



OBOR Kunststof heaveschermen



COLOFON

Titel	OBOR Kunststof heaveschermen
Opdrachtgever	HWBP-De Innovatieversneller Piping
Auteurs	Werner Halter (Fugro) Marijn Hop (Fugro) Albert Wiggers (RHDHV) Eindredactie door HWBP-De Innovatieversneller Piping
Foto omslag	Heibaarheidsproef Dijkversterking Wolferen-Sprok, 2020
Kenmerk	OBOR Kunststof heaveschermen DIV versie 1.0
Review	Berry Hol (De Betuwse Waard) Jos Karstens / Patrick Leeflang (JLD) Henry Hoekman (Profextru) Arjen Zagema (Fugro / UT Twente)
Datum	11-4-2025
Status	V1.0

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	9
1.1	<i>Aanleiding</i>	9
1.2	<i>Doel.....</i>	9
1.3	<i>Relatie met andere leidraden en documentatie.....</i>	9
1.4	<i>Doelgroep.....</i>	10
1.5	<i>Leeswijzer</i>	10
2	Samenhang met het Veiligheidsraamwerk en de Publicatie Heaveschermen.....	12
2.1	<i>Samenhang met het Veiligheidsraamwerk</i>	12
2.2	<i>Samenhang met de Publicatie Heaveschermen.....</i>	12
3	Kunststof damwandscherm als heavescherm	13
3.1	<i>Inleiding.....</i>	13
3.2	<i>Werkend principe kunststof heavescherm</i>	13
3.3	<i>Verhaal van de innovatie</i>	14
3.3.1	<i>Ervaring toepassing als heavescherm.....</i>	14
3.3.2	<i>Toepassingsgebied kunststof heavescherm</i>	15
4	Ontwerp	16
4.1	<i>Inleiding.....</i>	16
4.2	<i>Systeembeschrijving.....</i>	16
4.2.1	<i>Fysieke decompositie</i>	16
4.2.2	<i>Functionele decompositie.....</i>	17
4.3	<i>Waterveiligheidsontwerp</i>	18
4.4	<i>Constructief ontwerp.....</i>	19
4.4.1	<i>Vergelijking sterkte-eigenschappen kunststof en stalen heaveschermen</i>	20
4.4.2	<i>Nadere ontwerpdetailering</i>	20
4.5	<i>Duurzaamheid.....</i>	22
5	Analyse bedreigingen waterveiligheid	23
5.1	<i>Inleiding.....</i>	23
5.2	<i>Inventarisatie bedreigingen</i>	24
5.3	<i>Selectie van relevante bedreigingen voor uitwerking</i>	26
5.4	<i>Bedreiging A.1 Scherm ernstig uit het slot tijdens uitvoering en opening niet zanddicht</i>	27
5.4.1	<i>Faalpaden.....</i>	27
5.4.2	<i>Aanbevolen beheersmaatregelen</i>	29
5.4.3	<i>Conclusie.....</i>	30
5.5	<i>Bedreiging A.2 Lekkage door scherm</i>	30
5.6	<i>Bedreiging A.3 Verminderde pakking van zand vanwege voorboren</i>	31

5.7 <i>Bedreiging A.4 Verminderde pakking van zand langs het scherm door trekken van moederplank</i>	31
5.8 <i>Bedreiging A.14 Opbarsten en kwelweg aan bovenstroomse zijde van scherm</i>	31

6 Beheersmaatregelen uitvoering 33

6.1 <i>Inleiding</i>	33
6.2 <i>Uitgevoerde maakbaarheidsproeven</i>	34
6.2.1 <i>Toelichting maakbaarheidsproeven</i>	34
6.2.1.1 <i>Dijkversterking Mook</i>	34
6.2.1.2 <i>Dijkversterking Wolferen - Sprok</i>	34
6.2.1.3 <i>Dijkversterking Heel & Beesel</i>	35
6.2.1.4 <i>Dijkversterking Zwolle - Olst</i>	35
6.2.1.5 <i>Dijkversterking Sterke Lekdijk, Wijk bij Duurstede - Amerongen</i>	35
6.2.2 <i>Toegepast materieel</i>	35
6.2.2.1 <i>Dijkversterking Mook</i>	35
6.2.2.2 <i>Dijkversterking Wolferen - Sprok</i>	35
6.2.2.3 <i>Dijkversterking Heel & Beesel</i>	38
6.2.2.4 <i>Dijkversterking Zwolle - Olst</i>	38
6.2.3 <i>Installatieproces</i>	38
6.2.3.1 <i>Dijkversterking Wolferen - Sprok</i>	38
6.2.3.2 <i>Overige dijkversterkingen</i>	39
6.2.4 <i>Aanbrengen heisleuf</i>	39
6.2.5 <i>Productiesnelheid</i>	39
6.2.5.1 <i>Dijkversterking Mook</i>	39
6.2.5.2 <i>Dijkversterking Wolferen - Sprok</i>	39
6.2.5.3 <i>Dijkversterking Heel & Beesel</i>	40
6.2.5.4 <i>Dijkversterking Zwolle - Olst</i>	40
6.3 <i>Beheersmaatregelen gericht op functioneren van de pipingmaatregel</i>	40
6.3.1 <i>Monitoring tijdens realisatie</i>	41
6.3.2 <i>Detectie tijdens installatie</i>	42
6.3.3 <i>Herstelmaatregelen bij openingen in damwanden</i>	43
6.4 <i>Maakbaarheid: beheersmaatregelen gericht op kwaliteit en efficiëntie van uitvoering</i> ...	46
6.4.1 <i>Algemeen</i>	46
6.4.2 <i>Grondonderzoek</i>	46
6.4.3 <i>Correctie damwand tijdens uitvoering</i>	46
6.4.4 <i>Optimale werkrichting</i>	47
6.4.5 <i>Toepassing van stalen moederplank</i>	47
6.4.6 <i>Selectie van het optimale type damwandprofiel</i>	47
6.4.7 <i>Water toevoegen in heisleuf</i>	49
6.4.8 <i>Toepassen kleefonderbrekers</i>	49
6.4.9 <i>Vorboren</i>	49
6.4.10 <i>Voorprikken</i>	50
6.4.11 <i>Aanpassen machineconfiguraties</i>	50
6.4.12 <i>Fluïderen</i>	50
6.4.13 <i>Toepassen makelaar</i>	50
6.5 <i>Omgevingsbeïnvloeding</i>	51
6.5.1 <i>Trillingen</i>	51
6.5.2 <i>Geluid</i>	51
6.5.3 <i>Conusweerstand</i>	52
6.5.4 <i>Pakkingsgraad zand</i>	52

6.5.5	Vervormingen	52
6.6	Veiligheid tijdens de bouw	52
6.7	Kwaliteitsborging	53
7	Beheersmaatregelen levensduur	55
7.1	Inleiding	55
7.2	Beheersmaatregelen gericht op het functioneren van de pipingmaatregel	56
7.2.1	Lengtebepaling van kunststof damwanden	56
7.2.2	Detecteren van openingen in kunststof damwanden	56
7.2.3	Inspecteren tijdens hoogwater	56
7.2.4	Kwaliteit van kunststof	57
7.3	Beheersmaatregelen gericht op adaptiviteit	57
7.3.1	Verwijderbaarheid	57
7.4	Beheersmaatregelen gericht op duurzaamheid	57
7.5	Beheersmaatregelen gericht op beheerbaarheid	57
7.5.1	Registratie en vastlegging van de gerealiseerde constructie	57
8	Doorontwikkeling	59
8.1	Welke ontwikkelstappen zijn gemaakt?	59
8.2	Aanbevelingen (estafetteestokje)	59
9	Referenties	60
Bijlage A Referenties naar achtergronddocumenten		
Bijlage B Technische specificaties kunststof damwanden		
Bijlage C Duurzaamheidscertificaten damwandleveranciers		
Bijlage D Ervaringen grondonderzoek dijkversterking Wolferen-Sprok		
Bijlage E Getallenvoorbeeld 'kansbijdrage doorloopseheid als gevolg van uit het slot lopen'		

Afkortingenlijst

ALH	Achterloopsheid
BLH	Bovenloopsheid
BOI	Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium
DIV	De Innovatieversneller
DLH	Doorloopsheid
EEM	Eindige-elementenmethode
ENW	Expertise Netwerk Waterveiligheid
FMECA	Failure Mode Effect & Criticality Analysis
HWBP	Hoogwaterbeschermingsprogramma
IPLO	Informatiepunt Leefomgeving
MKI	Milieukosten indicator
OBOR	Ontwerp-, Beoordelings- en Onderhoudsrichtlijn
OI	Ontwerp Instrumentarium
OLH	Onderloopsheid
PBM	Persoonlijke beschermingsmiddelen
POV	Projectoverstijgende Verkenning
VLH	Voorloopsheid
WBI	Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Bij dijkversterking Wolferen - Sprok zijn kunststof damwanden aangebracht over een lengte van 4,6 kilometer. Dit is het eerste dijkversterkingsproject waarbij kunststof damwanden grootschalig als heavescherm zijn toegepast. In dit project is eerst kennis opgedaan bij een tweetal uitvoeringsproeven met kunststof damwanden, waarbij intensief is gemonitord. Tussen 2021 en 2025 is de versterking uitgevoerd. Daarbij is de aannemer geconfronteerd met nieuwe uitdagingen en zijn passende oplossingen bedacht. In deze Ontwerp-, Beoordelings- en Onderhoudsrichtlijn voor kunststof heaveschermen (OBOR Kunststof heaveschermen) worden de ervaringen en leerpunten samengevat, zodat hier bij volgende dijkversterkingen nuttig gebruik van kan worden gemaakt.

Voor recente ervaringen en achtergrondinformatie is verder navraag gedaan bij de aannemerscombinatie De Betuwse Waard en leveranciers van kunststof damwanden. Daarnaast is informatie uit andere, minder uitvoerig gedocumenteerde, dijkversterkingsprojecten meegenomen. De opgedane ervaringen en de reeds ontwikkelde kennis is in deze OBOR opgeschreven. Voor het opstellen is geen nieuwe kennis ontwikkeld.

Deze richtlijn is opgesteld door De Innovatieversneller in samenwerking met Fugro en aannemerscombinatie De Betuwse Waard.

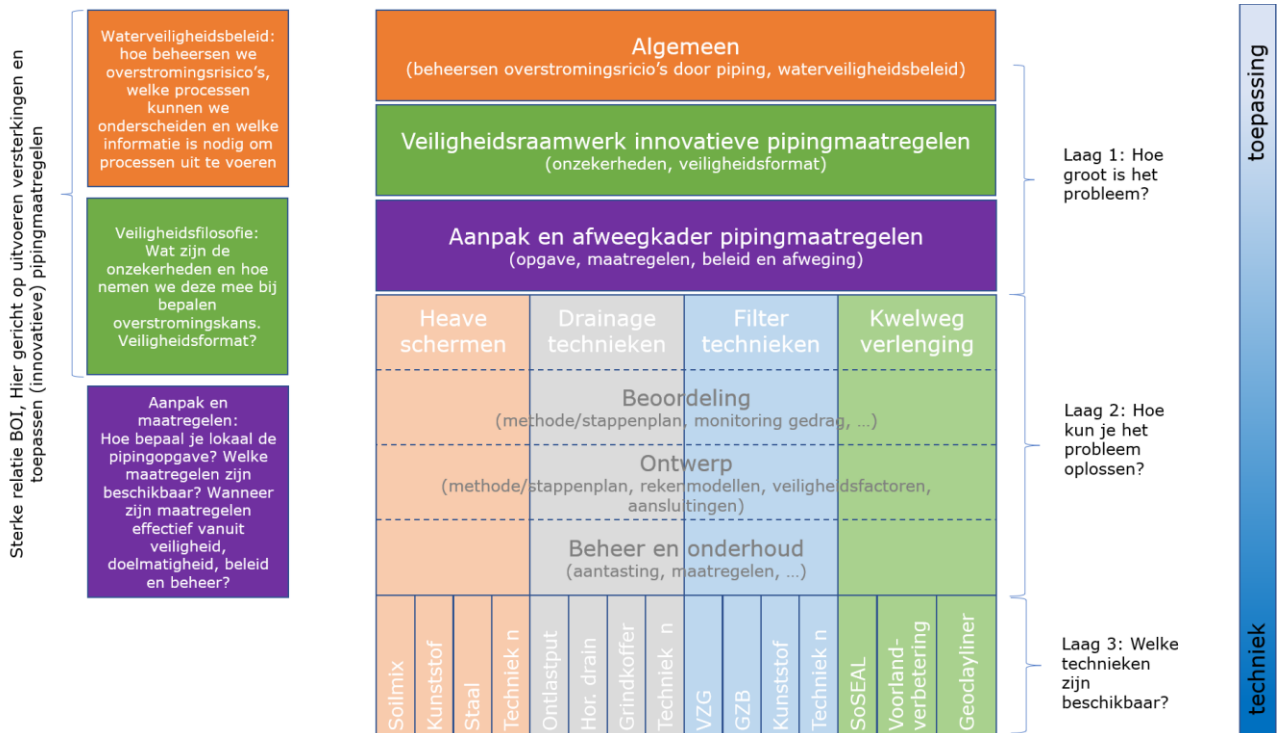
1.2 Doel

Het doel van dit document is om een richtlijn te bieden voor het beoordelen, ontwerpen en beheren van kunststof heaveschermen. De inhoud van dit document is gebaseerd op de opgedane ervaringen en reeds ontwikkelde kennis van aannemers en leveranciers van kunststof damwanden.

1.3 Relatie met andere leidraden en documentatie

Binnen De Innovatieversneller worden rondom piping zeven publicaties opgesteld. De publicaties bevatten handreikingen voor het uitvoeren van pipinganalyses en ontwerpen van pipingmaatregelen waarvan toepassing nog niet algemeen gangbaar is in de huidige praktijk.

Er zijn drie generieke publicaties en vier maatregelspecifieke publicaties. De algemene publicaties kunnen worden gebruikt voor het analyseren van het probleem. Bij de maatregelspecifieke publicaties staan de verschillende oplossingsrichtingen centraal. Bij deze publicaties worden in zelfstandig leesbare bijlagen voor verschillende technieken Ontwerp-, Beoordelings- en Onderhoudsrichtlijnen (OBOR's) opgesteld. Alle documenten zijn zodanig opgebouwd dat de algemene principes uit generieke publicaties in de maatregelspecifieke publicaties zijn geconcretiseerd en tot concrete handvatten zijn uitgewerkt in de OBOR's. Figuur 1-1 geeft een schematisch overzicht van de publicaties.



Figuur 1-1 Structuur publicaties DIV Piping

De publicaties van het DIV sluiten qua filosofie en opbouw aan op het Beoordelings- en Ontwerpinstrumentarium. Deze publicaties zijn gebaseerd op dezelfde filosofie van omgaan met overstromingskansen als het BOI-instrumentarium en hanteren dezelfde methoden en begrippen.

De handleidingen en technische leidraden van het BOI bevatten algemeen toepasbare generieke kennis en instrumenten. De DIV-publicaties bevatten kennis en innovaties die nog deels in ontwikkeling zijn of waarvoor beperkte ervaring is. De voorliggende OBOR kunststof heaveschermen sluit aan op het Veiligheidsraamwerk innovatieve pipingmaatregelen [2], waarmee de aansluiting op het BOI geborgd is. Bovenliggend is de Publicatie Heaveschermen [3]. In hoofdstuk 2 wordt nader ingegaan op de samenhang met deze documenten.

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

1.4 Doelgroep

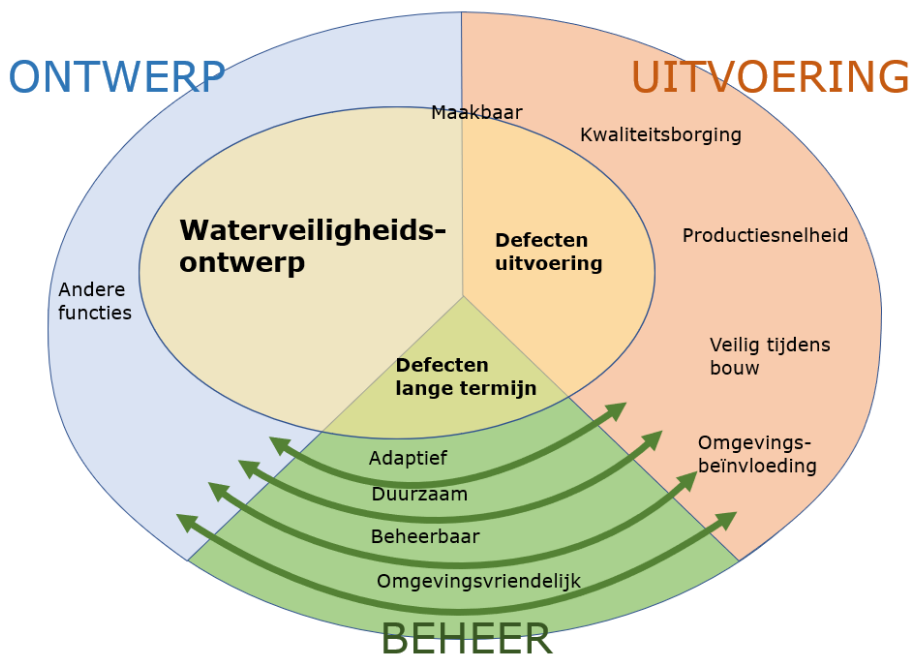
Deze OBOR is bedoeld voor dijkwerkers die bezig zijn of gaan met het ontwikkelen, ontwerpen, uitvoeren, beoordelen of beheren van kunststof damwanden als heavescherm. Ook kan deze OBOR nuttig zijn voor dijkwerkers die bezig zijn met de verkenning of planuitwerking en kennis willen nemen van de werking, de eigenschappen en status van kennisontwikkeling rondom kunststof damwanden. Van deze dijkwerkers wordt verondersteld dat ze bekend zijn met de voorschriften, de (deel)faalmechanismen en met modellen die voor deze (deel)faalmechanismen van toepassing zijn. Tevens wordt ervan uitgegaan dat informatie opgenomen in de documenten van het BOI bekend is.

1.5 Leeswijzer

In de OBOR Kunststof heaveschermen wordt ingegaan op het ontwerp, de uitvoering en het beheer van kunststof heaveschermen. In Figuur 1-2 is dit geïllustreerd.

Hieronder is de leeswijzer per hoofdstuk gegeven:

- Hoofdstuk 2: dit hoofdstuk beschrijft de samenhang tussen het waterveiligheidsontwerp zoals beschreven in deze OBOR, de Publicatie Heaveschermen [3] en het Veiligheidsraamwerk [2].
- Hoofdstuk 3: dit hoofdstuk beschrijft het werkend principe van een heavescherm als pipingmaatregel en het verhaal van de innovatie rond kunststof heaveschermen.
- Hoofdstuk 4: dit hoofdstuk beschrijft het waterveiligheidsontwerp (basisontwerp), oftewel hoe een heavescherm kan worden ontworpen als pipingmaatregel. De aanpak hangt nauw samen met de inhoud van de Publicatie Heaveschermen [3] en het hoofdstuk beschrijft daarnaast welke ontwerpaspecten specifiek voor kunststof heaveschermen van belang zijn.
- Hoofdstuk 5: in dit hoofdstuk staat het inventariseren van mogelijke bedreigingen ten aanzien van waterveiligheid centraal. De aanpak van een Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA) wordt daarbij toegepast op de kunststof heaveschermen.
- Hoofdstuk 6: dit hoofdstuk behandelt praktijkervaringen met uitvoeringsmethodes en beheersmaatregelen die gericht zijn op het uitvoeringsproces, op de werking van het systeem (waterveiligheid), op omgevingsbeïnvloeding en op veiligheid tijdens de realisatie.
- Hoofdstuk 7: dit hoofdstuk beschrijft de koppeling van het ontwerp op thema's als adaptief ontwerpen, duurzaamheid, beheerbaarheid, het lange termijn gedrag en eventuele beheersmaatregelen vanuit beheer.
- Hoofdstuk 8: dit hoofdstuk beschrijft de (benodigde) doorontwikkeling van kunststof heaveschermen.



Figuur 1-2 Aspecten die in deze OBOR aan bod komen

2 Samenhang met het Veiligheidsraamwerk en de Publicatie Heaveschermen

2.1 Samenhang met het Veiligheidsraamwerk

Deze OBOR sluit aan op de veiligheidsfilosofie uit de publicatie Veiligheidsraamwerk [2], waarin generiek en procesmatig is beschreven hoe kan worden aangetoond dat een pipingmaatregel voldoet aan de maximaal toelaatbare overstromingskans voor het mechanisme piping. Het veiligheidsraamwerk sluit aan op de uitwerking van de handleidingen en technische leidraden van het BOI.

Onderstaande stappen uit het veiligheidsraamwerk worden gevolgd:

1. Opstellen van het verhaal van de innovatie.
2. Systeemeisen: met als aandachtspunten voor heaveschermen het lengte-effect, faalkansruimte en of wordt ontworpen op een doorsnede of een vak met een bepaalde lengte.
3. Systeembeschrijving: werkend principe en modellen waarmee de veiligheid kan worden aangetoond.
4. FMECA aanpak: hierin wordt op basis van de systeembeschrijving gestructureerd bepaald hoe de kering met scherm kan falen en welke maatregelen hiervoor te treffen zijn om dit uit te sluiten. Zo blijven er een beperkt aantal gebeurtenissen over die niet direct uitgesloten kunnen worden op basis van een beheersmaatregel, en die in faalpadenanalyses verder worden onderbouwd.
5. Faalpaden: hierin wordt kwantitatief uitgewerkt hoe de veiligheid van de belangrijkste faalpaden wordt onderbouwd.
6. Verificatie: hierin worden alle maatregelen in samenhang beschouwd die nodig zijn voor het onderbouwen van de veiligheid.

In Tabel 2-1 is aangegeven in welke hoofdstukken in de OBOR de verschillende stappen uit het veiligheidsraamwerk worden behandeld.

Tabel 2-1 Aansluiting van hoofdstukken in de OBOR op het Veiligheidsraamwerk [2]

OBOR Kunststof heaveschermen		Publicatie Veiligheidsraamwerk
Onderwerp	Hoofdstuk	Onderwerp
Samenhang met het Veiligheidsraamwerk en de Publicatie Heaveschermen	2	Stap 2 Systeemeisen (relatie met overstromingskans)
Kunststof damwanden als heavescherm	3	Stap 1 Verhaal van de innovatie Stap 3 Systeembeschrijving
Ontwerp	4	Stap 3 Systeembeschrijving Stap 2 Systeemeisen (per component)
Analyse bedreigingen waterveiligheid	5	Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA)
Beheersmaatregelen uitvoering	6	Beheersmaatregelen uitvoering en verificatie
Beheersmaatregelen levensduur	7	Beheersmaatregelen beheer en verificatie
Doorontwikkeling	8	n.v.t.

2.2 Samenhang met de Publicatie Heaveschermen

In de Publicatie Heaveschermen [3] is er meer aandacht besteed aan faalpadbeschrijving, modellen en criteria en het toepassen van het veiligheidsraamwerk op heaveschermen in het algemeen, waarbij met name wordt uitgegaan van een gesloten heavescherm. Daarbij gaat de meeste aandacht uit naar onderlooptheid. Dit is doorgaans het belangrijkste faalpad voor het ontwerp qua kosten, waarover in bestaande technische leidraden betrekkelijk weinig specifieke uitleg is gegeven.

In deze OBOR is vooral gekeken naar specifieke bedreigingen voor een kunststof heavescherm. Deze bedreigingen kunnen ontstaan door defecten tijdens de uitvoering, defecten die optreden bij ontwerpbelastingen of lange termijn effecten. Voor een volledige veiligheidsanalyse van het ontwerp zullen dus zowel de generieke aanbevelingen voor heaveschermen uit de Publicatie Heaveschermen als de specifieke aanbevelingen voor kunststof heaveschermen uit deze OBOR moeten worden gebruikt.

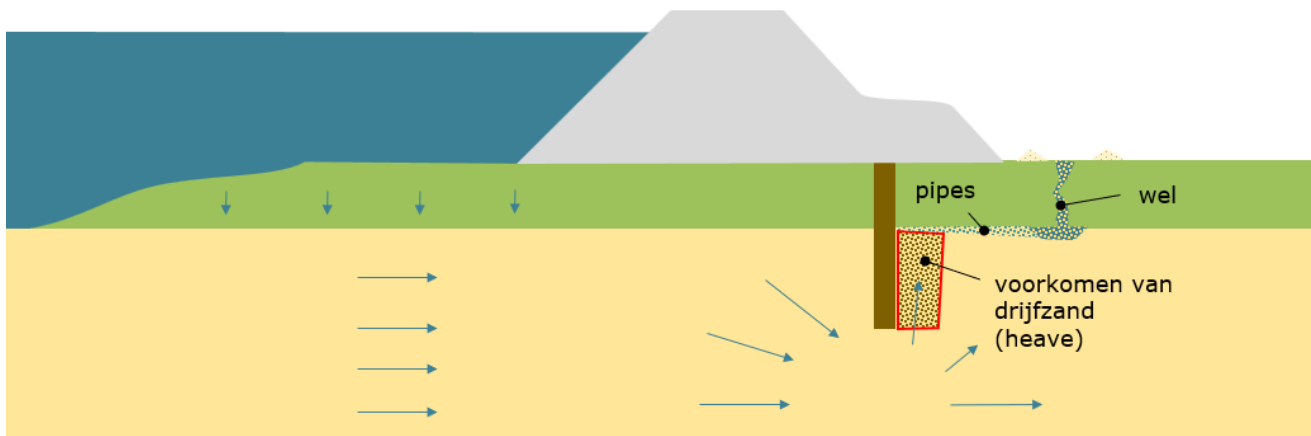
3 Kunststof damwandscherm als heavescherm

3.1 Inleiding

Voorliggend document gaat in op het toepassen van kunststof heaveschermen. Hierbij wordt in plaats van een stalen damwandscherm een kunststof damwandscherm de grond in gebracht. Vanwege het materiaal (PVC) dient een afwijkende uitvoeringsmethode toegepast worden. In deze OBOR is aangegeven op welke aspecten men bedacht moet zijn wanneer dit specifieke materiaal en de bijbehorende uitvoeringsmethode wordt toegepast. In dit hoofdstuk wordt ten eerste ingegaan op het algemeen werkend principe van een heavescherm. Vervolgens wordt overzicht geven van de ervaringen die zijn opgedaan met het toepassen van kunststofschermen. Voor een algemene beschrijving van de verschillende faalpaden die kunnen leiden tot falen door piping bij heaveschermen, wordt verwezen naar de Publicatie Heaveschermen [3]. In de hoofdstukken 4 Ontwerp, 5 Analyse van de betrouwbaarheid van het systeem, 6 Uitvoering en 7 Beheer komen de relevante faalpaden voor kunststof heaveschermen aan de orde.

3.2 Werkend principe kunststof heavescherm

Een heavescherm voorkomt dat het proces van terugschrijdende erosie zich doorzet onder de dijk, zoals dat mogelijk is bij een groene dijk zonder heavescherm. Het scherm zorgt er namelijk voor dat de kwelstroom ter plaatse van het scherm van richting verandert: bij het scherm gaat de stroming ofwel onder het scherm door ofwel zijwaarts langs het scherm. Bij sterke opwaartse stroming achter het scherm kan drijfzand ontstaan wanneer de kwelstroom en waterdruk dermate sterk is dat dit de korrelspanning reduceert naar nul: *hydraulic heave*. Wanneer er door opwaartse stroming in een grotere zone achter een scherm drijfzand optreedt, wordt deze grond instabiel. Wanneer drijfzand ontstaat over de volledige hoogte van het scherm kan een erosiepijp het scherm passeren en zal de totale weerstand tegen piping enkel nog afhangen van de weerstand tegen piping van het deel bovenstroomse deel van het scherm.



Figuur 3-1 Werkend principe van een heavescherm

Zoals de naam al aangeeft berust de werking van het heavescherm op het tegengaan van een toestand van *hydraulic heave* over de hoogte van het scherm aan de benedenstroomse zijde. In deze toepassing zal het heavescherm echter niet voorkomen dat andere initiële processen kunnen plaatsvinden, zoals het optreden van zandmeevoerende wellen; het begin van pijpgroei tussen de wel en het scherm; of lokale fluïdisatie direct onder de deklaag. Het scherm functioneert als pipingmaatregel zolang deze initiële processen zich niet doorzetten tot erosiepijpen die het scherm passeren.

De werking van een kunststof heavescherm is niet anders dan een houten of stalen heavescherm.

3.3 Verhaal van de innovatie

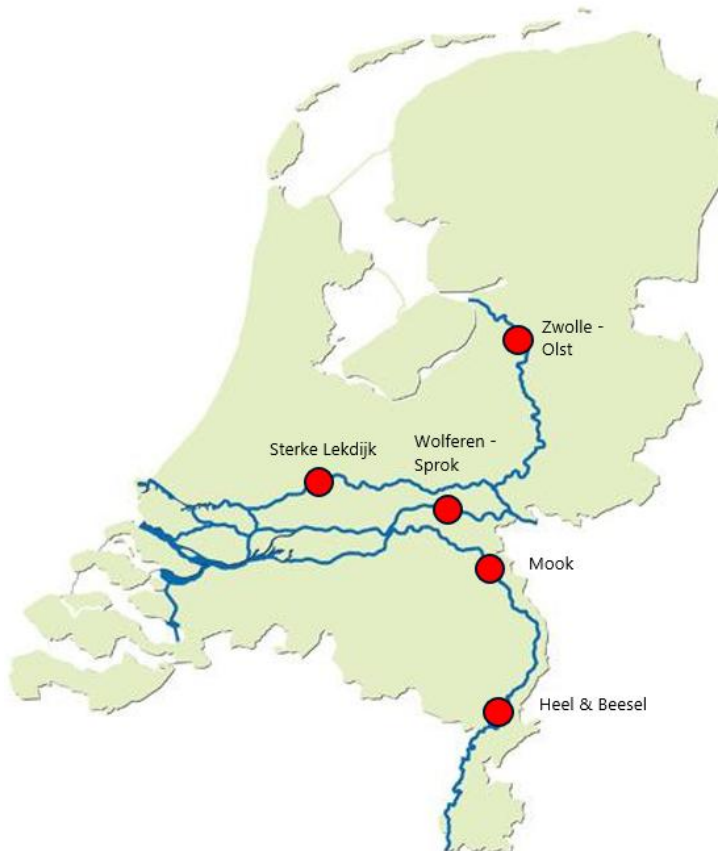
3.3.1 Ervaring toepassing als heavescherm

In 1838 is het materiaal polyvinylchloride (PVC) ontdekt door Henri Victor Regnault. In 1926 ontwikkelde Waldo Seman een methode om PVC te plastificeren door verschillende additieven toe te voegen. Het resultaat was een flexibel en eenvoudig te bewerken materiaal, waardoor dit kunststofproduct sinds de jaren '50 van de vorige eeuw breed toepasbaar werd in vele commerciële producttoepassingen. Kunststof damwanden bestaan sinds de jaren '80 van de vorige eeuw. Ze worden vooral toegepast als beschoeiing of als grondwaterkerend scherm (o.a. bij saneringen) en niet als constructief scherm, omdat de sterkte en stijfheid te klein zijn om grote krachten te kunnen opvangen [4].

In Nederland werden de kunststof damwanden veelal vooral als oeverbescherming toegepast, maar ook als kwelscherm en dichtschermb. Sinds 2018 worden kunststof damwanden als heavescherm toegepast in Nederlandse dijken. In Figuur 3-2 en Tabel 3-1 is een overzicht gegeven van dijkversterkingen met kunststof heaveschermen.

Tabel 3-1 Dijkversterking met kunststof heaveschermen

Jaar	Dijkversterking	Damwandlengte	Tracélengte	Bron
2018	Mook, Bergen – Aijen, Afferden	7 m	onbekend	[5]
2020	Wolferen – Sprok (1e maakbaarheidsproef)	10 - 12 m	21 m	[6]
2021	Wolferen – Sprok (2e maakbaarheidsproef)	7,5 - 11,5 m	10 m	[7]
2021 e.v.	Wolferen – Sprok (realisatie)	7,5 - 11,5 m	4.595 m	[8]
2021 e.v.	Sterke Lekdijk, Prolock Delta Filterschermb	onbekend	onbekend	Niet beschouwd
2021 e.v.	Heel & Beesel (maakbaarheidsproef)	8 m	10 m	[9] [10]
2022 e.v.	Zwolle – Olst (maakbaarheidsproef)	8 - 14 m	20 m	[11]
2024 e.v.	Sterke Lekdijk, Wijk bij Duurstede- Amerongen (maakbaarheidsproef)	7,5 - 13 m	2 x 80 m	Nog geen rapportage



Figuur 3-2 Dijkversterkingen met kunststof heavescherm

3.3.2 Toepassingsgebied kunststof heavescherm

Een kunststof heavescherm heeft een maximale lengte. Deze bedraagt tot nu toe 14 m, maar kan waarschijnlijk nog iets worden vergroot bij een optimale uitvoeringstechniek en gunstige bodemopbouw. De belangrijkste beperkende factoren zijn installeerbaarheid en barrièrewerking. De installeerbaarheid van een kunststof damwand is doorgaans complexer dan een stalen damwand. De kunststof is zonder stalen moederplank namelijk onvoldoende stijf en sterk is om in vastgepakte lagen te worden geïnstalleerd. Daarom wordt in de praktijk veelal een stalen hulpplank gebruikt. Dat leidt tot voldoende sterkte en stijfheid, maar ook tot een aanzienlijk hogere indringweerstand.

Vanwege de maximale lengte, zijn kunststof heaveschermen vooral relevant bij relatief dunne deklagen bij de binnenteen van de dijk. Deze situatie is veelal aanwezig in het bovenrivierengebied.

4 Ontwerp

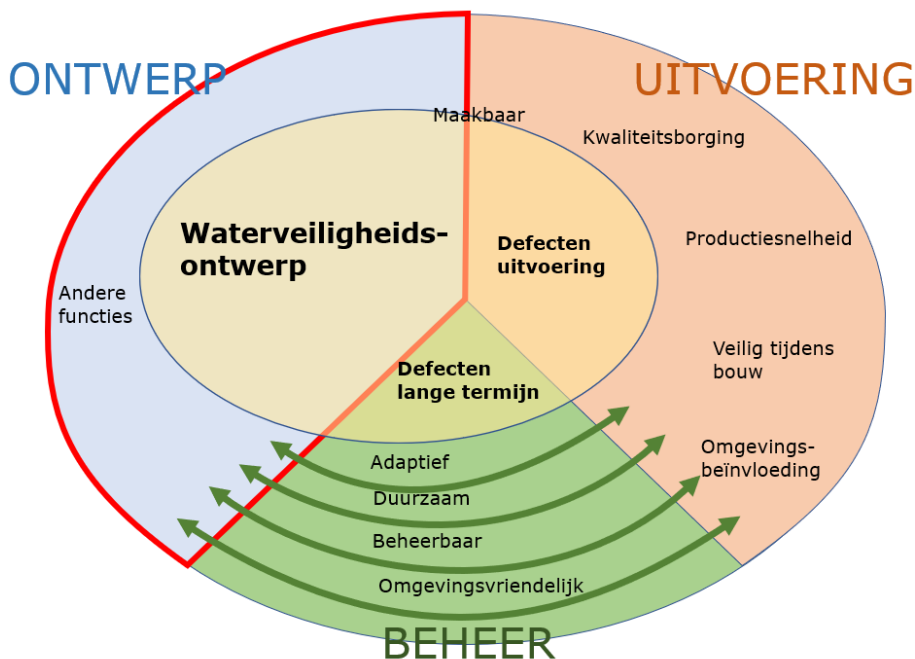
4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk staat voornamelijk het waterveiligheidsontwerp centraal, zie Figuur 4-1. In het figuur is weergegeven dat het ontwerp vele raakvlakken heeft met uitvoering en beheer. Naast waterveiligheid zijn er dus ook andere aspecten die een belangrijke invloed kunnen hebben op het ontwerp. Gedacht kan worden aan:

- Inpasbaarheid en omgevingsbeïnvloeding;
- Maakbaarheid;
- Constructieve sterkte;
- Adaptief ontwerpen rekening houdend met uitbreidbaarheid en verwijderbaarheid;
- Duurzaamheid;
- Beheerbaarheid.

Soms is er een voorkeur voor het toepassen van een specifieke techniek vanwege een innovatiedoelstelling of de beschikbaarheid van kennis en ervaring bij een ontwerpende of uitvoerende partij.

Dit hoofdstuk behandelt voornamelijk het waterveiligheidsontwerp. In paragraaf 4.2 en 4.3 wordt ingegaan op generieke ontwerpaspecten van kunststof heaveschermen. In paragraaf 4.4 wordt ingegaan op het constructief ontwerp, en in paragraaf 4.5 op de duurzaamheid van kunststof heaveschermen. De bovengenoemde zaken die naast waterveiligheid een rol spelen komen grotendeels aan bod in hoofdstuk 6 (Uitvoering) en 7 (Beheer).



Figuur 4-1 Hoofdstuk 4 gaat over het ontwerp, oftewel alles binnen de rode lijn

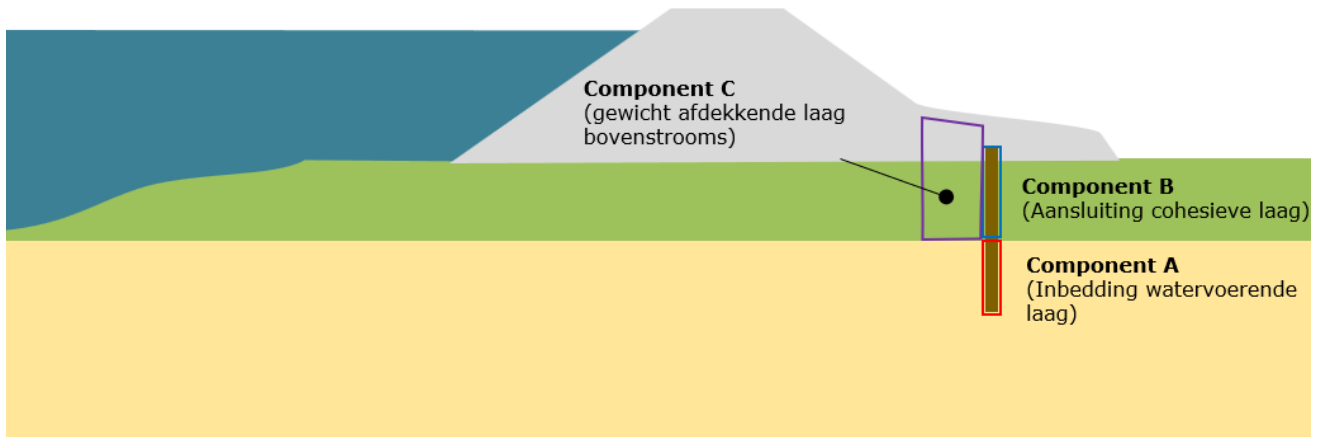
4.2 Systembeschrijving

4.2.1 Fysieke decompositie

In Figuur 4-2 is een voorbeeld gegeven van een kunststof heavescherm onder de binnenberm van een dijk. Het is een eenvoudig systeem dat opgedeeld kan worden in drie fysieke componenten:

- A. Het deel inbedding van het scherm in de watervoerende laag;

- B. De aansluiting op de cohesieve laag;
- C. Het gewicht van de deklaag/dijk aan de bovenstroomse zijde van het scherm.



Figuur 4-2 Situatieschets heavescherm met componenten A, B en C

4.2.2 Functionele decompositie

In Tabel 4-1 zijn de onderdelen van het waterveiligheidsontwerp van een kunststof heavescherm weergegeven. De tabel geeft de samenhang weer tussen de eigenschappen van de diverse componenten van het heavescherm en de waterveiligheidsfuncties. De tabel geeft ook een referentie naar de paragrafen waarin de verschillende onderdelen worden toegelicht.

Tabel 4-1 Samenhang eigenschappen componenten en waterveiligheidsfuncties

Onderdelen waterveiligheidsontwerp	Relevant voor faalpad	Functie	Toegelicht in
Inbeddingsdiepte in zand (comp. A)	Onderloopsheid	Scherm diep genoeg om onderloopsheid te voorkomen	Paragraaf 4.3, uitgebreider in Publicatie Heaveschermen [3]
Positie in dwarsprofiel dijk (comp. A, B en C)	Voorloopsheid	Voldoende dekking om opbarsten of voorloopsheid te voorkomen	Paragraaf 4.3, uitgebreider in Publicatie Heaveschermen [3]
	Onder-, door-, over- of achterloopsheid a.g.v. breken of scheuren wand	Voorkomen overbelasting (breken of scheuren) van scherm. Scherm staat op plek waar mogelijke belasting voldoende laag.	Paragraaf 4.4
	Andere faalmechanismen (niet piping)	Voorkomen andere faalmechanismen dan piping door pijpvormings-proces achter scherm	Publicatie Heaveschermen [3]
Afwerking en aansluiting bovenkant scherm op cohesieve laag (comp. B)	Bovenloopsheid	Goede zanddichte aansluiting op cohesieve laag zodat geen bovenloopsheid kan ontstaan, ook checken op mogelijke vervormingen van dijk	Publicatie Heaveschermen [3]
Constructieve eigenschappen scherm (comp. A en B)	Onder-, door-, over- of achterloopsheid	Scherm dient intact en zanddicht te zijn onder alle mogelijke belastingen. Scherm moet voldoende sterk of flexibel zijn om belastingen te kunnen opnemen of opgelegde vervormingen te kunnen volgen.	Paragraaf 4.4
	Andere faalmechanismen (niet piping)	Voorkomen andere faalmechanismen dan piping door pijpvormings-proces achter scherm	Publicatie Heaveschermen [3]
Achterloopsheidscherm (lengte in bovenaanzicht en situering)	Achterloopsheid	Scherm dient lang genoeg doorgezet te worden in lengterichting van dijk voorbij de pipinggevoelige strekking	Publicatie Heaveschermen [3]

4.3 Waterveiligheidsontwerp

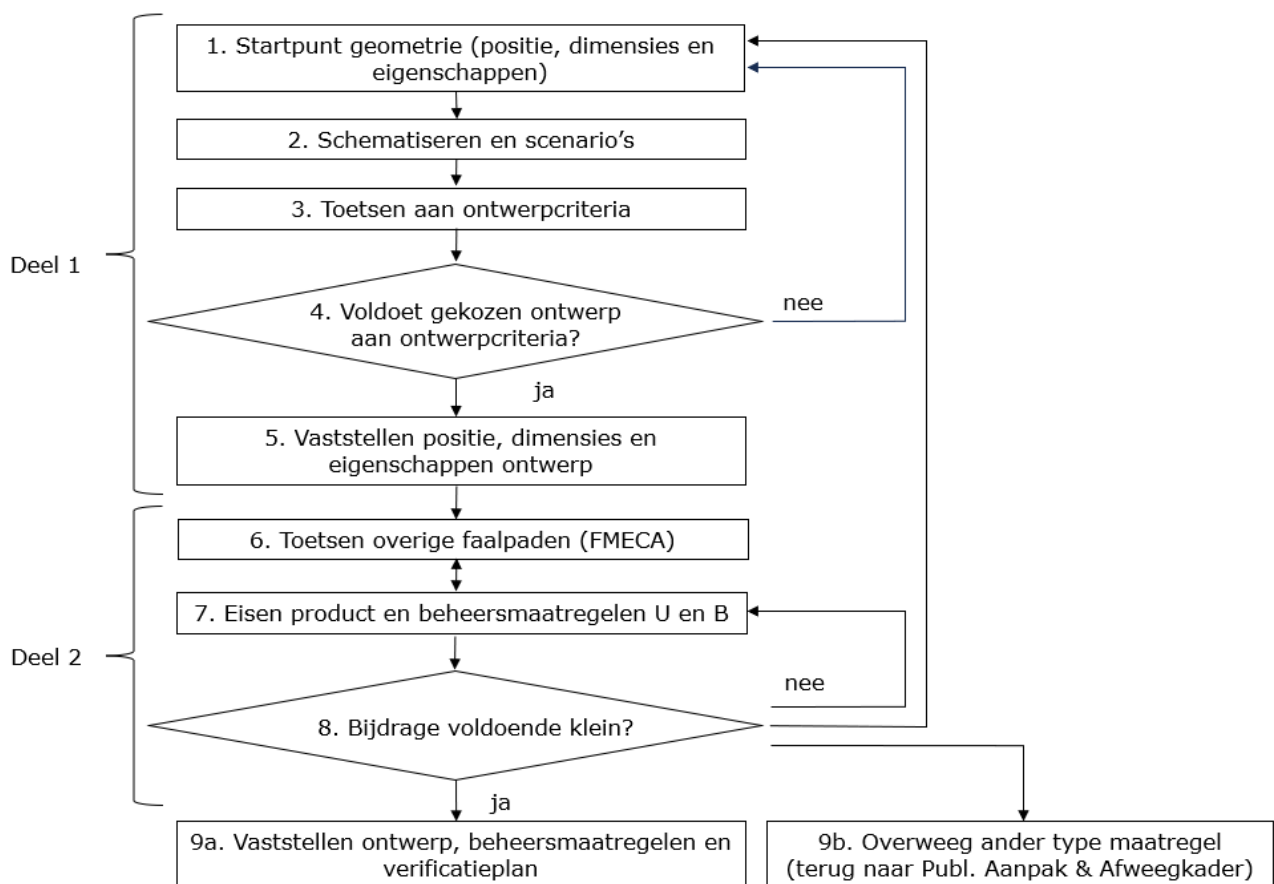
In Figuur 4-3 is een voorbeeld gepresenteerd van het volledige ontwerpproces om te komen tot een waterveiligheidsontwerp van een heavescherm. Deze aanpak bestaat in hoofdlijn uit twee delen:

1. het opstellen van het ontwerp;
2. een veiligheidsanalyse waarbij de betrouwbaarheid van het systeem wordt getoetst door het risico van mogelijke defecten aan het systeem te onderzoeken (FMECA-aanpak).

Zoals Figuur 4-3 aangeeft zijn er iteratieslagen mogelijk tussen het opstellen van het ontwerp en de betrouwbaarheidsanalyse van het systeem.

Voor het eerste deel, het opstellen van een ontwerp van een heavescherm, worden de faalpaden uit Tabel 4-1 beschouwd. Om te komen tot een ontwerp wat voldoet aan de gestelde ontwerpcriteria kunnen de volgende stappen worden doorlopen:

1. Bepalen van een startpunt ten aanzien van positie, dimensies en eigenschappen van het scherm;
2. Schematiseren van ondergrond en pijpstelsel en bepalen van scenario's;
3. Analyse ontwerpcriteria per scenario;
4. Evaluatie resultaten en eventuele bijstelling van positie, dimensies of eigenschappen van het scherm;
5. Vaststellen van het ontwerp, oftewel positie, dimensies en eigenschappen van het scherm.



Figuur 4-3 Voorbeeld ontwerpproces heaveschermen volgens aanpak van het Veiligheidsraamwerk [2]

Het tweede deel (6 t/m 8) bestaat voornamelijk uit het toetsen (en eventueel aanpassen) van het ontwerp aan de overige faalpaden die kunnen optreden, en die nog niet zijn meegenomen in deel 1. Voor deel 2 wordt de FMECA-aanpak gevolgd (zie hoofdstuk 2 en 5), waarmee alle bedreigingen voor het systeem worden beschouwd. Daarbij is het ook belangrijk om stil te staan bij overige ontwerpaspecten anders dan de waterveiligheid (zie Figuur 4-1).

Voor de uitwerking van de verschillende ontwerpstappen wordt verwezen naar de Publicatie Heaveschermen [3]. Met name voor kunststof heaveschermen is het bepalen van de positie van het scherm een zeer belangrijke ontwerpstep. De positie van het scherm bepaalt namelijk in belangrijke mate de krachten die vanuit grondrukken, vervormingen en maaiveldbelastingen op de constructie kunnen werken. Ook lokale afschuivingen, die an sich geen effect hebben op de overall geotechnische stabiliteit van de dijk en bij STBI niet als relevant glijvlak worden beschouwd, kunnen wel degelijk zorgen voor significante belastingen op het kunststof scherm. In [3] is nader ingegaan op de overwegingen die een rol kunnen spelen bij de positiekeuze van het scherm. In paragraaf 4.4 is verder toegelicht hoe een constructieve toets kan worden uitgevoerd bij een gekozen positie van het scherm. Zoals in Figuur 4-1 is aangegeven is een ontwerpproces iteratief waarbij na het doorlopen van de constructieve toets opnieuw kan worden geëvalueerd of de aanvankelijk gekozen positie de meest geschikte is voor dit type scherm.

4.4 Constructief ontwerp

Vervormingen van de grond rondom de kering kunnen leiden tot extra belasting op het scherm. Met name voor kunststof heaveschermen is daarom een controle op de constructieve eisen een essentieel onderdeel van het ontwerp. Dit wijkt enigszins af van stalen heaveschermen waarbij de installeerbaarheidseisen vaak bepalend zijn boven het constructief ontwerp. Een controle van het ontwerp van een kunststof heavescherm bestaat uit de volgende 4 checks:

- **Check 1:** Toets of alle glijvlakken¹ die het scherm snijden voldoende stabiel zijn (volgens vigerende beoordelings- en ontwerpinstrumenten). Hiermee wordt de kans op ernstige vervormingen door een afschuiving tijdens hoogwatercondities aanzienlijk verkleind. De stabiliteitsfactor is namelijk een goede maat voor ernstige vervormingen. In deze analyses wordt aangeraden om daarbij in eerste instantie uit te gaan van een stabiliteitseis voor STBI en terughoudend te zijn in het toepassen van de wand als weerstandbiedend element.
- **Check 2:** Analyseer het effect van de (werkzaamheden tijdens de) huidige en toekomstige dijkverzwaring en dagelijkse belastingen op wand. Toets de stabiliteit en de sterkte van de wand bij deze belastingen volgens de Eurocode. Maak daarbij onderscheid in:
 - *merkbaar falen*: deformaties of het breken van de wand worden gedetecteerd en kunnen tijdig hersteld worden. Toets de stabiliteit en sterkte van de wand in deze gevallen bij RC1. Voorbeelden: belastingen tijdens huidige en toekomstige dijkverzwaring, waarbij uitgangspunt is dat het risico op breken door grondvervormingen met adequate risicogestuurde monitoring tijdens de uitvoering en in de gebruiksfase wordt beheerst;
 - *niet merkbaar falen*: deformaties of het breken van de wand kunnen niet worden gedetecteerd. Het gaat hier om situaties die niet worden gemonitord en waarvan de effecten niet opvallen aan het maaiveld en dus ook bij een reguliere schouw onopgemerkt zullen blijven. Toets de stabiliteit en sterkte van de wand voor deze mogelijke situaties op RC3 (of RC2²). Voorbeeld: onderhoudswerkzaamheden, tijdelijke opslag van spullen op de dijk of berm, gebruiksbelasting, verkeer, toekomstige dijkverzwaring of verzwaringswerkzaamheden waarbij er minder mogelijkheden zijn voor een strikte risicogestuurde monitoring op risico's voor het kunststof damwandscherm.
- **Check 3:** Toets of er substantiële autonome deformaties van de dijk zijn te verwachten. Om de geschiktheid van het toepassen van vervormingssensitieve waterkerende elementen te kunnen beoordelen is van groot belang om in een vroeg stadium te weten of er significante autonome deformaties in het gebied zijn te verwachten. Deze inschatting kan gemaakt worden op basis van de volgende informatie:
 - Raadplegen van literatuur, zoals autonome bodemdalingskaart;
 - Onderzoek naar bodemopbouw (vervormingsgevoelige lagen);

¹ Dit beperkt zich dus niet tot de glijvlakken die als relevant worden gezien bij de analyse van de overstromingskans door macrostabiliteit. Lokale glijvlakken die de waterveiligheid niet significant beïnvloeden, maar wel impact kunnen hebben op het scherm, moeten getoetst worden.

² Start met RC3. Eventueel kan de betrouwbaarheidseis met een beschouwing van het faalpad, waarbij de kans op de bedreiging $P(S)$ en de kans op vervolgebeurtenissen gegeven het defect $P(F|S)$ worden beschouwd, naar beneden toe worden bijgesteld.

- Onderzoek naar laageigenschappen in relatie tot kruip, zwel/krimp en voorspellen van verticale deformaties met behulp van model en indicatie geven van mogelijke horizontale deformaties;
- Verplaatstingsgeschiedenis bepalen met op basis van metingen op land of vanuit lucht of ruimte (zoals INSAR);
- Metingen van dagelijkse en seizoensvervormingen van de dijk en ondergrond voorafgaand aan plaatsen van de wand;
- Controle metingen vervormingen van de wand enige tijd na plaatsing.

In het gebieden waar weinig deformatie te verwachten is, kan volstaan worden met de eerste twee stappen. Bij de aanwezigheid van slappe lagen onder de dijk is meer informatie nodig om het risico voldoende af te kunnen dekken.

- **Check 4:** zijn er andere gebeurtenissen die voor de specifieke locatie die tot extra belastingen op het kunststof heavescherm leiden?

Als één van bovenstaande checks 1 t/m 3 negatief uitvalt, overweeg dan om het ontwerp aan te passen door:

1. Aanpassing van de locatie van het kunststof heavescherm in de doorsnede van de dijk;
2. Toepassen van een ander type heavescherm dat makkelijker vervormingen van de grond kan opnemen zonder te breken (bijvoorbeeld een stalen damwand);
3. Toepassen van een ander type pipingmaatregel (zie stap 9b in Figuur 4-3).

4.4.1 *Vergelijking sterkte-eigenschappen kunststof en stalen heaveschermen*

Het verschil in sterkte-eigenschappen van staal ten opzichte van kunststof is weergegeven in Tabel 4-2. In Bijlage B zijn voor een groot aantal kunststof heaveschermen de sterkte-eigenschappen weergegeven. Benadrukt wordt dat kunststofschermen ook een (kleine) bijdrage kunnen leveren aan de macrostabiliteit van dijken indien ze ook die manier worden toegepast in het ontwerp.

Tabel 4-2 Vergelijking van sterkte-eigenschappen van staal ten opzichte van kunststof (voor twee veel toegepaste profielen)

	AZ12-700 (S240)	JLD 610 7.2
Breedte [mm]	700	606
Hoogte [mm]	314	200
Dikte [mm]	8,5	7,2
Weerstandsmoment [cm ³ /m]	1.205	774
Traagheidsmoment [cm ⁴ /m]	18.880	7743
Toelaatbaar Moment [kNm/m]	289	17
Stijfheid EI [kNm ² /m ¹]	39648	89
Massa [kg/m ²]	96,7	1,7

Kunststof heaveschermen zijn op zichzelf niet sterk genoeg om trillend in de grond te worden geïnstalleerd. Bij het installeren van de kunststofschermen wordt daarom een stalen moederplank gebruikt om de kunststofschermen trillend op diepte te brengen. Na installatie wordt de stalen moederplank trillend weer verwijderd.

4.4.2 *Nadere ontwerpdetailering*

In deze paragraaf worden enkele praktijkaspecten van het constructieve ontwerp behandeld.

Installatiediepte

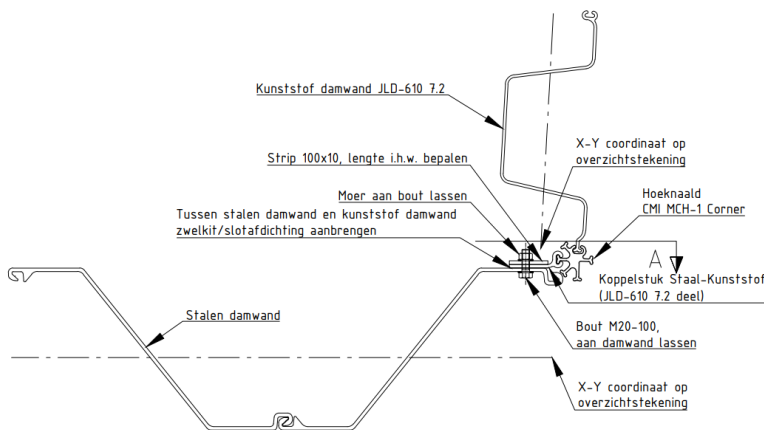
De installatiediepte van het scherm dient constant te blijven, dus het scherm mag niet wegzakken ten gevolge van negatieve kleeft in de deklaag. Het is belangrijk om dit te controleren in het ontwerp.

Afwerking kop heavescherm

Het heavescherm wordt verticaal ingebracht in het watervoerend pakket, waarbij de bovenzijde minimaal 0,5 m in de kleideklaag moet staan.

Aansluiting staal-kunststof

In veel gevallen dient het kunststof heavescherm waterdicht aangesloten te worden op een stalen damwand om een doorgaande waterdichte wand te vormen. Bij het aansluiten van een kunststofscherf aan een stalenscherf wordt een overgangsprofiel toegepast (zie Figuur 4-4). Hierbij wordt een kunststof profiel met slot aan de stalen damwand bevestigd en met zwelkit/slotafdichting wordt er dan een waterdichte aansluiting gemaakt. Na het aanbrengen van het overgangsprofiel kan het volgende kunststof scherm op de reguliere manier aangebracht worden. De aansluiting is vrijwel in elke hoek te realiseren omdat de strips aan meerdere kanten van de stalen damwand te boren zijn en het 'mannetje' of 'vrouwtje' van een kunststof plank eenvoudig te zagen zijn. Om kunststof hoeknaalden te voorkomen kan aan de binnenzijde van de damwandbuik worden aangesloten. In het algemeen zijn beperkt hoeknaalden toegepast omdat kunststof schermen redelijk flexibel zijn. Zodoende kunnen bochten wat flauwer worden ingezet en redelijk glooiend verlopen. Over het algemeen maakt dit het toepassen van kunststof schermen over langere lengtes met bochten en knikpunten eenvoudiger. Bij scherpe knikpunten of haakse hoeken van kunststof in de damwandlijn worden wel hoeknaalden toegepast.



DS-K.05 sp.
Rechte aansluiting Kunststof damwand op stalen damwand



Figuur 4-4 Toepassen overgangsconstructie stalen AZ-profiel en kunststof profiel

Gordingen

Zoals hierboven beschreven is de sterkte van kunststof heaveschermen op dit moment beperkt en wordt deze ook niet toegepast als stabiliteitsscherf. De haalbaarheid van het toepassen van kunststof schermen met een dubbelfunctie (stabiliteit en piping) is voornamelijk niet aangetoond. Dit betekent dat op dit moment

het niet nodig is om een gording toe te passen bij kunststof heaveschermen. Indien dit in de toekomst wel wordt aangetoond, dan dient de POVM publicatie langconstructies (PPL) [12] te worden gevolgd voor het toepassen van gordingen.

4.5 Duurzaamheid

Tijdens het ontwerp van kunststof heaveschermen is het belangrijk om goed naar de duurzaamheid en adaptiviteit van het ontwerp te kijken. De keuzes in het ontwerp hebben namelijk veel impact op de levensduur en het beheer van de kunststof heaveschermen, terwijl de ruimte voor aanpassingen na de ontwerpfase beperkt is. Daarnaast is het belangrijk om in het ontwerp rekening te houden met toekomstige dijkversterkingen of -verhogingen.

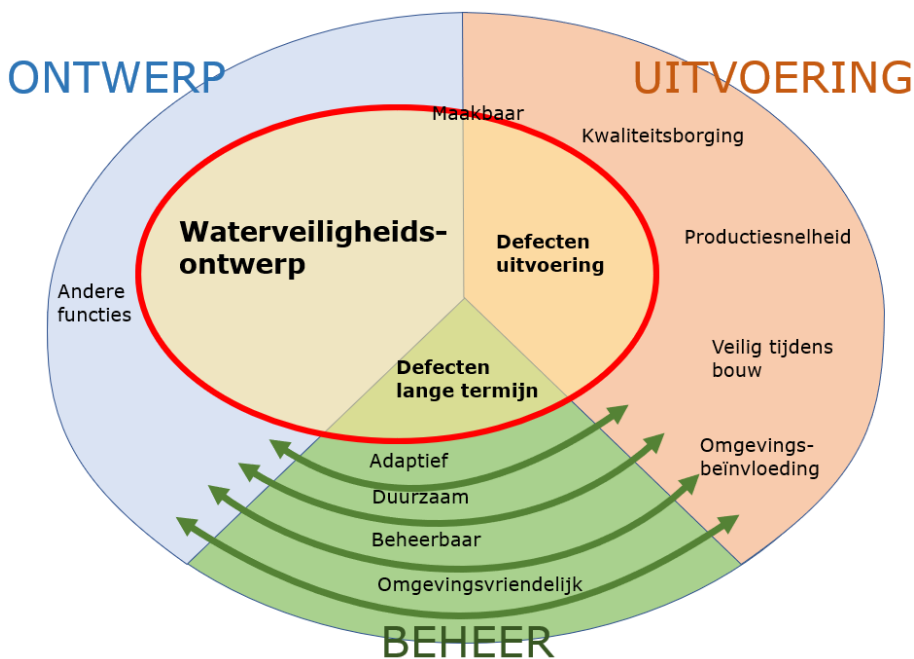
Kunststof heaveschermen hebben de volgende duurzaamheidsvoordelen:

- Ze bestaan grotendeels uit gerecycled materiaal. Bij dijkversterking Wolferen - Sprok is een vergelijking gemaakt tussen stalen heaveschermen en kunststof heaveschermen in DuboCalc. In DuboCalc kan de milieu-impact van materialen en producten kwantitatief worden vergeleken door middel van de Milieukosten indicator (MKI) en de CO₂-footprint. De kunststof damwand reduceert de CO₂ met 96 procent en de MKI met 94 procent ten opzichte van de stalen damwand (inclusief hergebruik schroot) per vierkante meter (artikel Land+Water [13]);
- Kunststof heaveschermen hebben een zeer laag gewicht, vooral in vergelijking met stalen damwanden. Dit maakt het transport naar locatie zeer efficiënt. Een gangbaar kunststof heavescherm van het type JLD 610 7.2 weegt bijvoorbeeld 1,7 kg/m². Een relatief lichte stalen damwand voor dijkversterkingen van het type AZ-18-700 weegt 109,3 kg/m²;
- Kunststof heaveschermen hebben naar verwachting een lange levensduur. Er hoeft niet, zoals bij stalen damwanden, te worden nagedacht over corrosie. Daarnaast is er door de statische toepassing onder de grond geen mechanische belasting die tot slijtage leidt. Uit onderzoek van het US Army Corps of Engineers [4] blijkt verder dat de oudste PVC-schermen die 50 jaar geleden in de zompige moerasgronden van de rivierendelta's in New Orleans zijn geplaatst, nauwelijks waren aangetast. De heaveschermen vertoonden weinig uiterlijke slijtage en de slagvastheid, buigzaamheid en trekkracht van het materiaal waren nog van prima kwaliteit. Door dit alles is de verwachting dat het scherm ook na een minimale levensduur van 100 jaar blijft functioneren in de grond. De verwachting dat het kwaliteitsverlies minimaal is, is bevestigd bij projecten waarbij kunststof schermen tientallen jaren na installatie worden getrokken [14] [15];
- Microplastics zijn kleine deeltjes, die ontstaan door het uit elkaar vallen van kunststof. De aanwezigheid van microplastics in het milieu wordt gezien als risico voor de gezondheid. Volgens diverse damwandleveranciers (ESC, Profectru, Pietrucha) is er geen sprake van uitloging of vrijkomen van microplastics bij PVC-damwanden. Dit komt omdat PVC diep onder de grond wordt toegepast en het niet wordt blootgesteld aan UV-straling die op lange termijn degradatie van het materiaal veroorzaakt. Daarnaast is er geen erosie door water en wind en geen oxidatie door zuurstof. PVC vertoont sowieso een verwaarloosbare uitloging in vergelijking met andere polymeren [14] [15].
- TNO en Deltares doen wetenschappelijk onderzoek naar uitloging van microplastics in de bodem. Daarin wordt niet specifiek gekeken naar damwanden, maar vooral naar zaken als geotextiel, geogrids en drainagematten. Als hulpmiddel heeft TNO voor diverse polymeren de MicroPlasticsIndex (MPI) bepaald. Deze drukt het deeltjesvormende vermogen van een materiaal uit. Polystyreen is het polymeer met hoogste MPI (7,2), PVC heeft een MPI van 4,6. Dit onderzoek sluit niet uit dat er risico's kleven aan microplastics door toepassing van kunststof in de grond. Er wordt echter benadrukt dat onderzoek naar microplastics complex is en dat er nog veel onduidelijkheden zijn. Oorzaken voor de onduidelijkheden zijn onder meer dat onderzoek zich tot nu toe vooral heeft gericht op water en nauwelijks op de bodem, dat er nog geen geharmoniseerde meetmethoden bestaan en dat vooral polystyreen is onderzocht [16] [17].
- Daarnaast zijn de materiaalkosten van kunststof doorgaans lager dan van staal.

5 Analyse bedreigingen waterveiligheid

5.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe de faalkansbijdrage van overige relevante bedreigingen kan worden bepaald, die niet met het eerste geometrisch ontwerp (beschreven in hoofdstuk 4) zijn afgedekt. Voor deze analyse is de werkwijze toegepast die is beschreven in het Veiligheidsraamwerk [2]. In dit raamwerk wordt de werkwijze van het uitvoeren van een Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA) beschreven. Het toepassen van een FMECA helpt de ontwerper om overzicht te krijgen van de relevante bedreigingen voor waterveiligheid, zie Figuur 5-1. Daarnaast dwingt een FMECA de ontwerper om oorzaak en gevolg op een evenwichtige wijze de beschouwen, zodat uiteindelijk de relevantie van de bedreiging kan worden bepaald.



Figuur 5-1 Hoofdstuk 5 gaat over de FMECA, oftewel de relevante bedreigingen voor de waterveiligheid, die zowel tijdens het ontwerp, de uitvoering of bij beheer kunnen optreden. Dit is weergegeven in de dikgedrukte rode cirkel.

Voor een juiste inventarisatie van de relevante bedreigingen is het belangrijk om goed onderscheid te maken tussen het optreden van een gebeurtenis, en wanneer deze gebeurtenis leidt tot falen. Een opening tussen twee kunststof planken is op zichzelf geen probleem indien het alleen water doorlaat. Pas als zand getransporteerd wordt door de opening en de pijp doorgroeit richting de rivier is sprake van falen.

Indien het effect van een bedreiging dusdanig groot is dat de vereiste faalkans niet kan worden aangetoond, dan zijn er verschillende mogelijkheden om tot een voldoende waterveilig ontwerp te komen:

- Aanpassing van het ontwerp;
- Beheersmaatregel toepassen tijdens de uitvoering (hoofdstuk 6) of beheerfase (hoofdstuk 7);
- Keuze voor een ander type pipingmaatregel dan een kunststof heavescherm.

Deze mogelijkheden zijn ook weergegeven in Figuur 4-3.

Wanneer gekozen wordt voor één van de bovenste twee mogelijkheden, dan zal voor het ontwerp inclusief beheersmaatregelen moeten worden onderbouwd dat de totale faalkans ten aanzien van piping voldoende klein is. Het Veiligheidsraamwerk [2] geeft handreikingen voor het uitvoeren van deze faalkansanalyse.

Voor potentiële bedreigingen kan de faalkansbijdrage op meerdere manieren worden bepaald, kwalitatief, kwantitatief of een combinatie van beiden. Voor de meeste bedreigingen volstaat een kwalitatieve

beargumentering waarom de kans bijdrage van de bepaalde bedreiging gering is ten opzichte van andere, meer relevante, bedreigingen. Alleen voor de bedreigingen waarvan de bijdrage aan de faalkans significant is (de meest relevante bedreigingen), zal een meer kwantitatieve uitwerking noodzakelijk zijn om een toetsing op de vereiste faalkans uit te voeren. Het gebruik van gebeurtenissenbomen of foutenbomen is een handig hulpmiddel om de meest relevante bedreigingen te identificeren, omdat de relevante faalpaden hiermee inzichtelijk worden gemaakt. De keuze voor een gebeurtenissenboom of foutenboom om gebeurtenissen gestructureerd weer te geven is aan de gebruiker en berust vaak op persoonlijke voorkeur. Dit geldt ook voor het detailniveau, maar de kunst is vaak om niet teveel details mee te nemen omdat dit ten koste kan gaan van het overzicht.

Aan de andere kant is het belangrijk om te beseffen dat het treffen van een beheersmaatregel soms minder intensief is dan het bepalen van de relevantie van een bedreiging. In dat geval is het bepalen van de faalkansbijdrage niet zinvol.

Aanbevolen wordt om bij aanvang van het ontwerp de FMECA op te stellen. Tijdens het ontwerp kan de FMECA dan ook gezien worden als onderdeel van een risicodossier. In de werkvoorbereiding en tijdens realisatie wordt het risicodossier geactualiseerd en aangepast. De via de FMECA afgeleide beheersmaatregelen voor waterveiligheid zullen in de werkvoorbereiding verder worden geconcretiseerd in verificatieplannen en procedures.

Deze werkwijze voor het opstellen en invullen van de FMECA is beschreven in de Publicatie Heaveschermen [3] en in het Veiligheidsraamwerk [2].

5.2 Inventarisatie bedreigingen

In deze publicatie wordt een aantal belangrijke bedreigingen voor het functioneren van kunststof heaveschermen benoemd. De inventarisatie van bedreigingen is niet compleet en het is aan de ontwerper om deze inventarisatie per project opnieuw uit te voeren met de tot dan toe opgedane praktijkervaring en inzichten. In Tabel 5-1 en Tabel 5-2 zijn de bijbehorende FMECA's gegeven voor onderdeel A en B van het voorbeeld, zie Figuur 4-2.

Tabel 5-1 Overzicht Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA) kunststof heaveschermen voor component A (deel scherm dat is ingebed in watervoerende laag, zie Figuur 4-2)

Nr	Gebeurtenis (S)	Faalpad (F)	Effect gegeven optreden S P(F S)	Kans optreden gebeurtenis P(S)	Relevantie	Maatregel
A.1	Opening scherm door ernstig uit het slot tijdens uitvoering en opening niet zanddicht	DLH	Afhankelijk van grootte van opening. DLH kan niet optreden wanneer gat zanddicht is	Afhankelijk van grondgesteldheid, eigenschappen scherm en installatiemethode. Inschatten o.b.v. praktijkervaringen	Significant, onderzoeken o.b.v. beschikbare informatie en praktijkproeven (Par. 5.4)	Zorgvuldige uitvoering; Monitoring inbrengproces; Slotverklikkers; Herstelmaatregelen bij uit het slot lopen; Onafhankelijke kwaliteitscontrole. Par. 5.4; Par. 6.4; Par. 6.3.
A.2	Lekkage door scherm door ernstig uit het slot tijdens uitvoering	OLH	Afhankelijk van lengte scherm	Afhankelijk van grondgesteldheid, eigenschappen scherm en installatiemethode. Inschatten o.b.v. praktijkervaringen	Bij schermen met relatief korte inbeddingsdiepte (Par. 5.5)	Voldoend inbeddingsdiepte van scherm (Par. 5.5)
A.3	Verminderde pakking van zand vanwege voorboren	OLH	Door lagere dichtheid van zand neemt weerstand tegen fluidisatie direct achter scherm af (progressieve fluidisatie)	Afhankelijk van mate van grondverwijdering	Significant, onderzoeken o.b.v. beschikbare informatie en praktijkproeven (Par. 5.6)	Praktijkproeven met grondonderzoek (Par. 6.2 en 6.4); aanpassen installatiemethode (Par. 6.4)

A.4	Verminderde pakking van zand langs het scherm door trekken van moederplank	OLH	Door lagere dichtheid van zand neemt weerstand tegen fluidisatie direct achter scherm af (progressieve fluidisatie)	Afhankelijk van locatie moederplank	Significant wanneer moederplank aan benedenstroomse zijde van scherm is (Par. 5.7)	Praktijkproeven met grondonderzoek (Par. 6.2 en 6.4); aanpassen installatiemethode (Par. 6.4)
A.5	Scherf niet op ontwerpdiepte door harde ondergrond of obstakels	OLH	Afhankelijk van diepte harde ondergrond of obstakels	Afhankelijk van ondergrond; materiaalkeuze; en inbrengmethode	Groot wanneer bij praktijkproef harde grondslag en obstakels is waargenomen	Praktijkproeven met grondonderzoek (Par. 6.2 en 6.4); aanpassen installatiemethode (Par. 6.4); aanpassen planktype (Par. 6.4)
A.6	Geotechnische instabiliteit dijk (GTI) a.g.v. pijpstelsel en lokale fluidisatie	GTI	Afhankelijk van mate waarin lokale instabiliteit (a.g.v. effect pijp/fluidisatie) kan leiden tot vervolgmecanismen die dijk ondermijnen	Afhankelijk van stabiliteitsfactor lokale afschuiving a.g.v. effect pijp/fluidisatie	Voldoende klein indien kans op lokale instabiliteit en kans op vervolgmecanismen in ontwerp zijn getoetst	Modelleren bij ontwerp (Hfs. 4); aanpassen positie scherm (Hfs. 4 en Publicatie Heaveschermen)
A.7	Opening in scherm a.g.v. grote vervormingen door GTI dijk tijdens hoogwater	DLH	Sterk afhankelijk van kans op initiële gebeurtenis P(S), dus effect P(F S) is groot	Zeer klein: grote glijvlakken worden separaat getoetst aan een faalkanseis (STBI)	Voldoende klein, omdat P(S) voldoende klein is.	Expliciet toetsen in ontwerp met faalkanseis STBI (Hfs. 4)
A.8	Opening in scherm a.g.v. belasting door maaiveldbelasting gevolgd door hoogwater	DLH	Onafhankelijk van initiële gebeurtenis P(S). Bovengrens P(F S) kan bepaald via kans STPH zonder scherm.	Klein: schade en vervorming scherm zal vaak op geringe diepte plaatsvinden op een plek die minder kritiek is voor doorloopbaarheid.	Voldoende klein indien expliciet getoetst in ontwerp	Expliciet toetsen in ontwerp volgens Eurocode bij dagelijkse belastingen (Hfs. 4)
A.9	Opening in scherm a.g.v. belasting door toekomstige dijkverzwaring gevolgd door hoogwater	DLH	Onafhankelijk van initiële gebeurtenis (PS). Bovengrens P(F S) kan bepaald via kans STPH zonder scherm.	Afhankelijk van kans op GTI of grote vervormingen tijdens de uitvoering, en het falen van inspectie en tijdig herstellen.	Voldoende klein indien expliciet getoetst in ontwerp en/of controle tijdens uitvoering	Expliciet toetsen in ontwerp volgens Eurocode (Hfs. 4); controle tijdens uitvoering dijkverzwaring (Par. 6.3)
A.10	Opening in scherm a.g.v. belasting door lokaal glijvlak tijdens of gevolgd door hoogwater	DLH	Gedeeltelijk afhankelijk van initiële gebeurtenis P(S). Bovengrens P(F S) ligt tussen 1 en de kans bij STPH zonder scherm.	Afhankelijk van plaats van scherm in dwarsprofiel. Wanneer bij WBN ook voor lokale glijvlakken wordt voldaan aan faalkanseis STBI dan zijn vervormingen klein.	Voldoende klein indien expliciet getoetst in ontwerp	Expliciet toetsen in ontwerp (Hfs. 4); aanpassen positie scherm (Hfs. 4 en Publicatie Heaveschermen)
A.11	Opening in scherm a.g.v. belasting door autonome grondvervorming gevolgd door hoogwater	DLH	Onafhankelijk van initiële gebeurtenis (PS). Bovengrens P(F S) kan bepaald via kans STPH zonder scherm.	Afhankelijk van gedrag dijk en ondergrond.	Voldoende klein indien expliciet getoetst in ontwerp	Expliciet toetsen in ontwerp (Hfs. 4); controle tijdens uitvoering (Par. 6.3)

A.12	Verbranden of vloeien van sloten, scheuren tijdens uitvoering, openingen niet zanddicht	DLH	Afhankelijk van grootte van opening. DLH kan niet optreden wanneer gat zanddicht is	Kans klein, tijdens uitvoering te beheersen o.b.v. praktijkervaringen	Kans klein, tijdens uitvoering te beheersen o.b.v. praktijkervaringen	Aanpassen methode uitvoering (Par. 6.4); controle tijdens uitvoering (Par. 6.3)
A.13	Doorbuiging planken tijdens vervoer en plaatsing	DLH	Klein, indien kromme planken niet worden geplaatst	Reëel	Klein, indien kromme planken niet worden geplaatst	Controle tijdens uitvoering (Par. 6.4)
A.14	Opbarsten en kwelweg aan bovenstroomse zijde van scherm	VLH	Afhankelijk van kritieke verval bij uittredepunt voorloopsheid	Afhankelijk van laagopbouw en positie scherm in dwarsprofiel	Voldoende klein indien expliciet getoetst (Par. 5.8)	Expliciet toetsen in ontwerp (Hfs. 4); voldoende grondonderzoek uitvoeren (Par. 6.4)
A.15	Slechte aansluiting op cohesieve laag door trekken moederplank	VLH	Afhankelijk van kritieke verval bij uittredepunt voorloopsheid	Afhankelijk van breedte plank en dikte cohesieve deklaag	Voldoende klein indien expliciet getoetst en/of er door uitvoering geen kortsluiting ontstaat	Expliciet toetsen in ontwerp (Hfs. 4); voldoende grondonderzoek (Par. 6.4); evt. aanpassen methode uitvoering (Par. 6.4)

Tabel 5-2 Overzicht Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA) voor component B (aansluiting op cohesieve laag, zie Figuur 4-2)

Nr	Gebeurtenis (S)	Faalpad (F)	Effect gegeven optreden S P(F S)	Kans optreden gebeurtenis P(S)	Relevantie	Maatregel
B.1	Afbreken van bovenkant scherm door heien	BLH	Klein, indien tijdens werk hersteld	Reëel	Klein, indien tijdens werk hersteld	Controle tijdens uitvoering (Par. 6.4)
B.2	Slechte aansluiting door te weinig inbedding of slechte aansluiting op cohesieve laag	BLH	Afhankelijk van kritieke verval bij uittredepunt voorloopsheid	Voldoende klein indien contact met cohesieve laag voldoende	Voldoende klein indien expliciet getoetst en/of door uitvoering geen kortsluiting ontstaat	Expliciet toetsen in ontwerp (Hfs. 4); voldoende grondonderzoek (Par. 6.4); evt. aanpassen methode uitvoering (Par. 6.4)
B.3	Slechte aansluiting en/of slechte aanvulling heisleuf	BLH	Afhankelijk van kritieke verval bij uittredepunt voorloopsheid	Voldoende klein indien contact met cohesieve laag voldoende	Voldoende klein indien expliciet getoetst en afgestemd met methode uitvoering	Expliciet toetsen in ontwerp (Hfs. 4); voldoende grondonderzoek (Par. 6.4); evt. aanpassen methode uitvoering (Par. 6.4)
B.4	Slechte aansluiting door grote vervorming van scherm na uitvoering	BLH	Afhankelijk van grootte opening/spleet. Kan niet optreden wanneer gat zanddicht is	Voldoende klein indien vervorming scherm beperkt is en cohesieve grond vervorming kan volgen	Afhankelijk van verwachte vervorming en inbeddingsdiepte in cohesieve grond	Expliciet toetsen in ontwerp (Hfs. 4); inspectie tijdens hoogwater (Par. 7.2); voldoende grondonderzoek (Par. 6.4);

5.3 Selectie van relevante bedreigingen voor uitwerking

Het ontwerpen en beoordelen van kunststof heavescherm is in wezen niet verschillend van het van een stalen damwandscherm. Er zijn echter enkele bedreigingen waarbij de kans van optreden in geval van kunststof schermen aanzienlijk groter is dan in geval van stalen damwandschermen:

- Bedreigingen die samenhangen met het uit het slot lopen van planken (A.1);

- Bedreigingen die samenhangen met het toepassen van voorboren (A.2);
- Bedreigingen die samenhangen met het ontstaan van een spleet tussen de damwand en grond bij het trekken van de moederplank (A.3);
- Bedreigingen die samenhangen met opbarsten en het ontstaan van een kwelweg aan de bovenstroomse zijde van het heavescherm (A.13).

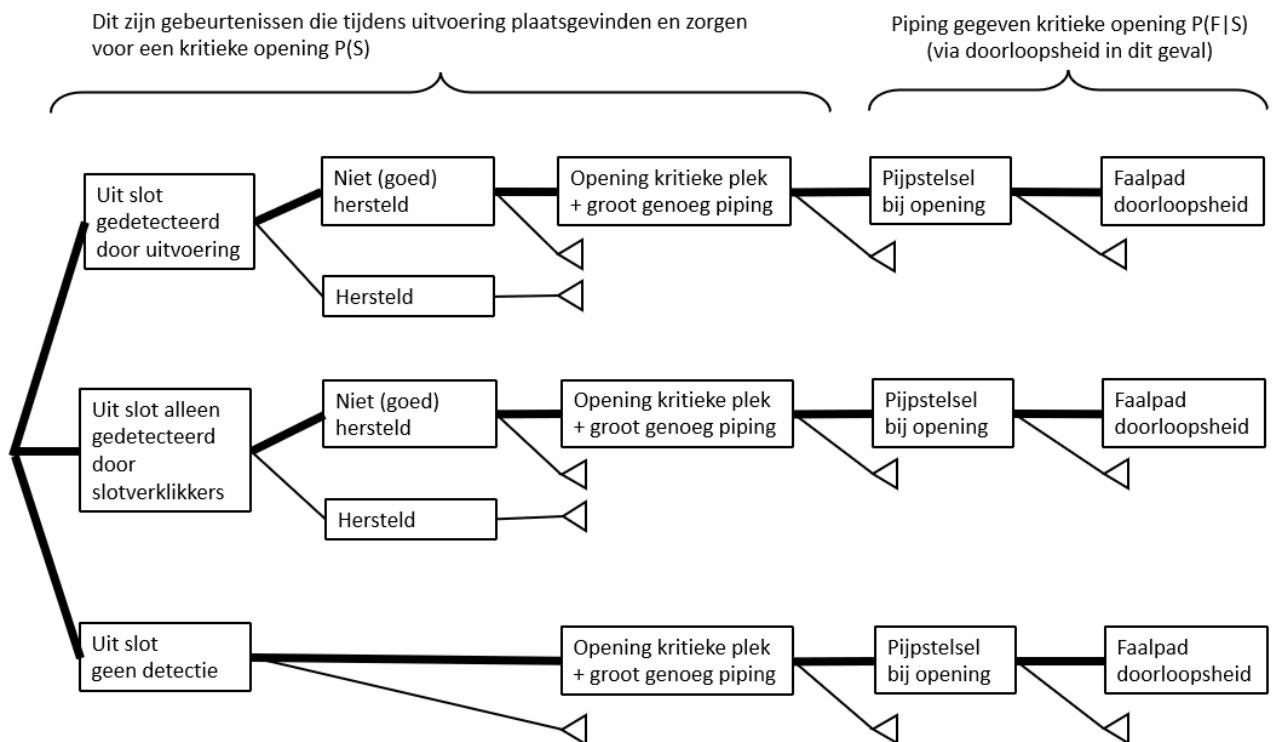
Alle bovengenoemde bedreigingen kunnen een significante bijdrage leveren aan de faalkans voor piping. Een nadere uitwerking van de FMECA voor deze bedreigingen is gegeven in deze paragraaf. Voor gebeurtenis A.1 is een eerste aanzet gegeven voor een kwantitatieve uitwerking, en voor gebeurtenis A.2, A.3 en A.10 is een kwalitatieve uitwerking gegeven. In de uitwerking wordt steeds uitgegaan van het vergelijken van faalkansbijdragen op trajectniveau. Hierbij wordt verwezen naar de benadering B uit het Veiligheidsraamwerk [2]. Dit betekent dat het lengte-effect niet in de faalkanseis is verwerkt maar in de kans van optreden. Dit is verder uitgewerkt in voorbeeld van de bedreiging A.1.

5.4 Bedreiging A.1 Scherm ernstig uit het slot tijdens uitvoering en opening niet zanddicht

5.4.1 Faalpaden

Met gebeurtenis A.1 wordt bedoeld dat er een dusdanige spleet is ontstaan, na het uit het slot lopen van de plank, dat er zandtransport door de spleet zou kunnen plaatsvinden. Een zanddicht en waterdoorlatend gat valt dus niet in deze categorie defecten.

De topgebeurtenis 'Piping door opening in scherm als gevolg van uit het slotlopen' kan alleen optreden als er sprake is van een aaneenschakeling van verschillende gebeurtenissen. Deze gebeurtenissen kunnen overzichtelijk worden weergegeven in een faalpad. Soms zijn meerdere faalpaden mogelijk en deze kunnen worden weergegeven in een gebeurtenissenboom. Wanneer wordt getracht de gebeurtenissenboom compleet te maken dijt de boom snel uit waardoor het overzicht afneemt. Vaak is het voldoende om slechts een deel van de gebeurtenissenboom te presenteren. In deze OBOR is volstaan met het opnemen van de uitwerking van de gebeurtenissenboom voor de gebeurtenis "uit het slot lopen van een kunststof heavescherm", zie Figuur 5-2. Verder in deze paragraaf wordt met een voorbeeld toegelicht hoe op een beschouwende wijze een uitspraak kan worden gedaan over de faalkansbijdrage voor deze bedreiging (zonder een probabilistische berekening uit te voeren) en hoe dit aansluit op de aanbevolen beheersmaatregelen.



Figuur 5-2 Gebeurtenissenboom met faalpaden leidend tot doorlooptheid door een opening in het scherm als gevolg van uit het slot lopen van een kunststof heavescherm (indien het faalpad eindigt met een driehoek, leidt dit faalpad niet tot falen)

In bovenstaande faalpad is uitgegaan van de gebruikelijke praktijk. In de gebeurtenissenboom kan onderscheid gemaakt worden in initiële gebeurtenissen die tijdens de uitvoering en voorafgaand aan hoogwater plaatsvinden en gebeurtenissen die tijdens hoogwater plaatsvinden en die heet faalpad voor piping beschrijven. In de figuur zijn verschillende faalpaden weergegeven. Ten aanzien van de initiële gebeurtenissen zijn 3 knopen te onderscheiden:

- Detectie: Het uit het slot lopen van een plank wordt bij kunststof planken in de meeste gevallen tijdens de uitvoering opgemerkt omdat de heiploeg na het uit het slot lopen van een plank bij het installeren van de volgende plank erg veel hinder zou ondervinden. Het installatieproces zelf werkt dus in feite al als een slotverklikker. Dit wordt beschreven door de bovenste tak van bovenstaande gebeurtenissenboom. Wanneer daarnaast ook slotverklikkers worden toegepast, dan fungeren de slotverklikkers als een tweede detectiesysteem voor die gevallen waar uit het slot lopen niet tijdens het installeren van de planken is opgemerkt. Dit is weergegeven met de middelste tak uit de gebeurtenissenboom. De situatie dat er een plank uit het slot is gelopen dat door geen van beide detectiesystemen is opgemerkt is weergegeven in de onderste tak.
- Herstel: Als er een opening in de damwand wordt gedetecteerd, dan wordt deze in principe altijd afgedicht met bijvoorbeeld een groutkolom of een overlappende damwand.
- Kritieke opening: Wanneer deze herstelmaatregel niet of niet goed wordt uitgevoerd blijft er een opening in het scherm achter. Wanneer deze opening niet op een voor piping kritieke plek

aanwezig is of wanneer deze opening niet groot genoeg is om zand door te laten zal er geen doorloopsheid optreden.

Uitgaande van de aanwezigheid van een potentiële kritieke opening het in scherm worden de volgende knopen in het resterende deel van het faalpad onderscheiden:

- Pijpstelsel bij opening: Er kan alleen piping via doorloopsheid optreden wanneer het pijpstelsel, dat zich bij hoogwater vanaf de wal heeft gevormd, ook aanwezig is op de locatie van de opening.
- Resterende knopen uit het faalpad doorloopsheid: Ten slotte dient er verdergaande voortschrijdende erosie, ruiming en bresgroei op te treden om een overstroming door piping te veroorzaken.

In bijlage E is een getallenvoorbeeld opgenomen van een schatting van de faalkansbijdrage. Het doel van het voorbeeld is vooral om redenerend te onderbouwen dat de kans van doorloopsheid als gevolg van uit het slot lopen in voldoende klein is bij toepassing van alle aanbevolen beheermaatregelen.

5.4.2 Aanbevolen beheersmaatregelen

Met de volgende beheersmaatregelen kan de kans op doorloopsheid als gevolg van uit het slot lopen voldoende worden gecontroleerd:

- a) Zorgvuldige wijze van uitvoering.
- b) Toepassen van slotverklikkers.
- c) Werken volgens strikte de protocollen voor treffen beheersmaatregelen bij het uit het slot lopen van planken.
- d) Zorgvuldige monitoring van het inbrengproces, gelet op de onzekerheden en onafhankelijke kwaliteitscontrole.

Hieronder zijn deze beheersmaatregelen toegelicht.

Ad a) Zorgvuldige wijze van uitvoering

Uit de praktijkproeven is gebleken dat kunststof damwanden eerder uit het slotlopen dan stalen damwandschermen en daarom in de uitvoering een nog grotere zorgvuldigheid vereisen om de kans op uit het slot lopen te beperken. Voorkomen van uit het slot lopen is zowel een functionele eis (gericht op de pipingmaatregel) als een eis die in het belang de voortgang van het werk. Als men damwanden namelijk scheef of krom aanbrengt, dan wordt het plaatsen van de volgende damwand ook lastiger of vaak zelfs onmogelijk.

Een zorgvuldige uitvoering begint met een vooronderzoek, zoals onderzoek naar obstakels en grondonderzoek gericht op installeerbaarheid van de planken. In hoofdstuk 6 van deze OBOR zijn de ervaringen en aanbevelingen vanuit de uitvoering opgenomen. Het is ook voor de beheersing van het risico van piping door uit het slot lopen van belang om deze aanbevelingen op te volgen.

Ad b) Slotverklikkers

Momenteel zijn slotverklikkers, naast controle op afwijkingen tijdens het inbrengproces, een veelgebruikte manier om een verificatie op uit het slot lopen uit te voeren. Opgemerkt moet worden dat defecten ten aanzien van de werking van de slotverklikker zelf, bij de meeste gangbare slotverklikkersystemen waarbij de verklikker via een draad meeloopt, tot een vals alarm leiden. Bij deze systemen is de werkelijke kans op uit het slot lopen lager dan dat de slotverklikker aangeeft. Bij systemen waarbij de weerstand van de eindslotverklikker wordt gemeten, zonder terugwinning van de verklikker, neemt de betrouwbaarheid van de verklikker af in hardere ondergrond omdat de weerstand van de verklikker dan niet niet erg onderscheidend is met de bodemweerstand tijdens het inbrengen van de plank.

Als praktische richtlijn kan de volgende intensiteit van slotverklikken worden aangeraden bij de eerste koploperprojecten:

- Het nauwkeurig bijhouden en vastleggen van uitvoeringsdata, een sterk uit het slot gelopen plank wordt, gezien de relatieve slapte van de planken, vaak gedetecteerd.
- De eerste 10 planken allemaal een slotverklikker om structurele uitvoeringsfouten te identificeren
- Na eerste planken de frequentie van slotverklikkers eventueel iets reduceren, bijvoorbeeld om de andere plank een slotverklikker. Het belangrijkste doel van deze slotverklikkers is om vertrouwen in de kunststofwanden te krijgen en om onbekende faaloorzaken af te vangen.

- Na ervaringen bij deze koploperprojecten op basis van een kosten/baten-afweging de frequentie van slotverklikkers evalueren.

Ad c) Werken volgens strikte de protocollen voor het treffen van herstelmaatregelen

Het in het slot aanbrengen van alle planken dient als eis in het contract worden opgenomen met het herstellen van uit het slot lopen als beheersmaatregel. Als er detectie is van een uit het slot gelopen plank moeten ook de voorgaande planken worden vervangen. Opgemerkt wordt dat het herstel ook in het belang is van de heiploeg. Als men damwanden namelijk scheef of krom aanbrengt, dan wordt het plaatsen van de volgende damwand ook lastiger. In paragraaf 6.3.3 is een beschrijving gegeven van herstelmaatregelen.

Ad d) Zorgvuldige monitoring en onafhankelijke kwaliteitscontrole

Hierbij kan gedacht worden aan:

- Supervisie door een onafhankelijke partij.
- Er kunnen filmopnames worden gemaakt van het installeren van damwanden. Met deze camerabeelden is achteraf een objectievere bewijslast mogelijk voor het afgaan van slotverklikkers, de verticaliteit en het zonder hapering inbrengen.
- Raadplegen van ervaringen bij andere (koploper) projecten en kennis die in deze OBOR is opgenomen.
- Tijdens het werk vastleggen van observaties en registraties rond installeren, verklikken en uitgevoerde herstelmaatregelen.
- Eventueel het uitvoerings- en verificatieplan aanpassen op basis van ervaringen. Tussentijdse evaluatiemomenten vooral aan begin van uitvoering.

5.4.3 Conclusie

- Kunststof damwanden zijn relatief nieuw en vragen extra aandacht.
- Belangrijkste oorzaken van uit het slot lopen zijn installatiefouten of geologische veranderingen.
- Op basis van een praktijkproef is er een orde 3% kans op uit het slot lopen.
- De kans op niet-detectie en herstel van kritische gaten is echter klein:
 - Voor bekende oorzaken is de ervaring dat gezien de slapte van de planken het uitvoeringstechnisch vaak niet lukt om een plank in te brengen als voorgaande plank(en) over aanzienlijke lengte uit het slot is gelopen. De voorgaande plank fungeert dus als een soort slotverklikker.
 - Gezien de beperkte ervaring met kunststof damwanden zijn er ook onbekende redenen van uit het slot lopen mogelijk die niet worden afgevangen met bovenstaande. Daarom wordt voor de eerste koploper projecten aangeraden om met slotverklikkers te verifiëren of uitvoeringservaring een betrouwbare indicator is voor uit het slot lopen.
- Met een rekenvoorbeeld is ondersteund dat gegeven bovenstaande beheersmaatregelen de kans op ernstig uit het slot lopen controleerbaar is en voldoende klein wordt ingeschat. Na deze eerste koploper projecten zou aan de hand van een evaluatie van metingen en uitvoeringsobservaties bovenstaande statement moeten worden geëvalueerd waarna de intensiteit van slotverklikken kan worden gereduceerd.

5.5 Bedreiging A.2 Lekkage door scherm

In de bureaustudie [18] is met numerieke grondwaterstromingsanalyses gekeken naar het effect van doorlatendheidsdiscontinuïteiten die ontstaan door scheuren of door minder goed gemengde en daardoor meer doorlatende plekken in het soilmix heavescherm. Inzichten uit deze studie zijn ook bruikbaar voor lekkage bij damanden. De studie laat zien dat de verticale hydraulische gradiënt lokaal achter het heavescherm toeneemt als gevolg van lekkage via doorlatendheidsdiscontinuïteiten. De toename in gradiënt treedt op tussen de locatie van de discontinuïteit in de wand en het pijpstelsel. Op basis van de studie kan geconcludeerd worden dat doorlatendheidsdiscontinuïteiten het proces van lokale fluïdisatie kunnen versterken. Uit de studie blijkt dat dit effect afneemt wanneer de doorlatendheidsdiscontinuïteiten zich op grotere diepte in het scherm bevinden. Bij ondiepe defecten is het risico op een doorgaande fluïdisatie leidend tot onderloopsheid gering wanneer er voldoende intact scherm onder de doorlatende plek aanwezig is. Bij een minimale inbeddingsdiepte van 3m in de watervoerende laag wordt het risico op onderloopsheid door lekkage voldoende afgedekt.

5.6 **Bedreiging A.3 Verminderde pakking van zand vanwege voorboren**

In het ontwerp dient uit te worden gegaan van een (schatting van de) karakteristieke waarde (5% ondergrens) van de dichtheid van het zand. Het is verstandig om in het ontwerp (bij het bepalen van de dichtheid van het zand) reeds te anticiperen op de mogelijkheid dat, als maatregel voor het installeren, voorboren nodig kan zijn. Het toepassen van voorboren (zie Figuur 5-3) leidt tot een nieuwe bedreiging, omdat door het voorboren de pakking van het zand kan afnemen.

Op basis van de uitgevoerde heiproeven kan geconcludeerd worden dat de pakking van het zand ook na voorboren voldoet aan de voorwaarden waarmee gerekend is bij het ontwerp van de kunststof heaveschermen. Voorboren leidt dus niet tot een verminderd functioneren van het kunststof heavescherm. Dit is tevens geverifieerd op basis van de sonderingen die bij de tweede maakbaarheidsproef (april 2021) bij dijkversterking Wolferen-Sprok zijn uitgevoerd.

Door de uitgevoerde heiproeven is aangetoond dat de bedreiging 'verminderde pakking van zand vanwege voorboren' niet relevant is indien hier in het ontwerp op geanticipeerd wordt. Hierdoor is een kwalitatieve uitwerking van de bedreiging niet nodig.



Figuur 5-3 Voorboren

5.7 **Bedreiging A.4 Verminderde pakking van zand langs het scherm door trekken van moederplank**

Na het trekken van de moederplank blijft een spleet achter langs het scherm, wat kan leiden tot afname van de pakking van het zand. Het omliggende zand zal de spleet opvullen, waardoor in een kleine zone rond de spleet een iets lossere pakking kan ontstaan. Echter, aangezien de moederplank trillend wordt verwijderd, zal het zand in de spleet ook weer iets verdichten. Dit heeft naar verwachting dus weinig invloed op het heavecriterium en daarmee het functioneren van het heavescherm. Om eventuele negatieve effecten te voorkomen dient de moederplank altijd aan de dijkzijde van het scherm geplaatst te worden. Door het toepassen van deze beheersmaatregel is de bedreiging niet meer relevant, en is een kwalitatieve uitwerking niet nodig.

5.8 **Bedreiging A.14 Opbarsten en kwelweg aan bovenstroomse zijde van scherm**

Indien aan de dijkzijde van het heavescherm een spleet achterblijft na installatie, is opbarsten aan de bovenstroomse zijde van het scherm bij maatgevend hoogwater in theorie mogelijk. Bij inachtneming van

de effecten van het heavescherm op de stijghoogte, de weerstand in de spleet en 3D-werking, is het zeer onwaarschijnlijk dat de berm bovenstreams van het heavescherm daadwerkelijk zal opbarsten.

Bij het onderzoek naar het voorland bij de dijkversterking Wolferen-Sprok is gekeken naar de boogwerking bij het bezwijken van een pipe. Hieruit blijkt dat in het geval van Wolferen Sprok (met een kenmerkende deklaagdikte van ca. 2 meter, een pijpbreedte van 0,30 meter en cohesie van $c' = 4$ kPa) er geen bezwijken zal optreden door boogwerking. De spleet langs het heavescherm zal kleiner zijn 0,30 meter, wat gunstig is. Hoogstwaarschijnlijk zal hierbij dus ook geen breuk van de deklaag en dus geen opbarsten optreden door boogwerking. Het risico wordt voldoende klein geacht, zodat geen aanvullende maatregelen nodig zijn om opbarsten te voorkomen. Wel wordt aanbevolen de klei bij het aanvullen van de heisleuf goed en zorgvuldig tegen het heavescherm aan te brengen, zodat hier geen spleet achterblijft.

De klei bij de kunststof heaveschermen worden in de damwandbuiken aangedrukt met stalen stampers. De stampers zijn zodanig ontwikkelt dat deze binnen het profiel van de damwandbuik vallen. Zorgvuldigheid van de machinist is vereist om dit niet tot onnodige schades te laten leiden. Binnen Wolferen-Sprok is uitgegaan van drie damwandbuiken tegelijk. In de voorbereiding van het ontwerp is nagedacht over het uitbreiden naar vijf stampers tegelijk, maar dit is niet verzilverd vanwege de mogelijke kans op schade vanwege de overbelasting aan druk aan één zijde van het kunststof. Het aanbrengen dient in lagen van 20 à 30 centimeter te gebeuren, waarbij beide kanten gelijkwaardig worden opgebouwd. Het goed verdichten van de heisleuf voorkomt het risico op bovenloopsheid.



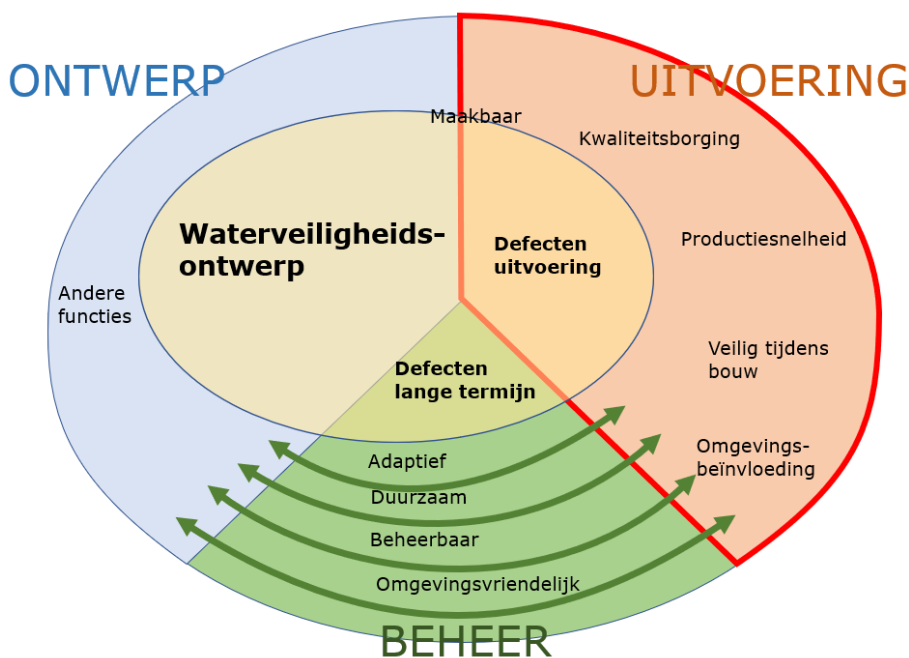
Figuur 5-4 Rupskraan met damwandstamper ontwikkelt voor kunststof damwandschermen

6 Beheersmaatregelen uitvoering

6.1 Inleiding

Het doel van de opgestelde FMECA in hoofdstuk 5 is om alle relevante bedreigingen voor waterveiligheid in beeld te brengen, oftewel de bedreigingen voor het functioneren van de pipingmaatregel. Voor het beperken van de effecten van deze bedreigingen is het vaak mogelijk om beheersmaatregelen te treffen tijdens de uitvoering. Bij kunststof damwanden blijkt dat veel van deze beheersmaatregelen sterk samenhangen met de maakbaarheid van de techniek. Bij veel projecten zijn daarom eerst maakbaarheidsproeven uitgevoerd, voordat kunststof damwanden daadwerkelijk zijn toegepast in de realisatiefase.

De genoemde beheersmaatregelen in dit hoofdstuk zijn dan ook gebaseerd op de praktijkervaringen van de dijkversterkingsprojecten die zijn benoemd in Tabel 3-1. Naast de beheersmaatregelen voor het functioneren van de pipingmaatregel, zijn er ook andere aspecten van belang, zoals de veiligheid tijdens de bouw en de omgevingsbeïnvloeding. In Figuur 6-1 is weergegeven welke onderwerpen in dit hoofdstuk worden behandeld, en in Tabel 6-1 zijn verwijzingen opgenomen naar de relevante paragrafen.



Figuur 6-1 Hoofdstuk 6 gaat over de uitvoering, zowel binnen de FMECA als daarbuiten, oftewel alles in het dikgedrukte rode deel.

Tabel 6-1 Aspecten bij beheersmaatregelen tijdens de uitvoering

Aspect	Omschrijving/voorbeelden	Paragraaf
Functioneren van de pipingmaatregel	Maatregelen voor het beheersen van defecten tijdens de uitvoering (zie FMECA in paragraaf 5.2).	6.3
Maakbaarheid: kwaliteit en efficiëntie van de uitvoering	Maatregelen om de damwanden op de juiste diepte aan te brengen zonder dat daarbij schade optreedt	6.4
Omgevingsbeïnvloeding	Maatregelen voor bijvoorbeeld verminderen van trillingen of het voorkomen van schade aan panden of percelen.	6.5
Veiligheid tijdens de bouw	Maatregelen voor de veiligheid van het uitvoerend personeel en/of omwonenden en verkeersdeelnemers nabij het werk.	6.6

Kwaliteitsborging	Maatregelen om te controleren of de uitvoering is gegaan zoals van tevoren bedacht.	6.7
-------------------	---	-----

Generieke zaken voor de installatie van stalen en houten damwanden worden beschreven in NEN-EN 12063:1999 nl 'Uitvoering van bijzonder geotechnisch werk - Damwanden'. Deze norm is officieel niet van toepassing voor kunststof damwanden, maar bevat wel relevante elementen voor de uitvoering. Voor de beheersmaatregelen tijdens de uitvoering wordt in de OBOR dan ook gefocust op de specifieke aandachtspunten bij kunststof heaveschermen. Voor generieke zaken over heaveschermen wordt verwezen naar de Publicatie Heaveschermen [3] en bovengenoemde norm.

6.2 Uitgevoerde maakbaarheidsproeven

Bij verschillende dijkversterkingsprojecten zijn eerst maakbaarheidsproeven uitgevoerd om de vereiste inspanning voor het op diepte krijgen van een damwand te onderzoeken. Deze inspanning is vooral afhankelijk van de installatiediepte en de vastheid (conusweerstand) van de zandlaag.

De relevante parameters van deze proeven zijn in Tabel 6-2 weergegeven voor de beschouwde projecten, waarna in 6.2.1 een korte toelichting is gegeven per project. Daarna zijn in paragraaf 6.2.2 t/m 6.2.5 achtereenvolgens het toegepaste materieel, het installatieproces, aanbrengen van de heisleuf en productiesnelheid nader beschreven voor verschillende projecten.

Tabel 6-2 *Praktijkervaring en maakbaarheidsproeven met kunststof heaveschermen*

Jaar	Dijkversterking	Damwand-lengte	Diepte in zandlaag	Conusweerstand zandlaag (maximaal)
2018	Mook, Bergen – Aijen, Afferden	7 m	onbekend	20 MPa
2020	Wolferen – Sprok (1e maakbaarheidsproef)	10 - 12 m	4 – 8 m	20 MPa
2021	Wolferen – Sprok (2e maakbaarheidsproef)	7,5 – 11,5 m	4 – 8 m	20 MPa
2021 e.v.	Wolferen – Sprok (realisatie)	7,5 – 11,5 m	4 – 8 m	56 MPa
2021 e.v.	Sterke Lekdijk, Prolock Delta Filterscherm	onbekend	onbekend	onbekend
2021 e.v.	Heel & Beesel (maakbaarheidsproef)	8 m	1 m	30 MPa
2022 e.v.	Zwolle – Olst (maakbaarheidsproef)	8 - 14 m	1 – 1,5 m	14 - 32 MPa
2024 e.v.	Sterke Lekdijk, Wijk bij Duurstede-Amerongen (maakbaarheidsproef)	7,5 - 13 m	3 - 6,5 m	30 - 35 MPa

6.2.1 Toelichting maakbaarheidsproeven

6.2.1.1 Dijkversterking Mook

Bij dijkversterking Mook zijn in 2018 voor het eerst kunststof heaveschermen in een Nederlandse dijk toegepast. Hierbij zijn Prolock Delta schermen toegepast. Hierin zitten twee kokers voor stalen geleidebuizen [5]. Bij latere dijkversterkingen zijn U-profielen toegepast en zijn moederplanken gebruikt voor installatie.

6.2.1.2 Dijkversterking Wolferen – Sprok

Voorafgaand aan de realisatie van dijkversterking Wolferen - Sprok zijn twee maakbaarheidsproeven gedaan nabij het kruispunt Waaldijk en Klipstraat:

- Bij de eerste maakbaarheidsproef in mei 2020 is gelet op de inbrengbaarheid, het type plank, de effectiviteit van de uitvoering en de omgeving beïnvloeding [6];
- Bij de tweede maakbaarheidsproef in maart 2021 is een ander type slotafdichting uitgetoetst en is de effectiviteit van de methode verder geoptimaliseerd [7].

In oktober 2021 is de daadwerkelijk realisatie van de dijkversterking begonnen met grootschalige installatie van kunststof damwanden. Hierbij is ca. 4,5 km kunststof heavescherm aangebracht. Daarbij is de aannemer geconfronteerd met nieuwe uitdagingen en zijn passende oplossingen bedacht. Nieuwe uitdagingen waren het aantreffen van hardere zandlagen (conusweerstand > 50 MPa, terwijl bij de maakbaarheidsproef maximaal 20 MPa was gemeten en het aantreffen van grindlagen [8].

De schadefrequentie nam geleidelijk af door het leereffect: bij de eerste 160 m kunststof damwand heeft 12 m schade aan de bovenzijde ondervonden, is uit het slot gelopen of is niet op diepte gekomen, ofwel bij 7% van de planken. Bij de daaropvolgende 790 m kunststof damwand heeft 23 m schade ondervonden, ofwel bij 3% van de planken [19].

6.2.1.3 Dijkversterking Heel & Beesel

Bij dijkversterking Heel & Beesel zijn haalbaarheidsproeven uitgevoerd in 2021 en is in 2022 een versterking gerealiseerd met een kunststof damwand. Tijdens de maakbaarheidsproef is gelet op de inbrengbaarheid en zijn trillingen en geluid gemonitord. Er waren maatregelen achter de hand gehouden, zoals voorboren en water toevoegen, om de installatie te vergemakkelijken. Deze bleken bij de ontwerpdiepte en aanwezige grondslag echter niet nodig [9].

6.2.1.4 Dijkversterking Zwolle - Olst

Bij dijkversterking Zwolle - Olst is nabij kilometer 32,2 van de IJsseldijk in september 2022 een maakbaarheidsproef gedaan. Daarbij is gelet op de inbrengbaarheid, de werking van de slotverklikkers, het type plank, de effectiviteit van de uitvoering, de omgeving beïnvloeding en de verwijderbaarheid [11].

6.2.1.5 Dijkversterking Sterke Lekdijk, Wijk bij Duurstede - Amerongen

Bij dijkversterking Wijk bij Duurstede - Amerongen is in september en oktober 2024 in twee vakken een maakbaarheidsproef uitgevoerd. De proef was bedoeld om te verkennen of schermlengtes tot 13 m geïnstalleerd kunnen worden tot in de vaste zandlaag. Dit is gelukt. Bij de proef zijn ook maatregelen getest voor het aanbrengen van kunststof damwanden in relatie tot het mogelijk ontstaan van holle ruimte, door voorboren, het trekken van de moederplank en afdichten van de deklaag. Verder is gemeten hoeveel grond naar boven komt tijdens het voorboren en zijn de uitvoeringsparameters afgestemd om de uitkomende grond zoveel mogelijk te beperken.

6.2.2 Toegepast materieel

6.2.2.1 Dijkversterking Mook

Bij dijkversterking Mook is een ABI-stelling met twee stalen geleidebuizen toegepast [5]. Bij een ABI-stelling hangt de moederplank vast in de makelaar en wordt deze door middel van een trilblok naar beneden gebracht.

6.2.2.2 Dijkversterking Wolferen - Sprok

In Tabel 6-3 zijn de aanbrengtechnieken, materieel, hulpmiddelen en de toepassing samengevat. In Figuur 6-2 zijn voorbeelden van het toegepaste materieel weergegeven. De keuze om een specifieke techniek/materieel toe te passen is verwerkt in een flowchart, zie Figuur 6-3.

Tabel 6-3 Aanbrengtechniek, materieel, hulpmiddelen en toepassing o.b.v. ervaringen bij Wolferen - Sprok [20]

Materieel/type	Toepassing
(1) Rupskraan met boormakelaar (300mm) en GPS	De hartlijn van de damwanden wordt voorgeboord t/m puntniveau van de kunststof damwand om de weerstand/draagkracht van de grond tijdelijk te verlagen. Makelaar en GPS is benodigd om rechtstand te borgen en damwandlijn te volgen.
(2) Funderingsstelling met vrij hangend blok	In combinatie met vrij hangend trilblok wordt gewerkt met heiframe incl. loopbordes. Het heiframe heeft functie om beter te kunnen richten en makkelijker rondom de damwanden te kunnen bewegen. In de praktijk helpt dit ook om de rechtstand te borgen. Tevens werkt het nauwkeuriger. Met vrij hangend blok wordt bedoeld dat het trilblok aan de grommer in de funderingsstelling hangt. Het aandrijvend vermogen bestaat dan uit het trilblok en het gewicht van het trilblok.

(3) Funderingsstelling met voorspanning (mee drukken of -trekken)	Eén voorbeeld hiervan is de ABI-stelling waarbij de moederplank vast hangt in een makelaar en door middel van trilblok naar beneden wordt gebracht. Omdat het trilblok nog vastzit aan de funderingsstelling kan de machinist mee drukken of d.m.v. lier van onderaf laten trekken (voorspanning). Het gebruik maken van voorspanning heeft grote voordelen bij aanbrengen in zwaardere lagen of bodem waar grind voorkomt. In tegenstelling tot funderingsstelling met vrij blok volstaat een metselkoord om de damwandlijn aan te houden. De makelaar heeft een extra functie om voldoende te kunnen richten en rechtstand te kunnen borgen.
(4) Funderingsstelling met voorspanning (mee drukken)	Eén ander voorbeeld is de Komatsu 450. De stelling heeft dezelfde eigenschappen als een reguliere rupskraan waarbij het trilblok vastzit aan de kraan. Daardoor kan de machinist tijdens het aanbrengen van kunststof damwanden de moederplank vermogen toevoegen door gewichtsdruk mee te geven. De verticaliteit kan niet op dezelfde manier worden gewaarborgd als bij een makelaar. De aanbrengtechniek heeft zich op WOS nog niet bewezen en wordt in juli-september 2023 voor het eerst ingezet. De verwachting is dat dezelfde productie behaald kan worden als met de ABI-stelling, waarbij de Komatsu flexibeler is in het hijsen van eigen materialen/materieel.
(5) Waterbak, Hydro-pomp en aggregaat	Water wordt gebruikt om de in- en uitgaande damwandplank vrij te maken van grondresten. Als dit niet frequent wordt gedaan gaat dit ophopen in de sloten en hechten de damwanden onvoldoende in het profiel. Ook kan het worden gebruikt t.b.v. de fluïdatieset of om water in de sleuf te zetten tegen warm worden van de sloten.
(6) Metalen clips	Om de kunststof damwand en stalen moederplank in te klemmen worden onderin vijf stalen clips bevestigd. Dit betekent aan elke vlakke zijde tenminste 1 clip.



(1) Rupskraan met boormakelaar als geleider



(2) Funderingsstelling met vrijhangend trilblok

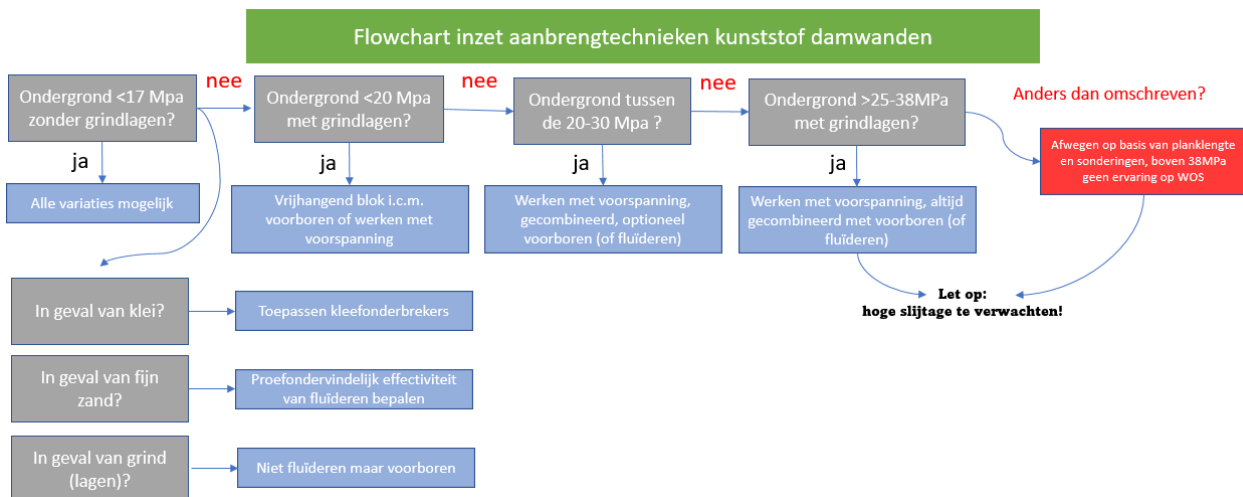


(3) Funderingsstelling met voorspanning (meedrukken of trekken)



(4) Funderingsstelling met voorspanning (meedrukken)

Figuur 6-2 Bij dijkversterking Wolferen - Sprok toegepast materieel (nummers komen overeen met Tabel 6-3)



Figuur 6-3 Flowchart inzet aanbrengtechnieken kunststof damwanden dijkversterking Wolferen - Sprok [20]

Bij dijkversterking Wolferen – Sprok is de heisleuf gegraven met een 14-tons kraan. Er is Hitachi EX455 kraan gebruikt, voorzien van een knikgiek, met een 8 lang boorframe, 12 m avegaar en trilblok 2316VM. Om de tolerantie tussen plank en heiframe te verkleinen en de damwand eenvoudiger verticaal te houden zijn 2 'hondjes' (stalen geleiders tussen de damwand en het heiframe) toegepast, waarbij 1 voor en 1 achter de aan te brengen damwand zit.

Daarnaast is een Sennebogen (653e) hulp(draad)kraan gebruikt. Deze was nodig, omdat diepladertransport over de dijk niet mogelijk was door de 4,5 ton aslastbeperking. De damwanden kunnen niet worden gelost met lepels in verband met doorbuigen.

Bij het inhijzen wordt de kunststof damwand geborgd met krammen. Op basis van de maakbaarheidsproef is het ontwerp van de krammen geoptimaliseerd: 1 pootje van 20 cm en 1 van 15 cm waarbij de laatste 5 cm een klein beetje verder open staan zodat de kram makkelijk om de moederplank en PVC plank heen schiet.



Figuur 6-4 Principetekening van kram

De stalen strips / krammen zijn in een later stadium voorzien van een extra zetting (zoeker, ca. 2 cm) bovenaan. Hierdoor is de strip bovenin iets breder dan de dikte van de moederplank en kunststof plank samen, onder de zoeker heeft hij wel weer de juist breedte. Hierdoor kan de klem makkelijk op de plank geslagen worden.

6.2.2.3 Dijkversterking Heel & Beesel

Bij dijkversterking Heel & Beesel is een funderingsmachine Klemm 2522 met Movax SG45V trilblok gebruikt.

6.2.2.4 Dijkversterking Zwolle - Olst

Voor de maakbaarheidsproef bij dijkversterking Zwolle - Olst [11] is een funderingsmachine van het type ABI Mobilram met telescoopmakelaar type TM22 ingezet. Het trilblok betreft type ABI 1203 30VV.

6.2.3 Installatieproces

6.2.3.1 Dijkversterking Wolferen - Sprok

De stappen die worden doorlopen bij dijkversterking Wolferen - Sprok bij het plaatsen van kunststof heaveschermen zijn weergegeven in Tabel 6-4.

Tabel 6-4 Fasering installatie kunststof heaveschermen bij dijkversterking Wolferen - Sprok

Stap	Deelactiviteiten
1. Voorbereiding	a. Aanbrengen heisleuf b. Uitzetten damwandlijn c. Lossen damwanden op schermlocatie (gestaffeld neerleggen) d. Ingangscontrole damwanden (type, lengte) op juiste locatie
2. Aanvoer materieel	a. Lossen materieel nabij werklocatie b. Leggen draglineschotten c. Eventueel uitventen damwand d. Aansluiten HFVM trilblok
3. Aanbrengen damwand	a. Uitzetten damwandscherm b. (Optioneel) Stellen boorframe c. (Optioneel) Voorboren damwand tracé met een avegaarboor (Bij het ophalen van de avegaarboor tegendraads draaien zodat boorgat niet geruimd wordt en er een minimum aan grond vrij komt. d. Egaliseren/ opschonen heisleuf e. Stellen heiframe f. Indien van toepassing aanbrengen slotverklikkers g. Ophijsen trilblok i.c.m. moederplank h. Inhijsen kunststof damwand, monteren clips aan onderzijde damwand i. Positioneren van de damwand in het heiframe j. Intrillen moederplank i.c.m. kunststof damwand tot definitief niveau k. Tussentijds verticaliteit controleren (zichten en/of waterpas) en monitoren van slotverklikker l. Uittrillen moederplank m. Herhaling vanaf stap 'c' totdat heiframe is vol gezet n. Omschotten naar volgende opstelplaats o. Hierna herhaling vanaf stap 3b p. Tussentijds inmeten geplaatste damwand

4. Opruimen werkkerrein	a. Afkoppelen HFVM trilblok b. Transport gereed maken materieel/materiaal c. Laden materieel/materiaal
-------------------------	--

6.2.3.2 Overige dijkversterkingen

Bij andere dijkversterkingen was de aanpak op detailniveau anders. Bij dijkversterking Mook is bijvoorbeeld geen moederplank gebruikt, maar zijn twee stalen geleidebuizen toegepast. Bij dijkversterkingen Zwolle – Olst en Heel & Beesel zijn de damwanden vooraf niet gestaffeld neergelegd. Verder is daar geen heiframe gebruikt, omdat het stellen langs de draad afdoende bleek. Dit geldt vooral na voorbereiden, omdat de plank dan het boorgat volgt in plaats van het heiframe.

6.2.4 Aanbrengen heisleuf

Een heisleuf is nodig om de bovenzijde van de damwanden op diepte te kunnen plaatsen en het grondprofiel daarna weer te herstellen. Het vrijkomende materiaal kan worden verwerkt in een werkplateau. De breedte van de kraanbak is ook de minimale sleufbreedte. In deze paragraaf zijn alleen de ervaringen van de dijkversterking Wolferen - Sprok beschreven.

Bij dijkversterking Wolferen – Sprok is de minimale sleufbreedte 1,8 meter. Dit is vrij breed. Deze breedte is echter nodig om de boogstralen van de damwanden te kunnen inpassen en het 17 meter lange heiframe te kunnen plaatsen. Het type in te zetten stelling is hierbij relevant: bij een draadkraan maakt de afstand van de kraan naar het te plaatsen damwand niet zoveel uit, bij een makelaarstelling wel.

Het aanvullen en verdichten achteraf ging goed met vrijkomend materiaal, verdichtingsrol en kraan met draai-kantelstuk. Het draaikantelstuk is nodig in verband met de vorm van de damwand, de rol en bak en moet met beleid tegen de plankvorm worden geduwd.

Als een heigording wordt gebruikt, dan is het belangrijk dat de brug van de heigording hoog genoeg wordt aangebracht, zodat deze niet op de kunststof damwand steunt. Dit kan namelijk leiden tot het afbreken van de bovenkant van de kunststof damwand.

6.2.5 Productiesnelheid

Om zo veel mogelijk damwanden op transport mee te kunnen nemen, worden ze bij sommige projecten om en om geladen (rechte stapels). Het inhijzen van de damwanden en aanslaan duurt hierdoor langer en de damwand komt geheel scheef onder de aanslag van de moederplank.

De damwanden worden bij voorkeur op de goede lengte besteld, omdat inkorten extra tijd kost. Het inkorten vindt bij voorkeur plaats met een reciprozaag en niet met een kettingzaag.

Gedurende het plaatsen van de damwanden zijn er een aantal stappen te onderscheiden, namelijk:

- het klaar leggen;
- inkorten;
- inhijzen;
- borgen;
- insluiten;
- stellen;
- en intrillen van de damwanden.

6.2.5.1 Dijkversterking Mook

Bij dijkversterking Mook is een productiesnelheid van circa 25 meter per dag behaald.

6.2.5.2 Dijkversterking Wolferen - Sprok

Wat betreft de voortgang kon tijdens de eerste maakbaarheidsproef bij Wolferen – Sprok het schema in Tabel 6-5 worden aangehouden. Het betreft een gemiddelde voortgang waarbij rekening gehouden is met dagelijks opstarten, stoppen en starten na pauzes, inefficiëntie door dagelijkse afstemming etc.

Tabel 6-5 Voortgang tijdens eerste maakbaarheidsproef Wolferen-Sprok

Activiteit	Duur
Maken heisleuf en verwerken in heiplateau	2 uur (afmetingen: 30m x 1,8m x 1m = 54m ³)
Productie voorboren	20 meter productie per dag (met een boordiepte van 12 m en een gatdiameter van 30 cm). Hiertoe behoort het boren en 4 keer omstellen van het boorframe: <ol style="list-style-type: none"> Duur voorboren per boorgat (met boordiepte 12 m): ongeveer 4,5 min indraaien, 1,5 min uitdraaien en 1 min omgaan naar volgende gat. Duur omstellen boorframe: 50 min. Uitgangspunt is dat het heiframe op de grond ligt. Hiertoe behoort, loskoppelen van de avegaar, inpikken van kettingwerk, ophijzen van het boorframe, positioneren van het frame, neerleggen van het kettingwerk en aankoppelen van de avegaar.
Omkoppelen van boren naar damwand zetten	2 uur. Hiertoe behoort: loskoppelen en neerleggen avegaar, loskoppelen boormotor incl slagen en gaffel, aankoppelen hijsgaffel, inpikken en aansluiten trilblok incl. hijslier, recht opzetten moederplank en vastpakken met trilblok.
Productie PVC damwand zetten	20 meter productie per dag (met een damwandlengte van 10 m) en een werkdag van 9 uur. Hierin moet dus 1 keer worden omgesteld en omgeschot. <ol style="list-style-type: none"> Duur zetten damwand: 12,5 min. (4,75 per uur). Hiertoe behoort: inhijzen, borgen, insluiten, stellen, intrillen en uittrillen moederplank inhijzen, borgen, insluiten en stellen (9,5 min.). intrillen en uittrillen (3 min.). Hierbij kan de intrilsnelheid lineair geïnterpoleerd worden. Duur omstellen heiframe (17 m): 25 min. Het uitgangspunt is dat het heiframe op de grond ligt. Hiertoe behoort, inpikken kettingwerk, ophijzen heiframe, positioneren, neerleggen van kettingwerk en vastpakken moederplank. Duur omschotten: 45 min. Hiertoe behoort omleggen 17 stuks dragline schotten en omzetten trilblok.

Na de maakbaarheidsproef is de productiesnelheid bij dijkversterking Wolferen – Sprok aanvankelijk afgenomen door de hardere ondergrond en grindlagen, maar daarna is door aanpassingen wederom een productie behaald van 20 m/dag (32 planken). De intriltijd van het verbeterde type moederplank bedraagt ca. 5 minuten in een bodem met een conusweerstand van mogelijk 56 MPa met een dikte van ca. 1,5 meter.

6.2.5.3 Dijkversterking Heel & Beesel

Bij de maakbaarheidsproef bij Heel & Beesel zijn meerdere planken van ca. 8 m lengte in de grond getrild. Het intrillen duurde 2,5 tot 7 minuten per plank.

6.2.5.4 Dijkversterking Zwolle - Olst

Bij de maakbaarheidsproef bij Zwolle – Olst zijn 30 damwanden geplaatst in 4 dagen. Hierbij is dus een productie behaald van 4,5 m per dag. Benadrukt wordt dat een proef betrof, waardoor de productiesnelheid lager is, dan tijdens realisatie.

6.3 Beheersmaatregelen gericht op functioneren van de pipingmaatregel

Deze paragraaf richt zich op de beheersmaatregelen gericht op het functioneren van de pipingmaatregel tijdens de uitvoering, oftewel de beheersmaatregelen voor de bedreigingen op waterveiligheid vanuit de FMECA. In Tabel 6-6 is een overzicht gegeven van de relevante bedreigingen tijdens de uitvoering, en de bijbehorende beheersmaatregelen. De volledige FMECA is opgenomen in paragraaf 5.2.

Zoals benoemd in de inleiding hangen veel van de beheersmaatregelen voor waterveiligheid sterk samen met de maakbaarheid van de techniek. In de tabel wordt dan ook regelmatig verwezen naar subparagrafen van paragraaf 6.4 Maakbaarheid.

Tabel 6-6 Overzicht FMECA kunststof heaveschermen voor component A en B (zie Figuur 4-2) gericht op beheersmaatregelen tijdens de uitvoering

Nr	Gebeurtenis (S)	Faalpad (F)	Beheersmaatregelen tijdens de uitvoering
A.1	Scherf ernstig uit het slot tijdens uitvoering en opening niet zanddicht	DLH	<ol style="list-style-type: none"> 1. Uitvoeren praktijkproeven (par. 6.2) 2. Aanpassen methode uitvoering (correctie damwand tijdens uitvoering (par. 6.4.3), optimale werkrichting (par. 6.4.4), toepassen stalen moederplank (par. 6.4.5)) 3. Aanpassen planktype (par. 6.4.6) 4. Controle tijdens uitvoering (monitoring tijdens uitvoering (par. 6.3.1), detectie tijdens uitvoering (par. 6.3.2), toepassen herstelmaatregelen (par. 6.3.3))
A.3	Verminderde pakking van zand vanwege voorboren	OLH	<ol style="list-style-type: none"> 1. Praktijkproeven in combinatie met grondonderzoek (par. 6.2 en 6.4.2) 2. Aanpassen installatiemethode (toepassen stalen moederplank (par. 6.4.5), water toevoegen in heisleuf (par. 6.4.7), toepassen kleefonderbrekers (par. 6.4.8), voorboren (par. 6.4.9), voorprikken (par. 6.4.10), aanpassen machineconfiguraties (par. 6.4.11), fluïderen (par. 6.4.12), toepassen makelaar (par. 6.4.13))
A.4	Verminderde pakking van zand langs het scherm door trekken van moederplank	OLH	<ol style="list-style-type: none"> 1. Praktijkproeven in combinatie met grondonderzoek (par. 6.2 en 6.4.2) 2. Aanpassen installatiemethode (toepassen stalen moederplank (par. 6.4.5), voorboren (par. 6.4.9), voorprikken (par. 6.4.10), aanpassen machineconfiguraties (par. 6.4.11), fluïderen (par. 6.4.12), toepassen makelaar (par. 6.4.13))
A.5	Scherf niet op ontwerpdiepte door harde ondergrond of obstakels	OLH	<ol style="list-style-type: none"> 1. Praktijkproeven in combinatie met grondonderzoek (par. 6.2 en 6.4.2) 2. Aanpassen installatiemethode (toepassen stalen moederplank (par. 6.4.5), voorboren (par. 6.4.9), voorprikken (par. 6.4.10), aanpassen machineconfiguraties (par. 6.4.11), fluïderen (par. 6.4.12), toepassen makelaar (par. 6.4.13)) 3. Aanpassen planktype (par. 6.4.6)
A.12	Verbranden of vloeien van sloten, scheuren tijdens uitvoering, openingen niet zanddicht	DLH	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aanpassen methode uitvoering (correctie damwand tijdens uitvoering (par. 6.4.3), optimale werkrichting (par. 6.4.4), toepassen stalen moederplank (par. 6.4.5)) 2. Controle tijdens uitvoering (monitoring tijdens uitvoering (par. 6.3.1), detectie tijdens uitvoering (par. 6.3.2), toepassen herstelmaatregelen (par. 6.3.3))
A.13	Doorbuiging planken tijdens vervoer en plaatsing	DLH	<ol style="list-style-type: none"> 1. Controle tijdens uitvoering (monitoring tijdens uitvoering (par. 6.3.1), detectie tijdens uitvoering (par. 6.3.2), toepassen herstelmaatregelen (par. 6.3.3))
A.14	Slechte aansluiting op cohesieve laag door trekken moederplank	VLH	<ol style="list-style-type: none"> 1. Voldoende grondonderzoek (par. 6.4.2) 2. Aanpassen methode uitvoering (correctie damwand tijdens uitvoering (par. 6.4.3), optimale werkrichting (par. 6.4.4), toepassen stalen moederplank (par. 6.4.5))
B.1	Afbreken van bovenkant scherm door heien	BLH	<ol style="list-style-type: none"> 1. Controle tijdens uitvoering (monitoring tijdens uitvoering (par. 6.3.1), detectie tijdens uitvoering (par. 6.3.2), toepassen herstelmaatregelen (par. 6.3.3))
B.2	Slechte aansluiting door te weinig inbedding of slechte aansluiting op cohesieve laag	BLH	<ol style="list-style-type: none"> 1. Voldoende grondonderzoek (par. 6.4.2) 2. Aanpassen methode uitvoering (correctie damwand tijdens uitvoering (par. 6.4.3), optimale werkrichting (par. 6.4.4), toepassen stalen moederplank (par. 6.4.5))
B.3	Slechte aansluiting en/of slechte aanvulling heisleuf	BLH	<ol style="list-style-type: none"> 1. Voldoende grondonderzoek (par. 6.4.2) 2. Aanpassen methode uitvoering (correctie damwand tijdens uitvoering (par. 6.4.3), optimale werkrichting (par. 6.4.4), toepassen stalen moederplank (par. 6.4.5))

6.3.1 Monitoring tijdens realisatie

Voor monitoring tijdens de realisatiefase wordt geadviseerd eenzelfde soort monitoring toe te passen die geldt voor het inbrengen van stalen damwanden. Hierbij kan gedacht worden aan bijvoorbeeld het uitvoeren van nulmetingen bij het meten van trillingen en geluid. Daarnaast wordt bij kunststof heavescherm aangeraden om steekproefsgewijs na te sonderen (na installatie) indien gebruik is gemaakt van voorboren.

6.3.2 Detectie tijdens installatie

Bij kunststof damwanden is het om meerdere redenen belangrijk om de waterdichtheid goed aan te tonen ten opzichte van stalen damwanden:

- Kunststof damwanden zijn minder sterk en stijf;
- De sloten van kunststof damwanden gaan smelten als te lang wordt getrild (door een te harde ondergrond);
- Kunststof damwanden kunnen niet, zoals bij stalen damwanden, eenvoudig worden getrokken en opnieuw worden geplaatst als er twijfel is over de aansluiting van de sloten.

Detectie en registratie van uit het slot lopen tijdens de uitvoering is essentieel. Na installatie is het lastig om de water- en zanddichtheid en de einddiepte van damwanden te bepalen. Het is van belang dat kwaliteitscontrole op bovenstaande detectiemethoden doorlopend en door een onafhankelijke partij plaatsvindt, omdat aantoonbaarheid van de water- en zanddichtheid na installatie zeer complex en bewerkelijk is (zie paragraaf 7.2.2.).

In paragraaf 5.4 is een toelichting gegeven op het belang van detectie van uit het slot lopen en is ook een aanbeveling gedaan ten aanzien van deze beheersmaatregelen. Er is daarbij onderscheid gemaakt:

- Detectie door stagnatie van de uitvoering als gevolg van het uit het slot raken van planken.
- Slotverklikkers als detectiemiddel.

Detectie door afwijkingen tijdens het installatieproces

De voorgaande plank fungeert dus als een detectiemiddel.

Voor en tijdens installatie moet worden beschouwd of een damwand niet beschadigd is of raakt. Tijdens installatie moet visueel worden vastgesteld of een damwand stabiel en 'rustig' op diepte op diepte komt. Als dit niet het geval is, dan kan dit een signaal zijn dat de damwand niet goed in het slot zit. De ervaring is dat het vaak niet lukt om een plank in te brengen als voorgaande plank(en) over aanzienlijke lengte uit het slot is gelopen.

Slotverklikkers

Niet alle situaties van uit het slot lopen van kunststof planken worden afgevangen via uitvoeringservaring (zoals stagnatie bij het aanbrengen van de volgende plank). Het toepassen van slotverklikkers is dan een aanvullende detectiemethode. Daarnaast worden slotverklikkers voor de eerste koploper projecten aangeraden om te verifiëren of uitvoeringservaring een betrouwbare indicator is voor uit het slot lopen. In paragraaf 5.4 is een aanbeveling gedaan ten aanzien van de frequentie van slotverklikkers.

Een goede slotverklikker voor kunststof damwanden is een mechanisch continu meelopend systeem. Onder de aan te brengen damwandplank wordt een 'voorloper' op het slot van de vorige plank geschoven. Zolang de aan te brengen plank in het slot blijft lopen, duwt die plank de voorloper mee naar beneden. Aan de voorloper is een koord bevestigd. Tijdens het aanbrengen wordt gemeten hoeveel lengte koord de voorloper verbruikt. Als de voorloper een planklengte koord heeft verbruikt, dan is de conclusie dat de plank over de gehele lengte in het slot is blijven lopen. De voorloper en het koord worden beschouwd als verloren. Nadat de damwand is aangebracht wordt het koord afgebrand en een nieuwe voorloper bevestigd aan het damwandslot voor de opvolgende plank. Eén alternatieve wijze om dit systeem te gebruiken is om de slotverklikkers prefab te maken en toe te passen. Daarmee wordt eventuele stagnatie voor mens en materieel tijdens het aanbrengen van damwanden door het bevestigen voorkomen.

Bij dijkversterking Mook zijn slotverklikkers toegepast. Op basis daarvan is geconcludeerd dat geen enkel scherm uit het slot is gelopen.

De verwachting bij dijkversterking Wolferen – Sprok is dat minder dan 5% van de koordjes zal knappen tijdens damwandinstallatie. Indien blijkt dat de damwand stabiel en 'rustig' op diepte komt, dan wordt volstaan met een notitie van het geknapte koord op het registratieformulier. Zo niet, dan wordt een afwijking genoteerd. De ervaring leert dat de maatregel fluïderen bij kunststof damwanden in zware grondslag ervoor kan zorgen dat het koord vroegtijdig knapt. Op locaties waar sonderingen een zware grondslag aangeven, wordt bij voorkeur ter vervanging van het koord staaldraad toegepast ter versteviging.

De door SGS geleverde slotverklikkers tijdens de eerste maakbaarheidsproef bij dijkversterking Wolferen – Sprok werkten niet. De oorzaak is dat de CL-serie een T-vormig slot heeft in plaats van een H-vormig slot.

Het staaldraadje dat boven maaiveld moet verklikken komt daardoor in de baan van het slot waardoor er vroegtijdig verklikt wordt.

Het komt soms voor dat de voorloper minder dan een planklengte koord heeft verbruikt. Bij de maakbaarheidsproef van Zwolle – Olst werkte 20% van de slotverklikkers niet naar behoren. Dit kan twee dingen betekenen: de plank is uit het slot gelopen of het slotverklikker systeem heeft gefaald (bijvoorbeeld doordat het koord is geknapt). Vermoedelijk was het laatste het geval, omdat een nylon draad is toegepast. Het falen van de slotverklikkers geeft dus nog wel eens een vals alarm.

6.3.3 *Herstelmaatregelen bij openingen in damwanden*

Een harde ondergrond kan het gevolg hebben dat damwanden niet op diepte komen, uit het slot lopen of dat er schade aan de damwand ontstaat. Op dat moment zijn maatregelen nodig om het damwandscherm alsnog volledig sluitend te maken. Hiervoor zijn diverse maatregelen mogelijk.

In het geval dat een scherm niet in één keer volledig sluitend is aangebracht, dat wil zeggen; een plank niet aantoonbaar in het slot, een plank niet diepte of functieverlies door schade, dan wordt een afwijking opgesteld en gaat de uitvoerder samen met de maatvoerder het damwandscherm langs om planken die niet voldoen in te meten en foto's te maken van beschadigde planken. In de afwijking worden de nummers genoteerd van de planken die niet voldoen en bij elke planknummer wordt vermeld waarom die plank niet voldoet. De maatvoerder meet de exacte locatie van de damwandplank in middels GPS. Voor elke damwandscherm met planken, die niet voldoet, wordt in overleg met de constructeur bepaald welke beheersmaatregel nodig zijn om het scherm alsnog volledig sluitend te maken. In de afwijking wordt per plank genoteerd welke beheersmaatregel toegepast is. De beheersmaatregel wordt bijgehouden en ingemeten. De afwijkingen worden genoemd in de voortgangsrapportages en worden benoemd op de as-buult tekeningen.

Om aan de eisen van waterveiligheid te voldoen kunnen de volgende herstelmaatregelen worden overwogen:

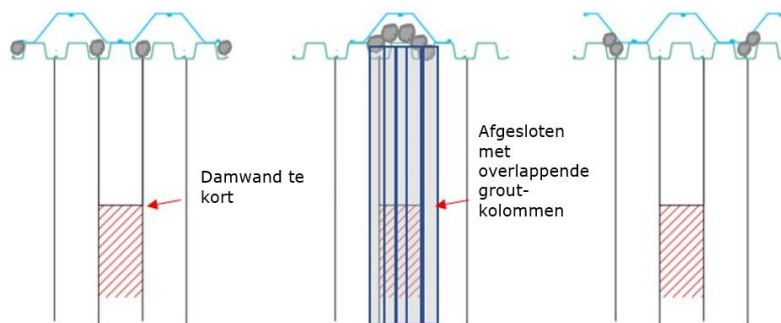
1. **Potdekselmethode:** Als het damwandscherm niet doorlopend aangebracht is, wordt de potdekselmethode toegepast. De oorzaak kan zijn dat de damwandplank is afgebroken (door obstakel of harde bodemlagen) en/of het uitbreken van damwandslot waardoor de damwand niet in het slot zit. Wanneer wordt gekozen voor potdekselen dan wordt in feite een nieuwe aanzet gemaakt t.b.v. het aanbrengen van het damwandscherm. Hierbij wordt een overlap gecreëerd door het intrillen van extra schermen. De theoretische open ruimten wordt afgedicht door grout te injecteren.

Het grouten vindt plaats door middel van een zelfborend anker met een aangepaste kop en zijdelingse geplaatste hogedruknozzle. Daarmee wordt het anker verticaal naar beneden geboord. Eenmaal op diepte wordt de pomp op maximaal gezet en de bodem met grout geïnjecteerd. De maximale injectiedruk aan de pomp is ca. 80 bar. Tijdens het injecteren wordt het anker langzaam draaiend teruggetrokken. Hiermee wordt de bodem versneden en blijft een gesloten groutkolom achter. Bij locaties waar groutkolommen overlappend worden aangebracht (bij open ruimte >300mm) worden eerst de even kolommen geboord en daarna de oneven (of andersom). Het uitharden van de groutkolommen moet voorkomen dat de boorstang tijdens het op diepte boren gaat wijken naar de naastgelegen vloeibare kolom. De aantoonbaarheid is gericht op het op diepte krijgen (lengte/aantal ankerstangen), de omvang van de groutkolommen (aantal en hoeveelheid cement) en de kwaliteit van het cement.



Figuur 6-5 Voorbeeld van de 'potdekselmethode'

- Aanbrengen stalen damwandscherm:** Een ander risico is dat de kunststof damwand niet op diepte komt. Het is aannemelijk dat het aanbrengen van een potdeksel op dezelfde locatie soortgelijke problemen geeft. In dat scenario wordt afhankelijk van de omvang van de open ruimte één of twee stalen damwand profielen aangebracht. De stalen damwand zorgt ervoor dat op diepte een scherm aanwezig is. De beheersmaatregel betreft een losstaand scherm met open ruimte tussen de stalen en kunststof damwanden. Om het restrisico op piping weg te nemen worden de schermen met elkaar verbonden door middel van grout. De stalen plank zorgt als het ware voor een bekisting om ervoor te zorgen dat het grout op de juiste plek met de juiste omvang kan worden gerealiseerd.



Figuur 6 Aanbrengen stalen damwandscherm

- Bovenzijde afwerken met erosiebestendige klei:** Een damwand kan ook aan de bovenzijde beschadigd of uit het slot zijn. Dit kan bijvoorbeeld komen doordat de plank tijdens transport of hijswerkzaamheden ergens tegenaan is gestoten, of als gevolg van het ontkoppelen van de stalen moederplank. In dit geval is een beheersmaatregel om de beschadiging tot 0,8 m dieper en 0,5 m breed aan weerszijde te ontgraven en met erosiebestendige klei, aan te vullen om alsnog het opsluiten van de kop van de kunststof damwand te realiseren.



Figuur 7 Beschadiging aan de bovenzijde van de damwand

4. **Damwand vervangen:** De damwand kan ook worden getrokken, waarna een nieuwe damwand wordt geplaatst. De minimale plakdikte is bepalend voor het kunnen trekken ervan. Bij dijkversterking Wolferen - Sprok wordt dit niet als een gewenste oplossing gezien, omdat de kans op schade of afbreken van de damwand daarbij te groot is. Bij de maakbaarheidsproef bij Zwolle - Olst is het wel als beheersmaatregel uitgeprobeerd. Dit was deels succesvol, maar leidde in aantal gevallen tot schade of afbreken. Het heeft daarom niet de voorkeur van de aannemer.

Door de registratie van afwijkingen krijgen de uitvoerder en werkvoorbereider inzicht in risicolocaties. Als voorafgaand aan damwandinstallatie het risico van harde grondlagen of obstakels als te groot wordt gezien, kan ook op voorhand een stalen plank in plaats van een kunststof plank worden toegepast [19], [21].

Bij dijkversterking Wolferen - Sprok zijn (naast de bovengenoemde) nog een aantal herstelmaatregelen geïnventariseerd en onderzocht, die om één of meer redenen niet de voorkeur hebben gekregen, zie Tabel 6-7.

Tabel 6-7 Niet toegepaste herstelmaatregelen bij dijkversterking Wolferen-Sprok [21]

Method	Principe	Overwegingen om niet hiervoor te kiezen
Ontgraving (nat / droog)	Er wordt een afgesloten bouwput gecreëerd, die wordt ontgraven. Vervolgens worden de openingen in de damwand afgesloten met een waterdicht folie of met zwelklei.	<ul style="list-style-type: none"> • Relatief grote bouwput nodig met bemaling of afsluitende bodem. • Maatregelen nodig om doorbreken kunststof wand door gronddruk te voorkomen.
Mechanisch leegzuigen	De holtes in de damwandbuiken worden afgesloten en vervolgens leeggezogen vanuit een zuigwagen. Daarna wordt dit opgevuld met zwelklei.	<ul style="list-style-type: none"> • Het puntniveau is te diep t.o.v. de kracht om leeg te zuigen, waardoor twee zuigniveaus benodigd zijn. • Om het leeg te houden voorafgaand het aanvullen moet deze methode 'blijven zuigen'. • Maatregelen nodig om doorbreken kunststof wand door gronddruk te voorkomen. • Het puntniveau kan niet volledig worden bepaald/ingemeten vanwege het feit dat het afzuigen doorlopend dient te gebeuren en aanvullen in een 'snelle werkgang' plaatsvindt.
Mechanisch leegspuiten	De holtes in de damwandbuiken worden afgesloten. Door met hoge druk in een relatief kleine bouwput een hoog debiet middels een spuitlans (of gelijkwaardig) op de ondergrond te richten wordt als het ware drijfzand/slib gecreëerd. Het loskomend materiaal wordt verwijderd door het continue blijven aanbrengen van water aan	<ul style="list-style-type: none"> • Om leeg te spuiten, onder druk zijn grote hoeveelheden water benodigd. • Maatregelen nodig om doorbreken kunststof wand door gronddruk te voorkomen. • Spuiten leidt tot grote ontspanning in de grond en dus grote vervormingen.

	de onderzijde van de bouwput. Daardoor reikt de spuitlans (of gelijkwaardig) steeds dieper totdat het puntniveau is behaald. Daarna wordt dit opgevuld met zwelklei.	
Leegboren (avegaarboor / spiraalboor)	Door middel van het leegboren van het gat met een boor wordt een holle ruimte gecreëerd. De ruimte kan worden gevuld met afdichtend materiaal zoals zwelklei.	<ul style="list-style-type: none"> • De avegaarboor is rond en daardoor is de kans aanwezig dat de damwandbuik niet volledig schoon is voorafgaand het aanvullen. • Door de booremmer en de 'zoekende' boor is zorgvuldigheid vereist. Schade is niet uitgesloten. • Resultaat is slecht aantoonbaar.
Bodeminjectie waterglas	Bodeminjectie met waterglas houdt in dat met chemische injecties bolvormige elementen worden aangebracht. Na uitharding beschikken deze elementen over een geringe doorlatendheid van water. Om de damwandschermen in te pakken kunnen meerdere lagen boven elkaar worden aangebracht.	<ul style="list-style-type: none"> • Op den duur breekt de samenstelling af in de ondergrond.

6.4 **Maakbaarheid: beheersmaatregelen gericht op kwaliteit en efficiëntie van uitvoering**

Deze paragraaf richt zich op de beheersmaatregelen gericht op kwaliteit en efficiëntie tijdens de uitvoering. Zoals benoemd in de inleiding hangen veel van de beheersmaatregelen voor waterveiligheid sterk samen met de maakbaarheid van de techniek. In Tabel 6-6 is een overzicht gegeven van de relevante bedreigingen tijdens de uitvoering, en de bijbehorende beheersmaatregelen.

6.4.1 *Algemeen*

Vanuit de maakbaarheidsproeven is een groot aantal beheersmaatregelen tijdens de uitvoering ontwikkeld en geëvalueerd:

- Uitvoeren grondonderzoek;
- Correctie damwand tijdens uitvoering;
- Optimale werkrichting;
- Toepassing van stalen moederplank;
- Selectie van het optimale type damwandprofiel;
- Water toevoegen in heisleuf;
- Toepassen kleefonderbrekers;
- Voorboren;
- Voorprikken;
- Aanpassen machineconfiguraties;
- Fluïderen ;
- Toepassen makelaar;
- Monitoring tijdens de uitvoering.

Deze maatregelen zijn hieronder per paragraaf toegelicht.

6.4.2 *Grondonderzoek*

Het wel of niet succesvol kunnen installeren/toepassen van de kunststof schermen is mede afhankelijk van de bodemgesteldheid. Er wordt geadviseerd elke 25 m te sonderen tot minimaal 1 m onder het puntniveau van de damwand om tijdens realisatie te kunnen anticiperen op lokaal harde ondergrond. Dit is de gangbare praktijk bij het ontwerp van langsconstructies t.b.v. de waterveiligheid en wordt ook in CUR 166 [22] als richtlijn meegegeven.

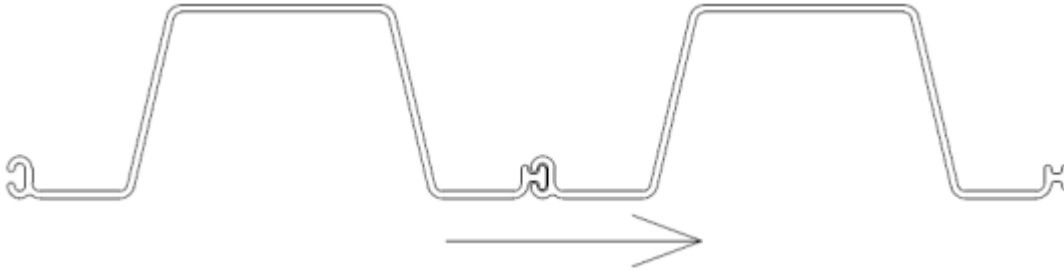
In bijlage D zijn de ervaringen opgenomen van dijkversterking Wolferen-Sprok over het beoordelen van het uitgevoerde grondonderzoek, en de effecten daarvan op de uitvoering.

6.4.3 *Correctie damwand tijdens uitvoering*

Het streven is om de damwand stabiel en 'rustig' op diepte te krijgen. Indien tijdens uitvoering de damwandplank onrustig en/of met scheefstand in de grond wordt aangebracht dan wordt de damwand gecorrigeerd om het zettingsproces zorgvuldig af te ronden.

6.4.4 Optimale werkrichting

Bij de werkrichting moet rekening gehouden worden dat het dichte slot in de richting wordt geplaatst (zie Figuur 6-8), waarbij dus het open slot wordt ingesloten. Op deze manier wordt het risico beperkt dat de damwand uit het slot loopt.



Figuur 6-8 Optimale werkrichting

6.4.5 Toepassing van stalen moederplank

De toepassing van een stalen moederplank is noodzakelijk om de kunststof damwanden op diepte te brengen, omdat kunststof alleen onvoldoende sterk en stijf is. De krachten van het trilblok kunnen op die manier door de stalen moederplank worden opgenomen. Terwijl deze de grond ingaat, wordt de kunststof plank meegenomen. Na het op diepte brengen van het kunststof scherm wordt de moederplank trillend getrokken. Bij het trekken van de moederplank zal er een spleet achterblijven langs het kunststof scherm. De spleet heeft waarschijnlijk een breedte van enkele centimeters afhankelijk van de dikte van de moederplank (ca. 10mm). In het zand zal de spleet snel opgevuld raken door trillingen tijdens het trekken van de moederplank, in de kleideklaag zal dit niet het geval zijn. Vanwege de consistentie van de klei van de deklaag, is het niet aannemelijk dat de spleet over de volledige hoogte snel weer dicht gedrukt zal worden. De spleet is aanwezig tussen de onderkant van de heisleuf en de onderkant van de deklaag. De heisleuf en berm worden naderhand aangevuld, dus de spleet komt niet tot aan maaiveld, maar staat wel in verbinding met het onderliggende watervoerende zandpakket. Het is dus mogelijk dat bij hoogwater, de stijghoogte in de spleet langs het heavescherm toeneemt. Daarnaast kan de pakkingsdichtheid van het zand langs het scherm lager zijn. Om de mogelijke nadelige effecten in de vorm van heave aan de landzijde van de damwand te beperken, wordt geadviseerd om de moederplank aan de dijkzijde toe te passen.

Bij voorkeur bestaat de moederplank uit een stuk zetwerk, zodat lasverbindingen en verstevigingsplaten worden voorkomen. Deze dempen namelijk de trillingen door de extra massa en de lagere stijfheid. Als de moederplank echter onvoldoende stevig is, dan moet deze toch voldoende worden verstevigd door middel van doorlassing en verstevigingsplaten. Het aanbrengen van 'tanden' aan de moederplank om de puntweerstand in de zandlaag te beperken, leidt niet tot een significante optimalisatie.

Er kan zand en grind tussen de stalen moederplank en de kunststofplank komen, mede als gevolg van een te sterke verdichting van grond door trillen in combinatie met veel water in de sleuf. Daardoor kan de kunststof plank weer mee omhoog worden getrokken bij het trekken van de stalen moederplank. Dit kan worden voorkomen door tussen beide planken een waterslang aan te brengen om grond weg te spoelen, waarbij de slang deels mee naar beneden gaat.

Bij dijkversterking Wolferen – Sprok is geprobeerd om dubbele moederplanken toe te passen, zodat naast de te plaatsen kunststof damwand alvast wordt voorgeprikt. Dit bleek niet te werken, omdat de weerstand van de bodem hiervoor te groot was.

6.4.6 Selectie van het optimale type damwandprofiel

Kunststof heaveschermen dienen onder alle omstandigheden voldoende waterdicht te zijn. Concreet betekent dit het volgende:

- De kunststof heaveschermen dienen met de sloten aan elkaar verbonden te blijven. Tijdens installatie van de schermen moet dit worden aangetoond. Daarna mogen er geen grote vervormingen optreden waardoor de schermen uit het slot kunnen schieten;
- De kunststof heaveschermen dienen constructief voldoende sterk te zijn, zodat de schermen niet scheuren of breken;

- De vervormingen van de grond het scherm dienen voldoende klein te zijn, zodat er geen scheuren of spleten ontstaan waardoor een kwelweg langs het scherm kan ontstaan;
- De installatiediepte dient op hetzelfde niveau te blijven, dus het scherm mag niet wegzakken ten gevolge van negatieve kleef in de deklaag.

Om te toetsen dat er niet te grote vervormingen optreden zijn bij het heaveschermontwerp van dijkversterking Wolferen-Sprok PLAXIS analyses uitgevoerd. Hierbij wordt opgemerkt dat de verwachte zettingen klein zijn vanwege de zandige klei en beperkte ophogingen. De vervormingen en kracht in de grond en het scherm zijn berekend voor een fasering van aanleg tot hoogwater gedurende de levensduur van het heavescherm. Op basis van de analyse kunnen de volgende project specifieke conclusies worden getrokken voor de situatie bij dijkversterking Wolferen-Sprok:

- Een kunststof heavescherm heeft een dusdanig lage stijfheid, dat deze goed in staat is de grondvervormingen te volgen en nauwelijks kracht naar zich toe trekt. Daarnaast bestaan er kunststof schermen die een aanzienlijke hogere kracht kunnen opnemen, deze kunnen indien gewenst ook voorzien worden van een gording en een anker;
- De horizontale vervorming van het kunststof scherm kan oplopen tot ca. 5 à 10 cm gedurende de levensduur van het heavescherm (100 jaar). Deze vervormingen treden echter geleidelijk op in de tijd. De vervormingen die tijdens een hoogwatersituatie optreden zijn beperkt tot ca. 1 cm. Deze vervormingen worden niet als een probleem gezien voor het functioneren van het heavescherm;
- De verschilvervormingen van de grond aan weerszijden van het heavescherm bedragen maximaal ca. 10 mm in de fase met de bodemdaling. In de hoogwaterfase is de verschilvervorming maximaal ca. 1 mm aan de bovenzijde van het heavescherm. Ter hoogte van de onderzijde van de deklaag zijn de vervorming zeer klein. De optredende vervormingen zijn zo klein, dat het risico van uit het slot springen van het scherm gedurende de levensduur voldoende klein wordt geacht. De vervormingen zijn ook zo klein, dat het niet waarschijnlijk is dat er een doorgaande spleet langs het heavescherm ontstaan waardoor kortsluiting en kwel langs het scherm kunnen ontstaan. De waterdichtheid van een zorgvuldig in de sloten geïnstalleerd heavescherm is op basis van de berekende vervormingen dus voldoende klein;
- Door de zakking van grond langs het scherm en negatieve kleef kan het scherm gaan meezakken. De zakking van het heavescherm bij de voet in het zand bedraagt maximaal ca. 1 cm en treedt grotendeels op door de zetting van de berm. De zakking is dusdanig beperkt dat het installatieniveau van het scherm gegarandeerd blijft;
- De verschillen in de berekende vervormingen en momenten tussen een kort en een lang heavescherm zijn klein. De lengte van het heavescherm in het zand heeft dus geen invloed op de bovenstaande conclusies.

Bij dijkversterking Mook zijn Prolock Delta dichtschermen toegepast [5], zie Tabel 6-8. Kenmerkend voor dit type damwand is dat in elk profiel twee zeshoekige kokers zitten waarin tijdens inbrengen stalen geleidebuizen worden gestoken. Na inbrengen worden de geleidebuizen getrokken en kunnen de kokers worden opgevuld met houten of stalen palen om de stijfheid en sterkte te vergroten. Nadien heeft deze damwandleverancier het Prolock Epsilon-profiel ontwikkeld speciaal voor heavetoepassingen. Dat is een breed U-profiel dat met een moederplank op diepte wordt gebracht. Afbeeldingen van Prolock Delta en Epsilon zijn opgenomen in Bijlage B.

Tabel 6-8 Overzicht damwandprofielen bij dijkversterking Mook

Profiel	Toelaatbaar moment [kNm/m]	Traagheidsmoment [cm ⁴ /m]	Dikte [mm]	Hoogte [mm]	Breedte [mm]
Prolock Delta	5,0	1.335	onbekend	120	500

Bij de eerste maakbaarheidsproef bij dijkversterking Wolferen – Sprok zijn drie planktypes uitgeprobeerd met een verschillende stijfheid: SG-325, CL-9000 en CL-9900 [6], zie Tabel 6-9. De stijfheid is alleen voor de installatie van belang, omdat de damwand geen constructieve functie heeft in het dijkversterkingsontwerp.

Tabel 6-9 Overzicht damwandprofielen bij 1e maakbaarheidsproef Wolferen - Sprok

Profiel	Toelaatbaar moment [kNm/m]	Traagheidsmoment [cm ⁴ /m]	Dikte [mm]	Hoogte [mm]	Breedte [mm]
SG-325	13,17	5.326	6,4	178	610
CL-9000	19,22	9.969	7,1	229	610

CL-9900	23,72	12.290	8,9	229	610
---------	-------	--------	-----	-----	-----

Het SG-325-profiel bleek onvoldoende stijf om te installeren. Het CL-9900-profiel kwam tijdens de maakbaarheidsproef niet op diepte, vermoedelijk door de massa van het profiel en de beperkte passendheid met de moederplank. Het CL-9000-profiel, qua zwaarte de middelste, bleek het beste te werken. Bij de 2^e maakbaarheidsproef en in de realisatiefase is overgestapt naar een gelijkwaardig type damwand van een andere leverancier (Tabel 6-10).

Tabel 6-10 Damwandprofiel bij 2 maakbaarheidsproef en realisatiefase dijkversterking Wolferen - Sprok

Profiel	Toelaatbaar moment [kNm/m]	Traagheidsmoment [cm ⁴ /m]	Dikte [mm]	Hoogte [mm]	Breedte [mm]
JLD-610 7.2	17,0	7.743	7,2	200	606

Bij de maakbaarheidsproef Heel & Beesel zijn ook JLD 610 7.2 damwanden toegepast.

Bij de maakbaarheidsproef bij dijkversterking Zwolle – Olst [11] zijn meerdere profielen toegepast, zie Tabel 6-11.

Tabel 6-11 Overzicht damwandprofielen bij maakbaarheidsproef Zwolle - Olst

Profiel	Toelaatbaar moment [kNm/m]	Traagheidsmoment [cm ⁴ /m]	Dikte [mm]	Hoogte [mm]	Breedte [mm]
JLD U 610/6	17,0	8.915	6,0	230	606
JLD U 610/7.2	17,0	7.743	7,2	200	606
JLD U 610/9	24,4	12.758	9,0	230	606

Aanbevolen wordt om in het ontwerp uit te gaan van 7,2 mm dikke damwanden, omdat 6 mm dikke wanden sneller breken bij trekbelasting.

6.4.7 Water toevoegen in heisleuf

De installeerbaarheid kan, afhankelijk van de bodemopbouw, significant worden vergroot door met een waterwagen water tussen de framebalken te laten lopen, zodat dit door de damwand die ingetrild wordt mee naar beneden loopt. Het water heeft twee functies. Ten eerste vermindert het de kleef met de kleigrond. Ten tweede koelt het de damwandsloten, waardoor deze minder snel verbranden / smelten. Een aandachtspunt is dat de sleuf niet helemaal vol wordt gezet, omdat te veel water in combinatie met trillen tot te veel verdichting zorgt.

6.4.8 Toepassen kleefonderbrekers

Kleefonderbrekers aan de onderkant van de moederplank voorkomen kleipropvorming. Zonder kleipropen is de massa van de plank lager, waardoor minder trillingen nodig zijn om deze in beweging te krijgen.

6.4.9 Voorboren

Bij dijkversterking Mook is niet voorgeboord, omdat dit niet nodig bleek. Bij andere projecten met Prolock damwanden is met een boormast van Van Tongeren gewerkt om de schermen trillingsvrij op diepte te krijgen. Vanuit de kokers wordt dan met een avegaar en beitels de grond onder het scherm opengemaakt en wordt het scherm gedrukt.

Bij dijkversterking Wolferen – Sprok is voorgeboord met een avegaar: type Auger Torque 50000 MAX Earth Drill met diameter 300 mm. De verticaliteit van de boor kan goed worden gewaarborgd door zichten, waarbij de machinist in y-richting kijkt en de heier in x-richting. De boor verloopt niet in de grond. Conform uitvoeringsnorm NEN-EN1536 moet men bij stalen en houten damwanden rekenen op een tolerantie van 0,02 m/m. Bij het boren komt weinig materiaal vrij, doordat tegendraads wordt teruggedraaid. Dit is ongeveer 50-75 liter grond per gat. Het is niet nodig om de heisleuf op te schonen omdat er weinig uitkomend materiaal is en het materiaal dat is vrijgekomen wordt opgevangen door het boorframe.

Uitvoeringstechnisch is het grootste effect van het voorbereiden dat de intrinsieke snelheid hoger is. Het duurt dus minder lang voor een damwand om op diepte te komen en hierdoor wordt het risico van sloten die verbranden kleiner.

Voor het voorbereiden, is tijdens de heiproef gebruik gemaakt van de Hitachi EX455 met losse boor(motor) en boorframe. Om het voorbereiden te versnellen heeft de aannemerscombinatie ervoor gekozen om een losse boorstelling in te zetten met een boormakelaar (verticale geleiding). Dit voorkomt het ombouwen na voorbereiden, scheefstand en verloop van de boor tijdens inboren. Ook het toepassen en omstellen van een boorframe is daarmee niet langer nodig.

Het effect van voorbereiden kan deels te niet worden gedaan door de verdichting die optreedt bij het trillen van de damwand. Daarom kan het bij harde ondergrond nodig zijn om per plank voor te boren (in plaats van grotere strekkingen), maar ook dit is bij zeer harde ondergrond in de praktijk niet afdoende. Voorboren met bentoniet voorkomt dit probleem en wordt aanbevolen, tenzij voor mogelijke holtevorming wordt gecompenseerd in het ontwerp, bijvoorbeeld als het heavescherm onder een brede stabiliteitsberm komt.

Een nadeel van voorbereiden in combinatie met bentoniet is echter dat het dit duurder is, en dat de business case voor het toepassen van kunststof damwanden hierdoor minder gunstig wordt ten opzicht van staal. Verder kan in harde zand en grindlagen de boorkop tijdens voorbereiden extreem slijten waardoor vroegtijdige vervanging nodig is.

Bij de maakbaarheidsproeven bij Zwolle – Olst en Heel & Beesel is niet voorgeboord, omdat dit niet nodig bleek.

6.4.10 Voorprikken

Bij een harde ondergrond kan eerst worden voorgeprikt met alleen de stalen moederplank, waarna pas in tweede instantie de kunststof damwand wordt geïnstalleerd. Voorprikken lijkt effectief in de kleilaag, niet in zand, hier werkt het juist averechts vanwege verdichtende eigenschappen. Voorprikken gaat uiteraard ten koste van de productiesnelheid.

Voorprikken is succesvol uitgetoetst bij dijkversterking Wolferen – Sprok. Bij de maakbaarheidsproeven bij Zwolle – Olst en Heel & Beesel is niet voorgeprikt, omdat dit niet nodig bleek.

6.4.11 Aanpassen machineconfiguraties

Bij zand leidt hoogfrequent trillen tot het beste resultaat. Bij klei werkt laagfrequent trillen het best. Bij de maakbaarheidsproef bij Zwolle – Olst is niet alleen de trillingsfrequentie (toerental in omwentelingen per minuut) gevarieerd, maar ook de slagkracht (percentage van de maximale slagkracht) en de makelaarsdruk (bar). Hieruit zijn geen generieke conclusies getrokken.

6.4.12 Fluïderen

Bij dijkversterking Wolferen – Sprok leidt fluïderen tot een betere installeerbaarheid. Bij fluïderen worden er spuitlansen aan de moederplank bevestigd. Deze spuiten de grond onder hoge druk los tijdens damwandinstallatie. Het op de goede manier vastmaken van de spuitlansen aan de moederplank is een aandachtspunt. Voorkomen moet worden dat deze tijdens installatie tot extra weerstand leiden of stuk gaan. Daarnaast is het kiezen van de juiste druk en debiet een aandachtspunt. Lage druk en weinig liters kan in specifieke bodemopbouw de uitkomst tot het plaatsen bieden. Conform CUR 166 is sprake van fluïderen bij een druk van 100 - 250 bar en een debiet in de orde van 6 m³/uur. Het is belangrijk dat geen hoger debiet wordt gebruikt, omdat dit juist tot ontspanning van grond kan leiden.

Bij andere beschouwde dijkversterkingen is niet gefluïdeerd, omdat dit niet nodig bleek.

6.4.13 Toepassen makelaar

In het najaar van 2022 is bij dijkversterking Wolferen - Sprok een extra installatieteam gevormd. Zij hebben in tegenstelling tot het eerste team een makelaar toegepast. Ook bij de maakbaarheidsproef bij Zwolle – Olst is een makelaar toegepast. Een voordeel van de makelaar is dat dit leidt tot een hogere productiesnelheid omhooggaat. Een nadeel is dat het lastiger is om de moederplank aan de dijkzijde te plaatsen, waardoor de productiesnelheid wordt verkleind.

6.5 Omgevingsbeïnvloeding

Deze paragraaf gaat over beheersmaatregelen die niet vanuit waterveiligheid (oftewel de FMECA) benodigd zijn, maar wel relevant zijn voor een goede uitvoering. De focus ligt op beheersmaatregelen om de impact om de omgeving te beperken. Denk hierbij aan maatregelen voor bijvoorbeeld het verminderen van trillingen of het voorkomen van schade aan panden of percelen.

6.5.1 Trillingen

Trillingen ten gevolge van het intrillen van de damwanden planten zich voort door de ondergrond. Dit gebeurt sneller en verder door vaster gepakte zandlagen dan door klei. Trillingen bij bebouwing kunnen via de fundering schade veroorzaken aan het gebouw. Het is belangrijk bekend te zijn met de mate van voortplanting van trillingen, om de noodzaak van beheersmaatregelen nabij bebouwing te bepalen. Om inzicht te krijgen in de voortplanting van de trillingen zijn bij de eerste heiproef van WOS en de maakbaarheidsproef bij Zwolle-Olst de trillingen gemonitord.

Bij de maakbaarheidsproef bij Zwolle – Olst zijn de trillingen gemonitord. De locatie kenmerkt zich door een relatief ongunstige bodemopbouw (hoge conusweerstand). Er is gemeten op één locatie, met één grondslag, één funderingsmachine en -machinist en enkel op het maaiveld. De resultaten lieten een grote spreiding zien, ook tussen identieke planken met identieke instellingen. Door variaties in grondslag, funderingsmachine en -machinist, gebouw en fundering, kunnen de trillingsniveaus, en daarmee de kans op schade, sterk variëren. Aangeraden wordt om bebouwing tijdens uitvoering te monitoren, en de contouren op basis van voortschrijdend inzicht aan te passen. Het toepassen van water in de heisleuf heeft geen noemenswaardig effect op de gemeten trillingen. Het effect van voorboren is niet gekwantificeerd omdat voorboren niet is toegepast.

Bij de maakbaarheidsproef bij Heel & Beesel zijn de trillingen ook gemonitord. De monitoring is gedaan op maaiveld 5, 10, 20 en 30m vanaf de bron. Uit de proef volgt dat het noodzakelijk is om binnen een afstand van 20m tot de bron de trillingen te bewaken. Er mag niet op voorhand van uit worden gegaan dat binnen een afstand van 20m de trillingen voldoende klein zijn om schade te voorkomen.

Bij de heiproef bij WOS zijn de trillingen ook gemonitord. Ze zijn gemeten aan maaiveld en in de top van de zandlaag met een frequentie van 0,1 Hz ($t = 10$ sec) De trillingsmeters waren zo gepositioneerd dat altijd op meerdere afstanden van de damwandplank (5 à 30 m) de trillingen zijn gemeten. Op basis van de trillingsmetingen zijn de volgende conclusies getrokken.

- De maximum gemeten trillingsversnelling bedraagt 1 à 2 m/s^2 op ca. 10 m uit de trillingsbron, de gemiddelde trillingsversnelling ligt tussen ca. 0,1 en 0,5 m/s^2 . Dit zijn normale waarden voor het intrillen van damwanden.
- Over het algemeen zijn er hogere trillingen gemeten bij de planken waar niet is voorgeboord, maar er is geen duidelijk verschil op te maken uit de metingen. Waarschijnlijk heeft het voorboren een positief effect op de trillingen, doordat de planken makkelijker aan te brengen zijn, maar het effect is niet groot.
- Er is geen duidelijk verschil te zien tussen de verschillende typen planken in de trillingsmetingen. Het type plank lijkt dus geen significante invloed te hebben op de trillingen.

6.5.2 Geluid

Om eventuele geluidshinder te kunnen voorspellen zijn er bij de maakbaarheidsproef Zwolle-Olst geluidsmetingen uitgevoerd. Hieruit worden de volgende conclusies getrokken:

- Uit de metingen blijkt dat ter voorkoming of beperking van geluidshinder het beste getrild kan worden met een vermogen van 30% en een trilfrequentie van 33 Hz.
- Verder blijkt dat er weinig richtingsafhankelijkheid in de geluidsemissie zit. Dit is alleen duidelijk aanwezig in de 125 Hz octaafband.
- Het toepassen van water in de heisleuf heeft geen noemenswaardig effect op de gemeten geluidseffecten.

Bij de heiproef uitgevoerd bij Heel & Beesel zijn ook geluidsmetingen uitgevoerd. De metingen zijn uitgevoerd op afstanden van 15, 30 en 60 meter vanaf de bron. Geconcludeerd wordt dat voor panden op een afstand van 20 meter de geluidbelasting beperkt blijft tot de waarden zoals genoemd in de Circulaire

Bouwlawaai. Op kortere afstanden is de belasting groter in kan gedurende korte (seconde) tijden niet aan de aanbevolen waarden worden voldaan.

Bij de heiproef uitgevoerd bij WOS zijn geen geluidsmetingen uitgevoerd.

6.5.3 Conusweerstand

Het toepassen van voorboren bij het aanbrengen van de kunststof damwanden heeft effect op de conusweerstand. Om dit effect in kaart te brengen is bij de heiproef bij WOS nagesondeerd op verschillende afstanden vanaf de damwand (0, 0,5, 1 en 2m).

Op basis van de sonderingen worden de volgende conclusies getrokken:

- Er is ter plaatse van de damwand een duidelijke afname van de conusweerstand te zien in de deklaag en zandlagen ten gevolge van voorboren, maar de afname verschilt sterk per grondlaag. In de deklaag is de afname ca. 30-70%. In de diepere zandlagen is de afname ca. 30%. In het algemeen kan gesteld worden dat het voorboren tot een afname van de weerstand van de grondlagen leidt, maar de afname is niet zodanig dat dit tot problemen leidt voor het functioneren van het heavescherm;
- Door het voorboren kan er klei uit de deklaag meegevoerd worden in de bovenste meter van het zand. Dit is terug te zien als een afname van de conusweerstand en toename van het wrijvingsgetal. Enige vermenging van de klei en zand wordt echter niet als een probleem gezien.

Bij de maakbaarheidsproef bij Zwolle-Olst is niet nagesondeerd, er is hier ook geen voorboren toegepast omdat dit niet nodig bleek.

6.5.4 Pakkingsgraad zand

Het heavecriterium waar de heaveschermen op worden ontworpen is afhankelijk van de relatieve dichtheid van het zand. Bij WOS is het heavecriterium geoptimaliseerd door extra onderzoek uit te voeren naar de aanwezige relatieve dichtheid. Omdat er is gekozen voor voorboren wijzigt de pakking van het zandpakket. Om het effect van het voorboren en het inbrengen van het kunststof heavescherm op de pakking van het zand te onderzoeken is er nagesondeerd na aanbrengen bij de eerste en tweede heiproef uitgevoerd bij WOS.

Op basis van de sonderingen worden de volgende conclusies getrokken:

- In de vastgepakte zandlagen is een afname te zien van de relatieve dichtheid in ten gevolge van het voorboren en intrillen van de damwand;
- In lossere gepakte zandlagen is juist een toename te zien, die waarschijnlijk wordt veroorzaakt door verdichting door het intrillen. Dit effect is terug te zien tot 1 à 2 m uit de damwand;
- Ook na het plaatsen van de damwand blijven de zandlagen matig tot vastgepakt. De pakking verandert niet zodanig dat dit tot een verminderd functioneren als heavescherm zal leiden.

6.5.5 Vervormingen

Ten gevolge van het trillend inbrengen van de kunststof damwanden is het mogelijk dat er vervormingen optreden van het maaiveld. Dit kan mogelijk leiden tot schade aan belendingen. Hierbij zijn er echter geen verschillen met het trillend inbrengen van stalen damwanden.

6.6 Veiligheid tijdens de bouw

Deze paragraaf gaat over beheersmaatregelen die niet vanuit waterveiligheid (oftewel de FMECA) benodigd zijn, maar wel relevant zijn voor een goede uitvoering. De focus ligt op beheersmaatregelen voor de veiligheid tijdens de bouw. Denk hierbij aan maatregelen voor bijvoorbeeld de veiligheid van het uitvoerend personeel en/of omwonenden en verkeersdeelnemers nabij het werk.

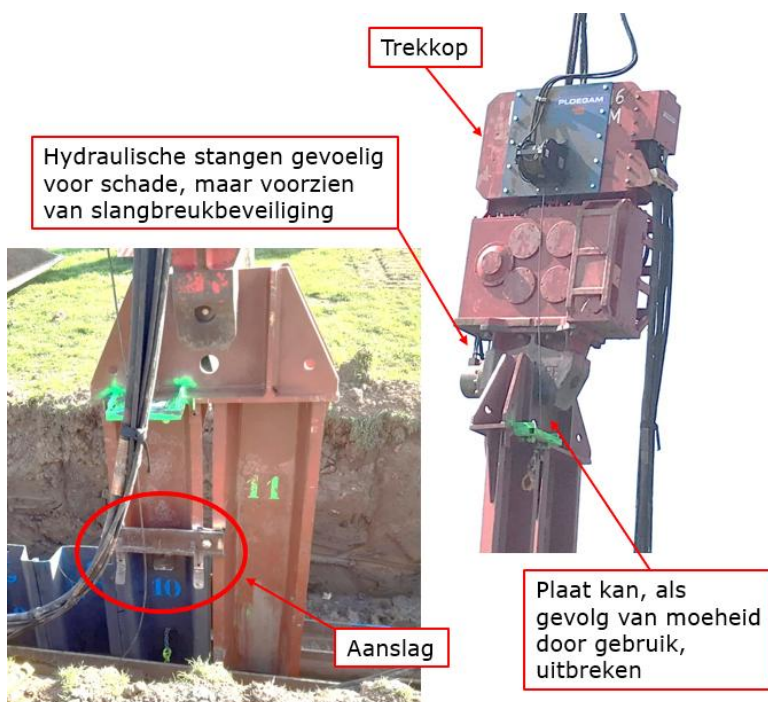
Bij dijkversterking Wolferen - Sprok zijn de volgende maatregelen genomen om de veiligheid van personeel en omstanders te garanderen:

- De bouwplaats wordt afgesloten voor publiek, zodat er naast het uitvoerend personeel zo min mogelijk omstanders zijn. Bezoekers aan de bouwplaats krijgen een veiligheidsinstructie, dragen PBM's en mogen niet in het valbereik van de kraan en damwand komen;
- Er is bij dijkversterking Wolferen - Sprok gebruik gemaakt van slijtvast constructiestaal met een hoog percentage koolstof (S355) in plaats van Hardox. Hardox moederplanken kunnen bij trillen in

een harde ondergrond namelijk gaan scheuren. Bij de dijkversterkingen Zwolle – Olst en Heel & Beesel was alleen in onderste 0,5 tot 1 m van de moederplank van Hardox;

- De moederplank zit vast aan het trekblok;
- De kunststof plank wordt opgesloten door de moederplank;
- Er zit een hijs oog in de kunststof plank, zodat deze goed aan de kraan kan worden bevestigd. De hijsvoorziening is aangepast naar een ankerketting, waarbij eerst een gat met diameter 50 mm wordt geboord op 750 mm onder de kop (zodat het hijsgat altijd in de afwerkingslaag zit). Door op deze manier hijsen is de plank dubbel geborgd, namelijk de ankerketting en de krammen. De ankerketting wordt uitgepikt zodra deze binnen handbereik is van de heier;
- Er zitten aanpassingen aan het heiframe;
- Hydraulische slangen zijn voorzien van een slangbreukbeveiliging, omdat ze gevoelig zijn voor schade.

Een specifieke veiligheidsmaatregel bij de maakbaarheidsproef bij Zwolle – Olst is dat de kunststof plank doormiddel van twee bouten boven in de plank is verbonden met de stalen moederplank.



Figuur 6-9 Veiligheidsvoorzieningen aan trilblok

6.7 Kwaliteitsborging

Aan het eind van de realisatie is het van belang om te controleren of de uitvoering ook daadwerkelijk is verlopen zoals van tevoren bedacht. Een manier hiervoor is het opstellen van een verificatieplan, waarin je de functionele eisen vastlegt en omschrijft wat dit betekent. In Tabel 6-12 is het verificatieplan van dijkversterking Wolferen-Sprok weergegeven.

Tabel 6-12 Functionele eisen en eisen verificatieplan WOS

Eis	Eisomschrijving
Overgangsconstructie tussen stalen- en kunststof damwanden	De aansluiting tussen kunststof- en stalen damwanden dient waterdicht te zijn
Levensduur kunststof maatregel	De kunststof damwand (piping-/heavescherm) dient bij oplevering de levensduur (op ontwerp en product) te hebben van tenminste 100 jaar
Kunststof damwanden - juiste type toegepast	De planklengte komt overeen met de 'te keuren waarde'. (foto planklengte)
Kunststof damwanden - productblad	De kunststof damwandplanken zijn van het type 'JLD-610 7.2' en voorzien van productblad.



Kunststof damwanden – ontvangst	De geleverde damwandplanken zijn dienen te voldoen aan: aantal en lengte 'te keuren waarde'. (foto geboortekaartje en planklengte)
Kunststof damwanden - in het slot	Alle damwanden zijn in het slot blijven lopen. Dit dient aangetoond te worden m.b.v. slotverklikkers.
Kunststof damwanden - overgangsplank	De overgangsplank is over de gehele planklengte correct bevestigd. (foto bevestiging overgangsplank)
Kunststof damwanden - ISO certificaat	De kunststof damwanden zijn onder ISO certificering vervaardigd.
Kunststof damwanden Controle kunststof damwand locatie	Controleren of het juiste materiaal op de juiste locatie wordt geplaatst conform Excel-Overzicht constructies
Kunststof damwanden Aanbrengen slotverklikkers	Controle slotverklikkers op werkslot (afhankelijk van bandbreedte) op weerstand tijdens aanbrengen.
Kunststof damwanden Kunststof damwanden op diepte	Controle z hoogte kunststof damwand

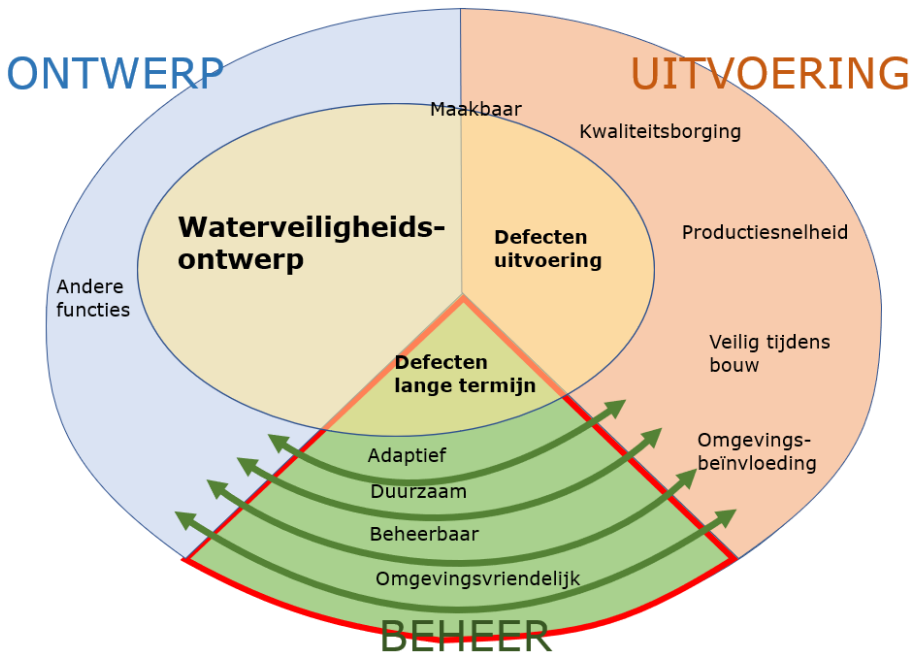
7 Beheersmaatregelen levensduur

7.1 Inleiding

Het doel van de opgestelde FMECA in hoofdstuk 5 is om alle relevante bedreigingen voor waterveiligheid in beeld te brengen, oftewel de bedreigingen voor het functioneren van de pipingmaatregel. Voor het beperken van de lange termijn effecten van deze bedreigingen is het mogelijk om beheersmaatregelen te nemen voor tijdens de levensduur (na afronding van de realisatie). De genoemde beheersmaatregelen in dit hoofdstuk zijn gebaseerd op de praktijkervaringen van de dijkversterkingsprojecten die zijn benoemd in Tabel 3-1. Veel van deze dijkversterkingsprojecten zijn kort geleden uitgevoerd of nog niet uitgevoerd, waardoor de ervaringen tijdens de beheerfase beperkt zijn. De opsomming van beheersmaatregelen in dit hoofdstuk is dus nog niet volledig, en wordt aangevuld naarmate er meer ervaringen zijn opgedaan binnen de HWBP-projecten.

Naast de beheersmaatregelen voor het functioneren van de pipingmaatregel, zijn er ook andere aspecten van belang, zoals de duurzaamheid en de beheerbaarheid. In Figuur 7-1 is weergegeven welke onderwerpen in dit hoofdstuk worden behandeld, en in Tabel 7-1 zijn verwijzingen opgenomen naar de relevante paragrafen.

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op risicobeheersing en levensduuraspecten na realisatie en uitvoering. De specifieke aandachtspunten bij kunststof schermen wordt toegelicht. Voor generieke zaken wordt verwezen naar de Publicatie Heaveschermen [3].



Figuur 7-1 Hoofdstuk 7 gaat over de beheerfase, zowel binnen de FMECA als daarbuiten, oftewel alles in het dikgedrukte rode deel.

Tabel 7-1 Aspecten bij beheersmaatregelen tijdens de levensduur

Aspect	Omschrijving/voorbeelden	Paragraaf
Functioneren van de pipingmaatregel	Maatregelen voor het beheersen van defecten op de lange termijn (zie FMECA in 5.2).	7.2
Adaptiviteit	Maatregelen voor bijvoorbeeld de verwijderbaarheid van kunststof damwanden	7.3

Duurzaamheid	Maatregelen om de impact om het milieu te beperken. Dit aspect wordt grotendeels uitgewerkt in het ontwerp, omdat het nauw samenhangt met de keuze van het type kunststof damwand.	4.5 en 7.4
Beheerbaarheid	Maatregelen voor de registratie en vastlegging van de gerealiseerde constructie	7.5

7.2 Beheersmaatregelen gericht op het functioneren van de pipingmaatregel

Kunststof heaveschermen worden na installatie doorgaans niet meer gemonitord of onderhouden. Wel kan het nodig zijn lengte, doorlatendheid en kwaliteit na verloop van tijd te controleren. In de volgende paragrafen worden beheersmaatregelen genoemd die gebruikt kunnen worden tijdens de levensduur. Voor het beheersen van bedreiging B.4 'Slechte aansluiting door grote vervorming van scherm na uitvoering' kunnen bijvoorbeeld inspecties tijdens hoogwater worden uitgevoerd.

7.2.1 Lengtebepaling van kunststof damwanden

Het na installatie bepalen van de lengte van een kunststof damwand kan nodig zijn om te controleren of de installatie goed is gegaan, of om een bestaand heavescherm te beoordelen waarvan de lengte niet goed is vastgelegd. De lengtebepaling bij kunststof damwanden is mogelijk, maar lastiger dan bij stalen damwanden, omdat er niet gewerkt kan worden met magnetometersonderingen.

De lengte van een kunststof damwand kan na installatie worden bepaald met een radarmeting in een boorgat langs de wand. Daarbij wordt de reflectie van hoogfrequente elektromagnetische pulsen gemeten. Deze methode werkt alleen in zand, maar dat is geen bezwaar omdat correct geplaatste heaveschermen altijd tot in het zand staan. Een voorwaarde is dat het boorgat vlak langs de damwand wordt geboord, vooral in brak water [23].

Bij relatief korte damwanden kan de lengte worden bepaald door een stok langs de wand te steken met een haak. Daarbij kan het einde van de wand worden gevoeld. Bij grotere dieptes kan dit worden gecombineerd met een spuitlanssysteem. Daarbij wordt een spuitlans direct langs de wand op diepte gebracht door met kracht water in de bodem te spuiten. Deze methode wordt vooral gebruikt voor dieptedetectie van gestuurde boringen en zinkers tot maximaal 25 m diepte, maar kan ook bij damwanden worden toegepast [24].

7.2.2 Detecteren van openingen in kunststof damwanden

Het na installatie detecteren van een opening in kunststof damwanden is, net als bij schermen van ander materiaal, gecompliceerd. Ondiepe openingen en spleten kunnen worden getraceerd met proefsleuven.

Bij diepgelegen openingen lijkt een pompproef de beste optie. Daarbij wordt een peilverandering opgelegd en wordt het respons rondom de damwand gemeten met peilbuizen. Op basis van het verschil in stijghoogteverandering kan worden vastgesteld of er sprake is van een situatie met en zonder werkend kwelscherm. Maar ook de hydraulische weerstand kan worden berekend via een grondwatermodel. Het uitvoeren van pompproeven is met name nuttig als er slechts een gering peilverval is tussen binnen- en buitenwater. Benadrukt wordt dat pompproeven nog niet veel zijn toegepast bij heaveschermen en dat dit specialistische begeleiding vergt. Daarnaast is het de vraag in hoeverre kleine openingen in damwanden hiermee daadwerkelijk kunnen worden getraceerd.

Een alternatief voor een pompproef is elektrische lekdetectie of potentiaalmeting. Elektrische lekdetectie werkt alleen bij schermen die een lage elektrische geleidbaarheid hebben. Het werkt dus niet bij stalen damwanden, maar zou mogelijk wel kunnen werken bij kunststof damwanden. De methode is arbeidsintensief vanwege het grote aantal potentiaalmetingen en elektroden die in de grond dienen te worden geplaatst. Daarnaast is speciale visualisatie en interpretatiesoftware nodig. De methode is kostbaar en alleen toepasbaar voor het opsporen van geconcentreerde lekken of piping. Er zijn geen toepassingen bekend bij kwelschermen [23].

7.2.3 Inspecteren tijdens hoogwater

Door het uitvoeren van inspecties tijdens 'kleine en grote' hoogwaters kunnen afwijkingen in het verwachte gedrag van de pipingmaatregel worden geïdentificeerd. Indien er locaties worden waargenomen waarbij (excessief) meer zandtransport plaatsvindt, en dit niet verklaarbaar is, kan dit

duiden op een defect aan de pipingmaatregel. Een andere aanwijzing hiervoor zijn excessieve deformaties van het dijklichaam en/of het maaiveld rondom de pipingmaatregel. Indien bij een inspectie grote vervormingen of zandtransporten worden waargenomen, dan kunnen tijdig noodmaatregelen worden getroffen.

7.2.4 *Kwaliteit van kunststof*

Het uitgangspunt is dat de duurzaamheid van het kunststof voldoende is om het functioneren van de pipingmaatregel tijdens de levensduur te garanderen. Er zijn verschillende manieren om de kwaliteit van het kunststof te controleren tijdens de beheerfase:

- Het installeren van een 'reserve/testpaneel' tijdens de uitvoering, die tijdens de levensduur getrokken en/of afgezaagd wordt;
- Het bewaren van een (deel van) een kunststof damwand buiten de grond, oftewel een fysiek stuk archief.

In beide gevallen kan het materieel tijdens de levensduur beproefd worden in een laboratorium om onder meer de stijfheid en sterkte opnieuw vast te stellen.

7.3 **Beheersmaatregelen gericht op adaptiviteit**

7.3.1 *Verwijderbaarheid*

Uit praktijkproeven met Prolock Delta Filterschermen blijkt dat minimaal 6 m lange kunststof damwanden in dijken kunnen worden verwijderd door aan de zijkanten met een avegaar de grond eerst los te woelen. Het was niet mogelijk om de kunststof damwanden direct uit de grond te trekken, omdat de damwand dan scheurde.

Bij dijkversterking Wolferen - Sprok was het niet nodig om kunststof damwanden te verwijderen. Daarom is hier geen ervaring mee opgedaan.

Bij de maakbaarheidproef bij Zwolle - Olst zijn de 8 à 14 m lange 6 mm dikke damwanden direct na installatie getrokken. Dit is deels gelukt. Sommige wanden braken echter af, waardoor de onderste 1 à 2 m in de grond bleef zitten. Andere planken kwamen weliswaar geheel naar boven, maar raakten beschadigd door het trekken. Hoogstwaarschijnlijk komt dit door het op en neer pendelen van de planken om ze los te maken in combinatie met het trekken aan de planken. De kans op het heelhuids trekken, kan worden vergroot door dikkere damwanden te gebruiken, bijvoorbeeld 7,2 en 9 mm in plaats van 6 mm. Uit de proef volgt dat deze goed te verwijderen zijn, en door het toepassen van water in de heisleuf. De verwachting is dat het trekken nog moeilijker wordt, als de damwanden lange tijd in de grond zitten en aan de kleilagen gaan 'kleven' [11].

7.4 **Beheersmaatregelen gericht op duurzaamheid**

In paragraaf 7.2.4 is beschreven hoe de kwaliteit van het kunststof tijdens de levensduur kan worden gecontroleerd. Indien een 'reserve / testpaneel' wordt geïnstalleerd dat tijdens de levensduur wordt getrokken, dan wordt hiermee ook de duurzaamheid van de kunststof damwand onderzocht. Daarnaast kan de omliggende grond ook in een laboratorium worden beproefd op bijvoorbeeld uitloging en/of microplastics.

7.5 **Beheersmaatregelen gericht op beheerbaarheid**

7.5.1 *Registratie en vastlegging van de gerealiseerde constructie*

Nadat de kunststof heaveschermen zijn gerealiseerd, is het belangrijk om goed te registreren waar de maatregel zich bevindt. Een mogelijkheid hiervoor is het plaatsen van een fysiek paaltje aan het begin en/of eind van het traject waar de maatregel is gerealiseerd, naast het digitaal registreren in een GIS-systeem en/of papieren dossier.

Bij dijkversterking Wolferen - Sprok is na het lossen van kunststof damwanden op locatie een innamecontrole gedaan. De lengte, breedte, dikte, rechtheid en aantallen van de kunststof heaveschermen zijn hierbij gecontroleerd [6].

Daarnaast worden alle planken in een damwandscherm bij Dijkversteking Wolferen - Sprok genummerd. In het geval dat een scherm niet in één keer volledig sluitend is aangebracht, dat wil zeggen; een plank niet aantoonbaar in het slot, een plank niet op diepte of functieverlies door schade, dan wordt een afwijking opgesteld. Hierbij wordt de betreffende plank ingemeten en worden foto's gemaakt van beschadigde planken. In de afwijking wordt per plank genoteerd welke beheersmaatregel toegepast is. Dit wordt afgestemd met het waterschap. Ook voert het waterschap zelfstandig controles uit tijdens de realisatie. De beheersmaatregel wordt bijgehouden en ingemeten. Afwijkingen worden uiteindelijk opgenomen op de as-built tekeningen welke onderdeel zijn van de opleverdocumentatie aan het waterschap. Op deze manier is bekend welke constructie, waar in de grond zit [19], [21].

8 Doorontwikkeling

8.1 Welke ontwikkelstappen zijn gemaakt?

Kunststof heaveschermen zijn een bewezen, duurzame en economisch voordelige methode om het risico op heave te verkleinen. Met maakbaarheidsproeven is aangetoond dat ze veelal tot de vereiste diepte kunnen worden geïnstalleerd. Bij een zorgvuldige werkwijze lijkt de kans op gaten en spleten in het scherm na installatie tot een aanvaardbaar niveau te kunnen worden verkleind.

Belangrijke restrisico's zijn:

- De invloed van gaten en spleten in het scherm na installatie op de waterkerende veiligheid kan nog niet nauwkeurig worden berekend. Dit speelt overigens ook bij stalen heaveschermen. Het verschil is dat kunststof damwanden kwetsbaarder zijn dan stalen damwanden, waardoor vaker gaten en spleten ontstaan na installatie.
- Maatregelen om na installatie geconstateerde gaten en spleten te herstellen zijn bewerkelijk.
- Bij lange damwanden, een zware grondslag en/of kwetsbare belendingen is installatie van kunststof damwanden lastig, dan wel onmogelijk. In sommige gevallen zijn dermate veel beheersmaatregelen nodig, dat het vervangen van de kunststof door staal de beste oplossing.

8.2 Aanbevelingen (estafettestokje)

De ontwikkelingen omtrent kunststof heaveschermen zijn in volle gang. Aanbevolen wordt om de leerpunten zorgvuldig vast te leggen en deze OBOR over enkele jaren te herzien.

Het kan niet worden uitgesloten dat er na installatie een gat of spleet achterblijft in het heavescherm. Dit levert mogelijk een verhoogd risico op heave op. Dit dient nader te worden onderzocht, bijvoorbeeld door de rol van het lengte-effect nader te kwantificeren of door de invloed van een beperkte gatgrootte of spleetbreedte op piping en heave te bepalen.

Spleetvorming naast het heavescherm door toepassing van een moederplank kan niet worden uitgesloten. Daarom wordt vooralsnog aanbevolen om de moederplank aan de dijkzijde van het heavescherm te plaatsen en dus niet aan de achterlandzijde. Voor het uitvoeringsproces kan het echter juist efficiënter zijn om de moederplank aan de achterlandzijde te plaatsen. Aanbevolen wordt om dit mogelijke risico nader te onderzoeken.

Op dit moment zijn de beschikbare monitoringstechnieken niet voldoende voor de integriteit van de schermen en lekdetectie. Op dit gebied dienen dus aanvullende monitoringstechnieken te worden ontwikkeld.

Kunststof damwanden kunnen zo worden ontworpen dat zij een significante stijfheid en sterkte hebben. Aanbevolen wordt om te beoordelen in hoeverre deze damwanden naast de functie van heavescherm ook een constructieve functie kunnen krijgen.

Het uitvoeren van een bezwijkproef met een kunststof heavescherm op werkelijk schaal, met en zonder opening in het scherm, zal naar verwachting waardevolle informatie opleveren om de huidige ontwerpmethodiek te valideren.

9 Referenties

- [1] DIV Piping, „Publicatie Algemeen,” 2025.
- [2] DIV Piping, „Veiligheidsraamwerk innovatieve pipingmaatregelen,” 2023.
- [3] DIV Piping, „Publicatie Heaveschermen,” 2025.
- [4] USACE, „A study of the long-term applications of vinyl sheet piles,” 2003.
- [5] Profextru, „OBOR Kunststof Heaveschermen - ervaringen dijkversterking Mook,” 2022.
- [6] De Betuwse Waard, „Evaluatie heiproef,” 2020.
- [7] De Betuwse Waard, „Evaluatierapport slotverklikkers,” 2021.
- [8] De Betuwse Waard, „Leerpunten kunststof damwanden,” 2022.
- [9] Combinatie Dijkversterking Heel & Beesel, „Verslag maakbaarheidsproef damwanden,” 2021.
- [10] Combinatie Dijkversterking Heel & Beesel, „Omgevingsbeïnvloeding,” 2021.
- [11] IJsselwerken, „Eindrapportage maakbaarheidsproef kunststof damwanden,” 2023.
- [12] POV Macrostabiliteit, „POVM Langsconstructies,” 2020.
- [13] R. Slats en G. Westerhof, „Kunststof damwanden als heavescherm,” *Land+Water*, 2020.
- [14] De Betuwse Waard, „Toelichting adviesvraag Adviesteam Dijkontwerp kunststof damwanden - dijkversterking Wolferen - Sprok,” 2021.
- [15] CE Delft; Stimular, „LCA-rapport van Prolock-oeverbescherming,” 2022.
- [16] A. Boersma, K. Grigoriadi, M. G. A. Nooijens, S. Henke, I. M. Kooter, L. A. Parker, A. Dortmans en J. H. Urbanus, „Microplastic Index - How To Predict Microplastics Formation?,” *Polymers*, vol. 15, nr. 2185, p. 22, 2023.
- [17] Deltares, KWR, Antea Group, „Plastics zijn overal, ook in de bodem. Maar wat zijn de risico's voor ons?,” 2023.
- [18] Deltares, „Soilmix als heavescherm dijkversterking GoWa, 11206443-003-GEO-0001,,” 2022.
- [19] Waterschap Rivierenland, „Toelichting proces kunststof damwanden n.a.v. vraag in commissie,” 2022.
- [20] De Betuwse Waard, „Leerdossier kunststof damwanden ontwerp en realisatie (WOS) concept,” 2023.
- [21] De Betuwse Waard, „Procesbeschrijving onderbreking damwandschermen dijkversterking Wolferen - Sprok,” 2022.
- [22] CUR, CUR 166 Damwandconstructies, 2012.
- [23] Acacia Water, „Meetmethoden voor het testen van de werkzaamheid van kwelschermen onder kunstwerken,” 2015.
- [24] Terra Carta, „Gestuurde boringen,” 4 januari 2023. [Online]. Available: <https://terracarta.nl/techniek/sputlans/>.
- [25] De Betuwse Waard, Constructieve toets heavescherm, versie 2 red., 2020.
- [26] A. Zagema, „The dike safety assessment for risks of an incorrectly installed vinyl heave screen (Master Thesis),” University of Twente, 2023.
- [27] Deltares, „Probabilistische gevoeligheidsanalyse heave (fase 5 - eindrapportage),” 1998.

Bijlage A Referenties naar achtergronddocumenten

De referentie bestaat uit een alinea waarin naast de titel van het achtergronddocument, de kern van het onderwerp en de kwaliteit van het document is gegeven.

<p>Bibliografienummer: [23] Titel: Meetmethoden voor het testen van de werkzaamheden van kwelschermen onder kunstwerken Auteur: Acacia water Datum: 24 juli 2015 Inhoud: Onderzoek naar een aantal onderzoeksmethode die informatie kunnen geven over de aanwezigheid, de staat en de hydraulische werking van kwelschermen onder kunstwerken. Opdrachtgever: Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier</p>
<p>Bibliografienummer: [15] Titel: LCA-rapport van prolock-oeverbescherming Auteur: CE Delft & Stimular Datum: Februari 2022 Inhoud: Resultaten van een cradle-to-gate LCA-studie uitgevoerd van Prolock-oeverbescherming. Deze oeverbescherming wordt geproduceerd met gerecycled pvc en kan onder andere toegepast worden als beschoeiingen, damwanden en kwelschermen. De resultaten van deze LCA-studie zijn opgenomen in de Nationale Milieudatabase (NMD) en beschikbaar in DuboCalc per vierkante meter (m²) oeverbescherming. Opdrachtgever: Profextru B.V.</p>
<p>Bibliografienummer: [9] Titel: Verslag maakbaarheidsproef damwanden Auteur: Combinatie Dijkversterking Heel & Beesel Datum: 24-9-2021 Inhoud: Verslag maakbaarheidsproef kunststof damwanden. Hierin zijn de werkzaamheden die per dag zijn uitgevoerd beschreven. Daarnaast een aantal besluiten en optimalisaties en resultaten van geluids- en trillingsmetingen. Opdrachtgever: Waterschap Limburg</p>
<p>Bibliografienummer: [10] Titel: Omgevingsbeïnvloeding Auteur: Combinatie Dijkversterking Heel & Beesel Datum: 02-11-2021 Inhoud: Verslag met conclusies m.b.t. de omgevingsbeïnvloeding ten gevolge van de de maakbaarheidsproef bij Heel & Beesel van de kunststof damwanden. Opdrachtgever: Waterschap Limburg</p>
<p>Bibliografienummer: [22] Titel: CUR 166 Damwandconstructies Auteur: CUR Datum: 2012 Inhoud: Algemene richtlijn m.b.t. damwandconstructies. Opdrachtgever: n.v.t.</p>
<p>Bibliografienummer: [6] Titel: Evaluatie heiproef Auteur: Combinatie De Betuwse Waard Datum: 21-8-2020 Inhoud: Evaluatie van 1^e maakbaarheidsproef kunststof heaveschermen bij dijkversterking Wolferen-Sprok.</p>

<p>Opdrachtgever: Waterschap Rivierenland</p>
<p>Bibliografienummer: [7] Titel: Evaluatie slotverklidders Auteur: Combinatie De Betuwse Waard Datum: 1-6-2021 Inhoud: Evaluatie van 2^e maakbaarheidsproef kunststof heaveschermen bij dijkversterking Wolferen-Sprok waarbij verschillende type slotverklidders zijn getest. Opdrachtgever: Waterschap Rivierenland</p>
<p>Bibliografienummer: [14] Titel: Toelichting adviesvraag Adviesteam Dijkontwerp kunststof damwanden Auteur: Combinatie De Betuwse Waard Datum: 10-6-2021 Inhoud: Toelichting bij adviesvraag aan ADO m.b.t. kunststof damwanden. Hierbij staan twee onderzoeksvragen centraal 1) is de kunststof damwand een effectieve maatregel? en 2) is het kunststofscherf een duurzame maatregel? Opdrachtgever: Waterschap Rivierenland</p>
<p>Bibliografienummer: [8] Titel: Leerpunten kunststof damwanden Auteur: Combinatie De Betuwse Waard Datum: 2-2-2022 Inhoud: Overzicht van alle leerpunten die bij dijkversterking Wolferen-Sprok bij het aanbrengen van de kunststof heaveschermen naar voren kwamen. Opdrachtgever: Waterschap Rivierenland</p>
<p>Bibliografienummer: [21] Titel: Procesbeschrijving onderbreking damwandschermen Auteur: Combinatie De Betuwse Waard Datum: 24-6-2022 Inhoud: Proces beschrijving onderbrekingen in damwandschermen met heave functie bij dijkversterking Wolferen-Sprok inclusief beheersmaatregelen. Opdrachtgever: Waterschap Rivierenland, review door Deltares uitgevoerd</p>
<p>Bibliografienummer: [11] Titel: Eindrapportage maakbaarheidsproef kunststof damwanden Auteur: IJsselwerken Zwolle-Olst Datum: 12-1-2023 Inhoud: Resultaten van de maakbaarheidsproef t.b.v. van het plaatsen van kunststof heaveschermen bij dijkversterking Zwolle-Olst Opdrachtgever: Waterschap Drentse Overijsselse Delta</p>
<p>Bibliografienummer: [12] Titel: POVM langsconstructies Auteur: POVM Datum: Maart 2020 Inhoud: Richtlijn langsconstructies in dijken Opdrachtgever: HWPB, POV Macro Stabiliteit</p>
<p>Bibliografienummer: [5] Titel: OBOR Kunststof Heaveschermen - ervaringen Dijkversterking Mook Auteur: Profextru Datum: 11-4-2023 Inhoud: Mail met informatie over toepassen van kunststof heaveschermen bij dijkversterking Mook, Afferden en Bergen Opdrachtgever: Onbekend</p>

Bibliografienummer: [4]

Titel: A Study of the long-term applications of vinyl sheet piles

Auteur: USACE

Datum: augustus-2003

Inhoud: Studie naar het effect van UV en kou op kunststof schermen

Opdrachtgever: US Army Corps of Engineers

Bibliografienummer: [25]

Titel: Constructieve toets heavescherm

Auteur: Combinatie De Betuwse Waard

Datum: 4-9-2020

Inhoud: Resultaten van analyse naar de optredende vervormingen in de ondergrond i.c.m. kunststof heavescherm

Opdrachtgever: Waterschap Rivierenland

Bibliografienummer: [19]

Titel: Toelichting proces Kunststof damwanden n.a.v. vraag in commissie

Auteur: Combinatie De Betuwse Waard

Datum: 2-6-2022

Inhoud: Beschrijving hoe het installeren van de kunststofheaveschermen bij dijkversterking Wolferen-Sprok verloopt en welke maatregelen er genomen worden bij afwijkingen

Opdrachtgever: Waterschap Rivierenland

Bibliografienummer: [26]

Titel: The dike safety assesment for risks of an incorrectly installed vinyl heave screen

Auteur: A.Zagama

Datum: 01-06-2023

Inhoud: Afstudeeronderzoek naar het effect van afwijkingen (uit het slot, niet op diepte etc) op de faalkans van de dijk

Opdrachtgever: TU Twente & Fugro

Bijlage B Technische specificaties kunststof damwanden

Bron: JLD, 2023

Data's JLD_Sheetpiles												
Manufacturer	Name	EI	E	$M_{r,rep,pl}$	Section area	W_{el} (or Z_{el})	Inertion moment (I)	Width	Height	Charac. tensile resistance (or yield strength) f_y	Ultimate Flexural / Bending Stress	Recommended Allowable Bending Stress
Manufacturer	Name	[kNm^2/m^4]	[MPa]	[kNm/m^3]	[cm^2/m^2]	[cm^3/m^3]	[cm^4/m^3]	[mm]	[mm]	[N/mm^2]	Mpa	Mpa
JLD-Vinyl	JLD-270/3.5 Waw Rib	6,4	2600	2,5	50	57	246	309	86	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-270/5.5 Waw Rib	10,0	2600	3,8	72	87	385	309	88	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-270/6 Waw Rib	10,9	2600	4,2	77	95	418	309	89	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-270/3.5 Box Rib	60,5	2600	11,2	57	254	2327	270	150	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-270/5.5 Box Rib	84,9	2600	16,3	82	369	3266	270	150	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-270/6 Box Rib	91,0	2600	17,5	89	398	3499	270	150	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-537/5.5	9,9	2600	3,8	68	87	382	608	88	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-537/6	10,8	2600	4,1	73	94	417	608	89	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-300/5.5	47,9	2600	14,1	99	320	1842	300	115	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-300/6	51,7	2600	15,2	107	345	1988	300	115	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-460/5.5	65,7	2600	15,8	93	360	2527	460	130	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-565/9	332,0	2600	45,8	129	1042	12768	565	245	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-610/6	231,8	2600	34,1	105	775	8915	606	230	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-610/6.4	143,4	2600	27,0	103	613	5514	606	180	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-610/7.2	201,3	2600	34,1	121	774	7743	606	200	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-610/9	331,7	2600	48,8	157	1109	12758	606	230	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-580/7	391,4	2600	52,1	162	1183	15056	290	240	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-580/7A	407,2	2600	54,0	164	1228	15429	290	240	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-580/9	487,2	2600	64,3	206	1462	18739	290	240	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-580/11	568,1	2600	75,3	247	1711	21851	290	240	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-458/10,4	538,7	2600	67,8	191	1542	20718	458	254	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-458/12	596,4	2600	75,5	213	1717	22937	458	254	44	65	32,5
JLD-Vinyl	JLD-10.5	719,7	2600	89,4	218	1967		432	279			
JLD-Hybrid	JLD-700FR SuperLock	912,0	4300	106,2	204	1685	21203	350	250	63	93,21	46,6
JLD-Composite	JLD-26.1	1713,2	27000	241,0	102	699		457	203		625	172,0
JLD-Composite	JLD-47.5	4292,3	27000	340,9	142	1236		508	254		690	138,0
JLD-Composite	JLD-80.5	10090,8	27000	562,3	178	2059		610	356		474	137,0

Bron: www.sheetspilingolutions.com

Type	Opneembaar		Opneembaar		Weerstand		Traagheids		Buig		Dikte t [mm]	Hoogte h [mm]	Breedte b [mm]	Profiel [type]	Gewicht per plank [kg/m ²]	Gewicht per m ² [kg/m ²]	Doorsnede oppervlakte A [cm ² /m ²]	Omtrek enkezijdig [m ² /m ²]	Hardhout (nieuw Azobé)	
	Momente M _{max} [kNm/m ²]	Momente M _{min} [kNm/m ²]	Momente M _w [cm ² /m ²]	Momente M _x [cm ² /m ²]	Stijfheid E*I [kNm ² /m ²]	E _{hardhout} [N/mm ²]	t _{min} [mm]													
Share Guard																				
SG-225	17,08	8,54	387	2.458	64,40	5,7	127	457	Q	6,02	13,17	91,47	41,33		1,60					17000
SG-325	26,34	13,17	597	5.326	139,54	6,4	178	610	Q	8,99	14,74	102,41	51,32		1,57					
SG-425	33,92	16,96	769	7.784	203,94	7,2	203	610	Q	10,38	17,02	118,26	58,24		1,64					
SG-550	46,26	23,13	1.048	10.652	279,08	9,4	203	305	Z	7,42	24,33	169,05	68,01		1,83					
SG-625	57,88	28,94	1.312	16.660	436,49	9,8	254	762	Z	17,86	23,44	162,86	76,08		1,67					
SG-850	70,22	35,11	1.591	20.212	529,55	9,8	254	457	Z	11,8	25,82	179,45	83,80		1,80					
SG-750	86,36	43,18	1.957	24.854	651,17	11,7	254	305	Z	10,86	35,61	247,48	92,93		2,17					
SG-825	87,05	43,53	1.973	30.043	787,12	12,2	305	762	Q	23,21	30,46	211,70	93,30		1,73					
SG-850	88,24	44,12	2.000	25.400	665,48	13,1	254	457	Z	15,44	33,78	231,00	93,94		1,80					
SG-950	134,74	67,37	3.054	46.567	1.220,06	16,5	305	457	Z	20,76	45,43	315,60	116,08		1,99					
CL-9000	38,44	19,22	871	9.969	261,19	7,1	229	610	Q	10,72	17,57	121,39	62,00		1,70					
CL-9900	47,44	23,72	1.075	12.290	322,00	8,9	229	610	Q	13,31	21,82	151,62	68,88		1,72					
FP-475	48,64	24,32	1.102	6.145	161,00	6,4/6,1	178	610	FP	11,75	19,27	79,57	69,74		2,03					
FP-575	74,02	37,01	1.677	12.430	325,67	7,4/12,1	229	610	FP	14,31	23,46	163,00	86,03		2,06					
UC-30	96,38	48,19	698	7.101	1.958,38	6,4/6,7	203	457	Z	9,2	20,13	99,58	98,17		1,44					
UC-50	154,20	77,10	1.118	14.200	3.916,22	8,3/9,0	254	914	Q	22,99	25,15	130,39	124,18		1,48					
UC-75	281,70	140,85	2.043	36.325	10.018,07	10,2/10,9	356	610	Z	19,88	32,59	173,13	167,84		1,60					
UC-95	433,68	216,84	3.145	67.870	18.717,87	13,7	432	762	Z	31,37	41,17	218,70	208,25		1,56					



Opmerkingen:

Kolom A: Opneembaar moment / spanning zonder veiligheidsfactor

Kolom B: Opneembaar moment / spanning met veiligheidsfactor 2*

* veiligheidsfactor (2): o.b.v. levensduur 100 jaar.

 Materiaal modulus "Hard PVC": $\sigma_g = 22,06 \text{ N/mm}^2$

 Materiaal modulus "Ultra Composite": $\sigma_g = 68,95 \text{ N/mm}^2$

 Elasticiteit modulus "Hard PVC": $E = 0,02620 \cdot 10^9 \text{ N/mm}^2$

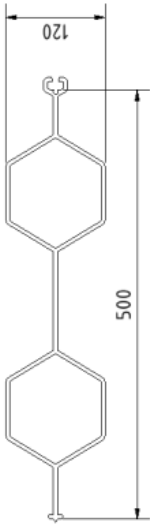
 Elasticiteit modulus "Ultra Composite": $E = 0,27579 \cdot 10^9 \text{ N/mm}^2$

Vergelijk met hout o.b.v. representatieve waarden; vergelijk alléén mogelijk voor nieuw materiaal!

Voor een vergelijk met staal en/of aluminium damwand profielen verzoeken wij u contact met ons op te nemen.

Bron: Profextru [5]

Prolock Sigma



Prolock
sustainable bank protection

PVC		60	[N/mm ²]
Buigsterkte	$f_{b,prop}$	12	[]
Max. karakteristiek moment	$M_{k,s}$	0.45	[]
Max. representatief moment (lange/korte duur)	$M_{r,prop}$	0.5	[]
Modificatiefactor (lange/korte duur)	k_{mod}	1.5	< 15]
Material factor	γ_m	2.3	> 15]
Hoogte	h	22.5	[N/mm ²]
Breedte	b	25.0	[N/mm ²]
Sectie oppervlak	A	2600	[N/mm ²]
Weerstandsmoment	W_{el}	14.6	[kg/m ²]
Traagheidsmoment	I_y	7.1	[kg/m ²]
Buigsterkte	$f_{b,prop}$		
Max. Rekennmoment (lange/korte duur)	$M_{r,stat}$		

PVC		34.7	[kNm ² /m]
Max. karakteristiek moment	$M_{k,s}$	13.35	[kNm/m]
Max. representatief moment (lange/korte duur)	$M_{r,prop}$	6.01 / 6.68	[kNm/m]
Modificatiefactor (lange/korte duur)	k_{mod}	0.45 / 0.5	[]
Material factor	γ_m	1.2	[]
Hoogte	h	120	[mm]
Breedte	b	500	[mm]
Sectie oppervlak	A	100.9	[cm ² /m]
Weerstandsmoment	W_{el}	222.5	[cm ³ /m]
Traagheidsmoment	I_y	1335	[cm ⁴ /m]
Buigsterkte	$f_{b,prop}$	60.0	[N/mm ²]
Max. Rekennmoment (lange/korte duur)	$M_{r,stat}$	5.0 / 5.6	[kNm/m]

Patent	Naaldhout		Naaldhout		Azobé		Azobé		Staal 235		Staal 235		Staal 355	
	C18	C24	C24	C24	D70	D70	D70	D70	5235	5235	5235	5235	5235	5355
Kwaliteit	●	●	●	●	■	■	■	■	○	○	○	○	○	○
Vorm	100	100	100	100	70	70	70	70	76	76	76	76	76	88.9
Afmeting	D_{out}	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d	d
Wanddikte	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Aantal	88	177	108	216	80	160	111	222	314	628	477	953	953	953
Stijfheid	EI_{prop}	$M_{k,s}$	$M_{r,prop}$	k_{mod}	γ_m	h	b	A	W_{el}	I_y	$f_{b,prop}$	$M_{r,stat}$	$M_{k,s}$	$M_{r,prop}$
Max. karakteristiek moment	2.11 / 2.68	4.22 / 5.37	2.81 / 3.58	5.62 / 7.15	4.40 / 5.60	8.80 / 11.20	5.63 / 7.17	11.27 / 14.34	7.91	15.81	12.00	23.99	36.25	36.25
Max. representatief moment (lange/korte duur)	0.60 / 0.76	0.60 / 0.76	0.60 / 0.76	0.60 / 0.76	0.55 / 0.70	0.55 / 0.70	0.55 / 0.70	0.55 / 0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Modificatiefactor (lange/korte duur)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1	1	1	1	1	1
Material factor (lange/korte duur)	157	196	157	196	116	146	146	146	16	32	26	51	51	51
Sectie oppervlak	393	393	196	393	114	229	146	293	34	67	51	102	102	102
Weerstandsmoment	18	18	24	24	70	70	70	70	235	235	235	235	235	355
Karakteristieke buigsterkte	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$	$M_{r,stat}$
Max. Rekennmoment (lange/korte duur)	1.62 / 2.06	3.24 / 4.13	2.16 / 2.75	4.32 / 5.50	3.39 / 4.31	6.77 / 8.62	4.33 / 5.52	8.67 / 11.03	7.91	15.81	12.00	23.99	36.25	36.25

Combinatie	Scherm met paten		Scherm met paten		Scherm met paten		Scherm met paten		Scherm met paten		Scherm met paten		Scherm met paten	
	C18	C24	C24	C24	D70	D70	D70	D70	5235	5235	5235	5235	5235	5355
Buigsterkte	123	211	143	251	115	195	146	257	349	663	511	988	988	988
Max. karakteristiek moment	16.88	20.42	18.06	22.77	21.35	29.36	23.59	33.84	21.26	29.16	25.35	37.34	37.34	49.60
Max. representatief moment (lange/korte duur)	8.12 / 9.36	10.22 / 12.04	8.82 / 10.25	11.63 / 13.83	10.41 / 12.28	14.81 / 17.88	11.64 / 13.84	17.27 / 21.01	13.91 / 14.58	21.82 / 22.49	18.00 / 18.67	30.00 / 30.67	30.00 / 30.67	42.25 / 42.92
Modificatiefactor (lange/korte duur)	0.48 / 0.55	0.50 / 0.59	0.49 / 0.57	0.51 / 0.61	0.49 / 0.57	0.50 / 0.61	0.49 / 0.59	0.51 / 0.62	0.65 / 0.69	0.75 / 0.77	0.71 / 0.74	0.80 / 0.82	0.80 / 0.82	0.85 / 0.87
Material factor (lange/korte duur)	1.22 / 1.23	1.24 / 1.06	1.23 / 1.06	1.25 / 1.05	1.24 / 1.05	1.26 / 1.04	1.25 / 1.05	1.26 / 1.04	1.08 / 1.03	1.05 / 1.02	1.06 / 1.03	1.03 / 1.02	1.03 / 1.02	1.02 / 1.01
Element breedte	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Sectie oppervlak	258	415	258	415	199	297	216	332	117	133	127	152	152	152
Weerstandsmoment	419	615	419	615	337	461	369	515	256	290	274	325	325	325
Max. Rekennmoment (lange/korte duur)	6.63 / 7.63	8.25 / 11.41	7.17 / 9.67	9.33 / 13.16	8.39 / 11.64	11.78 / 17.12	9.34 / 13.18	13.67 / 20.19	12.91 / 14.11	20.82 / 22.03	17.00 / 18.21	29.00 / 30.21	29.00 / 30.21	41.25 / 42.47

Profextru
sustainable bank protection

Prolock is product van
Bruchterweg 88, Hardenberg | T +31 (0) 523 654 011 | www.prolock.nl

Onder voorbehoud van vorm- en afmetingen
Nederland

Prolock scherm		PVC	
Buigstijfheid	EI_{top}	281	[kNm ² /m]
Max. karakteristiek moment	M_{ix}	51,4	[kNm/m]
Max. representatief moment (lange/korte duur)	M_{Trep}	23,1 / 25,7	[kNm/m]
Modificatiefactor (lange/korte duur)	K_{mod}	0,45 / 0,5	[-]
Materiaal factor	γ_m	1,2	[-]
Hoogte	h	230	[mm]
Breedte	b	735	[mm]
Sectie oppervlak	A	127	[cm ² /m]
Weerstands moment	W_{el}	856	[cm ³ /m]
Traagheidsmoment	I_y	10791	[cm ⁴ /m]
Buigsterkte	$f_{m,25p}$	60	[N/mm ²]
Max. Rekenmoment (lange/korte duur)	$M_{y,dst}$	19,3 / 21,4	[kNm/m]

PVC		PVC	
Buigsterkte	$f_{m,ik}$	60	[N/mm ²]
Materiaal factor	γ_m	1,2	[-]
Modificatiefactor langeduur	K_{mod}	0,45	[-]
Modificatiefactor korteduur	K_{mod}	0,5	[-]
Krimpfactor	K_{kri}	1,5	< 15j
	K_{kri}	2,3	> 15j
Buigsterkte	$f_{m,25}$	22,5	[N/mm ²]
	$f_{m,25}$	25,0	[N/mm ²]
E modulus	E_{25}	2600	[N/mm ²]
Gewicht (vierkante meter)	G	19,1	[kg/m ²]
Gewicht (strekende meter)	G	14,0	[kg/m]



Bijlage C Duurzaamheidscertificaten damwandleveranciers

Bron: De Betuwse Waard, Toelichting adviesvraag Adviesteam Dijkontwerp kunststof damwanden - Dijkversterking Wolferen-Sprok [14]

Case study: Stalen damwand versus kunststof damwand

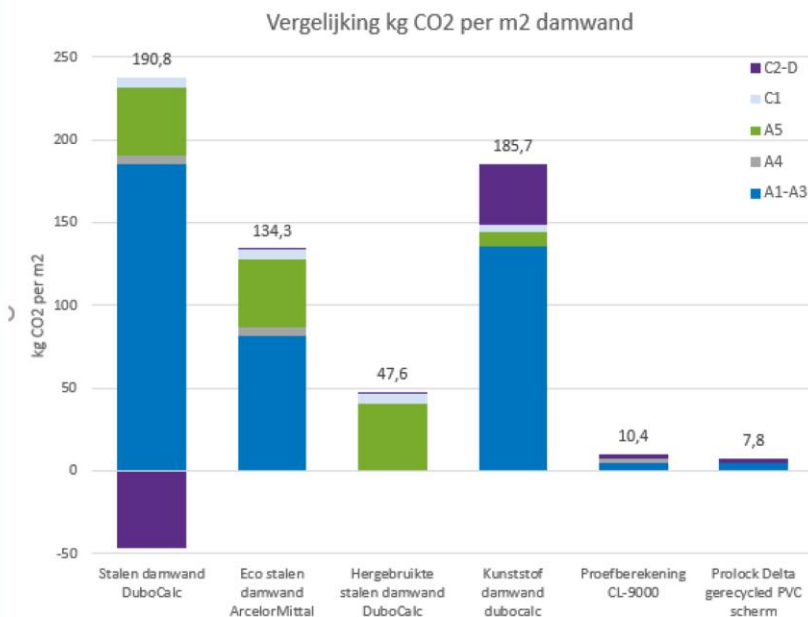
Voor dijkversterking Wolferen-Sprok zijn op veel plekken damwanden benodigd. Standaard worden hiervoor stalen damwanden gebruikt. Er is echter ook de mogelijkheid om gerecyclede kunststof damwanden te gebruiken.

Er is een vergelijking gemaakt tussen stalen damwanden en kunststof damwanden in DuboCalc. In DuboCalc kan de milieu-impact van materialen en producten kwantitatief worden vergeleken door middel van de CO₂-footprint. Damwanden hebben een grond- en/of waterkerende functie waarbij vooral het oppervlak van de damwand van belang is. Daarom zijn de damwanden omgerekend en vergeleken op CO₂ per m², zie de tabel hieronder.

Het transport van de Stalen damwand uit DuboCalc is aangepast naar de dichtstbijzijnde locatie (Luxemburg), dat is ca. 390 i.p.v. de default van 50 km. Er kunnen zowel Prolock als CL-9000 schermen worden toegepast. In DuboCalc is alleen Prolock beschikbaar. De CL-9000 is ook van gerecyclede kunststof, maar wordt in de VS geproduceerd. Alleen het transport van Prolock is aangepast voor de CL-9000; de verwachting is dat de impact van de productie niet veel zal afwijken.

De kunststof damwand reduceert de CO₂ met 95-96% ten opzichte van de stalen damwand per vierkante meter.

Vergelijking per m ²	CO ₂ /m ²	Reductie
Stalen damwand	190,8	
Prolock PVC scherm Delta	7,8	96%
Kunststof scherm CL-9000	10,4	95%



De case study gaat verder op de volgende pagina.

Voor Ontwerploop2 is er berekend hoeveel CO2 en MKI het toepassen van kunststof damwanden bespaart. Voor een deel van de damwanden is de kunststof variant geen optie, die blijven daarom definitief stalen damwand.

Ten opzichte van alle damwanden van staal leidt het toepassen van kunststof damwanden waar dat kan in Ontwerploop2 tot een reductie van 55% op de CO2 en 53% op de MKI, zie de tabel hieronder. Hierbij is wel de aanname gedaan dat het oppervlakte dat benodigd is voor stalen versus kunststof damwanden hetzelfde blijft.

Vergelijking Ontwerploop2	Hoeveelheid	kg CO2 eq.	MKI
Stalen damwand definitief	4.884 ton	5.862.796	526.300
Stalen damwand vervangen door Prolock	40.984 m2	7.733.855	694.264
Prolock PVC scherm Delta	40.984 m2	320.413	41.394
Absolute reductie		7.413.442	652.871
Reductiepercentage		55%	53%

De kunststof schermen, die zijn toegepast bij dijkversterking Wolferen - Sprok, bestaan voor het overgrote deel uit gerecycled PVC.

Wat betreft de toegepaste planken bij de twee maakbaarheidsproeven is hieronder de informatie opgenomen die door de leveranciers zijn aangeleverd t.a.v. aandeel gerecycled materiaal en andere kenmerken:

Maakbaarheidsproef 1 (maakbaarheid en omgevingsbeïnvloeding - leverancier; SPS)

De profielen van SPS, die bij de eerste maakbaarheidsproef zijn gebruikt, bestaan voor tenminste 95% (afhankelijk van de grootte van het profiel, UV beschermingen, etc.) oplopende tot 100% uit gerecycled kunststof.

Maakbaarheidsproef 2 (slotverklikkers – leverancier JLD)

JLD geeft aan dat hun proces bestaat uit mono-extruderend. Dat wilt volgens hen zeggen dat de additieven bij de kunststof korrels door-en-door worden gemengd alvorens het geheel wordt gesmolten en door matrijzen in de definitieve vorm wordt geperst. Bij de additieven die zij gebruiken zit ook een UV beschermer.



Duurzaamheid

De duurzaamheidsvoordelen van Hard PVC, mits juist en gecontroleerd geproduceerd, zijn CO₂ uitstoot, levensduur, gewicht, ongevoelig voor (bijna alle) chemische substanties, zwerfstromen, UV en vloeistof-dichtheid.

Belangrijk onderdeel in het behalen van de duurzaamheidsresultaten en het behouden van de primaire (sterkte-) eigenschappen, is de wijze van produceren en het aanhouden van een mono-extruderend proces of co-extruderend proces. Bij het co-extruderend productie proces wordt op het mono-geëxtrudeerde productie proces aangevuld met het aanbrengen van een UV beschermende (kleur)laag, welke zorgt voor UV-resistentie en bestand is tegen temperatuur en chemisch (zuren) invloeden.

Bij mono-extruderend proces zal het kunststof materiaal negatief beïnvloed worden door de natuurlijke omgeving.

Waterdichtheid

De waterdichtheid van Hard PVC damwanden hangt af van de dichtheid van het PVC, maar in meerdere mate de wijze van verbinden van de onderlinge damwanden, de sloten.

De productiewijze en vorm van het slot is producent afhankelijk en zal resulteren in verschillende doorlatendheden van de Hard PVC wand. De uiteindelijke dichtheid van de profielen zal middels een testprocedure volgens lekttest procedure opgesteld door Stork FDO Inoteg.

1. **Materiaaleigenschappen en classificatie.**

a. Fabricage.

PVC damwanden worden standaard via een continu extrusie-proces gefabriceerd. In plaats van gebruik te maken van nieuw PVC in de gehele dikte van het paneel, wat zeer kostbaar is om dit correct te doen, gebruiken fabrikanten van PVC damwanden doorgaans na industrieel gebruik gerecycled PVC als onderlaag. Standaard vormt de gerecyclede PVC onderlaag ± 95% van het volume (variërend van dikte profiel). Het buitenste deel, de 'capstock' genoemd, bestaat uit tegen UV-beschermd, nieuw PVC van een hogere kwaliteit voor bestendigheid tegen aantasting door weersinvloeden en UV-straling. Op dit moment zijn geen specifieke ASTM-normen beschikbaar voor de fabricage van PVC damwanden; de normen voor onbuigbare PVC buitenprofielen voor hekwerken en relingen zijn echter wel beschikbaar als ASTM F964. Deze ASTM komt momenteel het meest overeen met de normen voor het fabricageproces van PVC damwanden.

b. Classificatie en mechanische eigenschappen van PVC.

De mechanische eigenschappen en het functioneren van de PVC damwand op de lange termijn zijn afhankelijk van de chemische samenstelling hiervan. Hoewel deze samenstelling en fabricage cruciaal zijn voor het functioneren van de PVC damwand, heeft de industrie nog geen fabricagenormen hiervoor opgesteld. Al het nieuwe PVC dat in de damwand wordt gebruikt, moet minimaal een cel classificatie hebben van 1-42443-33 volgens ASTM D4216. De overige nummers komen overeen met de waarden zoals weergegeven in tabel A-1 in de volgorde waarin zij in de cel classificatie worden genoemd. Er bestaat geen ASTM-classificatie voor de onderlaag. Het volledige samengestelde product van de onderlaag en de kap moeten aan de vereiste mechanische eigenschappen 2 tot en met 8 in tabel A-1 voldoen.



KUNSTSTOF DAMWAND | JLD 610 7.2



JLD International BV

Postbus 147
1135 ZK EDAM
Nederland

Tel. +31 (0)299 622 396

Mail: info@JLDinternational.com
Web: www.JLDinternational.com

Veiligheid, kwaliteit en milieu staan bij JLD voorop.
Wij zijn VCA** | ISO 9001 | CO₂ Niveau gecertificeerd.
Meer informatie hierover vindt u op onze website.

KUNSTSTOF DAMWAND JLD 610 7.2



	Unit	Value
Section width	mm	606
Section depth	mm	200
Thickness	mm	7.2
Section modulus	cm ³ /m	774
Moment of inertia	cm ⁴ /m	7743
Allowable moment*	kNm/m	17.0
Ultimate moment	kNm/m	34.1

* Safety factor = 2



	Unit	Norm	Value
Density	kg/m ³	PN-EN ISO 1183-3:2003	1400-1480
Charpy impact test	kJ/m ²	PN-EN ISO 179-1:2004	≥30
Shore durometer	Shore's D	PN-EN ISO 868:2005	≥75
Softening point Vicat method	°C	PN-EN ISO 316:2004	≥77
Tensile strength	MPa	PN-EN ISO 527-2:1998	≥44
Tensile modulus of elasticity	MPa	PN-EN ISO 527-2:1998	≥2600
Bending modulus of elasticity	MPa	PN-EN ISO 178:2006	≥2600
Bending strength	MPa	PN-EN ISO 178:2006	≥63
Resistance to climatic ageing, Energy radiation of 2,6 GJ/m ²	%	PN-EN 532:2002 PN-EN ISO 4882-2 mod.A PN-EN 20205-402:1996 PN-EN ISO 179-1:2004	Not less than 4 in gray scale ≤30
<ul style="list-style-type: none"> ☒ Resistance to changes in the surface coloring ☒ Change in the impact resistance (the Charpy test) 			

Dit product bestaat uit 100% gerecycled materiaal.

LCA Summary

Eco Intelligence

Product	JLD VINYL & FRP SHEETPILE	LCA method	Bepalingsmethode 'Milieuprestatie Bouwwerken' versie 1.0, juli 2020
Owner LCA	J.L.D. International B.V.	Underlying standards	ISO14044, ISO14025, EN15804
Contact	Roy de Haan, Roy@jldinternational.com	Reference database	Ecolnvent v3.6
Product unit	ton	Characterisation method	Karakteristiefactoren volgens NMD Bepalingsmethode, dec 2019 & EN 15804 +A2
Functional unit	m2		
LCA conductor	Eco-Intelligence	Third party external review	Jeeninga Advieslab
Contact	Gert-Jan Vroeghe, gert-jan@eco-intelligence.nl	Contact	Anne Kees Jeeninga
Date LCA report	10-apr-22	Date review	11-apr-22



EN15804 modules declared		
A1 - A3 Production	v	
A4 Transport gate to site	v	
A5 Assembly / construction	v	
B1 Use	v	
B2 Maintenance	v	
B3 Repair	v	
B4 Replacement	v	
B5 Refurbishment	v	
C1 Demolition	v	
C2 Transport	v	
C3 Waste processing	v	
C4 Disposal	v	
D Benefits&loads recycling	v	

Results MKI per m2												
Type	Totaal	A1 - A3	A4	A5	B1-B6	C1	C2	C3	C4	D		
Z-PROFILE 270 / 3,5	Vinyl	€ 1,76	€ 0,72	€ 0,11	€ 0,09	€ -	€ 0,07	€ 0,01	€ 0,24	€ 0,00	€ 0,52	
Z-PROFILE 270 / 5,5	Vinyl	€ 2,53	€ 1,03	€ 0,16	€ 0,13	€ -	€ 0,10	€ 0,02	€ 0,34	€ 0,01	€ 0,74	
Z-PROFILE 270 / 6	Vinyl	€ 2,72	€ 1,11	€ 0,17	€ 0,14	€ -	€ 0,11	€ 0,02	€ 0,37	€ 0,01	€ 0,80	
Z-PROFILE 300 / 5,5	Vinyl	€ 3,04	€ 1,24	€ 0,19	€ 0,16	€ -	€ 0,12	€ 0,02	€ 0,41	€ 0,01	€ 0,89	
Z-PROFILE 300 / 6	Vinyl	€ 3,25	€ 1,32	€ 0,20	€ 0,17	€ -	€ 0,13	€ 0,02	€ 0,44	€ 0,01	€ 0,96	
Z-PROFILE 458 / 10,4	Vinyl	€ 5,86	€ 2,39	€ 0,36	€ 0,30	€ -	€ 0,23	€ 0,04	€ 0,79	€ 0,01	€ 1,73	
Z-PROFILE 458 / 12,0	Vinyl	€ 6,52	€ 2,66	€ 0,41	€ 0,34	€ -	€ 0,25	€ 0,05	€ 0,88	€ 0,02	€ 1,92	
Z-PROFILE 565 / 9,0	Vinyl	€ 3,95	€ 1,61	€ 0,25	€ 0,21	€ -	€ 0,15	€ 0,03	€ 0,54	€ 0,01	€ 1,16	
Z-PROFILE 580 / 7,0	Vinyl	€ 5,01	€ 2,04	€ 0,31	€ 0,26	€ -	€ 0,19	€ 0,04	€ 0,68	€ 0,01	€ 1,48	
Z-PROFILE 580 / 9,0	Vinyl	€ 6,31	€ 2,57	€ 0,39	€ 0,33	€ -	€ 0,24	€ 0,05	€ 0,86	€ 0,02	€ 1,86	
Z-PROFILE 580 / 11,0	Vinyl	€ 7,54	€ 3,07	€ 0,47	€ 0,39	€ -	€ 0,29	€ 0,06	€ 1,02	€ 0,02	€ 2,22	
Z-PROFILE EC26.1	FRP	€ 10,51	€ 2,78	€ 0,26	€ 0,38	€ -	€ 0,16	€ 0,05	€ 3,17	€ -	€ 3,71	
Z-PROFILE EC47.5	FRP	€ 14,09	€ 3,72	€ 0,35	€ 0,51	€ -	€ 0,22	€ 0,06	€ 4,25	€ -	€ 4,97	
Z-PROFILE EC80.5	FRP	€ 17,19	€ 4,54	€ 0,43	€ 0,62	€ -	€ 0,27	€ 0,08	€ 5,19	€ -	€ 6,06	
Z-PROFILE SUPERLOCK	FRP	€ 16,08	€ 4,25	€ 0,40	€ 0,58	€ -	€ 0,25	€ 0,07	€ 4,86	€ -	€ 5,67	
W-PROFILE 270 / 3,5	Vinyl	€ 1,53	€ 0,62	€ 0,10	€ 0,08	€ -	€ 0,06	€ 0,01	€ 0,21	€ 0,00	€ 0,45	
W-PROFILE 270 / 5,5	Vinyl	€ 2,21	€ 0,90	€ 0,14	€ 0,11	€ -	€ 0,09	€ 0,02	€ 0,30	€ 0,01	€ 0,65	
W-PROFILE 270 / 6	Vinyl	€ 2,38	€ 0,97	€ 0,15	€ 0,12	€ -	€ 0,09	€ 0,02	€ 0,32	€ 0,01	€ 0,70	
W-PROFILE 537 / 5,5	Vinyl	€ 2,06	€ 0,84	€ 0,13	€ 0,11	€ -	€ 0,08	€ 0,02	€ 0,28	€ 0,00	€ 0,61	
W-PROFILE 537 / 6	Vinyl	€ 2,23	€ 0,91	€ 0,14	€ 0,12	€ -	€ 0,09	€ 0,02	€ 0,30	€ 0,01	€ 0,66	
U-PROFILE 460 / 5,5	Vinyl	€ 2,85	€ 1,16	€ 0,18	€ 0,15	€ -	€ 0,11	€ 0,02	€ 0,39	€ 0,01	€ 0,84	
U-PROFILE 610 / 6,0	Vinyl	€ 2,72	€ 1,11	€ 0,17	€ 0,14	€ -	€ 0,11	€ 0,02	€ 0,37	€ 0,01	€ 0,80	
U-PROFILE 610 / 6,4	Vinyl	€ 3,17	€ 1,29	€ 0,20	€ 0,16	€ -	€ 0,12	€ 0,02	€ 0,43	€ 0,01	€ 0,93	
U-PROFILE 610 / 7,2	Vinyl	€ 3,70	€ 1,51	€ 0,23	€ 0,19	€ -	€ 0,14	€ 0,03	€ 0,50	€ 0,01	€ 1,09	
U-PROFILE 610 / 9,0	Vinyl	€ 4,80	€ 1,96	€ 0,30	€ 0,25	€ -	€ 0,19	€ 0,04	€ 0,65	€ 0,01	€ 1,41	

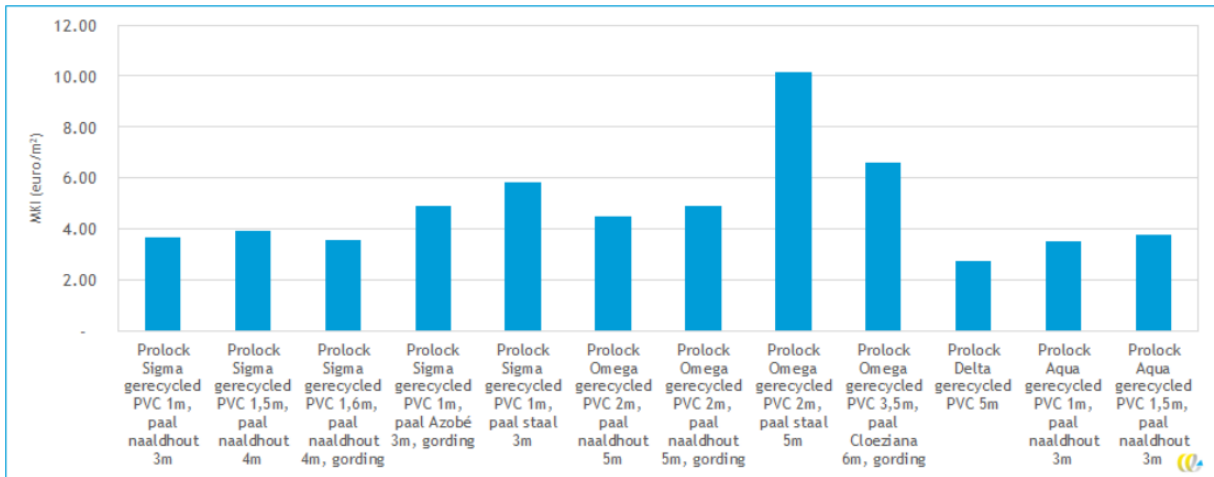
LCA Summary

Eco Intelligence

Result Vinyl Sheetpiles (per ton)												
Effectcategorie	Eenheid	Totaal	A1 - A3	A4	A5	B1-B6	C1	C2	C3	C4	D	
MKI / ECI	Euro	€ 212,48	€ 86,54	€ 13,21	€ 11,04	€ -	€ 8,23	€ 1,61	€ 28,80	€ 0,51	€ 62,53	
Abiotic Depletion, Non Fuel	kg Sb eq	3,147E-02	1,206E-02	1,889E-03	6,010E-04	0,000E+00	9,522E-05	3,419E-04	1,480E-03	1,132E-05	1,499E-02	
Abiotic Depletion, Fuel	kg Sb eq	1,492E+01	6,591E+00	8,262E-01	6,005E-01	0,000E+00	4,053E-01	9,841E-02	7,288E-01	1,214E-02	5,657E+00	
Global Warming	kg CO2 eq	2,007E+03	8,092E+02	1,111E+02	8,957E+01	0,000E+00	6,145E+01	1,338E+01	4,375E+02	7,268E+00	4,777E+02	
Ozone Layer Depletion	kg CFC-11 eq	4,438E-04	3,154E-05	2,097E-05	2,142E-05	0,000E+00	1,064E-05	2,374E-06	7,363E-05	2,619E-07	2,829E-04	
Photochemical Oxidation	kg C2H4	8,673E-01	3,029E-01	6,948E-02	7,336E-02	0,000E+00	6,256E-02	8,075E-03	2,559E-02	1,991E-03	3,234E-01	
Acidification	kg SO2 eq	9,328E+00	4,875E+00	3,636E-01	5,554E-01	0,000E+00	4,631E-01	5,884E-02	5,146E-01	7,082E-03	2,491E+00	
Eutrophication	kg PO4--eq	1,233E+00	5,828E-01	6,708E-02	1,161E-01	0,000E+00	1,053E-01	1,156E-02	6,346E-02	2,420E-03	2,842E-01	
Human Toxicity	kg 1,4-DB eq	5,784E+02	1,857E+02	5,239E+01	3,135E+01	0,000E+00	2,275E+01	5,634E+00	3,626E+01	7,323E-01	2,436E+02	
Ecotoxicity, Fresh Water	kg 1,4-DB eq	1,706E+01	6,040E+00	1,424E+00	5,781E-01	0,000E+00	3,166E-01	1,645E-01	1,476E+00	1,832E-01	6,875E+00	
Ecotoxicity, marine water	kg 1,4-DB eq	6,722E+04	2,588E+04	5,577E+03	2,080E+03	0,000E+00	1,101E+03	5,917E+02	8,119E+03	2,295E+02	2,365E+04	
Ecotoxicity, terrestrial	kg 1,4-DB eq	4,609E+00	3,257E+00	1,685E-01	6,980E-02	0,000E+00	3,745E-02	1,991E-02	1,729E-02	2,427E-03	1,037E+00	
Energy, primary, renewable	MJ	1,489E+03	7,942E+02	2,177E+01	2,397E+01	0,000E+00	4,622E+00	2,548E+00	1,434E+02	4,314E-01	4,982E+02	
Energy, primary, non-renewable	MJ	2,883E+04	1,128E+04	1,848E+03	1,313E+03	0,000E+00	9,075E+02	2,161E+02	1,402E+03	2,656E+01	1,184E+04	
Water, fresh water use	m3	3,280E+01	2,042E+01	1,972E-01	3,962E-01	0,000E+00	4,398E-02	2,479E-02	3,035E+00	2,613E-02	8,653E+00	
Waste, hazardous	kg	2,250E-02	6,390E-03	4,210E-03	2,540E-03	0,000E+00	2,328E-03	5,158E-04	1,551E-03	3,808E-05	4,924E-03	
Waste, non hazardous	kg	5,080E+02	1,404E+02	1,496E+02	7,339E+00	0,000E+00	1,012E+00	1,291E+01	1,784E+01	1,002E+02	7,862E+01	
Waste, radioactive	kg	6,131E-02	1,659E-02	1,188E-02	6,549E-03	0,000E+00	5,934E-03	1,337E-03	4,277E-03	1,488E-04	1,460E-02	

Result Vinyl FRP Sheetpiles (per ton)												
Effectcategorie	Eenheid	Totaal	A1 - A3	A4	A5	B1-B6	C1	C2	C3	C4	D	
MKI / ECI	Euro	€ 525,63	€ 138,78	€ 13,21	€ 18,98	€ -	€ 8,23	€ 2,42	€ 158,67	€ -	€ 185,34	
Abiotic Depletion, Non Fuel	kg Sb eq	9,669E-02	3,092E-02	1,889E-03	2,003E-03	0,000E+00	9,522E-05	5,129E-04	1,320E-02	0,000E+00	4,807E-02	
Abiotic Depletion, Fuel	kg Sb eq	3,139E+01	8,770E+00	8,262E-01	1,043E+00	0,000E+00	4,053E-01	1,476E-01	4,054E+00	0,000E+00	1,615E+01	
Global Warming	kg CO2 eq	4,949E+03	1,207E+03	1,111E+02	1,681E+02	0,000E+00	6,145E+01	2,007E+01	2,084E+03	0,000E+00	1,297E+03	
Ozone Layer Depletion	kg CFC-11 eq	1,394E-03	7,045E-05	2,097E-05	4,979E-05	0,000E+00	1,064E-05	3,561E-06	3,426E-04	0,000E+00	8,961E-04	
Photochemical Oxidation	kg C2H4	1,911E+00	4,387E-01	6,948E-02	1,010E-01	0,000E+00	6,256E-02	1,211E-02	2,212E-01	0,000E+00	1,006E+00	
Acidification	kg SO2 eq	1,924E+01	6,787E+00	3,636E-01	8,005E-01	0,000E+00	4,631E-01	8,826E-02	2,964E+00	0,000E+00	7,770E+00	
Eutrophication	kg PO4--eq	2,400E+00	7,930E-01	6,708E-02	1,453E-01	0,000E+00	1,053E-01	1,734E-02	3,883E-01	0,000E+00	8,833E-01	
Human Toxicity	kg 1,4-DB eq	1,692E+03	4,155E+02	5,239E+01	5,748E+01	0,000E+00	2,275E+01	8,451E+00	3,726E+02	0,000E+00	7,629E+02	
Ecotoxicity, Fresh Water	kg 1,4-DB eq	4,292E+01	9,301E+00	1,424E+00	1,268E+00	0,000E+00	3,166E-01	2,467E-01	8,885E+00	0,000E+00	2,148E+01	
Ecotoxicity, marine water	kg 1,4-DB eq	1,663E+05	3,959E+04	5,577E+03	4,710E+03	0,000E+00	1,101E+03	8,875E+02	4,122E+04	0,000E+00	7,317E+04	
Ecotoxicity, terrestrial	kg 1,4-DB eq	9,340E+00	3,786E+00	1,685E-01	1,895E-01	0,000E+00	3,745E-02	2,987E-02	1,708E+00	0,000E+00	3,420E+00	
Energy, primary, renewable	MJ	3,687E+03	1,086E+03	2,177E+01	8,205E+01	0,000E+00	4,622E+00	3,822E+00	8,379E+02	0,000E+00	1,651E+03	
Energy, primary, non-renewable	MJ	6,329E+04	1,576E+04	1,848E+03	2,240E+03	0,000E+00	9,075E+02	3,242E+02	7,976E+03	0,000E+00	3,423E+04	
Water, fresh water use	m3	6,815E+01	2,348E+01	1,972E-01	1,394E+00	0,000E+00	4,398E-02	3,719E-02	1,495E+01	0,000E+00	2,805E+01	
Waste, hazardous	kg	4,675E-02	1,218E-02	4,210E-03	3,080E-03	0,000E+00	2,328E-03	7,737E-04	1,231E-02	0,000E+00	1,186E-02	
Waste, non hazardous	kg	7,326E+02	1,867E+02	1,496E+02	1,285E+01	0,000E+00	1,012E+00	1,937E+01	1,177E+02	0,000E+00	2,454E+02	
Waste, radioactive	kg	1,307E-01	2,734E-02	1,188E-02	8,321E-03	0,000E+00	5,934E-03	2,005E-03	2,708E-02	0,000E+00	4,812E-02	

Bron: CE-Delft, Stimular [15]

Figuur 11 - Totale gewogen resultaten Prolock damwanden, per m² damwand. Set 2 (MKI, €/m²)

Tabel 31 - Totale gewogen resultaten Prolock damwanden, per m² damwand. Set 2 (deel 1)

Impactcategorie	Eenheid	Prolock Sigma gerecycled PVC 1 m, paal naaldhout 3 m	Prolock Sigma gerecycled PVC 1,5 m, paal naaldhout 4 m	Prolock Sigma gerecycled PVC 1,6 m, paal naaldhout 4 m, gording	Prolock Sigma gerecycled PVC 1 m, paal Azobé 3 m, gording	Prolock Sigma gerecycled PVC 1 m, paal staal 3 m	Prolock Omega gerecycled PVC 2 m, paal naaldhout 5 m
MKI (totaal)	€	3,65	3,90	3,57	4,89	5,85	4,51
001. abiotic depletion, non fuel (AD)	€	9,89E-05	1,24E-04	1,97E-04	1,95E-04	2,44E-04	1,48E-04
002. abiotic depletion, fuel (AD)	€	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,04
004. global warming (GWP)	€	1,74	1,90	1,68	2,21	2,47	2,22
005. ozone layer depletion (ODP)	€	2,53E-04	2,59E-04	2,46E-04	2,84E-04	2,85E-04	3,05E-04
006. photochemical oxidation (POCP)	€	0,03	0,03	0,03	0,04	0,06	0,04
007. acidification (AP)	€	0,45	0,47	0,44	0,81	0,71	0,53
008. eutrophication (EP)	€	0,15	0,14	0,14	0,22	0,28	0,15
009. human toxicity (HT)	€	1,13	1,20	1,16	1,42	2,00	1,39
010. Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	€	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01
012. Ecotoxicity, marine water (MAETP)	€	0,09	0,10	0,09	0,12	0,16	0,12
014. Ecotoxicity, terrestrial (TETP)	€	5,01E-03	5,25E-03	5,65E-03	5,53E-03	8,16E-02	6,28E-03

Tabel 32 - Totale gewogen resultaten Prolock damwanden, per m² damwand. Set 2 (deel 2)

Impactcategorie	Eenheid	Prolock Omega gerecycled PVC 2 m, paal naaldhout 5 m, gording	Prolock Omega gerecycled PVC 2 m, paal staal 5 m	Prolock Omega gerecycled PVC 3,5 m, paal Cloeziana 6 m, gording	Prolock Delta gerecycled PVC 5 m	Prolock Aqua gerecycled PVC 1 m, paal naaldhout 3 m	Prolock Aqua gerecycled PVC 1,5 m, paal naaldhout 3 m
MKI (totaal)	€	4,90	10,17	6,60	2,75	3,51	3,75
001. abiotic depletion, non fuel (AD)	€	2,54E-04	5,13E-04	2,29E-04	6,41E-05	9,46E-05	1,27E-04
002. abiotic depletion, fuel (AD)	€	0,05	0,08	0,05	0,02	0,03	0,04
004. global warming (GWP)	€	2,36	4,13	2,97	1,32	1,68	1,86
005. ozone layer depletion (ODP)	€	3,13E-04	3,92E-04	3,54E-04	2,27E-04	2,46E-04	2,51E-04
006. photochemical oxidation (POCP)	€	0,04	0,10	0,06	0,02	0,03	0,03
007. acidification (AP)	€	0,61	1,20	1,17	0,30	0,44	0,44
008. eutrophication (EP)	€	0,16	0,48	0,29	0,11	0,15	0,12
009. human toxicity (HT)	€	1,53	3,59	1,87	0,90	1,08	1,15
010. Ecotoxicity, fresh water (FAETP)	€	0,01	0,08	0,01	0,01	0,01	0,01
012. Ecotoxicity, marine water (MAETP)	€	0,13	0,30	0,16	0,07	0,09	0,10
014. Ecotoxicity, terrestrial (TETP)	€	7,05E-03	1,93E-01	6,86E-03	4,65E-03	4,91E-03	5,20E-03

Bijlage D Ervaringen grondonderzoek dijkversterking Wolferen-Sprok

Bij dijkversterking Wolferen-Sprok is ca. 4,5 km kunststof heavescherm aangebracht. De ervaringen bij het aanbrengen zijn grotendeels verwerkt in voorliggend document. Daarnaast is er een leerdossier opgesteld. In deze paragraaf staan de belangrijkste ervaringen m.b.t. het inbrengen samengevat.

In onderstaande tabel zijn de ervaringen van het beoordelen van boringen en sonderingen en het effect op de uitvoering samengevat

Tabel D-1 Effecten uitvoering bij beoordelen sonderingen en boorprofielen o.b.v. ervaringen bij WOS

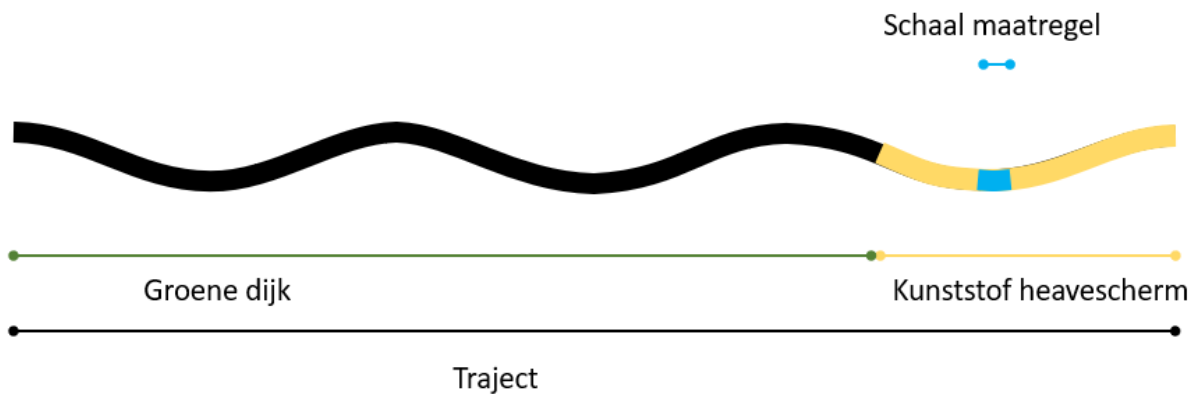
Bevinding	Effecten op uitvoering	Oplossing (realisatie)
Kleilagen	Veel kleef te verwachten, vaak weinig weerstand met aanbrengen van kunststof.	Waterbak aanwezig en schrapers om moederplank vrij te krijgen van stukken klei. Bovenkant damwand vast schroeven tegen meetrillen en/of meetrekken van moederplank. Kleefonderbrekers op moederplank (soort verdikking zodat water de klei af kan spoelen). Het nadeel kan zijn dat het materiaal zich gaat aanzuigen.
Fijn zand (siltig)	Minder kleef, vaak minder weerstand met aanbrengen van kunststof.	Fluïderen (paragraaf 6.4.12) en voorboren (paragraaf 6.4.9) afhankelijk van MPa waarden. Fluïderen kan nadelig werken als zand zich gaat gedragen als klapzand (=meer weerstand). Voorboren bij MPa waarden hoger dan 15-20 aan te raden.
Grof zand (grind)	Geen kleef, vaak gecombineerd met weerstand	Altijd voorboren t.b.v. aanbrengkwaliteit (minder beheersmaatregelen). Fluïderen heeft nauwelijks effect omdat in grindlagen geen wateroverspanning wordt opgebouwd.
Gemengd fijn zand/grind laagdiktes <1,0m	Naar verwachting geen kleef, voorboren in geval van hoge weerstand.	Gemengde lagen met lage weerstand kan mogelijk zonder fluïderen. Rekening houden met scenario om voor te boren (MPa is leidend). In geval van oude grindlagen, zandbanen of oeverwallen altijd voorboren.
Veen	Aandacht vlakke opstelplaats boorstelling en stabiliteit funderingsstelling.	Waterbak aanwezig om te kunnen spoelen. Verbetering schottenbaan. Op WOS geen directe ervaring met aanbrengen in diepe veenlagen, alleen in de toplaag. Verwachting is dat de weerstand geen belemmering vormt.
<15 MPa	Nauwelijks slijtage	Geen beheersmaatregelen nodig zoals voorboren of fluïderen. Aanbrengtechniek naar verwachting vrij inzetbaar
<20 MPa	Weinig slijtage	Mogelijk zonder voorboren of fluïderen. Als de MPa waarden onder de 20 MPa blijven dan kan vrij hangend blok worden ingezet. MPa waarden boven de 17MPa oordelen beheersmaatregelen op basis van grondlagen en rekening houden met overstappen op werken met voorspanning (meedrukken of -trekken).
>20- 30 MPa	Lichtelijk slijtage	Vorboren met bentoniet over de gehele lengte geadviseerd. Vorboren komt de kwaliteit van kunststof damwanden ten goede. Alleen gecombineerd met meedrukkende of meetrekkende funderingsstelling.
>25-38MPa	Veel slijtage, meerdere technieken van toepassing	Altijd voorboren en alleen gecombineerd met meedrukkende of meetrekkende funderingsstelling.
Vanaf 38MPa	Geen ervaring op WOS	Nader onderzoeken invloed op uitvoering en oplossingen.

De uiterste MPa waarden waar kunststof damwanden op WOS zijn aangebracht gaat tot 38 MPa. De maakbaarheid bij hogere MPa waarden dient nog nader te worden onderzocht, door de combinatie de Betuwse Waard is het exacte omslagpunt niet bepaald. Het is reëel om te verwachten dat hoe hoger de MPa waarden oplopen des te groter het percentage wordt met afwijkingen (puntniveau, beschadiging en/of uit het slot).

Bijlage E Getallenvoorbeeld 'kansbijdrage doorloopsheid als gevolg van uit het slot lopen'

Situatiebeschrijving

Op een traject van 20 kilometer wordt 2 kilometer versterkt op piping met een kunststof heavescherm. Op de overige 18 kilometer groene dijk wordt geen aanvullende pipingmaatregel aangebracht omdat de faalkansbijdrage ten aanzien van piping daar voldoende klein is. Een schets van de situatie is weergegeven in Figuur E-1. In dit voorbeeld bedraagt de trajecteis 1:10.000. Het ontwerpuitgangspunt is dat de faalkans voor piping voor het te versterken deel van het traject niet groter mag zijn dan $3,0 \cdot 10^{-6}$, afgeleid uit een faalkansbudget voor piping van 24% en een lengte-effect $N=7,7$ voor de te versterken strekking van 2 kilometer.



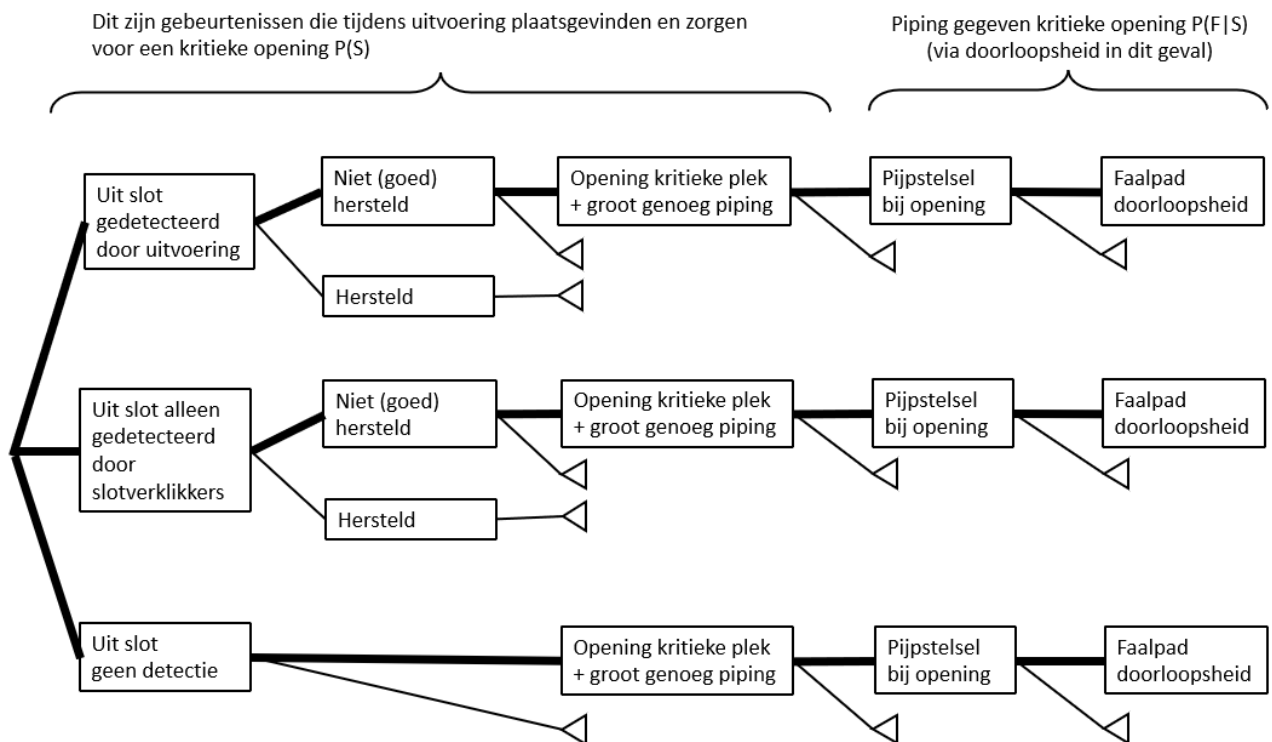
Figuur E-1 Situatieschets voorbeeld

In dit voorbeeld is het startpunt een veiligheidsanalyse, die voorafgaand aan het versterkingsproject is uitgevoerd, waaruit zou blijken dat de huidige kans op piping op doorsnede-niveau ter plaatse van het te versterken deel van het traject (gele strekking in Figuur E-1) zonder maatregel gelijk is aan 0,0002.

Hieronder is nagegaan wat de faalkansbijdrage is voor 'piping door een opening als gevolg van ernstig uit het slot lopen'. Daarbij is achtereenvolgens gekeken naar:

- Scenariokans $P(S)$ 'kritieke opening voor doorloopsheid door ernstig uit het slot lopen';
- Conditionele kans $P(F|S)$ 'Doorloopsheid gegeven kritiek opening in scherm'.

Voor het bepalen van deze kansen zijn de faalpaden in onderstaande gebeurtenissenboom beschouwd.



Figuur E-2 Gebeurtenissenboom met faalpaden leidend tot doorloopsheid door een opening in het scherm als gevolg van uit het slot lopen van een kunststof heavescherm (indien het faalpad eindigt met een driehoek, leidt dit faalpad niet tot falen)

Scenariokans P(S) 'kritieke opening voor doorloopsheid door ernstig uit het slot lopen'

De scenariokans 'kritieke opening voor doorloopsheid door ernstig uit het slot lopen' is bepaald op basis van onderstaande schattingen van (voorwaardelijke) kansen. De volgende uitgangspunten zijn gehanteerd:

- a) Frequentie van uit het slot lopen is 3% gegeven een zorgvuldige uitvoering. Uit de enkele praktijkproeven is gebleken dat 3% à 7% van de aangebrachte planken uit het slot is gelopen, zie intermezzo in het kader hieronder.
- b) 2/3 deel van alle uit het slot gelopen planken wordt opgemerkt tijdens de uitvoering vanwege stagnatie bij het aanbrengen van de volgende plank.
- c) In het getallenvoorbeeld is een gekeken naar het effect van slotverklikkers. Er is een keer gerekend met
 - o het scenario dat het resterende 1/3 deel van de uit het slotgelopen planken is verklikt met slotverklikkers en er is een keer gerekend met het scenario dat geen slotverklikkers zijn toegepast;
 - o het scenario dat van het resterende 1/3 deel de helft van de uit het slot gelopen planken (dus ca 15% van alle uit het slot gelopen planken) niet is verklikt en dus onopgemerkt is gebleven tijdens de uitvoering;
 - o het scenario dat van het resterende 1/3 deel (dus ca 15% van alle uit het slot gelopen planken) niet is verklikt.
- d) 1% van alle gedetecteerde uit het slot gelopen planken is niet of niet goed hersteld;
- e) In 5% van alle uit het slot gelopen planken was de opening van de uit het slot gelopen plank groot genoeg en op een kritieke plek voor doorloopsheid.

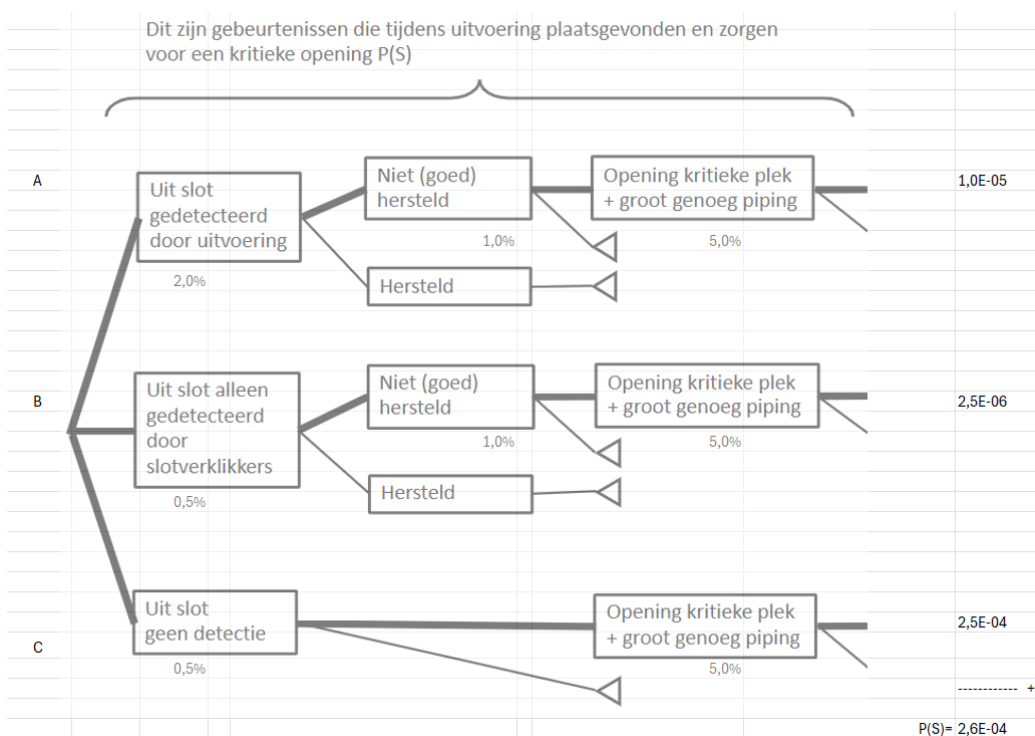
Met voornoemde getallen bedraagt de geschatte scenariokans "ernstig uit het slot lopen" $P(S)$:

- 1) $P(S) = 1,5 \cdot 10^{-5}$ wanneer alle uit het slot gelopen planken zijn verkend, hetzij door stagnatie tijdens uitvoering, hetzij door slotverklikker;
- 2) $P(S) = 2,6 \cdot 10^{-4}$ wanneer alle 15% van de uit het slot gelopen planken niet zijn opgemerkt (in dit voorbeeld wanneer slechts op de helft van de planken een slotverklikkers is toegepast);
- 3) $P(S) = 5,1 \cdot 10^{-4}$ wanneer alle 30% van de uit het slot gelopen planken niet zijn opgemerkt (in dit voorbeeld wanneer geen slotverklikkers zijn toegepast).

De afleiding van situatie 2) is grafisch weergegeven in Figuur E-3.

Intermezzo: Frequentie uit het slot lopen uit maakbaarheidsproeven

Op basis van de maakbaarheidsproef Zwolle-Olst [11] en dijkversterking Wolferen-Sprok [7] [19] is een inschatting gemaakt van de kans op het uit het slot lopen van de kunststofplanken. De frequentie van uit het slot lopen in deze maakbaarheidsproeven varieerde tussen de 3% en 7% van het totaal aantal aangebrachte planken. De kans dat het gat, dat ontstaat bij het uit het slot lopen, dusdanig groot is dat er zand door kan worden meegevoerd ligt vermoedelijk een stuk lager. Vooralsnog is er onvoldoende informatie uit de praktijkproeven beschikbaar om dit onderscheid te maken. In het afstudeeronderzoek van Arjen Zagema [26] is, op basis van informatie uit de maakbaarheidsproeven, gekeken naar de risico's van openingen in kunststof heaveschermen. In dat onderzoek is geconcludeerd dat bij de kans op gaten en spleten in het scherm sterk kan worden gereduceerd door een zorgvuldige wijze van uitvoering. Deze zorgvuldige uitvoering begint met een vooronderzoek, zoals onderzoek naar obstakels en grondonderzoek gericht op installeerbaarheid van de planken. Vervolgens moet een geschikt planktype worden gekozen/ontworpen. Daarna moet een passende uitvoeringsmethode worden vastgesteld. Tijdens uitvoering moet voldoende en onafhankelijke kwaliteitscontrole, visuele inspectie en monitoring plaatsvinden.



Figuur E-3 Voorbeeld van schatting scenariokans $P(S)$ "Opening in het scherm als gevolg van uit het slot lopen van een kunststof heavescherm" indien slotverklikkers op alle planken worden toegepast.

Conditionele kans 'Doorloopbaarheid gegeven kritieke opening in scherm' $P(F|S)$

De conditionele kans $P(F|S)$ beschrijft de kans op vervolprocessen resulterend in overstromen als gevolg van doorloopbaarheid gegeven het optreden van het kritieke gat. Er zijn momenteel geen gevalideerde modellen waarmee de invloed van gaten en spleten bij doorloopbaarheid kan worden bepaald. Complicerende factoren zijn onder andere: 3D-effecten, de invloed van de gatgrootte in relatie tot de pipedimensies en het vervolg van het faalpad. Vooral nog wordt volstaan met het schatten van een bovengrens van de kans op piping waarbij er gemakshalve in de berekening vanuit wordt gegaan dat er geen scherm aanwezig is. Dit is een conservatieve benadering. Voor deze bovengrens schatting van de conditionele kans $P(F|S)$ kan de methode van Sellmeijer (al dan niet met D-Geo Flow) worden gebruikt zonder daarbij het effect van het scherm mee te nemen. De huidige kans op piping op doorsnede-niveau kan worden benaderd met de kalibratieformule uit vigerende beoordelings- en ontwerpinstrumentaria. Voor de huidige kans op doorsnede-niveau geldt in dit voorbeeld een kans die gelijk is aan 0,0002, zie situatiebeschrijving aan het begin van dit voorbeeld.

Kans 'Doorloopbaarheid gegeven kritieke opening in scherm' $P(F_{DLH \text{ uit slot}})$

De kans op piping kunnen worden bepaald door de scenariokans $P(S)$ 'kritieke opening voor doorloopbaarheid door ernstig uit het slot lopen' te vermenigvuldigen met de conditionele kans $P(F|S)$ 'Doorloopbaarheid gegeven kritieke opening in scherm'. Daarbij hoort dan nog een tweede voorwaardelijke kans namelijk de kans op het op dezelfde plek aanwezig zijn van een erosiepijpsysteem en een opening in het scherm $P(\text{pijp bij opening})$. In formulevorm wordt de kans op doorloopbaarheid op doorsnede-niveau dan:

$$P(F_{DLH \text{ uit slot}}) = P(S) \cdot P(F|S) \cdot P(\text{pijp bij opening})$$

Lengte-effect

De kans $P(F_{DLH \text{ uit slot}})$ voor een gehele strekking van de pipingmaatregel (2 km) te bepalen dient het lengte-effect in rekening worden gebracht. Hierbij is het van belang dat de ruimtelijke variatieschaal bij piping verschilt van de variatieschaal die hoort bij 'uit het slot lopen'. Voor piping wordt vaak een correlatielengte van 300m gehanteerd. De variatieschaal voor 'uit het slot lopen' wordt gedomineerd door de variaties in weerstand tijdens het inbrengen van de planken door verschillen in de ondergrond. Variaties in pakkingsdichtheid van het zand en grindvoorkomens kunnen op aanzienlijk kortere afstanden sterk verschillen. Variaties in uitvoering en materiaal spelen een minder belangrijke rol bij de variatieschaal. Bij een zorgvuldige uitvoering zijn doorsnede-kansen namelijk sterk gecorreleerd van plank tot plank in een bepaald gebied omdat:

- planken in een deelgebied een zelfde lengte en sterkte hebben;
- de planken voor het inbrengen worden gecontroleerd op kwaliteit (dus kromme planken worden bijvoorbeeld niet geaccepteerd);
- de planken worden aangebracht door eenzelfde uitvoerder volgens vaste werkwijze.

De variatieschaal voor 'uit het slot lopen' is dus afhankelijk van de afzetting. In het beschouwde gebied schatten we, op basis van geologie en uitgevoerde sonderingen, dat de correlatieafstand van de weerstand in de ondergrond ca. 25 meter bedraagt.

Voor het bepalen van $P(F_{DLH \text{ uit slot}})$ is ervoor gekozen om eerst de kans op een strekking van 300 m te bepalen. In dat geval is het lengte-effect veroorzaakt door de ruimtelijke variatieschaal voor piping zeer klein, we stellen hier gemakshalve dat de kans op piping op een strekking van 300 m gelijk is aan de doorsnede kans en het lengte effect dan dus gelijk is aan 1. Het lengte-effect voor 'uit het slot lopen' wordt bepaald door de verschillen in ondergrond die de inbrengbaarheid beïnvloeden en daarvan is de correlatieafstand gelijk gesteld aan 25m. Voor een strekking van 300 m bedraagt de lengte-effectfactor dan $N_{\text{uit slot},300m} = 300/25 = 12$.

Op een strekking van 300 m kan $P(F_{DLH \text{ uit slot}})$ nu worden bepaald met:

$$P(F_{DLH \text{ uit slot},300m}) = P(S) \cdot P(F|S) \cdot P(\text{pijp bij opening}) \cdot N_{\text{uit slot},300m}$$

Stel:

- $P(S) = 2,6 \cdot 10^{-4}$ voor 300m
- $P(F|S) = 0,0002$ voor 300m
- $P(\text{pijp bij opening}) = 25\%$. Dat wil zeggen op 25% van de strekking is er tijdens hoogwater een wellenveld met pijpsysteem tot aan scherm aanwezig.
- $N_{\text{uit slot},300m} = 12$

Met bovenstaande getallen kan worden berekend:

- $P(F_{DLH \text{ uit slot},300m}) = 1,6 \cdot 10^{-7}$ voor 300 m

Voor de gehele strekking waarover een pipingmaatregel in de vorm van een kunststof heavescherm wordt toegepast (2 km) wordt de kans $P(F_{DLH \text{ uit slot}})$ bepaald door bovenstaande kans op 300m op te schalen van met de lengte-effect factor voor piping. Deze is gelijk aan $N_{piping,2km} = 1+(2000/300)=7,7$. De kans $P(F_{DLH \text{ uit slot}})$ voor 2 km kan worden bepaald met:

$$P(F_{DLH \text{ uit slot},2km}) = P(F_{DLH \text{ uit slot},300m}) \cdot N_{piping,2km}$$

Met bovenstaande getallen kan worden berekend:

- $P(F_{DLH \text{ uit slot},2km}) = 1,2 \cdot 10^{-6}$ voor 2 km

Het ontwerpuitgangspunt is dat de faalkans voor piping voor het te versterken deel van het traject niet groter mag zijn dan $3,0 \cdot 10^{-6}$. De kans voor doorsloopsheid als gevolg van uit het slot lopen bedraagt in dit geval 40% van de target faalkans voor piping voor het te versterken deel van het traject.