

OBOR-VZG



Projectnummer	P0020293
Projectomschrijving	Dijkversterking IJsseldijk Zwolle - Olst
Documentnummer	
Versienummer	V1.0
Versiedatum	8 juni 2023

NAAM EN PARAAF

Opsteller	Gecontroleerd	Vrijgegeven
B. van Meekeren	R. de Boer	M. van Dijk
G.P. van Rinsum	J. Terlingen	

DOCUMENTHISTORIE

Revisienummer	Revisiedatum	Omschrijving
100%	2023-6-8	Definitief t.b.v. advies ENW
85%	2023-2-5	Concept t.b.v. redactieteam DIV
80%	2023-1-5	Review klankbordgroep en uitvoerbaarheidstoets verwerkt
77%	2023-3-13	Concept t.b.v. klankbordgroep
75%	2023-2-14	Concept t.b.v. uitvoerbaarheidstoets
70%	2023-2-07	Concept t.b.v. interne review
50%	2022-10-18	Concept t.b.v. interne review

DISTRIBUTIELIJST

Kopie	Revisiedatum	Omschrijving
1		
2		
3		
4		





Voorwoord

Door Waterschap Drents Overijsselse Delta is in 2022 het initiatief genomen om de OBOR-VZG (Ontwerp-Beoordeling- en Onderhoudsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel) op te stellen. Deze OBOR geeft voor het VZG de benodigde handvatten voor ontwerpers en beheerders om deze techniek toe te passen in dijkversterkingen en te beoordelen in veiligheidsbeoordelingen. Dit document is een vervolg op de eerdere publicaties van het Verticaal Zanddicht Geotextiel die door de POV-piping zijn opgesteld. Het doel van deze OBOR-VZG is om de toepassing van de (innovatieve) techniek mogelijk te maken.

Voor het opstellen van de OBOR is een projectteam samengesteld, waarbij is ingezet op een integrale inbreng vanuit de waterschappen, de ingenieursbranche en de aannemerij. Het projectteam mocht zich omringen met - en gesteund voelen door - een team van deskundigen uit het werkveld. Die gezamenlijkheid hebben we als enorm positief ervaren. In bijlage 2 is een overzicht opgenomen van de betrokkenen bij de totstandkoming van deze OBOR.

De inhoud van deze rapportage is gebaseerd op de thans beschikbare kennis en ervaring. Deze ervaring bestaat onder andere uit:

- Laboratoriumonderzoek (kleine- en middelschaalproeven);
- IJkdijkproef (veldcondities);
- Toepassing in diverse proeven en dijkversterkingen Twentekanalen (Waterschap Rijn en IJssel) en Dijkversterking Gamareren Hagestein-Opheusden en Willemspolder (Waterschap Rivierenland).

Op deze ervaringen wordt in het vervolg van deze OBOR verder ingegaan.

De Innovatie Versneller (DIV) van het HWBP zal deze OBOR geregeld aanvullen met nieuwe kennis en ervaring, die met de toepassing van deze OBOR Verticaal Zanddicht Geotextiel worden opgedaan, in nauwe samenspraak met de sector.



1	INLEIDING	4
1.1	Aanleiding	4
1.2	Doel	4
1.3	Plaats in beoordelings- en ontwerpinstrumentarium	4
1.3.1	Beoordelen	5
1.3.2	Ontwerpen	5
1.3.3	Overgang naar het BOI2023	6
1.3.4	Publicaties binnen DIV Piping	6
1.4	Leeswijzer	7
2	PRINCIPE VERTICAAL ZANDDICHT GEOTEXTEL	8
2.1	Wat is een Verticaal Zanddicht Geotextiel	8
2.1.1	Beschrijving Verticaal Zanddicht Geotextiel	8
2.1.2	Onderdelen VZG-techniek	8
2.1.3	Inbrengmethode	9
2.1.4	Ervaringen	10
2.2	Werking Verticaal Zanddicht Geotextiel	12
2.3	Wanneer een Verticaal Zanddicht Geotextiel	13
2.3.1	MKI en CO ₂ -emissie	13
2.3.2	Plastics in grond	13
2.3.3	Omgevingshinder	14
2.3.4	Kosten	15
2.3.5	Toepassingsgebied	15
2.3.6	Samenhang met andere faalmechanismes	15
2.3.7	Aandachtspunten	16
3	BETROUWBAARHEIDSANALYSE	18
3.1	Faalboom waterkering	18
3.2	Faalpad waterkering met VZG	19
3.3	Faalboom VZG	19
3.4	Betrouwbaarheidseisen	21
3.4.1	Top-eis	21
3.4.2	Eis per faaloorzaken	21
3.5	Omgang bedreigingen	22



3.5.1	Bedreigingen ontwerp (categorie 1)	22
3.5.2	Bedreigingen uitvoering en beheer (categorie 2 en 3)	22
3.6	Koppeling tussen betrouwbaarheidsanalyse en ontwerp	25
3.6.1	Bedreigingen ontwerp (categorie 1)	25
3.6.2	Bedreigingen uitvoering (categorie 2)	25
3.6.3	Faaloorzaken beheer (categorie 3)	26
4	ONTWERP	28
<hr/>		
4.1	Algemeen	28
4.1.1	Probleemanalyse	28
4.1.2	Programma van Eisen	29
4.1.3	Voorontwerp	30
4.1.4	Definitief ontwerp	30
4.1.5	Uitvoeringsontwerp	30
4.1.6	As-Built	30
4.2	(Grond)onderzoek	31
4.2.1	Benodigde gegevens	31
4.2.2	Benodigde gegevens per projectfase	35
4.3	Sterkte-analyses	38
4.3.1	Onderloopsheid (heave)	38
4.3.2	Achterloopsheid	41
4.3.3	Voorloopsheid (opbarsten)	43
4.4	Algeheel ontwerp	49
4.4.1	Horizontale positie	49
4.4.2	Verticale positie	52
4.4.3	Ontwerp geotextiel (doorloopsheid)	54
4.4.4	Aanvulzand	59
4.4.5	Herstel deklaag (bovenloopsheid)	61
4.4.6	Bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT)	62
4.5	Ruimtelijke inpassing	63
4.5.1	Bermen en afritten	63
4.5.2	Aansluitingen	63
4.6	Omgevingsaspecten	66
4.6.1	Conditionering	66
4.6.2	Kabels en leidingen	66
4.6.3	Archeologie en NGE	66
4.6.4	Dierlijke graverij	67
4.6.5	Begroeiing	71



5	UITVOERING	74
5.1	Uitvoeringstechniek	74
5.1.1	Algemeen	74
5.1.2	Horizontale uitvoering middels kettinggraver	74
5.1.3	Overige uitvoeringswijzen	76
5.2	Toleranties en uitvoeringseisen	78
5.3	Verificatie	79
5.4	Opleverdossier	80
5.5	Omgang met onzekerheid in de uitvoering	81
5.6	Verwijderen VZG	81
5.7	Herstel en uitbreidbaarheid	82
6	BEHEER EN ONDERHOUD	83
6.1	Beheerplan	83
6.2	Goed gedrag VZG	83
6.2.1	Zandmeevoerende wellen	83
6.2.2	Maaiveldaling	84
6.3	Risico's functioneren VZG	84
6.4	Monitoring	85
6.4.1	Monitoring gedurende de levensduur	85
6.4.2	Monitoring aan het einde van de levensduur	89
7	BEOORDELEN	90
7.1	Algemeen	90
7.2	Processtappen beoordeling	90
7.2.1	Stap 1. Voldoende gegevens	91
7.2.2	Stap 2. Waargenomen gedrag	92
7.2.3	Stap 3. Controle rekenregels	92
7.2.4	Stap 4. Randvoorwaarden zijn hetzelfde of gunstiger	92
7.3	Oordeel vanuit beoordeling	93
8	VERWIJZINGEN	94
	BIJLAGE 1: FOUTENBOOM VZG	97



BIJLAGE 2: BETROKKEN DESKUNDIGEN	99
BIJLAGE 3: NADERE TOELICHTING (AFWEZIGHEID) VAN VERSTOPPINGSRISICO BIJ VZG	101
BIJLAGE 4: WITTE VLEKKEN EN HANDELINGSPERSPECTIEF	106
BIJLAGE 5: NADERE ANALYSES STERKTE VZG	107



1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Het Verticaal Zanddicht Geotextiel, hierna VZG genoemd, is een innovatieve maatregel tegen het faalmechanisme piping. Het waterdoorlatende geotextiel (VZG) wordt aan de binnenzijde van de dijk verticaal aangebracht op de overgang van de pipinggevoelige zandlaag en de bovengelegen deklaag. Indien er sprake is van hoogwater en er landinwaarts van het VZG een uittredepunt ontstaat en er sprake is van het eerste zandtransport, dan stopt het VZG de verdere groei van een erosiekanaal richting het buitenwater. Bij het toepassen van het VZG mogen en kunnen er dus nog wel zandmeevoerende wellen ontstaan (evenals bij vrijwel alle andere pipingmaatregelen).

Het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) zoekt naar manieren om versterkingen efficiënter, sneller en doelmatiger uit te voeren. Het VZG is een alternatief voor conventionele versterkingsmaatregelen tegen piping (zoals een pipingberm of een heavescherm).

De achterliggende techniek van een Verticaal Zanddicht Geotextiel is niet nieuw. In een horizontale vorm worden zanddichte geotextielen al decennia toegepast als filterconstructie bij kunstwerken of als filter bij steenbekledingen. In verticale vorm is hiermee geëxperimenteerd in het laboratorium, in het veld en zijn er dijkversterkingen uitgevoerd met deze techniek¹. In 2017 is een groene versie van de Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn (OBR) Verticaal Zanddicht Geotextiel opgesteld (POV-Piping, 2017). In de tussentijd zijn diverse onderzoeken uitgevoerd. Op basis daarvan is de voorliggende geactualiseerde blauwe versie opgesteld.

1.2 Doel

De Ontwerp, Beheer en Onderhoud Richtlijn (OBOR) omschrijft de ontwerp- en beheeraspecten die nodig zijn om een dijkontwerp met VZG op te stellen. De OBOR-VZG is bedoeld voor dijkbeheerders, ingenieursbureaus en aannemers die het VZG willen toepassen om de veiligheid te verhogen van dijklichamen. De OBOR is geschreven voor 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 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017) en het OI2014v4 (Rijkswaterstaat, 2017a), bekend is. Deze twee worden gebundeld binnen het beoordelings- en ontwerpinstrumentarium 2023 (BOI2023).

1.3 Plaats in beoordelings- en ontwerpinstrumentarium

Het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) is verantwoordelijk voor dijkversterkingen binnen Nederland. Het HWBP heeft de “Kennis en innovatieagenda” en daarbinnen valt De Innovatieversneller (DIV)². DIV ondersteunt de HWBP-projecten door nieuwe kennis en innovaties te ontsluiten. Een van de thema's van DIV betreft piping, waarbinnen meerdere publicaties worden geschreven in het komende jaar. Een van de onderwerpen is het gebruik van filtertechnieken als maatregelen tegen piping. Binnen DIV wordt gewerkt aan een generieke publicatie over filtertechnieken. De OBOR-VZG betreft een specifieke filtertechniek en omvat een gedetailleerde uitwerking hiervan. De inhoud van de OBOR-VZG zal op termijn een plek krijgen in alle producten die door DIV worden opgesteld en worden beheerd. Een overzicht van de publicaties binnen DIV|Piping is gegeven in paragraaf 1.3.4.

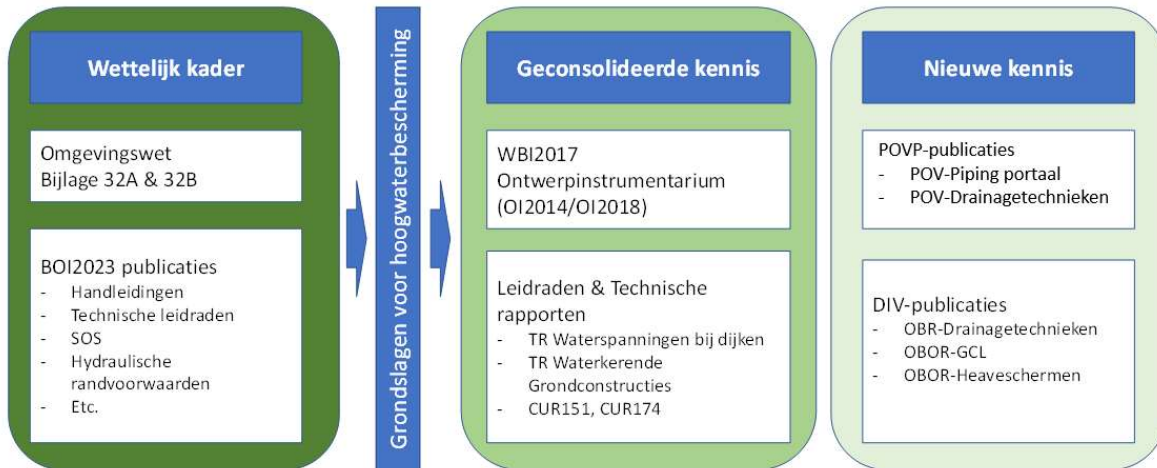
¹ In paragraaf 2.1.4 wordt hier nader op ingegaan.

² Websites van DIV zijn <https://publicwiki.deltares.nl/display/HWBPDIV> en <https://www.hwbp.nl/innoveren/innovatieprojecten/de-innovatieversneller>



De voorliggende versie van de OBOR-VZG sluit aan op de groene versie van de OBR-VZG. Deze versie van de OBOR geeft een nadere uitwerking op basis van aanvullende ervaringen voor ontwerpen, aanbrengen en beoordelen van een Verticaal Zanddicht Geotextiel.

De hoofdlijnen en definities voor waterveiligheid staan beschreven in de “Grondslagen voor hoogwaterbescherming” (ENW, 2017). 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 ontwerpinstrumentarium (OI2014). In het project BOI2023 wordt dit ontwerpinstrumentarium nader ingevuld en komt op een later tijdstip beschikbaar. In Figuur 1.1 is de samenhang tussen de diverse bronnen (niet uitputtend) voor ontwerpen en beoordelen van dijken weergegeven.



Figuur 1.1: samenhang tussen de diverse bronnen voor ontwerpen en beoordelen weergegeven.

1.3.1 Beoordelen

Het WBI 2017 voor de beoordelingsronde 2017-2022 bestaat uit de ministeriële regeling en drie bijlagen:

- 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. 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) een WBI-schematiseringshandleiding beschikbaar. Deze schematiseringshandleidingen geven aanwijzingen voor het beoordelen van een dijk zonder stabiliteitverhogende constructieve elementen (een ‘groene dijk’).

Een schematiseringshandleiding geeft aanwijzingen voor het type onderzoek en voor de benodigde hoeveelheid informatie 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 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.

Ten tijde van het opstellen van de voorliggende OBOR is het WBI 2017 vigerend. Op termijn zal het resultaat van BOI2023 vigerend worden.

1.3.2 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 voor het ontwerpen van

dijken, bijvoorbeeld het ontwerpen van rivier- en meerdijken. Tevens zijn er diverse deelrapporten over faalmechanismen of andere, voor de dijken, relevante onderwerpen. Enkele relevante locaties:

- Van deze rapporten zijn de vigerende delen 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/>
- Belangrijke aanvulling op bovenstaande voor de OBOR-VZG betreft de literatuur van SBR-CUR. Deze omvat documentatie zoals CUR151: Geokunststoffen in de civiele techniek (CUR, 1991) en CUR174: geokunststoffen in de waterbouw (CUR, 2009).

Deze OBOR sluit aan op het OI2014v4. Het ontwerpinstrumentarium (OI2014v4) geeft de kaders voor ontwerpen 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 ontwerpinstrumentarium nog nader ingevuld. Het ontwerpinstrumentarium is een handreiking die strekt tot aanbevelingen bij het ontwerpen van een kering conform de overstromingskansbenadering.

Bij het opstellen van deze OBOR is een doorkijk gemaakt naar het BOI2023. Deze gaat uit van een benadering gebaseerd op faalpaden. Deze benadering is daarom in de OBOR ook toegepast.

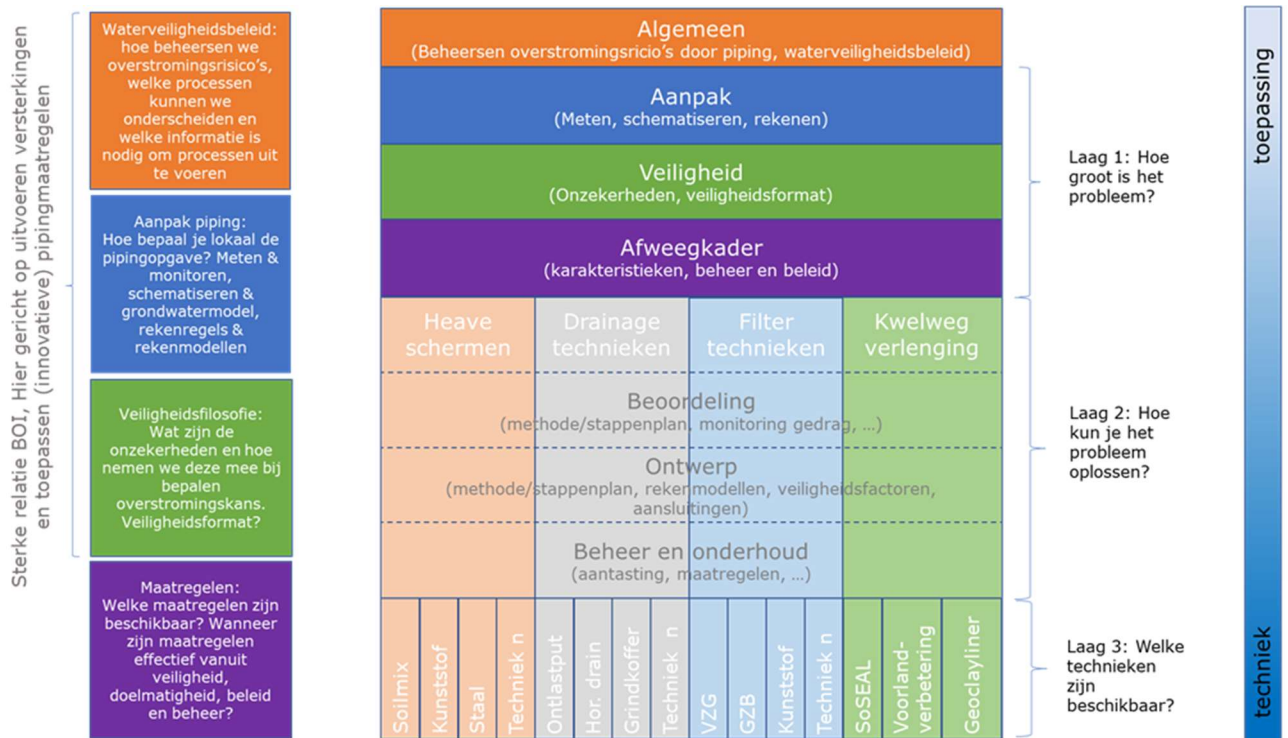
1.3.3 Overgang naar het BOI2023

In het BOI2023 wordt de bestaande kennis binnen het WBI2017 en OI2014 samengevoegd en verder aangevuld. Tegelijkertijd wordt de website www.helpdeskwater.nl vervangen door www.iplo.nl, de website van het informatiepunt leefomgeving. Alle bovengenoemde documenten zullen op termijn beschikbaar komen op www.iplo.nl.

1.3.4 Publicaties binnen DIV | Piping

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





Figuur 1.2: Structuur publicaties DIV|Piping

De verschillende publicaties zijn levende documenten, die bij voldoende rijpheid voor toepassing worden verstrekt aan de dijkwerkers via DIV. Door het toepassing van de documenten zullen de publicaties meegroeien met de innovatieve technieken.

Naast de documenten die gepubliceerd worden vanuit DIV wordt ook regelmatig verwezen naar recente ontwikkelingen, zoals de rapportage Gebiedspecifieke faalpaden voor piping, Kennis voor Keringen onderzoeken en diverse expert-sessies die de afgelopen jaren hebben plaatsgevonden al dan niet in samenwerking met DIV.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 van deze OBOR is het principe van het VZG toegelicht. Vervolgens is in het volgende hoofdstuk beschreven hoe een betrouwbaarheidsanalyse kan worden uitgevoerd. Hoofdstuk 4 en 5 gaan achtereenvolgens in op het ontwerp en de uitvoering van het VZG. In hoofdstuk 6 is beschreven hoe beheer en onderhoud kan worden uitgevoerd. Hoofdstuk 7 beschrijft hoe in een beoordeling omgegaan kan worden met een VZG.



2 Principe Verticaal Zanddicht Geotextiel

2.1 Wat is een Verticaal Zanddicht Geotextiel

De toepassing van geotextielen in de waterbouw is al jarenlang onderdeel van de standaard ontwerppraktijk. Geotextielen worden toegepast in steenbekledingen en als bodem- en oeverbescherming. Deze OBOR gaat over een specifieke toepassing waarbij een geotextiel verticaal in de grond wordt gebracht om horizontaal zandtransport (piping) onder de waterkering te stoppen.

2.1.1 Beschrijving Verticaal Zanddicht Geotextiel

Een verticaal zanddicht geotextiel is een geotextiel dat verticaal in de grond is gebracht ter plaatse van de overgang van de deklaag op de onderliggende zandlaag om, gedurende hoogwater, zandtransport te stoppen, zonder de grondwaterstroming te belemmeren. Een visualisatie van de techniek is weergegeven in Figuur 2.1.



Figuur 2.1: VZG in de binnenteen van een dijk.

2.1.2 Onderdelen VZG-techniek

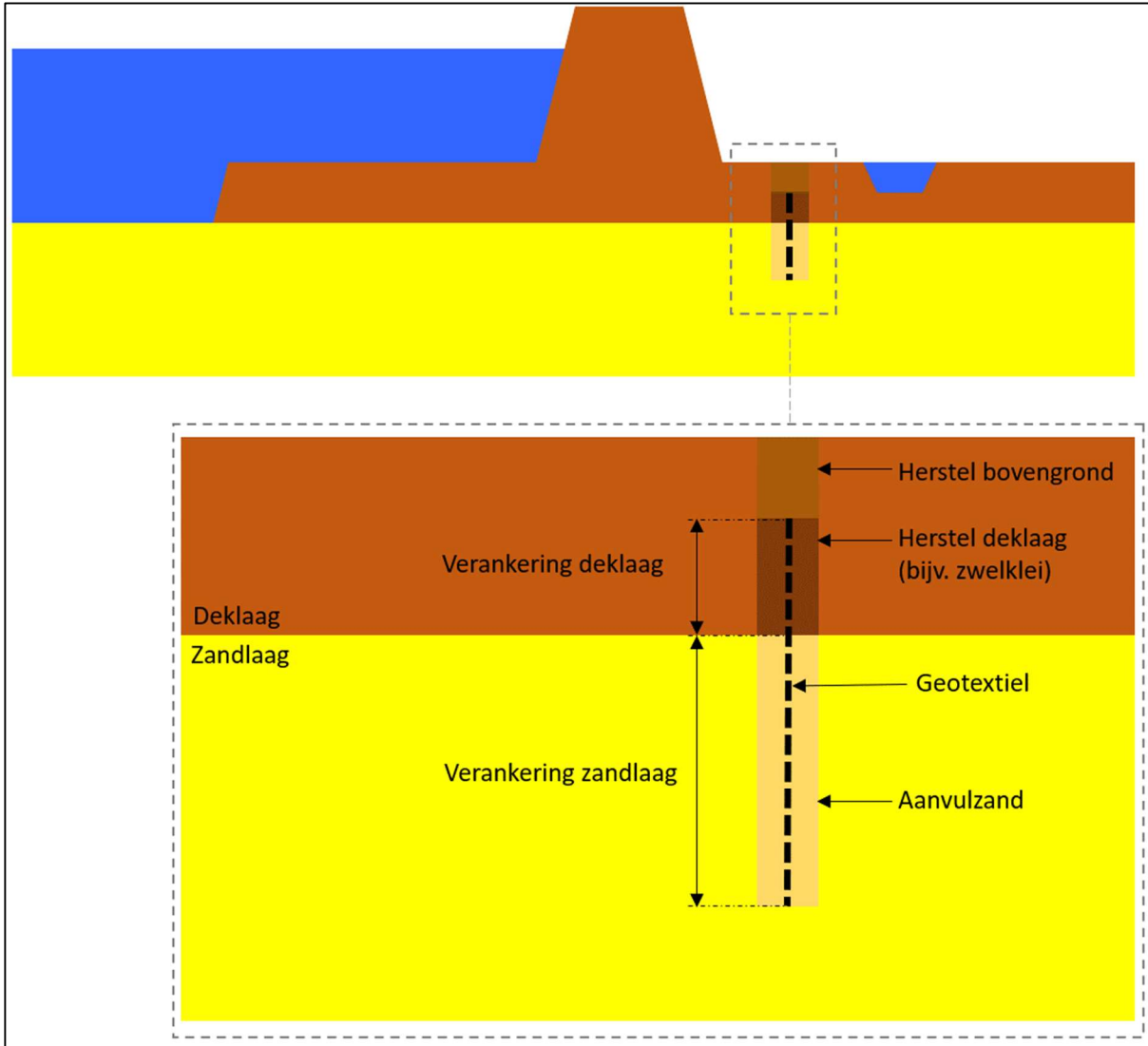
In deze paragraaf is verder ingezoomd op de belangrijkste onderdelen van het ontwerp. Verder zal in deze OBOR op de afzonderlijke onderdelen dieper ingegaan worden. De definities worden in deze paragraaf geïntroduceerd.

De afzonderlijke onderdelen zijn zichtbaar in Figuur 2.2:

- Geotextiel
Het belangrijkste onderdeel van de techniek is het geotextiel. De belangrijkste eigenschappen zijn de waterdoorlatendheid (zo hoog mogelijk), de zanddichtheid en de sterkte (met name voor het aanbrenge).
- Verankering deklaag
Om te voorkomen dat een erosiekanaal gevormd wordt boven het geotextiel langs is positionering van het geotextiel in de deklaag nodig voor een voldoende robuust ontwerp.
- Verankering watervoerend pakket
Om te voorkomen dat een erosiekanaal onder het geotextiel door gevormd wordt is positionering in de watervoerende zandlaag nodig.
- Herstel deklaag
Bij het inbrengen van het geotextiel wordt de bestaande (cohesieve) deklaag doorsneden. Deze deklaag

moet aan weerszijden van het geotextiel in de deklaag worden hersteld, zodat opbarsten/bovenloopsheid geen risico is. Dit kan bijvoorbeeld met klei, of zwelklei en daarboven met gebiedseigen grond.

- Aanvulzand
Bij het inbrengen van het geotextiel wordt de bestaande zandlaag ingesneden. Deze zandlaag moet aan weerszijden van het geotextiel worden hersteld. Dit kan bijvoorbeeld met drainagezand.



Figuur 2.2: Onderdelen VZG.

2.1.3 Inbrengmethode

Deze OBOR omvat een generiek en specifieke aanpak. Generiek gezien bestaan er meerdere inbrengmethodes (zie paragraaf 5.1). De gebruiker is zelf vrij in het kiezen van een inbrengmethode. Specifiek gaat deze OBOR uit van een tot op heden beschikbare en bewezen, doorontwikkelde en efficiënte inbrengmethode: de horizontale methode. Dit is de inbrengmethode met een kettinggraver (ook wel draineermachine genoemd), zie Figuur 2.3 en Figuur 2.4. De kettinggraver maakt een sleuf waarna het geotextiel wordt ingebracht en de sleuf direct weer wordt aangevuld met zand en klei.

Mogelijk ontstaan er op termijn goede ervaringen met andere inbrengmethodes, deze ervaringen kunnen in volgende versies van de OBOR worden opgenomen.



Figuur 2.3: Drainmachine voor aanbrengen VZG (1/2).



Figuur 2.4: Drainmachine voor aanbrengen VZG (2/2).

2.1.4 Ervaringen

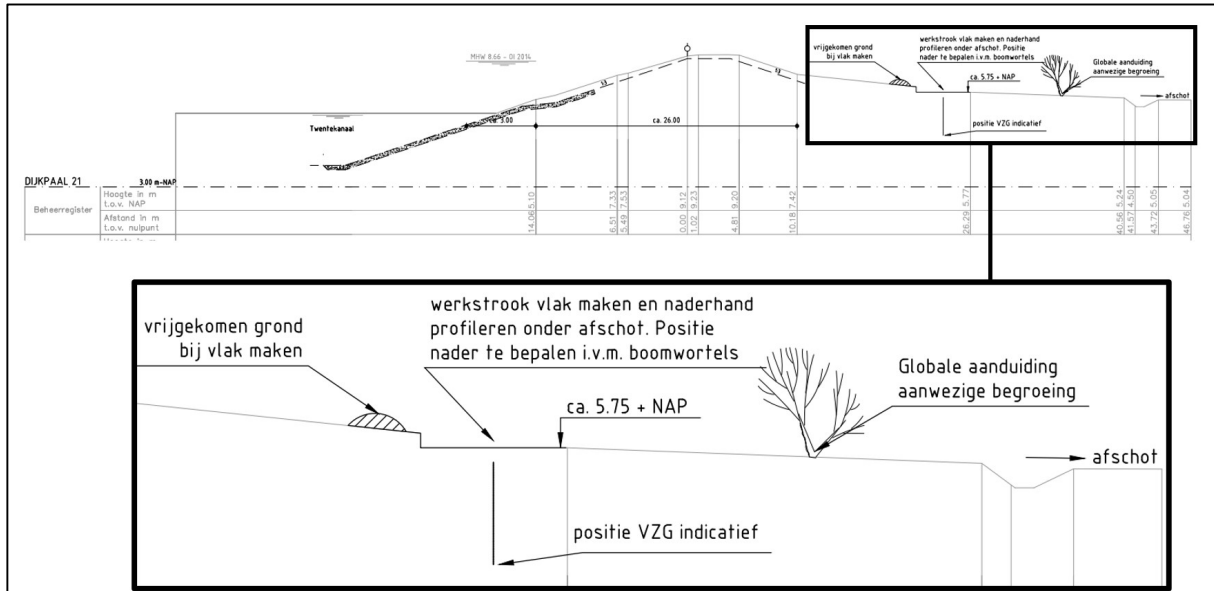
De toepassing en werking van het VZG is door Deltares beproefd in (1) kleine schaalproeven, (2) medium schaalproeven en (3) full-scale bij de IJkdijk. In deze proeven is de fundamentele werking van het VZG, in de vorm van non-woven geotextiel aangetoond. Een uitgebreide beschrijving van deze proeven is te vinden in (Deltares, 2013).

Met het toepassen en aanbrengen van een VZG is ervaring opgedaan in verschillende maakbaarheidsproeven en projecten:

- Maakbaarheidsproef als voorbereiding op IJzendoorn en Dijkversterking Hagestein Opheusden, Locatie Maurik, 50 meter succesvol aangebracht en opgegraven
- Project Dijkverbetering Hagestein - Opheusden (HOP); Op dit dijkversterkingsproject is het VZG succesvol aangebracht over een lengte van 2 x 700 meter.
- IJzendoorn (monitoring). Op dit project is 50 meter VZG aangebracht worden waarbij het geotextiel door opdrachtgever ter beschikking gesteld was en speciaal was geprepareerd vanuit het monitoringsoogpunt. Het doek was o.a. voorzien van verschillende glasvezelkabels t.b.v. van metingen tijdens en na aanbrengen. Hier is de leerervaring opgedaan dat, in tegenstelling tot het tot dan toe gebruikte woven geotextiel, de sterkte van het non-woven geotextiel niet bestand bleek tegen de krachten die uitgeoefend werden tijdens het aanbrengen, hetgeen de lijn van toepassen van woven geotextiel bevestigd. Het doek is gescheurd na het aanbrengen van ca 30 meter VZG.
- Maakbaarheidsproef t.b.v. Dijkversterking Twentekanal, locatie Eefde, 50meter succesvol aangebracht en opgegraven, daarnaast zijn ook de verticale aansluiting en het real-time monitoringssysteem beproefd.
- Dijkversterking Twentekanal. Op dit project is het VZG over een lengte van circa 1200 meter (in 3 trajecten) succesvol aangebracht. In Figuur 2.5 is een dwarsdoorsnede van het ontwerp weergegeven. De belangrijkste nieuwe ontwikkelingen/innovaties van dit project waren:
 - Een bewezen werkend real-time monitoringssysteem tijdens aanbrengen van het VZG (m.b.v. sensoren en metalen strips);

- Het verticaal zanddicht aansluiten van het VZG op een (bestaande) constructie (damwand);
- Het succesvol, in het veld, verlengen van VZG waarmee een theoretisch oneindige lengte VZG in één keer aangebracht kan worden. Het geotextiel zit op een rol van circa 450 meter, de uiteinden van verschillende rollen kunnen aan elkaar worden bevestigd.
- De lange-termijn-monitoring van de doorlatendheid van het VZG.

De opgedane ervaring is verwerkt in deze OBOR.

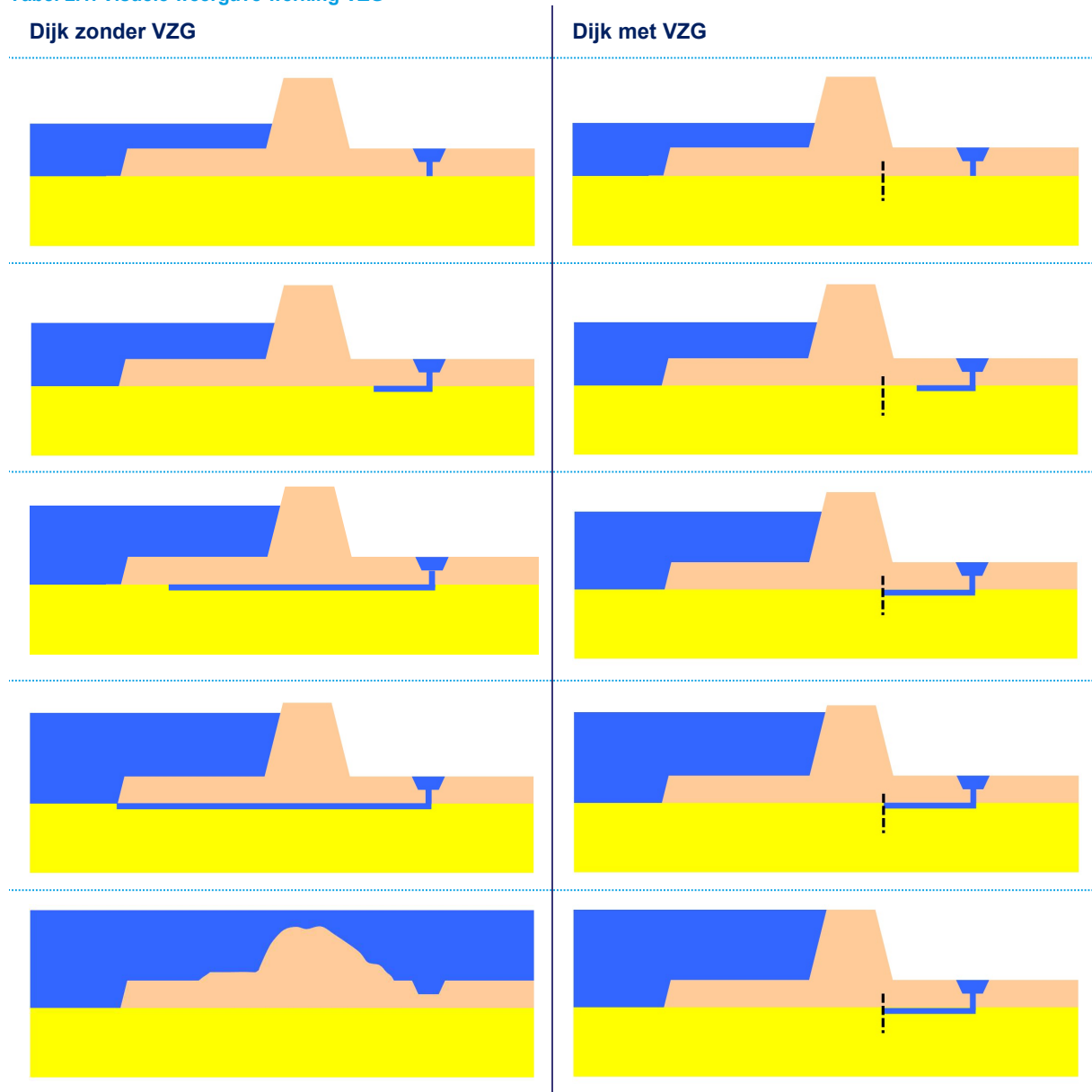


Figuur 2.5. Dwarsdoorsnede Dijkversterking Twentekanaal.

2.2 Werking Verticaal Zanddicht Geotextiel

De werking van een Verticaal Zanddicht Geotextiel als pipingoplossing is weergegeven in Tabel 2.1. Bij een normaal pipingproces zal een erosiekanaal groeien vanaf het opbarstpunt. Het erosiekanaal zal verder groeien, zeker als de buitenwaterstand toeneemt. Als het erosiekanaal bij het intredepunt (bijvoorbeeld de rivier) aankomt zal het erosiekanaal gaan ruimen en kan de dijk bezwijken (door bijvoorbeeld kruindaling). Door een zanddicht geotextiel in de baan van het erosiekanaal te plaatsten stopt de groei van het erosiekanaal richting het intredepunt en wordt kortsluiting voorkomen. Opbarsten, heave en de vorming van een erosiekanaal wordt dus niet voorkomen. Dit betekent dat zowel in de situatie met als zonder VZG zandmeevoerende wellen zichtbaar zullen zijn aan het oppervlak. Het verschil is dat het erosiekanaal niet zal doorgroeien richting het intredepunt.

Tabel 2.1. Visuele weergave werking VZG



2.3 Wanneer een Verticaal Zanddicht Geotextiel

Een verticaal zanddicht geotextiel (VZG) kan worden ingezet als versterkingsmaatregel tegen het faalmechanisme piping. Bij een benodigde versterking worden diverse soorten pipingmaatregelen afgewogen, zoals kwelwegverlenging (pipingberm), een heavescherm of VZG. De toepassing van een VZG wordt afgewogen in het licht van de beschikbare alternatieven, deze verschillende afwegcriteria zijn in deze paragraaf beschreven.

2.3.1 MKI en CO₂-emissie

Bij het VZG als versterkingsmaatregel wordt door middel van een draineermachine een geotextiel verticaal in de grond aangebracht. Qua materieelinzet en materiaalgebruik is dit in de regel geringer dan bij bijvoorbeeld een pipingberm of heavescherm als ontwerp oplossing. Een analyse voor dijkversterking Zwolle-Olst geeft bijvoorbeeld aan dat de milieukostenindicator (MKI) van een VZG ca. 93% beter is dan een stalen heavescherm en een vergelijkbare MKI-waarde heeft als een kunststof heavescherm (IJsselwerken, 2021). Om een zuivere afweging te maken wordt een locatiespecifieke MKI-analyse en CO₂-emissie-analyse aanbevolen.

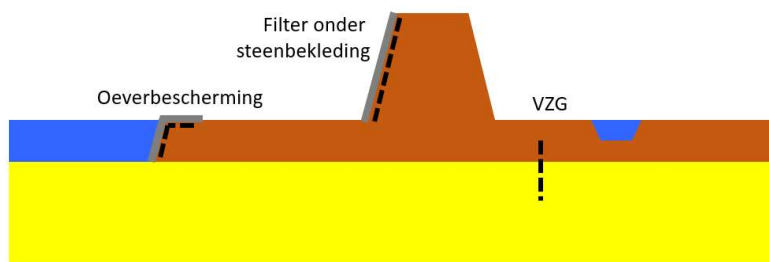
2.3.2 Plastics in grond

Onder normale omstandigheden³ degradeert een geotextiel door UV-straling en beweging (bijvoorbeeld scheuren als gevolg van beweging langs stenen). Recent is veel aandacht voor de onwenselijke vervuiling van het milieu door het vrijkomen van (micro-)plastics. In de waterbouw is een recent voorbeeld het degraderen en in de rivier terecht komen van geotextielen uit de oeverbescherming, zie Figuur 2.6.



Figuur 2.6. Voorbeeld degradatie geotextiel in oeverbescherming (Witteveen+Bos, 2022)

In de waterbouw wordt een geotextiel vaak toegepast op drie locaties (zie Figuur 2.7). Bovenstaande figuur (Figuur 2.6) is een voorbeeld van een oeverbeschermingstoepassing.



Figuur 2.7. Toepassing geotextiel in waterbouw

In opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat is in 2022 (Witteveen+Bos, 2022) een onderzoek uitgevoerd naar onder andere het risico van de toepassing van plastic filters als oeverbescherming. In dit onderzoek is geconcludeerd dat geotextielen onder normaal gebruik onder steenbestorting niet degraderen gedurende de levensduur. Een VZG wordt toegepast in een milieu dat nog meer beschermd is dan een steenbestorting (niet kwetsbaar voor UV-straling en geen beweging).

³ Geen extreme temperatuur(wisselingen) of aanraking met chemische stoffen.

De drie toepassingen van geotextielen in de waterbouw zijn vergeleken op (1) het risico op degradatie gedurende de levensduur en (2) de mogelijkheid tot verwijderen na levensduur, zie Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Vergelijking toepassing geotextielen

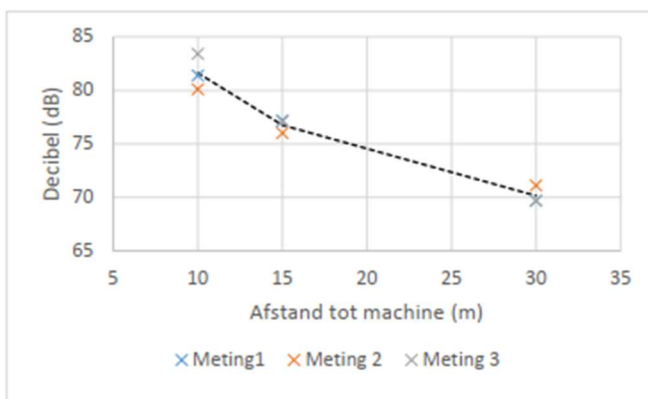
Toepassingsgebied	Risico op degradatie gedurende levensduur	Mogelijkheid tot verwijderen na levensduur
Oeverbescherming	Relatief groot. De praktijk leert dat deze geotextielen vrij kunnen komen te liggen bij onvoldoende beheer en onderhoud.	Eenvoudig, geotextiel ligt aan oppervlak en kan verwijderd worden.
Filter onder steenbekleding waterkering	Klein. De steenbekleding is een essentieel onderdeel van de (primaire) waterkering en zal frequent worden geïnspecteerd en gerepareerd indien nodig.	Eenvoudig, geotextiel ligt aan oppervlak en kan verwijderd worden.
VZG	Nihil. Het VZG wordt onder de grond aangebracht met voldoende gronddekking. In deze situatie is UV-straling uitgesloten en zal het ook niet bewegen (scheuren).	Mogelijk. Het VZG bevindt zich tot maximaal 5 á 10 meter onder de grond evenwijdig aan de dijk. De mogelijkheid tot verwijderen van het VZG is beschreven in paragraaf 5.6.

Samenvattend is de kans dat (micro-)plastics zich verder in het milieu verspreiden bij toepassing als VZG verwaarloosbaar.

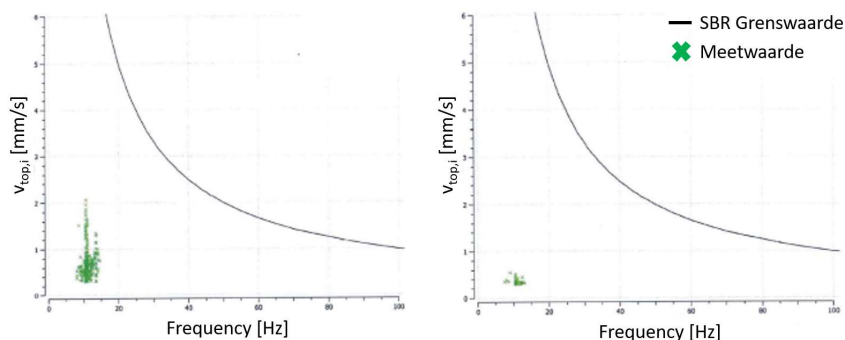
2.3.3 Omgevingshinder

Omgevingshinder wordt bepaald door geluid, trillingen en de duur van de overlast:

- Geluid**
 De omgevingshinder ten gevolge van geluid van de horizontale uitvoeringsmethode is gemeten tijdens uitvoering. Er is gemeten op 10, 15 en 30 meter afstand gedurende 30 seconden, elke meting is drie keer uitgevoerd. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in Figuur 2.8.
- Trillingen**
 De omgevingshinder ten gevolge van trillingen van de horizontale uitvoeringsmethode is gemeten tijdens uitvoering. Er is gemeten op 10 en 20 meter afstand. De resultaten van deze metingen zijn weergegeven in Figuur 2.9. De gemeten waarden bevinden zich ruim beneden de SBR-grenswaarde.
- Duur overlast**
 De hoge productiesnelheid van de machine (400 tot 450 meter per dag) maakt dat de overlast ook van beperkte duur is.



Figuur 2.8. Geluidsmeting VZG-machine



Figuur 2.9. Gemeten trillingen op 10 meter (links) en 20 meter (rechts) afstand. De zwarte doorgetrokken lijn is de SBR-grenswaarde.

2.3.4 Kosten

Wat betreft kosten kan onderscheid worden gemaakt in kosten voorafgaand, tijdens en na realisatie van de dijkversterking, enkele voorbeelden zijn:

- Voorafgaand: grondverwerving
- Tijdens: het leveren en aanbrengen van materialen.
- Na realisatie: beheer en onderhoud.

Een VZG vraagt een relatief gering ruimtebeslag (bijvoorbeeld in vergelijking met een pipingberm) en is vaak inpasbaar in de bestaande beheer- en onderhoudsstrook. Daarmee vraagt een VZG in de meeste gevallen geen aanvullende grondverwerving. Bij maatregelen zoals een pipingberm is dit vaak wel noodzakelijk. Een VZG maakt gebruik van materiaal zoals geotextiel, aanvulklei en aanvulzand. Deze materialen zijn goedkoper dan bijvoorbeeld een stalen heavescherm. In de beheer- en onderhoudsfase zijn de verschillen tussen deze drie versterkingstechnieken verwaarloosbaar.

Een LCC-analyse kan meer gedetailleerde handvatten voor dit onderwerp geven. Handvatten hiervoor zijn onder andere gegeven in "LCC bij ontwerp" (HKV; HWBP; Unie van Waterschappen, 2021).

2.3.5 Toepassingsgebied

Het VZG is goed toepasbaar wanneer er sprake is van een deklaag met een onderzijde op 1 m-mv of lager. Deze ruimte is nodig voor het realiseren van een minimale gronddekking en de realisatie van een afsluitende kleilaag om bovenloopsheid (zie paragraaf 3.3) uit te sluiten. Als deze deklaag niet aanwezig is kan deze worden aangebracht.

De voorgenomen onderzijde van een VZG dient binnen het dieptebereik van het materieel te liggen. Het dieptebereik is afhankelijk van het in te zetten materieel, dieptes tot 10 meter minus maaiveld zijn mogelijk.

2.3.6 Samenhang met andere faalmechanismes

Dijkversterkingstechnieken vervullen soms meerdere functies. Een pipingberm of damwand kan een dubbele functie vervullen, bijvoorbeeld voor zowel stabiliteit als piping. Het is daarom van belang om ontwerp oplossingen in samenhang te beschouwen.

Een VZG richt zich enkel op het faalmechanisme piping en heeft een beperkte meerwaarde voor andere doelen. Zo wordt rondom een VZG vaak gewerkt met een grondaanvulling in de berm tegen voorloopsheid (zie paragraaf 3.3). Deze grondaanvulling kan ook waarde hebben voor andere faalmechanismes (bv. macrostabiliteit, microstabiliteit).

Bij een VZG kan tijdens maatgevend hoogwater enige erosie plaatsvinden tussen het uittredepunt en het VZG. De gemiddelde maaiveld daling als gevolg van deze erosie was bij de IJkdijk 0,01 m. Daarmee is de invloed op andere faalmechanismes verwaarloosbaar.

Aandacht gaat uit naar grondverplaatsingen rondom het VZG. Deze kunnen schade opleveren aan het VZG. Dit speelt met name bij macrostabiliteit. Een klein bezwijkvlak hoeft niet kritisch te zijn voor de dijk an-sich, maar mogelijk wel (negatieve) invloed op het VZG. Deze samenhang dient beheerst te zijn in het ontwerpproces.

Een VZG onderscheidt zichzelf, met name van heaveschermen, doordat het VZG geen invloed heeft op de grondwaterstroming⁴.

2.3.7 Aandachtspunten

Een VZG heeft een aantal aandachtspunten. Deze komen vooral voort vanuit de werking van het VZG en de voorgenomen uitvoeringstechniek met behulp van een kettinggraver. De uitvoeringstechniek is uitgebreider beschreven in hoofdstuk 5:

- **Bodemopbouw**
Het VZG laat grondwater door, maar stopt de groei van het erosiekanaal. Daarbij is de achterliggende aanname dat de hoogteligging van het erosiekanaal (onder cohesieve deklaag) goed te voorspellen is en dat het ontwerp daarop aangepast is. Wanneer een bodemopbouw zeer grillig is, veel kleilaagjes heeft, helemaal geen deklaag heeft, of anderszins onvoorspelbaar is, dan kan het kiezen van de juiste hoogteligging van een VZG moeizaam zijn. In extreme gevallen kan dit ertoe leiden dat de verticale lengte van een VZG te gering is en dat een andere maatregel doelmatiger is.
- **Vervormingen**
Een VZG is flexibel. Daardoor kan het materiaal vervorming opnemen zonder schade. Als na het aanbrengen de vervormingen te groot worden kan er wel een risico op schade ontstaan, denk hierbij aan grote zettingen met horizontale vervorming, of een afschuiving van de taludhelling. Het is echter niet voorstelbaar dat dit onopgemerkt plaatsvindt, bij dergelijke fenomenen zal ook de werking van VZG in het onderzoek meegenomen moeten worden.
- **Materieel**
Een goede toegankelijkheid van de voorgenomen locatie voor het materieel is een vereiste.
- **Kosteneffectiviteit**
VZG wordt per strekkende meter goedkoper als de afstanden langer worden, dit komt omdat de mobilisatie- en demobilisatiekosten over een grotere lengte kunnen worden verdisconteerd. Als vuistregel kan worden gehanteerd dat afstanden groter dan 250 m1 per definitie doelmatig zijn. Als de afstand kleiner dan 250 m1 is, kan het nog steeds een doelmatige oplossing zijn, maar dan is het aan te bevelen om dit specifiek af te stemmen met de beoogde leverancier van het VZG.
- **Grondroerende techniek**
Het huidige materieel maakt gebruik van een kettinggraver of cassette-inbrenger (zie hoofdstuk 5). Dit is een grondroerende techniek. Voor alle grondroerende technieken geldt dat de aan-/afwezigheid van kabels en leidingen een belangrijk aspect is.
- **Obstakels in de bodem**
In het ontwerp moet rekening gehouden worden met objecten in de bodem, zoals puin, keien, beton, betonijzer, die de uitvoering bemoeilijken.
Tijdens de dijkversterking Twentekanalen is de nodige ervaring opgedaan met dit soort obstakels, omdat voor de opbouw van de dijk materiaal gebruikt is met veel obstakels. Gebleken is dat de kettinggraver weinig last heeft van dit objecten omdat deze door de messen 'uit de weg' worden geslagen of mee naar boven getransporteerd. In Figuur 2.10 enkele voorbeelden van objecten die in de uitvoering Twentekanalen (zie ook paragraaf 2.1.4) naar het maaiveld zijn getransporteerd. Wel is hierdoor een enkele keer bij het inbrengen het VZG beschadigd geraakt. Daarom is monitoring in de uitvoeringsfase een vereiste (zie ook par 5.5).
- **Conditionerende onderzoeken.**
In de voorbereiding dient aandacht gegeven te worden aan de uitvoeringswijze in relatie tot verontreinigingen, boringsvrije zones of niet gesprongen explosieven.

Grind en keien in de ondergrond geeft geen directe beperking voor de uitvoeringsmethode met de drainmachine. De messen van de drainmachine slaan de objecten uit de weg of transporteren ze naar boven.

⁴ Gedurende hoogwater ~~is~~ kan een erosiekanaal ontstaan, vergelijkbaar met die bij een groene dijk. Dit erosiekanaal heeft andere geometrie dan bij een groene dijk ([groeit van uittredepunt naar VZG en daarna parallel aan VZG. Door dit -Daarvoorerosiekanaal](#) is er tijdens hoogwater [wel](#) een theoretische verandering van de grondwaterstroming.





Figuur 2.10. Voorbeelden van obstakels die bij de uitvoering Twentekanalen naar boven zijn getransporteerd door de kettinggraver.

3 Betrouwbaarheidsanalyse

Intermezzo: samenhang met veiligheidsraamwerk

Binnen DIV is gewerkt aan het document: “Veiligheidsraamwerk innovatieve pipingmaatregelen” (Deltares, 2022). Deze baseert het veiligheidsraamwerk of betrouwbaarheidsanalyses op zes stappen:

Stap 1: Verhaal van de innovatie

Deze stap heeft als doel om de context te schetsen en omvat een (korte) introductie van het versterkingsproject en de innovatieve pipingmaatregel. In deze OBOR-VZG is dit opgenomen in hoofdstuk 2.

Stap 2 en 3: Systeemeisen en systeembeschrijving

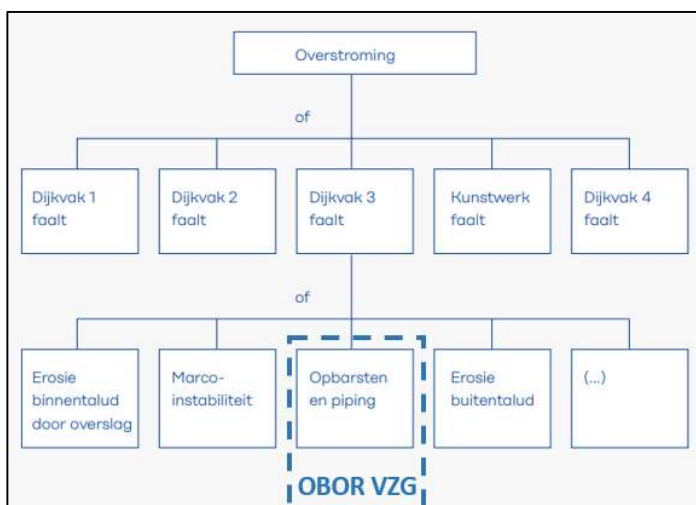
Een waterkering moet voldoen aan de voorgeschreven veiligheidsnorm, uitgedrukt in jaarlijkse overstromingskansen. Voor het veiligheidsraamwerk is het vooral relevant dat de normen zijn vastgesteld voor dijktrajecten en voor individuele dijkvakken/doorsnedes. De systeembeschrijving heeft als doel gestructureerd in kaart te brengen hoe de beschouwde pipingmaatregel functioneert en hoe deze mogelijk kan falen. In OBOR-VZG is dit opgenomen in paragraaf 3.1 tot en met 3.4.

Stap 4, 5 en 6: FMECA¹, Faalpaden en Verificatie

Op basis van stap 3 kunnen alle gebeurtenissen (van gewenst en ongewenst gedrag) van de verschillende componenten worden geïdentificeerd. Hier kan vervolgens in een Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA) mee om worden gegaan. Als er niet op basis van eenvoudige analyses of beheersmaatregelen kan worden onderbouwd dat een gebeurtenis een voldoende kleine kans heeft, kan dit met een (probabilistische) faalpadenaanpak worden gedaan. Tenslotte wordt samengevat hoe het systeem aan de eisen voldoet. Er wordt hierbij een overzicht van bedreigingen en bijbehorende maatregelen getoond. In OBOR-VZG is dit opgenomen in paragraaf 3.5 en 3.6. Deze gaan in op diverse maatregelen, deze zijn verder uitgewerkt in de hoofdstukken 4 en 5.

3.1 Faalboom waterkering

Een waterkering beschermt het achterliggende land tegen een overstroming. De waterkering kan op verschillende locaties falen als gevolg van diverse verschillende faalmechanismen, zie Figuur 3.1. Deze OBOR beschrijft een versterkingsmaatregel tegen het faalmechanisme piping.

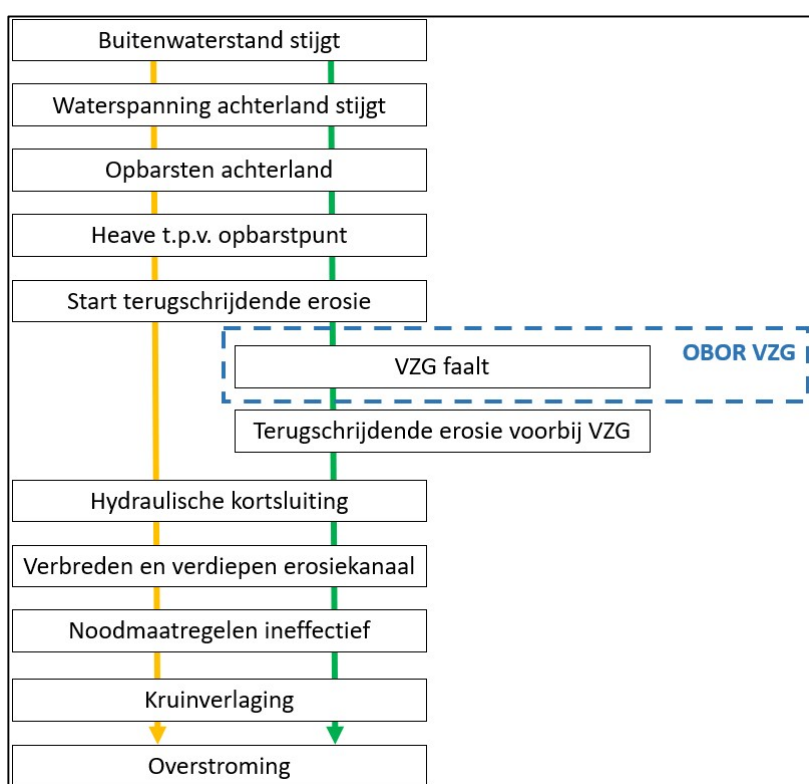


Figuur 3.1. Faalboom waterkering naar Grondslagen voor de hoogwaterbescherming (ENW, 2017).

3.2 Faalpad waterkering met VZG

Het faalpad piping van de waterkering met en zonder VZG is weergegeven in Figuur 3.2. De verschillende stappen die achtereenvolgens optreden alvorens falen van de waterkering optreedt, zijn weergegeven voor een waterkering zonder VZG (in oranje) en voor een waterkering met VZG (in groen). Het faalpad sluit aan bij de visuele weergave in paragraaf 2.2. Het faalpad bij een waterkering met VZG is tot aan de start van de groei van het erosiekanaal gelijk aan een waterkering zonder VZG. Het VZG zorgt ervoor dat het erosiekanaal niet verder groeit bovenstrooms van het VZG. Als het VZG faalt gedraagt de waterkering zich verder zoals een waterkering zonder VZG.

Deze OBOR gaat specifiek in op het onderdeel: *VZG Faalt* (of, het voorkomen daarvan). Voor de rest van het faalpad, of het bepalen van de sterkte van de waterkering bij gefaald VZG gelden de gangbare rekeninstrumenten beschreven in het WBI / OI / BOI.



Figuur 3.2. Faalpad waterkering met en zonder VZG.

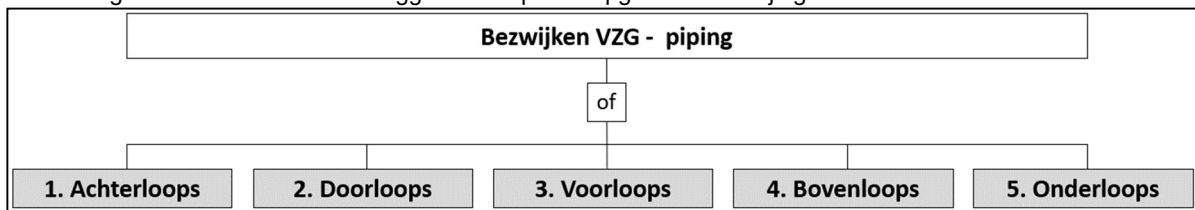
3.3 Faalboom VZG

Voor het falen van een VZG worden vijf faaloorzaken onderscheiden, zie Figuur 3.3 en Figuur 3.4:

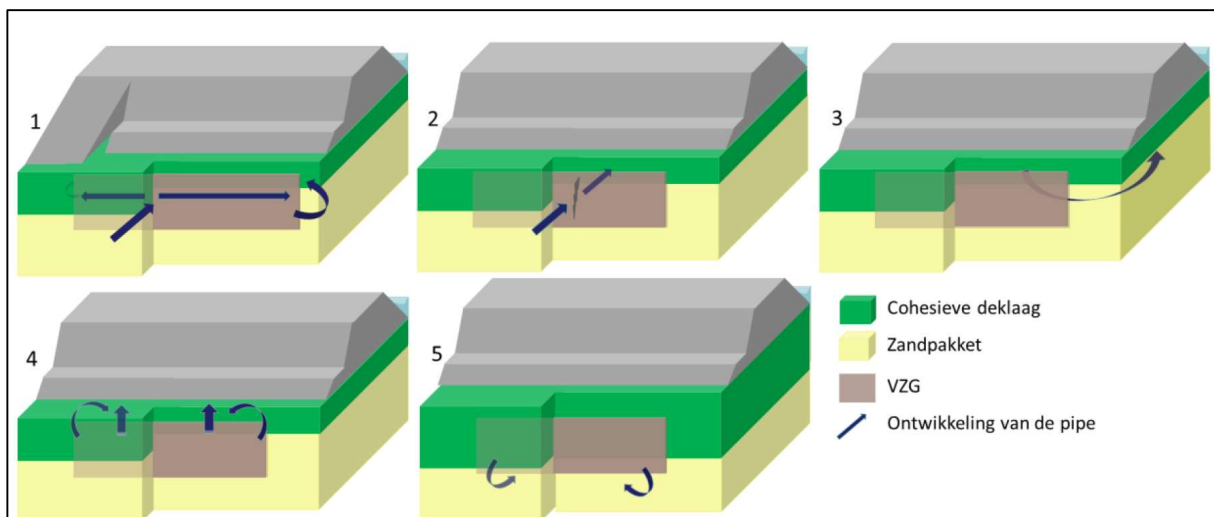
1. Bij **achterloopsheid** kan een erosiekanaal zich ontwikkelen in de lengterichting van de waterkering tot aan het uiteinde van het geotextiel. Daardoor kan een erosiekanaal achter het geotextiel langs ontwikkelen. Er dient rekening gehouden te worden met aansluitingen op andere objecten/maatregelen. Bij een VZG is dit analoog aan achterloopsheid bij een heavescherm. Een verschil is dat een VZG doorlatend is.
2. Bij **doorloopsheid** kan een erosiekanaal zich ontwikkelen door het geotextiel heen. Dit geeft doorslag of kortsluiting.

3. Bij **voorloopseheid** ontstaat een erosiekanaal aan de verkeerde (bovenstroomse) kant van het geotextiel doordat er bijvoorbeeld opbarsten plaatsvindt voor het VZG. Het VZG heeft in dit geval geen positieve bijdrage aan de waterveiligheid.
4. Bij **bovenloopseheid** ontstaat een erosiekanaal boven het geotextiel in de verankeringszone. Risico's op dit vlak kunnen uitgesloten worden door in het ontwerp expliciet rekening te houden met bovenloopseheid. Dit bestaat uit het zorgen voor een goede verankering van een VZG met de omliggende deklaag.
5. Bij **onderloopseheid** ontwikkelt een erosiekanaal zich onder het geotextiel door. Dit is het primaire faalpad. Het bestaat uit twee delen. In de eerste plaats dat er onder het VZG een dermate hevige verticale grondwaterstroming optreedt, dat dit leidt tot heave. Merk op dat bij heave ook tweede-orde-effecten optreden. Dit is verweking van de bodem en daardoor vervorming van de waterkering, zoals afschuiven van het binnentalud. Daarnaast verweking van de bodem en daardoor vervorming van het VZG, deze kan dan dubbelvouwen.

De volledige foutenboom met onderliggende knopen is opgenomen in bijlage 1.



Figuur 3.3. Faalboom VZG.



Figuur 3.4. Visuele weergave faalmechanismen VZG

Aan de vijf faaloorzaken zoals hierboven gepresenteerd liggen drie categorieën van bedreigingen ten grondslag:

1. **Ontwerp:** onder deze categorie vallen de eigenschappen van de oplossing zoals de verticale lengte, het type en sterkte van het geotextiel.

En

2. **Uitvoering:** onder deze categorie vallen de gebeurtenissen die tijdens uitvoering kunnen leiden tot een geotextiel wat in de grond niet voldoet aan de eisen die gesteld zijn in het ontwerp (1). Hierbij kan gedacht worden aan een gescheurd geotextiel tijdens het inbrengen.
3. **Beheer:** onder deze categorie vallen de gebeurtenissen die tijdens de gebruiksfase van het geotextiel leiden tot beschadigingen of disfunctioneren van de oplossing uit het ontwerp (1). Hierbij kan gedacht worden aan een beschadigd geotextiel door graverij door dieren.

In de bovenstaande categorisering is onderscheid aangebracht tussen het ontwerp en aan de ene kant en aan de andere kant de uitvoering en het beheer. In de gangbare ontwerp-praktijk zijn mogelijke disfunctionaliteiten ten gevolge van uitvoeringsfouten en/of aantasting tijdens de gebruiksfase geen onderdeel van de betrouwbaarheidsanalyse. Voor het VZG is gekozen deze aspecten wel te beschouwen omdat een geotextiel in

de grond kwetsbaarder en/of lastiger te inspecteren is dan andere type oplossingen zoals een pipingberm. In de omgang met de verschillende bedreigingen wordt een verschillende aanpak gehanteerd, dit is beschreven in paragraaf 3.5

Per categorie zijn de bedreigingen conform Tabel 3.1 geïdentificeerd, deze bedreigingen zijn in het vervolg van deze OBOR beschouwd. De bedreigingen zijn opgenomen in de volledige foutenboom VZG in bijlage 1.

Tabel 3.1. Bedreigingen per categorie

Ontwerp (categorie 1)	Uitvoering (categorie 2)	Beheer (categorie 3)
O1. Lengte van het geotextiel is in lengterichting van de waterkering te kort.	U1. Aansluiting geotextiel op overgangsconstructie biedt onvoldoende weerstand	B1. Menselijke graverij leidt tot beschadiging geotextiel
O2. Aansluiting op bestaande VZG, andere constructies en bermen is onvoldoende	U2. Schade aan geotextiel tijdens uitvoering	B2. Dierlijke graverij leidt tot beschadiging geotextiel
O3. Veroudering/ levensduur geotextiel.	U3. Lokaal aanwezig zand door geotextiel getransporteerd.	B3. Beschadiging geotextiel door wortelgroei
O4. Schade door voorspelbaar grondgebruik.	U4. Geotextiel niet goed ingeklemd in aanvulklei	B4. (Horizontale) vervormingen in de bodem. Zoals bij afschuivingen van het binnentalud.
O5. Maaswijdte geotextiel te groot	U5. Versmering geotextiel door klei tijdens uitvoering.	B5. Verstopping geotextiel
O6. Verankering geotextiel op deklaag onvoldoende		
O7. Geotextiel onvoldoende diep in zand (heave)		
O8. Uittredepunt (bovenstrooms) tussen geotextiel en waterkering		

3.4 Betrouwbaarheidseisen

3.4.1 Top-eis

De VZG is onderdeel van de waterkering waarvoor een wettelijk vastgelegde maximale overstromingskans is gedefinieerd. Locatiespecifieke keuzes leiden tot een vertaling tussen deze overstromingskans en een minimaal benodigde betrouwbaarheid van de pipingoplossing. In de praktijk kan dit bijvoorbeeld gedaan worden door de overstromingskans te vertalen naar een benodigde betrouwbaarheid voor piping met behulp van een faalkansbudget (vaak 24%). De betrouwbaarheid voor het faalmechanisme piping wordt vertaald naar een benodigde betrouwbaarheid per doorsnede door het lengte-effect in rekening te brengen. De werkwijze is beschreven in het WBI2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017) (Rijkswaterstaat, 2021a) en het OI2014v4 (Rijkswaterstaat, 2017a).

3.4.2 Eis per faaloorzaken

Voor de betrouwbaarheidseisen van de vijf verschillende faaloorzaken voor het VZG kan vervolgens (bovengrensbenadering) uitgegaan worden van onafhankelijke faaloorzaken (aannee gelijk aan faalkansbegroting OI2014v4). Dit betekent dat de kansen op de vijf verschillende faaloorzaken dus bij elkaar opgeteld kunnen worden. Voor doorloopsheid, achterloopsheid, onderloopsheid en bovenloopsheid worden in deze handleiding robuuste rekenregels gegeven waarmee in het ontwerp voldoende rekening gehouden wordt

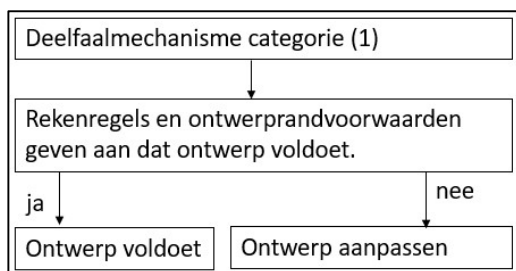


met de faalkans, waardoor de faalkans van deze faalmechanismen verwaarloosbaar kan worden gesteld. De faalkans van voorloopsheid wordt bepaald aan de hand van een (semi-)probabilistische rekenregel. Hierbij kan voor voorloopsheid gerekend worden met de faalkanseis gelijk aan de top-eis. Deze is beschreven in de voorgaande paragraaf (paragraaf 3.4.1).

3.5 Omgang bedreigingen

3.5.1 Bedreigingen ontwerp (categorie 1)

Voor de bedreigingen in de categorie **(1) ontwerp** worden in hoofdstuk 4 rekenregels en ontwerprandvoorwaarden gegeven. Uit deze analyses volgen de ontwerprandvoorwaarden zoals de lengte van het geotextiel en de eisen aan het geotextiel. Het proces is gevisualiseerd in Figuur 3.5.



Figuur 3.5. Omgang bedreigingen ontwerp.

3.5.2 Bedreigingen uitvoering en beheer (categorie 2 en 3)

Voor de bedreigingen in de categorie **(2) uitvoering** en **(3) beheer** geldt een andere aanpak (zie Figuur 3.6):

- Allereerst wordt geanalyseerd of de faaloorzaak kan worden uitgesloten op basis van fenomenologische gronden;
- Als dit niet het geval is wordt gezocht naar een afdoende mitigerende maatregel en/of monitoring. Deze OBOR geeft in de hoofdstukken 4, 5 en 6 handvatten om een locatiespecifieke afweging te maken wat afdoende maatregelen en/of monitoring inhoudt voor het ontwerp, uitvoering en beheer.
- Als wordt voldaan aan één van bovenstaande criteria is het risico verwaarloosbaar;
- Als niet wordt voldaan aan één van bovenstaande criteria is het risico niet verwaarloosbaar en dient het risico expliciet meegenomen te worden in de faalpaden.

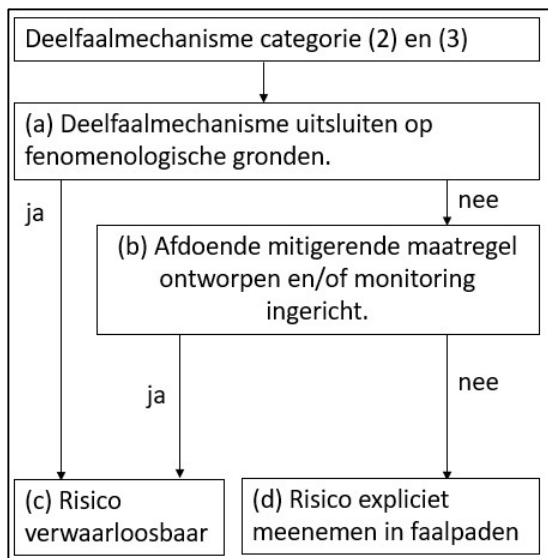
Het expliciet meenemen van het risico kan op basis van onderstaande formule waarin gewerkt wordt met twee scenario's (1) een intact VZG en (2) een niet functionerend VZG:

$$P(F_n) = (1 - P(FM_n)) \cdot P(F|VZG \text{ intact}) + P(FM_n) \cdot P(F|VZG \text{ gefaald})$$

Waarin:

$P(F_n)$	Faalkans piping gegeven faaloorzaak n	[-]
$P(FM_n)$	Kans op faaloorzaak n	[-]
$P(F VZG \text{ intact})$	Faalkans piping gegeven intact VZG	[-]
$P(F VZG \text{ gefaald})$	Faalkans piping gegeven gefaald VZG ⁵	[-]

⁵ Zoals blijkt uit de gebeurtenissenboom is de faalkans voor piping met gefaald VZG gelijk aan de faalkans van de waterkering zonder VZG. Reguliere berekeningen (zoals een Sellmeijer-analyse) liggen daarom ten grondslag aan het bepalen van deze faalkans.



Figuur 3.6. Omgang bedreigingen uitvoering en beheer.

Intermezzo: voorbeeld omgang met categorie 2 en 3 bedreigingen

Een voorbeeld van hoe omgegaan moet worden met categorie 2 en 3 bedreigingen is gegeven in onderstaande tabel. Voor een specifieke situatie is het risico op beschadiging van het geotextiel ten gevolge van begroeiing (wortelgroei door VZG) beschouwd.



Het mogelijk gevolg van een boomwortel die door het geotextiel heen groeit, is dat er een gat in het doek ontstaat ter hoogte van de boomwortel. Daardoor functioneert het geotextiel niet meer op doorloopsheid ter hoogte van deze boomwortel.

Boomwortels groeien in de regel niet beneden de grondwaterstand. Afhankelijk van de diepte van het VZG kan interactie tussen de boomwortel en het VZG mogelijk op voorhand worden uitgesloten. Mogelijk kan de invloed niet worden uitgesloten, maar de interactie met het faalmechanisme doorloopsheid vanwege de hoogteligging wel. In het bijzondere geval dat de invloed van de boomwortel op het functioneren van het VZG niet geheel uit te sluiten is, is een combinatie van mitigatie en of monitoring de oplossing.

Als mitigatiemaatregel kan gekozen worden om in het ontwerp een zone van vijf* meter aan weerszijden van het VZG vrijhouden van begroeiing (bomen en struiken). Bovendien wordt met de jaarlijkse inspectie gecontroleerd of gedurende de levensduur van het VZG deze zone vrij blijft van begroeiing. Op basis van deze combinatie van maatregelen wordt het risico op beschadiging door begroeiing verwaarloosbaar geacht. Bomen en struiken ontwikkelen niet binnen een jaar een wortelstelsel tot de diepte van het VZG.

Bereiding	Potentieel effect	Faaloorzaak uitsluiten op fenomenologische gronden	Mitigatiemaatregel	Monitoring	Bedreiging relevant?	Restrisico
Beschadiging geotextiel door begroeiing (bomen en struiken)	Gat in geotextiel, VZG functioneert niet meer op doorloopsheid	In specifieke gevallen is dit mogelijk, voor dit voorbeeld uitgaan van "nee".	Vijf meter* aan weerszijden van geotextiel vrijhouden van begroeiing.	Jaarlijkse inspectie van de waterkering	Nee: begroeiing groeit niet binnen een jaar door geotextiel.	Verwaarloosbaar

* Let op 5 meter is een voor het voorbeeld arbitrair gekozen maat en dient locatiespecifiek bepaald te worden.

3.6 Koppeling tussen betrouwbaarheidsanalyse en ontwerp

Bij een goed ontworpen VZG dienen tenminste de bedreigingen uit paragraaf 3.3 beschouwd te zijn (ontwerp, uitvoering en beheer). In dit hoofdstuk is beschreven hoe met de verschillende bedreigingen dient te worden omgegaan. De specifieke uitwerking is beschreven in deze OBOR. In deze paragraaf is per geïdentificeerde bedreiging uit paragraaf 3.3 aangegeven in welk deel van deze OBOR dit behandeld wordt.

3.6.1 Bedreigingen ontwerp (categorie 1)

De bedreigingen in de categorie ontwerp zijn in Tabel 3.2 beschreven met een verwijzing naar het deel van de OBOR waar dit is beschreven en uitgewerkt. Voor elk van deze bedreigingen dient ontworpen te worden conform het stroomschema uit paragraaf 3.5.1.

Tabel 3.2. Bedreigingen ontwerp

Bedreigingen ontwerp (categorie 1)	Gevolg	Ontwerpcriterium	Uitwerking in paragraaf
O1. Lengte van het geotextiel in lengterichting kering te kort	Achterloopsheid	Ontwerpen op achterloopsheid door VZG ver genoeg door te zetten	4.3.2
O2. Aansluiting op bestaande VZG, andere constructies en bermen onvoldoende	Achterloopsheid	Ontwerpen op achterloopsheid, of door een goede aansluiting te ontwerpen	4.3.2 4.5.2
O3. Veroudering / levensduur geotextiel	Doorloopsheid	Keuze sterkte / levensduur geotextiel	4.4.3
O4. Schade door voorspelbaar grondgebruik.	Bovenloopsheid	Minimale gronddekking dimensioneren.	4.4.2
O5. Maaswijdte geotextiel te groot	Doorloopsheid	Keuze maaswijdte geotextiel	4.4.3
O6. Verankering geotextiel op deklaag onvoldoende	Bovenloopsheid	Verankering deklaag over voldoende lengte	4.4.5
O7. Geotextiel onvoldoende diep in zand (heave)	Onderloopsheid	Voldoende lengte geotextiel in zandlaag dimensioneren.	4.3.1
O8. Uittredepunt (bovenstreams) tussen geotextiel en waterkering	Voorloopsheid	Opbarstbeschouwing voor gebied tussen VZG en waterkering	4.3.3

3.6.2 Bedreigingen uitvoering (categorie 2)

De bedreigingen in de categorie uitvoering zijn in Tabel 3.3 beschreven met een verwijzing naar het deel van de OBOR waar dit is beschreven en uitgewerkt. Voor elk van deze bedreigingen dient ontworpen te worden conform het stroomschema uit paragraaf 3.5.2.

Elk type uitvoeringswijze kan specifieke risico's met zich meebrengen. In deze OBOR ligt de nadruk op een bewezen werkbare techniek: de kettinggraver, zie paragraaf 5.1.2. Voor andere uitvoeringswijze dient de afweging, zoals onder andere gepresenteerd in deze paragraaf, nader uitgewerkt worden.

Tabel 3.3. Bedreigingen uitvoering

Bedreigingen uitvoering (categorie 2)	Gevolg	Mogelijkheden in analyse	Uitwerking in paragraaf
U1. Aansluiting geotextiel op overgangsconstructie biedt onvoldoende weerstand	Achterloopsheid	Uitsluiten: - Mitigeren: voldoende robuuste aansluiting ontwerpen Monitoren: controle uitgevoerd werk	4.5.2
U2. Schade aan geotextiel tijdens uitvoering	Doorloopsheid	Uitsluiten: - Mitigeren: voldoende sterk geotextiel kiezen, uitvoering zo inrichten dat kans op schade geminimaliseerd wordt. Monitoren: geotextiel voor en tijdens aanbrengen controleren op schades	4.4.3
U3. Zand in sleuf onvoldoende verdicht. Lokaal aanwezig zand door geotextiel getransporteerd.	Doorloopsheid	Uitsluiten: - Mitigeren: geotextiel afstemmen op zowel aanvul- als achtergrondzand Monitoren: -	4.4.4
U4. Geotextiel niet goed verankerd in aanvulklei	Bovenloopsheid	Uitsluiten: - Mitigeren: voldoende robuuste verankeringslengte realiseren Monitoren: controle uitgevoerd werk	4.4.5
U5. Versmering geotextiel door klei tijdens uitvoering	Onderloopsheid	Uitsluiten: Versmering is niet relevant als gewerkt wordt met een kettinggraver Mitigeren: - Monitoren: -	5.1

3.6.3 Faalorzaken beheer (categorie 3)

De bedreigingen in de categorie beheer zijn in Tabel 3.4 beschreven met een verwijzing naar het deel van de OBOR waar dit is beschreven en uitgewerkt. Voor elk van deze bedreigingen dient ontworpen te worden conform het stroomschema uit paragraaf 3.5.2.

Tabel 3.4. Bedreigingen beheer

Bedreigingen beheer (categorie 3)	Gevolg	Mogelijkheden in analyse	Uitwerking in paragraaf
B1. Menselijke graverij leidt tot beschadiging geotextiel	Doorloopsheid	Uitsluiten: - Mitigeren: zone rondom VZG opnemen in kernzone, VZG ontwerpen onder binnenberm, as-built-tekeningen Monitoren: (jaarlijkse) inspectie, hoogwaterinspectie	6.1
B2. Dierlijke graverij leidt tot beschadiging geotextiel	Doorloopsheid	Uitsluiten: analyse (gemiddelde) grondwaterstand i.r.t. specifieke fauna Mitigeren: beverwerend gaas, hoogwatervluchtplaatsen dieren. Monitoren: (jaarlijkse) inspectie, hoogwaterinspectie	4.6.4

B3. Beschadiging geotextiel door wortelgroei	Doorloopsheid	Uitsluiten: analyse (gemiddelde) grondwaterstand i.r.t. flora Mitigeren: zone vrijhouden van begroeiing, worteldoek Monitoren: (jaarlijkse) inspectie, hoogwaterinspectie	4.6.5
B4. (Horizontale) vervormingen in de bodem. Zoals afschuivingen van het binnentalud.	Doorloopsheid	Uitsluiten: - Mitigeren: - Monitoren: (jaarlijkse) inspectie, hoogwaterinspectie	6.1
B5. Verstopping geotextiel	Onderloopsheid	Uitsluiten 1: onderzoeken tonen aan dat voor de meeste gevallen dit niet mogelijk is. Uitsluiten 2: er kan zo robuust ontworpen worden dat ook een verstopt geotextiel voldoet. Mitigeren: - Monitoren: peilbuismetingen	4.4.3



4 Ontwerp

4.1 Algemeen

Het ontwerpen van een Verticaal Zanddicht Geotextiel is een cyclisch proces, waarin stapsgewijs wordt gekomen tot een ontwerp dat voldoet aan de veiligheidseisen en maakbaar is. Gedurende het ontwerpproces worden een aantal stappen doorlopen, welke zijn weergegeven in Tabel 4.1. Binnen elke werkstap vinden iteraties plaats. Het ontwerp is een vertaling van het Programma van Eisen. Na de effectbeoordeling wordt bepaald of het behaalde resultaat nog geoptimaliseerd kan worden. Als dit het geval is, wordt het ontwerpproces opnieuw doorlopen.

Tabel 4.1: Stappen binnen het ontwerpproces.

Werkstappen	Activiteiten	Fase		
1. Probleemanalyse	<ul style="list-style-type: none"> Bepalen veiligheidsopgave (pipingopgave) Uitvoeren veldwerk Bepalen of VZG een (deel)oplossing is Bepalen of een VZG maakbaar is 	Verkenning	Plan	Realisatie
2. Programma van Eisen	<ul style="list-style-type: none"> Opstellen PvE voor oplossing inclusief VZG 			
3. Voorontwerp (VO)	<ul style="list-style-type: none"> Bepalen hoofdafmetingen ontwerp oplossing (ligging van het VZG in de dwars- en de lengterichting van de dijk) 	Verkenning	Plan	Realisatie
4. Definitief ontwerp (DO)	<ul style="list-style-type: none"> Uitvoeren aanvullend veldwerk Bepalen detailafmetingen ontwerp oplossing Detaileren aansluitingen Ontwerp eventuele maatwerklocaties i.v.m. knelpunten Opstellen beheer instructie VZG 			
5. Uitvoeringsontwerp (UO)	<ul style="list-style-type: none"> Bepalen eventuele tijdelijke maatregelen uitvoering Benodigde vergunningen voor de bouw fase (bijv. werken in grondwaterbeschermingsgebied) 	Verkenning	Plan	Realisatie
6. As-built	<ul style="list-style-type: none"> Uitvoeren verificaties Opstellen As-built tekeningen Opstellen opleverdossier 			

De zes werkstappen worden in de volgende paragrafen nader toegelicht.

4.1.1 Probleemanalyse

De eerste stap van het ontwerpproces is gericht op het definiëren van het probleem, hierin is het van belang vast te stellen wat de (water)veiligheidsopgave is voor alle faalmechanismen. Het VZG is primair een oplossing om de weerstand tegen het faalmechanisme piping te verhogen. Om interacties tussen ontwerp oplossingen en een doelmatige⁶ afweging te maken is het van belang een integraal ontwerp te maken.

In de probleemanalyse wordt een inventarisatie gemaakt van het aanwezige grondonderzoek. Bij leemtes wordt aanvullend veldwerk ingepland en uitgevoerd. Handvaten hiervoor zijn gegeven in paragraaf 4.2.

In de probleemanalyse is het wenselijk om een eerste inventarisatie te maken van de haalbaarheid. Haalbaarheid bestaat uit de volgende zaken:

⁶ Voorbeeld: een VZG is een goedkopere maatregel ten opzichte van een stalen damwand om een pipingtekort op te lossen, dit is niet noodzakelijkerwijs het geval als ook een stabiliteitstekort aanwezig is.



- Grootte van de pipingopgave.
Een verkennende analyse geeft een beeld van of een VZG de pipingopgave kan ondervangen. Deze is opgenomen in paragraaf 4.3 en met name in paragraaf 4.3.1.
- Maakbaarheid.
Aandacht gaat uit naar de locatie waar het VZG geplaatst dient te worden. De beschikbare ruimte daar en de vereiste aanlegdiepte. Deze zaken variëren per uitvoeringswijze. Handvaten zijn gegeven in hoofdstuk 5.
- Schetsontwerp.
Het schetsontwerp omvat de locatie van het VZG ten opzichte van de dijk. Handvaten zijn gegeven in paragraaf 4.4.1 en 4.4.2. Deze zaken hangen samen met onder andere de bodemopbouw, uitvoeringstechniek en programma van eisen.

In de probleemanalyse worden ook omgevingsaspecten meegenomen die relevant zijn. Te denken valt aan de volgende zaken:

- Aanwezige objecten, zoals:
Op- en afritten, bebouwing, bomen, kabels en leidingen.
- Zaken gerelateerd aan vergunningen, zoals:
Eventuele verontreinigingen, archeologische waarden, Niet Gesprongen Explosieven (NGE) en grondwaterbeschermingsgebieden.

4.1.2 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, eisen 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 het VZG.

Onderwerpen die een VZG raken zijn onder andere de volgende zaken:

- Vergunbaarheid.
Rondom dijken komen diverse gebieden voor die speciale aandacht vragen, zoals grondwaterbeschermingsgebieden, boringvrije zones, verontreinigingen of natuurgebieden. Diverse vergunningverleners hebben beleid voor dit soort gebieden dat raakt aan graafwerkzaamheden / grondverzet. Een eerste toets betreft of een VZG vergunbaar is/ onder welke voorwaarden deze vergunbaar is. Deze analyse is niet specifiek voor het VZG maar zal voor alle ontwerp oplossingen gelden.
- Beschikbare werkruimte.
Als er voldoende werkruimte aanwezig is, dan is realisatie met een kettinggraver goed inpasbaar. Hierbij zullen situaties ingepast moeten worden met objecten, zoals op- en afritten, bebouwing, bomen, kabels en leidingen.
- Levensduur
Vaak worden bij levensduur expliciete eisen gesteld, zoals een levensduur van 50 of 100 jaar. Dit heeft invloed op de keuze van het materiaal.
- Eisen vanuit beheer.
Omgang met dierlijke graverij en in welke mate dit een rol speelt in het ontwerpproces is hierbij een belangrijk aspect.
- Eisen vanuit medegrondgebruik.
Bepaald grondgebruik, zoals akkerbouw waarbij geploegd wordt of de aanleg van toekomstige kabels en leidingen, doorwoelen de bodem. Een VZG dient voldoende diep ingepast te worden dat dergelijk medegrondgebruik geen invloed heeft.

Naast bovenstaande kan mede grondgebruik eisen geven voor de Bruikbaarheid Grens Toestand (BGT). Dit betreft vooral de zone tussen het VZG en het uittredpunt (i.v.m. mogelijk uitspoelend zand en daaropvolgende mogelijke maaiveld daling in dit gebied).



UGT / BGT: maaiveldddaling

Een belangrijke aanvulling op bovenstaande zaken betreft de acceptatie van uitspoelen van zand en maaiveldddaling. Een VZG voorkomt het optreden van zandmeevoerende wellen niet. Er kunnen erosiekanalen optreden tussen het uittredepunt en het VZG. In deze tussengelegen zone kunnen door deze erosiekanalen zanddeeltjes uitgespoeld worden. Bij langdurige belasting is het aannemelijk dat hierdoor maaiveldddaling ontstaat. Bij het ontwerp van een VZG wordt ontworpen op de uiterste grenstoestand (UGT), daarbij dient de veiligheid van de dijk geborgd te zijn. Daarnaast dient men rekening te houden met de bruikbaarheidgrenstoestand (BGT), zie paragraaf 4.4.6. Daarbij dient de maaiveldddaling acceptabel te zijn voor het aanwezige grondgebruik.

4.1.3 Voorontwerp

Het voorontwerp heeft als doel het bepalen van de globale ontwerpdimensies en een eerste vaststelling of de ontwerpoplossing maakbaar is. Op basis van deze analyse kunnen varianten worden afgewogen in het ontwerp.

In de eerste plaats worden de voornaamste gegevens verzameld, zoals het aanwezige grondonderzoek, opbouw van de dijk. Vervolgens wordt een globaal ontwerp gemaakt: bepalen van de ligging (horizontale positie) en diepte. In deze ontwerpsslag dient rekening te worden gehouden met de ontwerpoplossingen t.b.v. andere faalmechanismen, zoals stabiliteit en bekleding.

Voor de maakbaarheid van de ontwerpoplossing dient rekening te worden gehouden met de benodigde werkruimte en boogstraal. Dit zijn limitaties die worden opgelegd door de uitvoeringsmethode.

4.1.4 Definitief ontwerp

In het definitief ontwerp worden detailafmetingen van het VZG bepaald. Ook wordt het grondonderzoek geïntensiveerd om lokale variaties van de deklaag te karteren. Risicovolle aspecten zijn plotselinge overgangen, in de ondergrond zoals aanwezigheid van geulafzettingen. Daarnaast dient in het ontwerp rekening gehouden te worden met een heterogene bodemopbouw indien die aanwezig is. Indien de bodem niet een eenduidige opbouw heeft, zoals een deklaag met zandinsluitingen, dient een robuust ontwerp gemaakt te worden dat met deze variaties om kan gaan.

Tenslotte dient een locatiespecifieke inpassing gerealiseerd te worden op maatwerklocaties, zoals obstakels of sloten waar de standaardoplossing niet past. Daarnaast dient aandacht te zijn voor bermen en afritten, daarvoor zijn handvatten gegeven in paragraaf 4.5.1. Ook worden de aansluitconstructies uitgewerkt, daarvoor zijn handvatten gegeven in paragraaf 4.5.2.

4.1.5 Uitvoeringsontwerp

Het uitvoeringsontwerp is locatiespecifiek en omvat restpunten van het Definitief Ontwerp en uitvoeringsdetails.

4.1.6 As-Built

Na realisatie moet worden vastgelegd hoe het systeem daadwerkelijk is aangelegd. Dit omvat de toegepaste verificaties, as-built tekeningen en het opleverdossier. Afwijkingen ten aanzien van het ontwerp worden in het opleverdossier vastgelegd.



4.2 (Grond)onderzoek

In deze paragraaf zijn de conditionerende onderzoeken specifiek voor het ontwerp van een VZG beschreven. Allereerst zijn alle benodigde gegevens beschreven, vervolgens wordt per parameter toegelicht welke gegevens per projectfase van belang zijn en hoe die kunnen worden bepaald.

4.2.1 Benodigde gegevens

Voor de benodigde gegevens is onderscheid gemaakt in grondopbouw, grondparameters en overige gegevens.

Grondopbouw

Voor het dimensioneren van een VZG is het van belang om de grondopbouw te kennen, hierin worden vier grondlagen onderscheiden, zie Tabel 4.2 en Figuur 4.1.

Tabel 4.2. Definitie grondlagen relevant voor VZG

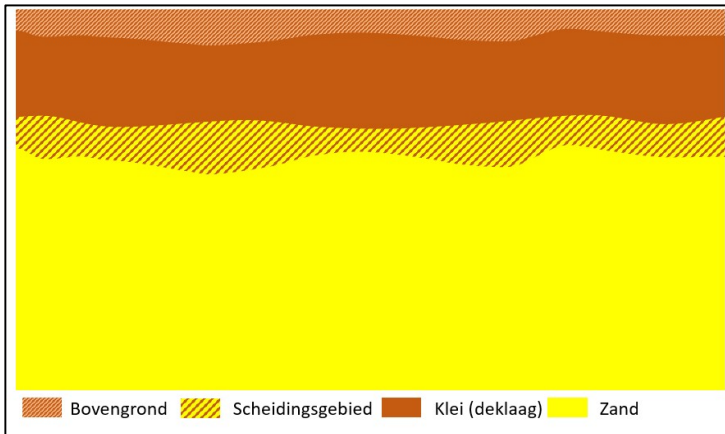
Grondlaag	Beschrijving	Functie in VZG-ontwerp	Definitie
Bovengrond	Dit is de toplaag aan maaiveld en kan zowel uit cohesieve als niet-cohesieve grond bestaan.	De bovengrond is de gronddekking en daarmee een veiligheidsmarge die zorgt voor bescherming van het VZG.	Alle mogelijke grondlagen boven de deklaag.
Deklaag	De cohesieve laag die bij het faalmechanisme piping opbarst en waaronder een erosiekanaal zal groeien.	In deze cohesieve laag wordt het VZG verankerd aan de bovenzijde.	De cohesieve kleilaag zoals gedefinieerd in reguliere pipinganalyses.
Scheidingsgebied	Dit is een zone waarvan het twijfelachtig is of het tot de deklaag of zandlaag gerekend moet worden.	Voor het VZG is een minimale verankering in zowel deklaag als zandlaag nodig (zie paragraaf 4.4.2). Het scheidingsgebied is daarin van belang omdat de dikte van het scheidingsgebied zorgt voor extra benodigde geotextiellengte (deze zone wordt niet gerekend bij de verankering klei- en/of zandlaag).	Hieronder is een opsomming gegeven van dergelijke lagen: <ul style="list-style-type: none"> Dunne kleilagen / kleilenzen. Gelaagde zandlagen. Zand met meer dan 5% lutum, maar minder dan 12% lutum⁷. <i>Dit betreft zandsoorten zoals kleilig zand (kzx) en zeer zandige klei (Kz3) in NEN5104⁸ classificatie, of zeer lichte zavel in de StiBoKa classificatie.</i> Zand met meer dan 17,5% silt, maar minder dan 50% silt⁹. <i>Dit betreft zandsoorten zoals zand sterk siltig (Zs3) en zand uiterst siltig (Zs4) in NEN5104 classificatie, of sterk lemig zand en zeer sterk lemig zand in de StiBoKa classificatie.</i>
Zandlaag	Dit is de pipinggevoelige zandlaag	In deze zandlaag wordt het VZG verankerd aan de onderzijde.	Zandlagen met minder dan 5% lutum en met minder dan 17,5% silt.

⁷ Nederlandse pipinganalyses gaan uit van of een laag pipinggevoelig is, of niet. De tussengelegen categorie heeft weinig aandacht. Deze aandacht is er wel in internationale literatuur, zoals (USBR, 2019). Hierin is als grenswaarde aangehouden "Probability of Holding a Roof" groter dan 90%, dan gelden de lagen als cohesief en als deklaag. Wanneer de "Probability of Holding a Roof" kleiner is dan 10%, dan gelden de lagen als niet-cohesief en als pipinggevoelige zandlaag. De tussengelegen categorie betreft het scheidingsgebied.

⁸ Let op, deze norm is vervallen.

⁹ Idem als bovenstaande. Merk op dat de invloed van silt op het faalmechanisme piping nog weinig onderzocht is. Grote proeven voor piping bij een groene kering zijn uitgevoerd op zand met minder dan 2% silt, dit geldt voor zowel de proeven in de Deltagoot (Silvis, 1991) als de IJkdijk (Deltares, 2009a). In (Deltares, 2019) zijn slechts twee kleine schaalproeven uitgevoerd op grondmonsters met meer dan 17,5% silt. Daarvan is de helft (één proef) bezweken.



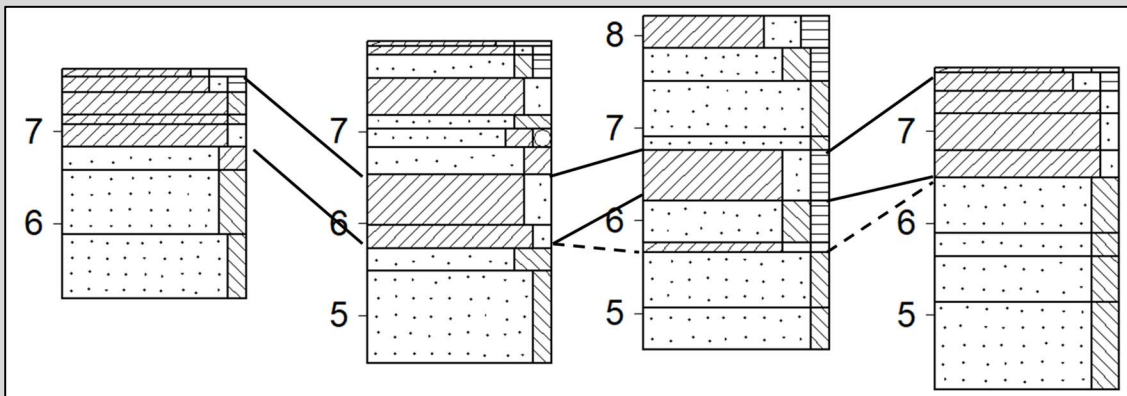


Figuur 4.1. Relevante grondlagen voor ontwerp VZG

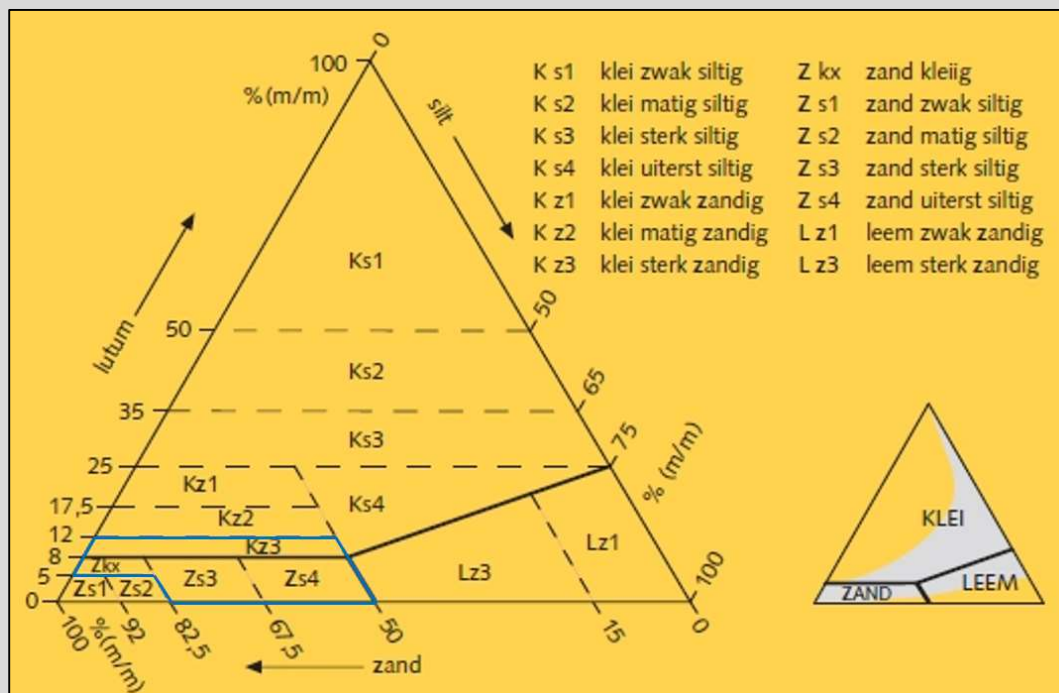
Intermezzo: voorbeeld identificatie scheidingsgebied, deklaag en zandlaag

Het VZG dient over een zekere lengte in de deklaag en zandlaag aanwezig te zijn. Daarbij dient voldoende reserve te zijn om het scheidingsgebied te overbruggen. In Figuur 4.2 is een voorbeeld uitgewerkt van het verloop van de deklaag, scheidingsgebied en de zandlaag. De eigenschappen van het scheidingsgebied zijn weergegeven in de NEN5104 klei-zandleem-driehoek. Deze is weergegeven in Figuur 4.3.

Te zien is dat tussen de boringen de hoogte van de kleilaag varieert. De kleilaag heeft als omschrijving klei zwak zandig of matig zandig. Deze klei heeft afdoende hoog lutumgehalte om als deklaag te functioneren. Onder de deklaag is een laag zand, matig siltig aanwezig. Het siltgehalte hiervan is laag genoeg om met zekerheid als zandlaag te functioneren. In de derde boring is in de zandlaag nog een kleiige stoorlaag aanwezig. Mogelijk kan een erosiekanaal hieronder ontwikkelen. Daarom geldt dit deel van de bodem als scheidingsgebied.



Figuur 4.2: Verschillende boorstaten conform NEN5104 met daarin weergegeven het verloop van de deklaag en het scheidingsgebied.



Figuur 4.3: Klei-zand-leemdriehoek conform NEN5104 hierin is het scheidingsgebied met blauw weergegeven.

Grondparameters

De grondparameters die van belang zijn voor het ontwerp van een VZG zijn beschreven in Tabel 4.3

Tabel 4.3. Grondparameters relevant voor VZG

Grond-parameter	Beschrijving	Functie in VZG-ontwerp
Korrelverdelingen	Minimaal de d_{15} , d_{40} , d_{50} en de d_{90} bepaald aan de bovenzijde van de pipinggevoelige zandlaag ter hoogte van het geotextiel.	Benodigd voor selectie type geotextiel. Hierbij wordt tenminste de d_{15} , d_{40} , d_{50} en de d_{90} bepaald aan de bovenzijde van de pipinggevoelige zandlaag ter hoogte van het geotextiel.
Doorlatendheid zand	Hierbij wordt de doorlatendheid bepaald van de zandlaag ter hoogte van het geotextiel.	Benodigd voor heave-analyse (zie geavanceerde analyse in paragraaf 4.3.1) en selectie geotextiel.
Volumiek gewicht deklaag	Volumiek gewicht deklaag aan binnenzijde van de waterkering	Benodigd voor opbarstberekening voorloopsheid.

Overige gegevens

De overige gegevens die van belang zijn voor het ontwerp van een VZG zijn beschreven in Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Overige gegevens relevant voor VZG

Grond-parameter	Beschrijving	Functie in VZG-ontwerp
Grondwaterstand	o.a. Gemiddeld Laagste Grondwaterstand. De ontwerper dient rekening te houden met randvoorwaarden die de grondwaterstand kunnen beïnvloeden zoals bijvoorbeeld droogte (t.g.v. klimaatverandering) en veranderende polderpeilen. Ook de stijghoogte ter plaatse van de voorgenomen locatie van het VZG is van belang.	Grondwaterstand speelt een rol bij dierlijke graverij. Daarnaast is een van de verouderingsprocessen van een geotextiel oxidatie. Dit treedt op boven de grondwaterstand. Dit is van impact op de selectie van het type geotextiel. De stijghoogte van belang voor de opbarstberekening voorloopsheid.
Grondwaterkwaliteit	De grondwaterkwaliteit betreft de pH-waarde	Dit heeft invloed op de verouderingsprocessen van een geotextiel. In de regel geldt een pH tussen de 4 en 9 als een standaard ontwerpwaarde, extremere pH-waarden (zowel hoger als lager) vragen aanvullende beschouwingen bij het ontwerpen van een geotextiel.



Intermezzo: geohydrologisch onderzoek in speciale situaties

Naast het genoemde geohydrologische onderzoek zijn er meer geohydrologische parameters die onderzocht kunnen worden. Deze parameters zijn alleen van belang om te onderzoeken als het VZG toegepast wordt in een milieu waar redelijkerwijs een hogere grondwatertemperatuur of sterk afwijkende bio-chemische waterkwaliteit verwacht wordt.

Temperatuur

Bij de grondwaterkwaliteit speelt ook de temperatuur een rol. Dit dient alleen onderzocht te worden indien er sterke aanwijzingen zijn dat de temperatuur verhoogd is tot boven de 20 °C. Boven deze temperatuur kan veroudering van geotextiel versneld optreden. Grondwater heeft een temperatuur van ca. 10 °C (Bot, 2016). Deze situaties komen dus alleen voor indien er een noemenswaardige warmtebron is. Dit kan het geval zijn nabij kabels en leidingen.

Bio-chemie

Bij grondwaterkwaliteit kan ook aandacht gegeven worden aan bio-chemische processen, zoals de neerslag van ijzer rondom een VZG. In bijlage 3 is een literatuurstudie opgenomen naar verstoppingsprocessen. Daaruit komt naar voren dat ijzerneserslag de grootste invloed heeft. Deze kan ervoor zorgen dat de doorlatendheid van het VZG gelijk wordt aan dat van de omliggende bodem. Dit is niet kritisch. Daarnaast zijn situaties bekend dat verstopping kan optreden door biologische processen. Dit is echter waargenomen bij sterk verhoogde concentraties BZV of CZV (Biologisch en Chemisch Zuurstof Verbruik) van 100 maal de lozingsnorm. Beide onderwerpen zijn daarom geen standaard onderdeel van het benodigde veldonderzoek.

4.2.2 Benodigde gegevens per projectfase

In deze paragraaf is per parameter beschreven welke informatie benodigd is voor (1) het voorontwerp en (2) het definitief ontwerp van het VZG. Er zijn voorbeelden gegeven hoe deze gegevens bepaald kunnen worden, de specifieke invulling van het geotechnisch onderzoek is een locatiespecifieke afweging op basis van de gebiedskenmerken (inhomogene grondopbouw of niet), al beschikbaar onderzoek en het benodigde detailniveau¹⁰.

Omgangswijze met het nader detailleren van grondonderzoek is beschreven in diverse literatuur. Enkele voorbeelden zijn:

- Schematiseringshandleiding Piping (Rijkswaterstaat, 2021a);
- Instructie SOS, Praktisch toepassen SOS binnen het WBI2017 (Witteveen+Bos, 2016);
- Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken (ENW, 2012);
- NEN9997-1 (Normcommissie Geotechniek, 2017).

De benodigde gegevens voor het voorontwerp is weergegeven in Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Benodigde gegevens het voorontwerp VZG

Parameter	Benodigde informatie voor voorontwerp	Voorbeeld onderzoek
Grondopbouw: dikte deklaag	De aanwezigheid van een deklaag van circa 1,0 meter is benodigd voor de toepassing van het VZG. In deze fase is het van belang om vast te stellen of deze laag in het interessegebied aanwezig is.	Karterend onderzoek op basis van: <ul style="list-style-type: none">• Bodemkaart.• Zandbanenkaart. Sonderingen: één per 200 meter Mechanische boringen: één per 500 meter.
Grondopbouw: dikte scheidingsgebied	Hoe dikker het scheidingsgebied hoe minder geotextiel beschikbaar voor verankering in zand- en kleilaag. Voor het voorontwerp is inzicht in de dikte van	Deze boringen dienen o.a. gebruikt te worden voor het gedetailleerder beschouwen van de bodemopbouw, verzamelen van grondmonsters voor

¹⁰ Voorbeeld: als er marge beschikbaar is in de lengte van het geotextiel kan een grotere onzekerheid in scheidingsgebied geaccepteerd worden.



	<p>het scheidingsgebied daarom van belang.</p> <p>Uitgaande van 3,5 meter inbrengbaar geotextiel, indien dikte scheidingsgebied ($d_{\text{scheidingsgebied}}$):</p> <ul style="list-style-type: none"> • < 0,5m: VZG zeer goed toepasbaar • < 1,0m: VZG goed toepasbaar • < 2,0m: VZG mogelijk toepasbaar • > 2,0m: VZG waarschijnlijk niet toepasbaar 	<p>het geotechnisch laboratoriumonderzoek.</p> <p>Geofysisch onderzoek: elektromagnetisch, geo-elektrisch en radar- onderzoek.</p>
Korrelverdelingen	Niet van belang voor voorontwerp	<p>Vanuit procesmatige overwegingen kan ervoor gekozen worden om deze onderzoeken wel te doen tijdens het voorontwerp omdat deze goed te combineren zijn met ander onderzoek, zoals mechanische boringen. Ook kan het wenselijk zijn om monitoring die langer aanwezig dient te zijn, zoals peilbuizen, vroegtijdig te plaatsen.</p>
Doorlatendheid zand	Niet van belang voor voorontwerp	
Volumiek gewicht deklaag	Niet van belang voor voorontwerp	
Grondwaterstand	Niet van belang voor voorontwerp	
Grondwaterkwaliteit	Niet van belang voor voorontwerp	

De benodigde gegevens voor het definitief ontwerp is weergegeven in Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Benodigde gegevens voor definitief ontwerp VZG

Parameter	Benodigde informatie voor definitief ontwerp	Voorbeeld onderzoek
Grondopbouw: dikte deklaag	De dikte van de deklaag dient over het gehele tracé nauwkeurig in kaart te zijn gebracht.	Boringen één per 50 meter ¹¹ . Sonderingen één per 100 meter.
Grondopbouw: dikte scheidingsgebied	De dikte van het scheidingsgebied dient over het gehele tracé nauwkeurig in kaart te zijn gebracht.	Van belang is het in beeld krijgen van laagovergangen en de eventuele stoorlagen/gelaagde bodemopbouw. Onderzoeksmethoden die hier goed in slagen zijn handboringen, mechanische pulsboringen met laboratoriuminterpretatie van continue gestoken monsters, of Begemanboringen. Onderzoeksmethoden die hier minder goed in slagen zijn sonderingen, mechanische pulsboringen, mechanische spuitboringen.
Korrelverdelingen	Benodigd voor selectie geotextiel. Gevoeligheid geotextielkeuze voor zandgrofheid relatief laag, zie paragraaf 4.4.3.	Twee per 500 meter (op verschillende dieptes)
Doorlatendheid zand	Benodigd voor selectie geotextiel en locatiespecifieke heave-analyse. Gevoeligheid geotextielkeuze voor doorlatendheid relatief laag, zie paragraaf 4.4.3.	Twee per 500 meter (op verschillende dieptes)

¹¹ NEN9997-1: Indien bij geotechnisch onderzoek voor grondwerken en grondkerende constructies in de geotechnische categorieën 2 en 3 op basis van de geologische kennis van het gebied wordt verwacht dat afwijkingen in dikte van aanwezige klei-, veen- en leemlagen op het bouwterrein kleiner zijn dan 0,5 m (...), mag de afstand tussen de punten van onderzoek ten hoogste 100 m zijn. Als (verschillen in de bodemopbouw groter zijn en) kunnen leiden tot overstroming van dijken of dammen (...), moet de afstand tussen de onderzoekspunten worden verkleind tot ten hoogste 50 m.

Volumiek gewicht deklaag	Benodigd voor opbarstanalyse voorloopsheid.	Gelijk aan reguliere pipinganalyse.
Grondwaterstand	(Toekomstige) ligging grondwaterstand (o.a.) GLG dient over gehele tracé in kaart te zijn gebracht. Stijghoogten zijn benodigd voor opbarstanalyse voorloopsheid.	Peilbuismetingen.
Grondwaterkwaliteit	Relevant als een afwijkende PH-waarde verwacht kan worden.	Labonderzoek op watermonsters



4.3 Sterkte-analyses

In de onderliggende paragrafen volgen de sterkte-analyses voor de faalorzaken onderloopsheid, achterloopsheid en voorloopsheid.

4.3.1 Onderloopsheid (heave)

Onderloopsheid of heave is een proces waarbij verticale grondwaterstroming zo groot is, dat er sprake is van verweking. Voor onderloopsheid is een ontwerpverificatie opgesteld. Deze bestaat uit een eenvoudige methode en een geavanceerde methode.

Eenvoudige methode onderloopsheid

Indien het ontwerp voldoet aan onderstaande toepassingsvoorwaarden, dan kan ontworpen worden aan de hand van de eenvoudige methode. Ontwerpen met de eenvoudige methode leidt tot een robuust ontwerp voor onderloopsheid zonder gedetailleerde grondwaterstromingsberekeningen.

De volgende toepassingsvoorwaarden gelden:

- Het ontwerp voldoet op de andere faalmechanismen (voorloopsheid, doorloopsheid, achterloopsheid en bovenloopsheid beschreven in de volgende paragrafen). Daarbij is aandacht gegeven aan alle beheer- en uitvoeringsaspecten, en bedreigingen.
- Het geselecteerde geotextiel voldoet aan het doorlatendheids criterium vanuit CUR174.
- De ligging van de deklaag, het scheidingsgebied en de zandlaag is vastgesteld.
- Het VZG wordt geplaatst tussen het uittredepunt van piping en de helft van de kwelweglengte.

In de eenvoudige methode kan de toegevoegde sterkte van het VZG bepaald worden op basis van standaard waarden. De sterktetoeename is in de eenvoudige methode vastgesteld voor twee verschillende VZG-lengtes:

- Minimale verticale lengte.
Dit betreft een minimale lengte van 0,5 m of 2,0 m in de zandlaag (onder het scheidingsgebied, zie paragraaf 4.2). De weerstand tegen piping die het VZG toevoegt is een functie van deze lengte (zie onderstaande bullit). Deze minimale lengte dekt de volgende zaken af:
 - 1) Onderloopsheid / heave.
 - 2) Eventuele erosie en bodemdaling zoals waargenomen in de full-scale proeven met het VZG.
- Begrenzing terugschrijdende erosie met extra sterktefactor.
De waarde van de sterktefactor is:
Indien de lengte van het VZG 0,5 m is: $\gamma_{VZG} = 1,5$.
Indien de lengte van het VZG 2,0 m is; $\gamma_{VZG} = 3,0$.
De bepalingswijze is toegelicht in de bijlage "Nadere analyses sterkte VZG". De rekenwijze van terugschrijdende erosie is verder gelijk aan de vigerende normen. Deze zijn o.a. gegeven in het WBI2017 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017), OI2014v4 (Rijkswaterstaat, 2017a) en de schematiseringshandleiding piping (Rijkswaterstaat, 2021a).

Rekenwijze terugschrijdende erosie zonder VZG:

$$F_p = \frac{\Delta H_c}{(h - h_{exit} - r_c D_{deklaag})}$$

Rekenwijze terugschrijdende erosie met VZG in eenvoudige methode:

$$F_{p,VZG} = F_p \cdot \gamma_{VZG} = \frac{\Delta H_c \cdot \gamma_{VZG}}{(h - h_{exit} - r_c D_{deklaag})}$$

Hierin is:

ΔH_c	Het kritieke verval over de waterkering	[m]
F_p	Stabiliteitsfactor voor terugschrijdende erosie	[-]
$F_{p,VZG}$	Stabiliteitsfactor voor terugschrijdende erosie voor een dijk met VZG	[-]
h	Niveau buitenwaterstand met een kans van voorkomen gelijk aan de norm.	[m+NAP]
h_{exit}	Freatisch niveau, of hoogte van het maaiveld, bij uittredepunt.	[m+NAP]
r_c	Reductiefactor voor de weerstand bij het uittredepunt (0,3)	[-]



Geavanceerde methode onderloopsheid

De geavanceerde methode bepaalt de minimale verticale lengte op basis van drie criteria:

- Toets terugschrijdende erosie met extra sterktefactor.
Deze toets is gelijk aan die in de eenvoudige methode
- Verticale lengte op basis van een heave-analyse.
- Minimale verticale lengte.
Indien de heave-analyse leidt tot een kortere verticale lengte dan 0,5 m onder het scheidingsgebied, dan is de minimale verticale lengte 0,5 m. Dit ondervangt maaknauwkeurigheid en eventuele erosie en bodemdaling zoals waargenomen in de full-scale proeven met het VZG.

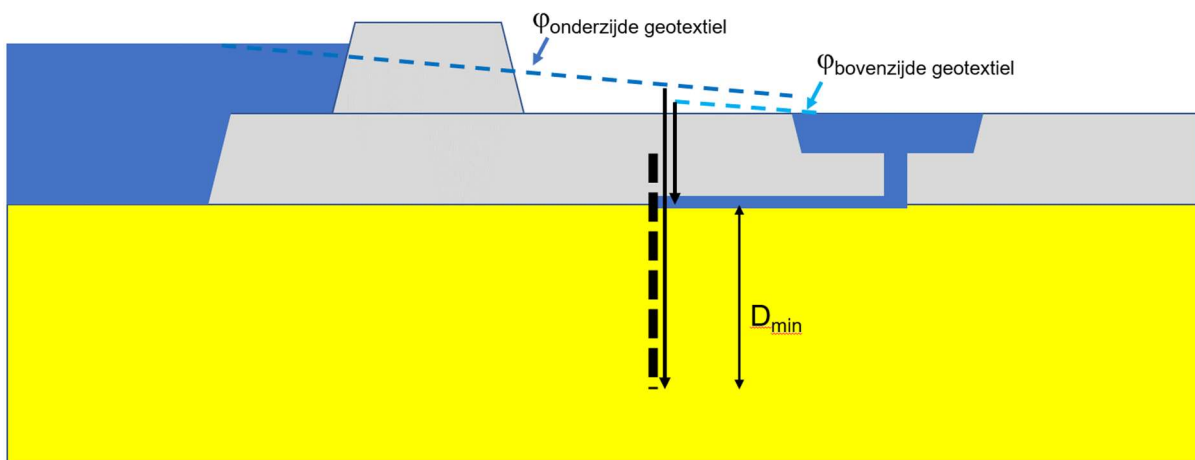
De verticale lengte wordt bepaald aan de hand van een heave toets. De heave toets wordt gedaan aan de hand van het heave-criterium. Achtergrond bij het heave-criterium is gegeven in Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen (Deltares, 2012). Een situatieschets is gegeven in Figuur 4.4. Het heave-criterium is hieronder herhaald.

Eis:

$$i_{c,h} > i = \frac{\varphi_{\text{onder}} - \varphi_{\text{boven}}}{D_{\text{min}}}$$

Waarbij:

$i_{c,h}$	Kritieke heavegradiënt.	[0,5]
i_h	Optredende heavegradiënt.	[-]
φ_{boven}	Waterdruk aan de bovenzijde van de pipinggevoelige laag	[m+NAP]
φ_{onder}	Waterdruk aan de onderzijde van het VZG.	[m+NAP]
D_{min}	Lengte van het VZG in de zandlaag	[m]



Figuur 4.4: Dwarsprofiel rondom VZG met diverse parameters binnen een heave-berekening.

Voor het bepalen van de waterdruk en de gradiënt is inzicht in de grondwaterstroming noodzakelijk. Dit dient bepaald te worden met een (numeriek) grondwatermodel. De heave-toets voor een VZG heeft een sterke overeenkomst met die van een damwand / ondoorlatend scherm. In Tabel 4.7 is hiervan een overzicht gegeven.

Een voornaam verschil betreft het modelleren van een (nagenoeg) geheel doorlatend element. Omdat heave-analyses sterk bepaald worden door (verticale) variaties in de doorlatendheid geldt de aanvullende eis om een gevoeligheidsanalyse met lokaal bepaalde doorlatendheden uit te voeren.

Tabel 4.7: Overzicht rekenwijze heave bij een verticale ondoorlatende maatregel vs. VZG.

Onderwerp	Heave-toets ondoorlatende maatregel	Heave-toets VZG
criterium	$I_c = 0,5$ Gemiddeld verhang over verticaal.	$I_c = 0,5$ Gemiddeld verhang over verticaal ^[1]
Buitenwaterstand	WBN	Idem
Veiligheidsbenadering	Deterministisch	Idem
Modellering	Fragmenten methode, of 2D grondwatermodel	2D grondwatermodel, Rondom VZG hoge resolutie (< 0,05 m rekencellen) ^[2]
Modellering erosiekanaal	Tot scherm oneindig doorlatend (vaste rand)	Idem ^[3]
Modellering verticaal kanaal	Conform 0,3D-regel of vigerend	Idem
Modellering verticaal element.	Ondoorlatend, minimaal 2 rekencellen breed	Doorlatend, minimaal 2 rekencellen breed ^[4]
Modellering bodemopbouw	Vrij aan de modelleur	Vrij aan de modelleur Het gebruik van drainagezand rondom een VZG geeft lokaal hogere doorlatendheden, daarmee lagere gradiënten en daarmee een hogere veiligheid
Gevoeligheidsanalyses	Vrij aan de modelleur	Omvat ten minste een analyse met doorlatendheden die lokaal onderzocht zijn, zoals beschreven in paragraaf 4.2 ^[5]

^[1] Bij een VZG is het verticale verhang niet constant. Terugrekenen van proeven laat zien dat het werken met het gemiddelde verhang beter aansluit bij het proefresultaat dan het maximale verhang. Het minimale verhang wordt gevonden aan de onderzijde van het VZG. Deze sluit het beste aan bij de proefresultaten. Hier is conservatisme voorgeschreven door te werken met het gemiddelde verhang.

^[2] Terugschrijdende erosie is een 3D-proces. Echter wanneer een erosiekanaal bij een verticaal element komt, zoals een damwand of VZG, groeit het erosiekanaal in de breedte. Daardoor ontstaat er een 2D-situatie. Modellering met een 2D-model sluit goed aan bij de meetgegevens van kleine-, medium- en groteschaalproeven.

^[3] Proeven geven aan dat het erosiekanaal bij kleine en medium schaal proeven verwaarloosbare weerstand geeft. Echter geven grote schaalproeven wel een noemenswaardige weerstand, ook na langere tijd. Zo is bij de IJkdijk (Deltares, 2013) een verval van 0,35 m gemeten tussen begin en eind van het erosiekanaal. Deze proeven zijn echter gering in aantal en zijn uitgevoerd op een beperkte variatie in zandsorten. Hier is conservatisme voorgeschreven door te werken met een oneindig doorlatend erosiekanaal.

^[4] Een VZG heeft een dikte van ca. 1 mm. Dit is kleiner dan de modelresolutie. De weerstand van het VZG dient dan ook toegekend te worden aan de rekencellen (minimaal twee rekencellen voor een numeriek juist resultaat). Dit leidt lokaal tot een lagere doorlatendheid. De weerstand van een VZG inclusief de effecten van geringe effecten is beschreven in paragraaf 4.4.3. Hieronder volgt een rekenvoorbeeld:

Er is in dit voorbeeld gekozen voor een modelresolutie van 0,03 m. De doorlatendheid (K) van het aanvulzand is 10 m/dag. De weerstand van het VZG is gelijk aan 0,03 m aanvulzand. Door verstopping neemt de weerstand van het VZG toe tot het dubbele. De weerstand is gelijk aan $C = L / K$. Voor twee rekencellen zonder VZG is dit $C = 0,06 / 10 = 0,006$ dag. Voor de weerstand van twee rekencellen met VZG is de weerstand $C = L / K + C_{VZG} = 0,06/10 + 0,03/10 = 0,009$ dag. Voor de weerstand van twee rekencellen met VZG inclusief verstopping is de weerstand $C = L / K + C_{VZG,verstopt} = 0,06/10 + 0,06/10 = 0,012$ dag. De effectieve doorlatendheid ter plaatse van de rekencellen in het model is gelijk aan: $K_{eff} = L / C$. Voor de situatie met een VZG inclusief verstopping is de effectieve doorlatendheid $K_{eff} = L / C = 0,06 /$



0,012 = 5 m/dag. Het verdisconteren van de weerstand van een VZG over twee rekencellen heeft daarmee geleid tot een lokaal lagere doorlatendheid.

^[5] Een VZG is een doorlatende constructie. Resultaten van analyses zijn daardoor sterker afhankelijk van lokale doorlatendheden en met name doorlatendheidsverschillen. Deze verschillen worden sterker wanneer er een overgang is van geologische kenmerken (windafzettingen met fijn zand vs. rivierafzettingen met grofzand) of wanneer er sprake is van hydromorfe kenmerken (Tussen de GHG en GLG¹² kunnen door ijzerafzettingen voorkomen die leiden tot lokaal lagere doorlatendheden).

4.3.2 Achterloopsheid

Achterloopsheid is een proces waarbij grondwaterstroming aan de kopse einden van een constructie zo groot is, dat terugschrijdende erosie plaatsvindt rondom het VZG. Achterloopsheid kan uitgesloten worden omdat het geen risico vormt, met het volgende criterium:

- Overgang naar andere constructie.
Voorbeeld: een VZG sluit aan op een andere constructie, zoals een heavescherm.

Als achterloopsheid niet kan worden uitgesloten dan moet het VZG ontworpen worden op achterloopsheid. Achterloopsheid dient ontworpen en beoordeeld te worden aan de hand van de rekenregel van Bligh¹³. De rekenregel van Bligh is onder andere gegeven in Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk (Rijkswaterstaat, 2021) en Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen (Deltares, 2012).

Eis:

$$\Delta H_{c,Bligh} > \Delta H = h - h_{exit}$$

Waarbij:

$\Delta H_{c,Bligh}$	Kritieke verval over de waterkering conform rekenregel van Bligh	[m]
ΔH	Verval over de waterkering	[m]
h	Niveau buitenwaterstand met een kans van voorkomen gelijk aan de norm	[m+NAP]
h_{exit}	Freatisch niveau, of hoogte van het maaiveld bij uittredepunt	[m+NAP]

Rekenwijze:

$$\Delta H_{c,Bligh} = \frac{L_h}{C_{w,creep,Bligh}}$$

Waarbij:

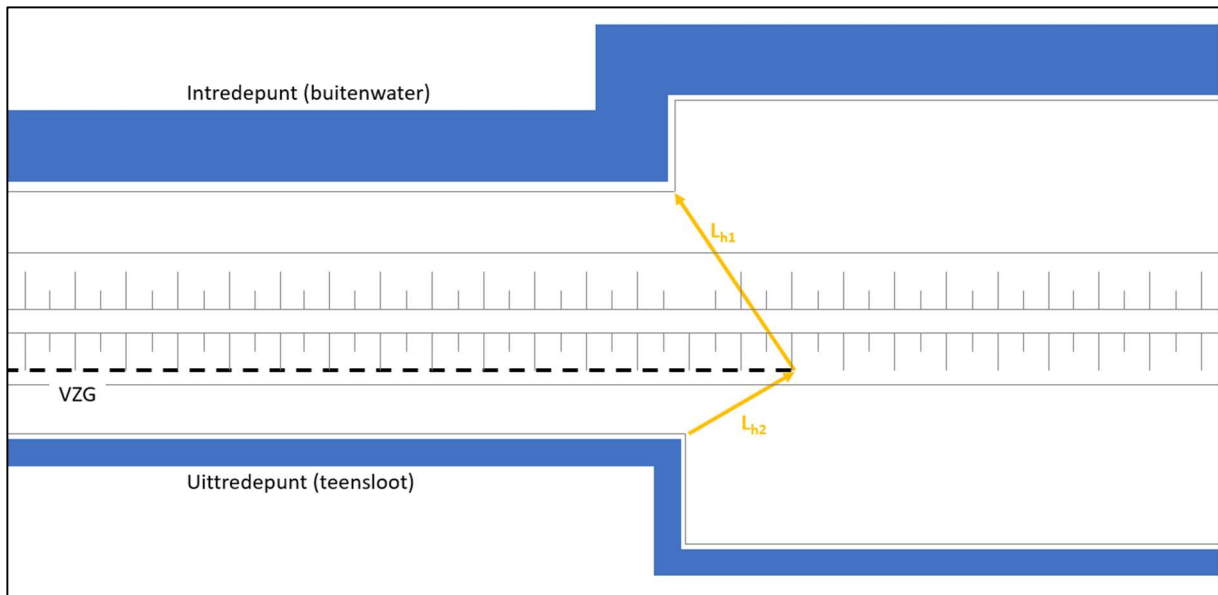
L_h	Kwelweglengte horizontaal.	[m]
D	Deklaagdikte ter plaatse van uittredepunt	[m]
$C_{w,creep,Bligh}$	Creepfactor conform Bligh	[-]
	Voor matig-fijn zand geldt $C_{w,creep,Bligh} = 15$.	

In Figuur 4.5 is een schets gegeven van een ontwerp tegen achterloopsheid. In de schets is te zien dat op de ene locatie de afstand tussen het intredepunt (buitenwater) en het uittredepunt (teensloot) gering is, elders is de afstand veel groter. Daardoor is niet overal de maatregel VZG noodzakelijk. Op het overgangsgedebied tussen waar deze wel en waar deze niet noodzakelijk is, dient getoetst te worden op achterloopsheid. Een tweede reden voor het einde van het pipingontwerp kan een administratieve (dijk)grens zijn. In alle gevallen moet voldaan worden aan achterloopsheid. Daarbij wordt het VZG verder doorgezet zodat de kwelweg om het VZG heen (hier $L_{h1}+L_{h2}$) voldoet aan het criterium voor achterloopsheid (L_h).

¹² Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand en Gemiddeld Laagste Grondwaterstand

¹³ Terugschrijdende erosie bij groene dijken wordt getoetst aan de hand van de rekenregel van Sellmeijer. Achterloopsheid wordt getoetst aan de rekenregel van Bligh. Deze twee verschillende rekenregels beschrijven hetzelfde fenomeen, maar geven (logischerwijs) verschillende uitkomsten. Bij sommige projecten wordt daarom gekozen beide fenomenen te toetsen middels de meest conservatieve rekenregel. Zo wordt binnen dergelijke projecten aanvullende robuustheid ingebouwd.





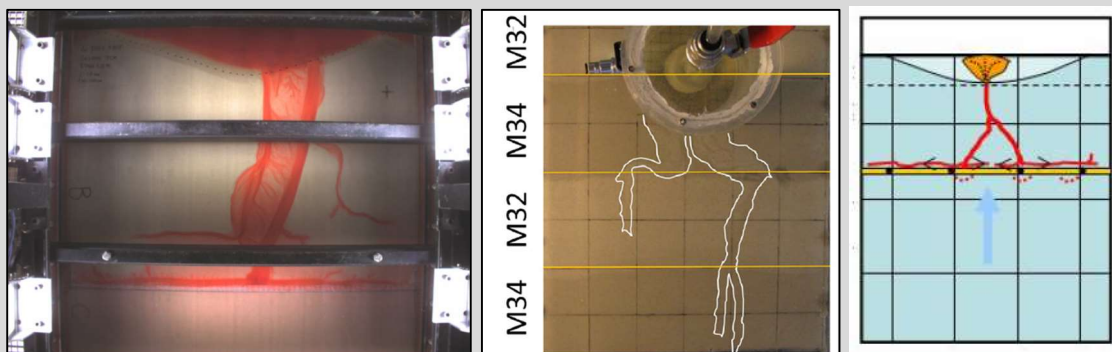
Figuur 4.5: Schets van een ontwerp tegen achterloopsheid

Intermezzo: achtergrond geen aanpassing regelregel van Bligh

Bij het onderzoek naar de werking van het VZG is de belasting/waterstand op het VZG stapsgewijs opgevoerd. Daarbij ontstaat bij bepaalde belastingen door terugschrijdende erosie een erosiekanaal vanaf een uitredepunt naar het VZG. Bij nog hogere belastingen groeit het erosiekanaal langs het VZG. In het kader van deze OBOR-VZG is beschouwd of deze groei in de lengterichting vraagt om extra robuustheid. Er is gekozen om geen aanvullende robuustheid op te nemen. Maar dit wel als witte vlek aan te wijzen. Het besluit om geen aanvullende robuustheid op te nemen is gebaseerd op twee argumenten.

Argument 1: groei langs VZG in de lengterichting is normaal

Het groeien van een erosiekanaal langs het VZG is weergegeven in Figuur 4.6. Er is een pipingproef gedaan in het verleden zonder VZG, maar met twee verschillende zandmonsters. Dit is beschreven in (Bezuijen A. V., 2017). Daarin is te zien dat het erosiekanaal ook groeit in de lengterichting van een overgang tussen twee zandsoorten. Ook zijn pipingproeven uitgevoerd met een heavescherm. Deze zijn beschreven in (Deltares, 2009). Ook daarin is beschreven dat het erosiekanaal groeit in de lengterichting van het heavescherm. Dat erosiekanalen dus groeien in een andere richting dan direct naar het buitenwater is normaal. Dit vraagt dan ook geen aanvullende zaken of robuustheid in de beoordeling.



Figuur 4.6: Medium-schaalproef met VZG. Daarnaast is een 'normale' pipingproef weergegeven op een grondmonster opgebouwd uit twee verschillende soorten zand. Tenslotte is een pipingproef met een heavescherm weergegeven. In het omcirkelde deel is te zien dat het erosiekanaal in de breedte groeit. Zichtbaar is dat de groei langs een VZG en een heavescherm meer uitgesproken zijn dan de groei bij een zandmonster.

Argument 2: groei erosiekanaal langs VZG is eindig

Bij de fullscale proeven met het VZG is het erosiekanaal zijwaarts gegroeid. De groei daarbij was 2 m naar de ene zijde en 1 m naar de andere zijde. De IJkdijk had een dijk met een lengte van 15 m. De groei van het erosiekanaal in de lengterichting is dus aanzienlijk korter dan de gehele lengte van de dijk. Dit komt doordat de grondwaterstroming aan de kop van een erosiekanaal afneemt naarmate het erosiekanaal in de lengterichting van de VZG groeit. Dat erosiekanalen groeien in een andere richting dan direct naar het buitenwater leidt dus niet tot buitensporige groei van erosiekanalen. Dit vraagt dan ook geen aanvullende zaken of robuustheid in de beoordeling.

4.3.3 Voorloopsheid (opbarsten)

Voorloopsheid betreft falen net bovenstrooms van het VZG. Falen van de dijk door voorloopsheid kan alleen optreden als er opbarsten plaatsvindt tussen het VZG en de dijk. Falen van de dijk op deze locatie kan optreden door elk van de volgende zaken: opbarsten, heave, terugschrijdende erosie. Om dit risico te beheersen kunnen aanvullende maatregelen genomen worden, zoals de aanleg van een opbarstberm. De rekenwijze voor dit faalmechanisme is gelijk aan opbarsten met enkele aanvullende aandachtspunten.

De achtergrond bij het opbarstcriterium is gegeven in de Schematiseringshandleiding Piping (Rijkswaterstaat, 2021a). Bij de toetsing op opbarsten wordt getoetst aan het verticaal evenwicht.

Eis:

$$\Delta\varphi < \frac{\Delta\varphi_{c,u}}{\gamma_{up} \cdot \gamma_{b,u}}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_{exit} - h_{exit}$$

$$\Delta\varphi_{c,u} = \frac{D_{deklaag}(\gamma_{sat} - \gamma_{water})}{\gamma_{water}}$$

Waarbij:

$\Delta\varphi$	Optredend stijghoogteverschil	[m]
$\Delta\varphi_{c,u}$	Kritieke stijghoogteverschil voor opbarsten	[m]
γ_{up}	Normafhankelijke veiligheidsfactor opbarsten	[-]
$\gamma_{b,u}$	Schematiseringsfactor voor het deelmechanisme opbarsten	[-]
φ_{exit}	Stijghoogte bij uittredepunt	[m+NAP]
h_{exit}	Hoogte maaiveld bij het uittredepunt	[m+NAP]
$D_{deklaag}$	Deklaagdikte nabij uittredepunt	[m]
γ_{sat}	Verzadigd volumegewicht van de deklaag	[kN/m ³]
γ_{water}	Volumegewicht van water	[kN/m ³]

φ_{exit} , is weergegeven in Figuur 4.8

Bij een semi-probabilistische analyse wordt gerekend met 5%-waardes van de sterkteparameters in combinatie met de veiligheidsfactoren. Aandacht gaat uit naar zaken zoals: laag maaiveldniveau ter plaatse van het uittredepunt, bodemopbouw met een dunne deklaag en/of veel slappe lagen (bijv. organische klei of veen). Deze zaken zijn gelijk aan de uitgangspunten zoals de beschreven in de Schematiseringshandleiding Piping (Rijkswaterstaat, 2021a).

Ook dient aandacht gegeven te worden aan de 95% waarde voor de belasting. Deze wordt gevormd door de stijghoogte of het stijghoogteverschil. Deze dient afwijkend bepaald te worden.

Opbarsten met aandachtspunten

De toets 'opbarsten met aandachtspunten' geeft aandacht aan de 95%-waarde van de stijghoogte. De modelleur is vrij om deze zelf te bepalen.

Een veel voorkomende werkwijze is het bepalen van de stijghoogte aan de hand van TRWD (TAW, 2004). Deze is in algemeenheid passend, maar vaak gelden rondom een VZG diverse bijzonderheden waardoor TRWD te optimistisch is. Dit komt vooral voor wanneer in de binnentee van de dijk een kwelsloot aanwezig is die het uittredepunt is voor piping. Zaken die niet meegenomen zijn in de rekenwijze van TRWD zijn de volgende:

- Diepte van de kwelsloot.
In TRWD wordt uitgegaan van een oneindig diepe kwelsloot. In de praktijk zijn kwelsloten niet oneindig diep, deze staan in contact met de bovenste decimeters van een watervoerend pakket.
- Breedte van de kwelsloot en bodemopbouw.
Indien een kwelsloot niet oneindig diep is, biedt de TRWD de mogelijkheid om te werken met ene andere schematisatie, namelijk met radiale weerstand. De radiale weerstand is afhankelijk van de breedte/natte omtrek van een kwelsloot. Handvaten om hiermee te rekenen zijn gegeven in (Bakel, 1996). Voorgaande wordt ook beïnvloed door de bodemopbouw. Wanneer deze rondom de bodem van de kwelsloot matig doorlatende lagen omvat, beperken deze de toestroom van water uit dieper gelegen zand lagen. In geohydrologische modellen wordt dit vaak meegenomen door of deze lagen te schematiseren, of door het meenemen van een intredeweerstand/conductance. Beide opties zitten niet in de schematiseringswijze van de TRWD.

Bij het toepassen van een VZG is vaak een kwelsloot aanwezig aan de polderzijde van het VZG. Deze kwelsloot zorgt voor een verlaging van de stijghoogte. Indien er geen kwelsloot is, is er vaak een laagte die als uittredepunt kan werken. Ook deze verlaagt de stijghoogte. Voor de modellering van de stijghoogte zijn er drie opties:

1. Worst case:
De (positieve) invloed van de kwelsloot / laagte aan de polderzijde op de stijghoogte wordt geheel niet meegenomen.
2. Extrapolatie van meetgegevens
Met peilbuismonitoring kan een locatie specifiek beeld verkregen worden van het verloop van de



stijghoogte op de plek waar het VZG is voorgenomen. Deze meetgegevens betreffen vaak een periode met hoogwaters die lager zijn dan waarop ontworpen wordt. Er is dus een extrapolatie vereist.

3. Conservatieve modellering

De (positieve) invloed van de kwelsloot / laagte aan de polderzijde op de stijghoogte wordt in beperkte mate meegenomen. Hiervoor zijn diverse modelkeuzes, schematisatiekeuzes en modelleringen nodig.

Worst-case

Indien wordt gekozen voor de worst-case optie, dan kan verder gerekend wordt volgens de vigerende methodiek. Deze is beschreven in de Schematiseringshandleiding Piping (Rijkswaterstaat, 2021a).

Extrapolatie van meetgegevens

Bij extrapolatie van meetgegevens wordt gebruikgemaakt van peilbuisdata. Deze peilbuizen dienen op de locatie te staan waar het VZG is voorgenomen (bv. de binnenteen). In de literatuur zijn diverse handvaten gegevens voor de omgang met peilbuizen en peilbuisdata, enkele voorbeelden zijn: TRWD (TAW, 2004), Handreiking meetnetten en grondwatermonitoring voor piping (POV-Piping, 2020), POV PipingPortaal (POV-Piping, 2019), Schematiseringshandleiding Piping (Rijkswaterstaat, 2021a).



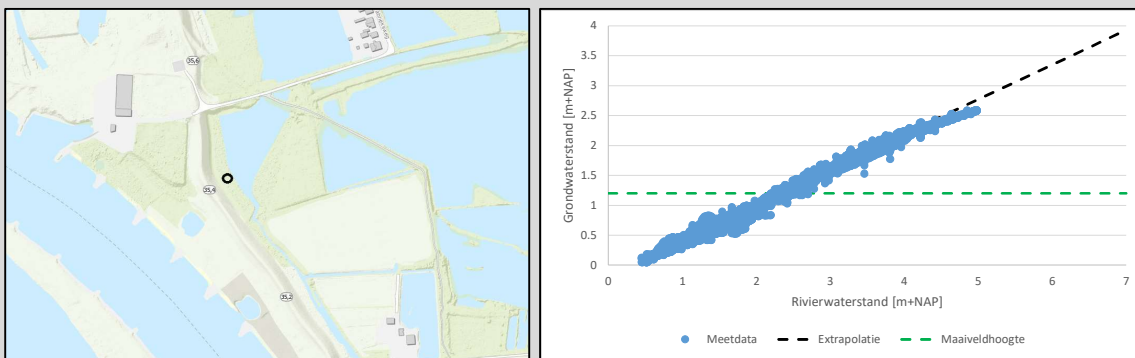
Intermezzo: Extrapolatie van meetgegevens

Bovenloopsheid dient getoetst te worden aan de hand van opbarstveiligheid. Daar dient een 95% bovengrens van de stijghoogte aangehouden te worden. Een van de manieren om dit te bepalen is extrapolatie van meetgegevens.

Meetgegevens dienen hiervoor te voldoen aan de volgende criteria:

- Meetpunt staat op de juiste locatie (bv. binnenteen waar VZG is voorgenomen).
- Meetpunt meet de juiste laag (bv. watervoerend pakket onder deklaag).
- Meetperiode is lang genoeg (bv. 2x hoogwater waarbij het water tot aan de buitenteen staan).
- Meetgegevens zijn vrij van gebreken (aandacht gaat uit naar de meetwijze wanneer de stijghoogten hoger is dan het maaiveld).

Een voorbeeld van de extrapolatie is weergegeven in Figuur 4.7. Te zien is dat de peilbuis in de binnenteen nabij oppervlaktewater ligt. De peilbuis meet de stijghoogte onder de deklaag, deze reageert sterk op de variatie van de waterstanden op de rivier. Het maaiveld in de binnenteen ligt op NAP +1,2 m. Zodra de buitenwaterstand hoger wordt dan NAP +2,5 m, wordt de stijghoogte hoger dan het maaiveld. Bij deze locatie is dan ook aandacht gegeven aan het inrichten van de peilbuis zodat die ook extremere stijghoogten kan meten. De meetperiode betreft ruim twee jaar met daarin ten minste drie (kleine) hoogwaters. Dit geeft de mogelijkheid om de meetwaarden te extrapoleren naar ontwerpsituaties. Extrapolatie wordt gedaan door de relatie tussen de buitenwaterstand en de stijghoogte in beeld te brengen. Een goede extrapolatie is mogelijk wanneer het verloop van de meetdata goed verklaard door een trendlijn (hier $R^2 = 99\%$).



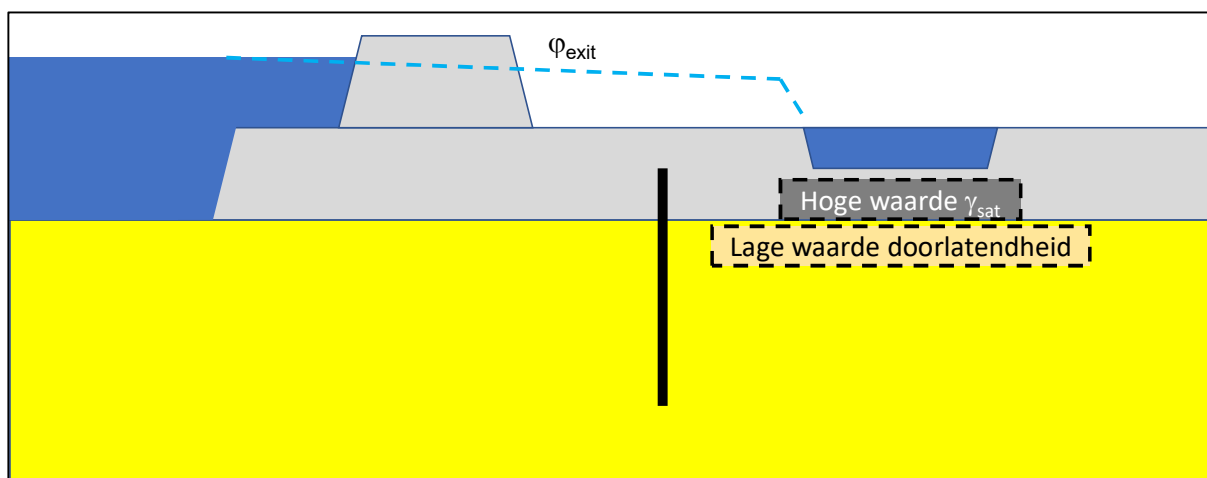
Figuur 4.7: Voorbeeld van een Extrapolatie van meetgegevens

Nb.

Dit betreft een peilbuis uit het beheersgebied van WDOD. Bij veel peilbuismetingen in de binnenteen wordt een geringere respons gemeten dan ter plaatse van de kruin of de buitenteen. Maar een extremere respons dan wat verwacht zou worden op basis van TRWD (TAW, 2004). Deze peilbuis in kwestie geeft stijghoogten ver boven het maaiveld ondanks dat het direct naast oppervlaktewater staat. De extreme meetwaarden worden verklaard doordat het binnendijkse oppervlaktewater deels draineert, maar doordat de bodem eerst dient op de barsten en daarna het peil meestijgt met het buitenwater, is de invloed hiervan slechts gering. Deze inzichten zijn verwerkt in het onderdeel *Conservatieve modellering*.

Conservatieve modellering

Indien wordt gekozen voor de conservatieve optie, dienen aanvullende zaken geverifieerd te worden. In Figuur 4.8 is een globale schematisatie gegeven van de stijghoogte rondom de dijk en de kwelsloot.



Figuur 4.8: Dwarsprofiel rondom VZG met het verloop van de stijghoogte berekening binnen "opbarsten met aandachtspunten"

Geohydrologische modellering

Bij "opbarsten met aandachtspunten" dient gerekend te worden met een numeriek model om de stijghoogte te bepalen. Dit is anders dan bij traditionele opbarstberekeringen, daar wordt vaak gerekend met analytische modellen. Het verschil is om diverse lokale bijzonderheden mee te nemen. Aandacht gaat uit naar de volgende zaken:

- Ongunstig slootpeil, zie het deel "Slootpeil".
- Ongunstige variant voor de deklaagdikte, zie het deel "Deklaagdikte".
- Indien de deklaag onder de kwelsloot dient op te barsten, wordt een ongunstige waarde voor de grenspotentiaal bepaald, zie het deel "Opbarsten bodem kwelsloot".

Aanvullend dient bij "opbarsten met aandachtspunten" het drainerende effect van de kwelsloot gereduceerd meegenomen te worden. Dit leidt tot een stijghoogteverloop zoals weergegeven in Figuur 4.8. Daarbij is de verlaging die een kwelsloot veroorzaakt geringer en meer lokaal dan wanneer dit optimistisch wordt geschematiseerd. Dit is in tegenstelling tot traditionele opbarstberekeringen, daar wordt (vaak) gerekend met oneindig drainerende effecten¹⁴. Dit dient meegenomen te worden als volgt:

- Geringe afmetingen van de kwelsloot.
Dit betreft de 95% bodemligging en 5% bodembreedte.
- Expliciete aandacht voor verticale stroming naar de kwelsloot.
Daarbij kan overwogen worden om een hoge waarde voor de anisotropie mee te nemen. Handvatten zijn gegeven in (Deltares, 2020) en (Deltares, 2018).
- Lage waarden doorlatendheid rondom sloot bodem.
Dit betreft de 5% lage waarde van de doorlatendheid direct onder en rondom de kwelsloot. Handvatten voor onderzoek zijn gegeven in paragraaf 4.2.

Slootpeil

Bij "opbarsten met aandachtspunten" dient gerekend te worden met een hoog peil in de kwelsloot. De aan te houden waarde is de 95%-bovengrens van het slootpeil. Dit in tegenstelling tot traditionele opbarstberekeringen, waar met lage peilen wordt gerekend. Het verschil ontstaat doordat hier niet wordt gekeken naar opbarsten van de kwelsloot zelf, maar naar hoge grondwaterstanden direct rondom de kwelsloot.

¹⁴ Rekenwijzen zoals gegeven in Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken (TAW, 2004) gaan vaak uit van oneindig diepe of oneindig brede waterpartijen. Daarbij worden vaak radiale weerstanden, intrede weerstanden, effecten van gelaagdheid en anisotropie genegeerd.

De stijghoogte bij het uittredepunt (ρ_{exit}) volgt uit berekening aan de hand van een grondwatermodel. Hierbij geldt het aandachtspunt dat naarmate grondwater eenvoudiger kan uittreden aan de landzijde, de stijghoogte net bovenstrooms positief wordt beïnvloed (wordt lager). Daarom dient in de modellering een conservatieve modellering toegepast te worden van het uittreden van grondwater aan de landzijde. Dit zijn algemeen geldende uitgangspunten die zijn niet specifiek van toepassing voor een VZG.

Deklaagdikte

Bij "opbarsten met aandachtspunten" dient zowel gerekend te worden met een dunne, een gemiddelde en een grote deklaagdikte. Dit is in tegenstelling tot traditionele opbarstberekeningen, waar (hoofdzakelijk) wordt gerekend met alleen een dunne deklaag. Dit is omdat een dikke deklaag er (mogelijk) toe leidt dat een kwelsloot minder positief effect heeft op de stijghoogte. Dit leidt tot drie analyses voor het faalmechanisme voorloopsheid, waarbij steeds een andere deklaagdikte wordt beschouwd.

Opbarsten bodem kwelsloot

Indien onder de bodem van de kwelsloot slecht waterdoorlatende lagen aanwezig zijn, dienen die eerst op te barsten, voordat de kwelsloot positieve invloed op de stijghoogte heeft. In deze opbarstanalyse wordt de grenspotentiaal bepaald aan de hand van conservatieve uitgangspunten. Dit zijn:

- Afmetingen van de kwelsloot
Dit betreft de 95% bodemligging en 5% bodembreedte.
- Positieve invloed van sloottaluds
De positieve invloed van de sloottaluds, als gevolg van spanningsspreiding, wordt meegenomen conform NEN9997-1 (Normcommissie Geotechniek, 2017)¹⁵.
- Hoog volumiek gewicht van de slecht waterdoorlatende lagen
Het volumegewicht waarmee gerekend dient te worden is 1 kN/m^3 hoger dan op de locatie waar voorloopsheid wordt beschouwd¹⁶.

¹⁵ Merk op dat een veel voorkomende werkwijze bij dijkveiligheid is de 2:1 methode. Daarbij is de aanname dat spanningen in de ondergrond precies spreiden onder een 2:1 helling. Dit is een vereenvoudiging, verschillen ontstaan bij brede watergangen en putten. Een meer correcte methodiek is spanningsspreiding conform Boussinesq. Deze is opgenomen in NEN9997-1.

¹⁶ Het volumegewicht van de deklaag varieert over de lengte en dwarsrichting van de dijk. Deze varieert ook in de verticaal. Het volumegewicht heeft invloed op de elasticiteitsmodulus. De eerdergenoemde spanningsspreiding is alleen valide wanneer alle grondlagen een homogene elasticiteit hebben. Het ongunstige geval is dus dat ter plaatse van de kwelsloot, die dient op te barsten, er een zwaarder deel van de deklaag ligt dan elders. Daardoor is op deze locatie ook een grotere invloed van het talud, waardoor opbarsten (nog) moeizamer plaatsvindt.

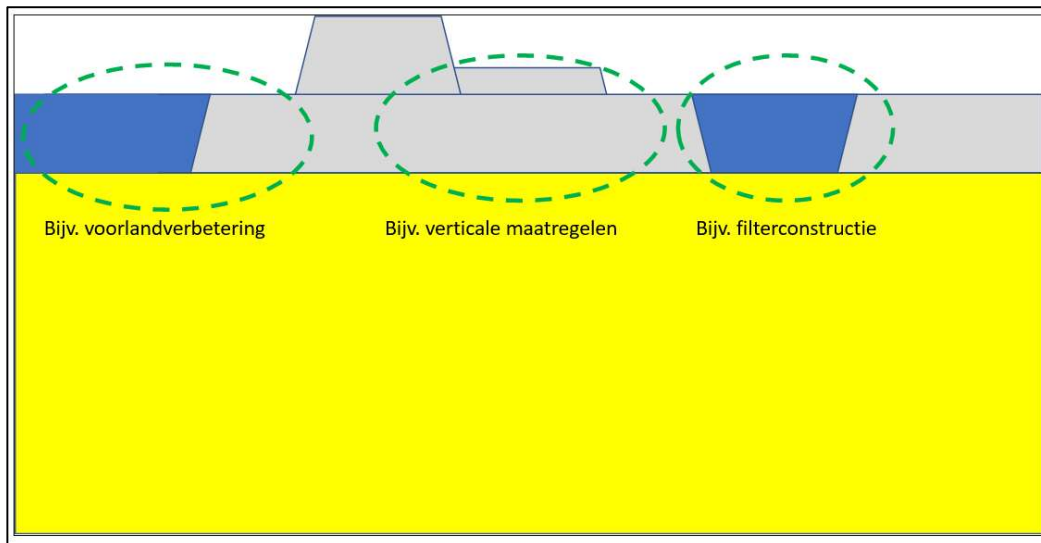
Vaak wordt een theoretische variatiecoëfficiënt van 0,05 op de parameter ($\gamma_{\text{sat}} - \gamma_{\text{water}}$) toegepast. Een deklaag met een volumegewicht van 15 kN/m^3 is 5 kN/m^3 zwaarder dan water. De verwachte standaarddeviatie is $0,025 \text{ kN/m}^3$. Deze waarde is erg theoretisch, het volumegewicht wordt namelijk ook bepaald door de verhouding in de samenstelling van de deklaag, zoals klei versus veen, de variatie in samenstelling is waarschijnlijk veel groter dan $0,025 \text{ kN/m}^3$. De toeslag van 1 kN/m^3 is een pragmatische waarde waarin alle variaties zijn ondervangen.



4.4 Algeheel ontwerp

4.4.1 Horizontale positie

Maatregelen tegen piping kunnen in oplossingsfamilies worden ingedeeld. In Figuur 4.9 zijn er drie locaties van de dijk weergegeven waar de verschillende oplossingsfamilies plaatsvinden. Aan de buitendijkse zijde zijn oplossingen zoals een voorlandverbetering toepasbaar. Aan de binnenzijde zijn oplossingen zoals (horizontale) filterconstructies een optie, bijvoorbeeld een grindkoffer. Daar tussenin zijn verticale oplossingen toepasbaar, het middelste groene kader in de figuur. Het VZG is hier één van, naast andere verticale filtertechnieken als GZB en een kunststof filterscherm. Plaatsing in de binnenteen heeft de voorkeur zodat het erosiekanaal relatief vroeg in het faalproces gestopt wordt en omdat dit het beste aansluit bij de uitgevoerde proeven.



Figuur 4.9: Locaties van verschillende oplossingsfamilies.

De horizontale positie wordt bepaald door de volgende aandachtspunten:

- Beheer en onderhoud
- Andere faalmechanismes
- Toekomstige ruimtelijke ontwikkelingen
Expliciete aandacht voor uitvoeringsfase, ophogingen en horizontale vervormingen.
- Het Programma van Eisen
In het bijzonder eisen aan de BGT
- Uitvoerbaarheid
Daarbij gelden zaken zoals beschikbare werkruimte, aanwezige objecten, aansluitingen, op- en afritten
- Rekenkundig ontwerp
Deze omvat: heave, terugschrijdende erosie en opbarstrisico's bovenstrooms

Beheer en onderhoud

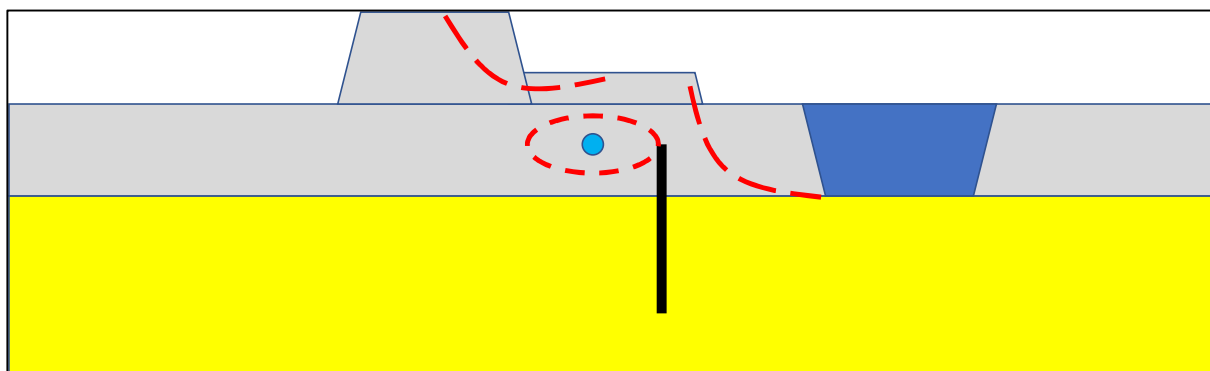
Beheer en onderhoud vinden plaats op en rondom de dijk en watergangen. Daarbij wordt gebruik gemaakt van materieel. Dit materieel mag niet leiden tot schade aan het VZG. In de regel wordt dit ondervangen door een minimale dekking (zie paragraaf 4.4.2). Indien een VZG nabij een watergang is gepositioneerd, dan mag beheer en onderhoud aan de watergang (bv. hekkelen, het schoonmaken van de watergang) niet leiden tot schade aan het VZG. Indien vanuit regionaal waterbeheer een wijziging is voorgenomen van de watergang, dan dient dit inpasbaar te zijn rondom het VZG. In de regel is een afstand van 1 á 2 m ten opzichte van de insteek van een watergang passend om schade gedurende regulier beheer- en onderhoud te voorkomen.

Extra aandacht gaat uit naar dierlijke graverij. Handvatten zijn gegeven in paragraaf 4.6.4. Soms worden in het beheer keuzes rondom het VZG gemaakt ten behoeve van de dijkveiligheid, zoals beverwerende maatregelen. In dit geval is de inpassing van het VZG op deze maatregelen gewenst zodat ook het VZG wordt beschermd.

Andere faalmechanismes

Andere faalmechanismes kunnen optreden die negatieve invloed hebben op een VZG, dit is weergegeven in Figuur 4.10. Voorbeelden zijn het afschuiven van de dijk, afschuiven van een sloottalud als gevolg van een zware lokale (verkeers-) belasting, falen van (water/gas) leidingen, omwaaien van bomen (zie paragraaf 4.6.5) en dergelijke. De gecombineerde kans op falen gegeven bovenstaande beïnvloedende factoren dient zodanig klein te zijn dat de dijk blijft voldoen aan de ontwerp-eis.

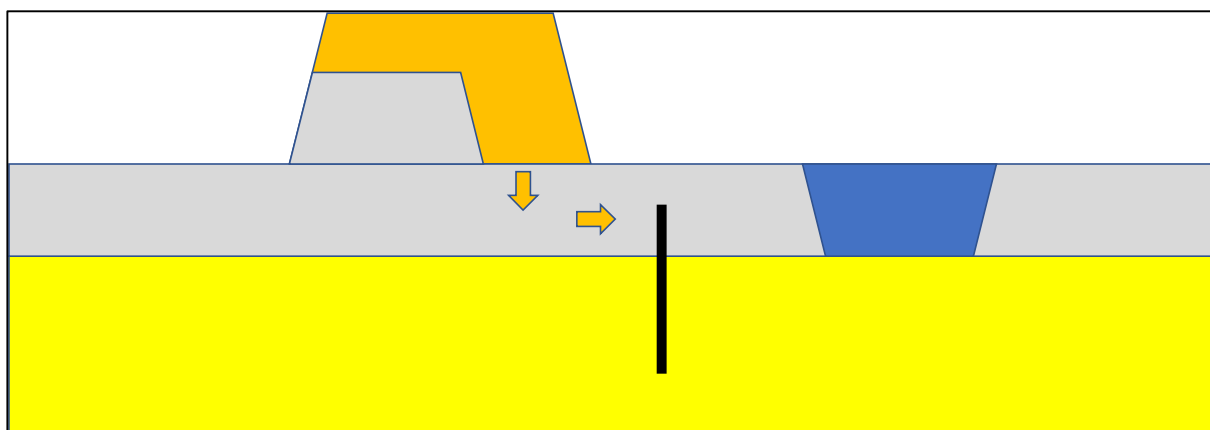
De rekenwijze voor deze mechanismen, zoals de invloed van bomen en kabel- en leidingen, is niet in deze OBOR opgenomen. Hiervoor wordt verwezen naar specifieke documentatie, zoals (POV K&L, 2020).



Figuur 4.10: Invloed van andere faalmechanismes op de locatiekeuze van een VZG.

Ruimtelijke ontwikkelingen

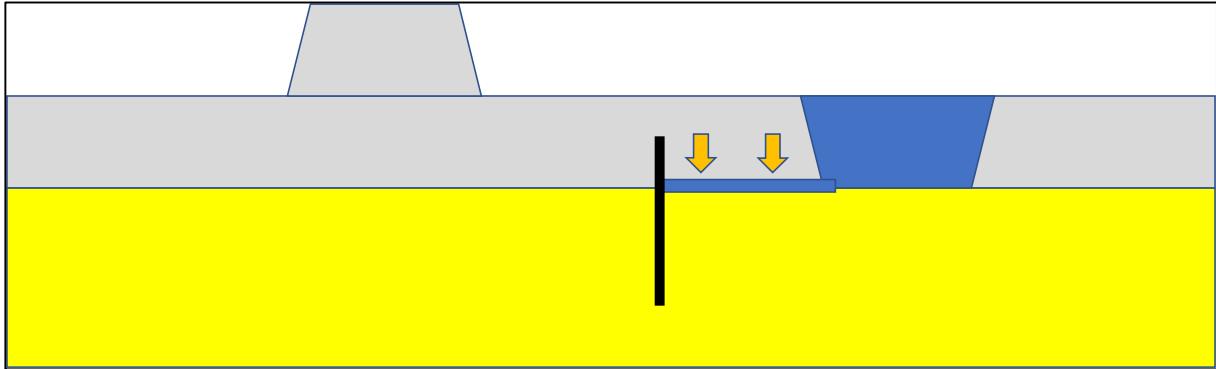
Het kan zijn dat de locatie van een VZG in de huidige situatie passend is, maar door ruimtelijke ontwikkelingen kan dit veranderen (bijvoorbeeld toekomstige dijkversterkingen). Aanvullende aandacht gaat uit naar voorgenomen ophogingen. Deze kunnen leiden tot verticale zettingen en horizontale vervormingen. Getoetst dient te worden dat door deze vervormingen een geotextiel niet onacceptabel wordt belast. Rekenwijze van vervormingen is gegeven in specifieke documentatie, zoals (CUR, 2010) voor horizontale vervormingen als gevolg van zettingen.



Figuur 4.11: Invloed van ruimtelijke ontwikkelingen, hier een nabije dijkversterking

Kaders vanuit het Programma van Eisen

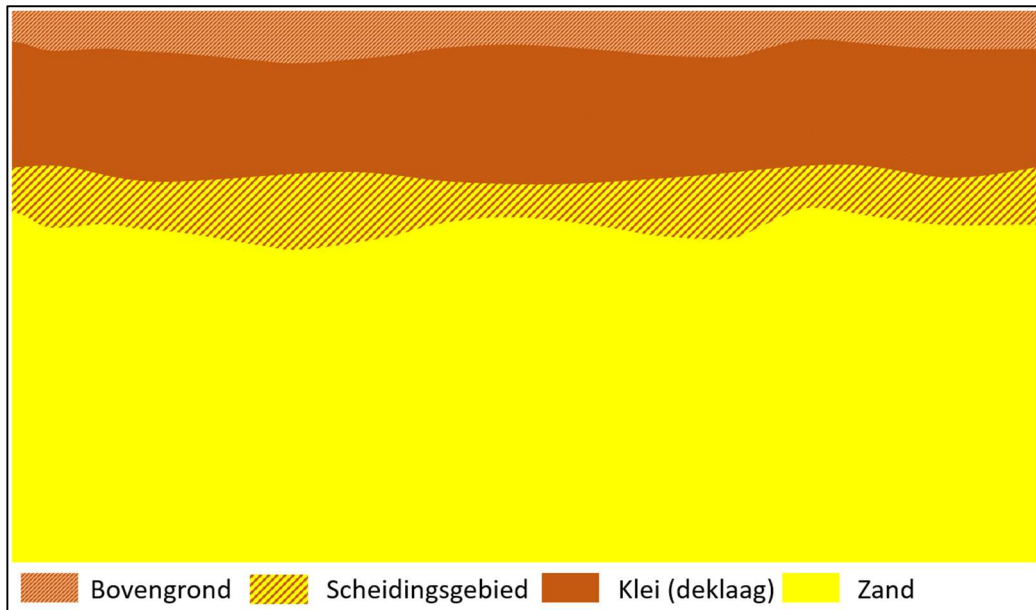
De kaders in het Programma van Eisen hebben mogelijk invloed op de keuze in de horizontale positie van het VZG. Hierbij kan worden gedacht aan het gedrag van een VZG onder extreme condities. Tussen het uittredepunt en het VZG kunnen erosiekanalen ontstaan. Wanneer hier buitensporige erosie plaatsvindt, kan dit leiden tot maaiveldddaling ter plaatse van de erosiekanalen. Metingen geven aan dat deze daling in gemiddeld genomen gering is, maar wel lokaal kunnen variëren. Daardoor geeft dit geen veiligheidsrisico, maar kan de ongelijke daling wel impact hebben op andere gebruiksfuncties.



Figuur 4.12: Locatie waar maaiveldddaling kan optreden bij buitensporige erosie

4.4.2 Verticale positie

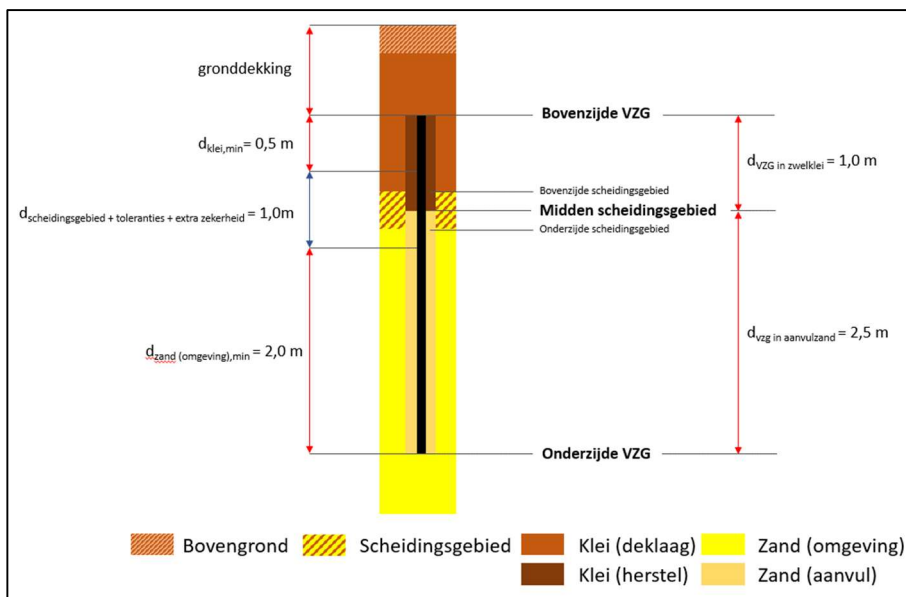
Om de verticale positie van het VZG te bepalen worden meerdere grondlagen onderscheiden: bovengrond, deklaag, scheidingsgebied en zandlaag. Deze lagen zijn beschreven in paragraaf 4.2 en zijn grafisch weergegeven in Figuur 4.13.



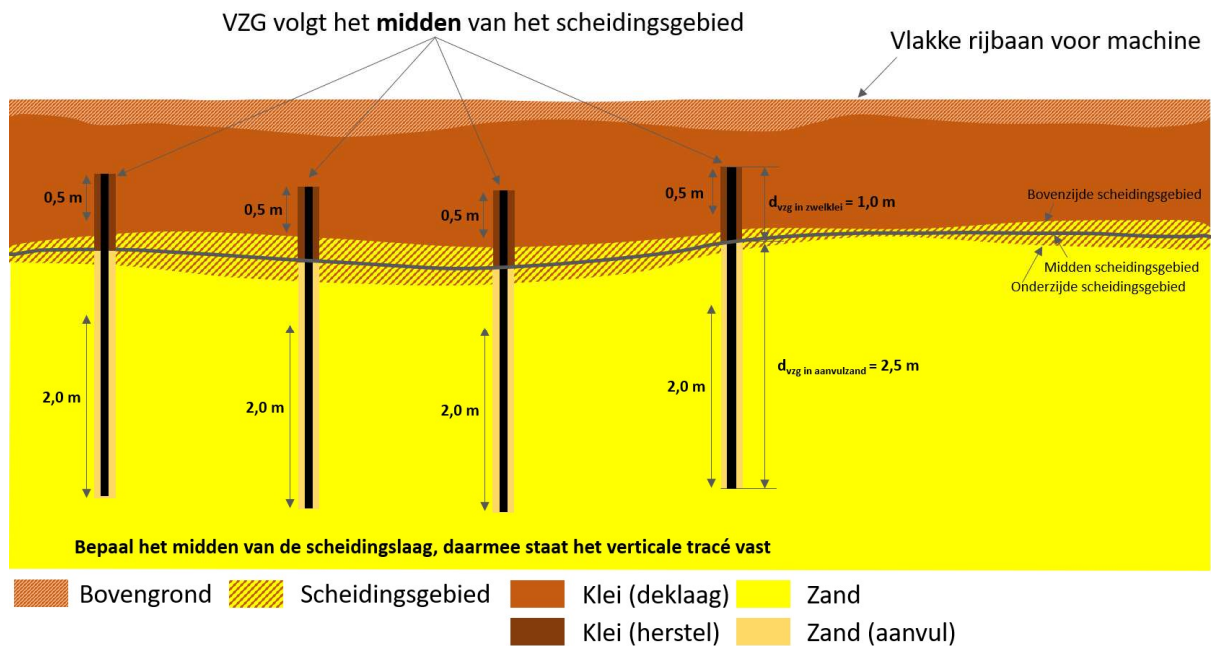
Figuur 4.13: Relevante grondlagen VZG

Bij de verticale positie wordt rekening gehouden met variërende bodemopbouw in de lengterichting van de dijk. Voor de lengte en verankering van het VZG zijn vier parameters van belang (Figuur 4.14 en Figuur 4.15), deze zijn:

- Bovengrond;
- Verankering in de kleilaag;
- Dikte scheidingsgebied;
- Verankering zandlaag.



Figuur 4.14. Definitie parameters VZG (lengte van 3,5 m geotextiel is nu gebruikelijk maar geen wetmatigheid)



Figuur 4.15. Lengteprofiel locatie VZG

De totaal benodigde theoretische lengte van het VZG op een puntlocatie is daarmee:

$$L_{VZG} = d_{klei} + d_{sch} + d_{zand}$$

Waarin

d_{klei}	Kleilaagdikte met VZG	[m]
d_{sch}	Dikte scheidingslaag met VZG	[m]
d_{zand}	Dikte zandlaag met VZG	[m]

De aan te brengen lengte van het VZG is daarnaast nog afhankelijk van:

1. De maaknauwkeurigheid (tolerantie) in verticale richting;
2. De maximale helling waaronder de deklaagscheiding gevolgd kan worden door de machine.

Voor deze twee parameters wordt verwezen naar hoofdstuk 5 uitvoering.

Minimale gronddekking (d_{grond})

De minimale gronddekking betreft de verticale afstand tussen het VZG en het maaiveld. Bij een VZG worden soms aanvullende maatregelen getroffen zoals het ophogen van het maaiveld tegen lokaal opbarsten. Daardoor is er een zekere ontwerprijheid rondom het maaiveldniveau.

De minimale dekking is ca. 0,5 m. Dit geeft de mogelijkheid voor planten en bodemleven om te groeien zonder interactie met het VZG. Daarnaast is het VZG hiermee niet kwetsbaar voor lokale verstoringen, zoals bodemvervormingen door zwaar materieel (zoals tractoren) in de gebruiksfase.

Andere waarden kunnen aangehouden worden op basis van het grondgebruik. Indien de locatie een weg is, dan dient de minimale gronddekking afgestemd te zijn op het wegcunet. Indien de locatie een landbouwperceel is, dan dient de minimale gronddekking afgestemd te zijn op landbewerking. Indien er drainage aanwezig is, dan is het wenselijk dat de realisatie van drainage geen invloed heeft op het VZG. Dit geeft, afhankelijk van de situatie, een minimale dekking van 0,8 tot 1,5 m.

Minimale verankering kleilaag (d_{klei})

De minimale verankering in de kleilaag betreft de laagdikte van de klei langs het VZG. De minimale verankering voorkomt bovenloopsheid (bijvoorbeeld ten gevolge van erosie van de onderzijde deklaag).

Voor de verankering in de kleilaag kan een $d_{min} = 0,5 \text{ m}$ gehanteerd worden. Deze waarde is exclusief variatie van de bodemopbouw en maaknauwkeurigheid.

Merk op dat op sommige locaties de bodemopbouw sterk varieert. Daardoor is de aanwezige kleilaag soms te dun voor en de minimale deklaag en de minimale verankering kleilaag. Het ontwerp omvat meerdere onderdelen. Een ervan is het voorkomen van voorloopsheid. Een maatregel daartegen is het aanleggen van een lokale steunberm. Daardoor kunnen knelpunten rondom de minimale verankering kleilaag worden ondervangen.

Dikte scheidingsgebied (d_{sch})

De dikte van het scheidingsgebied is locatiespecifiek en hangt van de lokale bodemopbouw. Bij een scherpe overgang tussen klei en zand kan de laag afwezig zijn. Bij een onduidelijke overgang kan de laag dikker zijn. De laag kan ook zo groot worden dat het de toepassing van het VZG uitsluit (benodigde lengte VZG groter dan maximaal aan te brengen). Handvatten voor het bepalen van het scheidingsgebied zijn gegeven in paragraaf 4.2.

Minimale verankering zandlaag (d_{zand})

De minimale verankering in de zandlaag betreft de laagdikte van het zand langs het VZG. De minimale verankering voorkomt onderloopsheid.

Voor ontwerp moet een waarde van $d_{min} = 2,0$ m gehanteerd worden (eenvoudige toets, zie paragraaf 4.3.1). Van deze waarde kan afgeweken worden indien dit aangetoond wordt door middel van een (locatiespecifieke) heave-analyse (geavanceerde toets, zie paragraaf 4.3.1).

4.4.3 Ontwerp geotextiel (doorloopsheid)

Het ontwerp van het geotextiel bestaat uit de volgende delen die in deze paragraaf achtereenvolgens zijn behandeld:

- Mechanische eigenschappen geotextiel;
- Grondichtheid (doorloopsheid);
- Minimale doorlatendheid;
- Risico op verstopping;
- Veroudering.

Mechanische eigenschappen geotextiel

Een geotextiel heeft mechanische eigenschappen zoals: treksterkte, elasticiteitsmodulus, maximale rek, woven versus non-woven. De grootste krachten in het geotextiel zijn te verwachten gedurende het aanbrengen, het is belangrijk dat in de uitvoeringsfase het geotextiel onbeschadigd aangebracht wordt. Om dit te garanderen zijn de volgende randvoorwaarden van belang:

- De treksterkte dient conform CUR205 (CUR, 2017) minimaal 35 kN/m te zijn;
- Het is vereist om gedurende het inbrengen het geotextiel te monitoren (zie voor voorbeelden paragraaf 5.3) en vast te stellen dat het doek onbeschadigd ingebracht wordt.

De volgende praktijkervaring is relevant:

- De horizontale uitvoeringswijze heeft tot nu toe (zoals bij o.a. Twentekanalen) gebruik gemaakt van een woven geotextiel met een treksterkte van 60 kN/m. Een woven geotextiel heeft ten opzichte van een non-woven geotextiel een hogere treksterkte en lagere rek.

Grondichtheid

De openingen van een geotextiel worden uitgedrukt met de karakteristieke poriegrootte O_{90} . Het geotextiel dient te voldoen aan zanddichtheidscriteria. Deze criteria gelden op ieder onderzocht punt¹⁷. Handvaten voor de hoeveelheden te onderzoeken locaties zijn gegeven in paragraaf 4.2. De afmetingen van de poriegroottes moeten worden afgestemd op de korrelgroottes van de omliggende grond¹⁸ én het aanvulzand. De ontwerpisen zijn gegeven in CUR174 (CUR, 2009) en CUR205 (CUR, 2017).

¹⁷ Algemene aanbeveling is om een ontwerp te maken per ca. 2 km kering. Dit geeft met de aanbevolen intensiteit aan grondonderzoek voldoende zeefanalyses (8 st) om lokale variaties mee te nemen. Daarnaast geeft dit de mogelijkheid op locaties met afwijkende bodemeigenschappen een locatiespecifiek ontwerp te maken.

¹⁸ In het theoretische geval dat het aanvulzand perfect is aangebracht en altijd perfect aansluit rondom het VZG en het aanvulzand voldoet aan de criteria van een granulaire filter voor de omliggende bodem, dan hoeft het VZG niet ontworpen te worden op de natuurlijk aanwezige bodem.



De criteria gaan uit van stationaire belasting vs. dynamische belasting en stabiele vs. instabiele grond. Enige achtergrond daarbij is gegeven in het Intermezzo “Achtergronden bij grond dichtheid”.

De criteria gelden voor:

- Grond met een $d_{40} > 60 \mu\text{m}$;
- Stabiele grond¹⁹;

Stationaire belasting (stroming), criteria conform CUR205:

1. Criterium 1: $O_{90} < 2 \cdot d_{90}$;
2. Criterium 2: $O_{90} < 5 \cdot d_{10} \cdot Cu^{1/2}$;
3. Criterium 3: $O_{90} < 500 \mu\text{m}$.

Dynamische belasting (stroming), criteria conform CUR174²⁰, zie onderstaand intermezzo:

1. Criterium 1: $O_{90} < d_{90}$;

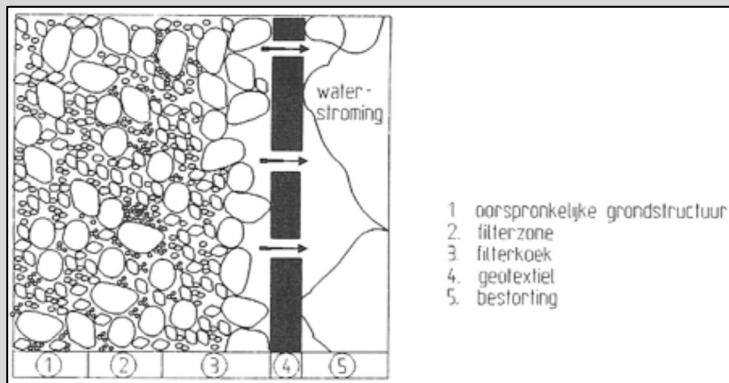
¹⁹ Stabiele grond ($Cu = d_{60}/d_{10} < 10$). In de regel voldoen grondmonsters van Nederlandse bodem aan deze eis mits er sprake is van slibarme grond (In de meeste zeefmonsters van schoon zand in Nederland ligt de d_{60}/d_{10} verhouding tussen 1,5 en 2,5. Aandachtspunt is vooral de aanwezigheid van andere delen dan schoon zand in de bodem, zoals slib-deeltjes). Niet stabiele grond is niet pipinggevoelig, zie intermezzo op volgende pagina.

²⁰ Dynamische belastingen variëren van een geringe verandering van stroomrichting van het grondwater tot zware golfklappen waarbij verweking van de grond achter een geotextiel op kan treden. In CUR205 ontwerprichtlijn voor geotextielen onder steenbekleding (CROW-CUR, 2021) zijn ook handvatten opgenomen voor het ontwerp van geotextielen bij dynamische belastingen. Deze zijn echter bedoeld, zoals de naam al zegt, voor geotextielen onder steenbekleding. De eisen zijn dan ook strenger dan die in CUR174. De eisen van CUR174 zijn meer passend voor het VZG.



Intermezzo: Achtergronden bij gronddichtheid

Achtergronden van gronddichtheid zijn onder andere terug te vinden in CUR174 (CUR, 2009). Hier is een beknopte uitsnede gegeven. Geotextielen hebben meestal de functie om gronddicht te zijn. Het omgekeerde hiervan, transport van gronddeeltjes, kan binnen een korrel skelet ontstaan wanneer er ruimte is (poriën tussen de korrels) en wanneer er een aandrijvende kracht aanwezig is (grondwaterdruk, verhang in het grondpakket). Grond bestaat doorgaans uit deeltjes van sterk verschillende diameter en vorm, hetgeen wordt weergegeven in de zeeffromme. Kleinere deeltjes kunnen door grondwaterstroming dwars door het geotextiel verdwijnen. Het achtergebleven korrel skelet kan dan de filterfunctie vervullen; zie Figuur 4.16.



Figuur 4.16: Opbouw van een natuurlijk filter (CUR, 1991), (Mlynarek, 1994) en (CUR, 2009)

Interne stabiliteit van het korrel skelet en piping

Bij een losse korrel stapeling van de grond kunnen veel kleinere gronddeeltjes door de openingen van het geotextiel spoelen voordat, nabij de scheiding tussen het geotextiel en ondergrond, een stabiel korrel skelet ontstaat. Er is sprake van een stabiel korrel skelet indien $c_u = d_{60}/d_{10} < 10$. Het VZG is een techniek die wordt toegepast om het faalmechanisme piping tegen te gaan. Piping wordt o.a. bepaald aan de hand van de rekenregel van Sellmeijer. Deze is geldig binnen het bereik van $1,5 < c_u < 2,5$ (Deltares, 2012).

Pipingonderzoek waarbij extremere c_u -waarden zijn onderzocht, geven aan dat bij een c_u extremer dan 5 geen falen meer optreedt (Schmertmann, 2000). Resumerend geldt dat instabiele gronden niet pipinggevoelig zijn. Daarom hoeft een VZG niet ontworpen te worden voor instabiele gronden.

Stationaire vs. dynamische stroming

In de literatuur wordt een beschrijving gegeven de stromingscondities die rondom een geotextiel gelden. Deze zijn stationair of dynamisch. Soms wordt de laatste verder onderverdeeld in "milde (oppervlaktewater) stroming" en "zware golf aanval". De opbouw rondom het natuurlijke filter is gegeven in Figuur 4.16. Te zien is dat er een brug is ontstaan waardoor kleinere delen tegengehouden worden. De opbouw hiervan kan ontstaan in enkele uren, ca. 100 uur, of in enkele maanden (Mlynarek, 1994). Bij dynamische belasting kan deze brug niet ontstaan en is een strenger filtercriterium nodig. Bij zware dynamische belasting kan (als gevolg van golfklappen) verweking optreden rondom een geotextiel.

De toepassing van een VZG betreft een middenweg tussen stationaire stroming en milde oppervlaktewaterstroming. Daarbij is de stroomsnelheid tijdens hoogwater afwijkend van de stroomsnelheid onder dagelijkse omstandigheden. Soms is er een meer dynamisch regime, dan stroomt het water onder de dijk door van de landzijde naar het buitenwater en verandert deze stroomrichting tijdens hoogwater.

Onderstaande geeft handvatten voor het belastingregime:

- Stationaire stroming
Grondwater heeft altijd dezelfde stroomrichting.
of
Grondwater heeft tijdens hoogwater dezelfde stroomrichting als tijdens dagelijkse omstandigheden voor ten minste 9 maanden per jaar. De achtergrondgedachte is dat een nieuwe brug rondom het VZG kan ontstaan voordat het hoogwater optreedt. Daarnaast is de stroomsnelheid in de overige 3 maanden gering waardoor het korrel skelet niet substantieel wordt beïnvloed.
- Dynamische stroming.
Alle overige gevallen.

Minimale doorlatendheid

Een VZG is zo ontworpen dat het waterdoorlatend is. Een zo minimaal mogelijke weerstand tegen stroming is gewenst. Het betekent echter niet dat een lagere doorlatendheid (dan het natuurlijk aanwezige zand) direct leidt tot onvoldoende veiligheid. Een lage doorlatendheid is voor een VZG acceptabel, mits dit wordt meegenomen in het ontwerpproces. Er gelden daardoor twee ontwerpopties.

Ontwerp optie 1: VZG met hoge doorlatendheid

Handvatten voor de minimale doorlatendheid zijn gegeven in CUR174. Als ontwerpcriterium geldt dat de waterdoorlatendheid van het geotextiel groter moet zijn dan die van de grond aan de uitstroomzijde. Als praktijkrichtlijn kan het onderstaande gehanteerd worden.

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

Voor de factor kan een waarde van 10 worden gehanteerd zodat conform de CUR174 geen overdruk ontstaat.

Bovenstaande rekenregel heeft een beperkte toepasbaarheid. De doorlatendheid van een geotextiel wordt namelijk bepaald in een proef zonder grond. Gronddeeltjes komen voor de openingen van een geotextiel te zitten waardoor er bij toepassing in grond sprake is van een afname van de doorlatendheid van een geotextiel. Metingen van de doorlatendheden van geotextielen in zand zijn gedaan door (Bezuijzen, Beek, & Schenkeveld, 2012). De conclusie is dat de doorlatendheid van een geotextiel, mits deze voldoet aan eerdergenoemde doorlatendheidseisen, de volgende weerstand heeft:

- Een geotextiel heeft een weerstand groter dan nihil, maar lager dan de weerstand van 30 mm van het omliggende bodemmateriaal.

Derhalve wordt in geohydrologische analyses ontworpen op basis van een geotextiel met een weerstand gelijk 30 mm van het omliggende bodemmateriaal. Deze weerstand wordt nog verhoogd om het risico op verstopping af te dekken.

Ontwerpopitie 2: VZG met nader te bepalen doorlatendheid

Indien niet aan de eisen vanuit de CUR174 wordt voldaan, kan een VZG nog steeds deugdelijk functioneren. In dit geval is sprake van een grotere weerstand van het VZG en eventuele fysische verstopping. Deze grotere weerstand en het risico op fysische verstopping dienen bepaald te worden met laboratoriumproeven (doorlatendheidsmeting in proefopstelling met zand en geotextiel) die vergelijkbaar zijn met of beter zijn dan die in (Bezuijzen, Beek, & Schenkeveld, 2012). De gevonden weerstand wordt meegenomen in verdere (geohydrologische) berekeningen.

Afname doorlatendheid en verstopping geotextiel

De doorlatendheid van geotextielen kan afnemen, in het meest extreme geval verstopt een geotextiel volledig. Geotextielen die goed zijn ontworpen en aangelegd hebben een verwaarloosbaar risico op volledige verstopping. Een analyse van de literatuur over dit onderwerp is opgenomen in bijlage 3. Er zijn ook zeldzame gevallen waarin volledige verstopping optreedt (zie intermezzo). Het is noodzakelijk om te verifiëren of een project te maken heeft met een van deze zeldzame gevallen. Indien dat niet het geval is, kan uitgegaan worden van een geringe mate aan verstopping.

De omgangswijze met het risico op verstopping van het VZG is in deze OBOR als volgt:

- Algemene eisen doorlatendheid.
De doorlatendheid van het VZG wordt bepaald conform eerdergenoemde ontwerpvoorschriften. Het VZG heeft een minimale levensduur conform het Programma van Eisen.
- Afname doorlatendheid conform CUR174 en CUR243.
Deze bronnen stellen dat de doorlatendheid kan afnemen (afname doorlatendheid van het geotextiel met factor 2 á 2,16²¹). In ontwerpberoekeningen (heave-analyse) dient dit meegenomen te worden.

²¹ In paragraaf 1.4.3 en 1.5.6 van CUR243 wordt invulling gegeven aan verstopping middels een reductiefactor (RF_{tot}). Dit wordt voor geotextielen berekend als RF_{tot} = RF_{we} x RF_{CR} x RF_{IN} x RF_{CC} x RF_{BC} x RF_{ID}. Voor het toepassingsgebied bij dijken gelden reductiefactor voor tijdsafhankelijke intrusie van de grond (RF_{IN} = 1,2), reductiefactor voor chemische verstopping (RF_{CC} = 1,2) en een reductiefactor voor chemische verstopping (RF_{BC} = 1,5). Dit geeft een totale reductiefactor voor de doorlatendheid van RF_{tot} = 2,16. Overige effecten, zoals samendrukken (RF_{cc}), schade door aanleg (RF_{ID}) en schade door blootstellen aan zonlicht in de aanlegfase (RF_{WE}) zijn hierbij buitenbeschouwing gelaten.



- Neerslag ijzer boven de GLG.
In het deel boven de GLG kan door ijzernerslag de doorlatendheid verder afnemen. In dit geval neemt de doorlatendheid af tot die van de bestaande bodem. Handvatten voor de onderzoeksdichtheid hiervan zijn gegeven in paragraaf 4.2. Merk op dat door een afname van de doorlatendheid van de zandlaag het risico op terugschrijdende erosie afneemt, waardoor de dijkveiligheid zonder VZG toeneemt.

Intermezzo: Geldigheidsgebied conclusies rondom verstoppingen

Er is een analyse gemaakt van het risico op verstoppingen. Deze is opgenomen in bijlage 3. Daaruit blijkt dat het risico verwaarloosbaar is voor het VZG. Voorbeelden waarin geotextielen wel verstopten zijn gegeven in (Koerner, 2013). De conclusie dat verstopping een verwaarloosbaar risico is, is geldig binnen een zeker parametergebied. Nagenoeg alle waterkeringen vallen hierbinnen.

Viscositeit van water

Het geldigheidsgebied omvat de viscositeit van de vloeistof. Deze dient gelijk te zijn aan die van water. In (Koerner, 2013) is beschreven dat verstopping optreedt bij het gebruik van vloeistoffen met een andere viscositeit. Voorbeelden zijn: olie, modder en mest.

Chemische kwaliteit van water

Het geldigheidsgebied omvat de chemische kwaliteit van het water. Deze dient gelijk te zijn aan de geëiste kwaliteit in Besluit Lozen Buiten Inrichtingen (BLBI). In (Koerner, 2013) is beschreven dat verstopping kan optreden wanneer de waterkwaliteit afvalwater betreft. Er is dan risico op biologische verstopping. Dit is (alleen) waargenomen in situaties waarbij COD₅ tussen de 3.000 en 32.000 mg/l ligt. Dit is een factor 20 tot 200 hoger dan de kwaliteitseisen die BLBI stelt (COD₅ <150 mg/l).

Aandacht dient ook uit te gaan naar de pH-waarde. In een sterk basisch milieu (pH > 9) gaat de levensduur van geotextielen sneller achteruit. In een sterk zuur milieu (pH <4) gaat de levensduur van geotextielen sneller achteruit. Geotextielen die qua materiaal hier niet op zijn ontworpen en een te korte levensduur hebben, kunnen daardoor gaan verstopten. De zuurgraad van regulier grondwater ligt tussen pH = 6,5 en 7,5.

Niet rondom een drainagebuis

Het geldigheidsgebied betreft toepassing van een geotextiel met grond aan weerszijden. In (Koerner, 2013) is beschreven dat verstopping kan optreden wanneer een geotextiel rondom een drainagebuis aanwezig is. Wanneer hoge ijzergehaltes in het grondwater zitten (dat geconcentreerd stroomt naar de drainagebuis), dan kan zuurstof (vanuit de drainagebuis) leiden tot neerslag van ijzer in de vorm van oker. Dit laatste is een slecht doorlatende slibachtige substantie.

Goed ontwerp / goede uitvoering

Het geldigheidsgebied gaat uit van een goed ontwerp en goede uitvoering. In (Koerner, 2013) wordt gesteld dat de meeste oorzaken van verstopping komen door een onjuist ontwerp of uitvoering. Dit betreft gebruik van een verkeerd type geotextiel, aanleg in verkeerde bodemlagen en het gebruik van overdaad aan hulpstoffen (bv. lijm).

Veroudering

De minimaal vereiste levensduur wordt bepaald bij het vaststellen van het Programma van Eisen, dit is benoemd in paragraaf 4.4.3. Het aantonen van een minimale levensduur valt binnen het ontwerpproces. Dit is afhankelijk van de toe te passen materialen en de omgevingsinvloeden.

Het borgen van de vereiste levensduur zorgt ervoor dat het geotextiel gedurende de levensduur zowel doorlatend als grond dicht is.

Er bestaan biologisch afbreekbare geotextielen. Deze hebben een (bewust) korte levensduur en zijn daardoor niet geschikt als langdurige dijkversterkingsmaatregel. De meeste geotextielen bestaan uit kunststof, zoals: polyester, polypropyleen, polyethyleen, poliamide, of polyvinyl. Ieder materiaal heeft verschillende kwetsbaarheden en verouderingsprocessen. Gedetailleerde informatie is te vinden in CUR243 'Durability of Geosynthetics' (SBR-CUR, 2012).

Hoofdlijnen zijn de volgende:

- Kwetsbaar voor zonlicht en UV-straling.
Veel geotextielen zijn UV-gestabiliseerd waardoor deze meer bestendig zijn tegen UV-straling. Dit wordt gemeten middels proeven zoals beschreven in ISO 4892-3²². De UV-bestendigheid wordt uitgedrukt in tijd (dagen of jaren), of in lichtbelasting (kilolichtjaar, Kly). De UV-bestendigheid is een relevante parameter voor geotextielen die in het veld liggen (opslag of voorafgaand aan inbrengen), eenmaal in de grond zal er geen UV-straling het geotextiel bereiken.
- Sommige geotextielen verouderen onder invloed van water (hydrolyse) of zuurstof (oxidatie) en zijn daarom niet geschikt als VZG.
- Verouderingsprocessen worden beïnvloed door tijd, temperatuur en pH-waarde. Daarbij leiden hoge temperaturen (hoger dan 20°C) of basisch water (pH 10 of hoger) tot een versnelde veroudering.
- De productie van geotextielen omvat (soms) chemische toevoegingen die het geotextiel minder kwetsbaar maken tegen bovenstaande zaken waardoor lange levensduren behaald kunnen worden.

Bij het bepalen van de levensduur van een geotextiel worden aannames gemaakt over zaken zoals temperatuur en oxidatie. In de beheerfase kunnen deze veranderen. Bijvoorbeeld de temperatuur kan veranderen indien er leidingen worden aangelegd (elektrakabels dragen warmte af aan de omgeving). Oxidatie kan optreden op delen die normaliter onder de grondwaterstand liggen door een tijdelijke daling van de grondwaterstand (bv. in een zeer droge zomer, of als gevolg van een tijdelijke bemaling). De aangehouden kaders dienen vastgelegd te worden en dienen een plek te krijgen in het beheerplan (zie hoofdstuk 6).

4.4.4 Aanvulzand

Bij het ontwerp van het aanvulzand zijn de volgende onderdelen van belang:

- Selectie soort aanvulzand;
- Risico op nazakken.

Selectie soort aanvulzand

Rondom het VZG wordt aanvulzand toegepast. De eigenschappen van dit zand dienen op het VZG-ontwerp afgestemd te worden.

De volgende soorten aanvulmateriaal zijn geschikt:²³

- Zand in zandbed.
- Drainagezand.

De volgende soorten aanvulmateriaal zijn minder geschikt:

- Zand voor ophoging.
- Grind en steenslag.

Geschikt aanvulzand kan goed worden verdicht en heeft een goede doorlatendheid. Tevens heeft deze een kleine fijne fractie. Daardoor is de kans op verstopping van het geotextiel verwaarloosbaar. Daarnaast is het risico dat het natuurlijk aanwezige zand leidt tot verstopping op de overgang met het aanvulzand minimaal²⁴. Van deze materialen is de volgende informatie vereist: korrelverdeling en doorlatendheidsmetingen.

De minder geschikte materialen hebben diverse aandachtspunten. In uitzonderingsgevallen hoeven deze aandachtspunten geen knelpunt te zijn voor de dijkveiligheid maar kunnen het functioneren van het VZG sterk veranderen. De grondsoort “Zand voor ophoging” heeft veel fijne fractie (tot 8% lutum en tot 50% silt). De

22 Volledige titel: ISO 4892-3:2016 Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources — Part 3: Fluorescent UV lamps.

23 Een overzicht van de civieltechnische criteria zijn gegeven op:

<https://www.bodemrichtlijn.nl/Bibliotheek/bodemsaneringstechnieken/d-verwerken-van-grond/d1-algemene-aspecten-verwerk8890/verwerken-van-grond-hergeb82918>

²⁴ In theorie wordt het aanvulzand ook getoetst op zanddichtheid. Handvaten hiervoor zijn o.a. gegeven in CUR197 (CUR, 2000), of in internationale literatuur (FEMA, 2011). Dit leidt tot een eis aan de verhouding tussen de D85 van het omliggende zand en de D15 van het aanvulmateriaal. Drainagezand heeft vaak een D15 van 200-250 µm. De D85 van het omliggende zand mag dan niet kleiner zijn dan 63 µm. Alle zandsoorten voldoen hier per definitie aan, omdat de definitie van zand alle delen groter dan 63 µm betreft.



doorlatendheid van dit materiaal is zeer laag, daarom ontstaat een hoog risico op verstopping. Daarnaast is verdichting als gevolg van de extra bijvoegingen ook moeizamer. Bij het gebruik van klei- en leem geldt hetzelfde aandachtspunt. In beide gevallen dient het ontwerp gebaseerd zijn op een ondoorlatende constructie. Het geotextiel zorgt in dit geval alleen maar voor zekerheid. Het gebruik van grind en steenslag is vergelijkbaar met de geschikte materialen, echter is er risico op schade aan het geotextiel in de uitvoering. In CUR-243 wordt de grens tussen geen schade en mogelijke schade gelegd bij delen groter dan 2 mm (SBR-CUR, 2012).

Risico nazakken

Het risico op nazakken is afhankelijk van de eigenschappen van het aanvulzand en de uitvoeringswijze. Bij de horizontale uitvoeringsmethode wordt het aanvulzand onder de grondwaterspiegel machinaal door middel van vizzeltoevoer geforceerd onder druk aangebracht. Deze uitvoering zorgt ervoor dat er geen holtes zijn.

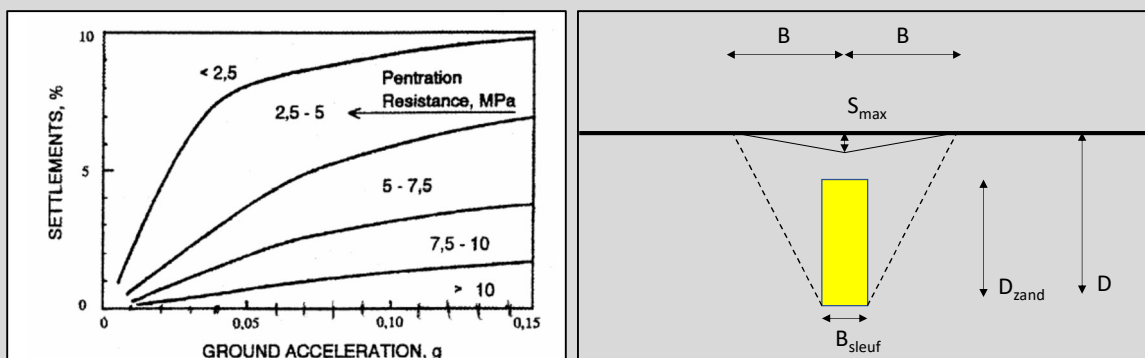
De horizontale uitvoeringsmethode geeft wel risico op nazakken. Bij deze methode wordt om praktische redenen het aangebrachte zand niet verdicht middels vigerende methoden (in lagen van 0,4 m met een trilwals). Metingen wijzen uit dat de pakking daardoor los tot zeer los is (sondeerweerstand van ca. 2,5 MPa). Indien dit door achtergrondprocessen verdicht, dan is sprake van een volume-afname. De absolute waarde van nazakking is in de regel beperkt. Een rekenkundige onderbouwing hiervan is gegeven in het intermezzo "Kwantitatieve onderbouwing risico nazakking". Het risico op doorloopbaarheid als gevolg van nazakken is in de regel verwaarloosbaar door het geotextiel op zowel het natuurlijk aanwezige zand (achtergrondzand) als het aanvulzand te ontwerpen.

Intermezzo: Kwantitatieve onderbouwing risico nazakking

Onderzoek naar volume-afname van los gepakt zand is gedaan in diverse studies, zoals voor damwanden die trillend worden ingebracht. Handvatten zijn gegeven in (Massarsch, 1992), (Massarsch, K.R., 2004) en (Meijers, 2007). Voor de verdichting zijn handvatten gegeven in (Massarsch, 1992). Daaruit blijkt dat de volumeafname tussen de 0 en 10% ligt afhankelijk van de externe (trillings)bron. Dit is weergegeven in Figuur 4.17.

De breedte van de zone waarin nazakking optreedt, is gegeven in (Massarsch, K.R., 2004). De benadering is geschetst in Figuur 4.17. Deze geeft voor de halve nazakkingstrog B de vergelijking: $B = 3 \times B_{\text{sleuf}} + D/2$. Hierin is B_{sleuf} de breedte van de sleuf gegraven met een kettinggraver (ca. 0,3 m). D is de diepte van de sleuf (ca. 4 m).

De nazakking is ook bepaald in (Massarsch, K.R., 2004). Deze geeft aan dat de gemiddelde nazakking een derde is van de maximale nazakking. De gemiddelde nazakking is gegeven met $S_{\text{avg}} = B_{\text{sleuf}} \cdot s\% \cdot D_{\text{zand}} / (2 \cdot B)$. Hierin is D_{zand} de diepte van de sleuf gevuld met los gepakt zand en is $s\%$ het percentage dat het zand is verdicht conform (Massarsch, 1992). Bij $B_{\text{sleuf}} = 3$ m, $s\% = 10\%$ en $D_{\text{zand}} = 3$ m geeft een gemiddelde zetting van $S_{\text{avg}} = 0,015$ m en een maximale nazakking van $S_{\text{max}} = 0,045$ m.

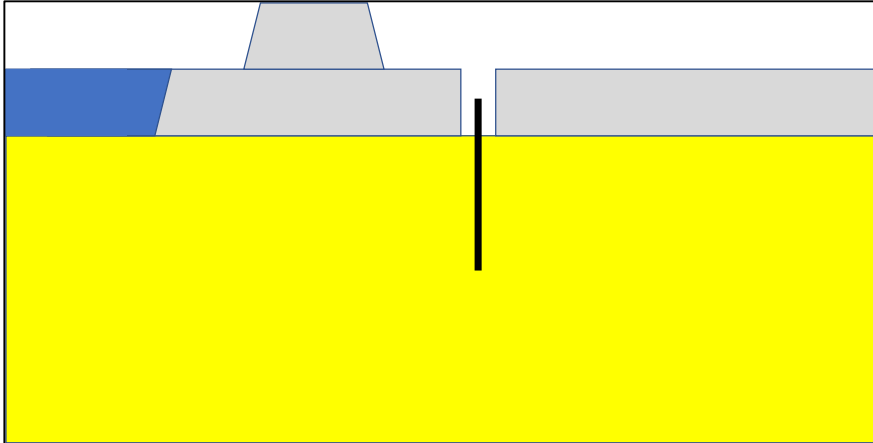


Figuur 4.17: Verdichting van diverse zandsorten als gevolg van (achtergrond) trillingen. (Massarsch, 1992) samen met de nazakkingstrog conform (Massarsch, K.R., 2004)

4.4.5 Herstel deklaag (bovenloopsheid)

Tijdens de uitvoering wordt de deklaag beschadigd, dit is weergegeven in Figuur 4.18. Bij het onderdeel “herstel deklaag” wordt dit hersteld. De mate van herstel is afhankelijk van de gebruikte uitvoeringstechniek. Bij de verticale uitvoeringstechniek is de schade een dunne opening. Bij de horizontale uitvoeringstechniek is dit een opening met de afmeting van een kettinggraver (zie hoofdstuk 5). De deklaag ter plaatse van het VZG heeft de volgende functies:

- uitsluiten voorloopsheid;
- uitsluiten bovenloopsheid.



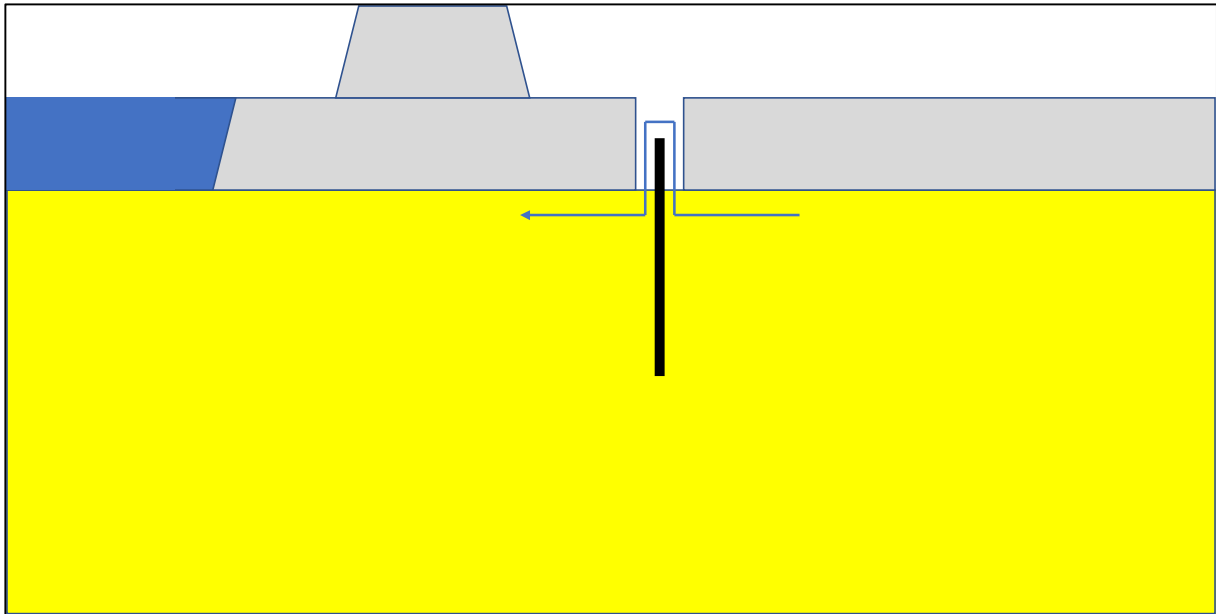
Figuur 4.18: Open ruimte langs het VZG tijdens uitvoering

Het criterium “uitsluiten alternatief uittredepunt” geeft de volgende eis: risico op piping voldoet aan WBI2017 / OI2014v4. In de regel betekent dit dat de open ruimte opgevuld dient te worden met massa. Daarbij kan zowel klei als zand voldoen aan de eisen. Het kan zijn dat op deze locatie aanvullende maatregelen noodzakelijk zijn.

Het criterium “Randvoorwaarden vanuit Programma van Eisen” kan het onderwerp kwel ter plaatse van de binnenteen omvatten. Wanneer de open ruimte ter plaatse van de binnenteen wordt opgevuld met zand, dan neemt de kwel ter plaatse van de binnenteen bij hoogwater toe. Daardoor kan een eis opgenomen zijn, om de opvulling te laten bestaan uit slechtdoorlatend materiaal, zoals klei.

Het criterium “Uitsluiten bovenloopsheid” betreft het risico dat een erosiekanaal groeit tot aan het VZG en dan bovenlangs verder gaat. Bovenloopsheid is weergegeven in Figuur 4.19. Dit risico is op de volgende wijzen uit te sluiten:

- Bovenzijde VZG is voldoende hoog.
of
- Erosiekanaal kan fysisch niet boven VZG langs.



Figuur 4.19: Schets bovenloopsheid.

De eerste wijze betreft een toets op de piping, maar met de locatie en bovenzijde van het VZG als uitredepunt. Deze dient te voldoen aan de veiligheidseisen voor piping conform WBI2017 / OI2014v4.

De tweede wijze betreft het realiseren van een erosiebestendige verankering van de aanvulling met de omliggende grond. Deze aanvulling dient aan de volgende criteria te voldoen:

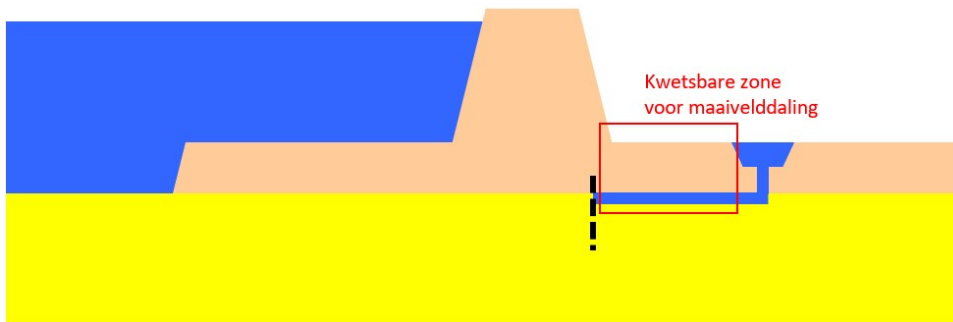
- Aanvulling is bestendig tegen erosie.
Een kleisoort met minimaal 25% lutum en maximaal 35% zandgehalte voldoet (consistent met (Rijkswaterstaat, 2021a)).
- Verankering met omliggende deklaag is waterdicht/grond dicht.
Dit wordt geborgd door het verdichten in den droge, of door gebruik te maken van zwelklei in den natte.
- Bestaande deklaag is voldoende in beeld.
De hoogteligging van de bestaande deklaag dient middels grondonderzoek in beeld te zijn. In paragraaf 4.2 zijn hiervoor handvatten gegeven.
- Aanleghoogte van verankering is voldoende nauwkeurig.
Bestaande technieken geven een geringe maakonnauwkeurigheid.
- Laagdikte is voldoende om onzekerheden te ondervangen.
Vaak is deze aanvulling bepalend in de kosten en wordt gekozen voor een zo dun mogelijke laag.
Verdere opvulling van de ruimte wordt gedaan met ander materiaal, zoals gebiedseigen grond.

De laagdikte wordt bepaald door het theoretische minimum, onzekerheid van de bodemopbouw, zakking van aanvulzand en uitvoeringstolerantie:

- Het theoretische minimum is de laagdikte van een slechtdoorlatend materiaal om als dak voor een erosiekanaal te fungeren, deze dikte is verwaarloosbaar.
- De bodemopbouw kan nauwkeurig gevolgd worden door het materieel van een VZG. Daarom is alleen de onzekerheid van de bodemopbouw belang. Bij voldoende grondonderzoek wordt de onzekerheid voldoende gereduceerd.
- De zakking van het aanvulzand is afhankelijk van de eigenschappen van het aanvulzand, dit is beschreven in paragraaf 4.4.4. De zakking van dit aanvulzand kan meerdere centimeters zijn.
- De maakonnauwkeurigheid (uitvoeringstolerantie) van de techniek is gegeven in hoofdstuk 5.

4.4.6 Bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT)

Als gevolg van erosie kan maaiveld daling optreden in de zone tussen het VZG en het uitredepunt, zie Figuur 4.20. Zo is bij de IJkdijk full-scale proef een maaiveld daling van gemiddeld 1 cm en maximaal 10 cm waargenomen.



Figuur 4.20. Kwetsbare zone voor maaiveldddaling

BGT-eis

De BGT-eis voor maaiveldddaling (frequentie van optreden) is een locatiespecifieke afweging die afhangt van het landgebruik²⁵.

Optredende frequentie maaiveldddaling

Voor de frequentie waarbij maaiveldddaling geldt dat:

- Bij ongewijzigde situatie (m.u.v. aanbrengen VZG) de frequentie van het optreden van maaiveldddaling in ieder geval lager is dan de frequentie van het waarnemen van zandmeevoerende wellen in de huidige situatie;
- De frequentie van maaiveldddaling in ieder geval lager is dan de frequentie van de buitenwaterstand waarbij opbarsten en heave optreden (in deze BGT-analyse mag voor opbarsten en heave gerekend worden met gemiddelde waarden van de parameters);
- Maaiveldddaling is het gevolg van verdieping van het erosiekanaal nadat het erosiekanaal aangekomen is bij het VZG. De buitenwaterstand waarbij dit het geval is kan worden bepaald met D-Geo Flow. De frequentie van de buitenwaterstand waarbij dit optreedt legt de ondergrens van de mogelijke frequentie op maaiveldddaling vast.

4.5 Ruimtelijke inpassing

4.5.1 Bermen en afritten

Bij bermen en afritten geldt dat voor de uitvoering van het VZG het op diepte komen van het materieel en de benodigde werkruimte voor het materieel extra aandacht vergt. Op deze locaties zijn minimaal twee methodes denkbaar:

1. Het afgraven van een berm of afrit. Daardoor kan het inbrengmaterieel tot de juiste diepte te komen. Na het verwijderen van de bermen en afritten dienen deze weer te worden hersteld.
2. Ter plaatse van de berm of afrit een andere techniek toepassen, bijvoorbeeld een damwand. Tussen het VZG en deze andere techniek wordt dan een aansluiting gemaakt. Dergelijke aansluitingen zijn beschreven in de volgende paragraaf (par. 4.5.2).

4.5.2 Aansluitingen

Aansluitingen van een VZG zijn afhankelijk van de locatie en uitvoeringstechniek. Alle aansluitingen dienen te voldoen aan de volgende algemene criteria:

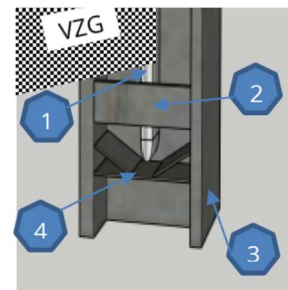
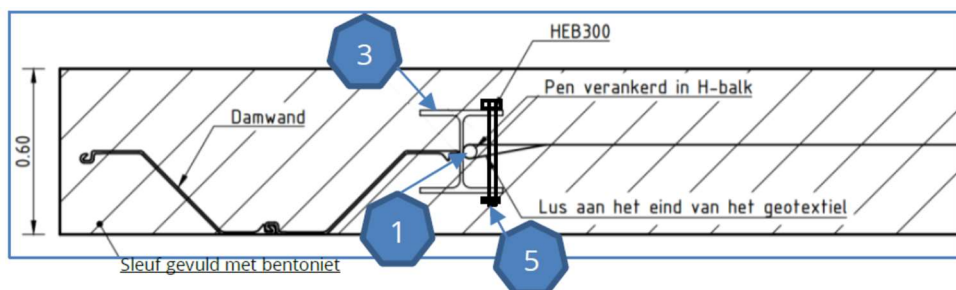
- Aan weerszijden van de aansluiting is de dijk veilig.
- De aansluiting is veilig op de volgende aspecten: achterloopsheid, voorloopsheid, bovenloopsheid, doorloopsheid, onderloopsheid. Het criterium doorloopsheid is niet zonder meer gegarandeerd, omdat gebruik wordt gemaakt van verschillende materialen en onderdelen waar ruimte tussen kan zitten of verschillende doorlatendheden kan hebben. Daarom maken de voorbeelden hier gebruik van een afdichtmateriaal, zoals bentoniet of grout.
- Uitvoering is beheerst en verifieerbaar.

²⁵ Ter indicatie voor wateroverlast (NBW-norm) wordt voor tijdelijke overlast gerekend met 1/10 per jaar voor grasland en 1/25 per jaar voor akkerbouw.

Een VZG die wordt aangebracht met de horizontale inbrengtechniek (zie hoofdstuk 5) start aan het maaiveld en komt geleidelijk op diepte (circa 10 meter). Aandachtspunt daarbij is de beschikbare ruimte die het materieel nodig heeft (ca. 25 m in lengterichting). Een VZG kan aansluiten op andere objecten, zoals een wand of een heavescherm. Soms is de beschikbare ruimte ook onvoldoende voor de geleidelijke overgang inclusief materieel. Om op een andere constructie aan te sluiten bestaan meerdere oplossingen. Hieronder zijn twee voorbeelden gegeven, genaamd een Startoplossing (SO) en Finishoplossing (FO).

Startoplossing (SO)

De SO is een oplossing die inpasbaar is aan het begin van een traject waar een VZG wordt aangelegd. Deze bestaat uit meerdere onderdelen, die zijn weergegeven in Figuur 4.21 en Figuur 4.22. Hierbij wordt een sleuf van tevoren gegraven nabij het aansluitpunt (afmetingen ca. 7m x 0,6m x 6m lengte x breedte x diepte). In de sleuf wordt verticaal een aangepaste H-balk geplaatst. Onder in de H-balk zitten een bodemplaat (4) en een borgplaat (2). Het geotextiel wordt aan een stalen pen bevestigd. Deze pen steekt ca. 0,5 m onder het geotextiel uit. Vervolgens wordt het geotextiel en de pen, in de sleuf geplaatst, zodanig dat de pen (1) aan de onderzijde achter de borgplaat (2) van de H-balk (3) valt en op de bodemplaat rust (4). De pen wordt vervolgens aan de bovenzijde met een borgpen (5) verankerd aan de H-balk. Daarna kan het materieel beginnen met de aanleg van het VZG voor de rest van het traject.



Figuur 4.21: Bovenaanzicht principeschets ontwerp Start Oplossing en Principe H-balk en pen.

Deze sleuf wordt tijdens het graven gevuld met een steunvloeistof zodat deze niet inzakt maar in stand blijft tijdens het realiseren van de SO. Aansluiten van de H-balk op een ander object wordt in het UO uitgewerkt. Dit kan bestaan uit een bentoniet-aansluiting bij een aansluiting op grond, een grout-aansluiting bij een aansluiting op beton, of het lassen van het H-profiel aan andere objecten bij een aansluiting op staal.

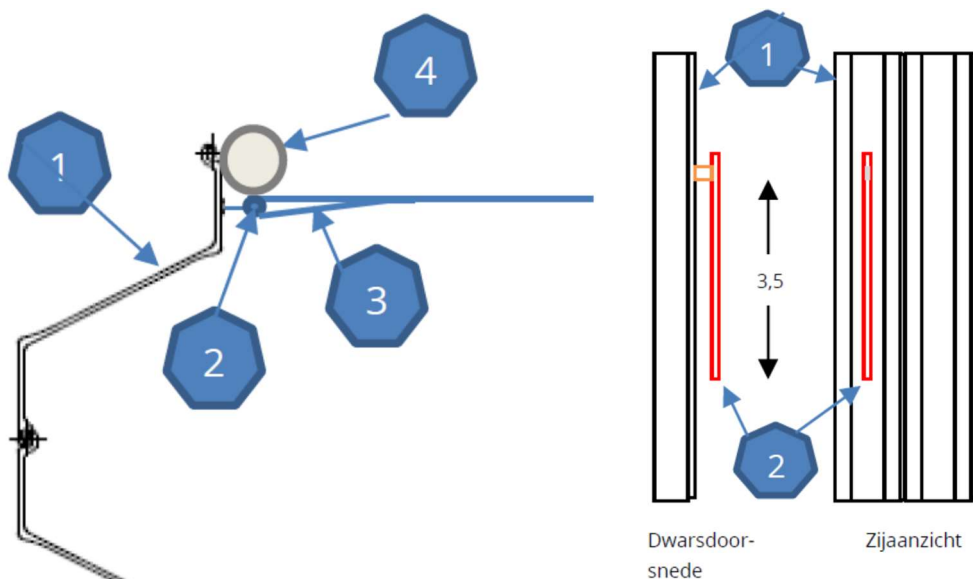


Figuur 4.22: Weergave startoplossing.

Finishoplossing (FO)

De FO is een oplossing die inpasbaar is aan het einde van een traject waar een VZG wordt aangelegd. Deze bestaat uit meerdere onderdelen, die zijn weergegeven in Figuur 4.23.

Voorafgaand aan de uitvoering is een lus aangebracht over de hele hoogte van het VZG. Nadat het VZG inclusief de lus aangebracht is, wordt ter plaatse van de lus de grond ontgraven totdat de bovenste pees en de bovenzijde van de lus zichtbaar zijn (3). Daarna wordt een damwandprofiel geplaatst waaraan een pen is gelast. Deze wordt zodanig in de grond getrild dat de pen in de lus verdwijnt en het VZG op de plaats houdt. Indien noodzakelijk kan de pen los van de damwand in de lus worden aangebracht. Het resterende deel tussen de pen en de damwand wordt met een groutkolom (4) grond dicht gemaakt.



Figuur 4.23: Doorsnede-ontwerp Finishoplossing en aanzichten ontwerp Finishoplossing

4.6 Omgevingsaspecten

Toepassing van een VZG 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.

4.6.1 Conditionering

Naast de stakeholders dienen de juridische en fysieke randvoorwaarden bij toepassing van het systeem te worden beschouwd. 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.

Omgevingsvergunning

Voor de aanleg van een VZG is een omgevingsvergunning noodzakelijk. Een overheidsinstantie is hiervoor het bevoegd gezag. De omgevingsvergunning kan worden aangevraagd via één loket.

Verontreinigingen bodem en grondwater

Bij de aanleg van een VZG worden grondroerende werkzaamheden 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.

Grondwaterbeschermingsgebied

In grondwaterbeschermingsgebieden zijn ook andere functies aanwezig, zoals drinkwaterwinningen. De inpassing van een VZG 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 tussen grondlagen i.v.m. risico dat in de toekomst verontreinigingen ontstaan).

Watervergunning

Voor de VZG 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. Het voornaamste onderdeel hiervan betreft de realisatiefase.

4.6.2 Kabels en leidingen

Voorafgaand aan een veldboring, graafwerkzaamheden of andere uitvoeringswerkzaamheden doet de aannemer een vooronderzoek en een graafmelding bij het KLIC. De aanwezigheid van kabels en leidingen bemoeilijkt de uitvoering.

Bij het uitvoeren van een gestuurde boring is een dieptecontrole tijdens het boren net voor en net na het VZG vereist.

4.6.3 Archeologie en NGE

Voorafgaand aan de aanleg van de VZG doet de aannemer een vooronderzoek naar mogelijke archeologische waarde in de ondergrond of niet-gesprongen explosieven (NGE). Indien uit dit vooronderzoek 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.



4.6.4 Dierlijke graverij

Binnen beheer en onderhoud wordt aandacht gegeven aan meerdere zaken. Een daarvan is dierlijke graverij. Daarbij wordt ingezet op het bestrijden van woel dieren (bv. muskusrat) en het herstellen van eventuele schades (afdichten van gaten). Aanvullend kan aandacht gegeven worden aan dit onderwerp binnen het ontwerp. Daardoor is de belasting voor beheerorganisatie lichter.

Het VZG kan kwetsbaar zijn voor dierlijke graverij (zeker in vergelijking tot damwandoplossingen). Bij een VZG is de aanpak niet wezenlijk anders dan bij een groene dijk. Indien de impact van graverij uitgesloten kan worden voor een groene dijk, dan kan deze ook worden uitgesloten bij een dijk die versterkt is met een VZG. Indien de verantwoordelijkheid rondom graverij bij een groene dijk bij de beheerorganisatie ligt is dat ook zo bij een dijk die versterkt is met een VZG. Indien graverij een dermate voornaam thema is dat een groene dijk hierop ontworpen wordt, dan is dat ook een aandachtspunt voor een dijk met VZG.

Door dierlijke graverij kan schade aan een VZG ontstaan. Indien dit niet wordt hersteld is de aanwezige reststerkte gelijk aan een dijk zonder VZG. Sommige beheerders kiezen er daarom voor om in gebieden waar dierlijke graverij een hoog risico is, robuuster te ontwerpen. Daarom is aanvullende aandacht gegeven aan dit onderwerp. Algemene informatie hierover is te vinden op de Wiki-noodmaatregelen²⁶.

In het ontwerp kunnen de volgende oplossingen gekozen worden om rekening te houden met dierlijke graverij:

- Geen maatregelen.
In de beheerfase dient gemonitord te worden of de aangehouden ontwerpuitgangspunten (zoals risico op nieuwe diersoorten) geldig blijven.
- Mijden van risicogebieden.
In de beheerfase dient gemonitord te worden of de aangehouden ontwerpuitgangspunten (zoals locatie van de risicogebieden) geldig blijven.
- Een maatregel nemen tegen schade door dieren.
Voorbeelden zijn het aanbrengen van beverwerend-gaas, oever onaantrekkelijk maken voor dieren, kalk in de klei bijmengen, etc.

Geen aanvullende maatregelen

Een analyse kan uitwijzen dat het treffen van maatregelen niet nodig is. Dat is het geval wanneer een diersoort wel graaft, maar dat de graafwerkzaamheden van een specifiek dier geen risico's geven voor de werking van een VZG.

In Tabel 4.8 is een overzicht gegeven van verschillende graaf/woel dieren. Dit overzicht kan veranderen in de tijd. Zo is de bever verdreven rond 1825 en pas gefaseerd geïntroduceerd in de periode 1988 – 2008 (Kurstjens, 2011).

²⁶ Link: https://v-web002.deltares.nl/sterktenoodmaatregelen/index.php/Dierlijke_activiteit



Tabel 4.8: Overzicht van dierlijke graverij en mogelijke beheersmaatregelen.

Dier	Graverij onder grondwaterstand	Risico voor VZG	Beheersmaatregel
Hond	Nee	Laag.	Geen, of woel-dierwerende maatregelen nemen.
Muizen	Nee ^[1]	Deze dieren graven in de regel niet dieper dan toplaag (<1,2 m-mv).	
Konijnen	Nee ^[1]		
Dassen	Nee ^[1]		
Mollen	Nee ^[1]		Wildstand beheren (afvangen / afschieten)
Rivierkreeft	Ja ^[1]	Laag ^[2]	
Beverratten	Ja ^[1]	Midden.	Risicogebieden mijden, of woel-dierwerende maatregelen nemen.
Muskusratten	Ja ^[1]	Deze dieren graven in de regel onder de grondwaterstand tot 5 á 10 m uit de oever/ teensloot.	
Bevers	Ja ^[1]		

^[1] In (UvW, 2020) worden graafdieptes gerapporteerd. Deze zijn uitgedrukt ten opzichte van het dijkprofiel. Deze geeft de volgende waarden: muis: 1 m, mol: 1 m, das: 3 m, konijn: 2 m, rivierkreeft: 0,8 m, beverrat: 8 m, muskusrat: 6 m, bever: 12 m. Voor de bever wordt opgemerkt dat de zoogdiervereniging meldt dat de bever ook tot 15 á 20 m diep kan graven. Dit blijkt ook uit een bevergang die is gevonden bij Wamel waar de bever 22 meter loodrecht op de dijk gegraven heeft.

^[2] Nadere toelichting is opgenomen in intermezzo: Risico's rivierkreeft.

Daarnaast wordt in het algemeen beheer al gewerkt met afvangen en afschieten van dieren zoals mollen, beverratten en muskusratten. Afhankelijk van het succes hiervan kan besloten worden dat er geen aanvullende maatregelen noodzakelijk zijn. Aandachtspunt is dat nabij beschermde diersoorten (bever) minder beheersmaatregelen toegestaan zijn (geen vallen plaatsen voor muskusratten), waardoor risico's op graafschade van deze diersoorten lokaal hoger is.

Diverse diersoorten hebben een voorkeurshabitat. Samen met een ecooloog en een beheerder kan in beeld gebracht worden waar bepaalde diersoorten wel en niet voorkomen. In diverse literatuur, zoals (Alterra, 2007) zijn hiervoor handvatten gegeven. Aandachtspunt is dat dieren zoals muskusratten, beverratten en bevers bij hoogwater gaan verplaatsen. Er zijn waarnemingen geweest dat buitendijks een goed habitat voor deze dieren was en achter de dijk minder en dat de dijk zelf een barrière vormt (drukke provinciale weg), maar dat deze dieren tijdens hoogwater zich verplaatst hebben naar de binnendijkse zijde.

Graafschade van Muskusratten en Beverratten vindt plaats op korte afstand van een sloot in de binnenteen. Handvatten zijn gegeven in (Alterra, 2007) en (COW, 1984). Een schets van de zone met graverij is weergegeven in Figuur 4.25. Bij veel inpassingen van het VZG kan graafschade van muskusratten en beverratten uitgesloten worden.

- Betreft: muskusratten en beverratten
- Graverij start vanuit water.
Deze start diep, maar eindigt boven de grondwaterstand. Met name aan de buitendijkse zijde is graafschade tot hoog in het dijktaalud waargenomen.
- Diepe graverij:
Diepte tot 1 m onder polderpeil.
Afstand ca. 2 m uit insteek sloot.
- Ondiepe graverij:
Diepte tot 0,65 m onder maaiveld.
Afstand 5 – 15 m uit insteek sloot / oppervlaktewater.

Intermezzo: Risico's rivierkreeft

Een van de dieren die graaft is de rivierkreeft. Er bestaan meerdere soorten. Een van de meer gravende soorten is de Rode Amerikaanse rivierkreeft (*Procambarus clarkii*). Deze exoot komt voor in heel Nederland, maar wordt het meest gezien rondom de randstad (Vos, 2013). Vanuit beheer is expliciete aandacht gevraagd voor deze soort. Aandacht gaat uit naar drie onderwerpen: graafpatronen, schade en graafdieptes.

Graafpatronen

Van de rivierkreeft worden in de literatuur twee graafpatronen beschreven. De eerste betreft oeverholten. Deze worden gegraven vanuit de oever. De graafafstand in dwarsrichting is maximaal 0,5 m (Koese, 2011) à 0,6 m (Vos, 2013). Daarbij wordt soms een schoorsteen gegraven tot aan het maaiveld. Het tweede patroon betreft landholten, deze komen het minst voor. Daarbij graaft een kreeft vanaf het land verticaal naar beneden. Landholten kennen (nagenoeg) geen horizontale graverij. Deze kunnen tot 5 m uit de oever plaatsvinden (Vos, 2013). Gezien de beperkte horizontale graafafstand is de invloed van oeverholten op het VZG op voorhand uit te sluiten. De invloed van landholten op het VZG is gesteld op onwaarschijnlijk, omdat deze niet tunnelvormig zijn.



Figuur 4.24: Schetsen en beelden van graverij (Vos, 2013) en (Lemmers, 2018).

Schade

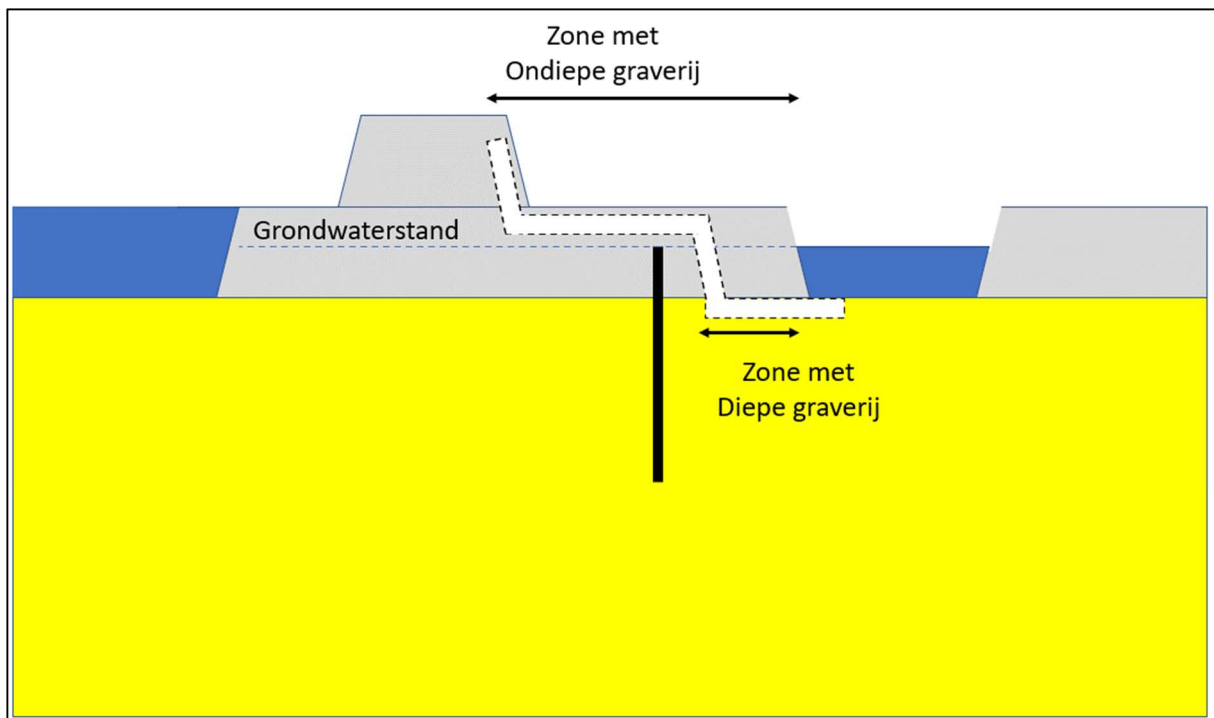
Activiteit van de rivierkreeft leidt tot schade. Deze schade betreft vooral het eten van waterplanten en het graven in de bodem. Daarbij graaft de diersoort goed in klei en veen. De diersoort graaft moeizaam in grind, keien, of aangestampte houtsnippers (Vos, 2013) (Lemmers, 2018). Over graverij in zand spreken de bronnen elkaar en zichzelf tegen. Over schade aan geotextielen zoals een VZG is beperkte informatie bekend. Zo worden kreeften gevangen met kreeftnetten, deze zijn gemaakt van materiaal zoals kunststoffen (nylon). Daarbij worden geen schades van de kreeften zelf gerapporteerd. In (Vos, 2013) wordt met regelmaat geschreven over geotextielen, maar nooit dat de graafschade van de rivierkreeft het geotextiel betreft. Er wordt voorzichtig geotextiel aanbevolen als maatregel tegen graverij van rivierkreeften. Schade van graverij door rivierkreeften aan een VZG in de pipinggevoelige zandlaag is daarmee niet uitgesloten, maar ook niet waarschijnlijk.

Graafdieptes

In het artikel (Koese, 2011) wordt een overzicht gegeven van de graafdieptes van de rivierkreeft. Gemiddeld is dit 0,09 m onder het waterpeil en maximaal 0,40 m onder het waterpeil. In (UvW, 2020) wordt een diepte van 0,8 m ten opzichte van het dijkprofiel gerapporteerd. Indien de pipinggevoelige laag zich dieper bevindt, kunnen effecten van de rivierkreeft op voorhand worden uitgesloten.

Conclusie

Op basis van literatuurbronnen is bepaald of graverij van rivierkreeften een risico is voor het VZG. De literatuur geeft een duidelijke richting. Daaruit blijkt dat invloed van de rivierkreeft op het VZG onwaarschijnlijk is. Echter is de bewijslast vooral anekdotisch en daarmee te gering om absolute zekerheid te bieden.



Figuur 4.25: Inpassing van VZG met betrekking tot dierlijke graverij.

Bovenstaande methode is niet toepasbaar voor graafschade van bevers. De zone met diepe graverij is volgens (Alterra, 2007) ca. 10 m uit de oever. Waarnemingen van beheerders geven soms grotere zones (tot circa 22 meter in vlak terrein en vanuit ondiep water gegraven is waargenomen in het beheergebied van Waterschap Drents Overijsselse Delta).

Mijden van risicogebieden

Niet alle risico's van graafschade van dieren kan uitgesloten worden. Met name graafschade door de bever wordt gezien als een voornaam risico. Een beheerstrategie is om het VZG niet toe te passen in gebieden waar de graafschade een te hoog risico is. Middels ecologisch onderzoek kan in beeld gebracht worden waar risicogebieden zijn (bijvoorbeeld: locatie bevernesten). Hierbij wordt opgemerkt dat dieren uitwijken naar minder geschikte / logische locaties als de populatie groter wordt dan het aantal beschikbare geschikte gebieden.

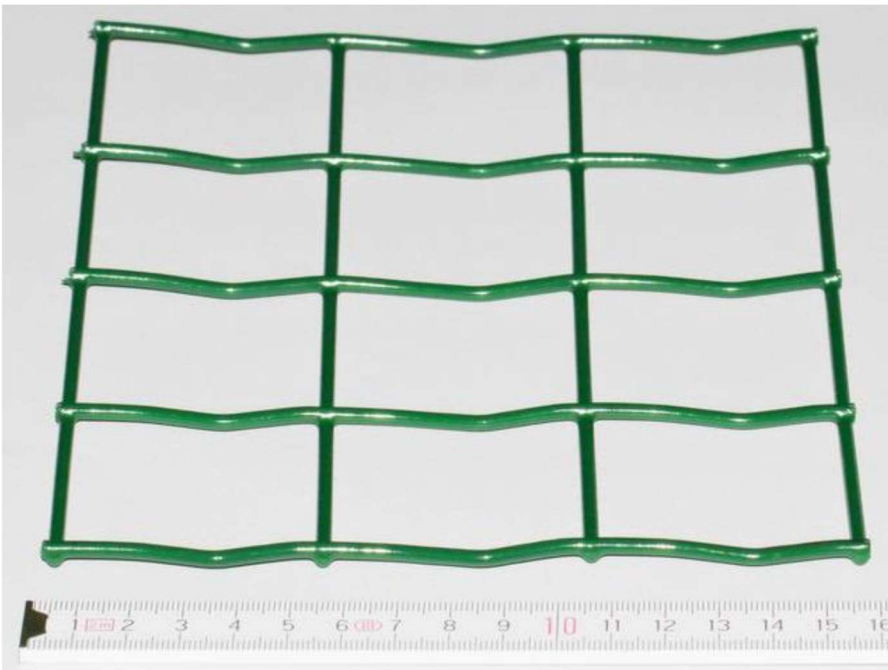
Aandacht gaat er naar uit dat de ligging van risicogebieden kan veranderen. Ten tijde van schrijven neemt de populatie van muskusratten en de vangst daarvan af. In 2004 was de vangst in heel Nederland 400.000 dieren per jaar en in 2021 ca. 45.000 dieren per jaar (LCM, 2010), (UVW, 2022). De populatie Beverratten neemt weer licht toe, in 2001 was de vangst in Nederland ca. 5.000 dieren per jaar, in 2010 was de vangst ca. 600 dieren per jaar en in 2021 is dit toegenomen tot ca. 1.400 dieren per jaar (LCM, 2010), (UVW, 2022). De populatie bevers neemt jaarlijks toe: de populatie bevers was nihil in 1987, tot 140 dieren in 2001, ca. 490 dieren in 2010 (Kurstjens, 2011) en in het voorjaar 2021 ingeschat op 4500-5000 (Zoogdierverseniging, 2023)

Robuust maken tegen woeldieren

Een derde oplossing is het robuust maken van de kering tegen woeldieren. Dit kan gerealiseerd worden middels meerdere technische ingrepen. Dierlijke graafschade kan worden voorkomen worden met een laag van grindhoudend zand voor kleine woeldieren (bijvoorbeeld muizen en mollen (Arcadis, 2021)), zie Figuur 4.26. Zowel bevers als muskusratten graven de ingang van het hol onder de waterlijn, waardoor locaties met bijvoorbeeld diepe kolken binnendijks een extra bescherming nodig is met een korte damwand of zware bestorting (vanaf sortering 10-60 kg). Voor grotere woeldieren kan als alternatief gewerkt worden met "bevergaas", zie Figuur 4.27.



Figuur 4.26: Aanbrengen grindhoudend grof zand (Arcadis, 2021)



Figuur 4.27: Voorbeeld bevergaas (Arcadis, 2021)

4.6.5 Begroeiing

Begroeiing kan op twee manieren leiden tot een verzwakking van de ontwerp oplossing:

1. Begroeiing, zoals een boom, kan falen (omwaaien) waardoor een kluit grond verdwijnt.
2. Begroeiing kan door wortelgroei in het geval van een VZG leiden tot beschadiging (doorgroeien en daarmee gaten) in het geotextiel.

Falen van begroeiing valt binnen de beoordeling van Niet Waterkerende Objecten (NWO). Voor de omgang hiermee wordt verwezen naar de reguliere ontwerp- en beoordelingspraktijk. Deze zijn gegeven in:

- WBI2017, ministeriele regeling III, deel 25.3 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017). Ten tijde van schrijven wordt gewerkt aan het BOI. Deze heeft vooralsnog geen nieuwe handvatten voor NWO's.

- LTVRK2015, module E (STOWA, 2015).

Negatieve invloed van wortelgroei ontstaat wanneer plantenwortels door het VZG groeien. Wanneer dit gebeurt ter hoogte van de pipinggevoelige laag, is het VZG niet meer zanddicht en faalt deze op doorloopsheid. Wanneer dit gebeurt ter hoogte van het VZG in de kleilaag, wordt de verankering bedreigt en kan bovenloopsheid ontstaan. Rondom wortelgroei zijn de volgende strategieën mogelijk:

- Uitsluiten (altijd in combinatie met beheersen).
- Beheersen.
- Mitigeren.

Uitsluiten

Indien schade van het VZG door begroeiing op voorhand is uit te sluiten, dan kan dit risico verwaarloosd worden. Deze strategie wordt beoordeeld op basis van de begroeiing op een bepaald moment, daarmee is dit een momentopname. Om zekerheid gedurende de levensduur te garanderen, dient deze strategie daarom gecombineerd te worden met beheersmaatregelen.

Schade kan uitgesloten worden door voldoende marge in de verticaal te realiseren. Een VZG wordt met een zekere gronddekking aangelegd (ca. 0,5 m). Negatieve invloed van begroeiing met een wortelkluit die minder diep rijkt dan de gronddekking, kan op voorhand worden uitgesloten. Bij gras is de wortelzone ca. 0,2 m. Bij eenjarige gewassen is de wortelzone 0,2 tot 0,4 m (Cultuurtechnische vereniging, 1988). Van deze gewassen is negatieve invloed, bij een goed gekozen gronddekking, op voorhand uit te sluiten.

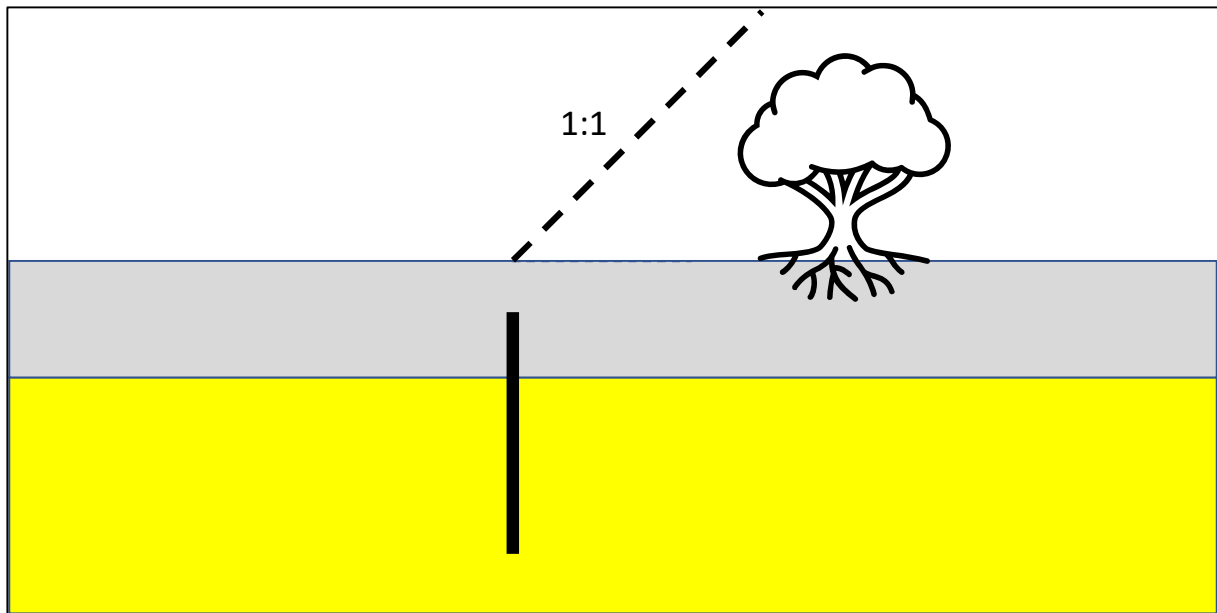
Van meerjarige gewassen/planten/bomen kan de wortelzone dieper worden. De maximale diepte daarbij is GLG. De STOWA geeft voor de onderzijde van de wortelzone maximaal 0,5 m onder het laagste polderpeil. Bij ontwerpen waarbij het VZG diep wordt aangelegd, kan op basis van dit criterium het effect van begroeiing worden uitgesloten.

Bij meerjarige gewassen/planten/bomen heeft de wortelzone een zekere breedte. Bij voldoende afstand tussen de begroeiing en het VZG kan negatieve invloed worden uitgesloten. Dit kan gerealiseerd worden met een begroeiingsvrijzone. Een praktijkvoorbeeld is het project Zwolle-Olst waarbij een zone van 10 m aan weersijden van het VZG wordt vrijgehouden²⁷.

Er kan aanvullend maatwerk gedaan worden om de grootte van de begroeiingsvrije zone nader te bepalen. De grootte van de wortelzone is gerelateerd aan de kruinprojectie en kruinhoogte. Deze relatie is plant- en boomspecifiek en dient projectspecifiek voor de relevante zichtperiode (dus niet alleen de actuele situatie) vastgesteld te worden in samenspraak met een ecooloog. Voor veel planten kan daarbij een 1 op 1 relatie tussen de hoogte van een plant/boom en de grootte van de wortelzone aangehouden worden. Dit is weergegeven in Figuur 4.28.

²⁷ Het vrijhouden van begroeiing over een bepaalde breedte leidt mogelijk tot een grotere compensatieopgave.





Figuur 4.28: Voorbeeld van maatwerk voor de begroeiingsvrije zone. Hier is een 1:1 lijn tussen de toegestane hoogte en de afstand tot het VZG aangehouden

Beheersen

De strategie beheersen gaat gepaard met de strategie uitsluiten. De strategie “uitsluiten” wordt beoordeeld op basis van de begroeiing op een bepaald moment, daarmee is dat een momentopname. Om zekerheid gedurende de levensduur te garanderen, dient deze strategie daarom gecombineerd te worden met beheersmaatregelen.

Bij het beheersen wordt ervoor gezorgd dat er geen ongewenste begroeiing komt in de zone waar dat schade kan veroorzaken aan het VZG. Dit betreft vooral meerjarige begroeiing.

Mitigeren

De derde strategie is mitigeren. Risico's van begroeiing voor het VZG worden uitgesloten door een mitigerende maatregel. Te denken valt aan monumentale bomen die te dicht op de voorgenomen locatie van het VZG staan, maar niet verwijderd kunnen worden. In dergelijke gevallen kan een barrière tussen de wortels van de begroeiing en het VZG geplaatst worden (bijvoorbeeld een kunststof damwand).

5 Uitvoering

5.1 Uitvoeringstechniek

5.1.1 Algemeen

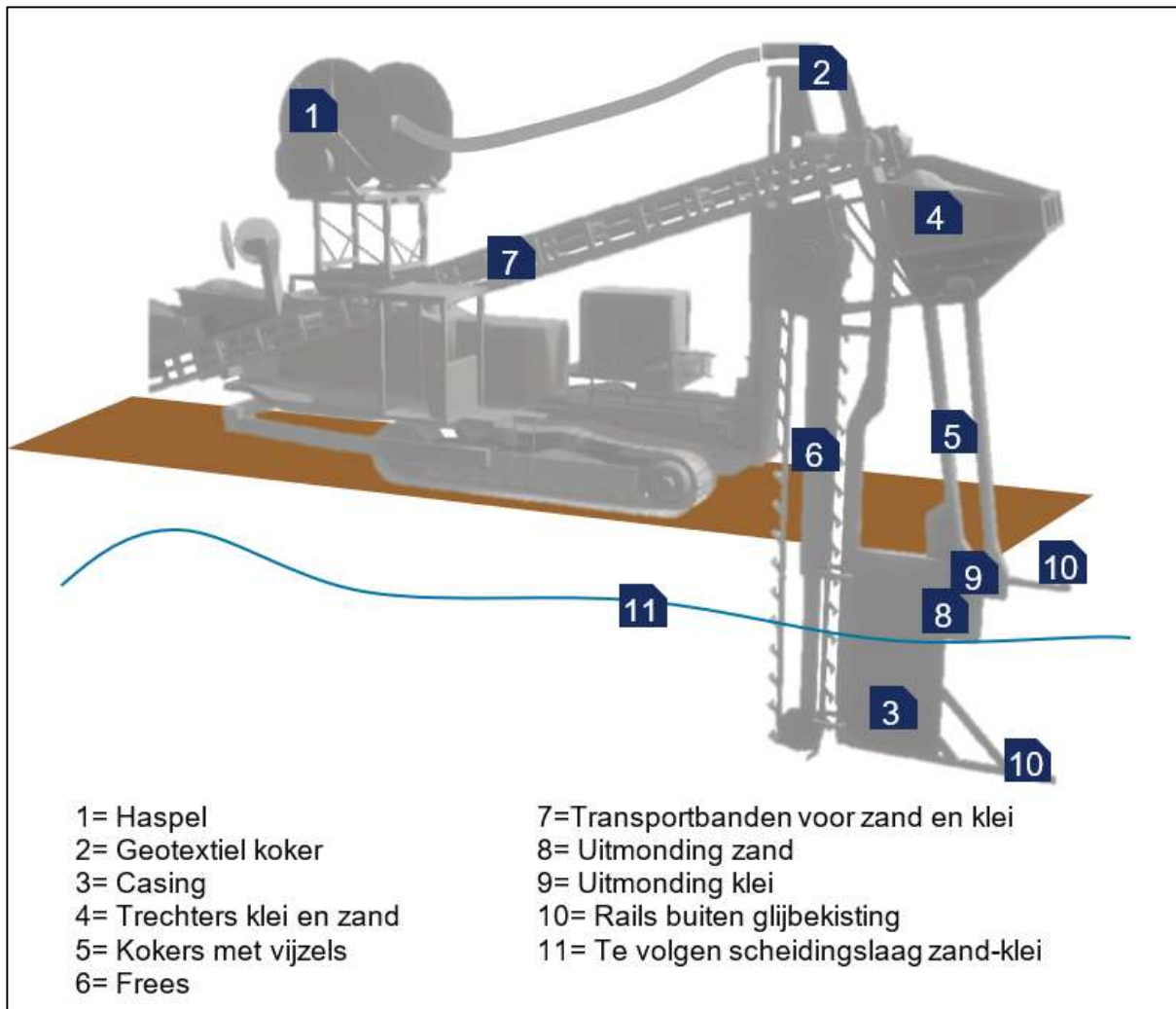
Er bestaan meerdere uitvoeringstechnieken. In alle gevallen is sprake van een trillingsarme uitvoeringswijze. De eerste is de horizontale uitvoering middels een kettinggraver. De horizontale techniek is bewezen effectief en ook doorontwikkeld voor grootschalige toepassing. Een tweede methode is de verticale inbrengh techniek, de derde methode het in den droge aanbrengen, echter deze methoden zijn op dit moment nog niet zodanig doorontwikkeld.

5.1.2 Horizontale uitvoering middels kettinggraver

De horizontale techniek middels kettinggraver is weergegeven in Figuur 5.1, Figuur 5.2 en Figuur 5.3. Op de diepfreesmachine zit een extra module: het ontwikkelde VZG-systeem. Dit systeem bestaat uit een haspel met opgevouwen geotextiel (1), een koker waardoor het geotextiel (2) naar de casing (3) vervoerd wordt, transportbanden (7) voor aanvoer zand en klei, die lopen naar de zand- en kleitrechters met vijzels en trilmotoren (4 & 5). De casing (3) zit achter de frees (6) en gaat dus achter de frees aan de sleuf in. Het geotextiel is zowel aan de boven- als onderkant voorzien van pezen die met behulp van rails (10) door het systeem geleid worden, tot achter de casing. In de casing loopt één rail naar de bovenzijde en één rail naar de onderzijde, waardoor het geotextiel uitgevouwen wordt.

Gelijktijdig met het aanbrengen van het geotextiel wordt aan weerszijden van het geotextiel zand via een trechter (4) met een vijzel (5) onder druk aangevuld. De uitmonding van de zandkoker zit op de hoogte van de (zand/klei) scheidingslaag (11), zodat het zand precies tot die hoogte wordt aangevuld. Ook zit er op de trechter een trilmotor die ervoor zorgt dat het zand nog beter door de koker getransporteerd wordt. Bovendien worden de trillingen overgebracht op de uitmonding, wat voorkomt dat er holle ruimtes ontstaan in het zand. Vervolgens wordt via eenzelfde soort trechter klei aangebracht boven op de aangebrachte zandlaag. De klei klemt het geotextiel direct in.





Figuur 5.1: Toepassing Verticaal Zanddicht Geotextiel horizontale uitvoering middels kettinggraver, duiding diverse onderdelen.

Technische eigenschappen zijn:

- Hoge productiesnelheid: 400 tot 450 meter per dag.
- Maximale diepte afhankelijk van in te zetten materieel. Dieptes tot 10 meter minus maaiveld zijn mogelijk. Benodigde werkruimte: circa 2,5 m aan weerszijden van de VZG (minimale boogstraal ca. 50 m).
- Maximale afmeting van het VZG is afhankelijk van de casing en de gebruikte rol geotextiel. Ten tijde schrijven zijn deze twee zo op elkaar afgestemd dat een geotextiel van 3,5 m hoog in de grond gebracht wordt.
- Het VZG kan qua diepte variëren over de lengte van een traject. De mate waarin deze kan variëren wordt bepaald door de uitvoeringsmethode en welke hoekverdraaiing daarbij haalbaar is. Bij de horizontale inbrengmethode is een verticale variatie van 0,5 m inpasbaar over een afstand van 5 m (ca. 1:10 helling).



Figuur 5.2: Toepassing Verticaal Zanddicht Geotextiel horizontale uitvoering middels kettinggraver.



Figuur 5.3. Toepassing Verticaal Zanddicht Geotextiel horizontale uitvoering middels kettinggraver.

Bij deze inbrengtechniek is bij een zorgvuldige uitvoering sprake van een beperkte grondontspanning. De verplaatsingen zijn echter zodanig klein dat geen sprake is van stabiliteitsreductie van betekenis.

5.1.3 Overige uitvoeringswijzen

Naast de uitvoering middels een kettinggraver bestaat er ook andere uitvoeringstechnieken. Deze technieken hebben aandachtspunten die nog niet allemaal zijn verholpen binnen een maakbaarheidsproef. Daarmee vragen

deze uitvoeringstechnieken nog de nadere aandacht bij toepassing, zoals een maakbaarheidsproef. Op het moment van schrijven van deze OBOR vindt geen ontwikkeling op dit vlak plaats.

In den droge

De pilot bij de IJkdijk is uitgevoerd in den droge. Dit is weergegeven in Figuur 5.4. Daarbij is gewerkt in droge grond, met geringe dieptes en licht materieel (ca. 1 ton kraan). Het geotextiel is voornamelijk handmatig aangebracht. Bovenlagen zijn aangebracht met nieuwe grond. Deze werkwijze is succesvol geweest. Deze uitvoeringswijze is echter lastig grootschalig in te zetten.

Aandachtspunten van deze techniek zijn:

- Geringe dagproductie.
- Beschikbare ruimte.
De benodigde ruimte van de het materieel is gering. Echter is mogelijk een open ontgraving nodig waarvoor een werkput gegraven dient te worden.
- Werken in den droge.
Afhankelijk van de voorgenomen diepte van het VZG en de heersende grondwaterstanden is hiervoor mogelijk bemaling benodigd.



Figuur 5.4: Toepassing Verticaal Zanddicht Geotextiel in den droge bij de IJkdijk.

Verticale inbrengtechniek

De verticale inbrengtechniek bestaat uit een kraan met een afsluitbare stalen inbrenggeleider (cassette) met hierin het geotextiel die de grond in gedrukt kan worden, ondersteund door hogedruk-nozzles. Nadat de inbrenggeleider op diepte is gebracht, opent deze zich en blijft het VZG door de bodemverankering en de eindflappen aan de onderkant van het Geolock-paneel achter wanneer de inbreng-geleider weer naar boven wordt gehaald. Deze techniek is weergegeven in Figuur 5.5. Deze techniek (in slankere vorm) komt oorspronkelijk voort uit het inbrengen van HDPE-Geolock-panelen tot op een weerstandbiedende kleilaag.



Figuur 5.5: Toepassing Verticaal Zanddicht Geotextiel met verticale inbrengtechniek.

De aandachtspunten van deze techniek zijn:

- Dagproductie is beperkt.
- Vereist zwaar materieel.
- Aansluitingen zijn nog niet uitgewerkt.
- Risico op slechte horizontale aansluiting tussen panelen door groot aantal panelen.
- Risico op versmering van het geotextiel met klei.

Bij deze techniek is sprake van een beperkte tijdelijke grondontspanning. Door gewelfwerking blijft de dijkstabiliteit gewaarborgd zonder nadelige vervormingen van betekenis. De sleuf dient naderhand (beperkt) aangevuld te worden met (zwe)klei.

5.2 Toleranties en uitvoeringseisen

De uitvoering kent een zekere maaknauwkeurigheid. Er zijn acceptabele toleranties gegeven voor de onderdelen die de waterveiligheid raken. Daarnaast zijn er nog overige uitvoeringseisen. Beide onderwerpen zijn opgenomen in Tabel 5.1.

Tabel 5.1: Overzicht toleranties en uitvoeringseisen.

Parameter	Eenheid	Waarde	Toelichting / eis
Horizontale afwijking	[m]	n.v.t.	Maximale toegestane afwijking in x,y-richting, + en – 25 cm op de rechte stukken; + en – 50 cm in de bochten. Verificatie middels een doorgaande x, y-meting op het aanbrengsysteem waaruit direct of indirect te herleiden is waar het geplaatst geotextiel zich bevindt.
Verticale afwijking geotextiel	[m]	n.v.t.	Gemiddelde toegestane afwijking in z-richting over 100 m aangebracht VZG 5 cm, maximale toegestane afwijking 10 cm. Verificatie middels doorgaande z-meting op het aanbrengsysteem waaruit direct of indirect te herleiden is waar bovenzijde en onderzijde geplaatst geotextiel zich bevinden
Verticale afwijking kleiafdichting	[m]	0,05	Aansluiting van de aangebrachte kleiafdichting op bestaande kleilaag / deklaag is essentieel. De

Laagdikte kleiafdichting	[m]	0,05	combinatie van maakbaarheidstoleranties (kwadratisch gesommeerd) samen dient minder dan 0,10 m te zijn.
Verdichting / nazakking aanvulzand	[m]	0,05	
Aanbrengen geotextiel	[-]	n.v.t.	Het geotextiel dient onbeschadigd en schoon te zijn aangebracht
Naden en sloten			Overgangen in het geotextiel dienen net zo zanddicht te zijn als het geotextiel
Herstellen bodemopbouw			De grond dient goed aan te sluiten op het geotextiel. Dit geldt zowel voor de zandlaag als voor de afdekkende laag
Doorlatendheid zand	[-]	n.v.t.	Het zand dient aan weerszijden van het geotextiel minimaal dezelfde doorlatendheid te bezitten als de bestaande zandlaag.
Doorlatendheid deklaag	[-]	n.v.t.	De deklaag dient boven het geotextiel minimaal dezelfde slechte doorlatendheid te bezitten als de bestaande deklaag. Nieuw aangebrachte klei boven de actuele grondwaterstand dient laagsgewijs te worden verdicht ²⁸

5.3 Verificatie

Tijdens de uitvoering dient een verificatie uitgevoerd te worden. Dit bestaat ten minste uit de onderstaande zaken:

- Gebruikte materialen.
Certificaten en/of keuringen en/of bewijzen van oorsprong van de leveranties geotextiel, zand en klei ter plaatse van het geotextiel. Levensduur en doorlatendheid van geotextiel wordt aangetoond. Van het aanvulzand dienen zeefkrommes en doorlatendheidsmetingen zijn opgenomen. Daarnaast dient aangetoond te zijn dat het gebruik van de grond geen milieukundige bezwaren heeft (denk aan Besluit bodemkwaliteit, chloride gehalten).
- Verificatie van de uitvoering.
Hierbij moet geverifieerd worden dat het VZG onbeschadigd, schoon aangebracht is tot de juiste verticale diepte en dat de bodemopbouw deklaag is (deklaag).

Dit kan bestaan uit discontinue monitoring en continue monitoring.

Discontinue monitoring

Bij discontinue monitoring wordt middels steekproeven gecontroleerd op de kwaliteit. Bij een steekproef op de kwaliteit van een VZG betreft dit het opgraven van een VZG tot het gewenste niveau zodat visuele inspectie kan plaatsvinden.

Nb.

Deze vorm van monitoring heeft als nadeel dat het VZG meerdere meters in de grond zit. De inspectie betreft dan ook het afgraven van een aanzienlijk deel van een dijk. Daarnaast heeft het opgraven als risico dat het VZG wordt beschadigd. Deze vorm van monitoring wordt daarom alleen toegepast bij pilots en maakbaarheidsproeven.

Continue monitoring

Bij continue monitoring wordt het plaatsen van het VZG op alle kritische aspecten gemonitord. Daarbij zijn detectiemethoden aanwezig die deze aspecten in beeld brengen. Een voorbeeld hiervan is gegeven in het tekstkader "Intermezzo: Continue monitoring tijdens de uitvoering".

²⁸ Bijvoorbeeld met een schapenpootwals.



Intermezzo: Continue monitoring tijdens de uitvoering

De verificatie kan uitgevoerd worden met continue monitoring. Dit is ontwikkeld binnen pilotprojecten in het verleden.

Monitoring positie VZG en aanvulmateriaal

De positiebepaling bestaat uit de onderzijde en bovenzijde van het VZG. Materieel dat wordt ingezet, wordt uitgerust met GPS (Veel graafmaterieel werkt tegenwoordig al met GPS). Bij het inbrengen wordt de positie vastgelegd. Daarbij is de nauwkeurigheid gelijk aan dat van de GPS.

De positie van het aanvulmateriaal wordt bepaald door hoogte instellingen van het materieel. Opgravingen hebben aangetoond dat de nauwkeurigheid van de aangebrachte lagen gelijk zijn aan de positie van het VZG.

Monitoring (afwezigheid van) schade VZG

Bij het inbrengen van het VZG wordt het VZG zelf continue gemonitord. Daarbij zijn op het VZG metalen strips bevestigd. Deze strips zitten op 3 verschillende hoogtes. Dit in combinatie met het gebruik maken van een ondergrondse casing, met sensoren die de strips op het doek waarnemen nadat zand en klei aan weerszijden van het doek is aangevuld. De signalen van de sensoren zijn zichtbaar voor de operator en de waarnemingen worden in de tijd gelogd. Wanneer er knelpunten optreden, zoals scheurvorming, afwijkingen in de hoogte, e.d. dan is real-time zichtbaar en gaat er tevens een alarm af.



Figuur 5.6: Real time monitoring in de cabine van de kettinggraver.

Overige monitoring

Naast de metalen strips op het geotextiel zijn er magneetstrippen aangebracht nabij de boven- en onderzijde van het VZG. Deze magneetstrippen kunnen ook jaren na aanleg nog middels dieptedetectie gedetecteerd worden. Deze methode die veelvuldig wordt gebruikt voor het opsporen van explosieven, maakt het mogelijk de positie van het VZG te vergelijken met de oorspronkelijke hoogte tijdens het aanbrengen. Daardoor kan de positie van een VZG in latere fases geverifieerd worden, ook zonder opgraving.

5.4 Opleverdossier

Na de uitvoering dient een opleverdossier opgesteld te worden. Dit bestaat ten minste uit de onderstaande zaken:

- Certificaten van de leveranties.
- Bouwverslagen waarin de uitvoeringsmethode aan de orde is gekomen;
- Keuringsrapporten;
- Revisietekeningen.
Omvatten bovenaanzicht en dwarsprofiel. Locatie van de VZG (X-, en Y-coördinaten), onderzijde en

bovenzijde VZG, overgang zand-klei. Locaties van overgangen en aansluitingen. Eigenschappen van het VZG, zoals maaswijdte. Eigenschappen van de lokale bodem, zoals kenmerkende waarden van de korrelverdeling.

- Een fotorapportage van de uitvoering.
Het vastleggen van aansluitconstructies is hierbij van belang.

Bovenstaande dient aangeleverd te worden bij de beheerder conform het overdrachtsprotocol. Deze omvat vaak de volgende onderwerpen: referentielijn, ontwerpvakken (GIS-bestand met locatiespecifieke verwijzingen naar ontwerprapportage), leggerprofiel (GIS-bestand met locatiespecifieke verwijzingen naar ontwerprapportage), profiel van vrije ruimte (PVVR) (GIS-bestand met locatiespecifieke verwijzingen naar PVVR-notitie) en revisieprofiel (as-built/revisie tekeningen).

5.5 Omgang met onzekerheid in de uitvoering

In de uitvoeringsfase bestaan er risico's en onzekerheid. Dit betreft met name het risico op beschadiging van het geotextiel. In onder andere de volgende literatuurbronnen is hier aandacht aangegeven: (CUR, 2004), (FEMA, 2008) en (Koerner, 2013). De schade valt onder de volgende categorieën:

- Schade door transport en opslag.
Deze schade kan ontstaan doordat geotextielrollen onjuist worden vervoerd, deze worden beschadigd door lepels van een vorkheftruck, onnodig bloot worden gesteld aan zonlicht/UV-licht. Dit laatste ontstaat vooral wanneer de bescherm laag wordt verwijderd ten behoeve van de uitvoering en er daarna vertraging in het werk ontstaat.
- Onjuiste aansluitingen.
Deze schade kan ontstaan doordat aansluitconstructies niet goed worden gemaakt (geen verbinding), of dat delen geheel niet worden uitgevoerd.
- Schade bij steenbekledingen (niet van toepassing bij VZG).
Schade is ontstaan door dat te zwaar stortsteen op te licht geotextiel is toegepast, doordat stenen van een te grote hoogte zijn laten vallen op onbeschermd geotextiel, doordat tijdens het vlieën stenen met de bak van de kraan over het geotextiel zijn geschraapt. Deze vorm van schade is niet van toepassing bij het VZG.

Bovenstaande kan ondervangen worden door met een zorgvuldige uitvoering waarbij aandacht is voor het voorkomen van schades.

Handvatten voor inspectie zijn gegeven in (FEMA, 2008). Deze geeft de volgende handvatten:

- Verifieer ontwerp- en materiaalspecificaties.
- Controle of specificaties aansluiten bij materiaalcertificaten.
- Controle op ontladen en opslag van geotextiel. Controle op schade.
- Controle op type geotextiel en of deze aansluit bij materiaalcertificaten.
- Controle op aansluitingen.
- Controle op afrollen van geotextielen / geotextiel opnemen in de machine, zonder beschadigingen.
- Controle of alle materialen gelijk zijn. Controle op productiefouten/afwijkingen.
- Verzamel materiaal monsters voor latere testen.
- Controle op alle verbindingen voor gebreken. Vastleggen van alle verbindingen die reparatie vereisen.
- Reparatie van alle beschadigingen.
- Fotografisch vastleggen van alle werkzaamheden.

5.6 Verwijderen VZG

Een VZG kan worden verwijderd. Dit kan doormiddel van het frezen ter plaatse van het VZG tot de relevante diepte. Na het verwijderen van de VZG en de ondergrond dient de sleuf te worden aangevuld. Aanvullend daarop is het verwijderde geotextiel middels grondreiniging te scheiden van de uitkomende freesgrond, zodat de basismaterialen kunnen worden hergebruikt.



5.7 Herstel en uitbreidbaarheid

Tijdens de uitvoering kan schade ontstaan aan het geotextiel. Vooral nog is dit alleen opgetreden in een situatie waar obstakels in de grond zijn aangetroffen (keien, beton en betonijzer). Deze schade kan hersteld worden, door lokaal ter plaatse van de schade grout te injecteren. Daardoor ontstaat een verbinding die zanddicht is.

Een VZG is uitbreidbaar in de lengterichting van de dijk. Indien in een latere fase een aanvullend traject wordt voorzien van een VZG, is dit mogelijk. Aandachtspunt is dat de aansluiting tussen beide trajecten passend wordt uitgevoerd (zanddicht / met aansluitconstructie). Aansluitconstructies zijn beschreven in paragraaf 4.5.2. Het zanddicht maken van de aansluiting kan middels een groutinjectie of vergelijkbare techniek.

Een VZG is in enige mate uitbreidbaar qua toegevoegde sterkte aan de dijk. De sterkte van een dijk met VZG wordt namelijk bepaald door onder andere de kwelweglengte. Deze kan in een latere fase worden uitgebreid indien de sterkte toename van het VZG onvoldoende blijkt.

De dijk is na realisatie van het VZG ook uitbreidbaar mits zettingen niet leiden tot schade aan het VZG. Bij een kruinverhoging of aanleg binnenberm zal de locatie van het VZG in het dwarsprofiel naar verwachting niet sterk wijzigen.



6 Beheer en onderhoud

6.1 Beheerplan

Een VZG is na de dijkversterking niet meer zichtbaar. Er dient een beheerplan opgesteld te worden waarin handvatten voor het beheer en onderhoud zijn vastgelegd, dit dient tevens als basis voor vergunningverlening.

In het beheerplan dienen de volgende zaken opgenomen te zijn:

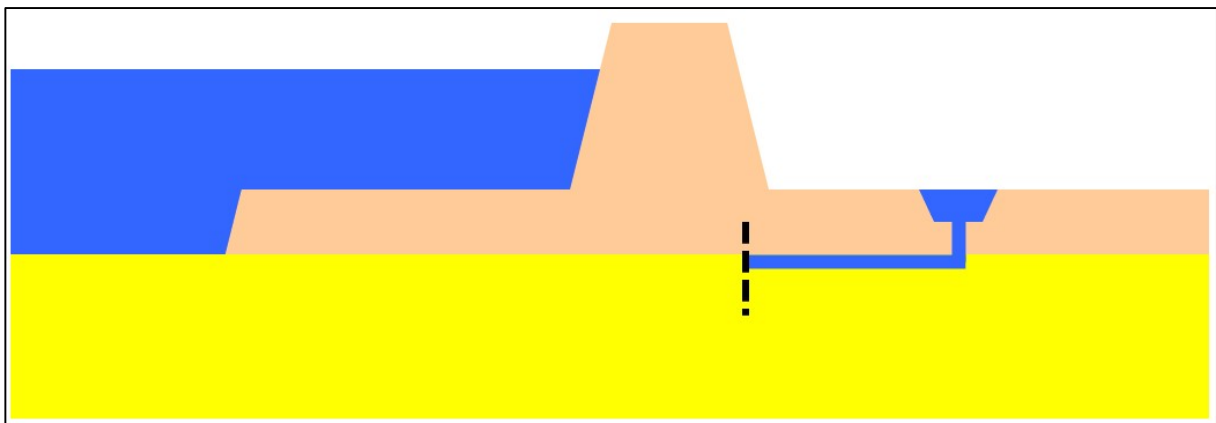
- Gegevens vanuit het opleverdossier.
Dit is beschreven in paragraaf 5.4.
- Toelichting wat het te verwachten gedrag van een VZG zal zijn tijdens hoogwater.
- Risico's voor functioneren VZG.
- Monitoring.

6.2 Goed gedrag VZG

6.2.1 Zandmeevoerende wellen

Bij groene dijken kunnen zandmeevoerende wellen ontstaan. En ook na het aanbrengen van verbeteringen zoals bijvoorbeeld een pipingberm, kwelscherm of VZG kan dit fenomeen zich voordoen en lijken te wijzen op een pipingprobleem (Deltares, 2012).

Het VZG stopt de groei van het erosiekanaal ter plaatse van het geotextiel. De groei van het erosiekanaal vanaf het uittredepunt tot aan het doek zal niet gestopt worden. Dit is weergegeven in Figuur 6.1. Dit betekent dat gedurende hoogwater zandmeevoerende wellen zichtbaar zullen zijn ter plaatse van het uittredepunt. De aanwezigheid van zandmeevoerende wellen aan de landzijde van het VZG betekent niet dat de pipingmaatregel faalt. Zandmeevoerende wellen tussen het VZG en de dijk wijzen wel op niet goed functioneren (voorloopseheid).



Figuur 6.1: Groei erosiekanaal tot aan VZG

Omdat het VZG een relatief jonge techniek is, is er nog weinig ervaring met de mate van zandtransport gedurende hoogwater na het aanbrengen. Net zoals bij andere fenomenen gedurende hoogwater geldt dat een waterschap na toepassing van de techniek ervaring zal opdoen met de techniek. Hierdoor zal het identificeren van afwijkingen (zoals meer zandtransport dan normaal) vanzelf onderdeel worden van de hoogwaterinspectie.

Gedurende hoogwaterinspecties is het verder van belang om te letten op:

- Welke monitoring is geïnstalleerd en geeft deze locatiespecifieke handvatten. Te denken valt aan monitoring middels tracerzand.
- Zijn er locaties die (excessief) meer zandtransport hebben dan andere locaties? Zo ja, is dit zandtransport verklaarbaar (op de zwakste plek met het steilste verhang is meer zandtransport te verwachten dan op locaties waar de kwelweglengte in relatie tot het verval groter is). Als dit zandtransport niet verklaarbaar is zou dit kunnen duiden op een niet goed werkend textiel.

Waarneming IJkdijk

Bij de beproeving van een VZG is een toename van zandtransport waargenomen. Het zandtransport is toegenomen bij een verval boven het verval waarom een niet met VZG versterkte dijk zou zijn bezweken. De toename van het zandtransport bedroeg ca. 0,12 m³. Bij dijken zonder VZG worden zandmeevoerende wellen waargenomen met een zandvolume tussen de 0,0 en 1,0 m³. Daarom is het waarschijnlijk dat een VZG niet leidt tot een toename van de zandmeevoerende wellen. Het is zelfs aannemelijk dat er sprake is van een afname.

6.2.2 Maaiveldddaling

Bij groene dijken kan sprake zijn van maaiveldzakking door bijvoorbeeld autonome bodemdaling. Een dijk met VZG heeft te maken met vergelijkbare processen. Daarbovenop kan aanvullende maaiveldddaling ontstaan. Bij een goed werkend VZG is deze aanvullende maaiveldddaling gering.

Voor eventuele maaiveldzakkingen zijn twee oorzaken:

1. Het aanvulzand aan weerszijden van het geotextiel heeft mogelijk een lagere verdichting dan het omgevingszand. Na verloop van tijd kan het maaiveld ter plaatse van het geotextiel (lokaal) zakken. Deze oneffenheid in het maaiveld kan worden opgevuld en staat overigens de werking van de VZG niet in de weg.
2. Als gevolg van terugschrijdende erosie tot aan het geotextiel kan op termijn lokale maaiveldzakking tussen het uittredepunt (bijvoorbeeld een kwelsloot) en de locatie van het geotextiel niet worden uitgesloten, zie 4.4.6. Deze maaiveldzakking kan worden opgevuld en staat overigens de werking van de VZG niet in de weg.

6.3 Risico's functioneren VZG

Er zijn meerdere risico's die het functioneren van het VZG kunnen bedreigen. Hieronder zijn handvatten gegeven voor de meest voorkomende risico's.

Graverij

Graafwerkzaamheden door mensen, zoals aanleg van kabels en leidingen kan leiden tot schade aan het VZG. In het beheerplan dient de locatie van het VZG aangegeven te zijn (o.a. in het opleverdossier). Dit is de basis in vergunningverlening. Verder kan dit risico ondervangen worden door visuele inspectie.

Dierlijke graverij

Graverij door dieren kan leiden tot schade aan het VZG. In een beheerplan dient het volgende te zijn aangegeven:

- Toegepaste constructieve maatregelen.
Voorbeelden zijn minimale gronddekking, keuze locatie VZG of maatregelen als beverwerend gaas.
- Verwachte aan-/afwezigheid van woedieren.
Een overzicht van meerdere woedieren is opgenomen in paragraaf 4.6.4.
- Situaties wanneer dierlijke graverij tot een risico leidt.
Bijvoorbeeld graafschade vanaf het maaiveld dieper dan een zekere diepte, of graafschade vanaf de waterzijde groter dan een zekere lengte.

Begroeiing

Begroeiing door planten kan leiden tot schade aan het VZG. In een beheerplan dient het volgende te zijn aangegeven:

- Benodigde beplantingsvrije zone.
Bij Waterschap Drents Overijsselse Delta wordt een zone van 10 m aangehouden. Hierin mogen wel gras en bloemen voor komen, maar geen tuinen, struiken of bomen.
- Toegepaste constructieve maatregelen.
Voorbeelden zijn het toepassen van schermen van PE-materiaal om wortels tegen te houden.
- Situaties wanneer beplanting tot een risico leidt.
Dit betreft wanneer de beplanting wortels heeft die reiken tot aan het VZG tot een diepte waardoor de



zanddichtheid wordt bedreigd. Dit is of de bovenzijde van het VZG, of de hoogte van de zandlaag. Naast voorgaande is de waarschijnlijkheid hiervan van belang. In de regel groeien plantenwortels niet dieper dan de grondwaterstand (GLG).

Levensduur VZG

In het ontwerp worden ook keuzes gemaakt rondom de levensduur van een VZG. De levensduur is geborgd gegeven de juistheid van deze keuzes. In het beheer dient geverifieerd te worden of deze voorwaarden valide zijn en blijven.

De keuzes rondom de levensduur zijn sterk afhankelijk van het type geotextiel. Handvatten voor de veel voorkomende verouderingsmechanismen zijn de volgende:

- Zonlicht / UV-licht.
Geotextielen verouderen onder invloed van licht. Blootstelling aan licht vindt plaats tijdens de aanleg en tijdens graafwerkzaamheden rondom het VZG. Indien graafwerkzaamheden rondom een VZG worden toegestaan, dient vastgelegd te worden hoe lang (uren/dagen) het VZG aan licht blootgesteld is.
- pH-waarden
De levensduur van de meeste geotextielen is geldig tussen een pH-waarde van 3 tot 9. Lagere en hogere pH-waarden kunnen in de bodem (zeldzaam) voorkomen. Dit komt voor in bijvoorbeeld kattenklei. Deze natuurlijke kleisoort bevat zwavel, dat kan reageren tot H₂S wat een zuur is. In dit geval kunnen pH-waarden lager dan 3 optreden. Hogere pH-waarden kunnen bijvoorbeeld optreden wanneer in de omgeving ophoogmateriaal zoals (staal)slakken worden toegepast. Wanneer deze (onbedoeld) in contact staan met water, ontstaat een basische oplossing. In dit geval kunnen pH-waarden hoger dan pH 9 ontstaan.
- Zuurstof
Sommige geotextielen kunnen reageren met zuurstof. De levensduur is bepaald of aerob (met zuurstof), of anaerob (zonder zuurstof). Wanneer de levensduur anaerob bepaald is, dient aandacht te zijn voor situaties waarin de bodem over gaat van anaerob naar aerob. Voorbeeld daarvan betreft een grondwaterverlaging als gevolg van bemaling of een (zeer) droge zomer.
- Temperatuur
De meeste geotextielen verouderen sneller bij hogere temperaturen. Vaak wordt de levensduur bepaald bij ca. 20°C. In de bodem heerst in de regel een temperatuur van ca. 10°C met enige seizoensvariatie afhankelijk van de diepte. Wanneer de temperatuur rondom het geotextiel structureel hoger wordt, is dit een aandachtspunt. Dit kan wanneer er een externe warmtebron wordt aangelegd nabij het VZG. Een voorbeeld hiervan zijn kabels en leidingen.

Vervormingen ondergrond

Een VZG betreft een geotextiel in de ondergrond. Wanneer de bodem vervormt, vervormt het geotextiel mee. Wanneer de bodem zuiver verticaal vervormt ontstaan er geen noemenswaardige spanningen in het geotextiel. Wanneer de bodem horizontaal vervormt, dan kan het VZG mee vervormen en op spanning komen. In extreme gevallen kan dit leiden tot schade aan het VZG.

Twee voorbeelden van dergelijke vervorming zijn de volgende:

- Een afschuiving van het dijktalud.
- Horizontale grondvervormingen door ophogingen naast het VZG, bijvoorbeeld als gevolg van een (latere) dijkversterking.

6.4 Monitoring

Bij een VZG zijn er twee vormen van monitoring in de beheerperiode:

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

6.4.1 Monitoring gedurende de levensduur

Monitoring gedurende de levensduur focust zich op de onzekere aspecten die in de loop van de tijd kunnen veranderen. Bij een goed ontwerp zijn alle aspecten, zoals bijvoorbeeld het risico op verstopping, goed ondervangen, en is aangetoond dat de uitvoering juist is verlopen. In de beheerfase kun je met behulp van



monitoring aantonen dat de filtertechniek gedurende de levensduur zanddicht is. In het tekstkader is hiervoor een mogelijke invulling gegeven. In de beheerfase zijn periodieke (visuele) inspecties wenselijk om veranderingen die een risico kunnen vormen, zoals beschreven in paragraaf 6.3, vast te leggen.

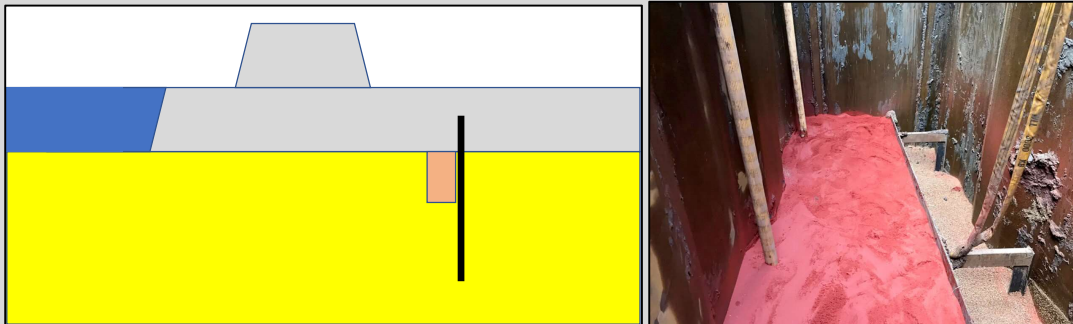


Intermezzo: monitoring middels tracerzand

In de gebruiksfase van het VZG is het noodzakelijk dat de werking aangetoond blijft. Een van de manieren is het gebruik van tracerzand over de gehele of een gedeelte van bovenstroomse zijde van het VZG.

Tracerzand

Bij het gebruik van tracerzand wordt in de realisatiefase aan de hoogwaterzijde van het VZG geplaatst. Deze locatie is weergegeven in Figuur 6.2. Dit tracerzand bestaat uit een type zand dat visueel sterk afwijkend is. Een weergave daarvan is opgenomen in Figuur 6.2.



Figuur 6.2: Locatie van tracerzand (rivierzijde VZG) en gebruik van tracerzand bij GZB (GWW-bouw, 2023).

Monitoringswijze

Bij het gebruik van tracerzand geldt de volgende beslisboom:

- Indien er geen zandmeevoerende wellen zijn, is het oordeel: de dijk is afdoende veilig tegen piping.
- Indien er wel zandmeevoerende wellen zijn, maar deze bevatten geen tracerzand is het oordeel: de dijk is afdoende veilig tegen piping.
- Indien er wel zandmeevoerende wellen zijn, maar deze bevatten wel sporen van tracerzand is het oordeel: de dijk is niet afdoende veilig tegen piping. Daarom dient visuele inspectie plaats te vinden naar het VZG.

Bovenstaande vraagt van het beheer dat visuele inspectie plaatsvindt naar zandmeevoerende wellen. Daarbij dienen monsters genomen te worden van het zand dat vrijkomt uit de zandmeevoerende wellen.

Aandachtspunten

Bij het gebruik van tracerzand gelden er meerdere aandachtspunten. Hieronder is beknopt overzicht opgenomen te zijn:

- **Kleur**
Het tracerzand dient een andere kleur te hebben dan het omliggende zand. In het voorbeeld is de kleur rood gebruikt. Merk op dat het natuurlijk voorkomende materiaal "ijzeroer" ook rood/roodoranje is. Afhankelijk van de projectlocatie kan een andere kleur wenselijk zijn.
- **Milieukundige eisen**
Tracerzand is een bodemvreemd materiaal. Bij het toepassen hiervan mag in het kader van milieuwetgeving geen sprake zijn van uitloging van kleur/materiaal. Eisen aan beproeving zijn o.a. vastgelegd in: NEN 7373:2004.
- **Chemische eisen.**
Er bestaan verschillende zandsorten die van nature een afwijkende kleur hebben. Deze afwijkende kleur dient chemisch stabiel te zijn. Natuurlijk voorkomende rode kleur wordt vaak veroorzaakt door ijzer wat kan reageren met zuurstof en mogelijk leiden tot verstopping. Natuurlijk voorkomende blauw-groene kleur wordt vaak veroorzaakt door glauconiet. Glauconiet is in een oxiderend milieu een instabiel en verweringsgevoelig mineraal (GeoDelft, 1995). Dergelijke materialen zijn dus ongewenst.
- **Fysische eisen.**
Het tracerzand moet overeenkomstige fysische eigenschappen hebben met het omliggende zand, waardoor het zand ook wordt meegevoerd indien er terugschrijdende erosie plaatsvindt. In het verleden zijn proeven uitgevoerd met piepschuim balletjes, maar deze worden minder goed meegevoerd (Pol, 2021).

Bij enkele projecten is extra monitoring toegepast, veelal in de periode dat het VZG nog in ontwikkeling was. Of deze monitoring wordt toegepast is een project- /locatiespecifieke keuze. De monitoring heeft dan als doel om een uitspraak te kunnen doen over de grondwaterstroming door het VZG. In de praktijk zijn geen verschillen in stijghoogte gemeten. De metingen zijn mogelijk onder de volgende voorwaarden:

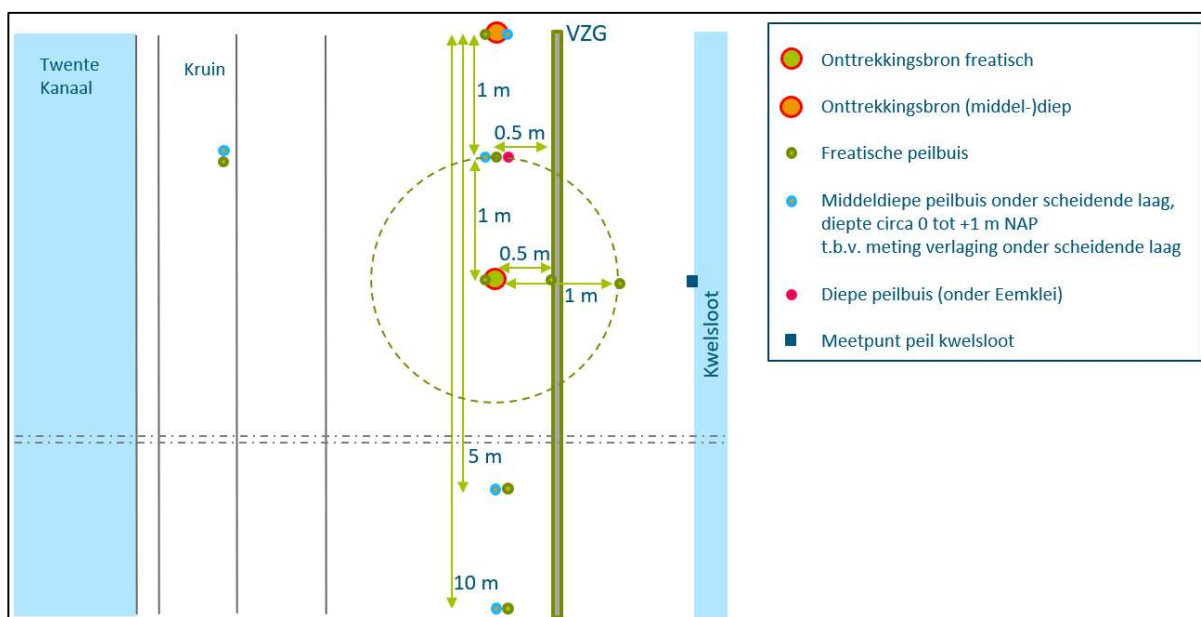
- Referentiemeting, er is duidelijk vergelijking materiaal.
- Minimum verhang, het grondwater staat niet stil.
- Grondwater stroomt door VZG en er niet onderdoor.

Er dient een referentiemeting te zijn. Idealiter is dit een meting voorafgaand aan de realisatie van een VZG. Hiervoor dient een meetopstelling geplaatst te zijn voorafgaand aan de uitvoering. Dit stelt eisen aan de maatvoering. Daarnaast dient de referentiemeting een zekere relevantie te hebben. Indien het doel van de monitoring is om uitspraken over de grondwaterstroming in extreme condities, dan dient de referentiemeting ook extreme condities te omvatten.

Er geldt voor monitoring een minimum verhang. Impact op grondwaterstroming kan alleen gemeten worden als er überhaupt sprake is van grondwaterstroming. Grondwater stroomt van hoog naar laag. Indien het verhang nihil is, is er ook geen grondwaterstroming. Er kunnen dan ook geen uitspraken gedaan worden over de grondwaterstroming. Dit stelt eisen aan de meetperiode. Indien uitspraken gedaan moeten worden met een zeer gering verhang tussen de meetpunten (bijvoorbeeld minder dan 0,05 m in de referentiesituatie), dan stelt dit eisen aan de meetnauwkeurigheid van de dijk.

De derde voorwaarde van de monitoring is dat het grondwater noemenswaardig door het VZG stroomt. De toepassing van het VZG is voorgenomen in watervoerende pakketten. Deze hebben een dikte die varieert van minder dan 5 m tot meer dan 100 m. Een VZG heeft een beperkte lengte in de verticaal. Indien een substantieel deel van de grondwaterstroming in de zandlaag onder het VZG doorstroomt, dan hebben de eigenschappen van het VZG geen invloed op de grondwaterstroming. Dus leidt het monitoren van de grondwaterstroming niet tot inzichten over het VZG.

Bij het project Twentekanaal is een monitoringsplan opgezet om het effect van het VZG op de grondwaterstroming te monitoren. Dit is geschetst in Figuur 6.3. Deze monitoring omvat een referentiemeting. Er was in het grondwater een te gering natuurlijk verhang om met zekerheid uitspraken te doen. Daarom gebruikt deze opzet een kortdurende pompproef waarbij kunstmatig een verhang in het grondwater wordt gecreëerd. Tenslotte is de monitoring op een locatie geïnstalleerd waar direct onder het VZG slechtdoorlatende lagen aanwezig zijn. Daardoor is alle grondwaterstroming op deze locatie door het VZG en niet onder het VZG door. Tot op heden geeft de monitoring aan dat verstoppingen, conform de literatuur op dit vlak, niet optreden.



Figuur 6.3: Overzicht meetopstelling pompproef Twentekanaal.

6.4.2 Monitoring aan het einde van de levensduur

Monitoring kan ook plaatsvinden aan het einde van de levensduur (50 tot 100 jaar). Een VZG wordt ontworpen voor een zekere levensduur. Het is mogelijk dat aan het einde van de theoretische levensduur de constructie nog intact is. Dit kan middels destructief onderzoek. Hieronder is de onderzoekswijze beschreven:

- Steekproefsgewijs opgraven, uitvoeren van visuele inspectie.
en
- Verzamelen geotextielmonsters (destructief voor de bestaande constructie).
en
- Laboratoriumproeven op geotextielmonsters.
Hierbij kan gedacht worden aan zanddichtheid, doorlatendheid en duurzaamheid²⁹.

Ten behoeve van deze monitoring kan gekozen worden om extra geotextiel in de grond aan te brengen, zonder waterkerende functie om later op te graven voor onderzoek.

²⁹ De meeste geotextielen in deze context betreffen het materiaal polypropyleen. Dit is kwetsbaar voor het verouderingsproces "oxidatie". Naar verwachting treedt dit verouderingsproces onder de grondwaterstand zeer beperkt op. De test die de duurzaamheid van geotextielen onder invloed van oxidatie beschrijft is opgenomen in: EN ISO 13438:2004.



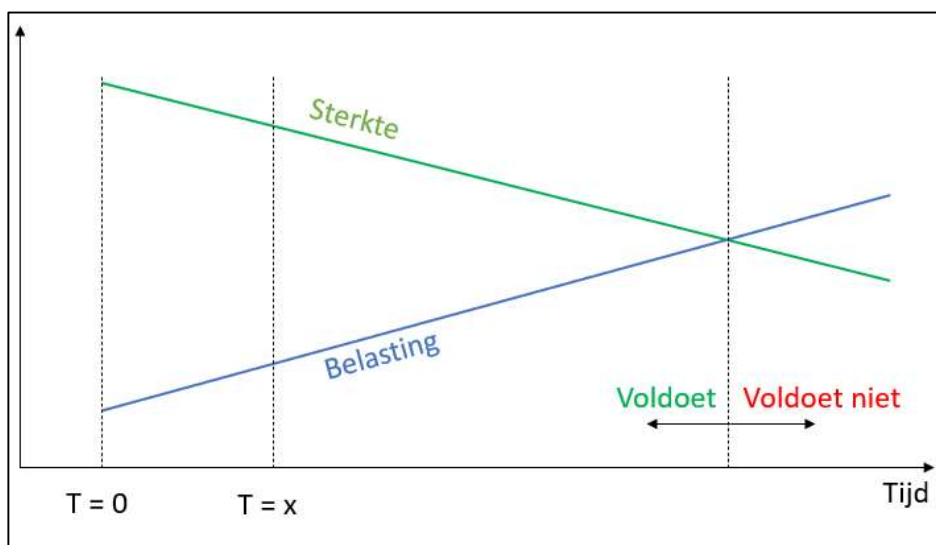
7 Beoordelen

7.1 Algemeen

Primaire waterkeringen worden periodiek (12-jaarlijks) beoordeeld. Daarbij wordt getoetst of de dijk inclusief constructies, zoals het VZG, voldoet aan de gestelde normen. In het algemeen wordt bij dijkontwerp een maatregel ontworpen voor een bepaald zichtjaar (doorgaans 50 of 100 jaar). Hierbij wordt rekening gehouden met:

- Degraderatie van de versterkingsmaatregel over tijd;
- Toename van de (hydraulische) belasting over tijd.

Een versterkingsmaatregel zal op peildatum conform de theorie niet meer voldoen omdat de (toegenomen) belasting groter is geworden dan de (afgenomen) sterkte. Dit proces is schematisch weergegeven in Figuur 7.1.



Figuur 7.1: Schematische weergave ontwerpprincipes

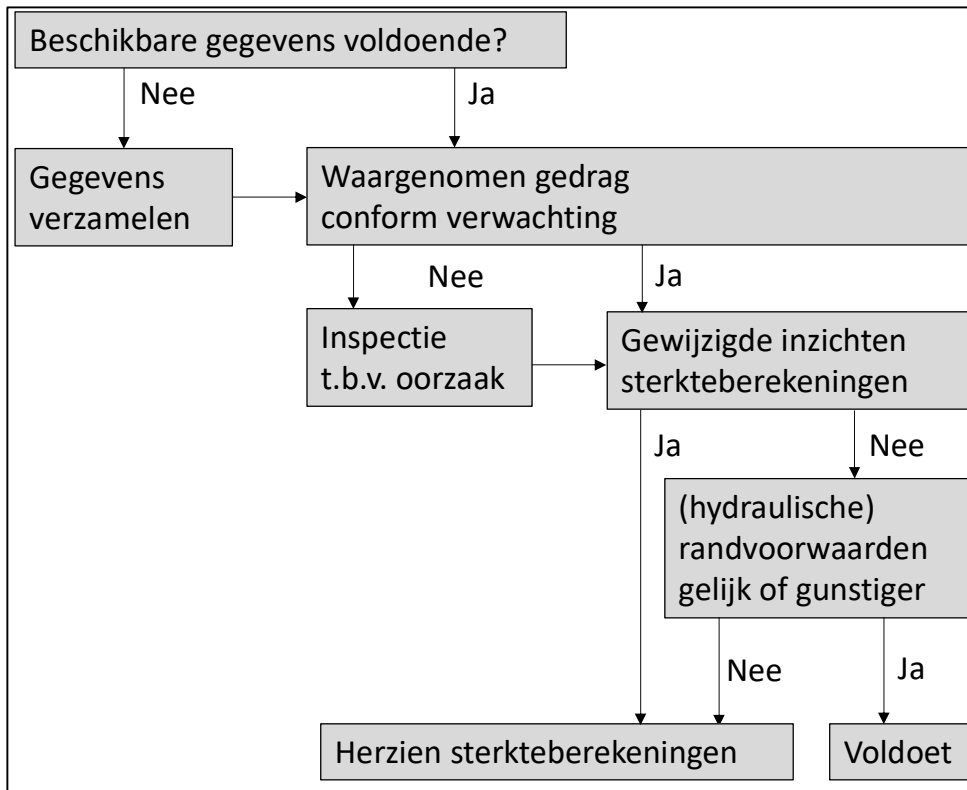
Tussen de oplevering van een versterking en de theoretische levensduur van de maatregel vinden periodieke beoordelingen plaats. Bij een goed ontworpen maatregel, ongewijzigde inzichten (sterkte en belasting) en ongewijzigde randvoorwaarden (zoals polderpeil) zal de pipingmaatregel voldoen tot peildatum.

7.2 Processtappen beoordeling

In de beoordeling wordt werken van grof-naar-fijn aanbevolen, conform onderstaande stappen (zie ook Figuur 7.2):

1. Controle of voldoende gegevens beschikbaar zijn;
2. Waargenomen gedrag;
3. Controle rekenregels sterkteberekeningen;
4. Controle of de (hydraulische) randvoorwaarden hetzelfde zijn of gunstiger.

Op basis van deze stappen wordt het oordeel gevormd.



Figuur 7.2: Stroomschema beoordeling.

7.2.1 Stap 1. Voldoende gegevens

In stap 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:

1. In het ontwerp is aangetoond dat minimaal voldaan wordt aan de eis van waterveiligheid.

Hiervoor dienen alle ontwerprandvoorwaarden en beschikbare gegevens (zoals ondergrondinformatie) volledig en herleidbaar te worden gedocumenteerd en is het nodig aan te tonen dat voldoende kwaliteitscontrole heeft plaatsgevonden.

2. Is de veiligheidsfilosofie van het ontwerp conform de meest recente eis aan de waterveiligheid?
3. Is de uitvoering uitgevoerd binnen de gestelde marges en toleranties?

Hiervoor zijn as-built tekeningen benodigd zoals beschreven in paragraaf 5.4 opleverdossier. Afwijkingen in de aanlegfase zijn vastgelegd en er is vastgesteld dat de bestaande situatie (as-built) voldoet aan de eis van waterkeringsveiligheid.

4. Er is een beheerplan opgesteld waarin is gespecificeerd welke marges en toleranties gelden in de gebruiksfase?

Dit betreft een inventarisatie van welke risico's (graverij, begroeiing) geaccepteerd worden en welke niet. Daarnaast welke vervormingen worden verwacht en worden geaccepteerd.

5. Er is vastgelegd in welke mate veroudering acceptabel is.

Dit betreft de levensduur van het geotextiel en onder welke condities dit geldt (temperatuur en pH-waarde van het grondwater).

Indien aan bovenstaande voorwaarden is voldaan zijn er voldoende gegevens beschikbaar om de beoordeling voort te zetten. Indien niet wordt voldaan dienen de missende gegevens te worden aangevuld.

7.2.2 Stap 2. Waargenomen gedrag

In stap 2 wordt gecontroleerd of het waargenomen gedrag van de dijk inclusief VZG valt binnen verwachtingen. De verwachtingen betreffen “Goed gedrag VZG” zoals beschreven in paragraaf 6.2.

Dit omvat ten minste inspectie en monitoring van eventuele wellen. Daarnaast gelden ook andere zaken die bij beheer en onderhoud belast zijn en een risico vormen voor een VZG. Een overzicht van deze zaken zijn gegeven in paragraaf 6.3. Indien het beheerplan voorziet in periodieke monitoring van andere zaken, dienen deze ook (periodiek) beschouwd te worden. Handvatten voor monitoring zijn gegeven in paragraaf 6.4.

Indien het tijdens beheer en onderhoud waargenomen gedrag niet binnen de vereiste kaders valt, in ongunstige zin, is inspectie nodig teneinde de oorzaak te achterhalen. Handvatten hiervoor zijn gegeven in hoofdstuk 6. Hieruit kan blijken dat uitgangspunten ten aanzien van sterkte, belastingen en/of onzekerheden in ongunstige zin moeten worden bijgesteld.

7.2.3 Stap 3. Controle rekenregels

In stap 3 wordt gecontroleerd of nieuwe kennis aanwezig is met betrekking tot het VZG. Daarbij wordt bezien of de beoordeling van verticaal zanddichte geotextielen in negatieve zin is gewijzigd. Nieuwe inzichten kunnen ontstaan vanuit wijziging van de gehanteerde rekensystematiek.

Indien het voldoende aannemelijk is dat er geen nieuwe inzichten zijn die tot aanpassing leiden van de betrouwbaarheid in ongunstige zin, wordt de analyse voortgezet met stap 4. Indien sprake is van nieuwe inzichten die leiden tot een conservatievere (strengere) aanpak, is nader onderzoek noodzakelijk.

Intermezzo: rekenregels zanddichtheid

Een van de geldende rekenregels betreft de zanddichtheid van het geotextiel. Handvatten voor het ontwerp zijn gegeven in paragraaf 0. Deze zijn overgenomen uit CUR205 (CUR, 2017). Dit betreft conservatieve empirische rekenregels.

Het risico bestaat dat een beoordeling jaren na de aanleg plaatsvindt. In dit geval worden soms nieuwe gegevens verzameld, wordt met nieuwe(re) criteria getoetst en ontstaat het oordeel dat een constructie (theoretisch) niet meer voldoet, terwijl er in het veld geen knelpunten zijn waargenomen. In dit geval biedt een geavanceerdere beoordeling een mogelijkheid.

Binnen de geavanceerdere beoordeling bestaat de vrijheid om te werken met alle beschikbare rekenregels indien die meer passend zijn voor de situatie. Afwijkende rekenregels zijn o.a. gegeven in de volgende bronnen: CUR151 (CUR, 1991), (Mlynarek, 1994), CUR205 (CROW-CUR, 2021) en (FEMA, 2008). Deze laatste omvat een literatuuroverzicht van ca. 40 verschillende criteria.

7.2.4 Stap 4. Randvoorwaarden zijn hetzelfde of gunstiger

In stap 4 wordt gecontroleerd of de randvoorwaarden hetzelfde zijn of gunstiger als waar in het ontwerp vanuit is gegaan:

- Hydraulische randvoorwaarden.
(waterstanden buitenwater, polderwaterstand).
- Geometrische en geotechnische randvoorwaarden.
(aanleg van nieuwe waterpartijen of grondlichamen en daarmee aanpassing van maaiveldhoogtes of kwelweglengtes).

Als de randvoorwaarden niet zijn veranderd in ongunstige zin ten opzichte van het ontwerp, wordt de analyse voortgezet naar het vormen van een oordeel.

Indien randvoorwaarden in ongunstige zin zijn gewijzigd dienen nieuwe sterkteberekeningen te worden uitgevoerd. Deze berekeningen zijn analoog aan ontwerpen en gegeven in paragraaf 4.3.

7.3 Oordeel vanuit beoordeling

Op basis van de stappen beschreven in de voorgaande paragrafen wordt een oordeel gevormd.

Indien binnen de beoordeling alle stappen zijn beoordeeld met “voldoet”, dan geldt het volgende oordeel voor de dijkvakken die zijn versterkt met een VZG:

- Faalkans kan worden overgenomen vanuit het ontwerp.

Er bestaan faalmechanismes waarbij een faalkans wordt bepaald, dit zijn “groep 1” toetssporen. Ook zijn er faalmechanismes waarbij geen faalkans wordt bepaald, dit zijn “groep 4” toetssporen”. Ten tijde van schrijven vallen de faalmechanismes achterloopsheid en onderloopsheid in “groep 4” toetssporen. Hiervoor worden geen faalkansen bepaald. De faalkans wordt derhalve bepaald door bovenloopsheid, deze valt als enige in groep 1. Indien bovenloopsheid uitgesloten is, is het oordeel “faalkans verwaarloosbaar”.

Indien binnen de beoordeling alle stappen zijn beoordeeld en de conclusie is “Herzien sterkteberekening”, dan is het oordeel gelijk aan het resultaat van de herziene sterkteberekeningen. Daarbij worden dezelfde stappen doorlopen als bij het ontwerp (zie hoofdstuk 4). Daarbij gelden de volgende uitzonderingen:

- Hydraulische belastingen.
Deze zijn conform de vigerende normen voor de beoordelingsperiode. Dit in tegenstelling tot de normen in het ontwerp voor het (toekomstige) zichtjaar.
- Levensduur materiaal.
Het materiaal (geotextiel) dient een levensduur te hebben tot ten minste het einde van de beoordelingsperiode. Dit in tegenstelling tot het zichtjaar van het ontwerp.
- Resultaat herziene sterkteberekeningen.
De sterkte berekeningen omvatten “groep 1” en “groep 4” toetssporen. Het oordeel van alle groep 4 dient “voldoet” op te leveren. Ten tijde van schrijven betreft dat de toets op achterloopsheid en onderloopsheid.

Indien het oordeel van alle “groep 4” toetssporen “voldoet” is, dan is de faalkans gelijk aan de ongunstigste faalkans van alle “groep 1” toetssporen. Ten tijde van schrijven is dit de kans op bovenloopsheid.

Indien niet het oordeel van alle “groep 4” toetssporen gelijk is aan “voldoet”, dan dient de dijk beoordeeld te worden alsof er geen VZG aanwezig is.

Indien er andere oorzaken zijn om aan de werking van het VZG te twifelen, bijvoorbeeld door schade aan het geotextiel, dan dient de dijk beoordeeld te worden alsof er geen VZG aanwezig is.

8 Verwijzingen

- Acacia Water. (2020). *Verticaal Zanddicht Geotextiel, Lange termijn functionaliteit achter de dijken in het rivierengebied*. Gouda.
- Alterra. (2007). *Graverij van bevers in rivierdijken in de Gelderse Poort*.
- Arcadis. (2021). *OBOR - GCL (bentonietmat)*.
- Bakel, v. J. (1996). De hydrologische grootheid 'Ernst'. *Stromingen (2)*, pp. 17-21.
- Bezuijien, A. V. (2017). Backward erosion piping through vertically layered soils. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-9.
- Bezuijien, A., Beek, v. V., & Schenkeveld, F. (2012). doorlatendheid geotextielen in zand. *Geokunst*, 58-59.
- Bot, B. (2016). *GWZ2016*. Rotterdam: Bot Raadgevend Ingenieur.
- COW. (1984). *Inventarisatie Muskusrattenschade in waterkeringen, kenmerk: S-72.029-II*. Delft: Centrum voor Onderzoek Waterkeringen.
- CROW-CUR. (2021). *Ontwerprichtlijn Geotextielen onder steenbekleding (660.15), CUR205*. Ede: CROW-CUR.
- Cultuurtechnische vereniging. (1988). *Cultuurtechnisch Vademecum 1988*. Utrecht: Cultuurtechnische vereniging.
- CUR. (1991). *Geokunststoffen in de civiele techniek - CUR151*.
- CUR. (2000). *Breuksteen in de praktijk, deel 2: dimensionering van constructies in binnenwateren - CUR 197*.
- CUR. (2004). *Schade aan geotextielen onder dijkbekleding van steenbestorting - werkrapport*.
- CUR. (2009). *Geokunststoffen in de waterbouw; CUR174*.
- CUR. (2010). *CUR228 Ontwerprichtlijn door grond horizontaal belaste palen*.
- CUR. (2017). *Ontwerprichtlijn Geotextielen onder steenbekleding CUR205*. Delft.
- Deltares. (2009). *Analyserapport IJkdijk pipingproeven, Flood Control 2015*. Delft.
- Deltares. (2009a). *SBW Hervalidatie Piping, HP5.4a Inrichting en aanleg full-scale experiment, kenmerk: 1200690-000*. Delft: Rijkswaterstaat.
- Deltares. (2009b). *SBW Piping - Kunstwerken, KW4.a Factual reports laboratorium experimenten Fase 1; kenmerk: 1001452-017*. Delft.
- Deltares. (2012). *Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen*.
- Deltares. (2013). *Onderzoek naar de werking van geotextielen als pipingremmende maatregel (Hoofdrapport) - Feitenrapportage kleine en medium schaalproeven, Numeriek onderzoek, Analyse kleine-, medium-schaalproeven en IJkdijkproef, ... Kenmerk: 1206806-000-GEO-0014*. Delft.
- Deltares. (2013). *Onderzoek naar de werking van geotextielen als pipingremmende maatregel; Feitenrapport IJkdijkproef. Kenmerk: 1206806-006-GEO-0001*. Delft.
- Deltares. (2018). *Anisotropie in doorlatendheid, Een literatuuronderzoek naar anisotropie in doorlatendheid en de effecten hiervan op piping, kenmerk: 11202960-002*. Delft.
- Deltares. (2019). *KvK Piping deelproject 011: Getijdenafzettingen en piping (2), kenmerk: 11203719-011-GEO-0001*. Delft: Rijkswaterstaat.
- Deltares. (2020). *Kennis voor Keringen: Syntheserapport pipingonderzoek 2018-2019, kenmerk: 11203719-019-GEO-0003*. Delft: Rijkswaterstaat.
- Deltares. (2021). *Ontwerp grofzandbarrière pilot Gameren; Aanzet tot ontwerp- en beoordelingsrichtlijn GZB*. Delft.
- Deltares. (2022). *Veiligheidsraamwerk innovatieve pipingmaatregelen*. Delft.
- ENW. (2012). *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken*. Rijkswaterstaat.
- ENW. (2017). *Grondslagen voor hoogwaterbescherming*.
- FEMA. (2008). *Geotextiles in Embankment Dams - Status Report on the Use of Geotextiles in Embankment Dam Construction and Rehabilitation*. Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. (2011). *Filters for Embankment Dams, Best Practices for Design and Construction*.
- GeoDelft. (1995). *Geotechnische opinie glauconiethoudende zanden (Zanden van Berg, Formaties van Breda en Oosterhout)*. s-Hertogenbosch: Combinatie Middelpaalt Westersehelde v.o.f.
- GWW-bouw. (2023, Januari 16). *Grofzandbarrière als dijkversterking is geweldige innovatie*. Opgehaald van GWW-bouw.nl: <https://www.gww-bouw.nl/artikel/grofzandbarriere-als-dijkversterking-is-geweldige-innovatie/>
- Herik, V. d. (2016). *As-built Realiseren Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG) binnen dijkverbetering Hagestein Opheusden (HOP) (Vol. 10594-VZG-AB-R04)*.
- HKV; HWBP; Unie van Waterschappen. (2021). *LCC bij ontwerp - handelingsperspectief voor HWBP projecten*.
- IJsselwerken. (2021). *TOM Piping*.



- Koerner, R. K. (2013). Geotextile Filter Failures Under Challenging Field Conditions. *Geotextiles and Geomembranes*, 272-289.
- Koese, B. R. (2011). Gravende rivierkreeften: waar gaat het heen? *De Levende Natuur*, 120-123.
- Kurstjens, G. N. (2011). *De verwachte ontwikkelingen van de beverpopulatie in Nederland: naar een bevermanagement*. Faunafonds.
- LCM. (2010). *Landelijk jaarverslag 2010 muskus- en beverrattenbestrijding*. Tiel: Landelijke Coördinatiecommissie Muskusrattenbestrijding.
- Lemmers, P. . (2018). *Invasieve exotische kreeften in het beheergebied van waterschap Rivierenland, Verkenning van effecten, risico's en mogelijke aanpak*. Tiel: Waterschap Rivierenland.
- Massarsch, K. (1992). Static and dynamic soil displacements caused by pile driving. *Proceedings 4th Int. Conference Application of Stress-wave Theory to Piles*, (pp. 15-24). The Hague.
- Massarsch, K.R. (2004). *Vibrations caused by Pile Driving*. The Magazine of Deep Foundations institute, Fall 2004, pp 39-42.
- Meijers, P. (2007). *Settlement during vibratory sheet piling*. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu. (2017). *Regeling veiligheid primaire waterkeringen 2017 - Bijlage III Sterkte en veiligheid*.
- Mlynarek, J. (1994). *Evaluation of filtration performance of geotextiles*. Delft: Ministry of Transport, Public Works and Water Management.
- Nederlandse geotextielorganisatie. (1985). *Syllabus, geotextiel; ontwerpmethodieken*.
- Normcommissie Geotechniek. (2017). *NEN 9997-1+C2 (nl); Geotechnisch ontwerp van constructies - Deel 1: Algemene regels*. NEN.
- Pol, J. K. (2021, Februari). Temporal Development of Backward Erosion Piping in a Large-Scale Experiment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, pp. Volume 147, issue 2.
- POV K&L. (2020). *Veiligheidsraamwerk POV K&L*.
- POV-Piping. (2017). *Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel (groene versie)*.
- POV-Piping. (2019). *POV-PipingPortaal*. Tiel: Waterschap Rivierenland.
- POV-Piping. (2020). *Handreiking meetnetten en grondwatermonitoring voor piping*. Tiel: Waterschap Rivierenland.
- Rijkswaterstaat. (2010). *Omgevingsmanagement: zo werkt het in de natte infrastructuur; van planstudie naar realisatie en beheer & onderhoud*.
- Rijkswaterstaat. (2017a). *OI2014v4 Handreiking ontwerpen met overstromingskansen - Veiligheidsfactoren en belastingen bij nieuwe overstromingskansnormen*.
- Rijkswaterstaat. (2021). *Schematiseringshandleiding piping bij kunstwerk*. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.
- Rijkswaterstaat. (2021a). *Schematiseringshandleiding piping, WBI 2017*.
- Rijkswaterstaat. (2022, juni 22). *Normen voor wateroverlast*. Opgehaald van Kenniscentrum InfoMil: <https://www.infomil.nl/onderwerpen/lucht-water/handboek-water/thema-s/wateroverlast/normen-wateroverlast/>
- SBR-CUR. (2012). *Durability of Geosynthetics, CUR243*.
- Schmertmann, J. (2000). The no-filter factor of safety against piping through sands. In F. S. Jr., *Judgment and Innovation: The Heritage and Future of the Geotechnical Engineering Profession* (pp. 65-132).
- Silvis, F. (1991). *Verificatie piping model, Proeven in de Deltagoot, evaluatierapport; kenmerk: CO-317710/7*. Delft: Grondmechanica Delft.
- STOWA. (2015). *Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen, kenmerk: STOWA 2015-15*. Amersfoort: Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer.
- TAW. (2004). *Technisch Rapport Waterspanningen bij dijken*.
- USBR. (2019). *Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations (D-6)*.
- UvW. (2020). *Beverprotocol voor de waterbeheerders in de provincies Gelderland en Zuid-Holland*. Den Haag: Unie van Waterschappen.
- UVW. (2022). *Muskusratten & Beverratten, jaarverslag 2021*. Den Haag: Unie van Waterschappen.
- Vos, J. &. (2013). *Graafactiviteiten van de rode Amerikaanse rivierkreeft (Procambarus clarkii)*. Delft en Leiden: Hoogheemraadschap van Delfland en Hoogheemraadschap van Rijnland.
- Waterschap Rivierenland. (2017). *Ontwerp en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel; groene versie*.
- Witteveen+Bos. (2016). *Instructie SOS; Praktisch toepassen SOS binnen het WBI2017*. Rijkswaterstaat.
- Witteveen+Bos. (2022). *Duurzaamheid filterlagen in oeverbeschermingsconstructies. Referentie: 132744/22-014.462*.
- Zoogdierverseniging. (2023, maart 3). *Zoogdiersoorten*. Opgehaald van Zoogdierverseniging: <https://www.zoogdierverseniging.nl/zoogdiersoorten/bever>

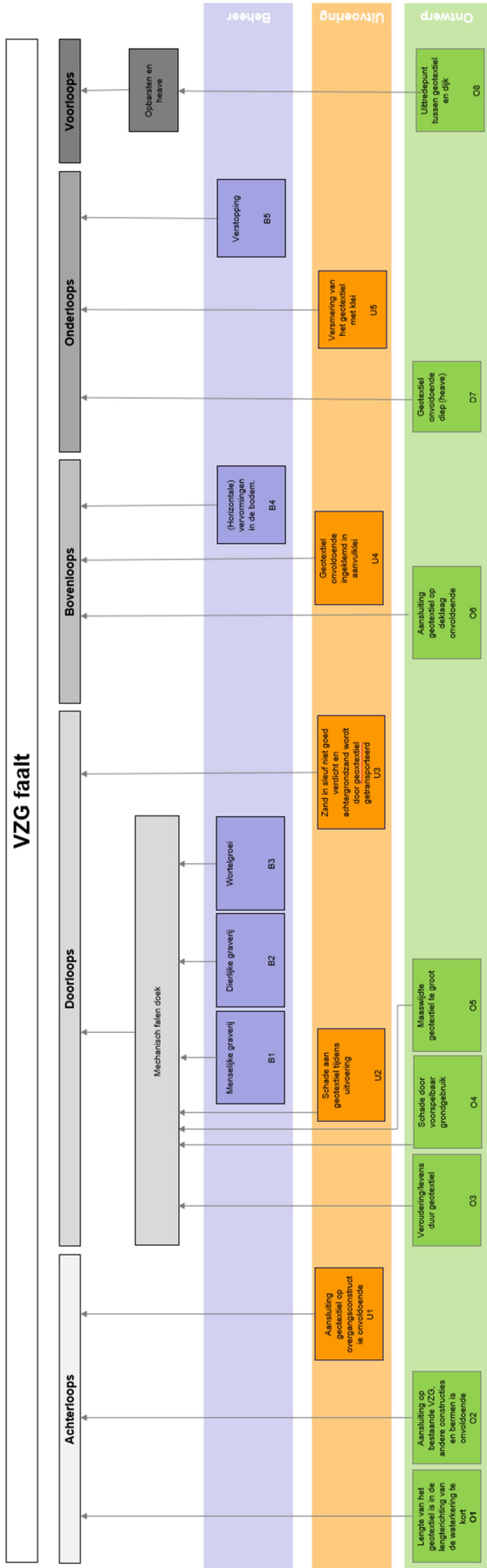




BIJLAGE 1: FOUTENBOOM VZG



VZG faalt



BIJLAGE 2: BETROKKEN DESKUNDIGEN



Leden deskundigenteam en expertsessies	Organisatie
Ir. J. (Jan) Gruppen	Waterschap Drents Overijsselse Delta
MSc. L.J. (Laura) Taal	Waterschap Rivierenland
Ir. B. (Bianca) Hardeman	Deltares
dr. W. (Wim) Kanning	Deltares
Dr. Ir. A. (Andre) Koelewijn	Deltares
MSc. L. (Leo) van Nieuwenhuijzen	Waterschap Rijn en IJssel
MSc. C. (Christien) Veenstra-Huisman	Waterschap Rijn en IJssel
Ir. H. (Henk) van Hemert	Rijkswaterstaat
MSc. M. (Marinus) Aalberts	Witteveen+Bos

Experts betrokken in reviewsessies	Organisatie
dhr. W. (Wijnand) Evers	Waterschap Drents Overijsselse Delta
dhr. J. (Johan) Elshof	Waterschap Drents Overijsselse Delta
MSc. C. (Coen) Steetzel	Witteveen+Bos
MSc. N. (Niek) van der Leer	Witteveen+Bos
BSc. B. (Bas) Bakker	Boskalis
Ir. R. (Richard) de Jager	Boskalis
Ir. J. (Jeroen) van den Bos	Boskalis

Leden schrijfteam en interne review	Organisatie
Ir. B.T. (Bouke) van Meekeren	Antea Group (schrijver)
Ir. G.P. (Guido) van Rinsum	Witteveen+Bos (schrijver)

IPM-Team OBOR VZG	Organisatie
Dr. M. (Maurits) van Dijk	Waterschap Drents Overijsselse Delta
Ing. R. (Richard) de Boer	Boskalis
Ing. J. (Jeroen) Terlingen	Van den Herik-Sliedrecht



BIJLAGE 3: NADERE TOELICHTING (AFWEZIGHEID) VAN VERSTOPPINGSRISICO BIJ VZG



Algemeen

Het verstoppingsrisico is in eerste instantie beschreven in de groene versie van het OBR-VZG (Waterschap Rivierenland, 2017). In deze bron zijn de onderstaande passages opgenomen.

“Bovendien is de verwachting dat het geotextiel niet acuut dichtslibt. Het dichtslibben zou bijvoorbeeld ook gemonitord kunnen worden. Als uit de monitoring blijkt dat er inderdaad verstoppingen voorkomen, kunnen beheersmaatregelen worden toegepast. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de strategie rondom monitoring van verstoppingen nog niet uitontwikkeld is.”

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

Uit deze passages blijkt de verwachting is dat verstopping geen majeur onderdeel is. Echter wordt tegelijkertijd rekening gehouden met het scenario volledige verstopping kan optreden en dat een VZG als ondoorlatend heavescherm getoetst dient te worden. In deze bijlage is een literatuurstudie opgenomen waarin het verstoppingsrisico van een VZG of geotextiel is beschouwd.

In de literatuurstudie zijn de volgende bronnen geraadpleegd:

- CUR151 - Geokunststoffen in de civiele techniek (CUR, 1991);
- CUR174 - Geokunststoffen in de waterbouw (CUR, 2009);
- CUR243 – Durability of Geosynthetics (SBR-CUR, 2012);
- Grofzand barrière (Deltares, 2021) & Onderzoek Acacia water (Acacia Water, 2020).
- Syllabus – geotextiel, ontwerpmethodieken (Nederlandse geotextielorganisatie, 1985).

CUR151 - Geokunststoffen in de civiele techniek

De CUR151 doet uitspraken over geotextielen en het risico op verstopping van de geotextielen. Daarbij wordt geïndiceerd op geotextielen die bestaan uit een enkel textiel. Dit is eenzelfde geotextiel die wordt gebruikt bij het VZG. In paragraaf 5.3 van CUR 151 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.

Bovengenoemde situatie betreft de interactie tussen de grond en het geotextiel. In deze OBOR is een toepassing van het VZG beschreven tussen het geotextiel en aanvulzand. Daarmee heeft het beschreven risico van CUR151 niet betrekking op de natuurlijk aanwezige grond, maar op het aanvulzand. Het beschreven risico betreft niet een proces dat optreedt in de lange termijn, maar na geringe tijd. Dit is meetbaar in een laboratoriumopstelling. Dit is reeds gedaan in het onderzoek (Bezuijen, Beek, & Schenkeveld, 2012). De inzichten hiervan zijn verwerkt in voorliggende OBOR.

Dit geeft de volgende deelconclusie:

- CUR151 beschrijft geringe risico's op verstoppingen. De ontwerpwijze in deze OBOR omvat alle beschreven risico's. Er zijn geen rest risico's.

CUR174 - Geokunststoffen in de waterbouw

De CUR174 doet uitspraken over geotextielen en het risico op verstopping van de geotextielen. Deze bouwt voort op de eerdere CUR151. Het proces dat CUR151 beschrijft is benoemd als “blocking”. Daarnaast wordt het proces clogging beschreven in paragraaf 3.4.1 van CUR174. 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 poriëgehalte 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.”

Bovengenoemde situatie bouwt voort op de interactie tussen grond en het geotextiel ('blocking'). Daar bovenop komen extra processen ('clogging'). De invloed daarvan is of nihil, of maximaal een halvering van de doorlatendheid van een geotextiel. Daarmee is de invloed van 'clogging' gering. In deze OBOR is de halvering van de doorlatendheid, welke worst-case is, standaard voorgeschreven.

Dit geeft de volgende deelconclusie:

- CUR174 beschrijft geringe risico's op verstoppingen. De ontwerpwijze in deze OBOR omvat alle beschreven risico's. Er zijn geen restrisico's.

CUR243 – Durability of Geosynthetics

De CUR243 doet uitspraken over geotextielen en het risico op verstopping van de geotextielen. Er wordt gesproken over drainagematten waarbij de doorlatendheid van belang is. Dit is een ander type geotextiel, dan het geotextiel dat wordt toegepast bij een VZG. De CUR243 gebruikt de inzichten van drainagematten ook voor gewone geotextielen. In paragraaf 1.4.3 en 1.5.6 van CUR243 zijn veiligheidsfactoren voor verstopping gegeven van drainagematten en filters gegeven. In paragraaf 1.5.11 zijn enkele voorbeelden gegeven hoe de afname van de doorlatendheid van geotextielen is bepaald. Het volgende wordt gesteld:

Basically the following Reduction Factors are used:

RF_{IMCO}	<i>Reduction factor for instantaneous compression.</i>
RF_{IMIN}	<i>Reduction factor for instantaneous intrusion by the soil.</i>
RF_{CR}	<i>Reduction factor for time-dependent compression of the core (compressive creep).</i>
RF_{IN}	<i>Reduction factor for time-dependent intrusion of the soil.</i>
RF_{CH}	<i>Reduction factor for chemical degradation.</i>
RF_{PC}	<i>Reduction factor for particulate clogging.</i>
RF_{CC}	<i>Reduction factor for chemical clogging.</i>
RF_{BC}	<i>Reduction factor for biological clogging.</i>

De eerste twee factoren (RF_{IMCO} en RF_{IMIN}) mogen op 1,0 gesteld worden wanneer testmethodes van de geotextielen overeenkomen met de werkelijke situatie. Dit is reeds gedaan in het onderzoek (Bezuijen, Beek, & Schenkeveld, 2012).

De factor RF_{CR} betreft het effect van kruip op de doorlatendheid. Dit is van toepassing op drainagematten aangezien deze een zekere holle ruimte in zich hebben. Geotextielen an sich hebben geen holle ruimte en worden niet beïnvloed door dit onderdeel. Deze factor is dus op 1,0 gesteld.

De factor RF_{IN} omvat de invloed van gronddeeltjes die een geotextiel binnendringen. CUR243 adviseert hiervoor de doorlatendheid te reduceren met een veiligheidsfactor 1,2.

De factor RF_{CH} betreft de chemische reacties van een geotextiel met de omgeving. Binnen de ontwerplevensduur van een geotextiel ligt deze factor op 1,0.

De factor RF_{PC} betreft de invloed van deeltjes die leiden tot verstopping. CUR243 sluit hier aan bij het gedachtegoed van CUR151 en CUR174 en stelt dat indien het filter ontworpen is conform de vigerende ontwerperegels (grond dicht), deze factor op 1,0 gesteld mag worden.



De factor RF_{cc} en RF_{BC} omvat de invloed van invloed van chemische en biologische verstopping. Voor het toepassingsgebied “embankment” en “dams” adviseert CUR243, indien niets bekend is van de chemische kwaliteit om de doorlatendheid te reduceren met een veiligheidsfactor 1,2 en 1,5.

Samenvattend geeft CUR243 aan dat verstopping kan optreden van geotextielen. Echter binnen de levensduur van een geotextiel is de invloed daarvan beperkt tot het toepassen van veiligheidsfactoren. Bij een goed ontwerp kunnen alle veiligheidsfactoren op 1,0 gesteld worden. Uitzondering zijn drie veiligheidsfactoren. Gezamenlijk leiden deze tot een reductie van de doorlatendheid met een factor 2,16, dus een halvering van de doorlatendheid. Dit is nagenoeg eenzelfde conclusie als dat CUR174 geeft.

Dit geeft de volgende deelconclusie:

- CUR234 beschrijft geringe risico's op verstoppingen. De ontwerpwijze in deze OBOR omvat alle beschreven risico's. Er zijn geen restrisico's.

Grofzandbarriere en onderzoek Acacia Water

Het onderwerp verstopping is ook beschouwd in de rapportage voor de Grofzandbarriere (Deltares, 2021). Daarbij wordt teruggerepen op een onderzoek van Acacia Water voor de VZG (Acacia Water, 2020). CUR243 doet uitspraken over geotextielen en het risico op verstopping van de geotextielen als gevolg van chemische en biochemische processen wanneer er geen informatie voorhanden is. Deze onderzoeken hebben een nadere analyse gemaakt van dit onderwerp wanneer er wel informatie van de chemische eigenschappen voorhanden zijn. De bronnen stellen het volgende:

Voor chemische verstopping moeten opgeloste stoffen in het grondwater met de omgeving reageren of een neerslagreactie ontstaan omdat er oververzadiging in de oplossing optreedt – juist ter plaatse van de grofzandbarrière. Het gaat dan met name om de neerslag van kalk (calciet – $CaCO_3$) en ijzeroxiden (Fe_2O_3).

Oververzadiging ten opzichte van calciet kan optreden bij menging van verschillende typen water, bij verandering van temperatuur of bij een optredende gasdrukverandering, waardoor bijvoorbeeld CO_2 uit het water ontwijkt. In het rivierengebied genomen grondwatermonsters tonen aan dat het water licht onder- of oververzadigd is ten aanzien van calciet. Echter, bij de voorgestelde toepassing (...) waarbij de deklaag hersteld wordt, treedt er geen verandering op in CO_2 -spanning in de bodem en zijn er ook geen aanwijzingen dat concentraties van Ca^{2+} of CO_3^{2-} verhoogd worden door toename van verweringsnelheden of verhoogde afbraak van organisch materiaal – het toegepaste grove zand kan weliswaar gebiedsvreemd zijn, maar wijkt op deze punten niet wezenlijk af van het reeds aanwezige zand.

Voor de neerslag van ijzeroxiden spelen ook biologische factoren een rol, zodat er dan sprake is van biogeochemische verstopping. De neerslag van ijzer(hydr)oxiden vereist verhoogde concentraties van opgelost ijzer in het grondwater, aanvoer van nutriënten en eventueel redox overgangen. De belangrijkste aerobe ijzer-bacterie, Gallionella, die vrij algemeen voorkomt in de Nederlandse bodem, wordt actief bij ijzerconcentraties in grondwater van boven 5 mg/l. In het algemeen wordt het risico op ijzerneerslag als verwaarloosbaar beschouwd als de ijzerconcentratie in grondwater lager is dan 3 mg/l. Er is onderzoek gedaan naar de chemische samenstelling van het grondwater op 11 verschillende locaties in het rivierengebied, daarbij varieerde de ijzerconcentratie van 0 tot maximaal 0,34 mg/l. Elders kan dit uiteraard hoger liggen, maar dan zal de bodem reeds ijzerneerslag vertonen. Deze ijzerneerslag, al dan niet in de vorm van een laag ijzeroer, leidt tot een aanzienlijk verlaagde doorlatendheid. Deze lagere doorlatendheid kan op zichzelf een reden zijn om piping uit te kunnen sluiten. Zo niet, dan geldt nog steeds dat het achtergrondzand hierdoor sterker in doorlatendheid achteruit zal gaan dan het grovere barrièrezand en vormt dit géén belemmering voor een goed functioneren van de grofzandbarrière.

Dit geeft de volgende deelconclusie:

- Deze bron beschrijft geringe risico's op verstoppingen. De ontwerpwijze in deze OBOR omvat alle beschreven risico's. Er zijn geen restrisico's.



Syllabus – geotextiel, ontwerpmethodieken

Het onderwerp verstopping is ook beschouwd in de Syllabus – geotextiel, ontwerpmethodieken (Nederlandse geotextielorganisatie, 1985). Dit is een syllabus die 7 onderwerpen behandelt, onder andere “Ontwerpmethode waterdoor latende bodemverdedigingsconstructies”. Daarbij betreft het ontwerp in het water en niet zozeer een geotextiel in de grond zoals bij een VZG. Het volgende wordt gesteld:

Dichtslaan / dichtslibben

De waterdoorlatendheid van het kunststoffilter kan afnemen door dichtslaan of dichtslibben.

Dichtslaan ontstaat doordat de korrels uit de te beschermen laag de openingen in het geotextiel gaan afsluiten. Dit treedt alleen bij een statische belasting toestand en vooral wanneer de openingen in het geotextiel gelijkmatig zijn verdeeld (bijvoorbeeld gazen) en de korrelverdeling van de ondergrond uniform is.

Dichtslibben van het geotextiel ontstaan door vervuiling door neerslag van slib op het geotextiel, opeenhoping van slib onder het geotextiel en door aancoeken van chemische verbindingen. Uit praktijkonderzoek van de kunststoffen in Kust en Oeverwerken is gebleken dat vooral ijzerverbindingen dichtslibben kunnen veroorzaken. De andere vormen van dichtslibben en dichtslaan bleken geen noemenswaardige nadelige gevolgen te hebben. De indruk bestaat dat dichtslibben een eindig proces is met als ondergrens de waterdoorlatendheid van de ondergrond.

Bovenstaande informatie komt overeen met CUR151 en CUR174. Risico's rondom slib worden hier nagenoeg expliciet uitgesloten. Expliciete aandacht wordt gegeven aan ijzerverbindingen. Dit sluit aan bij het onderzoek van Acacia Water. Er wordt gesteld dat de doorlatendheid kan afnemen, maar nooit tot een lagere waarde dan de omliggende grond door deze ijzerverbindingen. In het geval van de toepassing van een VZG betekent dit dat de doorlatendheid nooit lager wordt dan van de omgeving. Daardoor is een opstuwend effect van ijzernerslag per definitie uit te sluiten.

Dit geeft de volgende deelconclusie:

- Deze bron beschrijft geringe risico's op verstoppingen. De ontwerpwijze in deze OBOR omvat alle beschreven risico's. Er zijn geen restrisico's.

Samenvatting

In deze literatuurstudie zijn vijf bronnen beschouwd. Deze betreffen ontwerprichtlijnen tussen 1985 en 2021. Alle bronnen geven aan dat geotextielen een gering risico hebben op verstoppingen. Hiervoor moeten de volgende zaken in ogenschouw genomen worden:

- Fysische oorzaken (blocking).
Deze vorm van verstopping treedt op wanneer alle openingen van een geotextiel worden afgedekt met een zandkorrel. Deze theoretische vorm komt in de praktijk volgens CUR151 zelden voor. Dit is uit te sluiten middels laboratoriumproeven zoals uitgevoerd in (Bezuijen, Beek, & Schenkeveld, 2012). Het gebruik van geschikt aanvulzand rondom het geotextiel voorkomt dit op voorhand. Deze inzichten zijn verwerkt in de hoofdtekst van deze OBOR.
- Chemische oorzaken (clogging).
Deze vorm van verstopping wordt veroorzaakt door chemische en biochemische processen. Daardoor neemt de doorlatendheid af met maximaal een factor 2 volgens CUR174 en CUR234. De doorlatendheid wordt nooit lager dan van het achtergrondmateriaal volgens CUR174 en (Nederlandse geotextielorganisatie, 1985). Deze inzichten zijn verwerkt in de hoofdtekst van deze OBOR.
- Veroudering geotextiel
Geotextielen kunnen door veroudering hun vorm en daarmee de openingen verliezen. Volgens CUR234 verliezen geotextielen aan het einde van hun levensduur daardoor mogelijk de doorlatende eigenschap, of worden ze juist oneindig doorlatend. Deze inzichten zijn verwerkt in de hoofdtekst van deze OBOR.



BIJLAGE 4: WITTE VLEKKEN EN HANDELINGSPERSPECTIEF

Nr.	Witte vlek generiek	Toelichting	Hoe mee omgaan in deze publicatie	Verder handelingsperspectief
1	Achterloopsheid	<p>Proeven tonen aan dat een erosiekanaal die een VZG bereikt groeit in de lengterichting van het VZG. Op laboratoriumschaal omvat het erosiekanaal de gehele breedte van de proefopstelling. Binnen achterloopsheid is geen duidelijke plek voor dit fenomeen.</p> <p>Dit gedrag van een erosiekanaal is ook waargenomen bij proeven met een heave scherm, grof zand barrière, en in beperkte mate bij heterogene grond. Het is daarmee niet nieuw. Tevens laat de full scale proef zien dat deze groei eindig is.</p>	<p>De vigerende ontwerpmethodiek van achterloopsheid is gebaseerd voor terugschrijdende erosie dwars op de dijk. De juistheid hiervan voor achterloopsheid is niet bewezen.</p> <p>De verwachting is dat achterloopsheid bij doorlatende technieken, zoals een VZG minder sterk speelt dan bij ondoorlatende technieken.</p> <p>Er is veiligheidshalve aangesloten bij de vigerende ontwerpmethodiek van ondoorlatende technieken.</p>	<p>Het is wenselijk dat de juistheid van de vigerende ontwerpmethodiek voor achterloopsheid wordt aangetoond.</p> <p>Idealiter op zo'n wijze dat deze uitgebreid kan worden voor doorlatende technieken.</p>
2	Onderloopsheid	<p>Proeven tonen aan dat een VZG een grote toename aan sterkte geeft tegen piping. Deze toename is zo groot dat de grootste proeven niet zijn bezweken. De grootte van de sterkte toename is daarmee onbekend.</p> <p>Na rekenen van de sterkte toename geeft dat falen op heave verwacht wordt. Maar dit is pas opgetreden bij een verval aanzienlijk groter dan het faalcriterium van heave.</p>	<p>De ontwerp-methodiek voor onderloopsheid gaat uit van drie onderdelen: minimale lengte, heave toets en rekenregel van Sellmeijer met een extra sterktefactor.</p> <p>De combinatie van drie toetscriteria borgt dat toekomstige ontwerpen voldoende vergelijkbaar zijn met de uitgevoerde onderzoeken.</p>	<p>Het is wenselijk dat de sterkte van een VZG nader in beeld wordt gebracht. Daarbij dient deze op grote schaal belast te worden tot het optreden van falen. Het is aannemelijk dat dit extreme vervallen van 10 m of meer vereist. Daardoor is uitvoerbaarheid van dergelijke proeven een onderwerp op zich.</p> <p>Ook bestaat het risico dat er nieuwe faalmechanismen ontstaan. Aandacht vanuit de klankbordgroep is gevraagd niet alleen voor terugschrijdende erosie van zand, maar ook van de bovenliggende klei. Hiervoor bestaan nog geen modellen.</p>
3				

BIJLAGE 5: NADERE ANALYSES STERKTE VZG



Memo

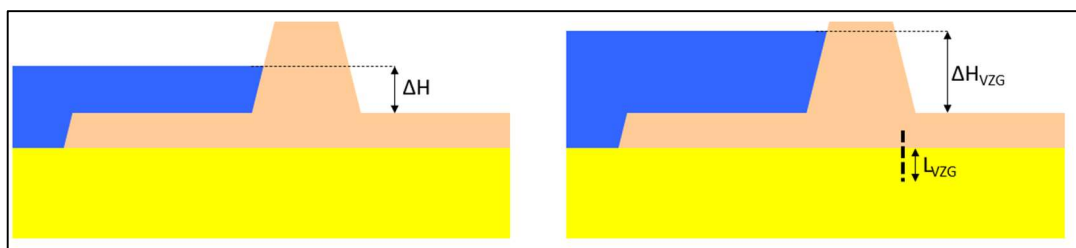
memonummer 2023-OBOR-VZG-03
datum 31 maart 2023
aan
van B. van Meekeren en
G.P. van Rinsum
kopie
project OBOR-VZG
projectnr.
betreft Nadere analyses sterkte VZG

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Dijkversterkingen kunnen uitgevoerd worden met meerdere technieken die weerstandsverhogend zijn tegen verschillende faalmechanismes. Een techniek is het Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG) deze biedt sterkte tegen piping (meer specifiek: terugschrijdende erosie). In 2017 is een groene versie van het Ontwerp en Beoordeling Richtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel (OBR-VZG) opgesteld [1]. Deze memo is onderdeel van de actualisatie van die richtlijn.

In de actualisatie staat de (maximaal) te keren waterstand van een met VZG versterkte dijk centraal en welke lengte van het VZG in het zand nodig is, zie Figuur 1-1. De weerstand van een met VZG versterkte dijk is beproefd in 2013 (small- medium en full-scale proeven). Dit is gerapporteerd in [2]. In het kader van deze actualisatie is een nadere analyse gemaakt van deze proeven. Daarbij is bepaald hoeveel de sterkte is en hoe dit het beste meegenomen kan worden in ontwerprichtlijnen.



Figuur 1-1. Bepaling (extra) sterkte dijk met VZG.

1.2 Doel

Het doel van deze memo is bepalen:

1. Wat de sterkte t.a.v. piping is bij toepassen van het VZG;
2. Hoe dit vertaald kan worden naar een ontwerpcriterium.

Op basis hiervan wordt een ontwerpverificatie afgeleid die kan worden gehanteerd in dijkversterkingsprojecten en wordt vastgelegd in de OBOR-VZG.

1.3 Werkwijze

De sterkte van een met VZG versterkte dijk is bepaald aan de hand van:

1. Een analyse van het faalproces op basis van de proeven en een vergelijking tussen proeven met en zonder VZG.
2. Een grondwatermodellering waarbij op basis van het heave-criterium falen is voorspeld, deze voorspelling is vergeleken met het geobserveerde faalcriterium.

Daarnaast zijn er aanvullende waarborgen nodig om het VZG te laten functioneren zoals in de berekeningen is aangenomen, zoals voldoende inklemming en bescherming tegen tweede-orde-effecten zoals erosie (ontgroning) van zowel de zandlaag als de kleilaag direct benedenstrooms van het VZG. Dit is onderdeel van de OBOR.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is het faalproces geanalyseerd en bepaald hoeveel sterkte een VZG toevoegt. In hoofdstuk 3 zijn de VZG-proeven nagerekend met een grondwatermodel. In hoofdstuk 4 zijn de ontwerpcriteria toegepast. In hoofdstuk 5 volgen de conclusies en aanbevelingen.

2 Faalproces

2.1 Beschrijving faalproces

Een met VZG versterkte dijk kan op verschillende manieren falen, er worden vijf hoofdoorzaken onderscheiden, zie Tabel 2.1. **In deze memo wordt het faalpad onderloopsheid beschouwd.** Dit is het falen wat wordt waargenomen in de small- en mediumschaalproeven [2].

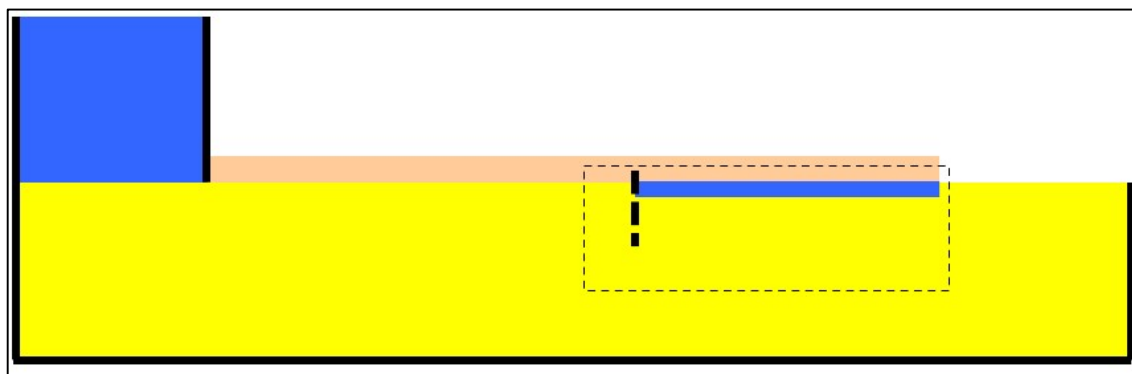
Tabel 2.1. Faalpaden VZG

Faalpad	Beschrijving faalpad	Oplossingsrichting
Voorloopsheid	Uittredepunt tussen dijk en VZG, VZG functioneert niet.	Voldoende gronddekking tussen VZG en dijk.
Doorloopsheid	Geotextiel is onvoldoende zanddicht, erosiekanaal ontstaat door geotextiel heen.	Specificaties geotextiel aanpassen.
Achterloopsheid	Terugschrijdende erosie ontstaat om VZG heen.	VZG voldoende ver doorzetten in langsrichting waterkering.
Bovenloopsheid	Erosiekanaal ontstaat aan bovenzijde VZG.	Voldoende inklemming VZG in kleilaag .
Onderloopsheid	Ten gevolge van hoge verticale stijghoogtegradiënt achter VZG faalt de inklemming van het VZG.	VZG voldoende diep inbrengen in zand.

2.2 Faalproces op basis van proeven

2.2.1 Opbouw proefopstelling

De opbouw van de small- en mediumschaalproeven [2] is schematisch weergegeven in Figuur 2-1. Aan de linkerzijde is de waterdruk opgevoerd en water stroomt van links naar rechts door een homogeen zandpakket met aan de rechterzijde een vrije uitstroomopening. Op ongeveer 2/3 van de kwelweglengte bevindt zich het VZG.

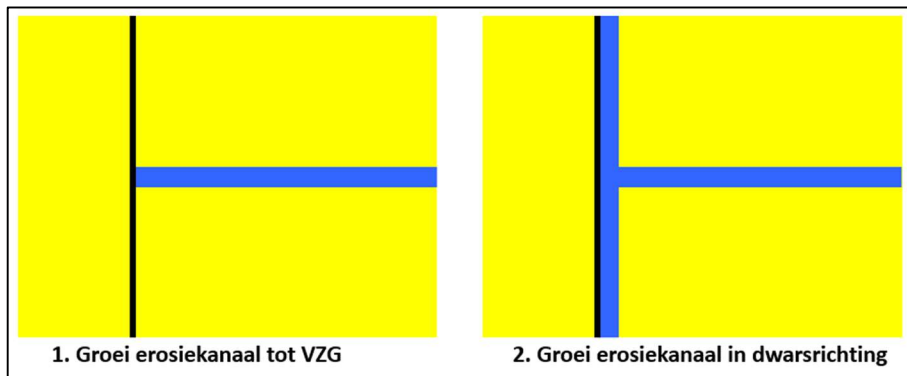


Figuur 2-1. Opbouw VZG small- en medium-scale proef.

2.2.2 Beschrijving faalproces

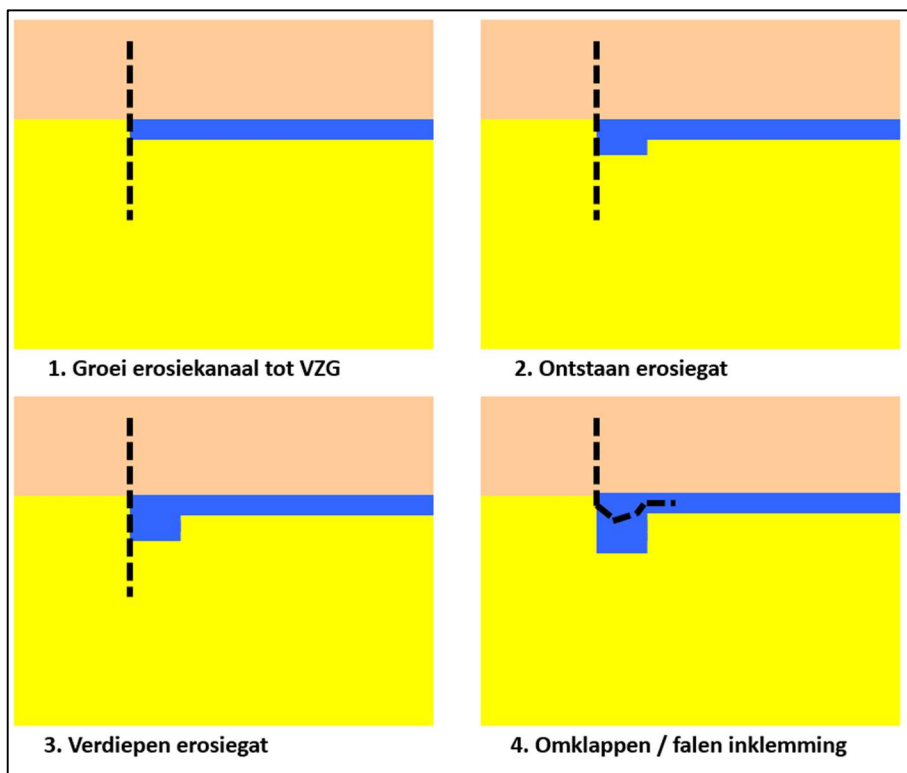
In de proeven is op hoofdlijnen het volgende faalproces te zien (op basis van procesbeschrijving in [2]):

1. Een erosiekanaal start vanaf de uitstroomzijde en groeit in bovenstroomse richting (terugschrijdende erosie). Dit gedrag is identiek aan een situatie zonder VZG.
2. Bij oplopend verval groeit het erosiekanaal verder tot het bij het VZG aankomt.
3. Nadat het erosiekanaal het VZG bereikt groeit het erosiekanaal in dwarsrichting, zie Figuur 2-2.



Figuur 2-2: Bovenaanzicht faalproces.

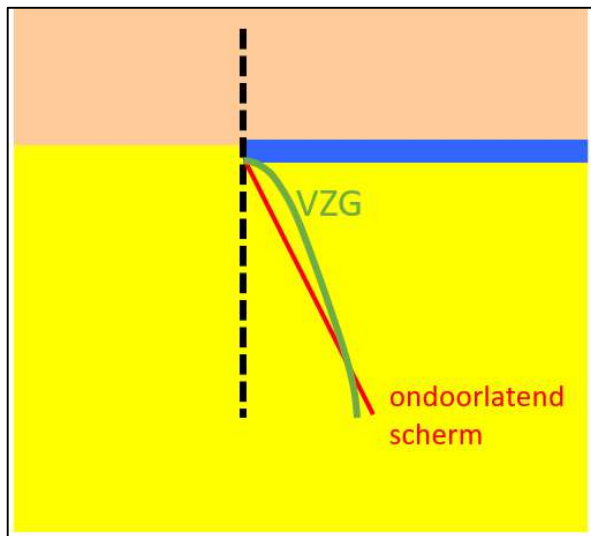
4. Naast groei in horizontale dwarsrichting is er verticale stroming en erosie zichtbaar achter het VZG. Dit is zichtbaar door het ontstaan van zandwolken en een gat achter het geotextiel, zie Figuur 2-3.
5. Bij gelijkblijvend verval stabiliseert het erosiegat.
6. Bij toename van het verval verdiept het gat achter het geotextiel en klapt het geotextiel om.



Figuur 2-3: Zijaanzicht faalproces.

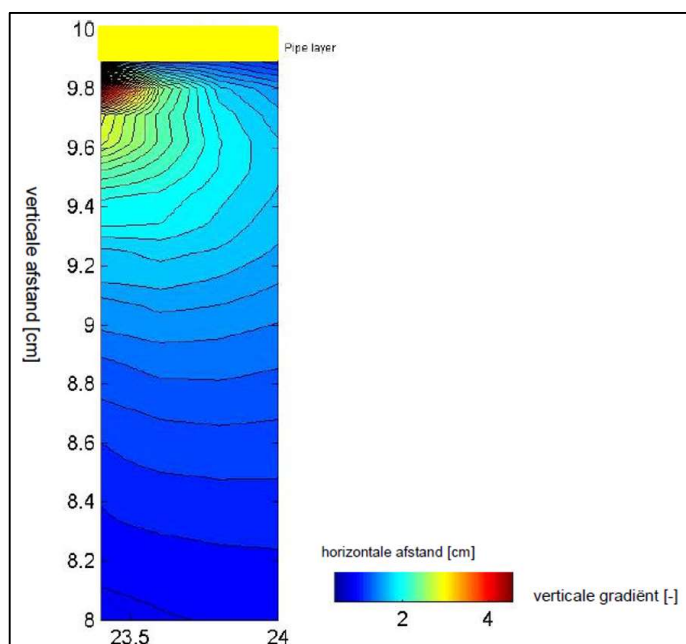
2.2.3 Waterspanningen

Voor het ontstaan van een erosiegat achter het geotextiel en/of het verweken van grond (opwolken) is een zekere verticale gradiënt nodig. In het faalproces, zoals beschreven in de vorige paragraaf, ontstaat er een erosiekanaal tot het VZG. In het erosiekanaal is de stijghoogte gelijk aan de stijghoogte aan de benedenstroomse zijde (uitstroomopening) plus weerstand (weerstand erosiekanaal en uitstroomverliezen). Er ligt dus een soort drain onder de deklaag tot bij het VZG. Omdat water door het VZG kan stromen is de gradiënt aan de bovenzijde van het VZG steiler dan aan de onderzijde. Dit is een verschil met een ondoorlatend scherm (zoals een damwand) waar het stijghoogteverloop bij benadering constant zal zijn (zie Figuur 2-4).



Figuur 2-4. Schematische weergave stijghoogteverloop.

Dit verloop is ook zichtbaar in de MSeep berekeningen [2] waarin de VZG-proeven zijn nagerekend, zie Figuur 2-5.



Figuur 2-5. Stijghoogtegradiënten in VZG-proeven.

2.3 Toegevoegde sterkte

Uit diverse pipingproeven met een VZG als versterkingsmaatregel blijkt dat het VZG extra sterkte toevoegt. In dit hoofdstuk is een vergelijking gepresenteerd tussen de proefresultaten (weerstand tegen piping) met en zonder VZG. Het doel is het bepalen van een globaal criterium die een **indicatie**¹ geeft van de extra weerstand van een met VZG versterkte dijk.

2.4 Definitie toegevoegde sterkte

De toegevoegde sterkte in dit hoofdstuk is gedefinieerd als volgt:

$$\text{Sterktefactor} = \frac{H_{c,\text{met VZG}}}{H_{c,\text{zonder VZG}}}$$

Waarin:

$H_{c,\text{met VZG}}$	Kritiek verval pipingproef met VZG	[m]
$H_{c,\text{zonder VZG}}$	Kritiek verval pipingproef zonder VZG	[m]

2.5 Selectie pipingproeven

2.5.1 Pipingproeven zonder VZG

De (small- en medium-scale) pipingproeven zonder VZG zijn uitgevoerd met verschillende onderscheidende parameters. Een volledig overzicht van proeven zonder VZG is gegeven in bijlage 1. De selectie van de proeven voor de vergelijking is gebaseerd op:

- **Proeven met een relatieve dichtheid boven de 50%.**
Er zijn proeven uitgevoerd met een relatieve dichtheid lager dan 50%. Deze zijn niet meegenomen. In Figuur 7-1 en Figuur 7-2 is te zien dat de sterkte van de pipingproeven met een relatieve dichtheid minder dan 50% sterk afwijkt van de overige proeven. Dit is ook beschreven in o.a. [3]. Pipingproeven met een lage relatieve dichtheid (in deze bron beschreven beneden de 35%) vertonen een ander faalpatroon: er is geen sprake van terugschrijdende erosie, het faalproces start aan de bovenstroomse zijde. Dit is in overeenstemming met de rekenregel van Sellmeijer die gevalideerd is voor relatieve dichtheden boven de 50% conform Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen [4].
- **Proeven zijn meegenomen zonder verdere correctie voor verschillen in relatieve dichtheid.**
Vanuit de theorie wordt verwacht dat een hogere relatieve dichtheid een hoger kritiek verval oplevert. Hogere dichtheid correleert met een lagere doorlatendheid en een hogere rolweerstandshoek van de zandkorrels [5]. De small scale VZG proeven zijn uitgevoerd bij een hoge relatieve dichtheid (circa 90%), het gros van de proeven zonder VZG zijn uitgevoerd bij een relatieve dichtheid van circa 70 à 75%. De proeven zijn niet gecorrigeerd voor de relatieve dichtheid omdat er geen duidelijk verband tussen relatieve dichtheid en kritiek verval in de small scale proeven zichtbaar is. Ook zijn er vier proeven zonder VZG met een vergelijkbare relatieve dichtheid uitgevoerd (dus direct vergelijkbaar met VZG-proeven), deze proeven laten een lager kritiek verval zien dan het gemiddelde van de overige proeven. Het niet meenemen van een correctie is daarmee gerechtvaardigd.
- **Alle proeven met variatie in d70 zijn meegenomen en zijn niet gecorrigeerd.**
De proeven met VZG zijn uitgevoerd bij een d70 van 270 µm, de proeven zonder VZG zijn uitgevoerd in een range van d70 tussen circa 150 en 430 µm. Vanuit de theorie wordt een hogere sterkte verwacht bij hogere d70's, de korrels worden minder makkelijk getransporteerd.

¹ Let op: deze sterktefactor is (1) gebaseerd op een beperkt aantal cases, (2) is geen fysische beschrijving en (3) is daarom geen "generiek toepasbare waarheid".

Echter, de d_{70} is direct gerelateerd aan de doorlatendheid (zeker voor proeven die zijn uitgevoerd voor een homogeen zandpakket) en daarom levert een hogere d_{70} ook een hogere belasting (grondwaterstroming op). In Figuur 7-3 en Figuur 7-4 (in de bijlage) is te zien dat er geen relatie lijkt te zijn tussen de d_{70} en het kritiek verval. Alle proeven ongeacht de d_{70} zijn daarom meegenomen in de vergelijking.

2.5.2 Pipingproeven met VZG

Alle pipingproeven met VZG zijn meegenomen in de vergelijking, deze bestaan uit [6], zie Figuur 2-6:

- 3 small scale proeven;
Y-135 en Y-136 met een VZG van 2 cm: deze zijn tot falen belast.
Y-134 met een VZG van 5 cm: deze is tot falen belast.
- 2 medium scale;
Bzand2_17_MS_Geotextiel met een VZG van 2 cm: deze is tot falen belast.
Bzand2_16_MS_Geotextiel met een VZG van 8 cm: deze is niet tot falen belast.
- 1 full scale.
Eén met een VZG van 50 cm: deze is niet tot falen belast.



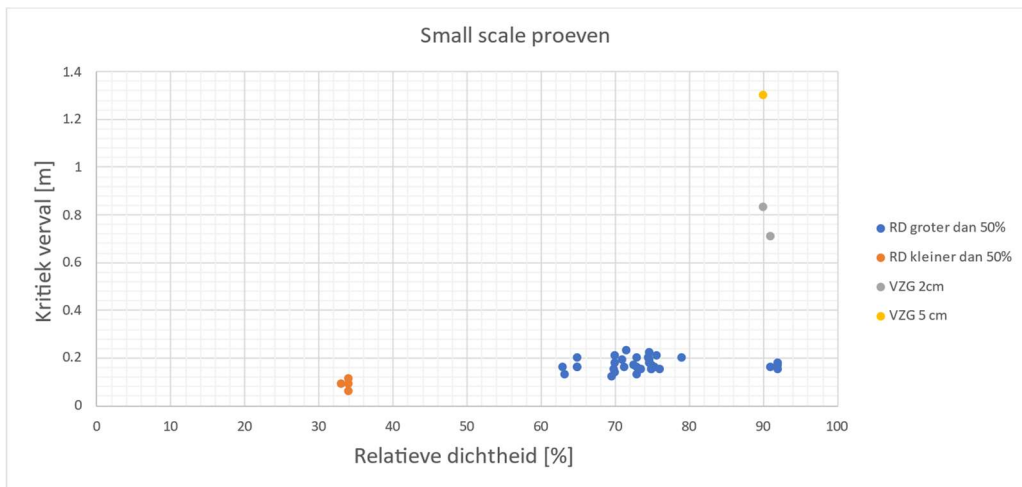
Figuur 2-6. Pipingproeven, van links naar rechts: small scale, medium scale en de IJkdijk.

2.5.3 Samenvatting proeven

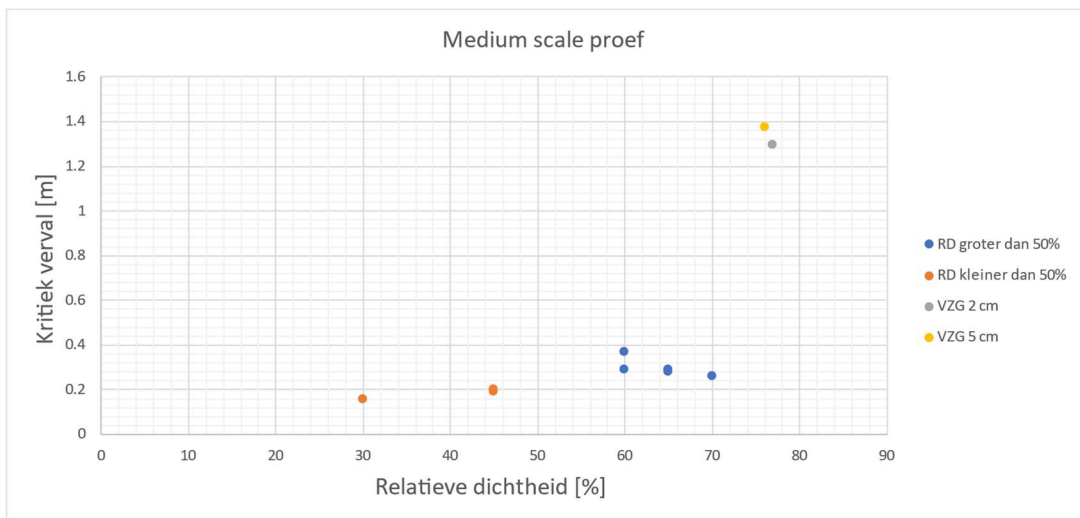
De pipingproeven (small- en medium scale) zijn weergegeven in Figuur 2-7 en Figuur 2-8:

- De oranje proeven zijn niet meegenomen in de vergelijking, deze proeven hebben een ander faalproces;
- De blauwe proeven zijn meegenomen als referentie (zonder VZG);
- De grijze en gele proeven zijn meegenomen als versterkingsproef (met VZG).

Tevens zijn er full-scale proeven uitgevoerd zonder het VZG. Deze zijn benoemd in de bijlage. Er is een full-scale proef uitgevoerd met VZG, deze is bij maximale belasting niet bezweken. Deze is benoemd in de bijlage.



Figuur 2-7. Overzicht small scale proeven met en zonder VZG als functie van de relatieve dichtheid.



Figuur 2-8. Overzicht medium scale proeven met en zonder VZG als functie van de relatieve dichtheid.

2.6 Toegevoegde sterkte op basis van proeven

Op basis van de pipingproeven is de toegevoegde sterkte afgeleid conform de definitie uit paragraaf 2.4. Voor de vergelijking zijn de volgende factoren afgeleid:

- **Minimale sterktefactor**
Deze sterktefactor is als ondergrens bepaald op basis van de zwakste proef met VZG en de sterkste proef zonder VZG.
- **Maximale sterktefactor**
Deze sterktefactor geldt als bovengrens. Deze factor is bepaald op basis van de sterkste proef met VZG en de zwakste proef zonder VZG.

De resulterende sterktefactoren zijn weergegeven in

Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Resulterende sterktefactoren

	Small scale		Medium scale		Full scale
	VZG 2cm	VZG 5cm	VZG 2cm	VZG 8cm*	VZG 50 cm*
Minimale sterktefactor	3,1	5,7	3,5	>3,7	>1,2** / 1,5***
Maximale sterktefactor	6,9	10,8	6,5	>6,9	>1,6** / 1,9***
* Niet tot falen belast					
** Inclusief 20% reductie kritiek verval full scale VZG-proef (zie bijlage 1)					
*** Exclusief 20% reductie kritiek verval full scale VZG-proef (zie bijlage 1)					

Het globale criterium (de sterktefactor) is afgeleid op basis van diverse pipingproeven en is geen fysische beschrijving van het faalproces. Er spelen een aantal onzekerheden die zowel positief als negatief kunnen uitpakken.

- Zo zijn de proeven uitgevoerd voor zeer beperkte lengtes geotextiel (2, 5 en 8 cm) in de proeven is al te zien dat de langere geotextielen (5 en 8 cm) grotere vervallen keren dan de korte geotextielen (2 cm). In de veldcondities is het toe te passen geotextiel echter nog veel langer (minimaal 1,0 tot 2,0 m). Verwacht wordt dat dit een significant positief effect heeft op het te keren verval.
- Aan de andere kant is het afgeleide criterium een globaal criterium en dus gevoelig voor schaafeffecten, ook is een beperkte range aan variaties (deklaag, locatie VZG en grondopbouw) beproefd, de sterkte onder veldcondities kan lager zijn.

2.7 Conclusie

Op basis van de uitgevoerde analyse en beschouwing wordt geconcludeerd dat:

- Falen ten gevolge van onderloopsheid van het VZG overeenkomsten vertoont met falen als gevolg van **heave**.
- Het faalmechanisme **niet zelfversterkend** lijkt. De stijghoogtegradiënten ter plaatse van het erosiekanaal zijn steiler maar na het ontstaan of verdiepen van het erosiegat stabiliseert de situatie bij gelijkblijvend verval.
- Alle de proeven met een VZG als versterkingsmaatregel laten een duidelijke **hogere weerstand** tegen piping zien dan de referentieproef zonder VZG. Op basis van de proeven is een indicatieve toename in sterkte gevonden tussen 3,1 (ondergrens) en 10,8 (bovengrens).
- De **lengte van het VZG** in het zand is **bepalend** in de weerstand tegen piping. Hoe langer het VZG hoe meer weerstand. In de schaalproeven zijn enkel de VZG's met een lengte van 2 of 5 cm tot falen belast. De proeven met 8 cm VZG zijn niet bezweken.

Aandacht gaat uit naar het toepassingsgebied. De laboratoriumproeven kennen een grote nauwkeurigheid rondom de bodemopbouw en de locatie van het VZG. Bij toepassing bij een dijkversterking kennen deze een grote variatie en onbekendheid. In samenspraak met de expertgroep is bepaald dat daarom bij een dijkversterking de minimale lengte van een VZG 0,5 m in de zandlaag dient te zijn, dit is vergelijkbaar met de IJkdijk.

3 Verificatie heave-criterium

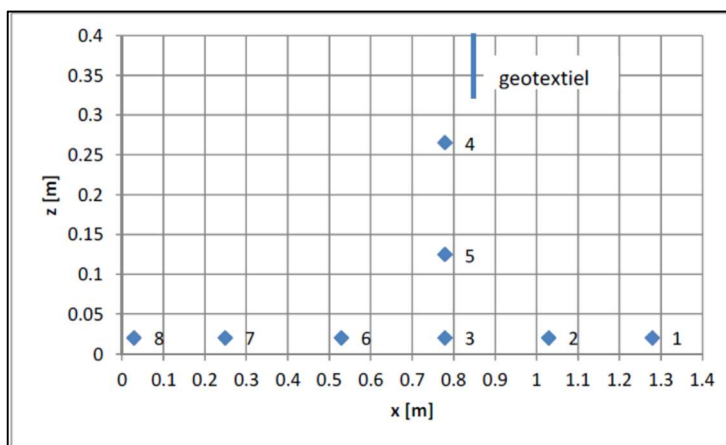
3.1 Doel analyse

Uit diverse pipingproeven met een VZG als versterkingsmaatregel blijkt dat het VZG extra sterkte toevoegt. Op basis van [2] komt (een deel van) het faalproces overeen met heave. In dit hoofdstuk is een vergelijking gemaakt tussen de gemeten grondwaterstroming en gemodelleerde grondwaterstroming in de proef. Het doel is bepalen of een heave-analyse op basis van een grondwatermodel een goede voorspeller is voor falen van een VZG.

3.2 Uitgevoerde proeven

Er zijn vijf laboratoriumproeven uitgevoerd waarbij het VZG is belast. Deze zijn gerapporteerd in [2], zijn beschreven in paragraaf 2.5.2 en in bijlage 1.

Bij de proeven is het verloop van de stijghoogte gemeten. In de medium scale proef is het aantal meetpunten het grootst. In proef Bzand2_16_MS_Geotextiel is bezwijken niet opgetreden, daar is tot het grootste verval het verloop van de grondwaterstand gemeten. De monitoringsopzet is weergegeven in Figuur 3-1.



Figuur 3-1: Dwarsdoorsnede van de medium schaal proef. Aan de linkerzijde ($x = 0$) zit de hoogwaterzijde, aan de rechter zijde ($X = 1,4$ m) zit het uittredepunt. Aan de onderkant ($Z = 0$) zit de onderzijde van de proef. Aan de bovenkant ($z = 0,4$ m) zit de bovenzijde van de proef met een perspexplaat. De genummerde vlakken zijn de waterspanningsmeetpunten.

3.3 Faal criterium

In de proeven met het VZG is de waterdruk aan de hoogwaterzijde opgevoerd. Dit is gedaan totdat het VZG is bezweken, dat punt is niet bij alle proeven behaald. In het faalproces groeit eerst een erosiekanaal tot aan het VZG. Dit erosiekanaal groeit daarna evenwijdig aan het VZG aan de laagwaterzijde van de proef. Bij verder verhogen van de waterdruk aan de hoogwaterzijde begint het zand rondom het erosiekanaal te koken, dit stabiliseert (bij gelijkblijvend verval) zich na enige tijd in de

proef. Bij nog verder opvoeren vouwt het VZG dubbel. Daarna is de proef vaak bezweken, in sommige gevallen is het extra verval wat gekeerd wordt na dubbelvouwen van het geotextiel relatief groot². Op basis van de visuele waarneming lijkt er sprake te zijn van verweking achter het geotextiel. Het geotextiel klapt op. Dit duidt er op dat er op den duur, als gevolg van verminderde effectieve spanningen, onvoldoende inklemming aanwezig is. Dit leidt tot twee faalcriteria³ die worden getoetst:

- Geheel falen op heave conform Terzaghi.
Hierbij wordt de gehele grondkolom achter het VZG getoetst op heave. Dit betreft het gemiddelde verhang over de verticaal. Deze wordt getoetst aan het heave-criterium zonder veiligheidsfactoren. Deze is weergegeven in Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen [3]. Voor een goed verdicht zandpakket met een verzadigd volumegewicht van 21 kN/m³ geldt dan als faalcriterium: $l_c = 1,1$ (verticaal stijghoogte verhang).
- Gedeeltelijk falen op heave conform Terzaghi.
Hierbij wordt de grondkolom langs de onderste helft van het geotextiel getoetst. Verdere toets randvoorwaarden zijn gelijk.

3.4 Rekenresultaten

3.4.1 Validatie grondwaterberekeningen

Er is een grondwatermodel opgezet. Hiermee is de grondwaterstroming rondom het VZG gemodelleerd. Deze is gevalideerd aan de hand van de stijghoogtemetingen tijdens de proef. De opzet van het grondwatermodel is weergegeven in Figuur 3-2.

De volgende uitgangspunten zijn aangehouden:

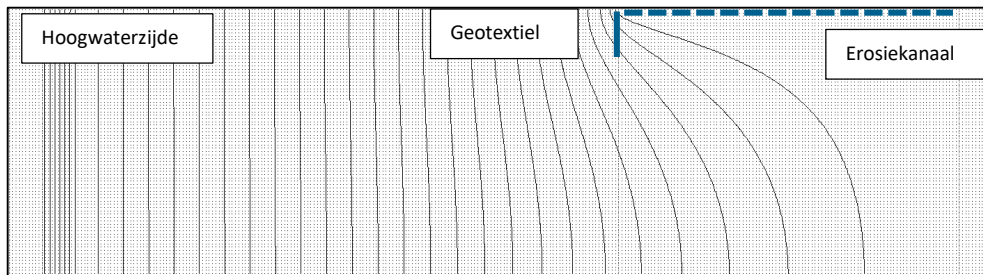
- Software: MicroFem v4.10.
- Modelresolutie: 0,01 m of fijner.
- Rekenwijze: stationair.
- Weerstand VZG: oneindig laag (doorlatendheid daarmee gelijk aan zand er omheen).
- Weerstand erosiekanaal: oneindig laag (gemodelleerd als fixed head).

De volgende technische uitgangspunten zijn aangehouden:

- Dikte zandlaag: 0,4 m.
- Doorlatendheid: homogeen, isotroop.
- Lengte proef: 1,50 m.
Daarvan zijn de eerste en laatste 0,05 m vaste stijghoogte randen voor het intrede en uittrede punt. De kwelweglengte daartussen is 1,40 m.
- Locatie VZG op $X = 0,93$ m (indien de rand van 0,05 m niet wordt meegeteld, dan is dit $X = 0,88$ m gelijk aan Figuur 3-1).
- Onderzijde en bovenzijde van het model zijn ondoorlatende randen. Met uitzondering van het erosiekanaal.

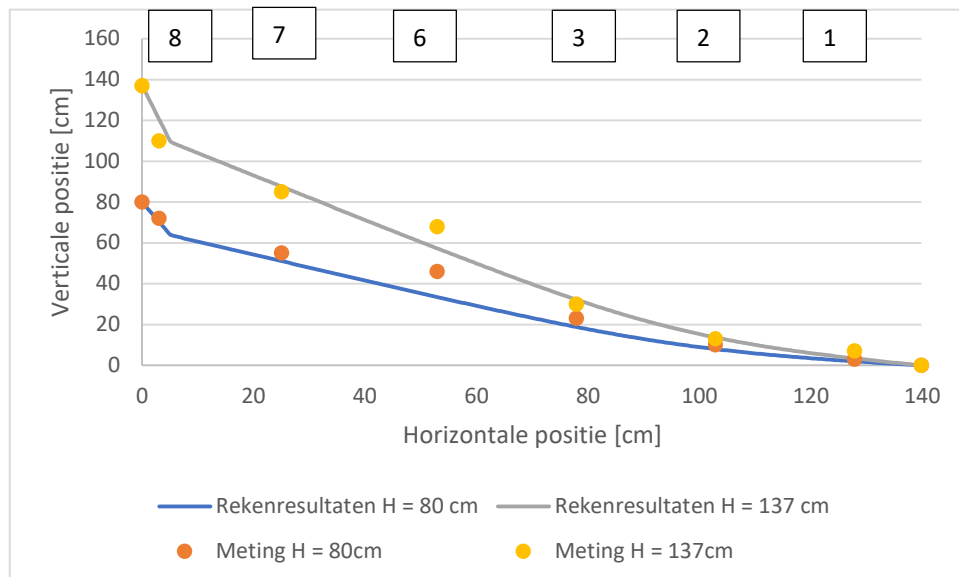
² Er zijn in het verleden laboratoriumproeven uitgevoerd met een waterdichte damwand. De afmetingen van deze waterdichte damwand zijn vergelijkbaar met die van het VZG (kleine schaal proef, verticale lengte 0,02 m). Deze proeven zijn gerapporteerd in onderzoek van Deltares uit 2009 [7]. Deze verticale constructie is niet dubbelgevouwen, maar het erosiekanaal is onderdoor gegroeid. Dit proces van onderdoor groeien van een erosiekanaal, zoals is opgetreden bij een waterdichte damwand, is niet waargenomen bij het VZG.

³ Naast bovenstaande zijn er ook andere mogelijke faalcriteria. Zo wordt in (Deltares, 2009) [4] gesproken over verticale piping. Daarbij is geconcludeerd dat dit fenomeen pas optreedt bij (zeer) extreme stroomsnelheden en daardoor niet maatgevend is.



Figuur 3-2: Dwarsdoorsnede van numeriek rekenmodel van de medium schaalproef, weergegeven is het Isohypsenpatroon.

Een vergelijking tussen de meetwaarden van de stijghoogte in de proef en de modelresultaten is weergegeven in Figuur 3-3. Dit is gedaan voor twee momenten. De proef heeft twee dagen geduurd. Het eerste moment is aan het einde van dag 1 (stijghoogte aan de hoogwaterzijde 80 cm). Het tweede moment is aan het einde van dag 2 (stijghoogte aan de hoogwaterzijde 137 cm).



Figuur 3-3: Berekende stijghoogte in medium schaalproef en meetgegevens met nummer van de meetpunten (conform Figuur 3-1).

Te zien dat de berekende stijghoogten goed overeenkomt met de meetgegevens. Wel zijn er enkele bijzonderheden:

- Het meetpunt nabij de hoogwaterzijde zit op 0,03 m afstand van de hoogwaterzijde. Echter is de gemeten stijghoogte hier noemenswaardig lager dan die hoofwaterzijde. Dit wijst op een introdeweerstand. Deze weerstand lijkt verschillend te zijn tussen dag 1 en dag 2. Na enige kalibratie is hier een weerstand aan toegekend.
- Op positie X = 53 zit een meetpunt (meetpunt 6). Deze is structureel hoger dan de rekenresultaten van het grondwatermodel. In de meetgegevens geeft dit meetpunt soms exact dezelfde stijghoogte als meetpunt 7 dat meer bovenstrooms is. Dit is fysisch niet verklaarbaar. Vermoedelijk omvat de meetwaarde een structurele afwijking. Derhalve is aan dit meetpunt verder weinig waarde toegekend. Een verklaring die gegeven is uit de expert groep is dat dit meetpunt mogelijk een onjuiste nulmeting heeft gehad.
- Op positie X = 78 zitten drie meetpunten boven elkaar (weergegeven in Figuur 3-1). In de grafiek is het meetpunt aan de onderzijde van de proef weergegeven. Te zien is dat deze goed past in het algehele beeld. Het grondwatermodel geeft voor deze meetpunten op dag 1 te lage

stijghoogten en op dag 2 juist te hoge stijghoogten. Een verklaring is dat de proef op dag 1 en dag 2 niet dezelfde eigenschappen heeft.

Er is verder gewerkt met het gekalibreerde model zoals weergegeven in Figuur 3-3.

3.4.2 Faalcriteria heave op basis van numeriek model

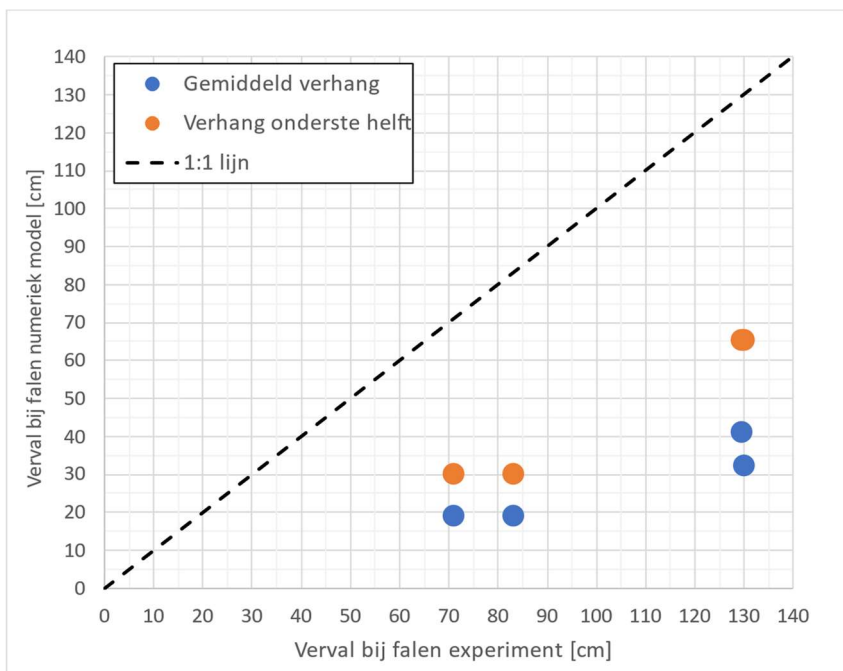
Met het gekalibreerde model zijn de proeven nagerekend. Daarbij is het verval over de proef in het model steeds verhoogd tot dat het faal criterium is overschreden. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 3-4. Bij een perfecte predictie komen de numerieke modelresultaten direct overeen met de meetresultaten en liggen alle punten op de 1:1 lijn.

Te zien is dat:

- in de proeven bezwijken is opgetreden bij een verval over de proef van 0,71 tot 1,30 m;
- met het faal criterium conform Terzaghi waarbij wordt getoetst aan het gemiddelde verhang over het VZG wordt falen voorspeld wanneer het verval 0,19 tot 0,41 m is;
- met het faal criterium conform Terzaghi waarbij wordt getoetst aan het verhang over de onderste helft van het VZG wordt falen voorspeld wanneer het verval over de proef 0,30 tot 0,65 m is.

Te zien is de proeven een substantieel hogere sterkte geven dan wat wordt voorspeld met het criterium van Terzaghi. Afhankelijk van de methode betreft dit een verschil van een factor 2 tot 3,6 tussen het berekende resultaat en het gehanteerde faal criterium⁴.

⁴ Bovenstaande verschillen zijn uitgedrukt als factor. Maar deze kunnen ook worden uitgedrukt als absolute waarde. Bij een VZG met een lengte van 0,02 à 0,05 m is de extra sterkte gelijk aan 0,5 à 1,7 kPa neerwaartse druk. Mogelijk is deze druk geleverd door een andere bron, zoals de plexiglas afdekplaat die boven op de proef ligt. Daarmee geven deze schaalproeven slechts beperkte mate aan zekerheid. Bij een toepassing bij een dijkversterking wordt het VZG ingeklemd. Dit bestaat waarschijnlijk uit 0,5 m gronddekking en 0,5 m inklemming in klei. Daardoor geven de proeven weinig zekerheid over het zuivere faalproces conform Terzaghi, wel geven deze een representatief beeld van het toepassingsgebied.



Figuur 3-4: Vergelijk tussen voorspeld falen en gemeten falen

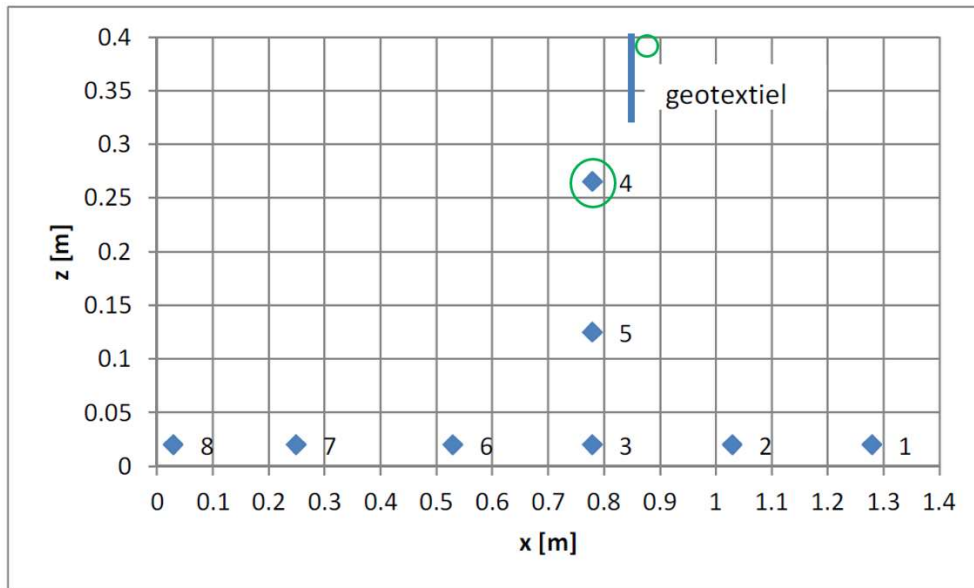
3.4.3 Meetresultaten

Naast de rekenresultaten is ook geanalyseerd welke gemeten gradiënten rondom het VZG optreden bij falen. Deze vergelijking is niet volledig correct te maken omdat er geen stijghoogtemetingen direct boven en onder het VZG zijn gemaakt.

Medium scale

Voor de mediumschaalproef (Bzand2_16MS_Geotextiel) is een vergelijking gemaakt tussen de stijghoogte t.p.v. de groene cirkels in Figuur 3-5):

- De stijghoogte aan de bovenzijde van het geotextiel is uitgegaan van 0 m (dit is een ondergrens, weerstand is aanwezig in het systeem en leidt tot een hogere stijghoogte);
- De stijghoogte in meetpunt 4, onder het VZG (13,5 cm t.o.v. bovenzijde VZG): deze stijghoogte is bij falen circa 23 cm



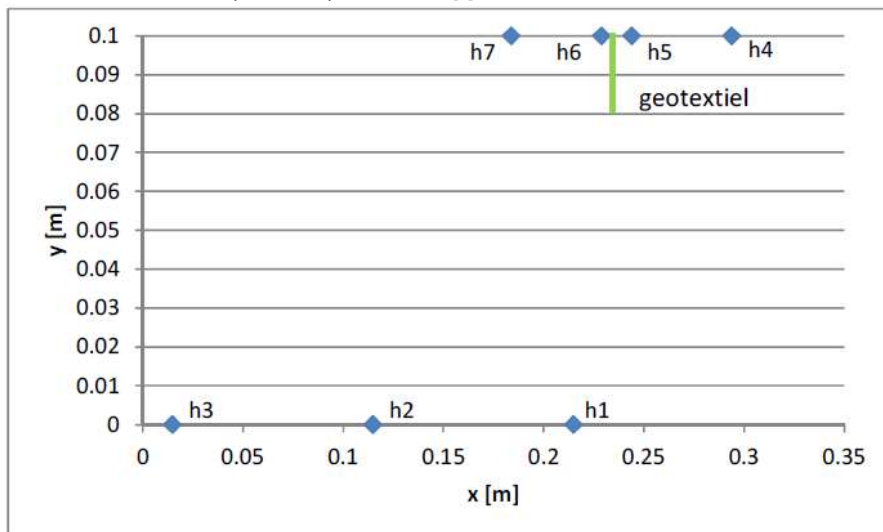
Figuur 3-5. Locaties stijghoogtemetingen mediumschaalproef [2].

Op basis van deze uitgangspunten is het verhang bij falen tussen meetpunt 4 en de bovenzijde van het geotextiel circa 1,7 [-]. Bij dit verhang is de proef niet gefaald.

Small scale

Ook voor de small scale proef is een vergelijking gemaakt (zie Figuur 3-6) tussen de stijghoogte aan de onderzijde van de bak⁵ (meetpunt 1) en de bovenzijde van de bak (meetpunt 5 of aanname van 0 cm⁶). Dit leidt tot het volgende verhang bij falen over de verticaal:

- Proef Y-134. $(17,1-0)/10 = 1,71$ [-]
- Proef Y-135. $(18,5-0)/10 = 1,85$ [-]
- Proef Y-136. $(17,8-2,3)/10 = 1,55$ [-]



Figuur 3-6. Locaties stijghoogtemetingen small scale proef [2].

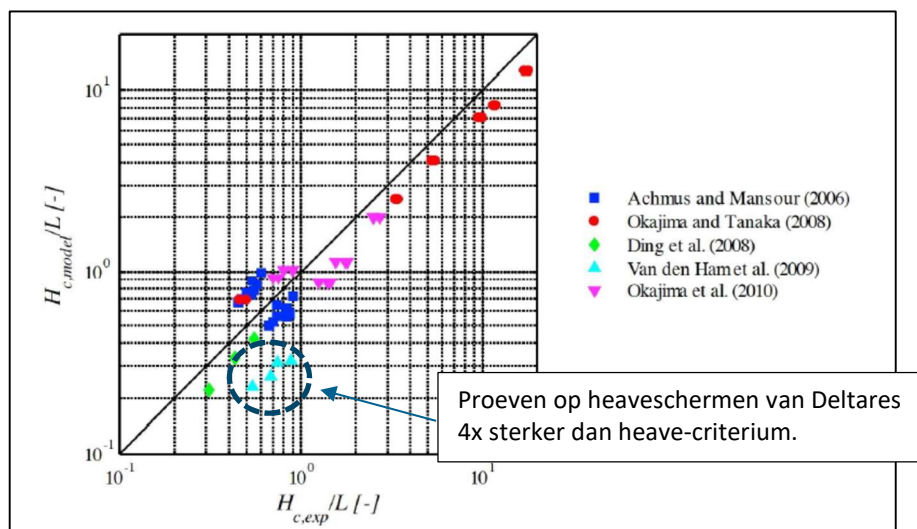
⁵ Er is geen meetpunt aan onderzijde VZG

⁶ Enkel voor proef Y-136 is meetdata beschikbaar voor meetpunt 5.

3.4.4 Vergelijking met ondoorlatend scherm

Om de resultaten voor het VZG te kunnen duiden is een vergelijking gemaakt met proeven die gedaan zijn voor een ondoorlatend scherm. Analyses rondom proeven met ondoorlatende heave schermen zijn o.a. gegeven in een antwoord van Deltares op een vraag van het DIV [5]. Daarin is aangegeven dat voor heaveschermen de resultaten ongeveer overeenkomen met het Terzaghi-criterium. De figuur hiervan is hier herhaald als Figuur 3-7. Merk op dat deze figuur geplot is op een log-log schaal. De proeven van Van den Ham (2009) gebruiken eenzelfde proefopstelling als de proef met het VZG. Deze geven (ook) een factor 4 hogere sterkte dan het heave-criterium van Terzaghi.

Voor ondoorlatende schermen is ontwerpen op het Terzaghi-criterium veilig.



Figuur 3-7: Voorspelde kritieke verhangen volgens een kritieke heave gradiënt van 1 uitgezet tegen de kritieke verhangen uit de proef. De zwarte lijn is de 1:1 lijn [5].

3.5 Conclusie

Er is een vergelijking gemaakt van laboratoriumproeven waarin een VZG aanwezig is. Een deel van het faalproces lijkt op basis van visuele waarnemingen sterkt op falen door heave (verweking) [2]. De proeven (smalle en medium scale) zijn in deze studie nagerekend met een grondwatermodel. Er is getoetst of het heave-criterium aansluit bij de meetresultaten.

Op basis van deze paragraaf wordt geconcludeerd dat:

- De proefresultaten geven aan dat het aanwezige verval bij bezwijken aanzienlijk groter is dan wordt voorspeld door het numerieke grondwatermodel met falen gedefinieerd als het overschrijden van het heave-criterium.
- De meetresultaten van de proeven (small en medium) geven aan dat bij falen het verticaal verhang ter plaatse van het VZG groter is dan 1 [-].
- De vergelijking met de analyse voor ondoorlatende schermen laat zien dat de spreiding van resultaten voor het VZG vergelijkbaar is met de resultaten voor ondoorlatende schermen.

Op basis van bovenstaande vergelijking is het aannemelijk dat ontwerpen op het heave-criterium leidt tot een veilig ontwerp.

4 Toepassing

4.1 Doel

In de voorgaande hoofdstukken is:

- Geconcludeerd dat falen van het VZG op onderloopsheid overeenkomsten met heave vertoont. Small- en medium-scale proeven zijn nagerekend en te zien is dat een heave-analyse voor de proeven een veilige benadering is (falen in proeven bij hoger verval dan in ontwerpverificatie)
- De extra sterkte die een VZG toevoegt een functie is van de lengte van het VZG en in de proeven een factor 3,1 tot 10,8 is. Dit is bepaald op basis van de small- en medium-scale proeven. De full scale proef is niet bezweken, daarmee geeft deze onvoldoende informatie om dit te bevestigen, maar deze proef ontkracht de laboratoriumproeven niet.

In dit hoofdstuk zijn meerdere cases doorgerekend. Doel daarbij is om te kijken tot welke ontwerpen de set ontwerpcriteria zou leiden.

4.2 Uitgangspunten

Er zijn meerdere cases doorgerekend. Een overzicht van de cases is weergegeven in Tabel 4.1. De eerste tien cases zijn fictieve cases. De laatste vier zijn gebaseerd op dijkversterking Zwolle-Olst.

Tabel 4.1: Overzicht van cases waarvoor een ontwerpverificatie is gedaan.

Berekening	Kwelweg- lengte [m]	D _{wvp} [m]	Locatie VZG	Opmerking
1	15	3	¼ van kwelweglengte	Gelijk aan IJkdijk
2	15	3	½ van kwelweglengte	
3	15	15	¼ van kwelweglengte	
4	15	15	½ van kwelweglengte	
5	15	15	¼ van kwelweglengte	Onderste 5 m grind
6	15	15	½ van kwelweglengte	Onderste 5 m grind
7	50	15	¼ van kwelweglengte	
8	50	15	½ van kwelweglengte	
9	50	15	¼ van kwelweglengte	Onderste 5 m grind
10	50	15	½ van kwelweglengte	Onderste 5 m grind
Km 28,75-1	34,5	32,25	¼ van kwelweglengte	
Km 28,75-2	34,5	32,25	½ van kwelweglengte	
Km 31,49-1	27	32,3	¼ van kwelweglengte	Bovenste 2,3 m fijn zand
Km 31,49-2	27	32,3	½ van kwelweglengte	

Uitgangspunten regenregel van Sellmeijer

De rekenregel van Sellmeijer wordt toegepast met de volgende uitgangspunten voor de eerste tien cases:

- Rekenregel conform WBI2017
- D70 = 200 µm.
- Doorlatendheid
Zand: 10 m/dag.
Grind: 100 m/dag.

In de rekenregel van Sellmeijer is, indien de bodemopbouw deels bestaat uit zand en deels bestaat uit grind gewerkt met een gewogen gemiddelde voorde doorlatendheid.

- Vereiste veiligheidsfactor: 1,41 (gelijk aan γ_{pip} voor dijktraject 53-2, excl. schematiseringsfactor).

De laatste vier cases gebruiken uitgangspunten gebaseerd op het ontwerp van dijkversterking Zwolle-Olst. Daarbij zijn de volgende uitgangspunten aangehouden:

- Km 28,75
D70 = 186 μm .
Doorlatendheid: 75 m/dag.
Vereiste veiligheidsfactor: 1,41
- Km 31,49
D70 = 186 μm .
Doorlatendheid fijn zand: 9 m/dag.
Doorlatendheid grof zand: 75 m/dag.
Vereiste veiligheidsfactor: 1,41

Uitgangspunten ontwerp heaveberekeningen

Het Terzaghi-criterium is toegepast met de volgende uitgangspunten:

- Toets aan heave over gehele verticale lengte van het VZG met gemiddeld verval.
- Toetscriterium $I_c = 0,5$ (inclusief de gebruikelijke veiligheidsfactor van 2).
- Erosiekanaal is oneindig doorlatend.
- Weerstand VZG: worst-case gebaseerd op 3 cm grond, i.v.m. geringe verstopping conform CUR174 verdubbeld naar 6 cm grond.
- Positieve invloed drainagezand rondom VZG is niet meegenomen.
- Erosiekanaal is gemodelleerd als oneindig doorlatend (lees: vaste stijghoogterand).
- Uittredepunt betreft een sloot met een bodembreedte van 1 m. Positieve invloed van drainerend achterland is niet meegenomen.
- Intredepunt betreft buitenwater dat weerstandsloos infiltreert aan de bovenzijde van het watervoerende pakket. Dit is gemodelleerd over een lengte van 15 m.
- Lengte VZG 0,5 á 2,0 m.

4.3 Resultaten

Resultaten regenregel van Sellmeijer zonder VZG

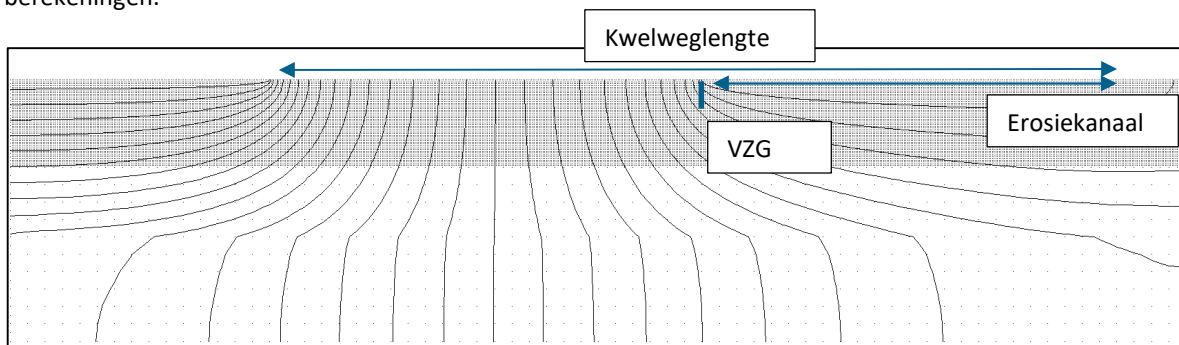
De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Tabel 4.2. Te zien is dat de voorspelde sterkte (inclusief veiligheidsfactoren) varieert van 0,70 m tot 3,01 m.

Tabel 4.2: Rekenresultaten cases op basis van Sellmeijer met extra sterktefactor.

Berekening	Kwelweglengte [m]	D _{wvp} [m]	H _c -Sellmeijer (excl. veiligheidsfactoren) [m]	H _c -Sellmeijer (incl. veiligheidsfactoren) [m]
1	15	3	2,08	1,48
2	15	3	2,08	1,48
3	15	15	1,56	1,10
4	15	15	1,56	1,10
5	15	15	0,98	0,69
6	15	15	0,98	0,69
7	50	15	4,24	3,01
8	50	15	4,24	3,01
9	50	15	2,67	1,90
10	50	15	2,67	1,90
Km 28,75-1	34,5	32,25	1,35	0,96
Km 28,75-2	34,5	32,25	1,35	0,96
Km 31,49-1	27	32,3	1,15	0,81
Km 31,49-2	27	32,3	1,15	0,81

Resultaten heave-berekeningen

Er zijn geohydrologische berekeningen uitgevoerd. Dit is gedaan voor de 10 casussen met twee lengtes van het VZG. Daarbij is het verval over de kering opgevoerd tot het heave-criterium rondom het VZG wordt overschreden. In Figuur 4-1 is een weergave gegeven van de output van de geohydrologische berekeningen.



Figuur 4-1: Resultaat heave-berekening van casus 10. Te zien zijn de isohypsen, ligging VZG en het erosiekanaal.

Sterkte met VZG versterkte dijk op basis van heave-verificatie

De resultaten van de heaveberekeningen zijn weergegeven in Tabel 4.3, deze resultaten zijn weergegeven als:

- H_c met VZG: dit is het verval waarbij het heave-criterium ter plaatse van het VZG (verhang van 0,5 [-] over de verticaal) wordt overschreden;

- Toename sterkte: deze factor geeft het verschil tussen het kritiek verval met en zonder VZG weer⁷.

De eerste casus komt overeen met de IJkdijk. De resultaten daarvan zijn gerapporteerd in Deltares (2013) [6]. Deze proef is belast gedurende 160 uur zonder te bezwijken. Hierin was een VZG met een verticale diepte van 0,5 m aangebracht. Daarbij heeft waterstandsverschil van ca. 3,4 m tegen de kering aan gestaan⁸. In Tabel 4.3 is te zien dat met veilige uitgangspunten eenzelfde verval wordt voorspeld (terwijl de IJkdijk niet is gefaald).

Te zien is dat alle berekeningen eenzelfde patroon geven. Casus 7 geeft de hoogste sterkte voor alle soorten berekeningen. Casus 6 heeft de laagste sterkte voor alle berekeningen. Uit de rekenresultaten volgt dan een VZG met een lengte van 0,5 m passend is voor kleine verhangen. Een VZG met een lengte van 2,0 m is in alle berekeningen robuuster dan de methode o.b.v. de sterktefactor.

De berekeningen die zijn gebaseerd op dijkversterking Zwolle-Olst hebben sterke overeenkomsten, qua D70 kwelweglengte en doorlatendheid. Er is een verschil in bodemopbouw, met name de aanwezigheid van fijn zand direct rondom het VZG. Te zien is dat dit een beperkte invloed heeft op het kritisch verval berekend met de rekenregel van Sellmeijer. Wel heeft dit een sterke invloed op het kritisch verval berekend voor het VZG met een heave analyse. Deze is bij de aanwezigheid van fijn zand aanzienlijk lager, omdat de grondwaterstroming direct rondom het VZG sterk wordt beïnvloed door dit fijne zand.

Tabel 4.3: Rekenresultaten heave-berekeningen.

	H _c zonder VZG (rekenwaarde) [m]	L _{vzg} = 0,5m		L _{vzg} = 2,0m	
		H _c met VZG [m]	Toename sterkte [factor]	H _c met VZG [m]	Toename sterkte [factor]
1	1,5	3,4	2,3	9,0	6,1
2	1,5	2,8	1,9	6,6	4,4
3	1,1	2,2	2,0	4,8	4,4
4	1,1	2,2	2,0	4,3	3,9
5	0,7	2,2	3,2	4,8	7,0
6	0,7	1,4	2,0	3,5	5,1
7	3,0	6,0	2,0	12,0	4,0
8	3,0	4,6	1,5	9,2	3,1
9	1,9	3,5	1,8	7,1	3,7
10	1,9	3,8	2,0	7,4	3,9
Km 28,75-1	0,96	3,4	3,5	7,3	7,6
Km 28,75-2	0,96	3,2	3,3	6,8	7,1
Km 31,49-1	0,81	1,3	1,6	2,45	3,0
Km 31,49-2	0,81	1,6	2,0	3,0	3,7

⁷ Bij een H_c voor de dijk zonder VZG van 1,5 meter en een H_c voor een dijk met VZG van 3,0 is de factor 2,0.

⁸ Omdat er intredeweerstand aanwezig was is het kritiek verval lager op basis van [6]

4.4 Vertaling resultaten naar eenvoudige toets

Het doen van heaveberekeningen met een grondwatermodel is niet gangbare werkwijze voor alle waterkeringspecialisten. Het werken met de rekenregel van Sellmeijer is meer gangbaar. Een meer eenvoudige benadering, dan het werken met heaveberekeningen met een grondwatermodel, is het werken met een sterktefactor ten opzichte van de rekenregel van Sellmeijer. De wens voor een eenvoudige benadering volgt uit de review van deze memo door het expertteam.

Op basis van de resultaten uit de voorgaande paragraaf zijn de volgende eenvoudige werkwijzes passend:

- Lengte VZG = 0,5 m, begrenzing sterkte-toename Sellmeijer $\times 1,5$.
Op basis van de analyses geeft een heave-analyse met VZG een factor 1,5 tot 3,2 hogere sterkte tegen piping dan een kering zonder VZG. De laagste waarde uit deze bandbreedte is 1,5. Deze waarde is hier aanbevolen als begrenzing op de sterkte-toename.
- Lengte VZG = 2,0 m, begrenzing sterkte-toename Sellmeijer $\times 3,0$.
Op basis van de analyses geeft een heave-analyse met VZG een factor 3,1 tot 7,0 hogere sterkte tegen piping dan een kering zonder VZG. De laagste waarde uit deze bandbreedte is 3,1. Deze waarde sluit aan bij het resultaat van de laboratoriumproeven zoals weergegeven in paragraaf 2.6. Eenvoudshalve is de waarde van 3,1 afgerond naar 3,0 als sterkte-toename.

Geldigheidsgebied:

Bovenstaande geldt voor een VZG waarbij de overige faalmechanismes, zoals voorloopsheid, doorloopsheid, bovenloopsheid en achterloopsheid zijn uitgesloten. Daarnaast betreft de genoemde lengte van het VZG de lengte in de zandlaag die kwetsbaar is voor terugschrijdende erosie.

4.5 Conclusie

Er is bepaald welk verval de waterkering kan keren voor verschillende configuraties. Hiervoor zijn berekeningen gemaakt voor 10+4 casussen met twee verschillende lengtes van het VZG (0,5 en 2 meter). Een VZG met een lengte 0,5 m is bij deze ontwerpcriteria toepasbaar bij beperkte vervallen. Deze geeft ten minste een sterkte toename van een factor 1,5 ten opzichte van een dijk zonder VZG.

Een VZG met een lengte van 2,0 m is bij deze ontwerpcriteria toepasbaar bij veel grotere vervallen (voor de doorgerekende cases). Deze geeft ten minste een sterkte-toename van een factor 3,0 ten opzichte van een dijk zonder VZG.

5 Conclusie en aanbevelingen

5.1 Conclusies

Op basis van een analyse van de small- en medium-scale proeven is geconcludeerd dat:

- Het faalproces van een met VZG versterkte dijk overeenkomsten vertoont met falen als gevolg van heave aan de benedenstroomse zijde van het geotextiel;
- De gemiddelde stijghoogtegradiënt bij een doorlatend scherm kleiner zijn dan bij een ondoorlatend scherm maar dat de stijghoogtegradiënten ter plaatse van het erosiekanaal steiler zijn dan bij een ondoorlatend scherm.
- Het faalproces (ontstaan erosiegat achter geotextiel) niet zelfversterkend is in de proeven.
- De lengte van het geotextiel bepalend is in de weerstand tegen terugschrijdende erosie.
- De sterkte van de proeven met VZG ten opzichte van vergelijkbare proeven zonder VZG een factor 3,1 tot 10,8 is. Dit is bepaald op basis van de small- en medium-scale proeven. De full scale proef is niet bezweken, daarmee geeft deze onvoldoende informatie om dit te bevestigen, maar deze proef ontkracht de laboratoriumproeven niet.

Aandacht gaat uit naar het toepassingsgebied. De laboratoriumproeven kennen een grote nauwkeurigheid rondom de bodemopbouw en de locatie van het VZG. Bij toepassing bij een dijkversterking kennen deze een grote variatie en onbekendheid. In samenspraak met de expertgroep is bepaald dat daarom bij een dijkversterking de minimale lengte van een VZG 0,5 m in de zandlaag dient te zijn, dit is vergelijkbaar met de IJkdijk.

De VZG-proeven zijn nagerekend met een grondwatermodel waarbij als faaldefinitie een heave-criterium van 1,0 aan de benedenstroomse zijde van het geotextiel is gehanteerd, op basis hiervan is geconcludeerd dat:

- De faaldefinitie conform het heave-criterium geen perfecte voorspeller is voor falen in de proeven maar leidt tot een veilige inschatting.
- De (afwijking van de) rekenresultaten vergelijkbaar zijn met de veiligheid bij een faaldefinitie voor ondoorlatende heaveschermen.

Het heave-criterium is toegepast op een aantal cases waarbij bepaald is welk verval gekeerd kan worden als functie van twee verschillende lengtes VZG (0,5 en 2,0 meter). Op basis hiervan is geconcludeerd dat:

- Een VZG met een lengte 0,5 m is bij deze ontwerpcriteria toepasbaar bij beperkte vervallen.
- Een VZG met een lengte van 2,0 m is bij deze ontwerpcriteria toepasbaar bij veel grotere vervallen.

5.2 Aanbeveling ontwerpcriterium

Op basis van de bovenstaande conclusies wordt aanbevolen om:

- Het VZG te ontwerpen op basis van een heave-criterium van $l_c = 0,5$ aan de benedenstroomse zijde van het VZG.
- Een langer VZG geeft een grotere toename van de sterkte. Dat blijkt uit zowel laboratoriumproeven als ontwerpberekeningen met het heave-criterium.
- Het te keren (kritiek) verval te begrenzen op een factor 3,0 op het kritiek verval van de waterkering zonder VZG (op basis van Sellmeijer).
- Een eenvoudige toets wordt opgenomen, dit voorkomt dat complexe berekeningen gedaan moeten worden in eenvoudige situaties. De volgende eenvoudige toets is opgesteld:
VZG lengte 0,5 m, begrenzing sterkte-toename tegen piping op basis van Sellmeijer: $\times 1,5$.
VZG lengte 2,0 m, begrenzing sterkte-toename tegen piping op basis van Sellmeijer: $\times 3,0$.

Geldigheidsgebied eenvoudige toets:

Bovenstaande geldt voor situaties waarbij het VZG tussen het uittredepunt en de helft van de

kwelweglengte is geplaatst. Daarnaast dient het ontwerp te voldoen op alle overige faalmechanismes, zoals voorloopsheid, doorloopsheid, bovenloopsheid en achterloopsheid zijn uitgesloten. Daarnaast betreft de genoemde lengte van het VZG de lengte in de zandlaag die kwetsbaar is voor terugschrijdende erosie.

- De uitkomst van een heaveberekening wordt beïnvloed door meerdere factoren. Dit is onder andere de aanwezigheid van lokaal fijn zand direct rondom het VZG. Dit beïnvloed namelijk de grondwaterstroming richting het erosiekanaal. In een locatiespecifieke analyse is aandacht voor locatie bodemopbouw met de bijbehorende doorlatendheden dan van belang.

5.3 Overzicht veiligheden en onzekerheden

In het aanbevolen ontwerpcriterium zijn de volgende veiligheden aanwezig:

- Op het heave-criterium wordt de gebruikelijke veiligheidsfactor van 2,0 toegepast;
- De werkelijke sterkte tegen heave is volgens de proeven aanzienlijk hoger, dit verschil is een factor 3. Combinatie met bovenstaande geeft dus een veiligheid van een factor 6;
- Ontwerpen op basis van het heave-criterium kan leiden tot een toename in kritiek verval van meer dan 10 ten opzichte van het kritiek verval berekend met de rekenregel van Sellmeijer. Dit wordt begrenst op een sterkte toename van een factor 3. Dat zorgt ervoor dat er aanzienlijke toename aan sterkte meegenomen kan worden, maar dat de ontwerpsituaties vergelijkbaar blijven met proeven (dijkvormig).

In de grondwatermodellering zijn de volgende veilige uitgangspunten gehanteerd:

- Stationaire grondwatermodellering;
Vooralsnog bestaan er geen handvaten voor tijdsafhankelijke heave analyses. Wel bestaan er tijdsafhankelijke analyses voor terugschrijdende erosie en tijdsafhankelijke analyses voor grondwaterstroming. Beide leiden ertoe dat heave rondom een VZG bij kortdurend hoogwater minder waarschijnlijk is. Deze zaken worden in de vigerende ontwerpwijze niet meegenomen.
- Modellering in 2D.
Een erosiekanaal is een smal kanaal. Wanneer deze bij een verticaal object komt, zoals een VZG, groeit deze in de lengterichting van het verticale object (VZG). Daardoor ontstaan een nagenoeg 2D grondwaterstromingssituatie. Narekenen van laboratoriumproeven geeft aan dat een 2D-benadering afdoende nauwkeurig is voor de geohydrologische modellering.
- Geen weerstand toegekend aan erosiekanaal (modellering met fixed head).
Analyses van zowel de IJkdijk zonder VZG als de IJkdijk met VZG geven een zeker verval in het erosiekanaal. Dit duidt op een zekere weerstand. Verkennende analyses geven dat het meenemen hiervan ertoe leidt dat falen pas bij een tweemaal zo hoog verval op zou treden bij de IJkdijk. Echter is de bewijslast in verband met het beperkte aantal onderzochte grote schaalproeven hiervan onvoldoende om toe te passen in ontwerp.

Tegenover de veiligheden staan een aantal onzekerheden:

- Uit de analyses in hoofdstuk 3 blijkt dat het gehanteerde model geen perfecte voorspeller is voor falen van het VZG. Dat blijkt uit het feit dat de gevonden sterkte tegen heave aanzienlijk sterker is rondom het VZG, maar ook in de gehele proef. Doordat de sterkte maar slechts deels wordt verklaard is onduidelijk hoe het proces zich gedraagt op grotere schaal. Het Heave proces gedraagt zich met schaal nagenoeg lineair. Daarentegen is de rekenregel van Sellmeijer niet-lineair, bij een dubbele kwelweglengte wordt daarmee niet een dubbele sterkte gevonden.

Omdat niet zeker is hoe het proces zich gedraagt op grotere schaal is dit ondervangen met een sterkte factor. Deze is toegepast op de sterkte van terugschrijdende erosie. Daarmee wordt aangesloten bij het meest conservatieve schaal effect.

- De range aan variaties voor de proeven is beperkt.
Net als bij de rekenregel van Sellmeijer wordt er geëxtrapoleerd voor kwelweglengtes boven de

15 m of diktes van het watervoerende pakket van meer dan 3 m. Ook is de invloed van het achterland in beide gevallen nagenoeg onbekend, zo is de verticale weerstand van het uittredekanaal nog nooit in combinatie met terugschrijdende erosie beproefd. Ook is de invloed van een 2D-, of 3D uitstroomopening onderzocht. Tenslotte is in de proeven is weinig gevarieerd met de locatie van het VZG in relatie tot de kwelweg.

Daarmee zijn er veel onzekerheden. Deze onzekerheden zijn echter vergelijkbaar met die van de andere processen rondom terugschrijdende erosie. Het werken met een sterkte factor die gerelateerd is aan terugschrijdende erosie zorgt ervoor dat de onzekerheid bij beide processen gelijk toegepast wordt.

6 Verwijzingen

- [1] Waterschap Rivierenland, „Ontwerp en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel,” 2017.
- [2] Deltares, „Onderzoek naar de werking van geotextielen als pipingremmende maatregel (Hoofdrapport) - Feitenrapportage kleine en medium schaalproeven, Numeriek onderzoek, Analyse kleine-, medium-schaalproeven en IJkdijkproef, Ontwerp- en Veiligheidsfilosofie.,” Delft, 2013.
- [3] Deltares, „Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen, kenmerk: 1202123-003,” Rijkswaterstaat, Delft, 2012.
- [4] Deltares, „SBW Piping Kunstwerken, KW9 Analyse kleine schaal proeven, 1200675-002-GEO-0001,” Delft, 2009.
- [5] Deltares, „DIV Wiki vraag: Verticale erosie en heave; kenmerk: 11207012-004-GEO-0003,” 2022.
- [6] Deltares, „Onderzoek naar de werking van geotextielen als pipingremmende maatregel, Feitenrapport IJkdijkproef, kenmerk 1206806-006,” Waterschap Rivierenland, Delft, 2013.

7 Bijlage 1. Overzicht proefresultaten

Tabel 7.1: Eenheden en begrippen

Eenheid	begrip
RD	Relatieve dichtheid
d70	70 percentielwaarde korrelverdeling
L	Kwelweglengte
Hc	Kritiek verval

7.1 Small scale proeven zonder VZG

Tabel 7.2: Proeven zoals opgenomen in Deltares. SBW Hervalidatie piping. A2: Kleinschalige laboratoriumproeven (Factual Reports Deel 2, Transport/erosie).

Proefnummer	Scale	RD [%]	d70 [µm]	L [m]	Hc [m]	Mee in analyse?
O42	Small	74.5	310	0.332	0.2	Ja
O43	Small	75.3	310	0.332	0.16	Ja
O44	Small	72.9	310	0.33	0.16	Ja
I45	Small	71.6	220	0.332	0.23	Ja
I46	Small	70	220	0.337	0.18	Ja
I47	Small	74.7	427	0.34	0.18	Ja
I48	Small	75.7	427	0.34	0.21	Ja
I49	Small	76	396	0.34	0.15	Ja
I50	Small	73	396	0.332	0.2	Ja
I51	Small	70	195	0.335	0.14	Ja
I52	Small	71	396	0.331	0.19	Ja
I53	Small	73.6	195	0.325	0.15	Ja
b54	Small	79	154	0.331	0.2	Ja
b55	Small	71.3	154	0.33	0.16	Ja
I56	Small	69.6	177	0.325	0.12	Ja
b57	Small	75	154	0.33	0.15	Ja
b58	Small	70	154	0.345	0.21	Ja
b61	Small	73	154	0.345	0.13	Ja
I62	Small	63.3	177	0.325	0.13	Ja
S63	Small	75	232	0.34	0.17	Ja
S64	Small	75	232	0.335	0.15	Ja

Tabel 7.3: Deltares. SBW Piping: Hervalidatie piping. A2. Kleinschalige laboratoriumproeven (Factual Reports deel 1, Relatieve dichtheid).

Proefnummer	Scale	R [%]	d70 [µm]	L [m]	Hc [m]	Mee in analyse?
b29	Small	34	154	0.335	0.09	Nee
b30	Small	34	154	0.33	0.06	Nee
d31	Small	65	192	0.332	0.2	Ja
d32	Small	65	192	0.332	0.16	Ja
d33	Small	34	192	0.332	0.11	Nee
d34	Small	33	192	0.332	0.09	Nee
b35	Small	65	154	0.335	0.16	Ja
b36	Small	63	154	0.334	0.16	Ja
d38	Small	92	192	0.335	0.18	Ja
d39	Small	92	192	0.331	0.15	Ja
b40	Small	91	154	0.332	0.16	Ja
b41	Small	92	154	0.334	0.17	Ja

Tabel 7.4: Proeven zoals opgenomen in Deltares. SBW Piping: Hervalidatie piping. A2. Kleinschalige labproeven (factual reports deel 3, waterspanningen). Documentnummer: 433380-0014.

Proefnummer	Scale	R [%]	d70 [µm]	L [m]	Hc [m]	Mee in analyse?
b71	Small	74.6	154	0.335	0.22	Ja
b73	Small	74.6	154	0.32	0.19	Ja
b74	Small	69.8	154	0.34	0.15	Ja
b75	Small	72.5	154	0.333	0.17	Ja

7.2 Medium scale proeven zonder VZG

Tabel 7.5: Proeven zoals opgenomen in Deltares. SBW Piping: Hervalidatie piping. HP2.2 Medium-schaalproeven (Analyserapport). Documentnummer: 1200648-004-GEO-0001.

Proefnummer	Scale	R [%]	d70 [µm]	L [m]	Hc [m]	Mee in analyse?
Bms01	Medium	65	154	1.37	0.28	Ja
Bms02	Medium	60	154	1.45	0.37	Ja
ITTms03	Medium	70	210	1.465	0.26	Ja
ITTms04	Medium	45	210	1.455	0.2	Nee
ITTms05 duplo	Medium	65	210	1.415	0.29	Ja
ITTms06 duplo	Medium	30	210	1.465	0.16	Nee
Bms07duplo	Medium	60	154	1.44	0.29	Ja
Bms08 duplo	Medium	45	154	1.42	0.19	Nee

7.1 Full scale proeven zonder VZG

Tabel 7.6: Proeven zoals opgenomen in Deltares. SBW: Hervalidatie piping. HP5.5a Analyse en validatie full-scale proeven.

Proefnummer	Scale	R [%]	d70 [µm]	L [m]	Hc [m]	Mee in analyse?
Proef 1 (fijn zand)	Medium	>50%	180	15	2,3	Ja
Proef 2 (grof zand)	Medium	>50%	260	15	1,75	Ja
Proef 3 (fijn zand)	Medium	>50%	180	15	2,1	Ja

[9]

7.2 Small scale met VZG

Tabel 7.7: Proeven zoals opgenomen in Deltares. 1206806-000-GEO-0014-v3-r-Onderzoek naar de werking van geotextielen als pipingremmende maatregel (Hoofdrapport).

	Schaal	VZG lengte [m]	d70 [µm]	RD [%]	L [m]	Afstand geotextiel tot instroom [m]	Verval bij bereiken geotextiel [m]	Verval bij kantelen geotextiel [m]	Verval bij falen [m]
Y-134	Small	0.05	270	90	0.335	0.225	0.15	1.3	1.3
Y-135	Small	0.02	270	90	0.332	0.225	0.17	0.83	0.83
Y-136	Small	0.02	270	91	0.327	0.225	0.14	0.71	0.71

7.3 Medium scale met VZG

Tabel 7.8: Proeven zoals opgenomen in Deltares. 1206806-000-GEO-0014-v3-r-Onderzoek naar de werking van geotextielen als pipingremmende maatregel (Hoofdrapport).

	Schaal	VZG lengte [m]	d70 [μm]	RD [%]	L [m]	Afstand geotextiel tot instroom [m]	Verval bij bereiken geotextiel [m]	Verval bij kantelen geotextiel [m]	Verval bij falen [m]
Bzand2_16 MS_geotextiel	Medium	0.08	270	76	1.41	0.53	0.32	1.373	-
Bzand2_17 MS_geotextiel	Medium	0.02	270	77	1.396	0.518	0.31	0.92	1.295

7.4 Full scale met VZG

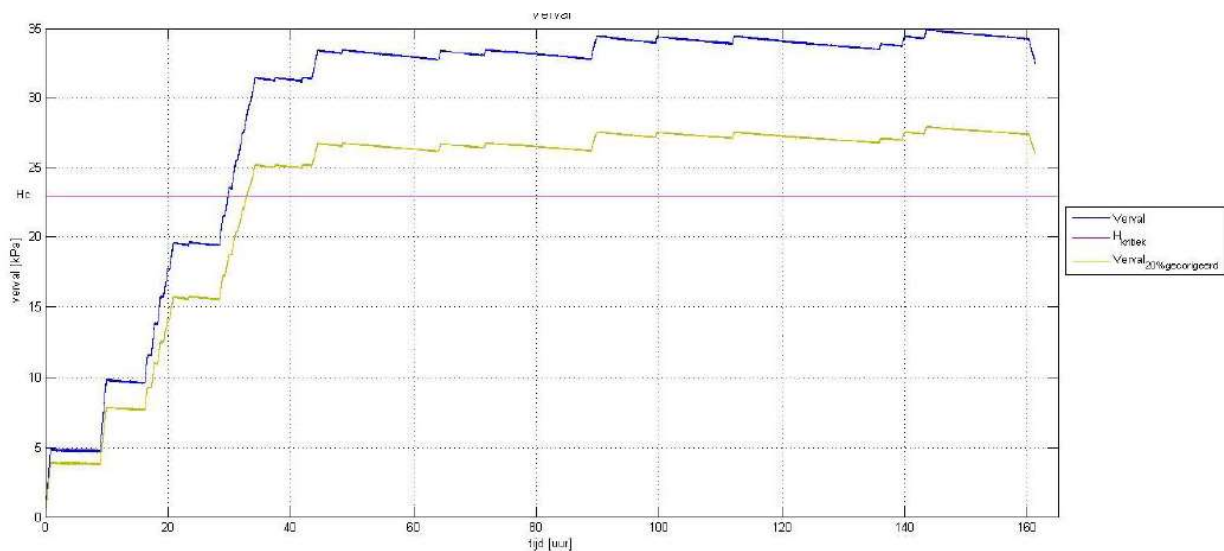
Tabel 7.9 Deltares. 1206806-000-GEO-0014-v3-r-Onderzoek naar de werking van geotextielen als pipingremmende maatregel (Hoofdrapport)

Proefnummer	Scale	R [%]	d70 [μm]	L [m]	Hc [m]*	Mee in analyse?
Proef 2012	Full	50-60	270	15	circa 3,4m**	Ja

*Er is geen falen opgetreden in de proef.

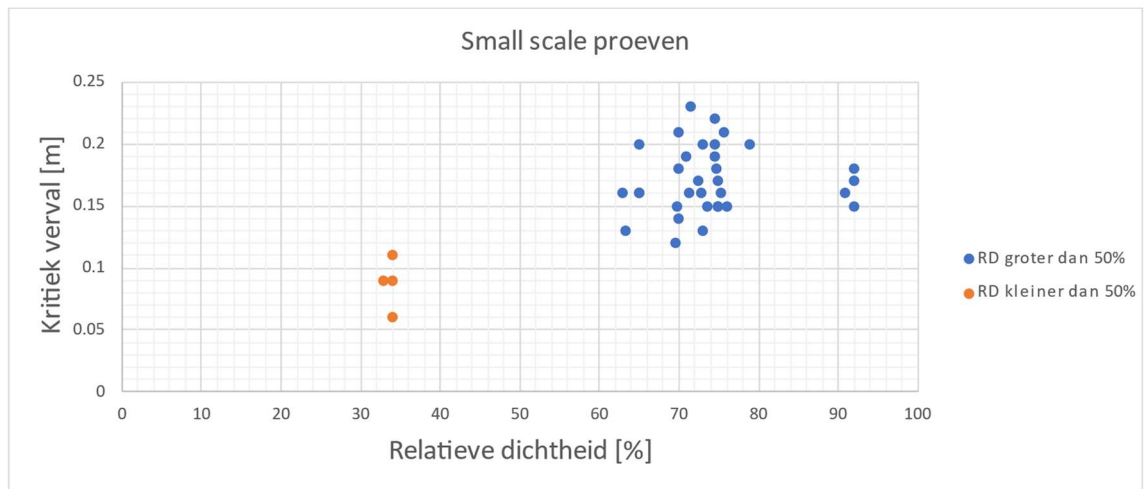
**In het Deltares rapport

In de onderstaande figuur is te zien dat de full-scale pipingproef met VZG een hogere sterkte heeft dan zonder VZG. Er is gecorrigeerd voor een teveel aan intredeweerstand.

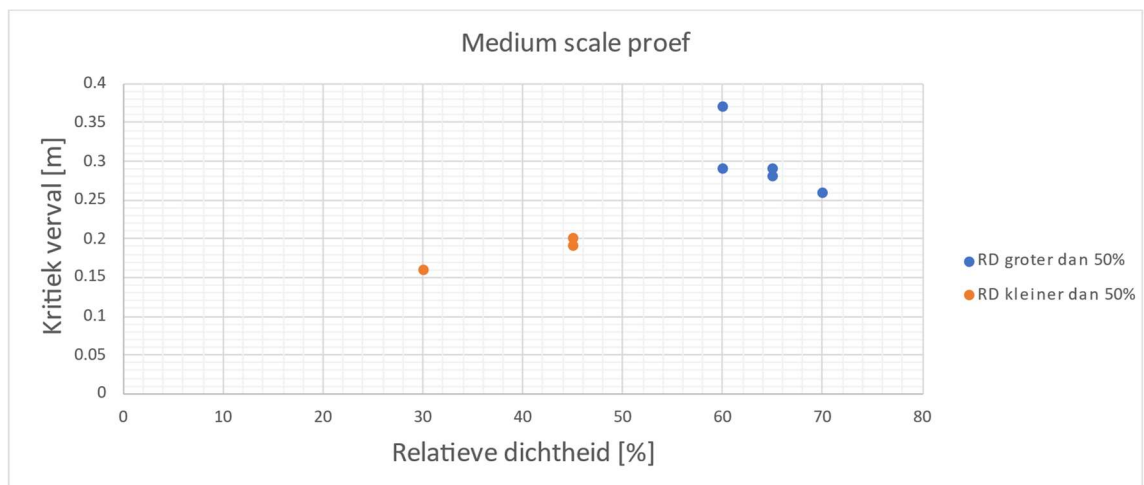


7.5 Grafieken pipingproeven

7.5.1 Relatieve dichtheid versus kritiek verval

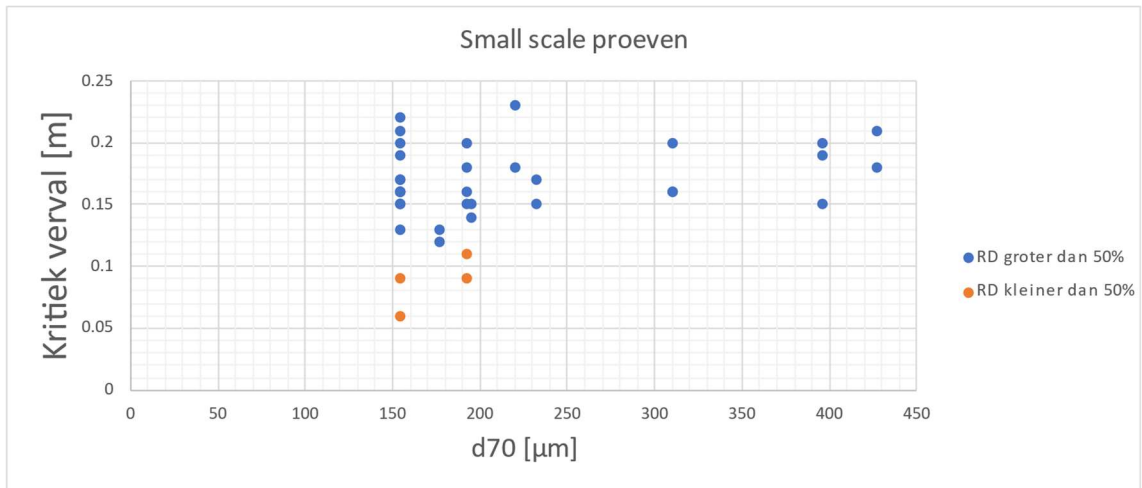


Figuur 7-1. Relatieve dichtheid versus kritiek verval voor small scale proeven (zonder VZG)

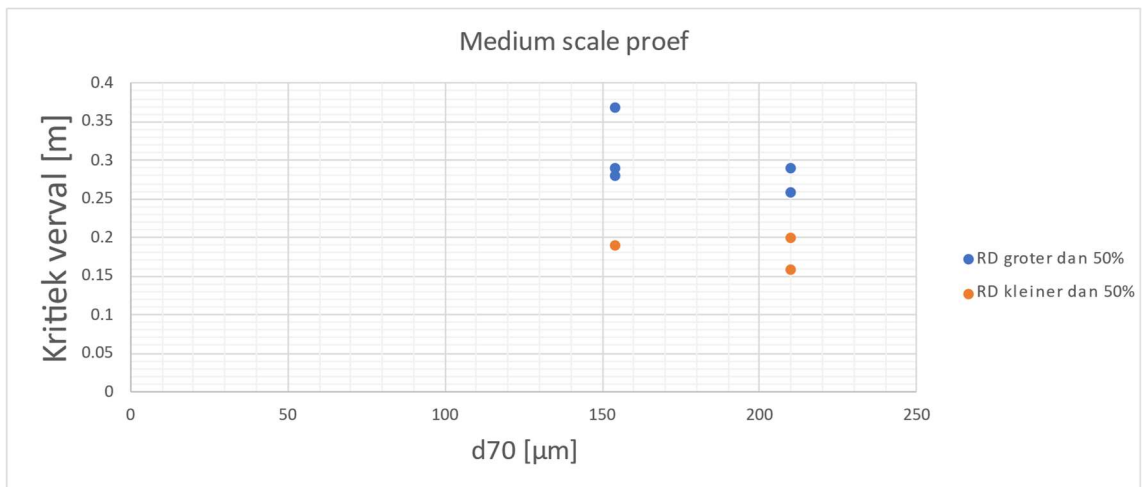


Figuur 7-2. Relatieve dichtheid versus kritiek verval voor medium scale proeven (zonder VZG)

7.5.2 D70 versus kritiek verval



Figuur 7-3. d70 versus kritiek verval voor small scale proeven (zonder VZG)



Figuur 7-4. d70 versus kritiek verval voor small scale proeven (zonder VZG)

8 Bijlage 2. Overzicht falen VZG in medium scale proef

In onderstaande afbeeldingen is het falen van een VZG in medium scale proef (Bzand2_17_MS_Geotextiel) weergegeven.

