Deltares

Verkennende berekeningen voor ontwerp grofzandbarrière bij Gameren

Schematiseringen en berekeningsresultaten

Verkennende berekeningen voor ontwerp grofzandbarrière bij Gameren
Schematiseringen en berekeningsresultaten

Auteur(s)
André Koelewijn
Bernard van der Kolk
Aron Noordam

Verkennende berekeningen voor ontwerp grofzandbarrière bij Gameren
Schematiseringen en berekeningsresultaten

Opdrachtgever	Waterschap Rivierenland
Contactpersoon	Bastiaan Heutink
Referenties	
Trefwoorden	Piping, dijkversterking, grofzandbarrière, voorlopig ontwerp, parameterstudie, gevoeligheidsanalyse, Gameren

Documentgegevens	
Versie	2.0
Datum	17-06-2021
Projectnummer	11200952-068
Document ID	11200952-068-GEO-0001
Pagina's	89
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	André Koelewijn Bernard van der Kolk Aron Noordam	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1 (als 11200952-058-GEO-0001, nov. 2019)	André Koelewijn	Ulrich Förster	Leo Voogt	
2.0	André Koelewijn	Adam Bezuijen Ulrich Förster	Goaitske de Vries	

Samenvatting

In deze rapportage worden de schematiseringen en voorlopige berekeningsresultaten beschreven voor de voorgenomen toepassing van de grofzandbarrière als innovatieve maatregel tegen het faalmechanisme piping op een pilotlocatie bij Gameren.

Voor de grofzandbarrière zijn twee varianten beschouwd, één met een vlakke aansluiting op de onderkant van de deklaag en één met een naar boven in de deklaag uitstekende inkassing. Ingegaan wordt op de geschiedenis van het gebied en het aanvullende grondonderzoek, de schematisering van de ondergrond in een tiental dwarsprofielen en de kalibratie voor de doorlatendheden op basis van stijghoogtemetingen bij een hoogwater van beperkte omvang. Vervolgens is een her-analyse beschreven met de aangepaste regel van Sellmeijer op basis van de vernieuwde inzichten, gevolgd door de keuze van het materiaal voor de grofzandbarrière.

Daarna worden voor de situatie met de vlakke aansluiting de berekeningsresultaten gepresenteerd inclusief een veiligheidsbeschouwing waarmee de aansluiting op de vigerende veiligheidsbenadering voor de Nederlandse primaire waterkeringen wordt gerealiseerd. Vervolgens worden voorlopige resultaten gepresenteerd voor de situatie met inkassing. De definitieve berekeningen zijn samen met het Voorlopig Ontwerp en het Definitief Ontwerp gerapporteerd in een ontwerprapport, samen met een veiligheidsbeschouwing inclusief alle denkbare faalpaden.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
1	**Inleiding**	**8**
1.1	Haalbaarheidsonderzoek grofzandbarrière	8
1.2	Wat is een grofzandbarrière?	8
1.3	Faalmechanismen grofzandbarrière	12
1.4	Pilotlocatie Gameren	12
1.5	Leeswijzer	13
2	**Beschikbare gegevens**	**14**
2.1	Situatieschets	14
2.2	Grondonderzoek	18
2.3	Oppervlaktewater- en grondwatermonitoring	20
2.4	Maatgevende peilen	21
3	**Ondergrondschematiseringen**	**22**
3.1	Inleiding	22
3.2	3D-model Amir Argaman	22
3.3	Diepliggende afsluitende lagen	24
3.4	Profiel RW134+050	25
3.5	Profiel RW135+050	26
3.6	Profiel RW136+050	27
3.7	Profiel RW137+050	28
3.8	Profiel RW138+050	28
3.9	Profiel RW139+050	29
3.10	Profiel RW140+050	30
3.11	Profiel RW141+050	31
3.12	Profiel RW142+050	31
3.13	Profiel RW143+050	32
4	**Kalibratieberekeningen**	**34**
4.1	Inleiding	34
4.2	Beschikbare gegevens en kalibratiemogelijkheden	34
4.3	Meest oostelijke meetraai	38
4.4	Overige meetraaien	41
4.5	Interpretatie	42

4.6 Keuze voor doorlatendheden 42
4.7 Herziene waarden op basis van HPT-(A)MPT-sonderingen 45
4.8 Mogelijkheden voor toekomstige aanscherpingen 46

5 Resultaten met de aangepaste regel van Sellmeijer 47
5.1 Inleiding 47
5.2 Eerdere resultaten 47
5.3 Hernieuwde analyse 48

6 Keuze barrièrematerialaal 50
6.1 Criteria 50
6.1.1 Filtercriteria 50
6.1.2 Interne stabiliteit 50
6.1.3 Weerstand tegen secundaire erosie 53
6.1.4 Werking ondersteund door experimenten 53
6.2 In Gameren toepasbare materialen 54

7 Berekeningsresultaten voor een vlakke aansluiting 57
7.1 Inleiding 57
7.2 Resultaten van verkennende berekeningen per profiel 57
7.2.1 Profiel RW134+050 57
7.2.1.1 Ingroeilengte 58
7.2.1.2 Specifieke bijzonderheden bij de berekeningen voor dit profiel 59
7.2.1.3 Invloed van parametervariaties 59
7.2.2 Profiel RW135+050 59
7.2.3 Profiel RW136+050 59
7.2.4 Profiel RW137+050 60
7.2.5 Profiel RW138+050 60
7.2.6 Profiel RW139+050 61
7.2.7 Profiel RW140+050 61
7.2.8 Profiel RW141+050 62
7.2.9 Profiel RW142+050 62
7.2.10 Profiel RW143+050 62
7.2.11 Invloed van diverse variaties 63
7.2.12 Invloed numerieke modellering 64
7.3 Resultaten met karakteristieke en gemiddelde waarden 65
7.3.1 Grofzandbarrière op de vastgestelde positie binnen het dwarsprofiel 65
7.3.2 Invloed positie binnen het dwarsprofiel 66
7.4 Correctie voor maatgevende peilen en pipe-weerstand 67
7.5 Aanvankelijk gehanteerde veiligheidsbenadering voor de vlakke barrière 68
7.5.1 Aanleiding en doel 68
7.5.2 Model voor primaire erosie van de vlakke grofzandbarrière 68
7.5.3 Stappenplan afleiding veiligheidsformat en modelfactor 69
7.5.4 Stap 1: Onzekerheden in primaire erosie vlakke grofzandbarrière 69
7.5.4.1 Modelmatige onzekerheden 69
7.5.4.2 Praktijkonzekerheden 70
7.5.5 Stap 2: Veiligheidsformat 70
7.5.5.1 Grenstoestandsfunctie 70

7.5.5.2 Semi-probabilistisch criterium 70
7.5.5.3 Afdekken onzekerheden in veiligheidsformat 71
7.5.5.4 Conservatieve en niet-conservatieve keuzes in het format 72
7.5.5.5 Welke onzekerheden af te dekken in modelonzekerheid/modelfactor? 73
7.5.5.6 Totale veiligheid 73
7.5.6 Stap 3a: Modelonzekerheid 73
7.5.6.1 Karakteristieke waarde $i_{crit,rep}$ 74
7.5.7 Stap 3b: Modelfactor 74
7.5.8 Stap 3c: Schadefactor 75
7.5.8.1 Op basis van algemene theorie 75
7.5.8.2 Op basis van overall pipingfactor 76
7.5.8.3 Op basis van enkele probabilistische analyses 76
7.5.9 Eerste schatting voor de rekenwaarde van het kritiek verhang 76
7.5.10 Discussie en vervolg 77
7.5.11 Omgang met overige deelfaalmechanismen 77

7.6 Conclusies voor een vlakke aansluiting 78

8 Berekeningsresultaten voor een inkassing 79

8.1 Inleiding 79

8.2 Verkennende berekeningen 79
8.2.1 Inleiding 79
8.2.2 Invloed dikte, doorlatendheid en hellingshoek 79
8.2.3 Invloed positie binnen het dwarsprofiel 81
8.2.4 Invloed doorlatendheid tussenzandlaag 82
8.2.5 Maatgevende resultaten en conclusies uit verkennende berekeningen 83

8.3 Definitieve berekeningen & veiligheidsbenadering 83

Referenties 85

1 Inleiding

1.1 Haalbaarheidsonderzoek grofzandbarrière

De huidige beoordelingsmethoden voor het faalmechanisme piping resulteren op veel dijktrajecten in grote veiligheidstekorten. Indicatieve studies laten zien dat op basis van de huidige beoordelingsmethodiek zelfs ongeveer de helft van de primaire dijken die onder het beheer vallen van Waterschap Rivierenland geen gunstig beoordelingsresultaat zal krijgen.

Een traditionele dijkversterkingsmethode, als het aanleggen van een berm om de kwelweglengte te vergroten, wordt door de grote benodigde kwelweglengtes en de aanwezige (vaak dichte) bebouwing steeds minder aantrekkelijk. Er zijn verschillende alternatieve en innovatieve methoden ontwikkeld die minder ruimtebeslag vergen en bovendien goedkoper kunnen zijn. Eén daarvan is de grofzandbarrière. Deze methode behelst het aanbrengen van een sleuf met grof zand in het bovenste gedeelte van een pipinggevoelige zandlaag, waarna de sleuf wordt afgedekt met klei.

Waterschap Rivierenland heeft de wens om de grofzandbarrière als innovatieve dijkversterkingsmaatregel toe te passen bij Gameren in de Bommelerwaard. Hier is in de derde toetsronde over een traject van ongeveer een kilometer een tweetal dijkvakken afgekeurd, nabij dijkpaal RW137 (0,2 km) en nabij dijkpaal RW143 (0,1 km). Meer recent is in een veiligheidsanalyse van de dijk bij Gameren vastgesteld dat vrijwel het gehele dijktrajectgedeelte tussen RW128 en RW146 als onvoldoende t.o.v. het faalmechanisme piping beoordeeld wordt, met op meer dan de helft hiervan een kwelweglengtetekort van meer dan 100 meter (Bisschop & Hofschreuder, 2016).

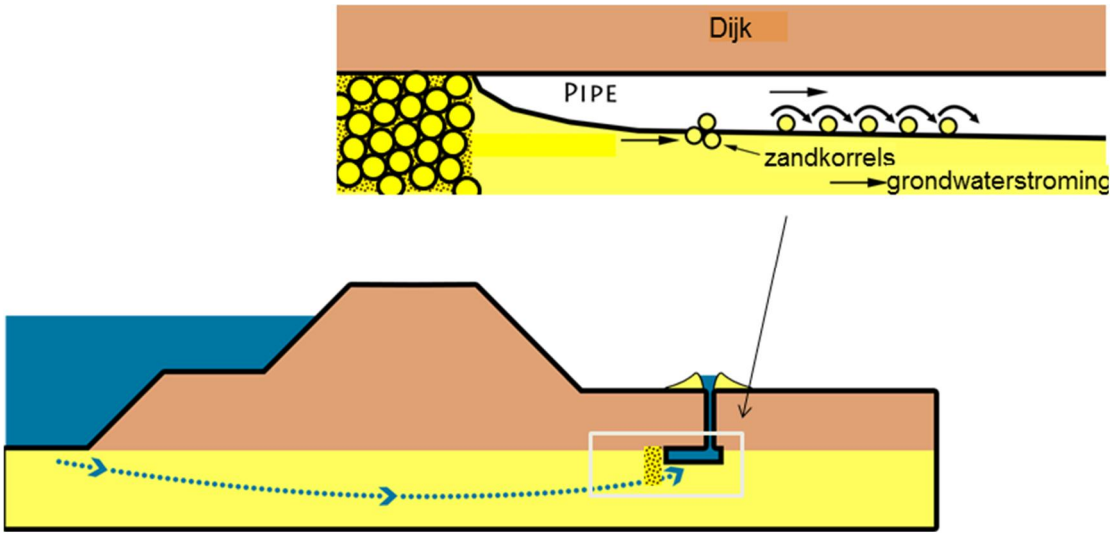
Nadat verkennende proeven in het laboratorium en op de IJkdijk de kansrijkheid van de grofzandbarrière hadden aangegeven, is recent bij Deltares een eerste haalbaarheidsonderzoek uitgevoerd om het functioneren van de grofzandbarrière ook modelmatig te begrijpen en deze methode, waar deze voldoende veiligheid biedt, toe te kunnen passen, zowel op deze pilotlocatie als ook elders. Een laatste stap in dit onderzoek betreft de verkenning van de toepasbaarheid van deze versterkingsmethode voor de pilotlocatie Gameren.

De definitieve berekeningen zijn samen met het Voorlopig Ontwerp en het Definitief Ontwerp gerapporteerd in een ontwerprapport, samen met een veiligheidsbeschouwing inclusief alle denkbare faalpaden (Koelewijn, 2021).

1.2 Wat is een grofzandbarrière?

Om te beginnen wordt voor een goed begrip van deze rapportage toegelicht hoe de grofzandbarrière functioneert.

Bij het faalmechanisme piping kunnen tijdens een hoogwater ten gevolge van grondwaterstroming zandkorrels worden meegenomen vanuit een watervoerende laag onder het afsluitende slappe lagenpakket en naar de binnendijkse oppervlakte worden getransporteerd. Er ontstaat dan een holle ruimte in de ondergrond, die overgaat in een pipe. Bij voldoende waterstandsverschil kan de pipe geleidelijk groeien in de richting van het buitenwater. Na kortsluiten met het buitenwater kan uiteindelijk bezwijken van de dijk optreden.



Figuur 1 Faalmechanisme piping gehinderd door een grofzandbarrière met vlakke aansluiting op de bovenliggende deklaag.

De essentie van het pipingproces is dat zandkorrels aan de bovenkant van een zandlaag onder een afsluitende cohesieve c.q. erosiebestendige deklaag worden meegevoerd door grondwaterstroming. Door aan de polderzijde van de dijk een grofzandbarrière aan te leggen, waarbij het aanwezige zand vervangen wordt door grover zand en de bovenliggende deklaag wordt hersteld (zie Figuur 1), kan een veel groter waterstandsverschil worden gekeerd voordat doorgaande piping gaat optreden. Het proces wordt om twee redenen bemoeilijkt. De eerste reden is dat het barrièremateriaal een grotere weerstand tegen erosie heeft, de tweede reden is dat de belasting op de korrels in de grofzandbarrière relatief klein is, ten gevolge van de relatief hoge doorlatendheid van het barrièremateriaal ten opzichte van het omringende materiaal. Door het grote doorlatendheidscontrast tussen het barrièremateriaal en het achtergrondzand is de drukval over de barrière betrekkelijk gering: het verval zal grotendeels worden gekeerd door het achtergrondzand bovenstrooms van de barrière, wat vanwege die barrière niet kan eroderen. Daardoor is een situatie met een combinatie van achtergrondzand en grofzandbarrière sterker dan een (fictieve) ondergrond die alleen uit barrièremateriaal zou bestaan.

Het ontstaan van zandmeevoerende wellen wordt met een grofzandbarrière niet tegengegaan, maar de grofzandbarrière voorkomt dat de pipes onder de dijk doorgroeien en de waterkering ondergraven. Er kan dan met een rekenkundig te kleine kwelweglengte toch voldoende veiligheid worden gecreëerd.

De voorgestelde methode heeft als voordeel dat er puur door het vervangen van een klein deel van het al aanwezige zand met een ander natuurlijk materiaal meer weerstand tegen piping kan worden gecreëerd. Er zijn echter ook nadelen verbonden aan deze methode. In tegenstelling tot een Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG) kan een pipe bij voldoende grote waterstroming in de grofzandbarrière verder groeien, zowel in zijdelingse richting als (iets) verder stroomopwaarts. Bij verdere vergroting van de waterstroming kan de pipe er zelfs doorheen groeien en kan de barrière uiteindelijk doorbreken (net zoals iedere andere maatregel natuurlijk ook een uiterste sterkte kent). In de haalbaarheidsstudie is onderzocht bij welk verval dit gebeurt (Van Beek & Rosenbrand, 2019).

De grofzandbarrière werkt niet op dezelfde manier als een klassiek filter, daarbij wordt namelijk aan het maaiveld gecontroleerd water afgelaten (ICOLD, 1994). Een grofzandbarrière is afgedekt met een kleilaag, om kwelstroming ter plaatse te voorkomen, en is dus niet zichtbaar aan het maaiveld. Zonder afdeklaag zou een grofzandbarrière als filter fungeren, waarbij het ontstaan van zandmeevoerende wellen wordt voorkomen. Maar het

risico op verstoppen en kwel (voorafgaand aan het ontstaan van pipes) is dan aanzienlijk groter. Net als bij een filter is het echter nodig om rekening te houden met filterregels: het achtergrondmateriaal mag niet door de grofzandbarrière heen stromen en de grofzandbarrière mag niet verstopt raken. Bij een juiste keuze van het barrièremateriaal kan dit echter uitgesloten worden.

De sterkte van de grofzandbarrière is dan geheel afhankelijk van condities waaronder de pipe door de grofzandbarrière heen groeit. In het haalbaarheidsonderzoek is onderzocht hoe deze sterkte bepaald kan worden en wat de sterkte is. De erosiemechanismen, die voor groei van een pipe zorgen, spelen hierbij een belangrijke rol.

De sterkte van de grofzandbarrière is af te leiden door te kijken naar het erosiemechanisme. Op basis van beschikbare literatuur kan afgeleid worden welke erosiemechanismen een rol zullen spelen. Verschillende onderzoeken (Hanses, 1985; Robbins et al., 2018; Van Beek et al., 2015) tonen aan dat voor de groei van een pipe twee mechanismen van belang zijn:

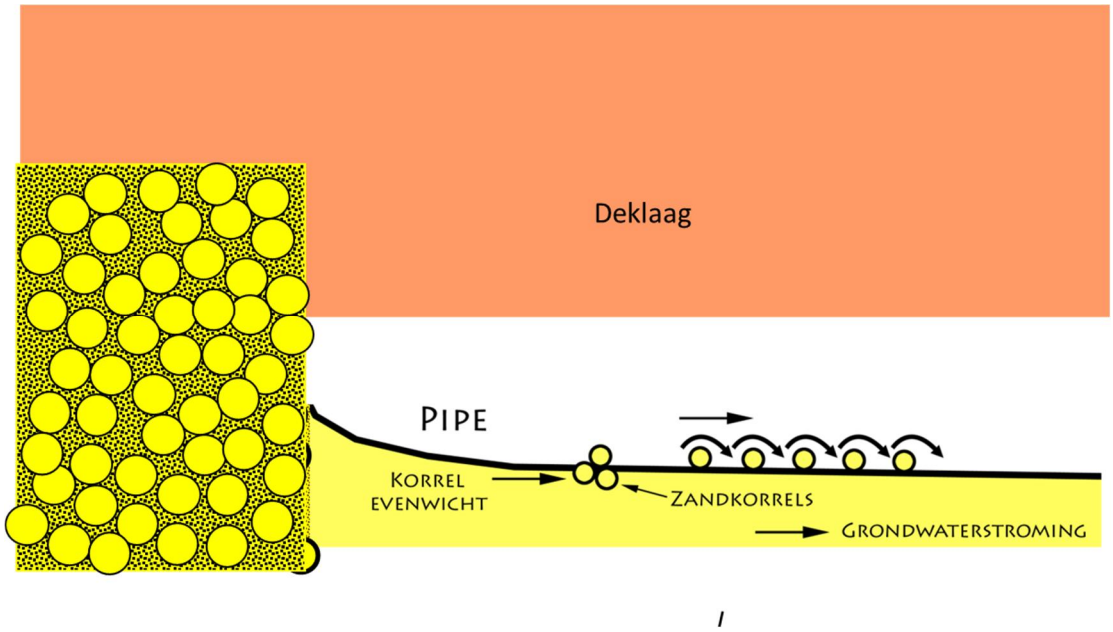
- Primaire erosie: het losmaken van korrels aan de kop van de pipe, door het fluïdiseren van een groep korrels, gedreven door de daar aanwezige lokale hydraulische gradiënt.
- Secundaire erosie: het eroderen van korrels op de bodem en wanden van de pipe, waardoor de pipe dieper wordt. De diepte van de pipe bepaalt de drukval in de pipe.

Voor piping zonder grofzandbarrière is de secundaire erosie erg belangrijk: de drukval in de pipe bepaalt in grote mate het uiteindelijke kritiek verval. In het model van Sellmeijer is alleen de secundaire erosie meegenomen.

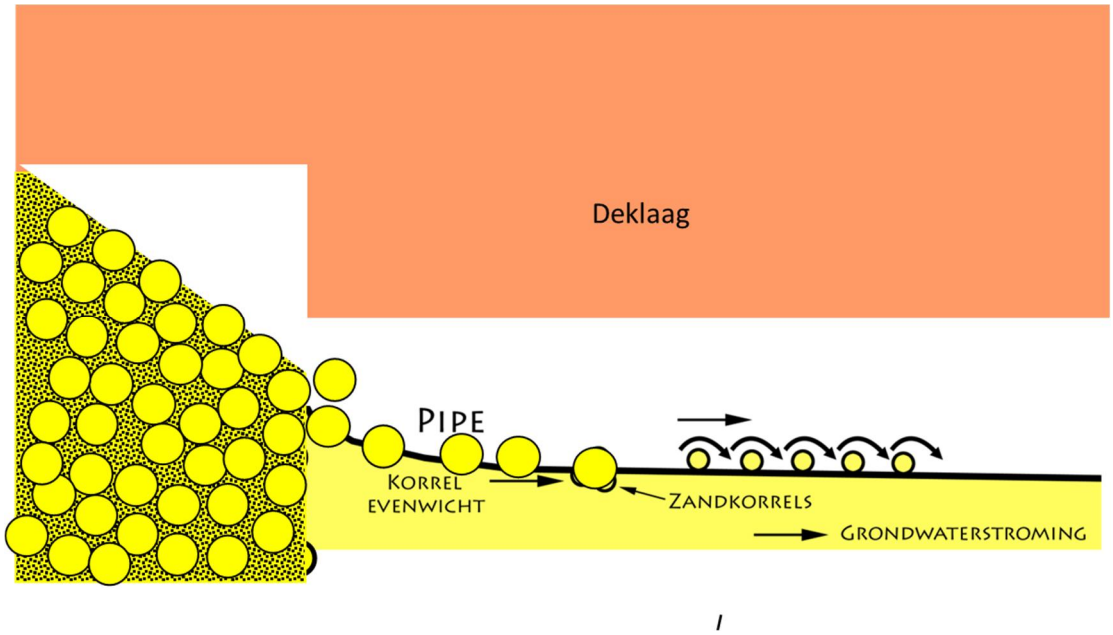
De sterkte van de grofzandbarrière (met een vlakke aansluiting op de deklaag) berust echter in grote mate op primaire erosie: wanneer de pipe bij de grofzandbarrière aankomt, ondervindt de pipe meer weerstand tegen erosie. Wanneer het verval hoger wordt, verdiept alleen de pipe, maar kan de pipe niet verder groeien in de grofzandbarrière, zolang de weerstand tegen pipevorming (door primaire erosie) niet overschreden wordt. De pipe groeit dan verder parallel aan en benedenstrooms van de grofzandbarrière in het fijne zand. Door het verdiepen van de pipe verdwijnt de weerstand in de pipe, waardoor de secundaire erosie niet meer bepalend is voor doorgroei: de sterkte van de grofzandbarrière berust dan alleen op de primaire erosie. Het Sellmeijer-model is daardoor niet geschikt voor het vaststellen van de sterkte van een grofzandbarrière. In het reeds aangehaalde haalbaarheidsonderzoek is primaire erosie bestudeerd en gekwantificeerd.

In wisselwerking met deze studie naar de toepasbaarheid van de grofzandbarrière bij Gameren bleek dat door de toepassing van voorlopig afgeleide semi-probabilistische veiligheidsfactoren de bovenstaande benadering (dit is een vlakke aansluiting van de bovenkant van de barrière aan de onderkant van de slappe deklaag) onvoldoende veiligheid zal bieden. Daarbij kwam de notie dat een dergelijke horizontale aansluiting in de praktijk door een in het algemeen variabele diepteligging van de klei-zand-overgang zelden exact gerealiseerd zal kunnen worden, naast het feit dat deze klei-zand-overgang in de praktijk lang niet altijd even scherp aanwezig is. Daarom is in een latere fase van het haalbaarheidsonderzoek ook de zogenoemde inkassing onderzocht, waarbij de grofzandbarrière enigszins naar boven toe uitsteekt in de deklaag. Dit bleek extra sterkte op te leveren. Hierna wordt de inkassing kort toegelicht. Opgemerkt wordt dat de andere denkbare variant, de zogenoemde uitstulping waarbij de bovenzijde van de grofzandbarrière juist dieper ligt dan de bovenzijde van het omgevingszand (met boven de grofzandbarrière een ondoorlatend materiaal), als gevolg van driedimensionale stromingseffecten juist ongunstiger werkt; de sterkte van de grofzandbarrière kan dan namelijk alleen benut worden op die plaatsen waar de pipe naar beneden groeit.

In Figuur 2 is een grofzandbarrière geschetst voor de situatie waarbij de benedenstroomse pipe net bij de grofzandbarrière is aangekomen. In Figuur 3 is een latere fase weergegeven, waarbij het grove zand uit de inkassing deels is afgevoerd en nu op de bodem van de benedenstroomse pipe ligt.

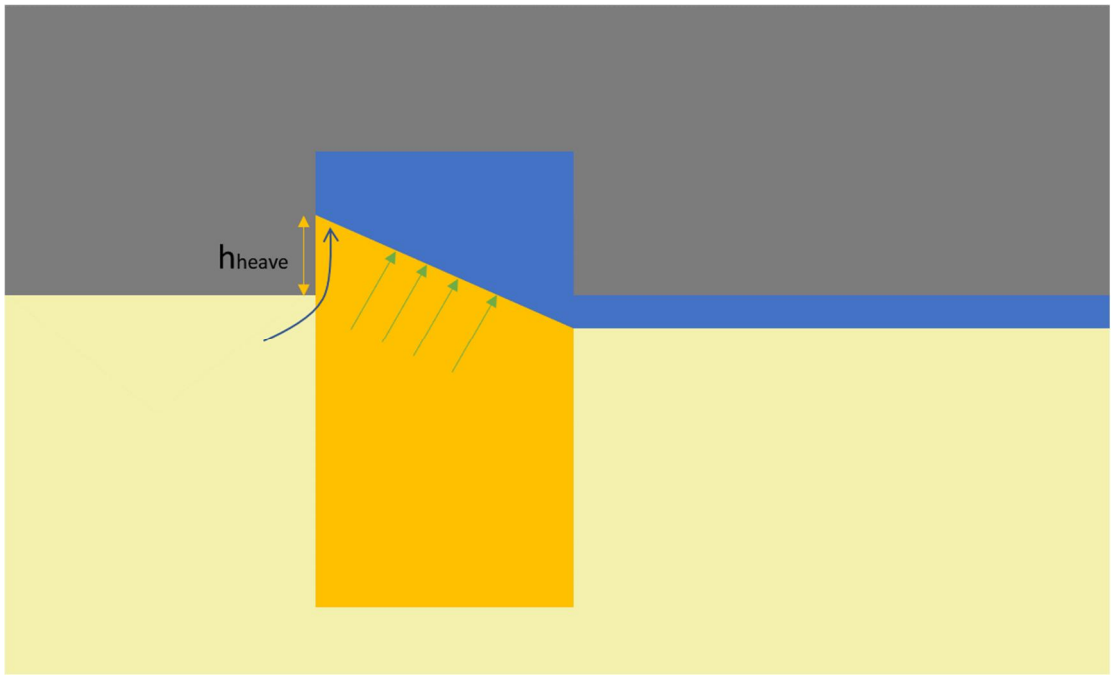


Figuur 2 Grofzandbarrière met inkassing: pipe aangekomen bij grofzandbarrière.



Figuur 3 Grofzandbarrière met inkassing; vorming van een helling in de grofzandbarrière.

Voor deze situatie met een inkassing bepaalt het criterium van Van Rhee & Bezuijen (1992) de minimaal optredende hellingshoek, die de hoogte van het verticale gedeelte aan de bovenstroomse zijde bepaalt, zie Figuur 4. Het heavecriterium van Terzaghi bepaalt tenslotte wanneer daar falen optreedt.



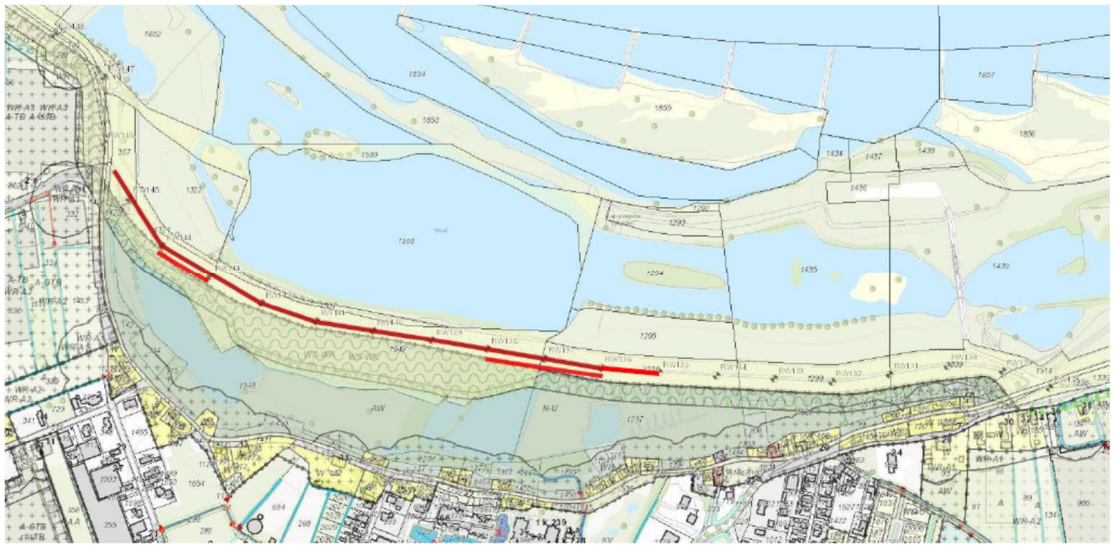
Figuur 4 Bepalende parameters bij een inkassing.

1.3 Faalmechanismen grofzandbarrière

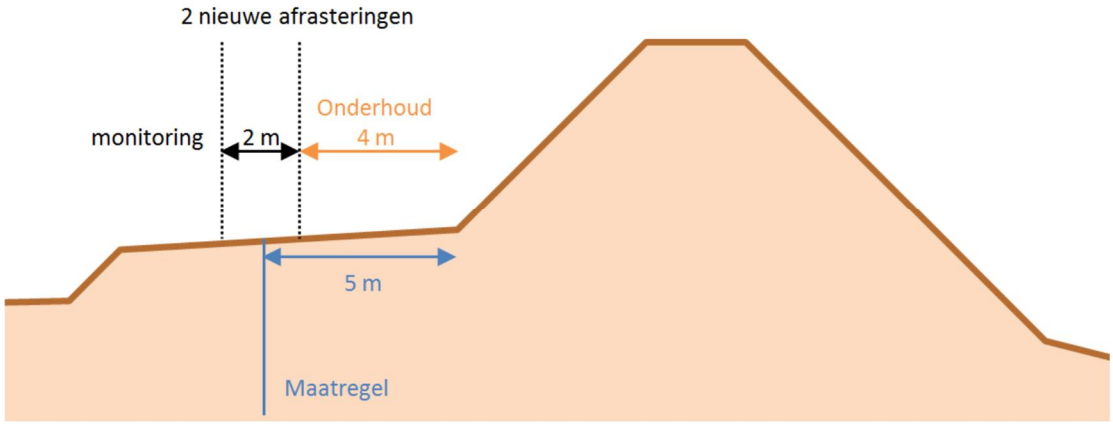
In het voorgaande is beschreven waar een grofzandbarrière zijn sterkte aan ontleent. Dit geldt voor het ideale geval van een adequaat ontwerp, dat naar behoren is uitgevoerd en waarbij een goed beheer plaatsvindt. Er zijn echter allerhande oorzaken denkbaar waardoor falen al eerder zou kunnen optreden, bijvoorbeeld door een verkeerde ondergrond-schematisering bij het ontwerp, ontmenging van het barrièremateriaal tijdens de uitvoering of doorgraven van de barrière naderhand, bijvoorbeeld door knaag- en graafdieren. Deze worden geadresseerd in een aanzet tot een ontwerp- en beoordelingsrichtlijn voor de grofzandbarrière, die geïntegreerd is met de verwerking van de resultaten uit deze rapportage (Koelewijn, 2021). De aanpak is daarbij analoog aan de aanpak voor de enigszins vergelijkbare pipingpreventiemaatregel met een verticaal zanddicht geotextiel zoals beschreven in de “Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel” (Taal, 2017).

1.4 Pilotlocatie Gameren

De locatie bij Gameren, die hoog op de urgentielijst van het Hoogwaterbeschermings-programma staat, is door Waterschap Rivierenland uitgekozen als pilotlocatie voor de grofzandbarrière, dat het voorkeursalternatief vormt voor het gedeelte dat is aangegeven in Figuur 5. Als terugvaloptie is hier een VZG mogelijk, of desnoods een damwand als kwelscherm. Deze verticale oplossingen passen allemaal binnen het huidige profiel van de kering (zie Figuur 6), waardoor er voor deze versterking op het faalmechanisme ‘opbarsten en piping’ geen grootschalige grondaankopen nodig zijn (De Wit, 2018).



Figuur 5 Scope dijkverbetering Gameren (De Wit, 2018).



Figuur 6 Principe-locatie van de te nemen verticale maatregel in het dwarsprofiel (De Wit, 2017).

1.5 Leeswijzer

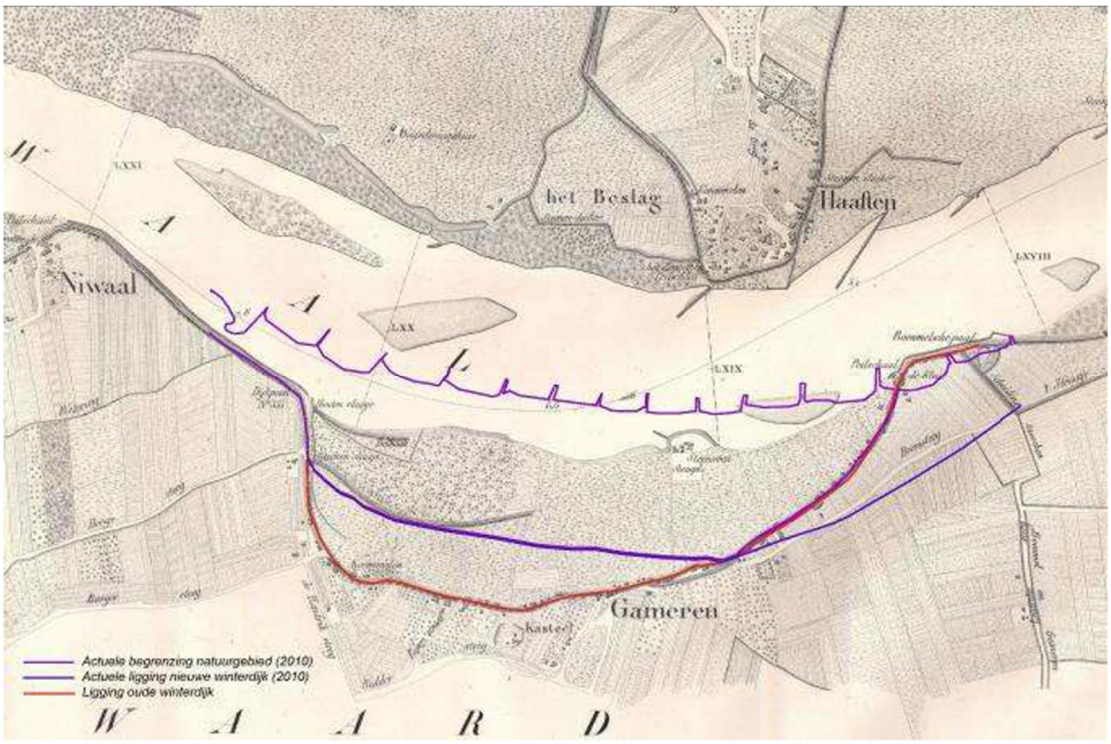
In hoofdstuk 2 worden de beschikbare gegevens beschreven. Hoofdstuk 3 gaat in op de schematisering van de ondergrond op basis van de beschikbare gegevens. In hoofdstuk 4 worden de grondwaterstromingsberekeningen beschreven waarmee de doorlatendheden van de verschillende grondlagen zijn gekalibreerd. In hoofdstuk 5 wordt aangegeven in hoeverre de nieuw verkregen inzichten in de ondergrondopbouw invloed hebben op de uitkomsten van de veiligheidsbeoordeling met de aangepaste rekenregel van Sellmeijer. Hoofdstuk 6 gaat in op de keuze van het barrièremateriaal. In hoofdstuk 7 worden de berekeningsresultaten beschreven uitgaande van een ideaal functionerende grofzandbarrière met een vlakke aansluiting (de situatie zoals getoond in Figuur 1) voor elk van de tien onderscheiden dwarsprofielen. Uit een bij de configuratie passende veiligheidsbenadering blijkt echter dat hiermee voor Gameren onvoldoende veiligheid wordt bereikt. In hoofdstuk 8 zijn de berekeningsresultaten beschreven voor de situatie met een inkassing (zie Figuur 2 en Figuur 3) en is de keuze beschreven van de dwarsprofielen en de geometrie van de grofzandbarrière voor de definitieve analyse, die elders is beschreven door Koelewijn (2021).

2 Beschikbare gegevens

2.1 Situatieschets

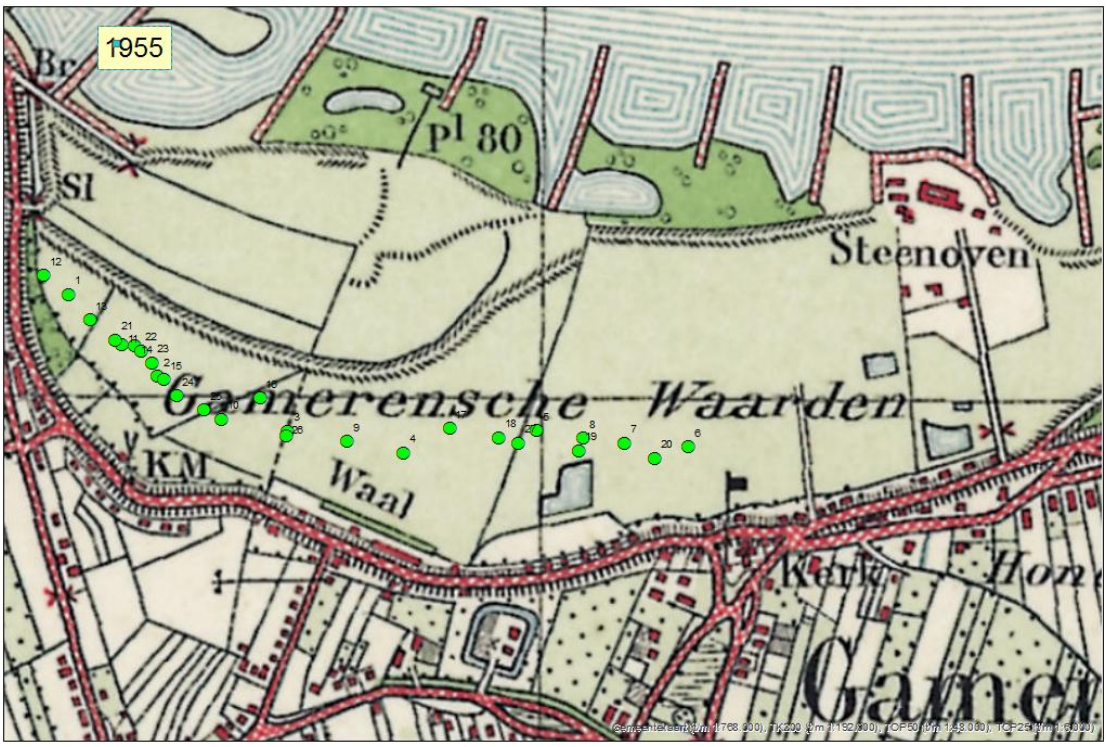
De huidige primaire kering is van betrekkelijk recente datum en ligt in een voormalige uiterwaard van de Waal. Ten westen van RW138 lag al in 1832 een (lage) kade, ten oosten daarvan ligt pas sinds eind jaren 1990 een dijk. De als primaire waterkering aangemerkte dijk is toen naar buiten verlegd om de lintbebouwing langs de oude Waalbandijk te sparen. De maaiveldhoogte varieert sterk door de aanwezigheid van bermen, kleiputten, opgevulde kleiputten, een grote zandwinput, een nevengeul en restanten van het oorspronkelijke maaiveld.

De Waalbandijk is oorspronkelijk aangelegd rond 1400. Eind 19e eeuw zijn leikades en kribben gebouwd. Tussen 1955 en 1965 zijn kleiputten gegraven in het centrale gedeelte van wat tegenwoordig het gebied tussen de oude en de nieuwe dijk vormt. De westelijke kleiput is tussen 1965 en 1975 gegraven. Deze westelijke put ligt nog grotendeels open, terwijl de centrale putten grotendeels zijn opgevuld. Na 1975 is een diepe zandwinput gegraven, welke begin deze eeuw grotendeels is opgevuld met baggerspecie van onbekende samenstelling (Visser, 2004). In Figuur 7 tot en met Figuur 13 is de ruimtelijke ontwikkeling van het gebied in de afgelopen twee eeuwen in zeven stappen zichtbaar gemaakt.

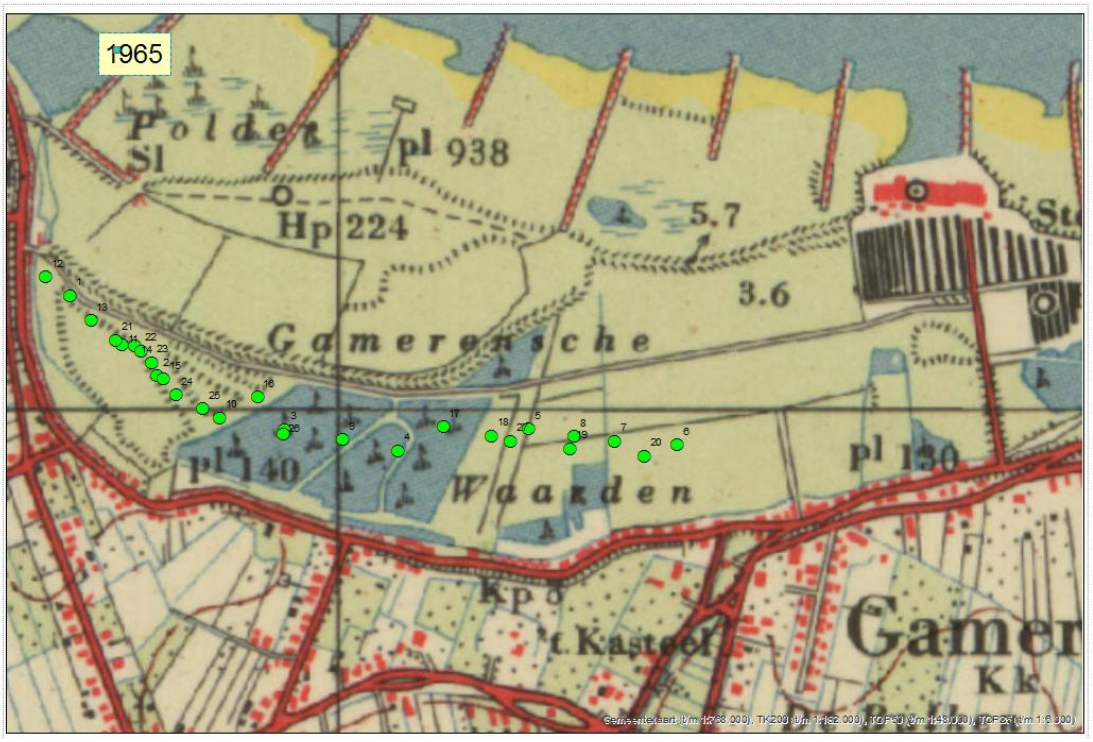


Figuur 7 Topografische kaart uit 1832 met de Waalbandijk, de huidige primaire kering en de huidige kribben.

Figuur 8 Topografische kaart uit 1901 met de voorjaar 2017 uitgevoerde boringen.

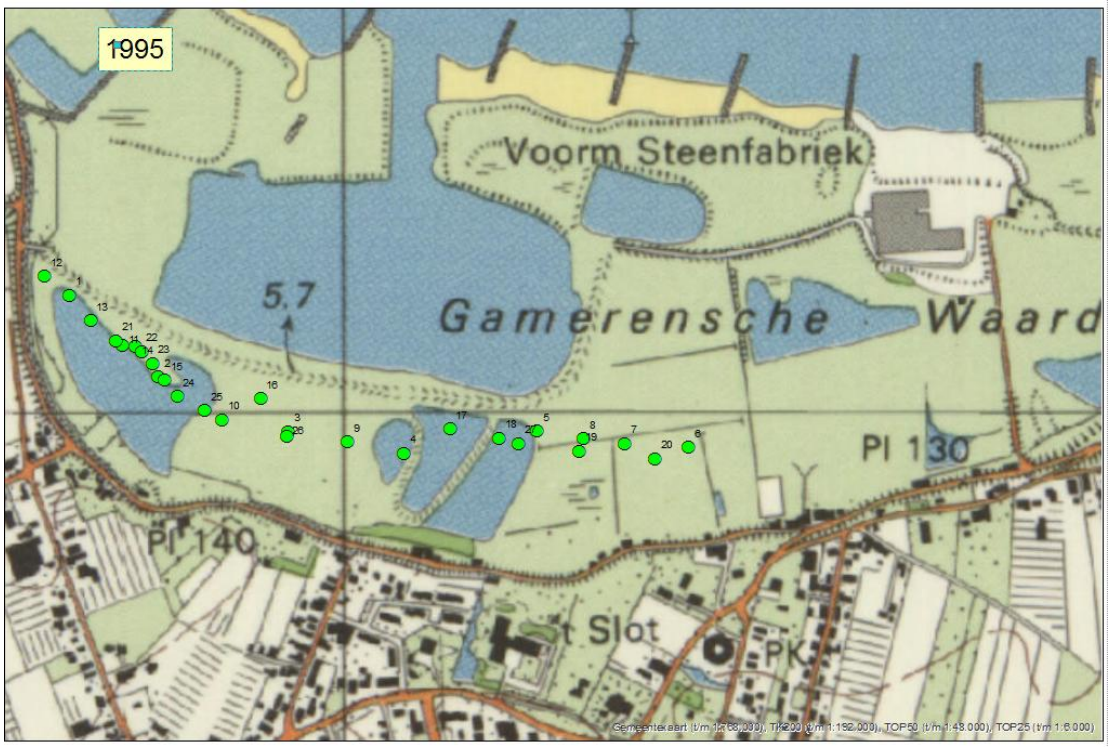


Figuur 9 Topografische kaart uit 1955 met de voorjaar 2017 uitgevoerde boringen.



Figuur 10 Topografische kaart uit 1965 met de voorjaar 2017 uitgevoerde boringen.

Figuur 11 Topografische kaart uit 1975.



Figuur 12 Topografische kaart uit 1995 met de voorjaar 2017 uitgevoerde boringen.

Figuur 13 Luchtfoto uit 2018 met alle in het voorjaar van 2019 beschikbare boringen.

Uit de landschappelijke ontwikkeling volgt dat de ondergrondopbouw in de eerste meters plaatselijk sterk verstoord is. Voor een grofzandbarrière is van groot belang wat de variatie in de hoogteligging van de pipinggevoelige zandlaag kan zijn. Volgens een verkennende studie (Van Beek et al., 2019) bedraagt de variatie maximaal 0.09 m/m, maar zal deze variatie bij natuurlijke afzettingen in het rivierengebied op plaatsen waar klei of silt bovenop het dekzand ligt, door versoepeling vervlakt zijn tot maximaal een orde van grootte van 0.025 m/m. Er moet echter ook rekening worden gehouden met variaties door menselijke ingrepen, variërend van prehistorische vuurplaatsen tot onrendabele randen van kleiputten. Specifiek voor Gameren geldt volgens Hijma (2020) dat hellingen en scherpe overgangen van 0.1 tot 0.3 m/m, dat wil zeggen een hoogteverschil van 0.1 tot 0.3 m over horizontaal 1 m, als realistisch beschouwd mogen worden. Wat betreft de ruimtelijke frequentie van deze

hoogteverschillen schrijft Hijma (2021) dat in Gameren hoogteverschillen van 5 tot 10 cm iedere 5 à 10 m verwacht mogen worden en hoogteverschillen tot 30 cm iedere 10 à 50 m kunnen voorkomen. De hoogteverschillen zijn van belang voor de inpassing van de grofzandbarrière en de hoogte van de toe te passen inkassing, rekening houdend met de vereiste hoogte om de ultieme sterkte te kunnen benutten.

Verder zijn de hoogteverschillen mede bepalend voor de kans dat de zijdelingse pipeontwikkeling langs de benedenstroomse kant van de grofzandbarrière stokt, hetgeen van belang is voor het optreden van stromingsconcentraties aan de uiteinden van deze zijdelingse pipes. In Rosenbrand et al. (2021) is een tabel opgenomen met de waarschijnlijkheid van verschillende afstanden waarover deze zijdelingse pipeontwikkeling kan plaatsvinden. Deze is hieronder (vertaald) overgenomen.

Tabel 1 Scenario's voor mogelijke afstanden waarover de zijdelingse pipeontwikkeling plaatsvindt (tabel 5.8 uit Rosenbrand et al. (2021)).

Totale lengte van de zijdelingse pipeontwikkeling	Waarschijnlijkheid en uitleg
5 m	Een ontwikkeling tot [slechts] 5 m lijkt **onwaarschijnlijk**, dit zou betekenen dat er op korte onderlinge afstand twee vrij abrupte heterogeniteiten aanwezig zijn die allebei het proces van zijdelingse pipeontwikkeling tot staan brengen.
10 m	**Wat meer waarschijnlijk**
50 m	**Meest waarschijnlijk**
Onbeperkt over de gehele lengte van de grofzandbarrière	**Minder waarschijnlijk**, het is vrij waarschijnlijk dat de heterogeniteiten op enig punt de pipegroei beperken.

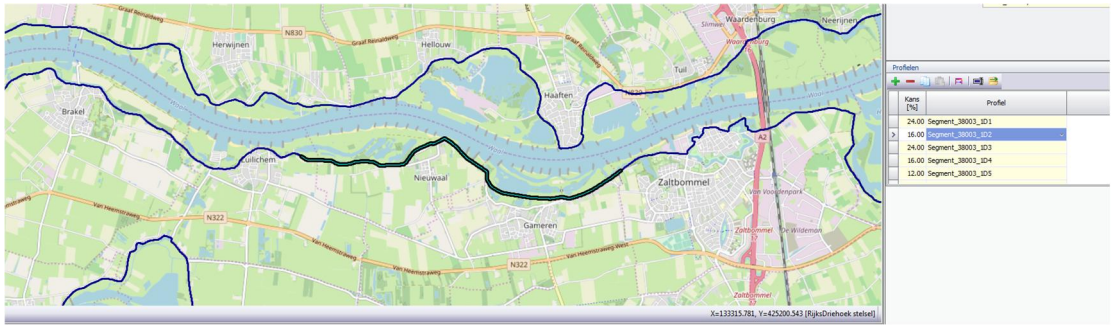
2.2 Grondonderzoek

Van de locatie is betrekkelijk veel grondonderzoek beschikbaar. Ouder grondonderzoek heeft geleid tot de basis-ondergrondschematisering zoals deze binnen het WBI-SOS beschikbaar is gesteld. Het dijkgedeelte bij Gameren maakt deel uit van SOS-segment 38003, waarvan de beschikbare gegevens vermeld staan in Tabel 2 en Figuur 14. Dit levert een eerste indicatie voor de ondergrondsamenstelling.

Tabel 2 Opbouw WBI-SOS-segment 38003.

Profiel	Kans (%)	Bovenzijde (m + NAP)	Grondlaag	Maximale diepte (m)	Minimale diepte (m)	Doorlatendheid (m/dag)
1D1	24	3 2.5 0.5 -1 -6	9093_H_Ro_z&k 9094_H_Ro_z&k 9096_H_Rk_k 9097_H_Rk_vk 9101_P_Rg_zg	3 2.75 1 0 -4.5	3 2 0 -2 -8	15 15 40
1D2	16	3 2.75 1 0 -4.5	9093_H_Ro_z&k 9095_H_Rk_k 9096_H_Rk_k 9097_H_Rk_vk 9101_P_Rg_zg	3 2.75 1 0 -4.5	3 2 0 -2 -8	15 40
1D3	24	3 2.5 0.5 -6	9093_H_Ro_z&k 9094_H_Ro_z&k 9098_H_Ro_z&k 9101_P_Rg_zg	3 2.75 1 -4.5	3 2 0 -8	15 15 15 40
1D4	16	3 2.5 0.5 -6	9093_H_Ro_z&k 9095_H_Rk_k 9098_H_Ro_z&k 9101_P_Rg_zg	3 2.75 1 -4.5	3 2 0 -8	15 15 40

Profiel	Kans (%)	Bovenzijde (m + NAP)	Grondlaag	Maximale diepte (m)	Minimale diepte (m)	Doorlatendheid (m/dag)
1D5	12	3	9093_H_Ro_z&k	3	3	15
		2.5	9094_H_Ro_z&k	2.75	2	15
		0.5	9099_H_Rg_zm	1	0	15
		-3	9100_H_Rk_ko	-2	-4	
		-6	9101_P_Rg_zg	-4.5	-8	40
1D6	8	3	9093_H_Ro_z&k	3	3	15
		2.5	9095_H_Rk_k	2.75	2	
		0.5	9099_H_Rg_zm	1	0	15
		-3	9100_H_Rk_ko	-2	-4	
		-6	9101_P_Rg_zg	-4.5	-8	40



Figuur 14 Dijkgedeelte waarvoor WBI-SOS-segment 38003 geldig is (dikkere lijn westelijk van Zaltbommel).

Meer recent uitgevoerd grondonderzoek betreft onder andere onderzoek dat door Wiertsema en Partners in 2015 is gerapporteerd (Westerhof, 2015) en een reeks handboringen uitgevoerd door Deltares op de locaties aangegeven in Figuur 7 tot en met Figuur 10 en Figuur 12, die zijn gerapporteerd door Hijma (2017).

In 2017 is een grootschalig aanvullend grondonderzoeksprogramma geïnitieerd, bestaande uit sonderingen, boringen, geofysisch onderzoek, oppervlakte- en grondwatermonitoring en bepalingen van de korrelverdeling (Förster, 2017). Dit is uitgevoerd door Wiertsema en Partners en eind december 2018 gerapporteerd (Stellema, 2018). Naderhand is nog een viertal sonderingen vanaf de buitenkruinlijn van de dijk uitgevoerd, welke gerapporteerd zijn in Stellema (2019). Eind 2019 zijn door Fugro nog 2 HPT-AMPT-sonderingen en 4 HPT-MPT-sonderingen uitgevoerd met als doel over de diepte lokale waarden voor de doorlatendheid en anisotropie te verkrijgen (Duizendstra, 2019).

Het uiteindelijk beschikbare grondonderzoek in de directe omgeving van het project, met uitzondering van de handboringen uit 2017 en het onderzoek door Fugro, is getoond in Figuur 13.

Het algemene beeld, dat hieruit naar voren komt, is:
- boven NAP -5 m: sterk antropogene en sterk heterogene afwisseling van afzettingen;
- rond NAP -5 m: dunne afsluitende laag, vermoedelijk basisveen;
- tussen NAP -5 m en NAP -15 m: zeer fijn tot zeer grof zand, beetje klei, leem en veen;
- tussen NAP -15 m en NAP -27 m: (zeer) grof zand, grindig zand, fluviale afzettingen;
- onder NAP -27 m: (matig) grof zand, fluviale afzetten.

Een echte afsluitende deklaag ontbreekt in een groot deel van het gebied, niet alleen ter plaatse van de kleiputten, maar ook daarbuiten. Er is sprake van een opbouw waar een deklaag amper aanwezig is en er onder de dijk een dik zandlichaam ligt dat tot in het Pleistoceen doorloopt, met ten dele een dunne slechtdoorlatende veenlaag daartussen. Vanuit dat zandlichaam lopen dunnere zandlagen richting binnendijks. Verder komen

binnendijks sterk siltige en behoorlijk zandige kleien voor. Deze opbouw behoort tot één van de meer gangbare bodemopbouwen in dit deel van het riviergebied.

2.3 Oppervlaktewater- en grondwatermonitoring

Het waterpeil in de Waal wordt door Rijkswaterstaat gemeten bij Vuren en bij Zaltbommel. Om over lokale data te kunnen beschikken zijn daarom peilmeters voorgesteld in de buitendijkse zandwinput en eveneens in twee van de binnendijkse kleiputten (Förster, 2017). In december 2017 zijn drie peilmeters geplaatst zoals aangegeven in Figuur 15 (gebaseerd op De Graaf, 2019). Opgemerkt wordt dat de buitendijkse peilmeter zich direct bovenstrooms van de vernauwing van de geul bij de brug naar de voormalige steenfabriek bevindt. Voor de grondwatermonitoring zijn 17 peilbuizen geplaatst zoals aangegeven in Figuur 16 (gebaseerd op De Graaf, 2019). Deze grondwatermonitoring is doorgezet tot in maart 2020 en gerapporteerd in De Graaf (2020). In hoofdstuk 4 wordt bij de kalibratie van de grondwatermodellen nader ingegaan op de kwaliteit van de verkregen data.

Figuur 15 Locaties peilmeters, binnendijks bij RW137+027 en RW142+016 (kleiputten), buitendijks bij RW129+062 (direct bovenstrooms van de brug).

Figuur 16 Locaties peilbuizen.

2.4 Maatgevende peilen

Voor de maatgevende ontwerpwaterstand wordt voor het buitenwater uitgegaan van NAP +9,00 m. In het uitgangspuntenrapport (De Wit, 2017) wordt dit ook als uitgangspunt genoemd voor het dijkvak RW137 – RW145 voor de grofzandbarrière met als zichtjaar 2075 en bij een maximaal toelaatbare faalkans van 1/10.000 per jaar. Voor het dijkvak RW135 – RW137 wordt daarin echter een ontwerpwaterstand van NAP +8,97 m aangegeven. Voor zover die 3 cm een verschil maakt: hier wordt bij de uiteindelijke interpretatie van de maatgevende berekeningen rekening mee gehouden.

Voor de waterstand aan de polderzijde van de primaire kering geldt een peil van NAP +1,80 m als maatgevend (De Wit, 2017). Hierbij is als uitgangspunt genomen dat de waterpartijen vollopen tot naastliggend maaiveld, overeenkomstig de analyse in Bisschop & Hofschreuder (2016). Een mogelijke kwelkomfunctie, waarbij het gebied tussen de oude en de nieuwe primaire kering tijdens hoogwater volstroomt, is daarbij niet meegenomen. In de huidige situatie vindt de afwatering van dit gebied echter plaats via een duiker met een diameter van 800 mm onder de oude dijk door, ter hoogte van RW 136. De uitstroomdrempel ligt op NAP +1,74 m (Cremer, 2017). Bij ernstige kwel is het peil van NAP +1,80 m daardoor niet te handhaven. Overigens wordt in de huidige praktijk de buis eenvoudigweg dichtgezet als de kwel teveel toeneemt, zodat het peil dan zeker verder zal stijgen. Met deze afwijkende, hogere waterstand wordt in het vervolg van deze rapportage echter geen rekening gehouden; dit kan in de toekomst, binnen de tijdhorizon van de komende dijkversterking, immers wijzigen.

Voor de hoogteligging is gebruik gemaakt van AHN3, aangevuld met inmetingen van de waterpartijen uit Stellema (2018).

3 Ondergrondschematiseringen

3.1 Inleiding

Op basis van de beschikbare informatie zijn schemateringen gemaakt van de ondergrond. De uiteindelijke schematiseringen worden in dit hoofdstuk beschreven. Hierbij is het van belang te vermelden dat het maken van deze schematiseringen een iteratief proces is geweest, deels doordat de informatie over de ondergrond gefaseerd beschikbaar kwam, deels doordat initiële schematiseringen en verkennende berekeningen daarmee leidden tot nieuwe vragen en identificatie van witte vlekken die soms van dermate grote invloed op de berekeningsresultaten waren dat deze tenminste voor een deel ingevuld moesten worden om tot zinvolle uitkomsten te komen. Dit gold bijvoorbeeld voor de bodemdiepte van de zandwinput en de aanwezigheid van de basisveenlaag.

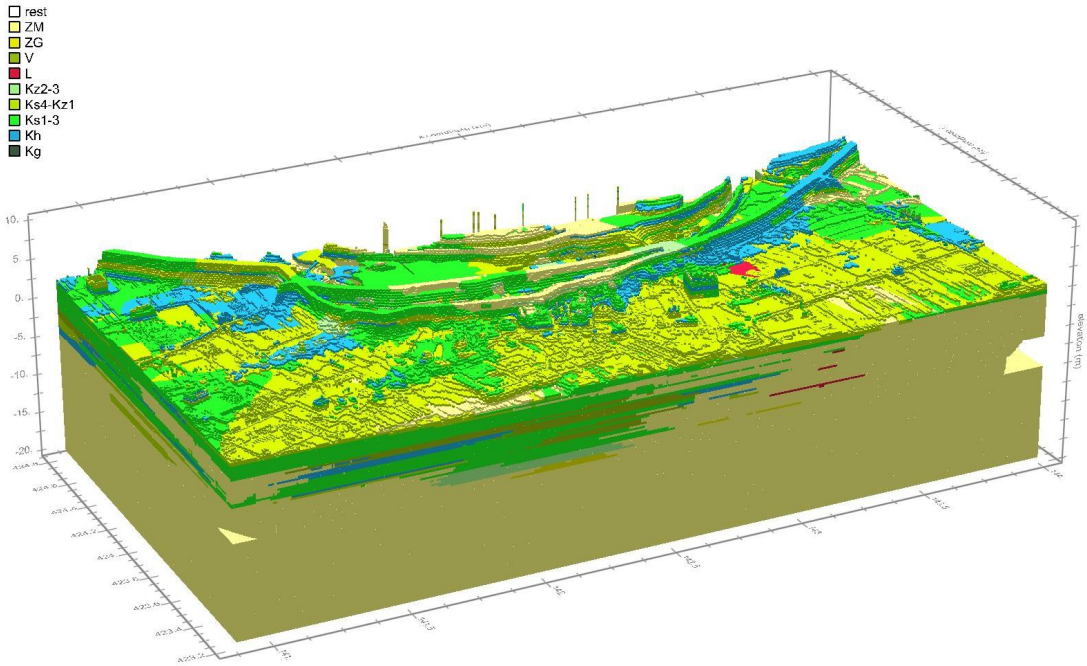
In dit hoofdstuk wordt eerst ingegaan op het 3D-model van de ondergrond, waarna de beschikbare informatie over de aan- of afwezigheid van slechtdoorlatende lagen op enige diepte is uitgelicht. In de tien paragrafen daarna worden de tien schematiseringen beschreven die gelijkmatig verdeeld zijn over het dijktraject waar de toepassing van de grofzandbarrière is voorzien.

3.2 3D-model Amir Argaman

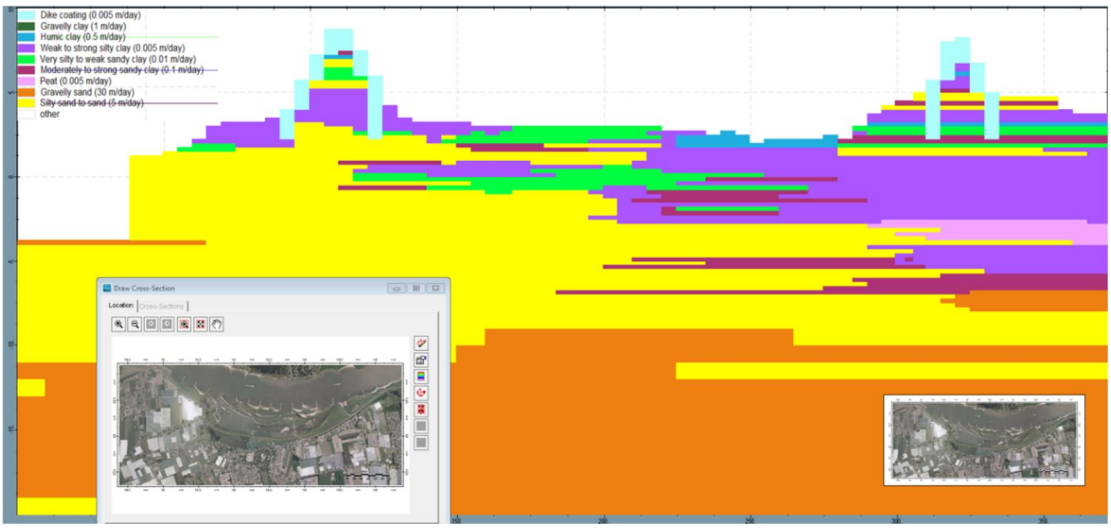
Het afstudeerwerk van Amir Argaman (2018) was gericht op de ontwikkeling van een driedimensionaal ondergrond- en grondwatermodel van het projectgebied. Hiervoor zijn alle destijds beschikbare gegevens gebruikt. Destijds waren de peilbuisgegevens zoals genoemd in §2.3 nog niet beschikbaar en zijn tien observatieputten met dagelijkse metingen over de voorafgaande vier jaar die beschikbaar waren in DINO benut. Deze putten liggen binnendijks van de oude dijk.

Door de relatief grote hoeveelheid beschikbare data kon vooral in de bovenste meters zonder veel inhoudelijke bezwaren door interpolatie tot een aannemelijke modellering worden gekomen. Er is een zogenoemd voxel-model gemaakt, bestaande uit blokken van horizontaal 5 bij 5 meter, met een dikte van 0,25 m tussen het maaiveld en NAP -8 m en een dikte van 1,0 m daaronder, tot NAP -20 m. De 57 categorieën aan grondsoorten die zijn onderscheiden in de onderliggende gegevens zijn samengevoegd tot 9 categorieën. Een impressie van het resulterende model is weergegeven in Figuur 17. Dit model kan op allerlei manieren worden bekeken, bijvoorbeeld laag-voor-laag of in dwarsdoorsneden (zie Figuur 18 en Figuur 19 voor enkele voorbeelden).

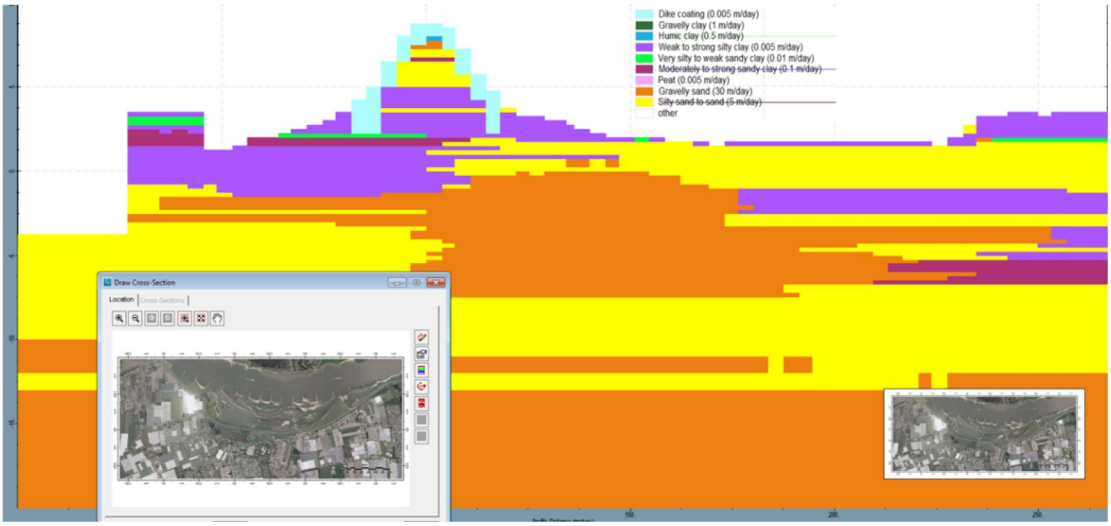
Het model is van nut geweest voor de selectie van een drietal - naar verwachting - maatgevende doorsneden voor het ontwerp van de grofzandbarrière, ter hoogte van RW137+000, RW141+050 en RW143+060. De uitkomsten van de initiële berekeningen voor deze drie doorsneden vormden een belangrijke aanleiding voor aanvullend grondonderzoek (om uitsluitsel te verkrijgen over aspecten met een grote invloed op de uitkomst van de berekeningen) en om over te gaan op in totaal tien dwarsdoorsneden, één per circa 100 m (vanwege de sterke variabiliteit van de ondergrond en vanwege het gebrek aan ervaring met de modellering van een grofzandbarrière in grondwaterstromingsberekeningen, waardoor inschattingen welke invloeden maatgevend zijn niet altijd met vertrouwen gemaakt konden worden).



Figuur 17 Impressie 3D-ondergrondmodel van Gameren door Amir Argaman. Zicht in noordnoordoostelijke richting.



Figuur 18 Voorbeeld van een doorsnede uit het model-Argaman, hier nabij RW137.



Figuur 19 Voorbeeld van een doorsnede uit het model-Argaman, hier nabij RW143.

3.3 Diepliggende afsluitende lagen

In de analyse van een grofzandbarrière is de grondwaterstroming een zeer belangrijke factor. Voor de belasting op de grofzandbarrière is een goede modellering van de ondergrond van cruciaal belang, niet alleen in de directe omgeving van de grofzandbarrière, maar ook op ruime afstand ervan. Voor de situatie bij Gameren zijn van belang de instroming vanuit de rivier en dan vooral vanuit de nevengeul met de grotendeels weer opgevulde zandwinput, de stroming richting de grofzandbarrière en daaronderdoor, en de stroming richting het achterliggende gebied, zowel het gedeelte voor de oude Waalbandijk als daarachter.

De aan- of afwezigheid van een slechtdoorlatende grondlaag, zoals een basisveenlaag, heeft hierbij een grote invloed op de uitkomsten van de berekeningen: als het bovenste gedeelte van het zandpakket in de omgeving van de grofzandbarrière geohydrologisch geïsoleerd is van het dikkere onderliggende pakket, dan reduceert dit de belasting aanzienlijk.

In Tabel 3 is een overzicht gegeven van alle diepere sonderingen die van het projectgebied beschikbaar zijn en waar relevante slechtdoorlatende lagen, indien aanwezig, in voorkomen. Er zijn geen diepe boringen beschikbaar.

De informatie is gerangschikt naar de locatie langs de dijk en grotendeels terug te vinden in Stellema (2018), dit met uitzondering van de vier sonderingen op de buitenkruinlijn van de nieuwe dijk en de zes HPT-(A)MPT-sonderingen. Deze zijn gerapporteerd in Stellema (2019) en Duizendstra (2019). Van iedere sondering is aangegeven op welke diepte (of dieptes) een slechtdoorlatende laag begint; in de meeste gevallen is deze normaliter niet meer dan 0,3 m dik. Met één of twee vraagtekens is eventuele onzekerheid benoemd, zoals nader toegelicht in de legenda onder de tabel. Ook is aangegeven tot welke diepte de sondering is uitgevoerd, hetgeen in enkele gevallen een verklaring biedt waarom een diepliggende laag wel in de ene sondering terugkomt maar niet in de andere. In de volgende paragrafen wordt voor elk dwarsprofiel aangegeven hoe deze informatie is verwerkt.

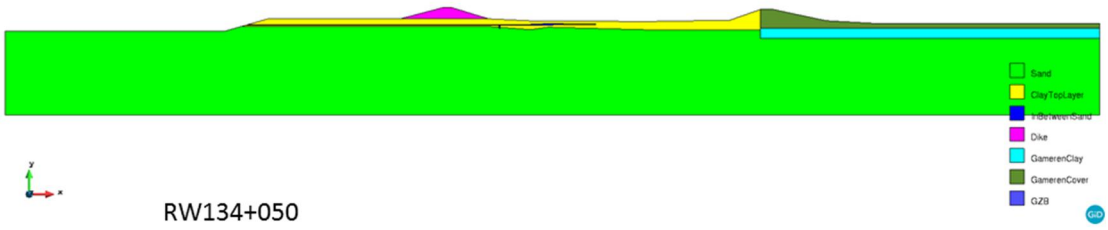
Tabel 3 Gegevens over slechtdoorlatende lagen uit diepere sonderingen.

Locatie	Diepte afsluitende laag (m + NAP)	Diepte sondering (m + NAP)
134+003 AL	---	-11.5
134+082 AL	-17.2 ?	-25.5
135+003 BIT	-5.5 ? én vanaf -22.4	-25.5
135+071 BIT	-3.8 & -24.5	-25.0
135+072 AL	-4.3	-14.5
136+015 AL	-8.4 ?	-25.5
136+031 AL	-5.3 ?	-13.0
136+043 BIT	-7.8	-25.0
136+051 BUK	-7.0	-10.8
136+073 BIT (AMPT)	-9.0	-16.5
137+000 AL (MPT)	-8.6	-14.0
137+001 AL	-8.0	-25.5
137+044 BIT	-8.3	-25.0
137+079 BIT	-6.3 ??	-24.5
138+062 AL	-6.0	-25.0
139+001 BUK	---	-10.8
139+030 AL	-5.0 & -20.0	-25.0
139+041 AL	-6.4	-25.3
139+051 AL	-7.8	-15.0
140+023 AL	-3.7	-25.5
141+002 AL	-5.8	-25.0
141+035 AL	-5.7	-25.0
141+047 AL	-7.3	-24.5
141+050 BUK	---	-10.8
141+048 BIT (AMPT)	-6.5	-10.6
141+048 BUT (MPT)	-7.6	-12.1
141+053 BIT (MPT)	-6.1	-20.2
142+019 AL	-6.3	-24.0
143+000 BUK	-9.8	-10.8
143+038 AL	-5.2 ?? &-9.3 ??	-25.5
143+040 BIT (MPT)	-7.8	-19.6
143+065 VL	-7.8	-12.5
143+077 AL	-6.2	-23.7
144+026 BIT	-6.2	-24.0
144+072 VL	---	-13.5

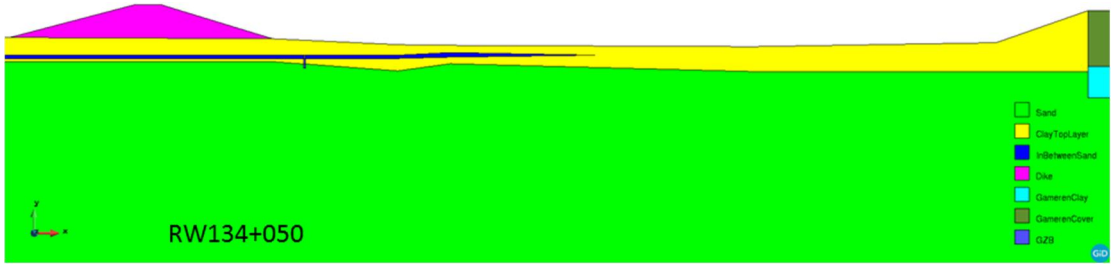
Aanvullende legenda bij de middelste kolom: ? = geen sterke verandering in sondeerwaarden, zoals elders,
?? = geen sterke verandering in sondeerwaarden én amper invloed op waterspanningsverloop.

3.4 Profiel RW134+050

In Figuur 20 is de uiteindelijk gebruikte schematisering weergegeven voor het dijkgedeelte tussen RW134+000 en RW135+000. In Figuur 21 is het gedeelte nabij de grofzandbarrière uitvergroot weergegeven. Een punt van aandacht is dat de verschillende grondlagen niet met de gangbare kleuren zijn aangegeven. Bovendien verschillen de kleuren per dwarsprofiel. De grofzandbarrière is in de legenda aangegeven als 'GZB'. De benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière is hier, net als in alle andere profielen, in aansluiting op Figuur 6, gemodelleerd op 5 m binnendijks van de huidige binnenteen van de nieuwe dijk. De onderzijde van het model ligt in alle profielen op NAP -40 m.



Figuur 20 Overzicht schematisering voor dwarsprofiel RW134+050. De afstand tussen de buitenkruinlijn van de nieuwe dijk (links in de figuur) en de buitenkruinlijn van de oude dijk (rechts) bedraagt 145 m.

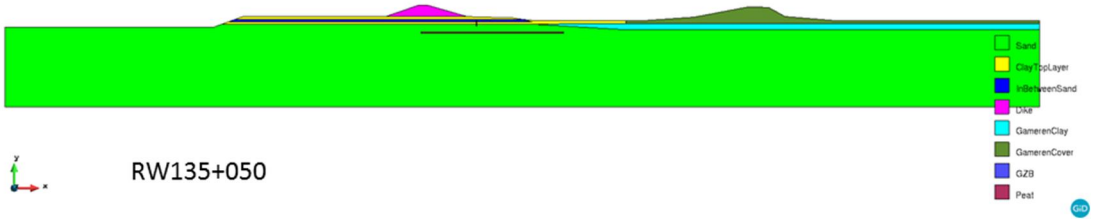


Figuur 21 Gedeelte uit de vorige figuur in de omgeving van de grofzandbarrière uitvergroot.

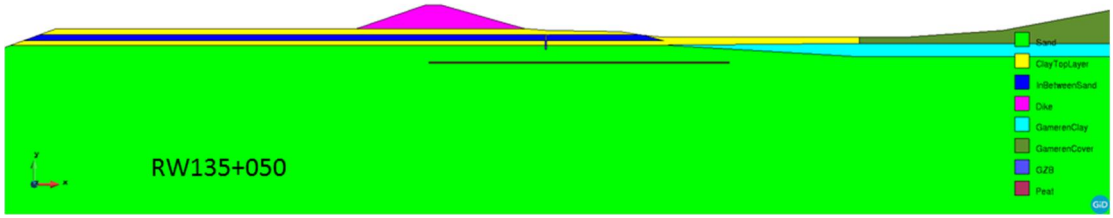
Voor de ligging van het landoppervlak is voor dit profiel en voor alle andere profielen gebruik gemaakt van AHN3. Voor de bodemligging buitendijks in de geulen en de zandwinput is gebruik gemaakt van bijlage 13 van Stellema (2018) en voor de bodemligging van de kleiputten binnendijks van bijlage 12 van Stellema (2018). Voor deze schematisering is gebruik gemaakt van de sonderingen 134+003_GS_AL, 134+082_DKMP2_AL en 135+003_DKMP2_BIT en de boringen 134+050_HB_BIT, 134+073_HB_BIT, 134+081_B_AL, 135+001_B, 135+006_HB_AL en 135+009_HB_BIT (Stellema, 2018). In dit profiel zijn geen aanwijzingen voor de aanwezigheid van een basisveenlaag. Sondering 136+051_BUK (Stellema, 2019) geeft hier wel aanwijzingen voor, maar die sondering kan hooguit als ondersteunend bewijs worden gebruikt en overtuigt niet voor dit profiel. De beëindiging van de tussenzandlaag in een punt op 70 m vanaf de buitenkruinlijn betreft een arbitraire keuze; tussen 48 m en 94 m vanaf de buitenkruinlijn is geen nadere informatie beschikbaar.

3.5 Profiel RW135+050

In Figuur 22 is de uiteindelijk gebruikte schematisering weergegeven voor het dijkgedeelte tussen RW135+000 en RW136+000. In Figuur 23 is het gedeelte nabij de grofzandbarrière uitvergroot weergegeven.



Figuur 22 Overzicht schematisering voor dwarsprofiel RW135+050. De afstand tussen de buitenkruinlijnen van de nieuwe en de oude dijk bedraagt 159 m.



Figuur 23 Gedeelte uit de vorige figuur in de omgeving van de grofzandbarrière uitvergroot.

Voor deze schematisering is gebruik gemaakt van de sonderingen 135+003_BIT, 135+071_BIT, 135+072_GS_AL, 136+015_DKMP2_AL, 136+043_DKMP2 en 136+051_BUK en de boringen 135+030_HB_BIT, 135+042_HB_AL, 135+043_HB_AL, 135+054_HB_BIT, 135+060_HB, 135+061_HB, 135+069_HB_BIT en 136+063_HB_BUT (Stellema, 2019).

In dit profiel zou op grond van voornoemde gegevens een volledig doorlopende basisveenlaag aanwezig kunnen zijn vanaf het slappe-lagenpakket onder de oude

Waalbandijk tot voorbij de nieuwe dijk, begrensd door oude riviergeulen en ontgravingen. De basisveenlaag zou hier echter ook vrijwel volledig afwezig kunnen zijn, of over een gedeelte van het profiel aanwezig zijn. Er is hier voor gekozen om op dit punt dezelfde schematisering te hanteren als voor het aangrenzende profiel RW136+050, waarvoor een kalibratie is uitgevoerd waarbij de gevoeligheidsanalyse met name op dit punt geconcentreerd is, zie §4.3.

In dit profiel is er ook enige onzekerheid ten aanzien van de bodemopbouw nabij de oude Waalbandijk. Als basisschematisering is uitgegaan van een relatief doorlatende kleilaag bij Gameren die richting de primaire kering doorloopt tot iets voorbij de buitenteen van de oude Waalbandijk (zoals aangegeven in Figuur 22 en Figuur 23), met een kleilaag daar direct onder (de lichtblauwe laag in beide figuren). Het is op basis van de beschikbare informatie echter even goed mogelijk dat de topkleilaag verder doorloopt, eventueel ruwweg tot aan de buitenkruinlijn van de oude Waalbandijk. Ook zou hier de onderliggende laag uit zand kunnen bestaan. Deze varianten zijn daarom eveneens doorgerekend.

3.6 Profiel RW136+050

De berekeningen voor Gameren zijn aanvankelijk opgezet voor een drietal representatief geachte doorsneden, ter hoogte van RW137+000, RW141+080 en RW143+050, toen een deel van het aanvullende grondonderzoek zoals gerapporteerd door Stellema (2018) nog niet beschikbaar was. De meest ongunstige resultaten werden toen verkregen voor RW137+000.

Vervolgens is meer grondonderzoek beschikbaar gekomen en kwamen ook de eerste grondwatermonitoringsgegevens (De Graaf, 2019) beschikbaar. Hiermee kon voor het profiel RW136+050 een kalibratie worden uitgevoerd (zie §4.3). De schematisering die op basis van de kalibratie uiteindelijk het meest aannemelijk wordt geacht is weergegeven in Figuur 24, met nadere details rond de grofzandbarrière in Figuur 25. De verschillen met Figuur 18 laten zich verklaren uit het in §3.2 genoemde aanvullende grondonderzoek en het feit dat het model van Amargan soms aanleiding kon geven tot artefacten in de grafische weergave.

Figuur 24 Overzicht schematisering voor dwarsprofiel RW136+050. De afstand tussen de buitenkruinlijnen van de nieuwe en de oude dijk bedraagt 208 m.

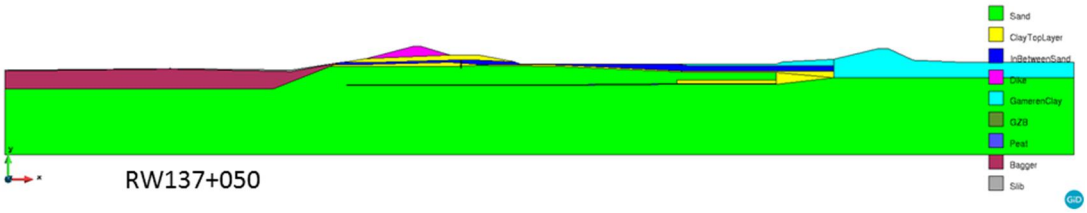
Figuur 25 Gedeelte uit de vorige figuur in de omgeving van de grofzandbarrière uitvergroot.

Voor deze schematisering is gebruik gemaakt van de sonderingen 135+003_DKMP2_BIT, 135+071_DKMP2_BIT, 135+072_GS3_AL, 136+015_DKMP2_AL, 136+031_GS3_AL, 136+043_DKMP2_BIT,137+001_DKMP2_AL, 137+044_DKMP2_BIT, 137+079_DKMP2_BIT, in mindere mate de sonderingen 134+003_GS3_AL en 134+082_DKMP2_AL, verder de boringen 135+001_B_BIT, 135+006_HB_AL,

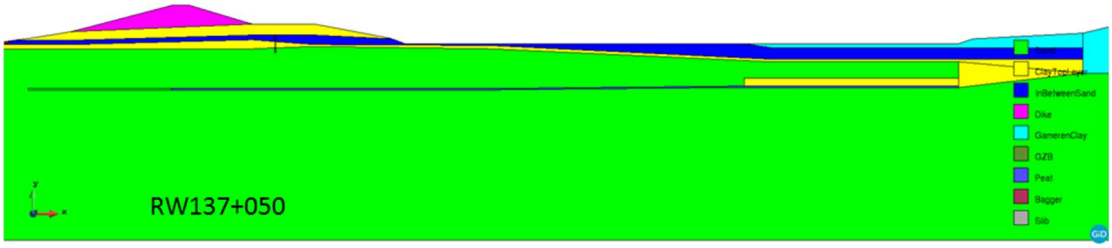
135+043_HB_AL, 135+061_HB_AL, 135+069_B_BIT, 136+016_B_AL, 136+022_HB_AL, 136+040_HB_BIT, 136+056_HB_AL, 136+063_HB_BUT, 136+072_HB_AL, 137+001_HB_AL, 137+009_HB_AL, 137+009_B_AL, 137+041_B_BIT, 137+079_HB_BIT, 138+061_B_AL, en in mindere mate de boringen 134+081_B_AL, 135+007_HB_AL, 135+042_HB_AL, 135+060_HB_AL, 136+021_HB_AL, 136+041_HB_BIT, 136+057_HB_AL, 137+080_HB_BIT, 138+008_HB_AL, 138+009_HB_AL en 139+024_HB_BUT (Stellema, 2018), en tenslotte de grond- en oppervlaktewatermonitoring zoals beschreven in hoofdstuk 4. De sondering op 136+051_BUK (Stellema, 2019) bevestigt de aanwezigheid van de veenlaag, zelfs wat verder dan is aangenomen. Hierop wordt nader ingegaan bij de bespreking van de berekeningsresultaten.

3.7 Profiel RW137+050

In Figuur 26 is de uiteindelijk gebruikte schematisering weergegeven voor het dijkgedeelte tussen RW137+000 en RW138+000. In Figuur 27 is het gedeelte nabij de grofzandbarrière uitvergroot weergegeven.



Figuur 26 Overzicht schematisering voor dwarsprofiel RW137+050. De afstand tussen de buitenkruinlijnen van de nieuwe en de oude dijk bedraagt 211 m.



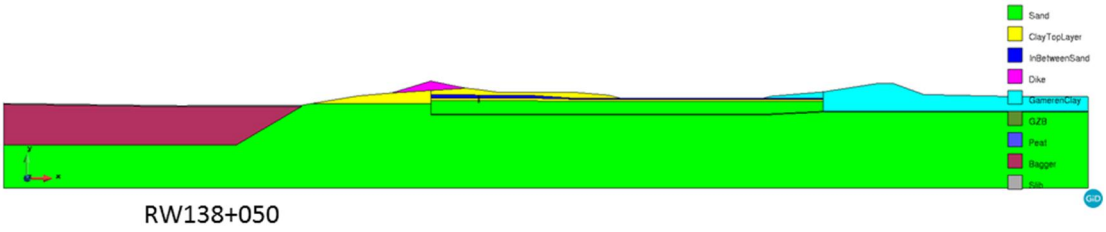
Figuur 27 Gedeelte uit de vorige figuur in de omgeving van de grofzandbarrière uitvergroot.

Voor deze schematisering is gebruik gemaakt van de sonderingen 137+001_DKMP2_AL, 137+044_BIT en 137+079_BIT en de boringen 137+001_HB, 137+013_HB_BIT, 137+039_HB_BIT, 137+059_HB_BIT, 137+079_HB, 137+080_HB, 137+081_HB en in mindere mate de boringen 136+063_BUT, 136+072_HB_AL, 138+002_B_AL 138+008_HB, 138+009_HB (Stellema, 2018). Sondering 136+051 (Stellema, 2019) heeft naderhand een bevestiging van de aanwezigheid van de veenlaag tot onder de buitenkruinlijn opgeleverd.

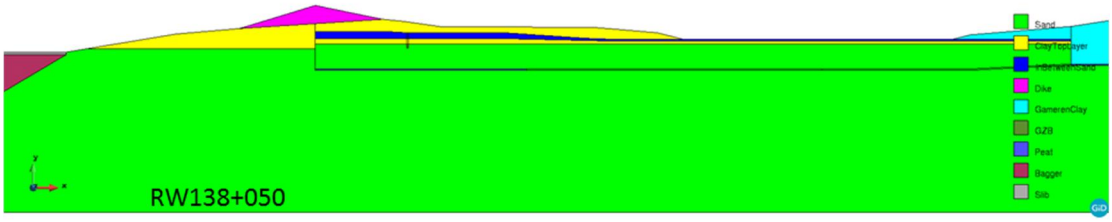
In bovenstaande figuren is de variant weergegeven met een veenlaag tot 30 meter buitenwaarts van de buitenkruinlijn, in de basis is echter uitgegaan van een veenlaag tot aan de buitenkruinlijn. Daarnaast is gevarieerd met het wel of niet doorlopen van de zandlaag nabij de oude Waalbandijk, hetgeen tot opsluiten van grondwater in de tussenzandlaag kan leiden.

3.8 Profiel RW138+050

In Figuur 28 is de uiteindelijk gebruikte schematisering weergegeven voor het dijkgedeelte tussen RW138+000 en RW139+000. In Figuur 29 is het gedeelte nabij de grofzandbarrière uitvergroot weergegeven.



Figuur 28 Overzicht schematisering voor dwarsprofiel RW138+050. De afstand tussen de buitenkruinlijnen van de nieuwe en de oude dijk bedraagt 204 m.



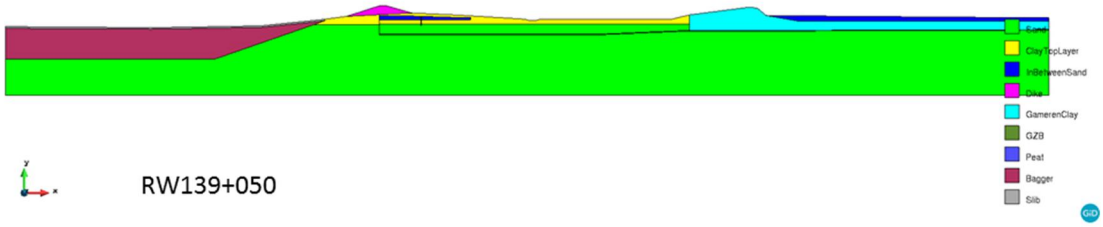
Figuur 29 Gedeelte uit de vorige figuur in de omgeving van de grofzandbarrière uitvergroot.

Voor deze schematisering is gebruik gemaakt van de sonderingen 137+079, 138+062 en in mindere mate sondering 139+030, en de boringen 138+002_B, 138+008_HB, 138+009_HB, 138+018, 138+040, 138+061_B, 138+064 en in mindere mate de boringen 137+079_HB, 137+081_HB, 139+016_HB, 139+017_HB, 139+024_HB_BUT, 139+029 en 139+030 (Stellema, 2018).

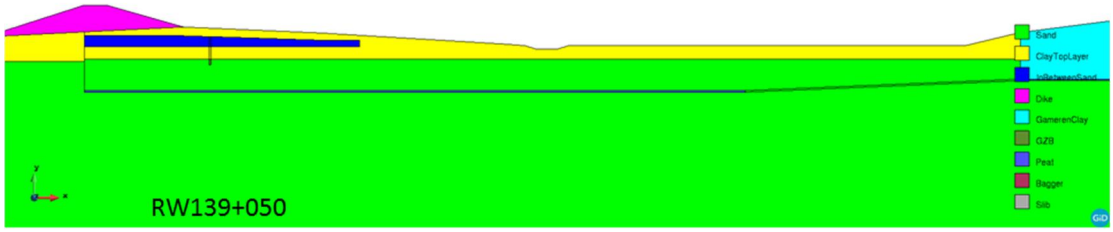
Ook in dit profiel bestaat onzekerheid over de mate waarin de veenlaag aanwezig is. In sondering 139+001_BUK (Stellema, 2019) is deze afwezig, maar in boring 138+062_AL, op 45 meter binnenwaarts van de buitenkruinlijn, is deze duidelijk aanwezig. Ook in de naburige sondering 137+079 op 17 meter binnenwaarts van de buitenkruinlijn lijkt sprake te zijn van een zwakke laag op die diepte.

3.9 Profiel RW139+050

In Figuur 30 is de uiteindelijk gebruikte schematisering weergegeven voor het dijkgedeelte tussen RW139+000 en RW140+000. In Figuur 31 is het gedeelte nabij de grofzandbarrière uitvergroot weergegeven.



Figuur 30 Overzicht schematisering voor dwarsprofiel RW139+050. De afstand tussen de buitenkruinlijnen van de nieuwe en de oude dijk bedraagt 201 m.



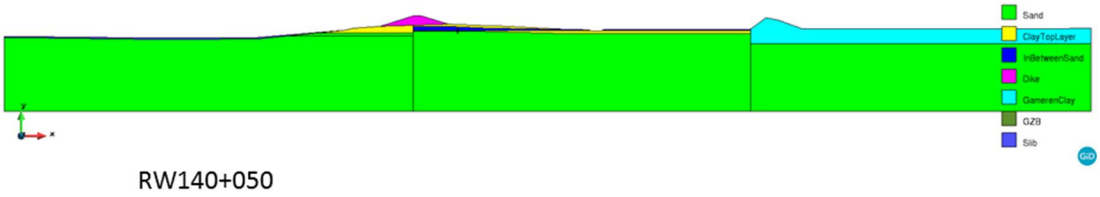
Figuur 31 Gedeelte uit de vorige figuur in de omgeving van de grofzandbarrière uitvergroot.

Voor deze schematisering is gebruik gemaakt van de sonderingen 139+030, 139+041, 139+051_GS3 en de boringen 139+002_HB_BIT, 139+016, 139+017, 139+024_BUT, 139+025_HB_BIT, 139+029_B, 139+038_HB_AL, 139+047_HB_BIT, 139+062, 139+065, 139+069_HB_BIT, 140+005_AL, 140+006_AL en de mindere mate de boring 140+003_HB_BIT (Stellema, 2018).

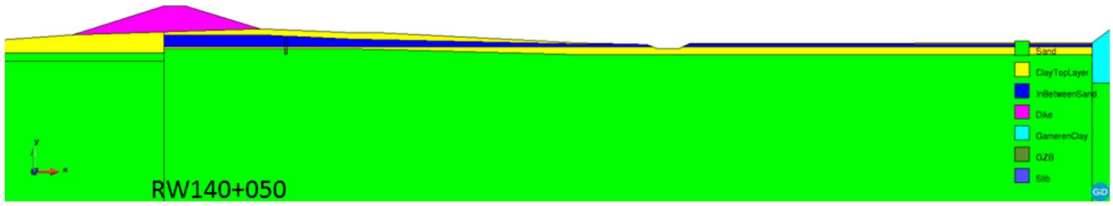
De veenlaag is niet terug te vinden in de later beschikbaar gekomen sondering op de buitenkruinlijn (139+001_BUK uit Stellema (2019)), maar wel in de sonderingen 139+051_GS3 en 139+041 op resp. 40 en 43 meter binnenwaarts vanuit de buitenkruinlijn. Daarom is de veenlaag opgenomen in de modellering, met als variatie dat deze niet aansluit op het slappe-lagenpakket onder de oude Waalbandijk en het dorp Gameren, maar afwezig is op het schuine gedeelte in de beide voorgaande figuren.

3.10 Profiel RW140+050

In Figuur 32 is de uiteindelijk gebruikte schematisering weergegeven voor het dijkgedeelte tussen RW140+000 en RW141+000. In Figuur 33 is het gedeelte nabij de grofzandbarrière uitvergroot weergegeven.



Figuur 32 Overzicht schematisering voor dwarsprofiel RW140+050. De afstand tussen de buitenkruinlijnen van de nieuwe en de oude dijk bedraagt 181 m.



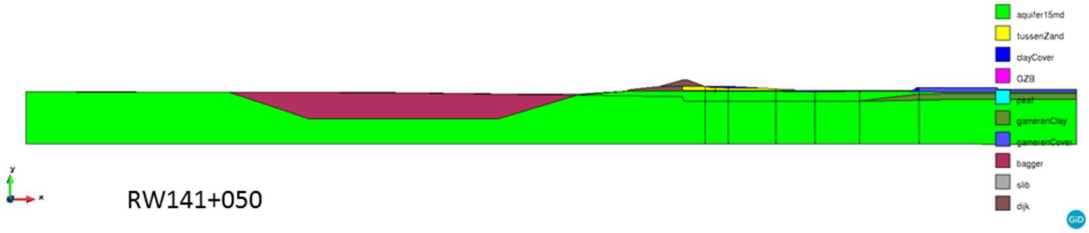
Figuur 33 Gedeelte uit de vorige figuur in de omgeving van de grofzandbarrière uitvergroot.

Voor deze schematisering is gebruik gemaakt van sondering 140+023 en in mindere mate de sonderingen 141+002 en 141+035, de boringen 139+024_HB_BUT, 140+003_BIT, 140+004_HB_AL, 140+005, 140+006, 140+023, 140+026_BIT, 140+048_BIT, 140+067_BiK (oude Waalbandijk), 140+071_BIT, 140+085, 141+006_AL en 141+051_HB_BUT en in mindere mate de boringen 141+002, 141+007_BIT, 141+032_AL en 141+038_AL (Stellema, 2018).

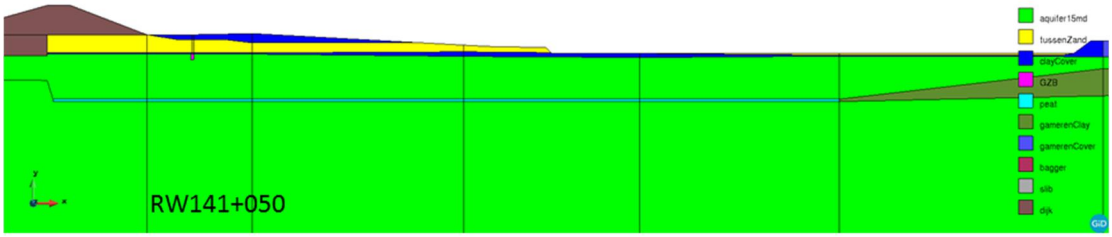
In dit profiel is géén veenlaag gemodelleerd. Weliswaar lijkt er in de sondering 140+023_AL, uitgevoerd op 42 meter binnenwaarts van de buitenkruinlijn, een slechtdoorlatende laag aanwezig te zijn op een diepte van NAP -3,7 m, maar in de boring 140+023_AL, die slechts 2 meter verderop gestoken is, op 44 meter binnenwaarts van de buitenkruinlijn, is tot op een diepte van NAP -4,0 m over een hoogte van ruim 5 meter alleen zand aangetroffen. Ook de later uitgevoerde sonderingen 139+001_BUK en 141+050_BUK (Stellema, 2019) laten geen veenlaag zien, al is in de drie HPT-(A)MPT-sonderingen rond dit laatste punt (Fugro) wel een slechtdoorlatende laag te onderkennen. Dit is echter buiten dit vak.

3.11 Profiel RW141+050

In Figuur 34 is de uiteindelijk gebruikte schematisering weergegeven voor het dijkgedeelte tussen RW141+000 en RW142+000. In Figuur 35 is het gedeelte nabij de grofzandbarrière uitvergroot weergegeven. Dit profiel betreft één van de aanvankelijke drie potentieel maatgevend geachte profielen.



Figuur 34 Overzicht schematisering voor dwarsprofiel RW141+050. De afstand tussen de buitenkruinlijnen van de nieuwe en de oude dijk bedraagt 214 m.



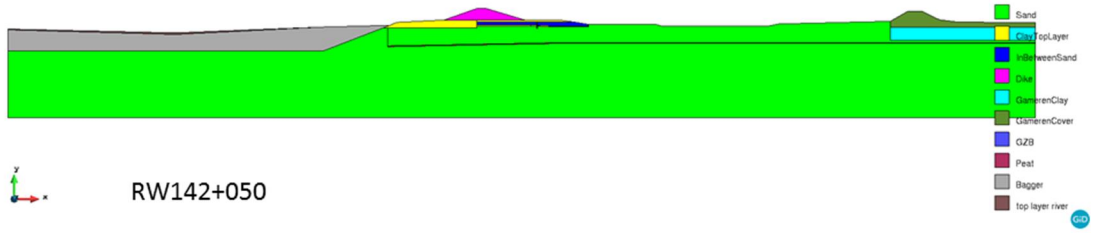
Figuur 35 Gedeelte uit de vorige figuur in de omgeving van de grofzandbarrière uitvergroot.

Voor deze schematisering is gebruik gemaakt van de onderzoekspunten 141+051 in de buitenteen, 141+050 en 143+000 in de buitenkruinlijn, 141+007, 141+028, 141+049 en 141+071 in de binnenteen, 140+085, 141+002, 141+046, 141+047, 141+055, 141+079, 142+007 en 142+017 in het nabije achterland, 141+079, 142+016 en 142+057 in de waterpartij, 141+006 en 141+043 in het verder gelegen achterland, 141+038 in het buitentalud van de oude Waalbandijk, 140+067, 141+035 en 142+070 aan de binnenzijde van de oude Waalbandijk en 141+032_HB en 141+032_B in het dorp (Stellema, 2018).

De aanname lijkt gerechtvaardigd dat hier onder het gehele gebied tussen beide dijken een slechtdoorlatende veenlaag aanwezig is, al is deze niet terug te vinden in sondering 141+050_BUK uit Stellema (2019), maar wel weer in de drie HPT-(A)MPT sonderingen in binnen- en buitenteen rond dezelfde locatie, zoals gerapporteerd in Duizendstra (2019).

3.12 Profiel RW142+050

In Figuur 36 is de uiteindelijk gebruikte schematisering weergegeven voor het dijkgedeelte tussen RW142+000 en RW143+000. In Figuur 37 is het gedeelte nabij de grofzandbarrière uitvergroot weergegeven.



Figuur 36 Overzicht schematisering voor dwarsprofiel RW142+050. De afstand tussen de buitenkruinlijnen van de nieuwe en de oude dijk bedraagt 193 m.

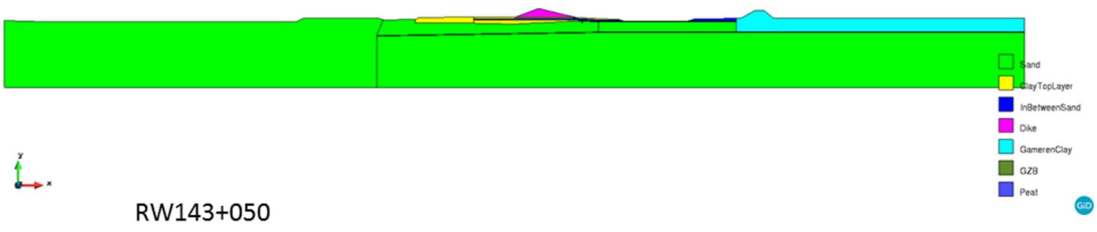
Figuur 37 Gedeelte uit de vorige figuur in de omgeving van de grofzandbarrière uitvergroot.

Voor deze schematisering is gebruik gemaakt van de onderzoekspunten 143+065 in het voorland, 141+051 in de buitenteen, 141+050 en 143+000 in de buitenkruinlijn, 142+007, 142+029, 142+050, 142+072 en 143+009 in de binnenteen, 142+007, 142+017, 142+019 en 143+030 in het nabije achterland, 141+079, 142+016, 142+057 en 143+022 in de waterpartij, 141+043 en 142+033 in het verder gelegen achterland, 141+038 en 143+083 in het buitentalud van de oude Waalbandijk, 140+067, 141+035 en 142+070 aan de binnenzijde van de oude Waalbandijk en 141+032_HB en 141+032_B in het dorp (Stellema, 2018).

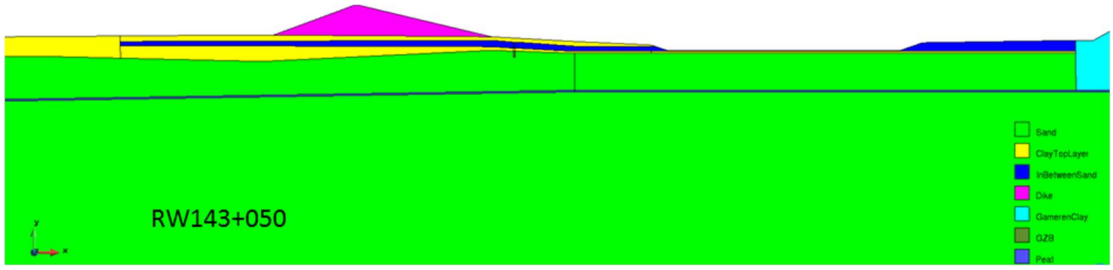
Ook in dit profiel lijkt een slechtdoorlatende laag aanwezig te zijn. Deze is ook te vinden in sondering 143+000_BUK (Stellema, 2019). Het beschikbare grondonderzoek geeft bovendien geen uitsluitsel over de grondopbouw kort achter de huidige binnenteen van de dijk, dus ook in het gedeelte waar de grofzandbarrière is gepland. Het is onduidelijk of de tussenkleilaag die onder de binnenteen gevonden is, richting achterland doorloopt over 5 à 20 meter. Daarnaast is het onzeker of onder de oude Waalbandijk en het dorp Gameren klei of zand aanwezig is op de diepte van het lichtblauwe vlak in beide voorgaande figuren. In de berekeningen is hiermee gevarieerd.

3.13 Profiel RW143+050

In Figuur 38 is de uiteindelijk gebruikte schematisering weergegeven voor het dijkgedeelte tussen RW143+000 en RW144+000. In Figuur 39 is het gedeelte nabij de grofzandbarrière uitvergroot weergegeven. Ook hier laten de verschillen met Figuur 19 zich verklaren uit het in §3.2 genoemde aanvullende grondonderzoek en het feit dat het model van Amargan soms aanleiding kon geven tot artefacten in de grafische weergave.



Figuur 38 Overzicht schematisering voor dwarsprofiel RW143+050. De afstand tussen de buitenkruinlijnen van de nieuwe en de oude dijk bedraagt 134 m.



Figuur 39 Gedeelte uit de vorige figuur in de omgeving van de grofzandbarrière uitvergroot.

Voor deze schematisering is gebruik gemaakt van de sonderingen 143+038_AL, 143+065_VL, 143+077_AL en 144+026_BIT en de boringen 142+070, 143+009, 143+022, 143+030, 143+031, 143+032, 143+054, 143+075_BIT, 143+075_AL, 143+083, 143+084, 144+007 en 144+010 (Stellema, 2018).

Alleen de sonderingen steken diep genoeg om iets te kunnen concluderen over de diepliggende veenlaag. Deze komt telkens terug, maar zal dichter naar de rivier ooit zijn doorsneden door de rivier. De later uitgevoerde sonderingen 143+000_BUK (Stellema, 2019) en 143+040 BIT (Duizendstra, 2019) bevestigen de aanwezigheid van deze laag.

4 Kalibratieberekeningen

4.1 Inleiding

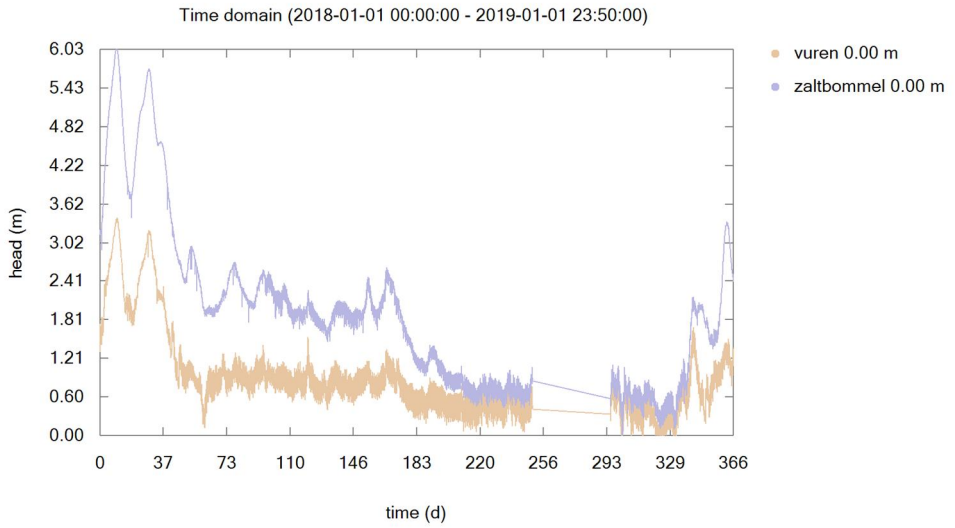
Het functioneren van de grofzandbarrière hangt in belangrijke mate samen met de optredende grondwaterstroming. Naast de schematisering in verschillende grondlagen, zoals weergegeven in het vorige hoofdstuk, is ook een doorlatendheid per grondlaag nodig. Deze kan in eerste instantie worden geschat op basis van algemene waarden per type grondlaag. Wanneer er, zoals hier, peilbuismetingen beschikbaar zijn bij een (beperkt) hoogwater, dan kan door kalibratie een betere schatting worden verkregen. Deze kan vervolgens worden vergeleken met waarden uit andere modellen, zoals het regionale grondwatermodel MORIA, en schattingen op basis van korrelverdelingen.

In dit hoofdstuk wordt in §4.2 ingegaan op de beschikbare gegevens en de mogelijkheden tot kalibratie van de doorlatendheden, vervolgens is de kalibratie beschreven in §4.3 en §4.4. In §4.5 is ingegaan op de interpretatie van de uitkomsten en worden de resultaten vergeleken met andere bronnen en in §4.6 is een voorlopige keuze gemaakt voor de doorlatendheden. Deze waarden zijn later herzien op basis van aanvullende gegevens, zoals vermeld in §4.7. Tot slot wordt in §4.8 ingegaan op de mogelijkheden voor verdere aanscherpingen in de toekomst.

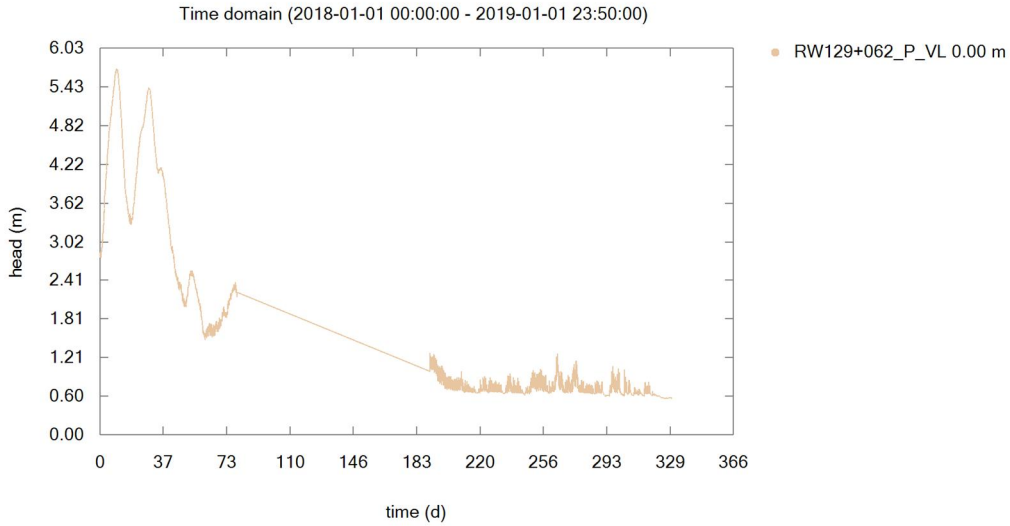
4.2 Beschikbare gegevens en kalibratiemogelijkheden

Voor de kalibratie van de doorlatendheden is primair gebruikgemaakt van de aanvankelijk beschikbare grond- en oppervlaktewatermonitoring (De Graaf, 2019), in combinatie met de ondergrondmodellering op basis van het beschikbare grondonderzoek (Stellema, 2019). Omdat uit de beschikbare gegevens geen debieten kunnen worden afgeleid en er ook geen directe debietmetingen beschikbaar zijn, kunnen alleen de onderlinge doorlatendheidsverhoudingen worden bepaald voor de verschillende grondlagen, maar niet de absolute waarde. Verder kan met deze analyse worden bepaald waar er wel of geen afsluitende lagen aanwezig zijn.

Een dergelijke kalibratie verloopt des te beter naarmate de opgetreden grondwaterstroming meer lijkt op de onder maatgevende omstandigheden te verwachten grondwaterstroming. In januari 2018 was er sprake van een beperkt hoogwater, met de hoogste waterstand sinds 2012. Nadien is nog één keer een significante waterstand bereikt totdat de monitoring werd beëindigd in maart 2020. Aanvankelijk waren echter alleen de hoogwatermetingen van januari 2018 beschikbaar, zoals getoond in Figuur 40 en Figuur 41. Deze figuren tonen respectievelijk de waterstanden in de meest nabijgelegen meetpunten van Rijkswaterstaat (Vuren en Zaltbommel) en de waterstand zoals geregistreerd in de nevengeul, direct bovenstrooms van de brug naar de voormalige steenfabriek.



Figuur 40 Waterstand (m + NAP) in de Rijkswaterstaat-meetpunten van Vuren en Zaltbommel in 2018.



Figuur 41 Waterstand (m NAP) gemeten in de nevengeul bij Gameren, direct bovenstrooms van de brug naar de voormalige steenfabriek (De Graaf, 2019).

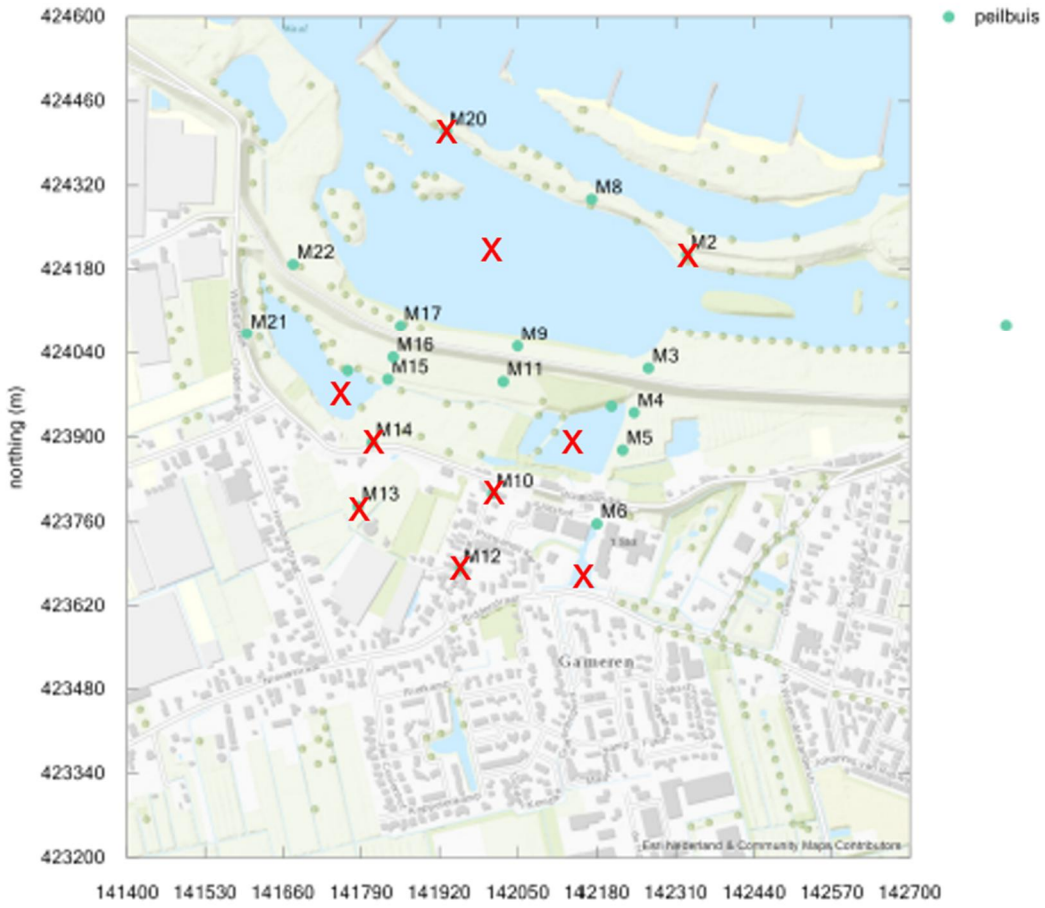
Dit hoogwater kende twee pieken. Daags na de tweede piek is het gebied bezocht door onder andere Laura Taal van Waterschap Rivierenland en Vera van Beek van Deltares. Zij hebben daarbij geconstateerd dat het gebied tussen de huidige en de voormalige primaire kering grotendeels onder water stond, zie ook Figuur 42 voor nadere details waar met behulp van het AHN uit volgt dat de waterstand in het gebied tussen beide dijken circa NAP +2.20 m bedroeg, en dat er sprake was van een grote wel die er schoon uitzag (d.w.z. niet zandmeevoerend was) nabij dijkpaal RW 143 (Van Beek, 2019a; Taal, 2019ab). De informatie over de waterdiepte is bruikbaar voor de kalibratie, aangezien een meting van de oppervlaktewaterstand in het gebeid tussen beide keringen ontbreekt.

Figuur 42 Met donkerrood omkaderd gebied dat bij veldbezoek op 30 januari 2018 circa 15 tot 20 cm onder water stond (Taal, 2019ab).

Begin februari 2021 was er opnieuw een hoogwater op de Waal. Nabij dijkpaal 143 waren op er 5 februari verspreid over een afstand van circa 50 m langs de dijk meerdere kleine zandmeevoerende welletjes te zien, zoals getoond in Figuur 43 (Van Gerven, 2021ab; Flos, 2021). De buitenwaterstand bedroeg toen circa NAP + 5.10 m. De piek van dat hoogwater werd bereikt op 9 februari, met een buitenwaterstand van circa NAP +5.40 m. Daarbij trad geen wezenlijke verandering op in de waarnemingen van de zandmeevoerende wellen; deze zijn alleen rond dijkpaal 143 geconstateerd.

Figuur 43 Kleine zandmeevoerende wellen nabij RW 143 op 5 februari 2021 (Flos, 2021).

In Figuur 44 zijn de beschikbare meetpunten uit De Graaf (2019) getoond. De rode kruisjes geven daarin aan van welke punten er geen gegevens beschikbaar zijn, onder andere omdat de instrumenten nog niet waren geplaatst of door uitval van instrumenten. Bij de latere analyse (zie §4.7) was overigens bij de meeste meetlocaties wel data beschikbaar.



Figuur 44 Overzicht van beschikbare meetpunten (groene bolletjes) en niet-beschikbare meetpunten/meetgebieden (rode kruisjes) voor de hoogwaterperiode van januari 2018.

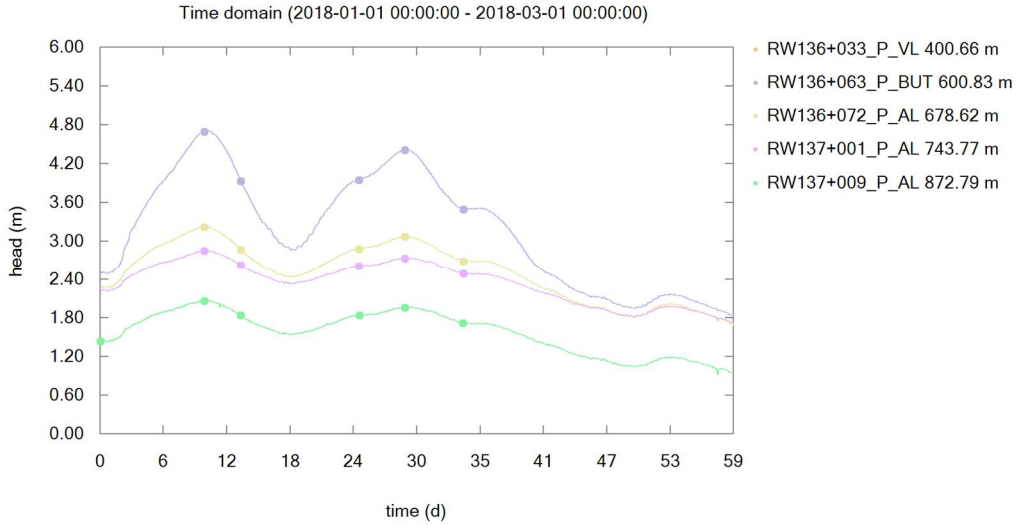
Idealiter zou deze kalibratie met een serie driedimensionale berekeningen moeten worden uitgevoerd. Dit vanwege de mogelijke variaties in doorlatendheid in de ondergrond, die mede als gevolg van de wijze van afzetten en het afzettingsmilieu zijn ontstaan. Bovendien is er hier een gecompliceerde stromingssituatie, met buitendijks de grotendeels weer met gebaggerd materiaal opgevulde zandwinput met bovenin een slibafzetting en binnendijks diverse kleiputten waardoor de deklaag ten dele doorbroken is. Daardoor is er geen sprake van een min of meer tweedimensionale stroming loodrecht op de dijk. Nog los van de daarvoor vereiste rekenkracht is een 3D-analyse door de schaarste aan gegevens onhaalbaar; slechts wanneer van alle meetpunten metingen beschikbaar zouden zijn, heeft een dergelijke aanpak nut. Daarom is een 2D-aanpak gekozen voor de kalibratie op basis van de metingen uit 2018.

De beperkte mogelijkheden met de beschikbare metingen leiden er ook toe dat de kalibratie slechts inzicht geeft in de onderlinge verhoudingen van de doorlatendheden; er worden geen absolute waarden verkregen. Daartoe is namelijk ook (een schatting van) de berging in de deklaag vereist en bij voorkeur ook debietmetingen op één of meer locaties. Overigens is het laatste in de toekomst wel haalbaar bij de duiker onder de oude dijk (zie §2.4), mits daar de

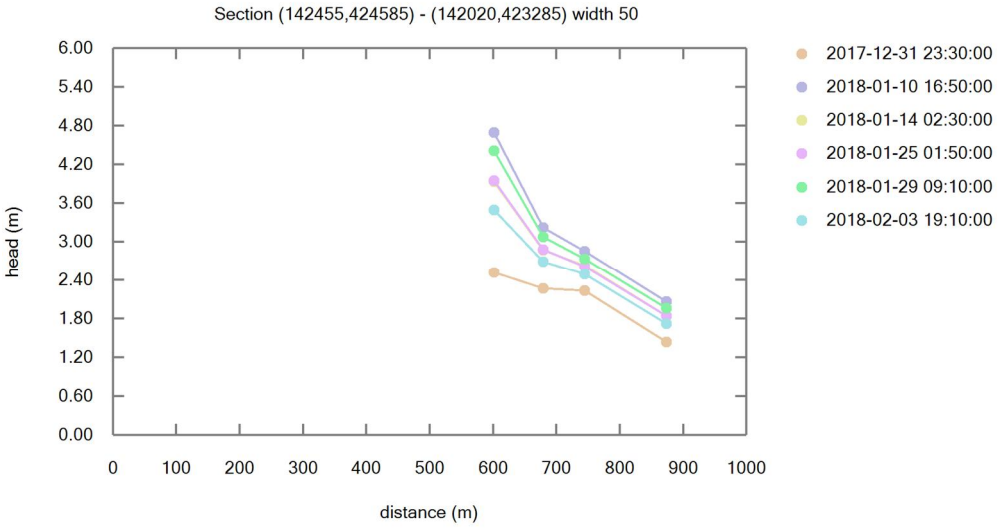
boven- en benedenstroomse peilen worden gemeten. Door voor één van de grondlagen een koppeling te leggen met de absolute doorlatendheid die op een andere manier verkregen is, kan vervolgens voor alle grondlagen tot een onderbouwde waarde van de doorlatendheid worden gekomen.

4.3 Meest oostelijke meetraai

Zoals in Figuur 44 te zien is, zijn de meeste gegevens beschikbaar voor de meest oostelijke meetraai, door de meetpunten M2-M3-M4-M5-M6. Deze meetpunten hebben een filter in de zandlagen, zoals aangegeven in Stellema (2019). Van de eerste van deze meetpunten, M2, is geen waarde beschikbaar. Het verloop van de overige meetwaarden voor januari en februari 2018 zijn weergegeven in Figuur 45. In Figuur 46 is voor dezelfde meetwaarden voor een zestal tijdstippen het verloop over het dwarsprofiel weergegeven.



Figuur 45 Gemeten stijghoogten t.o.v. NAP in de meetpunten M3-M4-M5-M6 in januari en februari 2018.



Figuur 46 Gemeten stijghoogten t.o.v. NAP voor een zestal tijdstippen in de meetpunten M3-M4-M5-M6.

Voor 30 januari 2018 is, zoals in de vorige paragraaf is aangegeven, een waarneming beschikbaar van de waterstand in het gebied tussen de dijken: NAP +2.20 m. Uit verkennende berekeningen, waarbij zowel met deze waterstand is gerekend als met het polderpeil van NAP +1.80 m, blijkt dat de berekeningen hier merkbaar door beïnvloed worden; reden om te pleiten voor een peilmeter in dit gebied. Vanwege deze invloed en een

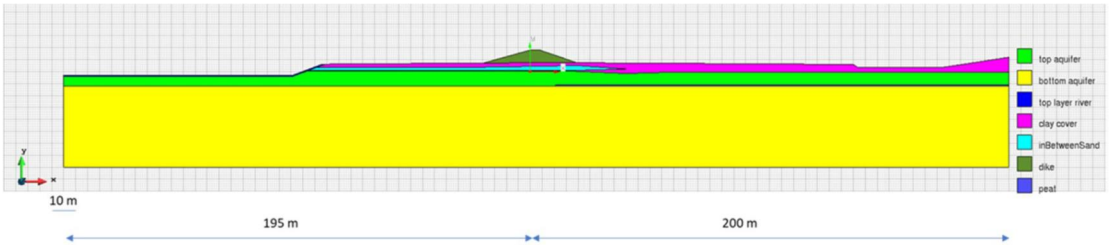
gebrek aan overige waarnemingen van de waterstand in dit gebied is besloten om de kalibratie uit te voeren met de tweede, lagere, hoogwaterpiek van 29 januari en daarbij aan te nemen dat de waterstand in het gebied tussen de dijken in de tussenliggende nacht niet veel is veranderd.

Voor de rivierwaterstand wordt uitgegaan van de meetwaarden voor meetpunt M8, waar het filter in een zandlaag dicht onder de oppervlakte is geplaatst. Uit lineaire interpolatie van de waterstanden in Vuren en Zaltbommel op basis van de afstand langs de rivier wordt ter plaatse van deze meetraai namelijk een lagere waterstand verkregen dan in meetpunt M8 is gemeten. Dit is niet realistisch, maar kan worden verklaard uit de niet-lineariteit van het verloop van de rivierwaterstand tussen beide meetpunten van Rijkswaterstaat; direct stroomafwaarts van Gameren bevindt zich een vernauwing in de Waal. Ook het meetpunt direct bovenstrooms van de brug levert geen aannemelijke waterstand op. Voor meetpunt M8 wordt derhalve aangenomen dat de toestroming in die ondiepe zandlaag zonder noemenswaardige weerstand plaatsvindt.

De kalibratie is in drie fasen uitgevoerd. In eerste instantie is uitgegaan van de initiële waarden voor de doorlatendheden zoals weergegeven in Tabel 4. Deze zijn gebaseerd op de verwachtingswaarden (dus: gemiddelde waarden) die gehanteerd zijn door Argaman (2018), die weer uitgegaan is van gegevens uit REGIS en Moria. Vervolgens is met de schematisering uit Figuur 47 bepaald wat de berekende stijghoogten in de meetpunten zouden zijn, uitgaande van de op dat moment bekende en ingeschatte randvoorwaarden: NAP +5.52 m voor de rivierwaterstand (overeenkomend met de meetwaarde uit meetpunt M8), NAP +2.50 m voor de waterstand uit het tussengebied (de nauwkeuriger waarde van Van Beek (2019c) en Taal (2019ab) kwam pas later beschikbaar) en NAP 1.80 m voor het gebied achter de oude Waalbandijk.

Tabel 4 Initiële doorlatendheden voor kalibratie.

Grondlaag	Doorlatendheid k (m/dag)	k_{laag} / $k_{zandlaag}$ (-)
Zandlaag	15	1
Grove zandlaag	40	2.667
Tussenzandlaag	15	1
Sliblaag	0.15	0.01
Dijksmateriaal	0.005	0.000333
Klei toplaag	0.005	0.000333
Klei Gameren-dorp	0.005	0.000333
Gameren toplaag	0.005	0.000333
Veenlaag	0.005	0.000333



Figuur 47 Gehanteerde schematisering in de eerste fase van de kalibratie voor de meest oostelijke meetraai.

Aanvankelijk is gerekend met een sliblaag in de rivier, die de intredeweerstand verhoogt. Daarmee was de afname van de stijghoogten richting het achterland veel te gering, zoals te zien is aan de eerste twee resultaten die vermeld zijn in Tabel 5. Daarbij is gevarieerd met de mate waarin de veenlaag aanwezig is: onder het gehele tussengebied, of alleen vanaf de huidige primaire kering tot halverwege richting de oude Waalbandijk. Bij beide varianten is de afwijking met de meetwaarden aanzienlijk. De afwijking zoals vermeld in de laatste kolom van

de tabel is berekend als de wortel uit de som van de kwadraten van de afwijking tussen de meetwaarde en de berekende waarde op elk van de vier meetpunten.

Tabel 5 Resultaten voor kalibratie met waterstand tussen beide dijken op NAP +2.50 m (vermelde waarden in m + NAP).

Model	M8	M3	M4	M5	M6	afwijking
Meetwaarden	5.52	4.41	3.07	2.73	1.96	n.v.t.
Gesloten veenlaag met slib		5.43	5.23	5.10	5.33	4.76
Veen 1e helft met slib		5.43	5.33	5.34	5.31	4.92
Opening bij oude dijk zonder slib		4.40	3.41	2.88	2.15	0.42
Gesloten veenlaag zonder slib		4.40	3.41	2.88	2.15	0.42
Veen 1e helft zonder slib		4.39	3.40	2.98	2.14	0.46
Geen veenlaag, zonder slib		4.37	3.54	2.97	2.14	0.56

Deze schematisering is vervolgens aangepast omdat in dit gedeelte geen slib aanwezig is, zoals te zien is in de metingen in Stellema (2018). Verder zijn er meer variaties met de uitgebreidheid van de veenlaag toegepast. De resultaten zijn hiermee aanzienlijk verbeterd, zoals te zien is in Tabel 5.

In de derde fase zijn twee aanpassingen gemaakt. Ten eerste is de waterstand in het tussengebied aangepast naar de waargenomen waarde van circa NAP +2.20 m en verder is de kalibratie geautomatiseerd: de initiële waarden worden hierbij net zo lang enigszins aangepast totdat de afwijking niet meer kleiner wordt. Deze procedure leidt bij herhaling met dezelfde beginwaarden telkens tot dezelfde uitkomsten; om de gevoeligheid voor de beginwaarden te onderzoeken is in de meeste gevallen daarom ook een tweede set met iets afwijkende beginwaarden gehanteerd. De resultaten voor de verschillende deelschematiseringen en beginwaardensets ('seeds') zijn weergegeven in Tabel 6. De bijbehorende doorlatendheden *relatief tot de doorlatendheid van de dominante zandlaag* zijn weergegeven in Tabel 7. In de eerste van deze tabellen is te zien dat de afwijkingen hiermee aanzienlijk kleiner zijn. Een (bijna) perfecte set wordt echter niet verkregen; dit zal onder meer samenhangen met tekortkomingen ten aanzien van de schematisering, het negeren van anisotropie in de doorlatendheden, meetonnauwkeurigheden en 3D-effecten.

Tabel 6 Resultaten voor geautomatiseerde kalibratie met waterstand tussen beide dijken op NAP +2.20 m (vermelde waarden in m + NAP).

Model	M3	M4	M5	M6	afwijking
Meetwaarden	4.41	3.07	2.73	1.96	n.v.t.
Opening bij oude dijk	4.36	3.12	2.66	1.98	0.10
2e seed	4.35	3.15	2.63	1.98	0.14
Gesloten veenlaag	4.34	3.14	2.62	1.98	0.14
2e seed	4.37	3.12	2.66	1.98	0.10
Veen 1e driekwart	4.35	3.15	2.63	1.98	0.14
2e seed	4.38	3.13	2.65	1.99	0.11
Veen 1e helft	4.33	3.09	2.72	1.97	0.08
2e seed	4.33	3.07	2.76	1.96	0.08
Geen veenlaag	4.27	3.19	2.63	1.98	0.21

Tabel 7 Gevonden doorlatendheden bij geautomatiseerde kalibratie met waterstand tussen beide dijken op NAP +2.20 m (relatief t.o.v. zandlaag, behalve de laatste regel).

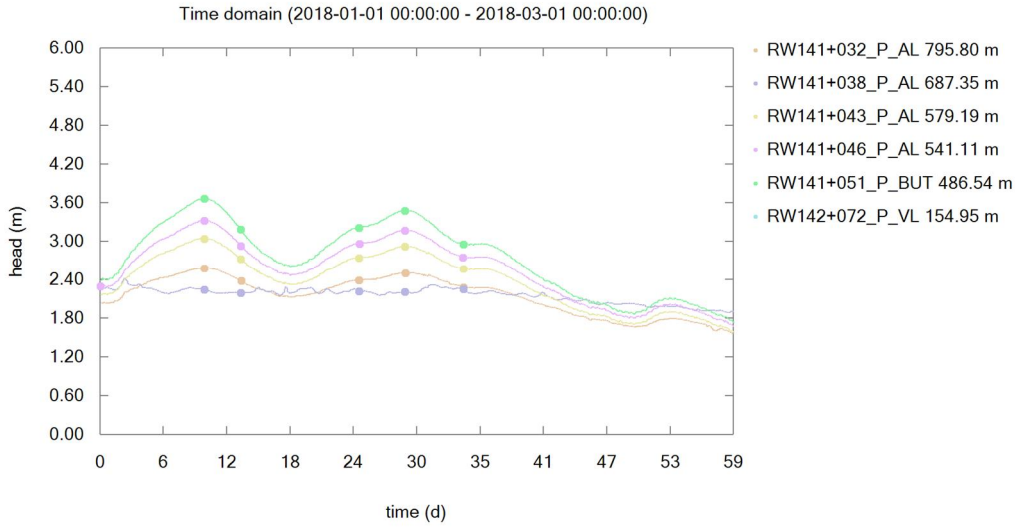
Model	Grove zandlaag	Tussen-zandlaag	Dijks-materiaal	Klei top	Klei Gameren	Gameren toplaag	Veen

Opening bij oude dijk **2e seed**	4.01 0.614	0.290 0.104	0.000213 0.0000162	0.0205 0.00714	1.14 0.254	0.273 0.0334	0.00488 0.00163
Gesloten veenlaag **2e seed**	0.791 5.68	0.113 0.117	0.0000208 0.000198	0.00910 0.0181	0.330 1.15	0.0402 0.632	0.00256 0.00343
Veen 1e driekwart **2e seed**	0.614 2.33	0.104 0.143	0.0000162 0.0000716	0.00714 0.00134	0.254 0.600	0.0334 0.148	0.00163 0.00271
Veen 1e helft **2e seed**	0.413 0.953	0.0670 0.112	0.0000199 0.0000678	0.00604 0.00959	0.0693 0.109	0.0387 0.182	0.00013 0.00112
Geen veenlaag	0.536	0.127	0.0000164	0.00908	0.0490	0.504	n.v.t.
Keuze: opening	1	0.1	0.0000667	0.00667	0.1	0.1	0.00133
Keuze	15 m/dag	1.5 m/dag	0.001 m/dag	0.1 m/dag	1.5 m/dag	1.5 m/dag	0.02 m/dag

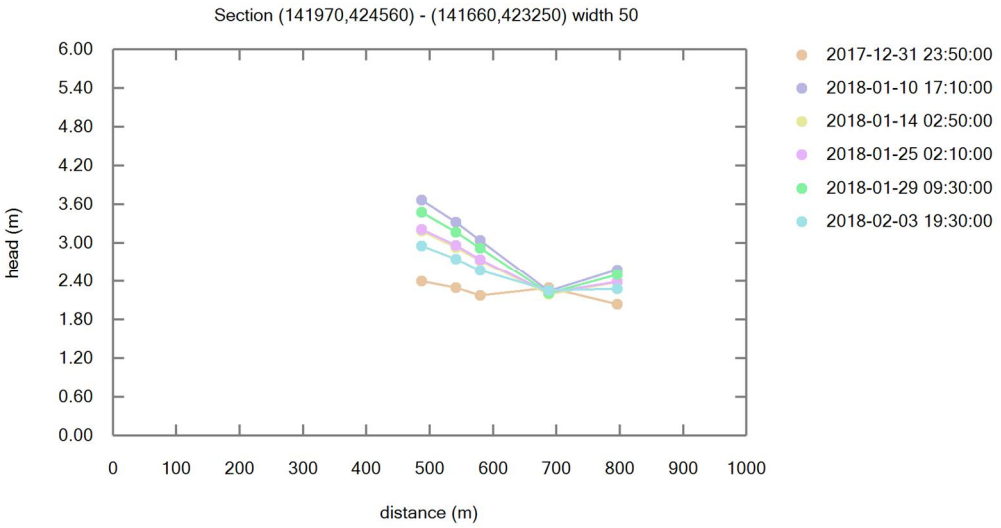
De interpretatie van deze uitkomsten en de keuze voor de te hanteren doorlatendheden komen aan de orde in §4.5 en §4.6.

4.4 Overige meetraaien

Figuur 44 toont ook een drietal andere meetraaien: door de meetpunten M8-M9-M10-M11-M12, door de meetpunten M20-M17-M16-M15-M14-M13 en door de meetpunten M20-M22-M21. Door de uitval van meetinstrumenten is het effectieve aantal meetpunten echter gering. Voor de middelste van deze drie raaien zijn de meetwaarden in de loop van januari en februari 2018 en het verloop ervan over het dwarsprofiel voor een zestal tijdstippen weergegeven in Figuur 48 en Figuur 49.



Figuur 48 Gemeten stijghoogten t.o.v. NAP in de meetpunten M13-M14-M15-M16-M17-M20.



Figuur 49 Gemeten stijghoogten t.o.v. NAP voor een zestal tijdstippen in de meetpunten M13-M14-M15-M16-M17-M20.

Van meetpunt M20 zijn geen meetwaarden beschikbaar. Meetpunt M14 vertoont vrijwel geen reactie op de buitenwaterstand, waar de omliggende meetpunten dat wel doen en wordt daarom onbruikbaar geacht. Dit meetpunt is mogelijk verstopt geraakt.

Met de resterende meetpunten bleek een goede en stabiele kalibratie niet mogelijk te zijn, mede vanwege de aanvullende complicaties in de berekeningen als gevolg van de sliblaag bovenop de qua samenstelling onbekende vulling van de diepe zandwinput buitendijks.

Voor de beide andere meetpunten zijn eenvoudigweg te weinig gegevens beschikbaar om tot een vertrouwenwekkende kalibratie over te gaan. Met de huidige gegevens is dus voor slechts één dwarsraai een kalibratie mogelijk. Dit is in de praktijk overigens niet ongebruikelijk.

4.5 Interpretatie

De interpretatie concentreert zich op de waarden in Tabel 6 en Tabel 7. Op basis van de kennis uit het grondonderzoek valt de situatie zonder veenlaag af (zie ook Tabel 3 voor de aanwezigheid van veen in dit gedeelte).

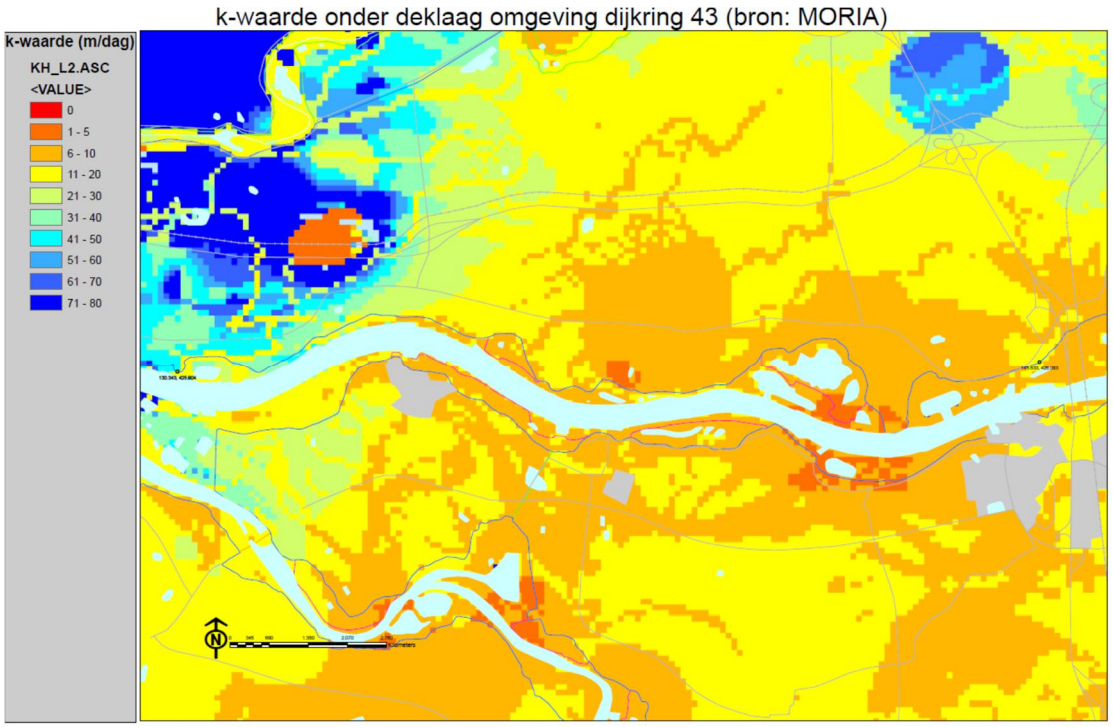
De kleinste afwijking met de meetwaarden wordt gevonden voor de situatie met alleen veen in de eerste helft van het gedeelte vanaf de nieuwe dijk naar de oude Waalbandijk, zoals weergegeven in Figuur 24. Hiermee wordt voor de onderliggende grove zandlaag echter een lagere doorlatendheid gevonden in beide berekeningen, wat de reden vormt dat deze variant afvalt. Voor de andere varianten ontlopen de resultaten elkaar niet veel, twee uitkomsten zijn zelfs identiek. Gekozen is voor de middelste variant van deze drie, namelijk met een opening in de veenlaag bij de oude Waalbandijk.

4.6 Keuze voor doorlatendheden

Op basis van de kalibratie is een keuze mogelijk voor de relatieve doorlatendheden. Deze keuze is vanwege de betrekkelijk wankele basis van de kalibratie, zoals benoemd in §4.3, mede gebaseerd op redelijke verhoudingen en de wens om de berekeningen niet te verstoren door numerieke instabiliteit zodra ook het veel doorlatender materiaal van de grofzandbarrière erin gemodelleerd wordt. Dit heeft geleid tot de keuze zoals vermeld op de één-na-onderste regel van Tabel 7.

De laatste stap betreft de keuze van de doorlatendheid van de maatgevende zandlaag in een absolute waarde. Hiervoor is gekeken naar het regionale grondwaterstromingsmodel MORIA, het WBI-SOS en de korrelverdelingen ter plaatse, waarbij ook rekening is gehouden met ervaringen elders.

Volgens het gekalibreerde MORIA-model is de doorlatendheidswaarde van deze zandlaag nabij Gameren relatief laag, namelijk rond de 5 m/dag, zie Figuur 50. Dit betreft een verwachtingswaarde.



Figuur 50 Regionale spreiding van de doorlatendheden onder de deklaag volgens het MORIA-model.

Het WBI-SOS vermeldt voor de hoger liggende zandlagen een waarde van 15 m/dag en voor de dieperliggende laag 40 m/dag (zie Tabel 2). Dit betreft karakteristieke waarden, de daarmee corresponderende verwachtingswaarden liggen rond respectievelijk 5 en 15 m/dag.

Uit boringen ter plaatse van de binnenteen of daar dicht bij in de buurt zijn 34 korrelverdelingen beschikbaar, waarvan 10 uit de tussenzandlaag, 8 betrekkelijk dicht onder de deklaag en 16 van wat grotere diepte (Stellema, 2019). Enige markante waarden voor elk van deze korrelverdelingen zijn vermeld in Tabel 8.

Tabel 8 Beschikbare korrelverdelingen nabij de huidige binnenteen (Stellema, 2019).

Locatie	Mon-ster	Boven-zijde (m+NAP)	Onder-zijde (m+NAP)	d_{10} (mm)	d_{15} (mm)	d_{50} (mm)	d_{60} (mm)	d_{70} (mm)	d_{85} (mm)	d_{90} (mm)
Tussen-zandlaag										
135+001 BIT	5a	+1.81	+1.56	0.103	0.125	0.177	0.195	0.219	0.253	0.295
136+040 BIT	2a	+2.04	+1.78	0.082	0.100	0.164	0.181	0.202	0.234	0.245
137+041 BIT	6a	+2.72	+2.35	0.143	0.171	0.273	0.302	0.336	0.442	0.490
137+079 BIT	2a	+2.74	+2.34	0.091	0.126	0.231	0.261	0.298	0.352	0.432
140+085 AL	4a	+2.61	+2.26	0.072	0.107	0.223	0.256	0.307	0.434	0.509
140+085 AL	5a	+2.11	+1.73	0.100	0.128	0.219	0.245	0.283	0.344	0.400
143+075 AL	3a	+1.67	+1.23	0.031	0.086	0.179	0.198	0.222	0.265	0.297
143+075 AL	4a	+1.17	+0.88	0.039	0.080	0.185	0.204	0.228	0.278	0.302
143+075 AL	5a	+0.67	+0.35	0.101	0.116	0.171	0.190	0.217	0.265	0.295

Locatie	Mon-ster	Boven-zijde (m+NAP)	Onder-zijde (m+NAP)	d_{10} (mm)	d_{15} (mm)	d_{50} (mm)	d_{60} (mm)	d_{70} (mm)	d_{85} (mm)	d_{90} (mm)
144+021 BIT	3a	-0.38	-0.67	0.105	0.125	0.155	0.164	0.175	0.209	0.220
Dicht onder de deklaag										
135+001 BIT	8a	+0.31	-0.07	0.135	0.143	0.198	0.210	0.219	0.246	0.258
137+041 BIT	12a	-0.28	-0.66	0.064	0.079	0.129	0.140	0.155	0.174	0.180
140+085 AL	8a	+0.61	+0.27	0.119	0.130	0.183	0.199	0.218	0.244	0.269
142+017 AL	7a	+0.65	+0.37	0.135	0.147	0.212	0.228	0.247	0.322	0.351
143+030 AL	1a	+1.92	+1.59	0.119	0.145	0.252	0.282	0.320	0.420	0.482
143+030 AL	2a	+1.12	+0.72	0.093	0.121	0.206	0.229	0.259	0.325	0.345
143+075 AL	7a	-0.33	-0.65	0.129	0.140	0.214	0.234	0.261	0.320	0.338
143+075 AL	9a	-1.33	-1.65	0.128	0.135	0.188	0.203	0.221	0.245	0.268
144+021 BIT	5a	-1.78	-2.78	0.025	0.071	0.148	0.162	0.177	0.228	0.250
Dieper in de maatgevende zandlaag										
135+069BIT	22a	-1.83	-2.23	0.162	0.188	0.297	0.324	0.354	0.471	0.534
136+040BIT	3a	-0.96	-1.46	0.138	0.180	0.282	0.315	0.353	0.868	2.889
137+041BIT	35a	-2.28	-2.68	0.189	0.212	0.333	0.381	0.464	0.658	0.794
140+085AL	10a	-0.39	-0.55	0.130	0.149	0.238	0.273	0.329	0.514	0.682
140+085AL	22a	-1.39	-1.79	0.137	0.153	0.252	0.292	0.342	0.491	0.624
140+085AL	24a	-2.39	-2.79	0.172	0.195	0.302	0.329	0.365	0.483	0.564
142+017AL	8a	+0.15	-0.15	0.160	0.186	0.303	0.351	0.491	1.625	3.445
142+017AL	9a	-0.35	-0.66	0.183	0.192	0.277	0.311	0.350	1.971	4.221
142+017AL	22a	-1.85	-2.25	0.127	0.139	0.234	0.280	0.358	0.690	1.062
142+017AL	24a	-2.85	-3.25	0.139	0.153	0.273	0.316	0.374	0.581	0.682
143+030AL	3a	-0.08	-0.41	0.145	0.162	0.243	0.280	0.330	0.497	0.671
143+030AL	4a	-0.48	-1.48	0.145	0.166	0.247	0.278	0.318	0.435	0.544
143+030AL	5a	-1.48	-2.48	0.138	0.161	0.258	0.287	0.324	0.434	0.534
143+075AL	22a	-2.83	-3.23	0.166	0.186	0.276	0.313	0.356	0.562	0.714
143+075AL	24a	-3.83	-4.23	0.190	0.207	0.327	0.377	0.470	0.717	1.126

Door Hazen (1892), Beyer (1964) en Den Rooijen (1992) zijn empirische formules gegeven om op basis van de d_{10} en de d_{60} de doorlatendheid te schatten (Hazen gebruikt overigens alleen de d_{10}). Voor de 34 beschikbare korrelverdelingen resulteert dit in de waarden vermeld in Tabel 9.

Tabel 9 Doorlatendheden volgens Hazen, Beyer en Den Rooijen .

Locatie	Mon-ster	Boven-zijde (m+NAP)	Onder-zijde (m+NAP)	Hazen (m/dag)	Beyer (m/dag)			Den Rooijen (m/dag)		
					losge-pakt	matig gepakt	vast-ge-pakt	los-ge-pakt	matig gepakt	vast-gepakt
Tussen-zandlaag										
135+001 BIT	5a	+1.81	+1.56	10.6	12.4	9.7	7.9	12.7	9.7	8.1
136+040 BIT	2a	+2.04	+1.78	6.7	7.7	6.0	4.8	7.9	6.0	5.0
137+041 BIT	6a	+2.72	+2.35	20.5	23.6	18.3	14.8	24.1	18.4	15.3
137+079 BIT	2a	+2.74	+2.34	8.3	9.2	7.0	5.6	9.4	7.1	5.8
140+085 AL	4a	+2.61	+2.26	5.2	5.5	4.2	3.3	5.7	4.2	3.4
140+085 AL	5a	+2.11	+1.73	10.0	11.3	8.7	7.0	11.5	8.8	7.2
143+075 AL	3a	+1.67	+1.23	*	*	*	*	*	*	*
143+075 AL	4a	+1.17	+0.88	*	*	*	*	*	*	*
143+075 AL	5a	+0.67	+0.35	10.2	11.9	9.3	7.6	12.2	9.4	7.8
144+021 BIT	3a	-0.38	-0.67	11.0	13.2	10.4	8.5	13.5	10.5	8.7
Dicht onder de deklaag										
135+001 BIT	8a	+0.31	-0.07	18.3	21.8	17.2	14.1	22.3	17.3	14.5
137+041 BIT	12a	-0.28	-0.66	4.1	4.7	3.6	2.9	4.8	3.7	3.0
140+085 AL	8a	+0.61	+0.27	14.2	16.8	13.2	10.8	17.2	13.3	11.1
142+017 AL	7a	+0.65	+0.37	18.3	21.6	17.0	13.8	22.1	17.1	14.2

Locatie	Mon-ster	Boven-zijde (m+NAP)	Onder-zijde (m+NAP)	Hazen (m/dag)	Beyer (m/dag)			Den Rooijen (m/dag)		
					losge-pakt	matig gepakt	vast-ge-pakt	los-ge-pakt	matig gepakt	vast-gepakt
143+030 AL	1a	+1.92	+1.59	14.2	16.1	12.4	10.0	16.4	12.5	10.3
143+030 AL	2a	+1.12	+0.72	8.7	9.8	7.5	6.1	10.0	7.6	6.2
143+075 AL	7a	-0.33	-0.65	16.7	19.6	15.3	12.5	20.0	15.4	12.8
143+075 AL	9a	-1.33	-1.65	16.4	19.6	15.4	12.6	20.0	15.5	13.0
144+021 BIT	5a	-1.78	-2.78	*	*	*	*	*	*	*
Gemiddelde van bovenstaande 16 waarden				**12.1**	**14.1**	**10.9**	**8.9**	**14.4**	**11.0**	**9.2**
Dieper in de maatgevende zandlaag										
135+069BIT	22a	-1.83	-2.23	26.3	30.5	23.7	19.2	31.1	23.9	19.8
136+040BIT	3a	-0.96	-1.46	19.1	21.8	16.8	13.6	22.2	16.9	14.0
137+041BIT	35a	-2.28	-2.68	35.8	41.5	32.2	26.2	42.3	32.5	26.9
140+085AL	10a	-0.39	-0.55	16.9	19.5	15.1	12.3	19.9	15.2	12.6
140+085AL	22a	-1.39	-1.79	18.8	21.6	16.8	13.6	22.1	16.9	14.0
140+085AL	24a	-2.39	-2.79	29.7	34.6	27.0	21.9	35.3	27.1	22.5
142+017AL	8a	+0.15	-0.15	25.7	29.4	22.8	18.4	30.0	22.9	18.9
142+017AL	9a	-0.35	-0.66	33.6	39.7	31.1	25.4	40.6	31.3	26.1
142+017AL	22a	-1.85	-2.25	16.2	18.5	14.3	11.6	18.9	14.4	11.9
142+017AL	24a	-2.85	-3.25	19.4	22.1	17.1	13.8	22.5	17.2	14.2
143+030AL	3a	-0.08	-0.41	21.1	24.5	19.1	15.5	25.1	19.2	16.0
143+030AL	4a	-0.48	-1.48	21.1	24.6	19.1	15.6	25.1	19.3	16.0
143+030AL	5a	-1.48	-2.48	19.1	22.0	17.1	13.9	22.5	17.2	14.2
143+075AL	22a	-2.83	-3.23	27.6	32.3	25.2	20.5	32.9	25.3	21.0
143+075AL	24a	-3.83	-4.23	36.2	42.0	32.7	26.5	42.9	32.9	27.3
Gemiddelde van bovenstaande 15 waarden				**24.4**	**28.3**	**22.0**	**17.9**	**28.9**	**22.2**	**18.4**
Gemiddelde van alle 31 waarden				**18.1**	**21.0**	**16.3**	**13.2**	**21.4**	**16.4**	**13.6**

* buiten geldigheidsgebied

Een waarde van 10 à 20 m/dag lijkt op basis van de korrelverdelingen en de gehanteerde formule redelijk. Hierbij wordt opgemerkt dat deze korrelverdelingen concrete steekproeven betreffen, dus geen verwachtingswaarden, karakteristieke waarden of rekenwaarden.

Alles overziend is de keuze gemaakt om verder te rekenen met een waarde van 15 m/dag voor de maatgevende zandlaag, waaruit met de keuzes op grond van de kalibratie de overige waarden zoals vermeld op de onderste regel van Tabel 7 volgen. Dit betreft dus de karakteristieke waarde uit het WBI-SOS. Strikt genomen zou er met een rekenwaarde moeten worden gerekend, dit zou dan een waarde van ongeveer 40 m/dag, mogelijk 50 m/dag kunnen opleveren. Dit leek op basis van de beschikbare korrelverdelingen te hoog. Daarbij komen de ervaringen van elders, waar rekenen met dergelijke rekenwaarden problematisch werd geacht, waarna er bijvoorbeeld een pompproef werd uitgevoerd en er geconcludeerd werd dat de karakteristieke waarde of zelfs een wat lagere waarde gehanteerd kon worden (Hijma, 2019).

4.7 Herziene waarden op basis van HPT-(A)MPT-sonderingen

Na afronding van de voorgaande analyse is aanvullend onderzoek verricht met HPT-(A)MPT-sonderingen, zoals reeds genoemd is in §2.2. Hiermee is een aanvullende analyse verricht, zoals beschreven is in Rosenbrand (2020) en Rosenbrand & Koelewijn (2020ab). Hieruit volgt een horizontale doorlatendheid k_h van 32 m/dag te hanteren voor het grootste deel van het gebied, en k_h = 64 m/dag voor het gedeelte rond profiel RW 143+050. Gezien alle onderzoek en de uitgevoerde kalibraties mogen deze waarden worden beschouwd als tamelijk nauwkeurige verwachtingswaarden, die wel opvallend hoger zijn dan hetgeen in de voorgaande paragrafen werd vastgesteld. Voor de verticale doorlatendheid kan op basis van

de aanvullende analyse in het hele gebied een licht conservatieve waarde voor de anisotropiefactor A = k_h / k_v van 5 worden gehanteerd.

4.8 Mogelijkheden voor toekomstige aanscherpingen

In de analyse van piping spelen de doorlatendheden een cruciale rol. Bij toepassing van een grofzandbarrière speelt dit nog sterker, omdat de sterkte van een grofzandbarrière in belangrijke mate beïnvloed wordt door het contrast in doorlatendheid tussen het omgevingszand en het barrièrezand.

Een verdere aanscherping zou verkregen kunnen worden uit pompproeven of uit een geavanceerde 3D-analyse waarbij voor een beperkt hoogwater (vergelijkbaar met dat van januari 2018, of hoger) ook tijdsafhankelijke metingen beschikbaar zijn voor alle punten in Figuur 44 (dus inclusief de oppervlaktepeilen in de verschillende gebieden, om zo ook de debieten te kunnen bepalen in combinatie met een digitaal terreinmodel, zoals AHN3).

5 Resultaten met de aangepaste regel van Sellmeijer

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de resultaten met de aangepaste regel van Sellmeijer herzien op basis van de nieuw verkregen informatie over en inzichten in de ondergrond bij Gameren.

5.2 Eerdere resultaten

In §1.1 is al kort aangegeven dat in 2016 uit een veiligheidsanalyse voor dit dijktraject een aanzienlijk tekort naar voren kwam. Dit was bepaald met de aangepaste regel van Sellmeijer (Förster et al., 2012) op basis van de toenmalige kennis over de ondergrond, voor het zichtjaar 2025. De uitkomsten van deze veiligheidsanalyse door Bisschop & Hofschreuder (2016) zijn in meer detail weergegeven in Tabel 10. Hierin staat *D* voor de dikte van de zandlaag waarvoor de analyse is uitgevoerd.

Tabel 10 Veiligheidsoordeel op het faalmechanisme piping (zichtjaar 2025), overgenomen uit tabel 12 in Bisschop & Hofschreuder (2016).

Profiel RW…	***D* (m)**	**Kwelweglengte (m)**			
		achterland	aanwezig	benodigd	tekort
134	35	150	245	221	-
135	35	20	110	205	95
136	35	20	41	176	135
137	35	0	78	198	120
138	35	0	117	222	105
139	37	0	102	232	130
140	37	0	103	233	130
141	36	0	104	234	130
142	36	0	107	237	130
143	36	0	82	232	150

De veiligheidsanalyse bevat ook een analyse van de opbarstveiligheid. Met een variatie tussen 0.04 en 0.76 is deze duidelijk onvoldoende. De huidige inzichten over de ondergrondopbouw zullen wat betreft de opbarstveiligheid niet tot wezenlijk andere uitkomsten leiden.

Eveneens in 2016 is door Royal HaskoningDHV een schetsontwerp gemaakt waarbij voor twee profielen het kwelweglengtetekort is bepaald, inclusief een gevoeligheidsanalyse (De Wit & Rosenbrand, 2016ab). De uitkomsten hiervan zijn aangegeven in Tabel 11. Hierbij is uitgegaan van een verval van 7.2 m, overigens uitgaande van een buitenwaterstand van NAP + 9,2 m en een ontwerppeil binnendijks van NAP +2 m. Verder is een schematiseringsfactor γ_b toegepast van 1.1 en een dijktrajectafhankelijke sterktefactor γ_{mp} (pipingmodelfactor) van 1.61. De schematiseringsfactor is hier niet onderbouwd, maar verdisconteert de mogelijke te gunstige aannamen ten aanzien van de laagopbouw.

Tabel 11 Resultaten voor analyse met de aangepaste regel van Sellmeijer voor twee dwarsprofielen bij Gameren (De Wit & Rosenbrand, 2016ab).

Profiel RW…	Variant	ΔH (m)	D (m)	L (m)	k (m/dag)	d_{70} (mm)	$H_c/(\gamma_b*\gamma_{mp})$ (m)	$L_{benodigd}$ (m)	L_{tekort} (m)
137	basis	7.2	30	65	49.2	200	1.52	373	308
	ongunstig	7.2	60	65	86.4	150	1.01	623	558
	gunstig	6.2	30	65	25.9	210	1.92	244	179
143	basis	7.2	30	58	49.2	200	1.38	373	315
	ongunstig	7.2	60	58	86.4	150	0.93	623	565
	gunstig	6.2	30	58	25.9	210	1.74	244	186

In deze tabel staan de gebruikte symbolen voor:
ΔH = aanwezig verval;
D = dikte van de zandlaag waarvoor de analyse is uitgevoerd;
L = met zekerheid aanwezige kwelweglengte volgens de gehanteerde schematisering;
k = doorlatendheid van de zandlaag;
d_{70} = 70-percentielwaarde van de korrelverdeling van de zandlaag;
H_c = kritisch verval;
γ_b = schematiseringsfactor (1.1);
γ_{mp} = dijktrajectafhankelijke sterktefactor (pipingmodelfactor, waarde 1.61);
$L_{benodigd}$ = benodigde kwelweglengte;
L_{tekort} = kwelweglengtetekort ($L_{benodigd}$ - L).

5.3 Hernieuwde analyse

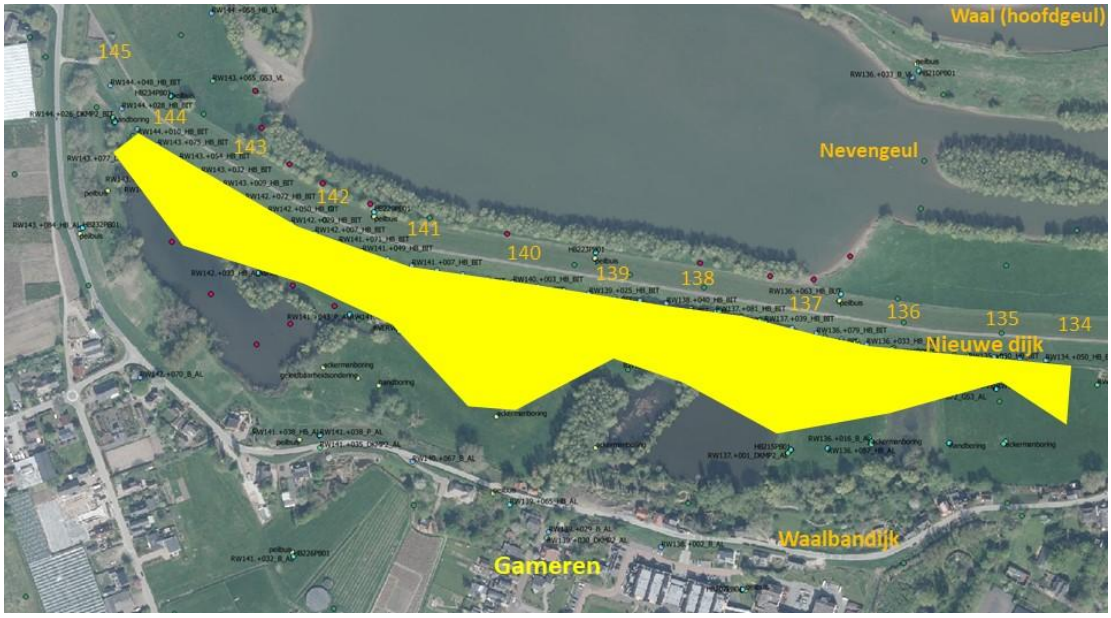
Met de inmiddels beschikbare gegevens en inzichten kan ook de veiligheid tegen piping conform de aangepaste regel van Sellmeijer opnieuw worden bepaald, dit om inzicht te krijgen in het effect van een grofzandbarrière op basis van dezelfde uitgangspunten ten aanzien van de ondergrond. Uitgaande van de schematiseringen zoals aangegeven in hoofdstuk 3 en de doorlatendheden volgens §4.7 zijn de resultaten zoals weergegeven in Tabel 12. Voor alle profielen geldt dat het polderpeil op NAP + 1.80 m ligt. Uitstroming vindt overal plaats in open water (sloot of kleiput), met uitzondering van het eerste profiel, waar het maaiveld op minimaal NAP + 3.10 m ligt en de deklaag 1.6 m dik is. Conform de geldende richtlijnen is voor dit profiel het maatgevend verval verlaagd met 0.3 maal de dikte van de deklaag.

Tabel 12 Benodigde kwelweglengte per profiel volgens de aangepaste regel van Sellmeijer voor alle profielen beschreven in hoofdstuk 3.

Profiel RW…+050	L (m)	D (m)	d_{70} (mm)	ontwerppeil (m + NAP)	H_c (m)	$H_c/(\gamma_b*\gamma_{mp})$ (m)	$L_{benodigd}$	L_{tekort}
134	120	40.5	0.219	8.97	5.19	2.93	221	101
135	140	3.9	0.219	8.97	10.32	5.83	172	28
136	143	8.0	0.155	8.97	7.71	4.35	236	93
137	82	8.3	0.155	9.00	4.62	2.61	226	144
138	123	6.0	0.155	9.00	7.21	4.07	218	95
139	112	5.7	0.218	9.00	7.68	4.34	186	74
140	127	41.2	0.218	9.00	5.43	3.07	298	171
141	129	8.3	0.218	9.00	7.98	4.51	206	77
142	122	7.3	0.247	9.00	8.22	4.64	189	67
143	129	6.3	0.261	9.00	7.27	4.11	226	97

Zoals vermeld in §4.2 zijn bij recente hoogwaters alleen rond dijkpaal 143 wat zandmeevoerende wellen geconstateerd; de rekenkundig zwakste locatie (RW 137+050) komt dus niet overeen met de locatie waar de eerste zandmeevoerende wellen ontstaan.

Ter illustratie is in Figuur 51 indicatief de impact van een pipingberm in het gebied tussen beide dijken weergegeven.



Figuur 51 Indicatieve weergave van de impact van een pipingberm ter bestrijding van het berekende kwelweglengte-tekort zoals aangegeven in Tabel 12.

Het verschil met de waarden zoals gevonden door De Wit & Rosenbrand (2016ab) is te verklaren door a) de andere schematisering, die mogelijk is geworden door een betere kennis van de ondergrond; en b) door de veelal lagere waarde die is aangenomen voor de doorlatendheid van maatgevende zandlaag. Voor een verklaring van de verschillen met Bisschop & Hofschreuder (2016) ontbreken in die meer samenvattend ingestoken rapportage te veel details, maar het is aannemelijk dat de oorzaken voor de verschillen ongeveer dezelfde zijn.

De algemene conclusie blijft overigens hetzelfde: het traject voldoet niet op het faalmechanisme piping.

6 Keuze barrièremateriaal

6.1 Criteria

De criteria voor de keuze van het barrièremateriaal zijn in het verleden al aangegeven door Koelewijn (2015) en Rosenbrand (2017). De inzichten zijn in de loop van de tijd diverse keren aangepast, mede op grond van de opgedane ervaringen. De criteria zijn naar achtergrond in de volgende groepen te verdelen:

- filtercriteria
- interne stabiliteit
- weerstand tegen piping
- werking ondersteund door experimenten

6.1.1 Filtercriteria

De filtercriteria zijn al geformuleerd door Terzaghi en bijvoorbeeld te vinden in Lambe & Whitman (1979). De eerste drie criteria garanderen dat er geen achtergrondzand uitspoelt in de barrière of daar doorheen gaat:

$$d_{15,GZB} < 5 * d_{85,a} \quad (A)$$

$$d_{15,GZB} < 20 * d_{15,a} \quad (B)$$

$$d_{50,GZB} < 25 * d_{50,a} \quad (C)$$

Bij deze criteria dient de kleinst voorkomende waarde uit de beschikbare korrelverdelingen van het achtergrondzand te worden gekozen.

Het volgende criterium garandeert dat de doorlatendheid van de barrière significant groter is dan de doorlatendheid van het achtergrondzand:

$$d_{15,GZB} > 4 * d_{15,a} \quad (D)$$

Hierbij dient de grootst voorkomende waarde uit de beschikbare korrelverdelingen van het achtergrondzand te worden gekozen.

Voor een zo goed mogelijke werking van de grofzandbarrière zal hier zo ruim mogelijk aan voldaan moeten worden. Daarom wordt aanbevolen om in de eerste plaats nog net te voldoen aan criteria (A), (B) en (C) en vervolgens te controleren of ook nog aan criterium (D) wordt voldaan.

Verder mag het filtermateriaal niet cohesief zijn. USACE (2000) stelt hiervoor als eis:

$$d_{5,GZB} > 0.075\ mm \quad (E)$$

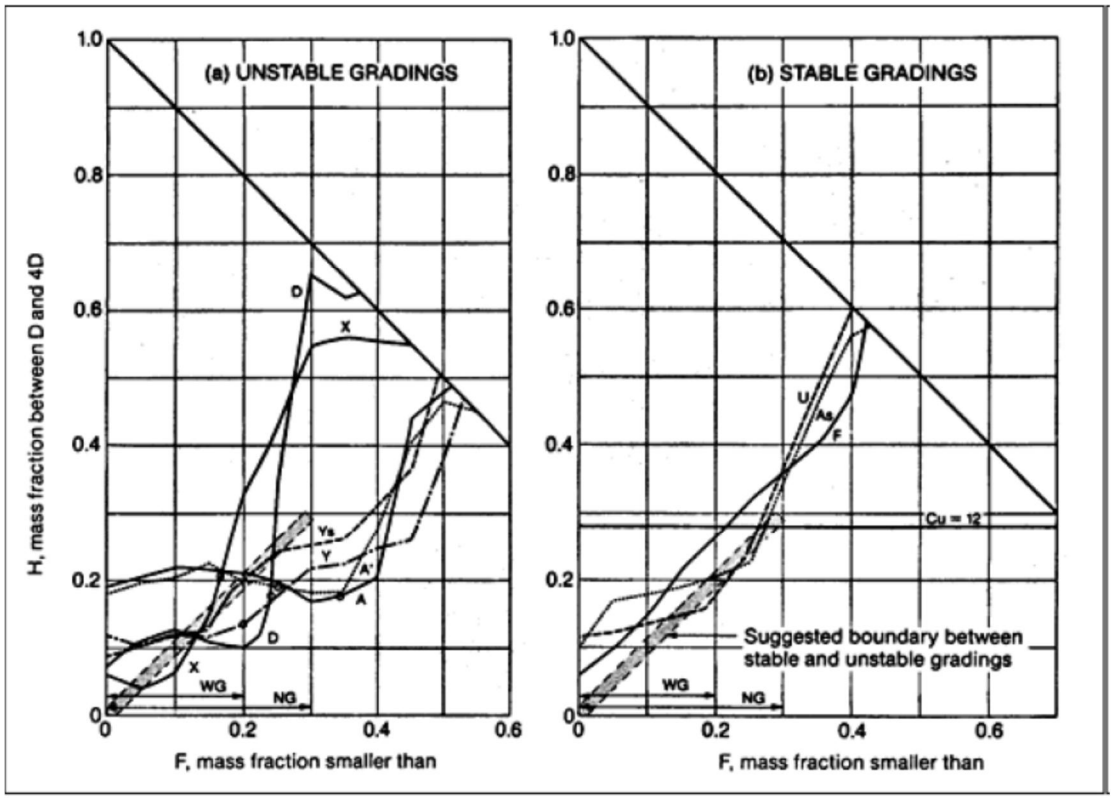
Aan deze eis zal in praktijk haast als vanzelf worden voldaan in het geval van een grofzandbarrière.

6.1.2 Interne stabiliteit

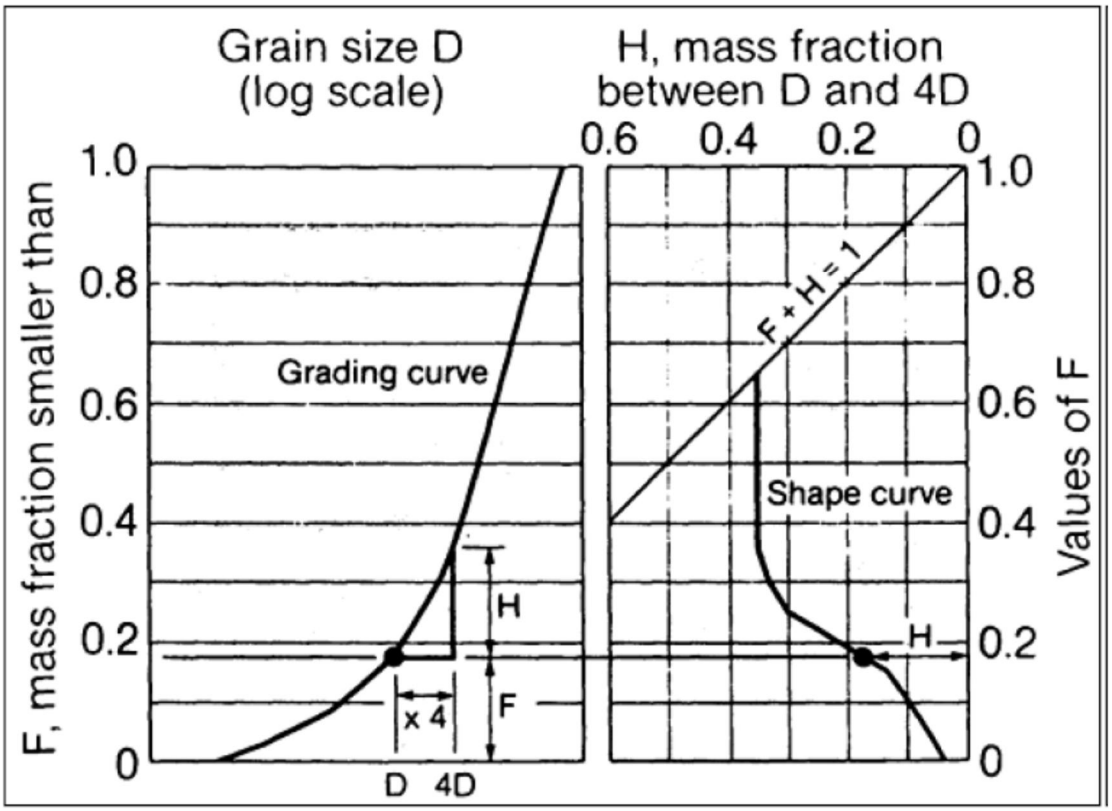
Interne stabiliteit wil zeggen dat de fijnste fractie niet kan uitspoelen door de poriën, waardoor in vervolg daarop ook niet de minder fijne fractie kan uitspoelen. In natuurlijke zanden zoals die in Nederland, met enkele uitzonderingen in de provincie Limburg, worden aangetroffen, vormt dit geen probleem, maar bij een kunstmatig gevormd materiaal vormt dit wel een risico.

Voor interne stabiliteit zijn in de literatuur al veel criteria opgesteld. Voor de grofzandbarrière is gekozen voor twee sets eisen waarmee bij Deltares enige ervaring is en die, in wisselende mate, ook internationaal worden gebruikt: de criteria van Kenney & Lau (1985, 1986) en van Burenkova (1993).

Kenney en Lau hebben experimenteel vastgesteld dat er waarschijnlijk interne instabiliteit zal optreden indien de massafractie in de korrelverdeling tussen *d* en *4d* (het laatste door hen afgekort als *H*), kleiner is dan de massafractie kleiner dan *d* (door hen op alternatieve wijze weergegeven als *F*) en het buigpunt in de korrelverdelingscurve kleiner is dan 0.2 voor ruime graderingen en 0.3 voor uniforme graderingen. In Figuur 52 en Figuur 53 (met gebruik van hoofdletters voor *d*) zijn voorbeelden gegeven van de toepassing van dit criterium (overgenomen uit ICOLD, 2017). Naar dit criterium wordt verder verwezen als criterium F.



Figuur 52 Methode voor het bepalen van interne instabiliteit van Kenney & Lay (1985), met de aangepaste criteria uit Kenney & Lau (1986) – figuur overgenomen uit ICOLD (2017).



Figuur 53 Methode om de vorm van een korrelverdelingsdiagram te karakteriseren (Kenney & Lau, 1986) – figuur overgenomen uit ICOLD (2017).

Burenkova (1993) heeft op basis van een groot aantal experimenten twee nadere criteria voorgesteld. Deze geven grenzen aan de verhouding tussen de grovere fractie en het geheel; niet te grof, niet te fijn:

$$0.76 \log (d_{90,GZB}/d_{15,GZB}) + 1 < d_{90,GZB}/d_{60,GZB} \quad (G)$$

$$d_{90,GZB}/d_{60,GZB} < 1.86 \log (d_{90,GZB}/d_{15,GZB}) \quad (H)$$

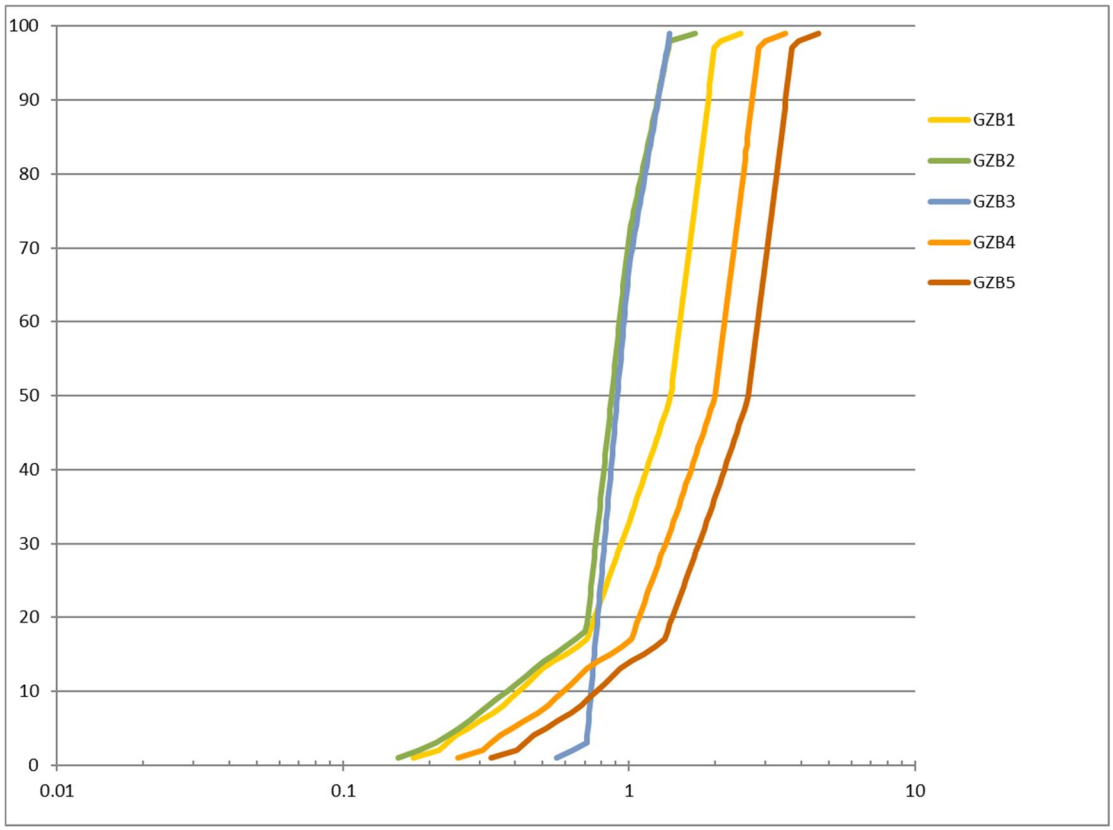
Aanvankelijk is voor interne stabiliteit van een grofzandbarrière alleen van de criteria van Burenkova uitgegaan (Koelewijn, 2015). Deze zijn later vervangen door het criterium van Kenney & Lau, omdat dit van de vele criteria die in de literatuur in omloop zijn, het meest lijkt te worden gebruikt (Rosenbrand, 2017). In de kleinschalige laboratoriumproeven ontstond echter een filtercake bij de grofzandbarrière in combinatie met metselzand als achtergrondmateriaal: de fijnste fractie spoelde uit en werd tegengehouden door de grofzandbarrière (Rosenbrand & Van Beek, 2017). Dit metselzand voldeed wel aan het criterium van Kenney & Lau, maar niet aan het tweede criterium van Burenkova (Akrami & Koelewijn, 2018). Daarom is nadien besloten om ook te toetsen op de criteria van Burenkova, om mogelijke problemen met interne stabiliteit tijdig te onderkennen. De criteria van Burenkova leveren echter geen eenduidig resultaat: het gebruikte barrièremateriaal GZB1 voldoet namelijk niet aan het eerste criterium (G), maar desondanks is er geen interne instabiliteit van het barrièremateriaal geconstateerd bij de experimenten met GZB1. De empirische criteria van Burenkova geven binnen de door haar gebruikte dataset ook geen scherpe scheidslijn tussen wel/niet instabiel materiaal; dit kan daarvoor de verklaring vormen. Overigens speelt het gebrek aan een scherpe scheidslijn ook bij Kenney en Lau, zoals gangbaar bij experimentele data.

6.1.3 Weerstand tegen secundaire erosie

De weerstand tegen secundaire erosie is maximaal als $d_{70,GZB}$ zo groot mogelijk wordt gekozen (criterium I).

6.1.4 Werking ondersteund door experimenten

Voor de situatie met een vlakke aansluiting geldt de hypothese dat de sterkte van de grofzandbarrière mede afhankelijk is van de specifieke korrelverdelingscurve, via de korrelcontacten: meer bij een sterk gegradeerd materiaal (zoals GZB1, zie Figuur 54) en minder bij een meer uniform gegradeerd materiaal (zoals GZB3 en, in mindere mate, GZB2). De gevonden sterkte is daardoor afhankelijk van het gebruikte barrièremateriaal. Wel geldt dat de korrelverdelingscurve schaalbaar is: indien de gehele korrelverdeling een zekere factor groter is, dan is de sterkte hetzelfde, doordat de korrelcontacten dan hetzelfde blijven. Dit is experimenteel bevestigd door een tweetal proeven met GZB5; een materiaal met 1.87 maal grotere korrels dan GZB1 (Rosenbrand & Van Beek, 2019).



Figuur 54 Korrelverdelingen van grofzandbarrièrematerialen GZB1 t/m GZB5.

Verreweg de meeste laboratoriumproeven zijn uitgevoerd met GZB1 of het 1.87 maal grotere GZB5, een kleiner aantal met GZB2 (waaronder ook de Deltagootproeven) en er zijn enkele kleinschalige proeven uitgevoerd met GZB3, hetgeen een standaard in de handel verkrijgbaar fijn filterzand is. Intussen is ook GZB4 gedefinieerd; dit is 1.43 maal groter dan GZB1. De korrelverdelingscurve van deze vijf materialen is weergegeven in Figuur 54. Gelet op de experimentele basis, die voor GZB3 uitermate zwak is, wordt sterk geadviseerd om bij een vlakke situatie alleen GZB1 of GZB2, of een verschaling van één van deze beide materialen toe te passen. Dit vormt het tiende criterium (J).

De doorlatendheden van deze vijf materialen zijn, afhankelijk van de behaalde relatieve dichtheid, aangegeven in Tabel 13. Voor GZB1, GZB2, GZB3 en GZB5 zijn deze waarden experimenteel bepaald met kolomproeven (Terwindt et al., 2019, 2020). Voor GZB4 zijn de vermelde waarden bepaald met een interpolatie tussen de waarden voor GZB1 en GZB5, op

basis van het kwadraat van de korreldiameter. Alle waarden zijn bepaald bij circa 20 graden en gecorrigeerd voor een gemiddelde grondtemperatuur van circa 10 graden Celsius.

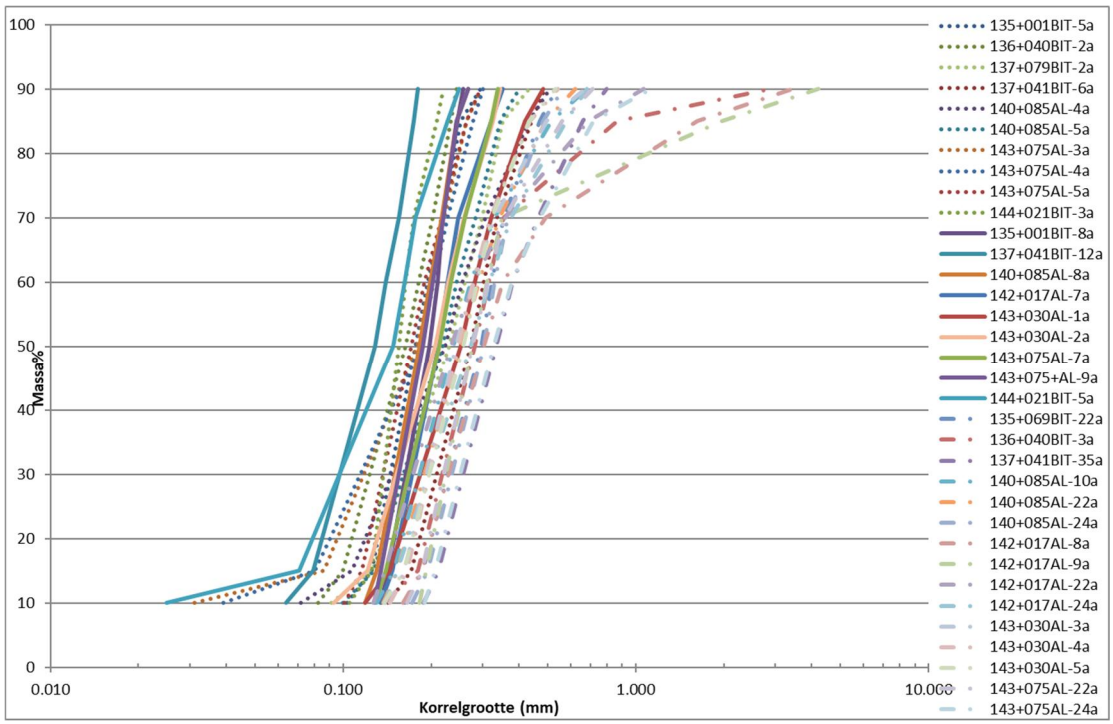
Tabel 13 Doorlatendheid in m/dag afhankelijk van de relatieve dichtheid voor GZB1 t/m GZB5.

Materiaal	100%	95%	90%	85%	80%	70%	60%	50%
GZB1	51	55	58	62	67	76	87	99
GZB2	47	50	53	57	61	69	78	88
GZB3	277	291	304	319	335	368	404	442
GZB4	116	125	134	144	155	178	204	232
GZB5	207	223	240	258	277	320	368	421

Voor de grofzandbarrière met inkassing is er geen invloed van het aantal korrelcontacten, omdat daarvoor heave als criterium wordt gehanteerd, waarvoor een veel bredere experimentele basis bestaat (naast een heldere theoretische basis). De geldigheid hiervan voor een grofzandbarrière onder uiterste belasting is bevestigd in een tweetal proeven op medium schaal (Förster, 2021).

6.2 In Gameren toepasbare materialen

In Figuur 55 zijn de 34 korrelverdelingen, zoals vermeld in Tabel 8 weergegeven, gerangschikt naar de positie in respectievelijk de tussenzandlaag, dicht onder de deklaag in de maatgevende zandlaag en dieper in de maatgevende zandlaag.

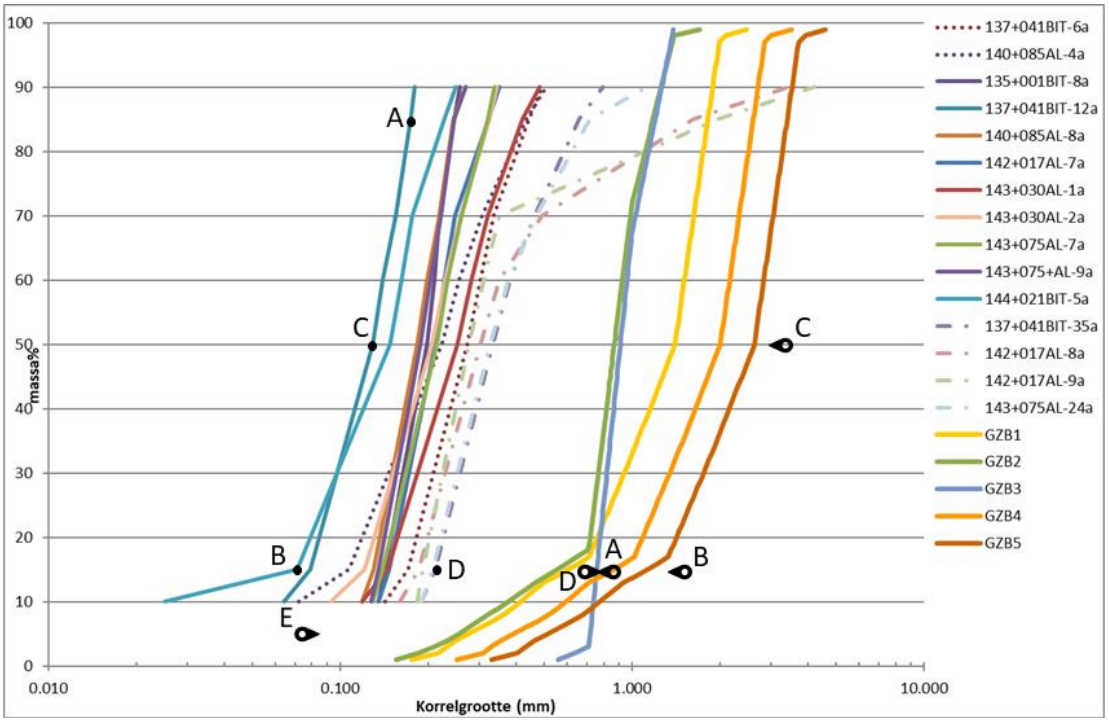


Figuur 55 Korrelverdelingen zoals beschikbaar voor de pilotlocatie in Gameren nabij de huidige binnenteen (Stellema, 2019).

De tussenzandlaag is in de situatie in Gameren niet van wezenlijk belang, omdat deze niet onder de dijk doorloopt. De wateraanvoer via deze laag is zodoende ook onder maatgevende omstandigheden beperkt en niet maatgevend. Voor de grofzandbarrière is daarom de zandlaag onder de deklaag maatgevend, met name het bovenste gedeelte daarvan.

Om voor deze eerste praktijktoepassing op inzichtelijke wijze te tonen hoe tot de keuze van een grofzandbarrièremateriaal kan worden gekomen, wordt hierna in enkele stappen het keuzeproces toegelicht.

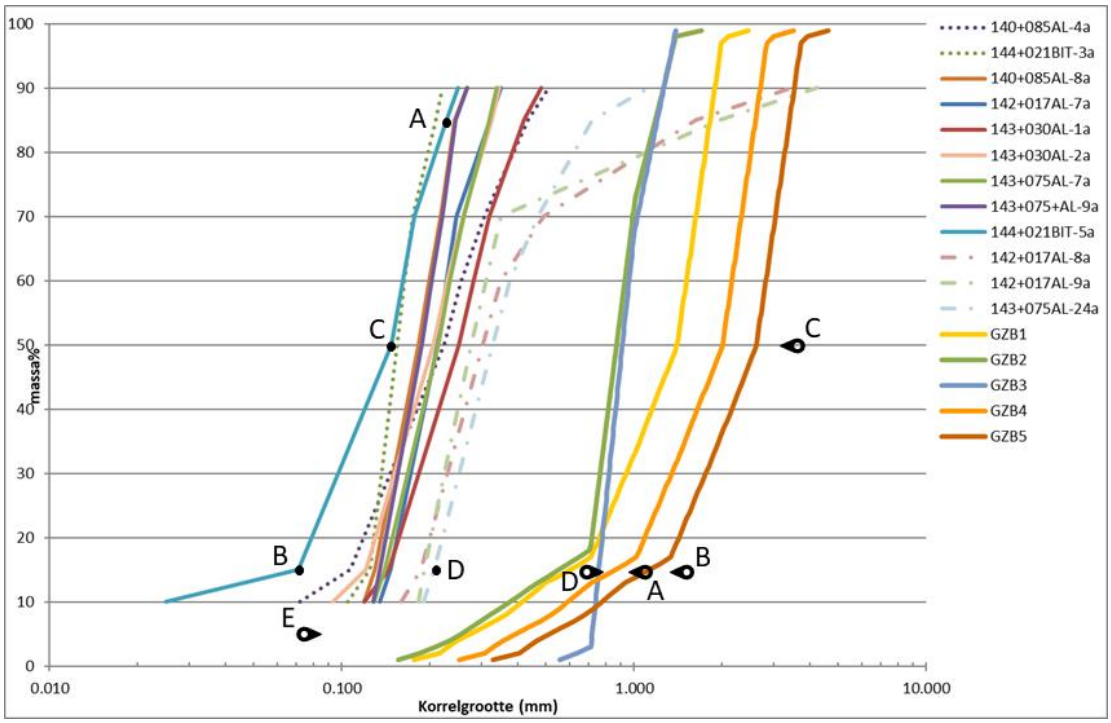
In Figuur 56 is de voorgaande figuur voorzien van de korrelverdelingen voor de grofzandbarrière uit Figuur 54. Verder is de figuur ter verduidelijking ontdaan van de acht korrelverdelingen in de tussenzandlaag die geheel binnen de korrelverdelingen van de monsters dicht onder de deklaag vallen. Van de diepere monsters zijn alleen de vier korrelverdelingen overgelaten die de contour bepalen. Met de letters A t/m E zijn, uitgaande van de daarvoor maatgevende korrelverdelingen, de filtercriteria uit §6.1.1 aangegeven die de grenzen bepalen waarbinnen de korrelverdeling van de grofzandbarrière dient te vallen.



Figuur 56 Maatgevende korrelverdelingen Gameren met filtercriteria en GZB1 t/m GZB5. De 'horizontale druppels' geven de grenzen aan voor criteria A t/m E, terwijl de met A t/m D geletterde stippen de basis daarvoor in de korrelverdelingen aangeven.

Het valt op dat met name de marge tussen criterium A (een bovengrens) en criterium D (een ondergrens) vrij klein is. Alleen GZB3 en GZB4 voldoen hieraan. Van GZB4 is dat overigens logisch, omdat deze verschaalde variant van GZB1 juist zó verschaald is dat een zo grof mogelijk materiaal wordt verkregen dat aan alle filtercriteria voldoet. GZB3 is een standaard in de handel verkrijgbaar fijn filterzand en daarmee gemakkelijker en goedkoper toepasbaar dan GZB4, dat waarschijnlijk speciaal gezeefd zal moeten worden. Desondanks is voor vlakke toepassing van de grofzandbarrière gekozen voor GZB4, omdat hiervan de werking veel meer wordt ondersteund door experimenten (criterium J – met GZB3 zijn slechts enkele kleinschalige proeven uitgevoerd, terwijl de meeste (meer relevante) medium-schaalproeven met de vergelijkbare materialen GZB1 en GZB5 zijn uitgevoerd). Voor de grofzandbarrière met inkassing vervalt dit criterium en kan op basis van kosten en verkrijgbaarheid GZB3 geschikter zijn.

Ten westen van dijkpaal RW140, dus grofweg in het westelijke deel van het dijkversterkingsproject Gameren, zou GZB5 wél voldoen, zoals aangegeven in Figuur 57 (NB: omdat de tussenzandlaag niet doorlopend is, is deze ook niet maatgevend voor criterium A). Dit kan van pas komen indien in het westelijke deel GZB4 rekenkundig niet voldoende veiligheid biedt, maar het grovere, daarmee beter doorlatende GZB5 wel.



Figuur 57 Maatgevende korrelverdelingen aan de westzijde van Gameren met filtercriteria en GZB1 t/m GZB5.

Tot slot moet nog worden getoetst op interne stabiliteit (criteria F, G en H). Zoals reeds aangegeven in §6.1.2 voldoet GZB1 niet aan het eerste criterium (G) van Burenkova, al heeft dit in de experimenten niet tot problemen geleid. Voor GZB4 en GZB5 wordt met de formules van Burenkova uiteraard dezelfde uitkomst gevonden.

7 Berekeningsresultaten voor een vlakke aansluiting

7.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden alle berekeningsresultaten weergegeven voor de tien profielen die in hoofdstuk 3 zijn beschreven voor de situatie met een vlakke aansluiting. Mede doordat dit de eerste praktijktoepassing van de grofzandbarrière betreft, is het rekenproces meer dan gebruikelijk te omschrijven als een lange weg langs diverse alternatieven. Omdat het ook voor latere toepassingen relevant zal zijn om van tenminste een gedeelte van die alternatieven de invloed in concrete situaties te kunnen zien, is er voor gekozen om hier alle volledig uitgevoerde berekeningen op te nemen.

In §7.2 zijn de resultaten voor met name geometrische variaties beschreven voor een vlakke aansluiting van de grofzandbarrière op de overgang van de pipinggevoelige zandlaag met de cohesieve deklaag. §7.3 geeft de berekeningsresultaten voor karakteristieke en gemiddelde waarden van de doorlatendheden van het omgevingszand, met daarbij variatie van twee parameters die direct met de grofzandbarrière zelf te maken hebben: de dikte en de lengte waarover de pipe kan ingroeien voordat bezwijken kan optreden bij een verdere (minimale) verhoging van het verval. §7.3.2 geeft aan hoe met de (licht) afwijkende peilen en met de weerstand in de pipe(s) benedenstrooms van de grofzandbarrière kan worden omgegaan. In §7.5 komt de veiligheidsbenadering aan de orde, waarbij een verbinding wordt gelegd richting de algemene veiligheidsfilosofie voor de primaire waterkeringen in Nederland zoals die sinds de invoering van het WBI geldt. De conclusies voor deze variant zijn aangegeven in §7.6.

7.2 Resultaten van verkennende berekeningen per profiel

7.2.1 Profiel RW134+050

De berekeningsresultaten zijn weergegeven in Tabel 14. Een algemene uitleg bij de opbouw van de tabel, die ook van toepassing is op de latere tabellen in deze paragraaf, is daarna gegeven, gevolgd door een specifieke toelichting voor dit profiel.

Tabel 14 Berekende horizontale gradiënt voor profiel RW134+050 voor de verkennende sommen. Toelichting zie navolgende tekst.

nr	locatie	dikte (cm)	ingroei (cm)	k_{GZB} (m/dag)	rvw rivier	peil bij GZB (m + NAP)	bijzonderheden	gradiënt (-)
1	B	30	4	60	dicht	1.80	-	2.21
2	B	30	4	125	dicht	1.80	-	1.34
3	O	30	4	60	dicht	1.80	-	1.92
4	O	30	4	125	dicht	1.80	-	1.18053
5	T	30	4	60	dicht	1.80	-	0.26
6	T	30	4	125	dicht	1.80	-	0.13
7	O	30	4	125	open	1.80	-	1.18056
8	O	45	6	125	open	1.80	-	1.12
9	O	45	10	125	open	1.80	-	0.94
10	O	45	15	125	open	1.80	-	0.80
11	B	45	10	125	open	3.10	3 m opbarstvlak	0.73
12	B	45	10	125	open	3.10	-	0.77
13	B	45	10	125	open	3.10	k_a = 5 m/dag	0.29
14	B	30	4	175	open	1.80	-	1.04
15	B	45	10	175	open	1.80	-	0.79

Toelichting per kolom:
- nr: volgnummer binnen de tabel, om naar specifieke berekeningen te kunnen verwijzen;
- locatie: locatie van de grofzandbarrière ten opzichte van de eventuele tussenkleilaag:
  - T: de grofzandbarrière is alleen aanwezig boven de tussenkleilaag, dus alleen in de tussenzandlaag;
  - B: de grofzandbarrière is zowel in de tussenzandlaag als in de zandlaag daaronder aanwezig en vormt dus een hydraulische verbinding;
  - O: de grofzandbarrière is alleen aanwezig onder de onderste kleilaag in het model (in een situatie zonder tussenzandlaag is ook 'O' gebruikt);
- dikte: dikte van de grofzandbarrière (horizontale afstand tussen benedenstroomse en bovenstroomse kant).
- ingroei: de ingroeilengte; de afstand waarover de pipe de grofzandbarrière kan ingroeien (zie §7.2.1.1).
- k_{GZB}: doorlatendheid van de grofzandbarrière (zie ook §6.1.4, aanvankelijk is met voorzichtiger schattingen gewerkt, bij een doorlatendheid van 15 m/dag voor het achtergrondzand en de doorlatendheden voor de andere grondsoorten eveneens conform Tabel 7);
- rvw rivier: randvoorwaarde aan de rivierzijde in de schematisering: aanvankelijk was dit als een dichte rand gemodelleerd, later meer correct als een open rand;
- peil bij GZB: opgelegde peil aan de achterzijde van de grofzandbarrière, waarmee de eventuele invloed van de vorming van een pipe langs de achterzijde van de grofzandbarrière die in verbinding staat met een gebied met een lager maaiveld of polderpeil in rekening kan worden gebracht. Voor het waterpeil aan de rivierzijde is steeds NAP +9.00 m aangehouden. De afwijking die hierdoor en door de weerstand in de pipes ontstaat is in de DG-Flow-berekeningen gemakshalve niet meegenomen. Hiervoor kan echter eenvoudig naderhand worden gecorrigeerd, zie §7.4;
- gradiënt: de berekende horizontale gradiënt over de 10 cm aan de bovenzijde van de grofzandbarrière, direct bovenstrooms van het punt tot waar ingroei heeft plaatsgevonden.

7.2.1.1 Ingroeilengte

De ingroeilengte heeft betrekking op de verschijnselen die tijdens de medium-schaalproeven in het laboratorium zijn waargenomen en de keuze die vervolgens gemaakt is met betrekking tot de laatste fase die altijd voldoende veiligheid biedt tegen bezwijken. Dit is de fase waarbij er een pipe in de grofzandbarrière gevormd is, met daarbij het maximale verval vóórdat het verval werd ingesteld waarbij de pipe verder groeide, wat in sommige proeven tot een nieuw evenwicht leidde met een significant andere vorm van de pipe (namelijk groei in dwarsrichting binnen de grofzandbarrière nabij de bovenstroomse rand) en in andere proeven direct tot een doorbraak leidde (Rosenbrand & Van Beek, 2019).

De ingroeilengte betreft de lengte vóór verdere doorgroei. Deze verschilt per proef, zoals aangegeven in Tabel 15. De minimale waargenomen waarde is 4 cm, dit is aanvankelijk als een veilige ondergrens in de berekeningen aangenomen.

Tabel 15 Ingroeilengte in 12 medium-schaalproeven.

Proef	Dikte grofzandbarrière (cm)	Ingroeilengte (cm)
MS-GZB1-B15-23	30	6
MS-GZB2-B25-24	30	12
MS-GZB1-B25-25	30	6
MS-GZB1-B25-26	30	8
MS-GZB1-B25-27	30	8
MS-GZB2-MS-28	30	4
MS-GZB1-B25-29	30	4
MS-GZB1-B25-30	30	8
MS-GZB1-B25-31	45	15

Proef	Dikte grofzandbarrière (cm)	Ingroeilengte (cm)
MS-GZB1-B25-32	45	18
MS-GZB1-B25-33	30	11
MS-GZB1-B15-34	30	4
MS-GZB5-B25-35	30	7
MS-GZB5-B25-36	30	7

7.2.1.2 Specifieke bijzonderheden bij de berekeningen voor dit profiel

Bij nr. 11 is een 3 meter breed opbarstvlak gemodelleerd in deze 2D-berekening, ter plaatse van het mogelijke opbarstpunt in het achterland, 15 m benedenstrooms van de grofzandbarrière. Opbarsten over zo'n grote breedte wordt niet erg waarschijnlijk geacht, maar deze waarde is gekozen om eindeloze iteraties te vermijden. Met deze te grote breedte is de invloed van deze alternatieve modellering al betrekkelijk gering, terwijl de invloed bij meer realistische (smallere) breedtes nog kleiner zal zijn. Nader onderzoek hiernaar heeft derhalve weinig nut.

Bij nr. 13 is voor het achtergrondzand niet met de in deze fase algemeen gehanteerde karakteristieke waarde van de doorlatendheid van 15 m/dag gerekend, maar met de verwachtingswaarde van 5 m/dag, om de invloed hiervan in te schatten.

7.2.1.3 Invloed van parametervariaties

In §7.2.11, na de presentatie van de resultaten voor elk van de tien profielen, wordt de invloed van de diverse variaties op overkoepelend niveau geanalyseerd.

7.2.2 Profiel RW135+050

Voor dit profiel zijn de berekende varianten en de daarbij berekende horizontale gradiënt over de eerste 10 cm bovenstrooms van de ingegroeide pipe aangegeven in Tabel 16.

Tabel 16 Berekende horizontale gradiënt voor profiel RW135+050 voor de verkennende sommen.

nr	locatie	dikte (cm)	ingroei (cm)	k_{GZB} (m/dag)	rvw rivier	peil bij GZB (m + NAP)	bijzonderheden	gradiënt (-)
1	B	30	4	60	dicht	1.80	-	1.23
2	B	30	4	125	dicht	1.80	-	0.74
3	O	30	4	60	dicht	1.80	-	1.08
4	O	30	4	125	dicht	1.80	-	0.66
5	O	30	4	60	dicht	1.80	topkleilaag ver doorlopend	1.14
6	O	30	4	125	dicht	1.80	topkleilaag ver doorlopend	0.69
7	O	30	4	60	open	1.80	zand onder Gameren	1.12
8	O	30	4	125	open	1.80	zand onder Gameren	0.68
9	O	45	6	125	open	1.80	-	0.62
10	O	45	10	125	open	1.80	-	0.52
11	O	45	15	125	open	1.80	-	0.44

De geometrische varianten die zijn doorgerekend, staan omschreven in §3.5. De invloed van deze variaties is betrekkelijk gering, maximaal 6% ten opzichte van n de basisschematisering (nr. 3, te vergelijken met nr. 5 en nr. 7). Die basisschematisering lijkt het meest aannemelijk op basis van de ontstaansgeschiedenis.

7.2.3 Profiel RW136+050

Voor dit profiel zijn de berekende varianten en de daarbij berekende horizontale gradiënt over de eerste 10 cm bovenstrooms van de ingegroeide pipe aangegeven in Tabel 17.

Tabel 17 Berekende horizontale gradiënt voor profiel RW136+050 voor de verkennende sommen.

nr	locatie	dikte (cm)	ingroei (cm)	k_{GZB} (m/dag)	rvw rivier	peil bij GZB (m + NAP)	bijzonderheden	gradiënt (-)
1	O	30	4	60	dicht	1.80	-	1.43
2	O	30	4	125	dicht	1.80	-	0.87576
3	O	30	4	125	open	1.80	-	0.87577
4	O	45	6	125	open	1.80	-	0.83
5	O	30	10	125	open	1.80	-	0.70
6	O	30	15	125	open	1.80	-	0.59
7	O	30	4	175	open	1.80	-	0.68
8	O	45	10	175	open	1.80	-	0.53

Vermeldenswaard zijn ook de eerste berekeningen voor Gameren, die ook voor dit profiel zijn gemaakt. Daarbij is allereerst gevarieerd met de diepte van de grofzandbarrière en met de aan- of afwezigheid van een dunne sliblaag op de bodem van de nevengeul, in een periode dat nadere informatie daarover nog ontbrak. Verder is gevarieerd met diverse doorlatendheden. De zes berekeningen waartussen de diepte van de grofzandbarrière is gevarieerd, staan vermeld in Tabel 18.

Tabel 18 Eerste berekeningen voor Gameren, met onder andere variatie van de diepte van de grofzandbarrière.

case	diepte grofzandbarrière (m)	k_{GZB} (m/dag)	$k_{zandlaag}$ (m/dag)	dikte zandlaag (m)	sliblaag	gradiënt (-)
1	1.5	100	5	18	ja	0.32
2	1.5	100	5	18	nee	0.46
3	1.0	100	5	18	nee	0.46
4	1.0	100	5	18	ja	0.29
8	1.5	100	5	40	ja	0.52
9	1.0	100	5	40	ja	0.47

Onderling vergelijkbaar zijn de cases 2 en 3, 1 en 4, en 8 en 9. Bij het eerste paar, waarbij de aanstroming door het ontbreken van de sliblaag meer horizontaal is dan bij de andere twee paren, is er geen verschil, terwijl bij de andere combinaties de diepere grofzandbarrière leidt tot een 10% hogere gradiënt.

7.2.4 Profiel RW137+050

Voor dit profiel zijn de berekende varianten en de daarbij berekende horizontale gradiënt over de eerste 10 cm bovenstrooms van de ingegroeide pipe aangegeven in Tabel 19.

Tabel 19 Berekende horizontale gradiënt voor profiel RW137+050 voor de verkennende sommen.

nr	locatie	dikte (cm)	ingroei (cm)	k_{GZB} (m/dag)	rvw rivier	peil bij GZB (m + NAP)	bijzonderheden	gradiënt (-)
1	O	30	4	60	open	1.80	-	1.14
2	O	30	4	125	open	1.80	-	0.71
3	O	30	4	125	open	1.80	veen tot x=-30m	0.65
4	O	30	4	125	open	1.80	klei bij Gameren	0.71
5	O	45	6	125	open	1.80	klei bij Gameren	0.67
6	O	45	10	125	open	1.80	klei bij Gameren	0.56
7	O	45	15	125	open	1.80	klei bij Gameren	0.47

De invloed van de variaties in de schematisering van de ondergrond blijkt gering.

7.2.5 Profiel RW138+050

Voor dit profiel zijn de berekende varianten en de daarbij berekende horizontale gradiënt over de eerste 10 cm bovenstrooms van de ingegroeide pipe aangegeven in Tabel 20.

Tabel 20 Berekende horizontale gradiënt voor profiel RW138+050 voor de verkennende sommen.

nr	locatie	dikte (cm)	ingroei (cm)	k_{GZB} (m/dag)	rvw rivier	peil bij GZB (m + NAP)	bijzonderheden	gradiënt (-)
1	T	30	4	125	dicht	1.80	-	0.25
2	O	30	4	125	open	1.80	-	1.00
3	O	30	4	125	dicht	1.80	-	1.00
4	O	30	4	60	dicht	1.80	-	1.72
5	T	30	4	60	dicht	1.80	-	0.50
6	O	45	10	125	open	1.80	3m opbarstvlak	0.70
7	O	45	10	125	open	1.80	-	0.80
8	O	45	10	125	open	1.80	k_a = 5 m/dag	0.34
9	O	30	4	175	open	1.80	-	0.83
10	O	45	10	175	open	1.80	-	0.60

De variaties bij nr. 6 en nr. 8 hebben een vergelijkbare invloed als bij profiel RW134+050 (zie §7.2.1).

7.2.6 Profiel RW139+050

Voor dit profiel zijn de berekende varianten en de daarbij berekende horizontale gradiënt over de eerste 10 cm bovenstrooms van de ingegroeide pipe aangegeven in Tabel 21.

Tabel 21 Berekende horizontale gradiënt voor profiel RW139+050 voor de verkennende sommen.

nr	locatie	dikte (cm)	ingroei (cm)	k_{GZB} (m/dag)	rvw rivier	peil bij GZB (m + NAP)	bijzonderheden	gradiënt (-)
1	O	30	4	60	dicht	1.80	-	0.68
2	O	30	4	125	dicht	1.80	-	0.42
3	O	30	4	60	dicht	1.80	veenlaag doorlopend	0.69
4	O	30	4	125	dicht	1.80	veenlaag doorlopend	0.42
5	O	30	4	60	open	1.80	-	0.92
6	O	30	4	125	open	1.80	-	0.56
7	O	30	4	60	open	1.80	veenlaag doorlopend	0.93
8	O	30	4	125	open	1.80	veenlaag doorlopend	0.56
9	B	30	4	60	open	1.80	-	0.93
10	B	30	4	125	open	1.80	-	0.58
11	T	30	4	60	open	1.80	-	0.28
12	T	30	4	125	open	1.80	-	0.14
13	O	45	6	125	open	1.80	-	0.52
14	O	45	10	125	open	1.80	-	0.44
15	O	45	15	125	open	1.80	-	0.37

De variatie in de ondergrondmodellering betreft hier of de aangetroffen veenlaag wel of niet doorloopt tot aan het slappe-lagenpakket onder de oude Waalbandijk en het dorp Gameren. Bij ‘doorlopen’ is ook aangenomen dat de veenlaag op dat pakket aansluit en er dus een hydraulische afsluiting ontstaat. De invloed hiervan blijkt minimaal te zijn en in de helft van de gevallen weg te vallen bij de gepresenteerde nauwkeurigheid.

7.2.7 Profiel RW140+050

Voor dit profiel zijn de berekende varianten en de daarbij berekende horizontale gradiënt over de eerste 10 cm bovenstrooms van de ingegroeide pipe aangegeven in Tabel 22.

Tabel 22 Berekende horizontale gradiënt voor profiel RW140+050 voor de verkennende sommen.

nr	locatie	dikte (cm)	ingroei (cm)	k_{GZB} (m/dag)	rvw rivier	peil bij GZB (m + NAP)	bijzonderheden	gradiënt (-)
1	O	30	4	220	dicht	1.80	-	0.80
2	O	30	4	125	dicht	1.80	-	1.23
3	O	30	4	60	dicht	1.80	-	1.98
4	B	30	4	220	open	1.80	-	0.84

nr	locatie	dikte (cm)	ingroei (cm)	k_{GZB} (m/dag)	rvw rivier	peil bij GZB (m + NAP)	bijzonderheden	gradiënt (-)
5	O	45	6	125	open	1.80	-	1.16
6	O	45	10	125	open	1.80	-	0.98
7	O	45	15	125	open	1.80	-	0.82

7.2.8 Profiel RW141+050

Voor dit profiel zijn de berekende varianten en de daarbij berekende horizontale gradiënt over de eerste 10 cm bovenstrooms van de ingegroeide pipe aangegeven in Tabel 23.

Tabel 23 Berekende horizontale gradiënt voor profiel RW141+050 voor de verkennende sommen.

nr	locatie	dikte (cm)	ingroei (cm)	k_{GZB} (m/dag)	rvw rivier	peil bij GZB (m + NAP)	bijzonderheden	gradiënt (-)
1	O	30	4	60	dicht	1.80	-	1.24
2	O	30	4	125	dicht	1.80	-	0.77
3	O	30	4	220	dicht	1.80	-	0.50
4	O	30	4	125	open	1.80	-	0.92
5	O	30	4	220	open	1.80	-	0.59
6	O	45	6	125	open	1.80	-	0.69
7	O	45	10	125	open	1.80	-	0.59
8	O	45	15	125	open	1.80	-	0.49
9	O	30	4	125	open	1.80	-	0.74

7.2.9 Profiel RW142+050

Voor dit profiel zijn de berekende varianten en de daarbij berekende horizontale gradiënt over de eerste 10 cm bovenstrooms van de ingegroeide pipe aangegeven in Tabel 24.

Tabel 24 Berekende horizontale gradiënt voor profiel RW142+050 voor de verkennende sommen.

nr	locatie	dikte (cm)	ingroei (cm)	k_{GZB} (m/dag)	rvw rivier	peil bij GZB (m + NAP)	bijzonderheden	gradiënt (-)
1	O	30	4	220	open	1.80	-	0.3550
2	B	30	4	220	open	1.80	-	0.380
3	O	30	4	220	open	1.80	klei tot 8 m achter GZB	0.3548
4	O	30	4	220	open	1.80	geen tussenkleilaag	0.382
5	O	30	4	60	open	1.80	-	0.89
6	O	30	4	60	open	1.80	geen tussenkleilaag	0.99
7	O	30	4	220	open	1.80	zand bij Gameren	0.354
8	O	45	6	220	open	1.80	-	0.30
9	O	45	10	220	open	1.80	-	0.27

Het effect van de geometrische variaties, zoals beschreven in §3.12, is vrij klein voor wat betreft de tussenkleilaag en erg klein voor de beide andere variaties (de extra decimalen zijn vermeld om dit zichtbaar te maken).

7.2.10 Profiel RW143+050

Voor dit profiel zijn de berekende varianten en de daarbij berekende horizontale gradiënt over de eerste 10 cm bovenstrooms van de ingegroeide pipe aangegeven in Tabel 25.

Tabel 25 Berekende horizontale gradiënt voor profiel RW143+050 voor de verkennende sommen.

nr	locatie	dikte (cm)	ingroei (cm)	k_{GZB} (m/dag)	rvw rivier	peil bij GZB (m + NAP)	bijzonderheden	gradiënt (-)
1	O	30	4	125	dicht	1.80	-	0.79
2	O	30	4	220	dicht	1.80	-	0.51
3	B	30	4	220	dicht	1.80	-	0.27
4	O	30	4	60	dicht	1.80	-	1.27

7.2.11 Invloed van diverse variaties

In deze paragraaf wordt nader ingegaan op de gevoeligheid van de berekeningsresultaten voor verschillende variaties. Achtereenvolgens komen aan de orde: geometrische variaties in de ondergrondschematisering, de doorlatendheden van het barrièremateriaal en van het achtergrondzand, de dikte van de grofzandbarrière, de ingroeilengte en de locatie van de grofzandbarrière binnen het grondprofiel. In de volgende paragraaf wordt ingegaan op enkele zuiver numerieke aspecten van de berekeningen.

De invloed van de aanpassingen in de ondergrondschematisering is in de meeste gevallen vrij klein of zelfs praktisch verwaarloosbaar. In enkele gevallen, zoals in profiel 142 waar de aanwezigheid van de tussenkleilaag op basis van de resterende onzekerheden vanuit het grondonderzoek ter discussie is gesteld, bedraagt de invloed op de maatgevende uitkomst (de gradiënt zoals toegelicht in §7.2.1) ten hoogste 10%. Op basis hiervan lijkt het hanteren van een schematiseringsfactor van 1.1 alleszins gerechtvaardigd. Een nauwgezette berekening van deze factor ontbreekt hier, maar deze zal waarschijnlijk tot een nog iets lagere factor leiden.

De invloed van de doorlatendheid van de grofzandbarrière en het achtergrondzand is groot, voor lage waarden van het doorlatendheidscontrast ($k_{GZB}/k_{achtergrondzand} < 10$) zelfs bijna lineair. Dit onderstreept het belang van het gebruik van betrouwbare waarden voor deze doorlatendheden.

Aanvankelijk is met een conservatieve waarde van de doorlatendheid van GZB1 bij een relatieve dichtheid van 100% gerekend, waaruit eveneens op conservatieve wijze waarden zijn geschat voor GZB4 en GZB5. Dit heeft geleid tot de in de berekeningen gehanteerde waarden van respectievelijk 60, 125 en 220 m/dag. Op basis van latere inzichten en de toen inmiddels gemaakte keuze om GZB4 toe te passen voor het gehele gebied is vervolgens met een waarde van 175 m/dag gerekend (zie §7.3). In §7.6 wordt nader ingegaan op de te hanteren waarde op basis van later verkregen inzichten.

De dikte van de grofzandbarrière heeft een kleinere, maar nog steeds significante invloed. Deze is mede afhankelijk van de keuze voor de ingroeilengte (zie hierna): een dikte van 45 cm in plaats van 30 cm (anderhalf maal dikker) geeft in de meeste gevallen bij een ingroeilengte van 6 cm (anderhalf maal groter) een 5 tot 8 procent gunstiger gradiënt, bij een ingroeilengte van 10 cm is de berekende gradiënt meestal bijna een kwart lager en bij een ingroeilengte van 15 cm (de laagst waargenomen waarde) is deze ongeveer een derde lager.

Voor de ingroeilengte is bij een barrièredikte van 30 cm in alle voorgaande berekeningen uitgegaan van de kleinst waargenomen waarde in de experimenten: 4 cm (zie Tabel 15). Dit heeft een fysieke achtergrond, maar is ook discutabel. Immers, bij een volgend experiment zou een lagere waarde behaald kunnen worden. Statistisch is er op basis van de beschikbare proevenset (12 proeven) een kans van 5% op een ingroeilengte van slechts 2 cm – wat echter amper meer is dan de afstand waarover initieel enige verbrokkeling optreedt zodra de pipe bij de grofzandbarrière aankomt, maar daar nog niet echt in ingroeit.

Met een 45 cm dikke barrière zijn slechts twee proeven uitgevoerd, waarbij een minimale ingroeilengte van 15 cm is geobserveerd. Dit kan als uitgangspunt voor de berekeningen worden genomen, evenals een anderhalf maal grotere waarde, dus 1,5 * 4 = 6 cm. Bij dit laatste wordt dan voorbijgegaan aan de dikte van de afbrokkelingszone. Een tussenweg, waarmee hier de meeste berekeningen met een dikkere grofzandbarrière zijn gedaan, is een keuze voor een ingroeilengte van 10 cm. De invloed van de verschillende keuzes is hiervoor al aan de orde gekomen bij de bespreking van de invloed van de dikte van de grofzandbarrière.

Voor de locatie van de grofzandbarrière geldt dat de locatie binnen het dwarsprofiel al grotendeels vastligt door de reeds gemaakte keuze zoals beschreven in §1.4: op 5 meter vanaf de huidige binnenteen van de dijk (zie Figuur 6). Vervolgens is er alleen nog variatie mogelijk over de diepte: een grofzandbarrière alleen in de tussenzandlaag, alleen in de onderste zandlaag of beide. In de voorgaande tabellen met berekeningsresultaten is dit weergegeven met respectievelijk T, O en B in de tweede kolom.

In drie profielen is gerekend met een grofzandbarrière in alleen de tussenzandlaag. Door de geringe dikte van deze laag en de slechte aansluiting op het buitenwater is de wateraanvoer beperkt en is deze situatie nooit maatgevend ten opzichte van beide andere situaties.

In zes profielen is gerekend met een grofzandbarrière die door de tussenkleilaag heen steekt en daardoor als het ware een schoorsteen vormt voor wateraanvoer vanuit de doorlopende onderste zandlaag. In de andere gevallen werd het onbedoeld doorsteken van de tussenkleilaag niet waarschijnlijk geacht vanwege de dikte daarvan (minstens 1 meter). In alle gevallen is hierbij gerekend met piping via de tussenzandlaag, door het opleggen van een vaste stijghoogte direct achter en tot aan de ingroeilengte in de grofzandbarrière, aan de bovenzijde daarvan. In vergelijking met dezelfde situatie met een grofzandbarrière in alleen de onderste zandlaag leidt dit in de meeste gevallen tot een hogere gradiënt; de toename bedraagt 5 tot 40 procent. In één situatie (profiel 143) wordt een lagere waarde gevonden, dit hangt samen met het relatief hoog liggende achterland daar, waardoor de berekening met piping in de tussenzandlaag problematische randvoorwaarden kent.

7.2.12 Invloed numerieke modellering

Een andere categorie van variaties betreft de numerieke modellering. Idealiter zou deze geen invloed moeten hebben op de uitkomsten. Hier is aandacht besteed aan twee aspecten: de randvoorwaarden en de kleinste elementgrootte nabij en in de grofzandbarrière.

Logische randvoorwaarden in deze situatie zijn een gesloten onderrand en open zij- en bovenranden. In de eerste serie berekeningen is abusievelijk gerekend met een gesloten rand aan de rivierzijde. Voor de meeste profielen is dit later gecorrigeerd, of waren er nog geen berekeningen gemaakt toen deze fout werd ontdekt. Op basis van de modellering zou verwacht mogen worden dat de invloed bij de geul verwaarloosbaar klein is (dus bij de profielen 134, 135, 136 en 143), maar bij de met minder goed doorlatend materiaal grotendeels opgevulde zandwinput niet (dus bij de profielen 137 t/m 142). Voor profielen 134 en 136 is er inderdaad geen significant verschil, maar dat geldt ook voor profiel 138 en, in wat mindere mate, voor profiel 140, al is daar geen 1:1 vergelijking mogelijk tussen twee berekeningen. Een grote invloed wordt gevonden bij profielen 139 en 141, terwijl bij profiel 135 geen goede vergelijking mogelijk is en voor profielen 137, 142 en 143 alleen met één type randvoorwaarde berekeningen zijn uitgevoerd.

Een ander punt betreft de keuze van de kleinste elementgrootte nabij en in de grofzandbarrière. Alle voorgaande berekeningen zijn uitgevoerd met een minimale elementafmeting van 2 cm. Het was aanvankelijk niet mogelijk om een eindige-elementennet (‘mesh’) te creëren met een kleinere minimale afmeting. Na afronding van de voorgaande berekeningen werd het wel mogelijk om deze afmeting terug te brengen tot 0,5 cm. Voor een zestal situaties is de invloed van de minimale elementafmeting onderzocht, met berekeningen met 0,5 cm, 1 cm en 2 cm. Uit elk van deze situaties kwam een lineair verband tussen de minimale elementafmeting en de gevonden gradiënt naar voren. Voor alle situaties bleek de gradiënt toe te nemen bij een kleinere afmeting. Voor de situaties met een vlakke aansluiting bleek dit 5 tot 8 procent verschil te maken. Dit betrof voor profiel 134 nr. 7 en nr. 9 uit Tabel 14 en voor profiel 137 nr. 4 en nr. 6 uit Tabel 19.

Er zijn ook twee situaties doorgerekend met een inkassing (zie hiervoor verder hoofdstuk 8), de eerste voor profiel 134, afgezien van de inkassing verder gelijk aan nr. 7 uit Tabel 14, en de tweede voor profiel 137, grotendeels vergelijkbaar met nr. 4 uit Tabel 19, maar met een doorlatendheid van de grofzandbarrière van 175 m/dag. Hiervoor werd telkens een verhoging van de maatgevende waarden (bij een hellingshoek van 10 graden) van minder dan 1 procent gevonden bij verkleining van de minimale elementafmetingen.

Hierna zijn alle berekeningen uitgevoerd met een minimale elementgrootte van 0,5 cm.

7.3 Resultaten met karakteristieke en gemiddelde waarden

7.3.1 Grofzandbarrière op de vastgestelde positie binnen het dwarsprofiel

Na de voorgaande berekeningen met een verkennend karakter zijn alle profielen doorgerekend met:

- een bij het dwarsprofiel passende keuze voor de positie van de grofzandbarrière: in beide zandlagen of alleen in de onderste zandlaag. Hierbij is rekening gehouden met de dikte van de tussenkleilaag, onzekerheden en variaties in de positie van die laag en marges bij de aanleg, voortvloeiend uit het materieel dat gebruikt kan worden. Alleen bij een dikte van meer dan 1 meter is voor een positie alleen in de onderste zandlaag gekozen;
- overal hetzelfde grofzandbarrièremateriaal met een doorlatendheid van 175 m/dag, destijds passend geacht bij GZB4. Dit is het grofste materiaal dat in het maatgevende oostelijke gedeelte (oostelijk van RW140) kan worden toegepast. Toepassen van één type barrièrezand verkleint de kans op fouten tijdens de aanleg;
- zowel de karakteristieke doorlatendheid van de in dit verband belangrijkste zandlaag in de ondergrond van 15 m/dag, als de gemiddelde of verwachte doorlatendheid van 5 m/dag;
- zowel de 95%-ondergrenswaarde voor de ingroeilengte in de barrière (2 cm) als de gemiddelde waarde uit de 12 relevante medium-schaalproeven (7 cm), zie Tabel 15.

De uitkomsten van deze berekeningen voor een grofzandbarrière van 30 cm dikte zijn vermeld in Tabel 26. Voor 9 van de 10 profielen zijn ook berekeningen gemaakt voor een dikte van de grofzandbarrière van 45 cm met een ingroeilengte van 10 cm en zowel de karakteristieke als de verwachte doorlatendheid van de zandlaag (resp. 15 en 5 m/dag). Voor één profiel is bovendien gerekend met een ingroeilengte van 6 cm. De uitkomsten van deze berekeningen zijn vermeld in Tabel 27.

Tabel 26 Berekende horizontale gradiënt voor alle profielen bij een dikte van de grofzandbarrière van 30 cm voor verschillende doorlatendheden van het achtergrondzand en verschillende ingroeilengtes.

profiel RW …+050	locatie	met karakteristieke doorlatendheid		met verwachte doorlatendheid	
		2 cm ingroei (-)	7 cm ingroei (-)	2 cm ingroei (-)	7 cm ingroei (-)
134	B	1.59	0.97	0.61	0.37
135	B	0.79	0.48	0.30	0.18
136	O	0.99	0.67	0.40	0.25
137	O	0.72	0.49	0.29	0.18
138	O	1.02	0.68	0.41	0.26
139	O	0.57	0.38	0.23	0.14
140	B	1.39	0.85	0.56	0.34
141	B	0.88	0.54	0.35	0.21
142	B	0.53	0.32	0.20	0.12
143	B	0.85	0.52	0.32	0.19

Tabel 27 Berekende horizontale gradiënt voor negen profielen bij een dikte van de grofzandbarrière van 45 cm voor verschillende doorlatendheden van het achtergrondzand en verschillende ingroeilengtes.

profiel RW …+050	locatie	met karakteristieke doorlatendheid		met verwachte doorlatendheid	
		6 cm ingroei (-)	10 cm ingroei (-)	6 cm ingroei (-)	10 cm ingroei (-)
134	B	-	0.92	-	0.33
135	B	-	0.45	-	0.17
136	O	-	-	-	-
137	O	0.55	0.45	0.21	0.17
138	O	-	0.63	-	0.23
139	O	-	0.35	-	0.13
140	B	-	0.82	-	0.31
141	B	-	0.51	-	0.19
142	B	-	0.37	-	0.14
143	B	-	0.49	-	0.18

7.3.2 Invloed positie binnen het dwarsprofiel

In alle voorafgaande berekeningen is de positie van de grofzandbarrière aangenomen op 5 m vanuit de huidige binnenteen van de dijk (zie ook Figuur 6). Dit is conform het uitgangspuntenrapport voor de dijkversterking bij Gameren, zoals vermeld door De Wit (2017). Voor de optredende gradiënt in de barrière zal een locatie dichterbij het uittredepunt gunstiger zijn, in elk geval vanuit theoretisch oogpunt. Praktisch betekent dit wel dat er een extra inspanning noodzakelijk kan zijn om voorloopsheid (bijvoorbeeld opbarsten tussen de dijk en de grofzandbarrière) tegen te gaan.

Om interferentie van erosieprocessen bij het uittredepunt en bij de aantakking op de grofzandbarrière te vermijden, wordt geadviseerd om hier enige afstand tussen te houden. Hier is (nog) niet goed aan te rekenen, maar voorgesteld wordt om hiervoor tenminste 5 meter aan te houden. Dit maakt bij eventueel bovenstrooms opschuiven van het uittredepunt dan eventuele beheersmaatregelen als het dumpen van materiaal in het erosiegat tijdens hoogwater nog steeds mogelijk.

In Tabel 28 zijn de locaties aangegeven van het aangenomen intredepunt, het uittredepunt en de grofzandbarrière in elk van de tien onderscheiden dwarsprofielen. De hier gehanteerde coördinaatsas heeft steeds het nulpunt op de bestaande buitenkruinlijn.

Tabel 28 Coördinaten ten opzichte van de buitenkruinlijn binnen elk dwarsprofiel van karakteristieke locaties.

Profiel RW …	Intredepunt (m)	Uittredepunt (m)	Grofzandbarrière (m)
134+050	-80	40	25
135+050	-85	55	27
136+050	-94	49	27
137+050	-33	49	27
138+050	-36	87	23
139+050	-30	82	23
140+050	-35	92	23
141+050	-43	86	22
142+050	-39	83	27
143+050	-76	53	28

Voor drie profielen is een alternatieve positie onderzocht voor een vlakke grofzandbarrière van 45 cm dikte. In Tabel 29 zijn de resultaten weergegeven voor de ten tijde van de

berekening geldende karakteristieke doorlatendheid van de zandlaag van 15 m/dag en een doorlatendheid van de grofzandbarrière van 175 m/dag. De gradiënt in de barrière blijkt sterker te worden beïnvloed door de locatie ten opzichte van de zandlagen (alleen in de onderste zandlaag (O) of ook in de tussenzandlaag (B)), dan door de positie binnen het dwarsprofiel.

Tabel 29 Berekende gradiënten in enkele profielen voor verschillende posities van de grofzandbarrière.

Profiel RW …	locatie	afstand tot buitenkruinlijn (m)	afstand tot uittredepunt (m)	gradiënt (-)
134+050	B	25	15	0.92
	B	35	5	0.85
138+050	O	23	64	0.63
	O	77	10	0.59
141+050	B	22	64	0.51
	O	76	10	0.26

7.4 Correctie voor maatgevende peilen en pipe-weerstand

Vrijwel alle voorgaande berekeningen zijn uitgevoerd voor een buitenwaterstand van NAP +9.00 m en een binnendijks peil van NAP +1.80 m. In de eerste drie profielen is daarom in de meeste gevallen nog een correctie nodig. Hiervoor kan eenvoudig een correctie worden toegepast recht evenredig met de verhouding tussen het correcte verhang en het in de berekening toegepaste verhang.

Daarnaast is de weerstand in de pipes verwaarloosd. Net als bij alle andere natuurkundige processen is de weerstand echter niet gelijk aan nul, zoals uitgewerkt door Van Beek (2019b). Zoals daarin is uitgewerkt, kan vooralsnog met een gradiënt in de pipe van 0.01 worden gerekend, dus 1 cm verval over iedere meter pipelengte. De pipelengte is minimaal gelijk aan de afstand tussen de grofzandbarrière en het uittredepunt. In het geval van zijdelingse pipegroei achterlangs de grofzandbarrière is de weerstand navenant groter.

In Tabel 30 is voor elk profiel een passende correctiefactor aangegeven, gebaseerd op zowel het werkelijke maatgevende verval als de minimale weerstand in de pipes (afstand tussen uittredepunt en grofzandbarrière vermenigvuldigd met 0.01 (m/m).

Tabel 30 Correctiefactor per profiel op basis van maatgevende peilen en minimale pipelengte

profiel RW …+050	buitenpeil (m + NAP)	binnenpeil (m + NAP)	pipelengte (m)	correctiefactor (-)
134	8.97	3.10	15	0.794
135	8.97	1.80	28	0.957
136	8.97	1.80	22	0.965
137	9.00	1.80	22	0.969
138	9.00	1.80	64	0.911
139	9.00	1.80	59	0.918
140	9.00	1.80	69	0.904
141	9.00	1.80	64	0.911
142	9.00	1.80	56	0.922
143	9.00	1.80	25	0.965

7.5 Aanvankelijk gehanteerde veiligheidsbenadering voor de vlakke barrière

7.5.1 Aanleiding en doel

Door Kanning is een memo opgesteld waarin uiteengezet is hoe de voorgaande berekeningsresultaten gekoppeld kunnen worden aan de huidige veiligheidsbenadering voor de primaire waterkeringen in Nederland (Kanning, 2019). De memo betreft slechts een eerste aanzet, omdat voor volledigheid onder andere een reeks van de probabilistische berekeningen vereist is. Veel betrokkenen bij het onderzoek naar de grofzandbarrière hebben hier hun inbreng aan geleverd. In deze paragraaf is deze memo op hoofdlijnen herhaald, aangepast aan hetgeen hiervoor al is vermeld.

Het belangrijkste (deel)faalmechanisme bij een grofzandbarrière is het doorbreken van de barrière door stromingsdruk. Dit wordt gemodelleerd met een primair erosiemodel. De vraag is echter wat de modelonzekerheid en modelfactor van dit primaire erosiemodel zou moeten zijn om aan een gegeven betrouwbaarheidseis te voldoen. Ook is een zogeheten veiligheidsformat voor primaire erosie in de grofzandbarrière vereist.

Idealiter wordt het hele veiligheidsformat geëvalueerd met semi-probabilistische en probabilistische analyses. Dit is voor het WBI2017 bijvoorbeeld gedaan voor het pipingmodel van Sellmeijer. Vanwege het ontbreken van praktische ervaring met de toepassing grofzandbarrière op meerdere, uiteenlopende locaties en de beperkt beschikbare middelen is dit vooralsnog beperkt tot een eerste inschatting van het veiligheidsformat en een aanzet hoe de modelfactor kan worden afgeleid op basis van pragmatische keuzes.

Deze paragraaf is volledig gefocust op het deelfaalmechanisme primaire erosie van het GZB. Andere deelfaalmechanismen worden in eerste instantie niet behandeld en worden uitgebreid behandeld in de bijlagen A en C van Koelewijn (2021). De afleiding van de betrouwbaarheidseisen waaraan de GZB moet voldoen zijn eveneens geen onderdeel van deze paragraaf, maar komen aan de orde in hoofdstuk 2 van Koelewijn (2021).

7.5.2 Model voor primaire erosie van de vlakke grofzandbarrière

Primaire erosie van de grofzandbarrière is één van de deelfaalmechanismen. Falen treedt op bij dit mechanisme als stromingsdruk op de zandkorrels in de grofzandbarrière groter wordt dan de weerstand die deze hebben tegen wegstromen. De primaire erosie wordt pragmatisch benaderd binnen het grofzandbarrière-onderzoek op basis van waarnemingen en metingen uit bovengenoemde proeven. Daarin is geconstateerd dat een pipe vanuit de benedenstroomse kant na het bereiken van de grofzandbarrière aanvankelijk niet verder de barrière ingroeit, maar zijdelings verder groeit in het van oudsher aanwezige achtergrondzand, langs de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière (in beide richtingen, loodrecht op de dominante stromingsrichting). De grofzandbarrière verkruimelt slechts in geringe mate aan de rand. Bij een verdere toename van het verval groeien korte pipes de grofzandbarrière in, maar vervolgens stabiliseert alles weer. Maatgevend wordt het stadium geacht vlak voordat een pipe in de barrière nog verder groeit, hetzij tot vlakbij de bovenstroomse rand (waarbij er nog van enige reststerkte sprake is), hetzij helemaal door de barrière heen naar het voorliggende achtergrondzand, waarna bezwijken slechts een kwestie van tijd is. Omdat er geen eenduidig onderscheid gemaakt kan worden wanneer de verdere doorgroei meteen doorzet en wanneer niet, wordt de situatie vlak voordat de verdere doorgroei optreedt als maatgevend beschouwd voor de sterkte.

Voor die situatie, waarin de weerstand tegen primaire erosie in ieder geval nog net voldoende is, wordt voor situaties met een dikte van de grofzandbarrière van 30 cm als criterium de *gemodelleerde* horizontale gradiënt (i_{DGF}) over een afstand van 10 cm gehanteerd uitgaande van een pipegroei van 4 cm in de barrière. De kritische gradiënt (i_{crit}) is voorlopig niet

afhankelijk van enige parameter, terwijl hier wel aanwijzingen voor zijn (bijvoorbeeld voor de Relatieve Dichtheid, *RD*).

In formulevorm wordt naar de volgende vergelijking gekeken:

$$i_{DGF} < i_{crit} \quad (1)$$

7.5.3 Stappenplan afleiding veiligheidsformat en modelfactor

De volgende drie stappen worden doorlopen:

1. Bepaling onzekerheden in modelvoorspelling en praktijk van i_{DGF} en i_{crit}
2. Veiligheidsformat: welke onzekerheden afgedekt door modelfactor
3. Afleiden veiligheidsfactoren

ad 1. Factoren van invloed op modelvoorspelling op basis van experimenten plus inventarisatie van aanvullende onzekerheden bij praktijktoepassingen. Bijvoorbeeld: Welke *RD* kan in werkelijkheid worden gehaald over de grofzandbarrière, welke 3D effecten zijn te verwachten, etc.

ad 2. Veiligheidsformat primaire erosie grofzandbarrière
In het veiligheidsformat wordt weergegeven hoe alle onzekerheden afgedekt worden. Onzekerheden die niet expliciet afgedekt worden, zijn hierna onderdeel van de modelonzekerheid.

ad 3. Modelonzekerheid, modelfactor en schadefactor
Hierbij wordt de relatie gelegd tussen modelvoorspelling en meting, waarbij in de modelvoorspelling alle onzekerheden zitten die niet eerder zijn afgedekt. Doorgaans bevat de modelfactor een 95% onderschrijdingswaarde van de modelonzekerheid. Er moet echter gekeken worden of dit voldoende veiligheid voor het gehele primaire erosie-criterium voor de grofzandbarrière oplevert in relatie tot de vereiste betrouwbaarheid.

7.5.4 Stap 1: Onzekerheden in primaire erosie vlakke grofzandbarrière

7.5.4.1 Modelmatige onzekerheden

Tijdens de modeltesten van de grofzandbarrière zijn relatief weinig variabelen gevarieerd, wel is er gekeken naar verschillende barrièrematerialen en achtergrondmaterialen; het primaire erosie model is daarmee gedefinieerd is als een kritische gradiënt, zonder dat deze een functie is van andere variabelen. De volgende onzekerheden zijn van invloed op het functioneren van de vlakke grofzandbarrière:

- Relatieve dichtheid. De relatieve dichtheid lijkt van grote invloed op de kritieke gradiënt. De meeste proeven zijn gedaan bij een relatieve dichtheid 80% - 110%, met een gemiddelde van 90%. 80% lijkt echter al een ambitieuze doelstelling voor de praktijk. De invloed van *RD* op i_{crit} is echter onbekend, de invloed van *RD* op de veiligheid ook.
- Horizontale gradiënt over grofzandbarrière. Er zijn verschillen factoren die de gradiënt over de grofzandbarrière bepalen (doorlatendheden, drukval in pipe), deze zijn in de proeven gemeten door waterspanningsmetingen. Er zit echter enig conservatisme in het narekenen van de proeven.
- Lengte waarover gradiënt bepaald wordt. Deze is nu op 10 cm gesteld omdat dat het best bij de proefresultaten lijkt aan te sluiten. Alternatieve afstanden en formuleringen (zoals een verticale en een diagonale gradiënt) zijn hiertoe onderzocht.
- Uniformiteit en gradering. De invloed van uniformiteit is niet precies bekend maar heeft waarschijnlijk een (grote) invloed. Veiligheidshalve kan worden aangesloten bij de korrelverdelingen waarmee proeven zijn gedaan.

- Schaaleffecten. Volgens de geldende onderzoekshypothese (Rosenbrand & Van Beek, 2019) zijn er geen schaaleffecten voor de grootte van het kritiek verhang. De keuzes om de kritieke gradiënt over 10 cm te nemen en deze 2D te modelleren zouden echter onjuist of onnauwkeurig kunnen zijn, waardoor schaaleffecten toch een rol zouden kunnen spelen.
- Geometrie van de grofzandbarrière: Deze is volgens Van Beek & Rosenbrand (2019) niet van belang (zie wel de opmerking hiervoor, bij schaaleffecten. Hiernaast zijn er de onzekerheden in de geometrie van de watervoerende pakketten onder het dijklichaam; deze zijn verwerkt via de schematiseringsfactor, zie §7.2.11)
- 3D-effecten. Er wordt 2D gerekend, maar het gedrag is 3D; dit is een niet-conservatieve keuze.
- Meetonzekerheid. Een deel van de spreiding in de proefresultaten komt door modelonzekerheden.
- Materiaal: er zijn verschillende materialen voor de grofzandbarrière en het achtergrondzand gebruikt. Dit zijn er echter te weinig om de invloed van verschillende eigenschappen op de grofzandbarrière te bepalen.

7.5.4.2 Praktijkonzekerheden

Gezien het beperkte aantal variaties tijdens de proeven is de doorvertaling naar de praktijk lastig vorm te geven. Er zijn waarschijnlijk belangrijke onzekerheden die niet bij de experimenten naar boven zijn gekomen:

- Onzekerheid optredende gradiënt. Het verval is bij de proeven gemeten met drukopnemers en de resultaten in een 2D DG-Flow som gefit, terwijl de waterspanningen in werkelijkheid onzeker zijn. De gemeten doorlatend op basis van de drukmeters liet een groot verschil zien met de voorspelling; dit verschil is nu echter verklaard door een betere correlatie tussen porositeit en doorlatendheid af te leiden uit aanvullende laboratoriumproeven. Dit onderstreept wel de invloed van doorlatendheden. De volgende factoren zijn van invloed op de optredende gradiënt over de grofzandbarrière:
    - Doorlatendheid achtergrondmateriaal.
    - Doorlatendheid barrière, uniformiteit (gecorreleerd met *RD*)
    - Lengte van de pipe
    - Drukval in de pipe
- Relatieve dichtheid. Zie hierboven.

Hiernaast zijn er ook nog onbekende variabelen welke de grofzandbarrière kunnen beïnvloeden maar die door het beperkte testprogramma nog niet bekend zijn.

7.5.5 Stap 2: Veiligheidsformat

7.5.5.1 Grenstoestandsfunctie

De grenstoestandsfunctie (*Z*) is gedefinieerd als sterkte (*R*) minus belasting (*S*):

$$Z = R - S = m * i_{crit} - i_{DGF} \qquad (2)$$

i_{crit} en i_{DGF} zijn hierin stochasten, waarbij *'crit'* staat voor kritisch en *'DGF' voor 'DG Flow',* het hier gehanteerde grondwaterstromingsmodelleringspakket.

Een keuze is nog of alle onzekerheid in een aparte *m* moet worden verwerkt of dat er kan worden gerekend met een verdeling van i_{crit}.

7.5.5.2 Semi-probabilistisch criterium

Het criterium in het veiligheidsformat waaraan de GZB moet voldoen is:

$$i_{DGF,d} < i_{crit,d} \quad (3)$$

waarin $i_{DGF,d}$ de rekenwaarde is van het berekende kritiek verhang op basis van de voorgestelde procedure en $i_{crit,d}$ de rekenwaarde van het kritiek verval.

De rekenwaarde van het kritiek verval, $i_{crit,d}$, kan op meerdere manieren worden bepaald:

1. Als direct kwantiel van de verdeling van i_{crit}. Bijvoorbeeld een 5%- of 1%-ondergrens. Hiervoor dienen wel alle onzekerheden in de verdeling van i_{crit} te zitten.
2. Een representatieve waarde van i_{crit} (bijvoorbeeld een 5% ondergrens of een 50% waarde) en een modelfactor: $i_{crit,d} = i_{crit,rep} / \gamma_d$. De modelfactor γ_d wordt bepaald op basis van m en welk kwantiel nodig is om voldoende veiligheid te garanderen.
3. Bovenstaande $i_{crit,d} = i_{crit,rep} / \gamma_d * \gamma_n$. Zelfde als bovenstaande, maar alle niet-modelonzekerheden en de overall veiligheid worden afgedekt door de schadefactor γ_n.

In alle gevallen geldt dat aan de doelbetrouwbaarheid moet worden voldaan. Dit dient nader ingevuld te worden. Voorlopig wordt uitgegaan van optie 3.

7.5.5.3 Afdekken onzekerheden in veiligheidsformat

In Tabel 31 is vermeld hoe de onzekerheden uit §7.5.4 worden afgedekt in het veiligheidsformat, alsmede waar deze op van invloed zijn.

Tabel 31 Onzekere parameters en hoe deze in het ontwerp kunnen worden afgedekt.

Parameter	Invloed op	Hoe narekenen in proeven?	Hoe bepaald? (lab/veld/numeriek)	Hoe afdekken in ontwerp
Variabiliteit proeven	$i_{crit,d}$	Bepalen op basis van metingen	Lab	Modelonzekerheid
Meetonzekerheid	$i_{crit,d}$	Bepalen op basis van metingen	Lab	Modelonzekerheid
Schaaleffecten	$i_{crit,d}$, $i_{DGF,d}$	Op basis van kleine-schaal-proeven, medium-schaal-proeven en Deltagoot-proeven	Lab	Modelonzekerheid
3D-effecten	$i_{crit,d}$, $i_{DGF,d}$	Niet in proeven	Nadere numerieke analyse (zie Rosenbrand et al., 2021)	Modelonzekerheid op basis van analyse
Lengte waarover gradiënt bepaald wordt	$i_{crit,d}$, $i_{DGF,d}$	Op basis van waterspanningsmetingen	Default	Rekenen met een gradiënt over 10 cm
Relatieve dichtheid grofzandbarrière	$i_{crit,d}$	Verwachtingswaarde	Veldmetingen	Minimaal 80% RD over de gehele grofzandbarrière
Uniformiteit / gradering grofzandbarrière	$i_{crit,d}$	Niet beschouwd als van invloed op gradiënt	Veldmetingen	Niet in model, eisen stellen aan waarden zodat deze vergelijkbaar zijn met de proeven (?)
Geometrie*	$i_{crit,d}$, $i_{DGF,d}$	Verwachtingswaarden	Veldmetingen	Verwachtings-waarden in numerieke analyse
Optredende gradiënt over grofzandbarrière	$i_{DGF,d}$	N.v.t. i.v.m. waterspanningsmetingen	DG-Flow of andere numerieke methode	Procedure bij DG-Flow of andere methode
Benedenstroomse pipelengte	$i_{DGF,d}$	N.v.t. i.v.m. waterspanningsmetingen	Default	Conservatieve rekenwaarde (x m)

Parameter	Invloed op	Hoe narekenen in proeven?	Hoe bepaald? (lab/veld/numeriek)	Hoe afdekken in ontwerp
Pipeingroei in grofzandbarrière	$i_{DGF,d}$	N.v.t. i.v.m. waterspanningsmetingen	Default	Rekenen met 4 cm pipe in 30 cm dikke grofzandbarrière
Drukval in pipe	$i_{crit,d}$, $i_{DGF,d}$	N.v.t. i.v.m. waterspanningsmetingen	Lab	Conservatief rekenen zonder drukval
Doorlatendheid achtergrondmateriaal	$i_{DGF,d}$	N.v.t. i.v.m. waterspanningsmetingen	Veldmetingen	Karakteristieke waarde
Doorlatendheid grofzandbarrière	$i_{DGF,d}$	N.v.t. i.v.m. waterspanningsmetingen	Veldmetingen	Karakteristieke waarde
Betrouwbaarheidsniveau	$i_{crit,d}$	N.v.t.	Kalibratie	Schadefactor

* overige invloeden op het gedrag van de grofzandbarrière, zoals leklengte, dikte watervoerend pakket enz. worden verondersteld op dezelfde wijze als in een reguliere pipinganalyse te worden meegenomen.

Onbekende-onbekenden. Gezien het ontwikkelstadium van de grofzandbarrière zijn er wellicht een paar onzekere maar belangrijke parameters nog niet bekend. Het strekt tot aanbeveling hier een marge voor op te nemen om niet het risico te lopen dat een ontwerp later wordt afgekeurd.

DG-Flow procedure: 2D rekenen in DG-Flow met een 30 cm dikke grofzandbarrière met 4 cm erosie en een horizontale gradiënt over 10 cm. De aanwezigheid van een 30 cm dikke grofzandbarrière dient hiervoor wel aangetoond te worden. Er wordt gerekend bij een waterstand bij de geldende norm.

Relatieve dichtheid. De relatieve dichtheid lijkt van groot belang voor de sterkte. De procedure dat kan worden aangetoond dat deze over minimaal 80% in het veld heeft *plus* het verschil met de 100% *RD* uit de proeven zijn van groot belang om aan te tonen.

Overige onzekerheden. Overige onzekerheden, zoals het mogelijk niet goed aansluiten van de grofzandbarrière op de deklaag, worden verondersteld afgedekt te worden in het algemene veiligheidsformat.

7.5.5.4 Conservatieve en niet-conservatieve keuzes in het format

De in Tabel 32 vermelde conservatieve en niet-conservatieve keuzes zitten in het format, alsmede onbekende invloeden.

Tabel 32 Indeling gemaakte keuzes naar type.

Conservatief	Niet-conservatief	Onbekend
Bepaling optredende gradiënt (rekenen met waterstand bij norm, drukval in pipe, doorlatendheid grofzandbarrìere en achtergrondzand (inclusief anisotropie), 80% *RD*, 4 cm pipegroei in grofzandbarrière)	3D-effecten	10 cm gradiënt
Modelonzekerheid		Inkassing
Modelfactor		
Schadefactor (zie verderop, in §7.5.8)		
Modellering kritieke gradiënten in proeven (zie Rosenbrand & Van Beek, 2019)		

7.5.5.5 Welke onzekerheden af te dekken in modelonzekerheid/modelfactor?

Er zijn een aantal onzekerheden welke al in de proefdata zitten, plus een paar andere onzekerheden welke waarschijnlijk afgedekt dienen te worden in de modelonzekerheid, zoals vermeld in Tabel 33.

Tabel 33 Modelonzekerheden.

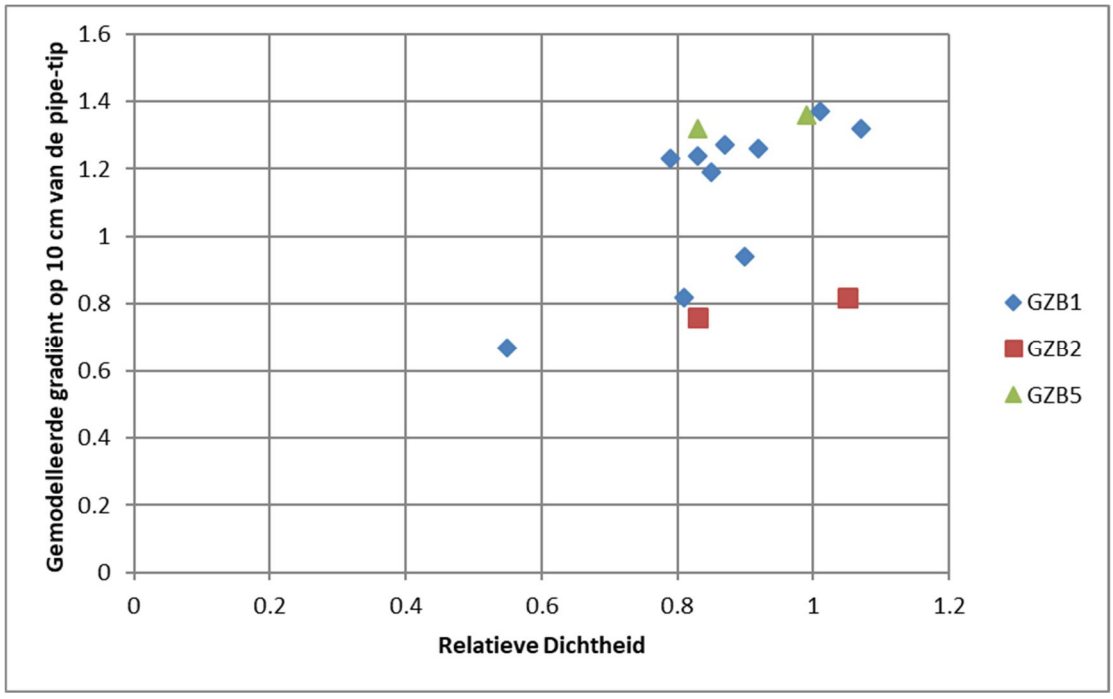
Aandeel modelonzekerheid	Verwerkt in meetdata	Hoe te bepalen
Variabiliteit proeven	Ja	Regressieanalyse proefresultaten
Meetonzekerheid	Ja	Regressieanalyse proefresultaten
3D en schaaleffecten	Nee, niet-conservatief	Nader te bepalen
Relatieve Dichtheid	Ja, niet-conservatief	Regressieanalyse proefresultaten

7.5.5.6 Totale veiligheid

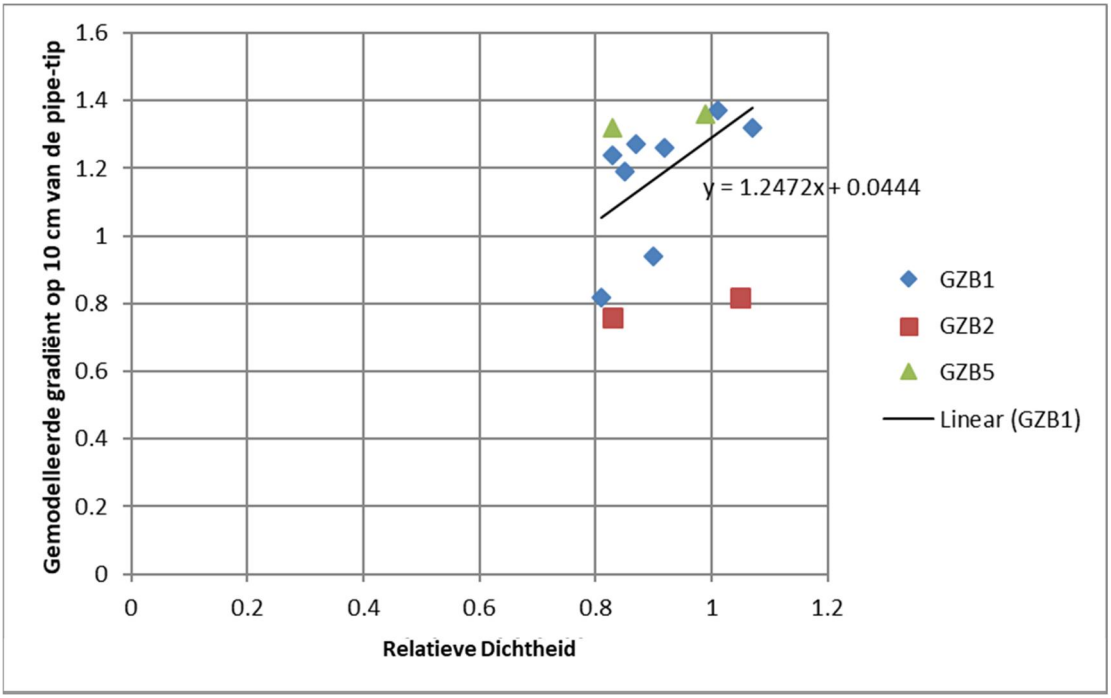
Er zijn een aantal conservatieve keuzes (bijvoorbeeld de 4 cm ingroei in de grofzandbarrière, de karakteristieke waarden voor de doorlatendheid in de DG-Flow berekeningen), maar ook een aantal mogelijk niet-conservatieve keuzes (80% RD, 2D rekenen). De totale veiligheid van het format zoals beschreven in deze paragraaf dient te worden gewaarborgd. Dit dient nader ingevuld te worden, afhankelijk van gemaakte keuzes voor het semi-probabilistische criterium. Gezien het ontwikkelstadium van de grofzandbarrière is het wellicht ook goed om een marge voor tegenvallers (onbekende-onbekenden) in te bouwen, zoals al genoemd in §7.5.5.3. Het hier beschreven format is alleen toepasbaar op barrièrezanden die qua uniformiteit en doorlatendheid vallen binnen de geteste range.

7.5.6 Stap 3a: Modelonzekerheid

De spreiding in kritische gradiënt van alle proeven staat in Figuur 58 als functie van de relatieve dichtheid. In Figuur 59 staan alle proeven met een RD>80% omdat dit in het ontwerp als eis wordt gesteld. Ook is de trendlijn voor de resultaten met GZB1 toegevoegd. De analyses worden uitgevoerd op basis van de selectie; bij gebruik van de hele dataset is de uitkomst iets conservatiever.



Figuur 58 Spreiding van proefresultaten als functie van relatieve dichtheid voor verschillende barrièrematerialen.



Figuur 59 Selectie van proefresultaten uit Figuur 58 voor RD > 80%, met trendlijn voor GZB1.

Het gemiddelde van de horizontale kritische gradiënt is 1.14 met een standaardafwijking van 0.23 (Variatiecoëfficiënt V = 0.2); de gemiddelde *RD* is 0.91.

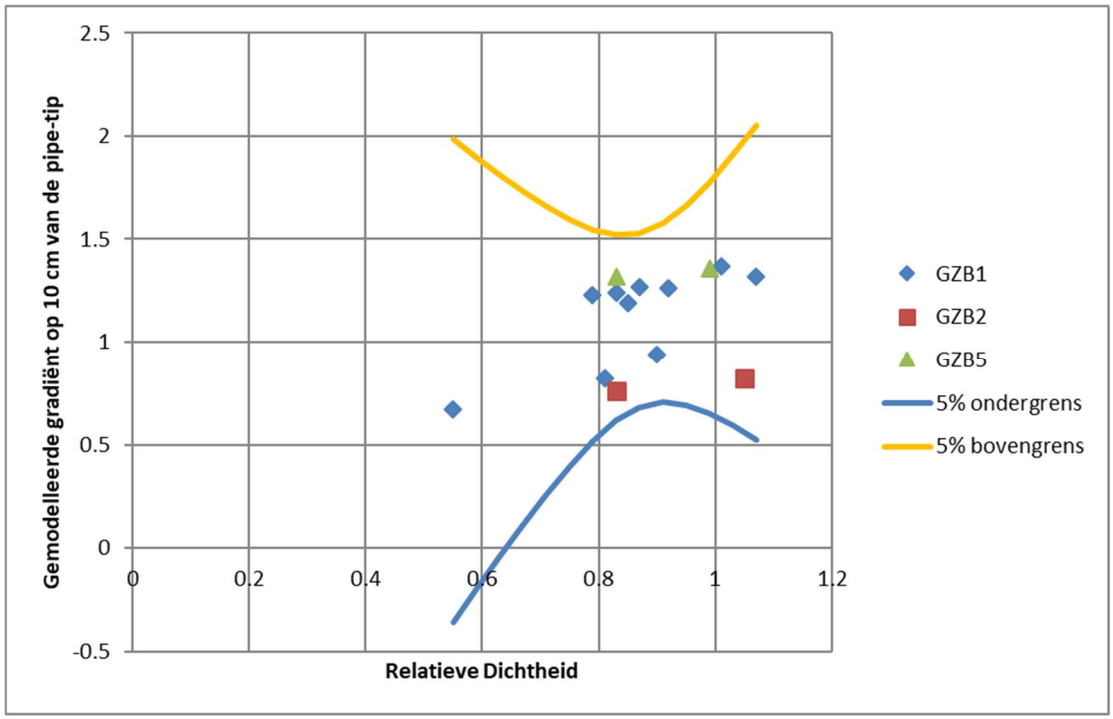
7.5.6.1 Karakteristieke waarde $i_{crit,rep}$

De karakteristieke waarde $i_{crit,rep}$ is bepaald op basis van de standaardformules van het Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies (TAW, 2001) zonder het meenemen van uitmiddelen. Dit resulteert in een karakteristieke waarde van **0.70**, zonder correctie voor *RD* en 3D-effecten.

7.5.7 Stap 3b: Modelfactor

De modelfactor wordt voor de grofzandbarrière gebruikt om overige verschillen tussen model en praktijk af te dekken, in dit geval de invloed van *RD* en waar mogelijk de correctie voor 3D-effecten.

Voor de *RD* geldt dat deze gemiddeld 90% is in de proeven, terwijl 80% als minimum wordt verondersteld in het ontwerp. Dit scheelt in 0.125 in gradiënt, wat weer gelijk is aan een modelfactor γ_d van **1.2** (= 0.70 / (0.70-0.125). Gecombineerd met de karakteristieke waarde van 0.70 en zonder tussentijds afronden levert dit een rekenwaarde op van **0.57** voor de modelonzekerheid. Deze waarde is ook uit Figuur 58 te halen. Zie hiervoor Figuur 60, met daarin de 5% ondergrens waarbij de *RD* direct wordt meegenomen. In dat geval wordt een iets lagere waarde gevonden bij een *RD* van 80%, namelijk 0.52. De lagere waarde komt voornamelijk door de beperkte hoeveelheid proeven.



Figuur 60 Onder- en bovengrenzen voor de kritische gradiënt op basis van gecombineerde RD-gradiënt analyse.

7.5.8 Stap 3c: Schadefactor

7.5.8.1 Op basis van algemene theorie

Een volledig en goed onderbouwde veiligheidsfilosofie is niet mogelijk binnen het beschikbare tijdspad. Op basis van pragmatische keuzes is een eerste schatting van de schadefactor gemaakt.

De onzekerheid in de kritieke gradiënt (Sterkte, i_{crit}) lijkt dominant voor de veiligheid, hier is dus een schadefactor op afgestemd. Dit is gedaan op basis van een algemene formule voor sterkteonzekerheden (R).

$$\gamma_R = \exp(-(1{,}65 - \beta_{vereist}\alpha_R)\sqrt{\ln(1+V_R^2)}) \qquad (4)$$

In deze formule staat γ_R voor de partiële sterktefactor, $\beta_{vereist}$ voor de vereiste betrouwbaarheidsindex, α_R voor de invloedscoëfficiënt en V_R voor de variatiecoëfficiënt.

Voor de belasting (i_{DGF}) is ten eerste niet bekend hoe groot de onzekerheden in de verschillende parameters zijn (doorlatendheden, drukval) en ten tweede is niet bekend hoe conservatief het gekozen format om i_{DGF} te berekenen is, hoewel er aanwijzingen zijn dat dit verschil tussen rekenwaarden en verwachtingswaarden een verschil in i_{DGF} kan betekenen van 0.5. In het vervolg wordt er vanuit gegaan dat $i_{DGF,d}$, berekend zoals hiervoor weergegeven) voldoende veilig is voor alle beschouwde betrouwbaarheidsniveaus.

Voor een dominante sterktevariabele kan volgens ISO 2394 een invloedsfactor (α_R) worden gebruikt van 0.8 (CUR, 2008). Op basis van de resultaten (V_R = 0.2) levert dit de waarden in Tabel 34 op voor verschillende betrouwbaarheidsniveaus.

Tabel 34 Schadefactor als functie van het betrouwbaarheidsniveau.

Betrouwbaarheid β	γ_n
3	1.2
4	1.4
5	1.6
6	1.9

De waarde hiervan zonder een goede veiligheidsbeschouwing is echter beperkt.

7.5.8.2 Op basis van overall pipingfactor

Voor normale pipinganalyses zonder grofzandbarrière wordt een overall veiligheidsfactor van 2 à 2.5 gevonden voor relatief lage betrouwbaarheidsniveaus. Dit is zonder de extra onzekerheid van een grofzandbarrière. Voor een GZB zou dit een rekenwaarde van $i_{crit,d}$ van ongeveer 0.35 à 0.5 inhouden zonder conservatieve berekening van de optredende gradiënt.

7.5.8.3 Op basis van enkele probabilistische analyses

Het is gebleken dat de uitkomsten van probabilistische analyses te gevoelig zijn voor de invoer om goede uitkomsten te bieden. ‘Door de oogharen’ heen is wel te beredeneren dat de standaardafwijking van Z ongeveer 0.25 is (aannemende dat de standaardafwijking van i_{crit} (0.23) sterk dominant is). Er zitten dan al snel 2 à 4 standaardafwijkingen tussen de gemiddelden van i_{crit} en i_{DGF} als geldt dat $i_{crit,d} < i_{DGF,d}$ in een ontwerp; afhankelijk van de schadefactor. Aangezien hier de hoogwaterstatistiek nog niet inzit, zou bij het gekozen format richting een betrouwbaarheidsniveau van 3 à 6 worden gegaan. Dit dient uiteraard eerst goed uitgezocht te worden.

7.5.9 Eerste schatting voor de rekenwaarde van het kritiek verhang

Op basis van voorgaande en de formule $i_{crit,d} = i_{crit,rep} / \gamma_d * \gamma_n$ om de rekenwaarde van het kritieke verhang te bepalen, wordt er een eerste schatting gemaakt voor de rekenwaarde $i_{crit,d}$. Aangezien er geen goede basis is voor γ_n wordt voorlopig de eerste aanpak uit §7.5.8 gevolgd. Dit levert de rekenwaarde $i_{crit,d}$ op zoals vermeld in Tabel 35. Deze rekenwaarde moet worden gezien in samenhang met het totaal van keuzes welke zijn gemaakt in §7.5.5 voor de bepaling van $i_{DGF,d}$.

Tabel 35 Afleiding rekenwaarde kritiek verhang.

Parameter	Beschrijving	Gemiddelde	Standaard-afwijking	Waarde in berekening
$i_{crit,rep}$	Modelspreiding: spreiding en meetonzekerheid	1.14	0.23	0.70 (karakteristieke waarde)
γ_d	Correctie voor *RD* van 80% Correctie voor 3D-effecten			0.13 correctie gradiënt: γ_d = 1.2 Nader te bepalen
γ_n	Overall veiligheidsfactor			1.2 tot 1.9 (voor β = 3 tot 6)
Rekenwaarde kritiek verhang $i_{crit,d}$				**0.48 tot 0.30** (voor β = 3 tot 6)

De totale veiligheid kan echter niet alleen op basis van het kritieke verhang worden bepaald, daarvoor zijn ook andere (deel)faalmechanismen van belang, zoals eventuele verstopping van de grofzandbarrière en opbarsten bovenstrooms van de grofzandbarrière. Ook de vraag of het voorgaande overmatig conservatief is of juist niet, kan niet beantwoord worden.

Verder zijn er vanwege de hiervoor gestelde uitgangspunten, de volgende randvoorwaarden van toepassing aan de uitvoeringseisen:

- *RD* > 80% over gehele grofzandbarrière;
- Samenstelling grofzandbarrière (zonder ontmenging bij aanbrengen!) moet binnen range van proeven vallen;
- Binnen range beproefde materialen qua uniformiteit en doorlatend (grofzandbarrière, achtergrondmateriaal)l
- Voorlopig alleen voor een grofzandbarrière van 30 cm dikte; voor een grofzandbarrière met een dikte van bijvoorbeeld 45 cm moeten de verschillende keuzes worden toegelicht.

7.5.10 Discussie en vervolg

In het voorgaande van deze paragraaf is een overzicht afgeleid van de parameters die bijdragen aan het ontwerpen van een grofzandbarrière, alsmede hoe onzekerheden hierin worden afgedekt in het veiligheidsformat. Bij de invulling hiervan zijn er echter 2 grote onbekenden: 1) de impact van alle conservatieve keuzes en 2) welke schadefactor nodig is om aan een totale betrouwbaarheid te voldoen.

Voor punt 1) zou een eerste stap kunnen zijn hoe groot de invloed is van de conservatieve keuzes die het optredende verhang over de grofzandbarrière bepalen (pipe voor barrière, ingroeiing, doorlatendheden). Punt 2 is echter een stuk uitdagender om op korte termijn op te lossen, waardoor het niet mogelijk is om in te schatten hoe ver de rekenwaarde van het kritieke verhang onder (of zelfs boven?) de karakteristieke waarde van de modelonzekerheid (0.57 inclusief correctie voor *RD*) komt. Het eerste schot voor de boeg (range van 0.30 – 0.48) is daarmee niet meer dan een eerste inschatting. Verdere onderbouwing van het veiligheidsformat en het uitzoeken hoe conservatief dit is, is daarom van groot belang.

Een paar andere aspecten die spelen en ten dele inmiddels zijn uitgezocht betreffen:

- Onvoorziene invloeden zitten hier nog niet in; het is een projectmanagement-keuze om hier eventueel nog een voorziening voor op te nemen;
- Een hogere *RD* eisen heeft relatief veel impact op de rekenwaarde (maar ook op de praktische uitvoerbaarheid);
- Het effect van een inkassing is nog niet meegenomen – zie hiervoor Koelewijn (2021);
- Uitvoeringscontrole en metingen: wellicht kan er nauwgezet worden gecontroleerd bij de aanleg en kan de onzekerheid in invoerparameters (doorlatendheden) sterk worden verkleind om zo op hogere berekende DG-Flow gradiënten voor Gameren te komen?
- Wellicht is het mogelijk een redenatie op te hangen waaruit blijkt dat de kritieke gradiënt niet onder een bepaalde waarde kan komen, bijvoorbeeld 0.7 op basis van fysische grenzen? Wellicht is hier wel een beter procesmodel voor nodig.
- Lengte-effect: impliciet is hier uitgegaan van een lengte-effect dat gelijk is aan dat bij normale pipinganalyses. Aangezien we hier van doen hebben met een andere situatie en sneller variërende parameters, dient dit nader uitgezocht te worden. Dit stelt mogelijk ook strengere eisen aan de aanleg.
- Bepalen invloed 3D-effecten – zie Rosenbrand et al. (2021)
- Bepalen invloed conservatieve keuzes op berekende gradiënt

Op de langere termijn zou een gedegen probabilistische analyse kunnen worden uitgevoerd waarmee de verschillende factoren op eenzelfde niveau kunnen worden bepaald als voor reguliere pipinganalyses.

7.5.11 Omgang met overige deelfaalmechanismen

De overige deelfaalmechanismen worden behandeld in Koelewijn (2021). Voor alle factoren in ontwerp, aanleg en beheer, die daarin aan de orde komen, en voor de daaruit resulterende potentiële faalmechanismen geldt dat het resulterende totale risico op falen tenminste een

orde van grootte kleiner zal moeten worden gehouden dan het in het voorgaande beschreven deelfaalmechanisme waardoor deze factoren binnen een (semi-)probabilistische context niet van een doorslaggevende invloed zullen zijn, met uitzondering van de invloed van graverijen van allerlei aard, bijvoorbeeld door bevers, welke vooralsnog in het algemeen (ook bij alle andere constructieve oplossingen en voor andere faalmechanismen dan piping) geacht worden afgedekt te zijn in de zorgplicht.

7.6 Conclusies voor een vlakke aansluiting

De enige berekende situatie die nu op basis van hetgeen in de vorige paragraaf beschreven is, getoetst kan worden, betreft een grofzandbarrière met GZB1, GZB5 of een daarmee vergelijkbaar materiaal waarvan de korrelgrootte niet veel kleiner of groter is, met een dikte van 30 cm en berekend met een ingroeilengte van 4 cm.

Voor Tabel 36 is geput uit de berekeningsresultaten in §7.2, waarbij voor elk profiel vermeld is welke berekening gekozen is. Daarbij is ook de doorlatendheid van het barrièremateriaal vermeld. In combinatie met de beschouwing in §7.2.11 over de invloed van de doorlatendheid kan worden ingeschat in hoeverre bij toepassing van GZB4 met een relatieve dichtheid van 80% en daarmee een doorlatendheid van 221 m/dag (zie Tabel 13) kan worden voldaan aan de eis die in de voorgaande paragraaf is geformuleerd. Uit Tabel 22, Tabel 23 en Tabel 25 volgt een conversiefactor van circa 0.65 tussen berekeningen met een doorlatendheid van de grofzandbarrière van 125 m/dag en 220 m/dag. Voor de conversie van 175 m/dag naar 220 m/dag is een factor 0.84 ingeschat. NB: bij een hogere relatieve dichtheid neemt de sterkte van de grofzandbarrière sneller toe dan de negatieve invloed van een lagere doorlatendheid.

Tabel 36 Maatgevende gradiënten voor alle profielen bij een vlakke aansluiting.

Profiel RW…+050	nr	k_{GZB} (m/dag)	berekende gradiënt (-)	correctiefactor	maatgevende gradiënt (-)
134	14	175	1.04	0.794 * 0.84	0.70
135	2	125	0.74	0.957 * 0.65	0.46
136	7	175	0.68	0.965 * 0.84	0.55
137	2	125	0.71	0.969 * 0.65	0.45
138	9	175	0.83	0.911 * 0.84	0.64
139	6	125	0.56	0.918 * 0.65	0.33
140	4	220	0.84	0.904	0.76
141	5	220	0.59	0.911	0.54
142	2	220	0.38	0.922	0.35
143	2	220	0.51	0.965	0.49

De uiteindelijke waarde voor de berekende gradiënt is voor alle profielen lager dan de laagste experimenteel gevonden kritieke waarde van de gradiënt met GZB1 en minimaal 80% relatieve dichtheid (0.81) en in 9 van de 10 profielen ook niet hoger dan de karakteristieke waarde (0.70). De afgeleide modelfactor en de schadefactor leiden er echter toe dat de uiteindelijke maatgevende gradiënt in alle profielen hoger is dan de ondergrens van het in Tabel 36 geformuleerde interval van 0.30 tot 0.48. Voor een viertal profielen, die niet aaneengesloten liggen, wordt een waarde lager dan de bovengrens gevonden en zou een grofzandbarrière met een vlakke aansluiting eventueel kunnen voldoen. Uit praktische overwegingen valt een grofzandbarrière met een vlakke aansluiting daarom geheel af voor de locatie bij Gameren, die logischerwijs aantoonbaar ook bij de gestelde veiligheidsfactoren moet voldoen.

8 Berekeningsresultaten voor een inkassing

8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk zijn de verkennende berekeningen voor de situatie met een inkassing gerapporteerd in §8.2. Op de definitieve berekeningen en de aangepaste veiligheidsbenadering wordt in §8.3 kort ingegaan; deze zijn elders gerapporteerd (Koelewijn 2021).

8.2 Verkennende berekeningen

8.2.1 Inleiding

Net als voor de vlakke grofzandbarrière zijn voor de grofzandbarrière met een inkassing eerst verkennende berekeningen uitgevoerd, om de invloed van diverse parameters en variaties te kunnen bepalen en om een keuze te kunnen maken welke dwarsprofielen maatgevend zijn, om daar uiteindelijk de definitieve berekeningen voor uit te voeren.

Eerst wordt in §8.2.2 ingegaan op de invloed van de dikte, de doorlatendheid en de hoek waaronder de helling in de inkassing zich vormt. Daarna wordt in §8.2.3 ingegaan op de positie binnen het dwarsprofiel (dicht bij de dijk of dicht bij het uittredepunt). Vervolgens wordt in §8.2.4 ingegaan op de invloed van de doorlatendheid van de tussenzandlaag, die door de inkassing aangesneden kan worden. Tot slot worden in §8.2.5 de maatgevende dwarsprofielen bepaald.

8.2.2 Invloed dikte, doorlatendheid en hellingshoek

In §1.2 is al ingegaan op de verschillen tussen een vlakke en een ingekaste grofzandbarrière. Kenmerkend voor een ingekaste grofzandbarrière is het ontstaan van een helling binnen de inkassing. Deze helling is bepalend voor de heave-hoogte, dit is de hoogte van het verticale gedeelte dat aan de bovenstroomse rand van de inkassing boven de zand/klei-overgang uitsteekt, zoals aangeduid met h_{heave} in Figuur 4. Ten tijde van het maken van deze verkennende berekeningen werd verondersteld dat deze helling bepaald kan worden met het criterium van Van Rhee & Bezuijen (1992), terwijl het heavecriterium van Terzaghi bepaalt bij welk verval dan falen optreedt bij het verticale gedeelte aan de bovenstroomse kant, over een hoogte h_{heave}. De hoogte van de inkassing is steeds zo ruim gekozen dat de helling altijd kan ontstaan zonder dat nabij de bovenstroomse rand alsnog een soort vlakke aansluiting op de afsluitende klei aan de bovenrand ontstaat, dus inkassingshoogte > h_{heave}.

In Tabel 37 zijn de berekende gradiënten weergegeven voor zes van de tien profielen, voor een grofzandbarrière van 30 cm dikte, een hellingshoek van 10 graden, telkens dezelfde doorlatendheid van het barrièremateriaal (175 m/dag; voor GZB4) en hoofdzakelijk de karakteristieke doorlatendheid voor het zand van de maatgevende zandlaag, deels ook voor de verwachte doorlatendheid van die laag. Van enkele profielen zijn twee verschillende locaties van de grofzandbarrière doorgerekend: zowel één waarbij de barrière alleen contact maakt met de maatgevende zandlaag (‘O’), als één waarbij de barrière een kortsluiting verzorgt met de tussenzandlaag en de feitelijke inkassing en de inkassing uitsteekt tot boven de tussenzandlaag (‘B’). Naast de gradiënt langs de verticale bovenstroomse rand is ook de gradiënt loodrecht op de helling, halverwege die helling, vermeld. Naar de toenmalige inzichten zou dit overigens niet maatgevend zijn, zoals hiervoor reeds opgemerkt is.

Tabel 37 Gradiënten voor een grofzandbarrière met inkassing van 30 cm dikte en een hellingshoek van 10 graden, bij een doorlatendheid van de barrière van 175 m/dag en verschillende doorlatendheden van het achtergrondzand.

Profiel RW…+050	locatie	karakteristieke doorlatendheid (15 m/dag)		verwachte doorlatendheid (5 m/dag)	
		loodrecht op helling	verticaal	loodrecht op helling	verticaal
134	O	0.30	0.33	-	-
	B	0.37	0.28	0.14	0.10
135	O	0.17	0.30	-	-
	B	0.17	0.13	-	-
136	O	0.34	0.37	-	-
137	O	0.18	0.18	0.07	0.06
139	O	0.14	0.15	-	-
140	O	0.32	0.24	-	-

In aanvulling op de vermelde resultaten is nog een situatie berekend: voor profiel RW 134+050 is nog voor locatietype ‘O’ gerekend met een karakteristieke doorlatendheid van 15 m/dag voor het achtergrondzand en een doorlatendheid van het barrièremateriaal van 125 m/dag. Hiervoor zijn gradiënten berekend van 0.40 (loodrecht op de helling) en 0.47 (verticaal).

Naar aanleiding van gesprekken met mogelijke aannemers en Waterschap Rivierenland is ook een dikkere grofzandbarrière doorgerekend, namelijk een met een dikte van 45 cm. Voor verder dezelfde parameterwaarden zijn hiermee alle dwarsprofielen uit hoofdstuk 3 doorgerekend. De resultaten staan vermeld in Tabel 38.

Tabel 38 Gradiënten voor een grofzandbarrière met inkassing van 45 cm dikte en een hellingshoek van 10 graden, bij een doorlatendheid van de barrière van 175 m/dag en verschillende doorlatendheden van het achtergrondzand.

Profiel RW…+050	locatie	karakteristieke doorlatendheid (15 m/dag)		verwachte doorlatendheid (5 m/dag)	
		loodrecht op helling	verticaal	loodrecht op helling	verticaal
134	B	0.26	0.20	-	-
135	B	0.13	0.10	0.05	0.04
136	O	0.17	0.18	-	-
137	O	0.13	0.13	0.05	0.04
138	O	0.18	0.19	0.06	0.06
139	O	0.10	0.10	0.04	0.03
140	B	0.23	0.18	0.09	0.07
141	B	0.14	0.11	0.05	0.04
142	B	0.10	0.08	0.04	0.03
143	B	0.14	0.11	0.05	0.04

Bij een anderhalf maal dikkere barrière nemen de gradiënten in de meeste gevallen met bijna een factor anderhalf af. Uitzonderingen hierop zijn profiel 136 (een halvering) en profiel 140 (reductie met een kwart).

Voor een zestal profielen is gevarieerd met de hellingshoek, de uitkomsten van die berekeningen zijn, samen met de gedeeltelijk hiervoor reeds vermelde resultaten, aangegeven in Tabel 39.

Tabel 39 Gradiënten voor een grofzandbarrière met inkassing van 45 cm dikte en verschillende hellingshoeken, bij een doorlatendheid van de barrière van 175 m/dag en de karakteristieke doorlatendheid van het achtergrondzand.

Profiel RW…+050	locatie	10 graden		20 graden		30 graden	
		loodrecht op helling	verticaal	loodrecht op helling	verticaal	loodrecht op hellling	verticaal
134	B	0.26	0.20	-	-	0.21	0.13
136	O	0.17	0.18	-	-	0.15	0.11
138	O	0.18	0.19	-	-	0.15	0.11
140	B	0.23	0.18	-	-	0.19	0.12
141	B	0.14	0.11	0.12	0.09	-	-
143	B	0.14	0.11	0.13	0.09	-	-

Logischerwijs wordt bij een steilere hellingshoek, dus bij meer achterblijvend materiaal in de inkassing, een lagere gradiënt gevonden.

In Tabel 40 zijn aanvullende berekeningen gerapporteerd voor profiel RW 134+050 bij een dikte van 30 cm.

Tabel 40 Gradiënten voor een grofzandbarrière met inkassing met variatie van dikte en hellingshoek, voor profiel RW 134+050 en locatie 'B', bij een doorlatendheid van de barrière van 175 m/dag en de karakteristieke doorlatendheid van het achtergrondzand.

Dikte	10 graden		20 graden		30 graden	
	loodrecht op helling	verticaal	loodrecht op helling	verticaal	loodrecht op hellling	verticaal
30 cm	0.37	0.28	0.34	0.23	0.30	0.19
45 cm	0.26	0.20	-	-	0.21	0.13

8.2.3 Invloed positie binnen het dwarsprofiel

In Tabel 41 zijn de resultaten gepresenteerd van berekeningen waarbij de positie van de grofzandbarrière binnen het dwarsprofiel is gevarieerd, vergelijkbaar met hetgeen is gerapporteerd voor de vlakke grofzandbarrière in §7.3.2.

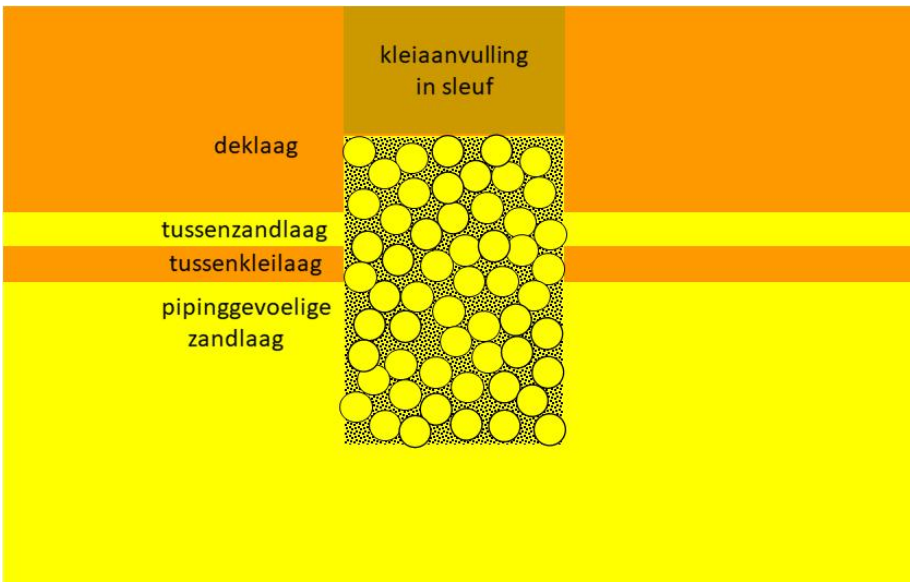
Tabel 41 Berekende gradiënten in enkele profielen voor verschillende posities van de grofzandbarrière met inkassing, met een dikte van 45 cm en een hellingshoek van 45 graden, een doorlatendheid van de grofzandbarrière van 175 m/dag en een doorlatendheid van de maatgevende zandlaag van 15 m/dag.

Profiel RW …	locatie	afstand tot buitenkruinlijn (m)	afstand tot uittredepunt (m)	gradiënt (-)	
				loodrecht op helling	verticaal
134+050	B	25	15	0.26	0.20
	B	35	5	0.24	0.18
138+050	O	23	64	0.18	0.17
	O	77	10	0.17	0.17
141+050	B	22	64	0.14	0.11
	O	76	10	0.07	0.07

De invloed is ook hier betrekkelijk gering; het verschil in toegepaste locatie ('B' of 'O', dus resp. zowel contact makend met de maatgevende zandlaag als de tussenzandlaag, of alleen met de maatgevende zandlaag) maakt net als bij de vlakke grofzandbarrière een veel groter verschil.

8.2.4 Invloed doorlatendheid tussenzandlaag

In zes van de tien berekende doorsneden is er sprake van een grofzandbarrière met inkassing die zowel in de tussenzandlaag als in de onderliggende zandlaag en de tussenliggende kleilaag aanwezig is, zoals indicatief geschetst in Figuur 61. Dit zijn alle profielen met de aanduiding ‘B’ onder ‘locatie’ in de tweede kolom van de meeste voorgaande tabellen. Omdat de tussenzandlaag niet erg dik is en bovendien naar verwachting niet goed contact maakt met het buitenwater, is de aanvoer van water vanuit de tussenzandlaag bovenstrooms van de grofzandbarrière beperkt. Door de verbinding met de onderliggende zandlaag via de grofzandbarrière is echter een sterker aanvoer van water mogelijk. Dit water moet vervolgens worden afgevoerd via het benedenstroomse gedeelte van de tussenzandlaag of via de dwarspipe achterlangs de grofzandbarrière.



Figuur 61 Grofzandbarrière met inkassing door tussenzandlaag heen.

In de voorgaande berekeningen is telkens gerekend met de verhoudingen tussen de doorlatendheden van de verschillende grondlagen die uit de kalibratie volgden. In dit geval kan dit te optimistisch zijn, wanneer de doorlatendheid (of de dikte) van deze tussenzandlaag ten dele kleiner is dan aangenomen. Daarom zijn er ook enkele berekeningen uitgevoerd waarbij de doorlatendheid van de tussenzandlaag tien maal kleiner is en alle andere parameters hetzelfde zijn gelaten. Voor de situatie met een dwarspipe zou er dan meer druk op die dwarspipe kunnen komen te staan, doordat de onder- en achterliggende tussenzandlaag in mindere mate als een ventiel kan functioneren. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 42.

Tabel 42 Gradiënten voor een grofzandbarrière met inkassing van 45 cm dikte en een hellingshoek van 10 graden, bij een doorlatendheid van de barrière van 175 m/dag, karakteristieke doorlatendheid van het achtergrondzand in de maatgevende zandlaag en variatie van de doorlatendheid in de tussenzandlaag.

Profiel RW…+050	locatie	basissituatie		doorlatendheid tussenzandlaag 10x zo klein	
		loodrecht op helling	verticaal	loodrecht op helling	verticaal
134	B	0.26	0.20	0.24	0.19
140	B	0.23	0.18	0.21	0.17
141	B	0.14	0.11	0.13	0.09

De berekende gradiënten in de inkassing worden hier juist kleiner van, waarschijnlijk doordat er in de gehanteerde modellering amper sprake is van stroming onder de dwarspipe door en

er bij een lagere doorlatendheid van de tussenzandlaag nog minder aanvoer van water van bovenstrooms van de grofzandbarrière sprake is.

De meest ongunstige situatie treedt derhalve op bij een situatie met een kortsluiting (verbinding met de tussenzandlaag via de grofzandbarrière) waarbij een hoog-karakteristieke waarde voor de doorlatendheid van de tussenzandlaag wordt aangenomen. Waar dat mogelijk van toepassing is, is hier in de basisschematisering mee gerekend. Dit betreft dus een conservatieve aanname.

8.2.5 Maatgevende resultaten en conclusies uit verkennende berekeningen

Voor de keuze van de drie definitief door te rekenen dwarsprofielen (met alle eventuele bijkomende varianten en variaties) is uitgegaan van de resultaten uit Tabel 38. De uitkomsten daaruit, voor een grofzandbarrière van 45 cm dikte met materiaal GZB4 en toepassing van karakteristieke doorlatendheden voor de maatgevende zandlaag kwamen het dichtst in de buurt van de kennis en verwachtingen op dat moment: afhankelijk van de te kiezen uitvoeringsmethode (kettingfrees of open sleuf) een effectieve dikte van 45 cm resp. 95 cm) en de verkregen resultaten uit het HPT-AMPT-onderzoek (zie §4.7), waaruit volgde dat de doorlatendheid van de maatgevende zandlaag ruim 2 maal zo groot was en bij profiel RW 143+050 zelfs ruim 4 maal zo groot. De uitkomsten uit Tabel 38 zijn nog vermenigvuldigd met de waarden uit Tabel 30 in §7.4 het resultaat is weergegeven in Tabel 42.

Tabel 43 Maatgevende resultaten voor een grofzandbarrière met inkassing.

Profiel RW…+050	locatie	loodrecht op helling	verticaal
134	B	0.21	0.16
135	B	0.12	0.10
136	O	0.16	0.17
137	O	0.13	0.13
138	O	0.16	0.17
139	O	0.09	0.09
140	B	0.21	0.16
141	B	0.13	0.10
142	B	0.09	0.07
143	B	0.13	0.10

Op basis van deze resultaten, met de notie dat de verticale gradiënt als maatgevend moet worden beschouwd, is het logisch om te kiezen voor de profielen RW 136+050 en RW138+050. Voor beide profielen wordt de hoogste waarde voor de berekende gradiënt gevonden (0.17). Daarnaast is als derde profiel het laatste profiel gekozen (RW 143+050), vanwege de veel grotere doorlatendheid van het achtergrondzand hier.

Hierbij wordt nog opgemerkt dat het doorrekenen van drie dwarsprofielen (of zelfs maar één of twee) over een strekking van 1 kilometer meer gangbaar is dan het doorrekenen van een groter aantal profielen, zoals hier bij de verkennende berekeningen is gedaan.

8.3 Definitieve berekeningen & veiligheidsbenadering

De definitieve berekeningen zijn opgenomen in Koelewijn (2021), waarin ook de aangepaste veiligheidsbenadering voor de grofzandbarrière met inkassing is te vinden, inclusief een analyse van de overige deelfaalmechanismen volgens een faalpadenanalyse. Hiertoe zijn ter validatie aanvullende medium-schaalproeven met een grofzandbarrière met inkassing uitgevoerd, geanalyseerd in Förster (2021). Hieruit bleek dat niet de verticale gradiënt maar de gradiënt loodrecht op de helling maatgevend was. Daarnaast zijn ook numerieke analyses uitgevoerd ter bepaling van de invloed van 3D-stromingsconcentraties, beschreven door Rosenbrand et al. (2021). Beide onderdelen zijn van grote invloed op de

veiligheidsbenadering en daarmee op de mogelijkheden om bij Gameren een grofzandbarrière te kunnen toepassen.

Referenties

Akrami & Koelewijn, 2018. Sepideh Akrami & Andre Koelewijn, Sand selection, memo 11200952-007-GEO-0010, Deltares, Delft, 17 mei 2018, 5 pp.

Argaman, 2018. Amir Argaman, Groundwater model of Gameren, Building and validating a detailed 3D subsurface and groundwater model in iMod, MSc thesis Earth Surface and Water programme, Universiteit Utrecht, Utrecht, 28 februari 2018, 98 pp.

Van Beek, 2019a. Vera van Beek, mondelinge communicatie, eind januari 2019.

Van Beek, 2019b. Vera van Beek, Pipe gradient estimate, memo, Deltares, Delft, 2 april 2019, 20 pp.

Van Beek & Rosenbrand, 2019. V.M. van Beek & E. Rosenbrand, Eindrapportage eerste haalbaarheidsstudie (HBO1), rapportage 11200952-013-GEO-0003, definitief, Deltares, Delft, juni 2019, 58 pp.

Van Beek et al., 2015. V.M. van Beek, H.M. van Essen, K. Vandenboer & A. Bezuijen, Developments in modelling of backward erosion piping, Géotechnique 65:740-754, doi:10.1680/geot.14.P.119.

Beyer, 1964. W. Beyer, Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve, Wasserwirtschaft und Wassertechnik 14(6):165-168, 1964.

Bisschop & Hofschreuder, 2016. C. Bisschop & B. Hofschreuder, Veiligheidsanalyse Gameren, projectnummer 110565, versie 3.0, definitief, Waterschap Rivierenland, Tiel, 15 april 2016, 45 pp.

Burenkova, 1993. V.V. Burenkova, Assessment of suffusion in non-cohesive and graded soils, In: Filters in geotechnical and hydraulic engineering, Brauns, Schuler & Heibaum (red.), Balkema, Rotterdam, 357-360.

Cremer, 2017. Jaap Cremer, Overloop hoogte schuif slot Gameren, e-mail d.d. 15 maart 2017 13:39, Waterschap Rivierenland, Tiel.

CUR, 2008. Van onzekerheid naar betrouwbaarheid, Handreiking voor geotechnisch ontwerpers, publicatie 2008-2, CUR Bouw & Infra, Gouda/Delft, juni 2008, 185 pp.

Duizendstra, 2019. O. Duizendstra, Geotechnisch onderzoek Gameren HPT-AMPT onderzoek, rapportage 1319-154774 versie 1.0, Fugro, Arnhem, december 2019, 91 pp.

Flos, 2021. Stefan Flos, Video verstuurd via WhatsApp, 5 februari 2021 om 22:09.

Förster et al., 2012. Ulrich Förster, Geeralt van den Ham, Ed Calle & Gerard Kruse, Onderzoeksrapport zandmeevoerende wellen, rapport 1202123-003-GEO-0002, Deltares, Delft, 2012, 324 pp.

Förster, 2017. Ulrich Förster, Vraagspecificatie aanvullend grondonderzoek Gameren, memo 11200952-020-GEO-0001, Deltares, Delft, 18 juli 2017, 10 pp.

Förster, 2021. Ulrich Förster, Analysis report coarse sand barrier verification tests, Analysis of medium-scale configuration with protuberance (phase 3), rapportage 11200952-063-GEO-0001, Deltares, Delft, 17 maart 2021, 145 pp.

Van Gerven, 2021a. Koen van Gerven, Video en foto verstuurd via WhatsApp, 5 februari 2021 om 17:26.

Van Gerven, 2021b. Koen van Gerven, mondelinge communicatie, 8 februari 2021.

De Graaf, 2019. N. de Graaf, Grondwatermonitoring, Gameren 22E (dijkring 38 traject 38-1) te Gameren, tussentijdse rapportage, projectnummer VN-69229-1, documentnummer R61644, Wiertsema & Partners, Tolbert, 13 februari 2019, 17 pp.

De Graaf, 2020. N. de Graaf, Grondwatermonitoring, Gameren 22E (dijkring 38 traject 38-1) te Gameren, definitieve rapportage, projectnummer VN-69229-1, documentnummer R69229, Wiertsema & Partners, Tolbert, 27 maart 2020, 19 pp.

Hanses, 1985. Ullrich Karl Hanses, Zur Mechanik der Entwicklung von Erosionskanälen in geschichtetem Untergrund unter Stauanlagen, dissertatie Grundbauinstitut der Technischen Universität Berlin, Universitätsbibliothek der TU Berlin, Berlijn.

Hazen, 1892. A. Hazen, Some physical properties of sands and gravels, Massachusetts State Board of Health, 24th annual report, 539-556, 1892.

Hijma, 2017. Marc Hijma, Gameren: een analyse van de ondergrondopbouw en de landschappelijke ontwikkeling, memo, Deltares, Utrecht 1 juni 2017, 9 pp.

Hijma, 2019. Marc Hijma, mondelinge communicatie, januari en februari 2019.

Hijma, 2020. Marc Hijma, Variatie in hoogteligging grens deklaag/zandlaag langs en over de GZB, memo 11200952-000-GEO-0007, Deltares, Delft, 29 januari 2020, 5 pp.

Hijma, 2021. Marc Hijma, Heterogeniteit Gameren, e-mail, Deltares, Utrecht, 21 januari 2021 14:22.

ICOLD, 1994. Embankment dams, granular filters and drains, review and recommendations, Bulletin 95, International Commission on Large Dams, Parijs, 1994, 260 pp.

ICOLD, 2017. Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations, Bulletin 164, International Commission on Large Dams, Parijs, 2017, 288 pp.

Kanning, 2019. Wim Kanning, Memo veiligheidsformat primaire erosie en modelfactor grofzandbarrière, versie 7, Deltares, Delft, 9 mei 2019, 10 pp.

Kenney & Lau, 1985. T.C. Kenney & D. Lau, Internal stability of granular filters, Canadian Geotechnical Journal 22:215-225, 1985.

Kenney & Lau, 1986. T.C. Kenney & D. Lau, Closure to: internal stability of granular filters, Canadian Geotechnical Journal 23:420-423, 1986.

Koelewijn, 2015. Andre Koelewijn, Factsheet Grof Zand Barrière, memo 1220240-000-GEO-0002, Deltares, Delft, 26 september 2015, 8 pp.

Koelewijn, 2021. Andre Koelewijn, Ontwerp grofzandbarrière pilot Gameren, Aanzet tot ontwerp- en beoordelingsrichtlijn GZB, rapportage 11200952-070-GEO-0001, Deltares, Delft, 2021.

Lambe & Whitman, 1979. T.W. Lambe & R.V. Whitman, Soil mechanics, Chichester: Wiley, 1979.

Pederzani, 2017. Federica Pederzani, Coarse sand barrier as a measure against backwards erosion piping under dikes, M.Sc. thesis, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Milaan, december 2017, vii + 241 pp.

Van Rhee & Bezuijen, 1992. C. van Rhee & A. Bezuijen, Influence of seepage on stability of sandy slope, Journal of Geotechnical Engineering 118(8):1236-1240, August 1992.

Robbins et al., 2018. B.A. Robbins, V.M. van Beek, J.F. Lopez, A.M. Montalvo Bartolomei & J. Murphy, A novel laboratory test for backward erosion piping, International Journal of Physical Modeling in Geotechnics 18(5):266-279, september 2018, doi:10.1680/jphmg.17.00016.

Den Rooijen, 1992. H. den Rooijen, Literatuuronderzoek doorlatendheid-korrelkarakteristieken, rapportage CO-326020/9, Grondmechanica Delft, Delft, 1992.

Rosenbrand, 2017. Esther Rosenbrand, Literatuurstudie filtercriteria ten behoeve van grofzandbarrière, memo, kenmerk 11200952-003-GEO-0001, Deltares, Delft, 19 september 2017, 12 pp.

Rosenbrand, 2020. Esther Rosenbrand, Uitgangspunten her-kalibratie Gameren profiel RW136+050, memo 11200952-067-GEO-0001, Deltares, Delft, 29 juni 2020, 15 pp.

Rosenbrand & Van Beek, 2017. E. Rosenbrand & V.M. van Beek, Analysis report coarse sand barrier, rapportage 11200952-006-GEO-0006, Deltares, Delft, november 2017, 125 pp.

Rosenbrand & Van Beek, 2019. Esther Rosenbrand & Vera van Beek, Analysis report coarse sand barrier, medium-scale experiments stage II, rapportage 11200952-052-GEO-0002, Deltares, Delft, oktober 2019, 284 pp.

Rosenbrand & Koelewijn, 2020a. Esther Rosenbrand & André Koelewijn, Analyse aanvullend grondonderzoek gameren, memo 11200952-067-GEO-0002, Deltares, Delft, 29 juni 2020, 11 pp.

Rosenbrand & Koelewijn, 2020b. Esther Rosenbrand & André Koelewijn, Gevoeligheidsanalyse profiel RW136+050, memo 11200952-067-GEO-0003, Deltares, Delft, 28 juli 2020, 17 pp.

Rosenbrand et al., 2021. Esther Rosenbrand, Vera van Beek & Geeralt van den Ham, 3D effects for a coarse sand barrier, rapportage 11200952-060-GEO-0002,Deltares, Delft, 3 februari 2021, 118 pp.

Van Schaick & De Wit, 2020. S. van Schaick & T. de Wit, Dwarsdoorsnedes Ontwerp Grofzand Barrière Open Methode, tekening BF6334-VO+ / 0000-05, RoyalHaskoningDHV, Nijmegen, 8 oktober 2020.

Stellema, 2018. G.A.F. Stellema, Geotechnisch en –fysisch onderzoek fase 1 en 2, DAS bodemonderzoek Gameren 22E (dijkring 38 traject 38-1), versie 2, definitief, projectnummer VN-699229-2, documentnummer R60860, Wiertsema en Partners, Tolbert, 20 december 2018, 324 pp.

Stellema, 2019. G.A.F. Stellema, Geotechnisch en –fysisch onderzoek fase 1, 2 en 3, DAS bodemonderzoek Gameren 22E (dijkring 38 traject 38-1), versie 1, definitief, projectnummer VN-699229-2, documentnummer R63853, Wiertsema en Partners, Tolbert, 27 mei 2019, 436 pp.

Taal, 2017. Laura Taal, Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel, Groene versie, POV piping, Tiel, 14 juni 2017, 48 pp. + 4 bijlagen.

Taal, 2019a. Laura Taal, Snel antwoord op voicemail, e-mail, Waterschap Rivierenland, Tiel, 24 januari 2019 14:57.

Taal, 2019b. Laura Taal, mondelinge communicatie, eind januari 2019.

TAW, 2001. Technisch Rapport Waterkerende Grondconstructies, Geotechnische aspecten van dijken, dammen en boezemkaden, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Den Haag, juni 2001, 302 pp.

TAW, 2004. Technisch Rapport Waterspanningen bij Dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. RWS-DWW, ISBN-90-369-5565-3, zie www.enwinfo.nl. Delft, september 2004.

Terwindt et al., 2019. J. Terwindt, E. Rosenbrand & S. Akrami, Factual report coarse sand barrier medium-scale experiments stage II, rapportage 11200952-041-GEO-0001, Deltares, Delft, juni 2019, 314 pp.

USACE, 2000. Design and construction of levees, Engineering Manual EM 1110-2-1913, United States Army Corps of Engineers, Washington DC, 30 april 2000.

Visser, 2004. A.Z. Visser, Een eenvoudig slibmodel van de Grote geul van Gameren, ontwikkeling en toepassing, RIZA werkdocument 2004.060X, projectnummer 6000.16.02, RIZA-WST, Dordrecht, februari 2004, 24 pp.

Westerhof, 2015. H. Westerhof, Geotechnisch onderzoek, HWBPproject 1e tranche, 22E Gameren (fase 1), definitieve rapportage, projectnummer VN-59650-1, documentnummer R39014, Wiertsema en Partners, Tolbert, 7 oktober 2015.

De Wit, 2017. Tom de Wit, Uitgangspuntenrapport Gameren, Ontwerp piping maatregelen: GZB, VZG en damwand-/pipingscherm, rapportage T&PBF6334R001F02, versie 2/finale versie, Royal HaskoningDHV, Nijmegen, 24 november 2017, 24 pp.

De Wit, 2018. Tom de Wit, Voorlopig ontwerp dijkversterking Gameren, Ontwerp pipingmaatregelen Grofzandbarrière, Verticaal zanddicht geotextiel en damwand- /pipingscherm, rapporage T&PBF6334R001F1.0, versie 1.0/finale versie, Royal HaskoningDHV, Nijmegen, 12 januari 2018, 42 pp.

De Wit & Rosenbrand, 2016a. Tom de Wit & Esther Rosenbrand, Gamerensedijk_dijkvak137_sellmeijer_6-6-16_DEF.xlsm, Schetsontwerp, Royal HaskoningDHV, Nijmegen, 8 pp.

De Wit & Rosenbrand, 2016b. Tom de Wit & Esther Rosenbrand, Gamerensedijk_dijkvak143_sellmeijer_6-6-16_DEF.xlsm, Schetsontwerp, Royal HaskoningDHV, Nijmegen, 8 pp.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl