de veiligheidsstudie in twijfel getrokken, omdat hierdoor veel dijken niet meer aan de geldende eisen zouden voldoen. Dit resulteerde in grootschalige validatie proeven om de vele aannames van deze rekenregel en de eigenschappen van piping te valideren.

Hiervoor zijn kleine en middelgrote schaal en centrifuge proeven uitgevoerd [bron: 11]. Omdat deze proeven te weinig duidelijkheid konden geven over de rekenregel van Sellmeijer werd besloten om deze op volledige schaal uit te voeren de zogenoemde IJkdijk proeven [bron: 10]. In 2009 is tijdens IJkdijk proeven waargenomen, dat korrelgrootte minder invloed had op de pipe als aangenomen in de kleine schaal proeven. Tijdens deze proeven werd waargenomen dat er een evenwicht kan ontstaan bij 1/3 lengte van de pipe bij een maximaal verval van de waterlijn. Dit was in voorgaande onderzoeken niet aangetoond. Aan de hand van waarnemingen uit deze proeven is de rekenregel van Sellmeijer aangepast. Het gevolg van deze aanpassing is, dat de rekenregel nog ongunstigere uitkomsten geeft. In stedelijke gebieden is het vaak niet meer mogelijk om een dijk breder te maken om deze te laten voldoen aan de eisen, omdat dit vaak een te dure oplossing is of stuit op maatschappelijke weerstand. Daarom hebben bedrijven preventiemaatregelen ontwikkeld. Het is belangrijk dat ontwikkelaars preventiemaatregelen kunnen testen op hun werking. Het onderzoek dat plaatsvindt op de IJkdijk maakt dit mogelijk. Instanties en ontwikkelaars kunnen hier aan elkaar aantonen, dat hun systemen werken.

1.3. Leeswijzer

In dit rapport is het onderzoek beschreven wat antwoord geeft op de hoofdvraag in hoofdstuk 1.3. In hoofdstuk 2 wordt toegelicht hoe het mechanisme piping werkt en welke verschillende stadia optreden, voordat er een volledige pipe ontstaat. Hierdoor zullen vaktechnische begrippen van het dijkfaalmechanisme piping makkelijker te begrijpen zijn. In Hoofdstuk 3, wordt ingegaan op de huidige situatie binnen het werkveld. Door ervaringen van medewerkers van waterschappen is in dit hoofdstuk een beeld geschetst van de praktische omgang met piping problemen. In hoofdstuk 4: Preventiemaatregelen, wordt een vergelijking gemaakt tussen enkele innovatieve pipingpreventiemaatregelen. In dit hoofdstuk wordt door een technische uitwerking van een verticaal geotextiel inzicht verkregen in de eigenschappen van ondergrondse maatregelen. Dit biedt een technische verdieping. In het laatste hoofdstuk, 5: Proefuitvoering preventiemaatregelen wordt vervolgens de methodiek van toetsen toegelicht. Dit geeft antwoord op de laatste deelvraag. In de conclusie wordt antwoord gegeven op de hoofdvraag. Er wordt gekeken naar het proces van ontwikkeling van oplossingen voor het dijkfaalmechanisme piping en er worden aanbevelingen gedaan hoe problemen uit het werkveld met oplossingen ingevuld kunnen worden.

Parallel aan dit onderzoek is ook het uitvoeringsplan van de Sensorvalidatietest opgesteld. Dit document wordt door Deltares gebruikt als leidraad voor het uitvoeren van de proeven in de zomer van 2012. In bijlage 1 is het uitvoeringsplan opgenomen. Het uitvoeringsplan is een dynamisch document waar voortdurend veranderingen in worden aangebracht en is bij schrijven van dit rapport nog niet afgerond. Omdat er veel belangrijke informatie uit het uitvoeringsplan komt, is deze opgenomen in de bijlage. De versie die is opgenomen is een concept versie (5-6-2012).

2. Methodologie

Het hoofdstuk methodologie is geschreven om het onderzoek een duidelijke structuur te geven. De in paragraaf 2.1 opgestelde hoofd en deelvragen worden volgens de opgestelde methodiek worden beantwoord binnen de gestelde kaders.

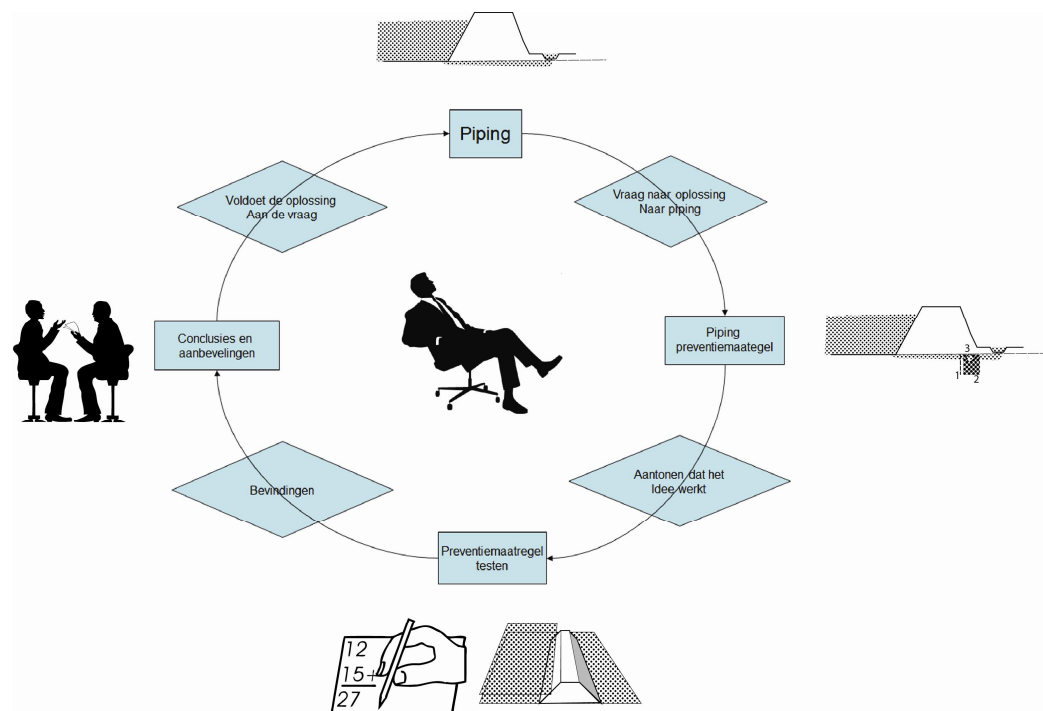
2.1. Onderzoek

Om het onderzoek te kunnen uitvoeren is de volgende hoofdvraag opgesteld:
Welke resultaten worden verwacht van de preventiemaatregelen om het dijkfaalmechanisme piping te voorkomen tijdens “Sensorvalidatietest” veldproeven uitgevoerd door Deltares in 2012?

Om een goed antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag wordt deze onderverdeeld in de volgende deelvragen.

- Wat houdt het faalmechanisme piping in?
- Wat zijn de huidige oplossingen die worden gekozen als maatregelen tegen piping?
- Welke wensen hebben dijkbeheerders bij preventiemaatregelen tegen dijkfaalmechanismen?
- Welke pipingpreventiemaatregelen worden getest tijdens de Sensorvalidatietest?
- Welke voor- en nadelen hebben de pipingpreventiemaatregelen die getest worden tijdens de Sensorvalidatietest?
- Op welke manier kunnen de pipingpreventiemaatregelen getest worden tijdens de Sensorvalidatietest?

Het proces waaraan het rapport is opgebouwd is weergegeven in afbeelding 3. Er zijn diverse oplossingen ontwikkeld om piping te voorkomen. Om de werking van de producten aan te kunnen tonen zullen de ontwikkelaars de maatregelen gaan testen. Daarna kan de gebruiker een overwogen keuze maken of er gekozen zal worden voor een ondergrondse preventiemaatregel.



Afbeelding 3: onderzoeksproces.

2.2. Methoden

Binnen Deltares zijn projecten uitgevoerd met dijken op volledige schaal voor de stichting IJkdijk. De ervaringen van directe betrokkenen en de conclusies en aanbevelingen van deze projecten vormen een degelijke basis voor het te maken uitvoeringsplan en draaiboek. Om meningen van gebruikers te verkrijgen is er onder deze groep een aantal interviews gehouden. Daarnaast is er voor een verticaal geplaatst geotextiel doek een technische uitwerking gemaakt. Om dit uit te kunnen werken is de testlocatie bezocht en onderzocht, zodat de mogelijkheden voor het validatie onderzoek duidelijk zijn.

De informatie voor dit onderzoek wordt gewonnen:

- uit ervaringen eigenwerk (G. de Vries, A. Koelewijn, V. van Beek, H. van Lottum en rapporten vorige IJkdijkproeven.);
- participant (DMC systems);
- waterschappen (Rijn en IJssel, Groot Salland, Rivierenland);
- internet (literatuur / wetenschappelijke artikelen);
- boeken (publicaties);
- vakbladen (wetenschappelijke artikelen).

2.3. Kader

Het afstudeerrapport zal zich richten op de te verwachten uitkomsten van de preventiemaatregelen die tijdens de Sensorvalidatietest zullen worden getest in de zomer van 2012. Het onderzoek zal bestaan uit het evalueren van vorige IJkdijk proeven en de pipingpreventiemaatregelen die zullen worden getest in de Sensorvalidatietest. De testen zullen uitgevoerd worden op de IJkdijk locatie gelegen in het Groningse drop Booneschans. Voor de Sensorvalidatietest zal een uitvoeringsplan en draaiboek gemaakt worden, waarin opgenomen wordt hoe de proeven uitgevoerd worden. Daarnaast zal een verticaal geotextiel in detail uitgewerkt worden voor het technische onderdeel van het afstudeerrapport. Door middel van interviews zal de achtergrond van kennis en ervaringen uit het werkveld worden meegenomen in dit onderzoek. Hierdoor zal niet alleen de theoretische kant van het probleem worden bekeken in het afstudeeronderzoek, maar ook de praktische toepasbaarheid van deze maatregelen.

2.4. Beperkingen onderzoek

De belangrijkste risicofactoren binnen dit afstudeeronderzoek hebben te maken met verschillende aspecten. Door het wegvallen van participerende partijen is het lastiger om specifieke informatie over eigenschappen van maatregelen te weten te komen. Ook is de test afhankelijk van het aanleveren van juiste informatie voor de pipingpreventiemaatregelen. Wanneer deze niet op tijd geleverd wordt, zal dit consequenties hebben voor de volledigheid van onderzoeksrapport.

Omdat de proeven al deze zomer uitgevoerd moeten worden is er binnen het tijdsbestek geen ruimte voor onverwachte tegenslagen. Dit kan problemen opleveren voor het tijdig afronden van het uitvoeringsplan en het afstudeerrapport.

3. Piping

Het hoofdstuk Piping is overgenomen uit het Technisch Rapport: Zandmeevoerende Wellen [bron: 12] en is opgenomen om technische achtergrond informatie en kennis te vergaren voor het onderzoek. In dit hoofdstuk is beschreven wanneer piping ontstaat en wat na de initiatie van piping de verschillende fasen van progressie zijn.

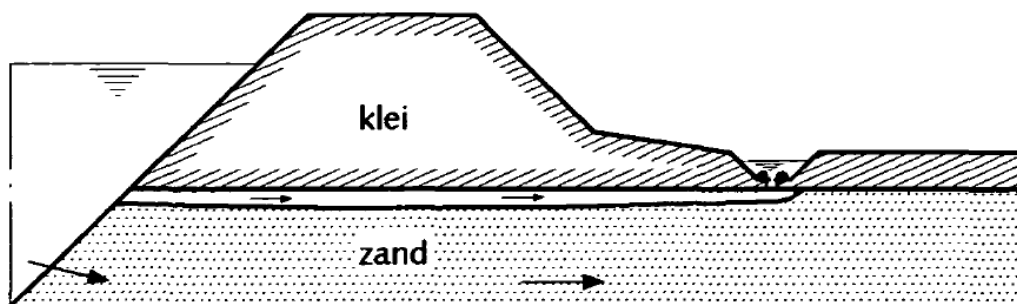
3.1. Ontstaan piping

De meest voorkomende situatie waarin piping ontstaat, is weergegeven in afbeelding 4. De kenmerkende situaties waarin piping voorkomt zijn:

“1. Een horizontale grondwaterstroming door een zandlaag, die bovenstrooms gevoed wordt door een waterreservoir (zee, rivier, watergang, (stuw)- meer, etc.) en benedenstrooms een uittreepunt heeft waar het grondwater vrij uit kan stromen. Vanaf het uittreepunt is de zandlaag in de bovenstroomse richting overdekt door een relatief ondoorlatend en samenhangend oppervlak, bijvoorbeeld de onderkant van een cohesieve grondlaag of de onderkant van een op de zandlaag rustende betonnen of gemetselde constructie, waardoor de mogelijkheid wordt geschapen dat de kanaaltjes in stand blijven.” [bron 12]

“2. Een intreepunt op een zodanig korte afstand van het uittreepunt, dat een open verbinding kan ontstaan tussen het waterreservoir bovenstrooms en het uittreepunt. In de bodemopbouw waarbij piping mogelijk een rol speelt zien we die elementen terug.” [bron 12]

“In de meeste situaties waarbij piping een rol speelt is de bodemopbouw opgebouwd uit een kleipakket met daaronder een zandlaag. Het uittreepunt wordt in dit geval gevormd door een opbarstkanaal, waardoor water vanuit de zandlaag kan uitstromen en zanddeeltjes mee kan voeren. Wanneer de afdekkende kleilaag zo zwaar is dat opbarsten niet op kan treden, kan ook het erosiemechanisme met daarop volgend piping niet optreden, omdat er geen zand kan worden afgevoerd. De bodemconfiguratie is dan ongevoelig voor piping.



(d) Doorgaande pipe (= mechanisme piping)

Afbeelding 4: zandmeevoerende wel. [bron 12]

Een andere typische bodemopbouw waarbij piping mogelijk een rol speelt is (zie afbeelding 5), wanneer twee zandlagen aanwezig zijn die beide rechtstreeks in verbinding staan met het buitenwater. Hierbij kan vanuit beide lagen een opbarstkanaal ontstaan aan de binnenzijde van de dijk. Een denkbare situatie is dat de bovenste zandlaag door beperkte

dikte of doordat deze uit relatief grof materiaal bestaat, niet erosiegevoelig is, maar de onderste laag wel. Wanneer de bovenste zandlaag door aanwezigheid van silt- of kleibijmenging enigszins cohesief is kan echter toch niet uitgesloten worden dat toch een doorgaand opbarstkanaal (pipe) ontstaat tot het maaiveld.” [bron 12]



Afbeelding 5: initiatie van piping. [bron 12]

3.2. Fases piping

Piping kan bij een dijk optreden wanneer er een voldoende hoge buitenwaterstand optreedt. In de volgende paragrafen wordt beschreven welke achtereenvolgende verschijnselen daarbij kunnen optreden (zie afbeelding 6).

3.2.1. Opdrijven van de afdekkende laag aan de binnenzijde van de dijk.

“Door een hoge buitenwaterstand zullen de spanningen in de zandlagen onder de dijk toenemen. Wanneer de waterspanningen ter plaatse van de afdekkende laag aan de binnenzijde groter worden dan het gewicht van die laag, zal deze gaan opdrijven. In de praktijk is opdrijven soms, maar lang niet altijd, waarneembaar door zwakke golfbewegingen van het maaiveld bij betreden.”[bron 12]

3.2.2. Opbarsten van de afdekkende laag en het ontstaan van wellen

“Door het opdrijven kunnen scheurtjes in de afdekkende laag ontstaan, waardoorheen het kwelwater zich een weg zoekt naar het maaiveld. Door erosie van deze kwelweg ontstaat een kanaal tussen de zandlaag en het maaiveld; het opbarstkanaal. Het geërodeerde materiaal uit het opbarstkanaal wordt meegevoerd door de kwelstroom en afgezet rond de uitstroomopening. De diameter van het opbarstkanaal kan sterk variëren afhankelijk van de stroomsnelheid en de erodeerbaarheid van het materiaal in de afdekkende laag.”[bron 12]

3.2.3. Het eroderen van de zandlaag

“Door de uit de zandlaag uittredende kwel worden zanddeeltjes vanuit de zandlaag naar het opbarstkanaal getransporteerd. Het opbarstkanaal wordt daardoor opgevuld met zand dat zich in gefluïdiseerde toestand bevindt. De stromingsweerstand in het opbarstkanaal neemt daardoor toe. Er zijn nu twee mogelijkheden, namelijk (1) door de toegenomen weerstand neemt de stroomsnelheid ter plaatse van het uittreepunt in de zandlaag zodanig af dat het erosieproces stopt, of (2) de stroomsnelheid neemt onvoldoende af, waardoor de aanvoer van zand naar het opbarstkanaal voort blijft duren. In het eerste geval zal de wel ‘schoon’ water gaan produceren. In het tweede geval zal zand door de kwelstroom via het opbarstkanaal naar het maaiveld toe worden getransporteerd en rond de wel worden

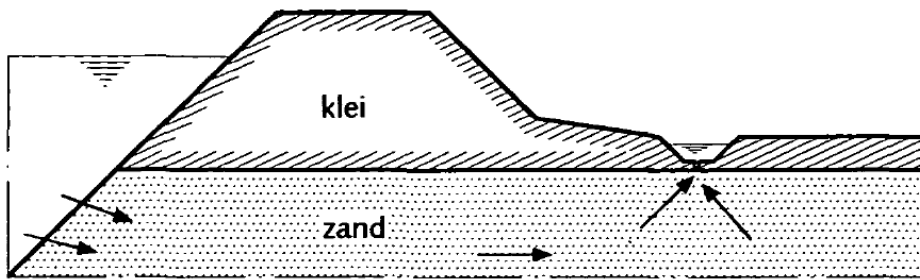
afgezet; daar ontstaat een zandkrater. In de zandlaag ontstaan kanaaltjes (pipes), bovenin de zandlaag direct onder de afdeklaag, die zich in bovenstroomse richting uitbreiden.”[bron 12]

3.2.4. Het ontstaan van doorgaande pipes

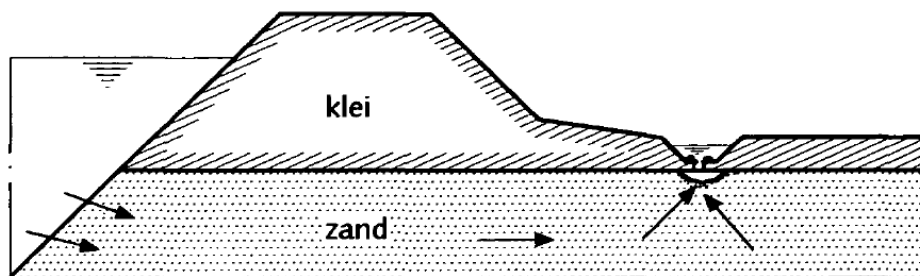
“Bij voldoende groot verval over de kering zullen de erosiekanaaltjes blijven groeien, tot ze het buitenwater bereiken. Er is dan een open verbinding tussen buitenwater en uittreepunt ontstaan, waardoor de waterkering onderloops is geworden (het mechanisme onderloopsheid of piping is daarmee een feit).”[bron 12]

3.2.5. Bezwijken van de waterkering

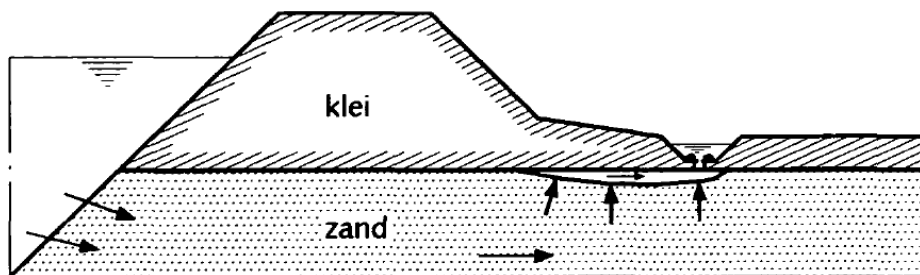
“Als gevolg van het ontstaan van doorgaande pipes zullen deze versneld verder eroderen, waardoor de afmetingen ervan toenemen. Uiteindelijk zal dit, naar wordt aangenomen, leiden tot holle ruimten onder de waterkering die zo groot zijn dat verzakking en breuk, en dus bezwijken, van het dijklichaam zal optreden. Feitelijke waarnemingen van dit bezwijkproces en van de tijdsduur ervan, althans bij dijken, ontbreken echter. In kleinschalige proeven is waargenomen dat de verdere erosie van de zandlaag na het ontstaan van een doorgaande pipe zeer snel, dat wil zeggen in de orde van minder dan een minuut, verloopt. Hoewel het ontstaan van doorgaande pipes niet onmiddellijk geïdentificeerd kan worden met feitelijk echt bezwijken van de dijk zelf, wordt er in de vigerende ontwerpfilosofie wel van uitgegaan. De grenstoestand 'ontstaan van doorgaande pipes' wordt daarom opgevat als grenstoestand ten aanzien van bezwijken.” [bron: 12]



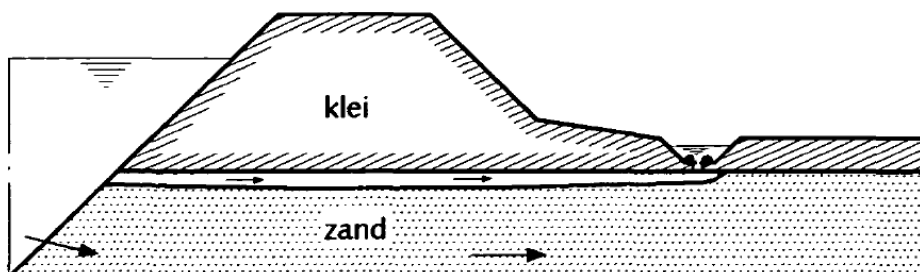
(a) opbarsten deklaag



(b) welvorming, begin van erosie



(c) pipe-vorming door terugschrijdende erosie



(d) Doorgaande pipe (= mechanisme piping)

Afbeelding 6: achtereenvolgende verschijnselen van piping progressie. [bron 12]

4. Huidige situatie

De afgelopen jaren zijn tijdens hoge waterstanden beheerders van dijken vaak in het nieuws geweest. Er werden in 2012 zelfs gebieden geëvacueerd, omdat de vrees bestond dat dijken door zouden breken [bron: 17]. Hoe worden in de praktijk deze problemen aangepakt en voor welke uitdagingen staan de beheerders van dijken. Er zijn voor dit hoofdstuk interviews gehouden bij waterschappen, die in de praktijk vaak te maken hebben met vormen van piping. Hiervoor zijn beleidsmedewerkers geïnterviewd [bijlage 2]?

4.1. Dijkfaalmechanismen

Tijdens hoogwater komt het meestal voor dat dijken tekenen vertonen van falen. Soms komt het zelfs voor, dat een dijk bezwijkt. De dijkdoorbraak in Wilnis (zie afbeelding 7), waar een keten van gebeurtenissen plaatsvond toont aan, dat dijken niet altijd bij hoog water hoeven te bezwijken. Tijdens een droge periode is in deze dijk de freatische lijn gedaald en het veen gaan krimpen (verdrogen) waardoor de dijk in zijn geheel lichter is geworden. Hierdoor is vervorming van de dijk opgetreden. Dit heeft uiteindelijk geleidt tot het ontstaan van een kortsluiting tussen de waterdruk in het zand en de boezem, nabij de beschoeiing wat uiteindelijk heeft geleid tot het afschuiven en wegdrijven van de dijk.



Afbeelding 7: dijkdoorbraak bij Wilnis.

In Stijn en Terbregge, was ook een groot gevaar op een doorbraak, omdat de dijk in deze gevallen begon af te schuiven. Deze extreme situaties komen gelukkig niet vaak voor. Tijdens hoog water zien dijkbeheerders, dat vaak op plekken waar een pipinggevoelige bodemopbouw aanwezig is wellen ontstaan. Daarnaast is het ook belangrijk, dat op plekken waar pipingpreventiemaatregelen zijn toegepast, de dijkbeheerders alert blijven op het optreden van andere faalmechanismen. Om in een vroeg stadium zwakke plekken in dijken te kunnen blijven monitoren, worden hiervoor kaarten bijgehouden. Daarnaast worden er tijdens hoog water helikoptervluchten uitgevoerd, om onbekende zwakke plekken snel te kunnen opsporen.

4.2. Werkwijze

Dijken worden één keer in de vijf jaar getoetst op veiligheid, waaronder piping. Wanneer blijkt, dat dijken niet meer aan de eisen voor piping voldoen, dan wordt er door dijkbeheerders in eerste instantie gekeken of het mogelijk is om een bredere berm bij de dijk

aan te brengen, omdat dit het probleem direct oplost en een bewezen maatregel is. Als dat niet mogelijk is, dan zal er gekozen worden voor het aanbrengen van een maatregel in de bodem, zoals een verticaal geotextiel, damwand of mixed in place wand onder de teen van de dijk. Ook wordt geprobeerd grote wellen te stoppen, door het aanbrengen van horizontale geotextielen. Daarnaast zijn in het verleden grindkoffers toegepast om piping te voorkomen (zie afbeelding 8).



Afbeelding 8: grindkoffer[bron: 13].

4.3. Problemen

Sinds 2000 worden dijken getoetst op piping door het toepassen van de rekenregel van Sellmeijer. Door toepassing van deze rekenregel zijn dijken vaker afgekeurd op piping. Om de juistheid van de rekenregels te controleren zijn hiervoor onderzoeken uitgevoerd. "In het kader van het onderzoeksprogramma Sterkte & Belastingen Waterkeringen zijn verschillende faalmechanismen nog eens nader onderzocht en bestaande kennisleemtes aangepakt om de onzekerheden binnen de huidige toetsing van primaire waterkeringen in beeld te krijgen en te verkleinen. Alleen heeft bij het faalmechanisme Piping nader onderzoek tot het inzicht geleid dat de bestaande toets- en ontwerpregels niet zo conservatief zijn als verwacht werd. Dit betekent dat de kans op bezwijken ten gevolge van piping groter is dan verwacht. Tevens is het zogenaamde lengte-effect voor het faalmechanisme buiten beschouwing gelaten." [bron: 2] Het gevolg is, dat dijken tijdens nieuwe toetsrondes weer niet aan de eisen voldoen. Omdat er ook steeds dichterbij dijken is gebouwd in stedelijk gebied is het niet altijd mogelijk om dijken te verbreden, zonder dat dit op grote maatschappelijke weerstand stuit, een grote impact op het gezicht van het landschap heeft of heel erg duur wordt. Om te voorkomen, dat in de toekomst dijkverbetering onmogelijk wordt, wordt er gekeken naar mogelijkheden voor kostenreductie, die gericht zijn op techniek en proces en op het gebiedspecifiek omgaan met risico's. Wanneer er voor een andere mogelijkheid, dan het verbreden van de piping berm

gekozen wordt, wordt vaak voor een vaste constructieve oplossing gekozen, die het kwel- en pipingprobleem verhelpen, maar die dan weer andere ongewenste lange termijn effecten met zich mee brengt.

Voor projectleiders binnen waterschappen is het moeilijk om steun te krijgen voor innovatieve ideeën. Vaak kiezen leidinggevendenden niet voor deze nieuwe ideeën, omdat deze Niet binnen het gevolgde beleid vallen. Het politieke belang is daarin meestal bepalend, omdat ze graag weer herkozen willen worden. Daarnaast wordt ook veel gedaan zonder deze bestuurders in te lichten. Hierdoor kan maar binnen een beperkt kader worden gewerkt.

Ook is er door de klimaatverandering een grotere kans op kwel. Dit is door huidige regelgeving niet toegestaan. [bron: 2 en 12]

4.4. Ontwikkelingen

Veel pipingpreventiemaatregelen zijn recent ontwikkeld, waardoor er veel onzekerheid bestaat om deze toe te passen. In het verleden zijn er kwelfilters toegepast. Een 'ventiel' wordt aangebracht in de achterliggende sloot nabij de binnenteen van de dijk. Doormiddel van diverse lagen grind wordt het gemakkelijk voor het water om onder de dijk door te kwellen. Bij enkele nieuwe dijkprojecten wordt overwogen om verticale geotextielen te plaatsen. Groot voordeel is dat de waterhuishouding niet wordt gewijzigd. Bij veel van deze nieuwe ontwikkelingen is de duurzaamheid, efficiëntie en soms de werking van de preventiemaatregel nog niet aangetoond, zodat het lastig is om deze toe te passen, zonder tegen problemen aan te lopen zoals beschreven in het vorige hoofdstuk.

4.5. Kansen

Bij de huidige ontwikkelingen worden de pipingpreventiemaatregelen onder de grond geplaatst, hierdoor is inspectie erg lastig. Wanneer er na het aanbrengen van de maatregel toetsing op locatie mogelijk is, kunnen vragen over de duurzaamheid en werking blijvend beantwoord worden. Belangrijk uitgangspunt is dat geen extra kwel mag ontstaan en het systeem betrouwbaar, robuust, duurzaam en goed kan worden onderhouden.

5. Proefuitvoering preventiemaatregelen

Tijdens de Sensorvalidatietest zal er de mogelijkheid zijn om pipingpreventieve maatregelen te testen. In dit hoofdstuk zal worden beschreven op welke manier de proeven uitgevoerd zullen worden en wat de mogelijkheden zijn voor bedrijven om de aangeboden preventiemaatregelen te testen. Daarnaast zal ook uitgelegd worden waarmee deze testen geregistreerd zullen worden en wanneer er sprake is van een geslaagde proef.

5.1. Mogelijkheden tijdens Sensorvalidatietest

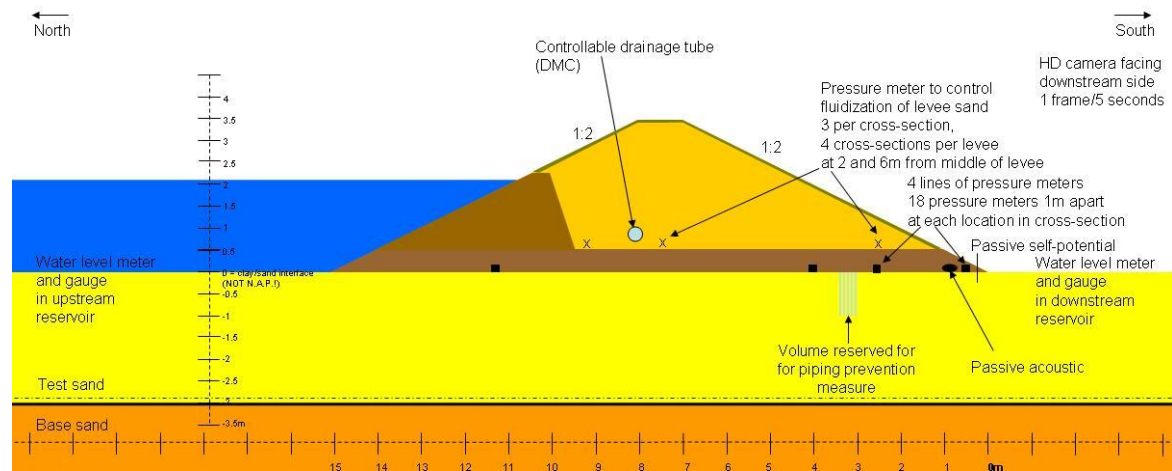
De Sensorvalidatietest zal gehouden worden op de testlocatie van de stichting IJkdijk in Booneschans (zie afbeelding 9). Op de testlocatie zijn twee grote reservoirs aanwezig waar een dijk in gerealiseerd kan worden, op een pipinggevoelige ondergrond. In 2009 zijn deze ook gebruikt bij pipingproeven. Daarnaast zal er nog een zanddijk gebouwd worden op de zachte ondergrond die op het testterrein aanwezig is van klei en veen. Deze dijk is ongeschikt voor pipingproeven. De mogelijke bezwijkingsmechanismes voor deze dijk zijn macro- of microinstabiliteit.



Afbeelding 9: testlocatie IJkdijk Booneschans.

Een aantal randvoorwaarden waar de preventiemaatregelen aan moeten voldoen om te zorgen dat de test slaagt zijn, dat de testen passen binnen het tijdsbestek van de

Sensorvalidatietest en dat deze gevalideerd kunnen worden binnen de aangeboden testopstelling (zie afbeelding 10 en bijlage 3.).



Afbeelding 10: pipingdijk [bron: 3].

Daarnaast moeten deze dijken ook kunnen bezwijken door interne overslag. Ook mogen de preventiemaatregelen geen belemmering vormen bij de validatie van sensoren.

5.2. Pipingpreventiemaatregelen

5.2.1. BioGrout

BioGrout is een preventiemaatregel waarbij doormiddel van injectie in de bodem in-situ versterking van ongeconsolideerde zandgronden kan worden gerealiseerd. Dit kan aangelegd worden onder bestaande dijken. Het biologisch verstevigen van grond heeft als resultaat, dat los zand en grind verstevigd worden tot zandsteen. Door middel van kalkneerslag, geïnduceerd door bacteriën, worden zandkorrels aan elkaar gekit, waardoor de sterkte en stijfheid van het zand toenemen. Het grote voordeel van deze maatregel is dat de doorlatendheid van de bodem door deze preventiemaatregel niet wordt beïnvloed (zie afbeelding 11). Het nadeel is, dat onder invloed van zuur de kalk oplost en je preventiemaatregel verdwijnt. Ook is niet exact te bepalen, waar het BioGrout na injectie aanwezig zal zijn. Door het verkitten van de gronddeeltjes kunnen deze niet meer verplaatsen. Dit zorgt ervoor, dat een doorgaande pipe niet meer mogelijk is. [bron: 9 en 13]



Afbeelding 11: BioGrout.

5.2.2. DMC

Het dijk monitoring en conditionering systeem DMC (zie afbeelding 12) is een preventiemaatregel waarbij doormiddel van een drain met daarin glasvezelsensoren, in segmenten van 150 meter de conditie van de dijk wordt gecontroleerd. Doormiddel van horizontaal geboorde drainagebuizen wordt dit systeem in bestaande dijken aangebracht. Dit heeft verder geen invloed op de rest van de dijk. Het systeem kijkt naar de waterspanning en de temperatuur van het dijklichaam. Wanneer de waterspanning in de dijk toeneemt, bij hoge waterstanden zal het overtollige water worden onttrokken uit de dijk. Hierdoor wordt voorkomen dat er piping ontstaat, omdat geen zandmeevoerende wellen kunnen ontstaan. Dit systeem kan ook water injecteren in de dijk wanneer een dijk dreigt uit te drogen [bron: 16].



Afbeelding 12: DMC.

5.2.3. Verticaal geotextiel

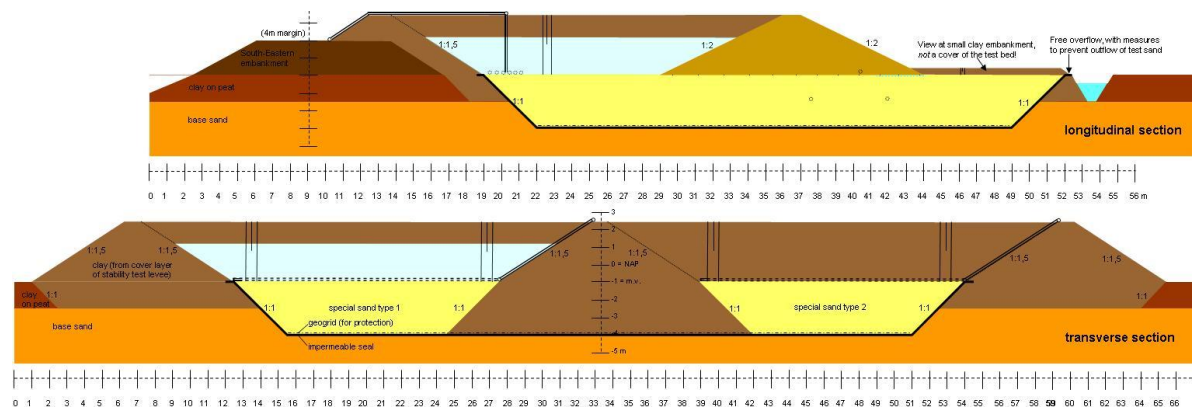
Een verticaal scherm wordt in de bodem geïnstalleerd als preventiemaatregel waarbij doormiddel van een geotextiel (zie afbeelding 13) een filter wordt gecreëerd, dat water laat passeren, maar de zanddeeltjes vasthoudt. Door een kettinggraver wordt dit systeem geïnstalleerd. Deze maatregel wordt gerealiseerd onder de binnentoe van de dijk. Het voordeel van dit systeem is dat het eenvoudig en goedkoop kan worden geïnstalleerd en vervangen. Ook kan dit op exacte locaties worden geplaatst. Wel is het mogelijk, dat na verloop van tijd het geotextiel verstopt raakt, waardoor de doorlatendheid vermindert en het systeem als keerwand gaat functioneren. Dit heeft als gevolg, dat er een lagere stijghoogte kan worden gekeerd en dat in plaats van piping Heave op zal treden [bron: 2].



Afbeelding 13: geotextiel.

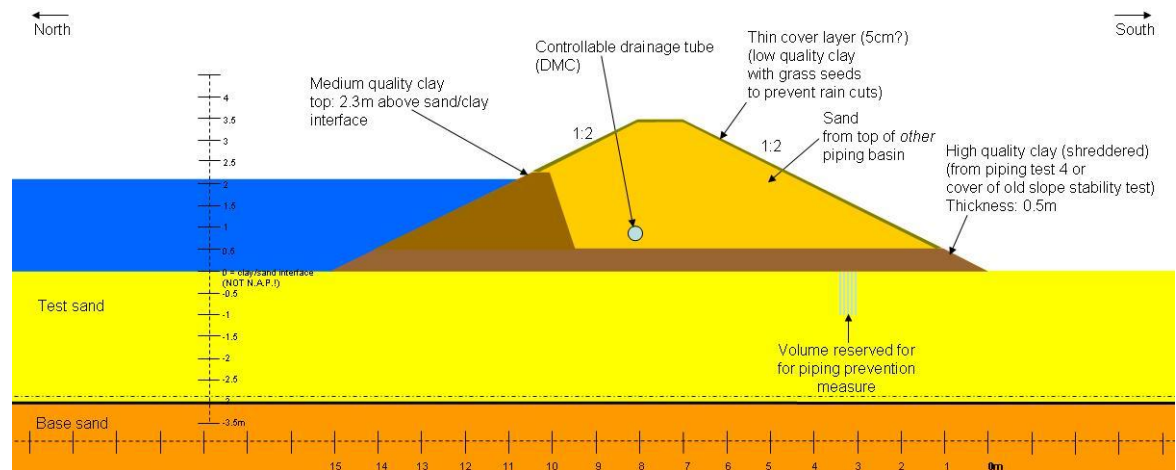
5.3. Proefopstelling preventiemaatregelen

Binnen de Sensorvalidatietest is er in de huidige planning plaats voor de uitvoering van twee preventiemaatregelen. In de huidige plannen wordt ervan uitgegaan, dat het DMC systeem en een grindkoffer getest zullen worden. Tot vlak voor afdrucken van dit rapport is er vanuit gegaan, dat BioGrout getest zou gaan worden. Door gebrek aan financiering is dit nu veranderd in een grindkoffer. In de beschrijving is er daarom nog van BioGrout uitgegaan. Het verticale geotextiel zal getest worden als aanvullende proef. Wanneer er nog financiering komt voor BioGrout zal dit ook als aanvullende proef getest worden. Dit zou tot gevolg hebben dat beide dijken op een zand ondergrond opnieuw opgebouwd zullen worden. In de beschrijving zullen er twee verschillende proefdijken op zand geplaatst worden in de faciliteit die gebruikt is voor de piping proeven in 2009 [bron: 11. De originele ontwerptekeningen voor deze proeven zijn herhaald in afbeelding 14. Echter, de Sensor Validatie Test, ook de 'All-in-One Test', [bron: 3.] moet geen herhaling worden van de proeven uit 2009. Daarom worden er tijdens deze testen pipingpreventiemaatregelen getest. Ook worden er andere faal mechanismen dan enkel piping mogelijk gemaakt. Verzadiging van het zand waar deze dijk voornamelijk uit opgebouwd is, zal optreden na interne overslag van de klei kern. Ook is het mogelijk dat er kruinoverslag plaatsvindt gevold door erosie [bron 1, bron 6].



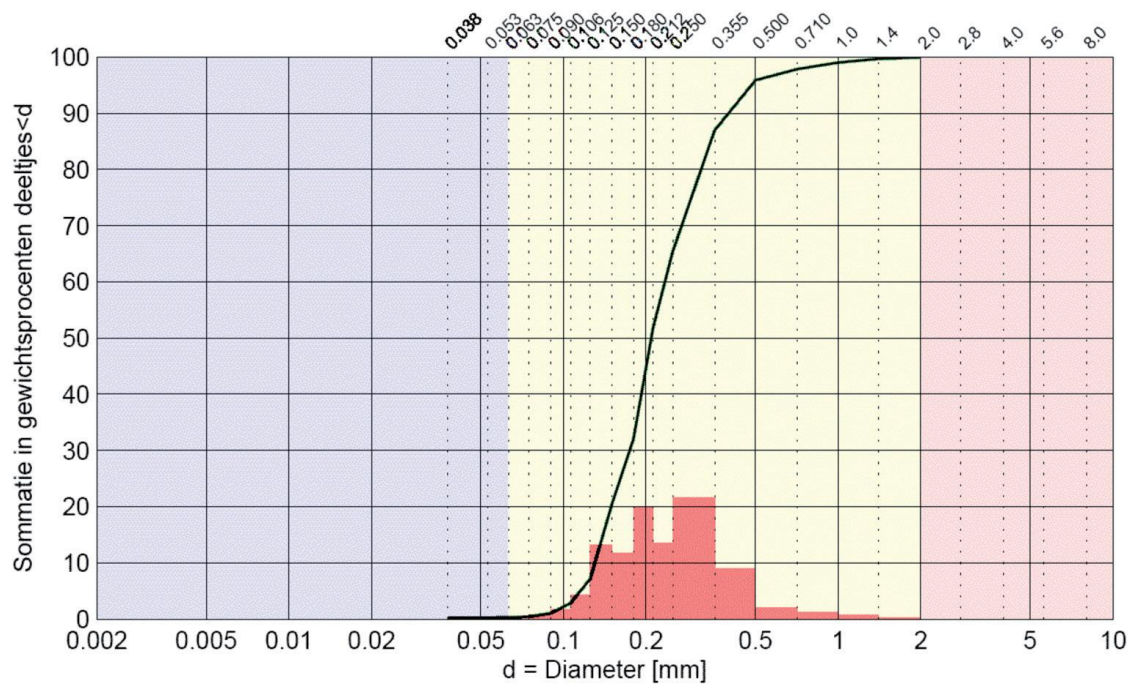
Afbeelding 14 lengte en dwars doorsneden van de piping bakken (op schaal) [bron3]

In afbeelding 14 wordt de algemene dwarsdoorsnede van de piping bakken weergegeven. De volledige klei dijken in deze afbeelding worden vervangen door die in de dwarsdoorsnede van afbeelding 15. Hierin wordt een deel van de klei vervangen door zand aangegeven door een licht bruine kleur.

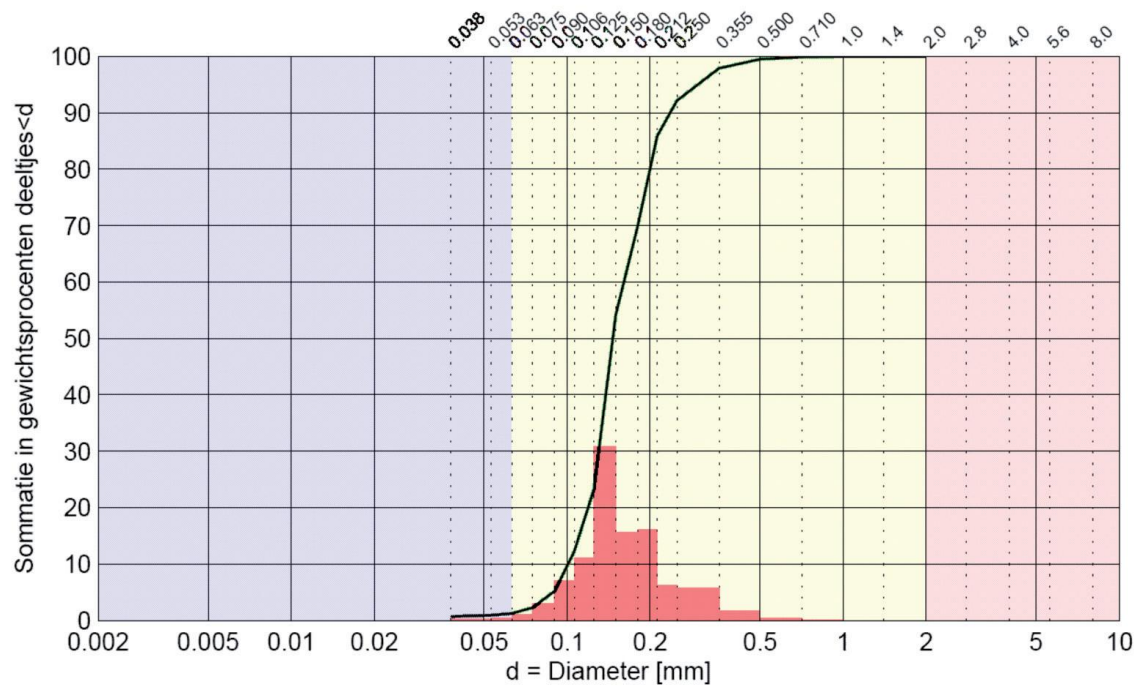


Afbeelding 15 algemene dwarsdoorsneden van de proefdijken op zand (op schaal). [bron3]

Het test zand onder de dijk zal hetzelfde zijn als tijdens de 2009 piping proeven. De bovenste 1.0 meter zal vervangen worden door nieuw zand met dezelfde samenstelling. Dit wordt gedaan om het organische materiaal te verwijderen (zie impressie foto gebied in bijlage 1 paragraaf 1.4). Zeef curven van het test zand zijn gegeven in afbeelding 16 en afbeelding 17. Op het test zand zal een kleilaag van 0,5 meter aangebracht worden. Deze dikte is deels nodig om het risico op alternatieve routes waar het kwelwater langs loopt na langdurige erosie te voorkomen. In de oost en west bak is dezelfde locatie voor piping preventiemaatregelen aangenomen: een ruimte van 0.5 meter breed en maximaal 1 meter diep (= 1/3 van de totale laagdikte).



Afbeelding 16 zeef curve data van het test zand in de west bak. [bron3]

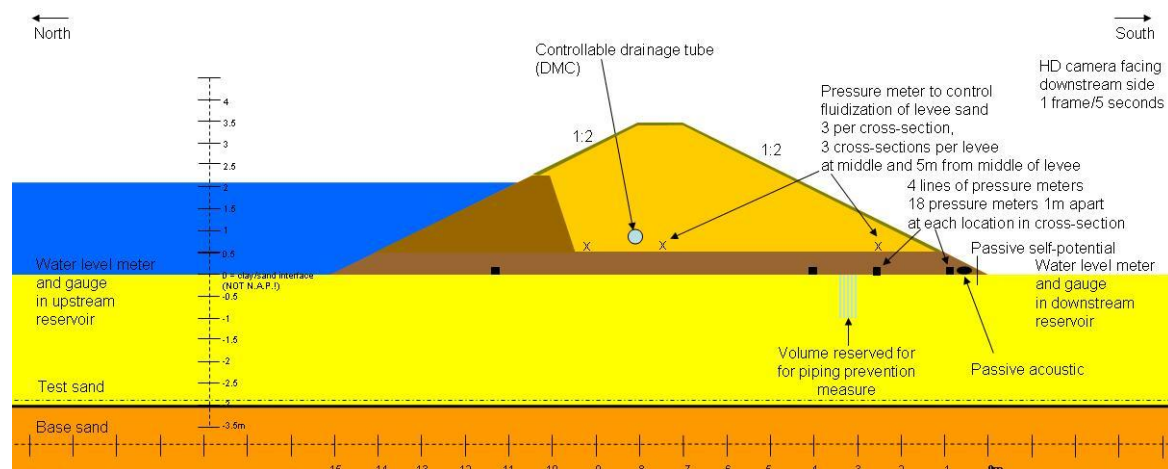


Afbeelding 17 zeefcurve data van het test zand in de oost bak. [bron3]

Het zand wat ontgraven wordt (bovenste 1.0 meter) uit de west bak zal worden hergebruikt in het zandgedeelte van de te bouwen dijk in de oost bak en omgekeerd. Door het verschil in korrelgrootte (zie afbeelding 16 en 17) is het mogelijk de twee verschillende faalmechanismen visueel te onderscheiden.

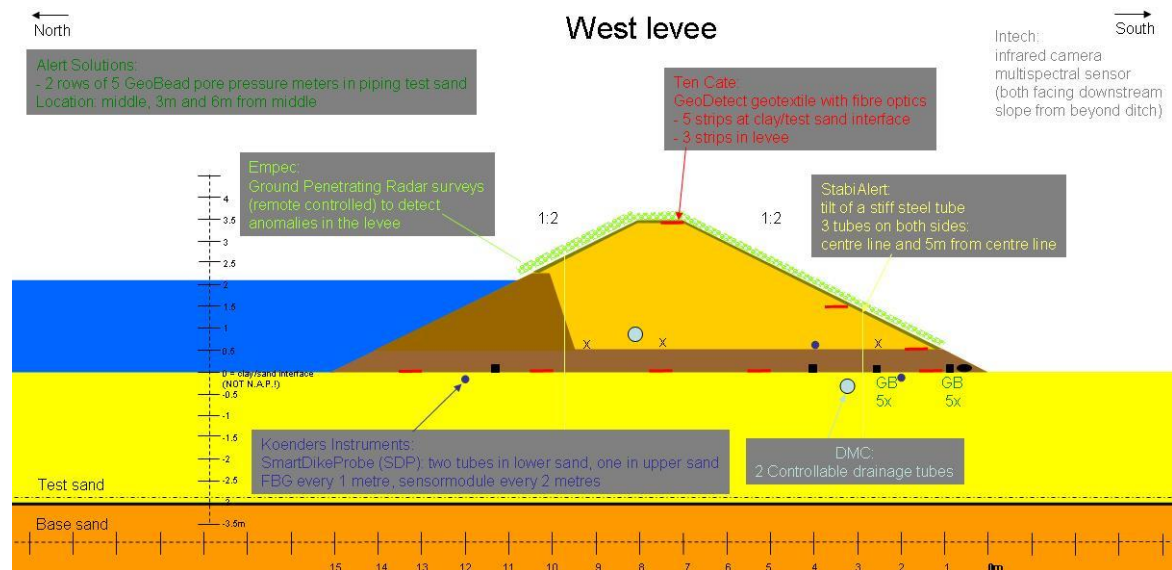
5.4. Monitoringsplan

In dit hoofdstuk zal dieper ingegaan worden op de referentiemonitoring die zal worden gebruikt om de pipingpreventiemaatregelen te monitoren. In de dijk zal het gaan over de monitoring die onder de kleilaag geïnstalleerd zal worden. De referentiemonitoring zal gebruikt worden voor het begeleiden van de bouw, het iken van meetresultaten van participerende partijen en het monitoren tijdens de proef (afbeelding 18 en bijlage 3). Essentieel voor de proeven is om het uittredeverhang te meten. Hiervoor wordt er bij het uittrede punt een raai drukmeters geïnstalleerd. Om de ontwikkeling van kanaaltjes te monitoren staan er nog drie raaien drukmeters op het klei/zand raakvlak. Peilmetingen worden bovenstrooms en benedenstrooms uitgevoerd. De meetfrequentie is 1 keer per 4 sec en de nauwkeurigheid 0,01 m (0,1 kPa) waterdruk. Met behulp van totaal station zullen deformaties van de dijk gemeten worden, minimaal 2 scans per belastingstap (per 20 min). Op basis van de debietmeters op de pomp kan er gezien worden hoeveel water er toegevoegd wordt gedurende de belastingsperiode om het verval constant te houden. Dit debiet zal gelijk zijn aan het debiet wat door het zandpakket wordt geleid. Benedenstrooms wordt ook een debietmeter geplaatst om te kunnen controleren of de waterbalans klopt en of er geen water weglekt, waardoor mogelijk de doorlatendheid van het zand wordt overschat. Er worden twee camera's geïnstalleerd één per bak die 1 frame per 5 seconden zal maken. Om de kinematische viscositeit van het water te bepalen zal ook de temperatuur worden gemeten van het water in het bovenstroomse en benedenstroomse deel.

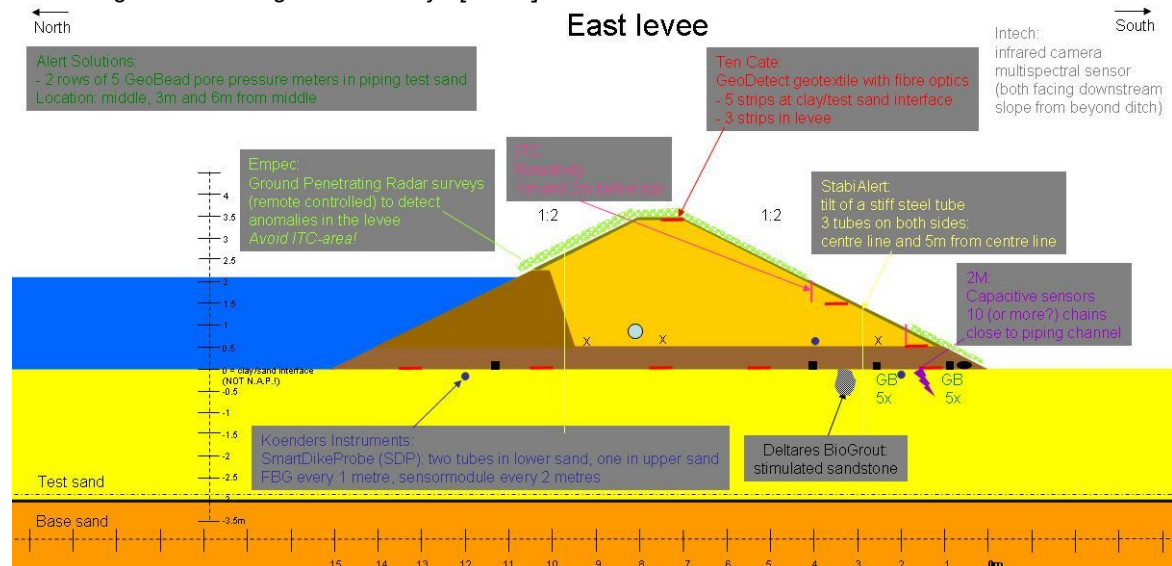


Afbeelding 18 referentie monitoring in proefdijken op zand. [bron3]

Naast bovengenoemde monitoring die bij alle proeven aanwezig is zal er door participanten ook monitoring worden aangelegd. Deze verschillen per dijk en zullen verder geen onderdeel uitmaken van de referentiemonitoring. (zie afbeelding 19 en 20 en bijlage 3)



Afbeelding 19 monitoring in de west dijk. [bron3]



Afbeelding 20 monitoring in de oost dijk. [bron3]

Tijdens de proef zullen visuele inspecties worden uitgevoerd. Met een hoogwerker zal het mogelijk zijn om de proefopstelling op een veilige manier te naderen en visueel te inspecteren. Dit zal met een vaste frequentie gebeuren. De waarnemingen worden bijgehouden in een logboek

5.5. Definitie geslaagde proef

Het doel van de Sensorvalidatietest is het valideren van de sensoren, het stoppen van piping en het aantonen van interne overslag. Hierin wordt dus een validatie uitgevoerd van maatregelen om piping te voorkomen. Bij een geslaagde proef moet de wateraanvoer zodanig zijn dat progressieve erosie kan optreden, maar de op zand aangelegde kleidijk mag in verband met de aanwezigheid van een preventiemaatregel niet bezwijken aan een door piping geïnitieerd proces. De geometrie van de proefopzet zal uiteraard zodanig moeten zijn dat deze gevoelig is voor het optreden van piping, terwijl andere bezwijkingsmechanismen alleen mogen optreden als secundair mechanisme, als gevolg van de werking van de pipingpreventiemaatregel.

De regels die cursief zijn gemaakt, kunnen voor geen enkele proefopstelling met absolute zekerheid worden gesteld. Er kan gezegd worden dat daar naar voortvarend inzicht naar gestreefd wordt. Deze regels schrijven de gewenste uitkomst van de proef voor. Samengevat betekent dit het volgende: De proevenserie is geslaagd wanneer de proef aansluit op de vooraf uitgevoerde predicties. De parameters waarop dit wordt getoetst zijn:

- doorlatendheid;
- waterdrukken en verhang onder de dijk;
- verval waarbij zand in transport komt.

5.6. Proefuitvoering

De pipingpreventiemaatregelen worden getest tijdens de eerste proefweek die plaats vindt van 20 augustus tot 26 augustus.

Voor beide bassins zullen de volgende belastingsschema's aangehouden worden. Dit wil niet direct zeggen, dat dit tot dezelfde belastingsschema's voor beide bassins leidt.

Fase 1: initialiseren.

1a. Vul het reservoir tot 1.00m gebruik hiervoor de beschikbare pompcapaciteit van 120 m³/uur gefilterd water.

1b. Wacht totdat er ongeveer een evenwicht is ontstaan tussen de inlaat en de uitstroom benedenstroomse.

Fase 2: de niet kritieke fase

2a. Verhoog het waterniveau in het bovenstroomse reservoir met 0.20 meter.

2b. Wacht minimaal één uur en voer visuele inspectie uit aan de benedenstroomse zijde op kwelstromen en zand wellen. Mocht dit plaatsvinden wacht dan met het vullen tot er een evenwicht is ontstaan.

2c. Herhaal stap 2a totdat in het reservoir het niveau van 1.80 meter is bereikt.

Fase 3: kritieke fase voor piping wanneer er geen preventiemaatregelen worden genomen

3a. Verhoog het waterniveau in het bovenstroomse reservoir met 0.10 meter.

3b. Wacht minimaal één uur en voer visuele inspectie uit aan de benedenstroomse zijde op kwelstromen en zand wellen. Controleer de referentie druk meters voor tekenen van piping. Wanneer deze zich voordoen, wacht dan totdat er een evenwicht is ontstaan.

3c. Herhaal stap 3a totdat het reservoir een niveau van 2.10 meter heeft bereikt. (Het kritieke waterniveau bij de 2009 IJkdijk piping proeven)

Fase 4: microstabiliteit interne overslag van het kleigedeelte van de dijk.

4a. Verhoog het waterniveau in het bovenstroomse reservoir met 0.10 meter.

4b. Wacht minimaal twee uur en voer visuele inspectie uit aan de benedenstroomse zijde op kwelstromen en zand wellen. Controleer de referentie druk meters voor tekenen van piping. Wanneer deze zich voordoen, wacht dan totdat er een evenwicht is ontstaan.

Wacht minimaal twee uur en voer visuele inspectie uit aan de benedenstroomse zijde op kwelstromen zand wellen.

4c. Herhaal stap 3a totdat het reservoir een niveau van 3.30 meter heeft bereikt.

Fase 5: interne overslag.

5a. Op dag zes van de test, één van de dijken wil tot bezwijken worden gebracht tenzij beide dijken al zijn bezweken. Dit zal gebeuren het niveau van het reservoir continu te laten stijgen met de beschikbare pomp capaciteit van 120 m³/uur, totdat de dijk is bezweken. Wanneer er een waterniveau wordt bereikt van 3.50 meter, het faalmechanisme overslag zal

plaatsvinden. Wanneer beide dijken nog niet zijn bezweken, zal eerst de East dijk tot bezwijking worden gebracht.

5b. Wanneer de West dijk nog niet is bezweken, dan zal het tot bezwijking worden gebracht zoals 5a op dag zeven van de test.

Algemene opmerkingen:

- Het aangegeven reservoirniveau wordt gehandhaafd binnen een nauwkeurigheid van 0.05 meter.
- Belangrijke toenames van het belastingsniveau waarvan verwacht mag worden dat deze zullen leiden tot significante veranderingen mogen niet worden uitgevoerd binnen drie uur voor zonsondergang en zonsopgang.
- Om onduidelijkheid in de meetwaarden te voorkomen zal zand worden verwijderd wanneer deze de waterspiegel nadert. Voor praktische redenen en helderheid zal dit worden voortgezet, totdat de eerste pipe het bovenstroomse reservoir heeft bereikt en de open ruimte zich benedenstroomse heeft voortgezet tot de vierde Deltares referentie monitoring lijn op $\frac{3}{4}$ lengte stroomopwaarts vanaf de benedenstroomse zijde van de dijk.
- Onder de west dijk de DMC drainage buis die als preventiemaatregel is geïnstalleerd zal worden geopend, wanneer de pipe een lengte heeft bereikt tot de derde Deltares referentie monitoringslijn. Deze is aangebracht 4 meter stroomopwaarts vanaf de benedenstroomse kant van de dijk. Dit is mogelijk het geval tijdens fase 3 of fase 4.
- In de West dijk zal de DMC drainage buis die in het zandgedeelte van de dijk ligt worden geopend wanneer de kwel significant deeltjes gaat verplaatsen vanuit de benedenstroomse helling door de kwelstroom die door de dijk loopt. Dit zal waarschijnlijk plaatsvinden tijdens fase 4.

6. Toetsing pipingpreventiemaatregel

Om beter inzicht te krijgen over de werking van de preventiemaatregelen zal er voor een verticaal geotextiel worden gekeken welke invloeden de plek van plaatsing en de doorlatendheid hebben op de hoogte van de maximale buitenwaterstand, zonder dat de dijk bezwijkt door piping of Heave.

6.1. Toelichting rekenmethode

Om een goed oordeel te kunnen geven over de preventie maatregelen wordt de preventiemaatregel verticaal geotextiel in detail doorgerekend en zal er worden gekeken of het effect heeft tegen piping. Voor het toetsen van de preventiemaatregel wordt het computerprogramma MSeep gebruikt. MSeep is een moduleerprogramma, dat grondwaterstromen en erosie tweedimensionaal kan analyseren. In deze berekeningen wordt gezocht naar de buitenwaterstand waarbij de waterspanning in de zandlaag zo hoog is dat de afdekkende laag gaat opdrijven. De waterspanning kan nooit groter zijn dan het gewicht van de afdekkende laag; de potentiaal in de zandlaag waarbij net het evenwicht aanwezig is wordt de grenspotentiaal genoemd. Deze grenspotentiaal is de randvoorwaarde voor het grondwaterstromingspatroon in de zandlaag. Indien de buitenwaterstand verder stijgt, zal het effect zijn dat het gebied waar het grenspotentiaal heerst zich uitbreidt in binnenwaartse richting. Aangenomen wordt dat door opbarsten, kwel door de afdekkende laag kan uittreden, waardoor er zandmeevoerende wellen ontstaan. [bron: 12]

Het programma MSeep werkt met verschillende eindig elementen rekenmodules voor stromingen, Sellmeijer en Heave. Om een goede vergelijking te maken zijn er een nulsituatie (zie tabel 2) en enkele situaties met een geotextiel doorgerekend (zie tabel 3 en afbeelding 23). Hierin zal gevarieerd worden met de locatie, de diepte en de doorlatendheid van het geotextiel. MSeep beschikt echter niet over een module om een verticaal geotextiel in het te modelleren systeem te plaatsen. Om dit te kunnen modelleren zijn er een aantal aannamen gedaan. De nulsituatie wordt doorgerekend doormiddel van MSeep. De opbouw van de dijk en ondergrond zijn gelijk aan de piping proeven van de Sensorvalidatietest. Het geotextiel zal in het model geplaatst worden als een zeer dunne grondlaag waarin parameters gebruikt worden die overeenkomen met een geotextiel. In de proefopstelling van de Sensorvalidatietest wordt er geen afdekkende laag aan de binnenzijde van de dijk geplaatst. In tabel 1 staan de parameters die zullen worden toegepast in het model. Deze eigenschappen behoren tot het zand dat onder de kleidijk komt en de klei waaruit de dijk zal worden opgebouwd. In dit geval de East dijk van de Sensorvalidatietest.

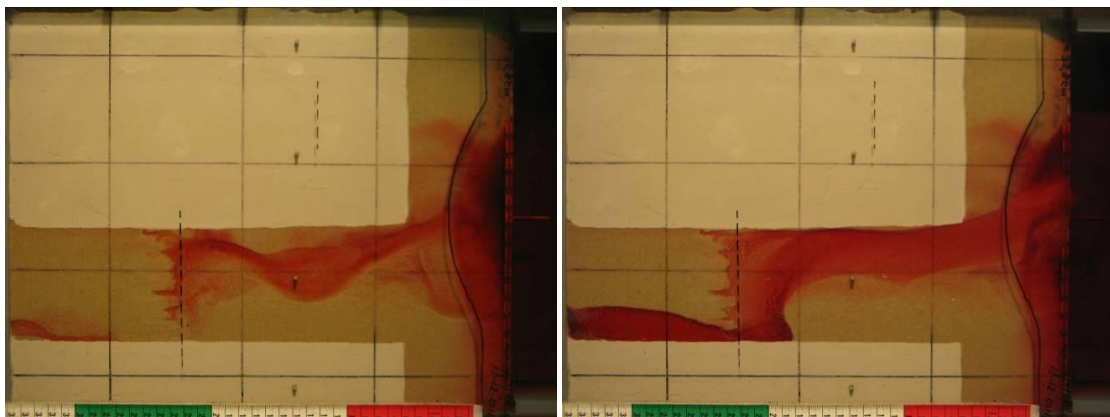
Parameters model		
Parameters	Zand East	Klei
Verticale doorlatendheid [m/s]	9,90E-05	1,00E-07
Horizontale doorlatendheid [m/s]	9,90E-05	1,00E-07
Gewicht verzadigd [kN/m ³]	19,8	17.00
Porositeit [-]	0,36	0.40
Diameter D70 [µm]	180	20
Hoek van inwendige wrijving [deg]	37	37
Constante van White [-]	0.250	0.250

Tabel 1: parameters MSeep model.

De berekening voor het geotextiel wordt deels met de hand gemaakt. De reden hiervoor is toe te lichten aan hand van het in hoofdstuk 2 beschreven piping proces. Nadat er door een voldoende hoge buitenwaterstand opbarsting optreedt en wellen ontstaan, kan de zandlaag gaan eroderen. De uittredende kwelstroom neemt zanddeeltjes uit de zandlaag mee en in bovenstroomse richting zullen er pipes ontstaan direct onder de afdekkende laag (in dit geval de dijk). Wanneer er een verticaal geotextiel geplaatst wordt zullen de zanddeeltjes vastgehouden worden. De groei van pipes zal hierdoor gestopt worden, maar het kwelwater kan blijven stromen. In de zandlaag vindt dan niet alleen een horizontale kwelstroom plaats, maar ook een verticale. Doordat het geotextiel verticaal geplaatst is wordt de terugschrijdende erosie in horizontale richting voorkomen, maar in verticale richting kan deze langs het geotextiel uitbreiden (onderloopsheid). Door de opwaartse kwelstroom nemen de korrelspanningen in het zand achter het geotextiel af. In het uiterste geval vallen de korrelspanningen geheel weg, waardoor het zand in een gefluidiseerde situatie verkeerd (drijfzand situatie), de zanddeeltjes kunnen hierdoor in verticale richting meegevoerd worden door de kwelstroom.

Dit proces is waargenomen in kleine en middel grote schaal proeven voor piping preventie door gebruik van BioGrout [bron: 8]. Is er een klein blokje BioGrout in een bak geplaatst waar vervolgens een kwelstroom gesimuleerd werd waar de waterdruk stapsgewijs werd opgehoogd. Om de kwelstroom visueel te maken is er een rode kleurstof aan het water toegevoegd.

Tijdens de proeven kwam duidelijk naar voren dat het BioGrout door de filterende werking de voortgang van piping stopte. Echter treedt er bij het verder verhogen van de waterdruk onderloopsheid op. In afbeelding 21 is een afbeelding van dit verschijnsel weergegeven. De linker afbeelding geeft het vormen van de pipe weer. Het water stroomt van links naar rechts en de pipe erodeert stroomopwaarts vanuit de benedenstroomse zijde tot aan het blokje BioGrout (gelegen links van de stippellijn). In de rechterafbeelding is de pipe onder het BioGrout door gegroeid.

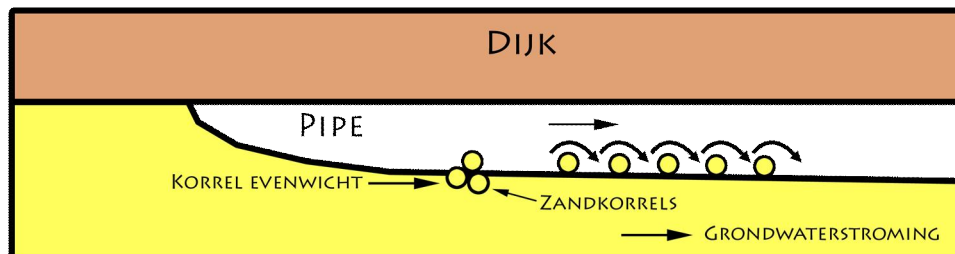


Afbeelding 21 twee fasen van het waargenomen Heave verschijnsel tijdens de BioGrout proeven.

Gebaseerd op de resultaten van deze proeven is gebleken dat onderloopsheid van het BioGrout het waarschijnlijke bezwijkingsmechanisme is, zeker waar de diepte van het BioGrout beperkt is. Omdat BioGrout vergelijkbare eigenschappen heeft aan een geotextiel wordt er aangenomen dat dit verschijnsel ook bij een geotextiel optreedt.

Berekeningsmethoden voor dit bezwijkingsmechanisme zijn helaas niet beschikbaar. Echter gebaseerd op de experimenten, kan een inschatting gegeven worden voor de weerstand van een dergelijke preventiemaatregel. Het model van Sellmeijer, wat gebruikt wordt voor de

berekening van de progressie van piping kan niet gebruikt worden voor het vaststellen van de kritieke stijghoogte van een geotextiel. In dit model wordt de kritieke stijghoogte bepaald door een analyse op invloed van de kwelstroom ten opzichte van de korrels in de pipe. Er wordt aangenomen dat de pipe langer zal worden wanneer de korrels in de pipe meegevoerd worden door de kwelstroom. Deze aanname is echter niet van toepassing wanneer er een filterend object in de ondergrond aanwezig is.



Afbeelding 22 schematisatie van het korrelevenwicht in het model van Sellmeijer.

6.2. Rekenen met onderloopsheid

Voor onderloopsheid van een constructie in de bodem zijn verschillende studies geweest voor het voorspellen van piping in dijken met een opgebarste deklaag. Het meest gebruikte criterium is een van Terzaghi, waar het verhang aan de benedenstroomse zijde van de constructie rond 1 moet zijn. Met een geotextiel is het bepalen van dit verhang niet gemakkelijk te vinden, omdat de doorlatendheid van het geotextiel bijna vergelijkbaar is aan de doorlatendheid van het omliggende zand.

Voor de verschillende berekeningen voor de kritieke stijghoogte aan de buitenzijde van de dijk, is het verhang waarop onderloopsheid van het geotextiel zal optreden gelijk gesteld aan 1. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een grondwaterstroom berekening in het programma MSeep. Er wordt aangenomen dat er opbarsting is opgetreden, waardoor het potentiaal ter hoogte van het maaiveld aan de binnenzijde van de dijk gelijk is aan nul. Hierdoor kan het verhang berekend worden door:

$$i = \frac{P}{\Delta L}$$

Waarin i het verhang is, P de potentiële stijghoogte aan de onderzijde van het geotextiel. Deze is berekend met de Heave functie in MSeep. ΔL is de lengte van het geotextiel. Omdat deze vergelijking lineair is kan na het vaststellen van het verhang met een vooraf bepaald potentiaal, de kritieke stijghoogte aan de buitenzijde van de dijk bepaald worden. Dit wordt gedaan door de $H_{\max}$ te bepalen bij $i = 1$.

De maximale stijghoogte die bereikt kan worden voordat de waterkering met preventiemaatregel bezwijkt wordt opgelost door $H_{\max}$ te berekenen in de volgende formule:

$$H_{\max} = \frac{\Delta H}{i}$$

Hierin is ΔH de stijghoogte waarmee in MSeep het Potentiaal is berekend. i het verhang en $H_{\max}$ de maximaal te keren stijghoogte van de waterkering.

Doordat de vergelijking voor het verhang lineair is, kan er dus door het berekenen van i teruggerekend worden wat $H_{\max}$ is bij een verhang van 1. Dit komt doordat de parameters van het geotextiel niet veranderen. De stijghoogte aan de buitenzijde van de dijk heeft direct invloed op het verhang en andersom.

Om deze methodiek verder toe te lichten is hieronder een berekening van het geotextiel van 2 meter volledig uitgewerkt.

Als eerste stap zal een stromingsberekening in MSeep gemaakt worden.

De eigenschappen van de grond zijn te vinden in tabel 1. Deze gegevens zijn nodig als parameters van het zand en klei in het model. Daarnaast word er in deze berekening voor gekozen om een geotextiel van twee meter te installeren. De doorlatendheid verticaal en horizontaal bedraagt voor dit geotextiel 0.0001 m/s. In het programma MSeep wordt nu een stromingsberekening uitgevoerd. Hieruit volgt dat de stijghoogte ook wel potentie genoemd, 2 meter onder de dijk 0.295 meter is (zie tabel 3.)

In stap twee wordt nu het verhang berekend wat bereikt wordt bij een waterstand van 5 meter aan de buitenzijde van de dijk.

Het verhang wordt berekend wordt uit:

$$i = \frac{P}{\Delta L}$$

Waarin $P=0.295$ meter en $\Delta L= 2$ meter i wordt dan 0.148.

In stap 3 wordt uitgerekend wat de maximale stijghoogte buitendijks mag zijn voordat er Heave zal optreden. Nu het verhang bekend is kan door het oplossen van de volgende vergelijking de maximale waterstand berekend worden:

$$H_{\max} = \frac{\Delta H}{i}$$

Omdat er een lineair verband in de formule zit en de maximale stijghoogte bij $i=1$ bereikt wordt kan gesteld worden: de waterstand $1/0.148= 6.78$ keer hoger kan zijn als 5 meter. $H_{\max} = 5/0.148$ of $H_{\max}=5*6.78$ wanneer één van deze sommen nu zal worden uitgerekend zal blijken dat de maximale stijghoogte aan de buitenzijde van de dijk 33.90 meter mag bedragen voordat de dijk zal bezwijken.

6.3. Resultaten

6.3.1. Nulsituatie

Voor het bepalen van het effect van een pipingpreventiemaatregel die ondergronds wordt aangelegd, zal bekend moeten zijn wanneer in een nulsituatie de dijk zal bezwijken. De kritieke waarden waarbij een dijk zonder preventiemaatregelen zal bezwijken, zal gebruikt worden om naar de werking van het systeem te kijken.

Erosie resultaten	East
Kritieke stijghoogte [m]	2,109
Kritieke kwel lengte [m]	3,158

Tabel 2: kritieke waarden oost dijk uitgangssituatie.

Doordat er in deze situatie alleen piping zal optreden is er gebruik gemaakt van de piping extensie in het programma MSeep. De gevonden waarden komen overeen met de waarden de waarop de pipingdijken bezweken tijdens de proeven in 2009 [bron 4]

6.3.2. Variatie in locatie preventiemaatregel

Er zijn drie berekeningen gemaakt op verschillende locaties onder de dijk: de buitenteen van de dijk, het midden van de dijk en de binnenteen van de dijk. De diepte van dit geotextiel is 2 meter (2/3 van het doorlatende zandpakket).

De resultaten hiervan zijn:

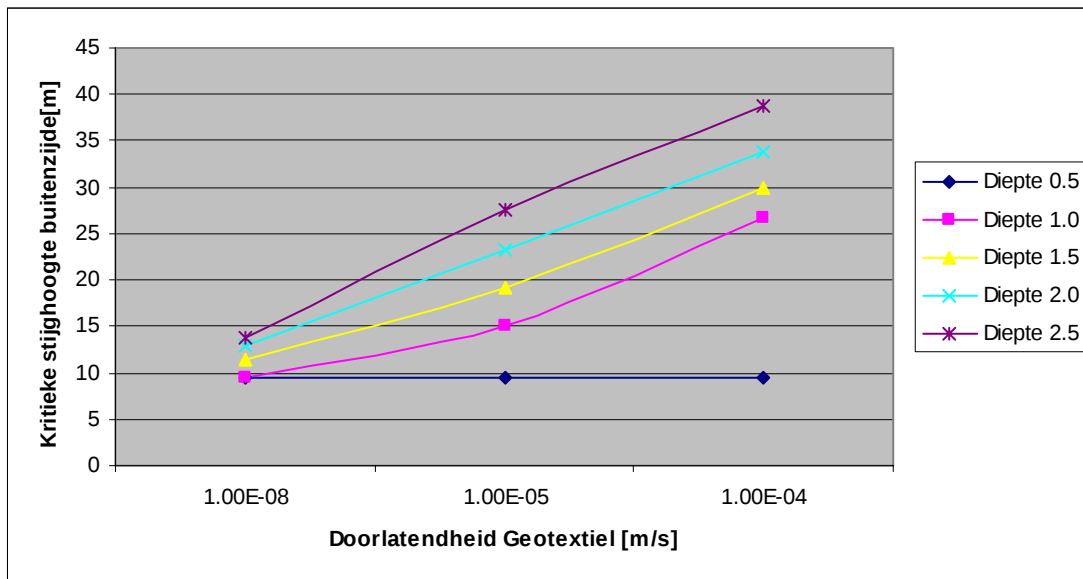
Verticaal geotextiel doorlatendheid 0,0001 [m/s]			
Output model zand East	Buitenteen	Midden	Binnenteen
Verticaal geotextiel [m]	2.000	2.000	2.000
Waterdruk [m]	5.000	5.000	5.000
Potentie [m]	2.497	0.524	0.295
i [verhang]	1.249	0.262	0.148
Kritieke stijghoogte buitenzijde[m]	4.005	19.084	33.898

Tabel 3: variatie in locatie verticaal geotextiel.

Er is duidelijk te zien in tabel 3, dat de kritieke stijghoogte bij de plaatsing van het geotextiel onder de binnenteen van de dijk vele malen hoger is dan bovenstrooms. Aan de binnenteen van de dijk kan het betreffende geotextiel een waterstand van 33.898 meter buitendijks keren aan de bovenstroomse zijde van de dijk is dit gedaald naar 4.005 meter (locatie buitenteen is 8.464 maal hoger). Dit is te verklaren, doordat de kwellengte invloed heeft op het drukverval onder de dijk. Het drukverval wordt groter naarmate het water verder onder de dijk door moet stromen. Achter het geotextiel valt deze beperkende doorlaatfactor weg doordat hier een pipe is gevormd en het water ongehinderd kan stromen. Een plaatsing van een geotextiel onder de binnenteen van de dijk is hierdoor dus aan te raden. Omdat het verschil significant groot is. De plaatsing onder de buitenteen van de dijk biedt in deze situatie slechts 10% van de maximale waterdruk ten opzichte van een plaatsing onder de binnenteen van de dijk.

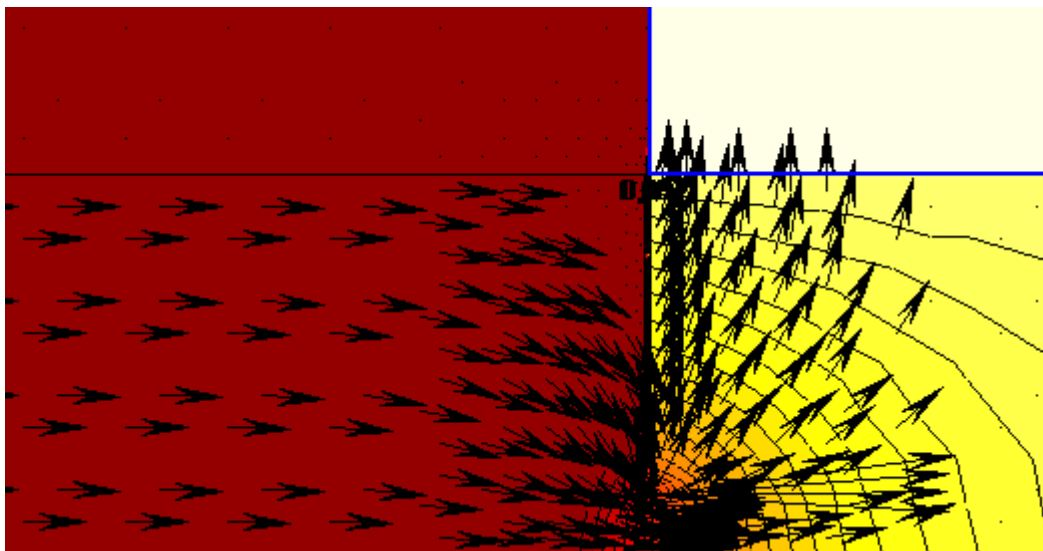
6.3.3. Variatie in diepte en doorlatendheid

In de tweede vergelijking wordt er gevarieerd met de diepte en de doorlaatfactor van het geotextiel. Door het eerder aangegeven significante verschil van de locatie van het geotextiel is er in deze situatie enkel gerekend met een plaatsing van het geotextiel onder de binnenteen van de dijk. De diepte van het geotextiel is telken met 0,5 meter verlengt, tot een lengte van maximaal 2,5 meter diepte. Hierdoor blijft er wel ruimte over waardoor er Heave kan optreden. Vervolgens zijn er voor deze diepten drie verschillende doorlaatfactoren doorgerekend. Voor de doorlatendheid is een waarde lager, gelijk en hoger dan de doorlatendheid van de zandlaag genomen. De resultaten hiervan zijn uitgezet in de grafiek van afbeelding 23, in bijlage 4 zijn de overige resultaten opgenomen.



Afbeelding 23 grafiek met resultaten van variatie in diepte en doorlatendheid.

Hier is te zien dat de diepte van het geotextiel bijna lineair invloed heeft op de kritieke stijghoogte aan de buitenzijde van de dijk. Dit geldt echter niet voor een geotextiel met een diepte van 0.5 meter. Dit komt doordat het potentiaalverschil langs het geotextiel te klein is om invloed te hebben op het potentiaal verschil aan de buitenzijde van de dijk. Er wordt namelijk gerekend met een stijghoogte van 5 meter aan de buitenzijde van de dijk. Wanneer de doorlatendheid na verloop van tijd af zal nemen, doordat zandkorrels in het geotextiel blijven hangen, zal de gehele kwelstroom niet meer direct door het geotextiel stromen. Hierdoor neemt de kans op onderloopsheid toe en neemt het textiel de eigenschappen van een keerwand aan (zie afbeelding 24), hierdoor daalt de kritieke stijghoogte aan de buitenzijde van de dijk.



Afbeelding 24: stroming ondoorlatend geotextiel.

Uit deze resultaten kan geconcludeerd worden dat een hoge doorlatendheid en de diepte van een geotextiel een positieve uitwerking heeft op de kritieke stijghoogte die een waterkering kan keren.

6.4. Conclusie berekeningen

Uit de berekeningen kunnen de volgende conclusies getrokken worden. Een preventiemaatregel met een filterende werking voor de zanddeeltjes heeft het meeste baad bij een plaatsing onder de binnenteeën van de dijk. Hierdoor is er een maximaal lange kwellingte en is er geen kans op erosie onder de dijk. Daarnaast heeft de doorlaatfactor en de diepte van een dergelijk filter een positieve uitwerking op de kritieke stijghoogte aan de buitenzijde van de dijk; hoe hoger de doorlaatfactor/diepte van de filter, hoe hoger de kritieke stijghoogte.

6.5. Validatie preventiemaatregelen

Er zijn berekeningen gemaakt voor een verticaal geotextiel. Hierin is gevarieerd met verschillende parameters. In paragraaf 4.4 staan berekeningen met gevarieerde parameters. Ook is er een aantal criteria door experts opgesteld, waar preventiemaatregelen in de toekomst aan moeten voldoen (zie bijlage 2 en bron 12.). De criteria waaraan maatregelen moeten voldoen zijn:

- veiligheid moet gewaarborgd blijven;
- robuuste oplossing die voor de komende 50 tot 100 jaar veiligheid kan bieden;
- beperken van wateroverlast;
- toekomstvast, flexibel en duurzaam;
- sparen van aanwezige bebouwing;
- bewaren van ecologische en cultuurhistorische waarden van het gebied;
- locatiespecifieke oplossing in knelpuntgebieden;
- betrouwbaar;
- inspecteerbaar / controleerbaar;
- toetsbaar;
- goede werking aantonen met monitoring;
- risicobeheersing;
- geen nadelige invloeden op omgeving;
- praktisch te onderhouden.

Het goed functioneren van het systeem is bepalend voor de kwaliteit en acceptatie van de techniek.

Wanneer er nu gekeken wordt naar de proefuitvoering van de Sensorvalidatietest, dan is het niet mogelijk om de preventiemaatregelen te testen op elk criteria. Het gebied waarop preventiemaatregelen binnen de Sensorvalidatietest getest kunnen worden zijn de doorlatendheid, Waterdrukken en verhang onder de dijk en verval waarbij zand in transport komt.

Daarnaast kunnen de verzamelde gegevens van grote waarde zijn voor een pakket van eisen, waar deze maatregelen op getoetst kunnen worden.

7. Conclusie en aanbevelingen

7.1. Conclusie

De in de inleiding gestelde deelvragen zijn in de verschillende hoofdstukken beantwoord. Samen geeft dit antwoord op de hoofdvraag van dit onderzoek; “welk resultaat wordt verwacht van de preventiemaatregelen om het dijkfaalmechanisme piping te voorkomen?

Nader onderzoek naar het faalmechanisme piping heeft uitgewezen dat er in de rekenregel van Sellmeijer te conservatief wordt gedacht. Over het verschijnsel piping bestaan nog veel onduidelijkheden en er blijken veel meer factoren invloed te hebben op het proces. Dit leidt tot voortdurend nieuwe inzichten en wordt de rekenregel bijgesteld. Hierdoor moeten er in de toekomst veel dijken worden aangepast om aan de nieuwe eisen te voldoen. Door het groeiende ruimte gebrek in Nederland wordt het steeds lastiger om piping bermen aan te brengen. Als antwoord hierop hebben verschillende bedrijven alternatieve oplossingen ontwikkeld om het faalmechanisme piping te voorkomen.

De wensen die dijkbeheerders (eindgebruikers) hebben bij deze maatregelen zijn: mogelijkheid tot toetsing op locatie, geen extra kwel, betrouwbaarheid, robuustheid, duurzaamheid en een gemakkelijk te onderhouden systeem.

Met de Sensorvalidatietest proberen ontwikkelende bedrijven de werking van pipingpreventiemaatregelen aan te tonen. De belangrijkste aspecten waar in deze proeven naar gekeken wordt zijn: voorkomen van piping, voorkomen van Heave en het niet optreden van een niet door piping geïnitieerd bezwijkingsmechanisme. Tijdens de proeven zal er doormiddel van het ophogen van de buitenwaterstand van de dijk een hoogwater gesimuleerd worden. Het ontwerp van de dijk is dusdanig dat er gemakkelijk progressieve erosie kan optreden. De te verwachten uitkomsten van dit experiment zullen zich gaan richten op de werking van de preventiemaatregelen en zullen zich niet richten op de wensen van de beheerders van dijken.

De technische uitwerking toonde dat de gemodelleerde dijk zonder piping preventie maatregel, bezwijkt bij een kritieke stijghoogte van meer als 2,11 meter aan de buitenzijde van de dijk. Bij installatie van een geotextiel van 1,0 meter diepte onder de binnenteen, kan dezelfde dijk een kritieke stijghoogte van 26,60 meter weerstaan. Samen met de resultaten van de overige berekeningen kan hierdoor de conclusie getrokken worden dat het plaatsen van een pipingpreventiemaatregel, de sterkte van de waterkering aanzienlijk verbeterd. Door het installeren van de pipingpreventiemaatregel is het wel mogelijk dat andere bezwijkingsmechanismes optreden.

Uit het onderzoek is gebleken, dat er veel interessante systemen zijn bedacht door verschillende partijen. Echter sluit de vraag en het aanbod niet op elkaar aan. De eindgebruikers zijn vaak niet enthousiast om pipingpreventiemaatregelen toe te passen, omdat deze niet aan hun wensen voldoen. De resultaten uit de veldproeven zullen laten zien dat het plaatsen van pipingpreventiemaatregelen onder een dijk, de sterkte van de dijk aanzienlijk verbeteren. De werking van een preventiemaatregel is helaas niet alles wat een dijkbeheerder belangrijk vindt in de afweging tot toepassing hiervan. Tijdens de ontwikkeling van de preventiemaatregelen wordt nog niet genoeg naar deze aspecten gekeken.

7.2. Aanbevelingen

Na aanleiding van het onderzoek naar te verwachten uitkomsten van pipingpreventiemaatregelen zijn er nieuwe vragen ontstaan, waar geen antwoord op gegeven kan worden. De volgende aanbevelingen zijn te doen naar aanleiding van dit onderzoek.

De te testen preventiemaatregelen worden in dit onderzoek maar voor een beperkte periode gevolgd. Daarom kan er na dit onderzoek nog niks worden gezegd over de levensduur of lange termijn effecten van de preventiemaatregelen. Na plaatsing in dijken zullen deze nog voor een lange tijd nauwkeurig gevolgd moeten worden om hier inzicht in te verkrijgen. Na onderzoek naar de levensduur van de preventiemaatregelen kan er ook gekeken worden naar de duurzaamheid van de maatregelen.

Om versnipperd beleid te voorkomen moet er worden gezorgd voor duidelijke randvoorwaarden, waar preventiemaatregelen ondergronds aan moeten voldoen. Dit om te voorkomen dat beleidsmakers verschillende eisen gaan ontwikkelen en langs en elkaar gaan werken. Hierdoor kunnen kennisleemtes door samenwerking ook ingevuld worden, wat weer zorgt voor betere eisen.

Het is belangrijk voor dijkbeheerders om de preventiemaatregelen te kunnen toetsen op locatie om aan te tonen, dat deze nog aan de geldende eisen voldoen. Uit dit onderzoek is gebleken, dat dit nog niet voldoende mogelijk is, maar wel een belangrijke randvoorwaarde is voor daadwerkelijke plaatsing van een preventiemaatregel.

Pipingpreventiemaatregelen worden getoetst aan de hand van onderloopsheid. Er wordt aangenomen, dat bij het falen van een preventiemaatregel er Heave optreedt. Kennisleemtes in dit mechanisme moeten nader onderzocht worden, om deze nauwkeuriger te kunnen toepassen bij de toetsing van pipingpreventiemaatregelen. Ook is dit nodig om te kijken of de huidige berekeningsmethode hiervoor geschikt is. Daarnaast is nog niet bekend welk bezwijkingsmechanisme leidend is bij toepassing van een preventiemaatregel.

Om de toepassing van de systemen in de praktijk te vergroten zullen er meer ontwikkeling moeten plaatsvinden in samenwerking van ontwikkelaars en gebruikers. Ontwikkelaars en gebruikers zouden samen in zee moeten gaan, om de meest geschikte oplossing te vinden voor het probleem piping.

Bronnen

literatuur

1. [den Adel, 2008]
H. den Adel, Brutusbakproeven, Microinstabiliteit schaal 1 op 1, 2008.
2. [Förster 2011]
U. Förster, Corporate Innovatieprogramma - cluster Waterveiligheid Innovatief Waterkeren, 2011
3. [Koelewijn, Peters, 2012]
A.R. Koelewijn, D.J.. Peters, Design of IJkdijk All-in-One/Sensor Validation test, 2012
4. [De Vries, 2009]
G. de Vries, HP5.1 Draaiboek IJkdijk full-scale piping proef, 2009
5. [Weijers, Elbersen, Koelewijn, Pals, 2009]
J. Weijers, G.T. Elbersen, A.R. Koelewijn, N. Pals, Macrostablieiteit IJkdijk: Sensor- en meettechnologie
6. [de Groot, 2008]
M.B. de Groot, Micro-instabiliteit binnentalud zanddijk, 2008.
7. [Sellmeijer 2006]
J.B. Sellmeijer, Numerical computation of seepage erosion below dams (piping), 2006.
8. [Van Beek 2012]
V. van Beek, Piping prevention using BioGrout - Translation to practice, 2012
9. [Van, den Ham, Blauw, Latil, Benahmed, Philippe, 2011]
M.A. Van, G.A. van den Ham, M. Blauw, M. Latil, N. Benahmed, P. Philippe ,Preventing Internal Erosion Phenomena with the BioGrout process, 2011
10. [Koelewijn, Förster, LAND+WATER NR 5, Mei 2010]
A.R. Koelewijn, U Förster, Proeven met IJkdijk tonen gevaar van piping, 2011
11. [Beek, Knoeff 2010]
V. van Beek, H. Knoeff, SBW Piping: Hervalidatie piping, 2010
12. [Calle, E.O.F. (ed.) 1999]
Calle, E.O.F , TAW Technisch Rapport: Zandmeevoerende Wellen, 1999

Internet

13. [mei 2012]
https://beeldbank.rws.nl/MediaObject/Details/DWW_Rivierdijken__Bovenrijn__rechteroever__Spijk__Spijkse_dijk_332682?resultType=Search&resultList=419179,332989,332983,332982,332981,332970,332969,332960,332959,332682,332680,331706,331176
14. [mei 2012]
<http://www.deltares.nl/nl/product/340639/biogROUT>.

15. [mei 2012]
<http://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid-0/item-31919/management/overstromingslexicon/lexicon/dijkbewaking>
16. [mei 2012]
http://www.landustrie.nl/nl/home/nieuws.html?tx_ttnews%5Btt_news%5D=131&cHash=eb7492e44b10a30634380beed96a82b7
17. [mei 2012]
<http://nos.nl/artikel/327928-dijkdoorbraak-dreigt-in-leek-gr.html>
18. [mei 2012]
<http://www.volkskrant.nl/vk/nl/2686/Binnenland/article/detail/1076527/2010/12/17/Waterschap-hoeft-schade-Wilnis-niet-te-betalen.dhtml>

Lijst met afbeeldingen

<i>Afbeelding 1: zandmeevoerende wel.</i>	9
<i>Afbeelding 2: verzakking van de kruin, macro-instabiliteit en afschuiving van de dijk .</i>	9
<i>Afbeelding 3: onderzoeksproces.</i>	12
<i>Afbeelding 4: zandmeevoerende wel. [bron 12]</i>	14
<i>Afbeelding 5: initiatie van piping. [bron 12]</i>	15
<i>Afbeelding 6: achtereenvolgende verschijnselen van piping progressie. [bron 12]</i>	17
<i>Afbeelding 7: dijkdoorbraak bij Wilnis.</i>	18
<i>Afbeelding 8: grindkoffer[bron: 13].</i>	19
<i>Afbeelding 9: testlocatie IJkdijk Booneschans.</i>	21
<i>Afbeelding 10: pipingdijk [bron: 3].</i>	22
<i>Afbeelding 11: BioGrout.</i>	23
<i>Afbeelding 12: DMC.</i>	24
<i>Afbeelding 13: geotextiel.</i>	25
<i>Afbeelding 14 lengte en dwars doorsneden van de piping bakken (op schaal) [bron3]</i>	26
<i>Afbeelding 15 algemene dwarsdoorsneden van de proefdijken op zand (op schaal). [bron3]</i>	26
<i>Afbeelding 16 zeef curve data van het test zand in de west bak. [bron3]</i>	27
<i>Afbeelding 17 zeefcurve data van het test zand in de oost bak. [bron3]</i>	27
<i>Afbeelding 18 referentie monitoring in proefdijken op zand. [bron3]</i>	28
<i>Afbeelding 19 monitoring in de west dijk. [bron3]</i>	29
<i>Afbeelding 20 monitoring in de oost dijk. [bron3]</i>	29
<i>Afbeelding 21 twee fasen van het waargenomen Heave verschijnsel tijdens de BioGrout proeven.</i>	33
<i>Afbeelding 22 schematisatie van het korrelevenwicht in het model van Sellmeijer.</i>	34
<i>Afbeelding 23 grafiek met resultaten van variatie in diepte en doorlatendheid.</i>	37
<i>Afbeelding 24: stroming ondoorlatend geotextiel.</i>	37

Bijlage 2: Interview waterschap Rivierenland, Rijn en IJssel + artikel en Groot Salland.

Vragen interview werkveld

Interview waterschap Rivierenland (Bas Effing)

Datum: 15-03-2012

- Wat is uw ervaring in het werkveld en welke functie bekleedt u binnen deze organisatie?

Ik ben Adviseur waterkeringen. Ik heb civiele techniek gestudeerd aan de universiteit Twente. Voor het waterschap ben ik werkzaam geweest bij Fugro als Waterbouwkundig Adviseur. Op mijn afdeling, Team Kennis en Advies, wordt er samengewerkt tussen dijkspecialisten, dijkadviseurs, hydrologen en ecologen. Binnen de afdeling houden wij ons met verschillende zaken bezig. Uiteraard planvorming voor nieuwe projecten. Weg en waterbouw, dus het uitvoeren en beheren van projecten, het controleren van dijkversterking ontwerptekeningen, de bestekstekeningen en de bijbehorende vergunningen. Vergunningen voor project ontwikkelaars, particulieren, deze willen namelijk graag op de locaties van waterkeringen bouwen. Dit willen we natuurlijk liever niet, maar we staan hier wel voor open. Daarnaast het onderhoud van 550 km primaire keringen, het beheer er van, denk aan muskusratten, maaien, erosie na hoogwater, we inventariseren ook na hoogwater en ontdekken dus ook zo problemen.

- Kunt u iets vertellen over dijkfaalmechanismen waar u de afgelopen jaren mee in aanraking bent geweest?

Tijdens het hoogwater van 2011 hebben we ongeveer 17 grote wellen gevonden. Deze wellen zijn adhoc aangepakt door deze om te bouwen en op te hogen, opkisten. Opkisten kan niet te hoog, anders verplaats je enkel het probleem en krijg je op andere locaties nieuwe wellen. Dit wordt op gevoel gedaan, dus zeer subjectief en gebaseerd op de jarenlange ervaring van dijkbeheerders. Waarschijnlijk is de methode hiervoor te blijven verhogen tot het moment dat er geen zand meer mee gevoerd wordt. Vervolgens wordt deze wel gemeld naar de binnendienst en wordt de locatie opgenomen in een gisbestand.

- In welke situaties bent u piping tegengekomen?

Piping komt voornamelijk voor in probleemgebieden waar het theoretisch ook verwacht wordt, maar af en toe ook op locatie die we juist niet verwacht hadden. De voorwaarde is dat de deklaag opbarst en dit gebeurt uiteraard alleen bij een hoog stijghoogte verschil.

- Waar in jullie gebied is een grotere kans op het ontstaan van piping en heeft dit een specifieke reden?

Daar waar er een dunne deklaag te vinden is, hier is de kans op opbarsting groter. Daarnaast merken we dat daar waar het zand fijner is er een grotere kans is op piping.

- Wat zijn de gevolgen geweest van de veiligheidsstudie in 2000 en aanpassingen aan de rekenregel van Sellmeijer voor de waterkeringen in waterschap Rivierenland?

Hier kan ik geen zeker antwoordt op geven. Na 1995 zijn er veel dijken aangepakt, hier is echter gerekend met de rekenregel van Bligh. Bligh is hier wat gunstiger dan Sellmeijer en er is toen afgeknot op 18h. Dit is eerder een politiek besluit van hogere overheden geweest, omdat een hogere h tot te zwaar dijkontwerp leidt en daardoor te duur zou worden. De verbeteringen die zijn toegepast zijn voornamelijk kruin verhogingen en stabiliteits- en

pipingsystemen aanleggen. Veel dijken werden afgekeurd op macrostabiliteit. Hier is toen volgens een Boertien concept, berm verbreding toegepast. Dit houdt in, met minimaal budget, zo veel mogelijk te versterken. Op enkele verbeterde locaties zijn bij hoogwater toch nog zandmeevoerende wellen geconstateerd.

Met de nieuwe rekenregel van Sellmeijer zullen er nog veel meer dijken afgekeurd worden. De vraag is echter hoe hier mee omgespeeld moet worden. Vanwege financiële redenen mag hier vanuit de hogere overheid nog niet met deze regel worden gerekend.

- Met welke methode heeft waterschap Rivierenland in het verleden pipingproblemen opgelost?

Alleen bij wellen met urgente problemen wordt er actie ondernomen. Sommige worden open gegraven om de oorzaak van deze wellen te bepalen. De dijkverbetering is over het algemeen het plaatsen van een geotextiel om het meevoeren van zand tegen te gaan, deze te verzwaren door grind er op te storten en af te dichten.

- Welke maatregelen neemt het waterschap om piping te voorkomen tijdens acute problemen?

Bij acute problemen wordt er opgekist. Vervolgens wederom een geotextiel plaatsen en af dichten.

- Waar moeten pipingpreventiemaatregelen aan voldoen voordat deze op grote schaal toegepast gaan worden door het waterschap?

Belangrijk uitgangspunt is dat geen extra kwel mag ontstaan. Traditionele oplossingen als bijvoorbeeld een pipingscherm mag dan niet. Bij enkele nieuwe dijkprojecten wordt serieus overwogen om verticale geotextielen te plaatsen. Dat is een nieuw concept en staat nog in de kinderschoenen. Groot voordeel is dat de waterhuishouding niet wordt gewijzigd.

- Maakt het waterschap gebruik van elektronische monitoringsystemen in dijken?

Nee, het is beheersmatig (grasmaaien, klepelen) erg bijna onmogelijk om de hele dijk vol te stoppen met sensoren. Daarnaast zijn de dijkbeheerders er absoluut niet over te spreken, zij willen vreemde elementen in de dijk zoveel mogelijk vermijden. Voor diverse dijkversterking projecten zijn er wel pijlbuisen geplaatst.

- Waar moeten monitoringsystemen aan voldoen voordat deze toegepast gaan worden door het waterschap?

De huidige instrumenten zijn erg fijn, om de 10 meter is onmogelijk. Daarnaast zijn dijkbeheerders niet tevreden met dingen in de dijk, zij zullen dus eerst overtuigd moeten worden van de voordelen hiervan. Sensoren om bijvoorbeeld iedere 100 meter zou al veel gemakkelijker zijn, alleen is het proef model dan wel minimaal. Voorlopig zie ik het echter nog niet gebeuren, diverse lagen en afdelingen in de organisatie moeten overtuigd worden van de voordelen ervan. Daarnaast moet het databeheer ook ingepast worden in de organisatie. Vanuit mijzelf gesproken zie ik er wel toekomst in, maar niet binnen nu en de komende 10 jaar.

Wat ik wel interessant vind is het gebruiken van een infrarood camera. Dit kan op een gewenste locatie toegepast worden, wanneer tijdens een calamiteit de buitenwacht aangeeft dat een locatie kritiek is. Deze kijkt vervolgens naar een dijkdeel en zou als hulpmiddel voor de dijkbeheerders gebruikt kunnen worden.

- Wat zou voor u het ideale monitoringsysteem en pipingpreventiemaatregel zijn?

Een systeem zonder sensoren in de dijk, liever op een grotere afstand.

Vragen interview werkveld

Interview waterschap Rijn en IJssel (Sander van Poorten)

Datum: 20-04-2012

- Wat is uw ervaring in het werkveld en welke functie bekleedt u binnen deze organisatie?

In 1997 heb ik de HTS in Arnhem afgerond en ben ik in dienst gekomen bij het waterschap. In het verleden heb ik werkzaamheden uitgevoerd als projectleider, maar mijn hoofdwerkzaamheden bestaan als beheerder uit het toetsen en beheren van 144 km primaire waterkering.

- Kunt u iets vertellen over dijkfaalmechanismen waar u de afgelopen jaren mee in aanraking bent geweest?

In 2011 is bij een waterstand van 15 meter in Lobith piping ontstaan bij een net aangelegde dijk in Westervoort, waar een mixed in place wand als preventiemaatregel was toegepast. Hierdoor ontstond er twijfel aan de stabiliteit. Daarbij is onzekerheid ontstaan bij experts (Waterdienst/waterschap/Arcadis) over de vraag wat de sterkteafname van grond is die aan piping onderhevig is. De dijk zou na gedeeltelijke afschuiving (restprofiel) wel voldoen aan de eisen, ondanks deze conclusie is er toch een extra berm aangelegd. (artikel bijgevoegd)

- In welke situaties bent u piping tegengekomen?

Er is in gebieden waar relatief weinig kwelweglengte aanwezig is of opbarsten als eerste optreedt (greppeltje, watergangen e.d.) een grotere kans, dat zandmeevoerende wellen worden waargenomen.

- Waar in jullie gebied is een grotere kans op het ontstaan van piping en heeft dit een specifieke reden?

Piping treedt alleen in de gebieden op waar de bodemopbouw ook gevoelig is voor piping en een grote kerende hoogte aanwezig is.

- Wat zijn de gevolgen geweest van de veiligheidsstudie voor dijken in 2000 en aanpassingen aan de rekenregel van Sellmeijer voor de waterkeringen in waterschap Rijn en IJssel?

Tijdens deze studie zijn er weinig extra afgekeurd, dan in vergelijking met voorgaande studies.

- Met welke methode heeft waterschap Rijn en IJssel in het verleden pipingproblemen opgelost?

Bij het eerder genoemde voorbeeld bij Westervoort, zijn de problemen opgelost, door het plaatsen van een verticaal scherm. Daarnaast zijn ook pipingbermen, voorlandingravingen aangebracht. Tijdens het hoogwater van 2011 heb ik ook diverse kwelfilters in werking gezien. Het idee hiervan is, dat er een 'ventiel' wordt aangebracht in de achterliggende sloot (nabij de binnenteen) van de dijk. Doormiddel van diverse lagen grind wordt het makkelijk voor het water om onder de dijk door te kwellen. De onzekerheid hiervan is, dat deze 'grindbakken' verkeerd worden gebruikt, door er bijvoorbeeld met motoren door te gaan racen. Ook is niet duidelijk of een kwelfilter na langdurig buiten gebruik te zijn geweest (dichtslibben, plantengroei/grasgroei) nog wel goed functioneert en robuust genoeg blijkt. Daarvoor komen er in bij ons waterschap te weinig hoge waterstanden voor. Deze onzekerheid is niet gewenst.

- Welke maatregelen neemt het waterschap om piping te voorkomen tijdens acute problemen?

De standaard maatregelen worden dan genomen, hierbij moet gedacht worden aan het peil opzetten in sloten, doormiddel van stuwtdjes en het opkisten van wellen bij een opbarstende bodem.

- Waar moeten pipingpreventiemaatregelen aan voldoen voordat deze op grote schaal toegepast gaan worden door het waterschap?

De volgende punten zijn voor het waterschap belangrijk om tot een keuze te komen voor het toepassen van een preventiemaatregel: Betrouwbaarheid(robust en duurzaam), onderhoud en inspecteerbaarheid.

- Maakt het waterschap gebruik van elektronische monitoringsystemen in dijken?

Het waterschap werkt niet met een elektronisch monitoringsysteem in dijken, omdat het overbodig is om deze continu toe te passen. Daarnaast is de levensduur van deze systemen maximaal 20 jaar. Er komt 1 keer in de 50 jaar een redelijke golf langs om het systeem te testen. De dijken binnen dit waterschap worden te weinig belast, waardoor de kosten niet opwegen tegen de baten.

- Waar moeten monitoringsystemen aan voldoen voordat deze toegepast gaan worden door het waterschap?

De uitvoeringsmaatregelen zijn tot op heden goedkoper dan de monitoringssystemen. Voor waterschappen langs de kust kunnen deze systemen wellicht wel een meerwaarde hebben, omdat deze met meer fluctuerende waterstanden te maken hebben.

Er bestaan wel veel mooie systemen en ik zie er ook wel de meerwaarde van in om dijken gerichter te kunnen inspecteren. Een optie zou kunnen zijn om tijdens hoogwater de dijken met infrarood te inspecteren. Daarnaast moeten de aangeboden monitoringssystemen eerst uniforme waarden gaan weergeven. Een voorbeeld hiervan is dat waterspanningsmeters van verschillende bedrijven, allemaal andere waarden kunnen geven.

- Wat zou voor u het ideale monitoringsysteem en pipingpreventiemaatregel zijn?

Het liefst zou ik zien, dat er in plaats van het uitgekende ontwerp van de dijken er in plaats daarvan één keer meer wordt geïnvesteerd in dijken, zodat er overal robuuste deltdijken kunnen worden aangelegd.

Werking pipingscherm in IJsseldijk nader onderzocht

Bij een verlegde dijk langs de IJssel ontstonden begin 2011 meerdere zandmeevoerende wellen. Daarop is onderzoek uitgevoerd naar het pipingscherm en naar de afschuifveiligheid van de dijk, die kan afnemen door ondermijning.

ING. R. KOOPMANS

In de periode 2007-2009 is langs de IJssel bij Westervoort de dijkverlegging Hondsbroeksche Pleij uitgevoerd. De werkzaamheden hebben plaatsgevonden in het kader van de planologische kernbeslissing Ruimte voor de Rivier en bestaan onder andere uit het verleggen van de bestaande primaire waterkering en de aanleg van een verdeelwerk.

De nieuwe primaire waterkering is een grondlichaam met taluds van 1:3. Aan de binnenzijde ligt, halverwege het talud, een verhoogde onderhoudsberm met daaronder een verticaal pipingscherm. Het pipingscherm is tot 9 meter beneden maaiveld aangebracht en sluit aan op de dijkkern van klei.

In 2010 heeft Rijkswaterstaat de dijk overgedragen aan het Waterschap Rijn en IJssel. Daarna, tijdens de hoogwatergolf van januari 2011, zijn meerdere zandmeevoerende wellen geconstateerd naast de binnenteeën. Voor Rijkswaterstaat en het waterschap was dit aanleiding de nieuwe dijk aan een nader onderzoek te onderwerpen.

Onderzoeksvragen

Het verticale pipingscherm in de dijk is ontworpen als zogenaamd 'heavescherm', dat wil zeggen dat er bij een verticale en omhoog gerichte waterstroom geen zand wordt meegevoerd. Er zit echter een aanmerkelijke afstand tussen scherm en binnenteeën (circa 10 meter). Daar-

IN 'T KORT - ONDERZOEK

- Zandmeevoerende wellen geconstateerd in nieuwe, verlegde primaire waterkering IJssel
- Onderzoek naar vraag of zandmeevoerende kwel de onderhoudsberm ondermijnt
- Pipingscherm onderzocht op aansluiting met dijkkern en op voldoende werking
- Gevolgen grondwaterstroming onder berm mogelijk te beoordelen



Zandmeevoerende wellen tijdens de hoogwatergolf van januari 2011.

door is het laatste deel van de kweilweg niet verticaal, maar horizontaal.

Bij een horizontale uitstroom spoelt er al zand uit bij een veel lagere stroomsnelheid van het grondwater. Tijdens het hoogwater van januari 2011 is dit ook gebeurd. Door het uitspoelen van zand kunnen kleine holten (pipes) ontstaan onder de cohesieve deklaag onder de onderhoudsberm. Bij het scherm kunnen de pipes zich niet verder ontwikkelen, maar de sterkte van de zandlaag met pipes neemt wel af. Door dit zogenaamde 'tweede orde'-effect neemt de macrostabiliteit van de dijk af.

De hypothese bij het onderzoek was: door terugschrijdende erosie wordt een deel van de on-

derhoudsberm ondermijnd en voldoet de stabiliteit van de dijk als geheel niet. Deze hypothese is getoetst door op drie onderzoeksvragen antwoord te geven. Is het pipingscherm (zand) dicht? Voldoet de lengte van het pipingscherm aan de ontwerpnorm? Wat is de afschuifveiligheid, rekening houdend met de zandmeevoerende wellen aan de binnenteeën?

Uitgangspunten berekening

De aansluitende dijken boven- en benedenstrooms zijn in 1990 verbeterd. De toenmalige ontwerpwaterstand komt overeen met een afvoer van 16.500 m³/s bij Lobith. Om geen overloop te creëren, is dit ook voor de nieuwe dijk

als uitgangspunt aangehouden. De ontwerp-waterstand van het kenmerkende dwarsprofiel bedraagt NAP +15 meter (rivierkilometer 878). Na het gereedkomen van Ruimte voor de Rivier is de maatgevende waterstand op dit punt NAP +14,7 meter.

Voor de benodigde grondmechanische parameters is de regionale proevenverzameling van het waterschap gebruikt. De rekenwaarden van de parameters en stabiliteitscansen volgen uit het Addendum bij het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies (TRWG).

Piping is beoordeeld volgens het Technisch Rapport Zandmeervoerende wellen (TRZ) en de afschuifveiligheid is bepaald conform het Technisch Rapport Actuele Sterkte van dijken (TRAS).

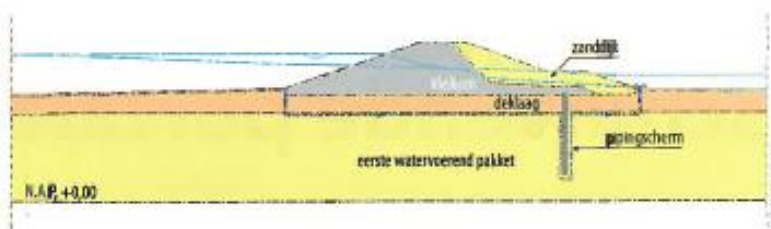
Wel of geen piping

Uit ontwerptekeningen en foto's van de aanleg blijkt dat het pipingscherm zanddicht verbonden is met de dijkkern. Hiermee was de eerste onderzoeksvraag beantwoord en kon worden gestart met het veldonderzoek, het laboratoriumonderzoek en de berekeningen.

Voor het geven van een gedetailleerd antwoord op de tweede en derde onderzoeksvraag was het nodig de proevenverzameling van het waterschap aan te vullen. De klei in de nieuwe dijkkern is geanalyseerd met multistage triaxiaalproeven en fallingheadproeven. Uit de verkregen waarden (verzadigd volumegewicht $\gamma_{sat} = 19,5 \text{ kN/m}^3$; hoek van inwendige wrijving $\varphi = 24,5^\circ$; cohesie $c = 0,5 \text{ kPa}$ als rekenwaarde) blijkt dat de sterkte van de nieuwe dijk vergelijkbaar is met dijken in de regio. De doorlatendheid ($k = 1,0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$) en plasticiteit ($PI = 18\%$) van de uiterst siltige klei voldoen aan het ontwerp.

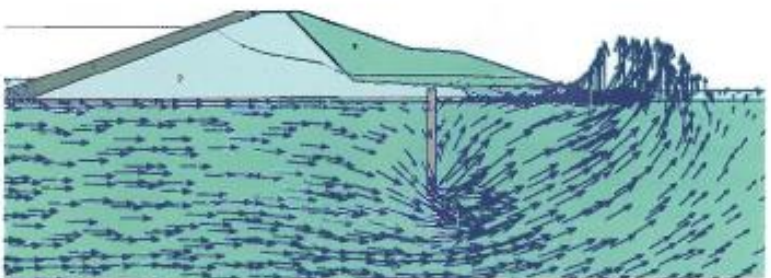
De lengte van het pipingscherm is in eerste instantie gecontroleerd met de eenvoudige rekenregel van Lane. Voor de zogenaamde creepfactor (die afhankelijk is van de zandgrofheid) is 6,5 aangehouden. Hieruit kwam naar voren dat er mogelijk sprake was van een tekort aan kwelweg. De daaropvolgende gedetailleerde controle met Plaxflow toont echter aan dat het pipingscherm wel voldoet aan het heavecriterium ($i < 0,5$). Het antwoord op de tweede onderzoeksvraag luidt dus 'ja'. Tegelijkertijd wordt duidelijk dat er een geconcentreerde grondwaterstroming onder de berm aan de binnentoeleer ontstaat.

De vraag of deze stroming ook ondermijning tot gevolg heeft, bleek lastig te beantwoorden.



KWELWEG

Dwarsdoorsnede van het dijklichaam met freatische lijn, stijghoogte in eerste watervoerend pakket en kwelweg (blauwe stippellijn).



GRONDWATERSTROMING

Resultaat van berekening met het programma Plaxflow: geconcentreerde grondwaterstroming aan de binnentoeleer (laag 3 is de dijkkern van klei) en freatische lijn.

De meningen van de specialisten liepen sterk uiteen. De maximale waterstand op 17 januari 2011 was met NAP +12,8 meter te laag om uitsluitend te geven. Door het uitvoeren van gevoeligheidsanalyses met de programma's Plaxflow en Mstab is uiteindelijk met 'expert judgement' een onderbouwde keuze gemaakt voor de wijze van berekening.

De laag zand die door zandtransport verzwakt raakt, is 0,1 meter dik aangenomen met $\gamma_{sat} = 15 \text{ kN/m}^3$; $\varphi = 15^\circ$; $k = 1,16 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ als rekenwaarde. Deze waarden gelden alleen in het laatste stadium van het ondermijningsproces.

Tweede orde-effect

Met de Plaxflow-resultaten en de verkregen uitgangspunten voor de sterkte van grond is de stabiliteit van de dijk berekend. Uit Mstab volgt voor de kenmerkende doorsnede een veiligheidsfactor van $F_{stab} = 1,19$. Dit voldoet nog juist aan de minimumeis van het TRWG. Maar door ondermijning van een deel van de onderhoudsberm, het tweede orde-effect, neemt de af-

schuifveiligheid circa 5 procent af. De dijk kan dan alleen nog via de geavanceerde methode uit het TRAS, met een restprofielbenadering, worden beoordeeld.

De stabiliteitsfactor van het restprofiel (dus na afschuiving van de onderhoudsberm) is $F_{stab} = 1,20$ en voldoet aan de minimumeis van het TRWG. De conclusie van het nader onderzoek is dat de stabiliteit van de dijk als geheel aan de normen voldoet en dat de hypothese dus kan worden ontkracht.

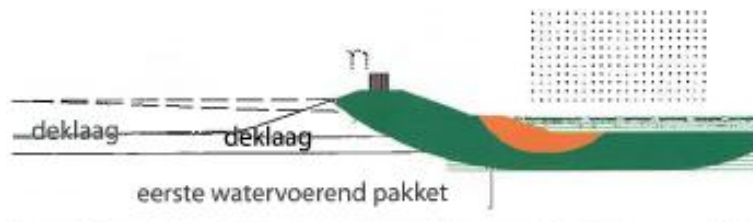
Toekomst

In de nazomer van 2011 is een extra berm aangebracht. Hierdoor kunnen wellen niet meer direct aan de binnentoeleer ontstaan. Dit is vooral gedaan met het oog op beheer en onderhoud en de beheersbaarheid van zandmeervoerende wellen. Wat betreft piping en veiligheid van de dijk als geheel is deze extra berm niet nodig.

Een filterconstructie van bijvoorbeeld grind en breuksteen aan de binnentoeleer voorkomt zandmeervoerende wellen. In een situatie met een dunne deklaag is dit een goede oplossing, maar bij een dikkere deklaag kunnen wellen ook verder van de dijk af ontstaan. Deze optie is vanwege het waterbezwaar en de kosten hier niet gekozen.

Tijdens het uitvoeren van het onderzoek werd duidelijk dat er geen rekenregels bestaan voor tweede orde-effecten bij dijken. Voor (civiele) bouwwerken is dit wel het geval. Dit artikel is een eerste aanzet voor het opvullen van deze kennisleemte.

Rimmer Koopmans is werkzaam bij Arcadis.



AFSCHUIFVEILIGHEID

Situatie met ondermijning, alle onveilige glijvlakken zijn oranje gekleurd, minimale afschuifveiligheid $F_{min} = 1,08$.

Vragen interview werkveld

Interview waterschap Groot Salland (Derk-Jan Sluiter)

Datum: 10-04-2012

- Wat is uw ervaring in het werkveld en welke functie bekleedt u binnen deze organisatie?

Ik ben beleidsmedewerker waterkeringen, wat inhoud eigenlijk specialist waterkeringen. Ik heb de HTS civiele techniek gestudeerd, ben vervolgens begonnen bij het adviesbureau Witteveen + Bos. Binnen waterschap groot Salland hou ik me bezig met de technische inhoudelijke kant van waterveiligheid. Maar ook met het toetsen van dijken, beoordelen van dijkversterking ontwerpen, plannen voor Ruimte voor de Rivier. Daarnaast hou ik me bezig met beleidsontwikkelingen, samen met waterschappen in de regio en andere belanghebbende kijken we naar waar we heen willen met waterveiligheid de komende 100 jaar.

- Kunt u iets vertellen over dijkfaalmechanismen waar u de afgelopen jaren mee in aanraking bent geweest?

Ik werk nog niet erg lang bij het Waterschap, slechts 3 jaar. In deze 3 jaren heb ik het hoogwater van 2011 en 2012 meegemaakt. In beide gevallen is er op verschillende locaties piping waargenomen, echter water geeft geen intensief meevoerende wellen.

- In welke situaties bent u piping tegengekomen?

Bij het hoogwater in januari 2012 en 2011

- Waar in jullie gebied is een grotere kans op het ontstaan van piping en heeft dit een specifieke reden?

Het gebied is eigenlijk in twee delen te verdelen. Stroomopwaarts is er een meer zandige ondergrond waar er bij oud stuifzand een extra fijne korrelgrote te vinden is. Op locaties waar er bijvoorbeeld een sloot door de afdekkende laag prikt, treed er gemakkelijk piping op. Stroomafwaarts is de ondergrond meer venig, hier treed er pas piping op bij hogere waterstanden, in deze gevallen vind er opbarsting plaats.

- Wat zijn de gevolgen geweest van de veiligheidsstudie in 2000 en aanpassingen aan de rekenregel van Sellmeijer voor de waterkeringen in waterschap Groot Salland?

Ja er zijn verschillende waterkeringen afgekeurd na de eerste veiligheidsstudies. Ook na latere veiligheidsstudies zijn er verschillende dijkstukken afgekeurd en hier zijn ook verschillende dijkversterkingsprojecten voor uitgevoerd.

- Met welke methode heeft waterschap groot Salland in het verleden pipingproblemen opgelost?

Omdat de meeste waterkeringen in het buitengebied bevinden is er in de meeste gevallen genoeg ruimte om een bredere berm te maken. Door het aanbrengen van deze berm wordt de kans kleiner dat er piping optreedt. In Windesheim was er een locatie waar dit niet mogelijk was, hier is een project geweest waar een verticaal geotextiel is toegepast.

- Welke maatregelen neemt het waterschap om piping te voorkomen tijdens acute problemen?

Bij acute problemen waar interactie nodig is zal de wel opgekolkt worden.

- Waar moeten pipingpreventiemaatregelen aan voldoen voordat deze op grote schaal toegepast gaan worden door het waterschap?

Veel pipingpreventiemaatregelen zijn zeer nieuw, waardoor er te veel onzekerheid bestaat om deze toe te passen. De duurzaamheid, efficiëntie en soms zelf überhaupt de werking van preventiemaatregelen zijn vaak nog niet aangetoond. Daarnaast wordt de maatregel onder de grond geplaatst, hierdoor is inspectie erg lastig. Wanneer er na het aanbrengen van de maatregel toetsing op locatie mogelijk is, kunnen vragen over de duurzaamheid en werking beantwoordt worden. Vooral dit laatste argument zou een groot voordeel zijn.

- Maakt het waterschap gebruik van elektronische monitoringsystemen in dijken?

Nee. Het is beheersmatig niet mogelijk om iedere 10 meter een sensor te plaatsen, dus hoe plaats je de sensoren. Daarnaast is een monitoringssysteem geen afvang voor de kennis van dijkbeheerders. Ook zou een dergelijk systeem ontzettend duurzaam moeten zijn, bijvoorbeeld 100 jaar. De huidige sensoren gaan niet zo lang mee.

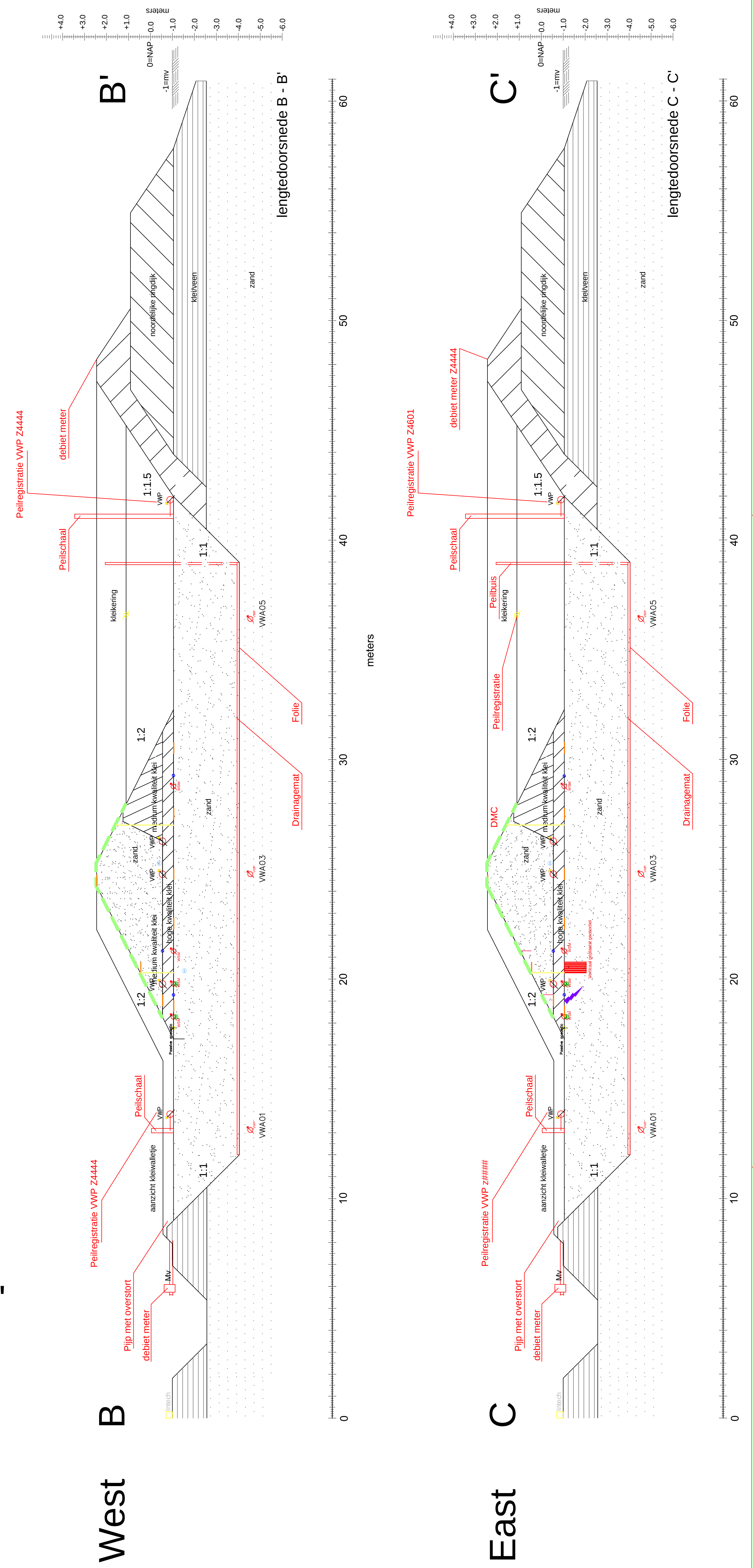
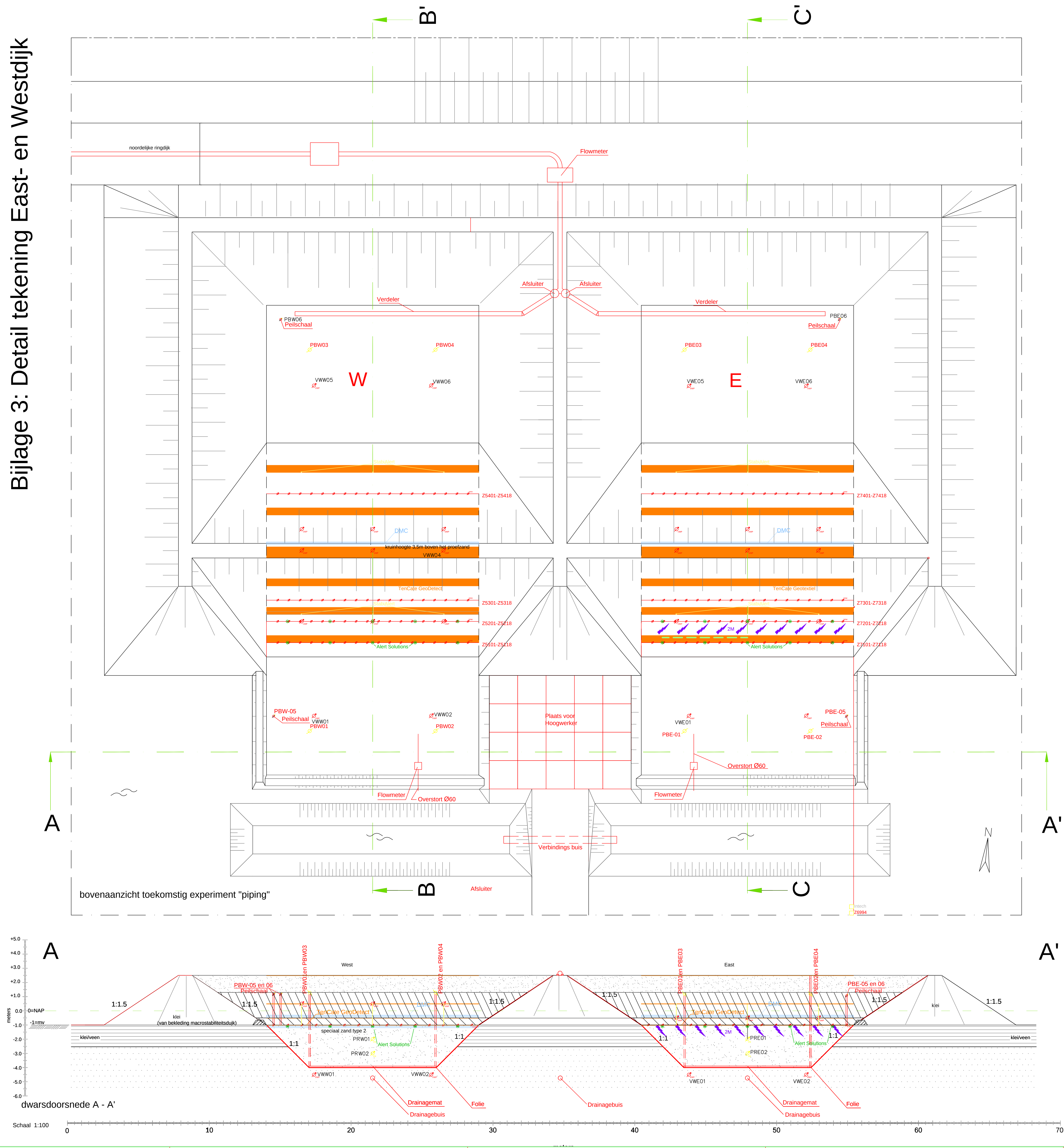
- Waar moeten monitoringsystemen aan voldoen voordat deze toegepast gaan worden door het waterschap?

Het zou een gebiedsdekkend systeem moeten zijn, wat niet om de 10 meter in de dijk geplaatst moet worden. Daarnaast moet het duurzaam zijn, dus minstens 100 jaar.

- Wat zou voor u het ideale monitoringsysteem en pipingpreventiemaatregel zijn?

Piping is een heet hangijzer, zeker met de nieuwe rekenregel voor de deur. "Dus ja, wist ik het maar."

Biilage 3: Detail tekening East- en Westdijk

[illegible]

Bijlage 4: Resultaten berekeningen MSeep.

Parameters model		
Parameters	Zand East	Klei
Verticale doorlatendheid [m/s]	9,90E-05	1,00E-07
Horizontale doorlatendheid [m/s]	9,90E-05	1,00E-07
Gewicht verzadigd [kN/m³]	19,8	17,00
Porositeit [-]	0,360	0,400
Diameter D70 [µm]	180	20
Hoek van inwendige wrijving [deg]	37	37
Constante van White [-]	0,250	0,250

Parameters model			
Parameters	Verticaal geotextiel situatie 1	Verticaal geotextiel situatie 2	Verticaal geotextiel situatie 3
Verticale doorlatendheid [m/s]	1,00E-08	1,00E-05	1,00E-04
Horizontale doorlatendheid [m/s]	1,00E-08	1,00E-05	1,00E-04

Erosie 0 situatie resultaten	East
Kritieke stijghoogte [m]	2,109
Kritieke kwel lengte [m]	3,158

Verticaal geotextiel doorlatendheid 0,0001 [m/s]			
Output model zand East	Bovenstrooms	Midden	Benedenstrooms
Verticaal geotextiel [m]	2,000	2,000	2,000
Waterdruk [m]	5,000	5,000	5,000
Potentie [m]	2,497	0,524	0,295
i [verhang]	1,249	0,262	0,148
Maximale waterdruk [m]	4,005	19,084	33,898

Doorlatendheid geotextiel [m/s]	1,00E-08	1,00E-05	1,00E-04
Verticaal geotextiel [m]	0,500	0,500	0,500
Waterdruk [m]	5,000	5,000	5,000
Potentie [m]	0,261	0,261	0,261
i [verhang]	0,522	0,522	0,522
Maximale waterdruk [m]	9,579	9,579	9,579

Doorlatendheid geotextiel [m/s]	1,00E-08	1,00E-05	1,00E-04
Verticaal geotextiel [m]	1,000	1,000	1,000
Waterdruk [m]	5,000	5,000	5,000
Potentie [m]	0,525	0,332	0,188
i [verhang]	0,525	0,332	0,188
Maximale waterdruk [m]	9,524	15,060	26,596

Doorlatendheid geotextiel [m/s]	1,00E-08	1,00E-05	1,00E-04
Verticaal geotextiel [m]	1,500	1,500	1,500
Waterdruk [m]	5,000	5,000	5,000
Potentie [m]	0,657	0,393	0,251
i [verhang]	0,438	0,262	0,167
Maximale waterdruk [m]	11,416	19,084	29,880

Doorlatendheid geotextiel [m/s]	1,00E-08	1,00E-05	1,00E-04
Verticaal geotextiel [m]	2,000	2,000	2,000
Waterdruk [m]	5,000	5,000	5,000
Potentie [m]	0,777	0,431	0,295
i [verhang]	0,389	0,216	0,148
Maximale waterdruk [m]	12,870	23,202	33,898

Doorlatendheid geotextiel [m/s]	1,00E-08	1,00E-05	1,00E-04
Verticaal geotextiel [m]	2,500	2,500	2,500
Waterdruk [m]	5,000	5,000	5,000
Potentie [m]	0,903	0,453	0,323
i [verhang]	0,361	0,181	0,129
Maximale waterdruk [m]	13,843	27,594	38,700