

# Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel

*Groene versie  
14 juni 2017*



## Colofon

<b>versie</b>	<b>Datum</b>	<b>Auteurs</b>	<b>Review</b>	<b>Vrijgave</b>
1.0	25 juli 2016	Laura Taal & Peter Damen	Rik Nieuwhof & Koen van Gerven	
2.0	17 augustus 2016	Laura Taal & Peter Damen	Hans Niemeijer & Koen van Gerven	
3.0	13 oktober 2016	Laura Taal & André Koelewijn	Stefan van den Berg & Koen van Gerven	
4.0	5 december 2016	Laura Taal & André Koelewijn	Martin van der Meer & Jeroen Terlingen	
4.1	26 januari 2017	Laura Taal	Projectgroep POV-piping	
4.2	30 januari 2017	Laura Taal & André Koelewijn	Ulrich Förster & Martin van der Meer	
5.0	24 februari 2017	Laura Taal & André Koelewijn	Martin van der Meer	
Definitief	14 juni 2017	Laura Taal	ENW-techniek	POV-piping

## Inhoudsopgave

<b>Colofon</b> .....	<b>2</b>
<b>Tabellen overzicht</b> .....	<b>4</b>
<b>Voorwoord</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Inleiding</b> .....	<b>6</b>
1.1 Leeswijzer .....	7
<b>2 Benodigde gegevens</b> .....	<b>8</b>
2.1 Grondonderzoek .....	8
2.2 Parameters .....	9
<b>3 Faalmechanismen</b> .....	<b>10</b>
<b>4 Ontwerp: Specificaties geotextiel</b> .....	<b>12</b>
4.1 Maaswijdte geotextiel .....	12
4.1.1 Indien geotextiel aan de binnendijkse zijde aangevuld wordt met zand in situ .....	12
4.1.2 Indien geotextiel aan de binnendijkse zijde aangevuld wordt met aanvulzand .....	12
4.2 Waterdoorlatendheid .....	13
4.3 Duurzaamheid .....	13
4.4 Sterkte-eigenschappen geotextiel .....	14
4.5 Overzichtstabel relevante faalmechanismen specificaties geotextiel .....	15
<b>5 Ontwerp: Positionering VZG</b> .....	<b>17</b>
5.1 Inbouwdiepte en hoogte geotextiel .....	17
Geotextiel dimensioneren als Piping-Heave scherm .....	17
5.2 Afstand ten opzichte van uittredepunt .....	18
Theoretisch beste locatie VZG .....	18
VZG plaatsen vóór het opbarstpunt .....	18
Pipe van uittredepunt tot aan VZG .....	19
Excessieve erosie bij uittredepunt .....	19
Maakbaarheid locatie VZG .....	19
5.3 Aansluiting op andere constructies en bermen .....	20
5.4 Overzichtstabel relevante faalmechanismen ontwerp en positionering van het geotextiel .....	21
<b>6 Uitvoering: Herstel van de ondergrond</b> .....	<b>26</b>
6.1 Zandaanvulling .....	26
6.2 Kleiaanvulling onder en boven de grondwaterspiegel .....	26
6.3 Uitvoeringsmonitoring als basis voor (toekomstige) beoordelingen .....	27
6.4 Bermen en afritten .....	29
6.5 Overzichtstabel relevante faalmechanismen uitvoering met herstel van ondergrond .....	30
<b>7 Uitvoeringsaspecten per techniek en pilots</b> .....	<b>33</b>
7.1 Verticale inbrengtechniek .....	33
7.2 Horizontale inbrengtechniek .....	34
7.3 Maakbaarheidsproeven voorafgaand aan WSRL-pilots .....	34
<b>8 Beheerfase met monitoring op lange termijn</b> .....	<b>37</b>
Nulmeting van oorspronkelijk situatie als referentie .....	37

Lange termijn monitoring met betrekking tot verstopping geotextiel .....	37
Lange termijn monitoring met betrekking tot vergravingen en wortelgroei .....	38
8.1 Overzichtstabel relevante faalmechanismen met betrekking tot lange termijn monitoring.....	39
<b>9 Beoordelingsrichtlijn .....</b>	<b>41</b>
Veiligheidsfilosofie.....	41
9.1 Methode.....	41
Stap 1: Veiligheidsfactoren per scenario.....	41
Stap 2: Bepaal de kans van optreden per scenario.....	42
Stap 3: Faalkansbenaderingsformule per scenario.....	42
Stap 4: Faalkans berekenen per scenario.....	43
Stap 5: Faalkans berekenen van de constructie .....	43
9.2 Beheerplan opstellen .....	45
Beoordeling van ontwerpuitgangspunten.....	45
Beoordeling uitvoering .....	45
Beoordeling beheerfase.....	45
<b>10 Aanbevelingen en vervolgonwikkelingen.....</b>	<b>47</b>
<b>Referentielijst .....</b>	<b>48</b>
<b>Bijlage 1: Foutenboom VZG .....</b>	<b>49</b>
<b>Bijlage 2: VZG Foutenboom tabel .....</b>	<b>49</b>
<b>Bijlage 3: Verslag en detailbevindingen ENW-Techniek Verticaal Zanddicht Geotextiel .....</b>	<b>49</b>
<b>Bijlage 4: ENW advies.....</b>	<b>49</b>

## Tabellen overzicht

Tabel 1: Overzicht van faalmechanismen en de daarbij horende gebeurtenissen die relevant zijn bij de specificaties van het geotextiel. Bij elke gebeurtenis is een actie gedefinieerd die uitgevoerd kan worden tijdens de ontwerp-, uitvoerings- of beheerfase. De kwalitatieve faalkansbijdrage hoort bij de gebeurtenis op voorwaarde dat de benoemde acties zijn uitgevoerd.....	15
Tabel 2: Overzicht van faalmechanismen en de daarbij horende gebeurtenissen die relevant zijn bij het ontwerp van de positionering van het geotextiel. Bij elke gebeurtenis is een actie gedefinieerd die uitgevoerd kan worden tijdens de ontwerp-, uitvoerings- of beheerfase. De kwalitatieve faalkansbijdragen horen bij de gebeurtenissen op voorwaarde dat de benoemde acties zijn uitgevoerd. ....	21
Tabel 3: Overzicht van faalmechanismen en de daarbij horende gebeurtenissen die relevant zijn bij het herstel van de ondergrond. Bij elke gebeurtenis is een actie gedefinieerd die uitgevoerd kan worden tijdens de ontwerp-, uitvoerings- of beheerfase. De kwalitatieve faalkansbijdragen horen bij de gebeurtenissen op voorwaarde dat de benoemde acties zijn uitgevoerd.....	30
Tabel 4: Ter illustratie een selectie van de functionele- en aspect eisen uit de vraagspecificatie VZG (Waterschap Rivierenland, 2014) die gebruikt zijn bij de verificatie van de maakbaarheidsproeven van de horizontale (van den Herik-Sliedrecht, 2015) en verticale techniek (Boskalis Nederland B.V., 2014). ....	36
Tabel 5: Overzicht van faalmechanismen en de daarbij horende gebeurtenissen die relevant zijn tijdens de monitoring op lange termijn. Bij elke gebeurtenis is een actie gedefinieerd die uitgevoerd kan worden tijdens de ontwerp-, uitvoerings- of beheerfase. De kwalitatieve faalkansbijdragen horen bij de gebeurtenissen op voorwaarde dat de benoemde acties zijn uitgevoerd.....	39
Tabel 6: Voorbeeld van omreken tabel. De Veiligheidsfactor $Fd$ wordt door middel van een faalkansbenaderingsformule ( $\beta$ -relatie) omgerekend. De $\beta$ -relaties zijn echter nog in ontwikkeling en tijdens het schrijven van dit document waardoor de faalkans nog niet berekend is in dit voorbeeld om de methode te illustreren.....	44

## Voorwoord

In deze Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn voor het Verticaal Zanddicht Geotextiel wordt deze innovatieve techniek ter beschikking gesteld voor toepassing in dijkversterkingen. Hiermee is een volgende fase voor deze innovatie aangebroken.

Het ontwikkeltraject voor het Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG) is in 2011 gestart en heeft diverse laboratoriumproeven doorlopen, aangevuld met proeven in de IJKdijk en maakbaarheidsproeven. Daarna is het VZG toegepast in een concreet dijkversterkingsproject langs de Lek. Met gebruikmaking van al deze ervaringen is deze Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn (OBR) opgesteld, waarbij natuurlijk ook is aangesloten bij de werkwijze en eisen die momenteel gangbaar zijn. ENW heeft een positief, maar genuanceerd, advies uitgebracht over de richtlijn. ENW noemt met name de systematiek van de richtlijn elegant en vindt het een prima handreiking om de maatregel in de praktijk te gaan uit voeren. ENW merkt echter terecht op dat de richtlijn vooral nog beschrijvend is en dat concrete praktijkervaring nog ontbreekt.

Praktijkervaring kan vooral worden opgedaan in concrete dijkversterkingsprojecten en dijkbeheerders worden dan ook van harte uitgenodigd om deze techniek toe te passen, rekening houdend met de aanbevelingen van ENW. Ervaringen zijn en worden ook al opgedaan in de volgende concrete projecten:

- Livedijk Willemspolder (op het moment van dit schrijven nagenoeg afgerond);
- Fullscale proef;
- Dijkversterking Twentekanal, waterschap Rijn en IJssel;
- Dijkversterking Gameren, waterschap Rivierenland.

Ervaringen zullen worden verzameld en in een volgende versie van de Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn worden verwerkt.

De ontwikkeling van het VZG is een initiatief van waterschap Rivierenland in samenwerking met Deltares. Waterschap Rivierenland heeft er gedurende de hele looptijd veel energie in gestoken en risico's genomen. Vanaf 2014 is de Projectoverstijgende Verkenning Piping (POV Piping) aangesloten bij het initiatief. Overkoepelend speelt het Hoogwatersbeschermingsprogramma (HWBP) een rol: de POV piping is een initiatief van het HWBP.

Dijkbeheerders die geïnteresseerd zijn in toepassing van de VZG kunnen contact opnemen met de POV piping voor advies en informatie over de laatste stand van zaken. Vanaf medio 2018 neemt het HWBP of een nog op te richten opvolger van de POV piping deze rol over.

Veel mensen hebben bijgedragen aan de totstandkoming van deze richtlijn. Naast de auteurs, hebben de volgende mensen een significante bijdrage geleverd:

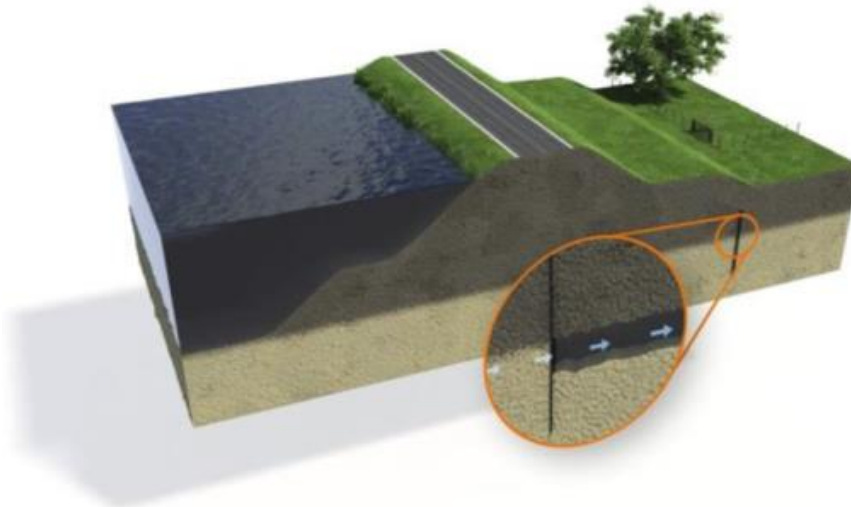
- Ulrich Förster en Vera van Beek als bedenkers, ontwikkelaars en ontwerpers van het concept VZG als pipingremmende maatregel, de foutenboom en de hiervoor benodigde monitoring.
- Stefan van den Berg, van 2012-2015 vanuit WSRL inhoudelijk trekker van de innovatie, na 2015 vanuit RWS betrokken in de review van de ontwerp- en beoordelingsrichtlijn;
- Koen van Gerven als technisch manager vanuit het dijkversterkingsprojecten Hagestein Opheusden waarin de pilots zijn uitgevoerd;
- Hans Niemeijer als technisch manager van de POV-Piping;
- Aannemers Van den Herik-Sliedrecht en Boskalis als ontwikkelaars van de inbouwtechnieken en uitvoerders van de verschillende pilots.
- Martin van der Meer als kritisch reviewer en meedenker met de beoordelingsmethode

Juni 2017, Waterschap Rivierenland, POV piping

## 1 Inleiding

Het Verticaal Zanddicht Geotextiel, hierna VZG genoemd, is een innovatieve maatregel tegen het faalmechanisme piping. Het waterdoorlatende VZG wordt aan de binnenzijde van de dijk verticaal aangebracht ter plaatse van de bovenzijde van de pipinggevoelige zandlaag: de overgang van de kleilaag naar het watervoerende zandpakket waarlangs piping optreedt (Figuur 1). Pipes die ontstaan kunnen zich niet verder bovenstrooms ontwikkelen doordat het zandtransport stopt bij het VZG. De grondwaterstroming blijft echter onveranderd omdat alleen de zandkorrels worden tegengehouden door het VZG.

Deze innovatieve maatregel vergt een klein ruimtebeslag vergeleken met een traditionele pipingberm. Een pipingberm wordt aangebracht om opbarsten van de deklaag direct aan de binnenteen te voorkomen en een voldoende lange kwelweg te creëren zodat geen zandmeevoerende wellen ontstaan dicht bij de waterkering die kunnen leiden tot falen van de waterkering. Bij het toepassen van het VZG mogen er wel zandmeevoerende wellen ontstaan. De bijbehorende pipes worden namelijk tegengehouden door het geotextiel waar de zandkorrels niet doorheen kunnen spoelen maar waar het water wel doorheen kan stromen. Door de doorlatendheid van het VZG wordt de (grond)waterhuishouding minimaal beïnvloed in tegenstelling tot pipingmaatregelen zoals damwanden, Mixed-in-place-wanden of vergelijkbare oplossingen.

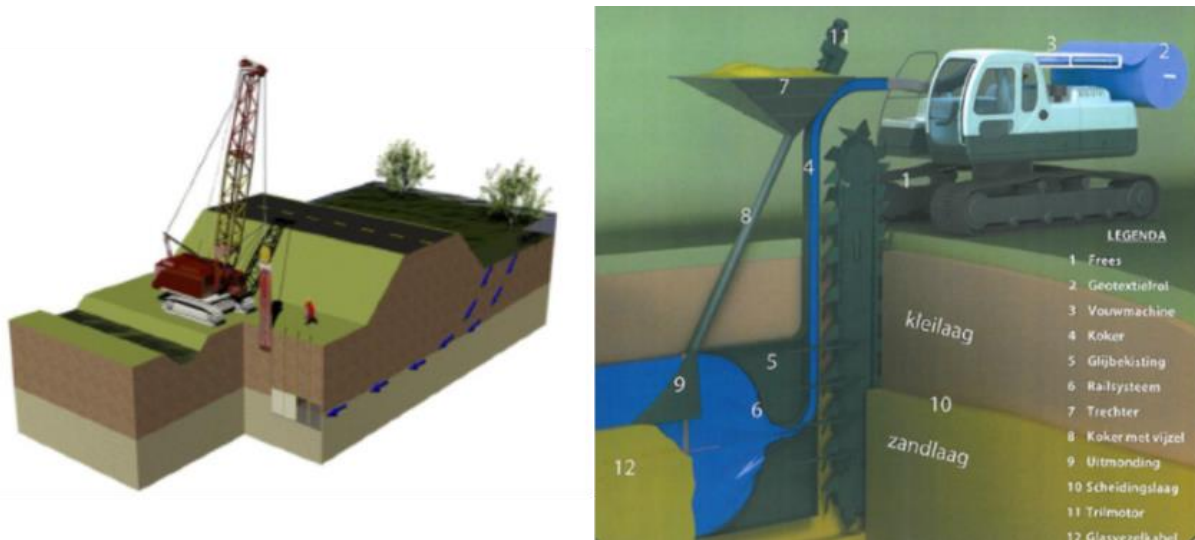


*Figuur 1: Illustratie van de werking van het Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG). De binnendijkse pipe die zich heeft ontwikkeld stopt bij het VZG. De kwelstroom, weergegeven met de witte pijlen, wordt daarmee niet beïnvloed. Bron: Opname uit de animatie over het verticaal Zanddicht Geotextiel (WSRL, 2015).*

Sinds 2011 is het VZG serieus in ontwikkeling (Förster, 2011). Na numerieke analyses zijn laboratoriumproeven uitgevoerd op kleine schaal (30 cm kwelweglengte) en middelschaal (1,4 meter kwelweglengte) (Förster e.a., 2013). Bij de IJkdijkproef te Booneschans in Groningen is de effectiviteit van het VZG beproefd op uitvoeringsschaal met een kwelweglengte van 15 meter. Bij deze proef met een kunstmatige bodemopbouw (3 meter homogeen fijn zand) bleef de waterkering mét VZG in stand bij een verval dat minstens 1,6 keer hoger was dan in de vergelijkbare situatie zonder VZG (Koelewijn e.a., 2009; De Bruijn & Knoeff, 2009). Het verval kon daar niet verder opgevoerd worden omdat de dijk rond het bassin dan zou overstromen. Daarom is hier sprake van een vervaltoename met *minstens* een factor 1,6 (Förster e.a., 2013).

Na deze laboratoriumproeven is het VZG toegepast als pilot binnen het Ruimte voor de Rivier dijkversterkingsproject Hagestein-Opheusden (WSRL, 2014). In deze pilot zijn twee technieken ontwikkeld: een horizontale en verticale techniek (Figuur 2). Horizontaal (sleufgravend grondvervangend) en verticaal (intrillend grondverdringend) zijn ontstaan vanuit de oriëntatie van het materieel. Bij beide methodes wordt het doek in de diepterichting (verticaal) aangebracht. Dit wordt verderop in het document duidelijk gemaakt.

Parallel aan de pilots langs de Nederrijn-Lek is in het kader van het LiveDijk-onderzoek dat geïnitieerd is door de Stichting IJkdijk een proeflocatie ingericht in de Willemspolder langs de Waal om de werking en monitoringsmogelijkheden te onderzoeken van het VZG onder natuurlijke veldomstandigheden, dit is later overgenomen door de POV-piping. De eindanalyse van deze proef wordt verwacht na het afronden van deze versie van de ontwerp- en beoordelingsrichtlijn voor het VZG.



*Figuur 2: Illustratie van de verticale (links) en horizontale (rechts) inbrengtechniek van het VZG. De verticale techniek bestaat uit een kraan met een trilblok die een afsluitbare inbrenggeleider met het geotextiel, verdringend de grond in kan drukken ondersteund door hogedruk-nozzles (Boskalis, 2014). De horizontale techniek bestaat uit een diepfreesmachine die een sleuf freest langs het dijktraject en tegelijkertijd het doek met aanvulzand en -klei inbrengt (Van den Herik-Sliedrecht, 2015).*

## 1.1 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 staat een overzicht van de benodigde parameters voor het ontwerp.

Hoofdstuk 3 beschrijft alle faalmechanismen die op kunnen treden bij het VZG. In een foutenboom is de onderlinge relatie weergegeven tussen de verschillende gebeurtenissen en deel-faalmechanismen. De eisen, acties en kwalitatieve faalkansbijdragen per gebeurtenis zijn beschreven in de daaropvolgende hoofdstukken.

Hoofdstuk 4 gaat in op het ontwerp en specificatie van het geotextiel en de daarbij horende relevante faalmechanismen in Tabel 1.

Hoofdstuk 5 gaat nader in op het ontwerp met positionering van het VZG en de daarbij horende relevante faalmechanismen in Tabel 2.

Hoofdstuk 6 beschrijft in algemene zin de uitvoering met herstel van de ondergrond en de daarbij horende relevante faalmechanismen in Tabel 3. Er wordt nader ingegaan op het belang van een uitgebreide uitvoeringsmonitoring als basis voor toekomstige beoordelingen.

Hoofdstuk 7 zoomt allereerst nader in op de verticale VZG-inbrengtechniek; vervolgens op de horizontale inbrengtechniek, beiden als onderdeel van de uitgevoerde pilots binnen dijkversterkingsproject Hagestein-Opheusden.

In hoofdstuk 8 wordt de beheerfase met monitoring op lange termijn toegelicht met de focus op: mogelijke verstopping, beschadiging door vergravingen, knagerij of veroudering van het geotextiel evenals mogelijke vervormingen van de dijkteen als gevolg van piping- groei door meerdere hoogwaters. De hierbij horende relevante faalmechanismen zijn opgenomen in Tabel 5.

Hoofdstuk 9 beschrijft de beoordelingsrichtlijn, die in belangrijke mate steunt op de voorgaande hoofdstukken die samen de ontwerprichtlijn vormen.

Hoofdstuk 10 geeft handvatten hoe tijdens de beheerfase input geleverd kan worden aan de technische beoordeling.

Hoofdstuk 11 geeft aanbevelingen voor gericht vervolgonderzoek.

## 2 Benodigde gegevens

### 2.1 Grondonderzoek

In Figuur 3 is een overzicht weergegeven van de relevante uitgangsparemeters die nodig zijn om parameters af te leiden voor het ontwerp van het VZG. De benodigde maaswijdte van het toe te passen gewezen geotextiel wordt afgeleid uit de korrelgrootte ( $D_{40}$ ,  $D_{90}$ ) en de doorlatendheid ( $k$ ) van het zand dat vlak onder de cohesieve deklaag aanwezig is tenzij zand aangevuld wordt aan weerszijden van het doek. In dat geval immers kan de korreldiameter van het aanvulzand zelf gekozen worden en wordt de maaswijdte van het doek daarop afgestemd. De afstand van de top van het zandpakket in meters ten opzichte van het maaiveld ter plaatse van waar het geotextiel wordt aangebracht is een belangrijke parameter voor de inbrengdiepte van het geotextiel ( $VZG_d$ ). De top van het pipinggevoelige zandpakket vormt de scheiding tussen de verankering in de klei ( $VZG_{a_{klei}}$ ) en de verankering in het zand ( $VZG_{a_{zand}}$ ). De dikte van de deklaag ( $d$ ) is relevant om na te gaan of het geotextiel voldoende verankerd kan worden in de klei. De dikte van het zandpakket ( $D$ ), de conusweerstand en de pakkingsdichtheid van het zand zijn relevant voor zowel ontwerp als uitvoering.

Inzicht in de te verwachten grondspanningen is voor alle inbrengtechnieken relevant om de maakbaarheid te kunnen garanderen. In hoofdstuk 5 wordt hier verder op in gegaan.

Uit de ontwerpwaterstand ( $H$ ) in combinatie met de parameters die de grondopbouw beschrijven, kunnen de acceptabele lengte van de pipe ten opzichte van de totale kwelweglengte, de inbrenglengte en de inbrengdiepte worden bepaald. Deze is nodig om de positie van het geotextiel ten opzichte van het intredepunt ( $VZG_{\Delta x}$ ) te bepalen. In hoofdstuk 5 wordt dit uitgebreid beschreven.

De gemiddelde laagste en hoogste grondwaterstanden ( $GLG$ ,  $GHG$ ) zijn voor de uitvoering relevant om te kunnen bepalen tot op welk niveau zand en klei gecontroleerd onder druk aangebracht moet worden onder de grondwaterspiegel. Afhankelijk van de situatie kan bij volledige drooglegging hier boven de klei-aanvulling en verdichting met gangbaar materieel plaatsvinden.

Omdat het geotextiel als pipingmaatregel vaak voor relatief grote afstanden wordt ontworpen (van 100 meter tot enkele kilometers) is een puntlocatie voor het grondonderzoek ten behoeve van een verantwoord ontwerp niet voldoende om inzicht te krijgen in deze parameters en variatie hierin.

Een combinatie van:

- Betrouwbare geotechnische lengteprofielen ter plaatse van de kruin, het tracé van het aan te brengen VZG en het achterland zijn voor een goed ontwerp noodzakelijk;
- Sonderingen met meting van waterspanningen (naast gebruikelijke conusweerstand en kleef)
- Peilbuismetingen (minimaal op twee locaties in dwarsrichting)

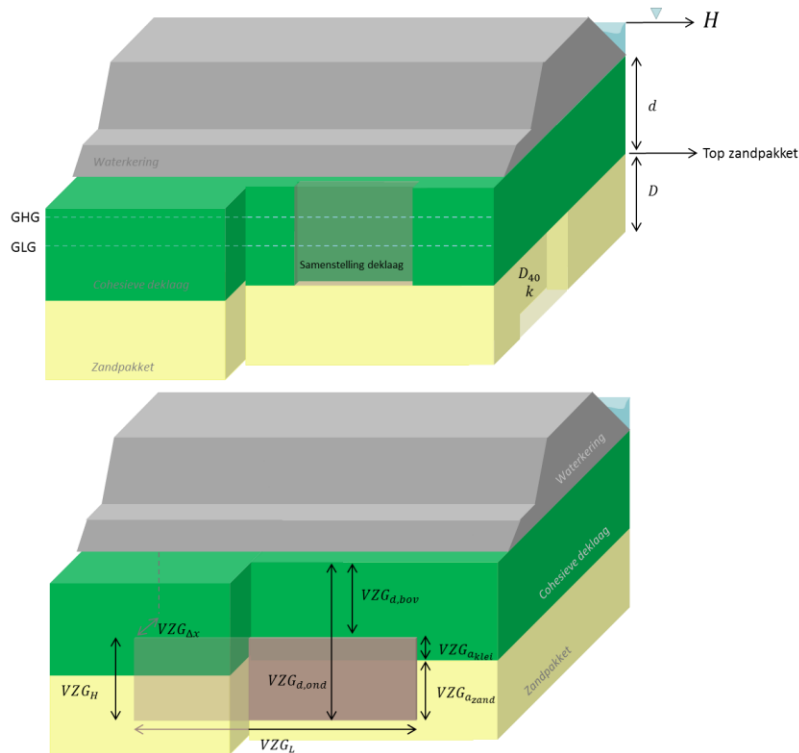
geven inzicht in de gelaagdheid van de bodem en het werkelijke waterstandverloop onder de dijk. Dit leidt tot meer zekerheid in het ontwerp doordat een betere inschatting is verkregen van de werkelijke situatie.

Naast gangbare boringen en sonderingen is het relevant mogelijke discontinuïteiten door middel van geofysisch onderzoek aantoonbaar in te kaderen. Hiervoor kan elektromagnetisch, geo-elektrisch en radar-onderzoek worden ingezet; passend voor de situatie en de bodemopbouw. Het gebruik in GIS van historische kaarten heeft daarbij een zeer grote meerwaarde (ENW, 2012).

De reden hiervoor is dat het niveau en de variatie van de bovenkant van de pipinggevoelige zandlaag inzichtelijk moet zijn voor zowel het ontwerp als de uitvoering. Een variërende hoogte van de pipinggevoelige zandlaag kan door het VZG bij zowel de horizontale als de verticale techniek goed worden gevolgd. Inspelen op een beperkte afwijkende hoogteligging tijdens de uitvoering is eveneens mogelijk.

Voorkomen moet worden dat pas tijdens de uitvoering ongunstige omstandigheden worden ontdekt, zoals een ondiepere zandbaan of een tussenzandlaag. Dit kan leiden tot grote tijdvertragingen en meerkosten in verband met de noodzakelijke door te voeren aanpassingen, mogelijke verwijdering, overlap, toepassen van een andere techniek, etc.





Figuur 3: Boven een illustratie van de te meten parameters tijdens het grondonderzoek. Onder een overzicht van de VZG-ontwerpparameters.

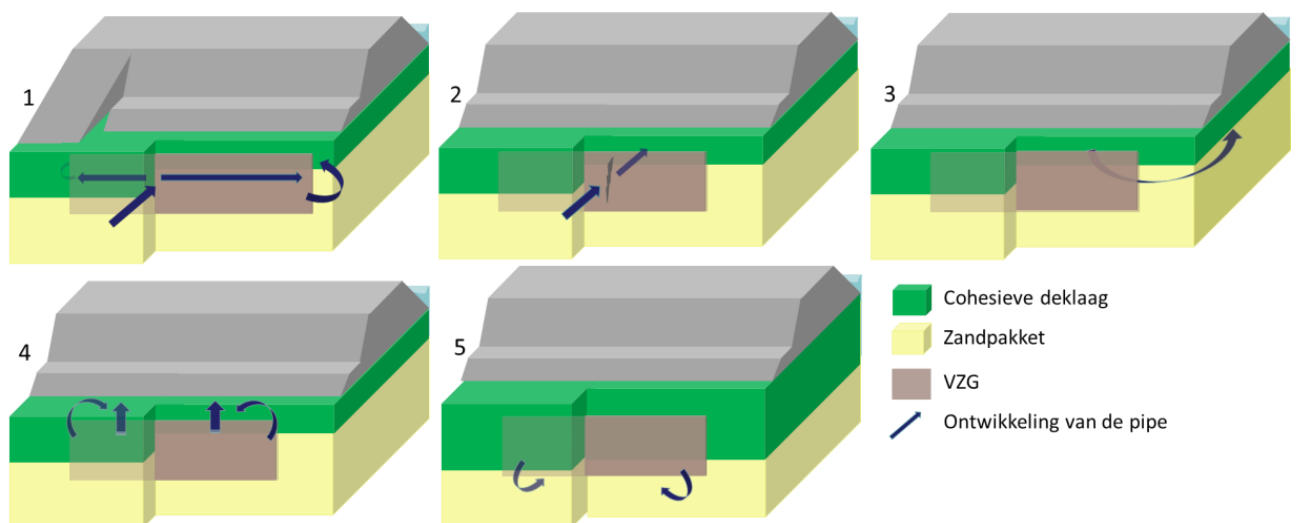
## 2.2 Parameters

Parameter	Eenheid	Omschrijving
$d$	(m)	Dikte van de cohesieve deklaag
$D_{40}$	( $\mu\text{m}$ )	Korrelgrootte waarvoor geldt dat 40% van de korrels kleiner is
$D_{90}$	( $\mu\text{m}$ )	Korrelgrootte waarvoor geldt dat 90% van de korrels kleiner is
$D$	(m)	Dikte zandpakket
$GHG$	(m)	Gemiddeld hoogste grondwaterstand in het relevante zandpakket
$GLG$	(m)	Gemiddeld laagste grondwaterstand
$h_p$	(m)	Polderpeil bij de ontwerpwaterstand
$H$	(m)	Ontwerp buitenwaterstand
$k_b$	( $\text{ms}^{-1}$ )	Doorlatendheidscoëfficiënt basismateriaal (relevante zandpakket)
$k_{VZG}$	( $\text{ms}^{-1}$ )	Doorlatendheidscoëfficiënt geotextiel
$l$	(m)	Acceptabele lengte van de pipe (zie ook §5.2)
$L$	(m)	Kwelweglengte
$N$	–	Levensduur geotextiel
$O_{90}$	( $\mu\text{m}$ )	Maaswijdte geotextiel
$\sigma$	(kPa)	Grondspanning op de locatie van het geotextiel
		Pakkingsdichtheid van het zand
		Eigenschappen zwelkleikorrels: afmetingen, zwelvermogen en zwelsnelheid
		Top van het zandpakket t.o.v. N.A.P.
		NAP-niveau bovenkant VZG in afdekkend pakket
		NAP-niveau onderkant VZG in pipinggevoelige zandlaag
$VZG_{a,klai}$	(m)	Verankeringslengte in klei
$VZG_{a,zand}$	(m)	Verankeringslengte in zand
$VZG_{d,ond}$	(m)	Diepte onderkant geotextiel t.o.v. NAP
$VZG_{d,bov}$	(m)	Diepte bovenkant geotextiel t.o.v. NAP
$VZG_L$	(m)	Lengte geotextiel
$VZG_H$	(m)	Hoogte geotextiel (= $VZG_{d,bov} - VZG_{d,ond}$ )
$VZG_{\Delta x}$	(m)	Afstand geotextiel tot uittredepunt

### 3 Faalmechanismen

Het VZG is een maatregel tegen het faalmechanisme piping. Dit faalmechanisme kan verder worden onderverdeeld in vijf deelfaalmechanismen (Figuur 4):

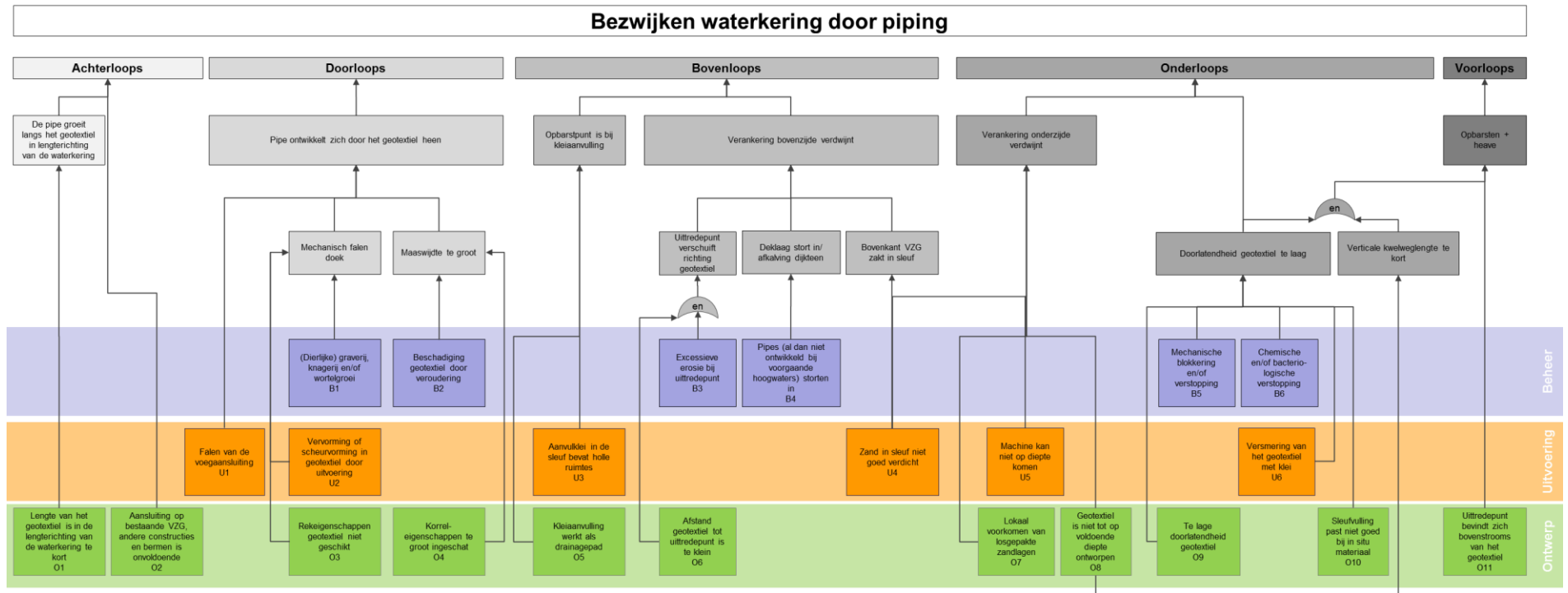
#	Deelfaalmechanisme	Omschrijving
1	Achterloopsheid	De pipe ontwikkelt zich in de lengterichting van de waterkering tot aan het uiteinde van het geotextiel, hetgeen betekent dat de pipe zich <i>achter</i> het geotextiel langs kan ontwikkelen
2	Doorloopsheid	De pipe ontwikkelt zich <i>door</i> het geotextiel heen (= doorslag of kortsluiting)
3	Voorloopsheid	De pipe ontstaat aan de verkeerde (bovenstroomse) kant, dus <i>voor</i> het geotextiel zodat het VZG geen effect heeft
4	Bovenloopsheid	De pipe ontwikkelt zich <i>boven</i> het geotextiel in de verankeringszone
5	Onderloopsheid	De pipe ontwikkelt zich <i>onder</i> het geotextiel door



Figuur 4: Deelfaalmechanismen die van toepassing zijn bij het Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG): 1. Achterloopsheid, 2. Doorloopsheid, 3. Voorloopsheid, 4. Bovenloopsheid en 5. Onderloopsheid.

Meerdere gebeurtenissen kunnen leiden tot een van de faalmechanismen uit Figuur 4. De onderlinge samenhang van de faalmechanismen en daarbij horende gebeurtenissen zijn weergegeven in een foutenboom (Figuur 5). De foutenboom wordt van onder naar boven doorgewerkt om tot het faalmechanisme piping te komen. De bijbehorende faalkansbijdragen per gebeurtenis zijn nog niet gedefinieerd en zijn alleen kwalitatief bepaald (zie volgende hoofdstukken). Het streven is om in de toekomst aan te geven hoe faalkansen toegekend kunnen worden per ongewenste gebeurtenis. Op dit moment lijkt er echter nog onvoldoende ervaring en data beschikbaar van in het veld aangebracht VZG om concrete faalkansbijdragen van de gebeurtenissen in detail te kwantificeren. Daar staat tegenover dat een goed ontwerp er uit bestaat dat bepaalde potentiële deelfaalmechanismen vrijwel kunnen worden uitgesloten door passende ontwerp-aanpassing en een intensieve uitvoeringsmonitoring waarbij het mogelijk is om tijdens de uitvoering bij te sturen. Ook de beheerfase is relevant. Hier wordt later nader op in gegaan.

Samengevat gaat het er uiteindelijk om dat het ontwerpverval met voldoende zekerheid gekeerd kan worden, door bijvoorbeeld voldoende kwelweglengte en het elimineren van kortsluitroutes. Dit verschilt niet van een berekening voor een andere maatregel tegen piping zoals een pipingberm of een kwelscherm. Bij het toepassen van de nieuwe normering is per faalmechanisme een faalkansruimte beschikbaar. Het OI2014 geeft een eerste aanzet hiervoor. Het staat echter vrij om als ontwerper deze waarden onderbouwd te herverdelen.



Figuur 5: Foutenboom bij het VZG (zie ook bijlage 1). Een overzicht van de faalmechanismen die kunnen optreden bij het Verticaal Zanddicht Geotextiel en de daarbij horende ongewenste gebeurtenissen. Het faalmechanisme piping is onderverdeeld in vijf deelfaalmechanismen die gerelateerd kunnen worden aan drie fasen: ontwerp (groen), uitvoering (oranje) en beheerfase (paars) (naar Förster e.a., 2013). Alle pijlen, tenzij anders vermeld, geven 'of' weer. Bijvoorbeeld: Achterloopsheid treedt op als  $O_1$  of  $O_2$  optreedt.

Aan de hand van de foutenboom is een eisenpakket opgesteld voor het VZG. De gebeurtenissen zijn onderverdeeld naar drie fasen: ontwerp, uitvoering en de lange termijn tijdens de beheerfase. In de volgende hoofdstukken worden per fase de desbetreffende eisen geformuleerd. De foutenboom is universeel voor horizontale, verticale en mogelijke toekomstige nieuwe aanbengtechnieken, maar de faalkansbijdrage kan wel per techniek verschillen. De eisen en de faalkansbijdrage per fase worden in de volgende hoofdstukken behandeld.

## 4 Ontwerp: Specificaties geotextiel

Als de ondergrond goed in beeld is gebracht (zie hoofdstuk 2), is de eerste stap in het ontwerp de eigenschappen van het geotextiel te specificeren. In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe dit kan worden gedaan en welke gebeurtenissen uit de foutenboom (Figuur 5) van toepassing zijn bij de keuze van het toe te passen geotextiel.

### 4.1 Maaswijdte geotextiel

#### 4.1.1 Indien geotextiel aan de binnendijkse zijde aangevuld wordt met zand in situ

De bepaling van de maaswijdte van het geotextiel in deze situatie is relevant voor de volgende gebeurtenissen:

- Korrelgrootte is te groot ingeschat  $(O_4)$
- Mechanische blokkering en/of verstopping  $(B_5)$

De benodigde maaswijdte voor het geotextiel ( $O_{90}$ ) wordt bepaald op basis van de zandkorrelgrootte in situ. Uitgaande van niet-stationaire belasting, een goed aanliggend geotextiel en dat de 40-percentiel korrelgrootte ( $D_{40}$ ) groter is dan  $60 \mu\text{m}$  mag volgens CUR 174 het volgende criterium worden toegepast:

$$O_{90} < D_{90}$$

Langs een strekking waarin het VZG wordt aangebracht (lengtes van 100 tot ca. 1000 meter) is de variatie in de zandkorrelgrootte vaak zo groot dat een karakteristieke waarde voor de  $d_{90}$  niet kan worden samengevat in één representatieve waarde. Om doorloopsheid (door gebeurtenis  $O_4$ ) te voorkomen is het verleidelijk om de maaswijdte  $O_{90}$  te bepalen met de kleinst gevonden  $d_{90}$  uit de zandmonsters. Echter, door aan de fijne kant te zitten met de maaswijdte is het risico op verstopping van het geotextiel groter (gebeurtenis  $B_5$ ) zolang de maaswijdte groter is dan  $0,5 d_{90}$  (CUR 174, 2009)<sup>1</sup>.

#### 4.1.2 Indien geotextiel aan de binnendijkse zijde aangevuld wordt met aanvulzand

De bepaling van de maaswijdte van het geotextiel in deze situatie is relevant voor de volgende gebeurtenissen:

- Korrelgrootte is te groot ingeschat  $(O_4)$
- Mechanische blokkering en/of verstopping  $(B_5)$

De benodigde maaswijdte voor het geotextiel ( $O_{90}$ ) wordt in dit geval bepaald op basis van de zandkorrelgrootte van het zand waarmee aangevuld wordt, welke weer afgestemd zal moeten zijn op de in situ gevonden zandkorrelgrootte, zie daarvoor Bezuijen e.a. (2012). Alhoewel het logisch lijkt aan te nemen dat gekozen moet worden voor minimaal het grofste zand dat in het tracé gevonden wordt, zal telkens beschouwd moeten worden of bij hele grote variaties korreldiameters in situ, de fijnste in situ korreldiameter geen negatief effect heeft voor de verticale laag met het grove aanvulzand en het dus relatief 'open' geotextiel.

Voor toekomstige projecten is het relevant de voorkomende korrelverdelingen per VZG-deelstrekking en/of het gebruikte aanvulzand met de toegepaste maaswijdte goed te documenteren. Dit ten behoeve van verklaring van mogelijke toekomstige locatie-specifieke verstopping én het ontwikkelen/valideren van eventuele ruimere maaswijdte-vuistregels voor deze specifieke VZG-toepassing. Dit is opgenomen in de aanbevelingen in hoofdstuk 10.

---

<sup>1</sup> Uit ervaringen met 'geotubes' (CUR 217, 2006; Van den Herik-Sliedrecht, 2015) blijkt dat grotere maaswijdtes (bijvoorbeeld gebaseerd op het gemiddelde) ook volstaan en verantwoord kunnen zijn. Een beperkte uitspoeling van fijne korrels is acceptabel en ook gangbaar bij het ontwikkelen van onttrekkingsputten. (KIWA, Kennisdocument Putten 2000). Voor beide toepassingsgebieden zijn filterregels bekend, doch wordt veelal per bedrijf uitgegaan van betrouwbaar gebleken eigen vuistregels, die op basis van ervaring en experimenteel onderzoek zijn ontwikkeld; veelal zijn deze ook locatie-specifiek. In deze richtlijn wordt vooralsnog echter uitgegaan van de hierboven aangegeven richtlijnen.

## 4.2 Waterdoorlatendheid

De bepaling van de (in situ) waterdoorlatendheid van het geotextiel is relevant voor de gebeurtenissen:

- Te lage doorlatendheid geotextiel ( $O_9$ )
- Mechanische blokkering en/of verstopping ( $B_5$ )

De waterdoorlatendheid van het geotextiel mag geen belemmering zijn voor de stroming door de ondergrond. In het geval dat het zand in situ doorlatender is dan het geotextiel, functioneert het geotextiel als een barrière voor de grondwaterstroming (gebeurtenis  $O_9$ ). In dat geval is het geotextiel in de meest extreme toestand (geheel ondoorlatend) te beschouwen als een kwelscherm, dat dan een voldoende diep inbrengniveau moet hebben om falen door heave te vermijden (zowel via onderloopsheid als via voorloopsheid). Bij heave treedt fluïdisatie op van het zand achter het geotextiel ten gevolge van de verticale waterstroming in de ondergrond. Als dit optreedt, leidt dit bovendien tot het falen van de verankering van het geotextiel aan de onderzijde.

Door het geotextiel te ontwerpen als een volledig ondoorlatend piping-heave-scherm (zie ook §5.1) met een toelaatbaar verhang  $<0,5$  wordt ook in deze situatie voorzien in voldoende verankeringslengte. In werkelijkheid zal het geotextiel niet verstopten of slechts geleidelijk in de tijd verstopt kunnen raken. Lange termijn-monitoring (zie hoofdstuk 8) zal hier uitsluitsel over kunnen geven. Daardoor zijn er op dit punt twee ontwerp mogelijkheden: een betrekkelijk ondiep geotextiel met monitoring of een betrekkelijk diep geotextiel waarbij monitoring op dit punt achterwege kan worden gelaten.

Bij een VZG wordt in principe gekozen voor een doorlatend geotextiel, dan is de algemene ontwerp eis voor een geotextiel ten aanzien van doorlatendheid volgens CUR 174:

$$k_{VZG} \geq c_m \cdot k_b$$

$k_{VZG}$  = loodrechte doorlatendheidscoëfficiënt van het geotextiel [m/s].

$c_m$  = factor afhankelijk van het basismateriaal [-];

$k_b$  = doorlatendheidscoëfficiënt van het basismateriaal [m/s].

De factor  $c_m$  is afhankelijk van het basismateriaal en het risico op blokkering. Blokkering is het verstopt raken van het geotextiel door het indringen van fijne deeltjes uit het zand waardoor de poriën blokkeren (gebeurtenis  $B_5$ ). Dit beïnvloedt de werking van het geotextiel nadelig omdat de doorlatendheid afneemt. In dit geval adviseert CUR 174 een waarde van 10 voor deze factor. Opgemerkt wordt dat geringe verstopping of blokkering de werking van het scherm nog niet hoeft te verhinderen. Wanneer met een factor 10 gerekend wordt, is het aannemelijk dat de doorlatendheid boven die van het zand zal blijven (Van Beek, 2013).

Aangezien de ervaring in het laboratorium is dat de doorlatendheid van het geotextiel ingebed in zand lager kan zijn dan de doorlatendheid van het geotextiel zelf, is het aan te raden bovenstaande als een vuistregel aan te nemen, maar moet de doorlatendheid ook bepaald worden in de situatie waarin het geotextiel is ingebed in zand, zoals beschreven in het artikel 'Doorlatendheden geotextielen in zand' (Bezuijen e.a., 2012). Met deze test kan vastgesteld worden of de drukval over het geotextiel filter verwaarloosbaar is. Daarnaast wordt een indicatie verkregen van de doorlatendheid van het filter wanneer dit is ingebed in zand. In deze test moet de doorlatendheid ook een factor 10 groter zijn dan die van het zand.

## 4.3 Duurzaamheid

De bepaling van de duurzaamheid van het geotextiel is relevant voor de volgende gebeurtenis:

- Beschadiging geotextiel door veroudering ( $B_2$ )

Ook op langere termijn moet het ingebrachte geotextiel aan de eisen blijven voldoen. Bij de eisen voor waterdoorlatendheid en zanddichtheid is al rekening gehouden met blokkering en verstopping (gebeurtenis  $B_5$ ). Ten aanzien van de eindsterkte worden geen hoge eisen gesteld, het geotextiel wordt na het inbrengen immers nauwelijks belast. Het materiaal mag echter niet scheuren als gevolg van degradatie-processen (gebeurtenis  $B_2$ ). De levensduur van een geotextiel is afhankelijk van het materiaal. Het materiaal is in deze situatie niet onderhevig aan UV-belasting en er is geen sprake van een agressief milieu (in dat geval een geotextiel kiezen dat hier wel in

past). Bij geotextiel-toepassingen voor constructies wordt in geval van een levensduur van 100 jaar over het algemeen uitgegaan van maximaal 15% sterkteverlies door oxidatie.

Voor de versterkingsmaatregel VZG zal normaliter uitgegaan worden van een ontwerphorizon van orde grootte 50 jaar waarbij de vereiste sterkte voor het onbeschadigd kunnen inbrengen van het geotextiel substantieel groter is dan in de situatie na inbrengen. Hieruit volgt dat aan de duurzaamheidseis gemakkelijk voldaan zou moeten kunnen worden. Meer informatie over eisen over de duurzaamheid zijn gedocumenteerd in de CUR 243 'Durability of Geosynthetics'

#### 4.4 Sterkte-eigenschappen geotextiel

De bepaling van de sterkte-eigenschappen van het geotextiel is relevant voor de volgende gebeurtenissen:

- Rekeigenschappen geotextiel niet goed ( $O_3$ )
- Vervorming of scheurvorming in geotextiel door uitvoering ( $U_2$ )

Tijdens het ontwerp moet rekening gehouden worden met de sterkte- en rekeigenschappen van het geotextiel. Deze moeten passend zijn voor zowel de aanbrengmethode als in de situatie met mogelijk grote holle ruimte en/of losgepakt zand tegen het geotextiel als gevolg van opdrukken en mogelijke pipe-groei, eventueel na meerdere hoogwaters<sup>2</sup>.

Uit ervaringen met noodzakelijk gebleken meerdere materieel-aanpassingen, zowel voor de horizontale als voor de verticale inbrengtechniek, blijken de afstemming tussen de sterkte- en rekeigenschappen van het geotextiel, de confectionering (= alle nadere bewerkingen), de wijze van vouwen en de geleiding zeer kritisch te zijn voor het onbeschadigd kunnen inbrengen van het geotextiel. De kritische maatgevende (piek-) belastingen en –rekken op het geotextiel treden op tijdens de uitvoeringsfase. Samengevat: het geotextiel met alle bewerkingen, het inbrengmaterieel evenals personeel dient in alle fasen op elkaar afgestemd te zijn t.b.v. een reproduceerbaar betrouwbare inbrengtechniek.

Het gebruik van non-geweven geotextielen wordt gezien de beperkte sterkte- en rekeigenschappen in relatie tot geweven geotextielen én de opgedane ervaringen sterk afgeraden.

Om aan te kunnen tonen dat het geotextiel onbeschadigd is aangebracht, is een continue uitvoeringsmonitoring noodzakelijk waarbij de locatie van mogelijke verstoringen geregistreerd wordt. Ondanks dat deze technieken nog in ontwikkeling zijn, lijkt het mogelijk om met uitvoeringsmonitoring vast te kunnen stellen of er een scheur aanwezig is. In een extra verkenning in het kader van de POV-Piping wordt dit door Waterschap Rijn en IJssel in het voorjaar van 2017 verder onderzocht (zie hoofdstuk Aanbevelingen en vervolg).

---

<sup>2</sup> De aanwezigheid van losgepakt zand met een dikte tot enige decimeters onder het afdekkend kleipakket met "vermeende holle ruimten" is ter hoogte van Rijnbandijk13 te Ingen (Nederrijn) uitgebreid onderzocht in 2011. Achtergronden van dit uitgebreide terreinonderzoek in deze piping-gevoelige omgeving is gedocumenteerd in "Wiertsema & Partners" Grondonderzoek Rijnbandijk 13 Ingen, VN-50260.4.

#### 4.5 Overzichtstabel relevante faalmechanismen specificaties geotextiel

Tabel 1: Overzicht van faalmechanismen en de daarbij horende gebeurtenissen die relevant zijn bij de specificaties van het geotextiel (zie ook bijlage 2). Bij elke gebeurtenis is een actie gedefinieerd die uitgevoerd kan worden tijdens de ontwerp-, uitvoerings- of beheerfase. De kwalitatieve faalkansbijdrage hoort bij de gebeurtenis op voorwaarde dat de benoemde acties zijn uitgevoerd.

Faal-mechanisme	#	Gebeurtenis	Gevolg	Actie tijdens ontwerp	Actie tijdens uitvoering	Actie tijdens beheerfase	Kwalitatieve faalkans bijdrage
Doorloopsheld	O3	Rekeigenschappen geotextiel niet geschikt	Mechanisch falen doek	Sterkte-eisen geotextiel definiëren (CUR 174). Geotextiel moet benodigde rek op kunnen nemen afgestemd op het inbrengmateriaal.	Vervorming monitoren en vergelijken met gebruikte sterkte eigenschappen	Vervorming monitoren en vergelijken met gebruikte sterkte eigenschappen.	Nihil
Doorloopsheld	O4	Korrelgrootte te groot ingeschat	Maaswijdte te groot, daardoor ontwikkelt de pipe zich door het geotextiel heen.	Variatie korrelgrootte op vaklengte (100-1000m) in beeld brengen op basis van grondonderzoek en geologie (afzettingsmilieu). Aanvullend met juiste gradering kiezen om bandbreedte af te dekken (soort extra filter).			Nihil
Onderloopsheld	O9	Te lage doorlatendheid geotextiel	Heave, daardoor mogelijk ook verlies van verankering aan onderzijde	Ontwerpen op heavecriterium o.b.v. verschillende doorlatendheden geotextiel. Mogelijk is geheel ondoorlatend te conservatief.	Controle op bereiken van ontwerpdiepte		Nihil indien de diepte van het VZG hierop is afgestemd (met aanvullende lengte), anders moet met monitoring blijvend aan B5 worden voldaan.

Faal-mechanisme	#	Gebeurtenis	Gevolg	Actie tijdens ontwerp	Actie tijdens uitvoering	Actie tijdens beheerfase	Kwalitatieve faalkans bijdrage
Doorloopsheid	U2	Vervorming of scheurvorming in geotextiel door uitvoering	Mechanisch falen doek, Daardoor ontwikkelt de pipe zich door het geotextiel heen	De treksterkte en rekeigenschappen van het VZG moeten afgestemd zijn op de het inbrengmateriaal met voldoende vormvastheid en voldoende vermogen. Voorafgaand aan definitieve uitvoering een maakbaarheidsproef eisen onder vergelijkbare omstandigheden of een referentie naar een eerder project onder vergelijkbare of zwaardere omstandigheden (tenzij eerdere ervaringen dit al aantonen)	Kwaliteitscontrole van het inbrengen van het VZG door intensieve uitvoeringsmonitoring. De precieze invulling hiervan is nog in ontwikkeling.		Nihil mits kwaliteitscontrole tijdens uitvoering afdoende is
Doorloopsheid	B2	Beschadiging geotextiel door veroudering	Maaswijdte te groot, de pipe ontwikkelt zich door het geotextiel heen.	Duurzaamheidseisen definiëren (CUR 243)	Certificaat bij oplevering	Geotextiel niet blootleggen. Volgen ontwikkelingen literatuur/branche over veroudering.	Nihil
Onderloopseheid	B5	Mechanische blokkering en/of verstopping	Doorlatendheid scherm neemt af, daardoor heave, daardoor mogelijk ook verlies van verankering aan onderzijde	Filterregels ontwerp geotextielen volgens, onder andere: CUR174, artikel "Doorlatendheid geotextielen in Zand" en ervaringen aannemers met het kiezen van juiste O90.	Certificaat bij oplevering	Periodiek doorlatendheid van geotextiel meten. Grenswaarden en beheersmaatregelen definiëren. Maximale interval en omvang van metingen baseren op pilots en kennisopbouw uitgevoerde projecten.	Nihil mits doorlatendheid voldoende groot blijft. Anders wordt heave bij een ondoorlatend of slechts gedeeltelijk doorlatend geotextiel van belang (zie O10).

Uitgaande van een goed ontwerp resulteert de enige bijdrage aan de faalkans bij bovenstaande onderdelen op termijn uit verstopping van een geotextiel dat qua lengte niet op heave is ontworpen.



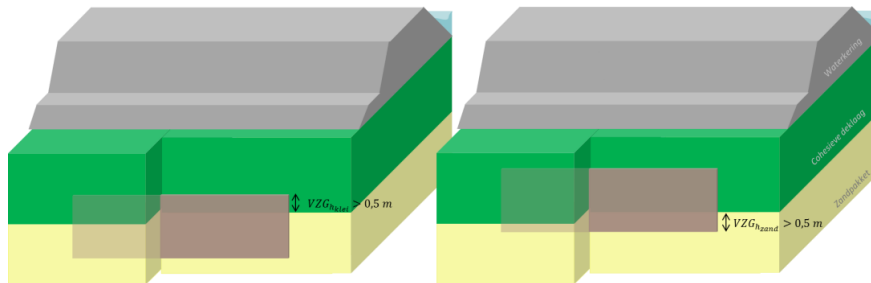
## 5 Ontwerp: Positionering VZG

### 5.1 Inbouwdiepte en hoogte geotextiel

Met onderstaande potentiële faalmechanismen moet bij het ontwerp rekening gehouden worden bij de bepaling van de inbouwdiepte ( $VZG_{d,ond}$ ;  $VZG_{d,bov}$ ) en hoogte ( $VZG_H$ ) van het geotextiel:

- Lokaal voorkomen van losgepakte zandlagen ( $O_7$ )
- Geotextiel is niet op de juiste diepte ontworpen ( $O_8$ )
- Mechanische, chemische en/of bacteriologische verstopping ( $B_5 + B_6$ )

De diepte van het geotextiel in het zand moet voldoende zijn om het pipingkanaal te stoppen. De minimale insteekdiepte in het zandpakket ( $VZG_{a,zand}$ ) en in het kleipakket ( $VZG_{a,klei}$ ) moet 0,5 meter zijn (Figuur 6, Van Beek 2013). Hierbij moet rekening gehouden worden met extra marge ten gevolge van onzekerheden die de heterogeniteit van de ondergrond met zich meebrengt om te voorkomen dat het geotextiel op de verkeerde diepte is ontworpen (gebeurtenis  $O_8$ ); bijvoorbeeld door de aanwezigheid van een niet ingekaderde (smalle) zandbaan die in verbinding staat met de rivier en hierdoor lokaal een hogere potentiaal t.o.v. de omgeving veroorzaakt. Het door grondonderzoek (hoofdstuk 2) vooraf inkaderen van eventuele tussenzandlagen en lokale zandbanen vergt hierbij speciale aandacht.



Figuur 6: Illustratie van de minimale insteekdiepte van het geotextiel in het kleipakket (links) en zandpakket (rechts).

Heave – het fluidiseren van het zand achter het geotextiel ten gevolge van de waterstroming in de ondergrond – kan leiden tot het falen van de verankering aan de onderzijde van het geotextiel en mag daarom niet optreden (zie ook §4.2 en gebeurtenis  $O_9$ ). Heave rondom het geotextiel, en daardoor losraken van het geotextiel, kan ook optreden doordat de ondergrond lokaal losser gepakt is dan verwacht (gebeurtenis  $O_7$ ). Afhankelijk van de mogelijke variatie in het gebied zal met een lagere pakingsdichtheid meer of minder rekening moeten worden gehouden. Het falen van de verankering kan voorkomen worden door extra verankeringslengte toe te kennen aan het geotextiel. De praktijk leert dat kosten voor geotextiel laag zijn en in bepaalde breedten wordt geproduceerd. In de pilots is daarom bijvoorbeeld gekozen om met  $VZG_H$  te werken van 3 meter. De verankering in het zand is gehanteerd op 2 meter. De bepaling van de diepte van het geotextiel ( $VZG_d$ ) kan worden verfijnd met grondwatermodelleringen waarbij een veilige verticale heavegradiënt van 0,5 wordt gehanteerd. Deze waarde wordt ook aangehouden bij het ontwerpen van kunstwerken (Technisch Rapport Zandmeevoerende Wellen, TAW 1999). In de pilots zijn schematiseringen uitgevoerd met ongunstige waarden. Het wordt aanbevolen om in de toekomst te werken met een schematiseringshandleiding, vergelijkbaar met die voor piping (WBI 2017, 2017).

#### **Geotextiel dimensioneren als Piping-Heave scherm**

Om de faalkans van een verstopping van het geotextiel (gebeurtenissen  $B_5$  en  $B_6$ ) te elimineren, kan gekozen worden om het geotextiel zo te dimensioneren dat het in geval van volledige verstopping functioneert als een piping-heave scherm mits dat mogelijk is. Een *doorlatend* geotextiel gedimensioneerd als piping-heave scherm is niet altijd uitvoerbaar vanwege een beperkt beschikbare ruimte (onvoldoende voor het benodigde inbrengmateriaal) of een te diep benodigd inbrengniveau (mede rekening houdend met de benodigde inklemming onderaan, ook bij heave). Bovendien is de verwachting dat het geotextiel niet acuut dichtslibt. Het dichtslibben zou bijvoorbeeld ook gemonitord kunnen worden. Als uit de monitoring blijkt dat er inderdaad verstoppingen voorkomen, kunnen beheersmaatregelen worden toegepast. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de strategie rondom monitoring van verstoppingen nog niet uitontwikkeld is. Afgbakende beheersmaatregelen bestaan ook nog niet, dit is dan ook opgenomen in de aanbevelingen.

## 5.2 Afstand ten opzichte van uittredepunt

De bepaling van de afstand van het geotextiel ten opzichte van de dijkteen ( $VZG_{\Delta x}$ ) is relevant in verband met onderstaande potentiële faalmechanismen (= ongewenste gebeurtenissen):

- Uittredepunt bevindt zich bovenstrooms van het geotextiel ( $O_5$ )
- Afstand geotextiel tot uittredepunt is te klein ( $O_6$ )
- Vervorming of scheurvorming in geotextiel door uitvoering ( $U_2$ )
- Machine kan niet op diepte komen ( $U_5$ )
- Excessieve erosie bij uittredepunt ( $B_3$ )
- Pipes (al dan niet ontwikkeld bij voorgaande hoogwaters) storten in ( $B_4$ )

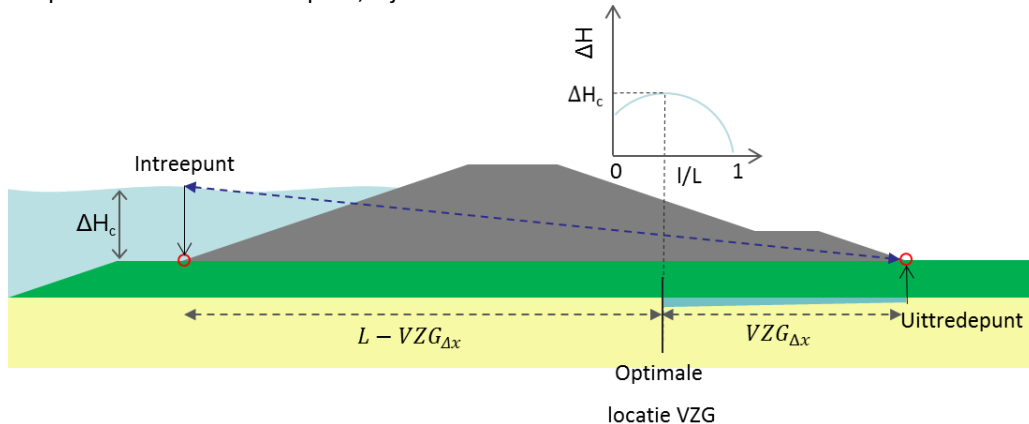
Voor de afstand van het geotextiel ten opzichte van het uittredepunt zijn de volgende overwegingen van belang:

### Theoretisch beste locatie VZG

De optimale plek van het geotextiel is afhankelijk van de relatie tussen de voor piping kritische waterstand in de situatie zonder geotextiel ( $H_c$ ) en de verhouding tussen de ontwikkelde horizontale pipelengte ( $l$ ) en totale kwelweglengte ( $L$ , Figuur 7) bij het bereiken van  $H_c$ . Een begin van pipe-vorming, dus het begin van zandmeevoerende wellen, leidt tot een herverdeling van de grondwaterstroming nabij het uittredepunt: de pipe(s) trekt/trekken relatief veel water naar zich toe, waardoor het erosieproces aan de kop van de pipe iets vertraagd wordt in vergelijking met de situatie waarin dit niet zo zou zijn. Naarmate de pipelengte  $l$  (zie figuur) toeneemt, neemt aanvankelijk ook het verval toe dat weerstaan kan worden, totdat het optimale punt wordt gepasseerd en het erosieproces progressief verloopt. De locatie van dit punt is sterk afhankelijk van de geometrie en ligt in de praktijk tussen een zesde en de helft van de totale kwelweglengte  $L$ , gerekend vanaf het uittredepunt. In de meeste gevallen ligt het punt op een kwart tot een derde van deze afstand. Meer informatie hierover is beschreven in bijvoorbeeld het onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen (Förster e.a., 2012).

De theoretisch beste locatie voor het VZG is ter plaatse van het maximum, praktisch kan het beste een locatie worden gekozen zo dicht mogelijk bij dit punt, maar wel aan de benedenstroomse zijde ervan (dus aan de kant van het uittredepunt).

Wanneer de afstand van het scherm tot aan het uittredepunt te klein wordt gekozen (gebeurtenis  $O_6$ ), dan kan de versterkende werking van het VZG onvoldoende worden benut. In het meest extreme geval is er sprake van een geotextiel ter plaatse van het uittredepunt, bijvoorbeeld een sloot: dit is relatief ineffectief.



Figuur 7: Illustratie van de theoretische beste plek voor het VZG. Het intrede- en uittredepunt zijn in dit figuur conservatief gekozen.

### VZG plaatsen vóór het opbarstpunt

Om er zeker van te kunnen zijn dat er geen opbarsten kan optreden bovenstrooms van het geotextiel (gebeurtenis  $O_5$ ) is het belangrijk om het geotextiel in elk geval te positioneren tussen het intredepunt en de opbarstlocatie (uittredepunt). In de schematiseringshandleiding voor piping (WBI 2017, 2017) wordt in detail aangegeven waar in- en uittredepunt gekozen dienen te worden. Het intredepunt wordt in de meest conservatieve gevallen gekozen bij de buitenteen (Figuur 7), anders verder buitenwaarts. Het uittredepunt wordt in de meest conservatieve gevallen gekozen bij de binnenteen van de dijk (Figuur 7), maar kan ook berekend worden aan de hand van het

opbarstcriterium (TAW, 1999). Van belang is om na te gaan of bij de maatgevende buitenwaterstand ( $H$ ) de grenspotential<sup>3</sup> in de zandlaag wordt bereikt voor en achter de beoogde locatie van het VZG. Door de berm voor het VZG in het gebied tussen het uitredepunt en het VZG op te hogen dient het opbarstpunt tot achter het VZG te worden verschoven. Een berm onder 1:20 is in verband met het verticaal verhang-criterium algemeen gangbaar.

### **Pipe van uitredepunt tot aan VZG**

Wanneer een zandmeevoerende wel ontstaat, vormen zich meerdere kleine kanaaltjes vlak onder de deklaag die zand meevoeren. Hoewel al deze pipes door het VZG worden gestopt, kan het totaal van al die kleine kanaaltjes voor een instabiliteit zorgen als de pipes instorten (gebeurtenis  $B_4$ ). Dit kan leiden tot verzwakking, het ontstaan van een losse zandpakking (Wiertsema & Partners, 2011), of in het ergste geval volledig wegspoelen van de berm en een deel van het binnentalud met als gevolg dat de macrostabiliteit niet meer gegarandeerd is. Dit zal echter in meerdere fasen plaatsvinden. In het ontwerp kan hier rekening mee worden gehouden door het VZG op enige afstand van het uitredepunt te plaatsen. Hierdoor vergt dit proces enige tijd en kan dit tijdig worden waargenomen. Het gebied waar de grond uitspoelt en de strook waarin het VZG zich bevindt dienen bereikbaar te blijven voor grondaanvullingen ten behoeve van de stabiliteit en voor inspecties. Tijdens de beheerfase is een periodieke controle nodig op verzakkingen van de deklaag. Waar nodig zullen aanvullingen moeten worden aangebracht. De grenswaarden en beheermaatregelen moeten nog eenduidig gemaakt worden. Dit wordt opgenomen in de aanbevelingen.

### **Excessieve erosie bij uitredepunt**

Indien een zandmeevoerende wel is ontstaan aan de binnendijkse zijde van het geotextiel kan dat leiden tot een zandmeevoerende wel die zoveel erosie veroorzaakt dat het uitredepunt langzaam richting het geotextiel opschuift. Hierdoor kan de dijkberm afkalven met het gevolg dat de verankering van het geotextiel bezwijkt (gebeurtenis  $B_3$ ). Door uit grondwatermodelleringen het opbarstevanwicht af te leiden, kan een extra marge in de afstand van het geotextiel tot het uitredepunt ( $VZG_{\Delta x}$ ) worden toegewezen. De hypothese is dat excessieve erosie vooral aan de orde is bij dunne deklagen en kopsloten vlakbij de dijkteen.

De omvang van deze gebeurtenis is nog niet bekend. Tijdens de pilot in de Willemspolder (een situatie met een bijna 2 meter diepe kopsloot met daaronder nog een 2 meter dikke deklaag, waarbij piping geforceerd is met een handboring vanuit de bodem van de sloot door de deklaag heen) is dit deelfaalmecanisme hoogstwaarschijnlijk opgetreden, maar niet volledig tot ontwikkeling gekomen. Deze waarnemingen moeten nog geanalyseerd en gerapporteerd worden.

### **Maakbaarheid locatie VZG**

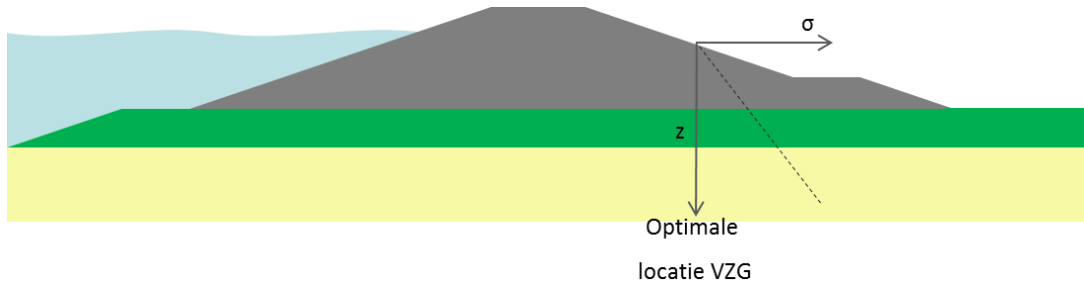
De theoretische meest geschikte locatie van het VZG is niet altijd een-op-een over te nemen in de praktijk. De ervaring met de pilot Hagestein-Opheusden heeft laten zien dat de maakbaarheid dwingende beperkingen oplevert zodat het uitvoeringsontwerp en de locatie van het VZG hierop moeten worden aangepast. Zo kan de theoretisch meest optimale locatie bijvoorbeeld halverwege het binnentalud zijn (zie Figuur 7). Dit zou voor de uitvoerbaarheid de onwenselijke consequentie hebben dat het binnentalud afgegraven moet worden voor de installatie van het geotextiel.

Een ander kritisch gebleken uitvoeringsaspect zijn de voorkomende hoge grondspanningen. Dit is vooral relevant nabij de dijk kern, trajecten in een bocht en in het geval van conuswaarden van het Pleistocene zand hoger dan 15 á 20 MPa welke in het bovenrivierengebied veel voorkomen. In deze situaties bestaat het risico dat het geotextiel niet diep genoeg kan worden aangebracht, doordat de (gangbare) aanbrengmachines de hoge druk niet kunnen hanteren (gebeurtenis  $U_5$ ). Indien de geleideconstructie van het geotextiel niet voldoende vormvast is, kan het geotextiel ingeklemd raken en scheuren (gebeurtenis  $U_2$ ).

De gronddruk vanuit de nabije dijk kern, in combinatie met het mogelijk vereiste diepe inbrengniveau, het eigengewicht van het materieel, evenals het effect van materieel manoeuvres en trillingen van het materieel vereisen een zeer grote buigstijfheid en vormvastheid van de inbreng-geleiders. Het benodigde vermogen van het materieel is hier eveneens sterk van afhankelijk. Hoofdstuk 7 gaat hier nader op in.

---

<sup>3</sup> De waterspanning in de zandlaag kan nooit groter zijn dan het gewicht van de afdekkende laag; de potential in de zandlaag waarbij net evenwicht aanwezig is wordt de grenspotential genoemd.



Figuur 8: Illustratie van het verloop van de grondspanning ( $\sigma$ ) op de theoretische optimale locatie van het geotextiel. De hoge grondspanningen blijken kritisch te zijn voor de maakbaarheid.

### 5.3 Aansluiting op andere constructies en bermen

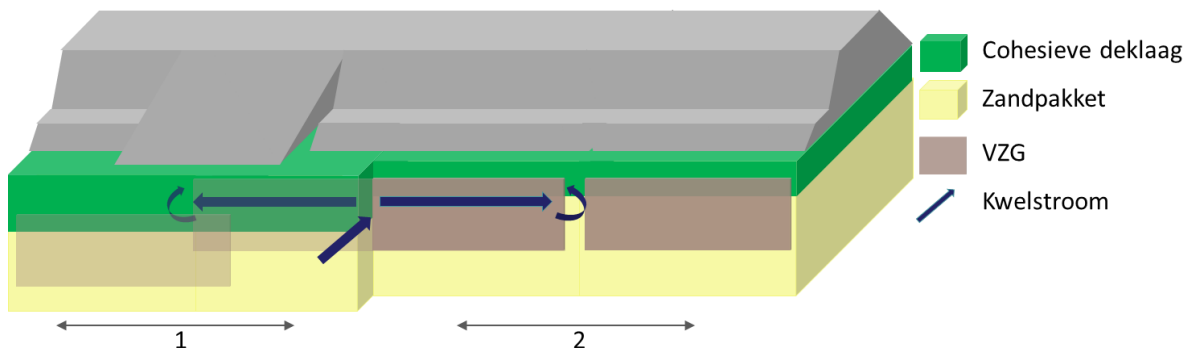
Een goede aansluiting op constructies en bermen is relevant voor de volgende gebeurtenissen:

- Lengte VZG ( $VZG_L$ ) is te kort ( $O_1$ )
- Aansluiting op al bestaande VZG, andere constructies en bermen is onvoldoende ( $O_2$ )

Indien het geotextiel niet goed aansluit op bermen of de voorgaande dagproductie bij de horizontale methode<sup>4</sup>, is het mogelijk dat de pipe zich in de lengterichting van de dijk langs het geotextiel kan ontwikkelen met als gevolg dat het geotextiel achterloops raakt (Figuur 9). Tot welke afstand de pipe in de lengterichting kan doorgroeien is nog niet bekend, de voorlopige resultaten van de proef in de Willemspolder geven aan dat een afstand van 20 meter door een pipe overbrugd kan worden (Koelewijn, 2017).

Bij constructies zoals damwanden wordt achterloopsheid voorkomen door de lengte van het scherm zo te vergroten dat de horizontale kwelweg niet meer tot piping leidt. Bij het VZG is het proces anders doordat het geotextiel waterdoorlatend is. Daarom moet de dimensionering op achterloopsheid op een andere basis plaatsvinden. De pipe in langsrichting vormt zich doordat er ook in zijwaartse richting toestroom van water plaatsvindt terwijl de erosiecapaciteit van de pipe ('de zandhonger') alleen vervuld kan worden met materiaal vanuit de zijwaartse richting of van onderaf; het geotextiel blokkeert immers de normale groeirichting van de pipe. Materiaalaanvoer van onderaf vereist heave, hier wordt minder gemakkelijk aan voldaan dan aan zijwaartse toestroom, totdat de pipe zo ver gegroeid is dat de weerstand te veel is toegenomen. Met 3D grondwaterstromingsberekeningen waarin zowel het geotextiel als de zijwaartse pipe(s) zijn gemodelleerd, is te onderzoeken bij welke pipelengte het erosieproces stopt. Dit vergt nog nader onderzoek.

Voorlopig kan pragmatisch ervoor worden gekozen om het VZG op dezelfde manier te dimensioneren op achterloopsheid als damwanden. Dit is in de orde van enkele tientallen meters.



Figuur 9: Illustratie van het VZG waarbij de onderlinge overgangen niet goed zijn. 1. Het geotextiel heeft te weinig overlap. 2. De geotextielen sluiten niet op elkaar aan.

<sup>4</sup> Bij de verticale methode wordt de aansluiting op het vorige VZG-paneel gewaarborgd door toepassing van een voegconstructie vergelijkbaar met een damwandslot.

#### 5.4 Overzichtstabel relevante faalmechanismen ontwerp en positionering van het geotextiel

Tabel 2: Overzicht van faalmechanismen en de daarbij horende gebeurtenissen die relevant zijn bij het ontwerp van de positionering van het geotextiel (zie ook bijlage 2). Bij elke gebeurtenis is een actie gedefinieerd die uitgevoerd kan worden tijdens de ontwerp-, uitvoerings- of beheerfase. De kwalitatieve faalkansbijdragen horen bij de gebeurtenissen op voorwaarde dat de benoemde acties zijn uitgevoerd.

Faal-mechanisme	#	Gebeurtenis	Gevolg	Actie tijdens ontwerp	Actie tijdens uitvoering	Actie tijdens beheerfase	Kwalitatieve faalkans bijdrage
Achterloopsheid	O1	Lengte van het geotextiel (in de lengterichting van de dijk) is te kort	De pipe groeit tegen het geotextiel aan in de lengterichting	Suggestie: ontwerpen op achterloopsheid zoals damwanden. Dit is in de orde van enkele tientallen meters.	Controle op overgangen (al dan niet in opleverdossier).		nihil
Achterloopsheid	O2	Aansluiting op bestaande VZG, andere constructies en bermen is onvoldoende	Achterloopsheid	Suggestie: ontwerpen op achterloopsheid zoals damwanden. Dit is in de orde van enkele tientallen meters.	Controle op overgangen (al dan niet in opleverdossier), aansluiting maken op constructies (hoe is nog onontgonnen terrein).	Gerichte monitoring bij overgangen	Nihil indien voldoende overlap is toegepast
Voorloopsheid	O5	Uittredepunt bevindt zich bovenstrooms van het geotextiel	Voorloops	Opbarstberekeringen maken, conform bestaande richtlijnen.			Nihil
Bovenloops	O6	Afstand geotextiel tot uittredepunt te klein	Bovenloops	Zonering definiëren waarbinnen geen opbarsten, graverijen e.d. mogen plaatsvinden			
Onderloopsheid	O7	Lokaal voorkomen van losgepakte zandlagen	Falen verankering geotextiel onderzijde in zand	Onzekerheid afdekken met extra diepte van het geotextiel.	Geforceerd zand aanvullen onder druk inclusief registratie		Relevant indien gemist bij grondonderzoek en/of in ontwerp. Gepast aandacht besteden opdat het nihil is

Faal-mechanisme	#	Gebeurtenis	Gevolg	Actie tijdens ontwerp	Actie tijdens uitvoering	Actie tijdens beheerfase	Kwalitatieve faalkans bijdrage
Onderloopsheid	O8	Geotextiel niet op juiste diepte ontworpen	Bij grote afwijkingen wordt verankering te klein of komt het geotextiel te hoog met bovenloopsheid of onderloopsheid als gevolg.	Met grondonderzoek en geologische kennis laagscheiding in beeld brengen (afhankelijk van afzettingsmilieu). Op basis van de onzekerheden uit dit onderzoek de lengte van het geotextiel aanpassen. Suggestie: bij een hoge onzekerheid een hoger geotextiel bijvoorbeeld.	Volgen van laagovergangen (uitvoeringsmonitoring).		Nihil
Doorloopsheid	U2	Excessieve vervorming of scheurvorming in geotextiel door uitvoering	Mechanisch falen doek, daardoor ontwikkelt de pipe zich door het geotextiel heen	De treksterkte en rekeigenschappen van het VZG moeten afgestemd zijn op de het inbrengmateriaal met voldoende vormvastheid en voldoende vermogen. Voorafgaand aan definitieve uitvoering een maakbaarheidsproef eisen onder vergelijkbare omstandigheden of een referentie naar een eerder project onder vergelijkbare of zwaardere omstandigheden (tenzij eerdere ervaringen dit al aantonen)	Kwaliteitscontrole van het inbrengen van het VZG door intensieve uitvoeringsmonitoring. De precieze invulling hiervan is nog in ontwikkeling.		Nihil bij gebleken goede uitvoering

Faal-mechanisme	#	Gebeurtenis	Gevolg	Actie tijdens ontwerp	Actie tijdens uitvoering	Actie tijdens beheerfase	Kwalitatieve faalkans bijdrage
Onderloopsheid	U5	Machine kan niet op diepte komen	Geotextiel is te hoog aangebracht i.v.m. maakbaarheid met onderloopsheid als gevolg	Bij ontwerp voldoende rekening houden met 1: de hoge gronddrukken vanuit de dijk kern, 2: eigen gewicht van het inbrengmateriaal en 3: hoge conusweerstand; hierbij ook gebruikmaken van ervaringskennis	Kwaliteitscontrole door plaats gerelateerde uitvoeringsmonitoring. Materiaal moet genoeg vermogen hebben zodat de machine niet vastloopt door de hoge gronddrukken. Daarnaast moet de inbrenggeleide-constructie bestand zijn tegen de hoge druk en vormvast zijn om het VZG onbeschadigd in te kunnen brengen.		Relevant. Indien de faalkans niet nihil is, is dat na uitvoering bekend.
bovenloopsheid/ onderloopsheid	B3	Excessieve erosie bij uittredepunt	Uittredepunt verschuift naar buitenwater waardoor verankering verdwijnt met bovenloops- of onderloopsheid tot gevolg.	Evenwicht benedenstroomse zijde geotextiel afleiden uit grondwatermodellering. Eventueel extra marge op de afstand op uittreepunt. Ervaringen en inzichten van de pilot Willemspolder afwachten.		Periodieke zakking deklaag meten. De verwachting is dat deze gebeurtenis zich afspeelt in een kort tijdsbestek (bij één hoogwater). Bij inspectie zal dit blijken en zal een maatregel genomen moeten worden.	Lijkt het meest relevant bij dunne deklagen en teensloten. Verplaatsing van het uittredepunt zoals waargenomen bij de Willemspolder is overigens een zeldzaamheid in de bekende waarnemingen.

Faal-mechanisme	#	Gebeurtenis	Gevolg	Actie tijdens ontwerp	Actie tijdens uitvoering	Actie tijdens beheerfase	Kwalitatieve faalkans bijdrage
bovenloopsheid	B4	Pipes (al dan niet ontwikkeld bij voorgaande hoogwaters) storten in	Deklaag stort in/afkalving dijkteen.	Onzekerheden afdekken met extra hoogte in scherm. In pilots is gekozen voor praktische maat van 3 meter hoogte in totaal, afgestemd op uitvoerbaarheid.		Periodieke zakking deklaag meten. Grenswaarde en beheersmaatregelen definiëren (ordegrootte is decimeters).	Relevant. Hoewel dit een kennisleemte is, dek je het af met veiligheid in ontwerp en inspectie tijdens beheerfase (zorgplicht). Dit maakt de faalkansbijdrage niet per se nihil: kan er voldoende snel worden opgetreden tijdens een extreem hoogwater?
Onderloopsheid	B5	Mechanische blokkering en/of verstopping	Doorlatendheid scherm neemt af.	Filterregels ontwerp geotextielen volgens, onder andere: CUR174, artikel "Doorlatendheid geotextielen in Zand" en ervaringen aannemers met het kiezen van juiste O90.	Certificaat bij oplevering	Periodiek doorlatendheid van geotextiel meten. Grenswaardes en beheersmaatregelen definiëren. Maximale interval en omvang van metingen baseren op pilots en kennisopbouw uitgevoerde projecten.	Nihil mits doorlatendheid voldoende groot blijft. Anders wordt heave bij een ondoorlatend of slechts gedeeltelijk doorlatend geotextiel van belang.



Faal-mechanisme	#	Gebeurtenis	Gevolg	Actie tijdens ontwerp	Actie tijdens uitvoering	Actie tijdens beheerfase	Kwalitatieve faalkans bijdrage
Onderloopsheid	B6	Chemische en/of bacteriologische verstoppingen	Doorlatendheid scherm neemt af waardoor de lengte van het scherm onvoldoende wordt	Ontwerpregels CUR174	Certificaat bij oplevering	Periodiek doorlatendheid geotextiel meten. Grenswaarde en beheersmaatregelen definiëren. Minimale interval en omvang van metingen baseren op pilots en kennisopbouw uitgevoerde projecten.	nihil

Wanneer ontwerp, uitvoering en beheer volgens bovenstaande inzichten worden uitgevoerd, levert geen van bovenstaande faalmechanismen een extra bijdrage aan de faalkans, behalve het risico op verstopping van een geotextiel dat qua lengte niet op heave is ontworpen.

## 6 Uitvoering: Herstel van de ondergrond

Bij het aanbrengen van het geotextiel wordt er weliswaar minder grond verzet vergeleken met traditionele maatregelen zoals een pipingberm, maar het is gezien de doorsnijding van het afdekkend kleipakket en de gewenste waterdoorlatendheid een kritisch onderdeel van de algehele uitvoering. In veel gevallen worden bermen en afritten gedeeltelijk vlak afgegraven om tot de juiste diepte te komen. Dit gebeurt ook ten behoeve van een eenvoudiger en daardoor betrouwbaardere uitvoering. Voorts moet rekening gehouden worden met voldoende ruimte voor het opstellen van materieel en de opslag en het transport van de tijdelijk verwijderde deklaag, het aanvulzand en de aanvulklei.

Voor de sleufvulling moet het juiste aanvulzand en klei worden aangevoerd om de ondergrond te herstellen.

### 6.1 Zandaanvulling

De bepaling van de zandaanvulling is relevant voor de volgende gebeurtenissen:

- Sleufvulling past niet goed bij in situ materiaal  $(O_{10})$
- Zand in sleuf niet goed verdicht  $(U_4)$

In het geval dat het aanvulzand te fijn is gekozen, veroorzaakt de sleufvulling en het VZG een te grote weerstand voor de grondwaterstroming waardoor onderloopsheid kan ontstaan (gebeurtenis  $O_{10}$ ). Om de grondwaterstroming niet negatief te beïnvloeden moet de totale weerstand van het aanvulzand en het geotextiel geringer zijn dan de oorspronkelijke situatie. Om te voorkomen dat het zand in de sleuf nazakt doordat het zand in de sleuf niet goed verdicht is (gebeurtenis  $U_4$ ) is het belangrijk om onderscheid te maken tussen situaties boven en onder de grondwaterspiegel. Uit ervaring is bijvoorbeeld gebleken dat met de horizontale methode (Van den Herik-Sliedrecht, 2015) het aanvulzand onder de grondwaterspiegel machinaal door middel van vijzeltoevoer geforceerd onder druk aangebracht moet worden om de juiste verdichting te kunnen garanderen. Daarnaast is een juiste afstemming tussen rijsnelheid, snelheid van de graafketting, (vijzel)aanbrengweerstand en inbrenghoeveelheden van het zand essentieel voor de borging van een goede verdichting van het zand. Al deze parameters dienen continu en plaats-gerelateerd te worden gemonitord. Deze data vormt de benodigde basis voor toekomstige beoordelingen (zie ook onder 6.3).

### 6.2 Kleiaanvulling onder en boven de grondwaterspiegel

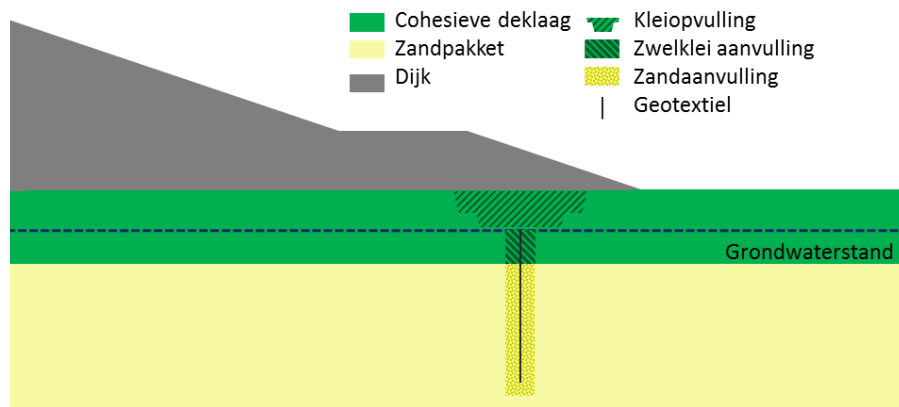
Bij de kleiaanvulling zijn de volgende potentiële faalmechanismen relevant:

- Kleiaanvulling werkt als drainagepad  $(O_5)$
- Sleufvulling past niet goed bij in situ materiaal  $(O_{10})$
- Aanvulklei in de sleuf bevat holle ruimtes  $(U_3)$
- Versmering van het geotextiel met klei  $(U_6)$

Net zoals bij het aanvulzand mag de kleiaanvulling niet voor extra weerstand zorgen voor de freatische grondwaterstroming (gebeurtenis  $O_{10}$ ). Hierdoor zou de freatische lijn hoger komen te liggen waardoor de stabiliteit en de begaanbaarheid van de berm negatief worden beïnvloed. Echter de kleiaanvulling mag ook niet voor kortsluiting zorgen doordat de kleiaanvulling bijvoorbeeld te zandig is of (bij een sterk siltige samenstelling) na een droge periode teveel krimpscheuren bevat (gebeurtenis  $O_5$ ) of dat de kleiaanvulling holle ruimtes bevat (gebeurtenis  $U_3$ ).

Onder de grondwaterspiegel is het niet mogelijk om klei te verdichten. Er kan daarom gekozen worden om hier kleikorrels aan te brengen. Dit kan bijvoorbeeld door de (zwe)klei door middel van geforceerde vijzeltoevoer (onder druk) aan te brengen om zo voldoende afdichting en inklemming te kunnen garanderen. Een gecombineerde handmatige en geautomatiseerde bijsturing is essentieel. Ook hier is een juiste afstemming tussen rijsnelheid, graafketting, snelheid, (vijzel)aanbrengweerstand en inbrenghoeveelheden van de zwekleikorrels daarbij essentieel in de borging van een goede verdichting. Ook dit zal uitgebreid gecontroleerd en plaats-gerelateerd geregistreerd moeten worden tijdens de uitvoering. Ook deze data behoort tot de benodigde basis voor toekomstige beoordelingen om aan te tonen dat wat bij het ontwerp was beoogd, ook daadwerkelijk in-situ aanwezig is. Een mogelijke maatregel om de aanleg te vergemakkelijken is het toepassen van een (beperkte) bemaling waarmee de heersende drukken verminderd kunnen worden.

Aard, kwaliteit en afmetingen van de zwelklei-korrels moeten worden afgestemd op het inbrengmaterieel, diepte en grondwaterhuishouding. De afmetingen van de zwelkleikorrels, het zwelvermogen en de zwelsnelheid zijn daarbij van belang. Een goede kleiaanvulling is bepalend voor de verankering (inklemming) van het geotextiel (gebeurtenis  $U_2$ ). De kleiaanvulling mag daarbij niet leiden tot versmering met het doek (gebeurtenis  $U_6$ ). De zwelkleikorrel-eigenschappen (afmetingen, zwelvermogen en zwelsnelheid) zijn relevant in verband met het voorkomen van plug- of propvorming in de toevoerkoker. Een droge opslag en een droge verwerking zijn relevant. Boven de (minimaal 1 meter dikke) zwelklei-afdichting en boven de grondwaterspiegel kan middels een open ontgraving over een grotere sleufbreedte (1 á 2m) de klei-aanvulling met gangbaar materieel in lagen tot 30 cm dikte elk worden aangebracht en verdicht, zie figuur 10.



Figuur 10: Schematische weergave van de sleufvulling.

### 6.3 Uitvoeringsmonitoring als basis voor (toekomstige) beoordelingen

#### **Maakbaarheidsproef ter verificatie reproduceerbaarheid uitvoering**

Een maakbaarheidsproef is relevant indien:

- niet eerder beproefd materieel wordt toegepast
- beproefd materieel wordt toegepast onder sterk afwijkende omstandigheden en er geen effectieve monitoring is die een juiste plaatsing garandeert

Een maakbaarheidsproef is een eenmalige droge ontgraving met bemaling (met eventuele sleufbekisting) en is ter verificatie van een goede reproduceerbare uitvoering noodzakelijk. Hierbij dient aangetoond te worden dat het geotextiel met passende zandaanvulling schoon en op het juiste niveau conform het ontwerp is aangebracht. Ook de maatvoering en kwaliteit van de kleiafdichting dient aangetoond te worden. De maakbaarheidsproef hiervoor dient onder vergelijkbare of ongunstigere omstandigheden te worden uitgevoerd als bij de beoogde toepassingslocatie.

Op basis van ervaringen met de pilots waar meerdere maakbaarheidsproeven zijn uitgevoerd, wordt opgemerkt dat de benodigde bemaling niet moet worden onderschat. Vaak is voor een objectieve beoordeling en goedkeuring een gecombineerde freatische en spanningsbemaling met voldoende capaciteit noodzakelijk t.b.v. een daadwerkelijk droge ontgraving.

Indien met beproefd materieel reeds eerder een geslaagde maakbaarheidsproef is uitgevoerd, en in het systeem zitten voldoende waarborgen (monitoring) verwerkt waarmee aangetoond wordt (tijdens en na aanbrengen) dat op elke locatie het doek heel en op de juiste plaats is aangebracht, kan een maakbaarheidsproef achterwege blijven.

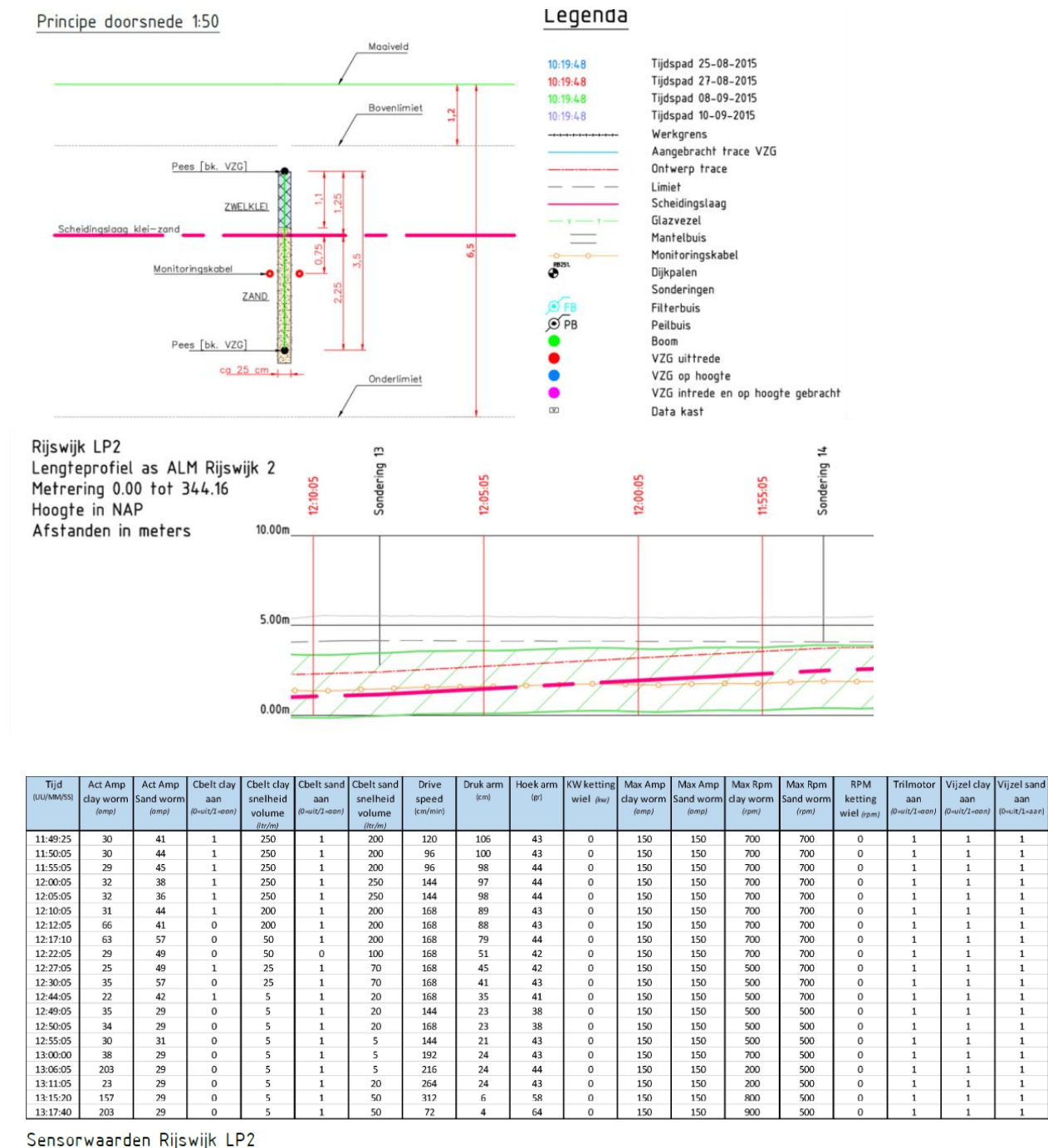
#### **Uitvoeringsmonitoring**

Zoals hierboven aangegeven, vormt de plaats-gerelateerde uitvoeringsdata de benodigde basis voor toekomstige beoordelingen om de reproduceerbaarheid van de inbrengtechniek als betrouwbare piping-maatregel aantoonbaar te maken. Dit is min of meer vergelijkbaar met de gangbare “geboortebewijzen” van diep wandpanelen.

Vanwege de onderlinge samenhang en beïnvloeding is het relevant veel machine-parameters continue te monitoren en te registreren. Deze moeten allen herleidbaar zijn naar locatie (XYZ). Hierbij kan bij de horizontale

techniek gedacht worden aan actuele en maximaal optredende toerentallen en opgenomen vermogen van toevoervijzels voor aanvulzand, aanvulklei (geeft indruk van voldoende en ononderbroken tegendruk), aan-uitstanden van toevoerbanden en trimmotoren voor aanvulzand en -klei, positionering van geleider-arm, rijnsnelheid, graafketting snelheid, etc.

Een voorbeeld van resultaten van de uitvoeringsmonitoring van de horizontale inbrengtechniek is weergegeven in (Figuur 11). Hierin zijn de meest relevante machine-parameters opgenomen.



Figuur 11: Voorbeeld continue en plaats gerelateerde uitvoeringsmonitoring (Van den Herik-Sliedrecht, 2016)

Voor de verticale techniek zijn met name de benodigde toevoerdrukken en aanvoervolumes voor de inbrenggeleider zeer relevant, evenals de nozzle-drukken en -debieten. Een plotselinge terugval of sterke afwijking van parameters kan duiden op een lekkage en het hierdoor niet schoon in kunnen brengen van het geotextiel.

#### 6.4 Bermen en afritten

In veel gevallen worden bermen en afritten gedeeltelijk en vlak afgegraven om met het inbrengmateriaal tot de juiste diepte te komen en t.b.v. een eenvoudigere en daardoor betrouwbaardere uitvoering. Ook moet rekening worden gehouden met voldoende ruimte voor materieel-opstelling alsmede opslag en transport van tijdelijk verwijderd deklaagmateriaal, aanvulzand en aanvulklei.

Het afgraven en herstellen van de berm is, afhankelijk van de situatie, relevant voor de volgende ongewenste gebeurtenissen:

- Uittredepunt bevindt zich bovenstrooms van het geotextiel  $(O_{11})$
- Machine kan niet op diepte komen  $(U_5)$

Na de installatie van het doek met het aanvulzand en zwelkleikorrels dient de berm op het vereiste niveau weer te worden geherprofileerd ten behoeve van voldoende macrostabiliteit en om te voorkomen dat het opbarstpunt bovenstrooms van het geotextiel kan ontstaan (gebeurtenis  $O_{11}$ ). De berm dient over het algemeen onder een helling van 1:20 te worden aangebracht in verband met de benodigde afwatering.

Daarnaast vormt de berm vaak een beheerstrook voor de bereikbaarheid tijdens calamiteiten. Boven de afdichting van zwelklei en de grondwaterspiegel kan met een open ontgraving over een grotere sleufbreedte (1 á 2m) de klei-aanvulling met gangbaar materieel in lagen van ten hoogste 30 cm worden aangebracht en verdicht.

## 6.5 Overzichtstabel relevante faalmechanismen uitvoering met herstel van ondergrond

Tabel 3: Overzicht van faalmechanismen en de daarbij horende gebeurtenissen die relevant zijn bij het herstel van de ondergrond (zie ook bijlage 2). Bij elke gebeurtenis is een actie gedefinieerd die uitgevoerd kan worden tijdens de ontwerp-, uitvoerings- of beheerfase. De kwalitatieve faalkansbijdragen horen bij de gebeurtenissen op voorwaarde dat de benoemde acties zijn uitgevoerd.

Faal-mechanisme	#	Gebeurtenis	Gevolg	Actie tijdens ontwerp	Actie tijdens uitvoering	Actie tijdens beheerfase	Kwalitatieve faalkans-bijdrage
Voorloops/ bovenloopsheid	O5	Kleiaanvulling werkt als drainagepad	Uittredepunt verschuift naar kleiaanvulling waardoor bovenloopsheid kan plaatsvinden.	Eisen stellen aan goede kleiaanvulling.	Klei ook onder grondwaterspiegel verdicht aanbrengen Aantoonbaarheid middels plaats gerelateerde uitvoeringsmonitoring.		Nihil
onderloopsheid	O10	Sleufvulling past niet goed bij in situ materiaal	Onderloopsheid + beïnvloeding waterhuishouding in omgeving	Gevoeligheid van de grondopbouw bepalen met grondwatermodellering. Marge aanbrengen in de ontwerpuitgangspunten t.a.v. doorlatendheid filter. Ontwerp als piping-heavescherm is een optie mits mogelijk.	Kwaliteitscontrole door plaats gerelateerde uitvoeringsmonitoring.		Nihil
Voorloopsheid	O11	Uittredepunt bevindt zich bovenstrooms van het geotextiel	Voorloops	Opbarstberekeringen maken, conform bestaande richtlijnen.			Nihil
Voorloops/ bovenloopsheid	U3	Aanvulklei in de sleuf bevat holle ruimtes	Deklaag barst op en de pipe kan zich bovenloops van het VZG ontwikkelen. Ook mogelijk dat bovenloopse	Concrete kwaliteitseisen stellen aan zwelklei qua zwelvermogen en zweltijd. Zwelklei ontwerpen over minimaal 1 meter boven de zand-klei overgang.	Klei ook onder grondwaterspiegel verdicht aanbrengen. Aantoonbaarheid middels plaats gerelateerde uitvoeringsmonitoring.		Nihil

Faal-mechanisme	#	Gebeurtenis	Gevolg	Actie tijdens ontwerp	Actie tijdens uitvoering	Actie tijdens beheerfase	Kwalitatieve faalkans-bijdrage
			verankering niet goed zit.				
Bovenloopsheid/ onderloopsheid	U4	Zand in sleuf is niet goed verdicht	VZG verzakt in sleuf.	Voorafgaand aan definitieve uitvoering een maakbaarheidsproef eisen onder vergelijkbare omstandigheden.	Aanvulzand geforceerd en gecontroleerd onder druk aanbrenge. Aantoonbaarheid middels plaats gerelateerde uitvoeringsmonitoring.		Nihil
Onderloopsheid	U5	Machine kan niet op diepte komen	Geotextiel is te hoog aangebracht i.v.m. maakbaarheid met onderloopsheid als gevolg	Bij ontwerp voldoende rekening houden met 1: de hoge gronddrukken vanuit de dijk kern, 2: eigen gewicht van het inbrengmateriaal en 3: hoge conusweerstand; hierbij ook gebruikmaken van ervaringskennis	Kwaliteitscontrole door plaats gerelateerde uitvoeringsmonitoring. Materiaal moet genoeg vermogen hebben zodat de machine niet vastloopt door de hoge gronddrukken. Daarnaast moet de inbrenggeleideconstructie bestand zijn tegen de hoge druk en vormvast zijn om het VZG onbeschadigd in te kunnen brengen.		Relevant. Indien de faalkans niet nihil is, is dat na uitvoering bekend.

Faal-mechanisme	#	Gebeurtenis	Gevolg	Actie tijdens ontwerp	Actie tijdens uitvoering	Actie tijdens beheerfase	Kwalitatieve faalkans-bijdrage
Onderloopsheid	U6	Versmering van het geotextiel met klei	Doorlatendheid geotextiel neemt af.	Voorafgaand aan definitieve uitvoering een maakbaarheidsproef eisen onder vergelijkbare omstandigheden.	Uitvoeringsmonitoring richten op parameters die hiervoor van belang zijn (bijvoorbeeld bij de verticale techniek is de druk in de inbrengcassette geleider zeer relevant)		Relevant, vooral kritisch bij verticale inbrengtechniek. Controle op voldoende doorlatendheid kan volgen uit monitoring tijdens beheer.

Wanneer ontwerp, uitvoering en beheer volgens bovenstaande inzichten worden uitgevoerd, levert geen van bovenstaande faalmechanismen een extra bijdrage aan de faalkans, behalve het risico op verstopping van een geotextiel door versmering met klei.



## 7 Uitvoeringsaspecten per techniek en pilots

Voor de pilots binnen dijkversterkingsproject Hagestein-Opheusden (HOP) is ervaring opgedaan met twee installatietechnieken: de verticale grondverdringende inbrengmethode (Boskalis Nederland B.V.) en de sleufgravende horizontale inbrengmethode (Van den Herik-Sliedrecht). In Figuur 2 (zie inleiding) zijn beide technieken afgebeeld.

Voor de ontwikkeling van beide inbrengtechnieken zijn in meerdere fasen verschillende materieelaanpassingen noodzakelijk gebleken en doorgevoerd. Alle relevante zaken zijn in deze ontwerp- en beoordelingsrichtlijn integraal opgenomen, inclusief de verwerking van de laatste inzichten en ervaringen tot en met oktober 2016.

Inzicht in de te verwachten grondspanningen is voor alle inbrengtechnieken relevant om de maakbaarheid te kunnen garanderen. De gronddruk vanuit de nabije dijk kern in combinatie met het mogelijk vereiste diepe inbrengniveau, het eigengewicht van het materieel, alsmede het effect van materieelmanoeuvres en -trillingen, vereisen een zeer *grote buigstijfheid en vormvastheid van de inbrenggeleider*. Het benodigde vermogen is hier eveneens sterk van afhankelijk. Dit heeft zowel voor de maakbaarheidsproeven als de pilots binnen dijkversterkingsproject Hagestein-Opheusden veel tijd en aanpassingen gevergd waaruit veel lering uit is getrokken door alle partijen.

### 7.1 Verticale inbrengtechniek

De verticale techniek is ontwikkeld door COFRA B.V. (onderdeel van Boskalis Nederland B.V.) en bestaat uit een kraan met een variabel excentrisch trilblok die een afsluitbare stalen inbrenggeleider (cassette) met hierin het geotextiel de grond in kan drukken, ondersteund door hogedruk-nozzles. Deze techniek (in slankere vorm) komt oorspronkelijk voort uit het inbrengen van HDPE-Geolock-panels tot op een weerstandbiedende kleilaag voor bijvoorbeeld de isolatie van verontreinigingen of het realiseren van verdiepte onderdoorgangen met een eigen waterhuishouding.

Bij de verticale inbrengtechniek wordt een Geolock-paneel met daarin het VZG-venster middels een stalen inbrenggeleider op diepte gebracht. Voor het op diepte krijgen van de inbrenggeleider met daarin het (onder wateroverdruk) opgesloten VZG wordt gebruik gemaakt van een variabel excentrisch trilblok en hogedruk nozzles aan de onderzijde van de afsluitbare inbrenggeleider.

Nadat de inbrenggeleider op diepte is gebracht, opent deze zich en blijft het VZG door de bodeminklemming en de eindflappen aan de onderkant van het Geolock-paneel achter wanneer de inbrenggeleider weer naar boven wordt gehaald. . Uit ervaring bij dijkversterking Hagestein-Opheusden is gebleken dat, hoewel de methode grondverdringend is, de sleuf aangevuld moet worden met extra (zwe)klei. Dit is vergelijkbaar met de gangbare praktijk bij sondeergaten die opgevuld moeten worden. Bij deze techniek is sprake van een beperkte tijdelijke grondontspanning. Door gewelfwerking blijft de dijkstabiliteit gewaarborgd zonder nadelige vervormingen van betekenis. Door het gebruik van een variabel excentrisch trilblok is geen sprake van een verhoogd schaderisico voor omliggende bebouwing.

Ten behoeve van het positioneren van de inbrenggeleider, en het manoeuvreren van het relatief zware inbrengmaterieel, moet bij ontwerp en uitvoering rekening worden gehouden met het benodigde ruimtebeslag.

De voordelen van deze verticale techniek is dat het VZG in scherpe bochten en langs knelpunten aangebracht kan worden waar dit met de horizontale techniek niet kan. Hierbij kan gedacht worden aan obstakels als bomen, huizen, op- en afritten en kabels en leidingen. Daarnaast kunnen de panels naast elkaar op verschillende dieptes aangebracht worden. Deze verticale inbrengmethode is geschikt bij een grote variatie in de diepte van de pipinggevoelige zandlaag en ook om grotere diepte te bereiken.

De nadelen van deze techniek is dat er door de hoeveelheid losse panels een hoger risico is op een slechte horizontale aansluiting (gebeurtenis  $O_2$ ) en de dagproductie beperkt is. Ook is de aansluiting op de horizontale techniek nog niet uitgewerkt.

## 7.2 Horizontale inbrengtechniek

Voor lange trajecten zonder veel obstakels en een ondiep VZG- inbreng-niveau (<8 meter) is de in figuur 2 (inleiding) weergegeven horizontale inbrengtechniek zeer geschikt. Deze techniek is ontwikkeld door Van den Herik-Sliedrecht B.V. Een door Van den Herik-Sliedrecht aangepaste diepfreesmachine “zaagt” hierbij tot maximaal 8 meter diep in de grond. Door een schermkoker kan het geconfectioneerde geotextiel via een glijbekisting in één gang worden aangebracht. Ook is de machine zo gemodificeerd dat daarbij tegelijkertijd aanvulzand aan weerszijden van het geotextiel tot aan de scheidingslaag zand/klei en zwelkleikorrels aan weerszijden van het doek daarboven worden aangebracht.

Voor de monitoring van verstoppingen op de lange termijn, kunnen in dezelfde werkgang twee verwarmbare (pulse heat) glasvezelkabels worden ingebracht. Feitelijk kunnen allerlei soorten kabels (bv glasvezel) op iedere hoogte naast het geotextiel meegevoerd worden. De benodigde werkruimte voor de inbrengfrees en hierachter getrokken shuttles voor aanvulzand en zwelklei is ca. 5 meter breed. De productiesnelheid is relatief hoog: in één dag kan een productie van enkele honderden meters worden gehaald (na voldoende voorbereiding).

Bij deze inbrengtechniek is bij een zorgvuldige uitvoering sprake van een beperkte grondontspanning. De verplaatsingen zijn echter zodanig klein (<0,1m) dat geen sprake is van stabiliteitsreductie van betekenis.

Bij knelpunten vormt de aansluiting op andere maatregelen nog wel een punt van zorg.

## 7.3 Maakbaarheidsproeven voorafgaand aan WSRL-pilots

Om aan te tonen dat het geotextiel schoon, plaatsvast en met voldoende inklemming onder veldomstandigheden reproduceerbaar kan worden aangebracht, is per aanbrengtechniek een maakbaarheidsproef geëist. Hierin wordt op een stuk grond met een vergelijkbare of ongunstigere bodemopbouw het geotextiel aangebracht.

In hoofdstuk 6.3 is hier in algemene zin al uitgebreid op ingegaan. De vereiste plaats-gerelateerde uitvoeringsdata behoort tot de basis voor toekomstige beoordelingen om de reproduceerbaarheid van de inbrengtechniek als betrouwbare piping-maatregel aantoonbaar te maken. Bij een maakbaarheidsproef gaat het nadrukkelijk *niet* om de duurzaamheid of mogelijke verstopping op langere termijn.

De maakbaarheidsproef speelt een belangrijke en noodzakelijke rol in de acceptatie van de aanbrengtechniek. De evaluatie van de maakbaarheidsproef én de opgraving vormt voor de beoordeling een cruciaal document omdat er vanuit wordt gegaan dat alle toekomstige trajecten die worden uitgevoerd op dezelfde reproduceerbare wijze verlopen. Aanbevolen wordt om (toekomstige) evaluatierapporten van elke aanbrengtechniek een specifieke status te geven zodat deze gebruikt kunnen worden voor bijvoorbeeld de wettelijke beoordeling.

Na installatie wordt het geotextiel opgegraven om visueel te controleren of het geotextiel is aangebracht volgens de eisen uit

Tabel 4. Deze tabel geeft een overzicht van de eisen die geverifieerd moeten worden met een maakbaarheidsproef. In de pilots bij dijkversterking Hagestein-Opheusden is het eisenpakket tot stand gekomen in samenwerking met de aannemers. De eisen zijn een selectie van het totale pakket aan de functionele- en aspect eisen uit de vraagspecificatie (WSRL, 2014).

Bij de pilots is gebleken dat één maakbaarheidsproef niet voldoende is om aan te tonen dat het geotextiel zonder problemen kan worden aangebracht. In de evaluatierapporten staan de leerpunten die naar voren zijn gekomen uit de maakbaarheidsproeven (Van den Herik-Sliedrecht, 2015; Boskalis Nederland B.V., 2014).

Indien met beproefd materieel reeds eerder een geslaagde maakbaarheidsproef is uitgevoerd in een voldoende vergelijkbare grondslag, en in het systeem zitten voldoende waarborgen (monitoring) verwerkt waarmee aangetoond wordt (tijdens en na aanbrengen) dat op elke locatie het doek heel en op de juiste plaats is aangebracht, kan een maakbaarheidsproef achterwege blijven.

Tabel 4: Ter illustratie een selectie van de functionele- en aspect eisen uit de vraagspecificatie VZG (Waterschap Rivierenland, 2014) die gebruikt zijn bij de verificatie van de maakbaarheidsproeven van de horizontale (van den Herik-Sliedrecht, 2015) en verticale techniek (Boskalis Nederland B.V., 2014).

Eis titel	Omschrijving eis opdrachtgever
Aanbrengen geotextiel	Het geotextiel dient onbeschadigd en schoon te zijn aangebracht.
Bodemopbouw	De grond dient goed aan te sluiten op het geotextiel. Dit geldt zowel voor de zandlaag als voor de afdekkende kleilaag.
Herstellen kleilaag	ON dient na aanbrengen van het geotextiel de afdekkende kleilaag te herstellen waarbij: <ul style="list-style-type: none"> <li>- De dikte van de kleilaag overeenkomt met de oorspronkelijke kleilaagdikte.</li> <li>- De doorlatendheid van de kleilaag gelijk blijft.</li> </ul>
Diepte geotextiel	ON dient het geotextiel aan te brengen op de scheidingslaag tussen de kleilaag en de zandlaag. Het geotextiel dient tussen 1,0 meter en 1,5 meter boven de scheidingslaag in de kleilaag te zijn aangebracht en ten minste 2,0 meter onder de scheidingslaag in de zandlaag te zijn aangebracht.
Herstel bodemopbouw	De ON dient na aanbrengen van het geotextiel verstoring van de bestaande bodemopbouw en zijn omgeving te herstellen, voornamelijk ter plaats van de zand-klei overgang.
Doorlatendheid zand	Het zand dient aan weerszijden van het geotextiel minimaal dezelfde doorlatendheid te bezitten als voor het aanbrengen van het geotextiel.
Naden en sloten	Overgangen in het geotextiel dienen net zo zanddicht te zijn als het geotextiel.
Graafwerkzaamheden	Bij graafwerkzaamheden in de bestaande dijk: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dient zo min mogelijk geroerde grond te worden veroorzaakt;</li> <li>- Dienen zo min mogelijk andersoortige materialen achter te blijven.</li> </ul>
Aanbrengen van klei	De klei die wordt toegepast bij het herstellen van de slecht doorlatende laag dient dezelfde fysische eigenschappen te hebben als de verwijderde klei, het gebruik van de zwelklei ter plaatse van de inklemming VZG in het kleipakket is toegestaan.
Maatvast	Het geotextiel dient maatvast en verticaal te zijn aangebracht. Een beperkte (INVI: circa 2%) afwijking van de verticale ligging is toegestaan zolang de afzonderlijke elementen (frames of aan elkaar gelaste geotextiel en) goed aan elkaar aansluiten zodat er geen lekkage kan ontstaan.
Verdichten klei	Nieuw aangebrachte klei boven de actuele grondwaterstand dient laagsgewijs te worden verdicht

## 8 Beheerfase met monitoring op lange termijn

Voor de beheerfase zijn de volgende potentiële faalmechanismen relevant:

- (Dierlijke) graverijen en/of wortelgroei  $(B_1)$
- Beschadiging geotextiel door veroudering  $(B_2)$
- Excessieve erosie bij uittredepunt  $(B_3)$
- Pipes (al dan niet ontwikkeld bij voorgaande hoogwaters) storten in  $(B_4)$
- Mechanische blokkering en/of verstopping  $(B_5)$
- Chemische en/of bacteriologische verstoppingen  $(B_6)$

Monitoring speelt in meerdere fasen een belangrijke rol om te controleren of het doek goed is aangebracht en daarna goed functioneert. De uitvoeringsmonitoring als basis voor (toekomstige) beoordelingen is reeds uitgebreid in hoofdstuk 6.3 beschreven.

Een eenduidige monitoringsstrategie is nog in ontwikkeling. Een opzet voor de monitoring op lange termijn, met samenhangende relevante potentiële bezwijkmechanismen, komt hieronder aan bod.

### *Nulmeting van oorspronkelijk situatie als referentie*

Enerzijds zijn metingen van de oorspronkelijke grondwatersituatie nodig om uitgangspunten voor het ontwerp vast te stellen voor de grondwaterhuishouding, bijvoorbeeld met peilbuismetingen. Anderzijds zijn nulmetingen noodzakelijk om verstoringen op de lange termijn doelgericht op te sporen. Idealiter wordt deze nulmeting uitgevoerd tijdens een periode die ook een hoogwater bevat om een geschikt bereik te meten in responstijden. Voorts omdat alleen bij een serieus hoogwater sprake van een verhang van betekenis over het VZG en lokaal opbarsten kan optreden. Omdat hierdoor een spanningsveld kan ontstaan bij een korte ontwerpstermijn voor een dijkversterkingsproject wordt aanbevolen om al direct na afkeuren dergelijke metingen uit te gaan voeren. Deze metingen zijn overigens relevant voor vrijwel alle ontwerpalternatieven, niet alleen voor een VZG.

### *Lange termijn monitoring met betrekking tot verstopping geotextiel*

Monitoring na realisatie richt zich op de werking van het doek op lange termijn en de levensduur (duurzaamheid). Een toename in de tijd met betrekking tot stijghoogte-verschillen over het VZG groter dan 1kPa (0,1mWk) is kritisch en dient logisch verklaard te kunnen worden. Metingen met waterspanningsmeters blijven puntmetingen, terwijl gezien het piping-risico een ononderbroken beeld gewenst is.

De toe- en afname van de doorlatendheidsweerstand van het VZG kan ook afgeleid worden uit bijvoorbeeld temperatuurmetingen met verwarmbare glasvezelkabels. Door middel van een glasvezelkabel en een verwarmbare kabel kunnen (variaties in) het doorlaatvermogen over de gehele strekking van het geotextiel worden afgeleid. Om de data van deze glasvezelkabels te ijken zijn peilbuis- en waterspanningsmetingen nodig. De verwachting is dat met deze data de ontwikkeling van pipes kan worden opgespoord. De methode om de lange termijn monitoring te interpreteren en de benodigde meetfrequentie zijn nog niet volledig bepaald en ontwikkeld. De resultaten uit de pilot van de Willemspolder geven een eerste aanzet hiervoor. De verwachting is dat deze begin 2017 zijn uitgewerkt.

Hierbij dient ook gerealiseerd te worden dat sprake kan zijn van een situatie met een:

- toename van de weerstand door verstopping van het geotextiel;
- afname van de weerstand door pipevorming benedenstrooms en achterlangs het geotextiel.

Dit kan elkaar overigens ongeveer compenseren. Dat betekent dan echter niet dat er niets aan de hand is.

Het al dan niet optreden van een grenspotential moet uit de monitoring blijken en overeenkomen met de berekende waarde op basis van de volumegewichten ter plaatse.

### ***Lange termijn monitoring met betrekking tot vergravingen en wortelgroei***

Lange termijn monitoring met betrekking tot dierlijke vergravingen of wortelgroei (gebeurtenis  $B_1$ ) evenals verzakkingen door pipes tegen het VZG aan (gebeurtenis  $B_4$ ) kunnen voor een belangrijk deel op een reguliere wijze worden meegenomen bij de dijksinspecties en calamiteitenbestrijding. Preventief onder normale omstandigheden, zowel door de dijkbeheerders als de muskusratten-bestrijders.

Hierbij valt vooral ook te denken aan onzichtbare vergravingen door bevers en muskusratten nabij oude dijkdoorbraak-wielen. Dit wordt een steeds grotere zorg die ook preventieve maatregelen vereist.

## 8.1 Overzichtstabel relevante faalmechanismen met betrekking tot lange termijn monitoring

Tabel 5: Overzicht van faalmechanismen en de daarbij horende gebeurtenissen die relevant zijn tijdens de monitoring op lange termijn (zie ook bijlage 2). Bij elke gebeurtenis is een actie gedefinieerd die uitgevoerd kan worden tijdens de ontwerp-, uitvoerings- of beheerfase. De kwalitatieve faalkansbijdragen horen bij de gebeurtenissen op voorwaarde dat de benoemde acties zijn uitgevoerd.

Faal-mechanisme	#	Gebeurtenis	Gevolg	Actie tijdens ontwerp	Actie tijdens uitvoering	Actie tijdens beheerfase	Kwalitatieve faalkansbijdrage
Doorloopsheid	B1	(Dierlijke) graverij/knagerij en/of wortelgroei	Mechanisch falen doek	Sterkte-eisen geotextiel definiëren (CUR 174). Controle of deel geotextiel dat in het zand steekt altijd verzadigd is.	Certificaat bij oplevering	Inspectie: focus op begroeiing en graverijen.	Nader te kwantificeren als de zandlaag niet continu verzadigd is. Anders nihil
Doorloopsheid	B2	Beschadiging geotextiel door veroudering	Maaswijdte te groot, de pipe ontwikkelt zich door het geotextiel heen.	Duurzaamheidseisen definiëren (CUR 243)	Certificaat bij oplevering	Geotextiel niet blootleggen. Volgen ontwikkelingen literatuur/branche over veroudering.	Nihil
bovenloopsheid/ onderloopsheid	B3	Excessieve erosie bij uittredepunt	Uittredepunt verschuift naar buitenwater waardoor verankering verdwijnt met bovenloops- of onderloopsheid tot gevolg.	Evenwicht benedenstroomse zijde geotextiel afleiden uit grondwatermodellering. Eventueel extra marge op de afstand op uittreepunt. Ervaringen en inzichten van de pilot Willemspolder afwachten.		Periodieke zakking deklaag meten. De verwachting is dat deze gebeurtenis zich afspeelt in een kort tijdsbestek (bij één hoogwater). Bij inspectie zal dit blijken en zal een maatregel genomen moeten worden.	Lijkt het meest relevant bij dunne deklagen en teensloten. Verplaatsing van het uittredepunt zoals waargenomen bij de Willemspolder is overigens een zeldzaamheid in de bekende waarnemingen.

Faal-mechanisme	#	Gebeurtenis	Gevolg	Actie tijdens ontwerp	Actie tijdens uitvoering	Actie tijdens beheerfase	Kwalitatieve faalkansbijdrage
bovenloopsheid	B4	Pipes (al dan niet ontwikkeld bij voorgaande hoogwaters) storten in	Deklaag stort in/afkalving dijkteen.	Onzekerheden afdekken met extra hoogte in scherm. In pilots is gekozen voor praktische maat van 3 meter hoogte in totaal, afgestemd op uitvoerbaarheid.		Periodieke zakking deklaag meten. Grenswaarde en beheersmaatregelen definiëren (ordegrootte is decimeters).	Relevant. Hoewel dit een kennisleemte is, dek je het af met veiligheid in ontwerp en inspectie tijdens beheerfase (zorgplicht). Dit maakt de faalkansbijdrage niet per se nihil: kan er voldoende snel worden ingegrepen tijdens een extreem hoogwater?
Onderloopsheid	B5	Mechanische blokkering en/of verstopping	Doorlatendheid scherm neemt af, daardoor heave, daardoor mogelijk ook verlies van verankering aan onderzijde	Filterregels ontwerp geotextielen volgens, onder andere: CUR174, artikel "Doorlatendheid geotextielen in Zand" en ervaringen aannemers met het kiezen van juiste O90.	Certificaat bij oplevering	Periodiek doorlatendheid van geotextiel meten. Grenswaardes en beheersmaatregelen definiëren. Maximale interval en omvang van metingen baseren op pilots en kennisopbouw uitgevoerde projecten.	Nihil mits doorlatendheid voldoende groot blijft. Anders wordt heave bij een ondoorlatend of slechts gedeeltelijk doorlatend geotextiel van belang (zie O10).
Onderloopsheid	B6	Chemische en/of bacteriologische verstoppingen	Doorlatendheid scherm neemt af waardoor de lengte van het scherm onvoldoende wordt	Ontwerpregels CUR174	Certificaat bij oplevering	Periodiek doorlatendheid van geotextiel meten. Grenswaardes en beheersmaatregelen definiëren. Maximale interval en omvang van metingen baseren op pilots en kennisopbouw uitgevoerde projecten.	Nihil mits doorlatendheid voldoende groot blijft. Anders wordt heave bij een ondoorlatend of slechts gedeeltelijk doorlatend geotextiel van belang.

Wanneer ontwerp, uitvoering en beheer volgens bovenstaande inzichten worden uitgevoerd, levert B1 onder voorwaarden een bijdrage aan de faalkans, B3 mogelijk ook, evenals onder voorwaarden B5 en B6



## 9 Beoordelingsrichtlijn

### Veiligheidsfilosofie

Doordat innovaties buiten de ervaring liggen, is de consequentie dat vooraf nooit met zekerheid kan worden aangetoond dat een innovatieve constructie volledig werkt. Bij nieuwe aanbrengtechnieken en materialen kunnen faalmechanismen optreden die tot op heden nooit zijn voorgevallen. Tijdens de ontwikkeling van een innovatie kunnen deze nieuwe faalmechanismen niet allemaal afgedekt worden, aangezien de benodigde ervaring nog ontbreekt. De enige manier hoe hier mee om te gaan is door de restrisco's in beeld te brengen met een plan van aanpak om deze op tijd te kunnen voorkomen.

De veiligheidsfilosofie voor de beoordeling sluit aan bij de systematiek die eerder gevolgd is rond recente dijkversterkingen. Hierbij wordt vastgehouden aan de indeling van de foutenboom: de ontwerp-, uitvoerings- en beheerfase. Een groot verschil is dat met de nieuwe overstromingskansbenadering de faalkans gekwantificeerd moet worden.

In dit hoofdstuk wordt een voorstel gedaan om de restrisco's in beeld te brengen en de daarbij horende faalkans af te leiden of aan te passen. Deze methode is geïnspireerd op de schematiseringstheorie volgens bijlage B in het technisch rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken (ENW, 2012) en correspondentie met Martin van der Meer (d.d. 22-2-2017). Deze omrekenmethode is niet alleen voor het VZG, maar kan voor elke maatregel, of deze innovatief is of traditioneel, worden uitgevoerd.

### 9.1 Methode

De foutenboom in figuur 5 (hoofdstuk 3) vormt de basis voor de beoordeling. In tabel 6 zijn **alle** faalmechanismen die voor deze maatregel tegen piping zijn geïdentificeerd benoemd. Elke gebeurtenis is een scenario met een daarbij horende veiligheidsfactor, kans van voorkomen en een faalkans. Hieronder volgt een stappenplan waarin wordt uitgelegd hoe de veiligheidsfactor ( $F_d$ ) per scenario kan worden afgeleid en hoe deze omgerekend kan worden naar een faalkans.

#### Stap 1: Veiligheidsfactoren per scenario

In de basis wordt veiligheidsfactor afgeleid volgens:

$$F_d = \frac{\text{sterkte}}{\text{belasting}}$$

Door de sterkte van het ontwerp uit te drukken in welke waterstand gekeerd kan worden en de belasting in welke waterstand gekeerd moet worden volgens de norm, kan op een relatief eenvoudige manier de veiligheidsfactor afgeleid worden per gebeurtenis (scenario 'i') uit de foutenboom met:

$$F_{d,i} = \frac{h_{\text{ontwerp};i}}{h_{\text{norm}}}$$

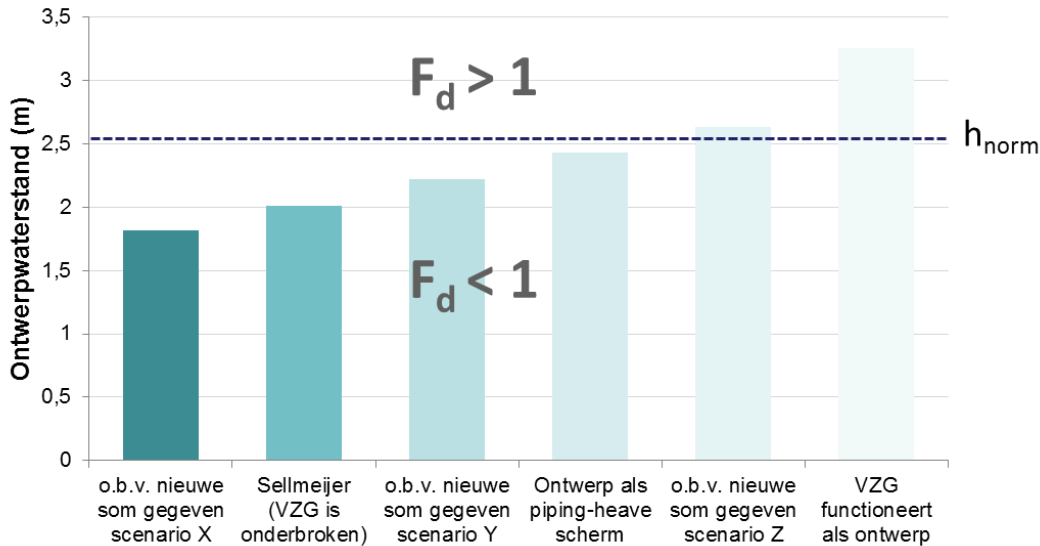
Voor een aantal gebeurtenissen kan de ontwerpwaterstand namelijk al worden afgeleid. Bijvoorbeeld:

- De waterstand als het VZG optimaal functioneert, dus het VZG werkt zoals is ontworpen
- De waterstand als het VZG functioneert als een piping-heave scherm
- De waterstand als het VZG beschadigd is, bereken je met Sellmeijer

Vervolgens kan met bovenstaande waterstanden een inschatting van de ontwerpwaterstanden gemaakt worden voor de overige scenario's (Figuur 11). Uiteraard zijn deze veiligheidsfactoren ook analytisch af te leiden. Tot op heden is dit niet gedaan voor de gebeurtenissen in de foutenboom van het VZG. Dit is enerzijds omdat dit tijdens het ontwerp niet werd gevraagd. Anderzijds omdat de ervaring nog ontbreekt. Hier zal bij toekomstige ontwerpen wél rekening mee moeten worden gehouden. In een beheerplan dient te worden beschreven hoe de beheerderservaring kan worden vertaald naar een faalkans. De veiligheidsfactor kan immers het best bepaald worden door de ontwerper op basis van het ontwerp en de uitvoering. Voor dit voorbeeld is gebruik gemaakt van een schatting op basis van de huidige inzichten. De vermelde waarden betreffen een 'onderbouwde schatting' en

zijn daarmee slechts in beperkte mate geldig. De waarden zijn vooral bedoeld om de 'omrekenmethode' te illustreren.

Door de veiligheidsfactor op deze manier af te leiden wordt meteen inzichtelijk bij welke waterstand welk risico wordt gelopen. De kans op het risico is echter nog niet bekend. Het bepalen van de kans wordt in de volgende stap uitgewerkt.



Figuur 11: Bepalen van ontwerpwaterstand om de veiligheidsfactor ( $F_d$ ) af te kunnen leiden per

### Stap 2: Bepaal de kans van optreden per scenario

Bij elke gebeurtenis in de foutenboom hoort een kans van optreden. Deze kansen zijn op voorhand niet exact te voorspellen. Daarom is in dit voorbeeld een onderscheid gemaakt in de volgende categorieën:

Kwalitatieve faalkans	$P_{scenario}$
Nihil	0,001
Klein	0,01
Relevant	0,1

De kans per scenario is afhankelijk van de locatie, maar ook de uitvoering. De waarden van de scenario's zijn het best in te schatten in overleg met een beheerder. De vermelde waarden zijn echter wel onder het voorbehoud van een correcte installatie; bijvoorbeeld ondieper installeren dan ontworpen is, kan alsnog bepaalde restrisico's induceren. Het is te verwachten dat de kansen worden bijgesteld op in de beheerfase op basis van monitoring en ervaring. In het beheerplan dienen concrete instructies te staan hoe deze kansen op scenario's ingeschat kunnen worden, een gerichte uitbreiding van de Digispectie-tool zou hierbij kunnen helpen.

### Stap 3: Faalkansbenaderingsformule per scenario

De veiligheidsfactoren kunnen omgerekend worden naar veiligheidsscenario's door middel van de functie van de betrouwbaarheidsindex ( $\beta$ ). Deze  $\beta$ -functie (faalkansbenaderingsformule) is afhankelijk van welk (probabilistisch) model is gekozen voor de sterkte en belasting en kan op verschillende manieren worden afgeleid. De volledige uitleg hiervan wordt niet behandeld in deze ontwerp- en beoordelingsrichtlijn, maar is onder anderen te lezen in bijlage B van het Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken (ENW, 2012) of (Vrouwenvelder en Vrijling, 1987). Per gebeurtenis is een aparte  $\beta$ -relatie af te leiden.

Er bestaan nog geen  $\beta$ -relaties voor de gebeurtenissen in de foutenboom van het VZG. In het kader van de Groene Versie van deze richtlijn wordt daarom aanbevolen om dit bij de komende ontwerpen te ontwikkelen en de kennis hierover te delen, zodat dit bij volgende ontwerpen kan worden benut voor de ontwikkeling van het beheerplan en zodat dit ook in de 'eindversie' van deze richtlijn kan worden opgenomen.

**Stap 4: Faalkans berekenen per scenario**

Als eenmaal de betrouwbaarheidsindexen per scenario zijn afgeleid, kan de faalkans berekend worden met:

$$P_{f;i} = \Phi^{-1}(\beta_i)$$

**Stap 5: Faalkans berekenen van de constructie**

De totale faalkans van de constructie wordt berekend door de som van de producten van de faalkans maal de scenariokans:

$$\sum P_{f;i} P_{scenario}$$

Tabel 6: Voorbeeld van omreken tabel. De Veiligheidsfactor  $F_d$  wordt door middel van een faalkansbenaderingsformule ( $\beta$ -relatie) omgerekend. De  $\beta$ -relaties zijn echter nog in ontwikkeling en tijdens het schrijven van dit document waardoor de faalkans nog niet berekend is in dit voorbeeld om de methode te illustreren.

#	Gebeurtenis	STAP 1			Stap 2	Stap 3	Stap 4	Stap 5
		$h_{ontwerp}$	$h_{norm}$	$F_d$	$P_{scen}$	$(-\beta)$	$P_{fji}$	$P_{fji} * P_{scen}$
		[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
	Constructie functioneert optimaal volgens ontwerp	3,26	2,51	1,30	0,653			
O01	Lengte van het geotextiel (in de lengterichting van de dijk) is te kort: bijv kwart van wat nodig is, leidend tot helft (?) van effect VZG	2,64	2,51	1,05	0,001			
O02	Aansluiting op bestaande VZG, andere constructies en bermen is onvoldoende	2,64	2,51	1,05	0,001			
O03	Rekeigenschappen geotextiel niet geschikt	2,01	2,51	0,80	0,010			
O04	Korrelgrootte te groot ingeschat	2,43	2,51	0,97	0,010			
O05	Uittredepunt bevindt zich bovenstrooms van het geotextiel	1,82	2,51	0,73	0,001			
O06	Kleiaanvulling werkt als drainagepad	1,82	2,51	0,73	0,010			
O07	Afstand geotextiel tot uittredepunt te klein	3,24	2,51	1,29	0,001			
O08	Lokaal voorkomen van losgepakte zandlagen	2,22	2,51	0,88	0,010			
O09	Geotextiel is niet tot op voldoende diepte ontworpen	2,22	2,51	0,88	0,010			
O10	Sleufvulling past niet goed bij in situ materiaal	2,43	2,51	0,97	0,010			
O11	Te lage doorlatendheid geotextiel	2,43	2,51	0,97	0,001			
U01	Falen van de voeg(-aansluiting)	3,26	2,51	1,30	0,001			
U02	Vervorming of scheurvorming in geotextiel door uitvoering	2,01	2,51	0,80	0,010			
U03	Aanvulklei in de sleuf bevat holle ruimtes	1,82	2,51	0,73	0,010			
U04	Zand in sleuf is niet goed verdicht	2,01	2,51	0,80	0,010			
U05	Machine kan niet op diepte komen	2,22	2,51	0,88	0,010			
U06	Versmering van het geotextiel met klei	2,43	2,51	0,97	0,010			
B01	(Dierlijke) graverij, knagerij en/of wortelgroei	2,01	2,51	0,80	0,010			
B02	Beschadiging geotextiel door veroudering	2,01	2,51	0,80	0,001			
B03	Excessieve erosie bij uittredepunt	3,24	2,51	1,29	0,100			
B04	Pipes (al dan niet ontwikkeld bij voorgaande hoogwaters) storten in	3,26	2,51	1,30	0,100			
B05	Mechanische blokkering en/of verstopping	2,43	2,51	0,97	0,010			
B06	Chemische en/of bacteriologische verstoppingen	2,43	2,51	0,97	0,010			

## 9.2 Beheerplan opstellen

Het bovengenoemde stappenplan is een methode dat nog in ontwikkeling is. Het is aan te bevelen om een beheerplan op te stellen met de beschrijving van de beheercyclus. Het beheerplan vormt daarmee een instrument voor de voortdurende controle en terugkoppeling naar de gestelde functies. Hierdoor wordt het beheerproces transparant en (bij)stuurbaar.

In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** staan alle beoordelingscriteria per gebeurtenis in de ontwerpfase (groene aders). De verwachting is dat in de loop van de tijd het aantal gebeurtenissen wordt uitgebreid en de faalkans kan worden gekwantificeerd op basis van het stappenplan. De beoordeling kan worden ingedeeld in de volgende hoofdlijnen:

### ***Beoordeling van ontwerputgangspunten***

Tijdens de ontwerpfase worden de randvoorwaarden en programma van eisen vastgesteld. De periodieke beoordeling voor het ontwerpedeelte kent de volgende deelvragen:

- Zijn de (hydraulische en andere) belastingen binnen de beoordelingshorizon kleiner of gelijk aan de gehanteerde ontwerpwaarden?
- Is het VZG ontworpen volgens de vigerende ontwerprichtlijn of een eerdere versie die op alle relevante punten gelijkwaardig of strenger was?
- Zijn er nieuwe inzichten (al dan niet geland in een ontwerprichtlijn) waardoor VZG anders behandeld zou moeten worden dan ten tijde van het ontwerp?

### ***Beoordeling uitvoering***

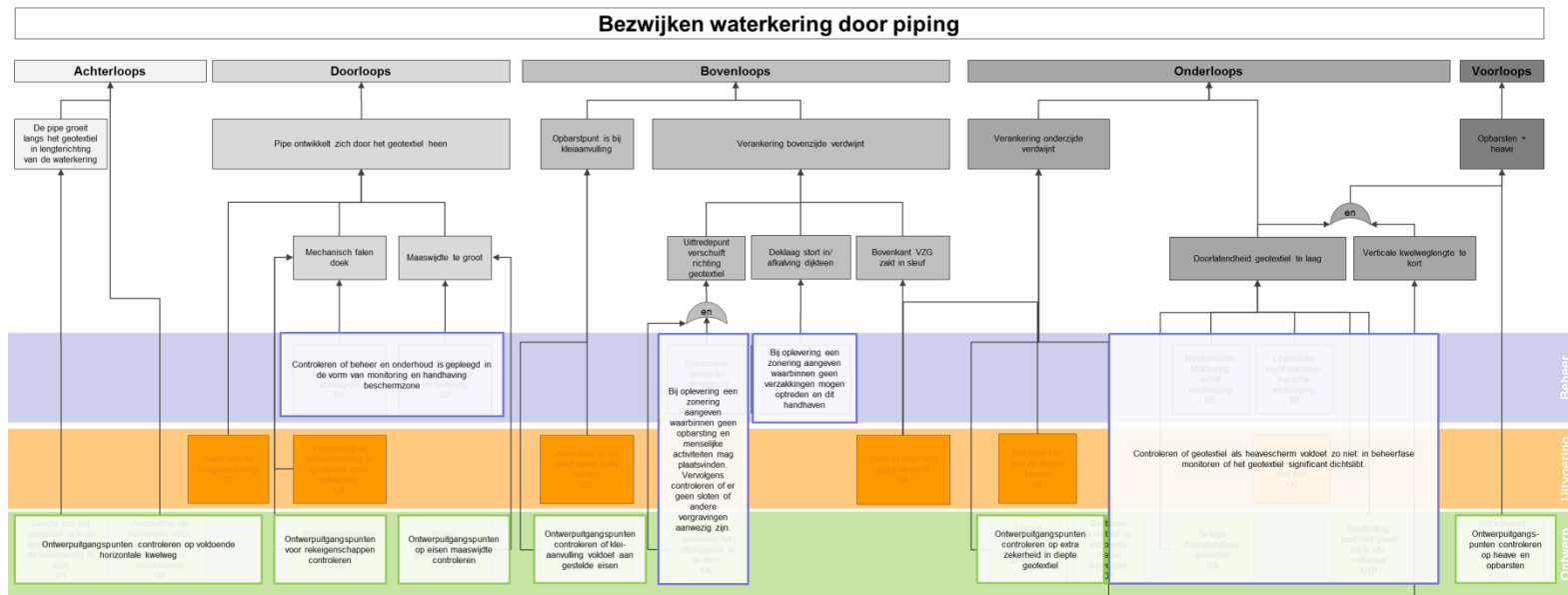
Voor de uitvoering moet worden nagegaan of:

- Het VZG correct is aangebracht, conform de vigerende ontwerprichtlijn of een andere versie die op alle relevante punten gelijkwaardig of strenger is. Indien de uitvoering niet goed is gegaan dan dienen er tijdens de uitvoering extra beheermaatregelen gedefinieerd te worden.

### ***Beoordeling beheerfase***

De basis van de beoordeling van het beheer bestaat uit:

- Controle op verzakkingen, vergravingen en dichtslibben. Afhankelijk van hoe de uitvoering is gegaan, kunnen hier nog aanvullende monitoringsaspecten bijkomen.



Figuur 12: Foutenboom met beoordelingscriteria (zie ook bijlage 1). De beoordeling van het ontwerp is op basis van (technische uitgangspunten). De beoordeling van de uitvoering is op basis van een goedgekeurd uitvoeringsrapport. De beoordeling in de beheerfase is op basis van monitoring

## 10 Aanbevelingen en vervolgonwikkelingen

§	Aanbeveling	Omschrijving
4.1	De maaswijdte bepalen niet alleen op basis van de CUR 174 maar ook op basis van ervaringen met Geotubes. Hier bestaat nog geen richtlijn voor.	Voor toekomstige projecten is het relevant de voorkomende korrelverdelingen per VZG-deelstrekking met de toegepaste maaswijdte goed te documenteren. Dit ten behoeve van verklaring van mogelijke locatie-specifieke verstopping én het ontwikkelen/valideren van ruimere maaswijdte-vuistregels voor deze specifieke geotextiel-toepassing.
4.4	Uitvoeringsmonitoring verder ontwikkelen om aan te kunnen tonen dat het VZG volgens het ontwerp is aangebracht.	Door middel van tijd- en plaatsgerelateerde monitoring kunnen afwijkingen in de constructie beter in kaart worden gebracht. Dit wordt verder ontwikkeld bij de verkenning Twente-kanaal)
5.1	Schematiseringshandleiding opstellen voor het VZG in aanvulling op de algemene schematiseringshandleiding piping die per 2 januari 2017 is opgeleverd.	Door dit als bijlage op te nemen in de bestaande schematiseringshandleidingen wordt geborgd dat deze richtlijn een update krijgt.
5.1	Afgebakende beheersmaatregelen definiëren.	De strategie rondom monitoring van bijvoorbeeld verstopping is nog niet uitontwikkeld. Gedurende de beheerfase wordt ervaring opgedaan met deze monitoring. Deze ervaring moet nog vertaald worden naar afgebakende beheersmaatregelen.
5.2	Grenswaarden definiëren.	In hoofdstuk 9 is een voorstel gedaan van de grenswaarden ( $h_{ontwerp}$ ) per gebeurtenis. Deze grenswaarden dienen gevalideerd te worden gedurende de beheerfase.
7.3	Evaluatierapporten van de uitvoering een specifieke status geven.	Door een status toe te kennen aan de evaluatierapporten kunnen deze als erkende referentie worden gebruikt in bijvoorbeeld de wettelijke beoordeling.
8	Standaard ontwikkelen voor lange termijn monitoring.	Dit geldt niet alleen voor een VZG, maar voor alle ontwerpalternatieven.
9.1	$\beta$ -relaties afleiden per scenario.	Een voorzet hiervoor is gegeven in hoofdstuk 9, maar de methode moet nog verder ontwikkeld worden.
	Verwijderbaarheid	Wat zijn de mogelijkheden wat betreft het verwijderen van het VZG in de toekomst?
	Uitbreidbaarheid in combinatie met andere technieken	Wat zijn de mogelijkheden wat betreft uitbreidbaarheid in combinatie met andere technieken en wat is de benodigde inspectie hiervoor?
	Uitbreidbaarheid van het VZG zelf	Wat zijn de mogelijkheden wat betreft de uitbreidbaarheid van het VZG zelf? Hoeveel overlap is bijvoorbeeld nodig bij een geconstateerd defect in het VZG?

## Referentielijst

- Van Beek, V.M., Knoeff, J.G., Sellmeijer J.B. (2011).** Observations on the process of backward erosion piping in small-, medium-, and full-scale experiments. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* **15(8)**, 1115-1137.
- Bezuijen, A., Van Beek, V.M., Schenkeveld, F. (2012).** Doorlatendheid geotextielen in zand, *Geotechniek* **16(2)**, 58-59.
- Boskalis Nederland B.V. (2014).** Verticaal Zanddicht Geotextiel, Evaluatierapport maakbaarheidsproef. Rapport nummer:524-14018-M01-JDJJ-rev1/12-12-2014
- Bruijn, de H., Knoeff, H. (2009).** SBW Piping: Hervalidatie Piping, HP5.4b Full-scale proeven (factual report proef 3), Deltares rapportage 1200690-005-GEO-0005, Delft, 9 december 2009
- CUR 174 (2009).** Geokunststoffen in de waterbouw (tweede, herziene uitgave), Stichting CUR, Gouda.
- CUR 217 (2006).** Ontwerpen met geotextiel en zandelementen, Stichting CUR, Gouda.
- CUR 243 (2012).** Durability of Geosynthetics, Stichting CUR, Gouda.
- Expertisenetwerk Waterveiligheid (2012).** Technisch rapport grondmechanisch schematiseren bij Dijken.
- Förster, U. (2011).** Corporate Innovatieprogramma – Cluster Waterveiligheid: Innovatief water keren. (technologische en proces) Innovaties ter voorkoming problemen met de waterhuishouding in, onder en naast een dijk. Deltares –rapport 1204317-002-VEB-0012.
- Förster, U., van den Ham, G., Calle, E., Kruse, G. (2012).** Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen. Deltares rapport in opdracht van Rijkswaterstaat-WVL. Kenmerk:1202123-003.
- Förster, U., Harkes, M., van Beek, V., Post, W., van de Kolk, B., Termaat, R. (2013).** Onderzoek naar de werking van geotextielen als pipingremmende maatregel (Hoofdrapport). Deltares-rapport in opdracht van Waterschap Rivierenland, kenmerk: 1206806-000-GEO-0014.
- KIWA (2000).** Kennisdocument Putten(velden), BTO 2000-110(C)
- Koelewijn, A., de Bruijn, H., van Beek, V. (2009).** SBW Piping: Hervalidatie Piping, HP5.4b Full-scale proeven (factual report proef 1), Deltares rapportage 1200690-000-GEO-0023, Delft, november 2009.
- Koelewijn, A. (2017).** LiveDijk Willemspolder, Praktijkproef Verticaal Zanddicht Geotextiel, Deltares rapportage 1208555-000-GEO-0006. *[te verschijnen]*
- Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), 1999.** Technisch rapport Zandmeevoerende wellen.
- Van den Herik-Sliedrecht (2015).** Evaluatierapport Maakbaarheidsproef Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG). WBS code: 10594-WPA-4.1.3.
- Van den Herik-Sliedrecht (2016).** Asbuilt Realiseren Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG) binnen dijkverbetering Hagestein-Opheusden (HOP). Tekeningnummer: 10594-VZG-ZB-R04. Besteknummer: 201404050.
- Vrouwenvelder, A.C.W.M., Vrijling, J.K. (1987).** Probabilistisch ontwerpen (dictaat b3). Faculteit der Civiele Techniek, TU Delft. 5<sup>e</sup> herdruk.
- Waterschap Rivierenland (2014).** Vraagspecificatie Verticaal Zanddicht Geotextiel.
- WBI 2017 (2017).** Schematiseringshandleiding piping, Rijkswaterstaat WVL, versie 2.2 (definitief), 2 januari 2017.
- Wiertsema & Partners (2011),** Grondonderzoek Rijnbanddijk 13 Ingen, VN-50260.4.



**Bijlage 1: Foutenboom VZG**

**Bijlage 2: VZG Foutenboom tabel**

**Bijlage 3: Verslag en detailbevindingen ENW-Techniek Verticaal Zanddicht Geotextiel**

**Bijlage 4: ENW advies**