



OBOR kunststof heaveschermen

Ondertitel document

**Dit is het format voor een hoofddocument.
Een hoofddocument heeft een breed draagvlak,
bijvoorbeeld door de betrokkenheid van een
klankbordgroep en/of ENW-advies, en maakt
onderdeel uit van de hoofdstructuur van DIV.**



COLOFON

Titel	OBOR kunststof Heaveschermen
Opdrachtgever	HwBP-De Innovatieversneller Piping
Auteur(s)	Werner Halter (Fugro), Marijn Hop (Fugro), Albert Wiggers (RHDHV)
Foto omslag	Heibaarheidsproef Dijkversterking Wolferen-Sprok, 2020
Kenmerk	VOLGT
Datum	08-11-2023
Status	Concept
Projectteam	Werner Halter (Fugro) Marijn Hop (Fugro) Berry Hol (De Betuwse Waard) Mark Van Lanen (De Betuwse Waard) Albert Wiggers (RHDHV) Laura van der Doef (Antea Group) Laura Halbmeijer (Witteveen+Bos)
Reviewers	Berry Hol (De Betuwse Waard) Jos Karstens / Patrick Leeftang (JLD) Henry Hoekman (Profextru) Arjen Zagema (Fugro / UT Twente)

Inhoudsopgave

Voorwoord (volgt)	9
1 Inleiding	10
1.1 <i>Aanleiding, betrokken partijen</i>	10
1.2 <i>Doel</i>	10
1.3 <i>Doelgroep</i>	10
1.4 <i>Relatie met andere leidraden en documentatie</i>	10
1.5 <i>Leeswijzer</i>	11
2 Samenhang veiligheidsraamwerk en publicatie heaveschermen	13
2.1 <i>Samenhang met veiligheidsraamwerk</i>	13
2.2 <i>Samenhang met publicatie heaveschermen</i>	13
2.3 <i>Aansluiting op overstromingskansen</i>	14
2.3.1 <i>Eis op verschillende niveaus</i>	14
2.3.2 <i>Lengte-effect afhankelijk van faalpaden en scenario's</i>	15
3 Kunststof damwandscherm als heavescherm	16
3.1 <i>In dit hoofdstuk</i>	16
3.2 <i>Werkend principe kunststof heavescherm</i>	16
3.3 <i>Verhaal van de innovatie</i>	17
3.3.1 <i>Ervaring toepassing als heavescherm</i>	17
3.3.2 <i>Toepassingsgebied kunststof heavescherm</i>	18
3.4 <i>Faalpaden bij een intact heavescherm</i>	18
3.4.1 <i>Faalpad onderloopsheid</i>	20
3.4.2 <i>Faalpad achterloopsheid</i>	22
3.4.3 <i>Faalpad voorloopsheid</i>	22
3.5 <i>Faalpaden bij een defect aan het scherm of aansluiting (bedreigingen)</i>	22
4 Ontwerp	25
4.1 <i>Algemeen</i>	25
4.2 <i>Systeembeschrijving</i>	25
4.2.1 <i>Fysieke decompositie</i>	25
4.2.2 <i>Functionele decompositie</i>	25
4.3 <i>Geometrisch ontwerp waterveiligheid</i>	26
4.3.1 <i>Stappen om te komen tot een ontwerp</i>	26
4.3.2 <i>Startpunt positie en diepte van het scherm</i>	27
4.3.3 <i>Schematiseren van ondergrond en pijpstelsel en bepalen van scenario's</i>	28
4.3.4 <i>Analyse onderloopsheid per scenario</i>	28
4.3.5 <i>Evaluatie resultaten en eventuele bijstelling positie of diepte van scherm;</i>	31

4.4	<i>Constructief ontwerp</i>	31
4.4.1	<i>Nadere ontwerpdetailering</i>	32
4.5	<i>Duurzaamheid</i>	33
5	Analyse bedreigingen waterveiligheid	35
5.1	<i>Inleiding</i>	35
5.2	<i>Inventarisatie bedreigingen</i>	35
5.3	<i>Selectie van relevante bedreigingen voor uitwerking</i>	38
5.4	<i>Bedreiging A.1 Scherm ernstig uit het slot tijdens uitvoering en opening niet zanddicht</i> ..	38
5.4.1	<i>Foutenboom</i>	38
5.4.2	<i>Scenariokans P(S):</i>	39
5.4.3	<i>Conditionele kans P(F S):</i>	39
5.4.4	<i>Voorbeeld faalkansbijdrage 'doorloopbaarheid door ernstig uit het slot lopen'</i>	40
5.5	<i>Bedreiging A.2 Verminderde pakking van zand vanwege voorboren</i>	41
5.6	<i>Bedreiging A.3 Verminderde pakking van zand langs het scherm door trekken van moederplank</i>	42
5.7	<i>Bedreiging A.10 Opbarsten en kwelweg aan bovenstroomse zijde van scherm</i>	42
6	Uitvoering	43
6.1	<i>Inleiding</i>	43
6.2	<i>Maakbaarheid</i>	43
6.2.1	<i>Maakbaarheidsproeven</i>	43
6.2.2	<i>Materieel</i>	45
6.2.3	<i>Installatieproces</i>	48
6.2.4	<i>Aanbrengen heisleuf</i>	48
6.2.5	<i>Productiesnelheid</i>	49
6.3	<i>Beheersmaatregelen gericht op kwaliteit en efficiëntie van uitvoering</i>	51
6.3.1	<i>Algemeen</i>	51
6.3.2	<i>Grondonderzoek</i>	51
6.3.3	<i>Correctie damwand tijdens uitvoering</i>	51
6.3.4	<i>Optimale werkrichting</i>	51
6.3.5	<i>Toepassing van stalen moederplank</i>	51
6.3.6	<i>Selectie van het optimale type damwandprofiel</i>	52
6.3.7	<i>Water toevoegen in heisleuf</i>	54
6.3.8	<i>Toepassen kleefonderbrekers</i>	54
6.3.9	<i>Vorboren</i>	54
6.3.10	<i>Voorprikken</i>	55
6.3.11	<i>Aanpassen machineconfiguraties</i>	55
6.3.12	<i>Fluïderen</i>	55
6.3.13	<i>Toepassen makelaar</i>	55
6.4	<i>Beheersmaatregelen gericht op functioneren van de pipingmaatregel</i>	55
6.4.1	<i>Visuele inspectie</i>	56
6.4.2	<i>Monitoring tijdens realisatie</i>	56
6.4.3	<i>Slotverklikkers</i>	56
6.4.4	<i>Maatregelen om openingen in damwanden te herstellen</i>	57



6.5	<i>Verificatieplan</i>	61
6.6	<i>Omgevingsbeïnvloeding</i>	61
6.6.1	Trillingen	61
6.6.2	Geluid	62
6.6.3	Conusweerstand	62
6.6.4	Pakkingsgraad zand	63
6.6.5	Vervormingen	63
6.7	<i>Veiligheid tijdens realisatie</i>	63
7	Beheersmaatregelen levensduur	65
7.1	<i>Registratie en vastlegging van de gerealiseerde constructie</i>	65
7.2	<i>Monitoring en onderhoud</i>	65
7.2.1	Lengtebepaling van kunststof damwanden	65
7.2.2	Detecteren van openingen in kunststof damwanden	65
7.2.3	Kwaliteit van kunststof	66
7.3	<i>Verwijderbaarheid</i>	66
8	Doorontwikkeling	67
8.1	<i>Welke ontwikkelstappen zijn gemaakt?</i>	67
8.2	<i>Aanbevelingen (Estafettestokje)</i>	67
9	Bibliografie	68
	Bijlage A: Referenties naar achtergronddocumenten	69
	Bijlage B: Technische specificaties kunststof damwanden	72
	Bijlage C: Duurzaamheidscertificaten damwandleveranciers	76



Voorwoord (volgt)

DIT HOOFDSTUK IS NOG IN BEWERKING

Op 24 november 2024 ontving Fugro te Utrecht van Waterschap Rivierenland te Tiel, de opdracht voor het opstellen van tekstvoorstellen voor het OBOR Kunststof heaveschermen.

Voor het opstellen van de tekstvoorstellen maken wij onder andere gebruik van de voor dijkversterking Wolferen - Sprok opgestelde documenten met betrekking tot het ontwerp en de uitvoerbaarheid van het heavescherm, inclusief de daarbij verzamelde meetdata. Bij Dijkversterking Wolferen - Sprok worden over een lengte van 4,6 km kunststof damwanden aangebracht. Eerst is kennis opgedaan bij een tweetal uitvoeringsproeven met kunststof damwanden, waarbij intensief is gemonitord. Sinds augustus 2021 is de daadwerkelijke versterking aan de gang met kunststof damwanden. Daarbij is de aannemer geconfronteerd met nieuwe uitdagingen en zijn passende oplossingen bedacht.

Voor recente ervaringen en achtergrondinformatie is navraag gedaan bij de aannemerscombinatie De Betuwse Waard en leveranciers van kunststof damwanden. Alleen de opgedane ervaringen en de reeds ontwikkelde kennis is opgeschreven. Er is geen nieuwe kennis ontwikkeld. De inhoudsopgave is opgesteld in samenspraak met De Innovatieversneller.

Daarnaast is informatie over kunststof heaveschermen verwerkt, die is aangereikt uit enkelen andere, iets minder uitvoerig gedocumenteerde, dijkversterkingsprojecten.

Deze tekstvoorstellen zullen samen met de Innovatieversneller worden uitgewerkt tot een OBOR. De door De Innovatieversneller in te vullen tekstdelen zijn in dit rapport geel gemarkeerd.

Naast een onderlinge review van elkaars tekstvoorstellen door Fugro en De Innovatieversneller, zijn / zullen de volgende partijen worden benaderd voor een review:

- De Betuwse Waard (de aannemerscombinatie die de dijk Wolferen - Sprok versterkt)
- JLD (de aannemer die de kunststof damwanden voor Dijkversterking Wolferen - Sprok levert en deels plaatst)
- Adviesteam Dijkontwerp
- Regieteam piping
- Community Technisch Managers

Er was gestreefd naar afronding van de opdracht in het eerste kwartaal van 2023, maar dit is niet gelukt, omdat het generiek veiligheidsraamwerk van De Innovatieversneller nog niet klaar was.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding, betrokken partijen

Bij Dijkversterking Wolferen - Sprok worden over een lengte van 4,6 kilometer kunststof damwanden aangebracht. Dit is het eerste dijkversterkingsproject waarbij kunststof damwanden grootschalig als heavescherm worden toegepast. In dit project is eerst kennis opgedaan bij een tweetal uitvoeringsproeven met kunststof damwanden, waarbij intensief is gemonitord. Sinds augustus 2021 is de daadwerkelijke versterking aan de gang met kunststof damwanden. 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 kan worden gemaakt.

Deze richtlijn is opgesteld in opdracht van De Innovatieversneller in samenwerking met Fugro en Aannemerscombinatie De Betuwse Waard.

1.2 Doel

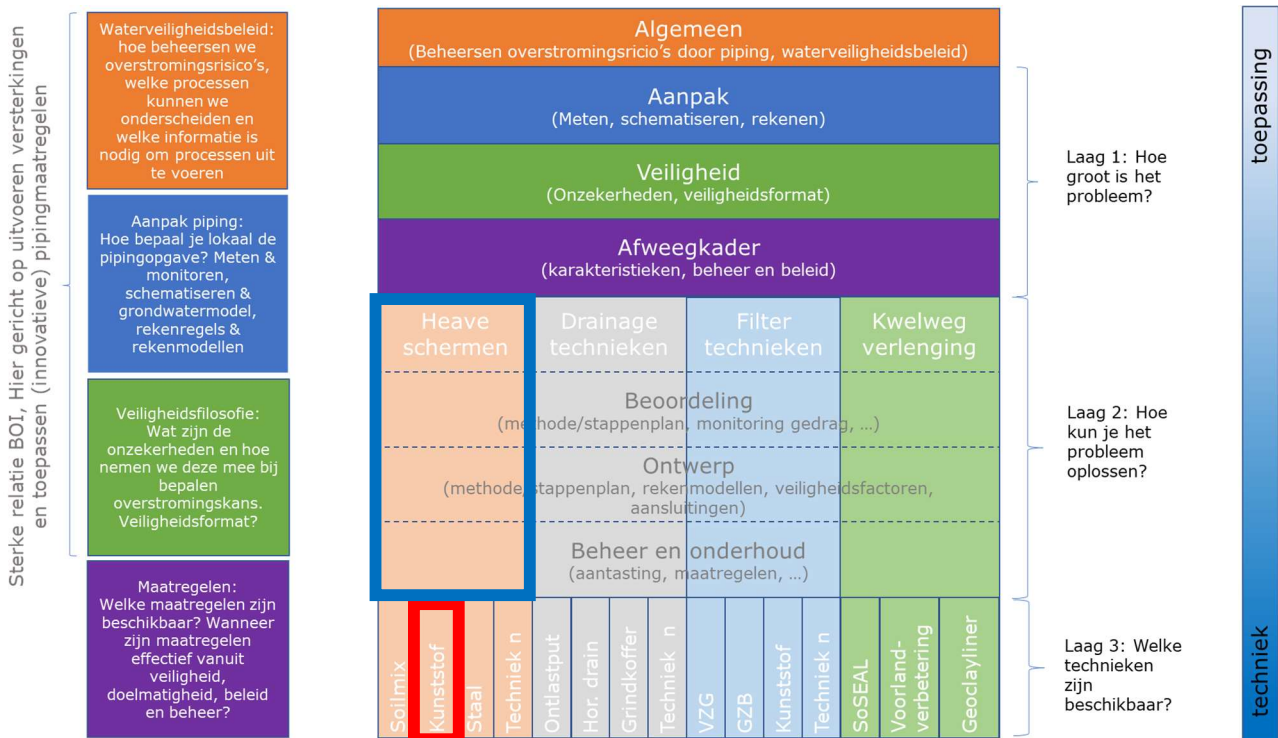
Het doel van dit document is om een richtlijn te bieden bij het beoordelen, ontwerpen en beheren van kunststof damwanden. De inhoud van dit document is gebaseerd op de opgedane ervaringen en reeds ontwikkelde kennis van aannemers en leveranciers van kunststof damwanden. Er is geen nieuwe kennis ontwikkeld.

1.3 Doelgroep

Deze OBOR is bedoeld voor dijkwerkers die bezig zijn of gaan met het ontwikkelen, ontwerpen, uitvoeren, beoordelen of beheren van kunststof damwanden. 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 BOI2023 bekend is.

1.4 Relatie met andere leidraden en documentatie

De Innovatieversneller (DIV) stimuleert en versnelt de toepassing en doorwerking van slimme en innovatieve oplossingen in het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP). Om relevante ontwikkelingen rondom het thema piping te ontsluiten worden er in de komende jaren 8 publicaties geschreven onder de regie van de De Innovatieversneller Piping (DIV Piping) en in samenwerking met dijkversterkingsprojecten (waterschappen en marktpartijen), kennisinstututen en ontwikkelaars van innovatieve technieken. In Figuur 1.1 is de structuur van deze publicaties weergegeven. De verschillende publicaties geven handvatten voor het ontwerp, uitvoeren en beheren van innovatieve pipingmaatregelen. De Publicatie Algemeen [1] bevat een beschrijving van alle in Figuur 1.1 genoemde publicaties en hun onderlinge samenhang.



Figuur 1.1 Structuur publicaties DIV Piping

De voorliggende OBOR kunststof heaveschermen is rood omkaderd in Figuur 1.1. De publicatie sluit aan op het Veiligheidsraamwerk [2], weergegeven in groen, waarmee de aansluiting op het BOI2023 geborgd is. De bovenliggende Publicatie Heaveschermen [3] is blauw omkaderd. 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.

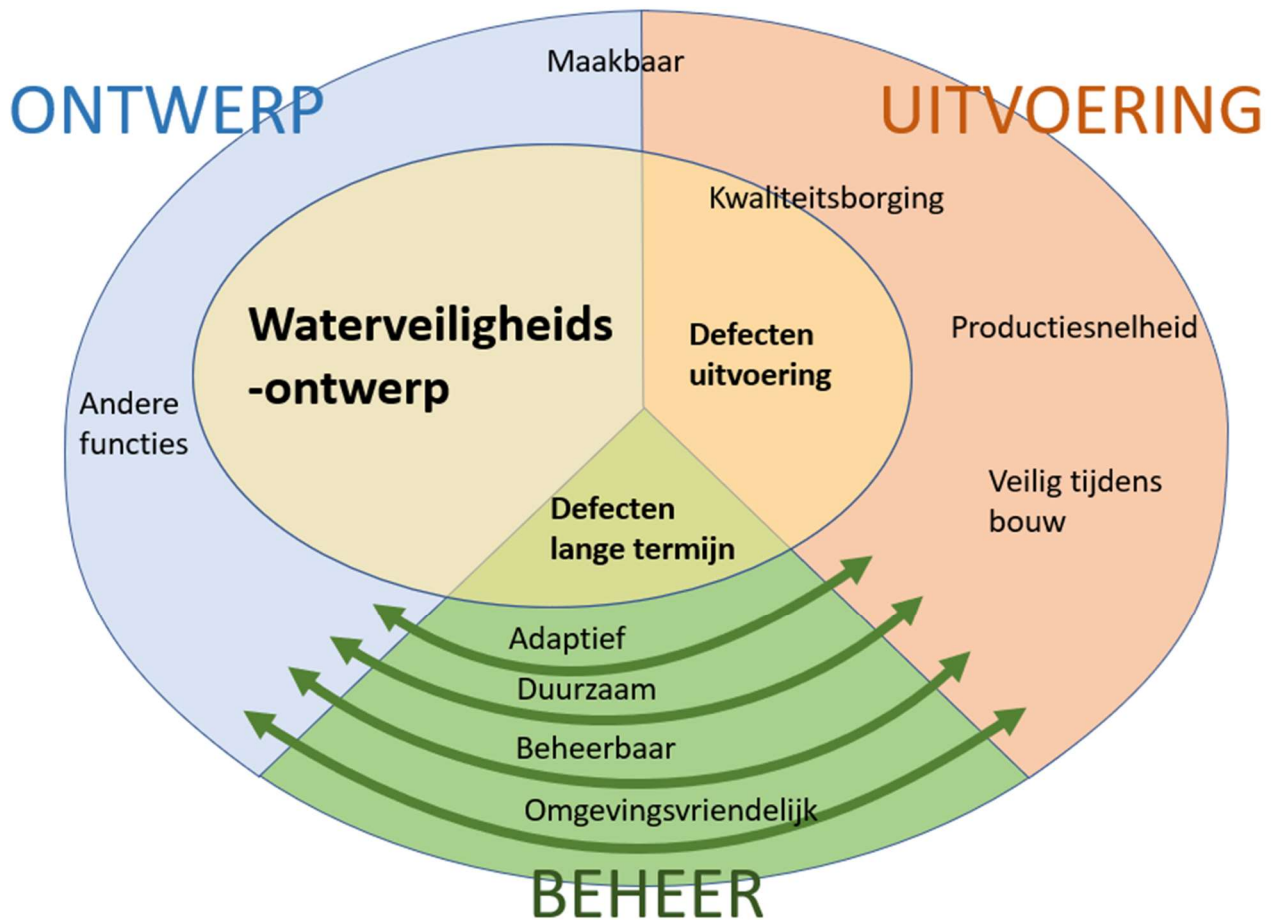
1.5 Leeswijzer

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 en de Publicatie Heaveschermen [3].
- 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. Hierbij wordt ook aandacht besteed aan het constructief ontwerp.
- 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: Status en doorontwikkeling.



Figuur 1.2 Aspecten die in deze OBOR aan bod komen

2 Samenhang veiligheidsraamwerk en publicatie heaveschermen

2.1 Samenhang met veiligheidsraamwerk

Deze publicatie sluit aan op het bovenliggende 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. Daarbij worden onderstaande stappen uit het veiligheidsraamwerk gevolgd:

1. 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	Hoofdstuk	Publicatie Veiligheidsraamwerk
Aansluiting op veiligheidsraamwerk en publicatie heaveschermen	2	Stap 2. Systeemeisen (relatie met overstromingskansen)
Werkend principe en toepassingsgebied kunststof heaveschermen	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)
Uitvoering	6	Beheersmaatregelen uitvoering en verificatie
Beheer	7	Beheersmaatregelen beheer en verificatie
Status en doorontwikkeling	8	n.v.t.

2.2 Samenhang met 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. Aangezien onderloopsheid doorgaans het belangrijkste faalpad is voor het ontwerp qua kosten, en omdat hierover in bestaande technische leidraden betrekkelijk weinig specifieke uitleg is gegeven, gaat de meeste aandacht in deze publicatie uit naar onderloopsheid.

In deze OBOR is vooral gekeken naar specifieke bedreigingen voor een situatie van 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 zullen dus zowel de aanbevelingen uit de Publicatie Heaveschermen als de aanbevelingen uit deze OBOR moeten worden gebruikt.

2.3 Aansluiting op overstromingskansen

DEZE PARAGRAAF IS RECHTSTREEKS OVERGENOMEN UIT DE PUBLICATIE HEAVESCHERMEN. BIJ INHOUDELIJK COMMENTAAR GRAAG IN ÉÉN VAN DE DOCUMENTEN AANGEVEN.

2.3.1 Eis op verschillende niveaus

De veiligheidsnorm die aan primaire waterkeringen wordt gesteld, is uitgedrukt in een jaarlijkse overstromingskans per dijktraject ($P_{eis,traject}$). In het veiligheidsraamwerk is aangegeven dat er verschillende manieren zijn om te onderbouwen dat aan deze overstromingskansen kan worden voldaan:

- A. Alle kansen van alle mechanismen en onderdelen van het traject combineren, en verifiëren op basis van de overstromingskansnorm. Zie verder hoofdstuk 5 van de Publicatie Heaveschermen [3] voor aanwijzingen hiervoor;
- B. Alle kansen voor piping voor alle onderdelen van het traject combineren en spiegelen aan de overstromingskansen op trajectniveau (faalkansbegroting nodig);
- C. Faalkans voor piping op doorsnedeniveau spiegelen aan de overstromingskansen voor piping op doorsnedeniveau (faalkansbegroting + lengte-effectfactor nodig).

Het opdelen van de faalkans tot een eis op doorsnedeniveau (benadering C) is conservatief. Voor **groene dijken** wordt de doorsnede-eis ($P_{eis,dsn}$) als volgt bepaald als functie van de trajecteis ($P_{eis,traject}$):

$$P_{eis,dsn} = \omega \cdot P_{eis,traject} / N \quad (2-1)$$

Bij benadering B wordt de eis naar trajectniveau gebracht maar wordt nog wel onderverdeeld naar faalmechanisme:

$$P_{eis,piping} = \omega \cdot P_{eis,traject} \quad (2-2)$$

En in benadering A wordt rechtstreeks getoetst overstromingskansen op trajectniveau.

In bovenstaande formules zijn:

- $P_{eis,traject}$: jaarlijkse overstromingskansen op trajectniveau (1/jaar)
- $P_{eis,piping}$: jaarlijkse faalkansen op trajectniveau voor piping (1/jaar)
- $P_{eis,dsn}$: jaarlijkse faalkansen op doorsnedeniveau voor piping (1/jaar)
- ω : Faalkansruimtefactor voor piping (-)
- N : Lengte-effectfactor voor beschouwde faalpad (-)

In het Veiligheidsraamwerk [2] is een algemene uitleg gegeven van deze begrippen.

Bij het toepassen van bovenstaande op andere een pipingmaatregel moet men zich bewust zijn dat de parameter N , en mogelijk ook de parameter ω , kan afwijken van de waarde die volgt bij toepassing van defaults die in de vigerende instrumentaria worden genoemd voor piping bij groene dijken. In volgende paragraaf volgt een korte toelichting.

De benadering B of zelfs een benadering A kan eenvoudiger zijn indien verschillende faalpaden met verschillende lengte-effecten moeten worden vergeleken. Dit is bijvoorbeeld vaak het geval bij het

vergelijken van faalkansbijdragen van verschillende scenario's uit de FMECA. Dit is nader in hoofdstuk 5 beschreven. In dit geval wordt het lengte-effect per scenario niet in de eis verwerkt maar in de kans van optreden.

2.3.2 Lengte-effect afhankelijk van faalpaden en scenario's

In hoofdstuk 3 van de Publicatie Heaveschermen [3] is aangegeven dat er bij heaveschermen andere faalpaden en scenario's kunnen worden onderscheiden dan in het geval van een piping bij een groene dijk. Voor het bepalen van de faalkansbijdrage van de verschillende scenario's aan de totale faalkans is de aanpak van een FMECA, waarin faalkansbijdragen per scenario en per faalpad worden geordend, behulpzaam. Dit wordt in hoofdstuk 5 van de Publicatie Heaveschermen [3] verder toegelicht. Per scenario kan het lengte-effect verschillen. De lengte-effectfactor N wordt volgens de vigerende beoordelings- en ontwerpinstrumentaria bepaald met onderstaande formule:

$$N = \max\left(1, 1 + \frac{a \cdot L}{b}\right) \quad (2-2)$$

Waarin:

- a: percentage van de lengte van het traject dat aan de overstromingskans bijdraagt. Defaultwaarden op basis van het BOI: 0,5 voor benedenrivierengebied, 0,9 voor bovenrivierengebied;
- b: equivalent onafhankelijke lengte (m). Default is 300 m voor groene dijken.

Zie het Veiligheidsraamwerk [2] voor een algemene uitleg van deze begrippen. De defaults zijn veilige beginwaarden **voor groene dijken**.

Voor pipingmaatregelen moeten de lengte-effecten passend zijn bij het ruimtelijk schaalniveau van de faalkansanalyse. Het lengte-effect is namelijk afhankelijk van het scenario en bijbehorende faalpad dat wordt beschouwd. Het lengte-effect voor het faalpad onderloopsheid uitgaande van een gesloten scherm is bijvoorbeeld anders dan voor het faalpad doorloopsheid dat wordt veroorzaakt door het scenario van een ernstig uit het slot gelopen scherm. Voor onderloopsheid zal het lengte-effect, en dan in het bijzonder de factor b , worden bepaald door de correlatielengtes die samenhangen met de ruimtelijke variatie van bodemparameters. In geval van doorloopsheid van bijvoorbeeld een kunststof damwandscherm, zal het lengte-effect ook sterk afhankelijk zijn van het uit het slot lopen van planken. In dat geval zal deze factor afhangen van het aantal planken, de wijze van installatie en bodemkenmerken die gekoppeld zijn aan de kans op het uit het slot lopen.

3 Kunststof damwandscherm als heavescherm

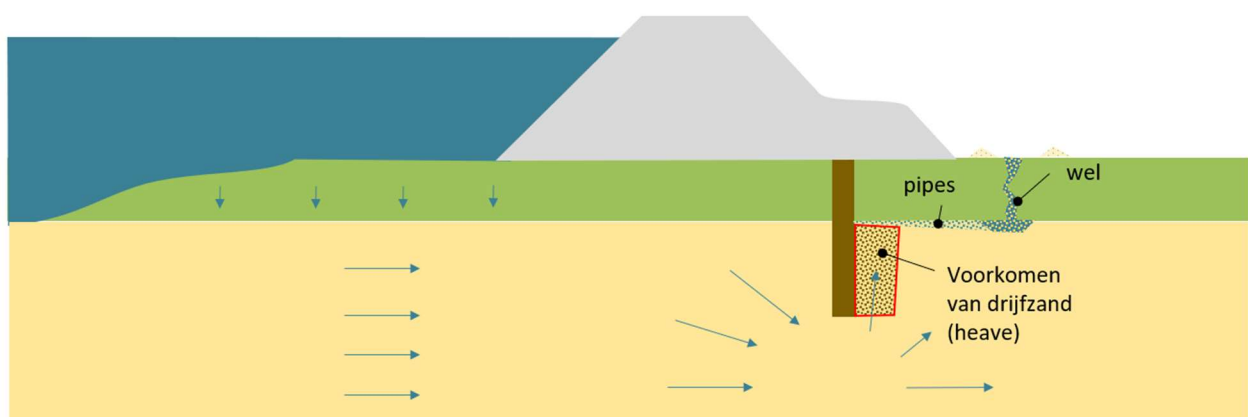
3.1 In dit hoofdstuk

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. Daarna wordt een algemene beschrijving gegeven van verschillende faalpaden die kunnen leiden bij falen door piping bij heaveschermen. Deze faalpaden zullen in de hoofdstukken 4 Ontwerp, 5 Analyse van de betrouwbaarheid van het systeem, 6 Uitvoering en 7 Beheer terugkomen.

3.2 Werkend principe kunststof heavescherm

DEZE PARAGRAAF IS RECHTSTREEKS OVERGENOMEN UIT DE PUBLICATIE HEAVESCHERMEN. BIJ INHOUDELIJK COMMENTAAR GRAAG IN ÉÉN VAN DE DOCUMENTEN AANGEVEN.

Een heavescherm voorkomt dat het proces van terugschrijdende erosie zich doorzet onder de dijk door, 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. 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 fluidisatie 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

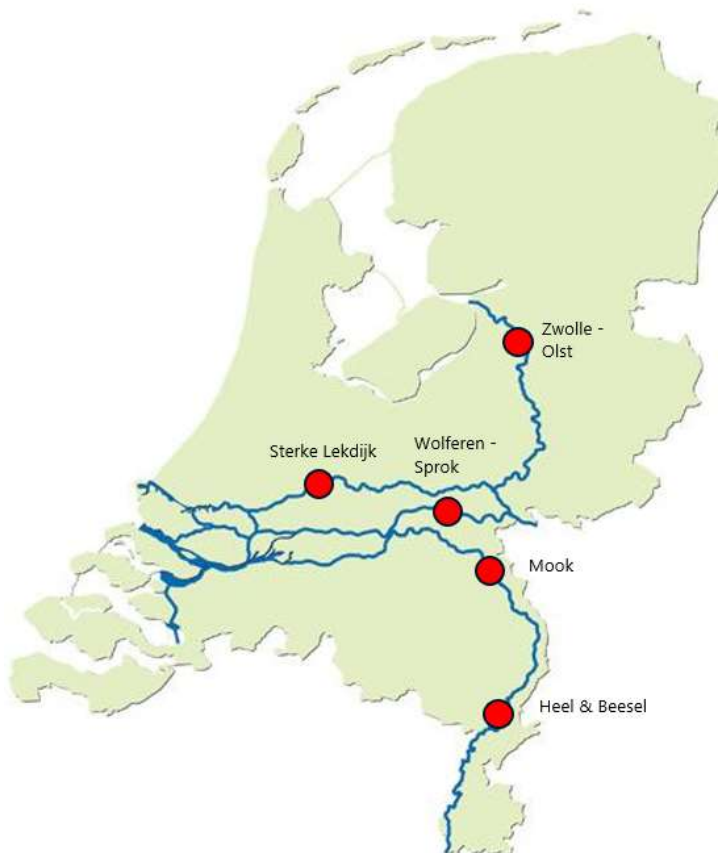
3.3.1 Ervaring toepassing als heavescherm

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 waterkerend 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	Damwand-lengte	Tracé-lengte	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 Filterscherm	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]



Figuur 3.2 Dijkversterkingen met kunststof heavescherm

3.3.2 Toepassingsgebied kunststof heavescherm

Een heavescherm is, onafhankelijk van de materiaalkeuze, pas effectief bij een lengte van meer dan circa 7 m, omdat het eerst door de cohesieve deklaag moet worden geïnstalleerd en vervolgens een paar meter in de zandlaag moet steken om de grondwaterstroming achter het scherm in verticale richting te dwingen.

Kunststof heaveschermen zijn vooral relevant bij dunne deklagen bij de binnenteen van de dijk. Deze situatie is veelal aanwezig in het bovenrivierengebied.

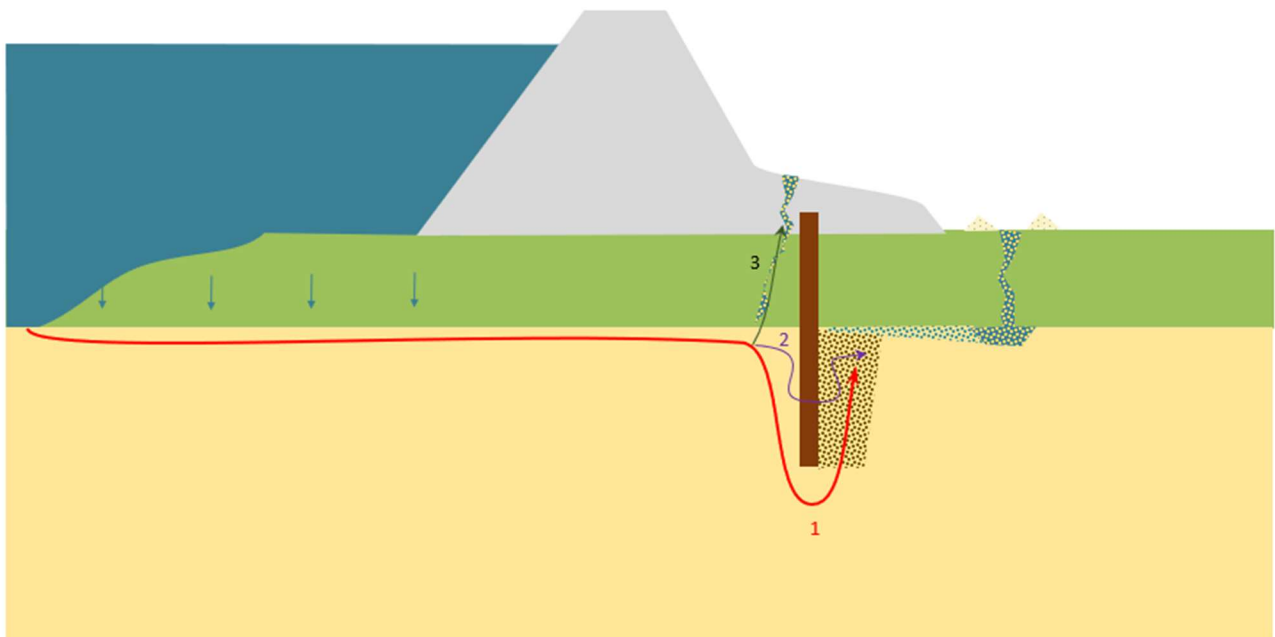
Een kunststof heavescherm heeft een maximale lengte. Deze bedraagt tot nu toe 14 m, maar kan waarschijnlijk nog iets worden vergroot bij een optimale uitvoeringstechniek en bodemopbouw. De belangrijkste beperkende factoren zijn installeerbaarheid en barrièrewerking. De installeerbaarheid van een kunststof 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.

3.4 Faalpaden bij een intact heavescherm

DEZE PARAGRAAF IS RECHTSTREEKS OVERGENOMEN UIT DE PUBLICATIE HEAVESCHERMEN. BIJ INHOUDELIJK COMMENTAAR GRAAG IN ÉÉN VAN DE DOCUMENTEN AANGEVEN.

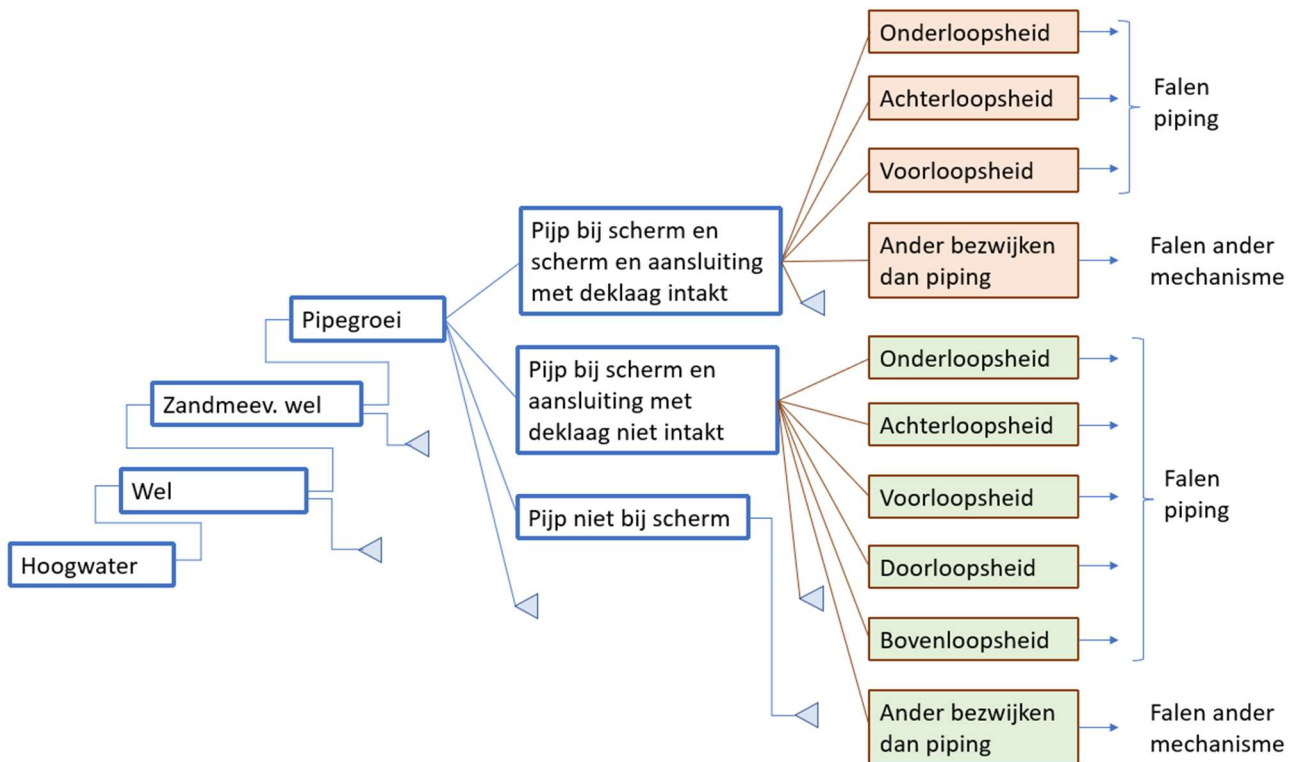
De faalpaden van een kunststof heaveschermen zijn hetzelfde als bij een houten of stalen heavescherm. Hieronder is een opsomming gegeven van verschillende faalpaden resulterend in piping bij een intact scherm (Figuur 3.3):

1. Onderloopsheid: het optreden van piping via horizontale en verticale kwelwegen onderlangs het scherm.
2. Achterloopsheid: het optreden van piping via horizontale kwelwegen in lengterichting van het scherm. De erosiepijp bereikt het uiteinde van het scherm en groeit vervolgens horizontaal verder richting het buitenwater.
3. Voorloopsheid: het optreden van piping via een zandmeevoerende wel op aan de bovenstroomse zijde van het scherm.



Figuur 3.3 Verschillende faalpaden voor piping bij een intact scherm: 1. Onderloopsheid; 2. Achterloopsheid; 3. Voorloopsheid

In Figuur 3.4 zijn bovenstaande faalpaden en de faalpaden die kunnen optreden indien er defecten zijn aan het systeem, dat wil zeggen aan het scherm zelf of aan de aansluiting van het scherm op de cohesieve afsluitende laag aan de bovenkant van het scherm. De faalpaden die verband houden met defecten aan het systeem zijn toegelicht in paragraaf 3.5.



Figuur 3.4 Gebeurtenisboom heavescherm met diverse faalpaden leidend tot piping bij intact scherm en bij defecten aan scherm of aansluiting

De geometrie van het scherm dient dusdanig te zijn de totale kans op alle genoemde faalpaden voldoende klein is. Een ontwerp van een heavescherm omvat:

- de positie van het scherm in het dwarsprofiel van de dijk;
- de diepte van het scherm;
- de situering van het scherm binnen het dijkvak;
- de aansluiting van de kop van het scherm op de cohesieve lagen;
- de constructieve sterke en geotechnische stabiliteit van het scherm;
- ontwerpaspecten die zijn gerelateerd aan installatiemethode.

In hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op het geometrisch ontwerp van het heavescherm volgend uit een integrale beschouwing van alle faalpaden zoals in dit hoofdstuk beschreven.

3.4.1 Faalpad onderloopsheid

Hieronder volgt een korte toelichting op de verschillende knopen uit het faalpad onderloopsheid voor de situatie van een intact scherm en een scherm dat zich onder de binnenberm van een dijk met deklaag bevindt. Indien er (vrijwel) geen deklaag aanwezig is, wordt de beschrijving van het faalpad wat eenvoudiger. Er is dan sprake van vrije uitstroming zonder sterke concentratie van kwelstroming bij een wel. In dit geval is het faalpad eenvoudiger en kunnen de eerste knopen worden overgeslagen. Deze laatste situatie wordt vaak in de technische leidraden over piping bij kunstwerken beschreven. Voorliggende publicatie focust op de situatie van heaveschermen bij dijken met een deklaag.

Initiële processen:

1. Toename buitenwaterstand en stijghoogte onder deklaag
2. Opbarsten en geconcentreerde verticale stroming in wel
3. Fluidisatie van zand en optreden van zandmeevoerende wel
4. Horizontaal zandtransport en pijpvorming vanaf wel tot aan scherm
5. Ontwikkelen van pijpvormingsproces tussen wel en scherm

Processen leidend tot verticale erosie achter het scherm:

6. Doorgaande verticale erosie achter scherm

Het ontstaan van een vertikaal erosiekanaal achter het scherm zou via verschillende processen kunnen ontstaan:

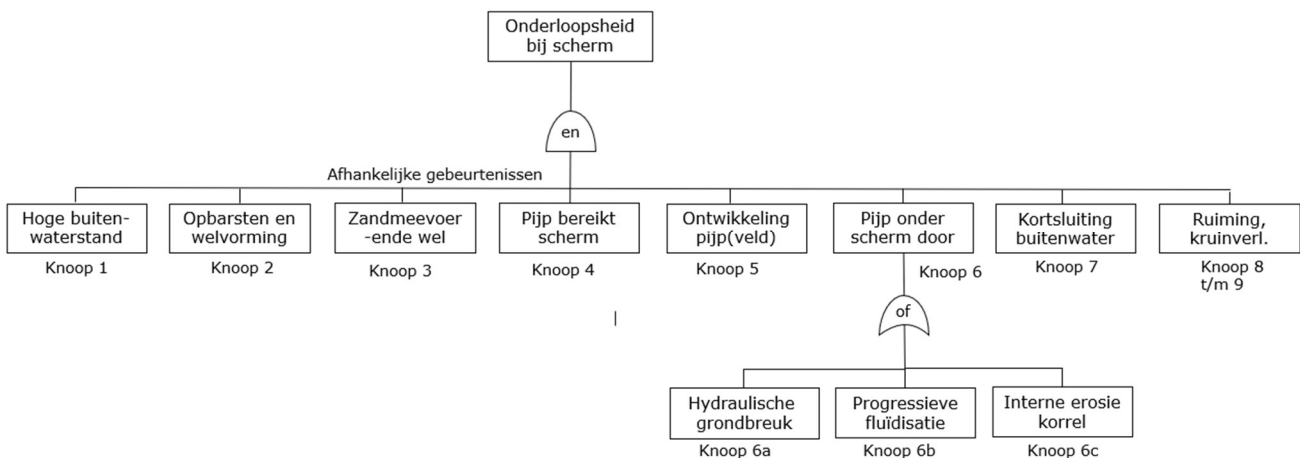
- a. *Hydraulische grondbreuk (drijfzandvorming van groot oppervlak in één keer)*
- b. *Lokale progressieve fluidisatie (drijfzandvorming van vanuit pijp naar de teen van het scherm)*
- c. *Vertikaal transport van individuele korrels (het korrel voor korrel losraken uit vaste korrelmatrix door aanstroming)*

Vervolgprocessen nadat erosiepijp scherm is gepaseerd:

7. Hydraulische kortsluiting erosiepijp buitendijks
8. Ruiming van de erosiepijp
9. Kruinverlaging, overslag/overlopen dijk, erosie talud, verdere kruinverlaging
10. Overstroming

In bijlage B van de Publicatie Heaveschermen [3] is een gedetailleerde fenomenologische beschrijving geven van de verschillende stadia in het proces van piping via het faalpad onderloopsheid bij heaveschermen. In deze bijlage zijn verwijzingen opgenomen naar relevante (internationale) literatuur.

De knopen uit het faalpad onderloopsheid bij een dijk met deklaag en een scherm zijn in Figuur 3.5 in de structuur van een foutenboom gezet.



Figuur 3.5 Foutenboom onderloopsheid bij dijk met deklaag en heavescherm

Hieronder is een korte toelichting gegeven op de knoop 6. Het ontwerp van het heavescherm richt zich namelijk op mogelijke gebeurtenissen rond deze knoop.

Knoop 6a: Hydraulische grondbreuk

Uit onderzoeken voor de situatie met vrije uitstroom blijkt dat pijpvorming onder het scherm door vrij plotseling kan optreden wanneer het zand achter de wand aan de benedenstroomse zijde van het scherm over de volledige hoogte van het scherm is gefluïdiseerd. Dit verschijnsel wordt hydraulische grondbreuk genoemd. In Engelstalige literatuur wordt dit verschijnsel aangeduid met *hydraulic heave* en in Duitstalige literatuur met *Hydraulischer Grundbruch* [12].

Hydraulische grondbreuk

Hydraulische grondbreuk is het ontstaan van drijfzand in een grotere zone door verticale opwaartse grondwaterstroming. In dit geval wordt de korrelspanning in het zand gelijk aan nul en gaat grond over

van een vaste pakking naar een gefluïdeerd zand-watermengsel. Veel geotechnische relaties tussen parameters voor zand in vaste pakking, zoals de relatie tussen gradiënt en doorlatendheid volgens Darcy, zijn niet meer van toepassing. Bij hydraulische grondbreuk treedt expansie op van het zand-watermengsel en als gevolg hiervan wil de grond omhoog bewegen (heave) en veranderen de eigenschappen van de grond drastisch: de dichtheid neemt sterk af en de grond wordt veel doorlatender. Dit verschijnsel is het eerst in 1919 door Karl Terzaghi met experimenteel onderzoek aangetoond. In hoofdstuk 4 en in bijlage B van de Publicatie Heaveschermen [3] wordt nader ingegaan op dit mechanisme en de modellen en grenstoestanden die voor de toetsing op hydraulische heave kunnen worden gebruikt.

Hydraulische grondbreuk gaat gepaard met interne instabiliteit en het omhoog komen van grond achter het scherm en uiteindelijk met doorgaande verticale erosie.

Knoop 6b: Lokale progressieve fluïdisatie

De hydraulische grondbreuk beschrijft het proces van drijfzandvorming in een groot volume aan de benedenstroomse zijde van het scherm. Er is ook een lokaal progressief proces van heave van boven naar beneden denkbaar. Dit proces is niet aangetroffen in proeven maar is ook moeilijk waar te nemen omdat bij de uitgevoerde proeven vaak niet de processen in de ondergrond is gekeken: het zicht is beperkt tot wat je door een perspex plaat kunt zien. Met name in situaties waarin de weerstand ten aanzien van hydraulische grondbreuk relatief groot is zou het proces van lokale progressieve fluïdisatie maatgevend kunnen worden boven hydraulische grondbreuk.

Knoop 6c: Erosie op korrelniveau

Dit fenomeen richt zich op korrelniveau en hoeft niet vooraf gegaan te worden aan drijfzandvorming. Het gaat hier om het losraken van korrels uit de vaste korrelmatrix door sterke aanstroming. Faalpaden bij een defect aan het scherm of aansluiting (bedreigingen)

3.4.2 *Faalpad achterloopsheid*

Wanneer het scherm is in lengterichting van de dijk niet ver genoeg doorgezet en er treedt piping op in lengterichting van het scherm. De erosiepijpen worden als het ware omgeleid langs het scherm. Uiteindelijk ontstaat er een doorgaande erosiepijp. In hoofdlijn is de beschrijving van de vervolprocessen tot aan falen van de waterkering vergelijkbaar met piping onder een groene dijk zonder scherm. Echter, door de sterke kromming van stroombanen aan de uiteinden van het scherm zal het erosieproces, zeer waarschijnlijk, wel anders verlopen dan bij vrije erosiepijpvorming zonder scherm. In het ontwerp van een heavescherm is de beschouwing van achterloopsheid een belangrijk onderdeel. Zeker bij kunstwerken en een gefragmenteerde pipingopgave (kleine stukjes los van elkaar) kan het aandeel achterloopsheidschermen een aanzienlijk deel van de opgave zijn.

3.4.3 *Faalpad voorloopsheid*

Wanneer er onvoldoende dekking aan de bovenstroomse zijde van het scherm aanwezig is kan er een zandmeevoerende wel ontstaan aan de bovenstroomse zijde van het scherm. De vervolprocessen tot aan falen van de waterkering zijn vergelijkbaar met piping onder een groene dijk.

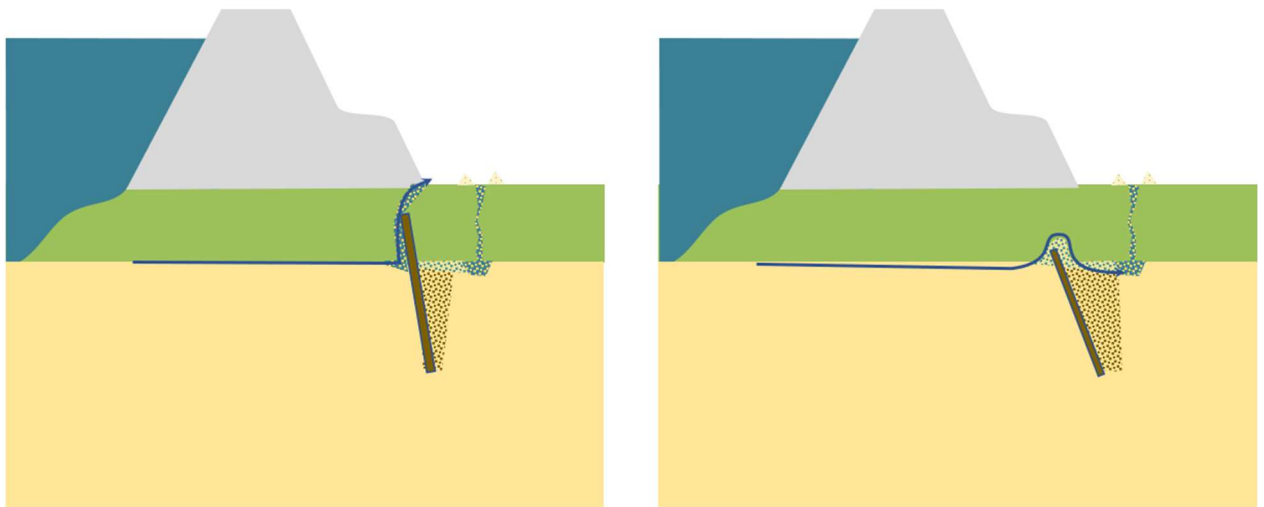
3.5 Faalpaden bij een defect aan het scherm of aansluiting (bedreigingen)

DEZE PARAGRAAF IS NAGENOEG RECHTSTREEKS OVERGENOMEN UIT DE PUBLICATIE HEAVESCHERMEN. BIJ INHOUDELIJK COMMENTAAR GRAAG IN ÉÉN VAN DE DOCUMENTEN AANGEVEN.

Vergelijkbare faalpaden als hiervoor beschreven kunnen ontstaan als gevolg van defecten aan het scherm zelf of defecten die ontstaan doordat het scherm te veel beweegt of zelfs instabiel wordt bij een maatgevende belasting. Deze faalpaden zijn voor kunststof heaveschermen hetzelfde als bij houten of stalen schermen, maar de kans van optreden verschilt. Deze categorie faalpaden en de impact op het ontwerp- of beheersmaatregelen zijn beschreven in hoofdstuk 5, 6 en 7 aan de hand van de FMECA (Failure Mode Effect & Criticality Analysis).

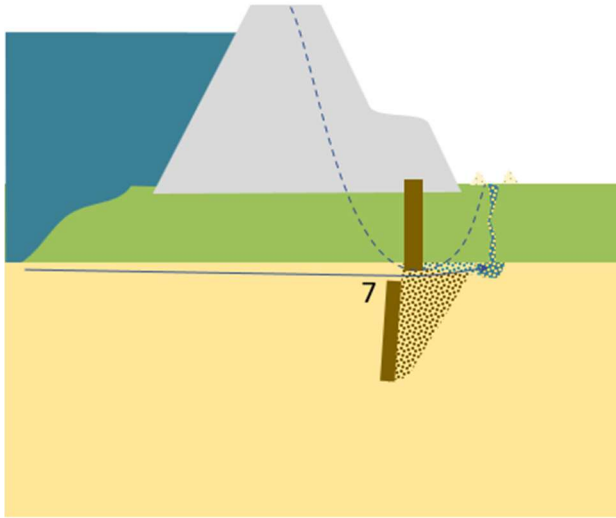
Hieronder enkele voorbeelden:

- **Bovenloopsheid:** Het scherm is niet diep genoeg ingebed in de cohesieve deklaag en er treedt piping op via de kop van het scherm. De vervolgprocessen tot aan falen van de waterkering zijn vergelijkbaar met piping onder een groene dijk met uitzondering van het zandtransport dat via de ruimte/spleet tussen de kop van het heavescherm en de cohesieve deklaag gaat. Dit kan het verloop van het pipingproces beïnvloeden.
- Er ontstaat geotechnische instabiliteit van het scherm doordat het heavescherm deformeert of instabiel wordt als gevolg van het ontstaan van drijfzand achter het scherm (Figuur 3.6). Dit kan resulteren in de faalpaden **voorloopsheid** en/of **bovenloopsheid**.



Figuur 3.6 Voorloopsheid en bovenloopsheid door geotechnische instabiliteit scherm

- Er treedt **doorloopsheid** (Figuur 3.7) op omdat het scherm niet dicht is. Dit is alleen mogelijk wanneer terugschrijdende erosie zich doorzet via de opening in het scherm. De terugschrijdende erosie gaat aan de voorzijde van het scherm door totdat er een doorgaande erosiepijp is ontstaan met een intredepunt aan de waterzijde en een uittredepunt aan de landzijde. De vervolgprocessen tot aan falen van de waterkering zijn vergelijkbaar met piping onder een groene dijk met uitzondering van het zandtransport dat via een gat in het heavescherm gaat. Dit kan het terugschrijdende erosieproces en het ruimingsproces beïnvloeden. Openingen waardoor doorloopsheid kan optreden kunnen ontstaan door:
 - constructief falen van het scherm als gevolg van te hoge spanningen of het niet kunnen volgen van deformaties in het scherm waardoor het scherm scheurt of breekt;
 - het uit het slot lopen tijdens installatie van het scherm;
 - het materiaal zelf dat onvoldoende waterdicht of erosiebestendig is.



Figuur 3.7 Doorlooptheid door constructief falen van het scherm

4 Ontwerp

4.1 Algemeen

In dit hoofdstuk staat het waterveiligheidsontwerp centraal. In Figuur 1.2 is aangegeven 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;
- 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.

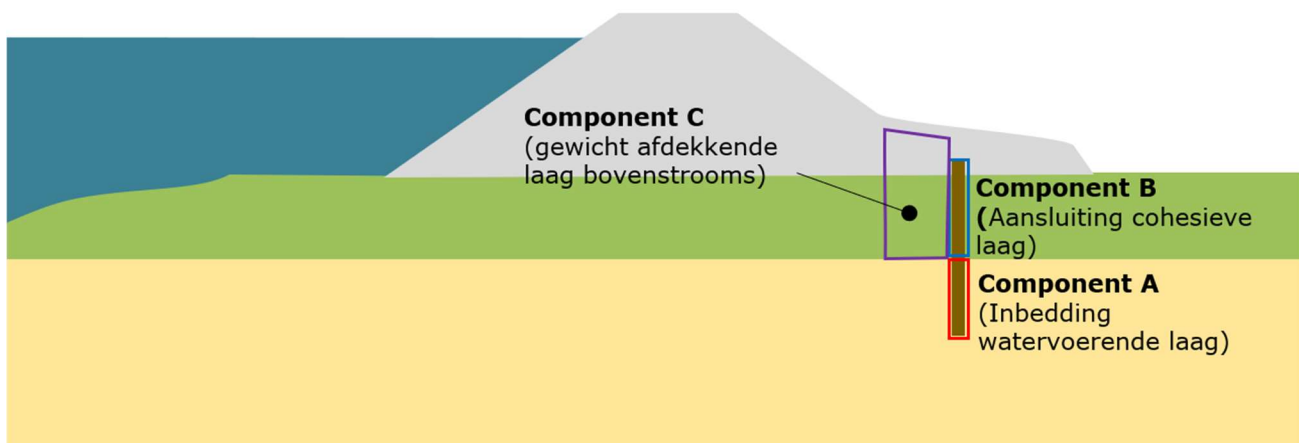
Dit hoofdstuk behandelt het waterveiligheidsontwerp. In paragraaf 4.2 en 4.3 wordt ingegaan op generieke ontwerpaspecten van kunststof heaveschermen. In paragraaf 4.4 wordt ingegaan op het constructief ontwerp, en in paragraaf 4.5 op de duurzaamheid van kunststof heaveschermen. De bovengenoemde zaken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

4.2 Systembeschrijving

4.2.1 Fysieke decompositie

In Figuur 4.1 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 4.1 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

Eigenschappen componenten waterveiligheids-ontwerp	Relevant voor faalpad	Functie	Toegelicht in
Inbeddingsdiepte in zand (comp. A)	Onderloopsheid	Schermdiep genoeg om onderloopsheid te voorkomen	Paragraaf 4.3, uitgebreider in Publicatie Heaveschermen [3]
Positie in dwarsprofiel dijk (comp. A en C)	Voorloopsheid	Voldoende dekking om opbarsten of voorloopsheid te voorkomen	Paragraaf 4.3, uitgebreider in Publicatie Heaveschermen [3]
	Geotechnische instabiliteit dijk of scherm	Positie dusdanig dat lokale afschuiving tijdens pijpvormingsproces niet leidt tot instabiliteit dijk	Publicatie Heaveschermen [3]
Afwerking en aansluiting bovenkant scherm (comp. B)	Bovenloopsheid	Goede zanddichte aansluiting op cohesieve deklaag zodat geen bovenloopsheid kan ontstaan, ook checken op mogelijke vervormingen van dijk	Publicatie Heaveschermen [3]
Constructieve eigenschappen scherm (comp. A en C)	Geotechnische instabiliteit dijk of scherm	Schermdient geotechnische instabiliteit dijk a.g.v. pijpvormingsproces te voorkomen	Paragraaf 4.4
	Doorloopsheid	Schermdient zanddicht te zijn onder alle mogelijke belastingen	Paragraaf 4.4
Achterloopsheidscherm (lengte in bovenaanzicht en situering)	Achterloopsheid	Schermdient lang genoeg doorgezet te worden in lengterichting van dijk voorbij de pipinggevoelige strekking	Publicatie Heaveschermen [3]

4.3 Geometrisch ontwerp waterveiligheid

4.3.1 Stappen om te komen tot een ontwerp

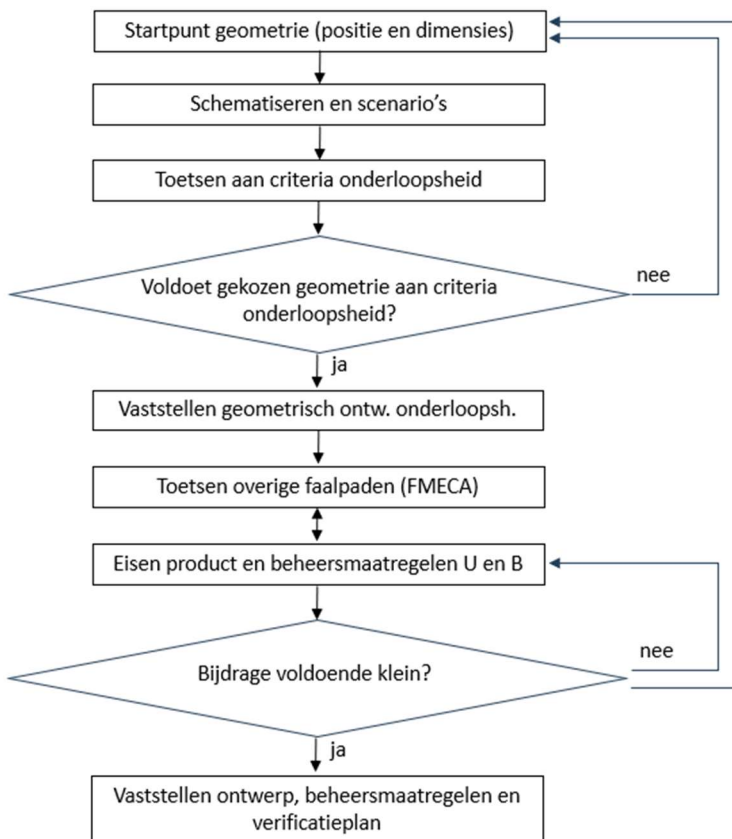
In Figuur 4.2 is een voorbeeld gepresenteerd van het volledige ontwerpproces om te komen tot een waterveiligheidsontwerp van een heavescherm. Deze aanpak bestaat in hoofdlijn uit twee delen:

1. het opstellen van het geometrisch ontwerp;
2. een veiligheidsanalyse waarbij de betrouwbaarheid van het systeem wordt getoetst door het risico van mogelijke defecten aan het systeem te onderzoeken.

Zoals Figuur 4.2 aangeeft zijn er iteratieslagen mogelijk tussen het opstellen van het geometrisch ontwerp en de veiligheidsanalyse.

Voor het eerste deel, het opstellen van een geometrisch ontwerp van een heavescherm staat het faalpad onderloopsheid centraal. Om te komen tot een geometrisch ontwerp dat voldoet aan de criteria die gesteld geworden aan onderloopsheid kunnen de volgende stappen worden doorlopen (zie Figuur 4.2):

1. Bepalen van startpunt ten aanzien van positie en diepte van het scherm;
2. Schematiseren van ondergrond en pijpstelsel en bepalen van scenario's;
3. Analyse onderloopsheid per scenario;
4. Evaluatie resultaten en eventuele bijstelling positie of diepte van scherm;
5. Vaststellen van geometrisch ontwerp.



Figuur 4.2 Voorbeeld ontwerpproces heaveschermen volgens aanpak van het Veiligheidsraamwerk [2]

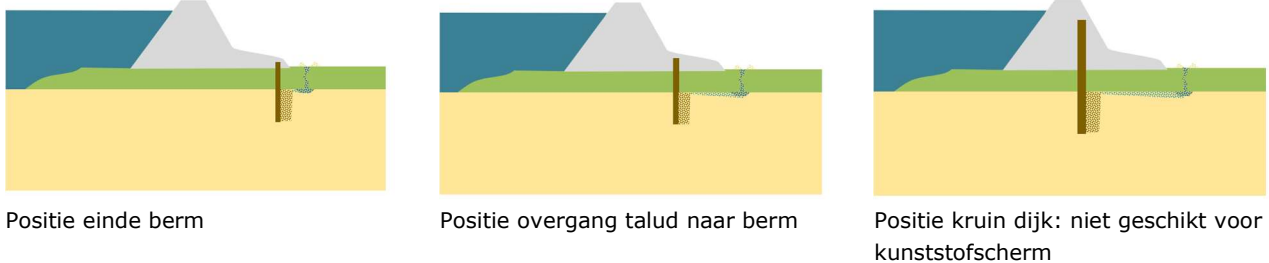
In de navolgende paragrafen worden de stappen kort toegelicht. Voor verdere achtergronden wordt verwezen naar de Publicatie Heaveschermen [3].

4.3.2 Startpunt positie en diepte van het scherm

De voorkeurslocatie van een kunststof heavescherm hangt af van verschillende aspecten zoals de maakbaarheid, de inpasbaarheid, de beheerbaarheid, de duurzaamheid en de uitbreidbaarheid. Voorbeelden van posities van het kunststof heavescherm zijn weergegeven in Figuur 4.3 en hieronder toegelicht.

1. **Positie einde berm:** deze positie kan vanuit waterveiligheid en beheerbaarheid de voorkeur hebben. Hiermee wordt vermeden dat een pijpstelsel zich onder de berm vormt, daarnaast is de afstand tussen het scherm en de potentiële wel hier het kortst. Voor de waterveiligheid moet wel een aanvullende check op voorloopsheid worden uitgevoerd, bijvoorbeeld door middel van een opbarstberekening aan de rivierzijde van het scherm. Vanuit inpasbaarheid kan deze positie niet de voorkeur hebben, bijvoorbeeld door de kortere afstand tot bebouwing in het achterland en hinder voor de omgeving tijdens de uitvoering.
2. **Positie overgang dijktalud naar berm:** vanuit beheerbaarheid kan deze positie de voorkeur hebben. Bijvoorbeeld wanneer niet de gehele dijk eigendom is van het waterschap is, waarbij het scherm aan het einde van de beheersstrook wordt geplaatst. Vanuit het ontwerp op waterveiligheid moet hierbij rekening gehouden worden met een mogelijke ontwikkeling van een pijpstelsel onder de berm. Dit zal een nadere analyse vragen vanuit het faalpad instabiliteit.
3. **Positie kruin dijk:** Deze positie kan de voorkeur hebben indien het scherm niet alleen weerstand tegen piping levert, maar ook als stabiliteitsscherm wordt gebruikt. Kunststof heaveschermen zijn op dit moment echter niet sterk genoeg om te functioneren als stabiliteitsscherm. Vooralsnog

wordt afgeraden om uit te gaan van een ontwerp waarbij kunststof heaveschermen op deze positie staan.

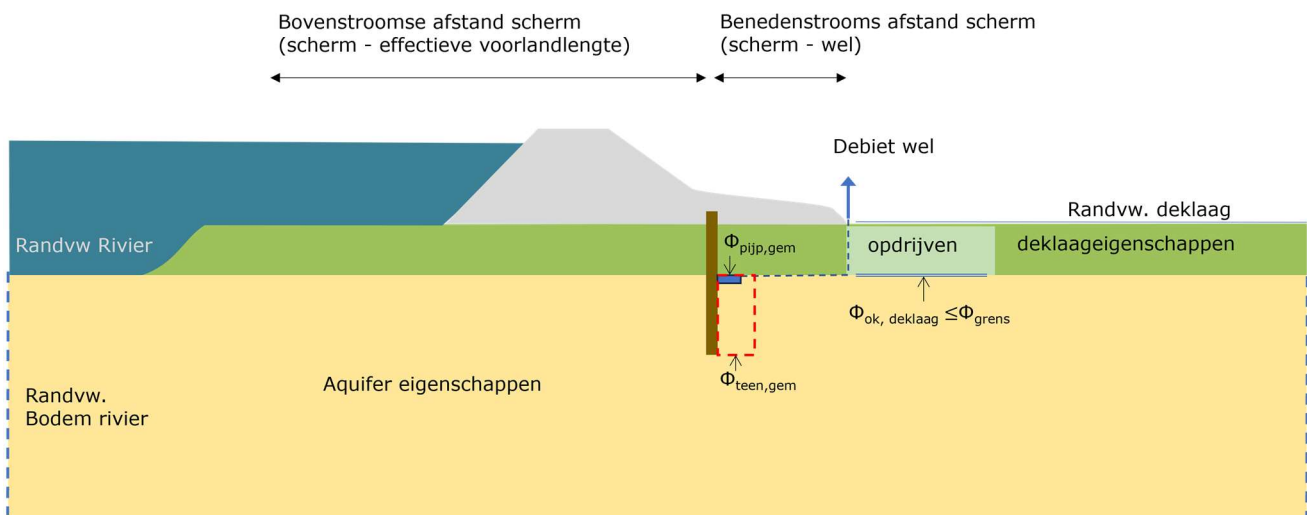


Figuur 4.3 Verschillende posities van een scherm in het dwarsprofiel van een dijk

Vanuit onderloopsheid is de startpositie een minimale inbeddingsdiepte van 3 meter. Het is vanzelfsprekend om een diepere startpositie te kiezen indien de ervaring is dat 3 meter onvoldoende diepte is bij vergelijkbare situaties.

4.3.3 Schematiseren van ondergrond en pijpstelsel en bepalen van scenario's

In paragraaf 4.3.4 is een korte samenvatting gegeven van de criteria en de modellen die kunnen worden gebruikt voor het toetsen op onderloopsheid. Voor achtergronden wordt verwezen naar hoofdstuk 4 van de Publicatie Heaveschermen [3] waarin deze methodes en criteria verder zijn toegelicht. Bij alle genoemde methodes is het voor het toetsen van hydraulische grondbreuk van belang om een grondwaterstromingsanalyse uit te voeren waarmee ofwel het waterdrukverschil (Δu) ofwel de gemiddelde gradient achter het scherm (i_{gem}) te bepalen bij een opgelegde hoogwaterstand in de rivier. In Figuur 4.4 is een schetsmatig voorbeeld gegeven van randvoorwaarden die kunnen worden toegepast om Δu en i te bepalen. In dit voorbeeld wordt uitgegaan van een tweedimensionaal EEM grondwaterstromingsmodel omdat dit model zich het beste leent voor het schematiseren van de lokale randvoorwaarden, zoals een pijpstelsel onder de deklaag.



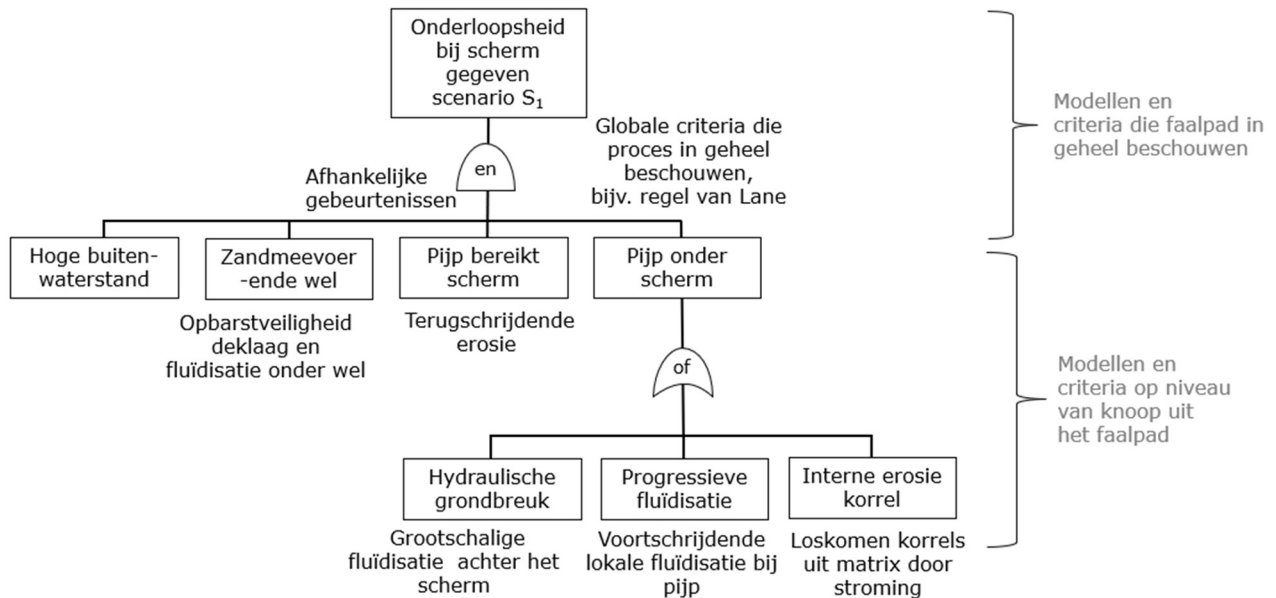
Figuur 4.4: Voorbeeld tweedimensionaal grondwaterstromingsmodel met relevante randvoorwaarden

Bij het opstellen van verschillende scenario's is het belangrijk dat de randvoorwaarden in de pijp, de randvoorwaarden in het geohydrologisch systeem en de geohydrologische parameters een logisch geheel vormen. Voor toelichting op deze aspecten wordt verwezen naar paragraaf 5.5.2 van de Publicatie Heaveschermen [3].

4.3.4 Analyse onderloopsheid per scenario

In Figuur 4.5 is een foutenboom met belangrijkste knopen uit het faalpad onderloopsheid weergegeven.

Het ontwerp op onderloopsheid spitst zich toe op het deelmechanisme 'Hydraulische grondbreuk'. Voor de gebeurtenissen 'Progressieve fluïdisatie' en 'Interne erosie korrel' hoeft geen analyse uit gevoerd te worden wanneer het scherm minimaal 3 meter is ingebed in de watervoerende laag, zie voor de achterliggende redenering de Publicatie Heaveschermen [3].



Figuur 4.5: Foutenboom onderloopsheid met meest relevante faalpaden voor ontwerp (ingekorte versie)

Hieronder volgt een korte toelichting op de modellen en criteria behorende bij het deelmechanisme 'Hydraulische grondbreuk'.

Voor het toetsen van hydraulische grondbreuk kan één van onderstaande methoden worden gebruikt:

- Toetsen van verticaal evenwicht volgens de Methode van Terzaghi;
- Toetsen van de gemiddelde gradiënt achter het scherm.

a. Verticaal evenwicht methode

De veiligheidsfactor wordt bepaald op basis opwaartse en neerwaartse krachten of drukken. Hieronder is de formule gegeven uitgaande van drukken:

$$SF = \frac{\sigma_v - u_0}{u_d - u_0} \quad (4-1)$$

Waarin:

- σ_v verticale totaalspanning onderzijde van beschouwde prisma [kN/m²];
- u_d waterdruk aan onderzijde van prisma bij aanwezigheid van stroming [kN/m²];
- u_0 waterdruk aan onderzijde van prisma bij afwezigheid van stroming en freatische waterstand achter scherm (hydrostatisch waterdrukverloop) [kN/m²].

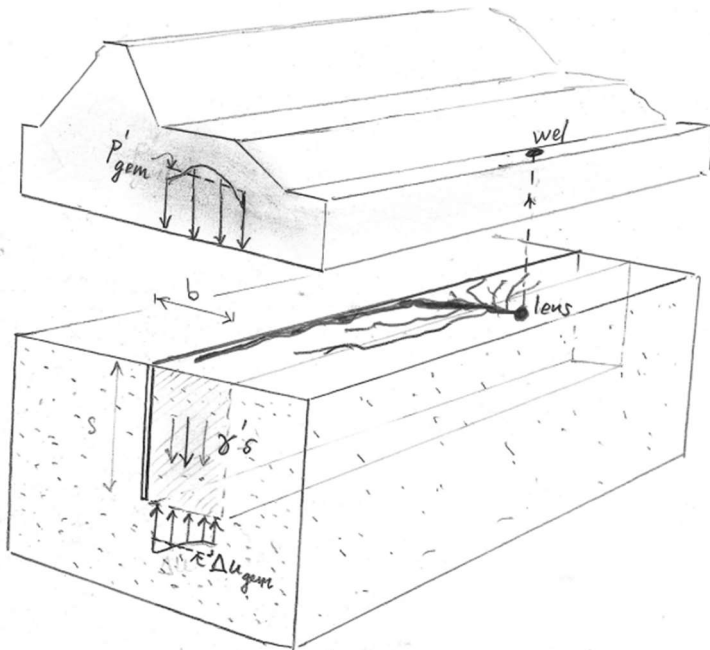
Uitgaande van evenwichtsbeschouwing op basis van gemiddelde spanningen zoals weergegeven in Figuur 4.6 kan dit worden omschreven naar:

$$SF = \frac{s \cdot \gamma' + p'_{v,gem}}{\Delta u_{d,gem}} \quad (4-2)$$

Waarin:

- SF overall veiligheidsfactor verticaal evenwicht rond denkbeeldig prisma [-];
- $\Delta u_{d,gem}$ verschil tussen waterdruk bij grondwaterstroming en hydrostatische druk gemiddeld over het grondvlak van het beschouwde prisma (op niveau z_s) [kN/m²];
- γ' effectief gewicht van grond in de beschouwd prisma [kN/m³];

- s inbeddingsdiepte van scherm in watervoerende zandlaag [m];
 $p'_{v,gem}$ effectief gewicht van de deklaag bovenop zandlaag gemiddeld over het bovenzvlak van het beschouwde prisma (op het niveau onderkant deklaag) [kN/m²].



Figuur 4.6: Krachterevenwicht denkbeeldig prisma in 3D, situatie met pijpstelsel onder een deklaag

b. Toetsen van de gemiddelde gradiënt achter het scherm

Bij de gemiddelde gradiënten methode wordt de veiligheidsfactor bepaald op basis van de gemiddelde gradiënt achter het scherm. Deze aanpak is geschikt voor een situatie met vrije uitstroom. Hierbij gelden de volgend formules:

$$SF = \frac{i_c}{i} \quad (4-3)$$

In combinatie met:

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (4-4)$$

Of

$$i_c = (1 - n)(G_s - 1) \quad (4-5)$$

Waarin:

- i_c verticale stromingsgradiënt waarbij de juiste drijfzandconditie ontstaat in een cylinder proef [-];
 γ' ondergedompeld volumegewicht grond [kN/m³];
 γ_w volumegewicht water [kN/m³];
 G_s specifiek gewicht korrel [-];
 n porositeit [-].

Voor een situatie van een uniforme verticale stroming hebben de formules (4-2) en (4-3) een gelijke uitkomst.

Aanbevolen minimale veiligheidsfactor

Voor de beschouwing van verticaal evenwicht voor het deelmechanisme hydraulische grondbreuk is nog geen set aan partiële factoren afgeleid zoals voor opbarsten van een cohesieve deklaag. De reden hiervan is dat het momenteel onduidelijk is welk aandeel model- en schematiseringonzekerheden hebben in de totale onzekerheid. Een probabilistische analyse om hierin inzicht te krijgen is nog niet uitgevoerd vanwege het ontbreken van fundamenteel onderzoek naar dit deelmechanisme, met name voor hydraulische

grondbreuk bij situaties met een deklaag. Differentiëren in partiële factoren is daarom voor het deelmechanisme hydraulische grondbreuk voorsnog een stap te ver. Daarom wordt voorlopig teruggevallen op een gelumpte overall veiligheidsfactor:

$$SF \geq 2,0 \quad (4-6)$$

Een vergelijkbare veiligheidsfactor wordt in meerdere ontwerprichtlijnen gevonden. Ook zit een vergelijkbare factor impliciet verwerkt in de maximaal toelaatbare gradiënt van 0,5 uit het huidige beoordelings- en ontwerpinstrumentarium WBI en OI. In het verleden is deze factor geverifieerd door middel van een probabilistische gevoeligheidsanalyse voor een situatie met vrije uitstroom geverifieerd [13]. Hieruit bleek dat de factor variaties in porositeit afdekt met uitzondering van situaties waarbij de variatiecoëfficiënt groot is. Daarom bevelen wij aan om voor het ontwerp uit te gaan van een karakteristieke waarden van de porositeit in combinatie met de overall veiligheidsfactor van 2.

In de Publicatie Heaveschermen [3] is aangegeven hoe met de verschillende parameters in bovenstaande modellen kan worden omgegaan.

4.3.5 *Evaluatie resultaten en eventuele bijstelling positie of diepte van scherm;*

De hoofdvraag is hier 'Leidt dit tot een consistent beeld van de faalkans voor piping?'. Hiervan afgeleide concrete vragen aan de ontwerper zijn:

- Wat is bepalende knoop? Kan op basis van de aanbevolen modellen per knoop zoals beschreven in Publicatie Heaveschermen [3] een maatgevende knoop worden aangewezen en is deze ook als startpunt voor het geometrisch ontwerp gebruikt?
- Hoe groot is gevoeligheid van het ontwerp ten aanzien van keuzen in schematisering en parameters. Met name ten aanzien van parameters waarover kennisleemten bestaan. Hierbij kunnen de aanbevelingen uit de Publicatie Heaveschermen [3] als startpunt worden genomen. De uiteindelijke keuze hangt vooral af van de impact op het ontwerp en in hoeverre het wenselijk is om nu al extra veilig te gaan zitten (bijv. bij beperkte meerkosten, of doordat de impact beperkt wordt door minimale inbedding van 3m), en of dat het wenselijker is de uikomsten van landelijk onderzoek af te wachten. Hoe groter de impact van deze keuze, hoe meer reden om te wachten of over te gaan tot behoudende keuzen in het ontwerp. Maak deze keuze expliciet in deze stap, met name wanneer wordt afgeweken van de aanbevelingen uit de Publicatie Heaveschermen [3].
- Is het geometrisch ontwerp uitlegbaar wanneer naar de voor piping relevante gebiedskenmerken wordt gekeken? Hoe groot is de gevoeligheid van het ontwerp voor variaties in parameters die in het gebied sterk kunnen variëren? Denk daarbij bijvoorbeeld aan de dikte van de deklaag of het lengte van het voorland. Is het geometrisch ontwerp uitlegbaar wanneer naar de veiligheidsanalyse voor piping van de groene dijk wordt gekeken.

4.4 **Constructief ontwerp**

Met name voor kunststof heaveschermen is een controle op constructieve eisen een essentieel deel van het ontwerp. Dit wijkt enigszins af van stalen heaveschermen waarbij de installeerbaarheidseisen vaak bepalend zijn boven het constructief ontwerp. Voor generieke zaken rondom het constructief ontwerp van heaveschermen wordt verwezen naar de Publicatie Heaveschermen [3].

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

- De kunststof heaveschermen dienen met sloten aan elkaar verbonden te blijven, zowel tijdens de uitvoering als in de beheerfase. Na installatie mogen er geen grote vervormingen meer 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 rondom het scherm dienen voldoende klein te zijn, zodat er geen scheuren of spleten ontstaan waardoor een kwelweg langs het scherm kan ontstaan;

- De installatiediepte van het scherm dient constant te blijven, dus het scherm mag niet wegzakken ten gevolge van negatieve kleef in de deklaag.

Het verschil in sterkte-eigenschappen van staal ten opzichte van kunststof is weergegeven in Tabel 4.2. In Bijlage B: Technische specificaties kunststof damwanden 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]	???* [*]	1,7

* Fugro gaat dit getal nog opzoeken

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.

4.4.1 Nadere ontwerpdetailering

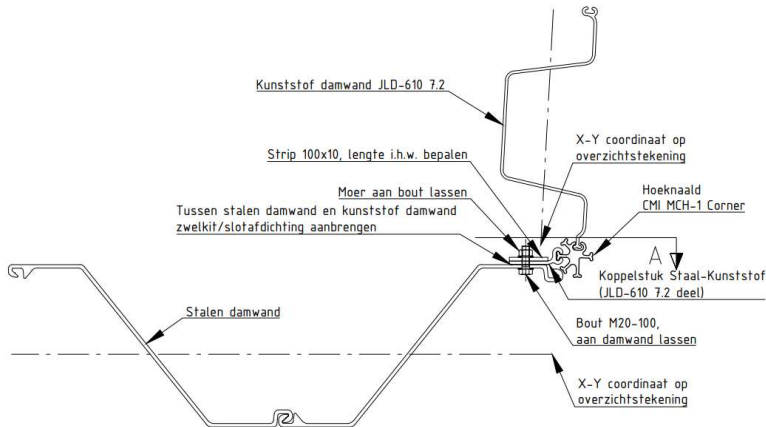
In deze paragraaf worden enkele praktijkaspecten van het constructieve ontwerp behandeld.

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 kunststofschermer aan een stalenscherm wordt een overgangsprofiel toegepast (zie Figuur 4.7). 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 'mannelijke' of 'vrouwelijke' 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 4.7 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 stabiliteitsscherm. De haalbaarheid van het toepassen van kunststof schermen met een dubbelfunctie (stabiliteit en piping) is vooralsnog 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) [14] te worden gevolgd voor het toepassen van gordingen.

4.5 Duurzaamheid

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 [15]);
- 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. Aangezien het PVC diep onder de grond wordt toegepast, wordt het niet blootgesteld aan UV straling die op lange termijn degradatie van het materiaal veroorzaakt en niet uitloopt. Op aangeven van een van de leveranciers is er geen sprake van uitlogen of vrijkomen van microplastics. 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 rivierdelta'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 [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 geometrisch ontwerp (beschreven hoofdstuk 4) zijn afgedekt. Voor deze analyse is het veiligheidsraamwerk gebruikt dat 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. Daarnaast dwingt het de ontwerper om oorzaak en gevolg op een evenwichtige wijze de beschouwen, zodat uiteindelijk de relevantie van de bedreigen kan worden bepaald.

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 of beheerfase;
- Keuze voor een ander type pipingmaatregel dan een kunststof heavescherm.

Wanneer gekozen wordt voor een 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 twee manieren worden bepaald, kwalitatief of kwantitatief. 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, zal een kwantitatieve uitwerking noodzakelijk zijn om een toetsing op de vereiste faalkans uit te voeren. Aan de andere kant is het belangrijk om te beseffen dat het nemen 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 worden 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 4.1.

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 4.1)

Nr	Gebeurtenis (S)	Faalpad (F)	Effect gegeven optreden S P(F S)	Kans optreden gebeurtenis P(S)	Relevantie	Maatregel
A.1	Scherf 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)	Praktijkproeven; aanpassen methode uitvoering; aanpassen planktype; controle tijdens uitvoering (Par. 6.3.4, 6.4.3, 6.4.4)
A.2	Verminderde pakking van zand vanwege voorboren	OLH	Door lagere dichtheid van zand neemt weerstand tegen fluïdisatie direct achter scherm af (progressieve fluïdisatie)	Afhankelijk van mate van grondverwijdering	Significant, onderzoeken o.b.v. beschikbare informatie en praktijkproeven (Par. 5.5)	Praktijkproeven met grondonderzoek; aanpassen installatiemethode (Par. 6.3.2, 6.3.9, 6.6.4)
A.3	Verminderde pakking van zand langs het scherm door trekken van moederplank	OLH	Door lagere dichtheid van zand neemt weerstand tegen fluïdisatie direct achter scherm af (progressieve fluïdisatie)	Afhankelijk van locatie moederplank	Significant wanneer moederplank aan benedenstroomse zijde van scherm is (Par. 5.6)	Praktijkproeven met grondonderzoek; aanpassen installatiemethode (Par. 6.3.2, 6.3.5, 6.6.4)
A.4	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; grondonderzoek; aanpassen installatiemethode; aanpassen planktype (Par. 6.3.2, 6.3.9, 6.3.12)
A.5	Geotechnische instabiliteit dijk (GTI) a.g.v. pijpstelsel en lokale fluïdisatie	GTI	Afhankelijk van mate waarin lokale instabiliteit (a.g.v. effect pijp/fluïdisatie) kan leiden tot vervolgmechanismen die dijk ondermijnen	Afhankelijk van stabiliteitsfactor lokale afschuiving a.g.v. effect pijp/fluïdisatie	Voldoende klein indien kans op lokale instabiliteit en kans op vervolgmechanismen in ontwerp zijn getoetst	Modelleren (ontwerp); aanpassen positie scherm (Publicatie Heaveschermen) (Par. 7.1, 7.2)
A.6	Breken/uit slot scherm door grondvervorming a.g.v. pijpstelsel en	DLH	Afhankelijk van grootte gat en gevoeligheid voor abrasie scherm door geconcentreerde	Afhankelijk van incasseringsvermogen scherm (sterkte en/of stijfheid) en mate van vervorming	Afhankelijk van verwachte vervormingen en materiaaleigenschappen scherm; voldoende klein	Testen en modelleren; aanpassen positie scherm; aanpassen materiaaleigenschappen;

	lokale fluidisatie		stroming; DLH kan niet optreden wanneer gat zanddicht is	door fluidisatie en pijpvorming	bij stalen scherm, bij ander materiaal expliciet toetsen	praktijkproeven (Par. 7.1, 7.2)
A.7	Breken/uit slot scherm door grondvervor- ming a.g.v. toekomstige dijkverzwaring	DLH	Afhankelijk van grootte gat en gevoeligheid voor abrasie scherm door geconcentreerde stroming. DLH kan niet optreden wanneer gat zanddicht is	Afhankelijk van incassingsver- mogen scherm (sterkte en/of stijfheid) en mate van vervorming door dijkverzwaren	Afhankelijk van verwachte vervormingen en materiaaleigen- schappen scherm. voldoende klein bij stalen scherm, bij ander materiaal expliciet toetsen	Testen en modelleren; aanpassen positie scherm; aanpassen materiaaleigen- schappen; praktijkproeven (laterale belasting), controle vervorming bij toekomstige dijkverzwaring (Par. 7.1, 7.2)
A.8	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; controle tijdens uitvoering (Par. 6.3.4, 6.3.7, 6.4.3, 6.4.4)
A.9	Doorbuiging planken tijdens vervoer en plaatsing	DLH	Klein, indien kromme planken niet worden geplaatst	Reëel	Klein, indien kromme planken niet worden geplaatst	Kwaliteitscontrole voor inbrengen tijdens uitvoering (Par. 6.3.3, 6.4.1, 6.4.2)
A.10	Opbarsten en kwelweg aan bovenstroom- se 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. 5.7)	Expliciet toetsen in ontwerp; voldoende grondonderzoek uitvoeren (Par. 6.3.2, 6.3.5)
A.11	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; voldoende grondonderzoek; evt. methode uitvoering aanpassen (Par. 6.3.2, 6.3.5)

Tabel 5.2 Overzicht Failure Mode Effect and Criticality Analysis (FMECA) voor component B (aansluiting op cohesieve laag, zie Figuur 4.1)

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. 6.3)
B.2	Slechte aansluiting	BLH	Afhankelijk van kritieke verval bij	Voldoende klein indien contact met	Voldoende klein indien expliciet	Expliciet toetsen in ontwerp; voldoende

	door te weinig inbedding of slechte aansluiting op cohesieve laag		uittredepunt voorloopsheid	cohesieve laag voldoende	getoetst en/of door uitvoering geen kortsluiting ontstaat	grondonderzoek; evt. methode uitvoering aanpassen (Par. 6.3)
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; voldoende grondonderzoek; evt. methode uitvoering aanpassen (Par. 6.3)
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 en inspectie tijdens hoogwater; voldoende grondonderzoek (Par. 6.3)

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.10).

Alle bovengenoemde bedreigingen kunnen een significante bijdrage geven 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 en A.3 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 is verwerkt. Dit is verder uitgewerkt in voorbeeld van de bedreiging A.1.

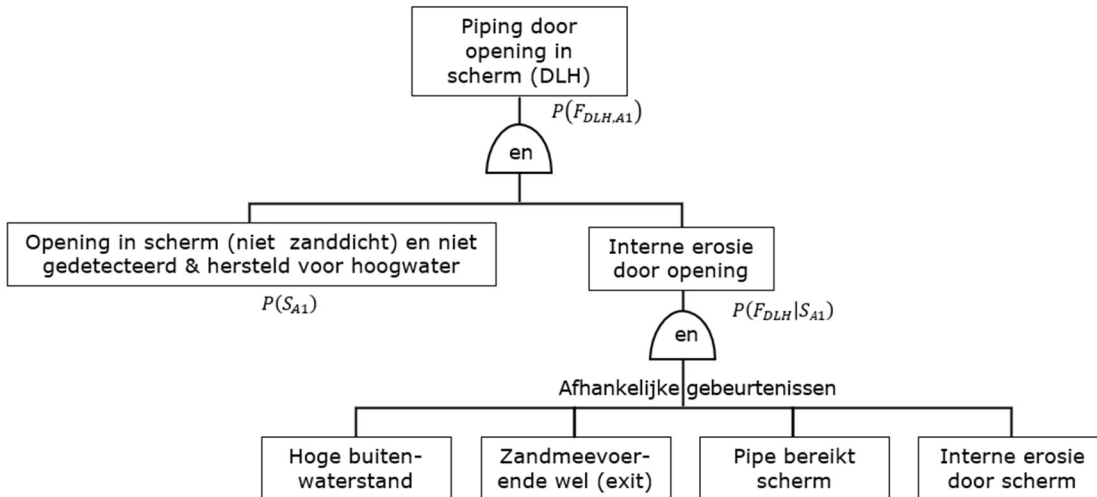
5.4 Bedreiging A.1 Scherm ernstig uit het slot tijdens uitvoering en opening niet zanddicht

DIT IS EEN VOORBEELD VOOR DE UITWERKING VAN EEN KWANTITATIEVE ANALYSE. WE HOREN GRAAG WAT HET ADO VAN DIT VOORBEELD VINDT.

5.4.1 Foutenboom

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.

In onderstaande foutenboom (Figuur 5.1) zijn de gebeurtenissen opgenomen die relevant het optreden van de topgebeurtenis 'Piping door opening in scherm'. Getoetst moet worden of deze topgebeurtenis een significante bijdrage kan leveren aan de totale faalkans voor piping. Verderop in deze paragraaf is een voorbeeld gegeven van een dergelijke analyse. Eerst worden de scenariokans $P(S)$ en de voorwaardelijke kans $P(F|S)$ voor deze bedreiging nader gedefinieerd.



Figuur 5.1 Foutenbomen piping door opening in het scherm

5.4.2 Scenariokans $P(S)$:

Er is sprake van een kans op een defect wanneer aan de volgende condities wordt voldaan:

- Eén of meerdere planken zijn dusdanig uit het slot gelopen dat er een opening is ontstaan die zand zou kunnen doorlaten. Deze opening is ontstaan op een locatie die voor piping nog gevoelig is. Een locatie onderaan het scherm of in de cohesieve deklaag is hierbij minder relevant;
- Deze opening is niet gedetecteerd en hersteld in de periode tussen de uitvoering en het hoogwater.

Op basis van de maakbaarheidsproef Zwolle-Olst [11] en dijkversterking Wolferen-Sprok [7] [18] is een inschatting gemaakt van de kans op het uit het slot lopen van de kunststofplanken. De faalfrequentie in deze maakbaarheidsproeven varieerde tussen de 3% en 7% van de totaal 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 [19] 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. Dit begint met voldoende grondonderzoek. Vervolgens moet een geschikt planktype worden gekozen/ontworpen. Daarna moet een passende uitvoeringsmethode worden vastgesteld. Tijdens uitvoering moet voldoende kwaliteitscontrole, visuele inspectie en monitoring plaatsvinden. Geconstateerde gaten en spleten moeten achteraf met maatregelen worden verholpen door herstelmaatregelen. In hoofdstuk 6 is een overzicht gegeven van beheersmaatregelen waarmee de kwaliteit van het aan te brengen scherm tijdens de uitvoering kan worden gecontroleerd.

Zelfs bij een zorgvuldige werkwijze kan een volledig zanddicht scherm niet worden gegarandeerd. De kans op een gat of spleet in de wand wordt geschat op 1% per plank.

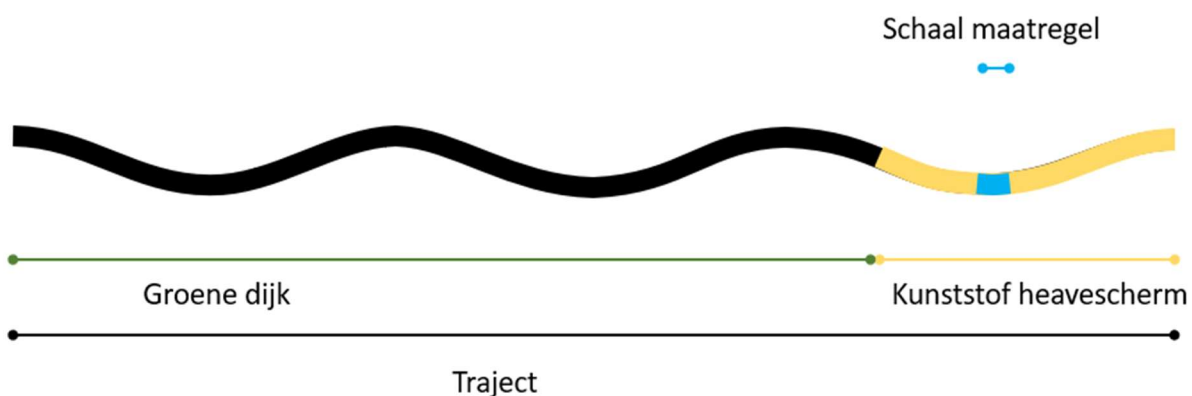
5.4.3 Conditionele kans $P(F|S)$:

Er is sprake van piping gegeven het optreden van het hierboven beschreven defect wanneer het volledige faalpad kan optreden. Het betreft in dit geval het faalpad doorloopsheid. De invloed van gaten en spleten in het scherm op de waterkerende veiligheid kan nog niet nauwkeurig worden berekend. Hiervoor is meer inzicht nodig in: 3D-effecten; de invloed van de gatgrootte in relatie tot de pipedimensies; het vervolg van het faalpad. Vooralsnog wordt deze kans daarom bepaald alsof er geen scherm aanwezig is. Dit is een

conservatieve benadering. Om deze kans te bepalen kan een pipinganalyse worden uitgevoerd volgens de methode van Sellmeijer (al dan niet met D-Geo Flow) zonder daarbij het effect van het scherm mee te nemen. Een veilige en eenvoudige benadering is het gelijk stellen van $P(F_{DLH} | S_{A1})$ aan de kans op piping die is bepaald uit de veiligheidsanalyse voor de situatie zonder maatregel zoals bepaald met de kalibratieformule uit vigerende beoordelings- en ontwerpinstrumentaria.

5.4.4 Voorbeeld faalkansbijdrage 'doorloopsheid door ernstig uit het slot lopen'

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 faalkans ten aanzien van piping daar voldoende klein is. Een schets van de situatie is weergegeven in Figuur 5.2.



Figuur 5.2 Situatieschets voorbeeld

Op basis van de uitgevoerde praktijkproeven is geschat dat de kans op ernstig uit het slotlopen (bedreiging A.1) bij een zorgvuldige uitvoering gelijk is aan 1% per plank. De kans op uit het slot lopen is bij een zorgvuldige uitvoering 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 een zelfde uitvoerder volgens vaste werkwijze.

De variaties in uitvoering en materiaal zijn in dit geval over grotere afstanden van plank tot plank vergelijkbaar. Dat geldt mogelijk niet voor 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. De ruimtelijke variatie is afhankelijk van de afzetting. Stel dat we in het beschouwde gebied op basis van geologie en uitgevoerde sonderingen inschatten dat de correlatieafstand van de weerstand in de ondergrond ca. 25 meter bedraagt en dat de correlatieafstand voor het optreden van situatie A.1 dan vooral wordt bepaald door de verschillen in ondergrond dan kan in dit voorbeeld worden uitgegaan van een lengte-effect factor van $N_{A1} = 2000/25 = 80$.

Stel dat in de veiligheidsanalyse voorafgaand aan het versterkingsproject is bepaald dat de kans op piping op het te versterken deel van het traject (gele traject in Figuur 5.2) zonder maatregel gelijk is aan 0,1 keer de $P_{eis,traject}$. De kans op piping als gevolg van het defect kan nu met bovenstaande getallen worden bepaald:

$$P(F_{DHL,dsn}) = P(S_{A1}) \cdot P(F_{DHL,dsn} | S_{A1}) = 0,01 * 0,1 * P_{eis,traject} = 0,001 * P_{eis,traject} \quad (5-1)$$

Door het lengte-effect in rekening te brengen kan de faalkansbijdrage door defect A.1 voor het gehele deeltraject waar met een kunststof heavescherm wordt versterkt als volgt worden bepaald op basis van lengte-effect en doorsnedekans:

$$P(F_{DHL,traject}) = \left(1 - \left(1 - P(F_{DHL,dsn})\right)^N\right) \approx N \cdot F_{DHL,dsn} = 80 \cdot 0,001 \cdot P_{eis,traject} = 0,08 \cdot P_{eis,traject} \quad (5-2)$$

In dit fictieve getallenvoorbeeld, was het pipingtekort over het te versterken deel fors. Na het aanbrengen van het heavescherm is de faalkansbijdrage nog steeds $0,08P_{eis,traject}$ en daarmee waarschijnlijk gezien andere faalkansbijdragen aan piping (FMECA) nog steeds dusdanig hoog dat dat er een extra aanvullende beheersmaatregel nodig is. Door het toepassen van **slotverklikkers op iedere plank** kan de kans op de bedreiging A.1 en daarmee de kans op 'Piping door opening in scherm' flink worden teruggebracht. In dit voorbeeld zijn bovendien diverse conservatieve aannamen gedaan. Alles overziend kan worden gesteld dat de bijdrage aan de kans op piping door het defect 'doorloopsheid door ernstig uit het slot lopen' (A.1) voldoende klein is wanneer wordt uitgegaan van slotverklikkers op iedere plank.

5.5 Bedreiging A.2 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

5.6 Bedreiging A.3 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.

5.7 Bedreiging A.10 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 bovenstrooms 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 ontwikkeld 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 Uitvoering

HOOFDSTUK 6 EN 7 ZIJN NOG IN BEWERKING EN SLUITEN NOG NIET GEHEEL AAN OP DE FMECA VAN DE VORIGE HOOFDSTUKKEN.

6.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op:

- Maakbaarheid;
- Beheersmaatregelen gericht op kwaliteit en efficiëntie van uitvoering;
- Beheersmaatregelen gericht op functioneren van de pipingmaatregel;
- Verificatieplan;
- Omgevingsbeïnvloeding tijdens de uitvoering;
- Veiligheid tijdens realisatie.

Ten aanzien van Beheersmaatregelen functioneren van systeem wordt opgemerkt dat hier met name de specifieke aandachtspunten bij kunststof schermen wordt toegelicht. Voor generieke zaken wordt verwezen naar de Publicatie Heaveschermen [3].

6.2 Maakbaarheid

6.2.1 Maakbaarheidsproeven

De vereiste inspanning om een damwand op diepte te krijgen is vooral afhankelijk van de installatiediepte en vastheid (conusweerstand) van de zandlaag. Deze zijn in Tabel 6.1 weergegeven voor de beschouwde projecten.

Tabel 6.1 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

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.

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. 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 [18].

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].

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].

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 Tabel 6.2 zijn de ervaringen van het beoordelen van boringen en sonderingen en het effect op de uitvoering samengevat.

Tabel 6.2 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 en voorboren 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, voorbereiden 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 voorbereiden.
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 voorbereiden of fluïderen. Aanbrengtechniek naar verwachting vrij inzetbaar
<20 MPa	Weinig slijtage	Mogelijk zonder voorbereiden 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 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 voorbereiden 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).

6.2.2 Materieel

Dijkversterking Wolferen-Sprok

In Tabel 6.3 zijn de aanbrengtechnieken, materieel, hulpmiddelen en de toepassing samengevat. In Figuur 6.1 zijn voorbeelden van het toegepaste materieel weergegeven. De keuze om een specifieke techniek/materieel toe te passen is verwerkt in een flowchart zie Figuur 6.2.

Tabel 6.3 Aanbrengtechniek, materieel, hulpmiddelen en toepassing o.b.v. ervaringen bij WOS 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) Funderings-stelling 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/rechtstand te kunnen borgen en makkelijker rondom de damwanden te kunnen bewegen. 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 waarom 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 aanbrengtechniek heeft zich op WOS nog niet bewezen en wordt in juli-september 2023 voor het eerst ingezet. De verwachting is dat dezelfde productie behaalt 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 ophogen en hechten de damwand onvoldoende in het profiel. Ook kan het worden gebruikt t.b.v. de fluïdatie-set 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

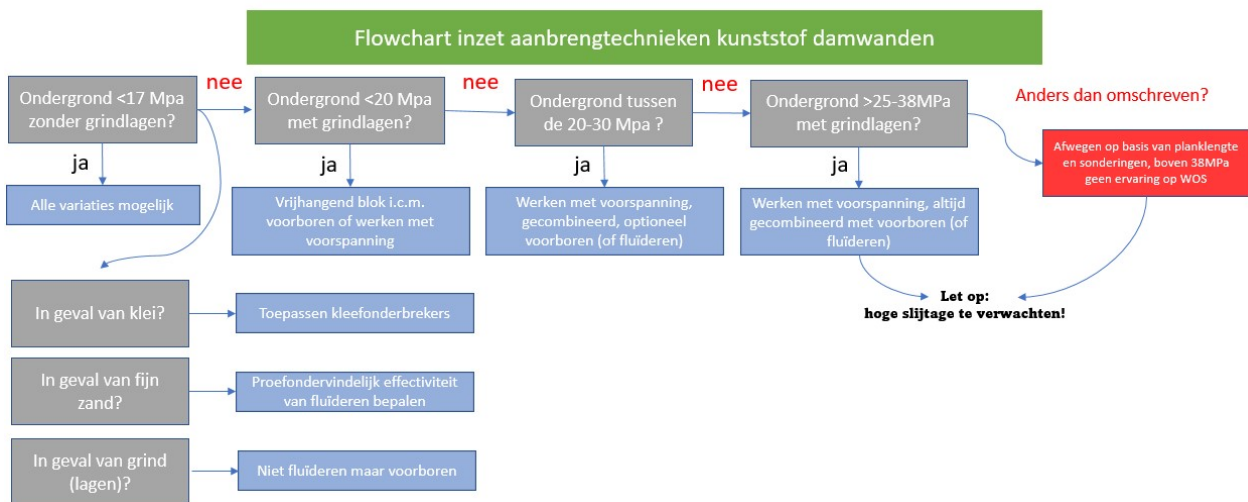


(3) Funderingsstelling met voorspanning door en/of lier



(4) Funderingsstelling met voorspanning (meedrukken van de makelaar stelling)

Figuur 6.1 Bij dijkversterking Wolferen-Sprok toegepast materieel (nummers komen overeen met Tabel 6.3)



Figuur 6.2 Flowchart inzet aanbrengtechnieken kunststof damwanden dijkversterking Wolferen-Sprok [20]

Dijkversterking Mook

Bij dijkversterking Mook is een ABI-stelling met twee stalen geleidebuizen toegepast [5].

Dijkversterking Wolferen – Sprok

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 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 Senneboge (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 6.3 Principetekening van kram

De stalen strips 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.

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

6.2.3 Installatieproces

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. Ingangscntrole 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. Ophijzen trilblok i.c.m. moederplank h. Inhijzen 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. Uitrillen 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 werkterrein	a. Afkoppelen HFVM trilblok b. Transport gereed maken materieel/materiaal c. Laden materieel/materiaal

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 voorboren, omdat de plank dan het boorgat volgt in plaats van het heiframe.

6.2.4 Aanbrengen heisleuf

Een heisleuf is nodig om de damwanden op diepte te kunnen plaatsen. Het vrijkomende materiaal kan worden verwerkt in een werkplateau. De breedte van de kraanbak is ook de minimale sleufbreedte. Bij Dijkversterking Wolferen – Sprok is dit 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 brede 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.

Er zijn meerdere werkwijzen onderzocht om kunststof damwanden op diepte te krijgen. Deze worden in de volgende paragrafen verder toegelicht:

1. Correctie damwand tijdens uitvoering;
2. Optimale werkrichting;
3. Toepassing van stalen moederplank;
4. Selectie van het optimale type damwandprofiel;
5. Water toevoegen in heisleuf;
6. Toepassen kleefonderbrekers;
7. Voorboren;
8. Voorprikken;
9. Aanpassen machineconfiguraties;
10. Fluideren;
11. Toepassen makelaar.

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.

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

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"> 1. Duur voorboren per boorgat (met boordiepte 12 m): ongeveer 4,5 min indraaien, 1,5 min uitdraaien en 1 min omgaan naar volgende gat. 2. 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"> 1. 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. 2. 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. 3. 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.

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.

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.

6.3 Beheersmaatregelen gericht op kwaliteit en efficiëntie van uitvoering

6.3.1 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.

6.3.2 Grondonderzoek

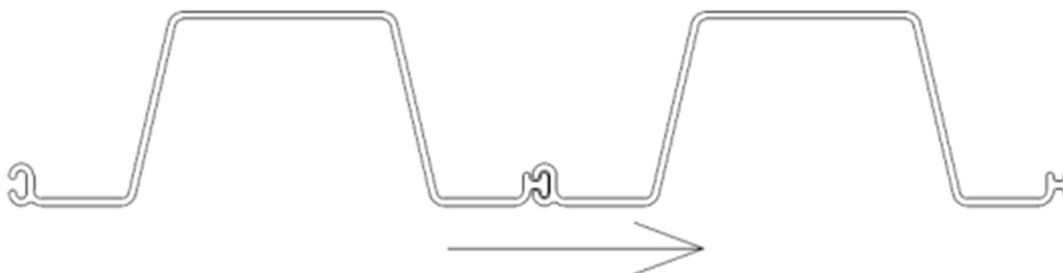
Het wel of niet succesvol kunnen installeren/toepassen van de kunststof schermen is mede afhankelijk van de bodemgesteldheid. Er wordt geadviseerd elke 25 m te sonderen tot minimaal 1 m onder het puntniveau van de damwand om tijdens realisatie te kunnen anticiperen op lokaal harde ondergrond. Dit is de gangbare praktijk bij het ontwerp van langsconstructies t.b.v. de waterveiligheid en wordt ook in CUR 166 [21] als richtlijn meegegeven.

6.3.3 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.

6.3.4 Optimale werkrichting

Bij de werkrichting moet rekening gehouden worden dat het dichte slot in de richting wordt geplaatst (zie Figuur 6.4), waarbij dus het open slot wordt ingesloten. Op deze manier wordt het risico beperkt dat de damwand uit het slot loopt.



Figuur 6.4 Optimale werkrichting

6.3.5 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 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.

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.

6.3.6 *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 kleeft 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 6.6. 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: Technische specificaties kunststof damwanden.

Tabel 6.6 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 uitgetoetst met een verschillende stijfheid: SG-325, CL-9000 en CL-9900 [6], zie Tabel 6.7. De stijfheid is alleen voor de installatie van belang, omdat de damwand geen constructieve functie heeft in het dijkversterkingsontwerp.

Tabel 6.7 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 6.8).

Tabel 6.8 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 6.9.

Tabel 6.9 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.

6.3.7 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.

6.3.8 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.

6.3.9 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. Bij het boren komt weinig materiaal vrij, doordat tegendraads wordt teruggedraaid. Dit is ongeveer 50-75 liter 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.

Uitvoeringstechnische is het grootste effect van het voorboren dat de intrinselheid 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 voorboren, is tijdens de heiproef gebruik gemaakt van de Hitachi EX455 met losse boor(motor) en boorframe. Om het voorboren te versnellen heeft de aannemerscombinatie ervoor gekozen om een losse

boorstelling in te zetten met een boormakelaar (verticale geleiding). Dit voorkomt het ombouwen na voorboren, scheefstand en verloop van de boor tijdens inboren. Ook het toepassen en omstellen van een boorframe is daarmee niet langer nodig.

Het effect van voorboren kan deels te niet worden gedaan door verdichting door het trillen van de damwand. Daarom kan het bij harde ondergrond nodig zijn om per plank voor te boren, maar ook dit is bij zeer hare ondergrond in de praktijk niet afdoende.

In harde zand en grindlagen kan de boorkop tijdens voorboren extreem slijten waardoor vroegtijdige vervanging nodig is.

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

6.3.10 *Voorprikken*

Bij een harde ondergrond kan eerst worden voorgeprikt met alleen de stalen moederplank, waarna pas in tweede instantie de moederplank met 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.

6.3.11 *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.

6.3.12 *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.

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

6.3.13 *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.

6.4 **Beheersmaatregelen gericht op functioneren van de pipingmaatregel**

Een voorwaarde voor een voldoende grond- en waterdicht heavescherm is een adequate uitvoeringswijze, waarbij genoeg maatregelen worden getroffen om de damwand in de aanwezige bodemopbouw op de gewenste diepte te krijgen. Tijdens uitvoering moet op basis van visuele inspectie en slotverklikkers vastgesteld worden of de damwanden voldoende op elkaar aansluiten. Als hier twijfel over is dan zijn

herstelmaatregelen nodig, zoals beschreven in Tabel 6.10. Onderscheid wordt gemaakt tussen detectie maatregelen, preventieve maatregelen en herstelmaatregelen.

Tabel 6.10 Maatregelen om grond- en waterdicht heavescherm te realiseren

Fase	Detectie	Preventie	Herstel
Voor Installatie	Sonderingen Controle op beschadiging	Gebruik rechte planken Keuze van juiste profiel Stalen plank i.p.v. kunststof Voorboren Voorprikken Ondergrondse obstakels verwijderen	Verwijderen beschadigde planken
Tijdens Installatie	Slotverklikkers Controle inbrengproces Controle op scheuren/breken	Correctie tijdens installatie Optimale werkrichting Stalen moederplank Stalen koordjes slotverklikker Toepassen makelaar Fluïderen Andere trilfrequentie Water in heisleuf Kleefonderbrekers	Damwand trekken
Na Installatie	Elektrische lekdetectie Lekdetectie d.m.v. pompproef Lengtebepaling met spuitlans Lengtebepaling met grondradar	Aanvullende maatregel tegen heave (bijvoorbeeld waterdicht voorland of pipingberm)	Potdekselmethode Groutkolom Kleikist Ontgraving Leegspuiten Leeggraven Leegboren Waterglasinjectie

6.4.1 Visuele inspectie

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.

6.4.2 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 uitvoeren van nulmetingen het meten van trillingen en geluid. Enige aanvullende monitoring die geadviseerd wordt is het steekproefsgewijs nasonderen na aanbrengen van het kunststofscherms als gebruik is gemaakt van voorboren.

6.4.3 Slotverklikkers

Slotverklikkers zijn nodig om aan te tonen dat de kunststof damwanden volledig waterdicht zijn geïnstalleerd. Het uit het slot lopen van damwanden kan immers niet altijd visueel worden vastgesteld. Na installatie is het lastig om de waterdichtheid en einddiepte van damwanden te bepalen.

Bij kunststof damwanden is het om meerdere redenen belangrijk om de waterdichtheid goed aan te tonen dan bij 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.

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-vorming 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.

Zelfs bij een zorgvuldige uitvoeringswijze met voldoende detectiemaatregelen vooraf en preventiemaatregelen kan een klein deel van damwanden (orde 1%) uit het slot lopen met mogelijk een significante verlaging van de heaveveiligheid. Daarom wordt aanbevolen om bij elke damwand een slotverklikker toe te passen. Soms wordt overwogen om dit niet doen, maar alleen bij bijvoorbeeld elke vijfde plank te meten. De kans op het missen van een uit het slot gelopen plank is dan echter te groot.

6.4.4 *Maatregelen om openingen in damwanden te herstellen*

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:

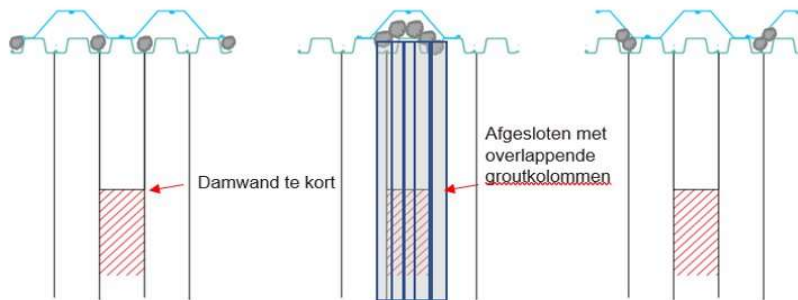
1. Als het damwandscherm niet doorlopend aangebracht is, wordt de potdekselmethode toegepast. De oorzaak kan zijn dat de damwandplank is afgebroken (door obstakel of harde bodemlagen) en/of het uitbreken van damwandslot waardoor de damwand niet in het slot zit. Wanneer wordt gekozen voor potdekselen 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'

2. 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.



3. 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.



4. 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 uitgetoet. 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 [18], [22].

Bij Dijkversterking Wolferen - Sprok zijn een aantal herstelmaatregelen geïnventariseerd en onderzocht, die om één of meer redenen niet de voorkeur hebben gekregen, zie Tabel 6.11.

Tabel 6.11 Niet toegepaste herstelmaatregelen bij Dijkversterking Wolferen-Sprok [22]

Methodes	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 de onderzijde van de bouwput. Daardoor reikt de spuitlans (of gelijkwaardig) steeds dieper totdat het puntniveau is behaald. Daarna wordt dit opgevuld met zwelklei.	<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.
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.

6.5 Verificatieplan

In Tabel 6.12 zijn de functionele eisen en eisen uit het verificatieplan van WOS 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

6.6 Omgevingsbeïnvloeding

6.6.1 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.

6.6.2 *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.

6.6.3 *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.

6.6.4 *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.

6.6.5 *Vervormingen*

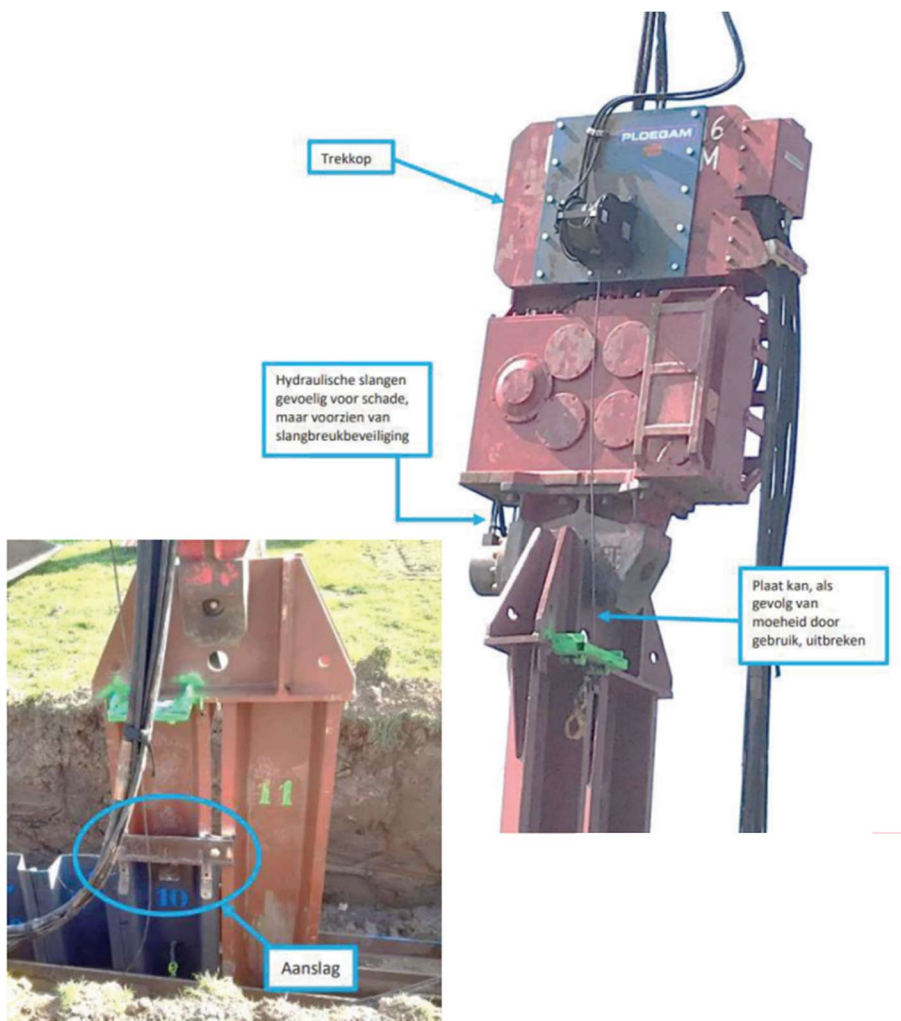
Ten gevolge van het trillend inbrengen van de kunststof damwanden is het mogelijk dat er vervormingen optreden van het maaiveld. Dit kan mogelijk leiden tot schade aan belendingen. Hierbij zijn er echter geen verschillen met het trillend inbrengen van stalen damwanden.

6.7 **Veiligheid tijdens realisatie**

De volgende maatregelen zijn bij Dijkversterking Wolferen - Sprok 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 6.6 Veiligheidsvoorzieningen aan trilblok

7 Beheersmaatregelen levensduur

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].

7.1 Registratie en vastlegging van de gerealiseerde constructie

Na het lossen van kunststof damwanden op locatie wordt een innamecontrole gedaan. De lengte, breedte, dikte, rechtheid en aantallen worden gecontroleerd [6].

Alle planken in een damwandscherm worden 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-buult tekeningen welke onderdeel zijn van de opleverdocumentatie aan het waterschap. Op deze manier is bekend welke constructie, waar in de grond zit [18], [22].

7.2 Monitoring en onderhoud

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.

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 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 peilverschil 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 pompproof is elektrische lekdetectie. Dit 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 *Kwaliteit van kunststof*

Het uitgangspunt is dat de duurzaamheid van het kunststof voldoende is om de levensduur te garanderen. De kwaliteit van het kunststof zou kunnen worden gecontroleerd door meer dan 10 jaar oude kunststof damwanden te trekken of een deel af te zagen en in een laboratorium te beproeven op onder meer stijfheid en sterkte.

7.3 **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].

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.

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 bewijkproef 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 Bibliografie

- [1] DIV Piping, „Publicatie Algemeen,” 2023.
- [2] DIV Piping, „Veiligheidsraamwerk innovatieve pipingmaatregelen,” 2023.
- [3] DIV Piping, „Publicatie Heaveschermen,” 2023.
- [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 slotverkliekers,” 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] S. Koltuk, „Untersuchungen zum hydraulischen Grundbruch in Baugruben in nichtbindigen Böden,” 2016.
- [13] Deltares, „Probabilistische gevoeligheidsanalyse heave (fase 5 - eindrapportage),” 1998.
- [14] POV Macrostabiliteit, „POVM Langsconstructies,” 2020.
- [15] R. Slats en G. Westerhof, „Kunststof damwanden als heavescherm,” *Land+Water*, 2020.
- [16] De Betuwse Waard, „Toelichting adviesvraag Adviesteam Dijkontwerp kunststof damwanden - dijkversterking Wolferen - Sprok,” 2021.
- [17] CE Delft; Stimular, „LCA-rapport van Prolock-oeverbescherming,” 2022.
- [18] Waterschap Rivierenland, „Toelichting proces kunststof damwanden n.a.v. vraag in commissie,” 2022.
- [19] A. Zagema, „The dike safety assessment for risks of an incorrectly installed vinyl heave screen (Master Thesis),” University of Twente, 2023.
- [20] De Betuwse Waard, „Leerdossier kunststof damwanden ontwerp en realisatie (WOS) concept,” 2023.
- [21] CUR, CUR 166 Damwandconstructies, 2012.
- [22] De Betuwse Waard, „Procesbeschrijving onderbreking damwandschermen dijkversterking Wolferen - Sprok,” 2022.
- [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.

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: [17] 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: [21] 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. Opdrachtgever: Waterschap Rivierenland</p>

<p>Bibliografienummer: [7] Titel: Evaluatie slotverklikkers Auteur: Combinatie De Betuwse Waard Datum: 1-6-2021 Inhoud: Evaluatie van 2^e maakbaarheidsproef kunststof heaveschermen bij dijkversterking Wolferen-Sprok waarbij verschillende type slotverklikkers zijn getest. Opdrachtgever: Waterschap Rivierenland</p>
<p>Bibliografienummer: [16] Titel: Toelichting adviesvraag ADO 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 kunststofschermbaan 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: [22] 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: [14] Titel: POVM langsconstructies Auteur: POVM Datum: Maart 2020 Inhoud: Richtlijn langsconstructies in dijken Opdrachtgever: HWBP, 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>
<p>Bibliografienummer: [4] Titel: A Study of the long-term applications of vinyl sheet piles Auteur: USACE Datum: augustus-2003</p>



<p>Inhoud: Studie naar het effect van UV en kou op kunststof schermen Opdrachtgever: US Army Corps of Engineers</p>
<p>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</p>
<p>Bibliografienummer: [18] 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</p>
<p>Bibliografienummer: [19] 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</p>

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^2]	[cm^2/m^2]	[cm^3/m^3]	[cm^4/m^4]	[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	401,2	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.sheetpilingolutions.com

Type	Opneembaar		Opneembaar		Weerstand		Traagheids		Buig		Dikte t [mm]	Hoogte h [mm]	Breedte b [mm]	Profiel [type]	Gewicht per plank [kg/m]	Gewicht per m2 [kg/m²]	Doorsnede oppervlakte A [cm²/m²]	Omtrek enkezijdig [m²/m²]	Hardhout (nieuw Azobé)	
	Momente rep. Mmax [kNm/m²]	Momente rek. Mmin [kNm/m²]	Momente Wx [cm²/m²]	Momente Ix [cm⁴/m²]	Stijfheid E*I [kNm²/m²]	Hardhout f _{m,0,rep} [N/mm²]	Hardhout E _{st} [N/mm²]													
	A		B																	
Shore 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					35,69
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					46,18
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					52,41
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					58,19
SG-625	57,88	28,94	1.312	16.660	436,49	9,8	254	762	Q	17,86	23,44	162,86	76,08		1,67					67,54
SG-650	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					72,04
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					77,17
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					82,21
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					77,74
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					95,14
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					56,92
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					61,03
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					48,44
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					61,26
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					111,4
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					140,35
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					191,94
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					236,41



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": $\sigma_s = 22.06 \text{ N/mm}^2$

 Materiaal modulus "Ultra Composite": $\sigma_s = 68.95 \text{ N/mm}^2$

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

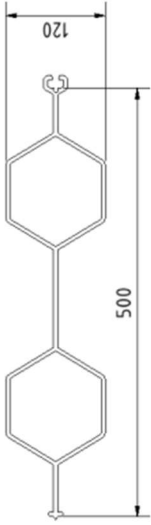
 Elasticiteit modulus "Ultra Composite": $E = 0,27579 \cdot 10^9 \text{ N/mm}^2$

Vergelijk met hout o.b.v. representatieve waarden; vergelijk alleen 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	$f_{m,opp}$	60	[N/mm ²]
Max. karakteristiek moment	$M_{k,s}$	12	[Nm/m]
Max. representatief moment (lange/korte duur)	$M_{r,opp}$	0.45	[Nm/m]
Max. representatief moment (lange/korte duur)	$M_{r,opp}$	0.5	[Nm/m]
Modificatiefactor (lange/korte duur)	k_{mod}	1.5	[Nm/m]
Modificatiefactor (lange/korte duur)	k_{mod}	2.3	[Nm/m]
Modificatiefactor korteduur	k_{mod}	> 15]	[Nm/m]
Material factor	γ_m	22.5	[N/mm ²]
Hoogte	h	25.0	[N/mm ²]
Breedte	b	2600	[N/mm ²]
Sectie oppervlak	A	14.6	[kg/m ²]
Weerstands moment	W_{el}	7.1	[kg/m ²]
Traagheidsmoment	I_y		
Buigsterkte	$f_{m,opp}$		
Max. Rekenmoment (lange/korte duur)	$M_{r,ast}$		

PVC		34.7	[kNm ² /m]
Buigsterkte	E_{opp}	34.7	[kNm ² /m]
Max. karakteristiek moment	$M_{k,s}$	13.35	[kNm/m]
Max. representatief moment (lange/korte duur)	$M_{r,opp}$	6.01 / 5.68	[kNm/m]
Max. representatief moment (lange/korte duur)	$M_{r,opp}$	0.45 / 0.5	[Nm/m]
Modificatiefactor (lange/korte duur)	k_{mod}	1.2	[Nm/m]
Material factor	γ_m	120	[mm]
Hoogte	h	500	[mm]
Breedte	b	100.9	[cm ² /m]
Sectie oppervlak	A	222.5	[cm ² /m]
Weerstands moment	W_{el}	1335	[cm ⁴ /m]
Traagheidsmoment	I_y	60.0	[N/mm ²]
Buigsterkte	$f_{m,opp}$	5.0 / 5.6	[kNm/m]
Max. Rekenmoment (lange/korte duur)	$M_{r,ast}$		

Kwaliteit	Naaldhout		Naaldhout		Azobé		Azobé		Staal 235		Staal 235		Staal 355	
	C18	C24	C24	C24	D70	D70	D70	D70	5235	5235	5235	5235	5235	5355
Vorm	●	●	●	●	■	■	■	■	O	O	O	O	O	O
Afmeting	100	100	100	100	70	70	70	70	88.9	88.9	88.9	88.9	88.9	88.9
Wanddikte	d	d	d	d	4	4	4	4	3	3	3	3	3	4
Aantal	2	4	2	4	2	4	2	4	2	2	2	2	2	4
Stijfheid	E_{opp}	88	177	108	216	80	160	111	222	314	628	477	953	953
Max. karakteristiek moment	$M_{k,s}$	3.53	7.07	4.71	9.42	8.00	16.01	10.24	20.49	7.91	15.81	12.00	23.99	36.25
Max. representatief moment (lange/korte duur)	$M_{r,opp}$	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
Modificatiefactor (lange/korte duur)	k_{mod}	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
Material factor	γ_m	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1	1	1	1	1
Sectie oppervlak	A	157	314	157	314	98	196	116	231	16	32	26	51	51
Weerstands moment	W_{el}	196	393	196	393	114	229	146	293	34	67	51	102	102
Karakteristieke buigsterkte	$f_{m,opp}$	18	18	24	24	70	70	70	70	235	235	235	235	355
Max. Rekenmoment (lange/korte duur)	$M_{r,ast}$	1.62 / 2.05	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

Kwaliteit	Naaldhout		Naaldhout		Azobé		Azobé		Staal 235		Staal 235		Staal 355	
	C18	C24	C24	C24	D70	D70	D70	D70	5235	5235	5235	5235	5355	
Buigsterkte	E_{opp}	123	246	143	286	115	230	146	291	349	698	511	988	
Max. karakteristiek moment	$M_{k,s}$	16.88	33.76	18.06	36.12	21.35	42.70	23.59	47.18	21.26	42.52	25.35	50.70	
Max. representatief moment (lange/korte duur)	$M_{r,opp}$	8.12 / 9.36	16.24 / 18.72	10.22 / 12.04	20.44 / 24.08	11.63 / 13.83	23.26 / 27.66	11.64 / 13.84	23.28 / 27.66	13.91 / 14.58	27.82 / 29.16	18.00 / 18.67	36.00 / 36.67	
Modificatiefactor (lange/korte duur)	k_{mod}	0.48 / 0.55	0.50 / 0.59	0.50 / 0.59	0.49 / 0.57	0.50 / 0.61	0.49 / 0.59	0.51 / 0.62	0.51 / 0.62	0.65 / 0.69	0.75 / 0.77	0.71 / 0.74	0.80 / 0.82	
Material factor	γ_m	1.22 / 1.23	1.24 / 1.06	1.24 / 1.06	1.25 / 1.05	1.26 / 1.04	1.25 / 1.05	1.26 / 1.04	1.26 / 1.04	1.08 / 1.03	1.05 / 1.02	1.06 / 1.03	1.03 / 1.02	
Element breedte	b	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	
Sectie oppervlak	A	258	516	258	516	199	398	216	432	117	234	133	266	
Weerstands moment	W_{el}	419	838	419	838	337	674	369	738	152	304	152	304	
Max. Rekenmoment (lange/korte duur)	$M_{r,ast}$	6.63 / 7.63	13.26 / 15.46	8.25 / 11.41	16.50 / 22.92	9.93 / 13.16	19.86 / 26.32	13.18 / 17.12	26.36 / 34.24	12.91 / 14.11	25.82 / 28.23	17.00 / 18.21	34.00 / 36.21	

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

Prolock scherm		PVC	
Buigstijfheid	EI_{top}	281	[kNm ² /m]
Max. karakteristiek moment	M_{yk}	51,4	[kNm/m]
Max. representatief moment (lange/korte duur)	$M_{T,rep}$	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	$f_{m,0,rep}$	60	[N/mm ²]
Max. Rekenmoment (lange/korte duur)	$M_{y,dst}$	19,3 / 21,4	[kNm/m]

PVC		PVC	
Buigsterkte	$f_{m,ck}$	60	[N/mm ²]
Materiaal factor	γ_m	1,2	[-]
Modificatiefactor langeduur	K_{mod}	0,45	[-]
Modificatiefactor korteduur	K_{mod}	0,5	[-]
Krimpfactor	K_{kriep}	1,5	< 15j
	K_{kriep}	2,3	> 15j
Buigsterkte	$f_{t,0}$	22,5	[N/mm ²]
	$f_{t,0,d}$	25,0	[N/mm ²]
E modulus	E_{rep}	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 ADO kunststof damwanden - Dijkversterking Wolferen-Sprok [16]

Case study: Stalen damwand versus kunststof damwand

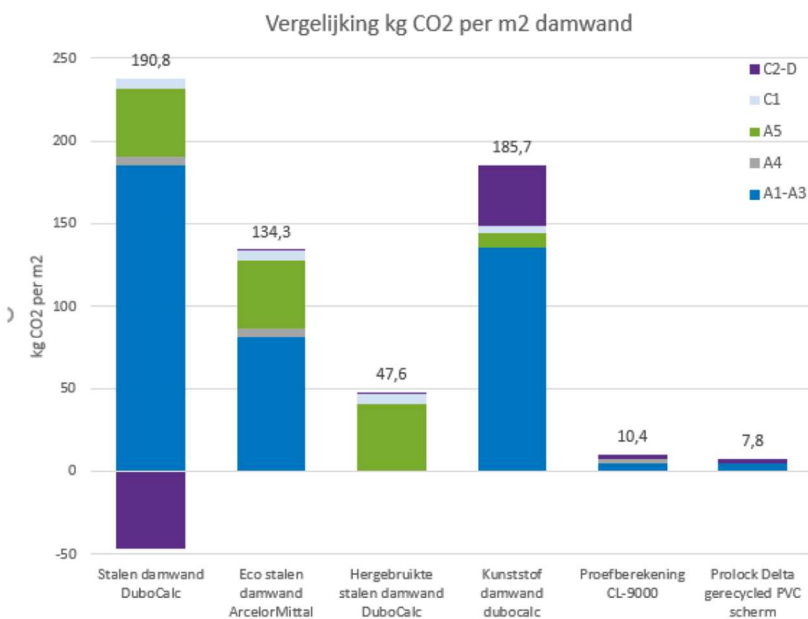
Voor dijkversterking Wolferen-Sprok zijn op veel plekken damwanden benodigd. Standaard worden hiervoor stalen damwanden gebruikt. Er is echter ook de mogelijkheid om gerecyclede kunststof damwanden te gebruiken.

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 beschermlagen, 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.



KUNSTSTOF DAMWAND | JLD 610 7.2



JLD International BV

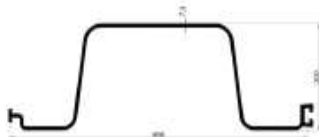
Postbus 147
1135 ZK EDAM
Nederland

Tel: +31 (0)299 622 396

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

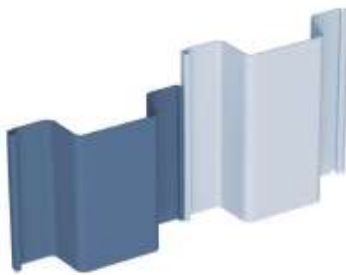
Veiligheid, kwaliteit en milieus staan bij JLD voorop.
Wij zijn: VCA** | ISO 9001 | CO₂ Mvo5 gecertificeerd.
Meer informatie hierover vindt u op onze website.

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 1183-2:2003	1400-1480
Charpy impact test	kJ/m ²	PN-EN ISO 179-1:2004	≥30
Shore durometer	Shore's D	PN-EN ISO 868:2003	≥75
Softening point Vicat method	°C	PN-EN ISO 306:2004	≥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 513:2002 PN-EN ISO 4892-2:1998A PN-EN 20225-A3:1998 PN-EN ISO 179-1:2004	Not less than 4 in grey 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
Owner LCA J.L.D. International B.V.
Contact Roy de Haan, Roy@jldinternational.com
Product unit ton
Functional unit m2

LCA method
Underlying standards
Reference database
Characterisation method

Bepalingsmethode 'Milieuprestatie Bouwwerken' versie 1.0, juli 2020
 ISO14044, ISO14025, EN15804
 Ecolnvent v3.6
 Karakteristiefactoren volgens NMD Bepalingsmethode, dec 2019 & EN 15804 +A2

LCA conductor Eco-Intelligence
Contact Gert-Jan Vroeghe, gert-jan@eco-intelligence.nl
Date LCA report 10-apr-22

Third party external review
Contact
Date review

Jeeninga Advieslab
 Anne Kees Jeeninga
 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	

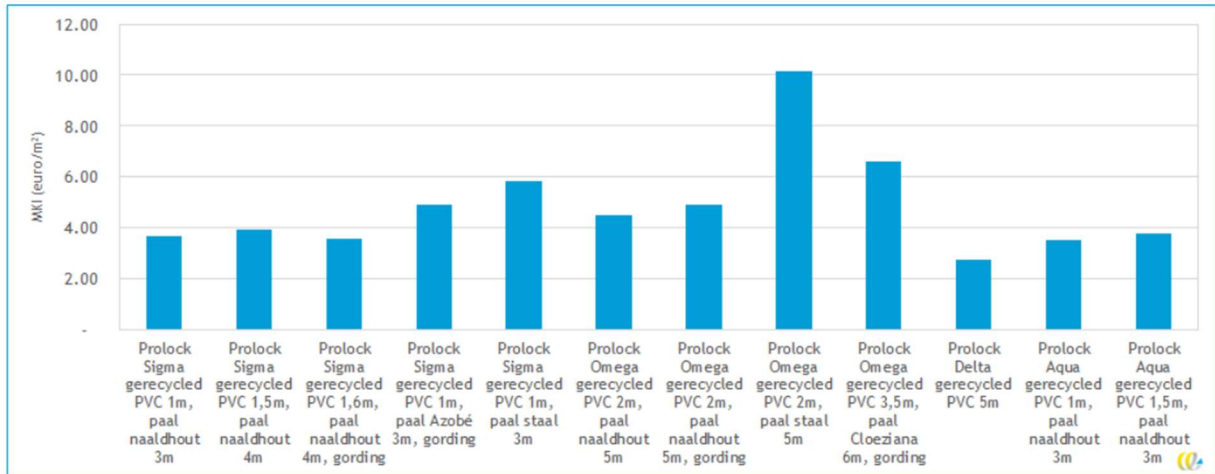
Results MKI per m2												
Type	Totaal	A1 - A3	A4	A5	B1-B6	C1	C2	C3	C4	D		
Z-PROFILE 270 / 3,5	Vinyl	€ 1,76	€ 0,72	€ 0,11	€ 0,09	€ -	€ 0,07	€ 0,01	€ 0,24	€ 0,00	€ 0,52	
Z-PROFILE 270 / 5,5	Vinyl	€ 2,53	€ 1,03	€ 0,16	€ 0,13	€ -	€ 0,10	€ 0,02	€ 0,34	€ 0,01	€ 0,74	
Z-PROFILE 270 / 6	Vinyl	€ 2,72	€ 1,11	€ 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 EC 26.1	FRP	€ 10,51	€ 2,78	€ 0,26	€ 0,38	€ -	€ 0,16	€ 0,05	€ 3,17	€ -	€ 3,71	
Z-PROFILE EC 47.5	FRP	€ 14,09	€ 3,72	€ 0,35	€ 0,51	€ -	€ 0,22	€ 0,06	€ 4,25	€ -	€ 4,97	
Z-PROFILE EC 80.5	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 CH24	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	4,427E-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 CH24	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	

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

Bron: CE-Delft, Stimular [17]