



AFSTUDEERRAPPORT

Afstudeeronderzoek Waterdoorlatend damwand

	Hogeschool Rotterdam
Opleiding:	Civiele Techniek
Vakcode:	CIVAFS40
Bedrijf:	Gebr. De Koning
Begeleider:	Ing. L.C.J. van Dijk
Student:	Bonno Haaring
	0884183
Plaats:	Papendrecht
Datum:	13-6-2017

AFSTUDEERRAPPORT

Afstudeeronderzoek Waterdoorlatend damwand

Organisatie: Rotterdam University of Applied Sciences,
Instituut voor de Gebouwde Omgeving;
Opleiding: Civiele Techniek
Opdrachtgever: Gebr. De Koning
Projectnaam: Afstudeeronderzoek waterdoorlatend damwand
Document: Onderzoeksrapport
Versie: 1.0
Status: Concept
Plaats: Papendrecht
Datum: 13-6-2017

Afstudeerstudent: Bonno Haaring
Studentnr: 0884183
E-mailadres: Bonnohaaring@gmail.com

Afstudeercoördinator: W. Kuppen
E-mailadres: w.j.j.m.kuppen@hr.nl

1^e Docentbegeleider: L..A. van Gelder
E-mailadres: l.a.van.gelder@hr.nl

2^e Docentbegeleider: P.J.L. Blommaart
E-mailadres: p.j.l.blommaart@hr.nl

Bedrijfsbegeleider: ing. L.C.J. van Dijk
E-mailadres: leo.v.dijk@gebrdekoning.nl

Autorisatie docentbegeleider

Naam: Dhr. L.A. van Gelder

Datum: _____

Handtekening: _____

Autorisatie bedrijfsbegeleider

Naam: Dhr. L.C.J. van Dijk

Datum: _____

Handtekening: _____

Voorwoord

Geachte lezer,

Voor u ligt het resultaat van het afstudeeronderzoek naar “Waterdoorlatend damwand”. Het rapport is geschreven in het kader van het afstuderen aan de Hogeschool te Rotterdam voor de opleiding Civiele Techniek. Het onderzoek is uitgevoerd door Bonno Haaring in opdracht van Gebr. De Koning BV, te Papendrecht en heeft plaats gevonden in de laatste 18 weken van de opleiding.

Het onderzoek is voortgekomen uit de wens van het bedrijf, welke haar disciplines wil verleggen en haar kennis wil vergroten om zo tot een meedenkende aannemer aangekaart te kunnen worden. De doelgroep van dit rapport bestaat uit werknemer van het bedrijf en dient naast beoordeling door Hogeschool Rotterdam mogelijk ook voor nader onderzoek.

Tijdens het onderzoek is er binnen het bedrijf veel overlegd met collega's. Hen wil ik allen bedanken voor het advies dat zij mij gaven en de tijd en moeite die zij voor mij hebben genomen. Echter is het niet meer dan gepast om enkele van deze collega's in het bijzonder te bedanken:

Allereerst wil ik Leo van Dijk bedanken voor de begeleiding tijdens het onderzoek en het betrekken van mijzelf bij de presentatiemiddag van de POV Macrostabieliteit. Hierdoor werd de mogelijkheid gecreëerd om in contact te raken met diverse experts op het gebied van macrostabieliteit. Mede door deelname aan deze middag ben ik in contact gekomen met Deltares.

Daarnaast wil ik Jorn Lankhorst bedanken voor het feit dat ik altijd welkom was met vragen, mij voorzag van advies en relevante informatie en waar het nodig was voor bijsturing zorgde gedurende het onderzoek.

Naast advies van collega's heb ik ook veel te danken aan Ruud Termaat, werkzaam bij Deltares, welke mij voorzag van kritische feedback. Daarnaast was hij gedurende het onderzoek bereidt om mij ten alle tijden te helpen bij het opzetten van het model en het bespreken van de hieruit volgende resultaten.

Ook wil ik de docenten, bij wie ik altijd terecht kon voor vragen, van de Hogeschool Rotterdam bedanken. In het bijzonder wil ik Leo van Gelder bedanken voor zijn begeleiding gedurende het onderzoek en voor het in contact brengen met Frans van den Berg van Waterschap Rivierenland.

Als laatste wil ik van deze gelegenheid gebruik maken om mijn familie, vriendin en vrienden te bedanken voor de steun en afleiding die zij boden.

Bonno Haaring, 13-6-2017 te Papendrecht.

Samenvatting (NL)

In het onderzoek is gekeken naar de haalbaarheid van een waterdoorlatend damwand scherm i.c.m. het voorkomen van meerdere faalmechanismen. Aanleiding van het onderzoek is de grote vraag vanuit de markt naar innovatie maatregelen waardoor een dijkversterking sneller, beter en goedkoper gerealiseerd kan worden. Daarnaast wil Gebr. De Koning haar kennis vergroten binnen de dijkversterkingen en hiermee de opdrachtgever een compleet pakket kunnen aanbieden waarin zij de rol vervult als meedenkende aannemer.

De doelstelling is van het onderzoek is om een oplossing te bieden voor meerdere faalmechanismen die gelijktijdig kunnen optreden en daardoor kostenbesparend is ten opzichte van andere maatregelen. Voor de rest moet de invloed van de constructie op de omgeving minimaal zijn. Hierin kan de constructie zich onderscheiden ten opzichte van traditionele maatregelen. Om dit te realiseren is er onderzoek gedaan in de vorm van literatuurstudie naar de faalmechanismen in Nederland en de maatregelen die daarbij genomen kunnen worden. Daarnaast hebben er diverse gesprekken plaats gevonden met externe experts.

Binnen het onderzoek is een locatie geanalyseerd waarvan bekend is dat hier piping kan optreden. Uit deze analyse bleek bij gebruik van de huidige rekenmethode van Sellmeijer dat er een horizontale kwelweglengte tekort was van meer dan 200 m. Aan de hand van de rekenregel van Lane werd een verlenging van het iets meer dan 24 m voldoende geacht om piping uit te sluiten. De gegevens uit deze analyse zijn vervolgens gebruikt in een numeriek softwareprogramma de effecten van een waterdoorlatend damwand te bepalen. Het softwareprogramma heet Plaxis en is gebaseerd op de Eindige Elementen Methode waardoor het mogelijk wordt om diverse grondwaterstromingsanalyses uit te voeren.

De resultaten uit het programma zijn geanalyseerd waardoor er geconcludeerd kan worden dat de constructie in zekere zin effectief is bij het voorkomen van meerdere faalmechanismen. Er zijn diverse situaties doorgeregend om een beter beeld te krijgen over het stromingsbeeld en de daarbij horende stroomsnelheden. Het waterdoorlatend maken van het damwand vindt plaatst ter hoogte van de pipinggevoelige laag, in de vorm van een filterraam bestaande uit geotextiel. Het filterraam wordt in het lijf geplaatst van de damwandplank. Hierbij wordt uitgegaan van een AZ18-700 profiel.

Door lange damwanden waterdoorlatend te maken treden er hogere stroomsnelheden op in de bovenin het watervoerende zandpakket. Dit heeft nadelige gevolgen ten aanzien van de wateroverlast. Bij toepassing van kortere damwanden is het effect een stuk gunstiger en heeft de constructie nauwelijks invloed op de omgeving. De lengte van het korte damwand is zo gemodelleerd dat deze niet voldoet aan de gestelde criteria. Door de wand waterdoorlatend te maken voldoet deze wel.

Vervolgens zijn de effecten op de reductie van de sterktecapaciteit bepaald door gebruik van eenvoudige benaderingsformules. Hieruit kan geconcludeerd worden dat het maximaal opneembaar moment per doorsnede gereduceerd wordt met ongeveer 28% op de locatie waar het filterraam is geplaatst.

Als laatste zijn de kosten van een dergelijke waterdoorlatend damwandscherm bepaald. Deze zijn vergeleken met andere traditionele en innovatieve maatregelen zoals een kwelscherm of VZG.

Inhoudsopgave

Voorwoord	ii
Samenvatting (NL)	iii
Begrippenlijst	vi
Inleiding	1
1 Onderzoek	3
<i>Onderzoeksvraag</i>	3
<i>Deelvragen</i>	3
<i>Onderzoeksmethodiek</i>	3
<i>Onderzoeksgrenzen</i>	4
2 Bezwijkmechanismen	5
<i>Macrostabiliteit</i>	5
2.1.1 Deelmechanismen	6
2.1.2 Oorzaken en factoren	7
<i>Piping</i>	7
2.2.1 Deelmechanismen	9
2.2.2 Oorzaken en factoren	10
3 Maatregelen	11
<i>Horizontale maatregel</i>	11
<i>Langsconstructie</i>	12
<i>Verticaal Zanddicht Geotextiel</i>	13
4 Rekenregels	14
<i>Rekenregels Piping</i>	14
4.1.1 Opbarsten	14
4.1.2 Sellmeijer 1989	15
4.1.3 Sellmeijer 2011	16
4.1.4 Lane	17
<i>Rekenregels Macrostabiliteit</i>	18
4.2.1 Opdrijven	18
4.2.2 Bishop	18
4.2.3 LiftVan	18
5 Locatie analyse	19
<i>Locatie</i>	19
<i>Boringen</i>	19
<i>Grondopbouw</i>	20
6 Modelleren	21

	<i>Model</i>	21
	<i>Situaties</i>	22
7	Resultaten	24
	<i>Handberekening</i>	24
6.1	<i>Modelanalyse</i>	25
6.2	7.2.1 Stijghoogteverloop	25
	7.2.2 Freatisch vlak.....	28
	7.2.3 Grondwaterstroming.....	29
7.1	7.2.4 Conclusie	30
7.2	<i>Sterktecapaciteit</i>	31
8	Ontwerp	32
7.3	<i>Risico's piping</i>	32
	8.1.1 Maaswijdte	32
	8.1.2 Waterdoorlatendheid.....	33
8.1	<i>Uitvoering</i>	33
8.29	Marktonderzoek	34
	<i>Kostenanalyse maatregelen</i>	34
9.1	9.1.1 Stabiliteits- en pipingberm	34
	9.1.2 Langsconstructie	35
	9.1.3 Verticaal Zanddicht Geotextiel	35
	9.1.4 Waterdoorlatend damwand.....	35
9.2	<i>Marktonderzoek</i>	36
10	Conclusie en aanbevelingen	37
10.1	<i>Conclusie</i>	37
10.2	<i>Aanbeveling</i>	38
11	Literatuurlijst	40
12	Bijlagen	42
	<i>Bijlage A; Analyserapport</i>	42
	<i>Bijlage B; Technische uitwerking</i>	43
	<i>Bijlage C; Kosten analyse</i>	44

Begrippenlijst

In het rapport wordt er gebruik gemaakt van enkele begrippen. De definities die in de onderstaande lijst zijn weergegeven, zijn op basis van de opgedane ervaring gedurende het onderzoek. De omschrijving van de begrippen geven weer op welke wijze de student deze heeft geïnterpreteerd en gehanteerd tijdens het onderzoek.

<i>Achterland</i>	Het gebied dat binnendijs ligt, ook wel aangeduid met de term polderzijde.
<i>Afschuiving</i>	Verschijsel dat een deel van een talud van een grondlichaam langs een meestal halfcirkelvormig glijvlak naar beneden schuift
<i>Aquifer</i>	Watervoerende pakket ook wel de zandlaag binnen dit rapport.
<i>Binnenteen</i>	Overgang van dijk naar maaiveld aan de polderzijde van de dijk.
<i>Buitenteen</i>	Overgang van dijk naar maaiveld aan de rivierzijde van de dijk.
<i>Cohesieve deklaag</i>	Afsluitende bovenste grondlaag, welke het watervoerende pakket afsluit, met een slechte waterdoorlatendheid.
<i>EEM</i>	Eindige Elementen Methode. Berekeningen met behulp van een ('multi-purpose') computerprogramma voor numerieke grondwaterstromingsanalyse. In dit rapport is dat het programma PlaxFlow.
<i>Freatische lijn</i>	Grondwaterspiegel in de betreffende grondlaag waarbij de druk in het grondwater gelijk is aan de atmosferische druk.
<i>Faalmechanismen</i>	Diverse processen waardoor een dijk kan bezwijken, zoals piping en macro-instabiliteit.
<i>Geohydrologie</i>	Stromingsbeeld en waterhuishouding onder en rondom de dijk als gevolg van het buitenwater en neerslag.
<i>Glijvlak</i>	Recht of gebogen afschuifvlak waarlangs een grondmassief afschuift.
<i>Grensstijghoogte</i>	Stijghoogte in de aquifer waarbij er net geen opdrijven optreedt als gevolg van het eigen gewicht van de deklaag.
<i>Heave</i>	In dit rapport: de situatie waarbij verticale korrelspanningen in een zandlaag wegvallen onder invloed van een verticale grondwaterstroming, ook fluïdisatie of vorming van drijfzand genoemd.
<i>Intredepunt</i>	Locatie waar het buitenwater in contact staat met het watervoerende pakket als gevolg van het verval over de waterkering.
<i>Kritiek verval</i>	Kritieke waarde van het verval waarbij nog net geen piping optreedt bij de aanwezige kwelweglengte.
<i>Kwelwater</i>	Water dat onder de dijk door stroomt als gevolg van het verval over de dijk en binnendijs tot het maaiveld treedt. De term wordt ook wel aangeduid als kwel.

<i>Kwelweg</i>	Mogelijk pad onder de dijk door, van intredepunt tot uittredepunt, afgelegd door het kwelwater.
<i>Kwelweglengte</i>	De lengte van de afgelegde kwelweg.
<i>Kwelscherm</i>	Een waterdicht damwandscherm dat voor een verticale verlenging zorgt van de kwelweglengte.
<i>Kwelsloot</i>	Sloot aan de binnenzijde van de dijk die tot doel heeft kwelwater op te vangen en af te voeren.
<i>Kritieke waterstand</i>	Waterstand waarbij nog net geen piping optreedt.
<i>Macrostabieliteit</i>	Faalmechanismen waarbij het grondmassief van een dijk kan afschuiven via een (on)diep glijvlak.
<i>Onderloopsheid</i>	Kwelstroming loopt onder de damwand door.
<i>Opbarsten</i>	Opbarsten van de deklaag bij een te hoge waterspanning in het daaronder liggende zandpakket.
<i>Opdrijven</i>	Situatie waarin er geen opbarsten optreedt maar door een te hoge waterspanning wel opdrijft.
<i>Piping</i>	Ontstaan van een kanaal onder de dijk door als gevolg van een geconcentreerde kwelstroom, tussen intrede- en uittredepunt, waarbij sprake is van terugschrijdende erosie.
<i>Stijghoogte</i>	Hoogte van de grondwaterstand op een specifiek punt ten opzichte van het referentievlak.
<i>Uittrededepunt</i>	Locatie waar kwelwater, vanuit het watervoerende pakket, tot de oppervlakte kan stromen.
<i>Verval</i>	Waterstandsverschil tussen twee locaties in het dijkprofiel. Bijvoorbeeld tussen de binnen- en buitenwaterstand.
<i>Wel</i>	De geconcentreerde stroming van kwelwater bij het uittredepunt.
<i>Zandmeevoerende wel</i>	Geconcentreerde stroming van kwelwater waarbij het zand uit het watervoerende pakket uitspoelt tot aan het maaiveld.

Inleiding

“Met de huidige aanpak van de dijkversterking gaan we het niet redden. Deze alarmerende boodschap van Rijkswaterstaat moet de waterbouwwereld aanzetten om innovatieve concepten van dijkversterking te ontwikkelen, waarbij ook nog eens zaken spelen als draagvlak bij omwonenden, ruimtelijke kwaliteit en natuurlijke processen. Staat de traditionele dijkversterking op een keerpunt?”

Zo luidt het artikel over dijkversterkingen in vakblad *De Ingenieur* op 4 mei 2016. Uit het artikel blijkt dat er verandering moet komen in de huidige methodes waarmee men op dit moment de dijken versterken. Door verandering van klimaat en beoordelingsmethodes is de opgave om de dijken te versterken groot. De condities waaronder dit moet gebeuren zijn veeleisend. Aan de ene kant gaat het om bewonersparticipatie, ruimtelijke kwaliteit en natuurlijke processen, en aan de andere kant is de tijd van het ruime geld voorbij. Jaarlijks stelt het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) €360 miljoen beschikbaar om de versterkingen te realiseren. Om de deadline van 2050 te halen zal er doelmatiger en in een hoger tempo gewerkt moeten worden. Innovatieve ideeën waardoor er geld en tijd wordt bespaard zijn hierdoor zeer gewild.

Aanleiding

Naast de vraag vanuit de markt komt de aanleiding van het onderzoek ook uit het bedrijf zelf. GDK is bezig om haar disciplines te verbreden. Door het onderzoeken en in praktijk brengen van innovatieve oplossingen willen zij zich meer kunnen profileren als een ambitieus, innovatief en meedenkend partner binnen de dijkversterkingen. Naast het feit dat GDK innovatieve ideeën omarmt is er ook een vraag naar nieuwe ideeën en oplossingen. Dit blijkt tevens uit het eerdergenoemde artikel waarvan de inleiding is geciteerd (Biesboer, 2016).

In de markt is er vraag naar innovatieve ideeën welke huidige technieken van een dijkversterking beter, sneller en/ of goedkoper kunnen maken. Dit blijkt uit de diverse aanvragen en de Project Overstijgende Verkenningen (POV) binnen het HWBP. De verkenningen zijn opgezet om met een team van experts welke werkzaam zijn bij waterschappen, kennisinstituten, ingenieursbureaus en aannemers op zoek te gaan naar verbeteringen van huidige technieken en innovatieve ideeën. Vooraf aan het onderzoek is een kennisdag (06-02-2017) bijgewoond waarbij de experts van POV Macrostabiliteit met elkaar de discussie aangingen over diverse onderwerpen. Op de kennisdag lag de nadruk voornamelijk op de toepassing van damwanden, quick wins en innovaties waarbij meerdere bezwijkmechanismen voorkomen konden worden. Men verwacht dat door met één constructie meerdere mechanismen aan te pakken mogelijk kosten kunnen worden bespaard. Op dit moment worden er nog te veel maatregelen toegepast welke maar één bezwijkmechanisme voorkomt.

Als antwoord op de vraag naar innovatieve oplossingen is vanuit GDK het idee ontstaan om met traditioneel damwand een constructie te ontwerpen waarbij de faalmechanismen macrostabiliteit en piping gecombineerd voorkomen kunnen worden. Het traditionele stalen damwand, waar GDK zeer bekend mee is, is al een vaak toegepaste oplossing voor deze twee faalmechanismen. Echter boden ze in de onderzochte toepassing ervan nog nooit een oplossing voor een situatie waarin beide mechanismen tegelijkertijd optreden.

Doelstelling

Het doel van dit afstudeeronderzoek is om tot een ontwerp te komen van een waterdoorlatende damwandconstructie welke;

- Een oplossing biedt voor meerdere faalmechanismen die gelijktijdig kunnen optreden en daardoor kostenbesparend is ten opzichte van andere constructies;
- De geohydrologie in de omgeving zo min mogelijk hindert waardoor de negatieve effecten van de constructie beperkt blijven;
- Bij beperkte ruimte geplaatst kan worden zodat de omgevingshinder minimaal is.

Het beheersen van de competenties, welke worden gesteld vanuit Hogeschool Rotterdam, op eindniveau is naast het leveren van een ontwerp ook een doelstelling.

Structuur

Vanuit het bedrijf werd opdracht gegeven om onderzoek te doen naar waterdoorlatend damwand als maatregel tegen in ieder geval piping. Om het onderzoek vorm te geven en om tot de eerder genoemde doelstellingen te komen is er alvorens besloten op welke wijze er onderzoek gedaan wordt. Dit is beschreven in hoofdstuk 1 van dit rapport waarin ook de hoofdvraag en deelvragen beschreven staan. Binnen het onderzoek en daarmee ook in dit rapport is er verder gegaan met het identificeren van de bezwijkmechanismen en de daarvoor mogelijke maatregelen, zowel traditioneel als innovatief. Hoofdstuk 2 is daarom gewijd aan de bezwijkmechanismen macrostabiliteit en piping. In dit hoofdstuk zijn de werking, fasering en oorzaken van de bezwijkmechanismen beschreven. Vervolgens zijn de maatregelen welke toepasbaar zijn bij het voorkomen van beide bezwijkmechanismen in hoofdstuk 3 beschreven. Hierin wordt, naast de impact op de omgeving, ook duidelijk gemaakt op welke wijze zij kunnen bijdragen aan het voorkomen van het falen van de dijk. Voor het dimensioneren van de maatregelen wordt er gebruikt van diverse rekenregels welke mogelijk een eerste inzicht geven van de afmetingen ervan. In hoofdstuk 4 zijn de rekenregels beschreven welke betrekking hebben op piping zoals het opbarstcriterium, de formule van Sellmeijer (1989 en 2011) en de formule van Lane. In hoofdstuk 5 is een locatie in het Rivierengebied besproken. Hierin is er onder andere onderzoek gedaan naar de beschikbare grondgegevens, het dijkprofiel en de waterstanden. Deze gegevens zijn vervolgens verwerkt in hoofdstuk 6 waarin de manier van modelleren, de schematisaties en de parameters wordt toegelicht. Vervolgens worden in hoofdstuk 7 de resultaten gegeven van de handberekeningen, volgens de rekenregels uit hoofdstuk 4, en een overzicht van de resultaten uit het Plaxis model. Na bespreking van de resultaten zullen de mogelijkheden binnen het ontwerp worden besproken in hoofdstuk 8. Aan de hand van de resultaten en het ontwerp kan een kostenvergelijking worden opgesteld in hoofdstuk 9 en de mogelijkheden binnen de huidige markt besproken worden. Het rapport eindigt met hoofdstuk 10 waarin antwoord wordt gegeven op de hoofdvraag en deelvragen. Tevens zullen in het laatste hoofdstuk diverse aanbevelingen worden gedaan betreft vervolgonderzoek en vervolgstappen.

1 Onderzoek

Als antwoord op de vraag naar innovatieve oplossingen is vanuit GDK het idee ontstaan om met traditioneel damwand een constructie te ontwerpen waarbij in eerste instantie het bezwijkmechanisme piping kan worden voorkomen. Uit het onderzoek zal blijken of door toepassing van deze constructie meerdere mechanismen voorkomen kunnen worden. Het traditionele stalen damwand, waar GDK zeer bekend mee is, is een vaak toegepaste oplossing voor piping en macro-instabiliteit. Tot op heden blijkt traditioneel damwand een (te) dure oplossing te zijn in een situatie waarin beide mechanismen tegelijkertijd optreden. Om deze reden wordt er uitgeweken naar andere oplossingen.

Onderzoeksvraag

Aan de hand van de eerder benoemde aanleidingen, het verzoek van het stagebedrijf en de probleemomschrijving is er een onderzoeksvraag opgesteld welke als volgt wordt beschreven:

- 1.1 *'In hoeverre is de techniek van een waterdoorlatend damwand i.c.m. het voorkomen van meerdere mechanismen relevant binnen de dijkversterkingen?'*

Deelvragen

- 1.2 Om het probleem te begrijpen en antwoord te geven op de onderzoeksvraag zullen de volgende onderdelen goed onderzocht moeten worden:
- Voor welke faalmechanismen kan een waterdoorlatend damwand een oplossing bieden en hoe werken deze mechanismen?
 - Welke andere maatregelen kunnen er worden toegepast om deze mechanismen tegen te gaan: zowel bestaand als innovatief?
 - Waar moet een maatregel aan voldoen om deze mechanismen te voorkomen?
 - Effecten en gevolgen op de constructie en de geohydrologie.
 - Welke kosten zijn er gebonden aan het realiseren van een dergelijke constructie?
 - Hoe groot is de vraag vanuit de markt en biedt deze perspectief om voor toepassing van het waterdoorlatend damwand in de toekomst te zorgen?

Gedurende het onderzoek is er informatie opgedaan waardoor er nog enkele deelvragen zijn geformuleerd. De beantwoording van alle deelvragen dienen ter onderbouwing van het antwoord op de onderzoeksvraag. De toegevoegde deelvragen zijn als volgt:

- 1.3
- Op welke wijze kan damwand waterdoorlatend gemaakt worden?
 - Met welke risico's dient er rekening gehouden te worden bij waterdoorlatend damwand?
 - Uitvoerbaarheid van een dergelijke constructie.

Onderzoeksmethodiek

Om tot een beantwoording te komen van de deelvragen en uiteindelijk de onderzoeksvraag wordt er gebruik gemaakt van diverse onderzoeksmethodieken. Allereerst wordt er gekeken naar de bezwijkmechanismen in Nederland en op welke wijze deze voorkomen kunnen worden. De informatie wordt vergaard door middel van literatuurstudies, analyses en interviews. Vanaf hier wordt het onderzoek steeds kleinschaliger en is er toegewerkt naar een casus waarbij in ieder geval piping een probleem is. De casus wordt technisch uitgewerkt waardoor de grootte van het probleem bekend zal zijn. In de technische uitwerking zal het waterdoorlatend damwand worden geschematiseerd waarna de effecten worden geanalyseerd.

Uiteindelijk vindt er een analyse plaats waarin waterdoorlatend damwand op basis van mogelijke kosten, de uitvoerbaarheid, de betrouwbaarheid en de invloeden op de omgeving wordt afgewogen tegen meer traditionele maatregelen zoals een piping- en stabiliteitsberm.

Onderzoeksgrenzen

Het onderzoek richt zich op een damwandconstructie welke waterdoorlatend is. Om deze reden wordt er enkel gekeken naar bezwijkmechanismen waarbij hoofdzakelijk damwand als maatregel kan dienen om te voorkomen dat het dijklichaam bezwijkt.

- 1.4 Daarnaast richt het onderzoek zich op het Rivierengebied in Nederland waar de bezwijkmechanismen voornamelijk voorkomen om vervolgens tot een casus te komen. Om te bepalen wat het effect is van waterdoorlatend damwand wordt de werkelijke situatie sterk geschematiseerd. Op deze wijze worden invloeden van diverse grondlagen uitgesloten en ontstaat er een eenvoudig door te rekenen model. De effecten die in dit rapport worden geanalyseerd hebben betrekking op de waterhuishouding rondom bestaande dijken, de waterdoorlatendheid en sterktecapaciteit van de constructie. Het onderzoek zelf zal zich beperken tot rivierdijken waarbij in ieder geval piping van toepassing is.

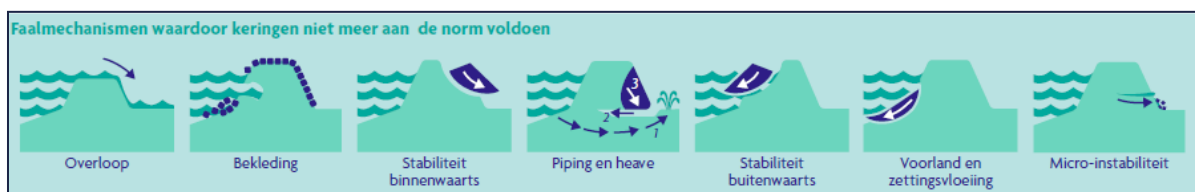
Binnen het onderzoek wordt, doordat het bedrijf hiermee bekend is en de student via de Hogeschool hier toegang tot heeft, gebruik gemaakt van het softwareprogramma Plaxis. Het programma beschikt over een module waarmee grondstromingsanalyses gemaakt kunnen worden genaamd PlaxFlow. Door gebruik van het programma wordt er meer inzicht verkregen in de grondwaterstromingen rondom de damwandconstructie en het uittredepunt. Invloeden van het intredepunt en het effect hiervan worden binnen het onderzoek buiten beschouwing gelaten.

In het model is gerekend met een stationaire stroming. Daarnaast wordt er ook vanuit gegaan dat de stromingen laminair zijn. Dit is een uitgangspunt bij gebruik van de formules van Sellmeijer net zoals een homogeen zandpakket. Hier wordt binnen het onderzoek dan ook van uit gegaan.

Als laatste wordt de Nederlandse markt, de vraag en de kosten van een dergelijke oplossing onderzocht. Kortom, het onderzoek richt zich op de Nederlandse markt en de faalmechanismen die enkel in Nederland voorkomen waarbij een dergelijke constructie van toepassing kan zijn.

2 Bezwijkmechanismen

Om Nederland te beschermen tegen het hoge water worden er in heel het land waterkeringen toegepast. Het stelsel van waterkeringen in Nederland bestaat uit duinen, dijken en (waterkerende) kunstwerken (Hart, Bruijn, & Vries, 2016). De waterkerende functie van de betreffende waterkering kan op verschillende manieren verloren gaan. Binnen het afstudeeronderzoek worden enkel de bezwijkmechanismen beschouwd welke betrekking hebben op waterkerende grondconstructies (rivierdijken). De mechanismen zijn: piping, micro-instabiliteit, macro-instabiliteit, zettingsvloeiingen, overloop en overslag en erosie buitentalud na bezwijken van de bekleding (Hart, Bruijn, & Vries, 2016). Zie figuur 2.1 voor een schematische weergave van de bezwijkmechanismen.



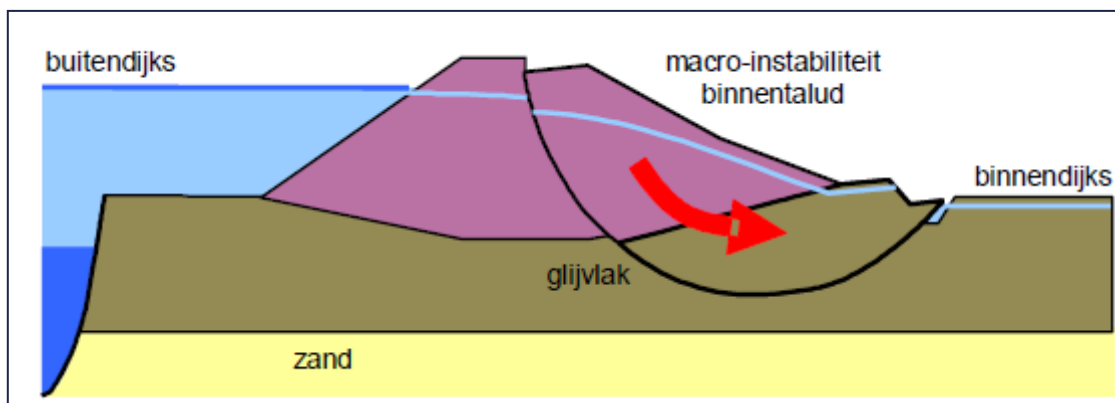
Figuur 2.1 Bezwijkmechanismen waterkerende grondconstructies. Bron: (Ons Water, 2016)

Uit het analyserapport, welke is bijgevoegd in bijlage A, blijkt dat damwand een veelvuldig toegepaste maatregel is om een dijk te versterken die kan bezwijken op piping en macro-instabiliteit. Deze twee mechanismen kunnen vaak tezamen optreden doordat beide mechanismen worden veroorzaakt door een (te) hoge waterspanning in/ of onder de dijk (Calle, 2002) (Hart, Bruijn, & Vries, 2016). Om deze reden beperkt het onderzoek zich tot de bezwijkmechanismen piping en macro-instabiliteit.

2.1 Macrostabiliteit

Tijdens het ontwerpen en toetsen van nieuwe en bestaande dijken dient er rekening te worden gehouden met het bezwijkmechanisme: macrostabiliteit, ook wel aangeduid als macro-instabiliteit. Het mechanisme treedt op in binnenwaartse en buitenwaartse instabiliteit. Tijdens het onderzoek wordt er enkel gekeken naar binnenwaartse instabiliteit.

Macro-instabiliteit treedt op wanneer een grondmassa uit evenwicht is en afschuift langs een recht of gebogen diepe afschuifvlakken. Het evenwicht wordt gecreëerd door een aandrijvend moment (gewicht grondmassief maal arm links van het middelpunt), een tegenwerkend moment (gewicht grondmassief maal arm rechts van het middelpunt) en de schuifspanningen langs het schuifvlak (zie figuur 2.2). Verstoring van het evenwicht komt voornamelijk doordat er een verandering optreedt in de schuifspanning. Deze verandering wordt veroorzaakt door een toename van de waterspanning waardoor de capaciteit om schuifspanningen op te nemen kleiner wordt. Dit kan worden afgeleid uit de wet van Terzaghi ($\sigma = \sigma' + u$), waarbij de grondspanning (σ) een opsomming is uit de effectieve spanning (σ') en de waterspanning (u). Een hoge buitenwaterstand, hevige regenval of deformatie kunnen leiden tot een toename van de waterspanning in het dijklichaam.



Figuur 2.2. Schematisatie van het bezwijkmechanisme "macro-instabiliteit". Bron: (Hart, Bruijn, & Vries, 2016)

2.1.1 Deelmechanismen

Het bezwijken van het dijklichaam als gevolg van macro-instabiliteit gebeurt in fasen. Deze fasen zijn hieronder weergegeven en toegelicht.

Opdrijven of opbarsten

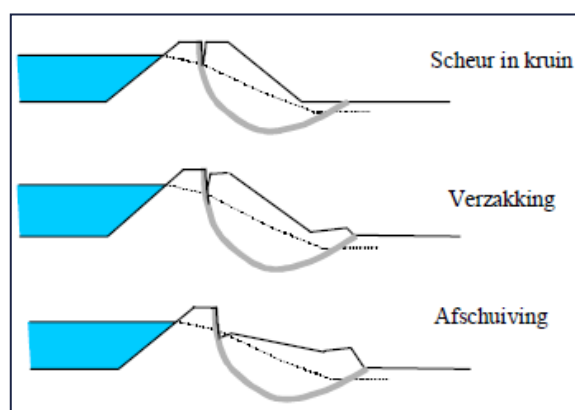
In de eerste fase treedt er een waterstandsverhoging op waardoor waterspanning in de dijk zelf toeneemt met als gevolg een afname van de capaciteit om schuifspanningen (weerstand van de ondergrond) op te nemen. Door infiltratie van water in de dijk kunnen onverzadigde delen verzadigd raken waardoor het gewicht en dus de aandrijvende belasting ook toeneemt. Toename van de waterspanning in het watervoerende pakket leiden tot een afname van de effectieve spanningen en schuifsterkte in de dijk. Binnendijks kunnen er zones ontstaan waar de schuifsterkte wordt overschreden. Deze zones worden plastische zones genoemd en zorgen opdrijven of opbarsten op de locaties waar de waterspanning groter is dan de gronddruk.

Scheurvorming

Door het opdrijven of opbarsten kunnen er scheuren ontstaan in de toplaag. Vervormingen in de ondergrond als gevolg van de afname van de schuifsterkte kunnen zichtbaar zijn in de toplaag. De locaties van de scheuren geven het vlak aan daar waar de dijk mogelijk kan bezwijken. Afhankelijk van de grondsoort van de deklaag kan een dijk bezwijken bij enkele of meerdere scheuren.

Afschuiving

Bij een bepaalde afmeting van de scheuren zal de dijk afschuiven langs het ontstane glijvlak. Hierbij daalt de kruinhoogte binnendijks totdat er een nieuw evenwicht is bereikt. In figuur 2.3 is het proces tot afschuiving vanaf het moment dat er scheurvorming optreedt schematisch weergegeven. Afhankelijk van het moment dat er zich een nieuw evenwicht vormt behoudt de dijk een reststerkte. Deze reststerkte biedt weerstand tegen het water. Bij onvoldoende weerstand kunnen diverse vervolgmecanismen optreden welke de dijk doen bezwijken. Zie hiervoor bijlage A Analyserapport.



Figuur 2.3 De drie fasen van een macro-instabiliteit. Bron: (Hart, Bruijn, & Vries, 2016)

2.1.2 Oorzaken en factoren

De mate waarin macro-instabiliteit kan optreden bij een dijklichaam hangt van een aantal factoren af. De belangrijkste hiervan zijn de dijkgeometrie, de waterspanningen in de dijk en de opbouw van de ondergrond. Deze factoren zijn hieronder uitgewerkt

Dijkgeometrie

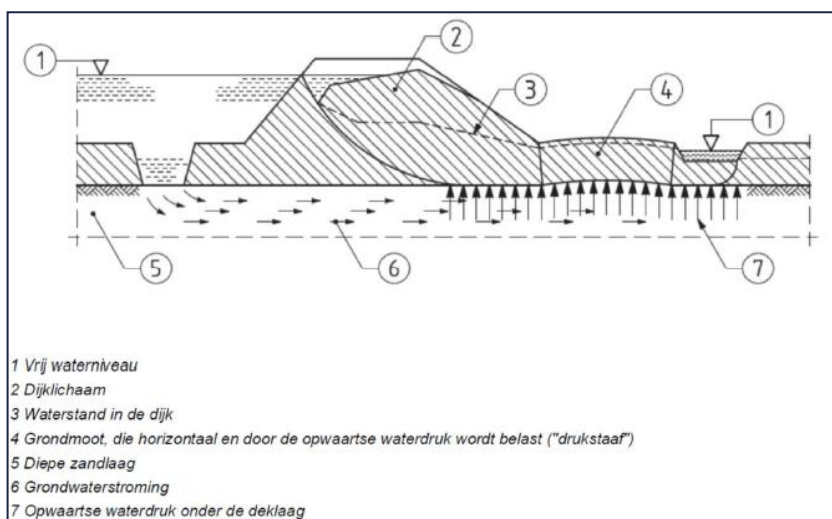
De geometrie van de dijk kan ervoor zorgen dat macro-instabiliteit in mindere mate optreedt. Zo kan een flauw binnentalud of een binnenberm de kans op instabiliteit verkleinen doordat het tegenwerkend moment groter is.

Waterspanning in de dijk

De waterspanningen in de dijk worden voornamelijk bepaald de grootte en de duur van de hoogwaterstand buitendijks. Wanneer de hoogwaterstand van korte duur is, is het mogelijk dat er onvoldoende water in en onder de dijk is gefiltreerd waardoor de schuifsterkte nog niet wordt overschreden. Tevens spelen hierbij de intredeweerstand t.p.v. de rivierbodem, doorlatendheid van grondlagen, het (grond)waterpeil binnendijks, de stijghoogte in de zandlagen en materiaaleigenschappen van de dijk zelf een rol (GeoDelft, 1994).

Opbouw ondergrond

De opbouw van de ondergrond bepaald de grootte van het afschuifvlak en het intredepunt van het afschuifvlak. Daarnaast zorgt de aanwezigheid en de dikte van het slappe lagen pakket niet alleen voor de waterspanningsopbouw maar ook of opdrijven van het maaiveld binnendijks mogelijk is. Opdrijven van het achterland is het gevolg van de toenemende



Figuur 2.4 Schuifvlak bij opdrijven achterland. Bron: (Hart, Bruijn, & Vries, 2016).

waterspanning in het watervoerende pakket. De doorlatendheid van de bovenliggende slappe laag is relatief laag waardoor het water niet weg kan. Hierdoor neemt de schuifweerstand tussen de slappe laag en de watervoerende zandlaag af waardoor er een opbolling optreedt. De opbolling is in figuur 2.4 weergegeven met nummer 4. De afname van de schuifweerstand zorgt ervoor dat de krachten geleverd door het aandrijvende moment niet overgedragen kunnen worden aan de onderliggende zandlaag. Als gevolg hiervan kunnen er zettingen optreden in het dijklichaam.

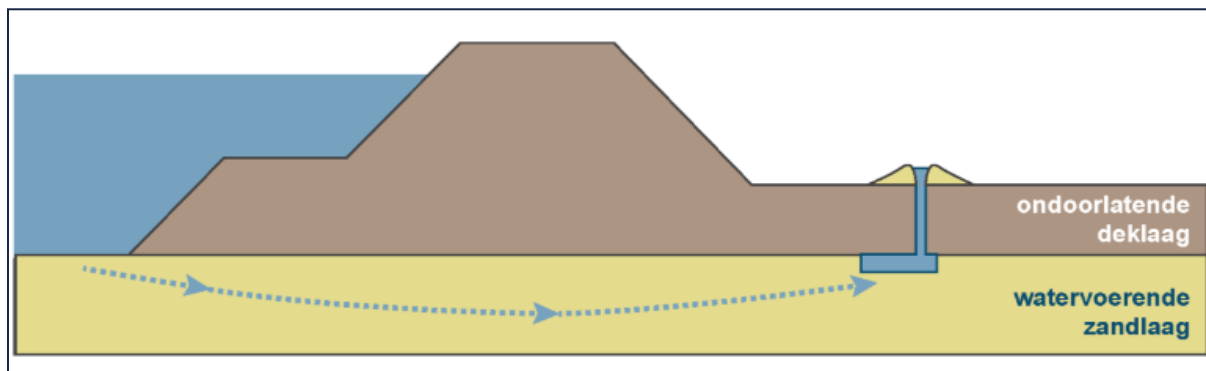
Piping

Naast macro-instabiliteit kan een dijk falen als gevolg van piping. Dit mechanisme wordt veroorzaakt door het waterstandsverschil binnen- en buitendijks waardoor er een stroming van grondwater onder de dijk door plaats vindt. Deze stroming wordt ook wel aangeduid als kwelstroming. Kwel onder een dijk door kan leiden tot erosie van gronddeeltjes waardoor er een verandering optreedt van de mechanische en hydrologische eigenschappen van grond. Dit proces resulteert na verloop van tijd in een instabiliteit van het grondlichaam met alle gevolgen van dien.

In Nederland wordt met de term *piping* voornamelijk terugschrijdende erosie bedoeld, welke een vorm is van interne erosie. Internationaal wordt er onderscheidt gemaakt in: erosie door scheuren in

cohesief materiaal, terugschrijdende erosie, contact-erosie en suffosie (Hart, Bruijn, & Vries, 2016). De overige drie verschijningen komen in Nederland vrijwel niet voor of worden aangeduid door andere faalmechanismen.

Piping komt voor bij dijken waarbij de ondergrond bestaat uit een zandlaag en de deklaag uit een dunne cohesieve grondlaag zoals klei. Deze samenstelling komt voornamelijk voor in het Rivierengebied. In figuur 2.5 is een voorbeeld gegeven van een schematische dijkopbouw welke pipinggevoelig is.



Figuur 2.5. Schematische weergave piping. Bron: (Laar & Nieuwenhuijzen, 2016)

De geconcentreerde kwelstroming in de waterdoorlatende laag onder de dijk zorgt ervoor dat gronddeeltjes aan de binnenzijde van de dijk worden meegevoerd en uitgespoeld. Door de uitspoeling van materiaal vormt er zich een open ruimte welke zich in de tegengestelde richting t.o.v. de stromingsrichting van het water voortplant. Op deze wijze ontstaat er een open kanaal ook wel 'pipe' genoemd (zie figuur 2.7). De open kanalen zijn slechts enkele korreldiameters hoog en ontstaan in de top van het zandpakket. Voor het ontstaan van een open kanaal zijn er enkele voorwaarden waaraan de dijk moet voldoen. Bij het ontbreken van een van de volgende voorwaarden kan piping worden uitgesloten (Bruijn, 2013):

- De dijk is opgebouwd uit een deklaag bestaande uit een pakket van klei en/of veenlagen welke cohesief en relatief ondoorlatend is. Onder de deklaag bevindt zich een waterdoorlatende zandlaag waardoor er een horizontale grondwaterstroming kan optreden;
- De waterdoorlatende zandlaag, ook wel watervoerend pakket genoemd, moet in contact staan met het buitenwater zodat water in de zandlaag kan filtreren (intredepunt);
- In de deklaag moet een opening aanwezig zijn waardoor water en zand kunnen worden afgevoerd (uittredepunt);
- Hoge waterstand van het buitenwater waardoor het verval (buitenwaterstand minus binnenwaterstand) hoog is. Om het pipingproces volledig te laten ontwikkelen dient de hoge buitenwaterstand langdurig aanwezig te zijn.

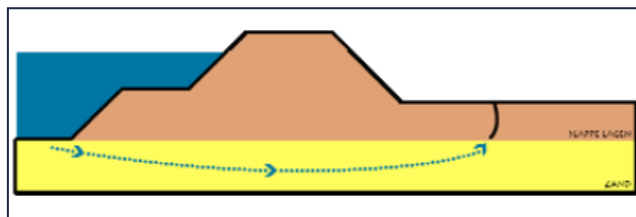
Al deze voorwaarden kunnen ertoe leiden dat een dijk faalt. Het gehele faaltraject bestaat volgens het rapport Fenomenologische beschrijving (Hart, Bruijn, & Vries, 2016) uit een reeks van deelmechanismen: opbarsten, welvorming en pipe-vorming, vergroten van de pipe en inzakken van de dijk. In het onderzoeksrapport "Zandmeevoerende Wellen" (Deltares, 2012) worden deze deelmechanismen beschreven als fasen binnen het pipingproces met een enigszins andere benaming.

2.2.1 Deelmechanismen

Zoals eerder is vermeld bestaat het bezwijkmechanisme piping uit meerdere deelmechanismen. Deze deelmechanismen zijn hieronder beschreven.

Opbarsten

Wanneer de watervoerende laag in verbinding staat met het buitenwater wordt er aan een randvoorwaarde van piping voldaan. Bij een stijging van het buitenwater zal de waterspanning onder de dijk toenemen. Op het moment dat de waterspanningen aan de binnenzijde van de dijk hoger liggen dan het gewicht van de afdekkende laag zal de deklaag gaan opdrijven.



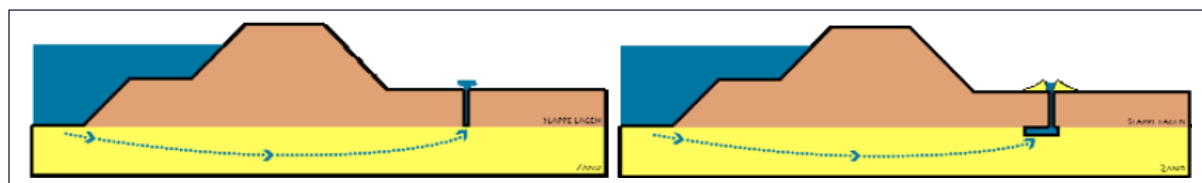
Figuur 2.6. Stijging buitenwaterpeil zorgt voor toename waterdruk onder de dijk, waardoor de deklaag barst. Bron: (Deltares, 2012).

Dit fenomeen is in de praktijk soms waar te nemen en wordt veroorzaakt door de toenemende waterspanning, het gewicht van de deklaag en de verticale (slechte) waterdoorlatendheid van de deklaag. De situatie is vergelijkbaar met het deelmechanisme opbarsten bij macro-instabiliteit beschreven in hoofdstuk 2.1.1 Deelmechanismen.

Door het opdrijven zullen er scheurtjes in de deklaag ontstaan waardoor de deklaag opbarst en het water naar het oppervlak kan stromen. Op dit moment is er een uittredepunt gevormd en wordt er aan een tweede voorwaarde voldaan (figuur 2.7).

Welvorming en pipe-vorming

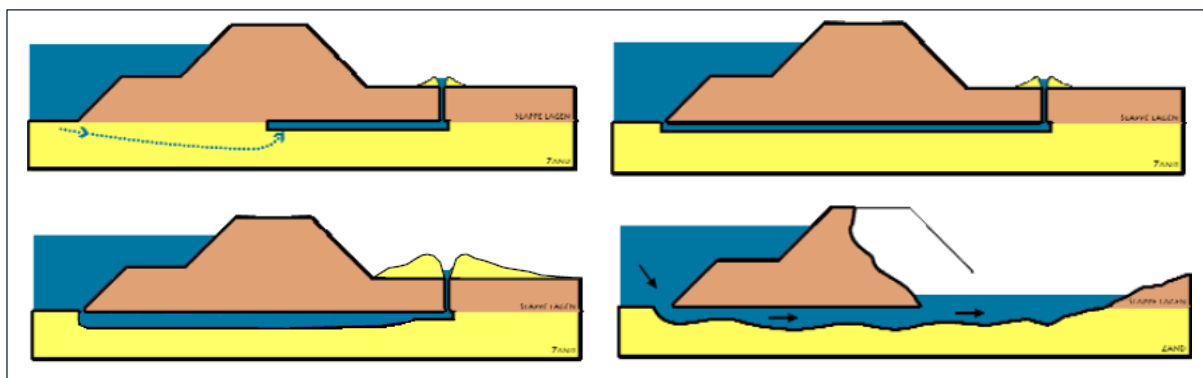
Door de open verbinding zal de stroomsnelheid van de kwelstroming toenemen, met name bij het uittredepunt. Als gevolg van de toename van de kwelstroming treedt er erosie rondom het uittredepunt op en ontstaat er het opbarstkanaal. Het kanaal is zichtbaar aan het oppervlakte in de vorm van een wel. De toename van de stroomsnelheid zorgt er mogelijk ook voor dat zanddeeltjes uit de watervoerende zandlaag, met de kwelstroming mee, naar het maaiveld worden getransporteerd. Wanneer het verval over de dijk voldoende hoog is, zodanig dat de effectieve spanningen in de grond vervallen en er zandtransport kan plaatsvinden, vult het opbarstkanaal zich met een zand-water mengsel welke kan leiden tot een zandmeevoerende wel. Wanneer dit gebeurt treedt er zanduitspoeling van de zandlaag onder de dijk op. Het begin van de “pipe” is hiermee gerealiseerd. Belangrijk hierbij is dat de “pipe” in de bovenstroomse richting groeit, dus tegengesteld aan de richting van de kwelstroming, en kan blijven bestaan doordat de bovenliggende laag cohesief is (figuur 2.7).



Figuur 2.7. Ontstaan van een wel en het opbarstkanaal. Door terugschrijdende erosie ontstaat er een beginnende pipe onder de cohesieve laag. Bron: (Deltares, 2012)

Verruiming van de pipe en bezwijken dijklichaam

Wanneer het verval groot genoeg is blijft de pipe verder groeien totdat deze het buitenwater heeft bereikt, waardoor er een open verbinding ontstaat tussen het buitenwater en de wel. Hierdoor verruimt de pipe zich in de richting van het uittredepunt met het bezwijken van de dijk als gevolg (figuur 2.8).



Figuur 2.8. Groei en verruiming van de pipe waardoor de dijk bezwijkt. Bron: (Deltares, 2012)

2.2.2 Oorzaken en factoren

Naast de eerder genoemde randvoorwaarden zijn er ook factoren welke de mate waarin piping optreedt kunnen beïnvloeden. Deze factoren zijn in dit subhoofdstuk kort genoemd en toegelicht. Voor een uitgebreide toelichting wordt er verwezen naar bijlage A Analyserapport.

De aandrijvende kracht binnen het pipingproces is de kwelstroming welke onder de dijk door naar het oppervlakte binnendijks stroomt. De mate waarin de kwelstroming voorkomt en daarmee dus het debiet onder de dijk door bepaald is afhankelijk van de dikte en doorlatendheid van de watervoerende zandlagen, het verhang over de dijk heen en de verticale doorlatendheid van de deklaag. Daarnaast speelt ook de tijdsduur waarin het hoge verval druk kan uitoefenen op de grondwaterstroming een rol.

De tegenwerkende kracht is de weerstand van de dijk geleverd door de deklaag en de watervoerende laag. De mate waarin de deklaag weerstand biedt hangt af van het eigen gewicht. Hoe groter het gewicht hoe groter de weerstand is tegen het opdrijven/ opbarsten. De mate waarin de watervoerende laag weerstand biedt tegen de terugschrijdende erosie is afhankelijk de doorlatendheid (kD-waarde), de korreldiameter d_{70} (Sellmeijer) en de kwelweglengte.

3 Maatregelen

In dit hoofdstuk worden enkele maatregelen benoemd welke piping en macro-instabiliteit kunnen voorkomen. Hiervoor zijn er diverse technische- als onderzoeksrapporten geanalyseerd zoals het onderzoeksrapport “Zandmeevoerende Wellen” (Deltares, 2012), het technisch rapport “Fenomenologische beschrijving faalmechanismen (Hart, Bruijn, & Vries, 2016) en het rapport “Dijkdoorbraakprocessen” (Calle, 2002). Uit deze analyse, bijlage A, blijkt dat de maatregelen de volgende vormen aannemen:

- Toepassen van een stabiliteits- en pipingberm, horizontale richting;
- Langsconstructie, verticale richting;
- Verticaal Zanddicht Geotextiel (VZG).

Het VZG is een innovatieve maatregel welke zanduitspoeling tegen gaat. Aan de constructie zelf kan weinig tot geen sterkte worden ontleent. Hierdoor wordt de maatregel alleen toegepast in dijktrajecten waarbij piping het voornaamste bezwijkmechanisme is. Voor het onderzoek is de toepassing van VZG erg nuttig aangezien de werking ervan overeenkomsten vertoont met de constructie welke in dit onderzoek wordt onderzocht.

In dit hoofdstuk zal de werking van de maatregel besproken worden en de impact op de omgeving gedurende de uitvoering en na realisatie. Uitgebreide beschrijvingen van de bovenstaande maatregelen en overige maatregelen zijn opgenomen in bijlage A Analyserapport.

Horizontale maatregel

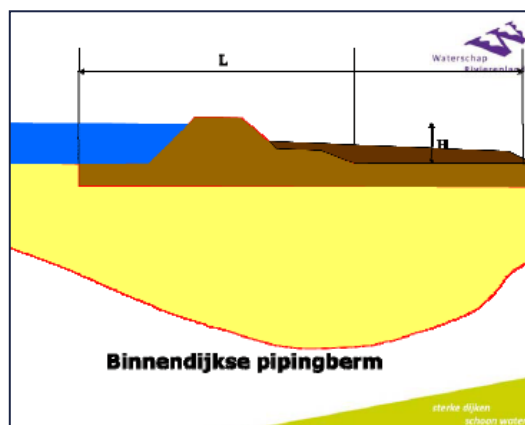
3.1

De eerste maatregel is veelvuldig toegepast en heeft zijn werking meerdere malen bewezen. Door het aanbrengen van een zogenoemde ‘stabiliteits- en pipingberm’ neemt het gewicht van het dijklichaam toe. Hiermee wordt het tegenwerkende moment, geleverd door het grondmassief rechts van het middelpunt, en de kwelweglengte in horizontale richting vergroot.

Werking

De berm zorgt door het eigen gewicht voor een vergroting van het tegenwerkende moment. Hierdoor neemt de schuifsterkte toe en daarnaast wordt ook de kans op opdrijven verkleind. Het gewicht veroorzaakt door de berm is groter dan de waterdruk geleverd door de waterspanning in het watervoerende pakket.

Daarnaast zorgt een berm voor een verlenging van de kwelweglengte. De breedte van de berm wordt bepaald aan de hand van de kritieke kwelweglengte volgens Sellmeijer (Sellmeijer, 1989). Tevens zorgt de toename van de gronddruk voor een verlegging of verdwijning van het opbarstpunt (Deltares, 2012) waardoor de kans op piping aanzienlijk afneemt.



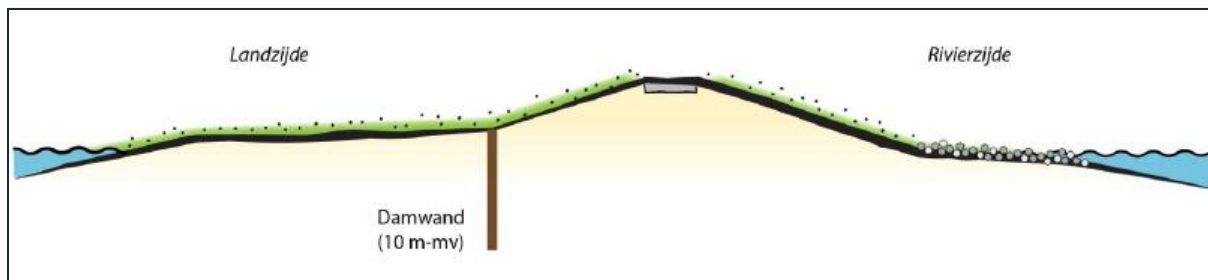
Figuur 3.1 Binnendijkse pipingberm. Bron: (Berg, 2013)

Impact

De impact voor de omgeving bij deze toepassing erg is ingrijpend. Er is veel ruimte nodig welke niet altijd aanwezig is en obstakels binnen het invloedsgebied dienen verwijderd te worden. Hierdoor kunnen de kosten hoog oplopen zeker wanneer bewoners en stukken land uitgekocht moeten worden. Daarnaast neemt de uitvoering veel tijd in beslag en zal er een constante aan- en afvoer van grond plaatsvinden. Dit levert veel hinder op voor de bewoners en de omgeving.

Langsconstructie

Een andere maatregel om de stabiliteit te verhogen en piping te voorkomen is het toepassen van een langsconstructie. De maatregel kan gerealiseerd worden door toepassing van verschillende materialen. De bekendste en meest toegepaste is een constructie bestaande uit een damwandprofiel. Door toepassing van damwand ontstaat er een scherm welk niet waterdoorlatend is en zorgt voor een verlening van de kwelweglente in de verticale richting. Naast damwand kan er ook een scherm gerealiseerd worden bestaande uit beton (Mixed-In-Place) of kunststof (ProLock).



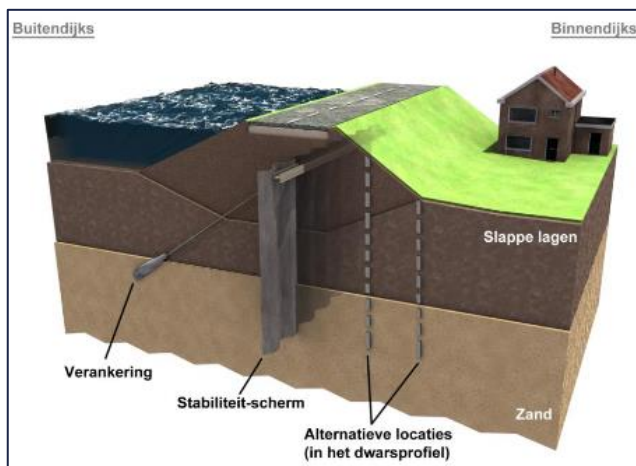
Figuur 3.2. Toepassing van een kwelscherm in de teen van de dijk. Bron: (Laar & Nieuwenhuijzen, 2016).

Het scherm kan op diverse plekken in het dijklichaam geplaatst worden. Dit kan zijn in de kruin van de dijk, in de binnenteen of daartussenin (figuur 3.3). Verder kan het scherm bestaan uit een verankerde of onverankerde wand welke tot in de onderliggende zandlaag reikt.

Werking

Door toepassing van een scherm verhoogt de stabiliteit van de dijk doordat afschuiving niet meer mogelijk is. De belasting geleverd door het aandrijvende moment wordt nu opgevangen door het scherm. Hiermee ontlast deze het tegenwerkend moment welke voor het evenwicht tussen deze twee momenten zorgt. Op deze wijze voldoet de dijk aan de wettelijk gestelde eisen.

Naast verhoging van de stabiliteit zorgt het scherm voor een verticale verlenging van de kwelweglengte. Het scherm is het meest effectief als deze aan de binnenzijde van de dijk wordt geplaatst, zo dicht mogelijk bij het uittredepunt. Doordat de werking van het scherm berust op het heave-mechanisme kan er nog steeds kwelstroming plaatsvinden. Echter wordt er door het dimensioneren op heave een groter kritiek verval verkregen dan bij horizontale uitstroming ter plaatse van het uittredepunt (Deltares, 2012).



Figuur 3.3 Stabiliteitsscherm. Bron: (Larsen, 2017)

Impact

De impact op de omgeving is minimaal doordat de constructie zich onder het maaiveld bevindt. De benodigde ruimte voor het aanbrengen van een scherm is beperkt tot een werkstrook van 5 á 10 meter waarin het materieel zich bevindt. Er kan een sleuf van circa 1 meter breed worden ontgraven waarin het kwelscherm wordt geplaatst. Deze wordt na de werkzaamheden opgevuld en de werkstrook zal worden ingezaaid met een grasmengsel waardoor er na afloop niks meer van te zien is.

Echter heeft een damwandconstructie wel invloed op de grondwaterstand in en achter de dijk. Zo kan het damwand zorgen voor een verhoging van de waterdruk aan de bovenstroomse zijde van de

constructie. Wanneer dit gebeurt en de gronddruk, geleverd door de deklaag, lager komt te liggen dan de waterdruk zal de deklaag opbarsten. Daarnaast kan het scherm voor een grondwaterstandsverlaging aan de benedenstroomse zijde zorgen. In geval van bebouwing op of naast de dijk kan dit tot schade leiden aan de funderingen.

Verticaal Zanddicht Geotextiel

3.3

Verticaal Zanddicht Geotextiel is een innovatieve en preventieve maatregel tegen piping. Het textiel wordt binnendijks aangebracht op de grens van het watervoerende pakket en de slappe bovenlaag. Het aanbrengen van het textiel is op twee manieren mogelijk. De eerste aanbrengmethode maakt gebruik van een freesmachine waardoor het textiel horizontaal wordt aangebracht tot een maximale diepte van 6 meter (figuur 3.4). De tweede methode is een verticale variant waarbij geotextielpanelen d.m.v. een speciale cassette de grond in gebracht (zie figuur 3.5). De wijze waarop de panelen in de ondergrond worden gebracht gebeurt op dezelfde wijze waarop damwanden worden geplaatst.



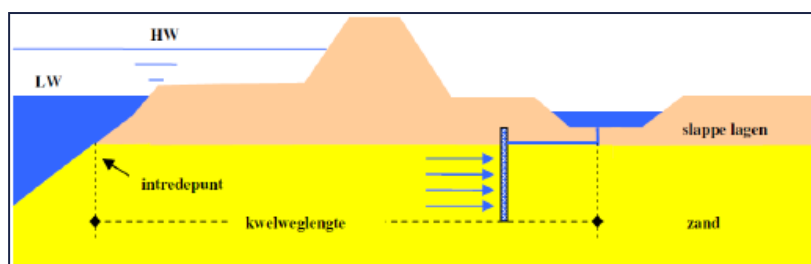
Figuur 3.5. Diepfreesmachine. Bron: (Van den Herik Sliedrecht, 2017)



Figuur 3.4. Verticale toepassing VZG. Bron: (Hanviskie, 2015)

Werking

De toepassing van geotextiel zorgt ervoor dat het zandtransport bij piping wordt geblokkeerd zonder de grondwaterstroming nadelig te beïnvloeden. Een pipe welke bij de polderzijde tot ontwikkeling komt, loopt dood tegen het geotextiel (figuur 3.6). De kwelstroom van water blijft onveranderd vanwege de waterdoorlatendheid van het textiel. Hierdoor treedt er minder verticale stroming (heave) op dan bij een ondoorlatend scherm.



Figuur 3.6 Schematisatie werking VGZ. Bron: (Johannes, 2012)

Impact

Beide inbrengmethodes hebben een beperkt ruimtebeslag. Het werkvak bedraagt zo een 5 tot 10 meter breed en is zeer toepasbaar bij dichtbebouwde gebieden (Van den Herik Sliedrecht, 2017). Echter wordt er voor de horizontale aanbrengmethode wel vlakke ondergrond aanbevolen.

Het aanbrengen van VZG door middel van de geotextielpanelen neemt meer tijd in beslag en komt het meest tot zijn recht in trajecten waar de constructie diep moet worden aangebracht of daar waar het traject veel bochten bevat. Na afwerking is er niks meer van de maatregel te zien en leidt deze niet tot gebruiksbependingen van het land.

4 Rekenregels

Rekenregels Piping

De rekenregels welke weergegeven zijn in dit hoofdstuk zijn afkomstig van het onderzoeksrapport “Zandmeevoerende wellen” (Deltares, 2012). De diverse rekenregels zijn terug te vinden in de voorwaarden die gesteld worden aan een dijklichaam om piping te laten optreden (zie voorgaand hoofdstuk). Allereerst dient de deklaag te kunnen opbarsten om voor een uittredepunt te zorgen.

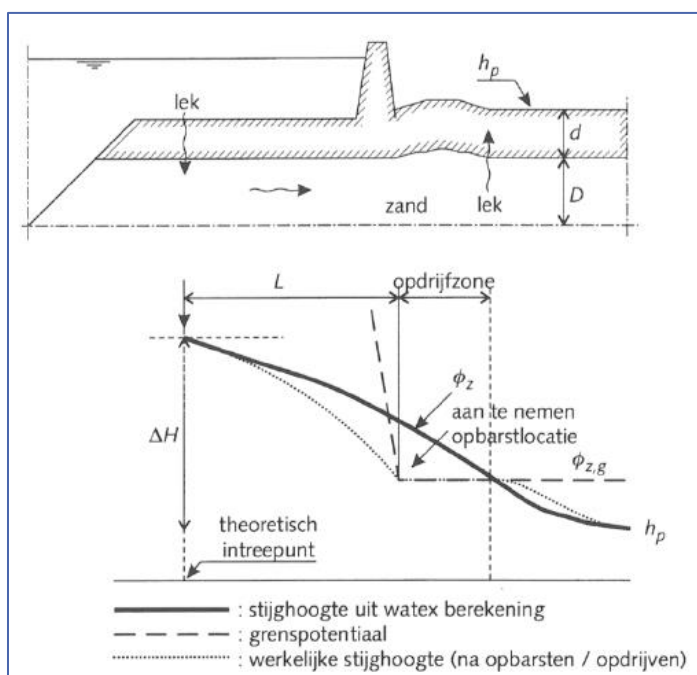
- 4.1 Vervolgens wordt de kritieke waterstand bepaald aan de hand van de formule van Sellmeijer. Door de jaren heen is deze formule gevalideerd en gecorrigeerd. Hedendaags zijn veel dijken gecontroleerd a.d.h.v. de oude formule (Sellmeijer, 1989). In de toekomst zal de controle worden uitgevoerd volgens de gevalideerde Sellmeijer-formule (Deltares, 2012).

In het verleden werd de eenvoudige rekenregel van Bligh als pipingcontrole toegepast. Uit onderzoek naar de validatie van de rekenregel van Sellmeijer (Beek & e.a, 2011) is gebleken dat de methode van Bligh niet altijd conservatief is ten opzichte van de aangepaste rekenregel van Sellmeijer. Door toepassing van de aangepaste rekenregel werden grotere benodigde kwelweglengtes gevonden. Om deze reden is in de adviespraktijk ervoor gekozen om de regel van Bligh te laten vervallen (Deltares, 2012) en wordt er binnen dit onderzoek dus niet gerekend met Bligh.

4.1.1 Opbarsten

In figuur 4.1 is een situatie geschetst van een dijklichaam waarbij het watervoerende pakket in verbinding staat met het buitenwater. Als gevolg van een stijging van het buitenwater neemt de waterspanning in het watervoerende pakket toe. Wanneer de toename van de stijghoogte dusdanig groot wordt, dat deze de deklaag doet opdrijven, bestaat de kans op opbarsten. Dit gebeurt bij overschrijding van de grensstijghoogte.

Zolang de grensstijghoogte wordt overschreden ontstaan er in de opdrijfzone, door scheurvorming, kanalen waardoor kwelstroming tot aan het maaiveld kan uittreden. Dit kanaal wordt ook wel het opbarstkanaal genoemd en vormt het uittredepunt binnen een kwelweganalyse.



Figuur 4.1. Configuratie van een dijk met voorland en ondergrond met daarbij horende stijghoogte in zandlaag, grenspotentiaal, opbarstlocatie en opdrijfzone. Bron: (Deltares, 2012).

Voor het opbarsten is het van belang dat de optredende waterspanning en grondspanning op de betreffende locatie bekend is. Of er daadwerkelijk opbarsten kan optreden kan worden bepaald aan de hand van het onderstaande opbarstcriterium:

$$\frac{\sigma_g}{\sigma_w} \geq 1,2 * \gamma_{b,opb}$$

Waarin:

σ_g	=	Grondspanning, opgebouwd uit het soortelijk gewicht vermenigvuldigd met de dikte van de deklaag [kN/m ²]
σ_w	=	Waterspanning aan de onderkant van de deklaag [kN/m ²]
$\gamma_{b,opb}$	=	Schematiseringsfactor voor opbarsten volgens TR Grondmechanisch Schematiseren van Dijken (ENW, 2012) [-]

4.1.2 Sellmeijer 1989

In 1989 is er door Sellmeijer een rekenmodel voor terugschrijdende erosie ontwikkeld. Het model is gebaseerd op een combinatie van stroming door het watervoerende zandlaag, stroming in de pipe en het krachtenevenwicht op de zandkorrels. Uitgangspunt voor het model is de configuratie van een dijk en ondergrond zoals deze is weergegeven in figuur 4.2 In deze configuratie bestaat het watervoerende pakket uit een homogene zandlaag met een constante dikte welke tot ver voorbij het uittredepunt reikt. In de zandlaag treedt er een grondwaterstroming op als gevolg van het verval over de dijk. Sellmeijer neemt in zijn model aan dat er zich een pipe heeft ontwikkeld met de lengte. In de pipe vindt laminaire stroming richting het opbarstkanaal plaats waardoor er, samen met de grondwaterstroming, krachten worden uitgeoefend op de zandkorrels. Het wiskundige model bestaat uit een koppeling van:

- De stijghoogtevergelijking voor de beschrijving van de grondwaterstroming in het watervoerende pakket;
- Een vergelijking voor laminaire stroming door de pipe;
- Een evenwichtsvergelijking van de optredende krachten en weerstanden op de zandkorrels in de pipe als gevolg van de eerder genoemde stromingen.

Met behulp van deze vergelijkingen kan het maximale verval over de dijk worden berekend. Bij het berekende verval zijn de zandkorrels nog in evenwicht. Het verval is afhankelijk van de verhouding l/L waarbij l de lengte van de pipe is en L de lengte van de constructie. Andere factoren waarvan het verval afhankelijk is zijn de doorlatendheid van het watervoerende pakket, de sleepkrachtcoëfficiënt (White) en de diameter en rolweerstand van de zandkorrels in het pipingevoelige zandlaag.

Het kritieke verval kan aan de hand van de volgende formule (Sellmeijer, 1989) bepaald worden:

$$\Delta H_c = \alpha c \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \tan(\theta) (0,68 - 0,1 \ln(c)) * L$$

Met:

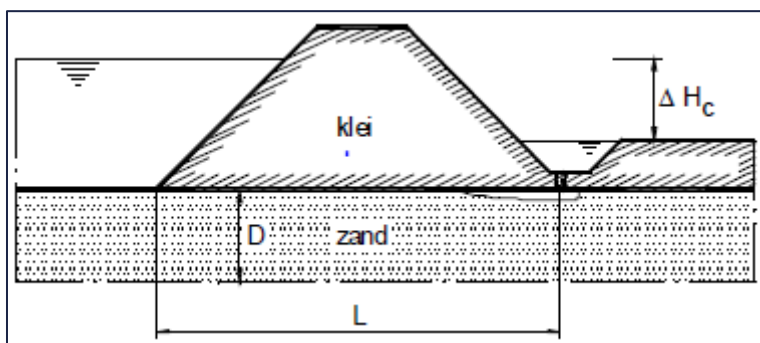
$$\alpha = \left(\frac{D}{L}\right)^{\left(\frac{0,28}{\left(\frac{D}{L}\right)^{2,8} - 1}\right)} \quad \text{(geometrie dijk)}$$

$$c = \eta d_{70} \left(\frac{1}{\kappa L}\right)^{1/3}, K = \frac{v}{g} * k \quad \text{(zandeigenschappen)}$$

Waarin:

- K = Intrinsieke doorlatendheid watervoerende laag [m^2]
 k = doorlatendheid zandlaag [m/s]
 ν = viscositeit van water [$1,33E-6 \text{ m}^2/s$]
 g = valversnelling [$9,81 \text{ m/s}^2$]

In de formule van Sellmijer (Sellmeijer, 1989) zijn de diverse factoren terug te vinden waarop het wiskundig model is gebaseerd: dijkgeometrie, zandeigenschappen, rolweerstand ($\frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \tan(\theta)$) en de krachtenvergelijking ($0,68 - 0,1 \ln(c)$). In het model wordt gerekend met de intrinsieke doorlatendheid van de watervoerende laag. Deze kan bepaald worden door de doorlatendheid van de zandlaag te vermenigvuldigen met een deling van de viscositeit met de zwaartekracht. Doordat de viscositeit van water bij 10°C ($1,33E-6 \text{ m}^2/s$) en de zwaartekracht ($9,81 \text{ m/s}^2$) vaste waardes zijn is de intrinsieke doorlatendheid gelijk aan $1,35E-7 \text{ m}^2$.



Figuur 4.2 Basisconfiguratie rekenmodel Sellmeijer. Bron: (Deltares, 2012)

4.1.3 Sellmeijer 2011

Binnen het kader van het project SBW Piping is onderzoek verricht naar het mechanisme piping. Het model en de formule welke het resultaat waren van het onderzoek van Sellmeijer (Sellmeijer, 1989) is aan de hand van nieuwe informatie en proeven op diverse schalen gevalideerd en gekalibreerd (Beek, Backward erosion piping - Initiation and progression, 2015).

De regel is afgeleid en gevalideerd voor Nederlandse zanden met een korreldiameter d_{70} tussen de 150 en 500 μm . In deze aangepaste rekenregel, welke gebaseerd is op het twee-krachtenmodel, is de relatieve dichtheid als extra parameter toegevoegd en is de invloed van de d_{70} verminderd. De invloed van de korreldiameter op het kritieke verval is in de rekenregel gereduceerd in de schalingsfactor F_s . Op basis van het twee-krachtenmodel van Sellmeijer (Sellmeijer, 1989) kan voor een standaard dijkconfiguratie met een homogene zandlaag onder een ondoorlatende laag de volgende rekenregel worden geformuleerd om het kritieke verval te bepalen:

$$\Delta H_c = L * F_r * F_s * F_g$$

Met:

$$F_r = \frac{\gamma'_p}{\gamma_w} \{ \eta \tan(\theta) \} \quad (\text{weerstand zand})$$

$$F_s = \frac{d_{70m}}{\sqrt[3]{\kappa L}} * \left(\frac{d_{70}}{d_{70m}} \right)^{0,4} \quad (\text{zandeigenschappen})$$

$$F_g = 0,91 * \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{0,28}{2,8} - 1} \quad (\text{geometrie dijk})$$

Waarin:

D	=	Dikte van de watervoerende laag [m]
d ₇₀	=	Korrel diameter van de laag waarin zich een pipe kan ontwikkelen, waarbij 70% van het materiaal kleiner is dan deze diameter [m].
d _{70m}	=	Gemiddelde d ₇₀ -waarde kleine schaalproeven [m]
L	=	Horizontale kwelweglengte waarover het kritiek verval optreedt [m]
Y' _p	=	Schijnbaar volumegegewicht zandkorrels onder water [kN/m ³]
Y _n	=	Volumegegewicht zand [kN/m ³]
Y _w	=	Volumegegewicht water [kN/m ³]
η	=	Sleepkrachtfactor (coefficient van White) [0,25]
θ	=	Rolweerstandshoek [37°]
K	=	Intrinsieke doorlatendheid van de watervoerende laag [m ²]

De formule van Sellmeijer heeft echter zijn beperkingen. Zo is de formule gebaseerd op diverse proeven waarbij het grondpakket uit een homogene zandlaag bestaat. Daarnaast kan aan de hand van de formule enkel de horizontale kwelweglengte bepaald worden. Voor het bepalen van de kwelweglengte bij verticale constructies zoals kwelschermen wordt er verwezen naar de Lane.

4.1.4 Lane

Het ontwerpen en toetsen van waterdichte kwelschermen gebeurt aan de hand van de formule van Lane. Met deze formule wordt het kritische verval over de dijk bepaald waarin de horizontale kwelweglengte voor een derde wordt meegenomen. De totale kwelweglengte wordt vervolgens gedeeld door creep-factor van Lane (C_w). De grootte van de factor hangt af van de grondsoort waarin het kwelscherm zich bevindt. De formule van Lane is hieronder weergegeven:

$$\Delta H \leq \Delta H_c = \frac{(\frac{1}{3}L_h + L_v)}{C_{w,creep}}$$

Waarin:

L _h	=	Horizontale kwelweglengte [m]
L _v	=	Verticale kwelweglengte [m]
C _{w,creep}	=	Creep-factor van Lane afhankelijk van de grondsoort (zie Tabel 4.1) [m]

Grondsoort	Mediane korrel diameter [μm]	C _{w,creep} (Lane)
Uiterst fijn zand, silt	< 105	8,5
Zeer fijn zand (mica)	105 - 150	7
Matig fijn zand (kwarts)	150 - 210	7
Matig grof zand	210 - 300	6
Zeer/uiterst grof zand	300 - 2000	5
Fijn grind	2000 - 5600	4
Matig grof grind	5600 - 16000	3,5
Zeer grof grind	16000 <	3

Tabel 4.1 Creep-factoren volgens de regel van Lane. Bron: (Deltares, 2012)

Echter zal een waterdoorlatende damwandconstructie enkel fungeren als een kwelscherm wanneer de filterconstructie verstopt raakt.

Rekenregels Macrostabiliiteit

De rekenregels ten behoeve van het bezwijkmechanisme macrostabiliiteit zijn gecompliceerder dan de rekenregels welke gebruikt worden voor het bepalen van de kans op piping. De in dit hoofdstuk weergegeven rekenregels en methodieken zijn grotendeels afkomstig van de

Schematiseringshandleiding macrostabiliiteit **Ongeldige bron opgegeven.** en de ontwerprichtlijn:

Ontwerp stabiliteitsschermen in primaire waterkeringen, groene versie **Ongeldige bron opgegeven.**

4.2 en vormen de leidraad van dit hoofdstuk.

Tijdens het onderzoek is er besloten om voor het ontwerpen van een stabiliteitsscherm een aanname te doen. Het risico dat de gemodelleerde dijkdoorsnede mogelijk voldeed in de basissituatie werd te groot geschat. Om een beeld te krijgen van mogelijk gebruikte rekenmodellen zijn deze wel benoemd in het hoofdstuk. Aan de hand van deze modellen kunnen de rekenwaardes van het optredende moment, normaalkrachten en dwarskrachten bepaald worden. Deze krachten dienen opgevangen te worden door de constructie waardoor de gehele dijkdoorsnede voldoet aan de veiligheidsnormen.

4.2.1 Opdrijven

De eerste factor welke een grote rol speelt bij het bepalen van de stabiliteit van de dijk is de kans op opbarsten. Door het opdrijven en of opbarsten verdwijnen de korrelspanningen ter hoogte van het in de ondergrond en neemt de capaciteit om schuifspanningen op te nemen af. Hierdoor kan er een afschuiving van het binnentalud plaatsvinden. De kans op opdrijven is afhankelijk van de grensstijghoogte en kan op dezelfde wijze bepaald worden zoals beschreven in paragraaf 4.1.1 Opbarsten.

4.2.2 Bishop

Een veelgebruikte methode bij het toetsen van de macrostabiliiteit is de methode Bishop. Het model van Bishop is gebaseerd op de beschouwing van de verticale krachten en het momentenevenwicht. Bij een stabiliteitsanalyse volgens de theorie van Bishop wordt ervan uitgegaan dat de maximaal mobiliseerbare schuifsterkte langs het glijvlak daadwerkelijk gemobiliseerd is. Met deze theorie wordt het bereiken van een bezwijktoestand beoordeeld op basis van de maatgevende belasting tegenover de maximaal beschikbare sterkte.

4.2.3 LiftVan

Een ander model om een glijvlakanalyse mee uit te voeren is de methode van LiftVan. Dit model is in 1999 ontwikkeld voor het rekenen aan de macrostabiliiteit van dijktafsluitingen bij opdrijven. Het nieuwe model sluit goed aan bij de modellering die volgens de Bishop-methode voor stabiliteit wordt gehanteerd. Bij een opdrijf lengte (drukstaaf lengte) die naar nul gaat en middelpunten van de glijcirkels die aan de actieve en passieve zijde samenvallen is het resultaat exact gelijk aan de Bishop-berekening.

5 Locatie analyse

In dit hoofdstuk zal een casus in het Rivierengebied worden onderzocht waarbij de bestaande dijk mogelijk kan bezwijken op het mechanisme piping. Er wordt op zoek gegaan naar een locatie in het Rivierengebied omdat uit vooronderzoek (bijlage A) blijkt dat grondopbouw in deze regio zeer pipinggevoelig is. Er bevinden zich kleidijken op zanderige ondergronden waarbij de dikte van de deklaag zeer beperkt is. Kans op opbarsten van het achterland is hiermee aanwezig. De casus is afkomstig uit de werkwijzer Piping bij Dijken (Rijkswaterstaat, 2014). In dit rapport is de casus behandeld als een voorbeeldcasus om de stappen te doorlopen welke noodzakelijk zijn bij het toetsen en ontwerpen van dijken op piping volgens de nieuwste rekenmethoden. Daarnaast is er veel informatie aanwezig over de locatie doordat er diverse grondonderzoeken zijn verricht door o.a. Arcadis en Wiertsema & Partners. Ook heeft er een onderzoek plaatsgevonden naar de macrostabiliteit welke is uitgevoerd door Grontmij.

Locatie

- 5.1 De locatie welke wordt behandeld in de casus is gelegen langs de Waal nabij Hurwenen, figuur 5.1. Het betreft een dijkvak dat onderdeel is van dijkkring 38: Bommelerwaard ten oosten van Zaltbommel. Ter hoogte van dijkpaal RW065 zijn tijdens het hoogwater van 2011 twee zandmeevoerende wellen waargenomen. De wellen zijn waargenomen bij een hoogwaterpeil van +6,25 m NAP terwijl het ontwerppeil van het dijktraject op +9,50 m NAP ligt.



Figuur 5.1 Ligging onderzoekslocatie nabij Hurwenen. Bron: (Rijkswaterstaat, 2014).

Boringen

In 2013 heeft Wiertsema & Partners geotechnisch grondonderzoek verricht ter hoogte van dijkpaal RW065. Hierbij zijn er diverse boringen gemaakt met als resultaat dat de korreldiameter d50 en d70 bepaald konden worden.

Bepaling d70

De korreldiameters zijn bepaald aan de hand van zeefanalyses en volgens de bepaling van de karakteristieke waarde zoals deze beschreven staat in het onderzoeksrapport “Zandmeevoerende wellen”¹. De resultaten van de boringen zijn in tabel 5.1 weergegeven.

Boring	Nr.	NAP-niveau [m tov NAP]	D50 [mm]	D70 [mm]	Classificatie D50
RW079+99_B-31_BIT	2	+3,14 tot +2,64	0,26	0,36	Matig grof
RW079+99_B-31_BIT	11	-4,96 tot -5,76	0,44	0,71	Uiterst grof
RW079+94_B-32_AL	9	-6,54 tot -7,54	0,29	0,37	Matig grof
RW065+50_B-34_BIT	3	+2,60 tot +1,40	0,27	0,35	Matig grof
RW065+50_B-34_BIT	8	-3,30 tot -3,65	0,18	0,20	Matig fijn
RW065+50_B-34_BIT	11	-5,70 tot -6,70	0,60	1,10	Uiterst grof
RW063+82_B-37_AL	8	-5,00 tot -6,00	0,41	0,65	Zeer grof
RW066+70_B-35_AL	6	-2,81 tot -3,16	0,30	0,36	Matig grof
RW066+70_B-35_AL	8	-4,91 tot -5,19	0,36	0,49	Zeer grof
RW067+46_B-36_AL	8	-3,84 tot -4,17	0,17	0,20	Matig fijn
RW064+69_B-38_AL	6	-3,05 tot -3,42	0,19	0,22	Matig fijn
RW066+51_B-39_AL	8	-4,16 tot -4,40	0,23	0,27	Matig grof
RW063+22_B-40_AL	7	-4,19 tot -4,29	0,18	0,24	Matig fijn

Tabel 5.1 Resultaten korrelverdelingen grondonderzoek Arcadis 2013. Bron: (Rijkswaterstaat, 2014).

Om tot een gemiddelde korreldiameter d70 is het belangrijk om te bepalen welke monster wel en niet worden meegenomen in de proevenverzameling. Allereerst beperkt de verzameling zicht tot de boringen rondom dijkpaal RW065. Op deze wijze worden enkel de resultaten van de heersende grondlaag ter plaatse meegenomen. Vervolgens dient het grindgehalte en slibgehalte te worden meegenomen. De classificatie van de grondsoorten is conform NEN-EN-ISO 14688. Om uitschieters binnen de bepaling van de d70 te voorkomen worden de zeer grove en uiterst grove zandlagen buiten beschouwing gelaten. De overgebleven (groen gearceerd) resultaten leiden tot een karakteristieke waarde van 0,23 mm (d70) en 0,19 mm (d50).

Bepaling k-waarde

Met behulp van DINO-loket en het REGIS-II kan de transmissiviteit (kD-waarde) worden bepaald, deze ligt op ongeveer 2700 m²/dag. In bijlage B Technische uitwerking is het lengte profiel tussen RW058 en RW068 weergegeven (DINOloket, 2017). Hieruit blijkt dat de dikte van het watervoerende zandpakket 60 meter bedraagt. De doorlatenheidscoëfficiënt van het zand komt dus neer op 2700/60 is 45 m/dag.

Grondopbouw

Uit de voorbeeldcase (Rijkswaterstaat, 2014) blijkt dat de deklaag in het achterland minimaal 3 meter dik is en bestaat uit een kleilaag. In het beheerregister van Waterschap Rivierenland (Waterschap Rivierenland, 2016) blijkt dat het maaiveld zich bevindt op +2,40 m NAP en de kruin van de dijk op +10,51 m NAP. De taludhellingen komen na benadering overeen met 1:3, daarnaast ligt er binnendijs een berm met een talud van 1:20. Het ontwerppeil ligt op +9,50 m NAP en zal in het vervolg worden aangehouden.

¹ (Deltares, 2012) Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen, bijlage B, formule A1.23. Schatting van de laaggemiddelde waarde van p uitgaande van een lokaal waarnemingsbestand.

6 Modelleren

Er bestaan diverse softwareprogramma's om grondwaterstromingsanalyse te maken zoals MSeep, WATEX en PlaxFlow. Het laatst genoemde programma is onderdeel van Plaxis en gedurende het onderzoek heeft de student de volledige beschikbaarheid over het programma. De software is gebaseerd op een Eindige Elementen Methode (EEM) en beschikt naast het bepalen van stromingsanalyses over de volgende mogelijkheden en/of eigenschappen:

- Bepaling van de stijghoogte in een watervoerende zandlaag onder een dijk en een erachter gelegen slecht doorlatende deklaag ten behoeve van opbarstcontrole;
- Bepaling van het stijghoogtepatroon in een watervoerende zandlaag onder een dijk met kwelschermen ten behoeve van het bepalen van het verticale verhang in verband met heave controle;
- Simuleren van 2-dimensionale stationaire en tijdsafhankelijke stroming in volledig en gedeeltelijk verzadigde grond.

Echter heeft het softwareprogramma ook enkele nadelen. Zo kunnen de toepassingen voor de opbarst- of heave controles enkel door intensieve invoer worden verkregen (Deltares, 2012). Daarnaast beschikt Plaxis niet over een aparte module om piping berekeningen te maken. Dit is ook gebleken gedurende het onderzoek.

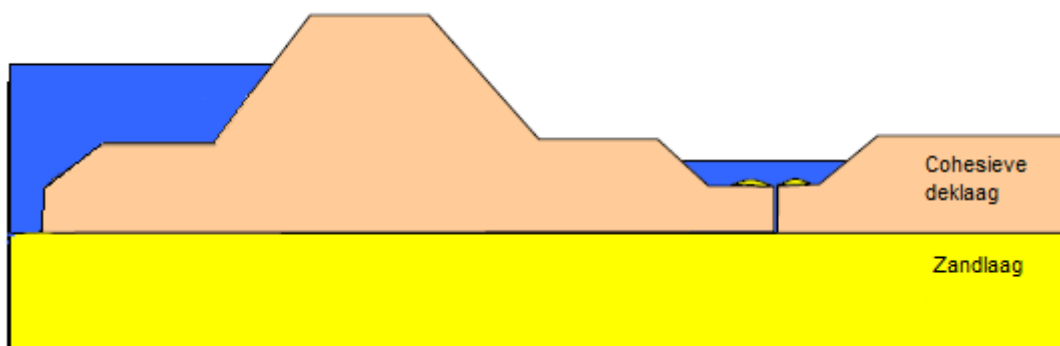
Het basismodel is weergegeven in hoofdstuk 6.1 en een gedetailleerde schematisatie is weergegeven in bijlage B hoofdstuk 4.3 *Schematisatie*. Binnen dit model zijn diverse situaties doorgerekend waarin damwanden zijn gemodelleerd met diverse lengten en diverse waterdoorlatendheden.

Het doel van de diverse situaties in PlaxFlow te modelleren is om meer inzicht te verkrijgen over het stijghoogteverloop en het stromingsbeeld in het watervoerende pakket en rondom de constructies. De resultaten uit het model worden gebruikt om te bepalen of het waterdoorlatende damwand voldoet aan onder andere het heave-criterium.

6.1

Model

In deze paragraaf wordt het basismodel en de daarbij horende uitgangspunten besproken en toegelicht. Veel uitgangspunten over de grondopbouw en de specifieke eigenschappen van de ondergrond zijn afkomstig uit het locatieonderzoek van hoofdstuk 5. Het basismodel komt overeen met het onderstaande schematisch overzicht en komt voor een groot gedeelte overeen met de situatie nabij Hurwenen. Tevens is deze schematisatie een veel voorkomend dijkprofiel in het Rivierengebied.



Figuur 6.1 Grove schematische weergave van het basismodel.

In het basismodel zijn de volgende uitgangspunten verwerkt:

- De kruinhoogte is overgenomen uit de casus nabij Hurwenen en bedraagt +10,50m NAP. Het maaiveld is ook overgenomen van de casus en bevindt zich op +2,40m NAP net zoals het voorland. De hellingen van het talud zijn na benadering aan genomen op 1:3;
- De kruinbreedte is ook overgenomen uit de casus en bedraagt 4,0m;
- Dikte van de deklaag is 3,0 m dit geldt voor zowel de aanwezige deklaag als de deklaag in het voorland. De deklaag bestaat uit een cohesieve kleilaag met een zeer lage waterdoorlatendheid aangenomen op $1,15 \cdot 10^{-8}$ m/s;
- Het watervoerende pakket bestaat uit een zandlaag. Uit de locatie analyse blijkt dat het watervoerende pakket een hoogte heeft van 60m met een doorlatendheid van 45 m/dag, dit komt neer op $5,21 \cdot 10^{-4}$ m/s;
- Het ontwerppeil is overgenomen van de casus en bedraagt zoals eerder vernoemd werd +9,50m NAP. De grondwaterstand is aangenomen op de gemeten grondwaterstand tijdens hoogwater van +2,40m NAP. Hierdoor bedraagt het verval over de dijk 7,10m;
- Het intredepunt is aangenomen onderaan het voorland waar het buitenwater in verbinding staat met het watervoerende pakket. De lengte van het voorland bedraagt 20m overeenkomstig met de situatie in de casus;
- Binnen het model is er gekozen voor een kwelsloot 10m buiten de binnenteen. Hierdoor wordt er een duidelijk uittredepunt gecreëerd. Doordat het intrede- en uittredepunt bekend is bedraagt de aanwezige kwelweglengte 75,5m.

Voor overige uitgangspunten en parameters word er verwezen naar bijlage B hoofdstuk 4.2

Parameters. In dit hoofdstuk is een lijst met parameters opgenomen met verdere toelichting van het model.

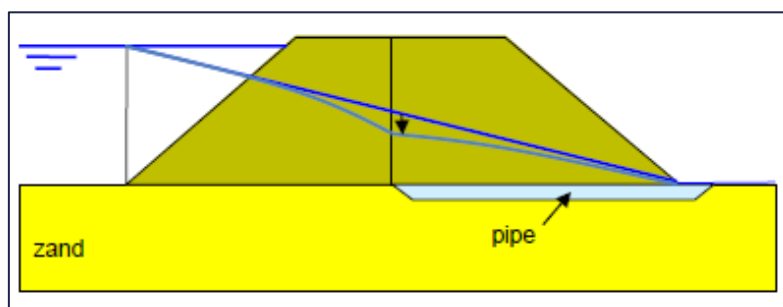
6.2

Situaties

Door diverse damwandconstructies toe te passen binnen het model worden de effecten van deze constructies op het stromingsbeeld inzichtelijk gemaakt. Om een eenduidig beeld te krijgen worden er geen veranderingen in het basismodel gedaan. Dit was echter wel de bedoeling om een beter beeld te krijgen van de afname van de stijghoogte als gevolg van pipevorming. Op deze afname is de theorie van Sellmeijer

gebaseerd en staat in verhouding tot de gevormde pipelengte. De afname van de stijghoogte is weergegeven in het hiernaast afgebeelde figuur 6.2. Door pipevorming veranderden de eigenschappen van het zand in de pipinggevoelige laag, waaronder de weerstand van het zand. Door een afname van de

weerstand daalt de stijghoogte en neemt de stroomsnelheid in de pipe toe. In eerste instantie werd er een pipehoogte van 0,1m aangehouden in het model waarin het zand een lagere weerstand bevatte. Tevens werd het opbarstkanaal gevuld met zand om de weerstand van het opbarstkanaal te verlagen. Door de tussentijdse resultaten te bespreken met externe experts (Termaat, 2017) werd de wijze van schematiseren juist geacht. Echter werd uit het gesprek duidelijk dat hieruit volgende resultaten niet representatief waren met de werkelijkheid. Het softwareprogramma is hierin beperkt



Figuur 6.2 Afname stijghoogte onder de dijk als gevolg van pipevorming. Bron: (Deltares, 2012).

waardoor er voor gekozen om de effecten welke optreden bij pipevorming buiten het onderzoek te stellen. In het vervolg van het onderzoek is de pipevorming dus weggelaten.

Binnen het onderzoek zijn de volgende situaties doorgerekend:

- Een damwandscherm waarbij de lengte gebaseerd is op de rekenregel van Lane. Om te kijken of het effectief is om een lang scherm waterdoorlatend te maken wordt hetzelfde scherm waterdoorlatend gemaakt. Dit gebeurt ter hoogte van de pipinggevoelige laag ook het grensvlak. De hoogte van het waterdoorlatende gedeelte bedraagt in deze situatie 1,0m.
- De verwachting is dat waterdoorlatend damwand enkel van toepassing is wanneer de benodigde damwandlengte om piping te voorkomen groter is dan de benodigde lengte om macro-instabiliteit te voorkomen. Hierdoor is in de tweede situatie een damwandscherm gemodelleerd welke een beperkte lengte heeft van 6,0m in de veronderstelling dat dit lang genoeg is om voor voldoende stabiliteit te zorgen. In dit kortere scherm worden ter hoogte van het grensvlak diverse hoogtes waterdoorlatend gemaakt. Dit gebeurt in stappen van 0,5m beginnend bij 0,5m tot en met het einde van het scherm: 3,0m.
- In de derde situatie worden er nog kortere damwandschermen gemodelleerd waarvan het onderste gedeelte waterdoorlatend wordt gemaakt. De lengte van het scherm is hierbij afhankelijk van de dikte van de deklaag. De hoogtes van het waterdoorlatende gedeelte worden in dezelfde stappen van 0,5m gemodelleerd. Beginnend bij een scherm van 3,25m waarvan de onderste halve meter waterdoorlatend is. Het laatste scherm in deze situatie heeft een totale lengte van 5,75m waarvan de onderste 3,0m waterdoorlatend is.

Iedere situatie waarin een waterdoorlatend damwand wordt gemodelleerd wordt doorgerekend met diverse waterdoorlatendheden. Het betreft hierbij de waterdoorlatendheid van het waterdoorlatende gedeelte. Doel hiervan is om aan te tonen dat bij een lagere waterdoorlatendheid het scherm nog steeds voldoet aan de gestelde criteria.

7 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten besproken en geanalyseerd welke volgen uit de handberekening en het PlaxFlow-model. De basis van de handberekening en het model zijn de grondgegevens, ontwerppeil en de schematisatie zoals deze in hoofdstuk 5 en 6 van dit rapport zijn beschreven. De resultaten van de handberekening zijn verwerkt in het model om het waterdoorlatend damwandscherm te toetsen op heave en de effecten op de geohydrologie te bepalen.

Na de modelanalyse zijn de resultaten opgenomen in de berekening naar de afname van de sterktecapaciteit van het damwand. Ook het resultaat hiervan is weergegeven en besproken in dit hoofdstuk.

Handberekening

7.1 Voor de handberekening is gebruik gemaakt van de formules van Sellmeijer (1989) zoals deze in de oudere toetsrondes werd gehanteerd en van de aangepaste Sellmeijer formule (2011) welke in de derde en vierde toetsronde wordt toegepast. De resultaten zijn weergegeven in tabel 7.1, voor de uitwerking wordt er verwezen naar bijlage B Technische uitwerking.

L = 75,5 m	Sellmeijer 1989 [m]	Sellmeijer 2011 [m]	Vershil [m]
Kritiek verval	3,69	3,02	0,67
Max. optreden verval	3,09	2,61	0,48
$\Delta H = 7,10$ m	Sellmeijer 1989 [m]	Sellmeijer 2011 [m]	Vershil [m]
Aanwezig kwelweglengte	75,5	75,5	0
Benodigde kwelweglengte	207	276,5	63,5
Vershil	131,5	201,0	-

Tabel 7.1 Resultaten handberekening volgens Sellmeijer 1989 en 2011.

Uit het model blijkt dat de kwelweglengte (intredepunt tot uittredepunt) 75,5 m bedraagt. Het kritieke verval bij de aanwezige lengte bedraagt 3,69 m en 3,02 m. Door vermindering van het kritieke verval als gevolg van de aanwezigheid van de deklaag (0,3d) mag het optredend verval maximaal 3,09 m en 2,61m bedragen. Dit is aanzienlijk lager dan het verval van 7,10 m bij het ontwerppeil.

Om piping te voorkomen bij een verval van 7,10 m is volgens Sellmeijer (1989) een horizontale kwelweglengte nodig van 207 m. Volgens Sellmeijer (2011) bedraagt de minimaal benodigde horizontale kwelweglengte 276,5 m. Dit is een forse lengte wanneer in de praktijk een pipingberm wordt gerealiseerd om de benodigde kwelweglengte te behalen.

Een andere methode om aan de benodigde kwelweglengte te voldoen is het toepassen van een kwelscherm. Een kwelscherm verlengd de kwelweg in verticale richting en is binnen dit onderzoek gedimensioneerd aan de hand van de formules van Lane. Hieruit blijkt dat een verticale verlenging van de kwelweglengte van 24,53 m voldoende is om piping te voorkomen. Omdat een kwelscherm voor een dubbele verlenging zorgt (links en rechts van het scherm) bedraagt de lengte van het scherm 12,27m. Om het scherm aan te brengen moet deze door de deklaag heen waardoor de totale lengte op 12,27m + 3,0m (dikte deklaag) = 15,27 m uit komt.

Modelanalyse

In dit hoofdstuk worden de resultaten afkomstig uit het PlaxFlow model besproken. De uitvoer richt zich voornamelijk op het stijghoogteverloop in het watervoerende pakket, verandering in het freatisch vlak en de stroomsnelheden inclusief de richting hiervan onderaan het scherm om zo de effecten te bepalen van de constructie op de geohydrologie. Door het analyseren van de resultaten afkomstig van het model kan er deels antwoord worden gegeven op de onderstaande deelvraag:

7.2

- Wat zijn de effecten en gevolgen op de constructie en de geohydrologie?

Door toepassing van diverse doorlatendheden kan er ook inzicht verkregen worden in situaties waarbij de doorlatendheid van het scherm niet meer voldoet aan de gestelde eisen van het ontwerp. Verandering van de doorlatendheid van het scherm kan komen door verschillende processen zoals deze beschreven zijn in hoofdstuk 7 van dit rapport.

Vanwege de grote hoeveelheid resultaten in tabel-, grafiek en figuurvorm zijn de verwijzingen binnen dit hoofdstuk gericht naar bijlage B hoofdstuk 5 *Resultaten* mits anders is aangegeven.

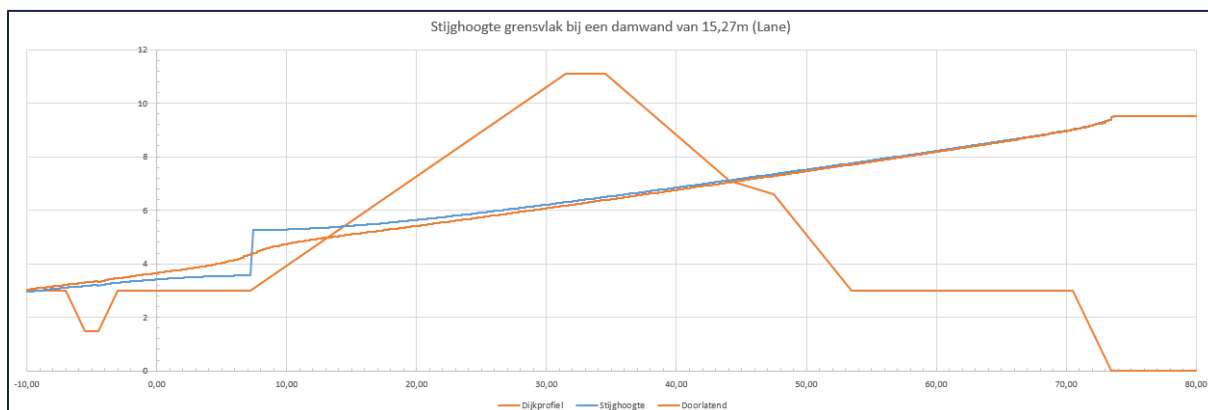
7.2.1 Stijghoogteverloop

In deze paragraaf wordt ingegaan op het stijghoogteverloop bovenin het watervoerende pakket. Dit gedeelte van de zandlaag wordt als pipinggevoelig beschouwd. Om de stijghoogte te bepalen is er in Plaxis een horizontale lijn getrokken ter hoogte van de pipinggevoelige laag onder de dijk door. De resultaten per situatie zijn weergegeven in bijlage B hoofdstuk 5 *Resultaten*. Voor het bepalen van de stijghoogte is het ontwerppeil (MHW) en het polderpeil van belang. Beide waarden zijn van te voren bepaald aan de hand van het locatieonderzoek.

Uit de waarnemingen blijkt dat het waterdoorlatend maken van damwand een positief effect heeft. De verschillen in stijghoogte voor en achter het damwand nemen af ten opzichte van een waterdicht damwand, waardoor het verval over het scherm ook kleiner wordt. Echter kan er wel geconcludeerd worden dat in situaties waarbij de deklaag in de binnenteen al kan opbarsten een waterdicht damwand beter is geschikt. Door een waterdicht damwand toe te passen daalt de stijghoogte in de polderzijde waardoor de kans op opbarsten aan deze zijde afneemt. Echter neemt de kans op opbarsten aan de rivierzijde van het scherm wel toe doordat er een verhoging van de stijghoogte plaats vindt. Bij een afname van de waterdoorlatendheid is op te merken dat het scherm gaat functioneren als een kwelscherm. Het verval over het scherm neemt toe waardoor de stijghoogte onder aan het scherm ook toeneemt. Dit heeft als resultaat dat het optredende verhang groter wordt waardoor het scherm mogelijk niet voldoet aan het heavecriterium. De effecten op de stijghoogte in het watervoerende pakket hangen niet af van de locatie van het scherm maar meer van de doorlatendheid. De waarnemingen zijn hieronder beschreven.

Waarnemingen

In figuur 5.2 van bijlage B is de situatie geschematiseerd waarbij er een lang kwelscherm is geplaatst in de binnenteen. Opgemerkt kan worden dat de druk aan de rivierzijde van het scherm toeneemt en aan de polderzijde veel lager is. Het verloop van de stijghoogte op het grensvlak is weergegeven in de onderstaande figuur 7.1. Het totale verval over het scherm bedraagt hierdoor 1,68 m.



Figuur 7.1 Stijghoogteverloop op het grensvlak bij een lang kwelscherm.

Geconcludeerd kan worden dat door een gedeelte van het damwand waterdoorlatend te maken het drukverschil afneemt. Hierdoor neemt de kans op opbarsten voor het scherm af zal de grondwaterstandsverlaging binnendijs vele malen kleiner zijn.

In figuur 5.4 van bijlage B is er een korter waterdicht scherm geplaatst van 6,0 m. Door het plaatsen van het scherm treed ook hier een opstuwing van het water aan de rivierzijde van het scherm op en een afname van de stijghoogte aan de polderzijde van het scherm. Het verval over het scherm bedraagt enkel 1,09 m wat veel minder is dan bij het plaatsen van een lang scherm volgens de rekenregel van Lane. Door het scherm op het grensvlak waterdoorlatend te maken neemt het drukverval af. In de figuren 5.6 t/m 5.11 (bijlage B) zijn de stijghoogteverlooplijnen weergegeven bij de situaties weergegeven waarbij een gedeelte van het damwand waterdoorlatend is gemaakt ter hoogte van het grensvlak. De hoogte van dit gedeelte varieert in stappen van 0,5 m. De resultaten zijn weergegeven in weergegeven in tabel 5.4 van (bijlage B). Uit deze tabel kan geconcludeerd worden bij een hoge waterdoorlatendheid ($10E-3$ m/s) nauwelijks verandering optreedt in stijghoogte ten opzichte van de standaardsituatie. Bij een matige waterdoorlatendheid ($10E-5$ m/s) wordt er iets meer weerstand geboden door het scherm waardoor de stijghoogteverschillen iets toenemen. Bij een lage waterdoorlatendheid ($10E-7$ m/s) gedraagt het scherm zich steeds meer als een waterdicht kwelscherm waardoor de stijghoogtes toe- en afnemen wat resulteert in een verval gelijkwaardig aan die van een kwelscherm.



Figuur 7.2 Stijghoogte verloop in het grensvlak bij een damwandscherm van 6,0m waarvan 1,0m waterdoorlatend is.

Om na te gaan of een waterdoorlatend damwandscherm kan dienen als maatregel tegen enkel het bezwijkmechanisme piping is er scherm gemodelleerd in de binnenteen, het talud en de kruin. Het scherm is 3,0m lang (dikte van de deklaag) en bij iedere stap wordt het scherm een halve meter

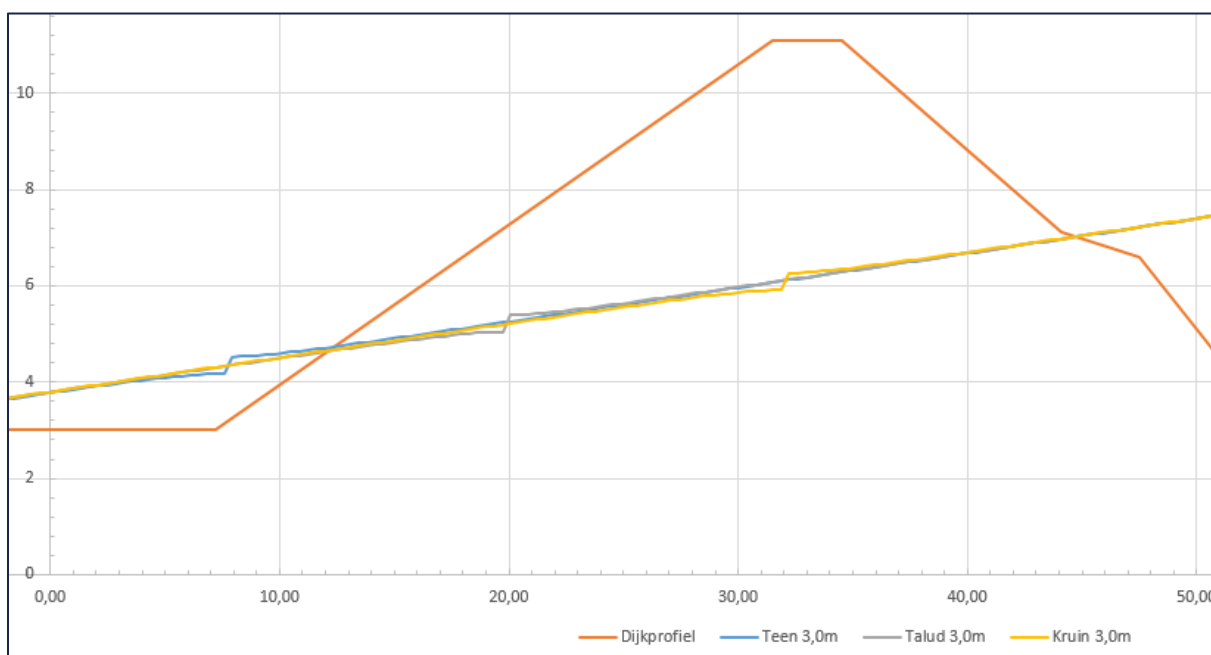
verlengd. In deze stappen wordt het waterdoorlatend gedeelte ook vergroot met een halve meter. In de eerste stap is er een scherm geplaatst van 3,25m waarvan de onderste 0,5m waterdoorlatend is. Hierdoor bevindt het waterdoorlatende gedeelte 0,25m boven en 0,25m onder het grensvlak.

Uit tabel 5.5 van bijlage B blijkt dat de maximale drukverval van 0,35 m over het scherm optreedt bij een waterdoorlatend scherm van 3,0 m met een lage waterdoorlatendheid ($k=10E-7$ m/s). Het scherm is hierbij geplaatst in de binnenteen van de dijk. Bij hogere waterdoorlatendheden treedt er nauwelijks verandering op in stijghoogte ten opzichte van de situatie zonder scherm

Ter illustratie zijn de gegevens van de stijghoogte over de gehele lengte van de dijk, bij plaatsing van een laag waterdoorlatend scherm in de binnenteen, in een grafiek gezet (figuur 5.12 van bijlage B). Hieruit blijkt dat de maximale drukken behaald worden bij een scherm van 3,0 m. Daarnaast valt af te lezen uit de grafiek dat de helling van de stijghoogtelijn afneemt ter plaatse van het scherm. Dit betekent dat de druk aan de rivierzijde van het scherm toeneemt ook wel een opstuwung van het water. Aan de polderzijde zorgt de afname van de helling voor een drukverlaging ook wel een daling van het water.

Uit tabel 5.5 t/m tabel 5.7 van bijlage B kan geconcludeerd worden dat de doorlatendheid effect heeft op het stijghoogte verloop in de pipinggevoelige laag. De locatie van het scherm heeft echter geen effect op het verloop van de stijghoogte op het grensvlak.

In de onderstaande figuur 7.3 zijn de verlopen van de stijghoogte van een laag waterdoorlatend scherm van 3,0 m op de drie verschillende locaties binnen het dijkprofiel weergegeven. Ook hierin is af te lezen dat de maximale vervallen over het scherm in alle drie de situaties gelijk aan elkaar zijn.



Figuur 7.3 Stijghoogteverloop in pipinggevoelige laag bij een kwelscherm van 3,0m met een lage waterdoorlatendheid.

7.2.2 Freatisch vlak

Veranderingen in het freatisch vlak kunnen het gevolg zijn van de veranderingen van stijghoogte in het grensvlak. Een stijging van de stijghoogte in het grensvlak leidt automatisch tot een stijging van het freatisch vlak. Bij een afname van de stijghoogte zal dan het freatisch vlak dalen. In figuur 5.15 van bijlage B is de situatie weergegeven waarin er nog geen kwelscherm is geplaatst in de binnenteen. Uit de figuur blijkt dat rondom de binnenteen de freatische lijn hoger ligt dan het maaiveld.

Als gevolg van de veranderingen in stijghoogte zoals is besproken in de vorige paragraaf veranderd ook de freatische lijn. Uit de waarnemingen kan geconcludeerd worden dat bij toepassing van een waterdicht scherm de freatische lijn aan de rivierzijde van het scherm boven het maaiveld komt te liggen en aan de polderzijde gelijk of onder het maaiveld. Door het scherm waterdoorlatend te maken daalt de waterspanning aan de rivierzijde en daarmee ook de freatische lijn. Bepalend voor de verandering in de freatische lijn is de aanwezigheid van het damwand in de deklaag. Dit zorgt in iedere situatie voor een stijging van de lijn.

Waarnemingen

In figuur 5.16 (bijlage B) is het kwelscherm volgens de rekenregel van Lane weergegeven. Het is al bekend dat de stijghoogte voor het scherm is toegenomen. Dit is terug te zien in de freatische lijn doordat deze nu voor een groot gedeelte boven het maaiveld uitkomt. De waterspanning in de binnenteen ter hoogte van het grensvlak bedraagt volgens het model $58,71 \text{ kN/m}^2$. De geleverde grondruk van de deklaag bedraagt 51 kN/m^2 , uitgaande van een soortelijk gewicht van 17 kN/m^3 . Zonder steunberm zou de deklaag al voor het scherm kunnen opbarsten want de waterspanning is groter dan de grondspanning. Hieruit valt af te leiden dat er water uit de deklaag treedt wat zorgt voor wateroverlast.

Door in het grensvlak 1,0m damwand waterdoorlatend te maken (figuur 5.17 bijlage B) daalt de stijghoogte en daarmee de freatische lijn. De waterspanning in het grensvlak bedraagt hierdoor $52,13 \text{ kN/m}^2$ wat alsnog voor een opbarsting kan zorgen.

Bij toepassing van een korter damwandscherm (6,0m) met diverse afmetingen waterdoorlatend oppervlakte daalt de stijghoogte in het grensvlak, aan de rivierzijde van het scherm, naarmate het oppervlakte groter wordt. Dit is duidelijk te zien in figuur 5.18 t/m figuur 5.21. Wanneer de gehele onderste 3,0m waterdoorlatend wordt gemaakt zijn de verschillen in stijghoogte minimaal. Dit resulteert in een lage waterspanning voor het scherm maar ook in een hogere waterspanning achter het scherm in vergelijking tot een waterdicht scherm (figuur 5.18). Mits de waterdoorlatendheid van het scherm hoog is. Afname hiervan leidt tot grotere verschillen zoals te zien is in de figuren 5.5 t/m 5.11.

In vergelijking tot de standaardsituatie waarin geen scherm is geplaatst zijn de verschillen wel minimaal en wordt de huidige situatie vrijwel behouden.

In figuur 5.22 t/m figuur 5.25 van bijlage B is een damwandscherm geplaatst waarvan de lengte varieert om te kijken of een kort waterdoorlatend damwandscherm ook voor alleen piping als maatregel kan dienen. De verschillen zijn minimaal en er kan opgemerkt worden dat door plaatsing van een kort scherm de grootste verschillen worden veroorzaakt doordat het scherm de kleilaag doorkruist. Hierdoor wordt de deklaag afgesloten wat resulteert in de voornaamste reden van de verhoging en verlaging van de freatische lijn rondom de binnenteen.

In figuur 5.26 t/m figuur 5.29 is er voor het scherm een andere locatie gekozen namelijk in het talud en in de kruin van de dijk. Ook hier is gevarieerd met de lengte van het doorlatend scherm en de

doorlatendheid ervan. De maximale verschillen in de freatische lijn treden op bij een scherm waarvan de onderste 3,0m waterdoorlatend is en de doorlatendheid van het scherm is afgenomen tot de laagste waarde ($10E-7$ m/s). De verschillen zijn ook al op te merken in de eerder besproken tabellen 5.5 t/m 5.7 en de figuren 5.12 t/m 5.14. De grootste oorzaak van het verschil in de freatische lijn is dat het scherm de kleilaag doorkruist. Het effect op de freatische lijn als gevolg van het doorlatend maken van de onderste meters is minimaal.

7.2.3 Grondwaterstroming

In deze paragraaf worden de resultaten besproken omtrent het stromingsbeeld rondom de constructie. De aandacht ligt hier vooral bij de stromingsrichtingen, stroomsnelheden en het optredende verhang. Het optredende verhang kan bepaald worden door toepassing van de Wet van Darcy welke inhoudt dat de stroomsnelheid (v) gelijk staat aan de doorlatendheid (k) vermenigvuldigd met het verhang (i).

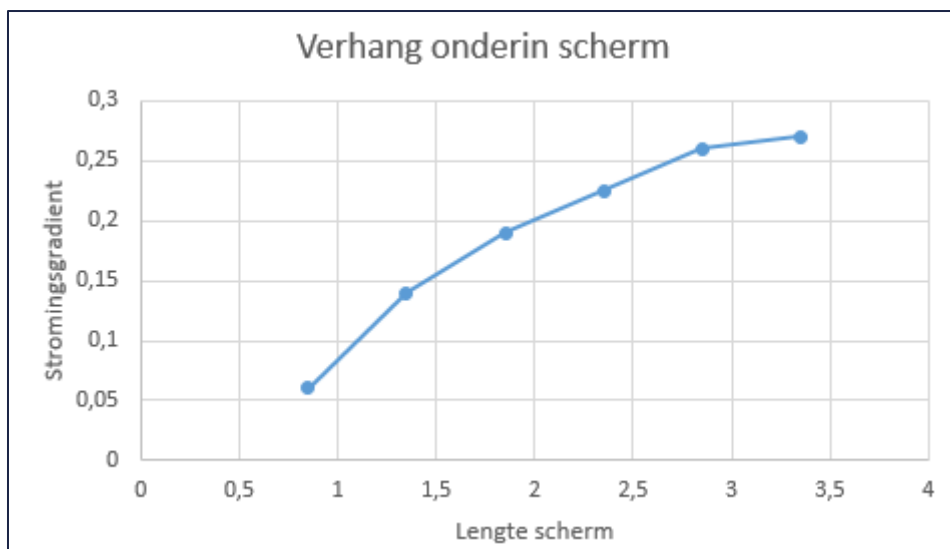
Uit het model blijkt dat het waterdoorlatend maken van damwanden enkel effectief is bij geringe lengtes. Door het damwand ter hoogte van de pipinggevoelige laag waterdoorlatend te maken ontstaat er een grote concentratie van waterstromingen. Bij lange damwanden ligt de snelheid in deze laag hoger dan bij korte damwanden. Dit heeft te maken met het feit dat lange damwanden het watervoerende pakket voor een groter gedeelte afsluit. De hoeveelheid water wat langs het scherm loop is hierdoor groter dan bij een kleiner scherm. Het water wordt gedwongen om boven- of onderlangs te stromen. Dit zorgt tevens voor een toename van het debiet kwelwater wat aan de oppervlakte kan komen. Door vergroting van het waterdoorlatend oppervlakte nemen de snelheden in de pipinggevoelige laag en onder aan het scherm af.

Waarnemingen

In figuur 5.31 en figuur 5.34 zijn de stroomsnelheden welke optreden bij een lang damwandscherm. Het water dat tegen het scherm loopt wordt langs het scherm naar beneden gedwongen waardoor de snelheden hoog oplopen. Door op de hoogte van de pipinggevoelige laag 1,0m scherm waterdoorlatend te maken daalt de stroomsnelheid onderin het scherm maar neemt deze bovenin het scherm toe (figuur 5.32 en 5.33). De snelheden lopen hoog op waardoor de constructie niet meer voldoet aan het heavecriterium.

In de figuren 5.36 t/m 5.41 zijn de stroomsnelheden en richtingen weergegeven voor damwandschermen waarvan het waterdoorlatend oppervlakte varieert. Bij kleine oppervlaktes ligt de snelheid hoger dan bij de grotere oppervlaktes. Echter voldoen alle situatie aan het verticale heavecriterium van 0,5.

In de figuren 5.42 t/m 5.47 zijn de resultaten weergegeven van de stroomrichting en stroomsnelheid bij korte schermen waarvan de lengte varieert ten behoeve van het voorkomen van piping. In deze figuren hebben de schermen een lage waterdoorlatendheid ($10E-7$ m/s) waardoor de maximale stroomsnelheid onder in het scherm worden behaald. Afhankelijk van de lengte van het scherm neemt de stromingsgradiënt toe. De resultaten uit deze figuren zijn samengevoegd in de onderstaande grafiek, figuur 7.4. De lengte van het scherm is ten opzicht van het grensvlak.



Figuur 7.4 Maximaal optredend verhang bij een lage waterdoorlatendheid.

In de tabellen 5.15 en 5.16 (bijlage B) zijn de snelheden en stromingsgradiënten weergegeven welke optreden bij schermen met een hoge en matige waterdoorlatendheid. Opgemerkt kan worden dat door toepassing van de juiste waterdoorlatendheid de grondwaterstroming nauwelijks wordt beïnvloed.

7.2.4 Conclusie

Uit de modelanalyse kan geconcludeerd worden dat het effectief is om het gedeelte in het damwand, ter hoogte van het grensvlak, waterdoorlatend te maken. Bij een hoge waterdoorlatendheid nemen de verschillen in stijghoogte, in het watervoerende pakket, voor en achter het scherm af. De huidige geohydrologie blijft hiermee grotendeels gewaarborgd. Echter beperkt de toepassing zich tot kortere schermen. Wanneer voor de macrostabiliteit een grote lengte damwand nodig is zal bij toepassing van een waterdoorlatend gedeelte de stroomsnelheden in de pipinggevoelige laag sterk toenemen. Naast een toename van de stroomsnelheden in deze laag zorgt een waterdoorlatend gedeelte in een lang damwand ook voor een toename in de hoeveelheid kwelwater dat aan het oppervlakte kan stromen. Dit kwelwater kan leiden tot wateroverlast wat onwenselijk is.

Bij kortere schermen komt dit effect in mindere mate voor en treden er ook lagere snelheden op. Dit zorgt ervoor dat een korter scherm acceptabeler wordt geacht voor toepassing in de praktijk. Tevens is er aangetoond dat er staal bespaard kan worden door een scherm waterdoorlatend te maken. Mits de benodigde lengte ten behoeve van macrostabiliteit kleiner is dan de benodigde lengte om piping te voorkomen. Hierbij is de benodigde lengte voor piping bepaald aan de hand van de rekenregel van Lane.

Tevens kan opgemerkt worden dat door toepassing van waterdoorlatend damwand een veel kortere lengte bereikt kan worden van het damwand bij het voorkomen van alleen piping. Door de onderste halve meter waterdoorlatend te maken treedt er al geen zanduitspoeling meer op. Getoetst aan het heavecriterium treedt er bij een afname van de waterdoorlatendheid ook geen verticale heave op en is onderloopsheid uitgesloten. Om extra zekerheid toe te kennen aan de waterdoorlatendheid van het scherm lijkt een scherm met een waterdoorlatend gedeelte van 1,0m het meest geschikt.

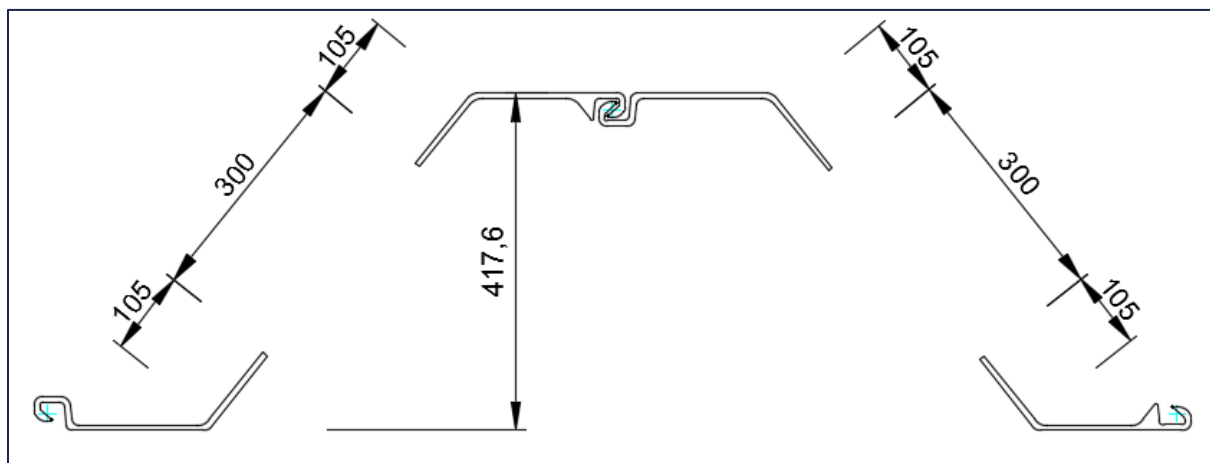
Sterktecapaciteit

Bij toepassing van een damwandscherm van 6,0m waarin een filterraam is geplaatst met een breedte van 300 mm en een hoogte van 1000mm blijken er nauwelijks veranderingen op te treden in de geohydrologie. Om de sterktecapaciteit van de constructie is begonnen met het bepalen van het gereduceerde oppervlakte in de doorsnede waar het filterraam zich bevindt. Vervolgens is de effectieve grondspanning bepaald en geverifieert aan de hand van een versimpeld D-sheet model.

7.3

Hieruit blijkt dat de effectieve grondspanning ter hoogte van het filterraam 23 kN/m² bedraagt. Verondersteld wordt dat het stalen damwandprofiel deze kracht kan verspreiden over het staal boven en onder het filterraam. Aan het filterraam zelf worden geen krachten ontleend. Tijdens het bepalen van de sterktecapaciteit is er uitgegaan van een AZ18-700 damwandprofiel met een staalklasse S355. Dit profiel is een veelal gebruikt profiel binnen de dijkversterkingen.

Uit bepaling van de optredende kracht, het gereduceerde oppervlakte en het opneembare spanning blijkt dat de constructie voldoet. Door de breedte van het filterraam aan te houden op 300 mm blijft er in het lijf aan weerszijde een oppervlakte over van 105mm * 9mm = 1827 mm². De schuifspanning in deze oppervlakte bedraagt hierdoor 8,81 N/mm² < 0,58 * F_y (355N/mm²).



Figuur 7.5 Gereduceerde oppervlakte damwandprofiel.

Door het gereduceerde oppervlakte mee te nemen in de bepaling van het traagheidsmoment en het weerstandsmoment kan de afname van het weerstandsmoment bepaald worden. Om aan te tonen dat de constructie over 100 jaar nog voldoet is de corrosie ook meegenomen. Deze bedraagt over 100 jaar 1,2 mm aan weerszijden. Uit de berekening blijkt dat het weerstandsmoment hierdoor met 27,9% is afgenomen.

Door de afname van het weerstandsmoment vervolgens mee rekenen in de bepaling van het maximaal opneembaar moment blijkt deze 461 kNm te bedragen. Ten opzichte van het oorspronkelijk maximaal opneembaar moment van een AZ18-700 profiel blijkt dit tevens een afname te zijn van 27,9%.

Voor de uitwerking van de bepalingen wordt verwezen naar bijlage B hoofdstuk 7 Resultaten.

8 Ontwerp

In dit hoofdstuk komen de criteria aan bod welke gesteld worden om de mogelijk optredende risico's te reduceren. Om het damwandscherm waterdoorlatend te maken is er gekeken naar de mogelijkheid voor het toepassen van geotextiel. Dit materiaal wordt ook toegepast bij het VZG en beschikt over zeer goede eigenschappen ten behoeve van de waterdoorlatendheid en de zanddichtheid. Daarnaast beschikt geotextiel op zichzelf over een lange levensduur van 50 tot 100 jaar. Uit gesprek met TenCate (Zengerink & Ruiter, 2017), leverancier van het geotextiel, blijkt dat de toepassing van geotextiel in combinatie met damwand een mogelijke oplossing is. Echter is het hierbij wel van belang dat de constructie op een juiste wijze is ontworpen. Tevens bleek uit het gesprek dat de grootste uitdaging in het aanbrengen van de constructie zit en niet zo zeer in het ontwerpen ervan. Voor het ontwerp wordt verwezen naar de CUR174 *Geokunststoffen in de waterbouw* (CUR Bouw en Infra, 2009). Door het bepalen van de juiste maaswijdte en waterdoorlatendheid kunnen diverse risico's, beschreven in dit hoofdstuk, worden beperkt.

Risico's piping

Het toepassen van geotextiel als maatregel tegen piping neemt diverse risico's met zich mee. Door

8.1 een juist ontwerp op basis van de volgende deelfaalmechanismen kunnen de risico's beperkt blijven:

- Achterloopsheid: de pipe ontwikkelt zich langs het damwand in de lengterichting van de waterkering tot aan het uiteinde van de constructie, piping kan dan alsnog optreden;
- Doorloopsheid: de pipe ontwikkelt zich door het geotextiel heen;
- Onderloopsheid: de pipe ontwikkelt zich onder de constructie door;
- Voorloopsheid: de pipe ontwikkelt zich aan de rivierzijde van de constructie.

Door specificaties van het geotextiel op de juiste wijze te bepalen kunnen de risico's omtrent de waterdoorlatendheid en maaswijdte beperkt blijven. Hiervoor kan er gekeken worden naar de CUR174 (CUR Bouw en Infra, 2009) en de *Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel, groene versie* (POV Piping, Waterschap Rivierenland en Deltares, 2016).

8.1.1 Maaswijdte

Een verkeerde bepaling van de maaswijdte kan leiden tot de volgende deelfaalmechanismen:

- Een te grote maaswijdte leidt tot zanduitspoeling door het geotextiel heen. De pipe kan zich verder ontwikkelen met doorloopsheid als gevolg. De dijk kan op deze wijze alsnog bezwijken op piping;
- Een te kleine maaswijdte kan leiden tot verstoppingen van het scherm en daarmee voor een afname van de waterdoorlatendheid. Hierdoor wordt het mogelijk dat piping alsnog kan optreden door achter-, onder- en voorloopsheid.

Zoals in bijlage B hoofdstuk 2.5 *Filterregels* is vermeld kan de benodigde maaswijdte (O_{90}) bepaald worden op basis van de zandkorrelgrootte op de betreffende locatie. Hiervoor dient grondonderzoek plaats te vinden met behulp van de natte zeefmethode. Uit gesprekken met TenCate (Zengerink & Ruiter, 2017) blijkt dat er een behoorlijk verschil, van max. 100 μm , kan zitten tussen de bepaling van de O_{90} aan de hand van de droge zeefmethode en de natte zeefmethode. Echter kan volgens de CUR174 de openingsgrootte O_{90} ook bepaald worden aan de hand van tabel 2.2 *Ontwerpcriteria voor geometrisch dichte geotextielen* uit bijlage B. Voor bijvoorbeeld niet-stationaire belasting en een D_{40} korrelgrootte groter dan 60 μm kan het volgende criteria worden toegepast:

$$O_{90} < D_{90}$$

Door gericht grondonderzoek te doen kunnen de korrelgroottes D_{90} en D_{40} nauwkeuriger bepaald worden. Dit kost echter wel meer tijd en geld maar de risico's worden hiermee beperkt wat de levensduur en functionaliteit van de constructie ten goede komt.

8.1.2 Waterdoorlatendheid

Belangrijk tijdens het ontwerpen is het bepalen van de waterdoorlatendheid van het geotextiel. Een te lage waterdoorlatendheid kan voor extra weerstand zorgen waardoor achter-, onder- en voorloopsheid kan optreden. Door de toename van de weerstand zal de kwelstroom een andere weg zoeken namelijk degene met de minste weerstand. Mocht de doorlatendheid van het scherm lager zijn dan de omringde grondsoort dan functioneert het scherm als een kwelscherm. Bij gehele ondoorlatendheid dient het scherm aan het heavecriterium te voldoen om onderloopsheid te voorkomen, mits de kans op verstoppingen nihil is. Aangezien er voor toepassing van waterdoorlatend geotextiel wordt gekozen dient volgens CUR174 de onderstaande ontwerpeis gehanteerd te worden.

$$k_{geo} \geq C_m * k_b$$

Waarin:

k_{geo}	=	Loodrechte doorlatendheidscoëfficiënt van het geotextiel	[m/s]
C_m	=	Constante afhankelijk van het basismateriaal	[-]
k_b	=	Doorlatendheidscoëfficiënt van het basismateriaal	[m/s]

De waarde van C_m is afhankelijk van het basismateriaal, de waterstroming en het gevaar voor dichtslibben en/of blokkeren. Uit onderzoek door Deltares (Förster, et al., 2013), in opdracht voor Waterschap Rivierenland naar de toepassing van VZG, blijkt dat bij een C_m -waarde van 10 het aannemelijk is dat de doorlatendheid boven die van het zand zal blijven.

8.2

Uitvoering

Een van de grotere risico's vindt plaats tijdens de uitvoering en betreft het dichtsmeren van het geotextiel. Bij de huidige aanbrengmethodes van het VZG wordt er in een treintje een sleuf gegraven, het doek geplaatst en de grond aangevuld. Hierdoor is de kans op dichtsmeren van het textiel zeer gering. Bij de verticale aanbrengmethode wordt er gebruik gemaakt van een cassette waarin het doek de grond in wordt gebracht. Na plaatsing wordt de cassette uit de grond getrokken en blijft het geotextiel achter. Door het geotextiel te verwerken in een damwandconstructie, waardoor de gehele constructie via intrillen of resoneren kan worden geplaatst, is de kans veel groter dat het doek al bij het doorkruisen van de deklaag volledig dichtsmeert.

Tijdens het onderzoek werd hier een mogelijke oplossing voor gevonden. Door gebruik te maken van in wateroplosbaar folie lijkt het in eerste instantie mogelijk om dichtslibben tijdens de uitvoeringsfase te voorkomen. Echter zal er bij het inbrengen altijd grond uit de bovenliggende lagen worden meegenomen door het damwand in de dieper gelegen lagen. Vervolgonderzoek zal moeten aantonen of deze oplossing in de praktijk ook echt werkt. Tijdens dit onderzoek zal deze oplossing worden meegenomen als mogelijkheid om dichtsmeren tijdens de uitvoeringsfase te voorkomen.

9 Marktonderzoek

Door het bepalen van de kosten van een dergelijke constructie en deze te vergelijken met de kosten van de huidige maatregelen wordt er inzicht verkregen naar de toepasbaarheid van de constructie. Tevens wordt de vraag vanuit de markt naar waterdoorlatend damwand beoordeeld op basis van het toepassingsgebied van de constructie. Deze twee analyses moeten voor de duidelijk beeld zorgen over de positie van waterdoorlatend damwand in de huidige markt.

Kostenanalyse maatregelen

Om de kostenvergelijking te maken worden de kosten voor een langsconstructie, bestaande uit een lang damwandscherm volgens de rekenregels van Lane, bepaald. Hierbij wordt net zoals in het model aangenomen dat voor piping een kwelscherm van 15,27m nodig is en voor de stabiliteit een scherm van 6,0m. Vervolgens wordt er gekeken welke kosten er worden gemaakt bij het realiseren van een waterdoorlatend damwand met een lengte van 6,0m ten behoeve van de stabiliteit.

Uit de modelanalyse bleek ook dat een waterdoorlatend scherm van toepassing kan zijn bij het voorkomen van alleen piping. De kosten hiervan worden vergeleken met de kosten van verticaal zanddicht geotextiel. De kosten van het geotextiel zijn in bijlage A al benoemd.

In de kostenanalyse wordt alleen gekeken naar de benodigde uitvoeringskosten voor toepassing van een maatregel over een dijkversterking van 100 strekkende meter. Op deze wijze wordt er getracht een gemiddelde prijs te bepalen voor toepassing van diverse maatregelen.

Het overzicht van de kosten is in de onderstaande tabel weergegeven.

Maatregel	Kosten/m ¹	Impact op de omgeving
Verticaal Zanddicht Geotextiel	€700,- tot €1000,-	+/+
Damwand tegen piping ²	€1450,-	+/-
Waterdoorlatend damwand ³	€920,-	+/+
Stabiliteits-pipingberm ⁴	€400,-	-/--

Tabel 9.1 Kostenvergelijking maatregelen

9.1.1 Stabiliteits- en pipingberm

Uit de berekening, waarbij de benodigde kwelweglengte wordt bepaald met de formule van Sellmeijer (2011), blijkt dat er een kwelweglengte van minimaal 276,5 m nodig is om bij het optredende verval van 7,10 m bij MHW piping te voorkomen. Dit verval is bijna het dubbele van het verval waarbij de benodigde lengte gelijk is aan de aanwezige lengte van 75,5 m. Om piping te voorkomen bij een verval van 7,10 m dient de kwelweglengte vergroot te worden met 201 m. Binnen de dijkversterkingen worden pipingbermen met een breedte van 30 m acceptabel geacht (Deltares, 2012). Bij lengtes groter dan 30 m wordt er overgestapt naar verticale constructies omdat de impact op de omgeving anders te groot wordt. Tevens wordt er verwacht dat de kosten voor het realiseren van een dergelijk pipingberm dermate groot zijn dat een verticale constructie goedkoper wordt geacht. In tegenstelling tot de eerder gevonden kosten voor de realisatie van een pipingberm in bijlage A Analyserapport. Tevens blijkt uit bijlage A dat de impact op de omgeving zeer groot kan zijn door forse bermbreedtes.

² Damwand is hierbij gedimensioneerd volgens de rekenregel van Lane

³ Bij waterdoorlatend damwand is een korter scherm aangenomen t.b.v. de macrostabiliteit.

⁴ Kosten zijn afkomstig uit het Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen (Deltares, 2012) en betreffen een bermbreedte van 10m. Dit staat niet in verhouding met de gevonden kwelweglengte uit het model.

9.1.2 Langsconstructie

De uitvoeringskosten voor het realiseren van een lang damwandprofiel (15,27m) over 100m bedragen € 143.327,- . Voor een overzicht van de meegenomen kosten wordt verwezen naar bijlage C *Kostenanalyse*. Door het plaatsen van damwandschermen ondervindt de omgeving na de uitvoering zeer weinig hinder van de constructie doordat deze onder de grond bevindt. De impact tijdens de uitvoering is wel groot doordat de uitvoeringstijd vrij lang kan zijn. Dit heeft te maken met de lengte van de damwanden. Daarnaast is de impact op geohydrologie ook aanwezig. Door de grote lengte van het scherm treedt er een opstuwing van het grondwater plaats aan de rivierzijde van het scherm. Aan de polderzijde treedt er juist een waterstandverlaging op.

9.1.3 Verticaal Zanddicht Geotextiel

Uit het analyserapport in bijlage A blijkt dat de uitvoeringskosten voor VZG €700/m¹ - €1000/m¹ bedragen. De impact op de omgeving is minimaal vanwege de snelle uitvoeringstijd (horizontale inbrengmethode). Doordat het scherm waterdoorlatend is zijn de invloeden op de omgeving omtrent de geohydrologie zeer gering.

9.1.4 Waterdoorlatend damwand

Uitgaande van een beperkte lengte van het damwand t.b.v. macrostabiliteit vallen de kosten lager dan voor de toepassing van een kwelscherm. Dit heeft voornamelijk te maken met de reductie van de benodigde scherm lengte. De kosten voor het filterraam worden geschat op €378,-; voor een uitwerking van deze kosten wordt verwezen naar bijlage C.

Door toepassing van het filterraam blijven de gevolgen in de geohydrologie zeer gering, mits het damwand t.b.v. van de macrostabiliteit niet te lang is. Mocht dit wel het geval zijn dan kan het filterraam voor wateroverlast zorgen doordat het dieper gelegen grondwater langs het scherm omhoog tot de oppervlakte kan stromen.

Daarnaast treedt er tijdens de uitvoering ook minder overlast op doordat er een korter scherm geplaatst kan worden.

Marktonderzoek

Tijdens het ontwerpen van waterkerende grondconstructies wordt er rekening gehouden met diverse bezwijkmechanismen door te ontwerpen of te toetsen aan de hand van diverse leidraden en het Wettelijke Beoordelingsinstrumentarium 2017 (voorheen VTV2006). Hierdoor kan een (bestaand) ontwerp beoordeeld worden met als conclusie of de waterkering voldoet.

- 9.2 Door nieuwe kennis op het gebied van hydraulische belastingen, fysieke veranderingen van watersystemen en het meenemen van onzekerheden (Maaskant & Knoeff, 2016) zijn er enkele veranderingen in de nieuwe toetsing (WBI2017) ten opzichte van de VTV 2006. Door deze veranderingen is de verwachting dat vele waterkeringen niet meer voldoen aan de wettelijke eis waardoor de komende tijd veel geïnvesteerd moet worden in dijkversterkingen.

Uit vooronderzoek blijkt dat, als gevolg van de nieuwe pipingregel, ca. 600 km dijk niet voldoet in de derde toetsronde. Naar verwachting speelt naast piping in 60% van de gevallen ook macrostabiliteit een rol. Dit betekent dat ca. 360 km aan dijken versterkt moet worden op basis van beide bezwijkmechanismen. Gekeken naar de toekomst biedt deze dus wel perspectief voor toepassing van waterdoorlatend damwand.

Echter worden er voor toepassing van een nog niet bewezen maatregel diverse criteria gesteld door opdrachtgevers. Dit blijkt uit gesprek met Frans van den Berg en uit het rapport *Ontwerp-uitgangspunten Primaire Waterkeringen* (Waterschap Rivierenland, 2016). Voor het Waterschap Rivierenland zijn in ieder geval de onderstaande criteria van belang bij het toepassen van een innovatie:

- Waarborging van de veiligheid;
- Het beperken van wateroverlast, er mag zeker geen extra kwel ontstaan;
- Robuuste oplossing met een lange levensduur (50-100jr.);
- Beperkte ruimtebeslag waardoor aanwezige bebouwing en ecologische en cultuurhistorische waarden bewaard blijven;
- Uitbreidbaarheid van de constructie, hierbij moet men denken aan de flexibiliteit (mee zakken) en aanpassingen a.g.v. klimaatverandering;
- Werking van de constructie moet aantoonbaar, toetsbaar en controleerbaar zijn;
- De constructie moet betrouwbaar en eenvoudig te onderhouden zijn;
- Optredende risico's moeten beheersbaar zijn.

Bepalend voor de acceptatie van de constructie is het kunnen aantonen dat de constructie voldoet en goed functioneert en dat ook blijft doen in de toekomst. Gekeken naar de toepassing van waterdoorlatend damwand zal het lastig zijn om aan te kunnen tonen dat na plaatsing van de constructie deze niet is dichtgesmeerd en tijdens de levensduur nog goed functioneert. Doordat de constructie zich onder de grond bevindt is dit moeilijk aan te tonen. Wellicht kan door peilbuismetingen het verval over het scherm bepaald worden en daarmee de waterdoorlatendheid van het scherm kan aantonen. Uit de modelanalyse blijkt dat naarmate het scherm dichtslibt het verval over het scherm toeneemt.

Het waterdoorlatend maken van lange damwandschermen zal naar inschatting niet in de praktijk worden toegepast doordat deze voor een toename van kwelwater zorgt.

10 Conclusie en aanbevelingen

Conclusie

Het voorkomen van meerdere bezwijkmechanismen in een dezelfde dijkdoorsnede zal in de loop der jaren toenemen. Dit is het gevolg van de verscherpte hydraulische randvoorwaarden en de aangepaste rekenregels en modellen welke gebruikt worden in de derde en vierde toetsronde. Deze hebben ertoe geleid dat een groot aantal dijken niet voldoen aan de gestelde veiligheidsnormen.

- 10.1 In de huidige opgave is gebleken dat door toepassing van de nieuwe beoordelingsinstrumentarium circa 600 km aan dijken versterkt dient te worden om piping te voorkomen. Van deze 600 km blijkt 360 km over onvoldoende stabiliteit te beschikken. Een oplossing welke beide vormen van bezwijken kan voorkomen en daarbij de impact op de omgeving minimaliseert kan hoog scoren in de huidige markt. De wensen van de omwonenden gaan een grotere rol spelen en de overlast tijdens de uitvoering dient steeds beperkter te worden. De vraag naar een betere, snellere en goedkopere oplossing ten opzichte van de huidige maatregelen biedt perspectief om onderzoek te doen naar innovatieve ideeën.

Het waterdoorlatend damwand is zo een mogelijke innovatie welke kan dienen als maatregel tegen piping en kan samengaan met het voorkomen van macro-instabiliteit. Door op de hoogte van de pipinggevoelige laag de damwand waterdoorlatend en zanddicht te maken kan zanduitspoeling worden voorkomen. Zanduitspoeling komt voor bij piping en wordt bij traditionele maatregelen voorkomen door de lengte van de kwelweg te verlengen. Hierdoor ondervindt de kwelstroming veel weerstand waardoor deze vanzelf afzwakt. Dit is echter een dure maatregel omdat de benodigde lengte fors kan oplopen. Het stoppen van zanduitspoeling, waardoor de pipe doodloopt tegen het scherm, kan verkregen worden door toepassing van geotextiel. Hierbij is het van belang dat de maaswijdte van het geotextiel juist wordt gekozen. Ter controle kan worden gesteld dat de maaswijdte (O_{00}) niet groter mag zijn als de D_{90} van de zandlaag bepaald met de natte zeef analyse. Het effect van het geotextiel is al beproefd bij de toepassing van het VZG. Doordat er geen zanduitspoeling meer op kan treden kan de pipe zich niet meer verder ontwikkelen maar blijft de kwelstroming behouden. Dit heeft een gunstig effect op het behouden van de huidige geohydrologie.

Door het toepassen van een stalen damwandscherm kan er aan het scherm een sterkte worden ontleend welke van toepassing kan zijn bij het verbeteren van de macrostabiliteit. Uit het onderzoek is gebleken dat bij een filterraam ter hoogte van de pipinggevoelige laag het opneembaar moment afneemt met maximaal 28% in diezelfde doorsnede. Dit heeft voornamelijk te maken met de afname van het oppervlakte in de doorsnede van het scherm.

De effecten op de geohydrologie zijn minimaal wanneer er gebruikt gemaakt wordt van een klein scherm, ten behoeve van de macrostabiliteit, met een filterraam van 1000mm bij 300mm. Het filterraam dient hierbij ter hoogte van de pipinggevoelige geplaatst worden en een over een 10 maal zo hoge waterdoorlatendheid te beschikken als de doorlatendheid van het watervoerende pakket. Belangrijk is dat er wordt voorkomen dat de waterdoorlatendheid afneemt, anders zal het scherm zich gaan gedragen als een kwelscherm. Door de beperkte lengte is dit niet wenselijk. Afname van de waterdoorlatendheid kan al voor komen tijdens de uitvoeringsfase waarbij het scherm door de deklaag heen moet om uiteindelijk in het watervoerende pakket geplaatst te kunnen worden.

De kosten van het filterraam worden, op basis van de resultaten en het ontwerp, geschat op €378/m¹ damwand en kan vergeleken worden met de kosten voor het plaatsen van 4,5m damwand. Het is dus kosteneffectief om in situaties, waarbij voor piping een 4,5m langer scherm nodig is dan voor de stabiliteit, het scherm waterdoorlatend te maken. Echter beperkt dit zich wel tot een

bepaalde lengte. Uit het onderzoek is gebleken dat de bij lange damwanden (15m) de snelheden hoog oplopen onder de deklaag wanneer ervoor wordt gekozen om het een filterraam toe te passen. Hierdoor wordt er ook meer wateroverlast verwacht door de toename van kwelwater dat de oppervlakte kan bereiken. Dit zorgt echter wel voor een beperking van de toepasbaarheid van waterdoorlatend damwand.

De kosten voor het toepassen van het waterdoorlatend damwand kunnen verder nog oplopen doordat er veel grondonderzoek plaats dient te vinden. Door de beperkte hoogte van het filterraam kunnen variaties in de hoogte van de pipinggevoelige laag moeilijk worden opgevangen. Dit probleem doet zich niet voor bij de toepassing van VZG waar het waterdoorlatend oppervlakte vele malen groter is.

Het toepassingsgebied van de constructie kan vergroot worden door het scherm ook toe te passen in situaties waarin alleen piping optreedt. Ten behoeve van de macrostabiliteit dient er dan geen extra lengte aan het scherm toegekend te worden. Door het filterraam onderin het scherm te plaatsen kan piping al worden voorkomen. De onderkant van het damwand reikt hierbij tot 1,0m in het watervoerende pakket. Uit vooronderzoek blijkt helaas dat een dergelijk oplossing al bestaat, namelijk ProLock. Hierbij wordt het scherm gerealiseerd uit gerecycled kunststof en kan deze tevens dienen als waterontspanner en actieve drainage. De kosten van deze constructie worden lager geschat dan de kosten van een stalen damwandscherm.

Aanbeveling

- 10.2 Naar aanleiding van het onderzoek wordt het bedrijf aanbevolen zich blijvend in te zetten voor onderzoek naar de toepassing van innovatieve ideeën. Tijdens het onderzoek is gebleken dat het bedrijf zich wil ontwikkelen tot een meedenkende aannemer en daarbij de markt kan voorzien van maatregelen welke beter, sneller en goedkoper zijn dan de huidige technieken.

Één van zo een mogelijke maatregel is het, in dit onderzoek, onderzochte waterdoorlatende damwand. Door toepassing van een filterraam ter hoogte van de pipinggevoelige laag zal de waterhuishouding behouden blijven zoals deze in de huidige situatie aanwezig is. De effecten zijn beoordeeld door middel van een Plaxis-model waarbij gebruik gemaakt werd van de grondwaterstromingsmodule PlaxFlow.

In dit model is een kwelscherm gemodelleerd met behulp van de rekenregel van Lane. Hierdoor voldeed het scherm ruimschoots aan het gestelde heavecriterium. Om de vergelijking te kunnen is er ook een kort scherm van 6,0m gemodelleerd. Bij de toetsing bleek deze net niet te voldoen aan het heavecriterium. Mogelijk kan het kwelscherm al korter worden gedimensioneerd dan in eerste instantie blijkt bij het hanteren van Lane. Hierdoor kunnen de verwachte kosten van een kwelscherm flink dalen en wordt het minder kosteneffectief om het scherm doorlatend te maken.

Tijdens het onderzoek is gebleken dat het model enkele gebreken kende. Zo is het niet mogelijk om de verminderde weerstand in de pipinggevoelige laag, als gevolg van pipevorming, in PlaxFlow te modelleren. De resultaten hieruit bleken na bespreking met een externe expert te veel af te wijken van de werkelijkheid. Door een extra controle uit te voeren in het programma MSeep van Deltares kan hier meer inzicht in verkregen worden.

Daarnaast zijn de beschikbare modellen gebaseerd op een homogene verdeling van de zandlaag met de daarbij horende gemiddelde waterdoorlatendheid. Door te variëren met korrelgroottes en waterdoorlatendheden kan er beter worden aangesloten op de werkelijke situatie. In de praktijk zal bijna nooit een scherpe scheidingslaag aanwezig zijn.

Tevens wordt er aanbevolen meer onderzoek te doen naar diverse situaties waarbij verschillende dijkprofielen worden doorgerekend. In dit onderzoek is er één bepaald dijkprofiel met een bepaalde dikte van de deklaag en het watervoerende pakket gemodelleerd. Tijdens het onderzoek is niet bekend geworden of de dijk voldoet aan de veiligheidsnormen omtrent macrostabiliteit. Om een maatregel door te voeren is deze, in overleg, aangenomen op een bepaalde waarde. Om de conclusie breed toepasbaar te maken zal hier meer onderzoek naar gedaan moeten worden.

Meer onderzoek naar de maakbaarheid en uitvoerbaarheid van de constructie zal plaats moeten vinden. Hierbij ligt de focus voornamelijk op het waarborgen van de waterdoorlatendheid van het scherm tijdens de uitvoering. Tijdens het onderzoek heeft hierover al een brainstormsessie plaats gevonden met in wateroplosbaar folie als resultaat. Een maakbaarheidsproef kan hier bijvoorbeeld meer inzicht over geven. Hierin kan dan tevens getest worden of gebruik van peilbuismetingen voor voldoende monitoring kunnen zorgen.

De overkoepelende aanbeveling voor Gebr. De Koning is om het onderzoek naar waterdoorlatend damwand niet door te zetten. De risico's omtrent het kunnen aantonen van de waterdoorlatendheid van het scherm zijn vrij groot. Er dient nog veel onderzoek gedaan te worden naar de maakbaarheid van het ontwerp en de uitvoerbaarheid. Met de beschikbare modellen en software is aangetoond dat de toepasbaarheid van de constructie zich beperkt tot korte schermen, ten behoeve van de binnenwaartse macrostabiliteit.

11 Literatuurlijst

Literatuur

- Arcadis. (2012). *Consequentieanalyse aangepaste pipingregel*. Arcadis.
- Beek, V. M. (2015). *Backward erosion piping - Initiation and progression*. Delft: Technische Universiteit Delft.
- Beek, V. M., & e.a. (2011). *Validation of Sellmeijer's model for backward erosion piping in small-, medium- and fullscale experiments*. Delft: Deltares, TU Delft.
- Biesboer, F. (2016). Dijkversterking moet anders. *De Ingenieur*, 44-53.
- Bruijn, i. H. (2013). *Het pipingproces in stripvorm*. Delft: Deltares.
- Calle, E. (2002). *Dijkdoorbraakprocessen*. Delft: GeoDelft.
- CUR Bouw en Infra. (2009). *CUR-rapport 174 'Geokunststoffen in de waterbouw - Tweede, herziene versie'*. Gouda: Stichting CURNET.
- Deltares. (2012). *Onderzoeksrapport Zandmeevoerende Wellen*. Lelystad: Rijkswaterstaat.
- ENW. (2012). *Technisch Rapport Grondmechanisch Schematiseren bij Dijken*. Utrecht: Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving.
- Förster, U., Harkes, M., van Beek, V., P. W., van de Kolk, B., & Termaat, R. (2013). *Onderzoek naar de werking van geotextielen als pipingremmende maatregel*. Tiel: Waterschap Rivierenland.
- GeoDelft. (1994). *Tijdsafhankelijke stabiliteit van dijken*. Delft.
- Hart, R. ., Bruijn, H. d., & Vries, G. d. (2016). *Fenomenologische beschrijving faalmechanismen WTI*. Delft: Deltares.
- Johannes, R. (2012, Augustus 07). Geotextiel beproefd op stoppen piping. *Cobouw*, pp. 4-5.
- Laar, R., & Nieuwenhuijzen, L. (2016). *Dijkverbetering Gameren - Notitie voorkeursalternatief*. RoyalHakoningDHV.
- Larsen, H. (2017). Kennisdag damwanden. *Deltares* (p. 10). Culemborg: Deltares.
- Maaskant, B., & Knoeff, H. e. (2016). *Consequentieanalyse Nieuwe Normering & WBI2017*. Utrecht: Rijkswaterstaat.
- POV Piping, Waterschap Rivierenland en Deltares. (2016). *Ontwerp- en beoordelingsrichtlijn Verticaal Zanddicht Geotextiel, groene versie*. Tiel: Waterschap Rivierenland.
- Rijkswaterstaat. (2014). *Werkwijzer Piping bij Dijken*. Den Haag: Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Sellmeijer, J. (1989). *On the mechanism of piping under impervious structures*. Delft: TU Delft.
- Senhorst, H. (2016). *Innovatie uit de markt, fase 2*. Werkgroep POV Piping.
- Termaat, R. (2017, Mei 22). Bespreking resultaten onderzoek. (B. Haaring, Interviewer)
- Waterschap Rivierenland. (2016). *Legger Primaire Waterkering - Dijkpaaltraject Rossum - Wilhelminasluis*. Tiel: Waterschap Rivierenland.

Waterschap Rivierenland. (2016). *Ontwerpuitgangspunten Primaire Waterkeringen*. Tiel: Waterschap Rivierenland.

Zengerink, E., & Ruiter, J. (2017, Maart 03). Toepassing geotextiel binnen de dijkversterkingen. (B. Haaring, Interviewer)

Zwanenburg, C., Duinen, A. v., & Rozing, A. (2013). *Technisch Rapport Macrostablieit*. Delft: Deltares.

Internetpagina's

Berg, S. (2013, December 19). *Workshop Piping*. Opgehaald van Helpdesk Water: <https://www.helpdeskwater.nl/algemene-onderdelen/structuur-pagina'/zoeken-site/@37694/workshop-piping/>

DINOloket. (2017, April 24). *Ondergrondgegevens*. Opgehaald van <https://www.dinoloket.nl>: <https://www.dinoloket.nl/ondergrondgegevens>

Ons Water. (2016, September 1). *Binnenzakkaart waterveiligheid*. Opgeroepen op Februari 21, 2017, van <https://www.helpdeskwater.nl/algemene-onderdelen/structuur-pagina'/zoeken-site/@43414/binnenzakkaart/>

Van den Herik Sliedrecht. (2017, Januari 01). *Piping Control*. Opgehaald van Van den Herik: <http://herik.nl/nl/content/piping-control>

12 Bijlagen

Bijlage A; Analyserapport

Bijlage B; Technische uitwerking

Bijlage C; Kosten analyse