



# Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn

**Drainagetechnieken (groene versie)**

projectnummer 0462120.100  
definitief revisie 02  
28 feb 2022

# Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn

## Drainagetechnieken (groene versie)

projectnummer 0462120.100

definitief revisie 02  
28 februari 2022

### Auteurs

P.J.N.J. Bart  
B.H.W.J. van Luit  
B.T. van Meekeren

### Opdrachtgever

Waterschap Aa en Maas  
Pettelaarpark 70  
5216 PP 'S-HERTOGENBOSCH

datum vrijgave	beschrijving revisie 02	gecontroleerd	vrijgave
	definitief	R. de Lange	E. Matla

## Voorwoord

Het projectteam OBR Drainagetechnieken van waterschap Aa en Maas heeft in 2020 Antea Group opdracht verleend voor het opstellen van een OBR Drainagetechnieken. Deze OBR Drainagetechnieken geeft voor verschillende (innovatieve) drainagetechnieken de nodige handvatten voor ontwerpers en beheerders om deze technieken toe te passen en te beoordelen, en is een vervolg op de eerdere publicaties over drainagetechnieken die door de POV-piping en POV-Macrostabieliteit zijn opgesteld.

Het doel van deze OBR Drainagetechnieken is om de toepassing van de verschillende (innovatieve) technieken verder te stimuleren en mogelijk te maken.

De OBR Drainagetechnieken is opgesteld door Antea Group en gereviewd door Deltares en een team van deskundigen uit het werkveld (zie bijlage 4)

De inhoud van deze rapportage is gebaseerd op de thans beschikbare kennis en ervaring. De Innovatie Versneller (DIV) van het HWBP zal deze OBR geregeld aanvullen met nieuwe kennis en ervaring, die met de toepassing van deze OBR Drainagetechnieken worden opgedaan, in nauwe samenspraak met de sector.

### **Status Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Drainagetechnieken (groene versie)**

Deze OBR is in september 2021 door ENW-Techniek behandeld en met een positief advies voorgelegd aan ENW-Kern om deze OBR Drainagetechnieken als groene versie geschikt te verklaren voor toepassing in de praktijk.

### **Conclusies ENW-kern ten aanzien van deze groene versie:**

Voor een toepassing in de praktijk is het van belang om aan te geven dat sommige harde getallen eerste schattingen betreffen. Een beschrijving van de achtergrond en van het toepassingsgebied van de getallen is een noodzakelijke aanvulling voor de richtlijn. Daarnaast vraagt het bepalen van de kans op falen van de drainage in relatie tot beheer en onderhoud om een verdiepingsslag. Het ENW verwacht daarbij in ieder geval een beschouwing over bijvoorbeeld de te hanteren inspectie-intervallen en de reparatieduur per onderdeel.

Het ENW adviseert om de richtlijn met inachtnaam van de voorgaande bevindingen te gaan gebruiken en de uitwerking in de praktijk te monitoren. De huidige versie kan als voorlopige versie uitgebracht worden. Verder vindt het ENW het raadzaam om de resultaten van de toepassing van de richtlijn breed te delen, zodat er lessen getrokken kunnen worden. Al doende kan de richtlijn worden gevalueerd en kan de 'groene versie' aangepast worden tot een definitieve versie. Met een dergelijke evaluatie en een borging van het rapport onder de 'De Innovatieversneller' van het Hoogwaterbeschermingsprogramma is in de toekomstbestendigheid voorzien voor gebruik in de diverse processen rond de waterveiligheid van de dijk.

# Inhoudsopgave

Blz.

<b>Voorwoord</b>		<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1	Algemeen	1
1.2	Afbakening	1
1.3	Relatie met andere leidraden en documentatie	2
1.3.1	Samenhang met de PPD	2
1.3.2	Positie POV-publicaties ten opzichte van WBI-2017 en overige leidraden en documentatie	2
1.3.3	Beoordelen	2
1.3.4	Ontwerpen	5
1.3.5	Overig	6
1.4	Leeswijzer	6
<b>2</b>	<b>Systemeigenschappen drainagetechnieken in waterkering</b>	<b>7</b>
2.1	Rijgnaald binnen de OBR	7
2.2	Impact drainagetechnieken op faalmechanismen	9
2.2.1	Piping	9
2.2.2	Macrostabieliteit	10
2.2.3	Microstabieliteit	11
2.3	Drainagesystemen	12
2.3.1	Algemeen	12
2.3.2	Verticale bronnen	15
2.3.3	Horizontale drains	17
2.3.4	Grindkoffers	19
<b>3</b>	<b>Systeemanalyse studiegebied</b>	<b>22</b>
3.1	Algemeen	22
3.2	Veldonderzoek & meetgegevens	24
3.2.1	Geologisch en geodetisch onderzoek	25
3.2.2	Geotechnisch onderzoek	27
3.2.3	Geohydrologisch onderzoek	29
3.3	Geohydrologische analyse – t.b.v. watervoerende pakketten	32
3.3.1	Regionale (grondwater)modellen	36
3.3.2	Lokaal grondwatermodel - Grondwatermodel locatie specifiek maken	36
3.3.3	Gekalibreerd watermodel – betrouwbaar grondwatermodel	37
3.3.4	Model bij hoog water	39
3.4	Geohydrologische analyse – t.b.v. freatische lagen	39
<b>4</b>	<b>Veiligheidsbenadering</b>	<b>43</b>
4.1	Wettelijke kaders	43
4.2	Veiligheidsbenadering uitgaande van WBI2017 en OI2014	43
4.3	Maximaal toelaatbare faalkans	45



4.4	Rekenrecept scenario 1: Drainagetechniek werkt naar behoren	50
4.5	Rekenrecept scenario 2: falen drainagetechniek	54
4.6	Handvatten faalkansanalyses drainagetechnieken	59
4.6.1	Algemeen	59
4.6.2	Faalkansanalyse – verticale bronnen	61
4.6.3	Faalkansanalyse – horizontale drainage	62
4.6.4	Faalkansanalyse – grindkoffers	63
4.6.5	Faalkansanalyse – leidingen	63
4.6.6	Faalkansanalyse – regelsystemen	67
4.6.7	Faalkansanalyse – actieve drainage	68
4.6.8	Faalkansanalyse – monitoring	70
4.7	Veiligheidsbenadering grondwatermodellen	71
4.7.1	Methodes ter bepaling van de karakteristieke grondwaterstand	72
4.7.2	Probabilistische analyses bij grondwatermodellering	73
4.7.2.1	Stap 0: Probabilistische analyse	73
4.7.2.2	Stap 1: methode	74
4.7.2.3	Stap 2: Onzekerheden	75
4.7.2.4	Stap 3: Zekerheden	78
4.7.2.5	Stap 4: Resultaten	80
<b>5</b>	<b>Ontwerpen drainagetechniek</b>	<b>81</b>
5.1	Algemeen	81
5.2	Ontwerpproces op hoofdlijnen	81
5.2.1	Probleemanalyse	81
5.2.2	Programma van Eisen	83
5.2.3	Voorontwerp	84
5.2.4	Definitief ontwerp	87
5.2.5	Uitvoeringsontwerp	89
5.2.6	As-Built	90
5.3	Ontwerp van verticale bronnen	90
5.3.1	Vereiste verlaging	90
5.3.2	Modelleerwijze verticale bronnen	93
5.3.3	Voorontwerp verticale bronnen	95
5.3.4	Definitief ontwerp verticale bronnen	96
5.3.5	Omgang met onzekerheden	99
5.4	Ontwerp van horizontale drains	101
5.4.1	Vereiste verlaging	101
5.4.2	Modelleerwijze horizontale drains	101
5.4.3	Voorontwerp horizontale drains	103
5.4.4	Definitief ontwerp horizontale drains	105
5.4.5	Omgang met onzekerheden	107
5.5	Ontwerp van grindkoffers	107
5.5.1	Vereiste verlaging	107
5.5.2	Modelleerwijze grindkoffers	108
5.5.3	Voorontwerp grindkoffers	109
5.5.4	Definitief ontwerp grindkoffer	109

5.5.5	Omgang met onzekerheden	117
5.6	Ontwerp van actieve drainage	118
5.7	Ontwerp watersysteem achterland	119
5.7.1	Systeemanalyse watersysteem achterland	119
5.7.2	Toets op afvoercapaciteit	120
5.7.3	Toets op peilstijging	123
5.8	Ontwerpen ten behoeve van beheeraspecten	124
5.9	Monitoringssysteem	125
<b>6</b>	<b>Omgevingsaspecten</b>	<b>127</b>
6.1	Stakeholdersmanagement	127
6.1.1	Omwonenden	127
6.1.2	Grondeigenaren	128
6.1.3	Waterbeheerder	128
6.2	Conditionering: procedures en besluitvorming	128
6.2.1	Omgevingsvergunning	129
6.2.2	Watervergunning	129
6.2.3	Overeenkomsten (privaatrechtelijk)	132
6.2.4	Kabels en leidingen	132
6.2.5	Archeologie en NGE	133
<b>7</b>	<b>Uitvoeringsaspecten</b>	<b>134</b>
7.1	Algemeen	134
7.2	Gegraven aanbrengtechnieken	134
7.2.1	Sleuven ten behoeve van leidingwerk	134
7.2.2	Ontgraving ten behoeve van grindkoffers	135
7.3	Sleufloze aanbrengtechnieken	137
7.3.1	V-ploeg en kettinggraver	137
7.3.2	HDD-boring	138
7.3.3	Boring ten behoeve van verticale bronnen	141
<b>8</b>	<b>Beheer en onderhoud</b>	<b>143</b>
8.1	Algemeen	143
8.2	Handvatten voor beheer en onderhoud	143
8.3	Verticale bronnen	145
8.4	Horizontale drains	146
8.5	Grindkoffers	150
8.6	Actieve drainage	150
8.7	Drainage met monitoring	151
8.8	Testprocedures	152
<b>9</b>	<b>Drainage in wettelijke beoordeling</b>	<b>157</b>
9.1	Beoordeling algemeen	157
9.2	Toetsspoor piping (STPH)	158
9.2.1	Procedureel spoor technische innovatie t.b.v. piping	158

9.2.2	Rekenkundig spoor technische innovatie t.b.v. piping	162
9.3	Toetsspoor macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)	164
9.3.1	Procedureel spoor technische innovatie t.b.v. macrostabiliteit binnenwaarts	164
9.3.2	Rekenkundig spoor technische innovatie t.b.v. macrostabiliteit binnenwaarts	164
9.4	Toetsspoor micro-instabiliteit (STMI)	164
<b>10</b>	<b>Voorbeelden dijkversterking met drainagetechnieken</b>	<b>166</b>
10.1	Algemeen	166
10.2	Casus dijkversterking Jaarsveld	167
10.3	Stap 0: wat is beslisvraag?	170
10.4	Stap 1 Start: basisinformatie op orde, opgave en kansen in beeld	170
10.5	Stap 2 Analyse	172
10.6	Stap 3 Beoordeling	181
10.6.1	Stap 4: Besluit	182
<b>11</b>	<b>Bibliografie</b>	<b>183</b>

## **Bijlage 1 Witte vlekken en handelingsperspectief**

## **Bijlage 2 Overzicht interviews**

## **Bijlage 3 Faalkans drainagebuizen**

# 1 Inleiding

## 1.1 Algemeen

Drainagetechnieken zijn een mogelijke versterkingsmaatregel voor dijken. Door waterspanningen gericht te reduceren en grondwaterstanden te verlagen, worden geotechnische aspecten van de dijk verbeterd. Wanneer drainagetechnieken de stijghoogte onder de dijk beïnvloeden, heeft dit invloed op (het voorkómen van) opbarsten en opdrijven van grondlagen. Daardoor is sprake van een positieve invloed op de faalmechanismen piping en macrostabiliteit. Wanneer drainagetechnieken de freatische grondwaterstand of de stijghoogte en de waterspanning in de dijk beïnvloeden heeft dit een (positieve) invloed op de sterkte van de ondiepe lagen, waardoor de macrostabiliteit of microstabiliteit verbeterd wordt.

Het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) zoekt naar manieren om versterkingen efficiënter, sneller en doelmatiger uit te voeren. Drainagetechnieken zijn een alternatief voor ruimtelijke versterkingsmaatregelen (zoals stabiliteits- of pipingbermen).

Drainagetechnieken zijn niet nieuw, lokaal worden deze al decennia toegepast. Maar het ontbreekt aan ontwerp- en beoordelingskaders. In dat kader is in een samenwerking van POV-Macrostabiliteit en POV-Piping de POV-Publicatie Drainagetechnieken (PPD) opgesteld. De voorliggende ontwerp- en beoordelingsrichtlijn (OBR) bouwt voort op dit eerdere document en moet in samenhang gezien worden.

Drainagetechnieken verlagen grondwaterstanden door het grondwater versneld af te voeren. Een inherente eigenschap is dan ook een toename van de waterafvoer. Drainage is alleen inpasbaar als deze toename van de waterafvoer óf direct wordt afgevoerd, óf een plek kan krijgen binnen het watersysteem bijvoorbeeld door middel van berging.

## 1.2 Afbakening

De OBR- drainagetechnieken is bedoeld voor dijkbeheerders, ingenieurbureaus en aannemers die drainagetechnieken willen toepassen om de veiligheid te verhogen van dijklichamen. De OBR is geschreven voor ruim ervaren en deskundige gebruikers die bekend zijn met de voorschriften en de (deel)faalmechanismen en met de modellen die voor deze faalmechanismen van toepassing zijn. Tevens wordt verondersteld dat informatie opgenomen in de documenten van het WBI2017 en het OI2014v4, bekend is.

De OBR gaat in op zowel drainagetechnieken in het watervoerende pakket als op freatische drainage. Dit document is een richtlijn voor het toepassen van drainagetechnieken als versterkingsmaatregel. In het document worden daartoe de stappen om te komen tot een doeltreffend ontwerp van het systeem en de realisatie van de versterkingsmaatregel behandeld.

Deze richtlijn geeft tevens handvatten voor het beoordelen en ontwerpen van drainagetechnieken in waterkeringen passend binnen de landelijk geldende beoordelings- en ontwerp-kaders. De OBR-drainagetechnieken richt zich op drainagetechnieken met als doel het

verbeteren van de faalmechanismen piping, macrostabiliteit en microstabiliteit van een waterkering.

## 1.3 Relatie met andere leidraden en documentatie

### 1.3.1 Samenhang met de PPD

De OBR voor drainagetechnieken sluit aan op de PPD. De OBR geeft een nadere uitwerking voor het ontwerpen en beoordelen van drainagetechnieken.

De PPD is opgesteld om drainagetechnieken makkelijker en veiliger toe te passen als dijkversterkingsmaatregel. In dat rapport is ingegaan op ontwerpkeuzes die ten grondslag liggen aan een drainagesysteem. De PPD beschrijft op hoofdlijnen het ontwerpen en beoordelen van drainageconstructies.

In de PPD is reeds aangegeven dat een OBR wordt opgesteld. Deze OBR is een aanvulling op de PPD en gaat in op de nadere dimensionering en beoordeling van verschillende typen drainagesystemen. Er is reeds een concept OBR voor het DMC-systeem. Deze is in 2020 in concept opgesteld (BZ Ingenieurs & Managers, 2017) maar niet definitief gemaakt en heeft geen formele status. Voorliggend OBR vervangt de OBR-DMC en gaat ook in op drainagetechnieken die bestaan uit verticale bronnen, horizontale drains en grindkoffers.

### 1.3.2 Positie POV-publicaties ten opzichte van WBI-2017 en overige leidraden en documentatie

Binnen de POV-Piping en de POV-Macrostabiliteit zijn verschillende POV Publicaties geschreven. Deze publicaties sluiten aan bij de rapporten en leidraden van het Wettelijk Beoordelings-instrumentarium (WBI2017).

De hoofdlijnen en definities voor waterveiligheid staan beschreven in de “Grondslagen voor hoogwaterbescherming” (ENW, 2016). Voor het beoordelen (voorheen toetsen genoemd) is een wettelijk beoordelingsinstrumentarium (WBI2017) beschikbaar. Voor het ontwerpen van een versterkingsmaatregel geldt dat het waterschap de randvoorwaarden vaststelt. De ontwerprandvoorwaarden bestaan onder andere uit het OI2014. In het project BOI2023 wordt dit ontwerp instrumentarium nader ingevuld en komt beschikbaar via de helpdeskwater ([www.helpdeskwater.nl](http://www.helpdeskwater.nl)).

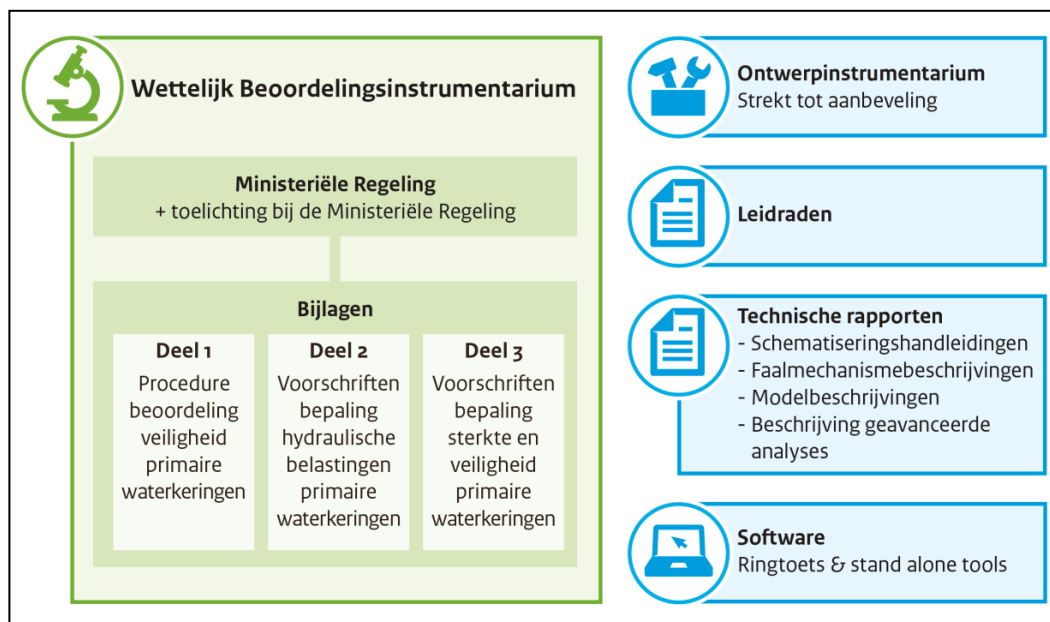
### 1.3.3 Beoordelen

Het WBI 2017 voor de beoordelingsronde 2017-2023 bestaat uit de ministeriële regeling en drie bijlagen. De drie bijlagen zijn verder aangeduid als:

- WBI 2017 Bijlage I Procedure.
- WBI 2017 Bijlage II Hydraulische belastingen.

- WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid.

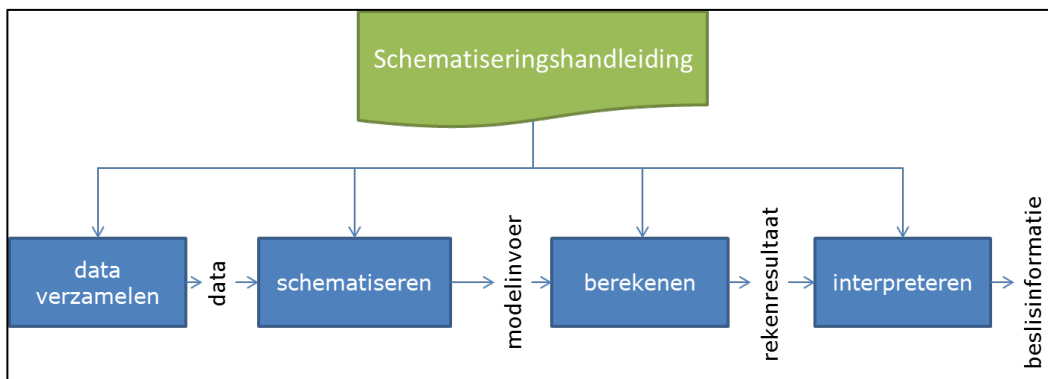
Het WBI bevat de voorschriften voor het uitvoeren van de beoordeling. Een overzicht van de structuur van het WBI en de daaraan gerelateerde documenten staat vermeld in Figuur 1-1. Het basisrapport bij het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium voor de beoordelingsperiode 2017-2023 (basisrapport WBI 2017 versie 1.1) beschrijft de inhoudelijke uitgangspunten bij het beoordelingsinstrumentarium.



Figuur 1-1: Het WBI 2017 en daaraan gerelateerde documenten (POV Macrostabiliteit en POV Piping, 2018)

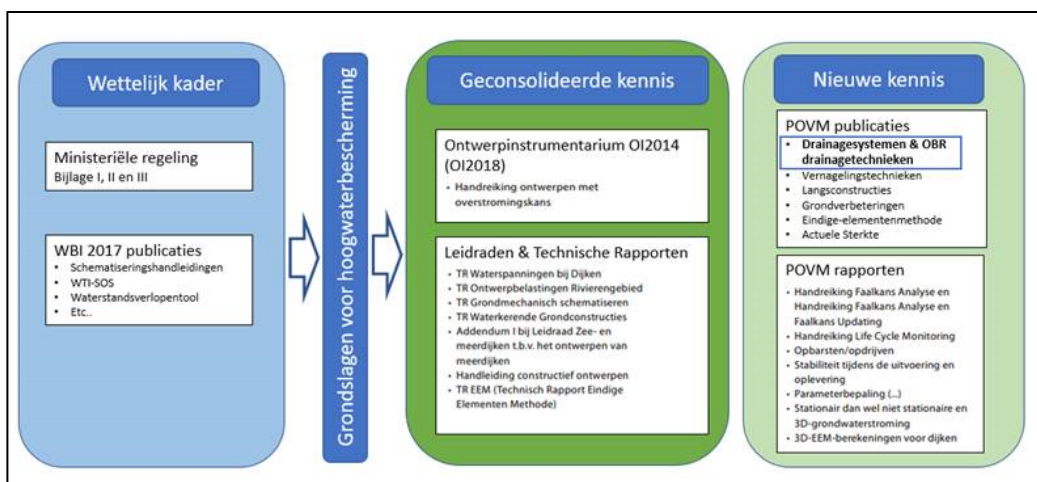
Voor de faalmechanismen en faalkansen staan onder andere definities en eenvoudige toetsregels in 'Bijlage III' van de ministeriële regeling.

Voor elk faalmechanisme is via de helpdesk water ([www.helpdeskwater.nl](http://www.helpdeskwater.nl)) een WBI schematiseringshandleiding beschikbaar. Deze schematiseringshandleidingen geven aanwijzingen voor het beoordelen van een dijk zonder stabiliteit verhogende constructieve elementen (een 'groene dijk'). Een schematiseringshandleiding beschrijft hoe vanuit data een schematisering wordt gemaakt en hoe er vervolgens met een veiligheidsbenadering een stabiliteitscontrole wordt uitgevoerd, zie Figuur 1-2.



Figuur 1-2: Activiteiten zoals beschreven in de schematiseringshandleiding macrostabiliteit (SHM), (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019e)

Een schematiseringshandleiding geeft aanwijzingen voor het type onderzoek en voor de benodigde hoeveelheid om tot een goede schematisering te kunnen komen. Verder ondersteunt de schematiseringshandleiding gebruikers in het omzetten van (veld)gegevens naar de juiste rekenparameters en goede schematiseringen die in de beoordeling kunnen worden toegepast. De wijze waarop gegevens ingewonnen moeten worden (bijvoorbeeld hoe veldonderzoek of laboratoriumonderzoek uitgevoerd wordt) wordt slechts summier behandeld. Hier verwijzen de schematiseringshandleidingen door naar aparte protocollen. De schematiseringshandleidingen zijn specifiek opgesteld voor het beoordelen van primaire waterkeringen en kunnen daarom niet zomaar worden toegepast voor andere doeleinden, zoals regionale keringen, ontwerp, et cetera. Figuur 1-3 toont als voorbeeld hoe de schematiseringshandleiding macrostabiliteit (SHM) samen met ondersteunende software een onderdeel vormt van het WBI en dat de SHM doorverwijst naar verdere leidraden en technische rapporten.



Figuur 1-3: De verwijzingen naar en vanuit de Schematiseringshandleiding Macrostabiliteit als voorbeeld voor de samenhang tussen het WBI, de overige (ontwerp)literatuur en de POV-P- en POV-M-publicaties.

Bovenstaande figuur geeft aan hoe de OBR en de PPD samenhangen met het WBI2017. Daarmee kan de OBR ook worden toegepast bij het uitvoeren van een Toets op Maat binnen het WBI2017 bij bestaande drainages.

### 1.3.4 Ontwerpen

Met de leidraden van het WBI2017 is de informatie beschikbaar om een dijk te beoordelen. Voor ontwerpen voor constructies in dijken zijn ook andere leidraden benodigd. Er zijn diverse rapporten die reeds geschreven zijn voor het ontwerpen van dijken, bijvoorbeeld het ontwerpen van rivierdijken of meerdijken. Tevens zijn er diverse deelrapporten over faalmechanismen of andere, voor de dijken, relevante onderwerpen. Deze rapporten zijn gescreend op vigerendheid en de vigerende delen van de rapporten zijn te vinden op:

<https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/technische-leidraden>.

De oorspronkelijke versies van de technische leidraden zijn te vinden op de Kennisbank waterbouw van de TU Delft (<https://kennisbank-waterbouw.nl/dicea/TAW-ENW.htm>).

Het meest complete overzicht van alle ontwerp literatuur is te vinden in de Catalogus Ontwerpinstrumenten Waterkeringen uit 2019. Deze ontwerp catalogus is te vinden op: <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/ontwerpen/@212306/catalogus-ontwerpinstrumenten-waterkeringen/>

Vanuit de geohydrologie wordt Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken geraadpleegd. Aanvullend is het grondwaterzakboekje (Gwz) geraadpleegd. Het Gwz is een compendium voor de praktijk op het gebied van grondwater. Daarnaast is het Cultuur Technisch Vademecum een belangrijke bron met een verzameling aan kennis betreffende de inrichting van het landelijke gebied, ook wat betreft hydrologische modellen. Tevens biedt het document KWR Putten praktische achtergrondkennis over putten en puttenvelden voor de winning van water.

Deze OBR sluit aan op het OI2014v4. Het ontwerpinstrumentarium (OI2014v4) geeft de kaders voor ontwerpen van een groene dijk op basis van de vigerende overstromingskans uit de Waterwet. Het OI is nog in ontwikkeling en dus nog niet volledig. In het project BOI2023 wordt dit ontwerp instrumentarium nader ingevuld en komt beschikbaar via de helpdeskwater ([www.helpdeskwater.nl](http://www.helpdeskwater.nl)). Het ontwerpinstrumentarium is een handreiking die strekt tot aanbevelingen bij het ontwerpen van een kering conform de overstromingskansbenadering.

Binnen de POV- Piping en de POV-Macrostabiteit zijn diverse publicaties opgesteld waaronder de PPD en de voorliggende OBR-Drainagetechnieken. Beide publicaties zijn voorgelegd aan het ENW. De publicaties zijn beschikbaar via de website van de POV-Piping ([www.pov-piping.nl](http://www.pov-piping.nl)) en de POV-Macrostabiteit ([www.POVM.nl](http://www.POVM.nl)).



### 1.3.5 Overig

Bovenstaande documentatie zijn de voornaamste kaders waarin deze OBR is ingepast. Daarnaast zijn er nog tal van meer specialistische leidraden en richtlijnen. De OBR bouwt voort op en verwijst naar de van toepassing zijnde vigerende Technische Richtlijnen (TR).

## 1.4 Leeswijzer

De hoofdstukken 2 en 3 vormen een algemeen deel. In hoofdstuk 2 is een korte omschrijving gegeven van de verschillende onderdelen van drainagetechnieken en faalmechanismen die door toepassing van drainage beheersbaar worden. Hoofdstuk 3 gaat in op de (geotechnische en geohydrologische) systeemanalyse.

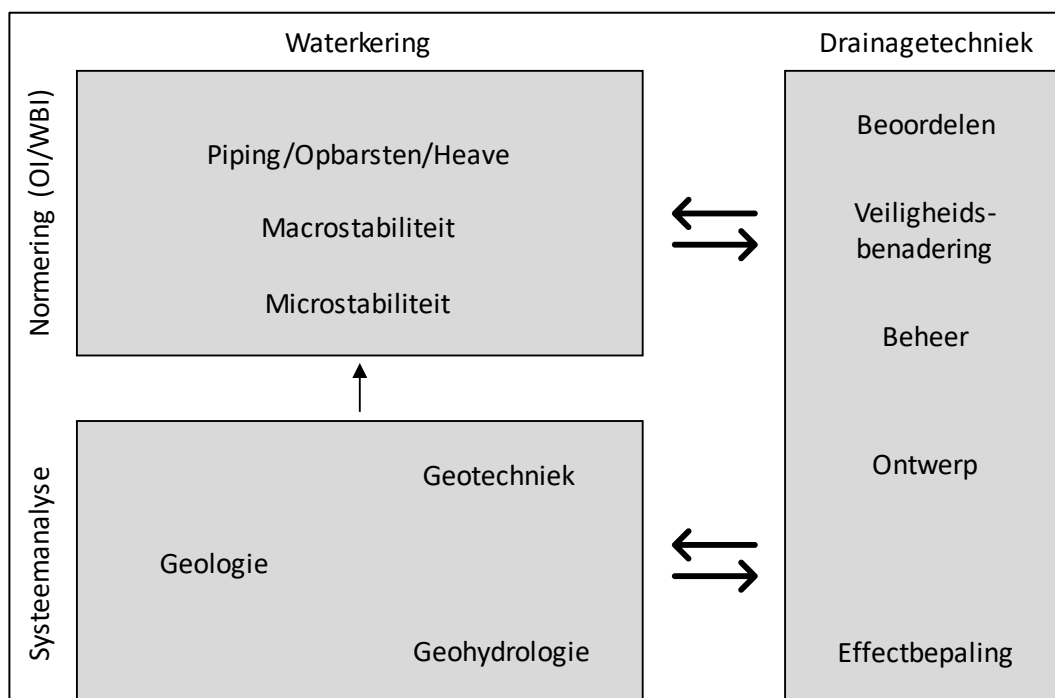
De hoofdstukken 4 t/m 7 vormen een het technische deel ten behoeve van ontwerpen. In hoofdstuk 4 is de veiligheidsbenadering van drainagetechnieken gegeven. Hoofdstuk 5 gaat in op het ontwerpen van drainagetechnieken. De omgevingsaspecten worden behandeld in hoofdstuk 6. Hoofdstuk 7 gaat in op de uitvoeringsaspecten.

De hoofdstukken 8 en 9 betreffen de beheercyclus. Hoofdstuk 8 gaat over het beheer en onderhoud van drainagetechnieken. Handvatten voor de wettelijke beoordeling worden in hoofdstuk 9 behandeld. In het laatste hoofdstuk (hoofdstuk 10) is een casus opgenomen voor een versterking waarbij een drainagetechniek is vergeleken met twee andere versterkingsopties op LCC-basis.

## 2 Systeemeigenschappen drainagetechnieken in waterkering

### 2.1 Rijnaald binnen de OBR

Drainagetechnieken hebben als doel het beheersen van de grondwaterstand. Waterkeringen hebben als doel het bieden van (hoog)waterveiligheid. Drainagetechnieken in waterkeringen hebben als doel het beheersen van de grondwaterstand om (extra) hoogwaterveiligheid te bieden. Deze OBR-Drainagetechnieken zit dan ook op het snijvlak van meerdere systemen. Dit zijn het systeem van de waterkering (systeemanalyse en normering) en het systeem van een drainagetechniek (o.a. beheer en ontwerp). Dit is weergegeven in Figuur 2-1. Beide systemen raken elkaar en bestaan elk uit meerdere onderdelen die samen het totaal vormen.



Figuur 2-1: Systeem van een drainagetechniek als dijkversterkingsmaatregel, interactie tussen normering van waterkeringen, de systeemanalyse en de drainagetechniek zelf.

#### Systeem: waterkering - normering

De normering van een waterkering is beschreven in de waterwet. Een uitwerking daarvan is gegeven in het WBI2017 en OI2014v4. Hoofdpijnen van deze normering zijn beschreven in hoofdstuk 1. Deze normen geven handvatten voor de beoordeling en ontwerp van een dijk. Een dijk wordt beoordeeld door te kijken naar faalmechanismen van dijken. Er bestaan een groot aantal mogelijke faalmechanismen (>20 faalmechanismen). In dit document is de focus gelegd op de volgende faalmechanismen:

- Piping.  
Dit mechanisme is op hoofdlijnen beschreven in paragraaf 2.2.1.
- Macrostabieliteit.  
Dit mechanisme is op hoofdlijnen beschreven in paragraaf 2.2.2.
- Microstabieliteit.  
Dit mechanisme is op hoofdlijnen beschreven in paragraaf 2.2.3

#### **Systeem: waterkering - systeemanalyse**

De werking van faalmechanismen wordt bepaald door de eigenschappen van een dijk. Voor de genoemde faalmechanismen zijn geotechnische, geologische en geohydrologische systeemeigenschappen dominant. Deze eigenschappen worden onderzocht in een systeemanalyse. Deze is beschreven in hoofdstuk 3.

#### **Systeem: Drainagetechnieken**

Drainagetechnieken bestaan uit meerdere onderdelen. Deze zijn benoemd in Figuur 2-1. Deze onderdelen raken aan het systeem van de waterkering. In deze OBR-Drainagetechnieken is gezocht naar een combinatie van best-practices rondom drainagetechnieken zodat die aansluiten bij de systeemanalyse van een waterkering. Daarnaast is invulling gegeven aan een theoretische benadering zodat drainagetechnieken aansluiten aan de normering van een waterkering.

De werkwijze rondom een drainagetechniek bestaat uit de volgende hoofdonderdelen:

- Ontwerp.  
Deze OBR-drainagetechnieken richt zich op drie hoofd-technieken (verticale bronnen, horizontale drains en grindkoffers), deze zijn beschreven in paragraaf 2.3. Het ontwerp per hoofd-techniek is beschreven in hoofdstuk 5. Andere ontwerp uitdagingen zoals omgeving en uitvoering zijn beschreven in respectievelijk hoofdstuk 6 en 7.
- Effectbepaling.  
Het doel van een drainagetechniek betreft het verlagen van de grondwaterstand. Dit raakt aan het geohydrologische systeem. Effectbepaling is een samenhang tussen het geohydrologische systeem (hoofdstuk 3) en het ontwerp (hoofdstuk 5).
- Beheer.  
Drainagetechnieken dienen beheerd en onderhouden te worden. Beheer en onderhoud is beschreven in hoofdstuk 8.
- Veiligheidsbenadering.  
Samen met beheer en onderhoud zorgt een drainagetechniek voor een effect op de sterkte van en/of belasting op de waterkering. De grootte van het effect is afhankelijk van de wijze van effectbepaling voor de diverse faalmechanismen en de daarin gehanteerde veiligheid. De wijze van effectbepaling is vastgelegd in een veiligheidsbenadering, deze is beschreven in hoofdstuk 4.
- Beoordeling.  
Binnen het WBI dienen waterkeringen beoordeeld te worden. Dit bouwt voort op de eerdergenoemde onderwerpen (ontwerp, effectbepaling, beheer en veiligheidsbenadering). Handvatten voor de beoordeling zijn gegeven in hoofdstuk 9.

## 2.2 Impact drainagetechnieken op faalmechanismen

### 2.2.1 Piping

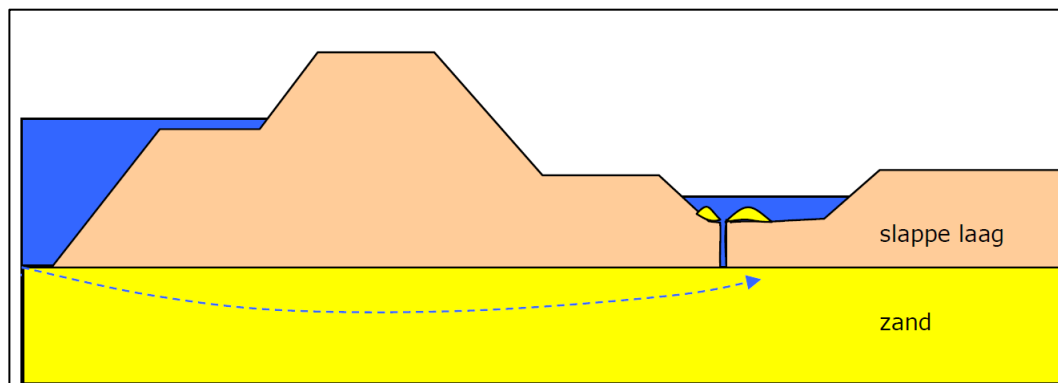
Piping kan voorkomen bij dijken waar een doorlopende deklaag aanwezig is. Piping ontwikkelt zich in drie stadia:

1. Opbarsten.
2. Heave.
3. Terugschrijdende erosie.

Deze mechanismen worden aangedreven door de stijghoogte die in de ondergrond optreedt, welke wordt beïnvloed door het niveau van het buitenwater. In Figuur 2-2 is opbarsten van een (slappe) afdekkende laag weergegeven waardoor een opening/scheur ontstaat. Wanneer zanddeeltjes meespoelen, is sprake van heave. Wanneer zanddeeltjes dermate meespoelen dat er een horizontaal kanaal richting het buitenwater ontstaat, dan is sprake van terugschrijdende erosie.

Dit faalmechanisme is o.a. beschreven in:

- Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017: Bijlage III Sterkte en veiligheid (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019c).
- Schematiseringshandleiding piping: (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019d). Technische handvatten zijn ook gegeven in Technisch rapport waterspanningen bij dijken (TAW, 2004) en Technisch rapport waterkerende grondconstructies (TAW, 2001).
- PPD; paragraaf 3.2.3; (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018).



Figuur 2-2: Opbarsten van de slappe afdekkende laag onder de sloot, (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019d)

Het doel is om een veilige waterkering te borgen. Een drainagetechniek kan hierbij een versterkingstechniek zijn. De veiligheid op het mechanisme piping wordt geborgd door het risico op opbarsten, heave, en/of terugschrijdende erosie te verminderen. Dit wordt gedaan door de stijghoogte in de watervoerende laag te verlagen door middel van een drainagetechniek.

Inzet specifiek op het faalmechanisme opbarsten wordt bereikt door de stijghoogte (ruim) onder de opbarstpotentiaal van de (slappe) afdekkende laag te verlagen. Inzet specifiek op het faalmechanisme heave wordt bereikt door het verschil tussen de stijghoogte en het niveau van het uittredepunt te reduceren zodat dit geringer is dan het kritische heave gradiënt. Inzet specifiek op het faalmechanisme terugschrijdende erosie wordt bereikt door het verhang in het grondwater richting het uittredepunt zo ver te reduceren dat dit kleiner is dan het kritische verhang.

De fysica van Heave in het kader van piping is echter niet volledig uitgekristalliseerd<sup>1</sup>. In de PPD is in paragraaf 3.2.3 het toe passen van drainagetechnieken specifiek gericht op het faalmechanisme terugschrijdende erosie beschreven als mogelijkheid voor in de toekomst. Deze OBR richt zich daarom hoofdzakelijk op opbarsten en in mindere mate op heave en terugschrijdende erosie.

### 2.2.2 Macrostabiliteit

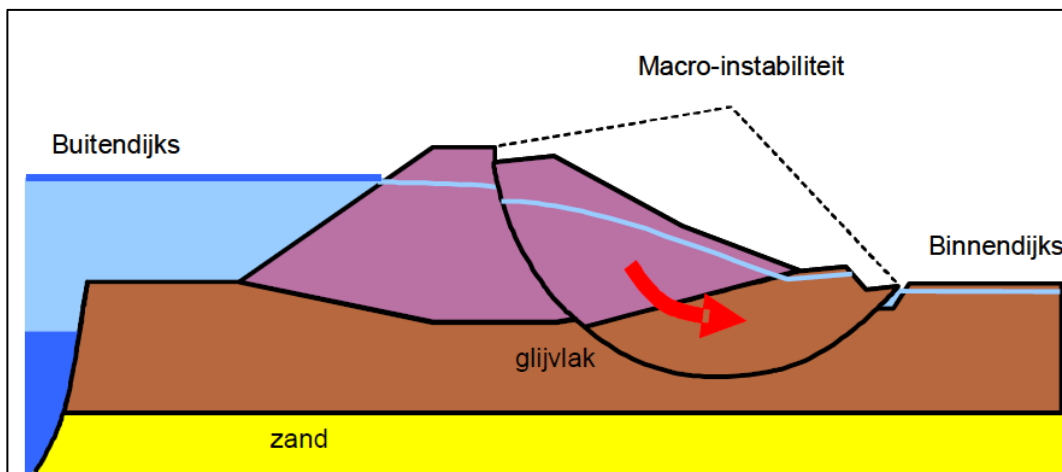
Bij macro-instabiliteit verliest de kering de waterkerende functie door het afschuiven van het talud. Dit kan zowel aan de binnenwaartse zijde voorkomen als buitenwaarts. Macro-instabiliteit binnenwaarts wordt veroorzaakt door het evenwichtsverlies langs een glijvlak, Figuur 2-3 geeft dit weer.

Dit faalmechanisme is beschreven in:

- Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017: Bijlage III Sterkte en veiligheid, (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019c).
- Schematiseringshandleiding macrostabiliteit: WBI 2017, (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019e). Technische handvatten zijn ook gegeven in Technisch rapport waterspanningen bij dijken (TAW, 2004) en Technisch rapport waterkerende grondconstructies (TAW, 2001).
- PPD; paragraaf 3.2.2, (POV Macrostabiliteit en POV Piping, 2018).

---

<sup>1</sup> De fysica van heave is onder andere beschreven in (Deltares, 2012) paragraaf 5.4. De fysica wordt deels beschreven met een model ontwikkeld door A. Bezuijnen. Dit model is echter nog onvolledig en onvoldoende gevalideerd. Het model is beschreven in (Deltares, 2018).



Figuur 2-3: Falen conform macro-instabiliteit, (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019e)

Het doel is om een veilige waterkering te borgen. Een drainagetechniek kan ook bij macrostabiliteit een versterkingstechniek zijn. Een drainagetechniek verhoogt de stabiliteit voor het faalmechanisme macrostabiliteit op twee mogelijke manieren:

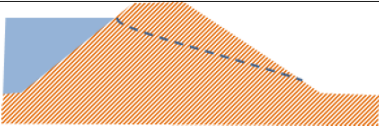
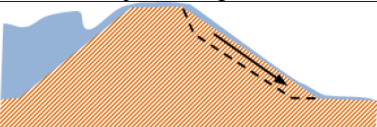
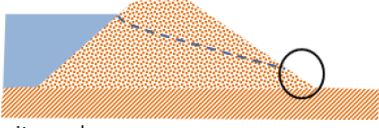
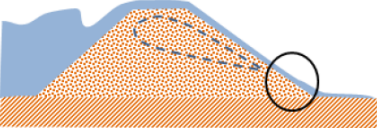
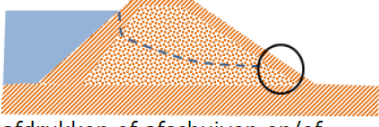
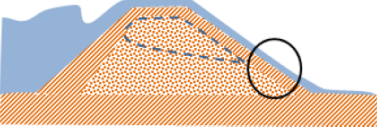
1. Verlagen van het niveau van het freatisch grondwater in de kern van de dijk.  
Door het freatisch niveau van het grondwater te verlagen, wordt de effectieve spanning in de dijk verhoogd, waardoor afschuiving wordt voorkomen.
2. Verlagen van de stijghoogte onder de deklaag.  
Door de stijghoogte te verlagen, wordt de effectieve spanning verhoogd op het grensvlak tussen de watervoerende laag en de cohesieve laag, waardoor de schuifsterkte toeneemt en de weerstand wordt verhoogd tegen afschuiving. Deze manier is extra effectief wanneer er risico op opbarsten of opdrijven van de deklaag is, indien wordt verlaagd tot onder de opbarstpotentiaal.

### 2.2.3 Microstabiliteit

Microstabiliteit is het verlies van de interne stabiliteit ter hoogte van de teen in het binnentalud. Dit is een samenspel tussen het materiaal en opbouw van de kering en de grondwaterstanden. In Figuur 2-4 is dit weergegeven.

Het faalmechanisme micro(in)stabiliteit is beschreven in:

- Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017: Bijlage III Sterkte en veiligheid, (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019c).
- Schematiseringshandleiding microstabiliteit: WBI 2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019). Technische handvatten zijn ook gegeven in Technisch rapport waterspanningen bij dijken (TAW, 2004) en Technisch rapport waterkerende grondconstructies (TAW, 2001).
- PPD; paragraaf 3.2.4 (POV Macrostabiliteit en POV Piping, 2018).

Type dijk	microstabiliteit	stabiliteit bij overslag
kleidijk	 <b>geen probleem</b>	 infiltratie en afschuiven
zanddijk	 uitspoelen	 infiltratie en uitspoelen
zanddijk met kleibekleding	 afdrukken of afschuiven en/of uitspoelen	 infiltratie en afdrukken of afschuiven en/of uitspoelen

Figuur 2-4: Schematische weergave verschillen en overeenkomsten microstabiliteit en stabiliteit van de bekleding bij golfoverslag, (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019)

De schematiseringshandleiding microstabiliteit stelt (in paragraaf 1.1) dat bij noemenswaardige golfoverslag microstabiliteit (STMI) wordt overschaduwd door het toetsspoor grasbekleding afschuiven binnentalud (GABI), dit moet dan worden gecontroleerd. Dan kan de verdere controle op STMI achterwege blijven. Voor beide toetssporen worden namelijk dezelfde modellen gebruikt.

Het doel is om een veilige waterkering te borgen. Een drainagetechniek kan ook bij microstabiliteit een versterkingstechniek zijn. Een drainagetechniek verhoogt de stabiliteit voor het faalmechanisme microstabiliteit op de volgende manier:

1. Verlagen van het niveau van het freatische grondwater in de kern van de dijk en ter hoogte van het binnentalud.  
 Door het freatische niveau te verlagen, wordt de kweldruk van het water op het binnentalud verlaagd. Daardoor wordt afschuiven van kleilagen op het talud voorkomen. Daarnaast wordt uittredend grondwater voorkomen, waardoor het uitspoelen van zanddelen uit te sluiten is. Er zijn hiervoor reeds handvatten gegeven in TRWD (TAW, 2004) bijlage 1.

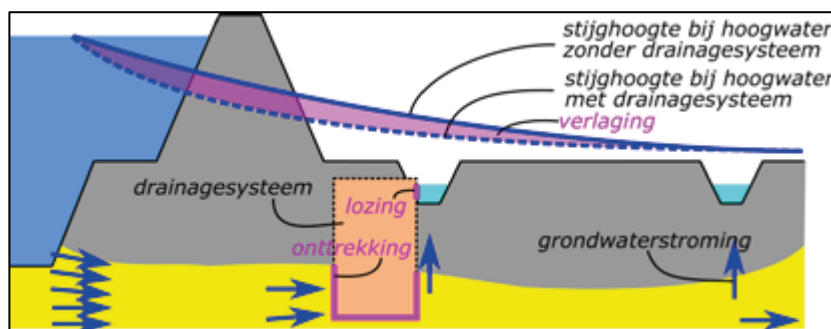
## 2.3 Drainagesystemen

### 2.3.1 Algemeen

Een beschrijving van drainagetechnieken is gegeven in hoofdstuk 2 van de PPD (POV Macrostabiliteit en POV Piping, 2018). Deze paragraaf en de volgende geven van deze technieken een herhaling op hoofdlijnen.

Figuur 2-5 geeft een schematische weergave van een dijk met een willekeurig type drainagesysteem in de watervoerende laag voor een situatie met hoogwater. De twee paarse lijnen geven de directe invloed weer tussen het drainagesysteem en de omgeving, in de volgende compartimenten:

- De grondwaterhuishouding via een onttrekking in de watervoerende laag/ freatisch grondwater.
- Het hydrologische systeem via een lozing op het (binnendijkse) oppervlaktewater.



Figuur 2-5: Schematische doorsnede drainagesysteem tijdens hoogwater. Locatie drainagesysteem in watervoerende laag.

### Type drainagetechnieken

In Nederland zijn reeds diverse drainagetechnieken toegepast. Ervaringen daarvan zijn beschreven in de PPD en (Witteveen+Bos, 2017). Internationaal zijn ook systemen beschreven, dit betreft onder andere (USACE, 1992), of (FEMA, 2011). In deze OBR zijn drie hoofdtypen beschouwd:

- Verticale bronnen.
- Horizontale drains.
- Grindkoffers.

Daarbinnen is nog een verder onderscheid te maken. Dit betreft:

- Passieve systemen.
- Actieve systemen.

Indien de waterdruk in de drainagetechniek lager is dan in de omgeving, dan zal water uit een watervoerende laag naar de drainagetechniek stromen. Wanneer dit onder vrij verval gebeurt, wordt dit een passief systeem genoemd. Een actief systeem bevat een pomp die grondwater uit het watervoerende pakket onttrekt.

### Neveneffecten van drainagetechnieken

Relevante (neven) processen op dat vlak die tijdens het ontwerp in ieder geval moeten worden beschouwd:

- Door de lagere stijghoogte is een lagere kweldruk aanwezig in het achterland. Dit kan grondwateroverlast tijdens hoogwater beperken of voorkomen. Uit de beoordeling van de regionale waterbalans volgt dat er een netto toename is van het waterbezwaar op het binnendijkse gebied.



- De grondwaterkwaliteit kan wijzigen, bijvoorbeeld doordat verontreinigingen zich anders gaan verplaatsen of door wijzigingen van de chlorideconcentratie.
- De grondwaterstand kan wijzigen, waardoor nagegaan moet worden of gevolgschade in de omgeving kan ontstaan, bijvoorbeeld zettingen of gewasschade. Hierbij is ook aandacht nodig voor verlagingen van het grondwater in afgesloten zandlagen die door het drainagesysteem worden ontlast.

### Drainagetechniek decompositie

Drainagetechnieken bestaat uit de volgende onderdelen:

1. Drainagetechniek & omstorting

De drainagetechniek heeft een deel dat het (grond)water ontvangt (drain, verticaal filter, e.d.). Deze is zo ontworpen dat de juiste hoeveelheid water op de juiste plek wordt onttrokken. Het onttrekken van water geeft risico dat gronddeeltjes worden mee gespoeld. Daartoe wordt het onttrekkingsmiddel zo ontworpen of voorzien van een omstorting/ omhulling dat dit wordt voorkomen. Een variant hiervan is een grindkoffer, deze bestaat uit vooral het omstortingsmateriaal die zo wordt ingericht dat dit grond dicht is.

Belangrijke ontwerpparameters zijn: afmetingen, diameters, h.o.h.-afstanden en de eigenschappen van de omstorting.

2. Verzamelsysteem, uitstroomniveau, beheer & lozingspunt

Het onttrokken grondwater wordt afgevoerd (via een verzamelput) naar een lozingspunt. Voorbeelden zijn een leidingennet die het water afvoert richting een verzamelput en daarna naar een lozingspunt in een goed gedimensioneerd ontvangend open water/watergang binnendijks. Of een leidingennet die het water afvoert richting een pomp en daarna naar een lozingspunt buitendijks. In dit stelsel is het mogelijk om verschillende uitstroomniveaus aan te leggen. Variant hiervan is dat de drainagetechniek en de watergang een geheel zijn. Dit komt voor bij grindkoffers die op de bodem van een waterpartij zijn gesitueerd.

De drainagetechniek en dit afvoersysteem moeten worden beheerd. Daarvoor moeten diverse objecten worden aangelegd. Voorbeelden zijn doorspuitpunten en robuuste eindbuizen die zichtbaar zijn.

3. Besturing - optioneel

De afvoer uit de drainagetechniek kan worden gestuurd. Bijvoorbeeld middels een regelbare stuw of een pompsysteem waarbij de inzet en verlaging regelbaar is.

4. Monitoring - optioneel

Rondom drainagetechnieken kunnen parameters worden gemonitord. Geadviseerd wordt om dit uit te voeren om de werking van een drainagesysteem te controleren.

Gedacht kan worden aan de grondwaterstand, grondwaterkwaliteit, debieten of verstoppingen rondom de drainagetechniek. Dit kan gebruikt worden in de beoordeling van de systemen of in de optimalisatie van het beheer. Eventueel wordt op basis van data geïnformeerd (alarmeringssysteem) of bijgestuurd (besturingssysteem).

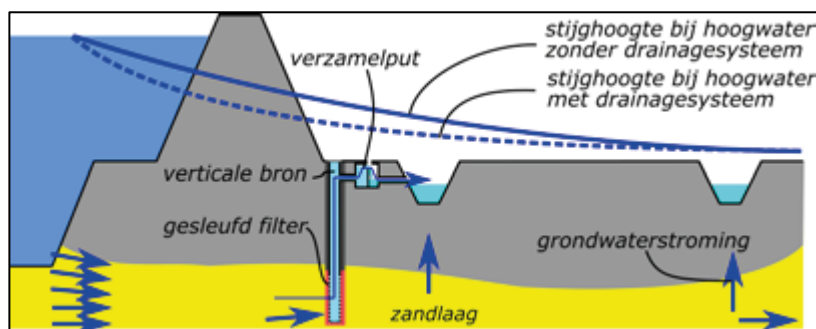
## 2.3.2 Verticale bronnen

### Systeemeigenschappen

Drainagetechnieken met verticale bronnen zijn reeds beschreven in de PPD (POV Macrostabiteit en POV Piping, 2018) paragraaf 2.3.1.

Onttrekking van grondwater uit een verticale bron is een veelgebruikte methode om de waterdruk in een zandlaag te verlagen. Dit kan met zowel een passief systeem als een actief systeem.

In Figuur 2-6 is een schematische doorsnede van een verticale bron weergegeven. Figuur 2-7 geeft een beeld van een systeem met een verticale bron zoals die buiten aanwezig is. De voornaamste eigenschappen van het systeem zijn gegeven in Tabel 2-1.



Figuur 2-6: Schematische doorsnede verticale bron en verzamelput tijdens hoogwater (bron: (POV Macrostabiteit en POV Piping, 2018)).



Figuur 2-7: Links, installatie van verticale bron. Rechts, ontlastbron in Opijnen, (Witteveen+Bos, 2017)

In Tabel 2-1 zijn de voornaamste eigenschappen van verticale bronnen gegeven. Hier zijn deze onderdelen ook gescoord. Daarbij is aangehouden dat een dijkversterking met een steunberm

neutraal scoort op kosten en met een damwand als negatief. Vaak is een drainagetechniek goedkoper in de aanleg dan een damwand, maar is de inspanning qua beheer groter dan bij een damwand. Bij de beheersinspanning is gelet op de beheerskosten op LCC-basis. Als deze gelijk zijn aan 10% van de LCC kosten van een damwand (zie casus in hoofdstuk 10), dan is aangehouden dat de beheersinspanning neutraal is. Als deze lager zijn dan 5% van de initiële kosten van een damwand, dan is aangehouden dat de beheersinspanning positief is.

De aanlegkosten en beheerskosten variëren per aanlegvariant. Enkele kentallen zijn als volgt:

- Aanlegkosten ca. €500/m (Witteveen+Bos, 2017) par. 3.3.7 en 4.3.3.
- Onderhoudskosten: ca. € 8,-/m/jaar (Witteveen+Bos, 2017) par. 4.3.3.

Tabel 2-1: Voornaamste eigenschappen van verticale bronnen.

Onderdeel	Score	Toelichting
Voornaamste toepassingsgebied <sup>[1]</sup>	n.v.t.	Watervoerende lagen dieper dan 3 m-mv. Eventueel uitvoerbaar tussen bebouwing en andere objecten.
Ervaring	+	Diverse ervaringen binnen de dijkenwereld van Nederland op kleine schaal. Daarbuiten op grote schaal.
Kosten	0	Kosten zijn iets hoger dan aanbermen. Meerwaarde zit in locatie specifieke situaties.
Beheers-inspanning	+	Verticale bronnen vragen onderhoud. Dit betreft de bronnen en de verzamelleidingen.
Risico's	- tot 0	Disfunctie van het afvoersysteem is het voornaamste risico. Dit wordt afgevangen met passend beheer.
Uitbreidbaarheid	0 tot +	Verticale bronnen kunnen relatief eenvoudig bijgeplaatst worden. Wel is aandacht voor de aansluiting op de rest van het (afvoer)systeem vereist.

<sup>[1]</sup> Er bestaan meerdere ontwerpen van drainagesystemen met verticale bronnen. De waterontspanner bij Schoonhovense Veer-Langerak heeft een watervoerende laag die ligt op ca. 8 m-mv en filters van de bronnen tot ca. 10 m-mv (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018). Het ontlaststelsel bij Opijnen heeft een watervoerende laag die ligt op 3 tot 6 m-mv en filters van de bronnen tot ca. 10 m-mv (Witteveen+Bos, 2017).

#### Ervaringen met de techniek – verticale bronnen

Deze techniek wordt toegepast binnen waterkeringen en buiten waterkeringen. Een verkenning op hoofdlijnen is weergegeven in (Witteveen+Bos, 2017), daarnaast heeft het HWBP een inventarisatie gemaakt in het kader van deze OBR-drainagetechnieken<sup>2</sup>.

Ten behoeve van waterkeringen in Nederland (niet limiterende opsomming):

- Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden: ca. 1 km (Jaarsveld)
- Waterschap Rivierenland: ca. 5 km. (Opijnen en Schoonhoven-Langerak)

Doeleinden buiten waterkeringen in Nederland (niet limiterende opsomming):

- Ten behoeve van de drinkwaterwinning (>> 100 bronnen).  
Zie o.a. (KWR, 2011).

<sup>2</sup> Bron: <https://www.hwbp.nl/innoveren/innovatieprojecten/obr-drainagetechnieken>.

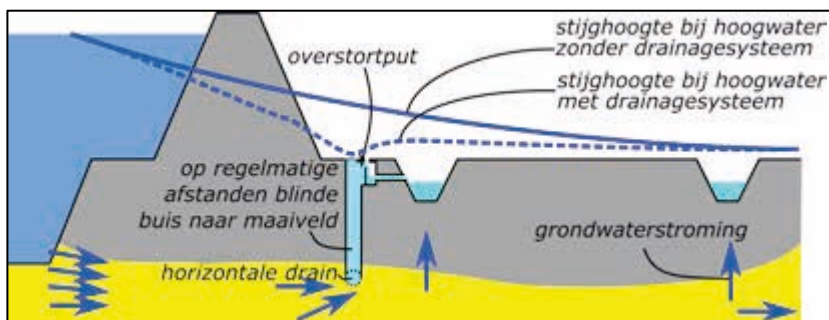
- Ten behoeve van de ontwatering van bouwputten (>> 100.000 projecten).  
Zie o.a. (Bot, 2016).

### 2.3.3 Horizontale drains

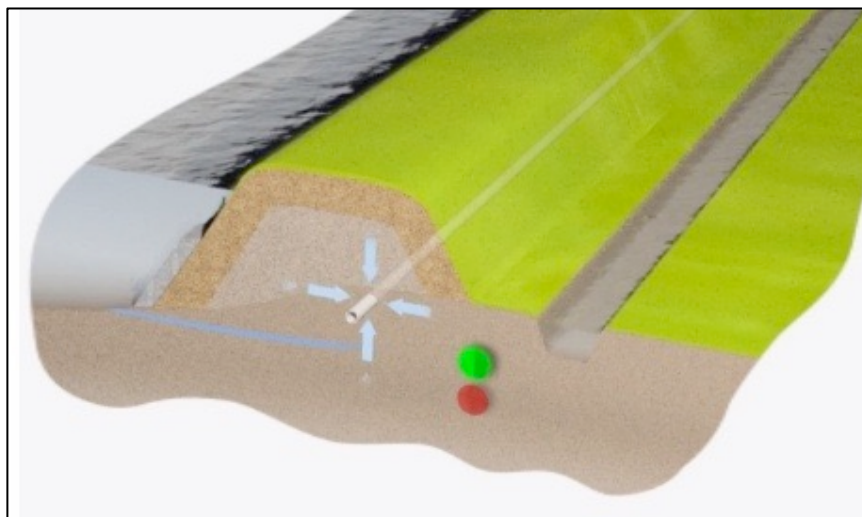
#### Systemeigenschappen

Horizontale drains zijn reeds beschreven in de PPD (POV Macrostabieleit en POV Piping, 2018) paragraaf 2.3.2.

Bij horizontale drains wordt water opgevangen en afgevoerd door een horizontale filterbuis. Dit gebeurt onder vrij verval of geforceerd met behulp van een afvoerpomp. In Figuur 2-8 is een schematische doorsnede van horizontale drains en verzamelput weergegeven. In Figuur 2-9 is het meer specifieke DMC-systeem weergegeven. De voornaamste eigenschappen van het systeem zijn gegeven in Tabel 2-2.



Figuur 2-8: Schematische doorsnede horizontale drains en verzamelput tijdens hoogwater, weergegeven in het watervoerende pakket (Bron: (POV Macrostabieleit en POV Piping, 2018)).



Figuur 2-9: Horizontale drainage met een DMC-systeem, weergegeven in het dijklichaam (DMC-System, 2020)

In Tabel 2-2 zijn de voornaamste eigenschappen van horizontale drains gegeven. Hier zijn deze onderdelen ook gescoord. Daarbij is aangehouden dat een dijkversterking met een steunberm neutraal scoort op kosten en met een damwand als negatief. Vaak is een drainagetechniek goedkoper in de aanleg dan een damwand, maar is de inspanning qua beheer groter dan bij een damwand. Bij de beheersinspanning is gelet op de beheerskosten op LCC-basis. Als deze gelijk zijn aan 10% van de LCC kosten van een damwand (zie casus in hoofdstuk 10), dan is aangehouden dat de beheersinspanning neutraal is. Als deze lager zijn dan 5% van de initiële kosten van een damwand, dan is aangehouden dat de beheersinspanning positief is.

De aanlegkosten variëren per aanlegvariant. Enkele kentallen zijn als volgt:

- Akkerbouw: €1,25/m (Kooistra, 2014), blz. 83.
- Drainage inclusief sleufvulling met zand. €15 à 20/m (kental deskundigenteam).
- DMC-systeem: €2.500/m (Witteveen+Bos, 2017), blz. 25.

De beheer en onderhoudskosten variëren ook per aanlegvariant. Enkele kentallen zijn als volgt:

- Akkerbouw: €0,10 à 0,30/m (Kooistra, 2014), blz. 84.
- Drainage in de berm van dijk: € 0,50/m (zie toelichting<sup>3</sup>).
- DMC-systeem: €7,5/m, (Witteveen+Bos, 2017) blz. 24.

Tabel 2-2: Voornaamste eigenschappen van horizontale drains.

Onderdeel	Score	Toelichting
Voornaamste toepassingsgebied <sup>[1]</sup>	n.v.t.	Lagen ondieper dan 8 m-mv.
Ervaring	++	Zeer uitgebreide ervaringen bij akkerbouw sector en bij enkele waterschappen.
Kosten	-- tot ++	Afhankelijk van de aanlegwijze en ontwerp.
Beheers-inspanning	+ tot ++	Afhankelijk van de aanlegwijze en ontwerp.
Risico's	- tot 0	Verstopping van de drain en falen van het afvoersysteem (bv. door platdrukken van de buis) zijn een voornaam risico. Dit wordt afgevangen met passend beheer. Achterwege blijven van beheer is daardoor een aanvullend risico.
Uitbreidbaarheid	- tot --	Systemen met horizontale drains kunnen moeizaam qua capaciteit/diameter worden aangepast. Wel is het mogelijk om aanvullende drainagebuizen aan te leggen.

<sup>[1]</sup> Er bestaan meerdere ontwerpen van drainagesystemen met horizontale drains. Akkerbouw drainage ligt op een diepte van 0,9 tot 1,2 m-mv conform tabel 22.5 in (Bot, 2016). Het DMC-systeem bij Veessen ligt ter plaatse van het binnentalud op een diepte van 2 à 3 m-mv (Witteveen+Bos, 2017). De maximale diepte is afhankelijk van de uitvoeringstechniek. In paragraaf 5.4 zijn handvatten hiervoor gegeven.

<sup>3</sup> De onderhoudskosten zijn gegeven in (STOWA, 2000) blz. 50. Dit is NLG 0,44 per meter (inclusief AKW&R, exclusief BTW, prijspeil 1996). Dit zijn de onderhoudskosten van Heemraadschap Fleverwaard het huidige Waterschap Zuiderzeeland. Omrekening naar prijspeil 2020 is gedaan op basis van een indexatie van 4% per jaar.

### Ervaringen met de techniek – horizontale drains

Deze techniek wordt toegepast binnen waterkeringen en buiten waterkeringen. Een verkenning op hoofdlijnen is weergegeven in (Witteveen+Bos, 2017) en (STOWA, 2000), daarnaast heeft het HWBP een inventarisatie gemaakt in het kader van deze OBR-Drainagetechnieken<sup>4</sup>

Ten behoeve van waterkeringen (niet limiterende opsomming):

- Waterschap Zuiderzeeland: ca. 240 km drainage.
- Waterschap Noorderzijlvest: ca. 12 km dijk. (o.a. DMC-systeem)
- Waterschap Drents Overijsselse Delta: ca. 12 km dijk.
- Waterschap Vallei en Veluwe (o.a. DMC-systeem).

Doeleinden buiten waterkeringen (niet limiterende opsomming):

- Ten behoeve van de ontwatering van akkerbouw (>> 100.000 ha).
- Ten behoeve van de ontwatering van sleuven en bouwputten (>> 100.000 projecten).

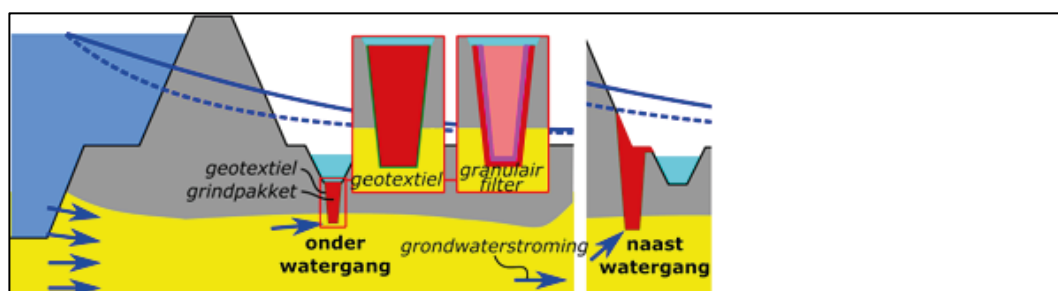
## 2.3.4 Grindkoffers

### Systemeigenschappen

Grindkoffers zijn reeds beschreven in de PPD (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018) paragraaf 2.3.3.

De grindkoffer is voor zover bekend het oudste drainagesysteem dat bij waterkeringen is toegepast. Een grindkoffer vormt een verbinding tussen de (diepere) zandlaag en het oppervlaktewater. De constructie wordt ingebed in de watervoerende zandlaag of het freatisch water en watert direct af naar het oppervlak of oppervlaktewater. Dit betekent dat water door het filter kan stromen, maar zanddeeltjes niet.

In Figuur 2-10 is een schematische doorsnede van een grindkoffer onder een watergang weergegeven. In Figuur 2-11 is de grindkoffer ter plaatse van Spijkse Dijk weergegeven. De voornaamste eigenschappen van het systeem zijn gegeven in Tabel 2-3.



Figuur 2-10: Schematische doorsnede grindkoffer onder een watergang tijdens hoogwater (bron: (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018)).

<sup>4</sup> Bron: <https://www.hwbp.nl/innoveren/innovatieprojecten/obr-drainagetechnieken>.





Figuur 2-11: Foto grindkoffer Spijkse Dijk, (POV Macro stabiliteit en POV Piping, 2018) (foto: Waterschap Rijn en IJssel)

In Tabel 2-3 zijn de voornaamste eigenschappen van grindkoffers gegeven. Hier zijn deze onderdelen ook gescoord. Daarbij is aangehouden dat een dijkversterking met een steunberm neutraal scoort op kosten en met een damwand als negatief. Vaak is een drainagetechniek goedkoper in de aanleg dan een damwand, maar is de inspanning qua beheer groter dan bij een damwand. Bij de beheersinspanning is gelet op de beheerskosten op LCC-basis. Als deze gelijk zijn aan 10% van de LCC kosten van een damwand, dan is aangehouden dat de beheersinspanning neutraal is. Als deze lager zijn dan 5% van de initiële kosten van een damwand, dan is aangehouden dat de beheersinspanning positief is.

Tabel 2-3: Voornaamste eigenschappen van grindkoffers.

Onderdeel	Score	Toelichting
Voornaamste toepassingsgebied <sup>[1]</sup>	n.v.t.	Watervoerende lagen ondieper dan 6 m-mv of het freatisch water. Uitvoerbaar in een waterpartij.
Ervaring	0 tot +	Diverse ervaringen binnen Nederland op kleine schaal. In het buitenland op grote schaal.
Kosten	0	Kosten zijn vergelijkbaar met aanbermen, ca 120% t.o.v. aanbermen. Indicatieve kosten zijn weergegeven in (Witteveen+Bos, 2017) paragraaf 3.3.7.
Beheers-inspanning	+ tot ++	Deze systemen vragen na een passende aanleg minimaal onderhoud. Aandachtspunt is vooral de inspectie van schades door bijvoorbeeld vandalisme/ onderhoud met grof materieel.
Risico's	0 tot +	Het afvoersysteem is het voornaamste risico. Dit wordt afgevangen met een goed (robuust) ontwerp en passend beheer.
Uitbreidbaarheid	-	Systemen met grindkoffers kunnen moeizaam aan capaciteit worden aangepast. Aandachtspunt zit in het maken van aansluitingen.

<sup>[1]</sup> Er bestaan meerdere ontwerpen van grindkoffers. Het ontwerp van de grindkoffer bij de Spijkse Dijk heeft een diepte van ca. 3 m-mv (POV Macrostabieleit en POV Piping, 2018). In (USACE, 2000) is een ontwerp van een grindkoffer op de bodem van een watergang opgenomen op een diepte van 4 à 5 m. Bij dijkversterking Neer is een grindkoffer gerealiseerd op de bodem van een waterpartij. Deze lag op een diepte van 1,5 à 2 m-mv.

#### Ervaringen met de techniek – grindkoffers

Deze techniek wordt toegepast binnen waterkeringen en buiten waterkeringen. Een verkenning op hoofdlijnen is weergegeven in (Witteveen+Bos, 2017) en (FEMA, 2011), daarnaast heeft het HWBP een inventarisatie gemaakt in het kader van deze OBR-Drainagetechnieken<sup>5</sup>.

Ten behoeve van waterkeringen in Nederland (niet limiterende opsomming):

- Waterschap Drents Overijsselse Delta: ca. 1 km
- Waterschap Rijn en IJssel: minimaal 5 km (Spijkse dijk en Twentekanaal).
- Waterschap Limburg: minimaal 0,8 km. (Beegden, Ooijen-Wanssum, Neer)
- Waterschap Vallei en Veluwe (Eefde).
- Waterschap Scheldestromen (o.a. filterconstructie).

Doeleinden buiten waterkeringen in Nederland (niet limiterende opsomming):

- Ten behoeve van de ontwatering van dammen buiten Nederland (>> 100 projecten). Zie o.a. (FEMA, 2011).

<sup>5</sup> Bron: <https://www.hwbp.nl/innoveren/innovatieprojecten/obr-drainagetechnieken>.

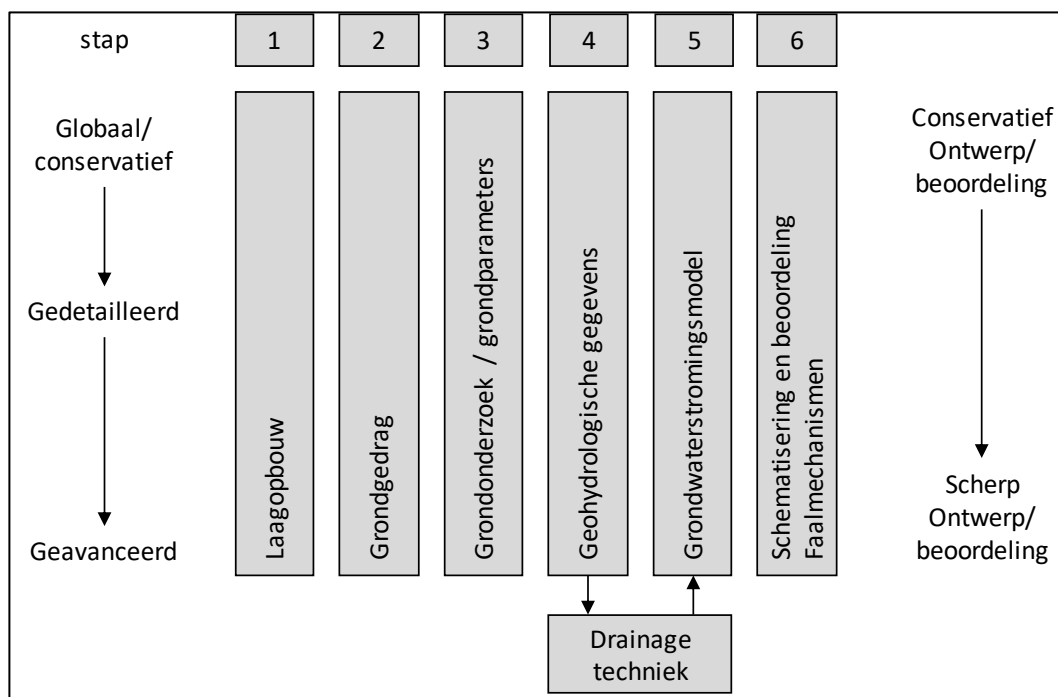


## 3 Systeemanalyse studiegebied

### 3.1 Algemeen

Het uitvoeren van een systeemanalyse is reeds beschreven in Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies hoofdstuk 4 (TAW, 2001), PPD hoofdstuk 4. Daarnaast zijn in POV PipingPortaal (HaskoningDHV, 2019) diverse handvatten gegeven. Hier zijn de hoofdlijnen herhaald. Figuur 3-1 geeft zes stappen die doorlopen dienen te worden bij het ontwerp/beoordeling van een dijk. Deze stappen zijn:

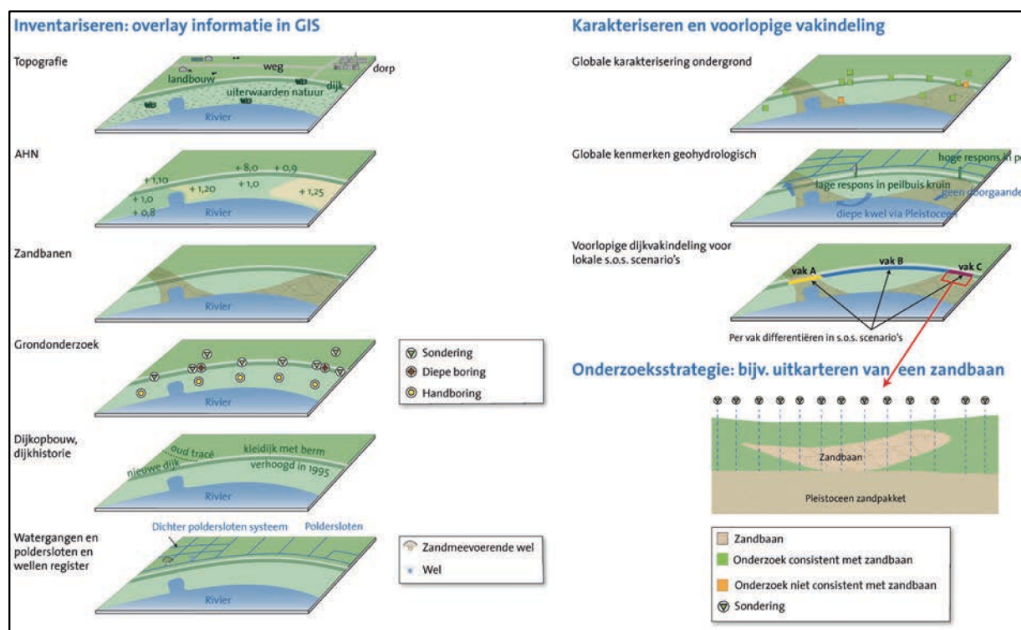
- 1 Beoordelen grondopbouw.
- 2 Beoordelen grondgedrag.
- 3 Onderzoeken grondopbouw en eigenschappen.
- 4 Bepalen geohydrologische gegevens.
- 5 Opzetten grondwaterstromingsmodel.
- 6 Grondmechanische schematisatie en berekening van faalmechanismen.



Figuur 3-1: Activiteiten verbonden met een beoordeling. Daarin is de impact van een drainagetechniek opgenomen. Figuur is gebaseerd op (TAW, 2001).

In de systeemanalyse wordt een analyse gemaakt van het studiegebied. Daarbij wordt van grof/globaal naar fijn/geavanceerd gewerkt. Het is wenselijk dat sommige zaken gedegen worden uitgediept, andere zaken kunnen weer lichter opgepakt worden of met alleen een

gevoeligheidsanalyse worden afgedekt. Daarom is kennis uit verschillende geo-disciplines (geologie, geohydrologie en geotechniek) nodig om te beslissen in welke mate onderzoek nodig en nuttig is. Een aantal stappen zijn hierin onder meer: het onderzoeken van de grondopbouw met de bijbehorende eigenschappen, het beoordelen van het grondgedrag en de -opbouw in combinatie met (het bepalen van) geohydrologische gegevens. Gebiedshistorie en kennis uit het verleden spelen hierbij een belangrijke rol (bv. meandering van rivieren, dijkverleggingen, ervaringen bij hoogwater). Een koppeling van deze informatie is gegeven in Figuur 3-2.



Figuur 3-2: Schetsmatig voorbeeld van de activiteiten 'Inventariseren', 'Karakteriseren van ondergrond', 'Geohydrologisch karakteriseren', 'Voorlopige vakindeling', 'Onderzoeksstrategie' (HaskoningDHV, 2019).

### Systeemanalyse bij drainagetechnieken

De systeemanalyse bij drainagetechnieken is gelijk aan die van een dijk zonder drainagetechniek. Verschil is het zwaardere accent op het onderdeel geohydrologie en de invloed die dit heeft op de (geotechnische) veiligheid van een dijk. Primaire aandacht gaat uit naar de zandlaag waarin de waterstanden te hoog zijn en waar de drainagetechniek als maatregel wordt overwogen. Dit leidt automatisch tot de inzet van geohydrologische modellen. In paragraaf 3.3 is hiervoor een stappenplan opgesteld.

Bij het opzetten van geohydrologische modellen is er een zoektocht naar verbinding tussen geotechnici en geohydrologen. Beide hebben vakgebieden die elkaar sterk raken. Beide zijn bezig met de bodem en gebruiken grondonderzoek om grip te krijgen op de materie. Toch is er soms een taalbarrière. Het stappenplan zorgt voor verbinding rondom deze barrière. Dit kan het rendement van een systeemanalyse verhogen. Hieronder enkele voorbeelden van de taalbarrière die in de systeemanalyse aan bod kunnen komen.

### *Aandachtsgebied*

Geotechnici richten zich op dijken of wegen. In de regel dus op lijninfra. Daar wordt ingezoomd tot een hoog detailniveau waarbij op de decimeter nauwkeurig wordt gerekend. Geohydrologen, zeker degenen die met regionale modellen werken, gebruiken een gebiedsbenadering. Daarbij worden vaak gebieden van meer dan 10.000 ha in een keer gemodelleerd. De aandacht van de specialist is dus meer verspreid. Een synthese is te krijgen door rondom de dijk een zone te definiëren (bv. 100 m uit de teen) waarbij intensiever wordt gemodelleerd.

### *Omgangswijze grondonderzoek*

Geotechnici gebruiken boringen en sonderingen en verwerken deze in geotechnische lengteprofielen om grip te krijgen op de bodem. Geohydrologen gebruiken boringen en geohydrologische profielen (bv. REGIS, welke alleen gebaseerd is op boringen). De hoeveelheid sonderingen of geotechnische lengteprofielen die geohydrologen gebruiken en deze informatie verwerken in modelstudies is soms spaarzaam. Door dit wel te doen kan een kwaliteitsslag gemaakt worden. Dit geldt met name voor de zone waar intensiever wordt gemodelleerd.

### *Omgangswijze watergangen en waterpartijen*

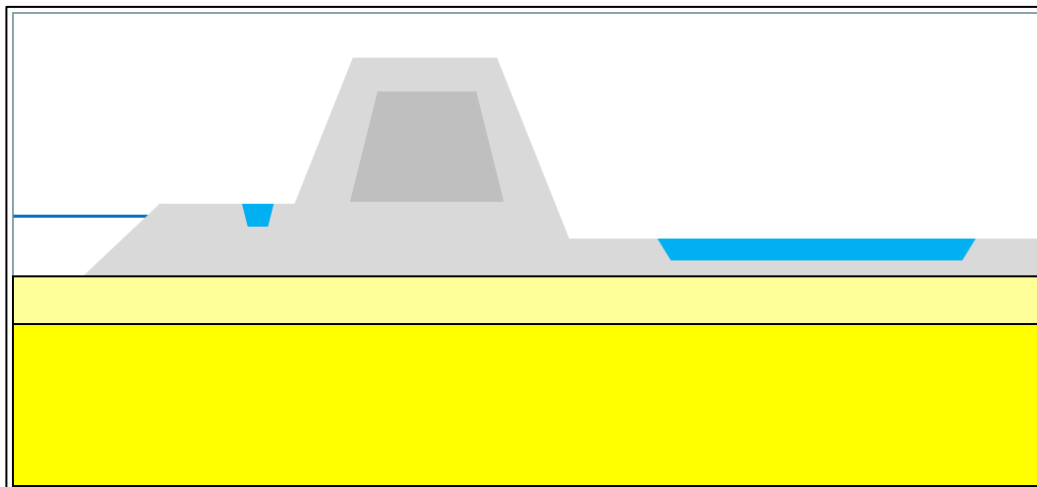
Geotechnici geven expliciete aandacht aan watergangen en waterpartijen. Dit zijn de locaties die het meest kwetsbaar zijn voor processen zoals: opbarsten of instabiliteit met grote glijcirkels. Juist de diepte van een waterpartij is daarbij van belang. Geohydrologen geven ook expliciete aandacht aan watergangen en waterpartijen. Dit zijn de ontwateringsmiddelen in een gebied. Maar op een grote schaal zijn deze vaak niet te modelleren. Daarom wordt een vereenvoudiging toegepast, deze krijgen een gemiddeld peil en een gemiddeld effect gebaseerd op een gemiddelde drainageweerstand. Vaak wordt gemodelleerd met een semi-3D model. Daarbij worden modellen gestapeld. Een van de bovenste lagen is de laag met watergangen. Dat watergangen een diepte hebben wordt niet standaard gemodelleerd. Dat watergangen daarmee misschien door een kleilaag heen snijden of dat onder een waterpartij een dunner pakket aan kleilagen resteert, is dan ook niet gemeen goed in de modellering.

Door binnen het aandachtsgebied wel expliciete aandacht te hebben voor een gedegen modellering van watergangen wordt een kwaliteitsslag gemaakt.

## **3.2 Veldonderzoek & meetgegevens**

In deze paragraaf zijn aanvullingen in onderzoek beschreven ten behoeve van drainagetechnieken. Onderzoek ten behoeve van meetnetten en grondwatermonitoring voor piping zijn gegeven in (POV Piping, 2020). De strategie in het grondonderzoek moet worden bepaald afhankelijk van lokaal voorkomende geologische fenomenen (zoals geulopvullingen, zandbanen, heterogeniteit, etc.). Eventueel moeten specialisten worden geraadpleegd (zoals een geoloog). Het type grondonderzoek dient tevens op de verwachte grondlagen te worden afgestemd, bijvoorbeeld juiste klasse sonderingen voor waarneming van veenlagen etc.

Er zijn handvatten aangegeven voor de hoeveelheid en soort grondonderzoek, daarbij is uitgegaan van een veel voorkomende bodemopbouw. Deze is weergegeven in Figuur 3-3.



Figuur 3-3: Veel voorkomende bodemopbouw in het rivierengebied, een deklaag, waaronder een fijne zandlaag en ten slotte een grove zandlaag.

### 3.2.1 Geologisch en geodetisch onderzoek

Een beschrijving van het geologisch en geodetisch onderzoek is gegeven in de PPD hoofdstuk 4 (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018). Dit bestaat in de regel uit een grof naar fijn aanpak. Daarbij zijn zaken benoemd als: hoogteligging gebied, aanwezigheid uiterwaarden, oude stroomgeulen, sloten, ontgrondingen, (metingen van de) hoogte van de rivierbodem.

#### **Aanvulling ten aanzien van onderzoek ten behoeve van drainagetechnieken**

Bovenop bovenstaande is extra detaillering nodig rondom een aantal onderwerpen. Onderstaand is een voorbeeld gegeven. Het is aan de ontwerper om te bepalen of in een project-specifieke situatie dit voldoende dekking geeft:

- Inmeten waterpartijen h.o.h. 500 m, binnen en buitendijks.  
Daarbij aandacht voor de geometrie en waterstand. Indien kwel reducerende maatregelen zijn genomen, deze ook inventariseren. Een voorbeeld is het aanbrengen van een kleilaag op de bodem van een waterpartij. Bij sommige waterschappen is een toename van kwel beleidsmatig niet toegestaan, gebiedsontwikkelingen krijgen dan ook hier vaak in de watertoets procedure mee te maken.  
  
Als de waterpartijen buitendijks zijn, ook de sliblaag op de bodem in beeld brengen en aangeven hoe waarschijnlijk het is dat deze aanwezig is tijdens hoogwater.
- Kartering van oude geulen, zandbanen en slootdempingen.  
Deze locaties leiden tot heterogeniteiten in de bodemopbouw. Deze kunnen bepalend zijn in de (opbarst-)veiligheid of de stroming van het grondwater. Verkennen van deze zaken met middels kaartmateriaal gevolgd door veldonderzoek (bv. boringen en sonderingen die zijn opgenomen bij geotechnisch onderzoek).

Dringend advies geldt voor het raadplegen van ten minste de bodemkaart, zandbanenkaart en beschikbare geotechnische lengteprofielen.

### **Intermezzo: best-practice ervaringen waterpartijen in geohydrologische modellering.**

De praktijk in geohydrologische modellering is om gebruik te maken van default gegevens, zoals de peilenkaart en de legger wateren. Deze werkwijze is passend, maar kent soms hiaten. Hieronder zijn enkele voorbeelden gegeven.

#### **Verschillen streefpeil en werkelijk peil**

Achter de dijk gelden waterpeilen die in de peilbesluiten formeel zijn vastgelegd. Om een waterpeil te realiseren moet regenwater en kwelwater afgevoerd worden naar andere delen in het watersysteem. Gemeten verschillen zijn (Antea Group, 2021):

- Kolk (200 m lengte) niet aangesloten op rest van het watersysteem.  
0,5 m hoger peil t.o.v. formeel peil.
- Natuurgebied (500 m lengte) verbonden met rest van het watersysteem door middel van te kleine en te hooggelegen watergangen en duikers.  
1,0 m hoger peil t.o.v. formeel peil.

Tijdens hoogwater neemt de kweldruk toe. Dit leidt tot hogere waterstanden in de watergangen direct achter de dijk. Gemeten verschillen zijn (Antea Group, 2021):

- Hoofdwatergangen: 0,2 m peilstijging t.o.v. streefpeil.
- Secundaire watergangen: 0,5 m peilstijging t.o.v. streefpeil.

#### **Kwelreducerende maatregelen**

Hoogwater op de rivieren leidt tot veel kwel in het gebied achter de dijk. Diverse beheerders nemen daarom maatregelen, of eisen maatregelen van derden in vergunningsprocedures.

Bekende situaties zijn:

- Nieuwe watergangen (ca. 400 m) welke “kwelneutraal” dienen te zijn. Deze omvatten 1,4 m klei-inzet onder de waterbodem. Drainerende werking treedt daardoor pas op bij zeer hoge stijghoogtes.
- Accoladeprofiel binnendijkse watergangen (400 m lengte), een brede watergang opgezet als diepdeel en plasdraszone. De plasdraszone is zo uitgevoerd dat deze niet in contact staat met het diepere watervoerende pakket.

#### **Toetsen versus modelleren**

Bij het toetsen van faalmechanismes zoals piping en macrostabiliteit wordt uitgegaan van conservatieve aannames. Dus lage polderpeilen bij de een en mogelijk hoge peilen bij de ander. Bij het opzetten van een geohydrologisch model is het doel om in de kalibratiefase zo goed mogelijk aan te sluiten, bij de werkelijke situatie. Bij het ontwerpen van een drainagetechniek is het van belang dat water afgevoerd kan worden naar ontvangend water en of deze niet overbelast is door natuurlijke kwel.

In deze laatste twee activiteiten is het aansluiten bij de werkelijkheid een hogere prioriteit dan in de toetspraktijk. Door gebruik maken van inmetingen en het meenemen van de ervaringen van de beheerder ontstaat meer grip op variaties op en rondom de dijk in de (geo)hydrologie. Daardoor komen hiaten in beeld in de default gegevens en geeft dit meer grip en vertrouwen bij modelleringen en ontwerpen. Deze extra grip op de situatie kan leiden tot aangescherpte uitgangspunten in het toetsen, mits er voldoende zekerheid is.

### 3.2.2 Geotechnisch onderzoek

Een uitvoerige beschrijving van geotechnisch onderzoek is gegeven in de PPD hoofdstuk 4 (POV Macrostabieleit en POV Piping, 2018). Dit bestaat uit een grof naar fijn aanpak. Daarbij zijn zaken benoemd als: ondergrondmodellen, grondonderzoek uit bronnen zoals Dinoloket/BRO, SOS-schematisaties, boringen en sonderingen. Daarnaast maken sommige projecten gebruik van onderzoeken zoals grondradar om deklaagdikten vlakdekkend te bepalen.

Vaak wordt het geotechnisch onderzoek weergegeven in een geotechnisch lengteprofiel.

#### **Aanvullingen in onderzoek ten behoeve van drainagetechnieken**

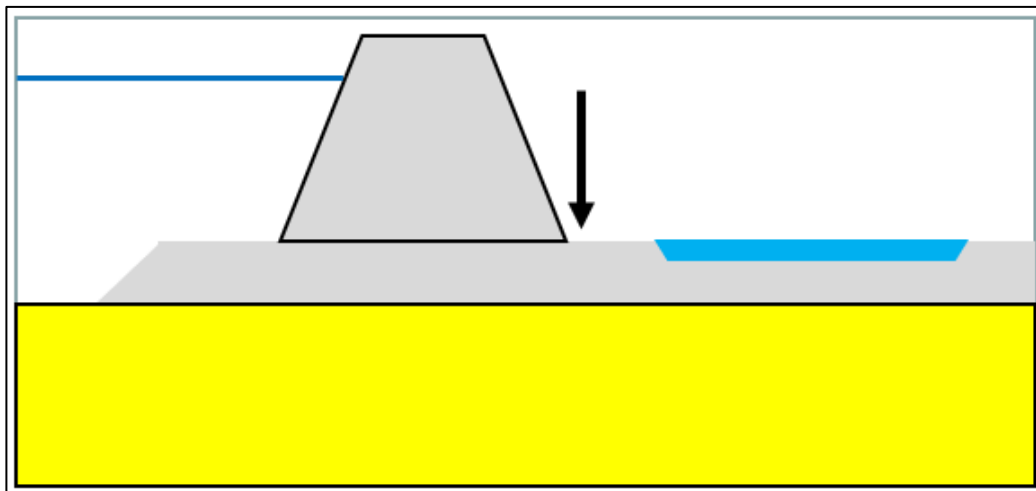
Bovenop bovenstaande is extra detaillering nodig rondom een aantal onderwerpen. Onderstaand zijn ordegroottes aangegeven. Het is aan de ontwerper om te bepalen of in een project-specifieke situatie dit voldoende dekking geeft:

- Bodemopbouw bepalen in de lengterichting van de dijk (boringen/ sonderingen). Advies voor het uitvoeren van geotechnisch onderzoek is h.o.h. 100 m in de fase van schetsontwerp. Bij situaties waar het voorland een aanzienlijke rol speelt, is de aanbeveling het voorland te onderzoeken h.o.h. 400 m. Advies is om in latere ontwerpfases risico-gestuurd onderzoek uit te voeren. Daarbij dient op risicovolle/heterogene locaties de onderzoeksintensiteit aangescherpt te worden tot een h.o.h.-afstand van 25 m.

Bovenstaande sluit aan op handvatten voor vigerende grondonderzoek. Handvatten voor het uitvoeren van geotechnisch onderzoek zijn gegeven in CUR2003-7 paragraaf 2.4 (CUR, 2003). Handvatten voor het risico-gestuurd uitvoeren van grondonderzoek zijn gegeven in CUR 247 (CUR, 2013). Bij sterk heterogene bodemopbouw is het wenselijk de onderzoeksintensiteit aan te scherpen conform NEN9997-1 (Normcommissie Geotechniek, 2017).

Expliciete aandacht gaat uit de ligging en de eigenschappen van de zandlaag waarin de grondwaterstand door drainagetechnieken beïnvloed dient te worden. Daarnaast zijn de grondlagen die impact hebben op de veiligheid (bv. opbarstveiligheid of stabiliteit) van belang. Grondonderzoek is wenselijk ter plaatse van de te versterken zone (binnenteen/teensloot, zie Figuur 3-4).

In de fase van risico-gestuurd onderzoek dient aandacht te zijn voor factoren die van (grote) invloed zijn op de drainagetechniek. Voorbeelden zijn: hoogteligging van de deklaag is kritisch voor een grindkoffer waar geen klei onder mag liggen, verschillende zandlagen (fijn zand vs. grof zand) waarbij één van de twee lagen de werking van de drainage negatief kan beïnvloeden, locaties waar op basis geologisch onderzoek heterogene bodemopbouw wordt verwacht, locaties waarbij op basis van antropogene oorzaken (bv. kleiwinning in het voorland) grote variatie wordt verwacht.



Figuur 3-4: Zwarte pijl markeert de onderzoekslocatie.

- Bodemopbouw - onderzoeksdiepte.  
Vanuit de systeemanalyse is inzicht gewenst in de bodemopbouw. Dit betreft de aanwezige slecht doorlatende lagen (klei/veen) en watervoerende lagen (zand/grind). Vaak richt bestaand grondonderzoek zich op de slecht doorlatende lagen. Het kan voor de systeemanalyse daarom wenselijk zijn om de bodem tot een grotere diepte te verkennen. De dikte van watervoerende lagen varieert van 1 m tot lokaal meer dan 100 m. Deze variaties kunnen zeer plaatselijk zijn door meanderingen en geulafzettingen. Indien de eerste 25 m van de bodem in beeld is, dan zijn de grootste onzekerheden rondom de laagdikte van een watervoerend pakket afgedekt.

Vanuit het ontwerpen van de drainagetechniek is inzicht vereist in de bodem rondom de drainagetechniek. Dit is minimaal 3 à 5 m dieper dan drainagetechniek. Het grondonderzoek dient enkele meters dieper te zijn dan de voorgenomen techniek. Dit geeft de vrijheid voor ontwerpoptimalisaties in latere fases en geeft aan of er rondom de techniek aandachtspunten zijn, zoals storende lagen.

Voor het toepassen van horizontale drainage en grindkoffers gelden de volgende aanbevelingen<sup>6</sup>:

- Grondmonsters verzamelen van de te ontwateren laag 2 à 5x per 500 m.  
Deze monsters verzamelen rondom de diepte van de voorgenomen techniek.

Bij korte trajecten grondonderzoek intensiveren zodat minimaal 4 proeven zijn uitgevoerd.

- Korrelverdeling op bovenstaande monsters.  
Advies is proef 6 conform standaard RAW-bepalingen (CROW, 2020).

Watervoerende pakketten bestaan uit verschillen de afzettingen. Aan de bovenzijde van

---

<sup>6</sup> Dit betreft het bepalen van punteigenschappen in de ondergrond. In verband met verticale gelaagdheid wordt dit niet aanbevolen voor verticale bronnen, er zijn geen punteigenschappen benodigd over de verticaal.

een watervoerende laag komen met regelmaat fijn zandige afzettingen voor, voorbeelden zijn de formatie van Boxtel of formatie van Echteld. Daarmee is een drainagetechniek aanwezig in een laag zand dat fijner is dan de diepere lagen. Fijn zand heeft risico op uitspoelen. Het ontwerpen van maatregelen daartegen is afhankelijk van de korrelgrootte.

#### **Aanvullend grondonderzoek t.b.v. boorbaarheid sleufloze technieken**

Sleufloze technieken zijn meestal gebaseerd op een horizontaal gestuurde boring (Horizontal Directional Drilled Well, ofwel HDDW), zoals het DMC-systeem. Niet alle ondergrond is geschikt voor een HDDW. Grind en uniform zand zijn voorbeelden van grondtypen waarin de boorkop slecht stuurbaar is. De boorbaarheid is afhankelijk van de stuurbaarheid, grondtype, korrelvorm, korrelgrootte, hardheid, aanwezigheid obstakels, stenen etc. Per locatie moet een inschatting gemaakt worden wat de beste boorlijn is. Dit onderzoek is noodzakelijk voor de uitvoering van sleufloze technieken, dit is beschreven in hoofdstuk 7.

### **3.2.3 Geohydrologisch onderzoek**

Een uitvoerige beschrijving van geohydrologisch onderzoek is gegeven in de PPD hoofdstuk 4 (POV Macrostabiliteit en POV Piping, 2018). Voor deze zaken zijn ook praktische handvatten gegeven in (POV Piping, 2020). Dit bestaat in de regel uit een grof naar fijn aanpak. Daarbij zijn zaken benoemd als: ondergrondmodellen, bepalen van doorlatendheden middels waterbalansstudies, pompproeven/proefbemalingen/peilbuizen of laboratoriumproeven.

#### **Aanvullingen in onderzoek ten behoeve van drainagetechnieken**

Bovenop bovenstaande is extra detaillering nodig rondom een aantal onderwerpen. Deze richtlijnen zijn deels al benoemd in andere documenten, maar zijn hier herhaald met de bijbehorende ordegroottes.

- Peilbuizenraai ter plaatse van aandachtsgebied.

Ten behoeve van de waterontspanner in het beheersgebied van Waterschap Rivierenland zijn voor 3,5 km dijkversterking 7 raaien met peilbuizen toegepast. Dit komt overeen met een raai ca. h.o.h. 500 m in lengterichting van de dijk (De Vries & van de Wiel, 2014).

Een raai bestaat in de regel uit drie peilbuizen loodrecht op de dijk, bijvoorbeeld: voorland, binnenteen en achterland. Deze peilbuizen zijn voor het gedegen modelleren en kalibreren van het grondwater. Op locaties waar zeer sterke variaties van de bodemopbouw worden verwacht, kan het wenselijk zijn lokaal meer metingen uit te voeren.

Aanbevolen wordt om de peilbuizen ten minste te laten meten tijdens een hoogwatergolf waarin het voorland onder water staat (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019d) (paragraaf 6.3.3). Dit is niet altijd haalbaar omdat dit vaak een hoogwaterperiode vereist, een praktische invulling hiervoor is nader beschreven onder 'praktische benadering'.



In getijdegebieden kan gebruik gemaakt worden van 13-uursmetingen. Deze zijn beschreven in Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TAW, 2004).

- Grondwatermonsters ca. h.o.h. 500 m ten behoeve van grondwaterkwaliteit. Deze analyseren op parameters<sup>7</sup> zoals ijzer en chloride. De grondwaterkwaliteit heeft te maken met de grondwaterstroming. Wanneer deze vanuit een hoog achterland richting de rivier stroomt, dan is de kwaliteit anders dan wanneer het water stroomt van de rivier naar het achterland. Aangezien de drainage vooral in het stormseizoen/ hoogwaterseizoen actief zal zijn, is het advies om ook in dat seizoen grondwatermonsters te verzamelen en te analyseren.

Voor het toepassen van horizontale drainage en grindkoffers gelden de volgende aanbevelingen<sup>8</sup>:

- Grondmonsters verzamelen van de te ontwateren laag 2x per 500 m. Deze monsters verzamelen rondom de diepte van de voorgenomen techniek.

Bij korte trajecten grondonderzoek intensiveren zodat minimaal 4 proeven zijn uitgevoerd.

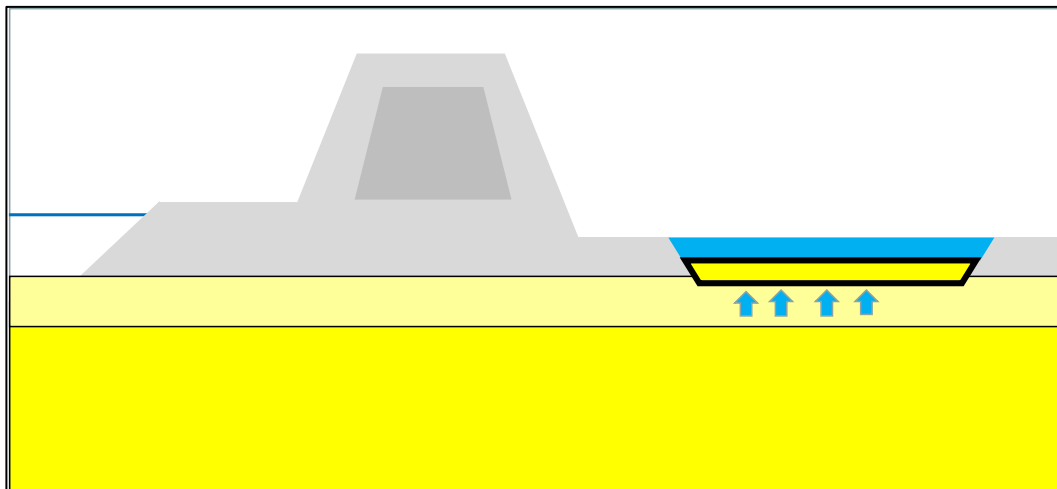
- Doorlatendheidsproeven op bovenstaande monsters. Advies is proef 11 conform standaard RAW-bepalingen. (CROW, 2020).

Deze proeven zijn wenselijk omdat de stroming naar deze drainagetechnieken vooral wordt bepaald door lokale/ ondiepe lagen. In Figuur 3-5 is de lokale grondwaterstroming in een (fijne) zandlaag naar een grindkoffer weergegeven.

---

<sup>7</sup> Er bestaan meer parameters waar analyses op gedaan kunnen worden. Voor lozingen is inzicht in het gehalte onopgeloste delen vereist. In de praktijk neemt dit gehalte bij grondwateronttrekking na verloop van tijd sterk af. Daardoor zijn metingen aan de voorkant niet representatief. Ook zijn er parameters zoals H<sub>2</sub>S. Deze zijn wel kritisch, echter ze komen zeer lokaal in het grondwater voor. Daarom is generiek het meten van deze parameter niet de aanbeveling.

<sup>8</sup> Dit betreft het bepalen van punteigenschappen in de ondergrond. In verband met verticale gelaagdheid wordt dit niet aanbevolen voor verticale bronnen, er zijn geen punteigenschappen benodigd over de verticaal.



Figuur 3-5: Lokale grondwaterstroming in een (fijne) zandlaag naar een grindkoffer.

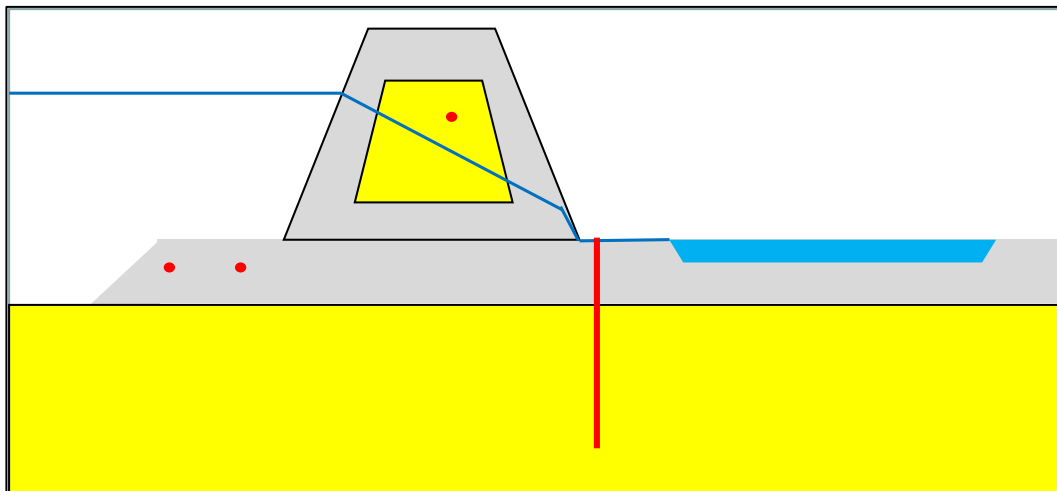
### Praktische benadering

Bovenstaand onderzoek gaat uit van kalibratie van een grondwatermodel. Dit is niet altijd haalbaar omdat dit vaak een hoogwaterperiode vereist. Alternatief is het direct bepalen van de geohydrologische parameters, deze zijn onder meer beschreven in 'Handreiking grondonderzoek voor piping' (POV piping, 2019). Bij onderstaande punten wordt in de onderzoeksopzet rekening gehouden met geologische objecten, zoals de ligging van geulen, discontinue lagen en kleipropen.

- Voorland: meting van verticale doorlatendheid.  
Gedacht kan worden aan 3 infiltrometer proeven per 500 m dijk. Hierbij wordt opgemerkt dat niet een standaard infiltrometer proef toegepast dient te worden, maar een grotere variant (> 1m) in verband met bodemheterogeniteit. (POV piping, 2019).
- Ondergrond: doorlatendheid zandlagen.  
Gedacht kan worden aan doorlatendheidsmeting over de gehele verticaal van het watervoerende pakket (bv. HPT-sondering om de 500 m). Alternatief is pompproef. Deze is kostbaarder, maar geeft direct een beeld van de praktische werking van een drainagetechniek, zoals de relatie tussen verlaging en debiet.

Bij de modellering van een zandcunet boven de grondwaterstand kan gedacht worden aan 3 doorlatendheidsproeven per 500 m op grondmonsters uit het cunet. Advies is proef 11 conform standaard RAW-bepalingen. (CROW, 2020).

Een schetsmatige visualisatie van onderzoek in het zandcunet boven de grondwaterspiegel en grondonderzoek over de gehele verticaal is weergegeven in Figuur 3-6.



Figuur 3-6: Grondonderzoek in het voorland en zandcunet (rode punt) en grondonderzoek over de gehele verticaal (rode lijn)

- Achterland: geohydrologische schematisatie.  
In de onderzoeksopzet wordt, naast de geologische objecten, tevens rekening gehouden met geometrische objecten, zoals (diepe) waterpartijen en ligging van gedraineerde percelen.

Voor het achterland kan ook gewerkt worden met een “spreidingslengte” of hydraulische weerstand van de deklaag. Deze kan bepaald worden samen met de doorlatendheid van zandlagen in een pompproef. De achterliggende aanname is dat deze een uniforme waarde heeft over het gehele gebied, dit is een nadeel van een “spreidingslengte”. Deze is passend buiten het aandachtsgebied.

### 3.3 Geohydrologische analyse – t.b.v. watervoerende pakketten

Een algemene procedure voor de opzet van een geohydrologische analyse is beschreven in paragraaf 4.4 van de PPD (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018). De geohydrologische analyse richt zich op het grondwater in watervoerende lagen.

Er gelden diverse aandachtspunten bij de modellering. In de onderstaande paragrafen zijn diverse handvatten daarvoor gegeven. De geohydrologische analyse maakt vaak gebruik van grondwatermodellen. Deze typen modellen zijn beschreven in Tabel 3-1. Beschrijving van de specifieke modellen is o.a. gegeven in paragraaf 4.5 van de PPD.

Tabel 3-1: Beschrijving van diverse typen grondwatermodel.

Type model	Beschrijving
Analytisch	<p>Eenvoudige modellen, vaak opgenomen in spreadsheets. Deze modellen vereenvoudigen de schematisatie. Maar kunnen grondwaterstroming op millimeter schaal modelleren.</p> <p>Voorbeelden: diverse voorbeelden zijn opgenomen in (USACE, 1992) en (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018).</p>
Numeriek, dwarsdoorsnede (2D)	<p>Praktische modellen, vaak gefocust op een dijklichaam. Deze modellen hebben een zeer hoog detailniveau rondom het dijklichaam. Deze modellen zijn in de regel geschikt om grondwaterstroming op decimeter schaal modelleren. In de regel geldt een afmeting van 100 à 1000 m als bovengrens van het modelgebied.</p> <p>Sommige grondwatermodellen, zoals Modflow of MicroFem, worden traditioneel gebruikt met een bovenaanzicht benadering. Gekantelde varianten hiervan werken met dwarsdoorsnede benadering.</p> <p>Voorbeelden: D-Geoflow, M-Seep (verouderd), gekantelde Microfem en Modflow modellen en Plaxflow 2D.</p>
Numeriek, bovenaanzicht (semi-3D)	<p>Praktische modellen, vaak gefocust op grotere regio's (&gt;1000 ha). Door het grote oppervlak hebben deze modellen een zeer laag detailniveau rondom het dijklichaam. Deze modellen zijn in de regel geschikt om grondwaterstroming op meter schaal modelleren. In de regel geldt een afmeting van 10 à 100 km als bovengrens van het modelgebied.</p> <p>Voorbeelden: Microfem, TimML/T-Tim en Modflow.</p>
Numeriek, Volledig 3D	<p>Zware modellen, vaak gefocust op complexe interacties met objecten (stroming rondom sluis met kwelschermen. Deze modellen zijn in de regel geschikt om grondwaterstroming op decimeter schaal modelleren. In de regel geldt een afmeting van 100 m als bovengrens van het modelgebied.</p> <p>Voorbeelden: Plaxflow 3D, Modflow, FEFlow.</p>

### **Intermezzo: tijdsafhankelijkheid**

Een van de zaken die uit de systeemanalyse naar voren kan komen zijn tijdsafhankelijke processen. In gebieden waar hoogwaterperiodes zeer kort zijn (bv. zee- en meergebied) en het grondwatersysteem traag reageert (bv. freatisch grondwater), kunnen deze processen een significante invloed hebben. In de systeemanalyse moet onderzocht worden of deze processen een invloed hebben en in welke mate. Dit kan gedaan worden aan de hand van (peilbuis)metingen. Daarnaast moet bepaald worden welke parameters hierbij horen.

Tijdsafhankelijkheid is meer inhoudelijk behandeld in enkele eerdere studies:

- Analytische methode: (POV-piping, Waterschap Scheldestromen, 2018).
- Analytische methode: paragraaf b3.4 van TRWD.
- (Diverse) numerieke methodes: (Sluis, 2016).
- (Diverse) parameters voor numerieke methodes: zie (Bot, 2016)

Rondom tijdsafhankelijkheid kan aan diverse knoppen gedraaid worden. Hieronder zijn enkele weergegeven.

### **Buitenwaterstand**

De buitenwaterstand tijdens een hoogwatergolf varieert in de tijd. Hiervoor kan worden aangesloten bij meetgegevens van historische data. Handvatten voor de bepaling van maatgevende hoogwatergolven is o.a. gegeven in: PPD.

### **Polderwaterstand**

De polderwaterstand varieert in sommige gebieden mee met het buitenwater. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van lokale meetgegevens.

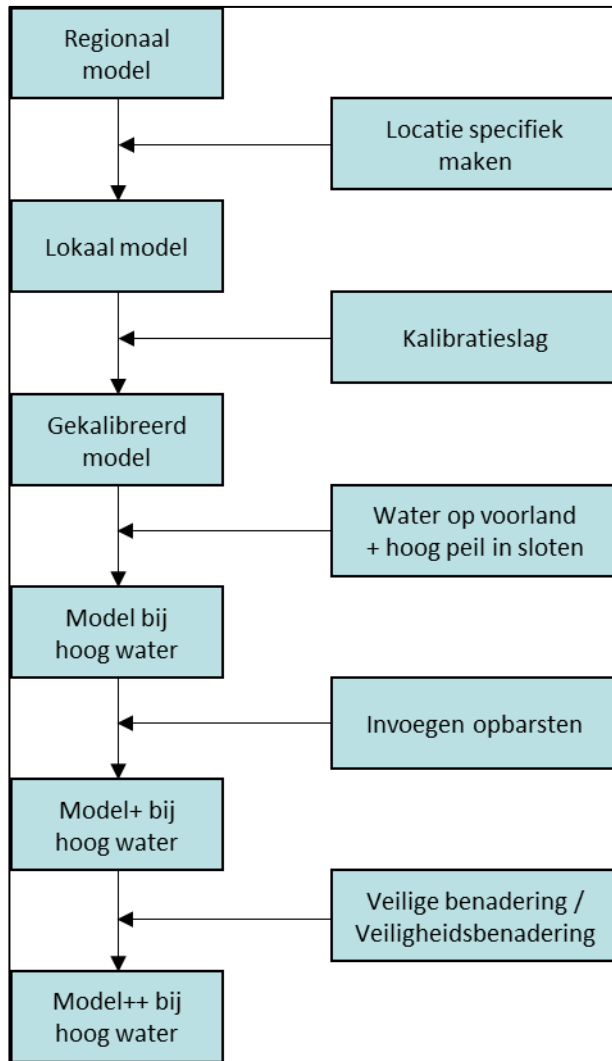
### **Freatisch grondwater**

Freatisch grondwater heeft een zeker volume water nodig voordat de grondwaterstand stijgt. Dit is het poriënvolume minus het reeds aanwezige hangwater. Dit verschil is de bergingscoëfficiënt. Deze wordt soms als constante verondersteld en wordt soms benaderd met een meer complexe benadering (bv. Staringreeks in (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988) of methode Van Genuchten in Plaxflow en D-Geo Flow).

### **Diep grondwater**

Diep grondwater heeft ook een zeker volume water nodig voordat de waterdruk stijgt. Dit wordt bepaald door de samendrukbaarheid van de bodem en het gehalte aan lucht, daarom is inzicht in deze eigenschap van de bodem gewenst. Een systeem breed beeld (zand- en deklaag) van de bergingseigenschappen wordt verkregen uit peilbuisanalyses. Rekenparameters voor tijdsafhankelijkheid voor de zandlaag kunnen afgeleid worden uit pompproeven ( $S$ , evt. ook  $K_h$  en  $c$ ) en HPT-AMPT sonderingen ( $S_s (=S/D)$ , evt. ook  $K_h$  en  $K_v$ ).

Bij het gebruik van grondwatermodellen kan het stroomschema van Figuur 3-7 worden doorlopen. Deze gaat van grof naar fijn en van algemeen naar specifiek in meerdere stappen. Deze stappen zijn verder beschreven.



Figuur 3-7: Stappenplan geohydrologisch modelleren t.b.v. stijghoogten rondom waterkeringen.

### 3.3.1 Regionale (grondwater)modellen

Voor grote delen in Nederland zijn regionale grondwatermodellen opgezet (zie o.a. paragraaf 4.5.2 van de PPD (POV Macrostabieleit en POV Piping, 2018)). Deze modellen zijn grootschalig met een grove resolutie (resolutie van invoer bodemopbouw vaak 250x250 m tot 25x25m voor waterlopen). Voornaam onderwerpen die hier meestal in zitten zijn passende doorlaatfactoren, inzicht op regionale schaal waar water infiltreert (rivier) en hoe het water uittreedt (achterland inclusief onttrekkingen). Daardoor bieden deze modellen een goed startpunt in de geohydrologische analyse.

### 3.3.2 Lokaal grondwatermodel - Grondwatermodel locatie specifiek maken

Het eerdergenoemde grondwatermodel moet locatie specifiek gemaakt worden. Dit is met name relevant ter plaatse van het aandachtsgebied binnen het grondwatermodel. Hierbij dient onder andere aandacht te zijn voor geulopvullingen en zandbanen in het voorland en bij het modelleren van een rivier dient rekening gehouden te worden met rivierdieptes en de (eventueel) aanwezige sliblaag. De grootte van dit aandachtsgebied verschilt van project tot project.

Dit rapport adviseert voor het aandachtsgebied:

- Breedte aandachtsgebied: 100 m uit de binnen- en buitenteen.
- Lengte: lengte gebaseerd op waar mogelijk een drainagetechniek wordt toegepast met een reserve van 100 m aan weerszijden.
- Afmetingen rest modelgebied: op basis van geohydrologische eigenschappen. Een praktijkwaarde is 3 maal de spreidingslengte van watervoerende lagen.

Bij het locatie specifiek maken kan gedacht worden aan de onderstaande (niet uitputtende) lijst:

- Verhogen van de modelresolutie ter plaatse van het aandachtsgebied. Gewenste resolutie is 5x5 m of fijner (1x1 m t.b.v. meenemen watergangen). In de ontwerpfase van het drainagesysteem zijn (mogelijk) fijnere resoluties gewenst, per drainagetechniek zijn hiervoor handvatten gegeven in hoofdstuk 5.
- Modelleren van het voorland met expliciete aandacht voor watergangen, kolken of havens die dermate diep zijn dat deze door deklagen heen snijden.

Indien situaties worden gemodelleerd zonder dat water op het voorland staat, dan is inzicht in de eigenschappen van het watersysteem van het voorland gewenst (zoals een eigen peilbeheer).

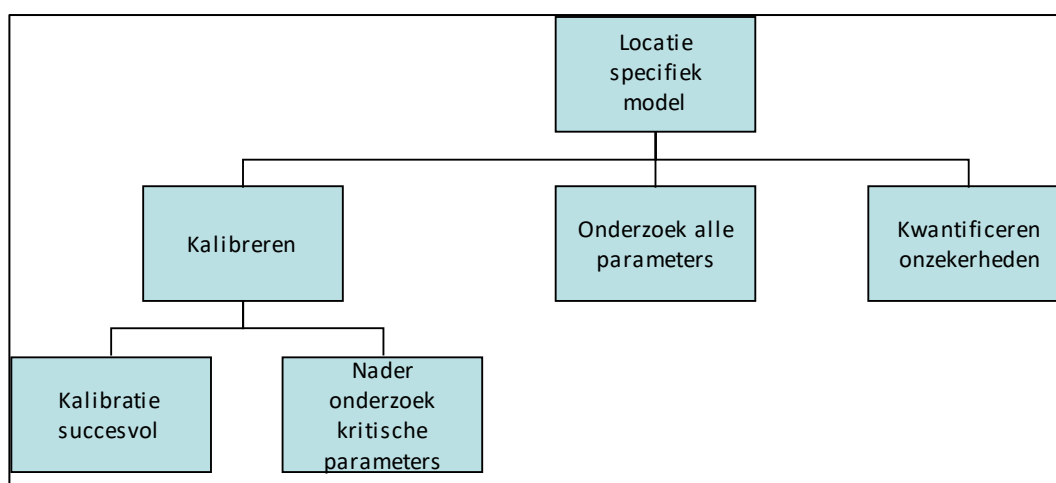
- Expliciete aandacht voor grondlagen rondom het (mogelijke) drainageniveau. In de regel zijn ondiepe zandlagen fijner en minder doorlatend dan diepe lagen. Rondom rivieren zijn deze fijne lagen enkele meters dik (doorlatendheid fijne zandlagen is 2 tot 7 m/dag vs. 20 tot 70 m/dag voor de grove zandlagen). De effectiviteit van drainagetechnieken in deze lagen wordt sterk beïnvloed door de doorlatendheid van de fijne zandlagen. Het is aan de geohydroloog of het verschil in horizontale en verticale doorlatendheid (anisotropie), kritisch is voor de modellering. Dit is afhankelijk van de locatie specifieke situatie waar drainage wordt toegepast bijvoorbeeld het geologisch milieu waarin de fijn zandige laag is afgezet.

Bij het opzetten van een model geldt de onderstaande (niet uitputtende) lijst met aandachtspunten rondom interacties tussen geotechniek en geohydrologie:

- Modelleren van het achterland met expliciete aandacht voor watergangen, kolken, vijvers en meren die dermate diep zijn dat deze door deklagen heen snijden. Door de (bijna) afwezige deklaag hier is de geohydrologische weerstand vooral afhankelijk van de waterbodem en daardoor noemenswaardig anders dan elders en daarom is het belangrijk om de weerstand te bepalen op deze locaties.
- Het meenemen van bodemonderzoek zoals opgenomen in het geotechnisch lengteprofiel. Deze informatie dient te leiden tot een zo nauwkeurig mogelijk (3D)ondergrondmodel. Indien kennisleemten over de bodemopbouw testen, dan kan dit worden meegenomen in gevoeligheidsanalyses.
- Het meenemen van waterbouwkundige objecten. Te denken valt aan kwelschermen, zomerkades of dijkversterkingen zoals klei-ingravingen in het voorland.

### 3.3.3 Gekalibreerd watermodel – betrouwbaar grondwatermodel

Bij voorspellingen met een model dient dit model een zekere betrouwbaarheid te hebben. Een manier daarvoor is succesvol kalibreren. Daardoor neemt de betrouwbaarheid van het model toe en nemen de onzekerheden van de modellering (sterk) af. Niet altijd is een succesvolle kalibratie haalbaar, omdat bijvoorbeeld meetreeksen te kort zijn of de fit tussen het model en de meetgegevens niet gevonden wordt. Figuur 3-8 geeft het te hanteren stroomschema weer voor het bereiken van een betrouwbaar grondwatermodel.



Figuur 3-8: Stroomschema voor bereiken van betrouwbaar (grondwater)model.

#### Kalibreren van grondwatermodellen

In de regel zijn de volgende zaken benodigd voor een passende kalibratie:

- Er is gebruik gemaakt van peilbuizen binnen het aandachtsgebied.
- Er is een situatie beschikbaar met een hoge waterstand waarbij het water tot aan de dijk stond, en dus het voorland onderliep, en waar (grond)waterstanden zijn gemeten.



- Er is gebruik gemaakt van gemeten waterstanden aan de binnenzijde van de dijk tijdens bovenstaande situatie.

Bij het kalibreren gelden de onderstaande aandachtspunten rondom interacties tussen geotechniek en geohydrologie.

- Exact beeld van welke delen van het voorland onder water staan.  
Niet alle zomerkades zijn even hoog. Vaak hebben uiterwaarden met natuur of landbouw lage zomerkades. Echter, uiterwaarden met activiteiten zoals industrie of recreatie hebben een hoger gelegen zomerkade. Het hoogteverschil tussen de diverse zomerkades kan ruim 3 m zijn.
- Waterstanden aan de binnendijkse zijde.  
Afhankelijk van het watersysteem kan dit zeer hoog zijn. In het zandige achterland langs rivieren staan bij een gemiddelde hoogwatergolf de sloten tot aan de rand toe vol en komen sommige landbouwpercelen al onder water te staan.
- Modelleren van landbouwpercelen.  
Drainage voert water af van een landbouwperceel naar een watergang. Wanneer een watergang een hoog peil heeft, dan kan een drainagebuis het grondwater niet verlagen tot onder het waterpeil. In het gemiddelde geohydrologische model moet deze logische koppeling echter handmatig worden ingevoerd.

#### **Alternatief voor kalibreren – onderzoek naar parameters**

Indien niet wordt gekalibreerd, dan kan nog steeds een model met voldoende zekerheid verkregen worden. Onderstaande punten leiden tot een model dat ook beschouwd mag worden als “voldoende betrouwbaar”:

- Het voorland is voldoende onderzocht en omvat geohydrologische metingen.  
Gedacht kan worden aan 3 stuks infiltrometer-proeven per 500 m dijk. Aanvullend zijn alle objecten in beeld (dempingen, kolken, e.d.).
- Het achterland is voldoende onderzocht en omvat geologische aandachtslocaties.  
Zoals discontinue lagen, geulen. Daarnaast waterpartijen, diepte en de fluctuatie van waterpeilen daarvan bij een hoogwatergolf.
- Het watervoerende pakket is voldoende onderzocht en omvat geohydrologische metingen.  
Gedacht wordt aan een geotechnisch lengteprofiel en minimaal doorlatendheidsmeting over de gehele verticaal van het watervoerende pakket (bv. HPT-sondering om de 500 m).

#### **Kalibreren en nader onderzoek naar kritische parameters**

Het kan zijn dat wordt gekalibreerd, maar dat niet een succesvolle kalibratie wordt bereikt. Oorzaken verschillen van project tot project. Een voorbeeld is dat de meetreeks te kort is om een hoogwaterperiode te omvatten. Een ander punt is dat een meetpunt niet modelmatig benaderd kan worden door externe invloeden.

De werkwijze in dit geval bestaat uit de volgende opties:

- Gevoeligheidsanalyse ten einde de kritische parameters te identificeren.  
Deze leidt tot een selectie van de parameters die kritisch zijn. Daarnaast geeft deze analyse de bandbreedte waarbinnen de waarde van deze parameters liggen.

- Nader onderzoek bovenstaande.  
Dit kan een selectie van onderzoek omvatten zoals benoemd bij “Alternatief op kalibreren – onderzoek naar parameters”.
- Geen nader onderzoek.  
In dit geval worden alle latere analyses zo uitgevoerd dat rekening wordt gehouden met de rest-onzekerheid van de kritische parameters.

#### **Kwantificeren onzekerheden**

In de PPD paragraaf 5.5.2. staat: “In een semi-probabilistisch dijkontwerp moet worden gerekend met de karakteristieke stijghoogte die met 95% zekerheid niet zal worden overschreden, gegeven de optredende buitenwaterstand.” Indien een model niet gekalibreerd is of meetgegevens omvat om de uitkomsten te staven, dan zijn de onzekerheden relatief groot. Een derde optie bestaat om deze grotere onzekerheden mee te nemen bij de bepaling van de karakteristieke waarde. Handvatten voor het bepalen van deze waarde staan in paragraaf 4.7.

### **3.3.4 Model bij hoog water**

Voor waterveiligheid wordt een extrapolatie gemaakt naar een hoogwatersituatie. Daarbij dient stapsgewijs rekening gehouden te worden met diverse aandachtspunten.

#### **Aandachtspunten**

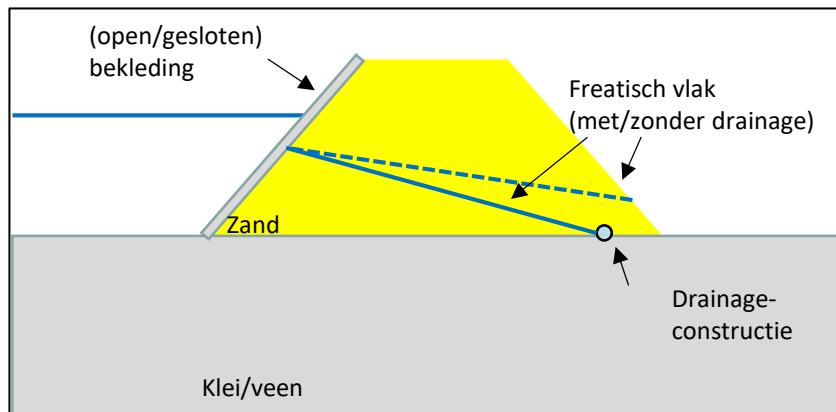
Bij het verhogen van de waterstand gelden de onderstaande (niet uitputtende) lijst met aandachtspunten:

- Delen die wel en niet onder water komen te staan.
- Binnendijkse waterpeilen die meestijgen.  
Als startwaarde kunnen hiervoor de gemeten waterstanden in de kalibratieperiode worden aangehouden. Deze geven een concreet beeld of de polderpeilen meestijgen of juist op streefpeil blijven.
- Opbarsten van diepe waterpartijen.  
Deze zorgen voor extra kwelstroom in de referentiesituatie. Afhankelijk van de locatie specifieke eigenschappen is dit misschien een kleine impact, maar het kan ook een dominant fenomeen zijn. Dit is met name van belang om verschil in het waterbezwaar te duiden tussen de referentiesituatie en de situatie met drainage. Daarnaast geeft dit een lokaal genuanceerd beeld.

Binnen de meeste grondwatermodellen kan opbarsten worden gemodelleerd als fixed head (Dirichlet randvoorwaarde). Waarbij de hoogte gelijk is aan de grensspanning zoals aangegeven in TRWD bijlage 4, model 4C. (TAW, 2004).

### **3.4 Geohydrologische analyse – t.b.v. freatische lagen**

De geohydrologische analyse ten behoeve van freatische lagen richt zich op freatische grondwaterstanden. Een weergave van de freatische waterstand in een dijk en (mogelijke) invloed van een drainagetechniek is weergegeven in Figuur 3-9.



Figuur 3-9: Freatische grondwaterstand in een dijk, analoog aan TRWD; bijlage 1. (TAW, 2004).

Een uitvoerige verhandeling van de geohydrologische analyse voor freatische grondwaterstanden is gegeven in TRWD (TAW, 2004).

#### **Geringe waarde peilbuizen en kalibratie van grondwatermodellen.**

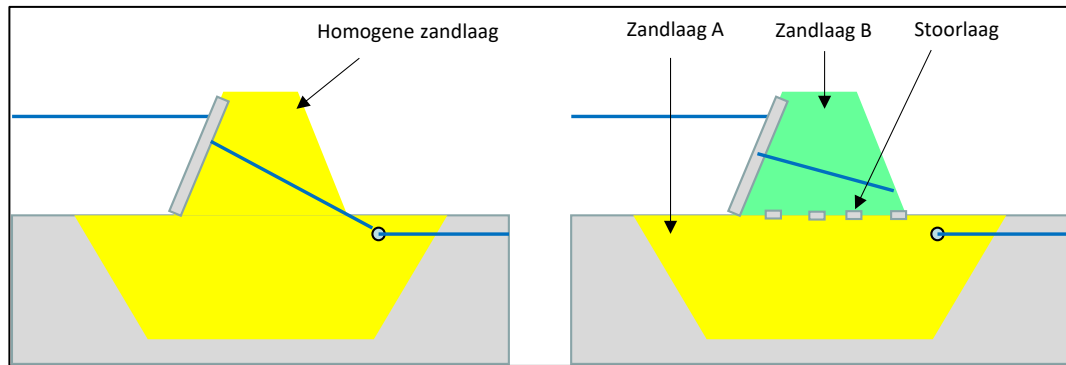
Het verloop van de grondwaterstand in een zandkern is onder dagelijkse omstandigheden fors anders dan bij hoogwater. Ook het verschil tussen een  $T=1$  hoogwater en maatgevend hoogwater is substantieel. Dit komt onder andere doordat het buitentalud een intredepunt is. Wanneer het buitenwater hoger komt te staan, komt de waterlijn steeds dichterbij de kruin van de dijk. Dit effect is dominant, omdat er sprake is van een zeer korte lengteschaal. Daarom is de waarde van kalibratie van een freatisch grondwatermodel ondergeschikt aan het correct meenemen van de relevante processen/fysica. Kalibratie is wel waardevol indien er een gering verschil is tussen streefpeil en maatgevend hoog water.

#### **Aanvullingen op default geohydrologische analyse freatische grondwaterstanden**

De modellering van de freatische grondwaterstanden heeft in de TRWD al veel concrete handvatten. Aanvullingen en detaillering op de TRWD zijn mogelijk, maar zijn niet vanzelfsprekend.

Twee zaken beïnvloeden de resultaten sterk in een grondwatermodel. De eerste is de invloed van doorlatendheden op de berekende debieten. Bij hogere doorlatendheden van de bodem worden altijd hogere debieten berekend.

De tweede is de invloed van stoorlagen en variaties qua grondsoort en doorlatendheid. In het dwarsprofiel zijn soms stoorlagen aanwezig. Deze hebben een sterke invloed op het freatisch niveau van het grondwater en de effectiviteit van de drainagetechniek. Bij diverse dijken bestaat het zandcunet uit twee delen. Deze hebben andere sondeerweerstand, verdichtingsgraden en daarmee ook andere doorlatendheden. Soms zijn tussen deze twee zandlagen (kleiige) stoorlagen aanwezig. Een schets daarvan is weergegeven in Figuur 3-10. De invloed hiervan kan het meest passend worden afgevangen door met meerdere scenario's voor de bodemopbouw te rekenen.



Figuur 3-10: Schematisering van een kering met een zandcunet. Daarbij zijn twee scenario's weergegeven.

### **Intermezzo: gebruik van grondwatermodellen bij bepalen niveau freatisch grondwater**

Het gedegen bepalen van het niveau van het freatisch grondwater in een dijk is mogelijk. Dit geeft ook de kans om meerdere parameters gedetailleerd te bepalen, zoals het effect van drainage. Echter, grondwatermodellen kunnen alleen een meerwaarde geven ten opzichte van de TRWD indien rekening wordt gehouden met onderstaande zaken.

#### *Boven de grondwaterstand zit geen grondwater*

In grondwatermodellen is de laagdikte van de watervoerende laag een wezenlijke parameter. Echter wanneer het niveau van het freatisch grondwater wordt beïnvloed, dan varieert de dikte van de watervoerende laag sterk binnen een dwarsprofiel. Er moet gebruik gemaakt worden van een softwarepakket waarin hier expliciet rekening mee wordt gehouden. Meestal kan dit met de meest gangbare softwarepakketten, maar hier dient handmatige aandacht voor te zijn. Vaak kunnen semi-3D modellen dit niet afdoende nauwkeurig modelleren. Goed modelleren is dus mogelijk, maar vraagt een bewuste modelkeuze.

#### *Het talud ligt onder een talud*

Het intredepunt voor grondwater is meestal het buitentalud. Wanneer het buitenwater stijgt, komt het intredepunt van het water dichterbij de kruin te liggen. Dit proces dient expliciet gemodelleerd te worden. Dit is goed haalbaar voor modellen die gebaseerd zijn op een dwarsprofiel. Goed modelleren is dus mogelijk, maar vraagt ook hier een bewuste modelkeuze (bv. Plaxflow, FeFlow of modflow met specifieke aandacht).

#### *Kleilagen en structuurvorming*

Een belangrijke invloed op de grondwaterstroming is de kleibekleding aan de buitenzijde. Indien deze een volledig afsluitende laag vormt over het gehele buitentalud (dit is niet altijd het geval), heeft deze een forse impact op het niveau van het freatisch grondwater. Deze laag ligt boven de reguliere grondwaterstand en wordt daardoor beïnvloed door bodemprocessen. Reguliere eigenschappen voor kleilagen in geohydrologische modellen zijn gegeven in bronnen zoals (Bot, 2016). Daar zijn doorlatendheden te vinden van ca. 0,01 m/dag. Hierin is nog geen rekening gehouden met structuurvorming. De invloed daarvan is beschreven in (TAW, 1996). Daar zijn doorlatendheden te vinden van ca. 1 m/dag. Structuurvorming kan een meer bepalende invloed hebben dan uit de meting van doorlatendheden in het laboratorium volgt. Indien beschikbaar kan dit met praktijkmetingen worden geïjkt. Goed modelleren is dus mogelijk, maar vraagt ook hier een bewuste keuze.

#### *In Nederland regent het (soms)*

Door neerslag stijgt de grondwaterstand. De rekenregels in TRWD voor zanddijken gaan ervan uit dat het nooit regent. De rekenregels in TRWD voor kleidijken gaan ervan uit dat er een opbolling is in de dijk zonder aanwijsbare oorzaak. In de WaternetCreator is de opbolling geheel geschrapt en stijgt ook in een kleidijk het grondwater mee met het buitenwater. De rekenregels voor een intensieve regenbui in TRWD (19 mm/dag gedurende 7 dagen) gaan er vanuit dat tussentijds het grondwater niet afstroomt. Hieruit blijkt dat er op verschillende manieren wordt omgegaan met regen in de bestaande kaders.

Passend modelleren van neerslag is mogelijk, maar kent veel uitdagingen. Dit betreft de tijdsduur van de regenbui, combinatie van extreme neerslag met extreem hoog water, invloed van de periode voorafgaand aan extreme neerslag, oppervlakkige afstroming en impact van objecten als asfaltwegen. Best practice oplossing voor bovenstaande is het maken van een grondwatermodel en deze valideren met freatische peilbuis (met neerslag en verdamping). Maar voordat deze een verbetering geeft ten opzichte van de TRWD is een ruime inspanning nodig.

## 4 Veiligheidsbenadering

### 4.1 Wettelijke kaders

De normen in de Waterwet zijn afgeleid van het overstromingsrisico dat aanvaardbaar wordt gevonden voor gebieden die bescherming genieten van (primaire) keringen. De normen voor deze gebieden berusten op de volgende twee principes (ENW, 2017):

1. Iedereen moet kunnen rekenen op dezelfde minimale bescherming: het basisbeschermingsniveau, uitgedrukt in Lokaal Individueel Risico (LIR).
2. Waar de gevolgen van overstroming zeer groot zijn, is een kleinere overstromingskans passend, op basis van het groepsrisico en een Maatschappelijke Kosten Baten Analyse (MKBA).

In het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) zijn voorschriften opgenomen voor het beoordelen van primaire waterkeringen. De huidige beoordelingsronde loopt van 2017 tot 2023. In OI2014v4 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017) zijn richtlijnen opgenomen voor het ontwerpen van maatregelen.

Beheerders van primaire waterkeringen moeten, volgens de Waterwet, minstens eens in de twaalf jaar rapporteren of hun keringen voldoen aan de wettelijke veiligheidseisen. De manier waarop deze beoordeling moet worden uitgevoerd, is vastgelegd in een wettelijk instrumentarium. In opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat actualiseert Rijkswaterstaat dit instrumentarium voor iedere beoordelingsronde. Actualisatie gebeurt op basis van nieuwe kennis, inzichten uit onderzoek en ervaringen met het vorige instrumentarium. In hoofdstuk 9 van dit document is beschreven hoe een beoordeling van een drainagetechniek dient te worden uitgevoerd op basis van het wettelijk instrumentarium.

### 4.2 Veiligheidsbenadering uitgaande van WBI2017 en OI2014

De basis van de veiligheidsbenadering is de overstromingskans. De overstromingskans wordt bestaat uit het risico op falen van een kering. Deze kan falen volgens meerdere faalmechanismes. Het bepalen van de faalkans van een faalmechanisme kan op meerdere werkwijzes. Er bestaan drie werkwijzes:

- Volledig probabilistisch.
- Semi-probabilistisch, met scenario's.
- Semi-probabilistisch, met schematiseringsfactor.

In de eerste methode worden alle onzekerheden meegenomen. In semi-probabilistische berekeningen wordt gewerkt met veilige waarden (karakteristieke of rekenwaarden). Restonzekerheden worden afgedekt met scenario's en/of veiligheidsfactoren.

De algemene werkwijze bepaling van belastingsituaties, relevante schematiseringskeuzes, parameteranalyses en rekenwijzes zijn binnen het OI/WBI vastgelegd in de schematiseringshandleidingen.

### **Intermezzo: Naar een groene veiligheidsbenadering voor drainagetechnieken**

Veiligheidsbenaderingen bij drainagetechnieken zijn in drie groepen in te delen.

De eerste groep bestaat uit onderzoeken die een sterke focus hebben op ontwerp van drainagetechnieken, maar daarbij het onderwerp veiligheidsbenadering niet aanstippen. Voorbeelden zijn: Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken, Addendum TRWG, WBI2017 (faalmechanismes STBI en STMI), literatuur rondom landbouwdrainage, of literatuur rondom drinkwaterwinningen (KWR, 2011).

De tweede groep bestaat uit onderzoeken die veiligheidsbenadering voor drainagetechnieken uitwerken en daarbij een aantal sterke punten hebben, maar ook blinde vlekken kennen. In (Miranda, 2014) zijn de invloeden van geohydrologische onzekerheden op drainage-technieken uitgewerkt. In (BZ Ingenieurs & Managers, 2017) zijn de onzekerheden van mechanische en elektrische onderdelen van het DMC-systeem uitgewerkt. In (De Vries & van de Wiel, 2014) is voor de waterontspanner een overall concept neergezet van beheer, techniek en dijk.

In de eerdergenoemde onderzoeken resteren blinde vlekken. Deze zijn soms opgevangen in het volgende onderzoek, soms niet. Er bestaan de volgende restpunten: combineren van onzekerheden tussen verschillende disciplines (geohydrologie, geotechniek en de constructie van de drainagetechniek). Daarnaast het verbinden van techniek met beheer en daarbij de invloed van reparaties, testen en monitoring. Het maken van keuzes die invloed hebben op onzekerheden, zoals ontwerpvarianten of het doen van onderzoek. Tenslotte missen er eenduidige rekenwijzes, parameters en uitgangspunten waardoor de resultaten reproduceerbaar zijn.

De derde groep bestaat uit documenten die bovenstaande zaken combineren zoals de POV Publicatie Drainagetechnieken en deze OBR-drainagetechnieken. Hierin is het streven om de sterke punten samen te brengen en de blinde vlekken weg te nemen. In POV Publicatie Drainagetechnieken is daarbij ingezet op het overkoepelende geheel. In deze OBR-drainagetechnieken is de focus het geven van eenduidige rekenwijzes, parameters en uitgangspunten. Sommige parameters en werkwijzes daarbij zijn nog groen. Daarmee is een stap gezet in de richting van het verder invullen van de blinde vlekken.

Het verschil tussen beoordelen en toetsen zit voornamelijk in het zichtjaar. Deze datum ligt doorgaans bij een ontwerp verder in de toekomst dan bij een beoordeling. Aangevoerd moet worden dat in het zichtjaar aan de veiligheid wordt voldaan. Naast de toekomstig hogere waterstanden moet ook rekening worden gehouden met degradatie van de dijk en de drainageconstructie, tot en met het zichtjaar. Vanzelfsprekend worden beheer en onderhoud daarbij in acht genomen. Het is ook mogelijk ervoor te kiezen een drainageconstructie, of onderdelen daarvan, te ontwerpen voor een kortere levensduur dan het zichtjaar voor de dijkversterking. In dat geval moet rekening worden gehouden met vervangen van (onderdelen van) het systeem.

In de PPD zijn werkwijzes beschreven om de drainagetechniek mee te nemen in de werkwijzes. Dit leidt tot de volgende drie werkwijzes:

- Volledig probabilistisch.  
Omvat probabilistische aspecten van de drainage zoals wel en niet functioneren.
- Semi-probabilistisch, met scenario's.  
Omvat scenario's betreffende de drainage zoals wel en niet functioneren.
- Semi-probabilistisch, met schematiseringsfactor.  
Deze factor is voldoende ruim voor het afdekken van scenario's met drainage, zoals wel en niet functioneren.

Bovenstaande methoden hebben sterke overeenkomsten. In de eerste plaats sluiten deze aan bij de vigerende normen. In de tweede plaats is de zekerheid van het functioneren van de drainage een extra onderdeel. Alle drie de werkwijzes kunnen direct of indirect in elkaar omgeschreven worden. In deze OBR is de methodiek "Semi-probabilistisch, met scenario's" uitgewerkt.

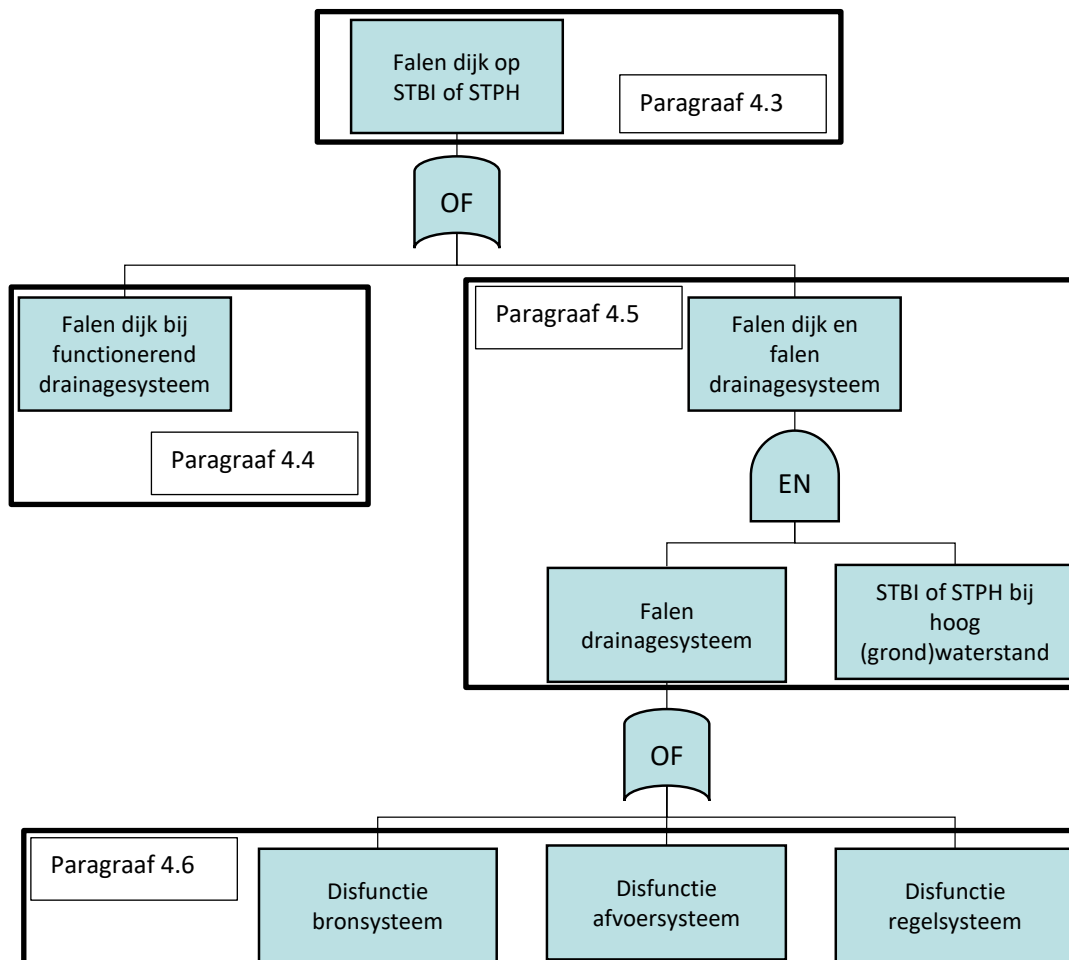
### 4.3 Maximaal toelaatbare faalkans

Centraal begrip binnen het WBI/OI is de norm of de maximaal toelaatbare faalkans. Er bestaan twee werkwijzes om daar invulling aan te geven. Bij beoordelen wordt gestart met de losse onderdelen, die worden gebundeld tot een totaal (bottom up) en deze wordt getoetst aan de norm. Bij ontwerpen wordt gestart met norm, deze wordt verdeeld over meerdere faalmechanismen, daarna over meerdere dijkvakken en tenslotte geeft deze handvatten voor een specifieke locatie (top down).

Vertalen van een maximaal toelaatbare faalkans naar een vereiste veiligheidsfactor is binnen WBI/OI een integraal onderdeel van de werkwijze. Het omgekeerde, van een veiligheidsfactor naar een faalkans, is ook een integraal onderdeel van de werkwijze. Deze werkwijze is ter informatie herhaald in de tekstkaders: "Rekenwijze OI2014v4 – opbarsten" en "Rekenwijze OI2014v4 – macrostabiliteit binnenwaarts" in de volgende paragraaf.

Binnen de PPD is in hoofdstuk 3 een doorwrochte veiligheidsbenadering gegeven. Centraal hierbinnen staat het gebruik van scenario's en foutenbomen. Deze methodiek is in deze OBR uitgebreid met handvatten die geschikt zijn voor ontwerpen. De samenhang is gegeven in Figuur 4-1.

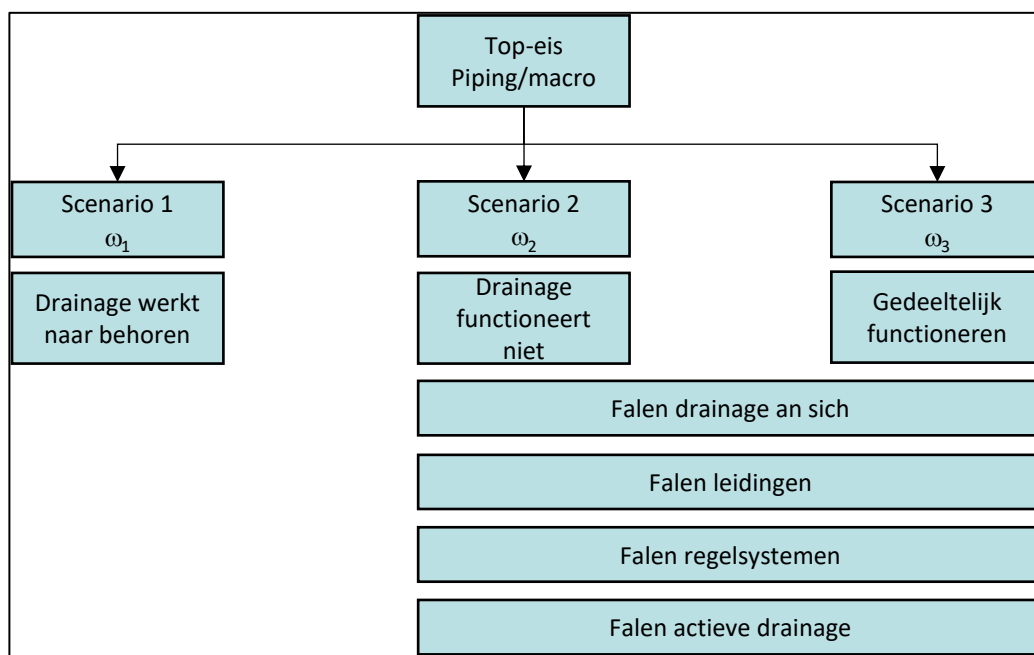




Figuur 4-1: Schematische weergave van de foutenboom op basis van verschillende onderdelen van de maatregel analoog aan de PPD, (POV Macrostabiliteit en POV Piping, 2018). Daarin is aangegeven welke delen waar in deze OBR nader zijn uitgewerkt.

### Algemene veiligheidsbenadering

De werkwijze van de veiligheidsbenadering is weergegeven in Figuur 4-2. Start is de faalkanseis op dwarsdoorsnede niveau voor de relevante faalmechanismen (macrostabiliteit of piping). Deze is onderverdeeld naar drie scenario's. De veiligheidsbenadering kan uitgebreid worden met meer scenario's als daar aanleiding toe is.



Figuur 4-2: Faalkansenverdeling voor drainagetechnieken, met veel voorkomende onderdelen.

De algemene rekenwijze van de faalkans is gegeven in eq. 4.1. Daar zijn de rekenwijzes eq. 4.2 t/m 4.4 vanaf geleid.

$$P(F|D_1) \cdot P(D_1) + P(F|D_2) \cdot P(D_2) + P(F|D_3) \cdot P(D_3) \leq P_{eis,dsn} \quad \text{eq. 4.1}$$

of

$$P(F|D_1) \cdot P(D_1) \leq \omega_1 \cdot P_{eis,dsn} \quad \text{eq. 4.2}$$

$$P(F|D_2) \cdot P(D_2) \leq \omega_2 \cdot P_{eis,dsn} \quad \text{eq. 4.3}$$

$$P(F|D_3) \cdot P(D_3) \leq \omega_3 \cdot P_{eis,dsn} \quad \text{eq. 4.4}$$

Hierbij is:

- $P_{eis,dsn}$  Faalkanseis op dwarsdoorsnedeniveau voor een specifiek faalmechanisme. [kans/jaar]
- $P(D_1)$  Kans op scenario 1 [kans]
- $P(F|D_1)$  Kans op falen kering, gegeven scenario 1 [kans/jaar]
- $P(D_2)$  Kans op scenario 2 [kans]
- $P(F|D_2)$  Kans op falen kering, gegeven scenario 2 [kans/jaar]
- $P(D_3)$  Kans op scenario 3 [kans]

• $P(F D_3)$	Kans op falen kering, gegeven scenario 3	[kans/jaar]
• $\omega_1$	Faalkansruimtefactor voor scenario 1	[-]
• $\omega_2$	Faalkansruimtefactor voor scenario 2	[-]
• $\omega_3$	Faalkansruimtefactor voor scenario 3	[-]

Bij het uitvoeren van een beoordelingen is de geadviseerde rekenwijze eq. 4.1.

Bij het uitvoeren van een vroege ontwerpfase (planfase tot en met VO) beoordelingen is de geadviseerde rekenwijze eq. 4.2 t/m 4.4. Daarbij worden de volgende faalkansruimtefactoren geadviseerd:

- $\omega_1 = 33\%$ .
- $\omega_2 = 33\%$ .
- $\omega_3 = 33\%$ .

Bij het uitvoeren van een latere ontwerpfase (DO/ UO) beoordelingen is de geadviseerde rekenwijze eq. 4.2 t/m 4.4. Daarbij worden de volgende faalkansruimtefactoren geadviseerd:

- $\omega_1 =$  vrij aan de ontwerper.
- $\omega_2 =$  vrij aan de ontwerper.
- $\omega_3 =$  vrij aan de ontwerper.
- Mits wordt voldaan aan de volgende voorwaarde:  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 100\%$ .

#### Scenario 1: Drainagetechniek werkt naar behoren

Het eerste scenario is dat de drainagetechniek naar behoren werkt. In dit geval moet (ook) voldoende veiligheid aanwezig zijn ter plaatse van de waterkering.

Specifieke aandacht gaat uit naar de grondwaterstand die wordt behaald bij een goed functionerende drainagetechniek. In de PPD paragraaf 5.5.2. staat daarover het volgende: "In een semi-probabilistisch dijkontwerp moet worden gerekend met de karakteristieke stijghoogte die met 95% zekerheid niet zal worden overschreden, gegeven de optredende buitenwaterstand." Handvatten voor het bepalen van deze 95% waarde zijn gegeven in paragraaf 4.7.

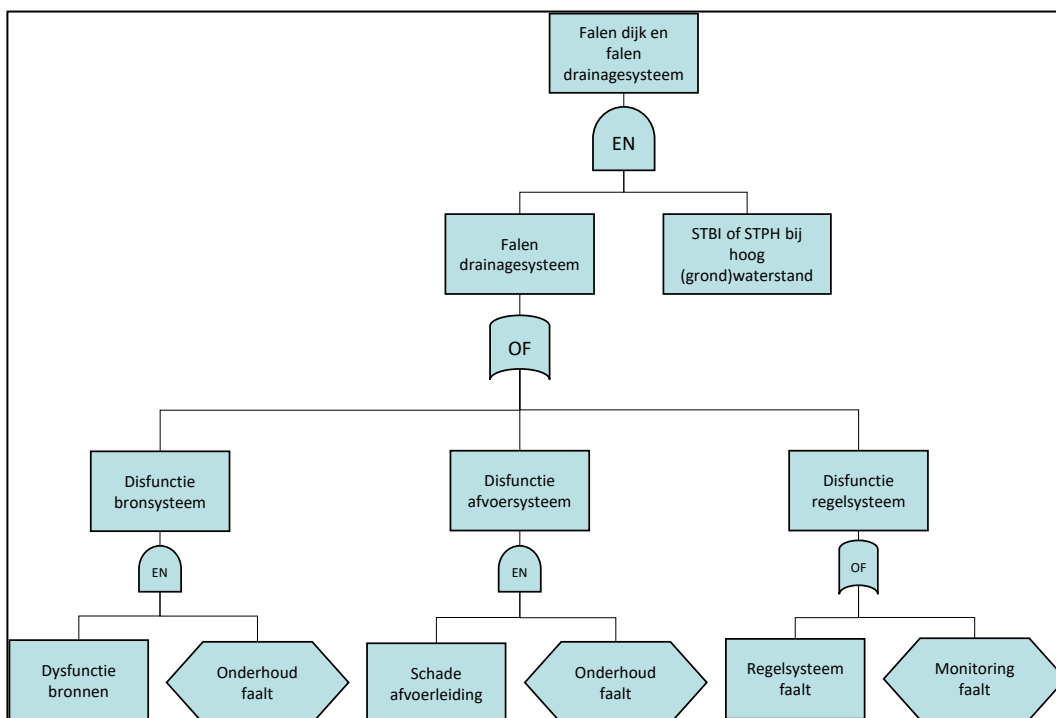
Daarnaast gaat aanvullende aandacht uit naar falen van de kering op andere locaties. Zoals ondiepe glijcirkels die niet beïnvloed worden door de drainagetechniek of opbarstrisico's in de zone tussen de dijk en de drainagetechniek.

#### Scenario 2: Drainagetechniek functioneert niet

Het falen van de drainagetechniek betreft de kans dat een drainage niet functioneert tijdens hoogwater. Dit betreft het gebruik van een foutenboom conform de PPD hoofdstuk 3 (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018). Een voorbeeld faalkansenboom is gegeven in Figuur 4-3. Deze richtlijn geeft hiervoor extra handvatten. Deze zijn gegeven in paragraaf 4.5 en in paragraaf 4.6.

**Context scenario 2: drainagetechniek functioneert niet**

Invulling van scenario 2 sluit aan bij bestaand gedachtegoed van eerdere veiligheidsbenaderingen. Het falen van leidingen en horizontale drainagetechnieken bouwen voort op het veiligheidsraamwerk van POV Kabels en leidingen voor leidingen (POV K&L, 2018). Daarop is de aanpassing gemaakt dat de tijdsduur van hoogwater ook van belang is, omdat in het rivierengebied deze tijdsduur niet verwaarloosbaar is. Het falen van regelsystemen bouwen voort op het veiligheidsraamwerk van betrouwbaarheid sluiting zoals opgenomen in Leidraad kunstwerken (TAW, 2003). Daarbij is de werkwijze omtrent het open keerpeil vervangen door de veiligheid van de dijk indien drainage niet functioneert.



Figuur 4-3: Schematische weergave van de foutenboom op basis van verschillende onderdelen. Dit is een vereenvoudigde versie van de PPD paragraaf 3.4.4.1, (POV Macrostabieleit en POV Piping, 2018) Onder andere het deel geotechnisch falen is nu elders belegd.

**Scenario 3: gedeeltelijk functioneren**

Scenario 1 en 2 zien het functioneren van drainage als zwart-wit. Drainage functioneert in de praktijk ook gedeeltelijk. In de overige scenario's kan hier rekening mee gehouden worden, invulling van deze scenario's is project specifiek. Hieronder zijn voorbeelden gegeven van het gedeeltelijk functioneren van drainagetechnieken:

- Regelbare overlaat is onjuist afgesteld.  
 In dit geval is niet het gehele drainagesysteem gefaald, er is nog een restfunctie. Afhankelijk van de compositie van de drainagetechniek, een 0,2 m hoger niveau van de regelbare overlaat tot 0,1 à 0,2 m hogere grondwaterstand rondom de dijk.

- Pomp van de actieve drainage faalt, water kan uitstromen via overlaat.  
In dit geval is ook niet het gehele drainagesysteem gefaald, er is nog een restfunctie.  
Afhankelijk van de compositie van de drainagetechniek, een 0,5 m hoger niveau van het uitstroomniveau tot 0,25 à 0,5 m hogere grondwaterstand rondom de dijk.
- Een dijkvak heeft drie drainagestrengen waarvan alleen de middelste faalt.  
Kans op dit scenario is gelijk aan het falen van een enkele drainagestreng. De faalkans gegeven dit scenario volgt uit een glijvlakanalyse of een opbarstberekening, maar met een grondwaterstand gebaseerd op slechts 2 van de 3 werkende strengen.

#### 4.4 Rekenrecept scenario 1: Drainagetechniek werkt naar behoren

Door het functioneren van een drainagetechniek wordt de grondwaterstand (lokaal) beheerst. Een dijk kent onder deze situaties nog een zekere resterende faalkans. Enkele voorbeelden daarvan zijn:

- Macrostabieliteit:  
Er is een bezwijkvlak, deze wordt positief beïnvloed door de drainagetechniek. Getoetst wordt of er nu voldoende stabiliteit/veiligheid is.
- Macrostabieliteit:  
Er zijn alternatieve bezwijkvlakken, maar deze liggen elders dan in de situatie zonder drainagetechniek. Bijvoorbeeld een ondiep glijvlak nabij een steil talud. Getoetst wordt of deze vlakken ook voldoende stabiliteit/veiligheid omvatten.
- Piping:  
Er is een opbarstpunt, deze wordt positief beïnvloed door de drainagetechniek. Getoetst wordt of er nu voldoende stabiliteit/veiligheid is.
- Piping:  
Er zijn alternatieve opbarstpunten, maar deze liggen elders dan in de situatie zonder drainagetechniek. Bijvoorbeeld een lageregelegen deel in het achterland/ waterpartij. Getoetst wordt of deze vlakken ook voldoende veiligheid omvatten.

##### Schematisatiewijze scenario 1

De schematisatie wijze in scenario 1 is conform de vigerende methodes. Bij de schematisatie van de grondwaterstanden wordt het effect van de drainagetechniek meegenomen.

##### Rekenrecept

De faalkans van een drainagetechniek is te berekenen met de onderstaande algemene rekenwijze:

$$P(F|D_1) \cdot P(D_1) \leq \omega_1 \cdot P_{eis,dsn} \quad (\text{herhaling eq. 4.2})$$

Hierin is:

- |                 |  |             |
|-----------------|--|-------------|
| • $P_{eis,dsn}$ | Faalkanseis op dwarsdoorsnedeniveau voor een specifiek faalmechanisme. | [kans/jaar] |
| • $P(D_1)$      | Kans op scenario 1   | [kans]      |
| • $P(F D_1)$    | Kans op falen kering, gegeven scenario 1                               | [kans/jaar] |
| • $\omega_1$    | Faalkansruimtefactor voor scenario 1                                   | [-]         |

### **Kans op scenario 1**

De kans op scenario 1 is afhankelijk van de betrouwbaarheid van de drainagetechniek. Deze wordt bepaald met de onderstaande rekenwijze.

$$P(D_1) = 1 - P(D_2) - P(D_3) \quad \text{eq. 4.5}$$

Vaak is de kans op falen van een drainagetechniek (scenario 2 en 3) zeer klein. In die gevallen benaderd  $P(D_1) = 1,0$ .

### **Kans op falen kering, gegeven scenario 1**

De faalkans van een dijk gegeven scenario 1  $P(F|D_1)$  wordt bepaald middels de vigerende methoden. Binnen het WBI/OI zijn hier handvatten voor gegeven. Deze zijn herhaald in de tekstkaders “Rekenwijze OI2014v4 – opbarsten” en “Rekenwijze OI2014v4 – macrostabiliteit binnenwaarts” en “Rekenvoorbeeld: microstabiliteit”.

### Rekenwijze OI2014v4 - opbarsten

Het veiligheidsconcept voor piping is erop berust dat het effect van de drainagetechniek op de waterspanningen zodanig is, dat de kans op opbarsten voldoende klein is. De vereiste veiligheidsfactor tegen opbarsten ( $\gamma_{up}$ ) is een functie van de betrouwbaarheidsindex en wordt in OI2014v4 middels onderstaande formule bepaald:

$$\gamma_{up} = 0,48 \cdot e^{(0,46 \cdot \beta_{eis,dsn} - 0,27 \cdot \beta_{max})}$$

Waarin:

$\gamma_{up}$	Veiligheidsfactor voor het faalmechanisme opbarsten	[-]
$\beta_{eis,dsn}$	Geëiste betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede	[-]
$\beta_{max}$	Betrouwbaarheidsindex behorend bij de maximaat toelaatbare overstromingskans (bij $P_{max} = 1/10.000$ jaar geldt $\beta_{max} = 3,72$ )	[-]

### Omgekeerde rekenwijze OI2014v4 - opbarsten

De faalkans van (in)stabiliteit is een functie van de veiligheidsfactor en wordt middels onderstaande formule bepaald:

$$\beta_{act,dsn} = \frac{1}{0,46} [\ln(\gamma_{up,act}/0,48) + 0,27 \cdot \beta_{max}]$$

$$P(F|D_1) = P_{act,dsn} = \Phi^{-1}(\beta_{act,dsn})$$

Waarin:

$\gamma_{up,dsn}$	Actuele veiligheidsfactor tegen opbarsten	[-]
$\beta_{max}$	Betrouwbaarheidsindex behorend bij de maximaat toelaatbare overstromingskans (bij $P_{max} = 1/10.000$ jaar geldt $\beta_{max} = 3,72$ )	[-]
$\beta_{act,dsn}$	Actuele betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede	[-]
$P_{act,dsn}$	Actuele faalkans voor een doorsnede tegen opbarsten	[-]

### Rekenvoorbeeld omgekeerde rekenwijze OI2014v4

Gegeven een opbarstsituatie met een opbarstveiligheid van  $\gamma_{up,act} = 2,0$  en  $\beta_{max} = 3,72$ .

$$\beta_{act,dsn} = \frac{1}{0,46} [\ln(2,0/0,48) + 0,27 \cdot 3,72] = 5,29$$

$$P(F|D_1) = P_{act,dsn} = \Phi^{-1}(5,29) = 6,25 \cdot 10^{-8} \text{ [kans per jaar]}$$

### Rekenwijze OI2014v4 – macrostabiliteit binnenwaarts

De vereiste veiligheidsfactor tegen (in)stabiliteit ( $\gamma_n$ ) is een functie van de betrouwbaarheidsindex en wordt in OI2014v4 middels onderstaande formule bepaald:

$$\gamma_n = 0,15 \cdot \beta_{eis,dsn} + 0,41$$

$$SF_{eis} = \gamma_n \cdot \gamma_d$$

Waarin:

$\gamma_n$	Veiligheidsfactor voor het deelfaalmecanisme opbarsten	[-]
$\beta_{eis,dsn}$	Geëiste betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede	[-]
$\gamma_d$	Modelfactor ( $\gamma_d = 1,06$ bij UpliftVan)	[-]
$SF_{eis}$	Vereiste stabiliteitsfactor in berekening	[-]

### Omgekeerde rekenwijze OI2014v4 - macrostabiliteit binnenwaarts

De faalkans van (in)stabiliteit is een functie van de veiligheidsfactor en wordt middels onderstaande formule bepaald:

$$\beta_{act,dsn} = \frac{1}{0,15} \left[ \frac{SF_{act,dsn}}{\gamma_d} - 0,41 \right]$$

$$P(F|D_1) = P_{act,dsn} = \Phi^{-1}(\beta_{act,dsn})$$

Waarin:

$SF_{act,dsn}$	Actuele veiligheidsfactor tegen (in)stabiliteit	[-]
$\gamma_d$	Modelfactor ( $\gamma_d = 1,06$ bij UpliftVan)	[-]
$\beta_{act,dsn}$	Actuele betrouwbaarheidsindex voor een doorsnede	[-]
$P_{act,dsn}$	Actuele faalkans voor een doorsnede tegen opbarsten	[-]

### Rekenvoorbeeld omgekeerde rekenwijze OI2014v4

Gegeven een talud met een stabiliteit van  $SF_{act,dsn} = 1,5$  en  $\gamma_d = 1,06$ .

$$\beta_{act,dsn} = \frac{1}{0,15} \left[ \frac{1,5}{1,06} - 0,41 \right] = 6,70$$

$$P(F|D_1) = P_{act,dsn} = \Phi^{-1}(6,70) = 1,04 \cdot 10^{-11} \text{ [kans per jaar]}$$

### Rekenvoorbeeld: microstabiliteit

Microstabiliteit is binnen het WBI2017 een faalmecanisme dat behoort conform ‘Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017; Bijlage III sterkte en veiligheid’ (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019c); paragraaf 2.1 tot “groep 4”. De omschrijving van groep 4 is als volgt:

*Toetssporen waarvoor geen probabilistische berekening of semiprobabilistische berekening met veiligheidsfactoren die voor WBI 2017 zijn afgeleid beschikbaar zijn.*

Er gelden dan ook geen rekenkundige kaders voor de faalkansen en de vereiste veiligheidsfactoren voor dit faalmecanisme.



**Rekenvoorbeeld: macrostabiliteit**

Voorbeeld: dijktraject 36-3 (norm 1:10.000, faalkansruimtefactor macrostabiliteit = 4%)

Faalkanseis op dwarsdoorsnede.

Zonder drainage:  $P_{dsn,stbi} = 2,2 \times 10^{-7}$  [1/jaar]

Met drainage:  $P_{dsn,stbi,drainage} = 2,2 \times 10^{-7} * 33\% = 7,1 \times 10^{-8}$  [1/jaar]

Schadefactor te hanteren in berekeningen:

Zonder drainage:  $\gamma_n = 1,17$  [-]

Met drainage:  $\gamma_{n,drainage} = 1,20$  [-]

**Rekenvoorbeeld: piping/ opbarsten**

Voorbeeld: dijktraject 36-3 (norm 1:10.000, faalkansruimtefactor piping = 24%)

Faalkanseis op dwarsdoorsnede.

Zonder drainage:  $P_{dsn,stph} = 3,0 \times 10^{-7}$  [1/jaar]

Met drainage:  $P_{dsn,stph,drainage} = 3,0 \times 10^{-7} * 33\% = 1,0 \times 10^{-7}$  [1/jaar]

Veiligheidsfactor voor opbarsten te hanteren in berekeningen:

Zonder drainage:  $\gamma_{up} = 1,75$  [-]

Met drainage:  $\gamma_{up,drainage} = 1,93$  [-]

## 4.5 Rekenrecept scenario 2: falen drainagetechniek

Een drainagetechniek kent een zekere faalkans. Indien deze faalt, dan neemt de veiligheid van de dijk af. Dit gecombineerde risico wordt in scenario 2 beoordeeld. De rekenwijze is analoog aan die van windturbines (STOWA, 2018) waarbij falen zeldzaam is, maar het falen impact (kan) hebben op de waterveiligheid.

### Schematisatiewijze scenario 2

De schematisatiewijze in scenario 2 is conform de vigerende methodes. Bij de schematisatie van de grondwaterstanden is het effect van de drainagetechniek niet meegenomen.

### Rekenrecept

De faalkans van een drainagetechniek is te berekenen met de onderstaande algemene rekenwijze:

$$P(F|D_2) \cdot P(D_2) \leq \omega_2 \cdot P_{eis,dsn} \quad (\text{herhaling eq. 4.3})$$

Hierin is:

- $P_{eis,dsn}$  Faalkanseis op dwarsdoorsnedeniveau [kans/jaar]  
voor een specifiek faalmechanisme.
- $P(D_2)$  Kans op scenario 2 [kans]
- $P(F|D_2)$  Kans op falen kering, gegeven scenario 2 [kans/jaar]
- $\omega_2$  Faalkansruimtefactor voor scenario 2 [-]

### Kans op falen kering, gegeven scenario 2

De werkwijze rondom de kans op het falen van de dijk in scenario 2 is analoog aan die in scenario 1. Verschil is de herziene schematisatie wijze.

#### Rekenvoorbeeld: piping – scenario 2

Voorbeeld: dijktraject 36-3 (norm 1:10.000, faalkansruimtefactor piping = 24%)

Faalkanseis op dwarsdoorsnede.

Zonder drainage:  $P_{dsn,stph} = 3,0 \times 10^{-7}$  [1/jaar]

Met drainage:  $P_{dsn,stph,drainage} = 3,0 \times 10^{-7} \times 33\% = 1,0 \times 10^{-7}$  [1/jaar]

Indien de drainagetechniek faalt, dan is de stijghoogte aanzienlijk hoger. Mogelijk is opbarsten ter plaatse van (binnenteen/teensloot van) de dijk niet meer uit te sluiten. De dijkveiligheid op het faalmechanisme piping wordt nu bepaald door de maatgevende faalkans van opbarsten, heave en terugschrijdende erosie.

Er geldt de volgende aannames:

Maatgevend faalmechanisme gegeven scenario 2: = terugschrijdende erosie

Berekende veiligheidsfactor, gegeven scenario 2: = 1,00 [-]

Kans op falen kering, gegeven scenario 2: =  $1,25 \times 10^{-5}$  [1/jaar]

Indien de kering wil voldoen aan de ontwerpeisen voor scenario 2, dan dient de kans op scenario 2,  $P(D_2)$ , afdoende laag te zijn. Deze kans dient in dit rekenvoorbeeld kleiner te zijn dan 1x per 125 jaar ( $= 8,0 \times 10^{-3} = 1,0 \times 10^{-7} / 1,25 \times 10^{-5}$ ).

#### Rekenrecept – kans op scenario 2

In de faalboom worden diverse onderdelen van een drainagetechniek opgenomen. Sommige onderdelen kunnen goed ondervangen worden met beheer, andere weer minder. Per drainagetechniek zijn expliciete handvatten en startwaarden voor de faalkansen gegeven in paragraaf 4.6.

Falen kan gebeuren door meerdere faaloorzaken, zoals het defecte (afvoer)leidingen of een afsluiter die dicht is. De totale kans op falen is de om van alle individuele faalkansen. Daarvoor geldt de onderstaande algemene rekenwijze:

$$P(D_2) = P(D_{2.Drainage}) + P(D_{2.Leidingen}) + etc. \quad \text{eq. 4.6}$$

Hierin is:

$P(D_2)$	Kans op scenario 2	[kans]
$P(D_{2.Drainage})$	Kans op scenario 2 als gevolg van falen drainage	[kans]
$P(D_{2.Leidingen})$	Kans op scenario 2 als gevolg van falen Leidingen	[kans]

Er bestaan twee soorten faalkansen:

1. Kans per gebeurtenis.  
Deze waarden kunnen gebruikt worden in vergelijking 4.6. Daarbij dient aandacht te zijn voor het aantal objecten binnen een dijksegment.
2. Kans per tijdseenheid.  
Deze waarden kunnen gebruikt worden in vergelijking 4.6 mits vermenigvuldigd met een tijdsduur. Handvatten zijn gegeven in het deel “Werkwijze faalkansen per tijdseenheid.”

### Werken per dijksegment

Faalkansen van drainagetechnieken bestaan uit een faalkans per lengte of per element. In de veiligheidsbenadering moet dan ook een keuze gemaakt worden welke lengte en welk aantal elementen worden meegenomen. Deze lengte is de lengte van een dijksegment.

De faalkanseisen en de veiligheidsbenadering zijn gebaseerd met WBI2017 en OI2104v4. De lengte van een dijksegment is daarom gelijk aan de b-waarde in het lengte-effect van WBI2017 en OI2104v4. Deze waarden zijn herhaald in Tabel 4-1.

Tabel 4-1: Lengte dijksegment per faalmechanisme.

Faalmechanisme	Parameter b <sup>[1]</sup>	Lengte dijksegment
Piping	300 m	Gelijk aan parameter b
Macrostabieliteit (binnenwaarts)	50 m	Gelijk aan parameter b

<sup>[1]</sup> Lengte van onafhankelijke, equivalente vakken. Waarden zijn overgenomen uit OI2104v4 (Rijkswaterstaat, 2017a).

Een voorbeeld is gegeven in Figuur 4-4. Deze geeft de ruimtelijke verdeling van drainage waar. Te zien is dat over de lengte van de dijk meerdere drainagestrengen aanwezig zijn. Indien de veiligheid wordt beschouwd voor het faalmechanisme macrostabieliteit, dan dienen de drainagebuizen meegenomen te worden die een bijdrage geven aan de veiligheid van 50 m dijk. Dit zijn 2 á 3 strengen. Bij andere locaties/drainagetechnieken kan dit betekenen dat naast meerdere strengen ook meerdere pompen/afsluiters/e.d. samen onderdeel uitmaken van de veiligheidsbenadering.

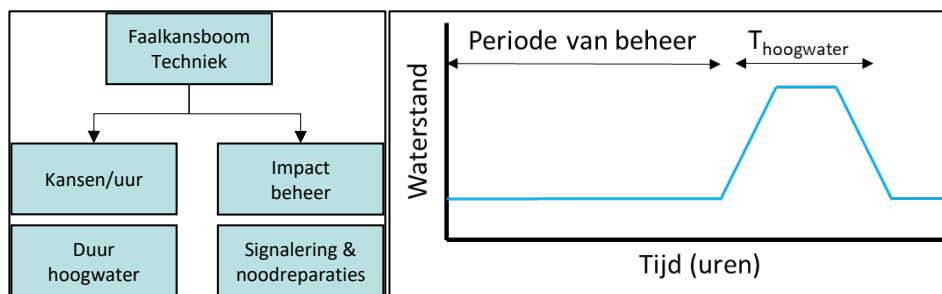


Figuur 4-4: Ruimtelijke verdeling van drainage nabij de dijk, (Waterschap Zuiderzeeland, 2020).

### Werkwijze faalkansen per tijdseenheid

De redeneerlijn is dat een drainagetechniek mag falen, zolang dat niet gebeurt tijdens hoogwater. Hoogwater duurt enkele uren (zee- en meergebied) of dagen per jaar (rivierengebied). Daarom is gewerkt met faalkansen per uur.

De redeneerlijn is gegeven in Figuur 4-5. Een hoogwater heeft een zekere tijdsduur, daarbinnen kan de drainagetechniek falen. Voorafgaand aan het hoogwater kan ook de drainagetechniek falen, maar dit kan binnen het reguliere beheer worden waargenomen. Afhankelijk van de beheerprotocollen en monitoring varieert de periode hoe snel of hoe langzaam falen wordt opgemerkt en verholpen.



Figuur 4-5: Receptuur faalkansboom drainagetechniek met daarin expliciete aandacht voor beheer.

De faalkans van een drainagetechniek is te berekenen met de onderstaande algemene rekenwijze:

$$P(D_2) = P_{falen/uur/m} \cdot L_{dijkvak} \cdot T_{uren/hoogwater} \quad \text{eq. 4.7}$$

Hierin is:

$P(D_2)$	Kans op scenario 2	[kans]
$P_{falen/uur/m}$	Faalkans van de drainagetechniek	[kans/uur/meter]

	Te bepalen aan de hand van een specifieke faalboom. Terugvertaald naar een lengte van 1 m dijk.	
L <sub>dijkvlak</sub>	Lengte van een bezwijkvlak (50 m)	[m]
T <sub>uren/hoogwater</sub>	Tijdsduur van een hoogwatergolf inclusief de periode die voor beheer en monitoring nodig is om gebreken op te merken en te verhelpen.	[uren]

### Tijdsduur van een hoogwatergolf en reparaties

De methodiek gaat uit van een faalkans per uur. Voor de vertaling naar faalkansen is relevant hoeveel uren achter elkaar de techniek zekerheid moet geven. Dit is gelijk aan de tijdsduur van een hoogwatergolf. Daarnaast kan het zijn dat gebreken ontstaan voorafgaand aan een hoogwatergolf. Wanneer die op tijd worden waargenomen kunnen deze worden verholpen voordat dit invloed heeft op het functioneren tijdens hoogwater. Globale handvatten zijn gegeven in Tabel 4-2.

De duur van een hoogwatergolf verschilt sterk tussen het kust/meren gebied en het rivierengebied. Voor het tijdsverloop van extreme buitenwaterstanden is binnen WBI de waterstandsverlooptool ontwikkeld. Deze geeft locatie-specifieke verlopen. Meer globale verlopen zijn gegeven in het verouderde HR2006 (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007).

Naast bovenstaande geldt ook de periode waarin gebreken worden opgemerkt en worden verholpen. Het heeft te maken met de snelheid van het opmerken, dus de inspectiefrequentie. Daarnaast de snelheid van verhelpen/reparaties, dus het beschikken over een effectief beheerprotocol. In dit document worden twee situaties onderscheiden:

- Intensieve monitoring en beheer  
Omvat continue metende sensoren (bv. automatische drukopnemers in peilbuizen) die automatisch signaleren wanneer knelpunten ontstaan. Deze knelpunten worden direct doorgeseind naar de betreffende persoon (bv. monteur). De periode tussen het optreden van een knelpunt en de reparatie ervan vindt plaats in een verwaarloosbare tijd.
- Extensieve monitoring en beheer  
Omvat het waarnemen van knelpunten op basis van dijkinspecties of mensen uit de omgeving. Wanneer een knelpunt wordt aangetroffen, wordt daarna een passende aanpak uitgezocht (bv. vervangen van drainagebuis) en wordt de reparatie ingepland. De periode tussen het optreden van een knelpunt en de reparatie ervan vindt plaats in T=14 dagen<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Het OBR-Drainagetechnieken geeft een eenduidige waarde, dit is een tussenwaarde van andere literatuur en omvat signaleren en reparatie. Enkele andere literatuurbronnen op dit vlak zijn de volgende. De uitgewerkte case-studies rondom leiding falen van de POV K&L (POV K&L, 2020). De uitgewerkte case op blz. 174 in leidraad kunstwerken (TAW, 2003). De uitgewerkte case op blz. 61 in Werkwijzer ontwerpen waterkerende kunstwerken (Rijkswaterstaat, 2018). De uitgewerkte case op blz. 5 in Factsheet: Omgang met buitenwaartse macrostabiliteit (Kennissplatform Risicobenadering, 2018). De handvatten gesteld op blz. 36 in Handreiking windturbines en waterkeringen: techniek (STOWA, 2018).

Tabel 4-2: Voorbeeldwaarden voor de tijdsduur van een hoogwatergolf inclusief periode om gebreken op te merken en te verhelpen.

Gebied	Monitoring en beheer	Tijdsduur Hoogwater	Tijdsduur Opmerken gebreken	Tijdsduur Totaal
Kust/ meren	Intensief	36 uur <sup>[1]</sup>	-	36 uur
	Extensief	36 uur	336 uur <sup>[3]</sup>	372 uur
Bovenrivieren	Intensief	400 uur <sup>[2]</sup>	-	400 uur
	Extensief	400 uur	336 uur <sup>[3]</sup>	736 uur

<sup>[1]</sup> (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007); waterverloop nabij Hoek van Holland.

<sup>[2]</sup> (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007); waterverloop nabij Hagestein.

<sup>[3]</sup> Periode van 2 weken voor signaleren en reparatie.

## 4.6 Handvatten faalkansanalyses drainagetechnieken

### 4.6.1 Algemeen

In de gegeven methodes voor de veiligheidsbenadering is de betrouwbaarheid van de drainagetechniek van wezenlijk belang. Drainagetechnieken kunnen falen door drie oorzaken:

1. Knelpunten bij de aanleg.
2. Geleidelijke faalprocessen.
3. Plotselinge faalprocessen.

Een voorbeeld van het eerste faalproces is dat een geplaatste drainagebuis is platgedrukt. Dit risico kan worden verholpen door een goede opleveringscontrole. Een voorbeeld van het tweede faalproces is dat een drainagebuis geleidelijk verstopt met ijzeraanslag. Dit risico kan worden afgevangen met passend beheer (met enige regelmaat doorspuiten). Dit blijkt ook uit de interviews die afgenomen zijn bij verschillende beheerders van drainagesystemen. Bij het uitvoeren van passend beheer en onderhoud zijn met regelmaat kleine incidenten waargenomen. Maar deze zijn, mits tijdig verholpen, zeer zelden kritiek voor de waterveiligheid. Voor het beheer en onderhoud wordt verwezen naar hoofdstuk 8. Een voorbeeld van het laatste risico is een pomp die het tijdens een hoogwaterperiode begeeft. Dit risico moet een plek krijgen binnen de faalkansanalyse.

Paragrafen 4.6.2 tot 4.6.8 geven handvatten voor de invulling van de faalkansanalyse. Daarbij worden risico's verdeeld naar beheer en de faalkansanalyse. Voor deze laatste zijn kentallen gegeven die passend zijn voor de fases tot en met het VO. Indien onderwerpen, zoals geleidelijke achteruitgang, worden afgevangen met regulier beheer, dan kunnen deze buiten de faalkansbenadering gelaten worden.

In het DO dient een specifieke analyse gemaakt te worden door een (RAMS) specialist. Diverse kentallen van faalkansen en rekenwijzes die specifiek gelden bij keringen zijn o.a. opgenomen in bijlage 3 van Leidraad Kunstwerken (TAW, 2003) of in de recentere (Rijkswaterstaat, 2018).

### **Intermezzo: gevolgen hebben oorzaken**

Faalkansanalyses zoals RAMS-analyses maken gebruik van kentallen rondom faalfrequenties. Daar is bijgehouden hoe vaak een object is gefaald, maar niet waardoor. Uit de literatuur en de interviews komen deze oorzaken wel naar voren. Hieronder een greep uit deze oorzaken.

### **Fusies van waterschappen**

Een waterschap heeft een drainagesysteem in stedelijke omgeving. Hier is 8 à 10 jaar geen onderhoud aan gepleegd. Toen wel onderhoud werd gepleegd, bleek dat diverse (grote) delen waren bezweken en verstopt. Er zijn vele redenen waarom er zo lang geen onderhoud is uitgevoerd. Enkele redenen daarvan zijn dat er een fusie van waterschappen is geweest, daarbij waren meerdere verschuivingen van verantwoordelijkheden. Ook waren de revisietekeningen spoorloos. Daardoor is de drainagetechniek uit het blikveld van beheer verdwenen. Tegenwoordig wordt regulier beheer en onderhoud uitgevoerd. In de 8 à 10 jaar sindsdien is geen enkel knelpunt geconstateerd. De betrouwbaarheid van de drainage als techniek is dus hoog. Maar factoren die het onderhoud beïnvloeden, zoals hier de fusie van een waterschap, hebben een forse invloed op het functioneren.

### **Gebrek aan toezicht**

In (STOWA, 2000) paragraaf 3.2.3 staat het volgende:

*In een onderhoudscontrole rapport uit 1982 werd geconstateerd dat een aantal drainverstoringen werd veroorzaakt door onzorgvuldigheid bij de aanleg (losse klikmoffen, platliggers, verzakkingen, ontbreken buizen of foutief aangelegd insteekpunt). Naar aanleiding hiervan wordt aangegeven dat bij de aanleg van drainage in het algemeen te weinig vakkundig toezicht is en dat bij de uitvoering van het onderhoudswerk vaak goede drainagetekeningen (revisietekeningen) ontbreken.*

Met goed toezicht en een opleveringscontrole kunnen bovenstaande risico's op voorhand worden uitgesloten. Maar in moderne contractvormen staat goed toezicht steeds lager op de agenda. Mogelijk is er een relatie tussen faalkansen en (moderne) contractvorm.

### **Vergunningverlening en gegevensbeheer**

In (STOWA, 2000) paragraaf 4.8 staat het volgende:

*Uit een onderhoudsinspectierapport uit 1982 bleek dat 20% van de drainverstoringen veroorzaakt werd door graafwerkzaamheden. Door vernieling van de drainage wordt de afvoer van de drainage belemmerd en verliest de drain gedeeltelijk of geheel zijn functie. Door beschikbaarheid van revisietekeningen tijdens de uitvoering en een goede afstemming van de werkzaamheden kan voorkomen worden dat de drainage wordt geraakt bij graafwerkzaamheden. Vindt toch beschadiging plaats, dan dient de drainage meteen te worden hersteld.*

Drainage ten behoeve van waterkeringen ligt binnen de beschermingszone van de waterkering. Deze werkzaamheden zijn dus vergunningsplichtig. Als deze procedure passend wordt uitgevoerd kan dit risico op voorhand worden uitgesloten.

In 1982 was het gegevensbeheer een aandachtspunt. Heden zijn al veel slagen gemaakt op het vlak van gegevensbeheer. De meeste beheerders beschikken over revisietekeningen. Met enige regelmaat staan deze ook in een beheerssysteem. Soms staan deze ook in de legger. Maar drainagebuizen rondom waterkeringen staan nog niet in de KLIC-database. Het gegevensbeheer dat de vergunningsprocedure ondersteund wordt dus stapsgewijs beter en kan nog verder verbeterd worden.

## 4.6.2 Faalkansanalyse – verticale bronnen

Bij verticale bronnen bestaan meerdere onderdelen die op verschillende wijzen kunnen falen. In de literatuur (KWR, 2011) wordt als voornaamste risico de achteruitgang van de capaciteit van bronnen/filters genoemd. Dit is een geleidelijk proces waarvoor in het beheer en onderhoud diverse handvatten bestaan. Handvatten voor het meenemen beheer en onderhoud in relatie tot de faalkansen voor verticale bronnen is gegeven in Tabel 4-3.

Tabel 4-3: Kentallen voor faalkansanalyses - verticale bronnen.

Onderdeel	Wijze van falen	Omgangswijze	Faalkans Per 50 m dijk [kans/uur]	Faalkans Per 300 m dijk [kans/uur]
Verticale bron	Geleidelijke verstopping	Conservatieve uitgangspunten in ontwerp, verder afvangen met beheer.	n.v.t.	n.v.t.
Horizontale leiding	Plotselinge breuk bv. door zettingen.	Niet direct zichtbaar, opnemen in faalkansboom. Aanvullende inspecties beheer (camera inspectie).	Conform aan falen leidingen (zie paragraaf 4.6.5).	
Horizontale leiding	Geleidelijke schades bv. door wortelingroei.	Afvangen met regulier beheer (o.a. camera inspectie).	n.v.t.	n.v.t.
Horizontale leiding	Breuk uitstroompunt bv. door maaien	Zichtbaar, afvangen met inspecties. Uitstroompunten robuust invullen.	n.v.t.	n.v.t.

Schade aan uitstroompunten komt zeer frequent voor. In de interviews met beheerders en specialisten is dit in nagenoeg alle gevallen aangegeven. De kans op schade op dit onderdeel is dan ook in de orde grootte van 100%. Beheersmaatregelen die genoemd zijn, zijn inspecties en het "afschrikken" van de maaier. Door bijvoorbeeld het gebruik van robuuste perkoenpalen of betonnen palen.



### 4.6.3 Faalkansanalyse – horizontale drainage

Bij horizontale drains bestaan meerdere onderdelen die op verschillende wijzen kunnen falen. In de literatuur (STOWA, 2000) wordt voornamelijk verstopping met diverse onderliggende oorzaken genoemd. De geleidelijke processen kunnen ondervangen worden in het beheer en onderhoud. Vaak is het zo dat als een buis niet meer kan worden doorgespoten, dat deze nog wel een zekere restfunctie heeft en dus restzekerheid heeft. Belangrijke restrisico's zitten in de zettingsschade waardoor verbindingstukken bezwijken of schade door graafwerkzaamheden (bv. ten behoeve van kabels en leidingen).

Vanuit de interviews en het tekstkader "Intermezzo: gevolgen hebben oorzaken" blijkt dat er verschil zit tussen drainage die normaal wordt beheerd en drainage die extensief wordt beheerd. Daarom zijn separate faalkansen gegeven voor deze twee vormen van beheer. Daarbij geldt:

- Normaal beheer.  
 Beheer vindt plaats conform beheerplan. Deze voldoet aan de kaders geschetst in hoofdstuk 8. Faalkansen zijn gebaseerd op de ervaringen van andere drainage. Deze zijn uitgewerkt in Bijlage 3 Faalkans drainagebuizen.
- Extensief beheer.  
 Beheer vindt niet plaats conform beheerplan of het beheer voldoet niet aan de kaders geschetst in hoofdstuk 8. Faalkansen zijn gebaseerd op andere leidingen (PE/ PVC) uit NPR3659 (NEN, 2003).

Handvatten voor het meenemen beheer en onderhoud in relatie tot de faalkansen voor horizontale drainage zijn gegeven in Tabel 4-4.

Tabel 4-4: Kentallen voor faalkansanalyses – horizontale drainage.

Onderdeel	Wijze van falen	Omgangswijze	Faalkans Per 50 m dijk [kans/uur]	Faalkans Per 300 m dijk [kans/uur]
Horizontale drains	Geleidelijke verstopping (bv. door grond of wortel ingroei)	Conservatieve uitgangspunten in ontwerp, verder afvangen met beheer.	n.v.t.	n.v.t.
Horizontale drains	Plotselinge breuk bv. door zettingen.	Niet zichtbaar, opnemen in faalkansenboom.  Normaal beheer <sup>[1]</sup> : Extensief beheer <sup>[1]</sup> :	1,5 x 10 <sup>-8</sup> 9,0 x 10 <sup>-7</sup>	9,0 x 10 <sup>-8</sup> 5,4 x 10 <sup>-6</sup>
Horizontale leiding	Breuk uitstroompunt bv. door maaien	Zichtbaar, afvangen met inspecties.	n.v.t.	n.v.t.

<sup>[1]</sup> Uitgaande van 50 m drainagebuis per 50 m dijk of 300 m drainagebuis per 300 m dijk. Normaal beheer is gebaseerd op de analyse in Bijlage 3: Faalkans drainagebuizen. Extensief beheer is gebaseerd op PE-leiding uit de NPR3659 (NEN, 2003).

#### 4.6.4 Faalkansanalyse – grindkoffers

Bij grindkoffers bestaan meerdere onderdelen die op verschillende wijzen kunnen falen. Er zijn enkele faalincidenten van grindkoffers bekend. Deze zijn o.a. gerapporteerd in 'Filters for Embankment Dams' (FEMA, 2011). Dit betreft vooral het bezwijken van afvoerleidingen. Dit betreft PVC-drains die in de constructiefase overbelast zijn, HDPE-drains die in sterkte afnemen door veroudering en stenen drains die bezwijken op brosse breuk. Een geval betrof een drain die nagenoeg gevuld was met (boom)wortels. In bijlage E van (FEMA, 2011) zijn faalgebeurtenissen gerapporteerd. Deze zijn voornamelijk gerelateerd aan de uitvoering. Resumerend zijn er twee belangrijke risico's bij grindkoffers. De eerste betreft de realisatiefase. De tweede betreft de horizontale afvoer.

Handvatten voor het meenemen beheer en onderhoud in relatie tot de faalkansen voor van faalkansen voor grindkoffers zijn gegeven in Tabel 4-5.

Tabel 4-5: Kentallen voor faalkansanalyses – grindkoffers.

Onderdeel	Wijze van falen	Omgangswijze	Faalkans Per 50 m dijk [kans/uur]	Faalkans Per 300 m dijk [kans/uur]
Filterwerking	Geleidelijke verstopping	Conservatieve uitgangspunten in ontwerp, verder afvangen met beheer en eventueel monitoring.	n.v.t.	n.v.t.
Bovenzijde grindkoffer	Schade door bv. vandalisme	Afvangen met inspecties binnen regulier beheer.	n.v.t.	n.v.t.
Drain t.b.v. horizontale afvoer	Beschadiging of breuk	Niet zichtbaar, opnemen in faalkansenboom.	Conform aan falen leidingen (zie paragraaf 4.6.5).	
Drain t.b.v. horizontale afvoer	Geleidelijke schades bv. door wortelingroei.	Afvangen met regulier beheer (o.a. camera inspectie).	n.v.t.	n.v.t.

#### 4.6.5 Faalkansanalyse – leidingen

Bij drainagetechnieken wordt water afgevoerd middels leidingen naar een uitstroompunt. Deze leidingen kunnen beschadigd worden en daardoor falen. In de literatuur zijn hiervoor kentallen gegeven. In Tabel 4-6 is een overzicht gegeven.

De faalkansen van leidingen kunnen als volgt bepaald worden:

- Eenvoudige methode.  
Faalkansen in de literatuur betreffen een kans per lengte. Deze waarde kan vermenigvuldigd worden met de totale lengte aan leidingen per dijksegment.
- Gedetailleerde methode.  
Analoog aan bovenstaande, maar deze methode houdt rekening met de eventuele robuustheid in het afvoersysteem. Dit is beschreven in het intermezzo “Intermezzo: voorbeeld robuustheid afvoersysteem”.
- Geavanceerde methode.  
Binnen de POV Kabels en Leidingen is onderzoek gedaan naar de faalkansen en de veiligheid van kabels en leidingen. De inzichten hiervan zijn opgenomen in (POV K&L, 2020). Daarnaast zijn kennisleemten benoemd in Doorontwikkeling Veiligheidsraamwerk K&L (POV K&L, 2020). Deze bronnen omvatten handvatten om de invloed van “Mitigerende maatregelen ter voorkoming van beschadiging door derden” mee te nemen. Een van deze mitigerende maatregelen is “Fysieke barrières op maaiveld” zoals dat een leiding gelegen is in een dijklichaam. Deze literatuurbronnen gaan zeer diep in op het onderwerp “kans op falen” van leidingen. Het onderwerp “kans op herstel” en de rol die beheer daarin heeft, heeft op beperkte handvatten.

Dit document adviseert voor een eerste faalkansanalyse het gebruik van de waarden uit NPR3659. De faalkansen van PE-drinkwaterleidingen kunnen gebruikt worden, mits dit plausibel gemaakt wordt. Gedacht kan worden aan de volgende zaken:

- Ontwerp.  
Drinkwaterleidingen worden ontworpen aan de hand van vigerende richtlijnen, zoals (KWR, 2020). Zaken die genoemd zijn als oorzaak voor geringe storingen in (POV K&L, 2020) zijn: de minimale gronddekking van 1,0 m (om bevrozing tegen te gaan), het leggen van vrijwel alle leidingen in een zandbed (voorkomen puntbelastingen en ongelijkmatige zettingen). Daarnaast omvatten de ontwerprichtlijnen voor drinkwaterleidingen ook diverse handvatten voor de realisatie en het testen van de leidingen.
- Beheer.  
Opnemen in de KLIC. Dit reduceert de kans op externe oorzaken. Bij PE-drinkwaterleidingen zijn externe oorzaken, ondanks de KLIC-registratie, 12% tot 40% van de storingen (POV K&L, 2020).

Registreren en evalueren storingen. Registratie van storingen bij drinkwaterleidingen wordt gedaan in USTORE, bij gasleidingen in NESTOR en/of CODATA (POV K&L, 2020). Evalueren van de storingen kan leiden tot een verbetering van het beheerproces.

Tabel 4-6: Kentallen voor faalkansanalyses – leidingen.

Onderdeel	Wijze van falen	Bron	Faalkans Per 50 m dijk <sup>[1]</sup> [kans/uur]	Faalkans Per 300 m dijk <sup>[1]</sup> [kans/uur]
PE-leiding (alle)	Niet benoemd	NPR3659 (NEN, 2003)	$3,1 \times 10^{-7}$	$1,86 \times 10^{-6}$
PE-leiding (drinkwater)	Gemelde lekkages <sup>[2]</sup>	POV K&L, Bijlage E (POV K&L, 2020)	$2,8 \times 10^{-8}$	$1,68 \times 10^{-7}$
PE-leiding (drinkwater)	Lekkage met kratervorming <sup>[2]</sup>	POV K&L, Bijlage E (POV K&L, 2020)	$7,1 \times 10^{-10}$	$4,26 \times 10^{-9}$
PE-leiding (gas)	Lekkages categorie 1 <sup>[3]</sup>	POV K&L, Bijlage D (POV K&L, 2020)	$2,6 \times 10^{-7}$	$1,56 \times 10^{-6}$

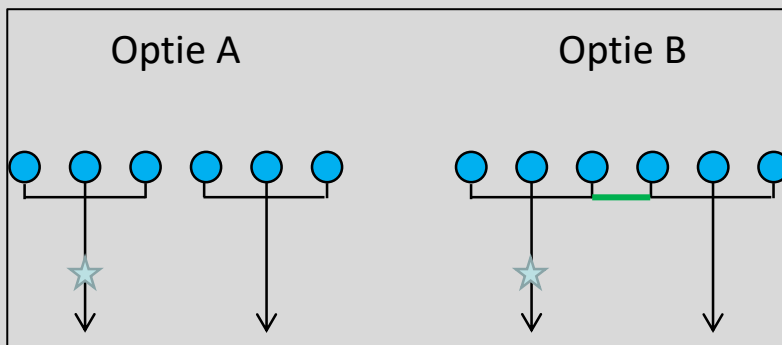
<sup>[1]</sup> Uitgaande dat een ontwerp van 50 m dijk ca. 25 m PE-leiding omvat en een ontwerp van 300 m dijk ca. 150 m PE-leiding.

<sup>[2]</sup> De definitie van lekkage bij waterleidingen betreft gemelde lekken voor transport en distributieleidingen. Een deel van de lekkages leidt tot een erosie krater. De bron stelt dat van de 443 lekkages bij PE-leidingen dit in 11 gevallen (2,5%) leidde tot een erosiekrater. Betreft PE-waterleidingen met een diameter groter dan 200 mm, zonder externe oorzaken (bv. graafwerkzaamheden).

<sup>[3]</sup> Gaslekken worden onderverdeeld in categorie 1 en 2 lekken. In de genoemde bron zijn categorie 2 lekken niet meegenomen, omdat die kleine lekjes betreffen. Dergelijke lekken vormen geen risico voor eventuele kratervorming. Betreft PE-gasleidingen met een diameter groter dan 200 mm en een druk kleiner dan 1 bar, zonder externe oorzaken (bv. graafwerkzaamheden).

### Intermezzo: voorbeeld robuustheid afvoersysteem

Een voorbeeld is gegeven in Figuur 4-6. Daarbij zijn twee configuraties van verticale bronnen gegeven (optie A en B). Daarbij is ingetekend dat er schade ontstaat aan een van de verzamelleidingen. Bij optie A zorgt dit voor uitval van drie van de zes bronnen. Bij optie B is een verbinding gemaakt tussen de verzamelleidingen. Daardoor kunnen alle bronnen geheel blijven functioneren. Het enige gevolg is enige centimeters aanvullende drukhoogteverliezen in het leidingen systeem, waardoor dit leidt tot een verminderde werking van de verticale bronnen.



Figuur 4-6: Bovenaanzicht, configuratie met verticale bronnen optie A (default) en optie B (met interne robuustheid).

Er gelden de volgende situaties. Conform Tabel 4-3 heeft een horizontale leiding een faalkans  $3,1 \times 10^{-7}$  per uur. Bij een 400 uur durende hoogwaterperiode geeft dit een faalkans van  $1 \times 10^{-4}$  per leiding. Dit geldt voor een glijvlak, waarbij de verticale bronnen zijn aangesloten op een verzamelleiding van 25 m.

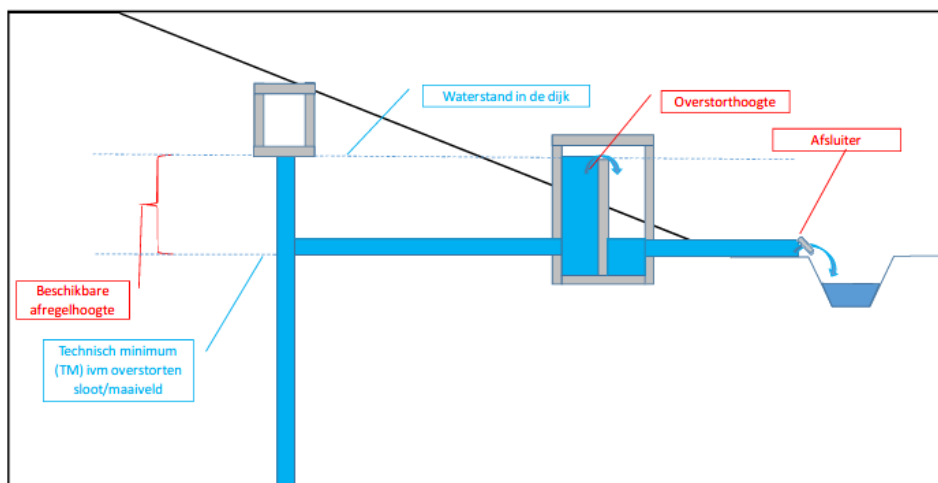
1. Situatie 1: alles functioneert naar behoren.
2. Situatie 2.1: een enkele afvoerleiding is defect (nabij eerste set bronnen).  
Situatie 2.2: een enkele afvoerleiding is defect (nabij tweede set bronnen).
3. Situatie 3: twee stuks afvoerleiding zijn defect (kans:  $1 \times 10^{-4} \times 1 \times 10^{-4} = 1 \times 10^{-8}$ ). Hierbij wordt verondersteld dat de twee leidingen onafhankelijk van elkaar falen.

De rekenwijze van bovenstaande is het volgende:

- Optie B: Kans situatie 1 x gevolg situatie 1.  
Dit is de referentiesituatie met een kans van bijna 100% ( $9997999 \times 10^{-8}$ ).
- Optie B: Kans situatie 2.1 x gevolg situatie 2.1.  
Dit is nagenoeg de referentiesituatie met een kans van  $1 \times 10^{-4}$ .
- Optie B: Kans situatie 2.2 x gevolg situatie 2.2.  
Dit is nagenoeg de referentiesituatie met een kans van  $1 \times 10^{-4}$ .
- Optie B: Kans situatie 3 x gevolg situatie 3.  
Hierbij geldt de sterkte van een dijk zonder drainage, dit scenario heeft een kans van voorkomen van  $1 \times 10^{-8}$ .

#### 4.6.6 Faalkansanalyse – regelsystemen

Bij drainagetechnieken worden soms regelsystemen toegepast. Voorbeelden zijn afsluiters of een regelbare overlaat, een weergave hiervan is opgenomen in Figuur 4-7. Deze systemen zorgen ervoor dat de drainagetechniek niet het volledige jaar functioneert. Dit kan voordelen hebben voor het achterliggende (grond)watersysteem. Deze regelsystemen kunnen falen. Daardoor werkt de drainagetechniek ten tijde van hoogwater niet naar behoren.



Figuur 4-7: Schets van een verticale bron met een (regelbare) overstorthoogte (De Vries & van de Wiel, 2014).

De faalkansen van regelsystemen kunnen als volgt bepaald worden:

- Eenvoudige methode.  
Analoog aan eenvoudige methode betrouwbaarheid sluiting bijlage B3 van (TAW, 2003).  
Overige handvatten zijn gegeven in Bijlage B van (Rijkswaterstaat, 2018).
- Gedetailleerde methode.  
Analoog aan gedetailleerde methode betrouwbaarheid sluiting bijlage B3 van (TAW, 2003)

Bij het toepassen van de methode betrouwbaarheid sluiting voor de regelsystemen van drainagetechnieken gelden de volgende aandachtspunten:

- Falen afsluiter.  
Indien een afsluiter faalt, dan kan grondwater niet via de reguliere weg afstromen. Een alternatief is uitstroom via andere (hoger gelegen) openingen, zoals inspectie openingen/ putdeksels. De gevolgen van deze situatie is een scenario met een afwijkende grondwaterstand. Dit kan berekend worden in een geohydrologisch model.

Afhankelijk van de drainageconfiguratie en de geohydrologische situatie leidt het falen van de afsluiter tot een hogere grondwaterstand van 50% tot 75% van de verandering

van het uitstroom niveau. Met een maximum van de grondwaterstand die heerst in de situatie zonder drainagetechniek.

- Falen regelbare overlaat.  
 Indien een regelbare overlaat faalt, dan heeft deze een onjuiste (klep)stand. De gevolgen van deze situatie is een scenario met een afwijkende grondwaterstand. Dit kan berekend worden in een geohydrologisch model.

Afhankelijk van de drainageconfiguratie en de geohydrologische situatie leidt een hogere klepstand tot een hogere grondwaterstand van 50% tot 75% van de verandering van de klepstand. Met een maximum van de grondwaterstand die heerst in de situatie zonder drainagetechniek.

- Extra keermiddel.  
 In Leidraad kunstwerken Bijlage B3 (Figuur B3.12) wordt ingegaan op een “extra keermiddel”. In deze context kan dit gelezen worden als “extra regelwerk” of “extra uitstroomoptie”.

#### 4.6.7 Faalkansanalyse – actieve drainage

Bij actieve drainage bestaan meerdere onderdelen die op verschillende wijzen kunnen falen. De grootste aanvulling op de andere technieken is het gebruik van een pomp. Deze kan op twee manieren falen. De eerste is doordat er sprake is van stroomuitval. De tweede is doordat de pomp zelf faalt.

Het risico op stroomuitval kan worden afgedekt door regelingen te treffen voor deze situaties, zoals een aggregaat op afroep. Handvatten daarvoor zijn opgenomen in Leidraad kunstwerken (TAW, 2003) en (Rijkswaterstaat, 2018). De faalkans van de pomp dient in de faalkansanalyse expliciet te worden meegenomen.

Handvatten voor het meenemen van faalkansen voor actieve drainage zijn gegeven in Tabel 4-7.

Tabel 4-7: Kentallen voor faalkansanalyses – actieve drainage.

Onderdeel	Wijze van falen	Omgangswijze	Faalkans [kans/jaar]	Faalkans [kans/uur]
Pomp	Onvoldoende capaciteit	Passend ontwerp. Capaciteitstest bij aanleg en periodiek.	n.v.t.	n.v.t.
Pomp	Niet starten	Afvangen met vroege ingreep (monteur).	n.v.t.	n.v.t.
Pomp	Stopt voortijdig	Niet zichtbaar, opnemen in faalkansenboom	n.v.t. <sup>[1]</sup>	3,0 x 10 <sup>-5</sup> <sup>[1]</sup>
Monitoring/signalering	Storing of onjuiste metingen	Robuust uitvoeren met meerdere sensoren en beheer.	n.v.t.	n.v.t.
Stroomvoorziening	Stroomuitval	Project specifieke regeling.	n.v.t.	n.v.t.

<sup>[1]</sup> Bron: Faaldata van Rijkswaterstaat (RWS - Faaldata database v1.1.xls). Betreft een pomp die slechts een deel van het jaar actief is. Faalkans per uur betreft de daadwerkelijke draaiuren.

### Robuustheden pompsysteem – gebruik van twee pompen

Om de faalkansen van een pompsysteem te reduceren wordt in pompkelders van viaducten vaak gewerkt met twee pompen. Daarbij wordt de werklast ongelijk verdeeld over beide pompen (ca. 2:1). Daardoor hebben beide pompen een verschillende hoeveelheid draaiuren waardoor beide pompen ook niet gelijktijdig falen vanwege de leeftijd. Daardoor mogen de faalkansen volledig ongecorreleerd verondersteld worden. Rekenwijze van de faalkans is analoog aan bijlage B3 van leidraadkunstwerken (TAW, 2003). Dit is afhankelijk van merkbaar of niet-merkbaar falen.

Rekenwijze merkbaar falen inclusief reparatie:

$$P(\text{falen 1 en 2}) = P_1 \cdot P_2 \cdot \theta_1 \cdot (\theta_A + \theta_B)$$

Met:

P(falen 1 en 2)	Kans op gebeurtenis waarbij beide pompen falen.	[kans]
P <sub>1</sub>	Kans op falen pomp 1	[kans/uur]
P <sub>2</sub>	Kans op falen pomp 2	[kans/uur]
θ <sub>A</sub>	minimum van θ <sub>1</sub> en θ <sub>2</sub>	[uur]
θ <sub>B</sub>	maximum van θ <sub>1</sub> en θ <sub>2</sub>	[uur]
θ <sub>1</sub>	Tijdsduur reparatie pomp 1	[uur]
θ <sub>2</sub>	Tijdsduur reparatie pomp 2	[uur]

Rekenwijze niet-merkbaar falen inclusief reparatie:

$$P(\text{falen 1 en 2}) = P_1 \cdot P_2 \cdot \theta_1 \cdot T$$

Met:

P(falen 1 en 2)	Kans op gebeurtenis waarbij beide pompen falen.	[kans]
P <sub>1</sub>	Kans op falen pomp 1	[kans/uur]
P <sub>2</sub>	Kans op falen pomp 2	[kans/uur]
θ <sub>1</sub>	Tijdsduur reparatie pomp 1	[uur]
T	Aantal draaiuren per hoogwatergolf <sup>10</sup>	[uur]

De benodigde tijd voor reparaties zijn afhankelijk van het type reparaties. Reparaties die zwaar materieel vragen (bv. graafmachine) zijn op korte termijn niet plausibel tijdens hoogwater situaties. Maar reparaties die door een monteur uitvoert, juist wel.

---

<sup>10</sup> In de Leidraad kunstwerken is voor de waarde T de periode tussen twee testmomenten aangehouden. De waarde T hangt echter samen met de faalkansen voor de pomp. De genoemde faalkansen in Tabel 4-7 betreffen de kansen per draaiuur, daarom is hier afgeweken van de Leidraad kunstwerken.



Afhankelijk van de reistijd van de monteur en het type storing is de reparatieduur korter of langer. Daarbij kunnen de volgende kentallen worden aangehouden<sup>11</sup>:

- Ondergrens (10% waarde): 1 uur.
- Mediaan (50% waarde): 2 uur.
- Bovengrens (90% waarde): 5 uur.

Op basis hiervan geldt dat storingen rondom het starten van (actieve) drainage tijdig verholpen kunnen worden voordat de piek van een hoogwatergolf is bereikt.

#### 4.6.8 Faalkansanalyse – monitoring

Het gebruik van monitoring leidt tot extra zekerheden. De monitoring kan in verschillende vormen voorkomen. Hier zijn drie vormen toegelicht.

##### **Algemene monitoring**

Bij algemene monitoring is sprake van een of meerdere monitoringspunten. Deze worden over een langere periode bemeten. Deze meetgegevens kunnen gebruikt worden om inzicht te krijgen in de veranderingen op langere termijn. Voorbeelden van deze type monitoring zijn: peilbuizen of debietmetingen.

Aangezien vaak langere termijn monitoring plaatsvindt, kan deze monitoring gebruikt worden bij het opstellen van grondwatermodellen of beheer evaluaties.

Deze vorm van monitoring heeft geen expliciete alarmwaardes, geen expliciete responstijd, geen betrouwbaarheid van het data-netwerk en is geen expliciet onderdeel van de faalkansbenadering. Daarom is deze vorm van monitoring niet van invloed op de faalkans van een drainagetechniek.

##### **Veiligheidsmonitoring - reactief**

Bij reactieve veiligheidsmonitoring wordt gebruik gemaakt van specifieke sensoren. Deze meten kritische processen van de (drainage)techniek. Als een knelpunt wordt gesignaleerd, wordt daar direct naar gehandeld. Er is naast een meting ook een actie. Door deze vorm van monitoring kan de betrouwbaarheid van een drainagetechniek worden verhoogd. De methode is reactief, omdat pas na een knelpunt wordt gereageerd.

Deze methode kan onderdeel zijn van de veiligheidsbenadering indien wordt voldaan aan de volgende voorwaarden:

- De monitoring is aanwezig, functioneert, wordt onderhouden.
- Er is een calamiteitenorganisatie aanwezig die reageert op de signalen vanuit de monitoring. De monitoring heeft concrete alarmwaardes.

---

<sup>11</sup> Deze gegevens zijn gebaseerd op de storingsregistratie van beweegbare bruggen in de periode 2014-2015 (>300 registraties). Storingen betreffen de bediening en de besturing, zowel hardware als software. Gegevens zijn gebaseerd op de tijdsduur tussen melding van de storing en van definitief herstel.

- In het calamiteitenplan zijn concrete acties opgenomen voor het geval van uitval van de monitoring (bv. netwerkstoring).

Indien bovenstaande het geval is, dan kan in paragraaf 4.5 de “tijdsduur van een hoogwatergolf en reparaties” gereduceerd worden. De responstijd en reparatieduur is in de regel zeer kort, deze kan dan ook verwaarloosd worden. Daardoor kan in de veiligheidsbenadering de “tijdsduur van een hoogwatergolf en reparaties” gelijkgesteld worden aan de tijdsduur van een hoogwatergolf. Indien sprake is van een actieve drainage en de monitoring zich daar (ook) op richt, kunnen de faalkansen van het pompsysteem bepaald worden op basis van merkbaar falen.

#### **Veiligheidsmonitoring - predictive maintenance**

Deze vorm van monitoring gaat een stap verder dan de reactieve monitoring. Hierbij worden knelpunten in een vroegtijdig stadium gesignaleerd en verholpen. Deze vorm van monitoring wordt in de industrie steeds meer toegepast. Daarbij wordt vaak gemonitord op roterende onderdelen en wordt gekeken met trendbewaking. Wanneer de trend afwijkt van het normale gedrag, dan is dit aanleiding om preventief onderhoud uit te voeren. Zo worden storingen voorkomen.

Van bovenstaande zijn nog geen toepassingen bekend in de drainagewereld. Deze vorm van monitoring is derhalve niet verder opgenomen.

## **4.7 Veiligheidsbenadering grondwatermodellen**

Grondwatermodellen kennen een zekere onzekerheid. In de PPD paragraaf 5.5.2. staat daarover het volgende: “In een semi-probabilistisch dijkontwerp moet worden gerekend met de karakteristieke stijghoogte die met 95% zekerheid niet zal worden overschreden, gegeven de optredende buitenwaterstand.”.

Bij het bepalen van de karakteristieke stijghoogte wordt rekening gehouden met diverse onzekerheden. De volgende onzekerheden vragen ten minste aandacht:

- Situatie onzekerheden.
- Proces onzekerheden.
- Schematisatie onzekerheden.
- Parameter onzekerheden.
- Veroudering/verstopping van drainage.

#### **Situatie onzekerheden**

Dit betreffen zaken als ruimtelijke ontwikkelingen of veranderingen in het waterbeheer. Enkele voorbeelden van aandachtspunten:

- Meenemen ruimtelijke ontwikkelingen.  
Voorbeelden zijn het opheffen of realisatie van grondwateronttrekkingen, aanleg van waterpartijen, herinrichting van uiterwaarden.
- Ontwikkelingen waterbeheer.  
Dit betreft het verwijderen van sliblagen van waterbodems, uitdiepen van rivieren en het verwijderen van kleilagen van de bodem of het hekkelen/opschonen van sloten.

- Afwijkend waterbeheer in extreme omstandigheden.  
Het is denkbaar dat in extreme situaties het waterbeheer in het achterland niet conform dagelijkse situaties functioneert. Gedacht kan worden aan niet actief zijn van gemalen of hogere waterstanden in de polderwatergangen.

#### **Proces onzekerheden**

Dit betreffen zaken als waterstanden in sloten tijdens hoogwater, opbarsten van sloten tijdens hoogwater.

#### **Schematisatie onzekerheden**

De bodemopbouw kent een bepaalde onzekerheid. Dergelijke onzekerheden zijn o.a. beschreven in SOS-scenario's. Onzekerheden betreffen zaken als:

- Onderzijde van de deklaag.
- Aan- of afwezigheid van zandbanen.
- Zandbanen die wel of niet in contact staan met watergangen/watervoerende lagen.
- Verschillende afzettingen.  
Watervoerende lagen bestaan vaak uit meerdere verschillende lagen. Deze lagen kunnen onderling variëren qua opbouw en eigenschappen. Voorbeelden zijn holocene vs. pleistocene zandlagen, of fijn zand vs. grof zand, of zand met kleilagen vs. zand zonder kleilagen.

Bij Meanderende Maas zijn de SOS-scenario's vereenvoudigd tot 2 maatgevende varianten per SOS-trajectlengte. Daarbij is gefocust op scenario's die betrekking hebben op de deklaagdikte. Deze hebben elk een eigen kans van voorkomen gekregen. Deze zijn toegepast op een zone van 100 m rondom de dijk. Deze zaken zijn meegenomen in de Monte-Carlo analyse (Waterschap Aa en Maas, 2020).

#### **Parameter onzekerheden**

Grondwatermodellen gebruiken parameters, zoals de doorlatendheid, intredepunten, e.d.. Deze kennen een onzekerheid. Deze onzekerheid kan beïnvloed worden door het uitvoeren van onderzoek en/of model kalibratie zoals benoemd in paragraaf 3.3.3.

#### **Veroudering/verstopping van drainage**

Door veroudering neemt de kwaliteit van de drainage en de omliggende filterlaag af. Deze kan verstopten waardoor de werking minder effectief is. Bij modellering van drainagetechnieken dient een veilig uitgangspunt aangehouden te worden. Handvatten zijn gegeven in hoofdstuk 5. Middels beheer en monitoring kan dit beheerst worden.

### **4.7.1 Methodes ter bepaling van de karakteristieke grondwaterstand**

In paragraaf 4.7 zijn diverse onzekerheden benoemd die een plek dienen te krijgen in de bepaling van de karakteristieke grondwaterstand. Hiervoor zijn drie methodes gangbaar:

1. Conservatieve uitgangspunten.  
Deze methode is gangbaar wanneer de grondwaterstand analytisch wordt bepaald.
2. Zekerheid behalen middels metingen.  
Deze methode is toegepast bij diverse dijkversterkingsprojecten, enkele voorbeelden

zijn opgenomen in hoofdstuk 9 van POV-publicatie Drainagetechnieken. Vaak worden deze methodes aangevuld middels risico- of gevoeligheidsanalyses.

3. Probabilistische analyses.

Deze methode is o.a. gebruikt in het project Meanderende Maas (Waterschap Aa en Maas, 2020).

De eerste methode is algemeen gangbaar. Deze methode is hier dan ook niet inhoudelijk uitgewerkt. Indien op voorhand onzeker is welke parametercombinaties/situaties conservatief zijn, is het werken met scenario's passend.

De tweede methode is op meerdere locaties toegepast. Dit is onder andere gerapporteerd in (De Vries & van de Wiel, 2014). Hoofdpijnen van de toegepaste methodiek zijn:

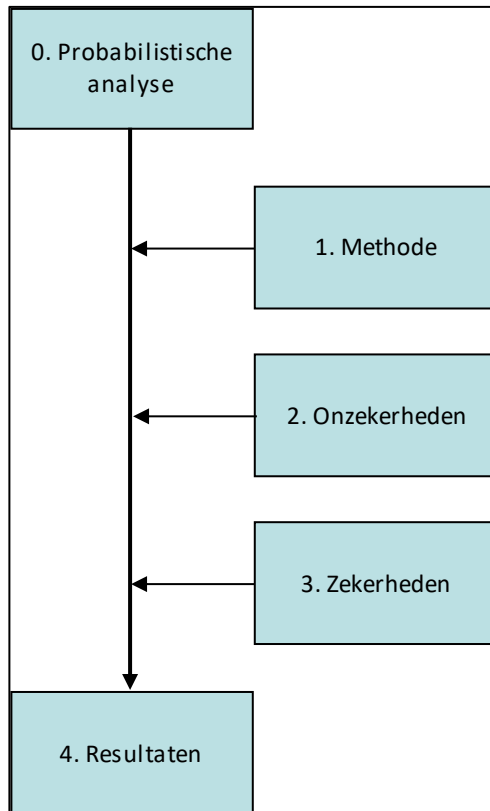
- Opzet grondwatermodel.  
Bij de opzet van het grondwatermodel is gebruik gemaakt van de best beschikbare gegevens (regionaal grondwatermodel, REGIS II, zandbanenkaart, boringen en sonderingen, oppervlaktewatersysteem).
- Kalibratie grondwatermodel.  
Verdeeld over vier segmenten met een totale lengte van ca. 3000 m zijn 7 raaien met peilbuizen geplaatst (h.o.h. afstand ca. 500 m) met in totaal 23 peilbuizen.
- Risico – gevoeligheidsanalyse.  
Er is aanvullend gekeken naar 8 parameters die van invloed zijn op het grondwater. Dit betreft zaken als de doorlatendheid, hydraulische weerstand van de rivier en kwaliteit van de drainagetechniek.

De derde methode (probabilistische methode) betreft een statistische analyse. Deze is toegepast in het innovatieve project Meanderende Maas (Waterschap Aa en Maas, 2020). Deze methode is bewerkelijker dan de eerdergenoemde methodes, maar geeft de mogelijkheid om statistisch verantwoorde uitspraken te doen. Deze derde methode is in paragraaf 4.7.2 meer in detail uitgewerkt.

## 4.7.2 Probabilistische analyses bij grondwatermodellering

### 4.7.2.1 Stap 0: Probabilistische analyse

De stappen binnen een probabilistische analyse zijn weergegeven in Figuur 4-8. Met deze methode worden alle (plausibele) grondwaterstanden bepaald. Daaruit kan de 95% bovengrens worden afgeleid. Toepassen van deze methode vereist het gebruik van een grondwatermodel en statistische technieken.



Figuur 4-8: Stappen binnen de probabilistische analyse.

#### 4.7.2.2 Stap 1: methode

Deze stap bestaat uit het kiezen van een methode. Vooralsnog zijn ervaringen opgedaan met een methode, dit is:

- Monte-Carlo analyse.

Bij deze methode wordt gestart met een basis grondwatermodel. Er worden meerdere varianten van dit model doorgerekend. Iedere variant heeft andere waarden voor de onzekerheden. Middels het doorrekenen van een groot aantal varianten wordt een range aan resultaten gevonden.

#### **Intermezzo: Rekentijden**

Bij Meanderende Maas is gewerkt met een Monte-Carlo analyse die 50 tot 10.000 simulaties omvat. De keuze voor het aantal simulaties wordt bepaald door de gewenste statistische nauwkeurigheid en pragmatische redenen zoals rekentijd.

Bij de berekeningen met het (tijdsafhankelijke) grondwatermodel is een rekentijd van 2 à 6 uur per berekening benoemd. Het werken met 50 simulaties leidt dan tot 100 à 300 uur rekentijd per keer dat de grondwaterstand bepaald dient te worden (4 à 12 dagen).

Of deze rekentijden wenselijk en passend zijn, is aan de ontwerper. Het maken van modelkeuzes is een mogelijkheid om de rekentijd aan te scherpen (bijvoorbeeld tijdsafhankelijk vs. stationair).

### **4.7.2.3 Stap 2: Onzekerheden**

Deze stap bestaat uit het definiëren en kwantificeren van onzekerheden. Er bestaan de volgende onzekerheden:

- Situatie onzekerheden.
- Proces onzekerheden.
- Schematisatie onzekerheden.
- Parameter onzekerheden.

#### **Situatie onzekerheden**

Dit betreffen zaken als ruimtelijke ontwikkelingen of veranderingen in het waterbeheer. Deze zijn reeds benoemd in paragraaf 4.7. In de regel worden voor deze zaken expliciete keuzes gemaakt. Deze worden niet gevarieerd in de probabilistische analyse.

#### **Proces onzekerheden**

Dit betreffen zaken als waterstanden in sloten tijdens hoogwater, opbarsten van sloten tijdens hoogwater en afname van de kwaliteit van drainagetechnieken. Deze zijn reeds benoemd in paragraaf 4.7. In de regel worden voor deze zaken conservatieve keuzes gemaakt. Deze worden soms, maar meestal niet, gevarieerd in de probabilistische analyse.

#### **Schematisatie onzekerheden**

De bodemopbouw kent een bepaalde onzekerheid. Dergelijke onzekerheden zijn o.a. beschreven in SOS-scenario's. Onzekerheden betreffen zaken als:

- Onderzijde van de deklaag.
- Aan- of afwezigheid van zandbanen.
- Zandbanen die wel of niet in contact staan met watergangen/watervoerende lagen.

Bij Meanderende Maas zijn de SOS-scenario's vereenvoudigd tot 2 maatgevende varianten per SOS-trajectlengte. Daarbij is gefocust op scenario's die betrekking hebben op de deklaagdikte. Deze hebben elk een eigen kans van voorkomen gekregen. Deze zijn toegepast op een zone van

100 m rondom de dijk. Deze zaken zijn meegenomen in de Monte-Carlo analyse (Waterschap Aa en Maas, 2020).

#### Parameter onzekerheden

Grondwatermodellen gebruiken parameters. Deze kennen een onzekerheid. In de Monte-Carlo analyse worden deze meegenomen als kansverdeling. In Tabel 4-8 zijn enkele veelvoorkomende parameters weergegeven<sup>12</sup>.

Tabel 4-8: Overzicht van veelvoorkomende parameters met variatiecoëfficiënt.

Parameter	Kansverdeling	VC	Correlatielengte
Dikte watervoerend pakket	lognormaal	10% <sup>[1,2]</sup>	1500 à 4000 m <sup>[1]</sup>
Doorlatendheid watervoerend pakket	lognormaal	50% <sup>[1,2]</sup>	600 m <sup>[1,2]</sup>
Dikte deklaag	lognormaal	50% <sup>[2]</sup>	200 m <sup>[1,2]</sup>
Doorlatendheid deklaag	lognormaal	40% <sup>[2]</sup>	
Conductance buitenwater	lognormaal	40% <sup>[2]</sup>	
Conductance waterlopen polder	lognormaal	40% <sup>[2]</sup>	

[1] Bron: Onzekerheden overzicht van belasting- en sterkteonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium (Deltares, 2017).

[2] Bron: HWBP Projectgebonden Innovatie 'Geohydrologische Aanpak voor Piping; Syntheserapport (Waterschap Aa en Maas, 2020)

De eigenschappen van de deklaag werken anders in het voorland dan in het achterland. Een dunne deklaag in het voorland zorgt voor hogere waterstanden onder de dijk. Een dunne deklaag in het achterland zorgt voor lagere waterstanden onder de dijk. Binnen Meanderende Maas is daarom gewerkt met een schaakbordpatroon met vakken van 200x200 m (gelijk aan de correlatielengte). Binnen deze vakken is de dikte van de deklaag gevarieerd. Zo zijn meerdere combinaties (dunne deklaag voorland en dikke deklaag achterland) meegenomen.

Een verdere aanpak is om voor alle andere parameters ook te werken met een schaakbordpatroon. Daarbij wordt gewerkt met een vakgrootte gebaseerd op de correlatielengte per parameter. Bij Meanderende Maas is om praktische redenen hier niet voor gekozen.

---

<sup>12</sup> In de analyse van Meanderende Maas is ook gekeken naar de parameters van diepere watervoerende pakketten en de bergingscoëfficiënt van de watervoerende pakketten. Deze parameters hadden een factor 10 tot 30 minder invloed op de stijghoogte dan de doorlatendheid van het eerste watervoerende pakket. Deze parameters zijn daarom weggelaten.

### Intermezzo: specifieke parameter onzekerheden

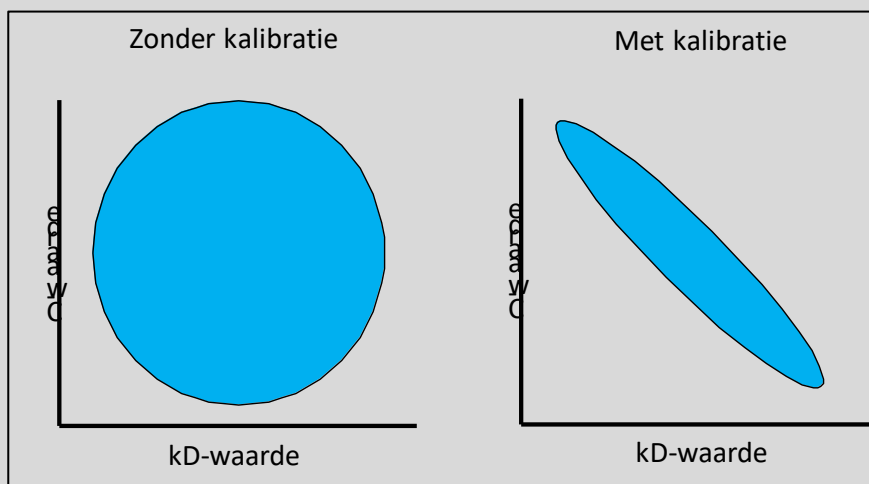
Eerdergenoemde parameter onzekerheden komen overeen met het WBI-SOS. Deze onzekerheden zijn robuuste waarden. De onzekerheden betreffen ook situaties waarin wordt gewerkt met het SOS en niet specifiek gebruik is gemaakt van aanvullende informatie. De onzekerheden kunnen daarom aangescherpt worden, mits beargumenteerd.

### Gebruik historische doorlatendheidsproeven

De onzekerheid in de doorlatendheid heeft vaak de grootste invloed op de analyses. Er zijn aanwijzingen dat de variatiecoëfficiënt van de doorlatendheid (regionaal) lager kan zijn dan de waarde uit het WBI. In (Grondmechanica Delft, 1996) is een  $VC = 20$  à  $40\%$  genoemd. Een regionaal specifieke waarde voor de onzekerheid van de doorlatendheid kan gebaseerd worden op (historische) pompproeven in die regio. Daarbij kan gebruik gemaakt worden van bijvoorbeeld de pompproeven die zijn opgenomen in de grondwaterkaarten uit de jaren '80.

### Gebruik kalibratieresultaten

Door het kalibreren van een grondwatermodel neemt de onzekerheid af. De invloed van kalibreren is geschetst in Figuur 4-9. Enkele softwarepakketten geven als output de onzekerheid van de parameters na kalibratie. Vaak geven deze softwarepakketten een oplossingsruimte. De oplossingsruimte bestaat uit kansrijke parametercombinaties, daardoor ontstaat er correlatie tussen de parameters. Bij het gebruik van het softwarepakket Modflow kan gekalibreerd worden met PEST. Na een goed verlopen PEST-kalibratie wordt een covariantiematrix, een correlatiematrix en een matrix met eigenwaarden opgeleverd. Dit houdt dus in dat correlaties worden gegeven als expliciete output. Beschrijving daarvan is te vinden in paragraaf 5.2.10 van de PEST manual (Watermark Numerical Computing, 2020). PEST kan verder niet alleen op stijghoogtes kalibreren, maar ook op het verschil in stijghoogtes over een weerstandslaag. Ook de reactie van een peilbuis op een (grond)waterstandsverandering en daarmee de spreidingslengte kan worden gebruikt voor kalibratie. Hierbij wordt opgemerkt dat de standaard PEST-module in softwarepakketten een 'uitgeklede' versie is. Om alle functionaliteiten van PEST te kunnen gebruiken, kan het noodzakelijk zijn om het oorspronkelijke PEST-programma te benutten.

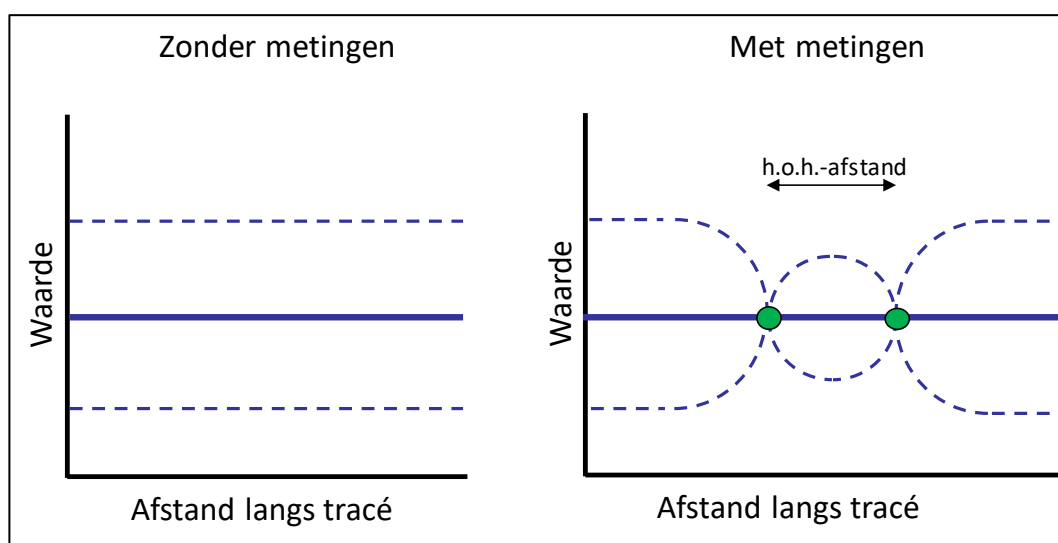


Figuur 4-9: Invloed van kalibratie op parameteronzekerheid. Weergegeven is het 95% interval waar alle parametercombinaties binnen vallen.



#### 4.7.2.4 Stap 3: Zekerheden

Door het uitvoeren van (aanvullend) grondonderzoek, metingen en het doen van proeven kan de onzekerheid verkleind worden. De relatie tussen meetpunten en de aanwezige onzekerheid wordt beschreven met geostatistiek en Kriging methodes. Het verloop van onzekerheid is geschetst in Figuur 4-10. Daar is een situatie geschetst zonder metingen en een situatie waar twee meetpunten zijn. Indien er geen meetpunten zijn is de onzekerheid overal even groot. De onzekerheid is nihil ter plaatse van een meetpunt, gering in de directe omgeving van een meetpunt en neemt toe met de afstand tot een meetpunt tot een maximum (namelijk de waarde zonder meetpunten). Door meetpunten met een geringe tussenafstand/ H.O.H. afstand te plaatsen wordt de onzekerheid van de tussenliggende delen gelimiteerd.



Figuur 4-10: Het verloop van een parameter en de onzekerheid ervan langs een (dijk)tracé wanneer er geen en wel metingen voorhanden zijn met een zekere h.o.h. afstand.

Het verloop van de onzekerheid met de afstand ten opzichte van een meetpunt wordt beschreven met een variogram. Binnen waterveiligheid<sup>13</sup> wordt het Gaussisch variogram toegepast, deze is hieronder weergegeven conform (Grondmechanica Delft, 1996).

$$\gamma(h) = C \left( 1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right) \text{ en } \sigma(h) = \sqrt{\gamma(h)}$$

Hierin is:

- $\gamma(h)$  Variantie op afstand h vanaf een meetpunt.
- $\sigma(h)$  Standaarddeviatie op afstand h vanaf een meetpunt.
- C Variantie van een variabele.
- H Afstand vanaf een meetpunt.
- A Range, is gelijk aan 0,88 maal de correlatielengte uit Tabel 4-8.

#### Intermezzo: Toepassing van geostatistiek

Afhankelijk van de correlatielengte van de gemeten parameter en de onderzoeksdichtheid neemt de onzekerheid af. In de hoofdtekst is de theoretische achtergrond gegeven. Een concrete uitwerking daarvan is gegeven in Tabel 4-9.

Tabel 4-9: Relatie tussen de onderzoeksdichtheid en de reductie op onzekerheid.

Correlatie-lengte	h.o.h.-afstand metingen	Maximale afstand tussen meting en willekeurig punt	Reductie onzekerheid (excl. uitmiddeling)	Reductie onzekerheid (incl. uitmiddeling)
600 m	1200 m	600 m	Factor 1,2	Factor 2,0
600 m	600 m	300 m	Factor 1,9	Factor 3,7
600 m	300 m	150 m	Factor 3,6	Factor 7,3

De doorlatendheid heeft in het WBI een correlatielengte van 600 m en een variatiecoëfficiënt van  $VC = 50\%$ . Indien metingen van de doorlatendheid beschikbaar zijn met h.o.h. 600 m, dan is door deze metingen tussen deze meetpunten in een lagere onzekerheid. Conform Tabel 4-9 kan een factor 3,7 lagere onzekerheid aangehouden worden, dus  $VC = 14\%$ .

Deze uitwerking gaat uit van de een aantal uitgangspunten. Dit is dat onzekerheden beschreven worden met een gaussisch variogram zonder nugget-effect, het omrekenen van de correlatielengte naar de range op basis van de genoemde constante in (Grondmechanica Delft, 1996) waarbij de onzekerheden variëren in een voorname richting (1-dimensionaal). De onzekerheid is het kleinst ter plaatse van een onderzoekspunt en is het grootst tussen twee onderzoekspunten in. Afhankelijk van of een parameter als punt waarde, of als gemiddelde van een vlak geldt, mag de onzekerheid tussen twee onderzoekspunten worden uitgemiddeld. Bij doorlatendheid geldt dat de resultante, de grondwaterstand, een vloeiend verloop heeft, dus is uitmiddeling geaccepteerd. Bij de deklaagdikte geldt dat de resultante, veiligheid tegen opbarsten, zeer lokaal is. In dat geval dient de onzekerheid precies tussen twee onderzoekspunten aangehouden te worden, zonder uitmiddeling.

<sup>13</sup> Bronnen waar deze methodiek voor komt zijn: VNK2 (TNO, 2003) en TRWG (TAW, 2001) en (Grondmechanica Delft, 1996).

#### **4.7.2.5 Stap 4: Resultaten**

De output van een Monte-Carlo analyse leidt tot een serie van rekenresultaten. Hiervan dient de 95% bovengrenswaarde bepaald te worden.

## 5 Ontwerpen drainagetechniek

### 5.1 Algemeen

Het ontwerpen van drainagetechnieken is een proces met iteraties dat leidt tot een optimaal ontwerp. Het ontwerpproces wordt geadresseerd in paragraaf 5.2 en de bijbehorende stappen in het ontwerpproces worden benoemd in de paragrafen 5.3 tot en met 5.6. Paragraaf 5.3 gaat in op het ontwerp van verticale bronnen, het ontwerp van horizontale drains is beschreven in paragraaf 5.4. In paragraaf 5.5 is het ontwerp van grindkoffers beschreven, paragraaf 5.6 gaat in op de ontwerpaspecten van het watersysteem in het achterland. In paragraaf 5.7 worden aspecten met betrekking tot het beheer en onderhoud beschreven die relevant zijn voor het ontwerp. Paragraaf 5.8 gaat in op het ontwerp van een actieve drainage en ten slotte is het monitoringssysteem beschreven in paragraaf 5.9.

### 5.2 Ontwerpproces op hoofdlijnen

Het ontwerpen van een drainagetechniek is een cyclisch proces, waarin stapsgewijs wordt gekomen tot een realiseerbaar en veilig ontwerp. Het ontwerp van een drainagesysteem doorloopt een aantal werkstappen. Binnen elke werkstap vinden iteraties plaats. Voor gedetailleerde uitleg over het ontwerpproces wordt verwezen naar hoofdstuk 5 in de PPD (POV Macrostabieleit en POV Piping, 2018). De werkstappen zijn in de Tabel 5-1 weergegeven.

Het ontwerp is een vertaling van het programma van eisen. De te ontwerpen onderdelen zijn per techniek geadresseerd. De effectbeoordeling gebeurt door het ontwerp te beoordelen volgens de geohydrologische analyse als beschreven in paragraaf 3.3 en 3.4. Na de effectbeoordeling wordt bepaald of het behaalde resultaat nog geoptimaliseerd kan worden. Indien dit het geval is wordt het ontwerpproces opnieuw doorlopen.

Als het uiteindelijke ontwerp geen verdere verfijning nodig heeft dient het monitoringssysteem ten behoeve van beheer en onderhoud en de sturing van actieve drainage nog ontworpen te worden. Dit wordt behandeld in hoofdstuk 5.9.

#### 5.2.1 Probleemanalyse

De eerste stap van het ontwerpproces is gericht op het definiëren van het probleem, ondersteund met een geohydrologische en geotechnische analyse, zoals beschreven in hoofdstuk 3. De analyse richt zich in dit stadium op het verkrijgen van de benodigde stijghoogteverlaging, of verlaging van het niveau van het freatisch grondwater afhankelijk van het faalmechanisme.

In de probleemanalyse worden tevens omgevingsaspecten meegenomen die relevant zijn, zoals bijvoorbeeld de aanwezige bebouwing.

Het kan voorkomen dat er al drainagetechnieken aanwezig zijn, maar dat deze onvoldoende capaciteit hebben. In dat geval dient te worden nagegaan hoe het ontwerp eruitziet, wat de huidige capaciteit is van de drainage en of het uitbreiden van de capaciteit van de drainage een optie is.

Tabel 5-1: Stappen binnen het ontwerpproces.

Werkstappen	Activiteiten	Fase	
Probleemanalyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bepalen stabiliteits-, piping- en/of microstabiliteitstekort dijk zonder drainage.</li> <li>Uitvoeren systeemanalyse.</li> <li>Uitvoeren veldwerk en controle voldoende gegevens.</li> <li>Bepalen of drainagetechnieken een (deel)oplossing zijn.</li> <li>Is een drainagesysteem in te passen?</li> </ul>	Verkenning	Verkenning
Programma van Eisen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Opstellen PvE voor oplossing inclusief drainage.</li> </ul>		
Voorontwerp	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keuze type drainagetechniek.</li> <li>Keuze actieve vs. passieve drainagetechniek.</li> <li>Bepalen hoofdafmetingen ontwerp oplossing en van het drainagesysteem om de benodigde verlaging te halen.</li> <li>Bepalen orde grootte van het af te voeren debiet.</li> <li>Controle op impact ontvangend watersysteem en omgeving.</li> <li>Ontwerp van eventuele maatregelen aan het ontvangend watersysteem.</li> <li>Opstellen LCC. Met aandacht voor beheersaspecten.</li> </ul>	Plan	Plan
Definitief ontwerp	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bepalen detailafmetingen ontwerp oplossing en drainagesysteem.</li> <li>Ontwerp eventuele specials i.v.m. knelpunten.</li> <li>Eventueel specifiek benodigde vergunningen voor de eindsituatie (bijv. lozing drainagewater).</li> <li>Opstellen beheer instructie drainagesysteem.</li> </ul>		
Uitvoeringsontwerp	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bepalen eventuele tijdelijke maatregelen uitvoering.</li> </ul>	Realisatie	Realisatie
As-Built	<ul style="list-style-type: none"> <li>As-built en eventuele ontwerpcontrole bij afwijkingen.</li> <li>Opleverdossier.</li> </ul>		

## 5.2.2 Programma van Eisen

De probleemanalyse wordt omgezet in een programma van eisen. In het programma van eisen worden meerdere soorten eisen aan het systeem gesteld waar het ontwerp aan moet voldoen. Dit zijn waterveiligheidseisen, eis aan levensduur, omgevingseisen en gebruikerseisen (voor bijvoorbeeld beheer en onderhoud).

Het programma van eisen zal over het algemeen worden opgesteld voordat wordt besloten tot het toepassen van de drainagetechniek. Voor een uitgebreide beschrijving van het programma van eisen wordt verwezen naar hoofdstuk 5 van de PPD (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018).

Enkele aanvullingen op hoofdstuk 5 van de PPD zijn:

- **Vergunbaarheid.**  
Rondom dijken komen diverse gebieden voor die speciale aandacht vragen. Voorbeelden zijn grondwaterbeschermingsgebieden, boringvrije zones, verontreinigingen of natuurgebieden. Diverse vergunningverleners hebben beleid voor dit soort gebieden dat raak aan drainagetechnieken. Een eerste toets betreft of een drainagetechniek vergunbaar is/ onder welke voorwaarden deze vergunbaar is.
- **Watervoerende laag/ freatische water.**  
Er wordt beschouwd waar een ingreep gewenst is, in de freatische laag of een watervoerende laag, om voldoende veiligheid te kunnen borgen. Hieruit volgt op welke diepte het systeem aangebracht moet worden en is een voorselectie mogelijk van verschillende drainagetechnieken.
- **Beschikbare werkruimte.**  
Indien er voldoende werkruimte aanwezig is, dan is horizontale drainage met bijvoorbeeld een kettinggraver goed inpasbaar. Wanneer deze er niet is, dan moet worden overgestapt naar andere technieken of andere aanlegwijzen (bv. gestuurde boring). Dit kan snel leiden tot een verdubbeling van de kosten.
- **Levensduur en alternatieve invullingen daarvan.**  
Vaak wordt bij levensduur expliciete eisen gesteld, zoals een levensduur van 50 of 100 jaar. Na aanleg van drainage is het plausibel dat de werking achteruitgaat in de tijd. Met passend beheer en goed ontwerp zijn levensduren van 20 jaar realistisch. Daarna is herdraineren/vervangen van bronnen om de 20 jaar een passende oplossing. Of herdraineren acceptabel is binnen het gedachtegoed van de levensduur moet vooraf vastgesteld worden.
- **Uitbreidbaarheid.**  
Voordeel van drainagetechnieken is dat diverse daarvan uitbreidbaar zijn. Bij verticale bronnen kunnen na verloop van tijd bronnen bijgeplaatst worden. Bij horizontale drainage kan, wanneer wordt besloten over te gaan op herdraineren, zelfs het gehele drainageplan worden aangepast. Dit is een groot verschil met andere versterkingstechnieken, zoals een damwand. Of uitbreidbaarheid wenselijk is en hoe dit wordt meegewogen dient vooraf vastgesteld te worden.
- **Lozen op polderwater.**  
Bij meerdere ontwerpvarianten wordt geloosd op het polderwater. Aandachtspunten

zijn of dit kan, past of mag. Verdere aandachtspunten zijn: de peilen van het polderwater en in welke mate die ook in extreme omstandigheden gehandhaafd blijven en of mitigerende maatregelen vereist zijn.

- Regelbaarheid.  
Drainagesystemen kunnen worden ingericht met een regelbare overlaat of afsluiter. Deze regelsystemen geven vrijheid om de werking van de drainagetechniek te regelen. Maar deze zorgen ook voor een extra schakel die onderhoud vergt en een werkstap die een zekere faalkans introduceert. Dit is deels te ondervangen middels monitoring.
- Eisen aan het maaiveld.  
Bepaalde uitvoeringstechnieken doorsnijden/doorwoelen de bodem. Herstel hiervan kan, maar brengt andere zaken met zich mee. Zoals uitvoering in den droge. Daarvoor is mogelijk bemaling noodzakelijk.

### 5.2.3 Voorontwerp

Het ontwerp van een drainagetechniek bestaat uit meerdere stappen. De technische werkzaamheden zijn reeds beschreven inclusief stroomschema in paragraaf 5.2.2 van de PPD. Een geactualiseerde variant hiervan is weergegeven in Figuur 5-1. Binnen het voorontwerp worden de voornaamste stappen van dit stroomschema doorlopen. Dit heeft als uitkomst een ontwerp waarvan de haalbaarheid van de drainagetechniek zeker is. Het stroomschema is hieronder op hoofdlijnen toegelicht.

#### **Systeemanalyse**

In de vroege verkenningsfase (bv. VKA-fase) kunnen gegevens voor de systeemanalyse (bv. ondergrond) vergaard worden middels een bureaustudie. Wanneer een ontwerpproces richting het voorlopig ontwerp gaat, is meer gedetailleerde geohydrologische en geotechnische informatie noodzakelijk. Afhankelijk van de informatie behoefte is aanvullend veldonderzoek nodig. Indien het VKA duidelijk aanstuurt op drainagetechnieken én er is behoefte aan een pompproef, dan kan de pompproef in deze fase afgewerkt worden tot een bruikbaar onderdeel van de definitieve drainagetechniek.

#### **Ontwerp drainagetechniek**

Het ontwerp van de drainagetechniek start bij het vastleggen van de veiligheidsopgave en de voorgenomen maatregel. Dit kan de drainagetechniek zijn, maar bij een integrale dijkversterking kan dit ook een combinatie van maatregelen zijn. Van belang is de watervoerende zandlaag waarin de drainagetechniek geplaatst wordt. Het filterniveau van de drainagetechniek ligt binnen de afmetingen van deze zandlaag. Aandacht gaat uit naar welke lagen goed en welke lagen niet of matig doorlatend zijn.

Bovenstaande leidt tot een initiële keuze voor een drainagetechniek en de hoofdafmetingen van de drainage:

- Welke hart-op-hartafstand dienen de bronnen of strengen te hebben?
- Hoeveel bronnen of strengen zijn nodig?

Aan het einde van het voorlopige ontwerp dienen deze zaken op hoofdlijnen vast te staan.

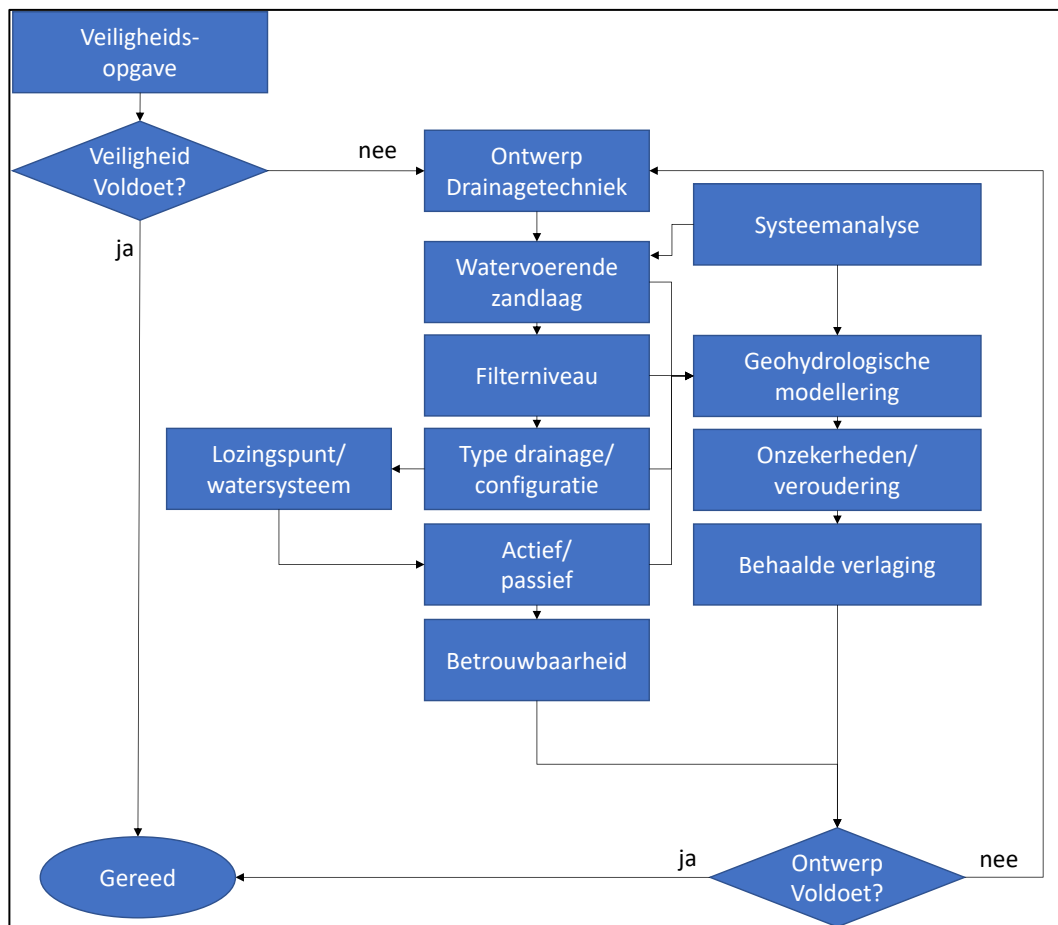
### **Lozingspunt/ watersysteem**

Het lozingspunt heeft invloed op meerdere zaken. Deze vragen in het voorontwerp algemene keuzes en in het definitieve ontwerp meerdere verdiepingsslagen.

- Waterstanden ter plaatse van het lozingspunt.  
Dit bepaalt de maximale verlaging die onder vrij verval behaalt kan worden.
- Afstand naar het lozingspunt.  
Dit bepaalt de aanleg van afvoerleidingen. Deze zijn medebepalend voor kosten en kans op falen van het systeem.
- Capaciteit van het watersysteem ter plaatse van het lozingspunt.  
Belangrijke vragen zijn of het ontvangende watersysteem geschikt is en of er aanpassingen nodig zijn. In paragraaf 5.7 is in meer detail ingegaan op de impact op het watersysteem en de analysemethoden daarvoor.
- Waterkwaliteit en waterkwaliteitseisen.  
Het lozen van drainagewater op een watersysteem vraagt ook aandacht. Dit raakt aan de vergunbaarheid van een drainagesysteem. Een voorbeeld hiervan is de omgang met hoge chloride gehalten in het grondwater in gebieden nabij zee.

Aan het einde van het voorlopige ontwerp dient de haalbaarheid van het ontwerp op dit aspect in beeld te zijn.





Figuur 5-1: Stroomschema technisch ontwerp van drainagetechnieken.

### Actief/ passief drainagesysteem

Er dient een keuze gemaakt te worden tussen passieve en actieve drainage. Passieve drainage heeft een maximum qua verlaging. Indien meer verlaging vereist is, dan valt passieve drainage af. Deze ondergrens is gelijk aan de laagste waterdruk die realistisch is in het verticale filter. Dit is gelijk aan de waterstand in het poldersysteem ten tijde van een hoogwaterperiode, verhoogd met enige drukhoogteverliezen en andere stromingsverliezen (ca. 0,05 m) in de afvoerleidingen van de drainagetechniek zelf. Een eerste indicatie van de waterstand in het poldersysteem is de waterstand die optreedt tijdens reguliere hoogwaters.

Bij verticale bronnen dient ook rekening gehouden te worden met opbolling tussen de bronnen zelf. Afhankelijk van de configuratie is de verlaging tussen de verticale bronnen 50 tot 75% van die in de filters zelf.

### Geohydrologische modellering

In deze stap wordt eerst de referentie situatie gemodelleerd. Daarna volgen keuzes voor de ontwerpsituatie (hydraulische belastingen en eventuele autonome ontwikkelingen). In de vroege verkenningsfase (bv. VKA-fase) kunnen berekeningen gemaakt worden met óf analytische

formules, óf de “drainage quickscan-tool” ([www.drainagequickscan.nl](http://www.drainagequickscan.nl)). Deze is beschreven in (Brakenhoff, 2019) en (Witteveen+Bos, 2018). Wanneer een ontwerpproces richting het voorlopig ontwerp gaat, is een gedetailleerde geohydrologische benadering noodzakelijk. Deze benadering dient rekening te houden met de diverse onzekerheden die aanwezig zijn in de bodem. Tenslotte dient aandacht te zijn voor de veroudering/ geleidelijke verstopping van de drainagetechnieken.

#### **Veiligheidsbenadering/ ontwerpafweging**

Aan het einde van de ontwerpcyclus komen alle onderdelen bij elkaar. Er dient getoetst te worden of het ontwerp voldoet aan de gestelde eisen qua veiligheid van de dijk en de betrouwbaarheid van de drainagetechniek. Verschillende ontwerpvarianten dienen tegen elkaar afgewogen te worden. Belangrijke keuzes daarbij zijn als volgt:

- **Afweging kosten-baten.**  
Actieve drainage heeft een aantal onderdelen die kostenverhogend zijn en een aantal die kostenverlagend zijn. Deze dienen afgewogen worden.

Denk hierbij aan het materiaal (bv. een pomp), ondersteunende elementen (bv. monitoring of nutsvoorzieningen), gebruik en onderhoud (bv. draaiuren en manuren). Daarentegen is met actieve drainage meer verlaging mogelijk met minder bronnen. Dit is kostenverlagend.

- **Afweging veiligheid.**  
Actieve drainage heeft een aantal onderdelen die zorgen voor extra veiligheid en een aantal die zorgen voor extra risico's. Deze dienen afgewogen worden.

Een optie is het lozen op buitenwater. Echter vraagt dit een leidingkruising met de dijk. Deze geeft extra risico's voor de dijk. Daarnaast zorgt de aanwezigheid van de pomp voor extra elementen die kunnen falen. Aan de andere zijde heeft een actief systeem in de regel meer monitoring, wat leidt tot aanvullende zekerheid.

Daarnaast is er aandacht nodig voor de beheervoorzieningen aangezien die mede de life-cycle-cost bepalen.

### **5.2.4 Definitief ontwerp**

In het definitief ontwerp worden detailafmetingen van het systeem bepaald. Dit betreft zaken als afmetingen van de bronnen, leidingen, drainagestrengen en de grindkoffer. Daarnaast dient aandacht te zijn voor het type pompen, stuwen/overlaten en de inpassing van beheervoorzieningen. Tenslotte dient aandacht te zijn voor specials, zoals obstakels of sloten waar de standaardoplossing niet past.

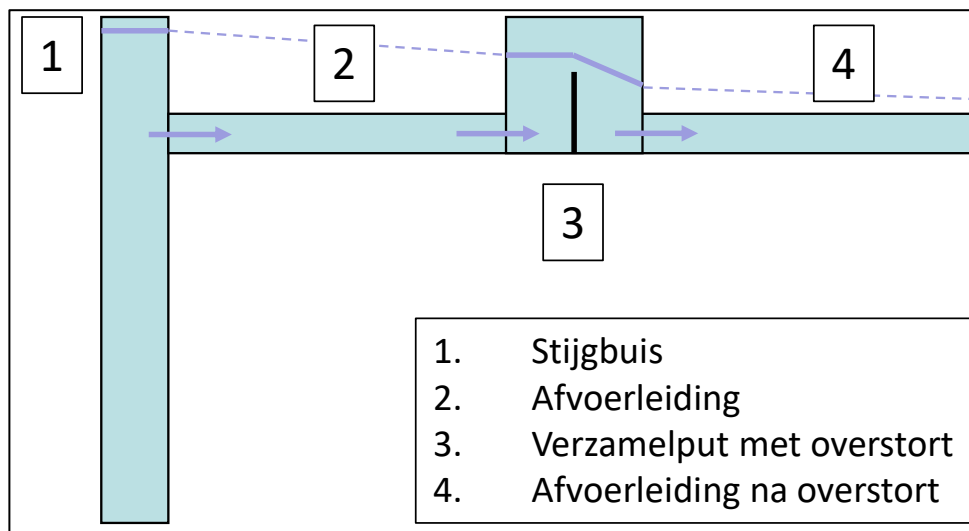
#### **Ontwerp horizontaal afvoersysteem**

Het horizontale afvoersysteem zorgt ervoor dat het water uit de verticale bronnen wordt afgevoerd. Dit is naar een watergang of naar een pomp (indien deze niet in de filters is inbegrepen). In dit horizontale systeem kunnen meerdere onderdelen zitten. Deze onderdelen dienen dusdanig ontworpen te worden dat deze niet leiden tot te veel drukhoogteverliezen.

Enkele onderdelen zijn hieronder genoemd, deze zijn weergegeven in Figuur 5-2.

- Afvoerleiding.
- Verzamelput met overstort.
- Afvoerleiding na overstort.

Bovenstaande onderdelen zorgen voor drukhoogteverliezen. Advies is om deze zo te ontwerpen dat het totale verlies lager is dan 0,05 m.



Figuur 5-2: Onderdelen binnen het horizontale afvoersysteem.

### Afvoerleiding

De afvoerleiding moet afdoende ruim zijn om het water van een verticale bron af te voeren. Er bestaan meerdere rekenwijzen voor het ontwerp ervan. Deze hebben o.a. te maken met de materiaalkeuzes, wrijvingsverliezen door bochten, vernauwingen/verbredingen, leidingen die volledig of deels gevuld zijn.

In een vroege fase kan gekozen worden voor een algemene rekenwijze, zoals Darcy-Weisbach:

$$\Delta H = \lambda \cdot \frac{8 \cdot L}{\pi^2 \cdot g} \cdot \frac{Q^2}{D^5}$$

Hierin is:

$\Delta H$	Drukhoogteverlies over de leiding	[m]
$\lambda$	Wrijvingscoëfficiënt volgens Colebrook	[-]
	Als startwaarde kan $\lambda = 0,03$ aangehouden worden.	
L	Leiding lengte	[m]
g	gravitatieconstantie	[9,81 m <sup>2</sup> /s]
Q	Volumestroom	[m <sup>3</sup> /s]
D	Inwendige diameter	[m]

### Overstort

Het ontwerpen van een overstort is hier niet behandeld. Rekenwijze is analoog aan een stuw. Handvatten daarvoor zijn gegeven in (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988). Uitgangspunt is dat een overstort ingesteld kan worden op een gewenste hoogte en dat dit aanpasbaar is. In een vroege fase kan gekozen worden voor een algemene rekenwijze, zoals gegeven in bovenstaande bron voor een volkomen overlaat:

$$(hs)^{3/2} = \frac{Q}{1,7 \cdot m \cdot b}$$

Hierin is:

hs	Hoogte van de boven-waterspiegel ten opzichte van de stuwkruin = overstorthoogte	[m]
m	Coëfficiënt, o.a. afhankelijk van de vorm van het stuwlichaam. Als startwaarde kan $m = 1,11$ aangehouden worden.	[-]
Q	Volumestroom / debiet	[m <sup>3</sup> /s]
b	Breedte van de overstort	[m]

### Afvoerleiding na overstort

Dit deel van de afvoerleiding eindigt vaak in de watergang. Advies is om deze onder het maaiveld te leggen en boven het streefpeil van de watergang (i.v.m. zichtbaarheid). De eindbuizen zijn relatief kwetsbaar. Deze moeten dan ook robuust gekenmerkt worden, bijvoorbeeld met perkoenpalen of andere objecten die bestendig zijn tegen regulier maaibeheer.

In extreme omstandigheden kan het waterpeil in de watergang verhoogd zijn. Dit leidt dan tot enige opstuwing in deze leiding. Daarnaast zitten in deze leiding zelf ook enige drukhoogteverliezen. In de regel zijn deze verliezen niet relevant zolang die gezamenlijk lager zijn dan het niveau van de overstort. Dit dient wel getoetst te worden.

Rekenwijze van deze afvoerleiding is analoog aan de afvoerleiding vóór de overstort.

### Beheerplannen en calamiteitenplannen

Tenslotte dient aandacht te zijn voor het beheerplan en de calamiteitenplannen. Handvatten zijn gegeven in de PPD of de leidraad kunstwerken (TAW, 2003). Daarbij dient inzichtelijk te zijn hoe het systeem moet worden beheerd en welke inspanning daarvoor nodig is. Hierbij dient ook een link te zijn met de veiligheidsbenadering en de wettelijke beoordeling.

## 5.2.5 Uitvoeringsontwerp

De afzonderlijke variabelen voor het ontwerp zijn vastgesteld op basis van de geotechnische en geohydrologische analyse en kunnen uiteindelijk worden samengevoegd tot een uitvoeringsgereed ontwerp. Dit bestaat uit zaken zoals situering van de beschikbare/benodigde werkruimte, lozingspunten naar het lokale watersysteem, ligging van onderhoudspunten of de schakelkast voor actieve drainage. Het uitvoeringsontwerp is vaak erg locatie specifiek en wordt hierna dan ook niet voor elke type drainage uitgewerkt.

## 5.2.6 As-Built

Na realisatie dienen we vast te leggen hoe het systeem daadwerkelijk is aangelegd en of er nog afwijkingen zijn ten aanzien van het ontwerp. Bij afwijkingen dienen we vast te leggen wat die afwijkingen voor effect hebben op de benodigde verlaging, het af te voeren debiet en op de beheerbaarheid van het drainagesysteem. Dit dient in het opleverdossier te worden vastgelegd. Een negatieve afwijking is niet gewenst, dit kan voorkomen worden door een robuust ontwerp. Indien mogelijk wordt het systeem getest op de werking ervan.

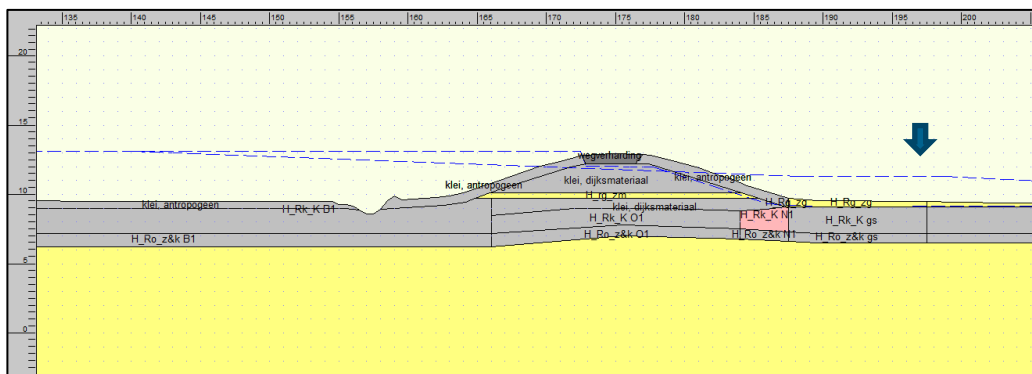
## 5.3 Ontwerp van verticale bronnen

### 5.3.1 Vereiste verlaging

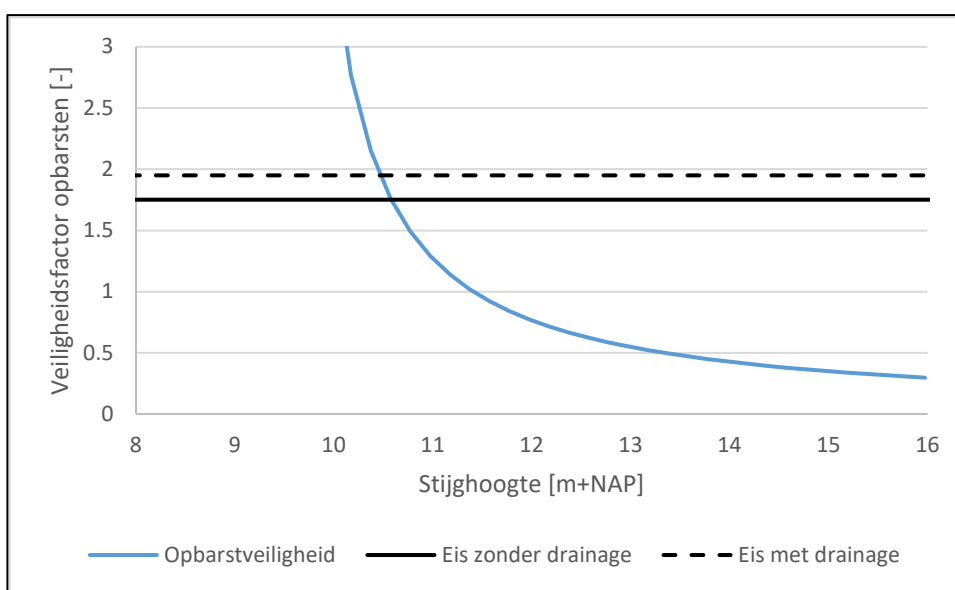
Startpunt is het bepalen van de vereiste verlaging. De volgende stappen dienen te worden doorlopen:

1. Bepaal de vereiste veiligheidsfactor voor het geotechnische faalmechanisme. Hiervoor zijn handvatten gegeven in hoofdstuk 4.
2. Bepaal de representatieve locatie. Dit betreft een dwarsprofiel of opbarstlocatie. Deze laatste is meestal een locatie met een laag maaiveld, bijvoorbeeld een teensloot.
3. Bepaal de bodemopbouw. In de regel is dit op basis van het aanwezige grondonderzoek. Indien er onzekerheid is of weinig gegevens beschikbaar zijn, dan kunnen ook (SOS-) scenario's gehanteerd worden.
4. Bepaal de stabiliteit/veiligheid bij verscheidene stijghoogten. Conform de vigerende werkwijzen (OI2014v4). Expliciete aandacht dient uit te gaan naar tussenzandlagen. Er moet bepaald worden of de waterdruk in de tussenzandlagen verlaagd moet worden, of juist in de diepere lagen.
5. Bepaal maximale stijghoogte. Dit volgt uit punt 1 tot en met 4. De vereiste verlaging volgt uit bovenstaande analyse. Hierbij dient nog aandacht te zijn voor verliezen binnen het systeem, zoals verliezen in de leidingen of verliezen door verstopping in het filter.

Een voorbeeld van bovenstaande is weergegeven in Figuur 5-3 en Figuur 5-4. Te zien is een dijk met een kleilaag in de binnenteen. Om piping uit te sluiten kan gekozen worden om het mechanisme opbarsten uit te sluiten. Daarvoor moet de stijghoogte zo ver worden verlaagd dat deze voldoet aan de vigerende normen. In de referentie situatie is de stijghoogte op deze locatie ca. NAP +11,3 m. Wanneer deze verlaagd wordt tot NAP +10,3 à +10,5 m voldoet deze aan de vigerende normen.

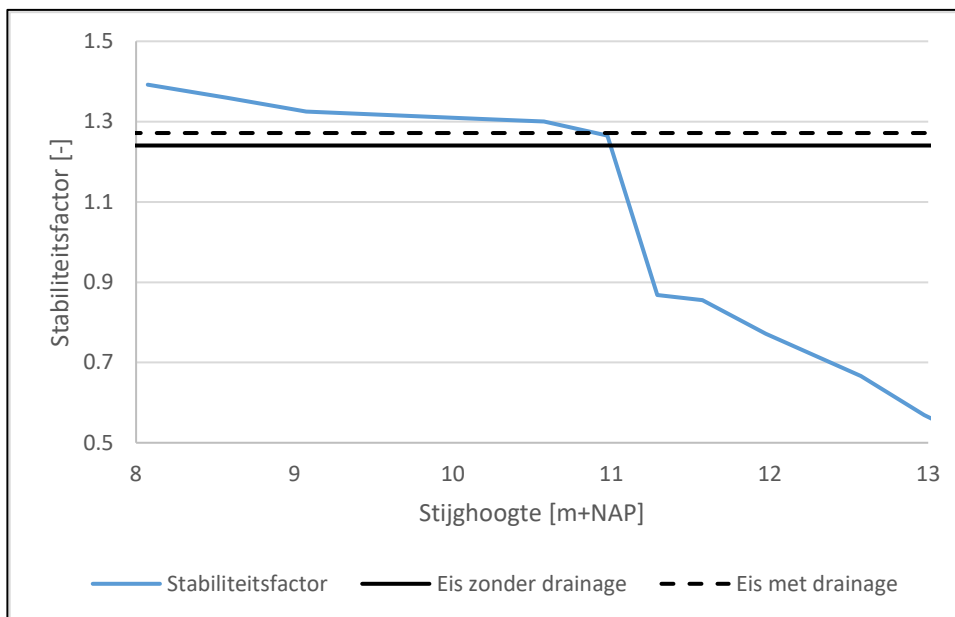


Figuur 5-3: Situatieschets van een waterkering met risico op opbarsten (pijl) aan de binnenzijde.



Figuur 5-4: Verloop van de veiligheidsfactor tegen opbarsten bij verschillende stijghoogtes. In de figuur zijn de eisen weergegeven conform tekst kader “Rekenvoorbeeld: piping/ opbarsten” zoals gegeven in hoofdstuk 4.

Bij macrostabiliteit binnenwaarts dient de verlaging niet alleen bepaald te worden door de veiligheidsfactor tegen opbarsten, maar ook door de veiligheidsfactor van macro-instabiliteit. Hiervoor is eenzelfde analyse uitgevoerd als in Figuur 5-4, echter nu is de stabiliteitsfactor uitgezet tegen de stijghoogte. Dit is weergegeven in Figuur 5-5.



Figuur 5-5: Verloop van de stabiliteitsfactor tegen opbarsten bij verschillende stijghoogtes. In de figuur zijn de eisen (inclusief modelfactor) weergegeven conform tekst kader “Rekenvoorbeeld: macrostabiliteit” en “Rekenwijze OI2014v4 – macrostabiliteit binnenwaarts” zoals gegeven in hoofdstuk 4.

Uit Figuur 5-5 is op te maken dat de stabiliteitsfactor sterk gerelateerd is aan de stijghoogte. Wanneer de stijghoogte wordt verlaagd tot NAP +10,5 m, dan zijn de stabiliteitsfactoren voldoende hoog. Door het verlagen van de stijghoogte in de modelschematisatie van macrostabiliteit binnenwaarts, kan de ligging van het glijvlak ook wijzigen. Dit is locatie en project specifiek en kan vragen voor gecombineerde oplossingen (bv. drainagetechniek in combinatie met taludverflauwing).

Verticale filters zorgen voor een grondwaterstandsverlaging in de bodem door grondwater af te vangen. De impact daarvan is op korte afstand van de verticale filters groter dan op afstand. Tussen de filters is sprake van een zekere opbolling. In de filters is sprake van een zeker ontwateringsniveau. Daarbij moet rekening gehouden worden met het volgende:

- Actieve drainage:  
Praktisch alle verlagingen zijn realiseerbaar. Aandacht is nodig voor de inpassing van de pomp in het systeem.
- Passieve drainage:  
Verlagingen kunnen niet lager zijn dan het lozingspunt. Indien dit een watergang is, dient de T=1 waterstand aangehouden te worden, of een andere waterstand die meer representatief is voor een hoogwatersituatie. Dit moet verder verhoogd worden met drukhoogteverliezen en regelsystemen in het afvoersysteem.

### 5.3.2 Modellerwijze verticale bronnen

De modellerwijze bouwt voort op de systeemanalyse en geohydrologische modellering van de huidige situatie. Hiervoor zijn handvatten gegeven in hoofdstuk 3. Verticale bronnen zijn vooral kansrijk voor diepe watervoerende pakketten met een stijghoogte. Bij het modelleren van verticale bronnen voor dergelijke situaties gelden de volgende uitgangspunten:

- Het grondwatermodel houdt ten minste rekening met de aandachtspunten beschreven in par. 3.3.1.
- De grondwatermodellering dient onzekerheden te omvatten, zoals omschreven in paragraaf 4.7.
- De dimensies van de drainagetechniek zijn op hoofdlijnen bekend. (bv. verticale bron wordt geplaatst met een grindkolom van 0,5 m diameter).
- Het grondwatermodel heeft een modelresolutie die aansluit bij de te modelleren techniek (lokaal rekencellen iedere 0,5 m in horizontale richting).  
 of  
 De modelleur houdt expliciet rekening met de verschillen tussen de te modelleren techniek en de modelresolutie.

Bovengenoemde kan gemodelleerd worden met een grondwatermodel. In paragraaf 5.3.3 zijn handvatten gegeven voor het voorontwerp, in latere fases is waarschijnlijk behoefte aan meer gedetailleerde modelleringen. In Tabel 5-2 is een overzicht gegeven van een aantal grondwatermodellen en hoe deze scoren op diverse criteria. Een beschrijving van de diverse softwarepakketten is gegeven in paragraaf 4.5 van de PPD en in b4.8 van TRWD (TAW, 2004).

Tabel 5-2: Scoretabel grondwatermodellen t.b.v. modelleren stijghoogten met verticale bronnen.

criterium	TIM-ML / T-Tim	Modflow 5 iMOD	Modflow 6	MicroFem	Plaxflow 3D
Locatie specifiek maken <sup>[1]</sup>	+	+	+	+	0
Kalibreren	+	+	+	0	0
Vertaalslag naar hoogwater Inclusief meenemen opbarsten	+	+	+	+	+
Modelresolutie	+	_ <sup>[2]</sup>	+ <sup>[2]</sup>	+	+
Verticale bronnen en tussenliggende opbolling <sup>[1]</sup>	+	_ <sup>[2]</sup>	+ <sup>[2]</sup>	+	+

[1] De modellen die uitgaan van een dwarsprofielbenadering zijn hier weggelaten. Deze modellen hebben sterke beperkingen als het gaat om de modellering van verticale bronnen.

[2] Modflow 5 en iMOD modellen hebben als aandachtspunt dat de modelresolutie in de basis 25x25 m is. Een verticale bron heeft een diameter van ca. 0,5 m en staan bijvoorbeeld met tussenafstanden van ca. 25 m. Deze modellen kunnen dan ook niet de processen tussen de verticale bronnen modelleren. Ook de stroming direct rondom een verticale bron kan niet gemodelleerd worden. Het aanpassen van de modellerwijze/ modelresolutie om wel verticale bronnen te modelleren vraagt expliciete inspanning. In Modflow 6 is dit verholpen doordat lokaal gewerkt kan worden met een verhoogde modelresolutie.



### Passende werkwijze

Indien aan de eerder beschreven uitgangspunten wordt voldaan, dan is het volgende een passende werkwijze:

- Opzet basismodel.  
Maak een basismodel van de te modelleren situatie. Inclusief alle deelstappen zoals weergegeven in paragraaf 3.3.
- Bepaal het ontwateringsniveau in de drainagetechniek.  
Dit is of het niveau van de drainagetechniek, of het niveau van een regelbare klep, of het niveau van het uittredepunt.
- Bepaal of binnen de drainagetechniek redelijkerwijs drukhoogteverlies kan optreden.  
In de regel is de overstortende straal bij een regelbare klep enkele centimeters, het drukhoogteverlies in een drainagebuis is ook maximaal enkele centimeters. In de regel is dit verlies dan ook minder dan 0,05 m ten opzichte van het ontwateringsniveau.
- Voer in het grondwatermodel de drainagetechniek in.  
Door middel van een fixed-head (Dirichlet randvoorwaarde) ter plaatse van de drainage met de afmetingen en het niveau van de drainage (verticale bron, drainagebuis, bovenzijde van grindkoffer). De invoerwaarde is gelijk aan het ontwateringsniveau verhoogd met de drukhoogteverliezen.
- Modelleer hulpconstructies.  
Indien hulpconstructies worden toegepast, dan dienen ook deze gemodelleerd te worden. Bij verticale bronnen betreft dit in de regel filtergrind. Dit wordt om praktische redenen vaak niet specifiek gemodelleerd.
- Aandacht voor veroudering/ verstopping.  
Door veroudering treedt verstopping op. Daardoor neemt de effectiviteit van het filter af. Handvatten zijn gegeven in meerdere literatuurbronnen. Hieronder zijn twee opties benoemd.

#### Eenvoudige methode:

Binnen de Quickscan-tool drainagetechnieken is voor verstopping een verval met een absolute waarde opgenomen. Dit is een verschil van 0,1 m tussen de buiten- en binnenzijde van het filter, ongeacht het debiet op het filter (Witteveen+Bos, 2018).

#### Gedetailleerde methode:

Een gedetailleerde methode omvat het berekenen van het verval over het filter als functie van het debiet. De doorlatendheid van filtergrind is initieel  $10^3$  à  $10^5$  m/dag (Bot, 2016), dit geeft een verwaarloosbaar verval over het filter. Door fysieke processen (verstopping) neemt de doorlatendheid van het filtergrind, het filter en de overgang bij het boorgat af en ontstaat een groter verval over het filter. In (USACE, 1992) is een verval van 0,3 m gerapporteerd bij een debiet van  $65 \text{ m}^3/\text{uur}/10 \text{ m}$  filter na ca. 15 jaar gebruik. Dit komt overeen met een afname van de gemiddelde doorlatendheid (weerstand boorgat, doorlatendheid filtergrind, weerstand filter) tot ca. 75 m/dag. Deze methode vraagt het gedetailleerd modelleren van het filter, dit is in de regel een modelresolutie van ca.  $0,05 \times 0,05 \text{ m}$ . Dit is haalbaar in lokaal verfijnbare modellen of in analytische berekeningen.

### 5.3.3 Voorontwerp verticale bronnen

Belangrijke ontwerpvrijheden zijn de h.o.h. afstand en de omgang met randeffecten. Daarnaast moeten de dimensies van de verticale bronnen bepaald worden. Tenslotte moet bezien worden of er gekozen wordt voor passieve of een actieve drainagetechniek.

In de regel is de opstelling van verticale bronnen voornamelijk in de lengterichting van de dijk. Meestal is er geen sprake van een tweede rij verticale bronnen. Daarmee betreft de h.o.h. afstand vooral de afstand tussen de verticale bronnen in de lengte richting van de dijk. Er gelden de volgende aandachtspunten:

- **Praktische invulling.**  
Diverse huidige systemen, bestaande uit verticale bronnen, hebben een h.o.h. afstand van 25 tot 50 m<sup>14</sup>. De locatie van de bronnen moet zo ingepast worden dat de opbolling tussen de bronnen beperkt is en dat de gekozen locaties uitvoerbaar en beheerbaar zijn.
- **Bodemopbouw.**  
De opstelling van de bronnen moet afgestemd zijn op de bodembouw. Expliciete aandacht dient uit te gaan naar de aanwezigheid van tussenzandlagen.

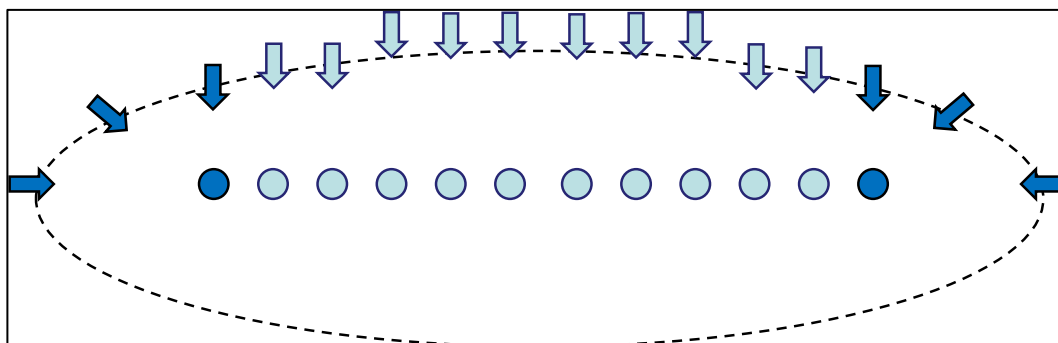
Advies is de bronnen in het geotechnisch lengteprofiel in te tekenen. Daardoor wordt de samenhang tussen de bodemvariaties en de bronnen inzichtelijk.

Er moet aandacht zijn voor de omgang met randeffecten. Bij een rij met verticale bronnen stroomt er meer water naar de bronnen aan de rand. Dit is weergegeven in Figuur 5-6. Daardoor is op die locaties moeilijk dezelfde verlaging te behalen als op de andere locaties. Er bestaan drie oplossingen:

1. **Uitbreiden.**  
De rij met bronnen uitbreiden met 1 à 2 bronnen aan de randen. Daardoor is de verlaging binnen het traject waar de versterking nodig is geborgd.
2. **Aanpassen.**  
De bronnen aan de rand kunnen een ander ontwerp krijgen. Zo wordt mogelijk toch het gewenste effect behaald. Gedacht kan worden aan een andere diameter van het filter/ de omstorting.
3. **Accepteren.**  
Hierbij wordt de situatie aan de randen ontworpen op een aangepaste verlaging. Dit is inpasbaar in combinatie met andere zaken, zoals: een (lichte) ophoging van een berm, het verleggen van een sloot of het meenemen van de positieve invloed van lokale objecten (bv. een toerit).

---

<sup>14</sup> Bij slechter doorlatend zand (siltig tot kleiig, bijvoorbeeld wadzand, doorlatendheid <10m/d) is een hele kleine h.o.h. afstand benodigd. In dit geval is een verticale bron geen realistische optie. Praktijkvoorbeelden van drainagetechnieken met verticale bronnen zijn opgenomen in (Witteveen+Bos, 2017).



Figuur 5-6: Grondwaterstroming richting een rij met verticale bronnen. Bij de bronnen aan de rand van de rij is sprake van aanvullende toestrooming.

### 5.3.4 Definitief ontwerp verticale bronnen

In het definitief ontwerp van de verticale drainage wordt voortgebouwd op het voorlopige ontwerp. Daarbij zijn de afmetingen van de drainage zelf bepaald, samen met de inpassing op de locatie en de vormgeving. Hierbij worden 2 deelsystemen ontworpen. Aanvullend dient aandacht te zijn voor de aansluitpunten en de ontwerpaspecten ten behoeve van beheer (zie paragraaf 5.8):

1. Het ontwerp van de verticale bronnen.
2. Het ontwerp van het horizontale afvoersysteem.

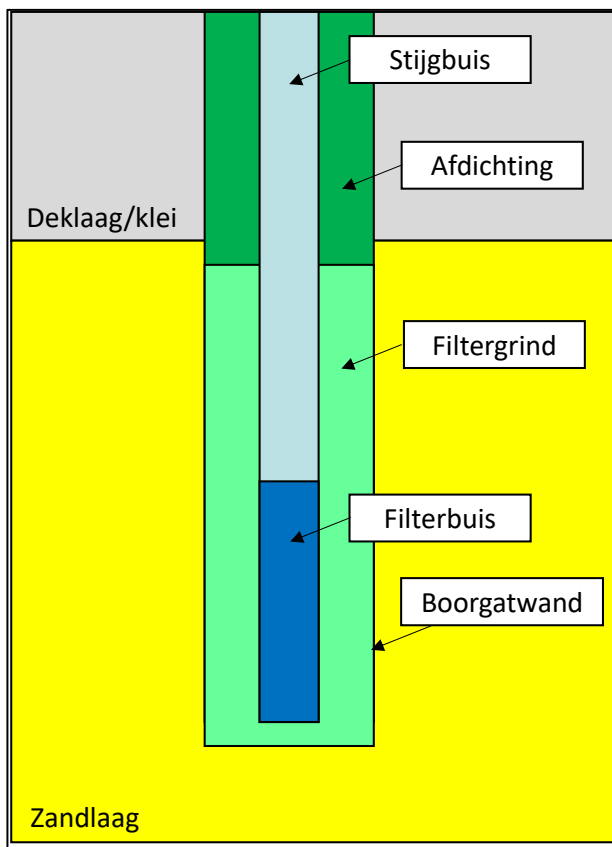
#### Ontwerp verticale bron

Het ontwerp van verticale bronnen is in meerdere documenten in detail beschreven. Een greep uit de literatuur:

- 'Design, Construction, and Maintenance of Relief Wells' (USACE, 1992).
- 'Kennisdokument Putten(velden)' (KWR, 2011).
- GWZ2016 (Bot, 2016).

Een verticale bron heeft de volgende onderdelen. Deze zijn weergegeven in Figuur 5-7:

- Diameter boorgat.
- Filtergrind.
- Filterbuis.
- Stijgbuis.



Figuur 5-7: Onderdelen binnen een verticale bron.

*Diameter boorgat*

De verticale rand van het boorgat is de overgang van de bodem naar het filtergrind. Bij gebruik van de verticale bron dient deze overgang stabiel te zijn. De maximale stroomsnelheid op de rand/omtrek van het boorgat wordt getoetst aan de hand van de formule van Sichardt.

$$Q = v \cdot L \cdot \pi \cdot D$$

$$v = \frac{\sqrt{k}}{15} f_{corr}$$

Hierin is:

Q	Debiet dat onttrokken wordt per filter	[m <sup>3</sup> /s]
v	Stroomsnelheid op de boorgat rand	[m/s]
D	Boorgatdiameter	[m]
L	Onttrekkingslengte	[m]

Te bepalen als de ongunstigste van de onderstaande twee waarden:

- Lengtefilter + 2 m boven filter + 2 m onder filter

Of:

- Dikte watervoerende laag.

K	Horizontale doorlatendheid	[m/s]
F <sub>corr</sub>	Correctie factor	[-]

#### **Intermezzo: correctiefactor**

Bij waterkeringen wordt gewerkt met “veilige” waarden. Bij het faalmechanisme terugschrijdende erosie is dit een hoge doorlatendheid. Echter in de formules van Sichardt werkt een hoge doorlatendheid positief. Dus moet gewerkt worden met een lage doorlatendheid, maar bij een lage doorlatendheid zijn de te onttrekken debieten ook lager.

Advies is derhalve het toetsen bij zowel “veilige” doorlatendheden met  $F_{corr} = 1,0$ . Daarnaast ook toetsen bij best-guess doorlatendheden met  $F_{corr} = 0,5$ . In dit geval sluit de methodiek volledig aan bij ‘Kennisdokument Putten(velden)’ (KWR, 2011); paragraaf 7.6.

#### *Filtergrind*

Het filtergrind zorgt voor de overgang tussen de natuurlijke bodem en het onttrekkingsfilter. Deze heeft als functie het voorkomen van verstoppingen<sup>15</sup> en het zandvrij houden van het filter. Het filtergrind loopt ruwweg door over de verticale lengte van het boorgat tot aan de deklaag. Daarna wordt deze afgedicht met slecht doorlatend materiaal, zoals zwelklei.

- Eigenschappen van het filtergrind zijn de volgende:  
Gemiddelde diameter van het grind afstemmen op de omliggende zandlagen:  
 $D_{50,filtergrind} = 4 \times D_{75,zand}$ .  
Hier is aangesloten bij ‘Kennisdokument Putten(velden)’ (KWR, 2011).
- Breedte 125 à 300 mm.  
Deze diktes hebben vooral te maken met uitvoerbaarheid (dunner dan 125 mm is niet maakbaar) en beheerbaarheid (dikker dan 300 mm kunnen verstoppingen aan de rand niet goed verwijderd worden).

#### *Onttrekkingsfilter en stijgbuis*

Het onttrekkingsfilter heeft een diameter. Bij drinkwaterwinningen wordt de diameter in de regel bepaald met:

- Diameter boorgat.
- Minus ruimte voor het filtergrind.

Het onttrekkingsfilter heeft openingen. De afmetingen van deze openingen moeten afgestemd zijn op het omliggende materiaal. Handvatten zijn gegeven in (Bot, 2016) blz. 280.

De stijgbuis heeft vaak dezelfde diameter als het onttrekkingsfilter. Soms is het wenselijk om een andere diameter aan te houden voor de stijgbuis, zodat een pomp geplaatst kan worden in de stijgbuis. Dit is benodigd voor de uitvoering als actieve drainage of voor het uitvoeren van een capaciteitstest. Hierbij kan een optimalisatie gevonden worden tussen beheer en onderhoud

---

<sup>15</sup> Het KWR rapport stelt dat binnen de drinkwaterwereld is geëxperimenteerd met diverse alternatieven. Een daarvan is het toepassen van geen filtergrind, maar de resultaten waren (nog) niet overtuigend.

(dompelpompen hebben in de regel een breedte van 200 à 250 mm) en de minimaal benodigde afmetingen van de stijgbuis.

#### *Stijgbuis*

In de regel wordt de stijgbuis niet op afvoer ontworpen. Uitgangspunt hier is: als deze eenzelfde diameter of ruimer heeft vergeleken met de nabijge afvoerleiding, dan is het ontwerp passend. Dit sluit aan bij 'Kennisdokument Putten(velden)' (KWR, 2011); hoofdstuk 8.

De stijgbuis heeft dezelfde diameter als het onttrekkingsfilter. Het is wenselijk de diameter afdoende ruim te kiezen zodat een pomp geplaatst kan worden in de stijgbuis. Dit is benodigd voor de uitvoering als actieve drainage of voor het uitvoeren van een capaciteitstest.

#### *Afwerking*

De stijgbuis kan afgewerkt worden met een afsluiter, dit is afhankelijk of de verticale bron op een gesloten of open systeem wordt aangesloten. In een open systeem kan het water vrij uitlopen uit de stijgbuis. Bij een gesloten systeem wordt dit middels leidingen afgevoerd.

Het geheel wordt bij voorkeur afgewerkt met een stalen deksel, zodat bij inspecties de putdeksel gemakkelijk via een metaaldetector te vinden is. Het is tevens wenselijk om een zandvang te installeren, op deze manier is gemakkelijk zand te verwijderen tijdens onderhoud.

#### *Actieve drainage*

Bij het toepassen van actieve drainage wordt in deze fase het type pomp en energievoorziening ontworpen. Eventueel is aandacht voor noodmaatregelen als een noodaggregaat om de betrouwbaarheid te borgen. Specifiek aandachtspunt is de verticale locatie van de pomp. Afhankelijk van de vereiste maximale verlaging in het filter is een andere configuratie wenselijk (onderwaterpomp of vacuümpomp).

### 5.3.5 Omgang met onzekerheden

#### **Capaciteit**

Er is onzekerheid van de doorlatendheid van de bodem. Daarnaast is er onzekerheid over de capaciteit van verticale bronnen na verloop van tijd. Daarom is het wenselijk om in een late ontwerpfase enkele pompproeven uit te voeren. Daarnaast is het wenselijk om direct na aanleg van de verticale bronnen capaciteitstesten uit te voeren. Daarmee wordt het referentiepunt voor de beheer cyclus bepaald. Indien de initiële testen tegenvallen, kan dit ook aanleiding zijn om op de uitvoering bij te sturen.

#### **Zettingen**

Afvoerleidingen zijn kwetsbaar voor zettingen. Vaak is (lange termijn) schade te wijten aan zettingen. Het zettingsvrij ontwerpen van afvoerleidingen, of zo ontwerpen dat deze een zekere hoeveelheid zettingen kunnen opvangen, verhoogt de levensduur van een afvoersysteem.

### **Maatgevende situaties bij afwijkende doorlatendheden**

Bij verticale bronnen is de grootste verlaging ter plaatse van de bronnen zelf. De minste verlaging is aanwezig tussen de bronnen, deze locaties zijn maatgevend voor het ontwerp. In hoofdstuk 10 zijn berekeningen gemaakt in het kader van een casus. Daarbij was sprake van een deklaag, eerste watervoerende laag, scheidende kleilaag en ten slotte een tweede watervoerende laag. Maximale grondwaterstanden zijn berekend bij de volgende situaties:

- Grote kwelstroom vanuit de tweede watervoerende laag.  
Dit kan komen door een lokaal dunnere kleilaag, meer zandige samenstelling of geheel afwezig zijn van deze laag.
- Geringe horizontale doorlatendheid in de eerste watervoerende laag.  
De kwelstroom wordt afgevoerd naar de verticale bronnen. Wanneer de doorlatendheid gering is, dan leidt dit tot grotere waterdrukken in de eerste watervoerende laag.

Deze situaties vragen nadere aandacht in het ontwerpproces.

### **Doorkijk in de toekomst**

Dijkversterkingen worden ontworpen voor een periode van 50 tot 100 jaar, dit geldt dus ook voor drainagetechnieken. Het kan zijn dat binnen deze periode normen strenger worden, risico's groter blijken, (klimaat)veranderingen extremer zijn. Om rekening te houden met dergelijke onzekerheden kan het doelmatig zijn om tegen marginale meerkosten een zekere overcapaciteit te realiseren. Ook kan gekozen worden om het ontwerp uitbreidbaar te maken. Dan kan, indien nodig, de capaciteit later worden uitgebreid door bijvoorbeeld verticale bronnen bij te plaatsen.

### **Aandacht voor horizontale vervormingen**

In de grond kunnen vervormingen optreden in horizontale richting. Dit kan bij de verticale bronnen leiden tot onacceptabele vervormingen en belastingen. Horizontale vervormingen kunnen ontstaan door ophogingen ter plaatse van slappe lagen. Daarnaast bestaat de benadering van stabiliteit van taluds uit critical state soil mechanics. Dit is de sterkte van de grond in de critical state, dit is de situatie waarbij de grond aanzienlijke vervorming heeft ondergaan. Deze situatie heeft overeenkomsten met horizontaal belaste palen. Handvatten daarvoor zijn gegeven in CUR228 (CUR, 2010).

## 5.4 Ontwerp van horizontale drains

### 5.4.1 Vereiste verlaging

Het bepalen van de vereiste verlaging bij horizontale drains is analoog aan die bij verticale bronnen (zie paragraaf 5.3.1).

Aanvulling is dat horizontale drains ook effectief zijn voor de verlaging van freatische grondwaterstanden. Onder andere ten behoeve van het faalmechanisme microstabiliteit.

### 5.4.2 Modellerwijze horizontale drains

De modellerwijze bouwt voort op de systeemanalyse en geohydrologische modellering van de huidige situatie. Hiervoor zijn handvatten gegeven in hoofdstuk 3. Horizontale drains zijn zowel kansrijk voor diepe watervoerende pakketten met een stijghoogte, maar ook voor het verlagen van de freatische grondwaterstand in een dijkcunet. Voor beide gelden de volgende uitgangspunten:

- Het grondwatermodel houdt ten minste rekening met de aandachtspunten beschreven in paragraaf 3.3 respectievelijk paragraaf 3.4.
- De grondwatermodellering dient onzekerheden te omvatten, zoals omschreven in paragraaf 4.7.
- De dimensies van de drainagetechniek zijn op hoofdlijnen bekend. (bv. drainagebuis heeft een diameter van ca. 0,1 m).
- Het grondwatermodel heeft een modelresolutie die aansluit bij de te modelleren techniek (lokaal dus rekencellen iedere 0,1 m).

Bovengenoemde kan gemodelleerd worden met een grondwatermodel. In paragraaf 5.3.3 zijn handvatten gegeven voor het voorontwerp, in latere fases is waarschijnlijk behoefte aan meer gedetailleerde modelleringen. In Tabel 5-3 en Tabel 5-4 zijn overzichten gegeven van een aantal grondwatermodellen en hoe deze scoren op diverse criteria. Een beschrijving van de diverse softwarepakketten is gegeven in paragraaf 4.5 van de PPD en in b4.8 van TRWD (TAW, 2004).



Tabel 5-3: Scoretabel grondwatermodellen t.b.v. modelleren stijghoogten met horizontale drains.

Criterion	D-geoflow	M-Seep	Modflow/ iMOD	Gekanteld Modflow	MicroFem	Gekanteld MicroFem	WATEX	Plaxflow 2D
Locatie specifiek maken <sup>[1]</sup>	0	0	+	0	+	0	-	0
Kalibreren	-	-	+	+	0	0	-	0
Vertaalslag naar hoogwater Inclusief meenemen opbarsten	0	0	+	+	+	+	-	+
Modelresolutie	+	+	0	+	+	+	-	+
Horizontale drains en omliggende stroming	+	+	-	+	-	+	--	+

[1] In de regel geldt dat modellen die een dwarsprofiel-benadering gebruiken zeer goed zijn voor dat specifieke dwarsprofiel, maar de samenhang met de directe omgeving verliezen. Daarom is voor modellen zoals D-geoflow of de gekantelde varianten de score 0 weergegeven.

Tabel 5-4: Scoretabel grondwatermodellen t.b.v. modelleren freatische systemen met horizontale drains.

Criterion	D-geoflow	Modflow/ iMOD	Gekanteld Modflow	MicroFem	Gekanteld MicroFem	WATEX	Plaxflow 2D
Relatie niveau freatisch grondwater – dikte watervoerende laag	? <sup>[1]</sup>	-	0	0	0	-	+
Modelleren taluds	+	-	+	-	+	-	+
Modelresolutie	+	-	-	+	+	-	+
Horizontale drains en omliggende stroming	+	-	+	-	+	-	+

[1] D-geoflow zit ten tijde van schrijven in een refactoring-proces en is dus aan ontwikkeling onderhevig. De huidige versie kan het niveau van het freatisch grondwater modelleren, maar alleen in de “advanced modus”.

### Passende werkwijze

Voor een passende werkwijze wordt verwezen naar de werkwijze zoals reeds beschreven bij verticale bronnen in paragraaf 5.3.2. Onderstaande punten onderscheiden zich van de werkwijze bij verticale bronnen:

- Opzet basismodel.  
Maak een basismodel van de te modelleren situatie. Maak indien nodig verschillende scenario's om de variaties in de bodem af te dekken.

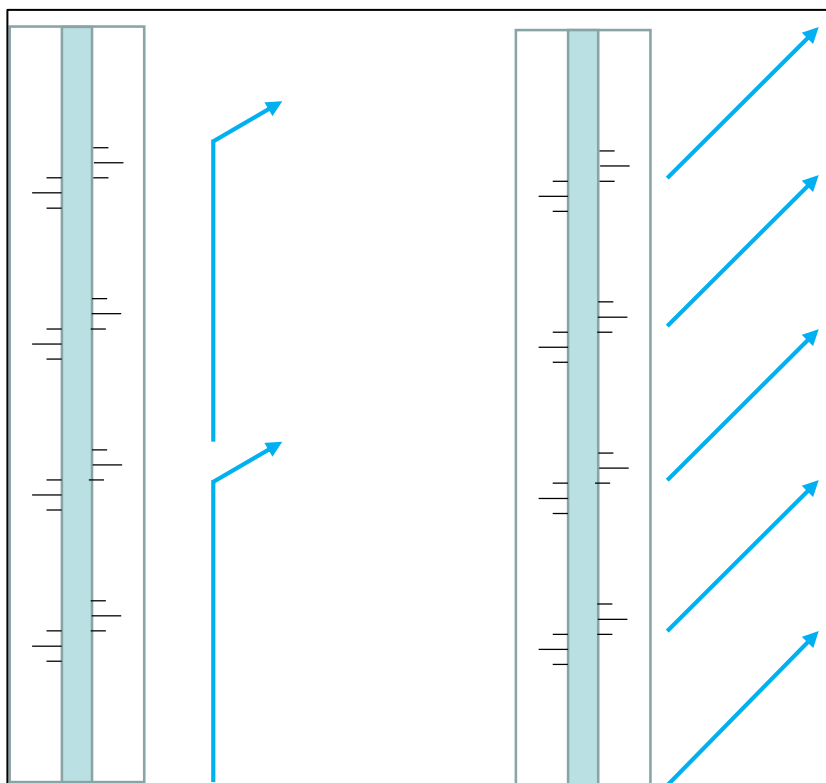
- **Modelleer hulpconstructies.**  
Indien hulpconstructies worden toegepast, zoals een laag drainagezand rondom de drain, dan dienen ook deze gemodelleerd te worden.
- **Aandacht voor veroudering/ verstopping.**  
Door veroudering treedt verstopping op. Daardoor neemt de effectiviteit van de drain af. Voorgestelde werkwijze is derhalve om dezelfde werkwijze als bij verticale filters toe te passen.

### **5.4.3 Voorontwerp horizontale drains**

Belangrijke ontwerpvrijheden zijn het aantal drains, de configuratie ervan, diameter en omstorting, omgang met randeffecten en de keuze tussen passieve en actieve drainagetechnieken.

Voor het aantal drains en de configuratie ervan bestaan meerdere opties. In Figuur 5-8 zijn twee configuraties gegeven. Daarbij is de drain aangelegd nabij de dijk en wordt het water met dezelfde drain afgevoerd naar het achterland (bv. teensloot). Beide voorbeeld configuraties komen voor in het beheersgebied van Waterschap Zuiderzeeland.

Andere configuraties bestaan uit: het gebruik van langere of kortere horizontale strekkingen voordat wordt aangesloten op het achterland, verschil in de dieptes en toepassing van een enkele buis of juist twee die op geringe afstand van elkaar worden aangelegd.



Figuur 5-8: Bovenaanzicht van een dijk met horizontale drains. Twee verschillende configuraties.

Drains komen in soorten en maten. In de akkerbouw variëren de diameters vaak van 50 tot 100 mm. Daarbuiten zijn ruimere diameters ook verkrijgbaar, zoals die gebruikt worden bij stortlocaties (diameters 90 tot 200 mm). Stalen buizen vanuit de drinkwaterindustrie hebben vaak een diameter van 200 mm. Om de effectiviteit (afvoer van grondwater) en levensduur van een drain te verhogen wordt deze soms in goed doorlatende grond gelegd (drainage zand/filtergrind). Deze is óf niet aanwezig, óf wordt omstort zodat de netto diameter wordt vergroot (tot bv. 500 mm). Bij akkerbouwdrainage wordt vaak gewerkt met omhullingsmateriaal. In 'Cultuurtechnisch vademecum', (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988); paragraaf 4.1.7 wordt hier expliciet op ingegaan.

Er dient een keuze gemaakt te worden tussen passieve en actieve drainagetechnieken. Dit is een keuze die analoog is aan die bij verticale bronnen.

De kopeffecten zijn bij horizontale drains analoog aan die bij verticale bronnen. Dit is beschreven in paragraaf 5.3.23. Oplossing voor randeffecten bestaat meestal uit het doorzetten van de horizontale drains met 10 à 20 m voorbij de grenzen van het dijkvak.

## 5.4.4 Definitief ontwerp horizontale drains

Het ontwerp van horizontale drains is in meerdere documenten in detail beschreven. Een greep uit de literatuur:

- 'Cultuurtechnisch vademecum', (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988); paragraaf 4.1.7.
- 'Aanleg en onderhoud van drainage. Vlugschrift voor de landbouw', (Ministerie van Landbouw en Visserij, 1982).
- 'Aanleg en onderhoud van Drainage', (Kooistra, 2014).
- Praktijkrichtlijn; aanleg van drainage met geribbelde draineerbuisen van ongeplastificeerd pvc (KIWA, 1991).
- GWZ2016 (Bot, 2016).

### Diepte drainage

De drainage dient aangelegd te worden in de laag waar de waterdruk verlaagd dient te worden. Deze volgt direct uit de bodemopbouw en geohydrologische schematisatie.

De kosten van aanbrengen worden sterk bepaald door de toepasbare aanlegtechniek. In de ontwerpfase dient dan ook een doorkijk gemaakt te worden naar de uitvoeringsfase en de gewenste werkwijze. Deze wordt sterk beïnvloed door de gewenste diepteligging. In Tabel 5-5 is een overzicht gegeven van de technieken en hun maximale diepte.

Tabel 5-5: Maximale aanlegdiepte per techniek.

Techniek	Maximale diepte [m-mv]	Opmerking uitvoeringswijze
Sleuf	> 99	In den droge
V-vormig mes	1,5	In den natte <sup>[1]</sup>
Kettinggraver	3,0 6,0 à 8,0	In den natte / in den droge <sup>[2]</sup> Betreft diepdraineer machines (Bot, 2016).
HDD-boring <sup>[3]</sup>	> 99	In den natte

<sup>[1]</sup> Er worden betere resultaten behaald wanneer ten tijde van de uitvoering de grondwaterstand laag is/ onder het drainniveau.

<sup>[2]</sup> De techniek an sich is geschikt voor uitvoering in den natte. Maar een kettinggraver doorsnijdt en doorwoelt alle bodemlagen. Wanneer (eventuele) bodemlagen herstelt moeten worden, dan moet aanleg in den droge gebeuren.

<sup>[3]</sup> Bij HDD-boringen spelen specifieke aandachtspunten en risico's. Paragraaf 7.3.2 geeft hier aandacht aan.

### Diameter drainage

Het ontwerp van de diameter van de drainage is analoog aan het horizontale afvoersysteem in paragraaf 5.3.4. In de regel is de diameter van een drain niet kosten bepalend. Daarom wordt gewerkt met een uniforme afmeting van de drains binnen projecten.

De diameter van de drain heeft invloed op de drainerende werking ervan. Dit moet passend meegenomen worden in de effectbepaling.

### **Omhulling drainage**

Er bestaan drie opties voor de omhulling van drainage:

1. Geen omhulling.
2. Zand of grind omstorting.  
De perforatie openingen in de drain moet kleiner zijn dan de D50 van het materiaal rondom de drain ( (FEMA, 2011), par. 5.2.1.).
3. Omhulling van materialen zoals kokos of polypropeenvezel.

De literatuur laat de ontwerper in principe vrij in de keuze voor een type omhulling. De functie van de omhulling is tweeledig. In de eerste plaats is het ter voorkoming van inspoeling van gronddeeltjes in de buis. In de tweede plaats zorgt het gebruik van goed doorlatende omhulling voor een effectief grotere diameter waardoor de drainage effectiever is.

In de regel is geen sprake van uitspoeling van fijne delen richting de drainagebuis indien het lutumpercentage hoger is dan 17,5% conform paragraaf 4.1.7 uit (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988). Uitspoeling van fijne delen is verder uit te sluiten mits de stroomsnelheid op de rand gering is. Dit wordt getoetst analoog aan verticale filters. Aandachtspunt is dat horizontale drains vooral in ondiepe delen van een zandlaag liggen. Deze delen zijn vaak fijner dan de diepe delen. Uitspoeling van fijne delen is tenslotte uit te sluiten mits de openingen (O90) kleiner zijn dan de korrelgrootte (KIWA, 1991). Dit betreft de openingen van de drainbuis zelf.

Indien aan bovenstaande niet wordt voldaan, dan kan gekozen worden voor filtermateriaal. Dit kan zowel bestaan uit zand- of grindomstortingen of kokos of polypropeenvezel. In theorie kunnen deze twee opties ook gecombineerd worden.

Doorgaans worden opties met zand- of grindomstortingen toegepast in de drinkwaterbranche. Deze opties zorgen voor een veel grotere omtrek van de drains. Daardoor kan deze meer water onttrekken. Dit is een kostbare variant, maar met een relatief lange levensduur (bij DMC minimaal 50 jaar).

In het algemeen worden opties met omhullingen (kokos of polypropeenvezel) toegepast in de agrarische sector. Deze opties zijn veel kosten effectiever dan zand- of grindomstortingen. Een omhulling zoals kokos is een natuurproduct. Dit heeft als voordeel dat het biologisch afbreekbaar is, maar als nadeel dat de levensduur daardoor gering is, omdat de drain dan eerder verstopt. In de praktijk wordt vaak gekozen voor polypropeenvezel. De levensduur van dit materiaal is in principe eeuwigdurend. Praktijkgerichte bronnen geven een levensduur van 15 à 20 jaar (Kooistra, 2014).

De keuze voor de omhulling heeft ook een relatie met het risico op ijzeraanslag. Daarbij kan gekozen worden om het risico op deze aanslag te minimaliseren door aandacht te geven aan het uitstroompunt (bv. onderwater). Er kan ook aandacht gegeven worden aan het type omhulling. Handvatten zijn o.a. gegeven in (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988).

## 5.4.5 Omgang met onzekerheden

### Risico's in de aanlegfase

Een voornaam risico uit de literatuur zijn onzorgvuldigheden in de aanlegfase. Voorbeelden betreffen platgedrukte drainagebuizen, gebruik van materiaal/verbindingstukken zonder keurmerk, geen juiste verbindingstukken of geen goede vlakligging. Deze risico's zijn beheersbaar met een gedegen aanlegfase inclusief toezicht, passende opleveringscontrole en revisietekeningen. Handvatten hiervoor zijn gegeven in: (KIWA, 1991) en (STOWA, 2000).

### Zettingen

Drainagebuizen zijn kwetsbaar voor zettingen. Vaak is (lange termijn) schade te wijten aan zettingen. Zettingen tot 50% van de diameter zijn op te vangen. Bij extremere zettingen ontstaan knelpunten. Voorbeelden zijn het ontstaan van een waterslot of losraken van de verbindingstukken. Beiden leiden tot een sterke afname van de afvoercapaciteit.

Voor deze risico's gelden de volgende aanbevelingen:

- Expliciete aandacht voor zettingen.  
Kwetsbare locaties zijn onder andere: ophogingen en (sloot)dempingen (recenter dan 2 jaar).
- Uitvoering afstemmen op zettingen.  
Opties zijn of zettingsvrij uitvoeren (de meeste drainage komt in een zandlaag te liggen), of na verloop van tijd herdaineren.
- Kiezen voor een ruimere draindiameter.  
Hierdoor is de tolerantie voor zettingen groter.
- Beheer en onderhoud.  
Middels inspecties verifiëren of de impact van zettingen op drainage acceptabel is of niet.

### Diepteligging

Vaak kent de bodem meerdere lagen (bv. een kleilaag en een zandlaag). Het is dan van belang dat drainagebuizen in de relevante laag liggen. Met de meeste uitvoeringstechnieken zijn de onzekerheden rondom maakbaarheid gering (precisie op centimeterniveau). De bodem zelf kent vaak meer variatie. Voor deze gevallen gelden de volgende aanbevelingen:

- Uitvoeren aanvullend grondonderzoek.
- Kiezen voor een robuustere uitvoering.  
De drainage kan dieper worden aangelegd of gemaakt worden met extra zandvulling. Zo wordt meer zekerheid gehaald.

## 5.5 Ontwerp van grindkoffers

### 5.5.1 Vereiste verlaging

Het bepalen van de vereiste verlaging bij een grindkoffer is analoog aan die bij verticale bronnen (zie paragraaf 5.3.1).

## 5.5.2 Modellerwijze grindkoffers

De modellerwijze bouwt voort op de systeemanalyse en geohydrologische modellering van de huidige situatie. Hiervoor zijn handvatten gegeven in hoofdstuk 3. Grindkoffers zijn vooral kansrijk voor het verlagen van de stijghoogte van watervoerende pakketten bij een geringe deklaag (ca. 3 m). Hiervoor gelden de volgende uitgangspunten:

- Het grondwatermodel houdt ten minste rekening met de aandachtspunten beschreven in paragraaf 3.3.
- De grondwatermodellering dient onzekerheden te omvatten, zoals omschreven in paragraaf 4.7.
- De dimensies van de drainagetechniek zijn op hoofdlijnen bekend (onderzijde en oppervlak).
- Het grondwatermodel heeft een modelresolutie die aansluit bij de te modelleren techniek (vaak rekencellen iedere 2x2 m, idealiter kleiner).

Bovengenoemde kan gemodelleerd worden met een grondwatermodel. In paragraaf 5.3.3 zijn handvatten gegeven voor het voorontwerp, in latere fases is waarschijnlijk behoefte aan meer gedetailleerde modelleringen. In Tabel 5-6 is een overzicht gegeven van een aantal grondwatermodellen en hoe deze scoren op diverse criteria. Een beschrijving van de diverse softwarepakketten is gegeven in paragraaf 4.5 van de PPD en in b4.8 van TRWD (TAW, 2004).

Tabel 5-6: Scoretabel grondwatermodellen t.b.v. modelleren stijghoogten met grindkoffers.

Criterion	D-geoflow	Modflow/ iMOD	Gekanteld Modflow	MicroFem	Gekanteld MicroFem	WATEX	Plaxflow 2D
Locatie specifiek maken <sup>[1]</sup>	0	+	0	+	0	-	+
Kalibreren	-	+	+	0	0	-	0
Vertaalslag naar hoogwater Inclusief meenemen opbarsten	0	+	+	+	+	-	+
Modelresolutie	+	0	+	+	+	-	+
Grindkoffers en omliggende stroming	+	0	+	0	+	--	+

[1] In de regel geldt dat modellen die een dwarsprofiel-benadering gebruiken zeer goed zijn voor dat specifieke dwarsprofiel, maar de samenhang met de directe omgeving verliezen. Daarom is voor dergelijke modellen de score 0 weergegeven.

### Passende werkwijze

Voor een passende werkwijze wordt verwezen naar de werkwijze zoals reeds beschreven bij verticale bronnen in paragraaf 5.3.2. Onderstaande punten onderscheiden zich van de werkwijze bij verticale bronnen:

- Opzet basismodel.  
Maak een basismodel van de te modelleren situatie. Maak indien nodig verschillende scenario's om de variaties in de bodem af te dekken.
- Bepaal het ontwateringsniveau in de drainagetechniek.

Dit is of het niveau van de drainagetechniek (bv. maaiveldniveau), of het niveau van een regelbare klep, of niveau van het uittredepunt (watergang met T=1 waterstand of meer passend).

- Modelleer hulpconstructies.  
Indien hulpconstructies worden toegepast, zoals verschillende afmetingen op de bodem dan aan het maaiveld, dan dienen ook deze gemodelleerd te worden.
- Aandacht voor veroudering/ verstopping.  
Door veroudering treedt verstopping op. Daardoor neemt de effectiviteit van een grindkoffer af. Literatuur geeft aan dat de doorlatendheid van een geotextiel door verstopping met 50% kan afnemen (CUR, 2009) (dit is een verdubbeling van de weerstand). Voorgestelde werkwijze is derhalve om dit effect toe te passen in de modellering.

### 5.5.3 Voorontwerp grindkoffers

De voornaamste ontwerpvrijheden van een grindkoffer zijn de breedte en locatie, omgang met randeffecten en de inpassing van taluds. Deze aspecten zijn hieronder toegelicht.

De breedte en locatie van de grindkoffer worden vooral bepaald door de beschikbare ruimte en de maakbaarheid (o.a. diepte en uitvoeringswijze). Daarnaast is de breedte ook een ontwerpparameter.

De randeffecten zijn bij grindkoffers analoog aan die bij verticale bronnen. Dit is beschreven in paragraaf 5.3.3. Oplossing voor randeffecten bestaat meestal uit het doorzetten van de grindkoffer met 10 à 20 m voorbij de grenzen van het dijkvak.

Bij de inpassing van de taluds wordt gekeken hoe een grindkoffer het beste past binnen een dwarsprofiel. Daarbij wordt gelet op de afstand tussen de binnenteen en de insteek van de grindkoffer. Hierbij zijn vaak criteria zoals bereikbaarheid voor beheer van belang. Een ander onderdeel is het talud waarbij een grindkoffer wordt aangelegd. Dit is vaak een talud van 1:2 à 1:3. Daarbij is maakbaarheid een voornaam criterium.

### 5.5.4 Definitief ontwerp grindkoffer

Een grindkoffer bestaat in diverse varianten. Een greep daaruit is weergegeven in Figuur 5-7. Deze onderscheiden zich op de volgende vlakken:

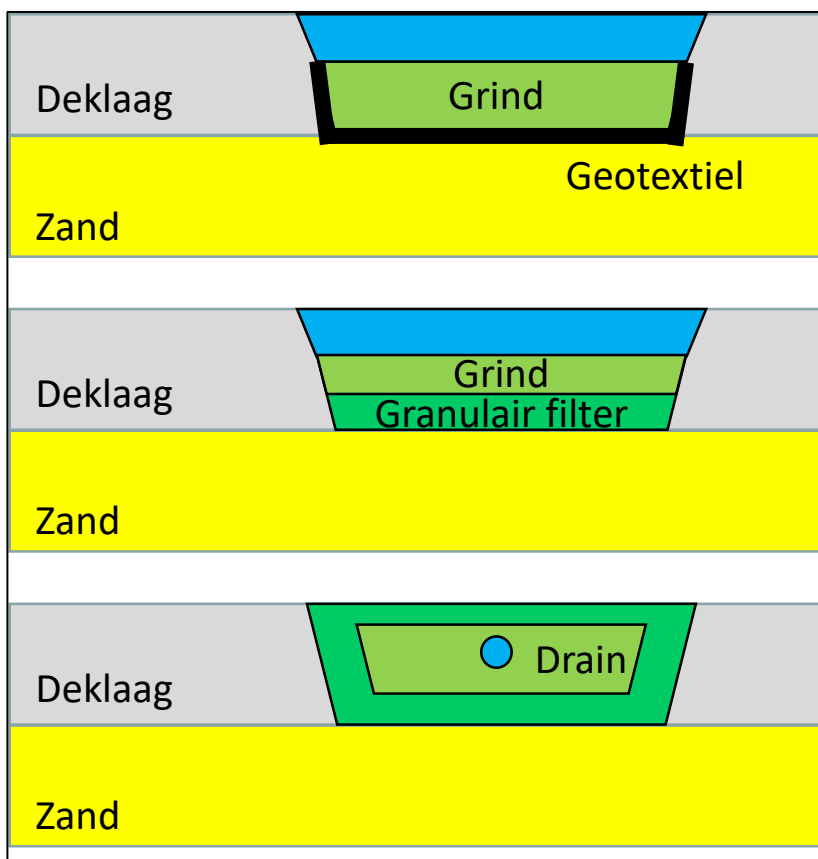
- Invulling filterwerking (geotextiel vs. granulair filter).
- Afvoer van afgevangen water (middels drains of via oppervlaktewater).
- Bescherming aan de bovenzijde.

Het ontwerp van grindkoffers is in reeds in meerdere documenten beschreven. Een greep uit de literatuur:

- 'Geokunststoffen in de civiele techniek - CUR151'; (CUR, 1991).  
Dit betreft grindkoffers met geotextielen als filters, deze zijn beschreven in hoofdstuk 5.



- 'Geokunststoffen in de waterbouw' - CUR174; (CUR, 2009).  
Dit betreft grindkoffers met geotextielen als filters, deze zijn beschreven in hoofdstuk 2 en 3.
- 'Filters in de waterbouw' - CUR161 (CUR, 1993).  
Dit betreft grindkoffers met granulaire filters.
- 'Breuksteen in de praktijk, deel 2: dimensionering van constructies in binnenwateren' - CUR 197 (CUR, 2000).  
Dit betreft grindkoffers met granulaire filters.
- 'Filters for Embankment Dams', (FEMA, 2011).  
Grindkoffers die bedoeld zijn voor het verlagen van de grondwaterstand zijn daar als type 1 filterconstructie omschreven.
- 'Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen' (Rijkswaterstaat, 2012).  
De rekenregels voor granulaire filters zijn opgenomen in paragraaf 5.4.3 en 8.6.3.
- 'The Rock Manual' (CIRIA, 2007).  
Dit betreft zowel grindkoffers met geotextielen als granulaire filters. Deze zijn beschreven in hoofdstuk 3 en 8.



Figuur 5-9: Verschillende varianten van een grindkoffer.



Figuur 5-10: Grindkoffer nabij Neer. Deze is ingepast in de watergang en doorgezet in de taluds.

### Ontwerp grindkoffer – breedte en dikte

De afmetingen van een grindkoffer moeten passend gekozen worden. Daarbij speelt een aantal overwegingen:

- Aansluiten bij bestaande objecten.  
Een grindkoffer in een watergang heeft de breedte gelijk aan de gehele watergang.
- Uitvoerbaarheid.  
Bodembreedte en talud zijn voldoende stabiel voor ontgraving. Afmetingen sluiten aan bij het te gebruiken materieel.
- Voldoende effectief.  
De afmeting van een grindkoffer moet in verhouding staan tot de dikte van het watervoerende pakket. Dit volgt uit de (geo)hydrologische modellering.
- Voldoende robuust.  
Geen risico op opbarsten/heave.

De toets op robuustheid voor heave gaat aan de hand van de vigerende rekenwijze binnen OI2014v4. Deze is hieronder gecombineerd met de grondwaterstroming conform Darcy<sup>16</sup>. Daarbij wordt het drukverval over de grindkoffer bepaald aan de hand van het kweldebiet.

$$\frac{Q_{kwel} \cdot f_{corr}}{D_{grindkoffer}} \cdot \frac{C_{grindkoffer}}{A_{grindkoffer}} < I_{crit}$$

Hierin is:

$Q_{kwel}$	Totale kwelstroom die de grindkoffer afvangt	[m <sup>3</sup> /dag]
$D_{grindkoffer}$	Totale (verticale)dikte van de grindkoffer	[m]
$A_{grindkoffer}$	Oppervlak van de grindkoffer, gemeten op de bodem	[m <sup>2</sup> ]
$C_{grindkoffer}$	Weerstand tegen kwel van de grindkoffer	[dag]
$f_{corr}$	Correctiefactor (2,0)	[-]
$I_{crit}$	Kritische heave gradiënt (0,5)	[-]

<sup>16</sup> Deze samenstelling bestaat uit de onderstaande twee delen:

[1] Berekening kweldebiet:  $Q_{kwel} = \frac{\Delta H}{C_{grindkoffer}} \cdot A_{grindkoffer}$

[2] Berekening heave gradiënt:  $I_{aanwezig} = \frac{\Delta H}{D_{grindkoffer}} < I_{crit}$

### Intermezzo: kwelweerstand en correctiefactor bij grindkoffers

Uitgangspunt is dat een zuivere gedetailleerde analyse een zuiver en gedetailleerd beeld geeft. De analytische berekening kan vervangen worden door een berekening met een grondwatermodel. Daarin kan gedetailleerd (laag voor laag) de grindkoffer worden geschematiseerd. De weergegeven analytische formule is een vereenvoudiging daarvan.

#### Kwelweerstand

De kwelweerstand van een grindkoffer wordt berekend conform de onderstaande vergelijking.

$$C_{grindkoffer} = \frac{d_1}{k_1} + \frac{d_2}{k_2} + \frac{d_3}{k_3} + C_{geotextiel}$$

Hierin is:

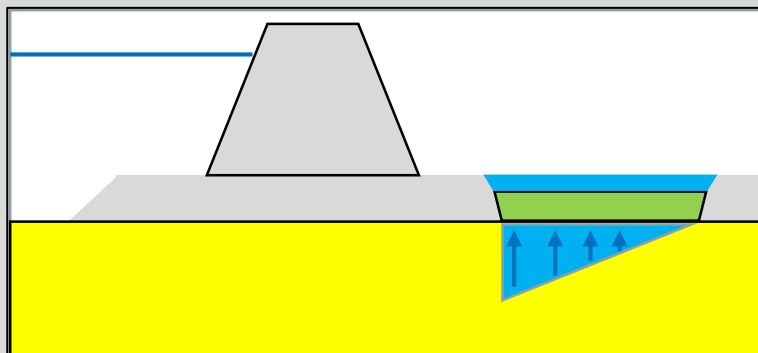
$C_{grindkoffer}$	Kwelweerstand	[dag]
$d_{1,2,3}$	Dikte van een specifieke filterlaag van de grindkoffer	[m]
$k_{1,2,3}$	Doorlatendheid van een specifieke filterlaag	[m/dag]
$C_{geotextiel}$	Kwelweerstand van een eventueel geotextiel	[dag]

De doorlatendheden dienen tijdens het ontwerpproces bepaald te worden. Realistische laagdiktes zijn 0,2 m per filterlaag in verband met maakbaarheid. Deze waarde moet nog worden verhoogd met een toeslag voor maaknauwkeurigheid. Realistische doorlatendheden zijn  $k = 10$  m/dag voor de onderste laag (meestal grof zand) en  $K = 100$  m/dag voor alle vervolg lagen (meestal grind).

Geotextielen hebben een zekere weerstand. Van geotextielen wordt de waterdoorlatendheid meestal weergegeven met de eenheid  $l/m^2/s$ . Doorlatendheden van 0,1 tot 500  $l/m^2/s$  zijn realistische waarden. Dit is gemeten bij een drukverschil van 0,1 m. Dit geeft een  $C_{geotextiel}$  die ligt tussen de 0,000002 en 0,01 dagen.

#### Correctie voor de eenvoud ( $f_{corr}$ )

De correctiefactor is een correctie voor de eenvoud. Bij een grindkoffer direct achter een dijk, zal de eerste vierkante meter van de grindkoffer meer kwel aantrekken dan de achterste vierkante meter. Als dit verloop van maximaal naar nihil verloopt, zoals geschetst in Figuur 5-11, dan is de verhouding tussen het gemiddelde kweldebiet en het maximale kweldebiet precies een factor 2,0. Wanneer de laatste meter van de grindkoffer meer kwel aantrekt dan nihil, dan is de factor van 2,0 conservatief.



Figuur 5-11: Theoretisch verloop van de kweldruk over de breedte van een grindkoffer.

### Ontwerp filter, variant: geotextiel

Het ontwerp van het filter op basis van een geotextiel zijn o.a. gegeven in 'Geokunststoffen in de civiele techniek - CUR151'; (CUR, 1991), hoofdstuk 5. Daarnaast gaat 'Geokunststoffen in de waterbouw' - CUR174; (CUR, 2009) hoofdstuk 2 en 3 in op dit onderwerp.

Er worden twee criteria<sup>17</sup> gesteld:

- De openingen van een geotextiel mogen niet te groot zijn.
- Het geotextiel moet voldoende doorlatend zijn.

De openingen van een geotextiel worden uitgedrukt met de karakteristieke poriegrootte. Dit zijn de O(90) of O(98). De afmetingen van de poriegroottes moeten worden afgestemd op de korrelgroottes van de bodem. In Tabel 5-7 zijn de ontwerpeisen gegeven voor verscheidene situaties.

Tabel 5-7: Ontwerpeisen voor geokunststoffen met filter- en scheidingsfunctie (CUR, 1991) en (CUR, 2009).

Omschrijving	Filterfunctie CUR151	Filterfunctie CUR174
Stationaire stroming	$O(90) < 2 * d_{90}$	$O(90) < 2 * d_{90}$ en $O(90) < 5 * d_{10} * Cu^{1/2}$
Niet-stationaire stroming > Stabiel korrelskelet	$O(98) < 2 * d_{85}$	O(90) < D <sub>90</sub>
Niet-stationaire stroming > niet-stabiel korrelskelet > geen nadelige gevolgen bij uitspoeling	$O(98) < 1,5 * d_{15}$	
Niet-stationaire stroming > niet-stabiel korrelskelet > ontoelaatbare gevolgen bij uitspoeling	$O(98) < d_{15}$	

De interne stabiliteit van een korrelskelet is in CUR151 uitgedrukt als de verhouding tussen de d<sub>60</sub>/d<sub>10</sub>. Bij een verhouding lager dan 10 wordt de grond als stabiel gezien. In de regel voldoen grondmonsters van Nederlandse bodem aan deze eis mits er sprake is van slibarme grond<sup>18</sup>.

<sup>17</sup> Bij geotextielen geldt soms ook het criterium levensduur. Hierbinnen zijn tijd en zonlicht van belang, deze hebben negatieve invloed op de maximale treksterkte van een geotextiel. Voor een filterconstructies geldt dat er geen zonlicht op het geotextiel komt en dat treksterkte niet relevant is. Daarom is levensduur expliciet niet benoemd als onderscheidend criterium.

<sup>18</sup> In de meeste zeefmonsters van schoon zand in Nederland ligt de d<sub>60</sub>/d<sub>10</sub> verhouding tussen 1,5 en 2,5. Aandachtspunt is vooral de aanwezigheid van andere delen dan schoon zand in de bodem, zoals slib-deeltjes.

Een geotextiel moet voldoende waterdoorlatend zijn. Als ontwerpcriterium geldt dat de waterdoorlatendheid van geokunststof groter moet zijn dan die van de grond aan de uitstroomzijde. Als praktijkrichtlijn kan het onderstaande gehanteerd worden.

$$k_{filter} > k_{grond} * f_{factor}$$

Indien een geokunststof een factor 10 meer doorlatend is dan de grond, ontstaat er geen overdruk onder de geokunststof. Ook niet bij verminderde doorlatendheid als gevolg van dichtslibben of dichtslaan. Indien er geen gevaar is voor dichtslibben of dichtslaan, kan een factor 2 à 3 worden aangehouden in bovenstaande formule.

In CUR174 wordt dezelfde vuistregel aangehaald als 18 jaar daarvoor. De relatie met de stabiliteit van de grond is echter losgelaten. De nuance dat een andere verhouding dan een factor 10 in de doorlatendheid kan worden toegepast is in CUR174 (paragraaf 2.7.4) niet meer benoemd.

#### Ontwerp filter, variant: granulair filter

Een granulair filter bestaat uit lagen granulair materiaal. De onderste laag voorkomt het uitspoelen van de ondergrond. De laag daarboven voorkomt het uitspoelen van de eerste granulaire laag. Dit geldt ook voor de laag erboven en daarboven.

Het ontwerp van granulaire filters is behandeld in 'CUR 197 Breuksteen in de praktijk, deel 2: dimensionering van constructies in binnenwateren' (CUR, 2000). Daarnaast zijn diverse zaken beschreven in 'CUR161 filters in de waterbouw' (CUR, 1993). Internationaal wordt gebruik gemaakt van 'Filters for Embankment Dams' (FEMA, 2011). Hoofdpijnen met diverse praktische aanvullingen zijn:

- Minimale dikte per laag  
Meest conservatieve waarde van:  
1,5x D50 (bij grote stenen)  
of  
0,2 m (fijner materiaal).
- Grofheid per laag  
De grofheid van een laag wordt zo gekozen dat de onderliggende laag niet kan uitspoelen. Daarbij worden de onderstaande punten getoetst<sup>19</sup>:
  - $D_{15}F / D_{85}B < 4 \text{ à } 5$
  - $5 < D_{50}F / D_{50}B < 60$
  - $5 < D_{15}F / D_{15}B < 40$

Hierbij is:

D <sub>15</sub> F	Korrelgrootte, 15% ondergrens, filtermateriaal	[m]
D <sub>50</sub> F	Korrelgrootte, 50% ondergrens, filtermateriaal	[m]
D <sub>15</sub> B	Korrelgrootte, 15% ondergrens, basismateriaal	[m]
D <sub>50</sub> B	Korrelgrootte, 50% ondergrens, basismateriaal	[m]
D <sub>85</sub> B	Korrelgrootte, 85% ondergrens, basismateriaal	[m]

<sup>19</sup> In sommige literatuur wordt  $D_{15}F / D_{85}B < 5$  aangehouden (CUR, 2000). In andere literatuur wordt  $D_{15}F / D_{85}B < 4 \text{ à } 6,5$  aangehouden afhankelijk van de grondsoort. Daarbij wordt de lage waarde gebruikt voor schoon zand en grind. Dit is onder andere het geval in (FEMA, 2011) blz. 84.



### Ontwerp horizontaal afvoersysteem

Het horizontale afvoersysteem zorgt ervoor dat het water uit de grindkoffer wordt afgevoerd. De grindkoffer is óf al aanwezig in een watergang, óf functioneert deels als watergang, óf er wordt een separate constructie aangelegd bv. met een drain.

#### *Grindkoffer aanwezig in watergang*

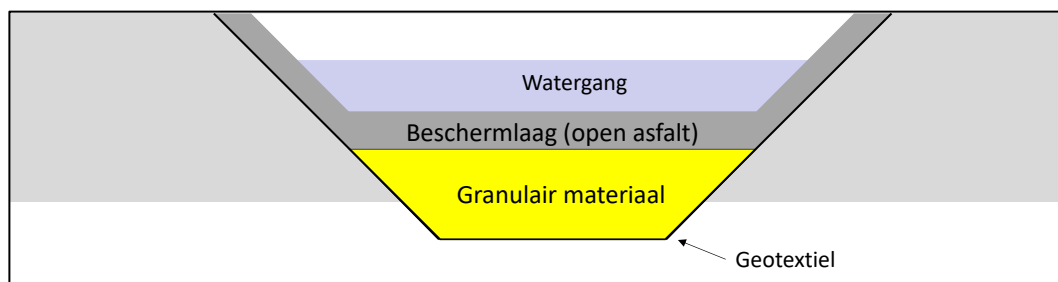
In dit geval hoeft er weinig ontworpen te worden aan het horizontale afvoersysteem. Er gelden de volgende aandachtspunten:

- Watergang moet zijn functie kunnen uitvoeren.  
Dit betekent een minimum profiel van de watergang. In de regel is dit een waterdiepte ten opzichte van streefpeil van 0,5 m.
- Beheer van de watergang moet passend uitgevoerd kunnen worden.  
Dit betekent enige robuustheid in het ontwerp van de grindkoffer. Dit is of een robuuste bovenlaag (bv. asfalt zoals bij WDOD zie Figuur 5-12, of een reserve van 0,5 m voordat onderlagen worden bereikt, of stortstenen zoals bij Neer). De aanwezigheid van deze robuuste laag moet in het beheer geïnspecteerd worden (bv. afbrokkelen asfalt door ouderdom of verdwijnen van stortsteen door vandalisme).
- Functie van de watergang heeft geen negatieve impact op de grindkoffer.  
Dit betreft de stroomsnelheid in de watergang met betrekking tot het eroderen van de grindkoffer. Indien deze lager is dan 0,5 m/s is dit risico afgedekt.

#### *Separate constructie met drain*

Wanneer er een separate constructie wordt aangelegd voor de afvoer, dan dient deze ontworpen te worden. Er gelden de volgende aandachtspunten:

- Diameter drain.  
Deze dient ontworpen te worden. Dit kan analoog aan de handvatten die gegeven zijn voor het horizontale afvoersysteem in paragraaf 5.3.4.
- Perforatie drain.  
Zie paragraaf 5.4.
- Voorkomen verstoppingen.  
Dergelijke systemen kunnen (ook) verstopping. Verstopping moet voorkomen worden en de systemen moeten dus onderhouden worden. Er dienen dus doorspuitpunten aangelegd te worden. Bepanting met bomen of struiken mag niet rondom de drain aanwezig zijn.



Figuur 5-12: Opbouw van een grindkoffer met beschermlaag t.b.v. onderhoud.

## 5.5.5 Omgang met onzekerheden

### Diepte grindkoffer

Grindkoffers worden aangelegd op de overgang van een deklaag (bv. klei en veen) naar een watervoerende laag (voornamelijk zand). Voor de werking is het van wezenlijk belang dat de grindkoffer goed aansluit op de watervoerende laag en dat er geen klei- of veenlagen lokaal resteren. In de meeste gebieden varieert de hoogteligging van deze overgang. Dit is met name het geval in gebieden met diverse geulen en meanders.

Om bovenstaande te borgen kan het volgende gedaan worden:

- Grondonderzoek intensiveren rondom de gewenste locatie.  
Bijvoorbeeld grondonderzoek om de 25 m.
- Uitvoeringscontroles.  
Bijvoorbeeld als de gewenste diepte van de grindkoffer is bereikt, dan extra ontgraven om te zien of er daadwerkelijk zand wordt aangetroffen ter verificatie.

### Afname doorlatendheid geotextiel

In de loop der tijd is het theoretisch mogelijk dat de doorlatendheid van een grindkoffer afneemt. Daardoor kan deze in theorie minder effectief zijn. In CUR151 Geokunststoffen in de civiele techniek (CUR, 1991); paragraaf 5.3 staat hierover het volgende.

*“Na verloop van tijd kan de waterdoorlatendheid van weefsels en vliezen sterk verminderen, omdat fijne deeltjes die met de grondwaterstroom uit de ondergrond worden meegevoerd, zich afzetten in de poriën van de geokunststof. Dit “dichtslaan” komt in de praktijk betrekkelijk weinig voor, omdat zich in de ondergrond een natuurlijk filter opbouwt. (...) Het risico van dichtslaan is aanwezig als de volgende drie omstandigheden zich gelijktijdig voordoen (wat in de praktijk zelden voorkomt):*

- *De openingsgrootte van de geokunststof is zeer uniform.*
- *De korrelgrootte van de onderliggende grond is zeer uniform.*
- *$O(90)/d_{90}$  ligt tussen de waarden 0,5 en 1,0.*

*Elke opening kan dan door een gronddeeltje worden afgesloten.*

*(...)*

*Om dichtslibben te voorkomen, moet men een zo groot mogelijke poriegrootte kiezen; deze moet uiteraard wel acceptabel zijn in verband met grond dichtheid.*

Bovenstaande punt is herhaald in CUR174 paragraaf 3.4.1 en beschreven als “Blocking”. Dit is aangevuld met het fenomeen “clogging”. Het volgende wordt gesteld:

*“Clogging kan ook ontstaan door de oxidatie van roestdeeltjes, kalkhoudend water, biologische aangroei of, zoals bij oever- of dijkbekledingen, door het aanslibben van buitenaf.*

*Verskillende onderzoekers hebben “in situ-onderzoek” gedaan naar clogging. Hieruit is geconcludeerd dat bij “mineral clogging”, hoewel het poriëngehalte en de doorlatendheid van het geotextiel sterk verminderden (de doorlatendheid tot wel 50% van de oorspronkelijke waarde), de waterdoorlatendheid toch altijd groter blijft dan die van het basismateriaal. Omdat in veel gevallen een soort evenwicht wordt bereikt, blijkt de waterdoorlatendheid desondanks voldoende groot te blijven.*



*Voor minder kritieke omstandigheden kan worden gesteld dat clogging niet optreedt als: (...) (volstaan wordt aan het) gronddichtheids criterium.”*

Advies voor de omgang met bovenstaande is het volgende:

- Om dichtslibben te voorkomen, moet men een zo groot mogelijke poriegrootte kiezen (dit betreft de openingen in het geotextiel); deze moet uiteraard wel acceptabel zijn in verband met gronddichtheid.
- Monitoring in de beheerfase.  
Daarbij dient het (verticale) verval over de grindkoffer gemonitord te worden en veranderingen in beeld gebracht te worden.

## 5.6 Ontwerp van actieve drainage

Een actieve drainage bestaat uit drainage met een pomp. Deze pomp slaat aan zodra de (grond)waterdruk een signaleringswaarde overschrijdt. Een afvoerleiding voert het grondwater af. Dit systeem is o.a. beschreven in de 'PPD', (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018), hoofdstuk 5.6.3.1.

Bij een actief drainagesysteem is sprake van een aantal aanvullende componenten ten opzichte van passieve drainage:

- Een pomp.
- Een drukopnemer of peilbuis met sensor om de pomp aan te schakelen.
- Een regelsysteem dat de sensorpuls vertaalt naar inschakeling van een elektrisch circuit dat de pomp aanstuurt.
- Een stroomvoorziening.
- Een afvoerleiding.
- Aandacht voor calamiteiten.  
Te denken valt aan opties voor handmatige bediening indien automatische bediening faalt. Mogelijkheden voor inzet van noodaggregaten indien stroomvoorziening faalt.

De afvoerleiding voor actieve drainage is iets anders dan voor passieve drainage. Deze leiding moet robuuster zijn in verband met de impact van de pomp (denk aan waterslag). Naast het lozen op het binnenwater bestaat de mogelijkheid om te lozen op het buitenwater. Dit heeft als voordeel dat het binnendijkse systeem niet wordt belast, maar heeft als nadeel dat er een leiding door de dijk wordt gelegd. Deze leidingen moeten worden uitgevoerd conform de regelgeving voor leidingen door dijken, dus of voldoende hoog middels een kattenrug, of afsluitbaar met voldoende betrouwbaarheid. Afhankelijk van het ontwerp is een doorvoer om de 100 à 200 m dijk noodzakelijk. Het kan wenselijk zijn om het aantal doorvoeren te beperken door de drainagetechnieken te bundelen in grotere deelsystemen en die door de dijk te voeren. De wenselijkheid hiervan is een overweging die de ontwerper in overleg met het waterschap moet maken.

## 5.7 Ontwerp watersysteem achterland

Drainagetechnieken kunnen worden aangesloten op het watersysteem in het achterland. De inpassing hiervan valt binnen de watertoets. Dit is een onderwerp waarbij het onderwerp waterveiligheid sterk overlapt met beheer van het watersysteem. Voor deze laatste gelden er andere normen, eisen en kaders.

De eisen voor de inrichting van het watersysteem zijn vrij aan de waterbeheerder. Hier zijn handvatten gegeven voor veel voorkomende situaties.

Aandacht gaat uit naar de beschikbare waterafvoer en bergingscapaciteit van het bestaande systeem. In Tabel 5-8 zijn twee voorbeelden gegeven voor de toename van waterafvoer op twee specifieke locaties. Beoordeling hiervan op twee manieren. De eerste is dat de extra belasting onder een grenswaarde moet blijven. De tweede is dat de absolute grootte van de belasting onder een grenswaarde moet blijven.

Bij de eerste manier is een bijzonder aandachtspunt de referentie situatie. In diverse delen in Nederland is bij hoogwater sprake van dermate veel kwel dat water op het maaiveld voorkomt. Daarnaast worden drainagetechnieken ingezet om opbarsten te voorkomen. Het waterbezwaar in de referentie situatie is een gevolg van kwel en opbarsten, maar niet alle rekenmethodes omvatten dit. Het vaststellen van de referentie situatie is dan ook niet eenduidig.

Tabel 5-8: Waarden voor de toename van waterafvoer bij Schoonhoven-Langerak en Cuijk-Grave.

Locatie	Situatie	Bodem-eigenschappen	Waterafvoer [m <sup>3</sup> /m/dag]	Toename [m <sup>3</sup> /m/dag]
Schoonhoven-Langerak	Referentie	Dunne laag van fijn zand.	13 <sup>[1]</sup>	7
	Met Drainage		20 <sup>[1]</sup>	
Cuijk-Grave	Referentie	Dikke laag van grof zand.	25 à 50 <sup>[2]</sup>	20 à 40
	Met Drainage		45 à 90 <sup>[2]</sup>	

<sup>[1]</sup> Bron: (De Vries & van de Wiel, 2014) (paragraaf 5.2; Traject Veersedijk). Gegeven een T10 hoogwaterstand en een neerslag van 2 mm/dag.

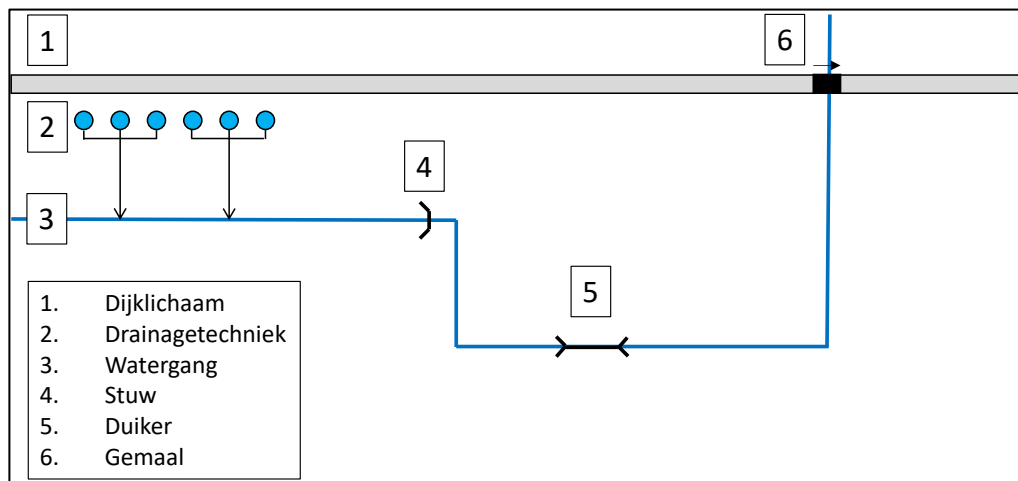
<sup>[2]</sup> Tussen Cuijk en Grave ligt het doorlaatvermogen van het watervoerende pakket tussen 700 en 1.400 m<sup>2</sup>/dag. Door opbarsten van de binnenteen geldt onder maatgevende situaties een verhang van de grondwaterstroming van ca. 1/25. Toepassen van drainage verlaagt de waterdruk ter plaatse van de binnenteen daardoor is geen sprake meer van opbarsten. Als gevolg van de drainage neemt het verhang toe tot ca. 1/15.

### 5.7.1 Systemanalyse watersysteem achterland

Veel voorkomende onderdelen in het watersysteem zijn watergangen, stuwen, duikers en gemalen. Deze zijn hier verder behandeld.

De eerste stap is een systemanalyse van het watersysteem van het achterland. In Figuur 5-13 is daarvan een schets weergegeven. In de regel bestaat het watersysteem uit een set watergangen

die het water leiden naar het laagste punt. Daar wordt dit met een gemaal uitgeslagen naar het buitenwater.



Figuur 5-13: Schets watersysteem van het achterland met een drainagetechniek (verticale bronnen) die loost op dit watersysteem.

Daar waar de drainagetechniek het grondwater loost op het oppervlaktewater ontstaat een extra belasting op het watersysteem. Dit is het geval voor de watergangen tot en met het gemaal. Dit hele gebied dient geanalyseerd te worden op de impact.

## 5.7.2 Toets op afvoercapaciteit

Watersystemen worden getoetst op afvoercapaciteit. Daarbij wordt gezien of de afvoer in absolute zin niet te veel opstuwung geeft en dat de stroomsnelheden acceptabel zijn. Er gelden twee standaard toetsituaties:

- Maatgevende afvoer.  
Wordt 1 à 2 dagen per jaar overschreden<sup>20</sup>.  
De omvang hiervan wordt bepaald door het oppervlak van het gebied dat op een watergang/systeem is aangesloten en de grondsoort (klei/ zand) in het achterland.
- Halve maatgevende afvoer.  
Wordt 10 à 20 dagen per jaar overschreden.  
Halve maatgevende afvoer is (logischerwijs) 50% van de maatgevende afvoer.

Deze OBR stelt het volgende:

- Drainagetechnieken in dijken geven voornamelijk extra afvoer bij hoge buitenwaterstanden. Hoge buitenwaterstanden duren in het rivierengebied 1 à 2

<sup>20</sup> Bron: 'Cultuurtechnisch vademecum', (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988); blz. 549; paragraaf 4.2.3.

weken<sup>21</sup>. In de kust- en meergebieden korter. Watersystemen geven voornamelijk hoge afvoer bij hevige en langdurige neerslag. Het samenvallen van maatgevende afvoer en hoogwater is niet waarschijnlijk. Het samenvallen van half-maatgevende afvoer en hoogwater is wel waarschijnlijk.

- Het is reëel om watergangen te toetsen aan de normen van half-maatgevende afvoer bij een debiet dat afkomstig is van een drainagesysteem tijdens een T=10.
- Het is reëel om watergangen te toetsen aan de normen van maatgevende afvoer bij een debiet dat afkomstig is van een drainagesysteem tijdens een T=10 plus half maatgevende afvoer uit het achterland.

### Toetsen watergangen

Watergangen worden getoetst of de afvoer in absolute zin niet te veel opstuwung geeft en dat de stroomsnelheden acceptabel zijn. Bij het toetsen van watergangen wordt gerekend aan de maximale opstuwung/verhang en de maximale stroomsnelheid. Dit kan gedaan worden in rekenmodellen waar het gehele watersysteem in is gemodelleerd of met analytische formules<sup>22</sup>.

- Standaard toetsituatie: half-maatgevende afvoer.
- Aangepaste toetsituatie: alleen watertoevoer van een drainagesysteem bij een T=10 hoogwater.
- Normstelling: maximaal verhang: 5 cm/ km.<sup>23</sup>  
Deze normstelling kan per waterschap verschillen.
- Normstelling: maximale stroomsnelheid: 0,2 à 0,5 m/s  
(afhankelijk van grondsoort slootbodembodem zand/veen of klei<sup>24</sup>)  
Deze normstelling kan per waterschap verschillen.

Doorgaans geldt het volgende: als de extra toevoer van een drainagetechniek minder is dan de halve maatgevende afvoer die normaliter in een watergang aanwezig is, dan voldoet de situatie.

#### Intermezzo: standaardafmetingen watergangen

Veel gebruikte standaardafmetingen van watergangen zijn:

- Waterdiepte: 0,5 m.
- Bodembreedte: 0,5 m.
- Talud: 1:1,5.

Deze minimale capaciteit wordt vooral bepaald door het maximale verhang en de bodemweerstand. Daardoor varieert de maximale capaciteit tussen 0,03 en 0,05 m<sup>3</sup>/s. Hier is het uitgangspunt aangehouden dat een drainagetechniek 10 m<sup>3</sup>/m/dag aan water geeft. In dat geval kan op deze standaard watergang 250 tot 430 m dijk met drainagetechniek aangesloten worden.

<sup>21</sup> Bron: 'Hydraulische Randvoorwaarden 2006 voor het toetsen van primaire waterkeringen', (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007); paragraaf 2.4.

<sup>22</sup> Bron: 'Cultuurtechnisch vademecum', (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988); blz. 779; paragraaf 11.4.

<sup>23</sup> Bron: 'Notitie stedelijk water', (Waterschap Noorderzijlvest, 2006); paragraaf 3.2.

<sup>24</sup> Bron: 'Cultuurtechnisch vademecum', (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988); blz. 791; paragraaf 11.4.

### Toetsen Duikers

Duikers worden getoetst of de afvoer in absolute zin niet te veel opstuwing geeft. Dit kan gedaan worden in rekenmodellen waar het gehele watersysteem in is gemodelleerd of met analytische formules<sup>25</sup>.

- Standaard toetsituatie: maatgevende afvoer.
- Aangepaste toetsituatie: watertoevoer van een drainagesysteem bij een T=10 hoogwater in combinatie met halve maatgevende afvoer in het achterland.
- Normstelling: maximale opstuwing: 0,02 m (bestaande duikers).  
Deze normstelling kan per waterschap verschillen.
- Normstelling: maximale opstuwing: 0,01 m (nieuw aan te leggen duikers).  
Deze normstelling kan per waterschap verschillen.

Doorgaans geldt het volgende: als de extra toevoer van een drainagetechniek minder is dan de halve maatgevende afvoer die normaliter door de duiker stroomt, dan voldoet de situatie.

Bij het volledige ontwerp van duikers wordt ook aandacht gegeven aan bodemerosie aan de uiteinden. Het risico op bodemerosie is acceptabel indien de stroomsnelheid beneden een kritische snelheid blijft. Er bestaat een directe relatie tussen de stroomsnelheid in een duiker en de opstuwing die de duiker geeft. Of een aanvullende toets op de stroomsnelheid nog relevant is, dient in samenspraak met de beheerder bepaald te worden.

### Toetsen stuwen

Stuwen worden getoetst of de afvoer in absolute zin niet te veel opstuwing geeft. De opstuwing wordt beïnvloed door het type stuw, een vaste stuw of een automatische stuw. Hier is uitgegaan van de eerste. Dit kan gedaan worden in rekenmodellen waar het gehele watersysteem in is gemodelleerd of met analytische formules<sup>26</sup>.

- Standaard toetsituatie: half maatgevende afvoer.
- Aangepaste toetsituatie: watertoevoer van een drainagesysteem bij een T=10 hoogwater.
- Normstelling: maximale opstuwing: 0,07 m.  
Deze normstelling kan per waterschap verschillen.

Bij het volledige ontwerp van stuwen wordt ook aandacht gegeven aan bodemerosie aan de benedenstroomse zijde.

### Toetsen gemalen

Gemalen worden niet getoetst op afvoer. Uitgangspunt is dat de aanvoer van water de afvoercapaciteit niet al te vaak overschrijdt. Wanneer dat wel het geval is, is sprake van een peilstijging nabij het gemaal. Meestal worden gemalen ontworpen op maatgevende afvoer (T=1 situatie). Dat betekent dat enige peilstijging wordt geaccepteerd, zolang dit maar niet vaker voorkomt dan 1x per jaar.

---

<sup>25</sup> Bron: 'Cultuurtechnisch vademecum', (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988); blz. 803; paragraaf 1.1.6.

<sup>26</sup> Bron: 'Cultuurtechnisch vademecum', (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988); blz. 803; paragraaf 1.1.6.

### 5.7.3 Toets op peilstijging

Dijken dienen overstromingen te voorkomen. In (ENW, 2017) is de volgende norm voor een overstroming gegeven: gemiddelde waterdiepte in minimaal één gebied of buurt met gelijke viercijferige postcode (op basis van de wijk- en buurtkaart van het CBS) groter is dan 0,2 meter. De bovengrens voor het acceptabele waterbezwaar van drainagetechnieken in dijken is daarmee deze wateroverlast. Deze normen richten zich op situaties met extreem hoog water.

Andere normen voor wateroverlast in het binnendijkse gebied betreffen de NBW-normen<sup>27</sup>. Deze geven aan dat landgebruik met een lage waarde (bv. grasland) 1x per 10 jaar mag inunderen. Landgebruik met een hoge waarde (bv. bebouwing) mag 1x per 100 jaar inunderen. Deze normen richten zich op situaties met extreme neerslag.

Voor het samenvallen van extreem hoogwater met extreme neerslag zijn geen uitgewerkte handvatten. Deze richtlijn stelt het volgende:

- Peilstijging in het watersysteem wordt bepaald door extreme regenbuien. Een veel voorkomende maat, zijn regenbuien/ de totale neerslag die valt in een periode van 4 dagen. Het exact samenvallen van een dergelijke bui met de piek van een hoogwatergolf is onwaarschijnlijk.
- Het watersysteem is op orde.
- Normaliter wordt een watersysteem getoetst op een 1x per 100 jaar regenbui<sup>28</sup>.
- De alternatieve toetsing waarbij rekening wordt gehouden met hoogwater is de volgende. Het drainagesysteem wordt getoetst op een hoog watergolf met een herhalingsstijd gelijk aan de norm (bv. 1x per 10.000 jaar). Gelijktijdig valt een 1x per jaar regenbui.

Onder bovenstaande uitgangspunten vereenvoudigt de toets op peilstijging tot het aantonen dat de drainagetechniek minder impact heeft op het watersysteem dan een T100 regenbui. Dit kan aan de hand van de onderstaande vergelijkingen:

$$V_{T100 \text{ regenbui}} = P_{T100 \text{ regenbui}} \cdot A_{polder}$$
$$V_{T1 \text{ regenbui} \& \text{ WBN}} = P_{T1 \text{ regenbui}} \cdot A_{polder} + Q_{\text{drainage, WBN}} \cdot L_{\text{drainage}} \cdot T$$

Hierin is:

$P_{T100 \text{ regenbui}}$	Neerslag in een T100 regenbui Bij een 4-daagse regenbui <sup>29</sup> is dit ca. 128 mm.	[m]
$P_{T1 \text{ regenbui}}$	Neerslag in een T1 regenbui Bij een 4-daagse regenbui <sup>30</sup> is dit ca. 59 mm.	[m]

<sup>27</sup> Nationaal Bestuursakkoord Water

<sup>28</sup> Er bestaan meerdere methoden, één daarvan is de stochastenmethode. Die toetst op een serie regenbuien met verschillende vormen en herhalingsstijden in verschillende situaties. Er worden dan situaties gecombineerd als een extreme regenbui die valt in de zomer en een gematigde regenbui die valt in de winter. Vaak komt een 1x per 100 jaar waterstand ongeveer overeen met een 1x per 100 jaar regenbui die valt in een nat gedeelte van de winter.

<sup>29</sup> Bron: 'Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019', (STOWA, 2019).

<sup>30</sup> Bron: 'Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019', (STOWA, 2019).

$A_{\text{polder}}$	Oppervlak van de polder/watersysteem.	[m <sup>2</sup> ]
$Q_{\text{drainage, WBN}}$	Debiet van de drainagetechniek bij WBN <sup>31</sup>	[m <sup>3</sup> /dag/m]
$L_{\text{drainage}}$	Lengte waarover de drainagetechniek is geïnstalleerd	[m]
T	Tijdsduur (gelijk aan neerslagduur <sup>32</sup> )	[dag]

De neerslagduur die in hydrologische ontwerpberekeningen wordt meegenomen heeft te maken met het type systeem. Snel reagerende systemen, zoals stedelijk gebied, worden ontworpen op een neerslagduur van 0 tot 2 dagen<sup>33</sup>. Traag reagerende systemen, zoals landelijk gebied, zijn afhankelijk van de voorgeschiedenis (droge zomer vs. natte winter). Om dit mee te nemen wordt gewerkt met langere neerslag gebeurtenissen, deze omvatten soms natte en droge periodes verdeeld over een totale duur van 4 tot 7 dagen. Gehanteerde uitgangspunten kunnen per waterbeheerder variëren.

#### Intermezzo: rekenvoorbeeld peilstijging

Uitgangspunten:

- Oppervlak polder: 10.000 ha = 100.000.000 m<sup>2</sup>.
- Debiet drainage: 10 m<sup>3</sup>/m/dag.
- T100 regenbui van 4 dagen (128 mm).

Bij een T100 regenbui ontvangt het watersysteem in totaal 12.800.000 m<sup>3</sup> aan water.

Bij een T1 regenbui ontvangt het watersysteem in totaal 5.900.000 m<sup>3</sup> aan water.

Wanneer de drainagetechniek een wateraanvoer van 5.600.000 m<sup>3</sup> geeft bij een hoogwatergolf gelijk aan de norm, dan ontvangt het watersysteem eenzelfde toevoer aan water als bij een T100 regenbui. Dus ook (waarschijnlijk) eenzelfde peilstijging.

Dit is het geval wanneer 140 km dijk versterkt is met een drainagetechniek.

## 5.8 Ontwerpen ten behoeve van beheeraspecten

In de voorgaande paragrafen en in de PPD (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018) zijn handvatten voor het beheer van drainagetechnieken gegeven. In hoofdstuk 8 zijn diverse handvatten voor beheer en onderhoud beschreven.

Belangrijke aspecten zijn het volgende:

- Beschikbaar zijn van As-build tekeningen.  
Deze opnemen in het beheerregister.

<sup>31</sup> WBN staat voor Waterstand Bij de Normfrequentie.

<sup>32</sup> Merk op dat de tijdsduur van een regenbui niet gelijk is aan de tijdsduur van een hoogwatergolf. Hier is dit wel verondersteld, dit is dus een vereenvoudiging. Een theoretisch meer passende optie is het gebruik van een regenduurlijn. Dit vereist echter ook een drainage-debiet-duurlijn. Dit is hier achterwege gelaten. De analyse hiervan is sterk afhankelijk van het verloop van de hoogwatergolf. Deze is minder zeker, omdat veel "hoogwater verlopen" niet zijn gebaseerd op waarschijnlijke verlopen, maar op conservatieve verlopen.

<sup>33</sup> Riolering wordt ontworpen op standaardbuizen. De 1x per 10 jaar regenbui betreft bui10, deze heeft een neerslagduur van ca. 1 uur.

- Beschikbaar zijn van beheerplan en calamiteitenplan.
- Duidelijkheid over de verantwoordelijkheid en uitvoering van bovenstaande.

Hoofdpijnen binnen het ontwerp zijn:

- Aansluitpunten, inspectiepunten en doorspuitpunten.  
Deze zaken moeten ontworpen worden in de DO/VO fase. Daarbij moet aandacht zijn voor toegankelijkheid en onderhoudbaarheid.
- Impact grondwaterkwaliteit.  
De grondwaterkwaliteit heeft impact op de drainagetechniek. Dit betreft zaken zoals ijzer in het grondwater waardoor drainage eerder verstopt. Daardoor is de behoefte aan beheer en onderhoud groter. Handvatten zijn gegeven in hoofdstuk 8.
- Verticale bronnen.  
Deze moeten toegankelijk zijn. De filters moeten geregenereerd kunnen worden/ doorspuiten. Deze moeten afgedekt zijn, idealiter met staal.
- Horizontale delen (afvoerleidingen/ horizontale drains).  
De leidingen/drains moeten doorgespoten kunnen worden. Daarvoor moeten voldoende doorspuitpunten aangelegd worden (om de ca. 100 à 200 m). Deze moeten afgedekt zijn, idealiter met staal<sup>34</sup>.
- Eindbuizen.  
Deze moeten zichtbaar zijn. Deze moeten robuust worden uitgevoerd/ worden beschermd tegen regulier maaibeheer. Gedacht kan worden aan perkoenpalen of betonnen palen rondom de eindbuizen als bescherming.
- Bovenzijde grindkoffers.  
Dit is of een robuuste bovenlaag (bv. asfalt zoals bij WDOD, of een reserve van 0,5 m voordat onderlagen worden bereikt, of stortstenen zoals bij Neer). De aanwezigheid van deze robuuste laag moet in het beheer geïnspecteerd worden (bv. afbrokkelen asfalt door ouderdom of verdwijnen van stortsteen door vandalisme).

Aanvullend leidt een drainagetechniek tot een afvoerpiek op bepaalde locaties. Aandacht moet gegeven worden aan de impact hiervan op het watersysteem en het beheer hiervan.

## 5.9 Monitoringsysteem

Monitoring kan worden toegepast voor twee doelen:

1. Verhoging van de betrouwbaarheid in samenwerking met beheer.  
Dit kan bestaan uit het meten van de verlaging, maar ook uit de relatie tussen debiet en verlaging (Q/h relatie).
2. Sturing van actieve drainage.

Het eerste punt is beschreven in de PPD paragraaf 5.6.5. Dit is tevens uitgewerkt in dit rapport in paragraaf 8.7. Het tweede punt sluit aan bij paragraaf 5.9.

---

<sup>34</sup> Straatpotten van kunststof beschadigen relatief snel. Daarnaast is het niet terug kunnen vinden een knelpunt voor beheer. Stalen straatputten kunnen teruggevonden worden met een metaal detector wat dit onderdeel vereenvoudigd.



Onderdeel van het ontwerp is het inrichten van het monitoringsysteem, dit betreft de volgende zaken:

- Kiezen van de parameters en meetpunten.  
Invulling hiervan is afhankelijk van het specifieke doel van de monitoring.

Monitoring van de grondwaterstand wordt gedaan in een of meerdere raaien peilbuizen.

Monitoring van het effect van de drainagetechniek wordt gedaan door raaien peilbuizen te plaatsen nabij de drainagetechniek en buiten het invloedsgebied van de drainagetechniek.

Monitoring van de verstopping van filters dient een monitoringspunt direct buiten en in het filter te staan.

Monitoring van het debiet is passend bij een regelbare overlaat of verzamelleiding. Dit kan middels een debietmeter of het meten van de overstortende straal bij de overlaat.

Bij monitoring van de uitstroomzijde is het wenselijk om het peil te controleren bij een overstort en om te controleren of een stuw niet verdrongen is.

- Kiezen van meetsensoren.  
Vaak bestaat dit uit peilbuizen met automatische drukopnemers. Voor de drukopname in de drainage kan een vergelijkbare sensor gebruikt worden. Tenslotte wordt bij een pomp vaak een debietmeter toegepast.
- Kiezen van de meetfrequentie.  
De meetfrequentie van monitoring dient afgestemd te zijn op het doel en de situatie. Handvatten hiervoor zijn gegeven in paragraaf 2.3 van Handreiking Meetnetten en Grondwatermonitoring voor Piping (POV Piping, 2020). Hieronder zijn waarden uit deze bron herhaald:  
1x per 1 à 5 minuten bij pompproeven.  
1x per 10 minuten in getijde gebieden.  
1x per 30 á 60 minuten in het rivierengebied.
- Kiezen van een datasysteem.  
Vaak wordt data opgeslagen in een datasysteem. Afhankelijk van het doel is deze volcontinue online beschikbaar.
- Kiezen van een betrouwbaarheidsniveau.  
Wanneer monitoring verantwoordelijk is voor de sturing van het systeem moet hier een zeker betrouwbaarheidsniveau aan gekoppeld worden. Dit betreft keuzes rondom sensoren dubbel uitvoeren, beschikbaarheid van online netwerken en het beheer ook de monitoring te laten controleren. Indien op basis van monitoring beheersmaatregelen worden ingezet, heeft de monitoringsfrequentie een aanvullende rol. Deze dient dan, in crisistijd, een hogere frequentie te hebben (ca. 1x per 10 minuten). Indien monitoring een kritisch onderdeel is van de betrouwbaarheid, dan dient de nauwkeurigheid van de monitoring ook geborgd zijn. Deze sensoren dienen minimaal 1x geverifieerd/geijkt te worden.

## 6 Omgevingsaspecten

Toepassing van een drainagetechniek heeft invloed op de omgeving. De omgeving bestaat uit de fysieke projectomgeving en de daarin aanwezige personen of organisaties met hun belangen. De manier hoe hiermee om te gaan heet omgevingsmanagement. Rijkswaterstaat omschrijft het omgevingsmanagement als het scheppen van fysiek-ruimtelijke en bestuurlijk-maatschappelijke condities in de omgeving om tot een voorspoedige en beheerste realisatie van een afgebakend project te komen (Rijkswaterstaat, 2010). Het omgevingsmanagement is een continu proces, dat loopt van de planfase tot en met de uitvoering en nazorgfase. We onderscheiden grofweg twee hoofdactiviteiten: stakeholdermanagement en conditionering.

### 6.1 Stakeholdersmanagement

Stakeholdersmanagement richt zich op de belanghebbende personen of organisaties (stakeholders) in de omgeving van de projectlocatie. Belangrijk daarbij is de mate waarin zij in hun belangen geschaad of juist tegemoetgekomen worden. Het laatste is in deze niet uit te sluiten omdat een drainagetechniek wordt toegepast met het doel de omgeving veiliger te maken. Voorafgaand aan het project wordt in kaart gebracht op welke stakeholders het toepassen van de drainagetechniek invloed heeft en wat hun belangen zijn.

#### 6.1.1 Omwonenden

Een drainagetechniek wordt veelal toegepast in gebieden waar weinig fysieke ruimte is voor versterkingsalternatieven, zoals bebouwd gebied. Het ligt dan ook vaak langs of onder bebouwing, zoals woningen. Dat maakt de omwonenden een belangrijke groep stakeholders. De omwonenden hebben een sterk, gedeeld belang bij waterveiligheid in hun omgeving. Zij zullen nut en noodzaak van dijkversterking ook vaak erkennen. Desondanks blijven er mogelijk bezwaren tegen de realisatie van het systeem door bijvoorbeeld verwachte hinder en/of schade als gevolg. Vormen van mogelijke hinder zijn:

- Aantasting van kwaliteit eigendommen tijdens realisatie.
- Slechte bereikbaarheid van de eigen woning tijdens realisatie.
- Onveiligheid (sociale veiligheid en verkeersveiligheid) tijdens realisatie.
- Slecht verkoopbare woning in de periode van planvorming en/of daarna.

Hinder is van korte duur, schade is vaak blijvend. Beiden dienen zo veel mogelijk voorkomen te worden. Omdat het optreden ervan niet volledig is uit te sluiten, is het belangrijk om vooraf goede afspraken te maken over het oplossen daarvan, met name over schadeafwikkeling. Een beheersmaatregel is het uitvoeren van een nulmeting, die de situatie vóór de realisatie weergeeft, om oorzaak en gevolg helder te hebben.

Omwonenden zijn te onderscheiden in direct omwonenden, die zich binnen het invloedgebied van de drainagetechniek bevinden en omwonenden die buiten het invloedgebied van de drainagetechniek wonen. Beide groepen hebben belang bij een waterveilige omgeving, maar de

eerste groep heeft een zwaarwegend belang. Een drainagetechniek is een alternatief voor een traditionele dijkversterking op de locatie, laatstgenoemde geeft vaak overlast aan bewoners. In het worst-case scenario zouden grootschalige ruimtelijke ingrepen noodzakelijk zijn en woningen daarvoor plaats moeten maken. Deze direct omwonenden kunnen dan ook worden gezien als co-makers of ambassadeurs voor het systeem.

### 6.1.2 Grondeigenaren

Naast de omwonenden kunnen andere personen of organisaties grond bezitten langs de dijk of de drainagetechniek. Afgezien van de beheerder van de dijk, kunnen dit gemeente, provincie, waterschap, grote terrein beherende organisaties als Staatsbosbeheer of private eigenaren zijn. Deze partijen kunnen ook het bevoegd gezag zijn voor vergunningen en/of ontheffingen (zie paragraaf 6.2: Conditionering). Verder is het belangrijk om met deze partijen afspraken te maken over voorkomen en oplossen van bovengenoemde mogelijke hinder en/of schade, maar ook over toegang en grondgebruik. Wanneer omwonenden wateroverlast ervaren, dan kunnen ook koppelkansen gevonden worden.

### 6.1.3 Waterbeheerder

Een voor de hand liggende, maar niet overbodig te noemen stakeholder, is de waterbeheerder. De waterbeheerder zal in de meeste gevallen tot dezelfde organisatie behoren als de opdrachtgever van een dijkversterking, maar heeft in deze diverse andere rollen, overkoepeld door de rol als waterbeheerder. Naast opdrachtgever is de waterbeheerder verlener van de watervergunning (zie paragraaf 6.2: Conditionering), peilbeheerder, dijkbeheerder (eindgebruiker van de techniek) en als installatiebeheerder verantwoordelijk voor het beheer en onderhoud van het systeem.

De peilbeheerder dient te worden geraadpleegd bij het organiseren van de afvoerlocatie en -capaciteit van het systeem. Bovendien dient de afvoermogelijkheid op orde te blijven. De dijkbeheerder dient mee te denken over het ontwerp, de beoogde veiligheid en te oordelen over de gebruiksvriendelijkheid. De installatiebeheerder dient de vereiste specificaties van de constructie te bepalen en zo nodig daarin te sturen. Bovengenoemde rollen van de waterbeheerder dienen in het gehele proces betrokken te worden en te blijven en zij toetsen idealiter het resultaat. Het systeem wordt immers na oplevering hun eigendom.

## 6.2 Conditionering: procedures en besluitvorming

Naast de stakeholders verdienen de juridische en fysieke randvoorwaarden bij toepassing van het systeem aandacht. Het in beeld brengen van deze randvoorwaarden en het uit de weg ruimen van de eventuele belemmeringen die daaruit voortvloeien, heet conditioneren. Hieronder staat een aantal zaken genoemd die aandacht behoeven.

## 6.2.1 Omgevingsvergunning

Voor de aanleg van een drainagetechniek is een omgevingsvergunning noodzakelijk. De gemeente is hiervoor het bevoegd gezag. De omgevingsvergunning kan worden aangevraagd via één loket.

### **Verontreinigingen bodem**

Bij de aanleg drainagetechnieken worden vaak graafwerkzaamheden toegepast. Verontreinigingen van de bodem hebben dan invloed op het vergunningen proces. Daarnaast hebben deze een (kostenverhogende) invloed op het verwerken en afvoeren van de grond.

### **Verontreinigingen grondwater**

Drainagetechnieken zorgen voor een veranderende grondwaterstroming. Indien verontreinigingen aanwezig zijn, dan dient de invloed van de drainage op deze verontreinigingen aangetoond (en uitgesloten) te worden.

### **Grondwaterbeschermingsgebied**

In grondwaterbeschermingsgebieden zijn ook andere functies aanwezig, zoals drinkwaterwinningen. De inpassing van drainagetechnieken moet zo plaatsvinden dat dit past binnen de vigerende regelgeving. Dit kan leiden tot extra eisen rondom de uitvoering (proceswater mag soms alleen drinkwater zijn). Dit kan ook leiden tot extra eisen aan het ontwerp (uitsluiten van kortsluitingen i.v.m. risico's dat in de toekomst verontreinigingen ontstaan).

### **Verdroging/ grondwaterstandsaling**

Drainagetechnieken zorgen voor een verlaging van de grondwaterstand. Primair doel daarbij is de verlaging in extreme omstandigheden. Aandachtspunt is dat onder normale omstandigheden geen sprake is van (onacceptabele) verlaging. Risico's op verlagen van de grondwaterstanden in het droge seizoen (GLG) en optreden van zettingen dienen in beeld te zijn.

Bij enkele trajecten met drainage is de ervaring dat er versnelde bodemdaling plaatsvindt rondom de drainage. Aandacht moet dan ook uitgaan naar de invloed van de drainagetechniek op bodemdaling/zettingen. Een mogelijke beheersmaatregel is door het systeem afsluitbaar/regelbaar te maken. Zo kan gestuurd worden op de grondwaterstand. Dit zorgt echter voor extra ontwerpuitdagingen en objecten die kunnen falen.

## 6.2.2 Watervergunning

Voor de drainagetechniek in de dijk, of in de beschermingszone daarvan, is naast een omgevingsvergunning ook een watervergunning noodzakelijk. Daarin staan zaken over de realisatiefase en de gebruiksfase.

### **Aandachtspunten realisatiefase**

In de watervergunning dient geregeld te worden dat er in of nabij de dijk werkzaamheden mogen worden verricht. Aandachtspunt daarin is het werken in het stormseizoen (1 oktober tot 1 april). Werkzaamheden in of nabij de dijk zijn in deze periode in principe niet toegestaan. Uitvoeren van

werkzaamheden is vaak wel mogelijk, mits aangetoond wordt dat de risico's voor de waterkering acceptabel zijn. De beheerder van de dijk, (waterschap of Rijkswaterstaat) is het bevoegd gezag.

Bij het werken met HDD-boringen gebaseerd op boorvloeistof speelt de lozing hiervan als extra aandachtspunt.

#### **Aandachtspunten gebruiksfase**

In de watervergunning moet het onttrekken van grondwater geregeld worden. Daarnaast moet de lozing van water op oppervlaktewater geregeld worden.

#### *Onttrekken van grondwater*

Diverse overheden hebben regelgeving die het zonder vergunning verbieden om akkerbouwdrainage toe te passen. Vaak is dit gekoppeld aan een beleidsdoel, zoals het beschermen van natuur of voorkomen van verdroging.

De bestaande regelgeving is geënt op akkerbouwdrainage, maar de formulering maakt het ook van toepassing op dijkversterkingen. Dit is mogelijk onbedoeld breed geformuleerd. Echter is het doel van drainage in of nabij de dijk exact hetzelfde als akkerbouwdrainage, namelijk: door afvangen van grondwater een hoger (veiligheids-)rendement behalen per eenheid oppervlak. Er is dan ook zorgvuldigheid nodig op dit beleidsvlak.

#### **Regelgeving drainage: Brabantkeur**

In hoofdstuk 14: beleidsregel drainage van de Brabantkeur is expliciete regelgeving voor drainage opgenomen. De drie Brabantse waterschappen, Aa en Maas, De Dommel en Brabantse Delta hebben hun keuren geharmoniseerd, dit is de Brabantkeur (Brabantkeur, 2020).

In de Brabantkeur staat:

*In de Beschermde gebieden wordt drainage alleen toegestaan indien deze in combinatie met andere maatregelen cumulatief tot een kwantitatieve en kwalitatieve versterking van het NNB en/of de Natura 2000 leidt ("nee tenzij"). Dit noemen we een hydrologische plus.*

Langs de rivieren liggen uiterwaarden, nagenoeg alle uiterwaarden in Nederland zijn Natura 2000. Een interpretatie van de beleidsregel is: in Brabant mag *nooit* een drainagetechniek als versterkingsmaatregel van een primaire kering toegepast worden, tenzij er *altijd* mitigerende maatregelen in de uiterwaarden tegenover staan. Een alternatieve interpretatie is dat drainage ter plaatse van de binnenteen meestal nipt buiten Natura 2000 gebieden ligt, dat drainage in de waterkering in een gemiddeld jaar *nooit* een functie heeft, dus dat de beleidsregels *nooit* van toepassing zijn. Aangezien beide interpretaties verdedigbaar zijn, moet toepassing van drainage in waterkeringen (vroegtijdig) met de beleidsmakers afgestemd worden.

#### *Lozen van grondwater buitendijks*

Het lozen van water buitendijks moet afgestemd worden met de relevante waterbeheerder. Wanneer wordt geloosd op primair water, dan is dat Rijkswaterstaat. Wanneer wordt geloosd op

gronden die normaliter droog staan, zoals uiterwaarden, dan is de waterbeheerder soms een andere partij (bv. waterschap). Dit is afhankelijk van de inrichting van het watersysteem in de uiterwaarden.

Het lozen buitendijks stelt eisen aan de inrichting. In de eerste plaats moet water over/door een dijk. Dit vereist dat een actief drainagesysteem in verband met de opvoerhoogte. Daarnaast moet het water (meestal) van de binnenzijde getransporteerd worden naar de buitenzijde. Daarvoor moet een leiding aangelegd worden door de dijk. Deze invulling van het systeem verhoogt daarmee de hoeveelheid leidingen/NWO's in de waterkering. Deze NWO's moeten voldoen aan de vigerende leidraden (o.a. NEN3650 serie, (NEN, 2020)).

#### *Lozen van grondwater binnendijks - kwantiteit*

Het lozen van water binnendijks moet afgestemd worden met de relevante waterbeheerder. Dit kan gemeente, waterschap of een andere beheerder zijn. Het watersysteem aan de binnenzijde moet afdoende robuust zijn voor de lozing.

Handvatten voor het kwantitatief ontwerpen van het watersysteem ten behoeve van een drainagetechniek zijn gegeven in paragraaf 5.7.1. Een drainagesysteem leidt tot een toename van de hoeveelheid water dat naar het binnendijkse gebied toestroomt. Sommige waterbeheerders stellen hier eisen aan.

#### *Lozen van grondwater binnendijks - kwaliteit*

Het lozen van (grond) water valt binnen algeheel vigerende richtlijnen. Twee belangrijke richtlijnen zijn:

- Besluit Lozen Buiten Inrichtingen (BLBI).
- Zorgplicht.

In BLBI wordt gesteld dat er geen sprake mag zijn van visuele verkleuring van het oppervlaktewater. Deze eis is ook reeds benoemd in de PPD in paragraaf 8.1.3. In de regel is de visuele verkleuring gekoppeld aan het gehalte ijzer in het te lozen water en de eigenschappen van het ontvangende water (redox-potentiaal). Daardoor bestaat er geen unieke concentratie wanneer wel en wanneer niet verkleuring optreedt. Voor de invoering van BLBI was het lozingscriterium voor ijzerhoudend grondwater in veel gebieden in Nederland: IJzertotaal < 5 mg/l. Wanneer de concentraties ijzer in het grondwater lager zijn dan deze waarde, dan is het toepassen van een drainagetechniek en lozen op oppervlaktewater waarschijnlijk inpasbaar binnen de kaders van BLBI. Wanneer de concentratie het dubbele is, dan is verkleuring van het oppervlaktewater zeer waarschijnlijk.

In de Zorgplicht is gesteld dat een ingreep (lozing) niet mag leiden tot een achteruitgang. Bij veel stoffen is dit plausibel. In de PPD is in paragraaf 8.1.3 specifieke aandacht gegeven aan het maximale zoutgehalte (chloridegehalte). Op dit vlak is een te letterlijke interpretatie van de zorgplicht onhoudbaar. Het water in een watergang is een menging van grondwater met regenwater, daardoor zijn de chloridegehalten in het oppervlaktewater in kustgebieden altijd lager dan het grondwater. Een meer pragmatische inpassing sluit aan bij de functie van het oppervlaktewater. Een benadering vanuit de landbouw geeft dan een maximaal chloridegehalte van 300 mg Cl<sup>-</sup>/l voor gebieden met bloembollen (tabel 5.3.5 (Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum, 1988) of 2000 mg Cl<sup>-</sup>/l wanneer de functie van het water

veedrenking is (tabel 6.26 van (Wageningen Livestock Research, 2019)). Een andere benadering is op basis van de KRW-doelen die op een waterlichaam liggen. De zoetwatertypen kennen een (bovengrens) van 300 mg Cl<sup>-</sup>/l, de brak- en zoutwater typen kennen een grens van 300 tot 3000 mg Cl<sup>-</sup>/l. Merk op dat al deze handvatten vooral gericht zijn op watergebruik in het groeiseizoen. Dijkveiligheid is daarentegen vooral gericht op het stormseizoen.

Op basis van voorgaande handvatten kan de kansrijkheid van lozen op oppervlaktewater in een vroege fase bepaald worden. Definitieve inpassing moet in samenspraak met bevoegd gezag gedaan worden.

#### **Beheersmaatregelen bij afwijkende grondwaterkwaliteit**

Wanneer de grondwaterkwaliteit dermate afwijkt dat lozen op oppervlaktewater ongewenst is, zijn er drie opties. Afzien van drainage, geen maatregelen, wel maatregelen. De eerste optie spreekt voor zich. De optie met beheersmaatregelen is in veel gevallen onaantrekkelijk. Het realiseren van ontziltings- of ontijzeringsinstallaties is financieel onaantrekkelijk. Het toepassen van een kleinschalige maatregel (bv. strobalen om ijzer te binden) is vaak effectief tot een gering volume water.

De optie geen maatregelen is daarmee de meest kansrijke optie. In KIWA 1991 staat: "In de praktijk neemt ijzerafzetting in de loop van de tijd af, behalve in kwelgebieden (met ijzerhoudend water)". Een belangrijke afweging is de vraag of de afwijkende grondwaterkwaliteit van tijdelijke aard is en of een tijdelijke overschrijding wordt geaccepteerd.

Bron: (KIWA, 1991) hoofdstuk 8: onderhoud van drainage.

### **6.2.3 Overeenkomsten (privaatrechtelijk)**

De drainagetechniek wordt eigendom van de waterbeheerder. Indien het systeem wordt gerealiseerd op grond van derden, anders dan de waterbeheerder zelf, dient er op de grond een recht van opstal te worden gevestigd. Dit zakelijk recht is nodig om het eigendom van het systeem goed te regelen. Een recht van opstal wordt door middel van een notariële akte ingeschreven in het kadaster.

### **6.2.4 Kabels en leidingen**

Voorafgaand aan een veldboring, HDD-boring of andere uitvoeringswerkzaamheden doet de aannemer een vooronderzoek en een graafmelding bij het KLIC.

## 6.2.5 Archeologie en NGE

Voorafgaand aan de aanleg van de drainagetechniek doet de aannemer een vooronderzoek naar mogelijke archeologische waarde in de ondergrond of niet-gesprongen explosieven (NGE). Beiden zaken worden onderzocht in de deskstudie van de geotechnische analyse (zie hoofdstuk 3) Indien uit deze bureaustudie blijkt dat één van beide aan de orde is, dient vervolgonderzoek te worden uitgevoerd en in het geval van NGE ook detectie en ruiming. Hinder rondom onderzoeken en werkzaamheden die horen bij archeologie en NGE zijn van korte duur en eindigen vanzelf, schade (aan het werkterrein) wordt nadien hersteld.



## 7 Uitvoeringsaspecten

### 7.1 Algemeen

De ontwerpfase heeft een uitvoeringsgereed ontwerp van de drainagetechniek opgeleverd die toegepast kan worden bij de projectlocatie. In het Handboek Dijkenbouw (HWBP, 2018) zijn vele algemene handvatten voor de uitvoering gegeven. In de PPD, (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018), hoofdstuk 6 zijn de hoofdlijnen rondom uitvoeringstechnieken benoemd. Hier is specifiek ingegaan op gegraven aanbrengtechnieken en sleufloze aanbrengtechnieken.

Van de sleufloze aanbrengtechniek worden de V-ploeg, kettinggraver en HDD-boring behandeld. Deze zijn de meest voorkomende technieken.

### 7.2 Gegraven aanbrengtechnieken

#### 7.2.1 Sleuven ten behoeve van leidingwerk

De aanleg van leidingwerk in een sleuf wordt gedaan in open ontgraving met een bodembreedte en een talud<sup>35</sup>. Deze methodiek vraagt dan ook een zeker ruimtebeslag. Deze werkwijze is altijd in den droge. Afhankelijk van de heersende grondwaterstanden ten tijde van uitvoering is bemaling noodzakelijk. Deze methodiek heeft voordelen en nadelen.

Voordelen:

- Nauwkeurig en uitvoerbaar.  
Zeker in gebieden met veel objecten zoals bij leidingkruisingen.

Nadelen:

- Ruimtebeslag.
- Bemaling en de aandachtspunten die bij bemaling gelden.

Er bestaan lichte verschillen tussen de werkwijze in het landelijke gebied en het stedelijke. Belangrijke verschillen zitten in de aandacht voor cultuurtechniek (in landelijk gebied) versus de aandacht voor overlast en andere objecten (in stedelijk gebied).

Uitvoeringseisen rondom horizontale drainage zijn gebaseerd op 'Praktijkrichtlijn; aanleg van drainage met geribbelde draineerbuizen van ongeplastificeerd pvc', (KIWA, 1991), dit zijn:

- Uitvoering in den droge.
- Drain wordt gelegd in gerijpte bodemlagen.  
Indien deze niet aanwezig zijn, dan werken met 0,1 m sleufomstorting zowel boven, naast en onder de drain.

---

<sup>35</sup> Veel voorkomende maten zijn een bodembreedte van 0,5 m en een talud van 1:1. Naar mate een sleuf dieper wordt, wordt of het talud verflauwd of worden andere maatregelen genomen om voldoende veiligheid te borgen (bv. sleufbekisting).

- Minimale sleufbreedte: 0,2 m.
- Sleuf zo spoedig mogelijk geheel aanvullen, bij voorkeur op de dag van ontgraving. Dit ter voorkoming van inspoeling of nazakking.
- Koppeling van draineerbuisen uitvoeren met een trekvlaste klikmof. De klikmof dient van dezelfde fabrikant te zijn als de draineerbuis.
- Drain minimaal 0,1 m boven slootpeil aanbrengen.
- Eindbuisen moeten zichtbaar zijn.
- Gewenst verhang van 0,1 m per 100 m.

De volgende maatvoering en uitvoeringstoleranties rondom horizontale drainage is in de literatuur gegeven:

- Hoogteligging bepalen:  
Met geautomatiseerd materieel.  
Gebaseerd op GPS van materieel<sup>36</sup>.  
of.  
Bij aanleg in open sleuf middels waterpassing.  
Daarbij iedere 20 m een hoogtemeting uitvoeren. Per segment van 100 m een detailmeting uitvoeren per 1 m over een lengte van 20 m.
- De afwijking in de helling van de binnenonderkant van de drain ten opzichte van de voorgeschreven hellingslijn mag niet meer dan de helft van de inwendige diameter van de drain bedragen.
- Bovenstaande afwijking mag nergens zodanig zijn dat het water boven de aslijn van de buis kan blijven staan als gevolg van een negatieve helling in de draineerbuis.
- Het is wenselijk een uitvoeringscontrole uit te voeren middels doorsteken. Zo kunnen platliggers, losse klikmoffen en andere knelpunten tijdens de aanleg worden opgespoord.

## 7.2.2 Ontgraving ten behoeve van grindkoffers

Grindkoffers worden nagenoeg altijd in open ontgraving aangelegd. Daarbij bestaan twee verschillende werkwijzen: in den droge en in den natte. De eerste is de meest voorkomende werkwijze. Echter, bij de aanleg van een grindkoffer op de bodem van een waterpartij is het droogzetten van de waterpartij niet altijd wenselijk.

In de uitvoering moet aandacht zijn voor drie hoofdthema's. Deze zijn gebaseerd op 'Filters for Embankment Dams', (FEMA, 2011); hoofdstuk 7:

- Verdichting.  
Deze dient voldoende hoog en uniform te zijn.

---

<sup>36</sup> Vroeger (ca. 1990) was het gebruik van GPS op materieel een onnauwkeurige methode. Daarom werd altijd waterpassing aanbevolen. Echter zijn in de loop van de tijd zowel de GPS nauwkeuriger geworden en zijn draineermachines preciezer geworden. Daarom is een meting naast de GPS op het materieel overdaad.

- Gradatie van materiaal.  
Bij een granulair filter is de korrelgrootte essentieel. Door segregatie in de uitvoering kan de korrelgrootte van het materiaal veranderen.
- Geometrie.  
Juiste constructie wijze moet voor uniforme afmetingen zorgen conform het ontwerp.

Verdichting wordt uitgevoerd voor meerdere redenen. Hoofdzaken zijn het voorkomen van inklinking in een latere fase (bv. als gevolg van vernatting) en het verhogen van de sterkte (zowel tegen heave als schuifsterkte). De verdichting dient niet onnodig hoog te zijn, dit zorgt voor lage doorlatendheden, hoge schuifkrachten en soms tot een toename aan fijne fractie<sup>37</sup> wat leidt tot een lagere doorlatendheid. Er geldt het volgende advies:

- Grindkoffers verdichten analoog aan ander ophoogmateriaal.

Gradatie en segregatie wordt beïnvloed door meerdere factoren. Dit onderwerp is kritischer naar mate een werk meer handelingen met het filtermateriaal omvat. Ook wordt dit onderwerp kritischer naarmate een werk/ depot groter wordt. Concrete handvatten zijn beschreven in (FEMA, 2011).

Bij het onderdeel geometrie moet rekening gehouden worden met de volgende zaken:

- Uniforme bouw.  
Dit wordt beheerst door de locatie uit te zetten in het veld, laagsgewijs te werken en de voortgang/laagdiktes tussentijds te meten.
- Veilige taluds  
Risico op instabiliteit dient in de uitvoeringsfase afwezig te zijn. Zwaar materieel moet zo rondom het werk kunnen rijden dat talud instabiliteit door trillingen wordt voorkomen<sup>38</sup>.
- Horizontale drains in de grindkoffer  
Deze zijn relatief kwetsbaar en kunnen snel beschadigen. Tijdens verdichting dient voldoende dekking aanwezig te zijn<sup>39</sup>. Achteraf dient de kwaliteit van de drains aangetoond te worden (bv. middels doorsteken).
- Voorkomen beschadigingen.  
Transportbeweningen over de grindkoffer voorkomen. Of achteruit werken. Of werken vanaf de zijkant.

Literatuur geeft de onderstaande testbehoefte:

- Verdichting.  
Of werken met een aantoonbaar robuuste werkwijze (bv. in den natte).

---

<sup>37</sup> Dit is vooral het geval bij granulair materiaal dat verbrijzeld tijdens verdichten.

<sup>38</sup> Een alternatieve methode is het werken met verticale taluds, zogenaamde "chimneys". Wanneer deze zijn ingesloten in slap materiaal en de grindkoffer aan de bovenzijde te zwaar belast worden, dan dijt deze uit naar de zijanten en ontstaat een "kerstboom-vorm". Interactie met materieel is bij deze extreme vorm dan ook van wezenlijk belang.

<sup>39</sup> (FEMA, 2011) stelt dat een dekking van minimaal 1,20 m (= 4 foot) nodig is voordat zwaar materieel over een drain heen kan rijden.

Of aantonen aan de hand van vigerende methodes (bv. nucleair). Onderste filterlaag 1x per 4000 m<sup>3</sup>. Opvolgende filterlagen 1x per 6000 m<sup>3</sup>.

- Korrelverdeling.  
Aan de hand van vigerende methodes (bv. zeefanalyse). Onderste filterlaag 1x per 4000 m<sup>3</sup>. Opvolgende filterlagen 1x per 7.500 m<sup>3</sup>.
- Geometrie.  
Aantonen dat er geen klei/veen lagen resteren onder de grindkoffer. Werken met extra diepte. Grondslag onderzijde grindkoffer aantonen in het werk (bv. grondslag opgraven en visueel inspecteren).

Dikte van lagen borgen door te werken met toeslag voor maakbaarheid (in den natte is dit ca. 0,05 m). Laagdikten aantonen in het werk (bv. kraanmachine model).

Werken met evident veilige taluds. Verslag maken van alle taludverzakkingen. Na verzakking lokaal de grindkoffer geheel opnieuw opbouwen.

## 7.3 Sleufloze aanbregtechnieken

### 7.3.1 V-ploeg en kettinggraver

Het werken met een V-ploeg is een veel voorkomende werkwijze voor de aanleg van drainagebuizen. Deze methodiek vraagt om een zeker ruimtebeslag, deze is gelimiteerd tot de afmeting van de V-ploeg zelf. Deze werkwijze is altijd vanaf het maaiveld tot een diepte van ca. 1,5 m-mv. Een kettinggraver kan dieper (ca. 2,5 m-mv), specifieke varianten hiervan zoals een diep-draineermachine kunnen nog dieper (ca. 6 m-mv). Algemeen advies is om de werkzaamheden in een zo droog mogelijke periode uit te voeren, maar uitvoering in den droge is niet vereist. Deze methodiek heeft voordelen en nadelen.

Voordelen:

- Zeer kosteneffectief<sup>40</sup>.
- Uitvoerbaar in den natte.
- Afhankelijk van materieel kunnen diverse dieptes bereikt worden (1,5 tot 6,0 m-mv).

Nadelen:

- Ruimtebeslag voor materieel.  
In stedelijke omgeving is dit daarmee moeizaam inpasbaar.
- Gebruik van (zand) omstorting is bij de V-ploeg een aandachtspunt.
- Realiseren van (zand) omstorting is bij de kettinggraver in een fijn zandige bodems onder de grondwaterstand (loopzand) een aandachtspunt.

---

<sup>40</sup> De kosten voor aanleg in akkerbouwgrond variëren van € 0,95 tot 1,25 per strekkende meter, dit is inclusief materieel en materiaal. Bron drainagekosten: 'Aanleg en onderhoud van drainage', (Kooistra, 2014); blz. 83. De kosten voor een meter drainage inclusief sleufvulling met drainagezand kost € 15,- tot 20,- per strekkende meter (kental deskundigenteam). Een damwand kost tussen de € 2.000,- en 5.000,- per strekkende meter dijk.

- Herstel van het bodemprofiel is bij de kettinggraver een aandachtspunt.

De eisen en criteria aan deze methode zijn analoog aan die in paragraaf 7.2.1.

#### **Kettinggraver en doorwoelen van de bodem**

Een kettinggraver graaft tot de gewenste diepte een gat/sleuf. Op de juiste diepte wordt een drain aangelegd. Middels een trechter wordt het gewenste type aanvulmateriaal (draineerzand/grind) toegepast. De overige bodem wordt geroerd teruggeplaatst.

Vroeger werd in leemgebieden de voorkeur gegeven aan de V-ploeg boven de kettinggraver voor het aanbrengen van drainage. Deze doorwoelde de bodem minder. Tegenwoordig wordt in leemgebieden juist voorkeur gegeven aan de kettinggraver boven de V-ploeg. Tegenwoordig wordt het doorwoelen van de bodem juist als een plus gezien.

Rondom waterkeringen is een veel voorkomende bodemopbouw enkele meters klei met daaronder een dik zandpakket. Met een kettinggraver is het mogelijk drainage in het zandpakket aan te brengen. Maar dan wordt de bovenliggende bodem doorsneden en doorwoeld. De teruggeplaatste lagen bestaan dan uit een mix van het zand tussen drainniveau en de kleilaag en de kleilaag zelf.

Bovenstaande heeft diverse consequenties. Net als bij de landbouw in leemgebieden kunnen die op basis van dezelfde feiten gezien worden als ongewenst, of juist als gewenst.

Wanneer wordt gekozen dat het doorwoelen ongewenst is, dan is dit ook uitvoerbaar. Maar dan moet het deel tussen de drain en de onderzijde deklaag geheel aangevuld worden met aanvulzand van elders. Dit kan uitgevoerd worden in den natte. Daarna moet de deklaag laagsgewijs worden opgebouwd/hersteld. Dit moet worden uitgevoerd in den droge. In de regel is dan bemaling nodig.

### **7.3.2 HDD-boring**

HDD-boring staat voor “horizontal directional drill” ook wel “horizontaal gestuurd boren”. Dit is een sleufloze techniek waarmee kabels, leidingen en drainage aangebracht kan worden. Voor de installatie met HDD worden de volgende fasen onderscheiden:

1. Pilotboring.  
In de eerste fase wordt een pilotboring uitgevoerd. Deze heeft een geringe diameter (3 à 5 inch). Deze boring geldt als basis voor de vervolgfases.
2. Ruimen boorgat.  
Na bovenstaande wordt bij het uittredepunt een ‘ruimer’ aan de boorstreng gekoppeld. De ruimer wordt vervolgens roterend terug naar het intredepunt getrokken. Door heen en weer trekken van de ruimer wordt het boorgat stapsgewijs groter gemaakt.
3. Intrekoperatie.  
Als het boorgat groot genoeg is wordt de buis, eventueel met bescherming, door het boorgat getrokken.

#### 4. Schoonmaken filterbuis.

Na aanbrengen van de buis wordt de drainagetechniek gemaakt. Hierbij wordt onder hoge druk water ingespoten en wordt de boorvloeistof afgevoerd.

Rondom sleufloze technieken en HDD-boringen is al veel geschreven. Een greep uit de literatuur:

- 'NEN 3650-1:2020; Eisen voor buisleidingsystemen – Deel 1: algemene eisen', (NEN, 2020).
- 'NEN 3651:2020; Aanvullende eisen voor buisleidingen in of nabij belangrijke waterstaatswerken', (NEN, 2020).
- 'Richtlijn Boortechnieken en open ontgraving voor kabels en leidingen', (Rijkswaterstaat, 2019).
- 'Protocol 5201; protocol geotechnisch onderzoek bij sleufloze technieken, (SIKB, 2018).
- 'Handleiding horizontaal gestuurde boringen', (HHNK, 2004).
- 'Handboek horizontaal gestuurd boren-HDD', (BTL, 2000).

Het ontwerpen van een HDD-boring betreft specialistische kennis. Hier is ingegaan op de hoofdlijnen en raakvlakken met het ontwerp. Daarbij wordt opgemerkt dat bovenstaande literatuur niet zondermeer toepasbaar is. De NEN3650-serie is erop gericht om de afstand tussen een dijk en een HDD-boring te maximaliseren. Voor een doelmatige inzet van een drainagetechniek is het omgekeerde gewenst.

Het toepassen van een HDD-techniek heeft voor- en nadelen.

Voordelen:

- Minimaal ruimtebeslag (alleen rondom intrede en uittredepunt).  
Daardoor is het (door)kruisen van niet-onderbreekbare infrastructuur, bij goede uitvoering van sleufloze technieken, mogelijk zonder dat schade aan de aanwezige infrastructuur optreedt.
- Geringe hinder.  
Stagnatie van weg- en spoorverkeer bij uitvoering wordt voorkomen door gebruik van sleufloze technieken.
- Gering grondverzet.  
Daardoor is de kans op verspreiding van en blootstelling aan (diffuse) verontreinigingen beperkt.

Nadelen:

- Risicovol bij te weinig onderzoek.
- Kwetsbaar voor diverse geologische aspecten die vooraf verkend moeten worden.
- Aandacht voor aanwezige (verticale) objecten.  
Dit zijn, maar niet gelimiteerd tot: damwanden/kwelschermen, kabels & leidingen, funderingen van woningen, hoogspanningsmasten of andere objecten.

Uitvoering van een HDD-boring gebruikt boorspoeling. Een veelgebruikte boorspoeling is bentoniet(klei). Een alternatief is het gebruik van water. Het nadeel van bentoniet is dat de boorgatwand bewust wordt verstopt ten behoeve van de uitvoerbaarheid. Dit wordt zoveel

mogelijk verwijderd in de fase “schoonmaken filterbuis”, maar mogelijk blijft een deel resteren. In Tabel 7-1 is een vergelijking weergegeven.

Tabel 7-1: Vergelijking boorspoeling met betrekking tot uitvoerbaarheid.

	<b>Boorspoeling: bentoniet</b>	<b>Boorspoeling: water</b>
Risico op verstopping boorgatwand	eventueel	nee
Maximale grofheid omliggend materiaal	Klei tot grind	Klei tot grind
Maximale lengte succesvol toegepast	Ca. 300 m <sup>[1]</sup>	Ca. 100 m
Maximale diameter succesvol toegepast	800 mm of meer	Ca. 300 mm

<sup>[1]</sup>Extreme afmetingen zijn 800 m voor PE en 1500 m voor staal. Deze zijn vaak kostentechnisch onaantrekkelijk.

Literatuur geeft de volgende maatvoering en uitvoeringstoleranties rondom HDD-boringen:

- Ligging boring ten opzichte van ontwerprijn<sup>41</sup>.  
Verticaal:  $\pm 1$  m.  
Dwarsrichting t.p.v. uittredepunt:  $\pm 1$  m.  
Dwarsrichting elders:  $\pm 5$  m.  
Bochtstralen:  $< 10\%$
- Boogstralen  
In het bovenaanzicht zijn HDD-boringen altijd een rechte lijn.  
In het dwarsaanzicht ligt een leiding in een kromming tussen het intredepunt, het horizontale deel en het uittrede punt. Deze boogstralen zijn afhankelijk van de diameter van de leiding en het materiaal. Onderstaand zijn twee kentallen ter vergelijking opgenomen.
  - Staal, rond 300 mm: boogstraal ca. 320 m.
  - PE, rond 300 mm: boogstraal ca. 30 m.

---

<sup>41</sup> Bron: NEN 3650-1:2020: bijlage F, (NEN, 2020).

### **Omgang met onzekerheden – HDD-boringen**

HDD-boringen kennen twee belangrijke onzekerheden. De eerste betreft de eigenschappen van de bodem en grondwater. De tweede is het tegenkomen van obstakels.

#### **Eigenschappen van de bodem en grondwater**

In de bodem zijn diverse zaken die invloed hebben op het ontwerp van een HDD-boring. Dit zijn, maar niet gelimiteerd tot: aanwezigheid stenen (zwerfkeien), puinlagen, grind, overgeconsolideerde kleisoorten (bv. potklei, Eemklei of Boomse klei), te los gepakte of te vast gepakte zandlagen, aanwezigheid van geulen, schelpenlagen, chemische kwaliteit grondwater (pH-waarde of chloride gehalte). Enkele lagen hebben obstakels (zwerfkeien) waar een HDD-boring niet doorheen kan. Sommige lagen zorgen soms voor een zeer hoge wrijving waardoor een leiding niet gemakkelijk door het boorgat getrokken kan worden. Andere aspecten zorgen ervoor dat een andere variant boorspoeling gebruikt moet worden. De eigenschappen van de bodem moeten vooraf onderzocht worden voordat een ontwerp van de HDD-boring opgesteld kan worden. De vigerende literatuur geeft hiervoor voldoende handvatten.

#### **Obstakels**

Het tweede type onzekerheden betreft het tegenkomen van obstakels in de bodem. Voorbeelden zijn gekarteerde en niet gekarteerde damwanden. Een HDD-boring kan niet door deze obstakels, deze moet er omheen of er onderdoor. De diameter van de HDD-boring bepaald hoe flexibel deze is en of deze eromheen ingepast kan worden. In de regel zijn diameters tot 150 mm dermate flexibel dat omgang met obstakels inpasbaar is. Wanneer een grote diameters HDD-boring een obstakel tegenkomen, kan het zijn dat de leiding/boor soms als verloren gezien moet worden.

### **7.3.3 Boring ten behoeve van verticale bronnen**

In het Handboek Dijkenbouw (HWBP, 2018) zijn vele algemene handvatten voor de uitvoering gegeven. Daarvan paragraaf 9.3 omvat een factsheet die specifiek betrekking heeft op verticale /ontlastbronnen. Daarnaast geeft het Kennisdocument puttenvelden (KWR, 2011) vanuit de drinkwater sector concrete handvatten voor de uitvoering van verticale bronnen.

Verticale bronnen worden geplaatst met een (verticale) boring. Dit is een sleufloze techniek. Daarmee is deze techniek inpasbaar tussen bestaande objecten (bv. gebouwen). Vaak worden verticale bronnen met horizontale leidingen gekoppeld aan afvoerstelsels. De aanleg hiervan is (in de regel) geen sleufloze techniek. Voor de uitvoeringsaspecten van de aanleg van horizontale verzamelleidingen wordt verwezen naar paragraaf 7.2.1.

#### **Uitvoeringswijze boren**

De uitvoeringsmethode van het boren is beschreven hoofdstuk 11 van (KWR, 2011). Bij de gangbare boormethode roterend zuigboren/luchtliften moet worden gezorgd voor een zeker gestelde toelevering van werkwater van gecontroleerde kwaliteit en voldoende hoeveelheid. Om bij exploitatie van de pompput de kans op verstopping en/of bacteriegroei zo klein mogelijk te houden, wordt bij voorkeur geboord zonder, of als dat niet anders kan, met zo weinig mogelijk



boorspoelingscomponenten. Bij aanboring van veel fijn materiaal is ontzanding van de boorspoeling noodzakelijk. In (KWR, 2011) zijn handvatten gegeven voor die situaties.

De uitvoeringstechniek voor de waterontspanner is gebaseerd op (De Vries & van de Wiel, 2014). De verticale bronnen zijn geplaatst in een schacht die in de bodem geboord is met een diameter van ca. 0,50 m. De schacht is geboord met de roterende of zuigboor techniek. De stabiliteit van het boorgat is daar gewaarborgd door de hydrostatische (water)kolom. In de containers op het maaiveld bezinken de opgeboorde gronddeeltjes en daarna wordt het water opnieuw gebruikt en teruggeleid naar het boorgat.

Als vuistregel geldt dat 10 keer de diameter van het boorgat een veilige afstand tot bebouwing is zonder aanvullende maatregelen (5 meter bij een diameter van 0,5 m). In die situaties waar de afstand tot naastgelegen objecten minder dan 10 keer het boorgat bedraagt, of daar waar de werkruimte beperkt is, kan van deze boormethode afgeweken worden en kan een casing toegepast worden. Bij deze techniek wordt de boring uitgevoerd binnen een tijdelijke stalen casing (buis); de stalen casing dient als steun voor het boorgat. De buis wordt door middel van hoogfrequente trilling naar beneden geboord. Na het bereiken van de einddiepte wordt binnen de mantelbuis het filter geplaatst.

#### **Uitvoeringswijze aanvullen**

De uitvoeringsmethode van het uitvullen is beschreven in paragraaf 11.5 van (KWR, 2011). Aanvullen wordt gedaan middels een stortkoker waarmee beheerst en met constante stort snelheid het filtermateriaal wordt gestort.

De werkwijze bij de boring met een stalen casing wijkt daar licht vanaf. Tijdens het omhoogtrekken van de stalen casing wordt het boorgat weer opgevuld met filtergrind rond het filterdeel en zwelkleikorrels rond het stijgbuisgedeelte van de bron ter afdichting.

#### **Voordelen:**

- Ruimtebeslag.  
Aanleg van de verticale bron geeft een gering ruimtebeslag. Dit wordt bepaald door het vereiste materieel (3x3 m in verband met rupsvoertuig). Er is sprake van enige invloedzone rondom de boring. Dit kan beheerst worden door het gebruik van een casing.

Horizontale afvoerleidingen vragen separate ruimte en inpassing.

- Gering grondverzet.  
Het grondverzet is gering bij plaatsen van de verticale bron.

Horizontale afvoerleidingen vragen separate ruimte en inpassing.

#### **Nadelen:**

- Aandacht voor aanwezige objecten.  
Dit zijn, maar niet gelimiteerd tot: kabels & leidingen, funderingen van woningen of andere objecten.

## 8 Beheer en onderhoud

### 8.1 Algemeen

In de PPD is in hoofdstuk 7 aandacht gegeven aan beheer en onderhoud. Daar zijn aanbevelingen gedaan om te werk te gaan volgens de leidraad kunstwerken (TAW, 2003). Belangrijke aspecten zijn de volgende:

- Beschikbaar zijn van As-build tekeningen. Deze opnemen in het beheerregister.
- Beschikbaar zijn van beheerplan en calamiteitenplan.
- Duidelijkheid over de verantwoordelijkheid en uitvoering van bovenstaande.

### 8.2 Handvatten voor beheer en onderhoud

Er zit een relatie tussen veiligheid, ontwerp, beheer en monitoring. Drainagetechnieken in waterkeringen hebben als eigenschap dat deze slechts incidenteel actief zijn. Wanneer deze actief zijn, worden ze niet maximaal belast. Tenslotte bestaat het falen uit graduele processen (bv. verstopping) en plotselinge processen (falen afvoerleiding). Veel voorkomende beheer- en onderhoudsstrategieën zijn daarom een combinatie van frequente visuele inspecties en periodieke testen. Daarbij zetten sommige waterschappen zwaar in op monitoring en andere juist helemaal niet. Handvatten voor het opzetten van een beheer- en onderhoudsstrategie zijn beschreven in bijlage 6 van de Leidraad kunstwerken (TAW, 2003). Deze geeft in paragraaf B6.4.2.2 een aantal beheer- en onderhoudsstrategieën.

Voor het beheer van de verschillende onderdelen van een drainagetechniek is het belangrijk om per onderdeel na te gaan:

- Wat de impact van falen van dat onderdeel op de veiligheid is.
- In hoeverre dat falen te voorspellen/monitoren is.
- Of falen te relateren is aan bepaalde gebeurtenissen (bijvoorbeeld hoogwater of het platdrukken van drainagebuizen na maaien/werkzaamheden).

In de veiligheidsbeoordeling worden faalkansen verondersteld als nihil indien passend beheer en onderhoud wordt uitgevoerd. In bovenstaande paragrafen zijn hiervoor algemene handvatten aangereikt. Hieronder zijn specifieke kaders gesteld die richting geven. Deze zijn o.a. gebaseerd op de beheerwijze zoals geformuleerd in “The International Levee Handbook<sup>42</sup>” (CIRIA, 2013) en de werkwijze van Waterschap Rivierenland.

#### Algemeen onderhoud

Van de drainagetechniek zijn beheerplannen, calamiteitenplannen en revisietekeningen voorhanden. Algemene inspecties geven aandacht aan de drainagesystemen en specifiek de

---

<sup>42</sup> Voor drainagetechnieken maakt deze onderscheid tussen “toe drains” en “relief wells”. Voor beide wordt gesteld dat onderhoud van belang is. De meest concrete uitwerking van het onderhoud is gegeven in: Design Construction and maintenance of relief wells’ (USACE, 1992).

uitstroompunten. Daar waar drainagesystemen zijn aangelegd dienen afvoersloten, oeverhellingen of bermen goed onderhouden te worden. Onkruid, struiken, bomen en puin rondom putten/inspectiepunten dienen verwijderd te worden, tot 1,5 m rondom de locaties.

Bij visuele inspecties dient gelet te worden of natte plekken aanwezig zijn rondom het drainagesysteem, dit kan duiden op een verstopping. Daarnaast controleren op schade, vervuiling, zandafvoer en invloed van vandalisme corrigeren naar de originele staat. Visuele inspecties dienen vlak voor het gesloten seizoen uitgevoerd te worden en vaker tijdens hoogwater periodes.

#### **Inspecties tijdens hoogwaterperiodes**

Drainagetechnieken moeten in de periode dat deze actief zijn met regelmaat (visueel) geïnspecteerd worden, ten minste 1x per week<sup>43</sup>. Aandacht gaat uit naar de zaken die ook genoemd zijn bij algemeen onderhoud. Tevens moet gelet worden of de afvoer continue is en gelijkmatig/verklaarbaar verdeeld is over de drains/putten.

#### **Calamiteitenbeheer tijdens hoogwaterperiodes**

In calamiteitenplannen is de omgang met calamiteiten vastgelegd. Daarbij wordt geanticipeerd op de risico's. Aandacht gaat uit naar de volgende onderwerpen:

- Uitval van stroom.  
Indien dit een risico is voor de (actieve) drainagetechniek zijn maatregelen (bv. noodaggregaat) geregeld.
- Uitval van technische onderdelen.  
Er kan uitval zijn van elektrische onderdelen (kabels, onderdelen van schakelkast, sensoren) of mechanische onderdelen (regelbare klep). Indien dit een risico is voor de drainagetechniek is dit ondervangen door het op voorraad hebben van de onderdelen of een contract met een derde partij die dit op voorraad heeft.
- Verstopping van afvoersysteem.  
Het afvoersysteem kan falen, voor die situaties zijn noodopties voorzien. Gedacht kan worden aan het gebruik van een (dompel)pomp in verticale bronnen met afvoer naar een alternatief systeem (bv. riolering). Of het opengraven met (licht) materieel van een horizontale drain. Aandacht dient te zijn voor de begaanbaarheid van het terrein rondom de drainagetechniek tijdens hoogwaterperiodes.

#### **Periodieke inspecties/ onderhoud**

Het beheerplan voorziet in periodieke inspecties en periodiek onderhoud. Daarbij zijn de onderstaande punten minimum frequenties.

- Minimaal 1x per 1 jaar test van het algehele systeem.  
Werking van de drainagetechniek dient kwalitatief getoetst te worden. Dit kan door deze in te zetten tijdens een (kleine) hoogwatergolf. Daarbij dient aandacht te zijn voor de werking van afsluiters, toegankelijkheid van inspectieputten en functioneren van uitstroompunten.

---

<sup>43</sup> In (USACE, 1992) wordt deze frequentie vastgehouden voor het gehele jaar voor drainagetechnieken die het hele jaar door actief zijn, zoals die bij een stuwdam. Bij gebieden met een laag risico (zonder risico op levens) is een frequentie geadviseerd van 1x per maand.

- Minimaal 1x per 5 jaar testen van het onttrekkingsstelsel.  
Dit kan het doorspuiten van een drainagetechniek zijn of een testprocedure zoals beschreven in paragraaf 8.8. Deze methode heeft vooraf bepaalde afkeurcriteria. Indien de capaciteit of werking onvoldoende is, worden onderhoudsmaatregelen toegepast.
- Minimaal 1x per 10 jaar testen van het afvoersysteem.  
Bij horizontale drains is dit eenzelfde procedure als het onttrekkingsstelsel. Bij verticale bronnen betreft dit een separaat deel, de horizontale leidingen. Deze dienen geïnspecteerd te worden middels een verifieerbare methode (bv. camera inspectie).

#### **Databeheer en evaluatie**

De inspecties, het onderhoud en beheer dient vastgelegd te worden in een logboek ofwel een GIS-systeem (gekoppeld aan het beheerregister). Hierin dienen ook alle uitkomsten genoteerd te worden van eventuele proeven, monitoring en testprocedures. Tenslotte moeten de ervaringen van hoogwaterperiodes worden vastgelegd.

Metingen, indien voorhanden, moeten worden opgeslagen in een herleidbaar en toegankelijk systeem. Daarbij is een duidelijke relatie opgenomen tussen alle gemeten parameters (bv. buitenwaterstanden, grondwaterstanden en debieten van de drainagetechniek).

Evaluaties van ervaringen, gemeten stijghoogtes en debieten dienen één week na de piek van een hoogwaterperiode plaats te vinden. Resultaten van stijghoogtemetingen in relatie tot debietmetingen dienen geëxtrapoléerd te worden naar maatgevende omstandigheden, indien deze niet onder maatgevende omstandigheden zijn gemeten. Als uit deze analyse blijkt dat de drainagetechniek niet voldoet of niet voldoet aan de signaalwaarde, dan dient nader onderzoek verricht te worden naar het optimaliseren van de drainagetechniek.

Evaluaties worden minimaal 1x per 5 jaar uitgevoerd.

### **8.3 Verticale bronnen**

Concrete handvatten voor verticale bronnen zijn gegeven in (KWR, 2011). Daarin gaan deel III en deel IV in op exploitatie en waarnemingsputten.

- Putverstoppingsmeting.  
Hierbij wordt met een pomp de waterstand in een enkele bron verlaagd. Deze proef duurt doorgaans een kwartier.

Vereiste is dat een pomp in de bron geplaatst kan worden. Daarbij moet de verlaging in de bron gemeten kunnen worden. De pomp moet betrouwbaar en constant een debiet verpompen. Tenslotte moeten alle metingen dezelfde tijdsduur hebben.

Er wordt gekeken naar de specifieke volumestroom ( $Q_s$ ). Dit is het debiet ( $Q$ ) gedeeld door de verlaging in de verticale bron ( $m$ ). Wanneer deze verhouding verslechtert (bij hetzelfde debiet ontstaat meer verlaging), dan duidt dit op een toenemende verstopping. Als er te veel verstopping is, dan zijn maatregelen nodig. Bij drinkwaterwinningen is dat wanneer  $Q_s$  lager is dan 70% van de referentiewaarde. Bij drinkwaterwinningen wordt deze meting één keer per jaar of vaker uitgevoerd.

- Putregeneratie.  
Putregeneratie bestaat uit een verzameling aan methodes om verstoppingen te verhelpen. Verstopping kan bestaan uit chemische verstopping (bv. ijzeraanslag) en mechanische verstopping (deeltjesverstopping). Regeneratie kan bestaan uit mechanische methoden (bijvoorbeeld hogedrukreiniger) of uit het gebruik van regeneratiemiddelen (bijvoorbeeld zuren om ijzeraanslag op te lossen) (KWR, 2011). Hoofdstuk 15 van de KWR gaat hier specifiek op in.

Horizontale leidingen die onderdeel zijn van verticale bronnen kunnen geïnspecteerd worden met een camera-inspectie. Deze methode is tevens beschreven in paragraaf 8.4. Hiermee kunnen breuken in de leiding gedetecteerd worden en verstopping door dierlijke activiteiten.

## 8.4 Horizontale drains

Onderhoud aan horizontale drains is in twee delen op te delen. Het eerste deel bestaat uit beheer en onderhoud dat vaak wordt gedaan. Het tweede deel bestaat uit inspecties die vanuit een onderzoeksperspectief waardevol zijn, maar in de praktijk niet veel voorkomen.

### Algemene aandachtspunten beheer en onderhoud

Horizontale drains worden dusdanig gedimensioneerd dat rekening wordt gehouden met een aantal zaken:

- Levensduur onderdelen.  
Bij geribbelde drainage buizen is de levensduur doorgaans 20 jaar of meer<sup>44</sup>. Bij het gebruik van robuustere materialen en afmetingen, zoals in het geval van DMC-systemen is een levensduur van 50 à 100 jaar haalbaar.
- Beplanting en doorworteling.  
Doorworteling door bomen, struiken en planten is negatief voor de levensduur. Drainage en beplanting moeten zo aangelegd worden dat de wortelzone van bomen en struiken niet aanwezig is nabij de drainage. Als richtlijn komen de wortels voor in een gebied zo groot als de kroonprojectie van een boom. Indien wel bomen en struiken aanwezig zijn rondom drainage dan zijn er twee oplossingen. De eerste is vooraf het verwijderen van de beplanting. De tweede is lokaal aanleggen van een blinde buis.<sup>45</sup>

Achteraf blijkt dat het reinigen van drains met permanente wortelgroei erg moeilijk is. Ook middels doorspuiten is het praktisch onmogelijk de wortels goed te verwijderen. Bij hardnekkige wortelgroei is herdrainage het enige alternatief (bron: (STOWA, 2000) paragraaf 4.7).

---

<sup>44</sup> Vroeger werd gebruik gemaakt met drainomhulling die verging na verloop van tijd. De huidige drains omhuld met een drainomhulling zoals pp450 of pp700 vergaan in principe niet meer. Wel kan de filterwerking door ophoping van vuil, ijzer, fosfaat e.d. afnemen. Daardoor is de ervaring/verwachting dat de levensduur van recent aangelegde drainage ruim 20 jaar is.

<sup>45</sup> Een blinde buis is een buis zonder perforatie. Bron: (KIWA, 1991) paragraaf 5.8

### Veel voorkomend beheer en onderhoud

Inspecties en beheer zijn gericht op het voorkomen van verstoppingen. Na de aanleg van de drainage kan de hydraulische werking na verloop van tijd teruglopen door verstopping van de drainagebuis en het filtermateriaal. Horizontale drains dienen met een zekere regelmaat geïnspecteerd te worden. Expliciete handvatten zijn gegeven in 'Onderhoud van drainageconstructies in waterkeringen'; hoofdstuk 5 (STOWA, 2000). Hier zijn diverse hoofdlijnen samengevat:

- Schouw van de eindbuizen/doorspuitpunten: 1 à 2 keer per jaar.  
Schouw van eindbuizen is noodzakelijk omdat deze onderdelen vaak beschadigd raken bij maaien en onderhoud van watergangen. Inspectie van doorspuitpunten is eveneens gewenst aangezien deze soms door derden verwijderd worden.

De controle van de eindbuizen is daarnaast een weinig arbeidsintensieve methode die inzicht geeft over de wateropbrengst van een buis en de kwaliteit van het water dat eruit spoelt. Dit kan eventueel gecombineerd worden met andere werkzaamheden. De methode geeft een indicatie van knelpunten.

- Controle ontwateringstoestand: ieder jaar.  
Bij veldbezoek kan door het lokaliseren van natte plekken aan het maaiveld vastgesteld worden waar de werking van de drainage onvoldoende is.
- Doorspuiten: frequentie afhankelijk van ijzer.  
Bij ijzerhoudende grond: iedere 1 jaar.  
Bij niet ijzerhoudende grond: iedere 2 à 5 jaar.  
In de praktijk neemt de ijzerafzetting in de loop der tijd af, behalve in kwelgebieden (KIWA, 1991).

Bij doorspuiten wordt een spuitkop met wateroverdruk door de drainagebuis gelaten. Dit verwijdert vuil uit de buis. Daarnaast ontstaat een beeld van verstoppingen en verzakkingen. Doorspuiten met een zender in de kop zorgt ervoor dat de ligging van een buis in X, Y en Z wordt vastgelegd.

Als de drain niet onder vrij verval kan afwateren is het advies om het einde van de drain weer bij maaiveld/ inspectieput uit te laten komen. Dit zorgt ervoor dat een drain met (lage) druk en veel water te doorspoelen is. Daardoor komt het vuil er makkelijk(er) uit zonder de drain te beschadigen. Ook is dan gelijk duidelijk of de drain van begin tot einde open is.

In de literatuur zoals "Aanleg & Onderhoud van Drainage" van K. Kooistra wordt hier specifiek op ingegaan. Voor de landbouw geldt het advies om niet te vaak door te spuiten, dit kan namelijk ook negatieve effecten hebben. Dit advies is minder valide voor waterkeringen. Bij waterkeringen treden geregeld forse zettingen op. Daarom is het advies om slechts 1x per 10 jaar door te spuiten uit de landbouwliteratuur niet overgenomen. Zekerheid over de ligging van drainage is bij waterkeringen zwaarwegender.

### IJzer in horizontale drainage

Het verstopping van drainage wordt met regelmaat gekoppeld aan hoge ijzergehaltes in het grondwater en ijzereerslag in drainage. IJzer in het grondwater reageert met zuurstof tot ijzeroxide (roest) wat neerslaat. Er bestaan ruwweg drie strategieën om hiermee om te gaan.

- 1) Geen zuurstof.  
Een mogelijkheid is het werken met onderwaterdrainage. Deze ligt 12 maanden per jaar onder de grondwaterstand. Daardoor komt ijzer niet in aanraking met zuurstof. Vaak komt ijzer nog steeds in aanraking met zuurstof, maar dan verder op in het systeem, zoals een verzamelput. Deze moeten dan onderhoudbaar ontworpen worden.
- 2) Geen ijzer.  
IJzer zit vaak in de bodem in een eindige hoeveelheid. Wanneer de aanvoer van ijzer nihil is, dan wordt de bodem ijzer-vrij. Daarom adviseren bronnen zoals (KIWA, 1991) (hoofdstuk 8) ook intensief beheer in de eerste jaren, wat daarna kan minderen.
- 3) Beheerbaar en vervangbaar.  
Aan de oostzijde van de Noordoostpolder is sprake van ijzerrijke kwel. Daar liggen de drainagebuizen op een niveau dat deze in een droge zomer boven de grondwaterstand liggen. Deze locaties zijn dan ook bekende knelpunten. Deze worden aangepakt door meer beheer (doorspuiten 1x per 2 à 5 jaar) en met enige regelmaat herdruinieren. Het voordeel is dat de drains visueel zichtbaar zijn, doordat ze niet onder water liggen.

Over de effectiviteit van de eerste strategie is binnen de literatuur niet altijd consensus. Deze richtlijn interpreteert de verschillende meningen als volgt: als 12 maanden per jaar de drainage onder water staat, dan is de ijzeraanlag gering. Als 11 maanden per jaar de drainage onder water staat en 1 maand per jaar niet, dan is de meerwaarde van deze strategie tenietgedaan. Daarnaast zit in het ondiepe grondwater altijd enig zuurstof, waardoor geringe aanslag op termijn niet is uit te sluiten. Er is dan ook altijd een vorm van onderhoud noodzakelijk, zij het in een gereduceerde mate.

Uitgebreide uitweidingen over dit onderwerp zijn te vinden in: (STOWA, 2000), paragraaf 4.6.

Bij rivierdijken werkt de drainage in bepaalde gevallen alleen in een hoogwatersituatie. Hierdoor hoeft de drainage in een groot deel van de tijd geen water af te voeren. Voordeel hiervan is dat chemische aantasting (ijzervorming) minder snel voorkomt. Nadeel is dat de controle op werking alleen in een hoogwatersituatie kan gebeuren.

### Bijzondere vormen van inspecties

Naast de veel voorkomende vormen van beheer en onderhoud, zijn er ook andere vormen. Deze zijn allen technisch uitvoerbaar, maar worden weinig toegepast. Deze zijn reeds benoemd in (STOWA, 2000). Hier zijn diverse hoofdlijnen samengevat:

- Doorsteken.  
Bij het doorsteken wordt een ellipsvormige kop aan een lange kunststof streng in de drain geschoven. De diameter van de kop is dusdanig dat deze maar net in de drain past. Wanneer verstoppingen, platliggers of niet aangesloten mofverbindingen voorkomen kan op deze wijze het probleem worden gelokaliseerd.

Enkele ervaringen bij doorsteken is dat het slib niet goed verwijderd kan worden. Dit geldt ook voor eventuele verstopping in de omhulling van de drain. Voor deze situaties is doorspuiten een betere methode.

- Camera-inspectie.  
Camera-inspectie (ook wel drainoscopie) gebeurt met een camera aan een kabel. De kabel wordt via de eindbuis of een vooraf gemaakt boorgat vanaf het maaiveld in de drainbuis gestoken. Het onderzoek kan via een monitor aan maaiveld gevolgd worden. Het voordeel van de camera-inspectie is dat de drain niet hoeft te worden opgegraven en de drain eventueel onder water in situ bekeken kan worden. Kans op een breuk in een horizontale leiding kan op deze manier visueel vastgesteld worden. Daarnaast is het mogelijk om verstopping te detecteren door dierlijke activiteiten.

De waarnemingen leveren echter geen informatie over de toestand van het filtermateriaal.

Adviesfrequentie: 1x per 10 jaar.

De frequentie is afhankelijk van de locatie en de mate van ander beheer en onderhoud. Indien het een zettingsgevoelig ondergrond betreft, kan de frequentie naar wens van de beheerder verhoogd worden.

- Stijghoogte waarneming.  
Stijghoogtemetingen geven op indirecte wijze een beeld van de locatie en mate van verstopping. Bij regelmatige metingen kan bovendien een indruk worden verkregen van de snelheid waarmee de verstopping optreedt. Voor de probleemidentificatie dienen meerdere peilbuizen te worden geplaatst.

De stijghoogtemetingen geven indien goed opgezet en uitgevoerd veel inzicht in de problematiek. Het is echter wel een arbeidsintensieve methode.

- Opgraven drains.  
Het opgraven van drains wordt toegepast bij hardnekkige problemen met de ontwateringstoestand en na (herhaald) onderhoud van de drainage. Meerdere opgravingen zijn vaak noodzakelijk om een goed oordeel te kunnen geven.

Bij het opgraven van drainage wordt de drain over een korte afstand blootgelegd. Er wordt dan gekeken naar de toestand van de drainbuis en het omhullingsmateriaal en naar de structuur van de grond in en naast de drainsleuf. Met deze methode is een goede beoordeling van de drain, de omhulling en het bodemprofiel mogelijk. Tevens is monsternamen voor verder onderzoek mogelijk van het drainagemateriaal en het verstoppingsmateriaal in de drain of de grond.

Het nadeel van deze methode is dat het erg arbeidsintensief is. Bovendien is het moeilijk een beeld van de verstopping te krijgen als er water in de drain staat, omdat bij het openzagen van de drain veel van de vervuiling wegspoelt uit de drain.



## 8.5 Grindkoffers

Grindkoffers en andere filterconstructie worden dusdanig gedimensioneerd dat rekening wordt gehouden met een aantal zaken:

- Levensduur onderdelen.  
Bij een filterconstructie gemaakt van een geotextiel is de levensduur van het textiel maatgevend. Bij filterconstructies gemaakt van een granulair filter is de levensduur van de materialen in principe oneindig.
- Beschadigingen van bovenaf.  
Bij onderwater constructies betreft dit bestendigheid tegen golven en stroming. Daarnaast moet ook aandacht zijn voor bestendigheid tegen vandalisme.

Filterconstructie moeten met een zekere regelmaat worden geïnspecteerd, daarbij dient gelet te worden op de volgende zaken:

- Algemene werking.  
Met name na een hoogwaterperiode is het belangrijk de filterwerking te controleren door te inspecteren op de onverhoopte uitspoeling van de onderliggende lagen. De hierdoor ontstane erosie kan de filterconstructie ondermijnen en uiteindelijk een uittredepunt voor piping vormen.
- Periodieke inspectie.  
Verandering van de steilheid van het talud, mogelijk als gevolg van lokaal afschuiven van het talud of door erosie van de ondergrond. Verandering in de dikte van de toplaag en/of het ontstaan van gaten in de toplaag en/of ongelijke zakkings (zetting).
- Overig.  
Mogelijk leidt (intensieve) recreatie tot beschadigingen. Dit risico is locatie specifiek en afhankelijk van de exacte invulling van de grindkoffer (afgedekt of zichtbare breukstenen). Dit kan relatief eenvoudig hersteld worden door het terugplaatsen of bijstorten van materiaal.

## 8.6 Actieve drainage

Bij actieve drainage speelt de installatie een grote rol. Het beheer van de installaties bestaat uit het controleren van de installatie onderdelen van de actieve drainagetechniek. Daarnaast is onderhoud benodigd op de onderdelen van het drainagesysteem, afhankelijk van het type systeem wat geïmplementeerd is. Onderdelen die onder de installaties vallen zijn de afvoerpomp, sensoren (bijvoorbeeld voor de waterspanning), modems en/of de accu.

Een van de kenmerken van actieve drainagetechnieken is dat ze van afstand bedienbaar en controleerbaar zijn. Dit maakt het mogelijk om het functioneren van het systeem op afstand te controleren. Veranderingen die als onwenselijk worden beschouwd kunnen daarmee snel opgelost worden.

In Tabel 8-1 staan de beheer- en onderhoudstaken die aan installaties uitgevoerd worden. In de beheercyclus moeten testen met enige regelmaat uitgevoerd worden. Essentieel is dat bij

geautomatiseerde systemen ook de sensoren onderdeel zijn van de beheer- en onderhoudscyclus.

Tabel 8-1: Periodiek beheer en onderhoud installatie.

Activiteit	Frequentie (normaliter)	Opmerking
Inspectie besturingskast	Ca. 2x per jaar	
Werking sensoren	Ca. 2x per jaar	Bij hoogwater deze frequentie verhogen
Inspectie vermogen pomp	Ca. 2x per jaar	
Vervangen pomp	Ca. 1x per 10 jaar	

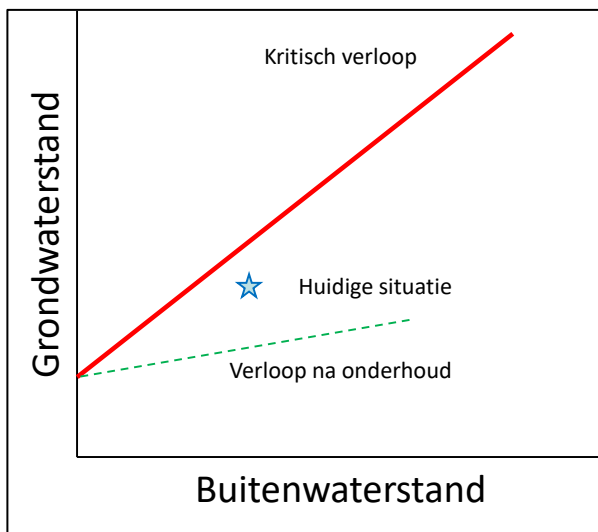
## 8.7 Drainage met monitoring

Bij drainagetechnieken met monitoring kan het effect van de drainage worden gemeten. Daardoor kan ook een achteruitgang van de drainagetechniek of de effectiviteit daarvan worden bepaald, dit vereist wel dat de drainagetechniek afvoert via vrij verval of een pomp. De meerwaarde van monitoring is vooral gericht op het reduceren van beheerkosten en het verhogen van de levensduur. Dit betreft (mogelijk) de volgende situaties:

- Aanscherpen beheerfrequentie.  
Een standaard beheerpatroon is frequent onderhoud in het begin en minder na verloop van tijd. Door te monitoren is het mogelijk om in een latere fase de beheerfrequentie in te vullen op de behoefte, in plaats van een veilige frequentie.

Daarvoor is wel een beeld nodig van de systeemwerking. Namelijk onder welke omstandigheden de werking van de drainage te gering/te kritisch is, dit vereist een model of een predictie naar extreme omstandigheden. Hoe het verloop eruitziet na onderhoud en waar de huidige situatie zich bevindt. Dit vereist metingen van het verleden. Dit principe is weergegeven in Figuur 8-1.

- Aanscherpen levensduur  
In het algemeen neemt de effectiviteit van een maatregel af met de tijd. Ook met goed onderhoud is vervanging op den duur noodzakelijk. Als dit wordt veroorzaakt door een meetbaar proces (bv. verstopping van de bodem), dan kan meetbaar gemaakt worden of dit proces optreedt. Zo kan aangetoond worden of einde levensduur nadert, of dat uitstel van vervanging verantwoord is. Het aantonen hiervan is vergelijkbaar met aanscherpen van de beheerfrequentie.



Figuur 8-1: Relatie tussen de buitenwaterstand en de grondwaterstand. Bij net onderhouden drainage (groen) en bij kritische omstandigheden (rood). Kritische omstandigheden betreffen die waarbij een drainagetechniek te weinig effectief is (bv. door verstopping) om de waterveiligheid bij hoogwater te garanderen. Wanneer een beeld beschikbaar is van de huidige situatie/werking (ster) kan bepaald worden in welke mate beheer noodzakelijk is.

Wanneer zwaar geleund wordt op monitoring, dan moet deze ook betrouwbaar zijn. Er is dan ook behoefte aan beheer en onderhoud van de monitoring. In (KWR, 2011) hoofdstuk 22 zijn hiervoor handreikingen gegeven. De volgende zaken geven aanleiding tot onderhoud:

- Waarnemingsput of peilbuis is stuk.
- Peilbuis is verstopt.
- Ontbreken van:
  - Labels.
  - Doppen.
  - Kappen.
  - Sloten.
  - Dekfels.
- Waarnemingsput staat vaak lange tijd onder water.
- Waarnemingsput niet goed toegankelijk, bijvoorbeeld door dichtgroeien met onkruid of struiken.
- Ongedierte in de waarnemingsput.
- Verzakking van de waarnemingsput.

## 8.8 Testprocedures

Testprocedures geven een beeld van de stand van zaken van een drainagetechniek. Deze kunnen handvatten geven voor het beheer en onderhoud. Deze kunnen handvatten geven aan de beheerder over de stand van zaken rondom de drainagetechniek.

### Testprocedures verticale bronnen

De standaard testprocedure is een Putverstoppingsmeting. Deze is reeds op hoofdlijnen beschreven in paragraaf 8.3. Deze is in meer detail beschreven in (KWR, 2011); hoofdstuk 14 en 15.

Hoofdlijnen zijn:

- Proef uitvoeren na realisatie.  
Hierbij de referentiec capaciteit bepalen.
  - Periodiek herhalingsmetingen uitvoeren.  
Bij drinkwaterwinningen wordt deze meting één keer per jaar of vaker herhaald om de ontwikkeling van eventuele verstoppingen in beeld te krijgen<sup>46</sup>. De keuze hierbij is aan de beheerder.
- Advies is een frequentie van één keer per vijf jaar.
- Signaalwaarde  
De signaalwaarde volgt uit het ontwerp.

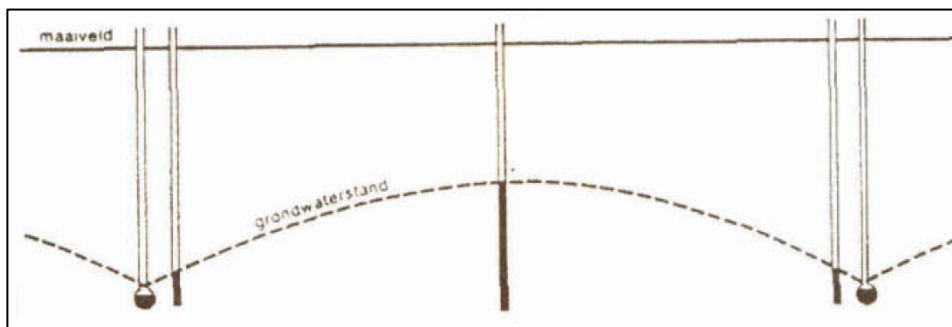
Literatuurwaarden voor de signaalwaarde zijn:

(USACE, 1992): 20% afname van de capaciteit ten opzichte van de referentiec capaciteit.  
(KWR, 2011): 30% afname van de capaciteit ten opzichte van de referentiec capaciteit.

### Testprocedures horizontale drains

Vaak worden horizontale drains doorgespoten, dit is een combinatie van een beheermaatregel samen met een testprocedure (o.a. op verzakkingen). Voor horizontale drains is daarom geen standaard testprocedure beschikbaar, anders dan doorspuiten.

Een testprocedure zonder doorspuiten kan uitgevoerd worden aan de hand van een stijghoogte meting. Deze is in meer detail beschreven in (STOWA, 2000); paragraaf 5.6. Bij de interviews die zijn gehouden ten behoeve van deze OBR-richtlijn zijn geen beheerders gevonden die deze methode toepassen.



Figuur 8-2: Monitoringsopzet rondom horizontale drains, conform: (STOWA, 2000); paragraaf 5.6.

<sup>46</sup> Bij drinkwaterwinningen is over het algemeen sprake van een gering aantal belangrijke filters. Bij dijkversterkingen is het aantal filters geregeld groter. Het is verantwoord om een lagere meetfrequentie aan te houden of een selectie van de filters te monitoren, omdat het aantal gebruiksuren per jaar lager is.

Hoofdlijnen zijn:

- Peilbuizen plaatsen na realisatie.  
Dit betreft een serie van drie peilbuizen. De eerste staat er recht boven. De tweede staat in de drainsleuf. De derde staat precies tussen twee horizontale drains in. De peilbuizen dienen voorzichtig geplaatst te worden, zodat de drain niet beschadigd. Dit is weergegeven in Figuur 8-2.
- Periodiek herhalingsmetingen uitvoeren.  
De stijghoogtemetingen geven een beeld van de opbolling tussen drainage. Daarmee geeft dit ook inzicht in de (intrede) weerstand.
- Signaalwaarde.  
Bij een te grote opbolling/ verschil tussen twee peilbuizen, is sprake van ongewenste verstopping. Dit is sterk afhankelijk van zaken zoals de buitenwaterstand en dient project-specifiek bepaald te worden.

Het DMC-systeem bevat binnen het beheer en onderhoud autonome zelftesten. Tevens worden autonome meldingen gegeven als het DMC-systeem gebreken detecteert tijdens de zelftest of doordat sensoren geen informatie meer geven. Gedurende een hoogwater geeft de monitoring en referentiemonitoring belangrijke informatie naast de reguliere inspectie van de kering gedurende hoogwater.

#### **Testprocedures grindkoffers**

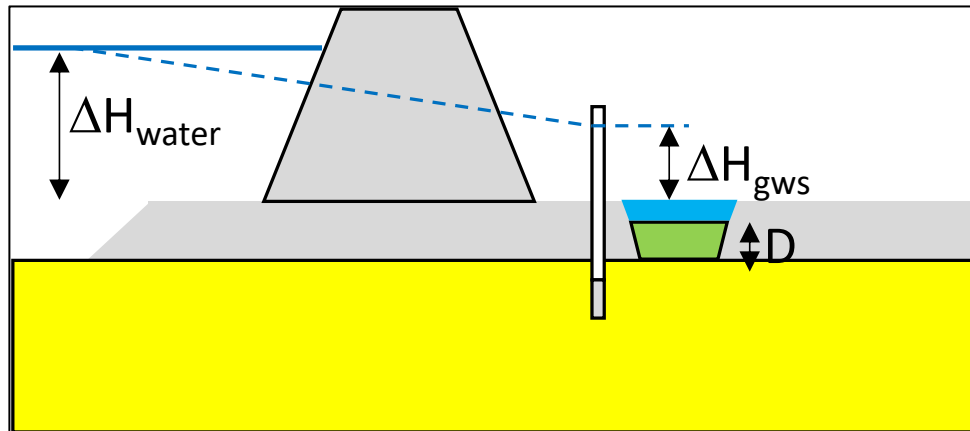
Voor grindkoffers is geen standaard testprocedure beschikbaar. Doorgaans is het verwachte faalmechanisme verstopping. Vaak ontstaat dit door ophoping van slib-deeltjes in het filter. Dit slib spoelt uit een grindkoffer na enige tijd met hoog water. Deze vorm van verstopping is geen knelpunt.

Andere vormen van verstopping kunnen ontstaan aan de onderzijde van het filter. Dit is onder andere beschreven in paragraaf 5.5.5. Een grindkoffer heeft echter niet als doel het perfect doorlaten van water, maar het voorkomen van een faalmechanisme. De impact van een verstopping moet beoordeeld worden in relatie tot het faalmechanisme. Voorbeelden zijn: te hoge grondwaterstanden zodat elders sprake is van opbarsten of te hoge grondwaterstanden zodat heave kan optreden rondom de grindkoffer. Er bestaan twee testprocedures. De eerste procedure test of er risico is op heave. De tweede procedure test of er sprake is van verstopping. De eerste is hier uitgewerkt<sup>47</sup>.

Het risico op heave kan getoetst worden middels de opstelling zoals weergegeven in Figuur 8-3. Daarbij wordt de wateroverdruk in een peilbuis nabij de grindkoffer gemeten. Idealiter is deze wateroverdruk nihil. Maar dit kan in de praktijk een hogere waarde zijn. De waarde dient vergeleken te worden met het ontwerp.

---

<sup>47</sup> De tweede test is hier niet uitgewerkt. Deze geeft inzicht op de beheersituatie. Echter kan verstopping ontstaan op twee manieren. De eerste is door verstopping van onderaf, de tweede is van bovenaf (bv. slib delen). De ervaring is dat een grindkoffer/filterconstructie bij een hoogwatergolf schoonspoelt, dus de slibdelen verdwijnen uit de constructie. De tweede test meet dan ook niet de relevante parameter, maar kan ook problemen aantonen die van nature weer verdwijnen.



Figuur 8-3: Schets meetopstelling testprocedure grindkoffers.

Hoofdpijnen zijn:

- Peilbuizen nabij grindkoffer.  
Dit betreft een peilbuis op korte afstand ( $\ll 5$  m) van het diepste punt van de grindkoffer.
- Metingen uitvoeren op relevante momenten.  
Dit betreft metingen tijdens een hoogwaterperiode.
- Signaalwaarde  
Bij een toets op heave is dit het heave-criterium. Bij een toets op opbarsten is dit het opbarstcriterium (vermoedelijk van de binnenteen). Daarnaast geldt als signaalwaarde de waarde die is aangehouden in het ontwerp.

### Intermezzo: Uitwerking heave-criterium

Het heave-criterium is opgenomen in OI2014v4 en is hieronder herhaald. Deze is aangevuld met een extrapolatie factor.

$$\frac{\Delta H_{gws}}{D} \cdot f_{extrapolatie} \leq i_{c,h}$$

Met

$$f_{extrapolatie} = \frac{\Delta H_{water,wbm}}{\Delta H_{water,T1}} \approx \frac{4 \text{ à } 6 \text{ m}}{2 \text{ m}} = 2 \text{ à } 3$$

Hierin is:

D	Dikte grind/-zandlagen in de grindkoffer/filterconstructie	[m]
$i_{c,h}$	Kritisch verhang voor heave. Voor grindkoffers kan de waarde $i_{c,h} = 0,5$ worden aangehouden analoog aan heaveschermen.	[-]
$\Delta H_{gws}$	Grondwateroverdruk onder/nabij de grindkoffer Indien de grindkoffer in een watergang ligt, is dit ten opzichte van het actuele waterpeil in de watergang. Indien de grindkoffer gelijk aan maaiveld ligt, is dit ten opzichte van het maaiveld.	[m]
$\Delta H_{water,wbm}$	Verschil tussen het waterniveau van het buitenwater bij een waterstand bij de norm en het niveau in de grindkoffer.	[m]
$\Delta H_{water,T1}$	Verschil tussen het waterniveau van het buitenwater bij een T=1 situatie en het niveau in de grindkoffer.	[m]

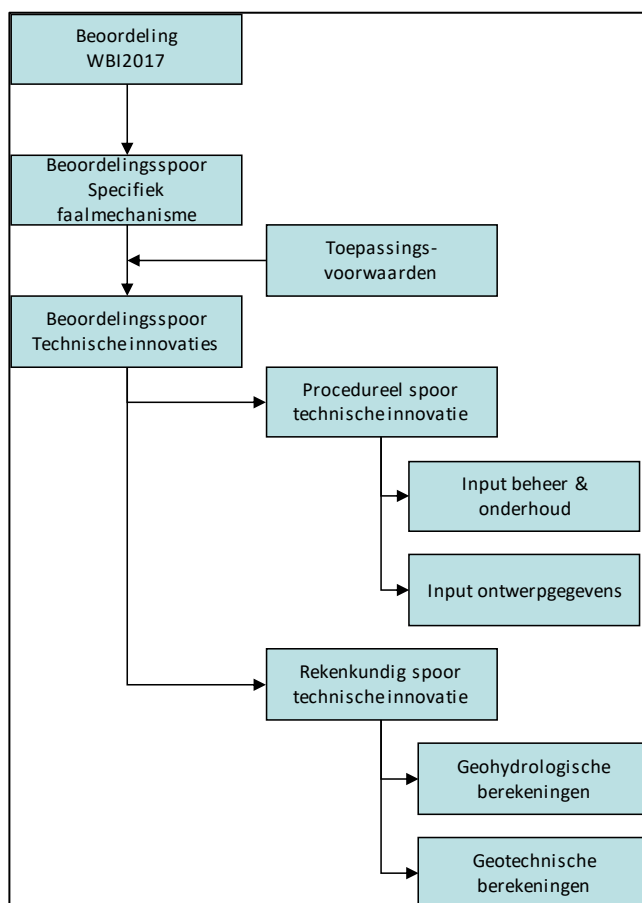
In de regel wordt getoetst op basis van extreme omstandigheden zoals de waterstand bij de norm. Inspecties worden echter uitgevoerd bij minder extreme situaties, zoals T=1 situaties. Daarvoor is een correctiefactor voor de extrapolatie opgenomen.

Een grove schatting van de extrapolatiefactor is een waarde van 2 à 3. In het rivierengebied is de peilstijging bij een T=1 waterstand ordegrootte 2 m ten opzichte van het achterland. In extreme situaties, zoals de waterstand bij de norm, is dit ordegrootte 4 tot 6 m. De extrapolatiefactor is daarmee in de ordegrootte van 2 à 3. Dit werkt niet indien de rivierstand bij T=1 lager is dan het polderpeil. Bij een grindkoffer die bestaat uit 1 m grind is, gegeven de hoge waarde van de extrapolatiefactor, een wateroverdruk van ca. 0,15 m bij een T=1 situatie acceptabel.

## 9 Drainage in wettelijke beoordeling

### 9.1 Beoordeling algemeen

In de PPD paragraaf 7.5 is de beoordeling benoemd. Daar wordt geadviseerd het beoordelingsspoor “toets op maat” binnen het WBI te gebruiken. Hier is verdere invulling aan gegeven. Binnen de wettelijke beoordeling (WBI2017) worden dijken beoordeeld op de dijkveiligheid. De hoofdlijnen van dit proces zijn benoemd in paragraaf 1.2 en zijn weergegeven in Figuur 9-1. Binnen het WBI wordt een beoordeling per faalmechanisme gedaan. Dit beoordelingsspoor is benoemd in WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019c). Deze start met een eenvoudige toets waarin wordt getoetst of een specifieke locatie voldoet aan de toepassingsvoorwaarden en of de standaard beoordelingsprocedure kan worden toegepast.



Figuur 9-1: Stroomschema beoordeling drainage binnen WBI2017.

Voor de sporen piping (STPH) en macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) geldt dat het gebruik van drainage-technieken niet of slechts moeizaam past binnen de toepassingsvoorwaarden.



Daardoor kan de standaard beoordelingsprocedure niet worden toegepast. Het WBI2017 verwijst in deze gevallen naar het beoordelingsspoor technische innovatie. Deze bestaat uit de eenvoudige toets, dit is hoofdzakelijk een procedureel spoor. Daarbij wordt informatie geëist over onder andere het ontwerp en het algeheel functioneren. Indien tussen ontwerp van de drainagetechniek en het moment van beoordelen uitgangspunten in de normen zijn gewijzigd (dit is nagenoeg altijd het geval), wordt verwezen naar de toets op maat. Dit is het rekenkundige spoor.

Dit hoofdstuk beschrijft het gedetailleerd doorlopen van bovengenoemd stroomschema per faalmechanisme.

## 9.2 Toetsspoor piping (STPH)

Het beoordelingsspoor piping is benoemd in hoofdstuk 7: piping van (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019c). In de 'standaard' procedure van de eenvoudige en gedetailleerde toets zijn toepassingsvoorwaarden opgenomen, in het specifiek stap E.3. Deze luidt:

*“Wanneer het grondlichaam, of de ondergrond, elementen bevat zijnde geen natuurlijke grond (bijvoorbeeld leidingen, .., drainage), dan is de beoordeling volgens het toetsspoor piping niet van toepassing. In deze gevallen wordt piping beoordeeld in de toets op maat of volgens een van de volgende toetssporen: niet waterkerende elementen, piping bij kunstwerken, langsconstructies of technische innovatie.”*

Dijkvakken die versterkt zijn met drainagetechnieken moeten voor het onderwerp piping, daarom beoordeeld worden aan de hand van het spoor Technische innovatie.

*Merk op:*

Drainagetechnieken an sich zijn geen innovatie en zullen op termijn ook in de sector van dijkveiligheid geen innovatie blijven. Het spoor van de technische innovatie is bewust wel toegepast, omdat deze een goed toepasbare methode is die aandacht en ruimte geeft aan zowel technische zaken als het beheer.

### 9.2.1 Procedureel spoor technische innovatie t.b.v. piping

Het beoordelingsspoor technische innovatie is benoemd in hoofdstuk 27: Technische innovatie (INN) van (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019c). Binnen het procedurele spoor wordt ingegaan op de stappen E.1, E.2 en E.4 van de eenvoudige toets.

#### **Stap E.1 Voldoende gegevens**

In stap E.1 wordt geverifieerd of de actuele situatie in de gebruiksfase past binnen de berekende dimensies en marges die tijdens de eerdere fasen (ontwikkeling, ontwerp en aanleg) zijn bepaald. De beheerder dient daartoe de volgende vragen (checklist) onderbouwd te beantwoorden:

*Stap E.1.1.*

*In het ontwerp dient aangetoond te zijn dat minimaal voldaan wordt aan de eis van waterkerendheid. Hiervoor dienen alle ontwerpvoorwaarden volledig en herleidbaar te worden gedocumenteerd en is aan te tonen dat voldoende kwaliteitscontrole heeft*

*plaatsgevonden. Is de veiligheidsfilosofie van het ontwerp conform de meest recente eis aan de waterkeringsveiligheid?*

Aan stap E.1.1 wordt voldaan indien:

- Revisietekeningen zijn beschikbaar.  
Er zijn berekeningen gemaakt die uitgaan van functionerende drainagesystemen.

#### **Ervaringen vanuit beoordelingen – E.1.1**

Er zijn interviews uitgevoerd met meerdere waterschappen en er zijn afgeronde WBI-beoordelingen opgevraagd. Daaruit blijkt dat nagenoeg alle beoordelingen gebruik maken van revisietekeningen. Alle beoordelingen toetsen daarna de sporen macrostabiliteit of piping.

Er zijn diverse beoordelingen uitgevoerd waarbij aandacht was voor controles en metingen in het veld. Er zijn geen beoordelingen aangetroffen die specifieke drainageberekeningen rapporteren.

*Stap E.1.2.*

*Van belang is dat de grens voor falen van de waterkering bekend is. Zijn er duidelijke criteria gegeven voor de uiterste grenstoestand (UGT) ten aanzien van waterkeringsveiligheid?*

Aan stap E.1.2 wordt voldaan indien:

- Een faalkansenboom wordt toegepast conform hoofdstuk 4.
- Geotechnisch falen gedefinieerd is conform een geotechnisch faalmechanisme (bv. opbarsten).
- Functioneren van de drainage is ondervangen in stap E.4 goed gedrag.

#### **Vrijwillige verdieping op stap E1.2**

Er zit een parallel tussen technische innovaties en groene taluds. Beide hebben een uiterste grenstoestand (UGT) met criteria voor functioneren. Vaak is de UGT dat bij veldinspecties geen verzakkingen mogen worden gezien. Daarnaast dat rekenkundige analyses geen knelpunten aangeven.

Zowel technische innovaties als groene taluds kunnen worden aangevuld met extra criteria. Bijvoorbeeld peilbuismetingen en dat de stijghoogte niet meer mag zijn dan een zekere waarde. Of infrarood metingen aan de hand van drones en dat plaatselijke kwel niet meer mag zijn dan een zekere waarde.

Al deze zaken gelden bij groene taluds als nice to have. Daarom stelt dit rapport dat ook bij technische innovaties al deze extra criteria nice to have zijn. Dus geen onderdeel vormen van een WBI-beoordeling. Wel kunnen deze extra criteria geformuleerd worden als vrijwillige verdiepingsslag.

#### **Ervaringen vanuit beoordelingen – E.1.2**

Er zijn interviews uitgevoerd met meerdere waterschappen en er zijn afgeronde WBI-beoordelingen opgevraagd. Daaruit blijkt dat nagenoeg alle beoordelingen de faaldefinities overnemen die horen bij de sporen macrostabiliteit of piping.

Er zijn diverse beoordelingen uitgevoerd waarbij aandacht was voor waarnemingen in het veld (bv. of zandmeevoerende wellen optreden rondom een grindkoffer). Er zijn geen beoordelingen aangetroffen die specifieke UGT-definities hanteren voor de stand van zaken rondom de drainagetechniek an sich.

#### *Stap E.1.3.*

*Is gespecificeerd welke marges en toleranties bij de aanleg en tijdens de inregelperiode gelden? Dit betreft toleranties ten aanzien van de afmetingen van het geheel, dan wel afzonderlijke onderdelen.*

Aan stap E.1.3 wordt voldaan indien:

- Dit onderdeel is niet van toepassing voor drainagetechnieken.

#### **Ervaringen vanuit beoordelingen – E.1.3**

Er zijn interviews uitgevoerd met meerdere waterschappen en er zijn afgeronde WBI-beoordelingen opgevraagd. Inregelperiode is bij geen van deze bronnen benoemd als relevant issue.

#### *Stap E.1.4.*

*Is gespecificeerd welke marges en toleranties gelden in de gebruiksfase? Dit betreft de toleranties ten aanzien van optredende vervormingen, veroudering of andere specifieke werking van deze innovatie bepalende eigenschappen gedurende de levensduur.*

Aan stap E.1.4 wordt voldaan indien:

- Dit onderdeel is niet van toepassing voor drainagetechnieken.  
Wel geldt aandacht voor verstoppingen. Binnen het ontwerp en beheer zijn hier kaders voor gegeven.

#### **Ervaringen vanuit beoordelingen – E.1.4**

Er zijn interviews uitgevoerd met meerdere waterschappen en er zijn afgeronde WBI-beoordelingen opgevraagd. Toleranties rondom vervorming en veroudering is bij geen van deze bronnen benoemd als relevant issue. Verstoppingen is bij geen van de bronnen benoemd als issue. Indien vervormingen optreden, dan is beheer niet of nauwelijks meer mogelijk. Punt E.1.4. is dan ook ondervangen in E.4: Goed gedrag.

#### Stap E.1.5.

Dit punt vervalt voor drainagetechnieken.

#### Stap E.2: Inzichten over de innovatie zijn nog dezelfde.

*In Stap E.2 wordt gecontroleerd of nieuwe kennis aanwezig is waaruit blijkt dat de voor deze innovatie aangenomen veiligheid of betrouwbaarheid wellicht te gunstig zijn in relatie tot de faalkanseis. Nieuwe inzichten kunnen ontstaan vanuit andere toepassingen van de innovatieve techniek of het materiaal, wijziging van de gehanteerde rekensystematiek, dan wel uit bijvoorbeeld ervaring met de aanleg van de innovatie zelf.*

Deze stap spreekt voor zich.

##### Ervaringen vanuit beoordelingen – E.2

Er zijn interviews uitgevoerd met meerdere waterschappen en er zijn afgeronde WBI-beoordelingen opgevraagd. Incidenteel worden peilbuizen geplaatst en geraadpleegd. Incidenteel worden bij grindkoffers grondmonsters verzameld en getoetst of deze voldoen aan de gestelde eisen.

#### Stap E.3 Hydraulische belastingen en overige randvoorwaarden zijn dezelfde of gunstiger.

*Als hydraulische belastingen of andere randvoorwaarden niet zijn veranderd in ongunstige zin ten opzichte van het ontwerp, wordt de beoordeling voortgezet met E.4. Indien randvoorwaarden in ongunstige zin zijn gewijzigd is nader onderzoek noodzakelijk. De eenvoudige toets leidt dan niet tot een oordeel.*

Deze stap spreekt voor zich.

##### Ervaringen vanuit beoordelingen – E.3

Er zijn interviews uitgevoerd met meerdere waterschappen en er zijn afgeronde WBI-beoordelingen opgevraagd. Gelijkblijvende hydraulische belastingen is bij geen van deze bronnen benoemd als relevant issue.

#### Stap E.4: Goed gedrag

*Het gedrag van de innovatie is zeer belangrijk omdat deze aangeeft of de innovatie aan de eisen ten aanzien van waterkerend vermogen voldoet. De uitkomsten van inspectie en monitoring dienen daarom in Stap E.4 te worden vergeleken met de verwachtingen zoals die in het ontwerpdocument zijn opgesteld (specificaties van veiligheid tijdens gebruik, inclusief goed- en afkeurgrenzen).*

*Indien het tijdens beheer & onderhoud waargenomen gedrag niet binnen de vereiste kaders valt - in ongunstige zin – is nader onderzoek noodzakelijk.*

Aan stap E.4 wordt voldaan indien:

- Een beheerplan is opgesteld.
- Beheer conform het beheerplan uitgevoerd wordt.
- Waarnemingen uit het beheer worden vastgelegd en afwijkingen worden geëvalueerd.

#### **Ervaringen vanuit beoordelingen – E.4**

Er zijn interviews uitgevoerd met meerdere waterschappen en er zijn afgeronde WBI-beoordelingen opgevraagd. Daaruit blijkt dat nagenoeg alle beoordelingen gebruik maken het oordeel van de beheerder. Alle beoordelingen geven aan of er bijzonderheden zijn waargenomen.

Er zijn diverse beoordelingen uitgevoerd waarbij aandacht was voor integrale hoogwaterinspecties. Waarnemingen vanuit deze inspecties zijn nooit benoemd. Er zijn geen beoordelingen aangetroffen die numerieke afkeurcriteria gaven. In de regel functioneert drainage goed zolang deze onderhoudbaar is. Daarmee is onderhoudbaar in de regel een afdoende criterium.

## **9.2.2 Rekenkundig spoor technische innovatie t.b.v. piping**

Het beoordelingsspoor technische innovatie is benoemd in WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid; hoofdstuk 27: Technische innovatie (INN) (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019c). Binnen het rekenkundige spoor wordt ingegaan op de stappen van de toets op maat.

### **Stap 1**

*Het met terugwerkende kracht opstellen van de bij het ontwerp, uitvoering en monitoring behorende toetsdocumentatie indien niet wordt voldaan aan de voorwaarden van stap E.1 van de eenvoudige toets.*

Het verzamelen van alle relevante documentatie is afgedekt in het procedurele spoor stap E.1.1. Rekenkundige uitwerking is opgenomen in het rekenkundige spoor stap 3.

### **Stap 2**

*Het uitvoeren van een berekening op basis van nieuwe inzichten indien niet wordt voldaan aan de voorwaarden van stap E.2 van de eenvoudige toets.*

De toets op actuele inzichten is afgedekt in het procedurele spoor stap E.2. Rekenkundige uitwerking is opgenomen in het rekenkundige spoor stap 3.

### Stap 3

*Het bepalen of het ontwerp voldoet bij de uiterste grenstoestand.*

Het doorlopen van deze stap is analoog aan het maken van een ontwerp. Daarbij kunnen we handvatten uit hoofdstuk 5 gevolgd worden. Dit bestaat hoofdzakelijk uit drie stappen:

- Systeemanalyse, deze omvat ten minste:
  - Geohydrologische berekeningen: situatie zonder drainage.
  - Geohydrologische berekeningen: situatie met drainage.
  - Geotechnische berekeningen: situatie zonder drainage.
  - Geotechnische berekeningen: situatie met drainage.
- Faalkansbenadering, deze omvat ten minste:
  - Faalkans van scenario 1 (faalkans dijk gegeven functionerende drainage). Dit wordt bepaald door de kans op een doorbraak van de dijk gegeven dit scenario.
  - Faalkans van scenario 2 (faalkans dijk gegeven niet functionerende drainage). Dit wordt bepaald middels de kans op falen van de drainage. Dit wordt gecombineerd met de kans op een doorbraak van de dijk gegeven dit scenario.
- Ontwerp van de drainagetechniek.
  - Bovengenoemde punten moeten aansluiten bij het aanwezige ontwerp.

#### **Ervaringen vanuit beoordelingen – stap 3 rekenkundig spoor**

Er zijn interviews uitgevoerd met meerdere waterschappen en er zijn afgeronde WBI-beoordelingen opgevraagd. Deze stap bestaat in principe uit de onderstaande stappen:

- 1) Systeemanalyse, geohydrologische en geotechnische berekeningen (analoog aan hst. 3).
- 2) Faalkansbenadering van de drainagetechniek (analoog aan hst. 4).
- 3) Ontwerp van de drainagetechniek (analoog aan hst. 5).

In de beoordelingen zijn altijd geotechnische analyses uitgevoerd.

In de recente beoordelingen is tot op heden nog nooit een systeemanalyse uitgevoerd. Geohydrologische berekeningen zijn tot op heden nooit een onderdeel van de beoordeling. Soms wordt met peilbuizen de werking gemeten. Dit is nooit getoetst aan numerieke criteria. In de beoordelingen is nooit de faalkansbenadering van de drainagetechniek opgenomen. In de beoordelingen worden zeldzaam de ontwerpcriteria (bv. korrelgroottes van omliggend zand) van de drainagetechniek meegewogen in de beoordeling.

### Stap 4

*Nader onderzoek van afwijkend gedrag en vaststelling of e.e.a. nog binnen de uiterste grenstoestand valt, indien niet wordt voldaan aan de voorwaarden van stap E.4. van de eenvoudige toets.*

Omgang met afwijkingen zijn afgedekt in het procedurele spoor stap E.4. Rekenkundige uitwerking is opgenomen in het rekenkundige spoor stap 3.

### 9.3 Toetsspoor macrostabiliteit binnenwaarts (STBI)

Het beoordelingsspoor Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) is benoemd in WBI 2017 Bijlage III Sterkte en veiligheid; hoofdstuk 5: Macrostabiliteit binnenwaarts (STBI) (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2019c). In de 'standaard' procedure van de eenvoudige en gedetailleerde toets zijn toepassingsvoorwaarden opgenomen, in het specifiek stap E.2. Deze luidt:

*“Wanneer het grondlichaam voor de binnenwaartse stabiliteit sterkte ontleent aan constructieve elementen (ankers, nagels, damwanden, etc.), of kunstmatig versterkte grondkolommen of lagen (bijvoorbeeld Mixed in Place of versterkt veen) is de beoordeling op macrostabiliteit binnenwaarts niet van toepassing. Afhankelijk van het type object(en) zal macrostabiliteit binnenwaarts worden beoordeeld volgend een van de volgende toetssporen: sterkte en stabiliteit puntconstructie, sterkte en stabiliteit langconstructie, of technische innovatie.”*

Bij piping is het WBI zeer expliciet dat drainagetechnieken beoordeeld moeten worden aan de hand van het spoor technische innovatie, maar bij macrostabiliteit wordt deze optie meer opengelaten. Deze OBR kiest voor een eenduidige lijn, bij macrostabiliteit wordt eenzelfde beoordelingsspoor gekozen als bij piping. Dijkvakken die versterkt zijn met drainagetechnieken moeten voor het onderwerp macrostabiliteit, daarom ook beoordeeld worden aan de hand van het spoor Technische innovatie.

#### 9.3.1 Procedureel spoor technische innovatie t.b.v. macrostabiliteit binnenwaarts

Het procedurele spoor voor technische innovatie t.b.v. macrostabiliteit binnenwaarts is analoog aan dat van piping. Dit is beschreven in paragraaf 9.2.1.

#### 9.3.2 Rekenkundig spoor technische innovatie t.b.v. macrostabiliteit binnenwaarts

Het rekenkundig spoor voor technische innovatie t.b.v. macrostabiliteit binnenwaarts is analoog aan dat van piping. Daarbij worden dezelfde stappen uitgevoerd, maar nu ten behoeve van een glijvlakberekening. Dit is beschreven in paragraaf 9.2.2.

### 9.4 Toetsspoor micro-instabiliteit (STMI)

Voor microstabiliteit geldt dat het toetsspoor twee stappen kent in de eenvoudige toets (E.1 en E.2). Aan de eerste stap (E.1.) wordt (nagenoeg) altijd voldaan, omdat het alleen duinen en kunstwerken uitsluit van de beoordeling. De tweede stap (E.2) eerste punt geeft de handvatten die nodig zijn in de WBI-beoordeling voor een dijk die versterkt is met drainagetechnieken.

E.2. Toets op basis van algemene kenmerken

*Indien aan één of meerdere van de volgende criteria wordt voldaan, is de bijdrage van microstabiliteit aan de overstromingskans verwaarloosbaar klein:*

1. *Het wordt aangetoond dat de binnentoevoer van de waterkering in voldoende mate gedraineerd wordt. Dit kan door aan te tonen dat een drainageconstructie in de teen van de waterkering goed functioneert.*
2. *[punten 2 t/m 4 zijn hier weggelaten].*

Indien drainagetechnieken zijn geïnstalleerd voor het faalmechanisme microstabiliteit wordt, als de techniek goed functioneert, voldaan aan de voorwaarde. Als het functioneren vervolgens wordt vastgelegd in de beoordelingsrapportage, dan krijgt het dijkvak, waarin de drainagetechnieken zijn geïnstalleerd, het oordeel 'voldoet'.



## 10 Voorbeelden dijkversterking met drainagetechnieken

### 10.1 Algemeen

Voorbeelden van dijkversterkingen met drainagetechnieken zijn in meerdere documenten in detail beschreven. Een greep uit de literatuur:

- POV-publicatie Drainagetechnieken (POV Macrostabieliteit en POV Piping, 2018).  
In hoofdstuk 9 van deze bron zijn voorbeelden opgenomen. Dit betreft de volgende locaties en systemen:  
Schoonhovenseveer-Langerak, Lek (waterontspanner),  
Veessen, IJssel (DMC),  
Spijk, Rijn (Grindkoffer).
- Drainagesysteem in de verkenning (Witteveen+Bos, 2017).  
In hoofdstuk 4 van deze bron zijn voorbeelden opgenomen. Dit betreft de volgende locaties en systemen:  
Jaarsveld, Lek (ontlaststelsel),  
Schoonhovenseveer-Langerak, Lek (waterontspanner),  
Veessen, IJssel (DMC).
- Filters for Embankment Dams (FEMA, 2011).  
Dit document geeft voorbeelden van ontwerpen van filterconstructies, o.a. in paragraaf 5.3.
- Design and construction of Levees (USACE, 2000).  
Appendix D en E gaan in op het ontwerp van watergang met filterconstructie op de bodem.

In aanvulling op bovenstaande voorbeelden is een casus opgesteld voor de locatie Jaarsveld. Deze casus sluit aan bij de methodiek zoals toegepast in "Toepassing LCC bij ontwerp" (HKV; HWBP; Unie van Waterschappen, januari 2021).

Beheerders, maar ook ontwerpers zoeken naar doelmatige maatregelen. Om de doelmatigheid van verschillende maatregelen te kunnen afwegen, wordt gebruik gemaakt van de Life Cycle Costing-benadering (LCC). Met deze benadering berekent en vergelijkt de beheerder de netto contante waarde (NCW) van het totaal van de aanleg- en beheer- en onderhoudskosten van verschillende maatregelen. Zo wordt bijgedragen aan de keuze voor het meest doelmatige ontwerp.

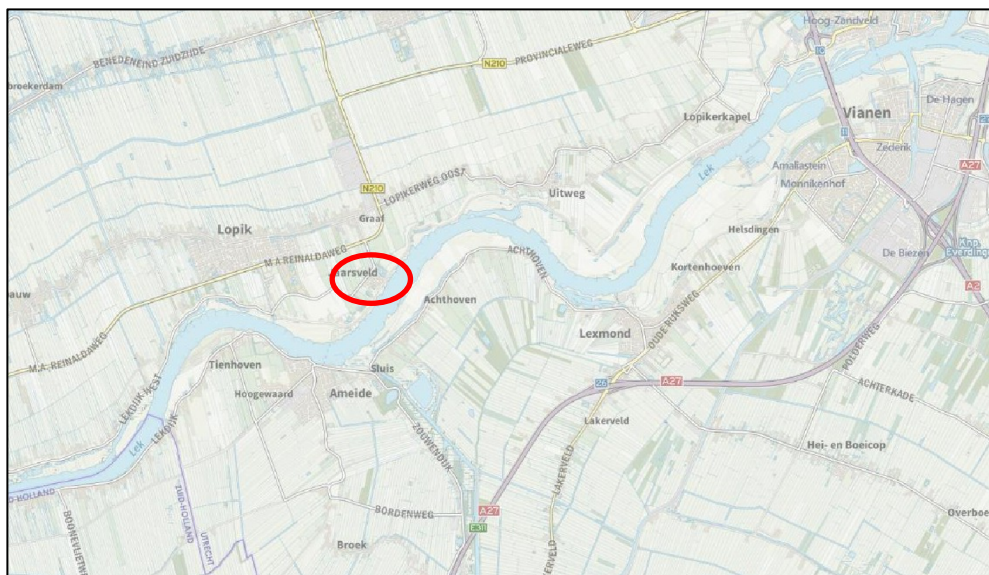
In dit voorbeeld, gebaseerd op de situatie bij Jaarsveld in het beheersgebied van Hoogheemraadschap de Stichtse Rijnlanden (HDSR), is een LCC-benadering opgezet om in een verkenningsfase een keuze te kunnen maken tussen varianten voor het veiligheidsprobleem van piping. Hieronder worden voor dit voorbeeld de afwegingen en conclusie toegelicht om beheerders en de programmadirectie meer inzicht te geven in de toepassing van LCC.

*Disclaimer:*

Let op: Bij Jaarsveld is in 1999 een ontlaststelsel aangelegd. Diverse technische informatie is o.a. terug te vinden in (Witteveen+Bos, 2017). Bij Jaarsveld is een afweging gemaakt tussen meerdere versterkingsvarianten waarbij het ontlaststelsel als beste keus naar voren kwam. Deze casus herhaalt die afweging, maar met uitgangspunten van nu. Getallen (aannames en uitgangspunten) zijn aangepast en versimpeld t.b.v. dit voorbeeld. Het doel van dit voorbeeld is een LCC-analyse te laten zien met niet klassieke oplossingen (vanuit een brede verkenning) en een analyse waarin de afweging met hogere B&O kosten speelt om het gesprek hierover te faciliteren.

## 10.2 Casus dijversterking Jaarsveld

Het dijktracé is gelegen langs de Lek in het beheergebied van HDSR bij het dorp Jaarsveld. Het is een streek in de gemeente Lopik, provincie Utrecht (figuur 1), ca. 7 km ten zuidwesten van IJsselstein. Het buitenwater is de Lek. Het tracé was afgekeurd op hoogte, macrostabiliteit binnenwaarts en piping voordat het tracé was versterkt.



Figuur 10-1: Locatie Jaarsveld.



Figuur 10-2: Locatie Jaarsveld.

Het dorp Jaarsveld ligt langs de waterkering. Het straatbeeld vanaf de waterkering is weergegeven in Figuur 10-3 en Figuur 10-4. Hierop is te zien dat de bebouwing redelijk dicht bij de waterkering staat. Er is geen binnenwaartse teensloot aanwezig. Er is een smal voorland aanwezig van 20 à 50 meter aan de buitenzijde van de Lekdijk Oost.



Figuur 10-3: Straatbeeld vanaf de waterkering in Jaarsveld, kijkrichting: noordoost. Links het achterland en rechts het buitenwater.



Figuur 10-4: Straatbeeld vanaf de waterkering in Jaarsveld, kijkrichting: zuidwest. Rechts het achterland en links het buitenwater.

De dorpskern van Jaarsveld heeft een lengte van 200 à 300 m langs de waterkering. Dit is de Lekdijk oost en valt onder dijktraject 15-1. Daarbij zijn ten tijde van schrijven van de casus andere normen vigerend dan in 1999. De vigerende normen zijn het WBI en het OI.



Bij de uitwerking van deze casus is een stappenplan aangehouden dat geïnspireerd is op het stappenplan uit (HKV; HWBP; Unie van Waterschappen, januari 2021). Dit stappenplan past in een brede verkenning bij aanvang van het proces waarin aandacht is voor de opgaves en onzekerheden ten aanzien van integraliteit, innovatie en adaptiviteit. De stappen zijn:

- 0) Startpunt in proces
- 1) Start
- 2) Analyse
- 3) Beoordeling
- 4) Besluit

### 10.3 Stap 0: wat is beslisvraag?

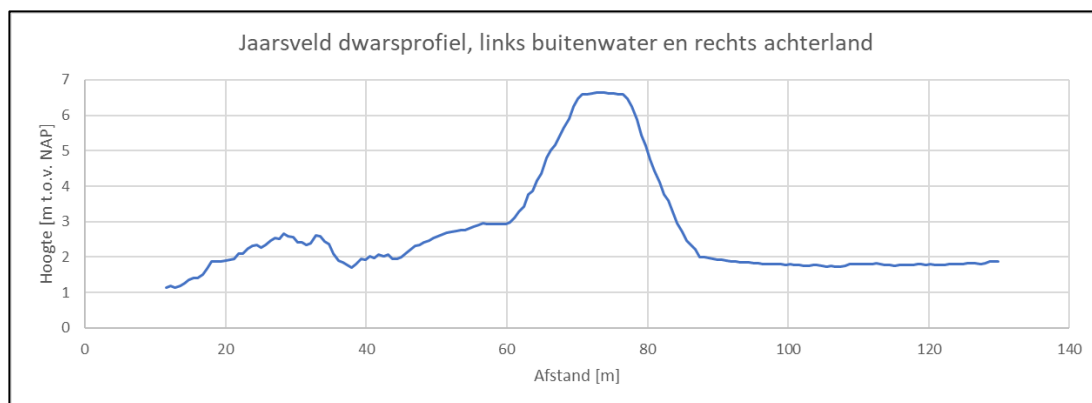
In dit voorbeeld ligt de focus op de afweging en besluitvorming van kansrijke varianten (in de verkenning) die de pipingopgave oplossen voor de dijkstrekking van 1000m voor het zichtjaar 2125. Voor de navolgbaarheid van de casus is gekozen om alleen de pipingopgave op te lossen. In de verkenningfase zijn drie kansrijke varianten geïdentificeerd. Voor dit voorbeeld is de volgende beslisvraag geformuleerd:

- Welke van de drie varianten is het meest doelmatig vanuit economische overwegingen?

### 10.4 Stap 1 Start: basisinformatie op orde, opgave en kansen in beeld

#### ***Dijkopbouw en ondergrond***

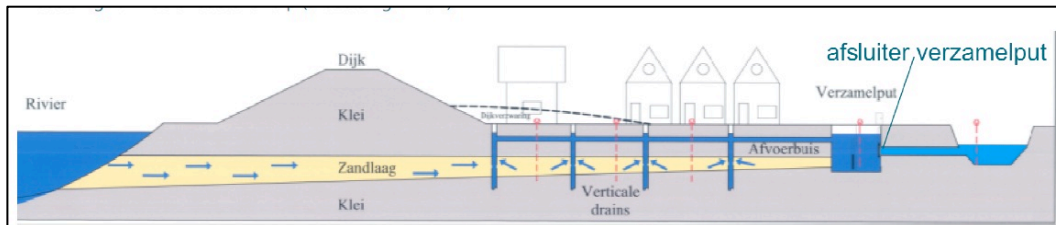
Het gebied omvat een dorpskern achter de dijk. Daardoor zijn diverse delen rondom de woningen opgehoogd met antropogeen materiaal. Het dijklichaam heeft een kruinbreedte van ca. 6 m met een asfaltweg van ca. 4,5 m breed.



Figuur 10-5: Dwarsprofiel ter hoogte van Jaarsveld, tussen Lekdijk oost 12 en 7a.

In het kader van de dijkverbetering in de jaren '99 is een ontlaststelsel aangebracht. Deze is weergegeven in Figuur 10-6. Het ontlaststelsel bestaat uit verticale drains die water uit de zandlaag afvangen en daarmee het opbarsten van de deklaag voorkomen. Deze casus gaat ervan

uit alsof het ontlaststelsel afwezig is. De taludhelling bedraagt 1:2,2 aan de binnenzijde en 1:2,5 aan de buitenzijde van het dijklichaam. Over de gehele strekking is een beperkt voorland aanwezig variërend van 50 m tot 70 m in Jaarsveld. Ten zuiden van Jaarsveld is dit lokaal ca. 10 m.



Figuur 10-6: Doorsnede (bestaand) ontwerp ontlaststelsel Jaarsveld (afbeelding: HDSR).

De globale bodemopbouw voor het gebied is hieronder beschreven:

- Maaiveld op ca. NAP +1,5 m.  
Laagtes op 15 à 20 m uit de teen van de dijk hebben een maaiveldhoogte van NAP +1,0 à +1,3 m, verder in het achterland liggen lagere percelen.
- Antropogeen materiaal (ophoog zand) tot NAP +1,0 m.
- Holocene deklaag (zandige klei en humeuze klei) tot NAP -2,0 m.
- Holocene zandlaag tot NAP -7 m.
- Holocene kleilaag tot NAP -10 m.
- Pleistoceen zand tot ca. NAP -50 m.
- Intredepunt in het voorland ligt bij de teen, met een opmerking dat, op een gedeelte, het onduidelijk is of er klei in het voorland aanwezig is.
- Aanname is dat de deklaag rondom de bebouwing voldoende dik is om opbarsten tegen te gaan. Het uittredepunt ligt ter plaatse van de laagtes tussen de bebouwing binnendijks.

In bovenstaande zitten een aantal onzekerheden. In dit voorbeeld is aangenomen dat deze onzekerheden niet van invloed zijn op de voorliggende beslisvraag. Normaliter is het verstandig om met behulp van gevoeligheidsanalyses na te gaan of de onzekerheden van invloed zijn op de beslisvraag: is er sprake van een kantelpunt? Is er voldoende informatie en zekerheid om de beslissing te kunnen nemen?

### Waterstanden Lek

In Tabel 10-1 zijn de ontwerpwaterstanden weergegeven tot zichtjaar 2125. Gerekend is met klimaatscenario W+ (conform OI).

Tabel 10-1: Ontwerpwaterstanden met zichtjaar tot 2125.

Locatie Hydra	Waterstand zichtjaar [m t.o.v. NAP]				
	2025	2050	2075	2100	2125
LE_1_1_15-1_dk_00128	+5,69	+5,90	+6,03	+6,16	+6,29

Voor het ontwerp van de maatregelen tegen piping is het van belang dat rekening wordt gehouden met hogere waterstanden in de toekomst en een toekomstige ophoging.

Onzekerheden hierbij zijn de ontwikkelingen van de waterstand in de toekomst (afhankelijk van klimaatverandering, rivierverruimende maatregelen, etc.). Net als bij de bodemopbouw is in dit voorbeeld de aanname dat bij de afweging tussen en besluitvorming over de varianten deze onzekerheden niet van doorslaggevende aard zijn.

#### **Waterstanden binnendijks**

Binnendijks bedraagt het waterpeil onder normale omstandigheden NAP -0,20 m. Voor de situatie bij hoogwater is het realistisch om een peilstijging binnendijks te verwachten. Voor hoofdwatgangen is een peilstijging van 0,2 m realistisch. Uitgegaan is van een peil binnendijks bij hoogwater van NAP +0,00m.

#### **Piping**

De veiligheidsopgave voor het faalmechanisme piping is bepaald op basis van de vigerende normen vanuit WBI en OI. Uitgaande van de default parameters vanuit WBI-SOS is de vereiste kwelweglengte 75 à 85 m. De dijkbasis is 25 à 30 m, laagtes met het grootste pipingrisico liggen op 15 à 20 m uit de binnenteen. De waterkering heeft een kwelwegtekort van 30 à 40 meter.

#### **Macrostabieleit binnenwaarts en overige faalmechanismen**

In de veiligheidsanalyse is geen voldoende-oordeel verkregen voor macrostabieleit. In deze LCC-casus wordt de opgave beperkt tot het faalmechanisme piping. Overige faalmechanismen zijn in dit voorbeeld buiten beschouwing gelaten.

#### **Omgevingsopgave**

Een andere aanname in dit voorbeeld is dat er geen ruimtelijke ontwikkelingen zijn die raakvlakken hebben met de dijk. De omgeving beïnvloedt de beslisvraag niet.

#### **Samenvattend: de opgave**

Vanwege de keuze om partieel te versterken zijn de oplossingen voor de veiligheidsopgave alleen gericht op piping, rekening houdend met evt. een versterking in de toekomst op de andere faalmechanismen. Er is alleen sprake van inpassing (geen meekoppelkansen, alleen behoud van huidige ruimtelijke kwaliteit).

## **10.5**    **Stap 2 Analyse**

#### **Welke varianten zijn er?**

Voor het pipingprobleem zijn er meerdere varianten mogelijk. In dit voorbeeld ligt de focus op een LCC-analyse van de volgende varianten, namelijk:

1. Kwelscherm.  
Een nieuw kwelscherm in de vorm van een damwand in de binnenteen/binnentalud van de dijk.
2. Drainagetechniek.  
Dit betreft de aanleg van verticale drains direct achter de dijk.
3. Voorlandverbetering.  
Dit betreft het plaatsen van bentonietmatten in het voorland met enkele aansluitconstructies.

Naast bovenstaande bestaan er meer varianten die overwogen kunnen worden. Dit zijn o.a. een kwel scherm, maar van een lichtgewicht materiaal (bv. kunststof damwanden of kunststof folie), verticale zanddicht geotextiel of een pipingberm met als mogelijke dubbelfunctie steunberm. Deze varianten vallen buiten deze casus.

### Veiligheidsbenadering

Voor dijktraject 15-1 geldt binnen het OI2014v4 (Rijkswaterstaat, 2017a) als maximaal toelaatbare faalkans  $1/10.000$  jaar voor de waterkering. Voor het faalmechanisme piping is de faalkans op dwarsdoorsnede niveau  $P_{eis,dsn} = 7,6 \times 10^{-7}$  per jaar. De varianten dienen te voldoen aan deze faalkans. Voor de variant met de drainagetechniek is in deze casus de volgende onderverdeling aangehouden:

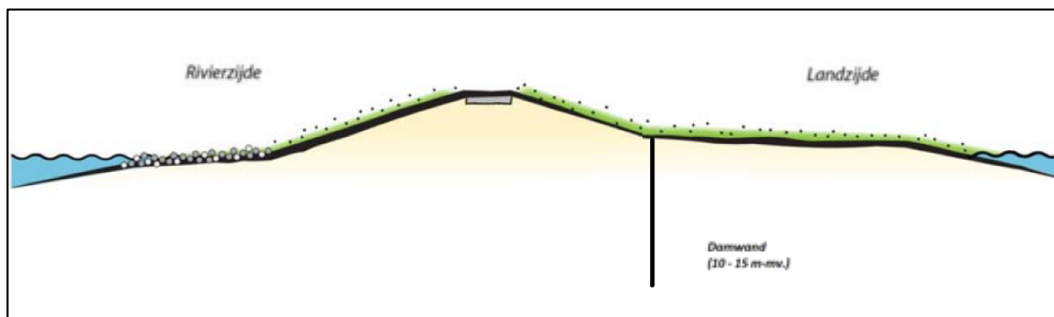
- Scenario 1: Drainage werkt naar behoren. Kans op dit scenario is 33%\*.  
De faalkans op dwarsdoorsnede niveau voor dit scenario is daarmee  $P_{eis,dsn,dr1} = 2,5 \times 10^{-7}$  per jaar.
- Scenario 2: Drainage functioneert niet. Kans op dit scenario is 33%\*.  
De faalkans op dwarsdoorsnede niveau voor dit scenario is daarmee  $P_{eis,dsn,dr2} = 2,5 \times 10^{-7}$  per jaar.
- Scenario 3: Overige scenario's. Kans op dit scenario is 33%\*.  
Te detailleren in planuitwerkingsfase. Dit kan leiden tot een optimalisatie van het ontwerp in samenhang met bovengenoemde scenario's.

\*: Hier wordt bedoeld: 33% van de faalkansruimte is gereserveerd voor het falen.

### Uitwerking hoofdafmetingen varianten

#### Kwel scherm

Bij het verlengen van de verticale kwelweg wordt onderscheid gemaakt tussen verlenging nabij de uitstroomopening enerzijds en verlenging onder de dijk of buitendijks anderzijds. Meest effectief is verlenging van de verticale kwelweg aan de landzijde door middel van een damwandscherm. Dit is weergegeven in Figuur 10-7.



Figuur 10-7: kwel scherm d.m.v. een damwand, bron: Toepassing LCC bij ontwerp, HKV (2021) (HKV; HWBP; Unie van Waterschappen, januari 2021).

Dimensionering kan dan gebeuren met de heave regels of de methodiek van Lane. Voor de situatie bij Jaarsveld wordt uitgegaan van een damwandscherm in het binnentalud bestaande uit stalen damwandplanken. De holocene zandlaag is los gepakt waardoor gewerkt kan worden met licht materieel, maar wel aandacht moet zijn voor negatieve effecten op de omgeving, zoals verkeershinder/ trillingen door vervoer en of materieel. Voor het aanbrengen is materieel nodig



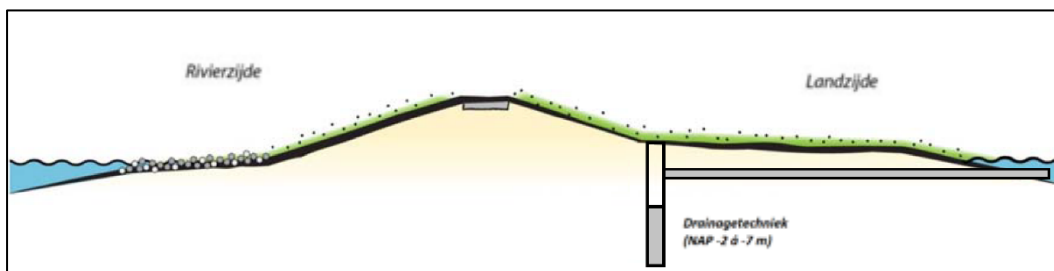
zoals een kraan die de planken trillingsvrij op diepte kan brengen en vrachtwagens voor aanvoer. De lengte van de damwand dient orde 10 à 15 meter te bedragen afhankelijk van de hoogteligging van bovenzijde van het kwelscherm. Het ruimtebeslag voor het aanbrengen van een damwandscherm is beperkt tot de werkstrook voor het materiaal dat de damwand aanbrengt (ordegrootte 5 tot 10 meter werkstrook). Na realisatie wordt het maaiveld weer ingezaaid met een grasmengsel en is de damwand niet zichtbaar in het landschap. Het profiel van de dijk verandert niet.

Het ontwerp van een dergelijke damwand zorgt voor een volledige afsluiting van de watervoerende laag. Daardoor is een kwelstroom van de rivier naar het achterland uitgesloten. Enerzijds is dit positief aangezien de negatieve effecten van kwel worden tegengegaan, zoals wateroverlast en het afvoeren van de kwel. Anderzijds is dit negatief aangezien dit kan leiden tot verdroging en daarmee zettingen in het achterland. Wat kan leiden tot negatieve effecten op de binnendijkse natuur. Uitgangspunt is dat de negatieve effecten gemitigeerd kunnen worden en dat de kosten van deze mitigatie gelijk is aan de positieve effecten. Deze twee effecten zijn verder niet beschouwd in de analyse.

Bij de damwand zijn voor de afweging in de verkenningsfase weinig onzekerheden. Er wordt in de analyse gerekend met een levensduur van 100 jaar zodat investerings- en B&O kosten goed vergeleken kunnen worden. Vanwege de relatief geringe toename in waterstanden door klimaatverandering en lange levensduur is gekozen voor klimaatscenario W+ (robuust) als uitgangspunt voor het voorbeeld.

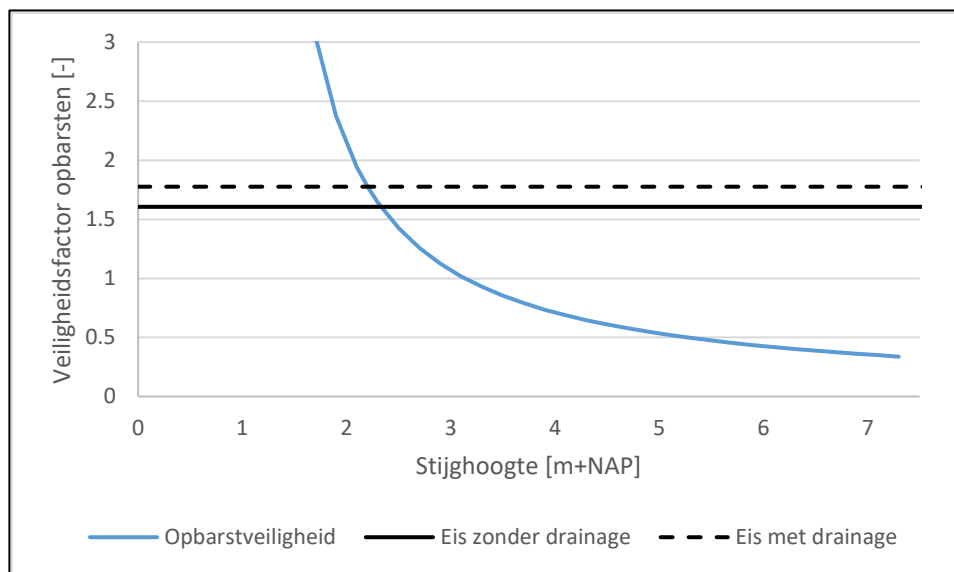
#### *Verticale drainage*

Door de aanleg van een drainagetechniek wordt de stijghoogte verlaagd. Daardoor nemen risico's rondom piping, opbarsten en heave af. Indien de stijghoogte voldoende wordt verlaagd wordt daarmee piping uitgesloten. Het verlagen van de stijghoogte kan met zowel een passief systeem als een actief systeem. Er bestaan meerdere vormen van drainagetechnieken, in deze casus is verticale drainage uitgewerkt. Daarbij is uitgegaan van een passief systeem. In Figuur 10-8 is een verticale drainage weergegeven.



Figuur 10-8: Verticale drainage met afvoerleiding in de binnenteen van de dijk.

Dimensionering is gebaseerd op het wegnemen van het opbarstrisico. Het berekenen van het opbarstrisico is uitgevoerd conform de rekenregels in het OI. Deze resultaten zijn weergegeven in Figuur 10-9. De vereiste veiligheid tegen opbarsten voor dit traject is gegeven in het OI. Voor de drainagetechniek geldt een strengere veiligheidseis van  $P_{eis,dsn,dr1} = 2,5 \times 10^{-7}$  per jaar. Indien de stijghoogte wordt verlaagd naar NAP +2,2 à 2,3 m kunnen opbarstrisico's en daarmee pipingrisico's worden uitgesloten.



Figuur 10-9: Berekende opbarstveiligheid bij variërende stijghoogte.

In de veiligheidsbenadering is het scenario “drainage werkt niet” van belang. Voor dit scenario geldt een veiligheidseis van  $P_{\text{eis,dsn,dr2}} = 2,5 \times 10^{-7}$  per jaar. Indien de drainage niet werkt, dan wordt de faalkans van de dijk gelijk aan die van een dijk zonder drainage. Hierbij is de faalkans van het faalmechanisme terugschrijdende erosie gehanteerd. De aanwezige kwelweglengte is ca. 45 m. Dit geeft een kritisch verval van 3,5 m. Dit geeft een faalkans van ca.  $1 \times 10^{-4}$  per jaar. De faalkans van het drainagesysteem mag daardoor niet hoger zijn dan  $2,5 \times 10^{-3}$  per hoogwater. Uitwerken van de betrouwbaarheid van de drainagetechniek ligt binnen de planuitwerkingsfase.

Het ontwerp van de verticale drainage is gedaan met de quickscantool drainage<sup>48</sup>. Het ontwerp is afhankelijk van meerdere parameters. Diverse parameters daarvan, zoals de eigenschappen van de bodem zijn onzeker. Daarom zijn meerdere scenario's doorgerekend, om de gevoeligheid daarvan te verkennen. Daarin is de doorlatendheid van de zandlaag gevarieerd tussen gemiddelde waarde in het SOS en de 95% bovengrenswaarde. De scheiding tussen de holocene zandlaag en het pleistoceen varieert in het gebied. Hiervan is de doorlatendheid gevarieerd tussen de waarde voor matig zware klei en zandige klei. De geohydrologische uitgangspunten zijn weergegeven in Tabel 10-2.

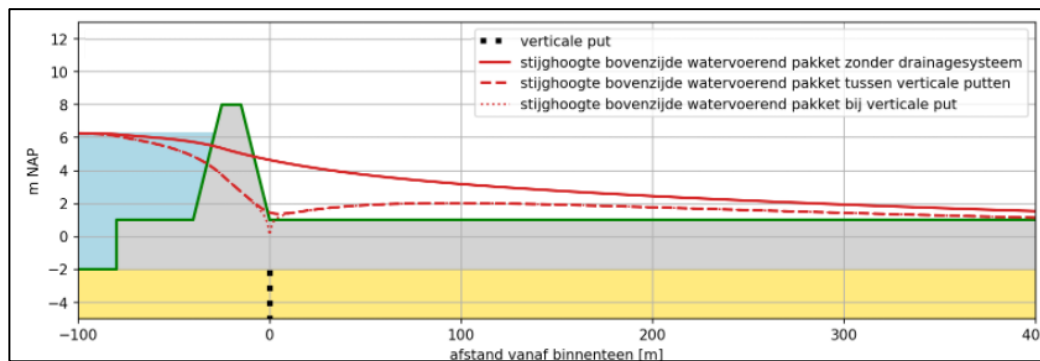
<sup>48</sup> Bron: <http://www.drainagequickscan.nl/>

Tabel 10-2: Geohydrologische parameters in de gevoeligheidsanalyse.

Parameter	Eenheid	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4
Doorlatendheid Holocene deklaag	[m/dag]	0,01			
Weerstand Voorland	[dag]	10 (lokaal ontbreekt het voorland, weerstand analoog aan weerstand geulbodems in paragraaf 3.5 van (Waterschap Aa en Maas, 2020).			
Doorlatendheid Holocene zandlaag	[m/dag]	12	21	12	21
Doorlatendheid Holocene kleilaag	[m/dag]	0,01	0,01	0,05	0,05

Bij het gebruik van verticale drainage is de verlaging in de drainage zelf groot, maar is sprake van opbolling tussen de drains. De verlaging in de drains is gelijkgesteld aan de polderwaterstand verhoogd met enige weerstand in de afvoerleidingen. Het ontwerp van de drainagetechniek is gevarieerd met het aantal verticale bronnen zodat de grondwaterstand met opbolling voldoet aan het opbarstcriterium. De output van deze analyse is weergegeven in Figuur 10-10. Te zien is dat de verlaging ter plaatse van de verticale bronnen voldoet. Naar het achterland is sprake van opbolling als gevolg van kwel uit diepere lagen. Het plaatsen van verticale bronnen in een ruimtelijk patroon met filters dicht bij de dijk en soms op grotere afstand kan zorgen voor een gebiedsdekkende veiligheid. Uitwerking hiervan ligt in de planuitwerkingsfase.

Uit de berekeningen komt naar voren dat een h.o.h. afstand van 40 m voldoet bij berekeningen 1 en 2. Er is een kleinere h.o.h. afstand van 20 m nodig in berekeningen 3 en 4. Het aantal benodigde verticale filters is 25 tot 50 per 1000 m dijk. Door middel van de drainagetechniek wordt de stijghoogte met enige veiligheid verlaagd tot onder de stijghoogte van de referentie situatie. Daardoor is er een toename van de kwelstroom naar de polder te verwachten. Een overzicht van de berekende kwelstromen is opgenomen in Tabel 10-3.



Figuur 10-10: Output drainagequickscan met de verlaging van de grondwaterstand als gevolg van verticale drainage. Berekening 3 met h.o.h. afstand van 20 m voor de filters ter plaatse van de binnenteen. Te zien is dat stijghoogten nabij de opbarstpotentiala verwacht worden op ca. 100 m vanaf de dijk.

Tabel 10-3: Geohydrologische resultaten, bepaling extra kweldebiet (waterbezwaar) tgv. drainagesysteem per 1000 m dijk.

Parameter	Eenheid	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4
<i>Referentie situatie</i>					
Kwel naar achterland	[m3/dag]	5.000	6.100	6.700	9.200
Kwel naar achterland Incl. opbarsten*	[m3/dag]	6.250	7.625	8.375	11.500
<i>Situatie met drainagetechniek</i>					
Kwel naar achterland	[m3/dag]	4.000	5100	4.100	5.000
Waterbezwaar drainagesysteem	[m3/dag]	3.500	5900	7.900	12.000
Totaal	[m3/dag]	7.500	11.000	12.000	17.000
<i>Toename kweldebiet</i>	[m3/dag]	1.250	3.375	3.625	5.500

\* In de referentie situatie wordt kwel naar het achterland berekend. Daarnaast worden stijghoogten berekend (ca. NAP +4,5 m ter plaatse van de binnenteen), deze liggen echter hoger dan de opbarstpotentiaal die hoort bij een veiligheidsfactor van 1,0 (ca. NAP +3,1 m). Er zal dus in de referentie situatie opbarsten plaatsvinden. Daardoor neemt het kweldebiet toe. Deze toename heeft betrekking op de grondwaterstroom in de holocene zandlaag direct onder de deklaag, maar niet op de grondwaterstroom in het pleistocene zand. Er is aangehouden dat deze toename 25% van het totale kweldebiet is.

Ontwerp van de drains zelf bestaat uit een verticale stalen buis met filtergrind. Het ontwerp van de verticale drains moet passend zijn bij het maximale debiet per drain. Dit is berekend op 140 m3/dag (berekening 1) tot 240 m3/dag (berekening 4). Een ontwerp van een bron met een diameter van 0,2 m voor de buis en 0,5 m voor het filtergrind heeft voldoende capaciteit voor deze debieten<sup>49</sup>. Detail engineering hiervan is nodig in de planuitwerkingsfase. Daarbij wordt gekeken naar de exacte omvang en de samenstelling van het filtergrind. Het water uit de drains wordt afgevoerd naar het oppervlaktewater. Het huidige systeem in Jaarsveld omvat per drie verticale bronnen een leiding die het water verzamelt, deze gaat over in een afvoerleiding die het water afvoert. Afhankelijk van de afstand tot het lozingspunt is de lengte van de afvoerleiding 50 à 100 m. Per 1000 m dijk is ca. 1000 m aan leidingwerk benodigd. Uitvoering van leidingen vindt plaats in open ontgraving.

Drainagetechnieken vragen na de aanleg nadere aandacht. Dit bestaat uit drie delen:

- 1) Beheerkosten en onderhoudskosten.  
 Bij Jaarsveld bestaat dit uit continue monitoring via het beheersysteem van het waterschap, een jaarlijkse test bij hoge waterstand op de rivier en het uitvoeren van een camera-inspectie iedere 10 jaar.
- 2) Vervanging van delen met een gelimiteerde levensduur.  
 Levensduur verzamelleidingen en afvoerleidingen (PVC-buizen) 50 jaar.
- 3) Impact op het achterliggende watersysteem.  
 Het systeem lost grondwater op het achterliggende watersysteem. Dit is een toename

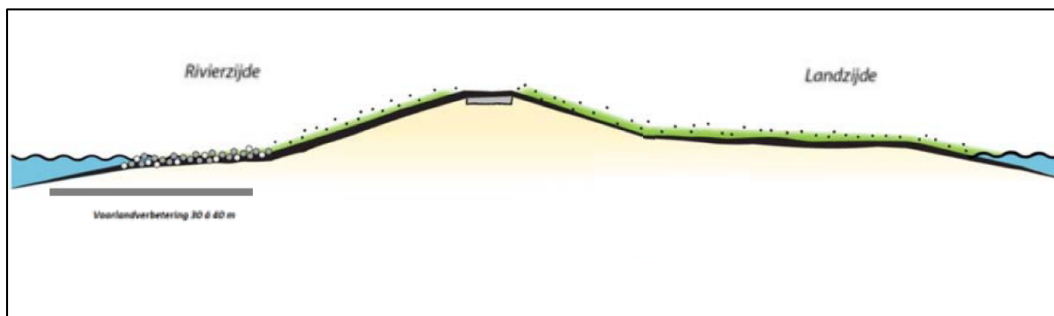
<sup>49</sup> Er is getoetst aan het criterium van Sichardt conform blz. 273 van (Bot, 2016).

ten opzichte van de natuurlijke kwel. Deze toename treedt op tijdens hoogwater periodes.

De impact van lozen op het achterliggende watersysteem bestaat uit de hoeveelheid water per tijdseenheid en de kosten per eenheid water. Bij de jaarlijkse test is sprake van 1 dag lozen van grondwater per jaar. Onder extreme omstandigheden is het systeem watervoerend gedurende de gehele of de top van de hoogwatergolf (tijdsduur 200 à 400 uur). Deze extreme omstandigheden komen voor 1x per 10 à 20 jaar. Bij een hoogwatergolf van 1x per 10 jaar is de waterstand op de Lek lager dan onder ontwerpcondities (NAP +4,15 m vs. NAP +6,29 m), de toename van de kwel is dan ook navenant lager dan die onder ontwerpcondities. Gemiddeld is de toename aan kwel 1.700 tot 7.300 m<sup>3</sup> per jaar per 1000 m dijk.

#### *Voorlandverbetering*

Door een voorlandverbetering te realiseren wordt de kwelweglengte aan de buitenzijde verlengd en daarmee kan voldaan worden aan de minimaal vereiste kwelweglengte. Op deze manier is geen doorgaande pipe mogelijk vanaf het uittredepunt tot het intredepunt en wordt daarmee piping uitgesloten. Dit is weergegeven in Figuur 10-11.



Figuur 10-11: Voorlandverbetering.

Dimensionering kan dan gebeuren met de rekenregel van Sellmeijer. Voor de situatie bij Jaarsveld is uitgegaan van een verbetering door het plaatsen van bentonietmatten (type: Bentofix B-4000 of vergelijkbaar) in het voorland over een breedte van 30 à 40 m. Hierbij is als uitgangspunt gehanteerd dat er geen grondverwerving benodigd is, dus dit is niet in de kosten opgenomen. De opbouw betreft een deklaag van 1 m gebiedseigen grond met daaronder deze bentonietmatten. De uitvoering vindt plaats in de uiterwaarden en behoren tot een Natura2000 gebied. Dit kan tot eisen leiden aan de uitvoeringswijze. Voor het aanbrengen is uitgegaan van het gebruik van licht materieel. Het grootste deel van de voorlandverbetering kan plaatsvinden boven water, maar lokaal zijn mogelijk ingrepen onder de waterlijn vereist. Na realisatie wordt het maaiveld weer ingezaaid met een grasmengsel en is de voorlandverbetering niet zichtbaar in het landschap. Het profiel van de dijk verandert niet.

In het voorland is enige bebouwing aanwezig. Nabij de waterlijn zijn diverse kribben aanwezig. De bebouwing is hoog gelegen. Het volgende uitgangspunt is gehanteerd: indien onder de bebouwing voldoende slecht-doorlatende lagen aanwezig zijn, dan hoeft de bebouwing niet geamoveerd te worden. De aansluiting tussen de bentonietmatten en de kribben dient waterdicht uitgevoerd te worden. Dit leidt tot aandachtspunten rondom de aansluitingen.

Uitgangspunt is dat deze aandachtspunten uitgewerkt worden in een volgende fase. Hiervoor is een reservering meegenomen in de investeringskosten. Deze bestaat uit het waterdicht maken van de kribben over een oppervlak van 15x10 m per kribbe door deze te vullen met beton tot een diepte van 1,5 m-mv.

Bij de voorlandverbetering zijn voor de afweging in de verkenningsfase weinig onzekerheden. Er wordt in de analyse gerekend met een levensduur van 100 jaar zodat investerings- en B&O kosten goed vergeleken kunnen worden. Vanwege de relatief geringe toename in waterstanden door klimaatverandering en lange levensduur is gekozen voor klimaatscenario W+ (robuust) als uitgangspunt voor het voorbeeld.

### Welke kosten en aannames worden gehanteerd bij de varianten en de daarbij bijbehorende scenario's?

De kosten voor de toekomstige dijkversterkingen voor evt. hoogte, macrostabiliteit, etc. worden niet meegenomen in de LCC-analyse. Deze toekomstige maatregelen zijn niet onderscheidend voor de afweging en vergelijking van de piping-varianten. De maatregelen voor piping worden dusdanig ontworpen dat deze alternatieven hiervoor geen extra kosten hebben t.o.v. elkaar en daarmee ook niet relevant voor het vergelijken en de afweging.

*In de LCC-berekeningen zijn de volgende algemene uitgangspunten gehanteerd:*

- Opgesteld volgens de SSK-systematiek (versie 2.2.0 van 2018).
- Kostenschattting op basis van schetsontwerp.
- Deterministische raming investerings- en LCC-kosten.
- Prijspeil: januari 2021.
- Prijzen incl. storkosten.
- BTW meegenomen.
- Staartkosten (uitvoeringskosten, algemene kosten en winst/risico) separaat meegenomen.

*In de LCC-berekeningen zijn de volgende uitgangspunten voor de variant kwelscherm gehanteerd:*

- Kwelscherm is een onverankerde damwand AZ12-700 lang 14 m zonder gording.
- Raming voor deze variant is samengevat in Tabel 10-4.

Tabel 10-4: LCC-kosten variant kwelscherm.

Omschrijving	Investering [€]	Levensduur [jaar]	LCC (NCW) [€]
Investeringskosten	€ 6.300.000,-	100	€ 6.300.000,-
Vervangingskosten	€ 5.800.000,-	na 100 jaar	€ 1.200.000,-
Beheer en onderhoud	n.v.t.	n.v.t.	0,-
<b>Totaal</b>			<b>€ 7.500.000,-</b>

*In de LCC-berekeningen zijn de volgende uitgangspunten voor de variant verticale drainage gehanteerd:*

De investeringskosten bij verticale drainage zijn vooral gebaseerd op de aanleg van het aantal verticale bronnen. Uit de gevoeligheidsanalyse kwam een bandbreedte naar voren met het

aantal vereiste verticale bronnen. In de LCC-analyse is gerekend met twee varianten waarbij de twee uitersten zijn meegenomen. Daarnaast zijn de volgende uitgangspunten meegenomen:

- De verticale drainage wordt voorzien van een putrand met deksel.
- Per drie verticale drains wordt het water afgevoerd via leiding PVC 315 mm, aan elkaar gekoppeld met een doorspuitput PE 800 mm incl. putrand.
- Peilbuis (1 per 500 m) met monitoringssysteem en verbinding met datacentrum.
- In de eenheidsprijzen zijn de kosten voor grondwerk, bemaling en aansluitingen opgenomen.
- Afvoeren water: gemiddeld 7.300 m<sup>3</sup> per jaar per 1000 m dijk.
- Raming voor deze variant is samengevat in Tabel 10-5 en Tabel 10-6.

Bij de kostenpost “impact op het watersysteem” bestaan de kosten uit de energiekosten voor de afvoer van water naar buiten het poldersysteem. Daarnaast zijn indirecte kosten van invloed, zoals afschrijving van objecten in het watersysteem en beheer en onderhoud aan deze objecten. De energiekosten van waterafvoer zijn ca. € 0,002 (+/- 50%) per kuub per meter opvoerhoogte. De combinatie van directe en indirecte kosten<sup>50</sup> zijn ca. € 0,03 per kuub per meter opvoerhoogte.

Bij Jaarsveld is tussen de afvoerleiding en het lozingspunt een verzamelput met een afsluiter aanwezig. Bij extreem hoogwater wordt de afsluiter van de verzamelput geopend via een automatische besturing. Een back-up voor lokale elektrische bediening of handmatige opening is aanwezig. Dit systeem heeft echter ook een afschrijving op de automatische bediening (elektrotechnisch: 15-20 jaar en werktuigbouwkundig: 25-30 jaar). Dit systeem heeft voordelen ten opzichte van een systeem met een vaste overlaat, die de afschrijving en onderhoud niet heeft. Deze voordelen zijn echter niet gerelateerd aan waterveiligheid. Voor de eenvoud is in de casus derhalve uitgegaan van een vaste overlaat.

Tabel 10-5: LCC-kosten variant drainagetechniek filters h.o.h. 40 m.

Omschrijving	Investering [€]	Levensduur [jaar]	LCC (NCW) [€]
Investeringskosten	€ 380.000,-	50 en 100	€ 380.000,-
Vervangingskosten (afvoerleidingen)	€ 190.000,-	na 50 jaar	€ 85.000,-
Vervangingskosten (geheel systeem)	€ 290.000,-	na 100 jaar	€ 60.000,-
Beheer en onderhoud	€ 600.000,-		€ 270.000,-
waarvan monitoring	32%	gehele periode	
waarvan testen en inspecties	61%	gehele periode	
waarvan impact op watersysteem	7%	gehele periode	
<b>Totaal</b>			<b>€ 795.000,-</b>

<sup>50</sup> Deze waarde is gebaseerd op de gemiddelde beheerkosten van Hoogheemraadschap van Rijnland bij een afvoer van 900 miljoen m<sup>3</sup>/jaar met een gemiddelde opvoerhoogte van ca. 2,4 m.

Tabel 10-6: LCC-kosten variant drainagetechniek filters h.o.h. 20 m.

Omschrijving	Investering [€]	Levensduur [jaar]	LCC (NCW) [€]
Investeringskosten	€ 530.000,-	50 en 100	€ 530.000,-
Vervangingskosten (afvoerleidingen)	€ 190.000,-	na 50 jaar	€ 85.000,-
Vervangingskosten (geheel systeem)	€ 370.000,-	na 100 jaar	€ 75.000,-
Beheer en onderhoud	€ 600.000,-		€ 270.000,-
waarvan monitoring	32%	gehele periode	
waarvan testen en inspecties	61%	gehele periode	
waarvan impact op watersysteem	7%	gehele periode	
<b>Totaal</b>			<b>€ 960.000,-</b>

In de LCC-berekeningen zijn de volgende uitgangspunten voor de variant voorlandverbetering gehanteerd:

- Uitvoering grondwerkzaamheden zijn deels (75%) in den droge en deels (25%) in den natte.
- Grondonderzoek is niet bekend, uitgangspunt is klasse wonen.
- Vrijkomende grond/zand kan en mag (milieutechnisch) hergebruikt worden binnen het projectgebied.
- De grondbalans is gesloten, eventuele overtollige grond spreiden in terrein.
- Grasvakken worden geëgd, geëgaliseerd en ingezaaid met 1 kg graszaad per are.
- Raming voor deze variant is samengevat in Tabel 10-7.

Tabel 10-7: LCC-kosten variant voorlandverbetering

Omschrijving	Investering [€]	Levensduur [jaar]	LCC (NCW) [€]
Investeringskosten	€ 3.700.000,-	100	€ 3.700.000,-
waarvan maatwerk aansluiten kribben	13%		
waarvan overige investeringskosten	87%		
Vervangingskosten	€ 3.200.000,-	na 100 jaar	€ 700.000,-
Beheer en onderhoud	n.v.t.	n.v.t.	0,-
<b>Totaal</b>			<b>€ 4.400.000,-</b>

## 10.6 Stap 3 Beoordeling

In Tabel 10-8 zijn de resultaten van de LCC-berekeningen opgenomen (afgerond). In de bijlage zijn overzichten opgenomen van de kosten.

Tabel 10-8: Samenvattingstabel LCC-kosten per versterkingsvariant.

Variante en situatie	LCC (NCW) [kosten per km]	B&O (NCW) [kosten per km]	Investering & vervanging [kosten per km]
Kwelscherm	€ 7.500.000,-	-	€ 7.500.000,-
Drainagetechniek Filters h.o.h. 40 m	€ 795.000,-	€ 270.000,-	€ 525.000,-
Drainagetechniek Filters h.o.h. 20 m	€ 960.000,-	€ 270.000,-	€ 690.000,-
Voorlandverbetering	€ 4.400.000,-	-	€ 4.400.000,-



Uit de LCC volgt dat de drainagetechniek de meest doelmatige variant is (laagste LCC), ongeacht de doorgerekende variant (h.o.h.-afstand van 20 of 40 m). Dit wordt veroorzaakt door de geringe investeringskosten ondanks de hogere beheerkosten. De beheer- en onderhoudskosten van de drainagetechniek zijn relatief hoog vanwege inspecties, maar ook de kortere levensduur van de onderdelen ten opzichte van de andere technieken. Het kwelscherm en de voorlandverbetering hebben de laagste beheer- en onderhoudskosten (geen), maar de investering van beide opties is erg hoog.

Gezien de onzekerheden in een schetsontwerp is het gewoonlijk zinnig om ook middels een gevoeligheidsanalyse te verkennen of de keuze tussen verschillende varianten anders uitvalt bij een iets andere kostenopbouw. Gezien de grote verschillen tussen de drainagetechnieken en de andere varianten zal dat voor deze casus niet tot een andere keuze leiden.

### 10.6.1 Stap 4: Besluit

Vanuit alleen economische overwegingen is de drainagetechniek de meest doelmatige oplossing. Hiermee is de beslisvraag (stap 0) beantwoord.

Bij het uiteindelijke besluit dienen hier echter ook andere overwegingen worden meegenomen. Zo dient een overweging gemaakt te worden tussen partieel versterken voor piping of een integrale ontwerp oplossing. Andere overwegingen gaan over onderwerpen die uit conditionerende onderzoeken kunnen volgen, zoals de aanwezigheid van verontreinigingen, eisen vanuit ecologie of risico op NGE. Daarnaast kunnen overwegingen met betrekking tot aandacht voor de legger, vergunning en handhaving ook een invloed hebben op de kosten. Dit is in dit voorbeeld niet opgenomen.

#### Wie betaalt wat?

Waterveiligheidsmaatregelen komen in aanmerking voor subsidie. Voor reguliere maatregelen geldt een subsidie van 90% met een 10% projectgebonden bijdrage van het waterschap. Het betreft alleen de investeringskosten. Alle beheer en onderhoudskosten (ook de vervangingsinvesteringen) zijn in principe niet subsidiabel. In Tabel 10-9 is per variant inzichtelijk gemaakt wie welke kosten draagt.

Tabel 10-9: LCC-kosten per versterkingsvariant met een toedeling wie welke kosten draagt.

Variant en situatie	LCC (NCW) [kosten per km]	HWBP* (NCW) [kosten per km]	Waterschap (NCW) [kosten per km]
Kwelscherm	€ 7.500.000,-	€ 6.7500.00,-	€ 750.000,-
Drainagetechniek Filters h.o.h. 40 m	€ 700.000,-	€ 525.000,-	€ 270.000,-
Drainagetechniek Filters h.o.h. 20 m	€ 960.000,-	€ 690.000,-	€ 270.000,-
Voorlandverbetering	€ 4.400.000,-	€ 3.960.000,-	€ 440.000,-

\* HWBP draag 90% van de initiële investering of 100% bij een innovatie. In deze casus is een drainagetechniek als innovatie beschouwd.

## 11 Bibliografie

- Antea Group. (2021). *Veldinspectie, waterstanden langs de IJssel bij hoogwater*.
- Bot, B. (2016). *Grondwaterzakboekje 2016; Gwz2016*. Rotterdam: Bot Raadgevend Ingenieur.
- Brabantkeur. (2020). Opgehaald van Brabantkeur: Beleidsregels:  
<http://www.brabantkeur.nl/keur/beleidsregels>
- Brakenhoff, D. M. (2019). analyseer dijkdrainage analytisch met een online quickscan.  
*Stromingen*, 17-26.
- BTL. (2000). *BTL-rapport 50 - Handboek horizontaal gestuurd boren-HDD*.
- BZ Ingenieurs & Managers. (2017). *Dijk Monitoring en Conditionering (DMC) Systeem - Ontwerpen Beoordelingsvoorschrift*.
- CIRIA. (2007). *The Rock Manual - The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*.
- CIRIA. (2013). *The International Levee Handbook*.
- CROW. (2020). *Standaard RAW Bepalingen 2020*. CROW.
- CUR. (1991). *Geokunststoffen in de civiele techniek - CUR-uitgave 151*.
- CUR. (1993). *CUR161, Filters in de waterbouw*.
- CUR. (2000). *CUR 197 Breuksteen in de praktijk Deel 2: dimensionering van constructies in binnenwateren*.
- CUR. (2003). *CUR 2003-7: Bepaling geotechnische parameters*.
- CUR. (2009). *Geokunststoffen in de waterbouw; CUR174*.
- CUR. (2010). *CUR228 Ontwerprichtlijn door grond horizontaal belaste palen*.
- CUR. (2013). *CUR 247: Richtlijn risicogestuurd grondonderzoek, van planfase tot realisatiefase*.
- De Vries & van de Wiel. (2014). *Achtergrondrapport Geohydrologie, Dijkverbetering Schoonhovenseveer - Langerak*.
- De Vries & van de Wiel. (2014). *Achtergrondrapport Water; Dijkverbetering Schoonhovenseveer - Langerak, kenmerk: B85-MHE-KA-1400350*.
- De Vries & van de Wiel. (2014). *Ontwerpnota Dijkverbetering Schoonhovenseveer - Langerak 10-09-2014 Versie 3.1*.
- Deltares. (2012). *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*.
- Deltares. (2017). *Onzekerheden overzicht van belasting- en sterkeonzekerheden in het wettelijk beoordelingsinstrumentarium; report no. 1220080-001-ZWS-0004-r*.
- Deltares. (2018). *KPP Piping – Heave; kenmerk: 11202560-016-GEO-0001*.
- DMC-Systeem. (2020). *Dike Monitoring and Conditioning System*. Opgehaald van <https://www.dmcsysteem.nl/>
- ENW. (2017). *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*.
- ENW. (2017). *Grondslagen voor Hoogwaterbescherming*.
- FEMA. (2011). *Filters for Embankment Dams - Best Practices for Design and Construction*.
- FloodControl IJkdijk. (2016). *LiveDijk XL Noorderzijvest - State of the Art 2015*.
- Geodelft. (2003). *Kwelproblematiek Vianen - hydrologische modelstudie*.
- Grondmechanica Delft. (1996). *PROBABILISME IN DE GEOTECHNIEK; Onderdeel Ruimtelijke Variabiliteit*.
- HaskoningDHV. (2019). *POV PipingPortaal*.
- HHNK. (2004). *Handleiding horizontaal gestuurde boringen*.

- HKV; HWBP; Unie van Waterschappen. (januari 2021). *LCC bij ontwerp - handelingsperspectief voor HWBP projecten.*
- HWBP. (2018). *Handboek Dijkenbouw, Uitvoering versterking en nieuwbouw.*
- Kennisplatform Risicobenadering. (2018). *Factsheet: Omgang met buitenwaartse macrostabiliteit.*
- KIWA. (1991). *Praktijkrichtlijn, aanleg van drainage met geribbelde draineerbuizen van ongeplastificeerd pvc.*
- Kooistra, K. (2014). *Aanleg en onderhoud van drainage.*
- KWR. (2011). *Kennisdocument Putten(velden) - Ontwerp, aanleg en exploitatie van pomp- en waarnemingsputten.* KWR Watercycle Research Institute.
- KWR. (2020). *Richtlijn drinkwaterleidingen buiten gebouwen.*
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017). *Handreiking ontwerpen met overstromingskansen; Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstomingskansnormen.*
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017f). *Handreiking ontwerpen met overstromingskansen; Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstomingskansnormen.*
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2019). *Schematiseringshandleiding microstabiliteit, WBI2017.*
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2019a). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017; Bijlage I Procedure.*
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2019b). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017; Bijlage II Voorschriften bepaling hydraulische belasting primaire waterkeringen.*
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2019d). *Schematiseringshandleiding piping; WBI 2017.* Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2019e). *Schematiseringshandleiding macrostabiliteit; WBI 2017.*
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2019c). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017; Bijlage III Sterkte en veiligheid.*
- Ministerie van Landbouw en Visserij. (1982). *Aanleg en onderhoud van drainage - Vlugschrift voor de landbouw, no. 361.* 's-Gravenhage.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat. (2007). *Hydraulische Randvoorwaarden Primaire Waterkeringen voor de derde toetsronde 2006-2011 (HR 2006).*
- Miranda, C. (2014). *Probabilistic Design of Relief Wells as Piping Mitigation Measure.*
- NEN. (2003). *Underground pipelines - Basic principles for strength calculation. NPR 3659:1996/A1:2003 nl.*
- NEN. (2020). *NEN 3650-1:2020; Eisen voor buisleidingsystemen – Deel 1: algemene eisen.*
- NEN. (2020). *NEN 3651:2020; Aanvullende eisen voor buisleidingen in of nabij belangrijke waterstaatswerken.*
- Normcommissie Geotechniek. (2017). *NEN 9997-1+C2 (nl); Geotechnisch ontwerp van constructies - Deel 1: Algemene regels.* NEN.
- POV K&L. (2018). *Faalkansanalyse bij dijkontwerp Zeeburgereiland met parallelle waterleiding.*
- POV K&L. (2020). *Doorontwikkeling Veiligheidsraamwerk K&L.*
- POV K&L. (2020). *Filters voor parallelle gas- en drinkwaterleidingen in en bij primaire waterkeringen.*
- POV K&L. (2020). *Veiligheidsraamwerk POV K&L.*

- POV Macrostabieliteit en POV Piping. (2018). *POV Publicatie Drainagetechnieken; een publicatie van de POV Macrostabieliteit en de POV Piping.*
- POV piping. (2019). *Handreiking grondonderzoek voor piping.*
- POV Piping. (2020). *Handreiking Meetnetten en grondwatermonitring voor piping.*
- POV-Macrostabieliteit. (2020). *POVM Actuele Sterkte.*
- POV-Macrostabieliteit. (2020). *POVM Eindige-elementenmethode.*
- POV-piping, Waterschap Scheldestromen. (2018). *Effect tijdsafhankelijkheid op stijghoogte bij getijdewateren.*
- Rijkswaterstaat. (2010). *Omgevingsmanagement: zo werkt het in de natte infrastructuur; van planstudie naar realisatie en beheer & onderhoud.*
- Rijkswaterstaat. (2012). *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen.*
- Rijkswaterstaat. (2017a). *OI2014v4 Handreiking ontwerpen met overstromingskansen - Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen.*
- Rijkswaterstaat. (2017b). *WBI2017 Code Calibration, Reliability-based code calibration and semi-probabilistic assessment.*
- Rijkswaterstaat. (2018). *Werkwijzer Ontwerpen Waterkerende Kunstwerken - Ontwerpverificaties voor de hoogwatersituatie.*
- Rijkswaterstaat. (2019). *Richtlijn Boortechneken en open ontgraving voor kabels en leidingen.*
- SIKB. (2018). *Protocol 5201; protocol geotechnisch onderzoek bij sleufloze technieken, versie 1.0/c2 (concept 2).*
- Sluis, J. S. (2016). *Effect van tijdsafhankelijkheid op piping bij zeedijken. Geotechniek, 8-12.*
- STOWA. (2000). *Onderhoud van drainageconstructies in waterkeringen - compendium, kenmerk: 0444170.*
- STOWA. (2004). *Statistiek van extreme neerslag in Nederland.*
- STOWA. (2018). *Handreiking windturbines en waterkeringen - techniek.*
- STOWA. (2019). *Neerslagstatistiek en -reeksen voor het waterbeheer 2019.*
- TAW. (1996). *Technisch rapport klei voor dijken.*
- TAW. (2001). *Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies.*
- TAW. (2003). *Leidraad Kunstwerken.*
- TAW. (2004). *Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken.*
- TNO. (2003). *Theoriehandleiding PC-RING - Deel B: Statistische modellen.*
- USACE. (1992). *Design construction and maintenance of relief wells.*
- USACE. (2000). *Design and construction of levees.*
- Wageningen Livestock Research. (2019). *Handboek Melkveehouderij 2019/20.*
- Watermark Numerical Computing. (2020). *PEST Model-Independent Parameter Estimation - User Manual Part I.*
- Waterschap Aa en Maas. (2020). *Deelproduct 5: Kwantificering onzekerheden stijghoogte.*
- Waterschap Aa en Maas. (2020). *HWBP Projectgebonden Innovatie 'Geohydrologische Aanpak voor Piping; Syntheserapport.*
- Waterschap Noorderzijlvest. (2006). *Notitie stedelijk water.*
- Waterschap Rivierenland. (2012). *Richtlijn toetsing kwel en wegzijging.*
- Waterschap Zuiderzeeland. (2020). *zsl Dijkdrainage.* Opgehaald van [geo-zsl.opendata.arcgis.com: https://geo-zsl.opendata.arcgis.com/datasets/zsl::zsl-dijkdrainage/data?geometry=2.878%2C52.254%2C8.105%2C52.838](https://geo-zsl.opendata.arcgis.com/datasets/zsl::zsl-dijkdrainage/data?geometry=2.878%2C52.254%2C8.105%2C52.838)
- Werkgroep Herziening Cultuurtechnisch Vademecum. (1988). *Cultuurtechnisch vademecum.*
- Witteveen+Bos. (2017). *Drainagesysteem in de verkenning (HWBP POV Piping).*
- Witteveen+Bos. (2018). *Quickscan-tool drainagetechnieken.*



**Bijlage 1 Witte vlekken en  
handelingsperspectief**

## Bijlage 1 Witte vlekken en handelingsperspectief

Nr.	Witte vlek generiek	Toelichting	Hoe mee omgaan in deze publicatie	Verder handelingsperspectief
1	Faalkansen zijn “groen”.	Er zijn nog weinig kentallen over faalkansen van drainagetechnieken. In het OBR is voor een aantal drainagetechnieken hier een voorzet voor gedaan, maar de beschikbare data waarop deze kansen gebaseerd zijn is nog beperkt. Faalevents worden momenteel door beheerders nog niet consistent bijgehouden waardoor data over faal- events maar beperkt beschikbaar is.	In het OBR zijn voor zover mogelijk kentallen voor faalkansen per type drainagetechniek gegeven. Deze kunnen gebruikt worden waarbij de ontwerper en beheerder gezamenlijk na dienen te gaan of er voor de project specifieke omstandigheden een grotere faalkans te verwachten is of niet. Op basis daarvan kan het kental eventueel worden bijgesteld (grotere faalkans).	Het wordt sterk geadviseerd dat beheerders de beschadigingen en faalevents aan drainagesystemen gaan bijhouden in hun beheersystemen. Bij voorkeur ook in een landelijke database. Op termijn kunnen hiermee de kentallen in het OBR worden aangescherpt
2	Relatie veiligheidsbenadering en beheer & onderhoud	De impact van beheer op het al dan niet falen van drainagesystemen is nog kwalitatief en niet via (vastgelegde) beheerervaringen te onderbouwen.	Er zijn in het OBR concrete handvatten gegeven ten behoeve van het beheer en onderhoud van drainagesystemen. Dit is gebaseerd op richtlijnen maar ook op praktijkervaringen. Deze kunnen toegepast worden eventueel aangepast op de lokale situatie. Bij het ontwerp dient ook een beheer, onderhouds- en monitoringsplan opgesteld te worden om de impact van beheer op schades en faal events inzichtelijk te maken.	Voorstel is om de praktische handvatten uit het OBR na een aantal jaar gebruik in de praktijk te herbeschouwen. Monitoring en vastleggen van schades en faalevents inzetten om op termijn de handvatten aan te scherpen
3	Vastleggen beheerervaring, schades en faalevents	Beheerders zijn meestal goed op de hoogte van drainage, maar het opnemen van de drainage in het (digitale) beheersysteem is niet bij alle beheerders doorgevoerd. Soms worden schades en faal events geregistreerd maar structureel gebeurt dat niet. Hierdoor is er weinig data beschikbaar om kentallen over drainages in dijken op te bouwen.	Binnen de OBR-Drainagetechnieken is in hoofdstuk “beheer en onderhoud” in paragraaf 8.2 gesteld dat expliciete aandacht dient te zijn voor “Databeheer en evaluatie”. Daarnaast wordt voor de wettelijke beoordeling hetzelfde schema van het spoor van de “innovatie” gevolgd. Deze methode vraagt expliciet aandacht voor de ervaringen van beheer en onderhoud.	Het wordt sterk geadviseerd dat beheerders de beheerervaringen, beschadigingen en faal events aan drainagesystemen gaan bijhouden in hun beheersystemen. Op termijn kunnen hiermee de kentallen in het OBR worden aangescherpt.  In de kabel- en leidingensector is het vastleggen van beheerervaringen wel gereguleerd (gas en water). Mogelijk biedt de opzet van de kabel en leidingen sector waardevolle handvatten voor drainagetechnieken in de toekomst



## **Bijlage 2 Overzicht interviews**

## Bijlage 2 Overzicht interviews

In deze bijlage is een beknopt overzicht opgenomen van de afgenomen interviews.

Organisatie	Persoon	Onderwerp
Strukton Van den Herik	Bart Daemen Bram Pijnappels	Interview betrof dijkversterking Neer waar een grindkoffer (zand, grind en breuksteen) is toegepast ten behoeve van piping en heave. De uitvoeringsmethode is besproken in combinatie met de toepassing van toleranties in het werk. Daarnaast is stilgestaan bij de risico's en de wijze van opleveren en verificatie.
Waterschap Noorderzijlvest	Jan Willem Nieuwenhuis	Interview betrof het DMC-systeem. Deze is ca. 500 m lang aangelegd in 2012 in het dijklichaam tussen Eemshaven en Delfzijl. Er is stilgestaan bij de ervaringen met het systeem.
Antea Group	Andries Brandsma	De (praktische) uitvoeringswijze van drainagetechnieken is besproken, met name gericht op HDD-boringen. Tevens zijn faalaspecten besproken van drainagesystemen. Er is stilgestaan bij de onderhoudsmethodes besproken om disfunctioneren van het systeem te voorkomen.
Antea Group	Jasper Bergsma	De (praktische) uitvoeringswijze van drainagetechnieken is besproken, met name gericht op HDD-boringen en de toepassing van drainzand. Er is stilgestaan bij de aandachtspunten rondom het toepassen van deze aanlegmethode.
Waterschap Drents Overijsselse Delta	Johan Elshof	De verschillende drainagesystemen zijn besproken in het beheergebied van WDOD. Er is ingegaan op de wijze van onderhoud en handvatten voor onderhoud. Daarnaast is monitoring en het vastleggen van gegevens aan bod gekomen.
Waterschap Zuiderzeeland	Jan Boezeman	Interview betrof de drainagesystemen in het beheergebied van WS-ZZL. Voornamelijk drains om het onderbeloop begaanbaar te houden en enkele systemen ten behoeve van macrostabiliteit. Tevens is de onderhoudsmethode besproken met de bijbehorende frequentie. Tevens is inzage verkregen in de frequente van disfunctioneren van het systeem.

## **Bijlage 3 Faalkans drainagebuizen**

## Bijlage 3 Faalkans drainagebuizen

### B3.1: Inleiding

In de NPR (NEN, 2003) staan faalgegevens voor leidingen, maar nog niet voor drainage. Ten behoeve van het opstellen van deze OBR-Drainagetechnieken is daarom een analyse gemaakt van de ervaringen met drainagetechnieken bij beheerders. Daarbij is gekeken naar de ervaringen met het falen van deze technieken. Dit met als doel om te komen tot een faalkans van drainagebuizen.

In deze analyse zijn ervaringen gebruikt van de volgende waterschappen:

- Waterschap Noorderzijlvest.
- Waterschap Drents Overijsselse Delta.
- Waterschap Zuiderzeeland.

### B3.2: Ervaringen Waterschap Noorderzijlvest

Waterschap Noorderzijlvest heeft het DMC-systeem in de primaire kering. Deze is onderdeel van het project Live Dike XL. En omvat het “Dijk Data Service Centrum”. Dit is onder andere beschreven in (FloodControl IJkdijk, 2016). Deze techniek heeft specialistisch onderhoud en beheer. Kentallen daarvan qua storingen zijn als volgt:

- Lengte: ca. 500 m.
- Aanlegjaar: ca. 2012
- Levensduur: 7 jaar operationeel.  
Ten tijde van schrijven is de dijk versterkt, deze is zo versterkt dat deze niet meer afhankelijk is van deze drainagetechniek.
- Storingen constructieve delen/ buis: er zijn geen storingen/ beschadigingen hiervan bekend.
- Storingen actieve delen (pomp/besturing): er zijn geen storingen/ beschadigingen hiervan bekend.
- Opmerking:  
De enige momenten van “niet-beschikbaar zijn” betreffen de momenten dat onderhoud is gepleegd. Daarbij zijn enige onderdelen vervangen.

Naast bovenstaande is in het kader van dijkversterking Eemshaven Delfzijl 12 km horizontale drainage aangebracht. Deze dijkversterking is recent uitgevoerd. Van deze drainage zijn (nog) geen knelpunten bekend.

### B3.3: Ervaringen Waterschap Drents Overijsselse Delta

Waterschap Drents Overijsselse Delta heeft rondom de waterkeringen op diverse locaties drainage in het beheer. Dit is reeds beschreven in (STOWA, 2000). Globaal zijn er drie systemen in gebruik. Kentallen daarvan qua drainagesystemen en storingen zijn als volgt:

- Systeem: filterconstructie ter plaatse van polder Mastenbroek langs de IJssel.  
Dit systeem ligt in een watergang, de functie is het doorlaten van grondwater en het tegenhouden van zanddeeltjes. Op de bodem is een geotextiel aanwezig. Daar bovenop ligt een laag zand. De bovenzijde is afgedekt met een laag asfalt/ ZOAB.
- Lengte: ca. 1000 m.
- Aanlegjaar: ca. 1989.
- Levensduur: 31 jaar operationeel.

- Storingen constructieve delen: er zijn geen storingen/ beschadigingen hiervan bekend. In het beheer wordt gelet op zandmeevoerende wellen. Deze zijn tot op heden niet waargenomen.
- Opmerking:  
Het asfalt heeft vooral de functie dat onderhoud aan de watergang uitgevoerd kan worden. Er is nog nooit onderhoud aan de filterconstructie uitgevoerd.
  
- Systeem: drainage met grindkoffer nabij Kampen.
- Lengte: ca. 4000 m.
- Aanlegjaar: ca. 1999, actief beheer sinds 2008.
- Levensduur: 12 jaar operationeel.
- Storingen constructieve delen: in de periode met actief beheer geen knelpunten.
- Opmerking:  
Actief beheer bestaat uit het doorspuiten 1x per 2 jaar.
  
- Systeem: drainage met grindkoffer nabij Kampen.
- Lengte: ca. 8000 m.
- Aanlegjaar: ca. 1985, actief beheer sinds 1999.
- Levensduur: 21 jaar operationeel.
- Storingen constructieve delen: in de periode met actief beheer geen knelpunten.
- Opmerking:  
Actief beheer bestaat uit het doorspuiten 1x per 2 jaar.

Knelpunten vanuit het beheer betreft schade aan de eindbuizen en het niet meer kunnen terugvinden van doorspuitpunten. Dit laatste kan komen door vandalisme, beschadigingen bij maaien, begroeiing, e.d. WDOD zet bij drainage in op een hoge frequentie aan onderhoud. Dit zorgt voor een hogere mate aan betrouwbaarheid.

Er zijn ervaringen met beschadigde en geheel verstopte drainagebuizen. Dit is gekomen doordat een aansluiting los zat waarna een drainagebuis verstopte. En een locatie waar zettingen leiden tot een losse aansluiting, waarna een drainagebuis verstopte.

Bovenstaande ervaringen zijn niet meegenomen als “faalgebeurtenissen”. Argumenten zijn de volgende:

- Losse aansluitingen heeft te maken met onzorgvuldige uitvoering. Dat is eenzelfde proces als “klei te nat aanbrengen” bij een groene dijk. Onzorgvuldige uitvoering is hier, net als bij groene keringen buiten de veiligheidsbenadering gehouden. Expliciete aandacht aan dit onderdeel is wel gegeven in paragraaf 5.4.5.
- De effecten van “externe invloeden” zoals die zettingen of activiteiten die leiden tot zettingen verdienen aandacht. Expliciete aandacht aan dit onderdeel is wel gegeven in paragraaf 5.4.5.

#### **B3.4: Ervaringen Waterschap Zuiderzeeland**

Waterschap Zuiderzeeland heeft rondom de waterkeringen een grote hoeveelheid horizontale drainage in het beheer. Deze drainage heeft hoofdzakelijk als functie het verbeteren van de toegankelijkheid van de binnentoe voor het beheer en onderhoud. Voor twee dijktrajecten

heeft de drainage ook een waterveiligheidsfunctie. Dit betreft de Vossemeerdijk en de Ketelmeerdijk. De beheerder heeft een overzicht bijgehouden met het beheer en onderhoud van de drainage inclusief de knelpunten. Dit gaat voor sommige trajecten terug tot in de jaren '90.

Kentallen daarvan qua storings zijn als volgt:

- Lengte: ca. 240.000 m.
- Aanlegjaar: variërend van de jaren '90 tot recente verbeteringen.
- Levensduur: >25 jaar operationeel.
- Storingen constructieve delen/ buis: storingen worden niet geregistreerd, wel de reparaties.

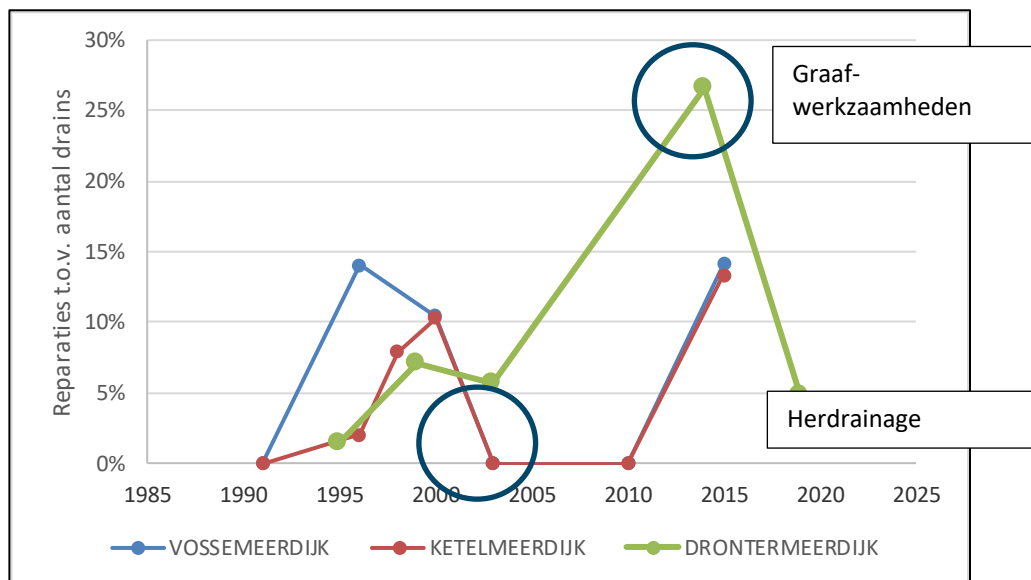
De reparaties betreffen zaken als schade aan de uitstroompunten, niet kunnen terugvinden van de uitstroompunten, vastlopen van de doorspuitkop op een ribbel (reparatie was in deze gevallen niet noodzakelijk), platgedrukte buizen en zware beschadigingen over grotere lengtes.

In totaal zijn 495 reparaties genoteerd, waarvan 7 zijn omschreven als "zwaar".

- Storingen actieve delen (pomp/besturing): er zijn geen actieve delen.

In figuur B3.1 is een beeld geschetst van de reparaties van drie dijktrajecten door de jaren heen. Onderhoudsbeurten worden uitgevoerd om de ca. 5 jaar, dit bestaat uit het doorspuiten van de buizen. Bij bijna alle onderhoudsbeurten is er sprake van reparaties. In "gemiddelde" jaren betreft dit 5 tot 15% van de drainagebuizen. In 2003 zijn de strekkingen van de Vossemeerdijk en Ketelmeerdijk ge-herdraineerd. In de 7 à 10 jaar daarna waren er geen reparaties benodigd. Daarna wel en was het aantal overeenkomstig aan de oudere drainage.

Bij de Drontermeerdijk waren er 56 reparaties nodig in 2014. Dit hoge aantal wordt geweten aan de werkzaamheden "t.g.v. herprofileren kwelsloot". Bij de IJsselmeerdijk is in 2011 een windmolenpark gesloopt, daar is gerapporteerd dat er "ontelbaar aantal reparaties" nodig waren. De hoeveelheid benodigde reparaties wordt dus sterk beïnvloed door externe factoren.

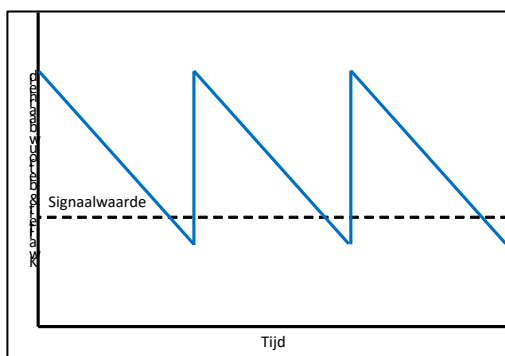


Figuur B3.1: Reparaties ten opzichte van het aantal aanwezige drainagebuizen per jaar.

### B3.5: Werkwijze analyse faalkansen

De conceptuele faalkansbenadering is weergegeven in figuur B3.2. De kwaliteit van een drainagetechniek neemt af in de tijd. Daardoor kan deze op den duur falen.

Door beheer uit te voeren, wordt de betrouwbaarheid van een drainagetechniek verhoogd. Dit kan gedaan worden met regelmatige tussenpozen, door het uitvoeren van testen, of gebaseerd op signaalwaarde.



Figuur B3.2: Verloop van de kwaliteit en betrouwbaarheid van een drainagetechniek in de tijd.

In de praktijk geldt de “signaalwaarde” dat als een drainagebuis door verzakkingen niet meer doorgespoten kan worden, dan is deze aan vervanging toe. De ervaringen van Waterschap Zuiderzeeland is dat drainagebuizen soms worden platgedrukt in de loop der tijd, maar dit leidt (bijna) nooit tot een natte plek. Er is dan blijkbaar ondanks de schade nog enige restcapaciteit.

Situaties waarbij de drainage niet meer functioneert over een grotere lengte zijn wel kritisch. Dit zijn de situaties die beschreven zijn als “zware reparatie”. Dit is 7x voorgekomen bij Waterschap Zuiderzeeland. Dit is nihil keer voorgekomen bij Waterschap Noorderzijlvest en Waterschap Drents Overijsselse Delta. Vermoedelijk komt dit door het frequente onderhoud of de kleinere dataset. Een overzicht van de storingen per waterschap is gegeven in tabel B3.1.

Tabel B3.1: Overzicht storingen

Waterschap	Lengte [km]	Leeftijd [jaren]	Lengte x uren [m x u]	Storingen (zwaar)
NZV	0,5	7	30.000.000	Nihil
WDOD	4+8	12 en 21	930.000.000	Nihil
WS ZZL	240	8 - 30 Gemiddeld 20	42.000.000.000	7x
Totaal			43.000.000.000	7x

### B3.6: Berekende faalkansen



Op basis van de ervaringen vanuit de beheerders zijn faalkansen voor drainagebuizen bepaald. Deze zijn weergegeven in de onderstaande tabel (tabel B3.2). Deze waarden worden geadviseerd voor "normale" situaties. Dit zijn situaties waarbij geen sprake is van externe factoren zoals graafwerkzaamheden of de sloop van een windmolenpark. Dat is verdedigbaar door in de vergunningverlening bij dergelijke activiteiten een extra controleslag op te nemen. Voor alle overige situaties wordt geadviseerd te werken met faalkansen conform NPR (NEN, 2003).

Tabel B3.2: Berekende faalkansen

Beheervorm/ type	Lengte x uren	Incidenten	Faalkans, verwachting	Faalkans, Bovengrens <sup>[1]</sup>
[-]	[m x u]	[-]	[kans/m/uur]	[kans/m/uur]
Normaal/ drainagebuis	$4,3 \times 10^{10}$	7	$1,6 \times 10^{-10}$	$2,9 \times 10^{-10}$
Overig			$1,8 \times 10^{-8}$	$1,8 \times 10^{-8}$

<sup>[1]</sup> Dit is de 5% bovengrens van de faalkans.

#### Disclaimer

De gerapporteerde faalkansen zijn "groen". De gehanteerde methodiek is analoog aan (POV K&L, 2020). Echter is de onderliggende data van fors andere kwaliteit. Faalgegevens van gasleidingen worden (verplicht) vastgelegd in de database NESTOR gas. Faalgegevens van waterleidingen worden (vrijwillig) vastgelegd in de database USTORE. Deze databases hebben een gestandaardiseerde structuur, onderscheid naar materiaal, vaste definities van falen, onderscheid naar oorzaak, onderscheid naar aanleg jaar, e.d. Bij drainagebuizen zijn al deze zaken (nog) niet het geval.

Een aanzienlijk verschil tussen gasleidingen, waterleidingen en van drainagebuizen is de faaldefinitie. Bij gasleidingen is dit een lekkage waarbij een zekere concentratie gas gemeten wordt buiten de leiding. Bij waterleidingen is een andere faaldefinitie gehanteerd, namelijk "gemelde lekken". De faalkans van PE-waterleidingen ligt een factor 10 lager dan die van gasleidingen. Drainagebuizen is lekkage geen knelpunt, dit is juist het doel van de buis. Daar is falen gedefinieerd als het niet kunnen afvoeren van water, bijvoorbeeld doordat deze ingespoeld is met grond of platgedrukt is. Een voorbeeld van "ingsespoeld met grond" is de situatie waarbij een lekkage van een waterleiding leidt tot een erosiekrater, dat is en 2,5% van de lekkages van een PE-leiding.

Een vergelijk tussen de verschillende faalkansen geeft de onderstaande waarden.

- PE-gasleiding:  $5,2 \times 10^{-9}$  kans/m/uur (POV K&L, 2020).
- PE-drinkwaterleiding:  $5,6 \times 10^{-10}$  kans/m/uur (POV K&L, 2020).
- PE-drinkwaterleiding inclusief erosie krater:  $1,4 \times 10^{-11}$  kans/m/uur (POV K&L, 2020).
- Drainagebuis:  $2,9 \times 10^{-10}$  kans/m/uur (deze studie).

Te zien is dat de gevonden waarde voor de drainagebuizen een tussen gelegen waarde is. Dit geeft, ondanks de beperkingen van de voorhanden data voldoende vertrouwen om deze waarde toe te passen.

## **Bijlage 4 Betrokken deskundigen**

## Bijlage 4 Betrokken deskundigen

Leden deskundigenteam	Organisatie
H. (Henk) van Hemert	Rijkswaterstaat WVL
H. (Harm) Rinkel	HWBP
H. (Hans) Knotter	Waterschap Rivierenland
B.M. (Bas) Berbee	Fugro GeoServices B.V.
J.J. (Hans) van Meerten	Deltares
J. (Jan) Blinde	Deltares
H.D.C. (Hendrik) Meuwese	Witteveen+Bos
T. (Timo) Schweckendiek	Deltares
H. (Henk) Barth	Barth Drainage BV
L. (Leo) van Nieuwenhuizen	Waterschap Rijn en IJssel
D. (David-Jan) Smeenge	Waterschap Zuiderzeeland
R. (René) Vincken	Waterschap Aa en Maas
M. (Mischa) Kramer	Kodos

Leden schrijfteam en interne reviewers	Organisatie
Ir. B.T. van (Bouke) Meekeren	Antea Group (schrijver)
Ir. B.H.W.J. (Bas) van Luit	Antea Group (schrijver)
Ir. P.J.N.J (Pieter Jeroen) Bart	Antea Group (schrijver)
Ing. W. (Wilbert) van Veggel	Antea Group (schrijver)

IPM-Team OBR Drainagetechnieken	Organisatie
drs. ing. H.H.H. (Henk) Weijers PMSE	Hoogheemraadschap van Rijnland (Projectmanager)
ir. M.P.M. (Monique) Sanders	Royal Haskoning DHV (Technisch Manager)
ing. A.A.C. (Arno) van der Aa	Waterschap Aa en Maas (Manager Projectbeheersing)
ir. A.F. (Arjan) Kooij	Waterwijzer (Omgevingsmanager)

## **Bijlage 5 Advies ENW Kern**

## Bijlage 5 Advies ENW Kern



Aan Waterschap Aa en Maas  
T.a.v. de heer F. Jorna, afdelingshoofd Waterveiligheid  
Postbus 5049  
5201 GA 's-Hertogenbosch

**Onderwerp:** Adviesvraag OBR Drainagetechnieken tegen piping  
**Datum:** 31 januari 2022  
**Bijlagen:** 1 (pagina 4)  
**Afschrift aan:** J. Slootmaker (DGWB)  
A. van der Aa (Waterschap Aa en Maas)  
A. Kooij (Waterschap Limburg)

**Ons kenmerk:** ENW-22-02  
**Uw kenmerk:** 936069  
**Contactpersoon:** ir. M. Hazelhoff  
**Functie:** coördinator ENW  
**E-mail:** marieke.hazelhoff@rws.nl  
**Telefoon:** 06-55765782

Geachte heer Jorna,

De Ontwerp- en Beoordelingsrichtlijn (OBR) Drainagetechnieken geeft voor verschillende (innovatieve) drainagetechnieken de nodige handvatten voor ontwerpers en beheerders om deze technieken toe te passen en te beoordelen. Het rapport is een vervolg op de eerdere publicaties over drainagetechnieken, zoals de POV-publicatie Drainagetechnieken (PPD) die door de POV-Piping en POV-Macrostabieliteit is opgesteld. Het doel van deze OBR Drainagetechnieken is de toepassing van de verschillende (innovatieve) technieken verder te stimuleren en mogelijk te maken. Het ENW is gevraagd te beoordelen of de OBR Drainagetechnieken geschikt is voor toepassing in de praktijk en welke verbeteringen dan wel aanvullingen wenselijk of noodzakelijk zijn.

### Algemeen

Het is een goed leesbaar en zeer uitgebreid document dat niet alleen goede informatie geeft over de verschillende drainagetechnieken, maar ook goede handvatten biedt voor bijvoorbeeld een plan van aanpak voor het voorontwerp. Ook is er informatie te vinden over uitvoerbaarheid, impact op omgeving, de beoordeling en consequenties voor beheer en onderhoud. Er is nuttige aandacht besteed aan de *life cycle* van de drainagesystemen ten opzichte van de ontwerplevensduur van een dijk(verbetering).

Kennis uit eerder onderzoek en eerdere publicaties wordt overzichtelijk samengebracht. Een duidelijke verwijzing naar teksten in de PPD (POV-publicatie Drainagetechnieken) zou een verbetering kunnen zijn in plaats van teksten over te nemen. In de OBR wordt verwezen naar uitgevoerde projecten waar ervaring is opgedaan en door middel van interviews is deze verwerkt in de OBR. De OBR Drainagetechnieken vormt daarmee een goede en nodige aanvulling op de PPD. Het ENW merkt wel op dat de term 'richtlijn' een nieuwe aanduiding is van publicaties vanuit het HWBP en beveelt aan de status hiervan duidelijk te maken. Het document geeft met het voorbeeldproject goed aan welke voordelen er te behalen zijn met het toepassen van een bepaalde drainagetechniek. Hiermee wordt de meerwaarde van het toepassen van een drainagesysteem onderstreept.



---

## Specifieke bevindingen ten aanzien van de OBR Drainagetechnieken

### *Veiligheidsbenadering*

Essentieel voor de meerwaarde van drainagetechnieken is dat er afdoende zekerheid is dat deze functioneren op de momenten (hoogwater) dat dit voor de veiligheid van de waterkering belangrijk is. Met het toepassen van een drainagetechniek kiest de waterkeringbeheerder immers voor een waterkering die niet intrinsiek veilig is, maar veilig op voorwaarde dat de aangebrachte drainage functioneert. Bij het afleiden van de faalkanseis in het rapport wordt beschreven dat het fout kan gaan als het beheer en onderhoud niet op orde is. In de uitwerking (paragraaf 4.6) is de kans op falen echter sterk ingekaderd. Voor het merendeel van de mogelijke manieren van falen wordt opgemerkt dat deze in het beheer moeten worden opgelost: de betreffende faalkansen zijn daarmee (impliciet) op 0 gezet. Dit vraagt om een concrete beheer- en onderhoudsstrategie, die in het kader van de zorgplicht uitgewerkt moet worden. Daar kan de invloed van het onderhoud vastgelegd en gevolgd worden.

In het hoofdstuk 'Beheer en onderhoud' komt de koppeling met de beheer- en onderhoudsstrategie om aan een verwaarloosbare faalkans te voldoen echter nog onvoldoende terug. In hoofdstuk 8 worden voorstellen gedaan voor test- en onderhoudsfrequenties, maar de samenhang met de faalkansen die hiermee moeten worden afgedekt wordt onvoldoende helder gemaakt.

In het rapport wordt voorgesteld om het functioneren van drainage te verdelen in faalkanseisen van 1/3 drainage werkt, 1/3 drainage werkt niet en 1/3 drainage werkt gedeeltelijk. Dit lijkt een conservatieve aanname. Toepassing in de praktijk moet uitwijzen of dit ook werkbare ontwerpen oplevert en of de veiligheid zo aangetoond kan worden.

### *Gegeven waarden*

In het rapport en in de kaders wordt expliciet gekozen om waarden van verschillende parameters te noemen. Er wordt bijvoorbeeld een standaard vakindeling van 50 meter gehanteerd, onafhankelijk van het faalmechanisme. Hiervan, en voor andere getalswaarden die in dit rapport worden aangereikt, mist een afleiding, een onderbouwing dan wel een beschrijving van het toepassingsgebied van die waarden. Dit is essentieel voor een juiste toepassing.

## Conclusie

### *Toepassing in de praktijk*

Voor een toepassing in de praktijk is het van belang om aan te geven dat sommige harde getallen eerste schattingen betreffen. Een beschrijving van de achtergrond en van het toepassingsgebied van de getallen is een noodzakelijke aanvulling voor de richtlijn.

Daarnaast vraagt het bepalen van de kans op falen van de drainage in relatie tot beheer en onderhoud om een verdiepingsslag. Het ENW verwacht daarbij in ieder geval een beschouwing over bijvoorbeeld de te hanteren inspectie-intervallen en de reparatieduur per onderdeel.





---

*Voldoende verbeterd*

De OBR is uitgebreid met aandacht voor alle relevante aspecten en waardevolle aanvullingen en is voldoende verbeterd, maar heeft op de genoemde getalswaarden nog een nadere onderbouwing en beschrijving van het toepassingsgebied. De richtlijn moet vervolgens gebruikt gaan worden om zijn effectiviteit te bewijzen.

*Aanvullingen of verbeteringen*

Het ENW adviseert om de richtlijn met inachtnaam van de voorgaande bevindingen te gaan gebruiken en de uitwerking in de praktijk te monitoren. De huidige versie kan als voorlopige versie uitgebracht worden. Verder vindt het ENW het raadzaam om de resultaten van de toepassing van de richtlijn breed te delen, zodat er lessen getrokken kunnen worden. Al doende kan de richtlijn worden geëvalueerd en kan de 'groene versie' aangepast worden tot een definitieve versie. Met een dergelijke evaluatie en een borging van het rapport onder de 'De Innovatieversneller' van het Hoogwaterbeschermingsprogramma is in de toekomstbestendigheid voorzien voor gebruik in de diverse processen rond de waterveiligheid van de dijk.

Wij hopen u naar tevredenheid van advies te hebben voorzien.

Hoogachtend,

Dr. ir. G.M. van den Top  
Voorzitter van het Expertise Netwerk Waterveiligheid



---

## **Bijlage 1 Gevolgd proces en adviesvraag aan het ENW**

### **Proces**

In oktober 2020 hebben vertegenwoordigers van de Projectoverstijgende Verkenning Drainagetechnieken met de werkgroep Techniek van gedachten gewisseld over de inhoud en opzet van de OBR Drainagetechnieken. In de ENW-Techniekvergadering van 10 september 2021 is de adviesvraag besproken na een toelichting door de auteurs.

De adviesvraag aan het ENW luidt:

- 1) Is deze OBR Drainagetechnieken geschikt voor toepassing in de praktijk?
- 2) Zijn de door ENW-T eerder gestelde vragen over de OBR Drainagetechnieken in voldoende mate verwerkt?
- 3) Op welke onderdelen en onderwerpen is aanvulling of verbetering wenselijk of noodzakelijk?

De stukken beschikbaar tijdens de ENW-Techniekvergadering van 10 september 2021 zijn:

- Brief van Waterschap Aa en Maas betreffende adviesvraag ENW ten behoeve van OBR-Drainagetechnieken van 27 augustus 2021
- Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn, Drainagetechnieken 99% versie opgesteld door Antea Group van 26 augustus 2021



---

## Over Antea Group

Antea Group is het thuis van 1500 trotse ingenieurs en adviseurs. Samen bouwen wij elke dag aan een veilige, gezonde en toekomstbestendige leefomgeving. Je vindt bij ons de allerbeste vakspecialisten van Nederland, maar ook innovatieve oplossingen op het gebied van data, sensing en IT. Hiermee dragen wij bij aan de ontwikkeling van infra, woonwijken of waterwerken. Maar ook aan vraagstukken rondom klimaatadaptatie, energietransitie en de vervangingsopgave. Van onderzoek tot ontwerp, van realisatie tot beheer: voor elke opgave brengen wij de juiste kennis aan tafel. Wij denken kritisch mee en altijd vanuit de mindset om samen voor het beste resultaat te gaan. Op deze manier anticiperen wij op de vragen van vandaag en de oplossingen voor morgen. Al 70 jaar.

---

## Contactgegevens

Rivium Westlaan 72  
2909 LD CAPELLE A/D IJSSEL  
Postbus 8590  
3009 AN ROTTERDAM

[www.anteagroup.nl](http://www.anteagroup.nl)

### Copyright © 2020

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van druk, fotokopie, elektronisch of op welke wijze dan ook, zonder schriftelijke toestemming van de auteurs.