

## **Publicatie Filtertechnieken**

## COLOFON

<b>Titel</b>	Publicatie Filtrertechnieken
<b>Opdrachtgever</b>	HWBP-De Innovatieversneller   Piping
<b>Auteurs</b>	Laura Halbmeijer (W+B) en Maurits van Dijk (WDOD)
<b>Foto omslag</b>	VOLGT
<b>Kenmerk</b>	Filtrertechnieken DIV Piping versie 1.0
<b>Datum</b>	8-6-2023
<b>Status</b>	Concept tbv advies ENW
<b>Projectteam</b>	Han Knoeff (Deltares) Wim Kanning (Deltares) Esther Rosenbrand (Deltares) Albert Wiggers (RHDHV) Maurits van Dijk (Waterschap Drents Overijsselse Delta) Laura Halbmeijer (Witteveen+Bos) Laura van der Doef (Antea Group) Derk-Jan Sluiter (DIJK53) Renske Nollen (DIJK53)



DEZE PAGINA IS NIET VOOR PUBLICATIE

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Laura Halbmeijer Maurits van Dijk	Laura van der Doef Wim Kanning Derk-Jan Sluiter		

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>3</b>
1.1	Algemeen	3
1.2	Aanleiding	3
1.3	Doel	3
1.4	Doelgroep	3
1.5	Relatie met andere leidraden en documentatie	4
1.6	Toepassingsgebied en afbakening	4
1.7	Leeswijzer	5
<b>2</b>	<b>Samenhang met veiligheidsraamwerk</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Basisprincipes van een filtertechniek</b>	<b>8</b>
3.1	Inleiding	8
3.2	Werkend principe filtertechniek	8
3.2.1	Werking van het ingraven van grover materiaal	8
3.2.2	Werking van een verticaal zanddicht geotextiel	9
3.2.3	Werking van een filterscherm	9
3.3	Faalpaden bij een intacte filtertechnieken	10
3.4	Faalpaden bij een defecte filtertechniek of aansluiting (bedreigingen)	11
3.5	Gebeurtenissenboom en primaire faalpaden	11
<b>4</b>	<b>Fysische processen bij primaire faalpaden</b>	<b>3</b>
4.1	Inleiding	3
4.2	Fenomenologische beschrijving	3
4.2.1	Knoop 6 en 7: VZG (onderloopsheid)	4
4.2.2	Knoop 6 en 7: GZB (doorloopsheid)	4
4.2.3	Knoop 6 en 7: filterscherm (doorloopsheid)	4
<b>5</b>	<b>Ontwerpcriteria</b>	<b>5</b>
5.1	Inleiding	5
5.2	Positie filtertechniek in het dwarsprofiel	5
5.3	Dimensionering van de filtertechniek	5
5.3.1	Breedte en vorm loodrecht op de dijk	5
5.3.2	Lengte parallel aan de dijk	6
5.3.3	Puntdiepte	6
5.3.4	Afwerking bovenkant	6
5.4	Materiaal en filterwerking	6
5.5	Uitvoeringstechnieken	7



<b>6</b>	<b>Omgaan met afwijkingen ontwerp, uitvoering en beheer.....</b>	<b>8</b>
6.1	<i>Inleiding .....</i>	8
6.2	<i>Inventariseren van potentiële bedreigingen.....</i>	8
6.3	<i>Voorbeeld: verstopping van een filtertechniek .....</i>	10
6.3.1	<i>Fysische verstopping .....</i>	10
6.3.2	<i>Chemische verstopping .....</i>	10
6.3.3	<i>Bacteriologische verstopping .....</i>	10
<b>7</b>	<b>Consequenties voor uitvoering en beheer.....</b>	<b>11</b>
7.1	<i>Inleiding .....</i>	11
7.2	<i>Goed gedrag van een filtertechniek tijdens hoogwater .....</i>	11
7.3	<i>Risico's voor het functioneren van een filtertechniek .....</i>	12
7.4	<i>Monitoring.....</i>	12
<b>8</b>	<b>Bibliografie.....</b>	<b>13</b>

## 1 Inleiding

### 1.1 Algemeen

Dit document gaat in op de generieke technische aspecten die van belang zijn bij het ontwerp, uitvoering en beheer van filtertechnieken als pipingmaatregel. De publicatie biedt hulpmiddelen voor het generieke ontwerp van verschillende filtertechnieken en geeft aan hoe daarbij omgegaan kan worden met onzekerheden.

Een filtertechniek is een pipingmaatregel die water doorlaat, maar zandtransport tegenhoudt. De filtertechniek voorkomt daarmee dat het terugschrijdende erosiekanaal kortsluiting maakt. Het toepassen van een filtertechniek als pipingmaatregel voorkomt dus niet zózeer het ontstaan van het erosiekanaal, maar het voorkomt dat het erosiekanaal doorschiet onder de dijk en daarmee kortsluiting veroorzaakt. .

Er zijn verschillende soorten filtertechnieken beschikbaar:

- Het toepassen van grover grondmateriaal direct aan maaiveld (grindkoffer; niet behandeld in deze publicatie)
- Het toepassen van grover grondmateriaal in de baan van het erosiekanaal (OBR GZB [1]);
- Het toepassen van een verticaal zanddicht geotextiel in de baan van het erosiekanaal (OBOR VZG [2]);
- Het toepassen van een filterscherm in de baan van het erosiekanaal (OBOR Prolock [3]).

### 1.2 Aanleiding

De aanleiding voor de Publicatie Filtertechnieken is de behoefte aan een breed gedragen ontwerpaanpak voor verschillende filtertechnieken die aansluit bij de recente inzichten op het gebied van piping. Zo zijn er voor piping in het algemeen veel nieuwe inzichten ontstaan op het gebied van fysische processen, schematiseren, rekenmodellen en over het omgaan met onzekerheden.

Daarnaast zijn er de laatste jaren verschillende innovatieve filtertechnieken ontwikkeld, waardoor bij beheerders en ontwerpers de wens voor uniformiteit in de aanpak voor het beoordeling, ontwerp en beheer is ontstaan. Het huidige ontwerpinstrumentarium en de onderliggende technische leidraden bevatten op dit moment nog onvoldoende informatie over hoe om te gaan met de technische innovaties op het gebied van filtertechnieken.

### 1.3 Doel

Het hoofddoel van dit document is om hulp te bieden bij het beoordelen, ontwerp en beheer van filtertechnieken in het algemeen. Voor hulp bij het ontwerpen van een grindkoffer wordt verwezen naar de OBR Drainagetechnieken [4]. De aanpak is dusdanig dat de publicatie kan worden ingezet als hulpmiddel voor het ontwerp van zowel conventionele als innovatieve filtertechnieken. Dit document biedt daarmee het algemene ontwerpraamwerk. De Ontwerp, Beoordelings- en Onderhoudsrichtlijnen (OBOR's)<sup>1</sup> geven een nadere uitwerking per specifieke techniek (OBR GZB [1], OBOR VZG [2], OBOR Prolock [3], etc.).

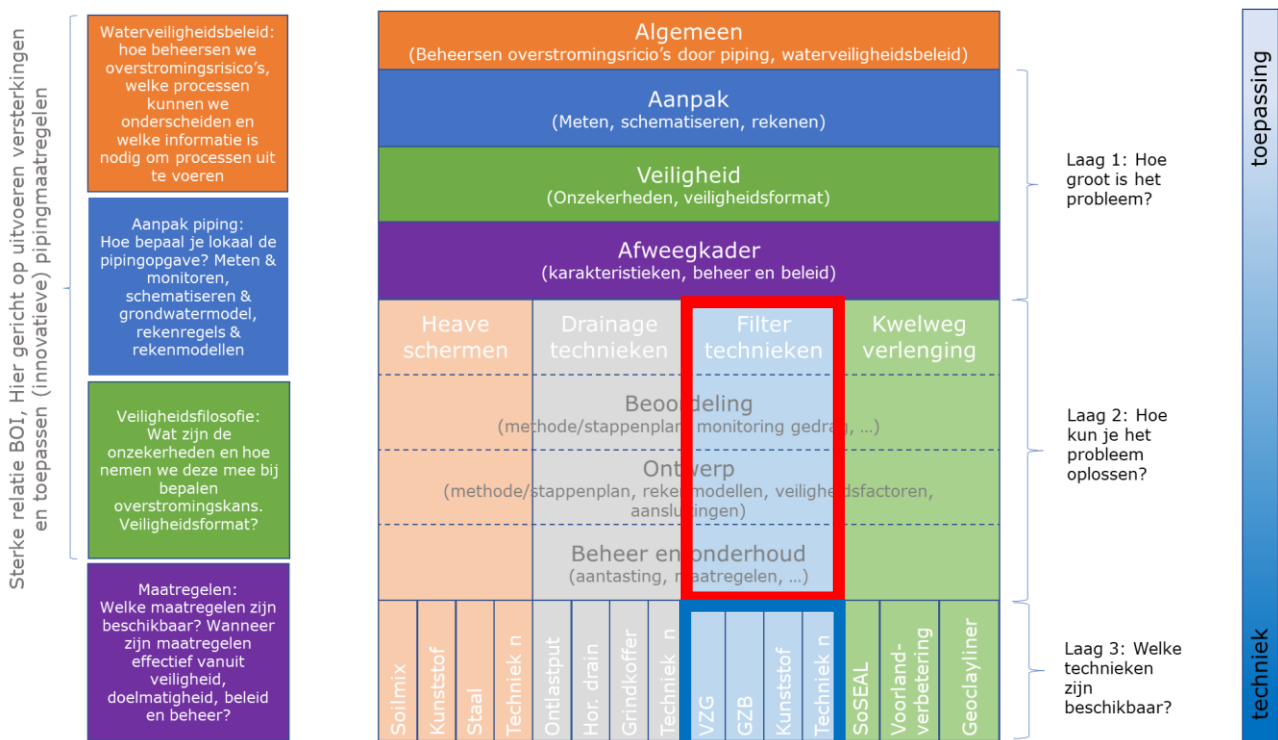
### 1.4 Doelgroep

Deze publicatie is bedoeld voor dijkwerkers die bezig zijn of gaan met het ontwikkelen, ontwerpen, uitvoeren beoordelen of beheren van filtertechnieken als pipingmaatregel. Ook kan deze publicatie nuttig zijn voor dijkwerkers die bezig zijn in een verkenning of planuitwerkingsfase en kennis willen nemen van de werking, de eigenschappen en status van kennisontwikkeling op het gebied van het ontwerpen van filtertechnieken. Van deze dijkwerkers wordt verondersteld dat ze bekend zijn met de voorschriften, de (deel)faalmechanismen en met de modellen die voor deze (deel)faalmechanismen van toepassing zijn. Tevens wordt ervan uitgegaan dat informatie opgenomen in de documenten van het BOI2023 bekend is.

<sup>1</sup> Hieronder worden ook de Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijnen (OBR's) verstaan

### 1.5 Relatie met andere leidraden en documentatie

De Innovatieversneller (DIV) stimuleert en versnelt de toepassing en doorwerking van slimme en innovatieve oplossingen in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Om de relevante ontwikkelingen rondom het thema piping te ontsluiten worden er in de komende jaren 8 publicaties geschreven onder de regie van De Innovatieversneller Piping (DIV Piping) en in samenwerking met dijkversterkingsprojecten (waterschappen en marktpartijen), kennisinstututen en ontwikkelaars van innovatieve technieken. In Figuur 1.1 is de structuur van deze publicaties weergegeven. De verschillende publicaties geven handvatten voor het ontwerp, uitvoeren en beheren van innovatieve pipingmaatregelen. De Publicatie Algemeen [5] bevat een beschrijving van alle in Figuur 1.1 genoemde publicaties en hun onderlinge samenhang.



Figuur 1.1 Structuur publicaties DIV Piping

De voorliggende Publicatie Filtrertechnieken is rood omkaderd in Figuur 1.1. De publicatie sluit nauw aan op de bovenliggende Publicatie Veiligheidsraamwerk [6], weergegeven in groen, waarmee de aansluiting op het BOI2023 geborgd is. De onderliggende publicaties, blauw omkaderd, betreffen de OBOR's per specifieke techniek (OBR GZB [1], OBOR VZG [2], OBOR Prolock [3]). Op het moment van schrijven van deze publicatie is de OBR GZB gereed en worden OBOR VZG en OBOR Prolock opgesteld. De verschillende publicaties zijn levende documenten, die bij voldoende rijpheid voor toepassing worden gepubliceerd via DIV. Door de toepassing van de documenten zullen de publicaties meegroeien met de innovatieve technieken.

### 1.6 Toepassingsgebied en afbakening

Het generieke toepassingsgebied voor filtrertechnieken is pipinggevoelige groene dijken, met name in het (boven)rivierengebied. Iedere onderliggende techniek heeft echter een specifiekere toepassingsgebied. In het algemeen geldt het volgende:

- Een grindkoffer is toepasbaar bij zeer dunne of afwezige deklagen;
- De GZB en VZG zijn momenteel toepasbaar bij dunnere deklagen in het achterland tot ca. 3-4 meter diepte vanwege het benodigde materieel;



- Het filterscherm is optimaal voor gebieden met dunne deklagen tot 3 à 4 meter (schermlengte tot 6 m zonder grote risico's), maar kan ook gebruikt worden bij dikkere deklagen tot ca. 6,5 meter (schermlengtes van 6-8 m kennen grote risico's met op diepte krijgen).

## 1.7 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt ingegaan op de relatie tussen deze publicatie en het Veiligheidsraamwerk [6]. Daarna worden in hoofdstuk 3 de basisprincipes van een filtertechniek toegelicht, waarna in hoofdstuk 4 de fysische processen in het primaire faalpad worden beschreven. Hierna volgt een overzicht van de ontwerpcriteria voor filtertechnieken in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 gaat in op het omgaan met afwijkingen tijdens het ontwerp, uitvoering en beheer. Als laatste wordt in hoofdstuk 7 beschreven wat de consequenties zijn voor beheer van de innovatieve techniek.



## 2 Samenhang met veiligheidsraamwerk

Deze publicatie sluit aan op het bovenliggende Veiligheidsraamwerk innovatieve pipingmaatregelen [6], waarin generiek en procesmatig is beschreven hoe kan worden aangetoond dat een pipingmaatregel voldoet aan de maximaal toelaatbare overstromingskansen voor het mechanisme piping. In deze publicatie wordt niet ingegaan op het afleiden van deze maximaal toelaatbare overstromingskansen. Hiervoor wordt verwezen naar de vigerende beoordelings- en ontwerpinstrumentaria. Voor nadere uitleg over de begrippen faalpaden, gebeurtenissenbomen en foutenbomen wordt verwezen naar het Veiligheidsraamwerk [6].

Het Veiligheidsraamwerk bestaat uit zes stappen:

1. Het verhaal van de innovatie
2. Systeemeisen
3. Systeem beschrijving
4. FMECA aanpak: hierin wordt op basis van de systeembeschrijving gestructureerd bepaald hoe de kering met een filtertechniek kan falen en welke maatregelen hiervoor te treffen zijn. Zo blijft er een beperkt aantal gebeurtenissen over die niet direct uitgesloten kunnen worden op basis van een maatregel, die in faalpaden analyses verder worden uitgewerkt.
5. Faalkansanalyse: hierin wordt kwantitatief uitgewerkt hoe de veiligheid van de belangrijkste faalpaden worden onderbouwd
6. Verificatie: hierin worden in samenhang alle maatregelen beschouwd die nodig zijn voor het onderbouwen van de veiligheid

De verschillende stappen zijn hieronder kort toegelicht.

### **Stap 1. Verhaal van de innovatie**

Deze stap heeft als doel om de context te schetsen en omvat een (korte) introductie van het versterkingsproject en de filtertechniek. Hierin wordt in algemene bewoordingen uiteengezet wat de uitdagingen zijn binnen het project en waarom een filtertechniek hier mogelijk toepasbaar is. Vervolgens wordt de maatregel zelf ook in algemene bewoordingen toegelicht. Daarnaast is het belangrijk een overzicht te geven van welke ervaringen er zijn met deze maatregel: is het concept compleet nieuw of is het al vaker toegepast? Een belangrijk aspect hierbij is dat de afbakening helder wordt weergegeven: wat is het toepassingsgebied, grenzen aan ondergrondtypes, etc.

In deze publicatie is deze stap niet expliciet uitgewerkt, omdat het hier niet over een specifiek project gaat. Wel bevat de publicatie een aantal bouwstenen die belangrijk zijn voor het verhaal van de innovatie, zie hiervoor hoofdstuk 3 en 4. Wanneer de innovatie wordt toegepast in een specifiek project (zoals in de OBOR's), is deze stap wel uitgewerkt.

### **Stap 2. Systeemeisen**

Een waterkering moet voldoen aan de voorgeschreven veiligheidsnorm, uitgedrukt in jaarlijkse overstromingskansen. Wanneer de kering aan deze eisen voldoet, is de jaarlijkse kans op een overstroming dusdanig klein, dat die kans acceptabel wordt geacht.

De systeemeisen zijn afhankelijk van het project waarin het wordt toegepast. Om uiteindelijk te kunnen beoordelen of met het project aan de veiligheidseisen wordt voldaan, moet de systeemeis worden geformuleerd. Een voorbeeld van een aandachtspunt bij het formuleren van de systeemeis is het lengte-effect. De voorgestelde methodes uit het WBI/OI kunnen namelijk niet altijd direct worden toegepast bij een innovatieve pipingmaatregel. In het kader hieronder is meer informatie opgenomen over de aandachtspunten bij het lengte-effect. Aangezien in deze publicatie geen specifiek project wordt behandeld, worden verdere systeemeisen niet uitgewerkt.

---

## Aandachtspunten bij het afleiden van het lengte-effect

De veiligheidsnormen voor overstromingen zijn vastgesteld voor dijktrajecten, die lengtes kunnen hebben van wel enkele tientallen kilometers, terwijl de versterkingsmaatregelen vaak op veel kleinere schaal worden toegepast. Idealiter worden de kansen van alle vakken/doorsnedes (met of zonder maatregel) gecombineerd tot een trajectkans. De gestelde norm op trajectniveau kan eventueel ook vertaald worden naar een vak- of doorsnede-eis, afhankelijk van op welk niveau de pipingmaatregel zal worden toegepast. Bij het formuleren van de systeemeisen speelt het lengte-effect een rol. De standaardwaarden voor piping die momenteel gangbaar zijn, kunnen anders zijn voor filtertechnieken. Hierbij geldt dat de lengte-effecten moeten passen bij het ruimtelijk schaalniveau van de faalkansanalyse. Hoe kleiner het ruimtelijk schaalniveau van het mechanisme (b), hoe groter de lengte-effectfactor. En hoe groter het ruimtelijk schaalniveau (of bij een grote ruimtelijke correlatie), hoe kleiner de lengte-effect factor.

---

### **Stap 3. Systeembeschrijving**

De systeembeschrijving beschrijft uit welke fysische componenten het systeem bestaat en hoe deze componenten functioneren. Deze beschrijving is in dit rapport voornamelijk terug te vinden in Hoofdstuk 3.1.

### **Stap 4. Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA)**

In de systeembeschrijving wordt beschreven hoe het systeem en zijn componenten zouden moeten functioneren. Op basis van deze analyse kan ook worden afgeleid wat er gebeurt als een of meer van deze componenten niet naar behoren functioneren (gebeurtenis) en wat dit voor gevolgen heeft. Daarnaast wordt een inschatting gegeven van de kans hierop. Als de combinatie van kans en gevolgen klein genoeg is, al dan niet na nemen van extra maatregelen, kan de gebeurtenis worden uitgesloten. Dit scheelt werk in de volgende stap. De FMECA is uitgewerkt in Hoofdstuk 7.2.

### **Stap 5. Faalkansanalyse**

Als er niet op basis van eenvoudige analyses of beheersmaatregelen met de FMECA kan worden onderbouwd dat een gebeurtenis een voldoende kleine kans heeft of een relatief kleine bijdrage ten opzicht van andere gebeurtenissen, moet deze dit met (probabilistische) faalkansanalyses verder worden geanalyseerd.

### **Stap 6. Verificatie**

Tenslotte wordt samengevat of en in welke mate het systeem aan de eisen voldoet. Er wordt hierbij een overzicht van bedreigingen en bijbehorende maatregelen getoond. De aandacht moet vooral liggen op het identificeren van de mogelijke gebeurtenissen. Deze moeten zo goed mogelijk zijn afgedekt op basis van uitsluiting en anders onderbouwd zijn met een kans.

## 3 Basisprincipes van een filtertechniek

### 3.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op het werkende principe van een filtertechniek en de (primaire) faalpaden voor een intacte en gefaalde filtertechniek. Onder het primaire faalpad wordt verstaan: de combinatie van gebeurtenissen met de grootste bijdrage aan de faalkans van de filtertechniek. Met een FMECA (zie hfs 2) worden de gebeurtenissen en de relaties daartussen in beeld gebracht.

### 3.2 Werkend principe filtertechniek

Het toepassen van een filtertechniek als pipingmaatregel heeft als doel om te voorkomen dat een terugschrijdend erosiekanaal kortsluiting maakt tussen buiten- en binnendijks. Het optreden van opbarsten, heave en fluidatie onder de deklaag vindt nog steeds plaats, maar de filtertechniek voorkomt dat het erosiekanaal doorgroeit onder de dijk tot aan de rivierzijde. Ter plaatse van de pipingmaatregel is een filter aanwezig dat zandtransport voorkomt, maar wel de kwelstroom laat passeren richting het achterland. Hierdoor ontstaat een sterke kwelstroom richting het uittredepunt, maar wordt de aanvoer van zand beperkt. Het toepassen van een filtertechniek voorkomt dus niet dat andere initiële processen kunnen plaatsvinden, zoals: het optreden van zandmeevoerende wellen; het begin van het erosiekanaal tussen de wel en de filter; of lokale fluidatie direct onder de deklaag. De filtertechniek functioneert als pipingmaatregel zolang deze initiële processen zich niet doorzetten tot erosiekanaalen die de filtertechniek passeren.

In hoofdstuk 1 staat beschreven dat er verschillende manieren mogelijk zijn om een filtertechniek toe te passen. Deze publicatie gaat alleen in op de nieuwe innovatieve technieken die de laatste jaren zijn ontwikkeld:

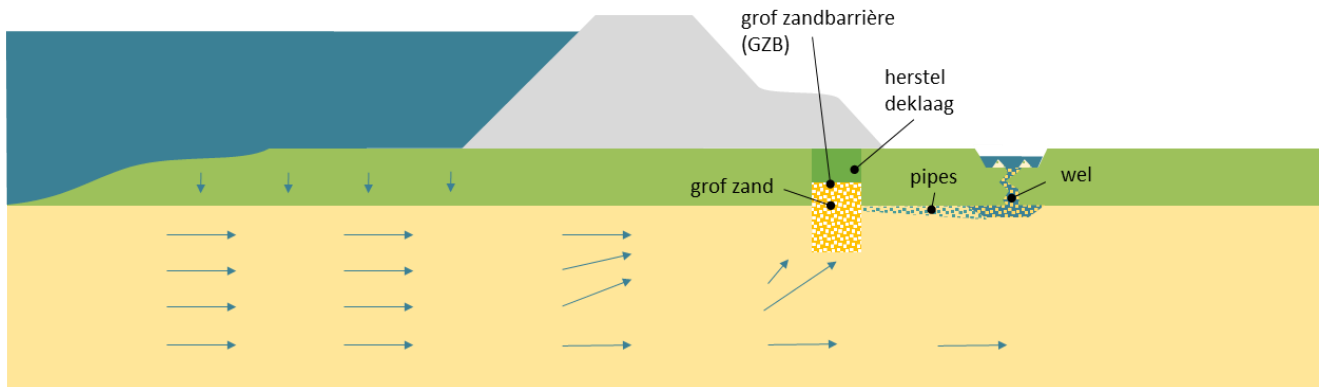
- Het toepassen van grover grondmateriaal in de baan van het erosiekanaal (OBR GZB [1]);
- Het toepassen van een verticaal geotextiel in de baan van het erosiekanaal (OBOR VZG [2]);
- Het toepassen van een filterscherm in de baan van het erosiekanaal (OBOR Prolock [3]).

In de volgende paragrafen worden de verschillende technieken in detail toegelicht met een schematische weergave. Hierin is uitgegaan van een referentiesituatie met sloot in het achterland, waarbij de deklaag in de sloot significant dunner is dan in de rest van het achterland zodat opbarsten altijd bij de sloot plaatsvindt.

#### 3.2.1 *Werking van het ingraven van grover materiaal*

Het toepassen van grover grondmateriaal in de baan van het erosiekanaal wordt ook wel een grofzandbarrière (GZB) genoemd. De werking van een GZB is schematisch weergegeven in Figuur 3.1. Bij deze filtertechniek wordt op enige afstand van de binnentoeen een deel van de deklaag en de onderliggende zandlaag vervangen door grover materiaal.

Nadat een beginnend erosiekanaal is gevormd onder de deklaag worden zandkorrels op het grensvlak van de pipinggevoelige zandlaag en de deklaag meegevoerd door de grondwaterstroming richting de wel in het achterland. Zodra het erosiekanaal tot aan de grofzandbarrière is gegroeid komt het erosiekanaal als het ware een muur van grof materiaal tegen, waardoor het pipingproces op verschillende manieren wordt bemoeilijkt. De eerste manier is dat het barrièremateriaal uit grotere korrels bestaat waardoor er dus meer weerstand tegen erosie aanwezig is in het filter dan in het origineel aanwezige zand (ook wel achtergrondzand genoemd). De tweede reden is dat de stromingsbelasting op korrels in de grofzandbarrière relatief klein is, omdat de barrière een hoge doorlatendheid heeft in vergelijking met het achtergrondzand. Hierdoor kan het achtergrondzand het filter niet passeren. Het grootste deel van het verval tussen de buitenwaterstand en het polderpeil in het achterland wordt opgenomen door het relatief fijne achtergrondzand bovenstrooms van de grofzandbarrière. Voor de grofzandbarrière geldt dat hoe groter het verschil in doorlatendheid is tussen het barrièrezand en het achtergrondzand, hoe effectiever de barrière is.

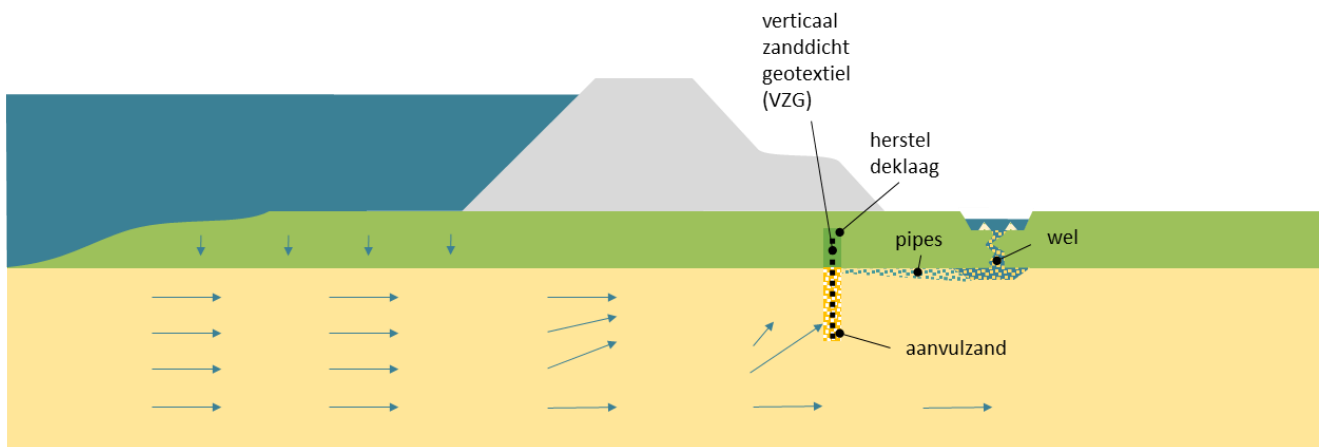


Figuur 3.1 Schematische weergave van de werking van een grofzandbarrière

### 3.2.2 Werking van een verticaal zanddicht geotextiel

Een verticaal zanddicht geotextiel (VZG) wordt bij de toepassing als filtertechniek verticaal ingebracht nabij de teen van de dijk. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 3.2.

Na het opbarsten van de deklaag in het achterland, ontstaat een erosiekanaal onder de deklaag richting de rivier. Naarmate de buitenwaterstand toeneemt, zal het erosiekanaal verder groeien richting de buitenzijde van de dijk. Door de toepassing van een VZG in de baan van het erosiekanaal, wordt zandtransport, en daarmee de groei van het erosiekanaal tegengehouden. De grootte van de perforaties in het geotextiel zijn zo groot dat het kwelwater hier makkelijk doorheen stroomt, maar ook klein genoeg dat het achtergrondzand niet kan passeren. Hierdoor wordt kortsluiting van het erosiekanaal tussen de binnenzijde en buitenzijde van de dijk voorkomen. Daarnaast is de waterdoorlatendheid van een VZG groot, waardoor de geohydrologie (stijghoogte) niet wordt beïnvloed.



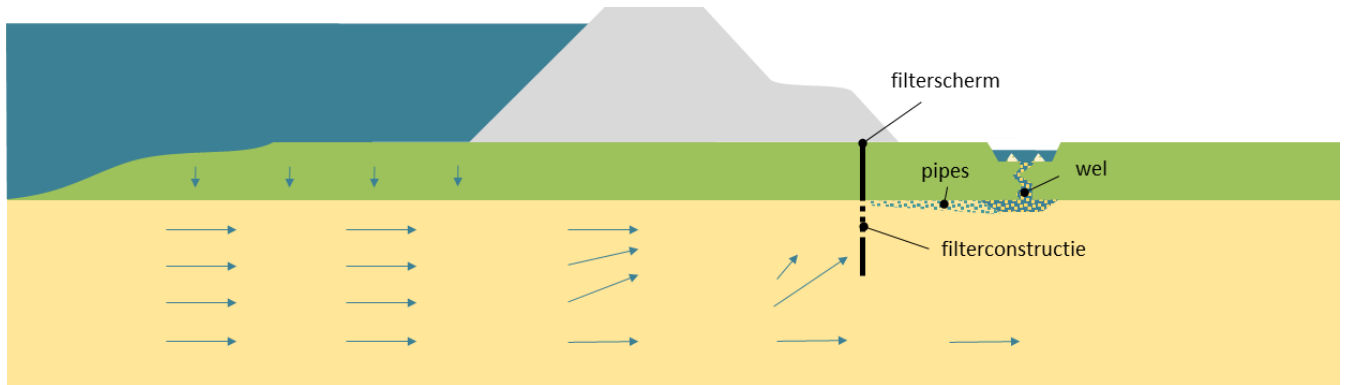
Figuur 3.2 Schematische weergave van de werking van een verticaal zanddicht geotextiel

### 3.2.3 Werking van een filterscherm

Een andere toepassing van een filtertechniek is een filterscherm. Dit is in feite een heavescherm met holle kokers waarin een filterconstructie is opgenomen. Door middel van 'gaten' in de kokers van het scherm kan water de filterconstructie passeren, maar zandkorrels niet. De toepassing van een filterscherm is schematisch weergegeven in Figuur 3.3.

Het filterscherm is gebaseerd op het filterwerkingsprincipe van een granulair geometrisch gesloten filter. Het bestaat uit brede kunststof damwandplanken die voorzien zijn van holle kokers in de vorm van een honingraat. De wanden van de kokers zijn over een beperkte lengte voorzien van verticale sleuven (hierna perforaties genoemd), waardoor het scherm waterdoorlatend is. De holle kokers worden gevuld met filterzand waarvan de samenstelling is afgesteld op het achtergrondzand. Het aangebrachte filterzand zorgt

voor een filterwerking, waarbij het grondwater het scherm kan passeren maar zandtransport wordt verhinderd.

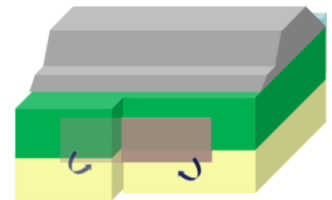


Figuur 3.3 Schematische weergave van de werking van een filterscherm

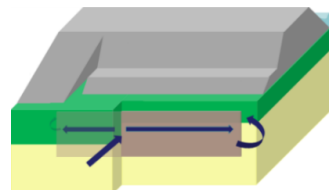
### 3.3 Faalpaden bij een intacte filtertechnieken

Voor het optreden van piping bij een intacte filtertechniek zijn verschillende faalpaden mogelijk. In de onderstaande tabel zijn de verschillende faalpaden benoemd en gevisualiseerd voor de toepassing van een VZG [7].

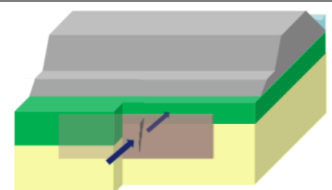
1 Bij onderloopsheid ontwikkelt een erosiekanaal zich onder de filtertechniek door omdat deze niet diep genoeg is aangelegd. Het faalpad voor onderloopsheid bestaat uit twee delen; in de eerste plaats treedt onder de filtertechniek een dermate hevige verticale grondwaterstroming op dat dit leidt tot heave (inclusief tweede-orde effecten als verweking van de bodem en daarmee vervorming van de waterkering zoals afschuiven van het binnentalud), en in de tweede plaats door vervorming/bezwijken van de filtertechniek door verweking van de bodem. Indien de filtertechniek volledig is bezweken dan zijn de vervolgprocessen tot aan falen van de waterkering hetzelfde als bij piping onder een groene dijk zonder filtertechniek.



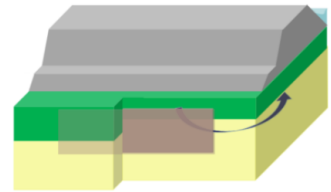
2 Bij achterloopsheid kan een erosiekanaal zich ontwikkelen in de lengterichting van de waterkering tot aan het uiteinde van de filtertechniek. Daardoor kan een erosiekanaal achter de filtertechniek langs ontwikkelen. Er dient in het ontwerp rekening gehouden te worden met aansluitingen op andere objecten en/of maatregelen in de lengterichting. Bij een filtertechniek is dit vergelijkbaar met achterloopsheid bij een heavescherm, maar heeft de filtertechniek als voordeel dat het waterdoorlatend is, wat een gunstige werking heeft tegen het ontstaan van achterloopsheid. De vervolgprocessen tot aan falen van de waterkering zijn grotendeels vergelijkbaar als bij piping onder een groene dijk zonder filtertechniek.



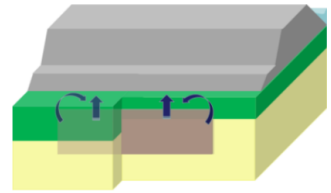
3 Bij doorloopsheid kan een erosiekanaal zich ontwikkelen door de filtertechniek heen. Dit geeft doorslag of kortsluiting. Dit kan grotendeels worden voorkomen door zorgvuldige uitvoering en monitoring van de uitvoering. De vervolgprocessen tot aan falen van de waterkering zijn vergelijkbaar als bij piping bij een groene dijk zonder filtertechniek omdat er geen weerstand meer is in de baan van het erosiekanaal.



- 4 Bij voorloopsheid ontstaat een erosiekanaal aan de verkeerde (bovenstroomse) kant van de filtertechniek doordat er bijvoorbeeld onvoldoende dekking aanwezig is. Hierdoor ontstaat opbarsten bovenstrooms van de filtertechniek. De vervolgprocessen tot aan falen van de waterkering zijn hetzelfde als bij piping onder een groene dijk zonder filtertechniek.



- 5 Bij bovenloopsheid ontstaat een erosiekanaal bovenlangs de filtertechniek door de deklaag. Risico's op dit vlak kunnen uitgesloten worden door in het ontwerp expliciet rekening te houden met bovenloopsheid. Dit bestaat uit het zorgen voor een goede verankering van een filtertechniek met de omliggende deklaag. De vervolgprocessen tot aan falen van de waterkering zijn hetzelfde als bij piping onder een groene dijk zonder filtertechniek.



### 3.4 Faalpaden bij een defecte filtertechniek of aansluiting (bedreigingen)

In het geval van een defect in de filtertechniek en/of aansluiting hierop kunnen vergelijkbare faalpaden ontstaan als benoemd in de vorige paragraaf. Deze categorie faalpaden (bedreigingen genoemd), de impact op het ontwerp en eventuele beheersmaatregelen zijn beschreven in hoofdstuk 0 en 0 aan de hand van een FMECA. In de OBOR's is dit per specifieke techniek verder uitgewerkt ([1], [2], [3]).

Enkele voorbeelden van vergelijkbare faalpaden na het optreden van een defect aan de filtertechniek/aansluiting:

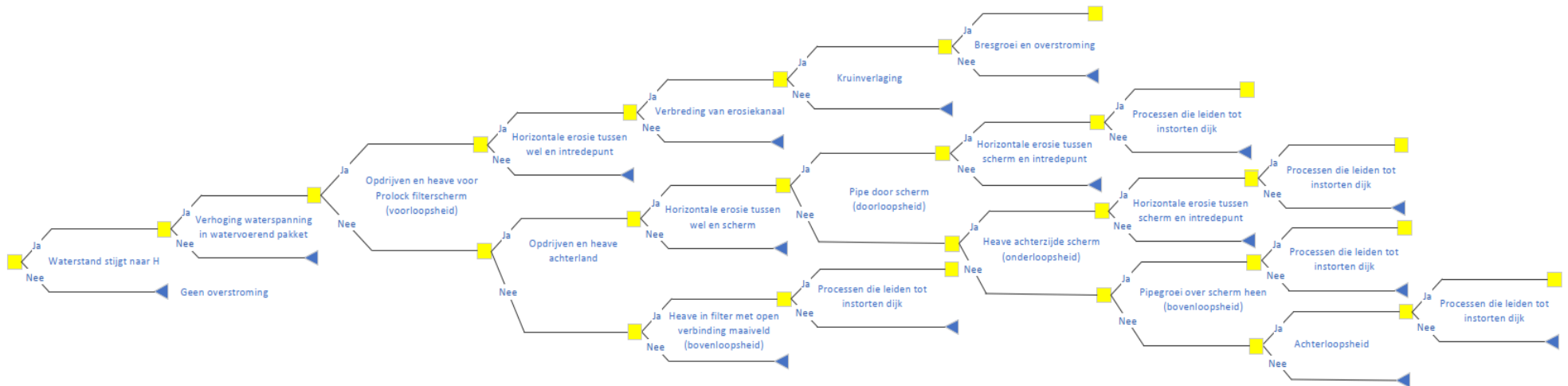
- GZB: door de afwezigheid van een scherpe grenslaag tussen pipinggevoelige zandlaag en de deklaag, kan de GZB onvoldoende diepte hebben. Hierdoor kan onderloopsheid of doorloopsheid ontstaan bij de GZB, waardoor de veiligheid tegen piping niet meer gewaarborgd is;
- VZG: door wortelgroei van begroeiing (bomen en struiken) die nabij de VZG staan, kan het geotextiel beschadigd raken. Hierdoor ontstaan een gat in het doek, en functioneert het geotextiel niet meer goed. Het faalpad doorloopsheid treedt op;
- Filterscherm: er ontstaat geotechnische instabiliteit van het scherm door vervorming/buiging van het scherm ten gevolge van drijfzand achter het scherm. Dit leidt tot een gat in het scherm, of tot uitspoeling van het filtermateriaal. In beide gevallen functioneert de filtertechniek niet meer, wat leidt tot het faalpad doorloopsheid.

### 3.5 Gebeurtenissenboom en primaire faalpaden

In de voorgaande paragrafen zijn de mogelijke faalpaden van piping bij filtertechnieken benoemd. De faalpaden samen kunnen gevisualiseerd worden in een gebeurtenissenboom. In Figuur 3.4 is een voorbeeld gegeven van een gebeurtenissenboom van een filterscherm. Elk geel blokje staat voor een knoop, en heeft een gezamenlijke kans van 1. De blauwe driehoeken geven de gebeurtenissen weer waarbij geen overstroming optreedt, wat betekent dat alle blauwe driehoeken samen de kans op 'geen overstroming' geven.

Het ontwerp van een filtertechniek dient dusdanig veilig te zijn dat de totale kans op alle genoemde faalpaden voldoende klein is. Dit kan worden behaald door de juiste dimensionering en opbouw toe te passen in het ontwerp, en bij de uitvoering rekening te houden met het primaire faalpad van een specifieke filtertechniek.

Bij de toepassing van een VZG is onderloopsheid het primaire faalpad, en bij de toepassing van een GZB of een filterscherm is dit doorloopsheid. In het volgende hoofdstuk wordt nader ingegaan op de primaire faalpaden onderloopsheid en doorloopsheid.



Figuur 3.4: Gebeurtenissenboom van een filterscherm [3]. Gele vierkanten geven knopen weer, en blauwe driehoeken de gebeurtenissen waarbij geen overstroming optreedt.

## 4 Fysische processen bij primaire faalpaden

### 4.1 Inleiding

Bij de toepassing van een filtertechniek als pipingmaatregel is het essentieel dat het filter goed functioneert. Voor de onder de deklaag aangebrachte technieken (VZG, GZB en kunststof filterscherm) is het nodig dat het erosiekanaal naar het filter toe groeit en niet via een omweg alsnog voor een bedreiging vormt door kortsluiting. Een deel van de fysische processen en faalpaden richt zich dus op die omwegen en kortsluitingsroutes (paragraaf 3.3). Het primaire faalpad richt zich op vorming van het erosiekanaal naar het filter toe en de grenscondities waarbinnen het filter met een voldoende te onderbouwen mate van zekerheid functioneert. Heave speelt hierbij een belangrijke rol, en deels zal er in de beschrijving ook sprake zijn van overlap met de Publicatie Heaveschermen [8]. Een grindkoffer is meer aan het oppervlak gelegen en voorkomt vorming van het erosiekanaal. De beschrijving van fysische processen en faalpaden van grindkoffers is beschreven in de OBR Drainagetechnieken [4].

In dit hoofdstuk wordt niet ingegaan op afgeleide veiligheidsfactoren en onzekerheden binnen de betrouwbaarheidsanalyses. De generieke aanpak hiervoor staat beschreven in het Veiligheidsraamwerk [6], en voor de verschillende filtertechnieken wordt verwezen naar de OBOR's omdat die grotendeels techniek-specifiek zijn ([1], [2], [3]).

### 4.2 Fenomenologische beschrijving

In het primaire faalpad van VZG (onderloopsheid) en het primaire faalpad van GZB en filterscherm (doorloopsheid) zijn meerdere stappen hetzelfde. In Tabel 4.1 zijn de volledige primaire faalpaden weergegeven. Iedere stap in het faalpad beschrijft een gebeurtenis, ook wel een knoop genoemd.

Tabel 4.1 Primaire faalpaden

Primair faalpad onderloopsheid (VZG)	Primair faalpad doorloopsheid (GZB/filterscherm)
1. Buitenwaterstand stijgt	
2. Waterspanning in watervoerend pakket neem toe; grondwaterstroming vindt plaats door (en onder) de filtertechniek	
3. De stijghoogte aan de polderzijde is voldoende om de deklaag op te tillen en te scheuren. Dit resulteert in een opbarstgat in de deklaag achter de constructie; het water stroomt verticaal uit het opbarstgat in de grond	
4. Er treedt 'heave' op. Door concentratie van stroming naar het uittredepunt worden zandkorrel gefluidiseerd, en worden ze door hoge verticale stroomsnelheden opgetild in het verticale kanaal	
5. Horizontaal zandtransport onder de deklaag waardoor een erosiekanaal ontstaat, en deze verder groeit tot aan de filtertechniek	
6. VZG faalt door onderloopsheid	6. GZB/filterscherm faalt door doorloopsheid
7. Groei van het erosiekanaal onder het VZG door	7. Groei van het erosiekanaal door het GZB/filterscherm heen
8. Hydraulische kortsluiting door een doorgaand erosiekanaal tussen buitenwater en intredepunt binnendijks.	
9. Verbreden en verdiepen van het erosiekanaal	
10. Kruinverlaging	
11. Noodmaatregelen ineffectief <sup>2</sup>	
12. Overstroming/inundatie van het achterland	

Uit de primaire faalpaden volgt dat de verschillen tussen onderloopsheid en doorloopsheid zich beperken tot knoop 6 en 7. Voor filtertechnieken start de beschrijving van relevante processen dus nadat er sprake is geweest van opbarsten, heave en terugschrijdende erosie (knoop 1 t/m 5) en voordat hydraulische kortsluiting en vervolprocessen optreden (knoop 8 t/m 12). Voor de beschrijving van deze processen wordt verwezen naar de Publicatie Heaveschermen [8], hoofdstuk 4, en de daarin genoemde bronnen. Let

<sup>2</sup> Noodmaatregelen kunnen in principe na ieder knoop in het faalpad worden toegevoegd, maar zijn hier gezamenlijk opgenomen aan het eind van het faalpad.



op dat de knoopnummers per publicatie kunnen verschillen. In de volgende paragrafen wordt per filtertechniek ingegaan op de fysische processen in knoop 6 en 7. Voor een uitgebreidere beschrijving van de primaire faalpaden wordt verwezen naar de desbetreffende OBOR's. Let op dat het detailniveau van deze beschrijving per OBOR kan verschillen.

#### 4.2.1 Knoop 6 en 7: VZG (onderloopsheid)

Bij het primaire faalpad van VZG, onderloopsheid, ontwikkelt zich een erosiekanaal onder het geotextiel door waardoor het VZG faalt. Dit bestaat uit twee stappen:

- Door het ontstaan van het erosiekanaal onder de VZG ontstaat een dermate hevige verticale grondwaterstroming dat dit leidt tot het optreden van heave. Hierbij treden ook tweede orde effecten op zoals verweking van de bodem, en daardoor (mogelijke) vervorming van de dijk zoals het afschuiven van het binnentalud.
- Er treedt zodanige verweking van de bodem op (een gat achter het VZG) waardoor het VZG gaat vervormen. Dit kan leiden tot het dubbelvouwen van het VZG, waarna het erosiekanaal voorbij het VZG groeit.

Na dat bovenstaande stappen zijn opgetreden, treedt opnieuw horizontaal en verticaal zandtransport op. Hierdoor groeit het erosiekanaal verder richting de rivierzijde voorbij het VZG.

#### 4.2.2 Knoop 6 en 7: GZB (doorloopsheid)

Bij het GZB is het primaire faalpad doorloopsheid, oftewel de ontwikkeling van een erosiekanaal door de GZB heen. Er ontstaat een dermate hevige horizontale grondwaterstroming door de GZB heen, dat erosie van het grove materiaal plaatsvindt. Dit treedt ook op in de lengterichting van de dijk door het ontstaan van zijdelingse erosiekanalen langs de benedenstroomse kant van de GZB. De erosie zorgt ervoor dat het bovenste deel van de GZB (de inkassing in de deklaag) wegspoelt totdat alleen een helling van grof materiaal overblijft onder de natuurlijke hellingshoek. Indien het verval verder toeneemt, wordt ook de horizontale stroming heviger door het GZB en neemt de hellingshoek bovenin de barrière af. Hierna treedt instabiliteit op bij het resterende grove materiaal, waardoor het achtergrondzand de filter passeert en het erosiekanaal door de GZB heen groeit. Zodra het erosiekanaal zich door de hele GZB heen ontwikkelt, is sprake van doorloopsheid en het bezwijken van de GZB.

#### 4.2.3 Knoop 6 en 7: filterscherm (doorloopsheid)

Bij de toepassing van een filterscherm is doorloopsheid ook het primaire faalpad. Dit treedt op indien het achtergrondmateriaal te fijn is in relatie tot het filtermateriaal. Er ontstaat onvoldoende boogwerking van het achtergrondzand op de filterwand, waardoor het filter niet in staat is om een erosiekanaal tegen te houden. Het achtergrondzand spoelt vervolgens (in grote hoeveelheden) zowel door de sleuven als door het filterzand, waardoor zandtransport door het filterscherm heen plaatsvindt. Dit betekent dat het erosiekanaal kan doorgroeien tot aan de andere zijde van het filterscherm. Er is dan sprake van doorloopsheid en het falen van het filterscherm.

## 5 Ontwerpcriteria

### 5.1 Inleiding

De toepassing van een filtertechniek als pipingmaatregel is ontstaan uit de bestaande kennis over filterregels. Indien de filtertechniek voldoet aan de filterregels, is het voor het achtergrondzand uit de pipinggevoelige laag niet mogelijk om de filter te passeren, en is daarmee de veiligheid met betrekking tot piping gewaarborgd. Naast de filterregels is ook heave een belangrijk onderdeel voor het ontwerp van filtertechnieken. De Publicatie Heaveschermen [8] geeft handvatten voor het ontwerpen van de heavegerelateerde aspecten van filtertechnieken.

In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de keuzen en analyses die een ontwerper maakt om de fysieke afmetingen van een filtertechniek te bepalen op basis van de primaire faalpaden voor piping. Naast waterveiligheid zijn er ook andere aspecten die een belangrijke invloed kunnen hebben op het ontwerp. Gedacht kan worden aan: maakbaarheid, inpasbaarheid, beheerbaarheid, duurzaamheid en uitbreidbaarheid. Soms is er een voorkeur voor het toepassen van een specifieke techniek vanwege een innovatiedoelstelling en de beschikbaarheid van kennis en ervaring bij een ontwerpende of uitvoerende partij. In dit hoofdstuk ligt de focus op het waterveiligheidsontwerp en de primaire faalpaden.

Tabel 5.1 Overzicht ontwerpaspecten en locatie in deze Publicatie

Ontwerp	Faalpad	Behandeld in:
Positie filtertechniek in het dwarsprofiel van het dijklichaam	Onderloopsheid (primair) Voorloopsheid	<ul style="list-style-type: none"> <li>Paragraaf 6.2 (onderloopsheid)</li> <li>Hoofdstuk 7 (voorloopsheid)</li> </ul>
Diepte van de filtertechniek	Onderloopsheid (primair)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Paragraaf 6.2</li> </ul>
Positie filtertechniek in het lengteprofiel (bovenaanzicht)	Achterloopsheid (primair)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Paragraaf 6.3</li> </ul>
Afwerking van de bovenkant van de filtertechniek	Bovenloopsheid	<ul style="list-style-type: none"> <li>Paragraaf 6.3.3</li> <li>Hoofdstuk 7</li> </ul>
Materiaal en installatiemethode	Doorloopsheid	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hoofdstuk 7</li> <li>OBOR van specifieke techniek</li> </ul>

### 5.2 Positie filtertechniek in het dwarsprofiel

Globaal gezien worden de filtertechnieken gepositioneerd rond de binnenteen of onder de binnenberm. De redenen hiervoor komen vanuit verschillende aandachtsgebieden, onder meer:

- Ontwerp en andere bedreigingen;
- Uitvoerbaarheid;
- Beheerbaarheid.

Eenzijds moet worden voorkomen dat er interferentie optreedt met het uittredepunt en, indien aanwezig, moet de afstand tot de watergang groot genoeg zijn om te voorkomen dat de onderhoudswerkzaamheden de functionaliteit gaan beïnvloeden. Ook het potentiële effect van dierlijke graverij kan mede de positie van de filtertechniek bepalen. Anderzijds is de uitvoerbaarheid van het aanbrengen van een filtertechniek verder richting de kruin van de dijk, oftewel dieper onder het binnentalud lastig. De optimale positie is dus locatiespecifiek.

### 5.3 Dimensionering van de filtertechniek

#### 5.3.1 Breedte en vorm loodrecht op de dijk

De breedte van de filterconstructie loodrecht op de dijk is sterk afhankelijk van het type. Hiervoor wordt verder verwezen naar de onderliggende OBOR's.

### 5.3.2 Lengte parallel aan de dijk

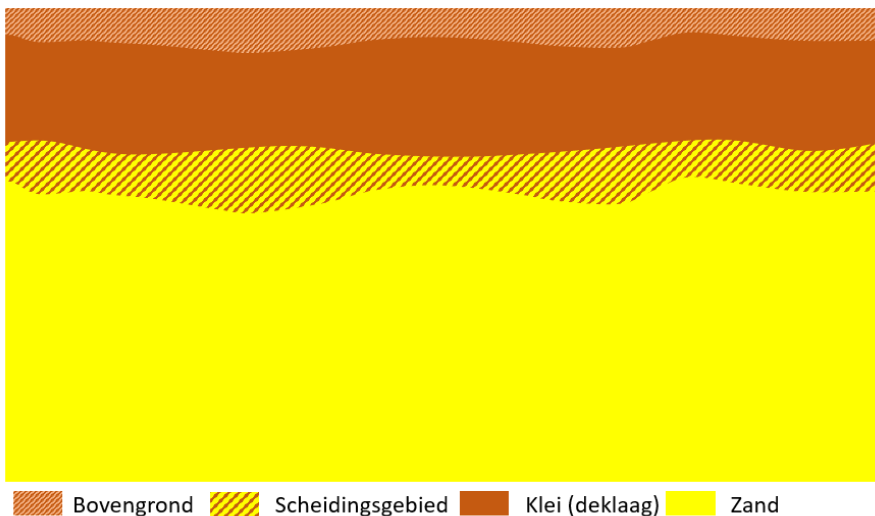
De lengte van de filtertechniek parallel aan de dijk is belangrijk voor het tegengaan van achterloopsheid. Voor alle filtertechnieken geldt dat deze lengte bepaald wordt met de gangbare regels voor piping uit het WBI2017 [9] en het OI2014v4 [10].

### 5.3.3 Puntdiepte

Voor het VZG en de GZB geldt dat er een toepassingsbereik en een minimale veiligheid is gedefinieerd bij een bepaalde diepte van de techniek in de pipinggevoelige zandlaag onder de slechtdoorlatende deklaag. Die diepte is sterk gerelateerd aan het voorkomen van heave, maar is ook afhankelijk van de dikte van het scheidingsgebied tussen de deklaag en de pipinggevoelige zandlaag. Voor het ontwerp is het dus van belang om de dikte van de slechtdoorlatende deklaag en opbouw van het scheidingsgebied tussen de deklaag en de pipinggevoelige zandlaag goed in beeld te hebben om een voldoende diepe maatregel te ontwerpen, zie hiervoor Figuur 5.1.

Voor de filterconstructie geldt dat filterwerking specifiek gericht moet zijn op het bovenste deel van de pipinggevoelige zandlaag, omdat hierin het erosiekanaal ontstaat. Dit betekent dat het scheidingsgebied goed in kaart moet worden gebracht om de optimale positie van het filter in de verticaal te bepalen (direct onder het scheidingsgebied).

Zoals te zien in Figuur 5.1 is de locatie en diepte van het scheidingsgebied variabel. Om dit goed in kaart te brengen is het belangrijk om voldoende dicht grondonderzoek uit te voeren.



Figuur 5.1. Relevante grondlagen voor ontwerp VZG

### 5.3.4 Afwerking bovenkant

De bovenkant van alle technieken moet zijn ingebed in de slechtdoorlatende deklaag. Voor alle technieken is bovenloopsheid en opbarsten vlak voor de constructie een potentieel faalpad dat beheerst moet worden. In het ontwerp moet rekening worden gehouden met voldoende weerstand voor het scherm. Dit kan in de vorm van een ondoorlatende laag met voldoende gewicht.

## 5.4 Materiaal en filterwerking

De toegepaste materialen en de bijbehorende filterwerking is per techniek verschillend. De verschillende filtertechnieken zijn in meer of mindere mate gebaseerd op de filterregels uit Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen [11], weergegeven in onderstaand kader. Zand met een bepaalde te ontwerpen korrelgrootteverdeling speelt bij alle technieken een rol, soms samen met een zanddicht geotextiel (VZG) of als omhulsel van het zand (filterconstructie). Het ontwerp van het toe te passen zand moet worden

bepaald aan de hand van de benodigde weerstand in relatie tot het omliggende erosiegevoelige materiaal. Bij het VZG moet de sterkte en doorlatendheid van het geotextiel bepaald worden in het ontwerp.

---

Beschrijving van de filterregels, samengevat uit paragraaf 5.4.3 uit Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen [11].

Uitspoeling van zand kan worden voorkomen door een filter. Dit kan worden bereikt als er bij het (vermoedelijke) uittredepunt een filterconstructie aanwezig is. Het filter kan bestaan uit een granulaire filter, opgebouwd volgens de filtercriteria (zie hieronder) of uit een verzwaard filterdoek. Voorwaarden voor een goede werking van de methode zijn dat het filter zanddicht is en meer waterdoorlatend (grover) is dan de ondergrond.

De eisen ten aanzien van stabiliteit en doorlatendheid zijn vastgelegd in zogenaamde filterregels. Het meest bekend en meest toegepast is het filtercriterium van Terzaghi:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4 \quad (5-1)$$

Waarin:

$D_{15}$  korreldiameter van het grove (filter)materiaal, waarbij 15 gewichtprocent van de deeltjes van het monster een kleinere diameter heeft.

$d_{85}$  korreldiameter van het fijne materiaal, waarbij 85 gewichtprocent van de deeltjes van het monster een kleinere diameter heeft.

Om opbarsten van het filter (het grove materiaal) te voorkomen, moet de doorlatendheid van het filter voldoende groot zijn ten opzichte van het fijne materiaal daaronder. Dit is het geval als aan de volgende, algemeen geaccepteerde, criterium wordt voldaan:

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} > 4 \quad (5-2)$$

Waarin:

$d_{15}$  korreldiameter van het fijne materiaal, waarbij 15 gewichtprocent van de deeltjes van het monster een kleinere diameter heeft.

Tevens geldt bij het filtercriterium van Terzaghi, dat de zeefkrommen van het grovere en fijnere materiaal ongeveer parallel moeten verlopen. Vergelijking 5-2 geldt alleen als zowel het grove als het fijne materiaal vrij uniform zijn (steile zeefkromme).

Om effectief te zijn moet een filter een dikte hebben die minimaal gelijk is aan twee á drie keer de diameter van de grootste korrels.

---

## 5.5 Uitvoeringstechnieken

Er zijn drie uitvoeringstechnieken beschikbaar:

- Freestechnieken: Hierbij wordt via een frees een sleuf in de ondergrond uitgegraven. Vervolgens wordt het filter aangebracht waarbij tegelijk (indien noodzakelijk) de sleuf weer wordt aangevuld. Als laatste wordt de deklaag weer hersteld.
- Open-sleuf technieken: Hierbij wordt via een open ontgraving de sleuf in de ondergrond vrijgemaakt. Vervolgens wordt het filter aangebracht waarbij tegelijk (indien noodzakelijk) de sleuf weer wordt aangevuld. Als laatste wordt de deklaag weer hersteld.
- Prefab-technieken: Hierbij wordt een prefab-omhulsel aangebracht in de ondergrond, die vervolgens wordt gevuld met het filter. Als laatste wordt de deklaag boven de constructie weer hersteld.

Voor het VZG is op dit moment een freestechniek beschikbaar. Bij de GZB is tot nu toe alleen ervaring opgedaan met een open-sleuf techniek, maar er wordt gekeken of ontwikkeling van een freestechniek haalbaar is. De filterconstructie is een voorbeeld van een prefab-techniek.

## 6 Omgaan met afwijkingen ontwerp, uitvoering en beheer

### 6.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk zijn de verschillende keuzes en analyses voor het ontwerp van een filtertechniek als pipingmaatregel beschreven. Hierbij ligt de focus op het voorkomen van falen van de filtertechniek via de primaire faalpaden. Naast de primaire faalpaden zijn er nog andere relevante faalpaden (zie hoofdstuk 3) die moeten worden beschouwd, en waaruit relevante bedreigingen kunnen ontstaan. Voor de toetsing van de relevante bedreigingen wordt gebruik gemaakt van het veiligheidsraamwerk dat is beschreven in hoofdstuk 2. Met dit raamwerk kan worden aangetoond of de totale faalkans van een filtertechniek voldoet aan de vereiste faalkans voor piping. Aangezien de relevante bedreigingen sterk samenhangen met de geanalyseerde techniek, zijn in deze publicatie alleen een aantal relevante bedreigingen opgenomen die generiek gelden voor alle filtertechnieken. In de onderliggende OBOR's zijn naast alle generieke bedreigingen, ook de techniek-specifieke bedreigingen uitgewerkt.

De bijdrage van relevante bedreigingen aan de faalkans op piping kan op verschillende manieren worden aangetoond: kwalitatief, kwantitatief als probabilistisch. Alleen voor bedreigingen waarvan de bijdrage aan de faalkans het grootst is, is een kwantitatieve of probabilistische uitwerking noodzakelijk. Bedreigingen die kwalitatief, bijvoorbeeld via onderlinge weging, kunnen worden weggeschreven vereisen dus geen kwantitatieve uitwerking. In paragraaf 6.3 is een voorbeeld opgenomen van een bedreiging die naar aanleiding van onderzoek een verwaarloosbare bijdrage aan de faalkans heeft.

Indien het effect van de bedreigingen dusdanig groot is dat de filtertechniek niet voldoet aan de vereiste faalkans, dan zijn er de volgende mogelijkheden:

- Aanpassing van het ontwerp;
- Het nemen van een beheersmaatregel tijdens de uitvoering of in de beheerfase;
- Een ander type pipingmaatregel.

### 6.2 Inventariseren van potentiële bedreigingen

De relevante bedreigingen zijn sterk afhankelijk van de geanalyseerde filtertechniek. Zoals eerder beschreven vormt doorloopsheid het primaire faalpad bij de GZB en het filterscherm, en is onderloopsheid dat bij het VZG. De overige faalpaden, en de daaruit volgende bedreigingen, moeten dus worden beheerst in de ontwerp-, uitvoerings-, of beheerfase. In de FMECA worden afwijkingen van de in het ontwerp beoogde functioneren benoemd. De FMECA wordt tijdens het ontwerp opgesteld en maakt uit van een lopend risicoregister. In de werkvoorbereiding en realisatie wordt dit register verder geactualiseerd en aangepast. Daarbij wordt ook gekeken naar de beheersmaatregelen die getroffen moeten worden om deze scenariokansen te verkleinen. Bij de inschatting van de relevantie kunnen ook al maatregelen worden meegenomen in de analyse.

Na de inventarisatie wordt een selectie gemaakt van afwijkingen die een relatief grote bijdrage leveren aan het falen van de waterkering door disfunctioneren van de filtertechniek, oftewel de relevante bedreigingen. Deze bijdrage wordt bepaald door de kans op de afwijking (de scenariokans) en de kans op falen gegeven de afwijking. Alleen voor de bedreigingen waarvan de bijdrage aan de faalkans het grootst is, zal een kwantitatieve uitwerking noodzakelijk zijn om een toetsing aan de vereiste faalkans uit te voeren. Bedreigingen waarvan kwalitatief, via onderlinge weging, kan worden aangegeven dat de faalkansbijdrage ondergeschikt is hoeven dus niet kwantitatief te worden uitgewerkt.

Tabel 6.1 Inventarisatie van generieke afwijkingen bij filtertechnieken

Gebeurtenis of bedreiging		Bedoeld functioneren scherm/ Disfunctioneren scherm	Effect gegeven optreden van gebeurtenis  P(F S)	Kans op optreden van gebeurtenis  P(S)	Relevantie	Maatregel
1	Achterloopsheid door kwelwegtekort in lengterichting	Bedoeld functioneren (op ontworpen)	Kans op achterloopsheid  <i>Schatting kans ondersteund met berekeningen en gebruikelijke ontwerpeisen</i>	Kans scherm intact  <i>Kans is ca. 1</i>	Bepalend voor ontwerp  <i>Schatting kans vooral bedoeld als referentie voor andere kansbijdragen</i>	Geen
2	Filtertechniek ligt benedenstrooms van uittredepunt	Bedoeld functioneren (op ontworpen)	Kans op voorloopsheid  <i>Schatting kans ondersteund met berekeningen en gebruikelijke ontwerpeisen</i>	Kans op scherm intact  <i>Kans is ca. 1</i>	Bepalend voor ontwerp  <i>Schatting kans vooral bedoeld als referentie voor andere kansbijdragen</i>	Geen
3	Filtertechniek is niet diep genoeg aangebracht	Disfunctioneren	Onderloopsheid onder filtertechniek  <i>Schatting kans ondersteund met berekeningen en beschouwing</i>	Kans op niet op diepte komen (bijv. lokaal harde gronden)  <i>Schatting kans ondersteund door casuïstiek</i>	Bedoeld voor prioritering, vergelijking met ontwerp  <i>Schatting o.b.v. kans van optreden en effect van optreden</i>	Beheersmaatregel of correctieve maatregel tijdens uitvoering of ontwerploop indien nodig
4	Lekkage van stroming door deklaag	Disfunctioneren	Bovenloopsheid door deklaag heen  <i>Schatting kans ondersteund met berekeningen en beschouwing</i>	Kans op slechte aansluiting met omliggende deklaag  <i>Schatting kans met berekeningen</i>	Bedoeld voor prioritering, vergelijking met ontwerp  <i>Schatting o.b.v. kans van optreden en effect van optreden</i>	Beheersmaatregel of correctieve maatregel tijdens uitvoering of ontwerploop indien nodig
5	Toekomstig gebrek aan kennis over aanwezigheid of locatie filtertechniek leidt tot beschadiging/verwijdering	Disfunctioneren	Achter-, door-, boven- en onderloopheids  <i>Schatting kans door beschouwing</i>	Kans op (gedeeltelijke) verwijdering of beschadiging  <i>Schatting kans ondersteund door casuïstiek</i>	Bedoeld voor prioritering, vergelijking met ontwerp  <i>Schatting o.b.v. kans van optreden en effect van optreden</i>	Beheersmaatregel opname in beheerplan en leggers

### 6.3 Voorbeeld: verstopping van een filtertechniek

Recentelijk is bewezen dat verstoppingen van het filter bij de toepassing van een filtertechniek verwaarloosbaar klein is, mits zorgvuldig ontworpen [12], dit is ook gerapporteerd in de OBOR's GZB [1] en VZG [2]).

De studie van Acacia behelst verschillende typen verstopping:

1. Fysische verstopping
2. Chemische verstopping
3. Bacteriologische verstopping

Hieronder wordt elk type verstopping beschreven en de impact op het ontwerp beschouwd.

#### 6.3.1 Fysische verstopping

Fysische verstopping treedt op als één van onderstaande situaties op kan treden:

- Omgevingsmateriaal in het filterzand kan spoelen
- Dit omgevingsmateriaal het doek kan bereiken
- Het filterzand het doek kan bereiken

In algemene zin is de conclusie dat het optreden van fysische verstopping uitgesloten kan worden mits een zorgvuldig ontwerp voor het filter wordt gemaakt, met aandacht voor:

- Grootste opening van het doek (indien aanwezig) moet groter zijn dan de grootste beschikbare korrelgrootte
- Kleinste opening doek groter dan de kleinste beschikbare korrelgrootte
- Het doek moet een overmaat aan openingen krijgen

#### 6.3.2 Chemische verstopping

De kans op verstopping door chemische neerslag wordt verwaarloosbaar klein geacht. De meest waarschijnlijke vorm van chemische neerslag is neerslag van kalk ( $\text{CaCO}_3$ ). De kans daarop is klein want:

- Kalk heeft een lage concentratie in grondwater in het rivierengebied
- Er zijn geen overgangen in temperatuur te verwachten rondom een filtertechniek. Die zijn nodig om de neerslag van kalk te initiëren
- In het rivierengebied is geen extra bron van  $\text{CO}_3^{2-}$  beschikbaar, en met een goed herstelde deklaag ook geen verandering te verwachten op dit punt.

#### 6.3.3 Bacteriologische verstopping

De kans op verstopping door bacteriologische activiteit wordt verwaarloosbaar klein geacht. De meest waarschijnlijke vorm van neerslag van bacteriologische oorsprong is neerslag van ijzer of mangaan als biofilm. De bacteriën die voor deze neerslag kunnen zorgen zijn algemeen aanwezig in grondwater, en ook hoge concentraties van ijzer of mangaan in grondwater zijn niet uit te sluiten. Als laatste zal er ook voldoende aanvoer van nutriënten voor de bacteriën aanwezig moeten zijn. Ook dat is niet uit te sluiten, nutriënten zouden in de vorm van mest in het grondwater terecht kunnen komen.

Toch is de kans daarop klein, want de bacteriën kunnen pas neerslag produceren in zuurstofrijke condities en de filters zullen zich altijd in zuurstofarme condities bevinden, namelijk onder de grondwaterstand. Mocht er twijfel zijn of een gebied vatbaar is voor dermate grote schommelingen in de grondwaterstand dat het filter 'droog' komt te staan, dan kan dit als uitsluitingscriterium worden gebruikt bij de afweging of de filtertechniek toegepast kan worden.

## 7 Consequenties voor uitvoering en beheer

**LET OP! Dit hoofdstuk is voor nu alleen gebaseerd op de OBOR VZG [2].**

### 7.1 Inleiding

In hoofdstuk 4 zijn de primaire faalpaden van de verschillende filtertechnieken uitgeschreven, waarna in hoofdstuk 5 de criteria voor het ontwerp hiervan zijn uitgewerkt. In hoofdstuk 0 zijn de overige relevante faalpaden in beschouwing genomen en de meest relevante bedreigingen geïdentificeerd. Voor iedere relevante bedreiging zijn een of meerdere beheersmaatregelen gegeven. Dit hoofdstuk gaat in op de verdere uitwerking van beheersmaatregelen na de uitvoering.

De filtertechnieken die in deze publicatie zijn beschouwd worden aangebracht onder maaiveldniveau, wat betekent dat ze na de uitvoering niet meer zichtbaar zijn. Om het gedrag van de filtertechniek in de gaten te houden moet een beheerplan worden opgesteld waarin handvatten voor beheer en onderhoud zijn vastgelegd. Dit beheerplan dient tevens als basis voor de vergunningverlening.

In het beheerplan dienen de volgende zaken opgenomen te zijn:

- Gegevens vanuit het opleverdossier (o.a. keuringsrapporten, revisietekeningen, fotorapportage en verslag van de uitvoering);
- Toelichting wat het te verwachten gedrag van de filtertechniek zal zijn tijdens hoogwater;
- Risico's voor het functioneren van de filtertechniek;
- Monitoring.

### 7.2 Goed gedrag van een filtertechniek tijdens hoogwater

Zoals eerder benoemd in de publicatie, voorkomen filtertechnieken als pipingmaatregel niet het ontstaan van opbarsten, heave of terugschrijdende erosie, maar voorkomen ze dat het erosiekanaal doorgroeit naar de rivierzijde. Dit betekent dat het ontstaan van zandmeevoerende wellen aan de landzijde van de filtertechniek geen indicatie is voor het falen van de pipingmaatregel. Indien zandmeevoerende wellen ontstaan tussen de filtertechniek en de dijk in, dan is dit wel een indicatie voor falen.

Omdat de toepassing van filtertechnieken als pipingmaatregel nog relatief jonge technieken zijn, is er nog weinig ervaring met de mate van zandtransport tijdens een hoogwater na het aanbrengen. Beheerders zullen na toepassing van een filtertechniek hier pas ervaring mee opdoen. Het inventariseren van afwijkingen (zoals meer zandtransport dan normaal) zal na verloop van tijd vanzelf onderdeel worden van de hoogwaterinspectie.

Gedurende hoogwaterinspecties is het van belang om te letten op:

- Welke monitoring is geïnstalleerd, en geeft dit locatiespecifieke handvatten? Bijv. monitoring door tracerzand;
- Zijn er locaties met meer (excessief) zandtransport dan andere locaties? Is dit verklaarbaar? Zo nee, dan kan dit een indicatie zijn voor een niet goed werkende filtertechniek.

Een andere mogelijke indicator voor het gedrag van een filtertechniek is maaiveldddaling. Maaiveldddaling kan ontstaan door autonome bodemdaling, maar ook door vervorming van de grond ter plaatse van de filtertechniek. De eerste oorzaak is geen indicatie voor falen, omdat autonome bodemdaling altijd kan optreden bij groene dijken. Aanvullende maaiveldddaling kan wel een indicatie zijn, aangezien dit gering is bij een goed werkende filtertechniek.

Voor eventuele aanvullende maaiveldzakkingen kunnen de volgende oorzaken een rol spelen:



- Bij VZG: het aanvulzand aan weerszijden van het geotextiel kan een lagere dichtheid bevatten dan het achtergrondzand. Na verloop van tijd kan het maaiveld ter plaatse van de VZG lokaal zakken. Dit kan worden opgevuld en staat de werking van de VZG niet in de weg.
- Bij GZB: indien de GZB bij aanleg onvoldoende verdicht is, kan dit in een latere fase alsnog gebeuren met lokale maaivelddaling als gevolg. Dit kan een indicatie zijn voor falen, indien er onvoldoende heavehoogte overblijft.
- Bij alle filtertechnieken: als gevolg van terugschrijdende erosie vanaf het uittredepunt richting de filtertechniek kan op termijn lokale maaiveldzakking ontstaan ter plaatse van het erosiekanaal. Deze maaiveldzakking kan worden opgevuld en staat de werking van de filtertechniek niet in de weg.

### **7.3 Risico's voor het functioneren van een filtertechniek**

De belangrijkste risico's, oftewel de relevante bedreigingen, voor het functioneren van een filtertechniek zijn geïdentificeerd met behulp van FMECA (zie hoofdstuk 2). Bij het schrijven van het beheerplan is het belangrijk om deze risico's op te nemen, samen met de beheers- of correctieve maatregelen die genomen kunnen worden.

### **7.4 Monitoring**

In de beheerperiode van een filtertechniek zijn er twee type monitoring van toepassing:

- Monitoring gedurende de levensduur;
- Monitoring aan het einde van de levensduur.

Monitoring gedurende de levensduur focust zich op de onzekere aspecten die in de loop van de tijd kunnen veranderen. Bij een goed ontwerp zijn alle aspecten, zoals bijvoorbeeld het risico op verstopping, goed ondervangen, en is aangetoond dat de uitvoering juist is verlopen. In de beheerfase kun je met behulp van monitoring aantonen dat de filtertechniek gedurende de levensduur zanddicht is. Hiervoor zijn vaak periodieke (visuele) inspecties wenselijk om de veranderingen die een risico kunnen vormen goed bij te houden. Een voorbeeld van monitoring tijdens de levensduur is het gebruik van tracerzand; dit is uitgebreider beschreven in de OBOR VZG.

Monitoring kan ook plaatsvinden aan het einde van de levensduur van een filtertechniek (50 tot 100 jaar). Het is mogelijk dat de filtertechniek aan het einde van de theoretische levensduur nog intact is, en dit kan worden aangetoond door middel van destructief onderzoek. Hierbij wordt de filtertechniek steekproefsgewijs opgegraven en visueel geïnspecteerd. Daarnaast kunnen ook monsters genomen worden van de filtertechniek die in het laboratorium beproefd kunnen worden. Dit is echter wel destructief voor de bestaande constructie. Ten behoeve van dit type monitoring kan een extra stuk filtertechniek worden aangebracht dat geen waterkerende functie heeft. Het is hierbij wel belangrijk om dit extra stuk te plaatsen op een representatieve plek.

## 8 Bibliografie

- [1] A. Koelewijn, „Ontwerp grofzandbarrière pilot Gameren - Aanzet tot ontwerp- en beoordelingsrichtlijn GZB,” 2021.
- [2] B. v. Meekeren en G. v. Rinsum, „OBOR VZG, concept 85%-versie,” mei 2023.
- [3] T. Maatkamp, N. Overbosch, A. Rohe, Y. Jongerius en J. Bijzagte, „Ontwerp-, beoordelings- en onderhoudsrichtlijn van het Prolock filterscherm bij Salmsteke, concept 80%-versie,” maart 2023.
- [4] P. Bart, B. v. Luit en B. v. Meekeren, „Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Drainagetechnieken (groene versie),” februari 2022.
- [5] H. Knoeff, „Publicatie Algemeen - DIV Piping,” 2023.
- [6] W. Kanning en S. Rikkert, „Veiligheidsraamwerk innovatieve pipingmaatregelen - DIV Piping,” 2023.
- [7] L. Taal, „Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel,” 2017.
- [8] A. Wiggers en L. v. d. Doef, „Publicatie Heaveschermen - DIV Piping,” 2023.
- [9] RWS-WVL, „Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017, Bijlage III Sterkte en veiligheid,” 2017.
- [10] RWS-WVL, „OI2014v4 Handreiking Ontwerpen met Overstromingskansen – Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen,” 2014.
- [11] Deltares, „Onderzoeksrapportage Zandmeevoerende Wellen, 1202123-003,” 2012.
- [12] Acacia Water, „Verticaal Zanddicht Geotextiel, Lange termijn functionaliteit achter de dijken in het rivierengebied,” Gouda, 2020.
- [13] RWS-WVL Waterkeringen, „Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken –Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie,” 2018.
- [14] TAW, „Zandmeevoerende Wellen,” 1999.
- [15] Rijkswaterstaat, HWBP, DIV, Deltares, „Rode Draden Piping,” 2022.