

Grofzandbarrière – correcties en aanvullingen op ontwerprapport Gameren naar aanleiding van ervaringen bij Dijkversterking Stad Tiel

Opgesteld door André Koelewijn (Deltares)

Verificatie door Ulrich Förster (Deltares) en Maurits van Dijk (DIV)

Versie 27 juni 2024

Doel memo

Deze memo biedt een aantal correcties en aanvullingen op het ontwerprapport voor de pilot van de grofzandbarrière voor Gameren¹, naar aanleiding van de ervaringen bij de tweede toepassing van deze maatregel tegen piping bij de Dijkversterking Stad Tiel².

Het gaat om de volgende punten:

1. Correctie van een formule voor de beoordeling van de geschiktheid van het barrièrezand;
2. Het verwerken van de veiligheid tegen opbarsten bovenstrooms van de grofzandbarrière in de faalkansverdeling;
3. Een tweede voorbeeld van de zandkeuze voor het barrièrezand;
4. Een nieuw voorbeeld van de afwerking van de uiteinden van de grofzandbarrière in lengterichting van de waterkering;
5. De omgang met bochten in het tracé en de consequenties voor de hydraulische belasting op de grofzandbarrière;
6. Nadere toelichting op de bepaling van de optredende gradiënt;
7. Mogelijkheden voor het weglaten van het kleimuurtje.

Deze punten kunnen later worden meegenomen bij het actualiseren van een OBOR voor filtertechnieken zoals de grofzandbarrière, het verticaal zanddicht geotextiel en het Prolock-scherm.

1. Correctie van de tweede formule van Burenkova³

In het ontwerprapport voor Gameren is in §6.2, in formule (6.5), in het rechterlid de term '+1' weggevalen. De correcte formule luidt:

$$d_{90,GZB}/d_{60,GZB} < 1.86 \log (d_{90,GZB}/d_{15,GZB}) + 1 \quad (6.5)$$

Deze formule vormt onderdeel van de bepaling van de interne stabiliteit van het barrièrezand. Met deze formule wordt de verhouding tussen de grovere fractie en het geheel begrensd, deze moet niet te grof zijn. De criteria voor interne stabiliteit zijn vooral van belang wanneer meerdere zanden worden gemengd; een meertoppige korrelverdeling kan problemen met otmenging opleveren.

2. Veiligheid tegen opbarsten

De veiligheid tegen opbarsten bovenstrooms van de grofzandbarrière, in de (doorgaans beperkte) ruimte tussen grofzandbarrière en het binnentalud van de dijk, zal in de meeste gevallen de belangrijkste vorm van zogenaamde voorloopsheid zijn. Het gaat hier om falen van de waterkerende functie bovenstrooms van de pipingmaatregel.

De faalkansruimte hiervoor moet gevonden worden binnen de faalkansruimte die toebedeeld is aan piping, doorgaans dus aan de grofzandbarrière als geheel. In het ontwerprapport voor Gameren is dit uitgewerkt in §7.5.2, dit is voor dit aspect echter niet volledig juist gedaan en hiervoor is destijds nog vóór de aanleg een correctie uitgebracht⁴.

1 André Koelewijn, *Ontwerp grofzandbarrière pilot Gameren, aanzet tot ontwerp- en beoordelingsrichtlijn GZB*, rapportage 11200952-070-GEO-0002, Deltares, Delft, 24 augustus 2021, 364 pp.

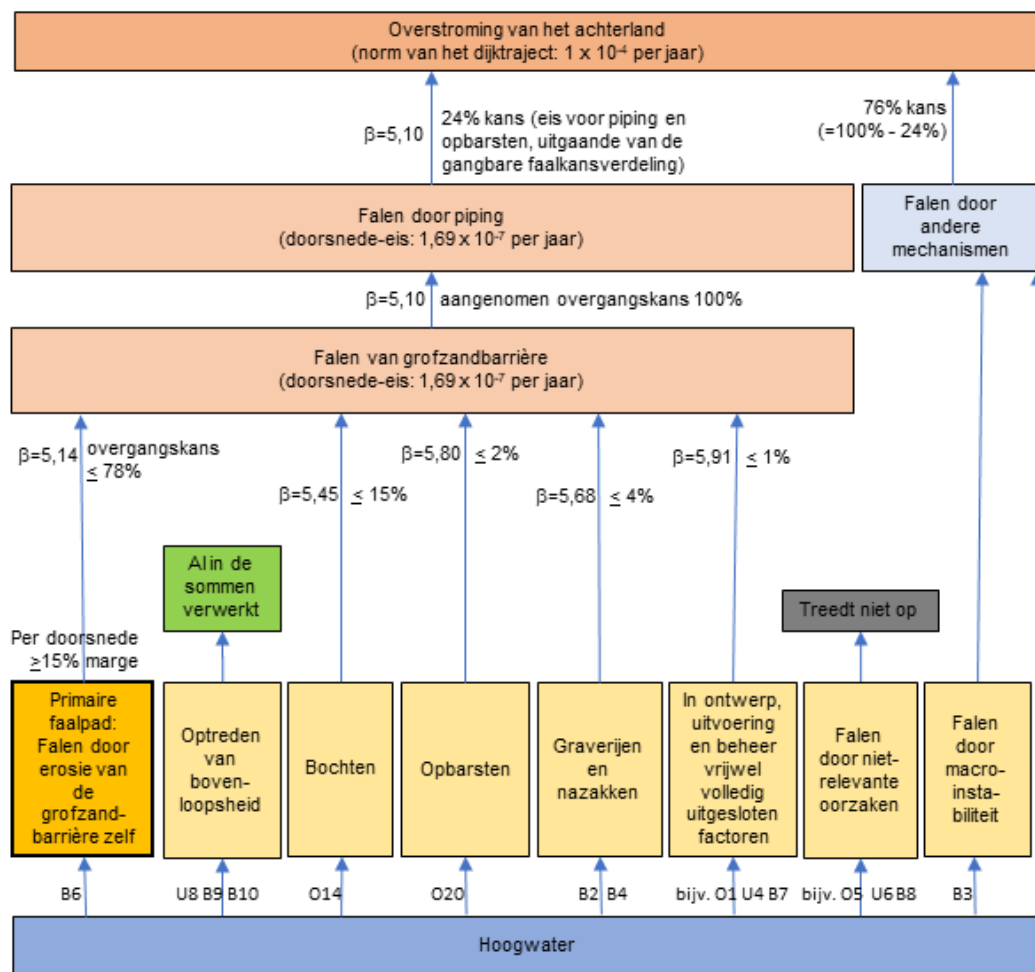
2 André Koelewijn, *Ontwerp grofzandbarrière Stad Tiel, toeleverend document voor ontwerpnota UO GZB DVST*, rapportage 11207327-002—GEO-0001, Deltares, Delft, 2 oktober 2023, 51 pp.

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

4 André Koelewijn, *Opbarstberekeringen voor grofzandbarrière Gameren, herziene versie naar aanleiding van gecorrigeerde veiligheidsfactor*, rapportage 11200952-080-GEO-0001, Deltares, Delft, 28 oktober 2021, 17 pp.

Een nieuw inzicht op dit punt, dat is toegepast bij de Dijkversterking Stad Tiel, is dat de kans op opbarsten bovenstrooms van de grofzandbarrière in verhouding tot de kans op opbarsten benedenstrooms van de grofzandbarrière mag worden beschouwd. Voor die situatie is de kans op bovenstrooms opbarsten conform het vigerende ontwerpinstrumentarium (OI2014v4⁵) $1,9 \times 10^{-4}$ per jaar, terwijl de kans op benedenstrooms opbarsten $9,5 \times 10^{-3}$ per jaar bedraagt⁶. De conditionele kans op bovenstrooms opbarsten (de kans dat bovenstrooms opbarsten optreedt gegeven dat benedenstrooms opbarsten nog niet is opgetreden) is daarmee $1,9 \times 10^{-4} / 9,5 \times 10^{-3} = 2\%$.

Deze 2% is in de totale faalkansverdeling voor die toepassing verwerkt zoals aangegeven in Figuur 1. Opbarsten is hierin terug in te vinden in het vierde gele blokje van links op de op-één-na onderste rij. Hierbij is uitgegaan van een faalkansverdeling waarin er aan piping 24% faalkansruimte is toegekend. Voor de verwerking van de voor opbarsten berekende 2% maakt dat echter niet wezenlijk uit.



Figuur 1 Faalkansverdeling bij de grofzandbarrière bij Dijkversterking Stad Tiel.

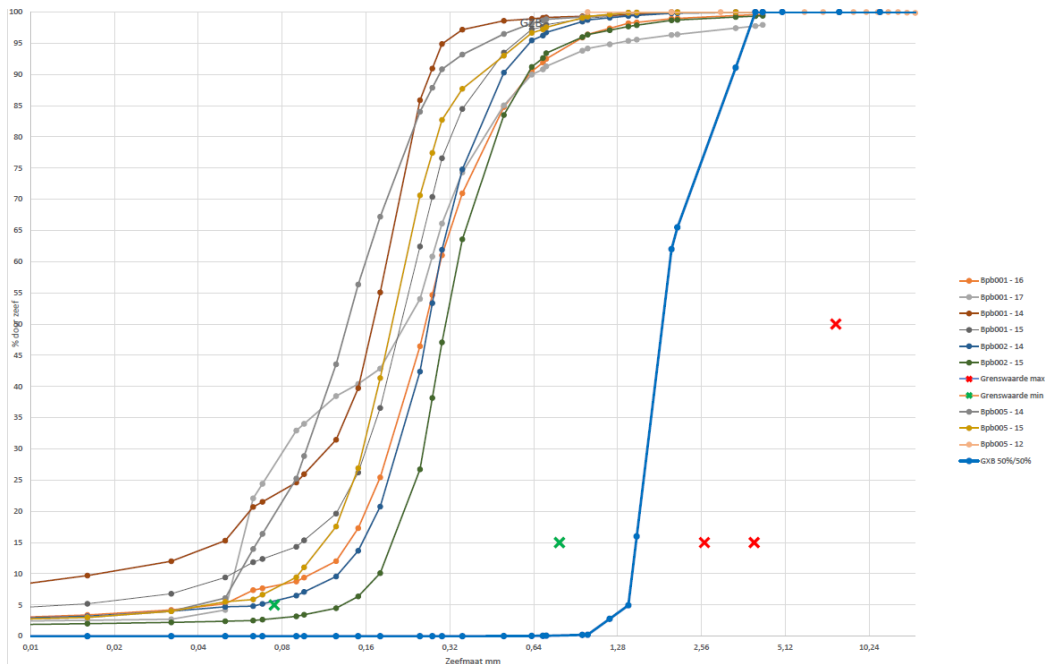
3. Barrièrezand zoals toegepast bij Dijkversterking Stad Tiel

Figuur 2 toont de korrelverdeling van het barrièrezand zoals toegepast bij de Dijkversterking Stad Tiel, naast de relevante korrelverdelingen die in en nabij het tracé van de grofzandbarrière daar zijn aangetroffen. De

⁵ Handreiking ontwerpen met overstromingskansen (OI2014v4), Rijkswaterstaat, februari 2017.

⁶ Matthijs van Joolingen, UO Dijkversterking Stad Tiel, Grondwaterstromingsberekening t.b.v. grofzandbarrière, rapportage 2200083, abt, z.p., 22 september 2023, 16 pp.

drie rode en twee groene kruisjes aan weerszijden van de korrelverdeling van het barrièrezand geven de grenzen aan waar deze verdeling binnen moet vallen, op basis van filtercriteria (de rode kruisjes), doorlatendheid en niet-cohesief zijn (de groene kruisjes).



Figuur 2 Korrelverdelingen in en nabij het tracé van de grofzandbarrière bij Dijkversterking Stad Tiel (dunne lijnen) en gekozen korrelverdeling voor de grofzandbarrière (dikke lijn).

Het zand is, net als voor Gameren, betrokken van de Belgische leverancier Sibelco. Waar voor Gameren een mengsel van vier gezeefde sorteringen is gebruikt, is hier gekozen voor alleen de twee grofste sorteringen daarvan in gelijke delen: 50% van de sortering 1,4-2,0 mm en 50% van de sortering 1,75-2,5 mm. Interne instabiliteit vormt hierbij geen enkel probleem.

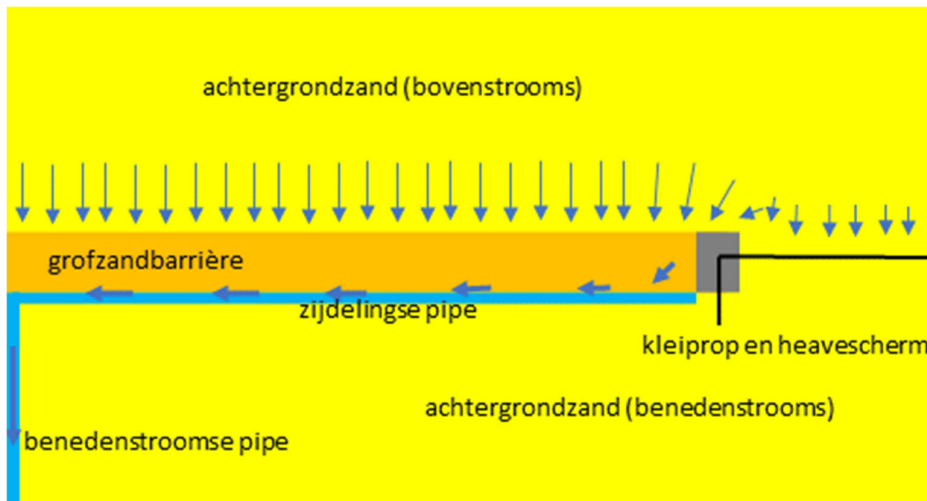
De sterk uniforme verdeling heeft verder als voordelen dat de vereiste verdichting gemakkelijk optreedt en dat ontmenging niet gemakkelijk optreedt. Bovendien geldt ten aanzien van ontmenging dat zelfs de meest fijne fractie nog steeds aan alle eisen voldoet en met een gering aandeel van de gemiddelde korrelgroottefractie tussen verder alleen de grofste fractie ook nog aan de eisen wordt voldaan. Daarom kan het als een aanbeveling worden gezien om een zo uniform mogelijke korrelverdeling voor de grofzandbarrière te nemen. Bovendien helpt het voor de werking van de grofzandbarrière als de verhouding tussen de doorlatendheid van de grofzandbarrière en de doorlatendheid van het omringende zand, het zogenaamde doorlatendheidscontrast, zo groot mogelijk is. Dat wordt bereikt bij een zo grof mogelijk materiaal, dus het ideale mengsel kent een zo steil mogelijke korrelverdeling, met – binnen de uitvoeringstoleranties – een d_{15} die zo grof mogelijk is, dus niet al te ver links van het meest linkse rode kruisje in figuur 2.

4. Uiteinden van de grofzandbarrière: een nieuw voorbeeld van een oplossing

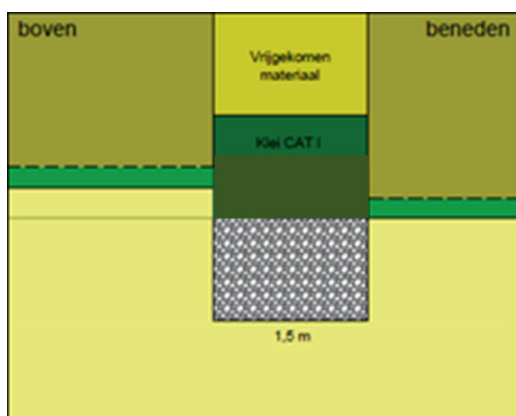
Aan de uiteinden van de grofzandbarrière, in de lengterichting van de dijk, is een maatregel nodig om een pipingbestendige situatie te creëren. Het gaat hierbij om een goede aansluiting op het aangrenzende dijkvak, waarbij achterloopsheid moet worden vermeden en ook de pipegroei achterlangs de grofzandbarrière, aan de kant van het achterland, moet worden gestopt.

In Gameren is aan het ene uiteinde een kleiprop loodrecht op de grofzandbarrière toegepast en aan het andere uiteinde eindigde de grofzandbarrière in een van nature aanwezige kleiafzetting.

In Tiel is aan het ene uiteinde eveneens een kleiprop toegepast en moest aan het andere uiteinde een aansluiting op een heavescherm worden gerealiseerd. Hier is een viertal planken haaks aangebracht (zie Figuur 3). Op basis van deze principe-oplossing is ervoor gekozen om in de eerste 'kist' (tijdelijke bekisting van 6 m lengte) boven de onderste meter grof zand over de volle breedte én lengte alleen klei aan te brengen over een hoogte van 1,0 m (zie Figuur 4). Dit in plaats van grof zand over de benedenstroomse⁷ 1,0 m loodrecht op de dijk (de eigenlijke grofzandbarrière) en klei over de bovenstroomse 0,5 m loodrecht op de dijk (een zogenaamd 'kleimuurtje' waarmee doorslag wordt vermeden in het geval van een bovenstrooms hoger liggende bovenzijde van de zandlaag dan benedenstrooms). Om uitvoeringstechnische redenen was het niet wenselijk om de klei tot onderin de ontgraving aan te brengen (door het onderliggende zand achterwege te laten), omdat de klei dan in den natte zou moeten worden aangebracht en dan onvoldoende verdicht zou kunnen worden. Het grove zand onderin, dat tijdens de uitvoering als drain werd benut, leidt niet tot een alternatief pipingpad. Pipevorming zal niet gemakkelijk tot op die diepte plaatsvinden, bovendien komt het grove korrelmateriaal niet gemakkelijk in beweging. Dit diepgelegen grove zand zal altijd minder gemakkelijk tot falen leiden dan de sectie van de grofzandbarrière die direct aan deze kleiprop grenst.



Figuur 3 Aansluiting grofzandbarrière bij Dijkversterking Tiel op heavescherm (bovenaanzicht).



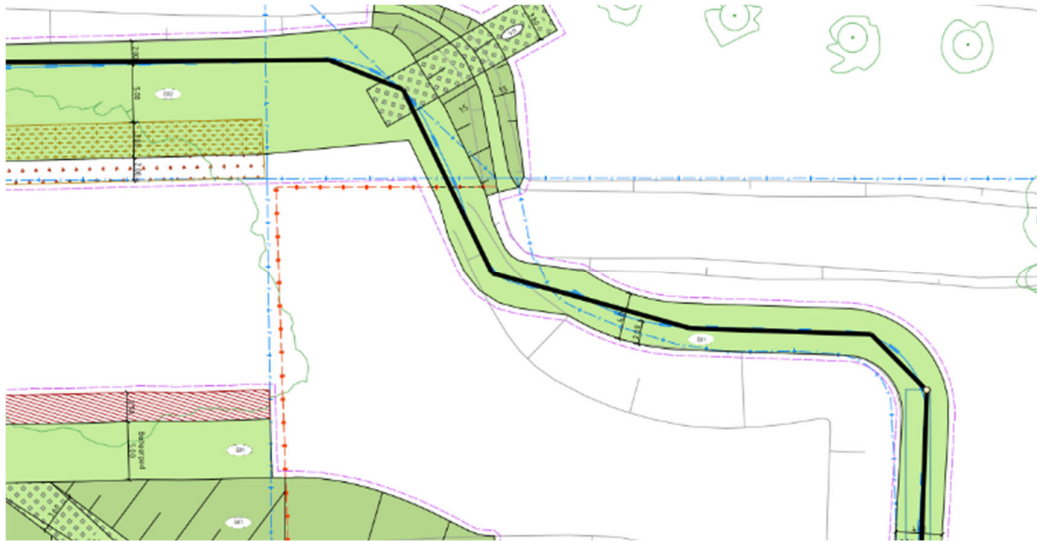
Figuur 4 Dwarsdoorsnede ter hoogte van de kleiprop uit de voorgaande figuur.

5. Bochten in het tracé

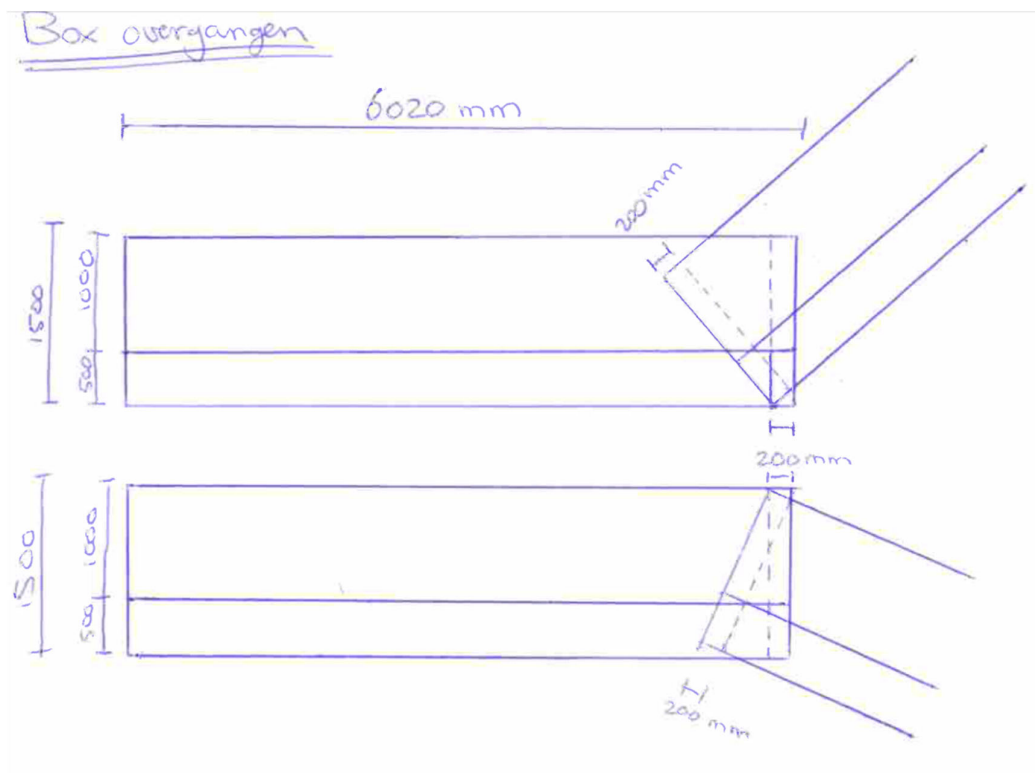
Bij de pilot in Gameren was het traject van de grofzandbarrière praktisch recht. Bij de toepassing in Tiel waren drie bochten in het tracé aanwezig, zoals aangegeven in Figuur 5. Met behoud van de vereiste overlap kunnen

⁷ 'Benedenstrooms' gebaseerd op de grondwaterstroming tijdens ontwerpomstandigheden, dus aan de achterlandzijde van de grofzandbarrière, niet aan de dijk- en hoogwaterzijde.

openvolgende kisten worden gemaakt zoals is aangegeven in Figuur 6 voor twee verschillende aansluitingshoeken. Voor de uitvoering vormen bochten derhalve geen probleem; ook haakse bochten zouden kunnen worden gemaakt.



Figuur 5 Gedeelte van het tracé van de grofzandbarrière in Tiel in bovenaanzicht (noorden naar rechts, achterland naar boven/rechts).



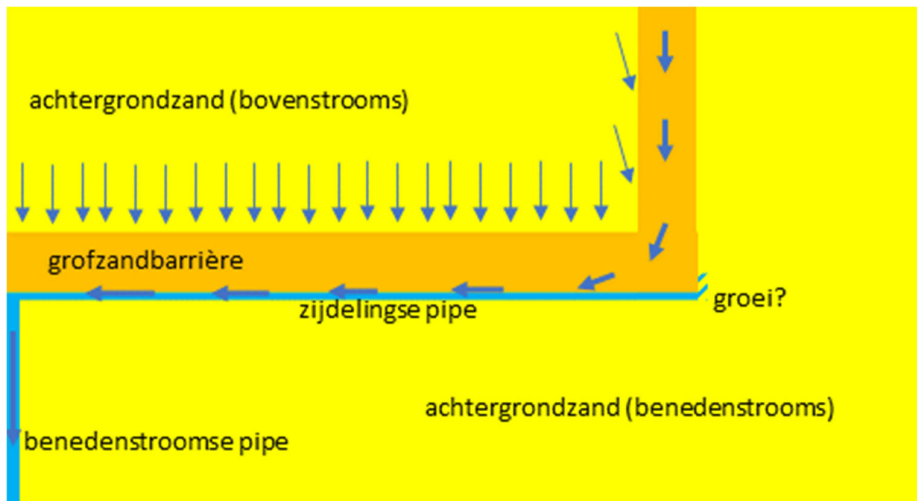
Figuur 6 Voorbeelden van overlap van afzonderlijke kisten bij bochten (principeschets).

Voor de stromingsverdeling rond een grofzandbarrière is het van belang dat wanneer een pipe vanaf het uittredepunt bij de barrière aankomt, zich aan de benedenstroomse zijde twee pipes zullen vormen in

zijdelingse richting, als het ware achterlangs de grofzandbarrière. Wanneer de groei van deze zijdelingse pipes wordt verhinderd, dan ontstaan er relatief hoge piekdrukken, die voor het ontwerp maatgevend zijn. Dit wordt aan het einde van deze paragraaf nader toegelicht.

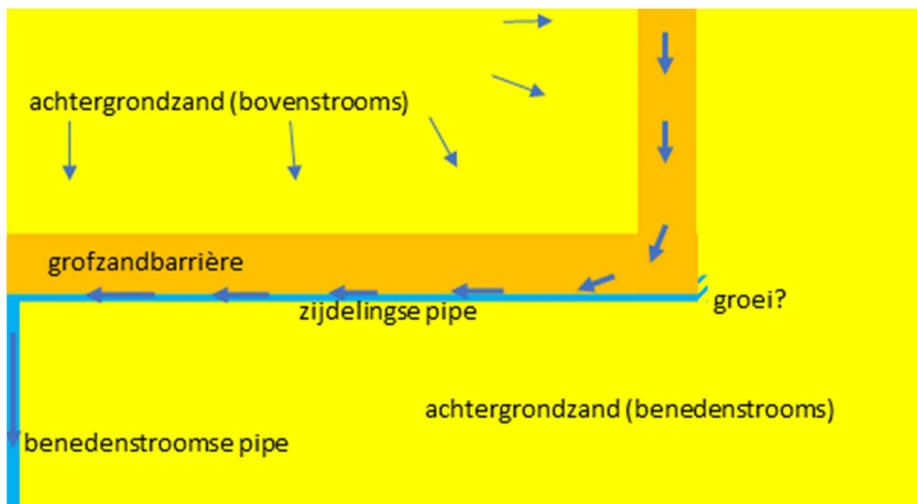
Bij een haakse bocht is het echter de vraag of de zijdelingse pipe, achterlangs de grofzandbarrière, nog wel om de bocht heen zal groeien. Voor deze pipegroei is namelijk wel voldoende stroming nodig in het achtergrondzand grenzend aan de grofzandbarrière en de reeds gevormde pipe. Als de dominante grondwaterstromingsrichting is zoals geschetst in Figuur 7, dan is het nog maar de vraag of de zijdelingse pipe zal doorgroeien. In dat geval is effectief sprake van een blokkade en een sterke stromingsconcentratie, met bijbehorende hoge gradiënt, in de grofzandbarrière ter plaatse van de bocht.

In Tiel was dit denkbaar geweest bij een haakse uitvoering van de meest noordelijke bocht, hoewel de stroming daar vanwege de vleugelwand van het sluisencomplex mogelijk al té beperkt is om tot een maatgevende situatie te leiden in vergelijking met de overige delen van het tracé.



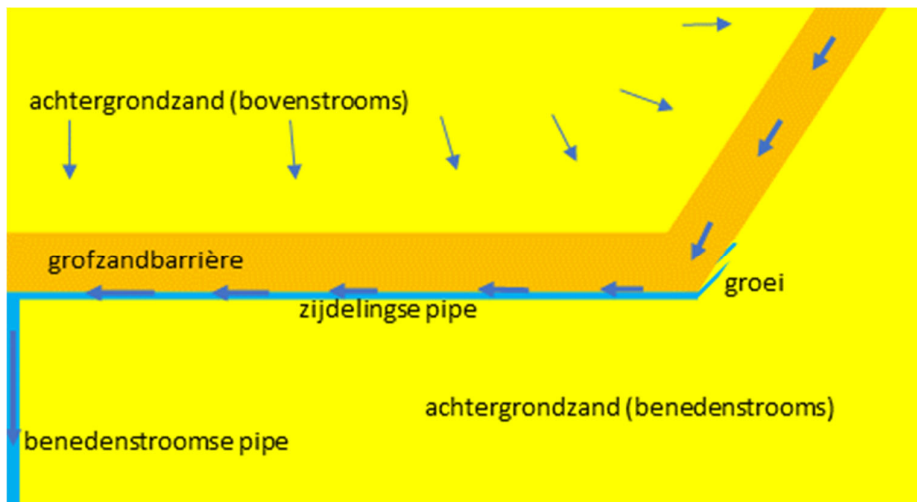
Figuur 7 Haakse bocht, met dominante grondwaterstroming loodrecht op het gedeelte van de grofzandbarrière waarin al een zijdelingse pipe is gevormd.

Als de dominante grondwaterstroming 'voorbij de bocht' meer loodrecht op de daar aangebrachte grofzandbarrière is (zie Figuur 8), dan is het nog steeds de vraag of de zijdelingse pipe wel om de bocht heen zal groeien, omdat de grofzandbarrière de stroming nabij de bovenkant van het watervoerend pakket zal afvangen en richting de reeds gevormde benedenstroomse pipe zal afvoeren, zonder voldoende mogelijkheid voor erosie 'om de bocht'. Dit had het geval kunnen zijn bij een haakse uitvoering van de meest zuidelijke bocht in het grofzandbarrièretracé bij Tiel.



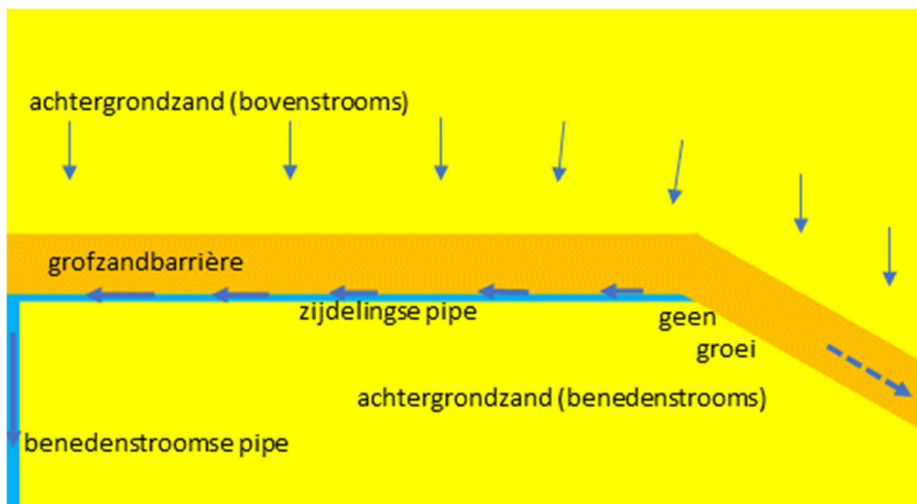
Figuur 8 Haakse bocht met variatie in de dominante grondwaterstromingsrichting.

Mede vanwege de boogstralen in het geplande tracé zijn haakse bochten in Tiel niet toegepast. Bij stompe hoeken bij de aansluiting van twee kisten is het doorgroeien van de zijdelingse pipe aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière wel aannemelijk in het geval van een bocht naar het buitenwater toe, zoals geschetst in Figuur 9.



Figuur 9 Niet-haakse bocht met doorgaande zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse zijde van grofzandbarrière.

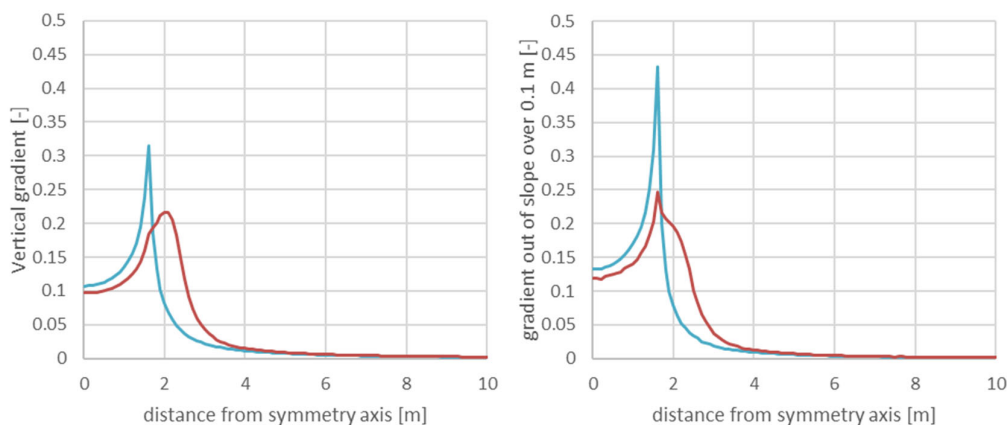
Wanneer de bocht de andere kant op gaat (zie Figuur 10), dan is doorgaande groei van de zijdelingse pipe onwaarschijnlijk. Dit zal echter niet snel tot een situatie met een falende grofzandbarrière ter plaatse van de bocht leiden, omdat het dan veel waarschijnlijker is dat verderop (meer naar rechts in de figuur) een andere benedenstroomse pipe zal aantakken op de grofzandbarrière, waardoor het water in die richting zal afstromen en een andere zijdelingse pipe (komend van rechts) zal aansluiten op de geschetste zijdelingse pipe.



Figuur 10 Niet-haakse bocht zonder doorgaande zijdelingse pipegroei aan de benedenstroomse zijde van de grofzandbarrière.

Ingeschat wordt dat bochten tot een hoek van maximaal 70 graden nog wel tot zijdelingse pipegroei zullen leiden, die nuttig is om een sterke stromingsconcentratie met bijbehorende hoge waarde voor de 3D-factor (een partiële veiligheidsfactor in de berekening) te kunnen vermijden. In het grofzandbarrièretracé bij Tiel bleek dit overal wel haalbaar.

Enige achtergrondinformatie (ook te vinden in het ontwerprapport voor Gameren): nabij de kop van de zijdelingse pipe zal er een stromingsconcentratie in de grofzandbarrière ontstaan. Deze vormt de aanleiding voor de partiële veiligheidsfactor die aangeduid is als '3D-factor'. Het stromingspatroon leidt ook relatief gemakkelijk tot verdere groei van de zijdelingse pipe. Als dit door wat voor oorzaak dan ook wordt verhinderd (bijvoorbeeld heterogeniteit, een steen of ook een haakse bocht), dan leidt dit in de buurt van de kop van de zijdelingse pipe tot een piek in de gradiënt in de grofzandbarrière. Zie Figuur 11 voor een indicatie van de pieken die kunnen ontstaan.



Figuur 11 Berekende gradiënten langs de grofzandbarrière voor een zijdelingse pipelengte van 3,2 m (in de gemodelleerde halfruimte: 1,6 m), links: verticale gradiënt aan de bovenstroomse rand van de barrière, rechts: gradiënt loodrecht op de helling, halverwege de barrière, gemiddeld over een afstand van 10 cm, blauwe lijn: verticale begrenzing bij het einde van de zijdelingse pipe, rode lijn: helling vanaf het einde van de zijdelingse pipe⁸.

Bij niet-haakse bochten is er wel sprake van enig restrisico in samenhang met de partiële 3D-factor, doordat een obstakel dat de pipegroei juist in de bocht verhindert tot een iets hogere maatgevende gradiënt in de grofzandbarrière leidt. De kans hierop is gering: alleen een obstakel binnen 1 à 2 meter van de bocht is relevant, omdat de piekdrukken volgens de uitgevoerde 3D-analyses binnen die afstand optreden (zie Figuur 11) en het deze piekdrukken zijn die in de bocht nog iets verhoogd kunnen worden.

Voor Tiel is de kans van optreden van een obstakel net als in Gameren waarschijnlijk kleiner dan eens in de 50 meter. De kans dat een obstakel dichtbij een bocht voorkomt is daarmee kleiner dan $1 \text{ à } 2 \text{ [m]} / 50 \text{ [m]} =$ kleiner dan 2 à 4%. Bij een deelfaalkansruimte van 24% voor falen gerelateerd aan piping en heave, zoals gehanteerd voor het ontwerp bij Tiel (zie ook Figuur 1 en de toelichting daarop) leverde dit voor dat ontwerp een risico op van 'minder dan 2 à 4% / 24% = 'minder dan 8 à 17%'. Voor het ontwerp bij Tiel is dit aan de conservatieve kant afgerond naar 15%, zie het derde gele blokje van links in Figuur 1.

Concreet voor Tiel is dit alleen relevant bij de meest zuidelijke bocht (zie Figuur 5); de middelste bocht gaat immers de andere kant op en de meest noordelijke bocht kent minder toevoer van water vanwege de vleugelwand van het sluzencomplex.

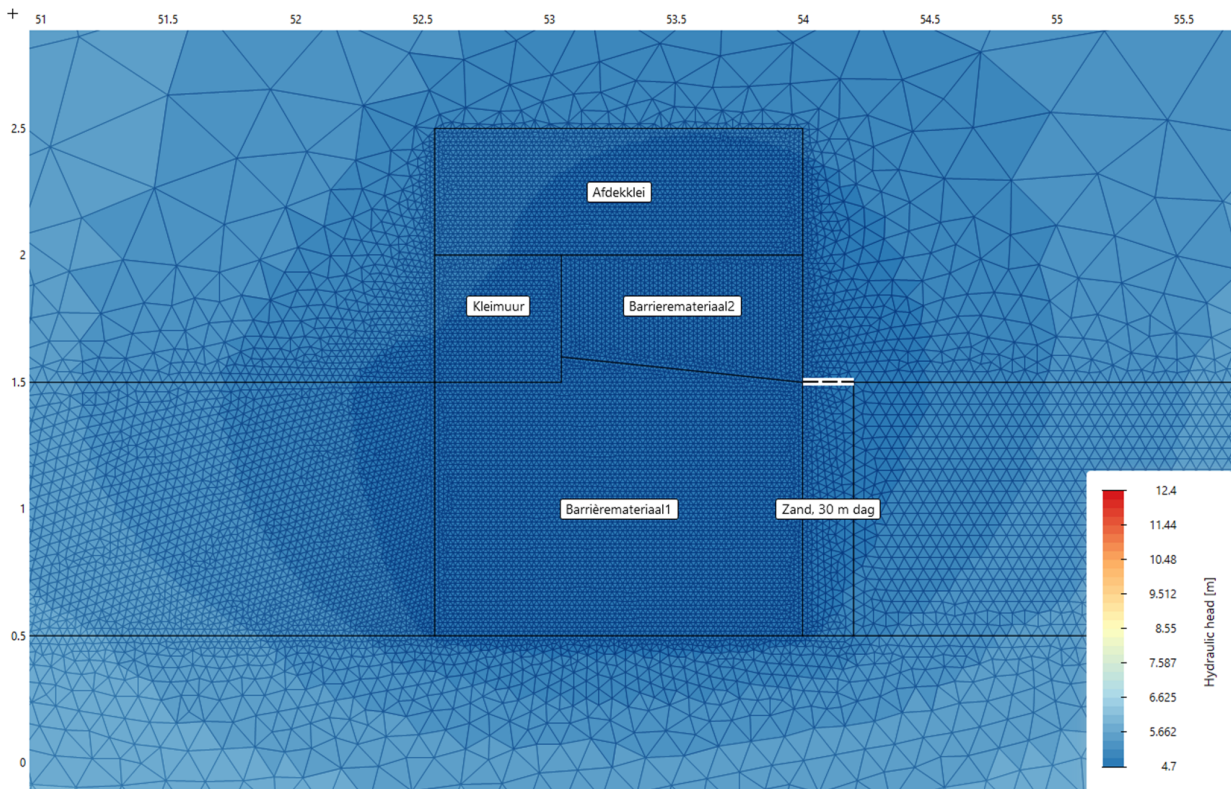
6. Nadere toelichting op de bepaling van de optredende gradiënt

Gebleken is dat de bepaling van de maatgevende optredende gradiënt in de grofzandbarrière een nadere toelichting behoeft.

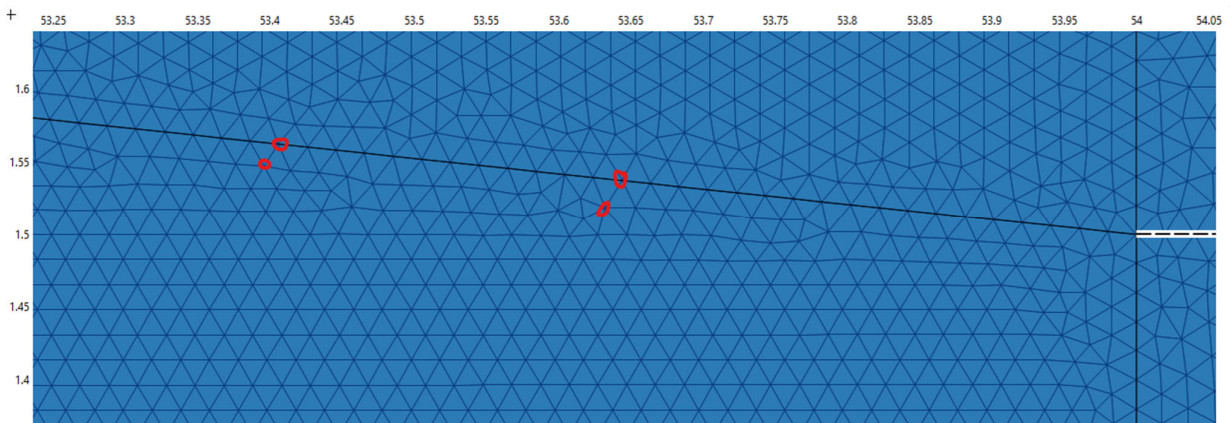
Maatgevend voor het ontwerp van een grofzandbarrière is de optredende gradiënt in de middelste 20 cm van de resthelling onder 10 graden van de grofzandbarrière bij WBN en de daarbij geldende binnenwaterstand. Hiertoe moet een grondwaterstromingsberekening (zonder erosie) worden gemaakt, zoals in het ontwerpverslag voor Gameren ook is aangegeven.

De bepaling van de maatgevende gradiënt bleek bij de berekeningen voor Tiel niet geheel duidelijk te zijn. In Figuur 12 is, als voorbeeld, het eindige-elementennet van één van de berekeningen. In Figuur 13 is een detail hieruit weergegeven, met twee punten langs de helling, 20 cm uit elkaar, in het midden van de helling. Bepalend is de hoogste uitstroomgradiënt nabij het oppervlak over deze 20 cm. Bij één van deze punten is deze het hoogst voor de volledige 20 cm, daarom is de bepaling van de gradiënt bij deze beide punten voldoende. Bij elk punt kan de gradiënt worden bepaald door de berekende stijghoogte in de helling en de berekende stijghoogte in het meest nabijgelegen knooppunt onder de helling te bepalen en het verschil in beide waarden te delen door de afstand tussen beide punten. De hoogste waarde van de beide verkregen waarden is bepalend. Deze procedure is conform de kalibratie op basis van medium-schaal laboratoriumproeven met de grofzandbarrière zoals beschreven door Förster⁹.

⁹ 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.



Figuur 12 Voorbeeld van een eindige-elementennet voor de berekening van de maatgevende gradiënt.



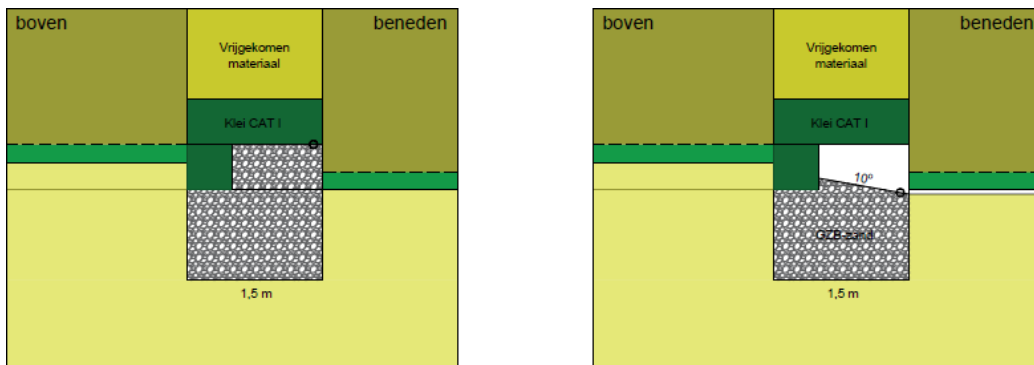
Figuur 13 Detail uit de voorgaande figuur met twee punten in het midden van de helling, 20 cm uit elkaar, met schuin onder elk punt een ander knooppunt waarmee de gradiënt kan worden bepaald

In de rapportage voor Dijkversterking Stad Tiel is overigens niet gedeeld door de daadwerkelijke afstand tussen elk punt op de helling en het bijbehorende meest nabijgelegen knooppunt onder de helling, maar alleen door de verticale afstand. Deze vereenvoudigde procedure leverde een iets hogere waarde, hetgeen aan de veilige kant is.

7. Mogelijkheden voor het weglaten van het kleimurtje

In de concept-fase van de grofzandbarrière werd nog geen rekening gehouden met een hoogteverschil van de bovenkant van de pipinggevoelige zandlaag aan weerszijden van de barrière. Pas in een later stadium werd gerealiseerd dat de laagscheiding tussen deze zandlaag en de deklaag niet altijd op hetzelfde niveau ligt, en dat dit voor de situatie pal voor bezwijken problematisch is wanneer de laagscheiding aan de bovenstroomse

zijde duidelijk hoger ligt dan aan de benedenstroomse zijde, zoals geschetst in Figuur 14. Dit komt mede doordat de maatgevende hellingshoek van de grofzandbarrière op 10 graden is bepaald. Bij deze hoek is een vrij gering hoogteverschil al problematisch, zeker wanneer de grofzandbarrière betrekkelijk smal is, bijvoorbeeld 35 of 50 cm vanwege de aanleg met behulp van een kettingfreesmachine, in plaats van de 1,5 m zoals in Gameren en Tiel.



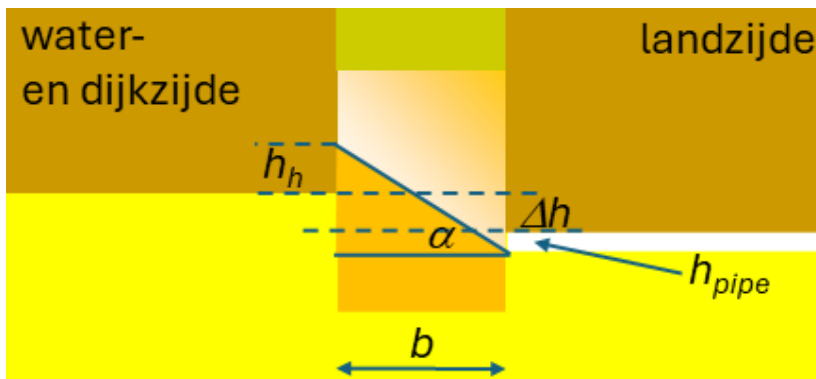
Figuur 14 Dwarsprofiel van de grofzandbarrière zoals toegepast in Gameren en Tiel. Links na aanbrengen, rechts in de uiterste situatie.

Als oplossing is daarom een 'doorgaande verticale afdichting aan de bovenstroomse zijde' bedacht, om het hoogteverschil te compenseren en tot nu toe uitgevoerd in klei, en bekend als 'het kleimuurtje'. Dit vormt echter een aanzienlijke kostenpost en bemoeilijkt de aanleg met behulp van een kettingfreesmachine.

Doorgaans zal over een groot gedeelte van het tracé het hoogteverschil nagenoeg nul zijn, of de andere kant op (dus: aan de benedenstroomse zijde ligt de laagscheiding dan (iets) hoger dan aan de bovenstroomse zijde, precies andersom dus dan geschetst in Figuur 14). Daar is een maatregel als een kleimuurtje om het hoogteverschil te compenseren dus overbodig.

Daarnaast is het zo dat de helling in de grofzandbarrière pas bij een relatief groot verval over de kering in serieuze mate verflauwt, zoals ook uit de uitgevoerde laboratoriumproeven is gebleken. Een hellingshoek van kleiner dan 25 à 30 graden trad pas bij 60 tot 75% van het maximale verval op. Dus tot 60% van het maximale verval bedraagt de hellingshoek niet slechts 10 graden, maar tenminste 25 graden. Daarmee is wel enig hoogteverschil op te vangen. Hoeveel precies is uiteraard afhankelijk van de toegepaste breedte.

Natuurlijk moet het ontwerp voor de maatgevende omstandigheden betrouwbaar zijn over het gehele tracé, maar dat betekent niet dat onder de maatgevende omstandigheden ook de uiterste grenssituatie hoeft op te treden (dus de situatie waarbij de helling van de grofzandbarrière is verflauwd tot 10 graden). Net zoals in de ontwerpfilosofie van SoSeal kan ook gekozen worden voor een ontwerp dat voldoet bij een minder extreme situatie bij de maatgevende omstandigheden, zoals bijvoorbeeld de situatie met een hellingshoek van 25 graden. Het verschil is geschetst in Figuur 15. Als wordt uitgegaan van de minimale hellingshoek, dan komt de hoogte aan de bovenstroomse zijde slechts $b \sin 10^\circ = 0,17b$ hoger uit dan de bodem van de benedenstroomse pipe (met b = de breedte van de grofzandbarrière). Wanneer de hoek α 25 graden bedraagt, dan komt dit uit op $0,42b$, hetgeen een factor 2,4 groter is. Bij een vereiste heavehoogte h_n , een hoogteverschil van Δh voor de bovenkant van de pipinggevoelige zandlaag tussen de dijkzijde en de landzijde en een pipediepte h_{pipe} geldt in het algemeen: $b \sin \alpha > h_n + \Delta h + h_{pipe}$ als eis. Een 'kleimuurtje' zorgt ervoor dat $\Delta h = 0$. De term h_{pipe} wordt doorgaans verwaarloosd.



Figuur 15 Dwarsprofiel van een grofzandbarrière met hellingshoek α en breedte b , evenals enkele relevante hoogtes.

Dan zijn er vervolgens nog twee verschillende situaties mogelijk:

1. Gegeven de redelijkerwijs maximaal mogelijk geachte verschillen in het niveau van de laagscheiding over de breedte van de grofzandbarrière, is er daarmee geen reëel risico meer dat ergens langs het tracé er sprake is van een te groot niveauverschil – dan voldoet dit alternatieve ontwerp (mits ook aan alle andere ontwerpisen wordt voldaan).
2. Anders dan in situatie 1, is het dan *op voorhand* denkbaar dat op enkele strekkingen langs het tracé dit alternatieve ontwerp niet voldoet, omdat het niveauverschil hier en daar te groot is. De locatie van de gedeeltes waar het ontwerp niet voldoet, zal over het algemeen niet voorafgaand aan de uitvoering bekend zijn. Tijdens de uitvoering zou wel op redelijk kostenefficiënte wijze dit niveauverschil frequent (bijvoorbeeld iedere 5 of zelfs 1 meter¹⁰) kunnen worden bepaald en daar waar het te groot is, kan dan in een tweede slag gericht een maatregel worden getroffen (zoals het met een kuip aanbrengen van een kleimuurtje). Of er ergens langs het tracé daadwerkelijk sprake zal zijn van een te groot niveauverschil Δh kan op voorhand weliswaar worden ingeschat, maar zal pas concreet blijken uit de metingen. Hierbij is het mogelijk dat soms het hele tracé voldoet en er soms op enkele plaatsen in een tweede slag alsnog een maatregel moet worden aangebracht.

De praktische uitwerking hiervan zal logischerwijs eerder bij de aannemerij liggen dan bij een kennisinstituut als Deltares.

8. Keerbare peilen onder verschillende aannamen

Ter illustratie is in Tabel 1 voor zowel Gameren als Tiel niet alleen aangegeven wat voor het ontwerp is aangenomen, maar is ook aangegeven welk verval gekeerd kan worden bij verschillende situaties: de uiterste situatie, weinig aantasting, meer aantasting en een vlakke grofzandbarrière – de meest ongunstige situatie die ontstaat wanneer een aangetaste grofzandbarrière nooit hersteld wordt, waarbij nog tenminste 70% van de oorspronkelijke sterkte overblijft. Daaronder is aangegeven welke buitenwaterstanden daarbij aanwezig zijn, uitgaande van het polderpeil binnendijks. Voor de situatie in Tiel zijn daarbij ook de buitenwaterstanden aangegeven voor het geval van een gevulde wadi, hetgeen voor de ontwerpomstandigheden realistischer mag worden geacht dan een droogstaande wadi. Voor Gameren geldt dat met de huidige afwateringsmogelijkheden het polderpeil niet te handhaven is, zodat het werkelijke peil tussen de huidige en de voormalige dijk hoger zal zijn. De vet aangegeven waarden gelden voor de huidige ontwerpen.

¹⁰ Zowel in Gameren als in Tiel kende het uiteindelijke grondonderzoek een hoge dichtheid, hetgeen kennelijk doenlijk was.

Tabel 1 Keerbare peilen in Gameren en Tiel onder verschillende aanvullende aannamen

	Gameren	Tiel	
Actuele kruinhoogte (m + NAP)	9,15	12,25	
Waterstand bij norm WBN 2075 (m + NAP)	9,00	12,10	
Polderpeil (m + NAP)	1,80	4,70 (lege wadi)	5,20 (volle wadi)
Maatgevend verval (m)	7,20	7,40	6,90
Keerbare verval huidige GZB (m)		8,50	
- uiterste situatie ($\alpha = 10^\circ$ / 100% sterkte)	10,14*		
- weinig aantasting ($\alpha = 30^\circ$ / 60%)	6,08	5,10	
- meer aantasting ($\alpha = 25^\circ$ / 75%)	7,61	6,37	
- vlakke grofzandbarrière (70%)	7,10	5,95	
Keerbare buitenwaterstand uitgaande van polderpeil (m + NAP)			
- uiterste situatie ($\alpha = 10^\circ$ / 100% sterkte)	11,88	13,20	13,70
- weinig aantasting ($\alpha = 30^\circ$ / 75%)	7,88	9,80	10,30
- meer aantasting ($\alpha = 25^\circ$ / 60%)	9,41	11,07	11,57
- vlakke grofzandbarrière (70%)	8,90	10,65	11,15

* Zie hiervoor Figuur 2 uit het rapport in voetnoot 4: per doorsnede is er zeker 33% marge voor het primaire faalpad, dus wordt maximaal 67% aangesproken, maar omdat die berekeningen gecorrigeerd zijn voor 6% stromingsweerstand in de pipe richting uittredepunt, wordt $67\% \cdot 1,06 = 71\%$ van de sterkte aangesproken om het maatgevend verval van 7,20 m te keren. Uit $7,20 / 0,71 = 10,14$ volgt het verval dat tenminste gekeerd kan worden door de Gamerse grofzandbarrière.